

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

嫦娥五号月壤氩同位素比暗示过剩 ^{40}Ar 可能来源于地球风赵莉^{1,3}, 李立武^{1*}, 王先彬¹, 曹春辉¹, 汤庆艳²

1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 油气资源研究中心, 兰州 730030;

2. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730030;

3. 兰州城市学院 石油工程学院, 兰州 730070

月壤中的 ^{40}Ar 过剩现象, 是指 ^{40}Ar 的含量显著高于预计的太阳风俘获和 ^{40}K 衰变产生的量。传统观点认为, 这种过剩的 ^{40}Ar 主要来源于月球内部 ^{40}K 衰变产生的 ^{40}Ar 。这些 ^{40}Ar 挥发到月球表面后, 被太阳辐射电离, 部分离子被月壤所俘获。然而, 根据月球表面的物理条件, 月表大气分子平均自由程较大, 太阳风在月表大气中的射程也较长, 这使得原子和分子之间较难发生碰撞, 从而降低了 ^{40}Ar 被电离并重新注入月表的可能性。本文对嫦娥五号月壤样品实施了分段加热脱气 Ar 同位素组成测试, 加热温度范围为 200~1300℃。通过分析 ^{36}Ar 和 ^{40}Ar 的相互关系, 探讨月壤中 ^{40}Ar 过剩的原因。测试结果表明, 可能存在两种类型的 ^{40}Ar , 即与 ^{36}Ar 相关的和与 ^{36}Ar 不相关的 ^{40}Ar 。与 ^{36}Ar 不相关的 ^{40}Ar 主要来源于月壤中 ^{40}K 的衰变, 而与 ^{36}Ar 相关的 ^{40}Ar 可能主要来自地球风的贡献。理论研究认为, 太阳中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值约为 10^{-4} , 远低于 ^{36}Ar 含量。因此, 太阳风注入不足以解释嫦娥五号月壤中 ^{40}Ar 的来源。嫦娥五号月壤样品的测试结果显示, ^{40}Ar 的总含量显著高于预计的太阳风俘获和 ^{40}K 衰变产生的量, ^{40}Ar 过剩达到了 10 倍以上。分段加热脱气实验中, 中温阶段 (600~1100℃) 释放的 ^{40}Ar 含量占总 ^{40}Ar 含量的大部分, 且 ^{36}Ar 和 ^{38}Ar 的含量也主要在此温度区间内。这一现象表明, 中温阶段释放的氩气主要来自太阳风的作用。由于 ^{40}Ar 主要来自于太阳风注入, 推测与 ^{36}Ar 相关的 ^{40}Ar 也可能来自太阳风。然而, 太阳风中的 ^{40}Ar 含量远低于 ^{36}Ar 含量,

因此这部分 ^{40}Ar 可能来自地球风。地球风可能是月壤中过剩 ^{40}Ar 的主要来源。太阳风扫过地球磁层外, 拾取地球外逸气体分子并与太阳风混合加速, 形成地球风。地球风将地球大气中的 ^{40}Ar 注入到月球表面的土壤中。月球背面基本不受地球风的影响, 嫦娥六号在月球背面着陆并带回月壤样品, 对其观测分析有望能够进一步验证月壤中过剩 ^{40}Ar 是否来源于地球风。加热脱气过程中, 700℃ 时 ^{40}Ar 的释放量显著高于预期, 这可能是由于距月壤表面某特定深度产生了 ^{40}Ar 的聚集。重离子注入固体材料时, 离子和能量总是沉积在其射程末端, 形成纳米气泡。这些纳米气泡可能对混有地球组分的太阳风 ^{40}Ar 产生表面溅射, 从而将这部分 ^{40}Ar 保存在气泡中。地球风离子能谱较宽, 大部分地球风 ^{40}Ar 的速度可能略低于同时注入太阳风 ^{36}Ar 的速度, 导致 ^{40}Ar 注入月壤深度比 ^{36}Ar 的浅, 从而在稍低的温度下释放出来。通过对嫦娥五号月壤样品的详细测试和分析, 本文提出了多项论据论证地球风是月壤中过剩 ^{40}Ar 的主要来源。这一发现不仅有助于深入理解月壤中 Ar 同位素的来源和分布, 也为进一步研究地球与月球之间的物质交换提供了新的视角。未来的研究可以进一步通过对月球背面月壤样品的分析, 验证地球风对月壤中 ^{40}Ar 过剩的贡献, 从而为地月系统的演化研究提供更全面的科学依据。

关键词: 嫦娥五号; 月壤; 氩同位素; 分段加热; 地球风

基金项目: 中国科学院兰州资源环境科学大型仪器区域中心功能开发技术创新项目 (2021g106)

第一作者简介: 赵莉 (1989-), 博士 (在读), 研究方向: 气体地球化学. E-mail: zsyzaoli@126.com

*通信作者简介: 李立武 (1967-), 研究员, 研究方向: 气体地球化学测试技术及相关研究. E-mail: llwu@lzb.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

镓 (Ga) 同位素在地球科学中的进展与挑战

陈思钰, 朱光有*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

随着高精度同位素质谱分析技术和化学纯化方法的迅速发展, 非传统金属同位素在地球科学领域的研究取得了显著突破。镓 (Ga) 因其独特的地化性质, 引起了地球化学界的高度关注。为推动 Ga 同位素地球化学体系的进一步完善, 本文对 Ga 同位素在地球科学中的研究进展与挑战进行了系统梳理, 包括 Ga 同位素的地球化学性质、实验测试方法、储库与循环、分馏机理及地质应用。总结如下: (1) Ga 是一种稀有分散元素, 在自然界中主要以 Ga^{3+} 出现, 主要分布在铝土矿中; 作为类铝 (Al) 元素, Ga 和 Al 的化学性质相似, 但与 Al 不同, Ga 有两种稳定同位素: ^{69}Ga (60.10 %) 和 ^{71}Ga (39.90 %)。 (2) 基于改进后的化学分离纯化方法和多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS), Ga 同位素组成 ($\delta^{71}\text{Ga}$) 分析日益准确, 数据精度可优于 0.04 ‰。 (3) 现有研究对 Ga 同位素在地幔、地壳、海洋、陨石等主要储库中的分布及分配进行了定量分析, 并初步建立了 Ga 同位素的地球化学循环模型。 (4) Ga 同位素分馏机制主要受风化、高温蒸发、吸附作用的控制。风化过程中, ^{69}Ga 相对于 ^{71}Ga 更倾向于保留在土壤中, $\delta^{71}\text{Ga}$

值随深度 (从基岩到地表) 减小, 范围为 ~ 0.18 ‰; 高温蒸发过程中钙-铝富集包体 (CAIs) 表面冷凝时与气体发生交换, 导致 Ga 同位素的显著分馏, $\delta^{71}\text{Ga}$ 低至 -3.56 ‰; 吸附过程中, Ga 从溶液到表面转移和含 Ga 晶体沉淀过程中的配位变化会导致 Ga 同位素的分馏; 环境的氧化还原状态也有可能造成 Ga 同位素组成的变化。 (5) Ga 同位素在示踪地表风化、探索天体演变、揭示岩浆起源与演化过程中的矿物分离和成分变化、反应吸附和沉淀过程、追踪与 Al 相关的地球化学过程、表征海陆环境变化等方面的应用已取得一定的进展。未来, 加强 Ga 同位素分馏机制研究、探究各储库 Ga 同位素组成与其迁移路径和动力、完善 Ga 同位素高精度测试体系、拓展 Ga 同位素的应用及其与其他同位素的联用等相关理论与实验工作还需要进一步强化。本综述旨在增进对 Ga 同位素在地球科学领域的全面认识, 为未来研究提供思路。

关键词: 镓 (Ga) 同位素; Ga 储库与循环; 同位素分馏; Ga 同位素测试; 地质应用

基金项目: 陈思钰 (2003-), 女, 在读硕士研究生, 地质资源与地质工程。E-mail: chensiyu8603@126.com

*第一/通信作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏研究。

E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

联合地震学和矿物学约束火星内部结构和成分

赵晨阳, 毛竹*

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

深空探测是我国重要的科学战略, 以探测太阳系内行星和卫星的起源和演化、开发利用行星资源为核心目标。火星作为深空探测的重点研究星球, 明确火星内部的结构和物质组成对理解火星的形成和演化、揭示行星宜居性发展规律至关重要。联合 InSight 火星探测任务的地震数据与高温高压矿物实验数据, 约束了火幔转换带的铁含量、温度及矿物成分。通过三阶 Birch-Murnaghan 状态方程和欧拉有限应变理论, 结合地震学和矿物学数据, 构建了

火幔转换带在高温高压条件下的矿物学模型。研究采用贝叶斯卷积神经网络 (BCNN) 进行反演分析, 结合高温高压实验数据与火星地震数据, 优化了铁含量和温度的反演结果。与前人的研究相比, 反演精度得到了提升, 为深入探讨火星内部物质组成提供了新的方法和视角。

关键词: 火幔转换带; 铁含量; 贝叶斯卷积神经网络; 火幔温度

第一作者简介: 赵晨阳 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 行星内部物理. E-mail: zhaochenyang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 毛竹 (1982-), 教授, 研究方向: 高温高压矿物学. E-mail: zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球斜长岩的钙同位素组成

王文科, 李欣*, 刘芳, 安亚军, 张兆峰

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

月球斜长岩是由斜长石(含量>90%)的岩浆岩构成,广泛分布于月球高地,研究斜长岩对理解月亮早期形成及月球演化历史具有重要意义。现有成因模型主要包括:(1)岩浆洋结晶;(2)地幔混杂;(3)局部熔融与 KREEP(富钾、稀土元素和磷物质)再分布;(4)多阶段合成模型(整合初始结晶、幔-壳相互作用、晚期 KREEP 同化)。近期理论模型(包括热扩散动力学、top-down 固化、三端元混合、KREEP 物质同化)与放射性成因 Sr-Nd 同位素证据表明,月球斜长岩的形成可能受多阶段、多源岩浆过程控制。此外,富钙斜长石(An>90)的存在与斜长岩年龄的不一致性,制约着对月球岩浆洋模型的理解。月球斜长岩以钙长石为主,钙同位素($\delta^{44/40}\text{Ca}$)具有分布广泛、对行星早期分异敏感等优势。为深入解析月球斜长岩成因,本研究系统测定了 13 块月球长石质角砾岩陨石中 14 个钙长石单矿物(斜长石含

量>90%)、26 个斜长岩碎屑(镁铁质矿物含量>10%)及 13 个长石质基质的钙同位素组成。结果显示,钙长石单矿物的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值为 0.68‰~0.94‰(平均值为 0.78‰~0.15‰, 2SD, $n=18$),与我们的前期研究结果(0.75‰~0.13‰, $n=4$)一致。斜长岩碎屑的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值为 0.59‰~0.99‰(平均值为 0.78‰~0.21‰, 2SD, $n=26$),与岩屑中镁铁质矿物(橄榄石、辉石、钛铁矿)含量无相关性,部分岩屑呈现 $\delta^{44/40}\text{Ca}>0.90$ ‰,显示同位素异质性存在。长石质基质的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值为 0.56‰~0.95‰(平均值为 0.79‰~0.27‰, 2SD, $n=13$),与斜长岩碎屑变化范围相当,同样存在约 0.4‰分馏。总体而言,斜长岩碎屑与长石质基质的钙同位素组成相似且具有约 0.4‰分馏,表明钙同位素对探讨月球斜长岩成因方面具有重要意义。

关键词: 月亮; 斜长岩; 钙同位素

第一作者简介: 王文科(1999-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: ww@stu.cdut.edu.cn

*通信作者简介: 李欣(1975-), 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: xlisu@cdut.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

嫦娥五号年轻玄武岩的成因：进展与挑战

田恒次*

中国科学院 地质与地球物理研究所, 地球与行星物理学科中心, 北京 100029

火山活动是内动力地质作用最重要的表现, 成为揭示月球内部物质组成和热演化历史的重要窗口。2020 年底, 我国嫦娥五号任务顺利从月球正面风暴洋北部地区返回样品, 开启了我国行星科学研究的热潮。对嫦娥五号样品的研究证实月球直到 20 Ga 年前仍存在岩浆活动, 这一结果刷新了人类对月球岩浆活动和热演化历史的认知。研究发现, 嫦娥五号年轻玄武岩具有富集稀土元素和低 $Mg^\#$ 指数特征, 是一种新类型的玄武岩。自 2021 年 7 月第一批科研样品发放

以来, 国内数十个研究团队围绕玄武岩的成因开展了系统研究, 取得了一批研究成果。然而随着研究深入, 玄武岩的成因却变得扑朔迷离, 学界针对玄武岩的起源深度、源区组成、岩浆过程等方面提出了多个不同的模型。3 年多来, 本人深度参与了嫦娥五号样品的研究, 本次汇报将回顾嫦娥五号玄武岩成因的研究进展以及面临的挑战。

关键词: 嫦娥五号; 玄武岩成因; 进展与挑战

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球火山穹隆热-力学生长机制研究

陈雨超, 黄倩*

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430071

月球火山穹隆作为月球浅部岩浆活动的直接产物, 其形成机制与月壳热演化历史密切相关。穹隆的形态特征(如高度与基底宽度比)及分布规律为揭示月球内部浅部岩浆的热-力学过程提供了关键约束。传统的月球火山学研究多基于火山形貌及其喷发产物的成分分析, 而对火山穹隆生长过程中的岩浆相变和运移特征等热-力学性质缺乏系统性的探讨。本研究通过数值模拟手段, 聚焦岩浆上升、冷却与结晶过程中的热-力学耦合效应, 旨在阐明穹隆形成的临界条件及其对月壳热状态的响应规律。采用计算流体力学(CFD)方法, 构建多物理场耦合模型, 涵盖岩浆流动、热传导和相变结晶等过程。模型输入参数包括: 1) 岩浆物性参数: 基于 Apollo 和嫦娥样品数据约束的玄武质岩浆粘度和结晶潜热; 2) 月壳结构参数: 依据 GRAIL 重力数据反演的月壳厚度及微波数据热导率垂向梯度; 3) 边界条件: 底部源自热流模拟月幔部分熔融区的持续热输入。数值模拟通过 Ansys Fluent 实现, 采用自适应

网格加密技术捕捉岩浆前锋的热-力学耦合界面。通过参数敏感性实验, 系统分析岩浆补给速率和月壳脆-韧性转换深度等对穹隆生长模式的调控作用。模拟将揭示浅部岩浆房的补给机制, 提出穹隆生长模型, 解释其表面环形断裂的分布规律; 通过对比不同热流条件下穹隆冷却速率, 揭示月壳热导率对穹隆形成时间差异的影响, 为反演区域热历史提供新指标; 通过对比穹隆高宽比与岩浆粘度以及月壳强度的相关性, 验证穹隆分类(如 Marius Hills 型穹隆与 Gruithuisen 型穹隆)的热-力学成因差异。本研究预期建立月球火山穹隆热力学演化的数值框架, 阐释浅部岩浆活动与月壳热状态的动态反馈机制, 为未来嫦娥七号等任务的实地探测结果(基于宽波段红外光谱矿物成像分析仪和月面穿透雷达)提供理论预测模型。

关键词: 月球火山穹隆; 热力学耦合; 计算流体力学; 浅部岩浆房; 月壳热演化

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0715100)

第一作者简介: 陈雨超, 博士研究生, 研究方向: 行星遥感与火山活动. E-mail: cyc1114@foxmail.com

*通信作者简介: 黄倩, 副教授, 研究方向: 行星遥感地质和地球物理. E-mail: qianhuang@cug.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球太空风化的纬度效应及其对单质铁成长机制的启示

卢学金, 陈剑, 曹海军, 凌宗成*

山东大学 空间科学与技术学院, 山东 威海 264200

太空风化作用普遍存在于月球等无大气天体表面。在太阳风粒子和微陨石的不断轰击下, 月球物质产生了一系列物理和化学变化, 导致可见/近红外波段出现了暗化(反射率降低)、红化(光谱斜率变陡, 即反射率随着波长的增加而增加)和矿物吸收特征减弱(光谱吸收深度变浅)等光谱效应。这些光谱效应来自于月壤中亚微米尺寸的金属单质铁, 通常由还原、热分解等过程产生, 根据粒径范围可分为较小的纳米铁($<50\text{ nm}$)和较大的微米铁($>50\text{ nm}$)。纳米铁对可见波段具有明显的吸收, 而对近红外波段的吸收弱于可见部分, 因此造成了光谱斜率变陡的光谱效应(红化)。当纳米铁颗粒通过不断聚合成长为更大粒径的微米铁时, 对全波段的反射率均有吸收, 因此其特殊的“红化”作用便会消失, 以暗化和减弱吸收特征的作用为主。前人根据 Clementine 多光谱数据揭示了月球月壤光谱存在纬度效应, 即在高纬度地区月壤光谱反射率更亮, 并表明这种光谱效应与高纬度地区较弱的太阳风通量相关, 因此前人提出了月球太空风化作用随着纬度的升高而逐渐减弱的机制。然而, 导致这种光谱效应以及单质铁的形成机制尚不明确。因此, 本研究针对全月玄武岩和磁异常区域(月球漩涡)开展了光谱参数分析, 旨在揭示月壤光谱的纬度效应及其形成机制。本研究利用月亮女神号 MI 多光谱数据对月球正面月海玄武岩区域(30°S – 60°N ; 90°W – 90°E)的光谱参数进行了统计分析。为了保证分析结果不受地形和撞击坑溅射物的影响, 在分析中没有考虑地形坡度 $>1.0^{\circ}$ 和光学成熟度(OMAT) >0.25

的像元。利用月船一号 M3 高光谱数据对 Reiner Gamma 漩涡区域进行光谱参数分析。结果表明, MI 750 nm 的反射率随着纬度的降低而变暗, 与前人利用 Clementine 的数据结果一致。MI 1550 nm 的反射率同样随着纬度降低而变暗, 且变化程度大于 750 nm 的反射率。因此, 相比高纬度区域, 低纬度区域呈现出较暗的反射率和较平的光谱斜率。对的反演结果进行统计, 纳米铁含量在纬度 0° – 45° 范围内变化较小($\sim 0.55\%$), 而微米铁含量则随着纬度的降低从 $\sim 0.8\%$ 单调增加至 $\sim 1.1\%$ 。此外, 本研究对月球漩涡结构的暗带区域进行了光谱参数分析, 该区域也出现了光谱反射率和光谱斜率的变化。在暗带中心, 光谱更暗、斜率更平坦, 而亮纹区域的光谱则更亮、斜率更陡。

月球玄武岩的光谱纬度效应和漩涡区域的光谱效应共同揭示了太阳风通量对月表物质的改造作用。因此, 本研究认为在月壤达到成熟状态后, 将进入后成熟阶段(post-mature)。在该阶段中, 太阳风通过注入 H^+ 产生的铁原子通过奥斯瓦尔德熟化作用吸附在已经存在的纳米铁, 导致纳米铁粒径的进一步增加, 月壤中单质铁的平均粒径会逐渐变粗。本研究揭示了太阳风注入作用促进纳米铁粒径变粗的机制, 并提出单质铁的粒径应当是表征月壤风化程度的重要指标之一。

关键词: 月球; 太空风化; 太阳风; 可见近红外光谱; 单质铁

基金项目: 国家自然科学基金(123B2046, 42102280, 42402231)

第一作者简介: 卢学金(1998–), 博士研究生, 研究方向: 月球遥感光谱学. E-mail: luxuejin@mail.sdu.edu.cn

*通信作者简介: 凌宗成(1981–), 教授, 研究方向: 行星遥感与光谱学、行星化学、行星地质学. E-mail: zcling@sdu.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

氟在月球火山玻璃珠成分熔体中的扩散

张力, 颜晗, 李万财, 倪怀玮*

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

作为最接近原始月球岩浆的样品, 月球火山玻璃珠经历了显著程度的去气作用。要恢复其初始氟含量需要氟扩散系数数据, 但目前尚未进行实验测定。我们在 0.5 GPa 压力和 1673~1883 K 温度条件下于活塞圆筒压机中进行了氟在四种合成的月球玄武质熔体(成分分别对应月球绿色、黄色、橙色和红色玻璃)中的扩散偶实验。通过电子探针测量的氟扩散曲线显示, 熔体的氟扩散系数从绿色到黄色到橙色再到红色呈温和递增趋势, 这归因于 Si+Al 的摩尔分数的逐渐降低。月球熔体中的氟扩散系数比羟基扩散系数低 2~7 倍, 但比地球熔体的氟扩散系数至少高 2~10 倍。

我们建立了一个适用于地球和月球熔体的氟扩散系数普适经验模型, 可在缺乏实验数据时作为有效估算依据。应用新测得的氟扩散系数对已报道的阿波罗绿色玻璃珠中的氟丢失曲线进行模拟分析, 得出其初始氟含量为 $12 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$ 。假设岩浆破碎前去气作用有限, 推算月幔源的氟含量为 $0.7 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-6}$ 。尽管月球内部的氟丰度低于地球内部, 但仍处于显著可测水平。

关键词: 月球火山玻璃珠; 去气; 氟扩散系数; 喷发前氟含量

第一作者简介: 张力 (1991-), 特任副研究员, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: zl12345@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

灶神星玄武质熔体中 Ga、Mo、W 的扩散

李逸凡¹, 张力¹, 倪怀玮^{1,2*}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

灶神星 (4 Vesta) 是小行星带内质量第二大的小行星, 保存有与地球类似的圈层结构, 是研究太阳系早期行星分异过程的绝佳载体。在灶神星的核幔分异过程中, 亲铁元素在核幔物质之间能否达到分配平衡取决于元素在岩浆熔体中的扩散系数, 但目前并没有对灶神星熔体中亲铁元素扩散系数的相关研究。作为亲铁元素, Ga、Mo、W 是灶神星形成和分异过程中的重要示踪元素。本研究利用气动悬浮激光加热手段合成灶神星玄武质熔体成分 (与 polymict eucrite Macibini 相同) 玻璃初始样品, 在 1300~1600°C 以及 0.5~1 GPa 的条件下于活塞圆筒压机进行 Ga、Mo、W 的扩散偶实验。通过 LA-ICP-MS 测量实验产物中 Ga、Mo、W 的浓度曲线, 可以用误差函数进行拟合。实验结果表明, 压力对扩散系数的影响可以忽略; 三

种元素的活化能基本相同 (189~13) kJ/mol, 在相同温度下, 三种元素扩散系数差别不大, 序列为 $D_{\text{Ga}} > D_{\text{Mo}} > D_{\text{W}}$ 。灶神星熔体的 Ga、Mo、W 扩散系数比地球熔体高出 1~3 个数量级, 这与灶神星熔体极高的解聚合度相关。综合目前数据, 我们建立了适用于灶神星熔体和地球熔体成分的 Ga、Mo、W 扩散系数普适经验模型。由于玄武质熔体中 Ga、Mo、W 的扩散系数比 Fe 慢 2~4 倍, 因此 Ga、Mo、W 在核幔之间的分配可能难以达到热力学平衡。根据 D_i/D_{Si} (其中 i 代表其他元素) 比值与轻重同位素扩散分馏经验因子 β 值的关系, 估计 Ga、Mo、W 的 β 值约为 0.095。

关键词: 灶神星; 扩散系数; 核幔分异; 动力学效应

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB 41010204)

第一作者简介: 李逸凡 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学。E-mail: liyifan0529@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学。E-mail: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

地球风化对于 Eucrite 化学组成的影响

白晓琪¹, 康晋霆^{2*}, 李欣¹, 刘芳¹, 安亚军¹, 张兆峰¹

1. 成都理工大学, 成都 610059;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

灶神星是小行星带中最大的分异型行星,也是地球上发现最多的无球粒陨石——“HED”陨石(Howardite-Eucrite-Diogenites)的母体。灶神星的增生分异过程非常迅速,发生在太阳系形成之初的 5 Ma 内,同时 HED 陨石也是太阳系内最古老的岩浆岩之一(岩浆结晶年龄约为 4.43~4.55 Ga),是研究太阳系早期行星分异和岩浆演化的重要样品。目前对 Eucrite 和 Diogenite 的研究显示其主量元素组成均一,然而稀土元素(REE)变化较大,对于该现象的解释仍存在较大争议。造成这一现象的原因在于大量的 HED 陨石均为沙漠陨石,受到了不同程度的风化作用。相比于主量元素,微量元素更容易在风化过程中发生迁移,对理解 HED 陨石的形成过程造成了干扰。针对这一问题,本次实验以 10 块 Eucrite 陨石作为研究对象,进行了岩相学以及地球化学分析。在通过岩相学明确风化程度的基础上,对样品先后进行

Milli-Q 水淋洗和 5 %醋酸溶液淋滤,分别收集到 MQ 水淋滤液、醋酸淋滤液以及残留物进行元素含量测定。二次风化物如碳酸盐、磷酸盐、粘土矿物,和极少量原生硅酸盐矿物会在醋酸淋滤下释放到溶液中。不同风化程度的 Eucrite 淋滤液 REE 含量存在明显差异,风化程度越高,淋滤液 REE 总体含量越高,但总体 REE 配分模式类似,未发现个别稀土元素解耦现象。对于南极陨石和降落型陨石,残留相的 REE 和全岩相似,反映风化程度较低。而沙漠型陨石的残留相中轻稀土含量相对于全岩显著偏低,重稀土含量相对于全岩略微偏低,说明风化过程中重稀土相对轻稀土不易迁移。下一步我们将调查风化过程中稀土同位素组成是否存在变化及原因。

关键词: 灶神星; Eucrite; 地球风化; 化学组成; 稀土元素

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(42330102)

第一作者简介: 白晓琪(2003-), 本科(在读), 研究方向: 行星化学. E-mail: 202201170126@stu.cdut.edu.cn

*通信作者简介: 康晋霆(1991-), 副教授, 研究方向: 金属稳定同位素. E-mail: kjt@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

类地行星挥发分早期增生与演化

王文忠*

中国科学技术大学, 合肥 230026

挥发分在行星形成与演化过程中扮演了关键角色, 直接影响地球宜居环境的形成。相较于早期太阳系物质, 硅酸盐地球具有类似的难熔性元素丰度, 但明显亏损挥发性元素。理解地球挥发分的增生机制对于研究类地行星的起源与可宜居性演化至关重要。当前有两种主要假说解释地球挥发分的来源: 一种认为地球初始增生物质贫挥发分, 硅酸盐地球的挥发分主要来自后期增生的富挥发分物质, 这一过程发生在地核形成之后, 称为“后期增生模型”; 另一种则认为地球初期增生物质富含挥发分, 当前的挥发分亏损是早期演化过程导致的, 称为“早期演化模型”。挥发性元素 (如 S、Se、Te) 的同位素可用于示踪其来源和演化, 前提是明确增

生过程中的同位素分馏机制。然而, 由于行星形成演化过程常在高温高压条件下进行, 实验测定同位素分馏挑战很大。本研究通过第一性原理计算, 确定了行星增生演化过程中的 S、Se、Te 同位素分馏。研究发现, 早期星胚熔融挥发使得星胚富集轻 S、重 Se 和重 Te 同位素; 而核幔分异并未导致显著影响 S、Se、Te 同位素分馏。这一结果与地球的观测结果十分吻合, 表明地球在吸积初始阶段就增生了大量的挥发性元素, 后续的星胚演化过程重塑了地球的挥发份储库。

关键词: 早期星胚挥发; 核幔分异; 同位素分馏; 挥发分; 第一性原理计算

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

含“水”火星的核-幔分异: Ni 和 Co 元素的约束

翟宽, 郭新转*

中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

水是火星科学研究的重点内容之一,也是评估火星宜居性的重要指标。现今火星壳层非常干燥,水的含量仅为 $(73\sim 290)\times 10^{-6}$ (Mc Cubbin 等, 2012)。火星形成初期,火星内部可能是富水的,水的含量最高可达 3.5 % (Black 等, 2022; Clesi 等, 2016)。多种同位素证据表明火星核-幔分异成核作用在太阳系形成后约 7~15 Ma 内完成,因此,火星内部的“水”很可能参与了火星的核-幔分异过程。亲铁元素常用于示踪类地行星的核-幔分异过程,其在金属核硅酸盐间的分配行为受氧逸度影响较大。Ni 和 Co 元素是火星核的重要组成成分,也是典型的亲铁元素,它们的分配系数都随着温度、压强和氧逸度的升高而降低。水是火星内部重要的挥发分和氧化剂。在火星核-幔尚未完全分离阶段,原始火星内部的水与

金属铁的反应极有可能提升了火星内部的氧逸度,可能会改变 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间的分配。我们将水含量与氧逸度的变化结合起来,在 4~10 GPa 条件下进行了不同水含量条件下 ($\leq 2\%$) 亲铁元素 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间的分配实验,系统地研究了 Ni 和 Co 的分配系数与温度、压力、氧逸度、水含量之间的关系。基于 Ni 和 Co 在金属和硅酸盐间分配系数的结果,我们认为水能显著减小火星岩浆洋的深度,含 2 % 水的火星岩浆洋比不含水的岩浆洋浅约 400 km。我们结合水-铁反应的机理与火星幔 FeO 含量的约束,建立了含“水”火星核-幔分异形成火星核的多阶段模型。

关键词: 火星; 水; 氧逸度; 核-幔分异

基金项目: 国家自然科学基金项目 (4207051)

第一作者简介: 翟宽 (1992-), 博士后, 研究方向: 实验地球化学。E-mail: zhaikuan@mail.gyig.ac.cn

*通讯作者: 郭新转 (1979-), 研究员, 研究方向: 实验岩石学、矿物物理学。E-mail: gxzhuan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

X 射线精细结构吸收谱在火星陨石中的应用

邵慧敏, 刘洋*

中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190

依托日本高能加速器研究机构的同步辐射光源 Photon Factory 9A 光束线站, 本研究运用 X 射线吸收精细结构 (XAFS) 手段, 针对辉玻无球粒火星陨石里的铁元素展开了系统性探究, 其核心目的在于挖掘出该元素在母体冷却进程里所留存的氧逸度相关信息。实验选择了三块颇具典型性的火星陨石样本, 分别为 NWA 13327、NWA 8657 以及 NWA 6963, 它们皆属于玄武岩质 Shergottites, 有着独特的矿物构成与地质背景。实验借助同步辐射 X 射线源, 把 X 射线

能量调至与样品内铁元素内壳层电子能量相匹配的程度, 进而实现对铁氧化态的高灵敏度监测。研究主要聚焦于熔长石与单斜辉石这两类矿物。最终结果显示, 熔长石于冷却环节呈现出较还原的氧逸度特性。借由 XAFS 技术, 本研究为洞悉 Shergottites 的形成环境以及火星内部的氧化还原状况开拓了新的视角。

关键词: 辉玻无球粒火星陨石; X 射线精细结构吸收谱; 氧逸度

第一作者简介: 邵慧敏 (1994-), 中科院特别研究助理, 研究方向: 天体化学。E-mail: shaohuimin@nssc.ac.cn

*通信作者简介: 刘洋 (1984-), 研究员, 研究方向: 行星遥感。E-mail: yangliu@nssc.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

克里普玄武岩成因对月球早期内部物质循环过程的限定

杨晶¹, 杜蔚^{1,2*}, 李瑞¹, 鞠东阳^{1,3}, 钱煜奇⁴,
黄葳^{1,4}, 刘建忠^{1,2}, 刘耘^{1,2,5}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 香港大学, 中国香港 999077;

5. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059

克里普是月球岩浆洋演化最后阶段的残余物, 富含包括放射性生热元素 U、Th、K 在内的不相容元素。因此, 富集克里普成分的月球样品具有独特的地球化学特征, 是示踪月球内部物质循环过程的重要媒介。然而, 包括原生克里普玄武岩在内的富克里普成分样品的岩石学成因, 特别是其母岩浆是在何时以何种方式获得克里普成分仍然没有确切结论, 因此急需对除 Apollo 返回样品之外的新的月球样品中的富克里普成分岩石样品进行研究。嫦娥五号任务于 2020 年降落至风暴洋北部, 远离 Apollo 和 Luna 任务采样区。通过对嫦娥五号月壤粉末光片样品 CE5C0800YJFM00101GP 的观察, 在其中发现了极少量的富克里普成分的外来撞击溅射物。结合矿物组成和主微量元素分析、原位 U-Pb 年代学分析, 以及遥感数据分析, 这些富克里普物质的原岩被限定为位于雨海撞击盆地西北缘的克里普玄武岩, 并于约 33 Ga 年前经撞击作用熔融形成冲击熔体并溅射到嫦

娥五号采样点。热力学模拟计算显示至少有 1%~5 % 的克里普成分加入到了深度约为 200 km 的月幔源区当中, 随后源区发生低程度部分熔融形成了克里普玄武岩的母岩浆。同时, 样品研究和遥感数据显示克里普玄武岩基本产出在雨海盆地边缘和风暴洋克里普地体周边, 这意味着克里普玄武质岩浆活动和月球的大型地质构造运动具有密切的联系。该研究表明, 在月球早期, 位于壳幔边界的克里普物质下沉至月幔深部, 而月幔深部的部分熔融又将克里普带回至岩石圈, 甚至穿越构造运动在月壳中形成的裂隙喷发至月表形成克里普玄武岩。而存在于富克里普物质中的生热元素在月壳和月幔中的再循环和不均匀分布可能是造成月球热状态和月壳建造-改造过程存在差异的原因。

关键词: 早期月球; 克里普; 物质迁移; 月幔组成

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42441822, 42373041)

第一作者简介: 杨晶 (1986-), 副研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: yang-jing@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 杨晶 (1986-), 副研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: yang-jing@mail.gyig.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

火星硫酸复盐的光谱学研究

张睿泽¹, 石二彬², 曾小家², 鞠恩明¹, 凌宗成¹, 辛艳青^{1*}

1. 山东大学空间科学研究院, 山东 威海 264209;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

火星表面广泛分布的硫酸盐矿物（如硫酸镁、硫酸铁、硫酸钙）记录了复杂的水岩相互作用历史。近期原位探测发现多种含混合阳离子的硫酸盐矿物，暗示火星可能存在硫酸盐复盐。此类复盐的形成机制与矿物结构特征可为重建火星的沉积环境、水文循环及气候演化提供关键约束。此外，铁的硫酸盐与氧化物在火星表层广泛存在，而 Mn 作为氧化还原敏感元素，其在沉积物形成与改造过程中的赋存状态及结晶特征尤为复杂，对揭示火星表层风化作用、地下水活动及宜居性演变具有重要意义。本研究针对火星硫酸盐复盐的识别问题，采用高温

固相反应法与水溶液缓慢蒸发法，成功合成七种硫酸镁复盐及五种铁锰硫酸复盐，并系统建立其拉曼光谱与红外光谱数据库。实验结果表明，不同复盐的拉曼特征峰位与中红外吸收带具有显著差异，可有效区分阳离子类型及结晶水含量。这些独特的光谱特征可为火星轨道探测（如 TES、THEMIS）与就位探测（如 SHERLOC）提供重要参考，并为解析火星表层物质循环、水活动历史及宜居性演化提供新依据。

关键词：火星；复盐；硫酸盐；光谱学

基金项目：国家自然科学基金项目（U1931211, 41972322）；山东省自然科学基金项目（ZR2023QD157）；中国博士后科学基金项目（2022M721916）；国家航天局民用航空航天技术预研项目（D020102）

第一作者简介：张睿泽，硕士研究生，研究方向：行星光谱学。E-mail: 202317810@mail.sdu.edu.cn

*通信作者：辛艳青，高级实验师，研究方向：行星光谱学。E-mail: yqxin@sdu.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

碳质球粒陨石成分假说和原行星盘演化

邓正宾*, 田元元

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

作为未分异小行星的可能主要岩石类型, 球粒陨石被认为是原行星盘演化阶段的“沉积岩”, 聚集了该阶段不同热作用条件下的产物, 例如难熔包裹体、球粒、基质等组分。其中, 不同组别的球粒陨石中各组分的占比变化显著, 例如不同碳质球粒陨石组别中球粒组分的比例变化为约 0~80 % (CL > CO > CV > CR > CM > CK > CI), 普通球粒陨石中球粒组分占比甚至可达 90 % 以上。长期以来, 关于碳质球粒陨石存在一个“球粒-基质化学成分互补”的假说, 该假说具体表现为: (1) 球粒组分往往具有比 CI 组别碳质球粒陨石 (几乎不含球粒的组别) 更高的 Mg/Si 比值, 而基质组分的比值偏低; (2) CV、CR、CO、CM、CK 和 CL 组别的碳质球粒陨石在全岩上却具有和 CI 组别的 Mg/Si 比值却基本一致, 即使它们有着截然不同的球粒对基质组分的比。来自该假说最直接的指示是原行星盘中存在多个局部空间近似封闭的储库, 每个储库中前体物质经高温作用改造后形成球粒组分, 热改造形成的气相部分则构

成基质组分。然而, 天文观测和数值模拟表明, 原行星盘中存在有剧烈的径向和轴向的物质搬运, 保留多个近似封闭的储库有一定难度; 另外, 碳质球粒陨石的基质组分中存在热不稳定的前太阳系颗粒物, 表明其基质组分不完全代表热改造作用形成的气相部分。也有学者认为该互补性系碳质球粒陨石在母体中经历热变质和水改造的结果, 抑或是该互补性根本不存在, 即碳质球粒陨石仅仅是高温球粒组分跟类似 CI 组别碳质球粒陨石的尘埃物质之间物理混合的产物。这里我们针对 CV、CR、CO、CM、CK 和 CL 多组别的碳质球粒陨石样品, 开展了一系列基于激光剥蚀的高分辨率元素组成测量和小质量样品湿法高精度金属同位素组成测量等方面的工作尝试, 来检验所谓的“球粒-基质化学成分互补”的假说, 为原行星盘演化提供制约。

关键词: 原行星盘; 碳质球粒陨石; 球粒和基质; 化学成分互补假说; 元素和同位素组成

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

(Fe、Ca、Mg) S 饱和条件下水星岩浆中的硫溶解度

吴何三¹, 倪怀玮^{1,2}, 刘康^{1*}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室, 合肥 230026

S 是水星内部最丰富的挥发分, 研究其在水星岩浆中的溶解度对于我们认识水星内部 S 的分布和演化具有重要意义。虽然不少证据表明水星地幔中可能存在大量的 MgS、CaS 等硫化物, 但水星地幔硫化物成分对于硫溶解度的影响并没有得到很好的约束。基于此, 我们利用活塞圆筒压机开展了一系列在不同温度、压力、硫化物成分条件下的水星岩浆-硫化物相平衡实验。实验温度范围为 1300~1500°C, 压力范围为 0.5~2 GPa。硫化物的成分变化采用 FeS、MgS 和 CaS 混合控制, Fe/(Fe+Mg+Ca) 比值的变化范围为 0~1。实验采用石墨样品舱, 氧逸度通过调控 Fe-Si

合金成分控制在 IW-4-IW-5 值附近。实验结果显示:

(1) MgS 和 CaS 的加入会大大提升硫溶解度, 并且 MgS 的提升作用强于 CaS; (2) 温度可以促进硫溶解度的提升, 压力基本不影响硫溶解度 (1~2 GPa 压力范围内)。我们正在尝试通过结合前人的实验数据, 综合考虑温度、压力、氧逸度、熔体成分、硫化物成分等因素的影响, 提出更加适用于水星岩浆的硫溶解度模型, 为认识水星地幔熔融过程中硫的行为和制约水星地幔硫化物组成提供重要依据。

关键词: 水星; 硫含量; 硫化物组成

第一作者简介: 吴何三 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: whs164830@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 刘康 (1995-), 博士后, 研究方向: 实验岩石学. E-mail: lk2017@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

小安的列斯群岛弧前大洋沉积物的 Ce 同位素特征

赵正捷, 李欣*, 张兆峰, 刘芳, 安亚军

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

作为稀土元素中丰度最高的元素, 铈 (Ce) 因独特的+3/+4 可变价态特性而显著区别于其他稀土元素, 其氧化还原敏感性使其成为重建古环境与物质循环过程的重要示踪工具。尽管传统研究已广泛利用铈异常 (Ce/Ce*) 和价态分布解析环境演化, 但 Ce 稳定同位素体系的运用仍少。近年来 Ce 稳定同位素分析测试方法得到了发展, 在现有研究基础上拓宽样品种类将有助于理解 Ce 稳定同位素的分馏机理及其储库分布特性, 丰富其地质应用。本研究选取了来自小安的列斯群岛弧前区域的大洋深钻计划 (DSDP) 的样品, 旨在认识该地沉积序列中不同组分海洋沉积物中的 Ce 稳定同位素组成特征 ($\delta^{142}\text{Ce}$, 以 NIST SRM 3110 为标样)。该岛弧自渐新世以来一直活跃, 南北

段岩性、厚度具有梯度差异, 沉积物成分、来源复杂。其中位于北段的大洋深钻计划 543 站点的样品远离南美大陆, 以远洋放射虫粘土为主, 上部样品可见火山灰层, 表明小安的列斯群岛的火山物质参与, 样品 $\delta^{142}\text{Ce}$ 值为 $-0.008\text{‰} \sim 0.221\text{‰}$ (平均值为 $(0.058 \pm 0.081)\text{‰}$, 2SD, $n=42$); 南段 144 站点的样品则以生物成因碳酸钙和来自南美洲大陆的陆源浊积岩为主, 由浅到深夹杂有白垩石、泥灰岩、黑色页岩和碎屑石英等, 样品 $\delta^{142}\text{Ce}$ 值为 $0.004\text{‰} \sim 0.205\text{‰}$ (平均值为 $\delta^{142}\text{Ce}=0.047\text{‰} \sim 0.104\text{‰}$, 2SD, $n=16$)。

关键词: 铈同位素; 大洋沉积物; 小安的列斯群岛; 大洋深钻计划

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330102)

第一作者简介: 赵正捷 (002-), 硕士研究生, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: zzj@stu.cdut.edu.cn

通信作者简介: 李欣 (1975-), 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学。E-mail: xlisu@cdut.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球波得月溪地区月壤厚度估算及物质溯源

曾学进¹, 刘建忠^{1,2*}, 朱凯^{1,2}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

波得月溪地区位于月球正面中低纬度地区, 月海和高地交界地带, 经历过多次大规模火山喷发和玄武岩熔岩流充填, 月壤中保存了丰富的地质信息和月球资源, 研究该区域月壤厚度与来源对理解月球区域演化历史和资源利用方面具有重要意义。本研究利用遥感数据, 对波得月溪地区的月壤厚度进行了定量分析, 并探讨了月壤的可能来源。基于月球勘测轨道飞行器 (LRO) 获取的影像数据, 结合 Kaguya 矿物绘图仪 (MI) 探测获得的光谱数据以及 1: 250 万月球全月地质图, 将研究区域自西向东划分为中低钛月海玄武岩区—火山碎屑岩区—低钛月海玄武岩区三个不同的地质单元, 由于小天体撞击到月球表面时穿透表面的月壤撞击到深处的月岩时由于硬度的变化会

使得撞击坑的坑底发生明显的变化, 因此可以通过选择合适的撞击坑根据坑缘直径和坑底直径的比较反演出当地的月壤厚度同时结合地质图以及撞击坑溅射物沉积模型, 分析月壤的潜在来源。研究发现波得月溪不同区域的月壤厚度明显不同, 其中火山碎屑岩区域月壤厚度 (12.13 m) 较玄武岩区域月壤 (6.15 m) 更厚; 研究区域内月壤来源主要为区域内部玄武岩和火山碎屑岩的风化产物, 但在部分地区可见明显的来自哥白尼撞击坑的溅射物, 对于反演区域地质演化历史有重大意义。

关键词: 波得月溪; 月壤厚度; 月壤来源; 区域地质演化

第一作者简介: 曾学进 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 行星科学. E-mail: zengxuejin23@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 刘建忠 (1968-), 研究员, 研究方向: 月球与行星地质方面. E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

Cr、Sr 同位素指示嫦娥 5 号玄武岩母岩浆的 Al 亏损特征

张英男¹, 王梓威¹, 沈骥¹, 胡依阳¹, 何小庆², 俞樨¹, 刘岢城¹,
孙家淮¹, 杨兵¹, 秦礼萍^{1*}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 安徽理工大学 碳中和科学与工程学院, 合肥 231131

火山活动对于维持类地行星的宜居性具有重要的意义, 分析嫦娥 5 号采样返回的玄武岩显示月球的火山活动可以持续到距今 20 Ga 以后。同时, 放射性同位素也指示其岩浆源区并非传统认知的富集放射性产热的 U、Th 和 K 元素的 KREEP 源区。理解这一源区的特征和形成机制对我们揭开月球年轻火山活度的驱动机制具有重要意义。因此, 我们通过对嫦娥样品多种金属元素的稳定同位素研究来制约嫦娥 5 号玄武岩的源区特征。对嫦娥 5 号玄武岩的元素和同位素分析结果显示, 相对于其他 Apollo 样品和月球陨石, 嫦娥 5 号玄武岩的 Mg[#]和 Cr 含量均较低, 同时伴随着显著偏负的 Cr 同位素分馏, 暗示其经历了较高级别的镁铁质矿物分离结晶 (如橄榄石和辉石), 与其高度富集的微量元素特征一致。其中玄武

岩碎屑 CE5C0000YJYX052 的 Cr 同位素分馏可达 -0.5 ‰, 这一显著的 Cr 同位素分馏指示嫦娥 5 号玄武岩在侵位前经历了较高级别的分离结晶。然而区别于 Cr 同位素, 嫦娥 5 号玄武岩的 Sr 同位素并未发生分馏, 指示其长石并未发生显著分离结晶。这种结晶序列特征与阿波罗高钛和低钛玄武岩均存在较大差异。Cr 和 Sr 同位素的分配行为指示嫦娥 5 号玄武岩在结晶过程中斜长石存在结晶推迟的情况。嫦娥 5 号玄武质岩浆中斜长石结晶的推迟可能是由于嫦娥 5 号玄武岩的母岩浆相对于阿波罗 12 和 15 采集的低钛玄武岩岩浆具有更低的 Al 含量。

关键词: Cr 同位素; Sr 同位素; 嫦娥 5 号玄武岩; 岩浆分离结晶

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42241102, 41930216, 42441837)

第一作者简介: 张英男 (1993-), 副研究员, 研究方向: 天体化学. E-mail: zynld@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 秦礼萍 (1978-), 教授, 研究方向: 天体化学. E-mail: lpqin@ustc.edu.cn

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

内太阳系的吸积: Pebble Accretion 还是 Grand Tack?

周游*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

理解从外太阳系向内太阳系的物质和水的输运动力学, 对于解析类地行星的形成过程至关重要。大迁移 (Grand Tack) 和卵石吸积 (Pebble Accretion) 这两种主要模型分别提供了不同的框架来解释内太阳系的形成。然而, 究竟哪种模型在该吸积过程中占据主导地位, 仍然存在较大争议。本研究旨在利用内太阳系的总物质量和水含量作为约束条件, 评估大迁移和卵石吸积模型在该区域吸积过程中的作用。

我们使用 N 体数值模拟方法 (N-body method), 构建 3 种大迁移情景与 2 种卵石吸积模型, 分析它们在内太阳系生成物质和水的能力。研究结果表明, 卵

石吸积模型在内太阳系产生的物质量远高于大迁移模型, 约为其 10~14 倍 ($20.58 M_{\oplus} \sim 28.6 M_{\oplus}$)。在水的生成能力方面, 卵石吸积模型的效率也显著高于大迁移模型, 最高可达 20 倍 ($122.17 M_{\oplus} O$)。(大迁移模型对应的数值是多少?) 总体而言, 卵石吸积模型所生成的物质和水远超当前观测到的水平, 而大迁移模型的结果更接近当前的内太阳系状况。这表明, 卵石吸积在内太阳系的形成过程中可能并未占据主导地位。

关键词: Grand Tack; Pebble Accretion; 内太阳系的形成

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球背面和正面岩浆结构的不对称性

韩喆¹, 曾罡^{1*}, 惠鹤九^{1,2,3}, 李宇¹, 韩紫嫣¹, 欧阳文昕¹, 张岳¹,
赵凯⁴, 谷渊涛^{5,6}, 陆现彩¹, 王汝成¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230036;

3. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

4. 中国科学院 紫金山天文台, 行星科学重点实验室, 南京 210023;

5. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023;

6. 河南工程学院 资源与环境学院, 郑州 451191

月球的背面与正面具有明显的“二分性”特征, 其重要表现之一为月海玄武岩在背面的分布远远少于正面, 暗示月球内部岩浆活动存在差异。为了证实这一推论, 我们从嫦娥六号返回的月背样品中挑选了一块具有明显单斜辉石扩散环带的高钛玄武岩屑进行研究。通过运用单斜辉石温压计、结晶模拟和扩散年代学等方法, 我们发现该样品源自一个比嫦娥五号和阿波罗 12 号低钛玄武岩更浅 ($> \sim 180$ km) 的低钛源区。大多数单斜辉石的扩散时间相对一致 ($113 \pm$

21 d), 我们认为在月背壳幔边界存在一个单一的岩浆储库, 早期从低钛岩浆中结晶的单斜辉石在此停留, 而后被新注入的高钛岩浆捕获并发生扩散。与正面相比, 月球背面简单的岩浆结构支持了月球内部结构“二分性”的存在, 并为月球表面观察到的差异提供了潜在解释。

关键词: 月背; 月海玄武岩; 扩散年代学; 岩浆结构

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

天体撞击过程与撞击历史研究

肖智勇*

中山大学 行星环境与宜居性研究实验室, 广州 519000

撞击作用是天体形成和演化过程中的重要地质营力, 撞击通量影响天体表面的改造速率和宜居性演化, 同时也是使用撞击坑统计估算地外天体表面模式年龄的基础。内太阳系天体可能经历了相似的撞击历史, 其中月球的地质活动和表面风化速度最弱, 最完整地记录了太阳系形成以来的撞击历史, 且月球是唯一开展过采样返回的类地天体。因此, 月球是标定内太阳系撞击历史的基础参照。我国正在推进中的探月工程四期、国际月球科研站、载人登月、火星采样返回探测, 以及国外正在实施的月球和深空探测任务, 均将刻画天体撞击过程、建立撞击通量作为首要科学目标之一。

Apollo、Luna 和嫦娥五号已建立了 15 个月球撞击通量的定标点。现有的样品年龄和表面撞击坑空间密度观测共同说明月球在形成之初的 10 Ga 遭受了极高的撞击频率, 而大约 36 Ga 以来的撞击频率较低且趋于稳定。但是, 所有定标点的同位素年龄和撞击

坑坑群的观测密度均存在普遍不一致。针对观测约束不确定性的问题, 数十年的研究揭示了两个共识性的原因: 背景二次坑的污染程度不详、弹道溅射物沉积模式的预测不足。解决这两个难点问题已超越了样品分析和坑群统计的研究范畴, 与撞击过程的物理机理紧密相关; 而撞击过程伴随着极高的应变速率和极端温压环境, 解析撞击机理是行星地质学研究的重要内容。

本报告将重点介绍近年来在月球表面的撞击机理和撞击历史研究方面的新进展, 尤其是基于我国嫦娥探月工程自主获取的科学数据独立完成的新发现。针对目前撞击过程和撞击历史研究领域的关键科学问题, 展望了未来月球探测任务有望取得的突破方向。

关键词: 天体撞击; 撞击历史; 撞击坑; 月壤; 年代学

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

K/Pg 界线黏土成因 ——来自丹麦 Stevns Klint 剖面的启示

廖世勇^{1*}, 李晔¹, Birger Schmitz²

1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210023;

2. Lund University, Lund, Sweden 221001

K/Pg 界线地层记录了海洋和陆地的一系列同步灭绝事件, 导致了包括恐龙在内的大约四分之三的物种灭绝, 被认为与 6600 万年前尤卡坦半岛的希克苏鲁伯撞击事件密切相关。典型的海相 K/Pg 界线以一个数毫米厚的红色富黏土层为标志, 含有冲击石英和蚀变微球粒, 直接覆盖在晚白垩世马斯特里赫特阶地层之上, 紧接着被数十毫米的层理发育的深色富有机质层状黏土覆盖。K/Pg 界线红色及上覆富有机质黏土是地质记录中研究最多的层位之一, 被广泛用来示踪陨石撞击过程, 以及后继的生态和环境效应。然而由于经历复杂的成岩物理化学过程, 以及后期风化作用影响, K/Pg 界线黏土成因仍然存在很大争议。

本研究以经典的丹麦 Stevns Klint 剖面 K/Pg 界线黏土层位研究对象, 开展了系统的原位岩相学工作, 追踪撞击相关物质组合。同时展开全岩单矿物分离研究, 示踪黏土源岩。首次在红色黏土层中发现了撞击玻璃蚀变成因的海绿石球粒, 其成分与占主体的蒙脱石黏土成分差异明显, 显示以蒙脱石为主体的红

色黏土层可能并非前人认为的来自蚀变的撞击玻璃。重矿物丰度、成分和年代学谱图研究发现, 红色黏土层与上覆层状富有机质黏土在物源上并无明显差异, 主要应来自邻近 Sveconorwegian 和 Sudetes 地区。然而, 界线红色黏土与上覆层状富有机质黏土在微陨石来源铬铁矿丰度上差异明显, 后者显著增加。这种微陨石来源铬铁矿丰度的增加难以用陆源物质输入变化解释, 而更可能与海啸导致的远海物质向陆迁移有关。由于陆源物质输入的减少, 远海沉积物中微陨石来源铬铁矿在内的地外物质丰度将相对近岸增高。陨石撞击导致的海啸在向陆传播的过程中, 将使得更为富集微陨石来源铬铁矿的远海沉积物向陆搬运并在近岸快速沉积。本研究可能首次在远离撞击点的 K/Pg 界线沉积中识别到海啸沉积。上述研究同时也表明, K/Pg 界线红色及上覆富有机质黏土的沉积时间可能非常短暂, 为小时-天量级, 而非前人认为的几十到数千年。

关键词: K/Pg 界线; 红色黏土; 成因

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

月球撞击玻璃珠储水的二分特性

胡森*

中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029

月表水的发现激起了就位利用月球水资源的热情, 更是 Artemis 和嫦娥七号任务的探测的主要目标。嫦娥五号 (CE5) 返回月壤中的撞击玻璃珠被确证可以储存 2000 $\mu\text{g/g}$ 的太阳风成因水, 其储存机制是太阳风注入后的扩散作用将太阳风成因水保存在撞击玻璃珠中。这种储水机制能否推广至整个月面是值得验证的重要科学问题。本文通过嫦娥六号 (CE6) 月壤返回的撞击玻璃珠, 通过测量水和氢同位素及其在撞击玻璃珠中的分布特征, 结

合撞击玻璃珠的化学成分, 发现月壤中的撞击玻璃珠的太阳风成因水与成分强依赖, (1) CE6 玄武质撞击玻璃珠与 CE5 相比具有更低的太阳风成因水含量, (2) 斜长质撞击玻璃珠与玄武质撞击玻璃珠相比, 完全没有发现太阳风成因水的痕迹。这些发现为理解月表水的储存、成因和迁移提供了新认知。

关键词: 月球; 水; 撞击玻璃珠

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

Ni 同位素揭示钛辉无球粒陨石母体的挥发份亏损历史

朱柯*

中国地质大学(武汉), 武汉 430074

钛辉无球粒陨石(Angrite)是一类罕见的无球粒陨石,以富钙辉石、富钙橄榄石和钙长石为主要矿物组成。其母体——钛辉无球粒陨石母体(Angrite Parent Body, APB)被认为是太阳系内挥发分最为贫乏的分化小行星之一,其 K/U 和 Rb/Sr 比值较 CI 球粒陨石分别低约 100 倍和 1000 倍。揭示 APB 的形成和演化历史对于理解太阳系岩质行星及小行星的挥发分丢失机制具有重要意义。本研究通过高精度镍(Ni)同位素分析,系统研究了不同类型的钛辉无球粒陨石(火山型、深成型、橄榄岩型)样品,以探讨 APB 的热演化历史及其极端挥发分亏损的成因。结果表明,深成钛辉无球粒陨石(如 NWA 12934、NWA 14758)具有较高的 Ni 含量($2000 \times 10^{-6} \sim 5000 \times 10^{-6}$),其 $\delta^{60/58}\text{Ni}$ 值($0.202\text{‰} \sim 0.028\text{‰}$)接近球粒陨石。而火山型钛辉无球粒陨石(如 D'Orbigny、SAH 99555) Ni 含量较低($20 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$), $\delta^{60/58}\text{Ni}$ 值变化范围较大($-0.470\text{‰} \sim 0.262\text{‰}$),其中部分样品(如 NWA 12774)呈现显著轻的 Ni 同位素组成。此外,橄榄岩型钛辉无球粒陨石(NWA 8535)及火山型钛辉无球粒陨石中的巨

晶橄榄石(A-881371, A-12209)显示出超球粒陨石的 $\delta^{60/58}\text{Ni}$ 值($0.422\text{‰} \sim 0.655\text{‰}$),这三个 APB 的储库(深成型,火山型,橄榄石)应该分别代表了 APB 核-幔-壳的 Ni 同位素组成。结合 Ni 的地球化学性质及其在分异型行星体中的行为,我们推测 APB 的 Ni 同位素组成受到高能撞击事件的显著影响。首先,APB 的核的 Ni 同位素组成基本保持球粒陨石特征,反应了核幔分异不造成 Ni 同位素分馏。然而,地幔物质的超球粒陨石 $\delta^{60/58}\text{Ni}$ 值可能是由撞击事件导致的高温蒸发所引起的。高温条件下,较轻的 Ni 同位素更易逸散,而残余物相对富集重 Ni 同位素。其次,火山型钛辉无球粒陨石中观察到的轻 Ni 同位素组成可能源于撞击挥发物的部分再凝结过程。在高温蒸发后, Ni 气体在冷却过程中重新凝结到 APB 表面,导致表层物质的 Ni 同位素组成偏轻。这一过程与先前钛辉无球粒陨石 K 和 Rb 同位素研究中提出的部分再凝结机制相一致。

关键词: 钛辉无球粒陨石; Ni 同位素; 挥发份亏损; 高能撞击

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

分异天体晚期吸积矿物残留的发现及意义

张爱铖^{*}, 杜天然, 张浪, 刘晓文

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

晚期吸积假说 (Late Veneer Hypothesis) 认为类地行星和分异小行星在发生金属-硅酸盐分离之后吸积了球粒陨石物质。这些球粒陨石物质的加入对于认识类地行星和分异小行星的早期演化具有重要意义。然而, 该假说主要依赖于部分硅酸盐样品中强亲铁元素的富集及其未分异的分配模式。本文报道在一块非角砾岩型灶神星陨石 NWA 8326 中, 一个硫化物颗粒包裹了一个约 300 纳米大小的金属颗粒。该金属颗粒

呈现富集 Ir、W、Ru 和 Rh 等强亲铁元素特征。这是富 W 难熔金属颗粒在非角砾岩型分异样品中的首次报道, 代表了分异天体晚期吸积的首个矿物学证据。该富 W 金属颗粒的存在对于研究分异天体早期的 W 同位素模式年龄具有重要影响。

关键词: 富 W 难熔金属; 晚期吸积假说; 灶神星陨石; W 同位素模式年龄; 分异天体

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

火星液态水活动历史和宜居条件演变：进展和问题

肖龙*

中国地质大学（武汉）行星地质与深空探测湖北省重点实验室，武汉 430074

火星作为太阳系内地球之外宜居环境最好的行星，其液态水活动历史和宜居条件的演变一直是行星科学和天文学领域的研究热点。液态水不仅是生命存在的必要条件，也是塑造火星地貌和地质演化的重要因素。本报告将从火星液态水活动的地质记录出发，阐述火星表面谷网、湖泊和古海洋等与

液态水活动相关研究的成果，结合气候模拟和实验分析，探讨火星宜居条件的研究进展和存在的问题。

关键词：火星；液态水；古海洋；宜居条件；地外生命

• 专题 1: 天体化学与行星科学研究进展 •

毅力号多载荷分析: 揭示火星杰泽罗沉积扇上部巨石的矿物学特征

黄文博, 辛艳青*

山东大学(威海)空间科学与技术学院, 山东 威海 264209

美国 NASA 的毅力号(Perseverance)火星车于 2021 年 2 月 18 日成功降落在火星杰泽罗(Jezero)撞击坑(18.4° N, 77.7° E), 至今已运行近 4 年, 完成了 5 个阶段的科学探测任务, 依次覆盖撞击坑坑底、沉积扇边缘、沉积扇上部、边界单元及撞击坑边缘。在此过程中, 毅力号搭载的四台光谱载荷——SuperCam、Mastcam-Z、SHERLOC 和 PIXL——发挥了关键作用。其中, Super Cam 具备激光诱导击穿光谱(LIBS)、拉曼光谱和可见-近红外光谱功能; Mastcam-Z 具备多光谱成像能力; SHERLOC 具备拉曼光谱功能; PIXL 具备 X 射线荧光光谱(XRF)功能。此外, 四个载荷均配备相机, 为深入研究杰泽罗撞击坑的表面物质组成、岩石成因及区域地质演化提供了重要依据。在第三阶段探测任务(沉积扇上部)期间, 毅力号穿越了一片遍布形态不规则、尺寸从厘米至米级不等的巨石区域。Mastcam-Z 的高光谱成像分析表明, 该区域的巨石可分为富橄榄石巨石与富辉石巨石两类。针对富橄榄石巨石的代表 Falcon Lake, 毅力号在其表面钻磨形成了 Lake Haiyaha(LH)。SuperCam-LIBS/可见-近红外/拉曼、SHERLOC-拉曼及 PIXL-XRF 的分析结果表明, 该岩石基质主要由富镁橄榄石(For_{73} ; 占比>70%)组成, 同时含有少量次生矿物(蛇纹石和呈块状横切岩石的 Mg/Fe-碳酸盐和硫酸盐), 岩石无明显表面涂层。相比之下, 富辉石巨石的代表(Mount Meeker)钻磨坑 Dragon's Egg Rock(DER)展现出显著不同的矿物学特征。多载荷

分析揭示, DER 岩石基质以富铝辉石(低钙辉石; >50%)为主, 同时伴有橄榄石、Fe-Cr-Ti 氧化物、陨磷钙钠石和铁磷酸盐。此外, 岩石内发育次生矿脉, 主要由烧石膏组成, 并可能含有硬石膏、石膏、硫酸钠或 Ca-Na 硫酸盐复盐。值得注意的是, Mount Meeker 表面具有明显的红棕色涂层, 其主量元素的分布趋势与岩石基质相似($SiO_2 > TFeO > Al_2O_3$), 表明涂层可能与基质成分密切相关。矿物学分析结果显示, 两类巨石与杰泽罗撞击坑坑底的 Séítah 组(富铁橄榄石)和 Máaz 组(富高钙辉石和长石)无直接联系, 更可能起源于杰泽罗撞击坑西部的 Nili 高原上的橄榄石-碳酸盐单元和更远处的低钙辉石单元, 或者是杰泽罗撞击坑边缘的区域性橄榄石单元和含低钙辉石的基性岩盖层。这些巨石的组成特征与洪水侵位相一致, 表明其可能在不同玄武质原岩演化后由后期洪水或冰的作用搬运至现今位置。在搬运过程中或更早, 巨石经历了不同程度的水蚀变或热液蚀变, 导致次生矿物的形成。随后, 在长期干旱环境下, 富辉石巨石的表面逐渐积累了悬浮于火星大气中的玄武质颗粒, 最终形成红棕色涂层。沉积扇上部巨石的形成和搬运过程记录了火星晚期水文活动与区域地质演化的重要信息, 为理解杰泽罗撞击坑及其周边地区的地质演变提供了关键证据。

关键词: 火星; 毅力号; 杰泽罗西部沉积扇; 巨石; 矿物

第一作者简介: 黄文博(2004-), 本科, 研究方向: 行星光谱学. E-mail: 2080466358@qq.com

*通信作者简介: 辛艳青(1984-), 硕士导师, 研究方向: 行星光谱学. E-mail: yqxin@sdu.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

沉积有机质在辐射作用下的演化规律

杨升宇*

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

火星有机质的探测是火星探测任务中的重要目标之一,旨在寻找火星上是否存在或曾经存在生命的证据。2018 年,好奇号在 30 Ga 年前的沉积岩中发现了复杂的有机分子,表明火星曾经可能存在适合生命的环境。2023 年,毅力号在杰泽罗陨石坑中探测到与矿物相关的有机质,证实了火星具有沉积有机质的事实。然而,目前发现的火星有机质具有非常强的惰性,且不含可溶有机物,与地球的典型沉积有机质差异较大。火星如果曾经有过远古生命,那么它们形成的沉积有机质在强烈辐射作用下的演化机理有

待研究。

本研究选取了地球上含铀量最高的富有机质页岩(北欧寒武系 Alum 页岩)为例,借助热脱附气相色谱和傅里叶变换离子回旋共振质谱等技术,揭示了富铀页岩干酪根(kerogen)在辐射作用下的演化规律,系统地阐明自由基交联、脱烷基化、芳构化反应的辐射作用机制,预测了在一定深度内,火星表面可能发现具有生物标志物(biomarker)特征的有机质。

关键词: 火星; 有机质; 辐射

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

孤立系统中微生物群落对温度的响应及非光合碳转化能力研究

刘明学¹, 胡文远², 周磊³, 赵玉连¹, 魏红福¹, 吕珍珍¹, 刘轶凡¹, 董发勤^{2*}

1. 西南科技大学 生命科学与农林学院, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;

3. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010

全球气候变化对土壤碳库影响是一个及其复杂的过程, 气温升高在宏观环境中难以阐述其独立作用; 基于此, 本研究提出构建一种孤立系统, 除空气外, 无外源 C、N、P 等物质输入而以恒温提供能量供给, 研究不同温度梯度对于土壤酶活性、碳含量、微生物群落的影响, 有助于深入理解土壤微生物群落及土壤碳库对于全球温度变化的响应。在实验室条件下使用隔水式恒温培养箱模拟 4 个温度梯度 (10℃、20℃、30℃、40℃), 每个温度设置三个生物学重复形成人为的孤立系统, 测量温度对土壤碳含量、碳转化途径、酶活性及群落结构的影响。长时间稳定的温度环境显著提升了碳酸酐酶活性 (5.5~7.6 倍), 但其活性峰值出现在 20~25℃, 高于 30~40℃ 高温区间; 环境温度的改变, 会导致过氧化氢酶活性的降低, 稳定的环境温度有利于过氧化氢酶活性的提升, 低温环境下 (10~20℃) 过氧化氢酶活性更强; 在短时间 (84 d) 内环境温度的变化可能不会造成土壤全碳的损失, 但高温条件会诱导微生物调整碳使用的分配比例, 微生物生长在不受限情况会使无机碳转换率 (SIC/STC) 提升 3.2 倍, 导致土壤有机碳池大量流向

无机碳池; 16S rDNA 扩增子测序结果表明, 青枯菌属 (*Ralstonia*) 和假单孢菌属 (*Pseudomonas*) 有极强的温度适应性, 无论是升温还是降温都将导致两种属占据主导地位, 但是在寡营养条件中, 在低温环境下被硫氧化湖沉积杆菌属 (*Limnobacter*) 所替代, 而在高温环境下被鞘氨醇单孢菌属 (*Sphingomonas*) 及甲基菌属 (*Methylobacillus*) 替代。将样本数据代入 BP 神经网络 (Back-Propagation Network) 训练, 结果表明土壤在低温度的时候可以较好的抑制有机碳流向无机碳, 无机碳转换率 (SIC/STC) 在 5~10℃ 温度区间内较低, 8℃ 时无机碳转换率最低 (5.93%), 超过这个期间后随温度的上升或下降而增高。土壤微生物群落的多样性更有利于有机碳的贮存, 无机碳转换率随 Chao1 指数的增多而减少, Chao1 指数每增加 1000 个无机碳转换率减少约 3.96%。同时, 结合大规模野外数据从宏观尺度上对土壤微生物群落-气候响应与土壤碳库的变化进行了探讨。

关键词: 立系统; 气候变化; 紫色土; 微生物; 非光合碳转化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172338); 四川省自然科学基金项目 (2025ZNSFSC0436)

第一作者: 刘明学 (教授), 研究方向: 地质与环境微生物学, E-mail: liumingxue@swust.edu.cn

*通信作者: 董发勤 (教授), 研究方向: 非金属矿物学, E-mail: fqdong@swust.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

地下水系统中铁氧化物- $\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$ 非均相体系的还原能力对有机污染物非生物衰减的指示意义

李欣, 杨珊珊*, 刘菲

中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

含水层中广泛赋存的铁氧化物增强溶解性二价铁($\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$)还原能力, 参与有机污染物的非生物降解, 这一过程是地下水中污染物自然衰减的重要组成部分。建立铁氧化物- $\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$ 非均相体系热力学和污染物还原动力学的定量构效关系, 对预测污染物环境归趋和指导修复技术具有重要意义。本研究以针铁矿和赤铁矿作为代表性稳态铁氧化物, 以水铁矿作为代表性非稳态铁氧化物, 通过介导电位法定量表征铁氧化物- $\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$ 体系的还原能力(还原电位(E_{H})), 以硝基苯作为模式有机污染物, 揭示不同混合铁氧化物体系热力学驱动力对硝基苯还原速率的控制机制。结果表明, 对于稳态铁氧化物体系, 硝基苯还原速率与体系 E_{H} 可建立平行的线性自由能关系。对于 $\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$ 催化水铁矿向不同次生矿物的晶相转

化过程, 硝基苯还原仍遵循同一线性自由能关系。然而, 不同转化途径中还原能力的演化呈现显著差异: 在生成热力学更稳定的 $\text{Fe}(\text{III})$ 氧化物时, 体系还原能力取决于矿物组成, 随转化而逐渐增强; 而混合价态磁铁矿的生成导致 pH 和 $\text{Fe}(\text{II})_{\text{aq}}$ 浓度变化主导还原能力, 使 E_{H} 呈现增加趋势。此外, 针铁矿-水铁矿共存体系可通过模板效应维持体系还原能力, 为污染物强化修复提供支持。研究成果证实了热力学参数在预测和强化有机污染物非生物降解中的重要价值, 为解析含水介质中复杂矿物转化过程中有机污染物的环境地球化学行为提供理论支撑。

关键词: 铁氧化物; 介导电位法; 硝基苯; 线性自由能关系; 水铁矿转化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277050)

第一作者: 李欣(1997-), 博士研究生, 研究方向: 污染水文地质, E-mail: 17854295815@163.com

*通信作者: 杨珊珊(1991-), 副教授, 研究方向: 矿物与有机质的相互作用, 地下水污染修复, E-mail: shanshany1202@cugb.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

极端条件下半水合氨的相变与稳定性

于英鑫, 孙宁宇*, 王登磊, 张馨月

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

冰行星广泛分布于太阳系及宇宙中,其内部由硅酸盐核和冰质幔层构成,幔层富含 C、H、O、N 等轻元素。氨和水分子通过氢键结合形成氨水合物,因此氨水合物在高温高压下的相变与性质对理解冰行星的组成和演化至关重要。在常温常压下,氨和水可以形成多种稳定的化学计量化合物,包括一水合氨 (AMH, $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、二水合氨 (ADH, $\text{NH}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和半水合氨 (AHH, $2\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。然而,高压实验和理论计算结果都指出,高压下含水量较高的氨水合物会发生浓度分区并析出 AHH。因此 AHH 可能是 N 元素在冰行星中最主要的存在形式。尽管已有研究在常温条件下观测到 AHH 的高压相 (II、II*、DMA 和 DIMA),但其在 19~26 GPa 范围内的相变行为仍存

在争议。此外,高压高温条件下 AHH 的相变研究较为有限。近期,原始体心立方相 (pbcc) 和准体心立方相 (qbcc) c 相的发现为理解 AHH 的物理性质提供了新的视角。然而,目前实验数据点分布稀疏,且缺乏对实验压力-温度路径影响的系统研究。因此,本研究通过外加热的金刚石对顶砧结合拉曼光谱技术,在高达 31 GPa 和 800 K 的条件下,首次明确了 AHH 高压相的相边界和拉曼峰位移,并揭示了实验路径对相变行为的影响。这些结果对理解冰行星和海洋行星中氨的存在形式及其物理性质具有重要意义。

关键词: 高温高压; 半水合氨; 冰行星; 相变边界; 拉曼光谱

基金项目: 青年科学基金项目 (42002037)

第一作者: 孙宁宇 (1992-), 女, 博士后, 研究方向: 高温高压矿物物理, E-mail: ningyu@ustc.edu.cn

*通信作者: 孙宁宇 (1992-), 女, 博士后, 研究方向: 高温高压矿物物理, E-mail: ningyu@ustc.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

面向生物医药应用的矿物与生物表界面相互作用研究

汪浩*

中国地质大学(武汉)纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430074

矿物与生物表界面的相互作用是生物矿化、生物材料、药物递送等领域的核心科学问题, 在生物医药领域具有广阔的应用前景。矿物-生物表界面相互作用的研究内容主要包括界面结构、相互作用机制、动态过程和生物效应。界面结构研究关注矿物表面原子排列、电荷分布、官能团等, 以及生物分子在矿物表面的吸附构象、取向等。相互作用机制研究则聚焦于矿物-生物分子之间的静电作用、氢键、疏水作用等非共价键作用, 以及配位键、共价键等强相互作用。动态过程研究涉及矿物-生物分子相互作用的动力学过程, 包括吸附、解吸、扩散、

组装等。生物效应研究则关注矿物-生物表界面相互作用对细胞行为、组织再生、药物释放等的影响。矿物-生物表界面相互作用的研究是生物医药领域的重要研究方向, 具有重要的科学意义和应用价值。随着表征技术和理论方法的不断发展, 对矿物-生物表界面相互作用机制的理解将不断深入, 为开发新型生物材料、提高药物递送效率、优化疾病诊疗策略提供理论指导和技术支持。

关键词: 纳米矿物; 生物医药; 细菌; 细胞; 相互作用

基金项目: 国家自然科学基金项目(52304303)

第一作者: 汪浩(1990-), 副研究员, 研究方向: 生物医药矿物材料, E-mail: wanghao13@cug.edu.cn

*通信作者: 汪浩(1990-), 副研究员, 研究方向: 生物医药矿物材料, E-mail: wanghao13@cug.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

太阳光辐射下的地表多圈层作用产物矿物膜的特征与效应

鲁安怀*

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100091

在地球表层系统中岩石圈与水圈、大气圈和生物圈之间交互作用错综复杂。然而, 这些过程及其产物如何受到太阳光辐射作用调控, 其内在机制与效应长期未能得到重视与理解。近三十年来, 我们深耕于太阳光辐射与地表矿物响应机制的研究领域, 首次发现暴露于阳光之下岩石与土壤表面普遍覆盖一层由水钠锰矿、针铁矿和锐钛矿等半导体矿物构成的纳米至微米级矿物膜, 受太阳光辐射可产生原位、灵敏且稳定的光电流与光电子能量。矿物膜的形成与下覆基岩受太阳光辐射以及水、无机物、有机物和微生物等多圈层物质的交互作用密切相关。伊利石向绿泥石转变通常发生在升温升压的进变质作用过程中。发现矿物膜中伊利石在光电子能量驱动下发生了绿泥石化作用。表明地表介质除 T、P、pH 和 Eh 之外, 还应加入 L (光) 这一新的影响因素, 为地表矿物转变机制研究开辟了新的维度。发现地表矿物膜中矿物光电子能量显著促进非光合微生物的生长代谢, 突破了传统微生物光能营养和化能营养的认知框架, 提出了微生物光电能营养新类型。拓展了微生物能量获取与利用的方式, 催生了半人工光合作用创新研究方向, 为在

地球及类地行星上构建人工光合作用体系提供了科学原理。提出了太阳光辐射地表矿物发生“非经典光合作用”创新理论。发现地表矿物膜中纳米水钠锰矿与植物叶绿体中锰簇物质 (Mn_4CaO_5) 具有起源上的同源性和功能上的相似性。开拓了提高植物叶绿体锰簇光催化裂解水效率与光合作用效率的全新途径。田间试验结果表明, 能显著提升多种农作物的产量和品质。发现陆地矿物膜中半导体矿物通过径流汇入海洋, 在海洋透光层中形成了天然光催化系统, 能高效转化太阳能, 为海洋初级生产力提升提供了独特的驱动力。在能量供给匮乏的海域生境中展现了巨大的生态潜力。提出矿物光电子是陆地和海洋表面继太阳光子和元素价电子之后第三种能量形式学说。提出矿物膜具备类似太阳能薄膜的光电转化功能, 构成了地球新圈层。深化了对地球表层系统的认知, 为探讨地球物质循环、环境演变及生命演化提供了新的研究范式, 也为探索类地行星表面复杂过程提供了科学借鉴。

关键词: 地表矿物膜; 矿物光电子能量; 光电能营养微生物; 矿物非经典光合作用; 地球表层系统

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

溶解性有机质对铁（氢）氧化物矿物与 纳米塑料颗粒表界面反应的调控机制

聂信, 谢瑞茵, 冉梅梅, 林晓萍, 林心旷, 万泉*

中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

纳米塑料 (NPs, 直径<1000 nm) 是一类广泛存在于地表环境中的新兴污染物, 其具有较高的化学稳定性、环境持久性、吸附能力、长距离迁移性和生物毒性。纳米塑料不仅可以作为持久性有机污染物、重金属、病原微生物等污染物的传播媒介, 还可以通过摄食、呼吸和皮肤接触等途径进入生物体内并对生物体造成危害。因此, 研究纳米塑料的地球化学行为已成为环境科学和公共健康领域的前沿热点。纳米塑料与环境中普遍存在的溶解性有机质以及矿物之间的界面反应过程是影响其迁移沉积的重要过程。因此, 阐明各类典型溶解性有机质对纳米塑料与矿物之间的表界面反应机制并查明关键影响因素对预测纳米塑料的迁移、沉积和生态风险具有重要意义。本研究系统地探讨了不同有机大分子 (腐殖质、多糖、蛋白质) 和有机小分子 (有机酸、氨基酸、糖类) 对羧基聚苯乙烯纳米塑料 (COOH-PSNPs) 和铁 (氢) 氧化物矿物 (针铁矿、磁铁矿、赤铁矿) 的表界面反应行为的影响和相关的调控机制。取得了如下认识: (1) 正电荷的铁 (氢) 氧化物矿物与负电荷的纳米塑料通过静电作用和氢键形成异团聚体导致纳米塑料沉积; 腐殖酸 (HA)、海藻酸钠 (SA)、牛血清白蛋白 (BSA) 等带电有机大分子通过增加静电斥力、空间位阻和竞争性吸附等机制, 显著抑制了纳米塑料与铁 (氢) 氧化物矿物的异

团聚沉积, 而纤维素、淀粉等中性有机大分子对异团聚沉积无显著影响, 有机大分子对纳米塑料与铁 (氢) 氧化物矿物异团聚沉积的抑制能力与其表面电荷密度 (SA>HA>BSA>>纤维素、淀粉) 正相关。(2) 酸性 (天冬氨酸) 和碱性 (赖氨酸和精氨酸) 氨基酸会略微降低纳米塑料沉积外, 而其它 17 种小分子氨基酸和小分子糖类 (葡萄糖、蔗糖) 不影响纳米塑料的异团聚沉积。(3) 有机小分子多元酸 (柠檬酸、草酸等) 可有效降低铁 (氢) 氧化物矿物的表面正电荷甚至将其反转为负电荷, 进而抑制纳米塑料异团聚沉积; 而单元有机酸 (甲酸) 对纳米塑料的异团聚沉积无显著影响; 其抑制顺序为: 柠檬酸>草酸>甲酸。有机大分子和小分子对纳米塑料与铁 (氢) 氧化物矿物异团聚沉积影响的巨大差异与溶解性有机质结构、分子量以及电荷密度相关。前述实验结果表明: 在腐殖质、多糖、蛋白质等带电有机大分子以及多元羧酸小分子含量高的环境中, 纳米塑料与铁 (氢) 氧化物矿物之间的异团聚沉积减少而导致纳米塑料长距离迁移性增加, 相关结果为理解溶解性有机质、铁 (氢) 氧化物矿物在纳米塑料颗粒迁移沉积中作用机制提供实验依据。

关键词: 铁 (氢) 氧化物矿物; 纳米塑料; 溶解性有机质; 表界面反应机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41902041, 41872046), 贵州省科技项目 ([2020]1Z039)

第一作者简介: 聂信 (1986-), 副研究员, 研究方向: 矿物学、纳米地球化学、关键金属富集机制. Email: niexin2004@163.com.

*通讯作者: 万泉 (1971-), 研究员, 研究方向: 矿物学、纳米地球化学. Email: wanquan@vip.gyig.ac.cn.

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

土壤矿物驱动的固碳机制及对重金属归趋的耦合作用

吴平霄*

华南理工大学 环境与能源学院, 广州 510006

矿物可以通过吸附、封闭、聚集、氧化还原反应和聚合等过程将易降解有机碳转化为更稳定的形式, 矿物在增加土壤有机碳的持久性和积累方面非常重要。矿物-有机碳相互作用会影响重金属的迁移归趋, 同时土壤矿物驱动的重金属钝化过程也会影响有机碳的转化和固存行为。本研究以铬和铜为代表, 探究有机质对铁矿物成矿的影响以及与重金属的微观固存机理。采用 3D-EEM 和 Q-Exactive LC-MS/MS 探究了溶解性有机质在水铁矿表面的界面分馏机制, 黄腐酸类小分子有机物会优先在水铁矿表面分馏。对矿物转化前后的物相进行分析发现, DOM 存在下水铁矿与铬酸盐反应后主要向针铁矿和赤铁矿的方向转化, 并在此过程中存在伴生矿物羟铬矿 ($\text{CrO}(\text{OH})$) 的形成。DFT 理论计算表明铬酸盐与水铁矿铁氧四面体的单齿单核配位比其他配位模型更加稳定。揭示 FA 介导下铁矿物的成矿过程以及水合铜离子在铁矿物和 FA 界面的固存机

制。通过 XRD、HRTEM 和穆斯堡尔谱探究 FA 介导下铁矿物随着 FA 含量的增加逐渐从针铁矿转化为赤铁矿再转化为无定形矿物。随着 FA 含量的增加, 铁矿物成矿的过程中会造成八面体结构的坍塌和四面体结构的增加。化学提取实验和相互作用区域指示函数 (IRI) 解释了 FA 与铁矿物之间主要通过范德华力相互作用, 部分官能团之间存在弱氢键 ($\text{C-H}\cdots\text{O}$) 的吸引作用。铜离子主要以 Cu-O 官能团的形式在铁矿物表面被吸附沉淀或在铁矿物表面与 FA 发生配位反应, 进而被固定在铁矿物表面。DFT 理论计算进一步揭示水合铜离子与铁矿物的微观分子作用机制, 结果表明水合铜离子与铁矿物之间的双齿配位和 FA 羧基官能团之间的反应相比其他配位模型更加稳定。

关键词: 土壤矿物; 有机碳固定; 重金属; 耦合过程

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

吸附作用的遗留效应对有机-矿物复合体形成的影响机制研究

陈淑玲^{1,2*}, 洪汉烈²

1. 深圳职业技术大学, 广东 深圳 518055;

2. 中国地质大学, 武汉 430074

The sorption of dissolved organic matter (DOM) is a major pathway for the formation of mineral-associated organic matter (MOM). However, limited information exists regarding how prior sorption events influence subsequent processes through their persistent impacts on mineral surfaces and solution chemistry (termed the "legacy effect"). To systematically characterize legacy effects in MOM formation, we conducted sequential sorption experiments using kaolinite and gibbsite as model minerals, with DOM extracted from forest floor materials. The MOM formation efficiency leveled off upon repeated addition of identical DOM solutions to minerals due to the retention of highly sorptive organic molecules (primarily aromatic, nitrogen-poor, hydrogen-rich, and oxygen-containing molecules), which decreased sorption site availability and simultaneously modified

mineral surface charge. Organic-organic interactions as postulated in multilayer models played a negligible role in MOM formation. Continued exchange between DOM and MOM molecules upon repeated sorption altered DOM composition but not MOM formation efficiencies. Sorption-induced depletion of solutions in high-affinity compounds further decreased MOM formation efficiencies to pristine minerals. Overall, the interplay between the differential sorptivities of DOM components and mineral surface chemistry explains legacy effects that contribute to the regulation of fluxes and distribution of organic matter in soil.

Key words: mineral-associated organic matter; sorption; carbon sequestration; Fourier-transform ion cyclotron resonance mass spectrometry; legacy effects

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

铁基矿物多途径活化亚硫酸盐特性及其环境应用

王成^{1,2}, 潘艳婷^{1,2}, 李根³, 张峰^{1,2}, 王小明^{1,2}, 殷辉^{1,2}, 谭文峰^{1,2}, 冯雄汉^{1,2*}

1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

2. 国家环境保护土壤健康诊断与绿色修复重点实验室, 武汉 430070

3. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430015

Fe 是地壳中丰度排名第一的过渡金属, 其存在形式多样, 如铁的氧化物、氢氧化物、硫化物和单质铁, 对自然界中的生物地球化学循环过程以及环境中污染物质的迁移、转化和控制起着至关重要的作用。亚硫酸盐 (S (IV)) 以往常作为一种强还原剂应用于高级还原技术中, 近年来其作为一种成本低且环境友好的 SO_4^- 前体物质, 在有氧环境下亚硫酸盐还可被多种过渡金属元素活化产生强氧化性自由基, 如羟基自由基 ($\text{HO}\cdot$)、硫酸根自由基 (SO_4^-) 和过一硫酸根自由基 (SO_5^-), 形成一种新式的高级氧化技术, 具有良好的研究及应用前景。关于 Fe 元素活化亚硫酸盐的研究最为广泛, 但主要集中在 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}/\text{S (IV)}$ 的均相体系, 其异相活化过

程和机制鲜有报道。本研究选用水铁矿和磁赤铁矿等代表结构态三价铁、马基诺矿代表结构态二价铁以及微米单质铁代表零价铁, 采取有光、无光两种活化方式, 加入多种有机、无机污染物质, 深入探究了不同结构态铁与亚硫酸盐的相互作用机制及其在环境污染控制中的应用。同时, 考虑到环境中普遍存在的天然有机质及其对亚硫酸盐活化的影响, 以腐殖酸 (HA) 作为代表性物质探究了天然有机质对上述体系的影响, 并深入探究了 HA 活化亚硫酸盐的过程与机制。

关键词: 铁基矿物, 亚硫酸盐活化; 有机污染物降解; 砷氧化; 氧化降解

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42030709, 42377303)

王成 (1995-), 男, 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学, E-mail: 2848269815@qq.com

*通信作者: 冯雄汉 (1973-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 土壤矿物与环境, E-mail: fxh73@mail.hzau.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

我国红壤区富铁土壤中铁氧化物特征及 Cr (VI) 固定和还原机制

殷辉*, 王文涛, 冯雄汉, 谭文峰

华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070

铬 (Cr) 在土壤中的生物地球化学行为受铁氧化物-有机质-微生物三元体系调控, 但其耦合作用机制尚不明晰。本研究选取我国热带-亚热带红壤区 4 类典型富铁土壤, 通过铁氧化物精细表征 (XRD、Mössbauer 谱等) 与多相培养实验, 系统揭示 Cr(VI) 固定与还原的驱动机制。研究显示: 土壤胶体中铁氧化物含量与 Cr (VI) 的固定呈正相关。此外, 铁氧化物的类型、铝取代程度以及晶面暴露情况均影响 Cr (VI) 的固定能力。在缺氧条件下的培养实验发现, 易氧化有机碳 (55%~84%) 和微生物 (16%~48%) 主导了富含针铁矿或赤铁矿土壤中的 Cr (VI) 还原。在旱地土壤中, 微生物硫酸盐还原也可能参与这一过程。而在富含水铁矿的稻田土壤中, 易氧化有机碳 (38%±1%)、微生物 (33%±1%) 以及与交换态和弱结晶铁氧化物相关的 Fe (II)

(29%±3%) 共同促进了 Cr (VI) 的还原。此外, 外源 Fe (II) 和微生物显著增强了富含水铁矿和针铁矿土壤中的 Cr (VI) 还原。值得注意的是, Fe (II) 大幅促进了 Cr 的钝化, 而微生物对此有轻微抑制作用。研究还表明, Fe (II) 和微生物, 尤其后者加速了 OM 的矿化; 且水铁矿丰富的稻田土壤中的 OM 损失最为显著。在淹水过程中, 部分水铁矿逐渐转化为针铁矿, 但微生物可能会抑制这一转化过程。这些结果揭示了铁氧化物、OM 和微生物之间的复杂相互作用对氧化还原敏感重金属的地球化学行为的深远影响, 为自然和工程环境中铬污染的调控提供了重要参考。

关键词: 铬 (VI); 铁氧化物; 有机碳; 氧化还原; 微生物

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

海洋透光层中锐钛矿光催化驱动针铁矿铁释放的 界面机制研究

孟令子*

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100091

海洋透光层中铁的生物可利用性是限制初级生产力的重要因素。尽管已有研究表明地球表面矿物涂层具有显著的光电转换能力,但矿物光催化作用在活性铁释放中的具体贡献及其微观机制仍不明确,特别是在海洋环境中。本研究以广泛存在于海洋环境中的半导体矿物锐钛矿(TiO_2)为研究对象,系统探讨了其在模拟近海透光层条件下对针铁矿 $\alpha\text{-FeOOH}$ 中铁的光催化还原释放作用,并深入解析了其微观机制。实验中精细控制了近海透光层的关键环境因素,包括紫外-可见光照射、海水盐度、典型有机配体(草酸)的浓度以及悬浮颗粒物的组成与浓度。动力学结果表明,在光照与锐钛矿共同作用下,针铁矿中铁的溶解释放速率显著提高,其中亚铁离子(Fe^{2+})在溶解态铁中的占比也显著增加;而无光照或无锐钛矿条件下的铁释放则明显较低。进一步的矿物学显微与光电化学表征揭示了锐钛矿与针铁矿形成了紧密接触的杂合体结构,该结构拓宽了矿物组合的光谱响应范围,显著提高了整体光电转换效率。原位衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)分析进一步表明,在锐钛矿参与

的光照条件下,针铁矿的特征峰的强度衰减更迅速、更明显,同时草酸铁络合物特征峰的增强速率和强度也显著高于无锐钛矿或无光照对照组。这一结果清晰地证实了锐钛矿的参与显著加快了针铁矿表面铁物种的还原和脱附过程,同时促进了草酸与铁的络合反应,揭示了矿物光催化作用中锐钛矿对铁释放的微观界面机制。本研究从微观尺度证实了锐钛矿光催化作用在海洋环境中对针铁矿的铁还原释放的重要贡献,揭示了矿物-矿物界面相互作用以及有机配体对矿物光催化过程的协同促进作用。这一非生物驱动的铁释放机制不仅拓展了对矿物光电转换效应的认识,也强调了其在富含悬浮颗粒物和有机配体的近岸水体微环境中对铁循环的重要意义。研究成果为深入理解海洋透光层中铁的来源、迁移和转化提供了新的视角,并为未来进一步探究光化学过程在海洋生物地球化学循环中的作用奠定了坚实基础。

关键词: 海洋铁限制; 光催化反应; 锐钛矿; 界面电子传递; 生物地球化学循环

*通信作者: 孟令子(1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学, E-mail: 2401110673@stu.pku.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

古新世-始新世极热时期 (PETM) 铁肥效应诱导 东赤道太平洋海水缺氧

蒋晓东*

广东工业大学, 广州 510006

古新世-始新世极热事件 (Paleocene- Eocene Thermal Maximum, PETM) 是地球历史中发生在古新世-始新世界线附近的一次突发性的全球增温事件。该时期总计有约 $4.5 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$ Gt 二氧化碳在小于 2 万年的时间内注入海洋-大气系统, 速率达每年 3~17 亿吨碳。这种短时期内巨额碳释放事件是现今人类活动导致地球气候变化的理想类比对象, PETM 由此被称为“气候相似型”事件。因此, 深入研究 PETM 的环境气候变化机制对于人类掌握气候变化规律、了解宜居地球演化历史乃至探寻“碳中和”新技术方法等具有重要意义。基于生物磁铁矿和重晶石等矿物介质, 利用高精度的岩石磁学和地球化学方

法, 我们揭示了 PETM 时期气候变化影响深海有机碳埋藏的重要证据链。结果显示矿物粉尘和火山灰的铁肥效应刺激了东赤道太平洋生产力爆发, 巨量的有机质降解消耗了海水中的溶解氧, 随之诱导了大洋海水脱氧。国际政府间气候变化委员会 (IPCC) 2019 年报告指出, 未来由于气候变暖、海水分层加剧, 开放大洋的海水溶解氧含量或将下降。我们的结果支持了 IPCC 的这一推测, 为有关全球变暖将如何减少开放大洋中的溶解氧并进而影响海洋渔业和未来粮食安全的讨论提供了新的研究证据。

关键词: PETM; 东赤道太平洋; 铁肥; 脱氧

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

解磷真菌对亚/正磷酸盐的溶解差异：探究早期生命的启示

汪滢，丁科进，李真*

南京农业大学 资源与环境科学学院，南京 210095

磷是生命起源中不可或缺的元素，在环境中以多种价态出现，亚磷酸盐（Phosphite, HPO_3^{2-} ）就是磷的中间氧化态（+3 价）。从上世纪中期开始，亚磷酸盐被用作有效的杀菌剂，以针对农业上某些卵菌和真菌病害，它通过占据细胞内相关酶与磷酸盐结合的点位，阻碍磷代谢的进行，从而抑制病原微生物的正常生命活动。本研究使用额外添加了亚磷酸钠的改良培养基对高效解磷真菌黑曲霉（*Aspergillus Niger*）进行培养试验，以探究亚磷酸盐的抑制作用是否具有普遍性。结果表明：在添加了亚磷酸钠后，黑曲霉的生物量及其分泌的酸性磷酸酶活性降低至正常培养条件下的一半左右，并且随着亚磷酸钠浓度的增加，该抑制效果并未显著增强。因此，亚磷酸盐对真菌有普遍的抑制作用，即使是能高效利用磷源的黑曲霉，其磷代谢也会受亚磷酸盐影响。然而，随着亚磷酸盐在前生命环境中的发现，地球早期生命起源过程中磷循环路径的传统认知被挑战，早期的磷地球化学可能主要受亚磷酸盐控制。还原态磷可能来源于晚期重轰炸期

间的外星物质，或者在撞击过程中产生，并在早期地球的轻微还原性大气中持续存在。早期地球磷酸盐溶解度极低，亚磷酸盐比磷酸盐更易溶且反应性更强。古菌体内可能存在能够利用亚磷酸盐为磷源的代谢系统，亚磷酸盐通过替代磷酸盐参与前生命化学反应。随着地球上氧含量的增加和生物体数量的增加， PO_4^{3-} 逐渐成为磷的主要存在形式，生物也逐渐形成了以磷酸盐为磷源的代谢模式，生物体因不能利用亚磷酸盐而显现出抑制效果。若类地行星存在亚磷酸盐的大量分布，存在类似的还原态磷的代谢途径，可能意味着该行星拥有生物生命活动的特征。同时，亚磷酸盐与磷酸盐比值的变化，可以作为研究行星氧化还原历史的参考指标。这为未来探究其他类地行星生命活动与环境演化提供新的思路，未来可针对亚磷酸盐的原位检测技术（如拉曼光谱、质谱）进一步深入研究，将其作为未来类地行星探测任务的潜在目标。

关键词：亚磷酸盐；生命起源；还原态磷

第一作者简介：

汪滢（2001-），女，硕士研究生，研究方向：土壤微生物磷循环，E-mail: 2023103007@stu.njau.edu.cn

丁科进（2003-），男，本科生，研究方向：土壤解磷真菌，E-mail: 9211310301@stu.njau.edu.cn

*通信作者：李真（1983-），女，副教授，研究方向：土壤矿物-微生物互作，E-mail: lizhen@njau.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黏土基复合材料的制备及其除磷性能研究

陈洪运*

中国地质大学(武汉), 武汉 430074

针对水体富营养化除磷的国家重大环境治理需求, 阐述黏土矿物基除磷材料的研究进展, 结合黏土矿物的表面形态、表面羟基丰富、离子交换能力强、吸附性好等优异特性, 开展表面改性、掺杂、结构改型黏土矿物制备除磷材料的系统研究。通过挖掘黏土矿物的理化特性, 构筑结构稳定、高性能、低成本、易回收、环境友好的黏土矿物基除磷材料。引入多种手段表征黏土矿物基除磷材料的表界面特

征, 厘清黏土矿物与功能源的界面耦合机制, 分析黏土矿物的结构与黏土矿物基除磷材料磷性能之间的相互关系, 揭示黏土矿物基除磷材料高效除磷的物理化学机制, 为黏土矿物基除磷材料的调控制备及其在水体富营养化除磷领域的产业化应用提供理论指导。

关键词: 层状矿物; 界面调控; 吸附; 除磷

基金项目: 国家自然科学基金项目(52404302)

第一作者简介: 陈洪运(1990-), 助理研究员, 研究方向为环境矿物材料。E-mail: chenhongyun@cug.edu.cn

*通信作者: 陈洪运(1990-), 博士。E-mail: chenhongyun@cug.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

磷灰石中挥发分在高温过程中的活动性

王君宇, 杨燕*

浙江大学, 杭州 310058

磷灰石作为重要的岩浆过程示踪剂, 因其对复杂岩浆系统演化、构造-热事件响应及深部元素循环的记录能力, 被广泛应用于地球动力学和岩石成因研究。值得注意的是, 磷灰石是目前地外物质(如月球陨石、火星样品及月球返回样品)中唯一普遍赋存多种挥发分的矿物, 为解析地外天体的形成演化历史、挥发分富集机制及生命元素的丰度提供了独特窗口。然而, 精准解译磷灰石中挥发分的成因信息需系统评估其保存能力。尽管已有研究报道了磷灰石中氟、氯和羟基的扩散行为, 其晶格内挥发分向开放体系迁移的动力学参数及耦合机制仍存在认知空白, 制约了对于磷灰石在更加丰富热事件中的应用潜力。本研究通过高温扩散实验(900~1100℃), 系统对比两种氟含量差异的天然磷灰石(分别来自 Durango 与 Imilchil)中氢、氟、碳的迁移行为, 取得以下关键发现: (1) 氢沿晶体 c 轴方向的扩散系数较氟高 2~3 个数量级, 且活化能显著低于氟, 表明氢的迁移更具有热力学优势; (2) 氢扩散呈现强烈各向异性, 其沿 c 轴扩散速

率与活化能均优于 a 轴方向, 表明磷灰石的晶体结构对其内部挥发分的迁移路径有明显的约束作用; (3) 氟和氢的迁移表现出样品依赖性, Durango 磷灰石沿 c 轴的扩散系数均小于 Imilchil 磷灰石; (4) 实验温度范围内未检测到碳的扩散行为, 表明其在磷灰石内部稳定性高。结合扩散机制分析, 氢可能沿 a 轴以 OH^- 形式迁移, 而沿 c 轴以 H^+ 形式通过通道结构迁移, 且氟的迁移需依赖 c 轴氢的扩散。基于上述动力学参数, 本研究重新评估了磷灰石的挥发分保存能力: 在短时间尺度热事件(持续数天至数年)中, 包括氢在内的所有挥发分均可有效保存于磷灰石核部; 但对于长达 Ga 尺度的长期热作用, 磷灰石仅能稳定记录氟、氯及碳的组成信息, 而氢因高扩散速率会发生显著丢失。这一发现为利用磷灰石挥发分开展地外样品形成环境反演提供了关键实验数据和理论约束。

关键词: 磷灰石; 挥发分; 活动性

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172041, 41972038)

第一作者简介: 王君宇(1999-), 博士, 研究方向: 矿物学. Email: wangjunyu@zju.edu.cn

*通信作者简介: 杨燕(1979-), 教授, 研究方向: 矿物学、地球化学. Email: yangyang2005@zju.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

类火星“矿物膜”中的黏土矿物： 形成、转化与星球宜居意义

方谦^{1*}, 李艳², 丁竑瑞², 洪汉烈¹, 陈中强¹, 鲁安怀²

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

“矿物膜”广泛分布于地球各个气候区, 尤其普遍存在于类似火星的干旱环境中。它在火星上的潜在存在使其成为行星研究的重要火星类比值。“矿物膜”中的主要成分是黏土矿物和铁锰氧化物, 黏土矿物可能在铁和锰的富集中起着至关重要的作用。然而, 对矿物膜中这些黏土矿物的深入细致研究很少。我们对大量地表矿物膜进行了原位微区观测并对分选的矿物膜粉末样品详细分析。结果表明, 所有矿物膜样品中均存在伊利石, 而其他黏土矿物的选择性产出与气

候背景密切相关。我们重点对矿物膜中伊利石和绿泥石形成条件进行了探讨, 首次发现伊利石向绿泥石发生转化作用, 这种转化关系在地表环境中鲜有报道, 提出太阳光辐射作用促进了伊利石向绿泥石发生转化作用的新认识。我们的发现对于更好地了解火星表面和火星矿物膜里黏土矿物的形成和转化以及火星上气候控制的水-岩相互作用具有重要意义。

关键词: 矿物膜; 黏土矿物; 伊利石; 绿泥石

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

微生物介导的水铁矿晶相转化及其控制 Mo 迁移的稳定性

胡焱弟*

北京大学 环境科学与工程学院, 北京 100871

钼 (Mo) 是生物系统中不可或缺的营养物质, 可催化全球生物地球化学中的碳、氮和硫循环以及其他重要的氧化还原过程。然而, 高浓度的 Mo 会对微生物、动物和植物产生毒性。铁氧化物在自然界中无处不在, 在铁 (II)/微生物 (*Geobacter sulfurreducens*) 存在的情况下, 铁氧化物可以通过吸附和矿物相变控制 Mo 的迁移。此研究通过关注 Mo (VI)-微生物-铁氧化物三相系统, 解析 Mo (VI)、微生物和铁氧

化物之间的吸附、氧化还原和矿物晶相转化机制, 从而预测和控制各种生物地球化学环境中铁氧化物的晶相转化及其在转化过程中控制 Mo 的迁移的长期稳定性。此研究将对制定土壤健康准则和土壤污染修复策略提供理论基础。

关键词: 铁还原菌; 水铁矿晶相转化; Mo 固定; Mo (IV) O₂, Mo (VI) 和 Fe (II) 竞争吸附

基金项目: 云南省科技部西南联合研究生院 (202302AP370002), 国家自然科学基金 (42177193),

第一作者简介: 张静 (1990-) 博士后, 研究方向: 微生物地球化学。Email: jing.zhang@pku.edu.cn

*通信作者简介: 胡焱弟 (1983-), 长聘副教授, 研究方向: 环境地球化学。Email: huyandi@pku.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

太平洋深海沉积物中共生型自生磷灰石的 矿物学特征及其磷汇效应

樊文泉¹, 周军明², 蒋晓东¹, 张欢³, 糜梅³, 袁鹏^{1*}, 董彦辉⁴, 刘冬³, 魏燕富⁵,
Jörn Peckmann⁶

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

3. 中国科学院 广州地球化学研究所, 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

4. 自然资源部第二海洋研究所, 海底科学重点实验室, 杭州 310012;

5. 澳门科技大学 澳门环境研究院海岸带生态环境国家野外科学观测研究站, 澳门 999078;

6. 汉堡大学 地球系统科学系地球系统研究和可持续性中心, 德国汉堡 020146

磷是海洋有机生命体的主要营养元素,对海洋初级生产力具有关键约束作用,从而影响了全球有机碳的埋藏和海陆氧循环。磷埋藏是海洋磷的长期保留形式,并与大陆风化作用共同调节海洋磷储层的输入与输出。自生磷灰石是海洋沉积物中最重要的磷埋藏形式,其含量占据整个磷埋藏的 50%以上。通常,自生磷灰石被认为形成于大陆边缘上升流区域和海山等初级生产力丰富的环境中。远洋深海环境由于初级生产力较弱,有机质含量较低,自生磷灰石往往独立分散存在,其成因机制和潜在磷汇效应并未受到重视。本研究基于对多个西太平洋深海(>5000 m)沉积物样品的分析,发现与钙十字沸石共生的自生磷灰石在深海低生产力环境中广泛存在。结合微区矿物学分析和矿物合成模拟实验。本研究提出了深海钙十字沸石-自生磷灰石共生现象的成因机制:钙十字沸石释放钙离子并吸附水体中的游离磷酸根,促进其形成

无定形磷酸钙,随后快速成核结晶,终形成六方柱状自生磷灰石颗粒。这类自生磷灰石不仅与钙十字沸石一起形成共生型磷埋藏,其单矿物的稀土元素含量也很高(超过 1000×10^{-6}),属于重要的稀土载体矿物。由于钙十字沸石在深海沉积物中含量可高达 20%,因此这类与钙十字沸石共生的自生磷灰石可能在低生产力的深海环境中广泛存在。根据钙十字沸石的沉积速率估算,此类磷的累积速率达 $1.30 \sim 2.56 \mu\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{ka}^{-1}$,约占深海磷总积累速率的 1/8 至 1/3。因此,钙十字沸石诱导自生磷灰石形成的机制可能是深海低生产力环境中重要的磷埋藏途径。此类新型磷汇不仅影响着深海磷循环,还在深海稀土元素地球化学循环中扮演了重要的角色。

关键词: 碳氟磷灰石; 微区矿物学; 深海环境; 稀土元素; 磷汇效应

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272043), 国家高层次人才特殊支持计划

第一作者简介: 樊文泉(1995-), 博士研究生, 研究方向: 资源矿物学、环境矿物学. Email: fanwenxiao@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 袁鹏(1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

自然硫矿物光化学活性与生物地球化学意义

黎晏彰^{*}, 李艳, 叶欢, 殷荣章

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

自然硫广泛分布于地球热液环境, 是地表丰度最高的非金属单质矿物, 参与了多种非生物和微生物介导的硫循环过程。然而, 当前对自然硫的生物地球化学活性认知主要归因于其作为变价元素而提供电子的源和汇, 自然硫固有的矿物结构与反应活性之间的关系尚未得到深刻认知。与离子型、共价型矿物不同, 自然硫是典型的分子晶格矿物, 其分子单元 S_8 环具有饱和、惰性的 S-S 键。基于原位同步辐射谱学联用技术与非绝热分子动力学模拟, 实现了对光致矿物结构变化与电子自旋转变的时间分辨过程研究。结果显示, 自然硫在波长小于约 575 nm 的光照射后, 其 S_8 分子单元在 56 飞秒内发生 S-S 键的断裂, 并伴随从环到链的超快分子构型变化。链状分子构型因含未成对电子而具有高反应活性, 并携带能量高达 -2.34 V (vs. NHE, pH 7) 和长寿命 (16 纳秒) 的光电子,

这是目前为止已知的自然界矿物产生的最高能量的光电子。针对采自云南腾冲热泉的自然硫样品, 在模拟早期陆地热泉透光层介质条件下, 通过光化学实验、热力学计算与分子动力学模拟, 发现自然硫产生的高活性与长寿命极性链状分子可促成极性 HCO_3^- 在矿物表面的直接化学吸附与电子传递, 产生甲酸等有机小分子。运用该机制建立了陆地热泉无机碳转化为小分子有机碳的反应动力学模型, 证明了构建生命模块的原始有机小分子可以在陆地热泉矿物激发态电子能量的持续供给下, 以更为温和、稳定的方式大量地合成, 为地球与地外行星的硫-碳耦合循环提供了新的见解。

关键词: 自然硫; 光化学; 生物地球化学; 前生命起源; 矿物激发态

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

第一性原理分子动力学探究分子氧在氧化铝- 水界面的吸附与活化机制

席梦宁, 张弛*, 贾汉忠

西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 咸阳 712100

理解氧化物界面分子氧的活化机制对于揭示地球元素化学循环及催化氧化过程具有重要意义。虽然对过渡金属氧化物上的 O_2 吸附和活化进行了广泛研究, 但对非过渡金属氧化物 (如普遍存在的铝氧化物) 的结构—活性关系和活化机理仍不明确。本研究通过第一原理分子动力学 (FPMD) 模拟, 揭示了 O_2 在 $\alpha-Al_2O_3$ 表面的原子尺度活化机制, 并阐明了氧空位的关键作用。结果表明, 有缺陷的 (001) 和 (012) 表面上的氧空位能将吸附的 O_2 稳定为超氧化物 (O_2^-), 其活化程度与吸附几何形状密切相关。对比分析表明, 侧位 (side-on) 构型比端位 (end-on) 构型能更有效地将电子转移

到 O_2 上, 缺陷 (012) 表面的活化能力优于 (001) 表面。值得注意的是, 界面水分子的氢键相互作用进一步增强了 (001) 表面活化的 O_2 的稳定性。这些发现从根本上揭示了 O_2 吸附和活化的几何构型与电子特征的协同作用机制, 不仅为地球化学循环中关键氧活化过程提供微观解释, 而且为非过渡金属氧化物催化剂的合理设计提供了理论框架, 发掘铝基氧化物表面氧空位工程在催化应用中的潜力。

关键词: 氧气活化; 非过渡金属氧化物; 吸附构型; 氧空位; $\alpha-Al_2O_3$ /水界面

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42107263)

第一作者简介: 席梦宁 (1999-), 博士 (在读), 研究方向: 计算矿物学. Email: xmn_6281223@nwafu.edu.cn

*通信作者简介:

张弛 (1990-), 副教授, 研究方向: 计算矿物学. Email: chizhang@nwafu.edu.cn

贾汉忠 (1983-), 教授, 研究方向: 土壤环境化学. Email: jiahz@nwafu.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黏土矿物-微生物相互作用促进厌氧生物转化的 多路径电子传递与群落响应研究

张颖¹, 姚奇志², 周根陶^{1*}

1. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 化学与材料科学学院, 合肥 230026

黏土矿物与微生物的相互作用在生物地球化学循环和环境修复中扮演关键角色。细菌群落偏好定植于矿物表面, 通过范德华力、电荷吸引和细胞外聚合物相互作用等机制, 诱导生物膜形成并启动一系列界面反应。这些相互作用影响矿物表面理化性质以及微生物代谢网络, 推动各类生物地球化学过程。目前研究证明含铁的黏土矿物在微生物电子转移网络中起着关键作用, 可通过 Fe(II)/Fe(III) 氧化还原循环介导微生物种间传递电子, 影响矿物晶体演化与金属元素迁移转化。尽管如此, 对黏土矿物介导电子转移网络调节及其与微生物群落代谢途径相互作用机制的认识尚不全面。为此, 本研究选用典型黏土矿物伊利石和绿泥石, 将其引入微生物降解偶氮染料体系, 从电子传递路径、代谢功能调控及微生物群落演替等多维度, 系统解析黏土矿物-微生物相互作用促进厌氧生物转化的机制。批实验结果显示, 伊利石和绿泥石均有效提高偶氮染料的生物脱色速率。其中, 伊利石通过促进电传导菌毛生长, 在微尺度上构建电子转移网络, 从而增强种间电子交流; 而绿泥石则依赖其结构铁诱导外膜蛋白表达, 调控胞外电子转移路径。两种黏土矿物均能提升还原性烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(还原型辅酶 I; NADH) 活性, 加速胞内 NADH/NAD⁺ 循环以确保电子供体的供给。这一代谢调控作用与跨膜质

子梯度的增强相耦联, 使 ATP 合成酶活性提升约 20%, 为微生物生长代谢提供能量保障。同时, 黏土矿物激活核黄素活性, 强化其作为偶氮还原酶辅因子的功能, 进一步推动偶氮染料的降解。电化学分析证实矿物添加显著提高体系电子转移速率, 其中核黄素介导的间接电子转移与细胞色素 c 介导的直接种间电子转移协同增强, 推动细胞呼吸活性提升 1.4 倍。微生物群落分析揭示, 黏土矿物具有选择性富集功能性微生物的能力, 伊利石和绿泥石显著提升电活性厚壁菌门(*Firmicutes*) 相对丰度, 增幅达 171%~182%。绿泥石特异性富集具金属还原功能的 α -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*), 并促使 Shannon 多样性指数从 1.7 提升至 3.3, 形成更具功能弹性的代谢菌群。代谢通路富集分析进一步表明黏土矿物显著上调微生物信号传导及代谢功能性相关基因表达, 为理解黏土矿物-微生物界面反应提供了分子层面的证据。当前结果系统阐明了黏土矿物通过代谢激活、电子载体介导及导电网络构建等多机制协同调控微生物电子传递的新范式, 为发展基于矿物-微生物互作的环境修复技术提供理论支撑, 同时拓展了对地质微生物界面过程的认识维度。

关键词: 黏土矿物; 电子传递; 微生物代谢; 群落响应

基金项目: 国家自然科学基金(42430201, 42472059)

第一作者简介: 张颖, 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学. Email: yingz04@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 周根陶, 教授, 研究方向: 环境矿物学、天体生物学与行星矿物学、同位素地球化学. Email: gtzhou@ustc.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黏土矿物/冰晶界的结构、热力学与动力学

陈锰^{1*}, 李赞²

1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055

黏土矿物/冰晶界面是地球表面环境中广泛存在的晶体界面, 冰在黏土矿物表面的结晶和熔融过程对地球系统的气候演变、冰冻圈物质循环、冰川运动以及冰冻圈地质灾害等具有重要影响。在火星上, 黏土矿物与冰的相互作用也影响着火星表面的水循环, 进而影响火星的矿物演变和环境演化。黏土矿物在低于熔点的温度下可能为冰的结晶提供成核位点, 而在接近熔点的温度下则可能促进冰的融解。然而, 目前尚未在原子-分子水平上完全理解黏土矿物对冰结晶和熔融的作用, 尤其是黏土矿物/冰晶界的结构与性质仍是未知领域。关键科学问题在于: 矿物/冰晶界的冰是与矿物表面位点形成结构匹配的结晶态, 还是局部熔融的预融态? 分子动力学模拟是解决这一问题的直观手段。我们通过分子动力学模拟研究

发现, 黏土矿物/冰晶界可能形成结构近乎完美的结晶态, 也可能形成局部无序的预融态, 这取决于表面冰的水分子密度。进一步的热力学计算表明, 结晶态晶界是矿物/冰集合体在全局平衡(化学平衡和力平衡)下的稳定状态, 而预融态晶界则是局域平衡的不稳定状态, 这颠覆了过去关于预融态是化学平衡状态的观点。此项研究表明, 外界环境的扰动是诱发矿物/冰集合体形成非平衡状态、致使冰局部熔融的关键因素。矿物/冰集合体的局部熔融, 有利于水的扩散和流动, 从而介导冰冻圈的物质循环和动力学过程。

关键词: 黏土矿物; 冰; 晶界; 分子动力学; 热力学

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

早太古代碳酸盐岩记录的热液-生物协同演化及其宜居性启示

向婉丽^{1*}, Joachim Reitner², Jan-Peter Duda², Andreas Pack², Matthias Willbold²,
Mark van Zuilen³, Wolfgang Bach⁴

1. 乐山师范学院, 四川 乐山 614000;

2. University of Göttingen, Göttingen, Germany 370730;

3. Naturalis Biodiversity Center, Leiden, the Netherlands 233300;

4. University of Bremen, Bremen, Germany 283590

早太古代碳酸盐岩作为地球早期环境与生命活动的珍贵矿物记录,为探索原始宜居环境的演变提供了宝贵的“岩石档案”。西澳大利亚东皮尔巴拉克拉通(约 35~32 Ga 前)因低变质程度和完整的层序关系,成为研究太古代初期矿物、环境与生命协同演化的理想场所。本研究通过整合环境矿物学的多尺度分析方法(显微结构-成分-同位素三位一体),结合高分辨率显微观测(激光拉曼光谱、 μ -XRF 元素成像)与多维度地球化学示踪(REE+Y 配分模式、 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ 同位素体系、放射成因 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值),系统揭示了三类碳酸盐岩的成因机制及其对宜居性演化的指示:(1)玄武岩间隙碳酸盐:矿物组合以原生方解石和次生富锰铁白云石(Mn 0.74%~0.16%)为特征,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值(0.22‰~0.98‰)、呈显著正相关($R^2=0.78$)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.700 596~0.712 832)与 Eu/Eu* 异常值(1.05~4.26)揭示该碳酸盐形成于海水渗透诱发玄武岩基底蚀变产生的热液系统,揭示了早期热液系统作为“元素传输泵”向古海洋输送 Fe、Mn 等生命必需元素的过程;(2)层状碳酸盐-燧石岩:方解石和富锰铁白云石通过有机质诱导的矿化作用形成。其 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别指示了两种沉积环境-浅海(1.85‰~0.48‰)和陆上热泉(-5.72‰~1.36‰)。

其 PAAS 标准化 REE+Y 配分显示轻稀土亏损((Pr/Yb) SN=0.1-0.7)、Y/Ho 比值(31.4 ± 2.3)接近球粒陨石值,并具有增强的 Eu/Eu* 正异常(1.85~3.11)。该特征与同时期受热液影响的海水沉积物一致。这些参数构建了缺氧条件下不同环境中矿物与有机质共沉淀的鉴别性地球化学指纹。(3)叠层石碳酸盐:三期白云石-燧石纹层的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(3.08‰~0.30‰)揭示了微生物介导的碳分馏过程。其总稀土元素(REE)含量较低,但 PAAS 标准化后的 REE+Y 特征依然保存完好,这显示出它是在受到较少热液影响的浅海环境中形成的。该岩石中微生物介导的矿化结构及其地球化学参数,提供了关于矿物与厌氧光合微生物相互作用的最古老地质证据。本研究进一步提出,早期玄武岩基底蚀变所引发的热液活动通过双重机制驱动了宜居环境的演化:一方面通过碳酸盐矿化作用固定了碳循环;另一方面则向原始生物圈输送了生命必需元素。这一发现对于深入理解深时地球矿物与生命的共演化机制以及评估类地行星的宜居性具有重要的科学意义。

关键词: 热液活动; 宜居环境演化; 玄武岩间隙碳酸盐; 层状碳酸盐-燧石岩; 叠层石碳酸盐

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

三维原子探针 (APT) 在地外样品研究中的应用: 纳米尺度解析类地行星演化与宜居性

杨僚, 方谦*, 陈中强

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074

地外样品(如陨石、月壤、小行星样本等)作为探究类地行星形成过程与宜居性演化的重要物质载体,其研究意义深远。近年来,随着阿波罗样本的重新分析,嫦娥五号样本以及火星陨石研究的持续深入,诸多重大事件得以揭示,如月球岩浆洋的固结过程以及火星早期的古水活动等。然而,传统分析技术受分辨率及灵敏度的限制,难以在纳米尺度上精准解析矿物界面反应、同位素分馏以及太空风化产物形成的微观机制,这在很大程度上制约了对行星环境演化的精细化认知。三维原子探针(APT)凭借其卓越的性能优势,成为地外样品研究中具有革命性的先进工具。该技术具备原子级的三维空间分辨率($<0.3\text{ nm}$),可实现全元素检测(涵盖 H-U 元素范围,灵敏度达 10^{-6} 级),并具备同位素成像功能。相较于 Nano SIMS 和 TEM 等传统技术,APT 能够更为深入地探测矿物晶格内部的元素偏析现象(例如锆石中 Pb/Y 纳米簇的形成机制)、同位素异常情况(如纳米金刚石中

$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 的异常分布特征),还可通过三维重建技术直观呈现界面扩散梯度(如橄榄石-伊丁石界面处 H 元素的富集层结构),从而为揭示行星演化过程中的微观机制提供直接且有力的证据。本研究系统阐释了 APT 技术的原理、仪器革新、样品制备方法以及三维数据重建技术等基本内容,通过系统梳理与整合 APT 技术在月球锆石定年、火星陨石蚀变界面、前太阳纳米金刚石及小行星风化层等典型地外样品中的创新应用,重点揭示了该技术在太阳系早期物质迁移、行星撞击事件年代学、火星古水文重建以及太空风化产物解析等领域的核心科学价值。最后,我们总结了 APT 技术在研究地外样品中的限制性和挑战,并展望其在地外样品研究中的未来发展,为未来地外样本研究与类地行星宜居性评价奠定基础。

关键词: 三维原子探针 (APT); 地外样品; 纳米尺度分析; 类地行星演化与宜居性

第一作者简介: 杨僚 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学. Email: liao_yang@cug.edu.cn

*通信作者简介: 方谦 (1993-), 研究员, 研究方向: 矿物学. Email: qian.fang@cug.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

高寒铀矿区碳/硫酸盐矿物协同微生物 减污固碳研究与应用

周磊¹, 董发勤^{2,1*}

1. 西南科技大学 国家核环境安全技术创新中心, 四川 绵阳 621010;

2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010

铀矿资源采、选、冶等过程产生大量危险固体废物, 固废堆积引起的水和土壤污染问题引起政府、公众广泛关注。矿山污染修复面积巨大、治理成本居高不下, 迫切需要因地制宜研发绿色、经济、高效的修复治理材料和技术。铀矿区碳酸盐矿物硫酸化(如石膏的形成)及硫酸盐碳酸化是自然界常见的地球化学过程, 该过程制约铀等重金属向环境迁移转化, 基于该过程的有效调控有可能实现矿区的同步减污固碳。本研究基于若尔盖矿区实际地质环境背景, 通过野外地质调查与室内模拟实验有机结合, 开展了铀矿区硫细菌调控含硫碳酸盐岩硫酸化的界面行为及其物相转变过程研究, 分析了该铀矿区含硫化物碳酸盐岩的时空分布特征, 解析了其风化产物的组构特征、矿物组合及成因, 建立铀矿区风化产物无机成因与生物诱导的矿物学识别标志, 阐明了黄铁矿微生物氧化推动矿区关键带碳酸盐矿物硫酸化的主控因子及调控原理, 揭示了铀在矿区典型微生物-矿物多介质微界面富集过程和矿相转变过程的迁移转化耦合机制。进而基于高寒铀矿区分相富集调控与矿相转变偶联机制, 通过系统的环境地质调查和土著微生物筛选, 以大宗工业固废磷石膏为原料, 创制了可工程化应

用、耐寒长效的“缓释自养型”磷石膏固定化微生物微胶囊(PG-SRB)。PG-SRB具有良好的耐酸碱能力, 酸碱度对铀的处理效果影响不大; 且 PG-SRB 具有良好的抗共存离子干扰能力, 矿山真实废水中 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等阴离子, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Sr^{2+} 等阳离子均不影响 PG-SRB 对铀的处理效果, 20 分钟内铀去除率可达 99.9 %。产物中铀主要以钙铀云母($Ca(UO_2)_3[PO_4]_2(OH)_2 \cdot 6H_2O$)的矿物相被固定, 而磷石膏被同步转化为以 $CaCO_3$ 为主要成分的方解石, 其形貌呈六方晶系的结晶形态, 为六边形的棱柱形或六角板状晶体。其中, 由 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 转化为 $CaCO_3$ 的硫酸盐碳酸化的过程, 可在 2 天内完成。研究初步阐明了铀在矿区典型微生物-矿物多介质微界面富集过程和矿相转变过程, 探究了高寒铀矿区硫酸盐矿物协同微生物对铀的快速滞固和稳定转化效果, 同时实现了是 CO_2 矿物封存, 可为高寒脆弱生态区铀污染修复原位治理提供理论依据和技术支持。

关键词: 铀矿区; 碳/硫酸盐; 微生物; 矿相转变; 减污固碳

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42377202)

第一作者简介: 周磊(1989-), 教授, 研究方向: 高寒铀矿环境地质. Email: leizhou@swust.edu.cn

*通讯作者: 董发勤(1963-), 教授, 研究方向: 环境地质学. Email: fqdong@swust.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

矿物助力早期生命获取“氮肥”

盛益之^{*}, 董海良

中国地质大学(北京), 北京 100083

氮是生命必需的基本元素, 在蛋白质、核酸等生物大分子合成过程中起着至关重要的作用。在生命出现初期, 生物可利用的氮主要通过闪电、光化学反应、陨石撞击等非生物途径产生, 但这些来源产生的氮极为有限。因此, 一种叫做“生物固氮”的过程应运而生, 将大气中的氮气还原为氨, 成为地球生命演化的重要转折点。生物固氮过程依赖于固氮酶的催化作用, 其活性中心由金属簇构成。根据所含金属辅助因子的不同, 固氮酶分为三种类型: 依赖钼(Mo)、钒(V)和仅含铁(Fe)的固氮酶。然而, 与现代海洋中富含溶解态 Mo (>100 nM) 不同, 太古宙海洋中 Mo 的含量可能极低 (<2 nM), 大量 Mo 主要赋存于辉钼矿(MoS₂)、黄铁矿(FeS₂)等硫化物矿物中。由于这些矿物在厌氧条件下的低溶解度, 传统观点认为 Mo 的生物可利用性受到严重限制。然而, 基于中太古代(~32 Ga 前)地层中氮同位素地质记录, 并结合不同固氮酶导致的氮同位素分馏特征, 表明 Mo 固氮菌群在这一时期已存在并可能广泛分布。这一结论与分子钟模型和系统发育分析相一致, 后者进一步表明 Mo

固氮酶的起源早于 V 和 Fe 固氮酶。这一矛盾现象表明, 即使在 Mo 含量受限的环境中, 仍可能存在其他形式的 Mo 储库, 为固氮过程提供支持, 并推动生物圈的扩展。本研究通过固氮微生物培养实验, 探讨了矿物和岩石中 Mo、Fe 和 V 的生物可利用性。结果表明, 含 Mo 矿物(如辉钼矿、黄铁矿、玄武岩、黑色页岩等)可作为 Mo 的重要来源, 供产甲烷古菌、不产氧光合细菌、厌氧发酵细菌以及好氧固氮菌利用, 以支持固氮过程。不同时期起源的固氮微生物通过分泌金属载体、有机配体或氧化还原反应, 从矿物中获取 Mo, 并在矿物表面留下生物标志信号。特别值得注意的是, 产甲烷古菌虽然不产生金属载体, 但仍能通过有机络合作用和氧化还原反应获取微量元素。此外, 微生物还可从矿物结构中获取 V 和 Fe, 并利用替代型固氮酶进行氮固定。这些研究结果表明, 矿物结合态过渡金属在远古海洋中可能为固氮酶的早期演化提供了关键支持, 为地球早期生命演化过程提供了新的视角。

关键词: 生物固氮; 金属矿物; 早期生命

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黄铁矿促进厌氧光合硫氧化菌生长的机制 及其地质环境意义

刘晓磊¹, 李润洁², 董海良^{1*}

1. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

厌氧光合硫氧化细菌在古今硫化海洋环境中广泛繁盛, 在碳、硫元素生物地球化学循环中发挥着重要作用。这类细菌的生长往往需要铁元素作为关键金属酶活中心, 但是其生存的硫化环境通常缺乏溶解态铁。关于厌氧光合硫氧化细菌如何在缺铁环境中生长, 目前尚不清楚。本研究指出, 硫化环境中广泛存在的黄铁矿, 可作为唯一铁源, 支持厌氧光合硫氧化细菌(如绿硫细菌)的生长与代谢活动, 且其生物可利用性略优于溶解态铁。转录组与蛋白质组分析表明, 黄铁矿的添加显著上调了光合作用、硫代谢以及脂多糖、氨基酸、细胞色素等有机物生物合成相关基因的表达并增强其蛋白表达。不同于

以往报道的微生物应对铁限制的普遍生存策略(如分泌铁载体), 本研究发现绿硫细菌可通过分泌有机物, 对黄铁矿表面进行修改, 氧化黄铁矿中硫元素, 破坏矿物结构, 进而促进微生物获取黄铁矿中铁元素, 维持其生长与代谢。本研究深化了厌氧微生物利用矿物结构态铁适应贫铁环境的相关认识, 对揭示缺氧环境中黄铁矿的微生物风化机制以及硫化环境中硫、碳元素生物地球化学循环具有重要科学意义。

关键词: 厌氧光合硫氧化细菌; 黄铁矿; 微生物获取铁机制; 硫氧化; 硫化环境

基金项目: 国家自然科学基金项目(42192503, 42192500)

第一作者简介: 刘晓磊(1992-), 副教授, 研究方向: 地质微生物. Email: lixiaolei_liu@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 董海良(1965-), 教授, 研究方向: 地质微生物. Email: dongh@cugb.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黏土矿物示踪风化演化与母质来源： 从宏观到纳米尺度

赵璐璐^{*}, 洪汉烈, 谢树成

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

黏土矿物作为地球表层系统中关键的活性组分, 在有机-无机界面反应中发挥着重要的桥梁作用, 其独特的地球化学行为与结构特性使其在不同尺度上均具有重要的研究意义与应用价值。我们以中国南方广泛分布的风成红土沉积为研究载体, 从微观、剖面和宏观尺度上对此类土壤剖面开展了一系列矿物学、地球化学、矿物谱学和机器学习的建模研究。我们提出了纳米尺度上母岩岩性控制地表风化的新认识, 发现了在黏土矿物演化中普遍存在拓扑性的固态转变过程。在风化作用的早期阶段, 绿泥石通过连续的固态机制转化为可膨胀的黏土矿物, 中间产物为柯绿泥石或随机间层的绿泥石-蛭石和/或绿泥石-蒙脱石。在亚热带季风气候下, 母岩矿物决定了黏土矿物转化的开端, 并在一定程度上决定了黏土矿物的蚀变轨迹。阐明了水文条件与黏土矿物演化路径之间的耦合关系: 从原生矿物到最终风化产物, 其转化途径主要受土壤溶液中酸性阳离子浓度、滞水状态和氧化还原振

荡等关键水文因素的调节。研究提出, 土壤孔隙水中酸性阳离子库是控制 2:1 型黏土矿物中羟基间层形成的关键因素, 证实了水文条件与次生黏土蚀变之间的密切关系, 为所有地质过程中核心的水-矿物相互作用动力学提供了新的见解。此外, 我们尝试建立了不同气候区古土壤的可见-近红外光谱库, 并运用大数据手段建立机器学习模型, 实现了用多维矩阵中的光谱信息表达土壤风化过程中黏土矿物与铁矿物的演化过程。通过二维矩阵数据融合方法, 结合随机森林(RF)和混合线性回归决策树(Cubist)等机器学习模型, 成功构建了地表环境演化过程的宏观监测与分析框架。通过整合微观机制解析、区域过程量化及大数据研究, 黏土矿物科学正成为连接地球系统科学与行星科学的桥梁, 为理解地球与行星的演化历史及未来趋势提供了独特视角。

关键词: 黏土矿物; 风化作用; 土壤; 机器学习

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

针铁矿表面反应性及稀土元素微观络合机制的计算模拟研究

张迎春, 高鹏元, 刘显东*, 陆现彩, 王汝成

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

稀土是全球高度关注的战略性关键资源。近年来, 全球范围内发现的具有潜在经济价值的新型稀土资源主要有深海沉积物、铝土矿赤泥、红土型稀土矿等类型。初步研究表明, 针铁矿是这些新型矿产中稀土元素重要的载体矿物。稀土元素在针铁矿表面的赋存形式是理解其富集与分异的基础。针铁矿的表面存在多种两性基团, 如单配位、双配位、三配位的 OH/OH_2 等。这些基团在不同 pH 条件下可以释放或得到质子, 使得针铁矿的表界面反应都表现出 pH 依赖性。因此, 针铁矿表面基团的类型与酸度常数 (pK_a) 是理解其表面反应性及稀土元素微观络合机制的关键。然而, 现有的实验手段无法区分针铁矿不同晶面、不同位点的 pK_a , 针铁矿的表面反应性及稀土元素的微

观赋存形式仍缺乏准确认识。本研究采用第一性原理分子动力学模拟方法, 对针铁矿主要表面的酸碱反应及络合反应活性进行了研究。获得了针铁矿主要表面不同基团的 pK_a , 明确了其主要表面的界面微观结构。在此基础上, 确定了 $\text{La}^{3+}/\text{Y}^{3+}/\text{Sc}^{3+}$ 等代表性稀土元素的微观络合结构与络合稳定性, 揭示了稀土元素在针铁矿不同表面的微观络合机制。本研究建立的针铁矿表面酸度数据集为准确认识其表界面过程提供了微观结构与热力学基础, 获得的稀土元素表面物种类型及络合结构为实验数据解译提供了可靠的参考数据集。

关键词: 针铁矿; 稀土元素; 酸度; 络合机制; 第一性原理分子动力学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42125202, 42302038)

第一作者简介: 张迎春 (1994-), 博士, 研究方向: 计算矿物学. Email: zhangyc@nju.edu.cn

*通信作者简介: 刘显东 (1982-), 教授, 研究方向: 计算矿物学, 计算地球化学. Email: xiandongliu@nju.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

矿物信息学在地球物质与能量循环过程中的应用

李艳*, 黎晏彰, 叶欢, 侯炳旭, 殷荣章, 李春江

北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

利用大数据和深度学习研究方法, 实现了对常压至 500 GPa 任意压力下从氢 (H) 到镅 (Cm) 共 96 种元素电负性的定量预测, 准确率达 98.7 %; 将深度学习与符号回归相结合, 建立了元素电负性与电子构型 (原子序数、主量子数、价电子) 及外部压力定量关系的函数解析式, 揭示了元素周期表中 7 个分区元素电负性随压力增加而呈指数减小的共性规律。根据电负性与功函数的相关关系, 构建压力调制的相对功函数作为新的定量描述符, 计算获得自然界中全部已知矿物在压力下的功函数值, 揭示了因压力引起的电子离域而导致矿物功函数随压力降低的一般规律。利用元素电负性差和矿物功函数差的相对大小作为评价定量指标, 发现两相界面功函数差随压力增加而增大以驱动电子转移的规律。解释了从地壳到地核矿物因金属性增强而电导率普遍增加, 以及深部间断面 (如核幔边界) 高电导率异常现象; 发现了金属元素价电子比非金属元素具有更强的离域性和更弱的结合能, 导致金属与非金属矿物之间的界面功函数差将随压力增加而增大以驱动电子转移的一般规律。基于上述理论发现, 提出深部矿物因电子转移而发生物相转化反应的预测模型, 成功预测了不同压力下含 Fe (II) 矿物与 H_2O 之间发生氧化还原反应产生氢气的

活性顺序, 提出了含 Fe (II) 矿物与无机碳之间发生压力诱导电子转移而形成还原性碳氢化合物的内在机制, 实现了对两相界面矿物电子转移所驱动的地球物质转化规律的理论预测, 并被深部地质包裹体与俯冲带中发现的氢气、甲烷、金刚石等地质证据所证实。将压力下元素电负性与矿物功函数的定量预测方法, 进一步拓展到对不同压力下元素、矿物及其它化合物的基本热力学性质预测。通过深度学习与高通量计算, 建立 Artificial Intelligence for Mineral (AI4Min) 智能数据平台和 AI4Min-PE 云计算工具 (<http://pe.ai4mineral.com>), 实现了在线输入任意元素、矿物及化合物的成分或化学式与任意压力值, 即可即时输出电负性、功函数、化学亲和性、键能及形成能等热力学参数, 并具有数据在线绘图分析与下载功能。广泛适用于物质科学相关的热力学机制研究, 特别为研究地球深部物质的反应性和稳定性提供了数据与工具。本研究为地球物质与能量循环过程中最基本的电子转移反应及物质的稳定性预测提供了理论依据与定量方法。

关键词: 矿物信息学; 物质与能量循环; 电子转移反应; 电负性; 人工智能

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

深海自生钛氧化物矿物结构特征及其形成机制

周军明^{1*}, 刘晶⁴, 蒋晓东², 韦振权³, 杨胜雄¹

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. 广东工业大学, 广州 510006;

3. 广州海洋地质调查局, 广州 511458;

4. 澳门科技大学, 澳门 999078

钛(Ti)是一种典型造岩元素,传统观点认为Ti具有亲石性、不相容性和流体不活动性。海洋环境(如沉积物)中,Ti通常被认为来自于陆源碎屑。沉积物中Ti含量及其同位素特征常被用作了解海洋环境变化的重要指标。海洋环境中丰富的火山物质(如火山灰沉积物、海山、洋壳等)在蚀变过程中伴随着元素的迁移、富集,但该过程所释放的Ti元素的赋存机制及其地球化学行为尚不清楚。本研究采用多种微区分析技术对东马里亚纳海盆火山灰沉积物以及Line和Marshall海山火山玻璃的微观形貌与结构进行深入分析,详细阐述了火山玻璃蚀变过程中Ti的迁移和自生TiO₂矿物微/纳米颗粒的晶体结构演化机制。具体结果如下:(1)火山玻璃蚀变,发生溶解与重结晶,Si、Al、Mg、Ca和K元素的亏损,以及Ti和Fe元素的被动富集,主要形成伊蒙混层和钙十字沸石矿物;(2)发现伊蒙混层-TiO₂的球壳结构,火山玻璃蚀变形成的自生TiO₂主要存在两种聚集形态:①包裹伊蒙混层球形聚集体表面

的球形壳层,壳层厚度为450~1000 nm,②附着于伊蒙混层矿物孔隙中的TiO₂纳米颗粒聚集体,粒径为4~32 nm;(3)自生TiO₂矿物的主要物相为板钛矿,伴随少量金红石和锐钛矿,存在TiO₂颗粒生长过程中矿物相的连续演化,同时,Fe通过类质同相替换赋存于TiO₂晶体结构;(4)火山玻璃蚀变过程中自生TiO₂的形成和分布揭示了Ti的短距离(几百微米)迁移性,且存在潜在的以TiO₂纳米颗粒形态的长距离运移。本研究,一方面揭示了火山玻璃蚀变过程中自生TiO₂的形成和分布揭示了Ti的短距离(几百微米)迁移性,另一方面发现了Ti在弱碱性和富氧海洋环境中可形成板钛矿,更新了前人对于TiO₂矿物常形成于酸性、有机且还原环境的认识,为理解板钛矿的形成以及Ti的迁移性提供了新的视角,对于揭示Ti的海洋地球化学行为具有重要意义。

关键词: 自生矿物; 板钛矿; 蚀变; 深海

基金项目: 广州市基础与应用基础研究项目(2023A04J0915), 自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2022-G02), 澳门科学与技术发展基金项目(0070/2022/A), 深圳科技项目(JCYJ20220530115406015)

第一/*通信作者简介: 周军明(1992-), 博士, 研究方向: 海洋矿物演化及其资源环境效应. Email: zhoujunming@gmlab.ac.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

钾质斑脱岩中黏土矿物转化与自生钛矿物形成的耦合机制

刘琛¹, 洪汉烈^{1*}, 方谦², 杨燕菱³

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;

3. 四川大学 分析测试中心, 成都 610040

火山灰在经历搬运和沉积后, 在成岩作用和风化作用的协同影响下转变为斑脱岩。这一蚀变过程受到沉积环境差异的显著影响, 进而形成具有不同矿物组合和化学成分的斑脱岩。这些环境差异所引起的矿物演化和化学成分的变化, 不仅影响了斑脱岩记录的原岩信息, 还进一步影响其在地层对比中的应用。自生钛矿物作为钾质斑脱岩中与黏土矿物具有密切生长关系的矿物, 其来源、成因以及生长机制尚未明确。理解钛矿物在高度风化的斑脱岩中的形成机制及风化作用下的行为, 以及与伊利石化反应之间可能的耦合关系, 对于理解钛通量在地表的分布具有重要意义, 也能为钛作为元素迁移计算的可靠性提供有力的指导。本研究利用聚焦离子束制样技术结合高分辨率透射电镜(FIB-TEM)、电子能量损失谱(EELS)、荟萃分析(Meta-Analysis)等手段对化学风化作用下钛矿物的形成、生长以及对黏土矿物转化的控制作用进行了研究, 结果表明化学风化作用可能会通过增加陆源输入改变流体的化学组成, 通过分解易风化组分创造更大的孔隙空

间的方式促进伊利石化反应的进行。钛在斑脱岩中主要以离散的微米尺度岩浆碎屑矿物锆钛矿和纳米尺度自生锐钛矿或次生板钛矿的形式存在。自生/次生 TiO_2 颗粒主要通过前驱体(锆钛矿、含钛火山玻璃等)的分解转化形成, 伊-蒙混层黏土能够在风化过程中吸附钛, 并为锐钛矿的成核提供合适的场所从而造成钛矿物的富集。与传统实验合成条件下锐钛矿的单一生长机制不同的是, 斑脱岩中自生锐钛矿的生长同时受到奥氏熟化与(半)定向附着生长机制的共同控制, 由锆钛矿分解析出的板钛矿由于较为半封闭条件而展现出受到定向附着机制控制的特征。由于深部海水上涌的 H_2S 而导致的还原环境, 在化学风化影响下, 斑脱岩中 TiO_2 颗粒边缘首先会非晶化并在低氧逸度条件下 Ti^{4+} 被还原为低价态 Ti 离子。由于锐钛矿受到周围附着伊蒙混层黏土的保护而蚀变程度较低(相比于板钛矿)。

关键词: 钾质斑脱岩; 火山灰; 伊利石化; 锐钛矿; 生长机制

第一作者简介: 刘琛(1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学. Email: liuchency@cug.edu.cn

*通信作者简介: 洪汉烈(1964-), 教授, 研究方向: 黏土矿物学. Email: honghanlie@cug.edu.cn

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

四川南江杨坝地区灯影组白云岩葡萄状构造特征及形成过程研究

夏焱文, 王利超*

西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500

四川盆地埃迪卡拉纪末期发育一种形态特殊的葡萄状构造, 其成因存在较大争议。本文以南江杨坝剖面发育的葡萄状构造白云岩为研究对象, 通过野外观察和室内显微分析, 探讨其形成过程。根据产状不同可将葡萄状构造划分为顺层分布的葡萄状构造和穿层空隙中充填的葡萄状构造。顺层分布的葡萄状构造由核心和栉状胶结物组成, 穿层空隙中充填的葡萄状构造额外发育亮晶胶结物。显微镜下观察发现, 顺层分布的葡萄状构造中核心主要为隐晶-细晶白云石, 阴极发光呈红色至亮红色。围绕核心发育多期栉状胶结物, 从早至晚依次为放射状正延性白云石 (RSD)、放射状负延性白云石 (RFD)、束状正延性白云石 (FSD) 和束状负延性白云石 (FFD), 阴极

发光相对较暗。根据矿物延性判断, FSD 和 RSD 为海水中直接沉淀, 而 FFD 和 RFD 则由负延性的高镁方解石 (HMC) 或文石通过拟晶白云石化形成。穿层空隙中的葡萄状构造与顺层分布的类似, 但栉状胶结物仅发育 RSD 和 RFD, 而后在空隙中充填白云石和石英。核心部分由海水中微生物参与形成的松散团块组成, 由于海平面波动核心受淡水淋滤影响形成网状溶蚀空隙。随后海平面上升, 在网状空隙中分别形成顺层分布的葡萄状构造和穿层空隙中充填的葡萄状构造。

关键词: 埃迪卡拉纪; 灯影组; 葡萄状构造; 栉状胶结物

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272127)

第一作者简介: 夏焱文 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 2669665400@qq.com

*通信作者简介: 王利超 (1988-), 副教授, 研究方向: 流体地球化学. Email: wanglichaohappy@126.com

• 专题 2: 地球与类地行星宜居性演化的环境矿物学基础与应用研究 •

黏土矿物界面化学过程的分子机制与环境效应

余梦涵*

中国地质大学(武汉) 纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430074

黏土矿物因其独特的层状结构、高比表面积及动态表面化学特性,在地球化学界面过程中具有关键作用。本研究聚焦黏土矿物-环境介质界面反应机制,系统阐释其在有机质周转、营养元素循环及污染物迁移等过程中的调控规律,为深入理解地球化学界面过程提供了新的理论框架。研究表明,黏土矿物层间域阳离子通过电荷匹配与空间位阻效应,主导水体溶解态有机碳与磷的共沉淀过程。蒙脱石等膨胀性黏土矿物的层间水合作用可形成分子尺度的反应微区,显著影响界面配位化学路径。在土壤碳循环领域,黏土矿物表面通过拓扑限域效应构建有机质稳定化微环境,其二维受限空间内的氢键网络与 π -电子相互作用协同延缓了有机碳的矿化速率。重金属迁移转化机制研

究发现,黏土矿物边缘位点的水解反应会重构表面电荷分布,通过静电作用调控重金属离子的特异性吸附行为,而层间域离子交换序列则决定了金属离子的竞争固定规律。本研究建立的层间-边缘协同作用模型,揭示了黏土矿物界面反应动力学的多尺度耦合机制。通过整合表面络合理论与晶体化学约束条件,构建了涵盖分子水平吸附构型到宏观相态演化的理论预测体系。这些发现不仅深化了对矿物-环境界面复杂作用的理解,更为地球关键带物质循环模型的完善提供了理论基础。

关键词: 黏土矿物; 界面过程; 营养元素循环; 土壤碳封存; 重金属固化

• 专题 3: 早期地球演化 •

类地行星核幔边界处一个潜在的铬储库

李琼^{1,2}, 杜蔚^{1,3*}, 杨晶⁴, 刘兆东⁵, 张一宁¹, 陈佑纬¹

1. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408;

3. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026;

4. 中国科学院 地球化学研究所, 月球与行星科学中心, 贵阳 550081;

5. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130012

月球样本的元素组成表明, 与球粒陨石相比, 月球的 V、Cr 和 Mn 含量较低。对现有实验数据的参数化拟合表明, Cr 和 V 的亏损可以用高温和相对还原条件下的核形成 (f_{O_2} -IW-2) 来解释, 但这个核应该含有一些轻元素, 如 S 和 C。另一方面, 月球岩石上富集的重同位素特征表明, 月球经历了挥发分的蒸发损失, 氧化条件下的蒸发被认为可以解释月球和地幔之间不同的 Cr 同位素组成。然而, 蒸发过程建议的温度远低于“大碰撞”的温度, 这使得月球的 Cr 组成及其核幔分异过程的细节尚不清楚。在这项研究中, 我们对顽火辉石球粒陨石 Sahara 97 096 进行了一系列高温高压实验, 以提高我们对还原条件下小行星核幔分异过程的理解, 并试图厘清 Cr 在核幔分异过程中的行为。实验结果表明: (1) 硅酸盐熔体的 Cr_2O_3 含量随温度的升高和氧逸度的降低而降低; (2) Cr 在金属液体和硅酸盐熔体之间的分配从 0.02 增加到约 1。更有趣的是, 我们在温度高于 1 450°C

的实验中观察到金属液体边缘形成铬铁矿, 这种铬铁矿在更高的温度 (~1 650°C) 和更高的压力 (5 GPa) 下是稳定的。顽火辉石球粒陨石 Sahara 97 096 的 Cr 含量 ($3\ 175 \times 10^{-6}$) 与 CI 球粒陨石相当, 在“核”形成过程中硅酸盐熔体中的 Cr 含量下降, 但铬铁矿的形成进一步“消耗”了“幔”中的 Cr 含量 ($1\ 800 \times 10^{-6}$)。由于铬铁矿的形成需要 Cr^{3+} , 因此在核-幔边界形成铬铁矿可能会导致幔中 ^{53}Cr 的亏损。假设月球的核幔分异温度为 1 600°C 左右, 经历 0.1%~0.5% 铬铁矿的形成后, 最多可使原始月幔 $\delta^{53}Cr$ 减少 0.04‰。但仍无法达到现今月幔平均 $\delta^{53}Cr$ 值 (-0.22‰)。因此, 应考虑导致 ^{53}Cr 丢失的其他机制, 例如在月球岩浆洋分异演化过程中尖晶石、石榴石等富 Cr 矿物的分离结晶等。

关键词: 核幔分异; 铬铁矿; 铬同位素; 类地行星; 顽火辉石球粒陨石

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41773052, 41973058), 国家重点研发计划 (2024YFF0807500)。

第一作者简介: 李琼 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: liqiong@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 杜蔚 (1980-), 女, 研究员, 研究方向: 实验岩石学与比较行星学. Email: duwei@mail.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

高压下镓和锗在金属和硅酸盐中的分配及其对地球挥发分吸积的启示

吴正阳¹, 景志成^{1*}, 蒲畅¹, 高秀进¹, 李金峰¹, 杜治学²

1. 南方科技大学 地球与空间科学系, 广东 深圳 518055;

2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

镓 (Ga) 和锗 (Ge) 作为中等挥发性亲铁元素, 它们在金属-硅酸盐熔体中的分配行为对于理解地核形成和挥发性物质吸积过程具有重要意义。在本研究中, 我们利用激光加热金刚石压砧装置, 在 22~70 GPa 和 3 728~4 740 K 的压力温度条件下进行了金属-硅酸盐分配实验, 以探究压力、温度和金属成分对 Ga 和 Ge 分配行为的影响。基于实验数据及文献数据的热力学建模表明, 随着压力和温度的升高, Ga 和 Ge 的亲铁性均减弱, 且 Ga 的亲铁性低于 Ge。拟合结果证实, 金属中硫 (S) 和硅 (Si) 的存在会降低 Ga 和 Ge 的亲铁性, 这与之前在相对低压低温条件下的研究结果一致。此外, 我们的研究还表明,

金属中的氧 (O) 对 Ga 和 Ge 的金属-硅酸盐分配行为具有相反的影响, 与之前的观点不同, O 会增加 Ga 的亲铁性, 但会降低 Ge 的亲铁性。结合 Ga 和 Ge 的分配行为, 我们进行了多阶段核形成模型的构建, 以探索能够重现地球硅酸盐部分 Ga、Ge 和 S 丰度的吸积情形和因素。结果表明, Ga 和 Ge 可能是在地球吸积的整个过程中持续被吸积, 而不仅仅是在地球质量增长的最后 10 %~20 % 的晚期阶段被吸积。

关键词: 金属-硅酸盐分配; 中等挥发性亲铁元素; 激光加热金刚石压砧; 高压; 地核形成

• 专题 3: 早期地球演化 •

前寒武降温古海洋关键 N-Fe-S 生物地球化学耦合演化
及其地质效应黄柳琴¹, 蒋宏忱¹, 董海良^{2*}

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(北京)地质微生物与生物地球化学研究中心, 北京 100083

地球早期古海洋具有高温、低氧、富铁氨等还原物质等特殊的物理化学特征, 经历了长期的环境-微生物协同演化过程, 逐渐演变成常温、氧化的类现代环境。环境-微生物的协同演化伴随着古海洋中生命元素的主要赋存形态、生物地球化学转化过程、产生的地质记录/痕迹在不同地质历史时期发生系统性变化。例如, 海洋氮库从 NH_4^+ 为主逐渐变成 NO_3^- 为主, 硫从局部分布的硫化层中 S^{2-} 为主氧化为广泛分布的 SO_4^{2-} , 铁从溶解态 Fe(II) 氧化成含铁矿物(磁铁矿、赤铁矿等)并沉淀成大规模条带状铁建造(BIFs)。随着这些关键元素在古海洋中赋存状态和空间分布的变化, 它们在微生物作用下发生着复杂多变的耦合过程, 如表层水体中 NH_4^+ 氧化形成 $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 后, 在不同地质历史时期, 可被表层的有机质、下层的铁化水体中 Fe(II) 或硫化水体 S^{2-} 还原, 从而可能造成不同的地质效应和沉积记录。然而, 尽管目前有了些框架性认识, 但对环境-微生物协同演化驱动早期地球元素生物地球化学耦合循环演变的具体机制还存在很多未知之处, 如导致生物地球化学过程转变的关键环境因素节点、微生物代谢适应机制等。古海洋大幅度的降温过程(从高于 70°C 降至常温)是驱动微生物群落和生物地球化学循环发生转变的一级影响因子, 以 N 为例, 由于不同氮转化微生物, 如氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌、反硝化菌等响应温度变化的敏感度不同, 不仅会导致不同时期(不同温度下)海洋氮库的组成、丰度的复杂变化, 也使得不同氮形态下与 Fe、C、S 等

耦合过程及产物发生变化。因此, 本研究通过利用不同温度的热泉微生物, 模拟海洋降温过程中微生物的自然演替, 分析硝化微生物及反硝化微生物作用下 N 产物随温度变化而发生的变化, 并进一步分析与 Fe(II) 、 S^{2-} 、有机质耦合情况下反硝化过程及产物的变化。结果表明, 高温($>65^\circ\text{C}$)下微生物硝化作用将 NH_4^+ 主要转化为 NO_2^- , 而低温($<48^\circ\text{C}$)则可完全氧化为 NO_3^- , 从而形成随着古海洋温度降低, 氮库逐步从 NH_4^+ 为主, 变成 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ 混合, 最后以 NO_3^- 为主的演替趋势。在这样的变化背景下, NO_3^- 若通过异养反硝化作用(与有机氮耦合)还原, 其产物也经历高温以 NO_2^- 为主(尤其 $>55^\circ\text{C}$)、低温以 N_2 为主的变化。与之相反, 若 NO_3^- 通过自养反硝化作用(与 S^{2-} 或 Fe(II) 耦合)还原, 则呈现出在高温下不易积累 NO_2^- 、低温下易积累 NO_2^- 的趋势。进一步研究发现, NO_2^- 以及 NO_3^- 在不同温度、化学条件(模拟古海洋富 HCO_3^- 、Si 等)下氧化 Fe(II) 形成的矿物呈现出高温($>45^\circ\text{C}$)以磁铁矿、硅酸盐矿物等 $\text{Fe(II)}-\text{Fe(III)}$ 混合价态铁矿物为主, 随着温度降低形成的主要铁矿物则演变针铁矿等 Fe(III) 矿物。这些认识为进一步精准刻画早期古海洋关键生命元素的赋存状态演变提供了实验数据支撑, 也为深刻理解地球早期生命演化和环境变迁提供重要科学依据。

关键词: 前寒武古海洋; 微生物-环境共演化; 氮-铁-硫生物地球化学耦合; 热泉; 条带状铁建造

基金项目: 国家自然科学基金项目(42192503, 42172340, 42202229, 42192500, 91951205)

第一作者简介: 黄柳琴(1987-), 副研究员, 研究方向: 地质微生物、微生物地球化学. Email: huanglq@cug.edu.cn

*通信作者简介: 董海良(1965-), 教授, 研究方向: 地质微生物. Email: dongh@cugb.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

波恩-奥本海默近似校正下的 C 和 O 同位素分馏

益西翁姆, 刘耘*

中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产与成矿预测全国重点实验室, 贵阳 550081

波恩-奥本海默近似 (BOA) 是量子化学计算中的核心假设, 但在处理轻原子、超快过程或强非绝热耦合体系时, 其适用性受到限制。同位素地球化学理论领域长期未对 C 和 O 同位素分馏的波恩-奥本海默近似造成的误差进行估算, 这是一个潜在的巨大缺陷, 因为在低温和常温下, 加了 BOA 的校正后的分馏结果, 会有大约 1~3 个 per mil 的差别, 对于某些需要精确的分馏参数的研究体系, 产生错误的解释。因此, 急需重新确定这个校正的贡献。目前, 国际上关于密度泛函理论 (DFT) 水平下的对角线波恩-奥本海默近似校正 (Diagonal Born-Oppenheimer Correction, DBOC) 的计算研究主要集中在非绝热效应的影响及其修正方法上。BOA 假设核与电子的运

动可分离, 但在涉及锥形交叉 (如电子态之间的简并) 或强非绝热耦合的体系中, 这一近似可能失效, 需引入校正项。在 DFT 框架下的 DBOC 计算是量子化学和计算化学领域的重要研究方向, 主要用于处理分子振动与电子态之间的耦合。近年来, 随着计算能力的提升和算法的优化, DBOC 的计算方法得到了显著改进, 并在有机分子、无机分子和生物大分子等体系中广泛应用。然而, 该领域仍存在一些争论与歧义, 例如在精度与效率之间的平衡、复杂体系中的适用性以及理论基础在某些特殊情况下的不足。

关键词: 波恩-奥本海默近似; 同位素分馏; 密度泛函理论

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130114)

第一作者简介: 益西翁姆 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 理论与计算地球化学. Email: yixiwengmu@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 研究员, 研究方向: 理论与计算地球化学. Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

富含金刚石的水星核幔边界：来自高温高压实验的证据

徐永江¹, 林彦蒿^{1*}, 吴培衍¹, Olivier Namur², Yishen Zhang²,
Bernard Charlier³

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. KU Leuven, Leuven 003001;

3. University of Liege, Liege 004000

MESSENGER 探测器确认水星的表面含有丰富的石墨, 这被认为是石墨从岩浆洋中上浮而形成, 说明在水星的早期演化过程中, 其内部处于碳饱和状态。因为水星的重力相对较低, 石墨被认为是水星岩浆洋结晶过程中唯一稳定的碳相。然而, 最新的模型对水星重力场的修正表明水星的核幔边界可能深度更深, 再加上硫对岩浆洋物理化学性质的潜在影响, 有必要重新评估水星内部的碳的存在状态。我们通过高温高

压实验、热力学模型和最新的行星物理模型重新评估了水星内部的碳的种型, 结果表明, 在高度还原的条件下, S 可以显著降低硅酸盐物质的液相线, 有助于金刚石在岩浆洋中保持稳定, 并沉淀在核幔边界; 另外, 固体金属内核的形成会导致金刚石从中结晶析出, 并上浮至核幔的边界处, 形成一个稳定的金刚石圈层。

关键词: 水星; 金刚石; 高温高压; 核幔边界

• 专题 3: 早期地球演化 •

斜长石-玄武岩熔体间氢的非亨利行为

徐永江¹, 徐永江^{1*}, 郑海燕¹, Wim van Westrenen²

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. Vrije Universiteit Amsterdam, Faculty of Science, Earth Sciences, Amsterdam 1081 HV, Netherlands

月球斜长岩中的斜长石晶体被认为很可能直接结晶自月球岩浆洋 (LMO), 其元素和同位素组成为了解 LMO 的成分、形成年龄和演化过程的独特探针。然而, 月球斜长石的氢含量极低, 目前对极低氢含量条件下斜长石与熔体间氢分配行为的认识非常有限, 这导致对 LMO 氢含量的估算存在很大的不确定性。为了更好地量化月球条件下氢在斜长石-熔体间的分配系数, 我们开展了一系列高温实验。利用傅里叶变换红外光谱法 (FTIR) 对实验合成的斜长石及其共存熔体中的水含量进行了

分析, 结果表明: 当熔体水含量低于 300 $\mu\text{g/g}$ 时, 斜长石-熔体间的氢分配系数 (D) 为 0.10 ± 0.05 至 0.36 ± 0.19 , 这是迄今为止报道的最高值。结合已发表的分配系数数据, 我们发现 D 与熔体中氢含量之间存在很强的依赖性。这一发现表明, 其他矿物-熔体体系中的氢分配行为也可能不遵循亨利定律。因此, 在利用恒定氢分配系数来估算月球岩浆洋水含量时, 需要格外谨慎。

关键词: 斜长石; 月球; 岩浆洋; 氢; 分配系数

• 专题 3: 早期地球演化 •

钒和硅同位素证据揭示月球形成巨大撞击驱动的 硅酸盐地球氧化

黄方^{1*}, 石震¹, 张申扬¹, 张宏罗², 康晋霆¹, 丁昕¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中国地质大学 (北京), 北京 100000

硅酸盐地球 (BSE) 的氧化还原状态对其宜居性和演化具有重要作用。全硅酸盐地球的氧逸度 (f_{O_2}) 比其他类地行星和月球高出两个数量级以上, 但地球在吸积过程中如何实现显著氧化仍不清楚。本研究通过系统分析球粒陨石、月球和 BSE 的硅 (Si) - 钒 (V) 同位素组成分析发现: 月球形成的大撞击事件后, BSE 的氧逸度显著增加。具体表现为: BSE 与月球具有相同的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值, 均显著高于球粒陨石; 但 BSE 的 $\delta^{51}\text{V}$ 为 -0.91‰ , 既高于球粒陨石 (-1.09‰) 也高于月球 (-1.04‰)。基于高温高压实验确定的 V 同位素分馏系数进行的理论模拟显示: 原始地球与陨石及月球间的同位素差异可由还

原条件下的核幔分异解释。而地球与月球之间的 $\delta^{30}\text{Si}$ 的高度相似性与 $\delta^{51}\text{V}$ 的显著差异性则表明, 月球形成的大碰撞事件引发了氧化条件下的二次核幔分异过程。这一氧化过程很有可能源于忒伊亚撞击导致原始地球下地幔 Fe^{3+} 富集物质重新溶解于碰撞后的岩浆洋中, 进而引发氧化性物质的重新分布。由此证明, 月球形成撞击事件是塑造 BSE 高氧逸度的关键机制, 该过程从根本上重塑了地球的物质组成与演化路径。

关键词: 氧化性硅酸盐地球; 核幔分异; 钒-硅同位素

• 专题 3: 早期地球演化 •

大碰撞引起的核幔角动量不均匀分布

毕榕熙*

成都理工大学, 成都 610051

类地行星的自转主要由晚期大碰撞决定的。在大碰撞发生后, 类地行星可能会呈现核与幔之间的角动量分布不均匀。这种不均匀性可能会持续很长时间, 并显著影响行星的内部结构和早期演化。然而, 关于这一领域的研究仍然较少。我们采用了无网格有限质量 (MFM) 方法系统地模拟了大碰撞, 并与平滑粒子流体动力学 (SPH) 方法的结果进行了比较。使用的撞击参数涵盖了广泛的撞击角度、撞击体与总质量

比以及撞击速度。我们发现, 大撞击能够引发核与幔之间的角动量不均匀分布, 并导致差速旋转。通过 MFM 方法比 SPH 方法更好地捕捉了这一过程, 因为 MFM 方法避免了使用人工粘度。此类差速旋转可能会引起核幔边界 (CMB) 处的开尔文-亥姆霍兹不稳定性 (KHI), 进而导致地幔和地核物质的混合。

关键词: 大碰撞; 差速旋转; 核幔相互作用

• 专题 3: 早期地球演化 •

超离子态 δ -AlOOH 及其稳定性的计算研究

何宇*

中国科学院 地球化学研究所, 地球内部物质高温高压实验室, 贵阳 550081

通过使用从头算和深度学习势分子动力学模拟, 我们发现了 δ -AlOOH 在下地幔温压下转变为超离子态, 其特征是氧亚晶格中具有高度扩散性的质子。高度扩散的元素为系统提供了额外的熵, 从而导致了极高的热稳定性。我们的自由能计算表明, 脱水在能量和动力学上是不利的, 因此水在下地幔

条件下以超离子态存在并且有强的稳定性。本研究表明, 在地球历史中, 水可以稳定储存于地球深部下地幔。

关键词: 含水相; 超离子态; 第一性原理计算; 热稳定性

• 专题 3: 早期地球演化 •

Stabilized Earth's cratons through episodic, felsic magmatism during Paleoarchean

袁禹*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

地球上最早的地壳物质可追溯至冥古代 (>4.0 Ga), 然而地壳岩石-克拉通的 building block 主要形成于随后的古太古代 ($\sim 3.6\sim 3.2$ Ga)。这些岩石如何得以大量保存不仅可以反映克拉通的稳定过程, 还对认识地球早期的构造样式和宜居性的形成具有重要启示。位于印度东部的 Singhbhum 克拉通保存了大量的古太古代 TTG 岩石, 是揭示这一前沿科学问题的理想对象。高精度 SIMS 锆石 U-Pb 年代学结果表明, 该克拉通内 TTG 岩石是周期性长英质岩浆活动的产物。此外, 不同期次锆石的 Hf 同位素、O 同位素和其他地球化学指标 (如 Eu 异常) 也呈现出周期

性的波动, 说明这些 TTG 岩石记录了交替出现的古老地壳再造和新生地壳生长事件。这些特征与全球其他克拉通内碎屑锆石的记录相一致, 可能反映了地幔翻转导致上浮岩石圈周期性熔融过程。因此, 周期性的长英质岩浆事件使得克拉通地壳逐渐获得刚性和浮力可能是地球上克拉通稳定的潜在机制。稳定克拉通的出现则为随后全球范围内的板块构造运动以及地球内-外部物质交换提供了基本前提。

关键词: 古太古代; 克拉通稳定; 锆石; SIMS; Singhbhum; 克拉通

• 专题 3: 早期地球演化 •

地核形成的新机制：应力下的渗流

王林*

中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

地核的形成机制决定了地幔和地核中亲铁元素和轻元素的丰度。前人研究表明, 在静水压条件下, 液态金属只能通过底辟作用或是在固体地幔中的巨大裂隙的运移形成地核。这些机制将会导致地幔和地核的不平衡。在本次研究中, 我们表明在应力存在的条件下, 渗流可以成为一个有效的地核形成机制。这种发生在颗粒大小尺度的核幔分异过程满足地核形

成的时间限制, 并且会导致下地幔和地核的部分平衡。因此, 地核在形成初期就可能已经富含轻元素, 而地幔中的中度亲铁元素的丰度也可以在这个过程中被提升到目前的数值。同时, 该模型中, 被困在地幔中的成核熔体也可以解释地幔中高亲铁元素的丰度。

关键词: 核幔分异; 渗流; 元素分配; 动力学

第一作者简介: 王林 (1989-), 研究员, 研究方向: 实验地球科学. Email: wldazuya@gmail.com

第二作者简介: 费英伟, 研究员, 研究方向: 实验地球科学. Email: yfei@carnegiescience.edu

• 专题 3: 早期地球演化 •

Nuclear volume effects in kinetic isotope fractionation: A case study of mercury oxidation by chlorine species

刘耘^{1,2*}, 杨晨璐¹

1. 成都理工大学, 成都 610059;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

It is well-known that the equilibrium isotope fractionation of mercury (Hg) includes classical mass-dependent fractionations (MDFs) and nuclear volume effect (NVE) induced mass-independent fractionations (MIFs). However, the effect of the NVE on these kinetic processes is not known. The total fractionations (MDFs + NVE-induced MIFs) of several representative Hg-incorporated substances were selected and calculated with ab initio calculations in this work for both equilibrium and kinetic processes. NVE-induced MIFs were calculated with scaled contact electron densities at the nucleus through systematic evaluations of their accuracy and errors using the Gaussian09 and DIRAC19 packages (named the electron density scaling method). Additionally, the NVE-induced kinetic isotope effect (KIE) of Hg isotopes

are also calculated with this method for several representative Hg oxidation reactions by chlorine species. Total KIEs for $^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}$ ranging from -2.27‰ to 0.96‰ are obtained. Three anomalous ^{202}Hg -enriched KIEs ($\delta^{202}\text{Hg}/^{198}\text{Hg}=0.83\text{‰}$, 0.94‰ , and 0.96‰ ,) caused by the NVE are observed, which are quite different from the classical view (i.e., light isotopes react faster than the heavy ones). The electron density scaling method we developed in this study can provide an easier way to calculate the NVE-induced KIEs for heavy isotopes and serve to better understand the fractionation mechanisms of mercury isotope systems.

Key words: Nuclear volume effect; Kinetic fractionation; Hg isotopes; Ab initio calculations

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130114)、中国科学院战略重点研究计划 (B) 项目 (XDB 41000000) 和国家航天局民用航天技术预研项目 (D020202)

第一作者简介: 杨晨璐 (1999–), 博士, 研究方向: 天体化学. Email: 1187878307@qq.com

*通信作者简介: 刘耘 (1968–), 教授, 研究方向: 稳定同位素分馏的理论计算、计算地球化学和行星增生动力学研究. Email: liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

核幔边界钨离子扩散性质的分子动力学研究

王涛*

中国科学院 地球化学研究所, 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

W 同位素在萨摩亚、冰岛以及夏威夷地区存在负异常, 在前人研究发现可能的原因有三种, 通过数据的对比和理论研究, 最终将原因聚焦在核幔边界相互作用上, 其中较为重要的是核幔边界的扩散作用, 对于核幔边界的扩散作用解释并不完善, 为了了解早期地球核幔分异后重要金属元素 W 的地球化学行为。本文运用第一性原理的分子动力学模拟和深度势能分子动力学模拟, 主要解决两个问题: (1) 核幔边界上, W、Mg、O 在晶界、晶粒和熔体中的扩散作

用。(2) 由于地磁场的存在, W 作为高价态金属元素, 在极端条件或特定条件下其扩散作用会受到地磁场的影响。所以需要考虑地磁场对核幔边界 W 分配的影响。预期得到 W 在核幔边界的扩散性质, 进一步解释 W 同位素负异常的原因。除此之外探明地磁场与 W 扩散之间的关系。

关键词: 核幔边界; 扩散作用; 钨离子; 分子动力学模拟; 深度势能

• 专题 3: 早期地球演化 •

碘的核幔分配及对异质增生的制约

张晟霖¹, 李云国^{1*}, John Brodholt², Lidunka Vočadlo²,
万磊¹, 郝记华¹, 黄方¹, 倪怀玮¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. University College London Department of Earth Sciences, London WC1E 6BT

洋中脊玄武岩 (MORB) 和洋岛玄武岩 (OIB) 具有截然不同的氙同位素特征, 其成因可以追溯到地球形成后不久的早期事件。具体来说, OIB 的 $^{129}\text{Xe}^*/\text{I}$ / $^{136}\text{Xe}^*\text{Pu}$ 比 MORB 低, 这可能是由于异质吸积, 也可能是核幔分异导致的, 因为实验表明在更高的压力下, 碘会逐渐变得亲铁。然而, 碘的分配行为还受到地核中硫和氧含量的控制, 目前并未得到很好澄清, 这阻碍了利用 I-Pu-Xe 同位素体系对地球吸积过程的准确量化。因此, 我们通过第一性原理计算离定了不同 S 和 O 含量下硅酸盐熔体和液态铁合金之间碘的分配。

我们发现, 随着液态铁中 S 和 O 含量的增加, 碘虽然变得更为亲铁但它仍保持亲石性, 并且在地核可能的最大 S 和 O 含量下依然大部分进入硅酸盐中。因此, 地核的形成并不能将大量硅酸盐地球中的碘抽离出去, 这表明 MORB 和 OIB 源区之间的氙同位素差异主要来自于地球的异质吸积。进一步利用 I-Pu-Xe 同位素体系, 可以约束地球在后增薄层时期加入了 0.07 %~1.68 % 的 CI 物质或与之相当的碳质球粒陨石。

关键词: 碘; 分配系数; 核幔分异; 地球吸积

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42322201), 国家自然科学基金项目 (42173040)

第一作者简介: 张晟霖 (2003-), 硕士研究生, 研究方向: 早期地球。Email: zsl_2020sgy@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 李云国 (1985-), 教授, 研究方向: 计算矿物学, 计算地球化学。Email: liyunguo@ustc.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

Deciphering a complex Neoarchean-Paleoproterozoic collisional history between the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons: new constraints from polyphase deformation of the Central Limpopo Belt, southern Africa

张健^{1*}, Guenther Brandl², 赵国春¹, 刘锦³, 赵辰⁴

1. The University of Hong Kong 地球科学系, 香港;

2. Council for Geoscience Limpopo Unit, Polokwane, South Africa 0700;

3. 吉林大学, 长春 130012;

4. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 沈阳 110034

The Limpopo Belt of southern Africa is a classical Paleoproterozoic orogenic belt that is believed to have resulted from the collision between the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons. Previous studies have primarily focused on geochronology, petrology, and geochemistry of different rock assemblages, resulting in a general tectonic framework indicating at least two significant tectonothermal events from Mesoarchean to Paleoproterozoic. However, the spatial and temporal relationships between these events, as well as their overall structural patterns in the field, are poorly understood. The Central Limpopo Belt contains the best lithological exposures of different ages, making it the most promising area for detailed structural mapping and analysis, and for gaining a better understanding of these issues. Based on the detailed field-based structural analyses, four generations of deformation were identified. The earliest D1 deformation is characterized by the penetrative S1 foliations only preserved within the 3.6~3.4 Ga anorthosites that now occur sporadically as xenoliths or boudins in the highly deformed 2.9~3.3 Ga Sand River gneiss. S2 are penetrative gneissic foliations that were extensively developed in the Sand River gneiss and were intensively superimposed by subsequent deformations into tight to isoclinal folds. After restoration of their attitude, S2 foliations strike NW-SE and dip steeply to SW at high angles, indicating that the D2 deformation experienced a roughly NE-SW-oriented compression between 2.9~2.6 Ga. D3 deformation resulted from significant NW-SE-oriented

compression that intensively superimposed the earlier S2 fabrics into vertically inclined isoclinal folds and tectonites S3-L3. Strain measurements on these tectonites indicate that all pre-existing rock assemblages were stretched or sheared along the vertical orientation, resulting in the development of numerous sheath folds in the Sand River gneiss and 2.6~2.7 Ga Grey gneiss. Associated with the zircon ages from anatexis melts, the D3 deformation most likely occurred at 2.1~2.0 Ga. SHRIMP U-Pb zircon age dating recorded these two metamorphic ages of ~2.6 Ga and 2.0 Ga on a single zircon of the foliated Sand River gneiss. A regional large scale inclined open fold F4 gently refolded the D1-D3 fabrics and marked the final deformation of the Central Limpopo Belt, occurring sometime after ~2.0 Ga.

Detailed structural data of this study, in combination of available geochronological and metamorphic data lead us to propose that the ~2.65 Ga and ~2.0 Ga tectonothermal events occurred under different tectonic environments. The ~2.65 Ga tectonothermal event developed coevally with D2 deformation and high-grade metamorphism during the NE-SW collisional event. In contrast, the ~2.0 Ga tectonothermal event occurred during a NW-SE-oriented collisional event between the Kaapvaal and Zimbabwe Cratons, resulting in the formation of the major Limpopo tectonic linear belt seen today.

Key words: Archean; Limpopo Belt; Deformation; Structural evolution; Tectonics

• 专题 3: 早期地球演化 •

基于太赫兹光谱的行星大气同位素分析

陈哲*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

行星大气的同位素组成是研究行星形成与演化的重要线索。本研究利用太赫兹光谱技术, 对行星大气中的关键同位素成分进行了高精度分析。太赫兹波段具有高分辨率和高灵敏度的特点, 能够有效探测行星大气中多种同位素的特征吸收谱线。通过对行星大

气中 H、C、O、N 等元素的同位素比值进行精确测量, 结合行星演化模型, 可以揭示行星在其形成与演化过程中所经历的物理化学变化。

关键词: 行星大气; 同位素; 太赫兹光谱

第一作者简介: 陈哲, 博士研究生, 研究方向: 行星地质学.

*通信作者简介: 刘耘, 研究员, 研究方向: 早期地球.

• 专题 3: 早期地球演化 •

北大别木子店地区新太古代两类 TTG 片麻岩的 岩石地球化学特征和成因指示

杨雄^{1*}, 高世新¹, 王达¹, 张兆峰¹, 邱啸飞², 刘耘^{1,3}

1. 成都理工大学, 成都 610000;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430000;

3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

湖北省麻城市的木子店片麻岩杂岩体是目前报道的扬子克拉通内年龄最古老的地区(冥古宙碎屑锆石和始太古代 TTG 片麻岩), 是探讨扬子克拉通早期大陆地壳演化的理想场所。根据岩石全岩元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学数据、锆石 Hf 同位素结果, 木子店片麻岩杂岩体在新太古代末期发生了强烈的构造-岩浆热事件, 形成了两类不同的 TTG 片麻岩: 第一类 TTG 片麻岩的锆石 Hf(*t*) 平均值范围在 (-0.1 ± 1.0) 到 (0.8 ± 1.8) , 两阶段 Hf 模式年龄为

~ 3.0 Ga, 全岩元素地球化学指示其可能形成于俯冲板片部分熔融, 并且可能存在地幔楔的混染; 第二类 TTG 片麻岩的锆石 Hf(*t*) 平均值范围在 (-26.7 ± 5.2) 到 (-18.9 ± 3.8) , 两阶段 Hf 模式年龄为 4.13~4.05 Ga, 全岩元素地球化学指示其可能形成于加厚下地壳的部分熔融, 且不存在地幔楔的混染。

关键词: 木子店; TTG 片麻岩; 新太古代; 锆石; 部分熔融

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地幔冷却机制：基于多阶段冷却模型的新框架

何婷*

中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

地球早期内部的热状态及其冷却过程对地球后续的地质演化至关重要。地球在形成初期经历了诸如月球形成的大碰撞、金属核心的分异、与早期月球的潮汐交互以及放射性元素衰变等剧烈事件, 这些过程导致地球最初处于极高的温度。然而, 尽管地球早期地幔的冷却机制对地球的早期演化具有关键意义, 现有的冷却模型仍存在较大的争议, 其合理性和适用性尚未得到充分验证。目前, 早期地幔热演化的参数化模型多基于单一构造机制 (如停滞盖层机制), 或依赖于板块构造理论的假设 (认为板块构造在约 35 Ga 前已开始存在)。然而, 这些假设在现代地质学中存在较大的争议, 其预测结果未必符合实际。基于此,

我们认为, 地幔冷却的过程应当发生在剧烈的岩浆海固化之后, 从一个非常高温的状态开始逐步降温。与单一标度定律的单阶段冷却模型不同, 我们提出了一种多阶段的冷却模型 (Episodic Multi-stage Cooling Model, EMCM)。这一新模型可能更贴近早期地幔的实际冷却过程, 能够解释地幔在约 35 Ga 前之前的冷却演化, 并与后期地幔热历史的已知约束相一致。通过该模型, 我们可以更为全面地理解地球早期地幔的热演化过程, 为进一步研究地球早期的地质演化提供更加可靠的理论框架。

关键词: 热演化; 参数化模型; 幕式冷却

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) 项目 (XDB41000000)

第一作者简介: 何婷 (1997-), 女, 博士研究生, 研究方向: 地球动力学数值模拟. Email: heting@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 男, 研究员, 研究方向: 同位素地球化学、天体化学. Email: liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

用量子蒙特卡洛方法计算模拟地球深部物质的状态和性质

刘之捷¹, 刘耘^{1,2*}

1. 成都理工大学, 成都 610000;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

自蒙特卡洛方法被应用于科学问题以来, 随着科学问题的深入推进, 对精度的要求越来越高, 其非常高的精度被给予了极大厚望, 量子蒙特卡洛能够通过量子力学的原理来准确模拟和描述系统的状态, 尤其是在涉及强关联和量子效应的复杂体系中具有独特的优势, 然而其巨大的算力需求让许多科学家望而却步, 随着算法(如神经网络)和计算机(如量子计算机)的发展, 量子蒙特卡洛(QMC)正变得可能。最新的实验和地球动力学计算发现, 金属液体在应力

作用下能在地幔中发生快速渗流, 这意味着经典的成核模型可能还不够完善。为此, 我们使用量子蒙特卡洛方法对地球深部物质的状态和性质进行计算, 通过模拟深部地幔物质在极端压力和温度条件下的行为, 可以更准确的描述其在地球内部的物理性质, 如熔点、密度、粘度以及其在不同应力状态下的流动特性。

关键词: 量子蒙特卡洛方法; 地球深部物质; 强关联和量子效应; 地幔; 极端压力和温度条件

基金项目: 国家重点研发计划资助(2024YFF0807500)

第一作者简介: 刘之捷(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向: 计算地球化学, Email: popyulexue@163.com;

*通信作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 早期地球与行星科学, Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地球及火星条件下含 Mn (II) 碳酸盐的光化学氧化

郝记华^{*}, 郭继业, 黄方

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

Mn 的氧化物是常见的地表强氧化剂, 在现代生物地球化学循环过程中发挥着不可或缺的作用。但是, 地球早期及行星无氧条件下, Mn 往往被认为会经历还原性风化, 形成富 Mn (II) 的早期水体或次生矿物(例如, 碳酸盐)。近些年, 有研究指出, MnCO_3 可以发生无氧光化学氧化, 为早期风化贡献关键的氧化剂, 但自然界中 Mn (II) 往往以 CaCO_3 或 MgCO_3 晶格中的杂质形式存在。目前, 学界对于碳酸盐体系

中痕量 Mn (II) 掺杂的光化学活性还不明确。对此, 本次汇报将展示一些利用第一性原理计算获得的痕量 Mn (II) 掺杂导致的常见 Ca/MgCO_3 光化学活性转变的结果, 并且探讨本研究对于早期地球和火星宜居性以及潜在生命信号解读的启示意义。

关键词: 早期地球; 光化学; 锰; 碳酸盐; 产氧光合作用

• 专题 3: 早期地球演化 •

另一种元素分配系数的计算方法: He 在 Fe 与 MgSiO₃ 间的分配

王杰¹, 尹坤^{1*}, 刘耘^{1,2}

1. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

核幔分异是早期地球演化进程中最为关键的事件之一。在此过程里, 微量元素会依据各自的分配系数, 有选择性地进入地核或者地幔。然而, 从理论计算的角度获取这些分配系数, 面临着巨大的挑战。目前, 学界已有的计算方法主要有两相共存法、基于热力学积分的化学势相等法以及交换反应法。基于第一性原理的两相共存法, 由于体系中存在界面, 且元素在两相中的扩散速率存在差异, 往往会产生较大不确定度。而当下的化学势相等法采用了理想混合熵近

似, 交换反应法则假设活度系数为 1。此外, 这些方法对相同体系所得出的分配系数存在较大差异。本研究构建了另一种计算方法。使用该方法, 获得了核幔边界条件 (4 000 K、5 000 K 和 135 GPa) 下, He 在 Fe 和 MgSiO₃ 熔体之间的分配系数。结果显示, 本研究所得数据与多数已报道的数据相近。这说明该计算方法在早期地球研究领域具有巨大的潜力。

关键词: 分配系数; 理论计算; 核幔分异

第一作者简介: 王杰 (1996-), 博士 (在读), 研究方向: 计算地球化学. Email: wjie0128@163.com

*通信作者简介:

尹坤 (1982-), 副研究员, 研究方向: 行星物质热力学计算. Email: yinkun@cdut.edu.cn

刘耘 (1968-), 研究员, 研究方向: 理论及计算地球化学. Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

矿物与气体之间 Xe 稳定同位素平衡分馏: 来自第一性原理计算的制约

刘璇, 李春辉*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 行星科学国际研究中心, 成都 610059

Xe 是惰性气体, 其化学性质十分稳定, 但是地球大气中 Xe 的丰度与同位素分馏表现出双重反常现象: 若以球粒陨石成分为基准进行归一化, 除氙(Xe)外, 所有稀有气体均呈现“轻元素丰度低于重元素”的规律(例如, 空气中的 Ne/Ar 比值低于球粒陨石中的 Ne/Ar 比值)。这种元素丰度差异伴随轻稀有气体(Ne、Ar、Kr)更显著的同位素分馏(例如, Ne 的同位素分馏程度高于 Ar)。作为较重的稀有气体, Xe 的丰度却显著低于更轻的 Kr(即大气中的 Xe/Kr 比值远低于球粒陨石, 大气 Xe/Kr 是球粒陨石的 1/24), 与“重元素更易保留”相悖。且 Xe 的同位素分馏程度(40%/amu)远超其他稀有气体(Kr 仅为 8%/amu)。这一现象也被称为 Xe 悖论。前人研究认为在地球圈

层分异的岩浆洋阶段, 随着橄榄石和长石从地球岩浆洋中分离结晶出来, 轻 Xe 同位素释放到大气中并丢失, 因此上地幔呈现重 Xe 同位素富集的特征。为了验证前人通过高温高压实验获得的 Xe 同位素分馏系数是否达到了热力学平衡, 本工作通过第一性原理计算详细解释了在岩浆洋结晶分异过程中 Xe 同位素的分馏机制。本文研究证实了前人的实验数据, 即橄榄石和长石与 Xe 气体之间确实存在可观的同位素分馏。因此, 地球岩浆洋在控制地球挥发性元素和同位素组成上起了重要作用。

关键词: 地球 Xe 悖论; 第一性原理计算; 岩浆洋

第一作者简介: 刘璇(1999-), 硕士研究生在读, 研究方向: 同位素分馏计算. Email: liuxuan19990328@163.com

*通信作者简介: 李春辉(1975-), 副研究员, 研究方向: 类地行星形成演化及其挥发性元素起源的研究, 侧重宇宙化学和稳定同位素地球化学. Email: lichunhui@cdut.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地幔的热边界层性质和动力学效应

章清文

中国科学院地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

早期地幔是岩浆洋固化后形成的冥古宙、太古宙的硅酸盐主体, 未充分分异。它的地幔动力学涉及地幔的热-构造-(化学)特征、驱动因素及其相互关系和演化。早期地幔通过对流传热, 提供重要热源, 也控制地幔熔融、地壳形成和驱动(前)板块构造。本研究聚焦于早期地幔的动力学特征及其演化过程, 旨在探讨早期地幔对流的活跃程度、岩石圈的性质以及地幔冷却的机制。通过对地幔对流强度的衡量指标——瑞利数(Rayleigh number)的分析, 结合热边界层理论和数值模拟方法, 揭示了早期地幔对流的活跃性及其对地球演化的影响。研究表明, 早期地幔的对流强度可能较大, 瑞利数可达 $10^7 \sim 10^9$, 远高于现代地幔对流的瑞利数($10^7 \sim 10^8$)。这种活跃的对流导致了边界层的变薄、地幔柱的细化以及岩石圈的变薄, 从而加速了地幔

的散热和熔融过程。此外, 早期地幔的热状态和热收支状况对理解地幔冷却路径具有重要意义。然而, 现有理论与地质记录之间存在矛盾, 如早期地幔热演化的“热突变危机”和富集储库的存在与活跃对流的 inconsistency。为解决这些困境, 提出了“波动式”冷却路径的假说, 并强调了进一步观测和理论研究的必要性。未来的研究将集中在推进理论研究、开发模拟算法和程序以推进数值模拟, 并借助多学科知识的融合, 以推进对高瑞利数对流、湍流和二相流等复杂问题的量化。这些研究将有助于深化对早期地幔动力学特征及其演化机制的理解, 为地球科学领域提供新的理论和方法。

关键词: 早期地幔; 热边界层; 地幔冷却; 壳幔分异; 前板块构造

• 专题 3: 早期地球演化 •

Differentiation of Enstatite chondrite-like planetesimals and planetary embryos

李琼, 杜蔚*

中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

Enstatite chondrites (E-chondrite) exhibit isotopic signatures remarkably consistent with those of Earth, suggesting their potential as analogous materials to the building blocks of our planet 1, 2, 3. The impactors similar as E-chondrites that contributed to the accretion of the proto-Earth are believed to have undergone differentiation^{4, 5}. However, the differentiation of planetesimals requires a mechanism for metal segregation, which is challenging given the small size of planetesimals and the absence of gravity triggered permeable flow. Partial melting of silicates may be necessary for this process. The high melting temperature of MgSiO_3 raises doubts about whether the heat sources from short-lived decay systems are sufficient to melt the E-chondrite-like planetesimals. This study present high pressure melting experimental results on Enstatite chondrite Sahara 97 096 and computerized tomography analyses of metal segregation

under various conditions. Thermodynamic calculations indicate that heating by the decay of the ^{26}Al - ^{26}Mg system can sufficiently increase temperatures to melt over 20 % of the silicate in Sahara 97 096, thereby initiating metal-silicate segregation. We infer that the parent body of Sahara 97 096 was likely smaller than 12 km, where efficient heat conduction kept the planetesimal cold enough to avoid thermal metamorphism. Impactors contributing to the accretion of the proto-Earth should have been larger, potentially undergoing “core-mantle” differentiation. Large planetary embryos, comparable in size to the Moon, are expected to have formed a core and a magma ocean very early in their history and would have cooled down subsequently.

Key words: Enstatite Chondrite; the building blocks of the Earth; High pressure and high temperature experiment; differentiation

• 专题 3: 早期地球演化 •

Acasta 片麻岩的长短寿命 Sm-Nd 同位素体系解耦

王达^{1*}, 刘耘^{1,2}

1. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

地球上太古代早期岩石记录的 Hf-Nd 同位素特征分别指示了地球早期地壳两种截然不同的演化历史 (早期地球的 Hf-Nd 悖论)。近期关于这个问题开展的研究认为这是由于早太古代岩石在形成后经历了复杂的变质和热作用, 导致富集稀土的副矿物分解和结晶并伴随开放系统的行为, 使全岩的长周期 Sm-Nd 同位素无法精确示踪古老岩石的源区。于是这引发了一个问题: 由于冥古宙的地质历史重度依赖短衰变周期的 Sm-Nd 体系 (^{146}Sm - ^{142}Nd), 古老岩石中潜在的 Sm-Nd 同位素开放系统行为是否会影响

^{142}Nd 同位素异常的记录? 基于这个问题我们选取了一套世界上最古老的岩浆岩, 4.0~3.7 Ga 加拿大 Acasta 片麻岩样品, 并对其受到强烈 Sm-Nd 同位素扰动的磷灰石单矿物进行了高精度的 ^{142}Nd 同位素分析。结果显示, 磷灰石的短寿命 ^{142}Nd 同位素体系并未受到明显的扰动, 这意味着在古老岩石中存在 ^{142}Nd - ^{143}Nd 的解耦, $^{142/143}\text{Nd}$ 协同演化的同位素模型可能无法准确记录冥古宙壳幔分异的年龄与模式。

关键词: ^{142}Nd ; 冥古宙; 早期地球

• 专题 3: 早期地球演化 •

扬子克拉通北缘古元古代岩浆事件及构造背景: 锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征

卢山松¹, 凌文黎^{2*}, 邱啸飞¹, 段瑞春¹

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

古元古代是全球地质历史上重要的构造-岩浆事件峰期之一, 包括超大陆的形成和裂解。目前, 虽然在超大陆重建方面取得了一定的进展, 但对于其形成和演化历史仍然存在争议。位于扬子克拉通西北缘陕南汉中碑坝地区, 出露了以后河杂岩为代表的前寒武纪基底岩系。本次研究对后河杂岩开展了系统的同位素年代学和元素地球化学研究。后河杂岩经历了高角闪岩相-麻粒岩相高级变质, 对其进行的锆石微区原位 U-Pb 同位素定年结果表明, 其原岩形成于 $(2086 \pm 10) \text{ Ma} \sim (2119 \pm 10) \text{ Ma}$, 四件锆石样品 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的加权平均年龄为 $(2106 \pm 26) \text{ Ma}$, (MSWD=2.3), 与全球范围内 Columbia 超大陆的聚合时间相当。后河杂岩的原岩为钠质钙碱性 I 型中酸性岩岩, 相对富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有岛弧岩浆岩的特点。样品的 ε_{Nd} 值范围为 $-2.7 \sim 3.1$, 两阶段亏损地幔 Nd 同位素模式年龄($t_{2\text{DM}}$)为 $2.26 \sim 2.63 \text{ Ga}$ 。较高的 ε_{Nd} 值以及与形成年龄相近

的模式年龄都指示, 后河杂岩主要为新生地壳岩石部分熔融形成, 但部分花岗闪长质岩石的源岩含有部分较老的地壳物质。后河杂岩的地球化学特征显示其形成于活动大陆边缘, 其成因与洋壳俯冲过程中板片发生断离有关。结合样品正的 ε_{Nd} 值及缺乏太古宙继承锆石的特点, 本研究认为后河杂岩可能代表了统一扬子克拉通形成前在洋壳基础上发展进来的独立微陆块, 并将其命名为“碑坝微陆块”。结合已有的扬子克拉通古元古代变质及岩浆事件的研究成果, 本研究认为后河杂岩所属的碑坝微陆块与扬子陆核区可能于 $\sim 2.0 \text{ Ga}$ 发生了碰撞造山事件。该碰撞事件使得碑坝微陆块与扬子陆核拼合, 促使扬子陆块完成了克拉通化, 并可能为 Columbia 超大陆聚合事件的组成部分。

关键词: 后河杂岩; 地球化学; 古元古代; 扬子陆块克拉通化; Columbia 超大陆

基金项目: 国家自然科学基金项目(40873017, 40673025)

第一作者简介: 卢山松(1986-), 高级工程师, 研究方向: 同位素地球化学. Email: lushansong@mail.cgs.gov.cn

*通信作者简介: 凌文黎(1962-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: wlling@cug.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

分子内同位素分馏：地球早期研究的新线索？

刘琪*

中国科学院 地球化学研究所，关键矿产成矿与预测全国重点实验室，贵阳 550081

近年来，多类陨石样品的分析表明，地外天体普遍携带丰富的有机化合物，包括氨基酸、多环芳烃及含氮杂环分子等。随着分析技术的突破，分子内同位素分馏研究为追溯有机物的形成机制与演化路径提供了全新视角，这一进展正在重塑我们对生命起源和太阳系早期物质循环的认知。传统同位素分析侧重于分子整体的同位素组成，而分子内同位素分析技术通过解析同位素在分子内特定位置（position-specific isotope analysis, PSIA）或团簇分布（clumped-isotope）的特征，能够区分不同合成路径的“同位素指纹”。例如，碳质球粒陨石中检测到的羧酸类分子内 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏特征，揭示了其可能通过星际介质中光化学反应或

低温水岩相互作用形成。这些发现对理解地球早期演化具有双重意义：一方面，外源性物质通过陨石、彗星等载体持续输入原始地球，可能补充了地表 C、N、S 等生命必需元素的库存；另一方面，内同位素特征揭示的分子形成温度、辐射环境等信息，为重建太阳系的演化提供了独立约束。因此，建立更系统的同位素分馏分析技术，拓展对多硫、多氧内同位素以及非质量分馏特征的分析能力，势必可以扩展我们对整个太阳系演化（包括地球早期演化）的理解。

关键词：内同位素分馏；分子特征位点；团簇同位素

• 专题 3: 早期地球演化 •

地幔热状态与氧化还原状态演化历史

张方毅*

中国科学院 海洋研究所, 深海极端环境与生命过程研究中心, 山东 青岛 266071

地幔氧逸度 (f_{O_2}) 控制着地幔来源熔体的氧逸度, 进而通过火山脱气作用调节大气组成。因此研究地幔氧逸度的演化历史对我们认识地壳和大气成分演化规律有着至关重要的意义。然而, 地幔氧逸度的长期演化仍存争议。本研究通过整合约 38 Ga 前至今的地幔柱来源科马提岩、苦橄岩及亏损地幔来源玄武岩的综合数据集, 揭示了地幔热力学状态与氧化还原状态的协同演化规律。研究结果表明, 无论是地幔柱来源还是亏损地幔来源的熔体, 其太古宙时期的氧逸度均显著低于后太古宙时期。地幔来源熔体氧逸度随

时间升高的现象, 与地幔潜能温度和熔融深度的系统性降低呈现显著相关性。通过将氧逸度归一化至恒定参考压力 (即潜能氧逸度), 本研究发现自冥古宙以来, 地幔柱与亏损上地幔的氧逸度基本保持稳定。这些结果表明, 长期的地幔冷却作用降低了熔融深度, 提高了地幔来源熔体的氧逸度, 从而促进了大气的氧化作用。

关键词: 氧逸度; 潜能温度; 早期地球; 大气成分演化

• 专题 3: 早期地球演化 •

机器学习恢复太古宙 TTG 片麻岩的形成压力

芦登岗, 刘佳*, 栾志康, 周靖钧, 雷天婷, 杨凯龙

浙江大学, 杭州 310058

TTG 片麻岩是太古代大陆地壳的主要组成部分, 了解他们的熔融压力条件有助于深入认识早期大陆地壳的性质和地球动力学起源。然而, 由于其源岩的不确定性和分离结晶作用的影响, 太古代 TTG 片麻岩的完整熔融压力历史仍不清楚。随着机器学习在地球科学领域的应用, 其为探究压力与成分之间的复杂关系提供了一种有效的方法。结合相平衡模拟, 我们开发了一种基于机器学习的压力计算工具, 利用主量元素恢复太古代 TTG 片麻岩的熔融压力。该工具具有高精度、批处理能力等优点, 并考虑了分离结晶作用, 其可以用于全球数据库以估算岩石的熔融压力。我们首先将模型应用于世界上最古老的岩石

~4.03 Ga 前的加拿大 Acasta 片麻岩, 结果表明它们主要在低压条件下形成 (<0.5 GPa), 厚度约为 20~30 km, 类似于现今冰岛的地壳厚度。此外, 我们将模型进一步应用于全球太古代 TTG 片麻岩, 发现高压型 TTG (≥ 1.5 GPa) 在约 3.8 Ga 首次出现, 并在 3.4 Ga 后显著增加。这些结果与前人计算地壳厚度的变化相一致。考虑到地幔环境温度和双变质带等指标的同步变化, 我们认为全球性板块构造可能在约 3.4 Ga 开始启动。

关键词: 太古宙 TTG; 熔融压力; 机器学习; 太古代动力学演化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373044)

第一作者简介: 芦登岗 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 早期地球演化. Email: ldg@zju.edu.cn

*通信作者简介: 刘佳 (1985-), 研究员, 研究方向: 地球内部挥发分. Email: liujia85@zju.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

贵州福泉寒武系牛蹄塘组的元素地球化学特征及意义

林丽^{*}, 庞艳春

成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059

贵州福泉地区寒武系底部牛蹄塘组多金属层位富集大量的管状化石。元素地球化学特征表明, 该层位的地球化学特征有别于其上下层位: 牛蹄塘组 Ba 等微量元素含量、Sr/Ba 比值、Th/U 比值特征表明, 多金属层层位的样品具有热水成因的沉积岩或沉积物特征; 稀土元素的测试结果显示, 本区多金属层位处的样品出现了明显的正 Eu 正异常值, 具有典型热水沉积特征; 在 K_2O-Rb 图上投点结果表明, 沉积时期的古海洋环境中有火山物质的混入; 牛蹄塘组中的磷质含量由下到上是递减的, 磷矿岩段和多金属层中

的磷质含量最高; V/Cr 比值、V/(V+Ni) 比值显示, 牛蹄塘组沉积时期海水中的氧含量是变化的, 由缺氧-贫氧-氧化的沉积环境, 甚至局部时间段出现短暂的富氧条件。因此, 推测牛蹄塘组沉积早期, 区域上存在深部热液活动, 带来了丰富的微量元素, 而局部时间的充氧事件为生物的牛蹄塘组生物的出现带来了较好的氧气条件。

关键词: 贵州; 寒武系, 牛蹄塘组; 元素地球化学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971108)

第一作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

*通信作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

类地行星早期大气的多组分逃逸模拟

王子琦¹, 刘耘^{1*}, 周游², 刘亦煊²

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学, 成都 610051

流体动力学逃逸对早期行星表层的物质储库以及热演化过程有着不可忽视的影响。在太阳系演化早期, 年轻太阳的极紫外 (EUV) 辐射通量可高出现今太阳水平两个数量级。类地行星大气吸收年轻太阳的高能 EUV 辐射, 发生流体动力学逃逸。流体动力学逃逸过程会导致剧烈的大气物种丢失率, 等同、甚至高于碰撞事件; 与此同时, 大气逃逸过程本身带走地表热量的功率, 可能显著高于同时期的热辐射。

水蒸汽作为类地行星大气参与流体动力学逃逸的典型物种之一, 在类地行星增生末期, 为岩浆洋冷凝去气过程所大量释放、扩散进入高层大气。大量的水蒸气吸收高能 EUV 辐射发生光解、进而逃逸。这一逃逸过程被认为是造成金星大气失控温室

效应的主导机制, 导致金星在过去漫长的地质时间中演化出了如今的高温地表。而地球则被认为, 冥古宙时期原始水海洋的形成, 及时终止了这一剧烈的大气水逃逸过程, 为形成我们现今的宜居环境创造了条件。

大气氢的剧烈逃逸会“拖拽 (drag)”其它更重的大气组分一同发生逃逸。因而, Ne、Ar 等原本不易发生逃逸的大气重组分, 会随富氢高层大气一同发生向星际空间的逃逸。这一过程导致的非放射成因惰性气体同位素质量分馏过程, 为我们通过数值模拟回溯早期大气的流体动力学逃逸场景提供了制约。

关键词: 行星大气; 大气逃逸

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFF0807500)

第一作者简介: 王子琦 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 行星大气逃逸. Email: wangziqui@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 刘耘, 研究员, 研究方向: 稳定同位素分馏的理论计算、计算地球化学和行星增生动力学. Email: liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

水诱导的地幔反转与第一次大氧化事件

吴忠庆*

中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

跟生命和板块运动一样, 大陆也是地球所特有的。岛弧模型和地幔柱的洋底高原模型是大陆起源的两个主流模型。相比较岛弧模型, 地幔柱模型能更好地解释太古宙大陆的特征, 但该模型在回答太古宙陆壳源区富水这一关键特征上遇到了困难。我们提出的水诱导的地幔反转模型比较好地解决了这个困难, 同时还能解释太古宙多个未解之谜, 包括浅部地幔的氧化。水诱导的地幔反转描述了地球早期由岩浆洋演化导致的特殊深部水循环。在地幔发生整体熔融的情况下, 高压下的物性研究表明结晶的地幔浮在岩浆洋中部, 将岩浆洋分成外面和基底两个岩浆洋。由于下地幔矿物含水能力低, 随着岩浆的结晶, 最初含一定量水的基底岩浆洋越来越富水, 水降低了基底岩浆洋的密度, 当水富集到一定程度后, 基底岩浆洋的密度不再比上覆地幔高, 基底岩浆洋会出现重力失稳而形成地幔反转(超级地幔柱), 该反转将水带到地球浅部, 促进大陆和克拉通地幔岩石圈等的形成。因此太古宙大陆是基底岩浆洋演化的产物, 当地幔反转耗尽基底岩浆洋后, 太古宙型的大陆不再产生, 太古宙末期对应着大

陆形成机制的转变期, 水诱导的地幔反转可以自然地解释为什么太古宙前后的大陆有完全不同的特性。

水诱导的地幔反转不仅能形成大陆, 同时还能促成浅部地幔的氧化, 是第一次大氧化事件的关键驱动力。高压下硅酸盐熔体中的二价铁会发生歧化反应, 生成的铁进入地核后, 基底岩浆洋富集三价铁。水诱导的地幔反转将富含三价铁的物质带到地球浅部, 氧化上地幔。大陆的形成和上地幔氧逸度的变化都是水诱导的地幔反转的效应, 它们在时间和空间上是相关的, 这种相关性确实得到了地质数据的支持。该图像也能解释太古宙末期是上地幔氧逸度变化最快的时期, 地幔反转下大量大陆在太古宙末期形成, 上地幔变得越来越氧化, 在水诱导的地幔反转这个关键驱动力及其它地质和生物过程的共同作用下, 地球最终在太古宙结束后不久诱发了第一次大氧化事件, 地球的大气出现可观的氧气。

关键词: 第一性原理计算; 早期地球; 前板块构造; 高温高压物性; 熔体

• 专题 3: 早期地球演化 •

北大别木子店地区~3.5 Ga TTG 片麻岩的识别及其地质意义

高世新^{1*}, 杨雄¹, 王达¹, 邱啸飞², 刘耘^{1,3}

1. 成都理工大学, 成都 610059;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430000;

3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

北大别构造带位于扬子克拉通北缘, 是其造山带的重要组成部分, 被认为可能代表了下地壳及其部分熔融的产物。本文对木子店地区出露的太古宙 TTG 片麻岩进行了全岩元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析, 目的在于揭示其成因机制, 为扬子克拉通地壳演化提供新的证据。研究结果显示, 新识别出的 TTG 片麻岩年龄为~3.5 Ga, 锆石 Hf (t) 平均值为 -4.7 ± 3.3 , 两阶段 Hf 模式年龄为 (4.12 ± 0.2) Ga, 表明木子店~3.5 Ga TTG 片麻岩可能是由更

加古老的地壳物质改造形成的。本文新识别出的 TTG 片麻岩与崆岭杂岩最古老岩石的对比结果显示, 木子店地区 TTG 片麻岩的形成时代老于崆岭杂岩, 且岩石类型也存在明显差异, 表明扬子克拉通可能由各自独立的微陆块古陆核组成, 并且木子店片麻岩杂岩可能是比崆岭杂岩更加古老的结晶基底。

关键词: 木子店; TTG 片麻岩; 地壳物质; 崆岭杂岩

• 专题 3: 早期地球演化 •

金属-硅酸盐分异过程的计算模拟研究

钟忞翰¹, 高才洪^{1*}, 刘耘^{1,2}

1. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

核幔分异是类地行星早期演化中最为关键的地球化学分异事件之一, 其动力学过程直接决定了行星圈层结构(金属核-硅酸盐幔)的形成。精确厘定核幔分异的物理化学条件(如温度、压力、氧逸度等), 是重建行星早期岩浆洋演化模型的基础。然而, 目前对金属熔体从硅酸盐熔体中的分离机制(如迁移速率、相界面行为)及其主导控制因素(温度、压力梯度、熔体粘度)仍缺乏系统性研究。为此, 本研究基于第一性原理分子动力学模拟, 以整体地球成分(Bulk Earth)为初始体系, 构建了原子级精度的高温高压熔体模型, 通过系统模拟不同温压条

件下金属-硅酸盐熔体的相分离动力学过程, 定量研究了核幔分异的临界温压条件(如液相分离阈值、分异速率与温压的函数关系)。研究表明: 岩浆洋的冷却速率可能是控制金属核形成时间的核心参数; 行星初始成分的氧逸度差异或为类地行星核幔分异程度及圈层结构分异提供关键解释; 该模型框架可进一步拓展至火星、月球等太阳系天体的演化差异性研究, 为行星形成理论的普适性约束提供新的数值工具。

关键词: 核幔分异; 岩浆洋演化; 相变

第一作者简介: 钟忞翰, 本科生, 研究方向: 地球化学, Email: 1992931930@qq.com

通信作者简介: 高才洪, 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学, Email: gaocaihong@cdut.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

黄铁矿微量元素重建埃迪卡拉纪陡山沱组 甲烷异常释放事件

陈 粲*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430000

海底甲烷水合物储量巨大, 在其失稳并释放出异常多数量甲烷的过程中, 甲烷的厌氧氧化过程会在海洋沉积物中产生一系列沉积学、元素地球化学和同位素地球化学变化, 并留下相应的地质记录。同时, 作为超级温室气体的甲烷也会很大程度的影响地球气候变化。在漫长的地质历史演化过程中, 地球曾经历过多次大大小小的冰期-间冰期旋回, 海平面的下降引起的静压力降低有可能触发多次古海洋甲烷水合物的失稳。因此, 厘清甲烷事件在地质历史时期的记录以及所带来的环境影响, 将为全球气候变暖起到“以古示今”的重要启示作用。黄铁矿作为硫酸盐驱动甲烷厌氧氧化作用 (SD-AOM, sulfate-driven anaerobic oxidation of methane) 的重要自生矿物之一, 能够稳定保存于地层之中并记录其形成时周围的孔隙水化学条件。甲烷释放后的一系列微生物参与的地球化学过程对某些营养型微量元素有着特定的需求, 而这些特征性微量元素将被记录于同时形成的黄铁矿之中。为探索黄铁矿微量元素作为甲烷释放指示指标的运用, 本研究前期通过印度洋安达曼海和我国南海神狐海域样品黄铁矿微

量元素和 Ni 同位素数据, 发现由于 SD-AOM 中的逆产甲烷作用对 Ni 和 Co 的需求, 使其富集在随后沉积的黄铁矿中, 因此, SD-AOM 主导产生的黄铁矿富集 Ni 和 Co。黄铁矿 Ni 同位素测试发现 AOM 主导产生的黄铁矿拥有更低的 Ni 同位素值, 验证了 AOM 主导产生的黄铁矿记录了逆产甲烷作用这一推论。本研究后续将该指标进一步运用于古海洋中, 通过华南青林口剖面埃迪卡拉系陡山沱组样品的黄铁矿微量元素数据, 发现并恢复了三次甲烷释放事件, 分别出现在陡山沱组底部、中部和顶部。可能与 Marinoan 和 Gaskiers 冰期海平面下降导致气体水合物失稳有关。黄铁矿微量元素揭示的甲烷信号与剖面内局部发现的极低碳同位素组成高度吻合, 证实该方法可作为古甲烷释放事件的有效示踪指标。该研究对理解古海洋甲烷释放调控机制、海洋氧化还原波动、大气氧含量演变及生物演化具有新启示。

关键词: 黄铁矿; 微量元素; 甲烷水合物; AOM; 埃迪卡拉纪

• 专题 3: 早期地球演化 •

核幔分异过程中成核金属熔体的成分演化

蒲畅¹, 景志成^{1*}, 高秀进¹, 吴正阳¹, 杜治学²

1. 南方科技大学, 广东 深圳 518055;

2. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

通过比较全硅酸盐地球 (BSE) 和 CI 碳质球粒陨石中的 Mg/Si 比值, 发现地球上地幔中 Mg 和 Si 的含量可能存在一定的亏损。这一缺失的 Mg 和 Si 元素可以通过以下几种机制解释: (1) 这两种元素具有一定的挥发性, (2) 在地幔-地核分异过程中, Mg 和 Si 同时溶解进入到地核内, 或 (3) 下地幔中可能存在一些富含这些元素的隐藏储库。为了探讨这些可能性, 我们利用多面顶大压机和激光加热金刚石压腔实验系统, 在 2~100 GPa 和 2000~5300 K 的温度和压力条件下, 开展了高温高压条件下 Si、O 和 Mg 的金属-硅酸盐分配实验。通过结合我们的实验数据与前人研究成果, 我们建立了一个自洽的热力学模型, 该模型同时考虑了金属熔体中 Si、O

和 Mg 之间的元素相互作用。利用该模型, 我们可以更精确地计算成核金属熔体在核幔分异过程以及随后可能发生的冷却阶段中轻元素的分配和演化情况。我们的实验结果表明, 在核形成过程中大量的 Si 和 O 可能从岩浆洋中进入到成核金属熔体内, 随后这些高温的金属熔体在下沉穿过低温的固体地幔时以 SiO₂ 的形式析出。然而, Mg 在成核金属熔体中的显著溶解需要在大型天体撞击时, 岩浆洋达到显著高温平衡的条件下才可能发生。这些发现为探讨地球深部主量元素 Si, O 和 Mg 的分布和演化提供了重要的实验和理论依据。

关键词: 核幔分异; 岩浆洋; 元素分配

第一作者简介: 蒲畅, 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验矿物物理. Email: 11930803@mail.sustech.edu.cn

*通信作者简介: 景志成, 副教授, 研究方向: 地球与行星内部物理. Email: jingzc@sustech.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地壳-地幔的形成与演化

刘鹏^{1*}, 崔夏红², 李潮峰¹, 彭澎¹, 郭敬辉¹

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 河北地质大学, 石家庄 050031

冥古宙时期地球圈层的分异和演化过程极大影响了随后地壳、地幔、大气的成分演化和物质演化, 但受限于地球早期的高热流环境、强烈的陨石轰击, 以及复杂的变质变形作用的叠加, 与这一时期相关的一系列涉及地球早期地壳-地幔的形成机制、早期地幔-地壳的最终命运等本源问题也一直众说纷纭、未有定论。考虑到早期锆石 Lu-Hf 等长周期放射性同位素并未记录可信的 Lu-Hf 同位素亏损的信号, 有学者提出至少在 38 Ga 以前地幔仍呈球粒陨石质特征, 即地球早期不可能有亏损地幔和大陆地壳的存在。但基于 Lu-Hf 等长周期放射性同位素反演地幔演化过程, 其中的一个重要假设是这些锆石所赋存的地壳具有短暂的居留年龄, 即岩浆从地幔分离出来之后, 其 Lu-Hf 同位素未经长期演化, 就很快被锆石记录下来, 但冥古宙-始太古代的镁铁质地壳常常可以在封闭体系下保存超过 10 Ga, 因此这一假设并不成立。加之锆石所对应的源区常呈富集特征, Lu-Hf 等长周期同位素体系往往并不能很好地揭示早期地幔和地壳的形成和演化规律。近二十年来灭绝核素 ^{146}Sm - ^{142}Nd 体系的数据日渐增多, 以此为依据, 迄今学界共提出多种理论用以揭示冥古宙地幔-地壳的最终命运, 如 (1) 太古宙晚期均一化模式, (2) 冥古宙地壳快速生长-快速循环模式, 和 (3) 冥古宙地幔长期封闭隔离模式。然而, 以往所使用的数据中, 中太古代明显缺失, 严重依赖始太古代数据, 而始太

古代数据又强烈不均一。对这些大量的始太古代数据进行分析显示, 其标准偏差 (2S.D.) 与标样数据的标准偏差高度正相关, 且一些极高正异常的 ^{142}Nd 数据并未在随后的研究中得到复现, 因此始太古代高度变化的 ^{142}Nd 值可能仅仅是测试分析所致, 并不能可信地指示早期地幔的高度不均一性。针对明显缺失的中太古代数据, 通过对华北克拉通冀东地区的 3.1 Ga 斜长角闪岩进行了 ^{142}Nd 分析, 更新后的全球数据并未表现出 ^{142}Nd 异常随时间逐渐减小的趋势。因此 ^{142}Nd 和 ^{143}Nd 数据分布更可能指示: 冥古宙亏损地幔可从 4.4 Ga 一直封闭保存至 2.7 Ga, 在此期间不受或较小受到地幔对流均一化的影响。考虑到华北克拉通曹庄地区, 北大西洋克拉通 Saglek、Isua 地区, Abitibi 等地区的幔源岩石具有相近的 $^{142/143}\text{Nd}$ 演化规律, 这可能指示它们起源于相同的冥古宙亏损地幔源区。由于多数古老幔源岩石由 ^{142}Nd 和 ^{143}Nd 联合限定的地幔亏损时间均在 4.4 Ga 前后, 且部分岩石所对应的地幔源区 Lu-Hf 和 Sm-Nd 体系明显解耦, 而下地幔布里奇曼石是目前已知的唯一可以造成 Hf-Nd 体系解耦的硅酸盐矿物, 因此冥古宙亏损地幔的形成可能与 4.4 Ga 前后形成月球的大碰撞导致的岩浆海事件有关。

关键词: 冥古宙; 亏损地幔; 灭绝核素; 华北克拉通; ^{142}Nd

• 专题 3: 早期地球演化 •

分子云中氮同位素分馏的理论计算

薛江^{*}, 李春辉

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

氮元素有两种稳定的同位素： ^{14}N 和 ^{15}N 。在地球大气中 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 为 272, $\delta^{15}\text{N} = 0$ (以地球大气为标准), 地球地幔的值约为 $\delta^{15}\text{N} = -5\text{‰}$, 并且现今太阳系内几乎所有硅酸盐储库的 $\delta^{15}\text{N}$ 分布在地球大气值附近。太阳风中的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 为 200 ± 55 , 基于太阳风推断的原太阳星云气体的估计值 $\delta^{15}\text{N} = (-390 \sim -370)\text{‰}$, 在较大范围内局部星际云的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比值可以达到 400, 基于对彗星 HCN 分子的光谱分析, 推断彗星的 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比值为 323 ± 46 , 木星大气的 $\delta^{15}\text{N} = (-375 \pm 160)\text{‰}$, 在一些星际固体尘埃颗粒 (IDPS) 中发现了相比于地球值 (SMOW 样品) 更大的 $\delta^{15}\text{N}$ 值, $\delta^{15}\text{N} = 480\text{‰}$ 。人们推测造成太阳系中如此大的 N 同位素比值差异的原因之一可能是不同含 N 分子

在分子云中分馏导致的, 这可能反映了早期分子云中 N 同位素组成的不均一性。然而, 现有文献对分子云条件下的 N 同位素理论分馏计算探讨较少, 并缺乏对超冷条件下 Urey 模型的必要校正, 即核自旋校正、振动-旋转耦合校正、振动非谐校正、DBOC 能量校正以及针对 NH_3 分子的翻转劈裂校正等多种情况。将上述因素全部纳入考虑后, 我们获得了分子云中常见含 N 分子的同位素分馏因子, 即 RPFR 值。我们计算的同位素分馏值可能会为大量的天文学观测测量的分子云中含 N 分子的同位素比值做出重要参考。

关键词: 分子云; 含氮分子分馏; Urey 模型; 超冷条件

• 专题 3: 早期地球演化 •

地表起伏驱动地球气候与环境长周期变化

曹晓斌^{1*}, 武广辉¹, 李广伟², 李高军², 王孝磊²

1. 南京大学 国际同位素效应研究中心, 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

冰期(或雪球地球)与大气氧化是地球演化史上最具变革性的事件,深刻塑造了其宜居性与生物圈演化。尽管已有大量研究,但这些事件背后的驱动机制仍存争议。有趣的是,冰期与大气氧化在时间上呈现关联性,但二者的关系却鲜有探讨。本文提出“地表起伏(continent ruggedness)”概念,并建立了一种定量评估地球古地表起伏及其对气候环境影响的新方法。研究表明,地表起伏的增加会促进沉积作用、侵蚀过程、化学风化和有机碳埋藏,从而增强 CO₂ 封存与 O₂ 积累,为冰期与大气氧化创造了有利条件。具体而言,我们的重建结果显示,古元古代早期与新

元古代晚期具有比其他地质历史时期更高的地表起伏,这有助于解释雪球地球事件、大氧化事件及新元古代氧化事件的发生。在显生宙时期,地表起伏总体维持较高水平,在晚古生代出现一个峰值,这可能触发了晚古生代冰期与氧化事件。相反,中元古代整体呈现较低的地表起伏,仅在该时期中期出现一个峰值,这为“boring billion”及中元古代氧化事件提供了新的解释视角。这些发现表明,地表起伏是驱动地球表层气候与环境长期演变的关键因素。

关键词: 冰期; 雪球地球; 大气氧化; 地表起伏

• 专题 3: 早期地球演化 •

高温高压下 H 的核量子效应

张一宁¹, 高才洪², 刘耘^{1,2*}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550082;

2. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610059

针对以 H 为代表的含大量轻元素的系统, 核量子效应 (Nuclear Quantum Effects, NQE) 被认为是分子模拟计算与实验观测间偏差的核心原因之一。近二十多年来, NQE 的算法与模拟技术得到了迅猛发展, 已然进入理论与计算化学的主流, 并应用到了地学研究中。以往的 NQE 研究重点关注常压常温与低温体系, 但近年来对于冰的高温高压实验研究发现其

表现出的各类异常性质和行为与 NQE 直接相关。因此, 为进一步明确 NQE 在高温高压下的行为, 本研究采用路径积分分子动力学结合深度势能的方法对以冰为代表的含 H 物质在高温高压开展模拟计算研究。

关键词: 核量子效应; 路径积分分子动力学; 深度势能

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130114)

第一作者简介: 张一宁 (1995-), 博士后, 研究方向: 同位素效应的理论计算与地学应用. Email: zhangyining@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 研究员, 研究方向: 同位素分馏理论. Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

太古宙俯冲作用演化的数据驱动型研究

刘纯韬, 叶辰阳, 张舟*

浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

俯冲作用的演化是地球构造演变的关键环节。然而, 关于俯冲带及其伴随的岩浆活动是否起始于太古宙或元古宙, 学术界一直存在争议。弧玄武岩是俯冲带中重要的岩浆产物, 通常由俯冲板片释放的熔/流体交代的地幔楔部分熔融产生。因此, 弧玄武岩具有亏损高场强元素和富集大离子亲石元素等地球化学特征。这些特征被广泛用于判别弧玄武岩, 并追溯古老的俯冲作用。然而, 这种过于简化的元素-构造分类方法准确率低, 不适用于识别古俯冲作用。针对这一科学问题, 本研究通过构建高维度的机器学习模型来区分弧玄武岩与非弧玄武岩。该模型综合了多种地球化学数据, 包括 Nb/La、Ti、U/Nb、Nb 和 Pb/Nd 等元素比值, 判别准确性达到 95 %。

本研究进一步将该模型用于识别太古宙弧玄武岩。研究表明, 不同克拉通的弧岩浆活动存在显著时间差异。在早太古代, 弧岩浆活动分布于少数克拉通中, 如格陵兰、西澳大利亚的皮尔巴拉以及卡普瓦尔克拉通。从中晚太古代开始, 弧岩浆的分布逐渐扩展至全球多个克拉通, 这一现象表明这一期间地球构造体制可能经历了从停滞盖层构造到移动构造的重要转变。本研究通过数据驱动型研究方法探究了太古宙俯冲作用的演化历史, 为理解地球早期构造演化提供了新的视角。

关键词: 太古宙俯冲作用; 玄武岩; 地球化学大数据; 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072066)

第一作者简介: 刘纯韬 (1994-), 博士后, 研究方向: 地球化学大数据. Email: c.-t.liu@zju.edu.cn

*通信作者简介: 张舟 (1986-), 研究员, 研究方向: 地球化学大数据. Email: zhangzhou333@zju.edu.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地球氧气起源: 矿物-水界面氧元素交换机制

吴逍, 何宏平*, 朱建喜, 林莽

中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

氧气 (O_2) 是生命代谢和发育的必须物质, 在地球早期生命起源与进化过程中发挥关键作用, 氧气的化学起源是当前地球科学与宜居行星探测的热点前沿之一. 我们首次采用同位素示踪技术解剖了矿物-水界面自由基反应, 发现石英等矿物表面的活性化学基团 ($\equiv SiO^\bullet$, $\equiv SiOO^\bullet$) 可与水反应并高效生成过氧化氢 (H_2O_2) 和氧气, H_2O_2 和 O_2 中的氧原子主要源自矿物表面基团 ($\equiv SiOO^\bullet$), 仅少量源自 H_2O , 氧原子在矿物-水-大气三相界面上发生快速交换. 在机械外力作用下, 硅酸盐矿物-水界面可以不断释放

活性氧, 而且这种作用广泛存在于风化剥蚀, 河流冲刷, 构造运动等地质过程中, 构成早期地球非生物氧化剂的重要来源, 并促使早期生命进化以适应氧化环境. 这项研究颠覆了“地球初始氧来源于 H_2O 分解”的传统认识, 揭示了新的产氧化学机制和氧元素地球化学循环方式, 为认识宜居行星岩石圈, 水圈, 大气圈和生物圈的协同演化提供了重要依据.

关键词: 早期地球; 矿物; O_2 ; 氧同位素示踪; 氧交换

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472063, 42202037)

第一作者简介: 吴逍 (1991-), 博士后, 研究方向: 矿物表面物理化学. Email: wuxiao@gig.ac.cn

*通信作者简介: 何宏平 (1967-), 研究员, 研究方向: 矿物学. Email: hehp@gig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

基于动态多维决策的小行星采矿目标优选方法

蒲秀浪¹, 刘耘^{1,2*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院 行星科学国际研究中心, 成都 610000;
2. 中国科学院 地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

针对地球不可再生资源加速枯竭的严峻挑战, 行星矿产资源开发已成为深空探测的战略焦点。小行星因富含铂族金属 (PGMs)、铁镍合金及稀有矿物被视为关键目标天体。然而, 如何从数以百万计的小行星中筛选出高开采价值目标仍面临挑战。现有筛选方法虽已考虑目标天体的轨道参数 (如倾角、偏心率和速度增量 Δv)、物质组成 (如光谱分类: M/S/C 型)、发射窗口优化及经济回报率等静态参数及法律伦理约束, 仍存在以下显著局限: (1) 资源评估不明确性: 受限于光谱/雷达数据分辨率不足及样品数据匮乏, 难以量化资源种类、品位及赋存形态等; (2) 技术整合滞后性: 未充分考虑以核能推进的小型化探测器和人工智能 (AI) 自主勘探导航等颠覆性技术突破对任务成本与可行性的指数级提升潜力; (3) 多学科建模碎片化: 轨道动力学、资源经济学与工程约束等

参数缺乏系统性耦合机制。为此, 本研究拟提出小行星采矿目标动态多维决策支持系统 (Dynamic Multidimensional Decision Support System for Asteroid Mining Target Selection, DMDSS-AMTS), 通过多源数据融合 (如光谱、雷达和陨石)、经济价值建模 (如金属当量系数)、工程风险分级 (如尺寸大小、风化层厚度和自转周期)、技术演化预测 (如蒙特卡洛模拟) 及多准则决策优化 (如 AHP-熵权法), 创新性构建 “资源-技术-决策” 动态耦合模型, 突破传统静态参数筛选的局限性。DMDSS-AMTS 系统可为未来小行星采矿任务的目标遴选与规划提供决策支持, 相关工作持续推进中。

关键词: 小行星; 太空采矿; 动态多维决策; 人工智能 (AI); 原位资源利用 (ISRU)

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2024YFF0807500)

第一作者简介: 蒲秀浪 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 1334501926@qq.com.

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 研究员, 研究方向: 理论及计算地球化学. Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn.

• 专题 3: 早期地球演化 •

早期地壳岩浆成分及磷元素丰度的演化： 来自锆石-熔体分配实验的新约束

尚升¹, 林彦蒿^{1*}, Wim van Westrenen^{1,2}, Fraukje M. Brouwer²

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. 荷兰阿姆斯特丹自由大学地球科学系, Amsterdam 081 HV
Netherlands

锆石是地球早期地质过程的最古老见证者,其微量元素和同位素组成是了解冥古宙和太古宙地壳演化条件的主要窗口。针对早期地壳成分演化、构造体制转变时间及生命起源元素供给能力等重大科学问题,本研究通过高温分配实验与全球锆石大数据分析相结合,系统解析磷(P)元素在锆石-熔体体系中的分配行为及其对岩浆成分演化的约束。结合 4 792 颗天然锆石的微量元素数据库,建立了实验分配系数约束下的岩浆成分演化历史。本研究通过锆石-熔体分配实验,定量研究了 P 含量对锆石-熔体分配系数的影响,重点关注铝(Al)、锂(Li)和 P 的分配系数。实验结果表明,锆石中 P 含量显著改变 Al 和 Li 等关键元素的分配行为,其中铝分配系数(D_{Al})与锆石 P 含量呈线性正相关($\log D_{Al}=0.0008C_P-2.87$), Li 分配系数(D_{Li})呈负相关($\log D_{Li}=-0.0019C_P-1.41$),而 P 本身的分配系数以及其他微量元素的分配系数与 P 含量无关。基于实验结果,我们重新评估了冥古宙岩浆的铝饱和指数(ASI)以及 P 和 Li 含量。研究表明,冥古宙-早太古宙(>3.6 Ga)岩浆铝饱和指数 ASI 普遍低于 1.0 (均值 0.85 ± 0.15),较前人模型低

0.5,表明早期岩浆源区以火成岩原岩为主。首例过铝质岩浆(ASI>1.1)出现于 3.6 Ga,标志着沉积物熔融事件在此后启动,为板块构造体制转变提供了精确的时间约束,支持了从以垂直运动为主的构造模式向伴随沉积物部分熔融的水平构造模式的转变发生在该时间之后的假说。进一步分析发现,古岩浆 Li 浓度计算值高达 $(1000\sim 2500) \times 10^{-6}$,远超现代陆壳均值($\sim 20 \times 10^{-6}$),暗示太古宙锆石中 Li 可能经历后期低温改造或流体作用的影响;与此形成对比的是,岩浆 P 含量 $(1900\sim 400) \times 10^{-6}$ 自 4.4 Ga 以来保持稳定,其浓度与现代地壳相当,表明早期地壳已具备维持生命起源所需的 P 元素持续供给能力。本研究通过实验岩石学与大数据的交叉验证,为理解早期地球岩浆成分演化提供了新的视角,揭示了 P 在早期地球地壳中的丰度及其对岩浆成分的潜在影响,为探索早期地球的构造模式和生命起源提供了重要线索。

关键词: 锆石-熔体分配; 铝饱和指数; P 丰度; 早期地壳演化

• 专题 3: 早期地球演化 •

超热地核的产生与地磁场的启动

周游*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

探究行星如何冷却是地球和行星演化的一个基本问题。对类地行星而言, 通常所有重要的地质现象都由行星内部的热量驱动, 包括板块俯冲、地幔对流、地表火山活动以及大型矿床的形成等。当行星完全冷却后, 所有地质活动也随之停止。最近的一系列深空探测成果表明, 行星冷却速率的复杂性超出了以往的理解。嫦娥五号的样本显示, 月球正面的热演化历史可能延续至 20 Ga, 而背面的火山活动历史可能长达 2.807 Ga (误差 ± 0.03 Ga), 甚至可能达到 1.2 Ga。火星 InSight 任务的地震数据显示, 火星的核心至今未完全固化, 可能仍存在底部岩浆洋。这些发现提示我们需要重新审视类地行星的热演化历史。本研究系统

模拟了地球增生晚期的所有重大碰撞事件, 包括碰撞角度、速度和碰撞体的质量。本研究得出以下发现: (1) 大规模碰撞事件可导致超热地核的形成; (2) 地核内部的热量分布不均, 自然在地幔边界形成一个热边界层; (3) 这一热边界层的散热过程影响了地磁场的启动。我们产生了以下发现: (1) 大碰撞事件会造成超热地核的形成; (2) 热量在地核内部的分布也是不均匀的, 会在地幔边界天然形成一个热边界层; (3) 热边界层的散热过程影响了地磁场的启动。

关键词: 超热地核; 大碰撞; 地磁场

• 专题 3: 早期地球演化 •

双羧酸在化学演化中的关键作用

蚁瑞钦*

中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

生命的起源是自然科学中尚未解开的重大科学谜题, 长期以来备受关注。根据化石和地球化学证据, 生命至少在 35 Ga 前 便已出现在地球上, 而构成生命的基本有机物质则必然在更早时期形成。理解这些生命必需分子的来源及其如何进一步演化成生物大分子, 是生命起源研究的核心问题之一。目前, 科学界对生命所需有机物的来源存在两种主要观点: 一是认为这些有机分子可以在早期地球环境中通过化学合成生成; 另一种观点则认为, 关键的有机物可能并非源自地球, 而是由地外天体 (如陨石、彗星、星际尘埃) 输送至地球, 为生命的萌发提供原始原料。例如, Murchison 碳质球粒陨石 的研究表明, 其中含有大量与生命起源相关的有机物, 包括 氨基酸、碱

基和糖类物质。然而, 陨石所携带的有机物如何在原始地球环境中进一步演化, 最终形成生物大分子并催生原始生命, 仍然是一个未解之谜。值得注意的是, Murchison 陨石中的糖类物质并非传统的单糖, 而是其氧化产物—糖酸。目前, 关于糖酸在生命起源过程中的作用仍缺乏系统研究, 特别是它们如何在原始环境中参与关键生物大分子的合成与自组装。本报告将重点介绍糖酸中双羧酸在原始地球环境中如何参与早期遗传物质的形成, 并进一步考察其手性特性对分子聚合和自组织过程的影响, 探讨双羧酸在生命起源中的潜在作用。

关键词: 生命起源; 聚合反应; 手性特性

• 专题 3: 早期地球演化 •

伽利略卫星热演化分异：多源数据下的比较行星学研究

刘吉鑫¹, 刘耘^{1,2*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

木星的伽利略卫星 (Io、Europa、Ganymede、Callisto) 在共享木星潮汐场与相近形成年龄的条件下, 却呈现热状态极端分异。木卫一 (Io) 的持续剧烈火山活动 (热通量 $>2 \text{ W/m}^2$) 与木卫四 (Callisto) 热演化停滞形成鲜明对比, 这种显著差异使其成为探究行星热力学演化及宜居性的天然研究对象。然而, 早期 Galileo 任务对 Callisto 和 Ganymede 重力场的测量精度有限 (惯性矩误差 ± 0.03), 导致内部结构模型在冰岩混合度 (Callisto 未分化 vs 分层) 与潮汐耗散效率上存在显著多解性。本研究整合 Juno 重力场数据、伽利略号热红外观测数据以及 JUICE/Europa Clipper 任务前瞻模型, 运用比较行星学方法, 深入剖析潮汐耗散、冰层传导与放射性衰变这三种关键机

制之间的竞争关系, 揭示它们是如何驱动伽利略卫星热演化路径的分化, 旨在为理解木星卫星系统的热演化机制提供更为精确且全面的理论依据。未来, JUICE 与 Europa Clipper 任务将通过协同观测, 进一步深化我们对伽利略卫星热演化历史的理解。JUICE 任务将对木星的三颗冰卫星 (Europa、Ganymede、Callisto) 进行详尽观测, 聚焦 Ganymede 的海洋、磁场与宜居性; Europa Clipper 任务则专注于 Europa 冰壳、次表层海洋与生命潜力, 两者将共同提供关于木星系统内冰冻卫星的宝贵数据。

关键词: 伽利略卫星热演化分异; 潮汐耗散机制; 冰层热输运耦合; 多源数据同化

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2024YFF0807500)

第一作者简介: 刘吉鑫 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 行星地质学. Email: liujx@stu.cdut.edu.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 教授, 研究方向: 计算地球化学. Email: Liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

地球超级地幔柱中铝的富集

曹徐岩, 胡清扬*

北京高压科学研究中心, 北京 100193

我们在 25~123 GPa 压力范围内利用金刚石对顶砧成功合成了富铝布里奇曼石。实验表明, 随着压力升高, Al^{3+} 对布里奇曼石中晶格阳离子的取代效应逐渐增强: 当压力超过 66 GPa 时, Al 几乎占据了阳离子的一半, 在核-幔边界温压条件下, 其晶体化学组成演化为 $(\text{Mg}_{0.5}\text{Al}_{0.5})(\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{0.5})\text{O}_3$ 。理论计算发现, 布里奇曼石的两个阳离子位点都有利于 Al^{3+} 耦合取代。在 123 GPa 和 2 400 K, 观察

到钙钛矿与后钙钛矿相共存, 后钙钛矿相可以安全地保留到环境压力。核-幔边界处铝大量的富集可能会降低硅酸盐矿物的热导率, 从而增强地幔对流中的局部热点效应, 形成维持超级地幔柱所需的临界热异常。

关键词: 富铝布里奇曼石; 核幔边界; 超级地幔柱

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42150101)

第一作者简介: 曹徐岩 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 材料科学与工程. Email: xuyan.cao@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 胡清扬 (1987-), 研究员, 研究方向: 高温高压岩石学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

固体中原子扩散的同位素效应理论 及其地球科学应用研究

李雪芳¹, 刘耘^{2,1*}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学, 成都 610059

固体中同位素扩散效应对揭示地球内部物质迁移机制和限定地质过程时间尺度具有重要意义。本研究系统阐述了固体中原子扩散同位素效应的理论及其在扩散年代学与核幔边界物质研究中的应用。基于量子力学和统计力学, 建立了部分间隙扩散与空位扩散类型中同位素效应的精确理论, 突

破了传统近似处理的局限性。而且通过第一性原理计算, 我们可以定量计算矿物中原子或离子扩散的同位素效应。

关键词: 固体扩散; 同位素效应; 下地幔; 第一性原理计算

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42173021), 国家重点研发计划资助项目 (2024YFF0807500)

第一作者简介: 李雪芳 (1981-), 副研究员, 研究方向: 计算地球化学. Email: lixuefang@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 刘耘 (1968-), 研究员, 研究方向: 计算地球化学. Email: liuyun@vip.gyig.ac.cn

• 专题 3: 早期地球演化 •

光解离过程对土卫六大气氮同位素的限制

王浩天*

中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

厘清土卫六大气初始 N 同位素比值和演化方式可以帮助还原更全面理解泰坦大气的起源与演化。本研究通过结合大气动力学逃逸与光解离理论计算方法, 还原了更全貌的土卫六大气中 N 同位素的非质量逃逸分馏的过程, 为后续研究土卫六起源演化提供

的同位素信号支持。

关键词: 光解离; 大气动力学逃逸; 理论计算; 非质量分馏

• 专题 3: 早期地球演化 •

面向地球内部物质凝聚态性质的高效数据生成： 基于 LLM 代理的自动化计算框架

黄俊鑫，李春辉^{*}

成都理工大学 行星科学国际研究中心，成都 610051

在获取地球内部物质在极端温压条件下的热力学、弹性及输运性质数据方面，传统研究手段存在计算资源消耗高、数据生成效率低等问题，本文提出了一种基于大型语言模型（LLM）驱动的自主研究代理框架。该框架通过设计 LLM 自动化代理系统，融合自动化实验规划、第一性原理计算流程优化与智能数据验证机制，实现从物质建模、参数选择、量子力学模拟到数据整合的全流程自主化。系统采用分层任务分解策略，基于文献智能分析生成地球凝聚态部分的热力学条件假设，并通过动态优化算法自主调度计算资源，显著提

升第一性原理计算工具的计算效率与数据可靠性。与传统人工驱动方法相比，LLM 代理通过自动化错误修正与多尺度验证机制，显著提升数据集生成效率，同时通过迁移学习策略预期实现对稀有矿物相性质的准确预测。这一创新方法不仅可以为地球深部物质演化模型提供高置信度基础数据，也可以为行星科学领域的大规模模拟研究开辟智能化数据生产的范式。

关键词：生成式大语言模型；第一性原理计算；地球

• 专题 3: 早期地球演化 •

Mesoarchean–Neoarchean coupled crust–mantle differentiation followed by gravity-driven lithospheric delamination and subduction initiation in the North China Craton

刘建辉*

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

The geodynamic regime that formed Archean silicic continental crust is unclear. The episodic Archean TTGs (tonalite–trondhjemite–granodiorite rocks) and associated granitoids, with emplacement ages of ca. 2.9, 2.7, and 2.5 Ga, occurred in the Jiaobei Terrane, North China Craton (NCC), provide a continuous record of the formation of the Mesoarchean–Neoarchean silicic continental crust. To investigate the crust–mantle differentiation, crustal reworking and recycling, and geodynamic regime associated with formation of the Mesoarchean–Neoarchean silicic continental crust, we undertook zircon U–Pb dating and Hf–O isotope, and whole-rock major and trace element analysis of Archean TTGs and associated granitoids. The episodic Archean TTGs and juvenile crust coexisted spatially–temporally in the Jiaobei Terrane, indicating Mesoarchean–Neoarchean synchronous differentiation of crust and mantle. In addition, the ca. 2.9 and 2.7 Ga TTGs have an identical Mesoarchean juvenile crustal source and similar mantle-like zircon $\delta^{18}\text{O}$ values, whereas the ca. 2.5 Ga TTGs were derived mainly from younger Neoarchean juvenile crust, indicating removal and replacement of the Mesoarchean juvenile lower crust. Some ca. 2.5 Ga TTGs, granitic gneisses, and sanukitoids have markedly higher zircon $\delta^{18}\text{O}$ values compared with mantle $\delta^{18}\text{O}$ values, which are indicative of Neoarchean supracrustal recycling.

Consequently, we can constrain the geodynamic processes responsible for the formation of the Mesoarchean–Neoarchean silicic continental crust in the Jiaobei Terrane, NCC. Episodic hot upwelling mantle (or plume)–lithosphere interactions at ca. 2.9, 2.7, and 2.5 Ga resulted in coupled crust–mantle differentiation, which produced the TTGs, juvenile crust, and dense lower crustal restites. Subsequently, lithospheric delamination triggered by gravitational instability occurred followed by continental uplift, subduction of altered oceanic crust, and upwelling of asthenosphere and mantle-derived mafic melts. This resulted in extensive anatexis and metamorphism with anticlockwise P–T paths in the middle to lower crust at ca. 2.5 Ga. Furthermore, following the large-scale melting and cooling of the mantle, a thick, stable, cratonic lithosphere had likely developed by the end of the Neoarchean. The geodynamic processes during the Mesoarchean–Neoarchean were diverse, and episodic hot upwelling mantle (or plume)–lithosphere interactions could have been responsible for the formation of Archean silicic continental crust in the Jiaobei Terrane, NCC.

Key words: Archean silicic continental crust; Archean TTGs; Archean geodynamic regime; North China Craton; supracrustal recycling

• 专题 3: 早期地球演化 •

类地行星岩浆冷却过程金属相形成机制

莫冰¹, 朱丹^{2,3,4*}, 刘耘^{2,3,4}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;

2. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

3. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230001;

4. 成都理工大学 行星科学国际研究中心, 成都 610051

金属铁在类地行星玄武岩中很常见, 比如灶神星和月海玄武岩。地幔的整体氧逸度约为 $\Delta IW-2$, 因此金属相也可能稳定地存在早期地球的玄武岩中。不过类地行星玄武岩金属相形成机制至今不清楚。目前假说认为是玄武岩演化过程 FeO 活度的变化, 导致玄武岩金属铁的饱和。本研究根据化学动力学理论, 和玄武岩中 FeO 和 O 传输性质的差异,

提出玄武岩中金属形成的氧化还原反应动力学模型, 并通过计算定量解释月海玄武岩中的金属铁成因, 并为月球基地原位高效制氧, 提供化学动力学理论支撑。

关键词: 金属铁; 玄武岩; 化学动力学; 早期地球; 月球

• 专题 4: 地球与行星科学研究人员如何做好科普科教工作 •

学科融合视域下普通地质学教学的创新与实践： 读本构建构想

尹睿鹏^{1*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

地球科学与行星科学是自然科学的重要组成部分。在新时代背景下, 如何将科学普及与科学教育有机结合, 激发青少年对地球与行星科学的兴趣并培养学科后备人才, 成为重要课题。学科融合视域下的普通地质学读本为科普科教工作提供了新路径, 具有重要的实践意义和可行性。读本教学以跨学科知识整合为核心, 打破学科壁垒, 融合物理学、化学、生物学、环境科学等多学科知识, 构建新型教学模式和内容体系。其优势在于拓展知识广度、提升学习兴趣、培养综合能力, 有效解决传统教材内容单一、案例陈旧、形式枯燥等问题。读本构建遵循以下原则: 科学性: 确保内容科学准确、逻辑结构清晰、案例真实典型, 帮助学生建立完整知识框架; 融合性: 打破学科界限, 整合多学科知识, 采用案例教学、问题探究、实践活动等多元化教学方法; 趣味性: 通过生动有趣的内容、图文并茂的形式和活泼的语言, 增强吸引力和参与感; 实用性: 贴近学生实际, 关注社会热点, 提供实

用知识和技能, 引导学生将所学应用于实际生活。内容框架涵盖地球系统科学、生命演化与环境变迁、资源开发与环境保护等模块, 旨在帮助学生理解地球各圈层的相互作用、生命演化规律以及资源环境问题。编写策略包括: 案例教学: 选取典型地质现象或事件, 引导探究式学习; 实践活动: 设计野外考察、实验模拟等活动, 增强实践能力; 信息技术应用: 利用多媒体和虚拟现实技术, 构建虚拟地质场景, 提升教学直观性和趣味性。学科融合视域下的普通地质学读本是教学改革创新实践, 也是地球与行星科学科普科教的重要工具。通过科研与教育的深度融合, 科研人员能够普及科学知识、弘扬科学精神、激发青少年探索热情, 为培养未来学科后备人才贡献力量。

关键词: 普通地质学; 学科融合; 读本教学; 跨学科思维; 科学普及与教育

• 专题 4: 地球与行星科学研究人员如何做好科普科教工作 •

学科势能向科普动能转化：高校新媒体地学传播的“地质信使”范式

闫俊¹, 张敏^{1*}, 杨梧¹

1. 贵州理工学院 资源与环境工程学院, 贵阳 550025

本研究基于“地质信使”公众号运营实践,系统探讨高校主导建设地球科学类新媒体科普平台的理论基础与实践路径。研究以行动研究法为核心,结合网络民族志与大数据分析,构建了“政策驱动-学科支撑-内容创新-技术赋能”四维模型。建设实践中,平台积极响应《全民科学素质行动规划纲要(2021—2035年)》政策导向,依托贵州“世界地质公园”资源优势,以大学生创新创业项目为载体,历时三年完成从实验室信息平台(2022年)向专业科普平台的转型升级。通过建立“双师指导制”(专业教师+传媒导师)和“内容三审制”(学生初审、导师复审、专家终审),确保科普内容科学性与可读性的有机统一。截止目前,累计发布推文 2000 余篇,内容建构采取“三级矩阵”模式:基础层(矿物/岩石/古生物等学科知识)、应用层(宝石鉴赏/地质灾害防治/资源勘查技术)、价值层(地质精神传承/生态文明建设)。运营数据显示,传播效能在热点关联型推文、争议性议题以及弘扬科学家精神等主题表现较好,如哀牢山地质现象解读推文阅读量达 46 万余次。但同时需把握专业性与通俗性的表达平衡、热点响应与长效价值的定位平衡以及技术应用与人工创作的协同平衡等。揭示了高校在科普

新媒体建设中的独特优势:①学科交叉优势形成“地质+传媒+教育”复合型团队;②学术资源库提供持续内容供给;③实践育人机制实现“科普创作+双创教育”闭环培养。未来将持续升级“四维模型”,形成“TRIP”模式:技术赋能(Technology-enabled)构建智能创作系统,需求导向(Requirement-oriented)建立用户画像数据库,IP 孵化(IP-incubation)开发虚拟数字人科普员,平台拓展(Platform-expansion)打造“公众号+短视频+研学营地”立体矩阵,计划构建“线上传播-线下体验”的立体化科普场景。同时,特别强调在 AI 时代构建“人机协同”内容生产机制,建立公众号为核心范围的地质知识图谱以提升科普内容的准确性与传播效率。本实践研究为高校科普能力建设提供可复制范式:通过整合学科资源、创新传播机制、构建协同生态,有效破解传统科普存在的传播力弱、持续性差等痛点,使账号关注人数增长率显著提升,验证了其推广价值。形成的“四维模型”与“TRIP 模式”对同类平台建设具有参考价值,为新时代地质文化传播与科学素养提升提供高校方案。

关键词: 高校科普; 地球科学; 新媒体平台建设

基金项目: 贵州省省级“金课”结晶学与矿物学实验(2024JKXN0053); 贵州理工学院教育教学改革研究项目: 基于创新性教学的《结晶学与矿物学》课程三维立体模型库及标本库建设、“思政”内涵有机融入《结晶学与矿物学》专业基础课教学研究、碳达峰碳中和背景下高校资源类专业教学改革思考—以《矿产资源勘查学》为例

第一作者简介: 闫俊(1989-), 高级实验师, 研究方向: 矿产普查与勘探. Email: yanjun@git.edu.cn

*通信作者简介: 张敏(1981-), 教授, 研究方向: 矿产普查与勘探. Email: zhangmin@git.edu.cn

• 专题 4: 地球与行星科学研究人员如何做好科普科教工作 •

科学传播的范式革新：技术赋能与公众共创的可持续发展路径

李朋伟¹, 高俊文^{1*}

1. 上海科技馆, 上海 201306

地球与行星科学领域的科研成果对社会可持续发展的重要性日益凸显,但过于专业和深奥的科学研究与公众认知之间仍存在显著鸿沟,尤其在复杂理论和前沿技术的传播过程中更为明显。因此,有必要进一步推动科研人员从“知识生产者”向“科学传播者”转型,构建高效、可持续的科普科教体系。具体总结为如下几个方面:一、明确目标定位。建立以需求为导向的科学传播体系,做差异化科普内容,如青少年群体:通过 XR 技术模拟火山喷发、陨石撞击等场景,激发好奇心,开发“地学科普卡牌游戏”,将岩石类型、构造运动等知识融入互动体验;普通公众群体:针对气候危机、能源转型等热点话题,采用“数据可视化+故事化叙事”手法,制作科普短视频,揭示人类活动对地球系统的影响;政府公务群体:聚焦地质风险预警、资源可持续利用等议题,提供基于科学证据的决策支持报告。二、强化科研人员的科普能力建设。1、做好双轨制培训:邀请专业培训,将论文成果转化为通俗易懂的图文、视频内容;设立“科研人员科普津贴基金”,鼓励参与科技馆常设展区设计和中小学课后科学课程开发等项目,并纳入绩效考核体系。2、可视化工具的应用:掌握开源数据可视化软件和 AI 绘图工具,快速生成交互式数字孪生模型。三、创新科普载体与模式。1、新兴技术驱动沉浸式

体验升级:构建基于区块链技术的虚拟博物馆,用户可通过数字身份参与交互场景;利用深度学习算法分析用户兴趣标签,动态生成定制化知识图谱。2、游戏化与社会传播创新:开发基于区块链的行星资源采集游戏,玩家通过完成科研任务获取虚拟矿物标本,部分收益反哺科研项目;发起地球密码解码者话题,鼓励公众深度参与(如通过气象 APP 记录城市热岛效应),优秀作品由科研团队标注专业解读并推荐至学术期刊可视化专栏。3、跨媒介叙事与艺术跨界:科幻影视 IP 科学顾问制,开发行星科学音乐节等节目。4、特定受众群体精准科普:开发银发族地球健康课堂,创客群体的开源硬件套件等。四、构建协同合作的科教生态系统。科研机构与媒体深度融合,确保报道专业性与传播性平衡;建立全球地球观测众包网络,用公众智慧反哺科学研究。综上所述,未来的科普工作应形成“技术赋能-公众共创-价值共生”的闭环生态。科研人员需突破学科壁垒,善用游戏引擎、生成式 AI 等工具重构知识传播路径,同时通过公民科学项目激活社会智慧。唯有让科学知识渗透至日常生活的每个场景,才能真正实现“人人都是行星守护者”的可持续发展愿景。

关键词: 地球科学传播; 科学普及; 可持续发展

第一作者简介: 李朋伟 (1992-), 工程师, 研究方向: 矿山生态修复、地质矿产、行星地质等.Email: 1336570674@qq.com

*通讯作者简介: 高俊文 (1991-), 工程师, 研究方向: 天文科普教育.Email: cpcst@126.com

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

铟在花岗质熔体中的扩散：对铟成矿的启示

张泽伟¹, 朱仁智^{2*}, 张力^{1,2}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

铟是一种关键金属, 通常作为与花岗岩相关矿床的副产品回收。鉴于其在地壳中的丰度极低, 铟从岩浆源区到矿床的富集倍数需超过 100 倍。铟在硅酸盐熔体中的扩散系数 (D_{In}) 是控制其迁移和富集效率的关键参数, 然而目前尚无关于铟扩散系数的实验数据。本研究利用活塞圆筒压机, 采用扩散偶法和铟片溶解法, 在 1073~1873 K 和 0.5~1 GPa 条件下, 获得了铟在含水量高达 6.5% 的花岗质熔体中的扩散系数, 系统揭示了水含量、温度和压力对铟扩散行为的影响。本研究通过 LA-ICP-MS 测定实验产物中的铟含量曲线, 使用误差函数拟合提取铟的扩散系数。实验结果表明, 在 1473 K 和 1 GPa 条件下, 随着熔体水含量从 0 增加到 6.5% 时, 铟的扩

散系数增加了约 3600 倍; 在 1 GPa 的无水熔体中, 温度从 1473 K 升至 1873 K 时, 铟的扩散系数增加了 34 倍; 在 1673 K 条件下, 压力从 1 GPa 降至 0.5 GPa 时, 铟的扩散系数增加了 3 倍。铟的扩散系数属于极慢的范畴, 表现为 $D_{\text{Mo}} < D_{\text{In}} \approx D_{\text{Sn}} \ll D_{\text{H}_2\text{O}} < D_{\text{Cu}} \approx D_{\text{Ag}}$ 。结合铟在含氯流体与花岗质熔体之间的极高分配系数, 缓慢的扩散速率会显著限制铟从熔体向流体的迁移, 导致其在流体中的富集程度低于热力学平衡分配所能达到的理论值。此外, 铟与锡扩散系数的显著相似性可能有助于解释铟-锡的共生成矿作用。

关键词: 铟扩散; 花岗质熔体; 铟成矿

第一作者简介: 张泽伟 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: zeweizhang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 朱仁智 (1991-), 副研究员, 研究方向: 行星与地球化学. Email: renzhizhu@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

NaAlSi₃O₈-H₂O 超临界地质流体体系的热力学建模

高慧^{1*}, 张志刚^{2,3}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

随着温度和压强的变化, 共存的两种性质截然不同的流体逐渐趋于相似, 直至形成一种均匀流体, 被称为超临界流体。这种现象在地球内部广泛存在, 在硅酸盐-水体系中尤为常见。超临界地质流体具有特殊的热力学性质, 是地球内部物种循环、能量交换、花岗质成矿系统形成及中深源地震发生的重要介质。超临界流体的形成受其复杂相图的控制, 临界曲线和湿固相线共同约束了超临界流体形成的温压和成分区间。NaAlSi₃O₈-H₂O 体系常作为玄武岩-H₂O 体系和花岗岩-H₂O 体系的简单代表。经过调研发现, NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的临界曲线仍不清晰, 密度数据非常不足, 能够准确预测该体系在临界曲线附近性质的模型也极其缺乏, 目前常用的热力学模型对于超临界流体形成前后的复杂性质几乎没有预测能力。最近, 我们提出了一个适用于超临界流体、覆盖其临界相变区域的新型热力学模型框架: 利用非随机双液模型 (Non-Random Two-Liquid Model) 重新表征了超临界流体的超额混合自由能, 并在必要时用简化的链式聚合反应进一步表征流体中物种变化所带来的自由能变

化。该框架具有形式简单、参数少、能够同时预测多种相平衡关系和密度以及可扩展性强等优点。该框架已成功应用于硅酸盐-水的另一典型体系: SiO₂-H₂O 体系, 并成功拓展至 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系。本模型可以预测 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系在 0.5~2.5 GPa、773~1673 K 的各种热力学性质, 是目前能同时预测溶解度、密度、液液平衡的唯一模型。模型预测 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的第二临界端点为 941 K、1.56 GPa。与密度实验数据相比, 模型最大偏差为 0.05 g/cm³, 平均相对偏差小于 1.1%。与溶解度实验数据相比, 模型的平均相对偏差为 11%。我们对比了 NaAlSi₃O₈-H₂O 和 SiO₂-H₂O 体系的模型预测结果, 发现 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的混溶间隙比 SiO₂-H₂O 大得多。地球早期温度梯度较高的俯冲环境可能更接近 SiO₂-H₂O 超临界流体的形成条件, 而 NaAlSi₃O₈-H₂O 较大的混溶间隙使得俯冲带背景下更易形成该体系的不混溶流体。

关键词: 钠长石-水; 超临界流体; 热力学建模; 第二临界端点; 密度

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702700)

第一作者简介: 高慧 (1997-), 博士后, 研究方向: 计算地球化学。Email: gh0420@mail.iggcas.ac.cn

*通讯作者简介: 高慧 (1997-), 博士后, 研究方向: 计算地球化学。Email: gh0420@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

俯冲带熔流体中铁的氧化还原状态及其对弧岩浆氧化性的指示

王沁霞¹, 张力¹, 倪怀玮^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

板片俯冲过程释放的熔流体是俯冲带物质迁移的重要载体, 可以将板片的地球化学特征通过交代作用传递给地幔楔, 并在弧岩浆中得到体现。目前普遍认为弧岩浆中的水和大离子亲石元素主要来自俯冲板片, 但关于弧岩浆的氧化性究竟是继承自俯冲板片还是由于地幔楔初始熔体的结晶分异仍存在较大争议。俯冲带熔流体的氧化还原性质可能是解决这一争议的关键突破口。

铁作为岩石中唯一的主量变价元素, 在俯冲带氧化性传递过程中的作用尚未得到足够重视。现有的高温高压实验表明, 板片俯冲过程释放的含水熔体和超临界流体可以携带 wt%量级的 Fe, 因此, 查明含水熔体和超临界流体中 Fe 的氧化还原状态对认识俯冲带熔流体的氧化还原性质具有重要意义。我们通过活塞圆筒压机模拟俯冲带温压条件, 探究了 850~1300 °C 和 2.5~3.0 GPa 条件下, 含水熔体及超临界流体中

铁的价态随水含量、温度和氧逸度的变化规律。实验结果表明, 熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值与氧逸度、温度和水含量密切相关。在 950 °C 和 2.5 GPa 条件下, 当体系的氧逸度为 FMQ+1.4 时, 熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值在 0.39~0.56 之间变化; 当氧逸度降低至 FMQ-0.5 时, 含水熔体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值降低至 0.22~0.25。水的加入可显著增加熔体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值。温度的降低不仅可以增加熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值, 还可以放大水对 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值的提升效益。因此, 即便在相对还原的条件下, 俯冲板片在弧下深度释放的含水熔体或超临界流体仍具有较高的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值, 板片熔流体可以通过迁移氧化态 Fe^{3+} 的方式将板片的氧化性传递到地幔楔。

关键词: 俯冲带; 铁价态; 含水熔体; 超临界流体; 氧逸度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330301)

第一作者简介: 王沁霞 (1996-), 博士后, 研究方向: 实验岩石学. Email: qinxia@pku.edu.cn

第一作者简介 (共同一作): 张力 (1991-), 特任副研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: zl12345@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

桂北摩天岭达亮铀矿床磷灰石化学特征 及对铀成矿作用的指示

史竟存¹, 王凯兴^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

达亮铀矿床位于摩天岭岩体西南侧与浅变质岩的接触带上, 为摩天岭岩体最老的富铀矿床。前人对该矿床成矿特征进行了初步研究, 针对达亮铀矿床磷灰石化学特征与铀成矿的关系研究较为薄弱。本文选择摩天岭地区达亮铀矿床成矿前的磷灰石作为研究对象, 开展磷灰石显微结构、电子探针主量元素、LA-ICP-MS 微量元素等方面的研究, 旨在探讨达亮铀矿床成矿前磷灰石的成因, 查明成矿前蚀变流体性质和热液蚀变作用过程, 探讨成矿前蚀变与铀成矿作用的关系。矿相学分析表明, 本次研究的磷灰石呈现不同的明暗区域, 可分为磷灰石 Ap1 和 Ap2。Ap1 颜色明亮表面干净清晰, Ap2 颜色较暗, 表面发育较多的孔洞及裂隙, 局部流体改造痕迹明显并含有少量矿物包裹体。达亮铀矿床磷灰石均具有高 F 低 Cl 的特征, 为典型的氟磷灰石。研究

结果表明, 达亮铀矿床磷灰石 Ap1 为岩浆磷灰石、Ap2 为热液磷灰石。Ap1 源自摩天岭岩体 S 型花岗质岩浆的分离结晶, 而 Ap2 则是 Ap1 经由热液流体改造后的产物。热液流体呈现高温及高氧逸度特征, 为富含 F、 SO_4^{2-} 、Sr 及低含量 Ca 等化学成分的酸性流体。热液蚀变过程是流体诱导的、溶解-再沉淀机制与富 F、 SO_4^{2-} 的酸性流体对 LREE 的优先迁移和沉淀的共同作用密切相关。磷灰石以及在蚀变过程中生成的独居石、磷钇矿等含铀副矿物, 在后期铀成矿阶段均为摩天岭地区的铀成矿作用提供了额外的铀源, 对于理解该地区的铀成矿机制具有重要意义。

关键词: 磷灰石成因; 热液流体; 达亮铀矿床; 热液蚀变; 摩天岭

基金项目: 本文为中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(编号 2023NRE-LH-01)和中国核工业地质局高校科研攻关项目(编号 201619)联合资助成果。

作者简介: 史竟存(1999-), 男, 硕士研究生, 地质学专业. Email: sjc15027717965@163.com。

*通讯作者: 王凯兴(1985-), 男, 副教授, 矿产普查与勘探专业. Email: xy2gmo02@ecut.edu.cn。

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

地球岩浆洋结晶过程中亲铁和亲铜元素在硫化物和硅酸盐熔体间的分配

张明东¹, 李元^{2*}

1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500;

2. Universität Bayreuth Bayerisches Geoinstitut, Bayreuth 095440

“冥古宙硫化物”(Hadean matte)是指在早期地球岩浆洋结晶过程中,由于硫含量达到饱和而分离出的硫化物液体。这种硫化物液体在地球核幔分离过程中起到了重要作用。本研究评估了“冥古宙硫化物”从地幔向地核分异的过程对地球硅酸盐部分中亲铜和亲铁元素(CSEs)丰度的控制作用。通过 1~14 GPa、1300~2100 °C 条件下的实验,测定了 CSEs 在硫化物熔体与玄武质-橄榄岩质硅酸盐熔体间的分配系数。实验获得的分配系数范围(Co: 30~160; Ni: 50~1200; Cu: 40~940; Mo: 20~210; Ag: 50~210; Cd: 20~90; In: 4~60; Sb: 30~150; Re: 3900~30000; Pb: 15~210; Bi: 140~1700; Zn: 0.3~7; Ge: 0.7~7; Ga: 0.1~0.9)可通过压力、温度、硅酸盐熔体和硫化物熔体成分等参数进行定量化描述。将这一参数化模型应用于 75 GPa 深部岩浆洋中的硫化物熔体核-幔分异过程时发现: Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Mo、Ag、Cd、In、

Sb、Pb 和 Bi 等元素被带入地核的比例均低于 10%;而在 10 GPa 的浅部岩浆洋中, Cu、Ag 和 Bi 被带入地核比例可达 50%~80%, 其他 CSEs 则低于 50%。但无论哪种情况, Re 的被带入地核的比例都超过 90%, 这需要后期增生(Late veneer)来解释现今地幔中的 Re 含量。我们的研究结果表明: 如果地球的挥发性 CSEs (Cu、Zn、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Sb、Pb 和 Bi) 是在金属分异基本停止后增生的, 那么硅酸盐地球中这些挥发性 CSEs 相对于同等挥发性亲石元素的亏损模式无法用硫化物熔体的核-幔分异来解释。因此, 前人利用硫化物熔体核-幔分异模型解释硅酸盐地球挥发性 CSEs 亏损的相关研究需要重新审视。

关键词: 亲铁和亲铜元素; 硫化物液体; 分配系数; 冥古宙硫化物; 地球岩浆洋

第一作者简介: 张明东, 博士, 研究方向: 实验地球化学。Email: zhangmingdong18@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者简介: 李元, 博士, 研究方向: 实验地球化学。Email: Yuan.Li@uni-bayreuth.de

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

大洋俯冲带变质流体演化研究：来自西天山含 CH₄ 流体包裹体的定量约束

齐宁¹, 张丽娟^{1,2*}, 张立飞¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

俯冲带变质流体在火山喷发、地震活动及深部碳循环中发挥着至关重要的作用。然而, 目前对俯冲带 C-O-H 变质流体的演化仍缺乏定量约束。本研究以我国西天山高压-超高压变质带中的新鲜榴辉岩和退变质榴辉岩为对比研究对象, 通过对其中含 CH₄ 流体包裹体的系统分析, 定量揭示了俯冲带变质流体的演化规律。基于岩相学研究和 DEW 模型模拟, 我们发现含 CH₄ 的还原性流体主要形成于俯冲进变质的高压-超高压阶段, 并在随后的减压折返过程中逐渐向氧化性流体转变。借助三维拉曼光谱技术, 我们对流体包裹体中 CH₄ 与 H₂O 的比例进行了定量分析。研究结果表明, 新鲜榴辉岩样

品中 CH₄ 与 H₂O 的体积比稳定维持在约 1:3, CH₄ 的重量百分比含量稳定在 0.97%~1.48% 之间; 而退变质榴辉岩则表现出更大的变化范围, CH₄ 与 H₂O 的体积比介于 1:1 至 1:6 之间, CH₄ 的重量百分比含量分布范围更广 (0.57%~11.45%)。这些发现表明, 变质 C-O-H 流体在减压折返过程中可能经历了由 CH₄ 和 H₂O 从混溶态向不混溶态转变的演化过程, 为揭示大洋俯冲带 C-O-H 流体的定量演化提供重要依据。

关键词: 俯冲带变质流体; C-O-H 流体; 三维定量; 不混溶

基金项目: 国家自然科学基金 (42172060, 42472083)、国家重点研发计划 (2019YFA0708501)

第一作者简介: 齐宁 (1994-), 博士生, 研究方向: 变质地质学. Email: 1430067486@qq.com

*通信作者简介: 张丽娟 (1986-), 副研究员, 研究方向: 变质地质学. lijuanzhang@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

二氧化碳对于含碳硅酸盐熔体 SCSS 的影响及其 对于地球深部硫循环的指示

刘康^{1*}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

硫化物饱和条件下硅酸盐熔体中的硫溶解度 (SCSS) 是我们约束地幔熔融过程中硫地球化学行为以及认识深部地幔硫循环的关键参数。虽然目前硫在硅酸盐熔体以及碳酸盐化熔体中的溶解度得到了广泛研究, 但是对于熔体 CO_2 含量对 SCSS 影响的认识仍存在较大争议。基于此, 我们利用活塞圆筒压机在 2 GPa, 1400 °C 的条件下, 系统探究了 CO_2 对于富钙霞石质熔体 SCSS 的影响。实验后产物玻璃 (硫化物饱和) 中的 CO_2 含量利用傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测定, 其含量范围为 1.00% 到 9.46%。实验结果表明 SCSS 随着熔体 FeO 和 CO_2 含量的升高而降低, 并且 CO_2 的效应低于 FeO。鉴于先前基于无碳熔体以及碳酸盐化熔体建立的 SCSS 模型无法很好

地重现我们的实验结果, 我们结合本实验以及前人的实验数据提出了一个新的 SCSS 模型。利用新的模型, 我们估计了全球原始 OIB 岩浆的 SCSS 值 ($(1163 \pm 38) \times 10^{-6}$), 明显低于之前不考虑 CO_2 效应的值 ($(1348 \pm 85) \times 10^{-6}$)。进一步, 结合 OIB 岩浆的产生速率以及密度, 我们估算出 OIB 从深部地幔迁移的硫通量可达 $(6.97 \pm 0.23) \text{ Mt/yr}$ 。此外, 通过对比金伯利岩全岩以及熔体包裹体的硫含量与计算的 SCSS 值, 我们发现硫含量高于 2000×10^{-6} 的金伯利岩很有可能源于一个氧化性并且含硫酸盐的地幔源区。

关键词: 硫溶解度; 熔体二氧化碳含量; OIB; 地球深部硫循环

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

地幔柱背景下榴辉岩熔体-岩石圈地幔反应的实验研究

侯永胜^{1,2}, 李洪颜^{2*}, 张超¹

1. 西北大学 地质学系, 西安 710000;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510000

地幔柱背景下, 榴辉岩熔体在穿越难熔岩石圈地幔过程中地球化学成分如何演化, 目前仍缺乏深入理解。为此, 我们开展了层状接触反应实验工作, 模拟榴辉岩熔体与方辉橄榄岩在 2~3 GPa、1400~1500 °C 条件下的反应, 实验运行时间为 2 小时和 24 小时。实验结果表明, 与初始榴辉岩熔体相比, 反应后残余熔体整体具有较低的 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO 和全碱含量, 较高的 Ni、MgO 含量和 Mg[#], 然而 CaO/Al₂O₃ 几乎保持不变。残余熔体的化学成分受熔体/方辉橄榄岩比例、实验温度和实验运行时间等因素的影响。降低熔体/岩石比例或增加实验温度和运行时间都会导致熔-岩反应程度变大。与平衡状态 (实验时间 24 小时) 相比, 非平衡状态 (实验时间 2 小时) 时残余熔体具有较高

的 SiO₂、FeO 和 MgO 含量, 而 CaO、Al₂O₃ 和全碱含量较低。这表明残余熔体的成分在非平衡状态下受到界面反应 (橄榄石溶解和斜方辉石沉淀) 缓冲, 而在平衡状态下主要受扩散作用控制。基于实验结果, 我们提出了新的两阶段模型来解释夏威夷造盾期母岩浆的成因: 第一阶段, 榴辉岩熔体迁移过程中与岩石圈地幔方辉橄榄岩按不同熔体/岩石比例反应, 在岩石圈地幔深部产生残余熔体; 第二阶段, 残余熔体在地壳岩浆房内与地幔柱橄榄岩熔体按不同比例混合, 从而导致了夏威夷造盾期岩浆中呈现的地球化学多样性。

关键词: 榴辉岩熔体; 岩石圈地幔; 熔体-岩石反应; 夏威夷造盾期岩浆

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

川西龙门山中段磷矿集区深部过程与流体包裹体记录的耦合机制

姚毅^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 何良^{1,2}, 贺天全^{10,11}, 李晓龙^{8,9}, 徐磊^{5,6,7}

1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 长沙 410012;
6. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
7. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 长沙 410012;
8. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077;
9. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077;
10. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;
11. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

川西龙门山中段作为我国磷矿集区的典型代表, 其磷矿床的形成与区域构造活动、深部物质循环和流体动力学过程紧密相关。磷矿作为战略性非金属矿产资源, 对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。因此, 解析川西龙门山中段地区磷矿床的成因及其与地下深部地质过程的相互关联, 对于磷矿资源的勘探与评价具有重要的战略意义。本课题致力于揭示川西龙门山中段磷矿床成矿过程中深部地质活动的角色及其对成矿作用的影响。研究通过综合运用显微测温 and 测压技术、稳定同位素分析以及微量元素地球化学分析等方法, 对磷矿床中流体包裹体的物理化学特性进行了细致的表征。分析结果揭示了流体包裹体中丰富的化学成分和同位素信息, 包括氢、氧同位素比例以及溶解气体和盐类的特征, 为重建古流体的性质和成矿环境提供了关键数据。研究结果表明, 川西龙门山中段磷矿床的形成与地幔热液活动、地壳物质循环

和区域构造应力场的演变紧密相连。流体包裹体的记录进一步证实了成矿流体的地幔源性, 并展示了其在地壳中的演化历程。此外, 同位素和微量元素的特征反映了古气候和古海洋环境的变化, 为理解区域古环境演变提供了宝贵的地质证据。本研究的成果不仅丰富了对川西龙门山中段磷矿床成矿机制的认识, 而且为磷矿资源的勘探与评价提供了重要的地球化学依据。通过耦合深部地质过程与流体包裹体记录, 本研究为理解区域构造活动与成矿作用之间的相互作用提供了新的视角, 并对于揭示地球深部过程对地表地质作用的影响具有重要的科学意义。未来研究将进一步整合多学科数据, 以提高对磷矿成矿作用及其与深部地质过程耦合机制的科学认识, 为磷矿资源的可持续开发和利用提供理论支持和实践指导。

关键词: 川西龙门山中段; 深部地质过程; 地壳物质循环; 微量元素地球化学; 古气候环境重建

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室“四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查”(项目编号: 200751070)、德阳昊华清平磷矿有限公司深部延伸接替工程项目“德阳昊华清平磷矿有限公司 100 万吨/年磷矿延伸接替工程”、“高地应力区深部磷矿开采岩爆孕育过程中应力迁移及微震活动性研究”、“深部磷矿开采突水机理与突水防治理论、关键技术及工程示范”、“南高地应力区磷矿深部开采岩体稳定性精细化识别与靶向调控技术集成”等项目联合资助。

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

软流圈熔体分层结构

张军波^{1*}

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100

板块构造是地球区别于太阳系其他类地行星的独特标志, 不仅塑造了地球的地表形态, 还促进了地球宜居性的演变。软流圈是位于刚性岩石圈之下的塑性圈层, 具有异常低的地震剪切波速, 普遍解释是由地幔部分熔融所导致。最新地震层析成像与矿物物理实验研究发现, 构造板块的运动速度与软流圈熔体比例直接相关: 软流圈中少量熔体的出现可降低其粘滞系数, 提高构造板块运动速度, 并促进软流圈中大尺度晶体定向排列。因此, 软流圈是构建经典板块构造理论的主要组成部分, 理解软流圈的结构及其成因机制对人们深刻认识地球内部物质-能量交换、地震波速各向异性和构造板块运动驱动力等地球动力学过程具有重要意义。

为了更好地了解地球内部的结构和运行方式, 我们开发了一种新的定量计算地幔熔融深度的地球化学指标, 即玄武岩 Y/Yb 比值。钇 (Y) 与铽 (Yb) 在上地幔深度主要赋存在石榴石和单斜辉石 (地球上地幔重要的造岩矿物) 中, 这两种元素在石榴石和单斜辉石中的相容性具有强烈的压力依赖性, 但随压力增加表现出差异性变化, 因此玄武岩 Y/Yb 比值可以指示含石榴石和单斜辉石地幔部分熔融的深度。通过收集整理全球年轻火山岩地区已有的地球物理-地球化学资料, 发现大陆/大洋玄武岩 Y/Yb 比值和相关地区的岩石圈-软流圈边界 (LAB) 或地震低速异常带 (LVZ) 深度数据之间具有明显的正相关性, 由此建立了基于玄武岩 Y/Yb 比值估算地幔熔融深度的简单

压力计。

通过对全球玄武岩地球化学数据的统计分析发现, 不同构造板块喷发的大洋/大陆玄武岩 Y/Yb 比值具有双峰式分布特征, 对应了两种不同来源深度的软流圈熔体 (80~110 km vs. 140~165 km), 这也大致对应于地球物理观察到的双剪切波低速带深度。此外, 该研究团队还发现不同起源深度的软流圈熔体也对应了截然不同的熔体物理-化学性质, 浅源熔体 (80~110 km) 为富硅熔体 (密度低), 深源熔体 (140~165 km) 为贫硅富铁熔体 (密度高、黏度低以及熔体活动性低), 而铁对深源熔体在软流圈 140~165 km 深度的稳定性可能扮演了极其关键的角色。高温高压实验结果也显示, 熔体活动性 ($\Delta\rho/\eta$) 在 110~140 km 压力范围内最强 (相应深度熔体向上迁移), 导致软流圈 110~140 km 深度处几乎没有熔体出现, 这一过程可能是软流圈熔体分层结构形成的重要机制。

软流圈熔体起源深度揭示出全球范围内软流圈中广泛存在双层熔体结构, 主要形成于岩石圈较薄的构造板块之下, 如快速扩张的太平洋板块、大陆边缘、大陆裂谷和裂解的微陆块, 这对我们理解地球内部的侧向地幔对流、板块漂移和克拉通/超大陆裂解具有重要指示意义。

关键词: 软流圈; 低速带; 分层; Y/Yb 比; 板块构造

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

富水熔体和超临界流体电导率实验研究

丁家乐¹, 郭璇^{1*}, 张力¹, 李云国¹, 倪怀玮¹

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

大地电磁测深常常探测到地球深处存在高导异常, 可能是由于含水熔体、富水流体或超临界流体的存在造成的。将电导率实验测量与大地电磁测深相结合, 可以为熔体或流体的成分和体积分数提供约束。目前已有许多含水熔体电导率实验研究, 实验结果显示无论是哪种岩性的熔体, 水都可以显著提升硅酸盐熔体的电导率。但现有的典型硅酸盐熔体电导率的测量仅限于水含量不超过 12% 的情况。另一方面, 也有多项研究测定了对富水流体的电导率, 但实验对象主要关注水含量高于 90% 的情况。因此, 对水含量超过 12% 的含水硅酸盐熔体以及超临界流体的电导率性质的了解目前仍然存在空白。本研究利用活塞圆筒压机结合阻抗分析仪, 在 1.5 GPa、900~1500 °C 条件下, 测量了 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系在水含量高达 35% 时的电导率。实验结果表明, 水对增强硅酸盐熔体的

电导率有显著影响, 加入 10% 的水可使体系电导率提高两个数量级以上, 但当水含量在 10%~30% 范围内时, 这种提升效应有所减弱。超过 30% 的水含量 (即组成属于超临界流体) 时, 电导率的增加变得不那么显著。但即使如此, 超临界流体的电导率也已经达到 40 S/m 以上, 这一数值明显高于文献中典型含水硅酸盐熔体的电导率值。本研究中获得电导率随水含量增加先急剧提升, 而后增加幅度减缓的趋势与其他传输性质如粘度和扩散系数相似。通过将富水熔体和超临界流体的电导率应用于解释 Cascadia 俯冲带的大地电磁测深结果, 表明只需要 3% 的超临界流体的存在就可以解释在 Cascadia 俯冲板块顶部约 80 公里处探测到的 0.5 S/m 的电导率值。

关键词: 含水熔体; 超临界流体; 电导率

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42222203, 42330301), 国家重点研发计划项目 (2018YFA0702700), 中央高校基本科研业务费专项资金 (WK3410000019)

第一作者简介: 丁家乐, 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. xiaoding@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮, 教授, 研究方向: 实验岩石学. hwni@ustc.edu.cn; 郭璇, 特任教授, 研究方向: 实验岩石学. guoxuan@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

底垫基性岩浆的高温去气驱动的上覆岩浆储库中高硅花岗质熔体与互补晶粥体的有效分离：来自大兴安岭中南段北大山岩体岩石学、矿物学和地球化学证据

刘翼飞^{1*}, 江思宏¹, 王丰翔¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所 境外矿产研究室, 北京 100037

高硅花岗岩 ($\text{SiO}_2 > 70\%$) 的形成有赖于熔体-晶体的有效分离, 但其机制依旧存在大量的争论。本次研究以大兴安岭中南段的北大山岩体为对象, 通过详细的岩石学、矿物地球化学及全岩地球化学综合分析, 揭示了两类互补岩性单元: (1) 高硅碱性长石花岗岩 ($\text{SiO}_2 = 73.9\% \sim 76.3\%$), 代表了代表高硅花岗质熔体结晶的产物; (2) 相对贫硅石英正长岩 ($\text{SiO}_2 = 64.6\% \sim 70.6\%$), 含大量基性包体, 代表了熔体亏损以后的碱性长石和石英斑晶残留堆积体。并指出, 在基性岩浆地垫释放大量挥发分至上覆岩浆房的条件下, 可以是高硅熔体和晶粥体发生有效的分离。关键证据如下:

1. 岩石学与矿物学特征

(1) 反环带与熔融结构: 石英正长岩中以碱性长石和石英斑晶为主, 均具有显著的溶蚀结构。基性包体斜长石则具有碱性长石增生边, 具有显微 rapakivi 结构, 显示岩浆储库经历了升温过程。

(2) 矿物中相容元素含量的显著差异: 石英正长岩中碱性长石斑晶具有非常高的 Ba, 并显著高于基性包体中长石的 Ba 含量, 并且是通过去除低 Ba 含量的高硅熔体这种机制来不断提升其斑晶中的 Ba 含量。

石英正长岩中黑云母发生了 F 的显著亏损。F 在黑云母中是相容元素, 因此, 石英正长岩中粒间黑云母非常低的 F 含量表明岩浆储库经历了多次高温熔融及含 F 熔体的去除, 使得石英正长岩中黑云母的 F 发生亏损。

(3) 基性包体中辉石的高硅熔体包裹体。拉曼光谱证实高硅熔体包裹体含 H_2O , 电子探针显示 S、F 和 Cl 均具有较高的含量, 显示底垫基性岩浆快速结

晶中释放了以水为主的挥发分。

2. 互补的元素地球化学特征

(1) 主量元素: 两个岩相的主量元素的线性关系是长石和不同碱性长石比例的控制的。

(2) 微量元素: 两个岩相的全岩 Rb、Ba、Zr 和 Rb/Ba 和 Zr/Hf 显示二者是具有互补的特征。

3. 高硅花岗质岩浆与晶粥体分离的机制

基性岩浆底侵至上覆长英质岩浆储库时使其发生升温的同时也释放高温挥发分 (H_2O 等), 使岩浆储库增加部分熔融程度和熔体分数, 提升熔体比例至流变临界阈值以上 (约 50% 晶体含量), 使熔体能够有效地与晶粥体发生分离。同时, 该机制形成的高硅花岗质熔体的温度显著高于水饱和固相线, 因而能够使快速从晶粥体中分离并上侵至地壳浅部, 不至于在上侵的过程中固结。本次研究同时也指出, 低 Rb/Ba、超球粒陨石 Zr/Hf、低黑云母 F 等化学指标, 结合矿物的反环带和溶蚀结构, 可有效识别高硅花岗质熔体驱离后残留的高温花岗质堆积体。

发表论文: Liu YF, Bagas L, Jiang SH, Wang FX. 2024. Efficient segregation of high-silica granitic melt from complementary cumulate caused by high-temperature gas sparging from mafic recharge. *Chemical Geology*, 669: 122364

关键词: 高硅花岗岩; 熔体-晶体分离; 堆晶岩; 熔体驱离; 基性岩浆补给

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

铜在矿物-熔体-流体之间的赋存和分配: 合成流体包裹体新启示

祁冬梅^{1,2}, 张超^{2*}

1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830017;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069

金属铜的超常富集通常发生于幔源岩浆的分异演化以及后续的岩浆-热液过程, 因此准确测定铜在矿物、熔体、流体(及蒸汽)中的赋存状态和分配系数能够为岩浆分异演化、冷却结晶、流体出溶以及近固相线条件下的水岩反应和含铜矿物沉淀等过程中铜的迁移行为和富集程度提供重要依据。人工合成流体包裹体及其它实验岩石学数据的归纳表明, 铜主要以+1价存在于100 °C以上的成矿热液流体和熔体中, 具体络合形式受到体系成分和温度的影响: Cu在贫 Cl、S 硅酸盐熔体赋存状态为 $\text{CuO}_{0.5}$; 在高温(>300 °C)、酸性、中低盐度热液流体中主要为 $[\text{CuCl}]^0$ 、 $[\text{CuCl}_2]^-$ 和 CuHS^0 ; 在低温(<300 °C)、碱性、中低盐度热液流体中主要为 $\text{Cu}(\text{HS})_2$ 和 CuHS^0 ; 在高盐度卤水中 Cu^{2+} 和 Cu^+ 均易与 Cl 发生络合形成高配位络合物。铜分配系数(D_{Cu})的总体变化趋

势为: $D_{\text{Cu}}^{\text{硅酸盐矿物/熔体}} (0.007 \pm 0.002 \sim 0.82 \pm 0.08) < d_{\text{Cu}}^{\text{铁钛氧化物/熔体}} (0.19 \pm 0.02 \sim 1.72 \pm 0.68) < d_{\text{Cu}}^{\text{流体/熔体}} (2 \sim 2698) < d_{\text{Cu}}^{\text{高盐度卤水/气相}} (2 \sim 7066) < D_{\text{Cu}}^{\text{硫化物/熔体}} (180 \sim 42000)$ 。将 D_{Cu} 数据应用于岩浆演化和斑岩体系铜成矿过程的模拟计算, 结果表明: 含硫和贫硫地幔橄榄岩发生中低比例部分熔融(<10%~25%)可导致 Cu 在幔源性基性弧岩浆中的显著富集; (2) 壳内岩浆-热液演化阶段中, 硫化物饱和和流体出溶等过程会导致 Cu 在残余熔体中发生强烈亏损, 但是硫化物的进一步分解可促使 Cu 在成矿流体中的高度富集。综合天然样品和实验结果表明, 成矿流体需至少携带 $1000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ Cu 才能导致黄铜矿等矿石矿物的沉淀。

关键词: 铜; 熔体; 流体; 赋存状态; 分配系数

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2023D04067)、国家自然科学基金项目(41972055, 42002059, 42122014)、科技部重点研发计划项目(2023YFF0804200)。

第一作者简介: 祁冬梅(1987-), 副教授, 研究方向: 实验岩石学与地球化学. Email: dongmei.qi@xju.edu.cn

*通信作者简介: 张超(1982-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: zhangchao@nwnu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

超临界地质流体的性质和效应

倪怀玮^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

在地球内部, 特殊组分的加入或温度压力的升高使 H_2O 和硅酸盐的混溶性增强, 形成同时含有大量 H_2O 和硅酸盐溶质的超临界地质流体。在以伟晶岩体系为代表的岩浆-热液体系中, 超临界地质流体的形成受控于熔体-流体临界曲线。在以俯冲板片为代表的变质岩体系中, 超临界地质流体的形成受控于第二临界端点。实验结果表明, 伟晶岩体系中硼和氟的存在使得地壳深度可能形成超临界地质流体, 而俯冲板片则要迟至近 100 km 深度才会释放超临界地质流体。富含 H_2O 和解聚结构单元 (单体、二聚体等) 赋予了超临界地质流体独特的物理性质, 包括低密度、低弹性模量、低黏度、高扩散系数和高电导率。

超临界地质流体可以有效迁移包括高场强元素和重稀土元素在内的多种元素。超临界地质流体的化学特征能被交代地幔和幔源熔体继承, 这可以解释弧岩浆氧化性。超临界地质流体可通过旋节分解发生相分离形成熔体网络。俯冲带岩石和伟晶岩中发现的多相流体包裹体可能是超临界地质流体的残留物。超临界地质流体可以造成俯冲板片顶部附近的低速高导异常, 并且可能与中源地震存在联系。超临界地质流体可能在伟晶岩及其矿床的形成过程中起到了关键作用。

关键词: 超临界地质流体; 混溶; 俯冲带; 伟晶岩

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体的结构和输运性质

卢奕帆¹, 孙义程^{1*}, 夏国欣¹, 刘显东², 王国光², 陆现彩²

1. 河海大学 海洋学院, 南京 210024;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

理解超临界地质流体的结构和输运性质对于深入了解它们在俯冲带中的行为至关重要。此前的研究已对源自长英质熔体的超临界地质流体有所了解, 但我们对深俯冲带中由超镁铁质熔体形成的超临界地质流体仍然认识有限。在这项研究中, 我们采用第一性原理分子动力学方法, 系统研究了 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系在 2000~3000 K 和 10 GPa 压力下, 以及水含量范围为 0~70% 的结构、元素自扩散和黏度。我们的研究证实了先前实验观察到的超镁铁质熔体由于溶解水而发生的聚合现象。在 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系中, 水和 OH 主要与 Mg 结合, 形成 $\text{Mg-H}_2\text{O}_n$ 和 Mg-OH 种型。结果表明, 随着水含量的增加, $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系的黏度在开始阶段呈现出快速下降的特点, 随后逐渐降低。在 2000 K 下观察到的黏度快速下降并非由于结构解聚导致, 相反, 在此过程中体系的结构变得更加聚合。驱动黏度快速下降的关键因素是质子化硅酸盐单元比例的增加。超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体的低黏度使其迁移率达到比玄武质熔体高 2 到 3 个数量级, 比碳酸盐熔体高 1.7 到 20 倍。通过将这些结果与源自长英质熔体的超临界地质流体进行比较, 我

们认为, 俯冲带中由不同硅酸盐组分形成的超临界地质流体表现出相似的低黏度, 仅存在细微差异。超临界地质流体促进元素迁移的能力主要取决于这些元素在超临界地质流体中的溶解度。在超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体中, 我们观察到 Q^0 和 Q^1 是主要的种型。在 20% 到 30% 的水含量范围内, 超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体中 Q^n 的比例分布为: $Q^1 > Q^0$ 。然而, 当水含量超过 30% 时, Q^n 含量的顺序变为: $Q^0 > Q^1$ 。 Q^2 的含量相对较低, 而 Q^3 和 Q^4 的含量可以忽略不计。这项研究表明, 超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体不仅含有大量低 Q^n ($n \leq 1$) 种型, 而且还含有很大比例的 OH^- 。在深俯冲带中, 由俯冲洋壳释放流体产生的超临界地质流体将更富集单体 $[\text{SiO}_4]$ 。这种结构有利于与特定元素 (例如高场强元素) 形成络合物, 并促进它们被超临界流体迁移。此外, 超镁铁质熔体形成超临界地质流体过程中大量释放的 OH^- 可能是深俯冲带中 OH^- 的重要来源。

关键词: 超临界地质流体; 第一性原理; 俯冲带; 结构; 输运性质

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0702700)、国家自然科学基金项目 (42373033)、中央高校基本业务费 (B240201111)

第一作者简介: 卢奕帆 (2003-), 本科生, 研究方向: 计算地球化学. Email: 2113010128@hhu.edu.cn

通讯作者简介: 孙义程 (1987-), 副教授, 研究方向: 计算地球化学. Email: sunyicheng@hhu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

巴西 Gilbués 砂矿金刚石形态形貌学特征及其指示

战雨仟¹, 梁伟章¹, 丘志力^{1*}, 丁永康²

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082;

2. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310013

巴西钻石的研究历史可追溯至 18 世纪初期, 近年来, 巴西钻石的研究取得了重要突破, 尤其是超深钻石的发现 (Svisero 等, 1995、2017)。这些钻石含有来自地球深部 (如下地幔) 的矿物包裹体, 为研究地球深部过程提供了直接的证据 (Walter 等, 2011; Pearson 等, 2014)。而金刚石表面微形貌作为一种记录地质信息的天然“档案”, 为揭示其形成演化及搬运沉积过程所经历的地质事件、熔流体性质及环境变化等提供了重要依据。本文对从巴西皮奥伊州 (Piauí State) 南部的 Gilbués 矿区收集的 27.4 ct, 共 86 颗金刚石进行形态形貌特征的观察分析, 结合前人在熔/溶蚀实验等方面的研究成果, 探讨巴西 Gilbués 砂矿金刚石对其经历的地幔形成、岩浆流体溶蚀和搬运沉积等形成过程的指示。通过对样品的深入观察, 我们发现: 1、研究样本以“十二面体+深蚀坑、深蚀沟”等严重熔蚀的地幔熔蚀特征组合为主, “八面体+三角形/锯齿状薄片+三角状台阶面/多阶地+深蚀坑”次之, 反映了巴西 Gilbués 砂矿金刚石在地幔中遭受了高程度的熔蚀作用 (Fedortchouk 等, 2017; 薄昊楠等, 2019; 丁永康等, 2024)。此外, 具有多阶地或三角状台阶面的八面体金刚石表明其可能曾经历过温度小于 1450 °C 的含水碳酸盐熔体的熔蚀作用 (Fedortchouk 等, 2019); 2、Gilbués 砂矿金刚石表面呈现尖底/弧底三角形凹坑、拉长形滴状丘和六边形凹坑组合, 具有富 CO₂ 溶蚀的特征, 指示其可能经历过 X_{CO₂}>0.9 的流体环境; 平底浅三角凹坑、圆形蚀坑等的存在则和富 H₂O 流体溶蚀环境有关, 指示了 X_{CO₂}<0.5 的流体环境 (Fedortchouk 等, 2017;

丁永康等, 2024)。Gilbués 砂矿上述金刚石表面的次生形貌特征记录了携带金刚石金伯利岩岩浆流体环境的变化或者显示金刚石来源不同。此外, 四六面体兼具富 CO₂ 和 H₂O 流体的表面微形貌特征的出现可能表明岩浆流体在上升过程中存在富 CO₂ 和富 H₂O 的转变, 在较高压阶段可能为富 CO₂ 流体, 在近地表为富 H₂O 流体。这些形貌特征为理解金伯利岩浆的演化或砂矿金刚石的来源提供了重要线索 (Spark 等, 2009; Fedortchouk 等, 2010、2019); 3、金刚石表面的色斑和蚀象特征揭示了其在沉积过程中的经历。绿色色斑是 α 粒子辐射损伤的结果, 而黄褐色色斑则是绿色色斑在加热条件下转化而来, 表明这批金刚石部分曾经历局部加热的地质环境 (Vance 等, 1972、1973; Eaton-magaña 和 Moe, 2016)。绿色和褐色色斑共存的金刚石可能经历了多次辐照和加热过程, 且绿色色斑清晰、呈现圆形等特征反映 Gilbués 砂矿金刚石在冲积矿床中与放射性矿物共同沉积后的稳定辐射作用 (杨明星等, 2002; Nasdala 等, 2013)。上述研究显示, 巴西 Gilbués 砂矿金刚石的来源可能较为复杂, 晶体表面形态形貌学特征反映其在地幔赋存期间所经历过地幔和岩浆流体的溶蚀作用, 熔流体的性质与特征可能还发生过转换。此外, Gilbués 砂矿金刚石在后期的沉积搬运过程中遭受地层的辐射损伤和机械磨蚀过程。

关键词: Gilbués 砂矿金刚石; 形貌学; 形成过程; 流体环境; 后期变化

第一作者简介: 战雨仟: 硕士研究生 (2001 年—), 女, 主要研究方向: 金刚石形成及其对深部地质过程的指示; E-mail: zhanyq25@mail2.sysu.edu.cn

*通讯作者简介: 丘志力: 教授 (1963 年—), 主要从事宝玉石成矿对重大地质作用过程响应及古玉文化演化研究; E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

部分熔融体系中熔体电导率效应的实验评估

刘汉永^{1*}, 杨晓志¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

电导率作为对熔体存在高度敏感的地球物理参数之一, 被广泛应用于限定地球内部部分熔融区域的熔体含量及分布特征。然而, 其应用需要预先确定固体-熔体混合体系的导电性。当前对固体-熔体混合体系电导率的研究主要采用两种方法: 一种是分别测定熔体和固相矿物的电导率, 然后利用理想几何模型进行计算; 另一种是在高温高压条件下直接测定混合样品。但是, 前者基于熔体完全连通的理想化假设, 忽略了实际岩石中熔体的拓扑结构与三维连通性; 后者则受限于实验条件, 使用样品中固相矿物颗粒远小于实际岩石中的矿物, 却从未考虑过颗粒粒度的电导率效应。

本研究设计了一个新的熔体电导率测定方案, 对上述两种方法的结果进行了验证。实验初始材料为无

水橄榄石和碳酸盐混合物 ($\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$), 熔体含量为 0.3%~10%, 橄榄石粒度为 0.5~20 μm , 实验压强和温度为 1 GPa 和 200~700 $^{\circ}\text{C}$ 。结果表明, 理论模型计算的混合体系电导率显著高于实验测定值, 在低熔体含量条件下 (<5%) 尤为显著; 而当熔体含量相同 (2%) 时, 体系电导率随粒度的升高而降低。以上研究结果表明, 现有方法系统性地高估了地球深部熔体的导电效应及其含量, 对熔体在局部区域特殊地质现象 (如软流圈电导率异常) 成因或动力学过程中所扮演的角色需要重新认识。这一发现也适用于其他矿物-熔体或矿物-流体体系电导率。

关键词: 电导率; 部分熔融; 高温高压实验

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

硅酸盐熔体和沉积物脱水流体交代岩石圈地幔过程的热动力学模拟及定年

王于健^{1*}, 刘金高¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

岩石圈作为地球表层最刚性的圈层, 由地壳和上地幔顶部组成, 不仅是地球生命系统的物理载体(“生命之筏”), 更是地球深部与表层物质-能量交换的核心枢纽。自形成之后, 岩石圈就不断受到俯冲带板片脱水/熔融形成的熔/流体以及下伏软流圈地幔熔体的交代和改造。定量阐明这些交代过程如何改造岩石圈地幔化学成分, 尤其是成矿关键金属元素的分配及分异行为, 以及准确限定交代作用的时间是固体地球科学领域的重要科学问题。本研究利用系统的岩石学、全岩-矿物元素-同位素地球化学, 结合 alphaMELTS 热力学模型, 针对大洋岩石圈地幔橄榄岩(加拿大 Bay of Islands 蛇绿岩地幔橄榄岩), 系统厘定了俯冲带背景下不同熔/流体致使地幔楔发生含水熔融的地球化学过程, 查明了方辉橄榄岩的成因(即俯冲沉积物脱水流体交代亏损地幔, 致使地幔发生进一步含水熔融)。在此基础上, 根据方辉橄榄岩的亲铜元素地球化学特征(低 Re/Ir, 高 Pt/Ir, Pd/Ir)揭示了俯冲带地幔交代过程促使 Re/Ir、Pt/Ir、Pd/Ir 强烈分异的控制机理。然而, 方辉橄榄岩和二辉橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 同位素组成基本一

致, 暗示 Re/Os 的强烈分异在短期内并未影响放射性成因 ^{187}Os , 从而约束了俯冲带地幔交代作用的时间(发生在近期)。此外, 还针对大陆岩石圈地幔橄榄岩(法国 Pyrenees 造山带 Lherz 地幔橄榄岩), 在地球化学尺度上准确识别了地幔再富集过程, 建立了有效的地球化学指标(MgO vs. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)。利用全岩 MgO vs. $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 新指标系统对比全球克拉通岩石圈地幔, 阐明了硅酸盐熔体交代作用在全球克拉通中普遍存在, 而高程度的交代作用会强烈破坏岩石圈的稳定性。利用一维渗滤模型模拟 Re-Os-Al 和 Lu-Hf 体系的行为, 有效限定了 Lherz 二辉橄榄岩发生地幔再富集的时间(约 20 亿年前)。本研究利用热动力学模拟的方式定量刻画了熔/流体交代岩石圈地幔的过程, 展示了不同熔融机制对全球不同构造背景下的岩石圈地幔的形成与演化的贡献, 并揭示了地幔再富集作用对克拉通岩石圈地幔稳定性的深远作用。

关键词: 岩石圈地幔; 交代作用; 热动力学模拟; 硅酸盐熔体

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

黑龙江省铜山斑岩铜矿床磁铁矿地球化学特征: 对成矿热液活动中心的指示意义

甘颜榕¹, 邓晓东^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

黑龙江省铜山斑岩铜矿床位于中亚造山带东段兴安地块的东北缘, 是兴蒙造山带的重要组成部分, 是我国重要铜多金属矿集区——黑龙江多宝山矿集区的重要组成部分。特别近年来紫金矿业有限公司在铜山矿床新发现了 V 号大型铜矿体, 表明该矿区深边部找矿仍具有巨大潜力。前人已对铜山斑岩铜矿床的岩石学、地球化学特征以及矿床成因等进行过一些研究, 但主要集中于浅部矿体, 对于近年来取得重大找矿突破的深部岩体缺少深入研究, 并且该矿床发育大面积青磐岩化, 并且强烈叠加于早期高温蚀变, 具有复杂的蚀变分带, 致使岩浆活动中心和热液活动中心不明确。磁铁矿广泛分布于岩浆岩、变质岩和沉积岩中, 也是大部分热液矿床中重要成矿期的常见金属矿物。并且由于磁铁矿具有反尖晶结构, 晶格中 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 能被 Ti、V、Cr、Mn、Al、Mg 等替代, 这些元素的种类、含量受控于形成时的物理化学条件, 进而反映成矿过程中岩浆-热液系统演变过程。本文以铜山矿床 19 个深钻中的系统采集的磁铁矿样品为研究对象, 利用光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 确定其矿物形态和共生组合, 并在此基础上使用电子探针

(EPMA) 和激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 原位分析技术测定铜山斑岩铜矿床中主、微量元素含量, 研究结果初步显示: (1) 磁铁矿产状为浸染状和脉状, 形态上显示为粒状和板状, 并且具有不同的矿物组合: 磁铁矿+钠长石+黑云母+石英、磁铁矿+黄铁矿+石英±黄铜矿、磁铁矿+黄铜矿+绿泥石±黄铁矿等; (2) 结合各种地球化学图解 (Ni/Cr-Ti、V-Ni、Ti+V-Al+Mn、Ti+V-Ca+Al+Mn 等), 表明铜山矿床中磁铁矿多为热液成因, 基本属于斑岩矿床类型, 且形成过程中温度、氧逸度、水岩交换等物理化学条件对磁铁矿中化学成分变化具有明显影响; (3) 根据 1 个剖面 (3 个钻孔) 中磁铁矿元素 V 随深度的变化趋势, 矿化地段 V 含量显著上升, 证实了磁铁矿在指示热液成矿中心的有效性。综上, 铜山斑岩铜矿床中磁铁矿是一种行之有效的找矿指示矿物, 且其微量元素特征能够指示其岩浆-热液演变过程, 有助于厘定成矿热液中心。

关键词: 铜山矿床; 磁铁矿; 主、微量元素; 成矿热液中心

黑龙江多宝山铜业股份有限公司委托项目《黑龙江多宝山矿集区成矿规律研究与深边部找矿预测》

第一作者简介: 甘颜榕 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床学.Email: 1202311369@cug.edu.cn

通信作者简介: 邓晓东 (1983-), 研究员, 研究方向: 矿床学.Email: dengxiaodong@cug.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

高温高压下水镁石和水之间的 H 同位素分馏及其对进入地球深部水 H 同位素组成的启示

高才洪^{1*}, 刘耘^{1,2}

1. 成都理工大学 地球与行星科学院, 行星科学研究中心, 成都 610059;

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

氢同位素 (D/H) 被广泛地应用于示踪俯冲带水的循环过程。传统的观点认为, 在俯冲脱水过程中, 板片释放的水会富集 D 同位素, 而板片中残余的水会富集 H 同位素。然而, 这一观点是基于常压下含水矿物和水之间的 H 同位素分馏实验而提出的。最近的研究表明, H 同位素的分馏存在明显的压力效应, 忽略压力效应的影响可能会造成很大的误差。基于此, 本研究利用路径积分分子动力学 (PIMD) 的方法计算了水镁石和水在高温高压 (0~8 GPa, 300~1273 K) 下的 H 同位素分馏。我们发现压力会导致水镁石和水之间的 H 同位素分馏发生反转: 在低压下, 分馏系数为负; 而在高压下, 分馏系数为正。此外, 我们利用水镁石-水之间的分馏系数, 并结合俯冲带的温压模型, 模拟了不同俯冲带 (cold、warm 以及 hot) 中板片残余水和释放水的 H 同位素演化。模拟结果表明, 板片释放水和残留水的 δD 值与俯冲带的温度和压力密切相关。若板片在 H 同位素分馏

发生反转前完全脱水, 释放的水会富集 D, 板片水和释放水的 δD 值会随着俯冲过程而降低; 若板片在 H 同位素分馏发生反转后发生大规模的脱水, 残留水会逐渐富集 D, 最终具有较高 δD 值的水会被板片带入深部地幔。这些结果与以往认为板块会携带极低 δD 值 (-234‰) 的水进入深部地幔的观点截然不同, 表明以往文献报道的具有极低 δD 值的样品可能并非深部俯冲的结果。此外, 具有较高 δD 值的水会被板片带入深部地幔, 其 δD 值特征与原始地幔储库 (-75‰至-220‰) 显著不同, 这将为研究地球深部样品的 H 同位素提供有力的支持。不过, 由于我们使用的是水镁石-水之间的分馏系数来代替俯冲脱水过程的 H 同位素分馏, 模型的结果可能会存在一定的误差, 未来我们会进一步提供更精确的结果。

关键词: 氢同位素; PIMD; 水镁石和水; 俯冲脱水过程; δD 值

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

Fe-Si-C-(H)体系中的轻元素共溶效应与出溶现象

朱峰^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

液核发电机是类地星球维持全球性磁场并形成宜居环境的关键要素。然而, 目前对驱动液核发电机的能量来源尚存在较大争议。近期研究表明, 在铁-轻元素多元熔体中, 一些轻元素的溶解度之间存在相互制约的关系, 称为共溶效应, 数种共溶轻元素的总含量超出共溶溶解度曲线或曲面即会发生轻元素出溶。本研究利用多面顶压机实验和机器学习力场加速的第一性原理分子动力学计算对类地星球液核条件下 Fe-Si-C-(H)多元体系的相关系进行了探索, 发现其中存在显著的轻元素共溶效应和出溶现象, 且共溶溶解

度随温度降低而降低, 随压力升高而降低。这表明, 在地球、水星等成核可能偏还原的星球液核中, 如果同时存在 Si、C、H 等共溶轻元素且总含量达到共溶溶解度, 其在冷却过程中将持续出溶轻元素引发成分对流, 为星球发电机的运转和全球性磁场的维持提供能量来源。另一方面, Si、C、H 等轻元素在铁熔体中的共溶溶解度也为它们在液核中的总含量提供了约束。

关键词: 液核发电机; 轻元素; 高温高压; 多面顶压机; 第一性原理计算

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

富 Mn 流体对 Nb-Ta-Sn 成矿的重要作用：埃及东部沙漠 Abu Dabbab 稀有金属花岗岩的证据

孙玉洁¹, 张超^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

埃及中东部沙漠 Abu Dabbab 稀有金属花岗岩为高度演化的钠长花岗岩 ($\text{Nb}/\text{Ta}=0.245$, $\text{Nb}=50.34 \times 10^{-6}$, $\text{Ta}=215.2 \times 10^{-6}$)。经济资源以富 Mn 的铌钽氧化物和锡石为主。本文综合运用电子探针 (EPMA)、LA-ICP-MS、矿物面扫描和锡石 U-Pb 定年 (641 ± 8 Ma), 分析了白云母和铌钽氧化物成分演化规律, 揭示了富 Mn 流体中的 Mn^{2+} 迁移-沉淀在 Nb-Ta-Sn 成矿过程中的关键控制作用。岩浆演化晚期, Ta 相比于 Nb 具有更高的溶解度, 原生白云母主微量元素显示, 随着 Li-Rb-Cs 等含量的升高, Nb/Ta, Fe/Mn 逐渐降低。白云母 Rb-K/Rb, Cs-K/Cs 指示钠长花岗质岩浆较高的分离结晶程度 ($F=75\% \sim 95\%$)。前人实验岩石学数据表明, 流体饱和性熔体与富集活动性阳离子 (Mn) 流体相互作用时, 当共存流体中 Mn^{2+} 浓度 $>1\%$ (450°C), 熔体中仅需 17×10^{-6} Nb, 铌锰矿即可达到饱和。钠长花岗岩中石英 Cl 环带记录了 $450 \sim 650^\circ\text{C}$ 结晶温度区间。富 Mn 流体可以提供必要的 Mn^{2+} , 促进铌钽矿物的饱和结晶。流体演化晚期, 由于温度和氧逸度等条件的影响导致软锰矿的沉淀

而致使热液中 Mn 活动性降低。Abu Dabbab 钠长花岗岩岩相学观察显示: (1) 铌钽族矿物颗粒 $\text{Mn}^\#$ ($\text{Mn}/(\text{Mn} + \text{Fe}) \times 100$) = 90, 边缘 Mn 含量略微降低。Ta[#] ($\text{Ta}/(\text{Ta} + \text{Nb}) \times 100$) 演化呈现核部铌锰矿 (42.33 ± 3.24) $\rightarrow$ 幔部铌锰矿 (60.87 ± 8.80) $\rightarrow$ 边缘锡锰铌矿 (76.49 ± 4.58) 的规律性分带; (2) 多期白云母的 Mn-F-Li 演化揭示阶段性富 Mn 流体行为: 热液次生白云母 (第二期) 在主成矿期富 Mn^{2+} 流体的环境下结晶形成, 具有较高的 Mn、F 含量, 而蚀变边缘 (第三期) 标志成矿后期氧化性流体中 Mn^{2+} 活动性逐渐降低的交代反应, 指示了富 Mn 流体阶段性的结晶交代作用; (3) 细晶石被软锰矿包裹, $\text{Mn}^\#$ 从核部 (97.26 ± 3.16) 至边缘 (51.83 ± 4.15) 显著降低, Ta[#] 变化不明显, Ta[#]、Mn[#] 与 F 含量呈正相关, 该研究揭示了富 Mn 流体在稀有金属钠长花岗岩成矿 Nb-Ta-Sn 成矿中的控制机制。

关键词: Abu Dabbab 稀有金属花岗岩; Nb-Ta-Sn 矿化; 富 Mn 流体; 锡石定年

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (2023YFF0804200)

第一作者简介: 孙玉洁 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学. Email: Syj243660@outlook.com

*通信作者简介: 张超 (1982-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学和实验岩石学. Email: zhangchao@nwn.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

俯冲沉积物熔融过程中亲硫元素地球化学研究

薛硕^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿室, 广州 510640

亲硫元素是指在地球化学性质上表现出强烈亲硫性的元素。亲硫元素不仅是一类重要的战略性矿产资源, 更是揭示地球深部动力学过程的关键地球化学探针。然而, 当前研究对俯冲沉积物熔融过程中, 亲硫元素的迁移机制及其控制因素尚不明确, 制约了我们对亲硫元素在地球各圈层的分布富集规律的认识。针对上述问题, 我们通过高温高压实验岩石学模拟, 系统揭示了沉积物熔体对亲硫元素的迁移能力和控制因素, 并阐明了地幔亲硫元素

在地幔的分布和富集规律。申请人重点开展了两个方面的研究, 主要包括: (一) 厘定了沉积物俯冲过程中碳酸质熔体对亲硫元素的迁移能力和控制因素; (二) 揭示了沉积物俯冲过程中硅酸质熔体对亲硫元素铈的携带能力, 破解“地球铈储库丢失之谜”。

关键词: 俯冲作用; 沉积物熔体; 碳酸质熔体; 硅酸质熔体; 亲硫元素

薛硕, 副研究员, 研究方向: 亲硫元素俯冲带循环和碳酸岩型稀土和铌矿床形成机理

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

熔体包裹体记录碱性玄武岩中的“碳印记”

曾罡^{1*}, 张慧丽¹, 陈立辉², Stephen Foley³, 刘建强², 王小林¹, 王小均²,
于津海¹, 任钟元⁴, 徐夕生¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 关键地球物质循环前沿科学中心, 地球科学与工程学院, 南京 210046;

2. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 地质系, 西安 710069;

3. 麦考瑞大学 自然科学学院, 悉尼 210900;

4. 广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

原生的碳酸岩熔体在地球内部碳循环过程中扮演着重要角色, 但其在自然界中却极为罕见, 这严重阻碍了我们对这类熔体起源和演化的深入理解。本项研究在中国东部新生代碱性玄武岩中发现了天然的、碳酸盐化的硅酸盐熔体包裹体(其 SiO_2 含量为 32.4%~40.0%)。通过对熔体包裹体的拉曼光谱分析, 也进一步证实这些熔体包裹体中溶解了 CO_3^{2-} 。对这些熔体包裹体的元素分析发现, 它们富含稀土元素(REEs)和 P_2O_5 (>2.0%), 具有高的 $\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ 比值(>1.0)以及低 Ti/Gd 和 Hf/Sm 比值, 这些都是碳酸岩熔体的典型化学特征。同时, 这些熔体包裹体具有低的 K/U 和 Ba/Th 比值, 与前人提出的再循环含碳酸盐沉积物释放的原生碳酸岩熔体特征一

致。据此我们提出, 这些熔体来源于地幔过渡带中储存的含碳酸盐沉积物。进一步地研究发现, 这些熔体包裹体不同元素成分和元素比值之间呈现出很好的协变关系, 这一现象可以用熔体与橄榄岩的反应解释, 且该过程会导致原生碳酸岩熔体逐步转变为碳酸盐化的硅酸盐熔体。前人对中国东部新生代碱性玄武岩(尤其是霞石岩、碧玄岩)的研究揭示, 这些硅不饱和的岩石中普遍存在碳酸岩熔体的化学特征。因此, 本项研究的发现就为解释这一现象提供了重要的成因机制。

关键词: 碳酸岩熔体; 碱性玄武岩; 熔体—岩石反应; 地幔过渡带; 中国东部

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

Identifying dehydration-induced shear velocity anomaly in the Earth's core-mantle boundary

韩松松^{1*}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077

Steep temperature gradient near the bottom of the mantle is known to generate a negative correlation between the shear wave velocity (VS) and the depth in most regions of the D'' layer, as detected by seismological observations. However, increasing VS with depth is observed at the D'' layer beneath Central America where the Farallon slab sinks, and the origin of this anomaly has not been well constrained. Here, we calculate the thermoelastic constants and obtain the elastic wave velocities of hydrous phase H with various Al contents and cation configurations, which may act as a water carrier to the D'' layer. We find its VS substantially

lower than the post-perovskite-type bridgmanite. The dehydration of Al-enriched phase H and the redistribution of Al from the hydrous component to dry silicates would raise the VS at approximately 100-150 kilometers beneath the top of the D'' layer. The presence of 3.5 wt.% water is sufficient to compensate for thermal effects to match the seismic anomaly at the bottom of the mantle beneath Central America. The positive slope of VS versus depth in the D'' layer may fingerprint deep water recycling.

关键词: 含水矿物; 地震波速异常

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

锆在含 F-B 花岗质熔体中的扩散实验研究

黄金花¹, 朱仁智^{2*}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 深空探测实验室, 中国科学技术大学, 合肥 230026

锆 (Zr) 是重要的战略性关键金属。研究发现, 与锆成矿相关的花岗岩富含挥发分氟 (F) 和硼 (B), 暗示 F 和 B 可能在锆成矿过程中起到了重要的作用。目前, 锆在含 F 花岗质熔体中的扩散实验研究十分有限, 且不同研究获得的 F 效应结果不能自洽, 而 B 对 Zr 扩散的影响尚缺乏实验研究。因此, 本项目采用活塞圆筒压机装置, 在 0.5 GPa 压力、1200~1400 °C 条件下, 通过天然锆石扩散进入熔体的系列实验, 测定了含 F (0~4%) 或 B (0~4%) 花岗质熔体的 Zr 扩散系数, 并同时探究了水和熔体成分对锆扩散速率的影响。实验结果表明, 在挥发分种类、含量及温压条件一致的情况下, Zr 在过碱性熔体中的扩散系数高于准铝质熔体, 表明熔体成分对元素迁移能力具有重要影响。在无水体系中, F 含量由 0 增至 4% 时,

锆的扩散系数提升约 1 个数量级; 而 B 对 Zr 扩散的影响呈现非线性特征: 当 B_2O_3 含量从 0 增加到 0.7%, Zr 扩散系数增长了 6 倍; 而当 B_2O_3 含量从 0.7% 增加到 4% 时, Zr 的扩散系数降低为原来的 1/5。综合对比挥发分 F、 B_2O_3 、 H_2O 对 Zr 扩散系数的影响发现, 在挥发分总量含量较低 ($\leq 2\%$) 时, 各挥发分对 Zr 扩散的促进效应排序为: $H_2O > B_2O_3 > F$; 在挥发分含量较高 ($\sim 4\%$) 时, 促进作用变为: $H_2O > F > B_2O_3$ 。值得注意的是, 当 F、B、 H_2O 共存时, 其共同作用对锆扩散的促进效果显著低于各组分单独作用的线性叠加, 揭示多组分挥发分之间存在竞争性耦合机制。

关键词: 锆的扩散; 氟; 硼; 花岗质熔体

基金项目: 中国科学院 B 类先导专项 (XDB0710000); 国家自然科学基金项目 (42103059); 中央高校基本科研业务费专项资金 (WK3410000019)

第一作者简介: 黄金花 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: huangjinhua@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 朱仁智 (1991-), 副研究员, 研究方向: 行星与地球化学. Email: renzhizhu@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

磷灰石示踪熔体-流体演化及稀土元素富集过程： 以南秦岭紫阳地区碱性岩为例

杨丽莎¹, 王连训^{1*}, 张超², 朱煜翔¹, 马昌前¹

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

南秦岭紫阳地区发育一系列早古生代碱性岩, 包括辉长岩类(辉石岩、玄武岩、辉长岩和辉绿岩)、闪长岩类(辉石闪长岩和角闪二长岩), 以及正长岩类(黑云母正长岩和粗面岩)。前人研究认为这些岩石源自同一富集地幔源区, 并形成于同一岩浆演化序列。本文通过对这套杂岩中岩浆成因和交代成因的两类磷灰石进行系统研究, 揭示了它们在结构、主微量元素(特别是稀土元素)和 Rb-Sr 同位素组成方面的变化规律, 进一步探讨了熔体-流体演化过程中 REE 的富集机制, 为理解碱性岩型 REE 矿床的形成机制提供了重要的理论依据。研究发现, 岩浆磷灰石的 REE 含量从辉长岩类(平均 2823×10^{-6}) 到闪长岩类(5417×10^{-6}) 再到正长岩类(37103×10^{-6}) 逐渐增加。与此同时, 大离子亲石元素(如 Sr、Ba)和相容元素(如 V、Sc)的含量呈现下降趋势。这一现象反映了熔体演化过程中辉石、角闪石和长石等造岩矿物的分离结晶作用, 导致残余熔体中 REE 逐渐富集。这与全岩成分中 REE 含量从镁铁质向长英质逐渐增加的规律一致, 表明磷灰石中的 REE 含量变化主要受控于熔体成分。通过计算磷灰石与熔体之间的 REE 分配系数, 我们发现随着熔体聚合度的降低, REE 在磷灰石与熔体中的分配系数呈指数升高, 进一步解释了磷灰石中的 REE 含量会在熔体演化末期显著提

升的现象。此外, 利用磷灰石 F 含量反算推熔体 F 含量, 结果显示熔体 F 含量从辉长岩类(平均 25026×10^{-6}) 到闪长岩类(25685×10^{-6}), 再到正长岩类(27983×10^{-6}) 逐渐增加, 与 REE 含量的变化趋势一致, 表明熔体 F 含量的增加可以进一步促进 REE 的溶解和富集。交代磷灰石主要发育于长英质岩中, 通常沿着岩浆磷灰石的边部或裂隙发生交代, 并伴生次生独居石。交代磷灰石的 REE 含量(平均 10482×10^{-6}) 显著低于岩浆磷灰石, 但更富 Sr、F、Cl、Ca, 表明富 Sr、F、Cl 和 Ca 的热液流体活化了磷灰石中的 REE, 并将其迁出且在附近沉淀形成了次生独居石。各类岩石中岩浆磷灰石具有一致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值($0.7033 \sim 0.7046$), 表明它们源自同一岩浆源区; 而交代磷灰石则表现出更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值($0.7090 \sim 0.7107$), 表明交代热液并非来自同一岩浆源区, 可能为自三叠纪区域变质流体。因此, 研究区碱性岩的 REE 富集机制可归因于两个主要过程: (1) 熔体结晶分异导致 REE 在残余熔体中逐渐富集; (2) 后期外来流体交代作用导致 REE 活化并进一步迁移富集沉淀。

关键词: 磷灰石; 稀土元素富集机制; 熔体演化; 流体交代; 紫阳-竹溪碱性岩

基金项目: 湖北省自然科学基金(2022CFB116), 国家自然科学基金(42072082)

第一作者简介: 杨丽莎(1998-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: yls@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 王连训(1983-), 教授, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

实验限定地幔楔碳封存

吴国济¹, 黄永胜^{1*}

1. 中国科学院大学广州地球化学研究所, 广州 510640

俯冲带在全球碳循环中起着至关重要的作用。近期的地球化学和地球物理研究发现, 地幔楔内的地幔岩石 (包括蛇纹岩和橄榄岩) 存在广泛的碳酸盐化, 这表明地幔楔存在一个潜在的碳储库。然而, 目前的研究缺乏对于多组分俯冲流体与地幔岩石反应所产生的碳封存的定量评估。在本研究中, 我们模拟地幔楔中的各种 P-T 条件, 研究了蛇纹石和橄榄石在 H₂O-CO₂-NaCl 流体中的碳酸盐化过程。研究结果表明, 碳酸盐化反应程度随流体中 P-T 和 CO₂ 浓度的升高而增加, 但随盐度的增加而降低, 尤其是在低盐度水平 (<10%) 下。盐度的增加会导致流体 pH 值下降、CO₂ 和 H₂O 的活度降低以及含盐流体中菱镁

矿溶解度增加, 从而影响矿物的碳酸盐化程度。基于前人的实验数据和本实验研究的数据, 我们得出了一个经验方程来量化流体中蛇纹石和橄榄石的碳酸盐化反应程度。通过经验公式外推到地幔楔条件得出对应的碳酸盐化反应程度, 我们估计在全球范围内俯冲过程中每年可在地幔楔中封存 33.7~42.4 Mt C/y。其中一部分封存的碳可能滞留在地幔楔的冷区域, 对长期碳储存和地震活动产生潜在影响。此外, 俯冲下沉拖拽和俯冲侵蚀等过程会将碳输送到部分熔融区域, 进而影响弧火山的喷发。

关键词: 俯冲带; 地幔楔; 碳循环; 多组分流体

第一作者简介: 吴国济 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: 1969588288@qq.com

*通信作者简介: 黄永胜 (1990-), 副研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: mountainandspring@gmail.com

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

高温流体中稀土元素赋存形式的第一性原理模拟研究

楼彦成¹, 陈锰^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

流体与碳酸岩型、碱性岩型、热液型等典型稀土矿床的成矿过程关系紧密, 厘清流体中稀土元素的赋存形式是研究稀土矿床成因的关键基础之一。多数研究已表明, 稀土络合物是流体中稀土元素的主要存在形式。因此, 探究温度、压力和流体成分对不同种类稀土络合物稳定性的影响十分关键。研究稀土络合物的微观结构和稳定常数是研究其稳定性的常用可靠方法。目前, 相关研究在 $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下较匮乏, 只在 La(III)-Cl^- 、 Y(III)-Cl^- 、 Y(III)-F^- 、 Y(III)-SO_4^{2-} 等少数络合物体系存在较详细的研究。因此, 我们运用第一性原理分子动力学模拟进行了 $300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1000\sim 3000\text{ bar}$ 条件下 Gd(III)-Cl^- 络合物体系的稳定性的研究。结构信息的研究结果表明 (1) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Gd(III)-Cl^- 络合物的最大 Cl^- 配位数可能为 3, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Gd(III)-Cl^- 络合物的最大 Cl^- 配位数可能为 5;

(2) 随着温度的升高, Gd(III)-Cl^- 络合物的总配位数有所下降, 且随着 Cl^- 配位数的增加总配位数会降低 (大约从 8 降到 6 左右), 此外压力对配位数的影响较小; (3) 离子间距方面, 随着温度的升高, $r(\text{Gd-O})$ 有所增加, 而 $r(\text{Gd-Cl})$ 有所下降, 此外压力对两种离子间距的影响均较小。稳定常数的研究主要通过热力学积分结合约束分子动力学模拟的方法进行, 结果表明 (1) Gd(III)-Cl^- 络合物的累积稳定常数呈现上升趋势, 说明高 Cl^- 配位数的 Gd(III)-Cl^- 络合物在理论上能稳定存在; (2) Gd(III)-Cl^- 络合物的逐级稳定常数随着级数的增加而逐渐降低, 说明高 Cl^- 配位数的 Gd(III)-Cl^- 络合物的出现需要溶液中 Cl^- 具有较高的浓度。

关键词: 稀土络合物; 流体; 第一性原理; 分子动力学; 热力学积分

第一作者简介: 楼彦成, 博士后, 研究方向: 计算地球化学. Email: louyancheng@gig.ac.cn

*通信作者简介: 陈锰, 特任研究员, 研究方向: 计算矿物学、计算地球化学. Email: chenmeng@gig.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

致密含水镁硅酸盐矿物在地幔转换带的命运

郭新转^{1*}, 宋云珂¹

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

水对地球深部物理化学性质具有重要影响。以往关于深部地幔水分布的研究表明, 致密含水镁硅酸盐 (DHMSs) 是水向深部输运的关键载体——通过冷俯冲板块携带, 水可能被输运至地幔过渡带甚至核幔边界。但是关于 DHMSs 稳定性的实验研究都是在水近饱和体系内开展的, 没有充分考虑水逸度的影响。本研究通过开展 16 GPa、21.5 GPa 压力及 1400 K 温度条件下含水 MgO-SiO₂-H₂O (MSH) 体系的相平衡实验, 揭示了地幔过渡带内 DHMSs 矿物的稳定域。核心发现表明: 当体系总含水量低于 1.23% 时, 水主要赋存于瓦兹利石 (wadsleyite) 和林伍德石 (ringwoodite) 中, 而非形成 DHMSs 矿物; 当含水

量超过该阈值时, E 相 (phase E)、超含水 B 相 (superhydrous phase B) 及含水斯石英 (hydrous stishovite) 等开始形成, 显著改变地幔过渡带的矿物组合与水分布格局。然而, 实际大洋俯冲板片的整体含水量通常低于 1%, 这意味着地幔过渡带可能成为 DHMSs 的“无法形成区”。本研究为深部水循环机制提供了新认识, 指出过渡带中的含水瓦兹利石和林伍德石 (而非 DHMSs) 才是该深度域主要的水赋存载体, 这一结论与地震观测数据高度吻合。

关键词: 地幔转换带; 致密含水镁硅酸盐矿物; 水; 含水矿物; 水逸度

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

金伯利岩石榴石捕虏晶揭示华北稳定和破坏部分之间的复杂岩石圈结构

刘为先¹, 戴宏坤¹, 熊庆¹, 郑建平^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

华北克拉通由遭受显著破坏的东部块体和相对完整的西部块体构成, 其中东部块体的岩石圈明显减薄, 西部块体保留有地幔深根。然而, 完整和破坏部分之间的岩石圈结构尚未被有效揭示, 这阻碍了对华北克拉通差异破坏机制的深入理解。为此, 我们利用华北中部鹤壁地区金伯利岩石榴石捕虏晶开展了深部岩石圈化学成像反演研究。这些石榴石可以分为高 $Mg^{\#}$ 和低 $Mg^{\#}$ 两组: 高 $Mg^{\#}$ 石榴石 (>85.5 , 原子比 $Mg/(Mg+Fe) \times 100$) 一般具有较高的重稀土元素含量 ($\Sigma HREE > 20$) 且记录了高温 ($1064 \sim 1191$ °C) 和弱压力变化 ($24 \sim 26$ kbar) 的平衡条件, 低 $Mg^{\#}$ 石榴石 (<85.5) 则具有重稀土元素含量 ($\Sigma HREE < 15$) 并显示较宽泛平衡条件范围 ($817 \sim 1019$ °C, $19 \sim 29$ kbar)。此外, 低 $Mg^{\#}$ 石榴石的平衡温压具有正相关性, 对应

了 $120 \sim 130$ 公里厚岩石圈的稳态地温梯度, 高 $Mg^{\#}$ 石榴石则向高温方向偏离了地温梯度, 显示岩石圈的内部存在过热且难熔 (地幔橄榄石 $Mg^{\#} > 92$), 其相对升高的重稀土元素含量可能是加热驱动石榴石相-尖晶石转变导致重稀土元素重新分布的结果。高 $Mg^{\#}$ 石榴石所记录的岩石圈内部热扰动可能反映了软流圈通过古老岩石圈薄弱带的优先上涌, 这或许与古元古代的克拉通陆核的拼合有关。结合华北东、西部岩石圈结构的研究资料和环克拉通构造演化历史, 我们认为不均匀分布的岩石圈内部薄弱带和周边构造环境可能共同造成了华北岩石圈差异性破坏。

关键词: 石榴石捕虏晶; 地温曲线; 岩石圈地幔; 克拉通差异性破坏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42320104001 & 42272053), 国家重点研发项目 (2023YFF0804404)

第一作者介绍: 刘为先 (2000-), 博士研究生, 研究方向地幔岩石学. Email: 1202210050@cug.edu.cn

通讯作者介绍:

戴宏坤 (1991-), 研究员, 博士生导师, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkai@cug.edu.cn

郑建平 (1964-), 教授, 博士生导师, 岩石圈演化. Email: jpzheng@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲沉积物中氮循环效率的高温高压实验研究

黄伟桦¹, 杨燕^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

作为大气和生命的关键组成元素, 氮在地球表层与深部之间的循环是调控地球宜居性演化的重要驱动力。尽管天然样品观测证实大量氮可通过俯冲带由地表进入地幔, 但俯冲板片对深部地幔氮储库的贡献仍不明确。本研究聚焦于俯冲板片中氮浓度最高的沉积物部分, 探究其在深俯冲过程中氮的分配行为。研究以泥质岩成分为初始体系, 通过添加氨水或硝酸铵作为氮源和水源 (其中氨水用于维持相对还原的实验条件, 硝酸铵用于维持相对氧化的实验条件), 采用多面砧压机在 10~12 GPa 和 800~1100 °C 条件下开展高温高压实验。实验结果表明, 多硅白云母及其分解产物钾-锰钨矿是沉积物中的含氮矿物, 且含氮体系中多硅白云母的的稳定域较无氮体系拓展了 1~3 GPa, 相边界位于 10~10.5 GPa。基于质量平衡原理, 研究进一步量化了含氮矿物与流体相之间的氮分配行为。由于实验条件下流体相为超临界流体 (Schmidt 等, 2004), 可溶解大量硅酸盐溶质, 因此在计算氮分配系数时需考虑溶质的影响。为此, 研究开发了预测超临界流体溶质含量的机器学习模型, 并将其预测结果应用于质量平衡计算, 从而实现了氮分配系数的精确评估。结果显示, 在 10 GPa 和 1000 °C 条件下, 氮在多硅白云母与超临界流体之间的分配系数为 0.031, 且与压强无

关; 而在钾-锰钨矿与超临界流体之间的分配系数范围为 0.008~0.064, 与压强呈正相关, 与温度和氧逸度呈负相关。通过对实验产物的矿物相比例和氮分配系数进行综合分析, 发现多硅白云母分解导致沉积物发生显著脱氮, 仅 43.3% 和 26.0% 的氮能够分别在冷俯冲带和暖俯冲带中得以保存, 并通过钾-锰钨矿继续向深部迁移。基于全球俯冲沉积物输入地幔的氮通量, 研究进一步估算出每年由钾-锰钨矿输入下地幔的沉积物氮最多仅有 1.5×10^8 kg, 相当于初始俯冲氮通量的 20%。即使经过 30 亿年的板块构造运动, 沉积物对下地幔氮储库的贡献也不超过 15%。综上所述, 本研究系统揭示了沉积物在深俯冲过程中的氮分配行为, 并对其氮循环效率进行了定量评估, 结果表明俯冲沉积物对深部地幔氮储库的贡献极为有限。近期研究发现 (Li 等, 2023), 俯冲板片中蚀变洋壳部分同样贡献了显著的氮俯冲通量。那么蚀变洋壳对地球深部氮储库的贡献如何? 这个问题尚缺乏明确认识。基于此, 我们正在开展后续研究, 重点探讨蚀变洋壳深俯冲过程中的氮分配行为, 以全面评估其氮循环效率。

关键词: 高温高压实验; 氮循环; 俯冲沉积物; 分配系数; 矿物稳定性

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

磷灰石中的挥发分揭示了华南板片撕裂引发的高温 S 型花岗岩岩浆作用

聂虎^{1*}, 夏小平¹

1. 长江大学 资环学院, 武汉 430000

沉积岩在白云母脱水熔融或水致熔融作用下形成的 S 型花岗岩, 通常具有较低的形成温度。然而, 研究表明, 存在一些含斜方辉石的高温/超高温 S 型花岗岩, 其成因仍未完全理解。华南印支期的大容山-十万大山花岗杂岩是一个典型的高温/超高温 S 型花岗岩带, 对该岩体的研究有助于揭示晚古生代至早中生代期间华南板块的构造演化过程。然而, 目前关于其构造背景的解释尚存较大争议。已有的解释包括与华南板块和印支板块在西南方向上的碰撞、古太平洋板块在东南方向上的俯冲撕裂, 以及与峨眉山幔柱的加热作用等因素的关联。挥发性成分是示踪流体来源的有效工具, 并为花岗岩的成因研究提供了重要见解。因此, 我们分析了大容山-十万大山花岗岩带中磷灰石的氯、氟和水含量, 以及氢氧同位素组成。基

于磷灰石数据计算的熔体 Cl/F 比值从西南向东北逐渐减小, 表明卤素成分来源于东北方向的俯冲板块输入。磷灰石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 9.7‰至 12.1‰之间, 相对均一, 指示了其来自变沉积岩熔融的来源。磷灰石的 δD 值变化较大, 最低值 ($-272.6 \pm 27.2\text{‰}$) 与地幔过渡带相当, 暗示流体可能源于深部地幔。大容山-十万大山花岗杂岩带的挥发性成分既包括俯冲板片脱水流体, 也包含深部地幔的流体。因此, 我们提出了一种成因模型, 认为特提斯洋的北向俯冲以及随后的俯冲板片撕裂诱发了深部地幔熔融, 基性岩浆底侵导致地壳岩石熔融并形成了这一套高温/超高温花岗岩带。

关键词: 磷灰石挥发分; 古特提斯; 华南; 印支期; 板片撕裂

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

水对硫、金、铜行为的控制及其对巨型斑岩矿床形成的制约

刘星成^{1*}, 李兰琴¹, 熊小林¹, 王锦团¹, 汪在聪²

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

本研究通过高温高压实验(850~950 °C, 1.0~2.0 GPa)系统研究了水含量与氧逸度对硫溶解度及金铜分配行为的影响。实验结果表明, 富水条件(>10% H₂O)下岩浆中硫溶解度显著高于传统模型预测值, 且水含量对金在硫化物/熔体间分配系数具有决定性影响。在中等氧化条件(FMQ+2)下, 将熔体水含量从 2%增加到 15%可使金溶解度提高达 37 倍。这种显著增加源于高水含量抑制磁铁矿结晶, 导致熔体 FeO 含量升高, 进而增加了 S²⁻的含量, 促进了 Au-S 在熔

体中的络合。富水熔体中金在硫化物/硅酸盐熔体间的分配系数比贫水熔体低一个数量级。相比之下, 铜分配行为对氧逸度的依赖性强于水含量, 解释了金铜在岩浆-热液演化过程中的差异行为。这些发现表明, 对于巨型斑岩型金铜矿床形成而言, 高氧逸度可能不是必要条件, 岩浆水含量可能是更为关键的控制因素, 对于理解金富集的岩浆-热液成矿过程提供了新见解。

关键词: 斑岩型矿床; 硫化物; 分配系数

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

印度大陆俯冲驱动喜马拉雅-青藏高原造山带 地壳碳的大规模活化、迁移与释放

张茂亮^{1*}, 刘伟^{1,2}, 郎赞超¹, 刘丛强¹, 徐胜¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 呼和浩特 010051

地球 99%以上的碳存储在其内部, 板块构造运动促进了地球深部和浅层之间碳的活化与迁移, 从而影响着区域和全球尺度上的气候与环境变化。喜马拉雅-青藏高原造山带是新生代时期印度大陆与亚洲大陆持续碰撞和俯冲的结果, 对全球碳循环和气候变化至关重要。在过去的几十年, 青藏高原及其周边构造隆升导致的硅酸盐风化和有机碳埋藏消耗了大气 CO₂, 部分学者提出将其作为碳汇。相反, 该地区也被认为是重要的碳源, 这是由于印度-亚洲大陆碰撞驱动的多期岩浆作用和变质作用导致火山与构造活跃区存在强烈的 CO₂ 释放现象。鉴于此, 喜马拉雅-青藏高原造山带是碳源还是碳汇, 长期以来一直存在争论。

本研究利用青藏高原南部定日-当惹雍错裂谷带水热流体的化学成分、He-C 同位素组成以及定量计算模型, 结合水热活动区和断裂带土壤 CO₂ 释放通量, 有效区分并厘清了深部碳来源及其活化、迁移与释放机制, 获得了喜马拉雅-青藏高原造山带前缘地区伸展构造的深部碳释放规模。结果表明, 裂谷带含碳流体主要来源于地壳碳酸盐岩或含碳沉积岩变质脱碳作用。空间上, 裂谷南部和中部含碳流体显示纯

地壳来源, 向北显示出幔源组分的增加。与裂谷中北部相比, 位于喜马拉雅地块的裂谷南部具有较高的地热区土壤 CO₂ 通量, 并且其空间分布与印度俯冲下地壳之上的喜马拉雅造山楔吻合。综合地质和地球物理资料, 认为印度大陆碰撞/俯冲背景下喜马拉雅造山楔地壳增温可能会增强变质脱碳作用, 而中地壳塑性流的加热效应以及含水流体渗透也能够提高变质脱碳反应的效率。构造上, 青藏高原南部的伸展构造利于含碳流体向上运移。因此, 印度大陆俯冲导致的造山带热状态和动力学扰动是地壳碳活化、迁移和释放的根本原因。通过地热区和断裂带空间分布等基础信息, 建立了伸展构造的 CO₂ 释放通量转换函数, 外推估算得到青藏高原裂谷带和正断层深部 CO₂ 释放规模为 $(37 \pm 21) \text{ Mt} \cdot \text{yr}^{-1}$, 其与洋中脊幔源 CO₂ 释放量相当, 表明喜马拉雅-青藏高原造山带是具有全球意义的重要碳源。上述研究结果为厘清全球地质源碳排放规模、评估大陆碰撞造山带的碳源/碳汇效应提供了重要基础数据。

关键词: 深部碳循环; 变质脱碳; 伸展构造; 大陆碰撞造山带; 青藏高原

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

超深地幔橄榄岩捕虏体中水的演化及效应

潘发斌^{1*}, 巫翔¹, 王超¹, 张艳飞¹, 周晓春¹, 何小波², 章军锋¹

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430078;

2. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022

地球内部的水(包括水分子、羟基和氢气分子等)可以显著影响矿物的波速、电导率、热导率、流变学强度、相变温压条件和部分熔融作用等地球物理化学过程,是形成地表生物宜居环境的关键因素之一。上地幔造岩矿物主要包括橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石/石榴石等名义无水矿物,这些矿物中的水具有强不相容性和极易扩散逃逸等特征,导致地表出露的地幔橄榄岩的水含量普遍很低,阻碍上地幔中水的演化特征的直接研究工作。我们在浙江嵊县组玄武岩中采集了一套石榴石橄榄岩包体,在其退变石榴石中发现富水橄榄石包裹体。富水橄榄石包裹体含有大量纳米级(100~300 nm)的铁镍合金颗粒,并且铁镍合金颗粒附近的橄榄石的三价铁比例($\text{TFe}_2\text{O}_3=\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$)达到35%~40%,推测为橄榄石中二价铁发生歧化反应的产物,暗示其起源深度至少大于250公里。纳米离子探针(NanoSIMS)测试结果表明,这些橄榄石包裹体普遍具有很高的含水量($190\times 10^{-6}\sim 270\times 10^{-6}$),局部水含量达到 1350×10^{-6} 。拉曼光谱和红外光谱研究结果

表明这些水以弥散状利蛇纹石的形式存在于富水橄榄石的核部,该矿物结构特征表明这些水很可能是深部起源的富水橄榄石的残余水。橄榄石原位氧同位素测试结果表明富水橄榄石包裹体的富水区域和相对贫水区域的一致($\delta^{18}\text{O}=5.1\text{‰}\sim 5.6\text{‰}$),均为地幔正常的氧同位素组成特征,进一步验证了富水橄榄石的水来源于地球深部。根据橄榄石高温高压含水实验研究结果推测,我们新发现的富水橄榄石包裹体记录了橄榄石在350~130公里左右的含水量特征,证明中国东部上涌的软流圈地幔中含有大量水,其可能来自于地幔过渡带。中国东部新生代地幔的高水含量特征可以降低地幔橄榄岩的熔融温度,增加部分熔融程度,促进软流圈地幔的塑性流变过程,加速岩石圈根的破坏等。富水橄榄石的发现对中国东部软流圈地幔部分熔融过程和流变学特征等研究具有重要的科学意义。

关键词: 橄榄石; 水含量; 歧化反应; 铁镍合金; 地幔过渡带

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

拉曼光谱测定单个包裹体二氧化碳同位素揭示壳-幔相互作用与碳循环

吕万军^{1*}, 王浩¹, 王文璟¹, 胡锦涛¹, 张准¹, 王哲¹

1. 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 武汉 430074

中国东部新生代多期次玄武岩浆活动携带的深源捕虏体记录了复杂的壳-幔相互作用与深部碳循环过程。研究团队基于新建立的激光拉曼原位碳同位素分析技术, 对山东昌乐一带新生代玄武岩携带的深源捕虏体橄榄石、辉石、刚玉等矿物中不同世代二氧化碳包裹体进行了高精度同位素测量, 发现方山玄武岩中刚玉巨晶生长环带与其核心二氧化碳包裹体有着显然不同的碳同位素组成, 刚玉核部的二氧化碳包裹体 $\delta^{13}\text{C}$ 值-8‰左右, 而多期生长环带中二氧化碳包裹体 $\delta^{13}\text{C}$ 值由内而外由-17‰左右降低到-21‰左右。幔源岩浆成因的刚玉环带记录了含碳同位素负偏的深部流体-熔体加入中国东部壳幔的过程, 是否与华南三叠纪俯冲陆壳底垫于华北南部岩石圈之下、富含有机碳的

陆壳部分熔融形成富硅质熔体向上渗透交代岩石圈地幔有关, 值得探索。北岩含尖晶石二辉橄榄岩捕虏体的橄榄石中包裹体二氧化碳同位素 (-19.6‰~-20.4‰)、斜方辉石中包裹体二氧化碳同位素 (-15‰~-9.7‰), 则记录了同位素由显著负偏逐渐变得偏重的碳加入过程, 可能记录并指示着古太平洋板块俯冲使得中国东部岩石圈发生的碳酸盐交代作用。理解中国东部地幔在中新生代受到多期次熔体/流体的交代所伴随的含碳物质的循环机制, 需要进一步把碳同位素记录与系统的岩石地球化学相结合深入探究。

关键词: 碳同位素; 流体包裹体; 壳幔相互作用; 拉曼光谱; 深部碳循环

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

挥发分对地幔的影响及其资源环境效应

汤艳杰^{1*}

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100

挥发分(如氢、碳、氮、硫、氟、氯等)不仅影响地幔的物理化学性质、地幔对流和熔融过程,挥发分的分布和循环对地表环境系统和矿产资源富集过程也有重要影响。挥发分的存在显著影响地幔的热力学状态和物理性质。例如,水(以氢的形式)可以降低地幔矿物的熔点,促进部分熔融过程,影响地幔的熔融程度和熔体的成分,也对地幔对流的模式和速度产生影响。研究表明,地幔中的挥发分含量越高,其熔融深度越深,熔融程度也越高,这表明挥发分在地幔对流过程中起着重要的驱动作用。挥发分在地幔交代过程中,通过影响流体的性质和迁移行为,控制着地幔矿物的成分和结构变化。挥发分的分布可能是导致地幔异常结构和地幔柱活动的重要因素。例如,地核出熔体中的原生氢可以通过出熔过程从地核运移至地幔底部,形成深部挥发分储库,这为地幔柱的形成提供了新的解释。挥发分在元素迁移和关键矿产资源富集过程中具有显著作用。例如,富含挥发分的流体可以溶解地幔矿物中的特定元素,并将其迁移至其

他区域,从而形成富集的矿产资源。研究表明,地幔源区的碳含量与岩浆的碱度呈正相关,高碳含量的地幔源区更有利于关键矿产资源的富集。地球内部的挥发分通过火山喷发和地质过程向地表释放,对地表环境和气候产生重要影响。例如,火山喷发释放的二氧化硫可以形成硫酸气溶胶,反射太阳辐射,导致局部地区降温。二氧化碳的释放对全球气候变暖也具有重要影响。通过对火山岩、橄榄岩包体、深源金刚石等样品的地球化学分析,可以确定挥发分的含量、同位素组成以及元素分配系数等信息。可以通过高温高压实验模拟地幔的物理化学条件,研究挥发分在矿物中的溶解行为和分配系数。地球物理探测技术,如地震层析成像,可以揭示地幔的物理性质和结构特征,为挥发分的分布和迁移提供间接证据。此外,通过建立地幔对流、熔融、交代等过程的数值模型,研究挥发分在地球内部的动态行为。

关键词: 挥发分; 地幔过程; 资源环境效应

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

大陆岩石圈地幔来源岩石的卤素组成及改造过程

郑怡欣¹, 汪在聪^{1*}, 汪翔¹, 朱照先¹, 何焘¹

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430070

卤素(F、Cl、Br、I)作为重要的挥发分,在地球长期演化过程中发挥着关键作用。岩石圈地幔是地球重要的卤素储库,研究岩石圈地幔卤素组成是理解卤素圈层循环的重要基础。幔源岩石常被用于推测岩石圈地幔的地球化学组成。然而,由于Cl、Br和I的流体活性强且易挥发,幔源岩石在多大程度上能够代表地幔的原始卤素组成,以及后岩浆过程如何影响幔源岩石的卤素组成,仍有待进一步研究。为此,我们对橄榄岩地体中的橄榄岩、辉石岩及煌斑岩的卤素地球化学特征进行了系统研究,以探讨其来源及改造过程。意大利 Ivrea-Verbano Zone 带的 Balmuccia 和 Baldissero 橄榄岩地体主要由新鲜的二辉橄榄岩组成,并被不同期次的辉石岩脉穿插。“左倾”的稀土元素分配模式图及亏损的 Sr-Nd 同位素均表明,这些岩石代表未受再循环组分交代的亏损大陆岩石圈地幔。然而,橄榄岩和辉石岩的卤素含量变化较大(Cl: <30~244 $\mu\text{g/g}$ Br: <0.10~0.94 $\mu\text{g/g}$ I: <0.015~0.12 $\mu\text{g/g}$),部分样品高于亏损地幔甚至是原始地幔的估算值。镜下观察显示,这些岩石中沿裂隙分布的次生流体包裹体广泛发育。结合高卤素/Nb 比值及其与 Ba/Nb 等流体交代指标的相关性,我们认为卤素的富集主要受后期流体渗滤作用影响,该过程可能发

生于地体抬升过程中。胶东煌斑岩形成于华北克拉通破坏峰期,具有岛弧型微量元素特征及放射性 Sr-Nd 同位素组成,指示其源区经历了俯冲组分的强烈交代。然而,煌斑岩的全岩卤素含量异常低(Cl: 58~170 $\mu\text{g/g}$ Br: 0.28~0.55 $\mu\text{g/g}$ I: <0.005 $\mu\text{g/g}$),与洋中脊玄武岩相当。尽管这些煌斑岩富含角闪石和黑云母等挥发分矿物,但电子探针分析表明角闪石的 Cl 含量很低(0.01%~0.04%)。基于卤素/K 比值的计算结果表明,相较于原始熔体,煌斑岩可能丢失了超过 90% 的卤素。我们推测,卤素的丢失主要由于熔体上升过程中发生流体饱和及出溶,导致卤素优先进入流体相。综上所述,幔源岩石中的 Cl、Br 和 I 易受后岩浆过程的改造。流体出溶过程导致富挥发分岩浆岩中卤素的强烈亏损,而流体渗滤作用则导致亏损的橄榄岩和辉石岩中卤素的不同程度富集。与 Cl、Br 和 I 相比, F 具有较强的亲石性和较弱的流体活性,不易受到后期改造的影响,可能更适合作为示踪地幔挥发分组成的指标。未来研究可结合 F、Cl、Br 和 I 的系统分析,以进一步揭示地幔中卤素的分布及其卤素在岩浆和后岩浆过程中的地球化学行为。

关键词: 卤素; 岩石圈地幔; 后期改造

基金项目: 国家自然科学基金项目(42273023, 41722302, 42103031)和国家重点研发计划项目(2016YFC0600103, 2023YFF0804200)

第一作者简介: 郑怡欣(1999-), 博士研究生, 研究方向: 卤族元素地球化学. Email: zhengyixin@cug.edu.cn

*通信作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 元素-同位素地球化学. Email: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲水诱发的金刚石及超低速带的成因

郑旭¹, 蒋佳俊¹, Joshua M. R. Muir¹, 王异¹, 张飞武^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

地球内部的碳和氢循环与关键的行星过程相关, 如影响地幔熔融、脱气和化学分异。但俯冲板片将氢带入深部地幔的命运仍知之甚少。我们首先利用第一性原理密度泛函理论 (DFT) 计算, 研究了极端下地幔条件下含水矿物与铁碳合金之间的化学反应过程。我们的研究表明 phase H 在核幔边界 (CMB) 与 Fe_3C 反应, 形成金刚石、FeH 和 FeOOH, 如下方程所示: $\text{Fe}_3\text{C} + \text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow \text{FeO} + 2\text{FeH} + \text{MgSiO}_3 + \text{C}$ (1); $\text{FeO} + \text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeOOH} + \text{FeH} + \text{MgSiO}_3$ (2); $4\text{Fe}_3\text{C} + 6\text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeOOH} + 9\text{FeH} + 6\text{MgSiO}_3 + 4\text{C}$ (3)。这些反应表明, 含水矿物随着俯冲板片带到下地幔深部与铁碳合金发生反应形成钻石, 同时富集深部地幔的氢和氧。生成的 FeOOH 可能促进富氧层的积累和增厚, 具有深远的全球地质意义。除此之外, 为了有效勘探富含金刚石、FeH 和 FeOOH 的区域, 对理解它们独特的地震特征至关重要。我们沿地温曲线计算了它们的弹性性质, 研究结果在较低压力和温度下与实验数据吻合良好。计算结果显示金刚石、FeH 和 FeOOH 的弹性常数和弹性模量都对压力和温度变化表现出显著的非线性变化。此外, 相比于 FeH 和 FeOOH, 金刚石的弹性各向异性非常显著。与 PREM 相比, 金刚石具有较高的体积模量和剪切

模量以及较低的密度。相反, FeH 和 FeOOH 具有较低的体积模量和剪切模量以及较高的密度。此外, 我们还计算了地幔岩模型混合密度和地震波速度 (V_p 、 V_s) 随其含量的变化。结果表明, 即使极少量的金刚石与背景地幔结合, 也能显著降低下地幔的密度并提高地震波速度。这为我们预测金刚石可能会在地球极端压力和温度条件下以及其他行星体上, 富含金刚石的区域将表现出异常高且各向异性的地震波速度。然而, 相反的是 FeH 和 FeOOH 表现出具有高密度和超低波速特征, 表明它们在可能 CMB 附近富集, 可能是 D'' 层中超低速带 (ULVZs) 的起源之一。这些发现为在地球地质历史长河中探测富含金刚石的区域和地球深部碳氢循环的地球物理学提供了潜在的指示方法。因此, 我们模拟计算在下地幔及核幔边界条件下, 铁碳合金和含水矿物之间的相互作用生成金刚石、FeH 和 FeOOH 的化学反应, 显著影响我们对深部地幔动力学、地震异常和地球化学的理解。例如, 我们的工作为 ULVZs 的成因提供重要见解, 并支持金刚石是理解地球深部物质结构的重要窗口。

关键词: 金刚石; 高温高压; 弹性; ULVZs; 第一性原理

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2024YFF0807500), 国家自然科学基金项目 (42403035), 国家博士后科学基金 (2024 M753196) 和贵州省科技计划项目 (ZK 2024-standard-669)。

第一作者简介: 郑旭 (1996– 至今), 博士研究生, 研究方向: 计算矿物物理. Email: zhengxu@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 张飞武 (1980– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理. Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

超钾质熔体电导率的实验研究：对印度板片撕裂和岩石圈熔融的指示

韩泽华¹, 王瑞^{1*}, 郭璇², Fabrice Gaillard³, 倪怀玮²

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

3. Université d'Orléans ISTO, Orléans 045071

藏南新生代超钾质岩作为岩石探针是理解印亚陆陆碰撞和壳幔相互作用的窗口。最近, 高分辨率地震图像和大地电磁数据都清晰地表明俯冲到喜马拉雅-青藏高原下的印度板片发生了撕裂并为软流圈上涌提供了通道。来源于岩石圈地幔部分熔融形成的超钾质岩浆对于理解穿地壳的熔融状态及其熔融机制至关重要。本研究在活塞圆筒压机中 973~1773 K 和 0.5~1.5 GPa 条件下, 用阻抗分析仪测定了水含量为 0.01%~6.31% 的高镁超钾质熔体的电导率。通过拟合实验数据, 我们建立了高镁超钾质熔体电导率随温度、压力、水含量变化的定量模型:

$$\log \sigma = 4.963 - 0.576 \times w^{0.4} - [7586 - 1992.16 \times w^{0.4} + (251.2 - 1.608 \times w^2) \times P] / T$$

式中, σ (S/m) 为熔体电导率, w 是熔体中的水含

量(%), P (GPa) 是压力, T (K) 是温度。研究发现, 含水条件下 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 对熔体电导率的贡献变得显著。根据我们的模型, 藏南的高导低速区可能由 5%~15% 的水含量为 4.5%~7.5% 的超钾质熔体导致的。通过地球物理手段和地球化学数据的时空分布特征综合分析认为, 印度板片撕裂诱导了热异常的发育, 促使岩石圈地幔熔融形成超钾质岩浆。幔源含水超钾质岩浆底侵, 诱发地壳熔融形成含水花岗质岩浆, 这套岩石和斑岩成矿密切相关。我们的研究增进了对含水超钾质熔体电导率的理解, 并为青藏高原的岩石圈熔融状态和熔融机制提供了新的见解, 为理解大陆碰撞成矿作用提供了理论依据。

关键词: 电导率; 超钾质熔体; 碰撞带; 板片撕裂; 水含量

基金项目: 创新群体研究项目(42121002), 国家重点研发计划(2022YFF0800902), 深时数字地球前沿科学中心(246 2652023001), “111”计划(B18048)

第一作者简介: 韩泽华(1995-), 博士研究生, 研究方向: 地质学. Email: zehhan@163.com

*通信作者简介:

王瑞(1986-), 教授, 研究方向: 斑岩铜矿成矿与找矿. Email: rw@cugb.edu.cn

郭璇(1982-), 教授, 研究方向: 高温高压实验岩石学、熔体和流体的物理化学性质和作用. Email: guoxuan@ustc.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

橄榄石中分子氢的赋存机制与浓度依赖性扩散行为研究

王异¹, 张飞武^{1*}, Joshua M.R. Muir¹, 郑旭¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

挥发性氢作为地幔中水的主要载体, 对地球的气候和宜居性起着至关重要的作用。氢作为宇宙中丰度最高的元素, 其中分子氢是其常见的一种存在形式。最近的研究表明, 地幔中的氢并非仅以水合物或羟基(OH)的形式存在。特别是在早期地球或类地行星的高度还原条件下, 氢可能以分子氢(H₂)的形式稳定存在于地幔矿物中。为了深入理解这一过程, 本研究结合第一性原理计算与基于机器学习力场的分子动力学模拟, 系统研究了分子氢在橄榄石中的赋存机制及扩散行为。在橄榄石晶格间隙中, 氢原子通过形成稳定的 H-H 共价键(键长为 0.75 ± 0.03 Å)趋向于以分子形式存在。同时我们从氢在橄榄石中的电荷、

体系能量及运动轨迹等关键证据发现了溶解在橄榄石间隙位的氢倾向于形成分子氢, 且其稳定性与深度呈正相关。此外基于机器学习力场进行的大尺度长时间分子动力学模拟显示 H₂ 的扩散速率呈现出显著的浓度依赖性特征。在低浓度条件下, H₂ 以孤立分子形式缓慢扩散, 随着浓度增加, 扩散速率表现出显著的提高。本研究为理解地球深部水循环及其演化提供了新的视角, 同时也为早期地球和其他类地行星的深部水循环研究提供了重要参考。

关键词: 分子氢; 浓度依赖性; 分子动力学; 赋存机制; 扩散行为

基金项目: 国家重点研发计划资助(2024YFF0807500)

第一作者简介: 王异(2000– 至今), 硕士研究生, 研究方向: 计算矿物物理. Email: wangyi@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 张飞武(1980– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理. Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

机器学习预测单斜辉石三价铁含量及其 氧逸度计对全球地幔氧逸度的意义

叶辰阳¹, 刘纯韬¹, 张舟^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

单斜辉石作为地幔造岩矿物中重要的 Fe^{3+} 载体, 可稳定存在于斜长石-尖晶石-石榴石相系的宽泛压力域。尽管 Luth 和 Canil (1993) 早期已论证其作为氧逸度计的潜力, 但单斜辉石在地幔氧逸度评估中的应用仍显不足。本研究应用机器学习实现以下目标: 1) 构建相较 Huang 等 (2022) 更为泛化的单斜辉石 Fe^{3+} 预测模型, 无需预先确定单斜辉石的种类; 2) 基于扩展的高温高压实验数据集 (共 2369 组数据), 迭代 Qin 等 (2024) 训练的单斜辉石温压计; 3) 另整合 1185 组包含单斜辉石成分、温压、氧逸度及预测的单斜辉石 Fe^{3+} 含量和 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的数据集, 我们训练了新的单斜辉石氧逸度计。所有的数据之间无重叠, 已规避过拟合。此外, 模型优选策略采用两阶段流程: 优先选择测试集表现优异者, 继而剔除存在过拟合风险的模型, 表现为: 训练集与验证/测试集得分显著偏

离, 或验证集至测试集性能骤降。将模型应用于全球 9848 组地幔捕虏体、蛇绿岩和构造橄榄岩中的单斜辉石数据, 不仅能够复现此前基于尖晶石/石榴石传统方法揭示的不同构造单元间氧逸度横向分布规律, 更将预测范围从已有成熟研究的地区, 如 Kaapvaal 和 Siberian 克拉通, 拓展至因 Fe^{3+} 分析数据不足而有待进一步研究的地区, 如 Baltica 和 North Atlantic 克拉通, New Caledonia 和菲律宾蛇绿岩, 阿尔卑斯和西藏的构造橄榄岩等。全球各克拉通氧逸度-深度剖面呈现介于 0.8~1.1 对数单位/GPa 的梯度, 且自约 1.18 Ga 以来未呈现梯度随时间的演化趋势。以上工作扩展了地幔氧化还原状态研究的空间覆盖度与垂向分辨率。

关键词: 地幔氧逸度; 机器学习; 单斜辉石氧逸度计

第一作者简介: 叶辰阳 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学大数据. Email: yechenyang_geo@zju.edu.cn

*通信作者简介: 张舟 (1986-), 研究员, 研究方向: 地球化学大数据. Email: zhangzhou333@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地球化学与热力学模拟联合约束大洋冷俯冲洋壳的卤素行为

熊庆^{1*}, 李镒聪¹, 郑建平¹

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

卤族元素(F、Cl、Br、I)是地球中关键的挥发分,在俯冲带熔流体活动、物质循环以及动力学演化中起着重要作用。本研究选取新喀里多尼亚变质混杂岩中蓝片岩-榴辉岩团块,通过全岩主微量元素分析、全岩卤素含量测定、矿物主量成分分析及相平衡热力学模拟,揭示冷俯冲背景下俯冲洋壳不同变质深度下的卤素演化规律。变质岩石学与相平衡模拟结果显示蓝片岩和榴辉岩的峰期条件分别达到 450~480 °C、12.2~16.0 kbar 与 510~550 °C、20.8~22.2 kbar。榴辉岩呈现典型拉斑玄武岩地球化学特征,蓝片岩则显示向钙碱性玄武岩演化的趋势。综合稀土元素配分、多元素蛛网图及 Th/Yb-Nb/Yb 比值图解(Th/Yb=0.04~0.52; Nb/Yb=1.24~7.79)分析表明,二者均具有 N-MORB 至 E-MORB 型源区属性,显示俯冲洋壳起源于新喀里多尼亚邻近洋盆。基于峰期变质温压条件与原岩地球化学特征,对比分析的卤素特征显示:(1) F 在蓝片岩(230×10^{-6} ~ 610×10^{-6})和榴辉岩(140×10^{-6} ~ 220×10^{-6})中保存率较高(相比蚀变洋壳 AOC: 17×10^{-6} ~ 442×10^{-6}),但 F/Cl 比值显著升高(蓝片岩 4.6~34.4,榴辉岩 4.1~15.3 vs. AOC: 0.1~17.7),表明早期脱水阶段 Cl 优先迁移;(2) Cl 迁移丢失呈现阶段性: Cl 在蓝片岩相(15×10^{-6} ~ 79×10^{-6})已接近完全丢失(较 AOC: 6×10^{-6} ~ 1622×10^{-6}),榴辉岩相进一步丢失至 14×10^{-6} ~ 34×10^{-6} ;(3) Br/Cl 比值演

化特征为: 蓝片岩(2.8×10^{-3} ~ 18.6×10^{-3})较 AOC(0.5×10^{-3} ~ 13.4×10^{-3})升高,反映俯冲至蓝片岩相之前 Cl 迁移速率>Br(Br 含量: 蓝片岩 46×10^{-9} ~ 571×10^{-9} vs. AOC: 19×10^{-9} ~ 2724×10^{-9});而榴辉岩 Br/Cl 比值(4.8×10^{-3} ~ 7.2×10^{-3})与 AOC 重叠,但 Br 含量(70×10^{-9} ~ 165×10^{-9})持续下降,指示蓝片岩相至榴辉岩相之间 Br-Cl 同步丢失;(4) I/Cl 比值在蓝片岩相(1.6×10^{-4} ~ 31.1×10^{-4} vs. AOC: 0.03×10^{-4} ~ 11.6×10^{-4})异常升高,反映 I 被相对保留,但在榴辉岩相 I 含量($<5\times 10^{-9}$ ~ 6×10^{-9})远低于蓝片岩($<5\times 10^{-9}$ ~ 65×10^{-9})与 AOC(4×10^{-9} ~ 131×10^{-9}),指示 I 的最终丢失发生于榴辉岩相脱水阶段。本研究厘定冷俯冲体系中卤素分馏序列: Cl(蓝片岩相)>Br>I(榴辉岩相)>F(深部滞留),揭示其受控于多阶段脱水熔融作用,并标定了不同俯冲深度卤素脱挥发分作用的温压临界条件(Cl: 450~480 °C、12.2~16.0 kbar; I: 510~550 °C、20.8~22.2 kbar)。该分馏机制模式可以进一步解释弧火山岩卤素成分分带性,并揭示持续俯冲的蚀变洋壳可能是导致地幔过渡带卤素异常的关键物质载体。研究成果为构建俯冲带卤素循环模型及揭示地幔地球化学不均一性提供了新的制约。

关键词: 大洋俯冲带; 变质洋壳; 卤素行为; 物质循环

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322303), 国家重点研发计划课题(2023YFF0804404)

第一作者简介: 熊庆(1986-), 教授, 研究方向: 地幔岩石地球化学. Email: xiongqing@cug.edu.cn

*通信作者简介: 熊庆(1986-), 教授, 研究方向: 地幔岩石地球化学. Email: xiongqing@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Impact of volcanic volatile fluxes on Mesozoic terrestrial biotas in northern China

王璐^{1,2*}, 徐其虎^{3,2}, 刘佳², 夏群科²

1. 上海大学 文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444;

2. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058;

3. 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224007

Volcanic eruptions significantly modify surface environments and climate, with profound effects on biota across various spatial and temporal scales. The spatiotemporal evolution of the Mesozoic Yanliao and Jehol biotas in northern China—two world-renowned terrestrial lagerstätten—correlates with Jurassic to early Cretaceous volcanic activity during the destruction of the North China craton. However, the coupling mechanisms between terrestrial volcanism and biological evolution remain poorly understood. In this study, we measured chlorine, fluorine, and sulfur concentrations in clinopyroxene phenocrysts and apatite inclusions from Jurassic volcanic rocks in northern China. Using experimentally calibrated clinopyroxene/apatite-melt partition coefficients, we quantitatively estimate the volatile degassing during the origin (0.1-3 Gt Cl, 0.06-1

Gt F, and 0.03-1 Gt S), development and flourishing (3-57 Gt Cl, 2-21 Gt F, and 1-10 Gt S), and decay (34-1002 Gt Cl, 10-216 Gt F, and 4-136 Gt S) phases of the Yanliao Biota. Our results, integrated with previous studies, suggest that environmental degradation and climate cooling induced by substantial toxic gas emissions likely contributed to the decline of the Yanliao Biota and impeded the development of the Jehol Biota. In contrast, the relatively limited volatile fluxes, reduced harmful element delivery, and sufficient nutrient element supply from volcanic products may have fostered favorable conditions for the development and flourishing of both the Yanliao and Jehol biotas.

关键词: volcanic eruption; volatile flux; terrestrial biota; Mesozoic; northern China

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

基于机器学习预测洋中脊玄武岩原始 CO_2 含量 及其对地幔碳循环的启示

雷天婷¹, 刘佳^{1*}, 夏群科¹, 周靖钧¹, 栾志康¹

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

洋中脊玄武岩 (MORB) 是研究上地幔成分和深部碳循环的关键对象, 但其在岩浆上升过程中常经历显著去气作用, 导致原始碳含量难以直接测定。尽管早期研究利用未显著脱气的 MORB 样品的 CO_2/Ba 比值重建原始 CO_2 含量, 但随着数据积累, 发现 CO_2/Ba 比值变化较大, 限制了其作为可靠指标的应用。为此, 我们整合了全球未显著脱气的 MORB 玻璃及熔体包裹体数据, 构建监督式机器学习模型, 基于主微量元素含量精确预测 MORB 脱气前的 CO_2 含量。该模型显著拓展了全球 MORB 原始 CO_2 含量的数据库。模型预测结果表明, 全球

MORB 的 CO_2 含量及其 CO_2/Ba 比值呈现显著的空间不均一性, 其中太平洋 MORB 普遍表现出较高的 CO_2/Ba 比值。此外, 研究表明, 地幔碳含量的富集机制不仅与地幔柱活动密切相关, 再循环洋壳物质及古俯冲板片释放的流体可能同样是重要的碳源。本研究创新性地将机器学习方法引入地幔地球化学研究领域, 为深入理解地幔碳含量、分布特征及其相关动力学过程提供了新的研究范式和技术路径。

关键词: 洋中脊玄武岩; 地幔; 碳; 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金 (42022019 和 42373044) 及中央高校基本科研业务费专项资金 (K20210168)

第一作者简介: 雷天婷 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. Email: leitt1106@zju.edu.cn

*通信作者简介: 刘佳 (1985-), 研究员, 研究方向: 岩石地球化学. Email: liujia85@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

H₂O 和 CO₂ 在天池火山钠闪碱流岩中的溶解度实验研究

童欣宇¹, 侯通^{1*}, 王萌²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100000;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100000

挥发分在硅酸盐熔体中的溶解度对于岩浆的熔流性质、元素分配及物理化学条件均有显著的影响, 而 H₂O、CO₂ 作为岩浆中最主要的挥发组分, 其溶解行为直接会影响到岩浆粘度、气体出溶阈值及喷发方式, 所以开展 H₂O 和 CO₂ 在岩浆中的溶解度实验研究, 具有重要的火山学意义。本文以长白山天池火山全新世喷发的钠闪碱流岩 (SiO₂=71.49%, Al₂O₃=11.84%, P.I.=1.10) 为研究对象, 利用高温高压实验系统测定 H₂O 和 CO₂ 在钠闪碱流岩熔体中的溶解度, 并探讨其对喷发动力学的指示意义。实验条件温度为 850 °C, 压力梯度为 50、100 和 200 MPa, 实验设备为冷封式高压釜。实验产物中挥发分含量通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 定量分析, 其中测定 H₂O 的吸收峰在 3580 cm⁻¹ 处, CO₂ 吸收峰在 2349 cm⁻¹ 处。实验结果表明在纯 H₂O 体系中, 熔体中 H₂O

溶解度随压力升高显著增加, 硅酸盐熔体溶解度与压力呈正相关关系。在 H₂O-CO₂ 混合体系中, 压力为 50 MPa, 流体相中 H₂O/CO₂ 的摩尔比由 3:1 变化到 1:1 时, 熔体中溶解的 CO₂ 浓度从 7.81×10⁻⁶ 增至 56.26×10⁻⁶, 而 H₂O 的溶解度从 1.53% 降至 1.46%, 揭示了流体相中 CO₂ 的浓度的升高会降低 H₂O 的溶解度。实验初步建立了钠闪碱流岩中 H₂O-CO₂ 溶解度的定量模型, 并与全球 104 次火山喷发, 其中 59 次爆炸性喷发, 45 次溢流式喷发的流纹岩熔体成分和水含量数据作对比, 为评估火山喷发前岩浆储存条件提供了关键参数, 对长白山等大型破火山口的喷发类型预测与灾害预警具有重要应用价值。

关键词: 天池火山; 挥发分; 高温高压; 溶解度实验; 火山喷发

基金项目: 国家自然科学基金项目【岩浆储运系统温压计和速率计的实验优化】

第一作者简介: 童欣宇, 硕士研究生, 专业方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 1962668750@qq.com

通信作者简介: 侯通, 教授, 研究方向: 岩浆作用与成岩成矿实验. Email: thou@cugb.edu.cn

第二作者简介: 王萌, 副研究员, 研究方向: 岩浆活动与金属成矿作用. Email: mwang@cugb.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地幔过渡带条件下石榴石含水性的实验研究

张凯¹, 杨晓志^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

地幔中的水主要存储在名义上无水矿物的晶体结构中, 其含量显著影响地幔的物理化学性质(如流变强度、电导率、扩散行为等)和动力学过程(如地幔对流、岩浆演化等)。地幔过渡带(约 410~660 km)作为连接上、下地幔的关键层位, 其储水能力对于理解地球深部水储库和水循环至关重要。石榴石是地幔过渡带的主要组成矿物之一(体积占比约 40%), 但其含水性仍存在较大争议。前人大多通过在简单含水熔体体系中生长石榴石晶体进行含水性实验研究, 实验中未严格限定氧逸度、共存矿物组合等关键参数, 且生长晶体的成分与实际天然样品不完全匹配, 导致含水性数据差异显著(约 $125 \times 10^{-6} \sim 2900 \times 10^{-6}$ wt. H_2O), 难以准确评估其对地幔过渡带水储库的贡献及相关的地质学效应。基于此, 本研究选择了三种代表性天然宝石级石榴石单晶(成分匹配天然超深金刚石中源于地幔过渡带的石榴石包体)作为初始样品, 在 15~21 GPa、1300~1500 °C、Fe~FeO (IW) 氧缓冲剂和亚固相线条件下, 系统开展了含水性实验。我们使用了橄榄石和石榴石的混合粉末作为传压介质, 以模拟地幔过渡带的矿物组合(石榴石+瓦兹利石/林伍德石); 除纯 H_2O 体系之外, 还使用了 $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$ 混合流体体系来模拟真实地幔的复杂流体环境。实验结束后的样品经检测, 同时存在过剩水和氧缓冲剂的实验才被用于进一步的测定分析。产物石榴石经红外光谱检测表明普遍存在羟基形式的水, 结合进一步的分

析发现: (1) 所有石榴石样品的红外谱图全部在 $\sim 3630 \text{ cm}^{-1}$ 处呈现单一非对称的吸收峰, 这个峰一般被认为与石榴石式取代 ($\text{SiO}_4^{4-} = \text{O}_4\text{H}^{+}$) 有关, 这可能说明在地幔过渡带条件下, 石榴石中水的耦合主要受石榴石式的取代机制控制; (2) 共存流体为纯 H_2O 时, 石榴石羟基溶解度为 $85 \times 10^{-6} \sim 360 \times 10^{-6}$ wt. H_2O , 且系统性随温度和压强升高而增加, 而 $\text{H}_2\text{O}-\text{CH}_4$ 混合流体体系下石榴石羟基溶解度则会大大降低; 此外, 不同成分石榴石中羟基溶解度也存在一定差异(比如在 17 GPa、1400 °C 及纯 H_2O 作为流体时分别为 211 、 115 和 311×10^{-6} wt. H_2O)。这说明体系流体组成和化学成分均会影响石榴石的含水性; (3) 基于实验数据建立石榴石储水能力随深度的定量关系表明, 地幔过渡带中石榴石的储水能力随深度增加呈线性增强, 推测约在 660 km 处的最大值仅为 $300 \times 10^{-6} \pm 50 \times 10^{-6}$ wt. H_2O , 显著低于瓦兹利石/林伍德石 (2%~3% H_2O), 这意味着石榴石不可能显著影响地幔过渡带中水的总储量; (4) 冷俯冲洋壳在地幔过渡带深部以石榴石为主要组成矿物, 而其低温特性将进一步抑制对应条件下石榴石的储水能力, 使得以石榴石为主的俯冲板片不太可能将大量水再循环到地球过渡带。

关键词: 石榴石; 亚固相线; 含水性; 地幔过渡带; 深部水循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230301, 42421002, 423B2202, 41725008)

第一作者简介: 张凯 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: zhangk@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 杨晓志 (1980-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: xzyang@nju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地幔热状态差异控制中-东亚南北重力梯度带 两侧岩浆巨晶种类

胡琳琳¹, 戴宏坤^{1*}, 熊庆¹, 郑建平¹

1. 中国地质大学(武汉) 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

岩浆巨晶(如单斜辉石、角闪石等)通常产于陆内火山岩中,代表了早期岩浆活动的深部堆晶,可以记录岩浆组成和环境条件(如 P - T - fO_2 - H_2O)。中-东亚地区晚中生代-新生代的玄武岩中普遍含有各类岩浆巨晶,晶体种类存在明显的空间差异:南北重力梯度带东侧的玄武岩一般不出现角闪石巨晶,而西侧通常不含单斜辉石巨晶,其控制因素尚不清楚。为此,我们聚焦于华北西北部同时出现单斜辉石和角闪石两种巨晶的狼山-潮格火山岩区,巨晶的寄主岩为玄武岩,其形成年代分别为 95 Ma 和 89 Ma。研究发现,两类巨晶是组成相似的玄武质岩浆在壳-幔过渡带的堆晶,记录了相似的温压条件(单斜辉石: 0.8~1.2 GPa, 1061~1143 °C; 角闪石: 1.1~1.2 GPa, 1068~1129 °C)和不同岩浆含水量(单斜辉石: H_2O =

2.1%~2.8%; 角闪石: H_2O = 3.6%~4.7%),母岩浆都起源于软流圈顶部并不同程度含有水化岩石圈地幔熔体贡献。结合区域岩石圈在 110~80 Ma 期间存在持续冷却和两类矿物的稳定域范围,我们提出地温梯度变化是控制该地区 95 Ma 和 89 Ma 玄武岩中巨晶类型差异的关键因素,即相对热的岩石圈具有较弱的储水能力,难以为岩浆系统提供富水熔体。考虑到中-东亚岩石圈厚度及构造环境在晚中生代以来存在显著东、西差异,我们认为巨晶类型差异主要体现不同热状态岩石圈对挥发分保存能力的差别,东侧大地幔楔环境的高温岩石圈不利于含水矿物长期保存。

关键词: 岩浆巨晶; 华北西北部; 南北重力梯度带; 岩石圈热状态; 中-东亚大陆

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104001 & 42272053), 国家重点研发项目(2023YFF0804404)

第一作者简介: 胡琳琳(1994-), 博士研究生, 研究方向: 地幔岩石学. Email: gemxiaohu@foxmail.com

*通讯作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 博士生导师, 研究方向: 地幔岩石学与热力学模拟. E-mail: hk dai@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

华北克拉通东北缘地幔的性质和演化:
以辉南地幔包体为例吴丹¹, 曹毅^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074

为精细阐明华北克拉通东北缘岩石圈地幔性质及其所经历的部分熔融作用、地幔交代作用等过程, 本研究以吉林辉南新生代玄武岩中地幔包体为对象, 开展了详细的岩相学和地球学的研究。根据矿物组成, 将地幔包体分为橄榄岩和橄榄辉石岩, 其中橄榄岩可分为两类。第一类橄榄岩为纯橄-方辉橄榄岩系列: 粗粒残碎斑结构, 具高的全岩 $Mg^{\#}$ 值(90.7~92.1) 以及低的全岩 CaO 和 Al_2O_3 含量, 平衡温度 TBKN 为 937~1116 °C。根据单斜辉石稀土元素配分曲线形态, 可将第一类橄榄岩进一步分为两个亚类: ① LREE 亏损型, 反映不同部分熔融程度的特点; ② LREE 富集型, 可能是部分熔融后受地幔交代的产物。第二类橄榄岩为二辉橄榄岩: 残碎斑状结构, 具低的全岩 $Mg^{\#}$ 值(89.6~91.4) 以及高的全岩 CaO 和 Al_2O_3 含量, 平衡温度 TBKN 为 848~1175 °C。根据单斜辉石稀土元素配分曲线形态, 可将第二类橄榄岩进一步分为两个亚类: ① LREE 亏损型, 可能是熔体与第一类橄榄岩反应形成; ② LREE 富集型, 可能是二辉橄榄岩形成后受地幔交代作用改造形成的。第一类橄榄岩可能代表了受弱硅酸盐熔体交代改造的古老岩石圈地幔部分熔融残余, 而第二类橄榄岩可能代表了受强硅酸盐熔体交代的再富集地幔。橄榄辉石岩: 具有残碎斑结构, 斜方辉石具有高的 $Mg^{\#}$ (91.1~91.9), 平衡温度 TBKN 为 921~978 °C, 单斜辉石富集 LREE、U、Th, 是熔体-橄榄岩反应的产物。岩相学和地球化学结果表明: 研究区岩石圈地幔经历

了两期熔体-橄榄岩相互作用。早期交代过程中, 熔体含量高, 发生大规模熔体-橄榄岩相互作用, 使得大部分亏损难熔的岩石圈地幔向富集的岩石圈地幔转变。由于交代的熔体不富集轻稀土元素, 使得形成的二辉橄榄岩单斜辉石轻稀土亏损, 该熔体可能来自于亏损的软流圈上涌。晚期交代过程中, 熔体含量低, 仅发生局部的熔体-橄榄岩相互作用, 形成轻稀土富集的橄榄岩和橄榄辉石岩。这些岩石中广泛发育海绵边和熔体囊结构, 个别样品局部发育嵌晶结构或熔体囊中发育角闪石, 同时单斜辉石具有弱的高场强元素亏损, 富集 Th、U, 高 Ti/Eu, 低(La/Yb)_N, 指示含水硅酸盐熔体的交代作用。这期地幔交代作用可能与太平洋俯冲有关。在俯冲过程中, 滞留在地幔过渡带的俯冲板片脱水部分熔融, 导致上覆大地幔楔中软流圈富集, 发生部分熔融, 形成含水硅酸盐熔体, 熔体在上升的过程中与岩石圈地幔相互作用, 使得部分橄榄岩发生交代作用, 局部熔体聚集的地方形成辉石岩。太平洋的俯冲可能对华北克拉通东北缘岩石圈地幔的形成演化起了重要的作用。该地区岩石圈地幔在垂向上具有明显不均一性, 既有饱满的岩石圈地幔又有古老难熔的岩石圈地幔残余。其中, 饱满的岩石圈地幔的成分接近于原始地幔, 代表了再富集的古老残留岩石圈地幔, 而非从软流圈新增生的岩石圈地幔。

关键词: 熔体-橄榄岩相互作用; 太平洋俯冲; 大地幔楔; 含水硅酸盐熔体

基金项目: 国家自然科学基金面上项目

第一作者简介: 吴丹, 博士研究生, 研究方向: 地幔包体地球化学及其显微构造, 975662285@qq.com

通信作者简介: 曹毅, 教授, 研究方向: 显微构造, caoyi0701@126.com

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

由大陆边缘海地幔不均一水含量揭示板块俯冲作用与大陆裂解的关联

杨帆^{1*}, 黄小龙², 徐义刚², 杨亚楠²

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

大陆的聚合与裂解是地球的基本构造演化模式。板块俯冲在大陆裂解过程中所起的作用一直备受争议。前人研究认为板块俯冲可能会引发地幔流循环, 为大陆岩石圈的伸展以及最终裂解提供所需的剪切力。然而, 这一假设常常因缺乏将板块引发的地幔流与裂解过程联系起来的地质证据而受到质疑。我们的研究为此提供了新的地质证据。我们通过对南海初始扩张与扩张期玄武玻璃的系统研究, 发现了南海从初始破裂到结束地幔水含量的高度不均一性。南海初始扩张期间 E-MORB 的关键元素比值 H_2O/F , H_2O/Ce 高于扩张末期西南次海盆 E-MORB 的 H_2O/F , H_2O/Ce , 指示更多的含水再循环洋壳物质的贡献。

南海洋壳的岩浆增生比例(M 值)显著高于开放大洋, 而我们也发现地幔含水再循环洋壳物质贡献与海盆拉张过程中 M 值成正比, 意味着南海初始拉张过程中地幔含水再循环洋壳物质为南海初始裂解提供了额外岩浆来源。我们提出这些额外的岩浆最可能由俯冲板片触发南海北缘地幔过渡带顶部低速层上涌熔融所引发。这些俯冲诱发的额外岩浆供给使得大陆边缘海早期扩张阶段形成了一种过渡型陆缘结构, 这也为过渡型大陆边缘的成因机制提供了一种解释。

关键词: 水; 俯冲; 大陆裂解; 南海; 洋中脊玄武岩

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

利用磷灰石示踪岩浆管道系统挥发分行为： 揭示辽西早白垩世火山喷发前过程

徐其虎¹, 夏群科^{2*}, 刘佳², 王璐³, 顾笑龔², 陈欢⁴

1. 江苏海岸带资源环境演变与智能调控重点实验室, 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224007;

2. 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058;

3. 硅酸盐文物保护教育部重点实验室, 上海大学, 上海 200444;

4. 海洋地质与资源探测研究所, 河海大学 海洋学院, 南京 210098

火山作用(喷发类型、规模等)是影响壳幔物质循环、成矿成藏以及地球宜居性的重要过程。岩浆管道系统中挥发分(H、C、S 和卤素等)的迁移行为是控制喷发类型和规模的关键因素,但其动态过程仍缺乏有效示踪手段。磷灰石可以将多种挥发分元素(H、C、S、Cl 和 F)结合其结构中,被认为是追踪岩浆挥发分的重要工具。本文以辽西早白垩世火山岩(流纹岩、玄武岩、安山岩)为研究对象,利用电子探针针对磷灰石包裹体(寄主在其它矿物中的磷灰石)和磷灰石微晶进行测试,结合矿物成分、主微量元素,

从而更加准确地反演岩浆的储存深度并示踪挥发分在不同深度的行为。结果显示(1)张家口组流纹岩和四合屯玄武岩在喷发前水含量趋于饱和,推测可能是爆发式喷发;(2)义县玄武岩和四合屯高镁安山岩喷发前水含量不饱和,推测可能是溢流式喷发。本研究从磷灰石的视角示踪了古火山岩浆通道中挥发分行为,这为探讨火山喷发对环境的影响提供了新的佐证。

关键词: 挥发分; 磷灰石; 岩浆管道系统; 早白垩世火山岩; 辽西

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(41688103), 国家自然科学基金青年基金项目(42403047), 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(24KJD170003)

第一作者简介: 徐其虎(1990-), 讲师, 研究方向: 地球内部挥发分, 火山学. Email: xuqh@yctu.edu.cn

通信作者简介: 夏群科(1972-), 教授, 研究方向: 地幔地球化学, 岩石学, 火山学. Email: qkxia@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Low fraction of volatile-charged carbonate melts in the upper mantle

黄永胜^{1*}, Guoji Wu^{1,2}, Xuran Liang³, Kaiwei Tao^{1,2}, Michihiko Nakamura⁴,
Yuan Li⁵

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

4. 日本东北大学 地球科学系, 仙台 000000;

5. 德国拜罗伊特大学 巴伐利亚地球科学研究所, 拜罗伊特 000000

Carbonate melts serve as an ideal medium for metasomatism, facilitating the global material cycle between Earth's surface and its interior. Recently, high electrical conductivity and low seismic wave velocity anomalies have been detected at the bottom of upper mantle, which are attributed to the presence of carbonate-rich melt. However, the spatial distribution of carbonate-rich melt in the mantle rock remains elusive. Here, we experimentally investigate the effects of volatiles (H_2O and NaCl) and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ on the dihedral angle in olivine-carbonate melt systems under upper mantle conditions. Our findings reveal that the addition of volatiles significantly reduces the dihedral angle, reaching nearly 0° even at 1 GPa and 1200 °C. Our results indicate that, at the bottom of the upper mantle,

volatiles-bearing carbonate melt can completely wet the olivine grain boundaries. The decrease in dihedral angle is probably attributable to the high solubility of olivine in a low-viscosity carbonate melt containing volatiles. Our model calculations show that a minimal volume fraction of volatiles-bearing carbonate melt, ranging from 0.0002 vol% to 0.06 vol%, sufficiently explains the observed high electrical conductivity and low velocity anomalies. The interconnected networks/films of volatile-charged carbonate melts effectively facilitate the permeation of melt, ultimately resulting in extensive metasomatism and matter transport within the upper mantle.

关键词: upper mantle; carbonate-charged melt; dihedral angle; complete wetting; melt volume

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Fluoritites produced by crystallization of carbonate-fluoride magma

Aleksandr Stepanov^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074

Magmatism on the Earth is dominated by silicate liquids. However, less common sulfide and carbonate melts attract a lot of attention due to their economic significance and anomalous geochemical properties. Experimental data suggest that fluoride and carbonate-fluoride melts could exist at conditions relevant to terrestrial magmatic systems (Veksler 2004; Yang and van Hinsberg 2019; Xue et al. 2024), yet the evidence of such melts in the crust remains tentative. Products of crystallisation of fluoride-rich melts have been observed as aggregates of F-rich minerals in topaz-bearing felsic rocks, peralkaline granites, and calcite-fluorite aggregates. Fluoride-rich melt inclusions have been discovered in the peralkaline granite of the Strange Lake pluton, Canada (Vasyukova and Williams-Jones 2016). The findings of fluid inclusions in fluorite-rich rocks led to interpretation of crystallization of these rocks from hydrous fluids and in magmatic-hydrothermal processes (Redina et al. 2020, 2021). While these observations demonstrate that fluoride-rich melts could form during the late stages of silicate and carbonate magma crystallization, the existence and appearance of rocks produced by such melts remains enigmatic. Rocks with high fluorite content, sometimes associated with carbonatites, have been observed in multiple locations (刘金字 et al. 2024), and are known

in several REE deposits in China (Xu et al. 2008). However, the geology, petrography and geochemistry of these rocks is rarely characterised in detail.

The Dunkeldyk area of the Pamir mountains in south-eastern Tajikistan contains dikes of distinctive rocks composed of calcite, fluorite, celestine-barite, sulfides, apatite, with minor quartz, biotite, and REE-fluorcarbonates (Stepanov et al. 2024; Stepanov et al. 2024). The dikes have sharp contacts with the host (meta-) sedimentary rocks and layering with ribbons, ranging from fluorite-bearing calcite carbonatites to fluoritites (rocks with >50% fluorite). The fluoritites are characterised by high Ca, F, Ba, Sr, REE and S coupled with anomalously low O. The geologic relations and textures suggest a magmatic origin of the dikes from melts close to calcite-fluorite eutectic that experienced nucleation-controlled differentiation during the crystallization of dikes and the formation of fluoritite cumulates in larger intrusions. The Dunkeldyk dikes demonstrate that sizable geological bodies of fluorite-dominated rocks could form from carbonate-fluoride melts originating by differentiation of alkaline silicate magmas.

关键词: fluoride-rich melt; carbonate-fluoride melt; fluoritite; Dunkeldyk dikes

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲起始含水岩浆诱发地幔辉石岩和纯橄岩形成

李宇¹, 曾罡^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

辉石岩仅占上地幔体积的 2%~10%，是地幔中最重要的岩性不均一之一。橄榄岩中辉石岩脉的形成通常归因于迁移的熔体，为壳幔相互作用提供了重要的机制。位于土耳其东北部的 Divrigi 蛇绿岩是新特提斯洋的弧前残片，发育了较为完整的蛇绿岩序列。在局部，观察到单斜辉石岩脉侵入至纯橄岩中，辉石岩的全岩和单矿物主量成分均指示其堆晶成因。计算出与辉石岩中单斜辉石平衡的母熔体具有玻安质岩浆的特征。通过对含水的低 Si 高 Ca 玻安质岩浆的岩石学结晶模拟显示了与单斜辉石岩一致的尖晶石、橄榄石、单斜辉石和斜方辉石结晶序

列。此外在纯橄岩中发育有高 Cr 型铬铁矿，并在铬铁矿中观察到角闪石等含水矿物包裹体，计算出与铬铁矿平衡的母熔体在主量成分上也具有玻安质岩浆的特征。据此我们推测，在俯冲起始阶段，含水的地壳物质俯冲导致地幔橄榄岩部分熔融产生一种含水的低 Si 高 Ca 玻安质岩浆，该岩浆侵入至地幔橄榄岩中经历堆晶形成了单斜辉石岩。同时，岩浆还与周围的地幔橄榄岩发生反应，诱发纯橄岩及高 Cr 型铬铁矿的形成。

关键词：辉石岩；玻安质岩浆；俯冲起始

基金项目：国家自然科学基金项目（42322202）

第一作者简介：李宇（2001-），硕士研究生，研究方向：岩石学. Email: yvli@smial.nju.edu.cn

*通信作者简介：曾罡（1985-），副教授，研究方向：火成岩与地幔地球化学. Email: zgang@nju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

大陆板内玄武岩铁同位素记录不均一软流圈 与地幔岩石圈的贡献

徐荣^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

为了进一步阐明不同地幔组分对大陆板内玄武岩地幔源区的物质贡献, 我们对华南浙江地区新生代玄武岩进行了系统的 Fe 同位素研究 (Xu 等, 2024)。结果表明这些玄武岩的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 SiO_2 、 $\delta^{66}\text{Zn}$ 、 Ca/Al 、 Zr/Nb 、 Ti/Eu 、 Hf 异常、 Dy/Yb 、 La/Yb 、 Nb/Y 、平衡压力、 K/La 、 Sr/Ce 比值具有相关性。此外, 早期低硅玄武岩具有中等富集的 Sr-Nd 同位素和高的 $\delta^{56}\text{Fe}$; 而晚期高硅玄武岩则表现出随着 SiO_2 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的增加和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的降低, $\delta^{56}\text{Fe}$ 大致呈现逐渐降低的趋势。正常地幔橄榄岩减压或者等压部分熔融都不足以产生足够大的 Fe 同位素分馏; 而源区氧逸度变化以及高压石榴石效应也都无法解释样品的 Fe 同位素变化。在排除了交代橄榄岩部分熔融的可能性之后, 我们认为 Fe 同位素主要反映了辉石岩组分的贡献。结合主-微量元素、其它同位素、温压结果, 我们认为早期重 Fe 同位素的低硅玄武岩是由含碳酸盐化榴辉岩/辉石岩的软流圈地幔在相对高压下发生减压熔融的产物; 晚期高硅岩浆则是由于软

流圈进一步减压熔融到更浅深度的产物, 这导致亏损橄榄岩组分的贡献增加, 从而稀释了易熔组分重的 Fe 同位素信号。然而, Fe 同位素随着 K/La 和 Sr/Ce 的变化趋势以及与 Sr-Nd 同位素的关系无法仅仅用不均一软流圈地幔减压熔融来解释, 还需要有交代地幔岩石圈组分的贡献, 这也可以合理解释样品的主-微量元素以及其它同位素特征。综上所述我们得到以下几点认识: (1) 含碳酸盐化榴辉岩/辉石岩组分的软流圈地幔在高压下发生低程度部分熔融可以形成观察到的重 Fe 同位素特征; (2) 进一步减压熔融随后与岩石圈地幔底部熔体混合导致轻 Fe 同位素特征; (3) 喷发在厚岩石圈之上的大陆板内玄武岩更有利于保存深部软流圈熔体的重 Fe 同位素特征; (4) Fe 同位素可以用来示踪大陆板内玄武岩地幔源区不同岩性的贡献。

关键词: 板内玄武岩; 铁同位素; 辉石岩; 岩石圈; 软流圈

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

循环洋壳中硫的深部循环: 板内玄武岩的记录

汪翔^{1*}, 汪在聪¹, 孙普², 杨宗锋³

1. 中国地质大学(武汉) 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

硫是地球系统中常见的挥发分之一。作为多价态的氧化还原敏感元素, 其在俯冲带的迁移循环对于理解地幔不均一性和氧化还原演化、金属的迁移富集与成矿作用、弧火山二氧化硫释放与环境气候变化起着重要的作用。蚀变洋壳是俯冲大洋板片中硫释放的最大贡献者, 尽管前期研究对蚀变洋壳在岛弧弧下/弧前深度释放硫的价态和同位素组成进行了广泛的研究, 但对于硫在更深的地幔循环还不太清楚。本研究聚焦于中国东部新生代板内玄武岩, 其深部地幔源区(>100 km) 受到了来源于太平洋洋壳来源熔体的改造, 能够揭示循环洋壳对深部硫循环的贡献。这些玄武岩携带许多含硫化物包裹体的高 $Mg^\#$ 单斜辉石巨晶, 其平衡熔体具有和寄主玄武岩一致的微量元素含量、分配模式以及 Sr 同位素组成, 指示其母岩浆与寄主玄武岩熔体来源于相似的深部地幔源区。因此, 考虑到地幔部分熔融和硫化物结晶分异过程中有限的硫同位素分馏, 辉石巨晶硫化物包裹体的硫同位素组成能够揭示新生代玄武岩及其地幔源区的硫同位素组成。结合其略高于亏

损地幔和冰岛玄武岩的 Sr-S 同位素以及低 Pb 同位素和壳源的 O 同位素组成, 这些特征都支持了地幔源区存在有再循环物质的加入。然而, 其地幔源区 $\delta^{34}S$ 值非常一致 ($\delta^{34}S$: $0 \pm 0.9\%$), 且与 MORB 相似, 表明蚀变洋壳来源熔体未能显著改变深部地幔的硫同位素组成。此外, 模拟计算结果表明, 无论是来源于蛇纹岩的氧化性流体还是蚀变洋壳自身释放的氧化性流体或熔体, 均无法解释中国新生代玄武岩地幔源区整体接近于 0 的硫同位素组成。因此, 源于深部循环洋壳的熔体整体是以还原性硫为主, 保留了脱水的玄武质洋壳的特点, 难以显著改造深部地幔的 $\delta^{34}S$ 和氧逸度组成。这与浅部地幔楔和弧岩浆的重硫同位素组成和氧化的特点显著不同, 表明俯冲板片释放流体/熔体中硫的价态、同位素组成以及相关的氧逸度并非恒定的, 而是会随着俯冲深度的变化而变化。

关键词: 硫循环; 大陆板内玄武岩; 循环洋壳; 氧化还原过程; 中国东部

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

岩石圈金刚石记录了克拉通的古地理亲缘性?

Zhou Zhang^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

克拉通为理解早期地球的形成过程提供了关键线索, 包括大陆形成、构造活动以及生命的演化。尽管各克拉通具有独特的地质历史, 但其相关性研究能揭示大陆形成与全球构造活动规律。例如, 克拉通关联性为元古代以来的超大陆旋回及太古代超级克拉通假说提供关键证据。虽然地质观测(如镁铁质岩墙和古地磁数据)为重建古大陆提供了关键证据, 但克拉通下伏的岩石圈地幔根部对其形成与演化的理解同样至关重要。本研究通过研究克拉通岩石圈金刚石及其矿物包裹体的成分变化和亲缘关系, 揭示了岩石圈地幔根部的形成与演化过程。我们整合了来自 304 篇文献的全球数据集, 包括 12138 个地幔金刚石和 12080 个包裹体矿物数据, 涵盖了金刚石的地球化学数据($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素比值、氮含量)以及矿物包裹体的元素含量。通过结合机器学习(LightGBM 算法)和统计建模, 我们分析了这些化学成分以评估克拉通之间的亲缘关系和相似性。研究表明, 来自 Kaapvaal、Amazon、Siberia 以及 Slave 克拉通的

金刚石在化学上相似, 这与它们在元古代超大陆聚合过程中的古地理联系一致。相比之下, Kimberley (Australia) 和华北克拉通则表现出独特的化学特征, 与 Kaapvaal, 金刚石和包裹体矿物的中心-中心相似性得分最低, 分别为 0.58 和 0.36, 反映了它们的相对孤立性和独特的构造过程。与太古宙克拉通形成相关的橄榄岩型金刚石表现出更紧密的成分相似性, 而与俯冲相关过程相关的榴辉岩型金刚石则显示出更广泛的变异性。机器学习利用包裹体化学成分有效分类了克拉通亲缘性, 但仅依靠金刚石同位素数据的效果较差, 凸显了多元素分析的重要性。尽管数据集具有较高的鲁棒性, 但采样偏差和稀疏的年代学数据(仅 5% 的金刚石具有年龄信息)等局限性表明仍需进一步研究。本研究建立了一个数据驱动的金金刚石研究框架, 结合机器学习和统计分析与传统地质方法, 推动了对克拉通演化和地球构造历史的理解。

关键词: 机器学习; 金刚石; 地球化学; 克拉通

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲洋壳中砷化镍型富铝含水二氧化硅在深下地幔条件下的稳定性

姚瑶¹, 张莉^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

部分俯冲板片能够穿越下地幔到达核幔边界, 俯冲板片中的水是否能输送至核幔边界取决于其中含水相在深下地幔条件下的热稳定性。俯冲洋壳中含约 20% 的游离态二氧化硅, 二氧化硅高压相是下地幔重要的水载体。在下地幔顶部压力条件下含 10% 氧化铝的 CaCl_2 型后斯石英的含水量超过 1%, 其 H/Al 摩尔比达到 0.7, 表明电荷耦合取代机制 $\text{Si}^{4+} = \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ 是下地幔重要的储水机制。更高温高压的实验进一步发现 NiAs 型六方二氧化硅相可包含约 30% 以上的氧化铝且其含水量也进一步增加, 表明在下地幔条件下 AlOOH 组分在水的存储和运输中发挥了重要作用。本研究在激光加热金刚石压腔中开展了高温高压实验, 研究了在深下地幔条件下近似俯冲洋壳成分的多组分

体系 $\text{MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 中的储水相及其热稳定性。通过对高温高压实验产物开展的同步辐射 X 射线衍射测试以及对回收样品的透射电镜化学分析, 我们发现在 96~106 GPa 和 2000~2300 K 的条件下, 含 28.5% Al_2O_3 的 NiAs 型二氧化硅与含 8.2% Al_2O_3 的布里奇曼石共存, 表明俯冲洋壳中的 NiAs 型富铝二氧化硅在深下地幔沿正常地温线保持稳定。我们目前正在开展核幔边界条件下俯冲洋壳中该含水相的热稳定性的研究。含水俯冲洋壳在高温高压下的相变以及部分熔融对解释核幔边界的复杂结构有重要意义。

关键词: 下地幔; 高温高压; 俯冲洋壳; 含水相; 二氧化硅

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42150103)

第一作者简介: 姚瑶 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验矿物学. Email: yao.yao@hpstar.ac.cn

通讯作者简介: 张莉 (1980-), 研究员, 研究方向: 高温高压实验矿物学. Email: zhangli@hpstar.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

金伯利岩与古老大陆亲缘性蕴含大陆长寿之谜

戴宏坤^{1*}, 郑建平¹, 熊庆¹

1. 中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

巨厚、难熔、低温岩石圈深根是大陆长寿之根本, 在与软流圈之间相互作用过程中能长期保存, 但具体机制还不清楚。目前的研究大多是基于岩石圈根本身, 主要讨论软流圈如何影响岩石圈, 还缺乏岩石圈根如何影响软流圈的研究。金伯利岩是古老大陆地区特有的来源于软流圈顶部的岩浆岩, 可以用于揭示古老大陆深根之下的软流圈化学组成和物理状态, 进而从软流圈的角度揭示大陆长寿之谜。为此, 我们在详细评估岩石圈混染和后期蚀变影响的基础上, 系统计算了华北及全球典型金伯利岩的熔体抽取条件。研究发现, 金伯利岩岩浆的起源压力一般为 5 GPa 及以上, 熔体抽取主要发生在岩石圈厚度剧变处的软流圈顶部, 熔融区的潜热温度低于同时期软流圈温度、高

于古老大陆深根的温度, 显示低温大陆深根对软流圈热状态的影响, 低温、巨厚的古老大陆岩石圈为金伯利岩的形成创造了合适的温压条件。此外, 黏度估算显示温度对地幔黏度具有重要影响, 软流圈顶部的温度降低会导致黏度显著增加, 从而在低温古老大陆深根之下形成一层粘滞的“保护壳”, 避免下方炙热软流圈对古老大陆深根的侵蚀和改造, 促进了古老大陆长期保存。详细内容见 Dai et al., 2025, *Chemical Geology* 676, 122621. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.122621>.

关键词: 金伯利岩; 岩石圈-软流圈界面; 圈层作用; 大陆命运

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104001 & 42272053)和国家重点研发项目(2023YFF0804404)

第一作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkdai@cug.edu.cn

通讯作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkdai@cug.edu.cn

专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 ·

布里基曼石的稳定性以及深下地幔低波速异常体的成因

张莉^{1*}

1. 北京高压科学研究中心 上海分中心, 上海 201203

太平洋和非洲板块位于深度 2000 千米以下的大型低剪切波速省 (LLSVPs) 是下地幔最显著的结构特征, 而且超级地幔柱起源于地幔底部的低剪切波速区 (French and Romanowicz, 2015), 地表的热点位置与深下地幔 LLSVPs 之间的垂直对应关系进一步表明了核幔边界过程可能控制地表的重大地质事件 (Thorne 等, 2004; Burke 等, 2008)。布里基曼石($\text{Mg, Fe}(\text{Fe, Al, Si})\text{O}_3$) 是下地幔的主要组成矿物, 同时下地幔是重要的潜在储水库, 然而我们对于水和高温高压如何影响矿物性质以及深下地幔结构知之甚少。通过多晶 X 射线衍射技术分离多相体系中各个矿物相的亚微米晶

粒, 结合对回收样品的化学分析, 我们可以获取高温高压条件下地幔体系的矿物组成 (Zhang 等, 2022)。当温度和压力达到下地幔 2300 千米深度以下的条件时, 含水体系中的布里基曼石中二价铁稳定, 而同等温度压力条件下干燥体系中布里基曼石的二价铁发生歧化反应并导致其贫铁 (Zhang 等, 2024)。该实验结果揭示了深下地幔发生化学分层以及形成横向不均一结构的矿物学成因。

关键词: 高温高压实验; 矿物物理; 布里基曼石; 下地幔; 深部水循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42150103)

通讯作者简介: 张莉 (1980-), 研究员, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: zhangli@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

下地幔主要矿物的含水量的高温高压实验研究

刘兆东^{1*}, 陈陆瑶¹, 许文良¹

1. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130012

水是影响地球气候、环境和宜居性的重要挥发分, 对地球表层地质活动、板块构造和深部动力过程都起着至关重要的作用。水在地球内部的存储一直是地球科学领域的前沿科学问题。现有研究表明地球的上地幔含水量较少(低于 100×10^{-6}), 地幔过渡带至少部分区域是富水的(0.1%~1%)(Ohtani, 2015, 2020), 天然超深样品也发现了含水林伍德石、冰-VII 等, 更深部的下地幔是地球内部体积和质量最大的圈层, 从地表以下 670 公里一直延伸到 2890 公里, 下地幔温压条件极为苛刻, 天然样品非常稀少, 带来了诸多挑战, 下地幔是否含水, 含多少水, 如何存储和循环一直悬而未决。下地幔主要名义无水矿物的含水量的研究强烈依赖于高温高压实验技术的发展。特别是大腔体压机的高温高压实验技术直接决定是否可以合成大尺寸、高品质的下地幔单晶矿物, 能否满足精确的含水量实验分析表征与研究。我们发展适用于大尺寸单晶

矿物合成的大腔体压机超高温高压关键技术, 在富水环境下, 在 17~32 GPa 和 1700~2000 K 合成大尺寸、不含流体包裹体的单晶(Mg, Fe)(Si, Al) O_3 布里奇曼石、石榴石、 SiO_2 斯石英、刚玉和方镁石, 系统的研究这些矿物的含水量随压力和温度的变化关系, 发现(Mg, Fe)(Si, Al) O_3 布里奇曼石、刚玉和方镁石是基本不含水的, SiO_2 斯石英和石榴石是富水的, 当石榴石和斯石英共存时, 水会主要进入到斯石英晶体中; 同时, 我们合成了新晶体结构的 phase H 固溶体; 研究结果进一步表明地幔岩的下地幔顶部 660~800 km 主要是干的, 以 Al- SiO_2 斯石英和石榴石为主要成分的大洋玄武岩可以将水带入下地幔, 为理解地球内部水的存储和分布提供重要数据支撑。

关键词: 水; 下地幔; 高温高压; 布里奇曼石; 石榴石

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272041)

第一作者简介: 刘兆东(1986-), 教授, 研究方向: 地球深部物质科学与高压材料 E-mail: Liu_zhaodong@jlu.edu.cn

*通信作者简介: 刘兆东(1986-), 教授, 研究方向: 地球深部物质科学与高压材料 E-mail: Liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

从俯冲带中 CaCO_3 到 MgCO_3 的转化认识碳的深地输运机制

张馨月¹, 毛竹^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

碳是影响生命生存及地球宜居性的关键挥发性元素, 每年有可高达 52 兆吨的碳伴随俯冲板片进入地球内部。碳酸盐矿物被认为是地球内部碳的主要载体, 可被俯冲洋壳携带至过渡带甚至下地幔, 对地幔熔融、金刚石形成等一系列地质过程产生重要影响。然而, 碳酸盐矿物在地球内部的存在形态、存在条件及其对地幔主要组成的硅酸盐矿物的影响仍存在争议。早期辉石与碳酸钙体系的实验表明, 在高压下碳酸钙会与辉石反应逐渐转换为白云石并最终菱镁矿的状态稳定 (Kushiro, 1975), 然而, 近期的研究指出, 菱镁矿在下地幔底部会再次转变为碳酸钙 (Lv 等, 2021)。此外, 更有实验表明, 碳酸盐化的俯冲

洋壳在 300~700 公里深度可能产生部分熔融, 阻碍碳酸盐向深地幔的输运, 进一步表明地球内部的碳输运过程极为复杂 (Thomson 等, 2016)。在本项研究中, 我们利用多面砧大腔体压机技术, 在地幔过渡带温压条件下, 探讨了不同成分洋中脊玄武岩对地幔碳输运的影响。实验结果表明, 温度和洋中脊玄武岩成分对碳在地球内部的存在形式具有重要影响。本项研究有助于理解地幔中碳的赋存状态, 并为解释相关地球物理异常提供重要依据。

关键词: 俯冲板片; 碳酸盐; 温度效应; 成分影响

第一作者简介: 张馨月 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: zxy0331@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 毛竹 (1982-), 教授, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: zhuma@ustc.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

龙岗火山群东区火山的橄榄岩包体的晶体粒度分布与分形特征

王亚楠¹, 刘永顺^{1*}, 聂保锋¹, 周淑媛¹, 薛晨莉¹, 冯玮霞¹, 孙玉菁¹, 江姗¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048

龙岗火山群位于吉林省靖宇县、辉南县的龙岗山脉中段, 大地构造上属于中朝克拉通北缘, 受宽甸—龙岗—敦化深断裂控制。区内火山沿着北东向、北西向和近东西向三组盖层断裂分布。前人对龙岗火山群的部分著名火山(如金龙顶子、大龙湾、龙泉龙湾、大椅山等)的火山学、岩石学、地球化学、地幔岩石学做了大量研究, 但对其东区火山(如南山、双山子、大旺山、李太山、东山、陶小山等)涉及甚少。东区火山主要是斯通博利式喷发类型, 其中南山、大旺山、陶小山等含有大量幔源包体(包括尖晶石二辉橄榄岩、含金云母的尖晶石二辉橄榄岩等), 这些幔源包体为认识地球深部地幔物质组成、结构、演化及动力学过程提供了直接途径。目前, 地幔包体的研究多侧重于从物质组成角度来研究, 而从结构量化角度来探索地幔组成、结构及其演变动力过程, 尚很薄弱。本研究基于晶体粒度分布(CSD: Crystal Size Distribution)与分形(Fractal)理论, 以野外火山地质考察、室内显微岩相学研究为基础, 开展了初步的橄榄岩包体的定量岩相结构研究, 以期揭示龙岗东区火山群的深部地幔的复杂演变机制和过程。研究结果表明: (1) 龙

岗火山群东区火山的尖晶石二辉橄榄岩的橄榄石属于镁橄榄石; 斜方辉石属于斜顽辉石; 单斜辉石属于透辉石和顽透辉石; 尖晶石属于镁(铁)铝尖晶石。(2) 橄榄岩中的橄榄石与单斜辉石晶体粒度与数量密度在一定范围内呈现较好的幂律关系, 且幂律指数 $G\tau$ 相近(注: $G\tau$ 代表晶体平均生长速度 G 与晶体平均生长时间 τ 的乘积), 橄榄石幂律指数范围为 2.02~2.54, 单斜辉石幂律指数为 1.98~2.25, 这反映了龙岗火山群东区地幔橄榄岩结构相对均一、结晶动力学相似。对于橄榄石和单斜辉石而言, 其 CSD 曲线既有小于一定粒度处向下弯曲的(橄榄石的转折点在 0.25 mm 处, 单斜辉石的转折点在 0.5 mm 处), 又有呈现线性递减趋势的。(3) 橄榄岩中橄榄石与单斜辉石在一定范围内呈现分形特征。五组橄榄石晶体分形维数为 1.108~1.153 ($\Delta D=0.045$), 反映其晶体形态相对简单、边界较平滑。五组单斜辉石晶体分形维数为 1.169~1.305 ($\Delta D=0.136$), 反映其晶体形态相对橄榄石的边界更复杂。

关键词: 龙岗火山群东区; 橄榄岩包体; 晶体粒度分布; 分形理论; 定量岩相结构

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372343, 40872062)

第一作者简介: 王亚楠(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学和火山学.Email: 18264505703@163.com

*通讯作者简介: 刘永顺(1966-), 副教授, 研究方向: 岩石学、火山学、地质流体力学和地质系统复杂性.Email: cnu901@126.com

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

下地幔布里奇曼石的高温高压变形实验研究

管隆莉¹, 巫翔^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

地震波各向异性对了解地球内部的动力学过程有深远的意义。研究表明在地球下地幔(660~1200 km)俯冲板片附近观察到了明显的地震波各向异性。布里奇曼石(bridgmanite)作为下地幔最主要的组成矿物, 具有强烈的弹性各向异性特征, 其晶格优选方位(LPO)可能是导致下地幔地震波各向异性的重要因素之一。为了进一步确定布里奇曼石在变形过程中形成的 LPO, 我们使用 D111 型高温高压流变仪, 在约 25 GPa 和 1700~2000 K 的温压条件下, 对布里奇曼石集合体进行了单轴压缩和简单剪切变形实验。实验结果表明, 布里奇曼石的变形组构与温度具有明显相关性, 低于 1800 K 时, 变形组构为 (100) <010>; 高于 1800 K 时,

变形组构为 (010) <100>。结合布里奇曼石的 LPO 及对应弹性常数计算出的波速各向异性表明, 变形的布里奇曼石样品波速具有较强的 P 波方位各向异性和 S 波极化各向异性, 各向异性的强度在组构转变后降低。当水平地幔流动发生时, 两种变形组构对应的水平极化剪切波的速度均大于垂直极化剪切波的速度, 且与下地幔主要俯冲带附近观测到地震波各向异性大小方向一致。我们的研究结果揭示了下地幔地震波各向异性的起源, 为下地幔的地幔流动方向提供了重要指示。

关键词: 下地幔; 布里奇曼石; 高温高压实验; 变形; 地震波各向异性

基金项目: 国家自然科学基金项目(42225202), 中国博士后科学基金(2024M753018)

第一作者简介: 管隆莉, 博士后, 研究方向: 深部矿物流变学性质研究, Email: guanlongli@cug.edu.cn

*通信作者简介: 巫翔, 教授, 研究方向: 高压矿物学领域, Email: wuxiang@cug.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

高温高压条件下超声波波速测量以及 熔融前现象的实验研究

刘超¹, 刘永刚^{1*}, 张飞武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

地震波作为探测地球内部结构的核心手段,其物理解读高度依赖于对地幔-地核矿物体系弹性及非弹性性质的精确表征。本研究依托多面体大腔体压机技术平台,创新性地发展出高温高压耦合环境下(无需同步辐射光源辅助)同步获取矿物样品弹性波速与空间尺度的原位测量方法。该技术突破为深部地球物质弹性研究提供了新型实验手段。基于此方法学创新,本研究聚焦地球内核地震波速异常这一重大科学问题。现实验和震观测表明,内核温压条件下金属铁的剪切波速较传统外推值低约 14.9%,泊松比异常增高 10%,这与现有矿物物理模型存在显著偏差(Martorell 等, 2015)。针对该异常现象,学界已提出多种理论假说:包括轻元素赋存态(H/O/Si)、部分熔融机制、预熔融效应以及超离子态相变等(He 等, 2022; Hirose 等, 2021; Martorell 等, 2013)。本研究以预熔融理论为切入点,通过精密控制实验验证该

机制对地震波速异常的贡献。鉴于六方密堆积(hcp)结构铁在超高压(约 330 GPa)和高温(约 6000 K)极端条件下超声波测量的技术瓶颈,本研究采用晶体结构相似但实验可行性更高的金属镁作为类比体系。本次实验的条件为 3 GPa 和 300~1100 K。实验首次定量揭示预熔融相变对弹性性质的显著影响:横波(V_s)和纵波(V_p)波速分别出现 14.5%和 4.0%的非线性衰减,同时伴随泊松比 13.3%的异常增幅。通过建立内核物质状态方程与地震观测数据的交叉验证,我们证实了预熔融效应可以解释内核波速异常。需要指出的是,类比实验体系与真实内核环境仍存在量级差异(压力差两个数量级,温度差五倍),因此仍需开展更高压力和温度的实验。

关键词: 高温高压; 超声波速测量; 熔融前现象; 地球内核; 波速异常

基金项目: 国家自然科学基金(42174225); 中国科学院特别研究助理项目

第一作者: 刘超, 博士后, 研究方向: 实验地球物理学, Email: liuchao@mail.gyig.ac.cn

通讯作者: 刘永刚, 研究员, 研究方向: 实验物理学, Email: liuyonggang@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

水诱导的地幔反转导致太古宙强磁场

吴忠庆^{1*}, 王冬¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

跟生命和板块运动一样, 大陆也是地球所特有的。岛弧模型和地幔柱的海底高原模型是大陆起源的两个主流模型。相比较岛弧模型, 地幔柱模型能更好地解释太古宙大陆的特征, 但该模型在回答太古宙陆壳源区富水这一关键特征上遇到了困难。我们提出的水诱导的地幔反转模型比较好地解决了这个困难, 同时还能解释太古宙多个未解之谜 (Wu 等, 2023), 包括太古宙强磁场。

水诱导的地幔反转描述了地球早期由岩浆洋演化导致的特殊深部水循环。在地幔发生整体熔融的情况下, 高压下的物性研究表明结晶的地幔浮在岩浆洋中部, 将岩浆洋分成外面和基底两个岩浆洋。由于下地幔矿物含水能力低, 随着岩浆的结晶, 基底岩浆洋越来越富水, 最终出现重力失稳而形成地幔反转, 该反转将水带到地球浅部, 促进大陆和克拉通地幔岩石圈等的形成。因此太古宙大陆是基底岩浆洋演化的产物, 当地幔反转耗尽基底岩浆洋后, 太古宙型的大陆不再产生, 太古宙末期对应着大陆形成机制的转变

期, 水诱导的地幔反转可以自然地解释为什么太古宙前后的大陆有完全不同的特性。

水诱导的地幔反转下, 下地幔底部高温的岩浆洋被相对冷的硅酸盐矿物替换, 加速地核的冷却, 增强核幔边界的热通量, 诱发了太古宙的强磁场。因此太古宙的强磁场跟太古宙大陆的形成是水诱导的地幔反转的两个不同效应。大陆大约 36 亿年前之后变得越来越多, 并在太古宙末期达到高峰, 这意味着 36 亿年前之后, 地幔反转越来越频繁, 核幔边界的热通量越来越大, 并在太古宙末期达到最大值, 如此得到的热通量能很好地解释太古宙的强磁场。水诱导的地幔反转改变了地球的质量分布, 因而有可能形成真极移, 因此 30 多亿年前的古纬度变化并不一定是由于板块运动, 也有可能源于水诱导的地幔反转形成的真极移。

关键词: 第一性原理计算; 早期地球; 前板块构造; 高温高压物性; 熔体

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

水致晶粒粗化揭示 LLSVP 长期稳定新机制

吕一夫¹, 费宏展^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

大型低剪切波速省 (LLSVP) 作为下地幔最主要的非均质结构, 其动力学稳定性对理解地幔对流模式与行星演化历史具有重要意义。尽管热点与大火成岩省的古位置重建显示 LLSVP 已稳定存在 ≥ 540 Ma (Torsvik 等, 2010; Torsvik, 2019), 但其高温特性导致的黏度弱化与有限的密度异常难以解释其在地幔对流作用下的长期稳定性 (Davies 等, 2015)。本研究聚焦 LLSVP 主要矿物相布里奇曼石,

通过多面砧高温高压实验定量约束了水对颗粒生长动力学的影响规律。实验结果表明, 微量的水即可显著促进颗粒生长, 使得 LLSVP 在高温的负效应下仍可保持远高于周围地幔的黏度。这样的黏度差异为 LLSVP 抵抗强烈地幔对流而长期存续提供了关键稳定机制。

关键词: 水; 布里奇曼石; 颗粒生长; LLSVP

第一作者简介: 吕一夫, 博士研究生, 研究方向: 高温高压矿物物理. Email: lyuyifu@zju.edu.cn

*通信作者简介: 费宏展, 研究员, 研究方向: 矿物物理, 地球动力学, 高温高压实验技术. Email: feihongzhan@zju.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

高温高压下水-盐物性研究及其地球和行星科学意义

李新阳^{1*}

1. 吉林大学 高压与超硬材料全国重点实验室, 长春 132100

水是地球和冰行星内部的重要组成部分, 水在极端温压条件下会与氨、甲烷、氯化钠、氯化钾等物质形成“盐冰”或水合物。理解水合物在高温高压下的物理化学性质, 例如, 密度、速度、相结构、热力学稳定性有利于理解冰行星内部组成。本次报告将汇

报, 氨-水、氯化钾-水、氯化钠等二元体系在高温高压下的实验研究。研究结果帮助解释地球深部金刚石包裹体以及冰行星内部速度结构、星幔对流成因。

关键词: 水; 高温高压; 矿物物理

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

斜方辉石的相变对深俯冲板片矿物组成的约束

许金贵^{1*}, 范大伟¹, 周文戈¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

俯冲板片是地球内部各圈层间物质和能量交换的重要载体, 对其物质组成的精细解析是揭示地球内外圈层联动机制的关键所在。在浅部, 俯冲板片主要由三种岩石组成: 上层为玄武岩, 中间层为方辉橄榄岩, 下层为二辉橄榄岩。俯冲板片在进入深部地幔的过程中, 板片内部的温度和压力不断增大, 矿物组合也随之发生变化。如果板片内部物质始终处于热力学平衡状态, 那么根据实验岩石学相平衡研究结果, 我们可以得到这三种岩石的矿物组成随深度的变化关系。然而, 现有的地球动力学模拟研究发现, 板片内部不同岩石单元的温度有很大差异。已有的实验研究表明, 在板片向下俯冲的过程中, 在其内部的低温区域, 物质并未达到热力学平衡, 而是处于亚稳态。方辉橄榄岩是板片内部温度最低的区域, 因此它是亚稳

态矿物最可能存在的区域。因此, 为了更好地约束深俯冲板片的物质组成, 需要研究方辉橄榄岩组成矿物在高温高压条件下的亚稳态相变。方辉橄榄岩的主要矿物为橄榄石和斜方辉石。目前, 对亚稳态橄榄石的研究已比较深入。但是, 已有的实验研究还不足以约束斜方辉石在高温高压条件下的相变。因此, 本文在深俯冲板片内部对应的温度和压力条件下, 研究了斜方辉石的相变, 并获得了 0~40 GPa 压力范围内亚稳态斜方辉石相变与成分的关系。基于这些数据结果, 我们进一步约束了上地幔及过渡带深度范围内深俯冲板片的主要矿物组成。

关键词: 斜方辉石; 相变; 俯冲板片; 高温高压实验

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

水在毛钙硅石中的赋存与化学作用

白承禾¹, 胡清扬^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

毛钙硅石是下地幔中含量第三大的矿物, 也是海洋地壳物质沉积的主要矿物相之一, 其含水量也会直接影响下地幔水化学的规模。而目前有关毛钙硅石中水的赋存形式与存储形式仍存在较大争议, 氢的取代机制也有待进一步研究。本文使用金刚石对顶砧技术, 选择硅酸钙作为原始样品, 在 25 GPa 的压力条件下进行激光加热到 2000 K, 合成出毛钙

硅石, 进一步运用原位 XRD、拉曼光谱等实验方法, 比较无水硅酸钙与毛钙硅石在晶胞体积、晶体结构等方面的区别, 从而推测氢的取代机制与其含水量。

关键词: 金刚石对顶砧; 激光加热; 毛钙硅石; 下地幔含水矿物

第一作者简介: 白承禾 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: chenghe.bai@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 胡清扬 (1987-), 研究员, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

基于机器学习力场的地核多元轻元素组成研究

陈千禧¹, 蒋佳俊¹, Muir Joshua Martin Richard¹, 张飞武^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550000

地核的轻元素组成是地球科学领域长期悬而未决的核心科学问题之一。这一问题的根源是, 纯铁和铁镍合金的物理性质无法完全解释地球内核的地震观测结果。因此地核中必然存在一定比例的轻元素, 但轻元素的组成仍是未解之谜。现有研究表明, 铁合金中需要包含至少两种轻元素才能重现密度和地震波速特征。然而, 关于轻元素组合的系统性研究仍然十分有限。传统的第一性原理计算方法在进行弹性性质计算时存在显著的计算资源瓶颈。这种局限性使得相关研究往往局限于最多两种轻元素组合的探索, 同时在模拟时间尺度上也受到限制。为突破传统方法的局限性, 本研究创新性地将机器学习力场 (Machine Learning Force Field, MLFF) 与分子动力学 (Molecular Dynamics, MD) 模拟相结合, 构建了一个兼具计算效率与精度的新型计算框架。该框架在保持与第一性原理计算相当的精度的同时, 显著提升了计算效率和扩展了模拟时间尺度。基于这一创新方法, 我们全面调查了 5 种常见的地核轻元素 (氢、碳、氧、硫和硅) 对六方密排铁 (hcp-Fe) 弹性性质及密

度的影响。研究特别关注了这些轻元素在地核极端条件下的赋存形式和相互作用机制。基于固溶体模型的计算结果揭示了新的发现: 与观测地震波和密度匹配的二元、三元轻元素组合解显著增加, 而三元以上的组合解数量更为可观。这一现象主要归因于在地核极端条件下氢、碳和氧呈现的超离子态特征, 与传统的替代机制相比, 这种特殊的赋存状态能够显著降低铁的剪切波速, 从而更好地解释地震观测数据。基于上述结果, 本研究表明, 在考虑超离子态的情况下, 内核的弹性性质和密度对其轻元素组成并未形成严格的约束条件, 因为多种轻元素组合均能同时满足这些观测指标。这一认识打破了传统观点认为地核成分受严格物理条件限制的固有思维, 为地核成分研究开辟了新的思路。未来需要将轻元素在固态内核和液态外核之间的分配行为及含不同轻元素的铁合金熔点等条件作为约束, 以建立更加精确的地核成分模型。

关键词: 地球内核; 机器学习力场; 超离子态; 轻元素组成

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2024YFF0807500), 国家自然科学基金项目 (42403035), 国家博士后科学基金 (2024 M753196), 贵州省科技计划项目 (ZK 2024-standard-669) 和贵州省科技基金 (ZK 2021 - 205)。

第一作者简介: 陈千禧 (2000- 至今), 博士研究生, 研究方向: 计算矿物物理。Email: chenqianxi@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介:

张飞武 (1980- 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理。Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

Muir Joshua Martin Richard (1985- 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理。Email: j.m.r.muir@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

Fe₃N 的高压结构与输运性质研究

庄毓凯^{1*}

1. 四川大学, 成都 610065

幔源超深金刚石包裹体的证据表明下地幔存在一定比例的 Fe₃N。目前对 Fe₃N 高温高压性质的了解还比较匮乏。本研究利用同步辐射 X 射线衍射, 同步辐射穆斯堡尔谱、金刚石压腔 (DAC) 结合激光加热等多种先进技术系统研究了 Fe₃N 的高温高压结构与输运性质。结果表明 Fe₃N 在高压下失去了磁性,

对地球电磁场影响微弱, 而氮元素的掺杂可以明显的降低铁的电/热导率, 对下地幔热力学演化具有一定贡献。

关键词: 同步辐射; 高温高压实验; 金刚石压腔; 激光加热; 电导率

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

橄榄岩熔体的超低黏度及其对类地行星 岩浆洋动力学的启示

黄东洋^{1*}

1. 北京大学, 北京 100871

类地行星表面岩浆洋的动力学过程主要受硅酸盐熔体输运性质的调控, 而因受到实验和模拟条件的限制, 目前学界对后者随成分、温压而改变的研究尚局限于简单端元的熔体体系或较低的温压条件。本研究通过第一性原理分子动力学模拟, 对硅酸盐地球的近似成分, 即橄榄岩熔体的黏度在全地幔熔融的温度、压强条件下进行系统计算, 以探究其输运性质在岩浆洋不同深度处的变化。我们发现:

1. 具有极低聚合度的橄榄岩熔体的黏度随压强单调递增, 有别于 MgSiO_3 及玄武岩熔体黏度对压强的异常响应;

2. 低聚合度导致橄榄岩熔体的低黏度, 可接近室温下水的黏度, 为所有硅酸盐地球候选成分之最低。

低黏度的硅酸盐熔体将提高岩浆洋的对流效率、极大促进其结晶分异作用, 进而在地球形成早期为地幔不均一性设置初始条件。此外, 该研究重新强调了岩浆洋物理性质对化学成分的依赖, 为理解行星形成的高能过程中化学成分所扮演的角色提出不同视角。

关键词: 黏度; 橄榄岩熔体; 岩浆洋; 第一性原理分子动力学

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

地球内核中超离子物相的热力学研究

孙阳^{1*}

1. 厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005

超离子态是一种独特的物质相,其特征是在固态晶格中存在类似液体的离子运动。近期研究揭示了多种轻元素在地球内核条件下可形成超离子态。理解超离子相与液态铁合金在极端高温高压下的热力学平衡,对于揭示地球内核的化学成分、物理性质及其演化过程至关重要。然而,精确计算超离子态的自由能仍面临诸多挑战。本报告提出了一种计算模拟方法,可用于计算 铁-轻元素体系在地球内核边界附近的

第一性原理吉布斯自由能,并构建超离子-液态相平衡相图。基于该方法,我们厘清了超离子相在不同晶体结构中的热力学稳定区间,并揭示了超离子态对地核中氧分布的影响,从而为深入理解地核物质的固液热平衡提供了定量研究框架。

关键词: 地核; 超离子态; 轻元素; 第一性原理计算; 分子动力学模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42374108, T2422016)

通讯作者简介: 孙阳 (1990-), 教授, 研究方向: 矿物物理、凝聚态物理. Email: yangsun@xmu.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

基于拉曼、布里渊的磷灰石弹性以及光谱学的研究

王登磊¹, 毛竹^{1*}

1. 中国科学技术大学 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230000

磷灰石 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ 广泛存在于太阳系的岩石体中, 作为磷等挥发物的寄主发挥着重要作用。文献报道了它的密度结构等信息, 而对它的弹性性质却少有研究。实验上, 因实验技术的限制, 获得单晶磷灰石的弹性特性是困难的。由于它们的六方结构, 磷灰石有五个独立的弹性常数。前人利用第一性原理和超声波技术测定了氟磷灰石的弹性刚度, 研究结果表明磷灰石弹性各向异性不强, 并且在文献中有限的计算结果显示出很大的分散。然而, 人们对地幔条件下的磷灰石结构知之甚少。因

此, 对磷灰石进行布里渊散射以及拉曼散射实验, 研究其弹性、结构等物理性质对于理解地球内部物质结构具有重要意义。

在本项研究中, 我们结合布里渊散射和拉曼散射技术研究了含氟磷灰石在常温常压下的弹性结构以及常温高压的拉曼光谱学特征等信息。实验数据很好地约束了磷灰石的结构和弹性性质, 为研究 F、Cl 等挥发分在地球内部的运输提供了较好的约束。

关键词: 磷灰石; 弹性常数; 拉曼光谱学

第一作者: 王登磊 (1998-), 博士在读, 研究方向: 磷灰石的物性探究。Email: 1553354208@qq.com

通信作者: 毛竹 (1982-), 教授, 研究方向: 地球内部极端高温和高压下研究物质的物理性质。Email: zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

高压下 CoTiO_3 钛铁矿中电荷转移诱导的费米共振现象

亓文明¹, Qingyang Hu^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

钛铁矿是地球表面火成岩和变质岩中常见的副矿物, 特别是钛铁矿因其弱磁化特性的影响而备受关注。钛铁矿不仅是研究月幔层结构演化的重要矿物, 还在火成岩和变质岩的氧化还原反应中发挥重要作用。以往的研究表明, 电荷转移效应使钛铁矿的电导率显著提高。从地球和月球科学的角度来看, 如果地幔或月幔中存在富含钛铁矿的基底层, 这种由电荷转移引起的高导电性可能会影响地球或月球磁场的传播。为深入探讨 CoTiO_3 钛铁矿在室温高压条件下的

结构和电子特性, 本研究利用拉曼光谱研究了 CoTiO_3 钛铁矿在地幔压力下的晶格动力学及电荷转移行为。研究发现, CoTiO_3 钛铁矿在压力下表现出类似于 FeTiO_3 钛铁矿中因电荷转移而引起的费米共振现象。此外, 本研究还为其他钛铁矿矿物在地幔压力下的电荷转移行为提供了新的见解。

关键词: 钛铁矿; 高压; 拉曼; 电荷转移; 费米共振

基金项目: 国家自然科学基金项目 (T2425016; 42150101)

第一作者简介: 亓文明 (1993), 博士研究生, 研究方向: 高压物理. Email: wenming.hp@outlook.com

*通信作者简介: 胡清扬 (1987), 研究员, 研究方向: 高压地学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

外地核条件下液态铁的密度和声速研究

甘波¹, 李俊², 张友君^{1*}

1. 四川大学 原子与分子物理研究所, 成都 610065;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999

铁是地核的主要成分, 液态铁在高压高温 (p - T) 条件下的物理性质对于揭示地核的成分、结构及动力学过程至关重要。然而, 在实验室中模拟外核的极端环境并精确测量熔融介质的物理性质仍面临挑战。目前, 激光加热金刚石压腔静高压实验已能够在约 120 GPa 和 4500 K 条件下测量液态铁的密度, 但与外核的温压条件仍存在差距。尽管冲击波动高压实验已成功测量数百 GPa 压力下熔融铁的密度 (ρ) 和纵波声速 (VP), 但其冲击温度的精确约束仍然不足。基于此, 我们利用瞬态辐射高温计精确测定了熔融铁在 ~365 GPa 下的冲击温度。结合已有的冲击波实验数据, 我们建立了液态铁沿 Hugoniot 的 p - T - ρ -VP 关系,

并通过热力学修正获得了液态铁沿地核绝热线的密度和声速。研究表明, 外核相对于液态铁表现出显著的密度亏损和声速过剩, 且密度亏损随深度增加, 而声速过剩随深度减小。在内-外核边界处, 基于 PREM 模型的外核密度亏损和声速过剩分别达到 8.74% 和 2.00%。这些差异无法通过单一轻元素的加入同时解释, 表明外核可能含有多种轻元素, 这些元素对液态铁的声速具有不同的影响。这一发现为外核的化学组成及其地球动力学过程提供了新的关键约束。

关键词: 液态铁; 高温高压; 外地核; 密度; 波速

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971108, 42402041)

作者简介: 甘波 (1994-), 男, 助理研究员, 主要从事冲击波物理与地球物理研究. E-mail: ganbo325@stu.scu.edu.cn

通信作者: 张友君 (1986-), 男, 博士, 研究员, 主要从事高压物理与地球物理研究. E-mail: zhangyoujun@scu.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

Explore the dynamics of a super-Earth: the composition and thermal convection of the silicate mantle

耿延雷¹, 胡清扬^{1*}

1. 北京高压科学研究, 上海 200120

We investigate the compositional and thermal convective dynamics of super-Earth silicate mantles through first-principles thermodynamic modeling and high-pressure phase diagram construction using the CALYPSO algorithm. Our phase predictions reveal that dense silicate phases (e.g., MgSiO_3 perovskite and CaSiO_3 post-perovskite) stabilize in the lower mantle, with their occurrence frequency showing a sensitive dependence on planetary mass (M^*). These phase transitions significantly modify mantle rheology and thermal transport properties, as quantified through ab initio-derived viscosity and thermal conductivity tensors. Three-dimensional mantle convection simulations

demonstrate that ascending plume dynamics undergo a critical transition at $M^* \gtrsim 3M_\oplus$, where spherical geometry induces flow inhibition and thermal boundary layer thickening. Our analysis further highlights how adiabatic temperature gradients and phase boundaries interact to control mantle cooling rates and the formation of stagnant lid regions. These insights establish a framework for reconciling theoretical models with seismic and thermal emission observations of exoplanets, particularly those in the super-Earth mass regime.

关键词: super-Earth silicate mantles; CALYPSO; MgSiO_3 ; CaSiO_3

第一作者简介: 耿延雷 (1998–), 博士 (在读), 研究方向: 高温高压矿物学. Email: gengyl24@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 胡清扬 (1987–), 研究员, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

Melt fraction at the 410 km dehydration melting layer

陈娟¹, 俞红玉¹, 徐放¹, 张宝华¹, 费宏展^{1*}

1. 浙江大学, 杭州 310058

地幔过渡带 (MTZ) 是连接上地幔和下地幔的纽带, 地幔过渡带 (410~660km) 中的瓦兹利石、林伍德石等主要矿物的水含量高达 1%~2%, 远远大于上地幔主要矿物 (橄榄石+辉石+石榴石) 的水溶解度。因此, 在 410 km 深度, 即 MTZ 和上地幔边界随着瓦兹利石相变成橄榄石发生脱水熔融, 形成部分熔融层。本项目利用大腔体多面砧压机通过高温高压实验系统地研究了含水橄榄岩在上地幔底部温压条

件下 (13 GPa, 1800 K) 的相平衡关系。实验结果显示, 410 km 部分熔融层产生的熔体含量可达 10% 以上, 远高于通过地震波速模型推测的 0.7%。即 MTZ 顶部脱水熔融产生的熔体含量足以形成熔体通道, 促使熔体不断向上迁移至软流圈, 从而使得软流圈底部甚至整个软流圈达到熔体饱和状态。

关键词: 地幔过渡带; 部分熔融; 熔体比例

第一作者: 陈娟 (1998-) 博士研究生, 研究方向: 高温高压矿物物理. Email: c.chenjuan@zju.edu.cn

*通信作者: 费宏展 (1986-) 研究员, 研究方向: 高温高压矿物物理. Email: feihongzhan@zju.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

金刚石穿插双晶的晶体形态特征及成因研究

孙凯悦¹, 何明跃^{1*}

1. 中国地质大学(北京) 珠宝学院, 北京 100080

金刚石晶体的不同形态特征反映了其生长条件, 并为揭示金刚石的形成过程提供了重要信息。金刚石双晶仅产生于晶体生长阶段, 且仅通过网状变形的形式形成, 这对金刚石的物理性质具有重要影响。然而, 由于样品稀少, 尤其是穿插双晶样品, 目前对其形态特征及成因的研究较少。本次研究主要通过扫描电子显微镜(SEM)、显微计算机断层扫描技术(Micro-ct)及阴极发光技术(CL)对 6 颗来自刚果共和国地区产出的天然金刚石穿插双晶样品进行了晶体形态与表面微形貌特征观察, 并探讨其成因过程。肉眼观察结果显示样品呈立方体晶体, 粒度普遍较小(2~3 mm), 半透明-不透明, 颜色呈灰白、棕褐及浅黄色。SEM 结果显示所有样品均表现为互为双晶位的两个或多个立方体晶体相互穿插生长, 晶体表面具有明显的溶蚀痕迹。双晶界线在扫描电镜下呈折线状, 进一步放大观察可呈裂沟状深入晶体内部, 并伴随着

平直生长纹结构。Micro-ct 结果显示, 样品内部存在大量空洞及流体包体, 且发育纤维状生长层, 指示其形成于高驱动力条件下的快速结晶过程。CL 图像分析表明, 金刚石穿插双晶位的形成涉及两种模式: 即成核阶段初期, 两晶粒以双晶位形式存在以及在晶体生长过程中碳原子层的发生异向堆叠模式。综合实验结果, 根据晶体宏观形态特征差异, 建立了三种类型的金刚石穿插双晶理论形态模型, 分别是: ①<111>共轴型; ②<100>同心镶嵌型; ③双晶位基底(100)面出露型。此外, 还观察到混合型孪晶结构, 即在穿插双晶样品中存在接触双晶界, 表明金刚石孪晶生长过程的复杂性, 涉及晶体结晶习性的转变, 证实双晶类型的非独立性演化机制。

关键词: 金刚石; 双晶; 穿插双晶; 晶体形态; 形成过程

国家自然科学基金项目(42073008)

第一作者简介: 孙凯悦(1997-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学, 宝石学。Email: 1415052413@qq.com

*通信作者简介: 何明跃(1963-), 教授, 研究方向: 矿物学, 宝石学。Email: hemy@cugb.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

利用含 Al 和 H 斯石英的相变揭示中下地幔 小尺度地震散射体的复杂深度分布

于英鑫¹, 毛竹^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

地震学观测结果表明, 在中下地幔的深度范围内广泛存在着具有明显低剪切波速度异常的小尺度散射体, 并且这些散射体具有复杂的深度分布特征。其中, 70%以上的小尺度散射体出现在 700~1300 km 的深度范围, 约 20%的地震散射体分布在 1300~1900 km 的深度, 然而只有不到 10%的散射体在深于 1900 km 的深度范围内被观察到。俯冲洋壳中游离的二氧化硅相从具有金红石结构的斯石英向具有 CaCl_2 型结构的后斯石英的转变被认为是导致这些地震散射体的主要成因。然而, 端元 SiO_2 的这种后斯石英相变预计将发生在沿正常地温梯度约 1800 km 的深度范围处, 这比绝大多数观测到的地震散射体要深。尽管先前的研究结果指出 Al 和 H 的掺入可以有效的降低后斯石英相变

的压力, 但 Al 和 H 含量以及温度对后斯石英相变压力的影响还缺乏必要的实验约束。基于上述问题, 本研究利用外加热的金刚石对顶砧及同步辐射 X 射线衍射技术及拉曼光谱技术详细研究了化学成分和温度的变化如何影响后斯石英相变压力。我们的研究表明, 当固定 SiO_2 中 H/Al 比为 1/3 的情况下, Al 含量从 0 到 0.07 a.p.f.u 的变化可以合理的解释环太平洋地区观测到的地震散射体从 800 到 1900 km 深度范围内的复杂分布。这些结果加深了我们对中下地幔地震散射体的复杂特征及其相应的动力学过程的认识。

关键词: 含铝和氢斯石英; 相变; 小尺度散射体; 下地幔; 高温高压

第一作者简介: 于英鑫 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: yingxinyu@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 毛竹 (1982-), 教授, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: zhuma@ustc.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

高温高压下 Fe_3P 的结构变化和热力学性质

李静¹, 孙宁宇¹, 于英鑫¹, 毛竹^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

地核主要由铁 (Fe) 合金和相当数量的镍 (Ni) 以及多种轻元素组成, 如硅 (Si)、硫 (S)、氧 (O)、碳 (C) 和氢 (H)。在这些元素中, 磷 (P) 虽然可能相对较少, 但在地核形成过程中具有重要的意义。P 是亲铁元素之一, 估计在地核中的浓度为 0.2%~0.5% (McDonough, 2003; McDonough and Sun, 1995)。由于其相对高的浓度, 地核可以被视为 P 的最大储集层。内核中, P 的赋存形式主要为 Fe_3P 或 $\text{Fe}_3(\text{S}, \text{P})$ (Gu 等, 2014; Stewart and Schmidt, 2007)。在环境条件下, Fe_3P 具有四方晶体结构 (空间群 Γ_4 , $Z=8$), 与 Fe_3S 同构。因此, 在极端高压条件下, Fe_3P 的行为将有助于揭示行星核心中 P 的储存和转化机制。此前已有大量研究采用 X 射线衍射技术获得了 Fe_3P 在高压下的结构演变, 研究结果表明, Fe_3P 约在 10~30 GPa 的压力范围内会发生从高自旋到低自旋的转变, 从 Γ_4 相变到未知结构, 伴随着体积坍

塌及 c/a 的变化。然而, 针对这个自旋转变, 前人的实验结果仍然存在较大的争议, 导致对 Fe_3P 在高温高压下的行为的理解不够一致。因此, 为了深入了解 Fe_3P 在高温高压下的结构演变及其相关物理性质, 我们需要更好的实验探索不同实验条件下 Fe_3P 的行为, 进一步明确其相变机制以及自旋状态的变化对其物理特性的影响。在本项研究中, 我们利用金刚石对顶砧结合同步辐射 X 射线衍射, 研究了粉晶状态下 Fe_3P 在 0~128 GPa、300~1700 K 条件下的稳定性及热力学状态方程。通过总结和对比前人研究结果, 我们发现 Fe_3P 在 20~25 GPa 发生了自旋转变, 实验同时确定了 Fe_3P 的体积模量、密度和体波波速。这将为理解行星内核中 P 的储存和演化提供更为全面的理论依据和实验支持。

关键词: 高温高压; 自旋转变; 热力学状态方程

李静 (2023–2025), 硕士研究生, 研究方向: 高温高压实验矿物物理. Email: slj77886@mail.ustc.edu.cn

孙宁宇 (2019–), 特任副研究员, 研究方向: 高温高压实验矿物物理. Email: ningyu@mail.ustc.edu.cn

于英鑫 (2023–2026), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验矿物物理. Email: yingxinyu@mail.ustc.edu.cn

毛竹 (2013–), 教授, 研究方向: 高温高压实验矿物物理. Email: zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

水对斜方辉石热物理性质影响的高温高压实验研究

颜鑫鑫^{1*}

1. 中国科学院大学 地球化学研究所, 贵阳 550081

斜方辉石是上地幔的重要组成矿物之一, 其热物理性质 (如热导率、热扩散系数和比热容) 对地球深部热结构和动力学过程具有重要影响。水通常以 OH^- 形式存在于矿物晶格中, 其存在可能显著改变矿物的热物理性质, 但目前关于水对斜方辉石热物理性质影响的高温高压实验研究仍十分有限。本研究通过高温高压实验, 探讨了水对斜方辉石热物理性质的影响。在高温高压条件下 (温度范围: 300~900 K, 压力范围: 2~8 GPa) 利用瞬态平面热源法, 系统测量了不

同含水量斜方辉石的热导率、热扩散系数和比热容数据。实验结果表明, 随着水含量的增加, 斜方辉石的热导率和热扩散系数显著降低, 而比热容则略有增加。进一步的晶体结构分析和理论计算表明, 水通过引入晶格缺陷和增强声子散射, 降低了斜方辉石的热传输效率。

关键词: 斜方辉石; 水含量; 热物理性质; 高温高压实验

第一作者简介: 颜鑫鑫 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 固体地球物理学. Email: yanxinxin21@mailsucas.ac.cn

*通信作者简介: 郭新转 (1979-), 研究员, 研究方向: 高温高压实验技术、地球内部物质传输特性、变质岩石学. Email: gxzhuan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

下地幔中镨氮化合物的稳定性及其地球深部意义

刘冉¹, 赵鑫宇¹, 刘兆东^{1,2*}

1. 吉林大学 高压与超硬材料全国重点实验室, 长春 130000;

2. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130000

地球下地幔底部是地球内部波速、密度等物理性质变化最为剧烈的区域之一。该区域的物理和化学性质对地球的演化、板块构造运动以及地幔对流模式具有重要影响。近期研究表明, 氮可能存在于地球深部。例如, 氮已在铁陨石中被发现(Hashizume and Sugiura, 1998; Kaminsky and Wirth, 2017), 并作为包裹体存在于超深钻石中。此外, 氮在核幔分异过程中的行为及其在金属相和硅酸盐相之间的分配已被广泛研究, 这些研究揭示了氮在高压条件下与多种元素形成稳定化合物的潜力(Dalou 等, 2017; Speelmanns 等, 2019)。尽管部分观点认为氮元素很难通过板片俯冲被大量携带到下地幔, 但仍有大量的氮元素作为初始成分被保留在地球深部(Huang 等, 2024)。无论是俯冲到地球深部的氮, 还是作为原始成分保留在地球深部的氮, 其在下地

幔的存在形式及其特性均值得深入研究。其中, 稀土元素与氮元素之间的相互作用在地球深部条件下鲜有研究。作为典型的亲石元素, 镨(Pr)通过板块俯冲进入下地幔后, 在高压条件下其电子结构特性可能促进氮的稳定化。同时, 氮的化学活性也可能影响稀土元素的配位环境。这种元素间的耦合效应可能使镨氮化合物在下地幔深部稳定存在, 并在这一区域的动态组成中发挥重要作用。因此, 通过第一性原理计算方法模拟镨和氮在地球下地幔以及核幔边界条件下所能形成的稳定化合物及其物理化学特性, 对于理解地球深部物质组成具有重要意义。这也有助于理解地球深部的氮循环, 进而为解释地球深部“氮亏损”之谜提供启示。

关键词: 下地幔; 氮循环; 第一性原理计算

基金项目: 国家自然科学基金项目

第一作者简介: 刘冉(1997-), 博士研究生, 研究方向: 第一性原理计算 Email: liuran22@mailsjlu.edu.cn

*通信作者简介: 刘兆东(1986-), 教授, 研究方向: 高压技术、高压物理与地球深部科学. Email: liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

华南崆岭地体太古-古元古代花岗岩类中的长石 Pb 同位素重置: 对于示踪热演化历史的意义

孟凡雪^{1*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266000

Feldspar Pb isotopes have been widely used to trace magmatic formation and evolution processes. However, it remains unclear whether post-magmatic thermal events can affect feldspar Pb isotopic ratios. Here, the in situ Pb isotopic composition of feldspar hosted in granitic rocks (thirteen Archean and one Paleoproterozoic) from the northern Kongling terrane, Yangtze Craton, South China, is analyzed. The samples reveal a substantial variation in their Pb isotopic composition, spanning the gap between the 1.9 Ga and present-day geochrons, which indicates extensive resetting by later tectonothermal events. This resetting was interpreted to have likely resulted from Paleoproterozoic and Neoproterozoic tectonothermal

events related to the assembly and breakup of the Columbia and Rodinia supercontinents. These results suggest that Pb isotopes should be used cautiously when tracing magma sources and petrogenesis in magmatic rocks that have experienced post-magmatic reworking. However, the in situ Pb isotopic composition of feldspar in ancient granitoids may also potentially be used to reveal later tectonothermal events. The extensive resetting of the Pb isotopic composition in feldspar by regional thermal events may also provide new insights into our understanding of the Pb isotope paradox.

关键词: 长石; Pb 同位素; 超大陆聚合

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

地球内核铁合金的流变机理和黏度的计算研究

何宇^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压实验室, 贵阳 550081

地震学观测表明,地球内核具有复杂的不均一性和各向异性结构,各向异性结构的形成与内核动力学过程相关,是认知内核演化的关键。各向异性结构的形成与内核铁合金的流变机制与黏度有关,然而在内核条件下铁合金的流变机制与黏度仍无定论。另外,内核可能存镍、硅、硫、碳、氢、氧等杂质,这些杂质对粘度的影响也尚不清楚。在本研究中,利用从头算分子动力学(AIMD)和深度学习分子动力学(DPMD)方法计算了在内核条件下铁、镍、硅、硫、

碳、氢和氧的扩散系数。其中,碳、氢和氧在晶格中像液体一样具有高度扩散性,而铁、镍、硅和硫通过铁位空位扩散。这些杂质对粘度的影响微乎其微。基于位错蠕变机制,预测的六方相铁合金的黏度为 $1 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{16} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,这与自由内核章动和地震波衰减观测预测的值一致。

关键词: 内核; 铁合金; 流变性质; 黏度; 分子动力学

基金项目: 自然科学基金(No. 42350002)和 中科院青年交叉团队(JCTD-2022-16)

第一作者简介: 何宇(1985-), 研究员, 研究方向: 高温高压下地球内部物质性质的计算模拟研究, E-mail: heyu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

有机碳俯冲过程中释放的含碳气体以及碳结构的演化

吴森森¹, 张宝华^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310000

深部碳循环对于地球宜居环境的形成起到了关键作用。在深部碳循环中, 关于无机碳在俯冲过程中的相变、熔融、脱碳等过程开展了相当深入的研究。但是, 对于还原性有机碳在俯冲过程中的命运还不够了解。鉴于此, 我们以沉积岩中最具代表性的干酪根为有机碳材料, 在 5 GPa 和 1473 K 以内开展高温高压实验。结果表明, 干酪根在俯冲过程中释放了不到 10% 的甲烷和乙烷, 超过 90% 的有机碳以石墨的形式

存在于深部。由于这些含碳气体的挥发性, 因此倾向于上升到地表, 在上升过程中参与了多种地学过程, 最终部分气体会来到地表, 维持了当时地表的温暖。而固体组分石墨则会保存地幔, 间接地增强了地表环境的氧化。因此, 有机碳的高效俯冲对于地球氧化环境的形成起到了关键作用。

关键词: 深部碳循环; 有机碳; 含碳气体; 石墨

第一作者: 吴森森 (1991-) 博士后, 研究方向: 深部碳循环。Email: wusendeepoc@163.com

通讯作者: 张宝华 (1978-) 教授, 研究方向: 矿物物理。Email: zhangbaohua@zju.edu.cn

通讯作者: 胡清扬 (1987-) 研究员, 研究方向: 深部水。Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

铁饱和超含水相 B 和相 E 的高压状态方程和振动光谱研究

李槟馨¹, 朱峰^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074

致密的含水镁硅酸盐(DHMS)相是地球水循环中的关键载体,也是深部地幔中水(氢)的重要宿主。许多高温高压研究对含水矿物的相稳定性、水容量、物理与化学性质等进行了探索,然而对于 Fe 对 DHMS 相的稳定性和物性影响的研究则相对较少。本研究中,我们选取超含水相 B 和相 E 作为本实验的研究对象,利用多面顶压机进行 FeO 与超含水相 B、相 E 间的相平衡实验,得到了超含水相 B 和相 E 的饱和 Fe 含量。再根据该结果通过多面顶压机实验

重新合成了 Fe 饱和的超含水相 B 和相 E 单相,并通过金刚石对顶砧实验对它们开展高压同步辐射 X 射线衍射实验及高压拉曼光谱实验,得到了 Fe 饱和的超含水相 B 和相 E 的三阶 Birch-Murnaghan 状态方程参量及振动模式与压力间的依赖关系。通过与纯 Mg 端元的超含水相 B 和相 E 进行比较,阐明了 Fe 对超含水相 B 和相 E 等 DHMS 相的物理性质的影响。

关键词: 高温高压; 超含水相 B; 相 E; 状态方程

基金项目: 国家自然科学基金项目(4210020845)

第一作者简介: 李槟馨(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学、矿物学、矿床学.Email: 18724404148@163.com

通讯作者简介: 朱峰(1988-), 教授, 研究方向: 矿物物理.Email: fengzhu@cug.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

岩浆洋冷凝期间地幔转换带的水化作用

谢龙剑^{1,2,3,4*}, Micheal Walter², Tomoo Katsura³, 徐放⁵,
Jianhua Wang², Yingwei Fei²

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

2. Earth & Planets Laboratory, Carnegie Science, Washington DC 20015, USA 000000;

3. Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth, Bayreuth 95440, Germany 000000;

4. Department of Earth Sciences, University College London, London WC1E6BS, UK 000000;

5. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

地幔过渡带以其卓越的储水能力著称, 被认为是地球深部水的重要储存区 (Ohtani, 2021)。尽管板块脱水作用——即地表海洋水通过俯冲板块释放——是地幔过渡带水化的主要机制 (Kuritani 等, 2011; Richard 等, 2006), 但深部地幔中的原生水 (Hallis 等, 2015) 暗示了另一种可能的水源。早期地球表面由于大碰撞作用形成了一个深岩浆洋, 其结晶固化过程奠定了现今固体地球的基本结构。该岩浆洋的残余熔体可能是这种原生水的潜在载体。由于地幔过渡带与下地幔顶部边界处存在密度跃迁, 是深部熔体的重要富集区。为了探究含水岩浆洋熔体在地幔过渡带与下地幔顶部边界的演化过程, 我们在 24 GPa 高压下研究了 MgO-FeO- CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O 体系的熔融相关系。研究发现, 随着温度下降, 布里基曼石 (bridgmanite) + 斯石英 (stishovite) + 熔体, 以及布里基曼石 + 铁方镁石

(ferropericlase) + 熔体的相边界曲线向富镁富水方向演化, 水含量可高达约 80% H₂O。岩浆洋熔体成分最终将沿着这两条三相共存相边界演化。通过熔体成分估算的密度显示, 在水含量达到约 25%之前, 岩浆洋熔体相对于上地幔和地幔转换带矿物呈中性密度。这一中性密度区间导致在岩浆洋演化到晚期阶段且熔体渗流占主导时, 下地幔顶部可能形成一个短暂的熔体富集层。当岩浆洋的结晶度超过 98% 时, 该熔体富集层中熔体的水含量大于 25%, 导致其密度低于上地幔, 从而因浮力作用向上迁移, 进入并水化地幔转换带。这一过程为地幔转换带深部原生水的起源提供了一种机制, 为理解地球深部水循环提供了新的视角。

关键词: 岩浆洋; 地幔转换带; 水化作用; 高压熔融相图; 熔体密度

第一作者简介: 谢龙剑 (1988-), 研究员, 研究方向: 地球内部结构起源与高压技术研发, E-mail: longjian.xie@hpstar.ac.cn

通信作者简介: 谢龙剑 (1988-), 研究员, 研究方向: 地球内部结构起源与高压技术研发, E-mail: longjian.xie@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

分子动力学模拟氢对橄榄石颗粒边界电导率的影响

王浩清^{1*}

1. 成都理工大学, 成都 610059

橄榄石作为地球深部的重要矿物之一, 其电导率对利用地球物理方法解释高导异常有重要作用, 而颗粒边界被认为对岩石的电导率有着重要的作用。尽管氢对地球内部物理化学性质极为重要, 其在颗粒边界的运移对橄榄石电导率影响还极为有限, 在特定情况下对氢的作用进行探究。本研究旨在探讨氢在橄榄石颗粒边界上的活动性及其对电导率的影响, 以揭示氢在深部地质条件下对橄榄石电导性质的作用。采用分子动力学模拟方法, 温度和压力由耦合到 Nosé-Hoover 恒温器的各向异性压抑器控制, 时间步长为 1 fs, 时间 1~2 ns, 模拟

了相同氢浓度下高温 (>1200 K)、和高压 (>1 GPa) 条件下的橄榄石多晶颗粒边界离子及含氢离子的活动性及其电导率, 分析了橄榄石颗粒边界离子以及氢离子在颗粒边界的迁移和电导。模拟结果表明, 在高温 (1500 K) 和高压 (1 GPa) 条件下, 氢离子活动性增强且橄榄石颗粒边界的电导率增加。氢对橄榄石电导率的影响显著。为探究氢对地幔橄榄石的作用提供参考。

关键词: 橄榄石; 颗粒边界; 电导率; 氢; 分子动力学模拟

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

含水矿物的超离子态相变与电学响应

刘锦^{1*}

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北 秦皇岛 066004

基于大地电磁测深数据, 俯冲板片随深度呈现出丰富的电学性质变化和结构特征, 尤其是高导异常蕴含着关键的地球动力学信息。当前高温高压物质科学研究认为: 15~20 公里以浅的浅层高导异常主要源于沉积物压实过程中孔隙水的排出作用; 弧下深度>90 公里的深部异常则与蛇纹石、滑石等含水硅酸盐矿物的脱水反应密切相关, 高温高压实验证实这些矿物在 400~600 °C 温压条件下发生分解并形成部分熔融体。近年观测数据显示, 在冷俯冲带中普遍存在 30~70 公里深度的显著高导异常; 然而, 该深度高导异常结构的特殊性在于: 冷俯冲板片温度在 200~300 °C 左

右, 远低于叶蛇纹石和滑石脱水温度, 以致传统脱水模型难以解释高导异常体的空间连续性和电导率量级。我们在燕山大学高压科学中心新引进的六轴压机上, 设计并同步开展高温高压变形与电学性质测量实验, 通过明确俯冲带重要含水矿物的高压变形特征及其电学性质的响应规律, 并结合第一性原理计算模拟揭示了含水矿物的超离子态相变, 为破解俯冲带弧前 30~70 公里深度的高导异常成因之谜提供了新思路。

关键词: 深部水循环; 俯冲板片; 高温高压; 电学性质

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

天然有机玻璃碳成因及其在高温高压下行为的研究

舒莎^{1,4}, 牛国梁¹, 张宇璇², 李世杰³, 缙慧阳¹, 李小伟⁴, 陶仁彪^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. 北京大学, 北京 100871;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

广西玻璃碳是一种罕见的通过地质作用形成的天然碳材料, 其具有和有机物类似的化学成分(含大量 N-S-H)以及玻璃碳材料(无序结构)属性。理解其成因及在高温高压下的行为, 对于探究相关地质过程与新材料的开发都具有重要意义。本研究以广西大化县七百弄乡地区采集的天然玻璃碳样品为对象, 根据天然玻璃碳的外观形态、元素含量、同位素组成以及光谱学等特征, 我们推测其可能由煤层沥青类物质迁移至地表固化而成。另外一方面, 最近研究发现, 天然地幔金刚石中可以容纳大量 N-H 缺陷, 但是对于其 N-H 缺陷成因还没有很好的解释。基于天然玻璃碳的特殊成分和结构性质, 我们对其进行了高温高压(5~25 GPa, 1400~1700 °C)处理, 用于研究地球深部形成天然含氢金刚石的成

因。实验结果表明, 在 5 GPa-1500 °C 的低压实验条件下, 天然玻璃碳转化为具有标准六边形结构的片状石墨, 通过石墨产物的 ID/IG 与 FWHM-D 的关系, 我们揭示了玻璃碳在高温高压下向石墨转化的路径。在 20 GPa-1500 °C 的超高压条件下, 天然玻璃碳能够成功转化为含氢纳米金刚石, 通过对合成纳米金刚石的 analysis, 我们推测了氢在合成金刚石中的存在方式和占位。本研究确定了广西天然玻璃碳的成因, 并研究了超高压下天然玻璃碳转化为含氢纳米金刚石的可行性, 为天然含氢金刚石研究和碳材料开发开辟了新方向。

关键词: 天然玻璃碳; 纳米金刚石; 天然含氢金刚石; 高温高压

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFB4100900)

第一作者简介: 舒莎(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 有机碳在高温高压下行为的研究. Email: sha.shu@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 陶仁彪(1984-), 研究员, 研究方向: 地球与行星内部挥发份循环及效应研究. Email: renbiao.tao@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

大洋板片表层沉积有机质深俯冲演化特征 及其深部资源勘查意义

徐良伟^{1*}, 许小凯², 胡咤咤², 张昆¹, 陈磊³

1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003;

2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003;

3. 武汉工程大学 机电工程学院, 武汉 430205

近年来, 全球的油气勘探正向埋深更深、时代更古老的超深层进行探索。滕吉文等(2013)认为, 油气能源应用广泛而供给又十分紧迫, 必须向地球深部“挺进”, 进而提出了第二深度空间(5000~10000 m)的油气勘探与开发的理念。而关于超深层的深度界限、地质内涵, 国内外认识并不完全统一(马永生等, 2011; 滕吉文等, 2013; 贾承造等, 2015)。美国西内盆地阿达科凹陷米尔斯兰奇气田在 7663~8083 m 埋深的下奥陶统碳酸盐岩内发现了世界上最深的气藏, 在墨西哥湾密西西比三角洲的列克-华盛顿湖油田 6540 m 深处发现了世界上最深的油藏(庞雄奇等, 2010)。目前, 已有学者对全球 20 个典型沉积盆地的超深层油气藏的分布领域进行了统计, 油气藏的形成与分布的深度主要受控于地热梯度, 预测超深层油气分布的门限深度可达 14000 m(庞雄奇等, 2020; Pang 等, 2021a, b), 而全球沉积盆地烃类的供给门限及烃类的排出门限也各不相同, 最深可以分别达到 9000 m 及 5000 m 左右(贾承造等, 2015; Pang 等, 2020)。

综上所述, 石油地质学家们主要关注地球表层 1 万米左右深度以内沉积盆地及其周缘油气的聚集与成藏规律, 对于地球更深层的有机质或烃源岩在高温与超高压条件下的物理化学性质演化与生烃现象的研究鲜有涉及。而关于沉积盆地油气的来源与形成过程的探讨, 根据盆地演化过程及形成条件的差异, 不同学者主要设计了开放系统、半封闭系统、封闭系统

实验体系来进行了模拟, 这些体系主要模拟了烃源岩及有机质在有液态地层水和矿物介质共同参与, 在相对低温(300~600 °C)、较高地层流体压力(30~120 MPa)和静岩压力(60~200 MPa)等因素直接或间接作用下地球表层浅部油气的热压降解-缩聚反应的形成过程(王治朝等, 2009; 汤庆艳等, 2013; 何川等, 2021)。而俯冲板片所到达的地球深部是一个极端的高温高压环境, 随着俯冲深度到达壳幔边界或者是更大的深度, 相应的温度可高达上千度, 而压力也显著增大至数个 GPa 及以上, 这就造成俯冲带的岩石及矿物组成都会发生明显异于地球表层的物理-化学变化。因而传统的生烃模拟实验手段往往难以完整的展示大洋俯冲板片富有机质沉积物在深俯冲过程中的脱碳与生烃行为。

其实, 板块俯冲可以把大洋地壳中的富碳沉积物拖拽至地幔中, 这些沉积有机质有异于地表沉积盆地的物质化学性质和生烃模式, 使原来认为的油气勘探“死亡线”复杂化(陈晋阳等, 2004; 王传远等, 2006), 这些过程都不符合石油地质学家们所广泛关注的大陆地壳中沉积盆地油气成藏机理, 也打破了的烃类聚集门限深度而普遍被认为无法聚集成藏且并无勘探潜力和商业价值。

关键词: 大洋板片; 超深层油气分布; 板块俯冲; 油气勘探“死亡线”

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

地球外核中液态铁轻元素合金的第一性原理分子动力学研究

谢妙栩¹, 何宇¹, 付洁^{2*}

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081;

2. 宁波大学 高压物理科学研究院, 浙江 宁波 315211

地球外核主要由液态铁 (Fe) 和轻元素组成, 其中 S、O、Si、C、H 被认为是外核中的关键轻元素。此外, 近期研究指出, N 也可能存在于外核中 (Bajgain 等, 2019), 外核中轻元素的组成及其浓度仍是科学界争论的焦点。研究外核中轻元素的含量对于揭示地球内部轻元素的分布、核幔边界及内核边界处的物质交换和化学反应机制等都具有重要意义。值得注意的是, 近期研究表明, Fe-O、Fe-C 和 Fe-H 合金在内核温压下呈现出超离子态, 这一模型可以很好地解释内核中的诸多现象 (He 等, 2022)。基于此, 我们对外核温压下的 Fe-O、Fe-C 和 Fe-H 合金展开了系统性研究。

在本研究中, 我们采用第一性原理分子动力学 (FP-MD) 模拟, 系统地预测了外核条件下 (约 136~330 GPa, 4000~6000 K) 下液态 Fe-O、Fe-C 和 Fe-H 合金的密度、声速及其热力学性质, 以探索外核的组成。研究结果表明, O 浓度为 6.1% 的液态 Fe-O 合金能够同时满足初步参考地球模型的密度和声速。对于 Fe-C 合金, 我们发现 C 含量为 5.1%~6.6% 的

Fe-C 合金能够解释外核的密度亏损, 而 C 含量为 2.9%~3.7% 的 Fe-C 合金与地震学的声速数据相符。鉴于这一差异, 我们在先前 Fe-O 研究 (Xie 等, 2024) 的基础之上, 将研究扩展至 Fe-C-O 三元合金, 以更全面地理解外核成分。研究结果显示, Fe-C-O 合金能够同时满足密度和声速的地震观测结果。针对三种地热线, 我们提出了与地震观测数据一致的“最佳”模型: 当内核边界温度 (TICB) 为 5400 K 时, “最佳”模型为 Fe-7.3% O, 当 TICB=6350 K 时, “最佳”模型为 Fe-6.5% O-0.3% C, 当 TICB=6760 K 时, “最佳”模型为 Fe-5.3% O-1.1% C。此外, 我们还探究了 Fe-H 体系在外核及核幔边界处的物态特征。总体而言, 本研究通过严谨的第一性原理分子动力学模拟, 为外核成分提供了新的理论模型。这不仅深化了对地球外核组成的认识, 也为核幔边界及内核边界的物质交换和化学过程研究提供了重要参考。

关键词: 状态方程; 第一性原理分子动力学; 热力学性质; 液态铁-轻元素合金; 地球外核

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11804175 和 42350002), 浙江省科技创新团队项目 (2021R01004), 宁波市自然科学基金 (2021J099), 中国科学院青年创新促进会 (JCTD-2022-16) 以及宁波大学王宽诚教育基金会。

第一作者简介: 谢妙栩 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球物理学. Email: xiemiaoxu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

氧缺陷型毛钙硅石的超离子态及其对深部地球氧循环的影响

王子范¹, 何宇^{1,2}, 毛河光^{1,3}, Kim Duck Young^{1,3*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;
3. 上海前瞻物质科学研究院, 上海 201203

毛钙硅石 (CaSiO_3 钙钛矿) 是地球下地幔的一种重要矿物, 可能从早期的岩浆海中结晶形成。然而, 氧空位等缺陷在地幔中对毛钙硅石的物理化学性质的影响尚不明确。本研究基于机器学习分子动力学模拟, 系统研究了氧缺陷在极端条件下对毛钙硅石的结构及输运特性的影响。结果表明, 在高温高压下氧离子的扩散可使毛钙硅石进入超离子态, 使电导率得到显著提升, 并且氧空位的浓度升高能扩展超离子相的

压力-温度范围。这一现象表明, 含氧缺陷的毛钙硅石可能为深部地幔中游离氧的主要来源和载体, 对地球深部的氧循环及早期地幔的氧逸度演化具有关键的调控作用。该研究为地球动力学过程、核幔边界物质交换及地球深部氧循环提供了新的思路和见解。

关键词: 毛钙硅石; 超离子态; 氧空位; 氧循环; 深部地球

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11774015, U1930401), 上海市科学技术委员会 (22JC1410300), 上海市极端环境新材料重点实验室 (22dz2260800)

第一作者: 王子范, 博士研究生, Email: zifan.wang@hpstar.ac.cn

通信作者: Duck Young Kim, 研究员, Email: duckyoung.kim@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

相互统一的铂-金-氧化镁-压标 P-V-T 状态方程

叶宇¹, 朱曦^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

高温高压实验是研究地球深部物质属性的重要实验手段, 实验中的压强标定则是高压实验的基础, 压标状态方程的准确性决定了我们能否地将实验模拟结果同地球物理观测合理地联系起来。Pt、Au 和 MgO 作为最常用的三种压标, 其 P-V-T 状态方程已有了大量研究, 但相互间长期存在着显著差异, 这严重制约着我们对高压实验结果的对比和分析。因此, 建立一套统一的、准确的 Pt、Au 和 MgO 状态方程, 对于我们将高压实验模拟同地球内部结构, 物理化学性质及诸多动力学过程有机联系是很有必要的。本研究基于这三种压标物质的冲击波(动高压)与金刚石压腔(静高压)的实验数据, 并结合

高温热熔, 高温 XRD 以及高温弹性测量数据, 建立了相互统一的 Pt-Au-MgO P-V-T 压标状态方程体系, 在 1500~2500 K, 0~140 GPa 的温压范围内, 三种压标方程标定的压力差别小于 1.5 GPa。基于建立的压标状态方程, 我们进一步精确约束了后尖晶石相变(主宰上下地幔分界面)和后钙钛矿相变(与下地幔底部“D”层形成密切相关)的克拉珀龙斜率分别为-2.4~-2.5 MPa/K 和+5~+7 MPa/K, 且基本不受化学成分的影响。

关键词: P-V-T 状态方程; 压标物质; 氧化镁; 后钙钛矿相变

第一作者简介: 叶宇(1982-), 教授, 研究方向: 矿物物理, Email: yeyu@cug.edu.cn

通讯作者简介: 朱曦(1995-), 博士后, 研究方向: 矿物物理, Email: zhuxi@cug.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

Distinguishing hydrogen defects and the thermoelastic wave velocities of hydrous stishovite

韩松松^{1,2*}, 侯明强¹, 胡清扬²

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077;

2. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

The Landau-type transition in hydrous stishovite is investigated to characterize two major H incorporation mechanisms, namely the tetrahedral hydrogarnet-type defects ($\text{Si}^{4+}=4\text{H}^+$) and H-filled silica channels. Using first-principles simulation, we isolate specific H defect species, overcoming experimental challenges of mixed H defects. We find that H-free and hydrogarnet defect stishovite exhibit similar critical pressure of shear instability. In contrast, the crystal structure of stishovite with H-filled channels is intrinsically

distorted, shifting the stability range of CaCl_2 -type silica to much lower pressure. We conclude that the ratio of H-defect types controls the magnitude of elastic wave velocities drops during the post-stishovite transition. The large varieties of seismic scatterers associated with stishovite in Earth's lower mantle may reflect not only the H-defect type of the hosted stishovite but also the size of the water reservoir in the mantle.

关键词: 含水矿物; 地震散射体

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

利用机器学习研究二氧化硅的动力学和热力学相变路径

曹徐岩¹, 胡清扬^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

我们使用机器学习势函数进行模拟, 研究了二氧化硅的相变动力学, 重点研究了连接赛石英的相变途径。除了兆帕压力下, 在赛石英稳定范围内, 发现了一条热力学控制的相变路径, 也在约 10 和约 25 GPa 下, 远远低于赛石英的稳定范围, 发现了有两条动力

学控制的相变途径。理论预测撞击压力下的陨石赛石英与最近对陨石布里奇曼石的观测相吻合。赛石英的存在可能为约束相关的动态压缩条件提供关键信息。

关键词: 赛石英; 机器学习; 动力学相变,

基金项目: 国家科技部基金 (2022YFA1405500), 国家自然科学基金项目 (42150101, 12274383)

第一作者简介: 曹徐岩 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 材料科学与工程. Email: xuyan.cao@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 胡清扬 (1987-), 研究员, 研究方向: 高温高压岩石学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

内核条件下铁相晶体结构的第一性原理计算研究

杨华¹, 万磊¹, 李云国^{1,2*}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

固态内核的晶体结构对于理解其化学成分和动力学演化至关重要。尽管已有大量高温高压实验和理论模拟研究, 关于内核条件下不同铁相结构 (如 bcc、fcc 和 hcp) 稳定性的争议仍未解决, 内核的具体晶体结构尚不明晰。实验上受限于内核极端的温压条件, 而计算上的主要困难在于不同结构相之间的能量差极小 (约几十毫电子伏特每原子), 导致不同理论方法 (如第一性原理计算、经验势能力场和机器学习方法) 得出的结论不一致。针对以上问题, 我们采用 Bain 路径积分方法, 通过对内应力做功进行热力学自由能计算, 避免了传统方法中引入其他参考体系及直接计算熵所带来的误差与收敛性问题。研究表明, Bain 路径积分方法显著提高了计算精度和效率, 澄清了不同理论方

法关于 bcc 结构在内核条件下力学和热力学均不稳定的争议。在此基础上, 我们以 Bain 路径积分方法自由能计算的收敛精度为基准, 进一步确立了两相热力学 (2PT) 模型自由能计算的收敛要求, 并结合大尺度、长时间的分子动力学模拟, 系统计算了不同铁相结构在内核条件下的熔点。结果显示, hcp 相的熔点要高于 bcc 和 fcc 相, 从热力学角度揭示了其成为内核最稳定晶体结构的内在机制。这一关于 hcp 相作为内核最稳定晶体结构的统一结论, 为未来内核成分、结构、温度及元素分配迁移等物性研究提供关键数据。

关键词: 铁相结构; 第一性原理; 高温高压; 自由能计算; 地球内核

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42173040, 42322201), 中国博士后科学基金 (2024M763142)

第一作者简介: 杨华 (1995-), 博士后, 研究方向: 地核物质结构与性质. Email: yanghua98@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 李云国 (1985-), 教授, 研究方向: 核幔相互作用与行星深部结构. Email: liyunguo@ustc.edu.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

深部熔体的波速和密度：对上地幔地震波低速异常区的启示

许满^{1,2*}, 景志成³, James Van Orman⁴, Tony Yu⁵, Yanbin Wang⁵

1. 上海前瞻物质科学研究院, 上海 201203;

2. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

3. 南方科技大学 地球与空间科学系, 广东 深圳 518055;

4. 凯斯西储大学 地球、环境与行星科学系, 美国 克利夫兰 044106;

5. 芝加哥大学 先进放射源中心, 美国 芝加哥 060637

深部熔体是地球内部能量与物质运移的主要媒介, 显著影响着地球的结构、成分及物理化学性质等, 造成地球物理及地球化学观测到的地幔不均一性。地震观测结果表明, 在上地幔软流圈及地幔过渡带之上存在显著的地震波低速异常区, 暗示着熔体层的存在。熔体能否稳定存在于这些区域并合理解释地震观测取决于熔体的密度和弹性波速等物理性质, 然而由于熔体具有易反应、易流动等特性, 给实验造成了较大的挑战, 熔体在高压下的波速和密度仍没有得到很好的制约。本研究运用先进的大腔体压机原位超声测量技

术和三维 X 射线断层显微成像技术对硅酸盐熔体的波速、密度及状态方程进行了测定, 包含 CaO-MgO-FeO-SiO_2 和 $\text{Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 熔体体系, 聚焦熔体中重要组分 FeO 和 Na_2O 对熔体物性的影响。实验结果对理解熔体在地球内部的重力稳定性及深部熔体的地震学特征具有重要意义。本报告将详细讨论这些实验结果及其对上地幔地震波低速异常区的启示。

关键词: 熔体; 弹性波速; 密度; 高温高压; 低速层

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

原始镁的存在解释地球外核最外层的低速层

刘涛¹, 景志成^{1*}

1. 南方科技大学, 广东 深圳 518000

地球液态外核的精确成分长期以来备受争议。现有模型认为, 外核主要由铁镍 (Fe-Ni) 合金组成, 并含有少量轻元素 (如 Si、O、C、S 和 H), 但这些模型无法解释外核最顶部数百公里处地震学观测到的低速层 (称为 “E” 层)。本研究提出, 原始镁 (Mg)——一种可能在月球形成巨型撞击事件后进入外核最外层的潜在轻元素——可为 E' 层的形成提供合理解释。通过第一性原理分子动力学模拟, 我们首次获得了外核条件下 Fe-Mg 合金熔体的状态方程 (压

力-密度-温度关系) 和纵波速度 (V_p)。结果表明, 与其他轻元素的增强效应不同, Mg 的存在会略微降低液态铁的 V_p 。结合地震学观测的密度和 V_p 约束, 我们发现需要 0.5%~1.79% 的 Mg 才能匹配外核的地震模型。外核中原始镁的含量可以部分地解释硅酸盐地球整体镁含量相对于球粒陨石的轻微亏损现象。

关键词: 地球外核顶部; 轻元素; 第一性原理; 镁

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

类地行星地幔粘、弹性结构及潮汐响应

陈博文^{1*}, 吴忠庆¹, 吴小平¹

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

潮汐耗散是近轨道系外行星的重要产热机制,也是超级地球区别于地球的重要动力学特征,对于理解类地行星的热演化和宜居性至关重要。行星内部的潮汐耗散强度不仅取决于行星的轨道参数,还与其自身的粘度和剪切模量密切相关,为此,我们通过第一性原理计算,研究了后钙钛矿 MgSiO_3 、I-42d 型 Mg_2SiO_4 和 P21/c 型 MgSi_2O_5 三种超级地球主要组成矿物的扩散、粘度和弹性性质。计算表明,超级地球中的矿物相变均能导致粘度降低,表现出高压软化现象,并在行星内部形成多个低粘度层。基于矿物的物性参数,我们构建了超级地球的地幔粘弹性结构,并进一步估

算了其内部潮汐勒夫数和潮汐产热速率。我们发现,近轨道超级地球内部的潮汐产热速率极高,远超放射性同位素衰变,是行星内部的最主要热源。如此强烈的潮汐加热作用显著降低了近轨道超级地球的宜居性,即便他们可能位于红矮星的宜居带内。此外,我们还探讨了行星内部结构和成分变化对地表潮汐响应的影响,评估潮汐耗散作为系外行星探测手段的可行性。

关键词: 类地行星; 粘弹性; 第一性原理计算; 潮汐耗散

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

The fate of perovskites deep in the mantle: aggregate chemistry at extreme temperatures

Joshua Muir¹, 张飞武^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

The Earth, particularly the deep earth where the conditions are unreachable by modern experiments, is generally represented by a series of models of simple ideal components but at extreme conditions (high temperatures, low strain rates, high pressures) these models can increasingly break down. The most common model of the mantle is that of a pyrolitic solid solution. In this talk I shall use thermodynamic models to predict that such a model would break down as temperatures increase and isolated phases increasingly interact. The most notable effect is that bridgmanite and davyne will dissolve into a single Ca-Mg-pv phase. This has profound implications for the lower mantle

and the core-mantle boundary as the properties of the aggregate increasingly diverge from the properties of the individual components of the aggregate. We predict the ‘D’ discontinuity is more likely a product of overlapping phase transitions between “inert species” rather than a single isolated phase transition, that the core is largely exposed to a Mg-Ca-pv perovskite rather than bridgmanite and that harzburgite, basalt and pyrolite have different stable phases (with different seismicity) in lower mantle conditions.

关键词: Mantle; Perovskites; Thermodynamic models; Phase transitions

基金项目: 国家重点研发计划 (2024FTF0807500)

第一作者简介: Joshua Muir (1985– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学。Email: j.m.r.muir@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 张飞武 (1980– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学。Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

高温高压实验探究地核中铁-氧-氢三元系统的熔融性质

付苏宇^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

地核由液态外核与固态内核组成。地球化学结果显示,地核主要由铁-镍(Fe-Ni)合金组成(McDonough and Sun, 1995)。然而,地震学观测发现,外核的密度比液态纯铁的低 7.5%~7.6%,而内核的密度比固态纯铁的低约 5%,被称为地核的密度亏损(Dziewonski and Anderson, 1981; Fei 等, 2016; Kuwayama 等, 2020)。为了解释这一密度亏损,前人提出地核中含有 5%~10%的轻元素,如氢(H)、硅(Si)、氧(O)、硫(S)、碳(C)(Poirier, 1994; Hirose 等, 2021)。然而,地核中究竟含有哪些轻元素以及它们的含量有多少,目前仍没有定论。此外,地球的外核与内核是在逐渐冷却过程中,由早期原始液态核结晶分异形成。轻元素在内核与外核中如何分配与地核可能组分的熔融相图密切相关。因此,为了更好地约束地核的成分,需要开展针对地核可能组分在高温高压条件下熔融性质的实验研究。

在地核可能含有的几种轻元素中,氢与氧一直是深部地球科学的研究重点。比如,矿物物理针对氢在硅酸盐熔体与液态铁合金间分配所展开的实验发现,氢在高温高压下由很强的亲铁性:在早期岩浆洋分异过程中,0.3%~0.6%氢能进入地核,使得地核可能成为一个巨大的储水库(Tagawa 等, 2021)。理论计算也表明,Fe-H 合金中的氢在内核的温压条件下表现为超离子态,可能解释地震学观测的波速、密度、泊松比等性质(Wang 等, 2021; He 等, 2022)。此外,在早期岩浆洋模型中,由于共存的硅酸盐熔体与液态铁合金,大量氧能进入地核。特别的,地核中氧含量的氧与固态铁几乎不相

溶,因此大部分氧在内核形成时会从其中排出,进入液态外核中(Oka 等, 2019)。尽管氢和氧在地核中很重要,但之前的实验核理论计算研究主要聚焦于高温高压下 Fe-O 或 Fe-H 二元系统的熔融相图(Oka 等, 2019; Tagawa 等, 2022)。Oka 等(2022)对 Fe-H-O 三元系统熔融相图的研究局限于 40 GPa,远低于地核的温压条件。

在本研究中,我们结合金刚石压腔和激光加热技术,对 Fe-H-O 系统进行了高温高压熔融实验(高达 120 GPa 和 4000 K)。我们采用同步辐射 X 射线衍射技术原位采集了高温高压下的 X 射线衍射图谱(XRD),通过测量样品的体积估算它的氢含量。我们通过聚焦离子束(FIB)技术切割表征了回收样品,并采用电子探针(EPMA)技术定量分析了 Fe-H-O 熔化过程中熔体相和共存固体相的成分。这些结果用于构建 Fe-H-O 在高温高压条件下的熔融相图,并定量分析了氢和氧对铁合金熔化曲线的影响。结果显示,氢和氧都能降低铁合金的熔化温度,而且氧元素的影响比氢元素腔。我们的结果还发现,随着氧在熔体中含量的增加,氢更倾向于进入共存固体相,使得氢在固-液相中的分配系数大于 1。由于氧几乎与铁不相溶,这意味着,在早期液态核结晶形成内核的过程中,大部分氧残留在液态外核中,而氢更倾向于进入内核,使得内核中的氢含量可能大于外核。这些结果能为约束地核的成分提供关键数据。

关键词: 地核的成分; 铁-氧-氢; 高温高压熔融实验; 金刚石压腔

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

Sulfide-Silicate Reactions at the Base of the Mantle: Implications for Core Formation and Seismic Anomalies

胡清扬^{1*}, 公龙飞¹

1. 北京高压科学研究中心, 上海 100193

Sulphide-silicate equilibrium during the final stage of core-mantle differentiation may have led to substantial sulphide reservoirs in the lowermost mantle. We here investigated the reactivity of calcium sulphide and silica at the pressure-temperature conditions relevant to the base of mantle. Experiments combining X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and electron microscopy revealed a reaction transforming CaS into a denser sub-sulphide with the composition of Ca_{1+x}S , along with the formations of CaSiO_3 davemaoite, elemental sulphur, and possibly silicon. These findings

reveal a mechanism for incorporating siderophile elements like sulphur and silicon into the outer core, converting ancient sulphide reservoirs into dense phases like davemaoite and sub-sulphide. These dense products, potentially admixed throughout lower mantle convection, could contribute to the development of large-scale seismic structures observed today, including the large low velocity provinces.

关键词: Core-mantle differentiation; Sulphide-silicate equilibrium; Davemaoite; Sub-sulphide phases

国家自然科学基金项目 (T2425016)

第一作者简介: 公龙飞 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 材料科学. Email: longfei.gong@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 胡清扬 (1987-), 研究员, 研究方向: 高压矿物物理、凝聚态物理和高压化学. Email: qingyang.hu@hpstar.ac.cn

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

碳酸镁铁在自旋转变区间的异常物理性质及其在地幔中部电导率不均一性的应用

赵超帅¹, 毛竹^{1*}, 刘锦², 徐良旭³, 侯明强⁴, 张馨月¹, 庄毓凯⁵, Spivak Anna⁶,
于英鑫¹, 李络¹, 朱洁⁷, 林俊孚⁸

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

2. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004;

3. 北京大学, 北京 100871;

4. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077;

5. 四川大学, 成都 610065;

6. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka 142432;

7. 贵州理工大学, 贵阳 550013;

8. The University of Texas at Austin, Texas 078712

(Mg, Fe)CO₃ 在地幔深部的碳存储和输运中扮演着至关重要的作用(Farsang 等, 2021; Isshiki 等, 2004; Zhao 等, 2021)。研究其在极端条件下的物理性质(如声速、电导率、热导率)对约束俯冲带碳含量、解释地球物理异常(如地震波速异常、热化学异常、电导率不均一性)以及识别深部地幔潜在富碳酸盐区域具有重要意义(Chao and Hsieh, 2019; Farsang 等, 2021; Fu 等, 2017; Gaillard 等, 2008; Liu 等, 2014; Thomson 等, 2016; Yu 等, 2024)。然而, (Mg, Fe)CO₃ 在同时高温高压下的物理性质的研究仍然相对匮乏。在本研究中, 我们结合外电阻加热金刚石压腔高温高压实验技术, 通过拉曼光谱研究了 0~65 GPa 和 300~900 K 下三种不同铁含量的(Mg, Fe)CO₃ 单晶样品的振动和结构特性。高温高压实验结果表明(Mg, Fe)CO₃ 在 0~65 GPa 和 300~900 K 仍然稳定存在。有趣的是, (Mg, Fe)CO₃ 在高温高压下表现出异常的振动特性和自旋转变相图。三种(Mg, Fe)CO₃ 样品的自旋转变初始压力随着温度升高先降低后升高, 在 500 K 时发生转折。值得注意的是, 富铁(Mg, Fe)CO₃ 的自旋转变压力

区间比贫铁(Mg, Fe)CO₃ 更窄。这些结果为研究温度、压力、铁含量对(Mg, Fe)CO₃ 的自旋转变的影响提供了新的约束(Zhao 等, 2024b)。

此外, 我们采用四探针范德堡法测量了(Mg, Fe)CO₃ 在 0~83 GPa 和 126~2000 K 条件下的电导率。在常温高压下, (Mg, Fe)CO₃ 的电导率与铁含量呈正相关, 且在自旋转变区间电导率异常增加 2~3 个数量级。在 10~20 GPa 压力下, FeCO₃ 的电导率从 300 到 1500 K 提升了约 6 个数量级, 显示出高温对其电导性质的显著增强效应。结合地球物理观测, 我们发现 800~2000 km 深部地幔环境中, (Mg, Fe)CO₃ 及其分解产物 FeCO₃+Fe₃O₄±C 混合体系的电导率比地幔主要矿物布里奇曼石、方镁铁矿和毛钙硅石高 1~4 个数量级。这一发现为揭示中下地幔局部大地电磁异质性的成因和潜在富碳区域的形成机制提供了重要参考(Zhao 等, 2024a)。

关键词: (Mg, Fe)CO₃; 高温高压; 自旋转变; 电导率

基金项目: 国家自然科学基金项目(42104101, 42241117, 42272036), 国家重点研发计划(2019YFA0708502, 2023YFF0804100)

第一作者简介: 赵超帅(1989-), 副研究员, 研究方向: 高压矿物物理。Email. cszhao@ustc.edu.cn

通讯作者简介:

毛竹(1982-), 教授, 研究方向: 高压矿物物理。Email. zhuma@ustc.edu.cn

刘锦(1984-), 教授, 研究方向: 高压矿物物理。Email. jinliu@ysu.edu.cn

朱洁(1986-), 副教授, 研究方向: 激光传输调控与整形技术。Email. jiezh_16@163.com

• 专题 7: 地球深部物质的组成、结构和物性 •

月球和水星核心条件下铁硅合金的声速

李孝红¹, 侯明强^{1*}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071

金属核心中轻元素的种类和含量对了解类地行星和卫星的结构、热状态、地球动力和演化具有重要作用。硅 (Si) 已被认为是地球和小天体行星核中主要的候选轻元素, 但参考前人对 Fe-Si 的声速研究结果, 仍然缺乏对于面心立方 (fcc) Fe-Si 的声速研究。因此在本研究中, 我们利用脉冲回波重叠技术结合能量色散 x 射线衍射 (EDXRD) 测量了含 3% 和 6% Si 的 Fe 合金在压力和温度高达 6.3 GPa 和 1273 K 时的横波 (VP) 和纵波 (VS) 波速。在温度为 300 K 时, Si 的加入使体心立方 (bcc) Fe 的 VP 随 Si 含量的增加而增加了

0.074(15) km/s, VS 降低了 0.024(9) km/s。然而, 3% Si 对 fcc-Fe 的影响很小。掺入 6% Si 使 bcc 和 fcc 相中的 Fe 在高温下稳定, VP 相对于 fcc-Fe 的声速增加了 0.59 km/s。根据阿波罗地震观测和 Fe 和 Fe-Si 合金的 VP, Si 不太可能是月球核心中唯一的轻元素。对于水星核, 当 Si 含量小于 3% 时, VP 分布在 5.65~6.34 km/s 时, 水星核处于 fcc 相。而 6% Si 可以稳定 bcc 和 fcc 混合相的水星核, VP 分布为 6.17~6.85 km/s。

关键词: 月核; 水星核; 声速

基金项目: 中国自然科学基金 (批准号: 42394114, 42394112, 42192535, R22R6402)

第一作者简介: 李孝红 (1998 年), 性别 女, 博士研究生, 研究方向: 地球及其他类地行星内部的物理与化学研究. E-mail: lixiaohong@apm.ac.cn

*通信作者简介: 侯明强现任中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员, 属于地震与地球内部物理研究部, 曾获优秀青年基金 (海外), “武汉英才”领军人才支持计划等项目支持. E-mail: houmq@apm.ac.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

地壳深熔过程中转熔锆石与深熔锆石的区分和识别

郑春丽¹, 夏琼霞^{1*}, 朱二林¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

锆石是变质岩中最重要的定年矿物之一, 其高 U 含量和低 Pb 含量的特征, 使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最有效和最常用的方法之一。锆石可以形成于几乎所有的地质环境, 包括岩浆作用、变质作用和热液作用, 以及变质作用的不同阶段。不同类型变质锆石的形成不仅取决于变质的温度和压力条件, 还取决于变质熔/流体的活动能力, 以及流体的物理化学属性。因此, 对变质锆石的有效区分和识别, 对解释锆石 U-Pb 定年及对应的地质事件具有重要指导意义。林芝地区位于喜马拉雅东构造结西侧的拉萨地体东南缘, 该区出露了大量的混合岩和淡色脉体, 为我们进行转熔锆石和深熔锆石的区分提供了理想的研究样品。锆石 U-Pb 定年结果显示, 该地区主要经历了~49 Ma 和~25 Ma 的两期深熔事件。根据 CL 图像、包裹体组成和微量元素特征可将该地区混合岩中的锆石分为 3 种类型。I 型锆石 U-Pb 定年结果广泛, 主要是来自源区的残留锆石。II 型和 III 型锆石均为新生锆石, II 型锆石为转熔锆石, 表现为: (a) 玻璃质或完全结晶的多相包裹体; (b) CL 图像中呈海绵状或无分带或弱振荡分带, 亮度较低; (c)

Th 和 U 含量高且 Th/U 比值广泛, HFSE (如 Hf、Nb、Ta) 和 HREE 含量相比 I 型锆石高; (d) 与岩浆锆石相似的 REE 配分模式。转熔锆石中 HFSE 和 HREE 的富集反映了转熔过程中钛铁矿、金红石、榍石、石榴石、云母等富钛矿物的分解对锆石生长的贡献。III 型锆石为深熔锆石, 表现为: (a) 振荡分带、面状分带或冷杉状分带, 在 CL 图像中亮度较高; (b) U 含量略高, Th 含量中等, Th/U 比值较低 (主要在 0.01~0.1 之间); (c) Hf、Nb、Ta 等 HFSE 含量与 I 型锆石相当或略高; (d) 与岩浆锆石相似的 REE 分布模式。深熔锆石是深熔熔体演化过程中由于温度降低和贫 Zr 矿物结晶而形成的。尽管转熔锆石和深熔锆石通常具有相似的 U-Pb 年龄范围, 但是其锆石岩相学特征、包裹体类型, 以及微量元素特征的差异, 可以将它们进行很好的区分和识别, 为我们理解和认识地壳深熔过程中熔体的分异和演化, 以及汇聚板块边缘的构造热演化提供了重要参考。

关键词: 转熔锆石; 深熔锆石; 部分熔融; 转熔反应; 喜马拉雅东构造结

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472069)

第一作者简介: 郑春丽 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物化学. Email: Zhengchunli@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 夏琼霞 (1979-), 教授, 研究方向: 变质岩石学、矿物学和地球化学. Email: qxxia@ustc.edu.cn

第二作者简介: 朱二林 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物化学. Email: zhuel@mail.ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

扬子地块西南缘大红山群变火山-沉积岩的变质作用
和年代学研究姜杭云¹, 刘福来^{1*}, 王舫¹, 王慧宁¹, 李同宇¹

1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037

云南新平地区大红山群位于扬子地块西南缘, 是扬子地块西缘出露的少数古-中元古界结晶基底。大红山群主要由低绿片岩-高角闪岩相变质的火山-沉积岩组成。目前对大红山群变沉积岩和变基性岩的变质作用已有相关研究。前人报道了大红山群老厂河组变沉积岩包括含蓝晶石-十字石石榴二云母片岩和石榴云母片岩的变质演化过程, 认为这些岩石记录了新元古代中压相系顺时针 P-T 轨迹。然而, 关于大红山群的中压相系变质岩石的岩石学、矿物相转变、变质演化及年代格架仍需进一步深入系统且精细地研究。本研究对大红山群老厂河组的变沉积岩和变基性岩详细开展矿物学、岩石学和年代学研究, 并利用相平衡模拟方法, 限定峰期变质条件和 P-T 轨迹。重建大红山群的变质岩石的变质演化过程用来阐释扬子地块西南缘构造-热事件演化历史, 为深入探讨扬子地块前寒武纪早期演化历史与 Rodinia 超大陆聚合和裂解的内在成因关联提供关键地质证据。研究区出露的变沉积岩岩性为石榴白云母片岩和蓝晶石榴白云母片岩, 变基性岩呈透镜状和夹层状产于变沉积岩内, 主要岩性为石榴角闪岩。岩相学研究表明石榴白云母片岩蓝晶石榴白云母片岩矿物组合可划分为两个阶段: (1) 升温升压的进变质阶段, 峰期矿物组合分别为石榴石+白云母+黑云母+斜长石+石英+金红石+钛铁矿和蓝晶石+石榴石+白云母+黑云母+石英+金红石+钛铁矿 (M1);

(2) 峰后降压阶段, 退变质阶段矿物组合分别为黑云母+钠长石+石英和黑云母+石英+白云母 (M2)。石榴角闪岩的矿物组合可分为变质峰期阶段石榴石+角闪石+斜长石+黑云母+金红石+钛铁矿 (M1) 和峰后变质阶段角闪石+斜长石+黑云母+磁铁矿+石英 (M2)。其中降温降压的退变质阶段由石榴石边部的“白眼圈”记录。利用传统温压计和相平衡模拟计算得出石榴白云母片岩和蓝晶石榴白云母片岩的峰期温压条件为 560~580℃, 8.5~9.5 kbar 和 575~620℃, 6.5~7.5 kbar, 与变沉积岩共生的石榴角闪岩的峰期温压条件为 590~650℃, 8.2~9.8 kbar, 之后共同经历降温降压的退变质阶段。综合前人和本研究的锆石、白云母、独居石和金红石变质矿物联合定年结果, 获得大红山群老厂河组变质岩石的峰期变质年龄为 845~830 Ma。本研究 and 前人研究表明大红山群变沉积岩和变基性岩的石榴石进变质成分环带记录了进变质和温度峰期的变质过程, 而岩石中的退变质矿物组合代表了降温降压的变质阶段。大红山群变质岩石的顺时针型 P-T 轨迹和变质时代表明, 扬子地块西南缘在 845~830 Ma 时发生了一次中压型碰撞造山变质作用, 经历先俯冲碰撞, 此后抬升至地表的过程。

关键词: 扬子地块西南缘; 大红山群; 变质演化; 年代学; P-T 轨迹

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

青藏高原南拉萨地体尼木地区始新世闪长玢岩脉与花岗岩脉揭示新特提斯板片撕裂过程

朱拓¹, 赵志丹^{1*}, 王珍珍¹, 刘栋¹, 朱弟成¹, 莫宣学¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100000

大洋俯冲到大陆碰撞的过程对于理解造山带形成与大陆地壳增生具有重要科学意义。然而, 此阶段青藏高原深部地球动力学演化仍存在争议。本研究通过针对尼木地区闪长玢岩与花岗岩脉开展全岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素地球化学, 结合南拉萨地体岩浆岩数据, 揭示了新特提斯洋大洋板片从俯冲到撕裂的地球动力学过程。闪长玢岩脉与花岗岩脉侵位于 47~46 Ma, 其锆石同位素组成均显示 Hf 亏损特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +9.0 至 +13.8, 具有年轻的亏损地幔与地壳模式年龄。两类样品均呈现俯冲相关弧岩浆特征, 表现为大离子亲石元素富集与高场强元素亏损。闪长玢岩脉具有埃达克岩特征, 有较低 SiO_2 (56.2~59.8 wt.%) 与较高 MgO (3.4~4.1 wt.%)、镁指数 ($\text{Mg\#} = 54\sim 58$) 和较高的 Sr/Y 值 (75.1~120.5), 源自含俯冲

沉积物加入的大洋板片部分熔融, 并经历了地幔橄榄岩交代, 主要经历以单斜辉石和石榴子石为主导的分离结晶作用。花岗岩脉具有高 SiO_2 (71.2~73.5 wt.%)、中高 K_2O (3.8~4.6 wt.%) 和低 MgO (0.2~0.4 wt.%) 的特征, 源于冈底斯新生地壳部分熔融, 并经历以斜长石和钾长石为主的分离结晶过程。我们认为, 欧亚—印度大陆的陆陆碰撞, 触发了特提斯洋板片撕裂, 冈底斯带古新世-始新世岩浆活动和后续的大陆地壳增长。新特提斯洋板片约 53 Ma 自西向东开始发生撕裂, 导致亏损地幔与新生地壳部分熔融, 最终形成具有弧岩浆属性的尼木闪长玢岩脉与花岗岩脉

关键词: 拉萨地体; 新特提斯洋; 埃达克岩; 岩石学; 地球动力学

基金项目: 国家自然科学基金 (2022YFF0800901-3)

第一作者简介: 朱拓 (2002-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学、地球化学. Email: tuo.zhu@qq.com

*通信作者简介: 赵志丹 (1968-), 教授, 研究方向: 岩石学、地球化学. Email: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

挥发分与金属的俯冲循环: 来自造山带橄榄岩
和幔源岩浆岩的约束汪在聪^{1*}, 任爱卿¹, 汪翔¹, 戴立群²

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国科学技术大学壳幔物质与环境重点实验室, 地球与空间科学学院, 合肥 230026

俯冲驱动的亲铜元素循环对汇聚板块边缘地幔交代富集和成矿作用具有重要意义。然而, 在不同俯冲背景和俯冲不同阶段下, 板片来源熔/流体中硫的氧化还原状态、及其能否迁移大量的金属到上部地幔楔富集, 存在较大争议。华北克拉通东部自古生代以来经历了多期次的大洋-大陆俯冲事件, 是研究俯冲背景下挥发分和金属循环的重要实例。本研究聚焦于华北克拉通东部苏鲁造山带橄榄岩和交代地幔来源的岩浆岩, 发现冲板片来源熔流体的氧化还原性质会随着俯冲深度(或阶段)的变化而变化, 且尽管贡献了大量的 S 等挥发分, 但并未造成地幔楔金属元素(如 Au、Cu)的显著富集。具体研究内容如下: 苏鲁造山带方辉橄榄岩具有古元古代的 Re 亏损模式年龄(1.7~1.9 Ga), 并显示 S 和金属的强烈亏损, 是华北克拉通岩石圈地幔高度熔融的结果。相比之下, 纯橄岩和二辉橄榄岩则反映了后期不同程度的交代过程, 主要可分为三期。在超高压变质作用阶段, 玄武质熔体的交代作用会引入还原性的 S ($\delta^{34}\text{S}$: ~0‰), 并将亏损地幔橄榄岩的金属元素含量补充至饱满地幔水平。而在折返阶段中, 尽管存在氧化性壳源熔/流体的加入, 且橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (高至 0.139)、 $\delta^{34}\text{S}$ (高至 5.2‰)、和 Fe^{3+} 比例(高至 59%)显著升高, 但其金属元素含量并未升高, 表明这些交代过程对金属元素的贡献非常有限。因此, 大陆俯冲带中 S 与金属迁移效率可能会随着深度的变化而变化: 高温高压条件下地幔再富集作用向亏损地幔楔加入了还原性 S 及少量金属, 意味着弧下地幔深度板片释放的

熔流体中硫主要以还原性 S 为主; 而浅部交代介质是含硫酸盐的氧化流体, 但是并未携带大量金属。相比于地幔橄榄岩, 幔源岩浆岩能够反映更大范围的地幔源区特征。华北东部形成于受到大洋俯冲改造的、交代岩石圈地幔来源的岩浆岩具有较高的 Ba/Nb 比值(10~20), $\delta^{34}\text{S}$ (0‰~2‰) 和低 $\epsilon\text{Nd}_{\text{CHUR}}$ 值(-4 至 5), 以及较高的 S 含量(700~3200 $\mu\text{g/g}$) 和较低的金属元素含量(如 Au: 0.1~1 ng/g)。相比之下, 形成于大陆-大洋俯冲叠加改造的、岩石圈地幔来源的岩浆岩具有更高的 Ba/Nb 比值(100~500), $\delta^{34}\text{S}$ (2‰~6‰) 和更低的 $\epsilon\text{Nd}_{\text{CHUR}}$ 值(-20 至 -2), 以及更高的 S (高至 4700 $\mu\text{g/g}$) 和 Au (1~4 ng/g) 含量, 而 Cu 等金属元素含量仍然较低。整体上, 这些富水岩浆的 PGE、Cu 含量以及 Os/Ir、Ru/Ir、Pd/Ir、Cu/Pd 比值与 MORB 一致, 表明俯冲相关的地幔交代作用对这些金属的贡献非常有限。相比之下, 大陆俯冲改造可能在地幔同位素富集过程中起着主要作用, 并引入了一定量的 Au (大陆俯冲相关的岩浆岩具有较高的 Au 含量和 Au/Pd 比值)。因此, 华北克拉通东部交代橄榄岩和幔源岩浆的结果一致表明, 俯冲相关的地幔交代作用贡献了大量的挥发分, 但并未造成金属元素的显著富集, 而仅仅是亏损地幔的金属元素含量补充至饱满地幔水平。这些结果对认识汇聚板块边缘的大规模金属迁移富集成矿具有重要启示意义。

关键词: 亲铜元素; 俯冲循环; 地幔交代; 苏鲁造山带; 华北克拉通

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲蛇纹岩再循环：来自板内玄武岩重 Mo 同位素的证据

代富强^{1*}, 赵子福², 陈仁旭², 陈伊翔², 王煜³, 李杰³

1. 河海大学, 南京 210098;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

地壳物质在汇聚板块边缘循环进入地幔是引起地幔地球化学不均一的重要地质过程。通过对洋岛玄武岩的研究表明, 它们的地幔源区中包含再循环的洋壳物质。然而, 俯冲大洋板片除了包含顶部的洋壳物质外, 还含有蛇纹岩化的大洋岩石圈地幔。但是如何从板内玄武岩的地幔源区中示踪再循环的大洋板片蛇纹岩仍然面临着诸多难题。最近新兴的 Mo 同位素有望在此方面发挥作用, 这是因为板片蛇纹岩及其进变质产物与俯冲洋壳具有截然不同的 Mo 同位素特征, 为示踪再循环板片蛇纹岩提供了强有力的工具。

我们对华北板块东部自 100 Ma 年以来的板内碱性玄武岩进行了全岩 Mo 含量和同位素分析, 以此来查明它们的地幔源区是否遭受到了俯冲 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩的影响。分析结果表明华北板块东部很多板内玄武岩具有重 Mo 同位素组成 ($\delta^{98/95}\text{Mo}$

最高达-0.06‰)。结合全岩 Sr-Nd 同位素和橄榄石 O 同位素数据, 这些重 Mo 同位素特征只能通过深俯冲的 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩来解释。因此, 我们指出板内玄武岩的重 Mo 同位素可以作为蛇纹岩再循环的鉴定性指标。俯冲板片蛇纹岩还能抵消地壳生长和洋壳俯冲对地幔 Mo 同位素的影响, 从而使地幔的 Mo 同位素从 35 亿年以来保持恒定。并且深俯冲的 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩能携带大量的水进入地幔深部, 最终导致了华北克拉通破坏、中国东部板内玄武岩的高水含量以及中国东部地幔的高电导率特征。该研究提供了蛇纹岩再循环的直接证据, 并加深了我们对全球 Mo 循环的认识。

关键词: 蛇纹岩再循环; Mo 同位素; 板内玄武岩; 地幔不均一; 全球 Mo 循环

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

柴北缘造山带不均一的岩石圈地幔： 同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩的地球化学证据

孙国超¹, 赵子福^{1*}, 戴立群¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

大陆碰撞造山带普遍发育有同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩, 其地球化学特征不仅能够反应造山带岩石圈地幔的性质, 而且为研究大陆碰撞造山带俯冲陆壳物质再循环及其壳幔相互作用提供了重要载体。为此, 我们以青藏高原东北部柴北缘造山带古生代镁铁质岩浆岩为研究对象, 对其进行了全岩主微量元素、Sr-Nd-Hf-Li-Mo 同位素、锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素分析。结果表明, 这些镁铁质岩石形成于 420 ± 8 至 395 ± 2 Ma 和 383 ± 5 至 368 ± 3 Ma, 分别对应柴北缘造山带同折返和碰撞后阶段。它们具有弧型的微量元素分布特征、亏损到富集的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成、低于地幔的 Li 同位素、高于地幔的 Mo 同位素组成以及高的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 与柴北缘造山带正片麻岩和陆壳型榴辉岩相似, 表明它们的地幔源区受到了俯冲大陆地壳物质的交代作用。同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩放射性成因同位

素组成的差别指示交代其地幔源区的地壳物质组成和数量有所不同。微量元素定量模拟结果显示, 同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩的微量元素组成可由 $93.0:6.0:1.0$ 和 $91.7:2.8:5.5$ 的地幔橄榄岩、正片麻岩来源熔体和陆壳型榴辉岩来源熔体的混合物分别发生 23% 和 28% 的聚集分离熔融作用形成。Li 同位素定量模拟结果同样指示约有 3~9 wt% 的地壳物质发生了再循环。这些不同性质和比例的地壳物质来源的熔体与地幔橄榄岩发生反应产生了不均一的造山带岩石圈地幔。因此, 同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩的地球化学组成可以有效记录大陆碰撞造山带岩石圈地幔的成分变化和大陆俯冲隧道内发生的壳幔相互作用。

关键词: 同折返镁铁质岩浆岩; 碰撞后镁铁质岩浆岩; 岩石圈地幔; Mo 同位素

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB41000000)

第一作者简介: 孙国超 (1989-), 副研究员, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: sgc@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 赵子福 (1973-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学和化学地球动力学. E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

深俯冲大陆板片部分熔融机制和熔体组成的磷灰石记录

汤跃¹, 陈仁旭^{1*}, 陈茂雨¹, 孙国超¹, 尹壮壮¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学, 合肥 230026

了解深俯冲大陆板片部分熔融机制和熔体组成对于理解壳幔相互作用和地壳分异至关重要。自然界中的部分熔融熔体容易受到后期的叠加改造, 利用它们的全岩成分信息反映初始熔体的组成和利用单一的地球化学指标识别部分熔融机制都相对困难。本研究对柴北缘造山带超高压正片麻岩、退变质榴辉岩及其中的长英质脉体系统地开展了磷灰石 U-Pb 年代学、主量元素、微量元素及卤素元素分析, 揭示了磷灰石组成在识别地壳岩石不同熔融机制和重建熔体组成中的有效性。所研究长英质脉体根据成分差异, 可以分成三种成因: 正片麻岩脱水熔融 (Vein M1)、正片麻岩加水熔融 (Vein M2) 和变基性岩加水熔融 (Vein A)。这些长英质脉体与围岩中磷灰石记录了深俯冲陆壳折返过程中在 ca. 420 Ma 的部分熔融作用。由 Vein A 到 Vein M2 再到 Vein M1, 磷灰石在 Na₂O、FeO、F、Ba、Mn、REE、Y 含量以及 F/Cl 比值表现出升高的趋势, 而 Cl 含量表现出逐渐降低的趋势。

与此同时, 本研究与低压条件下熔体成因的磷灰石在组成上也有很大的差异。这些差异主要受参与熔融反应的源岩类型、矿物类型和比例以及压力的影响。由此可见, 利用磷灰石可以用来有效区分地壳岩石的不同熔融机制。我们进一步利用磷灰石的成分重建了熔体的挥发分含量 (F 和 Cl 含量) 和氧逸度值。结果发现, 俯冲大陆板片部分熔融形成的熔体含有可观的卤素, 是卤素再循环至地幔以及地壳分异的重要途径。进一步发现, 脱水熔融形成的熔体的氧逸度高于加水熔融形成的熔体, 这种差异表明部分熔融过程中水的加入对熔体的氧化还原状态具有关键的控制作用。对于深俯冲板片部分熔融熔体氧化状态的限定, 有助于认识大陆俯冲带氧化还原状态变化及其效应。

关键词: 深俯冲大陆地壳; 部分熔融机制; 磷灰石; 熔体组成

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

板块俯冲如何诱发板内岩浆作用

周中彪^{1,4}, 陈立辉^{2*}, 黄周传¹, Hofmann A.W.³,
王小均², 曾罡¹, 毕雅菁¹, 赵键²

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

3. Max-Planck- Institut für Chemie Abteilung Klimageochemie, Mainz 000000;

4. 中国科学院海洋研究所 深海极端环境与生命过程研究中心, 山东 青岛 266400

在东亚大陆边缘, 滞留大洋板片之上分布有广泛的新生代板内岩浆作用。尽管大量研究表明这些岩浆活动与太平洋板块的俯冲作用存在成因联系, 但其具体的动力学机制仍存在显著争议。本研究选取黑龙江省东部的双鸭山地区作为关键研究区域, 通过地球化学与地球物理学的学科交叉研究, 来深入探讨板块俯冲诱发板内岩浆作用的动力学过程。地震观测数据显示, 双鸭山地区缺少深源 (深度 > 400 km) 的大地震活动, 同时层析成像结果揭示该区域下方存在滞留板片缺失的现象, 这些地震学证据共同表明双鸭山下方滞留的太平洋板片发生了撕裂, 形成了板片窗结构。基于此, 我们对板片窗之上的双鸭山新生代玄武岩进行了系统的全岩主量元素、微量元素以及 Sr-Nd-Pb-Fe-Mg 同位素分析, 并结合上地幔变形特征研究, 来识别并重建俯冲太平洋板片物质从地幔过渡带向浅部上地幔运移的路径。研究结果表明, 双鸭山玄武岩具有显著偏高的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值和偏低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 同时在元素组成上表现出高 Gd/Yb 比值和低

Ti/Eu、CaO/Al₂O₃ 比值的特征。这些独特的地球化学特征指示双鸭山玄武岩的上地幔源区存在再循环的俯冲太平洋洋壳组分——榴辉岩。此外, 近震 S 波分裂分析揭示了一个与板片窗相关的上地幔环状流结构, 表明含有板片碎片的地幔上涌流在上地幔中转变为向周围地区的环状流动, 从而引发了周围地区广泛的板内岩浆活动。通过初步的地球化学和地球物理学验证, 我们发现东亚地区的大多数新生代玄武岩的形成可能与滞留板片在地幔过渡带中的撕裂过程密切相关。本研究提出了一个“滞留板片撕裂诱发地幔上涌”的地球动力学模型: 俯冲过程导致滞留板片发生撕裂, 诱发地幔物质上涌; 这一过程使得俯冲至地幔过渡带的洋壳 (榴辉岩) 随上涌地幔返回上地幔并发生减压熔融, 最终在大陆内部引发火山作用。这一模型可能为理解板内岩浆作用的起源机制提供新的理论框架。

关键词: 板片撕裂; 地幔过渡带, 滞留板片; 地幔上涌; 板内玄武岩

基金项目: 国家自然科学基金 (42130310、42322202); 中央高校基本科研业务费 (2024300389); 国家重点研发计划 (2022YFF0800701)

第一作者简介: 周中彪 (1993-), 博士后, 研究方向: 玄武岩地球化学. Email: zhoub@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 陈立辉 (1972-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学、地幔地球化学. Email: chenlh@nwu.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

东北亚俯冲水运移载体的空间差异性及其深部效应

赵文源¹, 王枫^{1*}, 许文良¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春市 130061

地球浅部-深部圈层之间的水循环是驱动地球宜居性演化的关键过程。板块俯冲是地表水进入深部的主要方式, 少量的水就可以显著改变地幔属性, 如降低熔融温度和增强流变性质等, 进而对地球内部关键界面特征、岩浆活动规模、深源地震频次等诸多方面产生重要的影响。由于俯冲板片初始水化程度、俯冲带热结构和脱挥发分机制的时空变异, 全球大洋俯冲带具有显著不同的深部水循环样式。即便是同一俯冲带, 俯冲水输入沿弧同样存在小尺度的结构差异。值得注意的是, 近年来的研究表明, 以东北亚为代表的大地幔楔系统中, 俯冲板片能够将水运移至地幔过渡带, 但沿弧脱水过程的空间差异及其深部效应能否延伸至滞留板片之上的板内环境仍有待于进一步研究。前人利用三维热结构模拟的方法发现西太平洋俯冲带在东北日本具有小尺度 (~300 公里) 的沿弧温度结构差异。相比于日本俯冲带靠近南部的本州岛地区, 北面 (北海道地区) 具有明显高于南面 (本州岛地区) 的俯冲板片-地幔楔界面温度, 暗示着沿弧可能存在不同的脱水行为。更为重要的是, 该区域广泛分布的新生代玄武岩为我们提供了理想的研究载体。作为关键的流体活动元素, B 同位素是示踪深部水循环的理想工具。鉴于此, 本文选取东北亚陆缘沿弧及其对应的板内的中新世玄武岩作为研究对象, 开展了系统的 Sr-Nd-Pb-B 同位素研究。俯冲带温度较高的北面 (北

海道地区) 的弧火山岩具有相对较重的 B 同位素组成 ($\delta^{11}\text{B} = -2.12\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$), 而来自俯冲沉积物和蚀变洋壳的板片流体的 B 同位素组成随着俯冲深度增加而逐渐变轻, 无法解释观测到的弧玄武岩重 B 同位素组成, 只有蛇纹石脱水的贡献才能产生这样的同位素特征, 这意味着含水矿物在弧至弧后体系下近乎完全脱水, 因此名义上的无水矿物是携带水进入地幔过渡带的运移载体; 而由于弧下绝大部分的重 B 随水释放, 名义上无水矿物释放的水继承了残余板片极轻的 B 同位素特征, 这与其对应的板内火山岩较轻的 B 同位素组成相吻合 ($\delta^{11}\text{B} = -5.15\text{‰} \sim -10.01\text{‰}$)。相比之下, 南面 (本州岛地区) 的弧火山岩 B 同位素组成较轻 ($\delta^{11}\text{B} = -3.1\text{‰} \sim -4.7\text{‰}$, Moriguti et al., 2004), 仅反映出俯冲沉积物和蚀变洋壳的贡献, 暗示含水矿物从蛇纹石连续转变为稳定性更高的含水硅镁矿物, 这一过程几乎不会释放水, 因此大量的水可以被带入深部地幔, 这得到了板内火山岩的重 B 同位素组成的印证 ($\delta^{11}\text{B} = -5.18\text{‰} \sim -7.71\text{‰}$)。上述研究表明, 大地幔楔系统中弧下小尺度温度结构控制的俯冲水输入样式的空间差异会对滞留板片之上的地幔属性产生重要影响, 这能够很好的解释东北亚板内深源地震、地幔过渡带间断面、地幔过渡带顶部低速层等空间差异特征。

关键词: 东北亚; 大地幔楔; 水循环; 深部效应

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

深时岩浆活动与现今岩石圈深部物质架构的成因关联： 来自中亚造山带西天山的视角

黄河^{1*}, 王涛¹, Daniel G ó mez-Frutos², Antonio Castro²,
朱小三¹, 鲍学伟³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 西班牙国立自然科学博物馆, 西班牙 马德里 028071;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

岩石圈深部探测始终是地球科学研究的前沿。现今岩石圈物质架构是长期、多阶段深部过程——特别是岩浆作用——的最终结果。因此, 深时岩浆事件, 尤其是区域上最晚一期岩浆事件, 与现今岩石圈物质架构之间应当存在成因联系。本研究针对中亚造山带西段西天山地区晚石炭世—早二叠世岩浆岩, 开展了多元同位素和元素地球化学填图(空间成像)。填图结果揭示两类不同性质的岩石圈: 北侧的具有亏损放射性同位素特征的年轻岩石圈和南侧具有富集放射性同位素特征的古老岩石圈。结合地球物理观测结果和对岩石成因的相平衡模拟, 研究进一步揭示石炭世—早二叠世的岩浆活动, 奠定了现今岩石圈物质架构的基础。其中, 北侧下地壳物质, 形成于源自于俯冲交代地幔源区的岩浆的再分异和熔体抽离, 而缺乏表壳岩

物质的显著参与。相较而言, 南部古老同位素省的下地壳物质, 则通过底垫(relamination)的表壳岩物质与幔源岩浆混合后, 再分异并经熔体脱离形成。而经过下地壳深度的岩浆分异和熔体抽离, 残留固体矿物组合在空间的成分差异, 奠定了现今地球物理物性结构南北向差异的基础。本研究提出在中亚造山带陆块汇聚过程中, 古老地壳物质加入深部岩浆源区总体是较为低效的, 这是中亚造山带保留有大量年轻地壳物质的一个重要的机制。本研究为通过综合岩浆岩多元同位素和元素填图、地球物理观测、相平衡模拟等手段联合揭示深部岩石圈物质, 提供了一个重要的研究实例。

关键词: 中亚造山带; 西天山; 同位素填图; 深部物质

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

柴达木北缘石榴橄榄岩的蛇纹石化作用及
铁磁矿物特征研究李智勇¹, 熊庆², 周翔^{2,3}, 郑建平^{2,3*}

1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

造山带/俯冲带/缝合带等构造环境中的地幔岩石往往经历了不同程度的蛇纹石化作用, 其矿物组成、物理性质及地球化学等均会发生明显转变, 对研究区域地质演化、地球物理异常解释及地球化学元素循环等具有重要意义。中国西部柴达木北缘超高压造山带中的胜利口石榴橄榄岩地体经历了较高程度($S>65\%$)的蛇纹石化作用, 但矿物反应、岩石物性(如磁性)及化学组成的演变还不完全清楚。岩相学特征显示石榴橄榄岩样品(方辉/二辉橄榄岩)以利蛇纹石化作用为主并形成典型网状结构。橄榄石转变为利蛇纹石-水镁石的混合物, 只有少量新鲜核部残留。细小磁铁矿与叶蛇纹石颗粒形成混合细脉沿原橄榄石颗粒边界分布并呈现三联点结构。不含石榴石的样品(纯橄岩)则以叶蛇纹石化作用为主, 粗粒板状叶蛇纹石呈放射状或咬合结构, 间隙被利蛇纹石、粗粒磁铁矿及具有磁铁矿环边的铬铁矿颗粒填充。热磁实验结果显示: 1) 蛇纹石化石榴橄榄岩在 $T=110\sim 120\text{K}$ 和 $T=581^\circ\text{C}$ 时出现磁化强度转折, 说明纯磁铁矿占主导; 2) 不含石榴石的样品主要在 $T=40\sim 50\text{K}$ 和 $T=573^\circ\text{C}$ 时出现强度转折, 为富铁铬尖晶石类矿物/铬磁铁矿的特征(与电子探针结果一致)。顺磁校正后两类橄榄岩样品的饱和磁化率强度(M_s)分别为 $0.9\sim 1.8\text{ Am}^2/\text{kg}$ 和 $5.4\sim 11.6\text{ Am}^2/\text{kg}$, 相当于 $1\sim 1.95$

$\text{wt}\%$ 和 $5.9\sim 13\text{ wt}\%$ 的纯磁铁矿含量($M_s/92\times 100\%$), 高于挪威西片麻岩省超高压地体中的石榴橄榄岩样品, 但略低于苏鲁超高压带中的石榴橄榄岩样品。FORC 与 Dayplot 结果显示石榴橄榄岩样品中以细粒单畴磁性颗粒为主, 不含石榴石样品以粗粒多畴磁性颗粒为主(与岩相观察一致)。石榴橄榄岩样品的全岩氧同位素值($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=2.0\text{‰}\sim 3.1\text{‰}$)低于不含石榴石的样品($6.5\text{‰}\sim 8.3\text{‰}$), 与柴北缘超高压带东段沙柳河蛇绿岩剖面的叶蛇纹石化和利蛇纹石化橄榄岩相似。两者的氢同位素结果相似($\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 分别为 -114.2‰ 至 -108.5‰ 和 -109.8‰ 至 -91.9‰), 但低于西阿尔卑斯造山带蛇绿岩型叶蛇纹石化橄榄岩样品。综合以上岩石矿物、地球化学及岩石磁学研究结果, 胜利口石榴橄榄岩体展现了较为多样和丰富的蛇纹石化作用及铁磁性矿物特征, 与此带东段沙柳河蛇绿岩、北部祁连山蛇绿岩及挪威、苏鲁等超高压地体蛇纹石化橄榄岩样品相比既有相似又有不同, 有助于了解从大洋扩张到俯冲闭合再到碰撞造山等不同构造背景下地幔岩石的水岩相互作用及其物理性质-化学组成的协同演变过程。

关键词: 柴北缘; 石榴橄榄岩; 蛇纹石化; 铁磁性矿物; 氢氧同位素

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2021YFA0716102)

第一作者简介: 李智勇(1986-), 副教授, 研究方向: 岩石磁学. Email: zhiyonli@cug.edu.cn

*通信作者简介: 郑建平(1964-), 教授, 研究方向: 地幔岩石学. Email: jpzheng@cug.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆成分变化及其对俯冲带物质循环的指示

李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100

俯冲带是物质循环的重要场所, 俯冲组分在地幔源区的输入控制着岛弧岩浆成分的变化。目前对俯冲组分的研究主要关注蚀变洋壳和沉积物, 而对海山、残余板片、蛇纹岩等的识别及其循环机制的探讨还相对缺乏。另外, 随着俯冲的持续, 板片可能会发生撕裂甚至断裂, 进而引起板片之下软流圈地幔沿着撕裂处上涌, 改变岛弧岩浆组成, 这一过程的地球化学证据却鲜有报道。岛弧岩浆从地幔楔产生并上升的过程中需穿过厚层地壳, 难免会受到地壳物质的混染, 但详细混染过程还缺乏精细刻画。对西太平洋马里亚纳和琉球俯冲带的研究为明确上述问题提供了重要参考。马里亚纳俯冲带的研究发现初始裂谷阶段部分橄榄石内熔体包裹体显示出显著高的放射性 Pb 同位素组成, 表明 HIMU 型海山的俯冲对初始裂谷阶段地幔源区的重要物质贡献, 海山俯冲可能在俯冲带物质循环过程中较为普遍, 为俯冲带岩浆源区的组成及海山循环过程提供新的认识; 玄武岩 Mo 同位素具有显著的穿岛弧变化特征, 轻 Mo 同位素的残余板片物质可以进入弧后岩浆源区, 参与弧后地幔的岩浆物质循环; 弧前蛇纹岩具有重的 Mo 和 Mg 同位素组成, Mo 同位素的变化受到了俯冲早期浅部板片来源流体交代作用的影响, 而后蛇纹石化阶段水镁石的溶解导致 Mg 同位素升高, 强烈蚀变的弧前蛇纹岩的俯冲可以改变岛弧岩浆的 Mo 和 Mg 同位素组成, 是岛弧岩

浆的重要物质来源。在琉球俯冲带的研究中发现台湾北部玄武岩表现出典型岛弧火山岩元素特征及轻的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 这一过程涉及到板片下软流圈地幔沿板片撕裂上涌, 提供足够热量, 使得板片“富白云石”碳酸岩受热熔融并产生低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值熔体, 这些熔体交代地幔楔, 导致地幔楔不均一并发生部分熔融, 进而形成低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的岛弧火山岩; 冲绳海槽基性、中性和酸性岩内的单斜辉石地球化学特征存在差异, 晚期中酸性火山岩内单斜辉石环带明显, 表明岩浆演化过程中受到了来自深部的玄武质同源岩浆的填充, 并发生了陆壳岩浆房内不同岩浆物质的混合; 演化程度高的橄榄石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔, 指示晚期岩浆在上升演化的过程中受到了较为显著的高温热液蚀变的陆壳物质混染; 晚期结晶橄榄石内熔体包裹体中都具有少量高 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 组分的存在, 表明岩浆在晚期上升演化过程中捕获了陆壳组分, 明确了陆壳混染对陆缘弧后盆地晚期岩浆演化阶段的重要物质贡献。以上研究涉及了板块俯冲过程中俯冲组分输入、地幔楔不均一性过程、岛弧/弧后盆地岩浆混染等俯冲带物质运移传输的连续过程, 为全面理解俯冲带岩浆演化过程及物质循环机制提供了重要数据和理论支撑。

关键词: 海山; 蛇纹岩; 残余板片; 板片撕裂; 地壳混染

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆岩的铬同位素研究

徐丽娟^{1,3}, 沈骥², 刘盛遨¹, 李曙光¹, 赵国春^{3,4*}

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 香港大学, 香港 999077;

4. 西北大学, 西安 710069

本研究首次对一套来自堪察加半岛的岛弧玄武岩(IABs)进行铬同位素研究,以研究岩浆过程中的铬同位素分馏。堪察加岛弧玄武岩的铬同位素($\delta^{53}\text{Cr}$)范围为: $-0.09 \pm 0.02\text{‰}$ 至 $-0.16 \pm 0.02\text{‰}$ (2σ , $n=22$)。这些玄武岩的MgO含量与Cr、Ni含量以及CaO/Al₂O₃比值之间呈现正相关关系,表明它们经历了橄榄石和辉石的分离结晶。然而, $\delta^{53}\text{Cr}$ 与Cr、Ni或MgO含量以及CaO/Al₂O₃比值均无相关性。离子模型和瑞利分馏模型显示岛弧玄武岩分离结晶因子非常小($\Delta^{53}\text{Cr}_{\text{crystal-melt}}$: $+0.0001\text{‰}$ 至 $+0.009\text{‰}$),表明分离结晶过程对IABs的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 影响有限。此外, $\delta^{53}\text{Cr}$ 与熔融分数(f)之间缺乏相关性,表明部分熔融过程对Cr同位素组成的影响有限。这些岛弧岩浆的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、铬含量或流体活动性元素比值(如: Ba/Th、B/Nb、

As*/Ce)无相关性,表明来自俯冲板块的流体对岛弧玄武岩地幔源区的铬同位素组成影响极小。值得注意的是,与洋中脊玄武岩(MORBs)和洋岛玄武岩(OIBs)相比,岛弧玄武岩在统计学上具有更高的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值,与硅酸盐地球(BSE)的值相似。非实比熔融模型和瑞利分馏模型表明:岛弧玄武岩高的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值可能是在比MORBs和OIBs更高的岩浆氧逸度条件下的部分熔融和分离结晶的结果。这与它们更高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值和 $\Delta\log f\text{O}_2(\text{QFM})$ 值一致,强调了不同氧逸度对地球玄武岩中铬同位素分馏的作用。总之,本研究认为铬同位素在示踪行星氧逸度方面具有重要的潜力。

关键词: 铬同位素; 岛弧岩浆; 地幔氧逸度; 堪察加俯冲带

基金项目: 国家自然科学基金(42473017、41730214、42373010 to JS); 香港研究资助局(RGC)资助项目(JLFS/P-702/24、17308023)

第一作者简介: 徐丽娟(1984-), 副教授, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学。Email: xulj@cugb.edu.cn

通信作者简介: 赵国春(1961-)教授, 研究方向: Email: gzhao@hku.hk

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

西大别榴辉岩 P-T 轨迹对大陆俯冲带 最大解耦深度的指示意义

夏彬^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

俯冲带是汇聚板块边界的核心区域, 连接地球内部和表层, 是深刻理解板块构造、火山作用、物质循环及地震成矿等关键地质过程的重要场所。尽管已有大量研究, 但对俯冲带的最大解耦深度(MDD)仍不清楚, 这极大的制约了我们对俯冲带内部结构和俯冲带地球动力学过程的进一步认识和理解。以往研究注重数值模拟, 缺乏岩石学相关研究。如何从岩石学角度开展俯冲带 MDD 研究? 本报告试图选择西大别高压-超高压变质带开展一些探索性工作。数值模拟显示, 俯冲板片表面温压结构在最大解耦深度附近呈现显著变化, 但该理论预测尚缺乏关键岩石学证据支持。西大别位于苏鲁-大别造山带的西段, 是中生代华南板块向华北板块之下俯冲、碰撞的结果。其内发育了典型的陆壳深俯冲-碰撞型高压-超高压变质岩, 且保留了完整的进变质信息, 可用来追溯板片俯冲过程中的周围环

境变化。我们选择该带红安一带代表性样品开展岩石学研究, 通过精细限定其变质演化 P-T 轨迹, 并与数值正演模拟得到的俯冲板片表面热结构相比较, 尝试从岩石学角度来解析大陆俯冲带 MDD。初步研究结果显示: 红安一带榴辉岩大多具有相似的进变质阶段近等压升温 P-T 轨迹; 有一个样品记录的进变质轨迹表现为先近等压升温, 而后近等温升压。结合前人工作可以看出, 进变质 P-T 轨迹转折点发生在 20.0~23.0 kbar, 对应 70~80 km 深度。这一 P-T 轨迹样式类似于数值模拟结果, 而转折点发生的深度也大致对应通过数值模拟、地球物理观测等推测出来的结果。因此, 我们认为, 本研究可能为建立俯冲带 MDD 的岩石学判别依据提供新的研究范式。

关键词: 大陆俯冲带; 西大别; 榴辉岩; P-T 轨迹; 最大解耦深度

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

非生物甲烷的新来源：俯冲带榴辉岩化作用与能源潜力

张丽娟^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

无机成气假说由来已久, 其成因众说不一, 包括前寒武纪结晶基底、火山和沉积热液系统以及不同地质背景下的蛇纹石化作用产非生物甲烷气等。本研究将非生物甲烷的来源拓展到俯冲带高压-超高压榴辉岩, 开辟了非生物甲烷研究的新领域。本研究在西天山俯冲带榴辉岩中发现了大量富含 CH_4 的原生流体包裹体。岩石学特征和碳氢同位素组成都证实了这些 CH_4 为非生物成因。相平衡计算表明甲烷形成的温压条件为 $500\sim 560^\circ\text{C}$ 和 $2.1\sim 3.4\text{ GPa}$, 氧逸度为 FMQ-2 至 FMQ-3.5 的还原环境, 是俯冲进变质作用过程中多种反应机制共同作用的结果。结合 DEW 模拟可以估算出全球现代俯冲带非生物

CH_4 的循环通量可达 10.8 Mt/y , 是目前已知非生物甲烷气的最大来源。进一步研究揭示俯冲带高压条件下 H_2O 和 CH_4 不混溶的现象, 建立 CH_4 和 H_2O 混溶/不混溶压力标尺。俯冲板片的碳可能以 CH_4 超临界流体的形式从俯冲板片运移到上覆地幔楔中, 当遇到合适的储盖层条件时就可能形成潜在的天然气田。该研究为深部无机天然油气藏勘探开发提供理论基础, 有望突破油气只限制地表十公里以浅的限制。

关键词: 流体包裹体; 非生物甲烷; 榴辉岩; 俯冲带; 无机成气

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

青藏高原中北部深部地壳热演化与高原隆升

张修政^{1*}, 王强¹, 但卫¹, 苟国宁¹, 齐玥¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广东 510640

青藏高原不仅具有加厚的大陆地壳 (~60~80 km), 同时也具有异常平坦的地貌和莫霍面。目前的绝大部分研究主要集中在高原地壳加厚机制和地表的差异性隆升过程, 但对于平坦高原形成的深部机制却鲜有系统工作。理论和数值模拟研究认为中下地壳热演化引发的地壳熔融和流动是造成高原平坦化的主要机制。然而, 存在的核心问题在于目前没有任何源于天然样品的研究证实上述理论模型, 从而导致高原形成和隆升过程中深部地壳真实的热演化历史并不清楚, 深部地壳样品是该项研究的难点。针对上述问题, 对青藏高原中北部不同时代新生代岩浆岩中地壳包体和锆石捕虏晶进行了长期、系统的研究, 首次系统的构建了青藏高原深部地壳的热演化历史, 揭示青藏高原的地温梯度从 28 Ma 到 2.3 Ma 不断提升, 中下地壳经历了从冷到热, 从富水到无水, 从角闪岩相到超高温麻粒岩相的连续演化过程, 取得以下 2 点创新认识: (1) 在 28 Ma 岩浆岩中发现一套富水的角闪岩相中下地壳包体, 揭示高原在演化早期具有含水、可熔融的地壳端元 (Zhang XZ et al., 2023a, *Lithos*), 突破了高原地壳为“干的”、无法熔融的传统认识。另外, 发现羌塘地壳深部存在 23~13 Ma 的低压高温麻粒岩相变质作用, 揭示高原深部地壳热状态的转变 (由冷到热) 发生在 28~23 Ma 之间。该研究首次证明高原深部热状态的转变和平坦高原的形成几乎同时, 均发生在早中新世。相平衡模拟显示, 地壳的热状态的转变将会引发广泛的地壳熔融 (>30 vol%), 从而极大地降

低地壳的强度, 因此早中新世以来地壳侧向流动是导致伦坡拉和可可西里盆地快速隆升的主要机制, 证实了青藏高原平坦地貌的形成与深部地壳的热演化具有耦合关系 (Zhang XZ et al., 2022a, *Geology*)。 (2) 在青藏高原双湖地堑北段的东月湖地区发现了第四纪的超高温记录, 其保存在一套特殊的英安质熔岩中, 由超高温熔体、大量超高温泥质麻粒岩包体、转熔矿物, 以及少量基性麻粒岩组成。其变质和熔融时代均集中在 2.3 Ma, 峰期温度为 1100~1150 °C, 压力为 0.8~0.9 GPa, 代表了目前世界上已知最年轻的造山带超高温变质/熔融记录 (Zhang XZ et al., 2022b, *Geology*)。这一发现为超高温的研究提供了明确的、近现代的构造背景, 首次证实了碰撞造山带可以在地壳加厚之后极短的时间 (20~40 百万年) 演化出超高温条件。进一步热力学模拟揭示了造山带超高温产生的决定性因素在于地壳中放射性生热层的厚度。结合对藏北壳源岩浆岩 B-Nd-Pb-Hf 同位素研究, 提出亚洲大陆南向俯冲导致藏北高原的下地壳存在较多变沉积物 (Zhang XZ et al., 2023b, *Lithos*), 从而导致中下地壳整体放射性元素含量高, 这种地壳结构能够仅依靠正常放射性衰变热量的积累而快速达到高温-超高温的条件, 从而引发广泛的地壳熔融和地壳流动, 使造山带扩展为地表平坦、宽广的高原。

关键词: 地壳包体; 高温-超高温变质; 高原隆升; 青藏高原

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

地壳深熔与花岗质岩浆分异过程中的 Mo 同位素分馏

朱二林¹, 夏琼霞^{1*}, 戴立群¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

钼 (Mo) 同位素在变质脱水、部分熔融以及岩浆分异过程中表现出较大的分馏, 被广泛应用于示踪俯冲带壳幔物质循环和熔流体活动。对苏鲁-大别造山带低温超高压变质片麻岩以及深熔花岗岩进行岩石学、岩石地球化学和 Mo 同位素分析。结果表明, 经历变质脱水的 A 组花岗质片麻岩呈现源区控制的化学组成特征, 具有变化的 Ba/Th 比值, 其 Mo 同位素组成较高 (0.05‰至 0.48‰), 与大陆上地壳组成相似; 而经历部分熔融的 B 组花岗质片麻岩呈现熔体控制的化学组成特征, 具有变化的 Nb/Sm 比值, Mo 同位素组成 (-0.58‰至-0.13‰) 显著低于 A 组片麻岩; 而深熔花岗岩具有最低的 Mo 同位素组成 (-2.67‰至-0.14‰), 与之相邻的富黑云母熔融残留岩体具有较高的 Mo 同位素组成 (0.16‰至 0.24‰)。较低的 Mo 同位素组成通常被认为与脱去富重 Mo 同

位素的流体相关, 然而花岗岩具有极低的 Ce/Mo 比值, 且同位素组成与 Ce/Pb 比值无相关性, 表明流体效应不是导致熔体 Mo 同位素降低的原因。花岗质片麻岩以及深熔花岗岩 Nb、Ta、Rb、Ti 和 K 与 Mo 同位素良好的协变关系表明 Mo 同位素组成与参与熔融反应的矿物相关。岩相学研究表明, 花岗质片麻岩经历了白云母脱水熔融反应生成深熔花岗岩, 并有转熔矿物黑云母生成。由于黑云母具有较高的 Mo 同位素组成, 熔体与残留体的分离导致了轻的 Mo 同位素组成。因此, Mo 同位素可以有效地示踪地壳深熔过程及熔体演化, 为大陆碰撞带地壳的深熔变质作用以及花岗岩的形成和演化提供重要信息。

关键词: 地壳深熔; 花岗岩; 片麻岩; Mo 同位素

第一作者简介: 朱二林, 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物地球化学. Email: example@qq.com

*通信作者简介: 夏琼霞, 教授, 研究方向: 岩石矿物地球化学. Email: qxxia@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆岩 Fe 同位素与 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 解耦: 对沉积物循环及地幔氧化还原状态的启示

马利涛^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

俯冲带的氧化还原状态对于理解地球内部的地球化学和地球动力学过程至关重要。然而, 形成岛弧岩浆高氧化状态的机制仍然存在争议。通过对中国西秦岭造山带早三叠世岛弧岩浆岩 Fe 同位素和 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的研究, 揭示了可能的机制。西秦岭造山带早三叠世岩浆岩显示出弧型微量元素特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 表明其地幔源区受到了大量沉积物来源含水熔体的交代作用, 同时伴有少量板块来源富水溶液的加入。此外, 这些镁铁质火成岩表现出比洋中脊玄武岩[MORB, $\delta^{56}\text{Fe} = (0.11 \pm 0.06)\%$]更轻的 Fe 同位素组成 ($\delta^{56}\text{Fe} = -0.05\% \sim 0.09\%$)。尽管俯冲蛇纹岩在弧下深度的脱水作用可以释放出具有较轻 Fe 同位素的流体, 但 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与板块流体示踪剂(如 Ba/La、Th/Yb、Nd-Hf 同位素)之间缺乏相关性, 表明熔流体交代作用并没有改变地幔的 Fe 同位素组成, 可能是由其他机制造成的, 如先前地幔经历熔体提取。这一过程可能导致优先提取同位

素较重的 Fe^{3+} , 留下一个较还原的残余物, 其具有较轻的 Fe 和较低的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值。然而, 这与基性岩中观察到相比于 MORB(0.16 ± 0.01)更高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值($0.19 \sim 0.33$)不一致, 这些基性岩显示出 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值与 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值之间的显著解耦。值得注意的是, $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 值与沉积物熔体示踪剂(Th/Yb、Th/Nd、Th/La 和 Hf 同位素)之间的具有明显的相关性, 表明沉积物熔体的加入在控制弧下地幔高氧化状态的形成中起关键作用。因此, $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 的解耦可能是由于地幔源区先前经历熔体提取, 随后又受到含高氧化剂(如 S^{6+})的沉积物熔体的交代作用所致。因此, 弧岩浆中 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 的解耦现象为理解弧下地幔熔融机制、沉积物再循环及对地幔氧化状态的影响提供了重要见解。

关键词: 俯冲带; 岛弧岩浆岩; Fe 同位素; $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$; 氧化还原状态

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

新生下地壳水致熔融和脱水熔融的花岗岩双重成因: 来自 Mo 同位素和相平衡模拟的制约

夏友山¹, 高彭^{1*}, 孙国超¹, 赵子福¹, 周尧¹, 李振新¹, 文刚¹, 秦磊¹

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026

水在大陆地壳分化和花岗岩质岩浆形成中起着关键作用。然而, 关于如何区分无流体和有流体参与的熔融机制以探究花岗岩的起源, 仍然存在激烈争论。Mo 同位素已显示出追踪岩浆和变质过程中流体活动的潜力, 因此是识别地壳部分熔融过程中是否存在自由流体的有力工具。本研究对比了大别北淮阳带早古生代钠质和钾质花岗岩的全岩地球化学以及 Sr-Nd-Mo 同位素特征。Sr-Nd 同位素结果表明, 钾质花岗岩起源于新生下地壳, 这与时空上相关的钠质花岗岩一致。然而, 钾质花岗岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值 (-0.41‰ 至 0.23‰ , 中位数= 0.02‰) 与相邻同时期的基性岩石 (-0.17‰ 至 0.21‰ , 中位数= 0.02‰) 相似, 而钠质花岗岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值则较高 (-0.13‰ 至 0.74‰ , 中位数= 0.22‰)。模拟计算表明, 无论是分异结晶还是地壳混染, 都无法解释钾质和钠质花岗岩之间观察到的

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值和 Mo 同位素组成的差异。相反, 这些差异可以通过相同基性源岩在不同流体条件下的部分熔融来很好地解释。进一步的相平衡模拟表明, 流体的加入会导致斜长石的优先分解, 从而降低所得熔体的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, 但提高 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值。水致熔融可能是由俯冲带下含水基性弧岩浆结晶过程中析出的流体或新生下地壳中水合矿物分解释放的流体引起的。相比之下, 基性地壳的无流体熔融主要由包括黑云母和角闪石在内的水合矿物的分解驱动, 产生 Mo 同位素组成与源岩相似的钾质熔体。本研究为流体对花岗岩质岩浆 Mo 同位素组成的控制提供了有力证据, 从而提供了一种区分水致熔融和脱水熔融新方法。

关键词: 水致熔融; 脱水熔融; 新生下地壳; Mo 同位素; 花岗岩

基金项目: 中国科学院战略重点研究计划 (B 类) (XDB0710000、XDB41000000)、中国自然科学基金 (42373043)

第一作者简介: 夏友山, 博士研究生, 研究方向: 造山带岩浆岩地球化学. Email: xiays@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 高彭, 特任研究员, 研究方向: 造山带花岗岩成因研究. Email: gaopeng05@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

云南马关新生代玄武岩中的斜长角闪岩:
华南西南缘未暴露的太古宙基底马骁¹, 郑建平^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

火山作用的天然超深钻取样, 提供了探索大陆基底属性和形成演化过程的重要手段之一。华南陆块由扬子和华夏地块组成, 是东亚大陆重要的前寒武出露区。然而, 由于显生宙巨厚沉积盖层的覆盖, 使得太古宙物质(尤其是岩石)在华南的报道十分有限。目前仅在其北缘的扬子北部的鱼洞子、崆岭、钟祥、陡岭, 西部的措科等地质体中岩石, 以及其内部的华夏西部的道县、平乐、北江和小六典等地火山岩中锆石捕虏晶的报道。对采自云南马关新生代玄武岩中的斜长角闪岩在详细岩相学工作基础上, 进行了全岩地球化学分析和锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成系统研究。斜长角闪岩为中粒变晶结构, 块状构造, 主要由斜长石和角闪石组成, 副矿物锆石、榍石, 蚀变矿物帘石、绿泥石。全岩 SiO₂、MgO、TiO₂ 含量分别为 46.4%~48.6%、5.97%~6.97% 和 1.22%~1.37%, K₂O+Na₂O 含量为 2.47%~3.14%、Na₂O/K₂O 比值为 1.35~3.94; 稀土总量为 67~78 μg/g, 相对富集轻稀土元素(La/Yb)_N=6.55~7.52、弱负 Eu 异常(δ_{Eu} =0.83~0.92)。蛛网图中显示富集大离子亲石元素和放射性生热元素等, 并呈高场强元素负异

常、Sr 正异常特征。它们有相对较高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+8.59~+8.76)和较低的 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 值(0.698~0.700), 组成特征上与大陆基性中下地壳类似。斜长角闪岩中的锆石可分为岩浆结晶、变质作用两类:(1) 岩浆锆石的 U-Pb 年龄为 2550 Ma, 代表斜长角闪岩的原岩(拉斑玄武岩)的成岩时间;(2) 变质作用成因锆石的 U-Pb 年龄为 2450 Ma, 代表华南西南缘角闪岩相变质作用发生的时间。岩浆和变质锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 分别是+2.73~+5.76 和-4.49~+4.82、亏损地幔模式年龄 T_{DM} 2.9~2.5 Ga。因此, 所发现的捕虏体是华南西南缘所知最古老岩石。综合分析该斜长角闪岩代表的大陆中下地壳可能形成于新太古代的大陆弧后拉张的构造背景。综合考虑区域上古老地质体岩石以及锆石捕虏晶等地质事实, 进一步扩大了华南地块太古宙基底的范围。所发现斜长角闪岩作为华南西南缘存在的太古宙基底直接证据, 同时也表明太古宙-元古宙之交可能是华南陆块深部地壳生长的重要时期。

关键词: 华南西南缘; 太古宙基底; 地壳捕虏体

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

花岗岩岩浆分异过程中 Ba 同位素的变化: 对分离结晶和流体-岩浆相互作用鉴别的意义

张念钦¹, 陈伊翔^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

花岗岩的成因和成分多样性主要受到部分熔融和岩浆分异等多种作用的控制。然而, 区分部分熔融、分离结晶和流体-岩浆相互作用等过程对花岗质岩浆演化的具体影响仍具有挑战性。Ba 同位素是区分分离结晶和流体-岩浆相互作用过程的潜在有力示踪剂, 但分离结晶对 Ba 同位素组成变化的影响尚不明确。为了应对这一挑战, 我们对中国东部苏鲁造山带同折返花岗岩的 Ba 同位素组成进行了分析。高硅花岗岩 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值变化显著 (-0.69‰ ~ -0.36‰)。利用相平衡模型, 我们估计部分熔融过程中 Ba 同位素的变化可能导致熔体与原岩之间的增加小于 0.20‰ , 这不能解释观测到的轻 Ba 同位素组成。此外, SiO_2 含量与 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{t}}$ 、Ba、Sr 和 Eu/Eu^* 等主微量元素含量呈显著相关, 表明这些花岗岩中存在广泛的分离结晶。此外, $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值与这些主微量元素的组成具有良好的相关性, 表明在花岗质岩浆分离结晶

过程中 Ba 同位素变化较大。同时, 同折返花岗岩的 Zr/Hf、K/Rb、Nb/Ta 比值和稀土元素模式表明岩浆与流体的相互作用不存在。这些观测结果表明, 分离结晶作用是导致花岗岩中 Ba 同位素分馏的主要因素使其低至 -0.69‰ , 而不是流体-岩浆相互作用。利用 Melts 分离结晶模拟表明, 钾长石和云母的分离结晶控制了花岗岩 Ba 同位素的变化, 与岩石学观测结果一致。结合前人对淡色花岗岩和高分异花岗岩的研究结果, 认为利用 Ba 同位素组成进行流体-岩浆相互作用的示踪需要谨慎。分离结晶作用可以导致花岗岩的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值低至约 0.70‰ , 但更低的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值可能由于花岗岩岩浆后期分化过程中的流体-岩浆相互作用。

关键词: Ba 同位素; 花岗岩; 部分熔融; 分离结晶; 流体-岩浆相互作用

基金项目: 国家自然科学基金 (42073029、42373046); 中央高校基本科研业务费专项资金。

第一作者简介: 张念钦 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. Email: nqzhang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. Email: yxchen07@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

鄂尔多斯盆地内外长城系碎屑锆石年龄谱 及物源区对比研究

管晓涵^{1*}

1. 西北大学地质学系 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

华北克拉通是中国最古老的陆块之一, 其早前寒武纪至中元古代的构造演化是地质学研究的重要课题。长城系作为华北克拉通的重要盖层, 记录了克拉通裂解与汇聚的关键信息。然而, 鄂尔多斯盆地作为华北克拉通西部的重要组成部分, 其长城系的沉积特征与东部地区的对比研究仍较为薄弱。本研究以鄂尔多斯盆地内部(靖探 2 井)和外围(吕梁山地区)的长城系碎屑沉积岩为研究对象, 通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微量元素分析, 对比盆地内外碎屑锆石的年龄谱和化学特征, 揭示物源区的差异及鄂尔多斯盆地与华北克拉通东部基底在中元古代的构造联系。吕梁山地区长城系样品的最年轻锆石年龄为 1.63Ga (1679 ± 24 Ma), 与华北克拉通东部长城系的底界年龄($\sim 1.65 \sim 1.68$ Ga)一致, 表明其物源主要来自华北克拉通东部基底; 而靖探 2 井长城系砂岩的锆石 U-Pb 年龄约为 1866 ± 23 Ma, 指示其物源主要来自古元古代基底。锆石微量

元素分析进一步显示, 吕梁山地区样品的锆石稀土元素配分模式反映了其母岩可能为酸性花岗岩, 与华北克拉通古元古代晚期广泛发育的花岗岩活动一致; 靖探 2 井样品的稀土配分曲线则显示轻稀土富集、重稀土亏损的特征, 表明其原始物质主要来源于上地壳。结合锆石年龄谱和微量元素特征, 鄂尔多斯盆地长城系与华北克拉通东部地区长城系的沉积岩岩石组合具有相似性, 但部分样品中含有更年轻的碎屑锆石, 表明其物源区存在差异。盆地内长城系物源区主要为盆地东北部古元古界基底, 而盆地外围吕梁山地区长城系物源区则主要来自华北克拉通东部基底。这些发现为进一步理解鄂尔多斯盆地与华北克拉通东部基底在中元古代的构造联系提供了重要依据。

关键词: 华北克拉通; 鄂尔多斯盆地; 长城系; 碎屑锆石

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

铬元素揭示榴辉岩的多期变质作用： 以阿尔卑斯东部 Pohorje 山脉为例

李波涛^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

高压-超高压变质岩温压演化过程的重建强烈依赖于多硅白云母和石榴石的组成。然而, 在温度高于 700 °C 左右时, 通常石榴石中常见的二价阳离子 (Ca、Fe²⁺、Mg、Mn) 容易发生扩散。这种高温扩散性改变了石榴石的原始组成, 从而使变质演化的解释复杂化。微量元素相较于主量元素在石榴石中扩散速率相对较低, 但这些元素在全岩中的含量通常也比较低, 所以在矿物间的分布的规律很难被发现。铬 (它位于石榴石结构的八面体位置) 属于慢扩散阳离子族, 它在石榴石中的环带可保存到约 1000 °C 的温度 (Massonne & O'Brien, 2003)。石榴子石中 Cr 含量的变化可用于识别不同的地质过程。例如, 石榴子石的 Cr 震荡环带被作为间歇性的外来流体渗入的标志 (Angiboust et al., 2014); 螺旋环带被认为石榴石在生长过程中的旋转 (George et al., 2018)。本研究提供了另一个 Cr 含量揭示地质过程的例子: 即通过对东阿尔卑斯山榴辉岩的石榴子石和其它变质矿物中的 Cr 含量划分不同变质阶段矿物集合体、以及相图模拟来检验共生矿物组合的方法, 揭示了被忽略的多期变质事件 (Li

et al., 2024)。本研究在对经历多期变质作用的 Pohorje 山脉的榴辉岩进行研究时发现其石榴子石主量元素成分比较均一 (Vrabec et al., 2012), 但通过系统总结前人资料发现此地区的基性岩富 Cr (Hauzenberger et al., 2016)。基于此, 我们认为可尝试利用石榴子石 Cr 成分环带、并依据变质矿物 Cr 含量划分不同变质阶段矿物集合体、以及相图模拟来检验共生矿物组合的方法, 来揭示被忽略的多期变质事件。为了验证这一想法, 我们对东阿尔卑斯山 Pohorje 山脉榴辉岩石榴子石的进行了 Cr 成分面扫, 发现虽然主量元素含量比较均一, 但存在 Cr 的核-边结构, 并对不同产状的其它变质矿物 (如辉石、角闪石、白云母等) 的 Cr 含量进行测试也发现存在高 Cr 世代和低 Cr 世代。最终根据所有变质矿物的产出位置和 Cr 的含量不同, 确定了两个世代的矿物组合, 结合相图模拟, 揭示榴辉岩经历了与片麻岩相同的多期变质作用。

关键词: 榴辉岩; 矿物中 Cr 含量; 多期变质作用; 阿尔卑斯东部

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

深俯冲陆壳部分熔融熔体的氧化还原状态
和 Fe-Mo 同位素组成研究穆智慧¹, 陈仁旭^{1*}, 孙国超¹, 尹壮壮¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

深俯冲陆壳部分熔融对大陆碰撞带构造演化及壳幔相互作用具有重要影响。已有研究对熔融机制及时限已有较好认识, 但对其氧化还原状态和变价元素行为仍缺乏制约。我们对柴北缘造山带绿梁山超高压变基性岩和片麻岩及其中长英质脉体开展了岩相学、全岩 Sr-Nd-Fe-Mo 同位素分析和锆石学研究, 探讨了深俯冲陆壳部分熔融的氧化还原状态和 Fe-Mo 同位素行为。柴北缘绿梁山超高压变质岩在折返过程中经历了广泛的部分熔融作用。宏观上表现为超高压变质岩的混合岩化及其中长英质脉体, 微观上表现为大颗粒矿物间尖锐状 Pl+Qz 熔体假象结构、熔体迁移特征及锆石中 Pl+Qz 包裹体等。长英质脉体中新生长锆石表现出振荡环带、明显的 Eu 负异常和 HREE 平坦至陡峭的配分模式, 年龄为~420 Ma, 指示麻粒岩相条件下部分熔融, 全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素识别出变基性岩中脉体受到片麻岩来源熔体影响; 片麻岩主要为原地熔融产生熔体, 并部分迁移至变基性岩中。片麻岩熔融成因脉体 Mo 含量 (0.07~0.27 ppm) 显著低于片麻岩 (0.2~1.2 ppm), 同位素 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{mean}} = 0.20\text{‰}$; $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{mean}} = -0.09\text{‰}$) 略低于片麻岩 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{mean}} = 0.24\text{‰}$; $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{mean}} = -0.09\text{‰}$)。通过对 Fe-Mo 同位素的相关元素分析排除了次生过程、流体

出溶、分离结晶、热扩散等过程影响。多硅白云母作为片麻岩熔融过程中的主要分解矿物, 理论上产生高 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值和高 Mo 含量的熔体, 结合 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与 $\text{Mg}^\#$ 、 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值与 La/Yb 无相关性, 指示 Fe-Mo 同位素分馏受部分熔融过程影响有限。而水的加入可以较好地解释片麻岩熔融脉体的同位素特征。不同熔融机制产生的熔体的氧逸度具有差异, 变基性岩和片麻岩来源熔体混合成因脉体 ($\Delta\text{FMQ}_{\text{mean}} = -0.65$) 较片麻岩加水熔融脉体 ($\Delta\text{FMQ}_{\text{mean}} = -3.0$) 更氧化。片麻岩加水熔融脉体的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 ΔFMQ 无相关性, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 与 FMQ 负相关趋势并不符合理论上部分熔融过程氧逸度对 Mo 同位素分馏的影响, 表明部分熔融过程中 Fe-Mo 同位素分馏受氧逸度变化的影响有限。由此可见, 片麻岩加水熔融产生的熔体可能受贫 Mo、低 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值和低 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值的氧化性流体的影响。本研究通过多同位素体系 (Sr-Nd-Fe-Mo-Hf) 与岩石学-锆石学结合, 阐明了深俯冲陆壳部分熔融机制、氧逸度效应及变价元素行为, 为俯冲带部分熔融与壳幔物质循环提供了关键地球化学约束。

关键词: 超高压变质; 部分熔融; 氧化还原状态; Fe 同位素; Mo 同位素

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

扬子东北缘新生代岩石圈地幔的性质及形成方式: 地幔捕虏体 Sr-Nd-Pb-Os 同位素的启示

刘丹阳¹, 闫峻^{1*}, 赵建新², 俸月星^{3,2}, 王思诺⁴

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 昆士兰大学 放射性同位素实验室, 澳大利亚布里斯班 004072;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082;

4. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001

华北克拉通东部在古生代-新生代有超过 100 km 的古老岩石圈地幔被强烈改造或移除, 但是尚不清楚相同地球动力学背景下的扬子克拉通东部是否经历了类似的深部地质过程。本研究对扬子克拉通东北缘苏北盆地新生代玄武岩中的尖晶石相二辉橄榄岩捕虏体进行了详细的岩相学、主量元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb-Os 同位素分析。研究表明, 这些尖晶石二辉橄榄岩捕虏体均呈碎裂结构和粒状镶嵌结构, 表现出饱满地幔的性质 (全岩 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.09\sim 3.73 \text{ wt.}\%$, 橄榄石 $\text{Fo} = 89.1\sim 90.2$), Os 同位素与深海橄榄岩代表的软流圈有相似的范围 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1208\sim 0.1256$)。单斜辉石微量元素配分模式可分为两组: 第一组 LREE 轻微富集, Sr-Nd-Pb 同位素亏损 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7026\sim 0.7031$, $\epsilon_{\text{Nd}} = 8.9\sim 12.3$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.840\sim 18.135$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.419\sim 15.474$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.732\sim 38.115$]; 第二组 LREE 轻微亏损, Sr-Nd-Pb 同位素比第一组更为亏损 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7022\sim 0.7027$,

$\epsilon_{\text{Nd}} = 10.5\sim 23.0$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.114\sim 17.856$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.365\sim 15.461$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.011\sim 37.728$], 与 DMM 类似。这些微量和同位素特征表明, 苏北盆地的橄榄岩捕虏体是新生的岩石圈地幔。两组橄榄岩部分熔融程度均较低 ($<10\%$), 并且第一组受到了来自俯冲大洋板片沉积物来源的硅酸盐熔体的交代。两组橄榄岩有相似的平衡温度, 指示其来源于类似的深度。综合以上分析, 扬子克拉通东北缘的新生代陆下岩石圈地幔是古老岩石圈地幔拆沉以后, 软流圈快速上涌冷凝新形成的。本研究探讨了岩石圈地幔在古太平洋板片俯冲和后撤引发的弧后拉张背景下的演化过程, 包括古老难熔岩石圈地幔的完全拆沉、软流圈上涌和冷凝、以及新生饱满岩石圈地幔的形成。

关键词: 橄榄岩捕虏体; 岩石圈地幔; 拆沉; Sr-Nd-Pb 同位素; 扬子克拉通

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42030801、41672052)

第一作者简介: 刘丹阳 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: ldy1509@hotmail.com

*通信作者简介: 闫峻 (1966-), 教授, 研究方向: 地球化学. Email: jyan-hut@163.com

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

塔西南上白垩统-古近系分布特征及其对副特提斯海演化的记录

黄碧君^{1*}

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

塔里木盆地西南地区的上白垩统至古近系地层完整地记录了副特提斯海从扩张、分割到消亡的过程。研究区的陆-海-陆沉积旋回、生物化石组合及构造变形特征为揭示特提斯域演化与亚洲内陆干旱化机制提供了关键证据。伴随着印度板块与亚洲板块的碰撞所引发的大规模的大陆内部变形, 天山、帕米尔高原和昆仑山等古老造山带被重新激活。由前人研究发现, 塔里木西南地区的副特提斯海侵海退历程不但受全球海平面升降的影响, 还可能由于构造运动而表现出穿时性特征, 因此更加精确的结果有待进一步深入和全面的研究。副特提斯海的演化过程中, 在塔西

南地区沉积了数套海相地层, 这些地层构成了油气资源的良好生、储、盖层。在塔西南地区上白垩统-古近系可以划分为 2 套区域性的储盖组合, 即上白垩统依格孜牙组碳酸盐岩与上覆古近系阿尔塔什膏盐岩构成的储盖组合, 及古近系卡拉塔组碳酸盐岩与上覆乌拉根组深色泥岩盖层组成的储盖组合。因此研究副特提斯海的演化能够指导上白垩统--古近纪地层含油气系统的预测和储层分布分析。

关键词: 塔西南地区; 上白垩统; 古近系; 副特提斯海

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

全岩 Mg 同位素区分高温和低温 S 型花岗岩

王艳¹, 高彭^{1*}, 赵子福¹, 顾海欧³, 孙国超¹, 黄慧婵²,
伍章健², 尹常青²

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 510275;

3. 合肥工业大学, 合肥 230009

地壳深熔是碰撞造山带形成花岗岩的主要方式。地壳深熔温度的约束对于了解花岗岩的岩石成因和地壳深熔过程至关重要。在变沉积岩部分熔融过程中, 高温条件下, 以黑云母脱水熔融为主, 伴有转熔石榴石的生长, 而在低温条件下, 以白云母脱水熔融为主, 转熔石榴石鲜少形成。在平衡分馏的情况下, 石榴石相对其它含镁相具有更轻的镁同位素组成。因此, 镁 (Mg) 同位素可作为示踪地壳熔融温度相对变化的潜在指标。然而, 温度变化对熔体 Mg 同位素组成的影响程度尚不清楚。本研究分析和报导了喜马拉雅造山带高温和低温淡色花岗岩的 Mg 同位素和 O 同位素数据, 结合先前研究报导的全岩主量和微量元素、锆石 Ti 含量数据来讨论这一问题。低温淡色花岗岩的最大锆石 Ti 温度为 739~801 °C, $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 -0.70‰~0.14‰, 与全球 S 型花岗岩的 Mg 同位素组成一致。高温淡色花岗岩的最大锆石 Ti 温度为 800~855 °C, $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 0.46‰~0.53‰, 明显高于全球 S 型花岗岩和变泥质岩的 Mg 同位素组成。高温

淡色花岗岩具有相对较高的 Nb/Ta、Eu/Eu* 比值, 与低温淡色花岗岩一致的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 CIA 值, 表明流体交代蚀变、分离结晶以及地壳同化作用并不是造成这两组花岗岩 Mg 同位素组成差异的主要原因。我们认为高温淡色花岗岩较重的 Mg 同位素组成与较高熔融温度条件下更多转熔石榴石的残余有关。相平衡模拟结果证实随着温度的升高, 以白云母分解为主的熔融反应很快转化为以黑云母分解为主的熔融反应, 伴随石榴石比例的逐步增加。平衡分馏计算结果进一步表明熔体的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与系统中石榴石比例具有正相关关系, 高温条件下产生熔体的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值明显高于低温条件下形成的熔体。本研究阐明了 Mg 同位素组成与深熔温度之间的关系, 强调全岩 Mg 同位素可以作为区分高温和低温 S 型花岗岩的可靠指标。

关键词: 喜马拉雅淡色花岗岩; 深熔温度; Mg 同位素; 相平衡模拟; 转熔石榴石

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42325205、42373043)

第一作者简介: 王艳 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 花岗岩地球化学. Email: wangy4476@mail.ustc.edu.cn

通讯作者简介: 高彭 (1988-), 研究员, 研究方向: 花岗岩地球化学. Email: gaopeng05@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

北大别早白垩世富钾高镁埃达克质岩石的成因: 对造山带垮塌的意义

冯帆¹, 续海金^{1,2*}, 杨绍极¹, 刘强^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)新能源学院, 武汉 430074

造山带垮塌的机制和过程, 是理解造山带演化的关键。大别造山带是典型的、已垮塌的大陆碰撞造山带, 为揭示造山带垮塌机制提供理想的研究窗口。通过系统的岩石学、地球化学及年代学研究, 在大别造山带核部——北大别构造单元道士冲地区, 发现了早白垩世(~130Ma)的富钾高镁埃达克质岩石, 为理解大别造山带的垮塌机制提供了重要科学依据。道士冲岩体为石英二长闪长岩, 受罗田穹窿热隆升的影响, 发育明显的片麻理, 为片麻状石英二长闪长岩。岩内发育大量暗色基性微粒包体, 同样受罗田穹窿热隆升的影响, 发生明显的塑性变形, 呈长轴状, 长轴平行于寄主岩石(道士冲岩体)的片麻理。包体内还可见岩浆混合的证据, 如斜长石捕虏晶。道士冲石英二长闪长岩具有富钾高镁埃达克质岩石的地球化学特征: 高 Sr (672.5~818.8 ppm)、低 Y (11.37~20.92 ppm) 和 Yb (0.94~1.87 ppm), 高的 Sr/Y 比值 (35.07~72.02), 没有 Eu 和 Sr 的负异常, 为典型的埃

达克质特征; 高的 MgO (2.08~3.04 wt.%) 含量及 Mg[#]值 (44.36~49.32), 低的 Na₂O/K₂O 比值 (1.12~1.46), 体现出岩体富钾高镁的特征。包体则具有幔源岩浆的地球化学特征: 低 SiO₂ (48.10~51.85 wt.%)、高 MgO (3.27~5.62 wt.%)、Ni (16.60~63.59 ppm)、Cr (30.45~164.60 ppm)、Y (18.17~25.77 ppm) 和 Yb (1.50~1.94 ppm) 含量, 高的 Mg[#]值 (47.33~51.18), 与大别造山带内的基性-超基性岩石类似。通过对道士冲岩体与包体的野外特征和地球化学特征综合分析, 认为形成于加厚下地壳部分熔融的埃达克质熔体与幔源岩浆的混合, 指示了大别造山带在~130Ma 经历了山根拆沉作用。结合前人对大别造山带早白垩世岩浆岩的研究, 认为山根整体、快速的拆沉作用导致大别造山带的垮塌。

关键词: 造山带垮塌; 大别造山带; 高镁埃达克质岩石; 岩浆混合; 拆沉作用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372057、42072058、41772054)

第一作者简介: 冯帆 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学. Email: feng_fan_1224@qq.com

通讯作者简介: 续海金 (1976-), 教授, 研究方向: 岩石学. Email: xuhaijin@cug.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

大洋岩石圈流体交代过程中的硅同位素分馏: 来自西藏日喀则异剥钙榴岩的证据

许佳乐¹, 陈伊翔^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

海洋岩石圈在俯冲过程中对地幔硅循环及同位素不均一性产生深远影响, 而这一过程与海底交代作用密切相关。海底交代作用形成的具有特异地球化学特征的岩石可进入俯冲带, 并进一步影响深部地球化学性质。因此, 研究低温海底交代作用引起的 Si 同位素变化及其对全球 Si 循环的贡献, 对于理解地球内部物质交换至关重要。异剥钙榴岩是海底辉长岩在蛇纹石化流体作用下形成的富钙交代岩石, 其 Si 同位素组成可提供关键约束。本研究对西藏日喀则蛇绿岩中的异剥钙榴岩及其辉长岩原岩进行了 Si 同位素分析。结果表明, 与辉长岩原岩相比, 异剥钙榴岩具有显著降低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 (-0.67‰ 至 -0.29‰), 而辉长岩原岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 (-0.29‰ 至 -0.19‰) 接近大洋中脊玄武岩。异剥钙榴岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值明显偏离岩浆演化趋势, 其低 $\delta^{30}\text{Si}$ 特征不能通过原岩的岩浆分异机制解释。结合异剥钙榴岩相对较低的 Si 含量、偏低的 $\delta^{18}\text{O}$

值以及蛇纹石化流体中 Si 含量极低的特征, 表明外源轻 Si 同位素组分的加入不足以解释其 $\delta^{30}\text{Si}$ 的系统性降低。因此, 最可能的成因机制是交代作用过程中重 Si 同位素的丢失。质量平衡计算表明, 异剥钙榴岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与其葡萄石和石榴石的含量呈负相关关系, 表明矿物组合的转变直接影响 Si 的迁移。石榴石和葡萄石在形成过程中发生脱硅作用, 导致重硅同位素组分优先进入流体, 而残余的异剥钙榴岩则具有偏低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。综合来看, 本研究揭示了异剥钙榴岩在海底交代作用中作为轻 Si 储库的重要作用, 并表明其俯冲进入地幔后, 可能成为地幔轻 Si 同位素的潜在来源, 进而影响俯冲带弧岩浆的 Si 同位素组成以及全球 Si 循环。

关键词: 异剥钙榴岩; 流体交代作用; 硅同位素; 俯冲带过程

基金项目: 中科院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB41000000); 国家自然科学基金项目 (42373046)

第一作者简介: 许佳乐 (2000-), 在读博士, 研究方向: 同位素地球化学. Email: xujiale@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: yxchen07@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

熔体交代作用对大陆岩石圈地幔的改造: 来自 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩的岩石地球化学与 Re-Os 同位素约束

刘庆^{1*}, 侯泉林¹, 何苗¹, 闫方超¹, 梁子贤¹

1. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408

位于意大利阿尔卑斯山西部的 Ivrea-Verbano Zone (IVZ) 是全球罕见出露完整的大陆地壳剖面之一 (Rivalenti et al., 1981; Peressini et al., 2007; Mazzucchelli et al., 2010)。作为 Adriatic 板块的组成部分, IVZ 在阿尔卑斯造山运动中因与欧洲板块碰撞而抬升剥露 (Fountain, 1976; Handy et al., 1999; Quick et al., 2009)。IVZ 主要包含两大单元: 高级变质的副片麻岩 Kinzigite 组, 以及侵入其中的镁铁质复合岩体 (Peressini et al., 2007)。其中, Baldissero 地体作为 IVZ 西南缘的关键组成部分, 展现出独特的岩石组合特征。该地体由长 3 km、宽 0.5~2 km 的橄榄岩透镜体构成, 东侧与辉长岩质基性杂岩毗邻, 西侧通过构造接触与 Austroalpine 穹隆的 Canavese 地块相接 (Shervais & Mukasa, 1991; Quick et al., 1995)。现有年代学证据表明, 这些橄榄岩在石炭纪-二叠纪期间就位于下地壳麻粒岩相变基性岩中 (Peressini et al., 2007; Mazzucchelli et al., 2010)。岩石学研究显示, Baldissero 橄榄岩主体为尖晶石相二辉橄榄岩, 含少量方辉橄榄岩和纯橄岩 (Ernst, 1978; Sinigoi et al., 1980), 其显著特征在于被多期次辉石岩脉穿插, 晚期更发育切割早期构造的闪长岩脉 (Sm-Nd 年龄, 204~198 Ma)。值得注意的是, 这些闪长质岩浆活动不仅引起二辉橄榄岩发生局部反

应, 即使是远离岩脉的二辉橄榄岩也受到熔体渗透的影响, 导致副矿物钛韭闪石结晶及不相容元素富集 (Mazzucchelli et al., 2010)。本次研究的 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩展现出典型变质变形特征: 粒状结构 (粒径 1~5 mm) 中, 橄榄石 (约 55%) 发育有亚颗粒, 斜方辉石 (约 25%) 多见膝折带, 单斜辉石 (约 15%) 与填隙状尖晶石 (约 5%) 共生, 橄榄石和辉石普遍显示波状消光。地球化学分析揭示, 样品具有高镁特征 ($Mg\# \sim 91$) 和显著的 CaO 含量 ($\sim 2.9 \text{ wt}\%$), 其稀土配分模式显示 HREE 轻微富集且总体接近原始地幔值, 但明显富集 Cs、Ba、U、Ta 等流体活动性元素。进一步研究发现, PGE 配分呈现平坦的球粒陨石标准化模式, 与原始上地幔 (PUM) 高度吻合, 但 Pd/Ir (1.35~2.09) 和 Ru/Ir (1.87~2.03) 比值系统性偏高。同位素体系方面, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值稳定于 0.124 左右, 与深海橄榄岩范围重叠。综合上述特征, 结合 Re-Os 同位素的模式年龄、PGE 分布规律及区域构造演化史, 我们认为 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩可能代表经历过软流圈熔体交代改造的大陆岩石圈地幔残余。

关键词: 岩石圈地幔; 二辉橄榄岩; Re-Os 同位素; 熔体交代作用

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

古特提斯板片撕裂的快速传播: 来自华南三叠纪花岗岩高精度年代学证据

夏小平^{1*}, 聂虎¹

1. 长江大学 资环学院, 武汉 430000

板片撕裂常被用以解释汇聚环境中的复杂地球动力学过程。然而, 板片撕裂的启动与传播机制尚不明确。华南大容山-十万大山花岗岩带被认为是古特提斯板片垂直撕裂的岩浆响应, 能够为阐明该过程提供重要约束。本文报道了该花岗岩带的高精度锆石 U-Pb 年龄数据, 结果表明, 岩体侵位年龄与其空间分布呈现显著相关性, 从东北至西南逐渐变年轻, 年龄范围为 249.4 Ma

至 246.5 Ma, 持续时间约为 3 Ma。该发现表明, 大容山-十万大山地区的板片撕裂可能从俯冲带的弧后区域迅速传播至海沟。结合区域地质证据, 研究认为穿时碰撞作用可能是诱发板片撕裂的重要机制之一。

关键词: 板片撕裂; 古特提斯; 华南; ID-TIMS 年龄

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

多矿物 U-Pb 年代学和地球化学联合制约江南造山带 西坞口 Sn-W-Rb 岩浆-热液成矿过程

吴锬言¹, 高晓英^{1*}, 侯琪¹, 杨晓勇¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230031

西坞口矿床位于江南造山带东段, 为区内典型的岩浆-热液型 Sn-W-Rb 多金属矿床。为揭示 Sn-W-Rb 多金属矿床从岩浆晚期向热液转变成矿的关键过程, 本研究对西坞口 Sn-W-Rb 多金属矿床及其区内花岗岩开展了独居石、锡石、黑钨矿 U-Pb 年代学、地球化学与岩石学综合研究。野外勘查结合钻孔探察显示, 蚀变花岗岩-云英岩型 Sn-Rb 矿体主要赋存于岩体顶部, 而石英脉型 Sn-W 矿体则多产于志留纪沉积地层中。LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年揭示西坞口岩体存在两期岩浆活动: ~140 Ma 的斑状花岗岩(花岗岩 I)和~129 Ma 的斑状黑云母花岗岩(花岗岩 II)。蚀变花岗岩与蚀变花岗岩型 Sn 矿石中独居石 U-Pb 年龄均为~129 Ma。来自不同

类型矿体中的锡石和黑钨矿 U-Pb 定年进一步限定锡成矿时限为 129 Ma(蚀变花岗岩型)至 126 Ma(石英脉型), 石英脉型钨矿化时限在 125~127 Ma。独居石地球化学特征显示, 从花岗岩至蚀变花岗岩至锡矿石, Th 含量不断降低, Eu 异常增强, LREE-MREE 分异程度增高, 指示岩浆-热液演化是导致蚀变花岗岩型锡矿化的主要原因。结合花岗岩全岩地球化学特征及区域构造背景, 研究认为在~129 Ma 伸展环境下侵位的斑状黑云母花岗岩, 引发了该区主要的锡钨铍成矿事件。

关键词: 江南造山带; 西坞口; 岩浆-热液作用; Sn-W-Rb 成矿

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲陆壳的碳酸盐交代作用改造地幔楔氧化还原状态:
来自苏鲁造山带胡家林超镁铁质岩的制约王闯¹, 陈仁旭^{1*}, 尹壮壮¹, 孙国超¹, 穆智慧¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

地幔的氧化还原状态调控着地球深部挥发分(如 H_2O 、 CO_2) 的循环, 并对地幔演化、火山喷发、成矿过程及全球碳循环具有关键作用。俯冲带地幔楔较洋中脊玄武岩(MORB)更为氧化, 主要归因于俯冲物质的交代作用。来自俯冲大陆板片的碳酸盐熔体富含氧化性组分(CO_3^{2-} , Fe^{3+} , V^{5+}), 可能是导致地幔楔氧化的重要交代介质, 但其在大陆碰撞带中氧化机制的直接证据仍较缺乏。造山带橄榄岩中幔源橄榄岩直接记录了壳源熔流体与地幔楔的反应, 是研究大陆俯冲过程中壳幔相互作用的理想样品。我们对苏鲁造山带胡家林地区纯橄岩、异剥橄榄岩及单斜辉石岩开展了系统的岩石学和地球化学研究。胡家林纯橄岩具有极度亏损的全岩组分、高镁橄榄石($\text{Fo}=90.4\sim 92.8$)及高 $\text{Cr}\#$ (66~79) 尖晶石, 代表华北克拉通古老岩石圈地幔经历高程度部分熔融(20%~30%)后的难熔残留体。胡家林异剥橄榄岩中橄榄石具有低 Fo (86.7~88.3) 且从核到边表现出 Fo 、 SiO_2 、 MnO 的增加以及 FeO 的降低, 单斜辉石具有高 $\text{Mg}\#$ (90.3~95.2) 且富集 LREE 和 LILE, 指示其经历了碳酸盐熔体交代作用。胡家林单斜辉石岩根据其岩相特征分为 I 类(贫石榴石)、II 类(富石榴石)和 III 类(富 Fe-Ti 氧化物)。I-II 类单斜辉石岩全岩组分和单矿物成分与全球

交代成因辉石岩相似, 且其单斜辉石具高 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 、 Ca/Al 及低 Ti/Eu 比值, 指示了其碳酸盐熔体与地幔橄榄岩反应的产物。III 类单斜辉石岩因全岩与矿物成分与全球堆晶成因单斜辉石岩相似, 为演化熔体的堆晶产物。异剥橄榄岩和单斜辉石岩中含有交代成因锆石和残留的岩浆锆石, 交代锆石具有低的 Th/U 比值以及较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 并含有方解石包裹体, 表明交代介质为地壳来源, 锆石年龄 $226\pm 7\text{ Ma}$ 给出了碳酸盐熔体交代作用的时间。异剥橄榄岩和 I-II 类单斜辉石岩单斜辉石的 Sr 同位素特征 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7027\sim 0.7063$) 也显示出地壳来源碳酸盐熔体和亏损地幔端元混合的趋势。因此, 交代的碳酸盐熔体来源于三叠纪俯冲的扬子板片。相较于原生单斜辉石斑晶, 新生单斜辉石 V/Sc 比值的降低, 表明俯冲陆壳来源碳酸盐熔体可增强地幔不均一性并氧化上覆地幔楔。本研究揭示了大陆深俯冲过程中碳酸盐熔体对地幔楔的氧化效应, 阐明了壳源碳参与地幔氧化的机制。这些发现深化了对碰撞造山带壳幔相互作用的理解, 为深部碳循环与地幔氧化还原演化的耦合提供了制约。

关键词: 苏鲁造山带; 超镁铁质岩; 碳酸盐熔体交代; 地幔楔氧化; 壳幔相互作用

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩钼同位素记录 俯冲地壳物质再循环

王志刚¹, 戴立群^{1*}, 赵子福¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026

镁铁质岩浆岩的地球化学研究为探索俯冲带地壳物质输入地幔提供了重要窗口。然而, 俯冲带地壳组分的类别和对地幔的贡献程度很难直接被观察, 且这种再循环机制尚不明确。本研究对中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩的 Mo-Sr-Nd-Hf 同位素进行了综合分析, 制约了早中生代蒙古-鄂霍茨克洋俯冲板片输入地幔的交代过程。晚三叠世镁铁质岩浆岩 (约 227~226 Ma) 具有岛弧型微量元素特征, 较高的 Ba/La、Ba/Th、La/Sm、Th/La 比值, 以及亏损的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值为 0.7039 至 0.7043, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 4.0 至 8.5, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 6.9 至 11.1。这些岩石的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 7.7 至 12.7。

此外, 它们还具有重钼同位素特征, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值为 -0.24‰至 0.36‰, 大多高于正常地幔值 (-0.20‰±0.01‰)。上述元素和同位素特征指示, 中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩的重钼同位素特征主要继承自蚀变洋壳衍生的富水溶液和少量缺氧沉积物衍生的含水熔体。因此, 镁铁质岩浆岩的 Mo-Sr-Nd-Hf 同位素联合示踪是研究俯冲带地球化学通量的有力手段, 特别是钼同位素系统研究为会聚板块边缘的地壳物质再循环提供了新的见解。

关键词: 钼同位素; 板片流体; 沉积物熔体; 弧岩浆作用; 蒙古—鄂霍茨克洋

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0800402)

第一作者简介: 王志刚 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学、岩石地球化学. E-mail: zhigangwang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 戴立群 (1986-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学. E-mail: lqdai@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲大洋板片的卤素组成和活动行为

陈仁旭^{1*}, 潘正华¹, 汤跃¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

卤族元素(简称卤素)是挥发性微量元素、易溶于富水流体, 主要赋存于地球表面储库如海水、沉积物、蚀变洋壳中, 在地幔中含量很低。它们在俯冲带通过沉积物、蚀变洋壳和蛇纹岩化岩石圈地幔的俯冲进入地幔。卤素可以增加矿物稳定性, 抑制板片熔融, 增强流体的元素迁移能力等。了解俯冲带的卤素活动行为对于理解壳幔相互作用、地幔不均一性和全球卤素及相关元素循环具有重要意义。F 和 Cl 相比 Br 和 I 对地球内部的物理化学过程具有更显著更重要的影响。我们以 F 和 Cl 为主要对象对俯冲带变质岩中卤素的活动性进行了探讨。俯冲带中的卤素主要赋存于地壳浅部物质, 如孔隙流体、沉积物、蚀变洋壳和蛇纹石化岩石圈地幔, 它们在 F 和 Cl 含量进而 F/Cl 比值上存在巨大差异。板片俯冲过程中会发生一系列持续和非持续的变质脱水反应。卤素在板片脱水过程中发生再分配, 并通过替代 OH⁻的形式进入含水矿物中。随着矿物的分解在俯冲带不同深度释放, 形成卤素含量不同的变质流体。这些流体向上交代上覆地幔楔, 引发地幔楔部分熔融。也有部分卤素赋存于更稳

定的矿物(如磷灰石)中, 随板片一起进入更深地幔。洋壳俯冲到蓝片岩相过程中大部分 F 得到保留, 而 Cl 则大部分发生丢失, 蓝片岩相向超高压榴辉岩相进变质过程中则伴随着 F 和 Cl 的持续丢失, 这与不同变质条件下卤素赋存矿物的稳定性有关。蓝片岩和榴辉岩中 F 和 Cl 主要赋存在含水矿物如云母和角闪石以及磷灰石和榍石中。俯冲板片进变质过程中卤素在持续丢失但并不完全, 榴辉岩中不同程度 F 和 Cl 的富集和亏损指示俯冲过程中不同岩性之间存在流体交换。俯冲板片底部富含卤素的蛇纹岩来源流体对榴辉岩的渗滤作用会导致榴辉岩具有高的卤素含量, 这些富含卤素的榴辉岩也是携带挥发份进入弧下深度的重要载体。由于俯冲板片中卤素组成随深度变化导致俯冲板片不同深度下释放流体的卤素含量和组成也存在差异, 进而影响不同深度下释放流体的元素迁移能力。

关键词: 卤素; 挥发份; 榴辉岩; 流体活动; 俯冲带

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

赤峰平庄晚白垩世和渐新世玄武岩的成因研究及其意义

王丹¹, 洪路兵^{1*}, 张银慧¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西桂林 541000

地震层析成像显示, 东亚陆缘之下的地幔转换带有一高速体, 其往东可延伸至日本俯冲带, 形成了独特的东亚大地幔楔深部构造系统 (Huang & Zhao, 2006; Li & Van der Hilst, 2010; Zhao & Ohtani, 2009), 为我们研究大地幔楔系统的壳幔相互作用、物质组成及深部动力学过程提供了契机。赤峰平庄位于东亚大地幔楔前端。该地区发育了两套不同时代 (晚白垩世和渐新世) 玄武岩, 是探讨东亚大地幔楔前端壳幔相互作用、物质组成及其深部动力学的重要样品。赤峰平庄晚白垩世和渐新世玄武岩均具有 OIB 的微量元素组成, 指示其起源于软流圈。其中, 晚白垩世玄武岩显示高氧同位素组成, 它们的橄榄石斑晶具低 Ni、10000Zn/Fe 和 Fe/Mn, 以及高 Mn 和 Mn/Zn 特征, 指示源区为被经历低温热液蚀变的上洋壳改造的橄

榄岩; 渐新世玄武岩显示低氧同位素组成, 它们的橄榄石斑晶具有高 Ni、10000Zn/Fe 和 Fe/Mn, 以及低 Mn 和 Mn/Zn 特征, 指示源区为被经历高温热液蚀变的下洋壳改造的辉石岩。本文认为, 晚白垩世以来, (古)太平洋俯冲板片滞留于赤峰之下的地幔转换带; 在地幔加热和对流地幔上涌的共同作用下, 洋壳组分逐渐从滞留板片中剥离并进入软流圈, 其中, 晚白垩世以上洋壳为主, 渐新世加入了更多的下洋壳组分。它们与地幔橄榄岩相互作用, 形成了晚白垩世和渐新世玄武岩的源区物质。这表明, 东亚大地幔楔壳-幔相互作用和源区物质组成可能具有时空演化规律。

关键词: 东亚大地幔楔; 壳幔相互作用; 深部动力学; 赤峰平庄

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172053、42002057); 广西研究生创新项目 (YCSW2024388)

第一作者简介: 王丹 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: 2541967477@qq.com。

*通讯作者简介: 洪路兵 (1985-), 副研究员, 研究方向: 地幔地球化学。Email: honglubing@glut.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

利用新型弹性力学压力计 (QuiG) 和单矿物微量元素温度计 (Ti-in-Amp) 限定桐柏造山带榴辉岩进变质温压轨迹

王雨淳¹, 高晓英^{1*}, 张强强¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230000

榴辉岩的进变质压力 (P)-温度 (T) 轨迹反映了俯冲带地球动力学演化和热结构的重要信息。石榴石的稳定性使其成分通常与热力学平衡模拟结合使用, 以构建榴辉岩的进变质温压轨迹。然而, 最近研究表明, 石榴石可能经历不平衡的成核和生长, 这可能导致热力学平衡方法不能准确地重现岩石热构造演化。本文将新型的石榴石中石英包裹体弹性拉曼频移压力计 (QuiG)、相平衡模拟和单矿物微量元素温度计 (钙质角闪石中 Ti 温度计和金红石中 Zr 温度计) 多种方法相结合, 对桐柏榴辉岩的进变质 P-T 轨迹进行了精确限定。结果表明, 桐柏榴辉岩在 380~520°C/15~18 kbar 下经历了早期蓝片岩相进变质阶段, 在 520~600°C/18 kbar 下经历了晚期角闪石-榴辉岩相进变质阶段, 随后近等温升压至约 27 kbar 经历峰期绿帘石-榴辉岩相变质。QuiG 限定的进变质压力条件显

著低于相平衡模拟的限定 (23~25 kbar), 但在石榴石变斑晶中包裹体矿物组合的稳定域内。T-X (CaO) 视剖面的计算表明, 当进行相平衡模拟时, 榴辉岩的全岩成分与石榴石生长的有效平衡成分之间的差异会导致对进变质压力的高估, 而弹性力学压力计可准确地限定桐柏榴辉岩所经历的进变质压力。结果表明桐柏榴辉岩经历了一个以早期加热-晚期挤压为特征的进变质演化过程。这表明地温梯度发生从~8~15°C/km (深度~50 km) 到最大值仅 2.6°C/km (深度 55~80 km) 的连续变化, 呈现强烈上凹, 与前人对其它典型大陆俯冲带限定的热结构相当。

关键词: 变质演化; 石榴石中石英包裹体弹性拉曼频移压力计; 钙质角闪石中 Ti 温度计; 地温梯度; 俯冲带

基金项目: 国家自然科学基金项目 (W2412052)

第一作者简介: 王雨淳 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学与地球化学. Email: wangyuchun@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 高晓英 (1980-), 教授, 研究方向: 岩石学与地球化学. Email: gaoying@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

印度陆壳再循环的镁铁质岩浆岩地球化学示踪: 来自雅鲁藏布江缝合带古海沟沉积物的约束

陈龙^{1*}

1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛, 266100

自始新世印度—欧亚大陆碰撞以来, 印度大陆岩石圈持续俯冲至亚洲岩石圈之下, 但印度大陆地壳是否经历再循环仍是固体地球科学的前沿问题。再循环的地壳物质与地幔在地球化学组成上有显著差异, 可以通过分析幔源镁铁质岩浆岩的地球化学成分进行示踪。然而, 由于缺乏对印度大陆俯冲前新特提斯洋壳沉积物地球化学成分的有效约束, 目前难以通过对比拉萨地体镁铁质岩浆岩与印度陆壳成分, 明确其源区中富集组分的来源, 是再循环的新特提斯洋壳沉积物, 还是印度陆壳。为解决这一瓶颈问题, 本研究对

雅鲁藏布江缝合带保存的碰撞前-同碰撞期海沟沉积序列和拉萨地体碰撞前、同碰撞和碰撞后镁铁质岩浆岩, 开展 Li-Fe-Mg-K-Sr-Nd-Pb-Hf 等多同位素的地球化学分析, 结合前人地质、地球物理研究结果, 定性和定量约束不同时期镁铁质岩浆岩中的再循环地壳物质的性质。最终, 旨在回答印度大陆地壳是否经历再循环及其起始时间的关键问题。

关键词: 印度陆壳再循环; 海沟沉积物; 拉萨地体; 镁铁质岩浆岩

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

模拟幔源熔体中 V/Sc、V/Ti 和 V/Yb 变化与氧逸度的关系

刘纯韬¹, 叶辰阳¹, 张舟^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

氧逸度 (fO_2) 是表征体系氧化还原状态的热力学参数, 它调控着变价元素的地球化学行为, 对地幔部分熔融过程、岩浆挥发分的组成以及大气成分的演变均具有重要影响。变价元素钒 (V) 与单价态元素的比值 (如 V/Sc、V/Ti、V/Yb) 是获取地幔氧逸度的重要指标。然而, 这些比值在地幔部分熔融过程中的地球化学行为仍存在争议。为此, 我们模拟了不同的源区矿物组合和化学成分条件, 以探究这些比值与弧玄武岩和洋中脊玄武岩 (MORB) 地幔源区氧逸度的关系。研究结果表明, V/Sc 比值受地幔源区性质和熔融程度变化的影响

较小, 是更为可靠的示踪地幔氧逸度演化的指标。相比之下, V/Ti 和 V/Yb 比值对熔融程度更为敏感, 且 V/Ti 比值明显受地幔化学成分的影响。本研究深化了我们对地球上不同构造背景下地幔氧化还原状态的理解。例如, 将我们的模型应用于玄武岩数据集后发现, 现代弧下地幔通常比 MORB 源区更为氧化, 这反映了俯冲板片衍生的流体和沉积物对弧地幔氧逸度的影响。

关键词: 地幔氧逸度; 变价元素比值; 氧逸度指标; 玄武岩

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072066)

第一作者简介: 刘纯韬 (1994-), 博士后, 研究方向: 地球化学大数据. Email: c.-t.liu@zju.edu.cn

*通信作者简介: 张舟 (1986-), 研究员, 研究方向: 地球化学大数据. Email: zhangzhou333@zju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

九州帕劳脊南段熔岩岩石成因：对古伊豆-小笠原-
马里亚纳弧裂解过程的制约刘振轩^{1,2}, 鄢全树^{1,2,3*}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

2. 河海大学 海洋学院, 南京 210016;

3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东 青岛 266061

发育于西太平洋汇聚板块边缘的伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)沟-弧-盆体系完整记录了自 52 Ma 以来的区域构造-岩浆活动历史, 是研究俯冲带岩浆作用与物质循环、圈层相互作用及洋内岛弧发育演化过程(俯冲起始、岛弧裂解、弧后盆地扩张)的理想区域(Stern, 2003; Yan et al., 2024)。截至目前, 虽然对 IBM 俯冲带开展了大量研究并获取了许多重要认识, 但对 IBM 早期岛弧演化的研究仍相对缺乏(Samajpati 和 Hickey-Vargas, 2022; Ribeiro et al., 2020; 2022), 洋内岛弧裂解作用对后弧岩浆组分的影响仍有待阐明。本文对菲律宾海板块内早期演化形成的九州-帕劳残余弧脊南段(22° N 以南)基底玄武岩样品开展了地质年代学、岩石学、元素地球化学分析。结果表明, 其典型代表的 K-Ar 年龄为 23.7 ± 0.68 Ma, 代表着弧后盆地打开前古 IBM 弧裂解期间最后阶段的岛弧岩浆活动。全岩地球化学特征表明, 九州-帕劳脊南段基底熔岩为亚碱性到平湖拉斑玄武岩, 其微量元素组成与典型的岛弧玄武

岩(IAB)相似, 并显示出微弱的俯冲组分贡献, 且弧下地幔存在广泛的不均一性。模拟计算结果表明, 该脊段基底熔岩是由尖晶石二辉橄榄岩经过 4%~12% 低程度部分熔融所形成。对比 IBM 俯冲带其它处于岛弧裂解期的后弧岩浆活动, 九州-帕劳脊南段熔岩与其北段熔岩及演化更成熟的西马里亚纳残余弧、伊豆-小笠原弧岩浆在俯冲组分添加量上存在系统性差异, 更类似婴儿期的 IBM 弧。本研究进一步提出, 岛弧裂解影响下, 软流圈被动上涌阻碍了俯冲组分进入九州-帕劳脊南段弧下地幔。菲律宾海板块的旋转运动及太平洋板块的俯冲后撤共同影响下造就了南北差异性的裂解条件, 致使后弧处岩浆活动与弧壳增生终止, 并阻碍了九州-帕劳脊南段进一步演化成为平均组分为安山质的成熟岛弧, 最终表现为不成熟的洋内岛弧。

关键词: 洋内俯冲带; 岛弧裂解作用; 后弧岩浆活动; 岩石成因; 九州—帕劳脊

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大兴安岭南段蒙和乌拉花岗岩年代学、地球化学特征及构造意义

岳海欣^{1,2}, 于赫楠^{1,2*}, 孙珍军^{1,2}, 何燕萍^{1,2}, 于瀛博³

1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201;

2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 101601;

3. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201

大兴安岭南段位于中亚造山带东段的兴蒙造山带, 是我国北方著名的有色金属基地和多金属矿集区。经历了古亚洲洋闭合、蒙古-鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板块俯冲等地质构造演化, 地处古亚洲洋成矿域和滨西太平洋成矿域的叠加区, 显生宙以来经历了剧烈的构造活动, 形成了大规模断裂和褶皱构造, NE 向的黄岗梁-甘珠尔庙大型复式褶皱断裂带控制了岩浆岩的分布和多金属成矿作用。研究区构造活动受古太平洋构造体系与蒙古-鄂霍茨克构造体系的显著影响, 但其详细作用机制和影响的时空范围尚未明确, 限制了中生代岩浆活动与成矿作用关系的研究。本文在总结前人研究成果的基础上, 对蒙和乌拉地区进行了详细的野外地质调查, 开展了岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析研究, 为该地区岩浆演化与成矿作用的关系提供科学依据。本文研究岩体岩性分别为花岗斑岩和黑云母二长花岗岩。二者锆石 CL 图像可以看出锆石颗粒内部均发育清晰的振荡环带, 锆石均为岩浆成因 ($Th/U=0.24\sim0.7$), 锆石 U-Pb 同位素定年结果显示年龄分别为 135.60 ± 0.29 Ma 和 134.33 ± 0.28 Ma, 属于早白垩世花岗岩; 花岗斑岩 A/CNK 介于 $1.08\sim1.11$, A/NK= $1.11\sim1.14$, 黑云母二长花岗岩 A/CNK= $1.03\sim1.07$, A/NK= $1.09\sim1.11$, 且二者都具有高硅富碱的特征, 属于弱过铝质钙碱性花岗岩; 两个岩体具有较高的 SiO_2 ($76.78\%\sim77.38\%$)、 Na_2O+K_2O ($8.10\%\sim8.42\%$) 和 FeO^T/MgO ($13.74\sim21.69$), 低 P_2O_5 ($\leq0.03\%$)、

$10000*Ga/Al$ ($3.14\sim3.27$) 均大于 2.6, 呈极强的 Eu 负异常 ($\delta Eu=0.09\sim0.13$), 全岩高饱和温度分别为 $772\sim791^\circ C$ 、 $766\sim783^\circ C$, 结合它们的岩石成因判别图以及较高的分异指数 ($DI=96.11\sim96.90$), 充分证明其属于高分异 I 型花岗岩。二者岩体中较强的重稀土元素亏损、强 Eu 负异常、正 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 ($4.50\sim9.30$)、较年轻的二阶段模式年龄 ($904\sim595$ Ma) 以及在 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图中数据点均落于新生底侵下地壳演化线和古生代俯冲增生杂岩演化线之间的结果, 均暗示花岗质岩浆物质可能源于新元古代新生下地壳物质部分熔融。部分学者对区域进行了岩石学、年代学和地球化学研究, 认为蒙古-鄂霍茨克洋闭合引起东部发生碰撞, 造成了东北地区碰撞造山作用和隆升作用, 直至早白垩世早期大兴安岭南段构造环境由挤压向伸展转变。同时, 早一中侏罗世古太平洋板块俯冲方向发生转变, 导致陆内挤压、陆壳增厚, ~144 Ma 发生俯冲回卷作用, 伴随着俯冲板片重力下沉, 岩石圈伸展, 在晚侏罗世一早白垩世影响至大兴安岭地区。前人资料研究显示, 地球物理学方法系统总结出的俯冲板片下降速率证实了板片下沉时间的合理性。结合花岗岩的构造判别图解, 表明岩体形成于碰撞后伸展环境, 是古太平洋板块向欧亚大陆俯冲回卷作用的结果。

关键词: 大兴安岭南段; 花岗岩; 岩石元素地球化学分析; 花岗岩年代学

基金项目: 廊坊市科学技术研究与发展计划自筹经费项目 (2023013091); 河北省研究生教育教学改革研究项目 (YJG2023121)

第一作者简介: 岳海欣 (2001-), 在读硕士, 研究方向: 区域岩浆活动与成矿作用关系. Email: yuehaixin18@163.com

*通信作者简介: 于赫楠 (1987-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩岩石学及矿床地质学. Email: 239082532@qq.com

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

西太平洋南雅浦岛弧火成岩岩石成因与物质循环

闫施帅^{1,2}, 鄢全树^{1,2,3*}

1. 河海大学 海洋学院, 南京 210098;

2. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 266061;

3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

雅浦俯冲汇聚系统由太平洋板块及次一级的卡罗琳板块俯冲于菲律宾海板块之下形成的, 随后它又受到了卡罗琳海底高原向雅浦海沟的碰撞/俯冲作用(Beccaluva et al., 1980; Yan et al., 2022)。因此, 该区是研究海底高原与俯冲带相互作用的理想区域。雅浦俯冲带具有许多独特的构造特征, 比如, 雅浦岛弧主要由变质岩和极少量的火山岩组成, 沟弧间距异常短(< 50 km), 缺乏中深度地震活动, 以及雅浦俯冲带南、北部俯冲汇聚过程存在明显差异(Altis, 1999; Kobayashi, 2004; Ohara et al., 2002)。2018年自然资源部第一海洋研究所利用“向阳红 01”科考船在雅浦海域开展了综合地质调查航次, 获得了关键构造位置的多种类型的火成岩样品。本研究对采自南雅浦岛弧(大致以索罗尔海槽为界把雅浦岛弧分为南、北两段)的橄榄岩、辉长闪长岩、玄武岩和安山岩开展了系统的矿物学、元素化学和同位素地球化学的研究。结果表明: (1) 橄榄岩为弧前橄榄岩, 是海

底高原作用下经俯冲板块少量脱水导致的地幔楔低程度部分熔融(10%~15%)后的地幔残余物, 并在俯冲板块的构造侵蚀下暴露于雅浦岛弧; (2) 辉长闪长岩具有与新生期岛弧熔岩类似的微量元素地球化学特征, 指示其是由俯冲输入组分交代的相对较为亏损的浅层地幔楔低程度部分熔融所形成的; (3) 雅浦岛弧玄武岩表现出似 IAB 的地球化学特征, 而雅浦岛弧安山岩是岛弧前缘较低深度的基性岩受到少量沉积物熔体作用后形成的, 它们的源区地幔具有太平洋型 MORB 同位素地球化学特征。同位素组成表明, 南雅浦岛弧熔岩的地幔源区受到了卡罗琳板块下太平洋型地幔的影响, 在卡罗琳海底高原的差异俯冲作用下, 其软流圈地幔可能已通过由雅浦南北两侧差异俯冲所形成的板片窗而流入进雅浦弧下地幔中。

关键词: 岩石成因; 岩浆过程; 海底高原; 超慢速俯冲; 南雅浦岛弧

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

东昆仑晚三叠世壳幔相互作用及其对岩浆-成矿活动大爆发的动力学启示

熊富浩^{1*}, 侯明才¹, 马昌前²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院地质学系, 成都 610059;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

壳幔相互作用是实现地球深部圈层物质循环和地壳生长演化的重要方式, 因此, 理清壳幔物质相互作用的动力学过程对于认识火成岩多样性与成矿物质迁移富集机理具有重要意义。青藏高原北部东昆仑造山带发育大规模晚三叠世花岗质岩浆-成矿作用, 且具有显著的壳幔岩浆混合印记, 是探究壳幔相互作用与岩浆-成矿大爆发动力学联系的极佳窗口。本文以东昆仑晚三叠世复式岩墙、A 型花岗岩和埃达克质花岗岩等多种特殊成因类型岩浆岩为研究对象, 基于精细的矿物结构和原位微区元素-同位素等研究, 系统探究了晚三叠世不同成因类型岩浆岩记录的壳幔相互作用过程。研究结果揭示, 东昆仑造山带晚三叠世巨量岩浆-成矿作用与古特提斯域碰撞后伸展背景密切相关, 东昆仑于晚三叠世 228~208 Ma 期间发生了快速隆升剥蚀与大范围壳幔岩浆混合作用。多期次幔源岩浆底侵、不同属性加厚地壳(古老和新生)的部分熔融、长英

质晶粥活化、幕式壳幔岩浆混合和高程度分离结晶控制着东昆仑造山带晚三叠世长英质岩浆岩成因类型多样性。其中, 底侵的幔源 OIB-like 的玄武质岩浆通过高程度的分离结晶可形成 A1 型花岗岩, 加厚新生地壳的熔融以及随后的壳幔岩浆混合分别形成了低 Mg 和高 Mg 埃达克质岩浆岩, 而镁铁质和长英质晶粥岩浆储库的壳内多期次活化和混合则形成了辉长岩-闪长岩-花岗岩等复式岩墙群。本项研究表明, 壳幔岩浆不同方式的混合(熔体-熔体和熔体-晶体)以及不同程度的混合与分离结晶是控制火成岩岩石学多样性的关键, 且 A1 型花岗岩并非仅起源于板内裂谷环境, A1 和 A2 型花岗岩可以共存于造山带相关伸展背景, 其地球化学差异主要受控于岩浆源区和演化过程。

关键词: 壳幔相互作用; 火成岩; 岩石学多样性; 岩浆大爆发

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

藏南林周盆地设兴组时代及其区域对比

杨文凯¹, 赵志丹^{1*}, 莫宣学¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

近年来,林周盆地晚白垩世设兴组沉积岩的物源和沉积时代受到了学术界的广泛关注。碎屑锆石年代学能够揭示沉积岩的物源和沉积时代。但是,目前学者们对设兴组沉积岩的沉积时代和物源缺乏一致的见解。针对这个问题,本文选择了林周盆地中颇具代表性的设兴组沉积岩开展系统研究,就林周盆地设兴组的沉积时代及其区域地质特征进行初步对比。本文研究区主要位于藏南林周盆地,区域上属于冈底斯东段。设兴组地层在林周盆地的春堆村、那嘎寺等地区附近均有出露,这些地层不整合覆盖在林子宗火山岩的不整合面的下部,本文于此处采集了设兴组最高层位的长石石英砂岩,探讨设兴组的沉积时代和区域地质特征。砂岩碎屑颗粒以石英和长石为主,碎屑颗粒的磨圆程度和分选程度均较差。对设兴组沉积岩样品中的碎屑锆石进行 U-Pb 年代学分析,结果表明,本文所研究的设兴组沉积岩中锆石年龄分布极其广泛(92~3021 Ma),设兴组锆石年龄在年龄频谱上表现为具有同拉萨地体相似的年龄峰值,其同拉萨地体具有良好的亲缘性。本文所研究的设兴组沉积岩中最年轻的碎屑锆石年龄为 92 Ma,结合其他人获得的设兴组夹层火山岩的定年结果(约 70~72 Ma)看来,说明设兴组的沉积活动大约出于 92~70 Ma。在锆石微量元素方面,本文的研究数据表明,设兴组砂岩中的

碎屑锆石微量元素数据如 Pb、Ti 存在峰值,可能由于古老的锆石受到变质流体、熔体的作用影响,产生了一定程度的 Pb 损失等。设兴组的年龄分布波形具有同拉萨地体相似的 150 Ma 左右、550 Ma 左右、1150 Ma 左右的年龄峰值,暗示设兴组于拉萨地体具有良好的亲缘性。结合对林周盆地大地构造背景的分析,92~158 Ma 期间,林周盆地经历了中拉萨火山事件以及冈底斯带的隆起,这两个构造变化均为设兴组沉积岩提供了物源。前人在位于堆龙德庆的马乡地区采集过设兴组砂岩样品进行了分析,结合前人报道的设兴组砂岩研究结果表明,设兴组表现为沉积时间短(约 20 Ma 沉积作用时限)、物源区近(拉萨地体为主要物源区),同时形成的砂岩成熟度较低、碎屑矿物缺少分选和磨圆,并且设兴组于晚白垩世时期开始沉积(约 90 Ma),这些结论均与本文所获得的研究结果相吻合。地层方面,林周盆地附近的设兴组地层无明显分布的规律,前人发现林周盆地西部的冲堆地区以及南部的凯布—典中—白定一带的典中组不整合覆盖在设兴组之上,然而东部的古如—达嘎一带则是年波组覆盖于设兴组地层之上。

关键词: 林周盆地; 设兴组; 年代学; 砂岩; 区域对比

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新群体项目“碰撞带地壳演化”(42121002)

第一作者简介: 杨文凯(2000—), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: 3001220054@cugb.edu.cn

通信作者简介: 赵志丹:(1968—), 教授, 研究方向: 青藏高原及邻区, 秦岭-大别造山带, 中国东部等地区, 岩石学和地球化学。Email: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

马利亚纳俯冲带不同构造阶段的地幔源区岩性特征： 来自橄榄石主量和微量元素组成的启示

张紫璇¹, 李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266000

马利亚纳俯冲带的地幔通常被描述为与洋中脊相关的亏损地幔, 主要由橄榄岩 (peridotite) 组成。本研究旨在探讨俯冲过程是否会影响马利亚纳俯冲带下方地幔源区的岩性特征。我们对来自马利亚纳地区不同俯冲环境 (包括岛弧、弧后盆地和初始弧裂谷阶段) 的玄武岩中的橄榄石元素组成进行了综合分析。通过分析橄榄石中的主要和微量元素, 以及关键的元素比值 (如 $10000 \times \text{Zn/Fe}$ 、 Mn/Zn 和 $100 \times \text{Mn/Fe}$), 我们发现来自不同俯冲环境的橄榄石均表现出橄榄岩源区的特征。尽管 Ca 含量在样品之间存在显著差异, 高 Fo 值 ($\text{Fo} > 87$) 且高 Ca 含量的橄榄石与橄榄岩的特征一致。而低 Fo 值 ($\text{Fo} < 87$) 的橄榄石则表现出较低的 Ca 含量, 其成分趋势与辉石岩 (pyroxenite) 一致。这种差异可归因于板片俯冲作用

的影响, 俯冲板片增加了地幔楔中的含水量, 从而促进了 Ca 在熔体中的富集。橄榄石中 Mn 元素的分布表明, 在不同的压力和温度条件下, Mn 具有明显不同的分配特征, 且 Mn 元素的浓度对压力变化特别敏感。这些成分变化对应于橄榄岩演化过程中经历的不同压力条件。在不同的构造环境下, Ni 含量的变化主要受控于岩浆演化, 而温度和压力的影响较小。尽管元素含量存在一定差异, 但我们的研究表明, 无论是在岛弧、弧后盆地还是初始弧裂谷阶段, 马利亚纳俯冲带的地幔源区始终由橄榄岩组成, 俯冲过程的变化并未导致地幔源区岩性上的显著不同。

关键词: 马利亚纳俯冲带; 橄榄石; 地幔源区; 岩浆演化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42476062)

第一作者简介: 张紫璇 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质学. Email: zzixuan@163.com

*通信作者简介: 李晓辉 (1990-), 副教授, 研究方向: 海洋地质学. Email: xiaohuili@ouc.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

新疆上户 NYF 型伟晶岩成因及稀土富集过程:
来自副矿物的约束祝颖雪¹, 王连训^{1*}, 张海军^{2,3}, 杨智全⁴, 张笋⁴

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074;

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心 地质调查研究院, 武汉 430205;

4. 新疆地质局巴音郭楞地质大队, 新疆维吾尔自治区库尔勒 841000

花岗伟晶岩是稀有金属、稀土元素及宝石资源的重要载体之一, 其成矿机制与岩浆过程中的结晶分异或部分熔融密切相关。传统观点认为伟晶岩多由高度分异的花岗质岩浆演化形成, 但某些伟晶岩体(如加拿大的 Tanco 伟晶岩和阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩)缺乏时空上共生的花岗岩侵入体, 促使学界提出深熔派生模式以解释其成因。根据成矿元素的不同, 伟晶岩可分为 LCT 型(Li、Cs、Ta)、NYF 型(Nb、Y、F)及 LCT+NYF 混合型。我国伟晶岩主要分布于阿尔泰、松潘-甘孜、喜马拉雅、阿尔金等造山带及塔里木盆地边缘等构造活跃区, 以 LCT 型为主, NYF 型相对少见。新疆库尔勒上户花岗伟晶岩显著富集稀土元素(REE), 可归类为 NYF 型中的 REE 亚型。上户伟晶岩脉出露于塔里木克拉通北缘库鲁克塔格地块西段的库尔勒基底杂岩中, 该基底杂岩由多种变火成岩和变沉积岩组成, 包括黑云角闪斜长岩、花岗片麻岩、混合岩化斜长角闪岩等。伟晶岩脉出露于混合岩化黑云角闪斜长岩中, 呈北东东-南西西向展布, 与区域构造线一致。其矿物组合除石英(约 40%)和长石(绢云母化, 约 30%)等主要矿物外, 还富含稀土矿物(褐帘石、独居石、硅铈钨矿、磷灰石), 富 Ti 矿物(钛铁矿、榍石), 以及富 Zr 矿物(锆石、钽石)。这些次要或副矿物在岩石中分布不均匀, 局部富集成矿, 并有明显的热液蚀变特征(如独居石→次生磷灰石/褐帘石、钛铁矿→榍石)。岩相学显示矿物结晶顺序依次为: 独居石→硅铈钨矿→钛铁矿→褐帘石→磷灰石, 结合主要矿物含量, 表明岩浆成分富含 Ca、Al、REE 和 Ti。在岩浆演化过程中, 独居石优

先结晶消耗熔体中的磷, 随着钛铁矿与硅铈钨矿共结晶导致钛元素耗竭, 钙含量升高促使褐帘石形成, 进而 REE 含量逐步下降, 最终大量结晶长石和相对贫 REE 的磷灰石。热液蚀变进一步改造这些副矿物, 如独居石常呈现冠状环带结构: 独居石残留核外依次发育次生磷灰石和褐帘石环边, 并包裹大量细小钽石包裹体。通过 TIMA 面扫和质量守恒计算, 可知热液体系富 Ca、Al、Si, 且相对于岩浆阶段更为氧化。矿物原位主微量分析表明, 岩浆期稀土矿物 REE 含量显著高于次生稀土矿物, 次生褐帘石趋向斜黝帘石化, 而交代残余独居石则表现出向硅钽石转化的趋势, 这进一步验证了热液中富 Si 和氧化性强的特点。次生褐帘石的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-23.7~-22.3)与原生褐帘石、独居石和硅铈钨矿的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-23.3~-22.8)相似, 指示交代热液可能与岩浆同源。这些稀土矿物的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值与塔里木克拉通基底麻粒岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-24.4~-22.4)较为接近, 但明显区别于围岩黑云角闪斜长岩($\epsilon\text{Nd}(t) = -14.8 \sim -11.2$), 表明前者更可能是伟晶岩源岩。锆石 U-Pb 年代学结果显示伟晶岩形成年龄为 $1825 \pm 4 \text{ Ma}$, 与 Columbia 超大陆聚合期一致。综上, 我们认为新疆上户 NYF 型花岗伟晶岩是超大陆聚合过程中地壳深熔作用形成的, 进一步的岩浆结晶分异作用促进了稀土矿物的结晶, 这为 NYF 型伟晶岩中稀土元素富集与成矿提供了研究实例。

关键词: 褐帘石; NYF 型伟晶岩; 深熔作用; 稀土元素富集; 新疆上户

基金项目: 国家自然科学基金(42072082), 湖北省自然科学基金(2022CFB116)

第一作者简介: 祝颖雪(1997), 女, 博士研究生(三年级), 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: zyx2019@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 王连训, 男, 中国地质大学(武汉)教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

基于数据增强与机器学习的斜长石-熔体湿度计 及其在不同构造背景下的应用

林嘉敏¹, 刘平平^{1*}, 高剑峰², 薛泽润¹, 张舟³

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

水通过控制硅酸盐熔体的密度、粘度和成分, 而在调控岩浆的动力学过程中起关键作用。然而, 由于氢的高扩散性, 熔体包裹体和矿物中测得的水含量常呈现显著的波动, 且估计结果往往只能作为最小值的参考。相比之下, 基于斜长石的湿度计在准确重建岩浆水含量方面展现出巨大潜力。本研究对文献中收集的 330 个实验斜长石-熔体平衡数据, 采用机器学习方法构建改进型斜长石-熔体湿度计。针对小数据集的限制, 我们通过马尔可夫链蒙特卡洛 (MCMC) 模拟进行数据增强, 将数据集扩展至 3300 个样本。基于增强数据集, 利用极端随机树 (Extra-trees) 算法开发了适用于玄武岩至流纹岩成分 (压力范围为 30~1600 MPa, 温度范围为 563~1220 °C) 的改进型斜长石-熔体湿度计, 预测误差约 0.18 wt.%。为进一步提高模型可解释性和可靠性, 我们采用 SHAP (SHapley Additive

exPlanations) 方法进行特征分析, 发现温度、压力以及熔体的 SiO_2 含量为模型预测过程中贡献度最大的特征。最后, 通过水饱和和熔融实验及三个处于弧、热点和洋中脊环境的典型火山案例: 位于印尼的 Youngest Toba Tuff (YTT)、位于黄石火山的 Mesa Falls Tuff (MFT), 以及位于冰岛东部地区的 Grímsvötn tephra series (Saksunarvatn ash) 的验证计算表明, 该湿度计能以最小的误差精确重现水饱和和熔融实验的水含量, 并比天然火山岩中熔体包裹体的实测最高水含量值系统性偏高。相较于现有方法, 本改进型斜长石-熔体湿度计在确定不同构造环境的岩浆水含量方面有着更高的准确性和更广泛的适用性。

关键词: 岩浆含水量; 斜长石-熔体湿度计; 极端随机树算法; 马尔可夫链蒙特卡洛模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目创新科研小组科学基金项目 (42121003); 国家自然科学基金项目 (42272051)

第一作者简介: 林嘉敏 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩石学与机器学习. Email: linjiamin33@stu.pku.edu.cn

*通信作者简介: 刘平平 (1986-), 研究员, 研究方向: 幔源岩浆作用及其资源效应. Email: ppliu@pku.edu.cn.

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

俯冲带岩石圈地幔对弧岩浆作用成因的意义

于洋^{1*}, 黄小龙², 徐义刚², 钟孙霖³, Iwan Setiawan⁴

1. 山东大学 海洋研究院, 山东 青岛 266237;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

3. 中央研究院地球科学研究所, 台北 011529;

4. Research Center for Geological Resources, National Research and Innovation Agency (BRIN), Indonesia, Bandung 010340

俯冲带是地球地幔与地壳之间物质循环的主要场所。俯冲带岩浆作用在类型和化学组成上变化巨大, 反映了地幔源区中复杂的成因过程。俯冲带岩浆通常被认为源于二端元岩浆形成过程, 包含俯冲板片释放的组分和地幔楔橄榄岩。俯冲组分的加入导致软流圈地幔楔底部橄榄岩发生低温富水熔融, 产生初始熔体。初始熔体上侵, 通过软流圈地幔和岩石圈地幔, 并与周围物质持续发生反应, 最终获得原始岩浆成分。俯冲带原始岩浆应代表地幔中源区熔融过程与熔体上升过程的最终产物。然而, 目前流行的俯冲带岩浆成因模型主要集中在软流圈地幔楔中发生的熔融过程, 对于弧下岩石圈地幔在熔体上升过程中对其成分的改造作用仍然缺乏明确的约束。因此, 我们系统分析了巽他弧玄武岩的 Mg-Fe 同位素, 并综合对比全球俯冲带岩浆成分变化, 揭示弧下岩石圈地幔对俯冲带岩浆作用成因的重要贡献。巽他玄武岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值变化范围为 -0.28‰ 至 -0.05‰ , $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围为 -0.19‰ 至 0.14‰ , 与

全球俯冲带岩浆的同位素值相似。它们表现出较低的 TiO_2/Yb ($0.3\sim 0.5$) 和 Fe/Mn ($30\sim 60$) 比值, 表明其来源于软流圈地幔楔橄榄岩的部分熔融。Mg-Fe 同位素与 ϵNd 的缺少相关性, 表明俯冲相关的交代作用对软流圈地幔楔 Mg-Fe 同位素影响较小。巽他弧玄武岩显示出 $\delta^{26}\text{Mg}$ 与 Fe/Mn 的负相关性, 以及 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 Fe/Mn 的正相关性。这种相关性也在全球俯冲带岩浆中被观察到, 可能反映了初始熔体在穿过弧下岩石圈地幔时, 分别混染了低 Fe/Mn ($30\sim 50$) 的辉石岩和高 Fe/Mn ($50\sim 70$) 的橄榄岩。此外, 俯冲带岩浆的 Mg-Fe 同位素与 V/Sc 比成良好的相关性, 暗示混染岩石圈地幔物质可能是导致俯冲带岩浆氧逸度升高的重要机制之一。因此, 我们认为弧下岩石圈地幔对俯冲带岩浆作用成因具有重要的贡献。

关键词: 俯冲带; 岩浆作用; 岩石圈地幔; 镁同位素; 铁同位素

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0803403), 自然科学基金 (42273046), 山东大学齐鲁青年学者基金, 山东省泰山学者-青年专家基金项目 (tsqn202312001)。

第一作者简介: 于洋 (1988-), 研究员, 研究方向: 岩石地球化学. Email: yuyang0123@email.sdu.edu.cn.

*通讯作者简介: 王连训, 男, 中国地质大学 (武汉) 教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

斜长石稳定性控制弧岩浆拉斑-钙碱性演化趋势

王锦团^{1*}, 李立¹, 熊小林¹, Felix MARXER², 刘星成¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. Leibniz University Hannover Institute of Mineralogy, Hannover, Germany 301670

俯冲带是大陆地壳形成的重要场所, 弧岩浆钙碱性演化趋势是大陆地壳形成的重要机制。越来越多的证据表明弧岩浆的钙碱性演化倾向与上覆地壳厚度相关 (即地壳厚度相关的演化倾向)。地壳厚度通过调控岩浆演化过程中的矿物结晶行为来影响弧岩浆钙碱性演化倾向, 但何种矿物主导了弧岩浆地壳厚度依赖的演化趋势仍存在激烈争议。弧岩浆结晶分异过程中, 斜长石与石榴子石的稳定性均受岩浆结晶压力控制, 因此这两种矿物是调控弧岩浆地壳厚度相关的演化倾向的潜在矿物。我们收集了全球弧岩浆全岩数据, 发现岛弧岩浆早期演化阶段 Dy/Yb 与 La/Yb 比值未发生分异, 不支持石榴子石控制弧岩浆钙碱性演

化的假说。我们还发现 Fe/Al 比值分异也与地壳厚度相关, 这一相关性可通过斜长石结晶随地壳厚增加而受到抑制来合理解释。更重要的是, 矿物/熔体 $Fe-Mg-Al$ 分配实验与分离结晶模拟结果进一步支持斜长石稳定性在调控弧岩浆地壳厚度相关的演化倾向中的作用。为此我们提出斜长石 (而非石榴子石) 主导了弧岩浆地壳厚度相关的演化趋势。本研究揭示了驱动弧岩浆钙碱性演化趋势和大陆地壳形成的内在机制。

关键词: 大陆地壳; 弧岩浆; 钙碱性演化; 斜长石稳定性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42003047)

第一作者简介: 王锦团 (1989-), 副研究员, 研究方向: 实验地球化学. Email: wangjt@gig.ac.cn

*通信作者简介: 王锦团 (1989-), 副研究员, 研究方向: 实验地球化学. Email: wangjt@gig.ac.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

碳酸岩与硅酸岩的成因联系：来自穿岩浆矿物的启示

程志国^{1*}, 张招崇¹, 金子梁², Matthew J. Brzozowski³

1. 中国地质大学(北京)地质过程与找矿预测全国重点实验室, 北京 100083;

2. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078;

3. 长安大学 西部矿产资源与地质工程重点实验室, 西安 710054

碳酸岩与伴生硅酸岩之间的成因联系已在岩石学家们之间争论了数十年。一些副矿物, 如磷灰石和方解石, 可以在不同类型岩浆的分异过程中广泛结晶(可称为穿岩浆矿物), 并记录结晶环境中的地球化学成分变化。因此, 这些副矿物的成分有望为揭示碳酸岩及其伴生硅酸岩的成因联系提供重要的线索。位于中国西北的瓦吉里塔格碳酸岩杂岩体是一个典型的碳酸岩—碱性杂岩体, 由方解石碳酸岩、白云石碳酸岩、方解霞黄煌岩、霞石岩和霓霞正长岩组成。本次研究通过对穿岩浆矿物(如磷灰石和方解石)进行原位地球化学和 C-O 同位素分析, 探讨了不同类型碳酸岩和硅酸岩之间的成因关系。磷灰石的镁含量(Mg_{ap})被证明能够有效记录碳酸岩—碱性杂岩体的演化历史。特别地, 碳酸岩中的 Mg_{ap} 值与方解霞黄煌岩中的磷灰石相似, 但远高于霞石岩和霓霞正长岩

中的值。结合方解石碳酸岩中的方解石与方解霞黄煌岩中碳酸盐球粒的 $\delta^{13}C$ 值相似, 我们提出碳酸岩的母岩浆是通过液态不混溶作用从方解霞黄煌岩中分离出来的。随后, 从不混溶液体中结晶出的方解石和白云石继续形成了方解石碳酸岩和白云石碳酸岩。磷灰石的微量元素和 $\delta^{18}O$ 值表明, 霓霞正长岩的磷灰石呈现出两种成分截然不同的类型: Group-1 型与霞石岩呈现出明显的演化关系, 而 Group-2 型与方解霞黄煌岩有关, 表明霓霞正长岩存在霞石岩和方解霞黄煌岩的双重物质贡献。最终, 我们提出了一个基于碳酸岩碱性杂岩体岩浆储运系统的成因模型来解释碳酸岩与伴生硅酸岩之间的成因联系。

关键词: 磷灰石; 方解石; 碳酸岩-碱性杂岩体; 液态不混溶; 稀土矿化

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

亚洲-印度大陆碰撞后初期岩浆作用： 以西藏拉萨嘎拉山高硅花岗岩为例

钱汝辰¹, 王珍珍¹, 刘栋¹, 赵志丹^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

亚欧-印度大陆碰撞过程及其对青藏高原隆升的重要作用, 是青藏高原地质演化历史的重要课题。岩浆作用记录了大陆碰撞阶段高原演化历史与深部过程, 前人对碰撞时期(65~45 Ma)、碰撞后时期(< 30 Ma)均做了较为详细研究与讨论, 但是对碰撞后早期阶段(42~35 Ma)的岩浆活动报道较少。本文通过南拉萨地块嘎拉山地区晚始新世黑云母花岗岩的岩石地球化学与同位素成分研究, 为该时期的岩浆作用提供了重要线索。嘎拉山岩体位于贡嘎机场北、嘎拉山隧道以西、雅鲁藏布江以南紧靠江边, 与江北的典型曲水岩体隔江相望。岩体主要为黑云母花岗岩, 具有高硅($\text{SiO}_2 = 72\sim 74 \text{ wt}\%$)、偏铝质($\text{A/CNK} = 0.93\sim 1.02$)等特征。岩石富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素, 具有极低的 Co (1.61~6.25 ppm)、Ni (1.29~7.05 ppm) 含量, 高 Sr (312~526 ppm), 低 Y (3.84~11.1 ppm)、Yb (0.42~1.13 ppm), 富集轻稀土元素而亏损重稀土元素, 具有高的 Sr / Y 值 (40.8~100.8) 与 $(\text{La} / \text{Yb})_{\text{N}}$ 值 (33.1~46.8), 显示埃达克

质岩石特征。岩体含有富云母包体, 可见黑云母聚晶。黑云母花岗岩锆石 U - Pb 谐和年龄为 36 - 40 Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +0.1~+5.4, 全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.0~-2.1, 明显不同于雅鲁藏布江北岸的以花岗闪长岩为主要类型的典型曲水岩基(锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > +10$ 、全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +3.3\sim +3.7$)。嘎拉山黑云母花岗岩显示了冈底斯岩基较少见的岩石类型和地球化学特征(高硅、富集 Nd-Hf 同位素), 通过系统岩石学与地球化学分析, 本文认为嘎拉山岩体(1)具有埃达克质特征的黑云母花岗岩形成于增厚下地壳的部分熔融;(2)高硅特征是经历了低压环境下角闪石、黑云母的分离结晶作用, 含硅量中等的岩浆逐渐演化分异的结果;(3)岩体同位素成分指示有一定的富集组分加入, 该富集组分可能是印度陆壳物质或者是俯冲的特提斯洋大洋沉积物。

关键词: 冈底斯岩浆带; 后碰撞; 高硅花岗岩; 岩石成因;

第一作者简介: 钱汝辰(2000-), 博士研究生: 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 3190375745@qq.com

*通讯作者简介: 赵志丹(1968-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. Email: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

碎屑锆石稀土元素相关系数约束造山带演化

胡培远^{1*}, 翟庆国¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

受后期构造事件的影响, 古老造山带的岩石记录往往是不完整的。因此, 仅仅通过岩石记录往往难以全面的了解古老造山带的演化历史。锆石是自然界中常见的含铀副矿物, 不仅可以在经历后期构造、变质事件后保存于岩浆岩中, 也可以在经历风化、搬运等过程后富集于沉积盆地中, 最终成为沉积岩中的碎屑矿物。同时, 锆石是多种与岩石成因密切相关的元素的重要载体, 因而相关元素比值和同位素特征可以作为探索造山带演化的有力工具。在系统总结前人研究工作的基础上, 本研究尝试开发了通过碎屑锆石稀土元素约束古老造山带演化的方法, 即: (1) 在洋-陆俯冲造山带中, 锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值主要受控于母岩浆的源区深度, 因而其变化趋势耦合, 并且与地壳平均厚度正相关; (2) 在陆-陆碰撞造山带中, 虽然母岩浆的源区深度依然是重要的控制因素,

但是由于 S 型岩浆岩比例的上升和不稳定的氧逸度和水含量, 锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值呈现解耦的变化趋势。随后, 本研究通过计算锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值的相关系数 (rdz), 定量刻画了碎屑锆石稀土元素与古老造山带的耦合关系, 即在洋-陆俯冲造山带相对于陆-陆碰撞造山带具有更高的 rdz, 且 $rdz = 0.55$ 可以作为二者的一个经验界线。值得注意的是, 如果碎屑锆石来自多个不同类型造山带, 应当使用 rdz 的变化趋势约束造山带演化过程, 而非单一的 rdz 值。此外, 如果洋-陆俯冲造山带中岛弧岩浆岩的源区受到了地幔柱的影响, 也会产生较低的 rdz 值。

关键词: 碎屑锆石; 稀土元素; 相关系数; 造山带; 地幔柱

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

缅怀我们的导师周新民教授

徐夕生^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

在漫长的教学科研生涯中, 周老师始终秉持立德树人的教育理念, 以身作则, 敬业乐群, 严谨治学, 乐于提携后辈, 教育成果丰硕, 视培养地质学人才与推进科学研究为己任, 将毕生心血倾注于国家的教育事业与地质科学的发展之中。周老师热爱祖国, 为人谦和, 不慕名利, 他的一生是勤勉治学、

无私奉献的典范, 是追求卓越、勇于探索的写照, 深受师生及同行的尊敬与爱戴。作为周老师悉心教导的学生, 在此深切缅怀周老师的几个点滴与谆谆教诲。

关键词: 缅怀周新民教授; 南京大学

徐夕生, 1962 年出生, 南京大学教授, 研究方向: 火成岩岩石学. Email: xsxu@nju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

辽东曲家屯玄武岩的岩石成因研究及其意义

尹焕秋¹, 洪路兵^{1*}, 张银慧¹, 王丹¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西桂林 541006

晚中生代是华北克拉通破坏的关键时期, 定量约束晚中生代岩石圈厚度对理解华北克拉通破坏过程具有重要意义。本文报道了辽东晚白垩世 (~81 Ma) 曲家屯玄武岩的全岩和橄榄石化学组成。结果显示曲家屯玄武岩为碱性玄武岩, 具有洋岛玄武岩的微量元素组成 (Nb-Ta 正异常, 明显的 K 和 Pb 负异常) 和亏损的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(\text{t})=0.7040\sim0.7042$ 和 $\varepsilon\text{Nd}(\text{t})\approx-1.9$) 特征, 指示来源于软流圈。橄榄石斑晶的 Fo 值为 84.0~86.2, Ni、Ca 和 Mn 分别为 977~1823 $\mu\text{g/g}$ 、1234~1667 $\mu\text{g/g}$ 、1345~1833 $\mu\text{g/g}$, Fe/Mn、10000Zn/Fe 和 Mn/Zn 比值分别为 66.9~81.3、

7.4~8.7 和 16.6~19.8, 总体与橄榄岩熔体的橄榄石成分相似。结合全岩 FC3MS 和 FCKANTMS 值与橄榄岩熔体相当, 这表明它们的熔融源区为橄榄岩。曲家屯玄武岩形成时的地幔温压条件为 1298~1325°C 和 2.5~2.7 GPa, 显示形成时的岩石圈厚度为 82~90 km, 略厚于该地区早白垩世的岩石圈厚度 (40~60 km), 指示从早白垩世至晚白垩世, 华北克拉通东部岩石圈可能已经有所增生和增厚, 克拉通破坏已经结束。

关键词: 岩石圈演化; 华北克拉通破坏; 辽东曲家屯玄武岩; 橄榄石化学组成; 源区岩性

基金项目: 广西科技计划项目 (桂科 AD23026332、桂科 AD22035160); 国家自然科学基金项目 (42002057、42172053)

第一作者简介: 尹焕秋 (1998-), 女, 硕士研究生, 地球化学, 3183884097@qq.com。

*通讯作者: 洪路兵, 男, 博士, 副研究员, honglubing@glut.edu.cn。

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

古太平洋板块间歇性俯冲与幕式岩浆响应

赵梦婷¹, 夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 何建强¹, 麻志旺¹, 谭竹¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

东南沿海保存了丰富的晚中生代幕式岩浆活动, 这对理解古太平洋板块在中国东南部晚中生代的俯冲过程至关重要。粤东莲花山断裂带位于东南沿海地区, 隶属于政和-大埔断裂的西南段, 相较于浙闽沿海, 对粤东岩浆作用的研究仍较为薄弱。本文对粤东莲花山断裂带周边不同时期花岗岩及相关岩石开展了详细的岩相学、锆石 U-Pb 定年、全岩主微量元素、全岩 Rb-Sr 和锆石 Hf-O 同位素分析, 重点分析了岩浆起源与花岗岩中暗色包体的成因, 通过汇编已有资料, 查明粤东地区岩浆活动的年代学格架, 提出粤东莲花山地区晚中生代存在四期岩浆活动: 早侏罗世 (192~180 Ma)、中晚侏罗世 (172~150 Ma)、早白垩世早期 (148~130 Ma) 及晚期 (106~94 Ma)。这些花岗岩的地球化学组成变化受控于岩浆的结晶分异作用, 其中早侏罗世与早白垩世暗色包体与寄主岩的

Sr-Nd-Hf 同位素组成一致, 为同源包体。而非岩浆混合作用的产物。早侏罗世闪长玢岩富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 稀土配分图解呈右倾模式, Eu 呈弱的负异常。相对低 SiO₂ (59.85 wt%~62.73 wt%), 高 Al₂O₃ (15.85 wt%~16.01 wt%), 为准铝质-弱过铝质系列 (A/CNK=0.87~1.04), 富钾 (K₂O/Na₂O = 0.76~1.09), K₂O (1.52 wt%~3.66 wt%), $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.1~5.4 ‰, 亏损 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+8.52~+11.06), 具典型弧岩浆特征, 指示古太平洋板块俯冲于东南沿海之下应早于 180 Ma。后续的岩浆作用呈现出明显的幕式活动特征, 这一现象暗示板块俯冲过程并非以恒定速率持续进行, 存在间歇性的板块活动与停滞交替状态。

关键词: 古太平洋板块俯冲; 东南沿海; 粤东; 幕式岩浆作用; 同源包体

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42172052、42472086、41930214)

第一作者简介: 赵梦婷 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 火成岩岩石学. email: 502023290022@smail.nju.edu.cn.

*通信作者简介: 夏炎 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 火成岩岩石学. email: xiayan@nju.edu.cn.

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中的 Fe 同位素分馏

张晓宝¹, 刘建强^{1*}

1. 西北大学地质学系 地质学系, 西安 710069

液态不混溶作为碳酸岩成因模式之一, 熔融模拟实验已经证明在硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中轻的 Fe 同位素在碳酸岩熔体中富集, 而重的 Fe 同位素在硅酸岩熔体中富集。然而这一观察缺乏天然样品的验证, 并且液态不混过程中 Fe 同位素的分馏机制仍然不明确。我们报道了瑞典中部 Alnö 杂岩体中超镁铁质煌斑岩和伴生碳酸岩的高精度 Fe 同位素数据并结合岩相学, 全岩主微量元素以及 Sr-Nd 同位素来讨论硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中的 Fe 同位素分馏行为。Alnö 杂岩体中超镁铁质煌斑岩和碳酸岩具有一致的侵位时间, 并且两者 Sr-Nd 同位素组成重叠 (超镁铁质煌斑岩: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70273\text{--}0.70439$, $\epsilon\text{Nd}(t) = 2.5\text{--}3.6$; 碳酸岩: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70310\text{--}0.70311$, $\epsilon\text{Nd}(t) = 2.4\text{--}2.6$) 指示了它们来源于同一母岩浆。在 Alnö 超镁铁质煌斑岩中可观察到形态各异的碳酸岩球粒, 结合 Alnö 碳酸岩微量元素呈现富集 Sr, Ba, 亏损高场强元素如 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti

元素的特征, 而共轭的超镁铁质煌斑岩则具有 Th-U、Nb-Ta 的正异常, 这些证据都支持 Alnö 超镁铁质煌斑岩和碳酸岩之间液态不混溶的成因联系。Fe 同位素结果揭示 Alnö 超镁铁质煌斑岩 $\delta^{57}\text{Fe} = 0.16 \pm 0.08\text{‰}$; 与其伴生的碳酸岩 $\delta^{57}\text{Fe} = 0.03 \pm 0.04\text{‰}$, $\Delta^{57}\text{Fesil-carb} = 0.13\text{‰}$ 。在排除了低温蚀变、部分熔融、分离结晶等过程对 Fe 同位素组成的叠加影响, 我们得出结论, 在硅酸岩-碳酸岩不混溶过程中存在显著的铁同位素分馏。这与前人熔融实验观察到的分馏结果一致。Fe 同位素的分馏可能受到硅酸岩熔体和碳酸岩熔体不同的聚合网络提供不同的铁键强度以及 Fe 不同价态在矿物及熔体中富集状态不同等因素的影响, 最终导致轻的 Fe 同位素在碳酸岩熔体中更加富集, 而硅酸岩熔体更富集更重的 Fe 同位素。

关键词: 碳酸岩; 超镁铁质煌斑岩; 碱性杂岩体; 液态不混溶; 铁同位素分馏

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

滇东南个旧杂岩体岩石成因、岩浆源区及对锡成矿的地质意义

王春天¹, 郑晓军^{1*}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明市 650000

个旧是世界上最大的锡多金属矿集区之一, 该区岩浆活动强烈, 发育多种杂岩体, 尽管前人开展大量研究, 但仍缺乏对各种杂岩体成因以及与成矿关系的系统对比研究。本文以各种杂岩体为研究对象, 通过开展全岩主、微量元素地球化学分析, 试图厘定上述岩石的岩浆源区及岩石成因, 并对锡多金属成矿进行指示。结果表明各种杂岩体岩石地球化学特征和成因存在显著差异, 辉长岩、二长、闪长岩及正长岩形成于来自富集地幔的母岩浆经历了有限的地壳混染; 花岗岩来源于幔源岩浆与壳源岩浆发生混合作用, 既有物理混合又有元素相互扩散作用的影响。此

外, 从 Y、Rb 等微量元素特征显示, 个旧花岗岩具有 S 及 I 型花岗岩的特征。花岗岩在许多 Harker 变异图上呈现连续的演化模式并且经历了两阶段的分离结晶过程, 结合全岩 Nb/Ta、Zr/Hf 等分离结晶指标表明, 岩浆的演化趋势最终产物为高演化的等粒黑云母二长花岗岩, 分离结晶可能是控制岩浆演化的主要成岩过程。由于高温熔融以及黑云母分解反应, 推动了世界级个旧锡矿的形成。

关键词: 滇东南个旧; 杂岩体; 微量元素; 岩浆演化; 构造环境

基金项目: 云南省科技计划项目 (202202AG050006); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目 (云人社通[2020]150 号)

第一作者简介: 王春天 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学.Email: 2879126291@qq.com

*通信作者简介: 郑晓军 (1983-), 高级工程师, 研究方向: 水工环地质和地质灾害防治.E-mail: zh5101126@163.com

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

粤东晚中生代两阶段岩浆作用对 Sn-(W) 成矿的约束

麻志旺¹, 夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 赵梦婷¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

钨锡都是亲石元素、地球化学行为相似, 但钨矿往往分布于稳定的克拉通内部, 锡矿的分布多与深大断裂、强烈的壳幔相互作用有关, 地幔物质如何影响钨锡分异目前尚未得到深入研究。粤东地区莲花山断裂带发育了一系列早白垩世斑岩型 Sn-(W) 矿床(如厚婆坳、金坑、长埔等), 是研究活动大陆边缘 Sn、W 关键金属元素和 F、Cl、H₂O 等挥发分循环和富集过程的天然实验室。我们对粤东地区田东 Sn-(W) 矿床的角闪石花岗岩和黑云母花岗斑岩开展了系统的全岩主微量元素、锆石 U-Pb-Hf-O 同位素和黑云母主量成分研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示存在两期花岗质岩浆作用(163~159 Ma、143~135 Ma), 并在早白垩世岩体中发现大量晚侏罗世继承锆石(K1 岩浆锆石: J3 继承锆石=100: 36), 早白垩世花岗质岩浆可能是晚侏罗世晶粥重新活化的产物。晚侏罗世岩体和早白垩世岩体都具有高 SiO₂ (>69.61wt%)、准铝质到过铝质(0.95~1.20)、高 Ga/Al*10000 比值(1.5~3.0)和高场强元素(Zr、Nb、Ce、Y)含量的特征, 全岩锆饱和温度相似(772±

28℃、755±18℃), 且 Ga/Al*10000 与 Zr+Nb+Ce+Y 含量呈负相关, 说明两期岩体都属于铝质 A 型花岗岩。晚侏罗世、早白垩世岩浆锆石的 Hf-O 同位素组成分别 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -5 \sim -3$ 、 $\delta^{18}\text{O} = 7\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -4 \sim 0$ 、 $\delta^{18}\text{O} = 5\text{‰} \sim 6\text{‰}$, 表明晚侏罗世黑云母花岗斑岩起源于地壳物质的重熔, 而早白垩世黑云母花岗斑岩是在幔源岩浆注入下晚侏罗世岩浆房重熔的产物。粤东基底 Sn 元素含量(~1.48 ppm)远低于南岭基底(10~30 ppm), 晚侏罗世岩体 Sn 元素含量最高可达 10.5 ppm, 粤东晚侏罗世岩浆对基底中的 Sn 元素完成了萃取和初步富集, 为之后锡的富集成矿提供了重要的基础。但晚侏罗世岩体黑云母 F、Cl 含量(0.00±0.00 ppm、0.14±0.10 ppm)低, 早白垩世黑云母(0.16±0.10 ppm、0.17±0.17 ppm)高, 表明幔源岩浆向岩浆房提供的 F、Cl 组分是粤东地区最终在早白垩世锡矿大规模发育的重要因素。

关键词: 莲花山锡矿带; 锡矿花岗岩; 晶粥再活化; 氟氯挥发分

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大型花岗质侵入体是如何形成的？

马昌前^{1*}

1. 中国地质大学（武汉）地球科学学院，武汉 430074

大型花岗质侵入体的形成涉及一系列复杂的岩浆动力学过程，包括岩浆的抽取、上升、侵位、组装及其在地壳中的演化。其中，岩浆侵位是指岩浆在地壳中的运移和占位过程，而侵入体的组装则涉及岩浆在储库中的充填和排列方式。近年来，随着地球物理探测和地球化学分析的进展，侵入体的形成机制得到了新的认识。岩浆侵位的核心问题是如何获得占位空间。主要的侵位方式包括：（1）围岩向下位移；（2）围岩向上位移；（3）围岩横向位移；（4）围岩无明显位移。这些过程受围岩的流变学性质、岩浆压力及区域构造应力的共同影响。此外，研究表明，岩浆上升至地壳的脆-韧性转换带后，围岩不再发生显著的韧性变形，导致岩浆侵位的终止。侵入体的组装通常经历一个渐进的积累过程，而非单次大规模的岩浆注入。目前，主要的侵入体组装模式包括：（1）层叠式板状侵入体，由多个岩浆脉冲按层叠方式堆积，例如意大利 Elba 岛侵入体和东昆仑南山口岩基；（2）嵌套式带状侵入体，由多股岩浆依次呈环带状分布，如北京周口店岩体和美国 Tuolumne 侵入岩系；（3）积聚式楔状侵入体，由多个楔状侵入单元积聚形成的大型侵入体，如鄂

南-湘北幕阜山岩基。不同的组装方式反映了岩浆供给模式、区域构造环境及围岩性质的差异，并可能呈现出不同的分异机制、岩体-围岩相互作用和成矿过程。岩浆侵位和侵入体的形成对地壳稳定性、成矿作用及大陆生长具有重要影响。研究表明，造山带环境中的侵入体往往经历增量式侵位，而与超级喷发相关的大型岩浆房可能在较短时间内快速形成。此外，大型侵入体的形成可能与下地壳物质的侧向流动或挤出有关，这一过程通过地表隆升或弧后区域的收缩得以实现。尽管近年来对侵入体形成机制的研究取得了重要进展，但仍存在诸多未解之谜，例如：（1）不同侵入体组装模式的控制因素；（2）岩浆脉冲的生长顺序是否具有规律性；（3）侵入体形成与地壳演化、资源富集之间的关系；（4）如何利用成因分析和热力学模拟进一步约束岩浆侵位过程。未来研究应结合地球物理探测、岩石学分析与数值模拟，以深化对大型侵入体形成机制的理解，并探索其在地球动力学背景下的演化模式。

关键词：“空间问题”；花岗岩成因；侵位和组装机制

基金项目：国家自然科学基金重点项目（42130309）。

作者简介：马昌前（1958-），博士，教授，研究方向：花岗岩地质学。Email: cqma@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

南秦岭沉积物源与构造演化：来自晚白垩世碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的证据

王伟¹, 崔亚圣¹, 余浩宇^{1*}, 辛杰¹, 李乐¹, 杨迪¹, 胡远清¹

1. 湖北省地质科学研究院 (湖北省富硒产业研究院), 武汉 430034

南秦岭晚白垩世浙川盆地与郧阳盆地保存了关键的造山带沉积记录, 为揭示区域沉积-构造演化提供了重要资料。本研究基于两盆地中三件晚白垩世寺沟组砂岩样品的碎屑锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素分析, 系统厘定了地层沉积时代、物源特征及其构造关联。结果表明, 碎屑锆石年龄谱以新元古代 (910~720 Ma)、早古生代 (490~430 Ma)、晚三叠世 (210~230 Ma) 和早白垩世 (140~118 Ma) 为主峰, 次峰集中于古元古代 (1.9~1.8 Ga) 和太古宙 (2.9~2.5 Ga)。Hf 同位素具有规律性分异特征: 晚三叠世锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值轻微负偏 (-5.8 至 -1.4), 反映其源区来自基底物质部分熔融, 与秦岭中广泛存在的同期火山活动相符; 早白垩世锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显著负偏 (-26.8

至 -4.6), 指示古老陆壳物质的再循环, 为伴随新生地壳贡献。物源解析表明, 浙川盆地与郧阳盆地的碎屑物质源自华北克拉通、北秦岭造山带、南秦岭造山带及扬子克拉通。其中, 晚三叠世锆石与勉略洋闭合后碰撞隆升引发的剥露作用有关, 早白垩世锆石则来源于后碰撞伸展背景下的造山带塌陷。晚白垩世锆石的缺失与断裂控制的局部流域系统相吻合, 表明晚白垩世秦岭造山带存在显著的陆内变形特征。本研究为南秦岭多阶段构造体系转换提供了关键证据, 深化了对地壳组成、演化以及圈层相互作用的认知。

关键词: 南秦岭造山带; 碎屑锆石; 构造演化; 晚白垩世

第一作者简介: 王伟 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 岩石地球化学.Email: efvhgbth@foxmail.com

通讯作者简介: 余浩宇 (1995-), 助理工程师, 研究方向: 岩石地球化学.Email: 674145818@qq.com

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

塔里木盆地北部二叠纪辉绿岩的发现: 时空分布、成因机制及动力学启示

陆鹿^{1*}, 张银涛², 谢舟², 许永忠¹, 康鹏飞², 李壮福¹, 魏菱¹, 陈皓宇¹, 汤恒昊¹

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国石油股份有限公司塔里木油田公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

塔里木二叠纪大火成岩省成因及深部动力学过程是目前地球科学领域的研究热点。该大火成岩省内产出多种岩性, 包括玄武岩、英安岩(流纹岩)、镁铁质-超镁铁质侵入岩、碱性岩(碱性花岗岩、正长岩、煌斑岩、碳酸岩)等。对于不同岩性之间的时空关系及成因机制的研究, 是深入理解塔里木大火成岩省形成过程的关键。镁铁质-超镁铁质侵入岩是塔里木大火成岩省中的重要组成单元, 前人研究表明其局限于西部巴楚地区, 位于大火成岩省的边缘, 侵入于 280 Ma 左右, 整体晚于玄武岩的喷发时代。基于这一特征, 结合大火成岩省内部不同岩性单元的时空分布及成因机制, 一些学者提出“孵化型”两阶段地幔柱活动模式。然而, 在塔里木大火成岩省中的其他地区是否也有镁铁质-超镁铁质侵入岩的分布, 其时代是否真如前人所言整体晚于玄武岩的喷发, 目前依然无法明确。本文通过对塔里木油田公司大量石油钻井的分析, 在塔里木盆地北部阿满过渡带发现大量辉绿岩侵入体, 并对其进行了系统分析, 包括地震资料解译、宏微观岩相学观察、U-Pb 同位素定年、全岩主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析等。地震资料解译揭示出辉绿岩的两种产状类型, 即顺层侵入和碟状侵入。磷灰石 U-Pb 定年结果表明, 辉绿岩年龄在 308~262 Ma 之间, 可进一步划分为 308~298 Ma

和 286~262 Ma 两个侵位阶段。早期侵入体在研究区内零星分布, 而晚期侵入体则分布较为广泛, 并构成研究区内辉绿岩侵入体的主体。辉绿岩在地球化学上表现出碱性、富钠、高钛特征, 并具有较为一致的稀土元素和微量元素配分模式, 分别以 LREE 和高不相容元素富集为特征, 无 Eu 异常, 而 Ba 和 Pb 明显正异常。全岩 Sr-Nd 同位素组成相对亏损, $Sr_i = 0.704907-0.707392$, $\epsilon Nd(t) = 0.60-2.75$ 。元素和同位素特征表明辉绿岩在组成上与 OIB 相似, 因此它们的起源与地幔柱有密切的联系。具体而言, 辉绿岩很可能来源于地幔柱的部分熔融, 并伴有一定程度的地壳混染和结晶分异。该项研究突出贡献在于在塔里木大火成岩省内部新发现了镁铁质-超镁铁质岩的分布区, 表明塔里木大火成岩省内的基性-超基性侵入岩的分布比以往认为的更加广泛(大火成岩省内部和边缘均有分布), 而侵位时间跨度也更加漫长(跨越整个塔里木大火成岩省的生命周期)。除此之外, 基于这一新发现, 结合前人研究成果, 重构了塔里木大火成岩省形成过程的深部壳-幔作用模式。

关键词: 塔里木大火成岩省; 辉绿岩; 二叠纪; 地幔柱; 壳-幔作用

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

青藏高原始新世岩浆大爆发的精细过程及气候环境效应

纪伟强^{1*}, 陈厚彬¹, 张少华¹, 吴福元¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

青藏高原广泛发育新生代岩浆活动,其中以拉萨地块早始新世岩浆活动最为剧烈(峰期为~50 Ma),包括林子宗群火山岩和冈底斯岩基同期侵入岩。具有成因联系的火山岩和侵入岩的研究,不但能揭示火山喷发的规模和形式,还能揭示岩浆储库的动力学过程。前人研究表明,旁多盆地保留了大面积的始新世火山岩(帕那组)和侵入岩,主体都形成于~50 Ma,为研究始新世岩浆大爆发的精细过程提供了理想对象。研究团队对该地区进行了详细的野外调查、样品采集和室内研究工作,发现旁多盆地帕那组火山岩和侵入岩具有密切的成因联系,构成了旁多火山-侵入杂岩。其中高硅流纹岩、熔结凝灰岩和花岗斑岩代表了岩浆储库中提取的高硅熔体,石英二长斑岩代表了残存的堆晶;熔体和堆晶在主量元素和微量元素组成上具有较明显的互补关系(如 SiO_2 、Eu 异常等)。石英二长斑岩和粗面英安岩则属于补给的偏基性岩浆、高硅熔体和堆晶体混合的产物。基性岩浆注入导致了旁多地区的火山喷发和不同类型火山-侵入岩的形成。野外发现石英二长岩与花岗斑岩之间呈渐变过渡关系,石英二长岩局部存在长石等骨架矿物的平行排列,斜长石边缘发育膝折现象(指示压实应力影响)。骨架矿物的水平定向,有利于粒间熔体排出并沿着垂直方向聚集和向上运移,进而导致熔体抽提和火山喷

发。水平定向和压应力模拟研究揭示了 20%~30% 的压缩应变率,这可以导致熔体抽提速率提高 15 倍以上,有效促进了高硅熔体的提取和喷发。旁多盆地帕那组火山岩分布面积超过 1900 km^2 ,以前人得到的火山岩层序厚度(2 km)来计算,其致密岩石当量(DRE)超过 3000 km^3 ,远远超过超级火山喷发的判别标准(450 km^3)。在整个拉萨地块,南木林盆地、雄巴盆地、桑桑盆地等地区帕那组火山岩的发育规模也都明显超过了超级火山喷发级别,帕那组总的分布面积超过 16 000 km^2 。地球化学研究表明帕那组火山岩与高 $\text{CO}_2/\text{S}_\text{T}$ 比值火山岩成分相似,表明岩浆源区比较富集含碳物质,火山活动相关的碳释放量也较高。如果考虑岩浆活动相关的变质碳释放,拉萨地块始新世时期会具有更高的碳释放潜力。特提斯造山带东段,从青藏高原南部到东南亚地区(>6000 km)都广泛发育的早始新世岩浆活动(52~50 Ma),估算的碳释放通量上限可以与白垩纪全球大陆弧的碳释放通量相媲美。这些始新世岩浆活动导致的碳释放将引起大气圈 CO_2 浓度的显著升高和同期温室气候发育(即早始新世气候适宜期)。

关键词: 青藏高原; 始新世岩浆大爆发; 岩浆过程; 气候环境效应

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

东南沿海白垩纪侵入岩硅同位素组成及其岩石成因指示

郭锋^{1*}, 欧阳一帆², 赵亮¹

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100;
2. 湖南省地球物理与地球化学调查所, 长沙 410014

东南沿海地区地处西太平洋活动大陆边缘,中生代以来受到了太平洋板块俯冲与后撤作用的直接影响。区域上发育了大规模的岩浆作用,伴生了世界最具特色的金属成矿作用,是我国关键金属矿产资源的重要基地。尽管前人对区域火成岩成因开展了大量的研究工作,但是有关俯冲再循环地壳组分性质以及岩浆侵入过程中的流体活动影响等仍存在认识上的分歧。本研究选择中国东南沿海地区(包括福建漳州、泉州、福州和平潭)具有不同类型(I型和A型)和成分(从镁铁质到长英质岩石)的白垩纪侵入岩开展了全岩和钠铁闪石 Si 同位素分析,运用硅同位素分馏原理探究了岩浆源区、分异过程和流体-岩石相互作用对硅同位素变化的影响,进而为揭示其岩石成因机制提供了新视角。(1)东南沿海地区白垩纪不同成分和类型的侵入岩之间存在明显的硅同位素分馏。其中I型(包括二长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩)的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.170\sim -0.161\text{‰}$,平均值为 -0.013‰ ;A型花岗岩的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.062\sim -0.041\text{‰}$,平均值为 -0.002‰ ;具有类似 SiO_2 的I型比A型花岗岩更富集 ^{30}Si ;基性侵入岩(富闪侵入岩和辉长岩)的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.437\sim -0.031\text{‰}$,平均值为 -0.296‰ 。(2)白垩纪钙碱性系

列辉长岩-闪长岩-花岗岩具有明显高于“火成岩序列”演化线的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值,在变化趋势上与“火成岩序列”的演化线趋势相吻合,样品之间的 $\delta^{30}\text{Si}$ 变化主要受控于岩浆分离结晶作用的影响。结合前人来自全岩地球化学的研究结果,这些钙碱性系列侵入岩相对较重的硅同位素组成可能与古太平洋板块俯冲作用背景下,地壳组分(如海洋沉积硅质岩或硅化玄武岩)的再循环过程相关。与之相反,同期的富闪侵入岩投点于“火成岩序列”下方,具有相对更低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。这些样品的低 $\delta^{30}\text{Si}$ 主要归因于岩浆演化过程中含水矿物相如角闪石堆晶作用的影响。(3)钠铁闪石单矿物的 $\delta^{30}\text{Si}$ 变化在 -0.665 到 -0.542‰ 之间,平均值为 -0.603‰ ,平均 $\Delta^{30}\text{Si}$ 全岩-钠铁闪石 $= -0.605\text{‰}$ 。同位素模拟计算得到全岩与钠铁闪石的硅同位素分馏系数为 $a_{\text{全岩-钠铁闪石}} = 0.288\text{‰}$,二者之间仍存在较大的 $\Delta^{30}\text{Si}$ 差异(约 0.317‰)。根据硅同位素在流体-岩石中的分馏模拟计算结果,富F的碱性热液流体是导致钠铁闪石进一步偏轻Si同位素组成的主导因素。

关键词: 硅同位素地球化学; 岩浆演化; 流体作用; 白垩纪侵入岩; 东南沿海

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大陆与大陆地壳

王浩^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化学科中心, 北京 100029

大陆是人类赖以生存的物质基础, 大陆地壳提供着人类所需的主要矿产资源, 因此揭示大陆地壳的产生、演化及稳定暴露至海平面之上的过程是固体地球科学领域重要的议题, 然而目前学界对这一问题仍缺乏统一的认识。现今大陆地壳在地球化学组成上与岛弧岩浆岩具有诸多相似之处, 因此多数学者相信现今陆壳形成于俯冲带环境, 然而洋弧地体以基性岩为主, 而成熟的大陆地壳则具有麻粒岩为主的下地壳、闪长质的中地壳以及花岗质的上地壳, 初始的洋弧地体如何转变为具有典型结构和成分分层特征的大陆地壳是目前固体地球科学领域重要的研究议题。此外, 在地球形成早期, 地温梯度很高, 不能形成持续稳定的俯冲作用, 也不具有全球联动的板块构造, 那么在缺乏板块构造的地球早期, 大陆地壳是如何形成的? 同样由于地温梯度较高, 岩石圈强度较低, 早期地球地表的高差较小, 无法形成持续稳定的出露在海平面之上的大陆。那么, 持续稳定暴露在海平面之上的大陆是何时出现的? 是何种机制导致大陆地壳可以长期暴露在海平

面之上? 本文以南非和华北两个克拉通为切入点深入探讨了地球早期(>3.2 Ga)陆壳的生长与演化方式, 结合地幔与地壳两方面的研究判断在古太古代以前, 地球应该不存在全球联动的板块构造。大陆地壳暴露至海平面之上的过程不仅是地球深部动力学机制的显著变化, 也会引起全球表生环境的明显响应。综合判断地球深部动力学机制与地表响应的全球地球化学指标, 才是准确探讨这一问题的关键。综合来看, 3.0 Ga 似乎是一个重要的时间节点, 但需要更多地球化学和数值模拟结果的支持。综合华北克拉通南北缘的古生代岩浆活动特征判断, 显生宙以来的陆壳增长以洋弧地体的侧向增生为主, 在发生弧-陆碰撞的过程中或之后的短暂时间内, 洋弧地壳发生了明显的结构分层, 迅速转化具有典型结构和成分特征的大陆地壳。而陆弧地区的岩浆活动主要以地壳再造为主, 陆壳净增长量有限。

关键词: 大陆地壳; 地壳暴露; TTG; 地壳翻转; 增生造山

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

中国东北五大连池新生代钾质火山岩的 地幔源区岩性特征

赵雨潇¹, 葛子奕¹, 曾罡^{1*}, 李宇¹, 刘建强², 陈立辉², 于浩远¹, 周中彪¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210000;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 西安 710000

橄榄石是玄武质岩浆早期分异过程中主要的矿物相, 其结晶过程同时影响岩浆中 Ni、Mn 等元素的配分, 研究橄榄石的地球化学成分, 可以更好地理解源区地幔的物质组成与岩性特征。前人研究发现, 中国东北钾质火山岩源区可能存在大量再循环组分, 如沉积物、洋壳等。因此, 通过研究钾质火山岩中的橄榄石斑晶, 厘定其地幔源区的岩性, 就能为理解这些地表物质的深部循环提供重要约束。本文对五大连池这一典型的钾质火山岩区开展了系统的采样, 选取了其中小孤山、莫拉布山等 12 座火山中的橄榄石斑晶进行分析研究。研究发现, 五大连池火山岩中结晶的橄榄石成分呈现出显著的不均一性。部分橄榄石具有偏低的 Mn/Fe 比值与中等程度的 Ni/(Mg/Fe) 比值,

与前人研究结果一致, 与榴辉岩来源熔体结晶的橄榄石成分相符; 另一部分橄榄石则呈现出高 Ni 含量和高 Fe/Mn 比值, 与反应辉石岩来源熔体结晶的橄榄石成分一致。这一发现再次证明了中国东北钾质火山岩源区地幔在岩性上的复杂多样性。进一步的计算模拟表明, 榴辉岩(高硅)的存在是解释五大连池火山岩高 FeO/MnO 比值的关键。该再循环组分部分熔融形成的熔体在上升过程中, 经历熔体—橄榄岩的相互作用, 最终结晶的橄榄石成分能够解释五大连池火山岩中橄榄石斑晶的 Fe/Mn 成分变化特征。

关键词: 钾质火山岩; 橄榄石斑晶; 榴辉岩; 五大连池; 中国东北

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322202、42130310)和中央高校基本科研业务费项目(2024300389)

第一作者简介: 赵雨潇(2000—), 硕士在读, 研究方向: 岩石学. Email: zhaoyxemail@126.com

*通信作者简介: 曾罡(1985—), 副教授, 研究方向: 火成岩与地幔地球化学. Email: zgang@nju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华南基底岩石的流体助熔及花岗岩成因

丁兴^{1*}, 李嘉豪¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

花岗岩是大陆地壳的主要组成部分,其形成与陆壳基底岩石的部分熔融直接相关。传统上,人们普遍认为地壳岩石部分熔融的过程缺乏流体参与,以脱水熔融为主。然而地壳深处存在着广泛的流体活动,特别是在俯冲带地区,因而流体助熔近年来越来越受关注。作为降低活化能的介质和溶解挥发分的溶剂,流体的参与很可能会显著改变部分熔融体系的物理、化学性质;而成矿金属大多对挥发分具很强的化学亲和力,它的地球化学行为也一定程度上受到挥发分的影响。自然界这些富挥发分的流体如何影响基底岩石的部分熔以及如何影响成矿金属的地球化学行为,至今仍缺乏针对性的系统研究,这导致我们对花岗岩的源区过程以及其成矿专属性的认识存在明显不足。

华南属于环太平洋成矿带,自晚中生代以来就受控于(古)太平洋板块俯冲的影响,这导致华南深部地壳遭受了广泛的流体改造或交代作用。为了明确含氟流体对花岗岩源区岩浆过程中稀土元素地球化学行为的影响,本文采用华南代表性的高稀土片麻岩和低稀土片麻岩作为初始物质,与~4 wt.%的流体(纯水、1.5M HF、1.0M NaF)在 0.8 GPa、1000 °C 的条件下开展了流体助熔的部分熔融实验。实验结果表明所有片麻岩的熔融程度达到 40%以上,残余矿物组合主要为斜长石+石英+斜方辉石±单斜辉石+钛铁矿+磷灰石±黑云母。部分熔融产生的熔体的成分主要为花岗

闪长质-花岗质,总体具有高氟(0.11~0.27 wt.%)、高水(0.38~1.86 wt.%)和 A2 型花岗岩的特征;其中,高稀土片麻岩部分熔融形成的熔体为钾玄质和准铝质,而低稀土片麻岩熔融形成的熔体偏高钾钙碱性和强过铝质。两者在微量元素蛛网图上均表现为 K、Rb、Th、Ce、Sm、Y、Yb 等元素的正异常和 Ba、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等元素的负异常;稀土配分曲线则表现为右倾、Eu 轻微负异常的特征。相对于原岩,含氟流体助熔会强化熔体中 Si、K、Na、Rb、Sr、Ba、Th、U、LREE 和 F 的富集,并增加熔体的 LaN/YbN 比值。同时,实验也证实片麻岩部分熔融形成的熔体的稀土元素含量主要受原岩控制,高稀土片麻岩更易于熔出稀土元素初始富集的熔体;相对于原岩,各类流体助熔均会造成稀土元素在熔体中不同程度的富集,其中,含 HF 流体最高可富集稀土 46%~49% (近 1.5 倍富集)。由此本文特别强调含 F 流体的参与在形成华南 LREE 型和 HREE 型成矿花岗岩的重要作用。此外,本文也提出了一种新的 A2 型花岗岩形成机制,即含 F 流体助熔地壳基底岩石,这可以很好地解释华南晚中生代大规模分布的与稀土、稀有金属及氟成矿相关的陆内 A2 型花岗岩的形成。

关键词: 含氟流体; 含氯流体; 流体助熔; 片麻岩; 花岗岩

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

阳原碱性玄武岩结晶演化的矿物学记录： 热力学和动力学意义

杨宗锋^{1,2,3*}, 张馨月¹, 申俊峰³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京市海淀区学院路 29 号 100083;
2. 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 北京市海淀区学院路 29 号 100083;
3. 中国地质大学(北京)成因矿物学研究中心, 北京市海淀区学院路 29 号 100083

橄榄石作为镁铁质岩浆中的主要结晶相,对于解释岩浆过程至关重要。然而,利用橄榄石来解读岩浆历史往往因不平衡结晶导致复杂的分带模式而变得复杂,这些模式尚未得到完全理解。先前的研究未能充分探讨快速结晶与晶内扩散过程之间的相互作用在这些分带模式生成中的作用,从而在我们对岩浆演化的理解中留下了显著的空白。在本研究中,我们对阳原碱性玄武岩中的骨骼状橄榄石晶体进行了二维元素分布的全面分析,并辅以全岩、单斜辉石、尖晶石和磁铁矿的成分分析。通过将 these 成分分析与 Rhyolite-MELTS 分离结晶建模、晶内扩散模拟以及成分边界层效应相结合,我们阐明了这些分带模式的形成机制。研究表明,不平衡结晶主要受生长的速率和机制变化驱动,主导了橄榄石中复杂分带的形成,而晶内扩散则起次要作用。主要观察结果包括富磷成分边界层,从同心环到由富磷带连接的骨骼结构的转变,以及 Fo 和 NiO 正环带加局部震荡环带、 Al_2O_3 和 P_2O_5 的振荡分带,其中高 Fo 和 NiO 与低 P_2O_5

和 Al_2O_3 相对应,同时表现出各向异性的元素关系。多个橄榄石晶体的近同时成核与连续生长——这一过程虽在玄武岩结晶实验中少见但在理论上已被预测——驱动了所有造岩矿物的成分多样性,而单斜辉石和尖晶石中的某些成分特征归因于快速的不平衡结晶。估计的结晶时间范围为从成核到淬火的 10 至 30 天,表明短寿命的岩浆系统能够保留元素的振荡分带和 Fo-NiO 的各向异性协变,而长寿命系统可能仅保留各向异性,具体取决于初始 NiO 各向异性的程度和晶内扩散的持续时间。本研究强调了在未来橄榄石分带模式研究中进行高分辨率、精确分析的必要性,以增进我们对岩浆结晶过程中动态熔体环境的理解。未来应用橄榄石示踪源区和约束岩浆演化过程时,值得评估快速不平衡结晶作用的影响,因为这种效应可能引起矿物单晶尺度各种元素和同位素的显著分异。

关键词: 橄榄石; 玄武岩; 非平衡结晶; 成分环带; 晶内扩散

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华北晚中生代地质演化与古太平洋板块俯冲

马强^{1*}, 徐义刚², 郭建芳¹, 钟玉婷², 郑建平¹, 张超¹, 邹祖阳²

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

自中生代以来, 西(古)太平洋板块持续向东亚大陆俯冲, 深刻影响了东亚陆缘的中新生代地质演化。然而, 关于古太平洋板块的中生代俯冲历史仍不清楚, 该过程对岩浆活动、构造作用、盆地发展及浅表系统的控制作用也尚不明。我们通过大尺度岩浆分布规律、高分辨率年代地层学及典型盆地岩浆演化序列等多角度研究了华北克拉通中生代岩浆、构造、沉积等事件的迁移规律, 厘定了各事件的时空序列,

并为岩浆作用、燕山运动 B 幕、板块前进-后撤转换、燕辽生物群、早期热河生物群等重要事件提供了高精度的年代学约束。研究发现, 华北中生代岩浆-构造-沉积-生物事件具有“穿时性”的协同演化特征, 为华北中生代地质演化受古太平洋板块俯冲与后撤控制提供了关键证据和新约束。

关键词: 古太平洋板块俯冲; 华北克拉通; 穿时

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华北克拉通侏罗纪淡色花岗岩成因及稀有金属成矿

范文博^{1,2,3*}, 姜能³, 翟明国^{2,3}, 胡俊^{3,4}, 胡洋², 郑欢², 鲍霖⁵, 渠森²

1. 陕西理工大学, 陕西 汉中 723001;

2. 西北大学, 西安 710069;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029;

5. 江西省地质局有色地质大队, 江西 赣州 341000

淡色花岗岩及与之相关的伟晶岩, 是稀有金属成矿的一种重要岩石类型, 在 Nb、Ta 等战略性关键矿产资源的的研究中具有重要地位。在我国, 与此类花岗岩有关的稀有金属矿床主要出现在华南南岭地区。近年来, 在喜马拉雅造山带的淡色花岗岩内, 也发现了与之类似的稀有金属矿床, 再次引起了学术界对此类岩石成因及其与稀有金属成矿关系的关注。显生宙时期, 位于中国东部的华北克拉通内, 是否也存在类似的淡色花岗岩和稀有金属矿床呢? 带着对这一问题的思考, 我们对华北克拉通前人已有的研究资料进行了梳理, 并在冀东地区开展了详细的野外地质观测、岩石学、矿物学、岩石地球化学及铌钽铁矿 U-Pb 年代学等研究工作。综合研究发现, 华北克拉通冀东地区, 的确存在着一些以二云母或白云母花岗岩为主的侏罗纪淡色花岗岩, 部分岩体还发现了石榴石、铌钽铁矿、锆石、独居石、萤石、黄玉等多种副矿物。与此同时, 一些岩体的 Nb、Ta 等稀有金属元素含量, 明显高于此类花岗岩型矿床的边界品位, 且与江西宜春雅山 414 矿床等可以比拟, 并显示岩体整体成矿的特点, 成矿潜力大。矿物成分、稀土元素四分组效应与 Nb/Ta、Zr/Hf、Rb/Sr 比值以及 CaO、Ba、Sr 等元素含量的差异性指示, 这些淡色花岗岩经历了不同程度的岩浆分异作用, 部分还受到了岩浆演化晚期熔-

流体相互作用的强烈影响。铌钽铁矿的岩相学观察, 也支持 Nb、Ta 的成矿与成岩时代接近, 且二者存在着密切的成因联系。进一步, 我们通过氧同位素, 对淡色花岗岩的岩浆源区进行限定。全岩及石英等单矿物较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 指示这些淡色花岗岩并非主要来自变沉积岩部分熔融的产物, 而是具有与区域其它侏罗纪花岗岩一致的 I 型属性。它们可能是与同期黑云母花岗岩类似的 I 型花岗岩岩浆, 经历不同程度结晶分异和演化的产物。分异演化程度的不同, 是导致这些淡色花岗岩具有不同稀有金属成矿潜力的重要因素, 高度的分异演化有利于成矿元素的富集。华北克拉通吉南、辽西等地, 以及华北克拉通之外的东北、华南地区, 也零星报道了一些类似的侏罗纪花岗岩。因此, 华北克拉通东部乃至中国东部更大范围, 可能均存在这一期的淡色花岗岩及与之相关的稀有金属成矿。它们的形成环境明显不同于喜马拉雅造山带内的淡色花岗岩, 启发我们对此类型岩石及相关矿床成因、未来的勘探方向的思考。有利于岩浆分异的环境, 对于此类岩石及其矿化的形成, 可能更为关键。

关键词: 淡色花岗岩; 铌钽铁矿; 稀有金属; 岩石成因

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

低水岩浆体系下紫苏花岗岩“夹带”成因新模型

杨航¹, 姚金龙^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710068

紫苏花岗岩是含有紫苏辉石的花岗质岩石, 常伴随下地壳麻粒岩出现, 是许多前寒武纪高级变质地体的重要组成部分。按照紫苏辉石的成因, 紫苏花岗岩可大致分为岩浆和变质脱水成因两类。而紫苏辉石与含水熔体在接近固相线条件时发生水化反应, 容易形成含水矿物, 难以保存。因此关于紫苏花岗岩的类型, 成因及保存机制目前争议颇大。华南高州地区出露早古生代 (~431 Ma) 含麻粒岩包体的紫苏花岗岩, 属于云开基底 (高州杂岩) 的一部分, 是探讨揭示紫苏花岗岩成因模式的重要窗口。区域上高州紫苏花岗岩 (含麻粒岩包体) 侵入花岗片麻岩, 由紫苏辉石、石榴子石、斜长石、石英和少量黑云母组成, 地球化学特征表明岩体为弱过铝质 ($ACNK=1.06-1.1$), 具高 ΣREE 含量 (323~419 ppm) 和 $10\,000 \times Ga/Al$ (3.0~3.6) 以及高锆饱和温度 ($>850^\circ C$), 具典型的 A 型花岗岩特征。锆石 Hf-O 同位素组成 ($\delta^{18}O = 8.0-9.8\text{‰}$; $\varepsilon_{Hf}(t) = -11.5$ 至 -3.4) 指示壳源物质再造, 无幔源成分加入。岩相学和矿物成分特征表明高州紫苏花岗岩包含岩浆型和转熔型两种紫苏辉石。而紫苏花岗岩中转熔型紫苏辉石其矿物成分与麻粒岩一致, 可能来自源区的夹带, 指示麻粒岩包体可能作为原岩。部分港湾状紫苏辉石和石榴子石被黑云母围绕, 表明无水

矿物的水化。锆石水含量测试和地球化学模拟并结合流体包裹体成分分析等手段发现岩浆系统中的低水环境是紫苏辉石能够保存的关键。紫苏花岗岩具有高的岩岩固结温度 (~850 °C) 和极其低的熔体水含量 ($< 0.3\text{ wt.}\%$), 否则在近固相线条件下紫苏辉石会被完全水化, 从而转变为黑云母花岗岩。相平衡模拟和岩相学证据显示锆石为早期结晶产物, 记录了原始熔体的信息。高州紫苏花岗岩 (135 ppm, 中位数) 相比正常花岗岩 (202~643 ppm) 具极低的锆石水含量, 结合相平衡模拟工作, 表明紫苏花岗岩从开始结晶到完全固结一直处于低水环境。包裹体拉曼光谱分析指示体系中富 CO_2 的流体的存在, 这可能进一步降低体系水活度, 增加了紫苏辉石的稳定域。据此, 我们提出低水环境下无水矿物夹带 (紫苏辉石和石榴石) 的紫苏花岗岩成因新模式。而低水环境与麻粒岩高温熔融及体系中富 CO_2 流体的存在有关。区域岩浆-变质-构造资料表明, 云开~431 Ma 的 A 型紫苏花岗岩的形成与武夷-云开造山带后造山伸展-拆沉背景下软流圈物质的上涌有关, 代表后造山伸展作用达到顶峰。

关键词: 华南早古生代; 紫苏花岗岩; 低水环境; 矿物夹带; 锆石水

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42322208, 41972238)

第一作者简介: 杨航 (1996-), 博士研究生, Email: 1195753477@qq.com

*通讯作者简介: 姚金龙 (1987-), 教授, 研究方向: 板块构造、大陆造山带、超大陆聚散及其环境效应, Email: yaojinlong@nwu.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华北克拉通东部不均一地幔来源中生代火山岩的亲铜元素特征

汪浪¹, 汪在聪^{1*}, 汪翔¹, 雷煜田¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

交代岩石圈地幔在大型金矿床形成过程中被认为扮演着愈来愈重要的角色。然而, 交代岩石圈地幔通常具有不均一的地球化学性质并且产生化学成分多变的岩浆。这种源区的不均一性是否会导致地幔以及衍生岩浆金属含量变化仍不清楚。早白垩世时期, 华北克拉通东部郯庐断裂带两侧的交代岩石圈地幔具有不同的性质(EM1 和 EM2 型)。基于详细的岩相学, 本研究报道了沿郯庐断裂带及其次级断裂带分布的早白垩世火山岩(130~120 Ma, $n = 36$)的铂族元素(PGE)、金和铜等亲铜元素含量。这些火山岩具有一致的岛弧型微量元素特征, 但是富集程度不同的 EM1 和 EM2 型 Sr-Nd 同位素特征。硫化物的岩石学特征以及亲铜元素含量、Cu/Pd 与 MgO 之间缺乏相关性, 这些现象表明 EM1 型火山岩硫化物分离程度较低, 但是 EM2 型火山岩 Cu/Pd 随着进一步演化而升高, 说明存在明显的硫化物分

离。这些火山岩具有类似 MORB 的低 PGE、Au 和 Cu 含量。Ba/Nb 与 Au/Pd 和 Au/Cu 总体上呈现一定相关性, 说明在俯冲交代过程中地幔中 Au 相对于 Cu 和 Pd 存在微弱的富集并加入了有限的金属。部分 EM1 型火山岩由于岩浆演化过程也致使 Pd、Au 和 Cu 含量的略微升高。然而, 尽管存在化学成分的不均一性, 但是相对原始的 EM1 型和 EM2 型岩浆(MgO > 5.5 wt.%)具有相似的 Au 和 Cu 含量。因此, 地幔不均一性可能不是控制地幔源区和岩浆中亲铜元素变化的关键因素。值得注意的是, 在克拉通破坏过程中, EM1 和 EM2 地区的地壳厚度和断裂带明显不同。所以, 岩浆受构造背景影响而经历不同的演化过程是金属分布的空间变化和最终在地壳成矿的关键。

关键词: 火山岩; 亲铜元素; 交代岩石圈地幔

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0804200); 国家自然科学基金(42273023)

第一作者简介: 汪浪(1999-), 博士研究生, 研究方向: 亲铜元素地球化学与金属成矿. E-mail: wanglang@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 亲铁亲铜元素地球化学, 行星增生与壳幔演化. E-mail: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

东南沿海古太平洋俯冲与硅质岩浆系统演化

夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 谭竹¹, 赵梦婷¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

中国东南沿海广泛发育晚中生代的岩浆作用, 并形成一条由火山盆地、破火山和大量岩浆岩构成的火山-侵入杂岩带。越来越多的研究阐释了浙闽沿海火山-侵入杂岩的成因与穿地壳演化系统演化过程, 然而粤东晚中生代花岗岩-火山岩并没有得到足够的重视, 研究程度还比较低。此外, 对中国东南部古太平洋板块俯冲-后撤的具体过程, 也存在不同的认识。因此, 有必要对粤东多期次花岗岩-火山岩开展深入研究。

我们对粤东晚中生代火山岩开展了详细锆石 U-Pb 定年, 在此基础上建立了粤东晚中生代火山作用的时空格架。粤东晚中生代火山作用可以划分为四个火山活动旋回: 早中侏罗世 (195~161 Ma)、晚侏罗世 (161~146 Ma)、早白垩世 (146~130 Ma)、晚白垩世 (113~95 Ma)。同时, 我们对粤东莲花山断裂带及相邻区域的多期次花岗岩的研究也发现, 晚中生代莲花山地区存在四期花岗质岩浆活动: ~192-180 Ma、~172-150 Ma、~148-130 Ma、~106-94 Ma, 基本可与火山作用的四个旋回对比。莲花山盆地和白云嶂盆地毗邻莲花山断裂带, 出露多种火山岩和侵入岩, 周围存在众多锡矿床 (三角窝锡矿床、金坑锡矿床、陶锡湖锡矿床、吉水门锡矿床, 长埔锡矿床等)。莲花山盆地出露熔结凝灰岩、花岗斑岩和流纹斑岩, 而白云嶂盆地出露熔结凝灰岩、粗面岩、流纹岩和石英二长斑岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明在

误差范围内火山岩和侵入岩的结晶年代 (143~138 Ma) 一致, 属于近同时形成, 火山岩和侵入岩也具有一致的锆石 Hf-O 同位素和全岩 Nd 同位素组成。此外, 火山岩与侵入岩显示出明显互补的地球化学特征, 指示白云嶂盆地和莲花山盆地出露的火山岩和侵入岩的母岩浆来源于同一个深部岩浆储库, 但在浅部形成了两个独立的岩浆储库。两个浅层岩浆储库分别经历了不同程度的结晶分异和晶体熔体分离作用。最终通过多期次岩浆脉动式抽取形成了不同类型的火山岩、花岗斑岩和流纹斑岩。残余的晶粥就地固结形成石英二长斑岩。锆石 Hf-O 同位素和全岩地球化学研究揭示了粤东晚中生代不同时代的花岗岩、火山岩具有各自不同的岩浆起源。早侏罗世岩浆岩是新生地壳部分熔融的产物, 中晚侏罗世到晚白垩世的岩浆岩主要来源于古老地壳的重熔。从早侏罗世到晚白垩世, 岩石成因中新生组分的贡献比例呈现出先下降再增加的趋势。综合中国东南部已发表的火成岩的时空分布资料和锆石 Hf 同位素数据, 中国东南部晚中生代幕式岩浆作用揭示了古太平洋板块俯冲过程并非以恒定速率持续进行, 存在间歇性的板块活动与停滞交替状态。

关键词: 火山-侵入杂岩; 晶体-熔体分异; 幕式岩浆作用; 晚中生代; 粤东

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

北大西洋雷克雅内斯 V 型脊的成因：
来自橄榄石地球化学成分的制约吴涛^{1*}, 朱恒睿¹, 鲁江姑², 董玮琳¹

1. 浙江大学 海洋学院, 浙江省杭州市 310058;

2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江省杭州市西湖区保俶北路 36 号 310058

北大西洋雷克雅内斯脊位于冰岛南端, 是由冰岛地幔柱和北大西洋洋中脊相互作用而成。其呈非常特殊的“V”型, 发育一系列“穿时”的 V 型脊和 V 型槽。然而这些 V 型脊和 V 型槽的成因一直存在争议。目前的观点主要有三个: 1. 冰岛地幔柱内部周期性的热脉动 (Thermal pulsing); 2. 扩展裂谷 (propagating rift); 3. 地幔浮力上涌 (buoyant mantle upwelling)。为了解决这个争议, 国际大洋发现计划 (IODP) 395 和 395C 航次沿雷克雅内斯脊开展了一系列钻探工作。有 5 个站位打到了基底玄武岩。其中 4 个位于两组 V 型脊 (U1562 和 U1563) 和 V 型槽 (U1554 和 U1555) 上。本研究对来自 V 型脊和 V 型槽的 4 个钻孔样品中橄榄石开展了初步岩相学和矿物主、微量元素研究。岩相学观察发现在大部分玄武岩样品中, 橄榄石为唯一斑晶。其中, 来自 V 型脊的样品发现有燕尾状、骨架-枝晶状橄榄石, 反应了快速喷发冷却的过程, 而 V 型槽的橄榄石则较自形。来自 V 型脊的橄榄石 Fo 值变化在 87.4~84.6, 而来自 V 型槽的橄榄石 MgO 含量相对较低, Fo 值变化在

84.8~82.5。通过 pMELTS 模拟发现, 初始岩浆 MgO 含量是造成橄榄石 Fo 值差异的主要原因, 而岩浆温度和水含量则影响不大。橄榄石-尖晶石 Al 温度计计算结果表明, 所有橄榄石的结晶温度具有相同的变化范围。所有橄榄石均具有较低的 Ni 和较高的 Mn 含量。结合 Fe/Mn 和 Zn/Fe 比值, 指示它们的地幔源区以橄榄岩为主。此外, 来自 U1554 (V 型槽) 站位的橄榄石比其他三个站具有更低的 V 和 Cr, 但更高的 Ti 和 Cu 含量。这表明, 相对于其他三个站位, U1554 的地幔源区具有更富集和更氧化的特征。这些特征与冰岛已发表的橄榄石成分相似, 表明这些富集物质可能来自于冰岛地幔柱。我们的初步研究表明, 地幔源区的岩性和成分不是控制 V 型脊和槽的主要因素。尽管地幔熔融温度的波动可能控制了该特殊地形的形成, 但两者之间温度差可能很小 (<25℃), 导致不能被橄榄石尖晶石 Al 温度计所区分。

关键词: 北大西洋; 雷克雅内斯脊; 橄榄石; 主微量元素; 冰岛地幔柱

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大陆中上地壳陆缘弧岩石剖面: 以腾冲地块早始新世镁铁质岩为例

文泰^{1,2}, 张超^{1*}, 赵少伟²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

2. 长安大学 资源学院, 西安 710054

大陆地壳成因和生长方式一直是固体地球科学领域的研究热点。俯冲阶段形成的岛弧广泛发育镁铁质岩浆, 是认识大陆地壳形成和演化的重要载体, 而在此之后的同碰撞阶段的岩浆活动进一步加剧了地壳的增生和分异。腾冲地块西部那邦早始新世镁铁质-超镁铁质岩石组合是一系列连续陆缘弧岩浆演化的结果, 完整记录了新特提斯洋俯冲和印度-亚洲板块同碰撞阶段的陆缘弧岩浆体系, 但该时期镁铁质岩的成因及深部动力学机制还存在较大争议。本文以腾冲地块早始新世那邦角闪石岩-辉长岩-闪长岩组合为研究对象, 通过对其进行系统的野外地质、岩相学、全岩和矿物元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Sr-Nd、Lu-Hf 同位素和斜长石原位 Sr 同位素组成研究, 旨在查明腾冲地块早始新世镁铁质岩的岩浆结晶-堆晶演化过程, 揭示了矿物结晶过程与岩浆演化之间的关系和动力学过程, 并探讨堆晶-分异作用对大陆地壳垂向分异的控制作用。那邦早始新世镁铁质-长英质岩石剖面是一套典型的中上地壳弧岩浆剖面。那邦早始新世镁铁质岩的年龄为 52~53 Ma, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

(t) = 0.705 580~0.706 838, $\varepsilon\text{Nd}(t) = -3.3 \sim -1.7$, $\varepsilon\text{Hf}(t) = -1.2 \sim -7.8$, 与冈底斯弧同碰撞期岩浆岩具有相似的年龄和同位素组成。因此, 那邦早始新世镁铁质岩的原始岩浆起源于亏损地幔源区, 受到俯冲板片长期交代地幔楔过程, 最终就位于中上地壳岩浆储库。那邦角闪石岩-辉长岩-闪长岩岩石系列是中上地壳镁铁质岩浆储库中发育的一套以角闪石和斜长石为主要堆晶矿物的堆晶岩, 以角闪石为主、斜长石为辅的堆晶过程形成了角闪石岩和辉长岩, 以斜长石为主、角闪石为辅的堆晶过程形成了闪长岩。其中, 部分角闪石是单斜辉石与演化熔体发生替代反应的产物; 斜长石的环带和结构特征表明斜长石经历了同源岩浆的补给作用, 并诱发斜长石的多期结晶、溶解-再沉淀的过程。因此, 同源岩浆的多期补给是中上地壳镁铁质岩形成和演化的驱动力, 是大陆地壳由镁铁质向长英质转化的有效机制。

关键词: 弧岩浆; 镁铁质岩; 岩浆补给; 堆晶作用

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

塔什库尔干石头城、塔南霓辉正长岩的成因及其构造意义

杨伟^{1,2}, 童英^{1*}, 邱亮², 赵庆¹, 何芳^{1,2}

1. 中国地质科学院 地质所, 北京 100000;

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京市海淀区学院路 100000

塔什库尔干地区位于帕米尔构造结的东部, 是研究青藏高原演化的重要地质窗口。该区发育的新生代碱性杂岩带, 包含苦子干以及石头城和塔南霞石正长岩等多个岩体, 记录了印度-亚洲大陆碰撞过程中的岩浆活动和构造演化历史。本研究通过岩石学、地球化学、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析, 本文探讨了塔什库尔干石头城、塔南碱性杂岩的岩浆演化过程及其大地构造意义。结果表明, 该碱性杂岩带形成于新生代后碰撞伸展环境, 岩浆源区为加厚地壳底部的榴辉岩相镁铁质岩石, 拆沉作用为其提供了物质与热源。

引言

塔什库尔干地区位于帕米尔构造结的东缘, 是青藏高原西缘重要的地质窗口。该区的新生代碱性杂岩带因记录了印度-亚洲大陆碰撞后的岩浆活动和构造演化而备受关注。大量研究表明, 帕米尔构造结不仅见证了特提斯洋的俯冲、闭合过程, 也保存了陆陆碰撞后地壳增厚、拆沉以及伸展的宝贵信息。塔什库尔干一带的碱性杂岩还富含稀土元素, 具有重要的矿产资源潜力。然而, 关于塔什库尔干石头城、塔南区域碱性杂岩的成因与大地构造意义, 以及其与青藏高原碰撞-伸展演化的关系, 尚缺乏系统研究。为此, 本文结合岩石学、地球化学、U-Pb 年代学与 Lu-Hf 同位素分析, 对塔什库尔干石头城和塔南碱性杂岩的岩浆演化过程进行系统探讨, 旨在阐明其在印度-亚洲大陆碰撞后伸展环境中的形成机制及构造意义。

岩浆演化阶段

综合各项研究成果, 可以将该区域新生代碱性岩的演化归纳为两个主要阶段: 阶段 I – 深部初生阶段(慢源阶段) 岩浆主要由下地壳部分熔融产生, 受益于厚重、含榴辉岩残余的基质环境; 这一阶段产生的岩浆具有富碱、富钾和富钙的基本特征, 反映出高压下部分熔融的遗传信息。此时平衡结晶作用占据主导, 矿物(如钾长石、斜长石、透辉石或霓辉石) 的结晶基本在液体中持续进行, 分离结晶作用影响较小, 因而各岩石类型在化学组成上具有较强的继承性。阶段 II – 快速上升与侵位阶段(壳源及局部混合作用), 随着构造环境由挤压转为局部拉张(如走滑与断裂活动), 岩浆快速上升、侵位于上部较浅的地壳。

结论

塔什库尔干石头城和塔南碱性杂岩形成于新生代后碰撞伸展环境, 岩浆源区为加厚地壳底部的镁铁质榴辉岩石部分熔融。锆石 U-Pb 定年结果显示其侵位年龄约为 10~12 Ma, Lu-Hf 同位素指示源区经历了壳幔混源或壳内部分熔融。结合地球化学和同位素特征, 认为地壳拆沉大断裂与岩石圈减薄在本区碱性岩浆作用中发挥了重要作用, 体现了印度-亚洲大陆碰撞后的构造拉张特征。

关键词: 青藏高原西缘; 西昆仑; 塔什库尔干; 石头城塔南; 霓辉正长岩

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372263)

第一作者简介: 杨伟(1998-), 硕士研究生, 构造地质学, E-mail: weiyang@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 童英(1974-), 教授, 博士生导师, 岩石学, 目前主要从事花岗岩和大数据研究, E-mail: yingtong@pku.org.cn。

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

藏南拆离系内剪切作用促进下的淡色花岗质岩浆分异： 以聂拉木地区为例

杨雷^{1*}, 王佳敏², 刘小驰², 吴福元²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

花岗质岩浆的结晶分异作用是导致地壳化学多样性的关键过程之一。近些年来研究表明, 喜马拉雅淡色花岗岩普遍经历过不同程度的分离结晶过程, 且与稀有金属成矿作用紧密相关。作为全球最大规模的伸展拆离系统, 藏南拆离系是喜马拉雅淡色花岗岩重要的迁移-就位通道。淡色花岗岩的地球化学变化与藏南拆离系之间的时-空关系表明, 藏南拆离系同时也扮演着促进淡色花岗质岩浆分异的重要功能。但是该过程和机理尚缺乏系统研究。为解决这一问题, 本研究在藏南聂拉木地区系统采集了拆离断层内的同构造淡色花岗岩 (~300 m 厚岩席) 进行年代学、矿物学和地球化学研究。年代学表明淡色花岗岩主要结晶于 ca. 20 Ma, 正处于聂拉木地区藏南拆离断层的活动区间内 (ca. 25~15 Ma)。随着接近上拆离面 (海拔由低到高), 淡色花岗岩在矿物学和地球化学上呈现出系统的变化: (1) 黑云母含量降低, 白云母含量增加且出现富锰石榴石; (2) 相容元素 (如 Ca、Sr、Ba、Zr、Th 等) 及 Zr/Hf, Nb/Ta 比逐渐降低, 不相容元素 (如 F、Li、Rb、Cs 等) 及 Rb/Sr 比逐渐增加; (3) 斜长石 An 牌号逐渐降低, 从奥长石 (An = 28~

23 mol%) 到钠长石 (10~2 mol%); (4) 黑云母和白云母中 Mg、Ti 和 Mg# 降低, F 含量增加。这些特点表明淡色花岗岩岩系的成分变化主要受到分离结晶作用的控制, 从底部到顶部, 分离结晶程度增加。这一点与 Rhyolite Melt 模拟结果相一致: 岩席的下部成分更类似于堆晶, 而上部则类似于残余熔体成分。值得注意的是, 淡色花岗岩的 EBSD 石英组构分析表明淡色花岗岩岩席上部, 对应于演化程度更高的位置, 具有更高的差应力和应变速率。计算结果表明拆离系上部的高应变速率可以显著增加局部空隙体积和降低局部空隙压强。相对于浮力驱动的分异机制 (如压实作用、受阻沉降和微沉降等), 藏南拆离断层的剪切作用可能是更为有效的促进高喜马拉雅淡色花岗岩分异演化的机制。这一模型将区域尺度构造活动与岩浆化学成分演化联系起来, 将为淡色花岗岩的分异机制以及稀有金属成矿作用提供了进一步制约。

关键词: 淡色花岗岩; 藏南拆离系; 变形作用; 分离结晶; 喜马拉雅

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

幔源岩浆源区辉石岩的分布和演化：来自机器学习的约束

杨凯龙¹, 刘佳^{1*}, 芦登岗¹, 周靖钧¹, 栾志康¹, 雷天婷¹

1. 浙江大学, 杭州 310058

玄武岩作为地幔熔体的衍生物, 是揭示地幔物质组成与演化、地壳物质再循环和地球多圈层相互作用的窗口。玄武岩的地球化学特征常被用来揭示其形成构造背景和地幔源区性质, 但传统手段基于单一地球化学指标或经验公式, 受到玄武质岩浆演化复杂性的影响, 其适用范围和准确率具有局限性。在大数据和人工智能技术迅猛发展的背景下, 机器学习手段已成为解决地球科学领域难题的新途径。本文基于构建的实验岩石学及热力学模拟的玄武岩主量元素数据集, 训练机器学习分类模型来判别天然玄武岩样品的源区岩性, 在测试集和外部验证集

分别取得了 97%及 95%的预测精度, 显示出卓越的性能。随后, 我们将模型应用到全球板内玄武岩数据集上, 初步探究了时间尺度上全球玄武岩源区组分的变化情况, 以及玄武岩源区与岩石圈厚度的潜在联系。与传统方法相比, 机器学习能够从更高维度解析地球科学大数据, 揭示背后的内在联系和规律, 为玄武岩源区岩性的判别提供了一种更为准确和高效的研究方法, 也为我们对地幔组成与演化的研究提供了新视角。

关键词: 玄武岩; 地幔源区; 辉石岩; 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373044)

第一作者简介: 杨凯龙 (2000-), 博士生在读, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 1790830292@qq.com

*通信作者简介: 刘佳 (1985-), 研究员, 研究方向: 地球内部挥发分. Email: liujia85@zju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

橄榄岩 KLB-1 在 H_2O 不饱和条件下的熔融实验: 对科马提岩成因模型的启示

宋雨萍^{1*}

1. 中国科学院大学 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

太古宙科马提岩是在地幔极端条件下熔融形成的。其化学成分指示喷发温度高达约 1600 °C, 这表明它们的地幔源温度很高 (Nisbet et al., 1993)。然而, 由于科马提岩岩浆中含水量的不确定性, 这一信息变得模糊不清。一种观点认为科马提岩基本上是干燥的, 起源于地幔柱 (Herzberg et al., 2007), 而另一种观点则认为这些岩浆含有百分之几的水, 这大大降低了它们的喷发温度, 并将其与俯冲过程联系起来 (Parman et al., 2004)。在这里, 我们将水-二辉橄榄岩样品 KLB-1 体系作为实验初始物, 在 3~9 GPa, 1573-2298 K 下开展高温高压熔融实验并通过与相同二辉橄榄岩的无水熔融实验结果进行比较, 讨论了添加到干燥的二辉橄榄岩中的 H_2O 对熔融成分的影响,

以及温度和压力对熔融成分的影响。在地幔潜在温度足够高的前提下, 科马提岩可以在 H_2O 不饱和条件下由地幔部分熔融产生。结合津巴布韦 Belingwe 绿岩带 (2.7 Ga) 科马提岩实例, 揭示其成因与地幔水循环的关联。由于其主要和微量元素组成以及低氧逸度与俯冲环境不一致, 高 $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比是由于地幔过渡带的含水物质被夹带到科马提岩源中造成的, 表明 Belingwe 的科马提岩为地幔柱成因以及太古宙地幔的高温属性, 并揭示早期地球深部地幔存在含水储库, 并且为太古宙地幔动力学与早期地球水循环提供了关键约束。

关键词: KLB-1; 水不饱和; 熔融; 科马提岩

第一作者简介: 宋雨萍 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 固体地球物理学. Email: songyuping@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 郭新转 (1979-), 研究员, 研究方向: 高温高压实验技术、地球内部物质传输特性、变质岩石学. Email: gxzhuan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

秦岭造山带早古生代富水镁铁杂岩中暗色包体的
岩石成因及其记录的岩浆作用朱博康¹, 廖小莹^{1*}, 盖永升¹, 刘良¹, 王戈¹, Sang Wan Pak¹, 杨文强¹

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

岩浆岩中暗色包体的成因与岩浆演化过程关系密切, 可以用于探究、约束岩浆的起源、演化以及形成环境。北秦岭富水杂岩体是秦岭造山带中出露最大的早古生代富钾镁铁质杂岩体, 主要岩石类型包括辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩。前人对该杂岩的研究主要聚焦于形成时代, 岩浆源区性质, 源区熔融条件等方面, 但对富水岩体内分布的大量暗色包体, 包括角闪石岩和暗色辉长岩, 仍缺乏系统的成因研究。本研究通过年代学、地球化学、同位素地球化学、矿物化学等分析方法, 探究暗色包体的岩石成因及其与寄主岩石的关系。寄主岩石与暗色辉长岩包体具有一致的地球化学特征, 属于钾玄岩系, 具有弧型微量元素特征和富集的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (i) 值为 0.7123~0.7137, ϵNd (t) 值为 -5.1~ -4.5)。相比之下, 角闪石岩包体具有不同的地球化学特性, 属于中钾钙碱性-低钾拉斑系列, 表现为富集 Th 和 U, 亏损 HFSE 和 Sr, LREE 轻微富集或平坦的 REE 配分模式, 与寄主岩石相比具有相对亏损的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (i) 值为 0.7068~0.7136, ϵNd (t) 值为 -5.1~ -1.1)。基于实验岩石学的微量元素模拟结果显示, 角闪石岩包体和寄主岩石可能源自受俯冲洋壳与陆壳叠加交代的富集地幔, 记录了从洋壳俯冲到陆壳俯冲的转变。综合岩相学、地质年代学、地球化学、矿物化学和微量元素模拟分析, 揭示出角闪石包体源自受俯冲洋

壳交代的富水富集地幔早期部分熔融后在下地壳深部岩浆房中的早期堆晶, 结晶温压条件为 871 °C 和 13.7 kbar; 暗色辉长岩包体是寄主岩浆在岩浆通道和岩浆房边部发生淬冷作用、快速结晶的细粒矿物组合, 结晶温度和压力分别为 852 °C 和 11.9 kbar。综合前人及本研究的地质年代学研究发现, 锆石 U-Pb 年代学结果显示包体角闪石岩和暗色辉长岩分别形成于 500 Ma 和 497 Ma, 且两类包体中都有少量岩浆锆石记录了约 475 Ma 的年龄, 寄主岩石主要形成于 484~492 Ma。结合年代学和矿物化学, 本文认为富水镁铁质侵入杂岩体及其包体岩石记录了三期岩浆侵入事件和角闪-绿片岩相变质作用。第一期岩浆侵入事件 (500~497 Ma) 和第二期岩浆侵入事件 (484~492 Ma) 的 P-T 条件接近, 约 10.3 kbar 和 853 °C; 第三期岩浆侵入事件发生于 473 Ma, P-T 条件下限可被约束在约 7.9 kbar 和 800 °C。角闪-绿片岩相变质作用发生于 335 Ma, P-T 条件可被限定在约 1.4~3.9 kbar 和 328~468 °C。本研究不仅首次对富水镁铁质杂岩中暗色包体的岩石成因及其记录的岩浆演化过程进行了详细研究, 还通过微量元素模拟为富水杂岩的地幔源区性质和岩石成因提供新的解释、为区域构造演化提供新的制约

关键词: 暗色包体; 富水杂岩; 角闪石; 富角闪石堆晶岩; 多期次岩浆侵入

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272059、42030307)

第一作者简介: 朱博康 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: zbk5293@163.com

*通信作者简介: 廖小莹 (1991-), 副教授, 研究方向: 变质地质学及造山带演化。E-mail: xyiliao@nwnu.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

安徽庐江-枞阳地区中生代黄梅尖碱性岩体的成因研究

张诗滢¹, 柯珊^{1*}, 何永胜², 王阳²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

黄梅尖岩体是长江中下游庐江-枞阳地区一个大型的碱性复式岩体,也是该地区重要的铀源。根据岩石类型、岩石结构和矿物组成,黄梅尖岩体可以分为边缘相和中央相,边缘相以中粒碱长正长岩为主,由碱性长石、中-拉长石、石英、黑云母、角闪石和普通辉石组成。中央相以石英正长岩为主,中粗粒-伟晶结构、晶洞构造,由碱性长石、石英、少量角闪石和黑云母组成,部分样品萤石含量可高达 1%。通过岩相学、矿物学和地球化学分析,本文讨论了黄梅尖复式岩体的演化分异特点,成因联系及其与铀矿化的关系: 1. 边缘相碱长正长岩具有较低的 SiO_2 (54.61~60.10 wt%) 和较高的 CaO 、 MgO 含量,斜长石牌号为 36~54,显示弱的 Eu 、 Sr 和 Ba 负异常,主、微量元素相关图解指示其经历了辉石和钛铁氧化物的分异。氧逸度变化在 HM-QFM 之间。2. 中央相石英正长岩 SiO_2 变化范围大 (62.73~75.51 wt%), 贫 CaO 、 MgO , $\text{Fe}^\#$ 值 (0.86~0.99) 高,斜长石牌号低 ($\text{An}=0.24\sim1.01$), 富氟,挥发分含量高,结合高 Nb 、 Ga/Al 等元素比值图解,为典型的 A 型花岗岩。不同于边缘相,中央相显示强烈的 Eu 、 Sr 和 Ba 负异常和微弱的四组分效应,表明其经历了显著的斜长石结

晶分离,具高分异的特点。其氧逸度化在 HM-NNO 之间,总体高于边缘相。3. 二者的 Sr-Nd 同位素组成既有相似性,又有差异。边缘相和中央相的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 -6.398~-5.618 和 -6.203~-5.813,组成相似; I_{Sr} 分别为 0.7060~0.7061 和 0.7077~0.7132,差别大。结合前人的研究,中央相的 Sr 含量非常低,易受到围岩混染的影响。4. 两个相带的 U 含量差别很大,边缘相 U 含量仅为 3.82~6.04 (mg/g); 中央相 U 含量为 8.49~109 (mg/g), 且与 SiO_2 呈正相关。分异程度高及富碱、氟是中央相岩石铀富集的主因。 U 在岩浆体系中为高度不相容元素,结晶分异越强烈,残余熔体中 U 含量越高; 熔体中 Na 、 K 、 F 含量高,均会导致岩浆聚合度下降和非桥氧增加, U^{4+} 优先与非桥氧成键,从而增强 U 在熔体中的溶解度。综上所述,黄梅尖复式岩体的边缘相和中央相具有不同的特征,显示出不同的演化过程和演化程度,中央相的高分异和卤族元素富集是其铀含量高的主因,可以成为重要的铀源,而边缘相不具备这些特点,相对贫铀。

关键词: 庐枞地区; 黄梅尖复式花岗质岩体; A 型花岗岩; 结晶分异

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

地壳产热元素与过铝质花岗岩的成因联系 ——以武夷山钨成矿带为例

刘向冲^{1*}

1. 中国地质科学院地质力学研究所 矿田构造研究室, 北京 100081

过铝质花岗岩常常与锡、钨、稀有金属（锂、铍、铌、钽等）矿床有密切的成因联系。大量岩石地球化学和同位素数据表明其源岩以变沉积岩为主，然而造成源岩部分熔融的主要热源及其传热机制却进展缓慢。作者选择武夷山钨成矿带行洛坑黑云母花岗岩（侵位于 150 Ma）为例，识别出岩浆锆石 Hf 同位素值（= -25.72~7.01）落入继承性锆石（600~1000 Ma，=-28.24~10.24）范围内；结合前人地化数据认为，行洛坑花岗岩没有幔源岩浆的参与。根据武夷山地区中生代细粒沉积碎屑岩和麻粒岩的产热元素（U，Th，K），计算得到武夷山在中生代的上地壳、中-下地壳平均产热率分别是：2.9 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 0.6~4 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ，几倍于全球现今平均值（上地壳：

1.68 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ；中-下地壳：0.19~1 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ）。热模拟表明，这种高地壳产热率在地壳构造加厚至约 50 km 的配合下可在约 30~50 Ma 内使中-下地壳的变沉积岩产生部分熔融。壳内产热元素的自加热效应还将同步地使下地壳、甚至上地幔升温，并可能产生幔源物质的部分熔融。因而，过铝质花岗岩与少量的基性岩墙共存现象可能是同一构造加厚事件在不同深度的热产物，不同于以幔源岩浆底侵作用为核心的、自下而上的穿地壳岩浆体系。上述地壳产热元素与花岗岩的热成因联系可能也适用于华南其他地区的中生代过铝质花岗岩。

关键词：花岗岩；热源；热模拟；钨锡矿

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

岩性-气候协同调控流域碳循环

钟君^{1*}, 李思亮¹, 徐胜¹, 刘丛强¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

流域碳循环是全球碳循环的关键组成部分,对气候变化具有重要调控作用。河流中的溶解无机碳(DIC)约占河流输出碳的 50%,但其来源和循环机制仍不明确。本研究基于大河流域 DIC 浓度与流量的时间序列数据,构建了溶质生成模型,揭示了水文条件对 DIC 输运的影响。结合全球数据,我们进一步确认岩性在控制河流 DIC 动态及输出通量中的关键作用。这与传统观点中“DIC 源自岩石风化”相一致,但研究发现 DIC 的同位素组成($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$)与岩性并无显著相关性,挑战了传统理论。我们进一步分析了长江上游地区的主要离子浓度、硫酸盐硫同位素、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$,探讨了地理因素对流域碳循环时空变化的影响。构建了 DIC 输出的

水文-地球化学模型,结果显示该模型能够较好地反映测量数据中的时间变化,并支持 DIC 在大江大河中的保守混合行为。长江上游的 DIC 通量为 0.5~1.5 Mmol/(km²·a),主要由碳酸盐岩风化贡献。通过 $\Delta^{14}\text{C}_{\text{DIC}}$ 估算开放度参数(ψ , 范围从 0 到 1),结果表明 ψ 与流域平均海拔密切相关,说明海拔变化引起的气候差异(如降水和温度)在碳交换过程中起着重要控制作用。研究表明,碳酸盐岩的同位素示踪方法可能存在一定误差,而土壤 CO₂ 才是河流 DIC 的主要来源。岩性决定了 DIC 的横向迁移,而气候条件则主导了土壤呼吸及 DIC 的纵向交换。

关键词: 流域碳循环; 同位素; 岩性; 气候

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

农田土壤中铊富集特征的研究进展

蒋顺龙¹, 刘娟^{1*}, 石雨¹

1. 广州大学 环境科学与工程学院, 广州 510006

铊 (Thallium, Tl) 是一种高毒性稀有金属, 其化合物具有强蓄积性和神经毒性。铊可通过消化道、呼吸道及皮肤接触等多种途径进入人体, 并在体内蓄积, 引发视神经损伤、肌肉萎缩等典型中毒症状, 严重时可导致多器官功能衰竭甚至死亡。由于其剧毒性, 铊被全球大多数国家列入优先控制污染物之一。我国也将列入铊“十四五”新增重点防控重金属之一。国际上虽严格控制铊的使用, 但每年仍有超 5000 吨 Tl 通过多种工业活动进入环境。含铊矿石的开采、冶炼及加工导致大量铊通过尾矿

淋滤、工业废水排放及大气沉降等途径进入土壤环境。进入土壤中的铊迁移性强且难以降解, 可经作物吸收进入食物链, 最终可严重威胁人体健康。本课题组扎根于环境中铊环境行为及其污染控制研究近二十年。本文系统梳理了全球土壤铊污染现状、主要来源及当前的修复治理技术, 以期为典型区域农田土壤铊污染修复与控制提供科学的理论依据与重要参考。

关键词: 铊; 土壤; 富集; 生态风险; 农作物

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

河流水体溶解性有机质来源及转化过程的同位素示踪研究

张东¹, 张俊文², 吴娜², 贺美丽², 韩伽骏¹, 孙瀚林¹,
杨小溪¹, 于婧淼¹, 赵志琦^{2*}

1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306;

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

溶解性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 是水体环境重要的有机碳库, 为微生物和水生植物提供碳源。DOC 浓度与组成反映环境中有机污染物输入与转化, 影响重金属在水中的迁移、沉淀和生物可利用性, 还能反映降水和土地利用变化对水体生态系统的影响。汉江是南水北调中线重要水源地, 水质情况与丹江口水库出水质量密切相关, 但目前对于汉江流域水体 DOC 来源及转化过程仍不清楚。通过丰水期采集汉江干流、支流及沿岸地下水水体样品, 借助 DOC 浓度以及碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$) 组成, 结合水化学指标, 辨析自然因素与人为活动对碳循环的影响。结果表明: (1) 丰水期汉江干流水体 DOC 浓度范围 1.54~3.38 mg/L, 均值为 2.34 mg/L ($n=28$), 支流河水 DOC 浓度范围 0.97~4.52 mg/L, 均值为 2.59 mg/L ($n=30$), 地下水 DOC 浓度范围 0.44~5.16 mg/L, 均

值为 1.56 mg/L ($n=17$); (2) 丰水期汉江干流水体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值范围 -30.1‰~27.1‰, 均值为 -28.3‰ ($n=28$), 支流河水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值范围 -30.9‰~27.3‰, 均值为 -28.9‰ ($n=30$), 地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值范围 -30.1‰~20.8‰, 均值为 -25.6‰ ($n=17$); (3) 汉江流域水体中自然来源 DOC 具有浓度低且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值偏负的特征, 人为输入来源 DOC 具有浓度高且 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值偏正的特征。单一 DOC 降解过程中同位素分馏机制不能很好地解释汉江流域 DOC 浓度以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$ 值变化, 自然过程和人为输入叠加, 同时 DOC 降解机制, 共同控制了汉江流域河水 DOC 的空间变化。研究结果为汉江流域水资源管理提供科学依据。

关键词: 汉江流域; 溶解性有机碳; 碳同位素; 来源; 转化过程

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划重点项目 (2022JZ-19); 国家自然科学基金项目 (42073009); 上海市自然科学基金面上项目 (24ZR1428900)。

第一作者简介: 张东 (1978-), 教授, 研究方向: 环境地球化学. Email: d-zhang@shou.edu.cn

*通讯作者简介: 赵志琦 (1970-), 教授, 研究方向: 稳定同位素地球化学. Email: zhaozhiqi@chd.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

还原态含铁黏土矿物向铁（氢）氧化物传递 电子的机制与环境效应

钱傲^{1,2}, 郑云松², 张鹏^{2,3}, 袁松虎^{2,3*}

1. 江汉大学 环境与健康学院, 武汉 430056;

2. 中国地质大学（武汉）生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学（武汉）环境学院, 武汉 430074

电子传递（ET）是元素循环和污染物衰减等众多生物地球化学过程的核心，但不同矿物间 ET 机制与引起的环境效应尚不清楚。本研究首先使用表面结合态 Fe（II）变化指示矿物间 ET 程度，研究了还原态绿脱石（rNAu-2）与铁（氢）氧化物之间 ET。研究表明，rNAu-2 可以向水铁矿（Ferrihydrite）传递电子，但不能向针铁矿（Goethite）传递电子，ET 程度由矿物间反应位点及电势差决定。ET 主要通过矿物-矿物界面进行，Fhy 插入 rNAu-2 层间，在此 rNAu-2 中结构态 Fe（II）通过基面向 Fhy 传递电子。进一步研究发现矿物间电子传递会影响重金属 Cr（VI）的迁移转化。构建反应动力学模型定量评

估矿物间电子传递对重金属 Cr（VI）还原的影响，结果表明，矿物间电子传递对 Cr（VI）的介导还原作用随水铁矿浓度增加而增加，随 pH 降低而增加。不同 pH 条件下矿物间电子传递介导 Cr（VI）还原的相对百分比分别为 25%~86.5%（pH 5.5）、22.4%~76.4%（pH 7.0）和 1.9%~10.3%（pH 9.0）。矿物是土壤/沉积物的重要组成部分，其中不同还原电位的矿物经常共存，因此矿物-矿物界面 ET 可能在地下环境生物地球化学过程中扮演着重要作用。

关键词：还原态含铁黏土矿物；铁（氢）氧化物；电子传递；氧化还原；Cr（VI）还原

基金项目：国家自然科学基金项目（42102040，42025703）

第一作者简介：钱傲（1989-），讲师，研究方向：矿物界面化学与环境效应。Email: qianao.cug@outlook.com

*通信作者简介：袁松虎（1979-），教授，研究方向：地下水动态变化环境水文地球化学过程、水/岩界面氧化还原过程和地下水修复。Email: yuansonghu622@cug.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

土壤草酸盐的细菌降解及其环境效应

连宾^{1*}

1. 南京师范大学 海洋科学与工程学院, 南京 210023

草酸盐是以阴离子($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$)与金属或有机阳离子结合的一类化合物(如草酸钙和草酸镁等),广泛存在于生物体和环境。草酸盐在土壤中尤为常见,这与植物以及一些土壤生物需要获取土壤矿质元素有密切关联。植物生长所需的矿质元素(如磷、钾、钙、镁、铁和锌等)在土壤中常以矿物形态存在,难以被吸收利用,而植物和微生物在长期的进化中已获得在不同环境中有效利用矿质养分的“技能”,如:它们能分泌小分子有机酸和铁载体等风化介质促进矿物风化,其中广泛分布于植物、动物和真菌中的草酸(化学式为 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$)就是促进土壤矿物风化的一个重要介质。草酸能解离出氢离子驱动一些难溶性矿物质的溶解,草酸根离子还可通过其较强的络合能力促进矿物风化,但草酸根阴离子容易与许多金属阳离子形成难溶性草酸盐络合物,覆盖在矿物、菌丝和植物根系的表面,阻碍生物体对矿质营养的吸收及其对矿物的持续风化,所以草酸又被认为是矿质营养吸收的拮抗物。草酸是植物常有的成分,植物体内的草酸合成之后多以钾盐或钙盐的形式存在,并发挥特定的生理功能,如植物体内的草酸钙就具有维持钙离子平衡、妨碍昆虫取食和解毒作用等。植物草酸盐还会随植物残体、枯枝落叶再返回土壤并逐渐积累,从而增加土壤草酸盐的含量。过量积累的草酸盐能妨碍多种土壤生物的取食

活动及植物根系的养分吸收,进而影响土壤的生态功能,故而避免草酸盐在土壤中的积累对维护健康的土壤生态环境非常必要。草酸盐降解菌是一类能有效降解草酸盐物质的细菌,它们能将植物和真菌产生的草酸和草酸盐转化成碳酸盐,这不仅使草酸盐中的有机碳被细菌有效利用,减轻草酸盐的负面影响,而且部分有机碳还能被转变为存留时间更长的矿物态碳,故具有增加土壤无机碳汇的潜能。不仅如此,在草酸盐和碳酸盐的转化过程中,被草酸盐固定的金属离子会被活化,提高了金属离子的生物有效性。另外,土壤草酸盐降解后也有利于植物及其它土壤生物的生命活动及对矿物的持续风化,从而促进土壤生态环境的改善。由于土壤组成的复杂性和多重环境因素的影响,有关土壤草酸盐的细菌降解研究仍有很多值得探究的科学问题,如:草酸盐细菌降解的调控过程与影响因素,草酸盐细菌降解与碳酸盐合成的耦联作用,草酸盐降解转化的环境效应等,对这些问题的研究将有助于全面理解土壤矿物生物风化所引起的元素迁移、转化及固定的生物地球化学机制,为维护土壤生态系统功能和进一步研究地球关键带物质循环与全球变化关系提供新思路。

关键词: 草酸盐; 草酸盐降解菌; 生物降解; 环境效应; 土壤

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

含水层介质中含铁活性矿物的氧化还原活性 及其对污染物非生物自然衰减的指示意义

杨珊珊^{1*}

1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083

含水层介质中的铁以不同的状态赋存,各自代表着不同的地球化学状态和反应性。不同形态铁是含水层介质中电子交换容量的主要贡献者之一,电子供体是地下水系统发生非生物自然衰减的关键因素。本研究收集实际含水层沉积物并以硝基苯为代表性污染物,分析含水层介质中铁形态分布、电子交换容量和非生物衰减速率。结果表明在含水层介质中铁是含水层介质中 EEC 的主要来源。 Fe_{Si} 同时含有 $\text{Fe}(\text{II})$ 和 $\text{Fe}(\text{III})$, 导致 Fe_{Si} 对含水层介质 EEC 的贡献较为复杂,并影响以其余形态赋存的铁与 EEC 之间的关系。当 Fe_{Si} 含量较低时, Fe_{carb} 与供给电子容量之间存在

良好的线性相关关系。 Fe_{Si} 的热力学氧化往往受到矿物结构的约束,因此不能参与到污染物的还原降解。那么 EDC 不能代表含水层介质中能够参与非生物衰减的电子供体总量。而 Fe_{carb} 含量与非生物衰减速率呈良好线性关系。另收集样品对此关系进行验证,结果证明 Fe_{carb} 对非生物衰减速率具有预测作用。我们的研究结果揭示了铁形态对含水层介质 EEC 和 ANA 速率的重要指示意义。

关键词: 地下水系统; 氧化还原活性; 铁赋存状态; 介导电化学

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

气候驱动下页岩关键带土壤碳迁移转化与 风化作用机制研究

王诗琳¹, 文航^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

土壤和基岩作为最大的陆地碳库,其在复杂地形和气候梯度下碳迁移转化及其对化学风化作用机制仍不明确。本研究基于美国宾夕法尼亚州 Shale Hills 流域的土壤和溪流水化学、水文和地形数据集,构建流域尺度反应输运模型,揭示了水文-气候-地形协同调控下的碳通量耦合机制。研究表明,土壤呼吸产生的年碳通量中约 1.0%通过横向迁移进入河流系统,其余垂直迁移至大气中。气候变化驱动显著季节性差异:受强降水影响,冷湿季节每日横向碳迁移比例可骤增至 39.2%;年均硅酸盐风化速率呈现约 20%的季节性波动,其主导控制因素从冷湿季节的土壤二氧化碳(CO₂)浓度转变为干热季节的水分有效性。在常年湿润的谷底区域,硅酸盐风化对温度调控的土壤

CO₂浓度更敏感,而中坡和山脊顶部对土壤水分有效性变化的响应更为显著。而基岩深部的碳酸盐风化由黄铁矿氧化作用驱动且对气候变化无显著响应。在冷湿条件下,呼吸与风化产生的碳通量均随径流增加显著上升,并且呼吸敏感性的增加能够显著增加年尺度上横向碳迁移的比例、页岩风化速率以及溶质输出。本研究深入探讨了气候和地形对页岩关键带风化和碳通量的调控机制,进一步加深了对关键带碳循环的理解,为精准评估气候变化背景下关键带碳封存潜力及地表碳平衡演变提供了科学支撑。

关键词: 土壤呼吸; 化学风化作用; 气候变化; 页岩流域

基金项目: 国家自然科学基金项目(41925002)

作者简介: 王诗琳(2000-),女,硕士研究生,研究方向:流域生物地球化学循环模拟, E-mail: wangshilin910@163.com

*通信作者: 文航(1987-),男,博士,副教授,研究方向:地球关键带和生物地球化学, E-mail: wenhang@tju.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

硅 (Si) 同位素地球化学与硅质岩成因机理的研究进展

郑凯航¹, 朱光有^{1*}

1. 长江大学 (武汉校区), 武汉 430000

准确判识硅质岩 (SiO_2) 的成因机理一直是地质学研究中的难点问题。作为硅质岩的直接示踪同位素, 硅 (Si) 同位素在揭示硅质岩成因机理方面潜力巨大。近年来, 随着高精度 Si 同位素测试分析技术的快速发展, 运用 Si 同位素示踪不同硅质岩的硅质来源、迁移过程、沉积-成岩演化背景等方面取得了重大进展。为进一步推动 Si 同位素在约束硅质岩成因机理中更广泛的应用, 本文回顾了硅质岩成因类型, Si 同位素的分析测试方法、分馏机理、以及其在硅质岩成因研究中的应用, 取得如下认识: 硅质岩按成因类型可分为热水成因、火山成因、生物成因和交代成因。多接收电感耦合等离子质谱法和二次离子质谱法在 Si 同位素测试中都具有较高的精度, 分别可达优于 $\pm 0.10\text{‰}$ 和 $\pm 0.10\text{‰} \sim \pm 0.22\text{‰}$ 。Si 同位素分馏机理涉及多个方面, 扩散作用会造成 Si 同位素的选择性迁移并且影响同位素分馏的程度。温度、压力和化学成分等因素在凝结过程中共同作用, 决定了 Si 同位素的分馏程度。蒸发作用通过改变熔体的化

学成分和物理性质, 影响 Si 同位素的分馏。在低温地质作用中, Si 同位素分馏比高温地质过程更为显著, 例如化学风化、生物-非生物沉淀、生物吸收、吸附等过程。生物在吸收硅的过程中会引起同位素分馏, 从而导致生物地球化学过程中硅同位素相对丰度发生变化。不同生物在吸收过程中对 Si 同位素分馏存在差异。Si 同位素在硅质岩成因研究中的应用展现了其独特优势, 如揭示热液硅质岩的热液活动特征、火山硅质岩的岩浆起源和演化、生物硅质岩的形成机制以及交代硅质岩的硅质来源。为更准确判识硅质岩成因机理, 未来的研究需要在提高 Si 同位素分析测试精度、积累大样本数据、明确分馏机理和构建成因理论模型等深入探索。本文展示了 Si 同位素在硅质岩成因研究中的独特优势和重要意义, 为未来的研究方向和应用领域提供了有益的参考。

关键词: Si 同位素; 分馏机理; 硅质岩; 成因机理; 硅质来源

基金项目: 本文为中国国家自然科学基金委员会资助项目 (编号: 42073068) 的成果。

第一作者简介: 郑凯航 (2002-), 硕士研究生, 地质学专业, 主要从事石油与天然气地质学研究; Email: geozhengkaihang@126.com。

*通讯作者简介: 朱光有 (1973-), 博士, 主要从事石油与天然气地质学, 地球化学研究; Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn。

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

碳酸盐岩石风化增强全球河流氮同化过程

祁虹凯¹, 刘易^{1,2*}, 王浩然¹, 匡星星³, Aditya Nugraha Putra⁴,
焦赳赳⁵, 甘剑平^{2,6}

1. 香港科技大学 (广州) 地球与海洋大气科学学域, 广州 510000;

2. 港澳海洋研究中心, 香港 999077;

3. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 广东 深圳 518000;

4. University Brawijaya, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture,
Veteran Steer Malang, Indonesia 065145;

5. 香港大学 地球科学系, 香港 999077;

6. 香港科技大学 海洋科学系, 香港 999077

碳酸盐岩石风化为河流贡献大量溶解无机碳, 进而参与并影响河流的碳循环。然而, 地质背景对于河流氮循环的影响却往往被忽视。本研究通过珠江流域全流域的野外调查发现在雨季碳酸盐岩地区 (溶解无机碳较高) 溶解有机氮的分布与溶解无机氮及光照强度相一致, 但这一现象并未在非碳酸盐岩地区 (溶解无机碳较低) 出现。原位培养对比实验证实, 高溶解无机碳相较于低溶解无机碳存在对于氮同化 (有机氮生成) 过程的促进作用。这一促进作用及有机氮的差异分布由于受到温度和光照的限制, 在旱季并不明

显。这一发现并非仅存于珠江流域, 我们在印度尼西亚玛琅地区的不同地质背景的河流中观测到相同的有机氮分布差异现象。基于全球已发表的观测数据分析, 我们发现这一现象普遍存在于全球河流中。我们通过米氏方程纳入溶解无机碳限制因子更好的拟合了全球有机氮沿纬度的分布, 从而进一步证实了 DIC 影响氮同化作用这一长期被忽视的全球性现象。

关键词: 碳酸盐岩风化; 河流; 溶解无机碳; 氮同化

基金项目: 本研究受到香港研究资助局卓越学科领域计划 (项目编号: AoE/P-601/23-N), 广州市校联合资助专题 (香港科技大学 (广州)) 基础与应用基础研究项目 (项目编号: 2023A03J0640), 广东省土壤与地下水污染控制重点实验室 (项目编号: 2023B1212060002), 及港澳海洋中心资助。

第一作者简介: 祁虹凯 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 流域水文地质及氮循环。Email: chrisgardnerqihk@hotmail.com

*通信作者简介: 刘易 (1987-), 助理教授, 研究方向: 水文地质学。Email: yiliuyi@hkust-gz.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

镁同位素示踪青藏高原湖泊反风化作用及通量

胡忠亚^{1*}, 杨守业¹, 苏妮¹, 韩中²

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 成都理工大学, 成都 610059

青藏高原周缘河流的镁同位素指标被广泛用于示踪流域大陆风化过程及二氧化碳消耗通量。为了进一步了解青藏高原腹地区域的风化碳循环, 我们采集了高原腹地的河流和湖泊水样以及古湖泊沉积物, 系统分析了元素和镁同位素组成变化, 并与世界其它大型河流开展了对比研究。结果显示高原腹地区域的河水的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值在 -2.00‰ ~ -0.60‰ 之间, 平均值约为 $-1.12\text{‰} \pm 0.60\text{‰}$ 。河水中镁元素主要来源于白云岩和硅酸盐风化, 热泉以及雨水的贡献很少。与入湖河水相比, 封闭湖泊内的水体具有相对较低的 Ca/Na 、 Mg/Na 、 Al/Na 和 Si/Na 比值。但是水体整体相对富集 ^{26}Mg , 平均 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 $-0.61\text{‰} \pm 0.65\text{‰}$ 。依据元素相对亏损情况以及镁同位素变化, 开展了元素和同位素数值模拟分析, 结果表明湖泊内的含镁自生矿物沉积作用大约消耗了入湖河流带

来的近 90% 的镁离子, 其中矿物与水之间的镁同位素分馏程度 ($\Delta^{26}\text{Mg}_{\text{矿物-水}}$) 大约在 -0.09‰ ~ -0.06‰ 之间。古湖泊沉积物的扫描电镜观测结果显示, 湖泊自生含镁矿物由富镁碳酸盐矿物以及自生粘土矿物两部分组成。因此, 该分馏系数反映了富镁碳酸盐矿物与自生粘土矿物 (反风化) 共沉淀作用对湖水镁同位素的分馏影响。基于此, 我们进一步开展了镁同位素质量平衡计算, 结果表明, 在湖泊镁循环过程中, 反风化作用消耗的镁元素占封闭湖泊内总镁输出量的 80%。这些研究表明青藏高原封闭湖泊内反风化作用强烈, 反风化所释放的 CO_2 可以在很大程度上抵消流域内的风化石消耗。

关键词: 青藏高原; 反风化; 镁同位素; 风化; 碳循环

国家自然科学基金项目 (42230410, 42373005)

作者简介:

胡忠亚, 同济大学, 副教授, 研究方向: 主量元素循环及气候效应. Email: zhongyahu@tongji.edu.cn

杨守业, 同济大学, 教授, 研究方向: 边缘海“源-汇”过程及关键元素循环. Email: syyang@tongji.edu.cn

苏妮, 同济大学, 副教授, 研究方向: 流域风化. Email: nsu@tongji.edu.cn

韩中, 成都理工大学, 副研究员, 研究方向: 古海洋古气候古生物. Email: hanzhong19@cdut.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

黑色页岩的风化控制环境中有机结合态硒的赋存和转化

刘权¹, 皮坤福^{1*}, 王焰新¹

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

不合理的硒摄入是一个全球性的健康问题,与作物中的硒含量密切相关,而作物中的硒含量则直接受土壤中生物有效性硒的控制。尽管已有研究证明,土壤硒来源于富含有机质的母岩,并且硒在岩石中的形态及其释放机制决定了其在土壤中的生物有效性,但硒在整个成土作用中其赋存形式及转化机制仍不清楚。黑色页岩是全球众多富硒土壤的主要母质。长期以来,人们普遍认为黑色页岩的风化会将硒释放到地表环境中。与地壳平均硒丰度(约 0.05~0.09 mg/kg)相比,黑色页岩作为一种富含有机质的沉积岩,通常富集了更多对氧化还原敏感的硒。硒在黑色页岩中既与有机质结合,也与硫化物矿物具有亲和性。因此研究黑色页岩风化过程中硒的地球化学行为有利于深化我们对硒来源以及富集成因的理解。以深入揭示地表硒的形态分布及其转化机制为目的,本研究选择了中国恩施地区富硒黑色页岩风化壳剖面作为研究对象,以探讨硒的地球化学行为。为了查明黑色页岩在风化过程中的有机质变化,实验采用了 X 射线光电能谱(XPS)和固体核磁共振(SSNMR)等有机质表征技术对不同风化层单元进行分析。成土作用过程中硒的分馏是研究其地球化学行为的基础。随后,

采用连续化学提取法研究风化层剖面中硒的分布、赋存形态及其转化过程,在一定程度上揭示了风化过程中不同形态硒之间的相互作用。由于自然环境中硒的含量极低,传统方法难以直接观测其与其他元素的相互作用。因此,我们选择了不同风化壳单元中的黑色页岩,并采用纳米级二次离子质谱(NanoSIMS)等原位微区表征技术直接分析黄铁矿与铁氧化物矿物微界面处硒与有机质的分布特征。研究结果表明,与硒结合的有机质主要以胺的形式存在。在黑色页岩风化过程中,硒的形态转化可分为两个主要阶段:(i)首先,从母岩向弱风化层的转化过程中,黄铁矿结合态硒主要会转化为有机结合态硒;(ii)在上以阶段完成后,有机结合态硒和铁氧化物结合态硒迅速分解,并转化为具有更高生物利用性和迁移性的硒形态,如水溶性硒和吸附态硒;(iii)在近表层的全风化层,土壤又会接受外源硒(以有机结合态硒为主)的补充。这一新发现为区域土壤硒富集提供了更精细、更深入的证据,对理解不同时期硒的地球化学循环具有重要意义。

关键词: 有机结合态硒; 黑色页岩; 风化作用; 赋存转化

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2244218)

第一作者简介: 刘权(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 硒在风化壳上的地球化学行为。Email: 20191001182@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 皮坤福(1988-), 教授, 研究方向: 生源微量元素水文生物地球化学循环和水土污染与防治, 重点关注生源微量元素(如砷、硒、碘、氟)的来源、迁移转化、环境归趋和生态环境效应, 以及与公共健康的内在联系。Email: pikunfu@cug.edu.cn

作者简介: 王焰新(1963-), 教授, 研究方向: 主要从事水文地球化学、水污染控制、地下水污染及防治等领域的研究。Email: yx.wang@cug.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

河岸带地质电池的结构特征与关键组分识别

张鹏^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430078

通常氧化还原反应过程伴随着氧化剂或者还原剂的消耗, 而地质电池在氧化还原反应过程中自身结构和性质几乎不发生变化, 因此后者可以循环地参与氧化还原反应。目前研究证实磁铁矿、含铁黏土矿物和腐殖质可以充当地质电池材料, 然而关于实际沉积物能否充当地质电池尚不清楚。河岸带沉积物中富含大量的磁铁矿、含铁黏土矿物和腐殖质, 并且河岸带发生着频繁的河水-地下水交互作用, 因此有可能触发沉积物作为地质电池。为了验证上述假设, 本研究首先从汉江河岸带采集了 3 种不同岩性的沉积物开展模拟实验。3 轮氧化还原循环实验证实不同岩性

沉积物均可以循环地储存和释放电子, 并且反应后沉积物内部铁组分含量和结构几乎不发生变化, 因此可以推断河岸带沉积物可以作为地质电池。进一步本研究调查了河岸带场地地质电池的分布特征, 发现在河岸边以及临近的地下水水位波动带地质电池的电子交互容量比较高, 而远离河岸的区域的“地质电池”的电子交互容量较低, 其原因可能归结为河岸边以及地下水波动带氧化还原波动频繁, 从而激活了地质电池。

关键词: 河岸带; 地质电池; 氧化还原; 非均质

基金项目: 国家自然科学基金项目(42377056)

通讯作者简介: 张鹏(1989-), 副研究员, 研究方向: 河岸带水文地球化学. Email: zhangpeng@cug.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

有机质进入黏土矿物层间的微生物驱动机制

刘冬^{1,2*}, 余荣达^{1,2}, 沈宇果^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 王旭^{1,2}, 霍广铖^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

黏土矿物层间可有效保护有机质, 是土壤固碳和土壤矿物泵作用的重要机制之一。土壤中的部分 2:1 型黏土矿物, 如蒙脱石、蛭石、伊蒙混层矿物和 1.4 nm 过渡矿物(羟基间层矿物)等层间长赋存有机质。这些层间有机质, 可有效避免环境物理、化学及生物等对其的破坏, 形成稳定固碳效应。然而, 这些有机质进入黏土矿物层间的驱动力和相关机制如何仍尚不清楚。这不仅制约了我们对黏土矿物-有机质复合体形成机制的认识, 还影响到对土壤固碳效应的明确。本研究以土壤中典型天然粘土矿物为研究对象, 开展了有无微生物条件下的土壤天然有机质插层试验实验研究。结果表明, 仅存在土

壤有机质的条件下, 有机质无法进入黏土矿物层间; 同样, 仅存在微生物时, 黏土矿物层间也未能发现有机质。然而, 同时存在有机质和微生物时, 蒙脱石、蛭石等矿物层间出现了有机碳的信号, 这表明部分有机分子进入了其层间。因此, 很有可能的是, 在微生物的作用下, 部分有机质大分子被分解为小分子, 通过阳离子交换作用进入黏土矿物层间。由此可见, 黏土矿物层间有机碳的形成, 受到了土壤微生物的驱动作用。

关键词: 黏土矿物; 层间有机质; 微生物作用; 固碳

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

滨海湿地硫酸盐还原途径季节变化及其对甲烷排放影响

韩晓昆¹, 乔曼容¹, 刺伟², 丁虎¹, 郭庆军³, 李思亮¹, 郎赞超^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 山西大学 环境与资源学院, 太原 030031;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化过程 (S-AOM) 是调控滨海湿地甲烷排放的关键机制。然而, 滨海湿地沉积物中硫的循环过程及其对甲烷排放的影响尚不清楚。本研究通过采集夏季和冬季不同盐度滨海湿地沉积柱, 分析沉积物中甲烷、有机碳、不同形态铁和不同形态硫含量及其硫同位素组成, 探究沉积物中 S-AOM 和有机质硫酸盐还原过程 (OSR) 的季节变化特征及其对甲烷排放的影响。研究结果显示, 沉积物中酸可挥发性硫 (AVS) 和单质硫 (S^0) 的硫同位素组成以及硫酸盐和硫化物之间的硫同位素分馏系数呈现显著季节性垂向变化特征, 并且该变化与硫酸盐-甲烷转换带 (SMTZ) 季节性垂向变化一致, 证实滨海湿地沉积物中 S-AOM 和 OSR 的相对贡献比例

存在季节性垂向动态变化。研究表明, 夏季沉积物中 S-AOM 的反应速率较冬季高, 进而消耗更多硫酸盐和甲烷, 导致 SMTZ 垂向上移约 10~20 cm。此外, 研究显示滨海湿地水体高硫酸盐浓度促进沉积物中 S-AOM 对甲烷的消耗。本研究基于硫同位素示踪技术, 揭示了硫酸盐还原途径对 SMTZ 的动态响应规律, 完善了我们对于滨海湿地沉积物碳-硫耦合过程的理解, 强调了硫酸盐还原过程演变对滨海湿地甲烷通量具有显著调控作用, 为制定缓解气候变化的生态调控策略奠定了科学基础。

关键词: 硫同位素; 硫酸盐还原途径; 甲烷厌氧氧化作用; 沉积物; 滨海湿地

基金项目: 国家自然科学基金 (42103052) 和国家科技基础资源调查专项 (2021FY101001)

第一作者简介: 韩晓昆, 副研究员, 研究方向: 硫同位素环境地球化学. E-mail: xiaokun_han@tju.edu.cn

*通信作者简介: 郎赞超, 教授, 研究方向: 地表物质水文地球化学循环及其同位素示踪. E-mail: yunchao.lang@tju.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

有机质的激发效应及其对滨海地区碳汇的影响

戚羽霖^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

有机质是分布在地球各个圈层的重要化学物质, 是物质和能量传输的主要媒介, 与生态系统和碳库的源汇效应紧密相关。所以研究有机质是评估其生态环境效应的基础, 也是地学领域一直以来的研究热点和难点。滨海地区是陆地和海洋的交错过渡地带, 有机质的分解速率低, 单位面积碳储量在各类陆地生态系统中最高。从陆地系统到河口-湿地-陆架区这一陆海交错区域的碳循环以及有机质迁移、转化、埋藏的过程可能远比我们现有的认知更为复杂。滨海地区人口密度高、土地利用复杂、水盐梯度大, 是有机质分解、转化、沉积的重要场所, 也是揭示海洋中陆源有机碳

“失汇”的关键地带。本研究围绕激发效应 (priming effect, PE) 导致的有机质组成、结构和源汇变化机制, 通过室内模拟实验, 对环渤海地区海陆界面和特殊事件影响下激发效应对有机质的作用和强度进行研究, 并筛选可以指征激发效应的分子标志物, 进一步量化相关的驱动因素。模拟实验表明激发效应广泛存在于陆水界面的环境中, 尤其是在环境梯度大、人来活动剧烈的河口地区, 筑坝和人为活动对河口地区的碳汇功能影响深远。

关键词: 有机质; 激发效应; 滨海地区; 碳循环

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

超级 El Niño (2015—2016 年) 广州降水氢 (三) 氧同位素特征

谢露华^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州市 510640

2015—2016 年被认为是“史上最强”超级 El Niño 事件, 对我国南方带来异常降水, 比如广州 2016 年的降雨量高达 2638 mm, 是广州市自 1961 年来最多降雨量的一年。Ruan et al. (2019) 研究了 2015—2016 年 El Niño 事件对广州和香港降水氧同位素组成的影响。然而该研究只分析了降水的传统氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$), 广州降水只采集到 2015 年 12 月, 香港的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据是月平均值。降水的 d-excess ($=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$) 和三氧同位素 (^{17}O -excess 或 $\Delta^{17}\text{O}=\delta^{17}\text{O}-0.528\delta^{18}\text{O}$) 能较好地反映水汽源及水汽源的相对湿度 (Uechi and Uemura, 2019; Xia et al., 2023; Xie et al., 2011), 结合后向轨迹模型来研究水汽源的改变及各个水汽源的相对湿度情况。为此作者采集了 2015 年 1 月至 2016 年 12 月广州每场降水, 在 2018 年采用激光光谱仪 (LGR 公司) 测试了其中 2015 年 9 月至 2016 年 8 月一整年样品的氢氧同位素 (δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{17}\text{O}$), 进而得到 d-excess 和 ^{17}O -excess 参数。采用 WICO2016 其中 5 个标样 (Wassenaar et al., 2018) 及 LGR 公司提供的 3 个工作标样对样品进行了多次测量, 得到样品的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$, 但是至今尚未有 WICO2016 标样准确 $\delta^{17}\text{O}$ (即 ^{17}O -

excess) 的报道, 暂时认为所有以上标样的 $\Delta^{17}\text{O}$ 都为 0, 从而计算到标样的 $\delta^{17}\text{O}$ 值用来校正广州降水样品的 $\delta^{17}\text{O}$ 结果, 这与正确结果存在一些差异。结果显示广州 2016 年 1 月至 8 月降水场次频繁 (65 场), 1 月份和 3 月份具有异常高的降雨量; 大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 -12.1‰ ~ 1.4‰ 之间, $\delta^{17}\text{O}$ 在 -6.3‰ ~ 0.7‰ 之间; δD 在 -91.8‰ ~ 28.5‰ 之间; $\delta^{18}\text{O}$ 最低值比往年 (2007—2009 年, Xie et al., 2011) 的要高 2‰~3‰; 广州大气降水线为: $\delta\text{D}=7.93\delta^{18}\text{O}+8.36$ ($R^2=0.96$, $n=73$), 存在干湿季及季节性差异, 其斜率低于作者之前的研究 (Xie et al., 2011); 三氧同位素的关系为: $\delta^{17}\text{O}=0.520\delta^{18}\text{O}-0.031$ 或 $\delta^{17}\text{O}=0.522\delta^{18}\text{O}-0.029$ ($R^2=0.998$, $n=73$), 两者没有显著的差异。本文报道的广州降水氧同位素更好地记录了 2015—2016 年超级 El Niño 事件从“强盛”到“结束”过程, 发现超级 El Niño 事件华南季风区 (广州, 香港) 的降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值反而更高, 认同近距离来的海洋水汽的贡献更显著。

关键词: El Niño; 广州; 降水; 三氧同位素; 水汽源

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

喀斯特地球关键带的钾同位素循环特征

韩贵琳^{1*}, 屈睿¹, 张倩²

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

作为地球关键带物质循环的关键组分, 钾(K)的生物地球化学循环过程对维系生态系统稳定性和响应全球变化具有重要指示意义。近年来发展的钾同位素($\delta^{41}\text{K}$)作为示踪钾生物地球化学循环过程的新型指标, 其有效应用依赖于不同物质储库中钾同位素分馏机制及其特征参数, 因此当前亟需研究关键带中不同物质的钾同位素组分, 揭示关键带物质迁移过程中钾同位素分馏的主控因素, 以深化对钾循环与全球变化耦合关系的定量解析。本研究聚焦西南喀斯特生态脆弱区, 首次报道了化肥、植物以及不同土地利用下土壤中的钾同位素组成, 探究了影响钾同位素分馏的因素并拓展了相关应用。首先基于不同国家与种类的化肥中钾同位素值, 确立了化肥的钾同位素端元特征, 为量化农业输入提供了数据基础。针对生物地球化学过程, 首次揭示 C3 与 C4 植物叶片 $\delta^{41}\text{K}$ 存在显著分异, 可能与植物抗旱机制及酶活性差异导致的同

位素分馏有关, 并在一定程度上反映了植物营养元素平衡状态。此外, 本研究探究了自然林地、弃耕地、耕地三种不同土地利用类型的土壤钾同位素, 并发现土壤钾同位素受人为扰动特征明显, 且不同耕地的表层土壤均比深层土壤钾同位素更轻, 同时钾同位素分馏与土壤可蚀性因子呈显著负相关, 表明耕作扰动通过加剧土壤侵蚀导致轻钾同位素优先流失。本研究构建了农业活动-土壤侵蚀-钾同位素循环的响应框架, 提出 $\delta^{41}\text{K}$ 可作为量化人类干扰强度与生态恢复潜力的新型示踪剂。未来需进一步融合多界面同位素示踪与过程模型, 揭示关键带钾循环对全球变化的阈值响应, 为喀斯特区生态修复与可持续农业管理提供科学依据。

关键词: 钾同位素; 地球关键带; 化肥; 土壤侵蚀; 生物地球化学循环

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

新元古—早古生代大陆风化革命

李高军^{1*}, 欧阳盛辉¹

1. 南京大学, 江苏南京 210023

我们在这个汇报中提出一个观点: 新元古—早古生代大气氧化之前可能只存在很少的大陆风化。大数据显示泥岩的 K/Al 记录在新元古代早期以来持续降低, 我们认为这是沉积泥岩储库中增加的大陆风化 Al 输入稀释了热液 K 输入导致的。为了解释大陆风化和大气氧气之间的耦合关系, 自然界需要一个能够响应可能与构造活动相关外部盈力的正反馈机制。这个正反馈机制囊括了两部分: 大陆风化 P 输入控制机碳埋藏以及大气氧气含量, 氧气通过限定氧化风化前锋带深度进而控制大陆风化效率。其他地质记录能够支持这个假说。由于较低的 Fe 含量, 长英质风化壳相对铁镁质风化壳在同等氧气变化时, 能够发育更深的风化前锋带。为了维持 CO_2 消耗以平衡碳循环, 低氧条件下相对低的大陆风化通量也意味着相对高的海洋风化通量 (包括玄武质洋壳蚀变和沉积物风化)。因此风化岩性必定存在巨大变化, 从而导致细

颗粒陆源沉积物可能无法代表同期暴露的地壳。大气氧气的风化岩性效应可能一定程度引起了新元古—早古生代海水 Sr 同位素上升和沉积物 ϵNd 下降。由于长英质岩石相对玄武质岩石具有更高的 $Al/(Ca+Mg)$, 当风化岩性变化时, 为了维持相同 CO_2 消耗, 会形成更多粘土, 这可能是粘土工厂出现, 冲积泥岩频率升高和晚寒武纪海水 Li 同位素升高的原因。新元古—早古生代大陆风化革命可能已经对地球系统演化产生了深远影响。陆源粘土增加后, 沉积物润滑俯冲和含水粘土俯冲可能会影响固体地球动力学。粘土形成能促进土壤形成和陆地水的保持, 有利于陆生植物登陆。大气氧化引起大陆风化吸收 CO_2 效率升高甚至可能引发了新元古代雪球地球事件。

关键词: 大陆风化; 泥岩 K/Al ; 大气氧化; 风化岩性; 粘土工厂

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42325302)

第一作者简介: 李高军 (1983—), 教授, 研究方向: 大陆风化地球化学. Email: ligaojun@nju.edu.cn

*通信作者简介: 李高军 (1983—), 教授, 研究方向: 大陆风化地球化学. Email: ligaojun@nju.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

光致配体-金属电荷转移驱动下水铁矿的转化行为研究

王成^{1,2}, 周水晶^{1,2}, 万彪^{1,2}, 王小明^{1,2}, 殷辉^{1,2}, 谭文峰^{1,2}, 冯雄汉^{1,2*}

1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070;

2. 国家环境保护土壤健康诊断与绿色修复重点实验室, 武汉 430070

水铁矿是一种普遍存在于土壤和沉积物中的弱晶质氧化铁矿物, 常与溶解性有机质紧密结合。尽管配体-金属电荷转移 (LMCT) 诱导的水铁矿光还原溶解已有广泛报道, 而该过程能否驱动矿相转化以及改变赋存元素的环境归趋仍不清楚。因此, 本研究系统探究了模拟太阳光照和草酸为代表性溶解性有机质条件下, 一些环境因素如 pH、氧分压以及共存砷形态和含量对水铁矿转化的影响。结果表明, 草酸介导的 LMCT 过程使 Fe (II) 大量释放和质子消耗, 并且后者大大促进了新生 Fe (II) 与水铁矿之间的电子转移和原子交换 (IET-AE) 过程。pH 为 5.0~8.0 时, 水铁矿向针铁矿转化, 这主要是由于 LMCT 过程提供了足量的 Fe (II) (约 80~2700 $\mu\text{mol/L}$) 以及质子的消耗有利于 Fe (II) 在水铁矿上的吸附; 而

pH 为 3.0~5.0 时, 水铁矿仅还原溶解; pH 超过 8.0 时, 则不转化。提高氧分压和砷含量均会抑制水铁矿转化。氧分压上升不利于 Fe (II) 的生成和留存, 而砷的存在改变了水铁矿的表面性质从而抑制 IET-AE 过程。As (III/V) 存在时水铁矿还会转化为纤铁矿, 并且 As (V) 含量较高时转化产物以纤铁矿为主。此外, 溶液化学提取和 As K 边 EXAFS 光谱结果表明, 反应过程中砷以 As (V) 的形式进入针铁矿和纤铁矿结构中而被固定。综上所述, 这些发现为我们对自然环境中光驱动下弱晶质氧化铁转化和元素迁移提供了一些新的见解。

关键词: 水铁矿转化; 光照; LMCT; IET-AE; As 形态

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42030709 & 42377303)

第一作者简介: 王成 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学. Email: 2848269815@qq.com

*通信作者简介: 冯雄汉 (1973-), 教授, 研究方向: 土壤矿物与环境. Email: fxxh73@mail.hazu.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

基于青藏高原冻土区石笋和热融湖记录的冰消期 温室气体上升的源与驱动机制研究

刘建宝^{1*}

1. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871

冰期-间冰期旋回的一个显著气候变化特征就是大气温室气体 (CO_2 和 CH_4) 浓度的快速上升, 该时期没有人为排放的干扰, 是研究自然源温室气体排放对气候变化响应的绝佳时间窗口。了解冰消期温室气体上升的源与驱动机制对厘清温室气体、气候变化和生物地球化学循环之间的关系非常重要, 能够提高对当前和未来温室气体-气候反馈的理解。此外, 冰消期全球变暖在某种程度上是当前人为暖期的历史相似形, 可为预测未来全球气候环境变化提供重要参考和启示, 对驱动过去温室气体变化的源与驱动机制的

研究可以减少围绕这些气候反馈的不确定性。本研究利用湖泊沉积物和石笋记录, 通过生物标志物、单体碳同位素分析、碳十四测试、铀系年代学及数值模拟等方法, 得到以下发现 1) 湖泊甲烷释放响应于增温速率而不是绝对温度, 是冰消期大气 CH_4 上升的重要北方源。2) 冰消期 AMOC 停滞导致低纬青藏高原冻土比北极冻土更早退化, 对冰消期大气 CO_2 上升有正反馈作用。

关键词: 碳循环; 冰消期; 温室气体

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

Enhancement of the Formation and Stability of Iron-Bound Organic Carbon through Saline-alkali Soil Improvement and Its Potential Mechanisms

王书翰^{1*}

1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193

The protection of soil organic carbon(SOC)by iron oxides has been established as an important mechanism for the long-term stability of SOC. Given the extensive global area of saline-alkali soils, its improvement holds significant implications for food security and soil carbon storage. However, the effects of saline-alkali soil improvement on iron-bound organic carbon (Fe-OC) remain poorly understood. Therefore, this study revealed the impact of gypsum and bio-based material amendments on Fe-OC in saline soils from Northeast China and the underlying mechanisms. The results demonstrated that these amendments significantly increased SOC, total nitrogen, total phosphorus, and microbial richness while decreasing soil pH. Notably, Fe-OC content showed a marked increase, although its proportion relative to total organic carbon remained unchanged. The association mode of Fe-OC shifted from adsorption to predominantly co-precipitation. Thus, our results indicated that the improvement enhanced the formation and stability of Fe-OC, thereby

promoting soil carbon sequestration. Additionally, bio-based material amendments promoted the transformation of crystalline iron into poorly-crystalline forms. The enhancement in soil nutrients and microorganisms following the improvement served as the primary positive drivers for the formation and stabilization of Fe-OC, as well as mineral transformations. Conversely, the decrease in pH acted as the main negative driver. The improvement also reduced the preferential binding of iron minerals with microbially-derived carbon. Moreover, this study showed that aromatic-C was preferentially adsorbed by iron oxides. This study offered valuable insights into the effects of saline-alkali remediation on Fe-OC and underscored the significance of saline-alkali improvement for soil carbon sequestration.

Key words: saline-alkali soil improvement; iron-bound organic carbon; mineral transformation; soil carbon sequestration; carbon sources

基金项目: National Key Technology R & D Program of the Ministry of Science and Technology of China(2023YFD150050305)and “Double First-Class” project of the Ministry of Education of China (2024AC008) .

第一作者简介: 王书翰 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 环境地球化学与土壤地球化学. Email: 284972521@qq.com

通信作者简介: 胡树文 (1969-), 教授, 研究方向: 环境化学与环境材料. Email: shuwenhu@cau.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

表生过程中的阳离子交换反应对镁同位素循环的影响

蔡迪^{1*}, 杨守业¹

1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092

表生过程中关于水-沉积物相互作用的研究往往聚焦于矿物溶解-沉淀过程。尽管矿物表面或层间可交换阳离子的存在早已被认识, 但这一活性阳离子储库与地表水耦合的化学演化过程仍有待深入研究。本研究通过实验证实镁同位素 ($\delta^{26}\text{Mg}$) 可作为示踪阳离子交换过程的有效示踪指标, 并系统阐述了表生过程中阳离子交换反应对镁同位素循环的影响。首先, 我们开展了一系列模拟试验, 结果显示, 溶解态镁在与黏土矿物 (高岭石、蒙脱石)、阳离子交换树脂, 以及天然风化沉积物的交换过程中, 镁同位素分馏并不显著 ($<0.2\%$)。野外观测进一步证实了实验室的模拟实验结果: 河岸带、河流及海洋环境中溶解态镁与可交换镁的同位素组成几乎一致。因此, 镁同位素交换可以视作一个简单的混合过程, 可交换镁改变水体 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的潜力 (或反之) 取决于两相中镁的质量比。研究进一步探究了从风化壳到河流最终至河口的

地表沉积物产生-搬运过程, 并量化对比了不同阶段沉积物可交换态镁与对应水体的镁含量差异, 以及各个阶段阳离子交换反应对镁同位素循环的影响。结果表明, 风化剖面中的可交换阳离子总量一般远高于雨水或孔隙水。风化壳中庞大的可交换镁储库可有效缓冲渗流水的镁浓度及同位素组成。在全球河流中, 河流悬浮物的可交换镁仅占溶解态镁总量的 $6\% \pm 1.5\%$ 。但在强烈侵蚀流域, 侵蚀沉积物携带的可交换镁可能与溶解态相当甚至更高, 可能通过快速交换反应影响河水镁同位素组成。当河流沉积物入海时, 与海水建立的新交换平衡可改变某些溶解阳离子 (如 Ba, 重金属元素等) 向海洋的输出通量。但由于入海溶解镁通量远超沉积物携带的可交换镁, 镁及其同位素受此过程影响较小。

关键词: 镁同位素; 阳离子交换; 风化; 河流

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

典型城市化小流域河水溶质来源与水文过程解析： 基于多元统计分析和反演模型的方法

阳昆桦^{1*}

1. 浙江工业大学 前沿交叉科学研究院, 杭州 310014

摘要: 理解岩性背景和人为干扰对河流水化学的复杂影响对水资源管理至关重要, 特别是在城市化地区。本研究在中国东部太湖流域的城市河流东苕溪采集了丰水期的河水样品, 分析了 23 种水文地球化学参数 (包括理化参数、主微量离子、稳定同位素) 的空间变化特征, 通过多元统计分析和反演混合模型的综合方法揭示了显著的人为干扰。根据 Spearman 秩相关和聚类分析的结果, 选取 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 δ^2H 、pH 等 6 种关键水文地球化学参数进行因子分析。其中, 因子 FAC1 (51.39%) 主要反映水岩相互作用和水文过程的影响, 因子 FAC2 (36.38%) 主要反映城市和农业污水的输入。反演混合模型的结果表明, 河水阳离子的来源贡献比例依次为: 碳酸盐岩

(40.57%)、硅酸盐 (27.63%)、城市输入 (20.86%)、农业输入 (9.52%) 和大气降水 (1.42%)。这些方法共同证实了岩石风化作用是东苕溪河水的主要溶质来源, 其次是显著的人为输入和太湖回水的影响。同时, 子流域尺度上溶质来源的空间累积效应显著 ($r = 0.886$, $p = 0.019$)。不透水表面、碳酸盐岩和硅酸盐岩石的百分比分别控制了城市输入、碳酸盐风化和硅酸盐风化对河水阳离子的贡献。研究结果强调了城市输入和岩石风化对河流溶质源的累积效应, 为城市化地区水资源的可持续管理提供了科学依据。

关键词: 水化学; 水文过程; 河流溶质; 源解析; 城市河流

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

台湾山溪性河流沉积物铁化学相态组成特征及控制机制

焦裕杰¹, 苏妮^{1*}, 杨守业¹

1. 同济大学 海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

台湾岛小型山地河流 (SMRs) 因具有全球极高的剥蚀速率, 向海洋输送了大量的溶解态和颗粒态物质。本研究以台湾活跃造山带的最长河流浊水溪为研究对象, 聚焦于反应活性组分的铁氧化物态组分研究, 采用六步提取法获取了台湾浊水溪河流沉积物、悬浮物和基岩样品的总铁 (Fe_T)、高活性铁 (Fe_{HR})、弱活性铁 (Fe_{PR}) 和不活性铁 (Fe_U) 组分, 其中, 高活性铁组分包括碳酸盐结合态铁 (Fe_{carb})、易还原态铁氧化物 (Fe_{ox1})、可还原态铁氧化物 (Fe_{ox2})、磁铁矿 (Fe_{mag})。对上述样品开展主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析, 并结合 Al 元素含量、粒度、总有机碳 (TOC) 含量、化学蚀变指数 (CIA) 以及物理剥蚀速率 ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$), 探讨沉积物铁化学相态组成特征及控制机制。研究发现台湾浊水溪河流沉积物与悬浮物样品 Fe 相态含量大小关系均为 $\text{Fe}_{PR} > \text{Fe}_{HR} > \text{Fe}_U$, 且 Fe_T 含量从上游到下游总体呈降低趋势。进一步分析表明, Fe_{HR} 含量与 Al 含量、粒度、TOC 含量、CIA

无明显相关性, 而 Fe_{PR} 含量与这些指标均表现出显著正相关性, 这一趋势与全球河流以及典型大河流域 (如长江流域) 的相关研究结果有显著差异。此外, $\text{Fe}_{HR}/\text{Fe}_T$ 比值与物理剥蚀速率具有显著负相关性, 表明在物理剥蚀速率较高的上游板岩地区, 化学风化作用受到抑制, 反映出台湾岛是典型的风化限制型地区 (Weathering-limited regime)。台湾岛基岩多为沉积岩和变质沉积岩, 具有多次沉积旋回的风化信息, 已有研究指出台湾河流沉积物的地球化学组成主要受流域岩性控制。基于 $\text{Fe}_{HR}/\text{Fe}_T$ 、 $\text{Fe}_{PR}/\text{Fe}_T$ 与 Fe/Al 比值的相关性分析, 揭示出浊水溪河流沉积物 Fe_{HR} 和 Fe_{PR} 的分布特征也主要受流域岩性控制。这些发现为深入理解入海颗粒态 Fe 的源汇过程、地球化学循环及其环境效应具有重要参考价值。

关键词: 铁化学相态; 山地河流; 风化; 物源; 台湾岛

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 42173008); 国家重点研发计划项目 (批准号: 2022YFF0800501)

第一作者简介: 焦裕杰 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 沉积地球化学. Email: 2433404@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 苏妮 (1983-), 副教授, 研究方向: 大陆边缘沉积学. Email: nsu@tongji.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

非传统稳定同位素 (Sr-K-Mg-Li-Os) 示踪 地球大陆风化的进展与挑战

张杰志^{1*}

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

传统稳定同位素在灵敏度、分辨能力和抗干扰性等方面相较于非传统稳定同位素存在明显不足, 这制约了其在大陆风化研究中的广泛应用。尽管已有大量研究聚焦于单一的非传统稳定同位素示踪风化的研究, 但单一同位素在信息量、分辨能力、解耦多因素影响等方面存在局限性, 缺失在非传统稳定同位素耦合方面的系统研究。为了推动该领域的进一步发展, 本文从实验测试方法与进展、储库特征、分馏机制以及示踪大陆风化的应用等方面进行了综述。近年来, 随着高精度同位素检测技术的不断进步, 非传统稳定同位素 (Sr、K、Mg、Li、Os) 在示踪地球深时大陆风化研究中取得重要进展。在实验测试方面, 溶液法作为一种广泛应用的化学分析技术, 凭借其高灵敏度和广泛的样品适用性, 通过样品的采集与处理、化学分离与纯化等多流程, 结合多接收电感耦合等离子体质谱法 (MC-ICP-MS) 等质谱技术, 实现了对同位素的高精度测量。

由于不同元素的纯化方法具有高度特异性, 且常用测试技术各具优劣, 实际应用中需根据样品性质和研究目标进行综合选择。非传统稳定同位素在不同储库 (地幔、大陆地壳、水圈、生物组成) 中表现出独特的特征, 反映了物质来源、地球化学过程、环境条件等差异。其分馏机制较为复杂, 受到风化强度、温度、水岩相互作用以及气候条件等多种因素的综合影响。在示踪大陆风化应用中, 非传统稳定同位素能够探究风化与气候变化直接的关系、揭示风化强度与化学反应的规律、追踪大陆风化过程中的物质来源与迁移, 以及研究风化对水文地球化学循环的影响。通过多同位素耦合分析, 能够整合多种同位素体系的信息, 从而为深入理解风化作用的复杂性及其与古环境条件的相互作用提供了更为有力的手段。

关键词: 非传统稳定同位素; 耦合; 储库; 分馏; 大陆风化

第一作者简介: 张杰志 (2000), 硕士研究生, 研究方向: 地质学. Email: 19895253401@163.com

*通信作者简介: 朱光有 (1973-), 教授, 研究方向: 地质学. Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

源-汇沉积过程的碳汇作用

杨江海^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

硅酸盐风化是地质时期气候系统演化的重要驱动机制, 它通过消耗大气 CO_2 及随后的碳酸盐矿物沉淀将大气 CO_2 重新运移到岩石储库中。在源-汇沉积体系中, 硅酸盐风化可以发生于剥蚀区, 也可以发生于广袤的洪泛平原区, 在碎屑颗粒物入海后还可与海水发生化学蚀变, 并且火山或弱风化碎屑物质在海底沉积物中, 伴随甲烷的硫酸盐厌氧氧化可进一步发生化学风化。其中, 剥蚀区-洪泛平原区的地表和海底沉积物中的海洋硅酸盐风化, 特别是玄武岩质火山岩的风化作用, 具有重要的碳汇效应。此外, 地表风化和海底硅酸盐蚀变会产生大量的 P 等营养元素, 可促进海洋初级生产力的繁盛, 将大气 CO_2 转变为有机碳而实现碳埋藏。剥蚀区的快速侵蚀产生弱风化的碎屑沉积物, 随河流或风运移至暖湿的低地平原区后可发生再风化, 现代亚马逊平原和恒河平原的河流沉积物研究表明, 剥蚀区来源的碎屑沉积物在洪泛平原

区的再风化作用对流域风化碳汇具有重要贡献。陆源或火山碎屑最终堆积于大陆边缘, 这里也是有机质快速埋藏的重要场所, 同时也拥有最高的生物甲烷产率, 有利于硫酸盐还原-甲烷厌氧氧化作用(AOM)作用的发生, 因此通常具有较浅的硫酸盐-甲烷转换带。在 SMTZ 之下的海底沉积物产甲烷带, 微生物作用产生甲烷并向上扩散, 也形成 CO_2 造成孔隙水 pH 值的降低和碳酸盐的溶解, 使得埋藏的碳又返回到大气-海洋系统; 如果海底沉积物中含有碎屑长石或火山玻璃等活性硅酸盐物质, 则可以减缓孔隙水 pH 的降低而避免碳酸盐的溶解, 而且也通过再风化作用释放 Ca、Mg 等阳离子与 HCO_3^- 结合形成自生碳酸盐矿物。

关键词: 源-汇沉积体系; 侵蚀源区硅酸盐风化; 碳汇作用; 冲积平原再风化; 海底硅酸盐风化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42122015)

第一作者简介: 杨江海(1984-), 教授, 研究方向: 沉积地质学. Email: yangjh@cug.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

边缘海铁循环的源贡献：来自长江口沉积物铁同位素组成的证据

王姣^{1,2}, 孙子威², 袁华茂^{3,4}, 宋金明^{3,4}, 李宁⁵, 李琛⁵, 肖媛媛^{1,2,6*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室海洋观测与预报重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

4. 青岛海洋科技中心 海洋生态与环境科学实验室, 山东 青岛 266237;

5. 中国科学院海洋研究所 公共技术中心, 山东 青岛 266071;

6. 青岛海洋科技中心 海洋地质实验室, 山东 青岛 266237

长江口边缘海沉积物作为中国东部沿海重要的河流和陆源物质输入区, 其铁收支对了解边缘海生态系统的铁循环具有重要意义。近年来, 铁同位素组成已被用作了解地球铁循环和生物地球化学过程的重要指标。本文报道了长江口 3100-1 和 DH5 两个沉积物岩心的铁同位素变化。3100-1 岩心样品 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围为 0.02‰~0.08‰, 平均值为 $0.05\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$; DH5 岩心样品 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围为 0.02‰~0.10‰, 平均值为 $0.07\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ 。两个岩心沉积物的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与有机碳含量、化学风化、粒度、氧化还原条件等

参数的相关性不显著。主成分分析揭示了几个共同的影响因素, 特别是源物质输入, 显著影响了两个岩心的铁同位素组成。同时, DH5 岩心铁同位素组成可以反映长江流域人类活动的变化。研究结果为理解自然和人为影响下的边缘海铁循环提供了关键的铁同位素证据, 为全球边缘海生态系统研究提供了重要的视角。

关键词: 长江口; 中国边缘海沉积物; 铁同位素; 主成分分析; 源物质

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

氧化还原波动下有机质-水铁矿复合体产羟基自由基及其环境意义

曾强^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

氧化还原波动条件下矿物源自由基的产生深刻影响了表生环境中的元素循环过程, 尤其是碳的周转。但是目前对于矿物-有机质复合体在此类生境中的地球化学行为仍存在较大的研究空白。实验选取了 3 种表生环境中的代表性有机质: 柠檬酸(代表小分子有机质)、多糖(代表微生物源有机质)、木质素(代表植物源有机质), 与水铁矿进行共沉淀, 合成有机质-水铁矿复合体, 并通过多个铁氧化还原循环, 探究该过程中羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的产生及有机质的转化行为。

实验发现在氧化条件下, 不同的还原态有机质-水铁矿复合体均能够产生 $\cdot\text{OH}$ 。有机质的存在影响了 $\cdot\text{OH}$ 的产生速率及效率(即单位 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化产生 $\cdot\text{OH}$ 的量)。 $\cdot\text{OH}$ 的产生效率在氧化初期和氧化后期阶段存在明显的差异。在氧化的初始阶段, 由于体系内相对高浓度的 $\text{Fe}(\text{II})$ 即作为 $\cdot\text{OH}$ 产生的“源”

又是捕获 $\cdot\text{OH}$ 的“汇”, 导致整体 $\cdot\text{OH}$ 的产生效率较低。共沉淀有机质同样作为 $\cdot\text{OH}$ 的“汇”, 会进一步降低 $\cdot\text{OH}$ 的产生效率。在氧化的后期阶段, 由于体系内 $\text{Fe}(\text{II})$ 浓度的降低, $\cdot\text{OH}$ 的产生效率显著增加, 同时有机质的存在会进一步钝化 $\text{Fe}(\text{II})$ 对 $\cdot\text{OH}$ 的捕获效果。另外有机质还能改变反应过程中的电子传递路径, 促进均相体系中 $\cdot\text{OH}$ 的产量, 从而进一步增加 $\cdot\text{OH}$ 的产生效率。不同的有机质类型也对 $\cdot\text{OH}$ 产生效率也有不同的影响。木质素由于其本身具有氧化还原活性的官能团, 对 $\cdot\text{OH}$ 产量促进更加明显。另外, $\cdot\text{OH}$ 的产生还显著改变了木质素类复杂有机质的化学性质, 增加了其含氧官能团比例, 可能深刻影响了该类有机质在厌氧环境中的生物可利用性。

关键词: 铁氧化物; 有机质; 氧化还原; 羟基自由基

基金项目: 国家自然科学基金项目(42002038, 42192503)

第一作者简介: 曾强(1990-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学, 地质微生物. Email: zengq@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 曾强(1990-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学, 地质微生物. Email: zengq@cugb.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

关键微生物类群驱动内陆水体甲烷和惰性溶解有机质同步产生

史新杰¹, 李婉珠¹, 王宝利^{1,2*}, 杨美玲¹, 刘丛强^{1,2}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 天津环渤海滨海地球关键带国家野外科学观测研究站, 天津 300072

内陆水体是温室气体甲烷(CH_4)的重要来源, 内陆水体甲烷产生受到水体溶解有机质(DOM)、氧化还原条件和微生物群落组成等多种因素的影响, 具有明显的时空异质性。惰性溶解有机质(RDOM)能够抵抗微生物的快速降解, 从而在水生环境中滞留长达数百至数千年, 对评估水生生态系统的自然固碳潜力有重要意义。作为内陆水体碳循环的重要组成部分, 甲烷和 RDOM 的产生都依赖于微生物群落对有机碳的连续处理过程, 但目前尚不清楚这两个过程之间的联系以及潜在的微生物调控机制。为探究上述问题, 对我国不同类型的内陆水体进行了大环境梯度调查, 利用色谱、光谱、质谱和高通量测序等手段, 测定了水体甲烷浓度、DOM 化学组成、微生物群落组成、碳循环功能基因和相关环境参数。研究发现, 全国范围内水体甲烷和 RDOM 表现出相似的空间分布模式。在湖泊、河流、湿地和水库等多种类型的内陆

水体中, 普遍存在关键微生物类群(i.e., *Fluviicola* 和 *Polynucleobacter*)驱动甲烷和 RDOM 同步产生的过程。关键微生物类群通过促进微生物群落之间的合作, 既驱动了活性溶解有机质转化为 RDOM 的过程, 同时有利于产甲烷微生物的生存, 进而促进水体甲烷的产生。这一过程还受到总氮和溶解氧浓度等环境因素的影响。未来需要结合更多的实地调查和实验室控制实验, 来充分理解这些复杂过程。本研究加深了对于内陆水体碳周转微生物驱动机制的认识, 并强调了关键微生物类群的重要作用, 为实验室开展相关的控制实验提供了有用参考。考虑到甲烷和 RDOM 产生与内陆水体碳源汇关系密切相关, 本研究为准确评估内陆水生生态系统碳收支提供了科学依据。

关键词: 甲烷; 惰性溶解有机质; 关键微生物类群; 微生物相互作用

基金项目: 国家自然科学基金(42293264 和 42293262), 中国博士后科学基金(GZC20241196)

第一作者简介: 史新杰(1996-), 博士研究生, 研究方向: 湿地水体温室气体。Email: xinjie_shi@tju.edu.cn

通信作者简介: 王宝利(1976-), 教授, 研究方向: 水体微生物生态和物质循环。Email: baoli.wang@tju.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

土壤结构影响 N_2O 产生与排放的机理研究

晏智锋^{1*}, 常保璇¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

土壤结构主要通过影响底物有效性和气体扩散来调节土壤氧化亚氮 (N_2O) 的产生和排放。然而, 土壤结构对二者的影响及其对水分变化的响应仍然难以捉摸。本研究在不同水分 (40%、60%、80% 和 100%WFPS) 条件下, 对填充 (扰动) 和原状 (未扰动) 土柱进行了为期 21 天的室内培养实验。在整个培养期内连续监测土壤 CO_2 和 N_2O 排放通量, 同时培养结束时测量土壤相对气体扩散系数和垂直剖面 O_2 浓度。结果表明, 填充土柱的 CO_2 和 N_2O 通量分

别是原状土柱的 3~9 倍和 2~25 倍, 且原状土柱排放通量更接近野外观测结果。但两者的相对土壤气体扩散系数差异并不明显, 尤其是在高水分条件下。此外, 同一水分条件下, N_2O 通量与 CO_2 通量间存在显著的指数相关性。因此, 填充土柱对土壤 N_2O 排放的高估可能更多归因于土壤结构的破坏导致的底物有效性增加, 而不是气体扩散能力的变化。

关键词: 土壤结构; 氧化亚氮

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

生物质源热成有机质形成特征与环境效应

宋凡浩^{1*}

1. 中国环境科学研究院 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 北京 100012

生物质热解过程可以产生大量的热成有机质 (Pyrogenic Organic Matter, PyOM), 包含挥发性有机物、生物炭和生物油等, 既有产物回收利用价值, 也存在潜在的环境污染风险。本文综述了生物质中半纤维素、纤维素和木质素组分的热降解特征, 聚焦生物质源挥发性 PyOM 和生物炭的核心产物, 重点剖析了 PyOM 形成过程及关键环境效应。生物质源 PyOM 涉及气-固-液三相体系, 表现出协同形成的关联机制。挥发性 PyOM 动态形成过程与半纤维素、纤维素和木质素组分的热稳定性差异密切相关, 涉及键断裂、解聚、缩合和转化等反应, 对大气环境质量和人体健康构成潜在风

险。随着热成温度的升高, 生物炭结构的芳香性、稳定性、比表面积和孔隙度增加, 而不稳定官能团丰度减少。生物炭微观结构的多样性及异质性可以改善土壤理化性质, 影响环境中污染物的迁移和转化。未来工作需要重点关注生物质热解过程中 PyOM 的在线监测与污染防治, 以及生物质源 PyOM 进入环境后的迁移、转化与生物毒性等行为, 为深入评估 PyOM 的环境地球化学过程及风险提供重要的科学依据。

关键词: 生物质; 热解特征; 热成有机质; 形成过程; 环境效应

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

渤海、黄海和东海沉积有机碳的分布、埋藏及碳汇效应

乔淑卿^{1*}, 石学法^{1,2}, 吴斌^{1,2}, 姚政权^{1,2}, 胡利民^{1,2,3},
盛洁¹, 刘焱光^{1,2}, 刘升发^{1,2}, 王昆山^{1,2}, 邹建军^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;
2. 青岛海洋科技中心 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100

海洋是地球上最大的活性碳库。有机碳作为海洋固碳的主要形态,其沉积和埋藏在全球碳循环中扮演着重要的角色。我们利用采自渤海、黄海和东海海域的 5796 站沉积有机碳含量及相关地球化学和沉积学参数,编制了系列图件,总结阐述了中国东部近海沉积有机碳分布和埋藏规律;系统估算了渤海、黄海和东海有机碳埋藏通量;综合评估了中国东部近海沉积碳汇效应强度,基本摸清了渤海、黄海和东海沉积有机碳“家底”。研究结果表明,渤海、黄海和东海沉积有机碳含量介于 0.00%~2.12%之间,平均含量为 $0.47\% \pm 0.26\%$ 。有机碳含量主要受细粒沉积物组分控制,泥质区有机碳含量

平均值比非泥质区高 39%。渤海、黄海和东海现代沉积有机碳主要埋藏在 7 大泥质区,其沉积有机碳埋藏通量合计约为 8.20 Mt C/a,生源有机碳埋藏通量为 6.92 Mt/a。中国东部近海沉积物中每年固定的有机碳相当于 25.37 Mt 大气 CO₂,具有非常可观的碳汇效应。渤海、黄海和东海陆源有机碳的分布和埋藏主要受大河输入和海区复杂水动力环境的影响,但筑坝等人类活动已显著改变了近海泥质区有机碳的埋藏。

关键词: 沉积有机碳;埋藏通量;碳汇效应;碳循环;中国东部近海

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

气候变化与植被恢复对典型西南喀斯特关键带 溶解性无机碳的影响分析

王冰琴¹, 文航^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072

河流溶解无机碳 (DIC) 作为连接地球关键带各圈层 (包括岩土圈、水圈、生物圈和大气圈) 碳交换的重要纽带, 其通量动态不仅是揭示陆地碳循环机制的核心指标, 更反映着地球关键带物质能量传递过程中碳足迹的时空演变特征。然而, 在气候变暖和人类活动的共同影响下, DIC 的动态正在发生显著变化。由于长期观测数据的匮乏以及驱动因素之间复杂的相互作用, 量化这些变化对 DIC 通量的影响仍面临巨大挑战。本研究聚焦于以下科学问题: 气候和土地利用变化如何以及在多大程度上影响 DIC 生成与输出的长期季节性和年度性趋势? 本研究依托中国西南贵州普定喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站展开, 选择了经历了显著气候变暖、干旱和森林恢复过程的后寨喀斯特流域为研究区域, 构建了一个基于过程的生物地球化学耦合模型 (BioRT-Flux-PIHM)。研究结果显示, 从 1980s 至 2010s, 研究区域的年降水量从 1261 mm 下降至 1005 mm, 年径流量从 700 mm 减少至 552 mm, 而蒸散量未呈现显著变化。同期, DIC 生成速率和输出速率分别从 1.35×10^8 和

1.29×10^8 mol C/a 下降至 1.27×10^8 和 1.15×10^8 mol C/a, 年均降幅分别为 2.3×10^5 和 5.4×10^5 mol C/a²。气候干旱与径流减少不仅抑制了碳酸盐岩风化作用, 还导致更多由土壤呼吸和风化作用产生的 DIC 在流域内滞留, 从而使 DIC 输出量的降幅达到生成量降幅的两倍。此外, 森林恢复通过降低土壤温度和湿度, 抵消了气候变暖对土壤呼吸速率的正向影响, 进一步减缓了 DIC 的生成与输出。情景分析表明, 森林恢复对 DIC 生成下降的贡献率为 91%, 而气候变化对 DIC 输出减少的贡献率为 78%。季节性分析进一步表明, 土壤呼吸作用在湿热季节下降最为显著, 而碳酸盐岩风化在寒冷干燥的冬季减少更为明显。这些发现揭示了气候和土地利用变化对 DIC 过程及碳循环的不同调控机制, 为深入理解变化环境条件下的碳动态和碳收支提供了重要的科学依据。

关键词: 气候变化; 植被覆盖变化; 全球碳循环; 喀斯特; 反应传输模型

基金项目: 国家自然科学基金 (42230509, 42477240); 国家重点研发计划 (2023YFF0806000)

第一作者简介: 王冰琴 (2000-), 硕士生, 流域生物地球化学循环模拟. E-mail: wangbq0320@tju.edu.cn

*通信作者简介:

文航 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 陆地关键带水文-生物地球化学过程与模拟. E-mail: wenhang@tju.edu.cn

李思亮 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 地球关键带和生物地球化学. E-mail: siliang.li@tju.edu.cn.

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

地下环境从还原区到氧化区的长距离 电子转移过程及其环境启示

袁松虎^{1*}, 张妍婷¹, 童曼¹

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430078

地下环境在自然和人为扰动下通常会出现不同强度的长距离氧化还原梯度, 那么这种氧化还原梯度能否驱动长距离电子转移过程并引发环境效应呢? 本研究将介绍作者团队近期在地下环境长距离电子转移方面的一些初步进展。我们通过实验观测, 发现地下环境还原区与氧化区之间会发生长距离的定向电子传递, 是一种隐藏的电子流动过程; 进而根

据地下环境含水介质的渗透性和地球化学差异, 提出了地下环境电子流的 3 种模式; 最后展望了地下环境电子流对于元素循环和环境污染修复的重要启示意义。

关键词: 电子转移; 长距离; 地下环境; 氧化还原梯度; 环境效应

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

Effect of Weathering on the Dissolution Behavior of Phosphate Ore: An Analysis Based on Mineral Composition and Geochemistry Characterization

刘冰¹, 张彩香^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)生环国重, 武汉 430000

Dissolved release of phosphate ore plays an important role in the global phosphorus (P) cycle. In this study, the dissolution behavior and geochemical characteristics of phosphate ores with different weathering degrees were investigated using mixed-flow reactor and column leaching experiments. From $3 < \text{pH} < 7$, the rate of dissolved release of all phosphate ore decreased with increasing pH. Kinetic equations were used to fit pH and the dissolution rate, and the results showed a significant increase in the reaction orders with a higher weathering degree. Weathering has resulted in phosphorite being more sensitive to changes in hydrogen ion concentrations. Under the same pH conditions, fluorapatite and calcium phosphate phases in weathered phosphorites have lower free energies

relative to primary phosphorites, suggesting that they are more susceptible to dissolution. The acid neutralization capacity of weathered phosphate ores is reduced due to the significant loss of carbonate minerals, which results in a lower pH of its eluent compared to primary phosphate ores, and higher ion solubility in weathered phosphate eluent. In addition, under acidic leaching conditions, Detrital P (De-P) in phosphorite is gradually converted to the more soluble Exchangeable/loosely bound P (Ex-P), Iron-bound P (Fe-P), Calcium -bound P (Ca-P). At the same time, secondary precipitated minerals such as FePO_4 and CaF_2 will be gradually enriched during weathering.

Key words: weathering; phosphate ore; dissolution

第一作者简介: 刘冰 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学。Email: liubing199707@163.com

*通讯作者简介: 张彩香 (1970-), 教授, 研究方向: 地球化学与磷循环。Email: cxzhang@cug.edu.cn

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

从颗粒到流域尺度的绿泥石风化： 地下氧化反应的作用和分布

廖茹雪^{1,2*}, Xin Gu^{2,3}, Susan L. Brantley²

1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 兰州 730000;

2. Pennsylvania State University Department of Geosciences, State College, PA 016802;

3. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 037831

粘土矿物作为占沉积岩和风化壳总体积近一半的层状硅酸盐矿物, 其风化作用强烈影响地球关键带土壤的理化性质, 缓冲大气和生物圈中的酸, 为植物生长提供营养, 影响全球碳循环。绿泥石是一种重要的成岩粘土矿物, 但其在自然环境中的风化反应机制仍有争论。本研究选取了美国阿巴拉契亚山脉中部萨斯奎哈纳页岩山关键带观测站 (SSHCZO) 中一处以页岩为基底的小型流域, 研究了富铁绿泥石从深部原岩到残积岩再到土壤的风化过程。结果发现, 绿泥石中 Fe(II) 的氧化反应总是先于矿物间层的溶解反应。流域山脊下黄铁矿和绿泥石的起始氧化深度相近, 且都接近于区域地下水位; 而河谷下黄铁矿氧化深度大于绿泥石, 且氧化带要比山脊下更宽。我们推测, 这些模式可以通过山脊和山谷之间水文地球化学条件的差异来解释: 山脊下富含溶解氧的水流大部分沿一

维方向垂直下渗, 产生了与此方向垂直的窄而尖锐的绿泥石和黄铁矿氧化锋; 而河谷下水流中的溶解氧被消耗, 且水流沿三维方向 (向上, 向下, 侧向) 流出, 因而产生较宽的氧化带。地球化学和矿物学分析表明, Shale Hills 流域富铁绿泥石的转化是由 Fe (II) 的氧化所引发的。接着, 绿泥石层间片层溶解分别形成羟基层间蛭石和蛭石。伴随此转化过程的是镁和铁被释放到溶液中, 而铁则在孔隙空间中重新沉淀为针铁矿。本研究认为大气降水的渗入为深部地下输送氧气, 从而控制了 Shale Hills 绿泥石的初始风化。研究结果强调许多富含 Fe (II) 的矿物的风化可能由地下氧气输送速率所介导的氧化反应所引发。

关键词: 绿泥石风化; 黄铁矿氧化; 蛭石化; 水流路径

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

极端风化条件下花岗岩风化剖面锂同位素分馏机制研究

杨承帆^{1*}, 赵云², 徐娟¹, 朱冠虹³, 韦刚健³, 马金龙³,
苏妮¹, 陈金牛¹, 杨守业¹

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 上海交通大学, 上海 200030;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

化学风化在地球关键带物质循环以及气候调节方面发挥着重要作用, 锂同位素被认为是示踪风化过程最有效的指标之一, 近年来已广泛应用于现代流域和钻孔记录研究, 但我们对自然背景下锂同位素分馏机制认识仍有待深化, 特别是缺乏极端风化条件下相关研究案例。本研究以福建木兰溪花岗岩风化剖面为研究对象, 提取石英、黏土粒级 ($<2\ \mu\text{m}$) 和铁锰氧化物组分, 开展了元素、矿物和锂同位素组成分析。研究表明仙游风化剖面已接近完全风化, 全岩样品化学蚀变数 CIA 值大多高于 90, 易迁移元素 τ 值接近于 -1; 矿物组成上以石英、高岭石和伊利石为主, 其中石英含量约为 50%, 高岭石含量约为 40%; 全岩样品锂含量大多小于 $12\ \mu\text{g/g}$, 黏土粒级 (主要为高岭石) 锂含量大多小于 $6\ \mu\text{g/g}$ 。由于源岩中为花岗岩, 因此无法通过石英含量的变化确定风尘输入的影响,

但黏土粒级组分、铁锰氧化物组分以及石英锂含量均表现出向下减小的趋势, 可能表明剖面受后期改造影响更大。全岩样品锂同位素变化主要受到石英含量及粘土矿物的影响, 同时研究表明, 在极端强风化条件下, 石英也会受到风化过程影响, 其锂同位素及元素含量表现出两端元混合的趋势。此外, 本研究还观察到伊利石溶解和埃洛石形成, 伊利石溶解消耗 H^+ , 为埃洛石的形成提供了碱性环境以及原材料, 埃洛石形成过程中吸附了雨水来源的锂, 导致该层位黏土粒级组分锂同位素值偏高。本研究揭示了极端强风化条件下可能影响锂同位素分馏和同位素组成的多重因素, 为今后地质历史时期风化过程研究提供了借鉴。

关键词: 锂同位素; 风化剖面; 化学风化; 木兰溪

• 专题 10: 地球关键带物质循环与全球变化 •

青藏高原典型湖泊水体氢氧同位素及其水循环指示意义

李世杰¹, 李伟霄^{2,3}, 张志才²

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所;

2. 河海大学水文水资源学院;

3. 南京大学保卫处

青藏高原分布着世界上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖泊群, 湖泊类型多样, 成因复杂, 在维系区域生态系统和保持生物多样性以及区域气候变化和水分循环过程中扮演着重要角色, 同时, 青藏高原以高耸的海拔和地处地球中、低纬度的特殊条件, 使得气候变化及其影响有其区域复杂性, 随着气候从上世纪以来的持续变暖, 青藏高原的湖泊环境发生了重大而急剧的变化, 对湖泊水分循环与水文过程产生了重要影响。本文选择了青藏高原黄河源区开放性淡水湖泊扎陵湖和高原腹地封闭型咸水湖泊兹格塘错进行采样, 分析湖泊水体水化学和氢氧同位素特征来揭示青藏高原不同区域不同类型湖泊水体演化和水文水循环过程。根据分析结果获得以下新的认识:

1、扎陵湖和兹格塘错都是大型的深水湖泊和碱性湖泊, pH 值在 9~10 之间; 都存在着温度跃变层。扎陵湖的温度跃变层出现深度在 9~24 m 之间; 而兹格塘错温度跃变层深度出现在 15~25 m 之间, 温度跃变层的下界具有相似性, 这与湖泊的面积、深度、性质以及风浪强度等因素有关。

2、扎陵湖和兹格塘错是两个完全不同性质的湖泊, 扎陵湖是开放型淡水湖, 盐度为 0.3 g/L; 而兹格塘错是封闭型咸水湖泊, 盐度在 21 g/L。在湖泊水体主要阴、阳离子含量上也存在很大不同: 夏季扎陵湖主要阳离子含量最高的是 Ca^{2+} , 阴离子含量最高的为 HCO_3^- , 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水。而兹格塘错

主要阳离子含量最高的是 Na^+ , Ca^{2+} 含量最低; 阴离子含量最高的为 CO_3^{2-} , Cl^- 含量最低, 水化学类型为 $\text{Na-CO}_3\text{-SO}_4$ 型水。在离子浓度随湖泊深度上的变化上, 两个湖泊都表现出底层水体离子浓度增加的相同趋势。

3、两个湖泊水体氧同位素变化表现出明显不同。兹格塘错湖泊水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -7‰~-6‰ 之间, 而扎陵湖湖泊水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -5‰~-4‰ 之间。纬度偏南主要靠西南季风降水补给的兹格塘错水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显比纬度偏北的黄河源扎陵湖水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值要偏负, 这与局地水循环过程以及不同水汽来源有关。在随深度变化上也表现不同, 扎陵湖的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随水体深度增加逐渐偏正, 而兹格塘错的 $\delta^{18}\text{O}$ 值随水体深度增加逐渐偏负, 这与湖泊的水文水化学特征的演化有直接关系。

4、青藏高原湖泊水体演化受到多方面因素影响, 水汽来源和水循环过程起着重要作用, 西风系统和印度洋季风是青藏高原上主要的不同水汽来源, 但高原上陆面和水面再蒸发的水汽再降水也是湖泊水体演化的不可忽视的重要因素。因此在高原上存在着两种水循环过程: 一种为水分大循环, 即外部水汽输入-外部水分输出; 另一种为水分局地循环, 即高原上陆面和水面蒸发-凝结-再降水的过程。

关键词: 青藏高原; 湖泊水体演化; 氢氧同位素特征; 水循环过程

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

钡及其同位素海洋地球化学循环驱动

贾凡琛¹, 李茜², 朱光有^{1*}, 陈思钰¹, 黄月¹, 蓝婉嫣¹,
王瑞林¹, 王嘉宁¹, 高和婷¹, 李生¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

在海洋地球化学研究中, 钡 (Ba) 及其同位素因在沉积物中保存率高且同位素分馏稳定, 成为古生产力重建的重要示踪剂。本研究通过整合高精度同位素分析与多学科数据, 揭示海洋的钡循环受陆源输入、热液活动及生物过程的协同驱动, 其同位素分馏呈现显著区域异质性: 热液活动区受矿物沉淀动力学、硬石膏竞争抑制及微生物代谢共同调控; 河口混合区由吸附-解吸、氧化还原耦合及盐度梯度主导; 开阔海洋则以生物泵作用驱动垂向分馏。生物过程作为关键中间环节, 贯穿于整个循环链路。基于矿物-

流体-熔体间的分馏理论框架, 解析发现平衡与动力学分馏机制的交互作用是 Ba 同位素分馏的核心驱动力。区域分馏差异表明, 海洋钡同位素分馏是多因素协同作用的结果, 其空间异质性为示踪古海洋环境演变提供了关键依据。未来需结合原位微区技术深化生物-矿物-流体交互机制研究, 以提升古海洋环境重建精度。

关键词: 钡循环; 钡同位素分析方法; 平衡分馏机制; 动力学分馏机制

第一作者简介: 贾凡琛(2001-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏, E-mail: 15532110419@163.com
*通讯作者简介: 朱光有(1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏研究。E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

锑稳定同位素在揭示土壤中锑的来源和垂直迁移中的应用

孙广义^{1*}, 李欣宇¹, 吴云杰¹, 冯新斌¹

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

锑 (Sb) 是一种普遍存在的污染物, 具有潜在的全球性致癌风险。多国正努力应对大量历史遗留的含锑废物导致的土壤污染问题, 这一情况已引起国际关注。由于土壤中锑的来源和迁移机制不明确, 阻碍了土壤污染的有效防治。本研究采用锑稳定同位素技术, 对两种污染情景下的土壤剖面进行分析, 旨在量化锑来源、解析迁移过程, 并阐明土壤中同位素分馏机制。研究结果表明: 表层土壤锑主要来源于大气干沉降 (31.7%~56.3%)、湿沉降 (19.6%~32.7%) 和岩石风化 (<21.0%); 亚表层土壤锑主要

源自上层土壤解吸产生的溶液态锑, 其中铁矿物、锰 (氢) 氧化物和有机质的吸附作用会阻滞其向下迁移; 深层土壤呈现出更快速的锑迁移特征, 但由于吸附反应, 仍存在局部富集现象。同位素分馏机制方面, 黏土吸附过程导致 $\delta^{123}\text{Sb}$ 值增加 0.07‰~0.45‰, 而铁锰氧化物吸附使 $\delta^{123}\text{Sb}$ 降低 0.19‰~1.03‰。本研究为解析污染场地土壤重金属的来源和迁移提供了新的研究方法。

关键词: 锑同位素; 土壤; 锑污染; 来源; 迁移

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目 (No. 41921004); 贵州省科技支撑计划 (黔科合支撑[2023]一般 252); 贵州省重大专项 (黔科合重大专项字[2024]013)

第一作者简介: 孙广义 (1986-), 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学.Email: sunguangyi@vip.skleg.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

锑元素及其同位素在地球科学领域的研究及新进展

蓝婉嫣¹, 朱紫光², 朱光有^{1*}, 王嘉宁¹, 黄月¹, 陈思钰¹,
贾凡琛¹, 朱延庆¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

近年来, 非传统锑同位素 ^{121}Sb 和 ^{123}Sb 的应用受到了广泛关注, 它们在追踪锑的来源、迁移路径及地球化学过程方面提供了独特的视角, 并在环境污染监测、矿床勘探和古环境重建等领域展现出巨大的潜力。本文全面介绍了锑及其同位素的地球化学行为, 特别强调了它们在自然界中的分布特征与环境因素之间的相互关系, 这些特性使得锑同位素成为了研究地球化学循环的重要工具。在同位素分析技术方面, 讨论了锑同位素的分离纯化技术, 例如巯基棉纤维法(TCF)和离子交换色谱法, 为同位素分析提供了有效的样品预处理, 确保了分析结果的准确性和可靠性。此外, 通过采用多接收电感耦合等离子体质谱(MC-ICP-MS)等高精度分析技术, 结合氢化物发生系统(HG-MC-ICP-MS)和金属掺杂技术, 能够精确分析锑同位素, 从而揭示其在自然界中的分布和分馏机制。研究表明, 在不同的地质和环境条件下, 锑同位素的分布和分馏现象表现出显著差异。锑同位

素的分馏类型主要包括氧化还原、吸附、生物作用和蒸发过程。影响这些分馏现象的因素涵盖反应速率、温度、锑离子浓度、时间、吸附剂浓度、溶解度、酶以及盐酸浓度等多个方面。在此基础上, 本文探讨了锑同位素在地球科学领域的广泛应用, 其分馏特性使其在追踪污染源、沉积岩古环境研究、油藏研究、煤矿勘探以及古环境重建方面具有重要意义。随着分析技术的不断进步, 锑同位素的测定精度和灵敏度将显著提高, 这将推动地质学研究的深入。目前锑同位素在国内外的研究仍处于初步探索阶段, 许多应用仍需进一步验证和拓展, 未来应结合锑同位素与其他元素的同位素特征进行多重示踪, 将有助于构建更加全面的环境和地质模型, 为地质学和环境科学提供关键信息, 并对资源勘探和环境保护产生实际指导意义。

关键词: 锑同位素; 锑同位素组成; 地球化学; 分馏机理; 地球科学

第一作者简介: 蓝婉嫣(2002-), 本科生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: 17786525564@163.com

*通信作者简介: 朱光有(1973-), 教授, 研究方向: 石油天然气地质学, 地球化学, 同位素地球化学, 沉积学等. Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

产酸废石堆中闪锌矿氧化机理及其驱动的锌和镉释放迁移规律

鲍忠文^{1*}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031

Faro 铅锌矿曾是世界上最大的铅锌露天矿山, 自 1998 年以来成为加拿大最为复杂的废弃矿山修复场地之一。该矿区有 3.2 亿吨废石和 7000 万吨尾矿, 自废石堆和尾矿库释放的富含重(类)金属的酸性矿山废水威胁矿区土壤、地表水、地下水和生态系统安全。为科学指导矿区重金属污染控制和生态修复规划, 2017 年我们在矿区最大的废石堆中构建了包含 10 口监测井的水-气-热多参数实时监测系统。本报告以酸性和中性环境中的闪锌矿为研究对象, 采用光学显微镜、扫描电镜、电子探针、透射电镜与同步辐射微区成像和元素 X 射线近边吸收波谱表征闪锌矿晶体表层锌、铜、铁、硫等元素分布特征

和赋存形态, 结合废石堆中固相与液相化学成分、孔隙气体 O_2 和 CO_2 浓度、温度和表面络合数值模拟, 在纳米与微米尺度于闪锌矿表面发现痕量含铜次生矿物, 而闪锌矿晶体表面大面积溶蚀坑以及孔隙水和渗滤液中高浓度的锌和镉, 表明闪锌矿氧化和溶解同步进行, 仅有痕量次生矿物在闪锌矿晶体表层沉积, 释放大量锌、镉、铁和硫到孔隙水中。该研究强调解析矿区硫化物氧化机理以及次生矿物沉积和吸附过程对于优化矿区生态修复方案的重要性。

关键词: 废石堆; 闪锌矿; Zn; Cd

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

机械力化学合成环境矿物材料

黄柱坚^{1*}

1. 华南农业大学 资源环境学院, 广州 510642

机械力化学法合成环境矿物材料的研究为绿色制备高效催化剂提供了创新路径, 其核心优势在于无需有机溶剂、无三废排放且易于工业化推广, 符合环境材料可持续发展的需求。本研究工作系统揭示了机械力化学法通过调控矿物相结构、氧活性物种及催化反应路径, 实现抗生素污染物的高效矿化。研究发现, 球磨作用可定向合成一元 La_2O_3 、二元 CuFe 及三元 LaSrCo 金属氧化物矿物。XRD 分析矿物相演变证实球磨诱导 CuFe 氧化物形成尖晶石结构, 而 LaSrCo 氧化物呈现典型钙钛矿特征, 矿物相转变显著影响表面活性位点分布与反应路径选择性。球磨合成的环境矿物材料可应用于不同的催化体系, 其共性特征为催化反应以单线态氧 ($^1\text{O}_2$) 为主导活性物质, 兼具高选择性与广谱适用性。(1) 在光催化体系中, La_2O_3 通过 $^1\text{O}_2$ 、直接电子转移 (DET) 和羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 协同作用降解水中抗生素, 其中晶面调控是关键机制: 以 (101) 晶面为主的 La_2O_3 倾向于自由基路径 ($^1\text{O}_2/\cdot\text{OH}$), 而 (102) 晶面主导的 La_2O_3 则转向非自由基路径 ($^1\text{O}_2/\text{DET}$), 该特性源于球磨对金属氧化物晶面特性的重构。非自由基路径因其对竞争性阴离子惰性及宽 pH 适应性, 在复杂水环境治理中更具实际

应用潜力。(2) 在过硫酸盐 (PMS) 活化体系中, CuFe 尖晶石复合材料通过 $^1\text{O}_2$ 、超氧自由基 (O_2^-) 和硫酸根自由基 (SO_3^-) 协同催化抗生素污染物降解。(3) 在暗催化体系中, 而 LaSrCo 钙钛矿则依赖 $^1\text{O}_2/\text{O}_2^-$ 双路径, LSC 凭借 $^1\text{O}_2$ 与 DET 实现高效降解抗生素。深入机理研究表明, 球磨作用通过三重机制提升催化性能: 其一, 降低催化剂-PMS 吸附能, DFT 计算显示 CuFe 尖晶石与 PMS 的吸附能绝对值低于单一金属氧化物 ($\text{CuO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$), 促进界面电子传递效率; 其二, 增加氧空位 (Ovac) 浓度, ESR 谱图证实 CuFe 尖晶石的 Ovac 信号强度显著高于 $\text{CuO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, 高浓度 Ovac 加速金属价态循环 (如 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$), 提升氧化还原动力学; 其三, 优化晶面暴露比例, 通过调控 La_2O_3 的 (101) 与 (102) 晶面占比实现自由基/非自由基路径切换, 为定向设计抗干扰催化剂提供理论依据。上述发现阐明了机械力化学法“结构-性能-机制”的构效关系, 不仅为环境矿物材料合成开辟了绿色新途径, 更为矿物材料在氧活性物质的精准调控提供新思路。

关键词: 机械力化学; 矿物相; 氧活性物质; 氧空位; 构效关系

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

厦门市公园降尘-土壤-植物系统中重金属迁移特征及其来源解析

胡恭任^{1*}

1. 华侨大学, 泉州 362021

公园是人民重要的休闲娱乐区域和城市环境的重要敏感区, 随着城市化和工业化进程加快, 城市公园重金属污染问题越来越严重。城市公园重金属污染直接或间接影响人体健康和生态环境。论文以厦门市 32 个公园降尘-土壤-植物系统中的重金属为研究对象, 阐明重金属时空分布特征及其影响因素, 运用迁移因子、多元统计等方法揭示降尘-土壤-植物系统中的重金属迁移规律, 结合相关性分析、PCA-MLR 等多元统计方法及 Pb 同位素示踪技术定量解析重金属来源, 建立重金属在公园降尘-土壤-植物系统迁移的定量模型, 以期深入了解公园重金属污染来源及污染迁移机制, 为现代化城市规划及公园环境重金属污染防治提供科学依据。本文通过对厦门市公园降尘-土壤-植物系统中重金属污染迁移特征及其来源解析的分析, 得出主要研究结论如下:

(1) 厦门市公园夏、冬季降尘中重金属总量从大到小为 $Zn > Ba > Cu > Pb > Cr > Ni > V > Co > As > Cd$, 受到人类活动不同程度的影响, 主要来源于交通排放、建设施工、燃煤和工业排放、地面扬尘。厦门市公园夏季和冬季降尘中重金属主要受到局地源的影响, 冬季另外还受长距离运输气团的影响, 土壤扬尘贡献率升高。来源于交通排放、建设施工的 Cr、Co、As 是对人类健康产生致癌风险的主要贡献元素。

(2) 厦门市公园土壤中重金属受到人类活动不同程度的影响。V、Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Ba、Pb 的胃相生物可利用态含量与生物有效态含量显著相关, Co 的胃相生物可利用态与 F4 和 F1+F2+F3+F4 显著相关, 表明土壤中重金属胃相生物可利用态的来源因重金属种类而异。除 Cr 和 Ni 外, 人类活动源是重金属生物有效态的主要来源, 但是人类活动源对重

金属残渣态 (Cd、Ba、Pb、As、Mn) 仍有 55.1%~100% 的贡献率, 表明人类活动源对重金属生物有效态和残渣态均有影响, 但人类活动源对重金属生物有效态的影响更大。

(3) 厦门市公园夏、冬季榕树叶片中重金属总量从大到小为 $Ba > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Co \approx V \approx As > Cd$; 夏、冬季鹅掌木叶片中重金属总量从大到小为 $Mn > Zn > Ba > Cu > Pb > Cd \approx Co \approx Ni > As > V$, 鹅掌木叶片中 Mn、Zn、Ba、Pb、Cd、Co 总量均值均高于榕树叶片中相应的重金属总量均值。Pb 同位素、相关性分析、扫描电镜及 PCA-MLR 源解析表明, 榕树叶片中 Mn、Pb、Ba、As 主要来自燃煤和建设施工 (57%~78%), Co、Ni、Zn、Cu 主要来自交通排放 (58%~97%), V 主要来自土壤母质层 (73%)。鹅掌木叶片中 Pb、Cd、Mn、Zn 主要来自燃煤和化肥 (39%~93%), V、Co、As、Ba 主要来自土壤母质层和建设施工 (39%~83%), Ni、Cu 主要来自交通排放 (68%~85%)。

(4) 厦门市公园土壤的 pH、TC、EC 以及土壤中重金属赋存形态是影响土壤-榕树中 Cu、Ba、Pb 和土壤-鹅掌木中 Cu、As、Cd 迁移富集的主要影响因素。降尘的重金属赋存形态是影响降尘-榕树中 Ni、Cu、Pb 和降尘-鹅掌木中 Co、Cu、Zn、Cd 迁移富集的主要影响因素。利用多元线性回归构建厦门市公园降尘-榕树、降尘-鹅掌木、土壤-榕树、土壤-鹅掌木中重金属迁移定量模型, Cu 的预测效果优于其他重金属, 在每种系统中 Cu 的迁移定量模型均达到显著水平 ($p < 0.01$), 模型决定系数 $R^2 = 0.55 \sim 0.84$, 说明榕树叶片和鹅掌木叶片中 Cu 的迁移富集主要受到土壤理化性质及土壤、降尘中 Cu 的赋存形态的影响。

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

我国红壤区富铁土壤中铁氧化物特征及 Cr (VI) 固定和还原机制

殷辉^{1*}, 王文涛¹, 冯雄汉¹, 谭文峰¹

1. 华中农业大学 资源与环境学院, 武汉 430070

铬(Cr)在土壤中的转化过程受铁氧化物、Fe(II)、有机质(OM)和微生物的共同调控,但这些机制尚未得到深入研究。本研究对来自中国热带和亚热带地区的四种土壤样本进行了铁氧化物的综合表征,探讨了其在Cr(VI)固定与还原过程中的作用。土壤样品中含有不同数量的赤铁矿、水铁矿和针铁矿,且其铝取代程度和晶体表面暴露情况各异。吸附实验表明,土壤胶体中铁氧化物含量与Cr(VI)的固定呈正相关。此外,铁氧化物的类型、铝取代程度以及晶面暴露情况均影响Cr(VI)的固定能力。在缺氧条件下的培养实验发现,易氧化有机碳(55%~84%)和微生物(16%~48%)主导了富含针铁矿或赤铁矿土壤中的Cr(VI)还原。在旱地土壤中,微生物硫酸盐还原也可能参与这一过程。而在富含水铁矿的稻田土壤中,易氧化有机碳(38%±1%)、微生物(33%±1%)

以及与交换态和弱结晶铁氧化物相关的Fe(II)(29%±3%)共同促进了Cr(VI)的还原。此外,外源Fe(II)和微生物显著增强了富含水铁矿和针铁矿土壤中的Cr(VI)还原。值得注意的是,Fe(II)大幅促进了Cr的钝化,而微生物对此有轻微抑制作用。研究还表明,Fe(II)和微生物,尤其后者加速了OM的矿化;且水铁矿丰富的稻田土壤中的OM损失最为显著。在淹水过程中,部分水铁矿逐渐转化为针铁矿,但微生物可能会抑制这一转化过程。这些结果揭示了铁氧化物、OM和微生物之间的复杂相互作用对氧化还原敏感重金属的地球化学行为的深远影响,为自然和工程环境中铬污染的调控提供了重要参考。

关键词: Cr(VI); 铁氧化物; 有机碳; 氧化还原; 微生物

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

小分子有机酸共存条件下 Fe (II) -层状硅酸盐矿物对 Cr (VI) 的还原

吴非^{1,2}, 孙静², 孟方圆², 齐猛², 卢晓丽², 刘承帅^{2,3*}

1. 武汉纺织大学, 武汉 430200;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

3. 华南农业大学, 广州 510642

层状硅酸盐矿物中结构态 Fe (III) 通过微生物或非生物作用还原产生的原位 Fe (II), 能作为电子供体, 还原多种污染物, 包括 Cr (VI)、U (VI)、硝基苯和四环素等。之前关于含铁层状硅酸盐矿物对污染物还原的研究, 通常使用化学或生物作用预还原的矿物样品。在自然环境中, 层状硅酸盐、微生物和/或有机物的共存可能导致原位生成结构态和非结构态 Fe (II)。这种原位生成的 Fe (II) 能够有效促进污染物的还原。此外, 许多天然存在的有机酸, 如半胱氨酸 (Cys) 和去铁胺 B (DFOB), 也能还原 Cr (VI)。然而, 这些有机酸是否以及如何影响含 Fe (II/III) 的层状硅酸盐对 Cr (VI) 还原的动力学和机制仍不完全明确。在这样的反应体系中, 结构 Fe (III) 的还原可能与 Cr (VI) 的还原竞争可用的电子供体 (即拮抗作用), 或生成原位 Fe (II) 作为 Cr (VI) 的额外还原剂 (即协同作用)。因此, 本研究探讨了 Cys 共存条件下, Fe (II/III) 层状硅酸盐矿物 (黑云母和绿泥石) 对 Cr (VI) 界面还原过程机制。研究结果表明, 近中性条件下, Cys 的存在显著增强了黑云母和绿泥石对 Cr (VI) 的还原能力。Cys 在 Cr (VI) 还原过程中既作为有机配体

也作为电子供体。它能够直接还原 Cr (VI), 同时诱导层状硅酸盐矿物还原和溶解原位产生 Fe (II), 进而参与 Cr (VI) 的还原。此外, Cys 还可以与 Cr (VI) 的还原产物形成复合物。黑云母和绿泥石中不同结构位的 Fe (II) 在电子供给和 Cr (VI) 还原方面表现出不同的活性, 相较于反式配位 Fe (II), 黑云母中顺式配位 Fe (II) 在电子供给和参与 Cr (VI) 还原方面表现出更高的活性。Cr (VI) 的还原产物主要以不溶性 Cr (III) -有机复合物和亚纳米级 $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Cr}(\text{OH})_3$ 的形式存在, 与反应后的矿物形成复合体。这种结构将降低 Cr (III) 在暴露于氧化剂时再氧化的可能性。研究表明, 像 Cys 这样的电子穿梭体能够诱导含铁层状硅酸盐矿物的结构演变, 这可能显著影响或控制可污染物在水生和陆地生态系统中的长期迁移和转化。本研究为氧化还原活性污染物在含铁层状硅酸盐矿物界面上的电子转移过程提供了新的见解, 并对发展长期、原位污染物修复技术具有一定的指导意义。

关键词: 含铁硅酸盐矿物; 电子穿梭体; 界面电子传递; 原位 Fe (II); Cr (VI)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42025705、42207314)、博士后科学基金 (2022M713125)

第一作者简介: 吴非 (1990-), 讲师, 研究方向: 环境地球化学. Email: 1097260459@qq.com

*通信作者简介: 刘承帅 (1978-), 教授, 研究方向: 环境地球化学. Email: liuchengshuai@vip.gyig.ac.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

豫北某地重金属在土壤-小麦体系富集特征 及健康风险评价

刘淑亮^{1*}

1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心 分析测试实验室, 山东 烟台 264000

本文以豫北某地为研究区,对该区土壤-小麦协同采样分析,开展基于重金属总量、农作物重金属含量的综合评价,利用人体健康风险评价模型评价了作物重金属对人体存在的致癌风险和非致癌风险,并对作物重金属超标及其食用进行安全性评价。主要得出以下结论:(1)小麦 Cd、Ni、Pb、As、Cu 含量表现为:根>茎>籽实,Zn 含量为籽实>根>茎。小麦籽实中 Zn、Cu、Cd 富集系数较高,根、茎、籽实 Cd 富集系数均较大,Cd 在小麦各部位具有高迁移能力。(2)研究区小麦籽实中 As、Hg、Pb 含量整体表现为南部高、北部低的分布特征;Cd、Ni 含量整体表现

为工业企业集中区具有明显高值分布特征;Zn、Cu 含量整体表现东半部分高。(3)基于研究区小麦籽粒重金属含量与限值对每一个研究站点作物样品进行食用安全性评估,Cd、As、Pb 超标率分别为 20.4%、0.67%、12.9%。(4)研究区重金属对成人没有明显的健康风险,儿童 As 的 HQ>1,食用当地小麦对儿童有一定的健康风险。同一作物对儿童的非致癌风险高于成人。

关键词: 农田土壤; 小麦; 重金属; 富集因子; 健康风险评价

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20242769、DD20243133、DD20220885)、自然资源部生态地球化学重点实验室开放课题基金“豫北典型区耕地土壤重金属迁移富集及生物有效性研究 (ZSDHJJ202303)”联合资助。

第一作者简介: 刘淑亮 (1986-), 高级工程师, 研究方向: 生物地球化学。Email: liushuliang1234163.com

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

豫北区土壤-植物中 8 种重金属形态分析 及其生物有效性研究

万惠芸^{1*}

1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000

重金属的生物有效性是评价重金属环境风险和危害程度的重要依据。本文以豫北地区土壤-小麦籽实为研究对象, 采用“BCR 连续提取法”、“DTPA 一步提取法”两种分析方法分别获得研究区土壤重金属生物有效态含量, 并相互验证; 进一步采用“次生相与原生相分布比值法 (RSP)”、“风险评价编码法 (RAC)”两种评价方法对重金属生物有效性和环境风险进行了评价, 并相互验证。结果显示: (1) 研究区土壤中 Cr、Ni、Cu、Co、Zn、Pb、Mn 主要赋存形态为残渣态, 表明以上 7 种重金属元素在土壤中以“稳态”形式赋存, 生物毒害风险较小; 而 Cd 主要赋存形态为弱酸提取态 (39%) 和可还原态 (50%), 具有较强的迁移能力与较高的生态风险。(2) 土壤 pH、有机质与几种重金属各形态间相关性不显著,

As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的多数形态与其对应的重金属总量均呈显著正相关关系, 表明研究区土壤中 78 种重金属的赋存形态主要受其总量的影响。

(3) 采用次生相与原生相比值法 (RSP) 评价结果表明: Cd 处于高度污染水平, Mn、Pb 处于轻度污染水平, 其他元素处于无污染水平; 采用风险编码法风险评价 (RAC) 评价结果表明: Cd 处于高风险水平, Mn 处于中风险水平, Zn、Co、Ni 处于低风险水平, Cr、Cu、Pb 处于无风险水平。Cd 有效态组分、潜在有效态组分远高于其他重金属, 两种评价方法均表明 Cd 元素的生态风险最大, 应引起高度关注。

关键词: 农田土壤; 农作物; 重金属; 风险评价; 赋存形态

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20242769、DD20243133、DD20220885)、自然资源部生态地球化学重点实验室开放课题基金“豫北典型区耕地土壤重金属迁移富集及生物有效性研究 (ZSDHJJ202303)”联合资助。

第一作者: 万惠芸, 硕士, 助理工程师, 主要从事岩矿测试和生物地球化学研究。E-mail: 1239943760@163.com。

通信作者:

刘玖芬, 硕士, 正高级工程师, 主要从事岩矿测试与地球化学。E-mail: 13863858360@163.com。

刘淑亮, 高级工程师, 主要从事岩矿测试和生物地球化学研究。E-mail: 13863858360@163.com。

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

岷江水体重金属离子地球化学行为及环境效应研究

刘润鑫^{1*}, 杨斌²

1. 成都理工大学(宜宾校区)新能源科学与工程系, 四川 宜宾 644000;

2. 成都理工大学 地球化学系, 成都 610059

1 研究背景

岷江作为长江上游重要支流, 流域面积达 13.5 万平方公里, 流经四川盆地核心经济区, 承载着成都平原 80% 以上的工农业用水需求。近年来, 流域内工业化进程加快(如德阳重装基地、眉山化工园区), 农业化肥年施用量达 280 万吨(折纯量), 导致 Cd、Pb、Cr、As 等重金属通过地表径流(年均输入量约 1200 吨)和大气沉降(年沉降通量 15~20 $\mu\text{g}/\text{m}^2$)持续进入水体。2022 年环境监测数据显示, 干流成都段 Cd 浓度超标率达 35%, 彭山江口断面 As 浓度峰值达 0.12 mg/L , 远超 III 类水质标准(0.05 mg/L)。本研究通过碳硫同位素示踪($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$)与多元素联合分析(ICP-MS 检测 65 种元素), 旨在揭示重金属污染的时空演变规律, 为流域生态安全屏障建设提供理论支撑。

2 研究方法

2.1 样品采集

采用网格化布点法, 在干流(宜宾至都江堰段)设置 28 个监测断面, 支流(青衣江、大渡河等)设置 16 个汇入口监测点。针对重点污染源(如攀钢集团、长虹电子)设置 5 个加密采样区, 每个采样点同步记录水温(18.5~24.3 $^{\circ}\text{C}$)、pH(6.8~8.2)、电导率(200~450 $\mu\text{S}/\text{cm}$)等水文参数。沉积物样品使用重力柱状采样器获取 0~50 cm 分层样品, 通过 X 射线荧光光谱(XRF)预筛选高污染层位。土壤样品采用 5 点混合法, 在距河岸 50 m 范围内按 0~20、20~40 cm 分层采集, 共获取有效样品 432 组。

2.2 分析技术

水体样品经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后, 采用三重四极杆 ICP-MS (Agilent8800) 进行检测。通过动态反应池技术(DRC)消除 ArCl^+ 对 Cr 的干扰, 采用 Sc、Ge、In 内标法校正基体效应。仪器检出限

(3σ) 分别为: Cd 0.001 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、Pb 0.005 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、Cr 0.003 $\mu\text{g}/\text{L}$ 、As 0.002 $\mu\text{g}/\text{L}$ 。质量控制显示, 国家标准物质(GBW08607)测定值与标准值偏差 $<2\%$, 方法精密度 RSD 为 0.8%~1.2%, 加标回收率 92.5%~108.3%, 完全符合 HJ 700-2014 标准要求。

3 研究结果

岷江干流重金属污染呈现显著空间异质性, 成都段受汽车制造(Cd 排放系数 0.35 $\text{g}/\text{辆}$)和电子废弃物拆解(Pb 浸出率 1.2%)影响, Cd ($0.018 \pm 0.005 \text{ mg}/\text{L}$)、Pb ($0.032 \pm 0.008 \text{ mg}/\text{L}$) 浓度显著高于其他河段; 乐山段因不锈钢加工产业集群导致 Cr ($0.125 \pm 0.021 \text{ mg}/\text{L}$) 超标严重; 支流青衣江 As 污染突出($0.075 \pm 0.015 \text{ mg}/\text{L}$), $\delta^{34}\text{S}$ 值(+8.2‰~+12.5‰)显示与磷矿浮选废水特征吻合。水-沉积物界面研究表明, Cd 的分配系数(K_d)在 3000~5000 L/kg 之间, 受有机质含量($r=0.78$, $p<0.01$)和氧化还原电位(ORP)控制($r=-0.65$, $p<0.05$), 主要以 CdS (62%) 和 CdCO_3 (28%) 形式存在, pH >7.5 时易解吸; 水文模拟显示高流量($>2000 \text{ m}^3/\text{s}$)促进迁移, 枯水期($<500 \text{ m}^3/\text{s}$)则沉积富集。生态风险评估显示, 基于 Hakanson 指数法, Cd 的单项污染指数($E_i^i=85$)达中等风险, 综合污染指数($\text{RI}=125$)整体低风险但 Cd 贡献率 68%, 其可交换态占比 18.5%对底栖生物构成直接威胁。

4 结论与建议

本研究基于岷江流域重金属污染的时空演化模型, 提出四大治理策略: 工业源方面建立重点企业(如攀钢西昌钢钒)在线监测系统, 推广离子交换树脂法(Cd 去除率 $>95\%$)和电絮凝技术(Cr 去除率 $>90\%$), 并对电子废弃物拆解行业实施“一企一策”管理; 农业面源治理推广“有机肥替代+生物炭改良”技术(Cd 钝化率 45%), 建设 20 万亩示范基地并研发物联网施

第一作者简介: 刘润鑫, 本科在读, 专业: 新能源科学与工程.Email: 2847185494@qq.com

第二作者简介: 杨斌, 理学博士, 讲师, 研究方向: 环境地球化学.Email: wo.aitangke@163.com

肥系统提升化肥利用率至 42%;生态修复采用沉水植物(黑藻富集系数 850~1200)与“人工湿地+生态浮岛”组合工艺(处理规模 5 万 m³/d);监测预警体系升级在线监测站并构建天地空一体化网络,开发机器

学习模型实现 72 小时污染预警(准确率>90%)。

关键词: 岷江; 重金属污染; 地球化学行为; 环境效应

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

“惰性矿物”在砷形态转化中的关键作用

王鑫^{1,2*}, 蒲生彦¹, 王琳玲²

1. 成都理工大学 生态环境学院, 成都 610059;

2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 武汉 430074

砷的形态转化过程影响着环境中砷的生物可利用性、可迁移性以及潜在环境风险。砷的形态主要取决于(共)沉淀-溶解和吸附-脱附等反应过程, 其中沉淀过程可形成与 Fe、Ca、S 等元素结合的含砷矿物, 吸附过程则由 Fe、Mn、Al 等金属氧化物主导, 这些矿物很大程度上控制着砷的环境行为。其他与砷直接相互作用能力较弱的矿物常被看作是对砷形态转化影响很小的“惰性矿物”, 如黏土矿物、碳酸盐岩矿物等。这些“惰性矿物”通常具有较强的表面负电性, 导致其对砷氧阴离子具有天然的排斥作用, 从

而不具备显著的直接砷吸附固定能力。然而, 这些“惰性矿物”的负电表面可与 Fe、Ca 等金属阳离子强烈作用, 则可能通过改变 Fe、Ca 等与 As 密切相关元素的形态来间接影响砷的形态。本研究报道了高岭石强化亚铁氧化固砷和方解石诱导亚砷酸钙外延结晶成矿的相关进展, 为深入理解“惰性矿物”在砷形态转化中的关键作用提供参考。

关键词: 砷形态转化; 黏土矿物; 碳酸盐岩矿物; 界面反应

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

Ba 同位素指示氧化还原电位对重晶石污染土壤中 Ba 元素地球化学行为的影响

宫迎增^{1*}, 徐树铭¹, 熊朝¹

1. 贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025

重晶石是重要的矿产资源。中国是重晶石产量最高的国家。重晶石矿开采过程会使大量重晶石进入土壤中。由于重晶石在水体中的溶解度非常低, 其环境危害长期被人忽视。土壤的还原环境是可以极大促进重晶石的溶解, 导致大量的 Ba 被释放进入土壤溶液, 从而导致环境危害。定量制约土壤氧化还原电位 (Eh) 对重晶石溶解的影响, 是防治土壤重晶石环境危害的前提。大河边重晶石矿是世界上最大的重晶石矿床, 我们选取大河边重晶石矿区严重受重晶石污染

的水稻土, 进行栽培实验, 控制淹水和落干时间, 连续测试土壤氧化还原电位和 pH, 并分析孔隙水和土壤不同存在形式 Ba 含量和同位素组成。研究表明长期淹水土壤氧化还原电位一直维持在较低水平 (-200 mV 以下) 可以显著促进重晶石中 Ba 的释放, 而周期性淹水-落干土壤氧化还原电位变化明显, 孔隙水 Ba 含量更有可能受到土壤中其他组分的控制。

关键词: Ba 同位素; Ba 污染; 氧化还原电位

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

酸性条件下砷的赋存形态与稳定性

王少锋^{1*}

1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024

本研究聚焦于酸性条件下砷的赋存形态与稳定性, 深入探讨其在环境地质过程中的行为及其效应。我国水土环境中砷污染问题严峻, 与有色矿冶活动紧密相关。研究发现, 砷酸铁是酸性条件下重要的砷赋存形态, 其形态转化及稳定性对砷污染控制具有重要意义。通过实验与分析, 揭示了硫酸根、Fe(III) 和 Fe(II) 对砷酸铁的影响机制。硫酸根可加速砷酸铁

沉降并促进其分解, Fe(III) 增加溶解态和胶体态砷的比例, 提升砷的迁移性, 而 Fe(II) 则促进砷酸亚铁的形成, 提升砷的稳定性。这些发现为酸性环境下的砷污染治理提供了科学依据。

关键词: 酸性条件; 砷; 砷酸铁; 硫酸根; Fe(III) / Fe(II)

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFC3712602)

第一作者简介: 王少锋 (1970-), 教授, 研究方向: 环境地球化学. Email: swang@dlut.edu.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

水生生态系统汞同位素分馏、来源和迁移转化过程示踪

付学吾^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

汞同位素同时具有质量分馏、奇数和偶数汞同位素非质量分馏, 是迄今唯一具有“多维”同位素示踪体系的重金属, 不仅能定量解析环境中汞的来源, 还能示踪汞的迁移和转化过程, 为汞的环境地球化学循环研究提供了更准确、更可靠甚至是排他性研究手段。然而, 天然环境中汞同位素的分馏规律和机制认识不清, 制约了汞同位素在源解析和迁移转化过程示踪方面的应用潜力。该工作系统研究了水生生态系统不同形态汞的同位素组成, 并以此为基础, 获得了以下几个方面的主要认识: (1) 水体溶解态汞、颗粒汞、溶解性气态汞和活性汞同位素组成存在明显差异, 表明汞进入水体后并不像此前猜测的出现了快速的均质化; (2) 沉积物汞主要来自于水体颗粒汞的沉积作用, 占比可达 95%以上;

(3) 水体二价汞还原主要受光化学还原影响, 光化学还原主要发生在溶解态汞, 而颗粒汞贡献很小; (4) 大气零价汞向水体的扩散是水体溶解性气态汞的重要来源, 占比可达 40%~54%, 而并非如传统认识的主要来自于水体溶解态汞的还原过程; (5) 水/气界面零价汞交换是一个双向过程, 首次定量了水/气界面大气零价汞沉降通量和水体零价汞的排放通量, 发现大气零价汞沉降对水体汞的贡献高于大气汞湿沉降; (6) 建立了湖泊汞同位素质量平衡模型, 实现了全部汞输入源相对贡献的定量解析, 揭示地表径流是湖泊生态系统汞的最重要来源。

关键词: 汞同位素; 水生生态系统; 分馏规律; 源解析; 迁移转化过程

基金项目: 中国科学院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目

第一作者简介: 付学吾 (1981-), 研究员, 研究方向: 环境和同位素地球化学. Email: fuxuewu@mail.gyig.ac.cn

*通讯作者简介: 付学吾 (1981-), 研究员, 研究方向: 环境和同位素地球化学. Email: fuxuewu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

汞矿区汞污染稻田风险管控技术研究

王建旭^{1*}, 潘昭阳¹, 吴才鑫¹, 冯新斌¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550082

水稻甲基汞污染是我国西南汞矿区面临的突出生态环境问题, 矿区居民因食用汞污染稻米导致不同程度的甲基汞暴露健康风险。因此, 建立绿色和低成本汞污染稻田风险管控技术对保护人体健康和区域生态安全具有十分重要的意义。系统研究了稻田土壤中的汞随氧化还原电位波动的转化规律, 并探究了基于氧调控的汞污染稻田风险管控技术。主要研究结果如下, (1) 土壤中溶解态汞和甲基汞的含量随氧化还原电位升高而呈降低, 且这一过程受微生物、土壤胶体和铁矿物转化的偶联调控。基于此发现, 进一步探究了不同增氧措施(垄作和基于太阳能的自动增氧装置)对土壤汞转化及水稻富集汞的影响。(2) 汞污染稻田实施垄作后, 土壤溶液中铁锰含量分别降低 82%~88%和 40%~80%, 溶解态总汞和甲基汞含量分别降低 36%~74%和 62%~

76%。此外, 水稻籽粒中总汞和甲基汞的含量分别降低 3%~27%和 22%~47%。同时, 垄作可增加水稻稻穗生物量 10%~50%, 表明垄作不仅能降低水稻汞污染风险, 还有具有促进水稻生长的作用。(3) 基于太阳能的自动增氧装置处理稻田后, 土壤溶液中总汞含量平均降低 24%~36%, 土壤中甲基汞含量平均降低 18%~28%, 而水稻籽粒中总汞和甲基汞含量分别平均降低 30%和 37%。此外, 基于太阳能的自动增氧装置处理后水稻籽粒生物量平均增加了 28%, 表明水稻根际增氧不仅能降低稻米汞含量, 同时还有助于水稻增产。研究结果对汞污染稻田风险管控具有一定的指导意义。

关键词: 稻田汞污染; 风险防控; 安全生产; 汞矿区

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

稀土污染土壤减量化修复研究

李鸿博¹, 陈情泽¹, 梁晓亮¹, 朱建喜¹, 朱润良^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

稀土元素 (REEs) 因其广泛的工业应用及在风化壳中的普遍赋存而广泛存在于环境中, 并作为新兴污染物引发显著关注。土壤淋洗技术被认为是修复 REEs 污染土壤的有效手段, 但传统淋洗剂常导致土壤酸化和盐渍化, 对微生物群落与植物生长产生负面效应。本研究探讨了可生物降解螯合剂 (BCs): 谷氨酸-N, N-二乙酸 (GLDA)、亚氨基二琥珀酸 (ISA) 与聚天冬氨酸 (PASP), 在污染农田土壤 REEs 去除中的应用潜力。结果表明, REEs 去除效率与 BCs 浓度、液固比和淋洗时间呈正相关, 而与溶液 pH 呈负相关。通过响应曲面分析确定最优淋洗参数, GLDA、ISA 与 PASP 对 REEs 的总去除率分别达 50.8%、

40.5%和 23.2%。统计分析表明, BCs 浓度是影响淋洗效果的主导因素。此外, BCs 淋洗显著去除可还原态 REEs (即铁锰氧化物结合态), 从而降低土壤中 REEs 的迁移性与生物有效性。生物有效态 REEs 的减少显著降低了污染土壤的环境风险。值得注意的是, BCs 淋洗后土壤酶活性显著提升, 表明其对土壤健康具有积极调控作用。本研究为 BCs 修复 REEs 污染土壤提供了科学依据, 其中 GLDA 展现出优异的工程应用潜力。

关键词: 土壤淋洗; 稀土元素; 生物可降解螯合剂; 环境风险; 土壤健康

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (42225203); 国家自然科学基金 (42272045, 42302033); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2019B030302013); 广东省基础与应用基础研究基金 (2023A1515110854, 2022A1515010606); 广东省科技计划 (2023B1212060048)

第一作者简介: 李鸿博 (1993-), 助理研究员, 研究方向: 土壤污染成因与修复技术. E-mail: lihongbo@gig.ac.cn

*通信作者简介: 朱润良 (1979-), 研究员, 研究方向: 矿物表界面反应及资源利用. E-mail: zhurl@gig.ac.cn

• 专题 11: 金属元素环境地质过程及效应 •

施氏矿物与 Mn(II) 界面反应驱动的重金属迁移转化

陈梅青¹, 吴平霄^{2*}

1. 广东工业大学, 广州 510006;

2. 华南理工大学, 广州 510006

施氏矿物作为一种富含硫酸根的水合羟基铁氧化物, 在受酸性矿山废水 (AMD) 污染的河流沉积物以及土壤中广泛存在。它与金属阳离子之间存在着强烈的相互作用, 这种相互作用不仅对矿物的物相演化进程产生影响, 而且对重金属的形态、迁移以及归趋起着关键的控制作用。本研究以 Mn(II) 为可变价金属阳离子的典型代表, 深入探究了含铬施氏矿物 (Cr-Sch) 与 Mn(II) 之间在界面相互作用过程中矿物的演化, 以及重金属 (Mn 和 Cr) 的再分配行为。研究结果表明, 当 pH 值为 3.0 和 7.0 时, Mn(II) 的存在会对施氏矿物的转化过程产生抑制作用。这是因为被吸附的 Mn(II) 限制了铁氧化物表面位点的活性, 进而减缓了施氏矿物界面的溶解-重结晶过程。当 pH 值为 7.0 时, Mn 会部分取代矿物结构中 Fe(III) 的位点, 导致 Fe-SO₄ 结构破坏, 同时更多的 SO₄²⁻ 被释放出来。当 pH 值

为 10.0 时, Mn(II) 会取代矿物结构中的 Fe(III), 或者与矿物表面的 -OH 发生络合反应, 形成 Mn-O 复合物, 使得转化产物由赤铁矿转变为针铁矿。与此同时, Mn(II) 的吸附作用会使矿物表面携带更多的正电荷, 从而显著增强了矿物对 Cr 的固定能力。此外, 施氏矿物为 Mn(II) 和 Cr(VI) 之间的电子转移提供了有效的通道, 进而促进了 Cr(VI) 的还原反应。在施氏矿物的转化过程中, Mn(II) 能够将部分 Cr(VI) 还原为 Cr(III), 并将其固定在矿物内部, 从而降低了 Cr(VI) 的迁移性和生物有效性。本研究对于深入理解共存金属阳离子与施氏矿物之间的界面相互作用及其对重金属迁移转化的影响机制, 为矿区重金属污染的修复工作提供了理论基础和支撑。

关键词: 施氏矿物; 重金属; 迁移转化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207254)

第一作者简介: 陈梅青 (1991-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学. Email: cmq@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 吴平霄 (1968-), 教授, 研究方向: 地质矿物学. Email: pppxwu@scut.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

塔里木盆地晚寒武世 SPICE 事件的生物响应 及油气资源效应

程斌¹, 王浩哲², 韦志伟³, 廖泽文^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205;

3. 中国有色桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 541004

晚寒武世 SPICE 事件 (Steptoean 正碳同位素漂移事件, 497~494 Ma) 是地质历史时期全球最大碳循环扰动之一, 伴随着海洋生物灭绝、浮游生物革命与规模性有机碳埋藏等过程。该事件的触发机制、生物响应及油气资源效应等问题仍不清楚。本工作对塔里木盆地上寒武统不同沉积相 (浅海相、斜坡相、深海相) 地层剖面及台盆区海相原油开展了系统的生物-油气地球化学研究工作。通过对比不同沉积相剖面上的有机-无机碳同位素演化曲线, 明确了 SPICE 事件在不同海洋沉积环境中的不同步性, 揭示了浮游生物为适应极端环境而在不同深度海洋区域的动态演化过程, 强调了晚寒武世海洋生物灭绝与更替受到

海水深度梯度的控制。晚寒武世海洋浮游生物为适应大气 CO₂ 浓度降低的极端环境而调整了生存策略, 通过摄取海水中 HCO₃⁻ (CCM 机制) 来维持生命活动, 维持了海洋初级生产力的相对稳定, 为上寒武统烃源岩的发育奠定了基础。通过开展塔里木盆地沉积相特征对比与油-源对比, 提出了晚寒武世时期塔里木盆地台盆区泻湖相沉积环境可能发育了上寒武统烃源岩, 并对台盆区富集 ¹³C/亏损 ²H 的海相原油具有重要贡献。

关键词: SPICE 事件; 生物响应; CCM 机制; 上寒武统烃源岩; 塔里木盆地

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

黄铁矿微量元素及硫同位素组成示踪富有机质 黑色页岩中的热液流体循环 ——以川东地区五峰-龙马溪组为例

李劭杰¹, 肖七林^{1*}, 蔡苏阳¹

1. 长江大学, 武汉 430100

识别沉积盆地中的热液活动对于理解富有机质沉积物的形成和演化具有重要意义。我国中上扬子地区蕴藏着大量的天然气资源和密西西比河谷型(MVT) 锌铅矿床。天然气资源主要分布在四川盆地内部, 而锌铅矿床则分布在盆地周边地区。这种独特的分布模式表明, 天然气富集区与矿集区的边界区域可能存在广泛的热液-有机质交互作用过程。四川盆地东部出露了典型的奥陶系/志留系(五峰组/龙马溪组) 富有机质黑色页岩露头。黄铁矿在该剖面中广泛分布, 是研究热液特征及其对富有机质沉积物的潜在影响的天然实验室。我们在研究区识别出了与碳酸盐脉体伴生的黄铁矿, 这组黄铁矿(“B 组”) 通常具有适中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(0.78‰~8.86‰), 以及更高的微量元素含量。这些特征表明, 这组黄铁矿可能是通过局部热液流体活动形成。此外, 微量元素含量相对较低的黄铁矿可以进一步分为两组, 包括一组具有

较低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿(-18.06‰~-1.15‰; “A 组”), 以及一组具有较高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿(10.55‰~37.62‰; “C 组”)。A 组和 C 组的黄铁矿可能分别通过细菌硫酸盐还原作用(BSR) 和热化学硫酸盐还原作用(TSR) 形成。与流体相关的、富含微量金属的黄铁矿的发现表明, 黑色页岩中的流体循环具有活化、迁移和再沉淀微量元素的能力。此外, 富含金属的热液流体还可能促进四川盆地内有机质的成熟。本案例研究的结果, 结合之前在四川盆地中心发现的热液流体和盆地周边的锌铅矿集区, 暗示中上扬子地区可能存在一个广泛的埃迪卡拉纪-古生代流体循环系统。

关键词: 中上扬子地区; 奥陶系五峰组-志留系龙马溪组; 黑色页岩; 黄铁矿微量元素及硫同位素组成; 热液流体活动

第一作者简介: 李劭杰(1990-), 特任教授, 研究方向: 油气地球化学、油气成藏年代学. Email: shaojie.li@yangtzeu.edu.cn.

*通信作者简介: 肖七林(1980-), 教授, 研究方向: 油气地球化学、油气成藏动力学、非常规油气地质-地球化学. Email: qilinxiao@cug.edu.cn.

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

元古代中期海洋硫化程度的降低促进了 早期真核生物的演化

隋佩珊^{1*}, 张少兵¹, 卫炜¹, 黄方¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

元古代中期 (1.8~0.8 Ga) 是地质历史演化的关键时期, 承接了古元古代和新元古代两次大氧化事件, 见证了真核生物的起源和多细胞化过程。传统观点认为, 元古代中期环境演化相对停滞, 大气及海洋氧含量低, 真核生物演化受限, 被称为枯燥的十亿年。然而, 越来越多的研究发现, 以低氧为特征的元古代中期的海洋仍然存在几次脉冲式氧化事件, 尤其是在 ca. 1.57 Ga 和 ca. 1.4 Ga。与此同时, 元古代中期越来越多的真核生物化石记录, 尤其是高于庄组三段中最古老的多细胞宏体真核生物化石记录, 表明此时期真核生物生态系统比以往认为的更为活跃。因此, 对于元古代中期海洋氧化还原状态演化及其与真核生物的起源和多样性之间的关系尚存争议。我们分析了元古代中期华北克拉通延庆地区高于庄组钙质页岩

淋滤组分的 V 同位素组成 ($\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$)。研究样品的 V 富集程度与 $\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$ 之间有显著的相关性, 说明这些沉积物的 $\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$ 变化受到了局部储库的影响。基于平衡分馏模型, 我们重建了元古代中期~1.57 Ga 广海的 $\delta^{51}\text{V}_{\text{OSW}}$ 值及广海氧化还原状态演化。结果显示, 元古代中期广海 $\delta^{51}\text{V}_{\text{OSW}}$ 值从-0.36‰和-0.34‰增加到-0.11‰, 海洋氧化还原环境从广泛硫化转变为广泛缺氧, 海洋硫化程度显著降低, 海底氧化面积占比和可利用溶解氧含量显著增多。这种海洋环境的转变可能改善了海洋宜居性, 从而促进了多细胞宏体真核生物的出现和演化。

关键词: 元古代中期; 古海洋; 氧化还原; V 同位素; 真核生物

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

重庆城口陡山沱组锰矿沉积环境与沉淀机制

罗旭文¹, 樊海峰^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

锰是国家战略紧缺关键矿产之一, 被广泛用于钢铁工业和新能源汽车、新材料等战略新兴产业。近年来, 我国在锰矿资源勘查方面取得了显著进展, 例如在城口地区探获了高燕和修齐大型锰矿床。尽管前人对扬子北缘城口碳酸锰矿床进行了系统研究, 但在沉积环境和矿床成因等核心问题上仍存在较大争议, 导致城口锰矿成矿规律尚未得到充分阐明。为了更全面地了解城口锰矿床的沉积环境, 本研究测定了城口典型锰矿床的氮同位素组成 ($\delta^{15}\text{N}$)。结果显示, 城口锰矿床的 N 同位素组成 (平均值为 7.27‰) 明显高于同时期海洋 (大约 5‰), 这表明城口次级盆地的氮循环主要以反硝化作用和/或氨的厌氧氧化为主。结合城口锰矿铁化学组分和草莓状黄铁矿粒径的分析, 本文认为锰矿是在氧化还原分层的水柱中沉积形

成的, 在 (次) 氧化环境下以锰氧化物的形式沉淀并富集, 在缺氧底层水中还原为 Mn (II), 并以菱锰矿的形式保存。最近有学者对城口锰矿石 Mo 同位素 ($\delta^{98}\text{Mo} = -1.3\text{‰} \sim 0$) 研究也提出了类似的观点。然而, 新的数据并不支持这一观点, 强烈正的铈 (Tl) 同位素组成 ($\varepsilon^{205}\text{Tl} = 6.2\text{‰} \pm 0.8\text{‰}$, 类似于现代铁锰结壳) 表明, 锰矿在氧化水体中以锰氧化物的形成沉淀在沉积物-水界面, 随后在硫化沉积物中还原和再活化, 最终形成锰碳酸盐。总体而言, 本研究不仅提出了城口锰矿形成的修正模型, 而且也在地史时期锰矿成因探究提供了新的视角。

关键词: 城口锰矿; 氮同位素; 氧化还原环境; 铈同位素; 沉淀机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42073016、42121003、92062221、U2244210); 贵州省 2020、2021 年度科技补助项目 (GZ2020SIG、GZ2021SIG)

第一作者简介: 罗旭文 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: luoxuwen@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 樊海峰 (1981-), 研究员, 研究方向: 矿床地球化学. Email: fanhaifeng@mail.gyig.ac.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

埃迪卡拉纪末期升高的海洋生产力及其在 Shuram Excursion 恢复中的作用：来自锌同位素的证据

佟金祚¹, 程猛^{1*}, 李超¹

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059

埃迪卡拉纪晚期发生了地质历史上最大一次无机碳同位素负偏事件, 即 Shuram Excursion 或 DOOUNCE (Grotzinger et al., 2011)。通常认为, 该事件的恢复与海洋生产力的升高有关 (Canadas et al., 2024), 但缺乏直接的证据。海洋沉积物的锌同位素是约束海洋生产力及有机质埋藏的有效指标 (Zhong et al., 2024)。为了重建海洋生产力演化及其在 Shuram Excursion 事件恢复中的作用, 我们对华南陡山沱组九龙湾剖面 and ZK6305 钻孔的四段黑色页岩沉积开展了 Zn 同位素、主-微量元素和铁组分分析。结果显示, 铁组分及氧化还原敏感元素指标指示研究样品主要形成于硫化的沉积环境中, 盐度重建指标 (即 B/Ga) 指示南华盆地具有中到强的局限性。类似于现代的波罗的海, 这样的环境有利于 H₂S

对水体中 Zn 的完全捕获, 使得沉积物可以有效的记录海水的同位素组成 (Vance et al., 2016)。Zn 同位素在研究剖面上部显示出升高的趋势 (九龙湾: 从+0.31‰升至+0.70‰; ZK6305: 从+0.35‰升至+0.62‰), 这可能反映了升高的海洋生产力导致的有机质埋藏的增加。有机质的大量埋藏移除轻碳, 驱动海洋无机碳同位素的恢复。同时, 沉积物中颗粒有机质相较溶解有机质的增加导致了有机碳同位素组成重新与无机碳同位素耦合。我们的研究为生产力增强驱动 Shuram Excursion 恢复提供了重要证据。

关键词: 华南; 碳同位素; 碳循环; 铁组分; 古盐度

第一作者简介: 佟金祚, 博士研究生, 研究方向: 古海洋 Zn-Cu 同位素。Email: jin.zuo@qq.com

通讯作者简介: 程猛, 研究员, 研究方向: 地球早期古环境演化。Email: mengcheng@cdut.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地北部地区中二叠统茅口组上段硅质及含硅质岩类成因研究

刘沛云¹, 胡广^{1*}

1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500

四川盆地茅口组勘探历史悠久, 近年来滩相白云岩储层接连获高产工业气流, 成为勘探热点。在勘探中发现白云岩发育层段常有硅质岩伴生, 其以不连续结核状或连续层状产出, 形态多样, 分布广泛。目前对茅口组这套硅质岩的硅源及成因仍存在争议。本文以四川盆地北部地区中二叠统茅口组上段(茅二上亚段)硅质岩为研究对象, 选取马槽沟、西北乡、雪玉洞等 8 个野外剖面, 通过岩石学观察、主微量元素分析及硅氧同位分析, 系统探讨硅质岩的硅质来源与成因机制。根据野外产出特征及样品二氧化硅含量, 将研究样品分为四类: 层状硅质岩、层状含硅质岩类、结核状硅质岩和结核状含硅质岩类。层状硅质岩在深水斜坡和浅水碳酸盐台地均有产出, 前者含放射虫且钙质生屑局部硅化、泥质含量高, 后者基质完全硅化; 层状含硅质岩类仅一件样品, 发育于深水环境, 含重结晶放射虫; 结核状硅质岩及含硅质岩类主要产于浅水碳酸盐台地, 由微晶石英和玉髓组成, 含不等量碳酸盐, 生屑和基质均发生硅化。地球化学特征显示, 四类岩石的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 比值(接近 0.6)显著高于纯热液成因硅质岩的元素比值(0.01), $Al-Fe-Mn$ 三角图解

集中于富 Al 端; Y/Ho 比值(均值 40~50)指示海水沉积环境而非热液环境, 并混有少量陆源淡水; 稀土元素总量较低(数个 ppm), 稀土配分模式呈左倾趋势, 具明显 Ce 负异常, Eu 无正异常(除部分结核状硅质岩 Eu 正异常外), 与典型海水中生物成因硅质岩特征一致。硅氧同位素组成显示, 除一件层状硅质岩样品具热液成因特征($\delta^{30}Si=-1.9\%$, $\delta^{18}O=22.8\%$)外, 其余样品 $\delta^{30}Si$ 值为 0.3‰~1.5‰, $\delta^{18}O$ 值为 29.0‰~33.1‰, 与生物成因硅质岩特征相符。综合研究表明, 研究区硅质岩主要为生物成因, 硅质放射虫是主要硅源, 部分层状硅质岩和结核状含硅质岩受热液叠加影响。深水环境的层状硅质岩是放射虫死亡后直接沉积、成岩形成; 浅水环境的层状硅质岩、结核状硅质岩及含硅质岩类则受控于海侵背景下上升流作用, 深水中溶解的生物硅被搬运至浅水环境, 通过交代碳酸盐岩形成。另外, 盆地基底断裂引发的热液活动参与了浅水环境的硅质运移, 在局部形成混合硅源交代作用下的结核状硅质岩。

关键词: 四川盆地; 茅口组; 硅质岩; 地球化学; 成因机制

基金项目: 中石油科技部创新联盟体项目(2020CX010302)

第一作者简介: 刘沛云(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 1445282150@qq.com

*通信作者简介: 胡广(1978-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 地球化学. E-mail: guanghu1198119@163.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

鄂西地区上二叠统页岩解吸气天然气地球化学特征及成因分析

崔亚圣¹, 李乐^{1*}, 杨欢¹, 王伟¹, 辛杰¹, 余浩宇¹, 胡远清¹

1. 湖北省地质科学研究所 湖北省地质局, 武汉 430034

近年来,上二叠统页岩气勘探在扬子板块的鄂西及川东地区不断取得重要突破,早期研究已在气藏相关的沉积环境、孔隙结构及储层评价等方面取得了诸多重要认识,但在气藏的气体组成、烃类同位素分馏机制以及气藏成因等方面尚缺系统研究,制约了气藏成藏过程的深化理解及综合利用。本研究聚焦于鄂西地区上二叠统大隆组页岩,基于现场 28 个小时的长时间连续解吸实验,结合气体组分与同位素分析,系统总结了气藏天然气地球化学特征及其成因进行了初步探讨。

结果表明:(1)大隆组页岩解吸气中以 CH_4 (78.81%~91.18%/85.54%) 为主、包含少量 C_2H_6 (1.56%~3.63%/2.46%), N_2 (5.74%~18.94%/11.43%) 和 CO_2 (0.18%~0.90%/0.63%), 含微量硫化氢 (0.55~1.06 ppm/0.69 ppm)。受吸附-扩散效应影响,解吸呈现出初始、中期和末期三阶段变化,其中,烃类 (CH_4 、 C_2H_6) 及主要非烃组分 (N_2 、 CO_2) 在中期解吸阶段 (7~25 小时) 的组成最能代表储层原始气体特征。(2)大隆组页岩解吸气中的乙烷碳同位素

特征 (-37.84‰~-29.51‰) 指示其为油型气来源, $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1$ versus $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$, $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1$ versus $\delta^2\text{H}-\text{C}_1$, $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_1$ versus $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 图解则指示其为晚期热成因气,碳同位素倒转现象的出现则表明气藏内出现了干酪根原生气及油/凝析油次生气的混合。(3)气藏中的非烃气体的出现推测为无机-有机混合来源。其中, N_2 主要来源于富铵黏土矿物的热分解 (孤峰组中粘土含量为 21.9%)。 CO_2 versus $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 图解以及 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ (-8.01‰~-5.93‰) 指示 CO_2 以无机来源为主) 可能为碳酸盐矿物热分解产物,含少量有机成因 CO_2 混入。地层热演化程度与广泛发育的草莓状黄铁矿指示 H_2S 可能为有机质热裂解或热化学硫酸盐还原 (TSR) 的产物。

研究成果为页岩气资源评价与成藏机理研究提供了关键地球化学证据,支撑了鄂西地区及类似构造区页岩气高效勘探。

关键词: 页岩解析气; 吸附-扩散; 碳同位素倒转; 大隆组; 鄂西

基金项目: 湖北省自然科学基金 (2022CFB490), 湖北省地质局科技项目 (KJ2024-2)

第一作者简介: 崔亚圣 (1994-), 工程师, 研究方向: 石油与天然气地质. Email: yashengcui@163.com

*通信作者简介: 李乐 (1985-), 博士, 副研究员, 研究方向: 非常规油气地质. Email: santali2005@gmail.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地南部五峰组-龙马溪组有机质 孔隙结构及分形特征

管全中^{1*}, 陈诚¹

1. 成都理工大学, 成都 610059

有机质孔是页岩气储层中重要的储集空间, 约占总孔隙度的 50%。采用扫描电镜、低压 N_2 吸附、热分析、图像统计和分形理论等综合分析方法, 定量表征了五峰-下龙马溪组有机质孔的结构特征与复杂性。五峰-下龙马溪组具有较高的有机质丰度, 平均为 3.20%。有机质孔一般较发育, 主要分布于有机质集合体、有机质-黏土矿物复合体及草莓状黄铁矿内部有机质之中, 其形态一般呈椭圆状、纺锤状, 主要孔径呈现 10~40、100~160 nm 的双峰分布, 可能受到扫描电镜观测的限制。同一口井中埋藏较深页岩中有机质孔较多, 但深层气井与中浅层气井中有机质孔发育程度基本相当。分形维数值可用于表征有机质孔的复杂性, 其中有机质大孔 ($D>50$) 较有机质中孔

($D2-50$) 复杂, 有机质中孔又较有机质小孔 ($D<2$) 复杂。大孔与中孔的发育是造成有机质孔非均质性的关键因素。同一口井中有机质孔的复杂性随页岩埋藏深度的增加而逐渐增大, 深层气井中有机质孔的复杂性与中浅层气井基本相当。页岩中有机质孔的结构特征与分形特征主要受组分、成岩作用和构造作用等控制。下龙马溪页岩具有较高的生物石英含量和有机质较强的生烃能力, 这种组成对有机质孔隙起到很好的多向挤压屏蔽作用, 从而形成无定向的宏孔和中孔, 导致下龙马溪页岩有机质孔隙结构复杂度增加。

关键词: 四川盆地; 五峰组-龙马溪组; 有机孔; 分形

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地筇竹寺组黑色岩系与油气成藏及铅锌成矿间的关系研究

王国芝^{1,2*}, 肖钰于², 付于真², 雷庆², 李娜², 刘刚², 王昱睿²

1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

许多黑色岩系既是油气藏的烃源岩, 又是成矿的矿源岩。四川盆地寒武统筇竹寺组黑色岩系集中分布于盆地周缘的地表或者深埋于地腹, 它们是盆内灯影组和龙王庙组天然气藏重要的烃源岩。四川盆地周缘的 MVT 型铅锌矿床, 主要产于该套黑色岩系下伏的灯影组和麦地坪组白云岩中, 矿体沿古岩溶界面分布, 在空间上它们常与古油气藏(沥青)相互包容密切共生。

通过对盆地北缘马元铅锌矿、盆地西南缘唐家山铅锌矿和雪区铅锌矿中沥青的生物标志化合物研究表明, 沥青的形成环境、母质来源、CPI、OEP、萜烷化合物分子参数、甾烷分子参数均可与筇竹寺黑色岩系很好的对比, 说明筇竹寺组黑色岩系是这些古油气藏重要的烃源岩。研究表明, 盆地北缘和盆地西南缘与铅锌矿共生的古油气藏的油源, 可能分别来自于近邻和盆内绵阳-长宁拉张槽内的筇竹寺组烃源岩。

对盆地北缘、盆地西南缘和川中腹地筇竹寺组烃源岩中 Pb 和 Zn 含量的分析表明, 部分烃源岩中 Pb 和 Zn 元素异常富集, 绝大多数样品中 Pb 的含量可达地壳克拉克值的 1.7~5.9 倍; Zn 的含量普遍低于地壳克拉克值, 仅个别样品中 Zn 的含量达地壳克拉克值的 1.9~8.8 倍。通过扫描电镜分析表明, 烃源岩中可见丰度不等的 μm 级方铅矿、闪锌矿、重晶石和立方体状或草莓状黄铁矿。这些特征表明, 烃源岩具有提供成矿所需金属元素的潜力。

对盆地北缘不同地区和盆地西南缘雪区与铅锌

矿共生古油气藏内沥青的 Pb、Zn 含量分析表明, 绝大多数样品中 Pb 的含量达地壳克拉克值的 2~36 倍, 极个别样品可达 162~625 倍; 大多数样品中 Zn 的含量可达地壳克拉克值的 2~10 倍, 极个别样品可达 36~132 倍。对它们的扫描电镜分析表明, 在沥青内部可见丰富的 μm 级方铅矿、闪锌矿、重晶石和粒状黄铁矿。沥青中 Pb、Zn 含量远高于 MVT 型铅锌矿床成矿流体所需要的 Pb (2.0×10^{-6}) 和 Zn (13×10^{-6}) 含量, 表明石油可能也是成矿的初始流体。沥青中 Pb 和 Zn 的含量均大大地高于烃源岩中 Pb 和 Zn 的含量, 暗示着在油气生成过程中烃类对成矿金属元素有一个再富集的过程。

综上所述, 筇竹寺组黑色岩系不仅为与铅锌矿共生的古油气藏提供油源, 同时也为铅锌成矿提供了成矿所需的金属元素, 它具有双源层的作用。在黑色岩系初始沉积成岩阶段, 有机质对成矿金属元素可能进行了预富集形成了矿源层; 在成烃过程中, 烃源岩中的 Pb、Zn 被烃类萃取和进一步富集形成初始成矿流体和油藏流体; 其后, 金属元素可能与石油中卟啉化合物或非卟啉化合物形成金属-有机络合物形式搬运和聚集。烃源岩和沥青中 μm 级方铅矿和闪锌矿的存在, 说明金属元素也可能以 μm 级硫化物形式搬运和聚集。研究发现, 形成古油藏时可能并未成矿, 成矿可能主要发生于古油藏向古气藏转换后的古气藏破坏过程中。

关键词: 筇竹寺组; 烃源岩; 矿源层; 成矿成藏

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

砂岩型铀矿衰变的地质效应

吴立群^{1*}, 焦养泉¹, 张帆¹, 孙钰函¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

在传统的硬岩型铀矿床及其附近地区, 由于矿石中铀品位较高和铀元素富集的时间较长, 发现了很多铀矿衰变地质效应, 比如: 铀矿的放射性可影响大地热流, 其衰变热构成了地球内部的重要热能之一, 铀矿放射性可对围岩矿物晶格造成破坏, 被称为辐射损伤。然而, 在砂岩型铀矿中, 由于砂岩铀矿铀品位较低、矿床形成时间相对较短, 导致其对围岩影响强度不够, 铀矿衰变地质效应特别是生热效应微弱, 因此, 关于砂岩型铀矿的放射性地质效应系统研究较少。但是, 实际上古老的砂岩型铀矿在成矿后, 漫长的衰变也能对周围地质环境和围

岩造成种种辐射痕迹, 研究团队在鄂尔多斯北部和南部的古老砂岩型铀矿附近发现由于其衰变引起的围岩有机质成熟度“跃升突变”、钠长石红化和石英、锆石碎屑颗粒的辐射损伤“裂变径迹”等现象。其中, 碳质碎屑 Ro 跃升突变现象和规律的发现, 不仅阐明了碳质碎屑与铀矿的相互作用与成因联系, 更重要的是为研究砂岩型铀矿衰变的地质效应这一科学问题提供了很好的切入点。

关键词: 砂岩型铀矿; 铀矿衰变; 碳质碎屑; 辐射损伤

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172128)

第一作者(通讯作者)简介: 吴立群(1979-), 副教授, 博士生导师, 研究方向: 盆地铀资源. Email: 176781317@qq.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

玛湖凹陷二叠系风城组含碱页岩层系中 关键金属元素富集特征

刘新宇¹, 杨勇强^{1*}

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266000

准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷在二叠系风城组发育最古老的碱湖, 火山作用较强, 盆地中部发育厚层含碱页岩。本文在岩心系统描述的基础上, 利用 XRD、MICRO-XRF、ICP-MS、ICP-OES、LA-ICP-MS 等测试手段, 对碱矿和关键金属元素赋存特征和分布规律进行了总结。研究表明火山物质的持续供给和气候作用的周期性波动, 造成了暗色沉凝灰岩和浅色碱层的交替发育, 沉凝灰岩中发育成岩期形成的条带状和团块状的碳钠镁石、碳钠钙石等矿物, 浅色碱层主要由碳氢钠石和天然碱组成。通过主微量元素分析发现暗色沉凝灰岩层中的关键金属元素含量远大于浅色碱层, Li、Ga、Rb、Cs、Ta 等元素

呈分散状富集于凝灰质基质中, 表明其多为沉积成因; 而 Sr、Y 等元素以及稀土元素在碳钠钙石脉体中富集, 表明其易于随成岩流体迁移; Cd、W 两种元素分布均匀。火山碎屑的注入、物质的空落及深部热流体活动为碱矿和关键金属元素的形成提供了物质基础。建立关键金属元素矿产资源在火山、热液、陆源碎屑等多源控制下碱湖中的富集模式, 对此类盆地中碱矿和关键金属元素矿产资源的勘探和开发有着重要的意义。

关键词: 玛湖凹陷; 页岩; 碱矿; 关键金属元素矿产

中国石油克拉玛依勘探开发研究院横向项目: 风城组蒸发相页岩油层系伴生矿成藏地质背景研究

第一作者简介: 刘新宇(1999-至今), 硕士研究生, 研究方向: 地质学.Email: s23010034@s.upc.edu.cn

通讯作者简介: 杨勇强(1982-至今), 副教授, 研究方向: 层序地层学及沉积学.Email: yongqiangyang@upc.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南地区黑色页岩中钒有利富集条件与过程

杨立飞^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

华南黑色岩系普遍富钒, 然而其富集条件与富集过程缺乏精细研究, 限制了对黑色岩型钒矿成矿机理。系统沉积岩相学、同位素、元素地球化学研究表明, 下寒武统黑色岩系沉积环境变化明显, 对钒富集过程起到重要控制作用, 缺氧、高生产力、半局限性、温暖湿润等古海洋环境有利于促使钒富集成矿。精细矿物学与地球化学研究显示, 钒除富集在有机质中, 可形成钒独立矿物——曼纳德石 ($[\text{Ba} \cdot \text{H}_2\text{O}]\text{Ti}_6\text{V}_2\text{O}_{16}$, $a = b = 14.346(7) \text{ \AA}$, $c = 5.899(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $141/a$, $Z=4$)。钒与氧原子形成 V-O_2 -化学键占据固定晶格位置, 少量钒以 V^{4+} 形式通过类质同象形式替换 Ti^{4+} 。为钒富集过程提供了重要矿物学约束。综合以上研究, 本次研究探讨了钒富集过程: 1) 氧化环境

下, 钒主要以 V^{5+} 形式溶于海水; 2) 早寒武世海生生物活动和 Fe 、 Al 氧化物颗粒吸附作用促进了 V^{5+} 初始富集; 3) V^{5+} 在缺氧条件下被有机质 (生物残骸) 还原为 V^{4+} , 并通过有机质络合作用进一步积累; 4) V^{4+} 被还原剂 S^{2-} 进一步还原为 V^{3+} , 以曼纳德石形式再次高度富集, 少量 V^{3+} 以类质同象形式进入黏土矿中。同时, 约束了钒富集条件, 钒在黑色页岩中富集是早寒武世海生生物大爆发、还原剂 (S^{2-})、生物成因 Ba 和碎屑来源 Ti 等多条件耦合, 决定了其成矿具有鲜明的时-空专属性。

关键词: 黑色页岩; 钒矿; 富集成矿条件; 成矿过程

第一作者简介: 杨立飞 (1991-), 讲师, 研究方向: 沉积环境与多金属成矿过程. Email: lfyang@ecut.edu.cn

*通信作者简介: 杨立飞 (1991-), 讲师, 研究方向: 沉积环境与多金属成矿过程. Email: lfyang@ecut.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

从源岩大数据讨论黑色页岩成因和预测

王飞宇^{1*}, 冯伟平², 赵陶然¹

1. 中国石油大学(北京), 北京 102200;

2. 中国地质科学院, 北京 100083

富有机质源岩形成和空间分布是我们关注的一个重要科学问题, 许多人认为与全球火山活动、热液作用、极热事件、大洋缺氧事件、生物灭绝事件等关键地质事件密切相关, 在有机地球化学中一般认为富有机质源岩的形成主要受生产力, 保存条件(缺氧事件)和稀释作用 3 个方面因素控制。长期的油气勘探积累了大量源岩数据(主要是 TOC, 热解, 有机岩石学和分子地球化学数据)。过去的 20 年我们分析了中国和全球典型盆地油气系统和烃源岩数据, 本文主要从源岩大数据的分析, 讨论富有机质源岩形成的控制因素和预测模型, 以及这个领域中一些争论性问题。

(1) 富有机质源岩形成是否有旋回性? 天文旋回是否控制了源岩的发育? 烃源岩形成本质上是地质历史上通过光合作用形成有机质的保存, 目前全球源岩显生宙以来地层中源岩层段分布大致是明确的, 源岩层段对应的时限约为几到几十 Ma, 大尺度上难以得出天文旋回如何控制全球源岩发育。讨论源岩形成的天文因素时大多数研究基于一个源岩层段内, 时限约为几个 Ma 内, 这个时间尺度沉积岩定年数据本身精度有限, 较小尺度的旋回性主要与沉积相和气候有关。

(2) 保存条件(缺氧事件): 绝大多数高有机质丰度页岩形成于缺氧环境, 高生产力偏氧化环境下形成的源岩很少见到(如东欧的奥陶系 Kukersite 页岩)。从源岩分布实际数据, 全球性缺氧事件这种提法有些夸大了, 即使是 J-K, 也只是在全球的若干盆地中, 存在可对比的缺氧事件, 并没有全球性大范围分布的缺氧事件形成的源岩。

(3) 生产力: 大多数的研究认为源岩形成于高生产力, 但是地质历史上有有机生产力恢复很难, 生产力的准确概念主要基于现代环境, 另一方面, 只有生产力的不到 0.1%才保存为沉积物中有机质, 古生产力恢复分析令人信服的证据并不多, 从古生产力来预测古代源岩分布不大可行。

(4) 源岩 HI-TOC 阈值函数关系: 全球海相和湖相页岩 HI 与 TOC 之间存在阈值函数关系, 普遍来说未熟-临界成熟阶段 TOC 小于 1%, HI 一般小于 200 mg/g TOC, 当 TOC 小于 2%~3%, HI 随 TOC 增高而增加, 当 TOC 大于 2%~3%这一阈值区间, HI 保持恒定, 介于 600~700 mg/g TOC, 不同地区 TOC 阈值不同, 如刚果海白垩系源岩和鄂尔多斯盆地长 7 源岩约为 5%, 而柴达木盆地古近系咸水湖相源岩只有 0.5%~1%, TOC 阈值与有机质输入, 保存条件和稀释作用有关。

(5) 火山作用和烃源岩: 许多人认为火山作用(特别是火山灰)提供了丰富的营养元素, 促进了藻类勃发, 从而有利于源岩形成。但从更细英尺度的富有机质源岩的具体分布, 它与火山灰层并没有相关性, 高有机质丰度层段与最大洪泛面显示了良好相关。

(6) 源岩生烃模型: 基于大数据, 从源岩层系统的 TI (SI/TOC) 和 HI 数据随深度和温度的变化, 可较好的限定出源岩实际生烃模型, 这种模型的精度和可靠性要高于模拟实验数据建立的模型。

关键词: 烃源岩; 大数据分析; 缺氧事件; 火山作用; 生烃模型

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义

施振生^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 非常规研究所, 北京 100083

沉积构造不仅能揭示海相细粒陆源碎屑岩的形成环境和沉积时的古水动力条件, 还影响到页岩气储集层的渗透性及可压裂性。文中通过系统总结国内外相关研究成果, 明确了海相细粒陆源碎屑岩沉积构造的主要类型及成因。海相细粒陆源碎屑岩主要发育物理成因、化学成因和生物成因 3 类沉积构造: 物理成因构造主要有流动成因构造和软沉积物变形构造, 前者包括交错纹理、水平层理 (纹理)、块状构造、递变纹理和复合纹理, 后者包括滑塌-滑移构造、负载构造、火焰状构造、球-枕构造、包

卷层理、扭曲纹理、碎裂纹理和坠石; 化学成因构造包括碳酸盐结核和黄铁矿结核; 生物成因构造主要有生物遗迹构造和生物扰动构造。该 3 类沉积构造主要为细粒浊流沉积、等深流沉积和远洋-半远洋沉积成因, 少数为沉积物变形成因。沉积构造类型直接影响页岩气储集层的渗透性、水力裂缝的生成及延展方向。

关键词: 海相细粒陆源碎屑岩; 水平纹理; 交错纹理; 递变纹理; 软沉积物变形; 沉积构造

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技管理部 “十四五” 科技重大专项 (编号: 2021DJ1901) 资助

第一作者简介: 施振生, 男, 1976 年生, 高级工程师, 博士生导师, 主要从事细粒沉积学与储层地质学研究。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地五峰组—龙马溪组黑色页岩： 生物地层分布、沉积模式和页岩气潜力

聂海宽^{1,2,3*}, 陈清⁴, 李沛^{1,2,3}, 苏海琨⁵, 张珂⁵

1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206;

2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;

3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 102206;

4. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;

5. 中国地质大学(北京), 北京 100083

上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组底部 WF2-LM4 笔石带页岩是重要的烃源岩层段, 也是页岩气的富集高产层段, 为了明确不同笔石带页岩的展布范围、发育特征和页岩气潜力, 本文基于四川盆地五峰组-龙马溪组主要页岩气井和典型剖面的资料, 通过笔石鉴定和基于笔石带特征的页岩等时地层测井划分两种方法对典型井笔石带进行了鉴定和划分, 分析了不同笔石带页岩的沉积环境、厚度等特征。明确了五峰组下部(奥陶纪凯迪阶晚期 447.62~445.16 Ma) *Dicellograptus complexus* biozone 和 *Paraorthograptus pacificus* biozone、五峰组观音桥层(奥陶纪赫南特阶早期 445.16~444.43 Ma) *Metabolograptus extraordinarius* biozone 和龙马溪组底部(奥陶纪赫南特阶晚期

444.43~443.83 Ma 和志留纪鲁丹阶早中期 443.83~441.57 Ma) *Metabolograptus Persculptus* biozone、*Akidograptus ascensus* biozone、*Parakidograptus acuminatus* biozone 和 *Cystograptus vesiculosus* biozone 七个笔石带页岩的沉积环境、岩性和厚度特征, 建立了不同笔石带页岩的沉积模式, 并结合勘探开发实践, 明确了不同笔石带的页岩气潜力。与中东-北非志留系海相 hot shale 相比, 我国南方奥陶系-志留系富有机质页岩主要发育于凯迪阶晚期至鲁丹阶早中期。研究成果有助于富有机质页岩的精细化分和页岩气甜点优选。

关键词: 页岩气; 笔石带; 等时地层; 五峰组-龙马溪组; 四川盆地

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

黑色页岩中的地质事件：必然还是巧合

何治亮¹, 张钰莹^{2*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

黑色页岩的形成是地球系统多圈层(大气-海洋-生物-岩石圈)耦合作用的结果, 其时空分布与多种地质事件如构造事件、火山事件、海侵事件/大洋缺氧事件(OAE)、气候突变、生物灭绝/辐射、热液事件等紧密关联。本文在对特提斯域及邻区中元古宙以来代表性黑色页岩分析的基础上, 梳理了与其形成分布相关的各类地质作用与地质事件, 提出控制黑色页岩形成的地质作用与事件可分为必然因素与偶然因素(巧合)。必然因素为黑色岩系形成过程中必不可少的条件, 主要包括构造作用、海侵事件与火山活动, 这些地质因素决定了黑色岩系形成的空间、有机质来源与保存等关键作用。从中元古宙到新生代, 黑色页岩逐渐升高的出现频次与不断增强的板块活动相一致, 构造作用通过板块的裂解与聚合改变页岩沉积可容空间与沉积物来源; 此外, 超大陆的裂解与聚合往往会引起其他地质事件(如地幔柱、火山活动、海平面上升等), 对黑色页岩的沉积起关键作用。海平面的快速上升(海侵事件)会导致水体深度增加, 水体滞留分层造成底部水缺氧有利于有机质的保存。火山活动向海洋输入大量生命元素触发了海洋生物的繁盛, 为有机质沉积提供物质基础, 释放的气体可降低海水氧含量, 国内外页岩油气优质产层大多伴生火山灰层。偶然因素为黑色岩系形成过程中可能会伴随的

地质事件, 但是其对黑色页岩的形成并非直接相关或者仅有局限的促进作用, 主要包括热液事件、气候事件与生物的绝灭与辐射事件。海底热液口能够将地球内部的热量和化学物质传输至海洋中, 提高古生产力; 热液活动释放还原性气体促进有机质的保存。但热液活动的影响范围有限, 对局部黑色岩系的形成起到促进作用而非必要条件。前人研究认为温暖气候有利于有机质的形成与保存; 然而, 毛小平等(2024)研究认为, 寒温带虽然生产力低, 但固碳效率高。我国的典型黑色岩系可形成于温室期, 如二叠系龙潭组, 也可形成于冰期, 如奥陶系五峰组, 因此气候事件对黑色岩系的影响需要综合其他因素确定。部分黑色页岩形成于生物大灭绝事件前后, 然而更多黑色岩系的沉积与其无关, 决定黑色页岩是否形成的是生物事件前后的构造-沉积环境因素。总体来说, 多圈层与多重地质事件的耦合作用, 构造-水文-气候-生物协同作用联合控制了规模性的黑色页岩的形成和分布, 主要机制包括板块活动造成了多种相对局限盆地的地貌条件和稳定的欠补偿环境、适宜的气候和丰富的营养物导致旺盛的生产力、硫化与水体分层的缺氧环境导致有机质有效保存。

关键词: 黑色页岩; 地质事件; 沉积环境

第一作者简介: 何治亮(1963-), 教授, 研究方向: 石油地质学. Email: hezhiliang@sinopec.com

*通信作者简介: 张钰莹(1987-), 副教授, 研究方向: 石油地质学. Email: zhnagyuying@mail.neu.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩与 多重地质事件耦合关系

张钰莹^{1*}

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

华南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩是我国重要的页岩气资源富集层段, 主要发育于四川盆地及其周边地区, 形成于奥陶纪末至志留纪初的深水陆棚环境。奥陶纪与志留纪之交是地质历史上一个关键的转折期, 这一时期发生了许多重大地质事件, 对地球的气候、生物和构造格局产生了深远影响, 也对黑色页岩的形成起到至关重要的作用。奥陶纪-志留纪之交, 四川盆地的构造背景主要受扬子地块的稳定克拉通环境和加里东运动的影响, 盆地表现为克拉通内坳陷和克拉通边缘坳陷的复合性质, 晚奥陶世五峰组沉积期, 加里东运动导致川东南形成局限的深水海湾环境, 沉积了富有机质页岩。志留纪龙马溪组沉积特征, 四川盆地的沉积环境以深水陆棚为主。这期间火山活动频繁, 可能与扬子北缘秦岭洋闭合过程中的板块俯冲有关, 导致页岩中发育有多套钾质斑脱岩层。火山活动喷发释放的大量营养物质(如磷、氮等)进入水体, 能够显著提高初级生产力, 为黑色页岩中有机质的富集提供了物质基础。此外, 火山活动能够引发缺

氧环境的形成, 这有利于有机质的保存。奥陶纪末期发生了赫南特冰期, 在五峰组顶部, 冰川作用导致气候寒冷干燥, 水体变浅, 沉积水体由还原条件变为氧化条件; 而龙马溪组沉积早期, 随着冰期结束, 气候变暖, 发生大规模快速海侵事件, 沉积水体变为缺氧的还原环境。晚奥陶世末期至早志留世初期, 全球发生了生物大灭绝事件, 导致生物多样性显著下降, 但五峰组和龙马溪组沉积物中仍保存了丰富的笔石、放射虫和海绵骨针等化石。总体而言, 奥陶纪与志留纪之交经历了加里东运动、生物大灭绝、海平面快速下降与上升、气候变冷与回暖以及频繁的火山活动等重大地质事件, 这些地质事件通过控制页岩沉积可容空间、沉积环境的氧化还原条件、生物初级生产力和陆源输入等因素, 共同促进了五峰组和龙马溪组黑色页岩的发育和有机质富集。

关键词: 五峰组; 龙马溪组; 黑色页岩; 地质事件; 沉积环境

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

晚寒武-早奥陶纪海洋沉积环境重建: 来自 Alum 页岩的地球化学证据

边雷博¹, 王晓梅^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

晚寒武纪-早奥陶纪时期(500~480 百万年)是连接寒武纪生物大灭绝和奥陶纪生物大辐射的关键转折期。寒武纪晚期, 全球后生动物物种多样性在芙蓉世显著下降, 而奥陶纪生物大辐射事件中物种多样性增长了三倍。前人研究多集中于晚寒武世全球生物灭绝事件或奥陶纪生物大辐射事件的单独探讨, 而本研究则聚焦于揭示晚寒武-早奥陶世环境-生物转变的主要控制机制(Bian et al., 2023)。研究结果表明, 从苗岭世到芙蓉世早期, 沉积环境逐渐转变为硫化条件, 同时伴随着营养物质输入减少和水体循环受限, 多种地质因素的共同作用导致了全球碳同位素正漂移事件(Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)。在中芙蓉世早期, 强烈的火山活动可能引发了第二次生物灭绝事件。随后, 增强的大陆风化作用促进了地球降温, 并向生态系统输入更多营养物质, 从而推动了生物复苏。在早奥陶世初期, 尽管陆地营养物质输入减少,

但大规模的海水上涌降低了水体的硫化程度, 并为生物提供了必要的营养物质。此外, 我们通过汞地球化学方法研究了该时期的火山活动特征。结合钼-汞和钒- $\delta^{202}\text{Hg}$ 模型, 我们发现芙蓉世显著的汞富集伴随着正的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{200}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 值以及负的 $\Delta^{204}\text{Hg}$ 值, 这些特征表明汞可能通过大气长距离传输而来; 而早奥陶世的汞异常则以接近零的非质量分馏同位素值为特征, 表明其来源可能与海底火山(热液)活动有关。综上所述, 我们认为地表温度变化、营养物质输入以及底层硫化水体扩张与收缩的协同作用, 不仅有利于高有机质明矾页岩的沉积, 也可能是晚寒武-早奥陶世生物周转的主要驱动因素。这一过程体现了地球多圈层间物质与能量的相互作用及其对生物演化的深远影响。

关键词: Alum 页岩; 富有机质页岩; 晚寒武-早奥陶纪

第一作者简介: 边雷博, 博士后, 研究方向: 富有机质页岩沉积. Email: leibo19940528@foxmail.com

*通信作者简介: 王晓梅, 教授, 研究方向: 油气地球化学. Email: wxm01@petrochina.com.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

二连盆地下白垩统热水沉积岩的地球化学特征及有机质富集机制

吴飘^{1,2*}, 李渭^{1,2}, 马尚伟^{1,2}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 西安 710119;

2. 中国地质调查局北方古生界油气地质重点实验室, 西安 710119

二连盆地下白垩统湖盆的水体咸淡性质认识存在争议, 白音查干凹陷以外的凹陷是否存在热水活动, 以及热水活动的资源环境效应尚不明确。据此, 以二连盆地巴音都兰、阿南和乌兰花三个洼槽云质岩发育层段为研究对象, 通过开展岩矿测试和地球化学分析, 利用 B 元素法等多种方法定量恢复了水体古盐度, 并结合热水活动的岩石学和地球化学特征研究, 明确了热水的性质及热水沉积烃源岩的有机质富集机制。研究表明, 二连盆地热水沉积岩包括云灰质岩石、含方沸石岩石和凝灰岩, 热水矿物以(铁)白云石为主, 其次为方沸石和自生石英。云灰质岩石的分布受二级控洼断裂控制, 形成于盐度为 35‰~120‰的中咸水环境, 具有 Al、Ti 相对亏损, Ca、Mg、Mn、Fe 相对富集, Li、Sb 显著富集或大量富

集等特征, 为湖相白烟型热水沉积岩。云灰质泥岩具有 C₂₈ 甾烷含量高、 β -胡萝卜素烷含量高、甾藿比值高的特征, 凝灰质泥岩具有三环萜烷含量高、甾藿比值高的特征, 烃源岩的 TOC 与还原环境指标具有良好的正相关性。分析认为, 二连盆地存在广泛的热水活动, 热液通过断裂系统喷流进入湖盆并与湖水混合, 一方面使湖水中的 K、Na、Ca、Mg 等元素含量升高, 造成了湖盆咸化和水体盐度分层; 另一方面, 不同程度的咸化造成了不同类型的藻类繁盛, 并促进了缺氧环境的形成。盐度分层和缺氧环境的形成是咸水洼槽内有机质富集的主控因素。

关键词: 陆相热水沉积; 云灰质岩; 二连盆地; 生物标志化合物

基金项目: 中国地质调查局项目(批准号: DD2024000201), 国家自然科学基金青年基金(批准号: 42102188), 山东省自然科学基金青年基金(批准号: ZR2021QD095)

作者简介: 吴飘(1990-), 男, 助理研究员, 研究方向: 油气地球化学与油气成藏. E-mail: 435874032@qq.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

寒武纪早期扬子和塔里木地块缺氧陆架-盆地错时发育与差异古地理演化

陈代钊^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

扬子和塔里木地块作为中国两个主要的稳定陆块, 在寒武纪早期都发育了富有机质黑色页岩沉积, 并成为两大陆块重要的烃源岩, 同时也赋存了其他的重要矿产资源 (如磷、Ni-Mo-V 等多金属)。其中, 在扬子地区的有机质富集层系被称之为筇竹寺组 (或牛蹄塘组), 在塔里木盆地被称为玉尔吐斯组, 二者 (特别是陆架坡折-斜坡沉积) 底部都发育硅磷之沉积, 表明它们都形成于洋流上升盛行的陆架, 这种状况也得到了地球化学证据的支持。而处于中低纬度的信风为陆块陆架区的洋流上涌 (上升流) 和持续高生产力提供了持续动力和营养物质, 因此, 这两大陆块在黑色页岩形成时期都应该都处于中低纬度信风带。但它们形成的时间明显不同 (错时), 扬子地块黑色页岩层系 (筇竹寺组或牛蹄塘组) 主体形成于第 3 世, 而塔里木地块的玉尔吐斯组则形成于第 2 世, 早于扬子地块的, 也就是说这两大陆块是在不同的时间段到达合适区域的。另外, 从两陆块寒武系底部沉

积序列的变化来看, 扬子地块寒武系底部开始主要为浅水碳酸盐岩序列 (小歪头山组及相当的待补段+中谊村段+大海段) 组成, 向上磷质成分 (甚至磷块岩) 幕式增加, 其上被筇竹寺组覆盖, 说明寒武纪开始时扬子地块是从赤道热带区逐渐向中低纬度漂移的; 而塔里木地块的寒武系同期地层则从富有机质的玉尔吐斯组开始, 上覆含海绵 (特别是古杯)-微生物礁、丘的肖尔布拉克组碳酸盐岩沉积序列 (第 3 阶), 说明寒武纪初时塔里木地块经历了从中低纬度向生物礁宜居的低纬区 (赤道区) 的漂移。正是在寒武纪初期这两大陆块漂移路径差异和有机质富集环境发育的地理专属性 (依赖) 造就了它们富有机质沉积的错时, 因此古地理格局与演化为适宜的有机质富集环境的发育提供了最基础性的背景和初始驱动力。

关键词: 寒武纪早期; 富有机质沉积; 错时沉积; 古地理; 信风带

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

早寒武世古海洋中硅循环及其对页岩气富集的影响

高平^{1*}, 肖贤明¹

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

最近,四川盆地下寒武统深层页岩气勘探取得重大突破(郭彤楼等, 2023; 郭旭升等, 2025),但下寒武统优质页岩储层具有多样性,其形成机理仍存在争议,制约了页岩气的进一步勘探与开发。研究发现,早寒武世古海洋富含硅质,硅循环处于无机沉淀至生物沉淀的过渡期(Gao et al., 2020; Jurkowska and Świerczewska-Gładysz, 2024),多样的硅循环方式导致了下寒武统页岩储层形成相对复杂的孔隙系统。但是,早寒武世古海洋硅循环对优质页岩储层发育以及页岩气富集的影响尚不清晰。

通过对中上扬子地区多口钻井和野外剖面下寒武统黑色页岩样品进行岩石学和地球化学分析,明确了早寒武世古海洋中硅质的主要来源以及硅质成岩演化路径,探讨了特殊地质背景下硅循环对下寒武统页岩储层发育的影响。研究结果表明:(1)早寒武世古海洋中硅质生物主要以硅质海绵骨针为主,其次为硅质放射虫,但硅质生物数量仍不足以完全控制硅循环,导致古海洋中可溶硅浓度相对较高;(2)下寒武统页岩和硅质沉积物中硅质来源和硅质成岩路径相

对复杂,不仅包含硅质生物骨骼的溶解-再沉淀和黏土矿物的成岩转化,还包含富硅质海洋/孔隙水中硅质的直接沉淀和硅质交代碳酸盐矿物/磷灰石矿物,从而形成各种各样的微晶石英颗粒;(3)下寒武统页岩中硅质成岩作用开始于同沉积-非常早成岩期,主要发生在地温区间 30~90 °C,并呈现出多幕次特征,反映出页岩储层中多期次的硅质胶结作用,早期广泛的硅质胶结作用可能会严重恶化孔隙;(4)硅质生物的种类以及自生石英的相对含量可以影响页岩储层中有机质孔隙的发育和保持。硅质放射虫和硅质海绵骨针分别为底栖类和浮游类生物,前者生存于透光带中,放射虫的勃发有利于富有机质页岩的形成,而后者生存于相对氧化的底水环境,不利于有机质保存以及富有机质页岩形成,造成不同区域下寒武统页岩中硅质与有机质埋藏的耦合或解耦,继而影响页岩储层孔隙发育与页岩气富集。

关键词: 黑色页岩; 下寒武统; 石英; 硅质成岩; 有机质

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

中国陆相湖盆细粒沉积岩纹层结构与甜点评价

朱如凯^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 首席技术专家, 北京 100083

中国大陆主要经历了始特提斯 (Pt₂₋₃-Є1)、原特提斯 (Nh-D)、古特提斯 (C-T)、新特提斯 (J-Q) 4 个裂解-汇聚旋回。自二叠纪以来, 陆相裂谷与坳陷湖盆扩张期形成了淡水、微咸水、咸水和碱湖沉积, 发育多套陆相富有机质页岩, 蕴藏着丰富的页岩油资源。近期勘探在多个盆地获得突破, 获得了一批重要的储量发现。本文以中国陆相典型页岩油区带为研究对象, 综合利用 TOC、岩石热解、岩心薄片、场发射扫描电镜、物性分析、气体吸附、含油性评价等技术手段, 系统研究不同盆地页岩层系的纹层类型、组合与结构, 阐明纹层结构与矿物组成、有机地化、储集空间及含油性的关系, 探讨纹层结构差异性的影响因素及其对页岩油甜点评价的影响, 取得 4 项主要认识: (1) 陆相页岩纹层类型包括黏土矿物纹层、长英质纹层、碳酸盐纹层、凝灰质纹层、有机质纹层及碱性矿物纹层, 纹层类型与古湖盆水体环境密切相关, 水体盐度越大, 碳酸盐纹层与碱性矿物纹层发育比例越大。(2) 不同盆地纹层结构对应的储层品质差异明显: 松辽盆地白垩系青山口组黏土矿物纹层品质最好, 发育粒间孔与微裂缝发育; 鄂尔多斯盆地长 7

段长英质纹层品质最佳, 粒间孔发育比例高; 准噶尔盆地二叠系风城组和芦草沟组、渤海湾盆地古近系孔二段和柴达木下干柴沟组白云石纹层品质最好。(3) 矿物组成与热演化成熟度是影响纹层结构品质差异的关键, 长英质纹层、碳酸盐纹层对应的储层品质普遍优于黏土矿物纹层、碱性矿物纹层、凝灰质纹层及有机质纹层。在较高的热演化成熟度, 松辽盆地青山口组黏土矿物纹层优于长英质粉砂纹层。(4) 纹层结构直接影响了页岩系统的含油性、孔隙结构、矿物组成及储层物性, 不同盆地“甜点区/段”评价优势岩相对应的纹层结构具有差异。碱性湖盆与咸化湖盆页岩油应重点关注碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层, 淡水-微咸水湖盆应优选长英质粉砂纹层, 随热演化成熟度的增高, 黏土矿物纹层的储层品质逐渐变好。相关认识可为进一步丰富和发展中国陆相页岩油理论、推动页岩油规模勘探与有效开发提供科学指导与技术支持。

关键词: 细粒沉积; 页岩油; 储层品质; 源储配置; 非常规油气

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

川南地区龙潭组泥页岩地球化学特征及古环境意义 ——以兴文玉屏剖面为例

宁高飞¹, 曹涛涛^{1*}

1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201

为深入理解川南地区二叠世龙潭组泥页岩的沉积环境, 本文以兴文玉屏剖面为例, 开展了系统的有机地球化学、有机岩石学、主微量元素和稀土元素分析测试。结果表明, 研究区龙潭组泥页岩 TOC 含量平均为 2.69%, 显微组分以镜质组为主、其次为惰质体, 干酪根类型为 III 型, 为典型的陆相型烃源岩。主量元素以 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 为主, 较低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值表明主量元素的分布受黏土矿物含量的控制; 微量元素中 Ba、Cr 等元素略有亏损, Co、Cu、Ni 等元素较为富集; 稀土元素呈显著的轻重稀土分异现象, 轻重稀土比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 9.21。对龙潭组富有机质泥岩形成的沉积环境进行分析, $\text{La}/\text{Sc}-\text{Co}/\text{Th}$ 、 $\Sigma\text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{TiO}_2$ 图解反映了研究区源岩以峨眉山高钛玄武岩为主、同时也有一部分花岗岩; $\text{La}-\text{Th}-\text{Sc}$ 、 $\text{Th}-\text{Sc}-\text{Zr}/10$ 以及 $\text{Th}-\text{Co}-\text{Zr}/10$ 图解指示物源区具被动陆缘

构造背景。化学蚀变指数 CIA 平均值为 83.90, 显示沉积期风化程度较高; Sr/Cu 平均值为 1.89、 MgO/CaO 平均值为 1.99, 表明研究区整体处于温暖湿润的古气候条件。 Sr/Ba 平均值为 1.05、 $100\times\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 平均值为 3.76, 指示湖泊水体为半咸水-咸水, 结合 Zr/Al 值 (均值 8.25×10^{-3}) 及 $100\times\text{Mn}/\text{Fe}$ 值 (均值 0.66) 以及区域沉积特征, 证实龙潭组泥页岩形成于近源浅水沉积环境。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 平均值为 0.83、 Ni/Co 平均值为 4.77 和 Ceanom 平均值为 0.04 等特征, 判断研究区整体处于缺氧还原状态。总体而言, 川南地区龙潭组泥页岩具有较高的有机质含量和良好的生烃潜力, 富有机质泥页岩形成于温暖湿润气候下的半咸水-咸水缺氧还原的海陆过渡沉积环境。

关键词: 龙潭组; 元素地球化学特征; 源岩类型; 古气候条件; 川南地区

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472208); 湖南省自然科学基金项目 (No.2024JJ5145); 湖南省教育厅优秀青年基金项目 (No. 21B048); 湖南省自然资源厅科研项目 (No.20230149DZ) 联合资助

第一作者: 宁高飞, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: 646268747@qq.com。

通信作者: 曹涛涛, 博士, 教授, 主要从事非常规油气地质与地球化学研究。E-mail: 515165359@163.com。

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

滇黔北坳陷上二叠统龙潭组海陆过渡相页岩有机质富集机理及对页岩气勘探的指示意义

董田^{1*}, 何庆¹, 何生¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

目前我国南方海相页岩气已经得到商业开发,然而具有更大资源量的海陆过渡相页岩一直未能突破,总结其特征,主要体现在原始沉积环境的差异,导致有机、无机组分的差异,进而造成成岩作用和储层物性、含气性等差异性。为此,本研究结合系统的岩心描述、薄片和扫描电镜观察,矿物组分分析,元素地球化学分析、高分辨率扫描电镜-能谱元素-阴极发光原位观察、气体吸附技术以及高压甲烷等温吸附实验,以滇黔北坳陷上二叠统龙潭组页岩为例,恢复沉积古环境,剖析有机质丰度、类型、矿物组分变化的沉积机制。研究结果表明龙潭组海陆过渡相页岩的有机质富集机制与海相页岩较为不同,陆生高等植物碎片对于龙潭组页岩的有机碳含量具有重要贡献,因此,其有机碳含量较高。龙潭组页岩以黏土矿物为主,尽管也含有较多的石英,但多为碎屑来源。生物钡(Babio)和生物硅(Sibio)指标均表明龙潭组沉积时期的古生产力较低,因此,陆源有机质的输入、氧化还原条件和沉积速率是控制龙潭组有机质富集的主要因素。此外,龙潭组矿物组成在纵向上存在较大的非均质性,相比于下段,龙潭组中段和上段的菱铁矿含量、 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 比值、 $(Fe+Mn)/Ti$ 比值相对较高且具有明显的 Eu 正异常,表明龙潭组沉积的中期和晚期存在较为强烈的热液活动,而在龙潭组沉积的早期几乎没有热液流体的输入。

尽管龙潭组页岩有机质含量较高,但是存在较多的陆源有机质,因此,有机孔发育程度相对海相页岩要低。大量黏土矿物的存在使得龙潭组页岩发育较多黏土矿物收缩缝。龙潭组页岩的整体甲烷吸附能力也要低于海相页岩,但是龙潭组存在较多的细煤层,其甲烷吸附能力要远高于页岩。在仅考虑孔隙结构这单一因素的情况下,微孔可能对页岩的甲烷吸附能力贡献最大,中孔的贡献次之,大孔的贡献最低。尽管黏土矿物是龙潭组过渡性页岩的主要矿物成分,但它们对甲烷吸附能力的影响是相对有限的。为探究水分含量对龙潭组页岩甲烷吸附能力的影响,分别测定湿样和干样的甲烷吸附量。结果表明,水分的存在能够使得龙潭组页岩的甲烷吸附能力降低约 40%~50%。含水率可能是控制黏土含量丰富的过渡相页岩储层甲烷吸附能力的关键因素。通过对比在相同的实验温度(30 °C),相似的 TOC 含量的海相、陆相以及海陆过渡相页岩的甲烷吸附能力,发现过渡相页岩的甲烷吸附能力往往低于海相页岩,高于陆相页岩。因此相对于五峰-龙马溪海相页岩来说,龙潭组海陆过渡相的物质基础要差,但是考虑煤层的存在,其页岩气和煤层气的总量还是具有一定的商业价值。

关键词: 龙潭组; 海陆过渡相; 有机质富集; 储层物性; 甲烷吸附

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南中上扬子地区奥陶纪-志留纪之交化学风化作用与古海洋环境的耦合关系

户瑞宁^{1*}

1. 中南大学, 长沙 410000

重大地质事件对富有机质页岩形成的影响是地球科学领域的研究热点和前沿。在奥陶纪末期发生了显生宙的第一次生物大灭绝事件, 气候环境发生了显著变化, 化学风化作用占据主导地位, 同时沉积了五峰组-龙马溪组这套富有机质页岩。有机质的富集受控于底水的缺氧程度和初级生产力水平, 针对高生物生产力和缺氧条件的驱动机制目前仍存在较大争议, 特别是化学风化作用对古海洋环境的影响仍然知之甚少, 在一定程度上制约了对有机质富集机理的深入理解。本研究以华南中上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩为研究对象, 通过开展有机地球化学和无机地球化学

的相关分析, 查明了奥陶纪-志留纪之交化学风化作用呈现“强-弱-强”的特征, 与底水“缺氧-氧化-缺氧”的氧化还原条件具有较好的对应关系; 明确了这一时期的古海洋以生物固氮作用为主, 同时伴有局部好氧氮循环, 不同氮循环模式反映了含氮营养库的空间分布非均质性, 与化学风化作用的差异性演化同样具有较好的响应关系。阐明化学风化作用对古海洋环境的影响对于深入理解有机质富集机理具有重要科学意义。

关键词: 奥陶纪-志留纪之交; 化学风化作用; 古海洋环境; 有机质富集

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

镉同位素示踪鄂尔多斯盆地长 7 段陆相湖盆 异常高初级生产力及其资源效应

殷皓铭², 卫炜², 荆振华^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

二叠纪末期, 地球经历了显生宙规模最大的生物灭绝事件, 导致约 90% 的海洋物种和 70% 的陆地物种灭绝。鄂尔多斯盆地是该生物大灭绝事件后, 全球最早恢复的湖泊生态系统, 延长组长 7 段黑色页岩中发现了最为完整的湖泊食物链, 前期研究认为是初级生产力的大幅提升提供了物质基础。但是, 针对湖泊初级生产力水平, 尚未开展系统评价。同时, 鄂尔多斯盆地是中国陆相页岩油的重要生产盆地, 保守评估其资源量可达百亿吨, 主产层即为延长组长 7 段, 最高总有机碳 (TOC) 含量可超过 30 wt. %。目前针对其异常高有机质富集的主控因素是高初级生产力还是良好的保存条件, 仍存在争议。因此, 深入研究鄂尔多斯湖盆长 7 段的初级生产力水平对理解中三叠生态复苏过程和油气资源的形成机制具有重要意义。研究团队利用鄂尔多斯盆地不同地区两口钻井 (N70 井和 F75 井) 的黑色页岩样品, 重点关注湖泊 Cd 循环和 Cd 同位素分馏过程以及氧化还原敏感元素的富集。其中, 盆地南部 N70 井 TOC 较高 (7.6 wt. %~32.6 wt. %), 北部 F75 井 TOC 含量相对较低 (3.4 wt. %~10.2 wt. %), 但与世界范围内黑色页岩 TOC 平均值相比也处于高值, 说明鄂尔多斯盆地长

7 段 TOC 含量整体较高。盆地南部火山活动频繁, 大量营养物质的输入造成藻类等初级生产者勃发, 完全利用了水体中 Cd; 异常高的生产力同时导致水体的缺氧甚至间歇硫化, 进一步促进了有机质的保存。北部地区受火山活动影响较小, 生产力相对南部较低, 水体中的 Cd 被部分利用; 弱氧化环境中仍保存了大量有机质, 表明该地区生产力仍处于较高水平。研究团队得出了两个认识: (1) 鄂尔多斯盆地长 7 段发育时期, 频繁的火山活动向湖泊系统输入了大量的营养物质, 显著提高了湖泊初级生产力水平, 为有机质的积累提供了物质基础, 是异常高有机质富集的主控因素, 而局部缺氧环境则进一步增强了有机质的保存效果; (2) 大量勃发的浮游植物和藻类等初级生产者, 为湖泊昆虫和鱼类等生物提供了丰富的食物来源, 同时大量温室气体以有机碳的形式保存改善了当时的气候条件, 两者共同造就了鄂尔多斯盆地成为全球二叠纪末生物大灭绝后生态系统最先恢复的湖盆。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 初级生产力; 镉同位素; 火山活动; 页岩油

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

裂谷演化与生物地球化学反馈

王嘉宁^{1*}, 王瑞林¹, 李生¹, 贾凡琛¹, 高和婷¹, 朱光有¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉市 430100

本文系统综述了裂谷演化过程中生物地球化学反馈机制的形成、调控及其对全球元素循环与气候系统潜在影响的内在联系。裂谷作为新生板块边界, 其演化受板块拉张、地壳薄化及地幔上涌等动力学作用的驱动, 同时伴随断层活动、火山喷发和沉积环境的复杂演变, 这些地质过程通过火山与热液作用释放大量的温室气体, 并促进有机质的沉积与矿化, 从而对碳、硫、硅、磷、氮等关键元素的地球化学循环产生深远调控作用, 进而影响区域乃至全球的气候变化。近年来, 随着同位素地球化学、分子生物学及数值模拟等前沿技术的发展, 研究者对裂谷内部微生物和浮游植物(尤其是硅藻)在光合作用、甲烷生成及生物降解等过程中的作用进行了深入探讨, 揭示了其在温室气体释放和元素转化中的关键调节功能; 与此同时, 矿物-生物相互作用作为一种重要的反馈机制, 也逐渐显现出对裂谷长期演化的影响。以东非裂谷、巴伦支裂谷等典型区域为例, 综合研究表明, 火山活动、沉积作用与热液过程在共同作用下构成了复杂的反馈

网络, 使得裂谷构造演化与生物地球化学过程之间存在着多尺度、动态耦合的内在关系, 这不仅在温室气体排放和古气候变化记录中有所体现, 也为理解地球表层动力学演化提供了新的视角。尽管当前在数据采集、实验方法和跨学科模型构建等方面已取得诸多进展, 但高分辨率地球化学分析、微观尺度生物过程定量研究以及多学科交叉整合仍存在不足, 亟待进一步突破。展望未来, 综合运用先进的分子生物学技术、同位素追踪手段和数值模拟方法, 有望进一步揭示裂谷演化中生物地球化学反馈机制的内在细节及其作用路径, 从而为预测区域及全球气候变化提供更为坚实的理论支撑, 同时也为探讨地球系统中复杂反馈网络的形成与演化提供新思路, 对推动地质学、生态学及气候科学等相关领域的交叉融合具有重要理论与应用价值。

关键词: 裂谷演化; 生物地球化学反馈; 元素循环; 温室气体; 气候变化

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

南极罗斯海 LGM 以来氧化还原环境变化研究

王逸卓¹, 韩喜彬^{2*}, 张怡², 洪昱恺², 韩瑞³, 刘昀³,
马朋云³, 葛倩², 李小虎²

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都市 610000;

2. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 浙江省杭州市西湖区保俶北路 36 号 310012;

3. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 青岛 266590

大洋底层水氧化还原环境变化的研究, 对于理解全球气候变化、深层水循环、全球海洋环流及生态系统健康等具有重要意义。南极罗斯海是南极底层水生成的重要区域之一, 本文通过对罗斯海 ANT32-RB16C 柱状沉积物进行主、微量元素、粒度、有机碳及氮同位素的测试分析, 选取 Mn/Ti、Co/Ti、Mo/Ti、Cd/Ti、U/Th 及 Ni/Co 等氧化还原敏感元素地球化学指标, 结合前人建立的年代框架, 讨论了末次冰盛期 (last Glacial Maximum, LGM) 以来罗斯海底层水氧化还原状态的变化。结果表明, 研究区在 LGM 以来的沉积环境中, 始终处于富氧状态下, 但存在显著的变化并呈四个阶段。第一阶段 (24.7~15.6 Cal ka BP)

研究区氧化程度较强, 水体氧含量较高, 主要受南极底层水 (AABW) 的影响, 处于氧化条件高峰阶段; 第二阶段 (15.7 Cal ka BP~4.5 Cal ka BP) 则因生产力提高, 以及温度对海冰消退和大洋环流的影响等多重因素, 处于氧化条件衰减阶段; 第三阶段 (4.5 Cal ka BP~1.5 Cal ka BP) 还原环境显著增强, 同样也受到了生产力的主要影响; 第四阶段 (1.5 Cal ka BP~0 Cal ka BP), 氧化环境迅速恢复, 与此阶段气温突降而对 AABW 的增强作用及低生产力水平密不可分。

关键词: 氧化还原环境; 罗斯海; 末次冰盛期; 底层水; 氧化还原敏感元素地球化学指标

基金项目: 中国国家重点研发计划 (2023YFC2811305); 自然资源部第二海洋研究所科研基金 (SZ2405); 南极海洋对气候变化的影响及响应 (IRASCC)

第一作者简介: 王逸卓 (2000-) 硕士研究生; 研究方向: 沉积地球化学。Email: yz_wang@sio.org.cn

*通信作者简介: 韩喜彬 (1976-) 副研究员; 研究方向: 沉积地球化学。Email: hanxibin@sio.org.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

贵州草海生态系统退化诊断与恢复技术

杨海全^{1,2*}, 陈敬安^{1,2}, 王敬富^{1,2}, 廖鹏^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳市观山湖区林城西路 99 号 550081;

2. 红枫湖水库生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵州贵阳 551499

草海作为喀斯特高原湿地的典型代表, 其物质循环与生态环境具有典型特征。沉积物和颗粒物中有机质含量显著高于其他类型湖泊, 其中沉积物 TOC 平均含量达 16%, 沉积物磷形态以有机磷为主, 酯类等有机磷的矿化驱动内源磷释放, 内源释放通量高, 其中重污染区达 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。草海水体具有高 pH、高 HCO_3^- 等特征, 存在明显的施肥效应。实施流域综合污染治理工程以来, 草海外源污染输入得到了有效控制, 水体溶解氧含量升高, 水质稳中向好。然而自 2020 年以来, 草海出现大面积水体浑浊、水生植物消亡现象, 沉水植物盖度由原来 90% 以上减少到不足 30%, 水体营养盐含量显著升高, 水体浑浊, 水质明显恶化, 局部湖区甚至出现蓝藻水华, 对生态系统和鸟类构成严重威胁, 草海水生生态系统濒临崩溃。当前草海正处于从健康的清水草型生态系统向浊水藻型生态系统灾难性突变的关键时间节点。草海生态系统退化主要是由于持续的流域外源输入导致的湖泊存在较高内源负荷, 而水文节律的改变 (持续高水位和水位变幅减

小、水体流动性差) 导致近岸区挺水植物消亡、沉水植物萌发受到抑制; 同时禁渔措施的实施造成湖区鱼虾数量剧增, 一方面增加了沉积物再悬浮, 进一步造成水体浑浊, 内源释放增强, 另一方面食草性鱼类机械损伤进一步造成水生植物消亡, 造成水生生态系统退化, 水生植物消浪作用减弱, 水体自净作用降低, 生态系统失衡, 形成恶性循环。草海生态系统修复应遵循“自然修复为主, 人工干预为辅”的理念, 进一步削减流域外源营养盐输入通量的同时, 对湖区实施科学的鱼类种群调控和水位调控措施, 并研发高效适宜的水体营养盐和悬浮颗粒物削减-沉积物再悬浮控制技术, 降低内负荷, 提高水体透明度, 为沉水植物恢复创造良好生境。选择典型区域开展技术示范, 恢复水生植物群落, 提升水质, 形成草型健康的生态系统, 并向全湖应用推广, 逐步恢复草海水生生态系统。

关键词: 生态系统; 退化诊断; 恢复技术; 内源污染控制; 草海

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

中国交通碳排放预测与碳达峰路径规划

贾晓晨^{1*}

1. 成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都市 610051

在全球应对气候变化、推动低碳可持续发展的背景下。中国交通减排对于全球减排目标、推动交通领域的低碳可持续发展有重大意义。中国交通运输业的碳排放问题历来备受关注,其碳达峰、碳中和战略目标的实现对于全球气候具有深远影响。本研究旨在助力中国交通运输业提前达成这一战略目标,通过深入分析、科学预测,为制定有效的减排策略提供坚实的理论依据。为实现上述目标,本研究选取了 2000—2021 年中国 30 个省(市、自治区)的面板数据作为研究样本。这些数据能够全面反映中国不同地区交通运输业在长期发展过程中的碳排放特征及变化趋势。在数据处理阶段,对原始数据进行了严格的清洗、整理和标准化处理,以确保数据的准确性和可靠性,为后续的模型构建奠定坚实基础。在模型构建方面,本研究采用了多种先进的机器学习回归算法,包括线性回归、决策树回归、随机森林回归等。其中, Lasso 回归模型因其在变量选择和系数压缩方面的独特优势,能够有效处理高维数据并降低模型的过拟合风险;支持向量机算法则凭借其在小样本、非线性、高维模式识别问题上的卓越表现,展现出强大的分类和回归能力。将 Lasso 回归模型与支持向量机算法相结合所建立的预测模型(以下简称 Lasso_SVM 模型)在各项性能指标上均表现出色,成为本研究的核心预测工具。为了进一步验证模型的有效性和实用性,本研究以粤沪鲁川 4 省(市)的交通运输业进

行实证分析。针对这 4 省(市),本研究设定了基准、节能减排和技术减排这 3 种不同的未来发展情景。基准情景假设在现有政策和技术条件下,交通运输业按照历史趋势自然发展;节能减排情景考虑了常规的节能减排政策措施的实施效果,如推广新能源汽车、优化交通管理等;技术减排情景则聚焦于先进技术在交通运输领域的大规模应用,如智能交通系统、氢燃料电池技术的普及等。运用 Lasso_SVM 预测模型,对粤沪鲁川 2022—2035 年交通运输碳排放量进行了精确预测。预测结果显示,在基准情景下,四省市交通碳达峰时间分别为 2029 年(73.59 Mt)、2028 年(52.16 Mt)、2030 年(55.08 Mt)、2029 年(33.46 Mt);节能减排情景可使达峰时间整体前移 1~2 年,峰值削减 12.7%~19.4%;技术减排情景下新能源技术突破可使山东等货运大省峰值再降 8.3%。在节能减排情景下,4 省(市)的达峰时间均有所提前,碳排放峰值也相应降低,体现了节能减排措施的积极效果。而在技术减排情景下,由于先进技术的推动作用,达峰时间进一步提前,碳排放峰值显著下降,显示出技术创新在交通减排领域的巨大潜力。最后,本研究结合 4 省(市)在不同情景下的碳排放预测结果,综合考虑经济、社会、环境等多方面因素,制定了科学可行的减排路径。

关键词: 交通减排; 碳达峰; 碳中和; 减排路径

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

化学助剂促进二氧化碳地质封存和强化采油研究

段世辰¹, 于志强^{1*}, 郑益军¹, 廖丽姿¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州市 510640

在全球碳中和目标驱动下, 碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术已成为平衡减排与能源需求的关键路径。CO₂ 提高石油采收率 (CO₂-EOR) 作为 CCUS 的重要分支, 不仅能够促进油藏开发, 还可实现 CO₂ 的地质封存。CO₂-EOR 是将 CO₂ 注入油藏, 通过降低原油粘度、膨胀原油体积等机制提高原油采收率。因其具有成本优势, CO₂-EOR 技术已有 50 多年的研究历史并取得了商业成功。据估计, 全球 CO₂-EOR 的储存潜力高达 168 亿吨。然而, CO₂-EOR 过程中常面临重力超覆、粘性指进和早期气窜等技术挑战, 这些问题源于注入的 CO₂ 和储层流体之间的密度和粘度差异, 会导致采油量减少和碳储存能力降低。表面活性剂作为一类高效的化学添加剂, 在解决上述问题方面展现出独特优势。表面活性剂能够通过降低 CO₂-地层水/原油界面张力 (如磺酸盐类表面活性剂可降低界面张力 1~2 个数量级)、反转岩石润湿性 (氟碳表面活性剂可使砂岩接触角减少 40%~60%) 及抑制矿物溶解 (甜菜碱类表面活性剂降低矿物溶解速率 30%~50%), 显著提升 CO₂ 溶解封存容量与毛细管捕集安全性。在 CO₂-EOR 应用中, 表面活性剂通过促

进混相驱替 (烷基苯磺酸盐降低最小混相压力 10%~20%)、形成稳定泡沫/乳液 (Pickering 泡沫可提高采收率 15%~25%) 及优化流动性, 有效扩大波及体积并降低残余油饱和度。尽管表面活性剂技术优势明显, 但仍面临成本高昂 (氟碳表面活性剂成本达 10~50\$/kg)、环境风险 (传统石油磺酸盐存在生物毒性) 及多尺度作用机制不明确等瓶颈。本研究通过分子动力学模拟方法, 以界面张力降低能力和泡沫稳定性为关键指标, 对 CO₂-EOR 领域所用的化学助剂进行筛选。优选驱替效率高、封存效果好的表面活性剂并进行复配。筛选出来的复配体系通过岩心驱替实验验证模拟结果, 并进行盖层稳定性测试和生物毒性实验, 全面评估其现场应用的可行性。研究结果表明, 表面活性剂复配体系在 CO₂ 地质封存和 CO₂-EOR 中具有广阔的应用前景。通过不断的研究和技术创新, 表面活性剂将为应对气候变化和保障能源安全做出重要贡献。

关键词: 表面活性剂; 二氧化碳地质封存; 强化采油; 分子动力学模拟; 复配体系

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目 (2022-ZW10-A-023); 中国工程院院地合作项目 (2023-GD-07); 广东省千万吨级海上规模化 CCS 或 CCUS 集群前期规划研究项目 (E4410101)

第一作者简介: 段世辰 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 二氧化碳利用与封存。Email: duanshichen@gig.ac.cn

*通信作者简介: 于志强 (1970-), 研究员, 研究方向: 新型污染物的环境行为 (环境分布及非生物转化) 以及新型污染物对人体的早期健康影响。Email: zhiqiang@gig.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

清平磷矿床流体包裹体中稀有气体同位素组成的地质意义及其对古气候环境重建的启示

姚毅^{1,2}, 王浩^{1,2*}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 贺天全^{5,6}

1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 四川成都 611930;
6. 四川省化工地质勘查院, 四川成都 611930

在当前百年未有之大变局的深刻变革和复杂调整的国际背景下, 磷矿资源开发已上升到国家战略层面, 成为新一轮全球资源战略的焦点。清平磷矿床作为中国西南地区的重要磷矿资源, 其形成与演化过程中捕获的流体包裹体, 蕴含着丰富的古环境信息。然而, 清平磷矿床的成矿作用与古气候环境变化的关系尚不明确, 而流体包裹体中的稀有气体同位素组成为解决这一问题提供了潜在的线索。因此, 本研究旨在通过对清平磷矿床中流体包裹体的稀有气体同位素组成进行深入分析, 探讨其在地质过程中的意义, 并为古气候环境的重建提供新的启示。本研究采用先进的质谱分析技术, 对磷矿样品中的流体包裹体进行了详细的稀有气体同位素分析, 包括氦、氖、氩等元素的同位素比例测定。研究结果表明, 稀有气体同位素组成在清平磷矿床中显示出明显的多样性, 这反映了成矿流体的复杂来源和演化过程。氦同位素数据显示了地幔和地壳物质的混合特征, 指示了成矿流体可能受到了地幔热液的影响。氖和氩同位素比例的变化则揭示了成矿过程中流体的分馏和混合作用, 以及可能的大气参与。这些数据为理解磷矿床的成因提供了新

的地球化学证据。进一步地, 通过与现代气候环境数据的对比, 本研究探讨了稀有气体同位素在古气候环境重建中的应用。氩同位素数据表明, 成矿时期的气候条件可能比现代更为湿润, 而氖同位素数据则暗示了古气候环境中可能存在显著的温度变化。这些发现为重建古气候环境提供了新的线索, 特别是在解析古气候温度和降水模式方面。本研究的成果不仅丰富了清平磷矿床成矿机制的认识, 也为磷矿资源的勘探和评价提供了新的地球化学指标。同时, 通过稀有气体同位素组成的分析, 本研究为全球古气候环境变化研究提供了新的数据支持和理论依据, 对于深入理解地球气候系统的演变具有重要意义。本研究的战略意义在于为磷矿资源的可持续开发和利用提供理论支持和实践指导, 同时为全球古气候模型提供更加精确的约束条件。未来的研究将进一步探索稀有气体同位素在其他地质记录中的应用, 以期为全球古气候模型提供更加精确的约束条件。

关键词: 清平磷矿床; 流体包裹体; 同位素; 成矿机制; 古气候环境重建

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

非水相流体覆盖对矿物有效反应面积的影响研究 ——以 CO₂ 地质封存为例

朱慧星^{1*}, 杨博¹, 许天福¹

1. 吉林大学 新能源与环境学院, 长春 130012

在环境地球化学相关模拟中, 因受多种复杂因素的共同影响, 反应速率的精确计算始终是一个难题。在以 CO₂ 地质封存为代表的众多地下工程中, 水与矿物之间的有效反应面积 (Effective Reaction Area, ERA) 常受到矿物表面非水相流体覆盖的影响, 增加了反应速率的计算难度。然而, 目前关于非水相流体覆盖对矿物 ERA 的影响机制及其量化研究仍存在较大欠缺。针对这一问题, 本研究提出采用格子玻尔兹曼方法 (Lattice Boltzmann Method), 利用其精确表征相界面的优势来定量探究非水相流体覆盖对矿物 ERA 的影响规律。在此基础上, 构建了一种考虑流体润湿性的计算模型, 用于高效计算矿物的 ERA。研究结果表明, 在 CO₂、水两相体系中, 随着 CO₂ 饱和度的升高, ERA 的下降

曲线与传统线性模型偏离并呈现出上凸的特征, 采用新提出的模型能够显著提升预测精度。此外, 水、油两相体系内, 随着矿物润湿性不同, ERA 下降曲线呈现不同的特征 (亲水矿物上凸, 亲油矿物下凹)。进一步的模拟分析表明, 在更为复杂的 CO₂、水和油的三相体系中, CO₂ 倾向于被油相包裹。基于此, 本研究提出可通过 CO₂ 和油相的总饱和度来预测三相体系中矿物的 ERA。总体而言, 无论是在两相还是三相体系内, 通过在计算过程中考虑润湿性影响, 新提出模型对矿物 ERA 的计算精度均显著高于传统线性模型。

关键词: 水岩反应; 矿物有效反应面积; 格子玻尔兹曼方法; CO₂ 地质封存

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

沉积过程中生物藿烷构型变化的主要影响因素及其在重建古沉积环境酸碱度中的潜在应用

卢永丽¹, 吕沛宗^{1*}, 朱雷¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

藿烷类化合物是原油及沉积物中最常见的五环三萜类化合物, 是细菌藿多醇及其相关生物藿烷类化合物的沉积产物, 由多种细菌产生, 因此在多种环境中广泛存在, 也应用于反应细菌活动。沉积物中的藿烷主要以生物构型($\beta\beta$ 型)与地质构型($\alpha\beta$ 和 $\beta\alpha$ 型)存在; 随着埋藏加深, 首先生物构型藿烷会向地质构型藿烷转换, 其次升藿烷类化合物 C-22 位容易发生异构化, 由 22R 向 22S 转变并随着成熟度增加而达到平衡, 同时 $\alpha\beta/\beta\alpha$ 的值也会随着成熟度增加。因此升藿烷 22S/(22S+22R) 可以用于判断沉积物成熟度。基于现代沉积物最新研究发现生物藿烷与地质构型藿烷的转换还会受酸碱度影响, 从而提出了将生物构型藿烷用于恢复古沉积环境酸碱度的潜在可能性。但由于生物藿烷及其不稳定, 因此在应用之前需要谨慎考虑影响其构型变化的主要影响因素。

本研究基于新疆三塘湖盆地及和什托洛盖盆地两口钻井的连续样品。对样品中藿烷类, 正构烷烃, 类异戊二烯, 甾烷类, 以及菲系列化合物开展分析。通过主成分分析(PCA)发现生物藿烷 $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\beta)$ 参数与新藿-13(18)烯/ C_{30} 藿烷有较高的相关性, 而与升藿烷 22S/(22S+22R) 和深度具有较强的负相关性; 说明生物藿烷以及藿烯主要受控于埋藏深度, 且升藿烷 22S/(22S+22R) 在低熟样品中也可以用于反应成熟度变化。而生物藿烷参数则与姥植比、CPI、

甲基菲指数、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷以及甾烷类化合物成熟度参数相关性较弱, 但可以观察到 CPI 与姥植比具有较强相关性, 而甾烷类化合物成熟度参数具有较强相关性且这二者具有负相关关系; 这说明 1. 甲基菲指数、CPI、 C_{30} 莫烷/ C_{30} 藿烷以及甾烷类化合物成熟度参数并不能很好的反映低熟样品的成熟度。2. CPI 与姥植比的变化很有可能是沉积环境改变导致有机质输入共同变化。3. 沉积环境的氧化还原性以及有机质输入变化对生物藿烷参数的影响较小。4. 甾烷类化合物的构型组合可能受控于有机质输入或沉积环境的氧化还原性。

基于以上分析, 生物藿烷计算的酸碱度与深度的关系为 $pH = -0.0029 \times \text{深度} + 5.41$, 其 R^2 为 0.75。结合两个井位样品沉积相的变化并不明显, 我们假设两个井位的古沉积环境酸碱度变化较小且以最浅样品作为原始酸碱值, 以深度校正了基于生物藿烷的酸碱度计算公式: $pH(\text{校正}) = -0.0029 \times \text{深度} + pH(\text{原始计算})$ 由于数据点整体偏少, 且对于盆地的古地温梯度以及古埋藏史了解较少, 我们希望在以后的工作中逐渐完善校正公式并将其广泛应用于重建古沉积环境酸碱度。

关键词: 生物藿烷; 埋藏深度; 主成分分析; 古环境重建

第一作者简介: 卢永丽(2003-), 本科生; 研究方向: 有机地球化学。Email: 2295441401@qq.com

*通信作者简介: 吕沛宗(1999-), 硕士研究生; 研究方向: 有机地球化学。Email: 1540539926@qq.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

氧化石墨烯对植物修复系统的调控作用

杜俊杰^{1*}

1. 山西师范大学 生命科学学院, 太原市 030000

针对土壤重金属污染问题,植物修复因其能抵消碳排放、生态友好和成本低廉的优势一直都被认为是一种具有广阔应用前景的土壤重金属污染治理技术。如何利用纳米技术调控植物修复的效率是重要的学术问题。氧化石墨烯(GO)不仅比表面积大,表面带有酸性含氧官能团,还具有良好的生物相容性和水溶液稳定性,其应用涉及农业和环保等领域。GO在治理重金属污染方面,很多的报道集中于水体污染,目前GO在污染土壤的修复研究不足。经研究发现,GO能刺激植物根系分泌物的增量从而提高重金属的

生物有效性;GO能吸附营养元素和调整土壤菌群结构而有助于植物生长;GO能进入植物根部并向上转移。基于以上的研究基础,提出GO能吸附土壤中游离的重金属离子并以吸附体的形式进入植物根部并向上转移,增强超积累植物对重金属的富集。本研究的开展将为纳米技术调控植物修复效率的探索研究奠定一定的理论和技术基础。

关键词: 重金属; 植物修复; 氧化石墨烯; 超积累植物; 调控机理

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371709)

作者简介: 杜俊杰(1985-), 教授; 研究方向: 污染生态学。Email: 182284317@qq.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

海洋酸化对硅藻蛋白石固碳作用的影响及机制

刘冬^{1,2*}, 余荣达^{1,2}, 沈宇果^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 王旭^{1,2}, 霍广铖^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

海洋硅藻贡献了全球近 50% 的海洋初级生产力, 并通过“生物泵”作用提供了全球~20% 的固碳量。硅藻“生物泵”的有效性受到硅藻蛋白石(即, 硅藻的硅质壳体)这一生物矿物溶解性的显著影响。因此, 硅藻蛋白石在海水中的稳定性成为保证硅藻固碳效率的关键因素。近年来, 随着大气二氧化碳浓度的逐渐升高, 更多的二氧化碳进入海洋, 使海洋逐渐酸化, 海水 pH 不断降低, 这对硅藻蛋白石的形成产生了直接影响, 并引起硅藻蛋白石性质的变化, 进而影响到其溶解性, 随之作用于硅藻“生物泵”的效率等。然而迄今为止, “海洋酸化对硅藻蛋白石溶解度及其固碳效应影响”这一重要前沿问题尚未获得有效解答。本研究由生物矿物学研究入手, 尝试对不同酸化条件下硅藻蛋白石的矿物结构和表面性质开展研究, 以探明海洋酸化对硅藻蛋白石溶解性的影响及引起的固碳效应变化的机制。实验室开展模拟研究表明: 海洋酸化抑制硅藻对硅和铝的吸收, 削弱了硅藻蛋白

石的“压舱石”作用。低 pH 值培养液中所获硅藻蛋白石的含硅量减低, 这表明, 低 pH 值条件将抑制了硅藻对硅的吸收。并且, 所获硅藻蛋白石密度降低, 而孔隙度显著增加。这使得硅藻蛋白石在水体中的沉降时间增加, 溶解的可能性更高。另一方面, 低 pH 值降低了硅藻对铝的吸收, 使硅藻蛋白石中铝的含量降低。这不仅增加了硅藻蛋白石的溶解度, 还降低了其机械强度, 削弱了其在水体中的稳定性。因此, 海洋酸化将抑制硅藻蛋白石中的硅和铝, 从而降低硅藻蛋白石的水体稳定性, 导致其“压舱石”功能的减弱, 降低海洋生物泵效率。上述结果提升对硅藻蛋白石矿物学性质及其固碳能力受海洋酸化影响机制的认识, 为未来全球性海洋碳循环变化的预测提供理论依据。

关键词: 海洋酸化; 硅藻蛋白石; 生物泵效率; 固碳

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

双碳目标导向下米曲霉菌丝球介导的高效硒还原富集机制及回收技术研发

陈诗雨¹, 李非里^{1*}

1. 浙江工业大学 环境学院, 杭州 310014

硒(Se)作为典型稀散元素,其在水圈-生物圈-岩石圈系统中的地球化学分配行为及跨圈层迁移路径的解析,是实现表生环境生物有效性调控的理论基础。在工业革命及新能源产业驱动下,我国2024年原生Se产量预计达1802吨,而消费量高达2481吨,供需矛盾突出。含Se废水处理不当,会形成恶性循环,导致资源开采、污染扩散与生态风险相互加剧,包括人为干扰下Se的异常地球化学行为,及其高生物富集因子加剧的食物链传递风险。传统的物理化学以及微生物法成本高,能耗高、还可能存在二次污染的风险。因此,研究集高效Se富集-还原机制,是实现Se的资源化回收、降低人为活动对Se的生态地球化学行为影响的关键。本研究基于米曲霉(*Aspergillus oryzae*)菌丝球构建了多相界面耦合的硒(Se)生物地球化学转化的微生态,系统阐明了Se(IV)在菌丝-水界面传输中的形态转化动力学。研究表明该体系具有高效去除性能:低浓度Se(100 μ g/L)24 h界面通量 4.40×10^{-4} mmol/m²/h,去除率达92.09%;对高浓度Se(10 mg/L)96 h,界面通量 11.4×10^{-3} mmol/m²/h,去除率达95.18%,出水水质达GB 8978-1996三级标准,12 h单位体积Se回收率R_{Se}为8.6 g/m³。环境适应性:在稳定pH(2.5~6)、广域温度(15~40 $^{\circ}$ C)及中低盐度($\leq 20\%$)条件下,菌丝球(投加量2 g/100 mL湿重)对高浓度Se都能实

现近95%去除率。在30 $^{\circ}$ C条件下6 h即实现95%去除率,较常温(25 $^{\circ}$ C)效率提升10%。SEM-EDS、XPS, FTIR等表征技术进一步解析了Se在菌丝球界面的赋存形态演变规律:纳米硒(Se⁰)颗粒的粒径分布在60~100 nm范围内、并呈现出由Se⁴⁺向Se⁰梯度演变的空间异质性。吸附动力学($R^2=0.99$)和Weber-Morris扩散模型研究表明,菌丝球的三维网络结构通过多级吸附-生物转化耦合作用决定硒的迁移机制。①初始阶段(<1 h)由表面氨基等官能团主导吸附;②中期阶段(1~4 h)Se(IV)向菌体内扩散,经同化代谢生成硒代氨基酸(SeCys/SeMet);③后期阶段(>4 h)在谷胱甘肽还原酶催化下,异化还原生成Se⁰,同时伴随低量挥发性硒(DMSe/DMDSe)的代谢。限速步骤为胞内谷胱甘肽还原酶介导的异化还原过程,是硒生物累积的关键调控点。本研究首次阐明了米曲霉菌丝球介导的硒元素固-液界面迁移转化分子机制,发现其通过多尺度物理吸附-化学络合-生物还原级联反应实现硒的高效富集与价态调控,为开发基于微生物界面工程的硒污染治理修复技术提供了理论依据,同时其揭示的“硒还原-有机酸代谢”耦合电子传递路径为碳汇系统功能强化开辟了新方向。

关键词: 菌丝球; 纳米硒; 形成机制; 动力学

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977150)

第一作者简介: 陈诗雨(2000-), 硕士研究生; 研究方向: 微生物地球化学。Email: 2926447235@qq.com

*通信作者简介: 李非里(1973-), 教授; 研究方向: 重金属跨介质迁移与形态转化动力学。Email: lifeili@zjut.edu.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

气候变化和碳中和背景下矿物-有机碳-污染物的 生物地球化学过程：从冻土到农田

王梓萌^{1*}

1. 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200437

环境界面地球化学是水土污染防治、气候变化应对和新污染物治理的核心科学基础。然而, 在多重物理、化学和生物过程的共同调控下, 环境界面呈现显著的“热区”与“热时”特征, 其分子反应机制尚不清晰, 多要素驱动的耦合过程亟待系统解析。气候变化是近现代地球系统演化的核心驱动力之一, 其通过温度升高、极端降水、冻融循环等过程, 深刻影响环

境界面的地球化学行为, 改变碳循环与污染物的耦合机制。本报告将以气候变暖背景下冻土中结合残留态污染物的赋存和活化, 以及农田土壤固碳能力受限于微生物热适应演化驱动的铁库钝化为两个研究案例, 汇报近期的研究工作。

关键词: 土壤化学; 碳循环; 生物地球化学

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

天然纳米胶体驱动水中石墨相氮化碳的结合特性与光合毒性

姚树立¹, 欧阳少虎^{1*}

1. 南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350

石墨氮化碳 (Graphitic carbon nitride, CN) 已广泛应用于催化, 能源与环境污染修复。天然纳米胶体 (Nanocolloids, Ncs) 在环境中广泛存在, 在生物地球化学过程中发挥着关键作用。然而, Ncs 在 CN 上的结合特性及对藻类固碳行为的影响仍然未知。本研究综合二维荧光光谱和荧光激发-发射矩阵平行因子研究了 CN 对 Ncs 的吸附行为和机理。结果揭示了 Ncs 中的氨基酸和腐殖酸样成分的混合物通过 π - π 相互作用和静电相互作用优先结合在 CN 上, 这导致 CN 结构的改变以及光生电荷能力的增强, 值得注意的是, 与单独的 Ncs, CN 相

比, 复合暴露对藻类造成更强的光合毒性 (叶绿素 a 和光合相关基因显著下调)。代谢组学和转录组学分析进一步阐明了氨基酸、碳水化合物, 脂质代谢和光合相关基因的下调的调节是导致了毒性的根本原因。这项研究深入探讨了 Ncs 通过吸附作用调节天然水中 CN 的环境命运与风险, 特别是其通过增强能量转移能力进而加强光毒性方面的作用与机制。

关键词: 天然纳米胶体; 石墨相氮化碳; 能量转移; 环境行为

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

基于 NBS 的生态系统恢复力评价体系研究 ——以准格尔旗为例

李朋伟¹, 秦越强^{2*}, 张鑫²

1. 上海科技馆, 上海 201306;

2. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北省廊坊市 065000

针对矿集区生态系统恢复力评价需求, 本研究以准格尔旗为对象, 构建了涵盖生态脆弱性、生态弹性力及生态压力度的综合评价模型。基于层次分析法 (AHP) 与模糊理论, 整合多源数据及空间分析技术, 实现了恢复力等级划分与空间可视化, 旨在为生态修复决策提供科学依据。遵循科学性、代表性及相对独立性原则, 构建三级评价体系: 包括生态脆弱性 (坡度、坡向、降雨量、温度、表生土壤类型)、生态弹性力 (土壤有效水、有机质、净初级生产力) 及生态压力度 (地貌景观损毁、地质灾害、人口密度)。各指标按恢复力差、一般、较高、高四级量化。采用专家打分法构造判断矩阵, 通过 AHP 计算指标权重。以生态脆弱性为例, 其指标权重依次为降雨量 (0.352)、温度 (0.202)、坡度 (0.181)、坡向 (0.151)、表生土壤类型 (0.114), 通过一致性检验 ($CR=0.0616<0.1$)。生态脆弱性中气候因子 (降雨量、温度) 权重占比达 55.4%, 凸显半干旱区水热条件对系统稳定性的主导作用; 生态弹性力以净初级生产力 (NPP, 权重 0.539) 为核心, 反映植被恢复的关键地位; 生态压力度中地质灾害权重最高 (0.539), 揭示采矿活动对景观的显著扰动。生态弹性力与生态压力度指标权重均通过 $CR<0.1$ 检验, 满足逻辑一致性。利用 GIS 平台叠加指标图层, 结合模糊隶属度函数处理连续型数据 (如降雨量) 与离散型数据 (如土壤类型) 的不确定性,

进行生态系统恢复力评级分区。恢复力高区域为本底生态环境分布区域, 或生态压力度较低区域, 主要分布于准格尔旗中部广大区域, 介于准格尔召-那日松、薛家湾-龙口两大煤炭矿集区中部; 恢复力较高区域一般位于采煤集中区域, 因近年来相关政策的出台, 准格尔旗矿山基本实现了边开采边治理的良好运行模式, 部分矿山实现了绿色矿山建设目标, 排土场等景观治理取得了较好效果; 恢复力一般区域指生态压力指数较大地区, 主要体现为人口压力和人工活动影响较大地区, 分布于村镇等人口集中区域和矿山集中区域; 恢复力差区域主要分布于准格尔旗十二连城乡一带, 该地区土壤类型主要为风沙土, 抵抗降雨侵蚀作用能力较差, 是制约该区域生态地质作用向好发展的最主要因子, 净初级生产力和有效水指标明显制约生态系统向好发展。本次研究通过融合 AHP 权重分配、GIS 空间分析及模糊综合评价, 建立了可量化、可视化的生态系统恢复力评价模型, 为准格尔旗生态修复优先级划定提供依据。模型验证显示其与 SRP (敏感性-恢复力-压力) 框架结论一致, 但动态监测数据 (如 NPP 时序变化) 的纳入进一步提升模型时效性。未来可拓展至类似生态脆弱区, 为区域可持续发展策略优化提供方法论支撑。

关键词: 生态系统恢复力; 层次分析法; 模糊综合评价; GIS 空间分析; 准格尔旗

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20208078)。

第一作者简介: 李朋伟 (1992-), 工程师; 研究方向: 矿山生态修复、地质矿产、行星地质等。Email: 1336570674@qq.com

*通信作者简介: 秦越强 (1987-), 高级工程师; 研究方向: 矿山生态修复、地质灾害、地质矿产等。Email: qyq331851187@163.com

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

基于高精度在线监测的大气含氟温室气体 季节变化和排放估算

张艳利^{1*}, 黄晓晴¹, 王新明¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

含氟温室气体具有极高的全球增温潜势, 即使相对常规温室气体浓度较低, 其对全球变暖有非常重要的贡献。氢氟氯碳化物 (HCFCs)、氢氟碳化物 (HFCs)、含氟烯烃类 (HCFOs、HFOs) 以及全氟化合物作为氟氯烃 (CFCs) 的第二、三、四代替物, 针对其大气浓度水平及变化趋势的研究对评估它们的使用和排放现状及后续减排具有重要意义。我国目前处于第二-三代含氟制冷剂交替阶段, 然而由于现有研究在时间和空间尺度上相对较少, 且基于野外观测的研究数据比较缺乏, 为我国减排履约成效的评估带来较大挑战。由于含氟温室气体主要来自人为源, 针对人为活动较强的城市地区的研究

十分需要。基于在我国南方典型城市地区的长时间离线观测和短期高分辨高精度连续外场观测, 对中国华南地区大气中主要的 HCFCs、HFCs、HFOs 和全氟化合物的浓度水平、变化趋势、季节差异及其主要排放源区进行了探讨, 并基于示踪剂比值法估算了其排放量, 分析了含氟温室气体排放的历史演变趋势, 可填补该地区部分含氟温室气体监测数据的空白, 为华南地区含氟温室气体的排放估算提供可靠的数据支撑。

关键词: 含氟温室气体; 氢氟碳; 全氟化合物; 历史演变; 排放估算

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

港口航道疏浚土生态资源化利用技术路径研究

马国强¹, 贾建娜¹, 邱宁¹, 彭士涛^{1*}

1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津市 300456

我国疏浚土总量巨大, 2023 年沿海港口建设和航道维护(含长江口)每年疏浚土总量超 3.5 亿 m³。目前存在疏浚土处置方式单一、资源化利用较少、利用方式单一等诸多问题。围填海管控升级后, 沿海港口航道疏浚土处置利用已成为制约水运绿色健康发展的瓶颈难题。黄骅港位于渤海湾穹顶处, 所在地属于粉沙淤泥质海岸, 泥沙运动十分活跃, 泥沙易动、易扬、易沉, 航道极易发生淤积。黄骅港(包括煤炭港区和综合港区)全航道年淤积量在 2600 万 m³左右。本文调查分析了黄骅港疏浚土的理化特性, 结果表明黄骅港疏浚土硅含量在 50.30%~68.95%, 氯离子含量在 0.36%~1.52%, 远超过建设用砂标准限值 0.06%。针

对其氯离子含量高、黏土含量高、泥块夹带严重的特点, 开展了疏浚土生态资源化利用技术路径研究, 研究了黄骅港疏浚土泥沙分离的可行性, 研发了疏浚土高强度固化生态友好块体产品, 系统分析了疏浚土用于建材生产、生态保护修复的技术和经济可行性。借鉴长江航道疏浚土在生态固滩、吹填促淤及湿地营造等生态修复领域的应用, 提出了利用黄骅港疏浚土开展岸滩生态修复的技术路径, 对于解决港口航道疏浚土大规模处置难题, 保障潮间带生态安全具有借鉴意义。

关键词: 疏浚土; 岸滩修复; 生态资源化利用; 潮间带

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700, 2022YFE0113500)

第一作者简介: 马国强(1992-), 助理研究员; 研究方向: 环境科学。Email: zxmqq@tju.edu.cn

*通信作者简介: 彭士涛(1979-), 正高级工程师; 研究方向: 环境科学。Email: pengshitao@tiwte.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

高压条件下蒙脱石对 CO₂ 的吸附研究罗琨¹, 王航¹, 刘冬¹, 于志强^{1*}, 彭平安¹

1. 广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州 510640

地质碳封存 (Geological Carbon Sequestration, GCS) 是一种通过将二氧化碳 (CO₂) 捕获并长期储存在地层中以减少温室气体排放的技术, 是应对气候变化的重要手段之一。其核心目标是通过将 CO₂ 从工业排放源分离并注入地下地质构造中, 防止其进入大气层。蒙脱石是封存区最常见的矿物之一, 其具有较高的比表面积和 CO₂ 吸附能力, 在地质碳封存中起到重要作用。然而, 其对 CO₂ 在储层条件下的吸附机制仍尚不清楚。尽管有研究表明, 高压条件下气态 CO₂ 可吸附于蒙脱石层间域, 但仍存在如下问题尚待解决: (1) 未能提供 CO₂ 进入层间域的直接证据; (2) CO₂ 分子在何种温度压力下可进入蒙脱石层间; (3) 蒙脱石层间域的吸附量是多少。本研究基于上述问题, 开展了实验室模拟研究, 在 25℃、50℃

和 75℃ 条件下, 0~50 bar (5 MPa) 的压力范围内, 以天然蒙脱石和 600℃ 煅烧后闭合层间的热处理蒙脱石为研究对象, 开展了 CO₂ 气体吸附实验。结果表明, CO₂ 气态分子在压力 ≥ 14 bar 时可进入蒙脱石层间域, 并与层间的 Ca²⁺ 反应生成了 CaCO₃。该发现为 CO₂ 进入蒙脱石层间域提供了直接证据。随着压力的上升, 进入层间的 CO₂ 逐渐增加, 当压力为 50 bar 时, CO₂ 在层间域的吸附量可达蒙脱石总吸附量的~72%。上述结果表明, 蒙脱石层间域在地质碳封存过程中对气态 CO₂ 的吸附/捕获起到重要作用。

关键词: CO₂ 吸附; 层间域; 蒙脱石; 高压; 地质碳封存

基金项目: 二氧化碳地质碳封存场地初筛 (E2510104)

第一作者简介: 罗琨 (2000-), 博士研究生; 研究方向: 矿物学。Email: luokun21@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 于志强 (1970-), 研究员; 研究方向: 地质碳封存。Email: zhiqiang@gig.ac.cn

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

Atmospheric nitrate and its isotope records from a SE-Dome ice core with minimal post-depositional alteration

Shohei Hattori^{1*}, Wei Zhao¹

1. Nanjing University 国际同位素效应研究中心, Modern Engineering Plaza No.163 Xianlin Avenue, Qixia District, Nanjing, Jiangsu Province, China Postcode: 210023 210023

Stable isotopes of atmospheric nitrate (NO_3^-) are valuable tracers for nitrogen sources and atmospheric processes. However, post-depositional processes often alter their signals in ice core records. The Southeastern Dome (SE-Dome) ice core in Greenland presents a promising archive of atmospheric chemistry variations, as it has experienced minimal post-depositional modification due to its high accumulation rate ($\sim 1 \text{ m w.e. a}^{-1}$).

In this study, we present a 60-year (1959–2014) record of $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) from the SE-Dome ice core. $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) exhibited a decline from 1960 to 1974 and displayed clear seasonal variations, with higher values in summer and lower values in winter. $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) showed no significant long-term trend but retained a distinct seasonal pattern. The mass-weighted annual mean $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) values at SE-Dome were, on average, $4.2\text{‰} \pm 2.8\text{‰}$ lower than those observed in the Greenland Summit ice core between 1959 and 2006. Using the Transfer of Atmospheric Nitrate Stable

Isotopes To the Snow (TRANSITS) model under SE-Dome conditions, post-depositional changes were estimated to be limited, with only a 0.9‰ shift in $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and a -0.2‰ shift in $\Delta^{17}\text{O}$ (NO_3^-) from initial deposition. While differences in NO_3^- sources cannot be entirely ruled out, the lower $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) values at SE-Dome compared to Summit likely reflect reduced post-depositional processing.

As a result, the SE-Dome ice core NO_3^- record provides a more direct reconstruction of NO_x emissions and atmospheric oxidation chemistry during transport. This record captures signals from North American and Western European sources, offering robust insights into past atmospheric nitrogen cycling. In this presentation, we will introduce the latest findings on the controlling factors of $\delta^{15}\text{N}$ (NO_3^-) and discuss prospects for what can be revealed from the SE-Dome's nitrate isotope record.

关键词: 冰芯; 硝酸盐

• 专题 13: 生态地球化学与碳中和 •

Inorganic nitrogen nutrition in boreal plants is underestimated and insensitive to environmental changes

陈崇娟¹, 刘学炎^{2*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300000;

2. 中国科学院地球化学研究所 地球化学研究所, 贵阳 550000

Although more and more evidences on plant uptake of soil extractable inorganic N (EIN) challenged the traditional viewpoint of soil extractable organic N (EON) as the dominant (averaging 63%±6%) N source to boreal plants, relative contributions between EIN and EON to boreal plants and their environmental responses remain unclear. By investigating N concentrations and natural N isotopes in soils and plants, we evaluated and compared contributions of soil EIN and EON to plants of six same genera between Alaskan tundra (AT) with lower mean annual temperature (MAT, -6.8°C) and atmospheric N deposition (AND, 0.4 kg-N/ha/yr) and northeastern China peatlands (NECP) with higher MAT (-3.3°C) and AND (5.1 kg-N/ha/yr). Soil EIN was three times less than EON, but it contributed c.a. 54%±7% of N among

studied plants. In NECP, higher MAT and AND caused more increments (by three times) in soil EON than EIN, but soil EIN's contributions to plants did not differ between AT (52%±6%) and NECP (57%±7%). We concluded that soil EIN's contributions to boreal plants are underestimated (by 17%) and insensitive to concurring warmer climates and higher N deposition. These findings highlighted the importance of soil EIN nutrition to boreal plants and suggested potentially more EON losses under projected warming climate and increasing N pollution, which are useful for evaluating responses of N dynamics in boreal ecosystems to global changes.

Key words: plant nitrogen use; inorganic nitrogen; boreal ecosystem; climate warming; N deposition

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (42125301); 国家自然科学基金重点项目 (42330505); 国家自然科学基金青年基金项目 (42003061)

第一作者简介: 陈崇娟 (1992-), 讲师; 研究方向: 陆地系统氮生物地球化学。Email: chencj@tju.edu.cn

*通信作者简介: 刘学炎 (1982-), 教授; 研究方向: 氮污染与水-土-气环境质量演变、氮循环与生物圈结构与功能演化。Email: liuxueyan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

滑带水岩理化作用与滑坡预测预报

唐辉明^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

滑坡是地质灾害的重要类型, 约占地质灾害总数的 70%。滑坡预测预报被称为百年科学难题, 国内外学者为此不懈努力。滑坡预测预报经历了现象预测、统计预测和关联要素阈值预测等阶段, 难以解决复杂滑坡问题。理论和实践证明, 基于地质演化过程是实现滑坡预测预报的有效途径。滑带是滑坡地质演化的关键部位, 对滑坡启滑常常起控制作用, 滑带物理化学效应是国内外滑坡研究的重要前沿课题。滑带物理化学效应主要表现为滑带结构演变、岩土体物理特性和抗剪强度的改变。通过西南山区和三峡库区重大滑坡长期现场监测和试验, 揭示了物理化学作用下, 动水驱动型、锁固解锁型和静态液化型滑坡滑带结构演变规律和物理力学参数定量变化规律。以滑坡启滑分类为基础, 选取具有普适意义的动水驱动、锁固解锁和静态液化三类滑坡, 研究发现其启滑机制分别为: 渗流驱动-强度劣化-启动滑移、应力集中-锁固失效-解锁滑移、剪切蠕变-结构塌陷-液化滑移, 其中滑带物理化学效应发挥了重要作用。从而建立了三类滑坡

的共性启滑机制为: 动力触发-损伤演化-滑坡启滑。依据滑坡启滑共性机制, 提出了滑坡启滑通用判据。根据滑坡地质演化特征, 分别给出了三类条件下通用判据的不同表达形式, 即分别考虑损伤-硬化竞争机制、滑带速率效应和自愈合效应、渗流-力学-变形耦合作用的滑坡启滑通用判据。实现了通用判据的数值程序开发。以滑坡启滑通用判据为基础, 构建了滑坡数值预报模式。研发了滑坡多场关联和大变形自适应技术, 从而建立了国内外首个集地质力学模型与外动力因素不确定性表征、滑坡演化过程实时动态更新、滑坡启滑预测模型于一体的滑坡数值预报平台。系统开展了滑坡数值预报平台推广研究, 在全国建立了一批动水驱动型、锁固解锁型和静态液化型三类型滑坡监测示范点, 成功应用于三道沟东、白家包、屯堡乡和临江滑坡预测预报。

关键词: 滑坡预测预报; 滑带水岩理化作用; 启滑机制; 启滑判据; 滑坡数值预报模式

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42090050)

作者简介: 唐辉明(1962-), 教授; 研究方向: 工程地质与地质灾害。Email: tanghm@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

锑界面吸附过程中的同位素分馏机制

刘鹏^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430000

随着高精度分析技术的发展, 自然样品中锑稳定同位素组成在研究环境中锑的来源、迁移转化和归宿的示踪, 以及古海洋氧化还原条件的反演中发挥着越来越重要的作用。锑在矿物表面的吸附是控制锑在环境中分布的重要过程。本研究探究了锑在典型的铝、铁、锰氧化物上吸附过程中的同位素分馏规律及分馏机理。 γ - Al_2O_3 吸附实验表明轻的锑同位素首先富集在 γ - Al_2O_3 上, 锑同位素分馏值 ($\Delta^{123}\text{Sb}$) 在反应前 20 分钟内由 0.20‰ 升高至 0.47‰, 后逐渐下降至 0。EXAFS 结果表明锑在 γ - Al_2O_3 表面形成外层络合物, 从而导致未发生平衡同位素分馏。水铁矿、赤铁矿和针铁矿吸附实验表明同位素分馏符合平衡分馏模型, 其同位素分馏值分别为 0.49‰、1.12‰、1.14‰。EXAFS 结果表明锑与铁氧化物都形成了内层络合

物, 其中赤铁矿和针铁矿上第二壳层的 Sb-Fe 配位峰较弱, 从而导致了较大的锑同位素分馏。水钠锰矿吸附实验表明在吸附过程中锑同位素分馏值由 0.398‰ 在 1 小时内降低到 0.332‰, 最后升高至 0.384‰ 达到平衡。锑在水钠锰矿吸附过程中的同位素分馏符合平衡分馏模型。EXAFS 和 DFT 结果表明锑首先在水钠锰矿边缘形成边共享配合物, 然后转变为角共享配合物, 从而导致了锑同位素分馏随时间的演化。本研究理清了锑在铝、铁、锰氧化物上吸附过程中锑同位素的分馏机理, 为未来锑同位素的环境应用提供了基础数据及理论支撑。

关键词: 锑; 同位素; 同步辐射; 铁氧化物; 水钠锰矿; DFT

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

铀矿生物浸出过程中矿物-微生物相互作用机理研究

王健¹, 孙占学^{1*}

1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013

铀矿生物浸出是一种资源节约且环境友好的应用技术,然而铀矿物与微生物溶浸液相互作用机制尚不明确。本研究以沥青铀矿为目标矿物,以化能自养型嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, At.f) UBK35 为菌源,建立了无铁/有铁两种微生物浸铀体系,查明了沥青铀矿-溶浸液相互作用过程中微生物直接作用和间接作用机制。取得的主要研究成果为:(1)“硫酸”“硫酸+亚铁”“菌液”和“菌液+亚铁”四组浸出体系,在沥青铀矿-溶浸液相互作用 30 h 后,铀的浸出率分别达 2.73%、6.48%、22.68%、95.12%。“菌液+亚铁”体系铁氧化率达 92.67%,浸出后期总铁含量随着黄钾铁矾沉淀形成而明显降低。铀矿石所含碱性物质等耗酸使得体系 pH 在浸出初期快速升高,而后因黄钾铁矾形成过程中产酸又导致 pH 急剧下降并最终保持稳定;由于三价铁不断生成,溶浸液 Eh 值持续升高。(2)“菌液”体系,沥青铀矿-溶浸液相互作用过程中,浸铀菌通过胞外聚合物粘附在沥青铀矿表面并形成腐蚀坑,且铀浸出率显著高于对照组“硫酸”体系,证实

存在直接作用机制。浸出 30 h 后,微生物直接作用和硫酸作用对铀浸出的贡献率分别为 87.96%和 12.04%。浸出 15 h 后,铀浓度升高激发了浸铀菌自我解毒机制,铵根、磷酸根及铀酰离子在细菌胞内磷酸酶和胞外聚合物多糖作用下固定,形成均匀、玫瑰花状铵铀云母沉淀。(3)“菌液+亚铁”体系,沥青铀矿-溶浸液相互作用时,浸铀菌也吸附在沥青铀矿表面并形成腐蚀坑,表明存在直接作用机制。由于铁源加入,铀浸出率远高于“菌液”体系,说明该体系还存在间接作用机制。浸出 30 h 后,微生物间接作用、直接作用、非生物催化形成三价铁的氧化作用和硫酸作用对铀浸出贡献率分别为 72.22%、20.97%、3.94%、2.87%。本研究初步揭示了沥青铀矿-微生物溶浸液相互作用机理,发现精准控制微生物溶浸体系 pH 值,使其既利于微生物生长又能够抑制黄钾铁矾生成,是人工调控生物浸铀过程以达到最佳浸铀效率的关键。

关键词: 铀矿生物浸出; 水岩相互作用; 生物水文地球化学; 矿物-溶液界面反应

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772266, U1967209)

第一作者简介: 王健 (1988-), 讲师; 研究方向: 铀矿水文地球化学。Email: 1054218424@qq.com

*通信作者简介: 孙占学 (1962-), 教授; 研究方向: 水文地球化学。Email: zhxsun@ecut.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

超临界地热条件下石英溶解沉淀规律及 对岩层渗透性影响研究

钟承昊^{1*}, 许天福¹, 袁益龙¹

1. 吉林大学 新能源与环境学院, 长春 130000

深部超临界地热资源勘探开发是国际上地热学研究的焦点。超临界地热通常指温度和压力达到水的超临界点(374 °C, 22.1 MPa)以上, 地壳深部流体以超临界相态存在。石英和水作为地壳中普遍存在的两种物质, 揭示高温高压条件下石英溶解沉淀规律及对热储裂隙渗透性影响, 对综合认识深部超临界地热流体形成、运聚及开采过程十分重要。

利用自主研发高温高压水岩反应实验系统、原位高温真空取样装置, 开展 300~500°C、25~50 MPa 条件下石英溶解热力学和反应动力学实验, 获取亚临界至超临界地热条件下石英溶解度和溶解速率常数。结果表明, 在亚临界至超临界地热条件下, 石英溶解度和溶解速率常数受温度和压力共同作用。等压条件下, 石英溶解度和溶解速率常数在亚临界区随温度升高而增大, 进入超临界区后随温度升高而减小, 具有逆行溶解行为; 等温条件下, 石英溶解度和溶解速率常数与压力呈正相关关系。基于本次研究实验结果和文献中获取的高质量数据, 构建了石英溶解度和溶解速率常数预测模型, 实现常温常压至超临界地热条件下地热流体中二氧化硅溶解浓度及反应速率的定量

计算。

利用自主研发的超临界地热条件岩心渗流实验系统, 开展亚临界至超临界地热条件下花岗岩裂隙渗流-化学耦合实验, 揭示了超临界地热条件下石英溶沉对花岗岩裂隙渗透性演化的影响规律。结果表明, 在亚临界至超临界地热条件下, 裂隙渗透性随时间呈单一缓慢增加趋势; 裂隙渗透率的变化率同时受温度和压力影响, 其大小与不同温压条件下石英的溶解度和溶解速率测试结果具有一致性。结合溶液化学测试、裂隙面溶蚀特征以及裂隙面粗糙度系数综合分析, 论证了花岗岩裂隙壁面发生的自由面溶解作用是裂隙渗透率随时间缓慢增加的主要控制机制, 且石英是花岗岩裂隙面主要溶解矿物。

本次研究不仅对基础深部流体地学研究有重大意义, 而且具有较宽广的地质工程应用前景, 为有关深部流体地学问题和超临界地热开发工程等问题的解决提供科学理论和实验数据支撑。

关键词: 超临界地热; 石英溶解; 水热实验; 裂隙渗流-化学耦合作用; 储层渗透率

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

碘的水文生物地球化学行为

李俊霞^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

我国是世界上已知面积最大的水源性高碘国家, 全国约 3,098 万人暴露于高碘地下水, 碘的长期过量摄入对居民健康产生极大威胁。本研究以我国内陆大同盆地及滨海华北平原典型高碘地下水为研究对象, 查明了不同沉积背景地下水碘的主要物源包括陆源富有机质河湖相沉积及海相沉积, 厘清了利于碘富集的水文地质条件及水环境特征, 并提出高碘地下水成因模式, 包括埋藏-溶解型、压密-释放型和蒸发-浓缩型, 可用于解释自然界中广泛分布的原生高碘地下水。基于对高碘地下水宏观成因机理的认识, 利用大数据模型预测了全国范围高碘地下水赋存情况, 发现其高风险区 ($p>0.5$) 约占我

国国土面积的 19.8%。同时, 碘是典型的氧化还原敏感元素, 可参与地下水系统复杂的生物地球化学过程, 综合运用地质微生物学、基因组学等技术手段, 从原生高碘地下水系统中分离出首株异化碘酸盐还原菌, 并发现了地下水系统隐秘铁/硫循环激发碘的形态转化, 促使碘以活性最强的碘离子在地下水中富集, 构建了地下水系统碳-铁-硫-碘生物及非生物耦合循环网络, 识别了其在全球地下水碘循环中的重要意义。

关键词: 碘; 地下水; 水文地球化学; 生物地球化学; 迁移转化

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

能否利用氢氧稳定同位素识别水体盐化机理?

黄天明^{1,2*}, 祁生文^{1,2}, 张芬^{1,2}, 庞忠和^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

溶滤、蒸发、蒸腾是自然水体盐化的主要原因。但是, 如何定量评价水体盐化过程中各种作用的贡献比例, 目前尚无简单而又可靠的方法。由于蒸发伴随着浓缩(导致水中盐度增加), 造成水体中氢氧稳定同位素的富集, 很多人利用 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 与 TDS 的关系确定蒸发浓缩的作用。然而利用 $\delta^2\text{H}$ 或者 $\delta^{18}\text{O}$ 与 TDS 关系示踪水体盐化机理, 只适合初始水的氢氧同位素组成不变的情况下, 通常在流域尺度上, 由于降水同位素的季节效应和空间差异, 这种方法并不适用。

氦盈余($d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$)综合考虑了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的影响。由于在一个流域, 虽然降水或者初始水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化可能很大, 但氦盈余往往差别不大, 即具有相同的氦盈余值。只要存在蒸发, 氦盈余就会降低, 是很有潜力的指示剂。因此氦盈余与蒸发水体

剩余比例的定量化确定对于研究水体蒸发浓缩与溶滤对总盐度的贡献具有重要意义。

作者曾经基于同位素水文学原理, 根据同位素丰度概念和瑞利分馏模型导出蒸发剩余水体比例(f)与氦盈余(d)之间的关系; 并通过对比初始水(S_0)与剩余水的盐度(S)与氦盈余, 确定了蒸发与溶滤作用各自的贡献率。然而研究人员在利用该方法的时候, 往往出现初始氦盈余不易确定的情况, 本文给出了一些确定初始氦盈余的方法; 同时, 在地下水发生蒸发条件下, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化机理复杂, 本文也指出了利用该方法时需要注意的问题。

关键词: 同位素; 盐化机理; 氦盈余; 蒸发浓缩; 矿物溶解

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

乌梁素海溶解态砷-氟含量异常对黄河流域 原生劣质地下水成因的启示

闫雅妮¹, 张俊文^{1*}, 刘林², 赵志琦¹

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210007

干旱和半干旱地区地下水中砷和氟浓度异常威胁着当地居民健康饮水。这些地区地表水中这两种元素浓度升高的现象却很少受到关注, 其对当地劣质地下水(即高砷、高氟和高盐度)的影响也尚不清楚。本研究分析了我国河套盆地乌梁素海、引黄灌溉/排干渠及黄河水样的 pH 值、砷和氟浓度、其他主要元素浓度及氢氧稳定同位素组成。结果表明, 这些水样呈弱碱性(pH: 7.85~9.01), 总溶解固体浓度(TDS)介于 402~9778 mg/L(均值 1920 mg/L)。10 个湖水样品中, 有 6 个砷浓度超过 10 μ g/L(最大值为 69.1 μ g/L), 其中一个样本的氟浓度超过 1.5 mg/L。值得注意的是, 湖水中高砷、高氟和高 TDS 的结果与先前报道的当地地下水相似, 且所有

水样中, 除去两个钙离子浓度异常高的样本外, 砷和氟浓度呈显著的正相关关系($R^2=0.96$, $p<0.01$)。分析表明蒸发过程, 包括蒸发浓缩和解吸是导致湖水中砷和氟升高的主要原因。我们推测研究区的古湖泊经历了强烈的蒸发过程, 导致砷、氟和主要元素在沉积物(或残余湖水)中积累并被埋藏在河流盆地中; 随后, 它们通过多种(生物)水文地球化学过程被释放到地下水中。结合本研究与先前地下水的结果, 我们提出了干旱和半干旱地区高砷高氟地下水成因的新假设。

关键词: 干旱区和半干旱区; 地表水; 地下水; 砷; 氟

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930863, 42373058)

第一作者简介: 闫雅妮(1990-), 博士; 研究方向: 环境水文地球化学。Email: 2019027015@chd.edu.cn

*通信作者简介: 张俊文(1989-), 副教授; 研究方向: 同位素水文地球化学。Email: zhangjunwen@chd.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

气候变化和人类活动影响下岩溶水水文地球化学演化研究

高旭波¹, 王焰新^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

针对当前强烈人类活动和全球气候变化下, 岩溶水资源衰减、水质持续恶化, 岩溶生态系统失稳等问题, 围绕岩溶大泉水文地质调查理论与技术创新这一核心内容, 以查明岩溶水赋存规律及污染组分运移特征为立项根本、以服务于岩溶大泉保护及泉域生态环境修复为宗旨, 以水文地质调查为基础, 研发了岩溶水污染文地质调查新技术, 开展了多同位素示踪、放

射性同位素定年、痕量污染高精度检测、水文地球化学模拟等, 查明了岩溶水水化学演化机制, 为岩溶大泉保护和泉域生态环境可持续发展提供了理论和技术依据。

关键词: 岩溶大泉; 污染水文地质; 水资源开发与保护;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172288)

第一作者简介: 高旭波(1975-), 研究员; 研究方向: 地下水水文-生物地球化学、岩溶水资源与岩溶环境。Email: Xubo.gao.cug@gmail.com

*通信作者简介: 王焰新(1963-), 中科院院士, 教授; 研究方向: 水文地质学、水文地球化学、地下水污染及防治等。Email: yx.wang@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

曲折裂隙中两相流的非达西行为

王京平¹, 钱家忠^{1*}, 马海春¹, 薛俊杰¹, 刘咏²

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 合肥 230601

裂隙介质中探究非达西流动行为对于深入理解自然裂隙含水层的流动控制机制具有关键意义, 尤其是在地热储层建模方面显得尤为重要。尽管达西定律常被用于描述此类低流速流动, 但对于涉及非达西效应的粗糙垂直裂隙中的两相流动的定量研究却相对匮乏。本研究针对不相溶的气-水系统, 在满足高斯分布的裂隙几何形态中, 求解了三维 Navier-Stokes 方程, 并将其与 Cahn-Hilliard 模型相结合, 以应对不同的边界条件。结果表明, 在雷诺数介于 998 至 26930 之间时,

存在显著的非达西流动行为, 并证实了 Forchheimer 方程能够解释高水相比流量 q_w 时的达西偏离现象。揭示了水相饱和度 S_w 与 q_w 之间的非线性依赖关系, 从而能够定义两个水驱替气的区域。这些研究成果为修正当前两相流体系统相对渗透率的估算方法提供了新的视角, 使得非达西效应能够被纳入这些估算之中。

关键词: 垂直裂隙; 两相流; 非达西行为; 相对渗透率; 数值模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2267218, 42377050, 42472310)

第一作者简介: 王京平 (1995-), 博士; 研究方向: 环境地质学。Email: 2022010091@mail.hfut.edu.cn

*通信作者简介: 钱家忠 (1968-), 教授; 研究方向: 地下水科学。Email: qianjiazhong@hfut.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

亚热带河流系统中多样且碳活跃的水生生境： 碳酸盐含水层的促进作用

何立羹¹, 姜光辉^{1*}

1. 广西大学, 南宁 530004

揭示水生群落和环境因子的影响对于更清晰地认识河流环境中的水碳循环至关重要。为探讨归春河地下水流动和储存环境中水生群落的特征, 本文对归春河的瀑布、泉池、岩溶天窗、湿地、河道和水库进行了研究。喀斯特动力和水文条件导致河段类型更加多样化, 从单一河道到地下河流、岩溶天窗、湿地、水库和泉池并存。喀斯特含水层增加了钙离子 (+52.90~91.20 mg/L)、DIC (+156~284 mg/L)、CO₂ (+0~22 mg/L) 等气体和矿物离子的浓度, 促进了浮游生物和微生物的生物量和物种多样性。水库具有较高的 Chl-a 水平和方解石饱和指数 (SIc), 表明水生环境和生物过程有利于碳吸收。然而, 在春季水池和湿地环境中, 浮游生物丰度降低和 CO₂ 放出量增加可能导致碳释放。此外, 瀑布还增加了 DO (+1.71~

3.66 mg/L) 和 ORP (+0~158.05 mV) 浓度, 导致河道中方解石大规模沉积。这重塑了河床地形, 为植被生长创造了有利条件, 减缓了水流, 改善了水质。研究区共发现浮游植物 7 门 132 种, 浮游动物 4 门 22 种。浮游动物群落的丰度、生物量和多样性与浮游植物群落的变化趋势基本一致。微生物丰度受浮游植物产生的有机物控制, 多样性与 pH 有关。我们的研究将 GCR 水文和生物地球化学变化与水生群落特征联系起来, 强调了喀斯特动力和水文条件的重要作用, 为喀斯特河流生态中碳循环的相关研究提供了有价值的参考。

关键词: 喀斯特河流; 浮游植物; 微生物; 生物组成; 碳循环

基金项目: 国家自然科学基金 (42172287)

第一作者简介: 何立羹 (1998-), 博士研究生; 研究方向: 岩溶地下水。

*通信作者简介: 姜光辉 (1977-), 教授; 研究方向: 地下水科学与工程, 生态水文学。

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Multiscale reactive transport modeling and predictive uncertainty quantification of water-rock interactions during uranium in situ leaching

罗豪豪^{1,2}, Laura L. Kuhar³, Adam J. Siade^{4,5}, 李超^{1,2}, Baheten Boassen Guillaume Herman^{1,2}, Henning Prommer^{4,5}, 孙静^{1*}, 刘承帅^{1,6}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 101408;

3. CSIRO Minerals, Waterford, Australia 000000;

4. The University of Western Australia, Perth, Australia 000000;

5. CSIRO Land and Water, Floreat, Australia 000000;

6. 华南农业大学, 广州 510642

In situ leaching (ISL) has been widely applied for the extraction of uranium. However, the geochemical processes, such as the reaction between gangue minerals and lixiviant, exhibit nonlinear coupling, making them difficult to fully reveal through laboratory studies. Therefore, a deeper understanding of the uranium leaching mechanism is crucial for reducing the risks associated with the ISL process. This study analyzes uranium recovery experimental data using a process-based reactive transport model (RTM) to identify and quantify the key hydrogeochemical factors influencing uranium dissolution. Subsequently, we extend the laboratory-scale RTM to a field-scale to predict uranium recovery and quantify the uncertainty in model parameters and predictions through Monte Carlo uncertainty analysis. The results indicate that uranium dissolution is influenced by a combination of uranium mineralogy, leaching agent type, and gangue minerals. Under acidic conditions, the dissolution of

coffinite (U(IV)) does not require an oxidant, whereas in alkaline conditions, an oxidant is essential. The pH buffering effect caused by the dissolution of gangue minerals, such as chlorite, inhibits uranium leaching. Moreover, for the first time, quantitative analysis reveals a specific dissolution sequence of gangue minerals, with chlorite dissolving preferentially in this study. Uncertainty analysis shows that the initial concentrations of uranium and gangue minerals significantly impact the predictive accuracy of the field-scale RTM, leading to considerable uncertainty in the simulation results. The approach in this study not only enhances the understanding of the ISL process but also provides theoretical guidance for large-scale uranium recovery.

key words: Uranium in-situ recovery; water-rock interactions; reactive transport modeling; uncertainty quantification

基金项目: 贵州省重大科技计划项目 ([2024]013); 贵州省“百人”高层次创新人才项目 (GCC (2023) 038)

第一作者简介: 罗豪豪 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: luohaohao@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 孙静 (1987-), 研究员; 研究方向: 环境水文地球化学、土壤与地下水修复、反应性溶质运移建模。Email: sunjing@mail.gyig.ac.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

地下水环境中地质成因污染物氧化还原非平衡的生物能学机制

皮坤福^{1*}, 谢先军¹, 王焰新¹

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078

地下水是人类生存发展和生态系统运行不可或缺的重要基础资源。不幸的是, 全球范围内广泛分布的原生劣质地下水直接威胁超过 4.5 亿人口的用水安全和生命健康。原生劣质地下水形成与演化机制和风险管控体系不仅是学界广泛关注的前沿和热点, 而且是各国政府高度重视的基本民生问题。地质成因污染物(砷、氟、碘等)在地下水中的分散富集是水-矿物-气体-有机质-微生物相关作用(即广义的“水-岩作用”范畴)的结果, 由此构成的生物地球化学反应网络的复杂性使得地下水水质处于动态性、非线性、非稳态演化中。尤其是, 地质成因污染物氧化还原非平衡问题不但使得供水含水层中污染物的迁移转化和归趋更为复杂, 而且导致局部或区域上原生劣质地下水改良更为困难。譬如, 第四系孔隙地下水中, 相较

于其他主要氧化还原对, 不同砷/碘/硒价态往往表现出氧化还原不平衡性, 但其内在机制尚不清晰。通过结合野外水文地球化学调查、定量宏基因组测序、超高分辨率质谱和基于基因组学的分子模型等方法手段, 本研究发现, 地下水环境中多种地质成因污染物的水文生物地球化学行为受到微生物生物能学属性的限制, 其氧化还原不平衡性是热力学自由能有限条件下功能微生物介导元素氧化还原双向动力学过程的结果。这一认识对开发劣质地下水原位改良方法和认识地下水环境中污染物的高度变异性具有重要理论指导意义。

关键词: 原生劣质地下水; 地质成因污染物; 生物地球化学循环; 水-岩相互作用; 水质演化

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

渤海海域深部热液对太古界潜山储层的影响作用研究

臧春艳^{1*}

1. 中海油能源发展有限公司 中海油实验中心, 天津 300457

渤海海域近几年在太古界变质岩潜山领域取得了多个重大勘探发现, 累计探明储量超过 6 亿吨。薄片、岩心观察、电子探针、同位素等资料分析表明, 太古界潜山经历了复杂的深部热液作用, 储集空间受到了深部热液的强烈改造影响。研究表明, 储层中普遍含 CO_2 , 多口井统计表明, 储层中 CO_2 含量 6%~15%, CO_2 的碳同位素分析及 He 同位素分析表明 CO_2 主要为幔源成因。裂缝中见大量碳酸盐胶结物充填, 部分碳酸盐充填物氧同位素强负偏, 碳同位素偏正, 表现为深部热液的特征; 储层中见到大量黄铁矿, 电子探针分析表明, 部分黄铁矿 $\text{Co/Ni}>1$, 具有典型深部热液特征; 在部分储层中见到 CO_2 气藏中特征伴生矿物片钠铝石, B 表明储层中有过 CO_2 侵位的影响。为了进一步落实 CO_2 热液对储层的具体影响, 开展了溶蚀模拟实验, 实验表明, CO_2 流体作用下长石溶蚀后的伴生矿物组合为高岭石+铁白云

石+石英, 与钻井中长石溶蚀伴生矿物组合一致, 显示了 CO_2 对长石溶蚀增孔作用。裂缝中常见碳酸盐胶结物的溶蚀现象, CO_2 侵位后早期碳酸盐矿物的溶蚀是裂缝型储集空间的重要成因之一。太古界潜山经历了漫长的地质演化过程, 中生界、古近系都钻遇火山岩, 也见到辉绿岩、闪长玢岩, 煌斑岩等多期次侵入体, CO_2 主要可能主要来源于闪长玢岩、辉绿岩体侵位后的释气作用及伴生的深部热液温压降低后的析气作用。深部热液活动虽然也伴生黄铁矿、碳酸盐矿物、片钠铝石等矿物的充填作用, 但由于 CO_2 含量高, 在矿物沉淀后仍有大量 CO_2 剩余, 热液最终表现为对碳酸盐矿物和长石的溶蚀作用, 最终改善了储层物性。

关键词: 渤中凹陷; 太古界; 储层; 深部热液; 改造作用

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

莱州湾南岸海（咸）水入侵地下水的物理、化学和微生物过程

胡晓农^{1*}, 支传顺¹, 杨帆¹

1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022

莱州湾南岸是我国海（咸）入侵最严重的区域之一。本研究沿莱州湾南岸建立长约 35 km 的地下水监测剖面, 采集地下水与沉积物样品, 开展物理化学指标测试、同位素示踪与微生物分析。结果表明: 莱州湾南岸咸入侵的主要诱因是历史时期地下水超采, 淡水与卤水地下水漏斗共同作用改变地下水流场, 促使咸水向南部淡水区运移的结果。莱州湾南岸地下水盐度自内陆向沿海方向逐渐升高, 卤水盐分不仅来源于古海水, 还存在岩盐溶滤作用的贡献, 咸水是地下水与盐水、卤水混合作用的结果。

地下水微生物多样性随盐度升高呈先降低后升高趋势, 沉积物微生物多样性总体随盐度升高而增加。海杆菌属 (*Marinobacter*)、交替单胞菌科 (*Alteromonadaceae*) 等微生物可作为海水或古海水来源的生物标志物。地下水盐化过程影响碳、氮、硫循环等生物地球化学过程, 高盐度地下水中硫酸盐还原作用增强。

关键词: 海（咸）入侵; 高密度电法; 同位素示踪; 数值模拟; 微生物群落

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42430712); 青年项目 (42202277, 42402247)

第一及通信作者简介: 胡晓农 (1962-), 教授; 研究方向: 地下水循环。Email: stu_huxn@ujn.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Research on the Time lag between Groundwater level variation and Water Burst in Fissure Media Mine Tunnel Excavation by FEFLOW.

Amjad Danyal¹, Zaimin Wang^{1*}, Yangjun Wu¹, XiaoXiong Li¹

1. 成都理工大学 环境与土木工程, 成都 610059

Mining activities in fissure media pose significant challenges due to the complex and unpredictable behavior of groundwater flow, which can lead to hazardous water bursts. These bursts threaten operational safety, infrastructure integrity, and environmental sustainability. This study investigates the time lag between groundwater level variations and water bursts during tunnel excavation, emphasizing its role as an early-warning mechanism. Using the Maoping lead-zinc mining area as a case study, a conceptual model was developed to simulate groundwater flow dynamics, incorporating geological and hydrogeological data. The analysis focuses on hydraulic head, pressure distribution, water flux, velocity, and time lag, particularly within fractures 1 to 3, which represent varying hydraulic conditions. The results highlight the importance of monitoring wells in critical zones, where sudden hydraulic head reductions act as precursors to water inrush events. A negative time lag of -9, -8, and -10 steps was observed, corresponding to different monitoring locations, establishing it as a reliable indicator of transient hydraulic behavior.

High-risk zones, such as Fracture 2, exhibit dominant groundwater transport roles, characterized by high velocities and significant fluxes. These findings emphasize the need for prioritizing such fractures for real-time monitoring and proactive mitigation strategies. By integrating time lag analysis with advanced numerical simulations, this study provides a robust framework for enhancing safety in underground mining operations. The proposed early-warning system enables timely evacuation of workers, adjustment of excavation activities, and reinforcement of critical zones, mitigating risks and reducing economic losses. Furthermore, this study highlights the importance of integrating hydrogeological monitoring with predictive modeling to address groundwater flow challenges in fractured rock systems. The findings contribute to improved risk management strategies and pave the way for refining predictive tools through field applications.

Key words: Time lag; water inrush; water burst prediction; tunnel excavation; mining safety

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

基于多种稳定同位素联用的华北平原 地下水水-岩过程示踪

王莹^{1*}, 陈江¹, 苏媛娜¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北省石家庄市中华北大街 268 号水环所 050061

地下水水岩过程示踪是地下水质量和资源评价的重要组成部分, 利用稳定同位素分馏规律来示踪水岩过程是一种有效的手段, 但由于稳定同位素来源的多元性和分馏局限性, 在实际应用中仍需其它方法的支持。本研究联合应用氢氧和金属稳定同位素的分馏规律, 对华北平原典型流域剖面上地下水中的溶解沉淀、离子交换吸附作用进行了示踪, 结果显示从太行山前至滨海地区, 浅部含水层中氢氧和镁同位素随径流距离都呈逐渐偏重的趋势。地下水补给过程中, 除了受降雨的影响, 浅层地下水还经历了硅酸盐、白云岩和碳酸盐溶解, 导致了镁含量增大, 同时 $\delta^{26}\text{Mg}$

值在径流过程中存在上升趋势; 在深层径流补给过程中, 除了经历矿物溶解作用, 还经历了溶质沉淀过程, 使得镁含量随之降低, 重的镁同位素分馏而更多留在固相中, 导致地下水中 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值存在降低趋势。而在滨海地区的深部含水层中, 氢氧同位素和金属稳定同位素的变化趋势并不一致, 金属稳定同位素的贫化趋势说明除了混合作用, 还经历了次生矿物的形成及离子交换吸附作用, 使得镁含量减少而 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的值进一步降低。

关键词: 同位素; 地下水; 示踪

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

西藏堆龙德庆构造岩浆活动与现代地热关系研究

韩军¹

1. 核工业北京地质研究院 地矿所, 北京市朝阳区小关东里 10 号院 核工业北京地质研究院 100029

通过对拉萨西南部堆龙德庆区某园区及周边水热显示及地质条件的野外调查, 结合大地构造和构造岩浆活动的综合研究, 重点剖析了断裂构造、岩浆活动与地热活动的关系。调查发现的新的古地热蚀变遗迹为古近纪-更新世时期的产物, 蚀变矿物以高岭土、残留石英和蒙脱石为主要成分, 系中低温热液或热水作用的产物, 中更新世以来未见明显的地热活动现象。发现的古地热蚀变遗迹是北东、南北、北西向断裂控制的构造岩浆活动的产物, 东西向断裂则形成了研究区现代地貌和水文系统, 与地热活动没有直接联系。研究区中新世以前构造岩浆活动较为活跃, 其后岩浆活动明显减弱。构造体系不匹配以及岩浆活动不发育, 控制古钙华的断裂构造强度减弱造成深部可能的热水与浅部地下水没有联系等是研究区不具备现代水热显示和现代地热活动的主要原因。

主要结论:

研究区出露的“钙华”并不在主断裂及旁侧次级断裂上, 而是以钙华为代表的古地热蚀变遗迹的形式产在北东-南北-北西向张性、张扭性断裂产生的次级裂隙、节理、破碎带和脉岩中。根据断裂活动和岩浆岩形成时间推测, 这些钙华主要是古近纪-中新世时期中性、中酸性岩浆活动形成的热蚀变产物, 不排除少量形成于中更新世以前的酸性脉岩活动, 均属中低

温蚀变, 这类蚀变应为当时岩浆活动期后加热的古地下水运移和上涌的产物。

地表显示的钙华产生机制及现代热显示关系推测如下:

(1) 研究区地处拉萨地块中部为相对刚性地体, 与青藏高原近南北向地热带具显著不同, 构造岩浆活动较弱, 不属于地热活动有利带;

(2) 由北东、近南北向断裂为主, 北西向断裂次之, 这些断裂控制的从古近纪-中新世的岩浆活动是古热液-热水活动的热源, 热蚀变形成的钙华遗迹形成的主要时代为古近纪-中新世, 其后岩浆活动形成的脉岩规模较小, 表明其活动显著减弱;

(3) 控制出露钙华的几组断裂均为主断裂的次级构造, 这些派生构造切割较浅, 未切割到深部岩浆房或地下水, 深部可能存在热水不能上升到浅部, 造成的古钙华规模较小;

(4) 研究区构造岩浆活动在中新世以前较为活跃, 全新世以来岩浆活动明显减弱, 构造体系不匹配以及岩浆活动不发育造成热源不足, 且深部可能的热水不能循环至浅部;

关键词: 新生代构造岩浆活动; 古地热蚀变; 断裂; 堆龙德庆

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Hydrobiogeochemical Impacts of Water Sealing on Acid Coal Mine Drainage in Well-developed Karst Area

宋磊^{1,2}, 刘鹏^{3,4}, 李超^{1,2}, 刘宇晖⁵, 张海丽^{1,2}, 严杰^{1,2}, 宁增平¹, 刘意章¹,
刘承帅^{1,6}, 孙静^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074;

4. 中国地质大学(武汉)长江流域环境水科学湖北重点实验室, 武汉 430074;

5. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002;

6. 华南农业大学 资源环境学院, 广州 510642

The acid mine drainage of closed coal mines contamination for karst aquifers as important drinking water happens continuously. Understanding the underground iron and sulfur cycles controlled by the unique karst medium structure and the response of acid coal mine drainage (ACMD) to source control technology-blocking is imperative for effective groundwater quality management and reduce impact of ACMD for surface water environment in the karst region. This study combined hydrochemistry, multiple stable isotopes ($\delta D-H_2O$, $\delta^{18}O-H_2O$, $\delta^{18}O-SO_4^{2-}$, and $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$), microbiology, solid-phase chemistry and characterization, as well as a tracer test to clarify the SO_4^{2-} sources and iron-sulfur cycling within the karst aquifer affected by ACMD and blocking at the Yudong River Basin in Guizhou Province, Southwest China. Field investigations, solid characterization and hydrochemistry revealed that pyrite oxidation and dissolution of coal in the underground P2l layer, and reaches the surface via the karst conduits of the P2q+m layer. The low pH and high sulfate and total iron characteristics of ACMD effluents are not modulated by seasonal changes and blocking. The δD -excess values of water isotopes indicates that coal mining increases the difference in seasonal changes of δD -excess values, and blocking reverses the seasonal change characteristics of δD -excess values. The data from $\delta^{18}O-H_2O$ and $\delta^{18}O-SO_4^{2-}$ showed that the contributions of the pyrite oxidation by O_2 were 14%~45% and

21%~63% during the wet and dry seasons respectively for ACMD effluents in unsealed coal mines. However, blocking reduced the contributions of the pyrite oxidation by O_2 in the wet and dry seasons (7%~20% and 11%~21%, respectively). The data from $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$ suggested that dissimilatory sulfate reduction processes were responsible for the sulfur isotope depletion in the ACMD effluents within this region. The microbial community structure showed that there were hydraulic connection channels between CM#3 and the Baishui River. Moreover, the relatively weakened flow might be more conducive to the redox of Fe-S than the continuous flow. The predicted genes of Fe-S metabolism indicated that all links of sulfur redox and transport processes were relatively complete, and bacteria that could simultaneously carry out multi-metal redox including Fe may be the core population in karst ACMD. Moreover, enormous and free Fe^{3+} may exist in the karst groundwater system affected by ACMD. This study provided an integrated method for exploring the iron-sulfur dynamics in karst aquifers contaminated by ACMD and its response for blocking technology. Moreover, the study highlighted that the hydrological fluctuations and karst media structure control could interfere the stability and synergy of microbial indicators.

Key words: Acid coal mine drainage; Karst; Sealing; Multi-isotopic system; Microbial indicators

基金项目: 国家自然科学基金(42377256); 贵州省“百人高层次创新人才项目”(GCC[2023]038); 贵州省科学计划([2024]013); 环境地球化学国家重点实验室自主部署项目

第一作者简介: 宋磊(1994-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: 754254323@qq.com

*通信作者简介: 孙静(1987-), 研究员; 研究方向: 环境水文地球化学、土壤与地下水修复、反应性溶质运移建模。Email: sunjing@mail.gyig.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

CO₂ (aq) 受限条件下蓝藻的增殖优势加剧 喀斯特地区水库生态风险

曾艳¹, 冉光荣¹, 张紫焱¹, 陈敬安^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

蓝藻水华频繁发生, 尤其是在湖泊和水库中, 对水生生态系统和人类健康构成重大威胁。二氧化碳的可得性在浮游植物群落从硅藻和绿藻占优势向蓝藻占优势的转变中起着关键作用。喀斯特地区地表水的自然高 pH 值, 加上水库的季节性热分层, 导致该地区水库表层水中水溶性二氧化碳 [CO₂ (aq)] 的缺乏更为显著。然而, 目前关于喀斯特地区水库中无机碳动态变化对浮游植物群落影响的研究仍十分有限, 特别是在全球变暖的背景下。因此, 本研究选取了中国西南喀斯特地区的两个典型浅水水库, 在近一年的时间内, 每月采集表层水样, 并季节性采集垂直剖面水样。分析了营养物质、溶解无机碳 (DIC)、水溶性二氧化碳 [CO₂ (aq)] 浓度, 以及 DIC 的稳定同位素 ($\delta^{13}\text{CDIC}$) 和浮游植物种类。结果表明, 表层水体中 CO₂ (aq) 浓度在暖季显著低于冷季, 且蓝藻丰度与 CO₂ (aq) 浓度呈显著负相关, 而硅

藻和绿藻则与 CO₂ (aq) 浓度呈正相关。这表明, CO₂ (aq) 缺乏条件下更有利于蓝藻的主导地位。在热分层期间, 底层水体中的 CO₂ (aq) 浓度显著高于表层水体, 表明热分层阻碍了二氧化碳的垂直交换, 使表层水体更容易受到 CO₂ 限制, 从而更有利于蓝藻的主导地位。此外, 与非喀斯特地区水库的对比分析显示, 喀斯特水库中较高的 pH 值会加剧表层水体中 CO₂ (aq) 的缺乏, 进一步增强蓝藻的主导地位。随着全球变暖, 温度升高及由此导致的沉积物中营养物质释放增加, 将加剧喀斯特水库中蓝藻水华的风险。这项研究强调, 在喀斯特地区的 (亚) 深水库中, 蓝藻占主导地位的风险更高, 为这些水库的生态脆弱性提供了新的见解。

关键词: 蓝藻优势; CO₂ (aq) 限制; 喀斯特地区; (亚) 深水库; 生态脆弱性

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806000); 国家自然科学基金 (42177249)

第一作者简介: 曾艳 (1983-), 副研究员; 研究方向: 喀斯特地区水环境与水生态。Email: zengyan@vip.skleg.cn

*通信作者简介: 陈敬安 (1973-), 研究员; 研究方向: 环境地球化学。Email: chenjingan@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

喀斯特流域水生系统碳流失对流域碳汇的影响

侯永梅¹, 李思亮^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津市 300000

虽然陆地生态系统是重要的大气碳(C)汇,但由于水生生态系统碳的输出,特别是在生态环境脆弱且人类干扰强烈的流域,净景观生态系统碳汇能力可能被高估。本研究将水生碳输出的三种主要途径(碳埋藏、气态碳排放和下游碳输出)整合到中国西南典型的喀斯特河流-水库系统——乌江流域(WRB)的陆地-水生系统净景观生态系统碳汇评估中。结果表明,乌江流域在2000年、2006年、2013年和2017年的净景观碳汇分别为12.0、13.8、14.0和16.1 Tg C/yr,而水生系统碳输出分别抵消了陆地碳汇的10.6%、11.9%、14.6%和14.1%。就年际变化而言,水生生态系统碳输出呈现出显著的增加趋势,表明水库建设和生态修复极大地改变了流域碳的生物地球化学过程以及陆地向水生系统碳输出的动态变化。下

游碳输出占水生碳输出的61.8%~82.1%,其中约72%发生在雨季,主要归因于喀斯特地区强烈土壤侵蚀作用下岩石风化作用和外源碳的增加。水库中的有机碳埋藏占陆地碳汇的0.7%~2.0%,主要受内源碳的生物地球化学过程和陆地碳输入的影响。同时,CO₂和CH₄排放抵消了陆地碳汇的1.2%~3.7%,如果考虑水库下泄水中的气体排放(这些水体以增强的微生物降解和缺氧条件为特征),这种抵消效应会进一步增强。本研究强调了陆地-水生碳输出在抵消陆地碳汇中的重要作用,因此将水生系统碳输出纳入生态系统碳评估对于全面理解净景观生态系统碳汇有重要作用。

关键词: 陆地 C 汇; 生物地球化学过程; 净景观 C 平衡; 梯级水库

基金项目: 国家自然科学基金项目(42230509, 42222062)

第一作者简介: 侯永梅(1997-), 博士在读; 研究方向: 喀斯特流域水碳耦合。Email: ymhou23_@tju.edu.cn

*通信作者简介: 李思亮, 教授; 研究方向: 流域生物地球化学循环。Email: siliang.li@tju.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

西南“叠加区”生态环境现状检测与问题诊断

于慧^{1*}

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川省成都市 610213

通过地面调查、遥感监测、空间建模等手段, 开展以降雨侵蚀力、土壤可蚀性、植被覆盖度、净初级生产力、NDVI 等水土流失、植被状况、流域环境状况关键指标检测, 检测西南喀斯特“叠加区”生态环境现状, 诊断区域生态系统退化严重程度。建立西南

喀斯特“叠加区”适应气候变化生态保护修复技术效应评估的指标体系。

关键词: 生态环境现状检测; 生态系统退化; 生态保护修复

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFF0806004)

作者简介: 于慧 (1980-), 副研究员; 研究方向: 国土空间生态修复与土地综合整治。Email: yuhui@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

多情景视角下生态脆弱区土地格局优化及生态系统服务价值评估——以乌江流域为例

李志颖¹, 魏荣菲^{2*}, 唐玉倩¹, 王芳³, 郭庆军²

1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

喀斯特地区是西南地区典型的生态脆弱区, 乌江流域作为其中的核心部位, 发挥着生态安全屏障的重要作用。受气候变化与人类活动的双重影响, 该地区生态系统的稳定性与持续性受到挑战, 探明流域未来发展格局与生态系统服务的动态变化路径对于乌江生态环境保护与修复具有重要意义。然而, 土地利用在生态修复导向下的多目标优化路径及其与生态系统服务之间的响应机制尚不明确。因此, 本研究以乌江流域作为研究区域, 结合自然与社会经济等多种驱动要素数据分析人类活动和气候变化影响下土地利用的动态演变过程, 耦合启发式智能算法模型与 PLUS 模型探索经济效益最大化、碳排放最小化以及生态系统服务最大化多目标下协同的土地利用空间配置, 进而预测多种情景 (SSP1-

RCP2.6、SSP2-RCP4.5、SSP5-RCP8.5、自然发展、优化调控) 下生态系统服务价值的未来发展趋势。结果表明: 在 SSP1-RCP2.6 与 SSP2-RCP4.5 情景下, 林地、草地等生态土地利用类型得到一定程度的保护与恢复, SSP5-RCP8.5 情景下建设用地数量显著提升; 同自然发展情景相比, 优化后的土地利用配置兼顾建设用地与生态类型用地的的发展; 5 种情景预测下 2030 年乌江流域地区生态系统服务价值均有所增长。本研究可为乌江流域开展国土空间生态修复工作, 推动绿色可持续发展提供数据支撑与政策建议。

关键词: 生态系统服务; 土地利用; 多目标优化; 乌江流域

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806004)

第一作者简介: 李志颖 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 土地利用优化。Email: zhiying@cug.edu.cn

*通信作者简介: 魏荣菲 (1985-), 副研究员; 研究方向: 环境质量评价与修复。Email: weirf.12b@igsrr.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

蓖麻对某铀矿区土壤的修复行为及机制探讨

关燕鹤^{1*}

1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西省南昌市 330013

铀矿区土壤污染的修复是我国核工业生态环境保护领域亟待解决的重要课题。在众多土壤修复技术中, 植物修复技术因其环境友好性和经济性, 已成为铀污染土壤修复的研究热点。本研究以中国东南部某铀矿区为研究对象, 基于对矿区土壤铀含量的全面调研, 将土壤分为低 ($50\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、中 ($100\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、高 ($200\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 三个浓度组, 利用前期筛选出的优势植物蓖麻开展实验。采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)、透射电镜 (TEM)、能谱 (EDS)、高效液相色谱 (HPLC)、高通量测序 (High-throughput sequencing)、RNA-Seq 转录组测序和 LC-MS/MS 代谢组学等先进技术, 揭示蓖麻修复铀污染土壤的调控机制。结果显示: 蓖麻在不同铀浓度胁迫下的生物量和生长状态呈现先增后降趋势。在中、低浓度铀胁迫下, 蓖麻毒物兴奋效应明显。随着铀浓度的增加, 蓖麻叶片的光合色素 (叶绿素 a、b、类胡萝卜素、总叶绿素) 和抗氧化酶活性 (POD、SOD) 呈现先升后降的趋势; 可溶性蛋白含量则先降后升, 而丙二醛含量变化不大。根部细胞在不同铀浓度胁迫下状态良好; 茎、叶部细

胞在中、低浓度铀胁迫下淀粉粒数量明显增加, 而在高浓度铀胁迫下与对照组相差不大。含铀结晶主要位于表皮细胞壁的外侧, 而其他形态的铀则可见于细胞壁和细胞质中。铀胁迫显著影响了微生物群落的组成, 导致结构重组和功能变化。铀胁迫条件下, 蓖麻根际土壤中脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性均显著低于对照组 (CK), 而过氧化氢酶的活性随着铀浓度的升高呈现出先增长后降低的趋势。不同铀浓度胁迫下蓖麻根系的基因表达差异涉及代谢过程、酶活性与催化功能、转运过程、信号传导与调控以及细胞结构与功能等方面。差异显著基因的注释中, 代谢通路占据了主要部分, 其中氨基酸代谢、其他次级代谢物的生物合成和碳水化合物代谢的基因富集程度最高。此外, 在低、中浓度铀胁迫下, 差异显著的代谢物数量显著高于高浓度铀胁迫组, 且不同处理下对根系影响最大的均为代谢通路, 尤其是次级代谢物的生物合成通路。

关键词: 铀胁迫; 蓖麻; 微观分布; 代谢组学; 转录组学

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

人类活动影响下中国西南喀斯特地区磷转化 微生物的种群及演替特征

吴求生¹, 袁权^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

磷限制在全球范围陆地生态系统中普遍存在, 磷也是水库内源负荷的关键因素。微生物在磷循环过程中扮演重要角色。病毒是地球上最大的生物实体, 我们对其如何影响微生物磷获取过程的了解仍然有限。本研究采集贵州喀斯特植被恢复不同阶段土壤样本(0-60 年) 和不同库龄沉积物样本(最高 42 年) 进行宏基因组测序并识别病毒信息。结果表明随着植被恢复年限增加, 土壤微生物群落解磷和聚磷潜力增强。随着库龄增加, 沉积物微生物群落解磷潜力下降。2 种生境中, 病毒对于微生物磷获取潜力和磷循环微生物多样性的影响都大于理化指标。土壤中, 裂解型病毒显著促进微生物群落解磷和聚磷潜力, 但降低磷

循环微生物多样性; 溶源型仅与 C-P 氧化裂解和水解途径显著相关, 与磷循环微生物多样性未见相关性; 沉积物中, 裂解型和溶源型都显著降低微生物群落解磷和聚磷潜力, 但这 2 种病毒的多样性与磷循环微生物群落多样性显著正相关。沉积物中病毒编码丰富的磷获取的辅助代谢基因(包括 *ppk1*、*ppk2*、*phy*、*phnJ* 等基因)。2 种生境中, 病毒侵染频率最高的磷循环物种是链霉菌属、慢生根瘤菌以及中慢生根瘤菌等优势属。

关键词: 磷限制; 内源负荷; 裂解型与溶源型; 解磷与聚磷; 辅助代谢基因

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0806000); 国家自然科学基金(41573083, 42177116, U2202209)

第一作者简介: 吴求生, 博士研究生; 研究方向: 微生物地球化学。Email: 565715597@qq.com

*通信作者简介: 袁权, 研究员; 研究方向: 土壤微生物学和生物地球化学, 喀斯特系统生源要素循环的微生物学机制。Email: yuanquan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

喀斯特生态脆弱区土壤有机碳库提升的微生物机制

崔俊芳¹, 钟卫¹, 唐家良^{1*}, 李春培¹, 芦美¹

1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610229

报告系统梳理了喀斯特脆弱区边坡类型和特点, 以及国内外边坡修复领域的多项关键技术, 依据生态系统重建、维持和景观优化与生态系统功能提升的步骤, 提出喀斯特脆弱区生态修复总体设计思路; 通过分析对比喀斯特脆弱区生态修复及治理模式, 依据可持续发展理念, 提出蚕桑产业是推动

贵州叠加脆弱区可持续发展的新路径, 明确了边坡桑配搭苔藓在土石质边坡用于生态修复的技术方案。

关键词: 喀斯特; 适应性生态修复; 蚕桑产业; 苔藓

基金项目: 科技部重点研发项目 (2023YFF0806002)

第一作者简介: 崔俊芳 (1983-), 副研究员; 研究方向: 土壤结构与水碳耦合。Email: jfcui@imde.ac.cn

*通信作者简介: 唐家良 (1981-), 研究员; 研究方向: 地力提升。Email: jltang@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

西沙石岛喀斯特岩溶：珍贵地质遗迹资源之殇 和逆喀斯特岩溶海洋岩土工程

许红^{1,2,3}, 李琦⁴, 鲍志东⁵, 张莉⁶, 孔亮⁷

1. 长江大学(武汉), 湖北武汉, 434100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

3. 国土资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛, 266237;

4. 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

5. 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

6. 广州海洋地质调查局, 广东广州, 511466;

7. 青岛理工大学, 山东青岛, 266033

喀斯特地貌如桂林山水、云南石林, 是珍贵地质遗迹资源和顶级生态景观代名词。海洋岛屿喀斯特尤其是南海海岛喀斯特仅见于西沙群岛石岛。石岛是中国南海海拔最高的小岛, 石岛老龙头是唯一一尊发现于自然界的龙形石。老龙头酷似石龙, 是西沙军民图腾, 也是中华民族的象征。但是, 老龙头由弱固结沙屑灰岩-生物礁海滩沙固结形成, 逾 40 年研究发现是中全新世-晚更新世。老龙头是西沙群岛名片。但是, 在全球气候变化与人类获得加剧的背景下, 热带风暴、半日潮、波浪流、南海双向季风、高温、高湿、高盐

七大自然力与人类活动造成的损害、损坏和损毁, 老龙头现状堪忧: 头重脚轻, 已呈倒三角锥状, 摇摇欲坠, 定义为顶级生态景观之殇和海岛喀斯特岩溶。本文以现代海岛碳酸盐岩生态景观喀斯特为研究对象, 以台湾高雄叶柳公园女王头灰质泥岩喀斯特修复失败, “5-10 年或断颈”为警示。探索石岛老龙头修复保护的科学理论及其纳米材料和海洋岩土工程方案。

关键词: 西沙群岛石岛; 老龙头; 喀斯特岩溶; 逆喀斯特岩溶修复; 纳米材料与海洋岩土工程

基金项目: 国家自然科学基金项目(49206061, 41106064); 国家油气重大科技专项(2011ZX05025-002-04); 国家科技基础资源调查专项(2017FY201407)

第一作者简介: 许红, 教授; 研究方向: 碳酸盐岩沉积岩石学。Email: qdxhong@163.com

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

喀斯特湖泊沉积物-水界面 CO_2 产生的空间分布及分子机制

郭雯¹, 廖鹏^{1*}, 陈敬安¹

1. 中国科学院地球化学研究所 环境室, 贵州省贵阳市 550081

喀斯特流域因土层浅薄、石漠化严重而成为典型的生态脆弱区。最近数据显示, 该区域的增温速率 ($0.34^\circ\text{C}/10$ 年) 与青藏高原 ($0.32^\circ\text{C}/10$ 年) 相当, 位列全球升温最快区域之一。同时, 作为全国 13 大水电基地之一, 筑坝水库的周期性蓄放水行为和自然湖泊水体季节性分层使得湖泊沉积物-水界面呈现动态的无氧-有氧波动, 成为 CO_2 的潜在产生热区。然而, 目前对于 CO_2 产生的空间分布规律及其微观分子机制仍知之甚少。本研究以典型喀斯特湖泊红枫湖的 28 个表层沉积物为对象, 首次揭示有氧条件下 CO_2 产量较缺氧条件高 4.6 倍, 且呈现显著的空间异质性——富集 $\text{Fe}(\text{II})$ 的浅层沉积物表现出更高的 CO_2 释放通量。研究发现有氧环境中的 CO_2 来源不仅包括传统认知的微生物作用, 还包含 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化生成

的羟基自由基驱动的非生物氧化过程, 平均占比 26.76%, 其贡献的 CO_2 通量达 $95.61 \text{ g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。利用傅里叶回旋共振离子质谱分析, 进一步发现羟基自由基介导的羧基加成可引发芳香结构开环, 导致有机质解聚、脱甲氧基化和碎片化, 最终形成缩合芳香化合物和 CO_2 。此外, 羟基自由基还促进大分子氧化分解为生物可利用的小分子酸。本研究首次在喀斯特湖泊沉积物中发现羟基自由基介导的有机碳化学氧化是重要的非生物 CO_2 产生源, 这一过程机制需耦合到现有的沉积物碳循环的生物地球化学模型框架中, 以更全面评估喀斯特流域碳收支。

关键词: 喀斯特; 沉积物-水界面; 无氧-有氧波动; 羟基自由基; 二氧化碳

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806003)

第一作者简介: 郭雯 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: guowen@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 廖鹏 (1986-), 教授; 研究方向: 环境地球化学。Email: liaopeng@mail.gyig.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

全球变化下西南喀斯特高原湖库富营养化防控策略

王敬富^{1,2,3*}, 吴泓辰^{1,3}, 马一明^{1,2}, 金祖雪^{1,3}, 陈敬安^{1,2,3}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 红枫湖水库生态系统贵州省野外科学观测研究站, 贵阳 551499

富营养化是指水体氮磷等营养物输入过多, 引发藻类大面积爆发的现象。过去四十年全球藻华发生普遍增加, 富营养化和藻华频发是全球重大环境问题。然而, 除氮磷营养盐外, 气候变化在多大程度上对富营养化造成影响? 应该采取什么策略加以应对? 成为当前亟待回答的科学问题。本研究针对西南喀斯特区高原湖泊、水库富营养化问题开展研究, 取得如下认识: 1、全球变暖加剧冰川消融, 增加陆源输入, 提升初级生产, 对高原湖泊生态系统有重大影响; 2、2003~2020 年来, 中国湖泊 ($n=64$) 和水库 ($n=33$) 的藻华风险期 (ABRPs) 分别增加了 42 天 (11.5%) 和 54 天 (14.8%), 气温 (Tair)

对 ABRPs 延长贡献高于 TSI(N+P) 的时间超过 63%, 并随全球变暖而持续延长 ($0.82 \pm 0.04 \text{ d} \cdot \text{yr}^{-1}$); 3、气候变化将进一步降低西南湖库藻华发生阈值, “局部藻华” 可能成为未来的新常态, 藻-菌相互作用在西南喀斯特高原湖泊藻华形成与维持中可能扮演重要角色。综上, 气候变化背景下西南喀斯特高原湖库富营养化风险加剧, 应采取更为有力的保护与管理措施, 积极应对气候变化可能带来的生态环境风险。

关键词: 气候变化; 喀斯特高原湖库; 富营养化; 藻类水华

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806000); 贵州省重大科技专项 (黔科合重大专项字[2024]009, [2024]013); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台-YWZ[2023]006); 中国科学院青年创新促进会优秀会员 (Y2023105)

第一及通信作者简介: 王敬富 (1983-), 研究员; 研究方向: 水环境保护与污染防治。Email: wangjingfu@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

基于 InVEST 模型的贵州省水源涵养时空变化评估

牛凝^{1,2}, 范继辉^{1*}, 杨紫滢^{1,2}

1. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都市 610299;

2. 中国科学院大学, 北京市 100049

随着全球水资源短缺和水质恶化问题的加剧, 水源涵养成为水资源管理和生态系统可持续发展的重要议题。贵州省作为典型的喀斯特地貌区, 其独特的水文地质特征和严重的水土流失问题使得该区域的水源涵养研究尤为重要。然而, 当前研究多局限于短期变化分析, 针对贵州省长时间序列水源涵养时空演变规律及综合分区的研究尚显不足。因此, 本研究基于 InVEST 年产水模型对贵州省 1983 年至 2022 年的水源涵养量进行定量估算, 并结合 MK 趋势检验和 Sen's 斜率方法分析其时空变化特征。并探讨气候和土地利用变化对水源涵养的影响机制, 对贵州省进行水源涵养功能分区。结果表明, 贵州省多年平均产水

量和水源涵养量分别为 547.62 mm 和 364.70 mm, 空间上呈现东部上升、西部下降的变化趋势。降水是水源涵养变化的主要驱动因子, 不同土地利用类型中, 林地的水源涵养能力最高。空间分区结果显示, 高水源涵养能力-极重要区域主要分布在贵州省东南部, 而低水源涵养能力-极重要区域则集中于西北部。本研究为贵州省水资源合理利用和生态保护提供了科学依据, 对区域可持续发展具有重要的理论和实践意义。

关键词: 水源涵养; InVEST 模型; 时空变化; 气候和土地利用变化

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0806002); 国家自然科学基金 (U2240216); 四川省科技计划 (2024YFHZ0246)

第一作者简介: 牛凝 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 生态水文学。Email: niuning@imde.ac.cn

*通信作者简介: 范继辉 (1980-), 副研究员; 研究方向: 生态水文学和水文水资源。Email: jhfan@imde.ac.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

可解释机器学习揭示了气候变暖增加了 湖泊和水库的藻华风险

马一明^{1,2}, 王敬富^{1,2*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

近几十年来, 中国在减少外源氮(N)和磷(P)输入湖泊和水库(L&Rs)方面做出了巨大努力, 试图控制藻华(ABs)。气候变化似乎抵消了这一措施的效果。因此, 区分气候变化和营养物质的作用对于制定有效的藻华管理策略至关重要, 但仍然具有挑战性。在这里, 我们将藻华的开始和结束时间与神经网络模型相结合, 研究了 2003~2020 年中国藻华风险期(ABRPs)的变化趋势和控制因素。我们发现, 在过去的 20 年中, 湖泊和水库的 ABRPs 分别增加了 42 天(11.5%)和 54 天(14.8%)。气温(Tair)对 ABRPs 延长的贡献(11%)远大于 P(5.3%)和 N(3.5%)。Tair 的贡献超过

了 N 和 P 的贡献, 占一年的 63%, 并将随着全球变暖而继续扩大。此外, 与湖泊相比, 水库的 ABRPs 显示出更快的增长率。这可能是由于水库的 Tair 阈值较低(水库: 12.6℃, 湖泊: 16.7℃)以及温度的影响较大(水库: 17%, 湖泊: 5%)。总之, 我们的研究揭示了气候变暖对藻华开始和结束时间的潜在重要性, 并区分了 L&Rs 藻华驱动机制的差异, 从而为中国 L&Rs 藻华防控策略的制定提供了科学依据。

关键词: 湖泊和水库; 藻华; 气候变暖; 可解释机器学习

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0806000); 贵州省重大科技专项(黔科合重大专项字[2024]009, [2024]013); 贵州省科技计划项目(黔科合平台-YWZ[2023]006); 中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y2023105)

第一作者简介: 马一明(1994-), 博士研究生; 研究方向: 生态环境保护。Email: mayiming@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 王敬富(1983-), 研究员; 研究方向: 水环境保护与污染防治。Email: wangjingfu@vip.skleg.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

溶解无机碳对河流生态系统的潜在威胁

祁虹凯¹, 刘易^{1,2*}

1. 香港科技大学(广州)地球与海洋大气科学学域, 广州 510000;

2. 港澳海洋研究中心, 香港 999077

河流作为最重要的淡水生态系统之一, 是陆地、海洋与大气之间水、气体和能量交换的枢纽。河流生态系统的新陈代谢会随着太阳辐射、水流稳定性和温度等外部压力而发生变化。然而以溶解无机碳(DIC)等内部因素对河流生态系统新陈代谢的潜在影响却很少受到关注。在这项研究中, 我们使用机器学习来重现全球河流的 DIC 数据集, 然后将全球河流划分为高 DIC 河流和低 DIC 河流。通过全球河流观测数据计算得出的表观耗氧量(AOU)作为生态系统新陈代谢强度的指标。研究发现, 高溶解无机碳河流生态系统随季节气候变化表现出更强的波动, 这种现象在较寒冷的气候区更为明显。由于溶解无机碳促进了总初级生产力(GPP)维持生态系统平衡, 当 GPP 被温度等因素快速减弱时增加了高溶解无机碳河流出现缺氧的风险。同时, 随着自上世纪以来人类农业施肥及营养盐的输入, 全球河流生态系统新陈代谢开

始出现较大幅度的波动。通过全球河流 AOU 的历史波动发现, 面对人类活动干扰, 高溶解无机碳河流相较于低溶解无机碳河流具有更长的波动周期(影响更久)、更大的波动幅度(影响更大)及滞后效应。基于河流历史表观耗氧量的年度变化, 我们设计了一个简单的基于米氏方程改进的概念模型并较好地拟合出了全球年平均表观耗氧量的历史变化趋势。该模型进一步被用于预测在不同的未来气候情景下, 溶解无机碳在河流生态系统长期变化中所起的作用。研究表明与低溶解无机碳河流相比, 在不同施肥情况的所有气候情景下高溶解无机碳河流均面临着更高的耗氧风险, 从而揭示出溶解无机碳对河流生态系统新陈代谢带来了潜在的隐藏风险。

关键词: 河流生态系统; 新陈代谢; 溶解无机碳; 敏感性

基金项目: 香港研究资助局卓越学科领域计划(AoE/P-601/23-N); 港澳海洋中心资助

第一作者简介: 祁虹凯(1996-), 博士研究生; 研究方向: 流域水文地质及氮循环。Email: chrisgardnerqihk@hotmail.com

*通信作者简介: 刘易(1987-), 助理教授; 研究方向: 水文地质学。Email: yiliuyl@hkust-gz.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

近四十年西南喀斯特地区水文过程的生态恢复响应

曾思博¹, 蒋勇军^{1*}, 刘再华², 蒲俊兵³, 贺秋芳¹, 吴泽¹, 田兴¹

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400700;
2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;
3. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 400000

植被恢复可增加碳储量并产生生态系统正向效益,但其对脆弱喀斯特地区水资源可利用量的影响尚不明确。本研究以过去数十年实施大规模生态恢复工程的中国西南喀斯特地区为对象,系统分析了1982~2018年间气候参数、植被绿度、水文要素(蒸散发、径流、土壤湿度)、产水量及陆地水储量的长时空变化特征。采用广义线性混合模型(GLMM)定量解析了气候变化与植被绿化对该湿润区水资源变化的贡献率。结果表明:1982~2018年间西南喀斯特地区植被绿化趋势显著;气候变化呈现1993年前湿润化向1993~2013年干旱化的显著转折。研究发

现,近40年来该湿润区植被绿化与气候变化共同导致蒸散发显著增强(+2.08~2.67 mm/a)、陆地水储量持续减少(-2.19~2.96 mm/a),而产水量基本保持不变。植被绿化可解释26.43%~52.09%的陆地水储量下降,这种水分耗损主要源于干旱年份(1993~2013年)土壤水分和地下水的持续减少。研究强调,未来在湿润喀斯特区实施生态修复时,需充分考虑植被恢复对水资源可持续供给的影响。

关键词: 喀斯特水文;生态水文过程;生态恢复;西南喀斯特区;陆地水储量

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307070)

第一作者简介: 曾思博(1990-), 教授; 研究方向: 岩溶动力学与全球变化。Email: swsibozeng@swu.edu.cn

*通信作者简介: 蒋勇军(1968-), 教授; 研究方向: 水文学, 岩溶环境学。Email: jiangyj@swu.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

喀斯特典型小流域暴雨事件期间溶解性有机碳动力学过程与调控机制

王浩阳¹, 覃蔡清², 岳甫均¹, 李思亮^{1*}

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津市 300072;

2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安市 710049

气候变化下极端降雨事件的频发正在加剧陆地生态系统中碳库的转化与流失, 特别是在以浅层透水土壤和快速地表-地下水文连通性为特征的生态脆弱的喀斯特地区。为了科学评估气候变化对生态脆弱与环境敏感性较强的喀斯特流域物质循环的影响, 本研究以典型西南喀斯特小流域为对象, 开展了暴雨事件驱动下溶解性有机碳 (DOC) 输出的动态响应研究。基于高频原位光学传感器 (15 min 分辨率) 在不同水文条件下的连续监测数据表明, 暴雨阶段的 DOC 浓度变化可达基流段的 2~9 倍。进一步结合三维荧光光谱-平行因子分析 (EEM-PARAFAC) 技术解析了暴

雨事件期间溶解性有机质 (DOM) 的来源, 主要为陆源腐殖质与类蛋白类物质, 这与快速增强的水文过程促使土壤渗透有关的陆源地表径流输入有关, 为拓宽气候变化下喀斯特流域碳输出动态、迁移转化提供强有力证据。本研究通过多种技术手段与分析方法来量化和表征气候变化对喀斯特流域碳循环的扰动机制, 为制定行之有效的流域环境管理与气候适应型缓解策略提供了坚实的科学依据。

关键词: 喀斯特流域; 暴雨事件; 碳动力学; 溶解性有机质; 气候变化

基金项目: 科技部重点研发计划 (2023YFF0806001)

第一作者简介: 王浩阳 (1998-), 博士研究生; 研究方向: 有机碳的生物地球化学循环。Email: hywang_edu@163.com

*通信作者简介: 李思亮 (1978-), 教授; 研究方向: 地球关键带和生物地球化学。Email: siliang.li@tju.edu.cn

• 专题 15: 喀斯特生态环境脆弱性与适应性保护修复 •

喀斯特土壤侵蚀：全球变化背景下的关键驱动因素

崔珉铭^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

本研究整合贵州喀斯特区温度、降水、蒸散发和土壤湿度等数据, 分析土壤侵蚀变化趋势及对气候因素的敏感性。结果表明, 坡度和年降水量是影响土壤侵蚀的关键变量, 土地覆盖类型贡献较小。过去几十年, 该区域土壤侵蚀总量呈下降趋势。敏感性分析显

示, 降水普遍促进土壤侵蚀, 蒸散发在部分地区促进而在高海拔地区抑制土壤侵蚀。本研究为该地区土壤侵蚀防治和生态环境保护提供科学依据。

关键词: 喀斯特; 土壤侵蚀; 气候变化

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0806004)

作者简介: 崔珉铭 (1987-), 研究员; 研究方向: 微量元素地球化学与地球系统模型。Email: cuiminming@mail.gyig.ac.cn

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

柴西北缘大门口地区深层卤水水化学特征及成因研究

马晓晨^{1*}

1. 中国科学院青海盐湖研究所 盐湖地质与环境实验室, 西宁 810000

柴达木盆地深层砂砾孔隙卤水因其富水性强和钾资源品位较高而被认为是重要的接续钾资源, 对该类型卤水的成因与富集规律认识尚不足。本研究采集大门口地区 ZK05 孔 200~800 m 和 800~1100 m 地下深层卤水样品 11 件, 测试其水化学和同位素化学组成, 通过卤水水化学特征、元素相关性和特征系数, 探讨该地区深层卤水成因与富集规律。研究区卤水赋存于阿尔金山前巨厚砂砾层中, 矿化度 (TDS) 平均值为 281.4 g/L, pH 值在 6.8~7.0 之间, 富含 Cl^- 、 Na^+ , 而 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量较低, Li^+ 、 CO_3^{2-} 含量极低, 水化学为 Na-Cl 型。深层卤水元素特征系数 (钠氯系数、钾氯系数、溴氯系数、氯溴系数、脱硫系数) 综

合指示大门口地区深层砂砾型含钾卤水是蒸发残余卤水及盐岩溶滤卤水混合成因的多源性卤水, 深层卤水的封闭性和还原性好, 但浓缩程度较低, 远未达到钾盐沉积阶段。卤水氢氧同位素呈现正漂移, 进一步指示大门口地区深层砂砾型孔隙卤水是在陆相环境下由古代大气降水经过蒸发浓缩过程而形成, 陆源物质的输入对卤水的形成和演化起到了重要作用。研究区深层卤水形成过程中酸性及基性岩浆岩的风化对于研究区卤水的物质组成及演化存在一定的影响。

关键词: 柴达木盆地西北缘; 深层砂砾型孔隙卤水; 水化学; 岩石地球化学; 同位素

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

卤水赋存状态与可动性的核磁共振响应

付德亮^{1*}, 秦建强¹, 韩元红¹, 潘彤², 王自翔³, 郭廷峰²,
张绍栋², 贾建团², 张晓冬², 孙丽娜³

1. 陕西省煤田地质集团有限公司 (自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室), 西安 710021;

2. 青海省地质矿产勘查开发局 (青海省柴达木盆地盐湖资源勘探研究重点实验室), 西宁 810001;

3. 长江大学 (油气资源与环境湖北省重点实验室), 武汉 430000

为研究深层卤水赋存特征及其流动性, 本研究以柴达木盆地西部凹陷区碱石山背斜狮子沟组为研究对象, 通过核磁共振对岩心样品的干样、饱和卤水样、2 Mpa 离心和 4 Mpa 离心四种含水状态进行扫描, 分析了孔隙内的卤水赋存状态与孔径分布特征相关性。结果显示, 岩心样品的孔隙主要由大孔 (48.75%) 和流动孔 (30.76%) 组成, 同时也存在一定比例的吸附孔隙 (20.49%)。需要注意的是, 本次研究采用了 Hodot 储层孔隙度分类方案, 将孔隙分为吸附孔隙 (<100 nm)、渗流孔 (100~1000 nm) 和大孔隙 (>1000 nm)。经过在 2~4 MPa 下离心的水被简单地称为自由水, 代表盐水中的可移动部分。岩心饱和水样的 T2 分布较广, 大部分值落在 10~100 毫秒之间, 其次是 1~10 毫秒范围内的较小部分, 低于 1 毫秒的部分最小。这与其孔隙结构具有高度一致性。岩心离心前后 MNR 结果表明, 在 2~4 Mpa 离心条件下, T2 在 10 ms 以上部分赋存卤水几乎可完全被排出, 1~10 ms 部分赋存卤水可被部分排出。2 Mpa 离心与 4 Mpa 离心后的变化差别较小。样品在 2 Mpa 离心后, 核磁视孔隙度由 10.74% 降低至 5.34%, 继续 4 Mpa 离心

后, 核磁视孔隙度降低至 4.50%, 累积下降 6.24%, 视孔隙度下降比例占其总孔隙度的 58.10%。显然, 以大孔和渗流孔为主的样品中的卤水更易被排出。在饱和盐水样的 T1-T2 二维 NMR 谱中可以分出明显的 3 个区域, 分别对应着大孔中的自由水 (T1>50 ms, T2>10 ms), 渗流孔中的自由水 (30 ms<T1<100 ms, 1 ms<T2<10 ms) 和吸附孔中的束缚水 (T1<30 ms, T2<1 ms)。在 2 Mpa 离心后, 大孔和渗流孔中的自由水基本消失, 在进一步 4Mpa 离心后, 束缚水区域面积略有降低, 但信号强度没有明显降低。研究表明: 在对深部卤水层评价过程中, 孔隙结构是卤水储层的重要评价参数。以吸附孔为主的储层内卤水难以开采, 而以大孔和渗流孔为主的卤水层是优势储层。高渗透率储层虽然有利于卤水渗流, 但仍需要考虑储层的孔隙结构。纹层发育的泥页岩往往层理缝较为发育, 其横向渗透率较高, 但孔隙往往以吸附孔为主, 不利于卤水开采。

关键词: 柴达木盆地; 深藏卤水; 核磁共振; 束缚水; 自由水

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

玛湖凹陷二叠系风城组高矿化度地层水成因 及其演化过程研究

杨哲^{1*}

1. 长江大学, 武汉 430100

摘要: 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组岩石类型多样, 盐类矿物丰富, 风城组烃源岩的有机质含量较高, 且具有较好的生烃能力, 该区域具有较大的勘探潜力。前人学者通过各种技术手段基本上明确了碱湖形成的机理及其演化, 在高矿化度地层水的成因及其演化过程还有不足, 因此针对高矿化度地层水进行分布特征、矿化度、地层水化学参数、以及高盐矿物的综合分析。进一步分析高矿化度地层水的成因及其演化过程为该区域油气勘探做出参考。研究表明: 准噶尔盆地二叠系风城组地层水多为 NaHCO_3 型, 二叠系风一段平均矿化度超过 50 g/L, 并且其中玛湖 16 井风城组矿化度达到 236.83 g/L, 为全区最高, Cl^- 、 Na^+ 是主要的阴离子、阳离子; 该区风城组脱硫酸系数较低说明封闭性较好, 地层水浓缩变质作用较

深, 水岩反应较强, 储层次生孔隙发育, 是油气运聚成藏的有利区; 原始地层水为典型的海相成因地层水, 除蒸发浓缩作用外, 还有白云石化作用、溶蚀作用等水岩反应。高矿化度地层水的形成和演化受控于环境的影响和物源的影响, 在玛湖凹陷碱湖发育的过程中, 构造作用和火山作用活动强烈, 并且处于干旱-半干旱的环境, 地层水不断地浓缩, 同时火山作用带来了丰富的物源, 在期间不断生成盐类矿物典型的有: 硅硼钠石, 白云石, 碳酸钙石和方解石等, 这些矿物也受到大气降水的侵蚀不断的发生水岩反应使发生离子交换过程, 这样也使得地层水矿化度变高。

关键词: 地层水; 成因与演化; 玛湖凹陷; 碱湖; 风城组

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

藏东昌都盆地晚中生代地层物源属性特征与沉积环境演化：对区域成盐古流体迁移过程的指示

李长忠¹, 苗卫良^{1*}

1. 中国科学院青海盐湖研究所 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810008

藏东昌都地区与兰坪-思茅-呵叻成盐带空间位置毗邻, 且盆内同样发育有丰富的中生代膏盐类沉积及大量盐泉, 但二者间在物源演化关系和区域成盐古流体迁移过程等方面研究薄弱且存在争议。本文以昌都盆地为主要研究区, 通过对盆地内三个中生代长序列地层剖面沉积学、岩相学、矿物学研究, 结合沉积物硅酸盐相元素地球化学特征分析, 探讨了研究区的物源属性特征、沉积环境演化及区域内的古流体迁移过程, 并尝试揭示昌都地区与兰坪-思茅-呵叻成盐带之间的物源关系。研究结果表明, 昌都盆地中生代沉积地层兼具被动大陆边缘、活动大陆边缘及大陆岛弧等物源区大地构造背景信息, 显示了研究区长期以来的混合物质来源。昌都盆地晚中生代地层的源岩属性特征均以长英质酸性岩系

为主, 且与兰坪-思茅盆地对应地层的物源属性特征具有较高的相似度。昌都盆地的沉积环境从中侏罗世的海陆过渡相环境逐渐演变为晚侏罗世-晚白垩世的内陆河流-湖泊相环境。结合砂岩粒度特征及概率累计曲线分析, 发现中侏罗世以来盆地内的沉积环境由浅湖-半深湖相环境逐渐演变为滨浅湖相环境、河流-湖泊三角洲相环境。通过对昌都盆地与兰坪-思茅-呵叻成盐带之间物源演化关系的讨论, 认为晚中生代昌都盆地陆相古湖盆圈闭了大规模的变质海水, 为兰坪-思茅-呵叻成盐带巨型“异常”蒸发盐的形成提供了物质基础。

关键词: 昌都盆地; 物源属性; 沉积环境演化; 古流体迁移

*本文受第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0805)、2020 年度中科院西部之光青年学者项目和中国科学院青海盐湖所基础研究青年创新交叉团队项目(ISLJCTD-2022-2)联合资助

第一作者简介: 李长忠, 男, 1993 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lichangzhong18@mails.ucas.ac.cn

**通讯作者: 苗卫良, 男, 1980 年生, 博士, 副研究员, 主要从事沉积学及地球化学研究, E-mail: weiliangm@isl.ac.cn

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

新疆盐湖分布、形成演化及资源预测

刘成林^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074

新疆地区自晚古生代-中生代以来, 燕山运动、喜马拉雅运动强烈造山形成了昆仑山、天山等近东西向山脉, 发育了大量山间盆地与前陆盆地, 呈现“三山、三盆”地貌格局, 独特的地质、气候条件形成了星罗棋布的盐湖, 是我国最大的盐湖资源分布区。新疆盐湖可分为 6 个成矿区带: (1) 准噶尔盆地盐湖钾-溴成矿区, 岩层风化淋滤以及深部地层水、油田水补给成矿; (2) 东天山-吐哈盆地硝酸盐成矿区, 源于重金属的催化-光化学反应产生以及大气沉降作用; (3) 大罗布泊成矿区, 来自古盐层、周缘山系及深部卤水物质迁移-汇集成矿; (4) 莎

车盆地盐湖成矿区, 主要为副特提斯洋海侵成盐; (5) 库车盆地成矿区, 受海侵海水、深部流体以及陆源物质补给后蒸发浓缩成矿; (6) 阿尔金-昆仑山锂成矿区, 含钾锂火山岩的水-岩反应、温热带补给等成矿。新疆主要盐湖钾锂溴资源找矿靶区有: 大罗布泊西部、库车凹陷及塔西南地区, 西昆仑-阿尔金山间盆地, 准噶尔盆地中部-北部盐湖及深部地层卤水。

关键词: 新疆盐湖; 形成演化; 分布特征; 资源远景预测

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

基于 CiteSpace 的盐湖资源研究热点及前沿探析

崔博京^{1*}

1. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101

盐湖中蕴含丰富的矿产资源, 包括钾盐、锂、镁、硼等, 在农业、新能源、新材料等领域具有广泛的应用前景, 对保障国家资源安全、粮食安全和经济安全具有深远意义。近年来, 盐湖资源的探索与研究已成为学术界持续关注与深入探讨的热点议题。本文基于 CiteSpace 软件, 对近十年来 CNKI (中国知网) 和 CSSCI (中国社会科学引文索引) 期刊数据库收录的盐湖资源研究领域的 753 篇文献资料进行了系统分析与可视化处理, 从文献期刊来源、研究机构、关键词共现和凸现、关键词聚类等方面, 分析盐湖领域的

研究热点主题及研究前沿。研究结果显示, 当前盐湖资源研究的核心热点包括盐湖卤水提锂技术、盐湖资源的综合利用、盐湖生态环境保护以及盐湖生物资源的开发等; 盐湖资源研究的新兴方向包括盐湖中稀有元素的提取、盐湖微生物资源的开发利用等。希望本文的研究结果可以为盐湖领域的研究者提供信息参考, 推动盐湖资源科学研究的发展。

关键词: 盐湖资源; 盐湖综合利用; CiteSpace; 知识图谱

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项 (2024ZD1002004)、国家重点研发计划项目 (2023YFC2906500)、自然资源部“战略化工矿产成矿理论及找矿技术创新团队” (ZHTD202401)、中国煤炭地质总局科技创新项目 (ZMKJ-2023-JBGS03-02)

第一作者简介: 崔博京 (1996-), 助理工程师, 研究方向: 矿产资源战略研究. Email: 1043395301@qq.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

澳大利亚第四纪盐湖型钾盐勘探进展

赵相宽^{1*}, 徐佳佳¹

1. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083

钾是植物、动物和人类必需的营养物质, 没有任何替代品, 因此钾盐被多个国家列为战略性矿产。澳大利亚于 2013 年开始全国范围内的钾盐勘探, 是近十年除中国外钾盐勘探投入最大的国家, 且其钾盐赋存状态与中国相似, 以第四纪盐湖型钾盐为主, 因此针对澳大利亚的第四纪盐湖型钾盐勘探进行研究, 以期为我国钾盐勘探带来启示。2013 年, 澳大利亚地球科学局发布《澳大利亚战略资源盐湖潜力评估综述》, 评估了全国范围内的钾盐成矿潜力, 澳大利亚矿业和勘探公司协会也于 2019 年推出了符合 JORC 标准的《卤水资源量和储量评估指南》, 开启了澳大利亚钾盐勘探热潮。2013 年至今, 澳大利亚已探明 Lake Wells、Lake Mackay、Lake Disappointment、Beyondie 等多个第四纪盐湖型钾盐矿床, 查明可采资源量共计氧化钾当量 4730 万吨, 其中 Beyondie 项目已完成商业销售。在勘探技术方面, 除了传统的

地质填图、螺旋钻、探槽、钻探等方法外, 澳大利亚地球科学局使用高级星载热发射和反射辐射仪 (ASTER) 进行省尺度的钾盐潜力评估, 部分企业使用被动地震技术评估古河谷深度, 使用声波钻进技术采集相对较深的盐湖卤水样品, 都取得了较为理想的效果。研究表明, 澳大利亚近十余年的第四纪盐湖型钾盐勘探成功探明了多个钾盐矿床, 积极使用新兴勘探技术和设备, 建立了澳大利亚钾盐勘探的标准流程。我国第四纪盐湖型钾盐勘探启动较早, 近年在关键科学问题和关键勘探技术方面都取得重大突破, 在勘探方法层面, 可参考《卤水资源量和储量评估指南》引入时间和空间影响; 在勘探技术方面, 可尝试使用卫星遥感、被动地震、声波钻进等技术和设备。

关键词: 钾盐; 澳大利亚; 现代盐湖型; 矿产勘探

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

下扬子地区无为盆地中三叠世硬石膏成因及其 对深部富锂卤水演化的启示

吴通¹, 张传琳^{2*}, 何建华³, 黄亚浩⁴, 蒋苏扬⁵, 方朝刚¹, 章诚诚¹

1. 中国地质调查局南京地质调查中心 能源地质室, 南京 210016;

2. 河海大学 海洋学院, 南京 210001;

3. 成都理工大学 能源学院, 成都 610001;

4. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100;

5. 中国人民解放军陆军工程大学, 南京 210007

中三叠世, 沿着长江下游两岸形成了一系列的巨厚硬石膏沉积区, 其中包括下扬子地区的无为盆地。为了研究硬石膏成因及钻遇的富锂卤水来源, 对获取的岩心和卤水进行了水文和同位素地球化学、流体包裹体测试。白云岩的碳氧同位素分析表明, $\delta^{13}\text{CPDB}$ 值在 -2.9‰ ~ -0.4‰ 之间, $\delta^{18}\text{OPDB}$ 值在 -8.1‰ ~ -5.6‰ 之间, $\delta^{13}\text{CPDB}$ 与 $\delta^{18}\text{OPDB}$ 具备较好的正相关性, 表明在形成过程中受到了热流体强烈的成岩改造作用。 $\delta^{18}\text{O}$ 值与古温度的关系式计算出白云岩的形成温度为 $47\sim 56^\circ\text{C}$ 。白云岩原生盐水包裹体均一温度范围落在 $121.6\sim 139.4^\circ\text{C}$ 之间, 盐度为 4.40% NaCl, 硬石膏原生盐水包裹体均一温度为 $180\sim 185^\circ\text{C}$ 和 $210\sim 215^\circ\text{C}$ 之间, 盐度分布在 12.8% NaCl~ 15.5% NaCl, 异常高的流体温度和较大范围的盐度变化指示在原

生沉积时有大量热卤水的涌入至长期蒸发的古海水中。采用显微拉曼对硬石膏原生盐水包裹体的组分进行分析, 得出原始卤水水化学类型为 Cl-SO₄-Na-Ca 体系。卤水的水化学分析显示与硬石膏原生包裹体盐水类型一致, 微量元素 Li、Be、B 的富集表明卤水的物源与深部热液的供给有密切联系。上述研究揭示, 区域高盐度热水由大别造山带向长江下游两岸各汇水盆地的排泄汇聚, 并与盆地内本身的咸化古海水混合蒸发浓缩, 导致大量蒸发岩在盆地内沉积, 最终在周冲村组形成硬石膏矿床和伴生的富锂卤水。

关键词: 无为盆地; 中三叠世; 硬石膏; 富锂卤水; 成因演化

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“重点盆地页岩气调查评价”(DD20221662)、安徽省公益性地质工作项目(2022-g-2-3)和江苏省地质学会重点学术研究课题(JSDZXH-P2023-01)联合资助

第一作者简介: 吴通(1990-), 高级工程师, 博士在读, 研究方向: 蒸发岩及伴生卤水、油气资源富集规律. Email: wut@mail.cgs.gov.cn

*通信作者简介: 张传琳(1968-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 构造地质学、岩石地球化学. Email: zchuanlin1968@gmail.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

柴达木盆地北缘大小柴旦盐湖硼锂物源示踪

李雯霞^{1*}

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810000

硼锂是我国重要的战略性矿产资源,其成因研究一直是全球关注的热点。大、小柴旦湖作为柴达木盆地内唯一以富硼为典型特征的盐湖硼锂矿床,具有重要的经济价值和研究意义。但两湖之间成矿规模差异显著,而流域地表径流和深部流体虽然具有富集的硼锂含量,但是缺乏针对全流域尺度的系统性研究,目前对其溶质来源及可溶硼锂的物源属性仍不清楚,这显著制约了对大、小柴旦盐湖硼矿床源汇过程的深入理解。本研究系统分析了不同补给水体的元素和硼、锂、锶同位素组成特征,并对流域水文地貌格局改变的年龄进行了约束,结合以往的研究成果,得出以下主要结论:(1)地表径流的溶质来源主要是地层或地表蒸发岩的溶解(75.04%),其次是大气输入

(20.72%),硅酸盐仅贡献了0.62%的溶质,而碳酸盐在八里沟河和穿过泥火山的塔塔棱河处有少量贡献;(2)研究区可溶性硼锂的物源主要来自温泉和泥火山等深部流体,推测泥火山的贡献更大,鱼卡河和塔塔棱河对其也具有不可低估的贡献;(3)在23000~18000 a B.P.期间,区域水文格局发生改变,河流的改道使得湖区的水文收支急剧减少,导致了大柴旦湖区快速的盐沉积和硼矿富集,这也是造成两湖资源显著差异的主导因素。这些结果可为深入认识大、小柴旦盐湖硼矿床成矿机制具有重要的参考意义。

关键词: 可溶性硼锂; 物质来源; 水文格局演化; 大小柴旦盐湖; 柴达木盆地

第一作者: 李雯霞(1987), 博士研究生, 研究方向: 盐湖地球化学.Email: liwx@isl.ac.cn

通讯作者: 张西营(1977), 研究员, 研究方向: 盐湖地球化学.Email: xyzhchina@isl.ac.cn

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

盐湖卤水钾盐资源勘查评价指标体系构建与应用

孙小虹¹, 王畅^{1*}, 李博昀¹, 王淑丽¹, 王凡¹,
鲁楦银¹, 刘星旺¹, 崔博京¹

1. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101

科学合理的评价指标体系是资源评价准确可靠的关键。在盐湖资源研究领域, 以往学者的研究重点多聚焦于锂钾资源的赋存特征、成矿模式及分离提取技术等方面。然而, 资源评价工作研究不足, 定量评价较为缺乏。盐湖钾盐勘查评价受多种因素影响, 其中成矿要素是核心, 直接决定了钾盐的形成与勘查开发潜力。

本研究基于成矿要素剖析影响因素, 致力于构建层次化的评价指标体系。在文献调研与实际勘查数据的支撑下, 列出涵盖地质背景、储卤层特性、卤水特征等多维度指标。通过向多位专家分别征询意见, 结合专家打分与层次分析法进行统计处理, 筛选出权重相对较大的指标, 构建了盐湖卤水钾盐资源勘查评价指标体系。通过对柴达木盆地马海盐湖和察尔汗盐湖别勒滩矿段的实证研究, 验证了评价模型的可操作性以及评价方法的可行性。评价结果能够为盐湖钾盐资源潜力评价、勘查选区等工作提供有力的决策依据, 助力盐湖钾盐资源的高效开发与合理利用。

1. 评价指标体系的构建

从影响盐湖卤水钾盐矿床的地质背景、储卤层特性和卤水特征 3 个方面, 优选出“成矿条件”、“古水文条件”、“储卤层岩性”、“储卤层厚度”、“储卤层面积”、“孔隙度”、“给水度”、“渗透性”、“钾离子含量”、“伴生有益元素”10 项具有代表性的评价指标, 构建了盐湖卤水钾盐资源勘查评价指标体系, 能够直观地

反映盐湖钾盐矿床资源勘查开发的优势度。

2. 影响盐湖钾盐资源勘查评价的主要因素

影响盐湖卤水钾盐资源勘查评价的因素中, 储卤层特性的权重最高, 储卤层特性是盐湖钾盐资源勘查评价的核心因素, 直接反映了储卤层的物理特性(如岩性、厚度、孔隙度等), 不仅决定卤水的储存和运移能力, 还直接影响开采难度和效率。卤水特征的权重次之, 卤水钾离子含量、伴生有益元素是卤水资源经济价值的重要体现, 决定了资源的开发潜力和经济效益。地质背景的权重相对较低, 但它是盐湖钾盐资源形成和分布的基础条件, 反映了成矿条件、古水文条件等自然特性, 是资源勘查开发的先决条件。

3. 典型盐湖钾盐矿床勘查评价结果

典型盐湖钾盐矿床勘查评价结果排序为: 察尔汗盐湖别勒滩矿段, 得分 81.84; 马海盐湖, 得分 71.29。察尔汗盐湖别勒滩矿段在储卤层特性和卤水特征方面表现优异, 具备较高的勘查开发潜力; 马海盐湖虽以钾资源开发为主, 勘查开发潜力相对有限。评价结果反映实际情况, 但勘查评价是一个动态变化过程, 随着勘查技术水平的不断提高, 评价结果也会发生变化, 需持续跟踪评价。

关键词: 盐湖; 钾盐; 评价指标体系; 资源评价

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

思茅盆地盐泉及地表水地球化学及钾同位素特征

李晨^{1*}, 尹宏伟¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210000

本次研究的样品共计 38 件, 主要来自于云南思茅盆地景谷地区, 包括芒卡盐泉、恩耕井和换乐温泉, 以及研究区周边几条河流水, 包括澜沧江、威远江、恩耕河和景谷河。水样测试包括 K、Na、Ca、Mg、Cl、SO₄、HCO₃、CO₃ 以及 K 同位素, 测试工作均在南京大学完成, 采用了火焰光度计、OES、MC-ICP-MS 仪器测试。思茅盆地景谷地区采集三口盐泉样品, 通过简单的阴阳离子测试分析, 发现其具有极大的相似性, 主要受 Na、Ca、Cl、离子控制, F、HCO₃ 离子占据了一定比重, 进一步对其离子比图解分析, 盐泉样品主要以碳酸盐矿物溶滤为主。同时对景谷地区主要的河流进行采样分析, 发现其离子变化

趋势与盐泉水样较为接近, 但是存在一定的不一致性, 说明其受到不同来源的混入, 从离子比图解发现河水样品受碳酸盐岩和硅酸盐岩共同控制。景谷地区地表水 K 同位素组成和 K 元素浓度受多种因素控制, 包括盐泉输入、蒸发岩溶解以及流域内部的硅酸盐岩风化过程。空间上, K 同位素值呈现自西向东和自北向南的规律性变化, 反映了区域水文地球化学过程的复杂性。这些发现为理解景谷地区地表水化学组成及其控制机制提供了重要依据, 也为找钾矿提供新的手段和思路。

关键词: 盐泉; 地球化学特征; K 同位素

基金资助: 滇西南中生代海相钾盐成钾条件与成矿预测 (编号: 2023YFC2906504)。

第一作者简介: 李晨, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事钾盐矿产地质调查、同位素地球化学研究。Email: chenli_nju@smail.nju.edu.cn

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

青藏高原西昆仑构造带富锂盐湖物源属性与成矿过程研究

苗卫良^{1*}, 张西营¹, 李玉龙¹, 李长忠¹, 赵辉斌¹, 高品¹, 李雯霞¹

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008

在全球能源结构加速转型的背景下,盐湖卤水型锂矿因其占全球锂资源量 57%~63%的战略地位,正成为国际资源竞争的核心目标。中国青藏高原拥有全球第二大盐湖锂资源潜力,近年来已报道了数个百万吨级碳酸锂资源量的超大型盐湖锂矿。青藏高原西昆仑造山带位于古亚洲构造域和特提斯构造域的结合部位,是多期次造山运动复合叠加形成的大陆复合造山带。强烈的碰撞造山活动驱动了区内活跃的火山与岩浆作用,并形成了多个超大型硬岩型锂矿床和卤水型锂矿床,显示出巨大的锂资源成矿潜力。但目前对该区富锂卤水的成因机制及多圈层协同作用下的可溶锂迁移富集过程方面仍缺乏系统认识。本研究通过对该造山带内三个主要的卤水锂成矿区开展研究,基于水化学组成与同位素组成($\delta^7\text{Li}$, $\delta^{11}\text{B}$)系统探究了各富锂水体区的物源特征及其补给模式的异同。结果表明,古甜水海湖区(苦水湖、黄草湖、红山湖、

阿克赛钦湖)中的可溶性锂与区域构造运动引起的多期次富锂地热泉的补给密切相关,长期干旱气候条件驱动了弱补给区湖泊中锂的强烈富集。阿什库勒盆地(乌鲁克库勒湖)富锂湖泊主要受到了深部断裂带富锂流体上涌及地表火山碎屑岩的风化与短程补给的共同作用,并以低矿化度高富锂系数为典型特征。而肖尔库勒湖则受沿断裂带分布的泥火山上涌水体的补给而显示出富锂硼的特征,表现为浅部水-岩作用主控的特征。总之,西昆仑造山带内湖泊富锂特征的差异主要取决于各湖区可溶锂的物源及其补给模式制约。陆块碰撞的远程效应促进了青藏高原内部及周边地区断裂带的复活,这可能为区域水-岩作用程度的强化及深部富锂流体的溢出创造了良好条件。

关键词: 富锂卤水; 物源属性; 成矿过程; 西昆仑造山带; 青藏高原

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

江汉盆地卤水型钾锂矿成矿理论与找矿进展

王春连^{1*}

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所新能源新材料矿产研究室, 北京 100037

地热储层中的流体会受到与寄主岩石相互作用的影响。确定溶质来源和水岩相互作用过程, 本研究收集了从上白垩统到下白垩统的水样江陵盆地始新世地层。它们的化学和同位素(氢、氧、铷、硼)研究了元素特征及相应储层的矿物学特征。通过离子相比, 水样表现为 Mg 和 SO₄ 的耗竭和 K、Na、Ca 和 Cl 的富集蒸发海水的轨迹。观察到 Cl/Br 质量比(709~1390)、Na/Cl 摩尔比(0.79~1.01)、Ca 过量和 Na 缺乏暗示了岩盐溶蚀作用和钠长岩化、白云化、方解石和酸酐胶结等多重成岩作用的贡献, 与储层岩相一致矿物学。这些地热流体的化学地温计估计温度约为 200±热盐水。与化学成分比较在上白垩统咸水中, 热盐水富集 K、Li、B、Sr、Rb、Cs、Br、Ba 和过渡金属如 Co、Ni、Cu、Zn、V、Ti 和 Mn。 $\delta^{18}\text{O-Li}$ 、 $\delta^{18}\text{O-Rb}$ 、 $\delta^{18}\text{O-Cs}$ 和 $\delta^{18}\text{O-K}$ 值的相关性表明与岩石的平衡导致了 K、Li、Rb 和 Cs 的富集。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化(0.706954~0.711249)和 $\delta^{11}\text{B}$ 值(+8.7‰~+23.1‰)由于玄武岩与碎屑岩的水岩相互作用而存在差异。化学和同位

素数据的综合表明江汉盆地地热水主要来源于水岩相互作用和大气补给水域。此外, 硼同位素数据与传统的氢、氧、铷同位素数据一致同位素在解释水岩相互作用过程方面的作用。上部的多同位素表征白垩纪至下始新世地热水的同位素组成表明江陵盆地具有玄武岩、碎屑岩与水相互作用的流体特征源自经大气水稀释的原生盐水。水化学与多同位素组合研究表明, 高温水岩相互作用是成矿作用的主要影响因素江陵地热系统中的热盐水。本次潜江凹陷北部地区钾盐的发现和鄂钾 1 井找矿突破, 作为新区(浩口地区)、新层系(潜江组三段和四段卤水钾盐)、新类型(碎屑岩型储卤体)钾盐找矿的典型代表, 开辟了江汉盆地新的找钾空间。中新生代我国东部地区形成了江汉盆地、渤海湾盆地等一系列裂谷型盆地, 本次钻获高产卤水, 对推动我国东部陆相盆地钾锂找矿突破具有重要意义。

关键词: 江汉盆地; 富钾锂卤水; 同位素地球化学; 成因研究

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

前陆复杂地质条件下蒸发岩的原始沉积序列是什么？ ——以库车坳陷古近系为例

秦鹏^{1*}

1. 中国石油大学（北京） 克拉玛依校区石油学院，新疆 克拉玛依 834000

摘要: 蒸发岩沉积序列，揭示蒸发岩的演化规律。研究蒸发岩演化规律对指导岩矿资源和油气资源勘探具有重要意义。然而，库车坳陷古近系库姆格列木群蒸发岩受构造挤压和古地理条件制约，沉积序列在空间上具有很强的非均质性，致使地层对比困难，导致对蒸发岩的演化规律认识不清，造成导致对油气钻井工程指导性差。基于此，本次研究采用地质、地球化学和地球物理相结合的方法，首先查明了蒸发岩的岩石类型，综合古地貌、岩性序列、地震相、盐构造解释结果，然后建立了判别蒸发岩沉积序列是否受到由构造挤压导致的塑性流动变形的依据，最终恢复了古近系库姆格列木群蒸发岩的原始沉积序列。研究结果显示：（1）库姆格列木群蒸发岩发育 A 型，B 型和 C 型三种沉积序列：A 型具有砂泥岩-盐岩-膏岩-白云岩-膏岩-泥岩的岩性序列，指示环境突然从淡水环境演化至高盐度的钠盐环境，然后逐渐淡化至较高盐度的硫酸盐环境，再到中等盐度的碳酸盐环境；B 型具有砂泥岩-膏岩-白云岩-膏岩-泥岩的岩性序列，

指示环境从淡水环境突然演变至较高盐度的硫酸盐环境，然后逐渐淡化至中等盐度的碳酸盐环境；C 型具有砂泥岩-多套膏盐夹白云岩-泥岩的岩性序列，指示环境从淡水突然演变为较高盐度的膏岩或高盐度的钠盐到中等盐度的白云岩多次反复的淡化振荡。（2）A 型序列主要分布在克深地区，B 型序列主要分布在克拉-吐北和东秋以及却勒-羊塔克地区，而 C 型序列主要分布在大北地区。（3）A 型和 B 型沉积序列受到构造挤压变形弱，基本保持原始的沉积状态，而 C 型序列受到了构造挤压变形的影响。（4）库车地区蒸发岩具有砂泥岩-盐岩-膏岩-碳酸盐岩-膏岩-泥岩的沉积序列，指示蒸发岩演化遵循由淡水环境突然演变至高盐度的钠盐环境，然后逐渐淡化至较高盐度的硫酸盐环境，再到中等盐度的碳酸盐环境演化规律。

关键词: 蒸发岩沉积序列；古近系；库姆格列木群；库车坳陷

基金项目：湖北省自然科学基金青年基金（2024AFB293）

第一作者兼通讯作者：秦鹏（1991—今），讲师，研究方向，沉积地质（包括：蒸发岩沉积，碳酸盐岩沉积），E-mail: kumugeliemu@163.com;

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

柴达木盆地典型盐湖沉积物中锂的微观赋存特征研究

王顺¹, 崔若男^{1,2}, 于子萌^{1,2}, 王晨宇^{1,2}, 李鸿宇^{1,2}, 薛红盼¹, 魏海成^{1,2*}

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

锂(Li)资源是我国重要的战略性金属资源,是新能源、航空航天、核工业等高新技术产业发展的关键物质基础,被誉为“能源金属”、“白色石油”等。在全球能源转型和碳中和目标背景下,我国的锂需求量激增,加之全球锂资源分布极不均匀,我国锂资源对外依存度长期维持在 70%以上。我国锂资源类型复杂多样,主要分为卤水型、硬岩型和沉积型;揭示我国锂资源的形成机制和分布规律,进而推动锂资源的高效开发利用,已成为破解我国锂资源供应困境的关键所在。柴达木盆地锂资源极为丰富,尤其是中部四湖区(一里坪、西台吉乃尔湖、东台吉乃尔湖和察尔汗别勒滩区)是我国最大的卤水型锂矿区,战略资源地位不言而喻。前人在开展四湖区锂元素的“源-运-汇”过程研究时发现,在锂元素的迁移过程中,约 80%的总补给锂可能被固持于四湖区及其周缘的碎屑沉积物中。然而,现有研究主要关注宏观尺度的矿物组成与元素分布的相关性分析,沉积物中锂元素的赋存特征尚缺乏微纳尺度的精细研究与定量评价。因

此,我们以四湖区及其补给河流域的表层沉积物为研究对象,在开展主-微量元素分布、矿物组成和颗粒粒径分布等研究的基础上,利用扫描电镜-能谱(SEM-EDS)结合激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)研究了富锂沉积物中 Li 元素的微区空间分布及赋存状态。发现:1)在富含黏土矿物的微区中 Li 元素显著富集(可高达 1361 ppm),而在石英、长石、方解石等碎屑矿物中 Li 含量较低($<40\times 10^{-6}$);2)不同沉积区域中黏土矿物的类型及相对含量不同,导致不同的富黏土微区中 Li 元素的分布亦存在差异。所获成果从微纳尺度加深了对柴达木盆地典型盐湖区沉积物中锂资源分布赋存特征的认识,为进一步探究盐湖沉积环境下锂的迁移、富集和转化等地球化学行为及关键影响因素提供了新的研究思路。

关键词: 柴达木盆地; 富锂沉积物; 黏土矿物; 微观赋存机制

基金项目: 青海省十大国家级科技创新平台建设项目(2024-ZJ-J03); 青海省杰出青年基金项目(2023-ZJ-941J)。

第一作者简介: 王顺(1992-),助理研究员,研究方向:盐湖战略性金属资源评价、矿物表-界面作用及其资源与环境效应。E-mail: wangshun@isl.ac.cn

*通讯作者简介: 魏海成(1983-),研究员,研究方向:盐湖战略性金属资源评价、第四纪沉积环境与气候变化。E-mail: hcwei@isl.ac.cn

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

柴达木盆地表生风化过程的钾和锂同位素示踪

池禹麒¹, 林勇杰^{2*}, 郑绵平²

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100086;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要: 柴达木盆地是青藏高原北缘的典型干旱-半干旱内陆盆地, 其极端气候与活跃构造隆升的耦合作用, 是研究表生风化过程的天然实验室。本研究以柴达木盆地的主要流域为研究对象, 系统分析河流河水钾(K)和锂(Li)等同位素组成。研究结果显示柴达木盆地内不同流域河流溶解 K、Li 及其同位素变化较大, 河流溶解离子主要来源于硅酸盐风化, 而碳酸盐和蒸发岩风化贡献较小。河流水的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{41}\text{K}$ 分别与 X/Na 和 X/Mg (X 为 Li 和 K) 具有良好的相关性, 表明风化过程中次生矿物形成过程吸附 K 和 Li 是控制河流 K、Li 同位素分馏的主要机制。K 和 Li 同位素瑞利分馏模型能较好的拟合盆地流域河流的同位素变化, 其风化产物与河流水之

间的分馏系数 $\alpha_{\text{sec-diss}}^{\text{K}}=0.999792\pm0.0001$ 、 $\alpha_{\text{sec-diss}}^{\text{Li}}=0.9923\pm0.007331$ 。此外, 盆地剥蚀速率与 $\delta^7\text{Li}$ 、 $\delta^{41}\text{K}$ 呈负相关, 而河流 Li、K 通量则与剥蚀速率呈正相关。其中, 盆地西北部河流(铁木里克河、鱼卡河等)剥蚀速率较慢, 表现为“供给限制”风化模式; 而东南部流域(那棱格勒河、诺木洪河等)剥蚀速率较快, 表现为“动力学限制”风化模式。本研究不仅揭示了青藏高原北缘构造-气候-物源耦合的表生风化过程, 而且为深入理解陆相盐湖锂、钾的成矿过程提供重要依据。

关键词: Li、K 同位素; 剥蚀作用; 风化作用; 柴达木盆地

第一作者: 池禹麒, 男, 2002 年生, 硕士研究生(在读)。研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 2325099764@qq.com

通讯作者: 林勇杰, 男, 1990 年生, 博士, 副研究员。主要从事盐湖学与盐类矿产资源研究。E-mail: linyongjie2014@163.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

新疆莎车盆地乌帕地区含钾盐泉水演化规律

俄煜麒¹, 徐洋^{1*}, 刘成林², 聂诗程¹, 杨思博¹, 刘蕾¹

1. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 南昌 330013;

2. 中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

钾盐资源主要被用于生产钾肥, 在农业生产中具有极其重要的作用。我国作为农业大国, 然而钾盐资源却十分匮乏, 储量仅占全球 2% 左右, 对外进口占比超过 50%, 是我国七大紧缺矿产资源之一。我国对于钾盐资源高度依赖进口, 这无疑会严重阻碍国内农业发展, 威胁国家粮食安全。因此, 钾盐调查工作一直以来都是我国矿产勘查的重点之一。莎车盆地作为塔里木盆地的一个次级盆地, 白垩纪处于原副特提斯海东部, 海水通过阿莱依海峡多次侵入至塔里木海湾, 并沉积了厚层海相蒸发岩地层, 且该地层指示了良好的成钾潜力。沿着构造裂隙涌出地表的盐泉水是指示地下蒸发岩成钾信息的良好载体, 其中乌帕地区盐泉水最具代表性, 前人通过对该地区盐霜及盐泉水研究, 初步圈定为有利找钾区域, 但前人仅对部分样品进行了化学分析, 还未

对典型盐泉水进行系统性分析, 导致目前盐泉水的物质来源及循环演化过程尚未进行深入研究, 从而直接影响了我们对莎车盆地盐泉水如何形成和演化的全面而深入的认识。因此, 本研究通过综合分析乌帕地区 11 件盐泉水样品和 12 件盐霜样品的水化学特征及氢、氧、锶同位素, 探讨其补给来源及演化规律, 即盐泉水应起源于大气降水, 淋滤地下 194~566 m 的盐层后沿着构造裂隙涌出地表, 地表流经期间经历了强烈的蒸发浓缩作用, 并判断乌帕下游地区具有较好的找钾前景。这为今后该地区钾盐沉积的研究提供了参考, 也对国内外盐盆中盐泉水的演化具有重要的借鉴意义。

关键词: 盐泉水; 同位素分析; 物源; 演化规律; 莎车盆地

资助项目: 新疆自治区重大科技专项项目(编号: 2022A03009)、科技部第三次新疆综合科学考察项目第三课题(编号: 2022xjkk1303)、江西省自然科学基金青年项目(20242BAB20130)

第一作者简介: 俄煜麒(2000-), 男, 硕士研究生, 地质学专业。E-mail: 812028853@qq.com

*通信作者简介: 徐洋(1991-), 男, 副教授, 从事蒸发岩沉积和盐湖型钾锂矿床研究工作。E-mail: geologyxu@163.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

盐卤有价元素富集中的相化学

于旭东^{1*}, 马方通¹, 吴昌昊¹, 冯珊¹, 诸葛福瑜¹

1. 成都理工大学, 成都 610059

我国盐湖资源作为战略性无机盐宝库, 蕴藏着全国 98% 的钾资源和超 80% 的锂资源, 主要分布于青海、西藏、新疆等地区。数据显示, “十三五”期间青海盐湖产业实现年均钾肥产量 812.89 万吨、碳酸锂产量 2.996 万吨。根据《青海建设世界级盐湖产业基地行动方案(2021~2023 年)》规划目标, 钾、锂年产能分别达到 1000 万吨和 18 万吨时, 青海盐湖资源的静态保障年限仅约 30 年, 资源保障能力处于中等偏下水平。当前资源开发面临双重挑战: 在提效方面, 盐田富集过程中多离子共存环境对锂分离的制约机制尚未明确, 限制了锂提取阶段的优化选择; 在增储方面, 深藏卤水的特异组分对钾锂富

集的影响机制, 以及深埋固体钾矿中钾元素的有效溶出技术, 均成为亟待突破的瓶颈。这些技术难题均与盐类物质的动态溶解-析出过程密切相关, 相化学研究为解决上述问题提供了关键理论依据。本报告基于成都理工大学相平衡与盐卤化工团队四十年的研究成果, 结合不同类型资源特征, 将盐卤资源中有价元素的富集规律与相化学研究成果相结合, 建立了关键边界参数体系, 为盐湖资源的高效开发提供了重要数据支撑。

关键词: 相平衡; 盐湖; 深藏卤水; 杂卤石; 富集

基金项目: 四川省科技计划项目(2025YFHZ0276)。

第一作者简介: 于旭东(1985-), 教授, 研究方向: 相平衡与相分离技术. Email: xwdlyxd@126.com

*通信作者简介: 于旭东(1985-), 教授, 研究方向: 相平衡与相分离技术. Email: xwdlyxd@126.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

青藏高原各类水体硼同位素分布规律与地质意义

谭红兵^{1*}

1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 210000

青藏高原各类水体普遍富 B(也包括 Li 等元素), 且在盐湖或许多地热泉中异常富集, 并形成许多极为有特色的卤水型矿床。浓度空间变化表现出西高东低和南高北低的总体趋势, B 同位素则呈相反的分布规律, 浓度越高往往其同位素越偏负。这种同位素异常分布规律指示了物源机制与演化过程控制青藏高原各类水体 B 的富集与同位素分馏过程。结合青藏高原构造与深部地球物理探测成果, 推断板块碰撞和俯冲导致中下地壳部分熔融, 分异晚期的残余岩浆流体向上运移不断促使 B、Li 元素富集, 与深循环的地下水混合进一步演化为地热流体, 并沿构造(缝合带、裂谷、深大断裂、火山构造等)提供的有利通道持续上涌到达上地壳或以热泉形式向地表排泄, 与区域浅

层地下水或河水混合, 导致局部或区域性淡水系统中的 B、Li 浓度也显著上升, 形成整个高原水体普遍富 B、Li 的背景特征。青藏高原演化地史长、发育规模巨大的热泉作为载体, 将内生源深部流体(主控)、外生源岩石风化淋滤(附加)带来的 B、Li 源源不断输入终端湖盆, 经历了强烈蒸发浓缩, 最终演化形成了一系列世界级盐湖卤水型 B、Li 矿床, 并控制形成了富 B 水体且显著偏负的 B 同位素地球化学异常分布规律。因此, B、Li 元素从源到汇循环演化可概括为“内生外聚”模式。

关键词: 青藏高原; 水体; 硼同位素; 分布规律

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

藏北温泉-河流-盐湖耦合成矿系统锂的地球化学
行为与迁移过程薛飞¹, 谭红兵^{1*}

1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100

青藏高原是我国最重要的锂(Li)资源基地, 广泛分布着特色盐湖卤水锂矿和富锂地热泉, 两者存在密切的物源联系, 共同构成了温泉-河流-盐湖外生锂耦合成矿系统。然而, 对于锂在该系统内部运移过程中的地球化学行为仍缺乏详细刻画。本研究系统采集了夏康坚温泉、索美藏布河和拉果错的水样, 分析了样品的水化学组成、微量元素组成及 Li 同位素组成。结果表明, 索美藏布上游河水中的溶解态锂主要源自硅酸盐的风化, 表现出低锂(7.84 $\mu\text{g/L}$)和高 $\delta^7\text{Li}$ 值(+8.21‰)的特征。在经过富锂(8071.73 $\mu\text{g/L}$)且低 $\delta^7\text{Li}$ 值(+0.19‰)的夏康坚温泉排泄补给后, 索美藏布河水发生了锂的显著富集和锂同位素的负漂移, 锂元素富集了 200 多倍, 达到 1777.02 $\mu\text{g/L}$, $\delta^7\text{Li}$ 值降低了 8.07‰, 降至+0.14‰。经过温泉区后, 河水中的锂浓度在流动过程中大体保持稳定

(1105.49~1452.33 $\mu\text{g/L}$), $\delta^7\text{Li}$ 值仅提高 0.6‰(+0.12‰~+0.72‰), 这表明硅酸盐风化和次生矿物吸附对富锂河水地球化学成分影响有限, 充足的锂能够通过河流稳定地补给到盐湖中, 表现出与低锂背景河流不同的演化特征。夏康坚温泉-索美藏布-拉果错盐湖共同组成了一个从地史时期持续到现在的耦合成矿系统。富锂温泉作为主要的内生物源, 河流作为矿质表生输送路径, 尾间湖泊作为容矿场所, 高寒干旱气候条件导致的蒸发浓缩作为成矿驱动力, 持续形成盐湖卤水锂矿。锂元素完成了从源到汇、从深部到浅部的运移富集, 实现了从内生成矿到外生成矿的形式转换, 成为锂循环的重要一环。

关键词: 锂同位素; 水化学; 成矿系统; 温泉-河流-盐湖; 青藏高原

基金项目: 国家自然科学基金(42402071, U22A20573), 第二次青藏高原综合科学考察研究(2022QZKK0202)

第一作者简介: 薛飞(1992-), 讲师, 研究方向: 地热、盐湖战略性矿产资源研究. E-mail: fei.xue@hhu.edu.cn

*通讯作者简介: 谭红兵(1972-), 教授, 研究方向: 高温地热地质成因与稀有关键金属资源勘查评价. E-mail: tan815@sina.com

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

Overlooked contribution of salt lake emissions: a case study of dust deposition from the Qinghai-Xizang

朱海霞 Zhu Haixia¹, 李雯霞¹, 张西营^{1*}, 孔祥瑞²

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810800;

2. 哥德堡大学, 瑞典 哥德堡 296220

The Qaidam Basin in the northeastern Qinghai-Xizang Plateau, characterized by its numerous salt lakes and fragile ecosystem, is increasingly impacted by salt dust emissions. To evaluate the impact of salt dust on environment, monthly dust samples were collected from six monitoring stations between January 2020 and March 2023 and analyzed for dust and salt dust deposition flux (DF), mineral composition, water-soluble ions, trace elements, and carbonaceous content. The study used backward trajectory modeling, Pearson correlation, enrichment factor (EF) analysis, and positive matrix factorization (PMF) to quantify salt lake contributions to atmospheric dust. Results revealed that halite and gypsum content ranged from 0 to 47%, with salt dust deposition flux (SDF) varying between 0 and 2.54 g/m²·30d. Key soluble ions included non-playa salt sulfate (nps-SO₄²⁻), playa salt chloride (ps-Cl⁻), and sodium (ps-Na⁺). Trace elements like iron, aluminum,

silicon, and titanium originated from both natural and anthropogenic sources. Organic carbon to element carbon (OC/EC) ratio and PMF model pointed to vehicle emissions, coal combustion, and biomass burning as major pollution sources, particularly in urban areas. PMF analysis showed that salt lakes contributed 5.23% to 29.76% of total dust mass, aligning with changes in soluble ion and halite, gypsum content. As the region is a key source of river systems, the soluble salts in dust pose risks to glaciers and freshwater resources. These findings highlight the substantial impact of inland salt aerosols in arid inland regions, emphasizing that their contribution to atmospheric processes is significant and should not be overlooked.

关键词: Qaidam Basin; salt dust aerosols; PMF analysis; playa salt; non-playa salt.

• 专题 16: 盐湖资源与环境研究进展 •

可可西里盐湖锂铷铯资源分布规律及其富集机制

孔凡翠^{1*}

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008

可可西里盐湖中富集的铷和铯稀有金属在保障我国资源安全中具有极其重要的战略地位。为了了解可可西里湖泊水体中铷和铯资源元素的分布规律及其富集机制, 测试了湖水、地下水、河水以及降水的水化学、稳定同位素 (δD 和 $\delta^{18}O$) 以及元素含量, 研究表明: (1) 可可西里北部湖泊水的 TDS 值变化范围较大, 介于 0.42~31.99 g/L 之间。铷和铯的含量范围分别为 2.32~2467.7 $\mu g/L$ (均值: 210.85 $\mu g/L$) 和 0.65~945.53 $\mu g/L$ (均值: 98.23 $\mu g/L$)。在空间分布上, 铷和铯的含量与 TDS 呈现出中部最低、西部高于东部的趋势。其中, 勒斜武担湖的铷和铯含量及其 TDS 值最高。然而, 湖水存在明显的淡化现象, 这将对未来盐湖铷和铯资源的开发利用带来挑战。

(2) 氢氧同位素组成显示可可西里北部湖水受大气降水、岩浆水以及河流和地下水共同补给, 泉在上升过程中受到降水的混合作用与河水汇集补给到湖区。除了饮马湖、盐湖以及库赛湖东部, 其他湖泊中铷的含量均高于铯含量, 即 $Rb/Cs > 1$, 物源和迁移过程共同控制了可可西里北部湖泊水体中铷和铯含量的差异。湖水中铷和铯的富集主要受铷和铯高含量的热泉补给、水体蒸发浓缩作用和水岩作用影响。本研究一方面丰富了对可可西里盐湖铷和铯稀有金属富集机制的理论认识, 另一方面为提升盐湖铷和铯资源持续保障能力提供了科学依据和基础支撑。

关键词: 可可西里; 盐湖; 热泉; 锂铷铯资源

第一作者简介: 朱镇源 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 遥感与水文地质研究。Email: zhuzhenyuan22@mails.ucas.ac.cn。

*通信作者:

孔凡翠 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事同位素与水文地质研究工作。Email: kfc@isl.ac.cn。

王建萍 (1972-), 女, 博士, 研究员, 主要从事盐湖资源与环境研究工作。Email: jianpingwang@isl.ac.cn。

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

土壤地球化学测量多元素找矿指标研究 ——以二道坎银矿为例

符安宗^{1,2*}, 杨文鹏^{1,2}

1. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

多宝山地区二道坎银矿共发育两条北西西向的银多金属矿体, I 号矿体于 318~328 线之间出露地表, 于 332~356 线之间向地下侧伏; II 号矿体于 279~284 线之间出露地表, 于 278~232 线之间向地下侧伏。1:2 万土壤地球化学测量仅在地表矿体上方出现高值 Ag 异常 ($>1.00 \times 10^{-6}$), 而向地下侧伏部位则仅出现弱的 Ag 异常 ($0.12 \times 10^{-6} \sim 0.32 \times 10^{-6}$)。这些侧伏矿体引起的弱异常在以往的工作中大都被忽略掉了, 因此亟需创新矿产勘查新方法去识别这些弱异常。本次研究采集了二道坎银矿区地表矿体上方土壤 (EDK1)、侧伏矿体上方土壤 (EDK2)、围岩上方土壤 (EDK3) 及矿区外围背景岩石上方土壤 (EDK4) 等样品, 分析 Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Bi、Mn、F、Cd、B、Li、Be、U、Ba、Ni、Co、Cr、La、Nb、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Zr、SiO₂、TF₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O、MgO、CaO 等 39 种元素和氧化物。结果显示: 与 EDK3 和 EDK4 相比, EDK1 具有高含量的 Ag、Pb、Zn、TF₂O₃、Mn、As、Sb、Hg、Cd、W 和低含量的 Al₂O₃、CaO、K₂O、SiO₂、B、Ba、F、La、Sr、U、V, EDK2 具有高含量的 Ag、TF₂O₃、Mn、As、Sb、Hg 和低含量的 CaO、Ba、F、U; EDK1 的 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd 明显偏低, EDK2 的 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd 偏低; EDK1 的 Pb/Zn、Pb/K₂O 明显偏高, EDK1 和 EDK2 的 Sb/Cu、Sb/Mo、Sb/W、Sb/Sn、Sb/Bi、Ag/Cu、Ag/Mo、Ag/W、Ag/Sn、Ag/Bi 明显偏大。各元素和氧化物的箱线图显示, EDK1→EDK2→EDK3→EDK4, TF₂O₃、Ag、Sb、Hg 具有明显的下

降趋势, As 总体上显示下降趋势, CaO、K₂O、SiO₂、F、Ba、U 具有弱的上升趋势; EDK1 中的 Pb、Zn、Mn、W、Mo、Cd 含量明显比其在 EDK3 和 EDK4 中的含量高; EDK1 中的 La、Sr、V 含量较其在 EDK3 和 EDK4 中的含量低。本研究选择 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、F、Cd、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、TF₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 等元素和氧化物对数变换后的数据进行主成分分析, 通过提取累计方差约 64 % 的三个主成分 (PC) 绘制主成分分析 PCA 双标图。双标图显示, EDK1 多集中在右侧, 样品中的 Ag、Pb、Zn、TF₂O₃、Mn、As、Sb、Hg、Cd、W、Mo、Sn 等元素呈正相关, 并与 K₂O、Na₂O、Ba、La、Sr、V、P 等元素呈负相关; EDK2 集中在原点附近靠右侧, 样品中各元素相关性与 EDK1 相似, 但相关性较弱; EDK3 和 EDK4 主要集中在左侧, 样品中各元素相关性与 EDK1、EDK2 相反。本研究绘制了大量的二元图解, 其中 As-Sb、F-Hg、As-Hg、Co-Sb、Cd-Zn、Mn-TF₂O₃ 和 As/Cu-Sb/Cu 二元图解对地表矿体有很好的指示作用, Mg[#]-Cd/Zn 图解对隐伏矿体有很好的指示作用, As-Sb、Co-Sb 和 As/Cu-Sb/Cu 对隐伏矿体有一定的指示作用。这些特征可作为土壤地球化学测量的多元素找矿指标, 为银多金属矿产勘查中的微弱矿致异常的识别提供新的视角。

关键词: 二道坎银矿; 土壤地球化学测量; 矿致异常识别; 找矿指标

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

贵州埃迪卡拉纪沉积磷矿床成矿作用

高川黔¹, 杨瑞东^{1*}

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550000

在新元古代末期发生了一系列重大的地质历史事件, 诸如 Rodinia 超级大陆解体、“雪球事件”、全球大规模成磷事件等。在全球大规模成磷事件背景下, 扬子地块埃迪卡拉系陡山沱组不仅广泛发育海相沉积型磷矿床, 同时也保存了具有重要科学研究价值的古生物化石, 为早期生命的多细胞化、组织化提供了证据。贵州瓮安陡山沱组磷块岩矿床是此次成磷事件的典型代表之一, 在磷矿层中保存大量三维立体化石, 主要包括底栖的多细胞藻类、大型带刺疑源类、动物胚胎化石等类型。通过对贵州瓮安穿岩洞磷矿详细地野外地质调查与室内研究, 发现该地区陡山沱组磷矿床上矿层底部磷块岩中沉积有数层球粒状磷块岩。以该岩石样品为研究对象, 利用体视显微镜、光学显微镜和电子显微镜观察其显微结构特征。在显微镜下, 球粒状磷块岩具有明显的生物结构特征, 化石体形态多样, 多呈圆球、次圆球、长椭球状; 由于受到地质作用的影响, 部分化石个体保存不完整, 常见有壳体破损、化石表面的纹饰模糊不清等现象。通过对比分析认为化石主要包括多细胞藻类、Megasphaera 球状化石以及可能从中脱落的单体细胞。磷块岩中富

含 P_2O_5 、CaO, 并且含有较高含量的 SiO_2 , 主要组成矿物为碳氟磷灰石; 磷块岩中部分微量元素相对比较富集, Sr 的含量为 1235×10^{-6} , Ba 为 828×10^{-6} , 远高于地壳平均值和碳酸盐岩平均值。此外, As、Zn、Cu 等元素也相对比较富集, 这些元素的富集反映出生物在磷块岩形成过程中的富磷作用。在此基础上, 探讨该地区陡山沱组球粒状磷块岩形成过程中微生物的成磷作用。研究区球粒状磷块岩的形成是多细胞藻类生物、多细胞真核生物以及其他微生物共同富磷作用的结果, 其形成过程主要可概括为: 生物吸附大量的磷质, 在其组织中聚集磷质, 微生物死亡后, 细胞内部吸附的成矿物质发生磷酸盐化, 形成磷灰石; 同时, 微生物死亡降解过程中产生的各种氨基酸、甲烷、二氧化碳等气体以及磷质进入水体中, 改变了水体环境, 降解释放的磷质增加了水体中磷质含量, 当海水中磷质达到饱和状态时, 磷灰石发生沉淀。

关键词: 贵州省; 瓮安; 陡山沱组; 球粒状磷块岩; 生物成磷作用

国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFC2906604)、国家自然科学基金项目 (编号: U23A2027) 和贵州省地质勘查资金项目 (编号: 2024-2 号) 联合资助。

第一作者: 高川黔 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 沉积矿产, Email: 1922521159@qq.com

通讯作者: 杨瑞东 (1963-), 教授、博士生导师, 研究方向: 矿床学及地球化学, Email: rdyang@gzu.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

闪锌矿中关键金属铟富集机制的第一性原理计算模拟

肖凡^{1*}

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 珠海 519000

铟(In)是一种具有战略性资源意义的关键金属, 闪锌矿是 In 的主要载体矿物。研究表明, In 主要通过替代 Zn 而存在于闪锌矿晶格中, 但 In 在闪锌矿中的富集机理与制约条件仍不清晰。为了理解关键金属 In 在闪锌矿的富集过程, 运用第一性原理计算和分子动力学方法, 对成矿过程中常出现的两种耦合替代形式—— $\text{Cu (I)} + \text{In (III)} \rightarrow 2\text{Zn (II)}$ 和 $\text{Ag (I)} + \text{In (III)} \rightarrow 2\text{Zn (II)}$ 条件下, 以及 $\alpha\text{-ZnS}$ 与 $\beta\text{-ZnS}$ 相闪锌矿中, In 富集过程进行计算模拟, 包括: (1) In 取代 Zn 进入闪锌矿中的反应过程; (2) In 在 $\alpha\text{-ZnS}$

与 $\beta\text{-ZnS}$ 相闪锌矿中的替换 Zn 的过程; (3) In 在闪锌矿表面——(100)、(110) 和 (111) 的吸附过程。通过对模拟结果, 包括平衡构型、布居值、电子结构、表面能、形成能和吉布斯自由能等的分析, 揭示了 In 在闪锌矿替换 Zn 富集过程的物理化学特性与制约关系, 在原子或/和分子层面提升了对关键金属 In 成矿过程与有利条件的深刻理解。

关键词: 关键金属; 闪锌矿; 铟; 第一性原理; 分子动力学

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

滇东马路磷矿床富集机理与控制因素

庞雨雨¹, 高军波^{1*}

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550000

云南东北部是寒武纪早期沉积型磷矿发育的典型地区。本研究以滇东马路磷矿为主要对象, 在详细地野外沉积学调查研究基础之上, 通过精细地岩相学和元素地球化学分析, 探讨成磷环境, 揭示成磷过程, 综合探讨高品位磷矿床的形成机制和控制因素。

马路磷矿位于云南省会泽县马路乡, 属于云南五大磷矿聚集区之一的东川-会泽磷矿区, 大地构造位置位于扬子陆块-上扬子陆块-滇东被动陆缘-昭通陆棚。马路剖面由早寒武世梅树村组小歪头山段、中谊村段组成, 磷矿层赋存于中谊村段中, 由下部块状磷块岩和上部的厚层条带状磷块岩组成。矿石构造包括块状构造、条带状构造、纹层状构造、蜂窝状构造。主要矿石矿物为碳氟磷灰石, 脉石矿物有白云石、方解石、石英、铁氧化物和少量黏土矿物。矿石结构包括内碎屑结构、纤维聚晶结构、凝胶状结构。其中砂屑结构是马路磷矿最常见的结构, 粒径大小一般为 0.15~0.3mm, 分选性较好, 次棱角状-次圆状, 在矿石中含量约占 70%~95%, 胶结物主要为白云石和磷质胶结, 胶结方式以磷质纤状包壳叠加白云质亮晶孔

隙胶结为主。磷矿石主要化学成分包括 P_2O_5 、 MgO 、 CaO 、 SiO_2 、 F , 具富钙、低铝、低硅的特征。滇东地区处在早寒武世的开阔台地中, 发育以碳酸盐岩为主的浅水台地相, 属于潮间-潮下间歇性高能环境。马路磷块岩 V/Cr 、 δCe 、 Y/Ho 值等地球化学特征都反映其形成与较氧化的环境中。通过岩相观察马路磷矿小型楔状交错层理、砂屑结构等特征普遍发育, 结合 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 含量普遍较低, 且与 P_2O_5 含量都呈现负相关变化, 我们认为马路高品位磷矿可能形成与水下高地附近的浅水位置, 较强的水动力条件使得该磷块岩中颗粒分选良好, 呈次圆状-次棱角状, 泥沙质成分含量低。明显的砂糖状磷块岩、蜂窝状构造、溶蚀孔洞等暴露特征, 结合地球化学特征 MgO 与 P_2O_5 含量呈负相关变化, 说明后生淋滤风化作用使得碳酸盐成分流失, 磷品位进一步提高。综合认为岩相古地理和风化改造对成矿据重要的控制作用。

关键词: 富磷矿; 控矿要素; 成矿机理; 会泽; 云南

基金项目: 本文为国家重点研发计划项目 (2023YFC2906604)、贵州省科技支撑项目 (编号: 黔科合支撑[2024]一般 128) 和国家自然科学基金项目 (编号: 42163006, 42462008)、贵州省地质勘查资金项目 (编号: 2024-2 号) 联合资助的成果。

第一作者简介: 庞雨雨 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学, Email: 1520068289@qq.com

通讯作者简介: 高军波 (1985-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 沉积矿床教学与研究工作, Email: jbgao@gzu.edu.cn.

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

核边结构黄铁矿的形成机制

肖景丹¹, 谢卓君^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

卡林型金矿中的金主要以晶格金形式赋存于含砷黄铁矿中, 含砷黄铁矿通常围绕成矿早期的黄铁矿进行沉淀生长形成具有核边结构的黄铁矿。核边结构黄铁矿作为卡林型金矿最主要的载金矿物, 其形成机制尚不清楚。本报告是作者最新的研究进展, 从晶体

学角度揭示出外延生长是形成核边结构黄铁矿的最主要机制。

关键词: 卡林型金矿; 含砷黄铁矿; 核边结构黄铁矿; 晶格金

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

滇东南个旧锡矿锡石地球化学特征及意义

谢俊杰¹, 张嘉鑫¹, 刘英梅¹, 刘思芸¹, 傅佳丽¹, 李婉婷^{1*}

1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500

个旧锡矿位于滇东南锡矿带, 是全球最大的锡多金属矿床之一, 已探明的锡资源储量超过 200 万吨, 同时伴生 Cu、Pb、Zn、W、Bi、Mo、In 等多种金属矿产。该矿床的形成与燕山期高分异花岗岩侵入活动密切相关, 并经历多期次热液叠加成矿, 形成了云英岩型、矽卡岩硫化物型、块状硫化物型、层间氧化矿型、电气石细脉带型和含锡白云岩型 6 种主要矿石类型。本次研究综合利用扫描电子显微镜、电子探针和 LA-ICP-MS 等分析方法, 对个旧锡矿矽卡岩硫化物型和块状硫化物型矿石中锡石开展了原位微量元素成分研究, 探讨了两类锡石的成分差异和流体演化过程。

矽卡岩硫化物型锡石与石榴石、透辉石等矽卡岩矿物共生, 呈浅棕-深棕色, 颗粒大小不一, 粒径约 0.12~3.68mm, 多为四方双锥, 少量可见四方柱状晶形, 部分锡石颗粒发育环带结构。该类锡石主要由 SnO₂ 和少量 CaO (0.53%~0.60%)、FeO (<0.29%)、TiO₂ (<1.28%)、V₂O₃ (<0.07%)、Sc₂O₃ (<0.46%)、WO₃ (<0.99%)、MnO (<0.05%)、MgO (<0.04%)、Al₂O₃ (<0.05%)、SiO₂ (<0.03%)、Nb₂O₅ (<0.05%)、Ta₂O₅ (<0.11%)、ZrO₂ (<0.03%) 组成, 富集 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素, 还含有极少量 In (<6×10⁻⁶)。块状硫化物型锡石多与黄铜矿、闪锌矿、黝锡矿等硫化物共生, 呈浅棕色-棕黄色, 粒径约 0.13~0.78mm, 多为他形或四方柱状, 少量为四方单锥晶形, 普遍发育环带, 部分颗粒发育增生结构。该类锡石主要由 SnO₂ 和少量 CaO (0.54%~0.61%)、FeO

(0.06%~2.37%)、TiO₂ (<0.28%)、V₂O₃ (<0.02%)、Sc₂O₃ (<0.41%)、WO₃ (<0.88%)、MnO (<0.02%)、MgO (<0.03%)、Al₂O₃ (<0.08%)、SiO₂ (<0.08%)、Nb₂O₅ (<0.10%)、Ta₂O₅ (<0.05%)、ZrO₂ (<0.03%) 组成, 其 Fe 和 In (24×10⁻⁶~59×10⁻⁶) 含量明显高于矽卡岩硫化物型锡石, Al、Be、Ga、Sb 等元素含量也略有升高, 而 Ti、V 及 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素含量明显降低。

两类锡石均发育环带结构, 表明它们经历了较缓慢的结晶作用, 随着成矿热液温度的降低, 从锡石颗粒中心到边缘, Fe、W、Ti、Sc 等含量逐渐降低, Sn 含量逐渐增加。然而, 本次研究发现块状硫化物型锡石颗粒常被较多细小锡石颗粒包裹交代形成增生边, 且增生的锡石小颗粒中 Fe、Sc 含量显著增加, Sn 含量显著降低, 表明 Fe、Sc 大量进入锡石晶体中替代 Sn, 可能反映了成矿环境的突然转变, 指示锡石受到后期流体活动的叠加改造。铟在锡石中的富集与成矿热液的成分、温度、压力及矿物共生组合密切相关, 前人研究指出矽卡岩硫化物型锡石形成于高温、氧化环境, 因此铟可能更倾向分散于硅酸盐或氧化物相, 锡石中高场强元素的富集可能与岩浆热液的早期演化相关; 而块状硫化物型锡石则沉淀于中低温、还原、富硫环境, 硫化物活度的升高可能促进了亲硫元素 (如 In、Sb) 的络合与共沉淀。

关键词: 个旧锡矿; 锡石; In 富集特征; 微量元素

基金项目: 云南省基础研究专项面上项目 (202101AT070551); 云南大学大学生创新创业训练项目 (省级, S202310673257)

第一作者简介: 谢俊杰 (2003-), 在读本科生, 研究方向: 地质学. Email: 2609190123@qq.com

*通讯作者 j 简介: 李婉婷 (1988-), 讲师, 研究方向: 矿床成因及成矿规律. Email: liwanting0930@foxmail.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

基于植被波谱异常的铜钼矿植被地球化学信息提取

史超^{1*}, 李书¹

1. 水利部长江勘测技术研究所, 武汉 430011

高光谱遥感技术相较于多光谱遥感而言,其具有多光谱遥感数据无法比拟的光谱分辨率,细化的光谱间隔使高光谱遥感在地物精细识别及探测方面、地表物质的分类、识别、有用信息的提取等方面具有明显的优势,且具有较高的精度,这种优势是多光谱遥感数据所无法比拟的。以 AVIRIS 为代表的航空高光谱成像光谱仪投入使用后,高光谱遥感应应用得到了推进,特别是在地质找矿方面得到了广泛应用,并取得了众多的应用成果。随着时间的推进,众多航空高光谱成像光谱仪投入使用,如加拿大的 CASI/SFSI,美国的 ASI、HYDICE、SEBASS 和 AVIRIS,澳大利亚的 Hymap,以及中国的 OMIS、CMODIS 等高光谱成像光谱仪。现有的成像光谱仪包括 Terra 综合平台上 MODIS 成像光谱仪、新千年计划第一星的 EO-1,利用 EO-1 卫星的 Hyperion 数据在农业监测、生态与环境、矿产资源调查取得了大量的应用成果。高光谱遥感的光谱分辨率让其具有精确的地物探测能力,在植被覆盖区受植被及地表覆盖物的干扰,岩石及矿化信息表现为弱缓信息,限制了高光谱遥感技术在植被覆盖区地质找矿应用。基于成矿元素迁移规律和植被在吸收矿化元素后在叶片中积累,导致植被波谱发生异常,通过对比分析矿区与非矿区典型植被光谱特征,在光谱特征分析结果基础上得出矿区典型植被均不同程度受到了重金属元素胁迫,并造成光谱曲线发生

变异。在分析结果基础上,结合植被地球化学数据建立重金属与植被光谱胁迫相关性数学模型,提出矿区重金属与覆盖植被胁迫相关性,叶片中 Co, Cu, Zn, Mo, Ag, Hg, Mn, Bi 和 As 等金属元素含量与其光谱吸收深度的 R^2 均大于等于 0.80,表明上述金属元素与植被的吸收深度间存在较强的相关性,基于相关性模型估算出土壤及植被中成矿元素的含量及其空间分布特征,利用加权叠加分析,获得高光谱金属元素反演综合结果。综合已有矿点、线性构造、环形构造解译结果验证反演结果,为植被覆盖区利用高光谱遥感调查评价金属元素的分布和富集提供一种方法。

研究思路如下:(1)采集矿区和矿区外围背景区典型植被样本,同时利用光谱仪采集对应样本的光谱数据;(2)测定获得典型植被样本金属元素含量,通过金属元素含量测定结果,确定矿区典型植被样本是否受重金属元素影响;(3)对比分析矿区和背景区典型植被的波形特征;(4)统计分析矿区和背景区典型典型植被光谱的红边位置;(5)基于相关性模型估算出土壤及植被中成矿元素的含量及其空间分布特征,利用加权叠加分析,获得高光谱金属元素反演综合结果。

关键词: 植被覆盖区;波谱异常;高光谱;植被地球化学

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

Fe 同位素和黄铁矿 S 同位素证据揭示砂岩型铀矿成矿流体属性

刘源¹, 赵军红^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

砂岩型铀矿是全球最重要的经济易采铀矿类型, 但其矿床成因仍存在巨大争议。目前存在两种主要观点: 一种认为深部油气/煤储层衍生的还原性含烃热流体沿断裂上涌, 与氧化性地下水或含矿层发生耦合反应成矿; 另一种则认为成矿流体主要来源于大气水, 强调表生流体与砂岩内还原物质的持续反应成矿, 排除了深部含烃热流体的参与。因此, 矿床成因的争议焦点在于成矿流体的属性尚未明确, 尤其是深部还原性含烃热液流体是否参与成矿

过程, 缺乏有力证据的约束。本次研究以鄂尔多斯盆地东胜铀矿为对象, 通过矿物学、Fe 同位素及黄铁矿 S 同位素研究, 揭示了铀成矿过程中成矿流体的属性。这一研究不仅能够深化对砂岩型铀矿成矿机制的理解, 还将为后续的找矿勘探提供重要的理论依据。

关键词: 砂岩型铀矿; 铁同位素; 硫同位素; 成矿流体

第一作者简介: 刘源 (1994-), 博士后, 研究方向: 砂岩型铀矿成矿作用. Email: liuyuan@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 赵军红 (1975-), 研究员, 研究方向: 大陆动力学与矿床学. Email: jhzhao@mail.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

岩浆作用及成矿的动力学过程

姚卓森^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

岩浆是地幔内部物质和能量向外传递的主要载体, 其形成、运移到冷却成岩的过程往往也伴随着显著的成矿作用。以往工作更多聚焦于岩浆的成分演化和元素的分配富集, 而最近人们正在经历从传统的熔体岩浆房向穿地壳晶粥储库模型的范式转换。本文尝试从物理机制的角度介绍并归纳镁铁-超镁铁质岩浆作用及相关岩浆矿床的动力学过程。首先, 阐述硅酸盐熔体及岩浆的密度和动态粘度的变化规律及其主要控制因素; 随后分别梳理熔体岩浆房内的岩浆对流、补给和混合作用, 以及晶粥储

库模型所涉及的堆晶压实、成分对流、补给活化及反应熔体流等, 以期能将这些抽象的概念转换为具体的动力学过程, 揭示成矿物质在动态岩浆体系内迁移汇聚的物理机制; 最后列举了铜镍硫化物矿床、豆荚状铬铁矿矿床和层状岩体内铬铁矿及磁铁矿矿床等岩浆矿床可能经历的成矿动力学过程, 以期能促进相关领域的快速发展。

关键词: 岩浆动力学; 熔体岩浆房; 晶粥储库; 岩浆矿床; 物理机制

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

氟化物-硅酸盐熔体不混溶和结晶分异对碱性 花岗岩稀有稀土金属富集的作用

张道涵^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

氟化物-硅酸盐熔体不混溶被认为是碱性花岗岩体系中控制轻稀土 (LREE) 和 Y 富集的关键过程。然而, 该过程除了在加拿大 Strange Lake 岩体中报道外, 其他至今并未在其他碱性花岗岩中报道。因此, 氟化物-硅酸盐熔体不混溶过程对于稀土金属富集的重要性也有待商榷。本文选取了我国内蒙古巴尔哲矿床开展了碱性角闪石的矿物学和地球化学研究。巴尔哲成矿岩体由早到晚可依次分为细粒超溶相花岗岩、似斑状超溶相花岗岩、过渡相花岗岩、以及伟晶岩和梳状角闪石层。其中, 过渡相花岗岩是主要矿化部位, 而且该岩相内还存在超溶相包体。这些不同岩相中的碱性角闪石主要为钠铁闪石, 记录了结晶分异、机械混合、氟化物熔体不混溶、流体出溶和脱气等过程。钠铁闪石中氟化物包体的含量暗示, 除了过渡相和伟晶岩, 氟化物硅酸盐熔体不混溶过程在其他岩相中均有发生, 其中在似斑状超溶相花岗岩阶段尤为强烈。大

多数氟化物包裹体具有高 Ca, 富集 LREE、中稀土 (MREE) 和 Y 的特征。基于全岩 F 含量, 估算似斑状超溶相花岗岩中氟化物熔体含量小于 1%, 储存了体系中约 2%~6% LREE 和高达 8%~15% MREE 和 Y。但是, 氟化物熔体的出溶并未影响到硅酸盐熔体中 REE 和高场强元素 (HFSE) 含量因结晶分异而持续增长的趋势。结合主要赋矿岩体过渡相花岗岩以及伟晶岩中氟化物熔体的缺失, 表明早期出溶的氟化物熔体并未在残余熔体中聚集。因此, 氟化物-硅酸盐熔体不混溶对于巴尔哲矿床中 LREE 和 Y 富集的贡献非常有限。与之相比, 石英、碱性长石和碱性角闪石等硅酸盐矿物的结晶分异过程, 则促使体系中 REE 和 HFSE 的富集可达 5 至 20 倍。

关键词: 氟化物-硅酸盐熔体不混溶; 碱性花岗岩; 稀有稀土金属富集; 碱性角闪石; 巴尔哲

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

塔里木盆地麦盖提斜坡断裂及控藏作用

赵宇豪^{1*}

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

麦盖提斜坡位于塔里木盆地南缘, 北靠巴楚隆起, 南接西南凹陷和东临唐古巴斯凹陷, 是塔里木盆地西南坳陷的一个次级构造单元, 总体上呈现出 NW 向展布, 是一个西高东低、北高南低的倾斜构造, 麦盖提斜坡受多期次复杂构造运动, 主要为加里东、海西及喜马拉雅三次构造运动的共同作用, 在其多期次构造运动的作用下形成了复杂的断裂体系, 纵向上可以分为下部基底断裂、中部滑脱断裂以及上部走滑断裂, 这些断裂体系能够对油气储集层的发育、油气的运移与聚集以及圈闭的形成与保

存产生控制作用, 从而对于油气的成藏达到控制。本文通过对地震资料解释综合分析、断裂的活动期次、断裂的几何特征和性质进行系统的分析, 并结合前人的钻探资料、成藏期次分析、已探明的油气成藏模式的研究成果, 系统探讨麦盖提斜坡断裂特征及其控藏作用, 并对于麦盖提斜坡有利油气聚集区进行预测。

关键词: 麦盖提斜坡; 构造运动; 断裂; 控藏作用; 油气藏预测

横向课题:《塔西南地区构造演化及关键时期构造特征分析》

通讯作者简介: 赵宇豪 (2003-), 本科生, Email: 18209960807@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

东秦岭某伟晶岩型高纯石英形成过程与纯化机制研究

李晓宇^{1*}, 李开文^{1,2}, 蔡志超^{1,2}

1. 河南省地质研究院, 郑州 450016;

2. 超纯矿物产业技术研究院, 郑州 450016

高纯石英作为战略性新兴产业的关键基础材料, 其全球市场长期被美国垄断, 但中国东秦岭地区伟晶岩型高纯石英资源的发现为打破这一局面提供了可能, 但对高纯石英的形成过程和纯化机制缺乏研究, 限制了资源勘探和开发。本研究选取东秦岭某含高纯石英伟晶岩开展研究。该伟晶岩脉近东西向侵入秦岭群黑云斜长片麻岩, 展布宽度约 50 米, 局部膨大至数百米, 发育复杂的分带结构: 从边部到中心分为文象带(钾长石-石英文象结构)→中粗粒伟晶岩带(斜长石-石英-白云母组合)→块体微斜长石带(微斜长石-绿柱石共生)→核部石英带(石英为主)。通过阴极发光(CL)成像与原位成分分析, 识别出三类石英: 早期岩浆石英(ZSG-I), 呈不规则状残存在团块石英内部, CL 图像明亮, 杂质元素偏高, 其中 Ti 含量 $3.65 \times 10^{-6} \sim 9.89 \times 10^{-6}$ (平均 4.30×10^{-6}), Al 为 $12.7 \times 10^{-6} \sim 36.3 \times 10^{-6}$ (平均 20.8×10^{-6}), Li 为 $0.48 \times 10^{-6} \sim 5.43 \times 10^{-6}$ (平均 2.57×10^{-6}), 从脉边部到核部, 石英中的 Ti 含量逐渐降低, Al 和 Li 逐渐升高; 溶解-再沉淀石英(ZSG-II), 以不规则状包被 ZSG-I, CL 暗色, 杂质元素含量显著降低, 其中 Al 为 $5.39 \times 10^{-6} \sim 24.8 \times 10^{-6}$ (平均 15.2×10^{-6}), Ti 为

$1.10 \times 10^{-6} \sim 5.30 \times 10^{-6}$ (平均 3.20×10^{-6}), Li 为 $0 \sim 2.43 \times 10^{-6}$ (平均 0.26×10^{-6}), 不同带内石英的元素含量变化不明显。晚期变质重结晶石英(ZSG-III), 呈细粒多晶集合体, 杂质元素最低, Al 为 $2.58 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$ (平均 7.24×10^{-6}), Ti 为 $0 \sim 5.98 \times 10^{-6}$ (平均 3.17×10^{-6}), Li 为 $0 \sim 0.86 \times 10^{-6}$ (平均 0.07×10^{-6})。研究发现伟晶岩在演化早期以斜长石与钾长石结晶分异占主导, 石英中 Ti 含量随温度降低而降低, 而 Al、Li 因熔体分异逐步富集; 演化晚期挥发分饱和和形成超临界流体, 沿矿物界面引发耦合溶解-沉淀作用, 造成 ZSG-II 沿边缘取代早期 ZSG-I。该过程排出杂质元素(Al、Ti、Li 等), 成为石英纯度提升的核心机制。成岩后变质/变形作用使部分石英重结晶, 进一步降低杂质含量, 但其贡献受粒度与含量限制(占比 <5%)。该研究发现伟晶岩中的石英通常具有复杂的成因序列和多样的地球化学成分, 不同类型石英的含量组成控制了原料最终的石英纯度, 溶解-再沉淀石英和重结晶石英占据比较大比例的原料是优质原料。

关键词: 东秦岭; 高纯石英; 花岗伟晶岩; 原位成分分析; 溶解共沉淀

基金项目: 2024 年度河南省地质研究院地质科技攻关项目(批准号: 2024-904-XM02)

第一作者简介: 李晓宇, 男, 1992 年生, 工程师, 主要从事花岗岩成因与成矿研究。

*通讯作者, E-mail: hnsdzyjylee@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

鹿井小山铀矿床绿泥石特征及其与铀成矿作用关系

刘绪江¹, 余驰达^{2*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 南昌 330013

小山铀矿床位于鹿井矿田中部, 是核工业南方地勘中心所近年来新发现的中型铀矿床, 它属于典型的碎裂蚀变型铀矿床, 又与碱交代相关。矿床内主要出露寒武系和白垩系地层, 岩浆岩以粗粒似斑状黑云母二长花岗岩为主, 其次为细粒少斑黑云母花岗岩、二云母花岗岩。矿床的形成受北东向 QF_{II} 断裂控制, 围岩蚀变强烈, 与铀矿化密切相关的蚀变类型包括: 钾长石化、绿泥石化、赤铁矿化、黄铁矿化、硅化等。铀矿物主要为沥青铀矿、晶质铀矿、铀石。绿泥石对热液的温度、压力、物理化学性质及全岩成分高度敏感, 可用于反演其形成时的物理化学条件, 是一种重要的标型矿物。小山铀矿床中绿泥石化是与铀矿物密切共生的一种热液蚀变。因此, 本文以小山铀矿床的绿泥石为研究对象, 开展矿物学和元素地球化学特征研究, 旨在探讨绿泥石的类型、成因及形成环境, 并利用地质温度计估算其形成温度, 以期揭示小山铀矿床成矿作用特征提供依据。研究表明, 小山铀矿床的绿泥石分为四类: 裂隙充填型(Chl-I)、浸染分布型(Chl-II)、黑云母蚀变型(Chl-III)和长石蚀变型(Chl-IV)。

不同类型绿泥石矿物学和元素地球化学特征指示 Chl-I、Chl-II 与铀矿化密切相关, 而 Chl-III 和 Chl-IV 与铀矿化无关。 Si Vs. $Fe_{total} / (Fe+Mg)$ 分类图解和绿泥石主要阳离子与镁离子关系图指示小山绿泥石主要为铁绿泥石, 少量为铁镁绿泥石, 是多期热液活动的产物。利用绿泥石地质温度计估算绿泥石的形成温度, 结果表明: 与铀矿化密切相关的绿泥石形成温度介于 353~417℃, 平均值为 381℃; 与铀矿化无关的绿泥石形成温度介于 358~428℃, 平均值为 399℃。小山铀矿床绿泥石均为富铁绿泥石, 指示其形成环境为还原环境。成矿期前与铀成矿无关绿泥石温度(399℃)相比成矿期与绿泥石密切共生的绿泥石形成温度(381℃)更高, 指示小山铀矿床沥青铀矿形成于高温条件, 成矿流体降温、去气可能是导致 U 沉淀的重要因素。成矿流体温度降低会破坏流体的物理化学平衡, 引发铀酰络合物发生解离, 在还原环境中, 六价铀被还原成四价铀并形成沉淀。

关键词: 绿泥石; 地质温度计; 铀成矿; 小山铀矿床

第一作者简介: 刘绪江(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 铀矿地质与勘查. E-mail: 3159462640@qq.com

*通信作者简介: 余驰达(1990-), 讲师, 研究方向: 铀矿地质与勘查. E-mail: 841500824@qq.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

湘南柿竹园超大型稀有多金属矿床铍赋存 状态及铍矿物演化序列初探

林或涛¹, 王汝成^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

铍(Be)作为战略性关键金属,是优异的功能和结构材料。湘南柿竹园矿床是一个世界级超大型稀有多金属矿床,产于千里山杂岩体东南部与泥质条带灰岩接触带,长 1200 m,宽 1000 m,垂直厚度 50~500 m,呈透镜状体,发育有 W-Sn-Mo-Bi-Be 多金属成矿系统,是揭示铍在花岗质熔-流体中结晶行为与资源效应的理想研究对象。但现有勘查开发模式仍以钨锡为导向,导致铍资源利用率不足,铍的来源、赋存状态和成矿机制尚未查明。结合野外观察、岩相学观察、全岩地球化学测试及微区矿物学研究,本研究精细化研究 Be 从微量置换到形成矿物的全周期富集过程及其成矿机制。首次确定千里山杂岩体中等粒铁锂云母花岗岩(Be 含量可高达 214×10^{-6})为铍成矿母岩,为铍成矿提供最初物源。此外,通过对等粒铁锂云母花岗岩进行独居石原位 U-Th-Pb 定年,确定其成岩年龄为 155.3 ± 0.9 Ma,完善了柿竹园成岩成矿年代学格架。其次,揭示了柿竹园铍矿化存在“绿柱石-

硅铍石/羟硅铍石-金绿宝石”的矿物演化序列,指示其从低铝/硅饱和体系向高铝/硅不饱和体系转变的成矿环境。最后,建立了“岩浆结晶-热液交代-流体沉淀”三阶段成矿模型:在高分异花岗岩阶段,绿柱石在熔体中饱和并结晶,在云英岩阶段,伴随羟硅铍石产出。在矽卡岩阶段,铍赋存在硅酸盐矿物中,或者经晚期含铍流体交代矽卡岩矿物沉淀出硅铍石、羟硅铍石等,随着热液流体的运移,在大理岩广泛分布的云母萤石网脉中发现大量次生热液铍矿物。其中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 活度变化、Na/K 交代作用与高挥发分对铍富集和迁移起到控制作用。本研究证实高分异富高挥发组分的花岗岩浆-热液系统对稀有金属超常富集的关键作用,对提升我国战略金属资源保障能力具有重要现实价值。

关键词: 柿竹园铍矿; 铍成矿矿物序列; 岩浆-交代-热液过程

基金项目: 国家自然科学基金项目(42230809)

第一作者简介: 林或涛(2000-), 博士研究生, 研究方向: 成矿矿物学. Email: 602024290010@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 王汝成(1962-), 教授, 研究方向: 成矿矿物学. Email: rcwang@nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

金的非传统超常富集机制：金属液滴对金的富集作用

简伟^{1*}

1. 中国地质大学（北京），北京 100083

主要由低熔点亲铜元以及金组成的金属液滴，可在常见热液金矿的成矿温度下以液态形式存在，已在全球多种类型的热液金矿中被发现，如造山型金矿，浅成低温热液金矿，斑岩型（铜）金矿，矽卡岩型（铜）金矿床，与侵入岩相关的脉型金矿。金属液滴可在多次热液活动中，从金不饱和流体中高效中抽取金，并实现自我催化生长，代表了一种金的非常统超常富集机制。金属液滴结晶物的组成、外形、内部结构，以及金属液滴在寄主矿

物内移动所留下的痕迹，可作为鉴别金属液滴的依据。矿物-流体界面的吸附-还原作用，已有矿物组合的部分熔融，是金属液形成的两种重要机制。除黄铁矿等还原性矿物外，活化后的石英亦可吸附-还原流体中的金、银、碲、铋等金属络合物形成金属液滴。

关键词：热液金矿；金属液滴；吸附-还原；非传统；超常富集

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床成因 机制的矿物学及年代学研究

黄帅¹, 车旭东^{1*}, 王汝成¹, 陆现彩¹, 邓飞²

1. 南京大学 地球科学与工程学院关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023;

2. 广东省地质局佛山地质调查中心, 广东 佛山 528000

粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床位于广东省东北部, 处于华南板块的罗霄-云开湖盆系, 赋存于白垩系叶塘组地层, 为内陆湖泊相泥岩沉积(邵小阳等, 2024a)。矿层 Li_2O 含量为 0.1004%~0.2118%, 平均 0.1359%, 赋矿层位厚度约 450 m, 连续矿层厚度可达 226 m, 具有重要资源潜力。本研究综合采用 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、电子探针显微分析仪 (EPMA) 及激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 等分析技术, 对粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床进行了精细的矿物学和年代学研究分析。结果表明, 含矿的叶塘组泥岩及泥质粉砂岩的矿物组成以石英、长石及粘土矿物为主。其中粘土矿物以伊利石和绿泥石为主, 伊利石占全岩比重为 19.2%~30.5%, 绿泥石为 17.2%~22.8%。全岩地球化学分析显示, 全岩 Li 含量和粘土矿物的含量呈现明显的正相关, 且与 B、Rb、Ba 等热液元素呈正

相关, 与 Ce 异常呈负相关, 表明成矿岩层中的 Li 很可能赋存于粘土矿物中, 成矿过程受热液活动控制。除此之外, 本研究对成矿岩层及其下伏优胜组火山岩进行了年代学工作。优胜组沉凝灰岩和流纹岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $95.3 \pm 1.5 \text{ Ma}$ 和 $95.5 \pm 1.3 \text{ Ma}$, 属晚白垩世岩浆活动产物。含矿的叶塘组泥岩及泥质粉砂岩的碎屑锆石年龄谱呈现多峰特征: 主峰~100 Ma, 其次是~400 Ma 和 240~160 Ma, 说明优胜组火山岩是成矿岩层最主要的物质来源。

本研究通过对粤北石人背盆地火山粘土型锂矿床的矿物学和年代学研究, 揭示了锂主要赋存在伊利石、绿泥石等粘土矿物中, 锂成矿与晚白垩世火山热液活动密切相关。

关键词: 石人背盆地; 火山粘土型锂矿; 火山热液活动

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 42272067); 广东省自然资源厅“广东和平地区 1: 5 万区域地质调查”。

第一作者简介: 黄帅, 男, 硕士研究生, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: 502023290003@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 车旭东, 男, 副教授, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: xdche@nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

形成超大型斑岩铜矿床的最佳岩浆氧逸度

朱经经^{1*}, 汪殿钟¹, 胡瑞忠¹, 毕献武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

超大型斑岩铜矿床是由岩浆体积、岩浆物理化学条件、流体聚集、岩浆注入速率和铜金沉淀效率等多种地质过程的最佳组合形成的。普遍认为, 岩浆氧逸度控制了硫在硅酸盐熔体中的形态和溶解度, 最终对铜金的富集和矿化具有决定性作用。在还原条件下 ($\Delta\text{FMQ} < 0$), 熔体中的 S 主要以 S^{2-} 形态存在, 易导致高 $f\text{S}_2$ 岩浆的大量早期硫化物饱和, 从而导致演化熔体中亲硫元素 (如 Cu、Au 和 PGE) 的大量丢失, 最终不利于斑岩铜金矿的形成。因而, 一般认为, 高岩浆氧逸度对斑岩铜矿的形成至关重要, 且岩浆氧逸度越高越有利于成矿。然而, 通过对全球重要斑岩铜矿岩浆氧逸度的估算, 我们发现大部分斑岩铜矿形成

的岩浆氧逸度并不异常高, 集中分布在 $\Delta\text{FMQ} + 1$ 左右。通过数值模拟, 发现在岩浆氧逸度为 $\Delta\text{FMQ} + 1$ 时, 90% 的 S 在出溶热液中以 S^{2-} 形式存在, 从而绝大部分可用于沉淀 Cu; 然而在岩浆氧逸度为 $\Delta\text{FMQ} + 2$ 和 $\Delta\text{FMQ} + 3$ 时, 可用于沉淀 Cu 的 S 分别仅占总 S 的 33%~38% 和 15%~25%, 即当岩浆氧逸度过高时, Cu 的沉淀效率急剧降低。蒙特卡洛模拟进一步揭示, 中度氧化 ($\Delta\text{FMQ} \approx 1$) 而非高度氧化 ($\Delta\text{FMQ} > 2$) 的岩浆更有利于大型-超大型矿床的形成, 突破了传统认识。

关键词: 斑岩铜矿; 岩浆氧逸度; 数值模拟

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

阿尔金卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带成矿流体性质研究

陈康^{1,2*}, 宋文磊¹, 高永宝²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

2. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100

近年来, 在新疆阿尔金卡尔恰尔地区发现了超大型萤石成矿带, 截止目前预估该地区萤石矿石储量达到 3500 万吨, 目前已成为我国最重要的萤石大型资源基地。本文以新疆阿尔金西段卡尔恰尔超大型萤石成矿带为重点研究对象, 厘定了卡尔恰尔超大型萤石矿带矿区地质背景、矿化特征与关键控矿因素, 利用电子探针及 LA-ICP-MS 对萤石、碱长花岗岩、方解石、黑云斜长片麻岩进行主微量元素研究, 对与萤石伴生的碱长花岗岩进行锆石 U-Pb 年代学研究, 对不同类型和期次的萤石、方解石开展 C-H-O、Sr-Nd 同位素研究, 对不同类型矿石中的包裹体开展成矿流体地球化学研究, 总结成矿模式并开展成矿预测。取得的主要成果如下: 阿尔金西段地区卡尔恰尔地区超大型萤石成矿带形成于早古生代晚奥陶世, 与同期碱长花岗岩密切相关, 超大型萤石带成矿主要受岩体和围岩控制, 大量矿体产于岩体的接触带位置, 形成于后

碰撞伸展阶段, 成矿流体来源于碱长花岗岩的熔体-流体演化, 卡尔恰尔萤石成矿带矿床成矿早期萤石沉淀机制主要为流体混合作用和水-岩反应, 晚期受流体混合作用致使流体温度的降低, 建立了奥陶纪“卡尔恰尔式”岩浆热液充填型萤石成矿模式。在系统梳理阿尔金西段卡尔恰尔超大型萤石矿带成矿规律的基础上, 提出“碱长花岗岩+北东向断裂构造+阿尔金岩群富钙地层+F 化探异常+方解石空间分布”等重要找矿标志, 综合使用多源遥感数据创建了一种遥感萤石矿找矿模型。引领实现找矿新发现, 新发现矿产地 2 处, 提交找矿靶区 4 处, 推动了地勘基金和企业勘查投入, 促进形成了阿尔金西段萤石大型资源基地。

关键词: 萤石矿床; 岩浆-热液演化; 卡尔恰尔; 阿尔金西段

基金项目: 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目 (KC20230011)、中国地质调查局项目 (DD20243309)、(DD20211551) 联合资助。

第一作者简介: 陈康 (1991-), 高级工程师, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: kangchen320@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

云南思茅盆地勐野井 MK 钻孔盐矿物学研究

刘易德^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

云南思茅盆地江城含盐带的勐野井钾盐矿是我国唯一具开采价值的古代氯化物型固体钾盐矿床, 但其成矿物源与动力学机制仍存在争议。本研究聚焦勐野井 MK-1 和 MK-3 钻孔岩心样品, 综合矿物自动鉴别分析 (AMICS)、扫描电镜 (SEM) 及电子探针 (EPMA) 技术, 系统揭示了盐类矿物的微区地球化学特征及其对成矿过程的指示意义。研究表明, 石盐中 Br/Cl 比值及 K 含量特征显示成矿卤水经历多阶段蒸发浓缩, MK-1 钻孔石盐 $\text{Br} \times 10^3 / \text{Cl}$ 值 (0.02~0.44) 指示其母液兼具海源与陆源混合特征, 而高 K 含量 (>0.09%) 石盐的出现佐证了钾盐析出阶段的卤水演化。碳酸盐矿物 Sr/Ca、Fe/Mn 比值等均是揭示卤水蒸发序列、古盐度变化、氧化还原状态与成钾

关系的关键矿物指标, 因此, 本研究特别地对共生碳酸盐矿物进行了研究, 分析其微量变化特征对钾盐成矿物质来源以及成矿过程的指示意义, 如共生方解石的 Fe/Mn 分异反映构造驱动下的流体迁移与氧化还原波动。本研究突破传统单一盐类矿物研究的局限性, 建立多尺度地球化学表征方法, 为深化“二层楼”成矿理论提供微观地球化学证据。本研究预计将为思茅盆地钾盐成矿理论提供更全面的地球化学证据, 并为深部找钾勘探提供新的矿物学依据, 探索钾盐共生矿物对钾盐成矿物质来源和成矿模式的启示。

关键词: 钾盐; 石盐; 思茅盆地; 碳酸盐; 微区分析;

项目资助: 滇西南中生代海相钾盐成钾条件与成矿预测 (编号: 2023YFC2906504)。

第一作者简介: 刘易德, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事钾盐矿产地质调查、矿物学研究。Email: 502023290051@smail.nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

吉尔吉斯斯坦 Bozymchak 矽卡岩型金铜矿床 Au-Ag-Te 富集机制

章浩^{1*}

1. 国家地质实验测试中心 国家地质实验测试中心, 北京 100037

在天山成矿带 Chatkal-Kurama 地区 (中亚天山成矿带), 以 Kalmakyr 斑岩型铜金矿、Kochbulak 浅成低温热液型金矿及 Bozymchak 富金矽卡岩型矿床为代表的岩浆热液型 Au-Cu 矿床中, Au-Ag-Te 元素组合作为显著特征广泛发育。然而, 与碲化物伴生的金富集机制仍存在关键科学问题亟待解决 (如 Te 元素对金迁移-沉淀的具体控制机理尚不明确)。位于吉尔吉斯斯坦的 Bozymchak 矽卡岩型 Au-Cu 矿床具有高品位 Au (1.96 g/t)、Cu (1.14%)、Ag (13.2%) 及关键金属 Te、Se 等元素组合, 为研究岩浆热液系统中 Au-Ag-Te 富集过程提供了理想对象。本研究通过系统的岩相学观察, 结合电子探针 (EPMA)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS)、激光剥蚀扫描成像 (LA-Mapping)、TIMA 矿物自动分析及 XRF 元素填图技术, 首次揭示了 Bozymchak 矿床中 Au-Ag 碲化物的精细矿物学特征及主要 Fe-Cu 硫化物的地球化学组成。矿床中金主要以自然金 (成色 792-886) 及碲化物形式赋存, 包括碲银矿 (Ag_2Te)、

针碲金银矿 (Ag_3AuTe_2)、硫铋铜矿 (Cu_3BiS_3) 及硒铅矿 (PbSe)。这些矿物与自然金紧密共生, 形成不规则粒状结构、共结边结构。根据矿物组合与热力学模拟, Au-Ag-Te 矿物形成于 $\text{Log } f(\text{S}_2) = -11.4 \sim -4.6$ 、 $\text{Log } f(\text{Te}_2) = -14.7 \sim -7.8$ 、 $\text{Log } f(\text{O}_2) = -34.9 \sim -28.0$ 的物理化学条件。Te 在 Fe-Cu 硫化物中显著富集, 其中斑铜矿含量最高 (平均 272×10^{-6}), 其次为黄铜矿 (129×10^{-6}) 及黄铁矿 (13.04×10^{-6})。Ag、Bi 呈现相似分布规律, 而 Au 含量相对较低 (斑铜矿 0.19×10^{-6} 、黄铜矿 1.02×10^{-6} 、黄铁矿 0.22×10^{-6})。研究表明, 硫化作用与低熔点亲铜元素 (LMCE) 熔体的共同驱动金的沉淀。随着黄铜矿、斑铜矿的晶出, 硫逸度降低促进金沉淀及 LMCE 熔体形成, 后者可进一步从流体或围岩中萃取金元素, 最终导致 Bozymchak 矿床金的显著富集。

关键词: Au-Ag-Te 沉淀; 金的赋存状态; 低熔点亲铜元素 (LMCE) 熔体

第一作者简介: 章浩 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床学. Email: 2337937609@qq.com

通信作者简介: 李超 (1983-), 研究员, 研究方向: 地球化学. Email: Re-Os@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

黑龙江省大型二道坎银矿床岩矿石元素地球化学特征 及其对矿产勘查的指示意义

杨文鹏^{1,2*}, 符安宗^{1,2}

1. 黑龙江省自然资源调查院, 哈尔滨 150036;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

二道坎银矿床位于大小兴安岭结合带, 是该地区首次发现的三叠纪大型银矿床。本次研究采集了二道坎银矿矿区钻孔中的矿体、矿化体、构造角砾岩、围岩和矿区外围背景岩石样品, 分析 Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Bi、Mn、F、Cd、B、Li、Be、U、Ba、Ni、Co、Cr、La、Nb、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Zr、SiO₂、TF₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O、MgO、CaO 等 39 种元素和氧化物。结果显示: 二道坎银矿矿体除了 Ag、Pb、Zn、TF₂O₃、Mn 等元素含量高外, Au、As、Sb、Hg、Cd、W、Mo 等的元素含量也较高, 而 Al₂O₃、CaO、K₂O、Na₂O、MgO、SiO₂、B、Ba、Co、Cr、F、La、P、Sr、Ti、U、V、Y 等氧化物和元素的含量相对较低; 元素比值 Sr/Mn、Au/Ag、Zn/Cd、Au/Mo、Na₂O/CaO、Ti/La 在二道坎银矿矿体、矿化体中的含量明显低于其在围岩和背景岩石中的含量; Pb/Zn、Pb/K₂O、SiO₂/Al₂O₃、As/Ba、As/B、As/Cu、As/Mo、As/W、As/Sn、As/Bi、Sb/Cu、Sb/Mo、Sb/W、Sb/Sn、Sb/Bi、Ag/Cu、Ag/Mo、Ag/W、Ag/Sn、Ag/Bi 在二道坎银矿矿体、矿化体中的含量明显高于其在围岩和背景岩石中的含量。本研究绘制了二道坎银矿高品位矿石 (Ag 品位>600 g/t)、中品位矿石 (Ag 品位 200 g/t~600 g/t)、低品位矿石 (Ag 品位<200 g/t)、银矿化体、构造角砾岩、围岩和背景岩石中各元素 (氧化物) 的箱线图, 结果显示: 从高品位矿石到背景岩石, Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TF₂O₃ 具有明显的下

降趋势; F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 具有明显的上升趋势; 其它元素和氧化物的变化趋势不明显。为了更好地了解二道坎银矿岩矿石中主微量元素的变化特征, 本研究选择 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、F、Cd、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、TF₂O₃、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 等元素和氧化物对数变换后的数据进行主成分分析, 通过提取累计方差约 75% 的两个主成分 (PC) 来认识二道坎银矿岩矿石主微量元素变化特征, 绘制主成分分析 PCA 双标图。在双标图上矿体、矿化体多集中在左侧, 样品中的 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TF₂O₃ 呈正相关, 并与 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈负相关; 构造角砾岩集中在右侧, 样品中的 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈正相关; 围岩和背景岩石分布在构造角砾岩的下方, 样品中 F、U、Ba、Co、La、P、Sr、Th、Ti、V、Y、Al₂O₃、Na₂O、K₂O 呈弱的正相关, 并与 Ag、As、Sb、Hg、Pb、Zn、Sn、W、Mo、Mn、Cd、TF₂O₃ 呈负相关。这些特征表明二道坎银矿岩矿石的主微量元素地球化学行为不同, 这些元素地球化学特征对化探矿致异常的识别有较好的参考作用, 部分特征可作为新的银多金属矿产勘查找矿指标。

关键词: 二道坎银矿; 地球化学特征; 找矿指标

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

蒙其古尔矿床黄铁矿的原位微量元素、硫和铅同位素组成及对成矿的意义

赵凯¹, 周义朋², 陈开运¹, 包志安¹, 张研¹, 安芳¹,
吴柏林¹, 黎广荣², 袁洪林^{1*}

1. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069;

2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点, 南昌 330013

蒙其古尔矿床产于古亚洲成矿域—天山铀成矿省—伊犁盆地铀成矿区。大地构造位置归属西天山构造带, 隶属哈萨克斯坦板块南部—中天山隆起带—伊犁微地块。该矿床是我国首个绿色千吨级的铀矿大基地的主力矿山, 建成以来开采效果相对较好。富含黄铁矿是蒙其古尔矿床的一个显著特点, 黄铁矿与铀元素的迁移沉淀之间具有密切的关系。开展黄铁矿原位微区研究对理解砂岩型铀的成矿过程具有重要科学意义。本研究针对中国西北部伊犁盆地蒙其古尔铀矿床中的黄铁矿进行了深入分析, 旨在揭示其在铀成矿过程中的作用。研究中运用了偏光显微镜、扫描电子显微镜 (SEM) 以及飞秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (Fs-La-ICP-MS) 等技术手段, 系统地分析了黄铁矿的形态特征、与铀矿物形成的时序关系、微量元素组成, 以及硫 (S) 和铅 (Pb) 的同位素特征。通过显微观察, 我们识别出了黄铁矿的四种不同形态: 黄铁矿碎屑 (Py1)、球状黄铁矿 (Py2)、细小自形黄铁矿 (Py3) 以及黄铁矿胶结物 (Py4)。其中, Py3 根据其 与铀矿物的接触情况进一步细分为与铀矿物接触的 Py3-U 和与周围岩石接触的 Py3-x。研究表明, Py1 形成于成岩作用之前, 而 Py2 和 Py3 则形成于铀成矿阶段, Py4 则出现在成矿的后期。微量元素分析结果表明, 从 Py3-U 到 Py3-X 再到 Py4, Co、Ni、As、Se、Mo、W 和 U 的含量逐渐降低。与铀成

矿过程紧密相关的 Py3-U 显示出较高的铀含量和较低的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (-53.99‰ — 50.22‰), 这暗示了其可能具有生物成因。Py3-U 和 Py3-x 的 Co-Ni 分布模式表明, 蒙其古尔矿床的形成可能受到了煤层自燃的影响, 这可能导致了较高的成矿温度。黄铁矿中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的增加归因于成矿过程中铀的衰变, 这可以作为该阶段形成黄铁矿的一个标志。然而, 由于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值的显著变化, 需要通过全面的矿物学分析来识别与成矿过程相关的黄铁矿。蒙其古尔铀矿物主要是以细小沥青铀矿颗粒或沥青铀矿胶结物形式存在的沥青铀矿。铀矿物和黄铁矿的形成过程密切相关, 其中 Py3-U 是与铀矿物同时形成的。具体来说, 在铀预富集阶段, 黄铁矿的溶解释放出 Fe^{3+} , 有助于铀 (U) 的迁移和富集。在早期成矿阶段, 黄铁矿作为还原剂, 促进了铀的沉淀。在主要成矿期, 显著的生物活动将 Fe^{3+} 和 U^{6+} 还原, 形成了新的黄铁矿 (Py2/Py3) 和细小沥青铀矿颗粒, 这些颗粒经历了多次的溶解-沉淀循环。在成矿的叠加阶段, 黄铁矿和铀矿石转变成了胶结材料。因此, 黄铁矿及其与铀矿物的相互作用共同塑造了铀成矿过程的复杂性和多样性。

关键词: 砂岩型铀矿; 黄铁矿; 微量元素; S 同位素; Pb 同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130102, 42173033, 42073051 和 41825007)

第一作者简介: 赵凯 (1994—), 博士后, 研究方向: 铀矿物学. Email: 2756582465@qq.com

*通信作者简介: 袁洪林 (1974—), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: yhlslcd@126.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

准格尔煤田魏家峁矿区 8 号煤系关键金属元素富集特征研究

石羽钧^{1,2,3}, 久博^{1,3*}, 郝惠迪^{1,3}, 黄文辉^{1,3}

1. 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

鄂尔多斯盆地油-气-煤多种能源矿产富集, 是战略性关键矿产研究的前沿地带, 系列关键金属元素于煤炭中呈现出超常富集的特征。准格尔煤田石炭纪煤层巨厚, 发育伴生 Al-Ga 矿, 存在多个 Li, REE, Nb 异常高值层位, 元素迁移规律与富集特征复杂, 但目前研究集中于官板乌素、黑岱沟和哈尔乌素矿区太原组 6#煤, 对 8#煤没有进行研究, 其关键金属分布特征、赋存状态、富集控制因素探讨有待加强。研究使用系列矿物学及元素分析手段, 对魏家峁石炭纪 8#煤层关键金属元素的赋存状态与富集特征进行了研究, 初步探讨了煤中 Li、Ga 和 REY 富集控制因素。X 射线衍射分析结果显示, 高岭石及其同质多象体是煤顶底板、夹矸主要矿物(含量约 80%), 石英为次要矿物, 个别样品中存在黄铁矿。光学显微镜结合 SEM-EDS 分析结果表明煤中矿物主要为硅酸盐(主体铝硅酸盐)、氧化物(石英、金红石等)、氢氧化物(勃姆石)、硫化物(黄铁矿、闪锌矿)等, 此外还有磷酸盐、石盐等其他矿物。富集系数(CC)用于评定煤中元素富集程度。研究区主要元素不富集, SiO₂ (8.61%)、Al₂O₃ (6.43%) 平均含量高于中国煤 (8.47%、5.98%)。微量元素方面, Li、Zn、Hf 元素平均含量为 61.85 μg/g、123.31 μg/g、6.18 μg/g。与世界煤相比, 准格尔煤田魏家峁 8 号煤富集 Li、Zn、Hf 元素, 轻度富集 Sc、Ni、Ga、Zr、Nb、In、Cs、Ta、Pb、Th 元素, Cu、Sr、Ba、Bi 亏损。REY 平均含量 102.33 μg/g, 低于中国煤 (135.89 μg/g), 但高于世界煤中 REY 均值 (68.47 μg/g), 在顶底板中呈现富集。 δEu 轻微负异常, δCe 正异常, 可能受

到物源、海侵、热液流体综合影响。 δY 呈现轻微负异常, 暗示煤中陆源碎屑主要为长英质岩石, 海侵影响有限, 符合海陆过渡相地层特点。煤层顶底板、夹矸与煤样稀土配分模式存在差异, 顶底板配分曲线在轻稀土段斜率较大, 重稀土段相对宽缓, 轻稀土分馏程度大而重稀土不明显; 夹矸配分曲线形态宽缓, 分馏程度较小; 煤样稀土元素配分模式基本一致, 为向左倾斜的左低右高型, 重稀土段斜率相对轻、中稀土段较大, 重稀土分馏程度较大, 轻、中稀土分馏程度较小; 主、微量元素垂向分布特征显示煤层顶底板、夹矸样品中 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂ 含量较高, 呈现近似的垂向分布规律, 其中 SiO₂、TiO₂ 于顶底板相对富集, 而 Al₂O₃ 于夹矸中相对富集, 暗示了酸性火山灰对研究区的影响。MgO、K₂O 与 Al、Si 也呈现良好相关性, 推测在煤层沉积过程中发生了一定程度的富 K、Mg 海水侵入, 使煤中黏土矿物普遍出现伊利石化, K 还可能与长英质火山灰输入有关。微量元素方面, 依研究区相对富集微量元素为主要参考 (Ga、Li、Zn、Hf), 划分了煤层垂向剖面的三种微量元素分布的主要类型。综上, 笔者认为准格尔煤田魏家峁矿区 8 号煤关键元素富集受到陆源碎屑、沉积环境、火山灰、海侵、低温热液等因素的综合影响, 实验结果对于揭示鄂尔多斯盆地乃至其他沉积盆地中煤系关键元素的富集机理具有重要意义, 可有效助推准格尔煤田 8#煤系矿产资源的勘探与利用。

关键词: 准格尔煤田魏家峁矿区; 8 号煤; 煤系矿物学; 煤系关键金属元素富集;

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2021YFC2902003)、国家自然科学基金面上项目 (42272201)、国家自然科学基金青年基金项目 (42302193)、北京市大学生创新创业训练计划项目 (S202411415014)

第一作者简介: 石羽钧 (2003-), 本科生, 研究方向: 关键金属成矿矿物学、高温高压矿物物理。Email: shi.yujun@foxmail.com

*通信作者简介: 久博 (1995-), 副教授, 研究方向: 煤地质学。Email: bo.jiu@cugb.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

成矿元素空间变化规律对滇中新型锂矿成因机制的指示意义

朱平平^{1*}, 蔺子健¹, 农光信¹, 刘岳², 肖凡³, 成秋明³

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

3. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082

由于成矿元素以吸附形式赋存在早二叠世倒石
头组黏土矿物中和源区来源于下伏碳酸盐地台的特征
区别于已有矿床类型, 滇中锂矿被定义“碳酸盐黏
土型锂矿床”的新类型, 具有世界级的资源量潜力,
但锂(Li)元素富集机制以及与铝土矿(Al_2O_3)的
解耦等科学问题, 尚未充分揭示, 限制了关键矿产锂
与铝土矿进一步的找矿勘查工作。本研究从空间分布
规律的角度出发, 研究成矿元素 Li 与 Al_2O_3 的空间
变化规律和相互关系, 以期揭示成矿元素的富集机制
与解耦问题。研究表明, 在剖面上, 成矿元素有
显著的周期性, Li($\times 10^{-6}$)呈现~7 km 的周期, Al_2O_3
(%)为~14 km 的周期, 地形为~21 km 的周期; 且
三者的周期为~7 km 的倍数关系, 富集矿体周期性出
现且与野外地质观察相符合, 解释了 Li 与 Al_2O_3 的
空间耦合和解耦特征, 即: 在周期起始 $7/4 = 1.75\text{km}$

处耦合, $7+7/4=8.75\text{ km}$ 处解耦; 由于高程与地壳厚
度有较强的相关关系, 高程的周期性变化, 即代表着
地壳厚度的周期性变化, 而地壳厚度的变化与地质历
史时期板块周期性聚合或单旋回震荡性聚合有关; 此
外, 该地区的锂元素勘查地球化学异常具有南北向的
分布优势, 与元古代超大陆旋回有关的南北向断裂
(例如: 绿汁江断裂、小江断裂)关系密切。综合扬
子西缘的区域地质背景和分析结果, 本研究认为, 滇
中铝土矿和新型锂矿在空间上具有周期性分布的规
律, 可能根本上受控于扬子西缘元古代超大陆聚合过
程中产生的地形特征, 而华南早二叠世海平面周期性
变化产生的氧化还原环境只是直接因素。

关键词: 成矿元素; 空间分布; 周期性; 锂矿;
关键矿产

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1001600); 国家自然科学基金重点项目(42430111); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(KKRD202221051); 云南省应用基础研究基金-面上项目(202301AT070447); 云南省高层次科技人才及创新团队选拔专项(202305AT350004)。

第一作者简介: 朱平平(1984-), 男, 湖北荆州人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师, 研究方向: 地质大数据挖掘与知识发现。E-mail: zhupingcug@qq.com。

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

贵州织金富稀土磷块岩稀土富集路径的微区结构及其地球化学约束

王漫¹, 谢宏^{1,2,3*}, 王昌建⁴, 李智¹, 杨承龙¹, 汪宇航¹

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

2. 贵州大学 国土资源部喀斯特环境与地质灾害重点实验室, 贵阳 550025;

3. 贵州省古生物与古环境全省重点实验室, 贵阳 550025;

4. 贵州省煤田地质勘查局勘查研究院, 贵阳 550023

磷块岩型稀土是近年来各国科学家们研究的热点之一, 但稀土富集过程的研究仍不够深入, 系统。为更好地开发利用这部分资源, 本文以贵州织金新华早寒武世富稀土磷矿床为例, 通过详实地野外调查, 深入剖析矿石的显微结构, 利用 XPF、ICP-MS、TOC 测试和 LA-ICP-MS 分析等手段, 精细刻画稀土的源、运、储过程。研究结果表明, 富稀土磷矿石具有典型的颗粒结构, 颗粒组分主要为生物碎屑, 其次为砂屑及团块, 颗粒的矿物成分主要为胶磷矿。胶结物多为亮晶白云石、其次为磷酸盐胶结物和硅质胶结物。胶结方式和支撑类型有两种, 一种是接触式-孔隙式胶结, 颗粒支撑; 另一种是基底式-孔隙式胶结, 杂基-颗粒支撑。根据 P_2O_5 含量及矿石结构胶结支撑类型, 富稀土磷矿石包括富稀土磷块岩和富稀土磷质岩两种类型, 它们的矿石矿物均为磷灰石, 均高度浓集稀土元素 (REY 平均含量分别为 1187.2、376.9), 且富稀土磷块岩富集程度更高。主量元素相关性系数及 LA-ICP-MS 分析结果显示, 稀土元素可能主要被隐晶质-非晶质胶磷灰石所吸附或以类质同象形式赋存于微晶-细晶磷灰石晶格

缺陷之中, 集中分布于小壳生物体内及壳壁, 其次分布于砂屑内、砂屑边缘和磷酸盐团块中, 在磷酸盐胶结物中也有富集。揭示了早寒武世繁盛一时的浅水碳酸盐台地相小壳生物死亡后, 其腔体为稀土元素富集提供了最佳容纳空间, 活体生物吸收磷质以建造壳壁的同时也富集了稀土。另外波浪潮汐作用下产生的砂屑、团块以及一些后期孔隙水也是稀土的重要载体。含矿岩系沉积地质特征、特征元素判别指标 Ni/Co 比值、自生铀 (AU)、Sr/Ba 比值及 Al_2O_3/MgO 比值、总有机碳 TOC 含量等表明, 磷-稀土的富集受控于台地边缘的生物碎屑滩古地理条件、偏氧化的氧化还原条件、优越的生物有机质条件, 尤其是环境由氧化向贫氧转化时, 更有利于成矿。富稀土磷矿的成矿作用过程主要经历了海底喷流+海水混合, 富磷-稀土水团形成阶段; 海平面上升, 磷-稀土齐迁移阶段; 环境变化, 磷-稀土同析出阶段; 成岩作用, 磷-稀土共沉淀阶段等四个阶段。

关键词: 富集过程; 微区结构; 原位地球化学; 磷块岩型稀土; 贵州织金

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 42062009、42262014); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台 ZSYS[2024]002)

第一作者简介: 王漫 (2000—), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: 1762288132@qq.com

通讯作者简介: 谢宏 (1968—), 教授, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: hxie2@gzu.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

长英质熔体中钛铁矿结晶对 W, Nb, Ta 元素的配分的影响

李家掀^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

花岗岩是地表分布最广泛的岩石类型,也是许多关键金属矿产资源的主要宿主。钛铁矿(FeTiO_3)是 Ti-Fe-O 体系中的重要矿物,在自然界中钛铁矿(FeTiO_3)与赤铁矿(Fe_2O_3)组成固熔体常包含有大量微量元素,如 Mn、Cr、Mg、W、Sn、Mo、Zn、Nb、Ta、U 和 V。钛铁矿在花岗岩中较常见,其存在与否已被用于将其分为钛铁矿系列花岗岩和磁铁矿系列花岗岩。钛铁矿系花岗岩表明其氧逸度环境较低,通常与钨和锡矿床有关。磁铁矿系花岗岩与 I 型花岗岩相似,通常与斑岩铜矿床有关。前人研究指出花岗岩中的金红石和独居石的存在会影响相关微量元素在熔体中的地球化学行为。但花岗岩中的钛铁矿研究极为缺乏,仅少量数据可用。Brumm 的研究测量了石榴石辉石中 26 种微量元素在辉石和钛铁矿之间的钛铁矿/液体分配系数,间接获得了钛铁矿的分配系数。微量元素在钛铁矿和硅酸盐熔体之间的分配,但主要是为了了解月球的早期岩浆分异。Snyder et al.报道了镁铁质岩石中钛铁矿和磁铁矿结晶过程中矿物和熔体之间的微量元素配分。但遗憾的是这些研究都集中在镁铁质岩浆上,关于长英质熔体中钛铁

矿的数据极其有限。在本次研究中,我们配置了四组不同成分的岩石粉末进行活塞圆筒实验,模拟了长英质熔体中钛铁矿结晶对 Nb、Ta、Ni、W 等关键金属的影响。实验在 1 GPa, 800~1000°C 的条件下运行,并设置了不同氧逸度条件的对照组。传统研究多关注熔体成分对钛铁矿微量元素配分的影响,而对温度(T)、压力(P)、氧逸度($f\text{O}_2$)的协同作用缺乏系统认知。实验结果表明钛铁矿仅在低氧逸度的实验中结晶并与其他矿物相平衡,而高氧逸度条件下熔体中只存在钛赤铁矿这一种矿物。钛铁矿对 W 和 Sn 的分配能力均较弱,但熔体中 W 的富集可能是其倾向于与富硅相或后期热液流体结合,钛铁矿结晶刚好促进钨矿化这一过程。对 Nb、Ta 的分配能力金红石显著强于钛铁矿,这两种矿物是控制熔体中 Nb/Ta 的主要矿物。只存在钛铁矿的实验中熔体的 Nb/Ta 略高于原始熔体,同时存在钛铁矿和金红石的实验中熔体的 Nb/Ta 明显高于原始熔体。

关键词: 钛铁矿; 长英质熔体; 配分系数; 活塞圆筒实验

基金项目: 花岗岩熔体中钛铁矿的溶解度和微量元素分配实验研究: 了解花岗岩和金属矿床形成机制的新工具 (42073058)

第一作者简介: 李家掀 (1997-), 博士, 研究方向: 地质学. Email: 2202310074@cug.edu.cn

*通信作者简介: Aleksandr Stepanov (1981-), 教授, 研究方向: 地质学. Email: aleksandr@cug.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

Enrichment of IPGE in chromite from Ural-Alaskan intrusions: a novel exploration tool

Irina Zhukova^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

China's demand for platinum-group element (PGE) mineral resources is constantly increasing, however its supply relies on external sources (Wang et al., 2022). Exploration for new sources of PGE is thus strategically important. The Ural-Alaskan complexes are major sources of PGE-bearing placer deposits globally. These types of complexes consist of zoned mafic-ultramafic intrusions characterized by a variety of platinum-group minerals (PGM) found in chromitite lenses. A world-renowned example of an Ural-Alaskan intrusions (UAI) is the Kondyor dunite-clinopyroxenite intrusion located in East Siberia. We examined the distribution of PGEs in Kondyor chromite utilizing laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) spot analyses alongside laser ablation imaging. Notable concentrations of iridium-group PGEs—Ir, Ru, and Os (IPGE) —were found within the chromite lattice of both types, with levels reaching up to ~150 ppb, while platinum and palladium (PPGE) appeared to be below the limits of detection (1×10^{-9} ~ 2×10^{-9}). PGM

inclusions, evident as spikes in LA-ICP-MS signals were rare. The normalization to pyrolite (McDonough and Sun, 1995) indicates that Kondyor chromite shows up to a 100-fold enrichment in IPGE compared to the primitive mantle. Ruthenium and Rh-enriched mantle-normalized PGE patterns of UAI chromite closely resemble those of chromite from oxidised arcs, notably contrasting with known examples of plutonic chromite and ophiolite chromitite, which in-situ PGE content is low. This makes the in-situ PGE composition of chromite a possible exploration tool for UA-type deposits. The ability of chromite to retain PGE in a large intrusion that has undergone complex thermal evolution highlights its robustness as a petrological and exploration indicator. This suggests that examining chromite PGE geochemistry could offer valuable insights, especially for intrusions formed under oxidized conditions.

关键词: Platinum group element deposits; Ural-Alaskan-type intrusions; new exploration indicator.

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

平衡热力学模拟与钨成矿作用

刘向冲^{1*}

1. 中国地质科学院地质力学研究所 矿田构造研究室, 北京 100081

白钨矿与黑钨矿是两种最重要的钨矿石矿物。其中, 黑钨矿包含钨锰矿和钨铁矿两个端元, 且钨锰矿比钨铁矿罕见。钨锰矿在热液中的溶解度与沉淀机制长期属于研究空白。H₂WO₄ (钨在热液中主要物种之一)、钨锰矿、白钨矿等热力学数据不全, 这使许多钨矿床地球化学现象 (如黑钨矿的 Fe/Mn 比值分带现象、黑钨矿与白钨矿共存等) 始终停留在唯象阶段的归纳与演绎, 难以从理论的高度解释这些现象背后的地球化学机制。作者经多年理论探索和编程计算, 首次提出 H₂WO₄ 的 HKF 参数, 更新白钨矿、钨锰矿的比热容参数等, 它们可在误差允许范围内再现不同学者在 250~800℃ 的约 70 个钨矿物水热实验数据点。在此基础上, 通过热力学模拟系统地揭示了钨锰矿、钨铁矿、白钨矿这三个钨矿物端元在溶解度与沉淀机制上的异同, 取得以下创新认识: 1. 钨锰矿的溶解度在相同条件下几倍于钨铁矿, 这阐释了钨锰矿比钨铁矿罕见的地球化学机制; 2. 热液中的 Fe/Mn 比值是影响黑钨矿

Fe/Mn 比值的主控变量; 由于形成钨锰矿或富锰黑钨矿需要高度富 Mn 的流体, 它们更容易在成矿早阶段形成, 故黑钨矿 Fe/Mn 在矿床尺度的分带现象可用来指示矿体中心; 3. 提出简单降压是白钨矿取代 (或交代) 黑钨矿的新机制; 随着成矿热液降温降压, 白钨矿比黑钨矿更容易发育在成矿系统的外带; 黑钨矿与白钨矿共存现象用于可指示矿体中心, 指导找矿勘查; 4. 白钨矿在富 CO₂ 热液中的溶解度高度依赖压力, 而对温度的变化不敏感。白钨矿溶解度对温度不敏感可促使富 CO₂ 热液将钨迁移至离源区 (如成矿母岩) 较远的地方。这种远距离迁移机制可解释脉型白钨矿或矽卡岩钨矿为什么能产在距离花岗岩较远的位置 (>1 km)。经多年积累, 作者建立了以开源 R 语言程序为基础的开放、自主的热力学计算平台, 以供国内同行共同探索热液成矿作用理论。

关键词: 钨矿; 黑钨矿; 白钨矿; 热力学模拟

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

都龙超大型锡锌铟多金属矿床铟的分布与赋存规律及富集机制

刘玉平^{1*} 叶霖¹

中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

都龙超大型锡锌铟多金属矿床, 位于扬子地块、华南地块及三江特提斯造山带交接部位, 是我国重要的锡锌铟资源基地, 以其保有铟资源量大于 5000 吨而享有“南疆铟都”之美誉。通过系统采集的地表样品, 2017 年及之前生产勘探相关数据, 基本查明都龙矿区铜-曼主产矿段 In-Ag 的分布规律。综合地表样品 In 含量分布, 勘探工程 In 的累积成矿强度平面、代表性勘探线横剖面、南北向纵剖面和不同标高平面, 表明隐伏岩体上方距顶板 600 m 之内的南北向陡倾斜 FM 断裂破碎带及其毗邻两侧, 是 In 及 Zn、Sn、Cu 等相关矿化最主要的空间分布地段。In 在不同类别矿物的分配率为, 矿石矿物 77.04%, 脉石矿物 22.96%。其中, 闪锌矿是都龙矿区中 In 主要载体矿

物, 其次为黄铜矿, 钙铁榴石和锡石亦含有一定量的 In (钙铁榴石 In 平均含量达 135×10^{-6} , 对 In 的回收率造成一定影响); 类质同象是 In 主要赋存形式, 前人偶见的 In 独立矿物仅具有矿物学意义。结合成矿流体包裹体等地球化学研究, 解析了 In 的富集机制, 总结了元素亲合性、有利的地质地球化学条件等富集因素, 认为隐伏岩体及其上方的 Fm 断裂带是主要的控制因素; In 的富集与温度存在明显关系, 中-高温形成的闪锌矿和黄铜矿相对富集 In, In 富集的有利温度 $\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 铟; 分布与赋存规律; 富集机制; 都龙; 云南

基金项目: 云南华联锌铟股份有限公司科研项目 (ZY-201807-03)

作者简介:

刘玉平 (1971-), 研究员, 研究方向: 区域成矿规律与找矿预测. E-mail: liuyuping@vip.gyig.ac.cn

叶霖 (1970-), 研究员, 研究方向: 典型矿床地球化学. E-mail: yelin@vip.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

大兴安岭南段铍矿化特征与时空分布规律

朱昱升^{1*}, 杨浩², 葛文春², 李晓峰^{1,3}, 杨进辉^{1,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

2. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130026;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

金属铍因其优异的物理性能, 广泛应用于国防及尖端科技领域, 是重要的战略性关键金属。近年来, 国际市场对铍的需求急剧增长。然而, 全球铍资源分布极不均衡, 主要集中于与高分异花岗质岩浆作用相关的花岗岩-伟晶岩型和火山岩型铍矿床, 这些矿床主要形成于中生代并与伸展构造背景有关。大兴安岭地区位于中国东北部, 分布有超过 10 万 km² 的高分异花岗岩和火山岩, 并呈现出明显的铍地球化学异常, 显示出较大的铍资源潜力。然而, 该区铍矿化研究仍处于起步阶段。本研究通过系统的野外调查与室内分析, 在大兴安岭南段确认并识别出 21 处铍矿化点, 涵盖 5 种类型: 花岗岩-伟晶岩型、石英脉型、云英岩型、火山岩型和矽卡岩型。花岗岩-伟晶岩型矿化集中于共生花岗岩边缘或侵入外围地层的伟晶岩中; 石英脉型则沿地层或早期岩体裂隙填充, 伴生花岗岩侵入体; 火山岩型铍矿脉分布于花岗斑岩外围, 并填充于凝灰岩裂隙中; 云英岩型矿化位于花岗

岩体内部, 逐渐过渡至铍矿化带; 矽卡岩型则出现在花岗岩与碳酸盐围岩的接触变质带。绿柱石为主要铍矿物, 伴有少量次生硅铍石和羟硅铍石, 以及矽卡岩型矿化中的日光榴石。为精准测定矿化事件年龄, 本研究采用原位微区云母 Rb-Sr 等时线定年技术, 获得 29 个有效年龄数据, 揭示出晚三叠世 (230~237 Ma) 和晚侏罗世-早白垩世 (128~149 Ma) 两期铍矿化事件。晚三叠世铍矿化带沿西拉木伦-长春缝合带近东西向展布, 反映古亚洲洋闭合后岩石圈伸展环境; 而早白垩世矿化带则北东向延展, 与古太平洋板块回卷方向垂直, 指示该期成矿受古太平洋板块回卷导致的岩石圈伸展控制。本研究揭示了大兴安岭南段铍矿化的时空分布规律及成矿机制, 为区域铍资源勘查和成矿模式研究提供了科学依据。

关键词: 铍矿; 大兴安岭; 成矿时代; 云母 Rb-Sr 定年;

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

大兴安岭南段拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床成因研究

杨沙沙¹, 曹明雨^{1*}

1. 内蒙古工业大学 地质工程系, 呼和浩特 010051

拜仁达坝矿床是大兴安岭南段内典型的大型-超大型银多金属矿床。野外观察和矿相学研究表明该矿床热液成矿作用可划分为 3 个阶段: (I) 铜锌多金属硫化物-石英-绢云母阶段, (II) 银铅锌多金属硫化物-石英-萤石阶段和 (III) 银多金属硫化物-石英-方解石阶段。拜仁达坝矿床中黑钨矿的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 133.5 ± 5.7 Ma, 属于早白垩世成矿, 与维拉斯托矿床成矿年龄在误差范围内一致。石英和萤石的流体包裹体显微测温显示: I 阶段均一温度为 $223 \sim 376^\circ\text{C}$, 均值 309°C , 盐度为 $3.55\% \sim 12.16\%$, 均值 6.77% ; II 阶段均一温度为 $187 \sim 326^\circ\text{C}$, 均值 249°C , 盐度为 $1.57\% \sim 9.60\%$, 均值 4.85% ; III 阶段均一温度为 $156 \sim 254^\circ\text{C}$, 均值 198°C , 盐度为 $0.53\% \sim 7.17\%$, 均值 3.39% 。激光拉曼光谱特征显示包裹体气相成分主要为 CH_4 、 CO_2 和少量 H_2S , 成矿流体属于中低温、中低盐度的 CO_2 - CH_4 - H_2O - NaCl 热液流体体系, 与维拉斯托矿床高温、高盐度流体形成显著高温、中低温的热液矿化分带特征。H-O 同位素显示, 该矿床成矿流体具有混合来源特征, 主要为岩浆热液流体晚期混合大气降水 ($\delta^{18}\text{O}_\text{水}$ $0.19\% \sim 5.73\%$, $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ $-125.9\% \sim -114.6\%$), 与维拉斯托矿床流体成分呈现从早到晚的规律性变化。石英和萤石的 C 同位素表明 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ $-13.68\% \sim -6.68\%$), 表明碳主要为岩浆来源, 在晚阶段可能由于大气降水的加入混入了地层相关物质。原位 S 同位素结果 ($\delta^{34}\text{S}$ $-3.3\% \sim 0.3\%$) 表明拜仁达坝矿床与维拉斯托矿床具有相似的硫同位素组成, 主要为岩浆来

源硫。闪锌矿 LA-ICP-MS 微量元素分析结果显示拜仁达坝矿床闪锌矿形成于中低温环境, 以富集 Fe、Mn、Cd、In、Ga、Ge 等元素, 而亏损 Sn、Se、Co、Ni 等元素为特征。闪锌矿中 In-In-Ga 成因判别图也显示, 维拉斯托-拜仁达坝矿床均属于岩浆热液脉型矿床, 后者在晚阶段混入地层相关物质。拜仁达坝矿床中含银矿物主要沉淀在 III 阶段, 银主要以多种独立银矿物形式存在, 其次以显微-次显微银 (辉锑铅银矿) 呈它形粒状或细小不混溶包裹物出溶在方铅矿中, 少量以类质同象银赋存于黝锡矿、方铅矿和黄铜矿等硫化物中。随着成矿流体的演化和温度的降低, Ag^+ 逐渐增加 Cu^+ 减少, 依次形成辉锑铅银矿、深红银矿、脆银矿、辉银矿, 当体系中 Ag^+ 逐渐消耗殆尽时, 硫锑铅矿和不含银的方铅矿等矿物逐步沉淀。总的来说, 成矿热液温度下降, pH 值上升共同控制着拜仁达坝矿床的矿石矿物沉淀顺序、银的赋存状态及银矿物种类。综上所述, 本文认为拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床是受断裂控制的与岩浆热液相关的中低温热液脉状矿床, 属于早白垩世成矿, 与邻近的维拉斯托矿床组成了一个由温度场控制的具有明显矿化分带现象的 Sn-Li-Pb-Zn-Ag 热液脉状多金属成矿系统, 拜仁达坝矿床是维拉斯托矿床的远端成矿响应。

关键词: 拜仁达坝 Ag-Pb-Zn 多金属矿床; 岩浆热液脉型矿床; 银的赋存状态; 沉淀机制; 热液脉状多金属成矿系统

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金青年基金 (2024QN04002) 内蒙古科技厅中央引导地方科技发展资金项目. 内蒙古自治区拜仁达坝银多金属矿深部三维预测评价 (2022ZY0084)。

第一作者简介: 杨沙沙 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 地下工程与地质技术. E-mail: yanmshas@163.com

*通讯作者简介: 曹明雨 (1993-), 博士, 讲师, 研究方向: 矿床学、地球化学、矿产普查与勘探. E-mail: Mingyucao@imut.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

原子尺度揭示高铟闪锌矿中铟的赋存形式及富集机制

刘文元^{1*}

1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350108

关键金属铟主要以类质同象的形式赋存于具有四面体配位的硫化物中, 少数矿床中出现独立矿物相。其中闪锌矿是铟的最主要载体, 多数研究表明含铟闪锌矿中 ($\text{In} < 2\%$) 的铟主要以固溶体的形式进入晶体结构中, 其主要替代机制是 $\text{Cu}^+ + \text{In}^{3+} = 2\text{Zn}^{2+}$ 。而一些富铟的矿床中常出现异常高铟的闪锌矿 (In 最高可达 24.7%), 其铟的赋存状态存在显著争议: 是新矿物相? 还是纳米混合物交生? 还是类质同象替代? 本文选择了内蒙古一个典型富铟矿床中的高铟闪锌矿为研究对象, 通过耦合利用 FIB-SEM (双束扫描电镜)、

AC-TEM (球差电镜) 和 APT (原子探针) 等微区分析技术, 开展原子尺度的矿物形貌、晶体结构和元素分布表征分析。研究结果表明高铟闪锌矿中的铟主要以纳米尺度的“富铟新矿物相”出溶体的形式出现, 同时提出了一种纳米尺度下铟的超常富集机制, 即溶解-沉淀和元素扩散双机制的耦合作用下实现了铟的超常富集, 并形成了一种新的纳米铟矿物自组织结构。

关键词: 关键金属铟; 赋存状态; 纳米矿物相; 富集机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230807)

第一作者简介: 刘文元 (1982-), 教授, 研究方向: 矿床矿物学、斑岩-浅成低温热液矿床、关键金属矿床. Email: 15146@163.com

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

大陆俯冲提升玉龙铜矿带地幔氧逸度

许岳^{1*}, 毕献武²

1. 崂山国家实验室, 山东 青岛 266237;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

在洋-陆后俯冲环境中, 岩浆高氧逸度(fO_2)通过抑制硫化物饱和, 促使铜富集于残余熔体与流体, 是斑岩型铜矿成矿的关键机制之一。传统“古地幔继承说”认为高 fO_2 成矿岩浆源于早期俯冲大洋氧化性流体改造的古地幔楔, 但玉龙铜矿带的最新研究对此提出挑战。古特提斯洋位于赤道半封闭环境, 发育大规模还原性沉积地层, 其“缺氧”属性与“后俯冲阶段高 fO_2 继承自古大洋”假说存在矛盾。为此, 研究聚焦以下科学问题: (1) 幔源岩浆高 fO_2 是否继承自古地幔楔? (2) 若否, 高 fO_2 源区如何形成? (3) 幔源岩浆如何控制深部成矿?

1. 幔源岩浆非源于古大洋改造地幔。通过对比古特提斯弧岩浆与新生代高镁玄武岩的地球化学特征, 发现二者氧逸度与物质来源显著差异: (1) 古特提斯弧锆石 ΔFMQ 值为负 ($-2.40 \sim -0.77$), 磷灰石 S 含量低于检测限, 反映还原性源区; 而高镁玄武岩 ΔFMQ 值达 $+1.99$, S 含量显著富集。(2) 锆石 Hf-O 同位素显示, 古特提斯弧具高 ϵ_{Hf} ($t=37$ Ma) ($9.3 \sim 13.4$) 与 $\delta^{18}O$ ($5.6\text{‰} \sim 7.9\text{‰}$), 而高镁玄武岩 ϵ_{Hf} ($t=37$ Ma) ($4.0 \sim 9.3$) 与 $\delta^{18}O$ ($4.1\text{‰} \sim 5.4\text{‰}$) 较低, 表明后者源区未受早期大洋俯冲改造。

2. 幔源岩浆源于同期大陆俯冲重熔。地球物理资料揭示, 玉龙成矿期松潘-甘孜地块向南俯冲, 与岩浆活动时空耦合。高镁玄武岩呈现典型“碳酸盐交代”特征: (1) 单斜辉石含方解石脉, 全岩 Sr、Ba、

LREE 及 LREE/HREE 比值显著偏高; (2) 单斜辉石 Ca/Al 比值升高。松潘-甘孜地块下部为新元古代铁镁质-超镁铁质岩 (低 $\delta^{18}O \approx 4.2\text{‰}$, $\Delta FMQ \approx 2.08$), 中部为被动陆缘碳酸盐层。二者混合熔融可解释高镁玄武岩的高氧逸度与碳酸盐化特征。此外, P 波低速异常体显示俯冲大陆板块地温梯度升高, 碳酸盐加入降低硅酸盐固相线, 促进上地幔熔融。

3. 陆内俯冲驱动深部成矿。传统模型认为古大洋改造地幔重熔形成含水玄武质岩浆, 活化富铜弧根成矿。本研究修正为: 俯冲的松潘-甘孜陆块物质生成高 fO_2 ($\Delta FMQ \approx 2.08$)、高温 ($1278 \sim 1287^\circ\text{C}$) 且碳酸盐化的岩浆, 注入下地壳形成氧化性岩浆房。单斜辉石-熔体温压计显示岩浆房位于莫霍面附近 ($46 \sim 63$ km), 与玉龙成矿系统初始岩浆深度-温度一致。高氧逸度岩浆触发古特提斯“还原性”弧根释放铜元素, 最终形成壳内斑岩矿床。

本研究建立陆内俯冲与碰撞型斑岩成矿系统的成因联系, 挑战了传统大洋俯冲主导的成矿理论。通过揭示大陆板块重熔对地幔氧逸度的调控机制, 为陆内斑岩铜矿勘探提供了新模型。此外, 碳酸盐参与熔融的发现拓展了成矿流体来源的认知, 对全球类似构造环境矿床研究具有借鉴价值。

关键词: 斑岩铜矿; 陆内非弧环境; 氧逸度; 大陆俯冲

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿床黄铁矿的地球化学研究 及其对铀成矿的指示

杨玉蝶^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

黄铁矿作为砂岩型铀矿床中最常见的还原介质之一, 其矿物学及地球化学特征对铀富集机理具有重要的指示作用。鄂尔多斯盆地北部纳岭沟铀矿床黄铁矿分布广泛, 与铀矿物关系密切。通过钻孔岩心观察、光学显微镜、扫描电镜、电子探针、NanoSIMS 等分析测试方法, 阐明了黄铁矿的宏观和微观形态、识别

不同期次黄铁矿、黄铁矿的地球化学特征等, 硫同位素及微量元素组成揭示了黄铁矿的成因, 进而分析了黄铁矿与铀成矿的关系及其对铀成矿的指示。

关键词: 鄂尔多斯; 纳岭沟; 黄铁矿; 硫同位素; 微量元素

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFC2906702)

第一作者简介: 杨玉蝶 (2000 至今), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 3264246009@qq.com

*通信作者简介: 陈佑纬 (1983 至今), 正高级工程师, 研究方向: 长期从事矿床地球化学工作. Email: chenyouwei@mail.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

白云鄂博超大型稀土矿床中钪的富集机制: 多期次岩浆-热液演化过程的矿物学证据

许雅婷¹, 王汝成^{1*}, 车旭东¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

钪(Sc)作为战略性关键金属,其高度分散的地球化学行为导致工业可采独立矿床极度匮乏。华北克拉通北缘的白云鄂博矿床是全球最大的碳酸岩型稀土-铌-铁矿床,赋存于中元古代白云鄂博群 H8 碳酸岩中,其成矿与碳酸岩-霓长岩杂岩体密切相关,并经历了多期构造-热液活动的叠加改造。本研究通过野外地质调查、岩相学观察,结合电子探针显微分析(EPMA)、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)等微区矿物学分析技术,首次揭示了岩浆-热液演化过程中 Sc 元素的时空富集规律。研究发现:岩浆阶段 Sc 主要赋存于钪铌铁矿($(\text{Sc}, \text{Nb}_{2/3}\text{Fe}^{2+}_{1/3})\text{O}_2$, Sc_2O_3 含量达 22%)和霓石($\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$, 含~2% Sc_2O_3)中,而热液阶段则以钪钇石($(\text{Sc}, \text{Y})_2\text{Si}_2\text{O}_7$, Sc_2O_3 含量高达 48%)为特征载体,证实条带状矿化与萤石化是控制 Sc 超常富集的关键地质过程。晚期脉状成矿阶段中,镁钠铁闪石、硅钽铌矿及铌钇矿等矿物(含 Sc_2O_3 ~1%)的 Sc 次生富集现象,揭示了流体改造对

Sc 再活化的控制机制。通过钪钇石共生的独居石与氟碳铈矿的 Th-Pb 同位素定年,获得 421 ± 6 Ma (早古生代岩浆活动)和 269 ± 4 Ma (晚古生代热液叠加)两期成矿年龄,首次证实 Sc-Nb-REE 元素具有同步矿化特征。基于矿物组合演化序列与年代学证据,创新性提出“两阶段 Sc 成矿模型”:早阶段碳酸岩浆结晶分异形成 Sc 初始富集(Sc_2O_3 含量 >20%),晚阶段热液交代作用促使 Sc 在高温流体中二次富集(Sc_2O_3 含量达 48%),其中岩浆过程的富集对 Sc 成矿起决定性控制作用。该研究不仅系统阐明了碳酸岩型矿床中稀有金属 Sc 的完整成矿过程,建立的“岩浆-热液”多期次富集与改造成矿的理论模型更深化了对关键金属富集机理的认识,为白云鄂博矿床深部隐伏 Sc 资源勘查提供了重要的矿物学依据。

关键词: 钪; 成矿过程; 白云鄂博矿床; 碳酸岩型矿床; 原位微区分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(42230809, 92262001)

第一作者简介: 许雅婷(1994-), 博士研究生, 研究方向: 碳酸岩型稀有金属成矿. E-mail: xuyating007@smail.nju.edu.cn

*通讯作者简介: 王汝成(1962-), 教授, 研究方向: 稀有金属成岩成矿矿物学. E-mail: rcwang@nju.edu.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

峨眉大火成岩省攀西钒钛磁铁矿矿集区关键金属资源

宋谢炎^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

峨眉大火成岩省内带的攀西地区攀枝花、红格、白马、太和等矿床钒钛磁铁矿矿石量约 100 亿 t, V₂O₅ 储量 1580 万 t、TiO₂ 储量 8.7 亿 t, 还蕴含着丰富的 Co、Ga、Sc、Cr 等十多种稀有金属。其中 Co、Ga 和 Sc 在新能源、半导体和航空航天材料中是不可或缺的关键金属。尽管自上世纪 80~90 年代 V 和 Ti 逐渐得到了利用, 但是 Co、Ga、Sc、Cr 等元素尚未得到综合利用。我国西南峨眉大火成岩省内带的攀枝花-西昌地区是世界最大的钒钛磁铁矿矿集区。笔者和研究生一起自 2010 年以来对攀枝花、红格、白马和太和等 4 个主要矿床开展了较系统的成因研究, 积累的大量全岩主、微量元素和磁铁矿、钛铁矿、单斜辉石电子探针和激光等离子质谱原位分析的常、微量元素数据。本文以这些数据为基础, 分析了各个层状岩体不同类型钒钛磁铁矿矿石和镁铁-超镁铁岩石 Co、Ga 和 Sc 等元素(也兼论 Cr 和 V)的含量变化和赋存状态, 发现攀西地区层状岩体的 Ga 和 Cr 主要赋存在磁铁矿中; Co 主要赋存在硫化物中, 其次是磁铁矿; Sc 则主要赋存在单斜辉石中, 其次是钛铁矿; 不同矿床中不仅各类矿石的 Ga、Co、Sc 含量存在差异, 而且, 不同矿物中这些元素的含量也有显著不同; 数十年积累的尾矿中不仅残存大量 Fe、

Ti、V, 也蕴含着大量的 Ga、Co、Cr 和 Sc。在此基础上, 初步评价了这些元素的富集规律, 探讨了攀西地区钒钛磁铁矿矿床这些元素的资源潜力。

以钒钛磁铁矿矿石 Ga 平均含量 25×10^{-6} 计算, 攀西地区 Ga 的资源量大约为 25 万 t。Ga 主要以类质同象形式赋存于磁铁矿中, 矿石中磁铁矿的 Ga 含量高于 40×10^{-6} , 最高达 120×10^{-6} 。以矿石中 Co 的平均含量 150×10^{-6} 计算(最高达 300×10^{-6}), 攀西地区块状矿石和大多数浸染状钒钛磁铁矿矿石的 Co 含量高于 150×10^{-6} , 蕴含的 Co 资源量约为 150 万 t; Co 与 Cu 良好的正相关关系表明 Co 主要富集在硫化物中。Sc 与 Ga 和 Co 不同, 全岩 Sc 与 TFe_2O_3 的关系以及单斜辉石较磁铁矿和钛铁矿高的 Sc 含量, 表明单斜辉石是主要的含 Sc 矿物, 其最高含量可达 130×10^{-6} , 但钛铁矿的 Sc 含量也高于全岩平均值。

这些分析为矿石、尾矿甚至某些岩石中这些元素的综合利用提供了重要信息。例如, 尾矿中单斜辉石相对矿石原岩更加富集, Sc 的全岩含量会有不同程度的增高。

关键词: 钒钛磁铁矿; 钴; 镓; 钪; 峨眉大火成岩省

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

中越边境龙脖子-新泉 Fe-Cu 成矿带: 基本特征、 时空格架及成因进展

陈伟^{1*}, 刘磊¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

沿中越边境哀牢山-红河剪切带分布的元古代地层, 发育了一系列矿化特征类似的 Fe-Cu 矿床, 形成长约近百公里的龙脖子-新泉 Fe-Cu 成矿带。这些矿床均具有早期 Fe 矿化(磁铁矿)和晚期 Cu-REE-Au 矿化(黄铜矿、富稀土褐帘石等)的特征; 在蚀变类型上以成矿前区域 Na 化、Fe 矿化期 Na-(Ca) 化及 Cu 矿化期钾化等为特点, 与世界典型铁氧化物-铜金矿床(IOCG)极为类似。最新定年数据表明, 其赋矿火山-沉积地层形成于~1700 Ma 和~870 Ma, 大致能与我国西南康滇地区的元古宙地层相对比, 表明该带曾是康滇地区的一部分, 晚期被新生代哀牢山-红河剪切带错段至目前位置。新近的热液矿物原位

U-Pb 定年精确限定了该成矿带主要形成于 850~840 Ma, 与区域俯冲相关的岩浆作用同期, 代表了目前世界较少报道的、与俯冲背景有关的前寒武纪 IOCG 成矿带。矿物原位 O-S-Nd-Hf 同位素分析进一步揭示, 早期 Fe 与晚期 Cu-REE-Au 成矿流体以高温岩浆热液为主, 但可能涉及到不同来源的岩浆流体。基于目前研究进展, 本文也对今后研究中值得关注的问题提出了一些展望, 包括前寒武纪俯冲型 IOCG 的独特性、区域找矿意义等方面。

关键词: 龙脖子-新泉 Fe-Cu 成矿带; 红河剪切带; 俯冲背景; IOCG 矿床

基金项目: 本文获国家自然科学基金(批准号: 42121003)、中国科学院西部交叉团队项目(编号: xbzg-zdsys-202205)和贵州省高层次创新型人才项目(编号: 黔科合平台人才-GCC[2023]039)联合资助

*第一和通讯作者简介: 陈伟(1984-), 研究员, 主要从事矿床学研究, Email: chenwei@mail.gyig.ac.cn

• 专题 17: 关键矿产成矿作用、找矿预测与勘查实践 •

粤北韶关地区风化壳型稀土矿床典型剖面研究

谭娟娟^{1,2*}, 郭敏³, 王磊^{1,2}, 肖细炼^{1,2}, 王节涛¹, 汪实³, 黄华谷³,
丁丽雪^{1,2}, 邵鑫¹, 邱啸飞^{1,2}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205;

2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205;

3. 广东省地质调查院, 广州 510080

稀土元素在高科技领域、军事工业和新能源等方面都有不可替代的作用。风化壳型(离子吸附型)稀土矿床以其储量大、易提取的特点, 受到地学界研究者的重点关注。华南地区赋存大量该类型稀土矿床, 对其开展相关研究对了解稀土富集成因及迁移转化机制等均具有重要意义。本研究对粤北韶关一带新发现的该类型矿床中三个典型风化壳剖面开展了岩石学、矿物学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学综合研究。结果表明, 含矿剖面从上到下可分为全风化层、半风化层和基岩三部分, 其中基岩主要为黑云钾长花岗岩和黑云二长花岗岩, 锆石 U-Pb 定年均集中在~160 Ma。基岩中主要含稀土矿物为磷灰石、锆石、榍石、独居石、黝帘石、磷钇矿等。矿体主要集中在半风化层, 厚度 5~10 米不等, 该层样品中稀土元素含量最高可达 2363×10^{-6} , 其中稀土氧化物浸出分量最高达

1576×10^{-6} , 整体浸出率最高可达 82%。三个剖面的 (La/Yb) n 比值均大于 10, 为轻稀土富集型矿床。稀土形态分析结果进一步表明, 新鲜基岩中的稀土形态主要为残渣态, 占比可达 80%; 而在风化壳的矿体中则是离子交换态占绝大多数, 占比可达 62%, 其次是碳酸盐结合态和残渣态, 铁氧化物态则可忽略不计。矿物学研究发现基岩中的黝帘石和磷灰石发育明显成分环带, 氟碳铈矿和独居石等矿物充填磷灰石和独居石的裂隙, 表明后期热液过程使花岗岩中的稀土元素发生了迁移, 副矿物中所含的稀土元素在热液和风化过程中释放、迁移、分异, 随后被造岩矿物风化形成的黏土矿物吸附成矿。

关键词: 华南; 稀土; 风化壳; 离子吸附型稀土矿床; 迁移富集机制

基金项目: 广东省地质勘查与城市地质专项“广东省重要成矿区稀土资源评价项目”(编号 2024032)与国家自然科学基金面上项目“北大别始太古代基底岩系的组成、地球化学特征及其对早期地壳演化的制约”(编号 42272229)联合资助

第一作者简介: 谭娟娟(1985-), 高级工程师, 研究方向: 矿物学, 矿床学. Email: tanjuanjuan@mail.cgs.gov.cn

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西秦岭花崖沟-金厂沟一带金富集规律研究

滕飞^{1*}

1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 西安 710100

西秦岭花崖沟-金厂沟一带作为陇南-凤太金矿带的重要组成部分, 地质背景复杂, 发育多期次岩浆活动与成矿作用叠加, 形成了多类型、多阶段的金矿化特征, 深入研究其金富集规律对于揭示该区的成矿机制、矿产资源潜力和找矿方向具有重要意义。研究表明, 该带内金矿化与岩浆热液活动的叠加改造密切相关, 形成两类显著差异的矿石类型: 一类为规模大但品位较低的构造蚀变岩型金矿, 另一类为高品位石英脉型金矿。石英脉型矿体进一步划分为陡倾与缓倾两种类型, 明金随处可见。其中缓倾石英脉金品位极高, 局部达 250 克/吨, 两期石英脉成矿热液具均有岩浆热液特征。矿物学分析表明, 缓倾石英脉型矿化与自然铋及铋化物(如辉铋矿、碲铋矿)紧密共生, 其矿物组合及成矿特征与华北克拉通破坏背景下燕山期金矿高度相似, 暗示深部岩浆-热液过程可能受

控于克拉通破坏相关的伸展构造体制。通过 TIMA 扫描、显微矿物学及热液矿物地球化学研究, 发现缓倾石英脉的形成与晚中生代岩浆热液活动有关, 成矿流体中富集铋元素, 其沉淀机制可能与氧化还原界面或硫化物饱和度突变相关。结合区域对比, 花崖沟-金厂沟一带的金富集规律既继承了西秦岭晚三叠世造山型金矿的构造-岩浆背景, 又叠加了燕山期克拉通破坏相关的深部热液活动, 形成多期次、多类型的复合成矿系统。这一研究为进一步理解西秦岭造山带东-西段的成矿差异及其与燕山期构造-岩浆事件之间的关系提供了新的证据, 并为陇南-凤太地区深部及外围金矿勘查的广阔前景提供了理论支持。

关键词: 花崖沟-金厂沟; 金富集规律, 岩浆热液叠加, 石英脉型金矿, 铋矿物

基金项目: 中国地质调查局项目“甘肃李子园-花崖沟金矿重点调查区调查评价(DD20242984)”, “秦岭-豫西地区战略性矿产调查(DD20240019)”和“自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(ZKKJ202414)”联合资助
第一作者简介: 滕飞(1988-), 男, 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 工程师。从事区域成矿规律和矿床学相关勘查和研究工作。E-mail: xatwenchuan@163.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

辽-吉造山带北缘变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿床成 矿物质来源与富集机制

李同宇¹, 刘福来^{1*}, 王舫¹, 王伟¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

辽-吉造山带是华北克拉通东部一条极具代表性的古元古代造山带, 该造山带经历了多阶段复杂的岩浆-变质-构造演化过程, 并在古元古代接受了大量陆壳物质的沉积。区域地质调查资料表明, 造山带北缘后炒铁河-小女寨-高岭-马屯-草河口一带分布大面积的变基性-超基性岩床或岩体, 并普遍发生 Ni-Co 矿化。然而, 该类变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿床的成矿物质来源与富集机制尚不明确。本研究选取了小女寨-高岭一带 5 个钻孔中的变基性-超基性岩(岩心)开展了岩相学及全岩地球化学研究, 并结合前人年代学以及同位素地球化学特征, 进一步探讨辽河群 Ni-Co 矿床成矿机制及物质来源。5 个钻孔除 24GL-4 外均发育不同程度的矿化, 其品位分别为: 24GL-1 (26 m, Co=0.018%~0.045%, Ni=0.130%~0.282%)、24GL-2 (10 m, Co=0.020%~0.025%, Ni=0.158%~0.315%)、24XNZ-3 (8 m, Co=0.020%~0.051%, Ni=0.110%~0.450%)、24XNZ-5 (7 m, Co=0.048%~0.119%, Ni=0.367%~0.910%)。变基性-超基性岩主体岩性为斜长角闪岩、变黑云闪长岩以及黑云(绿泥)透闪片岩, 原岩属性多为亚碱性玄武岩, 属于拉斑系列。具有较大变化的 SiO₂ (38.32%~53.51%)、MgO (6.48%~24.20%, 除 24GL-1-2 为 1.50%)、Fe₂O₃^T (9.26%~30.41%) 及 Mg[#] (40.2~82.9, 除 24GL-1-2 为 12.8)。相对富集轻稀土元素(LREE)而重稀土元素(HREE)平坦, 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 表明其源区受到了俯冲流体的交代作用。年代学特征显示北辽河

群中变基性-超基性岩的原岩形成时代为 2150~2130 Ma (n=361), 变质时代为 1910~1850 Ma (n=216)。锆石 Hf 同位素特征显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -1.30~9.18, 二阶段模式年龄(t_{DM1})为 2150~2600 Ma (n=145)。较大的 Hf 同位素差异指示着其地幔源区的不均一性, 结合其地球化学特征表明变基性-超基性岩的原岩可能来自于弧后裂谷(盆地)拉张过程中受俯冲流体交代的富集地幔。值得注意的是, 变基性-超基性岩中的 Ni-Co 元素主要赋存在镍黄铁矿、辉钴矿以及辉砷钴矿中, 主要呈块状、网脉状以及斑点状分布。该类硫化物的 S 同位素分馏程度较弱, 且具有比地幔更重的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 指示硫化物中的 S 来源于大陆地壳。综上所述, 变基性-超基性岩型 Ni-Co 矿为岩浆-变质变形-热液叠加改造的复合造山型 Ni-Co 矿。2150~2130 Ma 期间, 岩石圈地幔在弧后裂谷(盆地)拉张过程中减压熔融形成基性母岩浆, 萃取了地幔中的 Ni-Co 元素, 并上升到地壳浅部岩浆房。随后地壳富硫流体的加入使基性母岩浆达到硫饱和, 促使 Ni-Co 元素进入硫化物中, 为 Ni-Co 矿初始预富集提供了重要的成矿条件与背景。1910~1850 Ma 期间, 区域碰撞造山事件对 Ni-Co 的活化与迁移起着关键的控制作用, 并主导了 Ni-Co 的超常富集与成矿。然而, 后期热液作用对于 Ni-Co 的富集作用尚不明确, 需进一步研究。

关键词: 辽-吉造山带; 变基性-超基性岩, 镍钴矿, 物质来源, 成矿机制

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号 2022YFC2903502)

第一作者简介: 李同宇, 男, 1996 年生, 在读博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: litongyu0117@sina.com

*通信作者简介: 刘福来, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lfl0225@sina.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

巴基斯坦 Siahdik 超大型斑岩铜矿床成矿流体来源及演化: 来自流体包裹体及 H、O、S 同位素证据

王小雨^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

Siahdik 矿床是近年来在巴基斯坦 Chagai 斑岩铜矿带新发现的一例超大型斑岩铜矿床。空间上, 该矿床由西部矿化中心(S1 矿段, 3.27 Mt, 0.32% Cu, 0.12 g/t Au)和东部矿化中心(S2 矿段, 4.84 Mt, 0.48% Cu, 0.10 g/t Au)两个矿段组成。本次研究, 在详细的野外地质调查和系统的样品采集基础上, 开展了详细的岩相学观察及成矿期次的划分, 并进行了流体包裹体显微测温、石英 H-O 同位素和硫化物原位 S 同位素分析。结果显示, Siahdik 矿床热液期不同阶段石英脉体中流体包裹体主要有 3 种类型, 分别是富液相包裹体(L 型)、富气相包裹体(V 型)和含子晶三相包裹体(S 型)。流体包裹体显微测温结果表明成矿早阶段(I 阶段)、主成矿阶段(II 阶段)及成矿晚阶段(III 阶段)石英中流体包裹体均一温度分别为 344~580 °C (平均 422 °C)、314~580 °C (平均 374 °C)和 254~399 °C (平均 305 °C), 盐度分别为 0.21%~59.09% (平均 10.54%)、0.65%~56.31% (平均 9.27%) 和 0.11%~14.38%

NaCl_{eq}, (平均 3.96%), 成矿流体温度和盐度从 I 阶段→II 阶段→III 阶段逐渐降低。Siahdik 矿床成矿流体属于 NaCl-H₂O 不混溶体系, 成矿流体从 I 阶段→II 阶段→III 阶段由高温-中高盐度 NaCl-H₂O 体系向中高温-中低盐度 NaCl-H₂O 体系演化。成矿早阶段、主成矿阶段和成矿晚阶段石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{DV-SMOW}}\text{‰}$ 值分别为 -75.5‰~-57.5‰、-59.6‰~-54.1‰和 -81.7‰~-63.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{OV-SMOW}}\text{‰}$ 值分别为 8.47‰~10.49‰、8.20‰~12.22‰和 9.41‰~12.64‰, 对应成矿流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}\text{‰}$ 值分别为 3.52‰~6.37‰、3.38‰~7.40‰和 2.54‰~5.77‰。H-O 同位素研究表明成矿流体中的水主要为岩浆水。矿床不同阶段脉体中的硫化物原位 S 同位素结果显示 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化于 -3.67‰~3.89‰ 之间, 具有明显岩浆硫源的特征。

关键词: Chagai 弧; 斑岩铜矿, 成矿流体, 氢氧同位素, 硫同位素

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

有机质在造山型金成矿过程中的作用

吴亚飞^{1*}, 刘旭洋¹, 李建威¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院、地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

造山型金矿床的容矿沉积岩中发育大量与含金硫化物密切共生的有机质, 对有机质参与金成矿作用的深入研究可以为全面理解造山型金矿床的成因提供重要的科学依据。前人对造山型金矿床中有机质的成熟度、同位素和有机地球化学组成等方面开展了大量研究, 但对有机质与共生硫化物相互作用过程中金的富集、迁移和沉淀等微观地球化学行为仍不清楚, 主要原因在于有机质颗粒细小、类型复杂且难以准确获得其中微量元素的含量。在详细的野外地质、矿床学和矿物学研究基础上, 本研究利用 SXRF、NanoSIMS 和 TEM 技术, 对西秦岭造山带三叠系含碳质浊积岩、志留系石墨片岩、以及大桥与夏家店金矿床金矿石中不同类型的有机质开展了系统深入的微区成分研究。研究结果显示, 在成岩过程中, 金和砷富集在莓球状黄铁矿中的沉积有机质基质内, 当黄铁矿及有机质重结晶

时, 金和砷发生活化迁移。在低绿片岩相变质过程中, 有机质发生溶解-再沉淀形成石墨、及黄铁矿被含碳质变质流体交代的过程, 均可导致其中的金被释放出来。在热液成矿过程中, 沉积岩中分散的沥青可通过吸附或还原作用导致流体中的金离子在其边部及周边的黄铁矿中富集; 同时细粒石墨还可与含金黄铁矿共同沉淀, 引起流体中 CO_2 和 H_2S 含量的降低, 从而导致包裹石墨的黄铁矿中富含金。表生氧化过程中, 大量纳米金颗粒在有机质中发生再次富集。综上所述, 有机质可在成岩过程中预富集金, 在重结晶和变质过程中释放金, 热液过程中促进金沉淀, 表生过程中再次富集金, 这些过程促进了造山型金矿床的形成与演化。

关键词: 有机质; 黄铁矿; 造山型金矿; 西秦岭造山带

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

江西相山火山盆地中铀与铅锌成矿空间分异机制

周龙跃¹, 邓腾^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330000

热液型铀矿常共生多种金属元素矿产, 如 Co、Ni、As、Cu 和 REE 等。虽然前人在部分铀矿床中发现过铅锌矿化, 然而与其他金属元素相比, 铀矿床中的铅锌矿化的研究和勘探并未引起足够的重视。近年来, 作为世界三大火山岩型铀矿的相山矿田深部发现了大规模的铅锌矿化, 且呈现出明显的“上铀下铅锌”的空间分异特征。然而, 铀与铅锌矿化的关系, 及其成矿空间分异的机制仍不明确。本文通过野外考察、岩相学与综合矿物分析 (TIMA) 发现, 浅部铀矿体 (SUO) 中发育方铅矿和闪锌矿, 而深部铅锌矿体 (DPZO) 中也少量的有沥青铀矿和钛铀矿, 且铀矿物和铅锌矿物形成于同一热液阶段。此外, 在 SUO 与 DPZO 中存在相似的围岩蚀变, 如伊利石化、赤铁矿化、萤石矿化、绿泥石化和碳酸盐化等, 结合 SUO 与 DPZO 中硫化物和副矿物具有相似的 S-Pb-C-H-O 同位素组成, 指示 SUO 与 DPZO 形成于同一流体。通过电子探针分析和前人对于 SUO 与 DPZO 中磷灰石与绿泥矿的成分分析, 以及基于绿泥

石成分计算得的流体硫逸度, 表明成矿流体具有富硫、氧化和酸性特征。地球化学热力学模拟表明, 该性质的成矿流体可同时运移高浓度的 U^{6+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 的含氯络合物以及 HSO_4^- , 且氧逸度的降低会造成 U 先沉淀, 而 Pb-Zn 硫化物后沉淀。基于以上研究成果, 提出了相山盆地铀-多金属动力学-地球化学成矿模型: 铀-多金属成矿与流体对流密切相关, 当流体向上运移时, 流体流经红层, 大气降水参与流体对流, 流体的氧逸度增加, 进而萃取围岩中的 U、Pb 和 Zn 等多种金属元素; 当流体沿区域断裂向下流动时, 氧逸度逐步降低导致 U-Pb-Zn 沉淀并在空间上形成“上铀下铅锌”的金属分带。将该成矿模式与野外地质特征结合, 可预测铀与其他多金属矿化的位置, 对在相山盆地和其他类似火山盆地中进一步的铀-多金属矿床勘查具有重要意义。

关键词: 铀与铅锌矿化; 空间分异; 氧化还原反应; 地球化学热力学模拟; 相山火山盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目: 42362012; 2025 年江西省人才支持计划: 青年科技人才培养项目 (2025QT10)

第一作者简介: 周龙跃, 博士研究生在读, 研究方向: 热液型铀-多金属矿床; 矿床-流体地球化学

通讯作者简介: 邓腾, 副教授, 研究方向: 热液型矿床; 地球化学热力学模拟; 矿床-流体地球化学

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

脱挥发分驱动 Au 纳米颗粒高效迁移的高温高压实验研究 ——对造山型金矿成因机制的启示

王振江^{1,2*}, 赵少瑞², 李敬波³, 张艳飞², 王超², 金振民²

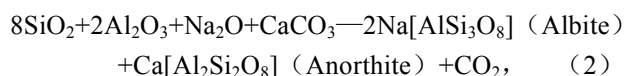
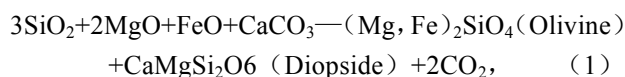
1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056203;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

3. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东 威海 264209

关键金属元素(如金)在地球深部的迁移过程与地壳浅部矿产资源的形成机制之间具有密切的地球动力学联系。普遍为大家所接受的观点认为变质脱挥发分产生的含碳等挥发份的流体促进了金等成矿物质的迁移富集,从而贡献了造山型金矿的形成。但是,造山型金矿的成矿流体如何从深部源区向上迁移进入浅部地壳,进而导致在造山运动后期应力转变过程中在多种深度(3~20 km)条件下连续成矿?前人研究普遍认为金等成矿物质需以含硫、氢或氯的络合物等形式溶解进入硅酸盐熔体或流体中从而随之迁移,即“化学迁移”,但是这种迁移模式无法解释超高品位金矿段的形成;为了解决这个矛盾,越来越多研究提出金以胶体纳米颗粒形式的高效迁移可能贡献了金的富集成矿,尤其是超高品位矿段的形成。然而,胶体金颗粒的稳定性、迁移驱动力及其与挥发份的关系仍存在较大争议。本研究在 0.5~1.5 GPa, 950~1100 °C 和 3~72 h 条件下,使用含硫化物蚀变洋壳(放置在样品下部)和方辉橄榄岩(放置在样品上部)作为初始物质进行了系统的分层反应实验研究,蚀变洋壳在变质脱挥发分反应(反应 1 和 2)之后产生透辉石、斜长石和少量橄榄石等硅酸盐矿物,而硫化物呈云雾状分布在其中;当恒温时间大于 10 h,样品上部初始不含硫化物的方辉橄榄岩区域中可观察到大量树枝状金属硫化物熔体和气孔,而且在其周边可观察到少量硅酸盐熔体(< 4 area.%)。据硫化物固相线计算模

型可知实验中硫化物的化学成分在无挥发份条件下的固相线约为 1030~1066 °C,高于实验温度,这表明实验中挥发份(碳)的出现降低了硅酸盐和硫化物相的固相线,导致其发生低程度部分熔融。电子探针分析表明相对于样品下部的硫化物,样品上部硫化物熔体中具有更低的 Fe/S 比值和更高的 Ni/S 比值,而且 EPMA 面扫结果显示上部硫化物熔体中 Au、Ag 等金属元素含量明显高于下部。根据 HRTEM 观察可知 Au 和 Ag 在样品上部主要呈纳米银金矿颗粒(粒径: 3~10 nm)赋存于硫化物熔体中。理论计算可知假设脱挥发份反应 1 和 2 产生的 CO₂ 气体具有理想气体性质时,当反应时间大于 10 h 时,实验体系内累积的气体压力(~10⁸ Pa)将远大于硫化物熔体迁移的阻滞力(10¹ Pa)。因此,纳米银金矿颗粒在变质反应过程中倾向于赋存在硫化物熔体中,在含碳变质流体驱动下随之沿孔隙/裂隙高效迁移,推测这种气体压滤作用可能驱动含矿流体沿着超壳裂隙高效迁移贡献造山型金矿从深部至浅部地壳连续成矿。



关键词: 高温高压实验; 造山型金矿, 气体压滤, 纳米 Au-Ag 颗粒

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102057), 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2024051), 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费(GPMR202413)

第一和通讯作者简介: 王振江(1989—), 副教授, 研究方向: 高温高压实验岩石学、矿床学. Email: zhenjiangwang@cug.edu.cn

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西藏雄村斑岩型铜金矿集区 1 号矿体晚期多金属矿脉的成因及指示

邓煜霖^{1*}

1. 成都理工大学, 成都 610059

西藏雄村斑岩型铜金 (Cu-Au) 矿集区位于西藏冈底斯成矿带中段南缘, 主要由 1、2 号斑岩型 Cu-Au 矿体组成, 1 号矿体发育早期的斑岩型 Cu-Au 矿化和晚期叠加的多金属 (Zn-Ag-Au-Cu±Pb) 矿化 (脉)。根据多金属矿脉中金属硫化物地球化学特征以及石英的原位 O 同位素组成, 表明晚期从岩浆出溶的成矿流体在开放性裂隙中运移, 经大气降水的强烈混合, 引起含矿流体的温度、氧逸度、硫逸度和酸碱度的改变, 导致 Zn-Ag-Au-Cu-Pb 沉淀于开放性裂隙中, 形成了晚期的多金属矿脉。根据多金属矿脉的地质特

征, 其成因类型可能属于“次浅成低温热液矿脉”, 连接了深部斑岩型矿化和浅部的中硫型浅成低温热液矿化。结合斑岩型矿化和中硫型浅成低温热液矿化的地质特征及流体性质, 认为多金属矿脉的形成指示了晚期岩浆含矿流体与碱性流体的混合促进了 Cu 的过早沉淀, 导致中硫型浅成低温热液矿床相对于斑岩成矿系统中高硫型浅成低温热液矿床普遍缺乏 Cu。

关键词: 西藏; 冈底斯; 雄村; 斑岩成矿系统; 多金属脉

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

邯邢式矽卡岩型铁矿床保存机制研究

王艳楠^{1*}

1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

矿床的产出一般会经历“源-运-储-变-保”多个阶段, 矿床学研究应兼顾矿床的形成(“源-运-储”)和变化-保存(“变-保”)两个方面。低温热年代学是定量揭示矿床变化与保存过程的有力工具。邯邢式矽卡岩型铁矿床位于华北克拉通中部, 是中国重要的高品位铁矿聚集区, 西石门铁矿是该区重要的铁矿床, 其保存过程尚不明晰。本研究在矿区岩体开展了系统的磷灰石裂变径迹和磷灰石(U-Th)/He 测年, 结果表明, 矿床经历了早白垩世快速冷却、早白垩世-新

生代早期极慢速剥露和新生早期快速剥露三个阶段的热历史, 总体的剥蚀量为~2.67 km, 小于矿床的就位深度(~3 km), 矿床被完整保存。晚中生代的慢速剥露和新生代早期的有限剥露是西石门矿床保存的关键条件, 对比研究已有矿床的保存机制, 发现特殊的构造位置在矿床保存和分布中扮演了重要角色。

关键词: 低温热年代学; 剥露, 矿床保存, 矽卡岩型矿床

基金项目: 国家自然科学基金项目(41902088)

第一作者简介: 王艳楠(1988-), 副教授, 研究方向: 构造热年代学. Email: yannanwang2012@163.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

俯冲带造山型金矿成矿流体来源

钟日晨^{1*}, 于畅¹

1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083

中生代造山型金矿的成因与环太平洋俯冲体系具有显著成因关联。除中国的金矿外, 全球该类矿床主要集中发育于俯冲带弧前增生楔(如美国西北部、新西兰等)。其典型地质特征表现为: (1) 赋存于绿片岩-角闪岩相变质带, 围岩以泥质岩、浊积岩为主; (2) 成矿流体及其硫组分主要源自地壳岩石; (3) 矿化时序晚于增生楔形成; (4) 成矿介质为变质流体。在俯冲构造体系中, 板片变质脱水形成的板片流体被认为是重要变质流体源区。现有研究表明, 地壳尺度变质作用产生的流体具备金迁移能力并可形成造山型金矿, 据此部分学者推测板片流体可能具有相似成矿潜力。新西兰 Otago 片岩带及加拿大北 Cascadia 弧前区发现的板片流体直接形成的石英脉, 为此假说提供了间接证据, 但尚未形成理论支撑。本研究通过热力学模拟, 系统计算了

300~800 °C、0.2~5.5 GPa 条件下变质基性岩与泥质岩平衡流体中金溶解度, 定量评估了常规俯冲过程中板片及上覆沉积物体系的金释放量, 以及增生楔在洋脊俯冲等热异常事件中发生变质过程的脱金效率。主要发现: (1) 金溶解度与压力呈显著负相关, 板片流体金溶解度较地壳压力下的变质流体低 2 个数量级以上; (2) 常规俯冲过程金释放量不超过 0.1×10^{-6} , 证实板片流体缺乏成矿潜力; (3) 泥质岩/浊积岩较蚀变洋壳具有更高金背景值; (4) 增生楔内造山型金矿化需洋脊俯冲等热事件驱动, 通过高温低压变质作用促使其中的泥质岩和浊积岩释放富金流体。

关键词: 造山型金矿; 俯冲带, 增生楔, 变质流体金溶解度

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222303)

第一作者简介: 钟日晨(1986-), 教授, 研究方向: 热液成矿作用热力学模拟, Email: zhongrichen@126.com

*通信作者简介: 钟日晨(1986-), 教授, 研究方向: 热液成矿作用热力学模拟, Email: zhongrichen@126.com

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

西藏冈底斯斑岩型铜矿床时空分布规律及控制机制

王旭辉^{1*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

冈底斯铜矿带位于青藏高原南拉萨地块, 发育了侏罗纪斑岩型 Cu-Au 矿床和中新世斑岩型 Cu-Mo 矿床, 这两种矿床呈现南北分带现象, 分别出露于南部侏罗纪岩浆弧和北部侏罗纪弧后区域。南拉萨地块南部侏罗纪弧岩浆岩与北部侏罗纪弧后岩浆岩相比, 具有更高的 V/Yb 比值、Cu 含量、 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值和锆石 Eu/Eu^* , 这表明南带侏罗纪弧岩浆岩具有更高的氧逸度 ($f\text{O}_2$) 和 H_2O 含量, 这是因为侏罗纪新特提斯洋壳的陡俯冲导致洋壳脱水释放出的高氧逸度流体在

弧下地幔聚集, 使得南带弧岩浆岩具有高的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量。南带侏罗纪弧岩浆岩高的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量抑制了硫化物在岩浆演化过程中过饱和, 有利于侏罗纪斑岩型矿床的形成。相反, 北带侏罗纪弧后岩浆岩具有低的 $f\text{O}_2$ 和 H_2O 含量, 导致硫化物的过饱和, 进而形成富含硫化物的下地壳, 为中新世斑岩型矿床提供了成矿物质。

关键词: 斑岩型矿床; 冈底斯; 氧逸度; 水含量

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

中国东北中生代铜成矿作用

曹延¹, 舒启海^{1,2*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)深时数字地球前沿科学中心, 北京 100083

中国东北地区中生代古太平洋板块俯冲作用形成了大量以钼为主的斑岩型矿床,但相较于全球其他俯冲带,该区斑岩铜矿床极为稀少,其成因机制尚不明确。本文对大兴安岭北段新发现的宝泉斑岩铜矿床含矿与贫矿岩体开展年代学与地球化学研究,为揭示岩浆属性对铜成矿的机制提供新证据。锆石 U-Pb 定年显示,宝泉矿床含矿石英闪长斑岩与贫矿正长花岗岩侵位时代分别为~115 Ma 和~312 Ma。含矿岩体具有高硅($\text{SiO}_2=62.7\%\sim63.9\%$)、准铝质-弱过铝质($\text{A/CNK}=1.00\sim1.09$)及富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.82\%\sim8.28\%$)特征,富集 LILE (K、Rb、Ba、Sr、U)而亏损 HFSE (Th、Nb、Ta、Zr)。全岩具有初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值($0.7049\sim0.7067$)与正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($+1.9\sim+2.0$),结合锆石正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+4.9\sim+13.6$),指示母岩浆主要源自受古太平洋俯冲板片物质交代的富集地幔,并经历下地壳混染后演化成了埃达克质特征。贫矿岩体则以高硅($76.4\%\sim78.0\%$)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=8.30\%\sim8.82\text{ wt}\%$)、高碱钙比值($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}=26.5\sim39.4$)为特征,显著亏损 Sr($40.6\times10^{-6}\sim82.4\times10^{-6}$)、Ba ($348\times10^{-6}\sim498\times10^{-6}$)而富集

Zr+Y+Ce+Nb ($206\times10^{-6}\sim277\times10^{-6}$),显示 A 型花岗岩属性。其正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+4.8\sim+20.1$)与新元古代二阶段 Hf 模式年龄(418~1017 Ma)表明岩浆源于新生地壳并受幔源物质影响。相较于贫矿岩体(锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 均值 34.7、Eu/Eu 均值 0.21、Ce/Nd 均值 15.4、 ΔFMQ 均值+0.6),含矿岩体具有显著升高的锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ (均值 588)、Eu/Eu(均值 0.62)、Ce/Nd(均值 21.9)及 ΔFMQ 值(均值+1.2),与东北及全球斑岩铜矿特征一致。含矿岩体低 Zr 含量(均值 151 ppm)、Sr/Zr 比值(均值 7.96),高 Sr/Y 比值(78.0~130)、低 Dy/Yb 比值(1.86~2.03)及弱 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.79\sim0.96$),表明岩浆结晶过程以锆石-角闪石分异为主,暗示高水含量特征。综合区域成矿岩体资料,提出高氧逸度、富水岩浆经高压分异是铜成矿的关键控制因素。此类岩体主要分布于中生代地壳显著增厚的东北地区北缘,具有重要找矿潜力,应作为未来勘查的重点靶区。

关键词: 宝泉斑岩铜矿; 岩浆属性; 埃达克质特征; 成矿潜力

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

基于机器学习的闪锌矿微量元素判别铅锌矿床类型

陈忠元¹, 任涛^{1*}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650000

为了解闪锌矿微量元素特征对不同成因矿床类型是否能够进行有效判别, 本研究系统收集了全球典型的沉积喷流型、密西西比河谷型、火山块状硫化物、矽卡岩型和浅成低温热液型铅锌矿床中 3117 条闪锌矿的 12 种微量元素含量数据 (Mn、Fe、Co、Cu、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Pb), 使用基于 Tree-structured Parzen Estimator (TPE) 优化的支持向量机机器学习算法建立了闪锌矿微量元素分类模型, 并使用 SHAP (SHapley Additive exPlanations) 方法解释预测模型和进行特征重要性分析。结果表明, 经

优化的 TPE-SVM 模型在测试集上展现出优异的分类能力, 准确率、召回率和 F1 值均超过 0.97。通过 SHAP 解释发现闪锌矿中 Mn、Ge、Co 为矿床成因类型判别三大关键元素。本文建立的闪锌矿微量元素判别指标体系, 不仅为矿床成因鉴定提供了新的技术手段, 更可为复合成矿系统解析、隐伏矿体预测等复杂地质问题提供创新解决方案。

关键词: 闪锌矿; 微量元素; 机器学习; TPE 优化算法; SHAP 算法

基金项目: 国家自然科学基金 (42163005)

第一作者: 陈忠元 (2000-), 男, 研究生, 地质工程专业。Email: 2820904039@qq.com

*通讯作者: 任涛 (1982-), 男, 教授, 主要从事矿床学、地球化学研究。Email: rentao@kust.edu.cn

• 专题 18: 造山带多金属成矿作用 •

滇西北羊拉铜多金属矿床白钨矿 U-Pb 年代学及地球化学特征

应元灿^{1*}, 李文昌¹

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093

三江成矿带是特提斯-喜马拉雅成矿带的重要组成部分, 蕴藏着众多贵金属和贱金属矿床, 包括一系列大型斑岩和矽卡岩型 Cu-Au 多金属矿床。而位于该成矿带内的羊拉铜矿床在近年来的勘探过程中新发现了一批 W-Sb 矿体, W-Sb 成矿机制及其与铜矿体的成因关系成为亟待解决的科学问题。白钨矿是羊拉矿床中唯一的含钨矿物, 在里农矿段发深部广泛发育。通过对里农矿段不同中段的白钨矿开展系统采样和地球化学分析, 从岩相学和白钨矿结构特征上将其划分为 3 类。原生白钨矿 (Sch-I) 在 CL 图像中一般呈现震荡环带, REE ($3.8 \times 10^{-6} \sim 142 \times 10^{-6}$) 含量最低, Sr ($604 \times 10^{-6} \sim 1480 \times 10^{-6}$) 含量最高。次生白钨矿 (Sch-III) 通常作为原生晶体上的叠印边缘沉淀, 其 REE ($145 \times 10^{-6} \sim 1071 \times 10^{-6}$) 和 Sr ($376 \times$

$10^{-6} \sim 793 \times 10^{-6}$) 含量最高。相比之下, Sch-II 属于从原生到次生的过渡阶段, 其 REE 和 Sr 含量处于中等含量。Sch-I 的特征是富含 LREE, 在球粒陨石稀土配分模式中呈现正 Eu 异常, 而 Sch-III 则呈现 MREE 富集模式, 具有弱正 Eu 异常。白钨矿的 U-Pb 定年 (30.3 ± 1.5 Ma) 表明, W 矿化与羊拉矿区三叠纪花岗岩的成因无关, W 矿化可能与新生代金沙江断裂带的隐伏岩浆活动和构造热事件有关。鉴于白钨矿具有较高的 $87\text{Sr}/86\text{Sr}$ 比值 ($0.71771 \sim 0.72229$), 且明显高于三叠纪花岗岩和赋矿大理岩, 我们认为 Sch-I 的地球化学特征继承自初始成矿流体, 很可能有区域古老基底释放的变质流体参与。

关键词: 羊拉; 白钨矿; U-Pb 定年; 地球化学

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

氦气盖层的分子动力学模拟

关平^{1*}, 宋丹丹¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

氦气在气藏中的封闭机制涉及复杂的地质和物理过程, 是氦气资源得以保存的关键因素。氦的分子尺寸、质量相对于其他气体分子更小, 扩散系数高, 易散失, 需要密封性更好的盖层。那么, 微纳米尺度的盖层孔隙中氦气的密封机制究竟是什么? 环境条件、孔隙尺寸有何影响? 不同岩性的盖层对于氦气的密封效果的具体差异是什么? 伴生气体和孔隙水对氦气的封存的影响是什么? 这些科学问题尚未有明确的理论与实验答案。分子动力学可以为上述问题提供解决方案。选取膏岩(石膏、岩盐), 泥页岩(高岭石、蒙脱石), 致密碳酸盐岩(方解石)等围岩材料建立多种盖层矿物层状孔隙模型, 模拟氦气在上述不同盖层孔隙中的吸附、扩散、流动行为, 再加入甲烷和水, 考察其对氦气运移影响。结果表明, 在实际

地质条件下, 膏岩层是氦气最好的盖层, 其次为泥页岩, 最后是致密碳酸盐岩。在总气压恒定的情况下, 随着气体中甲烷含量的增加, 氦气的扩散逐渐减慢, 因此, 纳米孔隙中的甲烷分子对氦气的扩散存在明显的阻碍作用; 随着氦气扩散的加快, 其受到甲烷的影响越明显, 扩散系数减小的幅度越大。当含水量较少时, 氦气在五种矿物孔隙中的扩散系数有明显差异; 含水量超过 30% 后, 孔隙结构影响就变得不明显; 随着含水量的升高, 氦气的扩散系数明显降低, 当含水量超过 90% 时, 氦气扩散系数接近于 0。结合赋存状态: 含水量超 90% 后, 氦气以孤立气团存在, 难以在孔隙中连通及扩散。此时盖层的密封效果最好。

关键词: 氦气; 分子动力学、盖层、扩散

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

沉积有机体系的氢逸度表征方法及意义

吴嘉^{1*}, 方朋², 王远³

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 102200;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214216

沉积盆地深层的氢逸度水平(氧化还原条件)往往由区域地质背景的无机矿物组成决定,并且能够影响沉积有机物,特别是小分子有机物的地球化学行为。对应体系中,部分小分子有机物之间可达到准热力学平衡,并且与体系的氢逸度水平相关。在自然体系中,此类平衡中的高活性有机质无法以游离态形式稳定存在,常规检测中无法识别。但是在地质有机聚合物中,包裹态的小分子烃类有更稳定的保存环境,活性分子可以长期保存其中。因此,建立沥青质基质中包裹烃中的烯烃与烷烃比值与氢逸度之间的相关性,有助于理解沉积有机质系统中氢逸度的变化。在本研究中,利用分散固相萃取法,对四川盆地西北部

的低熟寒武纪沥青质样品中的正烷烃和正烯烃进行了鉴定。在水热条件下,它们会发生裂解反应和烯烃-烷烃的相互转化反应。值得注意的是,从 C16 到 C18 的正烷烃分布主要受烯-烷转化反应的控制,并且对应的烯-烷比对体系氢逸度的响应灵敏。这表明基于样品所处的温压条件,该反应可以用来估算地层的体系氢逸度。该方法通过沉积有机质体系的固体样品即可准确评估地层氢逸度,对微量的氢逸度水平的计算响应灵敏,为地层氢逸度的普查工作提供了一种有效的补充方法,可以为进一步理解氢在沉积盆地的地球化学行为提供新的证据。

关键词: 氢逸度; 包裹烃; 烯烷比;

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

天然氢渗漏机理探讨

王国建^{1*}

1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所 实验研究中心, 江苏 无锡 214126

天然氢是国际能源气体理论与勘探实践的新热点; 全球已经发现 140 余处天然氢气气苗, 中国在松辽、渤海湾、苏北、四川、鄂尔多斯、柴达木、楚雄等盆地的油气井中先后发现了天然氢气气苗; 在商都、腾冲、即墨等地的温泉中也有发现。在三水、塔里木、松辽等盆地等地表壤气中也发现了高浓度氢气异常。预示着中国具有良好的天然氢勘探前景。目前, 对于天然氢的勘探方法, 主要有地球物理、地球化学、遥感技术。尽管基于微渗漏理论的地球化学勘探技术作为天然氢勘探的一项重要方法已在国内外得到应用, 但是对于天然氢渗漏机理研究甚少, 天然氢渗漏与天然气渗漏机理之间的差异性不清, 导致勘探上对天然氢有利区的确定存在争议, 因此深化天然氢渗漏及其近地表地化异常机理的认识是天然氢勘探的重要科学议题之一, 可为地球化学勘探技术应用提供理论指导。针对上述问题, 以高含氢气藏垂向微渗漏理论模型为基础, 气藏结构要素主要考虑高含氢气藏、直接盖层及上覆地层、第四系沉积层, 运移通道上只考虑地层中的孔隙以及优势路径。在室内研制天然氢气垂向微渗漏的三维模拟实验装置, 对高含氢气气藏通过直接盖层及上覆地层、第四系沉积层微渗漏过程进行实验模拟, 研究了氢气在盖层内渗漏的分散晕, 渗漏氢气和渗漏烃类的关系, 地表氢气异常与烃类异常的关系。同时, 以松辽盆地北部林甸区块断

陷层火成岩基底区新胜 1 井为例, 研究井中天然氢气与烷烃类的关系, 以及地表氢气异常与烃类异常的关系。模拟实验和已知区实测结果表明, 由于氢分子半径与甲烷分子半径的差异, 在盖层及上覆地层渗漏通道相同的情况下, 氢气渗漏与甲烷渗漏具有很大程度差异的分布特征, 甲烷对氢气有稀释作用, 但同时值得注意的是, 氢气和甲烷的渗漏也具有一定程度相似性; 同一渗漏源的氢气和烷烃渗漏在地表形成的氢气异常与甲烷异常并不处于相同位置, 地表氢气异常和甲烷异常相关性较弱, 也说明了甲烷对氢气具有稀释作用。前人研究认为, 油藏和天然气藏对富氢气体有稀释和破坏作用, 未来天然氢气藏的勘探应该避开油气充注的有利区。通过本次研究一方面验证了油藏和天然气藏对富氢气体有稀释和破坏作用, 但同时又指出同源的氢气和甲烷的渗漏也具有一定程度相似性, 因此, 建议天然氢气藏的勘探不能完全避开油气充注的有利区, 天然气共伴生的氢气也应是勘探重点关注的对象。另外, 对于天然氢气勘探而言, 地球化学勘探指标应用需结合地质、地球物理资料具体分析, 实现综合勘探, 为天然氢赋存的有利区确定提供可靠地球化学依据。

关键词: 天然氢; 渗漏机理; 模拟实验; 已知区实测; 有利区

基金项目: 中国石化基础前瞻项目“天然氢气形成富集机理及资源潜力”和国家自然科学基金项目“近地表轻烃来源判识模型及其油气勘探应用基础研究”(41872126)

第一作者简介: 王国建(1972-), 研究员, 研究方向: 地球化学勘探及石油实验地质研究, Email: wanggj.syky@sinopec.com

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

地热系统与氦气、氢气协同成藏的地质耦合机制

王帅^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430078

地热系统作为深部流体活动的重要载体, 与氦气(He)、氢气(H₂)等非传统资源的形成和富集存在密切的地质耦合关系。本研究基于典型地热区的地球化学与同位素分析, 结合构造-热演化模型, 揭示了地热流体中 He 与 H₂ 的成因机制及其协同运移规律。结果表明: (1) 壳幔脱气作用与岩石水岩反应是 He、H₂ 的主要来源, 其中高 ³He/⁴He 比值指示幔源贡献, H₂ 则与蛇纹石化及有机质裂解密切相关; (2) 地热活动通过断裂网络驱动流体垂向运移,

形成 He-H₂-地热流体的多相耦合输运模式; (3) 高温地热区(>150 °C) 更有利于 H₂ 的生成与保存, 而中低温地热系统(80~120 °C) 则可能成为氦气富集的有利靶区。研究提出“地热-稀有气体-氢气”三位一体的资源评价框架, 为深部清洁能源协同勘探提供理论支撑。

关键词: 地热系统; 氦气成藏; 氢气生成; 壳幔脱气; 水岩反应

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

柴达木盆地尖北气田氦气地化特征、 成因来源及成藏主控因素研究

王晓波^{1*}, 李剑¹, 王晓梅¹, 田继先¹, 徐朱松¹, 国建英¹, 崔会英¹

1. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 石油地质实验研究中心, 北京 100083

氦气是一种重要的战略稀缺资源, 因其特殊的物理化学性质, 在航天、国防、高端制造、医疗和科研等领域具有不可替代性。尖北气田位于我国西北部柴达木盆地柴北缘, 氦气平均含量超过四川盆地威远气田平均氦含量, 是目前国内评价发现的氦气含量分布最稳定的富氦气田。系统研究表明: (1) 尖北气田氦气含量分布范围较窄, 氦气平均含量超过四川盆地威远气田平均氦含量, 是国内目前评价发现的氦气含量分布区间变化范围较小、分布相对最稳定的富氦气田, 具有显著的工业利用价值; (2) 尖北气田氦气同位素比值表明氦气以壳

源放射性衰变为主, 氦气主要来源元古代古老基底花岗岩及片麻岩中铀钍等元素衰变; (3) 氦气成藏主要受元古代花岗岩及片麻岩氦源、基底断裂与沉积层断裂构成复合输导体系、烃类等载体气的携带、区域性新近系优质泥岩盖层封盖等因素控制; (4) 未来柴达木等盆地勘探应聚焦大型含气盆地古老基底花岗岩及片麻岩分布区、基底断裂带周缘的古隆起区。

关键词: 柴达木盆地尖北气田; 氦气、地化特征、成因来源、成藏主控因素

基金项目: 国家重点研发项目课题四 (2021YFA0719004)

第一作者简介: 王晓波 (1982-), 高级工程师, 研究方向: 氦气检测技术、资源评价与富集成藏规律, 天然气地球化学与成藏研究. Email: wangxb69@petrochina.com.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

中国克拉通盆地氦气成藏分布特征及勘探方向

彭威龙^{1*}, 刘全有², 张继标¹, 周波¹, 朱东亚¹, 马安来¹, 孟庆强³

1. 中国石化石油勘探开发研究院 西北地区勘探开发研究中心, 北京 102260;

2. 北京大学 能源研究院, 北京 100871;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 科学技术实验研究中心, 北京 102260

基于对我国三大克拉通盆地天然气中氦气相对含量及同位素组成特征, 结合地质背景与典型气藏分析富氦天然气地球化学特征、成藏主控因素及有利勘探区。研究表明: 克拉通盆地富氦气藏中氦气主要为典型的壳源成因, 深大断裂发育地区氦气具有相对较多的幔源贡献; 氦气源岩主要为花岗质基岩以及富含铀钍的泥页岩和铝土岩; 富氦天然气中氦气与氮气相对含量具有一定的正相关关系, 氮气含量较高的气藏中氦气相对含量一般较高。氦气形成主要受到源岩铀钍含量、源岩规模以及时间的控制; 氦气运移受到构造运动控制明显, 尤其是断裂活动、地层抬升剥蚀作用。地层流体是氦气运移载体, 主要包括地层水以及烃类气体等。氦气在地层水中运移脱溶符合亨利定律,

流动的地层水在富氦天然气运聚中可以起到“提氦泵”的作用而促进气藏中氦气富集, 膏盐岩和泥页岩是富氦天然气的优质盖层。富氦天然气勘探需要优先考虑大气区, 寻找大气田。具有大型隆起或者斜坡构造背景的圈闭, 邻近规模分布的高含铀钍矿物岩石, 适宜的构造运动是富氦天然气成藏的关键。氦气勘探普查可以重点关注氮气相对含量高的气藏。综合分析认为塔里木盆地巴麦地区、塔北地区, 鄂尔多斯盆地伊盟隆起、渭北隆起以及伊陕斜坡南部地区, 以及四川盆地川西南地区、川中地区是富氦天然气有利勘探区。

关键词: 氦气; 地球化学特征; 成藏主控因素; 提氦泵; 克拉通盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42472220, U20B6001, 41902160, U19B6003, U21B2063); 中国博士后科学基金项目(编号: 2019M650967, 2020T130721) 联合资助。

作者简介: 彭威龙(1988-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 博士, 主要从事天然气地质与地球化学研究.E-mail: pengwl26@yeah.net.

通信作者: 刘全有(1975-), 男, 山西朔州人, 特聘教授, 博士, 主要从事天然气地质与地球化学研究.E-mail: qyouliu@sohu.com.

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

塔里木盆地阿满过渡带氦气地球化学特征与来源判识

李朋朋¹, 刘全有^{1*}, 刘佳润¹

1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871

氦气是新型战略性能源矿产。壳源氦是目前工业开采的主要类型。本研究以塔里木盆地阿满过渡带油气田为例, 基于碳-氮-氦同位素及气体组分相关性, 系统地探讨了壳源氦气来源。多个油气田奥陶系碳酸盐储层中氦气含量普遍低于工业开采阈值 (约 0.05%), 然而哈得逊石炭系砂岩储层中氦气含量普遍高于 0.1%, 最高约 0.7%, 属于富氦天然气。不同气田的氦同位素并无显著差异, 均为 10^{-8} 量级, 指示壳源成因。与奥陶系碳酸盐储层完全不同的是, 石炭系砂岩储层中氦气伴生组分主要为氮气, 且二者呈显著正相关性。而且, 随着氮气含量的增加, 氮气的氮同位素呈同步增长的趋势。石炭系 CO_2 与 CH_4 的碳平衡系数 ($\alpha(\text{CO}_2\text{-CH}_4)$)

反演温度 (最高约 460 °C) 明显高于流体包裹体均一温度 (110~130 °C), 然而奥陶系两者温度大致相当。而且, 石炭系反演温度与甲烷与乙烷的碳同位素的差值、以及氮气、甲烷、氦气含量呈现显著的相关性, 因此, 推断哈得逊石炭系富氦天然气的形成需要深部富氦流体的充注。基于甲烷碳同位素组成、基底挥发分体系甲烷与氮气两者之间的相关性、以及气藏的探明储量, 评估深部富氦流体的主要成分为 N_2 和 CH_4 , 平均占比分别约为 80% 和 14%。

关键词: 氦气; 阿满过渡带、来源判识、伴生组分相关性

国家自然科学基金项目 (42203027, 42141021, U2244209)

第一作者简介: 李朋朋 (1991-), 助理研究员, 研究方向: 氦气富集成藏。Email: lipengpeng@pku.edu.cn

通讯作者简介: 刘全有 (1975-), 教授, 研究方向: 深部流体作用下有机-无机相互作用与油气成藏、稀贵气体富集成藏、CCUS。Email: liuqy@pku.edu.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

俯冲地表水转化为地球深部地幔中天然氢气的关键媒介： 铁氢化物 (FeH_x)

陶仁彪^{1,5*}, 朱金涛^{2,1,3}, Takayuki Ishii³, Daijo Ikuta³, 徐文博¹, 张立飞²,
苏宇通^{4,1}, 刘润超^{4,5}, 金之钧^{4,5}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 日本冈山大学, 鸟取 100193;

4. 北京大学 能源研究院, 北京 100871;

5. 北京大学鄂尔多斯能源研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

地球深部释放的氢气 (H_2) 是一种潜在的天然清洁能源, 但其在深部地幔中的形成机制仍不明确。本研究利用大腔体压机模拟实验, 结合原位同步辐射 X 射线衍射技术, 模拟了俯冲板片在上地幔温度压力下, 水 (H_2O) 与地幔矿物、金属铁 (Fe^0) 之间的相互作用。实验结果表明, 随着压力和温度的升高, H_2O 能与 Fe^0 、硅酸盐矿物发生反应, 形成富铁镁的硅酸盐矿物 (如顽火辉石、橄榄石及其高压多型) 和铁氢化物 (FeH_x) ($0 < x < 1$)。在高温条件下, FeH_x 随压力的降低逐渐分解为 Fe^0 , 并同时释放出大量

H_2 。综合实验结果和板块构造地质模型, 我们认为 FeH_x 在俯冲水向地球深部 H_2 的转化过程中起着关键作用。 FeH_x 在深部地幔物质上涌过程中的分解可能是超深金刚石包裹体或地幔捕虏体中 $\text{H}_2 \pm \text{CH}_4$ 流体和金属铁包裹体形成的原因。 FeH_x 分解释放的 H_2 沿深大断裂系统或通过岩浆脱气向上运移, 或许参与了地球浅部天然 H_2 渗漏或储层的形成。

关键词: 天然氢气; 铁氢化物, 壳幔相互作用, 高温高压, 实验地球化学

基金项目: 1、中国石油天然气集团公司-北京大学基础研究战略合作项目 2、地球多圈层碳氢化物的富集理论项目支持 (THEMSIE04010102)

第一作者简介: 朱金涛 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 变质地质学。Email: jintao.zhu@hpstar.ac.cn

*通讯作者简介: 陶仁彪 (1984-), 研究员, 研究方向: 深部碳氢循环。Email: renbiao.tao@hpstar.ac.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

天然氢形成与富集机制研究

韩双彪^{1*}, 王成善²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

未来能源格局中低碳甚至零碳的能源将成为重要组成部分, 氢气燃烧热值高于传统化石能源, 而天然氢气是一种真正零碳的极具发展前景的清洁能源, 形成机制多样且广泛分布, 具有广阔的发展前景。天然氢气富集成藏是一个包括“氢源”、“运移通道”、“储层”及“盖层或屏障”在内的动态变化过程, 但天然氢气富集成藏理论相关研究仍处于探索阶段。天然氢气发现或许自 1888 年就已开始, 尤其是近年来马里天然氢气成功商业开发、美国及澳大利亚等天然氢气专探井的布置。Science 正刊相关报道与文章均昭示着天然氢气成为了全球重要的研究热点。本团队开展的实际研究表明沉积盆地有着高含量的天然氢气, 利用实验测试与微观数值模拟技术, 结合地质资料对沉积盆地中天然氢气分布、储层特征、成因来源、

运移通道及赋存机理进行了深入研究, 最终明确了沉积盆地中天然氢气吸附机理, 并建立了天然氢气动态赋存模型, 吸附态天然氢气或许是深部地下天然氢气主要赋存状态。在未来一个较长时期, 天然氢气富集成藏理论研究将是重要内容, 考虑消耗与逸散在内的天然氢源通量预测评价、天然氢气赋存相态动态转化机理研究、天然氢气扩散运移机制将会是天然氢气领域所需要面临的三个关键问题。由于氢气特性, 未来天然氢气系统理论与勘探评价需要多学科交叉融合, 坚持科技攻关, 加强开展国际合作, 增进学术交流, 促进人才培养。

关键词: 天然氢气; 富集成藏; 勘探开发; 研究进展; 趋势展望

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“松辽盆地徐家围子断陷深层氢气来源及成因机理研究”(42072168)

第一作者简介: 韩双彪(1987-), 男, 副教授、博士研究生导师, 天然氢气地质评价、非常规油气成藏机理。E-mail: bjcuphan@163.com。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

鄂尔多斯盆地大牛地气田氦气成藏特征及其贫化主控因素

王杰^{1*}, 安川², 马亮帮¹

1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化华北油气分公司, 郑州 450006

摘要:近年来, 相继在杭锦旗东胜气田、大牛地气田等天然气中发现了一定含量的氦气, 但大牛地气田氦气平均含量仅为东胜气田氦气平均含量的 1/4 左右, 那么在盆地基底和构造背景相似的情况下, 究竟是何因素造成二者氦气含量差异如此之大, 值得深入研究。为此, 基于天然气伴生氦气地球化学特征与氦气成藏关键要素的系统分析, 明确大牛地古生界天然气中氦气含量介于 0.0001%~0.15%, 为低氦-中氦气田。相对于下古生界, 上古生界氦气含量相对较高, 纵向上从下往上氦气含量逐渐增加, 显示出浅部相对富集的特征。研究发现大牛地古生界氦气为典型壳源氦, 上古生界潜在氦源岩所生成的氦气成藏贡献很小, 氦气主要来源于盆地基底的太古宇-中元古界变质岩-花岗岩系。无论是基底岩石类型、矿物组成, 还是其厚度及 U、Th 含量, 大

牛地与杭锦旗基底氦源岩特征都比较接近, 推断出基底氦源岩特征不是造成大牛地和东胜气田氦气含量差异如此之大的原因。大牛地仅发育一条二级基底深大断裂, 且在燕山-喜山期活动较弱, 造成次一级断裂活动也较弱, 氦气由基底氦源岩向上运移以及纵向输导和横向调整都缺乏有效通道, 氦气与常规气成藏关键要素组合的时空配置不匹配, 氦气仅靠扩散进入大牛地古生界气藏中, 造成大牛地气田氦气含量偏低, 进而系统剖析了大牛地气田氦气贫化的主要控制因素为基底深大断裂及次一级断裂不发育且活动强度弱、氦气与常规气成藏要素组合不匹配、缺乏有效输导体系、浓度扩散。

关键词: 氦源岩; 断裂发育; 贫化主控因素; 大牛地气田; 鄂尔多斯盆地

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

多圈层作用与中国东部幔源氦运聚过程的动力机制探讨

洪智宾¹, 王晓锋^{1*}, 赵栋¹, 陈科羽¹, 张东东¹, 刘文汇¹

1. 西北大学地质学系 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

中国东部新生代玄武岩广泛发育幔源捕虏体, 其稀有气体同位素组成是揭示深部地幔脱气过程与资源效应的关键载体。基于中国东部新生代玄武岩中橄榄岩捕虏体的系统采样, 通过真空破碎后的稀有气体同位素分析, 结合前人区域地质构造与地球化学研究, 探讨东部克拉通破坏背景下幔源氦资源的动力来源、运移路径与富集机制, 揭示地球多圈层相互作用对幔源氦资源形成的控制规律。结果显示, 捕虏体氦同位素比值具有显著的空间分异性: 郯庐断裂带西侧样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值接近 MORB 型地幔 (6.5~8.0 Ra), 而胶辽地块样品呈现更高比值 (8.2~9.5 Ra), 暗示晚中生代以来太平洋板块俯冲导致软流圈上涌与富集地幔的局部熔融。地幔氦气存在两种端元混合: 其一为深部地幔柱贡献的高 ^3He 组分, 其二为受太平洋板块俯冲改造的岩石圈地幔脱气产物。提出晚白垩世-新生代岩石圈伸展引发的减压熔融是驱动幔源氦向上迁移的主要动力, 而郯庐断裂带、燕山期基底断裂网络则构成氦气垂向输运的优势通道。氦同位素空间

分布与区域布格重力异常、地壳厚度呈显著负相关, 表明岩石圈减薄区因软流圈上涌加剧地幔脱气通量。构造显示, 不同区域氦气运聚模式受控于盆地动力学背景: 华北克拉通破坏事件导致岩石圈减薄, 拆沉与岩浆侵入的共同作用形成了垂向熔融网络; 松辽盆地的新生代裂谷运动诱发岩石圈减薄, 同时地幔柱头部减压熔融产生大量碱性玄武岩, 伴随大规模脱气。华南地区古太平洋板块俯冲引起板块活化, 形成弧后伸展体系, 板片脱水诱发地幔楔熔融, 释放富氦流体。本研究从地球系统科学视角, 将深部地幔动力学过程与浅表资源效应纳入统一时空框架, 提出中国东部幔源氦资源的形成"深部过程驱动脱气强度-构造体制转换决定疏导体系-浅层流体-岩石特征响应"多尺度协同的结果, 为幔源氦资源整体预测提供了新的理论认识与动力学模型。

关键词: 幔源氦; 捕虏体; 构造差异; 壳幔相互作用; 地球系统科学

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472187)

第一作者简介: 洪智宾 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 氦气运移及动力学模拟. Email: 202410418@stumail.nwu.edu.cn

*通信作者简介: 王晓锋 (1979-), 研究员, 研究方向: 天然气地球化学. Email: wangxf@nwu.edu.cn

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

沉积盆地深层水-岩产氢对有机质裂解的影响: 来自沥青质热模拟实验的启示

方朋¹, 吴嘉^{2*}, 沈斌¹, 徐学敏¹, 翟佳¹, 洪智宾³, 金霄⁴, 王远⁵

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

5. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126

沉积盆地深层较高的温压条件下, 水-岩作用往往会产生较高的氢逸度, 这导致无机氢可能参与沉积有机质的生烃反应。通过探究深部地层氢逸度与沥青或原油二次裂解产烃特征的关系, 可以进一步厘定在外源氢参与的条件沉积有机质的产烃效应, 为准确预测深层油气资源的类型和潜力奠定基础。本研究选取低成熟的天然固体沥青为原始实验样品, 在双层金管的实验装置中分别加入矿物缓冲剂(磁铁矿和赤铁矿-MH; 钴和一氧化钴-CoCoO)和沥青质以进行含水体系的热模拟实验。通过分析实验条件下矿物缓冲剂控制的氢逸度与烃类产物的潜在耦合关系, 探讨了有机-无机相互作用对沥青质二次裂解生烃的促进效应。与不含矿物的对照组相比, 含有矿物缓冲剂的体系中水-岩反应产生的无机氢促进了沥青质裂解, 并抑制了其结焦。外源无机氢介入沥青质裂解使得体系中氢通量增加而存量减少, 从而产生了相对较多的气

态烃和相对较少的二氧化碳。同时, 外源无机氢加入提高了液态烃产率。其中, 含 MH 体系液态烃的产率提高了 7.14%, 含 CoCoO 体系液态烃的产率提高了 54.78%。外源氢对不同裂解位点的差异促进效应使得液态烃产物的族组成显著不同, 含有矿物缓冲剂体系的极性组分, 尤其是沥青质的产率有明显的升高, 而饱和烃与芳烃组分的产率则相对降低。芳烃分子标志物的对比分析表明外源氢加入也可以一定程度上促进小分子烃类的二次裂解, 同时还可能明显改变芳烃成熟度参数的大小。热模拟实验的结果为理解深部地层中水-岩产氢作用对沥青或原油二次裂解的产烃效应提供了重要见解, 有助于更准确地评估深部油气资源的类型、稳定性及资源潜力。

关键词: 沉积盆地深层; 有机-无机相互作用; 二次裂解; 氢逸度; 热演化

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助项目(CSJ-2024-05); 国家重点研发计划项目(2017YFC0603102)。

第一作者简介: 方朋(1995-), 助研, 研究方向: 有机地球化学和能源地球化学。E-mail: fangpeng@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 吴嘉(1984-), 副教授, 研究方向: 实验地球化学和油气地球化学。E-mail: jia.wu@cup.edu.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

氦气富集理论中关键问题讨论

秦胜飞^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 石油天然气地质研究所, 北京 100083

天然气藏中是否富氦, 取决于气藏中氦气的供给量和天然气对氦气的稀释程度, 正常的天然气成藏体系, 天然气由烃源岩到储集层形成气藏, 由于烷烃气对氦气的稀释作用, 氦气含量往往较低, 为贫氦气藏。氦气富集理论强调氦气富集为“多源供氦、主源富氦; 氦氮耦合、同溶共聚”的过程。氦气主要来自岩石中 U 和 Th 的放射性衰变, 任何岩石都含有微量的 U 和 Th, 但以花岗岩等大型古老基底往往是富氦气藏的主力氦源。氦气富集与天然气成藏条件和过程有很大差异, 不能用天然气成藏的思路来研究和寻找氦气。富氦气藏分布于有断裂沟通的古老基底之上、后期经历大幅度构造抬升、盖层相对薄弱、地下水比较活跃的常压或低压区。氦气富集与天然气的成因类型(煤型气、油型气、无机气)及气藏类型都无关,

氦气富集关键问题涉及到氦源岩评价问题、主力氦源的判识问题、气藏的盖层问题、氦气运移途径和运移载体、构造背景、油气充注的诸多问题。不能用简单的测定岩石中 U 和 Th 的含量来判断主力还源岩, 需涉及到岩石规模和地质年代, 以及与气藏沟通的可能性; 更不能因氦气分子量小、易扩散, 认为氦气富集需要更好的盖层; 尽管富氦气藏类型很多, 氦气只与天然气中的氮气相互耦合; 也不能简单认为火山活动带来了幔源氦, 认为应该在火山岩储集层找氦气等。另外, 氦气富集所需要地质条件和勘探选取与天然气也有较大差异。

关键词: 氦气; 富集理论, 富氦气藏, 氦气富集, 富集因素

国家自然科学基金专项项目《中西部叠合盆地氦气富集机理与资源潜力》(42141022)、国家自然科学基金面上项目《富氦煤层气和页岩气藏氦气富集机理》(42272189)。

第一作者简介: 秦胜飞(1969-), 正高级工程师, 博士生导师, 研究方向: 天然气地质与地球化学、油气成藏、氦气富集机理和分布规律. E-mail: qsf@petrochina.com.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

国际天然氢研究现状及资源勘查进展

房大任^{1*}, 张炜¹

1. 中国地质图书馆, 北京 100083

在全球从化石燃料向低碳可持续能源转型过程中, 氢能以其能量密度高、无污染等特性将成为能源结构中的重要一环。目前人类利用的绝大部分氢气是通过煤炭、石油、天然气等化石燃料制取的二次能源, 具有碳排放量大和获取成本高等缺点。而天然氢作为地球上通过多种自然过程生成并赋存于地质体中的一次能源, 近年来成为了全球能源地质领域关注的热点之一。尽管对自然界中地下氢气赋存的发现可追溯至 19 世纪 80 年代, 并且随后在洋中脊、板块汇聚边缘蛇绿岩带、以前寒武纪大陆基底为代表的构造稳定区、以岩浆及温泉为代表的构造活动带等多种地质环境中均有发现, 但对其关注一直以来多处于科学研究阶段。据不完全统计, 已有美国、加拿大、巴西、哥伦比亚、法国、西班牙、俄罗斯、中国、马来西亚、菲律宾、阿曼、澳大利亚、马里等涵盖各大洲的数十个国家探索性地部署和实施了对天然氢的资源勘查开发。其中, 法国、澳大利亚、美国等已开始从政府层面积极推动天然氢领域的科学研究、资源调查与评价、政策法规修订与完善。此外, 来自上述国家的 20 余家科研

机构和 40 余家企业正积极投身天然氢相关领域, 工作重点包括地表近圆形凹陷构造调查和土壤气体测量、成因机制和成藏机理研究、成藏系统构建、勘查开发远景区和有利目标区圈定、“地物化遥钻”综合资源调查、以及资源量和储量评估等, 天然氢在科学研究和勘探发现方面呈现出加速发展态势。在分析研究全球天然氢勘查开发发展趋势及成因/成藏研究与资源勘探进展的基础上, 认为可能的成藏地质条件包括法国比利牛斯造山带地幔超镁铁质岩的蛇纹石化、法国巴黎盆地构造缝合带橄榄岩的蛇纹石化、澳大利亚 Yilgarn 克拉通和 Pinjarra 造山带深部超镁铁质岩的蛇纹石化及浅部富铁花岗岩的氧化、马里 Bourakebougou 条带状含铁建造的氧化、吉布提 Asal-Ghoubbet 活动裂谷带磁铁矿的黄铁矿化及绿泥石的氧化、巴西 Maricá 新元古代变质岩内花岗岩的辐解及俯冲洋壳超基性岩的蛇纹石化以及巴西 Paraná 盆地古生代至中生代克拉通富有机质过成熟岩石的有机质热解及花岗岩的辐解。

关键词: 白氢; 能源革命, 零碳能源, 氢气藏

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

土壤气样品中氦浓度异常识别测试技术

李军杰^{1*}

1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029

土壤氦气地球化学勘探技术是寻找隐伏氦气藏的直接手段, 由于氦气极强的扩散性, 在具备一定压力条件下, 氦气藏中会有少量氦气扩散至上覆土壤层中。通过采集一定深度的土壤气, 对其氦浓度进行检测, 提取氦浓度的异常信息, 可有效地圈定隐伏氦气藏位置, 进而为气藏的钻探开发提供直接依据。然而, 由于土壤的松散性, 土壤气会与空气进行充分交换, 导致土壤气的氦浓度异常信息相对较弱, 一般来说, 仅比空气氦浓度高 5% 左右 (约 5.5×10^{-6}), 这对于测试仪器的灵敏度、稳定性等都提出了极高的要求, 传统的气相色谱分析技术很难识别出如此低的氦浓度异常信息。

本研究围绕小型四极杆质谱仪, 组建超高真空气体进样和纯化分离系统, 在静态模式下采用“稀释剂法”测试技术, 实现了极低氦气浓度的全流程自动化

测试。静态模式测试技术显著地提高了测试灵敏度, 降低了检出限, 可实现氦浓度为 1×10^{-9} ppb 的样品的准确测试; 采用一定量的 ^3He 作为稀释剂, 和样品一起进入质谱测试, 通过测定 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值, 计算样品氦浓度, 可有效避免仪器灵敏度的波动性带来的误差, 通过连续对 187 组空气标准进行测定, 测试的精密度优于 1%, 这对于有效分辨出土壤气微弱的氦异常信非常关键; 基于 CX-ONE 编程软件对控制逻辑进行编写, 并采用 MCGS 组态软件制作交互式界面, 实现了样品全流程自动化测试, 减小人为干预而带来的误差, 有效地提高测试准确度。

关键词: 氦气资源; 土壤气; 四极杆质谱仪; 静态模式测试; 稀释剂法

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41973051)

作者简介: 李军杰 (1986-), 正高级工程师, 研究方向: 稀有气体同位素地球化学. Email: 564484480@163.com

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

柴达木盆地氦气成藏规律与有利区预测

徐朱松^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

氦气是重要的战略稀缺资源, 在柴达木盆地已发现多个富氦气藏, 但氦气富集主控因素和成藏规律缺乏系统的研究。本次研究通过对柴达木盆地天然气开展氦气含量的测试, 结合基础地质资料及前人研究成果, 对柴达木盆地氦气分布特征、来源及富集主控因素进行分析, 建立氦气成藏模式。结果表明: 柴达木盆地具有良好氦气资源前景, 富氦气藏整体分布在盆地边缘的山前地带; 氦气属于典型的壳源成因, 主要来源于花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩等古老基底岩石, 泥页岩、页岩等沉积岩系作为补充; 氦气富集主要受古老基底岩石、输导体系、构造运动和天然气充注强度的控制。广泛分

布的基底花岗岩、花岗闪长岩、花岗片麻岩提供了充足的氦源; 断裂、不整合面等输导体系为氦气的垂向运移和横向运移提供了优势通道; 挤压和构造抬升控制了氦气的运移方向, 且促进了溶解氦的脱溶; 适量的天然气充注促进了氦气的富集。结合柴达木盆地构造背景和氦气富集控制因素, 建立了盆地边缘古隆起背景下天然气捕获氦气的富集模式, 预测盆地边缘的祁连山、昆仑山和阿尔金山三大山前古隆起/古斜坡区是氦气资源富集有利区。

关键词: 氦气; 柴达木盆地; 富集规律; 成藏模式; 远景区

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFA0719004); 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目 (编号: 2021ZG13); 中国石油集团科技管理部超前战略储备基金项目 (编号: 2018D-500802); 中国石油股份有限公司科技项目 (编号: 2021DJ06, 2022KT0901-5) 联合资助。
第一作者简介: 徐朱松 (1993-), 博士后, 研究方向: 天然气及氦气成藏物理模拟等研究.E-mail: zhusongxu1222@petrochina.com.cn.

通讯作者简介:

李剑 (1966-), 教授级高级工程师, 研究方向: 天然气及氦气地球化学、成藏及资源评价等研究.E-mail: lijian69@petrochina.com.cn.

王晓波 (1982-), 高级工程师, 研究方向: 氦气勘查与资源评价、地球化学、富集成藏及分析检测关键技术研发等研究.E-mail: wangxb69@petrochina.com.cn.

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

克拉通沉积盆地 H_2 -He 系统: 以鄂尔多斯盆地为例

魏永波¹, 刘全有^{2*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100871;

2. 北京大学能源研究院, 北京 100871

氢气是在能源转型中发挥重要作用的零碳清洁能源, 氦气是高新技术产业发展中不可或缺的重要稀缺战略资源。天然氢气和氦气在成因和富集机制上具有一定相似性, 克拉通沉积盆地天然气藏往往会同时含有高浓度的氢气和氦气。然而, 目前氢气和氦气在克拉通沉积盆地中的形成和富集机制尚未被很好揭示, 二者在地下耦合构成的 H_2 -He 系统也缺乏深入研究。本研究获取了鄂尔多斯盆地 9 个气田的 350 组含氢气和氦气的天然气地球化学数据, 囊括了下古生界和上古生界主要含气层系。整体上, 鄂尔多斯盆地天然气藏中天然氢气含量介于 0.001%~34.7%, 平均含量为 0.8%; 氦气含量介于 0.006%~0.387%, 平均含量 0.089%。上古生界下石盒子组氦气含量最大, 平均 0.11%; 下古生界马家沟组氢气含量最大, 平均 2.6%。东胜气田中氦气主要来源于沉积型氦源岩(上古生界石炭系-二叠系煤层、泥岩层、铝土岩层), 其他气田的氦气主要来源于基底型氦源岩(花岗岩、变

质岩)。相比于上古生界碎屑岩气藏, 下古生界碳酸盐岩气藏中天然氢气含量更高, 其来源于盆地结晶基底水岩反应和水辐射分解; 上古生界气藏中天然氢气来源于石炭-二叠系煤系烃源岩热演化和结晶基底。进一步 H_2 -He 动态耦合富集模拟揭示氢气富集是短时间尺度内的快速汇聚(小于 1 万年), 而氦气富集是长地质时间尺度上的逐渐累积(数十个百万年)。据成因法评估显示, 鄂尔多斯盆地共产生了 $81.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的天然氢气和 $377.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的氦气, 天然气藏对氢气和氦气的捕获率分别为 0.15% 和 3.7%。结合模型估算鄂尔多斯盆地地下古生界储层中氢气最大资源量为 $675.0 \times 10^9 \text{ m}^3$, 整个盆地的最大氦气资源量为 $22.6 \times 10^9 \text{ m}^3$, 所估算的氢气和氦气最大资源量分别是目前评价资源量的 11 倍和 1.6 倍。

关键词: 天然氢气; 氦气; 天然气; 克拉通; 鄂尔多斯盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(42488101, 42141021)

第一作者简介: 魏永波, 博士研究生, 研究方向: 沉积盆地氢气和氦气资源研究. E-mail: weiyongbo@mail.iggcas.ac.cn

*通信作者简介: 刘全有, 教授, 研究方向: 油气地质与地球化学研究. E-mail: qyouliu@sohu.com

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

鄂尔多斯盆地神木地区氦气运移相态及效率

刘成林^{1*}, 杨广坤¹, 张雪¹, 胡浩然¹, 范立勇², 陈兰³, 王海东¹,
丁振刚¹, 陈践发¹, 朱玉新⁴, 康锐², 董明祥¹

1. 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 西安 710018;

3. 重庆科技大学, 重庆 401331;

4. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007

含氦天然气藏中氦气与烃类气为同储异源, 氦气在水介质、在高浓度烃类中的运移、聚集机制尚需要深入研究。本文以鄂尔多斯盆地神木地区含氦天然气藏为例, 开展气藏地质条件、氦气运移通道、介质、相态、距离、方向、质量与聚集效率研究, 明确氦气运聚机理及对天然气中氦气丰度的影响。(1) 神木地区以平缓褶皱带及斜坡为构造背景, 上石炭统本溪组、下二叠统太原组、山西组富铀、钍暗色泥岩、碳质泥岩、煤、铝土岩为氦源岩, 氦气运移通道与储层为下二叠统太原组、山西组和中二叠统石盒子组砂体和微裂缝, 盖层为上二叠统石千峰组及上覆泥岩。(2) 模拟显示氦气运移分为三个阶段: 海西期-印支期氦气部分释放, 烃源岩多未成熟—低成熟, 生成烃类气少, 氦气以水溶相运移至砂岩储层中, 运移效率高, 地层水中氦气丰度高; 印支期

末-燕山期, 氦气全部释放, 烃类气生成并达到高峰, 氦气先以水溶相, 随烃类气增加, 呈游离相与烃类气一起运移, 运移效率较高, 天然气中氦气丰度低; 喜山期, 随烃类生成速率降低与散失, 砂岩储层逐渐致密化, 氦气呈扩散相与烃类一起运移, 运移效率较低, 天然气中氦气丰度升高;(3) 在已建立的斜坡—沉积源岩型含氦天然气富集模式基础上, 提出氦气与烃类气运聚动平衡模型, 计算侏罗纪前、侏罗纪—白垩纪、白垩纪后氦气生成量、释放量、运移量、聚集量与散失量, 明确神木地区二叠系氦气资源量与天然气中氦气丰度及影响机理。本文提出的氦气运聚机制与模型对氦气富集研究与勘探有借鉴意义。

关键词: 鄂尔多斯; 神木; 天然气; 氦气; 富集

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFA071900); 国家自然科学基金项目(41872127); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金项目(CSTB2024NSCQ-LZX0108)。

第一作者简介: 刘成林(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 油气成藏与资源评价。E-mail: liucl@cup.edu.cn。

• 专题 19: 深部氢和氦的地球化学行为、资源效应及其勘查评价技术 •

非常规天然气中氦气资源形成分布及资源潜力

刘祥柏¹, 陶士振^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

我国氦气资源分布广泛, 东部地区氦气主要分布在在郯庐断裂带两侧的含油气断陷盆地, 主要为壳幔混源氦气, 主控因素为深大断裂。断裂带两侧已经发现了多个含有氦气的油气藏和非烃气藏。在松辽盆地徐家围子断陷发现的烷烃气藏中氦气含量相对较低, 基本小于 0.05%, 烃类气体显示出无机地球化学特征。在松辽盆地、渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区、苏北盆地溪桥气田发现 CO_2 含量较高的气藏, 部分气藏中 CO_2 含量可以达到 70% 以上, CO_2 碳同位素较重, 显示典型的幔源岩浆脱气成因。在松辽盆地尚深 1 井、渤海湾盆地济阳坳陷花沟地区、苏北盆地溪桥气田发现氦气含量相对较高的氦气藏, 在部分 N_2 含量大于 50% 的气藏中氦气含量相对较高, 如花 501-1 井中, 氦气含量为 50.94%, 氦气含量达到了 3.08%。同时在松辽盆地发现 N_2 含量小于 10%, 但氦气含量相对较高的气藏, 如芳深 1 井、升深 201 井、汪 9-12 井, 氦气含量最高可达 2.104%。以上发现的这些气藏中氦气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值平均值超过 2.0 Ra, 整体表现出了明显的幔源氦气参与成藏的特征。四川盆地威远气田是中国首个实现氦气商业化利用的气田, 前震旦系、震旦系、寒武系、奥陶系气藏中普遍氦气含量较高, 可以达到富氦天然气的标准 (氦气含量大于 0.1%), 其中主力气藏震旦系灯影组气藏氦气含量整体最高, 可以达到 0.36%。地层自下向上, 不同地层中氦气含量降低趋势明显。鄂尔多斯盆地庆阳气田、东胜气田, 氦气含量较高, 并都已经进入商业提氦阶段。柴达木盆地发现北缘东坪气田、马北气田、柴北

缘全吉山地区、尖北气田等高品质富氦天然气藏。塔里木盆地巴楚隆起东南缘和田河气田氦气含量 0.26%~0.53%, 折算氦气探明储量 $1.9591 \times 10^8 \text{ m}^3$, 塔里木盆地塔西南、塔北、塔中地区氦气含量 0.05%~2.19%, 均展现出一定的氦气富集前景。中西部这些气田中氦气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较低, 表现为典型壳源成因。汾渭盆地地热水中的氦气资源也十分丰富, 在西安凹陷和固市凹陷地热井井口气体中氦含量大于 1% 的 38 口井中氦气含量最高达 9.226%, 在晋中凹陷新发现的 6 口地热井井口气体中氦气含量达 10% 以上, 资源潜力巨大。从资源类型来看, 目前我国已经在无机成因气、常规天然气、致密气、页岩气、地热水中发现氦气含量较高的气藏。在前人对煤层气中氦气含量的研究中也曾发现氦气含量较高的气藏, 但多在外国煤层气藏中。通过对大宁—吉县区块和三交北区块煤系气样品的精细取样、分析, 发现了三交北区块煤系气中氦气含量较高, 属于富氦煤层气田, 这是我国在常规天然气、致密气、页岩气、地热水、非烃气藏之外发现的新的资源类型中富含氦气。通过对煤系气中氦气富集机理的初步探讨, 认为煤层气中氦气主要是壳源异源型, 运移、保存条件是富氦煤层气藏形成的必要条件。建议加强煤系气中氦气富集机理研究, 为寻找富氦煤系气田/区提供理论指导。

关键词: 非常规天然气; 氦气; 资源分布; 富集机理; 勘探开发

基金项目: 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术项目 (编号: 2021ZG13)。

作者简介: 刘祥柏 (1991-), 男, 江苏连云港人, 博士 (后), 主要从事氦气地质、石油地质和油气成藏综合研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: xiangbai_liu@163.com。

通信作者: 陶士振 (1966-), 男, 安徽阜阳人, 博士, 中国石油勘探开发研究院企业高级专家、教授级高级工程师, 主要从事岩性地层油气藏、非常规油气、无机成因气及氦气地质研究与评价工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油天然气地质研究所, 邮政编码: 100083。Email: tsz@petrochina.com.cn。

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

磷灰石在火山喷发触发机制和喷发方式转换中的应用： 以东昆仑造山带勒宁湊古火山为例

黄贵治¹, 马昌前^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

月磷灰石属于岩浆系统中最常见的副矿物, 其封闭性较好, 受到风化蚀变的程度较低, 已经作为记录岩浆过程潜力最大的矿物之一。它可以弥补现代火山监测技术无法应用于古火山研究中的不足, 并为岩浆通道系统和火山喷发机制的研究提供新见解。我们报告了东昆仑勒宁湊古火山的残留火山机构、岩相学、年代学观察和测试结果, 并对磷灰石进行了微区分析测试, 旨在还原古火山喷发前可能的岩浆储存状态。勒宁湊古火山由中性-酸性熔岩和火山碎屑岩组成, 熔岩主要出露在古火山口中心以及火山口北部的柱状节理区域, 主要由大量安山岩和少量流纹岩组成; 火山碎屑岩则广泛分布在火山口周围区域, 主要由英安质、流纹质凝灰岩和角砾岩组成。锆石 U-Pb 定年的结果显示该火山在中三叠世 242 Ma 活动, 大量的喷发物质由相似的壳-幔混合源区产生。我们发现, 熔岩中的磷灰石相对自形、小而干净,

碎屑岩中的磷灰石大而不规则, 并且含有大量包裹体。同时, 熔岩中的磷灰石大多发育振荡环带, 而碎屑岩中的磷灰石则具有明显的核-边结构。我们运用磷灰石湿度计计算得到该火山口产物的熔体水含量在约 3.3~3.7 wt% 之间, 熔岩熔体中的含水量略高, 并且磷灰石的变价元素显示出的岩浆氧逸度也略高。我们认为在地壳浅部岩浆储库中发生了高水含量和高温的基性岩浆补充事件, 导致岩浆浅部储库中发生岩浆混合和晶粥活化作用。该事件不仅直接导致酸性岩浆爆炸性喷发, 喷发后更加开放的储库也使得大量混合成因的安山质岩浆随后以溢流式喷发的形式流出火山口, 形成大量成分均匀的柱状节理安山岩。

关键词: 磷灰石; 火山喷发机制; 火山喷发方式转换; 岩浆通道系统

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130309)

第一作者简介: 黄贵治 (2000-), 博士生在读, 研究方向: 花岗岩和古火山学。email: gzhuang@cug.edu.cn

*通信作者简介: 马昌前 (1958-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学。email: cqma@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

吉林省辉南县大椅山火山碎屑物特征及其形成机制

薛晨莉¹, 刘永顺^{1*}, 聂保锋¹, 王亚楠¹, 周淑媛¹, 孙玉菁¹, 冯玮霞¹, 江姗¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048

吉林省辉南县大椅山火山是龙岗火山群西缘第四纪火山的典型代表。大地构造上处于中朝克拉通东北缘, 受宽甸-龙岗-敦化深断裂控制。其火山锥为向西北开口的椅状形态, 锥体主要由多阶段岩浆喷发的空落火山碎屑层、弱的岩浆-蒸汽喷发的火山碎屑层的韵律构成。前人对该火山做了大量火山地质、岩石学和地球化学方面的研究, 但对其火山喷发动力过程研究薄弱, 缺乏系统的定量约束。基于大椅山四期火山喷发物的显微岩相学、粒度-粒形分析和分形理论, 本文对大椅山火山碎屑物特征及其形成机制开展了研究, 并反演了大椅山火山喷发的复杂机制。研究结果对认识火山爆炸喷发动力机制、火山碎屑物的破碎-输运-沉积全过程以及火山灾害预警与风险评估体系的完善有参考价值。大椅山火山碎屑物主要为渣状的火山碎屑夹杂大小不同、数量不等的火山弹、熔岩饼, 幔源包体(如尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩等), 壳源玄武岩、花岗岩、片麻岩等岩块和岩屑以及多种来源的晶屑。渣状的火山碎屑与火山弹或熔岩饼的表壳相为玻基斑状的粗面玄武质浮岩, 火山弹或熔岩饼内部相以及岩屑为斑状结构的较致密的粗面玄武岩。岩石的斑晶为橄榄石和斜长石, 基质由斜长石、橄榄石、单斜辉石、钛磁铁矿微晶+火山玻璃构成, 此外岩石还含有壳源捕虏晶(石英、斜长石和碱性长石)、幔源捕虏晶(橄榄石、斜方辉石、单

斜辉石和尖晶石)、多种类型的壳源和幔源捕虏体和少量的歪长石、单斜辉石巨晶。火山碎屑物特征分析表明: ①在粒度方面, 碎屑物的 Φ 值主要分布在 $-4\Phi \sim -5\Phi$ (分选系数 σ_Φ 为 0.766~1.193; 偏度 Sk 为 1.343~1.695), 粒度中值 Md_Φ 为 $-3.457\Phi \sim -2.456\Phi$ (粗粒优势)。碎屑物粒度分布频率曲线呈典型单峰形态, 粒度相对集中, 主峰主要在粗粒一端, 晚期堆积层的粒度主峰显著向较细粒端迁移(晚期堆积层 D_{50} 值较早期堆积层降低约 $\pm 20\%$), 同时, 大椅山火山第三期喷发物粒度分布峰值显著小于其他几期。不同粒径分布和分选性, 反映了碎屑物在形成过程中受到了不同岩浆爆炸能量、破碎强度、风力分选等的综合作用。②在粒形方面, 大椅山火山碎屑物的颗粒宽长比(b/l)和凸度($Conv$)分布差异较小, 类球度($SPHT$)略有差异, 第三期火山碎屑物 $SPHT$ 值略高于其他几期, 表明第三期喷发物显著地向规则形态趋近。③基于多段式幂律函数拟合方法, 火山碎屑物粒度分布存在四个显著分形区间(即对应四个分形维数: $D_1=0.069 \sim 1.208$; $D_2=1.900 \sim 2.256$; $D_3=1.337 \sim 1.900$; $D_4=2.495 \sim 2.737$), 各分形域对应不同的碎裂机制控制区, 表明大椅山火山在喷发过程中受到多重机制的控制。

关键词: 大椅山火山; 火山碎屑物; 粒度-粒形分析; 分形理论

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372343, 40872062)

第一作者简介: 薛晨莉(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学和火山学。email: 19834428827@163.com

*通信作者简介: 刘永顺(1966-), 副教授, 研究方向: 岩石学、火山学、地质流体力学和地质系统复杂性。email: cnu901@126.com

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

火成岩潜山油气藏成山成储动力学过程： 以珠江口含油气盆地为例

熊富浩^{1*}, 侯明才², 曹海洋²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院地质学系, 成都 610059;

2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059

海域火成岩潜山油气藏是近年来油气勘探的热点,其成山成储特征与动力学过程是油气勘探的重要研究内容。珠江口盆地是中国南海北部大陆边缘最大的新生代沉积盆地,也是我国非常重要的一个海上含油气盆地。受古太平洋和古南海扩张-消减影响,珠江口盆地发育晚中生代-早新生代中基性火山岩和花岗岩类,且具有规模油气成藏特征,为研究火成岩潜山油气藏的成山成储动力学过程提供了理想窗口。本文系统总结了珠一坳陷火成岩潜山的时空分布、岩石学和地球化学特征,揭示了珠一坳陷发育晚侏罗世(169~144 Ma)、早白垩世早期(140~133 Ma)、早白垩世晚期(120~106 Ma)和早古新世(66~40 Ma)四期火成岩,且发育显著的碎裂化和溶蚀孔隙。基于系统的岩石成因与大地构造分析,本研究重建了珠一坳陷火成岩潜山的成因动力学过程:1)晚三叠世-中侏罗世,古太平洋板片NW向低角度俯冲,珠一坳陷罕见岩浆活动,但发育NE-NNE向断裂构造;2)晚侏罗世-早白垩世早期,俯冲板片断

离与俯冲角度变陡,东南演化发育I型花岗岩类,珠一坳陷处于俯冲汇聚陆缘弧环境,发育NE向展布的挤压构造;3)早白垩世晚期(120~100 Ma),古太平洋板片发生回卷,诱发陆缘弧SE向伸展作用,导致珠一坳陷发育高Nb玄武岩和赞岐岩质安山岩,并形成NE向伸展构造线;4)晚白垩世(100~65 Ma):古太平洋板片俯冲方向转变,产生左旋压扭应力场,形成NW向逆冲断裂;5)古近纪时期,区域发生构造体制转换,古南海的扩张作用加强,珠一坳陷等南海北部陆缘进入被动陆缘演化阶段,发育多期伸展构造。本项研究表明,多幕式岩浆-构造作用控制着珠一坳陷火山岩潜山基岩的时空分布和成山动力学过程,而多旋回“岩浆—构造—流体”耦合作用则是珠一坳陷火山岩油气藏的主要成储机制。

关键词: 火成岩油气藏; 潜山; 成山成储; 动力学过程; 珠江口

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

望天鹅火山长白期造盾熔岩的特征及其冷却结晶机理

刘永顺^{1*}, 黄志聪¹, 聂保锋¹, 乔学斌², 李赫¹, 郭磊³, 殷旭阳¹,
李耀¹, 侯鹏¹, 杨智明¹, 冯晶晶¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 常熟 215500;

3. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 266100

在中国东北长白山脉与朝鲜盖马高原之间, 分布着三座规模巨大、喷发历史复杂、鼎足而立的复式火山——吉林天池火山、望天鹅火山和朝鲜境内胞胎山火山。其中, 望天鹅火山位于吉林省长白县与抚松县的交界处, 其喷发经历了造盾、造锥两个阶段。熔岩流就位方式和熔岩岩相结构复杂多样的控制因素与形成机理问题, 是物理火山学待解决的基本问题之一。对此本文选择望天鹅火山长白期造盾熔岩为研究对象, 在野外地质考察基础上, 通过偏光显微镜、X射线荧光光谱、地球化学分析、TG/DSC 同步热分析、熔融-冷却结晶模拟实验, 对其岩石学特征及其冷却结晶规律进行了研究, 取得了以下几点新认识。这些认识对火山建造形成、熔岩形成机理、岩相结构成因以及岩浆流体动力学研究具有参考价值。1. 长白期造盾熔岩主要有三种类型, 每种类型对应一个亚期。第一亚期为富含粗斑斜长石的基底玄武岩或玄武安山岩, 斑晶为斜长石+斜方辉石或斜长石+橄榄石或斜长石+橄榄石+单斜辉石+斜方辉石, 基质为斜长石、单斜辉石、橄榄石和钛磁铁矿微晶±火山玻璃。第二亚期为隐晶质粗面玄武岩(斑晶为斜长石或橄榄石)、玄武粗安岩(斑晶为橄榄石或单斜辉石+斜方辉石), 基质组成与第一期相同。这两期熔岩流分布范围广, 其间有明显分界。第三亚期是隐晶质的粗面岩, 斑晶为零星分布的透长石、橄榄石和单斜辉石, 基质含大量定向排列的透长石微晶, 代表长白期晚期岩浆

演化的最终产物。从矿物端元组分来看, 长石主要为拉长石和培长石, 橄榄石主要为透铁橄榄石和贵橄榄石, 单斜辉石为透辉石、普通辉石和斜顽辉石。2. 长白期造盾熔岩属于钠质型的拉斑系列, 岩浆从早期到晚期具有向钾质型转变的趋势。Sr-Nd-Pb 同位素分析显示长白期造盾熔岩大部分在 BSE 型地幔和 OIB 范围内, 有向 EM I 变化的趋势。这表明它们是经过橄榄石、单斜辉石、钛铁氧化物和磷灰石结晶分异的同源演化岩浆。元素比值协变关系图和同化混染作用判别图显示岩浆可能存在下地壳的混染。3. 熔融模拟实验显示: 实验产物由斜长石、单斜辉石、钛磁铁矿和火山玻璃组成。晶体的尺寸、形态和结晶程度与冷却速率存在密切关系。随着冷却速率逐渐变慢, 新生单斜辉石的晶体形态逐渐变化, 从毛发状晶须集合体、细针状雏晶, 到细条状、炉条状骸晶, 最后演变为短板状、长条状、四边形颗粒状微晶。同时, 岩浆的结晶程度也逐渐增强, 单斜辉石、斜长石、钛磁铁矿等晶体的尺寸逐渐增大, 自形程度逐渐增高, 火山玻璃逐渐减少。这些变化与野外观察到的熔岩流剖面从顶底至内部的结晶特征和岩相结构变化很相似, 代表了岩浆从远离平衡态向平衡态演变的逐渐变化过程。

关键词: 望天鹅火山; 长白期; 造盾熔岩; 远离平衡; 冷却结晶

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

流纹质岩浆的大喷发及其效应

马昌前^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

在强烈的酸性火山活动时期,流纹质岩浆往往会多次发生爆炸式喷发,喷出的岩浆体积可超过 100 km^3 ,甚至达到 10^4 km^3 。这一过程在全球多个地区均有发生,特别是在活动大陆边缘环境中,如中安第斯山普纳高原等地。这种喷发通常与俯冲板块角度变化及地壳伸展作用相关,可能是大规模岩浆底侵和地壳熔融的产物。

本研究以东昆仑中三叠世岩浆活动为例,探讨流纹质岩浆大喷发的成因、过程及其环境效应。东昆仑地区广泛发育二叠纪—三叠纪火山-侵入杂岩,包括熔结凝灰岩、流纹岩、英安岩及深部花岗质侵入岩。研究表明,该地区中三叠世岩浆活动高峰期与古特提斯洋构造演化密切相关,岩浆的高分异特征揭示了地壳熔融与深部储库分异过程。此外,不同区域流纹质凝灰岩的熔结程度存在显著差异,反映了喷发过程的复杂性。

流纹质岩浆的大喷发对地球系统产生深远影响。首先,它是重要的地壳演化和成矿作用驱动因素。火山喷发释放的金属元素和挥发分可能富集于地表或近地表,而斑岩铜矿等大型热液矿床往往出现在无大规模喷发的岩浆系统中。其次,火山喷发通过气溶胶效应和温室气体排放,引发全球气候变冷或变暖。例

如,萨马拉斯(1257年)和坦博拉(1815年)火山喷发均导致全球变冷,影响农业生产和社会稳定。历史上多次火山喷发事件甚至改变了人类历史进程。

此外,火山喷发还会对生态系统造成剧烈冲击,并影响生物演化。地质历史上的五次生物大灭绝可能均与大规模火山活动有关,但目前尚未重视流纹质岩浆大喷发的影响。火山喷发后的生态系统恢复通常经历从初级生产者(藻类、细菌)到高级消费者(鱼类、无脊椎动物)的渐进过程。淡水生态系统的恢复可能需要数十年甚至更长时间。

尽管近年来对流纹质岩浆的大喷发的研究取得了重要进展,仍存在诸多科学问题,如岩浆通道系统的结构与巨量岩浆积累机制、喷发触发机制及其动力学过程、火山喷发对圈层作用和环境效应的影响,以及如何从古老火山岩记录中提取火山学信息。未来研究应结合野外观测、地球化学分析和数值模拟,进一步揭示流纹质岩浆的大喷发的深层机制及其在地球系统中的作用。

关键词: 爆炸式喷发; 流纹质火山活动; 环境效应; 气候变化; 生物灭绝

c

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

辉绿岩结晶程度的量化表征及其储层意义- 以临南洼陷沙三段辉绿岩为例

纪罗俊杰¹, 边伟华^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130015

济阳坳陷沙河街组三段辉绿岩储层在近年实际勘验开发过程中展现出重要油气储集潜力。本次研究以该坳陷下属单元中临南洼陷商字号井段沙河街组三段辉绿岩为研究对象,通过岩相学分析和岩心观察相结合的方法,对辉绿岩结晶程度进行了量化表征;同时,本次研究运用铸体薄片、扫描电镜观察、毛管压力曲线分析和高压压汞测试等手段,从宏观与微观等多尺度对辉绿岩的储层空间进行刻画,实现了储集空间类型的系统识别。本次研究采用 ImageJ 数字图像处理技术对辉绿岩中斜长石晶体进行粒度统计,结合辉绿岩结晶程度与纵向展布规律,首次建立以

200 μm 和 400 μm 为分界值的细-中-粗粒级三级分类标准。通过构建粒度箱型图、物性参数交会图及孔隙分布直方图等多元统计模型,定量证实研究区辉绿岩储层物性(孔隙度、渗透率)与晶粒尺寸呈显著正相关:粗粒级辉绿岩(>400 μm)相较于中细粒级,具有更优的孔隙结构和储渗性能。该研究成果为辉绿岩储层评价提供了新的定量表征方法,对济阳坳陷致密油气勘探开发具有重要指导意义。

关键词: 临南洼陷; 沙三段; 火成岩; 粒度; 储层

第一作者简介: 纪罗俊杰 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 火山岩储层。email: 1215969825@qq.com

*通信作者简介: 边伟华 (1976-), 副教授, 研究方向: 盆地火山岩及油气地质。email: Weihubian@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

基于氮气吸附法和高压压汞法联合分析玄武岩储层 孔隙特征及控制因素-以准噶尔盆地红车 断裂带石炭系为例

李欢¹, 边伟华^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130000

准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩作为主力开发层系, 其微观孔隙结构特征是储层潜力评价的关键控制因素。针对该区优势岩性玄武岩微观孔隙研究薄弱的问题, 本研究通过岩心观察、薄片鉴定及扫描电镜 (SEM)、低温氮气吸附 (LTNA)、高压压汞 (HPMI) 等多尺度实验技术, 系统揭示玄武岩微观孔隙结构特征, 提出多方法联合表征技术体系, 阐明孔隙-孔喉分布规律及其主控机制。研究表明, (1) 多方法联合表征揭示玄武岩微观储层发育三级孔隙系统: 微孔 (<10 nm) 为粘土矿物层间孔及孤立脱玻化孔 (占比约 7%); 介孔 (10~100 nm) 以呈蜂窝状基质溶蚀孔为主, 孔径多集中于 20~40 nm (约 66%); 大孔及微米孔 (>100 nm) 包括孤立/斑晶溶蚀孔 (0.2~3 μm)、气孔内溶蚀孔 (1~8 μm) 及微裂缝 (>10 μm) (约 27%); (2) 孔隙形态统一性, 三类玄武岩均呈现“墨水瓶形孔+平行板状狭缝形”的复合孔隙结构, 其中气孔玄武岩的储集空间演化模式为溶蚀孔

-残余气孔-微裂缝; 致密玄武岩为脱玻化孔-微裂缝; 裂缝状玄武岩为基质溶蚀孔-构造裂缝。(3) 玄武岩储层孔隙结构受岩相与成岩作用协同控制。气孔玄武岩因溶蚀孔-残余气孔双模态系统渗流受限 (退汞效率 <25%); 致密玄武岩因隐晶质基质形成孤立纳米孔 (孔隙度 2.92%), 呈现超低渗特征; 裂缝状玄武岩以“纳米孔-裂缝”复合系统最优 (孔隙度 17.87%, 退汞效率 33.58%)。成岩作用中, 溶蚀作用增孔但未改善连通性, 蚀变产生的高比表面积 (9.13 m^2/g) 纳米层间孔需裂缝激活储集潜力, 构造破裂使裂缝状玄武岩渗透率提升 1-2 量级。构造-热液协同形成的裂缝网络是释放纳米孔储渗能力的关键。研究成果为红车断裂带火山岩储层分级评价与油气勘探开发提供了微观孔隙结构依据。

关键词: 玄武岩; 微观孔隙; 氮气吸附; 高压压汞; 红车断裂带

第一作者简介: 李欢 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事火山岩储层方面的研究。email: lihuan23@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 边伟华 (1976-), 男, 副教授, 主要从事盆地火山岩及油气地质研究。email: WeihuaBian@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

松辽盆地埋藏火山通道系统的发现及其地质意义： 基于国际大陆科学钻探松科 2 井全取心资料

胡庆博¹, 王璞珺^{1*}, 张文静¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 100031

火山口构造是指破火山口及其相关地质要素的总和, 包括下部岩浆房、中部断裂系统和上部火山机构。火山通道是岩浆向上运移输导系统的总和, 它是深部岩浆、区域构造和断裂作用与浅部地壳破裂相互作用的产物。现今深埋于地下的古火山口构造通常由一系列相互交切的小型侵入体构成火山通道系统; 它们是揭示过去构造火山事件的钥匙。松辽盆地是东北亚地区规模最大、油气资源丰富的沉积盆地, 其成因一直是人们探索的重大课题。而该盆地中埋藏火山通道系统的发现无疑对研究盆地成因具有重要意义。该埋藏火山通道系统位于松辽盆地中部, 在 1.4 亿年间 (242~102 Ma) 频繁活动, 控制了盆地的沉积速率和沉降中心的位置。松辽盆地国际大陆科学钻探松科 2 井 (底深 7108.88 m) 获取了从沉积盖层到变质基底连续完整的岩心序列; 揭示了基底滑脱断层 (DF, basement detachment fault)、裂谷起始不整合 (ROU, rift onset unconformity)、初始裂谷中心的三角形伸展域 (TED, triangular extensional domain)、火山活动四个成盆要素之间的关系及其它们上覆盆地充填之间的关系。裂谷起始不整合位于 5960 米深处, 对应于白垩系盖层与三叠系基底之间的不整合界面。基底滑脱断层顶面埋深 6490 米, 底界埋深大于 7355 米。通过 DF 与 ROU 的交点、ROU 上的 5960 米和 DF 上的 6490 米三点识别出一个三角形伸展域, 其处于盆地中心的基底地层中。穿过基底所有界面斜向上运移的蠕虫状反射结构代表了可能的岩浆通道或供给岩墙系统。它们之间有控制关系也有相互作用关系,

而高角度断裂与火山通道之间可能有共生组合关系。这些位于盆地中部的岩浆通道和埋藏古火山通道可能是探索松辽盆地成因的重要途径和对成盆具有重要意义。许多沉积盆地被认为是过去地幔流动体制的重要记录库。地幔流动引起的动态地形可能对沉积盆地的容纳空间有显著影响。然而, 问题是深部地幔流动通过何种具体方式影响浅部盆地的沉降或隆起? 幸运的是, 松科 2 井为深部地幔流动与浅部盆地之间的响应关系提供了一个很好的例子。穿过松科 2 井的地震剖面揭示了存在深部地幔流动结构, 它位于地表以下 60~70 公里处, 被解释为早期俯冲残片遗迹。呈蠕虫状或蛇形的反射结构, 向上移动并切割岩墙, 很可能是岩浆向上迁移的遗迹, 称为供给沿墙, 因为它们与高角度正断层密切相关, 并切割和捕获了岩墙岩块。推测松辽盆地下方的上地幔反射可能是由早期俯冲遗迹形成的, 这些遗迹可能随后成为地幔源岩浆。另一方面, 在地震剖面中, 通过岩脉识别的岩浆向上流动结构在 7355~2972 米的埋深范围内频繁出现。岩脉与裂谷地堑的高角度正断层密切相关。岩脉与基底断层一起出现在裂谷起始不整合界面, 塑造了早白垩世地堑的形态和构造格局。深源岩浆侵入引起的热效应可能是区域隆起的一个重要因素, 对盆地的成烃成藏的探索也具有重大意义。

关键词: 松辽盆地; 国际大陆科学钻探; 埋藏火山通道; 基底滑脱断层; 裂谷起始不整合

第一作者简介: 胡庆博 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 地质学. Email: 13943314019@163.com

*通信作者简介: 王璞珺 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事盆地地质和火山岩储层、沉积学和火山学的研究与教学, 长期担任松辽盆地国际大陆科学钻探总地质师 (2005-2022 年)。E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

幔源岩浆的非传统演化

陈立辉^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

地壳物质的再循环, 不仅改变了地幔的物质组成, 影响了地幔的物理性质, 而且使幔源岩浆的初始化学组成表现出很大的变化。当地幔发生低程度部分熔融时, 初始熔体中再循环地壳物质贡献的比例高, 挥发分的含量高。这些岩浆在地幔中运移时, 会与周围的地幔橄榄岩发生显著的相互作用: 在改造周围地幔(地幔交代作用)的同时, 自身的化学成分也发生

了明显的变化。由于成分上(如挥发分含量、种型)和构造环境上的差异, 被地幔改造后的岩浆, 在地壳中还会发生各具特色的演化, 这些“非传统”演化增加了幔源火成岩的多样性。

关键词: 幔源岩浆; 地壳再循环; 低程度熔融; 岩浆演化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130310)

作者简介: 陈立辉(1972-), 教授, 研究方向: 火成岩岩石学, 地幔地球化学. Email: chenlh@nwu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑造山带东段花岗伟晶岩成因及其成矿潜力分析

熊淮¹, 马昌前¹, 钟玉芳^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

花岗伟晶岩具有高分异的特点, 并且是稀有金属、云母、高纯石英和宝石的重要赋存岩石, 尤其与稀有金属矿床关系密切。然而, 花岗伟晶岩的成因和成矿机制仍众说纷纭, 尤其对于 I 型花岗岩为主的区域, 伟晶岩的成矿潜力亟待开展研究。东昆仑东段分布有大规模三叠纪 I 型花岗岩, 并广泛伴生有花岗伟晶岩出露。我们拟通过分析其成因机制、分异程度及流体出溶作用等方面探讨其成矿潜力。东昆仑东段的大部分花岗伟晶岩呈囊状以及脉状出露于伴生的花岗岩体内, 规模十分有限。在英特尔沟和王家当地区, 伟晶岩与其伴生花岗岩之间有明显的过渡接触关系, 揭示了花岗伟晶岩从其伴生花岗岩中分异出来。然而, 上述地区的花岗伟晶岩中普遍缺少如锂辉石、锂云母、电气石、绿柱石等特征矿物, 仅在莫可日地区的花岗伟晶岩中发现石榴子石。全岩主微量成分分析

表明, 所采样品大部分为钙碱性、高钾准铝质-弱过铝 I 型花岗岩, 且双胞胎元素 $Zr/Hf > 26$, 均未达到成矿岩石条件。另一方面, 样品的石英微量元素测试结果表明, 其总体微量元素含量过高 ($> 50 \times 10^{-6}$), 且 Li 元素含量较低 ($< 30 \times 10^{-6}$), 指示其不能作为高纯石英的潜力原料区以及潜在锂矿化区。我们认为, 由 I 型花岗岩作为母岩形成的花岗伟晶岩所含成矿元素十分有限且总体分异程度并不高, 其稀土元素四分组效应不明显 ($TE1, 3 < 1.1$)。同时, 样品缺乏单项凝织结构 (UST), 表明东昆仑地区花岗伟晶岩可能未经历流体出溶, 未能对成矿元素进行富集提纯, 导致东昆仑东段花岗伟晶岩普遍不具备成矿潜力。

关键词: 花岗伟晶岩; 结晶分异

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130309)

第一作者简介: 熊淮 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 火成岩. Email: hxiong@cug.edu.cn

*通信作者简介: 马昌前 (1958-), 教授, 研究方向: 火成岩. Email: cqma@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

俯冲碳酸盐的地幔循环历史：来自大陆玄武岩 Mg-Sr-Nd-Pb 同位素的启示

李艳青^{1*}, 刘彬¹, 马昌前², 胡祥云³

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

地表碳酸盐通过俯冲带进入深部地幔, 直接影响着地球上碳储库的重新分配, 在地质时间尺度上间接操控了气候的变化。然而, 板片在俯冲过程中经历了强烈的脱碳作用, 被俯冲板片带至深部地幔的碳比例, 以及碳在深部地幔中的存储深度和赋存状态仍未被充分理解。与正常地幔相比, 俯冲碳酸盐通常具有较轻的镁同位素比值($\delta^{26}\text{Mg}$), 因此, 镁同位素常被作为追踪幔源岩石中再循环碳酸盐信号的有效工具。中国东部广泛发育新生代玄武岩, 具有与洋岛玄武岩(OIB)类似的微量元素特征, 其放射性 Sr-Nd-Pb 同位素与富集地幔来源的 OIB 相似, 且呈现出明显的南北差异。特别地, 这些玄武岩普遍具有低于正常地幔的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 暗示其源区有再循环碳酸盐的参与。通过将新获得的东南沿海新生代玄武岩镁同位素组成与其余地区的数据进行综合对比, 本研究发现中国

东部以下深部地幔存在两种类型的低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 储库。东北地区新生代玄武岩源区的再循环碳酸盐主要以碳酸盐化橄榄岩的形式存在, 而东南沿海地区(闽、粤、琼)玄武岩源区的再循环碳酸盐主要以碳酸盐化榴辉岩的形式存在。进一步地, 存在于东南沿海玄武岩源区的榴辉岩经历了较强的脱水和脱碳作用, 所含的碳量远低于东北玄武岩源区。结合地球物理地震层析图像, 我们认为, 东北地区新生代玄武岩中的再循环碳酸盐主要来源于滞留在地幔过渡带的俯冲沉积物, 而东南沿海玄武岩中的再循环碳酸盐来自俯冲板片本身。这表明, 地幔过渡带可能是深部地幔中俯冲碳的主要储存位置, 而通过俯冲板片直接携带的碳会被携带至下地幔, 较少地被再带至地表。

关键词: 中国东部; 玄武岩; 镁同位素; 碳循环

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

汞含量和汞同位素所指示的古新世-始新世极热事件期间的火山活动

金思敏¹, David B. Kemp^{2*}, 尹润生³, 沈俊², David W. Jolley⁴,
Manuel Vieira⁵, 黄春菊²

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

4. 英国开放大学, 阿伯丁 000000;

5. GEOBIOTEC, 卡帕里卡 000000

沉积汞含量和汞同位素已被广泛用于识别地质历史时期的火山活动。已发表的研究表明, 古新世-始新世极热事件(PETM)可能至少部分是由与北大西洋火成岩省(NAIP)相关的岩浆活动所释放的CO₂驱动的。然而, 现有的PETM汞含量记录显示出很强的空间异质性。为深入探究PETM期间火山源汞的变化模式, 本研究以靠近北大西洋火成岩省的钻井沉积记录为研究对象, 发表了PETM期间首个汞同

位素数据序列。并对全球范围内19个PETM汞沉积记录进行了汇编和整合。研究结果表明, NAIP相关的岩浆活动释放的碳, 不仅是触发PETM事件的关键因素之一, 还可能在一定程度上对该事件的持续时间起到了维持作用。

关键词: PETM; 汞异常; 汞同位素; 北大西洋火成岩省

基金项目: 国家自然科学基金项目(41888101, 42230208, 42172039)

第一作者介绍: 金思敏(1996-), 博士后, 研究方向: 古气候学. Email: simin@cug.edu.cn

*通信作者简介: David B. Kemp, 教授, 研究方向: 古气候学. Email: davidkemp@cug.edu.cn

*通信作者简介: 黄春菊, 教授, 研究方向: 旋回地层学. Email: huangcj@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑白石崖火山-侵入杂岩体中磷灰石的地球化学特征： 对岩石成因与成矿作用的制约

孙洋^{1*}, 马昌前², 刘彬¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074

白石崖铁矿位于青海省都兰地区, 属于典型的矽卡岩型铁多金属矿床。矿区内发育的白石崖火山-侵入杂岩体主要由斑状花岗闪长岩、花岗闪长岩、英安玢岩和花岗闪长玢岩岩脉组成。通过前人的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究, 侵入岩和次火山岩显示出较为一致的结晶年龄, 范围为 229.5~224.1 Ma, 表明其形成于晚三叠世。尽管已有部分研究对其成因进行了探讨, 但关于该杂岩体的岩浆起源及演化过程仍存在较大争议, 有待进一步深入研究。磷灰石作为火成岩中常见的副矿物, 是研究成岩成矿过程的理想“矿物探针”。本文以白石崖铁矿区的酸性岩浆岩为研究对象, 重点开展磷灰石的矿物学和地球化学研究, 揭示磷灰石的成因特征及其对岩浆演化的指示意义, 进而探讨侵入岩与次火山岩的成因联系及其与成矿作用的关系。研究结果表明, 磷灰石强烈富集稀土元素, 轻重稀土元素分异显著, 并表现出明显的负 Eu 异常 ($Eu/Eu^*=0.06\sim0.63$)。同时, 磷灰石富集 Th、U 等高场强元素, 而亏损 Nb、Ti、Zr、Hf 等高场强元素以及 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素。稀土元素和微量元素的组成特征表明, 其寄主岩石的成岩物质具有壳幔混源的特征。岩相学研究表明, 磷灰石主要呈自形至半自形颗粒, 粒径多为 50~150 微米。在背散射电子 (BSE) 图像中, 大多数磷灰石晶体显示出均匀的结构和典型的振荡环带结构, 而部分

磷灰石颗粒则因不规则的晶体形态、内部孔洞或增生边缘而与之区分。核一边/环带结构的磷灰石从核部到边部 MgO 含量呈现波动式变化, 揭示了镁铁质岩浆的幕式注入过程。值得注意的是, 在花岗闪长岩中发育有暗色微粒包体。上述特征表明, 白石崖火山-侵入杂岩体的形成过程中可能经历了多期岩浆混合作用, 并有幔源岩浆的显著贡献。这种岩浆混合作用触发了混合岩浆的上升侵位, 为流体出溶和热液成矿提供了有利条件。白石崖侵入岩和次火山岩在空间上密切共生, 形成时代基本一致, 表明它们是同一期岩浆作用的产物。同时, 侵入岩和次火山岩中的磷灰石样品表现出一致的稀土元素 (REE) 配分模式、Sr-Nd 同位素组成和二阶段 Nd 模式年龄 TDM2 (1.60~1.41 Ga), 表明它们具有相同的岩浆起源, 即源自东昆仑造山带中元古代镁铁质下地壳的再造作用。研究结果表明, 白石崖侵入岩和次火山岩存在成因耦合关系, 侵入岩代表了岩浆储库内富晶体的堆晶物质, 而次火山岩可能是岩浆房内晶体间熔体提取、聚集的产物。这一发现不仅揭示了白石崖矿区中酸性岩浆岩的成因联系, 还为深入理解区域岩浆演化过程及成矿作用提供了新的地球化学依据。

关键词: 磷灰石; 火山岩-侵入岩成因联系; 晶粥模型; 东昆仑造山带

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

地壳浅部大型硅质岩浆储库的形成时限

陈宣谕^{1*}, 徐义刚¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

上地壳大型硅质岩浆储库的形成和演化对理解火成岩石学、火山学以及火山防灾减灾具有重要意义。然而, 与大规模硅质岩浆聚集和储存等过程相关的时间尺度问题目前仍存在争议。锆石定年和扩散计时给出的估算存在矛盾: 锆石定年显示上地壳岩浆滞留时间可达万年至百万年尺度, 而扩散年代学则指向千年甚至更短的岩浆聚集时间。上述两种方法均基于酸性侵入岩和火山岩中的矿物晶体, 然而晶体方法本身可能存在局限性(如继承锆石、扩散模型参数自然条件适用性等问题), 使得直接确定岩浆聚集时间存

在困难。本研究将地球化学和火山灰年代学方法有机结合, 揭示了导致灾难性破火山口形成喷发的岩浆累积过程。研究发现数百立方公里量级的硅质岩浆储库可在千年时间尺度内形成。此外, 研究还发现了指示破火山口坍塌后残余岩浆储库千年尺度再活化事件的火山灰记录。这些发现支持上地壳大型硅质岩浆储库具有较短寿命的认识。

关键词: 硅质岩浆储库; 破火山口形成喷发; 火山灰年代学; 地球化学

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

A Generalized View of Volcanic-Magmatic Pathways Incorporating Recent Drilling Results

John C Eichelberger^{1*}

1. University of Alaska Fairbanks Alaska Center for Energy and Power, USA, Fairbanks 11111

From the standpoint of geothermal energy, volcanic hazards, and even mineral resources, the most important systems are those that include establishment of a hypersolidus volume or volumes in the upper crust. Such regimes are only sustainable if open to repeated additions of heat and mass(magma)from the deep crust and upper mantle. Their primary form of heat loss to the surface is by hydrothermal convection and of heat and mass loss by eruption. This rather obvious concept has led to the term "trans-crustal" to describe such systems. The proportions of accumulated volumes of magma to erupted volumes is unknown but generally guessed to range from 2X to 10X. Common lifetimes of magma-hydrothermal systems range from 10^4 to 10^7 yr. The normal modeling practice of beginning with $t = 0$ obscures the likelihood that these systems may be near steady state for much of their lives, although not without frequent perturbation. Inputs heat and magma sometimes but not always trigger outputs(eruptions) from the systems. Outputs(eruptions)not only decrease the volume of accumulated superheated material, releasing thermal energy to the atmosphere and the

surface, but may also cool the hottest parts by allowing direct access of hydrothermal fluid to magma.

The major discontinuity in this trans-crustal heat-pipe is the abrupt upward transition from a regime of silicate fluid to aqueous fluid. Both are likely convecting, but magma convects as bulk flow whereas aqueous fluid convects in porous flow. The intervening solid rock zone (subsolidus but ductile) is characterized by conductive rather than convective heat transport. Therefore, for there to be continuity of vertical heat flux(as there would be in steady state), the interval between the magmatic and the hydrothermal system should be thin with a steep thermal gradient. Viewed this way, recent "accidental" drilling encounters with magma a short distance between hot hydrothermal systems is not an accident at all, but a normal consequence of the decrease in permeability as temperature approaches the solidus.

These considerations mean that high density geothermal energy is more accessible than expected.

关键词: Magma; Hydrothermal; Energy

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

坦桑尼亚伦盖活火山：一种特殊的钠质碳酸岩火山

王连训^{1*}, 陈济海¹, 任军平²

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170

坦桑尼亚伦盖火山(全名: Oldoinyo Lengai)位于东非裂谷东支南部的格雷戈里裂谷内,是目前全球唯一一座正在喷发的钠质碳酸岩活火山。其喷发历史可追溯到至少 35 万年前。该火山锥呈陡峭圆锥状,由交替的熔岩、火山灰和爆炸碎屑层构成,主要熔岩类型为霞石岩和响岩及少量橄榄黄长岩和碳酸岩。山顶有两个火山口,其中北火山口至今仍在活动,目前喷出的主要为碳酸质岩浆,温度约为 510 °C,白天呈现黑色,粘度与水相近,富含碱金属(Na_2O 为 32.4 wt.%, K_2O 为 7.6 wt.%)和卤素挥发分(Cl 为 3.4 wt.%, F 为 2.5 wt.%),冷却后形成以菱钠钙石(nyerereite)、格碳钠石(gregoryite)、钾盐和萤石为主要组成的黑色碳酸岩(Zaitsev & Spratt, 2024),明显不同于全球已知的其他碳酸岩(均以白色方解石或白云石为主)。菱钠钙石、格碳钠石和钾盐在空气中并不稳定,暴露在地表会快速与大气中的水分反应并溶解,最终形成以方解石和萤石为主要矿物的白色碳酸岩。因此有一种观点认为,全球大多数钙质碳酸岩多为次生,由钠质碳酸岩发生交代作用形成,而产生的富碱流体则交代围岩形成了霓长岩。伦盖火山碳酸质岩浆的喷

发最早记录于 1960 年前后,这一发现不仅最终确认了岩浆成因碳酸岩的存在,还在为火成碳酸岩的研究带来了诸多方面的启示与争议,具体包括(1)碳酸岩的岩浆起源;(2)碳酸盐熔体与硅酸盐熔体之间的液态不混溶作用;(3)富碱碳酸岩与钙质碳酸岩的成因联系等。碳酸岩与多种战略性关键矿产之间存在密切的时空联系,包括稀土、铌、磷、铁和萤石等。例如,巴西阿拉夏的碳酸岩中赋存着全球最大的铌矿;我国内蒙古白云鄂博碳酸岩则含有全球最大的稀土矿;南非帕拉博瓦碳酸岩储存有数亿吨铁矿和数亿吨萤石矿。这些矿床通常并非单一矿种,而是 REE-Nb-Fe-P-F 等多种成矿元素同步富集。在坦桑尼亚的伦盖碱性-碳酸岩火山中,也发现了磷灰石、磁铁矿、烧绿石和萤石等关键矿产的主要赋存矿物,甚至出现显著的富集现象(局部样品萤石高达 20%)。因此,未来应加强对伦盖火山在碳酸岩成矿指示方面的研究,以揭示其潜在的科学价值。

关键词: 火山; 钠质碳酸岩; 东非裂谷; 坦桑尼亚; 伦盖

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑都兰岩基就位过程及其地质意义

薛振华^{1*}, 马昌前¹, 刘彬², 黄贵治¹, 楼杭龙¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430074

岩浆在地壳中储存、就位和流动机制是地球深部过程与动力学的核心科学问题。近年来, 地球物理研究发现, 在活火山区并未发现大型岩浆房, 仅发育体积巨大的低熔体分数的低地震波速区域, 可能意味着岩浆房的体积很小。现今的矛盾在于, 深部小体积的“岩浆房”与巨型岩基和超级火山在物质总量上并不匹配。那么, 大岩基是如何生长的? 目前推测, 这些大型岩基是由巨大的岩浆通道系统(magmatic plumbing system)中上部的多个岩浆储库和反复的岩浆添加后固结而成的, 具有“千层饼”式结构。但先后加入到岩基中的每股岩浆有多大体积、按何种次序充填、充填时的晶体-熔体含量是多少? 这些仍是地球科学的未解之谜。东昆仑都兰岩基主要由三叠纪的香日德辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩等组成, 出露面积约 14000 km², 为研究岩基的组装、就位过程提供了理想的场所。通过对都兰花岗岩类岩体进行系统的

构造观察、磁组构和重力反演研究, 得出以下认识:

1) 重力反演依次从 70 km、60 km、50 km 至地表扣减, 揭示都兰岩基两个清晰的岩浆通道, 岩浆通道形态从深部向浅部迁移时, 直径逐渐变大, 并向四周扩散; 2) 磁组构研究表明, 在岩浆通道根部地区, 磁线理较陡, 为岩浆垂向运移的结果, 磁线理清晰揭示岩浆向 NW 和 SE 方向流动迁移, 构成现今长条状的岩体形态。对都兰岩基的研究表明, 大型岩基的就位, 仍然以重要的岩浆通道为主要的岩浆供给方式。岩浆从深部向浅部运移时, 向四周扩散运移, 形成超大规模的岩基。这也间接表明, 以岩基就位为代表的大陆生长方式, 更多是以“点状”形式进行, 岩浆通道下小小的岩浆房, 蕴含极大的地球物质生长能量。

关键词: 岩浆通道系统; 岩基生长过程; 东昆仑; 磁组构; 重力反演

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

黄金管热解过程中煤中硫的地球化学演化特征： 成熟度、烃类生成与芳香性响应

薛李苹¹, 唐跃刚^{1*}, 高硕²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

煤中硫随煤化程度的加深在地质环境中的迁移转化对煤结构、烃类物质生成及生烃潜力具有重要影响。本研究利用黄金管热解实验模拟了 300~600 °C 下煤的生烃过程, 结合气相色谱-质谱联用(GC-MS)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和 X 射线光电子能谱(XPS)技术, 探讨了热模拟前后烃类气体与 H₂S 的释放、游离含硫化化合物的生成以及煤大分子与有机硫结构的演化特征。结果表明, 低有机硫煤在低温热解时产生更多的甲烷, 但同时产生较多的乙烷、丙烷等。因此, 在低成熟阶段(Easy%R_o=0.71), 高有机硫煤的干燥系数(C₁/ΣC₁₋₅)显著高于低有机硫煤; 在过成熟阶段(Easy%R_o≥3.64), 煤中有机硫含量显著促进甲烷的生成。黄铁矿硫与有机硫均能热解生成 H₂S。H₂S 产率受全硫含量影响, 随温度的升高而升高。而高有机硫煤热解时, H₂S 浓度先升高后降低, 最终达到平衡, 其中超高有机硫煤在 400 °C 时 H₂S 浓度最大, 为 17.31%。在成熟阶段(Easy%R_o=1.75), 煤中游离有机硫的小分子最为丰富。低有机硫煤主要生成二苯并噻吩和苯并蔡并噻吩等芳香硫化化合物, 而高有机硫煤在此阶段则同时生成硫醇和苯硫酚等脂肪硫化化合物。随着煤化程度加深至 Easy%R_o≥3.64,

低有机硫煤和高有机硫煤中均生成元素硫(S₈)和硫酸酯类化合物。S₈ 的形成表明高阶煤中可能存在元素硫。FTIR 的分析显示, 相同热模拟条件下, 高有机硫煤中含有更多的脂肪烃结构, 低有机硫煤的参数 I 始终高于高有机硫煤, 这一现象表明有机硫含量降低了煤的芳构化程度。高有机硫煤的 H_{al}/H 与 "A" 值高于低有机硫煤, 表明相同煤化程度下, 高有机硫煤具有更高的生烃潜力。且热模拟中参数 I、DOC、“A”在 Easy%R_o=4.67 时均与自然条件下的演化有所差别, 值得更深一步研究。XPS 分析表明, 煤样的有机硫中, 噻吩与亚砷在 Easy%R_o=1.75~3.64 之间相对含量最高。噻吩与亚砷在高有机硫煤中相对含量最多, SHOS 煤中最高可达 91.24%。而脂肪族硫、砷、磺酸盐以及硫酸盐在低有机硫煤中相对富集。有机硫的芳香性在 Easy%R_o<1.75 时迅速增加, 随后煤中的砷和亚砷可能阻碍了噻吩硫的生成, 导致其芳香性减弱。本研究为热解脱硫和清洁能源开发提供了理论支持。

关键词: 煤中硫; 黄金管; 甲烷; 生烃潜力; 芳香性

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

扬子西北缘李家河条带状碳酸岩成因及铁矿成矿机制

马丹贞^{1,2}, 王连训^{1,2*}, Sebastian Tappe³, 马昌前^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

3. Technical University Bergakademie Freiberg Institute for Mineralogy, Freiberg, Germany 009599

火成碳酸岩作为全球铌-稀土等战略性关键金属的主要来源之一, 其铌-稀土成矿作用长期以来备受科学界和工业界的广泛关注。近年来的研究发现, 与火成碳酸岩密切共生的铁矿资源同样展现出巨大的潜力, 赋存规模可达数亿至数十亿吨。典型实例包括: 南非 Phalaborwa 矿床 (219 Mt @ 55.32% Fe)、我国内蒙古白云鄂博超大型矿床 (1500 Mt @ 35% Fe) 以及小秦岭铁岔沟矿床 (158 Mt @ 34.57% Fe) 等。然而, 目前对该类矿床的成矿物质来源、元素迁移及富集过程的研究相对有限, 严重制约了对其成矿机理的理解。值得注意的是, 碳酸岩型铁矿床多赋存于层状碳酸岩侵入体内, 其显著特征是发育火成堆晶层理构造, 尤以韵律式方解石层和磁铁矿层交替出现为典型特征。本研究选取扬子地块西北缘米仓山地区的李家河碳酸岩型铁矿床 (220 Mt @ 30% Fe) 为研究对象, 通过详细的岩石学、年代学、全岩及单矿物元素和同位素地球化学分析, 深入探究碳酸岩型铁矿的成因和成矿机制。

李家河碳酸岩以小规模岩株和岩脉形式出露, 其显著特征为条带状构造: 主要矿物方解石和磁铁矿交替富集, 形成以方解石为主的浅色富方解石层和以磁铁矿为主的暗色富磁铁矿层, 两层间多为过渡关系。磷灰石在碳酸岩中不均匀分布, 局部可高达 10 vol%, 而橄榄石、金云母和铌矿物则以次要矿物或副矿物形式存在。磷灰石 U-Pb 年代学显示成岩成矿时代为 778 Ma。李家河碳酸岩中各层均具有一致的 Sr 和 Nd 同位素组成 [$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.7039\sim0.7048$; $\epsilon\text{Nd}(t)=$

+1.5~+3.4], 与区域岛弧型基性岩同位素特征相似, 暗示其源区可能为受俯冲板片流体交代改造的岩石圈地幔。方解石单矿物和全岩样品均表现出平坦型稀土元素 (REE) 配分模式 [$(\text{La}/\text{Yb})_N=4.74\sim6.79$ 和 $5.54\sim14.1$], 显著区别于全球典型原生碳酸岩富集 LREE 的特征, 暗示岩浆可能源自贫石榴石、相对富集 HREE 的碳酸岩化地幔源区。

目前, 关于条带状碳酸岩中铁氧化物矿化的成因主要有两种观点: 结晶分异作用和液态不混溶作用。通过对李家河碳酸岩的野外观察发现, 其富方解石层和富磁铁矿层之间呈现渐变过渡关系。矿物组合与厚度的突变特征表明, 铁矿的形成并非由简单的晶体沉降或矿物分选堆积机制驱动, 而主要受液态不混溶作用控制。富磁铁矿层的 TFe_2O_3 含量 (50.0~66.5 wt.%) 显著高于过渡层和富方解石层, 并富含 Co、HFSE ($\text{Nb}=193\times10^{-6}\sim741\times10^{-6}$)、Sn 和 Zn, 而 CaO、Sr、Ba 和 REE 含量较低, 这一地球化学特征与不混溶富铁熔体的行为一致。进一步研究表明, 李家河碳酸岩中的磁铁矿和方解石夹层形成于富铁熔体向方解石晶粥体的重力塌陷过程。液态不混溶促使富铁熔体与富碳酸岩熔体分离, 富铁熔体随后结晶形成富磁铁矿层。因此, 我们认为富铁熔体的液态不混溶作用是铁氧化物矿化形成的关键因素。

关键词: 条带状碳酸岩; 铁矿化; 磁铁矿; 韵律分层; 李家河

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (编号: 42072082); 湖北省自然科学基金项目 (编号: 2022CFB116); 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室开放研究基金项目 (编号: GPMR202441)

第一作者简介: 马丹贞 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, Email: 2990510193@qq.com

*通信作者简介: 王连训 (1983-), 教授, 研究方向: 碱性-过碱性岩浆岩、火成碳酸岩及稀有稀土金属成矿作用, Email: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

浙江芙蓉山破火山的形成过程与岩浆系统演化

贺振宇^{1*}, 颜丽丽², 陆天宇¹, 张进³

1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

中国东南沿海晚侏罗世-白垩纪火山活动强烈, 以大量发育的破火山为典型地质特征。本文以代表性的浙江芙蓉山破火山为研究对象, 通过野外地质调查、火山岩岩石学、锆石 U-Pb 定年等研究, 探讨其破火山形成与岩浆演化过程。芙蓉山破火山呈直径约 16 km 的圆形, 火山岩以环形断裂为界与早古生代陈蔡变质杂岩并置, 两者现今出露在近同一水平, 沿破火山边缘发育系列正断层。破火山形成喷发富晶体凝灰岩(第二阶段)和破火山口湖相沉积主要分布在破火山的东部, 破火山形成后喷发阶段熔结凝灰岩(第四阶段)及同火山碎屑流滞后集块岩主要分布在破火山的西部。这些地质特征表明芙蓉山破火山是典型的塌陷破火山, 并且是经历了两次不对称塌陷(类似跷跷板)的复式破火山。对破火山形成后的流纹质凝灰岩和沉凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年揭示了 159~151 Ma、146~141 Ma、139~135 Ma 等三组年龄,

分别对应于芙蓉山破火山形成前喷发、破火山形成喷发和破火山形成后喷发的时代。进一步的锆石 Hf 同位素分析结果显示破火山形成后喷发(139~135 Ma)锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 为 -10.6~+0.4, 平均为 -4.4 ± 8.4 (2SD), T_{DMC} 模式年龄为 1.83~1.14 Ga, 暗示了在峰期破火山形成喷发后的岩浆补给和岩浆房再累积过程, 以及穿地壳岩浆系统内部地幔和地壳两种不同来源岩浆的贡献。中国东南沿海硅质破火山分布广泛且类型多样, 普遍经历了喷发、塌陷和复活等多阶段复杂演化过程, 破火山精细填图、高精度年代学约束、破火山分类体系的建立、破火山时空分布的综合编图等研究是未来中国东南沿海晚侏罗世-白垩纪火山活动过程研究的重要基础和方向。

关键词: 芙蓉山破火山; 流纹质火山岩; 火山地质调查; 岩浆系统; 中国东南部

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

河北省开平向斜南东翼煤矿区岩浆岩的成因机制

崔敏睿¹, 魏菱¹, 邢斌², 白林², 万业婷¹, 李伍^{1*}

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 开滦能源化工有限公司, 河北 唐山 063018

河北省燕山褶皱带主题呈 EW 向展布, 构造-岩浆岩发育, 开滦矿区地处该褶皱带南缘的开平向斜内, 该向斜为一轴向 NE-SW、向东北端渐变为近 EW 向并仰起的、北西翼陡、南东翼缓的不对称向斜。在开平向斜南东翼的四对矿井中井下开采揭露一定规模的岩浆岩。矿区内岩浆岩发育产状主要为岩床和岩墙, 在矿区西部(钱家营矿、吕家坨矿), 岩浆岩主要以岩床的形式存在; 在矿区东部(范各庄矿、林西矿), 则以 NNW 向的两组连续岩墙形式侵入煤层, 且煤层与岩浆岩的接触带表现出显著的热变质作用和破坏。

前人研究表明开平向斜煤层形成于晚石炭—中二叠纪聚煤期(300~259 Ma), 本次研究采集的样品岩浆侵入体锆石定年实验结果显示, 锆石年龄分别为 291 Ma 与 300 Ma, 且锆石呈现清晰的振荡生长环带, 定年结果高度集中, 表明锆石为岩浆岩自生锆石。岩浆锆石年龄与传统观点存在较大差异, 经过多角度的构造、矿物及煤化学分析后认为, 该岩浆侵入煤层的现象可能是多期岩浆与构造耦合控制的结果。

已有资料表明, 华北板块北缘早石炭世晚期—中二叠世(330~265 Ma)有大规模岩浆侵入, 且侵入岩为中性岩, 闪长岩居多, 与研究区岩浆岩的矿物岩石学相符, 且定年锆石年龄在 273~324 Ma 之

间, 与研究区岩浆锆石定年结果吻合。因此初步推断研究区岩浆侵入岩与华北板块北缘侵入岩来自于同一岩浆房。

华北板块北缘在早石炭世晚期—中二叠世期间受古亚洲洋闭合的影响, 形成了近南北向(SN 向)挤压应力场, 而研究区位于华北板块东缘, 未完全进入太平洋构造区, 因此未受强烈的挤压应力场作用。华北板块北缘的岩浆在挤压应力场作用下向上侵入, 而研究区的岩浆在早石炭晚期至中二叠时期未发生显著向上侵入。至中生代早期, 受燕山运动的影响, 研究区经历了 NW-SE 向挤压, 深部岩浆房再度活化, 岩浆开始向上侵入煤层。

对于研究区晚石炭至中二叠世岩浆侵入煤层的初步提出的观点为: 石炭纪早期(300 Ma), 华北板块北缘东段形成中性岩浆房(锆石结晶年龄 300 Ma), 但未完全侵入地表, 滞留于中下地壳; 二叠纪至中生代, 燕山期构造挤压使先存岩浆房再活化, 沿开平向斜北西翼推覆构造向上侵入煤层, 引发接触变质。这为该区域的岩浆岩分布规律提供了预测思路, 并在岩浆通道系统及侵入成因机制有着一定的理论价值。

关键词: 岩浆侵入机制; 构造—岩浆耦合

第一作者简介: 崔敏睿(2001—), 博士, 研究方向: 地球化学. Email: tb23010005a51@cumt.edu.cn

*通信作者简介: 李伍(1987—), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学、煤地质学及油气地质. Email: liwu@cumt.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑都兰三叠纪富晶体与贫晶体火山岩的成因 及其对长英质岩浆系统晶粥活化的指示

张萌雨¹, 刘彬^{1*}, 马昌前^{2,3}, 张瑶瑶¹, 薛振华^{2,3}, 孙洋¹, 李艳青¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

晶粥活化是控制长英质火山喷发与岩浆分异的关键过程之一, 直接影响着晶体-熔体分离与熔体抽取效率、岩浆混合行为及火山喷发方式, 对于理解大陆地壳形成与演化、揭示火山喷发机理以及科学预测未来火山喷发等具有重要意义。然而, 目前国内外学者对于长英质岩浆系统的晶粥活化作用的研究还不够深入, 例如, 对于晶粥再活化的驱动机制还存在岩浆补给、流体加入等“外源触发”与挥发分、岩浆房超压等“内因主导”多种不同观点。本项研究选取都兰海寺沟地区出露的三叠纪地壳剖面中富晶体与贫晶体火山岩为研究对象, 通过开展锆石、磷灰石和石英微区结构与成分研究, 结合岩石地球化学研究, 综合分析对比富晶体与贫晶体火山岩的形成与演化机制差异, 在此基础上探讨有关岩浆系统的晶粥活化过程及其控制因素。研究区富晶体火山岩由富晶体英安岩和富晶体流纹质熔结凝灰岩组成, 而贫晶体火山岩主要由贫晶体流纹质熔结凝灰岩和流纹岩组成。本次锆石 U-Pb 年代学测定结果揭示这些火山岩具有相似的结晶年龄, 均为中三叠世火山活动的产物。锆石 Hf 同位素分析进一步揭示这些火山岩具有相似的岩浆源区, 并且以新生下地壳物质为主。基于锆石微量元素、锆石结晶和饱和温度与锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 压力计估算结果等对比, 可以判断富晶体与贫晶体流纹质熔结凝灰岩、流纹岩应该代表同一岩浆储库不同演化阶

段的产物, 而富晶体英安岩来自另一个不同的岩浆储库。石英电子探针与 CL 图像分析结果表明, 石英 Ti 含量与灰度具有明显的正相关关系。这些火山岩中的石英微区结构类型丰富, 主要发育韵律环带和反环带, 能够反映基性岩浆不同程度的补给作用。贫晶体和富晶体流纹质熔结凝灰岩中的石英 Ti 含量和温度存在重叠, 进一步指示两者应为同一岩浆储库不同演化阶段的产物。石英 Ti 扩散年代学显示, 富晶体火山岩对应岩浆储库从加热活化到喷发的时间通常显著长于贫晶体火山岩对应的时间。富晶体火山岩的磷灰石发育正、反两种环带, 贫晶体火山岩多发育成分均一或具有正环带结构的磷灰石, 暗示富晶体火山岩对应的岩浆储库演化存在较多基性岩浆熔体的注入与混合。综合上述研究数据, 可以推断研究区内富晶体与贫晶体火山岩的形成与中三叠世基性岩浆底侵诱发下地壳部分熔融密切相关, 其中富晶体与贫晶体流纹质熔结凝灰岩、流纹岩可能为同一岩浆储库不同演化阶段的产物, 富晶体英安岩为另一岩浆储库演化的产物。基性岩浆不同程度和不同方式补给很可能是导致研究区长英质岩浆系统晶粥多次活化的重要机制。

关键词: 长英质岩浆系统; 晶粥活化; 富晶体火山岩; 贫晶体火山岩; 岩石成因

国家自然科学基金项目 (42130309, 41972066, 41502050)

第一作者简介: 张萌雨 (1999-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、火山岩油气藏等方面研究.E-mail: myzhang.stu@yangtzeu.edu.cn

*通信作者简介: 刘彬 (1987-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、基岩潜山油气勘探等方面教学与研究.E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

准噶尔盆地中部石炭纪超深层火山岩的岩石成因 及其深部地球动力学机制 ——以 ZS1 井为例

李世泽¹, 刘彬^{1*}, 王鹏², 李艳青¹,
袁禹¹, 张萌雨¹, 吴栾¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100

新疆准噶尔盆地是中亚造山带西南缘的重要组成部分, 其不仅是研究古亚洲洋演化与大陆地壳生长的“天然实验室”, 而且也是当前我国深层-超深层油气勘探的关键地区。该盆地内部石炭纪火山岩厚度大、分布广, 源-储配置关系优越, 具有巨大的油气勘探潜力。已有研究多聚焦盆地中一浅层火山岩, 对于深层-超深层火山岩的研究至今仍非常薄弱, 尤其是超深层火山机构的具体类型、形成机制与发育模式等认识几乎为空白。本研究选取准噶尔盆地中部最新钻遇的一口超深层探井 ZS1 井中石炭纪火山岩为研究对象, 通过开展锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学和地球物理学等综合研究, 深入剖析其岩浆源区组成以及有关岩浆形成与演化机制, 在此基础上系统分析其岩石成因与深部地球动力学机制, 以期为深入认识准噶尔盆地石炭纪构造演化与促进超深层火山岩油气藏勘探开发提供重要支撑。本次锆石 U-Pb 年代学测定结果揭示 ZS1 井发育两套时代不同的火山岩, 分别为早石炭世(335.2 ± 2.9 Ma)和晚石炭世(304.8 ± 2.0 Ma)。基于井-震对比方法揭示 ZS1 井发育一套中心式多火山口复合火山机构, 在岩相序列上表现为爆发相—溢流相—爆发相的演化特征。岩石地球化学分析结果显示, 早石炭世火山岩和晚石炭世火山岩样品均具有亚碱性玄武岩系列的成分特征, 早石炭世火山岩样品属于中钾钙碱性系列, 晚石炭世火山岩样品属于低钾拉

斑系列。与早石炭世火山岩样品相比, 晚石炭世火山岩样品具有相对高的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 含量, 相对低的 MgO 、 K_2O 、 CaO 、 FeO_t 含量。两套火山岩相对于球粒陨石富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 其 Eu 异常不明显。在原始地幔标准化图解上, 两套火山岩相对富集轻稀土和 Th 等元素, 显著亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 总体与起源于俯冲改造的岩石圈地幔的镁铁质岩成分特征类似。根据主量-微量元素特征指标可以判断两套火山岩受陆壳混染的影响较小, 经历了不同程度的橄榄石、辉石和角闪石等矿物的分离结晶。早石炭世和晚石炭世火山岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 $+1.8 \sim +15.1$ 和 $-4.9 \sim -2.6$, 表明其分别起源于相对亏损或者相对富集岩石圈地幔。两套样品均具相对高的 Th/Yb 值, 变化范围大的 Ba/Th 和 Ba/La 值, 反映其地幔源区受到俯冲组分(以流体为主)的改造。这两套火山岩具有相对低的 $\text{Zn}/\text{Fe}_t (\times 10^4)$ 和相对低的 Sm/Yb 值, 进一步表明两者均起源于尖晶石+少量石榴子石二辉橄榄岩地幔源区。综合本次研究成果以及区域多学科研究资料, 可以判断早石炭世火山岩应该形成于一个大陆弧的环境, 与北天山洋北向俯冲关系密切, 而晚石炭世火山岩形成于一个受板块回撤影响的大陆弧后盆地伸展环境中。

关键词: 超深层火山岩; 岩石成因; 地球动力学机制; 石炭纪; 准噶尔盆地中部

国家自然科学基金项目(41502050)和中国石化胜利油田分公司课题(24ZC0613)

第一作者简介: 李世泽(2000-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、火山岩油气藏等方面研究。E-mail: szli.stu@yangtzeu.edu.cn

*通信作者简介: 刘彬(1987-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、基岩潜山油气勘探等方面教学与研究。E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

长白山天池火山破火山口阶段岩浆房
系统形成与演化过程李嘉慧¹, 单玄龙^{1*}, 衣健¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130012

长白山火山是我国公认的最具喷发危险的活火山, 一旦发生爆炸式喷发, 将会造成巨大的灾害影响。岩浆过程是火山形成、演化和喷发的根本原因, 准确认识和恢复地质过程及规律是有效预防地质灾害的根本。本次研究以天池火山为研究对象, 基于野外剖面, 利用岩相学、矿物学、地球化学、熔体包裹体等方法, 结合 rhyolite-MELTS 模拟结果和地球物理探测结果, 深入揭示天池火山破火山口阶段岩浆房系统形成演化过程, 这对进一步探索长白山复合岩浆房系统的演化规律和喷发趋势具有重要意义。

(1) 天池火山破火山口阶段喷发序列

基于野外剖面, 综合利用岩相学、矿物学、地球化学等方法认为破火山口阶段主要由四个期次构成。结合年代学测年结果, 由下至上依次为: 29 ka 前喷发的天文峰期黄色碱流质浮岩; 7~17 ka 前喷发的气象站期碱流质熔岩; 公元 946 年千年大喷发事件, 包括以浅灰色碱流质浮岩为代表的千年大喷发 I 期, 和以黑色粗面质浮岩为代表的千年大喷发 II 期。

(2) 岩浆演化过程模拟

运用 rhyolite-MELTS 热力学模型对天池火山破火山口阶段各期次岩浆演化过程进行模拟, 在 $P=1\sim2$ kbar, 含水量为 0.3~0.5 wt.% 条件下, 模拟演化的结果与破火山口阶段四个期次样品分布吻合较好, 表明天池火山破火山口阶段岩浆的演化部位很可能处于地壳浅部位置。

(3) 复合岩浆房系统结构

利用熔体包裹体和单斜辉石-熔体温压计两种方法对岩浆房的温压条件进行计算, 结合 rhyolite-MELTS 模拟结果和地球物理探测结果, 实现对复合

岩浆房系统的刻画。天文峰期岩浆房深度范围为 4.7~6.8 km; 气象站期碱流质岩浆房深度范围为 5.9~7.5 km; 千年大喷发 I 期岩浆房深度范围为 4.3~7.8 km; 千年大喷发 II 期岩浆房深度范围为 2.5~5.5 km。

(4) 天池火山破火山口阶段岩浆房系统形成-发展过程

天文峰期岩浆来源于中地壳高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的粗面质岩浆。气象站期岩浆房为另一个新生的岩浆房, 其岩浆来源于中地壳低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的粗面质岩浆。气象站期与千年大喷发 I 期岩浆具有一定继承关系, 可能存在由小岩浆房逐渐生长形成大岩浆房的规律。即在气象站期喷发结束后, 此时碱流质岩浆房处于生长膨胀的状态。由于中地壳岩浆的持续补给, 形成大型的千年大喷发 I 期岩浆房, 直到后期大规模粗面质岩浆注入, 触发了火山喷发。千年大喷发 II 期岩浆来源于中地壳岩浆房中储集的另外一期新的粗面质岩浆, 并继承千年大喷发 I 期碱流质岩浆房, 在经过短时间的演化后继续喷发, 形成黑色浮岩堆积。

(5) 未来喷发趋势

长白山千年大喷发期岩浆房已经发生坍塌破坏, 在千年大喷发之后又发生了多次小规模喷发, 说明地下深部岩浆又开始重新上升聚集, 形成新的小岩浆房。岩浆房系统又进入下一个从小岩浆房逐渐生长形成大岩浆房的过程。结合近期火山监测数据, 推测长白山火山下次喷发仍以小规模的中酸性岩浆喷发为主。

关键词: 天池火山; 破火山口阶段; 岩浆房系统; 岩浆演化; 触发机制

基金项目: 国家自然科学基金面上项目《长白山更新世-全新世碱性熔岩到浮岩阶段喷发方式转换的深部岩浆过程》(项目编号: 41972313)

第一作者简介: 李嘉慧 (1997-), 博士, 研究方向: 火山地质. Email: 852431474@qq.com

*通信作者简介: 单玄龙 (1969-), 教授, 研究方向: 火山地质、火山岩/变质岩油气藏. Email: shanxl@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

火与热的馈赠：火山-岩浆活动景观价值链与地学旅游多维启示

任舫¹, 潘志新^{2*}, 张辉³, 李凌云⁴

1. 中国地质科学院 地质遗迹研究室, 北京 100037;

2. 海南大学 旅游学院, 海口 570228;

3. 海南交投环岛旅游公路投资开发有限公司, 海口 570233;

4. 海南省交通建设发展有限公司, 海口 570227

岩浆作用既是地球深部能量释放的窗口, 也是地表景观与资源协同演化的核心驱动力。本文以国内外著名的岩浆岩地质遗迹类型为例, 结合中国东南部白垩纪红层盆地丹霞地貌、美国黄石地热奇观及夏威夷火山景观等典型案例, 揭示火山-岩浆通道系统在资源形成、环境响应与美学塑造中的耦合机制。研究表明: (1) 火山活动通过岩浆分异、热液蚀变及火山碎屑沉积等过程, 直接塑造了地热泉、火山湖、熔岩台地等旅游资源, 并为关键金属 (如稀土元素)、非金属矿产 (沸石、浮石) 及矿泉水资源提供了成矿载体; (2) 景观演化密码: 中国东南部丹霞地貌的“赤壁丹崖”景观本质是中生代岩浆岩风化产物中铁元素氧化显色 (Fe^{3+} 胶结物) 与构造抬升共同作用的结果, 中国东南部丹霞地貌的成因与中生代火山-岩浆活动密切相关: 白垩纪岩浆岩经风化剥蚀为红层盆地提供了富铁碎屑物源, Fe^{3+} 胶结物的氧化显色作用与构造抬升共同造就了“赤

壁丹崖”的视觉奇观, 其美学价值已成为世界地质公园和世界遗产地旅游的核心吸引力; (3) 火山通道系统的多尺度结构 (如火山颈、放射状岩墙群) 不仅记录了岩浆运移的动力学历史, 其独特的地貌形态 [美国魔鬼塔国家纪念地 (Devil's Tower)、夏威夷火山链] 更成为科学普及与生态旅游的天然课堂。研究进一步提出“岩浆岩地质遗产资源链”模型, 强调从深部岩浆分异 (金属富集) 到浅表火山机构 (地貌景观) 再到表生地球化学循环 (资源再生) 的完整价值链。以湖南平江石牛寨、龙虎山、海口火山口等中国地质公园为例, 建议通过“地质遗迹保护-科学阐释-产业结合-旅游转化”的路径, 实现资源的多维开发与可持续利用, 为全球岩浆岩景观区域的生态价值转化提供科学范式。

关键词: 岩浆作用; 丹霞地貌; 地学旅游; 岩浆岩地质遗迹; 生态价值转化

基本科研业务费项目: 基于 GIS 的平江石牛寨地质公园丹霞地貌成因研究 (JKY202403)

海南省交通厅委托项目: 海南环岛旅游公路旅游地学资源挖掘与科普示范研究 (HX2023-09)

第一作者简介: 任舫, 副研究员, 研究方向: 地质遗迹保护, 丹霞地貌 Email: 546615019@qq.com

*通信作者简介: 潘志新, 副教授, 研究方向: 自然地理, 丹霞地貌, 地质遗迹保护, 生态地质. Email: 415979045@qq.com

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

利用地震资料解译火山岩有利储层的新视角 ——地层结构

唐华风^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

勘探早期火山岩有利储层的预测符合率一直以来是困扰勘探家的难点问题, 关键是需要建立储层与地震相的关系。已有的储层-岩相-地震相的研究方法流程未能建立起储层与地震相的关系。本文尝试从地层结构角度入手, 利用高勘探程度的松辽盆地白垩系营城组火山岩勘探成果, 建立地震相特征与储层的关系。研究表明, 松辽盆地白垩系营城组火山地层中发育似层状、似层状-块状、块状和层状等 4 类地层结构, 在火山岩圈闭的占比分别为 30%、26%、23%和 21%。从孔隙度几何均值、

渗透率几何均值和极好-好-一般储层的数量来看, 有利储层主要分布在似层状和层状结构的地层中。地层结构中导致储层品质好的原因是发育原生孔隙的似层状结构的熔岩流和热碎屑流。储层品质差的原因是原生孔隙不发育的块状结构的熔岩穹丘和熔岩流。该认识应用于勘探早期盆地的火山岩油气藏勘探, 可能会大幅度降低经济风险。

关键词: 火山岩; 火山机构; 有利储层; 分布模式

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790453)和吉林省重点研发计划项目(20230203107SF)

第一作者简介: 唐华风(1979-), 教授, 研究方向: 火山岩储层和火山地层综合研究. E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

新元古代扬子陆块北缘汇聚裂解过程

游国庆^{1*}

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

我国华南板块中新元古代构造演化一直是近年来研究的热点。扬子陆块北缘大洪山地区发育的花山杂岩体是在新元古代时期扬子地块与桐柏一大别地块之间形成的前寒武纪重要地质体, 它们对全球 Rodinia 超大陆在扬子陆块北缘的汇聚裂解响应具有重要的地质意义, 然而, 其地质单元形成的时空关系及其构造属性一直存在争议。通过对花山群杂岩岩浆岩和沉积岩有关锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素、沉积地层特征、岩石主微量元素的研究认为, 沉积地层(洪山寺组和六房咀组)与岩浆岩[辉长岩、辉绿岩、(枕状)玄武岩]不是同期同构造背景的产物。

花山杂岩体沉积地层的沉积学、地球化学等研究表明, 洪山寺组和六房咀组发育的小型斜层理位态和矿物成分显示物源可能主要来自南部地区下伏中元古代打鼓石群、太古宙鱼洞子杂岩以及崆岭杂岩等, 其沉积旋回显示裂陷扩张过程。其中, 洪山寺组主体形成于浅水浊积扇相, 六房咀组主要形成于深水盆地相。根据年代学研究资料和区域构造成果分析, 结合前人在扬子板块周缘发现的大量约 820 Ma 酸性—基

性岩浆活动记录以及同时代(820~800 Ma)的沉积地层, 花山群中的碎屑沉积物与基性火山岩、火山碎屑岩属于裂解背景下形成的同时代沉积火山建造, 说明花山群的沉积地层形成于青白口纪(820~815 Ma)的伸展构造背景, 其原型盆地形成于弧后裂陷构造环境。推测它可能形成于 Rodinia 超大陆裂解背景之下, 与超级地幔柱活动相关。

在花山群中的“蛇绿混杂岩”镁铁质岩体[辉长岩、辉绿岩、(枕状)玄武岩]组合在大洪山地区大致形成于 817~947 Ma 弧前或洋内构造背景, 可能是多阶段洋陆或洋内俯冲的产物。推测扬子陆块与桐柏一大别地块之间在晋宁期发生过一定规模的洋内或洋陆俯冲及造山运动, 二者可能曾在青白口纪晚期拼合到一起。

由此可见, 花山群镁铁质岩体与沉积建造依次反映了扬子板块北缘中新元古代时期由挤压构造背景向伸展构造背景的转换过程。

关键词: 扬子北缘; 新元古代; 汇聚与裂解; 花山杂岩体

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

塔北阿满过渡带二叠纪火山岩时空演化与喷发机制

魏菱¹, 陆鹿^{1*}, 张银涛², 谢舟², 许永忠¹, 康鹏飞²,
李壮福¹, 陈皓宇¹, 汤恒昊¹

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国石油股份有限公司塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

阿满过渡带在构造上属于塔里木盆地北部坳陷, 位于西部阿瓦提凹陷与东部满加尔凹陷之间的低隆带上。该地区发育广泛的玄武质熔岩和大量的以英安岩为代表的长英质火山岩, 形成基性-酸性双峰式火山岩喷发体系(厚度>500 m, 展布面积 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$), 构成塔里木二叠纪大火成岩省的重要组成部分。本研究通过三维地球物理资料和钻井数据解析、宏微观岩相学系统分析、锆石 U-Pb 同位素定年(12 口钻井, 28 件样品)、关键界面相干体分析, 首次揭示了该区二叠系火山岩的时空分布规律, 并探讨不同单元火山岩的喷发模式。研究结果表明, 该区二叠系火山岩在横向上呈现典型多中心集中分布, 其中玄武岩以富满、果勒西为喷发中心(NW-SE 向展布), 英安岩则发育跃满(弧形构造带)、果勒西、满深三个喷发中心。火山喷发整体具有“内早外晚”的时代序列特征。弧形构造带内部的火山岩喷发时代较早(296~291 Ma), 而外部喷发时代较晚(291~287 Ma), 自弧形构造带内部向外逐渐变年轻, 整体表现出破火山口沉陷型火山喷发序列。玄武岩喷发通道与辉绿岩侵入

体相连, 二者构成由横向岩床群主导的岩浆运移系统。 F_5 断裂以东沿 NW-SE 向伸展断裂呈裂隙式喷发, 西段受 NNW 向走滑断裂控制。英安岩定向展布特征不明显, 表现为“三中心”集中喷发特征, 反映深部岩浆房孕育和演化占主控作用, 为破火山口式喷发。岩浆通道并非定向断裂, 而是塌陷式破火山口周缘断裂。基于地震剖面 and 关键界面相干特征分析, 刻画出了二叠系英安岩火山喷发通道。本研究揭示了阿满过渡带二叠系火山岩时空分布规律, 刻画和追踪了以“东横西顺”为特征的辉绿岩-玄武岩岩浆侵入-喷发通道以及破火山口周缘断裂式英安岩喷发通道, 并分析其地质控因。创新性提出地幔柱背景下的双模式喷发机制: 1) 基性岩浆沿基底薄弱带(南华系先存断裂)快速上升形成裂隙式喷发; 2) 酸性岩浆受深部岩浆房演化控制, 产生破火山口塌陷式喷发。该模型为理解克拉通内地幔柱背景下双峰式火山作用提供了新的构造岩浆学视角。

关键词: 塔里木大火成岩省; 二叠系火山岩; 时空分布规律; 喷发机制; 阿满过渡带

基金项目: 中石油塔里木油田公司横向委托项目“阿满过渡带火成岩形成期次及发育模式研究”(041022070109)

第一作者简介: 魏菱(1999-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩岩石学. Email: 2296335068@qq.com

*通信作者简介: 陆鹿(1989-), 副教授, 研究方向: 岩石大地构造、沉积盆地演化、油气储层地质. Email: geollulu@cumt.edu.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

华北克拉通胶-辽-吉带生铁岭 REE-Fe 矿床的 年代学与地球化学: 约 1.85 Ga 构造- 岩浆事件对热液成矿的影响

王小慧^{1*}

1. 中国地质科学院, 北京 100089

华北克拉通胶-辽-吉带古元古代变质火山-沉积岩中赋存的稀土-铁矿床具有巨大的勘探潜力, 但其成因仍不明确。生铁岭稀土-铁矿床是该类型矿床中规模最大的之一, 矿石主要为富含独居石、磁铁矿、黄铁矿和重晶石的磁铁变粒岩。不含矿的变粒岩和赋矿的磁铁变粒岩的全岩地球化学数据表明, 其原岩为流纹岩和英安岩, 这些原岩提供了稀土和铁的物质来源。从磁铁变粒岩 STL24-Zr 中提取的锆石颗粒具有核-边结构。锆石核部和边部的原位 U-Pb 定年分别获得了 2161 ± 12 Ma 和 1837 ± 9 Ma 的加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 解释为岩浆原岩的形成时代和变质时代。从磁铁变粒岩中提取的独居石颗粒的原位 U-Pb 定年获得了 1843 ± 7 Ma 的加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年

龄, 这被认为是稀土-铁成矿时代的最佳估计。因此, 稀土-铁成矿作用可能与约 1.85 Ga 的变质-热液事件有关。与独居石和磁铁矿共生的黄铁矿的原位微量元素数据表明, 成矿热液在中高温环境 (307 °C 至 521 °C) 下, 在酸性、还原和低氧逸度 ($f\text{O}_2$) 条件下从原岩中淋滤出稀土、铁和磷。考虑到生铁岭矿床中的富 Co 黄铁矿与胶-辽-吉带中许多其他矿床, 如 (吉南大横路 Co 矿) 的成矿时代几乎一致, 我们认为约 1.85 Ga 的构造-岩浆事件可能对多金属成矿起到了重要作用。

关键词: 磁铁矿; REE-Fe 矿化; 磁铁浅粒岩; 胶-辽-吉带

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072112)

第一作者简介: 王小慧 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床成因与成矿规律. Email: 2936404660@qq.com

*通信作者简介: 马玉波 (1981-), 硕士研究生, 研究方向: 成矿规律与成矿预测. Email: 13911998185@139.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

鞍本地区条带状铁建造中磁铁富铁矿形成时代与成矿机制

李延河^{1*}, 王倩¹, 张增杰¹, 李厚民¹, 范昌福¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

辽宁鞍本地区是我国最重要的鞍山式沉积变质型铁矿 (BIF) 集中区, 在 BIF 贫铁矿中发育弓长岭式和齐大山式高品位磁铁富矿, 但关于富铁矿的形成时代和成因一直存在争论, 辽河群在富铁矿成矿中的作用长期被忽视。富铁矿与 BIF 贫铁矿关系密切, 时空分布明显受贫铁矿、断裂构造和热液蚀变围岩控制。在前人工作基础上, 研究总结了该地区弓长岭、齐大山富铁矿的形成时代, 对比研究了 BIF 贫铁矿、富铁矿和蚀变围岩的铁、硅、氧、硫、硼、碳、镁同位素组成特征和变化规律。鞍本地区富铁矿成矿作用共有二期, 第一期发生在 2.45 Ga, 第二期发生在 1.85 Ga, 二期成矿作用均与区域变质之后地壳伸展和基底隆升引发的碱性花岗质岩浆活动有关, 成矿热液主要由大气降水演化形成。富铁矿与 BIF 贫铁矿的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 、 $\delta^{30}\text{Si}$ 值基本一致, 强烈富集重铁同位素和轻硅同位素。富铁矿和蚀变围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较 BIF 贫铁矿显著降低。富铁矿和蚀变围岩中黄铁矿发育, 弓长岭富铁矿中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 较 BIF 贫铁矿显著升高, 齐大山铁矿中单颗粒黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值从核心到边部大幅升高。弓长岭等富铁矿蚀变围岩中电气石的 $\delta^{11}\text{B}$ 值异常高, 与 BIF 贫铁矿及围岩截然不同, 而与辽河群硼镁矿的值相似。不同富铁矿中石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围很大, 其中弓长岭富铁矿中石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值异常高, 而齐大山、南芬富铁矿中石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与石墨矿床的值相似。2.45 Ga 第一期成矿溶液具弱酸性

特征, 成矿溶液与 BIF 和围岩反应, 围岩发生强烈蚀变, 形成多种云英岩, BIF 中铁质发生活化再沉淀, 在 BIF 边部形成富铁矿脉/团块, 硅质大部分残留原地形成失铁硅质岩。该期成矿作用以“铁质活化再富集”为主, 形成齐大山式富铁矿。1.85 Ga 第二期成矿流体流经并淋滤了辽河群蒸发盐地层中的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、富 ^{13}C 的 CO_3^{2-} 、富 ^{34}S 的 SO_4^{2-} 和富 ^{11}B 的硼酸盐等可溶盐类物质, 使成矿溶液具偏碱性弱氧化特征。硅质在碱性条件下溶解, 在酸性环境中沉淀, 铁质刚好相反。偏碱性弱氧化的成矿溶液沿 BIF 贫铁矿中的层间构造破碎带运移, 并与围岩反应, 贫铁矿中 SiO_2 在偏碱性热液的作用下发生活化迁移, 溶液中 SiO_2 与围岩中粘土矿物等反应形成绿泥石、石榴石、透闪石等, 少量 SiO_2 迁移一定距离后随着温度的下降在富铁矿的边部再沉淀形成石英脉或团块; 大部分铁质在原地富集成磁铁富铁矿, 少量铁质发生活化再沉淀, 形成富铁矿脉。同时, 溶液中 SO_4^{2-} 被 Fe^{2+} 还原形成富 ^{34}S 黄铁矿, 热液中硼与围岩反应形成富 ^{11}B 电气石, 溶液中 CO_3^{2-} 被还原形成富 ^{13}C 的石墨。该期成矿作用以“去硅富铁”为主, 形成弓长岭式大型磁铁富矿。建立鞍本地区 BIF 中磁铁富矿铁矿成矿模型。

关键词: 弓长岭富铁矿; 成矿时代; 同位素; “铁质活化再富集”; “去硅富铁”

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

华北克拉通 BIF 型富磁铁矿矿床的成矿流体： 来自黄铁矿微量元素和硫同位素的约束

王亿^{1*}

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

BIF 型富铁矿床是世界上最重要的铁资源来源。尽管不如赤铁矿矿石常见, 但富磁铁矿矿石是另一种重要的类型, 主要分布在华北克拉通北部。一般认为, 富磁铁矿矿石是由高温热液流体与约 2.55 Ga 的 BIF 原岩相互作用形成的, 但成矿流体的性质和演化仍不明确。根据矿床规模和蚀变特征, 富磁铁矿矿床可分为两种类型: 弓长岭型和齐大山型。我们对这两种类型的富磁铁矿矿床中的 BIF、富磁铁矿矿石以及矿体周围蚀变岩中的黄铁矿进行了原位微量元素和硫同位素分析。结果表明, 这两种矿床的成矿流体均表现出与深部岩浆活动相关的热液系统特征。在弓长岭矿床中, 成矿流体主要来源于约 1.85 Ga 的岩浆活动,

同时还有来自淋滤古元古代富 Co、Ni 地质体的流体贡献。相比之下, 齐大山矿床则以富含 As、Se 的流体为主, 这些流体来源于约 2.5 Ga 的岩浆-热液活动。我们认为, 深部岩浆活动是形成富铁矿床的基础, 而要形成大规模矿床(如弓长岭矿床), 则需要多期次的热液活动, 并涉及富含 Co、Ni 的成矿流体。研究结果还表明, 黄铁矿的硫同位素可能受到多种因素的影响, 因此在约束成矿流体来源方面效果有限, 而黄铁矿的微量元素则能更精确地揭示流体的性质和来源。

关键词: 黄铁矿; BIF; 富磁铁矿矿床; 华北克拉通

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

山东郭店矽卡岩型富铁矿成矿流体特征及铁的富集机制

康健丽^{1*}, 张招崇², 王雯³

1. 中国地质调查局天津地质调查中心 矿产地质室, 天津 300170;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830049

我国铁矿储量较大, 但经济价值较高的富铁矿(>50% Fe)却相对短缺。矽卡岩型铁矿是我国最重要的富铁矿之一, 也是最有勘查潜力的铁矿类型, 对其成矿机制的研究, 有助于提升勘查效率, 增加储量。齐河-禹城是鲁西地区的国家级整装勘查区, 近年来实现了富铁矿重大找矿突破, 矿集区内目前探明的铁矿有郭店、李屯、叠道和大张。郭店铁矿是齐河-禹城整装勘查区典型的矽卡岩型富铁矿床, 其研究程度尚处于起步阶段, 因此, 其成矿机制是否与鲁西地区的莱芜、淄博乃至全国其余地区矽卡岩型铁矿的相似, 还不确定。

郭店铁矿位于平原区, 未见基岩出露, 钻孔揭露新生代地层厚度超过 800 m。从岩心观察来看, 铁矿床主要赋存于辉长闪长岩和奥陶系大理岩接触带及其附近。矿体呈透镜状产出, 埋藏深度在-1464~-1622 m, 矿石层磁铁矿最高含量 80%~90%。矿石构造主要为块状构造、脉状构造、浸染状构造和角砾状构造。根据脉体间的穿插关系、矿物共生组合及围岩蚀变等特征, 将郭店铁矿的成矿过程划分为矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段和碳酸盐阶段。

本次用于流体包裹体研究的样品均取自郭店铁矿钻孔 ZK801 标高的铁矿体附近, 通过详细的岩相学研究, 选取具有代表性的流体包裹体样品进行包裹体测温。郭店铁矿矽卡岩阶段透辉石和石榴子石内主要发育含子矿物包裹体和富液相包裹体, 另含有少量

富气相包裹体。含子矿物包裹体均一温度~505.9 °C 之间, 部分包裹体在加热至 550 °C 时仍未均一, 其子晶熔化温度介于 447.1~550 °C 之间, 对应盐度 w (NaCleq) 接近 20%。富液相包裹体均一温度介于 498.6~550 °C 之间, 部分包裹体在加热至 550 °C 时仍未均一。富气相包裹体均一温度介于 470.1~531.2 °C 之间。郭店铁矿流体包裹体的均一温度和盐度指示流体在矽卡岩阶段呈现高温、中高盐度的特征。

氢、氧同位素组成研究表明, 郭店铁矿矽卡岩阶段成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ fluid 为 5.6~8.1, δD fluid 为 -82.2~-140, 氧化物阶段成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ fluid 为 0.1~0.5, δD fluid 为 -45.3~-55.3, 在 H-O 同位素图解中, 氧同位素非常接近岩浆水, 而氢同位素落于岩浆水下方, 表明成矿流体早期发生沸腾作用, 导致氢氧同位素的分馏。而且早期的氧同位素显著高于晚期, 这表明在早期成矿流体可能与碳酸盐地层发生反应, 引起氧同位素的升高。

综上所述, 郭店铁矿成矿流体在早期呈现高温中高盐度的特征, 晚期温度和盐度都有显著的降低, 揭示早期成矿流体主要来自岩浆热液, 并与碳酸盐地层反应, 晚期逐渐有大气水的加入, 而二者的混合作用加之温度的降低可能是铁元素沉淀富集的主要机制。

关键词: 流体包裹体; H-O 同位素; 铁的富集机制; 郭店铁矿; 中国东部

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

冀东沉积变质型富铁矿成矿特征及远景分析

崔伟¹, 张招崇^{2*}

1. 河北省地矿局第二地质大队, 河北 唐山 063000;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

富铁矿是我国最紧缺的大宗金属矿产资源之一。冀东地区是我国沉积变质型铁矿的第二大产区, 目前累计查明了约 0.38 亿吨的富铁矿, 主要赋存于滦县司家营、迁安杏山和滦南马城等铁矿床中。冀东地区富铁矿成因, 以往主要有两种认识: 一种是原始沉积型和后期热液改造型均有, 且以原始沉积型为主(魏菊英等, 1979), 另一种原始沉积相对较富, 后期经热液或构造改造而成(钱祥麟等, 1985; 许英霞等, 2014; 周永贵等, 2012; 张龙飞等, 2015; 沈其韩等, 2015)。本文通过对冀东 5 个主要成矿区带典型矿床铁物相特征和富铁矿床地质特征研究, 发现: (1)富铁矿表现为受原始沉积控制, 贫铁矿床规模大或品位高, 有利于形成富铁矿, 但后期必须经过流体改造。杏山和马城铁矿分别分布有占比达 19.0%、23.43%的准富铁矿(TFe 40%~45%), 但后期热液蚀变相对较弱, 富铁矿集中分布在某一区段, 规模较小; 司家营铁矿准富铁矿较少, 但富铁矿体分布受后期断裂、热液叠加控制明显, 富铁矿规模较大。(2)富铁矿或受断层控制, 在断块间分布, 如司家营 S22 线区段; 或现阶段未发现受构造控制, 但顶板岩心相对前排孔热液蚀变现象明显增多, 局部岩心褪色、绿泥石化、碳酸盐细脉发育, 局部钾化发育、黄铁方解石脉发育, 在

司家营大 38 线还见到矿层中破碎带顶板贫铁矿主要由蓝闪霓石磁铁矿石组成, 富矿体顶板绢云绿泥石英片岩, 呈片状揉皱构造。说明构造提供了热液通道, 热液以碱性热液为主。酸性热液形成的铁质活化再富集, 司家营也有分布, 但厚度一般为厘米级, 硅和铁分别富集。(3)磁铁富矿较磁铁贫矿具磁性铁占有率高(高 6%左右)、硅酸铁占有率低的规律, 暗示了富矿受到更多后期热液叠加作用。(4)冀东富铁矿石可明显分为 2 组, 一组为角闪石(辉石)型富矿 SiO₂ 平均含量 17.04%~34.46%, 与准富铁矿类似; 另一组为碳酸盐型富矿 SiO₂ 平均含量 5.64%~7.09%, TFe₂O₃、MgO+CaO 及 LOI 较第一组明显高, 富集碳酸盐矿物。且碳酸盐型富矿分布在角闪石(辉石)型富矿中, 以角闪石(辉石)型富矿为主, 推断碳酸盐型富矿是热液通道中心。结合前人研究成果, 提出冀东富铁矿的形成是因为原生沉积时相对较富, 并进一步通过变质期后碱性热液叠加导致去硅富铁形成富铁矿。分析了富铁矿进一步找矿方向, 依据地质物探资料认为滦县司家营铁矿南区仍有较大富铁矿找矿潜力。

关键词: 条带状铁建造; 富铁矿; 成因类型; 找矿进展; 冀东

基金项目: 河北省地矿局地质科技项目“冀东铁矿找矿潜力预测及典型矿床成矿机制研究”(编号: 13000023P0069B410214D)

第一作者简介: 崔伟(1978年—), 男, 正高级工程师, 主要从事固体矿产勘查工作。E-mail: cuiwei781015@163.com

通讯作者简介: 张招崇(1965年—), 男, 教授, 主要从事矿床学、岩石学研究工作。E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

中国长江中下游成矿带航磁资料的地质解释 ——对玢岩与矽卡岩型铁矿床勘探的启示

葛藤菲¹, 杨雪^{1*}, 范振宇¹, 何敬梓¹, 高秀鹤¹, 范正国¹, 黄旭钊¹

1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

长江中下游成矿带以中生代玢岩铁矿、矽卡岩铁铜矿的形式蕴藏着大量的铁矿石, 显示出巨大的找矿潜力。前人研究表明, 长江中下游成矿带在中生代产生了爆发式成矿作用, 从而产生了诸多大中型陆相火山岩型铁矿床、矽卡岩铁矿床和热液型-斑岩型铜多金属矿床。

制约长江中下游成矿认识的主要问题包括矿床类型、控制不同类型矿床分布的因素以及新矿床的找矿远景, 由于河流冲积物的广泛分布, 制约了这些问题的研究。

由于大面积河流沉积物的覆盖, 地球物理勘探在长江中下游矿产勘探中可以发挥重要的作用。

研究使用长江中下游地区最新的航磁数据分析控制铁铜矿床的构造信息, 并使用弱信息提取新方法识别铁矿床位置。长江中下游成矿带铁矿位于区域重力异常的边缘及高磁异常, 为了剥离区域异常我们 IALM-RPCA 快速数据降维技术方法对该区进行低缓磁异常识别与提取, 基于 IALM 算法求解 RPCA 模型的方法分离出的矿致弱信息幅值较强、准确, 不易产生虚假异常, 克服了时间域计算耗时的缺点, 计算效率远高于前人所提出的 EALM 算法。该方法在区内三个玢岩型和矽卡岩型矿集区内提取出与赋矿岩浆系统相关的成矿弱信息, 发现铁矿位置与所提取信息密切相关。

居里面作为岩石圈的温度界面, 展示了大陆地壳磁性层以及热流的分布状态, 在大地构造、地震、地

热、矿产资源、油气资源以及火山活动等研究中都有非常重要的作用, 间接反映出地壳一定深度等温面的起伏特征。利用磁测数据反演居里面深度的方法有单磁异常法和组合磁异常法, 这两种方法都是通过把空间域数据转换到频率域来建立磁异常与磁性体深度关系。

本文使用东经 110°~115°、北纬 27°~34°范围的 1:5 万航磁数据进行居里面计算, 计算结果显示, 较为明显的居里面隆起分别位于宁芜矿集区东南和鄂东南矿集区黄石一带 (居里面深 21 km), 其中宁芜居里面最浅 19 km, 在 50 km 范围内隆起 5.5 km; 黄石居里面最浅 21 km, 在 90 km 范围内隆起 7.5 km, 这样的居里面的隆起往往反映了深部激烈的岩浆活动和热流的聚集与传导, 可以帮助判断深部岩浆活动强烈的位置, 同时两个居里面隆起中心均有明显的线性重磁场错断特征, 应为深断裂。长江中下游地区的两个居里面隆起与早白垩世成矿密切相关, 反映了该时期陆内俯冲造成地幔物质上涌的主要位置; 在宁芜东南主要俯冲发生的同时, 受到早起形成的大别超高压变质带的阻挡, 在鄂东南黄石一带发生了另一次大型俯冲。宁芜一带的玢岩型成矿来源于其东南部, 经历了约 80 km 的水平运移, 而鄂东南的矽卡岩型铁矿则未经长距离水平运移。

关键词: 航磁; 弱信息提取; 居里等温面; 矽卡岩型铁矿; 玢岩型铁矿

基金项目: 国家重点研发项目 (2022YFC2903704)

第一作者简介: 葛藤菲 (1987-), 高级工程师, 研究方向: 地球物理学、矿床学. Email: 564465031@qq.com

*通信作者简介: 杨雪, 高级工程师, 研究方向: 地球物理学. Email: 344189755@qq.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

宁芜矿集区向山南-大甸塘 IOA 型铁矿床闪长玢岩年代学和地球化学研究: 对岩石成因与铁成矿的启示

杨超¹, 张舒^{1*}, 钱祥³, 侯通², 张嵩松¹, 吴明安¹, 魏国辉¹

1. 安徽省地质调查院 (安徽省地质科学研究所), 合肥 230000;

2. 中国地质大学 (北京), 北京 100000;

3. 安徽省地矿局 322 地质队, 安徽 马鞍山 243000

铁氧化物-磷灰石型 (IOA) 或基鲁那型 (Kiruna) 矿床以磁铁矿-磷灰石-阳起石组合为特征 (Frietsch, 1978), 是全球重要铁矿类型。我国 IOA 矿床集中于长江中下游成矿带宁芜和庐枞矿集区, 成矿峰期约 130 Ma。其成因存在两大争议模型: (1) 铁氧化物熔体不混溶 (宁芜研究项目编写小组, 1978; Hou 等, 2010); (2) 高盐度流体出溶成矿 (Xu 等, 2024; Zhao 等, 2024)。两类模型均强调三叠纪蒸发岩的关键作用, 但对其加入时机 (岩浆同化 vs. 热液交代) 及控矿机制仍存争议。

向山南-大甸塘矿床位于宁芜凹山矿田, 为新发现的高品位 IOA 型铁矿床, 赋存于大王山组火山岩与辉石闪长玢岩接触带。矿体呈层状、透镜状, 垂向上分带明显: 浅部为黄铁矿-赤铁矿组合, 深部为磁铁矿主矿体, 受闪长玢岩穹隆控制。矿石具典型浸染状-网脉状构造, 矿物组合为磁铁矿+磷灰石+阳起石+硬石膏, 与全球 IOA 矿床一致。

本次研究对新发现的向山南-大甸塘铁矿中与成矿相关的火山-侵入岩进行高精度的锆石 U-Pb 定年、岩石主微量元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 为岩浆演化与磁铁矿-磷灰石成矿的空间、时间及成因联系提供了重要见解。高精度锆石 U-Pb 年代学将赋矿闪长玢岩侵位时间限定为 129.76 ± 0.98 Ma 和 129.49 ± 0.87 Ma, 与大王山组粗面安山岩 (129.78

± 0.98 Ma) 在时间上重叠, 并早于成矿后正长斑岩 (128.49 ± 0.57 Ma), 与区域成矿高峰期约 130 Ma 一致。类似弧岩浆的微量元素特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.82$ 至 -3.01 , 平均值 -9.35 ; -15.76 至 -5.28 , 平均值 -9.27 ; $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.24$ 至 -7.31 ; -4.70 至 -4.93), 表明粗面安山岩和闪长玢岩起源于交代的富集岩石圈地幔, 并显示地壳混染特征。闪长玢岩初始岩浆在中等压力条件下 (1.0~1.3 GPa) 经历橄榄石、单斜辉石的分离结晶, 保持了较高的 MgO 含量 (>4 wt.%), 抑制了磁铁矿的过早饱和。岩浆在上升过程中, 同化了三叠纪蒸发岩, 蒸发岩中硫酸盐的还原过程, 提高了熔体的氧逸度, 使磁铁矿达到超饱和状态, 并伴随超高盐度卤水析出形成富铁盐熔。本次工作于粗面安山岩和闪长玢岩中发现了继承的三叠纪锆石 (225~250 Ma), 直接证实了至少在岩浆过程中, 三叠纪蒸发岩就已经加入到岩浆系统中, 并为后续的 Fe 成矿提供了氧化剂与卤族元素。本研究建立了 IOA 型铁矿三步成因框架: (1) 中压结晶分异保留富 Fe 熔体, (2) 蒸发岩驱动的氧化作用优化磁铁矿稳定性, (3) 早期高盐卤水析出促进铁的迁移; 进而丰富完善了宁芜矿集区大王山火山旋回独特的铁成矿机制。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 闪长玢岩; 岩浆演化; 铁氧化物-磷灰石矿床; 宁芜矿集区

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

中国鞍山本地区弓长岭富铁矿床 Fe-Si-C 同位素特征及其成矿指示意义

栾金鹏^{1*}, 付建飞¹, 贾三石¹

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110000

辽宁鞍山-本溪地区是我国最大的 BIF 型铁矿资源基地, 其中弓长岭铁矿床是该区最具代表性的富铁矿床。针对弓长岭铁矿床中磁铁富矿的成矿物质来源和矿化过程等方面的争议, 本文进行了系统的矿物学、全岩地球化学和 Fe-Si-C 同位素研究。矿区代表性磁铁富矿石主要由磁铁矿和石英组成, 含有少量的绿泥石、阳起石、石榴子石、方解石和石墨, 且电子探针微区 C 元素面扫描结果显示, 磁铁矿中含 C 矿物的分布具有普遍性。富铁矿石的化学成分以高 Fe_2O_3^T 和 SiO_2 , 低 Al_2O_3 和 TiO_2 为特征, 表明磁铁富矿形成过程中未受到陆源碎屑沉积物的显著影响。磁铁富矿中石英表现出高的 $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$ 特征 ($-0.64\text{‰} \sim -0.24\text{‰}$), 与现代现代海底黑烟囱环境中石英和热液喷发活动中硅质岩的 Si 同位素特征相似。结合磁铁富矿石正的 Eu 和 Y 异常以及高的

Y/Ho 比值, 表明高温热液与海水的混合作用在成矿过程中发挥了重要作用。磁铁富矿石未出现负 Ce 异常, 且其中磁铁矿的 $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ ($1.043\text{‰} \sim 1.683\text{‰}$) 呈现分馏现象, 表明古海水处于还原状态, 海水中的 Fe^{2+} 未被完全氧化。此外, 磁铁富矿石中石墨具有低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ ($-19.5 \sim -14.5$), 与氧化有机碳经过微生物异化铁还原 (DIR) 作用形成的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-25 至 -15) 一致, 结合磁铁矿中含 C 矿物 (包括石墨和方解石) 分布的普遍性, 表明原始沉积的富铁矿物包含菱铁矿, 且微生物 DIR 和后期的变质作用都在磁铁富矿的形成过程中发挥了重要作用。

关键词: 弓长岭铁矿; BIF 型铁矿; 同位素; 成矿过程

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

华北克拉通新发现太古宙铌钽矿化花岗岩：齐大山铌钽矿化花岗岩岩石成因与稀有金属潜力

戴阳^{1,2}, 李立兴^{2*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

太古宙铌钽矿化花岗岩作为地壳生长事件的产物, 在全球克拉通中广泛发育。然而在经历大规模地壳生长事件的华北克拉通内, 具有经济价值的铌钽矿化花岗岩却鲜有报道。本研究在华北克拉通北缘齐大山铁矿区内新识别出一套铌钽矿化花岗岩, 为揭示华北克拉通内稀有金属成矿过程提供了珍贵实例。通过对铌钽矿化花岗岩中铌铁矿族矿物和锡石开展 U-Pb 年代学研究, 分别获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄 $2527\pm 5.8\text{ Ma}$ 和 $2535\pm 5\text{ Ma}$, 二者在误差范围内年龄一致。该结果表明齐大山铌钽矿化花岗岩形成于新太古代晚期。岩石学与地球化学研究表明, 该岩体属于

高分异花岗岩, 主要来源于成熟古老陆壳物质的再循环。花岗质岩浆的高程度分离结晶和熔体-流体相互作用是形成齐大山高分异花岗岩并导致铌钽稀有金属富集成矿的重要控制因素。齐大山太古宙铌钽矿化花岗岩的发现表明, 华北克拉通新太古代晚期构造-岩浆活动具有孕育铌钽稀有金属资源的潜力, 这为重新评估该区前寒武纪地体的成矿远景提供了新视角。

关键词: 太古宙铌钽成矿作用; 稀有金属花岗岩; 分离结晶作用; 条带状铁建造; 华北克拉通

国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC2905400)

第一作者简介: 戴阳(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学专业. Email: 1742001378@qq.com

*通信作者简介: 李立兴(1984-), 研究员, 研究方向: 金属矿床成矿作用研究. Email: llixing@cags.ac.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

磁异常模量三维反演在湖北金牛火山岩盆地矿产勘查中的应用

肖明顺^{1*}

1. 中国冶金地质总局中南地质调查院, 武汉 430081

在磁异常数据物理解释中, 一般假设地下磁性体的磁化方向和地磁场的方向一致, 忽略了剩磁或退磁作用的影响。实际上, 很多地区的地下磁性体均具有较强的剩余磁化强度(比如火山岩地区), 致使磁性体的实际磁化方向偏离主磁场方向, 若再按照主磁场方向进行相关的处理和解释, 则可能导致错误的解释与推断。 ΔT 磁异常依赖于磁化方向, 因而磁化方向的不确定性给磁异常的解释工作带来困难。以往研究成果发现磁异常模量具有弱敏感于磁化方向以及与场源平面位置对应关系更好的特点, 可以减少磁测数据物理解释中的剩磁影响。我们利用 1:25000 地面磁测数据, 在湖北金牛火山岩盆地开展了 ΔT 磁异常总场模量三维反演。金牛火山岩盆地位于长江中下游铁铜成矿带西段, 下扬子台褶带中东部的鄂东矿集区, 具有宁芜、庐枞火山岩盆地相似的成矿条件。印支-燕山期褶皱基底岩系主要为侏罗系碎屑岩及三叠系碳酸盐岩, 出露于火山岩盆地的东、南、西边缘。主要为中生代中基性-中酸性陆相火山岩建造, 其中东部广泛出露地表, 西部因燕山晚期大寺旋回大规模

火山爆发而开始的沉陷被白垩-第三系及第四系碎屑沉积物掩盖, 仅有少量区域出露。 ΔT 磁异常普遍在 $-400 \sim 500$ nT 之间, 局部存在大于 1000 nT 异常, 零等值线大致呈向西弯曲的“弓箭”型, 西部窄细, 东部宽阔, 局部曲线为“S 型”转折和扭曲, 北部和西南部为负磁异常区, 中东部主要为正磁异常区, 等值线在北部梯度带较南部梯度略陡。将 ΔT 磁异常转换为 ΔT 磁异常总场模量, 开展三维反演, 反演网格 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 、反演深度 5 km。磁异常模量三维反演的磁化率水平切片成果表明, 自 -500 m 标高 ~ -2500 m 标高, 在莲花吴一排口柯、晏公庙两个位置圈定存在明显的磁化率环状异常, 至 -3000 m 标高, 环状异常消失, 推断为火山口的反映, 反应了岩浆活动强烈, 火山多期次喷发, 火山机构或者火山通道产出的地质环境, 其火山机构周边重磁体向上隆起的基底构造格局, 对本区寻找火山岩或次火山岩形成的铁多金属矿, 具有指示作用。

关键词: 金牛火山岩盆地; 三维反演; 磁异常模量

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

华北克拉通北部勿兰乌苏磷铁矿床年代学与地球化学特征: 与古元古代斜长岩-纹长二长岩-紫苏花岗岩- 花岗岩 (AMCG) 岩浆作用的成因联系证据

吴玄^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

华北克拉通北部太古宙变质岩系中赋存的磷铁矿床是我国重要的磷、铁资源来源, 然而其成因机制与矿床类型仍存在争议。位于辽西建平地区的勿兰乌苏磷铁矿床为该类型矿床的典型代表之一, 其矿石主要由斜长石、角闪石、黑云母、磷灰石及铁钛氧化物组成。为揭示磷铁矿化的地质控制因素, 本研究对其磷铁矿石开展了岩相学、年代学及地球化学分析。锆石 U-Pb 定年获得其加权平均结晶年龄为 1730 ± 6 Ma, 精确的将矿化作用限定于古元古代晚期。结合岩相学观察和磷灰石地球化学分析, 表明矿石为镁铁质岩浆成因。全岩地球化学分析显示, 其微量及稀土元素地球化学特征与同时代的大庙辉长岩-苏长岩具有相似性, 并呈现典型的岩浆结晶分异特征。综合研

究表明, 该矿床的形成与镁铁质岩浆活动密切相关, 应归属于古元古代晚期岩浆型磷铁矿床。这一认识否定了前人提出的磷铁矿化与新太古代变质火山-沉积岩存在成因联系的观点。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.9 \sim -7.7$ 、全岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 $0.702647 \sim 0.703696$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-5.72 \sim -6.41$ 表明, 成矿母岩浆来源于混染了地壳物质的富集地幔。结合区域地质年代学与地球化学资料, 本研究认为勿兰乌苏磷铁矿床的形成与华北克拉通北部古元古代晚期 AMCG 岩套密切相关, 其可能形成于碰撞后伸展环境。

关键词: 磷灰石; 磷铁矿; 岩浆型磷矿床; AMCG 岩套; 华北克拉通

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

山东省黄河北煤田煤下富铁矿深部找矿进展

沈立军¹, 王怀洪^{1,2*}, 朱裕振^{1,2}, 周明磊^{1,2}, 张心彬^{1,2}

1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 济南 250104;

2. 中国地球物理协会煤田地球物理重点实验室, 济南 250104

黄河北煤田位于华北板块鲁西隆起区的西北部, 区内富铁矿勘查工作始于 2013 年, 依托山东省省级地质勘查项目对区内潘店磁异常进行了调查评价, 实现了煤下富铁矿重大找矿新发现, 拉开了该区煤与富铁矿协同勘查研究的序幕, 历经十余年勘查, 区内富铁矿找矿工作不断取得新突破。区内地层由老至新为新太古界泰山岩群、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系、新近系及第四系, 缺失晚奥陶世~早石炭世、侏罗纪、白垩纪地层。区内断裂构造发育, 切割形成断块式构造格局。岩浆岩广泛分布, 以中生代侵入岩为主。含煤地层主要为石炭及二叠纪马家沟群太原组和山西组, 累计含煤 14 层, 共获得煤炭资源量 2.45 亿吨。探获富铁矿为矽卡岩型, 发现李屯、郭店、大张等富铁矿床 3 处, 探获富铁矿资源量 1.04 亿吨, 全铁平均品位 55.27%、磁性铁平均品位 50.67%。李屯矿床为区内规模较大的矿床, 划分为小刘庄矿段和叠道矿段, 共圈定磁铁矿体

11 个, 矿体形态以似层状为主, 总体呈东缓西陡、东浅西深的延伸趋势, 赋存深度 1050~1550 m, 矿体厚度约 1.54~59.22 m。矿体主要赋存于闪长岩体与石炭系-二叠系接触带附近的地层中, 围岩发生大规模角岩化, 矽卡岩化强度低。矿体外围尚未封闭, 仍有较大找矿潜力。依托找矿思路的转变和理论技术的创新, 黄河北煤田内富铁矿找矿实现了重要突破, 主要认识如下: 一是在含煤地层内发现了厚层、高品位的富磁铁矿体, 探索建立了“禹城式”富铁矿成矿模式, 打破了矽卡岩型铁矿主要赋存于岩体与碳酸盐岩接触带的传统认识。二是受盆地内不同构造体系和地质活动控制, 形成了煤、铁等不同矿产共存的资源赋存状态, 提出了“煤铁同盆共存”成矿理论, 开辟了赋煤覆盖区找铁新方向。

关键词: 富铁矿; 矽卡岩型; 禹城式; 黄河北煤田

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2903705)、山东省省级地质勘查项目 (鲁勘字 (2023) 13 号) 和山东省煤田地质局科研专项 (MTDZKY-2024-02)

第一作者简介: 沈立军 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 地质矿产勘查及矿床学, Email: sdmtslj@163.com

*通讯作者: 王怀洪 (1963-), 研究员, 研究方向: 资源勘查与地球物理探测, Email: tawhh@126.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

华北克拉通矽卡岩铁矿大规模成矿作用的 深部地球动力学过程

张招崇^{1*}

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

富铁矿石作为重要的工业原料, 其形成机制一直是地质学研究的热点。全球范围内, 约 85% 以上的富铁矿石源自条带状铁建造(BIF)通过表生风化淋滤或者深部流体的去硅富铁作用形成的赤铁矿矿石。在中国, 尽管铁矿石同样主要来自 BIF, 但约 58% 的富铁矿石却来自矽卡岩型磁铁富矿。华北克拉通是中国矽卡岩富铁矿的主要产地, 拥有邯郸-邢台、莱芜、金岭、安阳、齐河-禹城等矿集区, 这些矿集区分布在华北克拉通内部东、西两个带。对含矿岩体以及矽卡岩的大量同位素测年结果表明, 这些矽卡岩型铁矿几乎均在约 130 Ma 前后形成, 其形成被归因于华北克拉通快速减薄。然而, 这种机制尚无法解释为什么东、西两个带的矽卡岩型铁矿均集中于~130 Ma, 而岩石圈减薄的高峰期~120 Ma 则没有形成? 空间上, 为什么克拉通破坏更强烈的东部地区为什么没有形成? 为了揭示华北克拉通矽卡岩铁矿这种独特的时空分布特征, 本文系统总结了与矽卡岩铁矿有关的成矿闪长质岩体的岩石学和地球化学特征, 认为其起源于被俯冲板片释放出的流体交代的岩石圈地幔, 是壳幔相互作用的结果。由于矽卡岩铁矿的形成需要关键

的矿化剂氯(Cl), 而 Cl 主要与蛇纹石的脱水有关, 并且考虑到蛇纹石脱水作用发生于<300 km, 所以矽卡岩铁矿的形成与~660 km 的大地幔楔无关。结合区域岩浆岩时空分布特征, 本研究提出华北克拉通矽卡岩铁矿的大规模矿化可能与 137 Ma 平板俯冲的板片回卷有关: 板片回卷导致俯冲板片和其上的岩石圈地幔之间形成“三角形”空间, 促使热的软流圈地幔在该“三角形的空间”上涌并激发已经强烈交代的富集岩石圈地幔发生部分熔融, 形成富水富 Cl 的氧化性基性岩浆。这种基性岩浆沿深大断裂上升, 并与~2.5 Ga 的下地壳(可能含有 BIF)发生不同程度的相互作用形成相对富铁的岩浆, 最终导致矽卡岩铁矿的大规模成矿。本研究提出的模式成功解释了华北克拉通矽卡岩铁矿的时空分布特征, 包括为何矽卡岩铁矿集中形成于~130 Ma 前后, 以及太行山西侧和东带东侧都未形成矽卡岩铁矿的原因。这一发现对于理解矽卡岩铁矿的形成机制及指导矿产勘查具有重要意义。

关键词: 矽卡岩铁矿; 大规模成矿; 板片回卷; 岩石圈地幔; 华北克拉通

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

冀北斜长岩型富铁矿成矿机制探讨

李立兴^{1*}

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

我国华北克拉通大庙斜长岩体中的富铁矿脉群形成于岩浆演化最晚期阶段, 在世界上独具特色, 其成矿机制长期以来备受关注。本研究提出: 赋矿斜长岩体的形成与高铝玄武质岩浆短期内多次注入有关, 而非单次岩浆持续演化的结果; 大庙斜长岩型富铁矿

为岩浆—热液过渡成因, 铁钛氧化物形成于岩浆阶段, 而磷灰石的形成贯穿整个岩浆-热液成矿过程。

关键词: 富铁矿; 斜长岩; 成矿机制; 华北克拉通

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41402067)

第一作者简介: 李立兴 (1984-), 研究员, 研究方向: 前寒武纪成矿作用。Email: llixing@cags.ac.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

小包庄铁矿磷灰石特征及其矿床成因

杨博为^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

IOA 矿床作为全球范围内典型的铁磷矿床类型, 提供了非常重要的铁磷来源。中国东部庐枞盆地小包庄矿床, 位于长江中下游的玢岩铁矿带, 该矿床矿体呈特殊的“双层”结构, 然而其矿床成因尚不清楚。针对此问题, 本文选取了不同层位、不同岩性中的磷灰石以及磁铁矿开展了岩相学、矿物学和地球化学特征研究。矿床由上部脉状-网脉状磁铁矿矿层与下部块状-稠密浸染状磁铁矿层组成; 与周围次火山岩地层成似层状产出且地层产出大量膏辉岩与矿层共生, 主要矿石矿物为磁铁矿、赤铁矿和黄铁矿。磷灰石中存在由碳酸盐包裹的磁铁矿和钛尖晶石的包裹体, 磷灰石的电子探针分析(EMPA)数据表明: -1750 m 以下矿体中磷灰石 F/Cl

值较低 (avg. 8.8), 显著低于上部矿体中的 F/Cl 值 (avg. 45.4)。下部较低的 F/Cl 值以及包裹体的矿物组合指示了膏岩层中大量的 Cl^- 、 CO_3^{2-} 进入到了岩浆中并与其发生了大规模的混染, 进而产生了一种不同于硅酸盐熔体和氧化物熔体的富硫酸盐、碳酸盐的熔盐; 上部磷灰石 F/Cl 值较高表明其主要为岩浆成因。综上所述, 本研究为 IOA 矿床隐伏矿体磁铁矿磷灰石的成因提供了证据, 约束了岩浆-膏岩层相互作用的成矿机制, 对区域资源评价及全球同类矿床找矿预测具有启示意义。

关键词: IOA 型铁矿; 小包庄矿床; 磷灰石; 膏岩层

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2903703)

第一作者简介: 杨博为 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学. Email: 1220464674@qq.com

*通讯作者简介: 侯通 (1984-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学和成岩成矿实验模拟. Email: thou@cugb.edu.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

地球平静期宣龙式铁矿成矿环境研究

杨秀清^{1*}

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

元古宙中期(18-8 亿年)大气氧化缓慢, 生命演化迟缓, 通常被认为是地球平静期(Boring Billion)。尽管诸多研究表明该时期海洋深部持续出现缺氧、铁化海洋, 但是元古宙中期铁建造却大规模缺失, 这与早前寒武纪缺氧、铁化海洋沉积巨量铁建造形成鲜明对比。近年来, 少量元古宙中期铁建造被相继报道, 但是其成因机制及其对海洋环境指示意义研究薄弱。我国宣龙式铁矿赋存于华北克拉通串岭沟组下部, 是继 18.8 亿年铁建造大规模消亡之后最早出现的铁建造。我们对宣龙式铁矿赋矿岩系 16.4 亿年串岭沟组开展了系统的主微量元素、铁组分、有机碳和铁同位素分析。结果表明, 宣龙式铁矿显示低 Y/Ho 比值、轻微 Eu 正异常、无 Ce 异常、富集重铁同位素, 相对深海沉积物($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 可达-33.4‰)浅海沉积物具有较高有机碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为-29‰), 这表明当时海洋氧化还原分层, 海水表层氧

化, 深部缺氧、铁化。同时生态系统也出现分层, 浅海相以自养生物为主(例如微需氧铁氧化菌和/或缺氧光合生物), 深水相以异养生物为主(如异化铁还原菌)。研究推测哥伦比亚超大陆裂解伴随的热液活动导致深部铁化海洋发育, 由于间歇性铁浓度升高, 微需氧铁氧化菌和/或缺氧光合生物引起铁氧化沉淀于浅海氧化还原界面附近, 形成串岭沟组底部宣龙式铁矿。此外, 研究还发现串岭沟组上部页岩记录了间歇性深海氧化现象, 这与最新报道的元古宙中期出现脉动氧化事件一致, 这暗示元古宙中期短周期和长周期内海洋波动氧化比较常见, 同时海水铁循环也出现动态变化, 二者共同限制了元古宙中期真核生物演化以及铁建造沉积, 该研究有效推动了成矿与环境生命协同演化研究。

关键词: 宣龙式铁矿; 地球平静期; 串岭沟组

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

洋中脊拆离断层面上沉积-火山碎屑岩盖层对热液硫化物矿化的制约：以赤狐热液区为例

李兵¹, 李传顺^{1*}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

沉积物覆盖型热液区是海底成矿系统的特殊类型, 主要分布于大陆边缘洋脊及裂谷带, 其高沉积速率环境通过沉积物盖层的物理屏障和化学缓冲作用形成独特成矿机制。相较于裸露洋中脊, 这类系统因盖层阻隔热液垂向扩散并促进流体-海水混合, 通过温度-氧化还原梯度调控硫化物富集 (如 Middle Valley 黄铁矿矿床), 且常伴随有机质或微生物参与的硫酸盐还原过程。虽然“半渗透界面模型”已阐释厚层沉积物盖层对成矿物质保存的强化作用 (如硫化物规模显著增大), 但广泛发育在洋中脊离轴热液区的薄层混合盖层 (沉积物-岩石角砾) 的控矿作用可能

被忽视。值得注意的是, 南大西洋赤狐热液区作为拆离断层发育的慢速扩张洋脊案例, 其断层面上覆盖的薄层沉积-蚀变角砾层导致热液流体侧向迁移并形成广泛分布的角砾状硫化物和网脉矿化, 这为揭示薄层盖层通过物理阻隔与化学缓冲双重作用影响成矿过程提供了关键研究载体, 尤其对理解贫沉积物洋中脊 (如大西洋中脊) 中特殊盖层类型的成矿机制具有重要意义。

关键词: 沉积物覆盖型热液区; 半渗透界面模型; 拆离断层; 赤狐热液区

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

南大西洋中脊热液硫化物成矿作用研究

党院^{1,2*}, 李传顺^{1,2}, 石学法^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 266061;

2. 自然资源部第一海洋研究所 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东青岛 266061

慢速扩张洋中脊的热液硫化物具有重要的经济价值和科学意义, 大西洋中脊属于典型的慢速扩张洋中脊。相比于研究成熟的北大西洋中脊, 南大西洋近年来新发现了多个热液区, 但其成矿作用研究相对薄弱。允臧热液区 (25.3° S) 是我国在南大西洋中脊新发现的一个热液区。通过对该热液区采集的硫化物样品进行了系统的矿物学、岩相学、地球化学等研究。基于矿物形态、结构、结晶程度、矿物组合及分带等, 可将硫化物烟囱体的生长过程分为五个阶段, 包括低温阶段(主要形成胶状—他形白铁矿)、中温阶段(半自形—自形黄铁矿和闪锌矿)、高温阶段(等轴古巴矿)、高温至中温阶段(黄铜矿)以及低温风化蚀变阶段(铁的氧化物和氢氧化物和次生铜矿物)。从低温—中温阶段到高温—中高温阶段硫化物的形态学和结晶程度变化特征指示成矿条件的演化。开始以大量海水

的混入形成低温-不稳定的环境, 随后逐渐演化成高温稳定的成矿流体环境。允臧热液区硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 呈正值, 通过二端元混合模型计算, 表明硫化物烟囱体和块状硫化物的硫 79%~92%和 69%~79%来自玄武岩的淋滤, 其余来自海水硫酸盐的还原。而块状硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 (3.5‰~6.8‰, 平均为 5.1‰ $\pm$ 0.9‰) 明显高于硫化物烟囱体 (1.1‰~4.5‰, 平均为 2.8‰ $\pm$ 0.8‰), 推测其主要有海底早其形成的硫酸盐与循环的流体相互作用导致的。从硫化物烟囱体的边缘至内部通道其 $\delta^{34}\text{S}$ 呈现明显的上升趋势, 表明允臧热液区硫化物烟囱体的成熟度相对较低, 且热液活动持续较短。该研究结果有助于理解海底热液活动的成矿作用。

关键词: 硫同位素; 硫化物烟囱体; 烟囱体成熟度; 允臧热液区; 南大西洋中脊

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

岩石成因颗粒对大洋锌循环的潜在影响

张兴超¹, 石学法^{1*}, 毕东杰¹, 沈芳宇¹, 黄牧¹, 于淼¹, 朱爱美¹, 罗翠华²,
位荀¹, 黄方², 刘季花¹

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 266061;

2. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026

远洋深海沉积物是海洋 Zn 循环中重要的汇, 具有较大资源潜力。尽管岩石成因颗粒是远洋沉积物的主要组分, 其对 Zn 在沉积和埋藏过程中的影响尚未完全明晰。本研究对西太平洋两个受不同程度沙尘与火山物质输入影响的沉积物柱状样开展 Zn 同位素研究, 并通过淋滤实验揭示活性组分与硅酸盐组分的组成特征。综合周边沉积物的文献数据显示, 火山物质的输入和蚀变可促进自生硅酸盐的形成并优先富集轻 Zn 同位素, 这一过程最高可贡献沉积物中约 25% 的自生 Zn。同时, Zn 和 Mn 在全岩样品和活性组分中的较好正相关性, 指示铁锰氢氧化物是自生 Zn 的主要载体。特别的, 受到较高沙尘输入影响的 GC02

沉积柱表现出 Zn 相对于 Mn 更显著的累积, 使得活性组分的 Mn/Zn 和 $\delta^{66}\text{Zn}$ 均较低。而 GC06 沉积柱整体沙尘累积速率较低, 活性组分的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 和 Mn/Zn 最高分别可达 0.57‰ 和 180, 接近铁锰结核和结壳组成。结果表明岩石成因颗粒的沉积和蚀变过程能够显著扰动大洋 Zn 循环, 并优先从海水中移除轻 Zn 同位素。该机制对解释海水高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 特征以及认识海洋微量金属的迁移行为有重要意义。同时, 本研究通过淋滤实验定义的沉积物活性组分的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 可有效示踪 (古) 海洋 Zn 循环变化。

关键词: 深海沉积物; 锌同位素; 岩石成因颗粒

第一作者简介: 张兴超 (1994-), 博士后, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhangxc1994@fio.org.cn

通信作者简介:

石学法 (1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学. Email: xuefashi@fio.org.cn

黄方 (1978-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: fhuang@ustc.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

欧亚北极陆架沉积有机碳源汇过程及其 对汞沉积归宿的约束

杜佳宗¹, 胡利民^{1*}, 姚政权², 刘喜停¹, 孙一方¹, 杨刚², Kirill Aksentov³,
Yuriy Vasilenko³, Alexander Bosin³, Anatolii Astakhov³, 石学法²

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;

3. 俄罗斯科学院远东分院太平洋海洋研究所, 符拉迪沃斯托克市 690041

北极冻土是巨大的碳库和汞库, 在全球变暖背景下, 冻土的快速融化导致陆源冻土有机碳和汞加速释放并迁移入海, 使得北极地区有机碳的源汇过程具有不可估量的气候效应, 且碳-汞的耦合循环还具有重要的环境意义。本研究选取了欧亚北极边缘海(拉普捷夫海、东西伯利亚海和楚科奇海)的表层沉积物样品, 分析了有机碳来源与降解特征以及汞分布的空间异质性。随后选取了两个典型断面进行汞含量与沉积特征和有机参数之间的相关性分析, 分析河流和海岸侵蚀两种输入方式下有机碳对汞吸附的差异性以及跨陆架输运过程中有机碳来源变化对汞沉积的影响。结果表明河流和海岸侵蚀影响区域有机碳陆源信号明显, 随着离岸距离的增加, 陆源有机碳降解增强, 而且初级生产力的增加导致海源有机碳信号增强。但河流和海岸侵蚀影响区域汞与有机碳结合关系表现出很大差异, 河流输入的有机碳和汞含量在跨陆架输运过程中具有很好的对应关系, 且相关性显著; 海岸侵蚀区域汞与有机碳含量不相关, 但和有机碳来源特征($\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC/TON)相关性更显著。这种差异性

与物源和输入方式有关, 河流输入的陆源物质主要源于表层冻土, 其中有机碳对汞的富集起到重要作用, 而且河流长时间尺度的输运过程会提高了冻土有机碳对汞的捕获, 因此汞与有机碳以复合物形式入海并输运, 且这种复合物对汞沉积的贡献不受陆源有机碳降解和/或海源有机碳添加的影响。海岸侵蚀主要释放富冰冻土, 其中有机碳对汞的富集不明显, 而且陆源物质的快速入海没有经过长距离输运的改造, 但在跨陆架输运过程中, 高生产力区域的海源有机碳因活性官能团对有机碳的吸附, 能捕获并促进汞沉积。然而, 高生产力的楚科奇海虽然埋藏了大量海源有机碳, 但汞的含量却十分低, 这表明该海区陆源输入的缺失使生物清除作用无法有效促进汞的沉积。该研究不仅为准确评估北极陆架有机碳和汞的源汇过程和埋藏保存奠定了基础, 更在揭示有机碳与汞归宿之间耦合关系方面具有重要意义。

关键词: 汞; 有机碳; 陆源输入方式; 初级生产力; 东西伯利亚陆架

基金项目: 国家自然科学基金项目(42306064)

第一作者简介: 杜佳宗(1992-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积与矿物学研究. E-mail: dujiazong@ouc.edu.cn

*通信作者简介: 胡利民(1983-), 教授, 研究方向: 海洋沉积与地球化学研究. E-mail: hulimin@ouc.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

洋脊-地幔柱相互作用导致 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值与地幔柱中心解耦

郭鹏远^{1*}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

Easter-Salas y Gomez 海山链是由 Easter 地幔柱产生的。前人报道过邻近的东太平洋隆起存在高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ (11.7 R_A) 的熔岩, 但截止到目前并未有 Easter 海山链 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 数据的报道。我们对 Easter 海山玄武岩玻璃进行了系统的 He 同位素分析测试。研究结果显示, Easter 海山链 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值 (18-19 R_A) 在 Easter 岛周围的海山 (110° W), 与根据不相容元素和放射性同位素推断的地幔柱中心 (106° W) 偏移了 300~400 km。由于靠近地幔柱中心 (具有厚的岩石圈) 的熔体表现出类似 MORB 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, 而高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 熔岩喷发在岩石圈较薄的近洋脊区域, 因此我们推测高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组分比低 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 组分具有更高的固相线, 其成分更亏损, 物理上更难熔。由于洋脊-地幔柱相

互作用, 地幔柱物质会向洋脊之下流动从而发生减压熔融。随着减压熔融的进行, 富集的组分逐渐被熔融、抽离, 而越来越多亏损且难熔的组分参与到熔融过程, 最终产生了空间上从地幔柱到洋脊逐渐降低的 $[\text{La}/\text{Sm}]_N$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 逐渐升高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的岩浆。因此, 我们认为洋脊-地幔柱相互作用是 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 峰值在空间上与地幔柱中心解耦的原因。类似的例子还包括冰岛地幔柱与 Reykjanes 洋脊相互作用, Amsterdam-St. Paul 地幔柱与东南印度脊的相互作用。

关键词: 洋脊-地幔柱相互作用; He 同位素; 大洋玄武岩; 海山链

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

过去 200 ka NPIW 与亚热带西太平洋氧化还原状况演化的耦合关系：钼同位素证据

窦衍光^{1*}, 杨守业², 石学法³, 张勇¹

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237;

2. 同济大学, 上海 200092;

3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266073

通过生物生产力和海洋大气 CO₂ 交换, 北太平洋中层通风有可能在冰期时间尺度上调节区域气候变化。然而, 亚热带西太平洋目前缺乏连续的长尺度氧化还原记录, 因此, 目前无法评估这一过程。在这种情况下, 我们提供了来自冲绳海槽沉积物的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 和氧化还原敏感微量元素数据, 以重建氧化还原条件, 并评估其在过去 200 ka 调节亚热带西太平洋大气 CO₂ 的可能。在海洋同位素 1 期 (MIS1), 黑潮增强引发的氧化增强表明冲绳海槽深水通风和上升流加强, 这可能导致间冰期大气 CO₂ 浓度升高。由于冰期北太平洋中层水 (GNPIW) 和微弱的黑潮,

冲绳海槽在 MIS2 和 MIS6 期间可能处于氧化状态, 并成为区域净碳汇。在间冰期, 东亚夏季风 (EASM) 增强带来的高生产力导致有机物埋藏和耗氧量增加。在 MIS4 和早期 MIS3 期间, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值的显著正偏移可能与甲烷的厌氧氧化 (AOM) 和甲烷水合物分解释放的富甲烷流体有关。我们的发现强调了晚第四纪亚热带北太平洋上升流、GNPIW 扩张和调节大气 CO₂ 收支的潜在过程之间的潜在联系。

关键词: 氧化还原; $\delta^{98/95}\text{Mo}$; NPIW; 耦合关系; 亚热带西太平洋

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

阿曼蛇绿岩壳幔转换带的 Mg 同位素及其 洋中脊深部热液循环示踪

周志宇¹, 张超^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

阿曼蛇绿岩带 Wadi Wariyah 地区的层状辉长岩被一系列复杂的岩脉穿插, 记录了快速扩张洋中脊的壳幔转换带在较宽温度范围内的流体-岩石相互作用, 这已被前期研究的含水蚀变证据和 Sr-O 同位素特征所证实。本项工作对这些样品 Mg (-Fe) 同位素开展研究, 为流体的性质和来源提供了新的制约。广泛的热液活动导致了选择性元素贫化和富集以及 Fe-Mg 同位素分馏的显著差异。Mg 同位素的数据显示, 层状辉长岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.23‰ ~ -0.34‰ , 辉长岩脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.28‰ ~ -0.43‰ , 富角闪石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.22‰ ~ -0.35‰ , 富绿帘石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.51‰ ~ -0.58‰ , 富葡萄石脉的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.27‰ ~ -0.28‰ , 蚀变晕的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.29‰ ~ -0.57‰ , 变辉长岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 约为 -0.27‰ 。总体蚀变洋壳的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.21‰ ~ -0.57‰ , 位于新

鲜洋中脊玄武岩和海水 $\delta^{26}\text{Mg}$ 范围之间。层状辉长岩、变辉长岩和富葡萄石脉 $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围与新鲜洋中脊玄武岩基本一致, 而辉长岩脉、富角闪石脉、富绿帘石脉以及变质晕 $\delta^{26}\text{Mg}$ 发生较大分馏, 且富集轻 Mg 同位素。富葡萄石脉 Mg 同位素未发生分馏, 解释为低温反应下的长石蚀变。富绿帘石脉 Mg 同位素发生较大程度的分馏, 指示为海水衍生流体的强烈交换导致重 Mg 同位素丢失。部分蚀变晕中绿帘石具有与富绿帘石脉相似的组分, 其 Mg 同位素组成也与富绿帘石脉相似。本项研究表明, 海水衍生流体能够深入至壳幔转换带附近, 并在较宽的温度范围 ($250\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) 触发不同程度的热液蚀变和元素交换, 导致 Mg 同位素的显著变化。

关键词: 阿曼蛇绿岩; 壳幔转化带; Mg 同位素; 热液循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972055)

第一作者简介: 周志宇 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学、矿物学、矿床学. E-mail: zhouzhiyu0519@outlook.com.

通信作者简介: 张超 (1982-), 教授, 研究方向: 岩浆过程与高温高压实验模拟. E-mail: zhangchao@nwu.edu.cn.

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

悬浮泥沙形貌特征初步研究及其应用潜力

陈坚^{1*}

1. 自然资源部第三海洋研究所 海洋与海岸地质研究室, 福建厦门 361005

以钱塘江和长江南京段枯水期悬浮泥沙为例, 通过 6000 多个悬浮颗粒形貌图像分析, 在边缘识别的基础上初步讨论了周长、圆度和短长轴比等参数在描述颗粒形貌方面的作用。统计分类结果显示, 周长、圆度和短长轴比能够比较有效地刻画悬浮颗粒的形貌特征。钱塘江河口悬沙颗粒的圆度介于长江和钱塘江非河口段之间, 且更接近长江, 表明钱塘江口悬沙颗粒受到长江沿岸流输入的强烈影响。钱塘江下游非河口段与长江南京段悬浮泥沙形貌特征具有较大的差别, 钱塘江颗粒尺寸总体上大于长江, 与钱塘江具有较强的水流有关; 尽管长江片状颗粒中硬度较大的高岭石

含量较高, 但其磨圆的程度总体上仍强于钱塘江, 与长江悬沙经历了较长的搬运时间有关。泥沙颗粒的形貌特征不仅取决于组成矿物的种类、比例及其化学风化程度, 还与经历的搬运输送过程有关。相对于泥沙颗粒的大小, 形貌特征在追溯沉积物的来源和形成环境时可起到更好的作用。从初步研究的结果看, 泥沙形貌特征不仅可用于泥沙物源的解析, 还在近海和深海古气候古环境研究、海底火山颗粒识别, 乃至微塑料方面也可能发挥作用, 具有比较广泛的应用前景。

关键词: 悬浮泥沙; 形貌特征; 长江; 钱塘江

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

边缘海海绿石化作用与关键元素循环

王凤梅¹, 窦衍光^{2*}, 梅西², 张勇², 陈晓辉²

1. 中国地质科学院, 北京 100037;

2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

海绿石是形成于海水-沉积物界面、具有二八面体层状结构的自生铝硅酸盐矿物, 广泛发育于全球大陆边缘浅海环境, 其形成过程消耗 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等阳离子和碱度, 是反风化作用的直接产物。海底反风化作用是生物硅结合可溶性阳离子生成自生粘土矿物的过程, 其作为调控大气 CO_2 和关键元素循环的重要机制近年来受到广泛关注, 然而, 反风化自生粘土矿物一般结晶较差或为无定形碎屑等化学相变致使对其进行直接观测研究极具挑战性, 这进一步限制了海底反风化过程的深入研究和进展。相较于其他自生粘土矿物, 海洋自生海绿石通过底层孔隙中的自形雏晶自生增大并伴随蚀变和交代而在海水-沉积物界面逐渐形成易分离的球

粒, 是进行反风化研究的良好载体。一直以来, 海绿石作为重要的海相指相矿物广泛应用于宏观尺度的层序地层分析、测定绝对年龄及揭示长时间尺度的海平面变化等研究, 而对其在反风化过程中 REEs 及 Fe、K 等关键元素迁移机制、同位素分馏规律以及如何参与全球关键元素地球化学循环等方面仍未有清晰认识, 亟需对海洋自生粘土矿物成因及其环境指示进行深入研究, 以此推动理解全球海洋不同时空尺度上的反风化作用过程、机制及其对全球海洋关键元素循环的贡献。

关键词: 海绿石; 自生粘土矿物; 反风化; 关键元素循环; 碳循环

基金项目: 国家自然科学基金 (42276084); MIS6 期以来东海外陆架-冲绳海槽沉积汇周期性转换过程与机制研究。

作者简介: 王凤梅 (1996-), 女, 博士研究生, 研究方向: 第四纪地质学。E-mail: 2834379218@qq.com

*通信作者: 窦衍光 (1979-), 男, 研究员, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究。E-mail: douyangaung@gmail.com

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

非稳态沉积环境下铁氧化还原调控微量元素循环机制

周哲^{1*}, 李江涛¹, 杨守业¹

1. 同济大学, 上海 200092

海洋表层沉积物在物理或生物扰动下会经历频繁的氧化还原条件的转化, 改变铁、锰等氧化还原敏感元素的生物地球化学循环, 同时潜在影响其结合的微量元素的归趋。本研究选取了非稳态沉积环境广泛发育的陆架边缘海表层沉积物, 利用沉积物培养实验及过流式时间分辨分析技术 (FT-TRA), 探究非稳态早期成岩作用下稀土元素 (REEs) 和重金属在高活性铁、锰相态间的分布特征。结果表明, 铁与稀土元素 (REEs)、Cr、Co 和 Li 的释放模式呈现强相关性, 而 Mn 与 Ni 的释放表现出较强的相关性。此外, 轻稀土元素 (LREEs) 在活性更高的无定型铁氧化物 (如水铁矿) 中富集, 这可能是由于

LREEs 对这类矿物具有较高的吸附亲和力。非稳态沉积环境频繁的氧化还原变化强化了铁在微量元素的结合和分馏过程中的作用, 主要归因于其迅速的再氧化-沉淀特性及更高的丰度。我们认为, 与极高活性铁结合的痕量元素具有较高的移动性, 在氧化还原条件振荡过程中可被重新释放。铁作为这种“氧化还原泵”的主要开关, 调控了部分微量元素在沉积物-水界面的通量, 进而影响了沉积物对海洋微量元素的贡献。

关键词: 海洋沉积物; 铁早期成岩; 氧化还原循环; 微量元素

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

菲律宾海板块内的四国海盆 EMI 组分的来源

袁龙¹, 鄢全树^{1,2*}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 266061;

2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

俯冲带是地球最重要的板块边界之一, 对研究地球内部物质循环、陆壳形成以及地震形成机制至关重要。西太平洋区域集中分布了大量的弧后盆地, 这些弧后盆地内存在一系列的板内岩浆活动, 例如西菲律宾海盆、四国海盆和南海等区域内广泛分布有板内岩浆活动。然而, 关于板内火山活动对弧后盆地的形成和演化的影响的研究还较为欠缺, 需要进一步研究。本次研究以深海钻探计划相关航次在四国海盆及南侧的帕里西维拉海盆获取到的基底火山岩样品为研究对象, 对其进行了详细的岩石地球化学研究。结果表明四国海盆遗迹扩张中心轴旁的 444 站位的基底熔岩为板内熔岩, 类似于

Kinan 海山链熔岩, 且四国海盆扩张中心期间的岩浆过程受到了 EMI 组分的影响。模拟计算表明, 四国海盆 EMI 组分很可能来源于日本海之下的富集地幔组分, 该 EMI 组分可能通过地幔环流 (toroidal flow) 运移至四国海盆之下, 或者是四国海盆在向北运动的过程中逐渐迁移到了具有 EMI 组分的软流圈地幔之上。最后, 本研究提出, EMI 组分广泛分布于中国东部、朝鲜半岛、日本海和四国海盆之下的地幔中。

关键词: 富集地幔; 弧后盆地; 俯冲组分; 板内熔岩; 四国海盆

基金项目: 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202204103); 国家重点研发计划 (2024YFF0807402); 山东省泰山学者特聘专家项目 (tstp20230643)

第一作者简介: 袁龙, 博士, 研究方向: 海底岩石学. E-mail: yuanlong@fio.org.cn

*通信作者简介: 鄢全树, 研究员, 主要从事海底岩浆作用与地质演化方面研究. Email: yanquanshu@163.com

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

末次冰消期以来冲绳海槽沉积物钼同位素富集机制及其古环境指示意义

孙呈慧¹, 窦衍光^{2*}, 杨守业¹

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

Mo 元素及其同位素由于其对氧化还原敏感的性质, 被广泛地用于研究全球古海洋氧化还原环境变化。本研究利用冲绳海槽中部 OKT-3 岩芯重力活塞沉积物样品, 基于氧化还原指标 (Mo 同位素、氧化还原敏感元素等) 以及沉积地球化学参数, 探讨同位素富集机制, 研究末次冰消期以来氧化还原条件和古海洋环境演化。结果显示, 钻孔全岩沉积物 Mo 元素含量介于 0.29~1.30 ppm, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值变化范围为 -1.31‰~0.11‰, 指示氧化/次氧化环境; 末次冰消期 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值变化较复杂, 响应高纬千年尺度的气候波动。其中, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值在 HS1 期偏负, BA 时期偏正,

YD 时期又偏负, 表现出与北太平洋中层水增强的同步性。同时 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值与大西洋经向翻转流的变化趋势呈反相位变化趋势, 支持大西洋-太平洋之间存在跷跷板效应。全新世时冲绳海槽底层水含氧量进一步增加, 与黑潮增强引起的通风增强有关, 受海水表层生产力的影响较小。研究还揭示, 输出生产力和有机碳埋藏之间存在解耦现象, 底层水氧化状态的变化是影响有机碳埋藏的重要因素。

关键词: 冲绳海槽; Mo 同位素; 富集机制; 氧化还原

基金项目: 国家自然科学基金“MIS6 期以来东海外陆架-冲绳海槽沉积汇周期性转换过程与机制研究” (批准号: 42276084)

第一作者简介: 孙呈慧, 博士研究生, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究. E-mail: 2311561@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 窦衍光, 研究员, 研究方向: 海洋沉积地球化学研究. E-mail: douyanguang@gmail.com

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

深海沉积物稀土元素富集成矿过程中的早期成岩作用研究

王樱静¹, 石学法^{1*}, 黄牧¹, 胡宁静¹, 朱爱美¹, 毕东杰¹,
张艳¹, 方习生¹, 刘季花¹

1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

深海富稀土沉积物中的稀土元素主要赋存在生物磷酸盐(鱼类骨骼碎片)和铁-锰(氢)氧化物中。已发表的研究表明, 在沉积物-水界面位置, 生物磷酸盐的稀土元素含量在千年尺度即可从几个 $\mu\text{g/g}$ 增加至 $7000 \mu\text{g/g}$ 。通过对从西太平洋采集的沉积物岩芯 GC12 的主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素特征进行研究发现, 在沉积物-水界面发生的硅酸盐水解是生物磷酸盐中稀土元素的来源之一。沉积物的 Nd 同位素则是指示沉积物硅酸盐物源的良好指标。而沉积物 Sr 同位素特征因为易受沉积物中生物磷酸盐累积的影响, 使全样 Sr 同位素偏向海水的 Sr 同位素, 不利于指示硅酸盐物源。对从 GC12 沉积柱的沉积物中筛分的生物磷酸盐的微量元素和 Sr-Nd 同位素特

征研究发现火山物质水解是生物磷酸盐在海水中沉降时稀土元素的重要来源, 而风尘和火山灰的水解是生物磷酸盐在沉积物-水界面(埋藏深度 100 cm 以浅)的稀土元素来源。在生物磷酸盐深埋藏过程中(埋藏深度大于 100 cm), 风尘是生物磷酸盐的主要来源。此外, 在沉积物-水界面位置的硅酸盐水解释放的 Fe、Mn 等元素会形成铁-锰(氢)氧化物, 吸收亲金属氧化物元素例如 Co、Ni 等, 促进沉积物中稀土元素和亲金属氧化物元素的富集。因此, 早期成岩作用过程的硅酸盐水解是深海沉积物稀土元素富集成矿的重要过程。

关键词: 深海沉积物; 稀土元素; 硅酸盐水解; 沉积物-水界面

基金项目: 国家自然科学基金项目(92262304, 2023YFC2811205)和中国科学院地球化学研究所开放基金(202405)

第一作者简介: 王樱静(1990-), 助理研究员, 研究方向: 斑岩型铜矿床和深海沉积物稀土元素富集成矿机制. Email: jhyingjwang@126.com.

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积与矿产资源勘查. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

深海沉积物孔隙水在稀土元素迁移富集中的重要作用

沈芳宇^{1,2}, 石学法^{1,2*}, 李力^{1,2}, 王小静^{1,2}, 刘洪娜¹, 李杰军¹,
任艺君¹, 黄牧^{1,2}, 刘季花^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与地球物理研究室, 山东青岛 266061;

2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

稀土元素(包括镧系元素和钇)作为支撑新能源、电子信息和国防科技发展的战略资源,是绿色转型与数字革命的新材料,但受地缘分布不均、开采环境成本高及需求激增等因素,正面临日益严峻的稀土供应危机。近年来在深海盆地中发现的富稀土沉积物资源潜力大、富含中重稀土,是陆地稀土的潜在替代资源。然而,海水中超低浓度的稀土元素无法解释沉积物中的高含量特征,其富集机制尚未明晰。本研究通过系统分析西太平洋、东南太平洋和印度洋富稀土沉积物发育区的沉积物孔隙水地球化学特征,识别出孔隙水发生的早期成岩作用改变主要为孔隙水中稀土元素含量的升高和中稀土元素的富集,结合沉积物及

上覆海水数据,发现沉积物-水界面发生的有机质降解、铁锰(氢)氧化物的微还原溶解或晶体转变以及粘土矿物溶解均可能贡献于孔隙水的早期成岩改变,孔隙水中的稀土元素进一步被磷酸钙吸收或在氧化环境中被铁锰(氢)氧化物重新吸附。孔隙水可以储存高含量的溶解稀土元素,因而是重要的溶解稀土元素储库,胶体态在稳定和保存孔隙水中的稀土元素中可能发挥关键作用。同时,孔隙水还是沉积物中稀土元素以及稀土元素海底通量的来源。孔隙水稀土元素浓度的差别可能是多种因素共同作用的结果。

关键词: 稀土元素; 孔隙水; 富稀土沉积物

基金项目: 国家自然科学基金项目(42430408, 42402097)

第一作者简介: 沈芳宇(1992-), 助理研究员, 研究方向: 海洋地球化学. Email: fangyushen@fio.org.cn

*通讯作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋地质学. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

络合物水热实验和模拟计算刻画锇 (Os) 从岩石圈到海水的迁移和分布

严海波¹, 丁兴^{2*}

1. 福州大学 紫金地质与矿业学院, 福州 350100;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

金属络合物是金属元素在流体中的基本载体, 也是地球浅部多圈层物质循环和热液成矿作用的主要角色, 其稳定性决定了金属元素的基本地球化学行为, 比如金属的溶解度、分异、分配和共生组合等等。因此, 定量表征金属络合物的稳定性有助于更加深入理解这些地球化学行为, 更是未来实现地球多圈层物质循环模拟的关键。基于此, 本研究采用金属络合物的高温高压水解法以及相关的热力学计算, 旨在获得表征金属络合物稳定性的关键热力学数据和地球化学模型, 并将该方法首次应用于金属锇 (Os) 在深海中的分布和循环研究。研究表明, Os (IV) -Cl 络合物随着温度升高, 触发+4 价 Os 离子的水解并发生沉淀, 导致 Os (IV) -Cl 络合物稳定性降低, 伴随着 Os 价态和络合物种型的变化。在 150~450 °C 和 100 MPa 条件下, Os 在流体中主要以 OsCl_6^{2-} 种型形式存在; 而在 450 °C 以上可能主要以 Os(IV)-OH-Cl 和 Os (II) -Cl 络合形式存在。并且, 根据水解实验的结果, 我们首次获得了 OsCl_6^{2-} 络合物种型在高温高压下的一系列热力学数据, 如累积水解平衡常数 ($\text{Ln}K$), 系统焓变 ($\Delta_r H_m^\ominus$)、熵变 ($\Delta_r S_m^\ominus$)、吉布

斯自由能 ($\Delta_r G_m^\ominus$) 以及 OsCl_6^{2-} 的形成常数 ($\ln \beta$)。作为 Os-Cl 络合物中最为稳定的种型, 高温高压下 OsCl_6^{2-} 络合物的热力学数据对于模拟富 Cl 热液中 Os 的地球化学行为极为重要。在此基础上, 我们通过地球化学建模, 实现了 OsCl_6^{2-} 络合物稳定性与流体温度、pH 和氯浓度之间的量化表征, 明确 OsCl_6^{2-} 络合物的稳定环境为相对低温强酸 (≤ 300 °C 和 $\text{pH} < 5$) 以及高温近中性 (> 300 °C 和 $\text{pH} < 7$) 流体环境, 进一步证实 OsCl_6^{2-} 络合物可稳定存在于大部分深海热液系统中。由此, 本研究认为 Os 在深海中的分布主要受控于热液和相关的扩散羽状流与海水的混合。在此过程中, 溶解态的 Os 会经历+2 价向+4 价以及 OsCl_6^{2-} 络合物种型向 OsCl_6^{2-} 、Os-OH-Cl 和 Os-OH 种型的转变。考虑到深海热液系统的特点以及 Os-Cl 络合物的稳定性, 洋中脊、弧后和沉积物系统起源的热液对全球海洋溶解态 Os 储库以及 Os 从岩石圈到水圈的迁移发挥了主要作用。

关键词: 铂族元素; 水热实验; 深海迁移; 模拟计算

基金项目: 中国科学院战略重点研究项目 (XDB42000000) 和国家自然科学基金项目 (41730423、41973055、42130109 和 42303031)

第一作者简介: 严海波 (1991-), 男, 副研究员, 研究方向: 元素地球化学研究. E-mail: 1141600188@qq.com

*通信作者简介: 丁兴 (1978-), 男, 副研究员, 研究方向: 元素地球化学, 实验地球化学研究. E-mail: xding@gig.ac.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

合成铁、锰矿物对 Te 的吸附和共沉淀实验

符亚洲^{1*}, 张健¹, 黄艳¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

稀有元素碲 (Te) 是一种全球稀缺性关键矿产, 在传统工业和高科技领域具有广泛应用。海洋多金属结核和富钴结壳是重要的海底矿产资源, 高度富集碲, 不仅可作为潜在的碲资源储备, 又是了解碲在表生环境中地球化学行为的重要介质。由于海洋结核和结壳中铁、锰矿物结晶程度差、颗粒极为细小、铁锰矿物密切共生, 难以挑选单矿物进行研究。为了揭示碲在结核和结壳中的富集过程, 我们在实验室人工合成水羟锰矿、钡镁锰矿、六方纤铁矿和针铁矿代替天然样品开展了矿物对碲的吸附和共沉淀实验。在不同合成铁、锰矿物对 Te 的等温吸附和吸附动力学实验中, 吸附剂用量保持恒定, 温度为 25 °C, 溶液基质为 0.7 M NaCl 溶液, 对等温吸附实验结果使用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型评估了不同矿物对 Te 的吸附容量, 对吸附动力学实验结果采用拟一级动力学方程和拟二级动力学方程研究了不同吸附剂对 TeO_3^{2-} 和 TeO_4^{2-} 的吸附动力学。四种矿物对于 Te(IV) 的等温吸附 Freundlich 模型较之 Langmuir 模型更加贴合, 表明对 Te (IV) 的吸附可能是不均匀的多层吸附, 比如吸附剂对 Te (IV) 的氧化作用可能会通过改变吸附剂表面的化学性质从而影响吸附行为; 对 Te (VI), 水羟锰矿、六方纤铁矿和针铁矿的等温吸附结果更符合 Langmuir 模型, 表明其为

均匀的单层吸附, 而钡镁锰矿则更贴合 Freundlich 模型, 可能是不均匀的多层吸附。动力学吸附结果显示在吸附过程初期阶段吸附量迅速增加, 之后吸附呈现缓和上升趋势, 直至平衡; 在 NaCl 和模拟海水介质中, 对 Te (IV) 的吸附能力, 六方纤铁矿>水羟锰矿>钡镁锰矿>针铁矿; 对于 Te (VI), 六方纤铁矿>水羟锰矿>钡镁锰矿>针铁矿。不同合成铁、锰矿物与 Te 的共沉淀实验结果显示, 当 Te (IV) 与 Te (VI) 分别与针铁矿、六方纤铁矿共沉淀后, XRD 衍射峰位置基本无变化, 但衍射峰强度增强, 表明 Te 共沉淀会进入针铁矿和六方纤铁矿结构并扩大了相应晶面间距, 增强了针铁矿和六方纤铁矿的结晶度。当 Te (IV) 与 Te (VI) 与水羟锰矿共沉淀, 衍射峰位置无变化, 而衍射峰强度降低, 特别是与 Te (VI), 表明 Te 与水羟锰矿的共沉淀过程, Te 会干扰水羟锰矿晶体的正常生长, 导致结晶度下降。当 Te (IV) 与 Te (VI) 与钡镁锰矿共沉淀时, 会经历形成中间阶段水钠锰矿, 最终形成钡镁锰矿, XRD 衍射峰出现部分峰强降低而部分增强, 表明 Te 的共沉淀会干扰钡镁锰矿一些晶面正常生长, 而同时会增强一些晶面的结晶度。

关键词: 碲; 铁锰矿物; 等温吸附; 吸附动力学; 共沉淀

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

上新世以来东亚陆缘沉积源汇系统及大陆风化演变

李芳亮^{1*}

1. 海南热带海洋学院 海洋科学技术学院, 海南三亚 572022

硅酸盐风化被视为维持地球气候稳态的关键过程; 但由于风化指标记录常常受到多种(非风化)因素的干扰, 风化强度如何响应晚新生代气候仍不清楚。东亚大河流域整合了大陆尺度的风化信息, 但“从源到汇”系统的演变如何影响风化信号需进一步厘清。本研究汇编了东亚陆缘及流域各沉积物源区的钕同位素(ϵNd)、锆石铀-铅年龄和化学蚀变指数(CIA)等已发表数据以及大陆架 CSDP-2 站位新数据, 以了解大河演变历史、评估其对风化指标记录的影响。东亚陆缘沉积物 ϵNd 值从 3.6 Ma 之前的 -18.8 增加到 1.0 Ma 以来的 -11.3, 分别与华北克拉通和青藏高原-黄土高原的同位素值对应。锆石年

龄进一步表明该物源变化, 显示类似现代的黄河水系在早更新世末期已完全贯通。全流域贯通促进了从内陆高原向边缘海的沉积物输送, 因此, 在上新世以来全球降温背景下, 东亚陆缘风化强度(CIA)下降幅度显著大于其他亚洲地区。总之, 本研究认为大河水系向上游高地扩展以及全球变冷共同控制了风化强度记录的下降趋势和幅度; 强调了在解译大陆边缘沉积物风化信号时, 深入理解源汇系统的演变的重要性。

关键词: 源汇系统; 水系演化; 大陆风化; 晚新生代变冷

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0800504)和国家自然科学基金项目(42230410 和 41991324)

第一作者/通讯作者: 李芳亮(1990-), 讲师, 研究方向: 大陆边缘沉积学与古海洋, Email: fangliang@hntou.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

深海多金属结核微观结构特征及其资源效应

周军明¹, Toshihiro Kogure², 袁鹏³, 任江波⁴, 杨胜雄^{1*}

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. The University of Tokyo, 日本东京 130033;

3. 广东工业大学, 广州 510006;

4. 广州海洋地质调查局, 广州 511458

水成型多金属结核富含钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、稀土(REE)等多种关键金属元素,是保障国家安全的重要深海矿产资源。水成型多金属结核由海水中Fe(II)、Mn(II)离子氧化沉积形成:氧化形成的纳米铁/锰(氢)氧化物矿物沉积形成微纳米级纹层(SMLs),纹层进一步生长形成多种微观结构(如树枝状结构、柱状结构、平行层状结构等),最终聚集形成多金属结核。解析多金属结核的微观特征,对认识多金属结核的形成和生长机制具有重要意义。例如,纳米铁/锰(氢)氧化物矿物组成的SMLs是水成型多金属结核的基本结构单元,具有指纹效应,精确记录着成矿信息,探明SMLs形成机制和生长过程,是认识水成型多金属结核成矿的重要基础,可从微观尺度系统地揭示结核成矿机制。但现阶段对于多金属结核的微观特征(包括SMLs)的认识存在明显不足。针对这一问题,本研究以典型水成型多金属结核为研究对象,采用微区X射线

荧光光谱、微区X射线衍射、扫描电子显微镜、聚焦离子束和高分辨透射电子显微镜等多种微区矿物学分析方法,探究了结核中SMLs结构特征。研究结果表明:(1)铁锰结核存在背散射图衬度对比明显的SMLs-D和不明显的SMLs-I两种类型,SMLs-D主要由10 Å和7 Å的层状锰酸盐矿物组成,由粒径较大和较小的锰氧化物矿物交替排列所致。(2)SMLs-D中Mn元素价态随纹层出现规律性变化,指示短地质历史时间尺度下成矿海水的氧化还原环境存在规律性波动。(3)系统揭示了多金属结核孔隙/裂隙中广泛存在的成岩作用——矿物溶解重结晶过程,发现成岩作用产物具有典型水成作用的矿物学和地球化学特征。相关研究结果对进一步认识铁锰结核的形成和生长机制提供了依据。

关键词: 多金属结核; 微观结构; 微纳米级纹层; 矿物学特征; 关键金属

基金项目: 中国博士后科学基金(2022M720888), 国家高层次人才特殊支持计划领军人才项目, 自然资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2022-G02)

第一作者简介: 周军明(1992-), 博士后, 研究方向: 海洋矿物演化及其资源环境效应. Email: zhoujunming@gmlab.ac.cn

*通信作者简介: 杨胜雄(1964-), 高级工程师, 研究方向: 海洋地质与矿产资源. Email: yangsx@gmlab.ac.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

沉积再悬浮作用调控颗粒态微量金属元素 在长江-河口-陆架的输运和埋藏

孙学诗^{1*}

1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

Understanding the processes influencing the transport and fate of particulate trace metals (PTM) at the land-ocean margin is important for quantifying the contributions of trace metals from land and rivers to the global budget of the coastal ocean. Despite this importance, constraining the delivery and marine fate of riverine PTM in estuarine and coastal settings remains challenging and is so far incomplete, due to their dynamic nature. Here, we employed geochemical—including inorganic and organic tracers—alongside sedimentological data to investigate the impact of

sediment transport processes, such as seasonal variations in riverine discharge and sediment resuspension, on the transport and fate of PTM along the Yangtze River-estuary-shelf continuum. We find that sediment resuspensions influence the transformation of mineral-associated PTM, thereby regulate the fate of PTM across the river-coastal ocean continuum.

关键词: Yangtze River; Particulate trace metals; Transport; Fate

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42476060)

第一作者简介: 孙学诗 (1988-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积地球化学. Email: sunxueshi@ouc.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

中始新世东南印度洋曼达岬海盆沉积物地球化学特征及其地质意义

王薇¹, 徐兆凯², 杨承帆¹, 胡忠亚¹, 杨守业^{1*}

1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

始新世 (53~34 Ma) 发生过多次极端气候变暖事件 (EECO, LLTM 和 MECO), 这些事件与火山活动、全球碳循环扰动和海洋-陆地环境变化密切相关, 因此是研究温室效应背景下地球系统多圈层相互作用的典范。然而, 目前对始新世气候变暖事件的驱动机制及其环境效应还不甚清晰。在始新世处于南半球高纬度地区 (50~60° S), 对古环境变化尤为敏感。因此, 本研究利用国际大洋发现计划 (IODP) 在东南印度洋曼达岬海盆获取的 U1514 站位的始新世高分辨率沉积物岩芯样品, 进行了沉积学、元素地球化学、同位素地球化学和有机地球化学等的综合分析, 开展了始新世沉积物源—汇过程及其与构造和气候变化间耦合关系的研究。结果表明, 早—中始新世 (52~43 Ma) 曼达岬海盆的碎屑沉积物主要来自澳大利亚西南大陆中元古代地块; 中始新世后期 (43~38

Ma), 研究区火山物质输入增多主要响应于澳大利亚与南极大陆的快速分离, 晚始新世 (38~34 Ma), 沉积物源由远源陆地 (如伊尔岗克拉通) 转变为近源陆地 (珀斯盆地和露纹杂岩), 受澳大利亚西南大陆区域性构造抬升和全球气候变冷的影响。始新世中期偶发性火山活动释放的大量温室气体 CO₂ 导致澳大利亚南部出现较长时间 (~5 Ma) 的气候升温, 同时南半球中—高纬度地区陆地水文循环加剧, 硅酸盐风化强度增加。本次研究重建了始新世曼达岬海盆对南半球中—高纬度地区构造运动和气候变化的沉积响应, 这为深入理解暖室气候条件下地球系统演变规律以及构造-气候-海洋变化提供了参考实例。

关键词: 中始新世暖期; 东南印度洋; 火山活动; 大陆风化; IODP 369

第一作者简介: 王薇 (1993-), 博士后, 研究方向: 海洋沉积地球化学. E-mail: wangwei24@tongji.edu.cn

通信作者简介: 杨守业 (1971-), 教授, 研究方向: 东亚大陆边缘物质的源汇体系与环境响应. E-mail: syyang@tongji.edu.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

强烈的软流圈地幔不均一性引发北冰洋加克洋中脊地区壳幔的解耦

许阳^{1*}, 刘传周^{1,2}, 林音铮¹

1. 崂山实验室, 山东青岛 266237;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100049

软流圈地幔在洋中脊上涌并发生减压熔融, 形成的熔体向上迁移形成洋壳(以洋中脊玄武岩为代表), 而固体残留则形成大洋岩石圈地幔。洋中脊玄武岩的获取相对便利, 这使得它成为最被广泛使用的研究洋中脊下方软流圈地幔成分特征的岩石探针。但是, 软流圈地幔中存在大量古老难熔的地幔组分, 它们难以发生熔融而对现今洋脊处的岩浆活动贡献极少。因此, 仅仅通过对洋中脊玄武岩的研究不能全面约束软流圈地幔的特征。深海橄榄岩作为软流圈地幔部分熔融后的残留能够保存更为完整的软流圈成分信息。在本研究中我们展示了来自北冰洋加克洋中脊的中部贫岩浆区(SMZ)和东部火山活动区(EVZ)的约 70 块深海橄榄岩样品的主量元素和微量元素数据, 这些数据表明加克洋中脊深海橄榄岩经历了小于 15% 的部分熔融程度。它们的单斜辉石矿物可以划分

为轻稀土亏损和轻稀土平坦两种类型, 后者很可能在洋中脊下的熔融区经历了瞬时熔体加入的再富化过程。加克洋中脊地区深海橄榄岩的成分沿着洋脊存在强烈的变化, 这不能归结于软流圈温度的变化。由于研究的橄榄岩的部分熔融程度比利用地震获得的洋壳厚度所推测的值更高, 因此我们推测加克洋中脊下软流圈中存在继承了古老熔融事件的难熔地幔。这些难熔组分的存在引起加克洋中脊地区的洋壳和岩石圈地幔存在解耦现象。特别是在 SMZ 地区, 难熔地幔很可能构成了软流圈地幔的主体, 因此该区域富集的玄武岩组分很可能来源于软流圈中少量的富集地幔物质。

关键词: 深海橄榄岩; 地幔不均一性; 壳幔解耦; 超慢速扩张脊; 加克洋中脊

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

水圈-岩石圈相互作用的地球化学记录: 来自蚀变洋壳玄武岩的约束

田丽艳^{1*}, 沈晨曦¹, 韦懿倩¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000

玄武质洋壳从大洋中脊/弧后扩张中心生成至俯冲进入地幔的过程中, 在海底表面和洋壳内部发生了广泛的水-岩相互作用, 这个过程所伴随的物质和元素交换控制了蚀变洋壳和海水的成分。此外, 蚀变洋壳作为俯冲带输入物质, 对岛弧火山和大陆地壳的形成具有重要贡献, 是导致地幔化学组成不均一性的主要原因。因此, 对蚀变洋壳的地球化学组成以及相关的水-岩相互作用研究是理解地

球系统物质和元素循环的基础。本研究以采自 IODP 368 航次 U1502B 钻孔基岩岩芯的蚀变玄武岩为研究对象, 分别对全岩、蚀变矿物、基岩岩脉开展详细的岩相学和地球化学特征分析, 进而约束海底洋壳的蚀变过程。

关键词: 水-岩相互作用; 蚀变玄武岩; 大洋钻探岩芯; 地球化学

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

印度洋沃顿海盆沉积物中生物磷灰石的原位地球化学和 Sr 同位素特征及其指示意义

李佳¹, 石学法^{1*}, 黄牧¹, 于淼¹, 毕东杰¹, 沈芳宇¹

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与地球物理研究室, 山东青岛 266000

稀土元素(镧系元素加钇, 简称 REY), 特别是中-重稀土元素因其在高科技领域的广泛应用和重要的战略价值, 是地质资源研究的核心对象。“深海富稀土沉积”(REY-rich deep-sea sediments)是指产于深海盆地(水深大于 4000 m)中的富含稀土元素的沉积物, 也称“深海稀土”, 其稀土元素总量(Σ REY)一般大于 700 $\mu\text{g/g}$, 最高含量接近 8000 $\mu\text{g/g}$ 。深海富稀土沉积作为一种具有前景的新型深海矿产资源, 已引发了广泛关注。富 REY 的深海沉积物中磷(P)与 REY 呈正相关关系, 生物磷灰石(鱼类残骸, 如牙齿和骨骼)被认为是 REY 的主要载体。本文通过对印度洋沃顿盆地 GC26 岩芯中生物磷灰石

的显微观察和原位地球化学特征分析, 从纳米尺度揭示了 REY 的富集机制。同时, 通过原位 Sr 同位素比值分析, 探讨了生物磷灰石对 Sr 元素的富集及其指示意义。研究结果表明, REY 通过牙本质的狭窄通道进入生物磷灰石。海洋沉积物中生物磷灰石的 REY 和同位素特征可用于重建古海水环境和演化过程。基于原位 Sr 同位素地层学结果, 我们推测 GC26 岩芯的上部主要受到大陆壳风化产物的影响, 而下部则主要受到地幔来源热液输入的影响。

关键词: 深海富稀土沉积; 生物磷灰石; Sr 同位素; 沃顿海盆

国家重点研发计划项目: 深海稀土资源高效探测评价技术与示范(2023YFC2811200)

第一作者简介: 李佳(1990-), 工程师, 研究方向: 深海稀土矿产资源. Email: lijia@fio.org.cn

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学、海底成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

南大西洋地幔不均一性与大洋岩石圈地幔再循环

王纪昕^{1,2}, 王赛^{1,2}, 鄢全树^{1,2}, 李传顺^{1,2}, 石学法^{1,2*}

1. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

2. 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 青岛 266061

软流圈地幔的不均一性因板片俯冲、大陆拆沉、热点/地幔柱活动等过程的搅动而尤为复杂。洋中脊玄武岩(MORB)通常被认为是不同来源熔体混合的产物,其携带的地幔不均一性信号在混合过程中被均一化。然而,近年来研究发现,在慢速和超慢速扩张中脊,由于岩浆活动较弱,岩浆混合程度低,洋中脊玄武岩能够保留不同尺度和来源的地幔不均一性信息,为揭示软流圈地幔组成和演化提供了重要窗口。南大西洋中脊是典型的慢速扩张洋中脊,洋盆内存在多个板内岩浆活动中心。南大西洋位于 17°~39°S 之间的洋脊段,北端在圣赫勒拿(St. Helena)火山链延伸线附近,靠近圣赫勒拿岛,南端在沃尔维斯海岭(Walvis Ridge)和特里斯坦-达库尼亚岛(Tristan da Cunha)附近。圣赫勒拿岛和特里斯坦-达库尼亚岛属于热点/地幔柱活动的产物。因洋脊与热点/地幔柱相互作用,该区域的洋中脊玄武岩表现出显著的洋岛玄武岩的同位素特征。然而,该区域洋中脊玄武岩的微量元素组成却呈现两种截然不同的特征:第一类介于全球 E-MORB 均值与 D-MORB 均值之间,微量元素配分模式与圣赫勒拿以及特里斯坦-达库尼亚洋岛玄

武岩的微量元素配分模式相近;第二类位于全球 D-MORB 均值以下,微量元素配分模式与两处洋岛玄武岩几乎呈镜像对称,具有显著的 Nb-Ta 负异常,表明这两类玄武岩的源区迥然不同。尽管南大西洋中脊 17°~39°S 显著受到热点的影响,但第一类玄武岩在洋中脊呈零星分布,而第二类玄武岩沿脊轴广泛分布,这一现象表明南大西洋地幔整体上比正常 MORB 地幔更为亏损。我们在第二类玄武岩的橄榄石熔体包裹体中识别出两组 D-MORB 熔体:第一组熔体包裹体的 Rb、Ba、U、K 含量较第二组更高。两组熔体包裹体均表现出明显的 Nb-Ta 负异常,且 Th-Pb 极低,低于检测限。结合全岩同位素和微量元素组成,我们推测且源区地幔更可能是再循环的脱水的蛇纹石化大洋岩石圈地幔。这种源区不仅能够解释 Nb-Ta 负异常,也可以解释熔体中极低的 Pb 含量。考虑到南大西洋中脊 17°~39°S 区域远离俯冲带等地质事实,我们推测这些蛇纹石化的大洋岩石圈地幔,在经历俯冲脱水作用后,在南大西洋打开之前就囤积于上地幔底部。

关键词: 南大西洋 洋中脊玄武岩 岩石圈地幔

第一作者简介:王纪昕,助理研究员,研究方向:海洋岩石地球化学. Email: jxwang@fio.org.cn

*通信作者简介:石学法,研究员,研究方向:海洋地质与成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

长江口及东海反风化过程

武雪超¹, 许心宁¹, 胡忠亚¹, 杨守业^{1*}

1. 同济大学 海洋地质全国重点实验室, 上海 200092

海洋环境中的反风化(又称可逆风化)作用是指硅(主要是生物硅)与可溶性阳离子结合形成自生铝硅酸盐矿物(粘土), 消耗海洋碱度并释放 CO_2 的过程。反风化作用一直被认为是全球海洋碳、硅和关键元素(Fe、K、Mg、Li 等)循环以及海洋碱度的重要调控机制, 但其作用机制和对全球海洋要素的影响尚不清楚。长江口—东海陆架断面独特的海洋地质环境使其成为研究反风化作用的天然实验室。通过对该断面代表地点沉积物和孔隙水样品的矿物学和化学分析, 探讨该地区的反风化过程并揭示其对大陆边缘关键元素循环的影响。以钾为例, 我们发现海洋颗粒物的钾/铝比明显高于长江, 平均值分别为

0.31 ± 0.04 和 0.25 ± 0.02 。根据孔隙水中钾浓度随深度降低以及向陆架方向绿色颗粒(大多为海绿石状)丰度增加的结果, 我们认为这些地球化学变化是由自生从海水中吸收钾引起的。有趣的是, 我们观察到多管样中溶解和颗粒态钾和镁浓度以及它们同位素的不同变化。我们推测全球河流碎屑主导大陆边缘钾的吸收通量约为 $81 \pm 62 \text{ Tg} \cdot \text{yr}^{-1}$, 与全球河流入海的溶解通量相当。该研究揭示大陆边缘地区反风化和自生矿物形成在改变海水和海洋沉积物地球化学中的重要作用。

关键词: 反风化; 边界交换; 东海; 长江

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

西太平洋底流增强对深海稀土超常富集的驱动

毕东杰^{1,2}, 石学法^{1,2*}, 黄牧^{1,2}, 沈芳宇¹, 于淼^{1,2}, 张颖¹,
石丰登¹, 刘季花^{1,2}

1. 自然资源部第一海洋研究所 自然资源部海洋地质与成矿作用重点实验室 山东省深海矿产资源开发重点实验室, 山东青岛 266061;

2. 青岛海洋科技中心 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266037

深海稀土 (又称“深海富稀土沉积物”; $\Sigma \text{REY} > 700 \mu\text{g/g}$), 是近年来发现的一种新的稀土资源类型, 主要分布于水深超过 4000 m 的深海盆地, 富含中-重稀土, 资源潜力巨大, 是陆地稀土资源的战略接替, 推测可能是最早实现开采的深海矿产之一。西太平洋深海富稀土沉积稀土总量高、发育连续性好, 可能是全球富稀土沉积发育最好的成矿带之一。深海富稀土沉积主要为棕色/红棕色远洋粘土沉积, 发育于强氧化环境。深海底流作为深海氧气主要来源, 其演化造成的氧化还原环境、水动力条件、营养物质供应等变化可直接影响稀土元素主要赋存矿物 (生物磷灰石、铁锰微结核等) 富集, 是控制深海稀土超常富集的关键因素, 但控制机制尚不清楚。本研究聚焦全球深海稀土发育最好的西太平洋深海稀土富集区, 基于沉积物自生铁锰组分 Nd-Pb 同位素、全岩 Mn/Ti 和 Mn/Al 比值等指标, 系统恢复了研究

区~12 Ma 以来底流演化历史及其造成的氧化还原环境、营养物质供应等变化过程, 发现研究区深海极富稀土沉积发育期底流活动、生物生产力明显增强, 显示强底流活动应该是控制深海稀土超常富集的关键因素。基于自生铁锰组分 Pb 同位素等指标, 分析认为研究区该期底流增强事件应该与区域构造活动造成的底流改道有关; 底流活动增强导致“海山效应”以及深海通风增强, 造成的沉积物中生物磷灰石和铁锰微结核富集是深海稀土超常富集的重要机制。本研究初步提出了西太平洋深海稀土成矿模型, 对于揭示深海稀土成矿机制、发展深海稀土成矿理论具有重要理论意义, 同时也对厘清深海稀土分布规律、指导深海稀土精准勘查具有重要现实意义。

关键词: 深海稀土; 底流演化; 富集机制; 海山效应; 西太平洋

基金项目: 重点研发计划项目 (2023YFC2811200), 国家自然科学基金项目 (42106085, 42249301, 91858209, 92262304)

第一作者简介: 毕东杰 (1992-), 副研究员, 研究方向: 深海稀土成矿作用. Email: dongjiebi@fio.org.cn

*通讯作者简介: 石学法 (1965-), 研究员, 研究方向: 海洋沉积学、海底成矿作用. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

北冰洋陆-海-气-冰多圈层作用下的陆架有机碳沉积及其环境效应

胡利民^{1*}, 石学法²

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100;

2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061

北冰洋作为全球气候变化和多圈层相互作用的敏感区域, 其陆-海-气-冰的圈层相互作用对区域生态系统、碳循环和全球气候变化及反馈具有重要影响。随着全球变暖, 北极海冰加速消融, 陆源物质输入增加, 海洋生产力变化显著, 这些因素共同调控着有机碳的来源、输运和埋藏。了解圈层作用背景下的极地边缘海系统有机碳的沉积埋藏对预测未来气候变化及其生态影响具有重要意义。2016~2019 中俄北极联合科考在喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海进行了系统的调查研究, 围绕有机碳的源汇过程及其环境响应这一科学主题, 初步研究发现, 在 AO 年际变化驱动的大气强迫作用下, 河流羽流路径也随之发生改变, 这种变化不仅会影响拉普捷夫海的水文

状况, 还会调节欧亚陆架 POC 的输运和动态, 从而影响不同海区的有机碳供应和沉积记录; 海岸冻土侵蚀排放是陆源冻土碳入海的重要方式, 识别了西伯利亚近岸海岸侵蚀导致的冻土碳对沉积黑碳物质组成的贡献 (约 30%), 这类冻土碳的输入对近海黑碳物质的组成分布特征、地球化学行为和沉积埋藏格局具有直接影响; 同时, 发现河流输入的土壤碳基质更有利于与颗粒汞的结合和稳定; 而海岸侵蚀的冻土碳基质与汞的结合作用较弱, 影响沉积汞的进一步输运和埋藏, 具有重要的环境效应和指示意义。

关键词: 圈层相互作用; 有机碳; 源汇过程; 陆架沉积; 北冰洋

• 专题 22: 多圈层相互作用与深海关键金属富集 •

东南太平洋富稀土沉积物粘土组分地球化学与矿物组成特征分析

胡倩男¹, 石学法^{1*}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与重点实验室, 山东青岛 266061

深海富稀土沉积(简称“深海稀土”)是近年来发现的一种新型稀土资源, 富含镧系元素和钇, 据估算, 深海稀土资源量是陆地探明储量的数千倍, 资源潜力巨大, 可能成为最先开发的深海矿产之一。为了解深海富稀土沉积物物质来源及其对稀土富集产生的影响, 本研究对东南太平洋沸石粘土分别进行全岩和粘土组分($<2\ \mu\text{m}$)的地球化学和矿物学对比分析。结果表明, 位于东太平洋海隆西侧提基海盆富稀土沉积物粘土组分中粘土矿物含量较低, 铁羟基氧化物相结晶程度相对较高。与此相反, 东

太平洋海隆东侧尤潘基海盆富稀土沉积物粘土组分主要以蒙脱石和无定形相的铁锰羟基氧化物为主。稀土元素主要赋存于结晶程度较低的铁锰羟基氧化物相。稀土元素配分模式表明粘土组分和全岩组分具有与海水相似的稀土配分特征。源于热液羽状流的粘土组分会不断的从海水中清扫出稀土组分, 这为受热液影响的东南太平洋富稀土沉积提供了全新的稀土富集机制。

关键词: 南太平洋; 粘土组分; 富稀土沉积物

第一作者简介: 胡倩男(1990-), 博士在读, 研究方向: 海洋地球化学. Email: huqiannan808@126.com

*通信作者简介: 石学法(1965-), 研究员, 研究方向: 海洋地质. Email: xfshi@fio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区烟囱体的矿物学特征及其对流体的记录

贾鹏飞¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东青岛 266591;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

近年来, 随着海底热液系统的发现和深海资源开发的需求, 同位素地球化学在揭示海底热液活动的形成演化、成矿规律、流体循环、生命响应及其环境影响方面取得了重要进展。经调查研究, 冲绳海槽中存在活跃的热液喷口、烟囱体、热液硫化物堆积体和生物群落, 其热液产物堆积体中 Fe、Cu 和 Zn 的变化、矿物组合和结构可有效地反映出热液产物堆积体生长过程中流体温度、氧逸度、硫逸度和 pH 的变化情况, 硫、铅及稀有气体同位素的联合分析能够有效揭示热液活动中的流体循环、矿物沉淀及微生物与金属元素相互作用的细节。其中, Noho 热液区 (NHF) 的海底热液硫化物矿石主要由磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和无定形二氧化硅组成, 可见磁黄铁矿

周围有较薄的白色边缘, 硫化物矿物间隙中有闪锌矿形成的他形晶粒, 且其构造背景、岩浆作用、矿化作用、流体-岩石相互作用以及沉积作用与生物响应、适应、记录和活动之间存在耦合关系。尽管如此, 目前对冲绳海槽 Noho 热液区中硫化物矿物的原位元素含量及其分布的研究依然较少。以上可见, 通过对海底热液硫化物的矿物组成、结构构造以及化学组成等特征的了解, 研究硫化物的形成机制以及后期的演化过程, 揭示热液硫化物记录的流体、岩浆活动等深部过程及信息, 可为正确评价海底热液硫化物的资源潜力提供研究基础。

关键词: 海底热液; 矿物学; 冲绳海槽

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)

第一作者简介: 贾鹏飞 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: jiafeifei61fc@163.com

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

Hydrothermal alteration of basalts in the ultramafic-associated Tianxiu Vent Field, Carlsberg Ridge

周鹏^{1*}

1. 宁波海洋研究院, 浙江宁波 315000

The Tianxiu vent field (TVF) is the first active ultramafic-associated hydrothermal field to be discovered at the termination of a detachment fault on the slow-spreading Carlsberg Ridge. Most hydrothermal chimneys in the TVF are developed on the basaltic apron. The basalt samples can be classified into seafloor-weathered and hydrothermally altered (i.e., slightly saponite-altered, highly saponite-altered, and silicified) types. At the periphery of the TVF, the basalts have experienced seafloor weathering, which has resulted in slight mineralogical and geochemical changes. In the TVF, most basalts have interacted with diffuse low-temperature hydrothermal fluids, leading to variable degrees of saponite alteration. As the distance from the vents decreases, basaltic glass, olivine, and pyroxene are progressively replaced by saponite; Zn, Cu, Co, and U are enriched; and Ca and Mn are depleted. Magnesium, Fe, and Li have been lost due to olivine replacement by saponite, and have been gained due to pyroxene replacement by saponite. In the fluid

flow conduits, the basalts have interacted with focused medium- to high- temperature fluids, which has led to the replacement of saponite by opal; depletion in Mg, Fe, Li, and rare earth elements, and enrichment in Zn, Cu, Co, and U. We propose a new hydrothermal alteration model for basalts in an ultramafic-associated vent field. Based on a comparison with mafic-hosted vent fields along mid-ocean ridges, we propose that: (1) the permeable host rocks promote lateral fluid flow, widespread mixing with cold seawater, and pervasive low-temperature hydrothermal alteration; and (2) H₂S-poor reducing fluids reduce the solubility of U and inhibit the precipitation of Fe, leading to high Cu/Fe and Zn/Fe ratios, and high U concentrations. The hydrothermal alteration model for the TVF is applicable to similar vent fields and can guide exploration for seafloor massive sulfide deposits along slow-spreading ridges.

关键词: Hydrothermal field; Alteration; Basalt; Chemical exchange; Detachment fault

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

北冰洋加克洋中脊 85°E 火山与热液活动耦合关系：来自海底观测和火山玻璃组分的证据

王涵林¹, 王叶剑^{1*}, 张涛¹, 丁巍伟¹, 鲁江姑¹, 杨驰¹

1. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

北冰洋加克洋中脊的 85° E 新火山脊上存在热液异常和罕见的深海爆炸式火山活动。本文利用 2021 年 JASMIN-E 航次所采集的火山玻璃样品和近底光学探测等资料, 开展该区域火山喷发与热液活动耦合关系的研究。在近底视频资料分析中, 我们观测到在 Oden 火山北部侧翼具有最厚级别 (大于 10 cm) 的火山碎屑沉积, 并伴随覆盖着约 2 km 宽范围的热液菌席区域。通过火山玻璃组分分析, 我们发现 Oden 火山样品的具有较低的 Mg# (63-66), 这指示了其岩浆经历了更高程度的演化。其挥发分的 CO₂ 平衡饱和特征, 表明在喷发前发生了较大程度的脱气, 岩浆房位于较浅的区域。Oden 火山样品中显示出高

H₂O/Ce、高 Cl/Nb 和 Cl 过量 (最大达 150 ppm) 的趋势, 说明浅层岩浆驱动了爆炸式火山喷发和热液循环。我们的研究结果显示研究区爆炸式喷发与其表面的热液活动是同一因素造成的不同方面的结果, 爆炸式喷发增强了海底渗透性, 为热液活动提供通道和热量, 同时热液作用又影响着岩浆的组分。本研究增进了对爆炸式喷发与热液系统驱动机制的认识, 丰富了超慢速扩张洋脊岩浆区小尺度上的复杂地质背景及支撑形成的生境, 有利于拓展深海多圈层相互作用的理论。

关键词: 加克洋中脊, 爆炸式喷发, 海底热液活动, 火山玻璃, CO₂

第一作者: 王涵林 (1999-), 硕士, 研究方向: 洋中脊火山与热液活动, 地球化学. Email: wanghlin@sio.org.cn

*通信作者: 王叶剑 (1984-), 研究员, 研究方向: 海底热液成矿系统. Email: yjwang@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽中部贫晶流纹质熔体的演化及其 对岩浆房状态的启示

罗鑫宇^{1*}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071

贫晶流纹质浮岩是岩浆极端分异的产物, 具有高气孔度(蜂窝状)的特点。然而, 形成浮岩的熔体的演化历史和挥发份饱和时间仍不清楚。冲绳海槽是西太平洋一个年轻的大陆边缘弧后盆地。本研究对采自冲绳海槽中部 Yoron Hole 热液区的贫晶流纹质浮岩(TVG7-1)中的斜长石、斜方辉石和 Fe-Ti 氧化物进行了详细的纹理和化学成分分析, 揭示了可喷发硅质熔体的演化过程、储存状态和喷发触发因素。矿物的纹理和化学组成表明开放的岩浆演化历史。斜长石的中空凹入结构以及斜长石-熔体湿度计证实了一个富水的熔体区。熔体区中挥发份(H₂O 等)的出溶将促进局部氧化条件的形成, 这一过程可能被斜长石中

FeO 和 An 的一致行为记录下来。此外, 挥发份出溶将导致储库超压, 将使岩浆房处于不稳定状态。岩浆房最终将因岩浆混合/补给而失稳, 并排出富水熔体。最后, 晶体尺寸分布(CSD)为理解冲绳海槽岩浆混合/补给的动力学效应提供了一个新的视角, 尤其是对矿物群的影响。我们的研究在晶粥模型框架内揭示了贫晶流纹岩的成因, 细化了岩浆演化历史, 并表明形成浮岩的岩浆在喷发前就已经达到挥发份饱和的状态。

关键词: 晶体尺寸分布; 贫晶流纹岩; 晶粥模型; 冲绳海槽

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划(B)(编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划(973)项目(编号: 2013CB429700)和泰山学者工程。

第一作者简介: 罗鑫宇(1999-), 博士研究生, 研究方向: 海底岩石学及地球化学. Email: luoxinyu@qdio.ac.cn

通信作者简介: 曾志刚(1968-), 教授, 研究方向: 海底硫化物. Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

西北太平洋采薇海山铁锰结壳中稀土元素富集机制研究

王琳璋¹, 曾志刚^{1,2*}, 齐海燕¹

1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

铁锰结壳由富含稀土元素 (REY) 的铁锰 (氢) 氧化物微层组成, 揭示 REY 的富集机制对未来深海沉积矿产资源的勘探开发具有重要意义。本研究对采薇海山铁锰结壳中各个类型的铁锰微层进行了原位微区分析。结果表明铁锰微层由柱状构造和斑杂构造组成, 主要为水成型、成岩型和水成-成岩混合型, 且具有高 Nd 含量。REY 在 $Mn/Fe < 2.5$ 的氧化环境中富集, 在 $2.5 < Mn/Fe < 5$ 的还原环境中急剧亏损, 在 $Mn/Fe > 5$ 的还原环境中几乎不发生变化, 表明氧化作用和早期成岩作用对稀土元素的富集起主导作用, 而后成岩作用对 REY 的富集影响较小。有机物降解和碎屑矿物的形成是铁锰结壳内部环境氧化还原电位变化的主要原因。我们提出了 REY 在铁锰结壳中

富集的三个过程。第一过程: 早期成岩作用促进了 REY, 特别是轻稀土元素 (LREE) 向孔隙水和磷酸盐的释放。铁锰微层表现出高 Mn/Fe 比和低 REY 含量的特征; 第二过程: 铁锰微层主要为水成-成岩混合型, 受孔隙水和海水共同控制。铁锰微层的 Mn/Fe 比降低, REY 开始富集; 第三过程: 在海水氧化作用下, 形成了以低 Mn/Fe 比和高 REY 含量为特征的铁锰微层。我们认为铁锰结壳在 REY 海洋地球化学循环中起到双重作用, 在氧化环境中是 REY 的汇, 在还原环境中是 REY 的源。

关键词: 铁锰结壳; 稀土元素; 氧化作用; 早期成岩作用

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)、泰山学者工程、青岛市博士后应用研究项目 (QDBSH20240102121) 和中国科学院留学基金。

第一作者简介: 王琳璋 (1995-), 博士后, 研究方向: 海洋矿产资源研究.Email:wanglinzhang@qdio.ac.cn

通信作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海洋热液地质学研究.Email:zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

西太平洋冲绳海槽热液活动对表层沉积环境的影响

曾志刚^{3,1,2*}, 胡思谊¹, 齐海燕¹, 王琳璋¹

1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072

研究表层沉积物的化学组成有助于了解海底含金属沉积物 (metalliferous sediment) 的元素富集特征, 可揭示热液柱与海水相互作用的程度, 并理解从热液柱到沉积物的元素变化状况。为此, 对西太平洋冲绳海槽 (OT) 不同热液区的表层沉积物样品进行了矿物学、元素含量、烧失量 (Loss on ignition, LOI)、水含量、干密度分析。结果表明, 样品由石英、微斜长石、钠长石、粘土 (伊利石、蒙脱石)、斜绿泥石、滑石、角闪石、方解石、白云石、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫、重晶石、石膏和钠铁矾组成。大多数表层含金属沉积物的 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 P_2O_5 含量低于正常表层沉积物, 且其 SiO_2 、 TiO_2 与 Al_2O_3 、 K_2O 与 SiO_2 之间存在正相关关系, 而 LOI 与 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 与 SiO_2 、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 FeO 之间存在负相关关系, 反映了海底热液作用增强将减少表层含金属沉积物中的 SiO_2 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 Cr 、 Ni 含量, 而热液柱扩散将增加表层含金属沉积物中的 TFe_2O_3 、 Cu 、 Zn 含量及 Fe/Ti 、LOI 值。越靠近热液喷口的

表层沉积物, 其 TiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 含量、 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值、水含量和干密度值的变化范围越大, 且其 Al_2O_3 、 MnO 、 CaO 含量以及 $\text{MnO}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 比值越小, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值和干密度则越大。与热液喷口的水深相比, 大多数表层含金属沉积物的水深较浅, 喷口深度与表层含金属沉积物深度之间的高度差较小。此外, 随着表层含金属沉积物的平均粒径增加, 其 SiO_2 、 MnO 、 MgO 含量减少, 而 ZnO 、 TFe_2O_3 含量增加; 同时, 当沉积物中 $<4\ \mu\text{m}$ 颗粒大小的组份增加时, 表层含金属沉积物中的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 含量增加; 而当沉积物中 $>63\ \mu\text{m}$ 颗粒大小的组份增加时, 表层含金属沉积物中的 SiO_2 、 TiO_2 含量减少, 反映了流体对西太平洋冲绳海槽表层沉积环境的强烈影响, 且导致含金属沉积物的 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 含量以及 $\text{MnO}/\text{TFe}_2\text{O}_3$ 比值降低, TFe_2O_3 和 LOI 含量增加。

关键词: 主要元素组成; 热液柱扩散; 颗粒大小; 热液喷口; 表层含金属沉积物

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

北极冰下加克洋中脊热液沉积物地球化学特征研究

薛文圣¹, 王叶剑^{1*}, 邱中炎¹, 杨驰¹, 杨春国¹, 马新雨¹

1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012

迄今为止, 全球已发现超过 721 处海底热液活动区, 但对北极洋中脊系统的热液活动规律仍知之甚少。本研究基于 2021 年 JASMIN 计划借助“雪龙 2”号破冰船在加克洋中脊 96° E 中央裂谷获取的长 369 cm 沉积物岩芯 (N12-GR-GC02)。岩芯组分包括远洋粘土、冰筏碎屑、Fe (氢) 氧化物、火山碎屑、Mn 氧化物等。该岩芯 85 cmbsf 以上部分识别出三个热液羽流事件层 (H1-H3), 以相对富集 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、U、P、V、Mg、Ca 和 Na 元素为特征。其中 Fe (氢) 氧化物主导 Fe-Mn-Cu-Pb-U-P-V 组合, 火山碎屑贡献 Mg-Ca-Na 组分。H2 层 (13~16 cmbsf) 受热液影响最强, 具体表现为: Fe (12.06~15.22 wt%)、Mn (2687~5465 $\mu\text{g/g}$)、

Cu (245~373 $\mu\text{g/g}$) 和 Pb (248~342 $\mu\text{g/g}$) 的显著富集, 总稀土元素 (REE) 含量降低, 页岩标准化 REE 配分模式呈现负 Ce、正 Eu 异常及 Y_N/Ho_N 比值升高。值得注意的是, 热液沉积层中火山碎屑含量同步增加, 结合 Al-Fe-Mg 三角图解分析 ($Fe+Al>90\%$, $Mg<10\%$), 指示该区记录热液活动可能受控于岩浆作用, 与玄武岩型热液系统具有成因关联。本研究揭示了深海沉积物中热液活动的证据, 深化了我们对冰封大洋环境下超慢速扩张洋脊热液活动规律及其驱动力的理解。

关键词: 冰下深海; 热液活动; 沉积物岩心; 主量元素与微量元素; 加克洋中脊

第一作者简介: 薛文圣 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋沉积物地球化学. Email: xuews@sio.org.cn

*通信作者简介: 王叶剑 (1984-), 研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统. Email: yjwang@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

Quaternary gas hydrate dissociation promotes the formation of Shenhu Canyon Group in the South China Sea

Hui Pan^{1, 2}, Hui Xie^{1, 2, 3*}, Zhongxian Zhao⁴, Jinlong Liu⁴, Guozhong Jiang^{1, 3}, Ruilong Li⁵, Yuanping Li⁶, Eun Young Lee⁷, Wen Yan⁴

1. Guangdong Ocean University College of Chemistry and Environment, Zhanjiang, Guangdong 524088;

2. Guangdong Ocean University Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction, College of Ocean and Meteorology, Zhanjiang, Guangdong 524088;

3. Guangdong Ocean University Key Laboratory of Climate, Resources, and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, Zhanjiang, Guangdong 524088;

4. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 511458;

5. University of Chinese Academy of Sciences South China Sea Institute of Oceanology, Guangzhou 511458;

6. Research Institute of China National Offshore Oil Corporation Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000;

7. University of Vienna, Vienna Department of Geology, Austria 518000

The Baiyun deepwater region (Shenhu area) of the Pearl River Mouth Basin (PRMB), northern South China Sea (SCS), is characterized by the presence of abundant gas hydrate deposits and dense submarine canyons. However, the relationships between gas hydrate decomposition and formation of submarine canyons remain unclear. Based on the seismic and well data, the variations of the gas hydrate stability zone (GHSZ) thickness were quantitatively calculated. The results indicate that the thickness of the GHSZ, which ranges from 0 to 350 m, is distributed in areas where the water depth exceeds 600 m. Since 2.5 Ma, there have been three combinations of sea level and bottom water temperature (BWT) changes that can significantly reduce the thickness of the GHSZ. These combinations have exerted control over the GHSZ thickness in this region: (1) a slight increase in sea level accompanied by a rapid increase in BWT; (2) a rapid decrease in sea level but a slight decrease in BWT; (3) a rapid increase in both sea level and BWT. It has been found that water depth exerts an influence on the variation of the thickness of GHSZ. The impact in shallow water areas (<1000 m) is more significant than that in deep water areas (>1000 m). Consequently, in the Shenhu area, where the water depth ranges from 500 to 1000 m, the reduction in the thickness of GHSZ is consistently much greater than that in deep water

areas. It is hypothesized that during seawater warming or sea level dropping, the substantial decrease in the thickness of GHSZ in the Shenhu area leads to the dissociation of gas hydrates. This dissociation may have triggered methane seepage, resulting in the formation of pockmarks. The pockmarks likely weaken the slope sediments, and the subsequent rapid sea level fall promotes synchronous gravity erosion processes, thereby forming a chain of pockmarks (channel). Continuous gas seepage may further trigger slope failures, which can widen the channel. It is proposed that this iterative process contributes to the formation of the current Shenhu Canyon Group. Our study presents a plausible mechanism elucidating how the reduction in the thickness of GHSZ, the release of methane, and the formation of submarine pockmarks interact to influence and reshape the slope morphology, as well as drive the evolution of submarine canyons. This integrative analysis not only uncovers the complex geological processes at play in the study area but also offers valuable insights into the long-term geomorphological development in submarine environments.

关键词: Gas hydrate stability zone; Submarine canyons; Gas hydrate decomposition; Baiyun deepwater area; Pearl River Mouth Basin

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金 (No.2023A151500124)

第一作者简介: 潘荟 (1989-), 硕士研究生在读, 研究方向: 天然气水合物资源潜力与构造研究 Email: Panhuine@163.com

*通信作者简介: 谢辉 (1987-), 副教授, 研究方向: 大陆边缘构造沉积演化与地球动力学模拟研究 Email: xiehuihaoba@163.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

帕里西-维拉海盆风尘石英对中更新世气候转型的响应

颜钰¹, 蒋富清^{1,2,3*}, 曾志刚^{1,2,3}, 郑昊^{1,3}, 任传亮^{1,3}

1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

中更新世气候转型是第四纪最重要的气候变化之一, 而对中更新世气候转型的形成机制仍存在不同的观点。帕里西-维拉海盆中的风尘记录了中更新世气候转型, 其中石英作为风尘的主要组分, 是否响应于中更新世气候转型尚待研究。本文对帕里西-维拉海盆 PV090102 孔 2.1 Ma 以来沉积物中的石英进行了定量分离, 并对石英的粒度组成、形貌特征、氧同位素组成和结晶度指数等进行了分析, 结果表明, 石英由众数粒径为 3.2 μm 的细粒端元 (EM1) 和众数粒径为 9.5 μm 的粗粒端元 (EM2) 组成, 其中 EM1 端元的石英主要来源于蒙古戈壁和塔克拉玛干沙漠, EM2 端元的石英主要来源于周围火山岛弧和海脊。通过对石英的粒度组成用 Weibull

分布函数进行拟合, 定量分离了两个端元的石英, 获得了 2.1 Ma 以来风尘石英的含量和通量。结果表明, 中更新世 (约 1.2 Ma) 以来, 风尘石英的通量比早更新世增加了 3 倍, 这与帕里西-维拉海盆总的风尘通量、亚洲内陆风尘堆积速率, 以及全球范围内风尘通量的增加是一致的, 表明帕里西-维拉海盆的风尘石英敏感地响应了中更新世亚洲内陆的干旱变化, 可以作为亚洲内陆气候变化的示踪指标, 用于西北太平洋深海长时间尺度风尘记录和亚洲内陆的古气候研究。

关键词: 中更新世气候转型; 源区; 石英; 帕里西-维拉海盆

基金项目: 国家自然科学基金“西太平洋暖池 8.5 Ma 以来风尘输入变化及其古气候效应” (42076049), “第四纪以来亚洲风尘和火山物质输入西北太平洋的制约机制” (41776065), “西太平洋俯冲体系中岩浆活动及其对热液物质供给的制约” (91958213); 中国科学院战略性先导科技专项“印太交汇区海洋物质能量中心形成演化过程与机制” (XDB42000000), “热液/冷泉区岩浆物质贡献与流体化学过程” (XDB42020402); 中科院海洋地质与环境重点实验室开放基金“晚中新世以来西太平洋暖池碎屑沉积物的来源” (MGE2020KG15); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目“典型弧后盆地热液活动及其成矿机理” (2013CB429700); 泰山学者工程专项 (ts201511061)

第一作者简介: 颜钰 (1996-), 女, 博士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: yanyu@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 蒋富清 (1972-), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: fqjiang@qdio.ac.cn

曾志刚 (1968-), 男, 研究员, 主要从事海底热液活动研究, E-mail: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

东海大陆边缘沉积物地球化学特征对热液活动的响应

王汶卓¹, 黄鑫^{1*}

1. 广东海洋大学, 广东湛江 524088

冲绳海槽位于东海东南部, 接收了大量的陆源物质, 由于其连续的沉积作用和该地区晚第四纪以来一系列快速的古环境变化的影响, 成为了古海洋学和海陆相互作用的理想研究区域。近几十年来, 对冲绳海槽的研究主要集中在沉积物来源及其演化、古气候变化 (东亚季风、典型气候事件、ENSO 等)、水文环境 (温盐条件、表层生产力、海平面升降、洋流演变、氧化还原环境、水柱分层等)、构造演化、热液活动等方面, 其中识别沉积物物源成为这些研究问题的关键。到目前为止, 许多研究者从古生物学、生物地球

化学、元素/同位素地球化学、矿物学、环境磁学等角度对冲绳海槽的沉积物源进行了大量的研究。冲绳海槽的沉积物主要由黄河、长江、台湾岛河流、火山物等组成, 但不同时空的物源信息仍然存在较大的争议。综合上述研究, 本文总结了末次冰期晚期以来冲绳海槽沉积物的物源历史, 提出造成这些研究差异的可能原因, 并对未来物源的判别工作进行了展望。

关键词: 冲绳海槽; 沉积物物源; 末次冰期晚期

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42006065)

第一作者简介: 王汶卓 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 沉积物地球化学. Email: wwz15225524353@163.com

*通讯作者简介: 黄鑫 (1987-), 教授, 研究方向: 沉积物地球化学/有机地球化学. Email: shaoshanhx@126.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

东太平洋海隆南部 7°24'S 与 18°25'S 海底黑烟囱蠕虫管硫同位素研究

林丽^{1*}

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059

本研究对来自于东太平洋海隆南部 7°24' S 与 18°25' S 海底黑烟囱蠕虫管管壁样品进行了形态学、矿物学和化学成分研究。SO62-402G 通常由 Fe、Zn、Cu、S 和 O 组成, 表明它可能由黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿组成。SO40-199G 通常由 Fe、Zn、S 和 O 组成, 这表明它可能由黄铁矿、闪锌矿组成。硫化物的整体化学成分富含 S 和 Fe, 并含有少量 Zn。在扫描电镜下, 从碎块样分辨出包括黄铁矿、白铁矿、黄铜矿和闪锌矿。此外, 我们发现可能存在微生物残留物, 但都被二氧化硅交代。我们推测原始生物被二氧化硅交代。块状硫化物矿物学显示出黄铁矿和闪锌矿的明显丰度, 其中黄铁矿是绝对主要的成分。分离硫化物

的形态表明黄铁矿为胶体, 闪锌矿为半自形到自形。TIMA 分析表明, 蠕虫管显示为由黄铁矿、闪锌矿、SiO₂ 等矿物组成的同心层结构。激光原位分析黄铁矿颗粒的硫同位素组成显示, 管壁黄铁矿和填充管的填充黄铁矿之间的 $\delta^{34}\text{S}$ 在统计学上存在显著差异。填充黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值平均值为 1.05‰ (SD: 0.71, 中位数: 1.0‰)。管壁黄铁矿报告的 $\delta^{34}\text{S}$ 范围更大, 从 1.5‰到 6.3‰。两者与大多数其他现代喷口硫化物样品的报告基本一致, 与喷口流体 H₂S 值大致匹配。

关键词: 东太平洋海隆; 热液系统; 蠕虫管; 硫同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173058)

第一作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

*通信作者简介: 林丽 (1965-), 教授, 研究方向: 生物成矿. Email: linli@cdut.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区烟卤体中金的分布特征和赋存状态

崔梦迟¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东青岛 266590;

2. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

海底热液活动广泛分布于洋中脊、弧后盆地及岛弧等构造环境, 其产物包括硫化物、含金属沉积物及蚀变岩石等, 并显著影响海洋地质与生态环境。其形成与岩浆去气、流体-岩石/沉积物相互作用及海水混合密切相关。热液流体具有高温、低氧、极端 pH 值特征, 富含 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Au、Ag 等金属元素。近年来, 针对不同海域热液系统的研究揭示了构造背景、岩浆作用及流体过程对热液成矿的协同控制机制, 尤其聚焦于金、银等贵金属的赋存形式与富集机理。海底热液系统贵金属富集受多因素耦合控制, 构造背景、流体演化及矿物结晶过程等是成矿机理研究的核心。尽管已经取得逐步进展, 但关于热液系统的成矿动力学机制仍需深入, 有关银的沉淀路径及其与金的耦合关系仍尚未完全明确。冲绳海槽作为典型弧后盆地, 其过渡性地壳、高热流值及多期岩浆活动为热液成矿提供了独特条件。此处热液活动受俯冲组分、地壳混染及岩浆分异共同影响, 喷口流体以

富 Zn、Pb、Cu 为特征。已有研究表明 Noho 热液区 (NHF) 的海底热液硫化物矿石主要由磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和无定形二氧化硅组成, 其构造背景、岩浆作用、矿化作用、流体-岩石相互作用以及沉积作用与生物响应、适应、记录和活动之间存在耦合关系。尽管如此, 目前对冲绳海槽 Noho 热液区 (NHF) 硫化物矿物中元素富集机制的研究仍相对较少。研究将聚焦于冲绳海槽 Noho 热液区块状硫化物(研究样品于 2016 年 6 月 12 日在冲绳海槽 Noho 热液区用电视抓斗采获, 取样位 126°58'58.640" E, 27°31'04.476" N; 水深 1581 m), 通过对硫化物矿物组成、结构、微量元素特征, 分析金的空间分布和赋存状态。研究成果对于金属矿产资源的勘探开发、深入了解金在热液活动中的行为、金的成矿作用机制以及地球深部物质循环和演化过程具有重要意义。

关键词: 海底热液硫化物; 金; 元素富集机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330409, 42221005, 91958213), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2013CB429700), 泰山学者工程资助

第一作者简介: 崔梦迟 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质. Email: cuimc@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 主要从事海底热液活动研究. Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

中中新世适宜期长偏心率驱动西北菲律宾海的黏土矿物沉积

任传亮^{1,3}, 蒋富清^{1,2,3*}, 曾志刚^{1,2,3}

1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与功能实验室, 山东青岛 266237;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

中中新世气候适宜期(MMCO, 17~14 Ma)是新生代总体变冷趋势中的一个显著变暖阶段。然而, 西北太平洋对这一明显气候变化的响应, 仍不清楚。在本研究中, 我们分析了国际海洋发现计划(IODP) 351 航次在奄美三角盆地的 U1438 站位采集的 17.5~12.2 Ma 沉积物样品中的黏土矿物。研究结果表明, 在 MMCO 期间, 蒙皂石是主要的黏土矿物, 约占 88%, 其次是伊利石, 约占 10%, 绿泥石和高岭石含量较少。MMCO 之后, 蒙皂石的比例下降到约 67%, 而伊利石(~24%)、绿泥石(~5%)和高岭石(~4%)的比例增加。物源分析表明 17.5~12.2 Ma 蒙皂石主要来源于西北菲律宾海的火山岛弧, 伊利石和绿泥石则来源于亚洲大陆。MMCO 期间蒙皂石/(伊利石+绿泥石)(S/IC)比值显著增加, 这与亚洲大陆磁化率的上升以及南海蒙皂石/伊利石比值和绿泥石/(绿泥石+赤铁矿+针铁矿)比值的增加相一致。这些相关性意味着 S/IC 比值敏感地响应了 MMCO 暖湿气

候。光谱和小波分析进一步揭示了 MMCO 期间 S/IC 比值具有显著的长偏心率(405 kyr)周期。S/IC 比值的 405 kyr 周期的峰值与长偏心率和日照量极小值、亚洲内陆磁化率极大值以及深海碳、氧同位素的正偏差相对应。在长偏心率极小值期间, 一方面寒冷的气候导致北半球西风急流南移。西风环流随即向亚洲大陆携带更多的水分, 减少了伊利石和绿泥石的输入。另一方面, 较冷的气候促进了极地深水向北流动。这为北太平洋深处带来了更多的热量和溶解物质, 并增强了太平洋深水和表层水之间溶解物质(如氧气和二氧化碳)的交换。这些过程加强了西北太平洋的深水通风, 加剧了海底风化并增加了蒙皂石的含量。这项研究证明了 MMCO 期间长偏心率对中纬度亚洲大陆到西太平洋的气候和沉积物供应的调节作用。

关键词: 中中新世适宜期; 西北菲律宾海; 黏土矿物; 长偏心率

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

现代海底热液沉积物微生物硫同位素分馏机制与 太古代海洋硫循环约束

贺治伟¹, 宿蕾¹, 沈延安², 陈中强³, 刘喜停⁴, 杨守业¹, 李江涛^{1*}

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

4. 中国海洋大学, 青岛 266100

沉积黄铁矿的硫同位素组成 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$) 被广泛应用于示踪地球演化史中的硫循环过程, 但其解释常存在多解性。太古代海洋硫循环的阐释尤其面临挑战, 因该时期岩石中保存的微小分馏信号具有多成因特征。本研究通过 Nano-SIMS 对加利福尼亚湾瓜伊马斯盆地热液沉积物中的草莓状黄铁矿进行了微区原位硫同位素分析(该高温环境可作为太古代海洋的现代类比体), 发现 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$ 值的范围超过了 160‰。我们解析了影响 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}$ 的微生物和环境因素, 发现微生物硫同位素分馏作用普遍较大

(接近 60‰), 且与硫酸盐还原微生物的群落结构及其温度适应性无关。在现代硫酸盐充足的热液环境中获得的这些证据表明, 太古代硫化物中低分馏特征的形成机制, 既非源于热液增强的硫酸盐还原速率, 也非硫酸盐还原酶系或代谢途径的根本性改变, 而最合理的解释是当时海水硫酸盐浓度处于极低水平。

关键词: 热液沉积物; 微生物硫酸盐还原; 黄铁矿; 二次离子质谱; 硫同位素

基金项目: 国家重点研发项目(2021YFF0501301); 国家自然科学基金项目(42072333, 42402309)

第一作者简介: 贺治伟(1989-), 副研究员, 研究方向: 海洋同位素地球化学. Email: hezw@tongji.edu.cn

*通信作者简介: 李江涛(1981-), 教授, 研究方向: 地质微生物学. Email: jtli@tongji.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳海槽 Noho 热液区热液成矿作用：矿物学、地球化学与同位素示踪的启示

刘鹏刚¹, 曾志刚^{2*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 青岛 266590;

2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071

冲绳海槽中部伊平屋海脊附近的 Noho 热液区是近年来在年轻弧后盆地中发现的活动热液系统。本研究通过硫化物烟囱样品的矿物学、地球化学及同位素综合分析, 揭示了这一俯冲相关环境中成矿机制、元素富集过程与物质来源特征。硫化物烟囱主要由磁黄铁矿 (30%)、闪锌矿 (60%) 和方铅矿 (10%) 组成, 含少量等轴黄铜矿及非晶质二氧化硅。成矿过程可划分为三阶段: (1) 早期高温阶段 (>300 °C) 形成自形板状磁黄铁矿; (2) 中期中高温阶段 (250~200 °C) 沉淀富铁闪锌矿 (Fe 含量 14.36%~24.79%), 其内发育黄铜矿显微包裹体 (“闪锌矿黄铜矿病毒”); (3) 晚期低温阶段 (<200 °C) 方铅矿与非晶质二氧化硅共生, 与海水混合及硫逸度降低相关。LA-ICP-MS 分析表明, 闪锌矿显著富集 Cd ($499 \times 10^{-6} \sim 2557 \times 10^{-6}$)、Sn ($12 \times 10^{-6} \sim 1406 \times 10^{-6}$)、Ag ($42 \times 10^{-6} \sim 1940 \times 10^{-6}$) 和 Sb ($0.1 \times 10^{-6} \sim 2084 \times 10^{-6}$), 元素间耦合置换 (如 $2\text{Cu}^+ + \text{Sn}^{4+} \rightarrow 3\text{Zn}^{2+}$) 主导其晶格赋存。基于闪锌矿 Ga/Ge 比值的 $\log[w(\text{Ga})/w(\text{Ge})]$ -t 模型显示成矿温度为 180~240 °C

(平均 210 °C), 对应流体温度约 150~250 °C。硫同位素 ($\delta^{34}\text{S}=3.58\text{‰} \sim 5.69\text{‰}$) 和铅同位素 ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1246 \pm 0.0010$) 表明硫主要源自火山岩淋滤 (81%~83%), 少量来自海水硫酸盐还原 (17%~19%); 铅源则受俯冲带流体-岩石作用及沉积物有机质分解控制。稀土元素配分模式显示高温硫化物轻稀土富集 (LREE/HREE=8.09~32.0) 及正 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=1.44 \sim 4.13$), 而方铅矿的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.47 \sim 0.83$) 反映晚期氧化流体叠加。Noho 热液区多阶段成矿过程受岩浆热源驱动, 并受海水-沉积物相互作用调控, 其硫化物以 Rh-Ag-Sb 富集为特征。黄铁矿的缺失表明硫供给受限, 残余铁优先进入闪锌矿晶格。本研究深化了对弧后热液系统的认识, 揭示了俯冲带动力学、多期流体演化与金属捕获机制的协同作用, 为俯冲相关环境海底块状硫化物勘探提供关键依据。

关键词: 冲绳海槽; 硫化物成矿; 热液地球化学; 同位素示踪

基金项目: 本研究得到了国家自然科学基金项目 (编号: 42330409, 42221005, 91958213), 中国科学院战略性先导科技专项 (编号: XDB42020402), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (编号: 2013CB429700) 和泰山学者工程资助。

第一作者简介: 刘鹏刚 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学.Email: liupg@qdio.ac.cn

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液地质学, 地球化学, 岩石学.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

南海西北部新近纪线性火山活动特征及构造成因

望畅¹, 孙启良^{1,2*}

1. 中国地质大学(武汉)海洋地质资源湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2. 青岛海洋科学与技术国家重点实验室, 青岛 266061

火山通常呈现圆形或椭圆形, 其火山锥在大陆边缘的沉积盆地中呈不规则排列。然而, 在南海西北陆缘, 围绕刚性西沙地块分布着罕见的线性火山脊。这些火山脊被解释为岩浆沿潜在 WNW-ESE 走向断层系统裂隙式喷发的结果。这些断层可能与晚渐新世-早中新世期间, 西沙地块与东南方向逃逸的印支地块之间的相互作用有关。逃逸的印支地块使得西沙地块具备逆时针旋转的趋势, 因此在西沙地块周缘的薄弱带内中形成了北西\北西西走向的断层, 这些断层随后作为岩浆上涌的通道, 形成了现今所观察到的线性火山脊。本研究首次关注到南海

西北陆缘的北西/北西西向线性火山脊, 并探讨其构造成因, 同时也揭示了印支地块的逃逸对南海演化具有深远且长期的影响(甚至在逃逸相关运动停止后仍然持续)。更重要的是, 本研究提供了一个沉积盆地中呈雁列式排列的线性火山构造的实例, 增强了线性火山脊对板内剪切伸展和微地块相互作用的构造指示意义, 其结果可适用于其他具有类似地质背景的地区。

关键词: 线性火山脊; 火山活动; 印支逃逸构造; 微地块; 南海西北部

国家自然科学基金项目(42222607、42130408、42176085)

第一作者简介: 望畅(1997-), 博士研究生, 研究方向: 海洋地质. Email: wangchang1997@cug.edu.cn

*通信作者简介: 孙启良(1984-), 教授, 研究方向: 海洋地质灾害与地质资源. Email: sunqiliang@cug.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

软流圈地幔上涌引起弧岩浆成分改变

李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东青岛 266100

岛弧是板块俯冲的重要产物。岛弧岩浆成分的变化通常归因于俯冲板片物质的脱水及循环。地球物理研究发现深部软流圈物质可以通过板片撕裂及边缘上涌, 并对岛弧岩浆产生贡献。然而, 这一过程的地球化学证据并不明确。琉球俯冲带受菲律宾海板块向欧亚板块的俯冲作用而形成, 地震层析成像表明琉球俯冲带南端存在与板片撕裂相关的岩浆活动。我们对琉球俯冲带不同区域(冲绳海槽、龟山岛、台湾北部火山带)火山岩进行了元素及 Sr-Nd-Mg 同位素分析, 为明确深部软流圈物质对岛弧岩浆的贡献提供直接地球化学证据。

冲绳海槽火山岩具有轻微高于地幔的 Mg 同位素组成, 表明其地幔源区主要受到了板片来源流体的影响。龟山岛安山岩来源于大陆地壳熔融, 具有较高的放射性 Sr-Nd 同位素及与地幔相似的 Mg 同位素组成特征。台湾北部火山带安山质火山岩 Mg 同位素高于地幔, 表明其演化过程中受到了板片来源流体的影响。值得注意的是, 台湾北部火山带的玄武岩具有显著低的 Mg 同位素组成, 这种低的 Mg 同位素组成与

矿物分离结晶、晚期蚀变等过程无关, 而与富 Mg 碳酸岩(白云岩)熔体在地幔源区的加入有关。

然而, 台湾北部火山带所对应的板片俯冲深度 <80 km, 远低于俯冲板片上白云岩的熔融深度(>300 km)。因此, 在台湾北部区域正常板片俯冲无法提供碳酸岩的熔融条件。然而, 地球物理资料显示区域内具有板片撕裂及板片边缘的存在, 板片以下深部软流圈沿板片撕裂及边缘上涌, 提供热量及物质使得俯冲板片上的碳酸岩熔融, 释放低 Mg 同位素熔体进入上覆地幔, 进而产生低 Mg 同位素组成的岛弧岩浆。

我们的研究结果与地球物理资料具有很好的一致性, 提供了俯冲带深部软流圈物质对岛弧岩浆不均一性贡献的地球化学证据。目前, 岛弧区域低 Mg 同位素岩浆的报道很少, 如果俯冲带存在板片撕裂, 可能会导致低 Mg 同位素组成的岛弧熔岩产生, 这需要更多岛弧火山岩 Mg 同位素的研究证明这一现象。

关键词: 海底岩石; 岛弧; 板片撕裂; 碳酸岩; 冲绳海槽

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

冲绳地质奇观：海底冷泉与热液近距双生

李季伟^{1*}, 孙治雷², 王大伟¹

1. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000;

2. 自然资源部青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237

2024 年 10 月 3 日至 11 月 9 日, 探索二号船携“深海勇士”号载人潜水器和全体 75 名科考队员, 在冲绳海槽我方主张区海域内, 开展了中国东海首次载人深潜科考航次。航次由中国科学院深海科学与工程研究所和自然资源部青岛海洋地质研究所共同发起, 联合中国地质大学(北京)、同济大学、自然资源部第二海洋研究所等多家单位共同实施, 旨在考察该区海底冷泉、热液系统的地质、环境与生命现象, 获得了多项重要的海底流体系统科考成果。1) 发现大规模活动冷泉在弧后扩张中心轴部发育。通过深潜, 在扩张中心轴部发现了大面积的冷泉活动, 局部区域浅表层水合物裸露, 这一发现突破了对天然气水合物资源聚集和冷泉形成环境的已有认知。2) 突破了冷泉、

热液两种极端环境在深海共生最短距离。调查结果显示, 冲绳海槽西侧新发现冷泉与东侧已知的“南奄西热液场”, 以中央裂谷区的次级峡谷为界, 相距仅为 10 km。3) 发现大规模的超临界二氧化碳流体释放活动。在冲绳海槽中北段, 新发现多个超临界二氧化碳高温喷口(高达 304 °C), 形成独特的“二氧化碳水团”现象。如此高通量的深部碳释放, 将为弧后扩张中心深部碳释放、局部深层海水酸化及极端环境生命适应策略、地球生命起源等重大问题的观测研究, 提供了绝佳的天然实验室。

关键词: 冷泉; 热液; 二氧化碳水团; 极端环境; 冲绳海槽

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

新西兰大南盆地热液通道系统

曹鎏¹, 孙启良^{2*}

1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁阜新 123000;

2. 中国地质大学 海洋学院, 武汉 430074

岩浆通道系统是岩浆活动重要研究内容之一, 主要关注岩浆上升与侵位的过程及产物等, 对其进行研究有助于了解岩浆侵入与火山喷发机制, 对地球动力学、资源勘探、气候变化和地质灾害等方面的研究均有重要意义。然而, 目前针对岩浆通道系统发育特征及可持续活动时间的研究仍存在不足。因此, 本研究选取新西兰大南盆地为研究区, 基于高精度三维地震资料, 从时空分布、几何形态及侵入机制等方面对新西兰大南盆地的热液活动进行分析, 揭示大南盆地裂后期热液通道系统以及热液通道的可重复利用性。通过对研究区内断层发育情况及断层与岩浆体空间关系的分析发现, 研究区内大部分岩床与火山发育在裂谷期形成的断层之上, 并且断层与岩床之间通过岩墙进行连接, 断层、岩墙、岩床与火山共同组成了研

究区的岩浆输运系统, 根据其空间关系总结出三种岩浆输运模式: (1) 断层-岩床; (2) 断层-岩墙-岩床; (3) 断层-岩墙-岩床-火山。此外, 研究区内还识别出一处热液输运系统, 该系统由 3 座垂向连续发育的热液喷口、古麻坑及浅部沉积层中的流体共同组成, 该热液输运系统中的流体输运通道被多次重复利用, 持续/周期性活动超过 54 Ma, 为目前有记录的活动时间最长的流体输运通道。本研究强调热液通道在沉积盆地内的关键作用, 其能够帮助岩浆突破相对刚性的基底, 也能长期、持续的为盆地内的各类流体资源(如烃类等)提供向上输运的通道。

关键词: 热液通道系统; 流体运移; 热液喷口; 气烟囱; 新西兰大南盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(42222607、42176085)

第一作者简介: 曹鎏(1994-), 副教授, 研究方向: 海洋地质学与矿床学. Email: caoliu@lntu.edu.cn

*通信作者简介: 孙启良(1984-), 教授, 研究方向: 海洋地质学与海洋地质灾害. Email: sunqiliang@cug.edu.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

热液和上升流活动对中扬子地块下寒武统黑色页岩 有机质富集的影响

陈秋平¹, 曹瀚升^{1*}, 陈法锦¹

1. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东湛江 524088

扬子地块是中国南方重要的地质单元,其下寒武统沉积序列完整,发育有丰富的化石和有机质含量高的黑色页岩。这些黑色页岩不仅是页岩气的重要潜在来源,同时也为揭示下寒武统海相黑色页岩中有机质富集机制提供了理想的研究对象。本研究聚焦于宜昌地区,通过元素地球化学和矿物学分析,重建了沉积环境的演化过程,探讨了古气候、古氧化还原条件和海底热液活动对有机质富集的影响。其主要研究结果如下:(1)水井沱一段的 TOC 含量显著增加,最高达 16.5%,表明生物生产力显著增强。同时,Cu/Al 比值异常升高(平均 $17.4 \times 10^{-6}/\%$),进一步证实了该时期生物生产力的提升。(2)化学蚀变指数(CIA)在剖面上部增加(大多大于 65),表明从冷干气候向暖湿气候转变。Sr/Cu 和石英/长石比值的变化也显示出气候变暖和适度化学风化的趋势。(3)水井沱一段 Mo/U 比值较大且相对集中,接近 $1 \times SW$,表现为弱至中等限制的水体条件,处于缺氧/硫化环境。MoEF、

UEF、U/Th 和 Corg/P 等指标表明,从水井沱一段的缺氧/硫化环境转变为晚期的亚氧化条件。(4)水井沱一段的正锶异常和 Ba/Al 比值的峰值为海底热液活动提供了有力证据,表明热液输入可能对有机质富集有重要影响。在 Zn-Ni-Co 三元图中水井沱组一段的大多数样品落在热液沉积区域,进一步支持了热液活动的存在。综上,研究认为早寒武世扬子地块水井沱组黑色页岩中有机质的富集是由多种因素共同作用的结果,其中海底热液活动是一个关键因素。浅水台地沉积条件的开放导致上升流和海底热液活动增强,破坏了原有的营养循环,促进了有机质的积累。这一过程不仅与古气候和古海洋条件密切相关,还受到海底热液活动的显著影响。此研究为理解早寒武世有机质富集机制提供了新的视角,也为扬子地块页岩气资源的开发提供了重要的地质背景和地球化学依据。

关键词: 下寒武统;有机质富集;海底热液活动

第一作者简介:陈秋平(1999-),硕士研究生,研究方向:边缘海地质 .Email: 1632677061@qq.com

*通信作者简介:曹瀚升(1988-),副教授,研究方向:古海洋碳氮循环 .Email: chsheng72@163.com

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

富金属岩浆流体对冲绳海槽南奄西热液成矿系统的贡献研究

孙治雷¹, 张侠^{2*}, 黄威¹

1. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266237;

2. 崂山实验室, 山东青岛 266237

岩浆—热液系统是主要发育于岛弧及弧后盆地发育的一类独特热液成矿体系, 其成矿物质主要来源于岩浆流体及挥发分对上覆热液系统的贡献, 但迄今, 对富金属岩浆流体在此类热液系统中扮演的角色尚不明确。本研究以冲绳海槽南奄西热液区重晶石为研究对象, 系统开展流体包裹体测温、氧同位素分析以及 LIBS 测试, 以揭示富金属岩浆流体对该区热液成矿系统的贡献。研究表明, 该区富金属岩浆流体以 Fe 的显著富集为主要特征, 同时该区富金属岩浆流体的脉冲式注入导致了热液流体盐度 (6.1 wt.% to 9.7 wt.% NaClequiv) 及氧同位

素组成 (1.1‰ to 8.0‰ SMOW) 的显著升高, 这些信息被重晶石流体包裹体及氧同位素忠实的记录下来。前人研究表明, 富金属岩浆流体金属元素含量比水—岩反应来源的流体高 3~4 个数量级, 其对热液系统的贡献会导致硫化物成矿效率显著提高。因此, 有富金属岩浆流体贡献的岩浆—热液系统应成为未来海底热液硫化物矿床勘探需重点关注的目标。

关键词: 富金属岩浆流体; 流体包裹体; 氧同位素; LIBS; 南奄西热液区

基金项目: 国家自然科学基金项目 (92358301; 42176057)

第一作者简介: 孙治雷 (1975–), 博士, 研究员, 研究方向: 深海极端环境成矿过程. Email: zhileisun@yeah.net

*通信作者简介: 张侠 (1991–), 博士, 副研究员, 研究方向: 现代海底热液成矿机理. Email: xzhang4@qnlm.ac

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

末次冰期以来东南亚岛屿火历史与植被演化

安宁^{1,2}, 于兆杰^{1,2*}, 万世明²

1. 山东科技大学, 山东青岛 266400;

2. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266400

黑碳是由生物质或化石燃料不完全燃烧产生的含碳物质, 由于其物理化学性质极为稳定, 常被用于重建其源区的火灾历史, 同时研究 C₃ 和 C₄ 植物的组成及其演化过程。本研究基于 MD98-2162、MD98-2178 和 MD01-2385 钻孔的高分辨率黑碳记录, 重建了东南亚岛屿 150 ka 以来的火活动与 C₃/C₄ 植被演化历史。结果表明: (1) MD98-2162 在 150~80 ka 黑碳含量变化并不明显, 75~45 ka 黑碳含量整体有明显增加趋势, 在 35 ka 以来黑碳含量变化不大, 125~40 ka 黑碳同位素比值整体偏正, 指示沉积物源区该钻孔附近的 C₄ 植被相对丰富度增加, 35~15 ka 黑碳同位素比值未出现明显变化, 10 ka 以来 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负, 指示沉积物源区该钻孔附近的 C₄ 植被相对丰富度减少; (2) MD98-2178 在 95~60 ka 黑碳含量变化不大, 50~45 ka 黑碳含量有增加趋势, 35 ka 以来

黑碳含量进一步增加, 95~55 ka $\delta^{13}\text{C}$ 值变化不大, 50~15 ka $\delta^{13}\text{C}$ 值正偏, 10 ka 以来 $\delta^{13}\text{C}$ 值有偏正趋势; (3) MD01-2385 黑碳含量整体变化不大, 在 140~40 ka 黑碳同位素比值整体偏正, 25 ka 以来黑碳同位素比值整体偏负。末次冰期以来东南亚岛屿火活动受到气候的影响, 即温度升高有利于火的发生, 反之则不利于火的发生, 同时温度降低成为了限制 C₄ 植被生长的因素。同时结合黑碳含量明显变化的时间节点与古人类迁徙的活动轨迹, 初步推测毁坏树木、农耕战争等人类活动的加强可能是导致东南亚岛屿火灾频发的主因, 在东南亚地区 C₃/C₄ 植被的长期演化过程中, 发挥重要影响的除了全球性因素, 比如大气 CO₂ 浓度, 还包括局部的温度和干旱度等因素。

关键词: C₄ 植被演化; 黑碳; 火历史; 末次冰期

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

基于矿物学与年代学的硫化物烟囱体生长过程研究

曾志刚^{1*}, 宋新春¹

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266000

现代海底热液硫化物烟囱体的生长模式一直是研究热点。然而, 由于缺乏原位微区分析, 烟囱体的流体演化历史和制约因素尚不清楚, 其生长过程及元素富集问题仍存在争议, 这限制了对烟囱体生长机理和资源潜力的深入理解。截至 2021 年, Inter Ridge 喷口数据库及文献记录显示, 冲绳海槽中至少存在 15 处海底热液区, 包括 Minami-Ensei、Iheya、North-Jade、Hakurei、Irabu Knoll、Hatoma、Yonaguni、Knoll IV、唐印、Noho 和龟山岛热液区等。这些热液区的火山岩、沉积物、活动喷口、热液柱、烟囱体、块状硫化物及热液生物等均有研究报道。以往研究表明, 硫化物烟囱体的形成可分为两个阶段: 硫酸盐主导的初期阶段和硫化物沉淀阶段。初始阶段, 矿物组合主要由硬石膏 (Anhydrite)、少量白铁矿 (Marcasite) 和黄铁矿 (Pyrite) 组成, 硬石膏为烟囱体提供了初始框架。随着生长, 热液流体的温度和化学条件变化, 矿物组合逐渐转变为以黄铁矿、闪锌矿 (Sphalerite)

和黄铜矿 (Chalcopyrite) 为主, 反映了金属硫化物的大量沉淀。此外, 烟囱体内部可能形成斑铜矿 (Bornite) 和蓝辉铜矿 (Digenite) 等次生铜矿物。最终, 矿物组合进一步演化为以铜蓝 (Covellite) 和磁黄铁矿 (Pyrrhotite) 为主。矿物组合的变化是热液流体化学演化、温度变化及与海水相互作用的综合结果, 反映了烟囱体从初始形成到成熟的全过程。此外, 曾志刚等通过测定铀系同位素分析冲绳海槽 Jade 热液区硫化物的形成年代, 结果为 0.2~2 ka。本研究聚焦于冲绳海槽 Noho 热液区, 以 2016 年采集的完整烟囱体样品为研究对象, 通过矿物学和年代学的原位微区分析, 采用铀系不平衡法与 ^{210}Pb 测年方法相结合, 测定烟囱体内外不同区域矿物的形成年代, 计算内外层相对形成时间, 以确定烟囱体的形成时间跨度, 探讨其生长机理。

关键词: 硫化物; 烟囱体; 矿物学; 年代学

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42330409、42221005、91958213)、中国科学院战略先导研究计划 (B) (编号: XDB42020402)、国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (编号: 2013CB429700)

第一作者简介: 宋新春 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: 1643725041@qq.com

通讯作者简介: 曾志刚 (1968-), 研究员, 研究方向: 海底热液硫化物.Email: zgzheng@qdio.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

末次冰消期以来气候变化和黑潮入侵主导南海北部陆坡沉积物源汇过程

黄超¹, 韦刚健^{2*}

1. 广东海洋大学 海洋与气象学院, 广东湛江 524088;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 524088

南海是西北太平洋最大的边缘海, 其水文特征受大陆和大洋的共同影响, 海陆相互作用强烈、物质循环活跃、且海洋动力过程复杂, 是研究海陆相互作用和沉积物源—汇过程的重要区域。黑潮是西北太平洋最强的西边界流, 当其北上经过吕宋海峡时, 由于失去岸界的阻挡向西弯曲入侵南海, 向南海输送大量的热量和水汽, 同时对南海北部的沉积动力和物质输运产生重要影响。现代观测和模拟结果表明黑潮入侵南海的强度和路径存在年代际和季节性变化, 然而地质历史时期黑潮入侵南海的演化历史及其控制机制的认识知之甚少, 黑潮入侵对沉积物源汇过程的影响仍然缺乏深入研究。利用南海北部陆坡的 NH07 岩心, 通过高分辨率的地球化学和粒度分析, 重建末次冰消期以来南海北部陆坡沉积物的源—汇过程, 并探讨其对气候变化和黑潮入侵南海的响应机制。稀土元素和 Sr-Nd 同位素分析表明, 台湾西南部河流是 NH07 岩心沉积物的主要

来源。粒度敏感组分分析发现, 敏感粒度组分 2 (24.7~27.9 μm) 可以用于示踪黑潮入侵南海的可靠指标, 从而重建了末次冰消期以来黑潮入侵南海的演化历史。研究结果表明, 黑潮入侵南海北部的强度与开放太平洋黑潮主轴的强度呈现反相关关系, 主要受东亚季风和 ENSO 活动的调控。在末次冰消期 (16000~11700 cal yr BP), 黑潮入侵南海北部的强度较大, 沉积物来源和输运主要受海平面变化与黑潮入侵强度的共同驱动, 而化学风化强度主要受控于低海平面暴露的陆架物质再风化作用影响; 全新世时期 (11700 cal yr BP 至今), 黑潮入侵南海北部的强度整体较弱, 东亚夏季风成为控制陆源物质输运和化学风化强度的主要因素。该研究深化了对边缘海沉积系统响应季风气候演变、海平面变化和海洋环流格局的理解。

关键词: 南海北部; 黑潮; 东亚夏季风; 粒度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42371162)

第一作者: 黄超 (1988-), 副教授, 研究方向: 海洋沉积地质学. Email: huangc@gdou.edu.cn

通讯作者: 韦刚健 (1968-), 研究员, 研究方向: 同位素地球化学. Email: gjwei@gig.ac.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

微量元素分布特征揭示海底热液硫化物烟囱体的成熟度演化过程

孟兴伟¹, 李小虎^{1,2*}, 陈灵¹, 初凤友¹, 金翔龙^{1,2}

1. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学与划界全国重点实验室, 杭州 310012;

2. 上海交通大学 海洋学院, 上海 200030

硫化物烟囱体是现代海底热液系统的重要产物, 是硫化物矿床的重要组成部分。确定其成熟度(生长阶段)是判断海底热液系统持续时间和成矿规模的重要参数指标。然而, 由于坍塌的硫化物烟囱体的原生结构和矿物学特征发生了改变, 使得确定其成熟度具有一定的难度和挑战性。海底热液硫化物的微量元素组成是指示海底热液系统矿化过程的重要手段。然而, 微量元素变化与硫化物烟囱体成熟度演化之间的耦合关系尚未可知。本项目采用原位微量元素分析和元素面扫描的手段, 对位于东太平洋海隆(1°~2°S)鸟巢热液区中三个不同成熟度的烟囱体进行研究, 以阐明微量元素和矿物特征变化与热液流体演化之间的相关关系。

研究发现, 硫化物烟囱体的矿物组合随成熟度变化呈现出明显的阶段性演化特征。初期, 烟囱体主要由闪锌矿和黄铁矿组成; 随着演化进程, 逐渐转变为黄铜矿、黄铁矿和高-Fe 闪锌矿为主的组合; 最终在成熟阶段再度出现黄铁矿和闪锌矿为主的矿物环带。这一变化反映了热液活动在不同阶段的流体成分和温度条件的变化。

通过系统的原位微量元素分析发现, 烟囱体中的 Cu、Zn、Pb、Ag 等元素在不同演化阶段呈现出规律性变化。初期, 这些元素以显微包体的形式赋存于低温形成的它形黄铁矿中; 随着烟囱体成熟, 微量元素逐渐富集, 并在高温条件下进入自形黄铁矿的晶格内。从硫化物烟囱体边部至核部, Co、As、Sb、Mo 等元素浓度显著增加, 同时 Co/Ni 比值上升, 这些特征成为评估烟囱成熟度的重要标志。此外, 在成熟度更高的烟囱体中, 它形黄铁矿中 Sb、Mg 和 Se 含量升高, 自形黄铁矿中 Se、Zn 和 Cd 富集, 以及黄铜矿中 Se 含量显著增加, 进一步揭示了热液系统逐渐演化的历史。

该研究揭示了微量元素分布特征与硫化物烟囱体成熟度之间的耦合联系, 提出了微量元素可作为评估海底热液系统演化和成熟度的新指标。这一发现不仅为深海矿物学研究提供了新的理论基础, 还对未来海底资源的勘探具有重要指导意义。

关键词: 鸟巢热液区; 东太平洋海隆; 硫化物烟囱体; 微量元素分布特征; 成熟度演化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42406223), 国家重点研发计划(2023YFC2811305、2023YFC2811205-01)

第一作者简介: 孟兴伟(1993-), 助理研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统, Email: xwmeng@sio.org.cn

*通讯作者: 李小虎(1979-), 研究员, 研究方向: 海底资源与成矿系统, Email: xhli@sio.org.cn

• 专题 23: 海底热液系统的地质环境与资源潜力 •

热液对海水中痕量金属的净输入

陈雪刚^{1*}

1. 浙江大学 海洋学院, 浙江舟山 316021

痕量金属在海洋中具有重要的生物地球化学功能, 而海底热液活动是海洋中痕量金属的重要来源和运移途径。热液来源的痕量金属一般在热液流体喷出海底时快速沉淀, 且沉淀过程在羽流扩散过程中持续进行。然而, 东太平洋洋隆 (EPR) 来源的痕量金属 (Fe 和 Mn) 在热液羽流中持续存在, 表明痕量金属在热液羽流中的地球化学行为有待进一步研究。本文研究了北大西洋 Rainbow 热液区热液来源溶解态和

颗粒态痕量金属在热液羽流中的含量分布特征, 结合稀有气体同位素重建了不同痕量金属的动力学去除过程; 我们分析了不同痕量金属在羽流扩散过程中的保守性行为 and 迁移转化规律, 并指出沉积物可能是被忽视的羽流中痕量金属的重要来源。

关键词: 热液; 痕量金属; 生物地球化学; 动力学过程; 沉积物

国家自然科学基金项目 (42476050)

作者简介: 陈雪刚 (1983–), 副教授, 研究方向: 海底热液地球化学, 痕量金属生物地球化学。Email: chenxg83@zju.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

富硫酸盐体系单个流体包裹体成分 LA-ICP-MS 分析及应用

蓝廷广

中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

富硫酸盐流体广泛存在于各种地质流体中, 特别是碳酸岩-碱性岩相关稀土矿中, 而此类稀土矿提供了全世界主要的稀土资源。富硫酸盐流体元素组成的高精度测定可为精准示踪成矿流体来源、精细刻画成矿过程提供重要支撑, 但目前尚无富硫酸盐流体包裹体元素含量高精度微区原位分析方法的建立。针对上述问题, 本研究利用激光拉曼光谱仪和激光剥蚀-电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 结合的方法, 建立了富硫酸盐流体包裹体主、微量元素 (尤其是稀土元素) 微区原位分析方法。首先利用激光拉曼光谱定量分析富硫酸盐流体包裹体中的硫酸根含量, 分析

误差在 $\pm 5\%$ 以内, 将硫酸根含量转换为 S 含量, 并以此为内标, 结合 LA-ICP-MS 分析, 获得流体包裹体中的主、微量元素含量。多元素流体包裹体标样分析显示, 绝大多数元素的分析误差在 $\pm 15\%$ 以内。利用上述方法, 开展了代表性稀土矿 (微山稀土矿) 应用研究, 发现富硫酸盐子晶流体包裹体含有高达数千 ppm 的稀土元素, 显示高浓度硫酸盐热液对稀土元素的迁移具有重要作用。

关键词: 硫酸盐; 单个流体包裹体; 元素含量; LA-ICP-MS; 稀土矿

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

深层-超深层白云岩实验技术与储层成因机理的新进展

李茜

中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

深层-超深层白云岩储层中蕴含着丰富的油气资源, 是未来油气勘探开发的重点领域。但是有关深层-超深层白云岩的储层成因机理仍存在诸多疑问, 很大程度上限制了地下含油气白云岩储层分布范围的有效预测。随着白云岩新型实验技术的快速发展, 近年来在解释深层-超深层白云岩成因机理和储集空间保持机制方面取得了诸多进展。新型实验技术方面: 微区取样技术提高了地球化学信息的可靠性, 高精度 Mg-Ca 同位素为约束白云石化流体来源提供了有效指标, 激光 U-Pb 同位素结合团簇同位素成为确定深层-超深层白云岩基质或孔隙填充物绝对年龄、形成温度和油气成藏的重要手段, 储层模拟实验为理解深层-超深层白云岩孔隙演化过程提供了正演模

型, 多尺度储层定量表征技术为解析深层-超深层白云岩储集空间的三维结构和油气流动性带来了直观依据。深层-超深层白云岩储层成因机理方面: 明确了深层-超深层白云岩储层孔隙受原始沉积环境和后期成岩改造的综合控制, 探究深层-超深层白云岩储层孔隙成因机理需要综合分析沉积背景和各种成岩作用对白云岩储层孔隙增加、减少和保持的相互耦合机制, 建立深层-超深层白云岩储集空间的形成-改造-保存的动态演化过程, 进而得出优质白云岩储层的主控因素和分布范围, 最终为油气勘探指明正确的方向。

关键词: 深层-超深层; 白云岩; 新型实验技术; 成因机理; 油气勘探

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

罗布泊第四纪深层含钾卤水成因机制探讨

樊馥

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

摘要 【目的】论文通过对罗布泊地区 LDK02 孔 200~500 m 卤水进行水化学分析, 探讨罗布泊深部卤水地球化学及成因演化特征, 对卤水钾盐成矿模式进行探索, 为后续罗布泊深层含钾卤水资源选区提供科学依据。【方法】通过对罗布泊地区 LDK02 孔卤水储层岩石学分析, 卤水常、微量元素及同位素检测, 利用相图、元素相关性分析等手段, 【结果】研究发现 LDK02 孔 200~500 m 早-中更新世卤水硫酸盐型为主, K^+ 含量远超 3 g/L 的卤水 K 单独开采利用标准。卤水 Na/Cl 系数接近 1 以及与海相沉积物接近的硼同位素特点, 反映了卤水主要为海相盐类溶滤成因类型, B 和 K 的正相关性, 反映溶滤盐层提供了卤水中一定量的 K 。D、O 同位素正漂移、与中新世含盐地层相近的锶同位素特点, 进一步指示了卤水主要为中新世含盐地层淋滤且经

历了浓缩蒸发过程形成。结合前人对于罗布泊早-中更新世构造演化及现代径流系统形成历史的研究, 说明塔里木河携带的古近纪-新近纪海相和海陆交互相含盐地层, 主要是中新世含盐地层溶滤盐类物质补给是该层段卤水 K^+ 的重要来源。此外, 卤水 K 、 B 、 Li 良好的正相关性、结合更新世时期西域构造运动背景, 认为西域运动相关的深部富 K 、 Li 热液、以及与构造运动相关的储层火山碎屑物质的溶蚀溶解, 也为卤水中提供了 K 的重要物质来源。【结论】以此为基础, 初步建立了罗布泊早-中更新世 200~500 m 深层含钾卤水“深部物质补给+古盐溶滤”二元成钾模式。

关键词: 罗布泊; 第四纪; 常、微量元素; 同位素; 成钾物质来源

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

羌塘盆地白云岩成岩作用与油气成藏的时空耦合过程： 流体包裹体地球化学和碳酸盐岩原位 U-Pb 定年的制约

卢宽，贾凡琛，朱延庆，黄月，陈思钰，蓝婉嫣

长江大学 地球科学学院，武汉 430100

羌塘盆地与中东油气富集区同属特提斯构造域，是我国面积最大的中生界海相沉积盆地，勘探前景被寄予厚望。尽管盆地内侏罗系白云岩地层发现多处油气显示，但仍未有大的勘探突破，成藏时期不明确是重要的制约因素之一。为重建羌塘盆地油气演化历程和评价油气储存条件，综合运用岩石学、包裹体地球化学和 U-Pb 定年等方法，探讨白云岩储层形成过程和油气充注之间的联系。研究发现，白云岩储层偏向下侏罗系形成（约 190 Ma），而后发生重结晶，溶蚀作用，并发育多期孔洞，缝方解石，白云石中有少量石油包裹体显示，孔、缝

方解石中无荧光显示，但存在大量甲烷气包裹体，通过拉曼定量分析恢复的古压力小于 1，指示储层为弱压环境，结合强构造环境推测发生油气逸散。基于 U-Pb 定年的白云岩成岩序列和油气包裹体证据在流体尺度揭示了羌塘盆地石油聚集主要发生在白云石化事件结束后的早期，白垩纪以来的地质运动可能以破坏成藏为主，白云岩储层形成初期的孔喉系统通常决定了其油藏规模。

关键词：羌塘盆地；侏罗系白云岩；油气成藏；流体包裹体

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

万米深层石油地质学理论进展与挑战

朱光有, 朱延庆, 黄月, 蓝婉嫣

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

随着全球中浅层油气资源逐渐枯竭,超深层及万米深层(>8000 m)油气勘探已成为石油工业发展的必然趋势。中国近年来在塔里木盆地和四川盆地等克拉通盆地实施的超深井钻探取得了一系列重大突破,揭示了万米深层油气资源的巨大潜力,推动了石油地质学理论体系的革新。本研究总结了超深层油气地质研究的核心进展,探讨了关键科学问题及未来挑战,为全球超深层油气勘探提供理论支撑与实践参考。传统观点认为碳酸盐岩储层埋深超 6000 m 后原生孔隙几乎消失,但中国克拉通盆地研究证实超深层碳酸盐岩储集空间以次生溶蚀孔、洞、缝为主,其保存机制突破深度限制。岩石力学模拟表明静岩压力作用下,溶洞围岩可通过压力拱效应实现力学稳定,即使 7500 m 深度仍可保持空间完整性。塔里木盆地奥陶系缝洞型储层 8000 m 深度仍发育大型溶洞,钻井放空、漏失现象普遍,证实储层非均质性极强且无深度下限。白云岩储层因准同生云化作用及早期油气充注抑制成岩作用,孔隙保存能力显著优于灰岩。研究揭示低地温场盆地液态石油保存深度下限可达 9000 m,突破传统“黄金带理论”局限。晚海西期形成古油藏因低地温梯度及短期高温暴露,避免大规模热裂解,至今保持单一油相。四川盆地安岳气田震旦系气

藏通过区域性膏盐盖层及构造稳定性实现超长寿命保存。金刚烷及乙基降金刚烷化合物作为原油裂解标志物,建立相态判识图版,为超深层油气相态预测提供新手段。超深层油气渗流机制与中浅层不同,提出“渗流 - 管流耦合”理论。裂缝 - 溶洞系统形成复杂输导网络,油气分布受控于储层非均质性及断裂带。塔里木盆地发现断控型油气藏,油气沿走滑断裂垂向运聚,形成高效富集区。四川盆地发育大面积滩体气藏,展现规模潜力。中国超深层油气勘探成果显著:塔里木盆地台盆区探明油气当量超 30 亿吨,顺北地区 48 口超 8000 m 深井中 20 口获千吨产能;四川盆地安岳气田储量超 2 万亿方。克拉通盆地深层烃源岩生烃强度大,形成近源 - 断控复式成藏系统,万米深层南华系—寒武系烃源岩及储盖组合具备万亿吨级资源潜力。克拉通盆地超深层油气地质理论通过储层保存机制、成藏动力学及勘探模式创新,突破传统石油地质学认知边界,指导中国 10 亿吨级油田与万亿方气田发现。未来需深化多盆地对比研究,发展适应极端环境勘探技术,构建全球万米深层油气资源评价体系,为石油工业迈向“超深时代”提供科学引擎。

关键词: 超深层; 克拉通盆地; 油气成藏

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

页岩中方解石形态类型、成因及其储层特性与勘探启示

陈泓州¹, 朱光有^{1*}, 卢志远¹, 李茜², 张杰志¹, 刘健勇¹,
郑凯航¹, 王嘉宁¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

页岩作为重要的烃源岩与储层, 其矿物组成对储层特性具有关键控制作用。方解石作为页岩中常见矿物之一, 其形态特征、成因机制及地质意义对页岩油气勘探开发至关重要。页岩中方解石主要形态类型包括亮晶方解石、泥晶方解石、重结晶方解石及方解石胶结物等。研究表明, 方解石脉的形成受流体超压、构造应力与结晶力共同驱动, 可分为三期: 早期受微生物还原作用影响, 中期与有机质脱羧作用相关, 晚期与甲烷热氧化流体活动关联。方解石胶结物则受沉积物粒径、钙质成核基底及热演化阶段控制, 铁方解石的形成与深埋流体迁移及离子置换密切相关。页岩方解石对沉积环境具有指示意义: 泥晶方解石组合反映缺氧还原环境, 碳酸盐富集指示深水—半深水沉积背景。页岩中介壳含量不同的岩性组合又能反映不同的古气候、古盐度、古生产力与沉积速率。在页岩的

脆性方面, 方解石作为脆性矿物提升了页岩脆性指数, 促进水力压裂裂缝网络发育, 但其胶结作用亦可能降低孔隙度, 呈现储层改造的“双刃剑”效应。此外, 方解石脉体记录了油气运移过程, 其溶蚀孔与层理缝为页岩油气提供了重要储集空间。本文系统总结了页岩方解石的形态类型, 阐述其形成过程与主控因素, 同时综合分析了页岩中方解石对页岩油气成藏与开发的多重影响, 强调需结合区域地质条件评估其储层效应。未来需深化古老高演化页岩中方解石的成因机制及其与有机质生烃的耦合关系研究, 为富方解石页岩油气的甜点预测与高效开发提供更为完善的理论支撑。

关键词: 页岩中方解石; 方解石成因机制; 储层特性; 勘探启示

第一作者简介: 陈泓州 (2001—), 硕士研究生; 研究方向: 油气富集理论与储层特性。Email: geochenhongzhou@163.com

*通信作者简介: 朱光有 (1973—), 教授级高级工程师; 研究方向: 非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏。Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

成岩作用对低阻油层电阻率的影响

孙玉玺¹, 陈亮^{2*}, 季汉成¹, 齐媛¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组普遍发育低渗透、低电阻率砂岩油层。由于其油水界面模糊且低阻形成机理尚未明确, 当前的勘探开发仍主要依赖于生产测试。以往的研究中, 导电矿物、粘土矿物及地层水矿化度等因素对电阻率的影响被着重讨论。然而, 对于储层成岩作用与电阻率之间的耦合关系研究较为有限。本研究以延长组 2 段低阻油层为例, 采用岩石学、水化学、机器学习以及地质建模等多种方法, 系统探讨低阻油层的形成机理, 并建立储层流体识别方法。研究表明, 姬塬地区低阻油层普遍具有较高的地层水矿化度(平均 88.78 g/L)和束缚水饱和度(平均 67.33%)。在成岩过程中, 地层压实导致的水浓缩作用以及硅酸盐矿物的溶解, 促使 Na^+ + K^+ 和 Cl^- 等离子的富集, 增加了地层水矿化度, 并使其向浓缩卤水演化。同时, 硅酸盐矿物的溶解还促使如高岭石等自

生粘土矿物在孔喉中大量堆积, 致使高矿化度地层水被滞留在孔隙中, 最终导致电阻率显著降低。地质模型的分析表明, 低阻油层倾向于富集在溶蚀作用较强的高砂地比、高孔隙度区域。溶蚀作用的增孔效应不仅有利于烃类充注与储集, 同时较大的孔隙($>10\mu\text{m}$)能够形成更稳定的导电网络, 进一步影响电阻率测井。此外, 通过结合 XGBoost 与 SVM SMOTE 过采样方法, 模型较好的解决类不平衡问题, 在流体性质识别方面表现出显著优势。可解释性机器学习也进一步为理解低阻油层的形成机理提供了科学依据。这些研究成果将为全球范围内低渗透、低电阻率砂岩储层的评估及预测提供新的见解及实践经验。

关键词: 低阻油层; 成岩作用; 电阻率; 致密砂岩; 机器学习

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金(2021D002-0102); 中国石油大学(北京)科研基金(2462023BJR011)

第一作者简介: 孙玉玺(1997-), 在读博士研究生; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: 2860485642@qq.com

*通信作者简介: 陈亮(1987-), 副教授; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: georabbit1987@hotmail.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

渤海海域太古界变质岩潜山应力差异成储机制

臧春艳

中海油能源发展有限公司 中海油实验中心, 天津 300457

摘要:渤海海域近几年在太古界变质岩潜山领域取得了多个重大勘探发现, 累计探明储量超过 6 亿吨。薄片、岩心观察、碳酸盐 U-Pb 年代学分析表明太古界潜山经历了多期次构造运动的影响, 构造应力、风化作用、岩性共同控制了储层的发育程度。研究表明, 岩性对裂缝形成也具有重要影响, 岩心观察表明, 在同一应力背景下, 暗色矿物高含量段其裂缝发育程度远低于长英质岩性段。风化作用大幅度降低了岩石的强度, 对应力更为敏感, 在后期应力作用下更容易形成裂缝; 模拟实验表明, 风化后的岩石其强度降低 3~10 倍, 实际钻井资料统计表明, 风化壳内记录的裂缝期次远高于内幕带。模拟实验表明, 挤压

条件下裂缝生成的规模远大于拉张背景; 构造应力是储层形成的核心控制因素, 早期裂缝奠定了裂缝形成的基础, 晚期对充填裂缝的在活化决定了有效储层的发育; 充填不同矿物的早期裂缝其后期裂缝再活化能力有较大差别, 方解石、黏土矿物、铁质杂矿物充填的裂缝在后期构造运动中更容易受到后期应力改造再活化。宏观上, 早期断裂与晚期断裂密集叠合带储层厚度及净毛比都远高于其它区带, 也是储量高丰度带。

关键词:渤海湾盆地; 太古界; 变质岩; 碳酸盐 U-Pb 年龄; 应力成储机制

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

四川盆地西南部震旦系灯影组气藏多期油充注过程

罗涛, 郭小文*

中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

四川盆地经历了多期构造隆升事件, 深层-超深层储层中伴随发生多期油气聚集与相态转换过程。古油藏的形成对现今气田分布具有重要控制作用, 但早期油藏记录多已遭受破坏。本文综合运用岩石学、阴极发光、流体包裹体、原位 U-Pb 同位素定年及盆地模拟等方法, 对四川盆地西南部威远地区震旦系灯影组储层多期石油充注过程开展研究。结果表明: 灯影组储层发育葡萄花边状白云岩纹层(LD)及孔洞充填的三期白云石胶结物(CD-1、CD-2、CD-3), 利用白云石 U-Pb 同位素定年和流体包裹体确定其形成时间分别为 542 Ma、486~482 Ma、410 Ma 和 270 Ma。储层中识别出三期沥青的存在(Bit-1、Bit-2、Bit-3), 揭示了三次油充注事件。基于储层岩相学特征确定成岩矿物和固体沥青之间的成岩序列: LD→Bit-1→CD-1→CD-2→Bit-2→CD-3→Bit-3。通过结合

烃源岩生烃模拟与成岩矿物年龄, 确定和约束第一期和第二期油充注分别发生于 500~486 Ma 和 410~400 Ma。加里东期构造隆升对威远古油藏进行了改造, 该事件发生于第二期油充注之后。根据 CD-3 白云石胶结物中次生沥青包裹体伴生的同期盐水包裹体均一温度(T_h)和下寒武统烃源岩主生油期分析, 确定灯影组第三期石油充注时间为 270~230 Ma。其中, 第一期油充注可能来源于陡山沱组烃源岩供给, 而第三期油充注主要来自下寒武统烃源岩供给。该研究揭示了四川盆地西南部多期石油充注时间序列, 为多旋回复合叠合盆地油充注期次厘定提供了新的方法体系。

关键词: 白云石 U-Pb 定年; 流体包裹体; 油充注; 灯影组储层; 四川盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20B6001)

第一作者简介: 罗涛(1995-), 博士研究生; 研究方向: 储层流体演化与油气成藏。Email: cugluotao@126.com

*通信作者简介: 郭小文(1980-), 教授; 研究方向: 油气成藏机理。Email: cuggxw@163.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

阳储岭钨钼矿成矿过程的流体包裹体硼-氯同位素示踪

张苗苗, 魏海珍*, 陆建军

南京大学 地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

斑岩型钨钼矿床是钨资源的重要类型之一, 其形成与花岗质岩浆活动具有密切的成因联系。阳储岭钨钼矿是我国华南燕山期钨钼成矿系统代表性矿床之一, 矿区岩浆活动具有多期次特征, 其成矿物质来源和成矿机制仍存在争议。本研究对阳储岭钨钼矿床不同期次岩石和矿石样品石英流体包裹体显微测温、化学成分和硼-氯同位素组成开展了系统的研究。阳储岭矿区花岗闪长岩和二长花岗斑岩均形成于晚侏罗世(锆石 U-Pb 年龄集中于 143.8~149.8 Ma), 具有一致的岩浆侵位时代。钨钼矿化主要集中在二长花岗斑岩中, 说明成矿过程与二长花岗斑岩有成因联系。总体上二长花岗斑岩 K_2O 与 SiO_2 呈正相关, CaO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 与 SiO_2 呈负相关, Al_2O_3 、 Na_2O 与 SiO_2 无明显联系。呈现典型的高硅(SiO_2 含量为 69.3%~71.6%)、富钾($K_2O/Na_2O > 1.5$)及弱过铝质特征($A/CNK = 1.01 \sim 1.05$), 其地球化学组成在 SiO_2 - K_2O 图解中落于高钾钙碱性系列区域。二长花岗斑岩在原始地幔标准化微量元素蛛网图中呈现显著 Ba、Nb、Sr、P、Ti 负异常, 其稀土配分曲线具明显 Eu 负异常($\delta Eu = 0.54 \sim 0.67$)。Ba-Sr 亏损与钾长石(富 Ba)及斜长石(富 Sr)的晶出相关, P-Ti 负异常反映磷灰石($Ca_5(PO_4)_3F$)与钛铁氧化物(如钛铁矿 $FeTiO_3$)的分离。Eu 亏损反映了斜长石(Eu^{2+} 优先进入晶格)的持续分异。以上特征指示了岩浆演化过程中发生了明显的分离结晶作用。二长花岗斑岩 W 含量随 Rb/Ba 比值的升高而升高, 反映随着岩浆

演化 W 在残余熔体中逐渐富集。根据岩相学和矿相学观察, 阳储岭钨钼矿床石英脉分为四个阶段: 成矿前石英脉(Qtz-I)、白钨矿-辉钼矿-石英脉(Qtz-II)、辉钼矿-石英脉(Qtz-III)及石英-硫化物脉(Qtz-IV)阶段。四期石英脉流体相对富 Cl 贫 F ($F/Cl < 1$), 具有低盐度(3.9%~10.2% NaCleq.)的特点, 主要矿化阶段(Qtz-II 和 Qtz-III)的成矿温度范围介于 181~320℃之间。阳储岭矿床四期石英脉硼-氯同位素组成变化范围较大: Qtz I 的 $\delta^{37}Cl$ 值介于 -3.31‰~+0.24‰之间, Qtz II 具有较高的 $\delta^{37}Cl$ 值(-1.66‰~+3.38‰), Qtz III 的 $\delta^{37}Cl$ 值变化较大(-3.31‰~+3.34‰), Qtz IV 样品的 $\delta^{37}Cl$ 值变化范围为 -3.03‰~+3.29‰。Qtz I $\delta^{11}B$ 值介于 -10.83‰~-0.78‰之间, Qtz II 具有高的 $\delta^{11}B$ (-8.67‰~+2.98‰), Qtz III 样品的 $\delta^{11}B$ 值介于 -7.22‰~+5.61‰之间。Qtz IV 的 $\delta^{11}B$ 变化范围最大(-10.58‰~+3.08‰)。流体包裹体硼-氯同位素表明, 早期成矿流体以岩浆流体为主。成矿期流体(Qtz-II 和 Qtz-III) $\delta^{37}Cl$ 和 $\delta^{11}B$ 变化较大, 数值模拟指示存在流体与二长花岗斑岩强烈的水岩作用, 反映了白钨矿和辉钼矿矿化受到围岩蚀变的控制。Qtz-III 阶段流体包裹体 $\delta^{11}B$ 显著偏高, 端元混合模型数值模拟反映了辉钼矿矿化阶段受到地表流体混合作用的影响。

关键词: 斑岩型钨钼矿床; 流体包裹体; 硼-氯同位素; 成矿过程示踪

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830428)

第一作者简介: 张苗苗(2001-), 硕士研究生; 研究方向: Cl 同位素在矿床研究中的应用。Email: 5022290022@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 魏海珍(1977-), 教授; 研究方向: 矿床同位素地球化学。Email: haizhenwei@nju.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

U-Pb 年代和团簇同位素温度约束深大断裂控制的热液白云岩成因机理新见解

高和婷, 朱光有*, 李茜, 李生

长江大学, 武汉 430100

热液白云岩化 (Hydrothermal dolomitization, HTD) 是碳酸盐岩成岩作用的关键过程, 其通过热液流体驱动的白云石置换方解石机制 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 对 CaCO_3 的置换), 形成优质储层及矿产资源载体 (如 MVT 铅锌矿)。然而, 关于 HTD 的形成时间 (深埋藏 vs 浅埋藏) 及构造-流体耦合机制仍存在重大争议。传统观点认为, HTD 是深埋藏阶段 (数千米深度) 基底断裂活化引发热液长期作用的结果, 但近年研究提出浅埋藏 (<1 km) 同沉积-早成岩阶段热液白云岩化的直接证据, 挑战了传统成因模型。争议核心在于明确白云化时限、流体性质及断裂活动的时空关联性。全球典型实例 (如西班牙坎塔布连带、伊朗扎格罗斯盆地、加拿大西部盆地及中国四川盆地) 表明, HTD 广泛发育于断裂带附近, 但其成因机制受控于基底断裂活化与同沉积断裂作用的动态耦合。传统研究依赖埋藏史模拟及岩相学分析, 但因缺乏高精度年代学约束, 难以直接解析成岩过程与构造事件的动态联系。近年来, 原位 U-Pb 定年、流体包裹体测温及团簇同位素 ($\Delta 47$) 等新技术突破, 为重建“时间-深度-流体”三元耦合关系提供了新途径。例如, U-Pb 年代学可直接获取白云石绝对年龄; 流体包裹体揭示古流体温度与成分演化; $\Delta 47$ 温度计则能反演成岩环境热历史, 示踪流体来源。基于这些技术, 学者提出浅埋藏断控热液白云石化 (FHTD) 模型: 同沉积断

裂活动触发海水对流循环, 基底碎屑含水层加热形成高温流体 (>80°C), 驱动早期白云岩化 (如加拿大寒武系、英国德比郡实例)。四川盆地中二叠统栖霞-茅口组是断控热液白云岩研究的天然实验室, 记录了断裂活化-流体运移-成岩响应的复杂过程。本文通过整合 U-Pb 年代学、团簇同位素温度分析、地球化学 (C-O 同位素、微量-稀土元素) 及阴极发光显微技术, 首次系统约束四川盆地 FHTD 的绝对成岩时间, 揭示其与峨眉山幔柱活动及区域断裂活化的时空关联。研究表明, 栖霞-茅口组白云岩化发生于浅埋藏环境 (<1 km), 与同沉积断裂诱导的热液循环同步, 且热液流体为混合成因 (岩浆热液与大气降水)。结合全球案例对比, 提出 FHTD 早期成因的普适性模式: 同沉积断裂系统通过基底活化形成热液通道, 浅层高温流体 (受火山活动或构造挤压驱动) 沿断裂快速运移, 触发局部白云岩化, 其时间窗口与基质白云岩形成接近。本研究为突破传统深埋藏成因理论提供了关键证据, 强调构造-流体-成岩动态耦合对 FHTD 的控制作用, 不仅深化了对“白云岩之谜”的成因理解, 也为全球碳酸盐岩储层预测、矿产勘探及碳封存靶区评价提供了新视角。

关键词: 热液白云岩; 深大断裂体; 原位 U-Pb 定年; 团簇同位素; 构造-流体耦合

第一作者简介: 高和婷 (1997-), 女, 博士研究生; 研究方向: 沉积储层、沉积地球化学, 矿产普查与勘探。Email: 2021710491@yangtzeu.edu.cn
*通信作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 教授级高级工程师; 研究方向: 深层油气地质与成藏。Email: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

晚侏罗世—早白垩世真极移事件对鄂尔多斯盆地 油气成藏的影响探究

王好萱, 韩非*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430199

晚侏罗世—早白垩世在地球地质历史时期中是很重要的时段,在此期间发生的真极移事件对全球地质构造、沉积环境以及生物演化等产生了深远的影响。真极移是指整个固体地球(地壳和地幔)相对于液态外核发生旋转的过程,真极移过程中,地球自转轴突然大幅偏移,使得地球表面各点相对于地磁极的位置发生改变,进而使各大陆板块古纬度出现显著的变动。鄂尔多斯盆地作为我国北方重要的含油气盆地,横跨陕西、甘肃、宁夏、内蒙古和山西五省区,其独特的地质构造与漫长的演化历史,造就了极为丰

富的油气资源,涵盖了多种油藏类型,在我国油气资源领域占据着举足轻重的地位。就鄂尔多斯盆地古纬度的变化而言,其受真极移的影响所引发,这一系列的变化又致使古环境产生了诸多改变,而这些古环境的变化,实则对油气成藏的过程产生了深远的影响。深入研究真极移对鄂尔多斯盆地古纬度演变的影响,并揭示其环境效应与油气成藏过程之间的内在联系,具有重要的学术价值和实际意义。

关键词: 真极移; 古纬度; 古环境; 油气成藏

第一作者简介: 王好萱 (2003—), 本科生。Email: 13993425419@163.com

*通信作者简介: 韩非 (1989—), 副教授, 研究方向: 古地磁、岩石磁学和环境磁学。Email: hanfei@yangtzeu.edu.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

基于流体包裹体的川西龙门山中段磷矿集区古气候环境变化的分辨率重建

姚毅^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 何良^{1,2}, 贺天全^{10,11},
李晓龙^{8,9}, 徐磊^{5,6,7}

1. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司, 四川 德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳昊华清平磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 长沙 410012;
6. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
7. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 长沙 410012;
8. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077;
9. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077;
10. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;
11. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

川西龙门山中段作为中国重要的磷矿资源地,其磷矿床的形成与古海洋环境紧密相关,而流体包裹体则保存了成矿时期的原始流体信息。磷矿作为战略性非金属矿产资源,对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。因此,本研究旨在通过分析川西龙门山中段磷矿集区中流体包裹体的特征,重建该区域古气候环境变化的分辨率历史,为磷矿资源的勘探与评价提供重要的地球化学依据。本研究采用显微测温测压技术、稳定同位素分析、微量元素地球化学分析等方法,对磷矿样品中的流体包裹体进行了系统的采集和分析。通过对流体包裹体中水的氧同位素和氢同位素的测定,能够恢复古气候环境的温度和降水条件。同时,包裹体中的盐度、压力和气体成分分析,为理

解古海洋化学环境提供了重要信息。结合区域地质背景和地球物理数据,本研究重建了川西龙门山中段磷矿集区在不同地质时期的古气候环境,揭示了其与区域构造活动、海平面变化和生物事件的耦合关系。研究表明,川西龙门山中段磷矿集区的成矿作用与古气候环境变化有着密切的联系。在特定的古气候背景下,流体活动的变化直接影响了磷矿的沉淀和富集。此外,本研究还发现,磷矿集区的古气候环境变化与全球古气候模式具有一定的同步性,表明区域性气候事件可能受到全球性气候因素的影响。这为理解全球气候系统的演变提供了新的地质证据。

关键词: 龙门山中段; 磷矿集区; 流体包裹体; 古气候环境; 分辨率重建

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

利用 C_7 轻烃碳、氢同位素判识轻质/凝析油的母源沉积环境 ——以塔里木盆地为例

邓晗宇¹, 程斌^{2*}

1. 中国地质调查局武汉地质调查中心 实验测试中心, 武汉 430205;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510340

轻质/凝析油热成熟度普遍较高, 其生物标志物浓度低且常趋于均一化, 导致传统生物标志物参数的指示意义存在不确定性。我们对塔里木盆地塔北、库车、塔西南等地区的 114 个轻质/凝析油中甲苯(Tol)、正庚烷(nC_7)、甲基环己烷(MCH)的组成及其碳、氢同位素特征进行了分析。结果表明, 海相、湖相和煤系轻质/凝析油中 MCH, Tol 和 nC_7 氢同位素分别深“V”型、浅“V”型和倒“V”型分布。通过分析这些 C_7 轻烃之间的氢同位素差值, 我们发现其 $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$ 与 $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$ 呈良好的线性相关性 ($R^2=0.8$), 其中海相、陆相以及煤系轻质/凝析油的 $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$ 分别为 $>6\text{‰}$ 、 $-20\text{‰}\sim 20\text{‰}$ 和 $<-20\text{‰}$, $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$ 值分别为 $<-5\text{‰}$ 、 $-30\text{‰}\sim 0\text{‰}$ 和 $> 0\text{‰}$ 。因此, 提出 $\Delta\delta D_{nC_7-Tol}$ 与

$\Delta\delta D_{Tol-MCH}$ 关系图版可以较好判识海相、湖相和煤系烃源岩来源的轻质/凝析油。根据此图版, 我们认为库车坳陷西部和东部的轻质/凝析油分别来源于湖相和煤系母质, 同时利用 $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$ 与 Tol/MCH 的关系图可以进一步识别库车坳陷轻质/凝析油经历的气侵作用。库车坳陷 C_7 化合物碳同位素差值 $\Delta\delta^{13}C_{Tol-nC_7}$ 与 $\Delta\delta^{13}C_{nC_7-MCH}$ 同样呈良好的线性关系 ($R^2=0.74$), 结合多个参数多元统计分析, 认为沉积相的转变控制了库车坳陷东、西部轻质/凝析油的 C_7 轻烃同位素的地球化学差异。

关键词: C_7 轻烃; 碳、氢同位素; 轻质/凝析油; 油气来源; 塔里木盆地

基金项目: 轻质油/凝析油藏中 C_7-C_{11} 芳烃化合物的演化特征及其地球化学意义 (42272144)

第一作者简介: 邓晗宇 (1996-), 男, 博士; 研究方向: 油气地球化学。Email: 1006420861@qq.com

*通信作者简介: 程斌, 男, 副研究员; 研究方向: 有机地球化学。Email: chengbin@gig.ac.cn

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

Doseo 盆地下白垩统 Kedeni 组成岩相的差异性演化及储集层物性控制因素

齐媛¹, 陈亮^{2*}, 孙玉玺¹, 季汉成¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

Doseo 盆地位于中非剪切带, 构造活动复杂, 勘探潜力巨大。由于前期勘探水平有限, 储层特征及储层控制因素尚不明确, 制约了后续油气勘探开发。基于薄片鉴定、物性测试、扫描电镜、X 射线衍射分析、碳氧同位素分析, 结合地热历史和埋藏历史, 明确了 Doseo 盆地下白垩统 Kedeni 组的成岩相类型, 建立了成岩序列与孔隙定量演化模型, 探讨了研究区的储层控制因素与成岩作用差异性演化。研究结果表明: Doseo 盆地 Kedeni 组储层岩石类型主要为长石石英砂岩和石英砂岩, 孔隙类型属原生与次生孔隙复合型, 为中孔-中渗储层。Kedeni 组因其水下支流河道砂岩粒径大, 石英等刚性颗粒含量高, 储集层物性好。将砂岩储层分为 3 种成岩相: 强压实相、中等压实-溶蚀相和胶结相, 其中, 中等压实-溶蚀相为优质成岩相, 主要分布在 kedeni 组上部。储层物性受压

实作用影响最大, 是造成原生孔隙减小的关键因素; 胶结作用次之, 胶结相中广泛发育高岭石和自生石英, 严重堵塞孔隙。溶蚀作用是改善储层孔渗性能的主要因素, 主要表现为长石粒间和粒内容蚀, 形成大量中等压实-溶蚀相。中等压实-溶蚀相中溶蚀作用的根本原因与开始于早成岩期 B 末期的烃源岩有机质热演化过程有关, 其产生的有机酸和 CO₂ 使地层流体环境逐渐呈酸性, 发生强烈溶蚀。石英颗粒的溶蚀发生在中成岩作用阶段 B 末期, 此时有机酸耗尽, 流体环境开始向弱碱度转变, 少量石英颗粒溶解。溶蚀效应显著改善了 Kedeni 组储层物性, 形成了中孔-中渗的优质储层。

关键词: 成岩相; 有机质热演化; 地质流体; 成岩作用; 储层孔隙演化

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金(2021D002-0102)、中国石油大学(北京)科研基金(2462023BJR011)

第一作者简介: 齐媛(1997-), 在读博士研究生; 研究方向: 沉积学与储层地质学。Email: 2024310007@student.cup.edu.cn

*通信作者简介: 陈亮(1987-), 副教授; 研究方向: 沉积学及储层地质学。Email: georabbit1987@hotmail.com

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

中国东部盆地古近纪海侵与油气生成: 来自石盐流体包裹体的证据

孟凡巍

中国矿业大学 资源与地球科学学院, 徐州 221116

在晚白垩纪到古近纪期间, 中国东部形成了广泛的内陆含盐油气盆地, 占全国石油产量的一半。1979 年, 在胜利油田发现的海生枝管藻与龙介虫化石之后, 引发了该地区是否受到海侵的争论, 受到海侵影响的地层通常富含蒸发岩, 并且是重要的烃源岩。本次研究对中国东部对不同盐盆中石盐中的流体包裹体的卤水主要成分分析显示以下浓度: 在金坛盆地, K^+ 为 0.7~15.8 g/L, Mg^{2+} 为 1.1~5.8 g/L, SO_4^{2-} 为 3.7~27.7 g/L; 在云应盆地, K^+ 为 2.8~8.8 g/L, Mg^{2+}

为 4.8~7.3 g/L, SO_4^{2-} 为 5.2~36.5 g/L; 在黄冈盆地, K^+ 为 2.4~4.8 g/L, Mg^{2+} 为 5.1~6.9 g/L, SO_4^{2-} 为 5.0~5.2 g/L。数值投在 Jänecke 图上, 部分数据与同时代蒸发海水成分相似, 表明盐岩的形成受到海水的影响, 但是随着陆相水体输入逐渐将海相卤水转变为陆相卤水。

关键词: 石盐; 流体包裹体; 海侵; 古近纪; 烃源岩

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

深层油气排烃和储集过程中流体演化与同位素年代学研究: 以塔里木盆地旗探 1 井为例

陈笑, 黄亚浩*

长江大学 资源与环境学院, 武汉 430000

深层—超深层油气具有漫长的流体演化过程和复杂的油气成藏机理, 塔里木盆地是目前中国最典型的深层-超深层勘探开发领域, 塔里木盆地目前仅有少数井揭示了下古生界震旦—寒武系烃源岩层和储集层, 但缺乏震旦—寒武系油气从源到储过程中直接的同位素年代学研究, 限制了塔里木盆地万米深层油气成藏机理的认识。本文分别以源—储层段(寒武系玉尔吐斯组和震旦系奇格布拉克组)孔缝洞充填脉体为研究对象, 明确多期脉体的流体来源和成因, 基于流体包裹体分析结合 U-Pb 同位素定年和 Re-Os 同位素定年, 阐明深层油气动态成藏过程。结果表明塔北地区寒武系玉尔吐斯组烃源岩两期方解石脉体均为热液成因且表现为深部富锶流体来源。对应的震旦系奇格布拉克组储层中发育两期白云石孔洞充填型脉体, 稀土元素配分模式显示储层中两期流体都表现出成岩流体来源, 其中第二期白云石脉体锶同位素表现为寒武系同期海水来源。寒武系玉尔吐斯组存在两次生烃高

峰, U-Pb 同位素数据表明第一次生烃高峰为中奥陶统时期 (460 ± 10 Ma), 与震旦系奇格布拉克组储层中油气成藏过程具有相同的时空匹配关系。U-Pb 同位素数据显示海西晚期玉尔吐斯组烃源岩进入第二次生烃高峰 (263 ± 69 Ma), 而震旦系储层中的第二期白云石脉体 U-Pb 定年结果为 55 ± 15 Ma (始新统早期), 可以看出深层烃源岩生烃和储层成藏存在时间差异, 差异主要由于寒武系烃源岩的源内滞留特征。储层中晚于第二期白云石脉体发育大量固体残余沥青 (30 ± 14 Ma), 表明震旦系油气藏在渐新统早期发生油气破坏和调整改造过程, 对应于喜山晚期的构造抬升导致。通过对塔里木盆地深层源储的系统性同位素年代学研究和流体演化分析, 明确了下古生界震旦—寒武系烃源岩生烃、排烃、储层内油气成藏以及保存过程。

关键词: 深层油气; 流体包裹体; 同位素年代学; 塔里木盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目“深层碳酸盐岩储层流体活动示踪油气差异成藏效应研究—以塔里木盆地富满油田为例”(42302154); 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室开放基金项目“深层走滑断裂带储层流体活动差异性及油气成藏响应研究—以塔里木盆地富满地区为例”(RIPED-2022-JS-2382)

第一作者简介: 陈笑 (1999—), 女, 在读硕士研究生; 研究方向: 油气成藏机理。Email: 1043440046@qq.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2719-5070>, Tel: 13103679095

*通信作者简介: 黄亚浩 (1990—), 男, 博士, 副教授; 研究方向: 油气成藏机理。Email: hyhtr08916@163.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4952-1320>, Tel: 18995641516

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

Diagenetic facies, volcanic tuffaceous sediment and its diagenetic features in deeply buried tight sandstone, Shan2-He 1 Members, Ordos Basin, China

卢志远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

Diagenetic processes play a crucial role in the evaluation of tight reservoir quality. We aimed to examine diagenetic facies and assess reservoir quality through an integrated analysis of petrology, mineralogy, mercury-injection, stable isotopic, porosity, and permeability of core samples from the Permian Shan 2 and He 1 Members in the Ordos Basin. The sandstone reservoirs display relatively poor petrophysical properties, with average porosity and permeability values of 6.07% and 0.434 mD, respectively. Early compaction and precipitation of diagenetic minerals have significantly reduced primary pore space, although certain sandstones have retained anomalously high porosity. The high-porosity reservoirs are influenced by multiple many factors, with dissolution being a predominant mechanism. It is inferred that CO₂ and organic acids generated during the thermal maturation of organic matter may have promoted the dissolution of clasts, VTS, and calcite, thereby improving the physical reservoir properties. Detailed petrographic observation and assessments of the primary minerals, mineral genesis, and diagenetic process revealed seven distinct diagenetic facies based on sand-grain populations, types of cementation, clay

matrix contents, and volcanic tuffaceous sediment (VTS). The main interstitial fills consist of VTS, clay minerals, quartz overgrowths, and calcite (ferrocalcite). Clast and VTS dissolved sandstone and VTS dissolved sandstone mainly formed Class I reservoirs with highly unstable grains and good secondary pores resulting from the dissolution of grains and VTS. VTS tight sandstone, siliceous cementation tight sandstone, illite-siliceous cementation tight sandstone, and calcite cementation tight sandstone formed Class II reservoirs with high interstitial-fill and cementation rates. Illite cementation tight sandstone tightly cemented by illite, which has poor reservoir properties, mainly formed Class III reservoirs. This classification underscores the critical importance of understanding diagenesis, diagenetic facies, and VTS diagenetic features for accurate reservoir quality assessment. A comprehensive understanding of diagenesis, diagenetic facies, and VTS alterations in diagenetic processes may contribute to more effective hydrocarbon exploration and exploitation.

关键词: diagenetic facies; diagenesis; reservoir assessment; Shan 2-He 1 Mbr; Ordos Basin

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

川中地区中二叠统白云岩储层成岩流体年代学与地球化学示踪

潘立银, 王永生, 梁峰

中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

在过去的十多年间, 四川盆地川中古隆起中二叠统深埋碳酸盐岩中发现了数个大型气田。储层表征工作揭示, 优势储集相主要分布在白云岩层段, 白云岩通常为薄层, 发育包含晶间孔、粒间孔、生物铸模孔、裂缝、溶蚀孔洞等在内的多种储集空间, 暗示经历了复杂的成岩历史。本研究对这些白云岩开展了综合的宏观—微观岩石学、碳-氧-锶同位素地球化学以及 Δ_{47} /U-Pb 热年代学 (即团簇同位素测温与激光原位 U-Pb 定年结合) 分析, 以精细揭示这些白云岩储层的成岩条件及其演化过程。钻井岩心及薄片观察显示, 这些白云岩由两类白云石构成: 一是交代白云石, 它们影响了浅海台地相的泥粒灰岩与颗粒灰岩; 二是鞍状白云石, 它们交代较早的碳酸盐矿物相或沿裂缝/孔洞充填。多数交代白云石呈斑驳状阴极发光, 说明存在后期成岩蚀变; 相比之下, 鞍状白云石呈现均一的暗红色阴极发光, 有些具有规则的环带, 表明后期成岩蚀变弱。后期成岩蚀变程度最弱的交代白云石具有最老的 U-Pb 年龄, 为 286 ± 10 Ma 至 274.5 ± 9.9 Ma, 与地层沉积年龄极为接近; 同时, 其团簇同位素 (Δ_{47}) 温度可低至 $30 \sim 52^\circ\text{C}$, 碳同位素和锶同位素组成与中二叠世海水非常接近, 因此为早成岩阶段低温海水白云石化事件提供了新证据。在中二叠世拉

张背景下, 海水可通过渗透—回流或热对流机制大规模流经碳酸盐沉积物, 从而导致白云石化。相比之下, 遭受过明显成岩蚀变的交代白云石具有明显年轻的 U-Pb 年龄, 为 ~ 270 Ma 至 230 Ma, 它们跟裂缝和溶洞中充填的鞍状白云石胶结物在年龄及稳定同位素组成上几乎一致, 记录了热液流体对白云岩围岩的改造事件。鞍状白云石微观岩石学特征及 U-Pb 定年结果清晰地揭示了发生在晚二叠世、中—晚三叠世期间的至少两期热液流体事件。同时, 鞍状白云石的形成温度及氧、锶同位素垂向变化特征暗示, 热液流体源自盆地深部、呈垂向运移特点。结合区域地球动力学, 热液流体事件极可能与峨眉山大火成岩省及盆地构造反转背景下的走滑断裂多次活化有关。走滑断裂活动及伴随的热液流体通过破裂、角砾化及溶蚀作用显著提升了白云岩围岩的孔隙度和渗透率。上述成岩改造事件发生在烃源岩成熟前, 为原油充注及后期裂解成气提供了有效储集空间。本次研究整合传统和新兴技术手段, 精细刻画了受早期海水及晚期多期热液流体控制的白云岩储层的形成演化过程。

关键词: 成岩流体; 白云岩; 中二叠统; 川中地区; 四川盆地

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

方柱石 Cl-Br 标样研制及在成矿流体示踪中的应用

邱正杰, 范宏瑞, 卫钦迪, 黄亮亮

中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变国家重点实验室, 北京 100029

地壳流体是地球科学研究的热点, 而挥发分又是沉积、岩浆、变质和成矿环境中热液流体源区的良好示踪剂。氯和溴是高度极不相容的元素, 通常富集于熔体、流体以及相关的含挥发分矿物中。不同流体储库的 Cl/Br 比值存在较大差异, 不同来源流体的混合程度也可以通过 Cl/Br 比值和 Br 含量表征。目前, 离子色谱、中子活化技术和惰性气体分析技术已广泛用于测定地质样品中的 Cl-Br 含量。采用上述分析技术获得的是群体流体包裹体组分的 Cl-Br 平均值, 而天然样品往往存在不同世代的流体包裹体组合, 因此采用全岩分析技术很难得不同世代流体包裹体的信息, 迫切需要研发适用于单个流体包裹体原位 Cl-Br 元素分析的矿物标样。方柱石是一种富含挥发分的铝硅酸盐矿物, 由三个端元组成: 钠柱石 ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$)、钙柱石 ($\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CO}_3$) 和硫酸方柱石 ($[\text{CaNa}]_4\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{SO}_4$)。此外, 方柱石稀土元素的含量极低, 可作为 LA-ICP-MS 测定矿物或流体包裹体中 Cl-Br 元素的标准物质使用。目前国际上成功开发用于 LA-ICP-MS 分析的天然方柱石标样只有 3 个颗粒 (SP、SY 和 BB1), 供应量不足, 难以满足

未来对单个流体包裹体挥发分 S-Cl-Br 含量分析的需求。针对上述问题, 本次研究开展方柱石 Cl-Br 元素标准物质研制, 改进了激光微区 Cl-Br 元素分析技术, 为成矿流体的源区示踪提供了技术支撑。本次研究开发的坦桑尼亚方柱石 (TSNY) 和马达加斯加方柱石 (MDJ) 的均一性好, 准确度优于前人开发的标样。以华北克拉通中部造山带内变沉积岩容矿型铜钴矿床作为研究案例, 确认方柱石 Cl/Br 比值可以有效指示深度地壳流体的来源和演化。该类型矿床成矿流体的盐度很高, 但其流体来源存在争议: 1) 深部岩浆流体; 2) 盆地卤水循环进入深部地壳; 3) 含蒸发岩地层的退变质溶解。分别对容矿围岩中变质成因和热液交代方柱石开展原位高精度 Cl 和 Br 含量分析。研究表明: 自形方柱石整体的 Cl/Br 比值高暗示存在石盐溶解流体形, 仅窄边部 Cl/Br 比值较低, 暗示晚期有浅部盆地卤水参与成矿。

关键词: 方柱石; Cl/Br 比值; 成矿流体; 示踪; 变沉积岩容矿铜钴矿床

• 专题 24: 矿产资源和油气资源形成过程的流体示踪 •

页岩中有机-无机相互作用机制及其对页岩储层的影响

黄月, 朱光有*

长江大学 地球科学学院, 武汉 430000

页岩中的有机-无机相互作用对页岩油气的生成和储集具有重要影响。本文系统综述了页岩中有机质与黏土矿物的相互作用机制及其对页岩油气储层演化的影响。通过整合沉积至成岩阶段的关键过程, 揭示了黏土矿物通过配体交换、阳离子桥接等机制对有机质的选择性吸附与富集作用, 阐明了有机酸溶蚀矿物驱动次生孔隙形成的协同效应, 并探讨了蒙脱石伊利石化与有机质生烃的耦合机制。黏土矿物类型与有机质赋存形式的差异显著影响吸附效率和生烃路径, 而有机酸溶蚀作用通过溶蚀无机矿物释放金属离子, 一方面形成次生孔隙另一方面促进矿物转化和次生矿物生成, 协同塑造了页岩储层的孔隙结构与脆性特征。在有机-无机协同成孔效

应的影响下, 阐述了利用分子动力学模拟研究的页岩纳米孔隙中流体的吸附行为, 揭示了孔隙壁面润湿性对页岩油赋存状态的关键调控作用。最后总结了常用的研究有机物与黏土矿物相互作用的分析技术的应用进展。尽管在有机-无机相互作用上取得了一些进展, 但各种无机矿物与有机质之间以及矿物转化过程与有机质生烃过程的耦合变化仍存在不确定性。未来的研究应聚焦于不同有机-无机组耦合演化的微观过程, 以及有机-无机复合孔隙中多组分流体的竞争吸附机制。

关键词: 有机-无机相互作用; 矿物吸附; 有机质富集; 有机-无机协同成孔; 纳米孔隙

第一作者简介: 黄月 (2003—), 女, 在读硕士研究生, 地质资源与地质工程专业。Email: 18171262022@163.com

*通信作者简介: 朱光有 (1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师; 研究方向: 深层油气地质与成藏研究。Email: zhuguangyou@petrochina.com.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

新疆准噶尔与高加索库班盆地泥火山地质流体的地球化学特征及成因分析

张力¹, 马向贤^{1*}, G. A. Chelnokov^{1,2}, 邵媛媛¹, 郭宇欣¹, 李中平¹,
V. Yu. Lavrushin^{1,2}, 郑国东^{1,3*}

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省石油资源勘探与评价重点实验室, 兰州 730000;

2. 俄罗斯科学院地质研究所热质传递实验室, 莫斯科 119017;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

泥火山是地球深部地质流体通过构造活动泄漏到地表的重要表现形式, 为研究深部地质过程提供了独特的信息窗口。新疆准噶尔盆地和高加索库班盆地发育的泥火山, 其水体和气体都表现出显著的地球化学差异性。这两个盆地的泥火山水体可分为三种水化学类型: Na-HCO₃ 型、Na-Cl-HCO₃ 型和 Na-Cl 型, 其中准噶尔盆地以 Na-Cl 和 Na-HCO₃ 型为主, 库班盆地以 Na-Cl 型最为常见。Cl/Br、Na/Br 和 B/Cl 的遗传系数分析发现, 准噶尔盆地泥火山水体处于较早的演化阶段, 与碳酸盐矿物达到了平衡, 而库班盆地水体趋于高变质水, 元素浓度仍受到硅酸盐矿物的影响。准噶尔盆地泥火山释放的气体主要为甲烷(CH₄), 浓度范围为 75.4%~91.2%, 二氧化碳(CO₂) 浓度较低, 介于 0.2%~12.4% 之间。相

比之下, 库班盆地的泥火山释放气体呈现甲烷与二氧化碳的混合特征, 部分泥火山的甲烷浓度低于 60%, 二氧化碳浓度可高达 40% 至 80%。流体氢同位素分馏(CH₄-H₂O 体系)和碳同位素分馏(CH₄-CO₂-DIC 体系)的分析表明, 准噶尔盆地和库班盆地泥火山释放甲烷除了典型的热成因甲烷外, 还存在次生微生物成因的甲烷。相较之下, 准噶尔盆地泥火山甲烷中次生微生物甲烷的比例明显高于库班盆地。这种差异可能与两个盆地的区域地质背景, 泥火山所处沉积环境、地热条件以及气体迁移速率等密切相关。

关键词: 泥火山; 地质流体; 地球化学特征; 同位素

基金项目: NSFC-RSF 联合研究项目(42261134534, 23-47-00035)

第一作者简介: 张力(1996-), 博士研究生; 研究方向: 气体地球化学。Email: zhangli194@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 马向贤(1987-), 研究员。Email: maxxan@lzb.ac.cn

*通信作者简介: 郑国东(1961-), 教授。Email: zhengguodong@cug.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

亚洲季风边缘带蜗牛壳内高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的天气尺度降水事件

张倩^{1,5}, 董吉宝¹, 王国桢¹, 罗凡³, 贾雅娜², 刘成程^{1,3}, 宗秀兰¹,
李祥忠⁴, John Dodson¹, 晏宏^{1,2*}

1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061;

2. 西安交通大学, 西安 710049; 3. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061;

4. 云南大学, 昆明 650500; 5. 中国科学院大学, 北京 100049

天气尺度降水事件对生态系统和人类生计具有重要影响, 如果能够重建地质历史时期不同气候背景下的天气尺度降水事件, 将大大提高我们对其机制的理解。利用二次离子质谱技术获得的超高分辨率蜗牛壳体 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$) 记录有助于重建陆地天气尺度降水事件。然而, 由于二次离子质谱仪的可及性和昂贵性, 这种调查受到限制。在这项研究中, 我们利用 2021 年 6 月、9 月和 12 月在中国西北地区采集的陆生活体蜗牛 (*Cathaica fasciola*) 样本, 在显微镜下用牙钻以~500~800 μm 的空间分辨率手动连续采样, 并用气源质谱仪测定了 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 。结果显示, 不同蜗牛个体间的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 记

录具有良好的重现性, 且利用高分辨率 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 序列重建的天气尺度降水频率与仪器观测记录基本一致。这表明在亚洲季风边缘区, 通过气源质谱测试得到的陆生蜗牛壳体高分辨率 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 序列能够重建天气尺度降水事件。此外, 我们发现蜗牛可能通过调整生长策略 (例如, 在有限的生长季节内降水发生时壳体快速生长) 来适应干旱和半干旱地区具有挑战性的环境。这一发现将有效地促进陆地古气候/古天气事件的重建。

关键词: 陆生蜗牛壳体; 氧同位素; 季风边缘区; 古天气

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

叁氧同位素揭示深部地幔广泛分布再循环沉积物

武广辉^{1*}, 李旭¹, 陈立辉², Takeshi Hanyu³, 曹晓斌¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

3. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Department of Solid Earth Geochemistry,
Yokosuka, Japan 000000

同位素示踪体系(如 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素)和微量元素配分模式等地球化学证据普遍支持地球深部地幔存在显著的不均一性, 主要由 DMM、EM1、EM2、HIMU 和 FOZO 五个端元组分构成。其中 EM1 和 EM2 的成因分别与俯冲再循环的海洋沉积物和陆源沉积物有关, 而 HIMU 和 FOZO 的物质来源由于放射性同位素特征的不确定性仍存在较大争议。本研究通过叁氧同位素($\Delta^{17}\text{O}$)对上述端元属性进行约束。实验选取代表不同地幔端元的洋岛玄武岩(OIB)样品, 在 CO_2 激光加热条件下与 BrF_5 反应生成 O_2 气体, 并利用同位素比值质谱仪(MAT 253 plus)获取高精

度的 $\delta^{17}\text{O}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。EM1 和 EM2 型 OIB 的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值为 $-70 \times 10^{-6} \sim -49 \times 10^{-6}$, 低于地幔平均值(约 -50×10^{-6}), 表明其岩浆源区存在再循环沉积物的混入, 因此可以利用 $\Delta^{17}\text{O}$ 有效示踪再循环沉积物。HIMU 和 FOZO 型 OIB 的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值为 $-73 \times 10^{-6} \sim -52 \times 10^{-6}$, 表明其同样受到再循环沉积物的贡献。上述结果不仅揭示了再循环沉积物在地幔中的广泛分布, 还为 HIMU 与 FOZO 之间的成因联系提供了新证据。

关键词: 叁氧同位素; 洋岛玄武岩; 地幔端元; 俯冲沉积物

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

叠加剪切应力下烃源岩生烃演化地球化学响应的初步实验研究

梁明亮

中国地质科学院地质力学研究所 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081

以接近地质实际的模拟实验条件, 开展烃源岩生烃模拟实验及其演化机制研究, 是构建现代油气有机成因理论的主要研究手段和重要基础科学问题之一。地质条件下烃源岩生烃过程是一个在应力场、渗流场、温度场、化学场等多场作用下, 固、气、液三相体系并存的多场多相演化过程。上地壳尺度, 剪切应力在任意岩石内部是无处不在的, 只是在剪切带、活动断裂带、造山带等构造应力通常较为强烈的区域引起的变形表现更加显著。机械力化学作用可以引起有机质化学结构的变化, 这一现象已经在一些地质研究及室内实验中被证实。但在烃源岩生烃模拟实验研究领域, 现有常规温压生烃模拟实验装置一般主要提供正应力等简单应力结构, 对实际地质条件下的复杂应力场结构考虑不够。本研究采用改进的含剪切应力的温压共控半封闭水热裂解生烃模拟实验装置, 研究了叠加剪切应力对 II 型烃源岩生烃演化过程的影响。在含剪切应力条件 (45° 和 30° 剪切角, $44.15\sim 90.90$ MPa) 和无剪切的正压条件下, 进行了两组对比实验, 静岩压力为 $88.3\sim 181.8$ MPa, 温度范围为 $250\sim 500^\circ\text{C}$ 。实验结果显示,

剪切应力结构可以显著提高较低成熟演化阶段的液态烃产量, 也特别抑制了高成熟演化阶段气态烃的生成。同时, 对气态烃的 C 同位素分馏也产生了一定的影响, 造成剪切实验系列气体产物中的甲烷碳同位素变重, 而乙烷和丙烷碳同位素变化较小。这些变化可能与力化学作用对 C-H 键更容易产生作用将其破坏, 而有机物中的 C-C 键等更长链的结构更容易被保存下来有关。这些结果表明, 剪切应力作用改变了烃源岩有机质转化过程和烃类生成模式, 导致更高的石油产量和较低的气体潜力。在构造应力复杂地区, 忽视剪切应力的作用可能导致低估低熟油的潜力, 并高估高过成熟阶段的天然气潜力。本研究强调了将剪切应力因素纳入烃类生成演化模型的重要性, 提供了关于力化学过程影响有机质演化的新的见解。建议进一步开展不同干酪根类型烃源岩在考虑剪切应力条件下的生烃模拟实验, 以推进烃类有机成因理论的继续发展。

关键词: 剪切应力; 烃源岩; 生烃演化; 力化学; 油气

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

中元古代现代型海水 $\delta^{18}\text{O}$: 来自燧石叁氧同位素的启示

戴博凯¹, 马浩然^{3*}, 曹晓斌¹, 李辰卿²

1. 南京大学, 南京 230000;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100000;

3. 北京大学 深圳研究院, 深圳 231303

古代海水的氧同位素组成是理解过去气候和构造演化的一个关键参数。尽管已采用多种方法重建海水氧同位素的演化历史, 但结论仍然难以捉摸。层状燧石由于其低孔隙率和抗成岩作用的特性, 非常适合保存古代海水的氧同位素, 但解释燧石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值仍然复杂。最近的研究表明, 燧石的三氧同位素组成($\Delta^{17}\text{O}$)可以为海水 $\delta^{18}\text{O}$ 提供额外的约束条件。然而, 来自前寒武纪燧石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}$ 值通常偏离海水平衡线, 这被认为与这些燧石的多成因性质有关。在此, 我们提出这种偏离是由于携带不同同位素特征的含氧矿物(如碎屑硅酸盐、自生黏土矿物和重晶石)的共沉淀所

致。为了验证这一假设, 我们研究了来自华北地区中元古代杨庄组和雾迷山组的燧石样品。在这些样品中, 我们测量了矿物组成、元素浓度和三氧同位素。结果表明, 燧石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与碎屑硅酸盐含量显著相关, 而共存的含氧矿物导致 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}$ 偏离海水平衡线。最纯净、未受污染的燧石样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}$ 值表明, 中元古代海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 与现代海水相似。这一发现支持了在地球中年时期, 造山活动平静、气候动态减弱以及初级生产力较低的观点。

关键词: 海水叁氧同位素; 中元古代; 燧石

第一作者简介: 戴博凯 (1996-), 博士研究生; 研究方向: 同位素地球化学。

*通信作者简介: 马浩然 (1992-), 助理研究员; 研究方向: 同位素示踪高级氧化过程、叁氧同位素在地层中的应用。

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

云贵高原湖泊现代生物壳体碳酸盐碳氧同位素和团簇同位素 对古气候重建的意义

雷国良

福建师范大学 地理科学学院, 福州 350000

碳酸盐团簇同位素 ($\Delta 47$) 已被广泛应用于各类碳酸盐材料研究, 包括珊瑚、有孔虫和腹足类等生物成因碳酸盐。然而, 这些碳酸盐的 $\Delta 47$ 值是否受生物分馏作用影响仍存争议。本研究在云贵高原湖泊收集了 26 个萝卜螺属壳体(萝卜螺属 *Radix* sp, 14 个来自异龙湖, 12 个采自异龙湖附近池塘) 和 12 个孟氏螺属壳体(环螺属 *Anularya mansuyi*, 分别采自异龙湖与杞麓湖), 报道了两种现代湖泊生物壳体的稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$) 与团簇同位素 ($\Delta 47$) 结果。研究结果显示, 两种湖泊壳体的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 均存在显著个体差异, 即使同一采集地点的样本也存在差异, 这表明水生壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 值主

要受不同自然环境水体的溶解无机碳控制。两种湖泊壳体的氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 与 $\Delta 47$ 值在个体间无显著差异, 可能与两类所处水体的 $\delta^{18}\text{O}$ 组成及温度环境相似有关。基于自然样本与实验室培养建立的校准方程, 本文获取了壳体的团簇温度 ($\text{T}\Delta 47$), 该温度与湖泊监测的实际水体温度基本吻合。这说明碳酸盐不平衡效应与生物分馏作用对这两类物种的影响较小。因此, 这两类壳体在古温度重建中具有重要应用潜力。

关键词: 碳酸盐; 团簇同位素; 云贵高原; 古温度

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

天然气成因研究的多维度视角：碳氢氮同位素的耦合约束与成因判识

倪云燕^{*}, 张津川, 郑权, 邸铭翾, 陈建平

中国石油大学(北京), 北京 102249

天然气成因判识是油气地球化学领域的重要科学问题,直接关系到常规非常规油气资源的勘探方向和深层/超深层天然气的资源潜力评估。随着天然气成藏环境的复杂性增加,单一指标的判识方法存在局限性,而多同位素体系的综合研究为区分不同类型成因天然气提供了更为精确的约束。本研究基于中国多个典型盆地(松辽、渤海湾、四川、鄂尔多斯、塔里木等)及温泉热液系统的天然气样品,系统分析了碳($\delta^{13}\text{C}$)、氢(δD)及氮($^3\text{He}/^4\text{He}$)同位素的分馏特征,探讨其在天然气成因研究中的应用价值。研究表明,无机成因天然气在碳氢同位素组成上呈现出显著的地球化学标识,包括较重的甲烷碳同位素($\delta^{13}\text{C}_1 > -25\text{‰}$)、反序排列的碳同位素分布模式($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$)以及氮同位素富集特征($\text{R}/\text{Ra} > 0.5$),指示其深源成因及幔源挥发分贡献。相比之下,有机成因天然气的碳、

氢同位素变化受烃源岩类型、热演化程度及成藏过程的影响,呈现正序排列($\delta^{13}\text{C}_1 < \delta^{13}\text{C}_2 < \delta^{13}\text{C}_3 < \delta^{13}\text{C}_4$),并表现出随成熟度增加而逐渐变重的趋势,但在某些条件下发生部分甚至完全倒转。此外,氮同位素的分布模式与主控因素的研究也为天然气成因研究提供了新的判识依据和手段。本研究基于碳氢氮同位素的耦合特征,进一步优化了传统的天然气成因判识图版,并提出在高演化阶段及混合气系统中需引入多维度同位素判识方法,以提升判识精度和适用性,也推动了对深层/超深层天然气成因模式的再认识。研究成果为天然气地球化学前沿研究提供了新的视角,对全球天然气资源评价及勘探战略具有重要的理论和实践意义。

关键词: 天然气成因; 碳同位素; 氢同位素; 氮同位素; 地球化学判识

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

土壤中氦气取样及浓度测量方法研究

刘汉彬, 张建锋, 金贵善, 韩娟, 张佳, 石晓

核工业北京地质研究院 稳定及稀有气体同位素研究室, 北京 100029

传统壤中气氦气浓度测量采用土壤、打孔抽气、气体渗透及吸附等方式进行取样, 不可避免带来空气污染、稀释等影响; 由于土壤中氦气浓度较低, 通常不能满足气相色谱等分析方法检出限要求, 大型磁式质谱仪分析能够对土壤气氦气浓度进行分析, 但测试效率较低。鉴于此, 研发了土壤氦气野外取样装置和专门测量氦浓度的 He 浓度质谱仪。土壤氦气野外取样装置主要由柱状取样器、主动式抽气筒、单向气阀、直通及三通金属阀门、水过滤器、干燥器、密封水槽、气压表、塑料软管、液压钳、无氧紫铜管、电锤组成。柱状取样器能够一次性打入土壤, 阻止大气进入、防止污染所取气体样品。主动式抽气筒(正压集气装置)主要将塑料软管中空气排除, 将土壤中氦气气体抽取出来。单向气阀具有防止气体从高压向低压泄露的功能。直通及三通金属阀门具有连接不同的管路的功能。水过滤器在地下水位较高的地区防止水进入抽气筒。干燥器内装有干燥剂, 能够除去水分。密封水槽能防止大气反向进入抽气筒。气压表指示排除和抽取气体的压力大小。紫铜管密封土壤气体样品, 液压钳对紫铜管进行冷封。电锤作用是锤击柱状取样器, 使其达到取样深度。该装置具有密封性好、防止空气

污染、能够长期保存、便携的特点, 是氦气气体样品取样的有效设备。研制了 He 浓度质谱仪, 一种用于分析氦浓度分析的测试系统。该质谱仪主要由真空系统、纯化系统、四极杆检测系统、计算机控制系统组成。气体的纯化、检测自动化程度高, 工作条件稳定。它利用 ^3He 同位素稀释剂来提高样品测试的准确性, 具有高灵敏度特征。在静态模式下, 系统可以保持超高真空环境, 在 20 min 的静态背景噪声下, 累积值仅为 4.8×10^{-13} A。通过同位素稀释剂校准的空气标准样品, 证实了该系统测量的可靠性, 样品的重现率达到 0.76%。该质谱仪检出限为 ppm 级, 满足低含量土壤气中氦气的测试要求。利用土壤氦气野外取样装置和 He 浓度质谱仪, 能快速、够准确测定土壤气体样品中 He 的浓度, 圈定出土壤中氦气异常分布, 满足砂岩型铀矿或氦气藏找矿勘查技术需求。该项技术已在应用于某盆地氦气藏勘查中, 取得了很好的应用效果。也在我国北方盆地砂岩型铀矿产地土壤气体地球化学测量试验中得到应用。该项技术可在砂岩型铀矿找矿、盆地氦气藏勘查、地震预测中得以应用。

关键词: 土壤; 氦气; 取样技术; 浓度测量

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

理论计算亚硫酸根被氧气氧化过程中叁氧同位素的动力学分馏

彭郁芊*, 曹晓斌, 韩山雨

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

由还原态硫的氧化风化形成的硫酸盐能够记录大气中氧气的同位素特征。因此, 其叁氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}$ 和 $\Delta^{17}\text{O}$) 具有重建古大气 O_2 和 CO_2 浓度以及总初级生产力的潜力。在亚硫酸根被氧气氧化过程中发生的叁氧同位素动力学分馏是定量解释硫酸盐 $\Delta^{17}\text{O}$ 信号的关键, 特别是对于那些具有微小 $\Delta^{17}\text{O}$ 负异常 (即大于 -0.2‰) 的硫酸盐样本。然而, 在相关文献中, 与此过程相关的 ^{18}O 动力学同位素效应 (KIE) 尚不明确, 而 ^{17}O 的 KIE 则极少被报道。本研究利用密度泛函理论并基于经典过渡态理论, 对亚硫酸根通过氧气氧化过程中的叁氧同位素动力学分馏进行了理论计算。反应物和过渡态的振动频率是在 $\omega\text{B97XD/6-311G+}(2\text{df}, 2\text{p})$ 水平上计算得出的。结果显示, 在地表条件下, 氧气对应的 ^{18}O 动力学分馏

系数约为 -21‰ , 这与实验值有显著差异。这种偏差可能是由不同实验条件 (如 pH、温度和盐度) 引起的反应可逆性变化所导致。如果氧气和中间体之间达到完全平衡, 则 ^{18}O 分馏可达到 5‰ , 即表面上会观察到逆向 KIE。计算的动力学和平衡分馏的 θ 值 ($\equiv \ln^{17}\text{KIE}/\ln^{18}\text{KIE}$ 或 $\equiv \ln^{17}\alpha_{\text{eq}}/\ln^{18}\alpha_{\text{eq}}$) 分别为 0.5145 和 0.5179。这意味着, 在氧气结合到硫酸盐中时, 根据具体情形, O_2 的 $\Delta^{17}\text{O}$ 值可能会减少 0.346‰ 或增加 0.036‰ 。通过这些理论计算结果, 我们强调了在解释实验结果和地质记录时考虑反应可逆性的重要性。

关键词: 叁氧同位素; 密度泛函理论; 亚硫酸根氧化

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

量子级联激光光谱技术及应用

李劲松

安徽大学, 合肥 230601

激光吸收光谱作为一种现代高级的痕量气体检测技术, 具有高灵敏度、良好的选择性、快速响应和高时间分辨率、及非破坏性等特性, 已成为研究大气化学、地球化学、宇宙和天文学、生态学和环境化学等领域的重要工具, 并取得了一系列突破性和开创性的进展。近年来随着激光制造技术的快速发展, 量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser: QCL) 作为一种新型半导体激光光源, 具有体积小、功耗低、功率高、可调谐范围宽, 而成为高灵敏度中红外激光光谱的理

想光源。本报告将围绕国际上量子级联激光光谱技术在大气痕量气体和同位素诊断方面的最新研究进展, 及该领域的关键技术问题, 介绍团队多年来与国内外合作单位在行星和地球大气痕量气体监测、同位素分析、呼吸气体诊断、地气交换过程研究和光谱仪器研发, 以及海洋勘探等方面的研究成果。

关键词: 量子级联激光光谱; 痕量气体和同位素分析

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

准噶尔盆地南缘中段油气地球化学特征及来源

李静, 高遥*

新疆油田 勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830000

准噶尔盆地南缘发育二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系等五套烃源岩, 为准噶尔盆地烃源岩层系最多的地区。准确判识南缘不同构造单元油气来源成为认识南缘油气成藏规律、控制因素和油气资源潜力的关键。采用分子碳同位素与生物标志物定量分析等技术对不同构造单元及不同层位源岩、油气样品进行系统分析, 明确南缘中段主要存在四种类型原油, 第一类原油正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -26‰ ~ -30‰ 之间, 全油 $\delta^{13}\text{C}$ 值通常小于 -29‰ , Pr/Ph 介于 1~2 之间, 为二叠系腐泥型源岩来源; 第二类原油正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -24‰ ~ -28‰ 之间, 全油 $\delta^{13}\text{C}$ $> -27.5\text{‰}$, $\text{Pr/Ph} > 2$, 为侏罗系腐植型源岩来源; 第三类原油正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -26‰ ~ -34‰ 之间, 全油 $\delta^{13}\text{C}$ $< -28.5\text{‰}$, $\text{Pr/Ph} < 1$, 为白垩系腐泥

型源岩来源; 第四类原油正构烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -23‰ ~ -29‰ 之间, 全油 $\delta^{13}\text{C}$ $> -28\text{‰}$, $\text{Pr/Ph} > 1.5$, 为安集海河组腐泥型源岩来源。目前南缘中段已发现天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 普遍介于 -26‰ ~ -21‰ 之间, 反应均存在腐殖型源岩贡献, 最近获得高产的天湾 1 井天然气 $\delta^{13}\text{C}_2$ 介于 -23.4‰ ~ -21.5‰ 之间, 同样表现为煤型气特点, 但其 $\delta^{13}\text{C}_3$ 介于 -28‰ ~ -25‰ 之间, 明显较轻且呈现倒转序列, 对其轻烃碳同位素进行分析, 苯、甲苯及环己烷、甲基环己烷碳同位素值均小于 -24‰ , 表现出腐泥型天然气特点, 揭示南缘中段天然气主要来源于侏罗系煤系烃源岩, 局部地区同样存在二叠系等腐泥型源岩贡献。

关键词: 准噶尔; 南缘中段; 油气; 地化特征

第一作者简介: 李静 (1990-), 高级工程师; 研究方向: 石油地质学。Email: lijing_11@petrochina.com.cn

*通信作者简介: 高遥 (1986-), 工程师; 研究方向: 石油地质学。Email: soroyal@126.com

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

轻烃硫酸盐热化学还原反应气体产物特征及其地质意义

郭慧娟^{1,2*}, 王云鹏¹, 刘金钟¹, 王强¹, 彭平安¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 沈阳 110034

酸性气藏中的 H_2S 气体对生产设备、人及环境均产生危害, H_2S 气量和分布的准确预测十分重要。碳酸盐岩储层中的硫酸盐热化学还原 (TSR) 反应是 H_2S 气体的重要来源之一。TSR 是指硫酸盐与有机质发生反应, 生成 CO_2 、 H_2S 和含硫有机化合物等产物的一种氧化还原反应。小分子易挥发有机质的 TSR 反应热模拟实验开展较少, 对其气体产物组成和碳同位素了解较少, 这不利于气源判识和 TSR 反应程度判断。本次工作针对凝析油、正戊烷和烃类气体开展了 360°C 条件下的恒温高压釜黄金管热模拟实验研究, 通过测定气体产物的组成和碳同位素及与前人工作的对比, 得到了以下认识: (1) 随着 TSR 反应程度的增大, 烃类气体的 TSR 反应生成气体的 $\ln(C_2/C_3)$ 呈现先升高再降低的现象, 这一现象在受 TSR 反应影响的四川盆地飞仙关组和鄂尔多斯盆地马家沟组盐下碳酸盐岩天然气藏中也同样发现。前人研究通常认为随着 C_1/C_2 值的增大, C_2/C_3 值的降低与初次裂解气的混合有关, 本研究表明 TSR 反应也是成因之一, 这为酸性气藏中的气源判识提供了新依据。(2) 可以根据气体干燥系数和烃类气体碳同位素与酸度 ($\text{H}_2\text{S}/(\text{H}_2\text{S}+\sum C_n\text{H}_{2n+2})$) 之间的关系, 判断有机反应物为烃类气体还是液态烃。在干燥系数相似

的条件下, 与正戊烷和凝析油 TSR 反应产物相比, 烃类气体 TSR 反应生成气体的酸度增长速率更快; 酸度相似的条件, 烃类气体 TSR 反应生成气体的碳同位素增长更快。不同液态烃在 TSR 反应初期的 $\ln(C_2/C_3)$ 值有差异, 与大分子有机物相比, 小分子有机物 TSR 反应初期的 $\ln(C_2/C_3)$ 值更高。推测可以根据包裹体中 $\ln(C_2/C_3)$ 值判断有机反应物, 该结论仍需后期热模拟实验和包裹体数据的支撑。(3) 在正戊烷的 TSR 反应初期, 裂解生成的烃类气体中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 $\delta^{13}\text{C}_2$ 值。针对这一现象, 本研究提出一种新的机制: TSR 反应初期, 硫酸盐氧化正戊烷生成乙酸和丙酸, 然后乙酸和丙酸脱羧后形成甲烷和乙烷, 同时形成甲基和乙基, 相较于乙基, 甲基更容易被氧化形成 CO_2 , 这些过程导致正的 $\delta^{13}\text{C}_1$ - $\delta^{13}\text{C}_2$ 值。在 H_2S 含量较低的碳酸盐储层中, 也存在这一现象, 本研究为这一地质现象的解释提供了新思路。(4) 根据 H_2S 气体产量, 烃类气体 TSR 反应可以明显划分为两个阶段, 烃类气体 TSR 反应的动力学参数可能需要重新测定和计算。

关键词: 硫酸盐热化学还原反应; 气体; 碳同位素; 组成

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

甲烷同位素“倒挂”现象的形成机理及地化意义

吴嘉

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

在高-过成熟地层的天然气气藏或者页岩气中, 会出现甲烷平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值重于对应干酪根或固体沥青平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值的“倒挂”现象。此异于正常生烃过程的碳同位素分馏行为被部分学者认为气-源对比的反证, 但仅能解释较为特殊的情况。此类甲烷形成机理不明, 制约了对深层和高-过成熟地层天然气生成的认识。本研究在 420~450 °C 条件下, 对高-过成熟 Alum Shale 干酪根进行可控加氢热模拟实验, 在沉积盆地氢逸度条件下重现了甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值的“倒挂”现象。揭示了该现象的反应位点为芳核上的短侧链烷基, 芳香碳不参与反应, 故占高-过成熟生甲烷母质 99%的

芳香碳与生成物甲烷之间没有关联, 不存在同位素分馏的解释前提。因此, 深部地层中甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值“倒挂”现象是在外源氢的参与下固体沉积有机质晚期生烃聚集形成的。该现象可作为一种外部氢源参与的有机-无机复合生烃判识标志, 表明该区域存在无机氢的化学迁移, 为研究沉积盆地氢的物质平衡和深层-超深层高-过成熟沉积有机质生烃的地球化学行为提供了新的证据和思路。

关键词: 甲烷同位素; 倒挂; 生成机理; 热模拟实验。

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

气体地球化学与地震监测预报——以思茅盆地温泉气为例

王希彬^{1,2,4}, 李立武^{1*}, 周晓成³, 李中平¹, 曹春辉¹, 邢蓝田¹

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 2. 陕西省地震局, 西安 710000;

3. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100043; 4. 中国科学院大学, 北京 100049

一、科学意义及研究背景: 地质流体作为地球内部活动的“动态窗口”, 其化学组分与同位素比值能够直接反映深部地质过程(如岩浆活动、断裂滑动及流体运移)。温泉作为岩石圈-大气圈流体交换的重要通道之一, 其气体组成(CO_2 、 N_2 、 CH_4 等)及其同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 δD 、 $\delta^{15}\text{N}$ 等)可揭示流体来源、运移路径及与地震活动关联性。思茅盆地位于欧亚板块与印度板块结合部位, 三江褶皱带南部, 地构造活动强烈, 新生代火山和深大断裂发育, 温泉广布且地震频繁, 为深入研究深部流体活动与地震孕育发生的关系提供了天然试验场。通过解析温泉气体的地球化学响应, 可以为地震监测预报提供新的观测参数和理论依据。

二、开展工作及技术路线: 自 2022 年起, 研究团队对位于思茅盆地中央构造带上的三口温泉(厄里(EL)、清平(QP)、那柯里(NKL))进行连续采样和分析, 重点监测 CO_2 、 N_2 及 CH_4 的浓度与 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 、 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 、 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ 、 $\delta^{15}\text{N}\text{-N}_2$ 等参数的时空变化。研究采用气相色谱、四级杆质谱和同位素质谱, 结合地震活动记录和地质背景, 探究气体异常与地震事件的关联性。分析结果显示, 三口温泉气体组分以 CO_2 (QP: 88.34%、EL: 36.05%、NK: 30.62%) 和 N_2 (QP: 9.73%、EL: 59.17%、NKL: 67.72%) 为主, CH_4 含量低 (QP: 1.4%、EL: 3.5%、NKL: 0.44%), 正常情况下, $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 的分布范围为 QP: -8.5‰ ~ -7.1‰ 、EL: -12.4‰ ~ -9.6‰ 、NKL: -9.5‰ ~ -8.6‰ , $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 的分布范围为 QP: -23.6‰ ~ -18.1‰ 、EL: -12.7‰ ~ -7.4‰ 、NKL: -5.7‰ ~ -1.7‰ ,

$\delta\text{D}\text{-CH}_4$ 的分布范围分别为 QP: -228‰ ~ -186‰ 、EL: -111‰ ~ -57‰ 、NKL: 82‰ ~ -185‰ 、 $\delta^{15}\text{N}\text{-N}_2$ 的分布范围为 QP: -2.6‰ ~ -0.7‰ 、EL: -0.4‰ ~ -1.2‰ 。时间序列分析表明, 温泉气体组分和同位素总体保持稳定。在 2022 年 11 月红河 5.4 级、2023 年普洱 4.3 级及老挝 3.9 级地震期间出现 CO_2 、 CH_4 浓度骤升/下降、碳氢同位素偏移等波动。

三、主要认识与科学发现: ①深部流体活动与气体成因。温泉气体以无机成因为主, CO_2 来自深部碳酸岩热解或岩浆活动, 甲烷混合了有机源和无机源, 氮气则主要来自大气溶解, 气体同位素特征反映出流体来源和运移路径的复杂性。②气体对地震的差异化响应。温泉中甲烷、二氧化碳和氮气对地震的敏感性与气体种类及构造位置密切相关。在红河地震中, 清平温泉二氧化碳浓度上升且 $\delta^{13}\text{C}\text{-CO}_2$ 变重, 厄里温泉甲烷浓度增加且碳、氢同位素同步变轻; 在普洱地震中, 清平二氧化碳浓度下降并伴随碳同位素持续变重, 清平温泉甲烷浓度激增, $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 和 $\delta\text{D}\text{-CH}_4$ 出现先重后轻的剧烈波动, 那柯里温泉 $\delta^{13}\text{C}\text{-CH}_4$ 持续偏重。不同断裂带对气体的调控存明显在差异。③多台多参数联合观测的价值。气体浓度与同位素的同步变化揭示了地震孕育过程中应力加载-释放的动态机制, 为地震前兆的识别提供了多维度依据, 多台多参数的联合监测能够更全面的支持地震预测的发展, 提高地震三要素的判断的准确性。

关键词: 温泉气; 地震; 思茅盆地

第一作者简介: 王希彬 (1988-), 博士研究生; 研究方向: 地震地球化学。Email: wangrswjx@163.com

*通信作者简介: 李立武 (1967-), 研究员; 研究方向: 气体地球化学实验与研究。Email: llwu@lzb.ac.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

塔西南山前地区新勘探层系天然气成因来源

肖宇¹, 孟强^{1*}, 王翔²

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100;

2. 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

塔里木盆地西南山前地区油气资源潜力大, 但勘探程度较低, 近年来该区油气勘探取得多项突破, 然而受复杂地层构造与多套潜在烃源岩发育影响, 天然气成因研究仍存在争议。本研究基于前人研究成果及近期油气资源评价认识, 系统分析了阿克莫木、柯克亚气田及 FS-8、KS-6、QT-1 等新发现井/突破井的天然气烃源岩, 通过天然气组分与同位素特征判识其成因类型。在此基础上, 结合烃源岩地球化学特征明确不同天然气来源, 同时阐释天然气中部分无机气的成因。研究表明: 柯克亚气田天然气主要为源自二叠系

普司格组的煤型气; 阿克莫木气田与 QT-1 井天然气烷烃碳同位素呈现异常偏重特征, 可能为源自二叠系棋盘组的高过成熟煤型气, 并含有一定比例的幔源氢和无机 CO₂; FS-8 井天然气属二叠系腐泥型烃源岩生成的油型气; 柯什地区 KS-6 井天然气则表现为以研究区侏罗系杨叶组烃源岩为主的油型气混合成因。

关键词: 塔里木盆地; 二叠系; 碳同位素; 成因类型; 气源对比

基金项目: 国家自然科学基金 (41903013); 校企合作项目 (041021090118); 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室 (hklpge - 202308)

第一作者简介: 肖宇 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 天然气地球化学。Email: yu_xiao0331@163.com

*通信作者简介: 孟强 (1989-), 副教授; 研究方向: 天然气地球化学、同位素地球化学。Email: mengqiang@yangtzeu.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

利用氮气团簇同位素量化地表水体总活性氮移除

商艳凯^{1,2}, 晏浩^{1,2*}, 仝凤台^{1,2}, 鲍惠铭^{1,2}

1. 南京大学 国际同位素效应研究中心, 南京 210023;

2. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

为满足人类对粮食和能源的需求, 人为活动使得全球活性氮(Nr)含量翻倍。Nr会通过地表径流和大气沉降进入地表水体, 导致水体出现富营养化和缺氧等环境问题。微生物介导的反硝化和厌氧氨氧化过程能将活性Nr转化为惰性的N₂(也称生物成因N₂), 可有效缓解上述环境问题。但由于大气中N₂浓度极高及现有方法的不足, 地表水体中生物成因N₂的量化存在极大的不确定性。近年来, 得益于高分辨率质谱的发展, 一种新的指标“N₂团簇同位素($\Delta^{30}\text{N}$)”被开发。该指标表现出可准确量化生物成因N₂的潜力, 已被成功应用到土壤生态系统中。为验证该指标在量化地表水体生物成因N₂的有效性, 我们选择贵州的两个富营养化的水库作为研究对象, 建立了从溶解气体采集到N₂纯化再到 $\Delta^{30}\text{N}$ 测试的一整套流程, 并将该指标与其他量化生物成因N₂的指标(氮氩比, N₂/Ar)对比分析。研究发现, 除了红枫水库的混合层样品, N₂/Ar计算出的生物成因N₂的贡献(Fbio-N₂/Ar)均大于 $\Delta^{30}\text{N}$ 计算的生物成因N₂的贡献(Fbio- $\Delta^{30}\text{N}$)(0.7%~12.2%)。由于N₂/Ar和 $\Delta^{30}\text{N}$ 分别表征的是净生物成因N₂的量和总生物成因N₂的

量, Fbio-N₂/Ar应小于等于Fbio- $\Delta^{30}\text{N}$ 。我们推测观察到的Fbio-N₂/Ar>Fbio- $\Delta^{30}\text{N}$ 可能是入库河流相关的气泡注入或降温效应导致的; 由于水中溶解N₂是生物成因N₂和大气成因N₂的混合。根据 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\Delta^{30}\text{N}$ 相交图, 计算得到阿哈水库和红枫水库生物成因N₂的 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为10.7‰±1.7‰和-14.6‰±5.5‰。阿哈水库生物成因N₂的 $\delta^{15}\text{N}$ 值接近硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(7.2~12.6‰), 分馏小且硝酸盐浓度下降为0 mg/L, 说明反应接近完全。红枫水库生物成因N₂的 $\delta^{15}\text{N}$ 值比硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(6.7‰~11.2‰)低-23.6‰±6.9‰, 分馏大且硝酸盐浓度在整个水柱保持稳定, 表明反应不完全。两个水库截然不同的N同位素效应暗示着在采样期间, 阿哈水库正在移除水中的Nr进而缓解其富营养化程度, 而红枫水库的富营养化程度并不能得到缓解。综上所述, 本研究使用 $\Delta^{30}\text{N}$ 量化了生物成因N₂对溶解N₂的贡献, 并使用生物成因N₂的 $\delta^{15}\text{N}$ 值判断了氮移除的反应进程。

关键词: 氮气; 团簇同位素; 氮移除; 水生生态系统

基金项目: 国家自然科学基金项目(42273032, 42150202)

第一作者简介: 商艳凯(1997-), 博士研究生; 研究方向: 同位素地球化学。Email: shang@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 晏浩(1988-), 准聘助理教授; 研究方向: 同位素地球化学。Email: yanhao@nju.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

不同形态硫同位素组成测量方法研究

韩娟*, 刘汉彬, 金贵善, 张建锋, 李军杰, 张佳, 石晓

核工业北京地质研究院 分析测试研究所, 北京 100029

硫在自然界中广泛分布, 具有不同的化学价态、存在形式和较宽的同位素变化范围。不同形态硫同位素的研究可以获取硫的循环信息, 相较于总硫的分析, 更加精确的分析不同形态硫同位素组成更具代表意义, 是判断沉积环境特征、反演成岩成矿过程的重要指标参数。本文设计了一套黄铁矿硫的多通道提取装置, 该装置包括保护气供给系统、样品反应系统和产物收集系统。保护气供给系统包括氮气钢瓶气、氮气减压阀和多个气体流量计; 样品反应系统包括六联带加热磁力搅拌器、平底三角锥形瓶、球形冷凝进样装置、夸克流量阀; 产物收集系统包括两级吸收装置。该装置可以用于依次提取酸可挥发性硫化物、酸可溶性硫酸根、黄铁矿硫、有机硫。提取流程采用四步连续化学处理法: 将样品装入平底三角瓶中, 加入 3 mol/L HCl 在 60℃加热 30 min 浸提硫化物, 转化硫化物为硫化氢, 通过吸收液固定硫化氢, 最后转化为

硫化银; 提取硫化物后取三角瓶中溶液离心, 取其上清液, 加入 BaCl_2 溶液, 可以将酸可溶性硫酸根固定为硫酸钡沉淀; 取完上清液的沉淀重新加入装置的平底三角锥形瓶, 加入 CrCl_2 溶液和浓盐酸, 加热 2 h, 转化黄铁矿硫为硫化氢, 通过吸收液固定硫化氢; 将铬还原法后的沉淀, 用去离子水洗至中性后, 采用艾什卡法将有机硫转化为硫酸钡。实验验证表明, 黄铁矿硫的加标回收率为 94%~100% ($n=10$, $\text{RSD}=1.9\%$), 铬还原法提取产物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与原始黄铁矿偏差 $<0.2\%$ (1σ), 证实该方法在硫形态分离效率和同位素保真度方面具有显著优势。本装置为多形态硫同位素同步分析提供了可靠技术方案, 可显著提升对硫循环过程及地质记录的解译能力。

关键词: 硫同位素; 铬还原法; 形态硫; 黄铁矿硫

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

矿物包裹体中气态烃碳同位素组成在线连续流分析方法

金贵善, 刘汉彬*

核工业北京地质研究院 分析测试研究所, 北京 100029

矿物包裹体, 是矿物生长时一部分成矿流体被包裹在矿物的晶格缺陷或窝穴中, 至今尚在矿物中存在并与主矿物有着相界限的那一部分物质。因此, 它是成岩成矿作用流体的原始样品, 它反映了成矿流体的本质特征。矿物包裹体中烃类碳同位素的研究作为一种地球化学新手段, 已被广泛用来了解金属和非金属矿产的成矿流体的来源、性质、成矿的物理化学条件, 以及讨论矿床成因、指导找矿等问题, 并已取得显著的成效。

现有的气态烃碳同位素组成测试方法包括真空球磨法、压碎法、传统爆裂法、气相色谱-质谱联用法, 由于流体包裹体中气态烃的含量从几个 ppm 到数千 ppm, 上述测试方法对于气态烃浓度过低或者高浓度过高的样品测试具有一定的局限性, 另外气态烃的标准较少且不易保存以及标准进样问题没有很好的解决, 造成气态烃碳同位素组成的测试存在制样成本高、效率低、定值困难等缺点, 因此, 本文介绍一种新的实验技术能够解决上述难题并能精确测试矿物包裹体中气态烃碳同位素组成。研制一套在线压裂装置, 将 40~60 目的 1 g 左右样品装入压裂装置后, 连接于在

线提取系统, 采用高纯氦对压裂装置及管道进行吹扫 10 min 左右, 将压裂装置中的空气直接排空, 从而减少对质谱仪的损害。压裂之前需要对系统进行 5 min 的本底富集, 然后进样检测甲烷生成二氧化碳的峰型, 如果出现高于 50 mv 的二氧化碳峰, 则认为本底过高, 需要对管路进行检测并增加吹扫时间, 直至测试无二氧化碳峰, 才能对样品进行压裂富集。本底达到要求后, 利用液压装置对样品进行多次压裂, 一般压裂释放共三次重复操作。气体经过氢氧化钠去除二氧化碳, 富集 5 min 后释放甲烷等烃类样品进入 Poraplot Q 色谱柱中, 甲烷等先后离开色谱柱进入 940℃ 的氧化管依次氧化为二氧化碳, 二氧化碳被高纯氦气送入稳定同位素质谱仪, 分别测试各个气态烃类的碳同位素组成。采用在线压裂提取方法进行矿物包裹体中烃类气体的提取富集及碳同位素分析, 取得较好的效果, 同一个样品的多次重复测试结果的标准偏差在 $\pm 0.30\%$ 以内。另外, 该方法的制样效率大幅提高。

关键词: 矿物包裹体; 碳同位素; 压裂法; 在线富集

基金项目: 铀矿 Pb 同位素及铀系核素示踪技术研究 (物 YY2103-1)

第一作者简介: 金贵善 (1980-), 正高; 研究方向: 同位素地球化学。Email: 16626162@qq.com

*通信作者简介: 刘汉彬 (1969-), 正高; 研究方向: 地球化学。Email: hanbinliu@sina.com

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

蜗牛壳体超高分辨率氧同位素示踪天气尺度降水事件频率

王国桢, 董吉宝*, 晏宏*

中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

利用地质生物载体重建过去天气变化, 能够极大地延伸气象记录的时间跨度, 有望揭示现代器测资料中未能显现的天气特征。陆生蜗牛对环境变化高度敏感, 其壳体氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$) 能够记录发生在天-周尺度的降水事件甚至极端降水, 是研究过去天气尺度降水变化的重要材料。然而, 目前基于超高分辨率 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 追踪天气尺度降水变化的研究仍处于起步阶段, 尚缺乏有效的定量方法重建这些降水事件, 限制了对过去天气尺度降水变化的研究。为此, 本研究在我国黄土高原的洛川和灵武采集了现代条华蜗牛 (*Cathaica fasciola*) 样本, 并利用二次离子质谱 (SIMS), 对蜗牛壳体进行了超高分辨率的氧同位

素分析, 获得了日分辨率的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 记录。结合蜗牛体液水氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{BF}}$) 的长期观测, 有效地从 SIMS $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 记录中提取天气尺度降水信息。研究结果显示, 使用 $\delta^{18}\text{O}_{\text{BF}}$ 和 SIMS $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 记录的一阶导数重建的降水事件频率与器测资料高度一致, 检出率超过 85%。此外, 研究还发现黄土高原地区现代蜗牛生长季的降水天数与年降水量之间高度相关。因此, 过去天气尺度降水事件的频次可进一步用于重建历史时期的年均降水量及其年际变率信息。

关键词: 陆生蜗牛; 氧同位素; 天气尺度; 降水频率; 古天气

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (42025304)

第一作者简介: 王国桢, 博士研究生; 研究方向: 第四纪地质学。Email: wangguozhen@ieecas.cn

*通信作者简介: 晏宏, 研究员; 研究方向: 第四纪地质学。Email: yanhong@ieecas.cn

*通信作者简介: 董吉宝, 副研究员; 研究方向: 第四纪地质学。Email: djb@ieecas.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

The Past and the Future of Energy Gases —Lessons Learned and Perspectives

Bernhard M. KROOSS*, Yunyan NI, Jia WU, Yong MA

China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249

Although the phenomenon of „burning“ gas has been known for thousands of years in various locations worldwide, the commercial utilization of natural gas and its systematic exploration started only relatively recently.

An AI chatbot provides the following milestone data for natural gas production:

1920 s–1950 s: Development of pipeline infrastructure enabled long-distance transport, boosting production and consumption.

1970 s: The energy crisis prompted a shift towards natural gas as an alternative to oil, leading to increased exploration and production.

2000 s: Technological advancements, such as hydraulic fracturing and horizontal drilling, unlocked vast shale gas reserves, particularly in the United States, leading to a significant production surge.

2020 s: The global focus on energy transition and sustainability has influenced natural gas production dynamics, with some regions experiencing declines due to policy shifts and market conditions.

Scientific analysis of the chemical and isotopic composition of natural gases started in the 1960 s and subsequent work resulted in seminal milestone papers by Stahl and Carey(1975), Bernard et al.(1976), Chung

et al.(1988). The studies of Stahl and Schoell, started at the German Geological Survey(BGR), contributed significantly to an improved understanding of the origins and occurrences of natural gas. With the research work led by Prof. Jinxing Dai and his students, China has become one of the world leaders in natural gas geochemistry during the past decades.

The U.S. GEOLOGICAL SURVEY PROFESSIONAL PAPER 1570 “The Future of Energy Gases” edited by David G. Howell(1993) constitutes one of the most comprehensive overviews and analyses of all aspects of natural gas exploration and utilization. Interestingly it did not foresee the massive evolution of shale gas production starting in the early 2000 s.

Gas hydrates, once hailed as a huge potential resource for future natural gas supply have not achieved any economic relevance so far.

While hydrogen, both technically produced and “natural H₂”, is widely proposed as a “clean” replacement for natural gas, it appears unlikely, for technical and energetic reasons, that it will meet these expectations. But predictions are difficult, especially about the future.

Keywords: energy gas; shale gas; gas hydrate; hydrogen; past and future

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

多接受高分辨质谱仪在高维度同位素中的应用

仝凤台^{*}, 晏浩, 谢豪, 曹晓斌, 彭永波, 鲍惠铭

南京大学, 南京 230026

叁氧、肆硫、团簇同位素等高维度同位素在解决行星、大气、地质等领域应用方面取得诸多两点成果。传统的气体同位素质谱仪(如 Mat 253 plus, Nu Perspective)存在测试体系单一、质量分辨率无法区分相近核质比杂质离子干扰等局限。据此, 赛默飞世尔科技有限公司推出了多接受高分辨质谱仪(Ultra HR IRMS), 该仪器法

拉第杯位置和放大器均可调, 质量分辨能力达 45000。借助该仪器和我们自主搭建的多重样品前处理系统, 我们建立了氮气、氢气、氧气、一氧化碳团簇同位素和叁氧、肆硫等高维度同位素分析方法。

关键词: 高分辨质谱仪; 高维度同位素

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

海陆过渡相页岩气富集机制：干酪根化学结构的视角

宋董军^{1*}, 邱振²

1. 兰州大学, 兰州 730000;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100049

海陆过渡相页岩气的勘探开发是中国页岩气事业发展的重要方向。本研究以不同演化程度的鄂尔多斯盆地山西组二段黑色页岩为例, 在分离干酪根的基础上, 详细剖析了不同演化阶段海陆过渡相页岩的干酪根结构, 通过对比全岩和干酪根的微孔隙分布特征, 揭示了干酪根化学结构对该类页岩气赋存的影响。研究发现, 山 2 段海陆过渡相页岩有机质富含杂原子和芳香环结构。随着热演化程度的增加, 杂原子释放引起芳香环结构明显改变, ~3.0% R_{mc} 后化学结构出现明显的缩聚; XRD 光谱中由芳香层堆叠产生的 (002) 峰的位置从 25.15° 增加到 25.88°, 芳香层之间的间距 (d₀₀₂) 从 0.3540 nm 减小到 0.3444 nm, 计算出的石墨化程度逐渐增加, 有机质的碳层排列从杂乱无章的形态逐渐定向化, 表明石墨化程度在不断提

高; 杂原子的释放导致芳香层的平均横向尺寸 (L_a) 和堆叠高度 (L_c) 减小, 在 ~3.0%~3.2% R_{mc} 时达到最小值。有机质与全岩样品具有相似微孔隙分布, 且孔隙孔径集中在 0.4~0.7 nm。有机质芳香化结构参数与微孔隙之间具有良好的相关关系, 证实这些微孔隙与有机质结构有关。通过综合分析认为, 由芳香层差异堆砌形成的微孔隙将有利于甲烷的吸附, 这为阐明海陆过渡相页岩气高吸附气比例、TOC 与微孔体积和含气性之间的正相关关系以及海陆过渡相页岩气开发过程产率衰减缓慢等现象的成因提供了科学依据。

关键词: 海陆过渡相页岩气; 甲烷赋存; 有机质孔隙; 芳香层堆叠; 石墨化

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

沥青质包裹烃碳同位素的稳定性：对四川盆地西北部 露头固体沥青来源的指示

方朋¹, 吴嘉^{2*}, 沈斌¹, 徐学敏¹

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;
2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

中国四川盆地西北部出露地表的下寒武统沥青脉被认为是前寒武系古油藏被破坏的产物, 追踪其油源是探索中-新元古界原生油气资源的重要方法。但由于地表沥青蚀变严重, 同时其潜在烃源岩的热演化程度较高, 利用常规的有机地球化学参数进行油源对比是困难的。有机地质大分子沥青质结构吸附或包裹的小分子烃组分通常被认为不易受到次生蚀变的影响, 这些组分的碳同位素组成对于分析沉积有机质的来源具有潜在价值。本文选取来自中国四川盆地西北部矿山梁地区出露地表的低熟沥青脉为样品, 对其沥青质组分进行封闭体系的热模拟实验, 分离了产物沥青质基质中不同赋存态(游离, 吸附, 包裹)烃组分,

并探讨了其同位素组成的特征、成因及指示意义。结果表明, 表生的微生物氧化的作用造成了沥青中游离的饱和烃组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于芳烃组分和极性组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。游离和吸附组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 对热演化的响应敏感, 并随热演化而逐渐变小, 变小的原因是沥青质基质中的同位素偏重的“残余碳”的释放会随着沥青质裂解程度变大而被稀释。沥青质包裹组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值始终与原始包裹组分保持一致, 不受热演化的影响, 指示了沥青的来源是埃迪卡拉系陡山沱组烃源岩。

关键词: 沥青脉; 沥青质; 吸附包裹烃; 碳同位素; 油源对比

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助项目(CSJ-2024-05); 国家重点研发计划项目(2017YFC0603102)

第一作者简介: 方朋(1995-), 助研; 研究方向: 有机地球化学和能源地球化学。Email: fangpeng@mail.cgs.gov.cn

*通信作者简介: 吴嘉(1984-), 副教授; 研究方向: 实验地球化学和油气地球化学。Email: jia.wu@cup.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

断层泥中自生伊利石激光 K-Ar 定年方法研究

张佳*, 刘汉彬, 李军杰, 金贵善, 张建锋, 韩娟, 石晓

核工业北京地质研究院, 北京 100029

地表脆性断裂精确定年一直是构造地质学研究中的难点问题。多数情况下, 脆性断层在活动时普遍发育断层泥, 其主要组成是伊利石、蒙脱石等粘土矿物以及围岩的碎粉和碎砾, 由于构造活动带来的水热蚀变作用极有利于自生伊利石的生长, 分选不同粒度自生伊利石进行 K-Ar 法定年可以直接确定构造发生的时间。以往样品中的氩气常用双真空加热炉加热释放, 从而测量放射成因 ^{40}Ar 含量, 但此方式存在坦加热器易断裂、升温后降至 200°C (伊利石未熔融) 时间长、系统热本底高等问题。本次工作尝试利用 CO_2 红外激光熔融方式, 建立自生伊利石激光 K-Ar

定年方法, 确定样品完全熔融功率为 5 W, 熔融时间为 300 s, 测量相对标准偏差达到 0.5%, 整个实验过程实现了自动化控制, 降低人为操作带来的误差, 可有效缩短测量时间, 提高测试准确度。该方法已在相山铀矿田邹家山-石洞断裂带中得到应用, 4 个不同粒度伊利石 K-Ar 年龄范围为 123~344 Ma, 结合 2M_1 多型碎屑伊利石含量, 拟合得到最近一期断层活动时间为 118~120 Ma, 与矿田成矿期 120 Ma 基本一致。

关键词: 断层泥; 自生伊利石; 激光 K-Ar 法

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

氦同位素地球化学及其在地震研究中的应用

张茂亮^{1*}, 刘伟², 张皓颖¹, 郑国东³, 徐胜¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 呼和浩特 010051;

3. 中国地质大学(武汉) 环境学院, 武汉 430074

氦(He)是最轻的稀有气体元素,由³He和⁴He两种稳定同位素组成。³He主要来源于地球最初形成时吸积的太阳星云物质,主要赋存于地幔中;而⁴He主要由U-Th放射性衰变产生,在地壳中相对富集。地球自其形成并演化至今,深部和地表各圈层的氦同位素组成(通常以³He/⁴He比值表示)差别极大,地幔³He/⁴He比值可达大气值(记为1 Ra)的5~30倍以上,同时也是地壳值(0.02 Ra)的数百至上千倍。因此,温泉气体等流体样品的氦同位素组成能够有效地区分幔源流体与壳源流体的混合比例,进而为揭示深部物质组成、地球物理结构以及地球动力学过程提供重要的示踪指标。

氦同位素地球化学方法已被广泛应用于地震研究中,其核心在于通过观测地震活动前后温泉气体等样品的³He/⁴He比值变化,探索地下深部流体运移与地震成因之间的潜在关系。然而,众多观测结果表明,

地震活动对气体³He/⁴He比值变化的影响不尽相同,其所反映的不同深度或不同规模的物理-化学过程与动力学机制差异显著,为利用氦同位素指标解译地震前兆信号带来了较大的不确定性。本研究将聚焦氦同位素地球化学及其在地震研究中的应用这一重要研究主题,在综述前人研究进展与认识的基础上,以青藏高原东部玉树-甘孜-鲜水河-安宁河断裂带、龙门山断裂带以及腾冲-普洱火山区等为代表性研究区,探讨构造与火山活跃区深部流体与地震活动成因之间的潜在关系,进而明确目前存在的主要问题与可能的研究策略。最后强调,随着分析技术的不断进步和理论模型的逐渐完善,氦同位素地球化学方法有望在地震预测和防灾减灾工作中发挥更大的作用。

关键词: 氦同位素; 活动断裂带; 第四纪火山区; 深部流体通量; 地震

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

浅层地下水溶解稀有气体对深部热信号的响应

王帅*

中国地质大学(武汉), 武汉 430078

稀有气体(He、Ne、Ar、Kr 和 Xe)的高度挥发性、化学惰性以及端元的显著性使其成为深层地热勘探的有利工具。新生代火山区地壳内普遍有未冷却的岩浆房,一般具有深层高温地热资源。因此,研究典型新生代火山区地下水中的稀有气体地球化学行为,可以完善该类型区域的地热地球化学勘探体系。本研究以松辽盆地北部的典型新生代火山区--五大连池火山区为研究区,通过水文地质调查、样品采集,结合水化学和

同位素数据查明了区域浅层地下水的补给来源和演化机制。通过对地下水中溶解稀有气体进行源(大气、地壳、地幔等)及地质过程(补给平衡、扩散、沸腾等)的判别与区分,对提取出的深部热信号进行解读,提升了对火山区深部岩浆状态和热状态的认识。

关键词: 稀有气体; 岩浆脱气; 沸腾; 同位素分馏; 浅层地下水

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

高精度硫酸根全氧的叁氧同位素测量

魏榆, 晏浩*, 彭永波, 鲍惠铭

南京大学 地球科学与工程学院, 国际同位素效应研究中心, 南京 210023

硫酸根微小氧十七异常 ($\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$) 在示踪硫循环上具有很大的潜力。但是当前硫酸根叁氧同位素测量存在着转化不完全和氧同位素分馏的问题, 导致测量结果无法校正到 VSMOW-SLAP 体系中从而无法与水、硅酸盐和碳酸盐等其它含氧物质进行对比, 并且不同实验室之间的测量结果也无法直接对比。本研究提出了一种硫酸根全氧的叁氧同位素测量方法, 即通过石墨还原法实现硫酸根中的氧完全转化进入 CO_2 , 再通过高温下 Pt 催化 $\text{CO}_2\text{-O}_2$ 氧同位素交换的方法测量 CO_2 的叁氧同位素组成。该方法 CO_2 的产率达到了 $100\%\pm 2\%$, $\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 精度达到了 9 per meg, 并且可同时测量 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$

和 $\delta^{18}\text{O}$ 。此外, 该方法对 1 mg BaSO_4 或者更低的样品量实现 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 测量, 此时精度仍可维持在 20 per meg。通过对 CO_2 的产率进行控制实验, 我们发现 CO_2 产率低会导致 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 值偏高和 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低。通过与氟化法对比我们发现, 尽管氟化过程发生在高温下, 但其 θ 值并非高温平衡分馏值 (0.5305), 而是介于 0.515~0.530 之间, 从而导致测得的氧气的 $\Delta^{17}\text{O}_{\text{excess}}$ 值相对硫酸根的值高 20 ~ 200 per meg。

关键词: 硫酸根; 叁氧同位素; 质量依赖氧同位素分馏

基金项目: 国家自然科学基金 (42273032, W2441015, 42150202); 中央高校基本科研业务费专项资金 (0206/14380918, 0206/14380185, 0206/14380150, 0206/14380174) 南京大学启动经费

第一作者简介: 魏榆, 男, 博士研究生; 研究方向: 同位素地球化学。Email: weiyu@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 晏浩, 准聘助理教授; 研究方向: 同位素地球化学。Email: yanhao@nju.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

深层原油痕量甾烷类生物标志物同位素分析方法

马荣, 邵媛媛, 吴应琴*

中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

随着油气勘探向深部推进, 热演化程度逐渐升高, 原油烃源岩中的生物标志化合物由于热改造, 含量逐渐降低, 有些甚至低于检测线, 这给生物标志化合物定量及同位素的精准分析带来了一定的困难。针对此问题, 本文采用沉淀聚合法, 以胆固醇、去氧胆酸、 β -谷固醇为虚拟模板, 丙烯酸) 为功能单体, 偶氮二异丁腈为引发剂, 乙二醇二甲基丙烯酸酯为交联剂, 制备甾烷类分子印迹聚合物 (MIPs) 和空白分子印迹聚合物 (NIP)。采用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线光谱 (XRD)、傅里叶变换红外光谱 (FT-IR) 和比表面积 (BET) 表征聚合物形貌和结构, 并考察其对甾烷类物质的吸附性能。分析结果表明, 甾烷类分子印迹聚合物尺寸均一、分散性好, 是表面密布孔穴的球形纳米颗粒。吸附性能研究结果表明, MIPs 对 5 α -胆甾烷的吸附能力明显强于 NIP, 且三

种 MIPs 相比, 去氧胆酸、 β -谷固醇分子印迹聚合物对 5 α -胆甾烷的吸附强于胆固醇分子印迹聚合物。通过吸附动力学研究发现, MIPs 对 5 α -胆甾烷的吸附过程符合准二级动力学模型, 主要受化学吸附控制; MIPs 和 NIP 的等温吸附符合 Langmuir 等温吸附模型和 Scatchard 模型, 表明 MIPs 对 5 α -胆甾烷具有特异选择性吸附能力, 且吸附过程属于单分子层吸附, 最大吸附量为 0.735 mg/g。表明胆固醇、去氧胆酸、 β -谷固醇三种虚拟分子印迹聚合物均对 5 α -胆甾烷具有较高的分子识别能力及选择性, 完全可以用于深层原油及烃源岩中微量甾烷类生标化合物的富集, 并应用于其定量及同位素的准确分析。

关键词: 甾烷类化合物; 分子印迹聚合物; 吸附性能; 模板分子; 功能单体

第一作者简介: 马荣 (1997-), 硕士研究生; 研究方向: 有机物地球化学。Email: 1712080500@qq.com

*通信作者简介: 吴应琴 (1971-), 教授; 研究方向: 有机地球化学。Email: wuyingqin@163.com

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

从大气观测到地表排放：氧化亚氮同位素技术应用

余龙飞^{*}, 张蓓, 黄媛媛, 牛泽同, 邹楠

清华大学深圳国际研究生院 环境与生态研究院, 深圳 518055

氧化亚氮是一种重要的温室气体, 其全球增温潜势相当于二氧化碳的 265 倍。随着氮肥的大量施用, 农田土壤中氧化亚氮排放日益显著, 驱动大气背景下氧化亚氮浓度的不断增长, 从而影响全球气候变化趋势。然而, 土壤和水体中氧化亚氮的排放过程复杂, 并且涵盖许多生物和化学过程, 给氧化亚氮排放机制的研究以及减排措施的制定带来困难; 比如, 反硝化过程中产生的氧化亚氮可能在排放之前被还原为氮气, 因此反硝化过程速率和氧化亚氮还原比例共同决定其排放通量。同时, 不同生态系统中氧化亚氮的反应底物来源复杂, 给区域乃至全球尺度下氧化亚氮排放源的追溯带来较大的不确定性。近年来, 稳定同位素技术的不断发展进一步推动了氧化亚氮的研究工作, 逐渐成为氮素生物地球化学领域的研究热

点。其中, 氧化亚氮同位素自然丰度手段较同位素示踪方法更有拓展性和广泛适用性, 能够从微观过程、区域定量和全球模拟的不同维度上探究氧化亚氮的排放来源和趋势。基于近年来氧化亚氮同位素观测、分析和应用领域研究进展, 我们将从以下三个方面探讨不同尺度下氧化亚氮同位素应用研究的发展趋势: 1) 氧化亚氮自然丰度的分析技术和进展; 2) 大气背景中氧化亚氮的来源追溯和趋势模拟; 3) 地表氧化亚氮排放过程的研究和思考。未来氧化亚氮同位素自然丰度方法将有巨大的应用前景, 随着国内外科学家的共同努力和不断应用, 将为全球氧化亚氮排放清单编制提供重要理论证据。

关键词: 氮同位素; 氧化亚氮; 温室气体

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

基于介形类载体的柴达木盆地中中新世古水文重建

宋博文^{1,2*}, 张克信^{1,2}, 季军良², 杨一博³, 李祥忠⁴, 徐亚东²

1. 中国地质大学(武汉)自然资源调查研究院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101;

4. 云南大学 地球系统科学研究中心, 昆明 650500

柴达木盆地位于青藏高原东北部, 新生代以来随着高原北部强烈隆升, 盆地发生了剧烈地相对沉降, 巨厚的沉积物记录了亚洲内陆干旱化的演化过程和青藏高原东北部的构造活动历史, 是揭示构造、气候相互作用的典型区域, 是建立青藏高原北部区域性高精度古环境和古气候记录的理想地区。湖相介形类作为重建湖泊古水文变迁历史的关键载体, 在地质历史时期古气候和古地理重建研究中扮演着重要角色, 介形类壳体的地球化学成分与其宿生水体的环境参数之间的关系更是近年来古环境重建, 特别是非海相古环境重建研究中由定性向定量发展的一个重要手段。保存在柴达木盆地大红沟剖面中中新世湖相沉积中的介形类为我们开展柴达木盆地中中新世古气候和古地理重建研究提供了宝贵载体, 取得了以下主要认识: 1) 介形类群落演替显示柴达木古湖在 13.3 Ma

之后, 由先前的喜淡水介形类占优势转变为以喜咸水介形类占绝对优势, 同时介形类群落的分异度显著降低; 2) 介形类壳体碳氧稳定同位素值 ($\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$) 在 13.3 Ma 之后均表现为强烈的正偏, 指示柴达木古湖蒸发作用显著增强, 湖泊封闭性增加, 干旱化明显加剧; 3) 基于介形类壳体锶同位素 (Sr) 和微量元素地球化学分析, 重建了柴达木古湖中中新世时期古湖泊的古水化学特征, 显示柴达木古湖中中新世湖水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值显著低于柴达木盆地现代湖水和河流沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值; 4) 基于特征介形类壳体, 利用碳酸盐岩团簇同位素古温度 (TA_{47}) 重建方法, 重建了柴达木古湖中中新世夏季近表层湖水的温度。

关键词: 介形类; 柴达木盆地; 中中新世; 古水文; 古地理

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

C₇ 轻烃演化过程中的氢同位素分馏效应 及其油气地球化学意义

程斌¹, 邓晗宇², 韦志伟³, 廖泽文^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205;

3. 中国有色桂林矿产地质研究院, 桂林 541004

正庚烷(nC₇)、甲苯(Tol)和甲基环己烷(MCH)是凝析油气藏以及天然气藏中重要的烃类组分, 其组成及其稳定氢同位素分布特征对烃类的母质来源、沉积环境以及次生改造等方面具有重要的指示意义。正丁基环己烷的热模拟实验结果显示, 烃类环化和芳构化形成甲基环己烷、甲苯的过程中涉及到 C-H 键的断裂, 导致反应产物中甲苯富集 2 H 而甲基环己烷亏损 2 H, 但这种富集与亏损程度随热成熟度的增大而逐渐降低。来自塔里木盆地不同地区轻质/凝析油样品中 C₇ 轻烃的氢同位素分析结果显示, 海相、湖相和煤系轻质/凝析油中 $\delta 2\text{HMCH}$ - $\delta 2\text{HTol}$ - $\delta 2\text{HnC}_7$ 分别

呈现深“V”型、浅“V”型和倒“V”型的分布特征, 利用 $\Delta\delta 2\text{HnC}_7\text{-Tol} - \Delta\delta 2\text{HTol-MCH}$ 关系图版可以较好地判识轻质/凝析油的母源沉积相特征。塔中地区晚期天然气的气侵作用导致不同构造带上轻质/凝析油中甲基环己烷和甲苯相对富集 2H, 库车克拉苏构造带东部地区的气体泄露导致轻质/凝析油中 Tol/MCH 比值的显著增大而对氢同位素的分布影响有限, 利用 $\Delta\delta 2\text{HTol-MCH-Tol/MCH}$ 关系图版有助于判识轻质/凝析油藏的气体泄露现象。

关键词: 轻烃; 氢同位素; 油气地球化学

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

TOC 分析仪与稳定同位素质谱仪联用测定低溶解性有机碳含量水体碳同位素组成

张东, 孙瀚林, 陈琳莹, 韩伽骏, 官尚桂, 冯东, 陈多福*

上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306

全球河流输入到海洋的溶解性有机碳 (DOC) 通量为 0.24 Pg·C/y, 海洋 DOC 库为 662 Pg·C。虽然陆地输出 DOC 通量远低于海洋 DOC 库, 但陆地输入 DOC 对于维持海洋初级生产力, 支持海洋生物多样性具有重要作用。 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 组成是研究这一过程的重要手段, 但目前对于低 DOC 浓度水体样品 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 测试存在一定困难, 表现在: DOC 浓度低于 5 mg·C/L 水体样品, 高温燃烧 TOC 分析仪难以准确量化空白的影响, 影响其 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 测定。为解决低 DOC 浓度水体样品 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 测试存在的问题, 选择湿氧化 TOC 分析仪 (OI Analyzer Aurora 1030W, DOC 浓度检测限可以到 10 $\mu\text{g}\cdot\text{C}/\text{L}$), 产生的 CO_2 气体, 通过 Gasbench II 多用途气体制取装置与稳定同位素质谱仪 (Delta V Advantage) 联用, 建立稳定可靠的低 DOC 浓度水体样品 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 测试方法。结

果表明: ① 磷酸是仪器背景 DOC 的主要来源, 纯水以及过硫酸钠氧化剂对于背景 DOC 贡献不大; ② 进样体积为 6 ml 时, 可以准确获取 DOC 含量不低于 3 μg 的水体样品 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 组成, 精度优于 0.2‰; ③ 通过降低定量环体积, 可以提高仪器空白 CO_2 同位素信号强度以及测试精度。研究表明, 湿氧化 TOC 分析仪可以检测低浓度 DOC 水体样品, 将产生的 CO_2 气体, 导入稳定同位素质谱仪, 可以实现低浓度 DOC 水体样品的 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 值测定。该联用技术可以实现低 DOC 浓度的海水、孔隙水、大气降水以及河水样品 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 测定, 为借助 $\delta^{13}\text{C}$ -DOC 技术研究海洋碳循环以及流域碳循环提供可靠支撑。

关键词: 溶解性有机碳; 碳同位素; 湿氧化 TOC 分析仪; 稳定同位素质谱仪; 联用技术

基金项目: 上海市自然科学面上项目 (24ZR1428900); 国家自然科学基金项目 (42073009)

第一作者简介: 张东 (1978-), 教授; 研究方向: 环境地球化学。Email: d-zhang@shou.edu.cn

*通信作者简介: 陈多福 (1962-), 教授; 研究方向: 海洋地质与海洋化学。Email: dfchen@shou.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

准噶尔盆地中拐地区油气藏成因及成藏过程

韩杨, 吴涛, 白雨, 何文军*, 蒋文龙, 高增浩

新疆油田勘探开发研究院, 新疆克拉玛依市 834000

准噶尔盆地中拐凸起向盆内延伸倾末端发育三大鼻凸构造带, 其周缘地区发现了多个油气藏, 其中, 南鼻凸带佳木河组天然气气藏勘探开发效果好。整体来看, 中拐凸起存在正常黑油、凝析油气、干气共存、油气呈现复杂分布的现象, 黑油、凝析油和天然气之间的关系、成因以及油气充注成藏过程尚不清晰。本文以中佳地区油气藏为解剖实例, 通过对油气藏中原油、凝析油和天然气同位素、生物标志化合物等地球化学特征的深入分析研究, 结合油气藏构造背景、源储背景与试油成果, 探讨中拐地区油气成因、油气藏充注成藏过程及地质地球化学控制因素。结果表明, 中拐凸起具有双源供烃背景, 原油均具有较高 β -胡萝卜素含量, 为典型 P1f 来源特征, 而上部天然气干

燥系数普遍大于 0.95、碳同位素均重于-25‰, 为典型的 P1j 来源; 中拐凸起的下倾方向风城组烃源岩埋深超过 6000 m, Ro 多高于 1.3%, 晚白垩世进入规模生气门限, 具备凝析油-天然气近源成藏优势; 历史上, 中拐凸起经历三个成藏期: ①早侏罗世, 风城组成熟油在古凸构造高部位成藏; ②早白垩世, 佳木河组干气与早期油藏混合气洗, 在两翼鼻凸区油气并存; ③晚白垩世, 深部风城组凝析油气在鼻凸带近源持续充注, 形成高成熟凝析油气藏。该结果为中拐凸起及其周缘地区晚古生界油气勘探部署提供指导。

关键词: 油气成因; 地球化学; 成藏过程; 中拐凸起; 准噶尔盆地

基金项目: 中石油股份公司科技专项—中石油“十四五”油气资源评价 (2023YQX201)

第一作者简介: 韩杨 (1994—), 男, 硕士研究生; 研究方向: 油气资源评价和油气成藏。Email: hanyang123@petrochina.com.cn

*通信作者简介: 何文军 (1988—), 男, 博士研究生; 研究方向: 油气资源评价和油气勘探。Email: fchwj@petrochina.com.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

吸附作用导致过成熟煤型气呈负碳同位素序列 ——以鄂尔多斯盆地庆阳气田为例

孟强*, 吴晓明, 肖宇, 刘鹂宇, 窦鲁星, 文志刚

长江大学 资源与环境学院, 武汉 430199

烷烃碳同位素序列是鉴别有机成因气和无机成因气的首要标志, 负碳同位素序列 (即 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_4$) 是无机成因气的典型特征。鄂尔多斯盆地西南部的庆阳气田部分气样呈负碳同位素序列, 但其不具备发育无机成因气的地质条件, 对该现象目前尚无合理解释。本研究立足地质背景, 通过天然气地球化学特征、高阶煤的吸附/解吸实验等综合研究了庆阳气田天然气烷烃碳同位素序列异常的原因。研究表明: (1) 庆阳气田天然气为来自石炭-二叠系的过成熟煤成气, 其负碳同位素序列主要与煤岩对气体的吸附作用有关, 过成熟阶段时, 重烃气体 (C^{2+}) 含量非常低, 而煤岩对重烃气体 (C^{2+}) 的吸附性强于甲烷, 具有轻碳同位素的乙烷等重烃气体 (C^{2+})

会优先解吸, 使得其具有较轻的碳同位素组成; 甲烷因含量高, 吸附对其同位素组成影响较小。(2) 过成熟煤型气地球化学特征异常导致以碳同位素序列反序判定无机成因气指标失效, 也使以 $\delta^{13}\text{C}_2 = -28\text{‰}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3 = -25\text{‰}$ 为界划分油型气、煤型气的指标失效; 同时, 使前人提出的 $\delta^{13}\text{C}_2\text{-Ro}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_3\text{-Ro}$ 经验公式不适用于过成熟天然气; 再次, 前人提出的 $\delta^{13}\text{C}_2\text{-}\delta^2\text{H}_1$ 图版判断母质类型时偏离煤型气范围, 图版失效。(3) 甲烷碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_1$) 和气体干燥系数 ($\text{C}_1/\text{C}_{1-5}$) 是指示源岩成熟度的可靠指标。

关键词: 吸附作用; 有机成因天然气; 煤成气; 负碳同位素序列; 庆阳气田

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

塔里木盆地北部油藏伴生气富氦机制与来源

陶小晚

中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

塔里木盆地塔北中西部原油伴生气中氦气含量高。英买 2 奥陶系油藏、英买 46 井区白垩系油藏、英买 32 寒武系-志留系潜山油藏、顺北 5 走滑断裂带北段奥陶系油藏原油伴生气中氦气含量分别为 0.116%~0.146%、0.100%~0.218%、0.126%~0.325%、0.074%~0.151%。塔北中西部主要发育三类有效氦源岩: 一是早寒武世玉尔吐斯组富 U 黑色泥页岩-硅质岩, 大面积广覆式分布, 厚度 30~160 m, U 和 Th 平均含量分别为 77.54×10^{-6} 和 4.99×10^{-6} ; 二是早二叠世酸性火成岩, 以马纳火成岩体为代表, U 和 Th 平均含量分别为 3.43×10^{-6} 和 16.13×10^{-6} ; 三是古元古代哥伦比亚超大陆基底和新元古代阿克苏群蓝片岩共同组成的前寒武纪变质基底, 前者 U 和 Th 含量分别为 0.46×10^{-6} ~ 1.10×10^{-6} 和 0.88×10^{-6} ~ 1.35×10^{-6} , 后者 U 和 Th 含量分别为 1.90×10^{-6} ~ 2.90×10^{-6} 和 $9.31 \times$

10^{-6} ~ 16.05×10^{-6} 。综合地质研究表明, 英买 2 奥陶系油藏与顺北 5 走滑断裂带北段奥陶系油藏原油伴生气中氦气主要源自早寒武世玉尔吐斯组黑色页岩, 前寒武纪基底产生的氦气存在一定贡献; 英买 46 井区白垩系油藏中氦气来源于早二叠世马纳火成岩体; 英买 32 寒武系-志留系潜山油藏中氦气来源于前寒武纪基底与玉尔吐斯组黑色页岩的共同贡献。紧邻前寒武纪基底、发育深大断裂且存在断裂晚期活动的油气藏, 早寒武世玉尔吐斯组黑色页岩早期生油阶段形成的低气油比油藏, 早二叠世规模酸性岩体之上的油藏是塔里木盆地北部未来寻找富氦油气藏的三种主要类型。

关键词: 氦气; 氦源岩; 玉尔吐斯组黑色页岩; 早二叠世花岗岩; 前寒武纪基底

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

青藏高原常见淡水螺类壳体地球化学及其环境意义

陈锋

山西财经大学 资源环境学院, 太原 030006

腹足类淡水软体动物萝卜螺、旋螺的壳体化石广泛存在于青藏高原湿地、湖泊沉积物及河湖相沉积地层中。这些生物碳酸盐文石壳体是一种具有潜在价值的环境变化信息记录载体,但是它们的生境及其壳体地球化学指标(如 Sr/Ca、Mg/Ca、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$)的环境指示意义尚未明确。课题组调查了青藏高原河流、湿地和湖泊中现生萝卜螺及其常见种和旋螺优势种(凸旋螺),以及纳木错等全新世湖相沉积物中的萝卜螺和凸旋螺壳体化石,测试了现代和化石壳体的 Sr/Ca、Mg/Ca、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值。结果表明,青藏高原常见淡水螺类宿生水体的水化学组成和电导率显著影响了其存活率和丰度。其环境耐受程度排序为:碳酸盐型>硫酸盐型>氯化物型。同时,建立了现代萝卜螺及其常见种和凸旋螺壳体与其宿生水体之间的

地球化学关系,并据此建立了萝卜螺—水化学转换函数和旋螺—水化学转换函数。为了评估它们重建古环境的潜力,进一步将这些转换函数应用于纳木错等全新世湖泊沉积物剖面中,研究揭示萝卜螺及其常见种和凸旋螺的 Sr/Ca 值是重建古水体 Sr/Ca 值和古电导率的可靠指标,其 Mg/Ca 值则不能用于环境重建。另外,萝卜螺及其常见种和凸旋螺的 $\delta^{18}\text{O}$ 能够反映其宿生水体的 $\delta^{18}\text{O}$,其 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了其宿生水体的 $\delta^{13}\text{CDIC}$ 。总之,萝卜螺和旋螺是极有潜力的和高分辨率的环境信息记录载体,具有重要的科学研究价值和广泛的应用前景。

关键词: 青藏高原; 湖泊; 腹足类动物; 碳酸盐壳体地球化学; 环境变化

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

利用 ESI-Orbitrap-MS 技术开发纳摩尔级甲磺酸的 叁氧同位素测试方法

洪一航, SHOHEI HATTORI*

南京大学 地球科学与工程学院 国际同位素效应研究中心, 南京 210023

二甲基硫 (DMS, CH_3SCH_3) 被氧化为硫酸盐 (SO_4^{2-}) 和甲磺酸 (MSA, CH_3SO_3^-) 是大气硫循环的关键过程, 尤其在偏远海洋地区。叁氧同位素组成 ($\Delta^{17}\text{O}$) ——即对质量依赖线性关系 $\delta^{17}\text{O} \approx 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$ 的偏离 (定义为 $\Delta^{17}\text{O} \approx \delta^{17}\text{O} - 0.52 \times \delta^{18}\text{O}$) ——是追溯大气中含氧物种形成机制的重要工具。然而, 传统同位素比值质谱法 (IRMS) 由于需要微摩尔量级的样品量且分析步骤复杂, 尚未被用于测量自然样品中 MSA 的同位素组成。本研究基于电喷雾-静电场轨道阱质谱 (ESI-Orbitrap-MS), 开发了一种测定甲磺酸 $\Delta^{17}\text{O}$ 的新方法。考虑直接对 CH_3SO_3^- 离子进行 $\Delta^{17}\text{O}$ 测定时, 需采用较高的质量分辨率以区别 ^{13}C 和 ^{17}O 同位素体, 使得相较

低分辨率设置, 通常会增加测试结果的不确定性。因此, 本研究通过碎片化方法分离 $-\text{CH}_3$ 基团, 对 MSA 衍生的 SO_3^- 离子碎片进行同位素测试, 从而消除了 ^{13}C 峰对 ^{17}O 峰的干扰, 使得 $\Delta^{17}\text{O}$ 测试可以在较低分辨率下开展。采用三点校准法将本研究的 ESI-Orbitrap-MS 与传统 IRMS 测试结果进行对比, 结果显示 $\Delta^{17}\text{O}$ 值的回归标准偏差小于 1%。总体而言, 该新分析方法较以往手段更为直接且灵敏, 为追溯大气 DMS 氧化化学过程提供了更多天然大气及冰芯样品的分析可行性。

关键词: ESI-Orbitrap-MS; 叁氧同位素; 碎片化方法; 甲磺酸;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (W2441015, 42494851, 42473011)

第一作者简介: 洪一航 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 同位素地球化学。Email: yihang.hong@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: SHOHEI HATTORI (1984-), 教授; 研究方向: 大气、冰芯和生物地球化学。Email: hattori@nju.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

利用 13.6 亿年的未蚀变灰岩的团簇同位素确定 中元古界海水的氧同位素

李平平^{1*}, 郝芳², 贺世杰¹, 柴浩博¹, 焦勇飞¹, 高雅宣¹, 邹华耀¹

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580

显生宙以来的海水的氧同位素组成得到了广泛的研究, 但是前寒武的海水氧同位素研究相对较少。至于前寒武的海水的氧同位素是否比显生宙的海水氧同位素显著偏负尚有争议。本次基于中国华北克拉通中元古代下马岭组灰岩样品的团簇同位素, 确定了中元代的海水温度和氧同位素。本次采集的灰岩结核和叠层石灰岩的方解石为极细粒级别(晶粒大小分别为 25 μm 和 15 μm), 无阴极发光, 没有发生显著的蚀变作用; 双团簇同位素(Δ_{47} 和 Δ_{48})的关系表明灰岩样品达到了团簇同位素的平衡; 经同层系页岩的等效镜质体反射率(0.5%)约束的灰岩样品的最大埋藏温度在 80~90°C 范围, 表明灰岩没有发生固态重置作用。经下马岭组灰岩样品的团簇同位素温度

($T-\Delta_{47}$) 确定矿物的初始形成温度或海水温度为 23.3 $\pm$ 1.3°C~ 28.4 $\pm$ 1.8°C (平均 26.9 $\pm$ 0.4°C), 与前人建立的温度演化模型吻合。结合传统氧同位素温度计, 获得中元代的海水氧同位素为 -6.3‰ $\pm$ 0.2‰ (SMOW), 这与前人利用地球化学模拟、海相的铁氧化物等得出的海水氧同位素组成相似。我们的研究证实了元古代的海水比显生宙以来的海水氧同位素为显著偏负的特点, 为乏味的中元古代地球气候环境和海水组成提供了新的约束。

关键词: 海水的氧同位素组成; 灰岩; 团簇同位素; 中元古界; 下马岭组

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

磷酸酸解碳酸钙过程中叁氧同位素的动力学分馏效应

刘飞翔, 曹晓斌*

南京大学 地球科学与工程学院国际同位素效应研究中心, 南京 210023

碳酸盐岩中的叁氧同位素组成 ($\Delta^{17}\text{O}$) 是重建古环境的地球化学指标之一, 在对湿度、温度、水文循环和成岩历史等的重建过程中发挥重要作用。高精度 $\Delta^{17}\text{O}$ 测量对于进行这些应用至关重要, 通过磷酸酸解碳酸盐提取二氧化碳再进行 $\Delta^{17}\text{O}$ 测量是一种常见的做法。然而, 由于该过程有 1/3 的氧原子留在酸解产生的水中, 相应过程的动力学同位素分馏系数, 即 $^{18}\alpha$ 和 θ ($\equiv \ln^{17}\alpha/\ln^{18}\alpha$), 对于准确地将测量到的 $\Delta^{17}\text{O}$ 转换为相关碳酸盐样品的 $\Delta^{17}\text{O}$ 结果至关重要。值得注意的是, 尽管理论预测和实验观测到的 $^{18}\alpha$ 值一致, 理论预测的 θ (0.528) 与实验观测到的 θ (0.523) 之间存在显著差异。我们认为这种差异源于理论计算中没有充分考虑过量磷酸分子包围碳酸分子所引起的溶剂化效应, 并采用量子力学计算来验证这一假设。

计算过程中, 我们使用多达 12 个磷酸分子和 1 个碳酸分子组成的分子簇模型来模拟碳酸分解过程中被磷酸分子包围的反应环境。结果表明, 当分子簇中含有 12 个磷酸分子时, 该分子簇可以充分模拟由磷酸引起的溶剂化效应。在碳酸分解的反应路径上, 我们确定了两个过渡态和一个中间态, 这与之前提出的磷酸环境下的碳酸分解反应机制不同。这种反应机制的差异对于确定实际的动力学同位素分馏值至关重要。我们的最终计算结果显示, 在 25°C 下, $^{18}\alpha$ 和 θ 的计算值分别为 0.9890 ± 0.0008 (2SE) 和 0.5233 ± 0.0008 (2SE), 与实验结果一致。

关键词: 碳酸盐; 叁氧同位素; 动力学分馏; 理论计算

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42173002)

第一作者简介: 刘飞翔 (1996-), 博士研究生; 研究方向: 计算地球化学。Email: liufeixiang@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 曹晓斌 (1985-), 教授; 研究方向: 同位素地球化学。Email: xiaobincao@nju.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

准噶尔盆地西部坳陷和丰地区天然气来源及混合比例探究

项威, 蒋文龙*

新疆油田 勘探开发研究院, 新疆维吾尔自治区克拉玛依市 834000

准噶尔盆地西部坳陷地区发育有玛湖凹陷以及盆 1 井西凹陷等富烃凹陷, 围绕在富烃凹陷周缘的鼻凸构造带展现出巨大的勘探潜力。本次研究区域和丰地区位于达巴松凸起, 是准噶尔盆地天然气勘探的重要领域。天然气碳同位素分析结果表明石炭系天然气为干气, 同位素重, 指示天然气为高-过成熟石炭系来源, 而三叠系气藏所采集的天然气为混源气, 成熟度较高, 偏干气, 乙烷、丙烷同位素偏轻, 具有二叠系来源特征, 存在同位素倒转, 表明为混源气, 部分甲烷同位素偏重, 可能存在石炭系混源, 且不同井天然气石炭系混源比例存在差

异。此外, 该区三叠系气藏中所采集的天然气乙烷与丙烷碳同位素值之间具良好线性关系, 表明其成藏过程中两类源岩供烃稳定。为更好衡量二叠系与石炭系源岩生烃量的差异性, 采用典型石炭系与二叠系烷烃碳同位素值作为端元值, 依据三叠系混源天然气烷烃碳同位素值结果, 利用最小二乘法计算不同来源天然气的混合比例, 以期日后和丰地区天然气勘探提供理论依据。

关键词: 西部坳陷; 天然气比例; 混源气; 碳同位素

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“中石油‘十四五’油气资源评价”(2023YQX201)

第一作者简介: 项威(1998-), 助理工程师; 研究方向: 油气地球化学。Email: 2568243323@qq.com

*通信作者简介: 蒋文龙(1987-), 高级工程师; 研究方向: 油气地球化学。Email: jwl@petrochina.com.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

渝东南复杂构造区常压页岩气地球化学特征研究

吴陈君

长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100

气体地球化学特征是研究复杂构造区页岩气逸散-保存的有效指示参数。本研究通过渝东南复杂构造区不同压力体系下页岩气烷烃气体、稀有气体组成及同位素特征的测试分析, 查明研究区烃类气组分和 C、H 同位素随构造条件变化规律, 揭示稀有气体特征随构造条件、压力系数的动态变化规律, 揭示气体地球化学特征对常压页岩气逸散-保存的指示意义。有以下几点进展: 1) 查明了研究区生产井气体组分、碳同位素、氢同位素特征, 揭示了盆内背斜-斜坡构造区与盆外向斜区气体地球化学特征差异及控制因素, 盆内背斜-斜坡构造区页岩气碳同位素分布差异大, 受埋深和生产阶段的双

重控制, 盆外向斜区由于受构造逸散, 整体偏重; 2) 稀有气体地球化学研究揭示了龙马溪组页岩气稀有气体为典型壳源成因, 盆外构造区氦含量较高但总量有限, 受构造抬升作用影响导致烃类气逸散程度更高, 持续生成的氦和氩受烃类气的稀释程度更低, 因此相对含量更高; 3) 完善了气体地球化学特征对区域上页岩气逸散-保存的指标体系, 建立了复杂构造区盆内-盆外页岩气富集条件的气体地球化学评价方法。

关键词: 富集规律; 常压页岩气; 气体地球化学特征; 渝东南地区

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

陆生蜗牛：陆地季节-天气尺度气候变化的记录者

董吉宝^{*}, 晏宏, 宗秀兰, 王国桢, 刘成程

中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

陆生蜗牛分布广泛, 对气候变化敏感, 尤其是对降水和温度。前人研究认为, 蜗牛壳的氧同位素($\delta^{18}\text{O}_s$)主要记录了蜗牛体液水的信息, 而蜗牛体液水 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{bw}}$) 最终来源于降水的 $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}_p$)。为验证这一推论, 我们对 2021 年整个生长季蜗牛体液水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{bw}}$ 开展了高分辨率(每两天采集一个样本)的研究, 并且对此期间采集的非成年蜗牛壳进行了壳内(毫米尺度) $\delta^{18}\text{O}_s$ 分析。结果显示, $\delta^{18}\text{O}_{\text{bw}}$ 的变化良好地记录了实测 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的变化, 而且, 在季节时间尺度上高分辨率蜗牛壳体 $\delta^{18}\text{O}_s$ 也与根据 $\delta^{18}\text{O}_p$ 和温度理论计算的 $\delta^{18}\text{O}_s$ 表现出一致的变化。这表明 $\delta^{18}\text{O}_p$ 主导了季节尺

度蜗牛体液水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{bw}}$ 和壳体 $\delta^{18}\text{O}_s$ 的变化。此外, 我们还利用二次离子质谱仪(SIMS)进一步开展了超高分辨率(微尺度)的壳内 $\delta^{18}\text{O}_s$ 研究。结果表明, $\delta^{18}\text{O}_s$ 可以示踪天-周尺度 $\delta^{18}\text{O}_p$ 的波动。值得注意的是, 壳内 $\delta^{18}\text{O}_s$ 甚至记录下了 2021 年郑州“千年一遇”的超大暴雨事件。总得来说, 本研究证实了 $\delta^{18}\text{O}_s$ 可以作为季节-天气尺度气候变化的代用指标, 有望用于揭示不同气候背景下陆地古天气变化。

关键词: 陆生蜗牛; 季节-天气尺度; 古天气; 高分辨气候变化; 壳内氧同位素

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

碳同位素在玄武岩碳封存研究中的应用现状及问题讨论

胥旺¹, 王晓光¹, 郑国东^{2,3*}, 马向贤³, 李中平³

1. 天府永兴实验室 碳汇与地质固碳研究部, 成都 610299;

2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

CO₂ 地质封存是目前国际公认的重要“碳中和”途径之一。其中, 玄武岩碳矿化技术具有安全性高、稳定性好和封存量大的优点, 是一种极具应用潜力的地质封存技术。该技术的关键是将 CO₂ 快速转化成稳定的碳酸盐矿物。因此, 认识 CO₂ 注入后的矿物转化效果和封存状况至关重要。碳同位素作为示踪地球化学过程的常用手段, 目前已被有效应用于玄武岩碳矿化过程和气体泄漏监测。本文通过总结碳同位素在玄武岩碳封存中的应用现状, 分析了其在示踪 CO₂ 迁移、转化及封存效果方面的优势与局限性, 并探讨了现存技术难题及未来改进方向。在玄武岩碳矿化方面, 可以分别基于气体和矿物中碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)特征, 识别流体和岩石是否发生了化学反应。在美国 Wallula 玄武岩碳封存示范项目中, 注入层采集的流体样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 发生偏移, 指示发生了流体-岩石反应。此外, 取芯样品中生成的结核(铁白云石) $\delta^{13}\text{C}$ 值与玄武岩中原位碳酸盐有显著区别, 而与新注入 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相近, 证明注入 CO₂ 发生了碳酸盐化反应。然而, CO₂ 气体注入含水的玄武岩地层后, 碳同位素的变化特征受到多种因素的影响。这些因素包括 CO₂ 与玄武岩的反应、在玄武岩中的溶解与扩散、以及可能存在的生物或化学过程等。因此, 在评估 CO₂ 地

质封存项目的碳同位素变化特征时, 需要综合考虑这些因素的作用。在气体泄漏检查方面, 可以采用放射性同位素 ¹⁴C 示踪注入 CO₂ 的动向和演化。由于深层地下水的天然碳同位素不含 ¹⁴C, 且 ¹⁴C 是一种反应性示踪剂, 因此其与地下水中碳的比例会因碳酸盐矿物的溶解和沉淀而变化, 可以通过质谱法测量储层流体和岩石样品的同位素组成来监测和验证。同时, 使用非反应性和反应性示踪剂的多示踪剂方法, 通过检查不同示踪剂之间的比例变化来分离物理和地球化学过程。混合分数将由保守的示踪剂定义, 而碳酸盐溶解或沉淀反应将由地下水和沉淀碳酸盐中测量的 ¹⁴C/C 值表征。在冰岛 Carbfix 玄武岩碳封存示范项目中, 基于以上方法, 计算出超过 95% 的 CO₂ 在不到两年时间内被完全矿化。碳同位素示踪技术的精准度直接影响封存评估的可靠性, 当前面临采样代表性不足、同位素分馏机制复杂等挑战。未来需优化采样策略, 深化分馏机理研究, 并结合多手段同位素监测, 以提升封存效果评估的全面性和准确性, 从而推动玄武岩碳封存技术的广泛应用, 为实现碳中和目标提供有力支持。

关键词: 碳同位素; 玄武岩; 碳矿化; 同位素分馏; 示踪剂

基金项目: 四川省自然科学基金青年基金项目(2024NSFSC0797); 天府永兴实验室有组织科研项目资助(2023CXXM25)

第一作者简介: 胥旺(1990-), 助理研究员; 研究方向: 元素地球化学。Email: 1571637453@qq.com

*通信作者简介: 郑国东(1961-), 研究员; 研究方向: 气体地球化。Email: gdzhibj@mail.igcas.ac.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

瑞金-寻乌断裂带温泉地球化学特征及与地震活动性关系

鲍志诚^{1,2}, 郑国东^{1*}, 欧晓斌², 欧阳澍培²

1. 中国地质大学(武汉)地下水与健康教育部重点实验室, 武汉 430074;

2. 江西省地震局 江西地震台, 南昌 330026

活动断裂带或者断层既是地下流体逸出的通道, 也是地震孕育和发生的主要场所。在地震孕育和活动过程中, 由于应力应变作用的改变, 导致地壳浅表层地下水和气体以及土壤等介质中的化学元素和同位素发生复杂的时间与空间变化, 即地震流体地球化学异常。近年来, 有记载的地球化学异常数量也在快速增加, 流体地球化学异常与地震活动在时空上的关联性进一步被证实, 从而成为地震预测研究的重要发展新方向, 并得到全世界地震工作者的普遍重视。邵武-河源断裂带的中段寻乌-瑞金断裂属于东南沿海地震带其区域地热背景值偏高且地热活动强烈、地震活动水平也较高。为了探索该断裂带的温泉地球化学特征及其对地震活动性的指示作用, 2020 年 12 月~2022 年 6 月间的野外考察中采集了 11 个温泉逸出气体样品和地下水样品, 对其化学组分、气体组分、稳定同位素和氦、氡与碳同位素的测试分析结果显示: (1) 寻乌-瑞金断裂带内温泉水主要有四大类型, 包括 Ca-Na-HCO_3 、

Na-HCO_3 、 Ca-HCO_3 和 Na-Cl 型; 除河角温泉达到部分平衡外, 其他温泉地热水的水-岩反应均未达到平衡, 这些温泉地热水的来源主要是大气降水。(2) 聚类分析和主成分分析结果显示, 烧湖里、楂山里、河角和九寨温泉具有相似的地球化学成因过程, 武阳和吊神排温泉则属于另外类似的地球化学成因过程。(3) 断裂带内的温泉气体主要来自于地壳, 幔源氦有从北向南呈现增加的趋势。除河角、龙门温泉以 CO_2 为主要组分外, 其他温泉都以 N_2 为主要组分, 其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分别是 -6.9‰ 和 -5.8‰ (vs. PDB), 应该为幔源无机成因。 N_2 型温泉气主要来源于大气, 并有壳源气体的贡献。(4) 寻乌-瑞金断裂带与区域地震活动性的对比分析结果表明, 寻乌-瑞金断裂带内深部流体上涌相对强烈的区域, 其深部流体对区域地震活动性具有重要的指示意义。

关键词: 寻乌-瑞金断裂; 温泉; 同位素; 地球化学特征; 地震活动性

基金项目: 开放基金项目 (SDGD202215)

第一作者简介: 鲍志诚 (1985-), 副研究员; 研究方向: 流体地球化学。Email: flag.bao@cug.edu.cn

*通信作者简介: 郑国东 (1961-), 研究员; 研究方向: 气体地球化学。Email: gdzhhbj@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

微量月壤样品分段加热脱气气体化学组成分析

李立武*, 王先彬, 赵莉, 曹春辉, 范桥辉, 李中平

中国科学院西北生态环境资源研究院 油气资源研究中心, 兰州 730000

月壤中的气体主要源于月球内部、太阳风、太阳高能粒子、宇宙射线、核反应、地球风或拾取粒子等等。对比研究月壤和地球外层大气中氮、氧、氩、碳和氢等气体元素及其同位素的比例, 月球表面稀薄大气化学组成, 对于探索太阳-地球-月球气体元素来源及其耦合关系具有重要意义。采用高真空分段加热脱气, 离子阱质谱和氦离子化检测气相色谱联合分析方法, 对毫克细粒岩石样品实施了分段加热脱气和脱出气体的化学组成分析。加热温度从 150~950℃。获得了各温度段 H₂、O₂、Ar、N₂、CH₄、CO、CO₂ 和 H₂O 等气体的含量数据。总的脱出气体量由多到少排列顺序为: CO > H₂ > CO₂ > CH₄ > N₂ > H₂O > O₂ > Ar。CO 和 H₂ 的释气高峰在 750℃, CO₂ 和 CH₄ 的释气高峰在 550℃。总的脱出气体中还原性成分 CO + H₂ + CH₄ 含量为 1.63 mL STP/g, 氧化性成分 CO₂ 含量为 0.33 mL STP/g, H₂O 含量为 0.053 mL STP/g。研究表明, 加热释放的气体以还原性成分为主, 挥发性元素以 C 和 H 为主, 分段加热气体释放模式类似于还原性地幔源橄榄石的释气模式。通过加热真空石英容器中细粒岩石样品到 950℃可收集的水量与新闻报道数据 (51 kg/t) 接近。分段加热脱气获得的气体化学组成数据, 不等于原位气体化学组成数据, 还涉及化学反应等诸多因素。分段加热水在高温或高真空状态下表现为气相, 可以用质谱观测, 是原位水还是太阳风氢与

矿物氧反应产生水则需研究。月壤加热脱气获得的水和氧气等气体组分的数据可以为未来月球基地建设提供参考。但是, 地表有~105 Pa 大气压, 而月球表面处于超高真空状态, 气压~10⁻⁹ Pa, 在地表对月壤加热脱气获得的数据能否在月表再现还需要验证。高温下石英通常不与月壤脱出的气体发生化学反应, 所以采用石英作为样品管材料, 但高温下石英具有较高的渗透率, 加热过程中气体可能在样品管内外之间渗透, 渗透量与加热温度、加热时间、样品管厚度、样品管表面积和内外气体分压等有关。尽管开展了空白样品测试, 在数据处理过程中按相应温度从样品脱出气体中减去了空白, 但仍然存在疑虑。加热样品脱出的气体改变了样品管内气体分压, 从而改变了渗透量, 不同气体分子之间、气体与月壤之间、气体与样品管之间甚至月壤与样品管之间可能存在化学反应。上述问题需要通过模拟实验和计算来解析, 如: ①采用双真空样品管, 模拟月表真空环境开展样品加热脱气气体化学组成分析, ②建立气体通过样品管的渗透/扩散计算方法, ③研究气体在高温稀薄状态下的化学反应。设气体浓度不随角度变化, 推导气体在样品管内外交换和样品加热脱气的扩散方程可分别表示为, 和扩散系数 D 与气体种类和温度有关。

关键词: 月壤; 分段加热; 原位气体; 水; 太阳风

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

地幔矿物气体包裹体同位素分析技术研究

李中平

中国科学院西北生态环境资源研究院 油气资源研究中心, 兰州 730000

地幔矿物气体包裹体同位素分析技术的研究具有重要的科学意义和广泛的应用前景。通过对地幔矿物中气体包裹体的同位素组成进行精确分析,可以揭示地球内部物质循环、流体迁移路径以及地质历史时期的物理化学条件。这种技术为理解地幔动力学、板块构造运动及其对资源形成的控制作用提供了直接证据。此外,气体包裹体中的稀有气体同位素特征(如氦、氩等)能够指示深部流体来源及演化过程,帮助科学家识别不同深度来源的流体混合情况,这对于研究火山活动、地震预测及能源资源勘探至关重要。该技术还能用于探究古气候变迁与环境演变,通过分析不同时期地幔矿物中保存的气体成分变化,提供地球系统长期变化的重要线索。因此,发展高效、准确的地幔矿物气体包裹体同位素分析技术不仅推动了地球科学基础理论的发展,也为解决实际问题提供了强有力的技术支持。高温热爆裂法作为传统流体包裹体分析的手段。该技术通过加压加热促使包裹体爆裂释放气体,但实际应用中面临三方面显著限制:①包裹体尺寸与抗压强度关系:在深源岩石中,小尺寸包裹体占比高达 70%,实验数据显示石英中 35 μm 包裹体爆裂压力为 850 atm。微小尺寸气体包裹体抗压强度可达 1200 atm,例如:橄榄石微包裹体更能在 1200 $^{\circ}\text{C}$

下承受 5000~7000 atm 高压。这种尺寸效应直接导致小包裹体难以通过常规热爆裂法有效释放气体;②包裹体含有机质,热分解过程会产生 CH_4 、 CO_2 等次生气体。实验表明,当温度超过 600 $^{\circ}\text{C}$ 时,有机质裂解产物可使气体组分偏差达 40%,严重干扰原生气体组成分析;③高温环境下,同位素与围岩发生交换反应的速率提升数倍,特别是在含铁镁质矿物的体系中,同位素分馏明显,这对精准重建原始同位素组成构成根本性挑战。本研究提出的微腔体高能振动球磨-差异溶解联用技术为深源矿物气体包裹体分析提供了新思路,解决样品中微量气体包裹体提取面临的挑战,并研究不同实验条件下微量气体或挥发性物质的释放特性。结合气相色谱-同位素比质谱技术(GC-IRMS),实现了对气体包裹体(如 CH_4 、 C_2H_6 等)的快速同位素分析。初步结果表明,这种方法能够有效释放岩石矿物中的微量气体。该技术的优势在于处理速度快、所需样品量少(1~10 g)。预研究显示,此方法具有样品用量少、灵敏度高、无污染等优点。

关键词: 气体包裹体; 气体地球化学; 气体同位素; 地幔矿物

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

鄂尔多斯盆地上古生界灰岩层系天然气地球化学特征及其来源

张雯¹, 刘文汇^{1*}, 王晓锋¹, 罗厚勇², 刘鹏³, 张东东¹, 张倩²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

2. 陕西科技大学 化学与化工学院, 西安 710021;

3. 西安科技大学 安全科学与工程, 西安 710054

近年来, 鄂尔多斯盆地二叠系太原组灰岩中天然气备受关注, 也成为天然气勘探的重要领域。但对于太原组灰岩层中天然气的成因及分布, 特别是这套含一定有机质的灰岩的生烃能力, 能否成为有效气源岩的研究相对薄弱。本文通过对上古生界太原组灰岩天然气的组分和碳同位素分析, 首次获得天然气丙烷特位同位素结果, 与相应层系煤型气及下古生界碳酸盐岩层系油型气进行对比。发现上古生界太原组灰岩天然气明显区别于下古生界盐下层系“自生自储”型油型气, 意味着两者无明显成因来源的相关性, 结果不支持下古生界碳酸盐岩层系规模聚集的天然气源自上古生界灰岩烃源的可能性。上古生界太原组灰岩天然气与上古生界典型煤型气高度一致。除常规天然

气地球化学特征一致外, 丙烷特位同位素 Δ_{C-T} 值分布范围小, 且大于 0, 明显显示出源于 III 型干酪根, 丙烷主要通过 $n-C_3H_7$ 自由基途径生成的特征。作为对比研究, 对太原组灰岩展开总有机碳测定、干酪根碳同位素及有机显微组分等烃源岩地球化学分析, 结合天然气地球化学分析, 认为太原组灰岩有机质丰度偏低, 有机质类型较好, 干酪根类型主要为 II-III 型, 处于成熟末期-高成熟演化阶段, 虽具备一定的生烃潜力, 但与石炭-二叠煤系烃源岩生烃能力相差较远, 目前未见规模生烃, 更不足以为下古生界供烃。

关键词: 太原组; 天然气; 丙烷特定位置同位素; 地球化学; 鄂尔多斯盆地

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41930426, U1663201); 国家自然科学基金面上项目 (41972134, 42172173); 中国石油长庆油田分公司重大科技专项 (ZDZX2021-03)

第一作者简介: 张雯 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 石油与天然气地球化学。Email: wenwenMMA@163.com

*通信作者简介: 刘文汇 (1957-), 特聘教授; 研究方向: 天然气地质学及油气地球化学。Email: whliu@nwnu.edu.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

挥发过程中轻烃氢同位素逆向分馏的主控因素 及油气成因指示意义

刘文娜, 贾望鲁*

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510000

有机化合物挥发过程中的同位素分馏是稳定同位素研究领域的关键问题之一, 轻烃的氢同位素是近年来原油成因研究的热点。我们开展了单个化合物、烷烃混合物和轻质油三种体系的挥发实验, 结合 C 同位素分析了 H 同位素分馏机制及其影响因素, 并为原油成因的研究提供参考。研究表明, 轻烃 H 同位素变化表现为“逆向分馏”的特征, 这与 C 同位素的分馏方向相反; 同位素的分馏程度受挥发体系、化合物分子量及其结构的影响: 1) H、C 同位素分馏程度大小依次为轻质油>烷烃混合物>单个化合物体系, 这种差异与挥发基质的不饱和度有关。2) 对于结构相似的轻烃, 由于样品池的缓冲作用, H 同位素分馏程度随分子量的增加而增加, 而 C 同位素呈现

的规律相反。3) 对于相同碳数的轻烃, 甲基环己烷具有比其它 C₇ 化合物表现出更慢的挥发速率, H 同位素分馏程度差异不明显。H 同位素独特的分馏特征使其在地质应用中独具优越性: 结合同一化合物的 H 和 C 同位素组成与常用的轻烃参数能够区分原油的蒸发过程, 热成熟和生物降解作用; C₇ 轻烃之间 H 同位素组成的差值 ($\Delta\delta D_{nC7-Tol}$ 和 $\Delta\delta D_{Tol-MCH}$) 可能受到挥发的影响, 但挥发引起的变化幅度远小于来源差异引起的变化。因此, H、C 同位素联合应用在油源定性方面具有很大的潜力。

关键词: 轻烃; 氢同位素; 逆向分馏; 碳同位素; 正向分馏

基金项目: 国家自然科学基金 (42125304, 42173057)

第一作者简介: 刘文娜 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 油气地球化学。Email: 1796775708@qq.com

*通信作者简介: 贾望鲁 (1976-), 研究员; 研究方向: 有机与油气地球化学。Email: wljia@gig.ac.cn

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

页岩气和煤层气中氦资源潜力及富集机制

马勇

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102200

工业氦提取主要依赖含氦/富氦天然气藏, 评价大规模非常规储层中氦含量及壳源主导成因机制, 对拓展战略资源供给具有重要意义。基于全球 450 个含氦页岩气和煤层气样品地球化学特征分析表明, 页岩气中氦含量为 $6 \times 10^{-8} \sim 0.0114$ (平均为 0.057%), 煤层气中氦含量为 $5 \times 10^{-7} \sim 0.0228$ (平均值 0.115%), 超过 24% 的非常规天然气样品中的氦含量达到 0.05%。氦同位素组成 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 (0.002~0.930, 平均值 0.071) 证实壳源放射性衰变为主要氦源。U、Th 含量及放射性衰变模拟计算表明, 富氦页岩气中 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值与同期源岩累积值高度吻合, 且富氦区普遍缺乏深部幔源流体通道, 表明页岩气中的氦主要来自页岩源内富 U、Th 矿物放射性衰变, 氦气强吸

附能力和页岩气藏中低氦浓度共同构成氦气高效保存的关键机制。煤层气氦含量显著高于源内生成潜力 ($< 120 \times 10^{-6}$), 主要依赖基底岩石的放射性衰变补给。生氦潜力、储层渗透性和水动力作用是导致页岩气和煤层气中氦气富集机制差异的主要原因。U 含量在 10×10^{-6} 以上且具有一定含气量 ($> 1 \text{ m}^3/\text{t}$) 的石炭纪之前古老页岩, 以及成藏年代较新且基底具备充足壳、幔源氦供给的煤层是富氦非常规天然气富集的有利区带。中国中—上扬子地区寒武系页岩和鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤层是富氦资源潜力区。

关键词: 氦气; 页岩气; 煤层气; 富氦非常规天然气; 富集成藏机制

• 专题 25: 气体同位素地球化学示踪技术——从微观到宏观的地球化学探索 •

地震流体地球化学研究进展

李莹*, 陈志, 周晓成, 胡乐, Zhaofei Liu, 路畅, 杜建国

中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

地震预测是仍未解决的世界性难题。流体地球化学是地震预测的潜在手段之一,近年来得到了较为广泛的认可与运用。地震的孕育和发生过程始终伴随着地下物质运移、能量传输和条件改变,从而导致流体中元素和同位素的迁移与演化,进而形成地表可观测到的流体地球化学异常。活动断裂带是地震多发区,同时也是深部流体运移和释放的有利通道。活动断裂带流体的地球化学特征对地壳应力、温压条件和渗透率的变化极其敏感,可以作为指示构造或地震活动的良好指标。流体地球化学与断裂活动的密切关系使得流体地球化学

不仅在地震预报中发挥着重要作用,也是解释地震过程中物质来源、能量交换和条件变化的有效手段。此外,新的地球化学分析技术的迅速发展,使其在研究地震前兆机理和地震物理过程中发挥越来越重要的作用。本文在综述近年来流体地球化学在地震预测领域研究进展的基础上,结合自身团队的研究结果和认识,提出未来地震地球化学研究的发展方向。

关键词: 地震; 地震流体; 流体地球化学异常; 地震预测

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

微量样品 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 联合分离流程

储著银*, 杨岳衡, 杨蔚, 彭澎

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

建立了一种多柱联合从月球玄武岩等珍贵样品中快速分离出 U、Pb、Rb、Sr、Sm、Nd、Lu、Hf 等元素的方法, 应用于 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 等同位素分析, 并预留 Ca、Ba、Fe-Mg-Cr-Ti-K 等元素供金属稳定同位素分析。样品加 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf 稀释剂后, 采用 HF-HNO₃ 溶解并转化为溶于 1.1 M HBr 的样品溶液后, 首先采用微型阴离子交换柱(0.1 mL Eichrom 1-X8 树脂, 200~400 目; 柱内径~3 mm)分离 Pb 与其它元素; Pb 一般需要进行二次过柱纯化。第二步采用小型化阳离子交换柱(0.25 mL AG50W-X12 树脂, 200~400 目; 柱内径 4 mm)将样品元素分离为三组: (1) Fe、Mg、Cr、Ti、K 等主量元素及 U、Hf 等元素; (2) Rb, 可供质谱测定; (3) Sr、Ca、Ba、REE 等元素。第三步采用 Sr 特效柱(0.5 mL Sr 树脂, 100~150 微米; 柱内径~6.4 mm)分离 Sr、Ba、Ca-REE; Sr 可供 TIMS

测定; Ba 预留。第四步采用 P507 树脂柱(1.7 mL 树脂, 粒径~100~150 μ m; 柱内径~7.4 mm)分离 Ca、Sm、Nd、Lu; Sm、Lu 可分别供 TIMS 与 MC-ICP-MS 测定; Ca 预留; 由于采用 TIMS NdO₂ 法测定 Nd 同位素, Nd 进一步采用 TODGA 柱(1 mL 50-100 μ m 树脂; 柱内径 7.4 mm)分离 Pr-Nd。第五步采用 TODGA 柱(1 mL 50-100 μ m 树脂; 柱内径 7.4 mm)分离 Fe-Mg-Cr-Ti-K 等主元素、U 和 Hf; U、Hf 可供 MC-ICP-MS 测定; Fe-Mg-Cr-Ti-K 等主元素预留。所建立流程具有分离速度快, 流程本底低的特点。通过对 USGS BHVO-2(称样量~3 mg)进行 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd 及 Lu-Hf 同位素分析, 验证了分离流程的有效性。

关键词: 化学分离流程; Rb-Sr、Sm-Nd、Lu-Hf、U-Pb; 微量样品; 同位素分析

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

金红石微区原位 U-Pb 定年时鉴别其同质异象矿物的 重要意义及方法

张永清^{1*}, 周红英^{1,2}, 耿建珍^{1,2}, 涂家润^{1,2}, 毕君辉^{1,2}, 李国占^{1,2}

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170

近年来, 国内外对金红石展开了大量的在方法上与锆石类似的微区原位 U-Pb 同位素定年研究。进行单矿物微区原位 U-Pb 定年时首先要明确用于定年的矿物。在进行金红石(TiO_2)微区原位 U-Pb 定年时, 主要依据电子探针数据, 结合阴极发光图像确定为金红石。然而金红石不同于其他如锆石、独居石等定年矿物, 金红石与锐钛矿、板钛矿为 TiO_2 的同质异象矿物, 化学成分均为 TiO_2 , 电子探针数据并不能有效区分; 本文作者在进行 TiO_2 同质异象矿物的研究中发现, 除具有典型晶型特征的金红石、锐钛矿和板钛矿颗粒, 大部分矿物颗粒其阴极发光图像并无明显区别; 因此, U-Pb 定年时常用的电子探针数据及阴极发光图像并不能有效区分三者。金红石、锐钛

矿和板钛矿形成环境、温度、压力等均不同, 代表了不同的地质环境, 如果研究样品中同时存在三种或者其中两种矿物, 得到的年龄将是混合年龄, 其指示的地质意义值得商榷。因此, 快速准确地鉴别金红石及其同质异象矿物非常重要。作者将激光拉曼光谱应用于 TiO_2 同质异象矿物的鉴别中, 快速准确的鉴别 TiO_2 同质异象矿物, 同时可识别出矿物之间发生的相变, 为金红石 U-Pb 定年时矿物的鉴别提供了新思路, 进而为提高金红石 U-Pb 定年数据准确性提供基础保障。

关键词: U-Pb 定年; 金红石; 同质异象矿物; 鉴别

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

微区原位橄榄石 Fe-Mg 同位素参考物质研制

曾显丽, 李明*, 张文*

中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

橄榄石作为重要造岩矿物, 其 Fe-Mg 稳定同位素特征为揭示关键地质过程提供了重要示踪依据。激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)原位分析技术虽能有效解析橄榄石生长环带同位素分异特征, 但基体匹配标准物质的缺失长期制约该技术的发展。本研究创新性结合超细粉末制备与固相烧结技术, 成功研制适用于 Fe-Mg 同位素分析的橄榄石标准物质 CUG-OL-Ar。通过物相表征证实合成样品完整保持了原始化学组成, 其激光剥蚀行为稳定, 信号曲线平滑。方差分析(ANOVA)表明不同批次样品 Fe-Mg 同位素组成均一性良好($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}} = 0.00\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$, $\delta^{25}\text{Mg}_{\text{DSM-3}} = 0.00\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, 2SD,

$n=350$)。基于溶液法 MC-ICP-MS 系统定值, 并依据 ISO GUIDE (2017) 规范计算不确定度, 最终标定 CUG-OL-Ar 的 $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$ 和 $\delta^{25}\text{Mg}_{\text{DSM-3}}$ 值分别为 $0.00\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD), $0.00\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$ (2SD)。通过将该标准物质作为外标进行多类型样品 Fe-Mg 同位素 LA-MC-ICP-MS 分析验证, 测试结果与推荐值高度吻合, 充分证明 CUG-OL-Ar 的均一性与稳定性。本研究为矿物微区同位素分析提供了关键标准物质支撑, 对深化岩浆演化与地幔过程研究具有重要意义。

关键词: 橄榄石; 参考物质; 微区分析; 铁-镁同位素

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2019YFA0708401)

第一作者简介: 曾显丽 (1996-), 博士研究生; 研究方向: 微区原位同位素方法开发。Email: Zengxianli5678@outlook.com

*通信作者简介: 李明 (1982-), 高级工程师; 研究方向: 金属稳定同位素分析方法开发 Email: liming19820426@163.com

*通信作者简介: 张文 (1985-), 副研究员; 研究方向: 微区原位等离子体质谱新技术和新方法开发研究。Email: tuyaken@hotmail.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

O-PTIR 揭示沉积有机质化学官能团结构和分布非均质性

王瑞林^{*}, 高和婷, 陈思钰, 徐镓, 李济远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

原油热裂解是超深层非常规油气成藏与勘探的关键科学问题。在自然界中, 石油和周围环境的复杂成分、变化的温度和时间(T-T)以及复杂的地质演化历史使揭示石油裂解的热演化机制变得具有挑战性。其中, T-T 是控制有机质热演化的两个最重要的因素。温度不仅控制裂化反应速率, 还决定反应途径和产物。随着 T-T 的增加, 热演化的程度不断加深, 导致碳氢化合物歧化。低热稳定性烃类经历 C-S、C-O 和 C-C 键的裂解, 产生小分子烃(C1-C5)。同时, 沥青质和多环芳烃(PAHs)等热稳定化合物会发生脱甲基和环化反应, 形成可以保存在储层中的固体沥青。本研究创新性应用亚微米分辨率光学光热红外光谱(O-PTIR)技术, 首次实现了轻质油热解过程中有机质官能团组成及化学非均质性的原位动态解析。实验结果表明, 随热成熟度(EasyRo)升高, 残油组分呈现显著演化规律: 饱和烃占比持续下降, 芳烃组分逐渐主导。非烃与沥青质含量在 EasyRo=1.5%~1.8%区间达到峰值后回落, 而多环芳烃(PAHs)环数从低成熟度(EasyRo=1.81%)的 2 环结构演变为高成熟度(EasyRo=2.40%)的 4-5 环稠合形式。O-PTIR 光谱特征显示, 脂肪族结构(C-H, 1450-1350 cm^{-1})与芳香

族 C=C(1600 cm^{-1})振动强度随成熟度增加呈负相关, 证实了脂肪族向芳香化结构的转化机制。同时, C=O(1720 cm^{-1})与 C-S(1250 cm^{-1})振动的阶段性富集揭示了脱甲基化与环化反应的分子路径差异。

微观形貌分析表明, 固体沥青含量随成熟度升高从 12%增至 35%, 其结构由松散粉状(EasyRo=1.2%)逐渐致密化为碎片状(EasyRo=2.40%)。化学非均质性在 EasyRo=2.40%时达到峰值, 表现为脂肪族化合物呈脉状穿插于芳香基质中。Pseudo-van Krevelen 分析计算不同官能团参数比, 表征含氧量、饱芳比和分支比。以此进一步量化了演化路径: 早期(EasyRo<1.5%)含氧官能团分解导致 C 因子降低, 中期(EasyRo=1.5%~2.0%)脂肪链裂解引发 A 因子下降, 而 B 因子的剧烈波动揭示了多环芳烃缩合与杂原子重排的协同作用。参数对比和 Pseudo-van Krevelen 分析进一步表明, 原油热裂解过程中残留的有机物不是均匀的, 而是区域性的。在微观尺度上理解这些分子和化学非均质性对于阐明超深轻质油的迁移、分馏和转化过程至关重要。

关键词: O-PTIR; 原油热裂解; 固体沥青

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

水中溶解性 He 同位素组成及含量测定

张建锋, 刘汉彬*, 李军杰, 张佳, 金贵善, 韩娟, 石晓

核工业北京地质研究院 稳定及稀有气体同位素研究室, 北京 100029

氦气在军工、航天、核工业、医学、低温科学等高科技领域具有广泛应用, 是一种关系国家安全和高新技术发展的稀缺战略资源。水中溶解性 He 在核电、地热、地震监测、地球化学示踪及环境指示中具有重要作用, 为此开展了水中溶解性 He 同位素组成及含量测定研究工作。实验方法流程包括以下几个步骤: 样品采集及预处理: 样品采集包括空气饱和水制备以及待分析水样品采集, 两种水均封存于经过真空退火处理的无氧铜管内。在配备压力计的恒温箱内向装满三级纯度水的玻璃水槽内通过膜片泵连续泵入空气, 使水中溶解气体与空气充分交换达到平衡, 并密封至铜管内, 完成空气饱和水样品制备。对于水样品的采集则需根据水体环境选择相应的取样方式, 将纯水样品封存于铜管内, 称量装满水样的铜管质量。本底测量: 在铜管样品释放前, 按照样品释放、干燥、纯化、分离提取流程, 测量全流程本底, ^4He 全流程本底应低于 $1.0 \times 10^{-15} \text{ mol}$ 。

样品溶解性 He 提取、纯化、同位素组成测试: 全流程本底满足要求后, 在真空条件下将铜管样品压开并充分释放, 水蒸气和分离出的溶解 He 气通过不锈钢毛细管进入气体纯化系统。气体经玻璃冷阱和充

填分子筛的不锈钢冷阱冷冻后, 再经过充填分子筛的干燥器进行干燥。用低温冷泵冷冻除 He 以外的其他气体, 将稀有气体同位素质谱仪调至 He 同位素测试参数, 分别用法拉第杯和电子倍增器对 ^4He 和 ^3He 进行同时接收。将 He 气扩散至稀有气体同位素质谱仪, 进行 He 同位素组成测定, 获得样品中 ^4He 和 ^3He 的离子流强度。将释放水的铜管拆离系统, 充分烘干后称量采样铜管的质量, 从而确定所分析样品水的质量。每件样品测试完成后, 按相同分析流程对空气饱和水和水中溶解性 He 同位素离子流强度进行测定。数据处理及精密度: 空气中 He 同位素值与空气饱和水中溶解 He 的同位素值相比较得到质量歧视校正因子。测量的水中溶解性 He 同位素比值需经质量歧视校正因子修正。水中溶解性 He 含量通过空气饱和水的质量、He 含量、离子流强度值以及样品的质量、样品离子流强度值计算获得。空气饱和水中 He 同位素及含量平行测量 5 次, 同位素测试精密度优于 0.6%, 含量测试精密度优于 1%。

关键词: 氦同位素; 氦含量; 稀有气体;

基金项目: 核能开发项目“塔里木盆地砂岩铀矿元素-同位素地球化学预测方法研究”(测 HTLM2101-06)

第一作者简介: 张建锋 (1978-), 正高级工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hdyzjf@163.com

*通信作者简介: 刘汉彬 (1969-), 正高级工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hanbinliu@sina.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

不同比值的锂同位素标准物质研制初步研究

程原原¹, 宋盼淑², 金章东¹, 任同祥², 李峥岩¹, 邓丽¹, 贺茂勇^{1*}

1. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国计量科学研究院, 北京 100029

标准物质是建立化学测量量值溯源体系的必要手段, 是分析测试中质量控制的重要环节, 是检测结果准确的基本保证, 同时也是国家中长期科学和技术发展规划的重要内容之一。锂 (Li) 同位素作为“非传统稳定同位素”家族成员, 近年来已经成为同位素地球化学热门领域和前沿之一。锂同位素标准物质是保证测量结果准确性的基础, 加上上世纪八十年代, 锂同位素在核方面的重要性, 其研制受到国际社会的重视。目前, 国际上通用的 Li 同位素标准参考物质有两种, 一种是美国国家标准局 (NIST) 提供的高纯碳酸锂样品 L-SVEC, 另一种是欧共体核测量中心局 (CBNM) 研制的 IRMM-016 (纯碳酸锂)。在过去较长时间里, 国际实验室采用的 Li 同位素标准主要是以上 2 种, 且同位素值单一。随着高精度同位素测定仪器的发展、测试方法的提高、研究领域的拓展, 在实验室检测过程中, 发现单一同位素标准物质已经不能满足实际测定需求。本申请拟采用同位素稀释法, 将购置于青海盐湖集团的 Li_2CO_3 作为基础样品源, 高浓缩的富含 ^6Li 的 LiCl 以及 ^7Li 的 Li_2CO_3 作

为稀释剂。首先对上述稀释剂进行溶解浓缩, 通过使用 ICP-MS、ICP-OES 对上述溶液进行测试, 判断其化学纯度以及浓度, 通过使用 MC-ICP-MS 对上述标准物质溶液进行锂同位素丰度比测试, 确定其同位素组成。在上述基础上制定不同同位素比值范围标准溶液配制方法, 包括正值 (约 38‰~42‰)、零值 (约 -2‰~+2‰)、负值 (约 -38‰~-42‰)。上述标准溶液配制完成后, 充分混合均匀并分装至提前洗净的高密度聚乙烯小瓶中, 每种同位素比值溶液分装 1000 瓶, 每瓶 5 mL, 浓度 1000×10^{-6} , 使用 2% 硝酸介质。按照标准物质研制的流程和方法, 目前正在对不同比值的锂同位素样品均一性、长期稳定性进行分析。并联合国内外知名实验室进行比对, 目前已经收到部分测试结果, 下一步争取完成定值分析并评价不确定度, 达到国家标准物质研制要求, 并向国家标准物质中心提交标准物质申请, 争取未来成为国家标准物质。

关键词: 锂同位素; 标准物质; 标准值; 研制; 定值

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42403030, 42173023); 黄土科学全国重点实验室开放课题 (SKLLQGPY2410); 中国科学院兰州区域中心开发技术创新项目 (LZ2024g104)

第一作者简介: 程原原 (1989-), 助理工程师; 研究方向: 同位素地球化学。Email: chengyy@ieecas.cn

*通信作者简介: 贺茂勇 (1979-), 研究员; 研究方向: 同位素地球化学。Email: hemy@ieecas.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于带间级联激光器技术检测二氯乙烷和氯化钠中氯同位素丰度

朱地^{1*}, 金彪¹, 史哲², 谢灵²

1. 南京大学 能源与资源学院, 江苏 苏州 215163;

2. 苏州冠德能源科技有限公司 仪器研发部, 江苏 苏州 215163

本文采用带间级联激光器作为光源, 空心波导管作为气体吸收池, 配合中红外探测器等配件, 制作出用于检测 HCl 气体氯同位素比值 ($\delta^{37}\text{Cl}$) 的光谱仪。光谱仪检测 HCl 气体氯同位素值偏差不超过 1 permil, 稳定性较好; 光谱仪配合加氢炉和色谱仪, 检测二氯乙烷中氯同位素, 经测试, 二氯乙烷样品的检测浓度极限约 2 g/L; 光谱仪配合自制反应容器, 将 NaCl 与浓硫酸在

反应容器中反应生成 HCl 气体, 再由光谱仪进行检测, 经检测, 两组 NaCl 样品中, 第一组样品稳定性较差, 说明仪器存在 HCl 气体吸附问题, 第二组数据稳定性较好, 相对标准偏差仅 0.139。

关键词: 带间级联激光; 空心波导管; 氯代烃; 氯同位素

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

碱性岩中石榴石激光微区 U-Pb 定年与 Sm-Nd 同位素分析

杨岳衡^{1*}, 吴福元¹, Roger H. Mitchell², 赵晗¹, 吴石头¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

2. Lakehead University, Thunder Bay, ON P7B 5E1, Canada 888888

碱性岩通常与战略性关键金属（锆、钪、铌、稀土等）矿产资源密切相关，含钛钙铁榴石（Ti-bearing andradite）是硅不饱和火成岩中的常见矿物与特征矿物，如碱性正长岩、霞石正长岩、响岩、霞石岩、黄长岩等常见含钛钙铁榴石。此外，与硅不饱和碱性岩浆相关的热液蚀变系统或矽卡岩中也多见含钛钙铁榴石。通常根据钛含量（1%~20%）高低不同，含钛钙铁榴石分别称之为黑榴石（Melanite）、钛榴石（Schorlomite）、钙钛榴石（Morimotoite）。开展含钛石榴石的研究可以反映岩浆的二氧化硅浓度与氧逸度，其富集锆、钪、铌、稀土和铀等高场强元素特征来研究岩浆的分离结晶，较高铀钍含量和较低的普通铅组成，其铀铅年龄为不饱和岩石的侵位时代及地球化学演化提

供制约。本工作中，我们建立了含钛钙铁榴石激光微区 U-Pb 和 Sm-Nd 同位素分析方法，在研发石榴石 U-Pb 定年与 Sm-Nd 同位素分析微区标准物质的基础上，对来自加拿大 Prairie Lake 和 Ice River、美国 Magnet Cove、瑞典 Alnö、挪威 Fen、俄罗斯 Ozernaya 和 Ural、中国紫金山、矾山与水泉沟、摩洛哥 Tamazert、意大利 San Ieo、德国 Kaiserstuhl、瑞士 Schaffhausen 等 14 个典型碱性岩中的石榴石样品，开展了主微量测试、U-Pb 定年和 Sm-Nd 同位素分析。我们的工作对碱性杂岩相关的成矿年代学与同位素地球化学研究具有重要意义。

关键词：碱性岩；石榴子石；U-Pb 定年；Sm-Nd 同位素；激光微区

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

七种玻璃标样 (OJY-1、OH-1、OA-1、CGSG-1、CGSG-2、CGSG-4 和 CGSG-5) 的锂和硼同位素比值: 用于原位 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 分析的新标样

李建辉, 吴石头*, 杨岳衡

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

锂和硼同位素地球化学广泛应用于地球科学领域。锂和硼同位素比值的原位微区分析需要基质匹配的标样来进行仪器分馏校准、方法验证和实验室间数据比较。在本研究中, 我们对七种玻璃标样 OJY-1、OH-1、OA-1、CGSG-1、CGSG-2、CGSG-4 和 CGSG-5 的 Li 和 B 同位素比 ($\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$) 进行了详细表征。通过对不同颗粒的 LA-MC-ICP-MS ($n = 80\sim 100$) 和 SIMS ($n = 8\sim 12$) 多点分析, 发现这在 $10\sim 120\ \mu\text{m}$ 空间分辨率下七个标样的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值均一。这些标样的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 的 2SD 在 $0.4\text{‰}\sim 1.5\text{‰}$ 之间。 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 的推荐值是用溶液 MC-ICP-MS 技术获得。来自多家独

立实验室的数据偏差在 $\sim 1.50\text{‰}$ 以内。7 个玻璃中 Li 和 B 的含量变化比较大从 $\sim 40\ \mu\text{g/g}$ 到 $2000\ \mu\text{g/g}$ 和 $\sim 40\ \mu\text{g/g}$ 到 $5000\ \mu\text{g/g}$ 。7 个玻璃的 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值也各不相同。 $\delta^7\text{Li}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$ 值的范围分别为 $+0.99\text{‰}\sim +5.69\text{‰}$ 和 $-10.92\text{‰}\sim +0.25\text{‰}$ 。值得注意的是, OA-1 和 OH-1 是高硅玻璃 ($\text{SiO}_2 > 75\%$), 有助于研究高度演化岩浆岩的锂和硼同位素地球化学。本次研究的 7 个玻璃标样可作为现有锂和硼同位素比值标样的重要补充。

关键词: 锂同位素地球化学; 硼同位素地球化学; 玻璃标准物质; LA-MC-ICP-MS; 原位微量分析

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42273034); 中国科学院青年创新促进会项目 (2020068, 2022066)

中国科学院地质与地球物理研究所重点研究项目 (IGG-CAS-2-21-1 和 IGG-CAS-202204); 中国科学院战略先导科技专项 (B 类) (XDB0710000); 意大利 MUR PRIN2022 (2022CX5AK9; 简称 AWARE)

第一作者简介: 李建辉 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 分析地球化学。Email: lijianhui23@mailsucas.ac.cn

*通信作者简介: 吴石头 (1987-), 高级工程师; 研究方向: 分析地球化学。Email: shitou.wu@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

含铀副矿物 ID-TIMS U-Pb 定年关键问题及思考

涂家润*, 周红英, 耿建珍, 李国占

中国地质调查局天津地质调查中心 (华北地质科技创新中心), 天津 300170

同位素稀释-热电离质谱 (ID-TIMS) U-Pb 定年技术具有高精度高准确度、无需矿物标样校正的优点, 在精细地层年代学、矿物标样研制等研究中具有重要作用。该方法通常先分选出单矿物, 再用酸溶解后通过离子交换柱来分离提纯 U 和 Pb, 最后混合磷酸-硅胶后转移到金属铯灯丝上进行热电离质谱测定。与微区原位 U-Pb 定年技术 (激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法、二次离子质谱法) 相比, ID-TIMS 虽然化学前处理流程复杂, 较为费时费力, 但是具有单点测定精度较高, 可测定的矿物年龄范围较广, 并且无需基体匹配的矿物标样校正的优点, 避免了寻找和制备理想矿物标样的困难。自 1973 年 Krogh 开发了高温高压下采用 HF 溶解锆石的技术以来, ID-TIMS 在 U-Pb 年代学领域取得了一系列重要进展。该方法结合空气磨蚀或化学溶蚀的矿物预处理技术, 能有效克服颗粒表面乃至内部 Pb 丢失的影响, 所得年龄更为谐和, 可实现单颗粒锆石 U-Pb 年龄测

定。2003 年, 国际上地质年代学组织地时 (Earthtime) 成立, 加速了 ID-TIMS 高精度 U-Pb 定年技术发展进程。近些年, 随着超净实验室 Pb 流程本底的下降以及 Earthtime 稀释剂的应用, ID-TIMS 锆石 U-Pb 定年精度可达 0.1 %, 已成为生物演化、地层划分和对比以及与其他定年标尺相互校正等研究的重要工具。ID-TIMS 是一种不可替代的具有测量绝对量的方法, 所有矿物微区原位 U-Pb 定年标样的参考年龄必须由 ID-TIMS 测定。本实验室在颗粒锆石 ID-TIMS U-Pb 定年的基础上, 发展了锡石、金红石、铀矿、氟碳铈矿、铌铁矿、独居石、磷灰石等含铀副矿物 ID-TIMS U-Pb 定年技术, 极大地拓展了 ID-TIMS U-Pb 定年技术的使用范围, 为诸多副矿物微区原位 U-Pb 定年标样研发提供了重要技术支撑。

关键词: ID-TIMS; 稀释剂; 标样; 高精度; U-Pb 定年

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

非接触式亚微米分辨红外拉曼联用系统在非常规油气研究中的应用

朱光有*, 陈思钰, 贾凡琛, 张杰志

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

对小分子烃类微观赋存特征的精准解析和有机质分子结构的定量研究, 对非常规油气(如页岩气、致密油、煤岩气等)的勘探与开发具有重要意义。传统表征技术受限于分辨率不足或单一尺度的观测, 难以全面揭示复杂孔隙网络和干酪根原位生排烃过程。本研究引入国际前沿的非接触式亚微米分辨红外拉曼联用系统(O-PTIR), 该技术作为一种快速、简单的非接触式光学方法, 突破了传统红外光谱的衍射极限。O-PTIR 通过检测样品表面因本征红外吸收引发的快速的光热膨胀或收缩信号, 解决了传统红外与拉曼光谱的诸多技术难题。结合高温高压热模拟装置, 该系统可以原位、连续地揭示等效温压场页岩生排烃过程中干酪根裂解、油气生成和显微组分演化的分子结构及空间分布差异。页岩生油过程的解析需依托对热演化过程中有机质微观化学结构与物理性质差异的分析。然而, 有机质的演化过程受母质来源的化学分子结构影响, 这导致在页岩沉积有机物呈现非均质性。长江大学地球科学学院新引进了一台非接触式亚微米分辨红外拉曼光谱显微联用系统, 可同步实现原位红外、拉曼和荧光光谱分析。其红外成像功能可对页岩样品进行亚微米级区域性官能团特征信号扫描, 精准识别轻质烃、重质烃及固体沥青等大分子有机质

的非均质性化学结构。页岩固体有机质通过范德华力、 π - π 堆积和氢键等多种非共价键作用力形成有机孔吸附保存小分子可动烃。而有机质类型、演化阶段和烃类组成等因素显著影响烃类吸附过程。通过热模拟实验制备梯度成熟度页岩样品, 结合干酪根提取残余烃类后进行原油吸附解吸实验, 可量化不同成熟度和多类干酪根对原油的吸附量和吸附种类, 并结合 O-PTIR 技术揭示烃类在页岩有机质中的赋存状态。

随着成熟度增加, 沉积有机质和可动烃的分子组成均会发生显著变化。基于 O-PTIR 的红外、拉曼和荧光同步原位分析, 可统计不同演化阶段显微组分的官能团组成差异, 计算成熟度相关性参数, 进而从分子化学层面评估显微组分的生烃潜力和生烃量。此外, 新型微区 X 射线荧光光谱分析仪通过高分辨率元素扫描(分辨率 $<10\ \mu\text{m}$)可对厘米级岩心中的矿物精细定性和定量评价, 实现全元素检测分析, 获取矿物的详细组成信息; 结合激光共聚焦显微分析系统与 O-PTIR 技术, 可展开多尺度储层的原位流体赋存状态研究。

关键词: O-PTIR; 非常规油气; 页岩; 煤岩气

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

全二维气相色谱-飞行时间质谱技术在非常规油气资源分析中的应用

李济远

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

GC-MS 技术一直是石油化工领域对样品定性定量研究的重要手段, 而近年来 GCxGC-MS 技术凭借其超高分辨率在该领域大放异彩。本研究通过测试一些地区的非常规油气样品, 探究其地球化学参数, 深入研究该技术在非常规油气资源分析中的可行性。将样品分为: 饱和烃、芳烃、杂原子化合物三类, 又对藿烷、甾烷、萜烷等标志性生物标志化合物进行定量研究, 得以对样品进行成熟度分析, 还原其生烃演

化史, 并指导非常规油气开发。前人的研究已经证明在处理饱和烃和芳烃时, 使用的试剂应该是正己烷(分析纯)和二氯甲烷(分析纯), 双色谱柱温差在 35℃ 附近, 调制器温度为 208℃; 色谱图中可见各族组分呈不同区块分布, 代表不同极性化合物, 横向上为不同碳数的变化

关键词: 全二维; 非常规; 地化参数

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

铁基矿物-重金属作用微界面的原位表征与机制解析

欧阳磊

中国地质大学(武汉)材料与化学学院, 武汉 430074

铁基矿物与重金属的界面行为显著影响其在环境中的迁移转化及归趋, 但传统表征手段难以实现固-液微界面反应的原位动态监测及分子机制解析。本研究采用原位表面增强拉曼光谱技术, 针对典型铁基矿物(如水铁矿、赤铁矿)与重金属(如 As、Sb)的界面作用过程, 实时追踪矿物表面晶相结构演变及重金属形态转化的协同机制。结果表明, 基于核壳隔绝的表面增强拉曼光谱可同步获取矿物羟基化表面重构、重金属吸附/氧化还原产物特征峰变化等关键信息, 揭示 Fe-O 键重组与重金属配位模式的动态耦合规律。相较于传统离线表征, 该方法

突破了非原位分析的时空分辨率局限, 可实现界面反应动力学与分子机制的关联解析。研究证实, 铁基矿物表面活性位点对重金属的络合能力及氧化还原效率受矿物晶面取向与局部微环境的调控, 为精准预测重金属环境行为及开发基于矿物界面调控的污染修复技术提供了理论依据。本工作凸显了原位表面增强拉曼光谱在多参数同步分析中的独特优势, 为复杂环境界面过程的原位解析与精准调控奠定了方法学基础。

关键词: 铁矿物; 重金属; 拉曼光谱; 原位表征

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

NH_4HF_2 消解-氨水共沉淀法准确测定地质样品中 Ag

何焘^{*}, 胡兆初

中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

银是一种强有力的地球化学示踪剂, 在各种地质过程中发挥重要作用(例如, 热液矿床的形成和地球及火星地幔的演化)。地质样品中含有大量的铅、铌和钇, 在 ICP-MS 分析过程中会造成严重的多原子干扰, 阻碍了这些样品中超微量银的测定。本文描述了一种简单快速的氨共沉淀方法, 经过 NH_4HF_2 消化后去除干扰元素(Zr、Nb 和 Y), 以通过同位素稀释 ICP-MS (ID-ICP-MS) 测定地质材料中的银。在掺杂实验中, 当向含有 1 ng/g Ag 和 10 $\mu\text{g/g}$ Zr、1 $\mu\text{g/g}$ Nb 或 1 $\mu\text{g/g}$ Y 的初始溶液中添加 4 ml 的 5% m/m 氨水时, Zr、Nb 和 Y 的去除率达到了 90%~100%。即使去除了 90% 的 Zr、Nb 和 Y, 来自上清液中残留干扰

元素的严重多原子干扰在银测量中仍然被观察到。通过在氨共沉淀之前向初始溶液中添加 10~10000 $\mu\text{g/g}$ 的基体元素(Si、Mg、Al、Fe 和 Ca), 消除了由残留 Zr、Nb 和 Y 引起的干扰。由于样品溶液中基体元素的质量分数较高(>10 $\mu\text{g/g}$), 因此对地质材料不需要额外添加基体元素。与内标法相比, 同位素稀释避免了在氨共沉淀过程中银的回收不完全造成数据结果的不准确。方法定量限为 1.38 ng/g。九种国际地质参考材料中银的测量结果与通过 ID-ICP-MS 和 ICP-MS/MS 获得的数据一致。

关键词: 银; 氨水共沉淀; 同位素稀释; 地质样品

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

明矾石 LA-MC-ICP-MS 测试方法研究及参考标样研制

高晓伟, 侯可军*

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100830

明矾石作为高硫化浅成低温热液矿床蚀变岩帽中常见的富硫矿物,其硫同位素组成通常为探索矿床的成因和成矿过程提供了宝贵信息。因此,明矾石硫同位素的测试分析至关重要。硫同位素微区分析具有快速、高空间分辨率、高精度等优点,本研究基于 LA-MC-ICP-MS 对影响实验准确性的基体效应、干扰扣除和仪器参数进行评估,建立了一种明矾石微区硫同位素分析方法。并研制一种用

于原位硫同位素分析的天然明矾石参考标样(MTS-1)。LA-MC-ICP-MS 测试结果表明,MTS-1 硫同位素组成均匀,IRMS 推荐值为 $3.42‰ \pm 0.31‰$,是 LA-MC-ICP-MS 硫同位素测量的合适参考物质。

关键词: 明矾石; LA-MC-ICP-MS; 标准参考物质; S 同位素

第一作者简介:高晓伟,研究生;研究方向:地质工程。

*通信作者简介:侯可军,研究员;研究方向:同位素地球化学、分析地球化学。

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于微孔压电超声雾化高效进样的元素、同位素灵敏 分析方法开发及地学与生命健康应用

朱振利

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 武汉 430074

元素及同位素地球化学研究地球演化、环境变迁以及生命健康的关键手段。相关领域的发展对超痕量元素、珍贵微量样品(如生物体液、纳米颗粒)的准确分析提出了更高的需求,但是传统气动雾化系统因样品引入效率低(通常<5%)严重制约了 ICP-MS 的灵敏度提升。基于此,本研究创新开发了一种基于微孔压电超声雾化(MUN)的高效样品引入系统。在优化条件下,该系统在 10~30 $\mu\text{L}/\text{min}$ 的雾化速率范围内,能够实现 100%的样品引入效率,分析灵敏度可提高一个数量级以上。此外,相较于常规气动雾化系统,MUN-ICP-QMS,显著降低了副产物比率,从而在无需依赖碰撞反应池(CRC)或其他干扰校正方法的情况下,准确测定了易受氧化物多原子干扰的元素,如地质样品中的稀土元素(REEs)。为验证该系统的有

效性和实用性,我们将其成功应用于血清、尿液、食蔬、地质样品和银纳米颗粒标准参考物质的元素定量分析及表征。进一步地,我们还将其与 MC-ICP-MS 联用,证实了其在微量样品同位素分析方面的潜力,单次分析仅需 2 ng Li,并成功获取了多种地质和生物材料标准参考物质的锂(Li)同位素组成,取得了可靠的测试结果。最后,我们还将该技术应用于精神疾病患者血清样品 Li 同位素分析,并初步证实了锂同位素在诊断精神疾病方面的潜力。综上所述,所研发的 MUN 高效样品引入系统为样本量有限的珍贵微量样品的 ICP-MS 分析测试可以提供可靠的技术支持。

关键词: 高效进样方法;高精度同位素分析;微量样品;同位素医学应用

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

单重静态法测量 MC-ICP-MS 离子计数器死时间

童喜润*, 卢山松, 邱啸飞

中国地质调查局武汉地质调查中心 (中南地质科技创新中心), 武汉 430205

用离子计数器 (IC: Ion Counter) 作检测器的多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 具有高灵敏度、低背景噪声的优点, 在地质、环境、核安全科学研究中有着广泛应用。然而, IC 的死时间效应会使其对离子的计数损失, 从而导致非线性信号响应问题。IC 死时间的精确测定是实现死时间效应校正的关键。多重静态 (Multi-Static) 测量法通过静态测量铀同位素比值, 克服了 MC-ICP-MS 信号波动问题, 测量精度较跳峰 (Peak Jumping) 测量法有显著提高。然而, 该方法需要使用具有放射性的 IRMM-073 或 IRMM-074 系列标准物质, 因而其应用受到了限制。本研究使用单重静态法 (Single-Static) 分别测量了武汉地质调查中心同位素实验室 Neptune plus 上两个 IC (SEM1 和 SEM2) 的死时间。实验使用一个 IC 和两个法拉第杯同时检测一系列有浓度梯度钨

金属溶液的 ^{180}W 、 ^{184}W 和 ^{186}W 信号, 然后通过钨同位素信号比值 ($^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$) 和 ^{180}W 信号强度 ($^{180}\text{W}(\text{IC})$ (cps)) 的线性关系计算出 IC 的死时间。在测量 SEM1 的死时间实验过程中, $^{186}\text{W}/^{184}\text{W}$ 保持稳定, ^{180}W 信号与 $^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$ 显示出良好的负相关关系 ($r^2=0.98$), SEM1 死时间的测定值为 19.2 ± 2.9 ns; 尽管 $^{186}\text{W}/^{184}\text{W}$ 在 SEM2 的死时间测量过程中保持了稳定, 但 ^{180}W 信号与 $^{180}\text{W}(\text{IC})/^{184}\text{W}(\text{F})$ 的线性关系不明显, 因而未能获得 SEM2 的死时间。一个可能的原因是 SEM2 没有配备高丰度阻滞器 (RPQ), 从而导致低丰度 ^{180}W 离子的测量受到高丰度 ^{182}W 离子的影响。

关键词: 死时间; 离子计数器; 单重静态法; MC-ICP-MS;

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

低铀方解石高空间分辨率 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年方法

张晨西

山东省地质科学研究院, 济南 250000

碳酸盐矿物特别是方解石分布广泛, 作为原生和次生矿物在多种地质环境中形成, 结合 U-Pb 同位素测年体系, 能为地球科学应用提供直接的时间约束, 具有广阔的应用前景。但方解石矿物的铀含量通常较低 (小于 $5\mu\text{g/g}$), 测年难度大, 限制了该方法的发展。激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 具有高灵敏度和高精度的特点, 已成功应用于锆石、方解石等副矿物的高空间分辨率 U-Pb 测年。本文针对 LA-MC-ICP-MS 的载气和氦气流速、屏蔽炬状态等实验参数进行了详细优化, 建立了适用于低铀方解石矿物的高空间分辨率 U-Pb 测年方法。为提升仪器灵敏度和等离子体状态, 详细讨论了锥组合、屏蔽炬接地状态、 N_2 引入量和 Ar 载气流速对 U、Pb 信号强度及氧化物产率 (UO/U) 的影响。结果表明, 在 Jet+X 锥组合、屏蔽炬接地、8 mL/min

N_2 引入量和 0.9 L/min 载气 Ar 流速条件下, Pb 灵敏度达到最高, 同时氧化物产率 (UO/U) 低于 1%。为验证该方法的准确性, 采用三个低铀 ($0.04\sim 0.63\mu\text{g/g}$)、方解石 U-Pb 定年参考物质进行测试, 使用高铀含量的 WC-1 标准物质作为校正 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 的外标, 同时减小束斑大小和剥蚀频率, 保持标准物质和待测样品的剥蚀坑纵横比一致。实验结果表明, 在 $44\mu\text{m}$ 束斑条件下, LD-5、PTKD-2 和 TARIM 的 U-Pb 年龄测试值分别为 $73.20\pm 0.56\text{ Ma}$ 、 $152.7\pm 2.5\text{ Ma}$ 和 $206.2\pm 1.3\text{ Ma}$, 与 ID-TIMS/ID-MC-ICP-MS 的定值结果在误差范围内一致, 验证了 LA-MC-ICP-MS 高空间分辨率测定低铀方解石 U-Pb 年龄的可靠性。

关键词: 低铀方解石; U-Pb 测年; LA-MC-ICP-MS; 高空间分辨率; 参数优化

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

碲高效光化学蒸气发生: 锑和铁离子的协同作用

黄渭文, 董亮, 邓秀琴, 余莹, 高英*

成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

碲 (Te) 因其独特的光电特性和热力学特性, 在工业应用、新材料开发以及荧光探针的生产中得到了广泛应用。然而, 由此带来的环境问题也引发了人们的高度关注。对碲在环境中的时空分布进行深入研究, 不仅有助于从科学角度揭示其迁移和转化规律, 还为评估人类活动对环境的潜在影响提供了重要依据。本研究建立了一种基于光化学蒸气发生 (photochemical vapor generation, PVG) 结合电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP MS) 的高灵敏痕量 Te 分析新方法。研究首次发现了锑 (Sb) 和铁 (Fe) 协同增敏 Te 的 PVG 过程。在优化条件下 [2% (v/v) 乙酸、5.0 mg/L Sb (III) 和 15.0 mg/L Fe (III)], 经 90 s 紫外线照射, Te (IV) /Te (VI) 的 PVG 效率高达 94%±3%。Te (IV) /Te (VI) 的检出限 (LOD) (3σ , $n=11$) 为 0.2 ng/L。本方法的分析灵敏度较传统气动雾化 (pneumatic nebulization, PN)

法提升了约 64 倍。通过对 1.0 $\mu\text{g/L}$ Te (IV) 和 Te (VI) 标准溶液进行 7 次重复测量, 获得相对标准偏差 (RSD) 分别为 2.1% 和 2.5%, 表明方法具有良好的精密度。将该方法应用于环境水样中痕量无机总碲的定量分析, 结果令人满意。本方法在保持高灵敏度的同时, 有机酸的使用量显著降低, 与以往关于 Te 的 PVG 体系相比, 酸用量减少了 10 倍以上。机理研究表明, 该体系中除生成挥发性 Te 外, 还生成了挥发性 Sb。同时, 检测到 Sb 和 Fe 的纳米粒子, 这些纳米粒子可能通过将自由基吸附至其表面, 为 Te 的还原提供高活性区域。本研究为在线分析环境样品中变价元素的总量提供了新的视角, 有助于理解在光化学过程中 Te、Sb 和 Fe 的相互作用。

关键词: 碲; 锑; 铁; 光化学蒸气发生; 电感耦合等离子体质谱

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41973019)

第一作者简介: 黄渭文 (1995-), 博士研究生; 研究方向: 地球化学。Email: 575889211@qq.com

*通信作者简介: 高英 (1981-), 教授; 研究方向: 地球化学。Email: ying.gaoy@gmail.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

一个新元古代锆石和一个渐新世斜锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素微区分析标准物质

牛俊龙*, 陈冉冉, 黄超, 王浩, 吴石头, 杨岳衡

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100083

锆石 (ZrSiO_4) 和斜锆石 (ZrO_2) 是自然界中两种重要的含锆矿物, 作为副矿物锆石常见于各类岩石中, 斜锆石常见于硅不饱和火成岩中, 它们是很重要的 U-Pb 定年对象和 Hf-O 同位素示踪剂。微区分析 (LA-ICP-MS 和 SIMS) 需要基体匹配的标准物质进行仪器分馏校正。当前, 年龄在 610~1090 Ma 之间的锆石标准物质很少, 和良好表征的大体量斜锆石标准物质也非常有限。因此, 开发 610~1090 Ma 年龄区间的锆石标准物质和斜锆石标准物质, 是对这两种矿物标准物质库的有益补充。在本研究中, 我们评估了年龄为~816 Ma 的新元古代天然锆石 (WJS810) 和~32 Ma 的渐新世天然斜锆石 (SK10-3) 作为原位微区分析标准物质的适用性。对于 WJS810 锆石, ID-TIMS 分析得出的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 为 $816.88 \pm 0.61 \text{ Ma}$ (2σ , $n=6$), SIMS 和两次 LA-ICP-MS 得出了 $821.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.2, $n=110$)、 $815.6 \pm 3.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.3, $n=64$) 和 $815.4 \pm 2.3 \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.3, $n=59$) 的结果,

与 ID-TIMS 年龄在分析不确定范围内一致。LA-MC-ICP-MS 测定 WJS810 锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值平均为 0.282548 ± 0.000043 (2σ , $n=121$), 与溶液 MC-ICP-MS 测定的平均值 0.282548 ± 0.000005 (2σ , $n=6$) 一致。SIMS 测定 WJS810 锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $6.65\text{‰} \pm 0.36\text{‰}$ (2σ , $n=117$), 与激光氟化法的测定结果 $6.46\text{‰} \pm 0.21\text{‰}$ (2σ , $n=8$) 一致。SK10-3 斜锆石经 ID-TIMS 分析得到的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $31.592 \pm 0.020/0.022/0.040 \text{ Ma}$ ($n=7$, 2σ , MSWD = 2.2)。MC-ICP-MS 分析 SK10-3 斜锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值平均为 0.282742 ± 8 (2σ)。与大多数斜锆石相比, SK10-3 具有较高的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值 (~0.007), 这使得在 LA-MC-ICP-MS 的 Hf 同位素测量过程中能够精确测量 βYb , 并有助于 $\beta\text{Yb}-\beta\text{Hf}$ 关系的计算。

关键词: 新元古代锆石; 渐新世斜锆石; 标准物质; ID-TIMS; LA-ICP-MS

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

稳定镁同位素组成的双稀释剂法分析

何永胜^{*}, 汪洋, 张寅楚, 柯珊

中国地质大学(北京), 北京 100083

镁(Mg)在自然界仅有 3 个稳定同位素, 传统上被认为不能使用双稀释剂法进行同位素分析。因为, 双稀释剂法同位素分析需要通过三个同位素比值的混合方程求解未知数, 理论上仅适用于拥有四个及以上同位素的体系。以往的 Mg 同位素分析中仪器分馏都是基于标样-样品间插法(SSB)校正, $\delta^{26}\text{Mg}$ 的长期分析精度一般 $\geq 0.05\text{‰}$, 准确度依赖于严格的样品、标样匹配(包括酸度、浓度和基体等)。最新理论研究表明对于 3 同位素体系存在特定的双稀释剂组成和稀释比, 使得数据校正对仪器分馏不敏感, 使双稀释剂法应用于 3 同位素体系成为可能。这种技术因此也被称为临界混合双稀释剂法(Critical Mixture Double Spike method, CMDS), 可将 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的分析精度提高至 $0.02\text{‰}\sim 0.03\text{‰}$ 。本实验室对相同地质标样的 CMDS 和 SSB 方法结果对比揭示: (1) 对于 Mg 单元素标准溶液以及大西洋标准

海水, 两种方法虽然分析精度存在差异, 但分析结果的均值相同; (2) 对于其他复杂基体的岩石、沉积物和矿物标样, SSB 方法获得的结果相对 CMDS 系统偏轻, 且偏轻的程度与标样的 MgO 含量以及基体复杂度相关, 标样的 $\text{Mg}/(\text{Si}+\text{Al}+\text{Ca})$ 越高、纯化后残余基质元素越多, 两者的偏差越大^[3]。这种偏差可归因于 SSB 方法在校正仪器分馏时存在基质效应, 因为即使经过严格的化学纯化流程, 对于复杂基体的样品, 纯化后的 Mg 溶液仍然不可避免存在残余基质元素, 而难以与间插的纯 Mg 标准溶液达到完全的基体匹配。因此, CMDS 方法不仅能显著提高 Mg 同位素分析的精度, 还使得具有复杂基体样品分析的准确度显著提升。

关键词: 镁同位素; 三同位素体系; 双稀释剂方法; 基体效应; 高精度分析

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

FTICR MS 在解析生物碳酸盐埋藏有机碳组成中的应用

刘海龙

南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023

揭示微生物驱动形成的球霏石的稳定性机制有助于进一步理解生物源矿物的形成机制及其潜在环境意义。解决这个问题, 关键要明确碳酸盐矿物埋藏有机碳组成与结构特征。鉴于金属离子-碳酸根固有的性质如电子结构, 酸碱性等化学特性, 其固定有机质在种类, 性质上有一定共性和代表性。傅里叶变换离子回旋共振质谱拥有高分辨率, 高灵敏度及高通量的分子检测能力, 为埋藏有机质的精确组成及性质的研究提供了关键技术。前期, 我们利用贝莱斯芽孢杆菌诱导了生物碳酸盐球霏石形成; 继而结合 TGA、XRD 以及 SEM-EDS 等技术分析其中的有机质相对含量; 建立了 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HCl}$ 联合提取生物碳酸盐埋藏有机质的前处理方法, 通过 FTICR MS 技术, 解析了其精细结构组成。最后, 通过典型有机质的体外生物矿化验证性实验、分子动力学模拟和 DFT 计算, 从实验和理论两个层面验证了有机质和碳酸盐晶体的相互作用促进生物球霏石稳定性提升的机制。研究结果

显示, 细菌诱导合成的球霏石含有丰富的有机质(相对含量约为 21%), 植入球霏石晶体结构中主要的有机质分子类别为 C20-28O9-14, 且多含有羧基, 氨基以及羟基等功能基团, 有机质通过以上官能团和钙离子或碳酸盐离子形成了致密的有机-无机杂化作用力进而提升了球霏石的稳定性。与单一无机 CaCO_3 晶体相比, 生物球霏石中所封存的有机质与无机 CaCO_3 作用生成的杂化键合作用力能大大提高球霏石结构的稳定性。具有高度稳定性的生物碳酸盐不仅能够使其自身稳定存在, 还对 CO_2 的长期固定非常有利。事实上, 有机质和碳酸盐的这种相互作用并不只在球霏石中存在, 也在其他矿物中广泛存在。比如黏土矿物, 铁矿以及其他碳酸盐矿物, 这也说明生物矿物的形成对有机质的封存是碳汇研究不可忽视的重要方式。

关键词: FTICR MS; 有机质组成; 球霏石; 碳汇

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

独居石微区原位 U-Th-Pb 定年标准物质研制

崔玉荣^{1,2,3*}, 喻光明¹, 涂家润², 周红英², 谢烈文³, 李秋立³

1. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

独居石作为理想的 U-Th-Pb 定年对象, 可解决稀有金属矿床成矿时代、中-低级变质作用时代、沉积地层的演化时代等难题。基体效应是 LA-(MC)-ICPMS 和 SIMS 等微区分析的一个主要问题, 用基体匹配的标准物质进行元素分馏校正是克服基体效应、获得准确分析结果的关键。然而, 当前国内外缺少高质量的微区分析标准物质, 严重制约了独居石 U-Th-Pb 年龄的发展与应用。本文利用扫描电镜和电子背散射图像、微区 X 射线荧光面扫描、电子探针、激光拉曼、LA-(MC)-ICP-MS、SIMS 以及高精度 ID-TIMS 等分析技术, 通过大量的野外调研及十几年的工作积累, 初步确定了 2 件备选样品。其中 1 件独居石样品 16TW01, 利用 LA-MC-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素测年, 获得的初步结果为 479 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=0.21); 然后利用 LA-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素年龄测定, 获得的结果为 480 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=0.14), 年龄较为均一。其 U 含量为 ~ 4000 $\mu\text{g/g}$, Pb 含量为 ~ 1000 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 5%~7%。另

1 件独居石样品 15FX01, 利用 LA-ICP-MS 进行 U-Pb 同位素测年, 获得的结果为 229 ± 1 Ma ($n=50$, MSWD=1.09); 利用单颗粒 ID-TIMS 法进行 U-Pb 定年, 获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 228.9 ± 0.6 Ma ($n=4$, MSWD=1.6)。其 U 含量为 ~ 1500 $\mu\text{g/g}$, Pb 含量为 ~ 300 $\mu\text{g/g}$, Th 含量为 $\sim 2\%$ 。后续将严格按照标准物质研制规范, 对备选样品进行 ID-TIMS U-Pb 与 Th-Pb 以及 LA-(MC)-ICP-MS、SIMS U-Th-Pb 同位素测年比对实验等工作。本研究能够有效解决目前独居石标样缺乏及依赖国外实验室的现状, 满足日益增长的微区实验室测试需求。同时对于合理地利用独居石标准物质进行微区原位 U-Th-Pb 定年, 进而获得准确可靠的成岩成矿作用的地质年代学信息, 具有十分重要的应用价值和科学意义。

关键词: 独居石; U-Th-Pb 定年; 微区原位; 标准物质

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

同位素稀释—电感耦合等离子体串联质谱法 (ID-ICP-MS/MS) 准确测定地质样品中的 S-Se-Te

李嘉威, 宗克清*, 汪在聪

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

硫(S)、硒(Se)和碲(Te)作为同属于第六主族的亲铁和强亲铜挥发性元素, 能够为核幔分异、壳幔岩浆演化以及挥发性物质运移等关键地质和宇宙化学过程提供重要信息。然而, 受元素的丰度、挥发性以及严重质谱干扰的影响, 地质样品中 S-Se-Te 的准确测定面临技术挑战。目前主流方法采用同位素稀释法(ID)结合化学纯化流程与氢化物发生装置, 在高分辨电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)中进行分析。虽然可以通过同位素交换平衡补偿元素的挥发损失, 但该方法仍存在前处理流程繁琐、试剂消耗量大以及需要额外装置等局限。电感耦合等离子体串联质谱(ICP-MS/MS)创造性地具备在线分辨分析物和干扰离子的能力, 因此成为解决 ICP-MS 测试中质谱干扰问题最有效的手段之一, 但其在地质样品元素分析方面的应用仍有待拓展。本研究将同位素稀释法在溶样方面的优势与 ICP-MS/MS 在线消除质谱干扰的

分析优势有效结合, 建立了准确、高效测定地质样品中 S-Se-Te 的分析方法。经过对碰撞反应池参数(反应气流量、八级杆偏转电压)和积分时间的系统研究和优化实验, 确立了基于 N₂O 或 O₂ 作为反应气的最佳无干扰分析策略。八种不同岩性(从超基性岩到酸性岩)的国际地质标样经硝酸-氢氟酸/逆王水两步消解, 在稀释 1000 倍后直接上机测试。ID-ICP-MS/MS 在两种反应气模式下的 S-Se-Te 含量测试结果都与经过化学纯化处理的常规 ID-ICP-MS 数据高度一致(相对偏差基本小于 10%)。该方法大大缩短了样品前处理时间, 降低了人力物力的消耗, 提高了样品测试效率。同时也为地质样品中低含量、高干扰元素的准确测定提供了新思路。

关键词: S-Se-Te; ICP-MS/MS; 同位素稀释法; 质谱干扰抑制; 元素含量分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(42373023)

第一作者简介: 李嘉威(1997-), 博士研究生; 研究方向: 地球化学分析方法。Email: ljw@cug.edu.cn

*通信作者简介: 宗克清(1982-), 教授; 研究方向: 深部挥发份循环, 地球化学分析方法, 壳幔相互作用。Email: zongkeqing@cug.edu.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

基于红外拉曼光谱显微系统的页岩有机质类型与成熟度表征

徐锴

长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

页岩有机质的类型与成熟度是评价页岩油气资源潜力的关键参数, 但其精细表征仍面临技术挑战。本研究通过红外拉曼光谱显微系统对四川盆地页岩样品进行非破坏性分析, 通过对比页岩样品的有机质光谱特征, 系统分析了红外光谱中脂肪族、芳香族及含氧官能团的强度变化规律, 结合拉曼光谱 D 峰、G 峰峰位及 D/G 比, 得以精细表征页岩样品中有机质类型与成熟度。前人研究表明, 拉曼光谱 D 峰与 G 峰的强度比反映了有机质的芳香结构有序度, 较高 D/G 比通常表示有机质结构的无序程度较高, 反之则表示有机质结构的有序程度较高。新兴的光学光热红

外光谱 (O-PTIR) 技术可突破光学衍射极限, 提供远高于传统红外光谱的空间分辨率, 基于 (O-PTIR) 技术的红外拉曼光谱显微系统可对样品进行非破坏性原位分析且具备强大的数据收集统计能力。红外拉曼光谱显微系统可作为优化传统有机质类型与成熟度表征方法的有效手段帮助研究人员更为精细地评价页岩油气资源潜力, 对页岩油气资源评价及勘探开发具有重大意义。

关键词: 页岩有机质; 成熟度; 红外光谱; 拉曼光谱

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

超低铱含量在少量地质样品中的测定：同位素稀释联用多离子计数电感耦合等离子体质谱法

徐诚, 李伟强*, 安诗超*

南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

本研究开发了一种基于同位素稀释联用多离子计数 MC-ICP-MS 的超低铱含量分析技术, 解决了地壳样品 (pg/g 级) 精准测定的挑战。通过 ^{191}Ir 稀释剂与样品混合, 结合 AG MP-1 阴离子交换树脂分离有效去除 Lu、Hf 等干扰元素, 利用 Nu 1700 Sapphire MC-ICP-MS 的双不连续打拿极计数器同步检测 $^{191}\text{Ir}/^{193}\text{Ir}$ 比值, 显著提升了灵敏度 (检出限 0.35 pg/g) 与抗干扰能力。研究表明, 碰撞池技术虽未有效消除 HfO^+ 等重离子干扰, 但化学纯化结合常规质谱分析已足够满足超低丰度

Ir 测定需求。通过验证 K-Pg 界线标准 (DINO-1) 与 6 种 USGS 地质标样, 方法结果与文献值高度一致, 且对 11 种低 Ir 地质标样 (涵盖基性岩至沉积岩) 的分析表明其适用于铂族元素分异、岩浆演化过程及撞击事件研究中 Ir 含量的精确解析, 为铂族元素地球化学循环提供了高灵敏、低空白的技术支撑。

关键词: 铱元素; 超低含量; 多离子计数; 同位素稀释法; MC-ICP-MS

基金项目: 国家自然科学基金 (42425301); 中央高校基本科研业务费专项资金 (020614380203)

第一作者简介: 徐诚 (2001-), 硕士研究生; 研究方向: 同位素地球化学, 矿床学。Email: 1944657193@qq.com

*通信作者简介:

李伟强 (1983-), 教授; 研究方向: 同位素地球化学, 矿床学。Email: liweiqiang@nju.edu.cn

安诗超 (1985-), 工程师。Email: asch@nju.edu.cn

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年方法测定大别造山带 基性岩多期变质年龄

张利国^{1*}, 金巍^{1,2}, 邓新^{1,2}

1. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205;

2. 中国地质调查局 花岗岩成岩成矿地质研究中心, 武汉 430205

硅不饱和变基性-超基性岩浆岩形成及其变质年龄的精确测定是同位素地质年代学研究的难点。由于岩浆结晶分异产生的 Sm/Nd 和 Rb/Sr 比值差异很小, 传统的全岩稀释法 Sm-Nd、Rb-Sr 等时线方法往往无法获得理想的等时线年龄。与之相比, 分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年方法通过不同酸试剂对单个岩石样品进行分步溶解, 再对各溶解相分别进行 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素组成分析以获得等时线年龄。该方法不仅样品用量少、测试周期短、成本低, 而且能有效避免单一地质体中不同空间样品形成时代的不确定性, 因而在对一些硅不饱和样品(如橄榄岩、玄武岩、碳酸岩)的年代学研究中取得了良好效果。本研究对大别造山带蕲春地区一套古元古代变基性岩脉进行了分步溶解 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年。在对单个粉末样品进行醋酸清洗处理后, 依次采用盐

酸、王水和氢氟酸-硝酸对基性岩样品进行分步溶解, 然后分别对盐酸溶解相、王水溶解相、王水不溶相和全岩开展了 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素组成分析。结果显示, 变基性岩样品的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.0483~0.1475, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 0.511475~0.511999, 获得 Sm-Nd 等时线年龄 $t=805\pm 14\text{ Ma}$ (MSWD=0.31); $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.4036~3.809, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.71395~0.71969, 对应 Rb-Sr 等时线年龄 $t=112.0\pm 3.2\text{ Ma}$ (MSWD=1.7)。结合区域上已广泛出露的新元古代和早白垩世岩浆事件, 认为本文获得的两条等时线年龄可能分别记录了这两次构造-岩浆事件对大别造山带内古元古代基性岩的叠加改造过程。

关键词: 分步溶解; Rb-Sr 等时线; Sm-Nd 等时线; 大别造山带; 变基性岩

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

VisualbetaAge: 一个基于 Iolite 软件的激光微区 β 体系 定年数据处理方法

吴石头

中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

电感耦合等离子体串联质谱 (ICP-MS/MS) 技术的突破, 实现了同质异位素的在线分离, 如能够区分 ^{176}Hf 与 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 的相互干扰。该技术与激光剥蚀 (LA) 系统联用, 可进行微区 β 衰变体系定年。近年来, 这一技术发展迅速, 已成功应用于多种矿物的 Rb-Sr、Lu-Hf、K-Ca 和 Re-Os 等定年体系, 极大地拓展了微区地质年代学的领域, 特别是突破了传统 U-Pb 体系的局限。然而相比于硬件技术的快速发展, 数据处理软件开发相对滞后。本文报道了一款基于 Iolite 平台的数据处理工具: "VisualbetaAge", 专用于激光微区 β 衰变体系数据处理。该工具集成了 Iolite (一款通用质谱数据分析软件) 中的数据处理代码方案 (DRS) 以及可视化模块, 其具有以下突出优点: (1) 可进行井下分馏校正, 该工具能够监测母体与子体比值的井下分馏情况 (DHF) 并进行校正。以 Rb-Sr 体系为例, 虽然该方法显著提高了内部测量精度, 但由于不同基体间的 DHF 模式存在差异, 其准确度没有得到本质提升; (2) VisualbetaAge 支持单个或多

个同位素体系的同步数据处理。例如, 可同时处理白云母 ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) 中的 Rb-Sr 和 K-Ca 年龄, 以及硅铍钇矿 ($\text{Y}_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$) 中的 Lu-Hf 和 Pb-Pb 年龄, 显著提高了数据处理效率; (3) 创新性地实现了实时等时线可视化功能。可根据需要, 以自定义积分区间显示单个或多个实时 (反向) 等时线图。支持固定或不固定初始值的实时年龄计算, 为数据准确性和精度的实时评估提供了便利, 同时也有助于识别异常数据点。此外, 该工具还具备同质异位素干扰校正, 特别是针对 Re-Os 体系, 少量的 Re 反应会干扰到 Os 同位素准确测定。通过采用基质匹配的参考物质, 还可实现在线基质效应校正。VisualbetaAge 为 β 衰变体系的分析提供了一个功能强大、应用灵活的研究工具, 将有助于该领域的发展。

关键词: 串联质谱仪; 激光微区 β 体系定年; 数据处理; Iolite 软件

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

富碳质样品 Re-Os 同位素研究进展

李超

国家地质实验测试中心, 北京 100037

在富碳质样品（如黑色页岩、煤、烃源岩）的 Re-Os 同位素定年研究中，样品前处理是确保分析可靠性的关键环节。目前广泛采用的氧化性消解体系（如 $\text{HNO}_3\text{-HCl-H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-CrO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-Na}_2\text{CrO}_4$ 等）虽能有效分解有机质并释放目标元素 Re 和 Os，但仍面临三方面主要挑战：其一，试剂本底干扰，传统消解体系中硝酸、盐酸及氧化剂（如 H_2O_2 、 CrO_3 ）常含有痕量 Re 和 Os 杂质，尤其在低含量样品（ppb

级以下）分析中易引入显著背景误差；其二，环境与安全风险，含六价铬（ Cr^{6+} ）试剂（如 CrO_3 、 Na_2CrO_4 ）具有强毒性和致癌性，其使用需严格防护且废液处理成本高昂；其三，流程复杂性与效率瓶颈，为降低本底并分离 Os，需结合多步纯化技术（如蒸馏、阴离子交换），导致实验周期延长且可能造成目标元素损失。

关键词：Re-Os 定年

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

如何得到一个好的原位 Rb-Sr 等时线年龄：以金矿床为例

于鹏岳, 李超*

国家地质实验测试中心, 北京 100037

铷 (Rb) - 锶 (Sr) 定年是地质年代学中的重要手段, 但传统同位素测试方法受质谱分析中 ^{87}Rb 同位素干扰影响。近年来, 激光剥蚀电感耦合等离子体串联质谱 (LA-ICP-MS/MS) 的发展实现了原位 Rb-Sr 定年。该技术通过向碰撞反应池中引入氧化性气体 (如 N_2O 或 SF_6), 使 Sr^+ 与气体反应转化为 SrO^+ , 从而实现 ^{87}Rb 与 ^{87}Sr 的在线分离。原位 Rb-Sr 定年具有高效、低成本和高空间分辨率等优势, 被广泛应用于地质研究。铷锶比值及年龄的准确度和精密度主要取决于激光、质谱参数设置和样品选择。为获取高精度铷锶同位素数据, 本研究系统考察了驻留时间、激光剥蚀频率、能量密度、光斑尺寸、剥蚀时间和样品选择的影响。研究表明, 50 ms 驻留时间适用于多数样品, 可在保证数据量的同时提升灵敏度; 较大光斑尺寸 ($>50\ \mu\text{m}$) 能显著提高测量精度并减少元素分

馏; 不同能量密度水平会显著改变 Rb 与 Sr 的元素分馏行为; 3 Hz 或 5 Hz 重复频率适用于多数样品, 而 10 Hz 虽可降低单点误差, 但会导致 Rb/Sr 比值显著偏移, 故不建议使用。剥蚀过程中存在明显的深度分馏效应 (down-hole fractionation), 标准样品与待测样品的信号必须取自相同时间区间以保证数据可靠性。将上述得到的条件应用于赋存在泥盆系李坝群变质沉积岩中的李坝金矿床作为研究对象。该矿床属成矿物质来源复杂的造山型金矿床。通过矿物学和地球化学方法对矿床中出现的各类绢云母进行分类研究, 筛选出最合金矿定年的绢云母类型, 从而通过精细矿物筛选提高 Rb-Sr 年代学对造山型金矿定年精度。

关键词: 原位 Rb-Sr 定年; LA-ICP-MS/MS; 造山型金矿

第一作者简介: 于鹏岳 (1999-), 男, 硕士研究生, 地质学专业。Email: ypy_13@qq.com

*通信作者简介: 李超 (1983-), 男, 研究员, 博士生导师; 研究方向: 地球化学研究。Email: Re-Os@163.com

• 专题 26: 分析地球化学新技术与新仪器研究进展 •

准噶尔盆地中央坳陷西南部二叠系深层高-过成熟烃源岩生烃潜力评价

王晨宇, 常象春*

山东科技大学, 青岛 266590

利用岩石热解、碳硫分析、生物标志物分析、干酪根显微组分、金刚烷定量、分子地球化学技术、主微量元素分析以及有机质恢复等手段, 从有机质热演化程度、有机质类型及有机质丰度三方面对准噶尔盆地中央坳陷西南部二叠系深层高-过成熟烃源岩的生烃潜力进行了系统研究, 并总结了一套评价高-过成熟烃源岩的研究方法。通过对已钻揭的沙湾凹陷征深 101 井及盆 1 井西凹陷庄深 1 井的烃源岩进行综合评价, 研究结果表明: 在传统镜质体反射率判断热演化程度的基础上, 综合利用金刚烷类化合物、甲基菲指数以及激光拉曼光谱, 目前研究区烃源岩的热演化程度均已达到高-过成熟阶段。平面上, 在 P_{1f} 层位与 P_{2w} 层位上, 沙湾凹陷征深 101 井的热成熟度高于盆 1 井西凹陷庄深 1 井; 垂向上, 两口井均表现出 P_{1f} 层位比 P_{2w} 层位的热成熟度更高。拉曼光谱和红外光谱综合判定研究区样品有机质类型主要为 II 型。通过物质平衡法、降解率法以及无机元素法三种有机质恢复技术手段, 获得原始的有机碳含量及生烃潜量。结

果表明恢复后, 沙湾凹陷征深 101 井 P_{1f} 层位的样品恢复后有机质丰度为中等—优质, 以优质为主; P_{2w} 层位的样品为优质烃源岩。盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2x} 层位的样品为差—优质, 以好—优质为主; P_{2w} 层位的样品为差—优质, 以好—优质为主。从水平上来看, 沙湾凹陷征深 101 井 P_{2w} 层位的样品相比于盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2w} 层位的样品表现出更高的有机质丰度。值得注意的是, 盆 1 井西凹陷庄深 1 井 P_{2x} 烃源岩显示出比 P_{2w} 烃源岩更优的潜力, 是一套值得关注的烃源岩。综合分析表明, 沙湾凹陷征深 101 井可能处于较深水、稳定的还原环境, 沉积速率可能更适中, 水体分层更稳定, 营养物质供应更充足, 有利于有机质富集。本研究的系统评估推动了高超成熟烃源岩的评估方法, 并强调了准噶尔盆地高超成熟二叠系烃源岩的勘探潜力。

关键词: 高-过成熟烃源岩; 烃源岩生烃潜力评价; 激光拉曼光谱; 傅里叶红外光谱; 有机质恢复

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372160, 42072172); 山东省自然科学基金项目 (ZR2021QD072, ZR2020QD040)

第一作者简介: 王晨宇 (2000—), 博士研究生; 研究方向: 油气地球化学。Email: 824127348@qq.com

*通信作者简介: 常象春 (1974—), 教授; 研究方向: 油气地球化学。Email: xcchang@sust.edu.cn

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

热震理论及其意义

张旗^{1*}, 原杰², 焦守涛^{3, 4}

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 邢台学院 资源与环境学院, 河北邢台 054001;

3. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;

4. 自然资源部 地质信息工程技术创新中心, 北京 100055

热震理论是一个正在崛起的地震新理论, 它认为地震不仅与构造有关, 还与岩浆活动有关。一部地球演化史, 即地球散热的历史。地震即是地球热能转变为动能的具体体现。

热震理论的具体表现是地下深处发生了爆炸, 所以也可以称为爆炸地震理论。野外见到的隐爆角砾岩即是古爆炸地震的证据, 也是地震的震源中心。据研究, 中国近期发生的破坏性大的大地震, 如 1966 年的邢台地震, 1975 年的海城地震, 1976 年的唐山地震、2008 年的汶川地震、2023 年的甘肃积石山地震, 甚至今年 (2025 年 1 月 7 日) 刚刚发生的西藏定日 6.9 级大地震, 都可能是爆炸地震所为。

热震理论意义巨大, 表现在下述 4 个方面:

1. 解决了地震预测的难题。构造地震理论认为地震是不可能预测的, 而爆炸地震理论认为地震是可以预测的。爆炸地震认为地震可以预测的根据是: 地震发生是有前兆的, 前兆包括地下深处有毒有害气体的泄漏, 地温增加及其导致的地电异常以及动物异常反应等。

2. 提出了地震成矿新理论。大家都知道, 隐爆角砾岩是有利于成矿的, 隐爆角砾岩型矿床即爆炸成矿理论成因的。隐爆角砾岩下面有花岗岩 (或斑岩) 侵入体, 斑岩型矿床也是爆炸造成的。此外, 爆炸产

生的强大冲击波会形成许多新的断裂, 在这些断裂中沉淀形成的矿床也是爆炸成矿的产物。于是, 根据爆炸出现的位置不同, 产生不同的矿床, 可以归纳为“三层楼”成矿模式: 在爆炸中心之上为卡林型矿床, 细脉浸染型矿床, 石英脉型矿床等; 在爆炸中心处为隐爆角砾岩型矿床; 在爆炸中心之下为斑岩型矿床。

3. 减灾防震。地震是大自然现象, 人类不可能防止地震的发生。但是, 打深钻是提前释放出深部气体与流体, 是有可能降低爆炸地震发生地震的几率, 降低地震的震级。

4. 发现今天正在形成的花岗岩侵入及其伴生的矿床。从理论上, 我们不能排除全球今天有正在形成的花岗岩侵入体, 也不能排除全球今天正在形成的矿床。但是, 它们在哪里呢? 如何识别呢? 全世界科学家一筹莫展。而爆炸地震理论则表明, 爆炸地震的震源中心为隐爆角砾岩, 隐爆角砾岩之下有正在侵入的花岗岩侵入体, 而隐爆角砾岩本身即是一种矿床的载体。因此, 爆炸地震解决了如何探明今天正在形成的花岗岩侵入体以及今天正在形成的与花岗岩有关的矿床的问题。而且, 可以根据现在地壳的厚度知道正在形成的花岗岩的性质以及正在形成的矿床的类型。

关键词: 热震; 地震预测; 地震成矿; 减灾防震

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

基于大语言模型的地质文本中译英

于新慧^{1,2,3}, 周永章^{1,2,3*}, 朱彪彪^{1,2,3}, 王郑哲^{1,2,3}

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东珠海 519000;

2. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广州 510275;

3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东珠海 519000

大语言模型 (LLM, Large Language Model) 是一种基于深度学习的自然语言处理模型, 具备处理复杂语言任务的能力, 这些模型通过训练数亿至数千亿参数, 能够执行包括但不限于文本分类、情感分析、机器翻译、问答系统和文本生成等任务。大语言模型凭借其卓越的语言理解和生成能力, 已经成为推动人工智能在医疗和金融等多个领域研究和应用的前沿力量。目前人工智能技术在地球科学领域研究中已经得到了广泛的应用, 并在多个方面取得了显著的进展。命名实体识别 (NER, Named Entity Recognition), 是指识别文本中具有特定意义的实体, 主要包括人名、地名、机构名、专有名词等。命名实体识别不仅是文本处理的基础, 还是信息提取、文档分类、知识图谱构建、机器翻译及问答系统等多种自然语言处理任务的重要基石。地质文本数据类型多样, 文本的语言风格因数据来源和使用场景的不同而有所差异, 但地质文本中均包含大量专业术语和领域特定词汇, 如矿物学、岩石学、矿床学、构造地质学以及地质勘探技术等术语。这些术语在进行翻译时, 常常会面临着专业术语的准确性与一致性弱、缺乏领域知识的深度以及文化和语言背景差异导致易产生误解等方面的问题。地质文本的翻译一般需要使用标准专业地质词典或数据库, 并结合权威地质论文, 特别是参考权威机构 (如国际地层委员会 (ICS)) 发布的术语标准, 以及具备地质背景的专家或研究人员审校之后才能确保高质量的翻译结果。目前常用的翻译方式为学术

翻译软件 (如 Google Translate、DeepL 和知云文献翻译等) 和大语言模型 (如 Deepseek、ChatGPT、Kimi 和文心一言等) 翻译。翻译软件更新术语快, 可以自定义专业词库, 但其缺乏深层次的语境分析。常常采用直译的方式, 在处理复杂句式、专业术语时会出现逻辑混乱或翻译不准确的现象, 特别是在进行涉密文本数据的翻译时, 用户的数据隐私存在被泄露的风险。大语言模型有更好的上下文理解能力, 具有灵活性与扩展性, 可以通过微调适配垂直领域 (如地质、医疗、法律等行业), 提供个性化翻译服务, 且支持实时对话交互。尤其是目前的开源大语言模型可以用于本地部署来规避用于数据隐私泄露的风险。但通用大语言模型会因原始训练数据缺乏专业领域知识而产生“幻觉”问题, 且训练数据受限于历史文本, 无法及时更新而导致大语言模型输出过时或错误信息。因此, 本研究提出通过构建地质命名实体模型和地质专业词典的外部向量数据库与本地大语言模型结合, 利用命名实体识别 (NER) 和检索增强生成 (RAG, Retrieval-Augmented Generation) 技术, 基于大语言模型进行地质专业术语增强的中译英翻译方法。在充分发挥大语言模型的上下文理解和处理复杂语言现象的能力的同时, 配备可随时更新地质术语的专业词库, 进而实现地质文本的高质量翻译。

关键词: 大语言模型; 自然语言处理; 地质翻译; NER; RAG

基金项目: National Key Research and Development Plan (2022YFF0801201); 国家重点研发计划 (2022YFF0801201); Supported by the National Natural Science Foundation of China (U1911202); 国家自然科学基金资助项目 (U1911202); Guangdong Key Areas Research and Development Project (2020B1111370001); 广东省重点领域研发计划项目 (2020B1111370001)

第一作者简介: 于新慧 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 地质大数据. Email: yuxh29@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 周永章 (1963-), 教授, 研究方向: 大数据与数学地球科学. Email: zhouyz@mail.sysu.edu.cn

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

基于计算机视觉的岩石薄片智能鉴定及系统

臧春艳^{1*}

1. 中海油能源发展有限公司 中海油实验中心, 天津 300457

岩石薄片是石油勘探开发中提供岩性和储集条件的重要基础实验。本次利用计算机视觉, 基于深度学习模型建立了高效的岩石薄片智能鉴定系统, 实现自动采集和交互式智能鉴定, 从而代替传统手工鉴定。同时基于大数据智能学习, 通过全自动高清、全息图像拍照系统进行鉴定矿物智能识别。

首先开发了不同光学系统下岩石薄片数字化信息采集系统, 软件操作界面控制正交、单偏、荧光、试板各状态自动定位图像采集, 通过单偏正交多角度“原位叠加”采集技术, 实现全薄片多光性多角度自动拼接。同时开发一套智能化信息管理系统, 首先利用卷积神经网络模型对岩石进行识别, 建立大规模的岩石矿物标准样本库, 然后进行图像预处理, 实现自动分割、自动识别、自动标注等功能。通过智能识别

技术利用专家库进行训练, 识别石英、不同长石类型和各种岩屑等几十种矿物, 如长石细分为斜长石、微斜长石、条纹长石、正长石等, 通过标准命名规则实现岩石薄片智能定名。该系统还可以定量分析孔隙含量、自动拼接全视域图像, 更直观的展示孔缝分布等岩石结构特征。利用自动采集系统和智能识别系统来模拟人工鉴定流程, 完成岩石薄片的智能鉴定, 实现了不同长石矿物和不同类别的岩屑类型等几十种矿物智能鉴定的创新, 准确率达到 95%以上, 实现了由传统的人工鉴定走向智能鉴定。此项工作为勘探评价和储层研究提供更优更快的实验数据。

关键词: 岩石薄片; 智能鉴定; 全自动采集; 神经网络; 岩屑

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

矿物分布外检测

季晓慧^{1*}

1. 中国地质大学 (北京), 北京 100083

深度学习已被越来越多地用于识别矿物。然而, 深度学习只能用于识别训练集分布内的矿物, 而训练集外的矿物不可避免地被错误分类为训练集中的某个类别。分布外检测可用于解决深度学习模型误将训练类别外的样本分类为训练集内类别的问题, 已被应用于医学图像、基因测序、机械等领域, 且表现出良

好性能。将介绍常用的分布外检测方法, 以及采用分布外检测来解决矿物识别时误将训练类别外的矿物识别为训练类别内某种矿物的方法, 并介绍相关实验结果及未来进一步的工作。

关键词: 矿物识别; 深度学习; 分布外检测

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

闪锌矿地球化学组成揭示铅锌矿床成因类型

曾庆文^{1*}, 牛旭东¹, 郁凡¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

长期以来根据特定矿物的成分特征确定矿床的成因类型,一直是经济地质学家和矿业公司关注的焦点。传统的二维图由于尺寸的限制,无法包含所有元素信息,可能会对判别结果产生偏差。在对铅锌矿床类型进行分类时尤其如此。本研究采用了四种广泛使用的机器学习算法(随机森林、极限梯度提升、支持向量机和多层感知器)来训练 4908 组闪锌矿元素数据,这些数据来自五种不同的铅锌矿床类型:VMS、SEDEX、MVT、矽卡岩和浅成低温热液矿床。然后通过主成分分析和 t 分布随机邻域嵌入对数据进行可视化解释,结果表明将闪锌矿元素数据简化为二维投影会导致重要特征信息的丢失,从而阻碍其有效区分矿床成因的能力。机器学习结果表明,所有四种模型

在测试集上的宏观 F1 得分均高于 0.95,表现出优秀的鲁棒性和出色的泛化能力,证明了使用闪锌矿地球化学数据区分铅锌矿床类型的可靠性。SHAP 值分析强调了 Mn、Fe、Ge、Cd 和 Co 等元素在使用机器学习算法区分矿床类型方面的关键作用。这些模型预测外部独立数据集的综合结果准确率为 83%,同时也被应用于对三个未知类型的铅锌矿床进行分类,预测结果与地质观测结果一致。模型的参数已进一步导出并编程到 Excel 宏程序和交互友好的 EXE 应用程序中,可通过以下方式访问 <https://sdeakii.github.io/machine-learning>。

关键词: 闪锌矿地球化学; 机器学习; 成因类型; 铅锌矿床

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

基于 DeepSeek 大语言模型与 RAG 技术在滑坡领域垂直模型构建的初步探索

何陆灏¹, 周永章^{1*}, 马建华¹, 刘蕾¹

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广州 510000

随着大语言模型在自然语言处理领域的快速发展, 其在地质灾害监测、预警与辅助决策等方面展现出越来越高的应用价值。然而, 通用大语言模型在应对专业性极强的滑坡领域时, 往往面临知识覆盖不足与专业术语理解不准确等问题。为此, 本研究基于 DeepSeek 大语言模型, 结合检索增强生成 (RAG) 技术, 对滑坡领域垂直模型构建进行了初步探索。首先, 对滑坡相关文献、案例与地理环境数据进行集中整理与高质量筛选, 并利用向量化编码方式构建多模态知识库; 随后,

在 DeepSeek 模型推断环节运用 RAG 技术, 动态检索并融合滑坡灾害风险评估、成因分析及监测预警等关键信息。初步实验结果表明, 该垂直化方案在文本分析和知识推理方面更能适应滑坡领域的专业需求, 为滑坡灾害预测与管理提供了新思路, 同时也为其他专业领域构建垂直大模型提供了可行的技术参考。

关键词: DeepSeek; RAG; 滑坡领域; 垂直模型; 地质灾害

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

战略性矿产找矿场景下多模态地质数据预训练模型构建与智能化应用

杜婷^{1*}, 王昭静¹, 周兆巍¹

1. 包钢集团矿山研究院(有限责任公司)矿产资源战略研究所, 内蒙古包头 014030

地质大数据是现代地球科学研究的重要基础, 其中, 岩石地球化学数据(例如元素丰度、矿物分布、矿物晶体化学参数及矿物标型学参数等)构成了地学研究的基本信息和关键维度。近些年, 地学数据呈指数级增长, 数据的多源性、高维性和非线性等特征显著, 传统的统计分析方法在特征提取和模型识别方面存在较明显的局限性。基于深度神经网络架构, 整合机器学习(随机森林、支持向量机等)、计算机视觉(卷积神经网络)和数据挖掘(关联规则分析)等技术, 在地质大数据复杂特征提取, 非线性关系提取, 高效率模式识别, 趋势预测分析等方面具有非常重要的意义。本研究旨在通过“数据驱动-模型构建-专家反演”的技术路径, 针对稀土、铁、铌等关键战略矿产资源开展更精准、更高效的找矿辅助工作。首先, 对多源地质数据集(如区域成矿背景、地质构造、矿物学解析数据、谱图解译数据、地质图件、地球物理及地球化学等)进行标准化处理, 通过卷积核特征提取实现数据融合。其次, 基于 Transformer 架构的多模态大模型, 利用自注意力机制捕捉“元素组合-矿

物相变-矿种分布-构造控矿”间的依赖关系, 使用地质勘测数据进行预训练, 并通过矿床尺度标注数据微调。最后, 将预测结果、注意力权重图和特征热力图等呈现于专家评测系统进行解释性分析, 矿床尺度标注数据通过对头数量、头维度、堆叠层数、隐藏层数、神经元数、激活函数阈值等超参数进行调整, 并利用强化学习算法实现特征权重动态优化, 反演成矿机理。通过跟踪 F1 值、置信度、位置精度和范围准等指标评估预测结果, 达到工程应用标准, 形成迭代化闭环。当前局限性主要体现在专家先验知识量化表征差异和不确定性, 以及新的找矿理论和技术迭代速度失配等问题。后续将引入贝叶斯概率图模型, 探索构建具有时序性、标型性的知识图谱, 实现跨学科知识的深度融合和协同推理, 进一步提升找矿算法的智能程度和泛化能力, 从而为战略性矿产资源勘察找矿提供更有力的技术支撑。

关键词: 地质大数据; 大模型; 人工智能; 找矿预测; 深度学习

杜婷(1988-), 高级工程师, 研究方向: 数智化、信息化研究、科技情报分析 Email: 361220391@qq.com

王昭静(1986-), 高级工程师, 研究方向: 矿床地质、矿物学研究、人工智能大数据 Email: wzjhjing_kevin@163.com

周兆巍(1992-), 工程师, 研究方向: 采矿工程、战略分析 Email: 775798850@qq.com

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

机器学习在岩矿地球化学研究中的可视化及应用实例

贺海洋^{1*}, 张焕宝¹, 李朋刚¹, 曾涛¹

1. 南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南衡阳 421001

人工智能的发展为解决地球科学问题提供了新思路。机器学习是实现人工智能的一种方法。地球化学数据分析为地球科学研究和相关应用提供了数据支持基础。为研究机器学习在地球化学研究中的应用, 使用 CiteSpace 进行可视化分析, 采用共现网络分析、突现性分析、中介中心性分析和聚类分析方法, 并进行可视化图谱解读。机器学习在岩石构造背景和成矿潜力方面有广阔的应用前景。埃达克质岩具有重要的地球动力学和金属成矿意义, 其构造背景的准确识别为探讨区域构造岩浆演化过程提供了重要依据。将机器学习与地质大数据相结合, 构建高精度埃达克质岩构造背景判别模型和可视化图解。本文收集了 1075 条全球埃达克质岩主、微量地球化学数据, 使用主成分分析和 t 分布随机近邻嵌入等无监督学习方法进行高维数据降维, 采用随机森林、支持向量机、人工神经网络和 K 近邻等机器学习方法进行数据训练, 得出准确率为 98.5% 的高斯核支持向量机埃达克质岩构造背景判别器, 并提出 Ba-Sr/Nd 图解, 为汇

聚板块边缘、板内火山活动和太古宙克拉通 (包括绿岩带) 3 种构造背景判别提供依据。花岗岩型铀矿是我国主要的铀矿来源之一, 因此, 厘定经济、可靠的铀含矿潜力评价方法对于推动我国铀矿事业的发展具有重要意义。结合机器学习模型开展花岗岩型铀含矿潜力评价, 在系统收集华南地区地球化学数据的基础上 (1417 条, 不包含预测数据), 通过多层感知机、随机森林以及梯度提升决策树机器学习算法分别构建花岗岩型铀含矿评价模型, 同时结合遗传算法和五折交叉优化模型; 最后利用混淆矩阵、精确率、召回率和受试者工作特征曲线等开展评价精度验证。结果表明, 梯度提升决策树在本数据集中的表现最佳, 其在测试集中的准确率达 95.3%。综上, 本文对机器学习在岩矿地球化学研究中的进展进行可视化分析, 并探讨了机器学习在岩石构造背景和成矿潜力方面的应用。

关键词: 机器学习; 岩矿地球化学; 知识图谱; 埃达克质岩; 花岗岩型铀矿

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

野外露头数字孪生系统呈现与应用——以陕西府谷县辫状河露头为例

印森林^{1*}, 李文军²

1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023;

2. 武汉数智地质信息科技有限公司, 武汉 430074

随着大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展, 数字露头和数字地质迎来了新的发展契机。针对露头表征技术的不足, 引入了无人机倾斜摄影技术, 把野外露头地质研究、三维剖面精细扫描和数字信息化呈现结合起来, 形成露头地质特征、地理地貌信息与数字特征的虚实孪生互动, 精彩、精准、分层次的呈现了野外露头数字孪生模型。利用倾斜摄影技术对陕西府谷县天生桥露头进行了数据采集和处理, 结合倾斜影像中的像素信息生成富有纹理的三维模型, 建立了图片与坐标相对应的野外露头三维数字化模型, 把生成的 OSGB 模型与地理遥感 DEM 数据在通过三维融合技术进行处理, 形成大、小尺度数据的空间数据融合。随后, 把野外露头研究的相关岩石体地质属性和工程参数属性数据进行输入。在无人机采集三维模型上形成一套覆

盖物理模型的露头地质参数数据。地质属性包括: 地层分层数据(海拔高差、颜色、岩性与厚度数据)、沉积构造数据(层理构造、层面构造、特殊构造)、储层砂体构型数据(几何形态、规模、方向与叠置样式)、储层质量数据(孔隙结构、孔隙度、渗透率、含油饱和度)。工程参数属性包括: 工程力学参数(脆性、泊松比和杨氏模量)。构建倾斜摄影模型、露头数据模型和地质知识结构模型等, 将地质知识结构模型映射到府谷倾斜摄影模型中, 三种模型相互耦合演化构建野外露头场景数字孪生模型。该系统将大大拓展野外露头地质研究理论的内涵, 对数字地质学的发展影响深远。

关键词: 无人机; 野外露头; 数字孪生; 辫状河; 府谷县

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

无人机倾斜摄影技术在致密砂岩露头储层构型解剖中的应用

印森林^{1*}, 李文军²

1. 长江大学 录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023;

2. 武汉数智地质信息科技有限公司, 武汉 430074

针对野外露头研究中存在互动性、定量化和可视化不足的问题, 近年发展了无人机倾斜摄影技术可以有效解决上述问题。经无人机采集和处理后的高精度倾斜摄影三维模型, 可以基于多视角开展储层构型互动解释, 大大增强了储层构型解剖的可信度, 较好解决了长期困扰地质研究人员的难题。以塔里木盆地库车河剖面侏罗系阿合组致密砂岩露头为例, 经过无人机倾斜摄影采集处理后的模型, 把 3-5 级储层构型定量化的方式呈现。研究发现: (1) 提出了一套基于高精度倾斜摄影三维模型的储层构型表征技术。该模型可定量表达不同级次构型单元, 也可以呈现构型要素的组合关系及其定量规模分布。把处理后的.OSGB 倾斜摄影三维数据模型输入到 EPS 软件中, 完成了不同储层构型级别的互动解释工作; (2) 建立了露头区中尺度河道叠加样式。

通过典型露头区的解剖发现, 主河道、次河道构型要素较为发育。砂体形态呈透镜状或半透镜状相互叠置, 叠置样式主要有垂向深切叠加、侧向拼接等; (3) 建立了定量知识库。剖面河道宽厚比呈较好的线性关系, 相关系数 0.75。此外, 结合密集采样分析测试工作, 揭示了露头砂体内部非均质性特征, 主河道砂体内部孔隙度向上渐变降低, 呈正韵律分布样式, 体现了河道垂向充填式沉积特征; 而次河道砂体沿侧积方向叠置, 孔隙度呈多期侧向渐变降低, 体现了侧积式河沉积特征。该研究不仅较好的拓展了露头表征的技术体系, 也为指导地下致密砂岩甜点分布提供了地质依据。

关键词: 无人机; 倾斜摄影; 致密砂岩露头; 储层构型; 阿合组

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

城市湿地公园碳汇核算研究方法研究

冯晶晶^{1, 3*}, 高国辉^{3, 2}, 周世武^{2, 3}, 庄圣炜³, 颜伟³, 齐登位³,
周永章², 卢桂宁¹

1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广州 510000;

2. 中山大学 地球环境与地球资源研究中心, 广东珠海 519080;

3. 广东埃文低碳科技股份有限公司, 广州 510000

在全球城市化加速和应对气候变化的大背景下, 城市湿地在城市碳循环中的作用至关重要。本文系统评述了城市湿地公园碳汇计量方法, 涵盖基于经验统计、生物量调查、碳通量测定以及碳循环模拟的多种方法。经验统计法采用 IPCC 国家温室气体清单法, 虽应用广泛但存在局限性; 生物量调查法通过样地调查和遥感技术估算碳汇, 遥感技术在城市复杂环境下面临挑战; 碳通量测定法中的微气象法和同化量法, 分别存在下垫面要求高和受环境因素影响大的

问题; 碳循环模拟法利用多种模型估算碳汇, 但模型普适性和参数获取存在难题。针对这些方法的不足, 提出未来应从技术创新、多学科融合、标准化建设和跨区域协作等方向开展研究, 以推动城市湿地公园碳汇计量研究的发展, 助力城市实现“碳达峰、碳中和”目标, 为城市生态保护和可持续发展提供科学依据。

关键词: 城市湿地公园; 碳汇计量; 研究方法; 碳循环

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

Developing a Smart Conversational Knowledge Base for the Qin-Hang Metallogenic Belt Using the ChatGLM3-6B Large Language Model

何陆灏^{1*}, 周永章¹

1. 中山大学 地球环境与地球资源研究中心, 广东珠海 519080

This study leverages the ChatGLM3-6B large language model, which uses the Langchain framework, to develop a smart conversational knowledge base tailored for the Qinzhou - Hangzhou Bays metallogenic belt. The objective is to enhance the model's comprehension and response accuracy concerning specialized geological inquiries. To this end, retrieval-augmented generation(RAG)technology is applied, allowing for the integration of multisource knowledge and dynamic updates to the knowledge base, thus broadening the corpus, increasing knowledge coverage, and improving response quality. To evaluate the efficacy of this specialized knowledge base integration, the study employs BLEU scoring in conjunction with metrics such as precision, recall, and F1 score, comparing the knowledge generation across five language models: ChatGLM3-6B, ChatGLM3-6B RAG, ChatGPT-4, Bing, and Gemini. The evaluation results indicate that the ChatGLM3-6B model, when

combined with the Qinzhou - Hangzhou Bays metallogenic knowledge base, demonstrates superior performance in all the metrics, particularly in terms of expertise and information coverage, achieving an F1 score of 0.8689, notably outperforming the other models. In summary, integrating domain-specific knowledge bases with RAG technology effectively enhances large language models for specialized domains. Future work should aim to further expand and refine the knowledge base and optimize its integration with the generation model to improve performance in complex fields, ultimately supporting the development and application of intelligent conversational systems in geology.

关键词: Domain-Specific Large Language Model; ChatGLM3-6B; Langchain; Qinzhou - Hangzhou Bays Metallogenic Belt; Retrieval-Augmented Generation (RAG)

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

基于 RAG 的智能找矿垂直领域大模型的构建

牛露佳^{1*}, 周永章¹

1. 中山大学 地球环境与地球资源研究中心, 广东珠海 519080

本研究提出了一种基于 RAG 和词典支持的智能找矿大语言模型-ProspectRAG, 采用检索增强生成 (RAG) 的方法, 结合领域专家知识和网络百科知识, 实现对复杂地质术语的精准识别。通过关键词与保护词的双重机制, ProspectRAG 能够识别领域内的关系词和结构性术语, 同时保护特定专业术语, 避免其在复杂语境中的误分割与误解读, 从而构建更完善的智

能找矿术语词典。词典的引入显著提升了大模型的生成能力, 且无需微调即可提升专业文本的理解和生成能力, 有效推动了智能找矿领域的知识共享和自动化应用, 为矿产勘查的智能化体系生成提供了坚实基础。

关键词: 地质大数据; 人工智能找矿; 知识图谱; 大语言模型; RAG

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

Mini-CarbonGPT: 碳中和垂直领域大语言模型

马建华^{1*}, 周永章¹

1. 中山大学 地球环境与地球资源研究中心, 广东珠海 519080

本研究构建的 Mini-CarbonGPT 是一个具有碳中和垂直领域知识的大型语言模型, 它依托作者整理的一套全面资源, 包括模型监督微调数据、检索数据库和评估数据训练而成。Mini-CarbonGPT 将开源的 GLM-4-9B 模型应用于监督微调数据。使用检索增强生成, 在微调后的大模型上构建向量检索系统。本研究设计了专业的训练数据, 包括模型预训练数据, 并分析了用于构建这些数据集的方法。同时, 从客观和主观两个角度创建评估数据, 以评估碳中和领域及相关领域大型语言模型的专业理解能力。评估结果表明, 在客观问题上 Mini-CarbonGPT 的正确率达到

80.57%, 优于原始 GLM-4-9B 模型和 4 个商用 LLM 模型, 验证了它的有效性。在主观题的自动化指标、GPT-o1 评分以及关键词覆盖率等方面亦显著提升。尽管语义表达尚需优化, Mini-CarbonGPT 获得的碳中和策略和知识可以作为推进碳中和领域研究者决策的基础。通过本研究的数据收集策略和积累的数据可以作为推进碳中和交叉领域的 LLM 研究, 促进综合碳中和决策的进一步发展。

关键词: 碳中和; 大数据; 垂直领域大模型; 检索增强生成; 碳中和语料库

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

新一代大数据与智能找矿系统研发

周永章^{1*}, 李文佳¹, 朱彪彪¹, 于新慧¹, 牛露佳¹, 徐述腾¹

1. 中山大学 地球环境与地球资源研究中心, 广东珠海 519080

本研发的智能找矿系统模型通过将区域地质与找矿垂直领域大模型与知识图谱结合, 实现长程关联和隐式知识推理。通过关联规则等数据挖掘算法模块, 挖掘出与矿致异常相关性最为密切的关联因子。通过深度学习算法高度融合知识推理结果和关联因子, 实现区域知

识、数据双驱动的智能找矿系统构建, 使系统能够从区域地质与找矿垂直领域大数据中检测矿致异常。

关键词: 地质大数据; 智能找矿; 垂直领域大模型; 矿床知识图谱

• 专题 27: 地学大数据挖掘、机器学习与人工智能算法应用 •

Geochemistry π : 无需编程基础即可开展机器学习的智能工具

张舟^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

近年来,机器学习在地球化学领域的应用为相关科学问题带来了新认识。但是,地球化学科研人员需要花费大量时间精力实践机器学习方法。为了降低地球化学家应用数据挖掘方法研究的门槛,我们开发了 Geochemistry π , 一款基于 Python 的高度自动化机器学习框架 (Framework)。通过一键安装和运行 Geochemistry π , 地球化学科研人员只需提供 Excel 表格数据,便能在终端命令行、Web Portal、Jupyter Notebook、Google Colab Notebooks 等多种模式下运行软件,通过问答式操作流程获得经过自动调参后的机器学习模型及其相关图表。

Geochemistry π 以 Scikit-learn 库为基础,建立了自

动化数据挖掘流程,能够训练各种分类、回归、降维和聚类算法。本工具通过构建数据传输和算法功能应用相分离的层级式架构,保证了框架的可扩展性和可移植性。同时,利用 FLAML 库的 CFO 和 BlendSearch 两种超参数搜索方法来实现 AutoML 模块,并结合 Ray 分布式计算框架来加速模型参数优化过程,集成 MLFlow 库用于机器学习生命周期管理与监测,方便用户在不同尺度下比较多组训练后的模型。此外,整个框架采用前后端分离模式构建 Web Portal 框架,通过友好的 Web 界面演示机器学习模型与数据科学工作流程。

关键词: 机器学习; 智能工具; 地球化学

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

矿物岩石热导率原位精确、快速测量

郭新转^{1*}, 颜鑫鑫¹, 周云¹

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

原位测量硅酸盐矿物的热导率(κ)和热扩散系数(D), 经过近 40 年的发展, 逐渐出现稳态热流法、热光栅法、周期热流法、脉冲加热法、时域热反射法等热导率原位测量方法。基于大腔体压机的热导测量主要采用脉冲加热法, 其优点包括: (1) 能够同时获得高温高压下的 κ 和 D ; (2) 大压机的温度和压力测量相对金刚石对顶砧技术更准确且样品的尺寸更大; (3) 可以获得高压下的热容(C_p)值。因此, 大腔体压机联用脉冲加热法逐渐成为重要且可靠的热导测量技术。我们经过近四年努力, 在国内率先开发了大腔体压机二级压砧联合脉冲加热的热导测量技术。我们新开发的热导测量仪获得的数据具有极低的背景

噪声(μV 级)、超低信号延迟(μs 级)、高效率(采用自编软件, 可以直接测量、计算各热物理参数)、高拟合精度(≥ 0.97)等特点。即便与日本 Osako 等开发的热导测量平台相比, 我们的新平台也具有更高测量效率的优势。我们已经使用 18/11 组装测试了橄榄石最高 10 GPa、1600 K 条件下的热物理性质(目前国内使用脉冲加热法开展的最高温压条件的测试), 测量结果不受脉冲时长、脉冲电压的影响, 展现高度的可重复性。

关键词: 热导率; 热扩散系数; 大体积压机; 高温高压实验

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

深地幔压力下稳定的原位变形组装设计

徐放³, 谢龙剑^{1*}, David P Dobson²

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

2. Department of Earth Sciences, University College London, London WC1E6BS, UK 000000;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

D111 型大腔体压机作为近年来研发的深地幔变形模拟关键设备, 其与同步辐射 X 射线技术的联用已成为研究转换带及下地幔矿物/岩石流变特性的重要手段。然而, 传统装置中采用的碳化钨(WC)二级压砧因 X 射线不透明特性, 需通过加工锥形狭缝构建 X 射线衍射光路, 此结构缺陷导致实验组装在转换带底部(>20 GPa)深度以上极易发生组装失稳放炮, 实验成功率长期很低。本研究通过采用 7-3 的组装, 在衍射光路窗口位置采用国产高温高压烧结金刚石替代传统

WC 压砧, 并创新性将地锥形狭缝后置于高压变形后的密封边之后。实验验证表明, 该优化组装可以实现 22 GPa, 1800 °C 的原位稳定变形, 且 10 次以上高压变形测试均未出现组装失稳放炮现象。目前, 该组装已成功应用于 CF 相和斯石英的流变率测量实验。该组装为今后深部地幔流变学研究提供了可靠的技术支撑。

关键词: D111 流变仪; 深地幔; 流变学; 高温高压; 烧结金刚石

第一作者简介: 徐放(1990-), 研究员, 研究方向: 地球深部流变学, E-mail: fang_xu@zju.edu.cn

通信作者简介: 谢龙剑(1988-), 研究员, 研究方向: 地球内部结构起源与高压技术, E-mail: longjian.xie@hpstar.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

大腔体压机中掺硼金刚石加热器的技术研发与应用

谢龙剑^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

掺硼金刚石 (BDD) 加热器因其卓越的耐火性和优异的 X 射线透射性能, 已成为 10 GPa 以上大腔体压机高压实验中的关键加热器。近年来, 该领域取得了显著进展, 先后开发出掺硼石墨 (Yoneda et al., 2014; Xie et al., 2016; Shatskiy et al., 2009; Yamada et al., 2008)、高压合成 BDD (HP-BDD) (Xie et al., 2017)、化学气相沉积 BDD (CVD-BDD) (Xie et al., 2020) 以及可加工 BDD 块体 (MBDD) (Xie and Instrum., 2017) 等系列技术。这些技术的突破不仅提升了 BDD 加热器的加温性能, 还显著改善了其使用便捷性。目前, BDD 加热器已能够实现高达约 4000 K 的极端温度 (Xie et al., 2017)。通

过与烧结金刚石压砧技术的结合 (Xie et al., 2021), 研究人员已成功在大腔体压机中同步实现超过 50 GPa 的超高压和超过 3300 K 的超高温环境。BDD 加热器在高压熔体物性测量等领域的成功应用 (Xie et al., 2020; Xie et al., 2021), 进一步证明了其在实际实验中的可靠性和广泛适用性。本文将系统梳理各类 BDD 加热器的技术特点, 并根据不同实验需求提供加热器选型与操作指南, 以期为相关领域的研究人员提供参考。

关键词: 掺硼金刚石; 大腔体压机; 高温; 高压; X 射线透过性

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压缺陷化学与矿物稳定性及储水能力实验研究方法

刘锦^{1*}

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004

高压矿物的热力学稳定性与水赋存状态研究是地球科学领域的重大前沿课题。作为地表水通过俯冲带进入地球内部的主要载体, 含水物质的相变行为主导着深部水循环过程。最新高温高压实验表明, 俯冲带中的含水矿物相可将水体输运至核幔边界。矿物脱水过程对地幔物理化学性质具有多重调控作用: 不仅显著改变地幔流变特性—特别是控制地幔对流的关键参数地幔黏度; 同时通过影响矿物相平衡制约深部物质组成。更为重要的是, 该过程与岩浆生成及深源

地震活动密切相关, 对地表地质过程和人类生存环境具有深远影响。值得注意的是, 主要地幔矿物的水溶解度存在显著约束, 尤其是受高温高压缺陷演变规律的制约, 这使得高压含水矿物在地幔极端温压条件下的稳定性成为决定深部储水能力和物质通量的关键因素, 为探索深部水循环提供新思路。

关键词: 高温高压; 含水物质; 缺陷演化; 热力学稳定性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (9247921)

*第一/通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压物质科学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

激光加热 DAC 高压电学技术和方法探究

徐良旭², 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

随着对地球深物质的物理化学属性研究的深入和大地电磁测深地球物理数据的日益丰富, 高温高压原位电学性质测试技术和方法逐渐成为限定地球内部电性结构异常成因机制以及水、碳等挥发份分布与效应的不可或缺的研究手段和重要途径。基于金刚石对顶压砧 (DAC) 与激光加热技术, 已发展出二电极法、四电极法、范德堡法、阻抗谱法等, 用于研究矿物岩石样品的电导率和电化学性质, 为深入理解地球深部的物理化学现象与物质性质之间的关联提供了关键矿物学证据 (Okada et al., 2014; Ryzhkin et al.,

2020; Yoshino, 2010; Ohta et al., 2007; Zhao, 2024; Su et al., 2023)。然而, 当前基于激光加热 DAC 高压电学技术和方法仍存在诸多挑战, 致使下地幔及地核深部物质的电学性质实验数据相对匮乏。鉴于此, 本工作尝试对范德堡法和阻抗谱法进行改进和完善, 期望借此可以深入系统地探究地球超深部的物理化学性质及动力学演化机制, 为深地科学研究提供新的思路。

关键词: 高温高压电学; 激光加温; 范德堡法; 阻抗谱法; 金刚石对顶压砧

国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 徐良旭 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: liangxu.xu@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. 地球化学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压条件下电导率测定实验的氧逸度控制方法

刘汉永^{1*}

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

氧逸度是地球内部重要的热力学参数, 可以通过改变变价元素的价态影响物质的多种物理、化学性质, 因此需要在高温高压实验中控制体系的氧逸度。对于地学硅酸盐矿物而言, 导电机制主要有质子导电、离子导电和小极化子导电, 而熔体主要通过离子的扩散而导电。不同的导电机

制对氧逸度的响应不同。本研究主要介绍在电导率的高温高压测定实验中氧逸度的控制方法, 并根据实例, 介绍氧逸度对不同导电机制和物质电导率的影响。

关键词: 电导率; 氧逸度; 高温高压

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上地幔矿物溶解度的准确测量——大腔体水热实验技术

孙鹏辉¹, 孙凤霞^{2*}, 刘锦¹

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

高温高压溶解实验对于探究地球深部物质及元素的迁移具有重要意义。目前, 在高温高压下溶解度实验通常局限于地壳温度-压力范围, 俯冲带(上地幔)更高温度-压力条件下的溶解度通常采用金刚石对顶砧装置(DAC)半定量实验。基于前人经验, 本课题组改进了一种基于金属子母扣的实验组装, 最多可以盛放 200 μL 以上体积的液体, 通过回收单矿物及流体, 实

现对 ~ 5 GPa 及 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以内较高温-压条件下溶解度及流体的准确测量; 通过使用不同材质的子母扣, 以实现实验体系氧逸度的控制。该组装可以应用于地球内部矿物的溶解度测量以及材料在高压下的水热合成。

关键词: 高温高压; 溶解度; 大腔体; 水热实验技术

基金项目: 国家自然科学基金交叉学部“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目(9247921)

第一作者简介: 孙鹏辉(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: sunpenghui@stumail.ysu.edu.cn

通信作者简介: 孙凤霞(1990-), 助理研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: sunfx@ief.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

纳米分辨率玻璃中水含量和分布分析技术

龙涛^{1*}, 杨亚楠¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 102206

水是地球与行星演化过程中最为重要的挥发份组成, 是驱动地质与化学过程的“催化剂”, 影响着从微观的矿物形成到宏观的板块俯冲和地幔对流等板块运动。近年来, 得益于现代分析技术和深地样品模拟研究的发展, 地球深部水的研究取得了巨大的进展。团队采用原子探针和纳米离子探针技术, 开展了含水玻璃中纳米尺度水含量、赋存状态与分布的探索研究。结果表明, 两种超高分辨率

的分析技术能够有效定量评估玻璃中羟基水的含量与三维分布特征。利用原子探针实现了玻璃中水含量的检测限好于 0.02%, 并发现玻璃中存在纳米富羟基水包裹体。上述方法为未来开展高温高压合成复杂样品中挥发份含量与赋存状态的研究奠定了技术基础。

关键词: 原子探针; 水; 纳米探针

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

超高动态高温高压下矿物波速的测量与地球深部研究

张友君^{1*}

1. 四川大学 原子与分子物理研究所, 成都 610065

高速撞击可以产生高温高压状态并可模拟地球超深部的温压环境。精确测量地球超深部矿物在相应温压环境下的波速物性对于了解地球内部成分与动力学过程具有重要意义。我们利用高速撞击产生高温高压, 在 0~300 GPa 以及 300~5000 K 温压范围内

获得了不同矿物的波速。本报告将介绍在极端高温高压下对铁和铁化合物波速的测量以及在深地中的应用。

关键词: 波速; 动高压; 地球超深部

基金项目: 国家自然科学基金 (42422201)

张友君 (1986-), 研究员, 研究方向: 高压矿物物理学, Email: zhangyoujun@scu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压中子衍射技术的新型压砧与组装设计

房雷鸣^{1*}

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900

中子衍射原位高压加载技术自上世纪 90 年代开始发展以来, 在新材料、地学、化学、物理等各领域发挥了越来越重要的作用。中国绵阳研究堆 (CMRR) 中子科学平台的高压中子衍射 (凤凰) 谱仪是国内首台可进行高压环境加载的中子衍射谱仪, 由中子聚焦系统、探测器系统、高压加载与集成系统等部分组成, 可进行常规、高/低温、高压环境下的中子衍射实验。巴黎-爱丁堡压机 (Paris-Edinburgh press) 因具有大体积样品、便携、结构简单等优点, 被广泛应用于中子源进行高压原位中子衍射实验。但因单轴加压而导致封垫和组装不断沿径向向外流动的特点, 限制了其加载的最高压力, 并且使高压下的温度加载也非常具有挑战性。本工作根据高压下组装受力和形变特点, 通过在压砧边缘处增加小平台, 形成类似多面顶压机组装的

密封边, 实现了对组装侧向支撑能力的大幅提高。由于组装在较高的压力下仍然保持较小的形变, 使单 Toroidal 金刚石压砧和组装的压力范围由原来的不到 10 GPa, 提高到了 14 GPa 以上, 并大大提高了压砧和组装的稳定性。同时, 优化设计的高温高压组装可以稳定加载温度到 1500 K 以上, 将加热管直径由 3.5 毫米减小到 3 毫米, 温度可以提高到 2000 K 以上。原位高温高压中子衍射实验结果显示, 压力 8.7 GPa、温度 1380 K 的条件下可以获得高质量的样品的中子衍射谱, 并且组装展现出优异的稳定性。本工作对研究材料在高压下的相变及揭示相变的微观机制具有重要意义。

关键词: 高压中子衍射; 巴黎-爱丁堡压机; 金刚石压砧; 高温高压组装; 封垫

基金项目: 国家自然科学基金 (12075215, 11427810)

通信作者: 房雷鸣 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事高压材料及高压中子衍射研究. E-mail: flmyaya2008@163.com

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上海光源大压机线站及应用介绍

杨科^{1*}

1. 中国科学院上海高等研究院 上海光源, 上海 201204

上海同步辐射装置（上海光源）的大压机专用实验站于 2024 年 1 月正式对用户开放。上海光源共有两个大压机专用实验站, 分别配备了 200 吨和 2000 吨的大腔体压机。其中, 2000 吨压机是国际上第一个在同步辐射采用的双模具大压机, 可以支持 DDIA 模具和 KAWAI 模具, 两个模具可以通过电动切换。200 吨压机提供 DDIA 模具。开放一年来, 已支持用户时间超过 1500 小时。2000 吨压机最高压机已经达

到 45 GPa 左右。大压机实验站可以提供能散衍射、XRD 和高分辨成像实验方法。上海光源大压机实验站的建成开放, 填补了国内大压机原位实验研究的空白, 为高温高压下的材料原位结构探测提供了一个重要的实验平台。

关键词: 同步辐射; 大腔体压机; 衍射; 成像; 原位

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压条件下基于大压机平台的弹性和滞弹性测量新技术的开发

刘超¹, 刘永刚^{1*}, 张飞武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

地震波波速的反演依赖于高温高压条件下对地球内部矿物的弹性和滞弹性特性的定性与定量测量。多面体大压机是实现高温高压环境的重要手段。与金刚石对顶砧相比, 尽管多面体大压机的最高压力有限(在碳化钨砧块下, 最高约 50 GPa, 常用压力范围小于 20 GPa)(Ishii 等, 2019), 但其具有较大的样品腔体(可达到毫米级甚至厘米级), 能够保证样品温度梯度的可控性, 并在各种物性测量中提供更多优势。因此, 我们在多面体大压机平台的基础上, 创新性地开发出弹性和滞弹性测量的新技术, 旨在没有同步辐射条件下实现滞弹性和弹

性的同步稳定测量。与传统的超声波波速测量弹性技术相比(Li 和 Liebermann, 2014), 该技术增加了多个换能器, 使得在不需要同步辐射光源的情况下, 能够实现样品长度与超声波速的同步测量; 而传统的滞弹性测量方法相比(Liu 等, 2021; Yoshino 等, 2016), 该技术同样摆脱了同步辐射光源的限制, 并有望在更宽的频率范围内实现更精确的衰减系数测量。

关键词: 多面体大压机; 弹性; 滞弹性; 地震波波速

基金项目: 国际自然科学基金项目(42174225)

第一作者简介: 刘超, 助理研究员, 研究方向: 实验地球物理学. Email: liuchao@mail.gyig.ac.cn

*通讯作者简介: 刘永刚, 研究员, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: liuyonggang@mail.gyig.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压同位素分馏实验技术与方法进展

王天阳^{2,3}, 刘锦^{2*}

1. 北京大学, 北京 100871;

2. 燕山大学, 河北秦皇岛 066004;

3. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

20 世纪末, 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS, multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry) 的发展实现了非传统稳定同位素的高精度测定 (Belshaw et al., 2000), 推动了高温地质过程中稳定同位素分馏效应的精细化研究。相较于传统基于地质样品测试结果反演式推导, 大腔体压机高温高压实验技术 (300~2000 K 和 0~30 GPa) 为极端温压条件下地质过程引发的同位素分馏提供了正演证据的约束 (Williams et al., 2012)。金刚石压砧 (DAC) 与核共振非弹性

X 射线散射 (NRIXS, Nuclear Resonant Inelastic X-ray Scattering) 技术结合 (Sturhahn, 2004), 可精确测定矿物高达数百 GPa 压力条件下的简约配分函数 β , 从而获取同位素分馏的绝对数值 (Liu et al., 2017)。高温高压实验模拟与同位素测试相结合, 为揭示早期行星演化、核幔分异、岩浆洋结晶分异及部分熔融等关键地质过程提供了突破性的研究手段。

关键词: 高温高压; 同位素; 分馏

基金项目: 国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 王天阳 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: tianyang.wang@stu.pku.edu.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

大腔体压机高温高压腔体温度场的数值模拟

李诗音¹, 刘兆东^{1*}

1. 吉林大学, 长春 130012

大腔体压机 (LVP) 被广泛应用于复制地球内部所存在的条件, 或用于产生高温高压条件进一步合成和研究材料。样品腔中的温度分布会对实验产生十分重要的影响。高压腔体中实际存在的温度梯度分布可能会影响到实验的温度分辨率, 而且还可能导致样品发生异常的化学反应。

我们基于大腔体压机 (LVP), 让铼片作为加热器去计算其腔体内的温度值及腔体内温度梯度的分布情况, 以有限元法作为分析手段, 采用 Abaqus 软件进行计算, 利用压缩后各组件的实际尺寸进行构建模型, 考虑了二维和三维两种模型构建方式, 对八面体, 压砧砧座等组件在构建模型时进行了适当的简化, 并考虑了其

边界条件和载荷类型。载荷分别考虑了交流, 直流两种交流方式进行加热, 对模型进行网格划分, 通过求解热电偶和公式进而得到各节点上的电压值和温度值, 由此可知腔体内的温度梯度分布情况。目前模拟了实验条件为 23 GPa, 温度 2300 °C 时以及 25 GPa 1200 °C 时的结果, 发现计算出的结果与实验数据尚有些差距, 后续会不断改进网格尺寸的划分, 材料参数, 对模型的简化等方面的影响, 使得计算结果与实验数据相符合, 进而对其温度梯度进行下一步的分析。

关键词: 数值模拟; 大腔体压机; 高温高压; 温度梯度

第一作者简介: 李诗音, 硕士研究生, 研究方向: 大腔体压机高温高压腔体温度场的数值模拟. Email: 2484502912@qq.com

*通信作者简介: 刘兆东, 教授, 研究方向: 地球深部科学. Email: liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Acoustic emissions detection of micro-cracks under high pressure and high temperature in a deformation large-volume apparatus

马帅领^{1*}

1. 宁波大学 物理科学与技术学院, 浙江宁波 315211

We successfully developed an in-situ Acoustic Emission (AE) detection setup that allows recording of AE waveforms (triggered and streaming) and simultaneous X-ray diffraction and imaging on samples deformed at high pressure and high temperature (HPHT) conditions in the Aster-15 LVP at the synchrotron beamline station P61B. This high-pressure AE detection system is a powerful tool to investigate AE phenomena from the HPHT chamber. Six commercial acoustic sensors, protected by a tungsten carbide support ring on each anvil of the same material, have excellent survivability throughout each successive experiment. By pulsing each sensor in succession, the average wave velocity through the anvils and cell assembly can be determined at any press load. The distance between the sensors is obtained by X-ray radiography and by logging the positions of each hydraulic ram. This provides a basis for accurately

locating AE events in the sample. The feasibility of this AE detection setup was confirmed by compression and deformation test runs using several different self-designed AE sources in specialized assemblies. The present setup proves to be extremely efficient and accurate in measuring brittle processes in samples under HPHT. It is now available for applications for beam time and experiments without X-rays at P61B. Combined with synchrotron X-rays, in-situ pressure, temperature, strain rate and stress, and phase changes can be monitored, while recording AE activity. We provide a powerful tool to investigate the origin of earthquakes, for example causing AE emissions due to brittle dehydration reactions or phase transformations in the Earth.

关键词: Extreme conditions; Acoustic Emissions; High-pressure; Earthquakes

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

一种提高大腔体压机合成样品效率的方法

许金贵^{1*}, 范大伟¹, 周宏斌¹, 周文戈¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

实验地球科学研究需要大量矿物样品。天然矿物样品通常含有多种杂质和缺陷, 且多为成分复杂的固溶体, 不适宜用来约束成分变化对矿物物理化学性质的影响。因此, 人工合成固定组分的矿物样品成为研究的重要手段。矿物样品的人工合成方法主要分为两类: 第一类为常压条件下的晶体生长, 其显著缺点在于耗时较长; 第二类为高温高压合成法, 尽管合成的晶体尺寸较小, 但具有成分纯净且合成速率方面的优势。在我们以往针对地幔矿物(如斜方辉石和单斜辉石相变)的研究中, 我们采用了很多的人工合成样

品, 这些样品均基于大腔体压机的高温高压实验制备。然而, 我们之前的实验装置仅能每次合成单个样品, 产量有限, 难以满足大样品需求量的实验研究(如矿物热力学性质, 包括比热容、熵等的实验测试, 通常需几十毫克样品)。为克服这一限制, 我们通过对实验装置进行改进, 可在单次高温高压实验中合成多达 8 个样品。该方法显著提升了大腔体压机合成样品的效率, 为相关研究所需样品提供了有力支撑。

关键词: 高温高压; 大腔体压机; 样品合成

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高压变温热导率的测量方法及应用

岳冬辉¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 亚稳态国家重点实验室, 河北秦皇岛 066000

变温热导率的实验测量是高压科学领域公认的技术难题。课题组基于金刚石对顶砧 (DACs) 装置自主研发稳态内加温 (1200~4000 K) 热导率测量方法及装置, 可用于高压地球科学领域; 此外, 课题组将时域热反射技术 (TDTR) 与低温装置结合, 可实

现 4~500 K 高压热导率的测量, 为高压超导材料及理论的研究提供新时域。

关键词: 高温高压; 金刚石对顶砧; 热导率; 时域热反射

第一作者简介: 岳冬辉 (1991-), 讲师, 研究方向: 高压热输运. Email: 15104409336@163.com

*通信作者简介: 刘锦 (1985-), 教授, 研究方向: 高压地球科学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

综合极端条件实验装置—高温高压大体积材料研究系统

刘兆东^{1*}, 胡阔¹, 朱品文¹, 周强¹, 杨新一¹

1. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130012

吉林大学国家重大科技基础设施“综合极端条件实验装置—高温高压大体积材料研究系统”是国家重大科技基础设施“十二五”期间重点建设项目, 投资规模 1.9 亿元, 建筑面积 6000 平方米, 负责建设与开放运行具有世界先进水平的高温高压大体积材料研究系统。设施系统由三大子系统构成, 包括固体环境高温高压、液体环境高温高压、非平衡高温高压子系统, 设施将研制先进大腔体压机以及相关关键核心技术, 发展大腔体压机超高压高温关键技术, 建立大腔体压机原位光谱、电学、波速等测试, 可开展高温高压极端条件下新材料合成、化学反应过程、地球深部物质属性等以前无法完成

的研究; 可以实现大腔体液体物质的原位化学反应、超临界流体及其与物质相互作用、高温高压流体的液-液相变及相平衡、深海极端环境模拟和水热与溶剂热晶体生长等研究; 目前设施正在建设中, 设施建成后将解决了国家对材料高压合成的实验装置的需求, 为大尺寸超硬材料和其他功能材料的高压制备提供了关键技术支撑与切实可行的制备路径; 更好地解决材料、物理、化学、地球科学等自然科学领域的关键科学问题。

关键词: 综合极端条件实验装置; 大腔体压机; 高压技术

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

利用 Paterson 流变仪研究水对透辉石多晶集合体流变性质的影响

李建峰^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

水广泛存在于地球内部且具有分布不均一性, 且可以明显影响矿物岩石的流变行为。Paterson 流变仪以高的差应力测量精度特点而被用来测定矿物岩石流变方程中的水逸度指数。然而在水饱和状态下测定的水逸度指数, 由于过量颗粒边界水的存在很可能高估了水对矿物岩石流变的影响。近期, 我们以含有一定量结构水的天然透辉石晶体颗粒为初始材料, 合成了水不饱和初始样品并在 Paterson 流变仪上开展轴向压缩变形实验; 通过利

用红外光谱分析变形前后样品的水含量建立变形过程中水丢失模型, 进而测定在水不饱和状态下透辉石多晶集合体的位错蠕变流变律, 并获得水含量指数 $r=1.2\pm0.2$ 。该方法有效的降低了颗粒边界水的影响, 为我们准确研究结构水对矿物岩石流变影响提供了新思路。

关键词: Paterson 流变仪; 水不饱和; 透辉石多晶集合体; 流变性质

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

间震期至同震期断层滑动的实验模拟：旋转剪切高温高压摩擦实验设备与方法

姚路^{1*}, 嶋本利彦¹, 马胜利¹, 冯炜², 宋刚¹, 覃伟峰¹

1. 中国地震局地质研究所 地震动力学与强震预测国家重点实验室, 北京 100029;

2. 意大利帕多瓦大学, 帕多瓦 635131

孕震断层在一个地震循环内不同阶段的滑动速率跨度可达 9~10 个数量级 (间震期: $\sim \text{mm/yr}$; 同震阶段: $\sim \text{m/s}$)。旋转剪切设备是实现这一较宽速率范围内断层摩擦滑动实验模拟的可靠实验装置。尽管水热条件下的低速率 ($< \mu \text{m/s}$) 旋转剪切摩擦实验设备相对较为成熟, 但开展高温高压孔隙水条件下的断层高速 ($\sim \text{m/s}$) 摩擦实验存在较高的技术难度。本报告以中国地震局地质研究所的旋转剪切低速-高速摩擦设备为例,

总结了研究团队为该设备配备外加温高温高压容器的设计研发与改造升级过程, 简要阐述了针对主要技术难点的解决方案; 此外, 还展示了利用该设备开展的断层低速率大位移摩擦性质和高速摩擦性质研究进展, 并简要讨论了对地震物理机制的重要新认识。

关键词: 旋转剪切设备; 水热条件; 断层低速至高速摩擦; 地震物理机制

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

利用大腔体压机结合声发射与同步辐射技术模拟 深部地震的成因

许满^{1,2*}, Tim Officer³, Tony Yu³, Yanbin Wang³

1. 上海前瞻物质科学研究院, 上海 201203;

2. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

3. 芝加哥大学 先进放射源中心, 美国芝加哥 060637

尽管在大约一个世纪前就已明确探测到地球深部(>50~700 km)地震的发生, 然而由于震源较深, 直接观察此类地震事件很困难, 因此控制深部地震发生的物理机制至今仍不明确。在地球内部由于高温高压条件的存在, 岩石应该呈塑性变形或蠕变而很难发生脆性断裂及摩擦滑移, 因此这种深部地震事件的断层机制和地球动力学解释仍然是地球科学中的未解之谜。近年来, 大腔体压机, 尤其是可对岩石进行可控变形的 DDIA 型压机, 结合先进的声发射监测技术

和同步辐射 X 射线成像及衍射技术, 已经能以前所未有的细节描绘岩石样品在高温高压条件下的断裂过程, 为实验室模拟深部地震提供了有效手段。本报告将回顾 DDIA 变形实验+声发射技术的发展历程, 重点阐述近年来运用 DDIA-30 在大样品(~cm 级)高温高压变形+声发射实验所取得的进展。

关键词: 大腔体压机; 声发射; 高温高压; 深部地震

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

极端动态压缩实验技术及其在地球化学中的应用

李治国^{1*}

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900

针对极端冲击压缩下的材料物性研究, 发展了基于阻抗梯度飞片的三级炮超高速发射技术以及流体多次反射冲击压缩实验技术。这些技术可以在稠密气体和固体中分别产生数百 GPa 和 TPa 的冲击压力。对低 Z 气体(如氢、氦、氘-氦混合物)和高 Z 金属(如金和铂)进行了多次反射压缩和超高速冲击实验。对于低 Z 气体, 获得了高达约 200 GPa 和 50000 K 的状态方程(EOS)数据, 并对极端冲击下的化学分解与电离进行了研究。对于高 Z

金属, 获得的 Hugoniot 数据达到了 1.1 TPa 的最大压力, 并且我们发现了在约 0.6 TPa 以上的 Hugoniot 中由金的 5 d 电子在极端冲击压缩下的热激发(电离)引起的“软化”行为。这些结果将极大地促进对温密物质(WDM)的理解, 以及 WDM 领域中理论模型的构建和验证。

关键词: 三级炮超高速发射技术; 多次反射压缩技术; 极端冲击下的化学分解与电离

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971108)

第一作者简介: 李治国(1987-), 副研究员, 研究方向: 冲击波物理. Email: zhiguo_li@foxmail.com

*通信作者简介: 胡建波(1980-), 研究员, 研究方向: 爆炸与冲击动力学. Email: jianbo.hu@caep.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压反应釜的研发和改进

姚永盛¹, 郭海浩^{1*}, 孙文泽¹, 李金龙¹, 巫翔¹, 章军锋¹

1. 中国地质大学, 武汉 430074

高温高压水热反应装置在深地研究中具有重要作用, 可用于模拟水岩反应和元素迁移等关键地质过程。针对国外同等设备造价昂贵、进口限制和后期维护困难等问题, 我们自主研发和改进了可变形袋式热液反应装置和快速淬火冷封式高压釜两种实验装置。(1) 可变形袋式热液反应装置在恒温恒压下通过内部柔性反应容器的形变可以做到随时取样, 以金罐为内部反应容器时其工作温压条件在 250~550 °C 和 200~550 bar 之间。常规的金质反应容器具有良好的惰性和延展性, 可在高温高压下保持化学性质稳定和制成各种实验容器设计形状。金罐通过钛盖密封, 钛盖在确保化学惰性的同时利于容器的拆卸和组装, 与反应容器直接相连的取样管同样由钛金属制成, 确保不会和实验产生的热液流体相互反应。我们对取样管进行了改进, 将取样管设计成内外管结构, 外管较短取容器上部气体样品, 内管较长取容器下部液体样品, 做到气液相分离取样。(2) 快速淬火冷封式高压釜主要由温压控制系统和高压釜组成。高压釜通过外

侧环形电炉加热, 以水为介质提供压力, 温度上限为 900 °C, 精度为 ± 2 °C, 压力上限为 4000 bar, 精度为 ± 10 bar。具有温压独立控制及数字化显示功能。我们还设计了一种新的高压釜温度校准装置及方法, 有效地解决了由于高压釜内外温度变化和高压釜内高度差引起的温度梯度问题。利用该装置测量了 500~900 °C (间隔 50 °C) 快速淬火冷封式高压釜的温度梯度, 结果表明反应釜内部 (4 cm 高度差) 温度梯度小于 10 °C。此外, 在 800、850、900 °C 超高温条件下, 冷封式高压釜内温度梯度进一步改善, 分别小于 5、3、2 °C。建立了釜体温度与样品温度的拟合曲线, 消除了釜内外温度差异对实验的影响。该方法明显提高了实验过程中的温度精度, 对于需要精确控温的实验具有重要意义。

关键词: 高温高压反应釜; 可变形袋式水热反应装置; 快速淬火冷封式高压釜; 金-钛反应容器; 温度校正

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373038)

第一作者简介: 姚永盛 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: yaoyongsheng2021@163.com

*通讯作者简介: 郭海浩 (1988-), 教授, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: haihao.guo@cug.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

低温气体围压压机的设计与改良

綦超^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

六方晶系水冰是太阳系中广泛分布的造岩矿物, 组成了地球的冰原与冰川、火星的冰盖、矮行星和冰卫星的冰壳。这些冰体的运动不但与地球的气候变化和宜居环境演化息息相关, 也在行星内部演化中扮演重要作用。因此, 冰的实验研究也是流变学的重点发展方向。尽管冰的变形温度很低 (大部分 $> -30\text{ }^{\circ}\text{C}$), 但是相比于冰的熔点, 这个温度是接近 90%熔点温度。因此, 冰的流变

学实验也是在高温高压下展开。我们正在搭建一台冰流变仪。该设备在宾夕法尼亚大学的冰流变仪基础上改良而来。温度范围为 $-100\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 围压由氮气提供, 可达 100 MPa, 可以进行轴向压缩变形实验。借此会议机会向同行汇报一下我们的设计和改良。

关键词: 实验流变学; 冰; 高温变形; 流变仪

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Slip-weakening and Unstable Friction of Antigorite under High Fluid Pressure: Implications for Slow Slip

张雷^{1*}, 何昌荣¹

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

蛇纹石矿物广泛分布于俯冲带地幔楔区域。鉴于其独特的物理化学特性, 这类矿物可能对俯冲断层带的摩擦性质和稳定性产生重要影响。本研究以叶蛇纹石断层泥为研究对象, 在有效正应力 30、50 和 100 MPa、孔隙流体压力 100 MPa、温度 100~500 °C 的热液条件下, 系统考察了其摩擦特性。通过采用 0.008~1.0 $\mu\text{m/s}$ 的加载速率变化, 深入探究了摩擦强度的速率依赖性。实验结果表明, 断层泥的摩擦系数随温度升高呈系统性降低趋势, 从 0.75 降至 0.36。叶蛇纹石主要表现为稳定的速度强化特征。但在 300 °C 和 400 °C 条

件下以及较低的有效正压力条件下, 当加载速率降至 0.04 $\mu\text{m/s}$ 时, 叶蛇纹石表现出以缓慢应力降为特征的速度弱化行为。在高孔隙流体压力和接近俯冲带地幔楔温度条件下, 地幔楔附近的富叶蛇纹石滑脱层在低速剪切时会孕育不稳定成核, 随之随着逐渐加速而进入高速的速度强化阶段进而地震的破裂过程逐渐减缓, 最终以慢地震的形式终止。这些发现为深入理解俯冲带慢滑移事件的形成机制提供了新的实验依据。

关键词: 俯冲带; 叶蛇纹石; 慢滑移

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

时域布里渊散射及其在高压科学中的应用

徐丰^{1*}, 黄海军¹

1. 武汉理工大学 物理与力学学院, 武汉 430070

时域布里渊散射 (Time-domain Brillouin scattering - TDBS) 是一种光学泵浦探测技术, 其利用飞秒脉冲光源在物质内部激发 GHz 频段的超声波, 并利用相同的光源探测声波导致的物质内部的瞬态光学响应。相较于传统的超声测量方法, TDBS 具有高时空分辨优势, 能够跟踪分析物质内部亚微米尺度的局部信息。我们将 TDBS 与金刚石压砧 (DAC) 相结合测量了两种立方相矿物 MgO 和 NaCl 的弹性性质。对于单晶 MgO, 测量了其不同晶向的声速, 再结合已知的状态方程, 获得了完整的弹性数据。结

果显示, 在下地幔顶部压强条件下, MgO 的各向异性随压强的升高持续增强。对于多晶 NaCl, 利用 PU 技术特有的高时空分辨优势, 同样获得了其单晶弹性数据, 数据跨越了 NaCl 由低压 B1 相到高压 B2 相的转变, 揭示了 NaCl 的各向异性在相变前后的变化趋势。该工作证明了 TDBS 技术在研究矿物的高压相时具备的独特优势, 尤其在经历了相变之后单晶样品无法继续保持的情况下, 依然能够研究其单晶弹性性质。

关键词: 瞬态探测; 声速; 弹性; 高压

第一作者简介: 徐丰 (1984-), 副教授, 研究方向: 高压矿物物理. Email: xufeng@whut.edu.cn

第二作者简介: 黄海军 (1976-), 教授, 研究方向: 高压物理. Email: hjhuang@whut.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

六轴大腔体压机微米级动态加载技术

邓奥¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学, 河北秦皇岛 066000

为模拟地壳-地幔的温度压力环境, 深化岩石矿物多场耦合力学行为研究, 燕山大学高压科学中心搭建了 LPQ6 六轴大腔体压机静高压装置。该压机装配 6 个可独立控制的工作油缸, 分别控制锤头从 XYZ 三个方向对样品施加压力, 结合辅助加热系统构建极端物态环境。各锤头执行机构具备 1 μm 的定位精度, 配合多轴同步控制算法, 可实现腔体内

压力场的梯度调制与三维应力对称性优化, 突破传统压机轴对称加载的局限性。系统在达到设定压力后仍能执行锤头位移, 实现样品压缩-拉伸循环加载, 有效模拟俯冲带岩层在地幔对流作用下的非稳态应力演化过程。

关键词: 极端条件; 高温高压; 大腔体变形压机

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上海光源 BL12SW 线站大压机实验站介绍及其在高压地球科学中的应用

周春银^{1*}, 杨科¹

1. 中国科学院上海高等研究院 上海同步辐射光源, 上海 201204

上海光源超硬多功能线站 BL12SW, 是上海光源二期线站工程中专用于高能 X 射线衍射和成像实验的线站, 其中大压机实验站主要聚焦于行星地球内部物质和新型材料在极端高温高压条件下的原位实验研究, 是国内第一个同步辐射大压机综合性实验站。大压机实验站 LVP1 和 LVP2 分别配置 200 吨 DDIA 压机和 2000 吨双模(DDIA 和 Kawai)大压机, 结合同步辐射 X 光可以开展高温高压下的相变、状态方程、流变、物性测量和超高压原位实验, 是国内

第一个同步辐射原位大压机综合性实验站。自 2024 年开始面向用户正式开放运行以来, 国内大压机用户利用上海光源 BL12SW 线站大压机实验站, 开展了广泛的高压实验, 并取得了初步的成果。随着线站软硬件的不断优化, 将为国内大压机用户提供更好的实验条件, 逐步达到国际先进水平。

关键词: 上海光源; 同步辐射; 大压机; 高温高压

基金项目: 国家自然科学基金项目(42274121)

第一作者简介: 周春银(1985-), 助理研究员, 研究方向: 高压矿物物理、同步辐射大压机技术应用。Email: zhouchunying@sari.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Kawai 型大腔体压机实现 50 GPa 以上的超高压力

赵鑫宇¹, 刘兆东^{1,2*}

1. 吉林大学 高压与超硬材料全国重点实验室, 长春 130000;

2. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130000

高压技术在地球和行星科学、物理学、化学中具有重要应用,尤其是在探索极端条件下物质的性质和行为方面。Kawai 型大腔体压机 (KLVP) 作为一种广泛使用的高压装置,能够实现超过 10 GPa 的压力,并且在精确控制的压力和温度条件下,提供从毫米到厘米量级的较大样品体积 (Kawai, N. 1966; Kawai, N. 1970)。然而,传统 KLVP 的压力上限通常限制在 25 GPa 左右 (Keppler, H. 2005; Irifune, T. 2014),这仅对应于地球下地幔顶部区域。尽管近年来通过改进碳化钨压砧的材质和构型, KLVP 的压力上限已有很大提高 (Yu-Chen, S. 2020; Hou, X. 2024),但使用传统 KLVP 配合碳化钨压砧在高温条

件下实现超过 50 GPa 的压力仍然是一个挑战。

本研究通过在八面体传压介质内引入导电的硼掺杂多晶金刚石和硬质氧化铝等材料,并结合常规 WC 压砧,设计了一种新型的 KLVP 内部组装。利用 GaP, Fe₃O₄ 等作为压力标定材料,通过电阻变化监测压缩过程中的压力变化,以及在超高压高温下通过合成含铝的布里奇曼石,并结合电子探针微分析,确定了我们在室温和 1900 K 高温条件下,分别实现了约 60 GPa 和 50 GPa 的超高压。

关键词: 超高压; 高温; 大体积压机; 碳化钨压砧

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFA1406200), 国家自然科学基金 (42272041、52302043、U23A20561), 吉林大学高水平创新团队基金 (2021TD-05), 以及上海同步辐射光源 (2024-SSRF-PT-510031、505511)

第一作者简介: 赵鑫宇 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 高压技术、高压物理与地球深部科学. Email: xinyuz23@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 刘兆东 (1986-), 教授, 研究方向: 高压技术、高压物理与地球深部科学. Email: liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

岩石流变学实验在深部地震物理机制研究中的应用

史锋^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

地球内部物质流变学性质是解决地球内部动力学过程的关键所在(例如: 板块运动的启动、地震的物理机制等动力学问题)。岩石流变学是通过研究岩石变形和流变规律的物理-化学过程, 定量的建立其流变强度随温度、压力、应变速率、水逸度等影响因素的变化。岩石变形不仅制约着地球不同时空尺度的演化, 也通过地震、资源的形成及其分布影响着人类社会的发展。岩石流变性质的主要研究手段是通过高温高压流变学实验, 建立其力学本构方程。以往的研究主要

集中在上地幔深度范围内(<100 km)的流变学实验, 主要的实验仪器包括气体介质的 Paterson 流变仪和 5 GPa 固体介质 Griggs 流变仪。随着同步辐射技术在 D-DIA 流变仪上的应用, 使得对于地幔转换带深度范围内的流变学实验成为可能。本研究主要介绍岩石流变学实验在中深源地震物理机制研究中的应用。

关键词: 岩石流变学; 高温高压实验; 中深源地震; 地震物理机制

史锋(1984-), 教授, 研究方向: 岩石流变学实验, 中深源地震物理机制, Email: shifeng@cug.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

热液金刚石压腔 (HDAC) 新型冷冻系统介绍及应用

高杰¹, 李建康^{1*}

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

热液金刚石压腔 (HDAC) 是一种为模拟地壳温压条件的地质作用而设计的实验设备, 可对 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 10\text{ GPa}$ 的热液体系进行实验 (Bassett et al., 1993; Chou, 2003; Li et al., 2016)。Li et al. (2020) 介绍了一种新型的热液金刚石压腔 (HDAC-VII) 及其配套冷冻系统, 此次介绍的新型冷冻系统是其基础上进行升级改造的。新型冷却系统主要包括液氮罐、高纯氮气瓶、温度控制器、气冷控制器、HDAC 温度控制软件等。前后两种冷却系统的主要工作原理相似: 利用减压阀和内径为 1/8 英寸的不锈钢管连接高纯氮气瓶和内部有盘管的液氮罐, 高纯氮气从氮气瓶内通过液氮罐内的液氮进行快速冷却后, 从液氮罐的另一头外接的橡胶软管通往 HDAC 样品腔处, 对样品腔进行冷冻。Li et al. (2020) 的冷冻系统通过气量控制阀调节气流大小以及 XYZ 控制杆调节冷冻后的氮气吹出位置, 来控制 HDAC 上下压腔的温度, 这非常考验操作人员对气流和冷气位置的控制, 并极其耗费精力。因此新型冷却系统进行

以下升级: 在高纯氮气罐和液氮罐中间添加气冷控制器; 去掉 XYZ 控制杆; 将温度控制器与气冷控制器相连接; 升级 HDAC 温度控制软件, 使其在低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下也可以控制 HDAC 的上下压腔内的电阻丝工作。升级后的 HDAC 温度控制软件根据所设置降温或升温速率的大小, 同时控制温度控制器和气冷控制器, 即控制上下压腔电阻丝工作功率及氮气气流大小。这使得上下金刚石砧的温差在 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且操作更为便捷、升降温速率更加精确 ($0.1\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$), 大大提高了冷冻实验的效率及准确性。因其效率及准确性的提高, 热液金刚石压腔 (HDAC) 新型冷冻系统的应用范围也更加广泛, 例如可以利用冰点 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对 HDAC 的热电偶进行校准、进行盐度测定、等容线测定 (Li et al. 2024)、样品腔内水的密度 ($>1\text{ g/cm}^3$ 时) 测定 (Haselton et al., 1995; Chou et al., 1998)。

关键词: 冷冻系统; 热液金刚石压腔

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2444204)

第一作者简介: 高杰 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 高温高压模拟实验. Email: 1249639049@qq.com

*通讯作者简介: 李建康 (1976-), 二级研究员, 博士生导师, 研究方向: 稀有金属成矿与高温高压模拟实验. Email: Li9968@126.com

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

鲜水河断裂带断层岩在水热条件下的摩擦滑动特征实验研究

苏晓婉¹, 周永胜^{1*}

1. 中国地震局地质研究所, 地震动力学与强震预测全国重点实验室 构造物理室, 北京 100029

鲜水河断裂是一条强震频发的大型走滑断裂, 但形变测量观测到某些段落存在蠕滑。这些蠕滑区段大量出露的富含黏土矿物的板岩、黑色碳质泥岩和千枚岩, 代表了鲜水河断裂上地壳的主要岩石组成。为研究鲜水河断裂的无震蠕滑和粘滑(地震)机制、转化条件与物理机制, 我们采用气体介质三轴高温高压岩石力学实验装置, 在围压 50、100、170 和 200 MPa, 孔隙水压 30、100 MPa, 和实验温度 25~370 °C 条件下, 开展了板岩、黑色碳质泥岩断层泥和千枚岩的高温高压摩擦实验研究。为获得实验样品摩擦稳定性的速度依赖性参数(a-b), 实验中的轴向加载速率在 5.0、1.0、0.2、

0.04 $\mu\text{m/s}$ 之间进行切换。实验结果显示, 板岩、黑色碳质泥岩和千枚岩在实验条件下的摩擦强度分别为 0.54~0.64、0.54~0.70 和 0.50~0.58。并且三种实验样品的摩擦稳定性均表现出随温度的升高由速度强化转变为速度弱化, 其中板岩和黑色碳质泥岩断层泥的转化温度为 250~300 °C, 而千枚岩的转化温度为 300~350 °C。结合地温梯度, 鲜水河断裂带在 10 公里以上呈现为速度强化型蠕滑, 在 10~20 公里深度具备地震成核条件。

关键词: 鲜水河断裂带; 板岩; 黑色碳质泥岩断层泥; 千枚岩; 摩擦滑动稳定性

基金项目: 国家自然科学基金地震联合基金(U2139202)

第一作者简介: 苏晓婉(1992-), 助理研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: suxiaowan@ies.ac.cn

通讯作者简介: 周永胜(1969-), 研究员, 研究方向: 高温高压岩石流变学实验研究. Email: zhouyush@ies.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压下地幔矿物的波速测量

赵超帅¹, 毛竹^{1*}, 于英鑫¹, 张馨月¹

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

波速是地幔矿物最为重要的物理性质之一。实验测量高温高压条件下地幔矿物的波速与地震学观测结果的对比, 是反演地球内部物质组成和比例, 揭示地球内部物质分布不均一性成因最为直接和重要的手段(毛竹等 2022)。因此, 实验模拟地幔矿物在极端条件下的波速测量变得尤为重要且关键。其中, 电阻外加热和布里渊散射技术的联用实现了高温高压下原位测量波速参数的精确获取。相比于传统的超声干涉测量的方法, 电阻外加热和布里渊散射技术的结合具有所需样品小(几十微米级), 测量压力高(100

GPa 以上), 温度稳定(误差正负 2 度), 精准获取矿物各种弹性和各项异性等众多优点。该联用技术已成功用于地幔矿物(如橄榄石、布里奇曼石、方镁铁矿等)和含碳含水重要挥发份(如碳酸盐, 含水矿物等)的波速测量(Kurnosov et al., 2017; Li et al., 2022; Mao et al., 2015; Su et al., 2021; Yang et al., 2016; Zhao et al., 2019), 为反演地幔矿物组成和分布提供了关键且可靠的实验约束。

关键词: 高温; 高压; 地幔矿物; 波速; 挥发分

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0807500)

第一作者简介: 赵超帅(1989-), 副研究员, 研究方向: 高压矿物物理。Email. cszhao@ustc.edu.cn

通讯作者简介: 毛竹(1982-), 教授, 研究方向: 高压矿物物理。Email. zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

金刚石对顶砧超高压技术发展及其在探索巨行星中的应用

吕超甲¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北秦皇岛 066004

过去十余年来, 金刚石对顶砧 (diamond anvil cell, DAC) 超高压技术在压力和温度极限的突破上取得了重要进展, 极大推动了固体物理及行星科学研究。二级金刚石对顶砧 (double-stage anvil) 和环形压砧 (toroidal anvil) 技术的提出, 使静高压实验突破了 400 GPa 压力瓶颈, 为研究超高压条件下的巨行星内部物质提供了新方法 (Dubrovinsky et al., 2022; Dewaele et al., 2018; Jenei et al., 2018)。近期, 环形压砧 DAC 的发展进一步提高了极限压力下的砧面尺寸, 并有效扩展了超高压实验的样品体积 (Zurkowski et al., 2024)。在温度控制方面, 脉冲激光加热技术提升了超高压实验的温度上限, 并降低了金刚石压砧因受热导致的破裂风险。同

时, 一系列结合聚焦离子束 FIB 技术设计加工的样品腔布局为透明样品的激光加热成为可能 (Weck et al., 2022)。这些静高压实验技术和方法上的进步使得对巨行星内部超离子相、铁合金在极端条件下的相变及挥发性元素的高温高压行为等关键科学问题的实验研究成为可能 (Millet et al., 2018)。随着 DAC 超高压技术的不断发展, 其在行星科学中的应用将进一步深化, 为理解巨行星的矿物组成、内部结构及热力学演化提供更精确的实验约束。

关键词: 金刚石对顶砧; 超高压; 巨行星; 超级地球

基金项目: 国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 吕超甲 (1993-), 博士后, 研究方向: 高压矿物物理. Email: lvchaojia@ysu.edu.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

基于同步辐射 X 射线谱学的水热大腔体高温高压装置

宋海鹏¹, 巫翔^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

报告将介绍了一种专用于同步辐射 X 射线吸收光谱学的高温高压水热装置, 温度可达 600 °C, 压力可达 200 MPa, 且温度和压力参数可以独立控制。该装置采用内陷式釜体密封模式, 以确保装置的密封性以及安全性, 具有三个铍窗口, 满足实验线站的多种测试模式。该装置已在上海光源 11 B 和 14 W 线站进行调试运行, 用于探究高温高压条件下 Au 在含氯流体中的络合形式。实验结果表明, 在低温低压条件下, Au 主要以[AuCl₄]络合物稳定存在, 而在温度和

压力升高至 200 °C、72.1 MPa, 其络合形式转变为 [AuCl₂]形式, 并能在高达 500 °C、92.4 MPa 的条件下稳定存在。该实验结果与前人的研究成果相一致, 进一步验证了我们的研究方法和设备的可靠性。该装置可有效的应用在模拟地质流体中金属元素在高压和高温条件下的演变、种类以及物理和化学性质。

关键词: 同步辐射; 高温高压实验技术; 水热大腔体装置; 热液成矿

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(41827802) 国家杰出青年科学基金项目(42225202)

第一作者: 宋海鹏(1995-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: songhaipeng@cug.edu.cn

通讯作者: 巫翔(1978-), 教授, 研究方向: 高压矿物学。Email: wuxiang@cug.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

标样的 Mo 同位素数据汇总、组成厘定与误差评估

方诗语¹, 孙剑^{2*}, 李小伟¹, 朱祥坤²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 非传统稳定同位素已成为地球科学研究的有力手段, 而其在地质过程尤其是高温地质过程中较小的自然分馏对测试精度提出了更高要求。精确确定标样的同位素组成是进行同位素高精度测试和实现实验室间数据对比的根本。随着全球不同实验室报道标样数据的增多, 通过汇总这些数据, 并合理评估数据的误差, 有望厘定出标样高精度的同位素组成, 在此基础上给出实验室的同位素测试精度和各测试数据的误差来源。本文以 Mo 同位素为例, 汇总了全球 20 家实验室对 149 个标样所报道的 530 个数据, 包括: (1) 不同批次国际标准物质 NIST SRM 3134 之间的 Mo 同位素组成差异; (2) 实验室内部标液以及纯 Mo 溶液或物质; (3) 高温地质标样 (BHVO-2、BCR-2 等); (4) 低温地质标样 (海水、SDO-1 等);

(5) 生物标样; 通过计算统一各实验室误差含义, 评估各实验室的 Mo 同位素测试精度和各测试数据的误差来源, 最终给出以上常用标准物质推荐值: (1) 实验室内部标液以及纯 Mo 溶液或物质 (如 JMC 602332B: $\delta^{98}\text{Mo}_{\text{NIST 3134}} = -0.234 \pm 0.015$); (2) 高温地质标样 (如 AGV-2: $\delta^{98}\text{Mo}_{\text{NIST 3134}} = -0.140 \pm 0.010$); (3) 低温地质标样 (如海水: $\delta^{98}\text{Mo}_{\text{NIST 3134}} = 2.042 \pm 0.009$)。这些基于全球实验室统计的标样数据结果可为 Mo 同位素分析测试的数据质量监控、实验室间数据对比、二级标准物质的筛选研制提供重要参考。本文的研究方法也为其他非传统稳定同位素体系标样的数据汇总和精度厘定、误差评估提供借鉴。

关键词: Mo 同位素; 误差; 标样

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

玄武质岩石化学风化过程中的 Rb 同位素分馏

张雅琦¹, 卫炜^{1,2*}, 黄方^{1,2}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

化学风化是地壳物质进入地表循环的主要方式, 连接着岩石圈、大气圈、水圈和生物圈。Rb 作为碱金属元素, 其同位素 $[\delta^{87}\text{Rb} = ((^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb})_{\text{sample}} / (^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb})_{\text{SRM984}} - 1) \times 1000 (\text{‰})]$ 在示踪硅酸盐岩石化学风化过程中有一定的潜力 (Zhang et al., 2021)。但是, 目前对于玄武质岩石化学风化过程中的 Rb 同位素分馏机制尚不明确。因此, 本文分析了广东湛江辉长岩风化剖面的 Rb 含量和 Rb 同位素 ($\delta^{87}\text{Rb}$), 结果表明剖面有显著的 Rb 元素迁移和同位素分馏。剖面总深度为 630 cm, 根据岩石风化程度可以分为三个层位, 最上层为强风化的残余土 (深度: 400~0 cm), $\delta^{87}\text{Rb}$ 变化不大 ($-0.15\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$) 与新鲜辉长岩的 $\delta^{87}\text{Rb}$ ($-0.11\text{‰} \pm 0.08\text{‰}$) 一致, 并且 Rb 和 Th 的含量呈现正相关关系, 这表明该层位大气风

尘输入占据主导地位。剖面中段为半风化的辉长岩 (深度: 400~600 cm), 其 Rb 含量和 $\delta^{87}\text{Rb}$ 呈强正相关关系, 说明该层是两端元混合物, 一个端元是大气风尘输入的 Rb (与新鲜辉长岩 $\delta^{87}\text{Rb}$ 值一致), 一个端元是吸附态的 Rb (计算后 $\delta^{87}\text{Rb} = 2.14\text{‰}$), 后者可能由于化学风化强度增强而逐渐解吸。研究结果表明, 玄武质岩石的强烈化学风化过程中, 重 Rb 同位素会从黏土矿物上解吸附而导致显著的 Rb 同位素分馏。本研究理清玄武质岩石化学风化过程中的 Rb 同位素行为, 提供了利用 Rb 同位素示踪地球历史大陆风化强度的新见解。

关键词: 铷同位素; 玄武质岩石风化; 风尘输入; 解吸附作用; 风化指标

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330101)

第一作者简介: 张雅琦 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhangyaqi99@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 卫炜 (1991-), 副研究员, 研究方向: 古环境地球化学. Email: wwel@ustc.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

同位素双稀释剂-标准加入法: Overspiked 样品的数据校正方案

朱建明^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产预测全国重点实验室, 北京 100083

同位素双稀释剂(Double Spike)是一种非常有效的、已用于分析多种元素同位素比值的常规方法。然而,在双稀释剂方法使用过程中,由于目标元素浓度测试的不准确或操作失误,往往在纯化处理的一批样品中存在被“Overspiked”的少数样品,也就是稀释剂加入过量导致了稀释剂与样品比超出了正常范围。遇到此类样品,通常的解决方案是重新纯化和重新分析样品以确保数据的准确和精密度。这里,我们利用同位素双稀释剂-标准加入技术的原理,给出了一个简单的数学方案来校正“Overspiked”样品的同位素比值,避免重复和耗时操作。该方案的操作就是向“Overspiked”样品中添加一个已知同位素比值的标准溶液,将 overspike 比降低到正常范围。相关的理论计算方程和误差传递模型已详细列出,并以镍(Ni)同位素为例,就如何利用“Overspiked”样品和加

入标液后混合液样品的稀释剂与样品比、以及标准溶液的同位素比值,通过二端元混合模型来准确计算实际样品的同位素比值。利用标样和实际样品镍、铬(Cr)和镉(Cd)的同位素比值计算评估了该方法的准确度和精密度(2SD)。结果表明,当添加的标准溶液分数(fstd)≤0.60(60%)或“Overspiked”样品的稀释剂与样品比是小于等于正常比的 2.5 倍时,可以实现与传统 DS 法相当的分析精度。同时,为简化计算过程,也建议添加的标准溶液是同位素基准液(例如 $\delta^{60}\text{Ni}=0.000\text{‰}$)。该方案不仅拓宽了传统 DS 的使用范围,也为今后 DS 技术使用中遇到此类问题的解决提供了灵活的途径。

关键词: 同位素双稀释剂-标准加入法; Overspiked 样品; 同位素比值校正

基金项目: 国家自然科学基金项目(42373018)

第一作者简介: 朱建明(1969-), 教授, 研究方向: 非传统稳定同位素地球化学与环境地球化学. Email: jmzhu@cugb.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

秦岭造山带松树沟橄榄岩的铁同位素组成及其研究意义

安亚军^{1*}, 李欣¹, 刘芳¹, 张兆峰¹

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院 行星科学国际研究中心, 成都 610059

地幔楔是连接俯冲板块与岛弧地壳的枢纽, 在地球圈层之间的物质循环和能量交换等方面发挥了重要作用。新鲜的造山带橄榄岩是来自地幔楔源区的直接样品, 保留了深俯冲-折返-熔岩相互作用等过程中的诸多印记。秦岭造山带的松树沟橄榄岩体是全球范围内非常典型并且非常新鲜的地幔楔橄榄岩, 经历了复杂的熔/流体-岩石反应过程, 并且发育有一套具有复杂演化特征的岩石系列。Fe 作为地幔楔橄榄岩中常见造岩矿物如橄榄石/辉石等的主要组成元素和丰度最高的变价金属元素, 极易在与熔/流体相关的地质过程中发生活化迁移和再分配, 影响其同位素组成进而产生明显的同位素分馏。鉴于俯冲过程的复杂性, 目前研究中尚缺乏系统性地分析此类样品全岩和单矿物的铁同位素组成与分馏机制的数据。因此, 我

们通过对松树沟橄榄岩体开展系统性的岩石学和铁同位素分析, 来获取地幔楔源区的铁同位素组成并制约岩浆演化和熔/流体-岩石反应过程中铁元素迁移和同位素分馏特征。研究结果表明全岩样品具有较大的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围, 从 $-0.237\text{‰} \pm 0.054\text{‰}$ 变化至 $0.302\text{‰} \pm 0.017\text{‰}$ 。其中纯橄岩、方辉橄岩和蛇纹岩具有类似饱满型上地幔的铁同位素组成, 与尖晶石相或石榴石相橄岩或者大洋橄岩具有相似的 Fe 同位素组成。而辉石岩脉体则具有明显更重的铁同位素组成 ($\delta^{56}\text{Fe}$ 值为 $0.169\text{‰} \sim 0.302\text{‰}$)。同时研究结果也发现单斜辉石与其它单矿物之间达到了铁同位素平衡。

关键词: 铁同位素; 地幔楔橄榄岩; 俯冲带

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

洋岛玄武岩的钙同位素不均一性及其 对 LLSVP 组成的启示

王小均^{1*}, 陈立辉¹, Takeshi Hanyu²

1. 西北大学 地质学系, 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069;

2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Research Institute for Marine Geodynamics, Yokosuka 000000

过去数十年对洋岛玄武岩(英文简称 OIB)的研究发现深部地幔在化学组成上高度不均一, 并揭示出 EM1、EM2、HIMU 和 FOZO 等地幔储库。尽管目前已充分了解这些储库的地球化学属性, 但对它们的岩石学属性仍知之甚少。Ca 是地幔的主要组成元素之一, 其在典型地幔岩(如二辉橄榄岩)中主要赋存于单斜辉石内。由于单斜辉石与玄武质熔体之间的 Ca 同位素(常用 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 表示)分馏较小, 因而橄榄岩熔融过程中 Ca 同位素的分馏程度相对较小(熔体比源区的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值偏轻约 0.1‰)。对于由俯冲洋壳转变而来的榴辉岩而言, 其 Ca 同位素比橄榄岩地幔偏轻(橄榄岩熔融产生玄武质洋壳时, 轻的 Ca 同位素进入洋壳), 且其中石榴石和单斜辉石均是 Ca 的主要赋存矿物。由于石榴石相对于熔体具有偏重的 Ca 同位素组成, 榴辉岩熔融产生的熔体比橄榄岩熔融产生的熔体应具有明显偏轻的 Ca 同位素组成。因此, 研究 OIB 的 Ca 同位素组成有望揭示上述地幔储库的岩性。基于上述设想, 我们选取经典的端元 OIB 进行了高精度的 Ca 稳定同位素分析。获得的 Ca 同位素数据显示: HIMU 型和 FOZO 型 OIB 的 Ca 同位素组成类似且与大洋中脊玄武岩

(MORB) 的 Ca 同位素组成接近; EM1 和 EM2 型 OIB 则具有比 MORB 明显偏轻的 Ca 同位素组成。由于玄武质岩浆结晶分异过程中的 Ca 同位素分馏很小($\delta^{44/40}\text{Ca}$ 的变化通常小于 0.07‰)且在相同的 MgO 含量时 EM1 和 EM2 型 OIB 的 Ca 同位素组成仍然比 HIMU 和 FOZO 型 OIB 的明显偏轻, 因此不同端元 OIB 的 Ca 同位素组成差别并非岩浆结晶分异过程引起。详细的定量计算表明, 石榴石橄榄岩的部分熔融可以很好地解释 HIMU 和 FOZO 型 OIB 的 Ca 同位素组成, 而 EM1 和 EM2 型 OIB 偏轻的 Ca 同位素组成难以由石榴石橄榄岩部分熔融产生, 轻的 Ca 同位素和高的 Gd/Yb 比值的耦合指示这些 OIB 的地幔源区有来自富石榴石的榴辉岩组分的贡献。由于产生上述端元 OIB 的地幔柱大多起源于太平洋板块之下的大型低剪切波速省(Large Low Shear Velocity Province, LLSVP)内部, 这些端元 OIB 的地幔源区岩性不均一性也暗示了 LLSVP 内部组成的高度不均一性。

关键词: 钙同位素; 洋岛玄武岩; 源区岩性; LLSVP

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

K 同位素指示再循环挥发分是花岗岩锡成矿的关键控制因素

谢国治¹, 张丽鹏^{1,2*}, 刘海洋^{1,2}, 方洪健³, 王鲲^{1,2},
顾海鸥⁴, 孙贺⁴, 章荣清⁵, 孙卫东^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所 深海极端环境与生命过程研究中心, 山东青岛 266000;

2. 崂山实验室, 山东青岛 266000;

3. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东珠海 519082;

4. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

5. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

挥发分(如 H_2O 和 F) 在花岗质岩浆的形成及其相关锡矿床的成矿过程中起着至关重要的作用, 但其具体来源一直存在争议。中国华南地区是全球最大的锡成矿区之一, 这里广泛分布着与锡矿化有关的白垩纪花岗岩体。本研究对华南白垩纪锡矿化花岗岩进行系统的 $K-Li-Nd$ 同位素分析, 并结合华南锡矿化区的地球物理低速带分布特征, 探讨了这些花岗岩岩浆中挥发分的来源及其对成矿过程的影响。分析结果表明, 华南地区白垩纪锡矿化花岗岩的 $\delta^{41}K$ 值(-0.80% 至 -0.47%) 低于贫锡花岗岩 (-0.67% 至 -0.27%)。模拟计算结果表明, 这一特征不能由分异演化过程和岩浆期后过程形成。而且, 锡矿化花岗岩中全岩 K 同位素与 Li 同位素呈正相关, 与全岩 H_2O 、 F 和 Sn

含量呈负相关, 这表明不同来源的挥发分对锡矿化花岗岩的 K 同位素组成产生了影响。结合华南南缘低速异常分布和地球化学定量混合模拟计算, 本研究提出白垩纪华南锡矿化花岗岩中的富 F 流体主要是由残留俯冲板片回撤过程中多硅白云母的分解释放而得到的, 其形成后促进了残留俯冲板片中金红石的溶解, 进而增进了岩浆中锡的初始富集。本研究建立了深部挥发分循环与锡矿化之间的联系, 并证明了 K 同位素在研究挥发分循环及指示锡成矿物质来源方面的重要潜力。

关键词: 挥发分再循环; K 同位素; 锡矿化花岗岩; 残余俯冲板片; 多硅白云母分解

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF0807102), 国家自然科学基金项目 (42406055, 92258303)

第一作者简介: 谢国治 (1996-), 博士后, 研究方向: 俯冲带资源与气候效应. Email: xieguozhi@qdio.ac.cn

*通讯作者简介: 张丽鹏 (1988-), 副研究员, 研究方向: 岩浆活动与挥发分再循环. Email: zhanglipeng@qdio.ac.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

锆石热液蚀变过程中 Zr 同位素分馏行为的实验研究

李金龙¹, 郭海浩^{1*}, 郭京梁¹, 张文¹, 王信水¹, 汪在聪¹

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

锆石作为常见副矿物在自然界中广泛存在, 为地球演化过程提供关键信息。锆(Zr)作为典型的高场强元素, 主要赋存于锆石中。近些年随着(LA)-MC-ICP-MS的发展, Zr同位素(尤其是锆石的原位Zr同位素)已成为示踪岩浆演化过程的重要地球化学指标。尽管锆石具有很强的物理化学稳定性, 但大量地质证据表明其在岩浆热液过程中仍会遭受热液改造。目前, 热液蚀变过程是否会对锆石Zr同位素产生影响在实验上仍不明确。据此, 我们利用快速淬火冷封式高压釜在600~800℃和200MPa条件下进行了一系列锆石-流体反应实验, 以探究不同成分流体对锆石Zr同位素组成的影响。实验初始材料使用Tanz锆石颗粒与NaCl±HCl、NaF±HCl溶液和钠长石玻璃。阴极发光(CL)图像表明锆石颗粒在NaCl溶液和钠长石熔体中未发生明显蚀变。

在NaF溶液与锆石反应实验中, 锆石颗粒边缘出现显著蚀变, 形成明亮蚀变带。实验结果显示, 所有蚀变锆石的 $\delta^{94/90}\text{Zr}_{\text{IPGP}}$ 平均值为 $-0.02\text{‰} \pm 0.18\text{‰}$, 与初始锆石的Zr同位素组成在误差范围内一致, 表明热液蚀变未引起Zr同位素分馏。这些初步研究不仅从实验角度证实热液改造对锆石Zr同位素组成无显著影响, 也进一步支持了Zr同位素示踪岩浆热液过程的可靠性。未来研究计划将聚焦于高温高压条件下, 探讨热液蚀变对辐射损伤锆石Zr同位素分馏行为的影响, 并拓展至超临界流体体系的实验模拟, 以完善Zr同位素在地质过程中的应用理论框架。

关键词: 锆同位素; 岩浆热液过程; 蚀变; 锆石; 实验地球化学

基金项目: 国家自然科学基金项目(42373038)

第一作者简介: 李金龙(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: jinlongli@cug.edu.cn

*通信作者简介: 郭海浩(1988-), 教授, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: haihao.guo@cug.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

大洋岩石圈水化过程中的金属稳定同位素分馏行为及其控制因素

陈伊翔^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

大洋岩石圈水化包括橄榄岩蛇纹石化以及基性岩的异剥钙榴岩化, 这些过程会影响大气和海洋的化学组成。这些水化后的岩石深俯冲会影响地球内部的物质组成和运行行为。因此, 大洋岩石圈水化对地球表层环境演化和深部地球运行都具有重要意义。本报告将结合对典型蛇绿岩(西藏日喀则蛇绿岩、西阿尔卑斯 Voltri Massif 变质蛇绿岩等)中蛇纹岩、异剥钙榴岩的岩石学、元素和同位素(特别是 Mg-Ca 等同位素)地球化学的研究, 揭示橄榄岩水化过程中的元

素迁移和 Mg 同位素分馏行为, 制约低压蛇纹石化流体和蛇纹岩的 Mg 同位素组成; 限定异剥钙榴岩化过程中 Mg-Ca 等元素迁移和同位素的分馏行为, 探讨 Ca 同位素在区分低 Mg 同位素组分的作用, 在此基础上揭示水化岩石圈深俯冲对壳幔物质循环和汇聚板块边缘岩浆作用的意义。

关键词: 大洋岩石圈; 蛇纹岩; 异剥钙榴岩; 壳幔相互作用; 非传统稳定同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目(42073029, 42303048)

第一/通讯作者简介: 陈伊翔(1983-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 俯冲带熔流体地球化学. Email: yxchen07@ustc.edu.cn.

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

A Novel Biomarker for Deep-Time Methanogenesis-Perspectives from Nickel Isotope Fractionation in Modern Stromatolites

Simon V. Hohl^{1*}

1. 同济大学 State Key Laboratory of Marine Geology, Shanghai 200090

Stromatolitic carbonates are key archives of ancient microbial environments, preserving chemical signatures of the fluids in which they formed. In particular, during the transition from an anoxic to an oxic atmosphere during the early Proterozoic era, stromatolites were proposed to have formed under increased methanogenic activity. In modern stromatolites, methanogenesis is directly observed by the presence of methane, and methanogenic archaea are typically identified via biomarkers or DNA analyses, but the absence of methane and organic matter in ancient stromatolites limits these approaches. Methanogens rely on nickel (Ni) as a co-factor for CH₄ production, and Ni isotopes ($\delta^{60}\text{Ni}$) fractionate in methanogenic biomass to lower values^[1]. This process may leave a unique Ni isotope signature in fluids within microbial habitats, the chemistry of which is directly trapped in stromatolite carbonates, and Ni isotopes offer a unique method to trace methanogenesis in deep-time environments. However, this concept remains speculative without support from modern systems.

To explore this idea, we present Ni isotope analyses of microbial carbonates from Lagoa Salgada, a Holocene

coastal ephemeral lake in Brazil, where methanogenic stromatolites are abundant. These carbonates display strong positive $\delta^{13}\text{C}$ carb values (up to 20‰) typically derived from ¹²C methanogen uptake^[2]. $\delta^{60}\text{Ni}$ values (−1.36‰) are significantly negative relative to ambient benthic gastropod shells and authigenic, unlithified carbonate sediments, forming in the water column, that show higher $\delta^{60}\text{Ni}$ values (+1.72‰ and +1.1 to +1.58‰, respectively). Our results indicate that negative Ni isotope values, linked to methanotrophic metabolism, can be preserved in stromatolite carbonate and serve as a proxy for methanogenesis in the deep-time geological record.

This study lays the groundwork for future investigations into microbial diversity within stromatolitic carbonates and the development of essential metabolic processes in microbial environments. Its findings hold significance for comprehending Earth's historical biosphere and have applications in astrobiology.

关键词: 叠层石; 镍同位素; 碳酸盐化学

[1] Cameron et al., PNAS (2009)

[2] Birgel et al., Geobiology (2015)

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

胶东金矿气相冷凝成矿: 来自银同位素的证据

弓昊天¹, 齐有强^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

金在成矿系统中的迁移路径对理解金矿成因和进一步的矿产勘探有重要意义。金作为单同位素元素无法通过自身同位素开展示踪研究, 而银同位素因金、银在成矿热液中呈现相似的地球化学行为, 成为解析金成矿过程的有效示踪剂。胶东金矿床根据构造位置差异可细分为焦家型(如三山岛矿床)和玲珑型(如玲珑矿床)。黄铁矿是主要的载金矿物, 金在其中主要以可见金的形式存在, 粒度通常小于 50 μm 。本研究选取三山岛与玲珑金矿成矿阶段 II (含金石英-黄铁矿阶段) 和阶段 III (含金石英-多金属硫化物阶段) 中典型黄铁矿开展银同位素分析。结果表明, 两矿床整体上具有相似的 $\delta^{109}\text{Ag}$ 分布范围, 但成矿阶段间呈现相反演化趋势, 指示了二者具有相同的金属来源但金迁移路径不同。在三山岛矿床中, 阶段 II 含金黄铁矿 (Py-II) 的 Ag 同位素组成 ($\delta^{109}\text{Ag} = -0.350\text{‰} \sim -0.083\text{‰}$) 较阶段 III (Py-III) 轻 ($\delta^{109}\text{Ag} = -0.066\text{‰} \sim -0.013\text{‰}$), 考虑到成矿流体中金-银合金的沉淀是由于强烈的水-岩反应引

发 $\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0$ 氧化还原转变, 上述同位素变化趋势可以合理解释为由沉淀过程中的瑞利分馏作用造成的。在玲珑矿床中, Py-II 的银同位素组成 ($\delta^{109}\text{Ag} = -0.045\text{‰} \sim -0.067\text{‰}$) 明显高于 Py-III ($\delta^{109}\text{Ag} = -0.157\text{‰} \sim -0.084\text{‰}$)。前人流体包裹体研究表明该矿床成矿过程中存在快速减压导致气液相分离, 我们认为 Py-II 中较重的 Ag 同位素值是通过 Au-HS 配合物的不稳定作用从初始成矿流体中沸腾析出的。而 Py-III 中较轻的 Ag 同位素组成需通过两步转移途径获得: 在早期相分离过程, 大量富集 ^{107}Ag 的 Au(Ag) 转移到气相中, 随后伴随蒸气相的冷凝, 其中的 Au(Ag) 被黄铁矿 (Py-III) 的表面吸附捕获再沉淀。总之, 胶东金矿的银同位素结果为水汽凝聚成矿提供了坚实的证据, 对世界范围内类似的金矿具有一定的应用价值。

关键词: 银同位素; 气-液相分离; 蒸汽相冷凝; 胶东金成矿省

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42273074, 41973049)

第一作者简介: 弓昊天 (1996-), 博士后, 研究方向: 矿床地球化学. Email: gonghaotian@mail.gyig.ac.cn

通信作者简介: 齐有强 (1982-), 特聘研究员, 研究方向: 矿床地球化学. Email: qiyouqiang@mail.gyig.ac.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

钌 (Os) 同位素在地球科学领域的研究进展

朱延庆¹, 朱光有^{1*}, 黄月¹, 陈思钰¹, 蓝婉嫣¹, 贾凡琛¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

钌 (Os) 作为高密度铂族元素, 其同位素体系 (尤其是 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$) 因其独特的地球化学行为, 已经被广泛应用于地壳和地幔演化、示踪物源以及恢复古海洋环境等领域。本文在总结钌及钌同位素地球化学行为的基础上, 系统综述了钌同位素在地球科学中的研究进展, 阐述了其四个研究方向: 解析地幔源区性质与演化过程、重建古海洋氧化还原条件、示踪矿床成因与成矿流体来源, 以及钌同位素年代学体系的构建。研究表明, Os 同位素在地壳与地幔间的分馏效应可有效识别壳-幔物质相互作用, 其在高灵敏度海洋环境示踪中的优势

为反演古海洋物源及环境变迁提供了新视角。近年来, 质谱技术的突破显著提升了低含量 Os 样品同位素比值的测定精度, 但针对低丰度样品的高分辨率分析技术、同位素定年准确性优化等问题仍需突破。未来研究需进一步开发高精度分析方法, 拓展钌同位素在深部物质循环、古大陆风化及核-幔相互作用等领域的应用, 从而深化对地球多圈层动力学过程的理解。

关键词: 钌同位素; 同位素示踪; 同位素定年; 地球科学

第一作者简介: 朱延庆 (2004—), 在读硕士研究生, 地质学专业。E-mail: 3233259723@qq.com

*通信作者简介: 朱光有 (1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事于深层油气地质与成藏研究。E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

Ba 同位素证据揭示 EM1 型大陆玄武岩源区中存在古老沉积物的再循环

刘建强^{1*}, 成倚山², 陈立辉¹, 陈开运¹, 赵健¹,
王小均¹, 曾罡³, 张宏福²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;
2. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027;
3. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

地球深部的化学组成是地幔地球化学的核心研究内容, 前人通过对洋岛玄武岩 (如 Pitcairn 岛、Tristan-Gough 群岛等) 的研究识别出 EM1 型富集地幔端元, 这些玄武岩以极低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为特征, 但由于地幔柱的整体熔融程度较高且大洋岩石圈厚度较薄, 洋岛玄武岩的 EM1 组分特征在岩浆形成过程中易被稀释, 传统的地球化学手段难以识别, 其成因始终存在争议。中国东北地区松辽盆地西北侧的新生代钾质玄武岩具有极端的放射性成因同位素组成特征, 被认为是 EM1 型洋岛玄武岩的大陆等同组分。并且大陆岩石圈厚度大, 大陆玄武岩的地幔熔融程度较低, 更有利于保留 EM1 富集端元组分的信息。为了进一步对 EM1 富集端元组分的成因进行限定, 我们对东北地区新生代钾质玄武岩进行了系统的 Ba 同位素研究。结果表明, EM1 型大陆钾质玄武岩的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ (-0.1% 至 0.08%) 明显低于亏损

地幔值 (DMM; $\delta^{138/134}\text{Ba}=0.03\%$ 至 0.05%), 且其与 K/U、Ba/Th、U/Pb、 ϵ_{Nd} 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 存在明显相关性, 呈现出两端元混合的趋势。其中, EM1 型富集地幔端元具有较轻的 Ba 同位素, 这一现象不是由于地壳混染、岩浆期后蚀变、分离结晶、部分熔融等过程导致。在排除了蚀变洋壳的可能性之后, 研究团队认为轻 Ba 同位素主要反映了俯冲沉积物组分的贡献。结合主微量元素、其他同位素以及定量计算表明, 上述独特的 Ba 同位素特征来源于再循环沉积物派生熔体与地幔橄榄岩的相互作用。上述研究表明, EM1 型大陆玄武岩保留了源区再循环古老沉积物中 Ba 同位素特征, 证实了 Ba 同位素示踪地壳物质再循环的潜力。

关键词: Ba 同位素; EM1; 再循环古老沉积物; 地幔地球化学

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

洋壳和岛弧岩浆的锌同位素组成及其对洋壳循环的启示

王霞¹, 汪在聪^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

俯冲的洋壳是造成地幔岩石化学不均一的关键因素。锌同位素($\delta^{66}\text{Zn}_{\text{JMC-Lyon}}$)已被广泛用于示踪循环的洋壳和表层物质。然而, 由于新鲜的下洋壳岩石出露非常有限, 其锌同位素组成未得到充分研究, 因此尚不清楚上洋壳 MORB 的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 是否能够代表整个洋壳的锌同位素组成, 以及洋壳在俯冲循环过程中对地幔及幔源岩浆锌同位素的综合影响。本研究报道了来自超慢速西南印度洋中脊的辉长岩($n=37$)、快速东太平洋中脊、慢速西南大西洋中脊的 MORB($n=12$)以及汤加岛弧岩浆($n=14$)的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 数据。不同扩张速率的 MORB 展现出均一的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值($0.27\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, 2sd)与前人研究结果一致。相比之下, 辉长岩的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值变化显著, 范围从 0.11‰ 到 0.34‰, 平均值为 $0.22\text{‰} \pm 0.11\text{‰}$ (2sd)。岩浆分异形成洋壳可以部分解释这种变化(约 0.10‰), 而堆晶后的改造(如熔岩反应, 不平衡等)进一步扩大了辉长岩的锌同位素变化范围。考虑到全球平均上、下洋壳的体积比为 3:7, 估算整个洋壳的加权平均 $\delta^{66}\text{Zn}$

值为 $0.23\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$, 低于 MORB 的平均值。汤加岛弧的玄武岩和英安岩, 尽管具有同源演化特征, 但其 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值保持一致(0.22‰ 到 0.24‰, 平均值 $0.23\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$, 2sd), 并且与结晶分异指标(MgO 等)和俯冲组分的指标(Ba/Nb 等)无明显相关性。结合全球其他大部分岛弧岩浆类似的特征, 表明洋壳在弧下深度脱水过程中释放的锌有限, 未显著影响岛弧岩浆的锌同位素组成。这些岛弧岩浆变化, 但整体介于亏损地幔与 MORB 之间的锌同位素特征, 指示不同亏损程度地幔对岛弧岩浆锌同位素的主导作用。因此, 当洋壳携带大量锌俯冲进入深部地幔, 其明显变化的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 会导致地幔锌同位素的不均一性。但其整体较 MORB 偏低的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值说明除了洋壳以外, 表层物质(如碳酸盐)对许多幔源岩浆(如 OIB 和中国东部新生代玄武岩)高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值的形成起着重要作用。

关键词: 锌同位; 辉长岩、MORB; 岛弧岩浆; 岩浆分异; 洋壳循环

基金项目: 国家重点研究计划(2023YFF0804100)、国家自然科学基金(42273023)

第一作者简介: 王霞(1994-), 博士后, 研究方向: 元素-同位素地球化学. Email: wangxia@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 元素-同位素地球化学. Email: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

上大陆地壳的铈同位素组成

吴姣姣¹, 李欣^{1*}, 安亚军¹, 刘芳¹, 张兆峰¹

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

大陆地壳(尤其上地壳)作为地球物质分异的最终产物,相较于地幔更富集不相容元素(如 K、Rb、Th)。这种极端富集现象源于壳内多阶段分异过程。因此,厘清上地壳的岩性组成、化学分异过程及其时间演化,对揭示大陆地壳生长机制、壳幔物质循环及地球动力学演化具有重要科学意义。铈(Ce)作为轻稀土元素(LREE),在岩浆体系中表现出亲石性和高度不相容特性,导致其在大陆地壳中显著富集。原始地幔 Ce 含量为 $1.75 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而大陆地壳整体丰度达 $43 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。为拓展 Ce 同位素体系($\delta^{142/140}\text{Ce}$,以 NIST SRM 3110 为标样)在不同储库中的应用,亟需厘清其在不同储库中的分布特征。尽管前期冰碛岩研究显示陆壳 Ce 同位素组成相对均一($\delta^{142/140}\text{Ce} = -0.029\% \pm 0.058\%$, 2SD),但岩浆过程对 Ce 同位素分馏的影响机制仍不明确。本研究收集了 61 件典型

上地壳样品(I型、S型、A型花岗岩及全球代表性黄土),系统限定上地壳 Ce 同位素组成,旨在揭示岩浆分异-风化循环过程中 Ce 同位素的分馏行为及其对陆壳演化的指示意义。我们的结果显示花岗岩样品具有相似的 Ce 同位素组成($\delta^{142/140}\text{Ce}=0.023\% \pm 0.053\%$, 2SD),暗示岩浆过程(如古老地壳物质重熔、分离结晶)对 Ce 同位素分馏的影响有限。黄土样品同样呈现均一的 Ce 同位素特征($\delta^{142/140}\text{Ce} = 0.024\% \pm 0.051\%$, 2SD),指示表生过程(侵蚀-搬运-沉积-成壤作用)中未发生显著同位素分馏。基于花岗岩与黄土的加权平均值($\delta^{142/140}\text{Ce}=0.023\% \pm 0.052\%$, 2SD),该值与冰碛岩研究结果($\delta^{142/140}\text{Ce} = -0.029\% \pm 0.058\%$, 2SD)在误差范围内保持一致。

关键词: 铈同位素组成; 上地壳; 花岗岩; 黄土

基金项目: 国家自然科学基金项目(42330102)

第一作者简介: 吴姣姣(1997-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学。Email: wujj2988@stu.cdut.edu.cn

通讯作者简介: 李欣(1975-), 副研究员, 研究方向: 同位素地球化学。Email: xlisu@cdut.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

低镁岩石中 Fe-Mg-Ca 的快速单柱分离方法

李赵雅¹, 孙国超¹, 夏琼霞^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

随着高精度质谱分析技术在国内的迅速发展, 非传统稳定同位素体系被越来越多地应用到地球科学的研究中。特别是较早发展的 Fe-Mg 同位素, 以及近年来开始广泛应用的 Ca 同位素, 已经突显出它们在各种地质过程中的有效示踪。然而, 现有的分离方法通常需要一系列单独的化学分离提纯步骤, 以及多柱分离的繁琐程序, 严重阻碍了非传统稳定同位素的分析和测试效率。本研究提出了一种在单柱中快速分离 Fe、Mg 和 Ca 的化学分离提纯方案, 适用于各种岩石样品, 尤其是高钙低镁岩石。在减少样品的损耗量的同时, 提升了实验的效率。该方案首先采用沉淀法去除样品中的 K、Na 和 Sr, 然后使用不同的酸性

介质通过相同的洗脱方法, 用 1.5 毫升 AGMP-50 树脂分离 Fe、Mg 和 Ca。收集到的 Fe、Mg 和 Ca 纯度高且本底低, 其同位素通过多接收电感耦合等离子体质谱法 (MC-ICP-MS) 采用标准样品内插法 (SSB) 进行测定。通过分析 10 种国际地质标样和参考物质, 验证了所提出方法的有效性, 结果与已发表的标准物质推荐值高度一致。因此, 本次研究所建立的化学分离流程能够满足对各类地质样品进行高精度同位素测定的要求。

关键词: 化学分离流程; 单柱; MC-ICP-MS 测试; Fe-Mg-Ca 同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472069)

第一作者简介: 李赵雅 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: lizhaoya@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 夏琼霞 (1979-), 教授, 研究方向: 变质岩石学、矿物学和地球化学. Email: qxxia@ustc.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

白云岩镁同位素示踪古海洋镁循环演变: 可行性及应用

胡忠亚^{1*}, 杨守业¹, 李伟强², 夏芝广³, 刘传⁴

1. 同济大学, 上海 200092;

2. 南京大学, 南京 210008;

3. 成都理工大学, 成都 610059;

4. 北京大学, 北京 100091

海洋是地球表生系统中最大的碳库, 其“源-汇”平衡是维持气候稳定的重要保障。显生宙以来, 尽管火山排气、大陆风化以及海洋反风化等地质过程发生过多次重大演变, 但海水碱度总体相对稳定。这表明存在一个联合调控机制, 能够维持大洋碱度平衡。海洋镁循环与长尺度碳循环的“源-汇”过程紧密关联。重建海洋镁循环有望解译维持海洋碱度稳定的机制及内在关联。镁同位素是量化镁循环过程的重要方法。碳酸盐岩作为记录海水碳、氧、锶同位素及元素含量的传统“地质档案”, 其是否能够可靠记录海水的镁同位素信号一直存在争议。通过对全球案例的系统性研究, 我们发现海相白云岩的镁同位素组成不受早期成岩作用、深埋高温成岩作用甚至热液蚀变等沉

积后过程的影响, 能可靠记录原始海水的镁同位素信号。基于新指标, 我们重建了显生宙多个时期海水镁同位素变化, 重点以二叠-三叠过渡时期和晚新生代为例, 用镁同位素数值模拟方法量化了海洋镁循环过程演变, 发现气候转折期, 海洋白云岩化和反风化作用能紧密耦合大陆风化入海通量和大气 CO₂ 含量变化, 作为负反馈机制, 协同维持大洋碱度平衡。这些研究表明白云岩的镁同位素信号可以用于反演古海水镁同位素和镁循环变化, 进而揭示地史转折期关键地质过程演变。

关键词: 镁循环; 镁同位素; 海洋碳储库; 碳循环; 古气候

基金项目: 国家自然科学基金 42103004 和 42373005

作者简介:

胡忠亚, 同济大学, 副教授, 研究方向: 海洋主量元素循环及气候效应. Email: zhongyahu@tongji.edu.cn

杨守业, 同济大学, 教授, 研究方向: 边缘海“源-汇”过程及关键元素循环. Email: syyang@tongji.edu.cn

李伟强, 南京大学, 教授, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学. Email: liweiqiang@tongji.edu.cn

夏芝广, 成都理工大学, 博士后, 研究方向: 镁、钾同位素地球化学. Email: 991225015@qq.com

刘传, 北京大学, 博士后, 研究方向: 镁同位素分馏变化的实验研究. Email: 609418055@qq.com

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

水成型铁锰结壳中的钾赋存形态与同位素特征及其启示

陈嘉阳¹, 李伟强^{1*}, 陈天宇¹, 曲扬¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210093

钾的稳定同位素为不同尺度的钾循环提供了重要的示踪手段。水成型海洋铁锰结壳是一种从海水中沉淀的富钾地质载体, 具有记录海水钾同位素的潜力。为评估这一潜力, 本研究对西北太平洋底部的两个水成型铁锰结壳中钾元素的赋存形态和同位素特征进行了精细分析。分步提取实验表明, 结壳中的钾主要有两种赋存形态: 可交换钾(占比 $62.8\% \pm 8.9\%$)和硅酸盐矿物结构中的钾(占比 $32.6\% \pm 9.3\%$), 其他形态贡献低于 5%。其中可交换钾的 $\delta^{41}\text{K}$ 值介于 $-0.09\% \pm 0.04\%$ 至 $0.35\% \pm 0.05\%$, 显著高于硅酸盐结构钾 ($-0.71\% \pm 0.06\%$ 至 $-0.34\% \pm 0.05\%$)。研究发现, 两处结壳中可交换态钾的 $\delta^{41}\text{K}$

随时间呈现不一致的演化趋势, 表明该形态的钾易受局部成岩作用影响, 难以可靠记录海水 $\delta^{41}\text{K}$ 的长期演化。而硅酸盐结构钾的 $\delta^{41}\text{K}$ 则显示出与样品点距夏威夷热点距离变化相吻合的演化规律, 表明铁锰结壳中自生矿物的生长可能受热点区玄武质火山碎屑物质供给的控制。本研究揭示了铁锰结壳中钾元素赋存形态与同位素组成的特征, 展示了两种主要钾赋存形态在示踪海底黏土自生作用与成岩过程方面的潜力。

关键词: 铁锰结壳; 钾同位素; 含钾相; 成岩作用; 自生黏土

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42425301)

第一作者简介: 陈嘉阳 (1998-), 博士研究生, 地质学专业. Email: 840513732@qq.com

通讯作者简介: 李伟强 (1983-), 教授, 主要从事金属稳定同位素方法开发及应用研究. Email: liweiqiang@nju.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

地幔柱-洋脊相互作用对加拉帕戈斯岩浆岩的 Ca 同位素影响

单玉婕^{1,2}, 祝红丽^{1*}, 张兆峰³, 孙卫东^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 成都理工大学, 成都 610059

加拉帕戈斯扩张中心 (GSC) 是一个东西向、中等扩张速率 (5.7~7.7 cm/yr) 的洋中脊, 该洋中脊分隔了科科斯板块和纳斯卡板块。加拉帕戈斯裂谷东部可能受地幔柱-洋脊相互作用或富集地幔源区影响, 但其具体机制和相互作用程度尚不明确。本研究选取 11 件来自加拉帕戈斯裂谷东部附近的新鲜岩浆岩样品, 对它们开展系统的 Ca 同位素研究, 并结合主微量元素及 Sr-Nd 同位素, 系统解析岩浆源区过程, 探讨地幔柱-洋脊相互作用对幔源岩性的制约。根据 SiO₂ 含量及总碱度, 样品为拉斑玄武岩和拉斑玄武质安山岩。结果显示, 样品的 Sr-Nd 同位素组成相对均一, 其中 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 从 0.702581 变化至 0.702716, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 从 0.513095 变化至 0.513145, 比 DMM 的 Sr-Nd 同位素组成略微富集。样品的 Ca 同位素组成 (用 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 表示, $\delta^{44/40}\text{Ca} = [({}^{44}\text{Ca}/{}^{40}\text{Ca})_{\text{sample}}/({}^{44}\text{Ca}/{}^{40}\text{Ca})_{\text{SRM 915a-1}}] \times 1000$) 也显示较小的变化范围, 其 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值从 0.73‰±0.09‰变化至 0.82‰±0.10‰, 平均值为 0.78‰±0.11‰ (2SD, N=11), 显著低于全硅酸盐地球的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ (0.94‰±0.05‰), 略低于洋中脊玄武岩 (MORB) 的平均 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ (0.84‰±0.09‰)。从样品的 REE 标准化模式图中可以看出样品存在 Eu

负异常 ($\delta\text{Eu}<0.87$), 并且 δEu 与 Sr/Nd 呈正相关, 表明样品经历了斜长石的分离结晶, 但样品的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 与 δEu 及 Sr/Nd 并无显著相关性, 说明斜长石分离结晶并没有影响样品的 Ca 同位素组成, 这与人研究结果一致。此外, 样品的 Gd/Yb 比值与 MORB 相似, 且该比值与 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 不存在相关性, 这说明这些样品的源区不存在石榴石的残余, 因此它们的 Ca 同位素特征也与石榴石效应无关, 而可能反映了地幔柱-洋脊相互作用导致的源区富集。这些样品的 Nb/Zr<0.06 以及 $\Delta\text{Nb}<0$ ($\Delta\text{Nb}=1.74+\log(\text{Nb/Y})-1.92\log(\text{Zr/Y})$), 比来自 East Pacific rise 和 Ecuador Rift 的 N-MORB 略微富集。另外, 本研究样品的 Ce/Pb 值 (25~38) 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值介于典型 N-MORB (来自 East Pacific rise 和 Ecuador Rift) 与 HIMU 型 OIB (来自 Cook-Austral 和 St.Helena) 之间, 并且存在一定正相关性, 暗示地幔柱富集组分 (如 HIMU 组分) 的混入。然而, 可能该富集组分混入的比例较低, 只轻微改变了样品的 Sr-Nd-Ca 同位素组成。

关键词: Ca-Sr-Nd 同位素; 岩浆岩; 加拉帕戈斯; 地幔柱-洋脊相互作用

基金项目: 国家自然科学基金 (42322302)、国家重点研发计划 (2023YFF0807103)、崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202204100)、中国科学院青年创新促进会会员 (2022207)

第一作者简介: 单玉婕 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地球化学与岩石学. Email: shanyujie@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 祝红丽 (1986-), 研究员, 研究方向: 海洋地球化学与岩石学. Email: zhuhongli@qdio.ac.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

洋岛玄武岩 Zn 同位素变化的原因

张笑宇¹, 陈立辉^{2*}, 曾罡¹, 王小均²,
Albrecht W. Hofmann³, Takeshi Hanyu⁴, 李伟强¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

3. Max-Planck-Institut für Chemie, Abteilung Klimageochemie 000000;

4. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Research Institute for Marine Geodynamics 237006

洋岛玄武岩 (Ocean Island Basalts, OIBs) 锌同位素变化的原因仍然存在争议, 主要的争议点在于 OIB 的 Zn 同位素变化究竟是由地幔部分熔融差异导致, 还是与源区中可能存在的具有高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 特征的再循环地表碳酸盐组分的贡献有关。为了厘清这一问题, 本研究系统地整合了来自全球不同地区的洋岛/海山玄武岩的 Zn 同位素数据及其主微量元素地球化学数据资料, 并补充分析了来自南太平洋 Pitcairn 岛和 Samoa 群岛火山岩的 Zn 同位素数据。发现来自全球不同地区的洋岛玄武岩呈现出较大的 Zn 同位素变化 (约 0.22‰)。其中来自 Cook-Austral 火山链 ($0.37\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$)、St. Helena 岛 ($0.38\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$)、夏威夷 Koloa 火山 ($0.38\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$) 和 Pitcairn 岛 ($0.42\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$) 的 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值明显高于 MORB ($0.27\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$) 和其他地区的 OIB ($0.29\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$)。这些具有高 $\delta^{66}\text{Zn}$ 特征的 OIB 的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值也与 MORB 和其他 OIB 显著不同: Cook-Austral

火山链和 St. Helena 岛的火山岩同时具有相对于 MORB 偏高的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和与 MORB 相似的 Zn/Fe 值, 表明其地幔源区的主要岩性为碳酸盐化橄榄岩; 夏威夷 Koloa 火山的玄武岩表现出比 MORB 更高的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Zn/Fe 值, 指示其地幔源区存在碳酸盐化榴辉岩; 而 Pitcairn 岛火山岩相对于 MORB 呈现更高的 Zn/Fe 值, 但其 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 相对于 MORB 和其他 OIB 显著偏低, 这一观察反映 Pitcairn 地幔柱中存在经历过脱碳的辉石岩组分。模拟计算结果表明, 在 OIB 形成所需的熔融程度的范围内 (2%~8%), 仅由熔融过程造成 $\delta^{66}\text{Zn}$ 值的变化非常有限 (约 0.02‰), 远不足以解释在全球 OIB 中观察到的 Zn 同位素显著变化。因此, 全球 OIB 的锌同位素变化主要受控于地幔源区物质组成的不均一性, 尤其与再循环物质 (如再循环地表碳酸盐等) 组分的贡献有关。

关键词: 洋岛玄武岩; Zn 同位素; 源区不均一

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130310, 42373012)

第一作者简介: 张笑宇 (1996-), 博士后, 研究方向: 地幔地球化学与火成岩岩石学. Email: zhxy@nju.edu.cn

*通信作者简介: 陈立辉 (1972-), 教授, 研究方向: 地幔地球化学与火成岩岩石学. Email: chenlh@nwu.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

冷俯冲带 Rb 同位素的穿弧变化

钟自强¹, 姜鼎盛^{1*}, 胡霞¹, 黄方¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230062

冷俯冲体系下俯冲板片部分熔融对岛弧岩浆活动的贡献机制是当前固体地球科学领域的前沿课题。传统理论认为蚀变洋壳(AOC)在俯冲过程中仅发生脱水作用, 而俯冲沉积物则参与部分熔融。然而, 针对岛弧岩浆元素通量(特别是 Sr 异常)的最新研究揭示, 单纯依靠沉积物熔融难以合理解释观测值, 这促使部分研究认为 AOC 的部分熔融也是必要的。铷(Rb)同位素作为新兴的地球化学示踪剂, 为揭示俯冲物质再循环过程提供了新的技术手段。本研究报道了中国东部与古太平洋(Izanagi)板块冷俯冲带相关的弧玄武岩、弧后玄武岩和板内玄武岩的 Rb 同位素数据($\delta^{87}\text{Rb}$)。研究结果发现, 这些玄武岩的 $\delta^{87}\text{Rb}$ 在俯冲带内显示出明显的穿弧变化, 从弧玄武岩($-0.31\% \pm 0.45\%$)到弧后玄武岩($-0.19\% \pm 0.07\%$), 再到板内玄武岩($0.03\% \pm 0.22\%$), 其值分别低于、类似于和

高于洋中脊玄武岩(MORB)的值($-0.12\% \pm 0.08\%$), 反映了冷俯冲带中不同构造环境下 Rb 同位素组成的差异。这些变化表明, 虽然俯冲沉积物的部分熔融在弧下、弧后和板内背景都有发生, 但 AOC 的部分熔融仅在弧后和板内区域, 而在弧下区域并不存在。此外, 弧玄武岩的 Rb-Sr-Nd-Pb 同位素比值与 Sr 含量或 Sr/Y 比值的强相关性强烈表明, 其高 Sr 含量($385\sim 913\ \mu\text{g/g}$)来源于沉积物的俯冲输入, 而不是来源于 AOC 部分熔融。在全球范围内其他冷俯冲带的弧熔岩也观察到类似的现象。本研究的结果表明, 冷俯冲带中弧熔岩的地球化学特征并不一定需要 AOC 在弧下深度发生部分熔融。

关键词: Rb 同位素; Sr 含量; 俯冲带; 蚀变洋壳; 俯冲沉积物

基金项目: 国家自然科学基金项目(4233000014)

第一作者简介: 钟自强(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhongzhiqiang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 姜鼎盛(1991-), 副研究员, 研究方向: 俯冲带同位素地球化学. Email: dshjiang@ustc.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

地幔岩石钒同位素分馏: 来自橄榄岩和辉石岩的约束

丁昕^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

本项目对来自意大利 Balmuccia (BM) 和 Baldissero (BD) 地区的地幔橄榄岩和辉石岩, 来自蒙古 Tariat 和西伯利亚 Tok 地区的包体橄榄岩和辉石岩, 来自华北三个地区 (磐石山、塔山、芝麻坊) 的尖晶石二辉橄榄岩和石榴石金云母二辉橄榄岩进行了 V 同位素研究。

这些样品被分为三组: (1) 由于部分熔融作用形成的富集-贫化橄榄岩; (2) 熔体与围岩橄榄岩相互作用形成的复合橄榄岩和辉石岩; (3) 与交代作用相关的橄榄岩。第 1 组富集-贫化橄榄岩的 $\delta^{51}\text{V}$ 变化范围为 -1.14‰ ~ -0.82‰ , 与全岩 Al_2O_3 含量呈现出相关性。熔融模型表明, V 同位素可在部分熔融过程中产生分馏, $\Delta^{51}\text{V}$ 残余-熔体为 -0.15‰ ~ -0.10‰ 。第 2 组熔体与围岩橄榄岩相互作用形成的复合橄榄岩和辉石岩, 根据熔体与围岩比值情况可以进一步分为两种情况。第 2a 组代表高的熔体/围岩比相互作用的结果。第 2a 组橄榄岩的 $\delta^{51}\text{V}$ 在 -1.19‰ ~ -0.98‰ 之间, 辉石岩的 $\delta^{51}\text{V}$ 在 -1.09‰ ~ -0.92‰ 之间, 反映了熔体与围岩橄榄岩相互作用过程中有限的 V 同位素分馏。第

2b 组反映了低熔体/围岩比时的相互作用。第 2b 组橄榄岩 $\delta^{51}\text{V}$ 在 -1.05‰ ~ -0.85‰ 之间, 辉石岩 $\delta^{51}\text{V}$ 从 -1.32‰ 到 -0.99‰ 不等。这可能是动力学驱动的同位素分馏所致。第 3 组交代橄榄岩的 $\delta^{51}\text{V}$ 与 BSE 值相近或略低于 BSE 值, 表明流体交代对全岩 V 同位素组成可能没有影响, 而略微偏轻的 V 同位素可能显示 Fe-V-Ca 熔体的改造。

对尖晶石二辉橄榄岩和石榴石金云母二辉橄榄岩的单矿物研究, 发现大多数单矿物的 $\delta^{51}\text{V}$ 值都接近于 BSE 值: 尖晶石为 -0.89‰ ~ -0.85‰ ; 石榴石为 -0.85‰ ~ -0.80‰ ; 斜方辉石为 -0.99‰ ~ -0.95‰ ; 金云母为 -1.02‰ ~ -0.96‰ 。然而, 单斜辉石的 $\delta^{51}\text{V}$ 值变化较大, 在石榴石金云母二辉橄榄岩中为 -1.13‰ , 在尖晶石二辉橄榄岩中为 -0.77‰ , 可能反映了含 V 矿物之间的重新分布以及其中的动力学 V 同位素分馏。

关键词: 钒同位素; 地幔岩; 部分熔融; 熔岩反应; 交代作用

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

西藏冈底斯大陆弧深部地壳钙同位素组成 及其对大陆地壳形成的意义

王美玲¹, 汪在聪^{1*}, 郭亮¹, 邹宗琪²

1. 中国地质大学(武汉)地学院, 武汉 430074;

2. 南方海洋科学与工程广东省重点实验室(广州), 广州 511458

大陆弧深部的岩浆作用对于理解安山质大陆地壳的形成至关重要。石榴石、辉石和角闪石是大陆弧深部主要镁铁质矿物相, 其中石榴石的结晶或残余可能会造成主量元素的稳定同位素如钙($\delta^{44/40}\text{Ca}$)的显著变化。与洋壳($0.85\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$)相比, 大陆上地壳(UCC)的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值较低($0.70\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$), 这可能是由于早期富含石榴石的镁铁质堆晶岩(其 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值较高)形成所致。然而, 由于中-下弧地壳剖面出露有限, 缺乏大陆深部地壳岩石的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 数据, 对深部地壳岩浆过程中的钙同位素分馏行为也知之甚少。冈底斯大陆弧里龙下地壳剖面出露于西藏拉萨地体东南部地区, 是一个典型的、新生的(90~80 Ma)、连续(深度约 42~17 km)的大陆弧下地壳剖面, 为研究深部地壳岩浆作用提供了天然实验室。该剖面由石榴石变辉长岩、上覆的镁铁质-中性序列及少量后期的超镁铁质序列组成。本研究对这些岩石和主要富钙单矿物的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值进行了系统分析, 以约束大陆深部弧地壳的平均钙同位素组成。石榴石变辉长岩是由辉长岩经麻粒岩相变质作用形成, 总体上呈现出较低的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值($0.59\text{‰} \sim 0.85\text{‰}$), 平均值为 $0.71\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD, N=10)。两个 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值较高的石榴石变辉长岩样品可能是由于采样不均匀, 分析时等溶液中粗粒石榴石的比例较高导致。镁铁质-中性序列岩石具有连续变化的化学组成(CaO 含量为 5%~11%),

但显示出相似的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值($0.58\text{‰} \sim 0.72\text{‰}$), 平均值为 $0.66\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ (2SD, N=12)。具有不同堆晶程度的超镁铁质序列岩石也显示出一致的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值($0.68\text{‰} \sim 0.82\text{‰}$)。这些结果表明, 大陆弧岩浆作用中辉石、斜长石和角闪石结晶分异造成的钙同位素分馏有限($< 0.1\text{‰}$)。基于西藏冈底斯大陆弧深部地壳结构模型, 计算深部地壳的平均 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值为 $0.69\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$, 这与前人估算的上地壳平均 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值($0.70\text{‰} \pm 0.02\text{‰}$)一致。然而, 估算的大陆地壳平均 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值($0.69\text{‰} \pm 0.07\text{‰}$)相比于洋壳($0.85\text{‰} \pm 0.09\text{‰}$)偏低约 0.1‰, 比地幔($0.94\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$)偏低约 0.2‰。镁铁质-中性序列中较原始的样品(辉长岩类)具有较高(Dy/Yb)_N比值(约 1.4)和低的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ (约 0.6‰)值, 这表明冈底斯弧可能在早期演化阶段经历过石榴石(约 20%)的分离结晶。相反, 岛弧玄武岩显示出类似于 MORBs 的 $\delta^{44/40}\text{Ca}$, 表明在岛弧岩浆形成过程中石榴石的影响微乎其微。大陆地壳中耦合的低 $\delta^{44/40}\text{Ca}$ 值和高(Dy/Yb)_N比, 进一步表明石榴石作为加厚大陆地壳岩浆分异过程中的早期结晶相, 或作为早期地壳高压部分熔融后的残余相, 在大陆地壳形成过程中发挥了重要作用。

关键词: 钙同位素; 大陆岩浆弧; 深部地壳; 结晶分异

基金项目: 国家自然科学基金项目(42273023, 42273049 和 42373031)

第一作者简介: 王美玲(1997-), 博士研究生在读, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学. Email: reonaku@163.com

*通信作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 亲铁亲铜元素地球化学, 行星增生与壳幔演化. Email: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

钡稳定同位素示踪埃迪卡拉纪磷的循环

樊海峰^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

埃迪卡拉纪见证了大气和海洋氧气的增加, 多细胞生物的出现以及全球磷酸盐的沉积, 最终形成了富含动物胚胎和真核生物化石的磷块岩。这一时期海洋和生命演化可能与磷在海洋陆架数量级的增长密切相关 (Laakso et al., 2020)。大多数模型聚焦于磷通量与初级生产力和海洋/大气氧化作用之间的联系, 然而, 由于现有的地球化学工具无法有效追踪古代磷通量、源的变化, 因此, 埃迪卡拉纪时期磷酸盐增加的根本原因仍然存在争议。Martinez-Ruiz et al. (2019) 提出, 无定形磷酸盐的存在可能刺激海洋沉积物中的重晶石沉淀, 在此过程中, 磷酸盐可能通过成岩作用被硫酸盐逐渐替代。因此, 钡同位素可能成为海洋沉积物中磷酸盐循环的潜在示踪指标。最近, 我们测试了来自中国南华盆地陡山沱组瓮安磷块岩的新 $\delta^{138}\text{Ba}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 及主量和微量元素数据 (Fan et al.,

2024)。瓮安磷块岩可以分为上下两层, 下层磷矿呈现低至负值的 $\delta^{138}\text{Ba}$ (-0.31‰ ~ -0.06‰) 和高值的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7100 ± 0.0002), 表明约在 600~630 Ma 前, 强烈的大陆风化促进了磷酸盐的输入, 这一时期南华盆地的限制性较强, 浮游植物的繁盛促进了大气氧化及南华盆地深海水体的富营养化。与下部的磷块岩石相比, 上层磷矿 (约 587~574 Ma 前) 的 $\delta^{138}\text{Ba}$ 显著升高 (0.07‰ ~ 0.35‰) 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值呈现下降趋势 (0.7097 ± 0.0007), 表明这一阶段的磷块岩形成主要受控于富含重新循环的磷酸盐的深海水体的上涌。随着时间的演化, 全球尺度的磷埋藏 (作为磷矿) 导致富营养化条件的下降, 并且伴随着深海水体中氧气水平的增加, 可能促进了埃迪卡拉纪动物群的演化。

关键词: 钡同位素; 埃迪卡拉纪; 磷循环

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

不同预处理方法对植物样品中钡同位素测定影响

王海润¹, 宫迎增^{1*}

1. 贵州民族大学 生态环境工程学院, 贵阳 550025

Ba 是一种对人、动物和植物都有害的重金属元素。Ba 同位素是研究 Ba 元素在生物体中迁移转化的重要示踪剂。但是目前还没有建立分析有机物中 Ba 同位素的方法。在本研究过程中, 分别利用干灰化法、高压闷罐法和酸溶法, 分析一系列土壤和植物标准物质的钡同位素比值, 以评估不同消解法分析有机质 Ba 同位素组成的可靠性。评结果表明, 在处理已知同位素值的样品时, 采用酸溶法消解样品不会造成钡含量损失, 并且同位素值和推荐值一致。而使用干灰化法

和高压闷罐法都会造成不同程度的钡含量损失, 并且同位素值和推荐值有较大差别。因此, 酸溶法更加适用于钡同位素比值测量中有机物的去除, 而高压闷罐法和灰化法可能需要注意消解过程中 Ba 的损失问题。本次报道首次报道了标准物质番茄叶 (NIST SRM 1573a) 和菠菜叶 (NIST SRM 1570a) 的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值。

关键词: 植物样品; 干灰化法; 高压闷罐法; 酸溶法; Ba 同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目

第一作者简介: 王海润 (2000-), 硕士研究生, Email: 1349286477@qq.com

*通信作者简介: 宫迎增 (1987-), 副教授, 研究方向: 土壤中的金属稳定同位素地球化学. Email: gongyingzeng255@126.com

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

黄铁矿与含铜流体反应过程中的 Cu 同位素分馏机理

张阳^{1,2}, 李伟强^{2*}, Matthew J. Brzozowski³

1. 阜阳师范大学 地理系, 安徽阜阳 236037;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

3. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710064

过去二十年,随着高精度金属同位素测试技术的发展,Cu 同位素被广泛应用于矿床学研究,如沉积型层状 Cu 矿、矽卡岩型 Cu 矿、斑岩型 Cu 矿以及 Cu-Ni-PGE 矿床等。准确获得硫化物与流体之间 Cu 同位素分馏系数并理解 Cu 同位素在成矿过程中的分馏机理是 Cu 同位素在矿床中应用的基础。矿床中含铜硫化物(黄铜矿、斑铜矿及辉铜矿等)的 Cu 同位素统计结果显示,在高温和低温成矿体系中,Cu 同位素组成不仅随成矿温度变化明显,在同一矿床类型,硫化物的 Cu 同位素组成也存在明显差异。然而,理论计算结果表明,含铜硫化物与流体之间 Cu 同位素平衡分馏系数较小,且对温度变化不敏感。因此,矿床中 Cu 同位素组成的变化,难以通过平衡分馏进行解释。矿石矿物结构观察表明,通过交代前期黄铁矿等铁硫化物,是含铜硫化物沉淀的重要方式。本研究在水热条件下,开展室内实验模拟,研究黄铁矿被含铜硫化物(黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿)交代过程中铜同位素的分馏行为。实验结果表明,在交代反应的初始阶段,反应是非均质的,仅发生在黄铁矿表面特

定区域,随后产物相互融合,最终覆盖黄铁矿颗粒。黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿依次形成从黄铁矿反应锋面向溶液方向的规律微观分带。在反应早期,固相与流体之间的铜同位素分馏值($\Delta^{65}\text{Cu}_{\text{固-液}}$)约为-0.6‰,与理论计算得到的含铜硫化物与 CuCl_2 之间的 Cu 同位素平衡分馏系数接近。然而,随着反应时间的延长, $\Delta^{65}\text{Cu}_{\text{固-液}}$ 逐渐偏离平衡状态,分馏系数从约-0.6‰变化至-1.2‰。实验产物的全谱拟合定量结果指示,这种异常的偏离过程主要受产物层中黄铜矿含量控制。实验结果表明, $\Delta^{65}\text{Cu}_{\text{固-液}}$ 的变化受 Cu 在产物层矿物颗粒边界及纳米孔隙中扩散以及黄铜矿沉淀过程中 Cu 的氧化还原变化控制。这些研究结果暗示,低温热液矿床中硫化物的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 值可能受控于交代反应过程中局部流体化学条件(如氧化还原条件、金属配位形态和元素扩散作用)。本研究强调了局部流体特性在非平衡矿物交代过程中对同位素分馏路径的重要影响。

关键词: Cu 同位素; 热液实验; 黄铜矿; 交代反应

基金项目: 本研究得到国家自然科学基金(42203001)和中国博士后科学基金面上项目(2022M711548)资助。

第一作者简介: 张阳(1989-), 博士, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhangyangmineral@163.com

通讯作者简介: 李伟强(1983-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: liweiqiang@nju.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

表生环境系统中金属同位素组成特征及其应用

黄艺^{1*}, 谢薇薇¹, 唐华¹

1. 成都理工大学, 成都 610059

环境介质中金属同位素的大量应用已经证实其在重金属溯源和示踪中的可靠性。这些金属同位素(特别是 Pb、Cd 同位素)已被广泛用以进行矿山重金属来源示踪。同时, 环境系统中能够引起金属稳定同位素分馏的过程复杂, 包括氧化还原、络合、吸附、沉淀、溶解、蒸发、扩散、生物循环。利用 V、Pb、Cu 同位素定量识别了矿山重金属的主要来源, 反映

了不同功能区不同人类活动对 Pb 积累贡献的差异。观察到植物生长过程中 Zn 同位素的分馏, 讨论了植物和微生物存在条件对 Zn 同位素分馏的影响。为元素生物地球化学循环研究提供了新视角。

关键词: 矿山环境; 金属同位素; 示踪; 同位素分馏

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

湖光岩玛珥湖沉积物中的钾同位素: 公元 1900 年以来的流域侵蚀与人为活动

李国鼎^{1,2}, 金章东^{1,3*}, 贺茂勇¹, 程原原¹, 郭汝军⁴, 邓丽¹,
徐阳¹, 满剑奇⁵, 冯琦^{1,2}, 李峥岩¹

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西安交通大学 全球环境变化研究院, 西安 710049;

4. 中国地质大学(武汉) 地理与信息工程学院, 武汉 430074;

5. 长安大学 土地工程学院, 西安 710064

人类活动对地球系统产生了深远影响, 引发了一系列环境问题。钾(K)作为生命的基本元素之一, 在人类活动过程中被大量释放, 显著改变了其地球化学循环过程。因此, K 同位素具有追踪人类活动的潜力。然而, 这一领域的研究一直较为有限。湖光岩玛珥湖(HML)作为一个水文封闭的湖泊, 其沉积物是保存历史时期人类活动的理想场所。本研究通过调查 HML 沉积物的 K 含量和同位素组成($\delta^{41}\text{K}$), 追踪了 HML 流域近 120 年的钾循环和人为活动过程。研究结果表明, 燃煤和机动车尾气对 HML 沉积物的渗滤液 K(K_{leachate})有显著贡献, 而流域基岩侵蚀是残留 K(K_{residue})的主要来源。在公元 1950 年之前, HML 流域受人类活动的影响相对较小, 沉积物 K_{leachate} 和 K_{residue} 的含量与 $\delta^{41}\text{K}$ 值变化不大。1950 年至 2000 年

期间, K_{residue} 的快速增加表明中华人民共和国成立后, 人类活动可能通过植被破坏、土壤扰动等作用显著增强了 HML 流域的侵蚀。2000 年以后, 中国的经济发展对湖泊系统产生了更为强烈和多样的影响。湖光岩景区的建立可能削弱了流域的侵蚀作用, 但煤炭燃烧和机动车尾气已经开始远距离传输并影响湖泊。因此, 在这一阶段, 沉积物 K_{leachate} 和 $\delta^{41}\text{K}_{\text{leachate}}$ 的波动变化是经济发展与环保政策影响下的燃煤污染与尾气排放之间竞争的结果。这项研究为人类对地球化学 K 循环的影响提供了新的见解, 强调 K 同位素能够作为一种新兴的人类活动的环境示踪剂。

关键词: K 循环; K 同位素; 人类活动; 污染历史; 侵蚀

基金项目: 国家自然科学基金项目(42221003)

第一作者简介: 李国鼎(1994-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: liguonai@ieecas.cn

*通信作者简介: 金章东(1971-), 研究员, 研究方向: 同位素地球化学. Email: zhdjin@ieecas.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

镉同位素及其在地球科学中的应用

刘健勇¹, 朱光有^{1*}

1. 长江大学武汉校区 地球科学学院, 武汉 430100

镉 (Cd) 位于元素周期表第五周期 IIB 族, 其原子序数为 48, 原子量为 112.4, 其具有 8 种稳定同位素, 分别为 ^{106}Cd 、 ^{108}Cd 、 ^{110}Cd 、 ^{111}Cd 、 ^{112}Cd 、 ^{113}Cd 、 ^{114}Cd 和 ^{116}Cd 。镉是一个分散元素, 广泛分布于地质环境中, 如地壳中 Cd 含量约为 0.2 mg/kg, 在土壤环境中为 0.01~1 mg/kg。镉也是一个亲铜元素, 因此硫化物矿床如 Zn-Pb 矿床通常含有丰富的镉。在海洋环境中, 镉是一个营养元素, 被浮游植物吸收用于其生命活动。而在陆地环境中, 镉则是一个毒性元素, 对几乎所有动植物来说都是有害的非必需元素。随着 MC-ICP-MS (多接收电感耦合等离子体质谱仪) 的出现以及分析测试技术的改进, 镉同位素的测试精度得到了提高, 使得镉同位素分馏机制及其应用得到了发展。已有研究表明蒸发与冷凝、生物的吸收、风化、

吸附以及沉淀等过程会导致镉同位素发生分馏, 因此镉同位素在地球科学中可用于反映海洋生产力、示踪水体混合、示踪环境中的污染源、追踪铅锌矿床的成矿流体来源和成矿环境以及研究铅锌矿床成因等方面。文章阐述了镉同位素的分析与测试技术、镉的地球化学行为及其同位素分馏机制和镉同位素在地球科学方面的应用, 以期后续镉的进一步研究提供基础。对于镉及其同位素今后的研究, 需提高同位素测试精度, 建立健全自然端元中的同位素组成, 深入研究同位素分馏机制以及探索镉同位素与其它同位素的结合在地球科学领域中的应用。

关键词: 镉同位素; 分馏机理; 生产力; 示踪镉源; 铅锌矿床分类

第一作者简介: 刘健勇 (1994-), 男, 在读硕士研究生, 地质学专业; E-mail: 18370737027@139.com

*通讯作者简介: 朱光有 (1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事非传统同位素地球化学与深层油气地质成藏研究。E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

铬同位素古海洋缺氧指标在河口环境中的分馏研究

王相力^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全重实验室, 北京 100029

铬同位素分馏主要受氧化还原反应控制, 因此被广泛用于反演地球的氧化还原历史。利用铬同位素定量估算海洋的缺氧程度, 需要清晰刻画海洋溶解铬的来源和汇及其相应的同位素分馏。河流是海洋溶解铬的主要输入源, 缺氧沉积物是海洋铬的主要汇。

前人对河流铬通量及其同位素组成的限定主要基于河水样品。然而, 河流溶解铬需经过河口环境才能进入开放大洋。河口环境里发生着复杂的生物物理化学过程, 可能对河流铬元素的通量和同位素组成产生影响。选取墨西哥湾北部莫比尔河口环境作为氧化型河口环境的代表, 发现六价铬在低盐度区域被完全还原成三价铬, 部分三价铬被悬浮物移除水体, 整个过程导致重同位素的丢失。因此, 如果不考虑河口环境而直接利用上游河水数据计算海洋铬的输入源, 将

可能导致铬通量和铬同位素组成的高估, 亟需更多河口环境铬同位素研究进一步量化。

切萨皮克湾作为间歇性硫化河口环境的代表, 由表及深随着溶解氧浓度的耗尽和硫化氢浓度的升高, 溶解铬浓度降低两倍, 同时铬同位素组成由正变负。这些现象说明部分六价铬被还原成三价铬, 且部分三价铬被悬浮物移除水体, 整个过程导致重同位素的丢失。据此推测, 硫化环境沉积的沉积物中的自生铬组分的铬同位素组成, 与上覆硫化水柱具有明显的差别。因此, 利用硫化缺氧沉积物反演古海水铬同位素组成, 需要考虑沉积物形成过程的铬同位素分馏。

关键词: 铬同位素; 氧化还原指标; 古环境重建; 河口环境; 硫化环境

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

古亚洲洋俯冲引发的多期次地幔交代作用: 来自兴蒙造山带地幔包体的 Mg-Sr 同位素证据

刘旭道¹, 刘勇胜^{2*}, 虞凯章¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430000;

2. 长江大学, 湖北荆州 433200

俯冲作用是壳幔物质交换的重要机制, 俯冲板片携带的壳源物质可以显著影响地幔的物理性质和化学组成。然而, 多期次交代叠加会在地幔留下复杂的地球化学记录, 准确厘定这些交代介质的性质和来源对理解地幔演化至关重要。尽管传统全岩镁同位素分析方法能够提供基础判别信息, 但难以有效甄别和解析叠加的交代信号。相比之下, 原位镁同位素技术凭借其高空间分辨率优势, 为识别复杂的多期交代信号提供了关键的技术支持。本研究以兴蒙造山带阿巴嘎新生代玄武岩中幔源包体为研究对象, 通过原位主微量和 Mg-Sr 同位素, 揭示古亚洲洋俯冲携带的不同交代介质对岩石圈地幔矿物组成和化学成分的改造。根据岩相学和稀土元素组成, 包体可以分为两类橄榄岩和两类辉石岩。第一类橄榄岩和第一类辉石岩中单斜辉石具有亏损的轻稀土、低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7022~0.7029) 和正常地幔的 $\delta^{26}\text{Mg}$ (-0.11‰~-0.26‰), 表明其可能来源于亏损地幔; 相比之下, 第二类橄榄岩中单斜辉石具有富集的轻稀土、相对亏损高场强元素、低 Ti/Eu、较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7032~0.7036) 和低 $\delta^{26}\text{Mg}$ (-0.32‰~-0.42‰), 表明其经历再循环碳酸盐交代。此外, 这类橄榄岩中少量单斜辉石具有高 U/Nb 和高 $\delta^{26}\text{Mg}$ (-0.09‰~-0.27‰), 暗示其早期可

能经历流体交代。第二类辉石岩中单斜辉石具有较低的 Mg# 和 Ni 含量, 但有着富集的轻稀土、高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7035~0.7044)、Ti/Eu 和 Dy/Yb, 表明其可能来源于硅酸盐熔体和橄榄岩反应。然而, 这些单斜辉石具有低 $\delta^{26}\text{Mg}$ (-0.31‰~-0.46‰), 与硅酸盐交代特征矛盾。其轻镁同位素特征可能来源于沉积碳酸盐岩和俯冲板片脱碳反应, 即沉积碳酸盐分解导致轻镁同位素进入硅酸盐相, 后期随着俯冲板片回撤或破碎导致减压熔融形成硅酸盐熔体, 这些熔体上升交代岩石圈地幔。结合区域地质背景和地球物理数据, 阿巴嘎旗地区的岩石圈地幔改造可能与古亚洲洋俯冲有关。俯冲板片在浅部发生脱水作用导致地幔流体交代; 随着俯冲深度的增加, 沉积碳酸岩发生熔融, 形成碳酸岩熔体, 交代岩石圈地幔; 俯冲板片进入深部地幔后, 沉积碳酸岩与俯冲板片发生脱碳反应, 促使轻镁同位素进入硅酸盐熔体相, 该熔体与岩石圈地幔相互作用最终形成具有轻镁同位素特征的辉石岩。综上所述, 原位 Mg-Sr 同位素不仅示踪了不同阶段交代介质的性质和来源, 更为俯冲带壳幔物质循环过程提供了重要约束。

关键词: 兴蒙造山带; 古亚洲洋俯冲; 原位镁同位素; 碳酸盐交代; 脱碳反应

基金项目: 示踪深部碳氧循环的金属同位素原位微区分析技术 (2019YFA0708401)

第一作者简介: 刘旭道 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 岩石圈地球化学. Email: xudao.liu@cug.edu.cn

*通信作者简介: 刘勇胜 (1971-), 教授, 研究方向: 分析地球化学、岩石圈地球化学、壳幔物质相互作用与地球深部碳循环. Email: yshliu@hotmail.com

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

石膏作为潜在的地震示踪剂: 以土耳其东安纳托利亚断裂带 Mw7.8 地震为例

罗泽彬¹, 周晓成^{2*}

1. 西华大学 应急管理学院, 成都 610039;

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

土耳其东安纳托利亚断裂带 (East Anatolian Fault Zone (EAFZ)) 地热流体在地震前后表现出显著的地球化学异常。通过水化学与稳定同位素 ($\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$) 系统分析发现, 地震活动通过能量-物质交换重构了地热流体系统。氯-焓混合模型显示, 受地震能量输入影响, 深部热储温度上升至 382 °C, 但震后浅层冷水大量混入导致深部信号被掩盖。地热水中 Ca^{2+} (54.04~501.58 mg/L)、 SO_4^{2-} (6.37~287.74 mg/L)、Sr (34.78~3244.8 $\mu\text{g/L}$) 等离子浓度异常升高, 揭示石膏溶解、方解石沉淀等水岩相互作用过程被地震活

动扰动。值得注意的是, HS05、HS09 和 HS14 站点的石膏溶解强度在震后明显增强, 表明浅层蒸发岩矿物对构造活动具有敏感响应。然而, 实际应用中此类地震前兆信号易受环境因素干扰 (温度、降水量, 季节, 气候等)。本研究证实浅层矿物 (石膏/硬石膏) 的地球化学行为能有效指示构造应力变化, 但其地震预警效能需建立多参数校正模型以排除环境噪声影响。

关键词: 地热流体; 水岩反应; 地震预警; PHREEQC; 石膏

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

花岗岩风化过程中的稳定 W 同位素分馏: 来自华南花岗岩风化剖面的证据

刘孟南¹, 李伟¹, 李涛², 李高军^{1*}

1. 南京大学 表生地球化学教育部重点实验室, 南京 210023;

2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008

化学风化对具有重要环境和经济意义的元素的行为具有重要的控制作用。然而, 由于造岩矿物的选择性分解和次生沉淀 (如铁/锰氢氧化物和层状硅酸盐粘土) 对元素的吸收, 对风化层中元素行为的研究变得复杂。广泛参与这些过程的元素及其同位素可能对所有元素的风化迁移性提供关键约束。在这项研究中, 我们发现稳定的钨同位素可以利用风化过程中钨的显著稳定同位素分馏, 帮助限制元素的风化迁移性以及它们随后被 Fe/Mn 氢氧化物和层状硅酸盐粘土吸收。对华南亚热带花岗岩风化岩的研究表明, 腐岩

相对于基岩富集较轻的 ^{184}W 同位素, 富集程度取决于粘土级组分中 W 的相对含量, 并受整体风化强度的调节。风化层粘土级组分的还原浸出表明, Fe/Mn 氧氢氧化物是轻 ^{184}W 同位素富集的原因, 其 $\delta^{186/184}\text{W}$ 值与当地水流的 $\delta^{186/184}\text{W}$ 值平衡。我们的研究表明, 稳定的钨同位素在追踪临界区元素循环方面具有很大的潜力。

关键词: 钨; 同位素分馏; 花岗岩风化; 铁锰氧化物

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

德兴超大型斑岩铜矿流体的钾同位素演化

贺佳峰¹, 王国光^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

作为流体的主要元素, 新兴的钾同位素体系是示踪热液流体演化最直接的手段之一。本研究选取我国最大的在产斑岩铜矿——德兴斑岩铜矿——为研究对象。通过改进的粉碎浸出法, 我们获得了德兴斑岩铜矿内不同阶段石英脉体中的流体包裹体, 并首次分析其钾同位素组成。从早阶段到晚阶段流体钾同位素

值的显著下降, 这可能指示了热液蚀变过程和流体饱和后盐的沉淀。该研究系统研究了斑岩系统中各潜在的钾同位素的分馏机制, 并指出包裹体钾同位素具有示踪岩浆热液系统流体演化的巨大潜力。

关键词: 斑岩铜矿; 钾同位素; 流体演化

基金项目: 国家自然科学基金面上项目-富 CO₂ 斑岩铜矿流体成矿过程和成矿机制的精确厘定: 以沙坪沟为例 (Grant no. 42172072)

第一作者简介: 贺佳峰 (2001-), 博士研究生, 研究方向: 金属稳定同位素在矿床学研究中的应用. Email: 191830049@smail.nju.edu.cn

*通讯作者介绍: 王国光 (1983-), 副教授, 研究方向: 热液流体作用成矿. Email: ggwang@nju.edu.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

非传统 Li 同位素示踪大陆风化的潜力和挑战

张飞^{1*}

1. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

晚新生代以来全球气候逐渐变冷, 形成了当今人类宜居的气候环境格局。在地质时间尺度上, 大陆硅酸盐岩通过化学风化吸收大气中的 CO_2 温室气体, 被认为在调控地球长期的气候变化中起到了关键作用。然而, 大陆风化速率到底受何种因素控制一直是地球科学研究的前沿和难点, 从 20 世纪下半叶以来就得到了科学界的广泛关注。过去 20 年来, 随着科学技术的高速发展, 非传统稳定锂 (Li) 同位素的前处理方法和仪器测试精度取得了巨大进步, 其在化学

风化领域研究中由于其主要赋存在硅酸盐岩、分馏大等独特的优势, 逐渐成为一支新的力量继续引领大陆风化研究的发展。本报告将对利用 Li 同位素示踪大陆风化研究的潜力、争论、挑战及未来应用进行深入探讨, 希望为未来大陆风化前沿领域的研究提供有价值的线索, 进而加快该领域的发展。

关键词: 大陆风化; 构造抬升; Li 同位素; 水文变化

第一作者简介: 张飞 (1984), 研究员, 研究方向: 地表过程与碳循环. Email: zhangfei@ieecas.cn

*通信作者简介: 金章东 (1971), 研究员, 研究方向: 陆地表生地球化学过程. Email: zhdjin@ieecas.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

嫦娥五号玄武岩中扩散驱动的 Fe-Mg 同位素分馏及其对岩浆冷却历史的制约

帅康^{1*}, 惠鹤九¹, Samuele Boschi¹, 陈嘉阳¹, 李伟强¹

1. 南京大学, 南京 210023

矿物尺度的同位素分馏在岩浆演化过程的示踪上具有重要作用。扩散驱动的同位素分馏能够定量示踪扩散过程, 并为岩浆冷却历史提供有效限定。我们将这一方法应用于嫦娥五号返回样品上, 测量了月球玄武岩岩屑中矿物的 Fe 和 Mg 同位素组成, 以示踪嫦娥五号玄武岩的岩浆演化历史。在矿物成分分析、Pb-Pb 定年和钾同位素组成分析的基础上, 本研究对嫦娥五号玄武岩岩屑#CE5C0000YJYX048 进行了细致的铁、镁同位素分析。通过对岩屑中的矿物(橄榄石、辉石、长石和钛铁矿)进行分离, 经溶解、分离提纯后采用 MC-ICP-MS 进行分析, 对于每种矿物获得了多组样品的 Fe 和 Mg 同位素组成。这些矿物表现出显著的 Fe 和 Mg 同位素分馏, $\delta^{56}\text{Fe}$ 变化范围为 -0.05‰ ~ $+0.25\text{‰}$, $\delta^{26}\text{Mg}$ 变化范围为 -0.53‰ ~ $+0.31\text{‰}$ 。矿物的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 呈现负相关关系, 表明 Fe 和 Mg 同位素分馏来源于矿物中的 Fe-Mg 互扩散过程。富 Mg 矿物显示出显著的 Fe 和 Mg 同位素

分馏, 而富 Fe 矿物显示出较大的 Mg 同位素分馏和有限的 Fe 同位素分馏, 符合扩散导致的同位素分馏的特征。本研究进一步对扩散过程及其同位素分馏效应进行了系统模拟, 得到了不同初始成分、冷却速率和矿物尺寸下的元素与同位素组成。通过比较实测数据和扩散模拟结果, 限定了不同阶段结晶矿物的冷却速率。结果显示, 富 Mg 矿物以 $10\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{天}$ 的速率快速冷却; 富 Fe 矿物以 $3\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{天}$ 的速率冷却。根据以上结果可以推测嫦娥五号玄武岩的冷却历史, 富 Mg 矿物可能在岩浆喷发前或喷发期间结晶, 并在喷发期迅速冷却, 而富 Fe 矿物可能在喷发后结晶并在岩浆池中以相对较低的速率冷却。本研究结果表明, 同位素数据与扩散模型的结合可以为岩浆冷却历史提供系统的约束。

关键词: 嫦娥五号; 月球玄武岩; Fe 同位素; Mg 同位素; 化学扩散

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

深海富稀土沉积物的稀土同位素组成

白江昊¹, 邓义楠², 韦刚健^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 广州海洋地质调查局 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075

深海稀土因具有储量巨大(陆地资源量的 1000 多倍)(Kato et al., 2011; 石学法 等., 2021b)、放射性 Th、U 等元素含量少、富集中-重稀土元素等优点, 被认为是“兵家必争之地”, 而被世界各国所关注。除具备战略定位外, 稀土元素本身还是被广泛使用的地球化学示踪剂, 其配分模式、轻重稀土分异、异常、放射成因同位素(如 ^{147}Sm - ^{143}Nd 体系)被应用于判断深海稀土的物质来源和探讨其深海稀土成矿机制(邓义楠等., 2018; Deng et al., 2021, 2022; Ren et al., 2021, 2022; 黄牧等., 2021; 石学法等., 2021a, 2021b; Liao et al., 2022, 2024; 付宇等., 2024), 已成为海洋地球化学中不可或缺的示踪剂。此外, 稀土元素还具有非常丰富的稳定同位素, 这些同位素特有的指纹特征有望扩展地球化学示踪能力, 为稀土的物质来源与富集机制提供最直接的地球化学信息, 但目前关于这方面的研究尚未有报道。本报告对一套典型的西太平洋水深 5714 m 的富稀土沉积

柱状样品开展了全岩 XRD 矿物成分分析、分步淋滤实验(磷酸盐相、铁锰氧化物相和铝硅酸盐相)、主微量元素分析以及稀土 Ce-Nd 同位素组成的测定。结果表明, 磷酸盐相和铁锰氧化物相的放射性成因 Nd 同位素基本一致, 且波动不大, 说明深海稀土来源于海水且没有发生大的物源变化。深海稀土沉积物中的磷酸盐组分富集重质量数 ^{146}Nd 、Fe-Mn 氧化物和铝硅酸盐组分亏损 ^{146}Nd , 揭示了稳定 Nd 同位素组成在磷酸盐—Fe-Mn 氧化物—铝硅酸盐三种主要赋存载体之间的迁移分配机制, 证实了富稀土大洋沉积物中稀土来源于海水的交换反应, 并从稳定 Ce-Nd 同位素的角度说明了高氧化的沉积环境有利于深海稀土成大矿。这一研究阐明了富稀土深海沉积物的稀土同位素的分馏行为, 有望为厘清深海稀土的富集机制, 甚至海洋稀土循环提供新的视角。

关键词: 深海稀土; Nd 同位素; Ce 同位素

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF0803901)、国家自然科学基金项目(U2244222, 41803026, 和 42403001)和博新计划(BX20240377)等项目联合资助。

第一作者简介: 白江昊, 博士后, 研究方向: 稀土同位素地球化学. Email: baijianghao@gig.ac.cn

*通信作者简介: 邓义楠, 正高级工程师, dengyinan@126.com; 韦刚健, 研究员, gjwei@gig.ac.cn

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

德令哈花岗岩-土壤间的 Zn 元素迁移及 Zn 同位素分馏机制研究

张贤亮¹, 翟华焱^{2*}, 徐国栋¹, 冉敬¹, 金斌¹

1. 中国地质调查局成都地质调查中心 实验测试室, 成都 610095;

2. 河北大学, 河北保定 071002

本研究对青海省德令哈地区巴音河流域的花岗岩及其对应风化土壤样品进行了系统采样与分析, 对深入理解风化作用下元素迁移转化规律、土壤形成与发育过程以及生态地球化学循环等具有重要价值, 为评估风化作用对区域环境质量的影响提供了科学依据。本研究共采集 32 件花岗岩及其对应风化土壤样品, 在河北地质大学河北省战略性关键矿产资源重点实验室完成对应主微量元素分析及 Zn 同位素分析。花岗岩 TFe_2O_3 含量变化为 0.38%~6.15%, Al_2O_3 含量变化为 10.11%~17.83%, CaO 含量变化为 0.46%~2.98%, 对应化学风化指数 (CIA) 变化范围为 53.34~65.59。Zn 含量变化较大, 从 0.55 $\mu\text{g/g}$ 到 80.0 $\mu\text{g/g}$ 。Th/U 比值变化较大, 从 1.7 到 20.57。本研究主要探讨了花岗岩及土壤中 Zn 同位素变化的原因及其与风化过程的关系。研究表明, 花岗岩的 Zn 同位素组成总体变化为 0.26‰~0.47‰, 绝大多数高于全球大洋玄武岩的平均值 (0.28‰ $\pm$ 0.05‰)。通过分析可知 Zn 含量与 Zn 同位素呈负相关, 并且 Zn 同位素与 La/Yb、Th/U 无相关性, 因此排除了部分熔融、岩浆

脱气和流体出溶导致花岗岩 Zn 同位素变化的可能性。花岗岩样品的 Zn 同位素组成与 Zn 含量、 SiO_2 含量以及 TFe_2O_3 含量都具有一定的相关性, 据此推断岩浆分异, 尤其是 Fe-Ti 氧化物的分离结晶是花岗岩 Zn 同位素变化的主要原因。本研究中土壤剖面的 Zn 同位素组成的变化范围为 0.25‰~0.38‰, 相较于母岩 Zn 同位素偏轻。在风化过程中, Zn 同位素分馏主要受铁氧化物控制, Zn 进入 Fe 氧化物结构中, 该结构易结合轻 Zn 同位素, 因此本研究区花岗岩 Zn 同位素组成与 TFe_2O_3 含量呈负相关。此外, 花岗岩 Zn 同位素与岩石化学风化指数 (CIA) 显著相关 ($R^2=0.57$), 进一步表明风化过程会导致岩石与土壤之间的 Zn 同位素分馏。根据土壤研究发现, 土壤比母岩更富集轻 Zn 同位素组成, 并且其 Zn 同位素与物质传输系数 (τ) τZn 值之间存在一定的相关性, 进一步证实风化过程会导致研究区土壤与母岩 Zn 同位素发生分馏。

关键词: 锌同位素; 风化作用; 德令哈

第一作者简介: 张贤亮 (1998-), 助理工程师, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学. Email: 814051451@qq.com

*通信作者简介: 翟华焱 (1994-), 博士, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学. Email: 15810205806@163.com

• 专题 29: 金属稳定同位素地球化学: 方法、原理与应用 •

快速烧结法制备 LA-MC-ICP-MS 基体 匹配标准物质——以铪为例

吕楠^{1,2}, 包志安², 陈开运², 聂小娟², 张妍², 彭德义², 袁洪林^{2*}

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土科学全国重点实验室, 西安 710061;

2. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

激光剥蚀 (LA-) 多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 是一种成熟的微束分析技术, 广泛应用于含 Hf 矿物的原位 Hf 同位素分析, 如锆石、斜锆石、金红石、异性石、锡石以及铌铁矿族矿物。然而基体效应会显著影响 LA-MC-ICP-MS 原位 Hf 同位素分析的准确性, 因此必须使用基质匹配的标准物质以实现精确微区分析。目前已有多种天然含 Hf 矿物被用作 Hf 同位素标准物质, 一般来说天然标准物质数量有限, 且 Hf 含量差异较大, 难以满足多样化需求。此外近期原位微区分析发现, 部分天然标准物质的 Hf 同位素组成存在天然的不均一性, 例如 Phalaborwa 斜锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值在 0.281193 ± 14 至 0.281262 ± 9 之间波动。目前, 许多实验室选择大颗粒锆石作为主要标准物质 (因其 Hf 含量稳定且供应充足), 但多数天然含 Hf 矿物 (如锡石、金红石) 的 Hf 含量较低, 难以作为 Hf 同位素标准。随着 LA-MC-ICP-MS 实验室的迅速增加,

开发新型可靠的原位 Hf 同位素标准物质的需求日益迫切。为低成本批量生产标准物质, 本研究采用快速热压烧结 (FHP) 技术合成 Hf 同位素分析用标准物质。FHP 烧结可在数分钟内实现样品致密化, 常用于纳米陶瓷和光电材料生产, 但其在标准物质合成领域的应用仍鲜见报道。本研究通过 FHP 技术烧结两种标准物质 (锡石和金红石), 验证其快速制备基体匹配标准物质的潜力。结果表明, 烧结后的锡石和金红石具有均一的 Hf 同位素组成、光滑表面及致密结构, 证实 FHP 技术是制备原位 Hf 同位素分析合成标准物质的有效方法。此外, FHP 技术单次实验可制备高达 10 克样品, 与传统制备方法相比, FHP 技术具有快速、低成本的优势, 可批量生产致密结构的标准物质, 为合成多种同位素基体匹配的标准物质提供了新途径。

关键词: 标准物质; 金红石; 锡石; Hf 同位素

基金项目: 国家自然科学基金项目 (2203035, 42130102, 41825007, 42173033)

第一作者简介: 吕楠 (1991-), 副研究员, 研究方向: 分析地球化学. Email: 563303494@qq.com

*通信作者简介: 袁洪林 (1974-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: yhlslcd@126.com

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

人工智能驱动下成矿预测-勘查评价- 战略决策协同机制探索研究

周兆巍^{1*}, 王昭静¹, 杜婷¹

1. 包钢集团矿山研究院(有限责任公司)矿产资源战略研究所, 内蒙古包头 014030

近年来, 人工智能技术深度融入矿产资源勘查全流程, 推动地质找矿理论与资源评价方法发生了结构性变革。本研究聚焦人工智能对成矿规律解析、勘查技术升级及资源战略决策的赋能机制, 系统阐述其在多元信息融合建模、三维定量预测及动态经济评价中的创新应用, 为智能化勘查体系构建与资源安全保障提供科学依据。海量地质数据的智能化分析和处理推动成矿理论研究向数据密集型模式转变。基于人工智能的多元地学数据协同解译技术, 显著提升了地球物理场和区域成矿的特征提取、地球化学异常圈定与遥感蚀变信息识别的综合能力。例如, AI 辅助下的矿物标型学特征智能提取, 成功揭示了白云鄂博稀土-铌-铁多金属矿床关键矿物的重要标型特性, 磁铁矿等判别准确率达 92 以上%; 重磁数据三维反演耦合构造解析技术在 Olympic Dam 矿床深部实现了隐伏岩体顶界面埋深预测, 误差小于 15%; 在鄂尔多斯盆地铀矿勘查中, 通过水文地球化学指标与层序地层格架的关联建模, 铀矿化有利区预测精度较传统方法提升了 41%; 人工智能辅助下的三维地质建模技术, 突破复杂构造控矿空间表征难题, 在卡林型金矿勘探中实现断裂-岩性

-地球化学异常体的协同定位, 勘探靶区定位精度达 87%。同时, 人工智能技术正在推动矿产资源经济评价从静态储量估算向全生命周期动态模拟转型。例如, 基于矿床三维品位分布/主要矿物占比与开采工艺约束的动态储量评估模型, 在矽卡岩型铁矿开发中实现可采储量误差率降至 8% 以下; 矿产品市场-政策-环境的多维耦合分析框架, 支持战略性矿产供需风险预警, 稀土元素供应链中断概率预测准确率达 89%; 在矿业权评估领域, 通过整合资源禀赋、基础设施与生态红线数据构建的矿业用地适宜性评价体系, 为投资决策提供量化依据, 使矿权出让方案优化效率提升 60%。可以预见, 人工智能技术在典型矿床数据知识图谱编制、地质本体约束下的 AI 模型解析、资源-环境-经济协同优化算法构建以及人机协同决策系统建立等方面将持续突破, 将推动矿产资源行业向智慧勘查、绿色开发与可持续管理方向迈进, 亦可为实现资源高效开发与生态环境保护的动态平衡提供更全面、及时和系统的解决方案。

关键词: 人工智能; 成矿预测; 资源勘察; 战略决策

周兆巍 (1992-), 工程师, 研究方向: 采矿工程、战略分析 Email: 775798850@qq.com

王昭静 (1986-), 高级工程师, 研究方向: 矿床地质、矿物学研究、人工智能大数据 Email: wzjhing_kevin@163.com

杜婷 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 数智化、信息化研究、科技情报分析 Email: 361220391@qq.com

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

安徽庐枞盆地小包庄铁矿榍石矿物学特征及其成矿指示意义

张龙¹, 侯通^{1*}, 王萌²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

庐枞盆地作为长江中下游成矿带的重要矿集区, 其内小包庄铁矿床是典型的玢岩型铁矿之一。本文以该区深部层位小包庄铁矿为研究对象, 重点研究副矿物榍石的矿物学特征及其成矿响应机制。该矿床以磁铁矿为主矿体, 共生硫铁矿与硬石膏矿化, 成矿作用与闪长玢岩及热液活动密切相关。研究表明, 磁铁矿体(-1694~1706m)中榍石呈小颗粒定向分布于碱性长石基质, 核部 $\text{FeO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值高达 8.97% (最高 17.05%), 与磁铁矿、磷灰石共生, 反映深部高温富 Fe 流体(>600 °C)快速结晶。边部 FeO 含量(2.45%)显著高于核部(2.28%), 且核部 Al_2O_3 含量极低(0.48%), 表明高温条件下 Al 活度受抑制, Fe^{3+} 通过类质同象大量替代 Ti^{4+} , 高氧逸度促使 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 。榍石中极端 Fe/Al 比值(17.05%)及共生磷灰石指示深部岩浆热液快速上涌的动力学过程。硫铁矿体(-1273 m)中榍石粒径呈双峰分布, 核部 TiO_2 (36.01%) 略高于边部(35.86%), 与绿泥石化/绿帘石化透辉石及黄铁矿共生, 指示中低温(200~350°C)热液叠加。 Al_2O_3 (0.56%~0.60%) 与 FeO (1.80%~1.90%) 呈正相关趋势, 且 $\text{FeO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值变化范围

不大(3.28%~3.32%), 反映 Al^{3+} 与 Fe^{3+} 在热液活动中的协同替代机制。浅部硬石膏矿体(-1018~-1056 m)中榍石以自形晶为主, 穿切早期透辉石, 核-边成分显示 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeO}$ 边部富集(2.84%, 核部 2.71%), 与透辉石、金云母及硬石膏共生, 对应中温矽卡岩化阶段。核部 Fe/Al 比值升高暗示流体向富 Fe 微调。榍石切穿透辉石的结构及环带成分分异(如边部 Al_2O_3 为 0.90%, 核部 0.96%)揭示矽卡岩化过程中热液活性的波动。因此, 榍石的核-边成分分异、环带结构及共生序列表明庐枞盆地铁矿成矿受多期热液上涌控制——深部早阶段高温富 Fe 岩浆热液快速结晶形成磁铁矿主矿体; 随岩浆上升, 中期中低温热液叠加导致硫铁矿化; 晚期浅部中温矽卡岩化形成硬石膏矿体。通过矿物学与地球化学特征相结合, 系统阐述榍石成因和成分变化特征, 揭示其对成矿过程的指示意义, 为完善长江中下游玢岩型铁矿成矿模型提供矿物学约束。

关键词: 榍石; 矿物共生组合; 地球化学; 小包庄铁矿; 庐枞盆地

基金项目: 东部地区富铁矿床矿体定位技术与增储示范

第一作者简介: 张龙(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 879686711@qq.com

*通信作者简介: 侯通(1984-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学和岩浆系统实验岩石学研究. Email: thou@cugb.edu.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

铁（氢）氧化物的可见-短波红外反射光谱研究及其在风化壳型稀土矿床勘查中的应用

罗莲英¹, 谭伟^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

铁（氢）氧化物（如赤铁矿、针铁矿和水铁矿）的形成与相互转化过程对表生环境中的气候变化和干湿条件具有重要的指示意义，同时在风化壳型稀土矿床的勘查中具有潜在应用价值。然而，铁（氢）氧化物在天然样品中的识别与定量分析面临挑战。现有实验室分析技术（如 X 射线衍射、穆斯堡尔谱等）样品前处理复杂、成本昂贵，难以满足大规模样品分析的需求。可见-短波红外反射（VSWIR）光谱是一种快速、便捷且经济的分析技术，其光谱波段（350~2500 nm）范围内包含铁（氢）氧化物相关特征吸收带，可以通过解译分析获得定性定量铁（氢）氧化物的光谱参数。但是由于铁（氢）氧化物 Fe^{3+} 相关的电子跃迁吸收带重叠严重，并且 Al 类质同像替代会导致吸收带位置的偏移，制约了 VSWIR 光谱识别和定量分析天然样品中铁（氢）氧化物的有效性。为解决上述问题，本研究以实验室合成的高纯度铁（氢）氧化物及不同程度 Al 类质同像替代样品为研究对象，系统开展了光谱学研究。通过构

建二元及三元铁（氢）氧化物混合物的光谱特征模型，量化分析了 VSWIR 光谱参数（如 P900、AS500、FWHM900）与各组分含量之间的相关性，建立了相应的函数模型。研究进一步揭示了 Al 类质同像替代对铁（氢）氧化物 VSWIR 光谱特征的影响机制，发现约 500 nm 波段的吸收强度对 Al 替代量变化最为敏感，可作为评估 Al 类质同像替代程度的有效指标。此外，通过天然风化壳剖面样品的验证，提出了基于 VSWIR 光谱的稀土矿化指示指标：在贫铁风化壳中， Nd^{3+} 在约 800 nm 处的晶体场吸收强度可作为稀土品位评价的可靠指标；在富铁风化壳中，P900 吸收带位置的突变可有效指示矿体边界。本研究为铁（氢）氧化物的 VSWIR 光谱定量分析提供了科学依据，并为风化壳型稀土矿床的勘查工作提供了重要的技术支撑。

关键词：VSWIR；铁（氢）氧化物；风化壳型稀土矿床

第一作者简介：罗莲英（1998-），女，博士研究生，研究方向：风化壳型稀土矿床成矿特征. E-mail: luolianyong@gig.ac.cn

*通信作者简介：谭伟（1987-），男，副研究员，研究方向：风化壳型稀土矿床的形成机制与可见-近红外光谱学标型. E-mail: tanwei@gig.ac.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

白云鄂博矿区黑云母地球化学特征及成因研究

田胜强^{1,2}, 覃凌峰¹, 戴霜^{1,2*}, 王彬¹, 刘雁江^{1,2}, 郭锐^{1,2}, 王其伟^{1,2}

1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000;

2. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室, 内蒙古包头市 014030

白云鄂博超大型多金属矿床是全球规模最大的 REE-Nb-Fe 共伴生矿床, 其成因机制与多期构造-岩浆-热液耦合过程解析是揭示稀土超常富集规律和指导深部找矿的关键科学命题。白云鄂博矿床主体形成于中元古代碳酸岩岩浆侵位及后期中酸性岩浆侵位叠加成矿, 具有两期成矿特点。如何鉴别成矿过程并评估不同成矿期次成矿贡献, 是亟待解决的稀土成矿关键科学问题。赋存矿体的碳酸岩体侵位于白云鄂博群 H9 片岩中, 这套片岩含有比较多的黑云母, 它的形成既经历了地层沉积后的区域变质作用, 也经受了碳酸岩浆侵位过程的叠加变质作用, 以及海西期中酸性岩体侵位时的叠加变质作用, 因此, 开展黑云母成分研究, 有可能是甄别成矿地质作用、认识成矿机制的重要途径。本文选取交代蚀变片岩、未蚀变片岩及含矿钠闪石碳酸岩 3 类代表性样品, 系统开展了黑云母矿物特征观测和化学成分分析, 结合 Ti-Mg 温度计、 $10\text{TiO}_2\text{-FeO-MgO}$ 成因分类图解及黑云母端元组分判别图解, 探讨了黑云母形成环境及成因类型, 为认识白云鄂博矿床成矿背景及成矿过程提供了基础资料。

镜下观察发现, 黑云母普遍呈半自形-他形片状,

鳞片状集合体, 粒径介于 $50\sim 200\mu\text{m}$, 常见定向排列。主量元素分析结果显示黑云母分为镁黑云母和铁黑云母。交代蚀变片岩包括黑云母片岩、钠长变粒岩、黑云钠长片岩, 部分黑云母颗粒边缘发育港湾状溶蚀结构, 薄片可见黑云母与钠闪石、磷灰石、独居石等矿物伴生, 反映岩石经受了后期流体交代改造; 黑云母 $10\text{TiO}_2\text{-FeO-MgO}$ 投点全部位于重结晶黑云母区间, 对应中高温热液交代环境 ($500\sim 660\text{ }^\circ\text{C}$), Ti 亏损 ($<0.2\text{ apfu}$) 与富镁特征 ($\text{Mg}\geq 0.70$) 共同指示岩石处于开放体系并有交代流体参与反应。未蚀变岩石为黑云斜长微晶片岩, 13 组样品中 9 个投点位于岩浆黑云母区间 (可能反应原岩为火山岩)、温度较高 ($650\sim 720\text{ }^\circ\text{C}$), 可能反映岩浆结晶分异过程; 4 个样品落入重结晶区间, 指示区域变质作用成因。含矿钠闪石碳酸岩的黑云母均落入新生黑云母区间, 低温 ($<500\text{ }^\circ\text{C}$) 及极低 Ti 含量 ($<0.06\text{ apfu}$) 标志该类黑云母可能形成于碳酸岩浆晚期富挥发分 (F/Cl) 的热液活动阶段, 可能与稀土成矿密切相关。

关键词: 黑云母地球化学; Ti-Mg 温度计; 温压序列; 多期热事件; 白云鄂博矿床

基金项目: 国家重点研发项目 (22022YFC2903305), 北方稀土重点项目 (BFXT-2021-D-0053) 及白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室联合项目 (2022H2272)

第一作者简介: 田胜强 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学, 岩石学, 矿床学. Email: tianshq2024@lzu.edu.cn

*通信作者简介: 戴霜 (1967-), 教授, 研究方向: 中生代构造与环境、矿产与勘查. Email: daisher@lzu.edu.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

基于高光谱技术对碳酸岩型稀土矿床中氟碳铈矿的识别及其地质意义

郭东旭^{1,2*}

1. 自然资源实物地质资料中心 中国地质调查局岩心数字化技术创新中心, 河北廊坊 065201;
2. 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

碳酸岩型(含碳酸岩-碱性岩型)稀土矿床所含稀土氧化物占稀土储量的 51.4%, 而氟碳铈矿是其中最重要的稀土矿物之一。氟碳铈矿在碳酸岩型稀土矿床成岩成矿、流体演化过程中记录了重要的地质信息, 如何有效识别该矿物含量, 一直是地质学家关注的重点问题之一。钻孔岩心、野外近地、机载或星载高光谱对矿物信息的反映, 被广泛应用于矿产勘查, 尤其在地质露头发育区域以及人力难以接近的区域优势显著(Laukamp et al., 2021)。与 XRD (X 射线衍射分析)、QEMSCAN (扫描电镜矿物定量分析) 等实验方法对矿物的识别相比, 高光谱技术在地矿行业的基础研究和生产应用中属于新兴技术, 具有绿色、快速、无损检测, 花费低, 可以获得海量数据等优势。稀土元素 4f 电子层的 f-f 跃迁引起的 V-NIR-SWIR (可见光-近红外-短波红外) 波段波谱特征吸收, 碳酸根离子 CO_3^{2-} 在 SWIR 的特征吸收和在 TIR 波段的特征反射, 为氟碳铈矿稀土矿物的定量识别提供了理论基础。前人应用光谱技术对溶液中离子吸附态的稀土离子, 对稀土氧化物、稀土氟氧化物、稀土氟化物, 对碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐稀土矿物的 V-NIR-SWIR 波段开展了光谱特征研究, 对离子吸附型 REE 矿床、沉积型 REE 矿床、REE-Nb-Zr 矿床的稀土元素开展了定量反演, 对碳酸岩型 REE 矿床仅有对 Nd 元素含量与光谱参数开展了相关性分析, 对稀土、铈、钙元素含量和矿物相影响稀土定量等方面取得了相应的研究进展 (Turner et al., 2014; Möller et al., 2018; 代晶晶等, 2018; 曹发生等, 2021; Cheng et al., 2021; Dai et al., 2021)。然而, 氟碳铈

矿在 TIR (热红外) 波段的光谱特征并未总结报道, 基于高光谱对碳酸岩型稀土矿床中氟碳铈矿的量化识别, 有待进一步深入研究。以牦牛坪稀土矿床矿物颗粒粗大的矿石、大陆槽和白云鄂博含氟碳铈矿矿石为研究对象, 全面总结氟碳铈矿在 V-NIR-SWIR-TIR 波段光谱特征。由于大多数含水含羟基矿物、碳酸盐矿物、硫酸盐矿物在 SWIR 有较强的吸收峰, 无水硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等矿物在 TIR 波段有显著光谱特征峰, 可能与氟碳铈矿特征峰有叠加, 而大多矿物在 400~1300 nm 波段很少有较强的吸收峰, 仅有部分铁矿石(赤铁矿、褐铁矿、针铁矿)在 900 nm 出现大而缓的吸收带, 在 500 nm 或者 700 nm 附件有很微弱的吸收带, 对稀土典型吸收位置和相对吸收深度影响不大。研究表明, 氟碳铈矿在 400~1300 nm 波段强吸收峰的吸收位置为 511、522、580、677、742、865、890、1094、1255 nm, 且不随氟碳铈矿含量($\geq 10\%$)的变化而变化。氟碳铈矿这些强吸收峰的相对吸收深度、吸收面积与其含量强烈正相关, 并以此建立氟碳铈矿定量反演的多类模型。其特征强吸收峰的相对吸收深度或吸收面积的线性回归模型($R^2 \geq 0.98$)对氟碳铈矿含量的预测效果最好。研究认为, 高光谱(V-NIR-SWIR-TIR)技术在氟碳铈矿准确识别和含量探测方面优势突出, 在碳酸岩型稀土矿床的野外矿产勘查、区域勘查、深边部资源预测等方面具有广阔的应用前景。

关键词: 高光谱; 碳酸岩型; 稀土矿床; 氟碳铈矿; 近红外

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

基于 X 射线单晶与中子衍射的富铍矿物成因研究 ——以绿柱石为例

石羽钧¹, 房雷鸣², 闫顺风¹, 杨眉¹, 李林^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国工程物理研究院 物理与化学研究所中子物理学重点实验室, 四川绵阳 621999

铍矿作为多个国家的战略型关键金属矿产备受世界关注, 其在高端材料和新兴技术领域具有重要应用价值。而绿柱石(Beryl, $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$)作为最常见的富铍矿物, 其成矿规律与晶体形态之间的关联一直是地球科学界关注的焦点[1]。本研究基于 X 射线单晶衍射与中子衍射的综合分析方法, 对不同形态的绿柱石样品进行了系统分析, 初步结果表明:

1) 结果显示, 无色绿柱石中存在广泛的 $\text{Be}^{2+} \rightarrow \text{Li}^+$ 类质同象取代, 而绿色绿柱石中则主要发生了 $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{R}^{n+}$ (R 可能为亲 Fe 相关的变价原子) 的取代;

2) 绿柱石晶体化学特征与结晶形态存在着较强的关联, 无色绿柱石和绿色绿柱石在晶体结构上存在差异, 通过对晶胞参数的精修分析(如图 1), 发现

无色绿柱石 $c/a=1.002$, 反映出 $[\text{BeO}_4]$ 四面体置换; 绿色绿柱石 $c/a=0.995$, 反映出 $[\text{AlO}_6]$ 位置置换, 与电子探针计算结果具有较好的一致性。

3) 板状绿柱石常出现在高碱金属富集和中高温气成环境, X 射线与中子衍射结果显示, 该类型晶体通道中 Cs、Na 等离子含量较高, 明显改变了 c 轴方向的晶面生长速率。

这些发现不仅为绿柱石的形态演化机制提供了新的佐证, 也为富铍矿物的精细成因研究提供了有效的测试手段, 对后续铍矿资源勘查与高压合成工艺具有重要参考价值。

关键词: 绿柱石; X 射线单晶衍射; 中子衍射; 晶体形态; 富铍矿物成因

基金项目: 国家自然科学基金项目 U2444208

第一作者简介: 石羽钧, 男, 2003 年生, 本科生, 研究方向: 主要从事高温高压晶体化学、行星地质与比较行星学有关研究。Email: 1006210131@email.cugb.edu.cn

*通信作者简介: 李林, 男, (1984-), 副教授, 研究方向: 成因矿物物理。Email: clark.li@cugb.edu.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

中国东部矽卡岩型铁矿床中的镓富集-来自磁铁矿微量元素的启示

梁贤¹, 汪方跃^{1*}, 张龙¹, 周涛发¹, 范裕¹, 张君伍², 张聚全³

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

3. 河北地质大学 地球科学学院, 石家庄 050031

矽卡岩型矿床提供了大量的 Fe、Cu、W、Sn 和其他关键金属, 如 Ga、Co、In、Te 和 Se。以往对矽卡岩型矿床关键元素的研究主要集中在 Co、Te 和 In 的富集机制上, 而 Ga 的赋存状态和富集机制尚不清楚。本次研究对比了中国东部 5 个矽卡岩型铁矿床(朱冲矿床、安庆矿床、白涧矿床、中关矿床和北洛河矿床)磁铁矿中 Ga 的含量, 重点研究了长江中下游成矿带安庆-贵池矿集区朱冲铁矿床中 Ga 的富集情况。朱冲矿床磁铁矿中的 Ga 含量最高, 为 $6.4 \times 10^{-6} \sim 134 \times 10^{-6}$, 平均为 69.4×10^{-6} , 远高于安庆矿床 (37.3×10^{-6})、北洛河矿床 (41.1×10^{-6})、中关矿床 (19.9×10^{-6}) 和白涧矿床 (14.9×10^{-6})。朱冲矿床钻孔观察到大量热液蚀变矿物, 并对其进行了系统分析, 其中绿帘石中的 Ga 含量在矽卡岩矿物中最高, 平均为 121.9×10^{-6} ; 磁铁矿中的 Ga 含量在矿石矿物中最高, 平均为 69.4×10^{-6} ; 透辉石和石榴石中的 Ga 含量分别为 8.7×10^{-6} 和 33.2×10^{-6} 。硫化物中的 Ga 含量最

低, 均小于 7.0×10^{-6} 。朱冲矿床的磁铁矿根据其结构和赋存状态可分为三类: 一是磁铁矿层内致密块状磁铁矿 MagI, 其 Ga 含量平均为 85.1×10^{-6} ; 二是矽卡岩层内浸染状磁铁矿 MagII, 其 Ga 含量平均为 23.7×10^{-6} ; 三是蚀变闪长岩中脉状磁铁矿 MagIII, 其 Ga 含量平均为 19.7×10^{-6} 。通过与矽卡岩型矿床的对比, 发现岩浆岩全岩 Ga 含量与矽卡岩型矿床磁铁矿中的 Ga 含量呈正相关关系, 表明岩浆岩中较高的 Ga 含量有助于这些矿床中富 Ga 磁铁矿的形成。磁铁矿中 Ga 含量在钻孔空间变化上随深度增加而减小, 与磁铁矿 Ti、V、Al、Mn 的富集趋势相同, 表明温度对磁铁矿中 Ga 的富集有控制作用。未来从磁铁矿中提取 Ga 的技术取得突破后, 矽卡岩型铁矿床可能成为有前景的 Ga 来源。

关键词: 矽卡岩型铁矿床; 镓富集; 磁铁矿; 朱冲矿床; 中国东部

基金项目: 国家自然科学基金项目(42430811、42273065)

第一作者简介: 梁贤(1995-), 博士研究生, 研究方向: 成因矿物学与矿床地球化学. Email: liangxian@mail.hfut.edu.cn.

*通信作者简介: 汪方跃(1982-), 副研究员, 研究方向: 现代分析测试技术和地球化学. Email: fywang@hfut.edu.cn.

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

太平洋深海沉积物中一种与钙十字沸石共生的 自生磷灰石的成因机制研究

樊文泉¹, 周军明², 蒋晓东¹, 张欢³, 糜梅³, 袁鹏^{1*}, 董彦辉⁴, 刘冬³, 魏燕富⁵,
Jörn Peckmann⁶

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

3. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;

4. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学重点实验室, 杭州 310012;

5. 澳门科技大学 澳门环境研究院海岸带生态环境国家野外科学观测研究站, 澳门 999078;

6. 汉堡大学 地球系统科学系地球系统研究和可持续性中心, 德国汉堡 020146

磷在全球海洋物质循环中具有重要作用, 直接影响全球氧含量和碳循环。磷的埋藏是其在海洋中的长期保留形式, 并与大陆风化作用共同调节海洋磷储层的输入与输出。自生磷灰石是主要的磷埋藏形式, 占海洋磷埋藏的 50%以上。早期研究认为, 自生磷灰石主要形成于生产力较高的特定沉积环境, 如大陆边缘和海山等。然而, 深海环境由于低有机质含量和较弱的初级生产力, 一直被认为不适合自生磷灰石的形成, 因此, 深海磷埋藏机制及其全球尺度影响未受到足够关注。然而, 本研究基于对多个西太平洋深海(>5000 m)沉积物样品的分析, 发现钙十字沸石与自生磷灰石共生现象在深海环境中广泛存在。结合微区矿物学分析和矿物合成模拟实验, 本研究提出了深海钙十字沸石-自生磷灰石的成因机制: 钙十字沸石能释放钙离子并吸附水体中的游离磷酸根, 形成理想的微环境来促进自生磷灰石的形成。钙十字沸石表面首先生成无定形磷酸钙,

随后快速成核结晶, 最终形成六方柱状自生磷灰石颗粒。由于钙十字沸石在深海沉积物中广泛分布(含量可高达 20%), 因此这类与钙十字沸石共生的自生磷灰石可能在低生产力的深海环境中广泛存在。根据钙十字沸石的沉积速率估算, 此类磷的累积速率达 $1.30\sim 2.56\ \mu\text{mol}/\text{cm}^2\cdot\text{kyr}$, 占深海磷总积累速率的 $1/8$ 至 $1/3$ 。因此, 钙十字沸石诱导自生磷灰石可能是深海环境中普遍存在的一种矿物界面反应, 其在磷循环中的作用应被重视。此外, 尽管已有研究认为钙十字沸石本身并不具有富集稀土元素的能力, 而本研究发现该类自生磷灰石颗粒中稀土元素含量超过 1000×10^{-6} , 说明该钙十字沸石-自生磷灰石共生现象对于深海稀土富集和循环可能扮演了不可忽视的角色。

关键词: 碳氟磷灰石; 微区矿物学; 深海盆地; 磷汇; 矿物成因机制

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272043), 国家高层次人才特殊支持计划

第一作者简介: 樊文泉(1995-), 博士研究生, 研究方向: 资源矿物学、环境矿物学. Email: fanwenxiao@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 袁鹏(1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

基于黄铁矿和黄铜矿的矿床成因机器学习判别： 以中国内蒙古东升庙矿床为例

高展¹, 张振杰^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

沉积喷流型 (SEDEX) 和火山岩型块状硫化物 (VMS) 矿床是两种具有相似地质背景和成矿特征的重要金属矿床类型。准确区分这两种矿床类型对于深入理解矿床形成过程以及有效指导矿产勘查具有极为重要的意义。黄铁矿和黄铜矿的地球化学成分是区分矿床成因类型的关键指示矿物。然而, 传统的二维判别图解难以处理高维数据, 在面对复杂矿床成因类型的精确分类时存在明显不足。近年来, 随着黄铁矿和黄铜矿地球化学大数据的快速积累以及高精度机器学习 (ML) 算法的广泛应用, 为克服这一挑战提供了全新的途径。本研究广泛汇编了来自全球不同地质背景的黄铁矿和黄铜矿地球化学数据。基于这些丰富的数据, 构建了包括随机森林 (RF)、极端梯度提升 (XGBoost) 和多层感知器神经网络 (MLP) 在内的多种机器学习分类器, 用于矿床成因类型的预测以及相互验证。结果显示, 所有三种模型均展现出了极为优异的预测性能。尤为值得一提的是, 随机森林模型在解释黄铜矿和黄铁矿数据集中的特征重要性

方面表现最为出色, 明确揭示了镍 (Ni) 和硒 (Se) 是黄铜矿和黄铁矿中用于区分 SEDEX 和 VMS 矿床的关键微量元素。此外, 本研究还针对中国内蒙古东升庙锌铅铜矿床早期的黄铜矿和黄铁矿样品, 运用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术进行了深入分析。经过训练的机器学习分类器被成功应用于对这些样品的成因类型进行判别。判别结果显示, 早期细粒黄铁矿和黄铜矿呈现出典型的 VMS 矿床特征。结合这些结果以及以往对该矿床岩石学、地球化学和同位素数据的综合研究, 我们提出东升庙矿床的早期成矿过程主要受控于海底火山活动。这一结论不仅有力验证了基于黄铁矿和黄铜矿地球化学的机器学习分类器在矿床成因判别中的可靠性和适用性, 而且为东升庙矿床的成矿过程研究提供了新的、极具价值的证据。

关键词: 黄铁矿; 黄铜矿; 微量元素; 机器学习; 矿床类型分类

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

豆荚状铬铁矿中不同类型矿物包裹体成因及指示意义

熊发挥^{1*}, 徐向珍¹, 邱添¹, 桂维彬¹, 谢慧丹¹, 杨经绥¹

1. 中国地质科学院地质研究所 火成岩与矿物学研究室, 北京 100037

豆荚状铬铁矿是十分重要的战略资源, 目前学者对它们的成因尚未形成统一的认识。先前的研究主要从岩石学、地球化学和地质年代学等方面对铬铁矿的成因进行了约束, 但对铬铁矿包裹体类型及其反映的地质过程还缺乏系统的总结和研究。通过对不同岩体的铬铁矿中矿物包裹体进行详细的研究, 发现铬铁矿中含有丰富的矿物包裹体, 分为 5 大类: (1) 无水硅酸盐类矿物包裹体, 包括橄榄石、斜方辉石、单斜辉石等; (2) 含水矿物, 包括角闪石、绿泥石、蛇纹石等; (3) 含铂族元素矿物和硫化物, 包括 Os-Ir 合金、Pt-Fe 合金、自然 Os 和自然 Ir, 以及黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等; (4) 壳源矿物, 包括锆石、金红石、石英、钙铬榴石等;

(5) 异常矿物, 包括金刚石、碳硅石、柯石英等超高压矿物, 以及自然镍、自然铬、自然铁和自然钛等。通过对比研究, 确定它们形成于不同期次, 进而初步拟定豆荚状铬铁矿形成过程存在四个阶段, 分别为地幔深部的地幔柱/地幔对流、大洋岩石圈中地幔橄榄岩的部分熔融/岩浆结晶分异、俯冲带环境中的岩石-熔体反应、后期的热液蚀变/流体改造。认为铬铁矿中矿物包裹体记录了铬铁矿成矿各个时期的环境条件, 针对铬铁矿中包裹体的详细研究可以更加准确地揭示铬铁矿的形成过程。

关键词: 豆荚状铬铁矿; 蛇绿岩; 矿物包裹体; 多阶段; 成因

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

岩浆岩区矿物学参数填图及成矿预测：以北太行地区为例

张聚全^{1,2,3*}, 张乐民¹, 吴晓贺¹, 郭子桀¹, 温雨菁¹, 卢静^{1,2,3}

1. 河北地质大学 地球科学学院, 石家庄 050031;

2. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 石家庄 050031;

3. 河北省战略性关键矿产资源协同创新中心, 石家庄 050031

成矿岩体的识别标志一直是矿床学界研究的热点问题。众多学者对比分析成矿岩体与不成矿岩体的地球化学和矿物学特征, 获得了一系列有意义的认识, 如 Sr/Y 比值>35、V/Sc 比值>10 可作为板块会聚边缘铜矿床的成矿潜力指标, 高的氧逸度 (大的锆石 Ce 异常值) 有利于斑岩型铜金矿的成矿。然而, 实际找矿实践中很难通过单一指标来判断岩体是否成矿。那么我们是否可以用一系列矿物参数的组合来进行成矿预测呢? 很多矿物学参数具有成矿的指示意义, 如果我们利用指示有利成矿的矿物学参数进行填图, 是否可以有效圈定找矿靶区, 更快圈定成矿岩体呢? 基于上述思考, 我们对北太行地区的中生代侵入体进行了较为系统的取样, 通过电子探针和 LA-ICP-MS 分析测试, 获得锆石、黑云母

的相关参数, 并利用相关参数进行了填图。填图参数包括: 黑云母的 Mg/Fe、Cl 含量、卤素逸度、温度、TiO₂、CaO 含量、锆石 Hf 同位素、Ce 异常、氧逸度、Eu 异常等参数。根据锆石和黑云母相关参数的矿物学填图结果, 选择了 10 种参数圈定了成矿有利地区。根据有利成矿因素叠加特征, 选择有利因素 6 条以上划分为 A 级预测区, 5 条为 B 级预测区。研究区共圈定 A 级区 3 个, B 级区 5 个。结果显示区域内的大、中型矿床和多数小型矿床都位于预测区内, 表明该方法在岩浆岩区进行成矿预测是有效的。

关键词: 矿物学填图; 成因矿物学; 岩浆岩; 矿物学参数; 成矿预测

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

矿物学研究揭示地球深部挥发分（氢、氮、氟）循环之间的联系

杨燕^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

挥发分（例如水、碳、氮、卤素等）在地球内外之间的循环过程是认识其来源、分布、资源环境效应以及宜居行星演化的关键。作为固体地球的基本组成单元,矿物是挥发分在地球内部传递和赋存的主要载体。水在地幔如何存在?地表的氮和氟有多少能够被传递至深部地幔?地球内部氮、氟与水的循环是否存在联系?围绕这些科学问题,我们利用微区分析技术,研究了俯冲带含水矿物和地幔名义上无水矿物中水、氮和氟的赋存机制、稳定性和分配等化学行为及其相互作用机制。为了正确解读天然地幔矿物所呈现的复杂的氢组分 (Grant et al. 2007),我们利用原位高温、高压红外光谱观察了橄榄石、辉石、瓦兹利石和林伍德石等地幔重要组成矿物中的水在地幔温压下的行为,发现不同赋存机制的水具有不同的稳定性,并且在矿物晶格中发生迁移。为了探讨板片深俯冲过程中氮和氟的传递效率,我们研究了沉积物中的氮在 10~12 GPa, 800~1100 °C 温压条件下的分配行为,以及蛇纹石中的氟在 2.5~8 GPa, 850~1150 °C 条件下的分配行为。发现板片深俯冲过程中, K-hollandite 是氮的主要载体,氮在 K-hollandite 与流体之间的分配系数为 0.008~0.064,据此估计沉积物板片对深部地幔氮的贡献不超过 15%;蛇纹石分解之

后的硅镁石族矿物是深部地幔重要的储氟载体,氟在硅镁石族矿物和流体之间的分配系数为 3~25,蛇纹石中高达 93%的氟能够被硅镁石族矿物继承,高效地传递至深部地幔。氮主要以铵 (NH₄) 的形式存在云母和长石等矿物晶格中 (Busigny and Bebout 2013),而氟和 OH 具有相似的尺寸和电价,在矿物晶格中取代氧或者 OH (Crépeau et al. 2014; Huges and Pawley 2019),矿物晶格中氮和水、氟和水在赋存方式上的关联表明氮循环和水循环、氟循环和水循环之间存在联系。为了厘清这种联系,我们利用原位高温高压谱学研究了多硅白云母和长石的脱氮和脱水过程,金云母、磷灰石和橄榄石的脱氟和脱水过程。发现在高温高压下,氮提高多硅白云母和长石的晶格稳定性,氟不仅提高金云母的晶格稳定性,还提高磷灰石和橄榄石中水的稳定性,这些发现表明氮和氟的存在,促进水向地球内部更深处传递。以上工作从矿物学的角度揭示了地幔水的赋存状态,板片深俯冲过程中氮和氟的传递效率,以及氮、氟循环与水循环的联系。

关键词: 矿物谱学; 挥发分; 稳定性; 分配行为; 地幔

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

海林陨石坑撞击起源的矿物学证据

尹锋^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

天体之间的碰撞作用形成的撞击坑是类地行星表面常见的地质构造。目前地球上仅发现了 200 余个陨石撞击坑, 远少于相邻的月球 (超过 130 万个直径大于 1 km 的撞击坑)。通过遥感手段识别环状凹坑地貌是寻找地外星体表面撞击坑的主要方法, 但由于地球活跃的内外动力地质作用, 类似地貌特征仅能作为寻找地球陨石撞击坑的线索。判别地球陨石撞击坑的“指纹”证据主要是矿物中的超高温和超高压变质特征, 其中最常见的是石英面状变形特征 (PDFs, planar deformation features)。海林陨石坑是我国新近证实的一个简单撞击坑, 位于黑龙江省海林市柴河镇的红光林场, 中心坐标为 129°25'51"E 和 45°18'08"N。海林坑形态较为完整, 仅东部和东北部缺失约三分之一的坑缘; 剖面上呈碗状, 坑缘和坑底高差约 50~180 m; 平面上呈椭圆形, 南北直径约 1360 m, 东西直径约 1200 m。坑区基岩主要为新元古代花岗闪长岩

($\gamma\delta\text{Pt}_3$), 但仅在坑缘顶部有基岩出露, 坑底被第四纪湖泊沉积物覆盖。在坑缘顶部、坑缘内侧山坡以及坑底, 可见较多花岗闪长岩角砾散落分布, 粒径数十厘米到数米不等。在采自坑内河沟的岩石碎屑沉积物中, 发现有少量石英颗粒发育 PDFs 冲击变质特征。对 400 余个薄片的观察结果表明, 其中有 40 余颗石英颗粒发育 PDFs, 占石英颗粒总数的比例低于 1%。石英中的 PDFs 呈页理状, 单个宽度低于 2 μm , 互相间距 2~5 μm ; 以一组为主, 少量含有两组, 多数平行石英晶体的 {10-13} 方向。石英 PDFs 的方向分布与冲击压力有关, 以 {10-13} 为优势方向说明冲击压力在 10~20 GPa 之间。石英 PDFs 的发现为海林坑的撞击起源提供了坚实证据。

关键词: 海林陨石坑; 简单撞击坑; 石英面状变形特征

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

川西龙门山中段清平磷矿床中锶赋存状态及富集机制： 矿物化学制约

姚毅^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 贺天全^{5,6}

1. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清平磷矿有限公司, 四川德阳 618299;

2. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清平磷矿有限公司技术中心, 四川德阳 618202;

3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;

4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;

5. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;

6. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

磷矿作为战略性非金属矿产资源, 对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。川西龙门山中段清平磷矿床是我国磷矿资源的重要分布区, 其研究对于地方经济发展和国家战略资源的安全具有重要意义。本课题聚焦于清平磷矿床中锶元素的赋存状态和富集机制, 尤其是矿物化学特性对锶元素分布和富集过程的制约作用。锶作为一种重要的微量元素, 在地球化学循环中扮演着关键角色, 并在磷矿资源的开发利用中具有潜在的经济价值。通过对清平磷矿床进行详细的地质调查和样品采集, 结合先进的矿物学分析技术和地球化学模拟方法, 本课题揭示了锶元素在磷矿床中的赋存特征、富集规律及其与矿物化学特性之间的内在联系。研究表明, 锶元素在磷灰石和方解石矿物中的赋存状态受到晶体结构的严格控制, 而其富集过程则与成矿流体的化学性质、温度、压力等地质环境因素紧密相连。本课题采用电子探针微区分析技术, 对矿物中的锶元素进行了精确的定量分析, 确定了锶在矿物中的取代机制和分布规律。研究发现, 锶元素在磷灰石中的取代主要遵循钙离子的晶格位置, 而在方解石中则表现为锶与钙的有序分布。此外, 通过同

位素地质学的研究, 本课题进一步探讨了锶元素的来源和迁移路径, 为理解磷矿床的成矿作用提供了新的线索。地球化学模拟结果表明, 锶的富集受到矿物溶解度、饱和度和流体-岩石相互作用等多重因素的制约。在矿床形成过程中, 热液流体的流动和矿物的早期结晶对锶的富集起到了关键作用。同时, 矿床的地质构造和围岩性质也对锶的最终富集状态产生了重要影响。这些发现为磷矿床的成矿理论和找矿实践提供了新的视角, 有助于推动磷化工产业的技术创新和产业升级。本课题的研究成果不仅丰富了磷矿床成矿理论, 而且对于指导川西地区乃至全国磷矿资源的勘探和开发具有重要的指导意义。通过深入分析矿物化学对锶赋存状态及富集机制的制约关系, 本研究为矿产资源的可持续开发和利用提供了宝贵的经验和启示。同时, 本课题的研究成果也为磷矿资源的综合利用和深加工提供了科学依据, 有助于推动磷化工产业的技术创新和产业升级。在全球磷资源日益紧张背景下, 本课题的研究对于保障国家粮食安全和促进农业可持续发展具有战略意义。

关键词: 川西龙门山中段; 清平磷矿床; 锶赋存状态; 富集机制; 矿物化学制约

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

基于机器学习和磷灰石成分识别东昆仑祁漫塔格地区 志留纪-泥盆纪花岗岩成因类型和成矿潜力

钟世华^{1*}, 刘嘉情¹

1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

祁漫塔格地区位于东昆仑造山带的西段,是我国西北地区重要的斑岩-矽卡岩 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属成矿带。大量研究显示,祁漫塔格地区花岗岩类主要集中出现于两个时期,即 435~370 Ma 和 245~196 Ma,分别形成于原特提斯洋和古特提斯洋闭合后的碰撞阶段。长期以来,祁漫塔格地区被作为三叠纪成矿大爆发的典型案例,因此三叠纪花岗岩类(即 245~196 Ma)一直是工业界和学术界关注的焦点。不过,近些年来地质调查显示,该地区成矿历史十分复杂。与许多典型斑岩成矿系统类似,祁漫塔格地区斑岩-矽卡岩矿床常见多期次、多类型花岗岩体在矿区范围内共存。并且,越来越多的研究指出在原特提斯洋闭合后的碰撞阶段,即志留-泥盆纪,也可以形成斑岩-矽卡岩矿床,但是这一观点远未形成共识。为了进一步揭示东昆仑祁漫塔格地区志留-泥盆纪岩浆活动规律和成矿规律,本文在汇编全球磷灰石数据基础之

上,训练得到了能够识别花岗岩成因类型的支持向量机模型以及能够识别斑岩-矽卡岩 Cu-Fe 多金属矿床成矿岩体和非成矿岩体的极致梯度提升模型。在此基础上,对祁漫塔格地区典型志留-泥盆纪花岗岩类样品进行了系统采集,然后利用训练得到的机器学习模型,判别它们的成因和成矿潜力。研究结果表明,87%的磷灰石被判定来自 I 型花岗岩,并且 34%的磷灰石颗粒被判定来自成矿岩体。这证明祁漫塔格地区志留-泥盆纪花岗岩大都属于 I 型花岗岩,且部分岩体具有形成斑岩-矽卡岩 Cu-Fe 多金属矿床的潜力。结合区域上最新研究成果,可以看出祁漫塔格地区志留-泥盆纪斑岩-矽卡岩矿床找矿潜力巨大,应该是接下来实现西北地区 Cu-Fe 多金属资源找矿勘查的重要突破口。

关键词: 机器学习; 磷灰石; 祁漫塔格; 东昆仑

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

乙醇酸盐类有机矿物的成因机制探究

胡明阳¹, 连宾^{2*}

1. 南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023;

2. 南京师范大学 海洋科学与工程学院, 南京 210023

有机矿物是在地质作用下形成的有机晶体, 与生命活动有密切联系。自 2018 年发现第一种乙醇酸盐类矿物 *lazaraskeite*, 目前已发现 7 种乙醇酸盐类矿物, 使其成为仅次于草酸盐类矿物的第二大有机矿物。乙醇酸是植物光呼吸的重要中间物, 也可由微生物代谢产生, 在自然界长期且广泛存在。然而, 相较于草酸盐类矿物, 乙醇酸盐类矿物发现晚、产地少, 这与乙醇酸在自然界的广泛分布相悖。因此, 探究乙醇酸盐类矿物的成矿过程、机理和保存条件, 有助于理解乙醇酸盐类矿物的成因机制及生命活动参与有机矿物形成的基本过程。本研究合成了所有 7 种乙醇酸盐晶体, 测试了其合成温度、溶解度、热稳定性等物理化学性质, 同时分析了采集自美国亚利桑那州图森市圣卡塔琳娜山脉的 *lazaraskeite* 和 *lianbinite* 的稳定同位素数据。结果显示, 这 7 种乙醇酸盐多具有较高的溶解度, 范围从 5.4 mg/mL 至 2438.3 mg/mL, 由此推断已发现的乙醇酸盐类矿物从水溶液中结晶成矿, 且可能经历了复杂的结晶-溶解-再结晶过程; 研究发现, 乙醇酸盐类矿物的合成温度有明显区别, 如 *lazaraskeite*-M₂ 亚型为乙醇酸铜于低于 220 K 时转化形成的低温亚型, *glecklerite* [Na(C₂H₃O₃)] 仅在高于 35 °C 可以合成, 低于 35 °C 时会形成 Na(C₂H₃O₃) · 0.5H₂O,

jimkrieghite [Ca(C₂H₃O₃)₂] 不论何种温度均由 *rasmussenite* [Ca(C₂H₃O₃)₂ · 3H₂O] 脱水转化而来; 热重分析结果显示含结晶水的乙醇酸盐晶体大多于 60~80 °C 开始失水, 而乙醇酸晶体于约 80 °C 开始分解, 表明乙醇酸盐类矿物仅能在接近地表的低温环境下存在。对 *lazaraskeite* 和 *lianbinite* 的 ¹³C 测试结果表明, 其乙醇酸根的 δ¹³C‰ 与高扩散速率、优先羧化速率的 C3 植物产生有机物的 δ¹³C‰ 一致, 表明图森市产地矿样的乙醇酸根可能来源于当地 C3 植物的代谢物; 其常在岩石孔洞内形成晶洞的特性则表明其成矿时间应当较晚。综上, 乙醇酸盐类矿物的形成应遵循以下成因模式: 来自高等植物、藻类和微生物等生命活动产生的乙醇酸通过降水溶解, 形成含乙醇酸的酸性流体; 土壤矿物在与含乙醇酸的流体作用后释放出阳离子; 流体中的各种乙醇酸盐可通过蒸发结晶、冷却结晶或冻结结晶等方式结晶; 结晶成矿的乙醇酸盐还可因降水而经历多次溶解-再成矿过程, 甚至可能被微生物分解利用。因此, 干旱地区或封闭环境的乙醇酸盐类矿物更可能被长期保存。(感谢杨和雄和谷湘平提供指导及矿物样品)

关键词: 乙醇酸盐类矿物; 有机矿物; 矿物成因

第一作者简介: 胡明阳 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 有机矿物与生物矿物, Email: humingyangk@gmail.com

*通信作者简介: 连宾 (1964-), 教授, 研究方向: 地质微生物学, Email: bin2368@vip.163.com

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

湘南地区通天庙花岗岩云母的矿物学研究：岩浆-热液演化过程与稀有金属的富集成矿

周睿¹, 郭春丽^{2,3*}, 李小伟¹, 陈振宇², 郝昭歌¹, 马星华²

1. 成因矿物学研究中心 中国地质大学(北京)地质资源勘查实验教学中心, 北京 100083;

2. 成矿作用与资源评价自然资源部重点实验室 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室 中国地质科学院, 北京 100094

高分异花岗岩在岩浆-热液演化过程中通常伴有稀有金属(Li、Rb、Cs、Nb、Ta等)矿化。然而, 稀有金属在花岗岩中的富集机制仍存在较大争议。湖南通天庙含钨铌钽稀有金属花岗岩位于南岭成矿带中段, 已有锆石 U-Pb 定年数据指示岩体形成于 132.9~118.6 Ma, 大地构造位于北东向郴州-临武和北西向耒阳-临武断裂带的交汇处。花岗岩体具有明显的垂直分带结构, 由底部到顶部依次为肉红色铁锂云母碱长花岗岩带(I带)、灰白色铁锂云母碱长花岗岩带(II带)、灰白色锂云母碱长花岗岩带(III带)。本次研究采用背散射(BSE)成像、电子探针(EMPA)和矿物原位微量(LA-ICP-MS)的手段对这三类花岗岩的云母类矿物展开了精细的结构和成分分析。结果表明: 不同分带云母可划分为两大类。具体来说, 第一类云母成分较为均一, 无环带, 自形程度较好。从 I 带到 II 带再到 III 带, 云母类型由铁锂云母向锂云母转变, 伴随有 SiO₂、F 和 MnO 含量的逐渐升高, 以及 FeO 含量的下降。同时, 随着 K/Rb 值降低, Rb、

Li 含量逐渐上升。云母成分的变化指示岩体垂直分带结构的形成以及 Li 和 Rb 的逐渐富集主要受岩浆结晶分异的控制。第二类云母具有明显的核-边环带结构, 在 BSE 图像中, 核部云母颜色较亮, 而边部云母颜色较暗。对于第二类云母的核部, 其 Li、Rb 和 Cs 含量明显高于边部, 而 F 含量低于边部, 指示了岩浆演化后期强烈的流体出溶作用。云母的结构和化学特征表明, 通天庙高分异花岗岩型稀有金属矿床经历了早期岩浆分异和晚期流体出溶两个阶段。演化早期随着岩浆分异作用的进行, 使锂、铷等稀有金属元素在残余熔体中不断富集, 这有利于稀有金属成矿; 在演化晚期, 强烈的流体出溶作用使锂、铷等稀有金属从通天庙的高分异花岗岩体系中丢失, 因此不利于稀有金属成矿。精细矿物学工作对于查明高分异花岗岩系统内稀有金属富集机制具有重要的指示意义。

关键词: 稀有金属; 结晶分异; 流体出溶; 高分异花岗岩; 云母

基金项目: 国家自然科学基金项目(92162210)

第一作者简介: 周睿, 男, 1998 年生, 博士生, 地质学专业, 研究方向: 成因矿物, E-mail: 1023895690@qq.com。

通讯作者:

郭春丽, 女, 1978 年生, 研究员, 从事花岗岩及其相关稀有稀散金属成矿作用研究, E-mail: gchunli@126.com。

李小伟, 男, 1985 年生, 教授, 博士生导师, 从事成因矿物学与岩石学研究工作。E-mail: xwli@cugb.edu.cn。

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

斜长石中铜纳米粒子包裹体特征与光学性质相关性的建立

王成思^{1*}, 沈锡田¹

1. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 武汉 430074

随着纳米技术在地学领域的深入应用,金属矿产常以纳米粒子形式赋存于寄主矿物/岩石中的现象被不断揭示。然而,纳米尺度金属元素的赋存状态难以观测和示踪,已成为制约其形成机制研究的关键科学问题。本研究以美国俄勒冈州哥伦比亚玄武岩省溢流玄武岩中富铜斜长石巨晶捕虏体为研究对象,首次建立了天然铜纳米粒子宏观光学响应特征与微观赋存状态的定量关联,为“不可见”金属元素的探测提供了创新性解决方案。

本研究通过高分辨率透射电镜表征,我们观察到铜元素以纳米粒子(10~20 nm)的形式赋存于拉长石单晶中。结合晶体颜色特征和偏振吸收光谱特征,我们发现:这些铜纳米粒子的几何特征与拉长石的光学特征具有直接相关性。当 Cu-NPs 以球体存在于晶体中时,会使长石呈现各向同性的红色,并在 563 nm 处产生 1 个吸收峰;当以椭球体定向排列于晶体中时,会使其呈现绿色-红色随方向变化的强二色性,并在 563 nm 和 610 nm 处分别产生 2 个吸收峰。基于纳米材料学理论分析,上述现象可

归因于金属纳米粒子的局域表面等离子体共振(LSPR)效应。

为验证该理论在天然矿物中的适用性,本研究整合多尺度验证方法:(1)将偏振紫外可见吸收光谱强度在偏振角度上的分布与纳米粒子排布方向相对比,建立了二者之间的空间相关性;(2)通过热处理进行纳米粒子与颜色的吸收-再析出实验,建立了铜纳米包裹体与颜色的动态相关性;(3)根据 LSPR 理论中关于粒子消光系数计算公式,结合 HRTEM 实测参数进行数值模拟,获得与实验数据吻合的理论计算结果;(4)采用有限时域差分法光学模拟纳米粒子-光波相互作用过程,模拟光谱特征与实测光谱呈现高度一致性。

本研究成功构建了基于 LSPR 理论的创新研究方法,探索了通过宏观光学性质反演非金属矿物中金属纳米粒子赋存状态与几何特征新路径。

关键词: 金属纳米粒子; 拉长石; 局域表面等离子体共振效应

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

最新矿物命名规则及对易解石矿物族的命名修正

诸泽颖¹, 陈振宇^{1*}, 于洪¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

矿物种类是通过判断端元组分来实现, 矿物命名规则在一定程度上决定了未知矿物是否为新的矿物端元。长期以来矿物端元确定标准基于“主要成分原则”, 即元素在特定晶体结构位置上是否占大多数。然而在一些复杂的矿物族中端元的确立更为复杂。由此国际矿物协会-新矿物命名及分类委员会 (IMA-CNMNC) 近期对矿物的命名规则进行了拓展和修正, 提出了不同位置上耦合多价替代 (heterovalent substitutions at two sites)、优势价规则 (dominant-valency rule) 以及位点-总电荷法 (Site-total-charge approach) 对新矿物端元的精确界定。新的矿物命名规则与方法将“主要成分原则”拓展为将相同价态的一组原子列为单个成分。不同位置上的耦合多价替代指的是在完全固溶体且无结构变化的条件下, 元素在两个晶体结构位置上发生异价取代以达到电价平衡的目的。优势价规则是根据同一价态的一组原子数数量多少来判断端元元素价态。该方法又基于电价平衡原则进一步延伸出了位点-总电荷法, 通过实验式中找出优势端元电荷排列, 继而从端元电荷排列中推导出优势端元。新的矿物命名规则可应用于结构复杂矿物端元。易解石族矿物一

般化学式为 AB_2O_6 , 其中 A 位置主要由稀土元素, Ca 等占据, 而 B 位置常由 Ti、Nb、Ta 占据。根据不同位置上的耦合多价替代原则, 易解石族 A 和 B 位置可发生异价替代以保证电价平衡 $A(REEs)^{3+} + B^{4+} \leftrightarrow A^{2+} + B^{5+}$, 由此易解石族矿物可简单分为维铌钙矿 ($CaNb_2O_6$)、钽钙矿 ($CaTa_2O_6$) 以及易解石族 $[REE(TiNb)O_6]$ 和钽易解石族 $[REE(TiTa)O_6]$ 。其中易解石族 $[REE(TiNb)O_6]$ 的一般分子式表明易解石与铌易解石公用一个分子式, 因此本研究提出铌易解石族与易解石族矿物在元素和晶体结构均存在重复的现象, 建议废除铌易解石族的命名。由此本研究通过应用最新的矿物命名规则重新修正了易解石族矿物为铈易解石 $[Ce(TiNb)O_6]$, 钕易解石 $[Nd(TiNb)O_6]$, 钇易解石 $[Y(TiNb)O_6]$, 钇钽易解石 $[Y(TiTa)O_6]$ 以及铈钽易解石 $[Ce(TiTa)O_6]$, 废除了铌易解石族矿物, 得到了国际矿物协会-新矿物命名及分类委员会 (IMA-CNMNC) 的认可。

关键词: 矿物命名规则; 易解石族矿物; 矿物族修正

本文受国家重点研发计划项目 (编号: 2024YFC2909300)、国家自然科学基金项目 (编号: 41902037; 42272087)、中国地质调查局地质调查项目 (项目编号: DD20221684, DD20221695, DD20190379, DD20160346) 联合资助

第一作者简介: 诸泽颖, 女, 1990 年生, 副研究员, 主要从事稀有金属成矿研究; E-mail: zhuzeying_nju@163.com

通讯作者简介: 陈振宇, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事矿床矿物学与微束分析研究; E-mail: czy7803@163.com

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

集宁碱性玄武岩中橄榄石的成分特征及其深部过程记录

唐宗源^{1,2}, 赵国春^{3,2*}, 孙德有⁴, 邓昌州⁵, 李杰¹

1. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 石家庄 050031;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710029;

3. 香港大学 地球科学系, 香港 999077;

4. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

5. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

碱性玄武岩能够记录地幔物质组成和深部动力学过程的信息, 是研究深部物质循环的重要对象之一。位于华北克拉通西缘的集宁新生代碱性玄武岩 (7.60 ± 0.04 Ma), 以其保存完整的橄榄石-单斜辉石结晶序列, 为揭示岩石圈地幔演化提供了关键样本。电子探针分析显示, 橄榄石具有较低的镁橄榄石分子 (Fo 为 77~83) 和镍含量 ($487 \times 10^{-6} \sim 2239 \times 10^{-6}$), Fe/Mn 比值 (60~85) 较高, 表明其形成于富石榴石源区。单斜辉石为透辉石-普通辉石系列 (Wo 41.29~46.36, En 39.84~45.83, Fs 9.74~12.78), 具有较高的 TiO_2 (0.78%~2.28%) 和 Al_2O_3 (2.78%~6.34%) 含量, 进一步佐证岩浆源自深部石榴石稳定域。另外, Sr-Nd-Mg 同位素组成显示, 集宁碱性玄武岩具有较轻的镁同位素组成 ($\delta^{26}\text{Mg} = -0.56\text{‰}$ 至 -0.42‰) 和 EMI 型地幔端元特征 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70487 \sim 0.70524$; ϵ_{Nd}

(t) = $-4.95 \sim +0.82$), 揭示源区经历了前寒武纪俯冲带碳酸盐交代作用的改造。基于矿物相平衡与温压计反演, 该岩浆系统演化可划分为两阶段: (1) 在岩石圈-软流圈边界 (约 70~100 km) 附近的深部岩浆房中, 单斜辉石和石榴石发生早期结晶分异, 形成高 Ti 碱性岩浆; (2) 岩浆上升至浅部岩石圈地幔 (<0.4 GPa) 时, 碱性岩浆与斜方辉石岩发生相互作用, 促进了橄榄石和单斜辉石的结晶。这种多阶段的分异结晶过程最终控制了观察到的矿物组合特征。矿物化学成分变化揭示了从深部地幔源区到地表的完整岩浆演化历史, 为理解华北克拉通西部深部地质过程提供了重要约束。

关键词: 新生代; 橄榄石; Sr-Nd-Mg 同位素; 碱性玄武岩; 华北克拉通

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目 (批准号: QN2022158)

第一作者简介: 唐宗源, 讲师, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: tangzy19@hgu.edu.cn

*通信作者简介: 赵国春, 教授, 研究方向: 前寒武纪地质研究. E-mail: gzhao@hku.hk

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于近红外光谱快速确定矿石中粘土矿物含量的方法研究

冯凯^{1,2*}, 肖仪武^{1,2}, 叶小璐^{1,2}, 方明山^{1,2}, 刘娟^{1,2}

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京市 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

粘土矿物是一类广泛分布在土壤、河海沉积物和众多固体矿产资源中的含水层状或层链状硅酸盐矿物, 兼具重要的环境与资源属性。在矿产资源综合开发利用中, 矿石中粘土矿物含量的高低常常会直接影响浮选或堆浸等工艺方案选择及流程优化。但目前还缺乏一套行之有效的快速确定矿石中粘土矿物种类及含量的方法, 以降低在矿石的预处理分类中人为判断的较大不确定性, 从而满足在矿山实际生产中对矿石预处理分类的迫切需要。本研究选取不同类型的高纯粘土矿物和不同含量粘土矿物的混合样品, 并利用近红外光谱分别采集了原始混合

矿物光谱数据, 经平滑+一阶导数+波段选择+最小二乘法等数据处理方法后, 分别建立了基于最小二乘法的高岭石、叶腊石和伊利石定量校正模型。通过独立的外部样品集验证, 表明了所建立模型的预测准确性, 分析误差均不大于 5%。该成果不仅可用于指导矿山生产现场矿石的快速预处理分类与工艺流程优化, 还在矿产勘查、表生环境与气候反演、矿山环境治理、土壤修复等诸多领域有着广泛的应用前景。

关键词: 粘土矿物, 近红外光谱, 矿物定量,

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

自动矿物分析系统在锂资源中的应用

李波^{1*}, 李美荣¹

1. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所 工艺矿物学与分析测试中心, 广州 510651

锂因其卓越的电化学性能, 在新能源等领域具有重要应用价值。作为最轻的金属元素, 锂的 K 层跃迁特征能量约为 54 eV, 对应波长约为 22 nm, 这一特性使得电子探针、X 射线能谱仪等传统 X 射线分析技术难以对其特征光谱进行有效检测。此外, 锂元素形成的矿物多数是硅酸盐矿物, 其光学特征和背散射信号与常见脉石矿物反差较小, 给锂矿物及物相的定性、定量分析造成极大困难。本文系统综述了包括 ToF-SIMS、LA-ICP-MS、自动矿物分析系统 (MLA) 在内的多种锂分析表征技术, 重点探讨各方法的优势

与局限性; 并选取了伟晶岩型锂矿、云母型锂矿、锂冶炼渣及废旧锂电池材料等典型样品, 以自动矿物分析系统为核心表征手段, 从样品前处理、仪器参数优化、数据后期处理等关键环节进行深入探讨, 建立了一套适用于锂矿物及物相的精准定性、定量分析方法体系, 并详细研究了这些锂资源的工艺矿物学特征, 为锂资源的开发利用提供重要的理论依据和技术支撑。

关键词: 自动矿物分析系统; 锂矿石; 工艺矿物学; MLA; 锂电池废料

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于矿物组成的脆性评价对矿石磨矿的影响

许晨^{1,2*}, 肖仪武^{1,2}

1. 矿冶科技集团, 北京 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

磨矿是选矿工艺中能耗最高、效率制约最严重的环节,而矿物脆性差异是导致选择性破碎不足与过磨现象的关键因素,科学界定与评价矿物脆性对优化磨矿工艺具有重要理论意义与工程价值。目前对矿石脆性评价的研究主要集中在岩石力学和油气资源开发利用领域,选矿场景下矿物脆性与磨矿行为的关联机制研究明显滞后于工程实践需求。本文搭建“矿物组成—脆性评价—矿石磨矿”理论框架,系统梳理矿物脆性的理论内涵、评价方法及其对磨矿工艺的调控机制,旨在揭示矿物学属性与磨矿行为的规律,为构建矿物脆性评价体系提供理论支撑。本文首先在综述既有文献对矿物的脆性研究基础上,梳理磨矿过程和矿

物脆性的基本概念,明确两者具有显著的相关影响;其次梳理矿物组成法和力学参数法两种评价体系的适用性与分歧点,尝试将两者结合以有效表征矿石脆性差异,构建脆性评价体系;最后根据脆性评价方法,在工艺应用层面上论证矿物脆性对磨矿行为指导的有效性。本文扩展了矿物脆性与磨矿行为的理论边界,为从矿物学出发突破磨矿工艺瓶颈提供了依据,有助于推动选矿工艺从经验判断向矿物属性驱动的精准模式转型和发展。

关键词: 矿物组成; 脆性评价; 磨矿; 工艺矿物学

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

内蒙古某含钛铁尾矿工艺矿物学及尾矿资源再利用

周亚坤^{1*}, 牛向龙^{1,2}, 赵立群¹, 陈彤¹, 莫凌超¹, 牛斯达¹

1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘查院, 云南昆明 650201

内蒙古某超贫磁铁矿矿石中, 钛、铁矿物致密共生、嵌布粒度细, 原选矿工艺选矿比偏大, 尾矿中的钛损失严重, 造成尾矿堆积、伴生资源综合利用率低。为回收铁尾矿的钛及其他可利用矿物, 对选矿全流程进行了工艺矿物学研究。结果表明, 原矿矿石含铁(以氧化物计) 16.92%、钛 2.45%、钒 0.08%, 铁物相主要为磁铁矿和赤铁矿(47.95%)、钛铁矿(10.91%), 少量黄铁矿(3.41%), 其余铁赋存于硅酸盐矿物中; 钛物相主要为钛铁矿(57.49%), 榍石(11.43%), 少量金红石(1.18%), 其余钛赋存于硅酸盐矿物中。原矿经干选抛尾、高梯度磁选、二次精选后, 尾矿铁

品位分别降低至 7.66%、7.78%、8.93%, 终尾中, 铁主要赋存于硅酸盐矿物(67.33%)、钛铁矿(14.93%)、磁铁矿和赤铁矿(11.31%), 少量黄铁矿(6.43%); 钛主要赋存于钛铁矿(42.72%)、硅酸盐矿物(39.19%)、榍石(15.57%)以及少量金红石中。多元素分析结果显示, 终尾仍含钛 2.21%且主要赋存于钛铁矿中, 可考虑通过“重选-磁选-浮选”等联合工艺对其进一步回收利用。

关键词: 尾矿; 工艺矿物学; 尾矿资源化利用; 有价元素回收; 综合利用

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

喜马拉雅伟晶岩中石英原位微量元素特征及资源潜力评价

胡欢¹, 王汝成^{1*}, 谢磊¹, 徐志豪¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

高纯石英 (HPQ) 是微电子、光纤通信、航空航天等高端科技领域的关键性基础原料, 要求 SiO_2 纯度 $\geq 99.9\%$ 。自然界石英分布广泛, 资源非常丰富, 但可以加工为高纯石英的高端资源却非常稀少。伟晶岩是石英的重要载体之一, 少有伴生或共生矿物, 是重要的高纯石英原料来源 (王登红等, 2024)。喜马拉雅淡色花岗岩带是全球淡色花岗岩和伟晶岩最发育的地区之一, 本次研究对喜马拉雅 I、II 和 III 岩体中伟晶岩开展了石英原位 LA-ICP-MS 微量元素分析, 探讨石英中微量元素含量变化以及影响石英纯度的主要因素。I、II 和 III 岩体中伟晶岩主要有钾长石、斜长石和石英等矿物组成, 含少量白云母、石榴子石、电气石。本次研究对三个岩体中石英颗粒进行原位微量元素分析。I 岩体伟晶岩中石英杂质元素含量分别为: Li $2.77 \times 10^{-6} \sim 8.38 \times 10^{-6}$ 、B $0.37 \times 10^{-6} \sim 2.33 \times 10^{-6}$ 、Na $0.31 \times 10^{-6} \sim 6.69 \times 10^{-6}$ 、Al $21.91 \times 10^{-6} \sim 43.21 \times 10^{-6}$ 、P $21.14 \times 10^{-6} \sim 98.19 \times 10^{-6}$ 、K $0.67 \times 10^{-6} \sim 3.46 \times 10^{-6}$ 、Ca $43.89 \times 10^{-6} \sim 463.05 \times 10^{-6}$ 、Ti $0.49 \times 10^{-6} \sim 4.60 \times 10^{-6}$ 、Fe $0.06 \times 10^{-6} \sim 7.47 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值为 355.96×10^{-6} ($n=14$); II 岩体中 Li $16.62 \times 10^{-6} \sim 23.62 \times 10^{-6}$ 、B $0.97 \times 10^{-6} \sim 2.08 \times 10^{-6}$ 、Na $0.50 \times 10^{-6} \sim 9.83 \times 10^{-6}$ 、Al $74.24 \times 10^{-6} \sim 99.55 \times 10^{-6}$ 、P $1.17 \times 10^{-6} \sim 38.77 \times 10^{-6}$ 、K $0.22 \times 10^{-6} \sim 0.88 \times 10^{-6}$ 、Ca 低于检测限 $\sim 178.05 \times 10^{-6}$ 、Ti $8.00 \times 10^{-6} \sim 15.79 \times 10^{-6}$ 和 Fe 低于检测限 $\sim 2.98 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值 384.35×10^{-6} ($n=9$);

III 岩体中 Li $45.05 \times 10^{-6} \sim 72.24 \times 10^{-6}$ 、B $1.33 \times 10^{-6} \sim 5.27 \times 10^{-6}$ 、Na $0.06 \times 10^{-6} \sim 16.80 \times 10^{-6}$ 、Al $282.88 \times 10^{-6} \sim 407.83 \times 10^{-6}$ 、P 低于检测限 $\sim 190.86 \times 10^{-6}$ 、K $1.71 \times 10^{-6} \sim 6.62 \times 10^{-6}$ 、Ca 低于检测限 $\sim 315.87 \times 10^{-6}$ 、Ti $4.61 \times 10^{-6} \sim 11.74 \times 10^{-6}$ 和 Fe $0.05 \times 10^{-6} \sim 2.17 \times 10^{-6}$, 微量元素总含量平均值为 1107.87×10^{-6} ($n=9$)。Müller 等 (2012) 提出高纯石英定义为: 石英中杂质元素 Li 5×10^{-6} 、B 1×10^{-6} 、Na 8×10^{-6} 、Al 30×10^{-6} 、P 2×10^{-6} 、K 8×10^{-6} 、Ca 5×10^{-6} 、Ti 10×10^{-6} 、Fe 3×10^{-6} , 总杂质元素含量低于 50×10^{-6} 。Al 和 Ti 是石英中最常见的微量元素, 它们作为晶格微量元素存在于石英中, 在石英原料提纯过程中很难被去除, 因此 Al 和 Ti 是评估石英质量的关键指标。I 岩体中 Al 含量多低于 30×10^{-6} , 而 Ti 明显低于 10×10^{-6} , 满足了高纯石英单元素项指标, 而 II 和 III 岩体 Al 含量均显著高于 30×10^{-6} , 而 Ti 有满足高纯石英的低于 10×10^{-6} 。三个岩体中 Li、B、Na、K、Fe 杂质元素具有达到高纯石英单元素要求, 而 P、Ca 含量变化大, 均有明显高的数据, 可能是样品中极细的磷灰石包裹体造成, 也是造成三个岩体中石英总杂质元素含量偏高的主要因素。综上所述, 三个岩体中 I 岩体伟晶岩中石英达到了中高端高纯石英标准, 具有作为高纯石英原料的潜力, 且后期要关注原矿中磷灰石微细包裹体赋存状态和净化处理。

关键词: 喜马拉雅, 伟晶岩, 高纯石英

资助项目: “战略性矿产资源开发利用”重点专项: 高纯石英原料矿床成矿机制与提纯关键技术 (2024YFC2910100)

第一作者简介: 胡欢 (1972-), 副教授, 研究方向: 成岩成矿矿物学. Email: huhuan@nju.edu.cn

通讯作者简介: 王汝成 (1962-), 教授, 研究方向: 稀有金属矿物学和成矿学研究. Email: rcwang@nju.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

中国四川梭罗沟造山型金矿成矿作用过程研究: 来自元素赋存状态和微量元素的证据

刘春花^{1*}, 王登红¹, 陈振宇¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京市西城区百万庄大街 26 号 100037

梭罗沟金矿位于甘孜-理塘成矿带南段, 是目前中国四川省查明资源量最大的金矿床, 累计探明金资源量超 60 t, 平均品位约 3.7 g/t。主要发育浸染状和细脉状硫化物两种矿化样式。阐明金的赋存状态、特征矿物组合及黄铁矿与金红石等关键矿物内的微量元素含量, 对于限定四川梭罗沟金矿成矿作用过程及揭示矿床成因至关重要。电子探针微区分析 (EPMA) 与激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 研究表明, 该矿床中的金以不可见金形式赋存于黄铁矿和毒砂中。矿床中黄铁矿可分为四个世代 ($\text{Py}_1 \sim \text{Py}_4$), 平均含金量依次为 26.2×10^{-6} 、 107×10^{-6} 、 87.8×10^{-6} 和 5.1×10^{-6} 。矿床中有三个世代的石英和白云石; 有两个世代的毒砂、金红石、绢云母及磷铈铝石。毒砂可被命名为第二与第三世代 (Apy_2 、 Apy_3), 其平均含金量分别为 260×10^{-6} 和 414×10^{-6} 。黄铁矿中金 (Au) 与砷 (As) 呈显著正相关性, 且毒砂 (Apy) 的平均含金量高于黄铁矿, 表明砷在金富集过程中起关键作用。通过 Ti、Nb、W、V、Zr 等微量元素示踪, 金成矿作用可划分为四个阶段, 其中第二与第三阶段为主要成矿期。第一阶段: 黄铁矿与 A1 脉阶段; 第二阶段: 黄铁矿与 A2 脉阶段, 富含 Ti、Nb、W、

V、Zr、Co、Ni、Au 等成矿元素的流体沿近东西向主断裂贯入, 因流体强活动性, 此阶段矿物多呈细粒结构; 第三阶段: 黄铁矿-毒砂 (Apy) -A3 脉-B1 脉阶段, 随着流体流动性减弱, 矿物结晶环境趋于稳定, 形成大量中-粗粒矿物。第四 (最终) 阶段以碳酸盐-B2 脉-B3 脉组合为标志。金矿化涉及的水-岩反应主要包括以下过程: ①第一世代金红石发生溶解-再结晶作用, 生成锐钛矿及第二世代金红石; ②第一世代磷铈铝石通过溶解-再结晶作用形成第二世代磷铈铝石; ③钾长石与水反应生成蚀变钾长石; ④热液作用再结晶的石英混合了 Al、Mg、Ca、K、Ti、Fe 及水等组分。此外, 碳酸盐化作用导致成矿流体中 CO_2 含量急剧减少。随着硫化物结晶, 热液中的 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 络合物稳定性被破坏, 促使金元素发生沉淀。矿石内第一世代金红石的变质-热液成因特征, 表明梭罗沟金矿属于具有变质热液成因的造山型金矿床。锐钛矿作为典型的低温成因矿物, 其存在指示主成矿阶段发生于低温环境。

关键词: 金、黄铁矿、金红石、磷铈铝石、造山型金矿、梭罗沟

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

工艺矿物学研究在贵金属浸出效率评价中的应用

叶小璐^{1*}

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628

某金矿硫精矿制酸后的烧渣采用水洗提金工艺, 通过浸出提取烧渣中的金、银等贵金属, 生产中始终存在金、银浸出率低于设计指标、尾渣含银偏高等问题。针对浸出工艺的给料硫酸烧渣以及浸渣开展的工艺矿物学研究, 围绕影响金、银浸出率的矿物学因素进行了系统分析, 为评价金、银浸出指标, 给出优化方向提供矿物学依据。烧渣中 Au 的品位为 2.56 g/t, Ag 的品位为 34.8 g/t。金矿物为自然金和银金矿, 其中 53.52% 的金矿物包裹于三氧化二铁和脉石矿物中, 46.48% 的金矿物以裸露金的形式存在。银矿物主要为辉银矿, 少量硫铜银矿, 微量的银金矿、自然银, 50.45% 的银包裹于三氧化二铁和脉石矿物中, 49.55% 的银矿物以裸露银的形式存在。金矿物的嵌布粒度较集中于 20 μm 以下, 其中小于 1 μm 的金矿物占比高达 29.25%; 银矿物嵌布粒度较集中于 30 μm 以下, 其中小于 1 μm 的银矿物占比为 24.41%。浸渣中 Au 的品位为 1.42 g/t, Ag 的品位为 26.70 g/t。金矿物主要以自然金和银金矿的形式存在, 高达 95.07% 的金以包裹金的形式存在, 且嵌布粒度细, 均小于 20 μm , 其中 43.21% 的金矿物颗粒小于 1 μm 。银矿物主要以辉银矿和硫铜银矿的形式存在, 少量以

分散形式存在于硫酸铅中。这部分以含银硫酸铅形式存在的银较难在氰化浸出过程中得以回收。另外, 少量辉银矿嵌布粒度达 20 μm 以上, 且辉银矿与氰化浸出液的反应速度较慢, 需要延长氰化浸出时间才能较好的浸出。对比烧渣和浸渣中金、银矿物种类、粒度和嵌布特征的变化, 可以确定损失的金矿物主要为微细粒被三氧化二铁致密包裹的自然金和银金矿; 银矿物主要为辉银矿和硫铜银矿, 少量含银硫酸铅。因此, 通过延长浸出时间, 或对该浸渣细磨后再浸出, 可以一定程度提高金、银的回收率, 但是提升幅度不会太大。造成包裹金、银占比过高的原因是硫酸化焙烧时过高的焙烧温度造成部分三氧化二铁烧结未形成蜂窝状、多孔状结构, 而直接形成了致密状三氧化二铁, 并包裹金、银矿物。在这种嵌布特征下, 金、银矿物较难与氰化浸出液接触, 影响最终浸出回收, 提高金、银浸出回收率的最根本方法是优化焙烧条件, 避免出现三氧化二铁烧结现象的发生。

关键词: 工艺矿物学, 贵金属, 浸出, 矿物学评价

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

新疆屈库勒克东金锑矿工艺矿物学研究

蔡镠璐^{1*}, 杨晗¹, 李文娟¹, 陈高杨¹, 屈伟¹, 刘爽¹, 李倩¹

1. 有研资源环境技术研究院(北京)有限公司, 北京 101407

新疆屈库勒克东金锑矿工艺矿物学研究

摘要: 屈库勒克东金锑矿位于新疆南部青藏高原北东缘东昆仑地区洒阳沟-屈库勒克一带, 隶属新疆巴音郭楞自治州且末县, 已有研究表明屈库勒克东锑金矿体主要产出于上石炭统哈拉米兰河群下亚群碳酸盐岩-沉积碎屑岩组合中, 岩性为灰色砂岩、岩屑砂岩、粉砂岩、灰岩等。对新疆地区金锑矿床的成因一直是众多研究的主题, 然而, 对该地区的金锑的工艺矿物学特征尚未得到详细研究。本研究旨在对该地区金锑矿床的不同区域进行详细的工艺矿物学研究, 以确定金和锑的分布及赋存状态以及工艺矿物学特征, 为充分利用其有价金属提供有力的数据支持。研究采用 BPMA 工艺矿物学参数自动分析系统, 结合化学分析、显微镜、电子探针等研究手段, 对矿石的矿物含量、金的赋存状态和嵌布特征等进行研究。结果表明, 金颗粒以金银互化物形式赋存, 区域 1 样品中金平均品位为 8.16 g/t, 锑含量为 3.14%, 金颗粒粒度主要分布在 0.003~0.100 mm, 88.38% 的金粒度大于 0.020 mm。区域 2 中金平均品位为 3.09 g/t, 锑含量为 0.18%, 金颗粒粒度主要小于 0.010 mm, 其中粒度小于 0.005 mm 的金占 78%。

可见金粒度随着金的含量变低而变细。区域 1 中金和辉锑矿关系密切, 难以分离。在磨矿产品中, 除了单体解离的金外, 区域 1 中的金主要嵌布在辉锑矿中, 而区域 2 中的金则主要在黄铁矿、毒砂、石英等矿物中。金在不同区域的嵌布特征具有明显差异, 可能与成矿时期流体中金和锑的流体浓度和络合形式有关。在高金高锑的区域 1 中, 锑浓度较高, 金与锑形成金锑络合物 HAuSbS^{3-} 离子, 随着温度降低和辉锑矿的沉淀, 金锑络合物分解, 金和锑同时析出, 形成了金和辉锑矿形成密切交代共生的特征, 磨矿产品中金与辉锑矿难以完全解离, 金主要与辉锑矿连生。低金低锑区域中锑浓度较低, 金主要以金的硫氢络合物 $\text{Au}(\text{HS})^{2-}$ 离子形式迁移, 在沉淀析出过程中金与其他硫化物同时析出, 形成金和其他硫化物交代共生的特点, 磨矿产品中金多与黄铁矿、毒砂、石英等矿物连生。该矿区不同区域的金特征具有明显差异, 为实现有价金属金和锑的充分回收利用, 应通过适当调整选矿工艺流程来提高金锑的回收率。

关键词: BPMA 系统、工艺矿物学、金的赋存状态、地球化学成因

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

基于拉曼光谱的月壤矿物学研究：对非月海溅射物 复杂岩性组成的指示

师爽¹, 曹克楠¹, 余振兵^{1*}, 汪在聪¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院 行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 武汉 430078

激光拉曼光谱分析具有高精度、原位、无损和快速特点, 使之成为地球科学基础研究中的一项重要研究手段, 近年来在行星矿物识别和表征方面显示和很好的应用前景。“嫦娥六号”(CE-6)任务首次带回月球背面月壤样品, 这对了解月球背面地质多样性和演化历史具有重要意义。本研究采用基于拉曼的自动矿物分析系统, 对 CE-6 月球土壤对矿物组成和粒度进行了研究, 并与嫦娥五号(CE-5)月球土壤样品进行了比较。结果表明, CE-6 月壤平均粒度为 4.4 μm , 其玻璃物含量明显高于 CE-5 月壤, 而辉石和橄榄石含量均低于 CE-5。拉曼光谱进一步揭示了 CE-6 橄榄石相比 CE-5 橄榄石, 镁(Mg)元素明显富集($\text{Fo}=40\text{-}90$)。

此外, 在嫦娥六号(CE-6)的一块岩屑中观察到了明显的橄榄石成分分带, 这很可能代表了具有复杂岩浆相互作用的月亮溅射物质。这些发现揭示 CE-6 月壤中存在大量非月海成分, 与 CE-5 样品显著不同。由于 CE-6 着陆点玄武岩中橄榄石含量极低, 月壤中橄榄石显著的成分范围指示了该区域基性月亮可能具有复杂的岩石组成。本研究显示, 拉曼光谱技术在无损、快速和粒度-矿物成分同步测定方面具有很大潜力, 为未来天体原位探测和返回样品分析提供了技术支撑。

关键词: 激光拉曼光谱, 嫦娥六号, 月壤, 矿物组成, 粒度

基金项目: 国家自然科学基金项目(42441802, 42241156)和中国地质大学(武汉)优秀青年团队项目(G1323523042)

第一作者简介: 师爽(1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学, 矿物学. Email: 373007131@qq.com

*通信作者简介: 余振兵(1979-), 教授, 研究方向: 前寒武纪地球生物学及天体生物学. Email: zbsher@cug.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

图像识别技术在矿物自动识别中的发展与应用

方明山^{1*}

1. 矿冶科技集团有限公司 矿产资源研究设计所, 北京 102628

矿物识别是矿物学研究和矿山生产中的重要环节,传统方法依赖人工在光学显微镜下肉眼观察和分析,存在效率低、成本高、主观性强等问题。随着计算机技术的发展,图像识别技术逐渐应用于矿物识别领域,经历了从基于灰度处理、色彩空间系统模型到结合人工智能技术的演变。在矿物识别应用中,图像识别技术展现了高精度、自动化的优势,并已开发出基于扫描电镜和能谱仪、光学显微镜的矿物自动识别

系统。这些系统能够高效处理矿物图像,提取矿物特征参数,为矿物学研究和矿山生产提供了强有力的技术支持。未来,随着人工智能技术的进一步发展,矿物图像识别技术将向更高精度、智能化和在线化方向迈进,持续赋能矿产资源的高效开发。

关键词: 图像识别技术; 矿物识别; 人工智能; 矿物参数自动分析

第一作者简介: 方明山 (1982-), 教授, 研究方向: 工艺矿物学。Email: fangmingshan@bgrimm.com

通信作者简介: 方明山 (1982-), 教授, 研究方向: 工艺矿物学。Email: fangmingshan@bgrimm.com

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

铁铜矿尾矿资源化利用现状数据库建设初探

陈彤^{1*}, 牛向龙^{1,2}, 赵立群¹, 周亚坤¹, 莫凌超¹, 牛斯达¹

1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;

2. 中国冶金地质总局昆明地质勘察院, 云南省昆明市盘龙区地址勘察院 650201

摘要: 目前, 数据库建设在很多领域得到广泛应用, 但在尾矿库管理方面, 仍存在一些问题。一方面, 数据分散存储, 缺乏统一的管理和规范, 导致数据的一致性和完整性难以保证。另一方面, 数据共享程度低, 不同部门和企业之间的数据难以互通, 影响了尾矿库的高效管理及技术的推广应用。本数据库通过将不同来源、地区、格式的尾矿库数据集中梳理存储, 统一管理和访问, 提升数据的一致性和完整性, 在此基础上数据库建库可以扩展出查询、分析功能, 进一步挖掘信息价值, 再通过数据共享和协作平台, 提高相关企业、部门的工作效率和信息的准确性。为尾矿库的监管、资源综合利用提供数据支持, 帮助相关部门和企业做出科学决策。本数据库建设流程包括:

历年勘查资料、行业年鉴、政府及企业公开资料收集整理, 数据库设计、数据标准化处理、数据录入编辑、质量检查及维护更新等。在建设过程中, 循科学性、规范性、一致性、适用与实用性原则, 明确数据格式、精度、属性字段规范等技术要求, 并选用 GIS 软件、数据库管理软件等。为更具针对性的服务铁铜尾矿矿物综合利用提出扩充方案, 包括矿山及尾矿库信息、尾矿理化性质、矿物特征数据等, 以全面梳理我国主要铁铜矿尾矿特性, 提高资源利用率, 减少环境污染。

关键词: 铁铜矿尾、尾矿资源化利用、数据库建设、尾矿库

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

川西可尔因稀有金属矿田李家沟锂辉石工艺矿物学特征研究

赖翔¹, 陈翠华^{1*}

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

四川金川李家沟锂辉石矿床位于川西可尔因稀有金属矿田东南部。经过最新的勘探评估工作, 李家沟矿床已被确定为超大型锂辉石矿床, 备受国内外学者关注, 且李家沟矿床矿石工艺特征随高程而变化, 急需正确评价李家沟矿床矿石的工业价值。为了确定矿石的工艺特性并评估其工业价值, 本研究基于详细的显微镜下和手标本观察, 综合运用 X 射线粉晶衍射 (XRD), 电子探针 (EPMA), 激光剥蚀等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS), 化学全元素分析, 化学物相分析, 矿物参数自动分析系统 (MLA) 等方法和技术, 揭示了矿石的工艺特性及 Li 的赋存规律, 为优化选矿工艺和资源综合利用提供了科学依据。

李家沟矿床形成于晚三叠世 (约 200 Ma), 与印支晚期岩浆热液活动密切相关, 属于典型的 Li-Cs-Ta (LCT) 型伟晶岩锂矿床。矿体呈脉状、透镜状, 赋存于钠长石锂辉石伟晶岩中, 矿石以钠长石锂辉石型为主 (占比>95%)。矿石结构主要为自形一半自形板柱状结构, 矿物组合以锂辉石、白云母、石英、钠长石为主, 含少量黄铁矿、石榴石等。锂辉石呈浅绿色或乳白色, 粒径差异显著 (0.01~20 mm), 常见蚀变及铁染现象。研究采集了 93 件样品 (63 件岩芯样品与 30 件拣块样品), 按深度分为 LJG-1 至 LJG-4 四组。矿石平均 Li_2O 品位为 0.86%, 属低品位矿石。锂主要赋存于锂辉石 (占比 84.1%), 其次以类质同象形式分布于云母类矿物 (15.8%)。伴生元素 (Nb、Ta、Sn 等) 无工业价值。全岩 SiO_2 含量达 73%, Al_2O_3

为 15.64%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 6.20%, 与区域伟晶岩型锂矿特征一致。

锂辉石晶体多呈半自形-自形柱状 (粒度 2~8 mm), 但受后期热液蚀变影响形成大量共生结构 (如石英-钠长石-锂辉石蠕状交生体), 导致深部矿体锂辉石粒度细化 (0.04~0.26 mm)、自形程度降低, 且锂品位随深度增加呈递减趋势 (浅部样品 LJG-1 品位 1.74% Li_2O , 深部 LJG-4 降至 0.46%)。矿石非均质性显著, 锂辉石解离特性与粒度和蚀变程度密切相关: 浅部样品在 -0.075 mm 粒度下解离度达 92%, 而蚀变强烈的深部样品解离难度增大, 需通过多段磨矿 (首段磨至 0.15 mm, 终磨至 -0.075 mm) 结合脱泥工艺优化浮选效率。研究指出, 后成合晶结构中微米级蠕状锂辉石 (3~50 μm) 因 MLA 技术分辨率限制易被误判为脉石矿物, 是尾矿锂损失的主要因素; 同时, 黏土矿物沿锂辉石裂隙渗透引起的 Fe 杂质吸附及浮选药剂消耗需在选矿流程中针对性处理。选矿流程建议采用“粗磨—云母粗选—尾矿再磨—脱泥—锂辉石细选”的多段分选工艺, 以应对矿石粒级分布宽 (-2~-0.075 mm) 的特征及蚀变矿物干扰等。该研究为川西伟晶岩型锂资源的高效利用提供了关键矿物学依据, 对提升低品位锂矿综合回收率及精矿品质 (理论 Li_2O 品位 6.4%) 具有重要工程指导意义。

关键词: 后成合晶; 锂辉石; 解离度; 可尔因

第一作者简介: 赖翔 (1989-), 博士后, 研究方向: 矿物学, 矿床学. Email: laixiang@cdut.edu.cn

*通信作者简介: 陈翠华 (1972-), 教授, 研究方向: 矿物学, 矿床学, 地球化学. Email: chencuihua@cdut.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

毒重石对含钛无氟保护渣熔渣结构和析晶行为的影响

刘磊^{1,2}, 韩秀丽^{1,2*}, 张玓^{1,2}, 刘子瑶³, 郭静静³

1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北省唐山市 063210;

2. 河北省矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心, 河北省唐山市 063210;

3. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北省唐山市 063210

在连铸无氟保护渣的应用探索中, 含钛无氟保护渣以其独有析晶矿相的优势和改善保护渣物化性能的效果, 成为无氟保护渣领域的研究热点, 但由于高熔点矿物的存在, 导致保护渣熔点和黏度较高, 而毒重石中的钡可以改善含钛保护渣的理化性能, 使得含钛保护渣具有较好的应用效果。选用含钛高炉渣、石灰石、石英砂、硼砂、纯碱和毒重石作为主要原料制备含钛无氟保护渣, 对无氟保护渣熔渣结构和析晶行为进行了系统研究, 以查明毒重石作为氟替代物在含钛无氟保护渣中的作用机制, 从而实现含钛无氟保护渣的工业化应用。结果表明, 随着毒重石质量分数从 1%增加到 5%, 熔渣中 Ca-O 键和 Ba-O 键稳定性、硅氧四面体内部与外部有序

度以及硅酸盐结构聚合度均表现为先降低后升高, 而 Si-O 平均配位数和氧硅比呈现为先升高后降低的趋势; 含钛保护渣主要析出相为钙钛矿、霞石和硼硅酸钙, 开始析晶温度和钙钛矿占比变化较小, 岛状结构的硼硅酸钙含量先升高后降低, 架状结构的霞石含量先降低后升高, 当毒重石含量为 3%时硼硅酸钙占比达到峰值为 15%, 霞石占比为 18%。保护渣熔渣结构的改变会影响保护渣的析晶行为, 保护渣熔渣硅氧网络结构的复杂度升高, 会促进复杂结构的硅酸盐矿物含量升高。

关键词: 含钛无氟保护渣; 熔渣结构; 析晶行为; 毒重石; 钙钛矿

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774140); 河北省自然科学基金项目(E2024209062); 河北省省属高校基本科研业务费项目(JQN2022008); 唐山市科技计划项目(24130206C)

第一作者简介: 刘磊, 男, 36 岁, 副教授, 研究方向: 工艺矿物学及矿物材料, Email: heutliulei@163.com

通讯作者简介: 韩秀丽, 女, 58 岁, 教授, 博导, 研究方向: 工艺矿物学及矿物材料, Email: hanxl@ncst.edu.cn

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

华南震旦系-下寒武统磷块岩的工艺矿物学研究

余振兵^{1*}, 刘聪靓¹, 李天洋¹, 王伟¹, 黄康俊²

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

2. 西北大学, 西安 710069

采用偏光显微镜和矿物自动定量分析系统对湖北宜昌震旦系陡山沱组和云南东川、贵州织金下寒武统沉积磷块岩矿石及相关岩石的矿物组成、嵌布特征、嵌布粒度等进行了系统的工艺矿物学研究和对比。研究表明, 磷块岩矿石以条带状构造为主, 少数为块状构造, 主要为中-低品位硅质型和碳酸盐型矿石。宜昌陡山沱组磷块岩样品 P_2O_5 含量为 4.5%~31.5%, 平均含量 14.5%; 东川、织金下寒武统磷块岩样品 P_2O_5 含量分别为 6.4%~30.6%和 5.2%~31.3%, 平均含量 18.7%和 18.2%。由于条带状构造发育, 矿石在毫米级尺度上磷灰石含量从<10%可变为>80%。矿石中的有用矿物为碳氟磷灰石, 几乎全部以隐晶质集合体形式产出, 集合体常呈现粒度数十至数百微米的颗粒; 脉石矿物主要为硅质矿物(石英、玉髓)、碳酸盐矿物(白云石为主)及少量含铁矿物等。碳酸盐矿物常呈独立条带

或以磷质颗粒的基质或胶结物形式存在, 可根据样品中磷质颗粒的粒度设计对应的破碎和磨矿工艺进行较好的解离。硅质矿物除以独立条带形式存在以外, 在部分样品中还以微米级包裹体形式分散于磷质颗粒内部, 为选矿带来了较大困难, 需通过更复杂的工艺进行处理。总体而言, 华南沉积磷块岩的结构和构造多样, 矿物组成和嵌布分析比较复杂, 通过矿物自动定量分析系统精确测定矿物的嵌布特征和解离度, 可以帮助确定最佳的磨矿条件, 提高矿物的单体解离度的同时避免过磨导致的机械夹带和泥化问题, 并可为选矿药剂的选择和工艺流程的优化提供重要参考, 从而提高磷矿资源的回收率和产品质量。

关键词: 磷块岩, 矿物自动定量分析, 陡山沱组, 下寒武统, 矿物解离

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

都龙锌锡多金属矿床铟的赋存状态和富集机制

康东艳^{1*}, 肖仪武¹

1. 矿冶科技集团有限公司 资源所, 北京 102628

都龙锌锡多金属矿床是我国重要的铟资源产地, 其铟的赋存状态与富集机制对稀散金属成矿理论及勘查开发具有重要意义。该矿床的含铟矿石以磁黄铁矿、闪锌矿和磁铁矿为主, 含少量锡石、黄铜矿等, 非金属矿物以绿泥石、白云石及复杂硅酸盐组合为特征。本研究综合运用扫描电镜 (SEM)、矿物自动分析系统 (AMICS) 和电子探针 (EPMA) 等分析手段, 系统揭示了都龙锌锡多金属矿床铟的赋存规律及其控制因素。结果表明: 铟以类质同象形式均匀分布于铁闪锌矿中, 因此铟的高效回收利用取决于铁闪锌矿的处理; 发现闪锌矿存在“铟窗效应”, 当 Cd 含量介于 0.17%~0.20% 时, In 含量普

遍较高 (大于 0.08%), 可能暗示 Cd-In 协同富集的作用; In 与 Cu 呈显著正相关, 其替代机制遵循 $\text{In}^{3+} + \text{Cu}^+ \rightarrow 2\text{Zn}^{2+}$ 的耦合置换模式, Cu^+ 对电荷失衡的补偿作用或为铟富集的关键; 结合闪锌矿地质温度计及 Zn/Fe、Zn/Cd 和 Ga/In 比值, 确定成矿温度集中于中高温区间, 富铟环境需高温驱动元素扩散及充足的 Cd^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Cu^+ 流体供给; 闪锌矿的微量元素特征与岩浆热液型矿床特征相似, 指示其成因与岩浆热液活动密切相关。

关键词: 铟; 都龙锌锡多金属矿床; 闪锌矿; 富集机制

• 专题 31: 选冶工艺矿物学 •

元素赋存状态-连接成矿过程与选冶的桥梁: 以柿竹园矿床中锡为例

田明君^{1,2}, 肖仪武^{1,2*}, 尚衍波^{1,2}, 王中明^{1,2}, 王明燕^{1,2}, 刘方^{1,2}, 李磊^{1,2}

1. 矿冶科技集团有限公司 矿产资源研究设计所, 北京 100160;

2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628

元素的赋存状态是矿床学研究的核心内容之一, 不仅为探讨矿床形成过程、建立成矿模型提供关键依据, 同时对矿石选冶工艺制定具有重要指导意义。华南地区锡矿床常与高分异过铝质花岗岩相关, 且主要富集在矽卡岩型矿床中。然而, 该类矿床在开发过程中普遍面临选冶回收率低的难题。以典型矿床柿竹园为例, 其现场锡回收率仅为 12%~15%。因此深入研究锡的赋存状态, 成为连接矿床成因模型与实际选冶难题的重要纽带。本研究采用湿化学分析、选择性溶解、矿物自动分析系统 (AMICS) 和电子探针微区分析 (EPMA) 等综合技术手段, 对 III 矿带矽卡岩型矿石开展了系统的岩石学与矿物化学研究, 查明锡的赋存状态并进行定量表征。研究发现锡存在两种主要替代机制: (1) 石榴石和绿帘石中的八面体替代: $2\text{Fe}^{3+}_{(\text{oct})} = \text{Fe}^{2+}_{(\text{oct})} + \text{Sn}^{4+}_{(\text{oct})}$; (2) 韭闪石中的四面体替代: $\text{Sn}_{(\text{tetr})} = \text{Si}_{(\text{tetr})}$ 。石榴石和绿帘石中 SnO_2 与 Fe_2O_3 呈现相反的线性变化趋势, 指示前者为原始锡晶格替代, 而后者则反映了锡矿物蚀变后的重新分配过程。定量分析结果表明, 62.75% 的锡以锡石形式存在, 31.82% 赋存于石榴石中, 少量分布于韭闪石和绿帘石中, 微量存在于榍石中。结合前人流体包裹体研究成果, 本研究系统整合了矿床流体演化、氧化还原

态与锡地球化学行为, 建立了以温度为线的成矿模型: 在早期高温氧化阶段 (超临界流体), 锡主要赋存于石榴石中, 富氟环境有利于锡以 Sn^{4+} 氧化态存在, 晚期形成锡石与磁铁矿的嵌晶结构; 随着体系冷却, 富含氯化物的流体携带锡迁移, 随温度降低沉淀形成锡石, 并受到晚期硫化物 (如磁黄铁矿、闪锌矿) 的交代。综合考虑矿石性质 (包括伴生有价矿物的综合回收及其物理化学特性), 确定了选冶原则工艺流程: 首先进行磁铁矿磁选, 随后进行硫化物浮选, 最后对钨、锡进行浮选。研究团队创新性地提出了锡石理论回收率预测的经验公式 $\varepsilon_{\text{Sn}} = A_{\text{Cass}} \times B_{\text{Cass}} \times C_{\text{Cass}}$, 其中, A_{Cass} 代表锡石可选性系数; B_{Cass} 代表锡石结构影响系数; C_{Cass} 为锡石粒度影响系数。计算得到锡石理论回收率为 24.05%, 与实验室闭路流程试验结果高度吻合, 验证了公式的可靠性。该研究说明矽卡岩型锡矿床的经济性从根本上受控于锡的赋存状态, 即地质作用。这一认识可为类似矿床的地质研究、勘探策略和选冶工艺制定和优化提供了重要的理论指导和方法支撑。

关键词: 锡赋存状态; 柿竹园; 回收率预测; 锡成矿过程; 矽卡岩

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2905103)

第一作者简介: 田明君 (1989-), 高级工程师, 研究方向: 矿床学及工艺矿物学. Email: tianmj51@163.com

通信作者简介: 肖仪武 (1965-), 正高级工程师, 研究方向: 工艺矿物学及资源评价. Email: xiao_yw@bgrimm.com

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

江西相山下家岭稀土矿风化球体中表生稀土矿物的发现及其指示意义

杨永乐^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌市 330000

相山下家岭风化壳淋积型稀土矿床的风化球体中稀土元素异常富集。为了探讨其稀土元素异常富集的主要原因, 利用扫描电镜、电子探针以及激光拉曼, 对该稀土矿中不同风化程度的风化球体开展了精细矿物学研究。结果显示: 风化球体中大量发育次生稀土矿物。该矿物主要分布在黑云母解理以及斜长石的风化孔洞中。其 $\Sigma \text{REY}_2\text{O}_3$ 含量为 69.04%~80.89%, 富 La_2O_3 、 Nd_2O_3 以及 Y_2O_3 , 几乎不含 Ce_2O_3 , 含有一定量的 F。拉曼测试显示多个谱峰, 拉曼位移位于 741 cm^{-1} 、 1097 cm^{-1} 的谱峰可能分别反映 CO_3^{2-} 的 ν_4 面内弯曲振动和 ν_1 对称伸缩振动, 位于 272 cm^{-1} 的谱峰可能与卤族元素 F 有关, $3100\sim 3700\text{ cm}^{-1}$ 的谱峰可能对应 OH 的伸缩振动。综合探针和拉曼的测试结果, 判断该矿物可能为含

羟基的稀土氟碳酸盐矿物。这种次生矿物的形成过程可能如下: 富稀土的流体流经风化球体时, 黑云母和斜长石风化形成的粘土矿物可以吸附稀土元素, 使粘土矿物附近的稀土浓度骤升, 当稀土浓度、碳酸根离子、氟离子的浓度超过一定阈值时沉淀, 这部分稀土元素以表生稀土氟碳酸盐矿物的形式赋存于风化球体中。然而随风化程度进一步增强, 表生稀土氟碳酸盐矿物分解, 稀土元素被释放。风化球体中表生稀土矿物的形成与分解使得风化球体在下家岭稀土矿的成矿过程中起到了由稀土“汇”到稀土“源”的角色转变。

关键词: 风化球体, 表生稀土氟碳酸盐矿物, 风化壳淋积型稀土矿

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41972071、41862004)

第一作者简介: 杨永乐 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿产普查与勘探。Email: 804160288@qq.com

*通信作者简介: 李光来 (1983-), 教授, 研究方向: 花岗岩与成矿作用。Email: liguanglei@ecit.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

新疆东天山红石铜矿床成矿流体演化过程中绿泥石、石英及黄铁矿微量元素行为示踪

成曦晖^{1*}, 凌明星¹, 负丽¹, 张志欣², 耿新霞³, 杨富全³

1. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 南昌 330013;

2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 830011;

3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

红石矿床位于东天山卡拉塔格矿集区, 探明铜储量 8.3 万 t, 平均品位 0.83%, 赋存于奥陶系大柳沟组火山岩中。前人研究对矿床成因存在斑岩型、浅成低温热液型与 VMS 型之争, 且成矿流体温度-压力条件、金属置换机制等关键问题尚未明晰。矿区内广泛发育多期次绿泥石、石英与黄铁矿, 为示踪热液演化提供了理想对象。研究采集了钻孔及坑道样品, 采用阴极发光 (CL)、背散射成像 (BSE)、电子探针 (EPMA) 及激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术, 系统分析三个成矿阶段 (石英-黄铁矿阶段、石英-黄铜矿-黄铁矿阶段、石英-方解石-黄铁矿阶段) 绿泥石、石英与黄铁矿的主微量元素组成。结果显示, 绿泥石分为富铁绿泥石 (Chl-1), 富铝绿泥石 (Chl-2) 与富镁绿泥石 (Chl-3), Fe/(Fe+Mg) 比值分别为 0.52~0.61、0.35~0.57、0.35~0.41, 显示随成矿过程中铁含量降低、镁含量升高趋势。温度计算表明 Chl-1 形成温度为 251~357 °C, Chl-2 为 201~270 °C, Chl-3 为 117~211 °C, 与流体包裹体均一温度 (108~299 °C) 一致。氧逸度 ($\log f_{O_2}$) 与硫逸度 ($\log f_{S_2}$) 从 Chl-1 (-37.25~-31.20; -11.58~-10.96) 向 Chl-3 (-46.86~-41.48; -13.60~-11.75) 递减, 指示流体由氧化向弱还原环境演化。石英中 Al 含量从早期 Qtz-1 (均值 4600.5×10^{-6}) 向晚期 Qtz-3

(327.0×10^{-6}) 递减, 反映热液 pH 值升高。Ti 含量呈反向趋势 (Qtz-1= 2.1×10^{-6} , Qtz-3= 180.0×10^{-6}), 与阴极发光强度变化无关, 表明 Ti 并非石英发光主控因素。Li-Al 正相关及 Ti-Ge 置换机制揭示微量元素以类质同象形式进入石英晶格。三期黄铁矿 (Py1-Py3) Co/Ni 比值均值分别为 158.6、161.7、11.7, 具典型热液成因特征 (Co/Ni>1)。主成矿期 Py2 发育多孔结构及 Ag/As、As/Sb 高比值, 结合流体包裹体证据, 指示硫化物流体沸腾导致金属快速沉淀。Se 含量从 Py1 (均值 83.8×10^{-6}) 向 Py3 (215.9×10^{-6}) 递增, 反映成矿过程中流体氧化程度增强。红石矿床成矿流体经历早期高温氧化 (~300 °C)、中期中温弱氧化 (~250 °C) 至晚期低温弱还原 (~190 °C) 的连续演化, pH 值升高与流体沸腾共同控制铜的沉淀。绿泥石氧逸度-温度耦合、石英 Al-Ti 分带及黄铁矿 Co/Ni-Se 系统为热液演化提供了可靠地球化学指标。综合矿物地球化学与区域构造背景, 红石矿床应属“科迪勒拉”型热液脉状铜矿, 与深部斑岩系统存在成因联系。本研究为东天山早古生代铜矿成矿规律研究与隐伏矿体定位提供了重要理论依据。

关键词: 绿泥石、石英和黄铁矿; 微区原位分析; 热液脉状铜矿; 东天山

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

锡石：锡钨稀有金属成矿作用研究的多面手

章荣清^{1*}, 齐振楠¹, 周明召¹, 张彬¹, 林振铎¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

锡石是锡矿床和稀有金属矿床中常见的矿石矿物, 同时也是部分钨矿、铅锌银矿、铜矿、VHMS/SEDEX 矿床的伴生矿物。锡石 (SnO_2) 属于四方晶系金红石族, 其晶格能容纳一定量的 Fe、Mn、Nb、Ta、W、Ti、Zr、Hf、In、Si、Ge、Ga、Sc 等微量元素。因微量元素含量差异, 锡石具有无色透明、红、棕、棕褐、黑等颜色。随着显微图像拍摄和分析技术的迅猛发展, 锡石已经成为研究锡钨稀有金属矿床的多面手。锡石阴极发光、微量元素、U-Pb 定年、Hf 同位素、O 同位素和 Sn 同位素可以用来有效约束成矿时限、物质来源和成矿过程。此外, 锡石是半透明矿物, 其内部的流体包裹体能够记录成矿流体的温度、压力、盐度, 根据包裹体中 CH_4/CO_2 比值可以估算成矿流体的氧逸度。阴极发光图像观察显示锡石常常有复杂的环带结构和生长期次, 能够很好的记录锡在岩浆热液过程中富集、迁移和沉淀历史。锡石的微量元素能够用来判断锡矿成因类型、示踪岩浆热液成矿过程。锡石晶格中可容纳一定量的 U, 并且初始 Pb 相对较低, 锡石 U-Pb 定年已经成为厘定锡钨稀有金属矿床最常用、成功率高并且经济快速的定年手段。锡石中 U 含量变化范围比较大, 约为 10^{-9} ~ 10^{-4} 。多数锡石的 U 含量级别只有 10^{-6} ~ 10^{-5} , 并且都有一定量的普通 Pb。目前常用的经过 TIMS U-Pb 定年标定的锡石有 AY-4、Yankee、Jian-1、SIL-1、Cligga Head、SPGIV、BB#7、19GX、RG-114、PitAB、Rond-A 等,

这些锡石多数是热液成因。岩浆和热液锡石成分差异较大, 进行 U-Pb 定年时, 用热液锡石标样校正岩浆锡石或者用岩浆锡石校正热液锡石, 是否存在基体效应有待进一步评估。这些锡石多数具有普通 Pb, 寻找多个高 U 含量并且没有普通 Pb 的岩浆和热液锡石标样刻不容缓。近年来, 一些学者对原位锡石 SIMS 氧同位素示踪进行了尝试, 发现锡石氧同位素受晶体取向性影响小; 与石英氧同位素相比, 锡石氧同位素分馏对温度不敏感, 可以用来直接示踪锡成矿流体物质来源和流体演化以及成矿效率。锡石晶格可以容纳一定量的 Hf, 锡石中 Hf 含量变化范围较大, 从 10^{-6} 到 1000×10^{-6} 以上, 岩浆锡石比热液锡石更富 Hf。锡石原位 Hf 同位素研究尚处于起步阶段。锡石原位 Hf-O 同位素联用, 将会为示踪锡成矿物质来源和流体演化提供新思路。锡石中锡同位素变化非常显著, 部分熔融、结晶分异、氧化还原和气液分离等地质过程会导致明显的锡同位素分馏。单颗粒尺度锡石具有一定的锡同位素分馏。含锡花岗岩溶液法与锡石原位锡同位素联合分析, 将为探究含锡花岗岩的成因、锡成矿物质来源和成矿过程 (如氧化还原态变化和熔体挥发分丢失历史) 提供强有力的技术支撑。

关键词: 锡石阴极发光和微量、锡石 U-Pb 定年、原位 Hf-O 同位素、原位 Sn 同位素、矿床成因

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272077)、中央高校基本科研业务费“关键地球物质循环前沿科学中心”GeoX 交叉项目“锡成矿过程的锡石 Hf-O-Sn 同位素示踪”

第一和通信作者简介: 章荣清 (1986-), 副教授, 研究方向: 钨锡稀有金属成矿机制、成矿年代学. Email: rqzhang@nju.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

铌铁矿族矿物的地球化学成分及 U-Pb、Hf 同位素在 铌钽成矿研究中的应用

汤志敏¹, 车旭东^{1*}, 王汝成¹, 杨岳衡², 吴福元², 陆建军¹, 邓飞³

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023;

2. 中国科学院 地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

3. 广东省地质局 佛山地质调查中心, 佛山 528000

铌、钽是重要的关键矿产资源, 其成矿机制研究对资源勘查具有重要意义。全球内生型 Nb-Ta 矿床主要包括花岗岩型-花岗伟晶岩型和碳酸岩型-碱性岩型矿床。而我国 Nb-Ta 成矿尤其是 Ta 成矿主要与强过铝质花岗岩或花岗伟晶岩有关。近年研究发现, 华南很多大型-超大型 Nb-Ta 矿床的成矿与准铝-弱过铝质的黑云母花岗岩的联系紧密。但准铝-弱过铝质体系的 Nb-Ta 成矿机制, 以及其与传统的强过铝质体系的成矿差异尚不明晰。铌铁矿族矿物[(Fe, Mn)(Nb, Ta)₂O₆]作为 Nb-Ta 矿床中最重要的矿石矿物之一, 是研究 Nb-Ta 成矿机制的重要指标。本文综合分析铌铁矿族矿物的主微量元素含量和 U-Pb 定年、Hf 同位素组成来研究以上问题。

研究选取了国内 24 个典型的 Nb-Ta 矿床(涵盖准铝-弱过铝质体系和强过铝质体系)的铌铁矿族矿物样品开展对比分析。结果表明来自两个体系的铌铁矿族矿物具有明显不同的主微量元素含量、元素比值和稀土配分模式。基于铌铁矿族矿物主微量元素的多元统计分析(即偏最小二乘判别分析, PLS-DA)表明 PLS-DA 可有效地区分两类成矿体系。准铝-弱过铝质体系中的早期结晶的铌铁矿呈现更高 Nb₂O₅ 特征, 这源于初始岩浆中更高铌含量, 不需要经历强过

铝质体系所需的高程度结晶分异。而且准铝-弱过铝质体系的铌铁矿族矿物具有高 Sc、 Σ REE、Y 含量和 Th/U 原子比, 但低 Li 含量和 Y/Ho 原子比, 进一步反映了两个体系的 Nb-Ta 成矿源区存在本质差异。此外研究也发现在岩浆演化过程中, 铌铁矿族矿物的 Zr/Hf 原子比和 Σ REE 含量随着 Ta/(Nb+Ta) 原子比的升高而降低, 且熔体-晶体-流体相互作用对晚期铌铁矿族矿物中稀土元素特征的影响也不容忽视。结合前人和本研究的铌铁矿族矿物 U-Pb 年代学数据, 准铝-弱过铝质体系相关的 Nb-Ta 成矿作用集中于早白垩世(约 140~120 Ma)。对两个体系的铌铁矿族矿物进行 Hf 同位素进行分析, 结果显示了这两个体系具有显著差异的 Hf 同位素组成, 同时揭示了华南早白垩世与准铝-弱过铝质体系相关的 Nb-Ta 成矿物质来源于伸展构造背景下的深部源区贡献。本研究通过多维度对比准铝-弱过铝质体系和强过铝质体系的铌铁矿族矿物的矿物地球化学特征, 深化了对 Nb-Ta 成矿机制的理论认识, 为今后进一步开展准铝质-弱过铝质体系相关稀有金属矿床的研究与勘查提供了新的科学依据。

关键词: 铌铁矿族矿物; 主微量元素; U-Pb 年代学; Hf 同位素; Nb-Ta 成矿

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 92462302, 42230809, 42272067), 广东省自然资源厅“广东和平地区 1: 5 万区域地质调查”

第一作者简介: 汤志敏(1995-), 男, 博士研究生, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: zmintang@163.com

*通信作者简介: 车旭东, 男, 副教授, 研究方向: 稀有金属成矿. E-mail: xdche@nju.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

粤北下庄铀矿区花岗岩中磷灰石地球化学特征 及其对成岩成矿的启示

杨跃贵¹, 陶继华^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

粤北下庄铀矿田是我国最大的花岗岩型铀矿田, 其成矿作用与花岗岩关系密切。磷灰石作为花岗岩中常见的副矿物, 其化学成分能有效示踪岩浆源区性质和精细刻画岩浆演化和成岩过程。本次研究以下庄铀矿田中产铀的下庄二云母花岗岩和非产铀的鲁溪黑云母花岗岩为研究对象, 利用电子探针和 LA-ICP-MS 开展磷灰石矿物原位微区主、微量元素化学成分分析, 探讨其对成岩成矿的指示意义。结果表明, 鲁溪黑云母花岗岩和下庄二云母花岗岩均来自富 F 贫 Cl 的变沉积岩部分熔融, 属于 S 型花岗岩。下庄二云母花岗岩具有比鲁溪黑云母花岗岩更高的岩浆分异演化程度, 更低的岩浆氧逸度和更高的 F 含量, 从而导致下庄二云母花岗岩具有比鲁溪黑云母花岗岩

更高的 U 含量。同时, 高分异演化阶段的熔体中含有大量游离氧 (O^{2-}), 而高 U 含量导致熔体中存在大量满足类质同象交换后的 U^{4+} 与 O^{2-} 结合, 并形成重要的铀源矿物—晶质铀矿。鲁溪黑云母花岗岩中 U 主要赋存在富稀土副矿物中, U 含量低且不易被释放, 不利于后期热液成矿, 而下庄二云母花岗岩中大量 U 赋存在晶质铀矿中, U 含量高且容易被释放, 有利于后期热液成矿。本次研究表明, 磷灰石化学成分特征差异可用于探讨花岗岩岩浆演化的物理化学条件差异及其对不同铀成矿潜力的制约。

关键词: 下庄岩体; 鲁溪岩体; 下庄铀·矿田; 花岗岩; 磷灰石

基金项目: 铀资源探采与核遥感全国重点实验室(东华理工大学)项目(编号: 2024QZ-TD-01)、国家自然科学基金项目(编号 41963002, 42063001)和东华理工大学-中国铀业有限公司联合基金(批准号: 2022NRE-LH-19)联合资助

作者简介: 杨跃贵(2000-), 硕士, 研究方向: 岩浆岩与铀-多金属成矿作用研究. E-mail: 2785166365@qq.com

*通讯作者简介: 陶继华(1985-), 副教授, 研究方向: 岩石地球化学、岩浆岩与成矿作用研究工作. E-mail: taojihua123@163.com

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

VMS 矿床中方铅矿地球化学控制因素及其在找矿勘查中的应用：以阿尔泰山可可塔勒铅锌矿床为例

孙超¹, 张辉善^{1*}, 杨晓勇², 陈博¹, 计文化¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 西安 710119;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

方铅矿、闪锌矿和黄铁矿是 VMS 矿床中主要的金属矿物, 相关研究表明闪锌矿和黄铁矿地球化学在 VMS 矿床中具有一定的找矿勘查潜力, 而方铅矿地球化学特征及其控制因素研究薄弱, 对该类矿床找矿勘查是否具有指示意义尚不明晰。本研究以阿尔泰山可可塔勒 VMS 型铅锌矿床为例, 通过方铅矿原位微量元素、原位 Pb 同位素和矿物 Mapping 分析, 探索 VMS 矿床中方铅矿地球化学控制因素及其在找矿勘查中的潜力。阿尔泰山可可塔勒 VMS 型铅锌矿床中发育两期方铅矿, 即火山喷流沉积期(形成块状、稠密浸染状和条带状矿石)的同生方铅矿和变形变质改造期(形成改造矿石和硫化物-硫盐脉)的后生方铅矿。同生方铅矿的微量元素含量变化较大, 而后生方铅矿的微量元素含量落在了同生方铅矿的范围之中。尽管原生方铅矿在形成后遭受了变质作用和再活化作用, 但其晶格元素几乎未受影响。元素协变关系表明, 同生方铅矿中几乎所有的元素(如 Sb、Ag、As、Cu、Tl 等)通过直接或耦合替代的方式进入方铅矿晶格中, 部分元素(如 Zn、Cu、As 等)则以矿物包裹体的形式赋存其中。分析表明, 方铅矿微量元素含量主要受形成温度和共存矿物(如闪锌矿和硫盐矿

物)的影响。Pb 同位素分析表明, 同生和后生方铅矿的铅同位素组成相似, 落在火山-沉积地层和隐伏古老物质的混合线上, 且更靠近火山-沉积地层一侧, 据此推断矿床的成矿金属离子主要来源于火山-沉积地层; 结合矿床地质特征此推断: 火山-沉积地层经演化海水和变质流体的先后淋滤和迁移, 分别形成了同生和后生矿石。方铅矿微量元素的空间变化表明, 方铅矿的 Tl、Cd、Sn 含量在靠近热液喷口处呈上升趋势, 这主要是因为热液喷口处温度高、流体通量大, 这样的元素变化趋势有助于定位成矿热液中心。利用方铅矿数据集和随机森林算法, 本研究发现方铅矿地球化学可以区分不同类型的铅锌矿床; 基于此本研究提出了根据方铅矿地球化学判断矿床成因类型的判别算法和相应的判别图解($\lg(Tl)$ vs. $\lg(Sn)$), 这有助于确定未知的铅锌矿床类型。总而言之, 本研究表明方铅矿地球化学不仅可以阐明 VMS 矿床矿化过程, 而且能够指导找寻 VMS 矿床(如确定矿床类型、定位成矿热液中心), 具有广阔的应用前景。

关键词: 阿尔泰山, 可可塔勒矿床, VMS 矿床, 原位分析, 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金项目(42402089); 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心)主任基金项目(XACGS-2023-04)

第一作者简介: 孙超(1994-), 助理研究员, 研究方向: 矿床地球化学. Email: chaosunguo@163.com

*通信作者简介: 张辉善(1987-), 高级工程师, 研究方向: 铅锌成矿机制和找矿预测. Email: zhanghuishan.2086@163.com

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

微区分析在砂岩型铀矿中的应用

胡小文¹, 凌明星^{1*}

1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013

铀矿是我国重要的战略资源。其中, 砂岩型铀矿因其埋藏浅、储量规模大、开采成本低以及环保等优点, 已成为我国铀矿勘探和开发的主要矿种。砂岩型铀矿是指产于砂岩等碎屑沉积岩中的外生后成铀矿床, 主要赋存于大型沉积盆地。由于砂岩型铀矿形成于开放的岩石体系中, 其沉积物质为混合来源, 且在成岩后期经受了多源流体的长期改造, 导致矿石组成极为复杂。此外, 砂岩型铀矿床中的矿物颗粒通常十分细小, 且往往存在多个成矿期次, 这使得传统的全岩地球化学分析方法难以揭示铀矿物的赋存状态, 并限制了对成矿机理的认识。近年来, 微区分析技术在砂岩型铀矿研究中取得了显著进展。例如, 通过微区 X 射线荧光成像光谱 (Micro-XRF) 结合扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS), 可以快速识别砂岩型铀矿石的矿物组成、分布和赋存状态。此外, 电子探针微区分析 (EPMA) 和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术因其高空间分辨率和高灵敏度,

已被广泛应用于矿物微区原位分析, 能够精确测定铀矿物及相关矿物的元素组成。激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱 (LA-MC-ICP-MS) 和离子探针 (SIMS) 技术的发展, 使得对矿物进行高精度的微区原位同位素分析成为可能, 从而为成矿环境和成矿机制研究提供了关键信息。本文总结了微区分析技术在我国北方重要含铀盆地 (包括准噶尔、松辽、鄂尔多斯盆地) 典型砂岩型铀矿床的研究实例。通过多种原位微区分析技术的结合, 查明了铀矿的发育状态, 揭示了矿床成因, 并建立了成矿模型, 为砂岩型铀矿成矿理论的发展做出了重要贡献。最后探讨了微区分析技术在砂岩型铀矿研究中的广阔应用前景, 通过不断优化和创新分析方法, 微区分析技术将为砂岩型铀矿的成因研究、资源评价和勘查提供更有力的支持。

关键词: 砂岩型铀矿; 微区分析; 元素组成; 同位素; 含铀盆地

基金项目: 中国铀业有限公司—东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金 (编号: 2022NRE-LH-16)。

作者简介: 胡小文 (1994—), 博士后, 主要从事沉积盆地和砂岩型铀矿研究, Email: xwhu@ecut.edu.cn。

*通信作者简介: 凌明星 (1981—), 教授, 主要从事关键矿产资源等研究, E-mail: mxling@ecut.edu.cn。

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

石榴子石、角闪石、黑云母 $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{Fe}$ 电子探针分析测试方法

袁浩洋¹, 李晓彦¹, 张超^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

铁是地球上含量最高的变价元素, 矿物中的 Fe 价态 (Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的比例) 及其赋存形式可以反映矿物形成环境和介质 (岩浆、变质和流体) 的氧化还原条件。尽管目前已经具备多种分析测试方法, 利用电子探针确定固体相中 Fe^{2+} 含量是最简便、高效的方法。它的基本原理是铁的 L 线系 (L_{α} 与 L_{β}) 的特征 X 射线呈现的谱图在峰位与信号强度上, 都因 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 含量的不同而有所差异。此外, 使用该方法的一个先决条件是利用较多的标准样品标定信号获取位置与计算方程。在本次研究中, 我们在配备有 TAPL 晶体的 JAX-iHP200 场发射电子探针上, 使用两种端元成分的合成石榴子石——富 Fe^{2+} 的铁铝榴石与富 Fe^{3+} 的钙铁榴石——去标定测试信号的“峰肩”位置。此外, 加上额外挑选的 5 个天然石榴子石样品, 用于作为标定测试未知石榴子石 Fe^{2+} 含量方法的标准样品 (Fe^{2+} 含量变化范围为

0%~32.20%)。结果显示, 石榴子石的 L_{β} 与 L_{α} “峰肩”位置信号强度比值 (L_{β}/L_{α}) 与 Fe^{2+} 含量 (%) 之间呈正相关关系, 可以利用简单相关方程表述为: $L_{\beta}/L_{\alpha} = a + b \times \text{Fe}^{2+} (\%)$, 其中 a, b 分别为从简单线性回归计算得到的回归方程截距与系数。同样地, 本次研究还测试了 9 组角闪石 (Fe^{2+} 含量变化范围为 1.47%~8.35%) 与 9 组黑云母 (Fe^{2+} 含量变化范围为 2.73%~18.01%) 样品, 均得到了较好的回归结果。结果表明, 利用回归方程再计算的标样 Fe^{2+} 含量与湿化学法所测结果偏差均在 $\pm 1\%$ 以内, $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的偏差均在 ± 0.1 之内; 因此, 本项研究所用的石榴子石、角闪石与黑云母样品能够作为电子探针测试 $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的标准样品, 并且覆盖了较广的 FeO_T 含量变化范围。

关键词: 电子探针, 铁价态, 石榴子石

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372069)

第一作者简介: 袁浩洋 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学. Email: yuanhaoyang220@outlook.com

*通信作者简介: 张超 (1982-), 教授, 研究方向: 岩石学 (岩浆作用, 实验岩石学). Email: zhangchao@nwnu.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

纳米尺度下黄铁矿外延生长过程中微量元素非均匀掺入机制研究

王燕燕¹, 龙涛^{1*}

1. 中国地质科学院地质研究所 北京离子探针中心, 北京市西城区百万庄大街 26 号 100037

矿物结晶是各种地质作用的基础, 涉及复杂的界面相互作用和元素富集过程。热液矿床通常经历多期次的流体活动, 形成的矿物往往具有复杂的结构和成分。黄铁矿作为热液系统中最常见的硫化物之一, 广泛用于研究热液流体的性质与演化过程。在卡林型金矿床中砷黄铁矿是金的主要载体, 但其微量元素掺入机制及成矿过程仍不明确。本研究通过原子探针断层扫描 (APT) 和扫描透射电子显微镜 (STEM) 等先进技术, 研究了上芒岗卡林型金矿床中未改造的砷黄铁矿幕式外延生长过程中微量元素在纳米尺度的三维分布, 并探讨其富集机制。

该矿床黄铁矿发育出明显的核-幔-边结构, 微量元素如 As、Au、Cu、Sb、Pb、Hg 等集中分布于环带中。根据 APT 分析结果, 砷黄铁矿在结晶过程中微量元素分布可分为: 均匀环带状分布的类质同象元素 (如 As、Cu 和 Au)、局部团聚的非结构混入物 (如 Pb、Sb、Hg 和 Tl), 以及不均匀板状分布 (如 As 和

Cu)。微量元素分布从均相到非均相的转变表明, 在外延生长过程中晶格缺陷的产生呈现出相互耦合的“链式反应”, 并引发黄铁矿生长方式从层状生长到岛状生长再到层状生长的转变。即类质同象元素 (As、Au 和 Cu) 引起的晶格畸变促进“非结构”混入物 (Sb、Pb、Hg 和 Tl) 在晶体缺陷中局部聚集, 而随界面流体中的微量元素快速消耗, 元素的掺入逐渐平缓, 晶格失配程度也随之降低, 流体中少量 As 和 Cu 以类质同象进入新的外延层, 黄铁矿生长方式逐渐回归层状生长。

该研究通过宏观到微观、微米到纳米尺度的系统成分和结构表征, 探讨了黄铁矿在多期次流体活动过程中结晶和微量元素富集的复杂关系, 为热液矿床成因研究提供了新的视角和思路。

关键词: 黄铁矿; 原子探针; 卡林型金矿床; 微量元素掺入

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFF0704901、2021YFC2903003) 和自然科学基金 (42241158)

第一作者简介: 王燕燕 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学、地球化学. Email: 1448386876@qq.com

通讯作者简介: 龙涛 (1984-), 研究员, 研究方向: 二次离子质谱及应用 Email: longtao@shrimp.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

飞秒与纳秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱副矿物 U-Pb 年代学分析对比研究

赵严^{1*}

1. 东华理工大学 铀资源探采与核遥感全国重点实验室, 南昌 330013

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析(LA-ICP-MS)具有前处理简单、分析速度快和微区原位分析的特点,已成为副矿物微区 U-Pb 年代学研究的主要技术手段。LA-ICP-MS 常规装配的激光器为纳秒准分子激光器,本世纪以来,随着激光技术的进步,飞秒激光剥蚀器得到发展,并已在国内数个实验平台装配。与纳秒激光相比,飞秒激光具有脉冲时间更短和脉冲峰值强度更高的特点,能避免或减弱激光剥蚀的热效应和冲击波,产生颗粒细小、粒度分布均匀的样品气溶胶。理论上,飞秒激光能够减弱传统纳秒激光剥蚀过程中由热效应导致的元素分馏,抑制基体效应,进一步提高副矿物 U-Pb 定年的精度和准确度,但目前仍缺乏实际样品对比测试的研究。

本研究对国际锆石标样 91500 和 Plešovice 开展飞秒与纳秒激光剥蚀的对比研究,探究二者在副矿物 U-Pb 年代学分析中的优劣势。实验工作在东华理工大学铀资源探采与核遥感全国重点实验室开展,纳秒激光剥蚀装置为 ESI NWR 193 nm 准分子激光,飞秒激光剥蚀装置为 ESL NWR FEMTO 257 nm 飞秒激光,测试时二者分别单独与 PerkinElmer NexION 1000 四极杆质谱连接。测试过程保持外部测试条件一致,包括激光频率(5 Hz)、束斑大小(30 μm)、背景与剥蚀时间、载气流速和质谱分析条件等。实验分别利用飞秒激光和纳秒激光测试 24 组 91500 锆石和 12 组 Plešovice 锆石的点位,测试结果利用 Iolite4 软件进行时间漂移、剥蚀深度和年龄校正,并通过 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值反映不同元素间的分馏。

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值数据显示,飞秒激光和纳秒激光

下未经校正的 91500 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值偏差(与标样推荐值)分别为-30.58%和-18.08%,未经校正的 Plešovice 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值偏差分别为-30.47%和-18.23%;飞秒激光和纳秒激光下经剥蚀深度校正的 91500 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值偏差分别为-16.95%和-11.73%,经剥蚀深度校正的 Plešovice 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值偏差分别为-17.17%和-12.17%。上述结果表明,与纳秒激光相比,飞秒激光产生了更大的元素分馏。而且,飞秒激光测试的同位素比值数据误差均大于纳秒激光。

以 91500 锆石为年龄校正外标,对飞秒和纳秒激光条件下测试的 Plešovice 锆石数据进行校正处理。飞秒和纳秒激光测得的年龄协和度均较高,二者测得 Plešovice 锆石的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $336.6 \pm 2.9 \text{ Ma}$ (MSWD=0.37) 和 $337.5 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (MSWD=1.2),两年龄在误差范围内一致,均在 Plešovice 锆石的年龄推荐值误差范围。但值得注意的是,与纳秒激光相比,飞秒激光的测试的同位素比值与年龄均显示较大的误差。

综上所述,尽管理论上飞秒激光能够减弱元素的分馏,得到更好的年龄结果,但实际测试结果则相反,飞秒激光与纳秒激光相比,具有更大元素分馏和数据误差。本研究以锆石为例,对比了飞秒与纳秒激光剥蚀电感耦合等离子体质谱副矿物 U-Pb 年代学结果,证实纳秒激光 U-Pb 年代学分析结果可能优于飞秒激光,但产生这一结果的机制还有待进一步研究。

关键词: 飞秒激光; 纳秒激光; U-Pb 年代学; 锆石

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

赤铁矿 (U-Th) /He 定年在矿床中的应用- 以德兴斑岩铜矿为例

张红^{1*}

1. 西北大学, 西安 710069

赤铁矿广泛分布于斑岩矿床中, 具有较低的封闭温度 (65~200 °C), 并含有一定量的 U 和 Th, 可用于开展 (U-Th) /He 定年。在记录矿床冷却历史温度变化方面发挥着关键作用, 结合磷灰石和锆石 (U-Th) /He 定年可为矿床的最新热演化路径的提供有利证据。基于优化的分析方案, 我们建立了一种新的赤铁矿 (U-Th) /He 热年代学方法, 揭示了中国东部德兴斑岩铜矿床最新的隆起和冷却历史演变。我们从德兴铜矿的铜厂矿和富家坞矿采集了两份赤铁矿样品, 其年龄分布分别为 92~11.2 Ma 和 112~24 Ma, 并基于

88~199 μm 的赤铁矿颗粒大小, 计算出 180~215 °C 的封闭温度。结合已发表的锆石和磷灰石 (U-Th) /He 热年代学数据, 本研究提出德兴斑岩铜矿可能经历了一个长期的温度降低热历史。最初的发生剥蚀和隆起时间约为 112 Ma, 随后从 11.2~8.0 Ma 发生了快速隆起。本研究还表明, 赤铁矿 (U-Th) /He 定年可以有效应用于揭示斑岩铜矿床的隆起和保存历史。

关键词: 赤铁矿 (U-Th) /He 定年, 低温热年代学, 德兴斑岩铜矿, 抬升剥露历史

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

长江中下游成矿带荷花山铅锌矿床成因探究: 来自闪锌矿原位成分制约

刘光贤^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

长江中下游成矿带铜陵矿集区是我国东部重要的 Cu-S-Au-Pb-Zn 矿集区, 区内主要矿床类型为斑岩型、矽卡岩型以及一些存在成因争议的矿床, 如新桥、冬瓜山矿床, 矿床中的层状矿体被认为是同生沉积或岩浆热液成因。荷花山铅锌矿床该矿集区内近年来新发现的一例大型铅锌矿床, 铅锌金属量 140 万 t, 并伴生 Cd (639 t)、Ga (161 t), 铅锌矿体呈似层状赋存于中-下三叠系碳酸盐岩地层中, 矿体走向与地层走向接近一致, 矿床中存在两期成矿作用。早期主要为脉状和角砾状矿石 (方解石为主要胶结物), 晚期主要是角砾状 (含黑色基质) 和脉状矿石。两期成矿作用有多种类型闪锌矿: (1) 细粒结晶闪锌矿; (2) 不规则状闪锌矿; (3) 鲕粒状闪锌矿; (4) 环带结构闪锌矿; (5) 粗粒结构闪锌矿。为探究闪锌矿中关键金属 Cd、

Ga、Ge、Tl、In 富集特点及矿床成因, 我们对荷花山铅锌矿床中不同类型闪锌矿开展了 LA-ICP-MS 微量元素和硫同位素分析, 明确了荷花山矿床中不同类型闪锌矿所含关键金属含量不同, 其中 Cd 主要集中在早期闪锌矿中, 而 Ge、Ga、Tl 主要集中在晚期形成的闪锌矿中。同时通过与典型 MVT 和矽卡岩型铅锌矿床的闪锌矿微量元素对比发现, 荷花山早期闪锌矿表现出与矽卡岩型矿床相似的特征, 而晚期闪锌矿与 MVT 铅锌矿床表现出相似的特征, 表明荷花山铅锌矿床成矿过程中早期受到岩浆热液活动的影响, 晚期主要受到非岩浆流体 (如盆地卤水)。

关键词: 铅锌矿床; 闪锌矿; 微量元素; LA-ICP-MS

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

福建尤溪龙门场银金多金属矿床 Re-Os 定年和金属硫化物 S 同位素研究

陈天楚^{1*}

1. 东华理工大学 资源与环境高等研究院, 南昌 330013

硫化物广泛存在于各类金属矿床中, 是 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等金属的重要载体。因此, 硫化物的 S 同位素组成、元素比值等地球化学指标, 能够有效区分矿化活动的期次, 帮助分析成矿物质的来源, 并深入探讨成矿作用的机理。

福建尤溪龙门场银金多金属矿床位于武夷山成矿带东南缘, 矿区内包含多个矿体, 且各矿体受地层、断裂和构造蚀变带等多重因素的控制。由于地质构造复杂且多变, 矿床的研究尚不深入, 缺乏明确的成矿时代及成矿物质来源的相关数据。该矿床的原生矿主要赋存于碳酸岩中, 金银矿物主要包括自然金、碲金银矿、辉银矿、脆银矿和碲银矿等, 并且大多与金属

硫化物紧密共生。

辉钼矿样品 Re-Os 同位素定年得到加权平均年龄为 (167.5 ± 3.0) Ma (2σ , MSWD=3.8), 表明龙门场银金多金属矿床形成于中侏罗世。通过 LA-MC-ICP-MS 微区原位 S 同位素分析, 黄铜矿、黄铁矿和毒砂等金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为: 黄铜矿 0.54‰~1.15‰, 黄铁矿 0.61‰~0.90‰, 毒砂 0.19‰~1.16‰。结果表明, 龙门场银金多金属矿床的硫来源可能来自深部岩浆或上地幔, 成矿物质可能与燕山早期的岩浆活动有关。

关键词: 银金多金属矿床, 金属硫化物, Re-Os 定年, S 同位素, 岩浆活动

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42173024)

第一作者简介: 陈天楚 (1994), 博士后, 研究方向: 地质资源与地质工程. Email: chentianchu@ecut.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

飞行时间二次离子质谱分析技术及其 对矿床学样品的分析研究

李展平^{1*}, 王梦琴², 徐子琪³

1. 清华大学, 北京市 100084;

2. 中国地质大学(北京), 北京市 100083;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京市 100029

本研究以用 TOF-SIMS 对载金黄铁矿和岩石中广泛存在的磷灰石的表征为例, 探究 TOF-SIMS 在矿床学样品领域的应用。针对水银洞金矿和胶东金矿的样品, 用 TOF-SIMS 分析了 As、Fe、Cr 等微量元素空间分布, 以及它们与环带结构的关系。TOF-SIMS 还揭示了 Au 的富集区空间分布。用 TOF-SIMS 对树脂包埋打磨抛光法制备的天然黄铁矿晶体表面层进行了原位分析, 探究树脂包埋打磨抛光法对矿床学样品表面及对 TOF-SIMS 测试的影响。结果表明, 黄铁矿树脂包埋抛光表面易氧化, 必要时分析测试应重新抛光后进行。本研究以 Durango Apatite 为检测样品, 探究 TOF-SIMS 定量分析磷灰石的微量元素和卤素元素的分析精密度和正确度, 以及影响分析精密度和

正确度的各种因素。并进一步探讨玻璃标准样品 NIST 610 作为定量分析其他基体(以磷灰石为例)中微量元素的标准样品的可行性。研究结果显示, TOF-SIMS 对磷灰石中微量元素(Sr、Mn、⁵⁴Fe)和卤素元素(F、Cl)定量的精密度可达 3.76% (RSD), 正确度可达 0.90%。在无法获取标准样品的情况下, 可以用 NIST 610 作为标准样品对磷灰石中的微量进行定量分析, 正确度误差范围在 1 倍以内。本研究证明, 飞行时间二次离子质谱可为矿床学样品的分析表征提供一种新途径。

关键词: TOF-SIMS, 矿床学, 成像分析, 定量分析

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0702600)

第一作者简介: 李展平(1964-), 高级工程师, 研究方向: 表面物理与表面分析技术. Email: zhanpingli@mail.tsinghua.edu.cn

*通信作者简介: 李展平(1964-), 高级工程师, 研究方向: 表面物理与表面分析技术. Email: zhanpingli@mail.tsinghua.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

激光微区 β 体系定年技术及其在矿床学中的应用

吴石头^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

近年来, 串级质谱技术的突破, 实现了微区 β 衰变体系定年, 包括 Rb-Sr、Lu-Hf、K-Ca 和 Re-Os 等体系, 极大地拓展了微区地质年代学的领域, 特别是突破了传统 U-Pb 体系的局限, 当前这一技术快速发展, 在矿床学研究中也得到了广泛应用。本文将详细介绍这一技术的工作原理和重要技术突破, 综述了其在矿床学中的应用实例, 主要包括以云母为代表的 Rb-Sr 定年体系在中低温矿床中的应用,

以磷酸盐矿物为代表的 Lu-Hf 定年体系在高温矿床中的应用, 深入分析了激光微区 β 衰变体系的优势及微区分析的重要性, 基于当前研究现状, 本文讨论了该技术面临的主要挑战, 并对其在矿床学领域应用进行了展望。

关键词: 激光微区 β 体系定年; 同位素地质年代学; 矿床定年;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42273034 和 42441818)

第一作者简介: 吴石头 (1987-), 高级工程师, 研究方向: 分析地球化学. Email: shitou.wu@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

单个二氧化碳包裹体碳氧同位素高精度原位定量分析方法

王文璟^{1,2,3}, 吕万军^{3*}, 王浩³

1. 北京大学 地空学院, 北京市 100091;

2. 北京大学鄂尔多斯能源研究院, 内蒙古鄂尔多斯 017004;

3. 中国地质大学(武汉)海洋学院, 湖北武汉 430074

二氧化碳作为最常见的地质流体之一, 广泛分布于多种地质环境中并在成矿过程中起到重要作用。多期成岩成矿过程中的二氧化碳流体被矿物捕获形成的流体包裹体, 准确记录了多阶段二氧化碳流体的各类关键地球化学信息(如古温度, 古压力/埋深, 同位素等)。其中二氧化碳的碳氧同位素作为可以有效辨识多期流体活动、指示成矿流体来源、示踪流体-岩石相互作用等方面的重要依据, 是流体活动-成矿规律研究中的高分辨率“化学探针”。本工作针对天然二氧化碳流体包裹体为分析对象, 基于激光拉曼光谱高精度定量手段, 成功创建了对于单个二氧化碳包裹体的无损原位碳氧同位素高精度定量计算方法与模型, 可以成功应用于广阔碳氧同位素范围[碳同位

素: -34.9‰ (V-PDB) $\sim 3.58\text{‰}$ (V-PDB); 氧同位素: -18.85‰ (V-PDB) $\sim -0.42\text{‰}$ (V-PDB)] 和密度范围 ($0.25 \sim 1.23 \text{ g/cm}^3$) 内多种地质环境和成矿系统的二氧化碳流体同位素定量分析。定量评估结果显示, 建立的定量计算模型对二氧化碳体系的碳同位素计算精度可以达到 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$, 对于氧同位素的计算精度可以达到 $2\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 。较前人的包裹体同位素分析方法而言, 本方法真正实现了对单个包裹体的无损同位素定量分析且可用于多成矿阶段二氧化碳流体的高精度同位素分析研究。

关键词: 二氧化碳; 流体包裹体; 碳氧同位素; 原位测量; 拉曼定量分析;

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目“西北太平洋俯冲带含碳流体形成、演化、活动及其资源环境效应”(92058208)

第一作者简介: 王文璟(1994-), 博士后, 研究方向: 地质流体高精度定量分析与同位素演化规律。Email: wenjingwang@pku.edu.cn

*通信作者简介: 吕万军(1972-), 教授, 研究方向: 地质流体热力学、流体包裹体地球化学、实验地球化学。Email: wjlu@cug.edu.cn

• 专题 32: 微区分析技术进展及其在矿床学研究中的应用 •

个旧矿区晚白垩世花岗岩锡差异性富集的控制因素

郭佳^{1*}, 陈盈金¹, 蒲荣镐¹

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都市 610059

个旧超大型锡多金属矿床是与花岗岩有关的岩浆-热液矿床。矿区内发育多个晚白垩世花岗岩体, 包括个旧断裂以西的龙岔河和神仙水岩体, 个旧断裂以东的白沙冲、马松和老卡岩体。然而, 已知的大型锡矿床均分布在个旧断裂东侧(东区)的花岗岩体附近, 断裂西侧(西区)的花岗岩体周边尚未发现大中型锡矿床, 偶见锡矿化点。尽管前人对这些花岗岩进行过不同程度的成因研究, 但是对东区、西区花岗岩的锡成矿能力以及成矿差异的研究仍然十分薄弱。据此, 本文对个旧地区不同花岗岩体的锆石进行了形态结构和 LA-ICPMS 微量元素以及 U-Pb 年代学研究, 探讨花岗岩中锡差异性富集的控制因素。

个旧矿区花岗岩中的锆石普遍发育清晰的振荡环带, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 86.7~77.6 Ma, 与前人获得区内花岗岩的结晶年龄基本一致。不同的是, 个旧东区花岗岩中部分锆石具有暗的/不清晰的边部, 暗示存在蜕晶作用(个别锆石已完全蜕晶化), 且具有明显偏年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(60~47 Ma)。在稀土元素球粒陨石标准化图中, 与西区(龙岔河)花岗岩相比, 东区花岗岩中的锆石具有明显的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.01\sim 0.22$)和相对弱的 Ce 正异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1.51\sim 60.0$)。利用锆石微量元素和全岩

地化数据, 获得西区 and 东区花岗岩中锆石的 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值分别为 28~411 和 4~162 (绝大多数 ≤ 99), 对应的平均氧逸度分别为 FMQ+0.5 和 FMQ-1。此外, 东区花岗岩的锆石具有较高的 Hf (1.04%~3.58%)、Li ($0.11\times 10^{-6}\sim 147\times 10^{-6}$)、Be ($0.09\times 10^{-6}\sim 124\times 10^{-6}$)、Sn ($0.10\times 10^{-6}\sim 33.8\times 10^{-6}$) 和 W ($0.02\times 10^{-6}\sim 86.5\times 10^{-6}$) 含量。元素的富集在蜕晶化锆石中尤为明显, 例如个别蜕晶化锆石的 Sn 含量可以达到 384×10^{-6} 。蜕晶锆石相对高的 Sn 含量可能记录了晚期熔体/流体富 Sn 的特征, 暗示蜕晶锆石高 Sn 含量可能是判别含锡花岗岩的一个重要指标。基于野外观察和锆石的成分特征, 本文认为西区龙岔河花岗岩整体具有较高的氧逸度和低的结晶分异程度, 而东区黑云母花岗岩则具有较低的氧逸度、高的演化特征, 并伴随强烈的热液蚀变作用(云英岩化、矽卡岩化等)。结合前人已发表的全岩主微量元素、Sr-Nd 和锆石 Hf-O 同位素组成, 我们认为源区组成、岩浆氧逸度、结晶分异过程, 是导致区内花岗岩中锡差异性富集的主要因素。

关键词: 锆石微区成分, 锡差异性富集, 花岗岩, 个旧锡矿

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

改性磷尾矿吸附除磷材料的制备与性能研究

韦红卫¹, 苏艺怀², 汪诚文^{1*}

1. 清华大学 环境学院, 北京市 100083;

2. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都市 610000

摘要: 随着磷矿开采量的增大, 磷矿固废的库存量逐年增加, 磷尾矿的减量化与高值化利用备受关注。磷尾矿因含有钙镁元素而在水体中表现出吸附除磷特性, 但目前磷尾矿作为除磷吸附剂的效率不高, 难以实现高值化利用。本研究以磷尾矿粉末为主要原料, 采用酸法处理制备改性磷尾矿吸附除磷材料, 提升磷尾矿在污水除磷中的吸附效率。研究显示, 改性磷尾矿吸附除磷材料的吸附效率高, 且磷尾矿与混合添加剂的最佳配比为 2:8。吸附性能受环境 pH 变化影响较为明显, 通过实验发现

原始磷尾矿中磷主要以物理吸附为主, 吸附稳定性差, 容易发生二次溶解。为提高酸法改性后吸附材料的稳定性, 制备过程中添加凹凸棒土与镁铝水滑石, 两种材料具有多层网状结构, 能有效的固定金属离子使其与穿过孔洞的阴离子结合, 通过解吸附实验测得改性磷尾矿吸附除磷材料的稳定性明显提高。

关键词: 改性磷尾矿吸附材料; 酸改性; 污水除磷; 稳定性

通讯作者:

汪诚文 (wangcw@tsinghua.edu.cn), 男, 博士, 教授。

郭永杰 (444565847@qq.com), 男, 博士, 高级工程师。

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

热液驱动铁的还原矿化与有机碳封存的机制研究

朱雁平^{1*}

1. 华南农业大学, 广州 510642

热液驱动铁的还原矿化与有机碳封存的机制研究全球气候变化加剧背景下, 土壤有机碳长效稳定封存是实现碳中和目标的关键挑战。含铁矿物作为土壤的主要组成物质可以与有机碳结合, 形成矿物结合态有机碳, 实现有机碳的长效封存。热液系统作为地球深部铁-碳循环的重要载体, 其高温高压环境为铁-碳协同作用提供了独特的研究窗口。含铁矿物在热液活动驱动下会发生氧化还原和迁移转化, 而在浅层地表区域生物质会在不同阶段参与铁的转化过程。目前, 关于热液过程中生物质参与铁的转化途径以及铁转化过程对有机碳封存的影响尚不清晰。本研究通过模拟热液过程, 揭示了热液驱动铁的还原矿化与有机碳封存的过程和机制: Fe^{3+} 首先水解生成水铁矿⁻。在生

物质存在的条件下, 生物质碳的中间产物草酸会诱导水铁矿溶解, 并重新结晶形成草酸铁。随后, 生物质碳的还原性中间产物直接提供电子还原草酸铁为草酸铁矿⁻ (还原率 100%); 铁形态演化遵循 “ $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{水铁矿} \rightarrow \text{草酸铁络合物} \rightarrow \text{草酸铁矿}$ ” 的还原矿化路径。与此同时, 生物质碳一部分与铁络合, 存在于强化学键和的草酸铁矿中, 另一部分则稳定在具有石墨烯化结构的水热碳中, 形成兼具 “化学键合 (Fe-C 配位结晶) + 芳构化 (石墨烯化 HTC)” 的双效稳定化有机碳结构, 实现了有机碳更长效稳定的封存。

关键词: 热液; 还原矿化; 有机碳封存; 草酸铁矿⁻; 水热碳

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42207069)

第一作者简介: 程六龙 (1995-), 博士, 研究方向: 铁碳耦合机制研究. Email: chengl13@126.com

*通讯作者简介: 朱雁平 (1991-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学. Email: zhuyanping@scau.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

辐照产电电气石的高压水热性能优化

郭铭¹, 董发勤^{1*}, 张伟², 张云翼¹, 曹一凡³, 李嘉琳³

1. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川省绵阳市 621000;

2. 西南科技大学 分析测试中心, 四川省绵阳市 621000;

3. 西南科技大学 材料与化学学院, 四川省绵阳市 621000

电气石属三方晶系环状硅酸盐矿物, 化学式 $XY_3Z_6[T_6O_{18}][BO_3]_3V_3W$, 以复杂类质同象替代和独特热释电/压电特性著称, 本课题组研究发现电气石在伽马射线的辐照下有定向粒子流产生, 证明电气石具有成为新型核电换能材料的潜力。尽管天然电气石分布广泛, 但其辐射产电性能受产地、矿床类型影响显著, 晶体缺陷及元素占位无序导致应用受限, 而通过人工合成可精准调控电气石成分结构, 突破天然矿物局限, 为揭示元素-性能构效关系及定向设计功能

材料提供新途径。

本研究以构建高性能电气石为目标, 通过高温高压水热合成技术优化电气石结构, 从而进一步优化其性能。实验表明, 合成产物结构相较天然电气石更趋近理想构型, 性能增强。尽管水热生长仍存在微量元素替代, 但高纯度、大晶粒及结构优势证实人工调控可突破天然矿物性能瓶颈, 为产电材料开发提供理论及技术支撑。

关键词: 电气石, 辐照产电, 水热合成

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51974261)

第一作者简介: 郭铭 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学. Email: 806897163@qq.com

*通信作者简介: 董发勤 (1963-), 教授/博导, 研究方向: 应用矿物学. Email: fqdong@swust.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

碳中和背景下粘土矿物调控水合物法封存 二氧化碳的作用机制研究

李赞^{1*}, 陈锰²

1. 南方科技大学, 深圳市 518055;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州市 510640

水合物法封存二氧化碳作为一种极具潜力的碳封存技术, 是指将二氧化碳注入具备水合物形成条件(低温、高压)的地层中形成二氧化碳水合物。这种封存方式的最大优点在于其高储气密度, 以及能够实现二氧化碳的长期稳定封存。特别是在海洋沉积物或冻土层中, 由于其低温高压环境有利于二氧化碳水合物的形成和稳定封存。二氧化碳水合物在沉积层中的形成不仅受到温度和压力的影响, 还受到矿物组成的显著调控。粘(黏)土矿物是沉积物中的主要矿物组成之一, 其微小的粒径、较大的比表面积以及丰富的表面基团, 使得粘土矿物可能对二氧化碳水合物的成核和生长过程产生重要影响。因此, 研究粘土矿物对二氧化碳水合物形成的影响, 对于优化水合物法封存二氧化碳的效率和稳定性具有重要意义。本研究选取了几种典型的粘土矿物, 包括蒙脱石、伊利石、高岭石、滑石和绿泥石, 系统探讨了粘土矿物对二氧化碳水合物形成的影响机制。研究表明, 不同类型的粘土矿物对二氧化碳、水的分布特征及水合物成核行为存在显著差异。蒙脱石和伊利石的表面通常被阳离子占据, 这导致二氧化碳主要分布在远离其表面的体相区域成核。高岭石的羟基表面形成了一层稳定的水化层, 阻碍了二氧化碳的直接接触; 二氧化碳水合物成核发生在远离羟基表面的体相区域。相比之下, 高岭

石/滑石的硅氧烷表面能够吸附较多的二氧化碳分子, 并且二氧化碳在其表面聚集形成纳米液滴, 未观察到二氧化碳水合物的成核。说明在高岭石/滑石的硅氧烷表面, 二氧化碳虽然能够富集, 但由于缺乏足够的水分子以达到适合的成核条件, 无法有效形成水合物。表明矿物表面对二氧化碳的吸附特性并不一定直接促进水合物的成核, 水合物的形成仍然依赖于具体的表面结构及其对气体和水分子分布的调控能力。此外, 二氧化碳水合物可以在绿泥石硅氧烷表面稳定形成, 这主要归因于绿泥石的硅氧烷层具有一定的荷电性, 能够有效吸附二氧化碳与水分子在其表面形成水合物。因此, 与高岭石/滑石的硅氧烷表面相比, 绿泥石的硅氧烷表面上二氧化碳水合物的成核特征表现出明显的差异。表明硅氧烷表面的荷电特性可能是影响二氧化碳水合物形成的重要因素之一。上述研究结果揭示了粘土矿物的结构和表面性质在水合物法封存二氧化碳过程中的重要作用。不同类型的粘土矿物能够显著影响二氧化碳的吸附行为和水合物的形成特征。这些发现不仅深化了对粘土矿物调控二氧化碳水合物形成的认识, 也为未来优化水合物法封存二氧化碳的技术提供了重要参考。

关键词: 粘(黏)土矿物, 二氧化碳, 分子动力学模拟, 成核

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

碱溶-地聚反应法低碳处理花岗岩风化土类工程渣土的矿物界面反应机制

张佰发¹, 袁鹏^{1*}, 玉婷¹

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东省广州市番禺区大学城小谷围街道 100 号 410006

花岗岩风化土广泛分布在我国华南地区, 由花岗岩经强烈风化而形成, 富含大量的粘(黏)土矿物(如高岭石、伊利石等)、长石和石英等矿物。随着该地区的建设发展, 基坑的开挖形成了大量工程渣土, 将其直接堆填会侵占大量土地资源并造成环境危害。考虑到在碱作用下, 粘土矿物能够发生解聚-缩聚的地聚反应, 形成绿色低碳胶凝材料的特点, 通过碱溶液处理废弃花岗岩风化土型渣土具有十分可观的环境效益。而其中大量涉及高岭石等粘土矿物的物相转变和固液相界面反应问题, 值得从矿物界面反应的角度进行深入研究。

利用碱溶液作为固化剂, 协同纤维对工程渣土进行改良。研究表明, 在少量碱的作用下, 花岗岩风化土中的矿物, 尤其是部分高岭石等粘土矿物能够发生地聚反应, 矿物经历溶解-重排-缩聚, 最终形成了少量地聚物(水合硅铝酸钠)凝胶, 粘结矿物颗粒, 并填充矿物颗粒孔隙之间, 降低土体的孔隙率, 从而提高静态力学性能。而纤维的添加能够加强土体中矿物颗粒的连接, 高岭石等矿物与玻璃纤维协同作用, 显著提高了改良土的动力学性能。在该体系中加入少量(2%)的水泥后, 改良土的力学性能得到进一步提升; 这是由于高岭石等高活性矿物为水泥提供了重要的铝源, 水泥水化后形成强

度更高的水合硅铝酸钙凝胶, 并与地聚物发生耦合作用, 形成更致密的结构。

利用碱溶液作为激发剂, 通过地聚反应可以将工程渣土转变为性能优异的地聚物。在合适热处理(850 °C)下, 高岭石转化为偏高岭石, 具有很高反应性。在碱溶液的作用下, 偏高岭石能够充分的溶解, 部分伊利石也参与反应, 形成大量的铝硅单体, 进而聚合成凝胶, 石英和长石作为填充颗粒, 所制备地聚物抗压强度能达到 58 MPa; 可溶性硅的含量和碱浓度影响着矿物的溶解速率与溶解量, 进而制约地聚物的微结构和性能发展。值得注意的是, 在相似性能条件下, 渣土地聚物碳排放和酸排放量分别低于水泥的 22%和 15%; 其使用不但可以消纳大宗的渣土, 还能获得低碳材料。

上述研究结果表明, 碱溶-地聚反应处置花岗岩风化土类渣土涉及复杂的矿物界面反应和相变过程, 尤其是其中富含铝硅成分、反应性较高的高岭石, 是制约此类渣土反应性的关键。此外, 无论是改良土壤, 还是制备胶凝材料, 通过碱溶-地聚反应法处理渣土的环境足迹低, 可望成为废弃花岗岩风化土的资源化利用的绿色途径。

关键词: 高岭石, 工程渣土, 碱溶, 地聚反应

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972045; 42302032), 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515012180)

第一作者简介: 张佰发(1989-), 副教授, 研究方向: 应用矿物学、环境矿物学与矿物资源利用. Email: zhangbaifa@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 袁鹏(1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

中国南方不同气候条件下玄武岩风化过程中 微量元素的迁移特征

张爱^{1*}, 方谦¹, 洪汉烈¹, 王家伟¹, 黑贺堂¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

摘要: 为了更好地了解中国南方不同气候条件下玄武岩风化过程中微量元素的迁移富集规律, 对热带地区海南南阳和亚热带地区云南大理两条原位玄武岩风化剖面开展了微量元素的地球化学分析, 结果表明, (1) Zr、Hf、Ta、Th 元素在两条剖面中均具有较稳定的特征, 碱和碱土金属元素 Rb、Sr、Ba、Cs 在热带海南剖面中均亏损严重, 而在亚热带云南剖面中富集。(2) 两剖面重金属元素 Cr、Ni、Cu、Zn 均淋失, 表现出淋溶迁移和再富集的特征, 与次生铁氧化物的吸附有关。(3) 海南剖面稀土元素发生三次富集, 云南剖面发生两次富集, δCe 在海南剖面淋溶层上部和下部分别有两个相对富集的峰, 表明了风化剖面经历了两次氧化环境, 与氧化还原环境和有机胶体的吸附、淋滤迁移有关。 δCe 在云南剖面的上部呈现出正异常, 而在淋滤层-半风化层界面处出现负异常, 原因是其它

REE 在剖面表层淋滤在剖面中部沉淀。 δEu 在海南剖面几乎均为负异常, 是因为斜长石溶解严重导致; δEu 在云南剖面上部几乎均为负异常, 原因为上部风化较强, 斜长石溶解较严重, 而半风化层为正异常富集, 原因为此处风化较弱, 斜长石尚未风化。两剖面微量元素的迁移情况既有相同之处, 又有不同, 主要是因为海南位于热带气候, 风化程度较云南强, 此外还与原生矿物风化性质、土壤环境 (pH 值等)、次生矿物吸附作用、有机质络合作用和次生矿物淋滤淀积作用等有关。玄武岩风化过程中的矿物演化和微量元素迁移的研究有助于更好理解地表岩石圈、土壤圈的演化、岩石风化的环境以及气候条件等问题。

关键词: 玄武岩; 风化作用; 微量元素; 稀土元素; 重金属

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

稀土离子修饰对硅藻壳体二氧化硅电化学性能影响机制研究

孙世贸¹, 刘红昌^{1,2*}, 刘宏伟^{1,2}, 刘灿¹, 付宇航¹, 王军^{1,2}

1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 生物冶金教育部重点实验室, 长沙 410083

随着碳排放引起的环境气候变化成为焦点, 全球各行各业都在向可持续能源解决方案转型。锂离子电池凭借其多功能性、高效性以及与绿色能源倡议的一致性, 已成为实现碳中和目标的关键。传统的锂离子电池石墨负极由于较低的理论比容量 ($372 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$) 很难满足当下能源市场需求, 寻找新的替代负极材料成为研究热点, 其中 SiO_2 由于其较高的理论比容量 ($1965 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)、丰富的资源储量和低廉的成本被视作下一代负极材料的理想候选者。但 SiO_2 的低导电性以及一定的体积膨胀限制了其大规模应用。在众多的 SiO_2 负极材料来源中, 硅藻生物 SiO_2 由于其天然的中空多孔结构使其具有传统无机二氧化硅材料无法相比的结构优势, 天然的三维多孔和中空结构, 可以为锂离子传输提供快速通道, 并容纳体积膨胀。硅藻细胞的生物质经碳化可形成碳包覆层, 提升导电性的同时作为弹性基体抑制体积膨胀。将硅藻壳体与导电相复合已被证明是提高其电化学性能的有效方法, 稀土元素因其独特的理化性质在储能领域具有广泛应用, 然而大多数研究集中在稀土元素对锂离子电池正极材料的掺杂改性上, 鲜有研究探索稀土元素在负极材料中的作用机制。因此, 本研究选用典型底栖硅藻舟形藻 (*Navicula* sp.) 为原料, 通过调控硅藻生长过程中添加的稀土离子 (La^{3+} 和 Y^{3+}) 的浓度, 利用硅藻自身独特的生物矿化作用, 实现稀土纳米颗粒在硅藻壳体内外原位自组装, 并通过多种光谱学以及显微学技术表征稀土纳米颗粒在硅藻壳体上的赋存状态和硅藻壳体负极材料循环前后的结构变化, 阐明稀土离子对于硅

藻生长及硅藻壳体结构的影响和稀土元素修饰条件下硅藻壳体物相组成、结构及电化学性能之间的构效关系及其作用机制。并通过密度泛函理论计算揭示 La 和 Y 掺杂对 SiO_2 负极电化学性能的提升机制。结果表明, La^{3+} 和 Y^{3+} 通过硅藻的生物矿化机制在硅藻壳体上自组装形成氧化物纳米颗粒。经过高温碳化还原, La_2O_3 和 Y_2O_3 纳米颗粒还原结晶形成 La 和 Y 纳米颗粒, La 能够扩大晶格间距, 而 Y 能够稳定晶体结构, 减弱极化现象。La 和 Y 纳米颗粒负载的硅藻生物 SiO_2 负极材料具有较高的循环稳定性、高比容量和稳定的固体电解质界面层。其中在 10 mg/L 的 La^{3+} 添加条件下的硅藻壳体负极 (DBS@C-La-10) 在 $100 \text{ mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下循环 220 次后的放电比容量约为 $1021.3 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 在 $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的大电流密度循环 1000 次后仍具有约 $814.6 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 的放电比容量。以 LiFePO_4 为正极组装的全电池在 120 次循环后的放电比容量约为 $756.7 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, La 和 Y 掺杂的硅藻壳体负极材料电化学性能显著优于未经修饰的硅藻壳体负极。DFT 计算结果表明, La 和 Y 的掺杂改变了 SiO_2 费米能级附近的能带结构, 降低带隙, 提高了 SiO_2 的载流密度, 从而实现 SiO_2 负极的电化学性能提升。这种绿色低碳的合成方法提供了一种适用于制备各种硅藻和稀土元素纳米复合材料的简单方法, 为稀土元素在储能系统中的应用提供新的策略。

关键词: 稀土元素; 生物矿化; 硅藻; 二氧化硅; 锂离子电池

基金项目: 国家重点研发计划项目 (批准号: No. 2022YFC2105300)

第一作者简介: 孙世贸 (2000—), 硕士研究生, 研究方向: 微生物学. E-mail: sunshimao@csu.edu.cn

通讯作者简介: 刘红昌 (1989—), 副教授, 研究方向: 资源与环境生物技术. E-mail: hchliu2050@csu.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

玛雅蓝颜料中矿物-染料界面作用机制及其应用

庄官政^{1*}, 袁鹏¹, 李莉¹, 刘芊¹, 范吉星¹

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006

玛雅蓝是一种具有重要文化意义的蓝绿色颜料, 在古代玛雅文明中占据重要地位。这种颜料以其优异的耐久性著称, 现代科学研究证实它是由黏土矿物坡缕石与天然染料靛蓝构成的纳米复合材料。然而, 其形成和稳定机制尚未被完全揭示, 这不仅限制了对玛雅文明科技的理解, 也阻碍了现代高性能矿物颜料的开发。为此, 本研究系统考察了(类)玛雅蓝颜料的合成机理、光学特性和稳定性, 并探索其在现代矿物颜料设计中的应用潜力。首先, 通过控制热处理条件, 研究了坡缕石结构中配位水和纳米通道对玛雅蓝颜色及稳定性的关键作用。结果表明, 配位水和纳米通道结构对维持其光学性质至关重要。为进一步阐明坡缕石与靛蓝的界面作用, 我们研究了不同热处理条件(100~500 °C, 1~72 h)下合成的玛雅蓝颜料的光学、热学和化学特性。实验发现, 在加热时靛蓝分子向坡缕石的纳米通道扩散并被限制在其中, 这种纳米限域效应显著提升了颜料的稳定性。研究还表明, 玛雅蓝的蓝

绿色特征源于靛蓝从低聚物向单体的转变。此外, 基于颜色饱和度和色差评价发现, 玛雅蓝的优化制备条件为 150~200 °C 加热不超过 8 h。与其他黏土矿物(如海泡石)相比, 坡缕石的纳米孔道结构在限域靛蓝分子方面表现出独特优势。虽然具有较大孔道的海泡石基玛雅蓝颜料具有更好的光稳定性, 但其化学稳定性较差。这是由于海泡石的通道尺寸更大, 有利于靛蓝分子的扩散, 但也难以有效阻隔化学物质的破坏。此外, 我们还发现真空条件下的热处理更有利于提升颜料的色彩饱和度和稳定性。基于上述研究, 我们筛选了适宜的有机染料与黏土矿物组合, 构建了多种玛雅蓝类颜料, 揭示了其中的矿物-染料界面作用机制。这些成果为理解古玛雅蓝的合成提供了新的认识, 也为开发基于黏土矿物的有机-无机纳米复合材料提供了理论依据。

关键词: 坡缕石, 海泡石, 有机染料, 颜料, 表界面反应

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

双碳战略目标下非金属矿物材料的创新发展

廖天棋¹, 余梦涵¹, 杨华明^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430074

二氧化碳的捕集、利用和封存(CCUS)是应对全球气候变化的关键技术之一,是实现碳中和的托底技术,预计2050年CCUS将抵消当前全球碳排放量的10%~20%。本文总结了国内外CCUS工业应用发展。如对于水泥行业每年排放约41亿t CO₂,但仍须解决核心煅烧反应产生的CO₂,要减少这部分二氧化碳排放,CCUS是水泥行业脱碳的必要技术手段。通过比较化学吸收法、吸附分离法、膜分离法、低温分离法等二氧化碳捕获技术,显示出不同的发展潜力。

基于成本与实际工厂情况,围绕非金属矿物与固废的优势,开发适用于多种应用场景的不同二氧化碳捕获技术,实现捕集CO₂与调控制备实际价值产物的结合,不但实现绿色发展节能减排,还可产生显著的经济效益。研究展示了基于非金属矿物材料特性的新型建筑材料多功能化设计以及应用前景。

关键词: 双碳战略; 非金属矿物材料; 矿物固碳; CCUS; 多功能设计

第一作者简介: 廖天棋(1997-), 博士生, 研究方向: 环境矿物材料. Email: liaotianqi@cug.edu.cn

*通信作者简介: 杨华明(1968-), 教授, 研究方向: 矿物功能材料. Email: hm.yang@cug.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

黄龙高寒岩溶土壤微生物群落结构及功能特征研究

邓沁晴¹, 夏热克亚木·伊提尼牙孜¹, 董发勤^{2,3*}

1. 西南科技大学 生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010;

2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川绵阳 621010;

3. 西南科技大学 固体废物处理与资源化重点实验室, 四川绵阳 621010

高寒岩溶是四川黄龙风景区独特的地质特征。为分析高寒岩溶区土壤微生物群落组成特征与土壤理化性质间的相关性, 以黄龙风景区土壤为研究对象, 对土壤细菌的 16S rRNA 基因序列和真菌 ITS 序列进行高通量测序, 同时通过碳源利用特征和土壤基础呼吸特征来探明微生物群落对钙华沉积区的功能响应。结果表明: 不同岩溶区的土壤细菌多样性和丰富度具有显著差异, 但土壤真菌差异不显著, 且土壤细菌群落占主导地位; 细菌群落以变形菌门(*Proteobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)为主; 真菌群落以子囊菌门(*Ascomycota*)、担子菌门(*Basidiomycota*)为主, 真菌在门和属水平的差异较大。冗余分析发现总磷

(Total Product, TP) 和温度是黄龙风景区土壤微生物群落结构变化的重要环境因子, pH 是第二重要的环境因子。黄龙沟不同海拔土层的土壤呼吸速率均差异显著 ($P<0.05$)。高寒岩溶区的土壤微生物 AWCD 值均随培养时间的延长而上升, 土壤微生物碳源代谢活性随海拔上升呈现增加趋势。黄龙沟土壤微生物不同碳源利用存在差异, 呈现羧酸类>碳水化合物类=氨基酸类>聚合物类=胺类>酚酸类, 海拔变化对土壤微生物群落碳代谢特征有显著影响。

关键词: 黄龙风景区; 高寒岩溶; 岩溶土壤; 群落结构与碳代谢; 环境因子

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

四川盆地西北盆缘大气 PAHs 分布特征及健康风险评估

李文金¹, 董发勤^{1*}, 吕珍珍¹, 张雪梅¹

1. 西南科技大学, 四川省绵阳市 621000

为了解四川盆地西北盆缘区域典型城市(成都-德阳-绵阳)大气多环芳烃(PAHs)的污染特征、主要来源及其健康风险。利用聚氨酯泡沫(PUF)被动采样技术于 2020 年冬季到 2021 年秋季期间在成都-德阳-绵阳三市采集大气 PAHs, 以气相色谱-三重四级杆质谱检测 PUF 膜中的 16 种优控 PAHs, 使用特征比值法、正定矩阵因子分析法(PMF)识别其主要来源, 并以美国 EPA 推荐的健康风险模型评估人群健康风险。研究发现 16 种 PAHs 质量浓度的季节变化规律为: 冬季>秋季>春季>夏季, 城市间呈现: 成都>德阳>绵阳; 浓度占比最高的单体为菲(42.77%~55.86%)、其次为荧蒽(15.78%~26.04%), 与 Σ PAHs 浓度呈现出一致的季节变化规律, 二苯并(a, h)蒽

浓度占比最低; 三市 PAHs 构成均以中低苯环为主, 3 环 PAHs 浓度占比最高, 4 环次之, 5~6 环 PAHs 浓度占比最少。三市大气中 PAHs 均以煤/生物质燃烧、交通排放等为主, 春、夏季大气中 PAHs 煤/生物质燃烧为主, 秋、冬季除了煤/生物质燃烧源外, 交通排放源贡献占比升高。不同季节 PAHs 的致癌风险值呈现冬季>春季>秋季>夏季, 冬季大气中 PAHs 对人群存在潜在的致癌风险; 儿童的暴露风险高于成人; 三种暴露途径中儿童通过摄食暴露所致的健康风险更高, 成人皮肤接触导致的潜在致癌风险值更大。

关键词: 多环芳烃; 污染特征; 来源解析; 致癌风险评估

基金项目: 国家自然科学基金(41831285; 51974261)

第一作者简介: 李文金(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 大气污染与人群健康评价研究.Email: 953381264@qq.com

通信作者简介: 董发勤, 教授, 研究方向: 环境矿物学和环境地球化学.E-mail: fqdong@swust.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

非金属矿物基储热材料及用于建筑热管理的研究

左小超¹, 杨华明^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430074

随着城市化和工业化的加剧, 我国在建筑领域产生的能耗不断增长, 已成为温室气体排放的主要来源之一。全国建筑能耗占能源消费总量的 45% 以上, 占据着相当重要的比例。为了应对能源危机和环境问题, 将新能源材料或新节能技术应用于建筑, 以降低能耗、减少碳排放成为发展趋势。以相变材料为储能媒介的热能存储技术在建筑节能领域是近年来的研究热点, 这主要得益于相变材料具有储能密度高、安全性好、相变温度可调等特点。将相变材料应用在建筑领域, 不仅可以降低建筑的能耗,

实现节能减排, 而且可以改善室内温度, 提升房间舒适度。然而其存在液相泄漏和低导热率两个问题严重影响实际应用。非金属矿物具有来源广泛、孔道丰富、导热系数高、热稳定性好等优势, 与相变材料复合制备矿物基储热材料可以很好克服相变材料使用中的问题。本报告系统阐述了非金属矿物基储热材料制备、表征及性能提升及其在建筑节能领域应用方面的研究进展。

关键词: 非金属矿物; 相变材料; 建筑节能

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

玄武岩碳封存强化研究

郑益军^{1*}, 段世辰¹, 廖丽姿¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州市 510640

当前, 全球变暖和气候变化问题日益严峻, 碳捕获与封存(CCS)技术已成为中长期缓解人为 CO₂ 排放的关键手段。CCS 技术通过捕获工业源 CO₂ 并将其封存于地下地质构造中, 以降低大气中温室气体的浓度。然而, 传统 CCS 技术在封存安全性、成本控制及长期监测需求等方面仍面临诸多瓶颈。玄武岩地层因其广泛分布、高反应性及快速矿物碳酸化特性, 展现出突出的 CO₂ 封存潜力。玄武岩 CO₂ 封存的核心机理依赖于矿物碳酸化作用, 即二价金属阳离子 (Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺) 与溶解态 CO₂ 发生反应, 生成热力学稳定的碳酸盐矿物。然而, 当前技术条件下, 矿物碳酸化效率受到一定程度的制约。本研究聚焦玄武岩 CO₂ 封存效率提升, 从催化反应优化和注入工艺改进两个维度开展系统创新。在反应动力学层面, 引入碳酸酐酶仿生催化剂, 显著降低 CO₂ 水合反应活化能, 加速 HCO₃⁻ 生成。在注入工艺方面, 采用“高压脉冲-低速渗吸”交替注入模

式, 借助应力扰动效应将微孔隙 CO₂ 饱和度提升。它是一种优化的 CO₂ 注入策略。该模式通过高压脉冲打开和扩展岩石裂隙, 随后在低速渗吸阶段允许 CO₂ 充分渗透到微细孔隙中。这种交替注入方式类似于“挤压-放松”循环过程, 既能通过高压脉冲提高储层渗透性, 又能借助低速渗吸确保 CO₂ 与岩石充分接触, 从而显著提升整体封存效率。与传统单一注入模式相比, 该方法可以更有效地利用储层空间, 实现 CO₂ 的深度封存。研究表明, 该技术体系可显著提升玄武岩 CO₂ 封存效率, 为大规模工业应用提供了新的技术路径。这种协同优化方法不仅提高了 CO₂-玄武岩反应动力学, 也实现了储层空间的高效利用, 为碳中和目标的实现提供了重要技术支撑。

关键词: CCS, 玄武岩碳封存, 矿物碳酸化, 碳酸酐酶仿生催化剂, 高压脉冲-低速渗吸

项目: 中国科学院学部咨询评议项目 (2022-ZW10-A-023), 中国工程院院地合作项目 (2023-GD-07), 广东省千万吨级海上规模化 CCS 或 CCUS 集群前期规划研究项目 (E4410101), 有机地球化学国家重点实验室自主课题 (SKLOG2024-04)

第一作者简介: 郑益军 (1986-), 助理研究员, 研究方向: 二氧化碳封存适宜性评价和监测。Email: zhengyijun@gig.ac.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

Engineering Clay-Alginate Composites for Enhanced Tetracycline Removal: From Ab Initio Insights to Sustainable Processing

李语涵¹, 杨亚婷¹, 温雅琪¹, 张博翔^{1*}

1. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州市 350002

This study evaluates the performance of montmorillonite/sodium alginate (MT/SA) composite beads for tetracycline (TC) removal, comparing two preparation methods: freeze-dried (FD) and oven-dried (OD). Both adsorbents demonstrated high TC removal efficiency, with batch adsorption capacities ranging from 445 to 499 mg g⁻¹, surpassing the performance of previous adsorbents. The OD method (60°C for 12 hours) showed a 10% higher efficiency under various conditions. XRD analysis indicated that no crystalline TC precipitated, with adsorption primarily occurring on external surfaces at lower TC concentrations. At higher concentrations, MT/SA/FD showed expanded d (001) spacing, indicating significant interlayer adsorption. FTIR spectra confirmed the integrity of the clay and alginate structures, with band shifts suggesting that TC adsorption occurred through electrostatic interactions. SEM analysis revealed enhanced crystallinity in MT/SA/OD samples, contributing to improved adsorption capacity. Fixed-bed column studies supported these findings, with MT/SA/OD and MT/SA/FD showing maximum adsorption capacities of 7.41 mg g⁻¹ and 0.68 mg g⁻¹, respectively. Both adsorbents effectively treated

100-bed volumes within 150 minutes at Ct/C0 = 0.1. The Thomas model provided an excellent fit for breakthrough curves ($r^2 > 0.98$). In addition, the ab initio molecular dynamics (AIMD) simulations show that the formation of water "bridge" and charge transfer on the surface of TC and MMT, as well as the formation of hydrogen bonds between the -OH, -NH₂, and -CH₃ functional groups on TC and MMT surface may play a key role in the entire adsorption process. These millimeter-sized composite beads offer practical advantages for large-scale water treatment, including easier handling and reduced pressure drop. The fabrication process, especially for MT/SA/OD, is simple and energy-efficient. This approach, which combines natural earth materials with cost-effective composite materials, provides a scalable and high-performance solution for water contaminant removal. Future research should focus on process intensification, regeneration methods, structural modifications, and the development of continuous production methods for industrial-scale applications.

关键词: tetracycline, Ca-montmorillonite, sodium alginate, column study, molecular simulation

This research was supported by multiple funding sources. The "Innovation and Development Center of Sustainable Agriculture" program, part of the Higher Education Sprout Project funded by the Ministry of Education (MOE) in Taiwan, provided financial support. Additional funding was received from the Ministry of Science and Technology, Republic of China (ROC), under project numbers 109-2811-B-005-505 and 110-2313-B-005-023-MY3, which provided visiting scholar support to Po-Hsiang Chang. Fujian Agriculture and Forestry University, China, also contributed financial support through grant number 105-KG0000020. The authors express their gratitude to Fujian Agriculture and Forestry University and National Chung Hsing University for providing access to essential analytical facilities, including ion chromatography (IC), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and laser microscopy. These resources were crucial for the successful completion of this study.

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

改性煤矸石复合材料的多元重金属污染吸附及机理研究

霍婷婷^{1*}, 龙江玥¹, 柳佩欣¹, 雷艳¹, 尹菟囡¹

1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川省绵阳市 621010

本研究针对铅锌矿采选过程中产生的含 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 重金属废水治理难题, 以大宗工业尾矿为原料, 通过碱改性和负载 Fe₃O₄ 制备了磁性改性煤矸石复合材料 (MCG-Fe₃O₄), 并系统研究了其对单一及复合重金属污染的去除机理及竞争吸附行为。通过碱改性和 500 °C 煅烧 1 h 处理, 煤矸石形成类沸石结构, 水热条件下使其表面均匀负载 30~50 nm 的 Fe₃O₄ 纳米颗粒, 材料比表面积显著提升至 184.29 m²/g, 且具备良好的磁性能。在 pH=5、材料用量 0.8 g·L⁻¹ 条件下, MCG-Fe₃O₄ 对 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 的吸附量分别达到 137.36、47.61 和 57.44 mg·g⁻¹, 吸附过程符合准二级动力学模型和 Langmuir 等温模型, 以化学吸附为主。与单一金属离子体系相比, MCG-Fe₃O₄ 复合材料在二元体系和三元体系对 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 三种重金属的吸附容量都有所下降, 但

三元体系下吸附量分别可保持在 129.92、6.4、9.42 mg·g⁻¹。采用异步吸附实验发现材料对 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 的选择性依次为 Pb(II) > Cd(II) > Zn(II), Pb(II) 对 Zn(II) 和 Cd(II) 的吸附具有显著抑制作用。浮选剂 Na₂SiO₃ 对 MCG-Fe₃O₄ 复合材料吸附 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 有促进作用, CuSO₄ 对 MCG-Fe₃O₄ 复合材料吸附 Pb(II)、Zn(II) 和 Cd(II) 有抑制作用。材料对金属离子的吸附机制涉及静电吸附、离子交换、化学沉淀。研究揭示了改性煤矸石吸附多元重金属离子的复杂作用过程机制, 指出 MCG-Fe₃O₄ 可作为铅锌镉复合污染治理的高效吸附材料, 研究对大宗固废的综合利用以及重金属废水处理具有一定的理论和实践意义。

关键词: 铅锌镉污染; 改性煤矸石; 复合材料

*通信作者简介: 霍婷婷 (1987-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学. Email: huotingting1203@163.com

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

过硫酸根活化诱导水铝英石表面化学修饰新策略： 铝羟基-烯烃双键加成反应构建高性能杂化材料

张庆成¹, 谢庆斌¹, 袁鹏^{1*}

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006

水铝英石 (Allophane) 作为火山灰中广泛存在的纳米结构矿物, 其独特的富缺陷纳米空心球 (直径 3.5~5.0 nm) 结构赋予了其特殊的物理化学特性。除自身孔结构外, 水铝英石单体无序堆积还会产生大量的次生分级孔道系统, 使其具有高的理论比表面积 (达 1000 m²/g 以上)。这些特性使其在环境吸附、异相催化和药物缓释等领域展现出独特优势。然而, 该材料的纳米效应及表面化学特性也使其在实际应用中面临诸多挑战: 一方面, 水铝英石表面的铝羟基 (Al-OH) 配位结构导致其存在较强的纳米颗粒团聚倾向; 另一方面, 亲水性表面与疏水性基体材料之间存在显著的界面不相容问题。从而, 水铝英石的功能化改性及复合研究仍存在明显局限, 表现为表面修饰较难控制。如何通过矿物表界面反应实现水铝英石纳米结构表面的稳定化调控, 已成为突破其高值化应用

瓶颈的关键。针对此问题, 本研究工作发现, 在过硫酸根离子活化作用下, 水铝英石表面铝羟基 (Al-OH) 与丙烯腈单体的碳碳双键 (C=C) 可发生直接加成反应, 从而构建具有 Al-O-C 键的无机-有机复合结构。通过综合运用 XRD、FT-IR、XPS 及 ²⁷Al MAS NMR 等分析方法, 揭示了该过程中水铝英石表面羟基向 Al-O-C 结构的化学转变机制, 并证实了铝羟基与烯烃双键的定向加成反应路径。该合成策略展现出优异的普适性, 可拓展至丙烯酸、丙烯酰胺、丙烯酸钠等多种含 C=C 双键的有机单体。本研究发展了水铝英石表面化学修饰的新方法, 也为设计开发高性能纳米复合材料开辟了新路径, 在环境修复、催化载体及功能涂层等领域具有潜在应用价值。

关键词: 水铝英石, 表面修饰, 纳米复合材料

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52161145405), 国家高层次人才特殊支持计划

第一作者简介: 张庆成 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 超微粘土和纳米结构矿物资源的表界面反应性和应用. Email: 1112307017@mail2.gdut.edu.cn

*通信作者简介: 袁鹏 (1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

玄武岩碳封存: 机制、效率与实地应用潜力

廖丽姿¹, 于志强^{1*}, 郑益军¹, 段世辰¹

1. 广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广州市 510640

在全球气候变化背景下, CO₂ 矿化封存技术作为一种将二氧化碳永久转化为稳定碳酸盐矿物的固碳策略, 正日益受到科学界的关注。本研究聚焦于玄武岩作为 CO₂ 矿化封存介质的机理研究、效率评估及实际应用前景。自 Seifritz 于 1990 年首次提出该技术以来, 其核心溶解-沉淀机制已被广泛研究, 即 CO₂ 溶解于水形成碳酸, 进而与岩石中的 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺ 等金属阳离子反应生成稳定的碳酸盐矿物。玄武岩因其富含这些活性阳离子、地质分布广泛及优良的反应性能, 被认为是矿化封存 CO₂ 的理想地质介质, 这一点已在冰岛 CarbFix 项目和美国 Wallula 项目中得到实证。本研究通过 CO₂-水-岩石模拟实验系统, 对湛江地区采集的玄武岩样品(包括地表不同变质的玄武岩样品和钻井岩芯新鲜的玄武岩样品)进行了全面表征。实验过程中, 所有玄武岩样品在模拟地层条件下与 CO₂ 饱和水溶液接触, 进行矿化反应。采用多种分析技术, 包括 X 射线计算机断层扫描(CT)

三维成像、X 射线衍射(XRD)、X 射线荧光光谱(XRF)、扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)以及电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)等, 对反应前后样品的矿物组成、微观结构、孔隙-裂隙特征及元素迁移进行了系统分析。研究结果表明, 玄武岩中 CO₂ 的矿化速率显著高于传统砂岩储层, 且呈现出良好的时间线性关系。通过定量分析反应前后的矿物组成变化和新生碳酸盐矿物的空间分布, 我们确定了玄武岩对 CO₂ 的理论封存容量及实际封存效率。本研究不仅深化了对不同变质程度玄武岩 CO₂ 矿化机制的理解, 还为评估浅层玄武岩地层作为 CO₂ 封存储层的可行性提供了科学依据。这些发现对于推动区域尺度碳捕获与封存(CCS)示范工程的实施具有重要的科学指导意义, 为应对全球气候变化提供了可行的技术路径。

关键词: 碳矿化封存; 玄武岩; 水岩反应; 封存潜力

中国科学院学部咨询评议项目(2022-ZW10-A-023), 中国工程院院地合作项目(2023-GD-07), 广东省千万吨级海上规模化 CCS 或 CCUS 集群前期规划研究项目(E4410101), 有机地球化学国家重点实验室自主课题(SKLOG2024-04)

第一作者简介: 廖丽姿(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 玄武岩碳封存. Email: liaolizi23@mails.ucas.ac.cn

*通信作者简介: 于志强(1970-), 研究员, 研究方向: 1) 新型污染物的环境行为(环境分布及非生物转化); 2) 新型污染物对人体的早期健康影响. Email: zhiqiang@gig.ac.cn

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

废弃混凝土高效固碳及高值化利用

刘磊^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号 430070

我国废弃混凝土年产生量约为 6 亿 t, 社会积存量超 120 亿 t, 占地大造成污染; 在水泥生产过程中释放大量二氧化碳, 约占碳排放总量的 9%。日本率先开发了加热揉搓工艺, 实现了高品质骨料的回收。然而, 在回收过程产生了 30%左右富含水泥的混凝土微粉(再生微粉), 还需进一步处理才能利用, 流程过于繁琐。通过机械搅拌-碳化

耦合分离技术实现了废弃混凝土的高效分离和再生微粉的高效碳化; 基于两步碳化法开发了废弃混凝土微粉同时制备高纯碳酸钙和无定形纳米硅胶的新技术, 实现了废弃混凝土高效固碳及高值化利用。

关键词: 废弃混凝土; 固碳; 高值化利用

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

黏土矿物与二氧化碳的界面吸附作用及其碳捕集机制研究

余梦涵^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430074

高效的二氧化碳(CO_2)吸附剂对于减缓气候变化和实现工业净零排放至关重要。碱性氧化物由于其选择性和多样化的应用,表现出显著的 CO_2 捕获潜力。虽然纳米结构在控制 CO_2 捕获性能方面的重要性已得到充分认识,但对潜在机制的全面理解和精确的结构控制仍然是主要挑战。因此,我们提出了一种原子水平的方法,通过利用黏土矿物介导 MgO 晶体面工程的能力来设计高性能的 CO_2 吸附剂。具体来说,高岭石修饰 MgO (K-M),促进富含(220)晶面的台阶面形成。这些台阶表面具有低配位、不饱和氧位点的特征,表现出增强的 CO_2 结合。高岭石的掺入显著提高了 MgO 的 CO_2 吸附能力和吸附速率,并具有良好的稳定性(100次循环后仍保持0.24 g/g)。采用原位

傅里叶变换红外光谱和密度泛函理论计算,阐明了高岭石增强 CO_2 吸附的潜在界面机制。K-M复合材料的反复煅烧在高岭石表面产生了额外的碱性位,而 MgSiO_3 的形成提供了成核位,阻止了 MgO 的烧结,从而提高了其循环稳定性。该研究为黏土矿物和 MgO 的协同效应提供了重要的见解,为合理设计具有优越吸附能力、动力学和循环稳定性的新型 CO_2 吸附剂提供了蓝图。碳核算和生命周期评估证实了这种大规模 CO_2 捕获方法的环境和经济可行性,为新型矿物基碳捕集材料提供了一个可扩展的、可持续的途径。

关键词: 二氧化碳捕集; 纳米黏土; 晶面工程; 理论计算

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

CeO₂-MnO₂/NF 粒子电极协同臭氧高效三维电化学降解茜素红

胡珂¹, 董发勤^{1*}

1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川省绵阳市 621010

本研究通过水热法成功合成了泡沫镍负载 Mn、Ce 双金属氧化物复合材料作为粒子电极, 并协同臭氧对典型蒽醌染料茜素红 (AR) 进行了高效降解。考察了常见因素对茜素红降解率的影响。得出最佳实验条件为外加电压=3.5 V, 初始 pH=5.5, NaCl 浓度为 4.5 g/L, 初始染料浓度为 20 mg/L。五次循环后粒子电极具有较高的循环稳定性。结合 Fukui 函数分析染料分子结构的活性位点, 并以此为依据提出茜素红

的降解路径。通过对比 O₃、3DER 和 3DER-O₃ 三种不同体系下茜素红的降解效果, 证实了三维电极与臭氧联用具有良好的协同作用。最后得出在 CeO₂-MnO₂/NF 协同臭氧体系下茜素红的降解机理, 在此过程中单线态氧 (¹O₂) 在降解过程中发挥了主要作用。

关键词: 粒子电极; 蒽醌染料; 协同效应; 降解机理; Fukui

• 专题 33: 非金属矿与关键过程碳中和——机理和方法 •

华南地区富粘土矿物工程渣土的地聚物应用： 酸/碱激发的对比研究

玉婷^{1,2}, 陈佳蓉^{1,2}, 张佰发¹, 袁鹏^{1*}

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州市 510006;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州市 510640

工程渣土是指各类建筑物、构筑物等基础设施开挖过程中产生的弃土。随着我国城市化的推进, 建筑、道路、水利等建设工程产生了大量工程渣土, 但目前我国工程渣土的资源利用率较低, 未被资源化利用而随意堆存或倾倒的工程渣土会引发一系列环境问题, 比如水土流失、淤积河道等; 甚至还会造成严重的安全事故, 如渣土场滑坡和泥石流。因此, 亟待寻找渣土的高效利用方法以提高其资源利用率。尤其是, 本研究发现我国华南地区的很多建筑工程渣土的主要成分是高岭石、伊利石、石英、长石等, 适合用于绿色低碳建材地质聚合物(地聚物)的制备。因此, 本研究通过酸/碱激发地质聚合反应(地聚反应)制备渣土地基聚物, 探讨了制备条件对地聚物性能、成分和微观结构的影响。相关研究表明: 富粘土矿物工程渣土的最佳活化温度为 700 °C, 高岭石转化具有高地聚反应活性的偏高岭石。对于碱激发地聚反应, 活化工程渣土中的偏高岭石等活性物质遇碱后发生 Si 和 Al 的溶解, 经扩散、缩聚、固化等反应后形成具有力学性能的无定型水化硅铝酸钠(N-A-S-H)凝胶, 该地聚物

凝胶与伊利石, 石英, 八面沸石共同组成碱激发渣土地基聚物的主要成分。此外, 研究还发现, 不同含量的可溶性 Si 对渣土的表界面作用形式不同, 高含量的可溶性 Si 可使体系形成更多的 N-A-S-H 凝胶, 而低含量可溶性 Si 的体系则形成更多的沸石。对于酸激发地聚反应, 活化渣土中的活性 Al 最先在磷酸(H_3PO_4)溶液中溶出, 形成磷铝酸盐矿物; 随着地聚反应的进行, Si 慢慢溶出, 最终形成具有力学性能的无定型磷铝硅酸盐(SAP)凝胶, 其与伊利石, 石英, 纤磷铝石, 磷铝石均为酸激发渣土地基聚物的主要成分。通过对比研究发现, 工程渣土中的粘土矿物和长石等活性矿物成分在酸激发地聚反应过程中形成更多的地聚物凝胶, 填充孔隙, 使基质密实, 因此展现出更优的力学性能。本研究为富粘土矿物的工程渣土的利用提供了一种新的、绿色低碳的途径, 也为其用于制备具有较高性能的酸/碱激发地聚物材料提供了理论依据。

关键词: 高岭石, 工程渣土, 地聚物, 碱激发, 酸激发

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972045), 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515012180)

第一作者简介: 玉婷(1998-), 博士后, 研究方向: 应用矿物学、环境矿物学. Email: yuting@gdut.edu.cn

*通信作者简介: 袁鹏(1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

溶解氧对酸性溶液中黄铁矿-水界面产生活性氧物种动力学的影响

何昭露^{1,2}, 鲜海洋^{1*}, 梁晓亮¹, 朱建喜¹, 何宏平¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 中国科学院广州地球化学研究所深地过程与战略矿产资源全国重点实验室/

广东省矿物物理与材料研究开发重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

黄铁矿作为地壳中分布最广的硫化物矿物,不仅是地球表层关键的物质组成,更是研究地球氧化还原演化的重要示踪矿物。大量实验证实,无论在有氧或缺氧环境中,黄铁矿-水界面反应均可产生活性氧物种(ROS),这一非生物氧化过程被认为是早期地球氧化还原状态转变的重要驱动力之一。且自首次发现无氧条件下黄铁矿-水界面生成 ROS 以来,对其反应机理进行了大量的研究。现有研究主要集中于无氧或者是现代大气氧浓度下的黄铁矿-水界面产生活性氧机理且尚未有统一认知,此外对于氧气在该过程中的调控作用知之甚少。地质记录的地球大气氧浓度演化具有显著的非线性特征,这提示氧气对黄铁矿-水界面反应的调控可能存在复杂的浓度依赖性。且已有实验证实,无氧条件下毒砂的氧化以及溶出行为与有氧条件下相反。那么,不同的溶解氧条件下,黄铁矿-水界面产生活性氧的行为是否和溶氧浓度变化一致呢?为解答上述问题,本研究以天然块状黄铁矿为研究对象,在实验室条件下厌氧球磨为微米级粉末。基于自主设计搭建的溶解氧控制装置,在标准大气压条件下实现了从早期地球极低氧环境($<10^{-5} \times 10^{-6}$)到

现代大气氧浓度(21%)的饱和溶解氧(DO)梯度模拟。在酸性溶液中进行黄铁矿-水界面产 ROS 的动力学实验。发现双氧水的产生只发生在有氧反应初期(0~10 min),说明了双氧水的产生受到氧气和黄铁矿初始表面双重制约。但羟基自由基生成速率随反应时间呈指数增长,结合 XPS 和红外光谱数据分析发现在黄铁矿表面有多种 S, Fe 中间产物持续产生,证实表面硫铁中间产物的持续生成有效降低了·OH 形成的活化能垒。无氧条件下,黄铁矿的 Fe 溶出更快且 Fe^{3+} 更多,说明了缺氧条件下黄铁矿-水界面产生的活性氧首先参与自身氧化过程。这些数据均说明了氧气对黄铁矿-水界面反应有着多重制约,首先是作为直接的氧源,既作为电子受体,又提供氧原子;其次可以通过界面氧渗透机制,部分氧原子嵌入黄铁矿晶格表层,参与形成具有催化活性的 Fe-O/S-O 中间相,构建低能垒的·OH 生成路径。该发现为阐释黄铁矿-水界面产生活性氧物种提供了新的证据。

关键词: 黄铁矿-水界面, 活性氧, 氧浓度, 动力学

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42102028); 国家自然科学基金面上项目(42372048)。

第一作者简介: 何昭露(1997-), 博士研究生, 研究方向: 矿物表界面物理化学. Email: hezhaolu@gig.ac.cn

*通讯作者简介: 鲜海洋(1991-), 男, 副研究员, 研究方向: 矿物物理化学. E-mail: xianhaiyang@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

常温常压条件下钙锰矿的形成

文科¹, 李珊¹, 杨宜坪¹, 席佳鑫¹, 朱建喜^{1*}, 何宏平¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

钙锰矿, 又称钡镁锰矿, 是一种具有 3×3 隧道结构的锰氧化物矿物, 常见于土壤、沉积物、海洋锰结核以及热液矿床中。其三维隧道晶体结构由 MnO_6 八面体通过共棱和共角顶连接形成, 隧道内常填充水分子和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Na^+ 等阳离子。实验室条件下合成钙锰矿, 是人们研究其结构、性质、成因机制及与其它锰氧化物矿物相互转化关系的重要途径。截止目前, 钙锰矿在实验室中的合成仍依赖于高温高压的热液处理或低温热液的热回流处理等。同时, 钙锰矿常见于海底热液活动形成的铁锰矿床中。因此, 传统观点认为钙锰矿仅形成于高温高压的

热液环境, 其常被视作热液成因锰结核的标识矿物。然而, 钙锰矿的热液成因观点难以充分解释其在多样地球化学环境, 特别是在常温常压陆相表生环境中的普遍存在。本研究在实验室厌氧条件下, 通过以溶解态二价锰 (Mn(II)) 诱导层状锰氧化物发生物相转变, 模拟不同地球化学环境中钙锰矿的形成, 发现钙锰矿可在常温常压条件下快速形成, 表明热液活动并非形成钙锰矿的必要条件。

关键词: 钙锰矿, 常温常压条件, 锰氧化物, 隧道结构

第一作者简介: 文科 (1991-), 博士后, 研究方向: 环境矿物学、天体矿物学. Email: wenke@gig.ac.cn

*通信作者简介: 朱建喜 (1973-), 研究员, 研究方向: 黏土矿物学、表面矿物学、纳米矿物学. Email: zhujx@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

基于生物矿化的硅藻蛋白石结构功能化调控及其环境效应

李梦圆^{1,2}, 刘冬^{2*}

1. 河南科技大学, 河南洛阳 471000;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

硅藻蛋白石是一种生物成因的天然矿物, 来源于硅藻的硅质骨架。硅藻蛋白石的主要成分是无定形二氧化硅, 属于 A 型蛋白石。硅藻蛋白石具有天然的三维层次结构、丰富的孔尺寸和独特的物理化学性质, 因此在环境修复、生物传感和微纳制造等领域具有广泛应用。然而, 硅藻土矿床中获得的硅藻蛋白石的功能基团主要为羟基且含量较低, 作为吸附剂或载体, 缺少专性吸附能力, 与客体离子/分子等结合力较弱。已有研究借助表面硅烷化等对矿床硅藻蛋白石进行调控, 尝试提升其专性/稳定吸附能力, 然而活性基团在硅藻蛋白石表面分布不均匀且含量较低, 使得效果提升不明显。基于此, 有必要从硅藻蛋白石的形成入手, 通过调控硅藻的活性, 借助其生物矿化特性, 使其表面和结构中生成多类型官能团。本研究借助硅藻自身的生物行为, 开展功能化调控, 诱导硅藻利用有机硅烷作为生长所需硅源, 在硅藻体内生成了巯基功能化的硅藻蛋白石。所获硅藻蛋白石不仅保留了原有的三维多级孔结构, 而且完成了骨架巯基化, FIB-TEM 的结果证实: 在结构和表面均匀分布丰富的巯基基团, 而且随着巯基密度的增加, 硅藻蛋白石表面负电荷和

表面活性位点显著增多, 稳定性升高。探索发现, 巯基功能化硅藻蛋白石具有较好的环境应用: (1) 对水体中贵金属银具有独特的吸附性能, 吸附量可达 87.59 mg/g (功能化前仅为 33.21 mg/g), 且巯基与银离子之间主要通过内球表面络合的方式结合; (2) 负载银之后的功能化硅藻蛋白石表现出明显的表面增强拉曼散射 (SERS) 效应, 可用于检测模型探针分子亚甲基蓝和罗丹明 6G, 检测限分别可达 10^{-4} 和 10^{-5} , Ag_2S 和探针分子之间的电荷共振转移是主要的拉曼增强机理; (3) 硅烷功能化过程还形成了疏水性的硅藻蛋白石, 实现了硅藻蛋白石溶解度的显著降低 (降低达 18.95%), 这显著提高了硅藻蛋白石的水体稳定性, 为其长时间应用提供了保障。上述研究为硅藻蛋白石的功能化调控提供了新的思路和方法, 对硅藻生物材料的研发和硅藻蛋白石矿物资源的高效利用具有重要意义, 也对拓展硅藻蛋白石在环境修复、生物传感、微纳制造甚至海洋固碳等领域的应用具有重要价值。

关键词: 硅藻蛋白石; 生物矿化; 巯基功能化; 银吸附; 表面增强拉曼散射

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172047)

第一作者简介: 李梦圆, 讲师, 研究方向: 矿物表-界面作用及其环境效应。E-mail: limengyuan@haust.edu.cn

通讯作者: 刘冬, 研究员, 研究方向: 生物-矿物表/界面作用, 矿物资源的高效利用。E-mail: liudong@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

纳米针铁矿内建电场耦合配位吸附的晶面效应

胡文远^{1*}, 许志豪¹, 黄丹¹, 刘明学², 董发勤²

1. 西南科技大学 材料与化学学院, 四川省绵阳市涪城区青龙大道中段 59 号材料与化学学院 621010;

2. 西南科技大学 固体废物与资源化教育部重点实验室, 四川省绵阳市涪城区青龙大道中段 59 号材料与化学学院 621010

半导体矿物作为地球关键带中广泛存在的重要组分, 其光催化驱动的物质循环及耦合作用深刻影响着 C、N、S 元素的地球化学循环过程, 并在调控污染物环境行为方面发挥关键作用。本文聚焦半导体矿物表界面这一地球化学反应的核心载体, 通过多尺度界面反应路径解析与微观作用机制研究, 揭示了矿物表面电荷转移机制及界面电子耦合传递特性。结合原位谱学表征与理论模拟方法, 阐明了污染物在矿物界面的吸附-转化动力学过程有效性演变规律。研究结果从分子水平揭示了半导体矿物驱动的地球化学循环微观机制, 为准确评估污染物环境归趋、构建地表关键带元素循环模型提供了新的理论视角, 对深入理解地球表生系统中微观界面过程与宏观生态效应的内在联系具有重要科学价值。

土壤中广泛存在的铁氧化物可通过氧化/还原、吸附/解吸及催化作用对重金属及有机污染物的固定、转化产生影响, 是非生物日光驱动地球氧化还原化学反应的载体。铁氧化物间相互转化诱导

的巨大比表面、丰富的活性吸附位点是土壤污染物重要的吸附媒介。由于结晶习性和介质条件的共同作用会导致铁氧化物在土壤中存在纳米尺度的不同赋存状态, 例如针铁矿常以 (110)、(021) 晶面赋存, 赤铁矿常以 (001)、(012)、(113) 等晶面赋存, 由于不同晶面原子排列结构的不同, 产生的不同活性位点数量, 从而导致产生晶面反应的差异性。针铁矿作为土壤中主要的铁氧化物之一, 禁带宽度较小、且具有可见光响应, 其晶面特性的研究已有相关报道, 但其不同晶面的光催化差异性机制并未形成共识。在本文中采用水热法制备了不同 (021) / (110) 比例的纳米针铁矿, 将其用于光催化吸附还原 Cr(VI) 环境行为研究, 以探究针铁矿晶面赋存比例对光催化性能影响机制, 为深刻理解纳米针铁矿晶面赋存形态及演化规律对物质归趋的影响提供参考。

关键词: 针铁矿; 晶面; 耦合; 表界面作用

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42172388), 四川省自然科学基金面上项目 (2025ZNSFSC0294)

第一作者简介: 胡文远 (1976-), 女, 教授, 研究方向: 半导体矿物光催化. E-mail: huwenyuan@swust.edu.cn

*通信作者简介: 董发勤 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 生态环境材料、矿物环境, E-mail: fqdong@swust.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

橄榄石-硅藻界面作用促进了海洋固碳增汇

余荣达^{1,2}, 刘冬^{1,2*}, 刘红昌³, 袁鹏⁴, 李梦圆^{1,2},
沈宇果^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 王旭^{1,2}, 霍广铖^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广东广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南长沙 410083;

4. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广东广州 510006

在全球亟需负排放技术实现碳中和的背景下, 增强海洋碱性硅酸盐矿物的规模化风化固碳被视为最具工程可行性的解决方案之一。碱性硅酸盐矿物的风化释放碱度并提供养分, 从而促进海洋光合生物的生长, 进而增强海洋碳汇。橄榄石 $[(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4]$ 作为上地幔的主要造岩矿物之一, 因其储量丰富和较快的风化速率, 成为研究的重点。然而, 橄榄石自然风化时常形成富硅无定形钝化层, 导致其风化速率远不足以满足气候变化缓解的需求。因此, 如何进一步加速风化速率并增强碳封存效果, 仍是关键挑战。本研究从生物风化角度出发, 探讨底栖硅藻与橄榄石的生物-矿物界面相互作用机制及其对海洋碳汇的促进作用。研究以近海典型底栖硅藻—舟形藻为研究对象, 通过细胞色素组成、光合作用效率、代谢组和转录组分析, 以及高分辨透射电子显微镜 (HRTEM) 和同步辐射近边吸收谱 (XANES) 等矿物表征手段, 全面解析硅藻与橄榄石的界面相互作用。结果表明, 硅藻通过生物作用还原橄榄石表面富硅无定形层中的铁

(Fe^{3+}), 并通过主动摄取硅破坏这一钝化层, 进一步加速风化过程。转录组与代谢组联合分析揭示, 在此过程中, 橄榄石不仅促进了硅藻的光合作用效率和碳固定能力, 还通过诱导硅藻特定的代谢途径, 增强了碳酸盐 (文石) 的成核作用, 为无机碳封存提供了额外路径。基于上述结果, 本研究提出硅藻-橄榄石体系通过三个机制增强海洋碳汇: 1) 通过硅藻生物作用促进橄榄石风化提升碳封存, 2) 通过提高硅藻生长和光合作用固碳增强生物碳泵效率, 3) 通过硅藻-橄榄石相互作用诱导碳酸盐生成, 增强无机碳固存。上述结果表明, 该体系具有重要的应用潜力: 在硅藻丰富的沿海水域中, 通过实施橄榄石风化工程, 可实现多碳泵集成增效, 提升海洋碳汇。这为基于矿物介导的海洋负排放策略的实施提供了理论依据和数据支持, 有望为实现碳中和以应对气候变化提供有效方案。

关键词: 底栖硅藻; 橄榄石风化; 富硅钝化层; 海洋碳封存;

基金项目: 国家自然科学基金 (42172047)、广东省自然科学基金 (2024B1515040003、2022A1515010824) 和 ONCE 国际大科学计划

第一作者简介: 余荣达 (2000—), (在读) 博士研究生, 研究方向: 生物-矿物表/界面作用. Email: yurongda@gig.ac.cn

*通讯作者简介: 刘冬 (1981—), 研究员, 研究方向: 矿物学、生物矿物学 (微观尺度下的生物-矿物表/界面作用). Email: liudong@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

典型二八面体层状硅酸盐矿物 ——水界面反应与成分、结构演变

孙红娟^{1*}, 曾鹂¹, 彭同江¹

1. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川省绵阳市 621010

矿物—水界面反应几乎涉及所有的地球化学过程, 包括矿物的结晶、蚀变、变质、风化和粘土矿物的形成等。除与地质作用相关外, 还涉及植物养分的供应、土壤改良和重金属钝化等, 也涉及酸性矿山废水对尾渣和库坝的溶蚀、重金属污染物的迁移与沉淀及对周边水体和土壤的污染, 并对水质调控、生态修复、环境保护等起到关键作用。二八面体层状硅酸盐矿物(DPSM)在地表风化层分布广泛, 选择 TOT 型(蒙脱石和白云母)和 TO 型(高岭石和埃洛石)矿物作为研究对象, 对比了不同结构类型 DPSM 与偏酸性水溶液的界面反应对矿物晶体结构、化学组成、形貌和比表面积等的影响。结果表明, 在 DPSM 与偏酸性溶液的水界面反应过程中, H^+ 首先沿边缘进入层间域, 或置换出层间阳离子(若有), 或与 $Al-(O, OH)$ 八面体的羟基作用形成 H_2O , 使得与羟基配位的 Al^{3+} 暴露并脱离结构而溶出; Al^{3+} 的溶出使得边缘的 $Si-O$ 四面体不稳定, 以偏硅酸的形式进入溶液中。

在酸性环境中, DPSM 通过中和作用和/或离子交换作用对溶液的 pH 值起到缓冲与调节作用, 其中 H^+ 对矿物表面 $Si-OH$ 和 $Al-(O, OH)$ 位点的攻击是主要的质子消耗途径。在与不同 pH 值的酸性溶液

反应过程中, 蒙脱石、白云母、高岭石和埃洛石结构中 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的溶解量均随溶液 pH 值的升高而降低, 且质子和有机配体对矿物表面位点的协同攻击作用加速了离子的溶解过程。其中, 质子对羟基攻击性最强, 可破坏矿物结构的电中性; 而有机配体不仅可与溶出的 Al^{3+} 等形成强络合物, 降低溶液中有效 Al^{3+} 的浓度, 使反应向溶解方向进行, 还可吸附于矿物表面使得 $M-O$ 键极化, 削弱键能, 从而进一步促进矿物结构中阳离子的溶解。蒙脱石与酸性溶液的水界面反应导致结构中 Al^{3+} 、 Si^{4+} 等离子的溶出后, 结构层剩余的骨架塌陷, 原带负电荷的结构层被破坏, 导致阳离子交换容量降低; 而高岭石和埃洛石与酸性溶液反应后, 边缘或结构缺陷断键数量的增加使得反应产物的阳离子交换容量增大。蒙脱石与白云母、高岭石和埃洛石相比具有更高的阳离子交换性能、更大的比表面积和水化可膨胀特性, 使得其阳离子溶解率与溶解速率最大。本研究阐明了矿物结构属性的差异对水界面反应过程的影响, 对于进一步理解 DPSM 在偏酸性体系下的风化及演化过程具有重要意义。

关键词: 蒙脱石; 白云母; 高岭石; 埃洛石; 矿物-水界面反应

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

镁离子对碳酸钙结晶动力学的调控机理

戴兆毅^{1*}, 王明杰¹

1. 中国地质大学(武汉), 武汉市 430074

解析碳酸钙的结晶机理和动力学过程是研究海洋和陆地碳循环、揭示海相和陆相碳酸钙成因、优化二氧化碳地质储存、控制碳酸钙类矿物的结垢风险等一系列理论研究和工程实践工作的重要基础。在不同的地质和工业流体中, 镁离子广泛与钙离子共存, 对不同地质和工业活动中的碳酸钙结晶过程造成了显著影响。例如, 显生宙以来, 方解石海与文石海的循环演化被认为受镁钙离子的摩尔比 ($[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$) 控制, 镁钙比大于 2 左右时是文石海, 小于 2 则是方解石海; 在油气开采与地热资源开发过程中, 共存的镁离子将显著抑制碳酸钙结垢的量和速率, 因此对阻垢剂的最佳使用量也存在很大影响。但是, 为了解析溶液中的镁离子是如何通过改变矿物组分、结构和物化性质, 进而调控碳酸钙结晶动力学的, 还亟需更加深入的机理研究和定量模型构建。针对以上研究空白, 本研究搭建了激光实验装置, 系统测量了不同饱和指数 (SI)、温度 (T) 和 pH 的条件下 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 对碳酸钙结晶诱导时间 (t_i) 的影响。诱导时间是指

从过饱和溶液形成到检测到碳酸钙矿物形成的时长, 直接反映了碳酸钙的结晶动力学。结果显示, 在不同条件下碳酸钙结晶诱导时间都随 $[Mg^{2+}]/[Ca^{2+}]$ 比值增大而显著增加。更重要的是, 在系统实验数据的基础之上, 基于经典成核理论, 本研究建立了镁离子对碳酸钙结晶诱导时间的定量化机理模型, 精确评估了镁离子对碳酸钙矿物的不同物化性质的影响, 包括摩尔体积、扩散系数、表面能和吉布斯自由能 (溶解度), 模型显示镁离子对碳酸钙晶体表面能的影响最为显著 (增加 23%), 且与分子动力学模拟结果相符, 证实了镁离子对表面能的调控是其最主要的结晶动力学调控机制。本研究结合实验测试、机理模型开发和分子动力学模拟, 从不同角度深入研究了镁离子对碳酸钙结晶动力学的调控机理, 为相关研究提供了新的数据和思路。

关键词: 白云石; 经典成核理论; 表面能; 固溶体; 文石海

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42202035)

第一作者和通讯作者简介: 戴兆毅 (1990-), 教授。研究方向: 流体-矿物-微生物相互作用。Email: daizhaoyi@cug.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

可见-短波红外反射 (VSWIR) 光谱对风化壳次生矿物演化和稀土富集行为的响应

谭伟^{1*}, 罗莲英¹, 秦效荣¹, 韩梦麒¹, 梁晓亮¹, 何宏平¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

风化壳淋积型(离子吸附型)稀土矿床是全球重稀土的主要来源。黏土矿物与铁氧化物是风化壳中主要的次生矿物,其演化特征能够有效揭示稀土元素的富集-分异过程。可见-短波红外反射(VSWIR)光谱是一种快速、经济的技术,已被广泛用于识别矿床规模的热液蚀变带和成矿带。研究表明,利用 VSWIR 光谱能够很好地识别风化壳中的次生矿物,并反映其演化特征。因此,VSWIR 光谱有望为稀土矿的找矿勘查工作提供有效光谱“指纹”。研究发现风化程度控制了造岩矿物向 2:1 型黏土矿物(如蒙脱石、伊利石等)的转化,而水动力条件则影响高岭石的晶体结构有序度、高岭石与埃洛石比例、以及赤铁矿与针铁矿比例。针对华南不同地区的典型风化壳剖面,进行元素含量和矿物组成以及 VSWIR 光谱等分析,揭示特征光谱参数与风化壳型矿化特征的内在成因联

系。高岭石结晶度能够引起其在可见-短波红外反射光谱~2200 nm 波段的宽化,并可以用与之相关的光谱参数 SC11 来量化表征。另一方面,VSWIR 反射光谱在 900 nm 附近的特征吸收波段位置(P900)可以被作为是判别赤铁矿和针铁矿的指标,归属于 Fe^{3+} 的 $6\text{A}_1 \rightarrow 4\text{T}_1$ 电子跃迁,其中赤铁矿的 P900 特征吸收通常出现在 850~860 nm,而针铁矿通常在 930~940 nm。受到水动力学分带的共同影响,次生矿物的演化与稀土的富集在空间上存在一定的耦合性,因此,与高岭石结晶度以及赤铁矿/针铁矿比例相关的 VSWIR 参数能够有效指示风化壳中稀土矿化的位置。

关键词: 可见-短波红外反射光谱; 矿物演化; 稀土富集

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

黏土矿物制约铁氧化物的形成与转化

陈情泽¹, 朱润良^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

黏土矿物是自然界中与人类活动联系最为紧密的一类天然纳米矿物, 具有粒径小、表面基团丰富、反应活性强等特点。高度活跃的表面反应性和分布的广泛性使得黏土矿物在地质地球化学过程中发挥着重要作用。一方面, 黏土矿物作为常见的地质吸附剂和天然催化剂, 影响自然界元素的运移、富集、转化等过程, 从而影响地球系统的物质循环。另一方面, 黏土矿物还对共存次生矿物的结晶、生长、相转变等过程具有重要的影响。近年来, 课题组探究了黏土矿物对铁氧化物纳米矿物形成与转化的制约及影响机制, 获得如下认识: (1) 黏土矿物的纳米限域作用会影响 Fe(II) 在层间的氧化结晶过程, 层间 Fe(II) 的结晶主要发生在黏土矿物片层边缘, 且与层外 Fe(II) 的氧化结晶产物相比, 层间 Fe(II) 氧化形成

的铁氧化物具有更好的分散性及更高的结晶度。(2) 黏土矿物通过影响水铁矿的分散程度和/或与水铁矿发生界面相互作用(形成 Si-O-Fe、Al-O-Fe 及氢键)等过程控制着水铁矿的水热和干热转化行为, 最终影响着水铁矿的转化速率、产物类型和形貌特征。(3) 在 Fe(II) 催化水铁矿转化过程中, 黏土矿物对水铁矿的分散作用会影响水铁矿通过还原溶解产生活性 Fe(III) 及其后的再结晶过程, 同时黏土矿物的层间域空间会进一步限制 Fe(II) 和活性 Fe(III) 的再结晶过程, 进而影响着转化速率和产物类型; 黏土矿物可以作为模板促进星状针铁矿和六方片状磁铁矿的形成。

关键词: 黏土矿物; 铁氧化物; 相转变; 层间域

基金项目: 国家自然科学基金项目(42225203, 42272045)

第一作者简介: 陈情泽, 男, 34, 副研究员, 矿物结构与表面反应性, chenqingze@gig.ac.cn

通讯作者简介: 朱润良, 男, 研究员, 矿物学, zhurl@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

两种产酸微生物及其代谢物-离子型稀土矿 相互作用机制研究

刘红昌^{1*}, 王梦园¹, 李京娜¹, 黄诗云¹, 刘洋^{1,2}, 王军^{1,2}

1. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 生物冶金教育部重点实验室, 长沙 410083

离子型稀土矿富含中、重稀土元素 (REEs), 是我国不可或缺的战略矿产资源。目前, 国内多采用铵盐或镁盐法原位提取离子型稀土矿中的稀土离子, 这些方法虽然简便、高效, 但存在潜在的环境污染风险。随着生态环境保护意识的日益增强, 绿色生物浸出工艺逐渐成为相关研究热点。生物浸出法主要基于酸水解、络合和氧化还原等原理提取稀土矿中的稀土离子, 微生物及其代谢物在整个提取过程中起着关键作用。生物浸出法与化学法相比具有独特的优势, 不仅环境友好, 而且可实现稀土元素选择性提取。然而, 与化学法相比, 其浸出效率相对较低, 因此, 目前大多数研究主要集中在稀土元素的浸出率以及不同微生物/代谢物浸出稀土矿物的差异上。相关研究对提高稀土生物浸出效率和稀土生物浸出工艺推广应用提供了重要参考, 但有关微生物和代谢物与离子型稀土矿的相互作用机制仍不清晰。研究这些机制对于改进稀土生物浸出工艺和促进稀土生物浸出技术的发展至关重要。因此, 本研究选取两种典型产酸微生物--黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 和嗜酸氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*), 在酸性条件下构建了微生物-离子型稀土矿相互作用体系, 比较分析了这两种微生物及其代谢物-离子型稀土矿相互作用时的溶液行为, 利用多种显微和光谱学技术比较研究了作用前后细胞和矿物相的形貌、结构、稀土元素

分布特征, 以及联合比较转录组学和代谢组学技术比较分析了这两种产酸微生物关键代谢物和代谢途径。结果表明, 黑曲霉和嗜酸氧化亚铁硫杆菌对离子型稀土矿的作用和浸出效果存在显著差异。黑曲霉主要通过分泌含有羧基官能团的有机酸等代谢产物与离子型稀土矿中的稀土离子形成稀土配合物, 从而促进稀土元素的释放, 且对 Yb 具有很强的吸附能力。嗜酸氧化亚铁硫杆菌主要通过铁硫氧化相关的酸化和络合作用促进稀土矿释放稀土元素, 稀土浸出率达到 94.03%, 显著高于黑曲霉作用下稀土浸出率 (83.48%)。黑曲霉作用后矿物显著溶解和转化, 而嗜酸氧化亚铁硫杆菌作用后矿物结构没有显著变化。比较转录组学和代谢组学分析结果发现与主要代谢物分泌相关的基因表达上调, 表明其与生物浸出过程密切相关。结果还发现, 离子型稀土矿的存在可以促进嗜酸氧化亚铁硫杆菌的生长代谢过程以及黑曲霉的三羧酸循环途径。上述结果揭示了典型产酸微生物黑曲霉和嗜酸氧化亚铁硫杆菌及其代谢产物在离子型稀土矿浸出中的作用机制, 这对于理解离子型稀土矿生物浸出机制和推广稀土生物浸出技术工业应用具有重要意义。

关键词: 离子型稀土矿; 微生物-矿物相互作用; 黑曲霉; 嗜酸氧化亚铁硫杆菌; 比较转录组学

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

华南风化壳中原生微生物对稀土元素富集和分异的影响

李旭锐¹, 马灵涯^{2*}, 梁晓亮¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 南京大学, 南京 210023

华南风化壳型稀土矿床是全球最主要的重稀土资源类型, 提供了全球约 90% 以上的重稀土。该类矿床形成于表生环境之中, 是花岗岩等成矿母岩在温暖湿润的气候条件下强烈风化的结果。风化壳中蕴藏着丰富的微生物群落, 对表生环境中稀土元素的富集、迁移和分异起着重要作用。为了厘清风化壳中原生微生物对稀土元素富集和分异的影响, 本研究利用从广东仁居风化壳型稀土矿床风化剖面中分离培养的 30 株原生微生物对稀土元素进行了吸附特征的研究。分离获得的土著微生物菌株均具有吸附稀土元素的能力, 但不同菌株的吸附效果差异较大。大多数菌株对稀土元素的吸附效率较高, 吸附量在 $2.3\sim 42.9\text{ mg g}^{-1}$ 之间。值得注意的是, 微生物类群对稀土元素的吸附选择性有显著影响。革兰氏阳性菌的吸附显著富集重

稀土元素, 而革兰氏阴性菌对稀土元素没有明显的吸附倾向。革兰氏阴性菌和真菌对稀土元素的吸附模式存在四分组效应, 但真菌对轻、中稀土元素表现出更高的亲和力。利用化学修饰后的微生物细胞对稀土元素的吸附机理进行了研究, 发现微生物细胞的不同官能团对应着微生物对稀土元素的不同吸附偏好。羧基和磷酸基分别对轻稀土和重稀土具有较高的吸附能力。研究表明, 不同的微生物群落组成可能对风化剖面中稀土元素的生物地球化学循环产生重要影响。此外, 通过化学修饰改变微生物细胞的吸附位点比例, 可能是微生物特异性回收稀土元素的一种可行方法。

关键词: 稀土元素, 微生物群落, 生物吸附, 稀土分异

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

无定形磷酸铁及其介导的臭葱石结晶过程

朱翔宇^{1*}, 常沛¹, 滕辉¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津市 300072

无定形三价铁磷酸盐 (AFeIII) 与无定形二价铁磷酸盐 (AFeII) 是酸性富砷环境中的重要砷汇, 在砷的地球化学循环以及铁磷酸盐矿物 (如臭葱石 $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 水砷铁石 $\text{FeAsO}_4 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$) 的结晶过程中起着重要作用。然而, 这些无定形相的沉淀动力学与结构演化机制尚不明确。本研究通过原位小角/广角 X 射线散射 (SAXS, WAXS) 以及 X 射线吸收边精细结构谱 (XAFS) 等技术, 系统探究了在不同 pH、As/Fe 比及温度条件下, AFeIII 与 AFeII 的形成及结晶路径。结果显示 AFeIII 的沉淀过程具有两阶段特征: (i) 初始阶段形成由磷酸根- FeO_6 八面体构成的亚纳米至纳米级初级颗粒 (半径为 0.887~1.011 nm); (ii) 随后, 初级颗粒通过氢键

介导的非经典附着机制进一步生长; 高温通过促进磷酸根和 FeO_6 八面体的结合, 高 pH 和高 As/Fe 比通过降低静电斥力, 共同加速了第二阶段的颗粒生长。与 AFeIII 和臭葱石相比, AFeII 的 Fe-O 键更长 ($2.02 \pm 0.01 \text{ \AA}$, 而臭葱石为 $1.99 \pm 0.01 \text{ \AA}$), 这种结构与臭葱石本身的晶体结构不匹配; 此外, AFeII 可显著限制体系中的 Fe^{3+} 浓度, 导致其向臭葱石的转化速率较慢, 最终能够形成更大尺寸的自形臭葱石晶体。该研究深化了学界对无定形磷酸铁物质的结构及其矿化机制的理解, 为自然体系与工业场景中的砷固定策略提供了理论依据。

关键词: 无定形磷酸铁, 非经典结晶, 臭葱石

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

Fe₂O₃-[BO_x]反应驱动硼硅酸钠玻璃结构变化的机制: 微米至纳米尺寸赤铁矿掺杂的影响

杨燕菱^{1,2}, 王成思², 刘琛³, 沈锡田^{2*}

1. 四川大学 分析测试中心, 成都 610064;

2. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

赤铁矿(α -Fe₂O₃)作为铁的主要氧化矿物之一,具有较强的化学活性,其中铁(III)离子容易与硼硅酸盐玻璃基体中结构单元发生反应,从而改变玻璃及其衍生物(如玻璃陶瓷)的多种性能。然而,关于含Fe₂O₃的硼硅酸盐玻璃存在一些争议:(1)Fe₂O₃是否转变为纳米级多晶结构,或是否与玻璃基体反应形成新物质;(2)Fe₂O₃在玻璃网络中的作用是否依赖于其浓度。因此,为了深入探讨Fe₂O₃与基体之间的反应机制,首先通过COMSOL数值模拟 α -Fe₂O₃在多种分散系中的掺杂,从而建立粒径为1~180 nm α -Fe₂O₃在玻璃中的光学模型。然而,在根据Na₂O-B₂O₃-Fe₂O₃相图制备掺杂 α -Fe₂O₃粉末(颗粒尺寸为30 nm、1 μ m、75 μ m)的硼硅酸钠玻璃 x Fe₂O₃·(100- x)[41.6 B₂O₃-20.7 Na₂O-19.2 CaO-9.7 Al₂O₃-7.0 SiO₂-0.6 ZnO] ($x=1.20\sim1.95$ mol%)的过程中,我们发现大多数 α -Fe₂O₃不再作为半导体纳米晶体存在于玻璃结构中,氧化铁粉末的颜色对于粒径尺寸依赖的效应也随即消失,此时 α -Fe₂O₃以过渡金属离子

Fe³⁺的形式在硼酸盐玻璃结构中[BO_x]结构单元中呈现稳定的黄褐色。结合XRD、NMR、FTIR、Raman、LA-ICP-MS以及紫外-可见光谱微区光谱等结果发现,(i)掺杂微米级或纳米级 α -Fe₂O₃颗粒均导致Fe³⁺在四配位[BO₄]中对B³⁺的替代以及Fe³⁺与[BO₃]单元在无定形网络中结合形成Fe-O-B键;(ii)即使在较低浓度下, α -Fe₂O₃仍能作为网络中间体,使其铁离子发挥补网和断键的双重作用。综合以上发现,提出了一种掺杂玻璃反应过程模型,为研究玻璃网络结构的形成机制提供了重要依据,同时也为矿物和地球化学环境中的物质转化与元素赋存状态的分析提供了新的思路,进而对于深入理解铁氧化物在钠硼硅酸盐玻璃中的行为及其用于优化铁质矿物掺杂玻璃的性能、推动矿物资源的高效利用具有重要的应用潜力。

关键词: 氧化铁纳米粒子; 光谱分析; 矿物颜料; 低温玻璃; 数值模拟

第一作者简介: 杨燕菱(1998-), 博士研究生, 研究方向: 分析化学. Email: elliyeung@stu.scu.edu.cn

*通讯作者简介: 沈锡田(1962-), 教授, 研究方向: 微量元素、同位素地球化学与统计学方法在宝石产地与优化处理鉴定之应用. Email: shenxt@cug.edu.cn;

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

富锂盐湖沉积物中典型黏土矿物与 Li^+ 的微界面作用机理研究

崔若男^{1,2}, 王顺^{1*}, 于子萌^{1,2}, 王晨宇^{1,2}, 程宇琪^{1,2}, 魏海成^{1,2}

1. 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁市 810008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

随着“双碳”战略目标的推进以及新能源行业的迅速发展, 我国对锂资源的需求急剧增加。柴达木盆地锂资源极为丰富, 特别是中部四湖区(一里坪、西台吉乃尔湖、东台吉乃尔湖和察尔汗别勒滩区)——锂资源储量约占盆地总储量的 80%——不仅是我国目前最大的卤水型锂矿区, 也是我国最重要的锂产品生产基地, 战略资源地位不言而喻。近期研究表明, 四湖区的锂资源补给量(约 6232 万 t)显著高于其卤水型锂资源储量(约 1408.3 万 t); 据此估算, 在锂元素的迁移补给过程中, 约 80% 的锂可能被固持于四湖区及其周缘的沉积物特别是黏土矿物中, 未能转化为卤水型锂储备资源。这表明, 沉积物中的黏土矿物对四湖区的卤水型锂矿的成盐成矿过程以及锂资源的分布具有重要制约。然而, 在盐湖区这一特殊的环境中(如离子种类多、离子强度高等), 黏土矿物对锂元素(表生环境中以 Li^+ 的形式存在)迁移-富集的制约及所涉微界面作用机理尚不清楚。因此, 基于富锂盐湖区表生沉积物中常见的黏土矿物(伊利石、高岭石、蒙脱

石、绿泥石等)类型, 我们以纯相的黏土矿物为研究对象, 系统开展了其对 Li^+ 的吸附-脱附规律及微观吸附机理的研究。结果发现, 随着 Li^+ 平衡浓度的增加, 黏土矿物的吸附量均呈上升趋势, 但不同黏土矿物对 Li^+ 的吸附动力学、等温吸附曲线存在明显差异, 这主要与黏土矿物的表面活性位点的类型与分布有关。此外, 随着吸附体系 pH 的升高, 黏土矿物的吸附量逐渐增加, 符合其对大多数金属阳离子的吸附规律, 这主要与黏土矿物表面羟基的去质子化有关。进一步, 还将采用精细结构谱学技术研究黏土矿物中锂元素的微区分布特征及原子局域环境, 加深对黏土矿物与 Li^+ 之间微界面作用机理的认识。预期成果有助于理解和掌握柴达木盆地盐湖区表生环境中锂元素的迁移、富集和转化等地球化学行为, 也为厘定盐湖沉积环境下锂资源的赋存机制提供科学依据。

关键词: 黏土矿物; 盐湖沉积物; 锂元素; 迁移-富集; 吸附-脱附

基金项目: 青海省十大国家级科技创新平台建设项目(2024-ZJ-J03); 青海省杰出青年基金项目(2023-ZJ-941J)。

第一作者简介: 崔若男(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 盐湖战略性金属资源评价。E-mail: cuiruanan23@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者简介: 王顺(1992-), 助理研究员, 研究方向: 盐湖战略性金属资源评价、矿物表-界面作用及其资源与环境效应。E-mail: wangshun@isl.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

绿泥石富集锂的规律及机理研究

于文彬^{1*}, 邓智一^{1,2}, 万泉¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

锂作为战略性关键金属, 在新能源等领域具有重要地位, 保障其资源安全对我国经济社会发展至关重要。黏土型锂矿因具有分布广、储量大、开采成本低等特点, 成为我国锂资源的重要潜在来源(温汉捷等, 科学通报, 2020; 胡瑞忠等, 科学通报, 2020)。绿泥石是锂的主要载体矿物(张朝群等, 岩石学报, 2024; Ling et al., Miner. Deposita, 2024), 但其对锂的富集机制尚不明确。本研究针对绿泥石富集锂的规律及机理开展 Li^+ 吸附实验研究, 选取高铁 (Fe_2O_3 含量 14.74%) 和高铁 (Fe_2O_3 含量 1.55%) 绿泥石样品, 系统考察时间、固液比、 Li^+ 初始浓度、温度、pH 及离子强度等因素的影响, 并结合脱附实验、 ^7Li -NMR、TG 及 XPS 等谱学分析揭示吸附机理。结果表明, 两种绿泥石在 48 h 内吸附 Li^+ 达到平衡, 吸附率随固液比增加而升高。高铁绿泥石吸附能力显著优于高铁样品, 温度升高促进吸附, 吸附量随 pH 升高而增加, 离子强度增大亦增强吸附。酸碱滴定显示两种绿泥石

的零电荷点 (PZC) 约为 9, pH<9 时, 矿物表面带正电荷, 与 Li^+ 间存在静电斥力。离子强度增加通过压缩双电层削弱斥力, 从而促进 Li^+ 吸附。脱附实验显示仅有少量 Li^+ 可解吸, 表明绿泥石与 Li^+ 间存在强作用力。 ^7Li -NMR 结果显示, Li^+ 初始浓度为 2000 mg/L 时, 吸附样品锂的化学位移为 -0.72×10^{-6} , 说明吸附样品中存在六配位锂(Hindshaw, et al., Geochim. Cosmochim. Acta, 2019); 吸附 Li^+ 后, 绿泥石的类水镁石层脱羟温度显著下降, Mg1s XPS 峰的结合能也有所下降。因此, 推断吸附过程中 Li^+ 进入了水镁石层、以六配位形式存在绿泥石结构中。本研究揭示了绿泥石对 Li^+ 的吸附规律及其受矿物组成和环境参数的影响机制, 为黏土型锂矿的成矿机理研究和锂资源提取利用提供了实验依据, 具有重要的科学意义与应用价值。

关键词: 锂矿; 绿泥石; 吸附实验; 矿物谱学; 富集机制

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

贵州金沙地区九架炉组黏土岩中锂的富集特征

唐座^{1*}

1. 贵州省地矿局区域地质调查研究院 资勘中心, *毕节市 551700

为了厘清金沙地区下石炭统九架炉组铝质黏土岩系中锂的富集特征, 为锂资源的综合利用与评价提供参考依据, 文本对金沙县坪子上和桶井研究区的锂资源进行评价, 研究含铝岩系化学元素在平面和垂向上的分布特征, 并分析相关关系。结果表明, 研究区锂资源暂不具工业价值。坪子上研究区在平面上 Li_2O 呈北高南低, 桶井研究区呈西北高东南低。垂向上, Li_2O 含量在 $1000 \times 10^{-6} \sim 1999 \times 10^{-6}$ 的样品占分析样品总数的 16.87%, 在 $2000 \times 10^{-6} \sim$

2999×10^{-6} 的样品占分析样品总数的 5.42%, 在 $>3000 \times 10^{-6}$ 的锂样品占分析样品总数的 1.81%, Li_2O 在铝土岩中最为富集, 其次为粘土岩、铝土矿。 Li_2O 与 Al_2O_3 ($r=0.40$)、 TiO_2 ($r=0.43$) 呈正相关, Li_2O 与 SiO_2 ($r=-0.33$)、 TF_2O_3 ($r=-0.20$) 呈负相关, Li_2O 与 A/S (铝硅比) ($r=0.04$)、岩层厚度 ($r=-0.07$) 无相关关系。

关键词: 贵州, 锂, 黏土岩

[基金项目]贵州省威宁地区中二叠统梁山组三稀元素富集特征及其地质因素(黔地矿科合(2017)15号)和贵州省自然资源厅“毕节试验区金沙县制陶用粘土岩普查(编号:21P0048BH100839)”项目联合资助。

第一作者简介:唐座(1988-),男,高级工程师,研究方向:矿物学及成矿规律方面等研究。E-mail: tangzuo111@163.com。

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

锂渣基高强地聚物的微波法制备及其性能

高欢^{1*}, 冯润龙¹

1. 成都理工大学 材料与化学化工学院, 四川 成都 610059

目前由于新能源电池行业的快速发展, 碳酸锂的生产和消耗量也在迅速增长。中国在这方面尤为突出, 月度产能持续上升, 2024 年 6 月已达 94 t, 782 t。目前, 中国锂矿资源开发主要集中在锂辉石矿上, 但由于其锂含量较低及提锂技术效率不高, 导致碳酸锂生产过程中产生了大量锂渣。而锂渣的堆放与填埋不仅会占用大量土地资源, 还会对土壤及水源造成污染。因此, 提高锂渣的利用率, 探索更环保的处理方法, 是当前需要面对和解决的问题, 以推动行业的可持续发展。

地质聚合物是由 $[\text{SiO}_4]$ 与 $[\text{AlO}_4]$ 四面体单元通过共用顶点氧原子构建而成, 形成了一种无定形至半晶态的三维空间网状结构。这种独特的结构赋予了地质聚合物高强度、耐高温、耐腐蚀等一系列优良特性, 使其在建材行业中展现出巨大的应用前景。此外, 与传统硅酸盐水泥相比, 地质聚合物的生产过程能够减少 CO_2 排放, 对于缓解全球气候变暖、促进环境可持续发展具有重要意义。锂渣主要由 SiO_2 和 Al_2O_3 组成, 其中的非晶硅铝组分的大量存在提供了潜在的胶凝活性, 使其适合作为地质聚合物原料或者辅助胶

凝材料。

本文以脱硫锂尾渣和 NaOH 为主要原材料制备了锂渣基地质聚合物, 综合运用扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶变换红外光谱分析仪 (FT-IR)、X 射线衍射仪 (XRD)、万能力学测试仪等仪器, 研究了不同原料配比以及不同养护条件对锂渣基地质聚合物的理化性能的影响。研究结果表明: (1) 高浓度的 NaOH 以及较低的水灰比更有利于提升锂渣基地质聚合物的抗压强度; (2) 微波养护对增强锂渣基地质聚合物的抗压强度有着积极的影响, 如图 1, 微波养护的锂渣基地聚物的抗压强度比常温养护 28 d 的样品的抗压强度提升了 27.6%, 达到了中国国家标准 (GB175-2007) 中 P.O 42.5 的抗压强度; (3) 在锂渣基地聚物中加入标准石英砂, 并以最优配比以及最优养护条件制备锂渣基地聚物砂浆, 最终测得样品的抗压强度达到了中国国家标准 (GB/T 25181-2019) 中 M25 的抗压强度。

关键词: 脱硫锂渣; 地质聚合物; 微波养护; 常温养护

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

插层型蒙脱石复合锂电池固态电解质

周树森¹, 韩章阔¹, 王晓飞², 吕国诚², 刘昊^{1*}, 廖立兵²

1. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京市 100083;

2. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京市 100083

复合固态电解质具有良好的界面相容性和机械性能, 但其存在容易着火, 易被锂枝晶穿透等安全性以及经济成本问题, 阻碍了其在全固态锂金属电池中的应用。本文以锂化蒙脱石为主体材料, 通过将聚偏二氟乙烯聚合物基体插入蒙脱石层间, 制备了一种高蒙脱石含量的插层型复合固态电解质, 其室温离子电导率达 $2.28 \times 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$, 电化学稳定窗口达 4.8 V, 锂离子迁移数达 0.57, 断裂应力达 12.58 MPa。该复

合电解表现出相当优异的热稳定性, 阻燃性能良好。LiFePO₄ | SPE-0.5Li | Li 全电池在 0.5 C 倍率下稳定循环 100 圈以上, 并保持 130 mAh g⁻¹ 的放电比容量。本工作表明低成本且环境友好的天然黏土矿物材料在高能量密度固态电池应用方面具有较大潜力。

关键词: 黏土矿物, 蒙脱石, 复合固态电解质, 固态锂金属电池

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 41831288)

第一作者简介: 周树森(1999-), 博士研究生, 研究方向: 黏土矿物基锂电池固态电解质. Email: 2849243465@qq.com

*通信作者简介: 刘昊(1982-), 教授, 研究方向: 新能源矿物材料. E-mail: liuhao1398@cugb.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

矿物基固态电池

刘昊¹, 白小洁¹, 蒋迪², 韩章阔¹, 周树森¹,
郑佳涵¹, 吕国诚², 廖立兵^{2*}

1. 中国地质大学(北京)数理学院, 北京市 100083;

2. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京市 100083

固态电池因安全性好、理论能量密度高、不泄露、无记忆效应等优点, 被人们寄予厚望以彻底缓解能量密度焦虑, 并成为当下电池领域的研究热点。然而基于聚环氧乙烷(PEO)、聚偏氟乙烯(PVDF)等聚合物的电解质其室温离子电导率较低、热稳定性较差, 无法满足固态电池实际应用需求。蒙脱石、蛭石等层状黏土矿物基本晶胞单元由硅氧四面体层(T)和铝氧八面体层(O)呈“TO”或“TOT”型堆垛构成。因类质同象置换作用, 蒙脱石、蛭石等层状黏土矿物结构层荷负电, 层间充斥大量电荷补偿性可交换碱金属阳离子。这些阳离子可在一定条件下被锂离子或有机分子交换。此外, 黄铁矿等天然矿物有着较高的理论容量、较低的经济成本是良好电极材料。鉴于此, 本团队研究结合典型矿物特征, 设计并构建了黏土矿物基固态电解质, 开发了硫化物基固态电池正极材料, 主要研究包括: (1) 利用分子动力学模拟研究了 PVDF 和 DMF 改性蒙脱石层间 Li^+ 输运机制。结果表明, PVDF 作为支撑骨架稳固存在于层间, Li^+ 富集于四面体负电荷侧并穿插于 PVDF 中, DMF 分布于 Li^+ 周围。模拟得到的 Li^+ 电导率与实验值吻合良好, 证明了模拟的正确性, 揭示了有机物改性对蒙脱石层间离子输运的影响; (2) 以锂化蒙脱石和凹凸棒石为主体材料, 加入聚氧化乙烯作为粘结剂, 通过溶液共混

和冷压相结合的方法制备了具有互穿黏土矿物网络基质的矿物基固态电解质。基于该复合电解质制备的 $\text{Li}/\text{LiFePO}_4$ 固态电池具有优异的放电比容量和循环稳定性(在 0.5C、60 °C 下可稳定循环 500 圈, 容量保持率为 94.1%); (3) 利用丁二腈实现蒙脱石的层间改性, 通过静电纺丝制备出具有 3D 纤维结构 PVDF-HFP/SN-MMT 固态电解质薄膜, 借助热聚合实现原位聚合。在 LFP/Li 电池中, 1C 下循环 1000 次后容量仍保持在 $120 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在对锂电池中, $0.1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下能够稳定循环 3000 h 以上; (4) 通过将锂皂石与 PEO 及少量离子液体复合, 制备了矿物基固态电解质, 展现出优异的热稳定性和机械强度。组装的 $\text{Na}/\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ 电池在 0.1C、60 °C 下实现了 101 mAh/g 的比容量, 表现出良好的电化学性能; (5) 利用来自陕西、北京、湖北等五个产地的天然黄铁矿组装 $\text{FeS}_2/\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}/\text{Li-In}$ 固态电池, 发现其具备良好的倍率性能和优异的循环稳定性。通过球磨减小矿物粒径后, 电池经 450 次循环后比容量不减反增, 提升了约 30%~40%。以上结果表明天然矿物在固态电池中具有良好的应用潜力。

关键词: 固态电解质, 黏土矿物, 黄铁矿, 固态电池

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 41831288)

第一作者简介: 刘昊(1982-), 教授, 研究方向: 新能源矿物材料, E-mail: liuhao1398@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 廖立兵(1963-), 教授, 博士生导师。研究方向: 矿物材料, E-mail: clayl@cugb.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

江西烂泥坑重稀土矿床基岩副矿物特征 及其对稀土成矿的影响

殷琦杭^{1,2}, 谭伟^{1*}, 何宏平^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

稀土元素(镧系+钇)由于其独特的光、电、磁效应,被广泛应用于新能源、新材料、航空航天、国防军工等领域,是支撑现代科技发展、绿色能源转型以及国防安全的重要材料,被称为现代工业的“维生素”。我国华南地区广泛分布的风化壳型稀土矿床是全球稀土资源的重要组成部分,其中重稀土资源占全球稀土产量的 90%以上。风化壳型稀土矿床主要指富含稀土元素的基岩在温暖湿润的气候条件下,经过强烈的风化淋滤作用,稀土元素从基岩的矿物中释放出来,以离子态向下迁移,最终在风化壳下部被高岭石等黏土矿物吸附从而富集形成的矿产资源。大多数矿床会继承基岩的稀土配分,前人通常认为不同类型基岩中的稀土元素主要赋存在稀土副矿物中,因此认为矿床的稀土配分在很大程度上也是受稀土副矿物控制的。然而,目前对于华南地区独特的风化壳型重稀土矿床,在成矿特征以及稀土副矿物特征等方面的研究尚有不足。本研究以江西烂泥坑重稀土矿床为研究对象,利用多种测试方法对矿床进行了系统的地球化

学和矿物学方面的研究工作。结果表明,烂泥坑矿床风化壳基本继承基岩的稀土配分特征,呈现“海鸥式”的重稀土配分。矿体主要分布在风化壳的全风化层下部,并且随着风化壳深度的增加,其轻重稀土的比值呈持续下降的趋势,这表明在风化壳下部,重稀土元素发生了较为明显的富集分异。扫描电镜观察结果显示,基岩中主要的稀土副矿物为硅铍钇矿、褐钇铈矿、萤石、锆石等,并且这些副矿物表面均出现了明显的热液改造特征,其稀土元素的含量和配分也具有显著变化,这暗示了热液作用可能为副矿物的形成提供了部分稀土元素。此外,结合矿物含量及元素组成等数据进行分析,认为矿物含量较低的硅铍钇矿和褐钇铈矿是矿体中稀土元素的主要贡献者。这些发现为华南风化壳型重稀土矿床的矿体特征以及其基岩中稀土元素的来源问题提供了新的思路。

关键词: 风化壳型重稀土矿床; 稀土副矿物; 硅铍钇矿; 褐钇铈矿

基金项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项(A类先导专项), XDA0430205

第一作者简介: 殷琦杭(1999-), 博士研究生, 专业: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: yinqihang@gig.ac.cn

通讯作者简介: 谭伟(1987-), 副研究员, 专业: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: tanwei@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

三聚氰胺甲醛树脂-凹凸复合气凝胶的制备与性能研究

金慧然^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 纳米矿物材料及应用教育部工程研究中心, 武汉 430078

气凝胶是一种具有三维多孔结构的固态材料, 具有高比表面积、低密度、低热导率等诸多优异特性。2021 年,《Science》杂志将气凝胶誉为“可以改变世界的多功能新材料”。凹凸棒石黏土(凹土)是一种天然一维纳米材料(单晶长约 1~5 μm , 直径约 20~70 nm), 属含水富镁铝硅酸盐黏土矿物, 具有高长径比的优良力学结构单元和胶体性能, 使其成为制备气凝胶的理想候选材料之一。然而, 仅靠凹土棒晶间的氢键作用难以获得力学性能良好的气凝胶。针对凹土纤维(直径 20~70 nm)自身尺寸限制其难以在纳米尺度精细调控气凝胶孔隙的问题, 引入原位聚合工艺构建互穿型结构, 使所得三聚氰胺甲醛树脂-凹土复合气凝胶孔隙尺寸在 3 nm~20 μm 范围内可有

效调控且力学性能显著提升。通过对催化剂和水热条件的调控, 精准控制原位聚合的密胺树脂颗粒尺寸在 3 nm 左右, 为三聚氰胺甲醛树脂-凹土复合气凝胶孔隙在纳米级调控奠定了良好的理论基础; 凹土纤维的三维网络结构与三聚氰胺甲醛树脂三维网络形成分布均匀的、具有良好力学性能的互穿型双网络结构。独特的双网络结构使常压干燥制备复合气凝胶成为可能, 所得复合气凝胶隔热性能良好(0.036 W/mK)且具有烟雾缓慢释放特性(200 s 内总烟释放量仅为 6.26 m^2/m^2)。

关键词: 凹土基气凝胶, 高分子改性, 结构调控, 隔热阻燃

第一作者简介: 金慧然(1989-), 博士后, 研究方向: 黏土矿物材料. Email: jinhuiran@cug.edu.cn

*通信作者简介: 金慧然(1989-), 博士后, 研究方向: 黏土矿物材料. Email: jinhuiran@cug.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

基于坡缕石晶体结构特征的功能材料设计

吴丽梅¹, 吕国诚^{2*}, 廖立兵², 唐宁¹, 王晴¹

1. 沈阳建筑大学 材料科学与工程学院, 辽宁省沈阳市 110168;

2. 中国地质大学(北京) 材料科学与工程学院, 北京市 100083

科技发展所引发的污染问题愈发严重, 其中有机污染问题尤为突出, 以印染行业为例, 约 10%~20% 的染料会随着废水排出。有机染料存在分子量大、难去除等问题, 传统的物理、化学以及生物法很难实现对它的完全清除, 同时, 化学清除剂的加入往往会导致二次污染, 因此探究高效、绿色的水污染修复技术成为水体污染防治的重要课题。

本研究通过水热合成法, 在坡缕石表面原位合成了二硫化钼, 获得了坡缕石/二硫化钼纳米复合材料。在此基础上, 通过盐酸对坡缕石基体进行改性, 有效提升了坡缕石和二硫化钼的结合程度; 采用 N-甲基吡咯烷酮与正丁基锂对二硫化钼进行改性, 剥离二硫化钼, 使其结构呈现微弱的无序化, 并引入了适量的缺陷使得复合材料的催化活性位点数增多, 获得了高性能坡缕石/二硫化钼纳米复合材料。二硫化钼通过氨基与坡缕石表面羟基相结合, 均匀分散于坡缕石表

面, 形成独特的纳米花结构。

坡缕石/二硫化钼复合材料对罗丹明 B 具有较好的光催化降解性能。在溶液 pH 值为 6、反应时间为 170 min、溶液浓度为 1500 mg/L 时, 对罗丹明 B 的去除量可达 371.73 mg/g; 经改性后的高性能坡缕石/二硫化钼复合材料在溶液 pH 为 6、反应时间为 140 min、溶液浓度为 2000 mg/L 时对罗丹明 B 的去除量可达 986.47 mg/g, 催化效果提升明显。在此基础上, 采用液质联用分析(LC-MS)得出, 坡缕石/二硫化钼复合材料可将罗丹明 B 降解为苯二酚、羧基苯等断链中间产物。本研究结果对新型黏土矿物基光催化复合材料的开发、我国矿产的资源化利用以及有机污染物的去除均具有重要意义。

关键词: 坡缕石, 类质同像, 晶体结构, 结构演化

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

氨基功能化多孔纳米 SiO₂ 调控铂纳米颗粒形貌及其催化氧化性能研究

张祥伟¹, 陈情泽¹, 朱润良^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州市 510640

铂(Pt)纳米多面体催化剂因其丰富的低配位活性位点而在挥发性有机物(VOCs)催化燃烧中表现出了优异活性,但在载体上表面实现原位生长与均匀分散仍面临巨大挑战。本研究通过预先氨基功能化蒙脱石衍生的多级孔 SiO₂ 载体,成功合成了负载型 Pt 多面体纳米催化剂(Pt-APSiO₂)。研究表明,Pt 纳米多面体均匀分散于 SiO₂ 表面,平均直径为 6.58 nm。在甲苯催化燃烧实验中,Pt-APSiO₂ 的 T₉₀ 为 148 °C,同时表现出优异的稳定性,在连续运行 72 h 后仍能保持 95%以上的催化活性。微观形貌与 EXAFS 分析

表明,Pt 纳米颗粒表面存在丰富的台阶、边缘与拐角位点,这些配位数低的 Pt 位点是主要的催化活性中心。理论计算表明,表面台阶与棱角的形成导致 Pt 的 d 带中心上移,这赋予了 Pt 位点更强的甲苯和 O₂ 吸附/活化能力,以及更低的活性氧形成能垒。本研究为原位合成具有丰富低配位位点的 Pt 纳米颗粒提供了一种新策略。

关键词: 蒙脱石、SiO₂、低配位位点、d 带中心、甲苯催化燃烧

第一作者简介: 张祥伟 (1995-), 研究方向: 矿物功能材料. Email: zhangxiangwei0613@126.com

*通信作者简介: 朱润良, 教授, 研究方向: 纳米矿物结晶生长及表界面反应性. Email: zhurl@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

风化壳中不同种类黏土矿物对离子态稀土富集的贡献-以帽峰山风化剖面为例

徐洁¹, 朱建喜^{1,2,3*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 广东省战略金属与绿色利用基础学科研究中心, 广州 510640;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

在离子吸附型稀土矿床中, 离子态稀土是主要可利用的赋存态, 黏土矿物被认为是可离子态稀土的主要载体。高岭石和埃洛石是风化壳中富集稀土的主要黏土矿物, 高岭石和埃洛石属同族矿物, 结构相似, 互为多型, 但常规方法无法准确区分高岭石和埃洛石的矿物组成和含量, 从而无法准确区分各黏土矿物对稀土富集的贡献。因此作者以帽峰山风化剖面为研究对象, 采用甲酰胺法处理风化壳样品, 对风化壳中的高岭石和埃洛石进行半定量分析。通过模拟吸附实验, 查明各类黏土矿物对稀土离子的吸附特征和吸附量, 结合等温吸附模型揭示了黏土矿物对稀土离子的吸附机理。进一步地, 通过理论计算量化各类黏土矿

物对风化剖面不同深度稀土富集的贡献。结果表明, 全风化层稀土富集的主要贡献矿物是高岭石, 全风化层下部和表土层稀土富集的主要贡献矿物是埃洛石, 半风化层稀土富集的贡献矿物同时包括高岭石、埃洛石和伊利石。该研究半定量分析了风化壳中高岭石和埃洛石的矿物组成, 量化了各类黏土矿物对风化壳各层稀土富集的贡献作用, 厘清了各类黏土矿物对稀土离子的吸附机理, 为进一步认识风化壳中稀土的富集机制奠定理论基础。

关键词: 离子吸附型稀土; 黏土矿物; 高岭石; 埃洛石; 富集

第一作者简介: 徐洁 (1995-), 女, 博士研究生, 从事稀土资源绿色高效开采工作。Email: xujie777@gig.ac.cn

通讯作者简介: 朱建喜 (1973-), 男, 研究员, 主要从事离子吸附型稀土矿产开采与环境效应研究。E-mail: zhujx@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

熔盐对水镁石固定 CO₂ 能力的调控机制

何欣阳¹, 刘鹏^{1*}

1. 华南理工大学 环境与能源学院, 广州 510006

水镁石 (Mg(OH)₂) 是镁含量最高的天然碱性矿物, 对弱酸性温室气体 CO₂ 具有很强的吸附固定能力。理论上, 每 100 g 水镁石可以固定约 75.5 g CO₂, 高于大多数的固体吸附剂。由于化学吸附过程中, CO₂ 在水镁石表面转化成碳酸盐层, 阻碍体相中 Mg²⁺ 与 CO₂ 反应, 吸附固定能力受到反应动力学限制。中高温时, 颗粒的烧结和聚集减少吸附位点密度, 进一步降低水镁石固定 CO₂ 能力。

研究发现水镁石固定 CO₂ 能力随着富 Na 熔盐含量先增加后减少, Na 熔盐为 20% 时, 复合材料的 CO₂

固定能力达到最大 (438 mg/g)。表面形成的熔盐薄膜能溶蚀片状水镁石为颗粒状, 提供更多 CO₂ 吸附位点和扩散孔隙。熔盐薄膜吸收 CO₂ 后, 溶解的 CO₂ 与 Mg²⁺ 反应生成碳酸盐, 碳酸盐析出结晶为菱镁矿, 显著提升水镁石吸附固定 CO₂ 的能力。通过揭示富 Na 熔盐对水镁石吸附-固定 CO₂ 的调控机制, 为后续开发镁基固碳材料提供借鉴。

关键词: 水镁石; CO₂ 固定; NaNO₃ 熔盐; 调控机制

第一作者简介: 何欣阳 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 环境矿物学. E-mail: xiny_he@163.com

*通信作者简介: 刘鹏 (1992-), 副教授, 研究方向: 环境矿物学. E-mail: liupeng@scut.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

氟对地幔中水储量的影响

高程¹, 杨燕^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

过去的研究表明, 地幔是地球上主要的水储库。但是目前对地幔水的储量的认识仍存在争议。需要注意的是, 地幔同时也是氟的主要储库。结晶于 27 亿年前的科马提岩中熔体包裹体的成分表明早期深部地幔同时富含氟和水 (Sobolev et al. 2016), 来自南非 Kaapvaal 克拉通的金伯利岩捕虏体中, 受到富氟熔体交代作用的样品同时含有更高含量的水 (Jackson and Gibson 2023)。这些天然观察表明氟和水在地幔中相伴存在, 地幔名义上无水矿物则是氟和水的主要载体。尽管有大量工作通过研究橄榄石等地幔矿物中水和氟的储存能力来评估地幔氟和水的储量 (例如, Férot and Bolfan-Casanova 2012; Roberge et al. 2015; Grützner et al. 2017), 但是未考虑氟和水在矿物晶格中的相互作用。氟与 OH 电价、尺寸相似, 在矿物晶格中互相取代 (Crépeau et al. 2014), 那么氟如何影响地幔名义上无水矿物中水的储存能力呢? 这对探讨地幔水的储量具有重要意义。我们以上地幔重要的组成矿物橄榄石为研究对象, 利用活塞圆筒压机, 研究了 2GPa, 1200~1400 °C 条件下, 氟对橄榄石中水的溶解度和稳定性的影响, 以探讨氟对上地幔浅部水的储量的影响。结果显示氟的加入促进硅空位水的进入, 提高水的溶解度, 并且提高硅空位水

的稳定性。这些结果表明氟能有效地促进水在橄榄石中的掺入, 并且能够将水稳定地保存在橄榄石的晶格中, 据此推测含氟的地幔区域能储存更多的水。

关键词: 氟, 水, 地幔, 溶解度, 扩散

参考文献:

- [1] Férot A, Bolfan-Casanova N. Water storage capacity in olivine and pyroxene to 14GPa: Implications for the water content of the Earth's upper mantle and nature of seismic discontinuities[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 349-350: 218-30.
- [2] Grützner T, Kohn S C, Bromiley D W, et al. The storage capacity of fluorine in olivine and pyroxene under upper mantle conditions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 208: 160-70.
- [3] Jackson C G, Gibson S A. Build-up of multiple volatiles in Earth's continental keels: Implications for craton stability[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2023, 611.
- [4] Roberge M, Bureau H, Bolfan-Casanova N, et al. Is the transition zone a deep reservoir for fluorine? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 429: 25-32.
- [5] Sobolev A V, Asafov E V, Gurenko A A, et al. Komatiites reveal a hydrous Archaean deep-mantle reservoir[J]. *Nature*, 2016, 531(7596): 628-32.

第一作者简介: 高程 (2000—), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验. Email: 12238004@zju.edu.cn

*通讯作者简介: 杨燕 (1979—), 教授, 研究方向: 矿物学. Email: yanyang2005@zju.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

应用非传统稳定同位素示踪矿物表界面反应位点与机制

李伟^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京市 210023

过去三十年, 同步辐射 X 射线吸收光谱技术的应用, 提供了原子分子尺度的化学结构信息, 极大推动了矿物表界面化学的进步。但同步辐射技术在超轻元素的表征存在局限, 由于碳 (C) 和氧 (O) 等轻元素的反向散射能力较弱, XAFS 分析在审视这些轻元素时遇到了固有挑战。此外, 扩展 X 射线吸收精细结构 (EXAFS) 光谱学的不敏感性要求在样品制备中使用高锌浓度 (通常在毫摩尔每升水平), 或延长光谱采集时间以确保足够的信号强度, 从而限制了传统 XAFS 研究真实地质环境过程。为了解决这一难题, 李伟教授团队创新性地利用金属稳定同位素的分馏差异成功示踪了锌离子在不同矿物表面吸附位点的结合模式。与同步辐射研究结果相反, 不同表面吸附过程产生的锌同位素平衡分馏却存在较大差异, 表面沉淀态的锌可产生 $0.20 \pm 0.04\text{‰}$ 的分馏, 与方解石表面以内圈配位结合态的锌可以产生 $0.47 \pm 0.03\text{‰}$ 的分馏 (图 2)。基于同位素平衡分馏的质量守恒原理, 我们可以定量算出复合体系各种含锌物种的形态。此前, 金属稳定同位素在表生环境领域主要用于宏观尺度的源解析,

我们的工作将稳定同位素的应用进一步推广到了微观尺度的地球化学反应过程示踪, 为研究复杂系统的元素生物地球化学循环提供新思路。在 pH 为 6.5 且锌浓度较低 ($5 \mu\text{M}$) 的条件下, 锌在方解石表面的覆盖度达到 $0.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, 同时吸附与态溶液态锌的同位素分馏 ($\Delta^{66}\text{Zn}$ 吸附-溶液) 显著, 为 $+0.40\text{‰}$, 表明锌主要以四面体内圈表面络合物的形式存在。相反, 在 $\text{pH} \geq 7.5$ 且锌浓度较高 ($100 \mu\text{M}$) 时, 表面覆盖度超过 $57.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, 锌同位素分馏减弱至 $+0.20\text{‰}$, 暗示了水锌矿沉淀的形成。结合 XAFS 分析, 研究结果表明, 随着 pH 和/或锌浓度的升高, 锌在方解石上的吸附机制从四面体内圈表面络合物逐渐转变为水锌矿沉淀, 呈现出连续过渡的特征。此外, 锌同位素分馏对不同吸附机制的敏感性得到了锌同位素分馏与锌-氧键长之间反向线性关系的有力支持, 并针对水纳锰矿和钙锰矿的表面吸附位点发挥了突出作用。

关键词: 稳定同位素, 矿物表界面, 吸附位点, 同步辐射

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 42421002)

第一作者简介: 李伟, 教授, 研究方向: 环境矿物学与表生地球化学 E-mail: liwei_isg@nju.edu.cn

*通信作者简介: 李伟, 教授, 研究方向: 环境矿物学与表生地球化学 E-mail: liwei_isg@nju.edu.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

攀西钒钛磁铁矿矿床中伴生钴的综合利用途径探索

高尚^{1,2}, 王焰^{1*}, 谭伟¹, 陈晓龙¹, 白玉颖¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;

2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043

钴是实现低碳能源转型的关键金属,其需求预期在未来几十年迅猛增长。为了满足不断增长的钴需求,关键金属的提取策略需要由传统矿产逐渐向贫矿、尾矿、矿渣和电池废料等替代原材料转变。我国攀枝花-西昌(攀西)地区产出了世界级的钒钛磁铁矿矿床,其中伴生钴是可供综合利用的主要元素之一,预测金属量可超过 100 万 t,相当于一个大型钴矿床。但是目前对攀西铁矿石及其尾矿中伴生钴的综合利用程度还很低,这一方面是由于对铁矿石及其选冶过程产物中钴的赋存状态缺乏系统认识,另一方面是由于现有的选冶方案中缺乏钴靶向识别与超常富集提取的绿色新工艺。基于攀西铁矿石及尾矿中钴的赋存状态研究发现,伴生钴的赋存具有典型“稀”、“伴”、“细”的特征,仅依靠矿物物理和表面化学性质差异开展尾矿中钴的选矿富集,很难实现伴生钴资

源的充分利用。因此,要提高铁矿石中钴的可利用性,需要加强对铁矿石中钴的赋存状态研究,并超越传统选冶研究范式,寻找能够实现钴活化迁移和有效富集的新途径。通过模拟表生风化成矿过程,尝试利用生物、物理、化学等人工干预手段,加速并靶向调控钴在尾矿中的活化、迁移和富集等地球化学行为,可能为攀西尾矿伴生钴的绿色经济利用带来新机遇。这种新的利用途径需要明晰矿物-溶液/微生物界面作用机制,以及钴的活化与动态转移过程,揭示钴微观形态与溶液环境的响应规律,在理论机制创新的基础上建立综合利用方案,最终为使尾矿转化为具有一定经济价值的矿产资源,为破解钴等战略金属安全供给难题提供重要技术支撑。

关键词: 攀西; 钒钛磁铁矿; 伴生钴; 综合利用

第一作者简介: 高尚(1989-), 博士后, 研究方向: 成因矿物学. Email: gaoshang@gig.ac.cn

*通信作者简介: 王焰(1968-), 研究员, 研究方向: 岩浆作用与成矿研究. E-mail: wang_yan@gig.ac.cn

• 专题 34: 矿物表界面过程与矿物资源高效利用 •

黏土矿物对水铁矿相转化行为的制约及其 对重金属迁移转化的影响

李鸿博¹, 韩斌¹, 陈情泽¹, 朱润良^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

水铁矿(Fhy)是Fe(III)水解首先形成的铁(氢)氧化物矿物,通常以弱晶质纳米颗粒的形式广泛分布于地表环境中,可以通过吸附、共沉淀等过程影响环境中重金属离子的迁移和赋存。水铁矿结构不稳定,在自然条件下会向结晶度更高的铁(氢)氧化物转化,根据转化时所处环境条件的不同,其转化产物可能为针铁矿、赤铁矿、纤铁矿、磁铁矿等。水铁矿的相转化会导致原先通过络合或共沉淀作用固定的重金属元素掺入到转化产物的结构或释放进入溶液中,从而改变共存重金属元素的迁移性。在地表环境中,水铁矿常与其他组分结合形成纳米颗粒聚集体,共同影响着环境中重金属离子的赋存状态和迁移行为。其中黏土矿物与水铁矿在土壤和沉积物中广泛共存,并对水铁矿的相转化行为产生显著影响,如降低水铁矿相转化速率和改变转化产物组成等。理论上,黏土矿物既可以通过调节水铁矿的相转化行为来影响共沉淀重金属离子的赋存状态,也可以通过吸附作用直接影响共沉淀重金属离子的固液分配。系统研究黏土矿物-水铁矿纳米颗粒聚集体中水铁矿的相转化行为及共沉淀重金属离子的再分配过程,可以帮助更好地理解表生环境中矿物间相互作用以及重金属离子的环境

归趋。在Cd(II)-水铁矿-黏土矿物共存体系中,黏土矿物显著抑制了水铁矿相转化并改变其转化路径,减少了Cd(II)向溶液中的释放,且蒙脱石的作用效果强于高岭石。黏土矿物通过静电作用、氢键、化学键以及溶解释放出的Si、Al来抑制水铁矿相转化,高岭石和蒙脱石共存时水铁矿转化率分别为92%和63%(无黏土矿物时水铁矿100%转化);无黏土矿物时水铁矿转化产物为结晶良好的赤铁矿和针铁矿,而黏土矿物共存时转化产物中针铁矿的生成被完全抑制,仅生成结晶度较低的赤铁矿和无定形产物,即“无序赤铁矿”(poorly-ordered hematite)和超顺磁赤铁矿(superparamagnetic hematite);水铁矿转化会导致Cd(II)向溶液相迁移,黏土矿物通过抑制水铁矿相转化、缓冲溶液pH值、吸附部分被释放的Cd(I),从而减少Cd(II)向溶液相的迁移,高岭石和蒙脱石共存时释放到溶液相的Cd(II)比例分别为40%和0%(无黏土矿物时释放到溶液相的Cd(II)比例为53%)。

关键词: 水铁矿, 黏土矿物, 重金属, 相转化, 环境效应

基金项目: 国家杰出青年科学基金(4225203); 国家自然科学基金(42272045, 42302033); 广东省杰出青年自然科学基金(2023B1515020006); 广东省科技计划(2023B1212060048)

第一作者简介: 李鸿博(1993-), 博士后, 研究方向: 土壤污染成因与修复技术. E-mail: lihongbo@gig.ac.cn

*通信作者简介: 朱润良(1979-), 研究员, 研究方向: 矿物表界面反应及资源利用. E-mail: zhuril@gig.ac.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

东天山印支期花岗岩浆活动与稀有金属成矿作用 ——以国宝山铷矿床为例

吴世保¹, 雷如雄^{1*}

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 南二环中段长安大学 710000

高分异花岗岩与稀有金属矿化密切相关,然而控制稀有金属富集的机制及其具体过程仍未得到充分约束。位于中国东天山的国宝山铷(Rb)矿床是最大的与花岗岩相关的铷矿床之一,其保存了从黑云母花岗岩、白云母花岗岩到富铷的天河石花岗岩和伟晶岩的一系列渐变岩相,为研究花岗岩体系中铷的富集过程提供了绝佳的机会。国宝山大型铷矿床的 Rb_2O 资源量达 28.1 万 t, 平均品位为 0.12%, 主要赋存于含天河石花岗岩和天河石花岗岩岩相中。在本研究中,我们综合了年代学、全岩地球化学、Nd 同位素和锆石 Hf 同位素数据,以表征国宝山花岗岩岩体的演化过程,并揭示铷富集的机制。黑云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(244.8 \pm 1.8) \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=1.1), 而天河石花岗岩的锆铁铀 U-Pb 年龄为 $(241.9 \pm 2.3) \text{ Ma}$ (1σ , MSWD=1.0)。含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩中正长石、云母和钠长石的原位 Rb-Sr 年龄分别为 $(249.1 \pm 7.3) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=1.6)、 $(245.5 \pm 16.8) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=0.63) 和 $(245.8 \pm 9.8) \text{ Ma}$ (2σ , MSWD=3.3)。这些年龄数据共同表明国宝山花岗岩岩体形成于三叠纪,并经历了长期的岩浆演化。国宝山花岗岩岩体具有高硅富碱和铝含量,以及低镁铁钙磷钛含量的特征,其铝饱和指数(A/CNK)为 1.01~1.14。该岩体富集 Rb, 但亏损 Ba、Sr、P 和 Eu, 稀土元素总量较低 ($83.1 \sim 221 \times 10^{-6}$),

并表现出显著的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.01 \sim 0.44$)。黑云母花岗岩富集轻稀土元素,而白云母花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩则亏损轻稀土元素,并表现出明显的四分组效应 ($\text{TE}_{1,3} = 1.05 \sim 1.50$)。这些地球化学特征,结合 Zr/Hf、Nb/Ta、Y/Ho 和 K/Rb 的非离子电荷-半径控制的比值,表明国宝山岩浆演化过程中存在熔-流体相互作用。黑云母花岗岩作为演化程度相对最低的岩石相,其岩相学和地球化学特征表明其为 I 型花岗岩。略微变化的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和一致的负 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明,国宝山花岗岩体的岩浆源区可能为中元古代地壳,仅有少量地幔物质的加入。这些岩石的同期年龄、一致的地球化学变化和矿物组成表明,它们是通过同一岩浆系统中斜长石、云母、石英和钾长石的分离结晶作用形成的,这一结论得到了 Rhyolite-MELTS 模拟的支持。基于白云母花岗岩、含天河石花岗岩、天河石花岗岩和伟晶岩的岩石学、矿物学变化特征以及地球化学特征,结合 Rhyolite-MELTS 与瑞利分馏模拟的结果,我们认为花岗质岩浆的高度分离结晶作用及其与富 F 流体的相互作用是铷富集的关键机制,而熔-流体相互作用对铷矿化的贡献更为关键。

关键词: 高分异花岗岩; 熔-流体相互作用; Rhyolite-MELTS; 国宝山铷矿床

基金项目:“战略性关键金属超常富集成矿动力学”重大研究计划重点支持项目(91962214)、新疆重点研发计划“塔里木-南天山结合带稀有稀土金属成矿潜力关键技术研究”项目(2022B03015)

第一作者简介:吴世保(1999-),博士研究生,研究方向:矿床学. Email: wsb@chd.edu.cn

*通信作者简介:雷如雄(1987-),教授,研究方向:矿床学. Email: ruxionglei@chd.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

闪锌矿 S-Zn 同位素原位分析的参考物质研究

聂晓娟¹, 袁洪林^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

本研究合成了一种基体匹配的合成闪锌矿标准物质, 用于 LA-MC-ICP-MS 原位硫同位素比测定。PAS 合成的闪锌矿表面光滑致密, 易于抛光和保存。对 PAS 合成的闪锌矿进行了电子探针分析和绘制了元素分布图, 表明其主要元素具有良好的均匀性。用 LA-MC-ICP-MS 分析 PAS 合成的闪锌矿, 在五个月内其长期测量精度优于 0.20‰ (2SD), 并使用 MSWD、F 检验和 H 指数来检查均一性。此外, 以 PAS 合成的闪锌矿为标准, 对天然闪锌矿 NBS123 和 SPH-1 进行了均匀性测试。所有结果表明, 不仅 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值的再现性良好, 而且 PAS 合成的闪锌

矿的硫同位素组成的平均值在分析不确定度内与 GS-IRMS 测量的值一致, 表明 PAS 合成的闪锌矿可以作为基体匹配的闪锌矿硫同位素标样。

根据组合不确定度的计算, 我们建议将 $-5.44 \pm 0.18\text{‰}$ (2SD) 作为 PAS 合成闪锌矿的参考 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值。PAS 合成的闪锌矿目前有大量可供分享, 可应世界各地实验室的要求, 如需请联系 (电子邮件: yhlslcd@126.com)。

关键词: 闪锌矿, 硫同位素, LA-MC-ICP-MS, 基体匹配, 标准物质

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42130102, 42173033 和 41825007)

第一作者简介: 聂晓娟 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 分析地球化学. Email: 740867698@qq.com

*通信作者简介: 袁洪林 (1974-), 教授, 研究方向: 分析地球化学. Email: yhlslcd@126.com

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

冀东地区中元古代雾迷山组富锂岩系中锂的 细致赋存形式研究

徐飞¹, 温汉捷^{1*}

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

锂作为一种战略性关键金属,在新能源领域发挥着重要作用,特别是在驱动新能源经济的锂离子电池方面。最近,在华北东缘中元古代雾迷山组白云岩中发现了富锂层位($\text{Li}_2\text{O}>0.3\%$),其地层分布广泛、厚度大和层位稳定,表明锂资源开发潜力巨大。本研究以冀东地区中元古代雾迷山组富锂样品为研究对象,采用场扫描电镜、飞行时间二次离子质谱、高分辨透射电镜和核磁共振等原位微区分析技术对雾迷山组锂的细致赋存形式进行探讨,旨在全面理解锂的超常富集机制。研究表明,冀东地区雾迷山组富锂样品主要由白云石和石英组成,其次是伊利石、伊蒙混层和绿泥石等黏土矿物,还有少量钾长石、钠长石、黑云母、氟磷灰石、方解石、重晶石、萤石和赤铁矿等。根据矿物的形貌特征和共生组合关系,钾长石、钠长石、黑云母和氟磷灰石等矿物与高于庄组凝灰岩中相似,表明这些矿物除陆源碎屑输入之外,还可能由火山活动输入。浸染状和脉状的重晶石和萤石切割

赤铁矿、石英、伊利石等现象,表明重晶石和萤石为后期热液成因矿物。原位微区分析和 $^7\text{Li-NMR}$ 表明,锂主要赋存于自生的伊利石和伊蒙混层的八面体结构中,而碎屑的伊利石和绿泥石、未蚀变的钾长石以及白云石中不富集锂。靠近重晶石、萤石和方解石脉的黏土矿物中锂和氟的明显富集,以及全岩样品锂与氟之间的强正相关性表明,后期富锂和氟的热液流体对锂的富集及其载体矿物的形成具有促进作用。根据黏土矿物的共生组合表明,富锂伊利石由钾长石热液蚀变而来。在持续的热液流体蚀变作用下,这些富锂伊利石进而转变为一系列的富锂伊蒙混层,其中包括富伊利石的伊蒙混层和富蒙皂石的伊蒙混层。这些发现为这一有前景的锂资源的勘探、开发提供了有价值的见解。

关键词: 冀东地区; 雾迷山组; 富锂伊利石; 富锂伊蒙混层; 热液流体

基金项目: 国家自然科学基金(92162214), 中国科学院战略性先导科技专项(编号 XDA0430103)

第一作者简介: 徐飞(1994-), 博士研究生, 研究方向: 沉积型锂资源的赋存状态和富集机制. Email: xfei1018@163.com

*通信作者简介: 温汉捷(1971-), 教授, 研究方向: 三稀元素(稀土、稀有、稀散)地球化学及成矿机制. Email: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通晚古生代含铝岩系关键元素 富集特征及其成因机制

王壮森¹, 李勇^{1*}

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

华北克拉通上石炭统本溪组含铝岩系是我国重要的铝土矿资源之一, 其关键元素(Li、B、REE等)的富集机制对于资源开发和成矿理论具有重要意义。本研究选取鄂尔多斯盆地东部(陕西府谷及山西河曲、保德、临县、兴县等地)剖面为研究对象, 系统分析了含铝岩系的岩矿组成、地球化学特征。结果表明, 含铝岩系主要由一水硬铝石、一水软铝石、高岭石、伊利石、绿泥石、赤铁矿、锐钛矿等矿物组成, 呈现致密块状、豆鲕状、多孔状及碎屑状等结构。基于矿物学特征, 提出基于铁矿物端元、铝的氢氧化物及钛矿物端元、黏土矿物及其他矿物端元含铝岩系的分类方案, 将其划分为铝土岩、泥质铝土岩、铁质铝土岩、泥岩、铝质泥岩、铁质泥岩、铁岩、泥质铁岩和铝质铁岩共 9 种类型。研究区含铝岩系主要为泥岩、铝质泥岩、泥质铝土岩和铁岩 4 种。通过系统对比华北地区野外露头及

岩心资料, 含铝岩系的剖面结构从下到上分为 5 段: 富铁层段、含铝层段、铝土矿层段、含铝层段和暗色泥岩段。通过微量元素、扫描电镜-能谱及探针微区激光联合分析揭示了关键元素(Li、B、REE)的赋存状态及富集机制。Li 主要赋存于锂绿泥石中, 通过类质同象/吸附作用赋存于黏土矿物表面, 特别是在上部含铝泥岩层段富集。B 主要吸附于伊利石, 在伊利石向高岭石的转化过程中部分释放; REE 主要赋存在黏土矿物、一水硬铝石和一水软铝石中; B 和 REE 主要富集于下部铝土矿层段和含铝泥岩层段。本研究不仅对关键元素的勘探与开发具有重要价值, 同时也可有助于揭示地球表层风化过程中元素迁移与富集的基本规律。

关键词: 华北克拉通、含铝岩系、锂、硼、稀土元素

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2021DQ02-1003)

第一作者简介: 王壮森(1995-), 博士研究生, 研究方向: 煤系矿产资源. Email: 18810361039@163.com

通讯作者简介: 李勇(1988-), 教授, 研究方向: 煤层气及煤系成矿学. Email: liyong@cumtb.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

地幔深部碳封存形成高氧化异常熔体

董栩含¹, 王水炯^{1*}

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

深部碳循环在调控地幔动力学过程及维系地球宜居环境方面扮演着至关重要的角色。前人通过金属同位素分析发现中国东部大地幔楔是一个巨大的碳库。研究表明, 西太平洋板块的持续西向俯冲并滞留地幔过渡带, 携入大量表生碳至大地幔楔, 触发了挥发份循环、改变了地幔氧化还原状态, 并显著影响了地表环境。本研究通过对中国东部典型新生代玄武岩进行全岩 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值分析, 发现这些玄武岩具有极高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值, 显著高于大洋玄武岩, 与岛弧玄武岩相近。然而, 在 U/Pb 与 Th/Ba 比值的相关性上, 它们却与典型的岛弧岩浆体系存在显著差异。本研究认为, 中国东部新生代玄武岩的高度氧化与地幔过渡带停滞的太平洋板块相关, 该板块在俯冲过程中优先失去流体流动性元素。这些玄武岩的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值与 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Zr/Nd 、 Ti/Ti^* , Hf/Hf^* , $\delta^{26}\text{Mg}$ 及 $\delta^{66}\text{Zn}$ 等地球化学参数之

间的显著相关性强烈暗示了碳酸盐熔体在高度氧化的玄武岩成因中的重要作用。通过第一性原理计算, 本研究揭示了金刚石因密度高于地幔熔体而自然沉降, 此机制显著促进地幔源区高氧逸度状态形成。经计算, 本研究估测中国东部地幔过渡带内潜在的碳储量达到约 2400 千兆吨 (Gt), 这一数值相当于工业革命前大气中碳储量的四倍。因此, 我们提出: 全球板内玄武岩存在一个共同高度氧化的地幔端元 (Highly Oxidized Mantle Endmember, HOME), 其形成和再循环碳深部封存密切相关, 形成了中国东部独特的高度氧化的新生代板内玄武岩。HOME 的形成和深部碳封存对地幔的热动力学演化以及表生气候的调控具有重要意义。

关键词: 深部碳循环; 板内玄武岩; 再循环碳酸盐; 高度氧化的地幔端元

基金项目:

国家重点研发计划 (2022YFF0801004)

国家重点研发计划 (2019YFA0708404)

国家自然科学基金 (41973010)

中央高校基本科研业务费专项资金 (2652023001)

第一作者简介: 董栩含 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学与岩石地球化学. E-mail: dxh@email.cugb.edu.cn

*通信作者简介: 王水炯 (1986-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学与岩石地球化学. E-mail: wsj@cugb.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通新太古晚期赞皇 BIF 成因： 地质和古环境意义

蒋康¹，王军鹏^{1*}，Timothy Kusky¹，王璐²

1. 中国地质大学（武汉）地球科学学院，武汉市 430074；

2. 中国地质大学（武汉）地质过程与矿产资源国家重点实验室，武汉市 430074

条带状铁建造（BIF）是一种海相化学沉积岩，由层状硅质条带和铁质条带组成，主要形成于太古代和古元古代。BIF 是早期地球地质、生物和大气海洋环境演化特定阶段的产物，与铁建造密切相关的铁矿床不仅是最重要的铁矿类型，而且其物源特征和沉积环境可为研究早前寒武纪古海洋的化学成分、氧化还原环境提供重要信息。本研究采用大比例尺地质填图、岩石学、主微量元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Sm-Nd 同位素等方法，对华北克拉通赞皇地块中一套新太古代 BIF 开展详细研究，并对整个华北地区太古宙至古元古代 BIF 进行了统计分析。该研究为揭示古海洋化学成分、氧化还原环境以及地质-环境协同演化与 BIF 形成的关系提供了约束。赞皇 BIF 主要由石英和磁铁矿组成，富铁条带中含有铁闪石、阳起石（铁阳起石）和石榴石，属于阿尔戈马型 BIF。与 BIF 伴生沉积岩的锆石 U-Pb 年龄表明，赞皇 BIF 形成于~2.51 Ga。赞皇 BIF 为纯化学沉积岩，其中 Al_2O_3 、 TiO_2 含量很低，高场强元素 Zr、Hf、Th、U 含量较高。BIF 亏损轻稀土元素，La 和 Y 呈正异常，与现代海水的地球化学特征相似。而 Eu 正异常和含量相对较高的过渡金属元素表明高温热液流体是 BIF 沉积物质的主要来源。此外 BIF 低于海水的 Y/Ho 比值和高于海水的 Sm/Yb 比值表明沉积水体有 10%~20% 的淡水输入，

或者洋壳衍生流体等其他流体参与 BIF 沉积。赞皇 BIF 全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值（-2.16~+2.1）变化范围很大，表明壳源物质对海水 Nd 同位素组成的复杂贡献。赞皇 BIF 具有 Ce 无异常和低 $(\text{Pr}/\text{Yb})_{\text{SN}}$ 比值的特征，表明 BIF 的沉积盆地仍处于缺氧状态。赞皇 BIF 形成于岛弧构造环境，弧陆碰撞不仅为 BIF 沉积提供了合适的沉积盆地，伴随的岩浆和热液作用更是供给了丰富的物质来源。统计表明，华北地区太古宙-古元古代 BIF 的峰期沉积年龄为~2.54 Ga。大多数华北克拉通 BIF 为阿尔戈马型，少数古元古代 BIF 为苏比利尔型。<0.1%~1% 的现代海底高温热液和海水混合可以解释 BIF 的 REE+Y 配分特征，而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值表明海水中可能有陆源物质的贡献。BIF 的 Eu 异常值表明~2.7 Ga 和~2.55 Ga 是华北克拉通海底热液和岩浆活动的两个高峰，分别对应华北克拉通地壳生长和俯冲碰撞事件。Ce 异常和 Fe 同位素证据显示，在~2.5 Ga 之前，海洋整体缺氧但可能局部存在氧气绿洲，而在 GOE 期间逐渐转变氧化还原分层。华北克拉通 BIF 大多形成于与岛弧相关的构造环境，而古元古代的 BIF 则可能反映了裂谷—俯冲环境。

关键词：条带状铁建造；赞皇地块；新太古代；构造环境；华北克拉通

基金项目：国家自然科学基金面上项目（42372231）

第一作者简介：蒋康（1998-），博士研究生，研究方向：前寒武纪地质学。Email: kangjiang@cug.edu.cn

*通信作者简介：王军鹏（1986-），教授，研究方向：前寒武纪地质学。Email: wangjp@cug.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

页岩气成藏与保存过程中页岩裂缝开启与 胶结作用时间差异性对比-以涪陵页 岩气田五峰组—龙马溪组页岩为例

罗涛¹，郭小文^{1*}

1. 中国地质大学（武汉）资源学院，武汉 430074

中国南方海相页岩在多期次埋藏和隆起过程中具有高热演化和强烈变形的特点。在经历不同构造演化的页岩储层中，与构造活动、成岩作用、油气生成和迁移过程相关的裂缝和脉体分布广泛且差异较大。在这项研究中，我们利用横切关系、流体包裹体显微测温、激光拉曼光谱以及裂缝充填方解石脉的 U-Pb 定年，结合埋藏史模拟，阐明了五峰-龙马溪页岩储层的裂缝开启的时间和机制，以及涪陵页岩气田的区域变化。页岩储层中的层理平行裂缝（BFs）充满了方解石和石英脉。根据最低均一化温度和 U-Pb 年代测定，页岩裂缝开启时间估计发生在大约 191~122 Ma，在此期间，一些短的垂直（或高角度）裂缝（VFs）分别在 163.4 Ma 和 137 Ma 左右打开，随后分别被方解石脉胶结。这些断裂内的方解石脉和石

英脉均含有高密度甲烷包裹体，而页岩储层则处于高成熟演化阶段。这表明，压裂主要是由深埋过程中产生的气体超压驱动的。在断层带褶皱附近的页岩储层中，发育了多级断裂，包括三期交切的裂缝（IFs）和一段长 VF。裂缝开启和胶结的时间与燕山构造隆起（约 83~69 Ma）相吻合，强烈的构造运动可能导致构造抬升过程中页岩气的排出，反映出页岩气保存条件遭到破坏。与此相反，在构造平缓带没有观察到明显的裂缝开启或胶结作用过程。不同的断裂和胶结过程表明，在构造抬升过程中，随着裂缝数量的增加，保存条件也在下降，这与页岩气的富集有关。

关键词：裂缝，方解石 U-Pb 定年，流体包裹体，五峰-龙马溪页岩，四川盆地

基金项目：国家自然科学基金项目（No. U20B6001；No. 92255302；No. 42172157）

第一作者简介：罗涛（1995-），博士研究生，研究方向：流体演化与油气成藏。Email: cugluotao@126.com

*通信作者简介：郭小文（1980-），教授，研究方向：油气成藏机理。Email: cuggxw@163.com

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

华北克拉通冀东地区新太古代晚期 TTG 片麻岩年代学及地球化学研究

井佳浩¹, 刘潜^{1*}, 赵国春^{2,1}, 孙晨阳¹

1. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 地质学系, 西安 711069;

2. 香港大学 地球科学系, 香港 999077

现有研究表明, 太古宙是大陆地壳形成与演化的重要时期, 至少 60%~80% 的现今大陆地壳形成于该阶段, 且新太古代早期 (~2.7 Ga) 是全球大陆地壳生长的峰期, 同时也是全球岩浆活动及锆石年龄峰期。相比于世界其他典型克拉通, 华北克拉通发育强烈的新太古代晚期构造岩浆活动 (~2.5 Ga)。关于该期次岩浆活动是否代表华北克拉通一次显著的地壳生长一直存在争议。另一方面, 英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩岩石组合 (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite, TTG) 是太古宙大陆地壳的重要组成部分, 因而其岩石成因几乎代表了早期陆壳形成方式, 从而成为另一亟待解决的科学问题。为此, 本文选择华北克拉通新太古代基底典型出露的冀东地区, 对研究区内广泛分布的 TTG 片麻岩进行详细的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、全岩地球化学以及锆石 Hf 同位素的综合研究, 讨论其形成时代及岩石成因。

年代学研究表明, 冀东地区 TTG 片麻岩原岩结晶年龄为 2554~2547 Ma, 变质年龄介于 2510~2485 Ma, 与冀东地区 ~2.5 Ga 的区域变质作用时代一致。此外, 本文样品的岩浆锆石均具有正的且接近同时期亏损地幔的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+5.0~+7.5), 且模式年龄 (2673~2578 Ma) 与锆石结晶年龄相差不大 (<200 Ma), 指示 TTG 片麻岩原岩起源于新生地壳物质的部分熔融。结合研究区内新太古代表壳岩中基性火山岩的广泛出露, 本文认为冀东地区新太古代晚期存在一次显著的地壳生长。

地球化学分析结果显示, 冀东地区 TTG 片麻岩具有较高的 SiO_2 (66.54%~75.31%)、 Al_2O_3 (14.21%~18.30%)、Sr (296×10^{-6} ~ 1113×10^{-6}) 含量和低的 Y (0.80×10^{-6} ~ 7.20×10^{-6})、Yb (0.06×10^{-6} ~ 0.58×10^{-6}) 含量, 以及较高的 Sr/Y (94.81~1420)、(La/Yb) N (16.20~89.09) 比值, 并相对富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 与典型的埃达克质岩石地球化学特征类似。此外, 这些样品均具有较低的 MgO (0.14%~1.98%) 以及 Cr (2.67×10^{-6} ~ 51.4×10^{-6})、Co (1.45×10^{-6} ~ 12.3×10^{-6})、Ni (2.52×10^{-6} ~ 26.7×10^{-6}) 含量, 指示其为加厚下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石。本文样品属于 Moyen et al (2011) 划分的高压型 TTG, 并具有较高的 Nb/Ta 和 Zr/Sm 比值, 指示源区残留相为金红石和石榴子石。同时, 所有样品具有显著的 Eu 正异常及较高的 Sr 含量, 进一步说明其源区无斜长石的残留。基于太古宙拉斑玄武质岩石的平均成分, 利用简单的批式部分熔融模型进行模拟, 结果显示 TTG 片麻岩最有可能是含金石榴辉岩低程度 (10-25 %) 部分熔融的产物。综合上述证据, 本文认为冀东地区新太古代晚期 TTG 片麻岩原岩来源于新生的镁铁质加厚地壳的部分熔融, 石榴子石和金红石是源区主要的残留矿物, 无斜长石残留。

关键词: 华北克拉通; TTG 片麻岩; 地壳生长; 岩石成因

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272249)

第一作者简介: 井佳浩 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 前寒武纪地质学. Email: jingjh@stumail.nwu.edu.cn

通信作者简介: 刘潜 (1988-), 教授, 研究方向: 岩石大地构造、超大陆古地理重建、大陆风化与古环境. Email: liuqian@nwu.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

基于机器学习的磁性矿物识别与宏观磁学反演

裴召文¹, 常燎^{1*}

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京市 100871

磁性矿物广泛存在于岩石、沉积物和陨石等自然样品中, 在地球各圈层及地外天体的研究中具有重要意义。磁学性质是磁性矿物学研究的核心, 但其表征面临两大挑战: 一是许多磁性矿物处于纳米尺度; 二是部分矿物在样品中含量极低。这些特性使得直接观测磁性变化和开展控制实验变得困难。因此, 当前研究主要依赖宏观全岩磁性测量和少量样品的高分辨率显微观测。然而, 全岩磁性参数解译存在主观性和多解性问题, 且缺乏定量化解译工具。机器学习算法的发展为解决上述问题提供了新途径。本研究开发了基于卷积神经网络的磁性矿物显微图像原位识别框架 MagNet, 可高效提取磁性

矿物的尺寸、形状和位置等信息, 并基于原位信息建立微磁模型, 定量计算其磁学性质。此外, 针对一阶反转曲线这一重要岩石磁学方法, 我们提出了基于卷积神经网络的磁性反演框架 FORCINN, 可直接从宏观磁学性质反演磁性矿物的尺寸和形状特征。通过机器学习方法, 本研究实现了磁性矿物的图像自动识别与宏观磁学参数的精确反演, 为磁性矿物学研究的定量化和智能化发展提供了重要支持。

关键词: 磁性矿物, 机器学习, 磁学性质, 图像识别, 磁学反演

第一作者简介: 裴召文 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 磁性矿物学. Email: zwpei@pku.edu.cn

*通信作者简介: 常燎 (1981-), 研究员, 研究方向: 磁性矿物学. Email: liao.chang@pku.edu.cn

• 特别专题：中国科协青年人才托举工程博士生专项计划学术沙龙 •

火山物质诱发的湖盆 S-Fe-P 元素循环扰动与 有机质异常富集——以鄂尔多斯盆地上 三叠统黑色页岩为例

李克¹, 蒯克来^{1*}

1. 中国石油大学（华东）地球科学与技术学院, 山东省青岛市 266580

黑色页岩是有机碳的主要储存库, 记录了碳汇过程中元素循环的重要信息。然而, 由于埋藏过程中的地质改造, 全面理解湖相页岩的元素循环过程仍然具有挑战性。本研究综合地质-地球化学研究方法, 阐明了火山物质对铁-硫-磷元素耦合机制的扰动及其对鄂尔多斯盆地上三叠统陆相页岩中有机碳保存的影响。岩石学分析表明, 有机碳富集 (TOC>6%) 与火山物质的输入存在成因关联, 尽管页岩的有机碳峰值区间在地层上滞后于凝灰岩沉积段。火山物质输入为湖盆提供了大量的铁、磷和硫元素。火山灰空落施肥促进了湖泊中藻类、瓣鳃类和大型鱼类在短时间内迅速繁盛, 但难以维持百万年时间尺度的营养供应。然而, 火山来源的磷可以通过铁氧化物吸附和生物吸收被迅

速封存至沉积物中。硫酸盐的输入调节了湖盆中铁氧化的还原途径, 增强了细菌硫酸盐还原作用 (BSR), 同时抑制了异化铁还原作用 (DIR), 从而使水体氧化还原条件从贫氧转变为硫化环境。在此过程中, 铁合磷中的 Fe (III) 被还原为 Fe (II), 随后被形成的黄铁矿移除。随后, 缺氧底水条件促进了磷从富磷沉积物中重新释放, 维持了长时间尺度的湖泊生产力, 最终导致了有机质的异常保存。本研究揭示了火山物质扰动后, 湖泊内营养元素动态循环在有机碳埋藏中的关键作用, 为理解陆相湖盆碳汇机制提供了新的见解。

关键词: 黑色页岩, 火山活动, 有机质富集, 铁-硫-磷循环, 鄂尔多斯盆地

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072161)

第一作者简介: 李克 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 深水细粒沉积与页岩油气. Email: likea0619@163.com

*通信作者简介: 蒯克来 (1988-), 教授, 研究方向: 深水细粒沉积与页岩油气. Email: kelai06016202@163.com