

• 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 $0.302\text{‰} \pm 0.017\text{‰}$ 。其中纯橄榄岩、方辉橄榄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榄岩或者大洋橄榄岩具有相似的 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 $\delta^{41}\text{K}$ 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% ± 8.9%) 和硅酸盐矿物结构中的钾(占比 32.6% ± 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 $-0.09\text{‰} \pm 0.04\text{‰}$ 至 $0.35\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$, 显著高于硅酸盐结构钾 ($-0.71\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$ 至 $-0.34\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$)。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($385\sim 913\text{ }\mu\text{g/g}$)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 CO₂ 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, 翟华焯^{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: 翟华焯 (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