

Mo 同位素体系在矿床学中的应用

刘洁^{1,2}, 温汉捷^{1*}, 张羽旭¹, 樊海峰¹, 朱传威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, 贵州贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

Mo 元素及其同位素的化学性质和地球化学特征决定了其在示踪沉积环境变化方面的优势, 并多被用来示踪(浅成)低温矿床的成岩成矿环境。此外, 近年来的研究发现, 它在追溯成矿物质来源、区分矿床类型、建立成矿模型、反演成矿温度和成矿期次等方面也有广泛地应用前景。

首先, 在成矿沉积环境示踪方面: 贵州织金磷矿为一超大型含稀土磷矿床, 产于早寒武世梅树村期底部含磷岩系。上段硅质磷块岩的 Mo 元素含量变化为 3.75ppm~40ppm, 平均为 12.9ppm, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 $1.88\% \pm 0.08\%$; 下段白云质磷块岩的 Mo 元素含量变化为 0.26ppm~1.88ppm, 平均为 0.75ppm, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 $1.71\% \pm 0.08\%$ 。结合 Mo 元素和其同位素地球化学性质来看: ①上段 Mo 元素含量比下段高, 说明上段硅质磷块岩沉积于水体相对较深, 较还原的环境; ②该剖面所有的样品的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值都接近于现代海洋 ($2.34\% \pm 0.1\%$) 的水平, 并且最高值达到 $2.45\% \pm 0.08\%$, 说明在早寒武时期, 海水的氧化程度至少已经和现在海洋比较接近了, 并且当时沉积区大部分都是与外海相连通的, 而该剖面上段的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值较下段而言偏重, 表明上段中的铁锰氧化物对轻的 Mo 同位素的吸附作用较弱。生物作用以及成岩后期风化作用几乎不会对 Mo 同位素分馏产生大的影响。综上, 贵州织金磷矿主要沉积作用发生于扬子地台边缘开阔海区域, 属于海进沉积序列, 自下而上由弱氧化向弱还原、水体逐渐变深的环境。

其次, 用于追溯成矿物质来源: 由于 ^{98}Mo 的分馏差值约 3‰, 相对于质量数较轻的同位素(如传统的稳定同位素 C、H 和 S 等)的分馏要小得多, 而且, 各地质储库的 Mo 同位素组成测试还有待完善, 就目前而言, 要清楚地区分各个不同物质来源的 Mo 同位素组成端元相对较难, 运用的比较多的是判别沉积型矿床中海水物质来源的贡献。例如, Xu et al. (2013)对华南扬子地台湖北、贵州等地区的早寒武世 Ni-Mo-PGE-Au 多金属硫化物沉积矿床进行了 Mo 同位素组成分析, 结果表明, 多金属硫化物的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 $1.13\% \pm 0.14\%$, 其母岩黑色页岩的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 1.70% , 而黑色页岩中的 Mo 几乎都源于当时的海水, 多金属硫化物的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值与其母岩黑色页岩的 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值很接近, 并结合 REE 及 PGE 等元素指标, 结果表明早寒武的海水中的金属物质为该矿层中的金属元素的富集做出了很大的贡献。

再者, 区分矿床类型、建立成矿模型、反演成矿温度及成矿期次: 我们通过封闭系统和开放系统高温实验模拟, 发现 Mo 同位素在高于 400℃ 的情况下就会发生不同程度的分馏。Mathur et al. (2010)发现在不同矿床类型(斑岩型铜矿、浅成热液多金属矿脉、矽卡岩型矿床和 Fe 氧化物 Cu-Au 矿床)中的辉钼矿存在较大的 Mo 同位素分馏 ($\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值变化范围为 $-0.39\% \pm 0.04\% \sim -2.01\% \pm 0.14\%$), 其中斑岩型铜矿中的辉钼矿 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值最轻, 平均为 $0.07\% \pm 0.23\%$ (1 σ), 而其他矿床中的辉钼矿 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 $0.49 \pm 0.26\%$ (1 σ), 这主要是由于在成矿作用过程中, Mo 进入到不同的矿物相中发生了同位素分馏, 因此可以利用不同的 Mo 同位素组成来协助分析其矿床类型。Greber et al. (2014)指出, 在 700~350℃ 区间内的岩浆—热液作用过程中, 会发生三种不同模式的 Mo 同位素分馏模式, 其结果都导致矿石比其岩浆来源要富集重的 Mo 同位素, 更进一步地, Shafiei et al. (2014)提出, 2H 多型辉钼矿中的 S-Mo-S 键能要比 3R 多型辉钼矿强, 富集重的 Mo 同位素 (2H: $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值 $\sim 0.35\%$, 3R: $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值 $\sim 0.02\%$), 而且在不同的温度和成矿期次条件下, 会形成不同多型的矿物, 如在早期 600~400℃ 情况下, 多以 2H 多型为主, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 0.46% ; 过渡期 400~300℃ 情况下, 2H 多型和 3R 多型混生, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 0.08% ; 晚期远低于 300℃ 情况下, 多以 3R 多型为主, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值平均为 0.02% 。

基金项目: 科技部“973”项目(编号: 2014CB440904); 国家自然科学基金(40930425, 41173026); 中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“陆内成矿作用研究团队”(KZZD-EW-TZ-20); 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(编号: SKLODG-ZY125-07)

作者简介: 刘洁, 女, 1989 年生, 博士研究生, 同位素地球化学专业. E-mail: liujie@mail.gyig.ac.cn

* 通讯作者, E-mail: wenhanjie@vip.gyig.ac.cn