

专题27: 早期地球的形成与演化

Tl元素的非质量分馏对于早期地球演化的指示

方童, 刘耘*

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

重金属短半衰期元素体系, 包括 ^{182}Hf - ^{182}W ($t_{1/2}\approx 8.9\text{Ma}$), ^{146}Sm - ^{142}Nd ($t_{1/2}\approx 68\text{Ma}$), ^{205}Pb - ^{205}Tl ($t_{1/2}\approx 17.3\text{Ma}$), ^{247}Cm - ^{235}U ($t_{1/2}\approx 15.6\text{Ma}$)。它们可以指示早期太阳系和地球的演化和分异过程。这些体系由于元素之间地球化学性质的差异, 在衰变周期内, Hf/W、Sm/Nd、Pb/Tl 在金属/硅酸盐分异、岩浆岩结晶分异、高温气化过程中的变化, 会造成子体同位素组成的差异, 表现为地幔样品、球粒陨石、铁陨石中, $^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$ 、 $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}$ 、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 同位素信号的不均匀性。

在金属稳定同位素的实验测试过程中, 通过标准化校正去除所有自然界和实验过程中产生的质量依赖分馏。实际测得样品的同位素异常值, 被认为来源于衰变成因、核合成成因、动力学分馏过程, 以及核体积效应造成的重金属同位素的非质量分馏效应。缺一则不可以完整探讨子体同位素异常值, 并示踪地球化学过程。通过探讨各重金属体系的核体积效应在不同矿物或分子离子之间的分馏可以补充完善自然界发现的同位素异常的成因。

Pb-Tl 体系可以帮助定年早期太阳系的 Pb/Tl 分异过程, 包括金属/硅酸盐相的分异、岩浆岩中的结晶分异、挥发分的迁移过程。Tl 是不相容元素, 它会在岩浆分异过程和部分熔融中分异。另外因为 Tl 被证明是亲石元素, 又是亲铜元素。在成核过程中, Tl 可能会随着硫化物进入金属核中, 从而造成分异和分馏。Tl 有两种氧化态, Tl^+ 和 Tl^{3+} 。自然界多数以 Tl^+ 形式存在, 只有在非常氧化或者地表环境才会以 Tl^{3+} 形式存在, Tl^+ 会取代矿物(云母、钾长石)中的碱金属元素位置, 如 Rb 和 K。Tl 是高度挥发性元素, 它的半凝聚温度为 532K。因此在太阳系的蒸发凝聚过程中, Tl 会产生动力学分馏。对于短半衰期体系 ^{205}Pb - ^{205}Tl , 认为灭绝核素 ^{205}Pb 是由核合成的 s-process 形成的。Baker 等(2010)通过 CC(碳质球粒陨石)等时线法确定太阳系初始 ^{205}Pb 组成。在早期太阳系的蒸发凝聚过程中, 发生 Pb(727K)和 Tl 的分异, 会形成 ^{205}Tl 分布不均匀。目前在各种球粒陨石中存在 50‰ 的差异。

我们通过计算, 得到含 Tl 体系在蒸发过程、流体交代作用、海水和矿物交换、卤代反应中能发生的 Tl 同位素因核体积效应产生的分馏值。Wood 等(2008)在高温高压实验中, 获得的分异的硅酸盐/硫化物间的分馏达到 0.2~0.3‰, 硅酸盐/金属之间的分馏最高为 1.1‰(约 1650°C)。我们计算了不同含 Tl 矿物的核体积效应分馏值, 结果和实验值相吻合, 硫化物的 $\epsilon^{205}\text{Tl}$ 值最大, 云母和钾长石亏损 ^{205}Tl 。Nielsen 等(2016)发现在 Fe-Mn 氧化物存在明显的 Tl 同位素富集($\epsilon^{205}\text{Tl}\approx +15$)和海水之间目前观测到的最大的分馏。计算获得在常温下, Tl 在六方锰氧化物和海水之间分馏值为 10‰, 与观测值相吻合。Tl 在 CI 球粒陨石的丰度远高于在地幔中的丰度(CI 中 0.14×10^{-6} , 地幔中 0.0041×10^{-6})。Tl 有两个去向, 一个是挥发掉, 一个是进入地核内。已知 Tl 具有亲硫性, 如果在成核过程中部分 Tl 会和 S 一起进入地核中, 撞击体如果是富集 S 和亲硫元素或者岩浆岩 S 饱和, 那么会增加分配系数。硫化物含 Tl 量最高。这个过程会造成 Tl 在核幔间的分异和分馏。硫化物流体/硅酸盐熔体的分配系数为

第一作者简介: 方童(1991-), 女, 博士研究生, 研究方向: 理论与计算地球化学; Email: fangtong@mails.gyig.ac.cn

通信作者简介: 刘耘(1970-), 男, 研究员, 研究方向: 理论与计算地球化学; Email: liuyun@vip.gyig.ac.cn

4.8~13.8, 说明硫化物确实是上地幔 Tl 的主要赋存形式。Tl 易被硫物流体带走, 并成矿。Tl 配分进入硫化物和层状硅酸盐, 被岩浆流体运移。在分异过程中, 共存相, 硅酸盐/硫化物之间产生的分馏值为 $0.17\sim 0.28\varepsilon$ 。