

· 专题 19: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识 ·

## 对 Hf-W 定年方法的校正: 修正月球重大事件的时间

方童, 杨宇红, 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

核体积效应(nuclear volume effect, 简称 NVE)是由于重同位素之间原子核大小、核形状的不同引起的异常同位素效应。前人研究了一些较重元素体系如 Hg、Pb、Tl、Sn、U 等的同位素核体积效应, 并发现了不同体系之间存在着较大的分馏。同位素的核体积效应可以用来解释行星、陨石演化过程中形成的重同位素之间的某些差异。并且一些核体积效应的分馏结果足以影响到某些重同位素放射性衰变定年的准确性, 尤其是对于高精度的放射性定年, 比如 Hf-W 定年。

Hf-W 为短半衰期元素体系( $t_{1/2} \approx 8.9 \text{ Ma}$ ), 它可以用于定年太阳系前 100 Ma 的重要地质事件。月球早期一系列重大事件产生的时间存在争议。Hf-W 同位素定年方法是目前确定月球核幔分离等早期重大事件精确年龄的最主要的定年方法之一。因此我们通过计算 $^{180}\text{W}$ 、 $^{182}\text{W}$ 、 $^{183}\text{W}$ 、 $^{184}\text{W}$ 等 W 同位素的小分子体系及固体体系的核体积效应。发现在高温条件下, W 同位素在金属相和不同价态硅酸盐相之间的核体积效应引起巨大的非质量分馏( $10 \sim 1000 \times 10^{-6}$ 级别), 其数量级能够解释及影响 W 同位素在类地行星、球粒陨石和铁陨石之间的同位素异常值。另外, 这种核体积效应引起的同位素分馏能够校正月幔样品中的 Hf-W 同位素体系, 更准确的界定目前被广泛接受的大碰撞理论下的月球形成和演化的时间尺度和过程。

前人发现了类地行星相比于球粒陨石存在  $200 \times 10^{-6}$  的 $^{182}\text{W}$ 的正异常值, 以及原始地幔岩样品中的 $^{182}\text{W}$ 比现今地幔样品高约  $15 \times 10^{-6}$ 。人们认为这种异常值是由于核幔分异后, 未完全衰变的 $^{182}\text{Hf}$ 全部进入地幔继续衰变为 $^{182}\text{W}$ 引起的。继而能够通过 Hf-W 同位素定年核形成年龄。其次, 对于地幔岩中发现的  $15 \times 10^{-6}$  的异常值的成因目前存在一

些争议, 其中一种说法是由于后期陨石轰炸整体拉低了地幔中 $^{182}\text{W}$ 的值, 另外一种认为是由于过渡带中富 $^{182}\text{W}$ 流体的改造作用。通过计算 W 同位素的核体积效应, 发现这种同位素平衡分馏在核幔分异的温度下也能造成地幔中富集观测到的 $^{182}\text{W}$ 值。因此, 只有把由核体积效应引起的 $^{182}\text{W}$ 的正异常值扣除, 才能更准确的界定出 W 同位素在地幔中的分布以及地核的形成年龄。

探讨地月样品之间 $^{182}\text{W}$ 的差异是解释地月系统早期历史的关键所在, 同时也能限制后期增生的过程和时间, 建立合理的月球演化的模型。对于月球样品, 目前已经测得的月幔样品中 $^{182}\text{W}$ 的正异常值为  $20 \sim 25 \times 10^{-6}$ 。如果排除后期陨石污染和暴露在宇宙射线引起的中子捕获过程的影响, 这个值被认为与后积薄层加积前原始地幔中的 $^{182}\text{W}$ 的值相同。而对于地核形成后撞击体的加入对地月之间 W 同位素差异的影响一直存在争议, 但根据目前的数据分析认为大碰撞过程并没有造成月球上 $^{182}\text{W}$ 的异常值。

除了根据 $^{182}\text{W}$ 示踪月幔演化过程, 还需要结合 W、 $^{142}\text{Nd}$ 、 $^{187}\text{Re}$ - $^{187}\text{Os}$ 、 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 和 HSE 的数据综合分析。若样品为原始月幔, 则会有高 $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ , 低 HSE 的特征。而 $^{182}\text{W}$ 与 $^{142}\text{Nd}$ 的非耦合关系说明了两者的存在截然不同的同位素分馏机理, 这极有可能是 W 的核体积效应引起的。对于 W 的其他同位素的核体积效应, 其中 $^{180}\text{W}$ 含量极小, 测量困难;  $^{183}\text{W}$ 核体积效应要小于 $^{182}\text{W}$ , 因此需要高精度测量, 并且 $^{183}\text{W}$ 的值受核合成过程影响明显, 需要排除误差才能进行比较。若将样品中的 $^{182}\text{W}$ 和 $^{183}\text{W}$ 的分馏值投图, 偏离非质量分馏线的程度即为衰变产生的 $^{182}\text{W}$ 的异常值。

基金项目: Strategic priority research program(B) of CAS 项目(XDB18010103)

第一作者简介: 方童(1991-), 女, 博士研究生, 研究方向: 计算地球化学. E-mail: fangtong@mail.gyig.ac.cn.

\* 通讯作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 计算地球化学. E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn.