

· 专题 19: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识 ·

## 气化过程同位素分馏对大碰撞模型的制约

罗海洋, 鲍惠铭\*, 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 550081

实验已经测得月壤中有明显的 S、K、Zn 等元素的重同位素富集, 并且微陨石撞击和离子溅射被认为是造成月壤中这些重同位素富集的主要原因 (Rees and Thode, 1972, 1974; Humayun and Clayton, 1995; Paniello *et al.*, 2012)。此外, 月球岩浆岩中也发现 Cl、Zn 和 K 元素的重同位素富集, 通常认为这些挥发性元素的重同位素富集验证了“大碰撞假说”, 并且可以利用所测得的同位素富集程度对大碰撞模型进行限制 (Sharp *et al.*, 2010; Paniello *et al.*, 2012; Wang and Jacobsen, 2016)。Wang 和 Jacobsen (2016) 就以所测的月岩中 K 同位素偏重 0.4‰ 为基础, 结合硅酸盐熔体 K 同位素蒸发实验结果, 推出要达到这样的同位素分馏需要压强大于 10 bar, 进而讨论得出 K 同位素证据支持月球起源于一次高能量、高角动量的大碰撞, 并倾向于认为月球于撞击星云盘的气相部分凝结而形成, 而且这一凝结的瑞利过程导致月球富集 K 的重同位素。

首先我们并不认为凝结的瑞利过程一定会导致月球富集 K 的重同位素, 这还取决于凝聚反应的形式。但更重要的是, 只以一个蒸发或凝结的瑞利分馏就确定从大碰撞发生到月球形成整个过程的同位素分馏情况显得太过简单了。对于一般的气化过程就可能包含了固体升华、熔体蒸发、气体扩散等几个对同位素分馏影响不同的过程。特别是对于大碰撞来说, 我们认为从碰撞发生到月球形成其实包含多次不同的气化过程, 比如, 碰撞产生的气体挥发、吸积盘蒸发、岩浆洋蒸发以及气体凝结等过程。而这些过程因物理化学条件的差异所带来的同位素分馏就可能有所不同, 并且每一个过程对应的同位素分馏机制也可能截然不同, 比如平衡蒸发和动力学蒸发。因此, 对于整个气化过程同位素分馏体系的认知直接关系到我们研究月壤和利用月球岩浆岩中挥

发性元素重同位素富集来讨论大碰撞的准确性。我们的工作即是对整个气化过程的细节进行回溯和重建, 而不是使用一个简单的瑞利过程。本研究提出了一个新的模型, 该模型尽可能地考虑了真实情况下的各种同位素分馏环节。

关于气化过程的同位素分馏系数, 地学领域一般使用的仅是熔体在真空中蒸发的动力学分馏系数  $\alpha = \sqrt{m_L/m_H}$ , 但这一分馏系数对于许多实际的气化过程并不适用。而在气化过程的实验研究方面, 前人不仅做了很多熔体在高真空中蒸发的实验 (Davis *et al.*, 1990; Wang *et al.*, 2001; Richter *et al.*, 2002, 2007; Zhang *et al.*, 2014), 同时也有不少在不同压力下的熔体蒸发实验 (Hewins *et al.*, 2003; Richter *et al.*, 2011), 但由于实验条件、熔体成分和研究对象等的不同, 其结果往往存在一定差异性, 并只在有限的温度压力范围内具有参考价值。一些远远超过实验温压范围的过程 (比如月球形成大碰撞), 可能并不能直接使用简单进行延伸的数据。鉴于气化过程基本同位素分馏系数的缺乏, 我们计算了一些代表性熔体与气体间的同位素平衡分馏值, 并且着重考虑了压力对这类分馏值的影响。

由于需要计算气化物, 本研究的另外一个内容是研究如何鉴定出真实的气化物物种类型, 即某种元素以何种形式发生气化。传统实验方法的一个弊病是不能排除气化物在气化后很快同其他物质发生反应, 形成了表观的气化物形式。同位素分馏方法, 尤其是用多维同位素关系的方法, 也许是确定不同气化物的一条新的途径。因此, 除了常规的同位素分馏, 我们也尝试了 2 种多维同位素方法, 即三同位素关系和 2 个同位素体系相对分馏关系的改变, 这些关系的改变可以用于确定初始气化物的类型。

第一作者简介: 罗海洋 (1992-), 男, 博士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: luohaiyang@mail.gyig.ac.cn.

\* 通讯作者简介: 鲍惠铭 (1966-), 男, 研究员, 研究方向: 地球化学. E-mail: bao@lsu.edu.