

· 专题 19: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识 ·

## 为何月海玄武岩富铁

张明明<sup>1,3</sup>, 朱丹<sup>2\*</sup>, 许英奎<sup>1</sup>, 章清文<sup>4</sup>

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, 贵阳 550002;

2. 中国科学院 地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002;

3. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640; 4. 中国科学院大学, 北京 100000

来自月海玄武岩和洋中脊玄武岩的样品表明, 月海玄武岩 FeO 含量普遍高于洋中脊玄武岩。这意味着月幔相对于地幔更加富铁, 这与多数学者获得的月岩浆洋成分一致 (Sakai *et al.*, 2014)。月震数据显示月核质量不超过月球总质量 6% (Hood, 1986), 大碰撞模拟也显示撞击体核和地核对月球形成没有贡献 (Canup, 2004), 因此月球的总铁含量比地球低。那么, 是什么过程使总铁含量较低的月球能够形成比地幔还富铁的月幔? 前人已经意识到这种不对称性 (Hood, 1986), 并试图通过大碰撞过程和地核生长来解释为什么月幔比地幔富铁。例如, 撞击体含铁量比较高 (Delano *et al.*, 1985; Taylor, 1987; Newsom *et al.*, 1989; O'Neill, 1991; Melosh, 2014), 或者撞击溅射物发生强烈去气作用 (Ringwood, 1984); 或者假设月球是在地核完全形成前从地幔分离 (Jagoutz *et al.*, 1982; Binder, 1983; Taylor, 1986), 分离后月幔中的 FeO 含量保持不变, 而地幔中 FeO 转化为 Fe 并进入地核, 使得地幔比月幔贫铁。实际上, 大碰撞使月幔富铁很难找到切实证据, 而地核生长的假设也并没有证据支持 (Newsom *et al.*, 1985)。经典岩浆洋演化模型在解释月幔富铁时, 符合鲍文反应序列, 认为岩浆洋从底部向上依次结晶橄榄石→斜方辉石+橄榄石→橄榄石+单斜辉石+斜长石→单斜辉石+斜长石→单斜辉石+斜长石+钛铁矿 (Taylor, 1982)。当岩浆洋已结晶~80%时, 斜长石在岩浆洋上部开始结晶并上浮至月表。由于富镁的橄榄石和辉石会在岩浆洋底部先结晶, 导致晚期岩浆洋中的钛铁含量增高, 最终在

上月幔形成钛铁矿。因此, 岩浆洋前 80% 结晶的部分与地幔的含铁量一致且不具有 Eu 异常, 只有最后 20% 结晶的部分才会表现出富铁和 Eu 负异常的特征。这与月海玄武岩普遍 Eu 负异常的现象矛盾。因此, 经典岩浆洋理论不能合理解释全月幔富铁和 Eu 负异常特征。

本研究认为月球刚形成时, 全月球和地幔具有相同组成 (Reufer *et al.*, 2012)。月球刚形成时处于岩浆洋状态, 由于月球质量很小, 无法锁住大气 (Abe, 1997), 因此岩浆洋暴露在温度很低的环境中, 表面会形成一层固态淬火层。淬火层会极大地抑制岩浆洋热量丢失, 使得岩浆洋能够缓慢结晶。岩浆洋是从底部和顶部同时开始结晶, 但顶部的结晶速率更快。岩浆洋顶部从上到下依次为固态淬火层 (结晶度 100%), 部分结晶区 (结晶度 100%~0%), 熔融区 (结晶度 0)。由于岩浆洋具有一定深度, 根据热力学原理, 熔融区顶部的岩浆一定高于液相线。在部分结晶区处结晶的橄榄石、辉石等矿物, 由于密度大, 会逐渐下沉并重新熔回岩浆洋。由于结晶的斜长石密度小, 斜长石会逐渐上浮或者底辟至月表。这样, 斜长石便离开岩浆洋体系。随着温度降低, 部分结晶区不断向下移动, 斜长石便不断堆积, 最终形成斜长质月壳。总体结果就是斜长石优先于橄榄石、辉石从岩浆洋中结晶。因此, 月幔富集 FeO 等组分, 而亏损斜长石相容组分, 如 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Eu。所以月海玄武岩也是相对富铁的。可以看到, 在整个岩浆洋冷却的过程中最先结晶的是斜长石, 而不是橄榄石和辉石, 所以月幔富铁和亏损 Eu。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41490635, 41503065, 41373068)

第一作者简介: 张明明 (1990-), 男, 博士研究生, 研究方向: 月球早期演化与数值模拟. E-mail: zhangmingming14@mails.ucas.ac.cn.

\* 通讯作者简介: 朱丹 (1970-), 男, 研究员, 研究方向: 地球化学动力学和行星科学. E-mail: zhudan5269@163.com.