

地球化学热力学计算模拟月球岩浆洋的演化

鞠东阳¹ 杜蔚^{1,2*}

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 550081;

2 中国科学院比较行星卓越创新中心 合肥 230026

关于月球的形成, 目前比较得到学术界认可的是大碰撞模型, 认为月球形成于 45 亿年前一次类似火星大小的星体与原始地球的大碰撞事件, 而月球的物质来源与地球的地幔非常相似 (Canup and Asphaug, 2001)。鉴于目前为止人类还没有获得任何直接来自月球深部的岩石样品, 关于月球形成和演化模型主要是以实验和数字模拟月球岩浆洋的结晶分异为主。比如目前引起学界关注的先发生平衡结晶然后剩余岩浆发生分步结晶的两阶段模型 (Lin et al., 2017)。然而, 不同的课题组的研究结果对于月球岩浆洋的初始成分和月幔部分熔融的深度等参数仍存在着很大异议, 而初始的月球岩浆洋物质组成对后期结晶有着非常大的影响。

本文利用地球化学热力学计算, 模拟月球岩浆洋的结晶分异过程。计算所采用的初始物质分别是接近地幔的化学组成成分 (Lin et al. 2017) 和几乎未经过分异的地幔橄榄岩样品 (Takazawa et al., 2000) (表 1)。假设月球岩浆洋的初始深度 700km, 采用两阶段结晶分异模型, 运用 O1-P1-Wo-Qtz 体系的热力学平衡参数 (Longhi, 1991), 考虑结晶矿物相与熔体之间的反应, 对月球深部不同温压条件下的不同矿物相的结晶序列和所占比例进行定量计算。

我们的计算结果显示, 斜方辉石在结晶达到 42% 的时候才开始出现, 比 Lin et al. (2017) 的实验结果显示的斜方辉石的结晶时间晚很多。造成这种差异的主要原因是 Lin et al. (2017) 为了降低实验的难度, 对月球深部的物理环境进行了简化, 假设月球岩浆洋发生强对流, 因此选取了等温条件。而我们的计算过程中温度随压力变化, 也更接近月球内部的温度梯度。因此, 斜长石的结晶时间也比 Lin et al. (2017) 的实验观察结果稍晚, 因此我们计算所得的月亮厚度只有 55.56km, 薄于 Lin et al. (2017) 的结果 (67.5km)。

计算过程中选取的橄榄岩样品的化学组成相对第一组富镁而贫铝, 因此在结晶序列上斜方辉石和斜长石出现的都相对较晚, 相应的形成的月亮厚度更薄 (37.27km), 而这一结果与最新的根据 GRAIL 任务得到的地形学与重力学数据计算结果非常吻合 (30-40km)。这说明铝元素对于斜长石矿物出现的时间有着重要的约束作用, 相对较薄的月亮可能表示月球岩浆洋的成分中铝含量并没有前人估计的那么多, 或者是由月球深部的富铝相矿物存在导致的。我们课题组接下来的工作将主要是对这一推论进行实验和地球化学动力学模拟验证。

表 1 本文采用的月球岩浆洋组成

	Takazawa et al. (2000)	Lin et al. (2017)
SiO ₂	45.03	45.49
TiO ₂	0.07	0.53
Al ₂ O ₃	2.88	4.5
Cr ₂ O ₃	0.39	0
FeO	7.75	10.5
MgO	40.71	35.74
MnO	0.14	0
CaO	2.51	3.23
K ₂ O	0.01	0
Na ₂ O	0.20	0
P ₂ O ₅	0.01	0
NiO	0.26	0
Total	99.96	99.99
Mg [#]	90.35	85.85

参考文献

Canup R M , Asphaug E . Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation[J]. Nature, 2001, 412(6848):708-712.

Lin Y, Tronche E J, Steenstra E S, et al. Experimental constraints on the solidification of a nominally dry lunar magma ocean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 471: 104-116.

Longhi J . Comparative liquidus equilibria of hypersthene-normative basalts at low pressure[J]. American Mineralogist, 1991, 76(5):785-800.

Takazawa E , Frey F A , Shimizu N , et al. Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process?[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(4):695-716.