

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.810>



月球火山活动究竟能持续多久？

杨蔚¹, 胡森¹, 李秋立², 田恒次¹, 王浩², 陈意², 林杨挺¹, 李献华²

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

月球火山活动历史是月球科学基本问题之一, 是理解月球内部物质组成和热演化历史的关键 (Head and Wilson, 2017). 2020 年 12 月 17 日, 我国嫦娥五号任务从月球风暴洋克里普地体北部的吕姆克山附近 (51.92° W, 43.06° N) (Wang *et al.*, 2021) 采集了 1 731 g 月壤样品, 并成功返回地球, 实现了我国首次地外天体采样 (Yang and Lin, 2021). 对嫦娥五号月壤样品中玄武岩岩屑的系统定年结果显示, 着陆区的火山活动至少可以持续至 20 亿年前 (Che *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021), 该结果将阿波罗样品和月球陨石限定的月球火山活动结束时间推迟了 8 亿年 (Merle *et al.*, 2020). 然而, 这一定年结果也给月球科学研究提出了新的问题. 月球的质量仅为地球的 1.2%, 由于比表面积大, 理论上应该快速冷却. 热演化模拟计算也表明, 月球火山活动应当结束于 25 亿年前 (Spohn *et al.*, 2001), 且撞击坑定年显示月球背面的火山活动确实结束于 25 亿年前 (Haruyama *et al.*, 2009). 但是, 嫦娥五号玄武岩定年结果确证了月球风暴洋克里普地体的火山活动可以持续到 20 亿年前, 那么, 为何月球火山活动能够持续如此之久呢? 更进一步, 月球火山活动的最终结束时间是多晚?

1 核心理念

通常情况下, 月幔部分熔融形成玄武质岩浆有 3 种机制: 升温熔融, 减压熔融, 加挥发分降低熔点导致熔融 (Niu, 2005). 要破解风暴洋克里普地体长时间火山活动之谜, 首先需要判别最晚期玄武岩 (如: 嫦娥五号玄武岩) 属于上述哪种形成机制.

目前最流行的观点是升温熔融, 即风暴洋克里普地体富含 K、Th、U 等放射性元素, 放射性衰变持续释放热量, 维持了该区域长时间的火山活动 (Wieczorek and Phillips, 2000), 主要证据是月球晚期火山活动在空间分布上与 γ 谱探测的高 Th 含量具有一定的相关性 (Jolliff *et al.*, 2000). 但是, 对嫦娥五号玄武岩的微区原位 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果显示, 其源区具有亏损的初始同位素组成特征, 富含放射性生热元素的克里普物质的贡献不足 0.5% (Tian *et al.*, 2021). 尽管也有学者提出克里普物质只是提供了热源, 而没有直接参与月幔熔融的可能性 (Borg *et al.*, 2004), 但是这很难解释为什么克里普物质能够释放热量导致月幔熔融, 自身却没有发生熔融, 尤其是考虑到克里普作为岩浆洋冷却的最终残余熔体, 理论上更加易熔. 此外, 微量元素模拟计算显示, 嫦娥五号玄武岩经历小比例 (2%~3%) 的部分熔融和 (78%~88%) 大程度的分离结晶

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (No. XDB41010400); 民用航天技术预先研究 (No. D020203); 中国科学院重点部署项目 (No. ZDBS-SSW-JSC007).

作者简介: 杨蔚 (1981—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石地球化学、比较行星学和离子探针分析技术等研究.
E-mail: yangw@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 杨蔚, 胡森, 李秋立, 田恒次, 王浩, 陈意, 林杨挺, 李献华, 2022. 月球火山活动究竟能持续多久? 地球科学, 47(10): 3789–3791.

Citation: Yang Wei, Hu Sen, Li Qiuli, Tian Hengci, Wang Hao, Chen Yi, Lin Yangting, Li Xianhua, 2022. How Long has Lunar Volcanism Lasted? *Earth Science*, 47(10): 3789–3791.

(Tian *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2022),这也从一个侧面反映了其熔融温度并不高.总而言之,嫦娥五号玄武岩的研究并不支持富含放射性生热元素维持月球长时间火山活动的主流观点.

另外一种形成火山活动的机制是月幔源区挥发分含量高,导致其熔点降低从而发生部分熔融.通过嫦娥五号玄武岩中磷灰石和熔融包裹体水含量和 H 同位素,结合部分熔融和分离结晶过程所造成的水含量变化,即可估算出其月幔源区中的水含量,仅为 1~5 $\mu\text{g/g}$ (Hu *et al.*, 2021).这一结果低于阿波罗样品和月球陨石估算的月幔水含量,指示嫦娥五号玄武岩的月幔源区非常“干”.此外,对嫦娥五号玄武岩中陨硫铁的 S 同位素研究显示,其源区 S 含量仅为 1~10 $\mu\text{g/g}$,显著低于阿波罗玄武岩的源区(Liu *et al.*, 2022).这些结果都表明,嫦娥五号玄武岩的源区并不富含挥发分.

在 3 种可能的机制中,最难以验证的是减压熔融,即月幔对流导致深部物质上涌,因压力的释放导致熔点降低,从而发生熔融.由于嫦娥五号玄武岩经历了高程度的演化,要反演其初始岩浆的成分并不容易,这给估算岩浆起源的温压条件带来了困难.尽管没有证据表明月幔对流是造成月球长时间火山活动的主要控制因素,但如果月球演化晚期月幔对流速度缓慢,实际上有利于延缓其内部热量的散失(Mitchell, 2021).

综上所述,尽管排除了两种可能的机制,但月球长时间火山活动之谜尚未解开,仍然需要深入研究嫦娥五号玄武岩的源区性质,并反演其岩浆起源的温度和压力条件.

2 科学价值

类地行星火山活动既是形成行星壳的主要方式之一,也是理解其深部物质组成和热演化历史的关键(Head and Wilson, 2017).只有通过对比不同行星火山活动的规模、持续时间和形成机制,才可能掌握行星火山活动的一般规律,从而更加深刻地理解地球火山活动.同时,月球最显著的地质特征就是其二分性或不对称性(Zuber *et al.*, 1994),正面地势低洼平坦,背面则主要是高地.这种不对称性也体现在火山活动上,正面约有 34% 被玄武岩覆盖,而背面仅有 1%.因此,解开月球风暴洋长时间火山活动之谜,也是解密月球二分性成因的前提.

3 发展前景

尽管月球长时间火山活动之谜尚未解开,但是嫦娥五号玄武岩的研究结果已经证明,现有的月球热演化模型需要修正(Carlson, 2021).要建立新的热演化模型,不仅需要采集更多的月球火山岩样品,综合考虑月表遥感探测和月球样品分析数据,而且需要融合岩浆演化和月球热演化模拟,这为未来月球探测和研究提出了新的方向.

参考文献

- Borg, L. E., Shearer, C. K., Asmerom, Y., et al., 2004. Prolonged KREEP Magmatism on the Moon Indicated by the Youngest Dated Lunar Igneous Rock. *Nature*, 432(7014): 209–211. <https://doi.org/10.1038/nature03070>
- Carlson, R. W., 2021. Robotic Sample Return Reveals Lunar Secrets. *Nature*, 600(7887): 39–40. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-03547-7>
- Che, X. C., Nemchin, A., Liu, D. Y., et al., 2021. Age and Composition of Young Basalts on the Moon, Measured from Samples Returned by Chang' e-5. *Science*, 374(6569): 887–890. <https://doi.org/10.1126/science.abl7957>
- Haruyama, J., Ohtake, M., Matsunaga, T., et al., 2009. Long-Lived Volcanism on the Lunar Farside Revealed by SELENE Terrain Camera. *Science*, 323(5916): 905–908. <https://doi.org/10.1126/science.1163382>
- Head, J. W., Wilson, L., 2017. Generation, Ascent and Eruption of Magma on the Moon: New Insights into Source Depths, Magma Supply, Intrusions and Effusive/Explosive Eruptions (Part 2: Predicted Emplacement Processes and Observations). *Icarus*, 283: 176–223. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.031>
- Hu, S., He, H. C., Ji, J. L., et al., 2021. A Dry Lunar Mantle Reservoir for Young Mare Basalts of Chang' e-5. *Nature*, 600(7887): 49–53. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04107-9>
- Jolliff, B. L., Gillis, J. J., Haskin, L. A., et al., 2000. Major Lunar Crustal Terranes: Surface Expressions and Crust-Mantle Origins. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E2): 4197–4216. <https://doi.org/10.1029/1999je001103>
- Li, Q. L., Zhou, Q., Liu, Y., et al., 2021. Two-Billion-Year-Old Volcanism on the Moon from Chang' e-5 Basalts. *Nature*, 600(7887): 54–58. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04100-2>
- Liu, X. Y., Hao, J. L., Li, R. Y., et al., 2022. Sulfur Isotopic

- Fractionation of the Youngest Chang' e-5 Basalts: Constraints on the Magma Degassing and Geochemical Features of the Mantle Source. *Geophysical Research Letters*, 49(15): e2022GL099922. <https://doi.org/10.1029/2022gl099922>
- Merle, R.E., Nemchin, A.A., Whitehouse, M.J., et al., 2020. Pb-Pb Ages and Initial Pb Isotopic Composition of Lunar Meteorites: NWA 773 Clan, NWA 4734, and Dhofar 287. *Meteoritics & Planetary Science*, 55(8): 1808–1832. <https://doi.org/10.1111/maps.13547>
- Mitchell, R.N., 2021. Chang' e-5 Reveals the Moon's Secrets to a Longer Life. *The Innovation*, 2(4): 100177. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100177>
- Niu, Y., 2005. Generation and Evolution of Basaltic Magmas: Some Basic Concepts and a Hypothesis for the Origin of the Mesozoic-Cenozoic Volcanism in Eastern China. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 9–46.
- Spohn, T., Konrad, W., Breuer, D., et al., 2001. The Longevity of Lunar Volcanism: Implications of Thermal Evolution Calculations with 2D and 3D Mantle Convection Models. *Icarus*, 149(1): 54–65. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6514>
- Tian, H.C., Wang, H., Chen, Y., et al., 2021. Non-KREEP Origin for Chang' e-5 Basalts in the Procellarum KREEP Terrane. *Nature*, 600(7887): 59–63. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04119-5>
- Wang, J., Zhang, Y., Di, K.C., et al., 2021. Localization of the Chang' e-5 Lander Using Radio-Tracking and Image-Based Methods. *Remote Sensing*, 13(4): 590. <https://doi.org/10.3390/rs13040590>
- Wieczorek, M. A., Phillips, R. J., 2000. The “Procellarum KREEP Terrane”: Implications for Mare Volcanism and Lunar Evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20417–20430. <https://doi.org/10.1029/1999je001092>
- Yang, W., Chen, Y., Wang, H., et al., 2022. Geochemistry of Impact Glasses in the Chang' e-5 Regolith: Constraints on Impact Melting and the Petrogenesis of Local Basalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 335: 183–196. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2022.08.030>
- Yang, W., Lin, Y.T., 2021. New Lunar Samples Returned by Chang' e-5: Opportunities for New Discoveries and International Collaboration. *The Innovation*, 2(1): 100070. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100070>
- Zuber, M. T., Smith, D.E., Lemoine, F.G., et al., 1994. The Shape and Internal Structure of the Moon from the Clementine Mission. *Science*, 266(5192): 1839–1843. <https://doi.org/10.1126/science.266.5192.1839>