



嫦娥六号玄武岩揭秘月背岩浆活动

张谦¹, 杨慕涵^{1,2}, 李秋立^{1,2*}, 李献华^{1,2}

¹ 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029;

² 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: liqiuli@mail.iggcas.ac.cn

Chang'e-6 basalts reveal magmatic activities on the lunar farside

Qian Zhang¹, Mu-Han Yang^{1,2}, Qiu-Li Li^{1,2*} & Xian-Hua Li^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: liqiuli@mail.iggcas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2024-1220](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1220)

月球是地球唯一的卫星,也是人类开展“深空探测”的起点和前哨站。在探索月球的浩瀚征程中,人类曾通过6次Apollo任务、3次Luna任务和1次嫦娥五号任务从月球表面共返回了380余公斤岩石/土壤样品。然而,这些样品全部来自于月球正面,我们对于月球背面的认识还主要基于遥感工作。中国的嫦娥六号任务首次实现了在月球背面采样,成功带回了1935.3 g珍贵的月壤样品,为探索月球背面的物质特性、岩浆活动、大型撞击事件/通量以及月球二分性成因等方面提供了关键的研究素材^[1]。

月球正面与背面在玄武岩分布、地形特征、月亮厚度和Th含量等方面存在显著的不对称性,其成因一直是一个悬而未决的科学难题。月海玄武岩是由月幔发生部分熔融产生的岩浆上升喷发至月表形成,因此是探索月球内部物质组成和热演化的重要窗口。月海玄武岩和隐月海玄武岩覆盖了约18%的月球表面,它们在月球正面和背面分布明显不均匀。其中,约93%的玄武岩集中分布在正面,而背面仅占7%。Apollo、Luna及嫦娥五号任务带回的玄武岩样品表明,月球正面最古老的月海火山活动可以追溯至40亿年前,并至少延续至20亿年前^[2]。此外,嫦娥五号样品中的火山玻璃珠揭示了月球正面甚至在1.2亿年前还存在小规模火山活动^[3]。月球背面是否也经历了类似的长期火山活动仍不清楚。基于遥感观测的撞击坑统计年代学研究表明,虽然正面和背面的火山喷发量差异巨大,但它们的年龄分布可能大致相似^[4]。然而,由于缺乏来自月球背面月海区域的样品,至今尚无法进行可靠的比较,人类对于月球背面火山活动的时间跨度及其源区特征的认识仍然非常有限。

嫦娥六号采样点位于月球背面南极-艾特肯盆地内部的阿波罗撞击坑边缘,该区域月亮极薄,遥感观测显示该地区主要岩性为月海玄武岩,这也得到了返回样品的证实^[1]。针对这些玄武岩样品开展年代学研究,是嫦娥六号样品研究的首要任务之一。放射性同位素定年法是一种通过测量已知半衰期的放射性同位素的衰变量来计算样品绝对年龄的科学方法,例如U-Pb衰变体系(²³⁸U衰变为²⁰⁶Pb, ²³⁵U衰变为²⁰⁷Pb)。中国科学院地质与地球物理研究所和国家天文台研究团队,基于离子探针(SIMS)实验室自主研发的微区原位Pb同位素分析方法,对嫦娥六号月壤样品中的玄武岩岩屑进行了精确定年^[5]。所采用的方法为基于U-Pb定年体系的Pb-Pb等时线法,提取分析数据中²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb比值为横坐标、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb比值为纵坐标进行等时线拟合,获得²⁰⁴Pb(非放射成因Pb的代表)为0的y轴截距即放射成因²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb比值,可计算年龄;在U为0(即不含放射成因Pb)的测点上可以获得玄武岩初始Pb同位素组成,用于计算玄武岩源区的²³⁸U/²⁰⁴Pb比值,即 μ 值,可指示玄武岩月幔源区性质是否富集不相容元素,如克里普物质(即KREEP, 钾元素(K), 稀土元素(REE), 磷元素(P)的组合)。

陨石撞击作用会使得非本采样区至少上百公里内的物质混合到采样点,已经确认嫦娥六号返回样品的月壤物质成分和本地玄武岩成分存在明显的不一致现象,说明存在较多的外来物质^[1]。考虑到遥感工作显示嫦娥六号采样点周围可能分布有多期次、多类型的玄武岩,因此返回样品中的玄武岩岩屑可能具有不同的来源和形成年龄,需要将每一颗岩屑当做独立的样品对待,通过大量测试来检验。研究人员从5 g

月壤中分选出了大于300 μm 的108颗玄武岩岩屑开展定年工作,发现嫦娥六号中的玄武岩岩屑主要包括三种结构类型,即斑状结构、次辉绿结构和嵌晶结构。对每一种结构的岩屑分别进行定年研究,首先检验同种结构的多个单颗粒发现具有误差范围内一致的年龄,再构建同种结构岩屑的Pb-Pb等时线,最后对比3种结构岩屑年龄的异同。最终发现其中107颗(包括9颗斑状、45颗次辉绿和53颗嵌晶结构)玄武岩岩屑获得了误差范围内一致的Pb-Pb年龄,且等时线斜率也一致,意味着这些岩屑极可能来源于同一个期次的玄武岩喷发。综合来自107颗岩屑的所有数据,最重要的是其中的78颗含锆矿物,即斜锆石、钙钛锆石和静海石(这类矿物具有高U含量,高放射性成因Pb含量和非常低的初始Pb含量),精确限定了这一期玄武岩的喷发时代为 2807 ± 3 百万年前(Ma)。通过对硅酸盐矿物(斜长石和单斜辉石)和陨硫铁开展的180个U-Pb同位素测点分析,发现3颗陨硫铁具有低于0.001的 $^{238}\text{U}/^{208}\text{Pb}$ 比值,这意味着其中的放射性成因Pb含量几乎可以忽略不计,其Pb同位素组成($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=1.085\pm 0.003$, $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.00550\pm 0.00014$)可以代表样品形成时的初始Pb同位素组成。根据初始Pb同位素计算出这一形成于28亿年前的玄武岩源区的 μ 值为 360 ± 10 。此外,还发现一颗具有嵌晶结构的高铝玄武岩岩屑,对其中的斜锆石、静海石和硅酸盐矿物开展Pb-Pb定年,精确限定其喷发时代为 4203 ± 4 Ma,并根据等时线斜率计算出其源区的 μ 值为 1620 ± 160 。

以上研究揭示嫦娥六号采样点的主期(本地)玄武岩形成于 2807 ± 3 Ma,标志着月背岩浆活动至少持续到了28亿年以前,这一年龄也填补了月球正面玄武岩样品在该时期的记录空白。其月幔源区 μ 值低至 ~ 360 ,低于绝大部分正面玄武岩样品和月球玄武岩陨石的源区 μ 值,指示来自于非常亏损的月幔源区,且岩浆上升过程中也没有混染KREEP组分。42亿年前高铝玄武岩源区的 μ 值高达 ~ 1620 ,指示其可能来源于富集KREEP的月幔源区。这一颗高铝玄武岩在分析样品量中占比极低,根据撞击坑统计定年和遥感揭示的周边隐伏单元的矿物含量^[6],推测它可能是由南侧隐月海单元溅射至嫦娥六号采样点的外来物质,指示了采样区附近岩浆活动的多样性及背面月幔源区的复杂性。综合来看,研究发现的两期玄武岩指示月背的火山活动至少持续了14亿年(图1),且揭示出月背在经历了形成南极-艾特肯盆地的大撞击事件之后,在42亿年前仍存在较富集KREEP物质的月幔源区;另一方面,演化到28亿前已经非常亏损的月幔源区仍可以产出岩浆活动,暗示月背较小规模的岩浆活动与亏损KREEP物质并不直接相关,可能较厚的月亮厚度是导致月背玄武质火山活动分布较少的更主要原因。嫦娥六号本地玄武岩年龄与此前通过撞击坑统计定年法得到的采样区模式年龄比较一致,表明为月球正面建立的陨石坑统计年代学模型也适用于月球背面,可用于进一步完善当前的陨石坑统计年代学函数,提供关键锚点,弥补定年曲线在该时段的空白。研究原文发表于Nature^[5]。

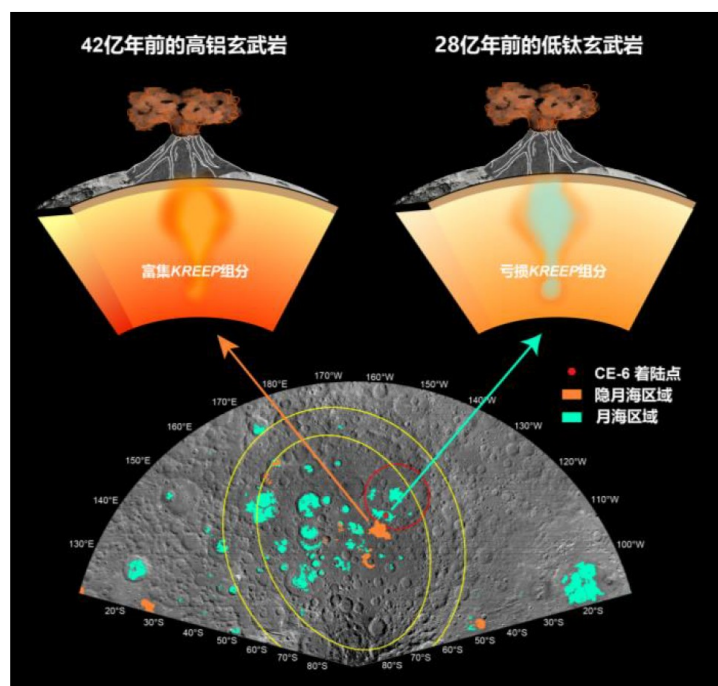


图1 嫦娥六号返回月壤样品中记录的两期玄武质火山活动及其月幔源区性质示意图。该图据文献^[5]修改

Figure 1 Schematic diagram illustrating the two episodes of farside basaltic volcanism and their mantle source characteristics, as revealed by analyses of Chang'e-6 lunar soil samples. The figure is modified from Ref. [5]

推荐阅读文献

- 1 Li C, Hu H, Yang M F, et al. Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang'E-6 mission. *Natl Sci Rev*, 2024, 11: nwae328
- 2 Li Q L, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 2021, 600: 54–58
- 3 Wang B W, Zhang Q W L, Chen Y, et al. Returned samples indicate volcanism on the Moon 120 million years ago. *Science*, 2024, 385: 1077–1080
- 4 Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE terrain camera. *Science*, 2009, 323: 905–908
- 5 Zhang Q W L, Yang M H, Li Q L, et al. Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. *Nature*, 2024, doi: [10.1038/s41586-024-08382-0](https://doi.org/10.1038/s41586-024-08382-0)
- 6 Qian Y, Head J, Michalski J, et al. Long-lasting farside volcanism in the Apollo basin: Chang'e-6 landing site. *Earth Planet Sci Lett*, 2024, 637: 118737