

嫦娥六号返回样品揭秘月球背面演化奥秘

王赤

中国科学院国家空间科学中心, 太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190

E-mail: cw@nssc.ac.cn

月球是距离地球最近的天体, 也是地球的唯一天然卫星, 宛如一颗神秘而迷人的明珠, 静静地陪伴着地球已达45亿年之久, 与地球形成了协同演化的地-月系统. 研究月球可以帮助我们更好地了解地球, 了解太阳系早期的环境和演化过程, 为探索宇宙的起源和演化提供重要线索.

人类在探索月球的浩瀚征途中, 曾先后通过6次Apollo任务、3次Luna任务和1次嫦娥五号任务, 从月球表面带回380余公斤样品. 然而, 所有这些样品均来自月球正面. 中国嫦娥六号(CE-6)任务首次完成人类从月球背面采样返回, 获取1935.3 g月壤样品^[1], 为研究月球二分性成因和深部演化提供了关键信息. 针对嫦娥六号返回样品的首批研究成果发布以来, 带给科研界乃至公众全新的月球演化新认知, 成为“2024年中国十大科学进展”中最引人注目的重大突破之一.

1 着陆区地质特征

嫦娥六号着陆区(南纬41.64°, 东经153.99°)具有四大特点. 第一个特点就是着陆区在月球的背面. 由于地球的引力造成的潮汐锁定, 月球背面永远背对地球, 传统的地面深空测控网络无法对其进行有效覆盖, 这增加了月背采样的复杂性和不确定性, 目前只有中国实现了月背采样返回. 月球背面与正面在地形地貌、火山岩分布、地壳厚度、钍含量分布等多方面存在显著差异, 被称为“月球的二分性”, 要回答是何种原因造成的这种差异, 就需要对来自月背的样品进行研究. 第二个特点是着陆区位于南极-艾特肯盆地. 这是月球上最大、最古老且最深的盆地, 其地质构成极为复杂, 蕴含着丰富的月球演化信息. 从这里采集的样品相比以往月球正面的样本, 年代更为久远, 岩石类型更为多样, 可以为我们揭开月球起源、演化的神秘面纱提供全新且关键的线索. 第三个特点是嫦娥六号着陆于月亮最薄的阿波罗盆地, 它是南极-艾特肯盆地中最大的陨石坑, 位于其东北边缘, 阿波罗盆地被形象地比喻为“在地下室再挖了一个更深的洞”, 可能会暴露出月球的更深层的物质. 第四个特点嫦娥六号是着陆于一片



王赤 中国科学院国家空间科学中心主任, 中国科学院院士, 国际宇航科学院院士. 长期从事空间物理和空间天气研究. 现担任探月工程四期首席科学家, 中国科学院空间科学战略性先导专项(二期)负责人. 曾获国家科技进步特等奖、钱学森杰出贡献奖、中国地球物理学会科技进步奖一等奖等.

月海玄武岩区域. 月海玄武岩虽然只占月表面积的18%左右, 却是月球岩浆活动最长的地质记录, 对其进行年龄和成分研究, 可以追溯月球的地质演化的具体过程.

由于月表经历了不可胜数的陨石冲击作用, 使得受冲击组分四处飞溅, 因此任何一份月壤都可能来源复杂. 虽然CE-6与CE-5同样着陆于玄武岩区域, 但CE-5着陆点方圆150 km以内都是单一年龄和成分类似的玄武岩, 外来组分所占比例不超过5%^[2], 而嫦娥六号着陆点上下30 km以外都出了玄武岩范围, 暗示着嫦娥六号月壤样品来源会比较复杂. CE-6样品密度较低, 其结构较为松散, 孔隙率较高. 月壤的粒径呈现双峰式分布, 表明样品可能经历了不同物源的混合作用. 与嫦娥五号(CE-5)月球正面的样品相比, 斜长石含量增加, 橄榄石含量减少, 这可能是该区域月壤受到了非玄武质物质影响的结果. 嫦娥六号采集的岩屑碎片主要由玄武岩、角砾岩、黏结岩、浅色岩石和玻璃质物质组成. 玄武岩碎片只占总量的30%~40%, 其矿物以辉石、斜长石和钛铁矿为主, 橄榄石含量极低. 角砾岩和黏结岩由玄武岩碎屑、玻璃珠、玻璃碎片以及少量的斜长岩和苏长岩等浅色岩石碎屑物质构成. 通过对这些非月海玄武岩物质的地球化学分析表明, 嫦娥六号样品中的铝氧化物(Al_2O_3)和钙氧化物(CaO)含量较高, 而铁氧化物(FeO)含量相对较低, 显示出月海玄武岩和斜长岩的混合特征. 在微量元素上, 样品中的钍(Th)、铀(U)和钾(K)

引用格式: 王赤. 嫦娥六号返回样品揭秘月球背面演化奥秘. 科学通报

Wang C. Unveiling the evolutionary mysteries of the lunar far side: insights from Chang'e-6 returned samples (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-0563

等微量元素含量偏低,与位于月球正面风暴洋克里普地体中的阿波罗任务和嫦娥五号任务的样品表现出了巨大差异。

2 玄武岩定年突破

月球约占地球质量的1.2%,传统认为体积越小的星球,热量会散失越快,会较早失去以岩浆活动为代表的地质活动。要了解月球的地质活动可以持续多久,就需要看来自月球的岩石有多年轻,这就要求准确的放射性同位素定年。经过50余年的研究和比对,当前最为精确的定年方法是离子探针微区原位Pb-Pb等时线法,其基本原理是基于U的两个同位素,即 ^{238}U 和 ^{235}U ,分别衰变为 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb ,利用这两个体系的衰变速率差,通过放射成因 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值来计算年龄。这个方法容易受干扰之处在于地球铅的污染,因为月球形成之初的岩浆洋阶段丢失了90%以上的Pb,月球样品中的Pb以U衰变而来的放射成因Pb为主,而地球上以非放射成因Pb为主,因此两者在Pb同位素组成上具有显著的差异。离子探针分析需要在样品表面加载上万伏高压以激发二次离子,前提是在不导电的岩片表面镀上一层金或碳,因此在颗粒裂隙和边界处不可避免地会带入地球Pb的污染,分析时混入这些地球Pb组分就会影响数据结果。前人对阿波罗样品和陨石样品的定年分析只采用厘米级的颗粒,采集几十甚至上百个测试点数据,通过一定规则筛选去除受地球Pb污染的测点,构建左边等时线来计算年龄。嫦娥工程返回样品称之为月壤,定义为颗粒小于1 cm的颗粒,实际上绝大多数平均粒径在50 μm 左右^[1,2],可以称之为月尘(小于1 mm的颗粒)。针对这种小颗粒岩石碎屑定年分析则需要另辟蹊径,中国科学家通过仪器关键部件的改造和分析策略的优化,率先实现了小于3 μm 束斑下的稳定一次离子束,精确定位在小颗粒矿物表面,避开裂隙和边界,最小化地球Pb的污染,从而提高了U-Pb体系定年精度和准确性,在嫦娥工程返回样品年代学研究中发挥了关键作用。

嫦娥样品返回之前,所有测试过的月球样品均老于30亿年,因此认为月球可能在30亿年前就停止了地质生命。嫦娥五号返回的玄武岩确定为20.3亿年前喷发^[3],将月球岩浆活动的时限推迟了10亿年之久。最新研究在嫦娥五号月壤中发现了3颗火山玻璃珠,指示在1.2亿年前月球正面仍存在小规模火山活动^[4]。与月球正面的样品相比,嫦娥六号样品具有低的 μ 值和Sr同位素比值,背面月幔可能比正面月幔更加亏损,亏损难熔的月幔是南极-艾特肯盆地缺乏大规模火山活动的重要原因。这为解释月球的二分性提供了重要线索。研究人员通过对上百颗玄武岩颗粒定年结果的统计,揭示出了嫦娥六号着陆区的火山活动时间为28亿年前^[5,6],这个时间段的火山活动在月球正面还没有发现过。此外,还发现一颗形成于42亿年前的高铝玄武岩颗粒,显示月背不仅存在28亿年前的年轻火山活动,而且存在至少长达14亿年的火山活动历史^[5]。在样品返回之前,月海玄武岩的年龄需要通过撞击坑

统计定年法来推测,然而这个方法是基于在月球正面返回的样品及对应采样区撞击坑统计量来建立的,是否适用于月球背面一直存在疑问。遥感方法给出的嫦娥六号着陆区玄武岩年龄在25~30亿年之间,其平均值与同位素体系给出的精确年龄在误差范围内一致,从而指示出月球正面和月球背面受撞击的概率一致,这表明依据正面样品所建立的撞击坑统计定年曲线同样适用于背面,且嫦娥六号返回样品为该定年曲线增加了28亿年数据点的校正锚点,进一步提高了撞击坑统计定年方法的结果准确度。

3 月幔源区示踪

要进一步追踪玄武岩的成因以及所反映的月球演化信息,需要对其源区性质做深入研究。月球上的玄武岩演化没有地球上那么复杂,可以大体归纳为两个阶段,即月球岩浆洋冷却分异成不同的月幔部分,作为源区在不同时间熔融出玄武岩。根据返回玄武岩的年龄和同位素特征就可以追溯出源区的地球化学性质。对于42亿年这一颗玄武岩,根据所获得的Pb-Pb等时线可以计算出源区的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ (μ 值)高达~1600,比所有返回的月海玄武岩源区相应 μ 值都要高,显示出源区富集克里普组分的特点。嫦娥六号着陆区基本上是月球上最为亏损克里普组分的地方,有多种模型来解释月球背面亏损克里普组分,例如月球岩浆洋的不对称结晶,月背可能就没有分异出克里普组分;约43.5亿年左右可能发生的月幔翻转或者南极-艾特肯盆地形成时的大撞击导致背面的克里普组分向正面发生了转移。嫦娥六号返回样品中42亿年前源于克里普组分富集源区的玄武岩的发现,证明了月背分异出了克里普组分,存在全球性岩浆洋。即使存在月幔翻转或南极-艾特肯盆地撞击影响,对克里普组分的重新分配的作用程度需再厘定。

28亿年前的本地玄武岩源区 μ 值只有~360,接近返回月海玄武岩源区最低 μ 值,对应最为亏损克里普组分的特征,这在极其亏损的Nd同位素特征($\epsilon_{\text{Nd}} \sim +17$)上也得到了验证。嫦娥六号玄武岩源区的克里普组分亏损程度与阿波罗12号玄武岩源区特征非常类似,而阿波罗12号玄武岩却位于月球正面的风暴洋克里普地体中,这表明即使嫦娥六号和阿波罗12号着陆区表面表现为截然不同的克里普组分含量特征,他们的源区却是类似地都很亏损克里普组分。那么更进一步,月表观测到的克里普组分的二分性特点是否能对应到深部呢?月球二分性是表皮现象还是有内部相对应的特征就成为下一个接下来更需深入思考和研究的问题。此外,如此亏损克里普组分的源区,在较晚的时段内仍可以发生火山活动,指示放射性元素生热未必是月球持续岩浆活动的关键因素。嫦娥工程返回样品揭示出月球具有持久地质活力,对于月球这样一颗较小体积的星球,为何可以延续如此长的岩浆活动?研究清楚月球的演化特征,就可以提供对其他星球的地质活力认知的参照。

4 研究展望

嫦娥六号带回的月球背面样品，无疑是月球科学研究皇冠上的一颗璀璨明珠。它们不仅填补了月球背面研究的历史空白，而且为研究月球早期演化、背面火山活动和撞击历史提供了直接证据，为理解月球背面与正面地质差异提供了新

的途径。展望未来，嫦娥六号任务的成功不仅为月球科学研究开辟了新方向，更为人类开展太阳系探测奠定了坚实基础。随着嫦娥六号深入研究，有望不断加深对月球内部结构、物质成分及形成演化过程的认识，推动月球及行星科学的蓬勃发展。

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 C, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'e-5 mission. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab188
- 3 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
- 4 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
- 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*, 2025, 643: 356–360
- 6 Cui Z, Yang Q, Zhang Y Q, et al. A sample of the Moon's far side retrieved by Chang'e-6 contains 2.83-billion-year-old basalt. *Science*, 2024, 386: 1395–1399

Summary for “嫦娥六号返回样品揭秘月球背面演化奥秘”

Unveiling the evolutionary mysteries of the lunar far side: insights from Chang’e-6 returned samples

Chi Wang

Key State Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

E-mail: cw@nssc.ac.cn

Lunar science explores the Moon’s origin, evolution, and geological processes to unravel the history of the Earth-Moon system and the early solar system, leveraging data from missions like Apollo, Artemis, and Chang’e, as well as lunar samples and remote sensing, to advance understanding of planetary formation, volatile migration, and potential *in-situ* resource utilization for future exploration.

China’s Chang’e-6 (CE-6) mission has achieved a historic milestone by successfully returning 1935.3 g of lunar samples from the far side of the Moon, marking humanity’s first collection of materials from this enigmatic region. These samples, retrieved from the South Pole-Aitken (SPA) Basin—the Moon’s oldest, deepest, and largest impact basin—provide unprecedented insights into the lunar dichotomy, volcanic history, and mantle evolution, positioning CE-6 as a landmark advancement in lunar exploration and planetary science.

The CE-6 landing site (41.64°S, 153.99°E) exhibits unique geological characteristics. Located in the southern part of the Apollo Basin within the SPA basin, the region exposes deeper crustal materials due to its thin crust and complex impact history. Unlike previous samples from the lunar nearside, CE-6 materials originate from a diverse mixture of sources, including both local mare basalts and non-mare components. Analytical results reveal a bimodal grain-size distribution, elevated Al_2O_3 and CaO content, and lower FeO and incompatible elements (Th, U, K), reflecting mixing between mare basalts and highland materials.

A groundbreaking achievement lies in the precise radiometric dating of CE-6 basalts. Using optimized microbeam Pb-Pb isochron methods, researchers determined that local volcanic activity occurred 2.8 billion years ago (Ga), a surprisingly young volcanic episode that has not been observed on the nearside. Intriguingly, a 4.2 Ga high-alumina basalt clast suggests prolonged volcanic activity spanning at least 1.4 billion years on the far side. These findings validate the applicability of crater chronology models to the lunar far side.

Geochemical tracing of mantle source regions reveals a depleted KREEP signature ($\epsilon_{\text{Nd}} \approx +17$) for the 2.8 Ga basalts. This paradox challenges previous theories linking prolonged volcanism solely to radiogenic heating from KREEP (potassium, rare-earth elements, phosphorus)-rich regions. It also highlights a disconnect between surface KREEP distribution and mantle source characteristics. The discovery of a 4.2 Ga basalt with a highly enriched μ -value ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb} \approx 1600$) further confirms the existence of a global magma ocean, reshaping models of lunar mantle differentiation and redistribution processes.

The CE-6 samples not only bridge critical gaps in understanding the Moon’s asymmetric evolution but also offer a new framework for studying planetary geological activities. Future investigations will focus on resolving the mechanisms sustaining prolonged volcanism in a KREEP-poor environment and re-evaluating the role of mantle overturn or giant impacts in shaping lunar geochemistry. As analyses progress, these samples promise to deepen our knowledge of the Solar System’s early dynamics and the fundamental processes governing rocky planetary evolution.

lunar exploration, lunar samples, lunar geology, planetary

doi: [10.1360/CSB-2025-0563](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0563)