



嫦娥返回样品揭示月球中期磁场演化

蔡书慧

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

E-mail: caishuhui@mail.iggcas.ac.cn

Mid-stage evolution of the lunar magnetic field revealed by Chang'e returned samples

Shuhui Cai

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

E-mail: caishuhui@mail.iggcas.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2025-0102](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0102)

地核发电机产生的全球性磁场保护着地球的大气、水和生命, 维持着地球的宜居环境. 就像地球一样, 月球也曾有自己的磁场, 它不仅能告诉我们月球内部的结构、热量变化和运动方式, 还会影响月球表面的环境变化. 通过研究月球磁场的变化, 我们可以更好地了解月球的历史, 认识月球的演化过程. 目前的月球没有像地球那样的全球性磁场, 但月壳中保留着磁化痕迹. 阿波罗任务带回的月岩研究显示, 月球早期(42~35亿年前)曾拥有较强的磁场, 接近今天地球磁场的水平. 之后, 月球磁场波动减弱, 约31亿年前急剧下降, 到10亿年前后月球内部的“发电机”系统逐渐停止运作, 全球性的月球磁场也随之消失^[1~5]. 然而由于样品有限, 已发表的月球磁场强度数据都来自月球正面, 并主要集中于30亿年前. 这使得对月球发电机的持续时间、驱动机制, 以及月球磁场空间分布等重要科学问题的约束较为模糊, 例如, 学界也有观点认为月球发电机磁场只能持续到月球形成以后的1~2亿年^[6,7]. 因此, 获取更多样本并进行月球磁场强度测定是破解月球磁场演化之谜的关键.

嫦娥五号任务从月球风暴洋区域采回第一批中纬度月球样品(图1)^[8], 其中的玄武岩喷发年龄约为20亿年^[9,10], 是迄今为止最年轻的月球玄武岩返回样品. 嫦娥六号任务的着陆点位于南极-艾特肯盆地的阿波罗撞击坑, 这次任务采回了首批月背样品^[11], 其中的玄武岩主期次喷发年龄约为28亿年^[12~14](图1). 这两次任务采集的样品不仅有助于认识月球中

晚期的火山活动, 还为揭示月球中-晚期的磁场状态和月球发电机演化过程提供了独特的机遇.

由于月球返回样品具有珍贵、量少、磁信号弱等特点, 研究其记录的磁场信息需要特别精密的方法. 针对这些挑战, 我们开发了一套高精度、低损耗的研究方法, 专门用于分析月球等地外天体的微量弱磁样品, 为嫦娥五号和嫦娥六号任务采集样品的磁学研究提供了技术保障^[15]. 在此基础上, 通过多种古磁场强度测试方法, 团队对9颗嫦娥五号采集的毫米级玄武岩岩屑和4颗嫦娥六号采集的毫米级玄武岩岩屑进行了详细分析, 成功测定了20亿年前和28亿年前的月球磁场强度^[14,16]. 进一步分析剩磁来源, 我们认为这些样品记录的古强度很可能代表月球发电机磁场的信号.

嫦娥五号样品的结果显示, 20亿年前的月球的内部仍存在一个运行但较弱的“发电机”, 其在月球表面产生了2~4微特斯拉(μT)的磁场强度(图2), 接近现在地球磁场强度的1/10, 表明当时月球内部仍存在一定的热活动, 如热对流或热传导等. 其能量可能来源于多种过程, 例如月球内核的结晶、月球的摇摆运动(进动), 或富含钛铁矿物质的下沉等. 这些过程不仅维持了弱磁场, 还可能为月球晚期的火山活动提供了额外的热量支持^[16]. 嫦娥五号样品来自月球中高纬度区域, 本研究结合来自中低纬度的20~15亿年非常有限的阿波罗样品数据, 尝试分析当时月球磁场的可能形态, 模型计算结果显示, 月球磁场在距今20亿年前很可能不符合类似于地磁场的

引用格式: 蔡书慧. 嫦娥返回样品揭示月球中期磁场演化. 科学通报, 2025, 70: 1845–1847

Cai S. Mid-stage evolution of the lunar magnetic field revealed by Chang'e returned samples (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 1845–1847, doi: [10.1360/TB-2025-0102](https://doi.org/10.1360/TB-2025-0102)

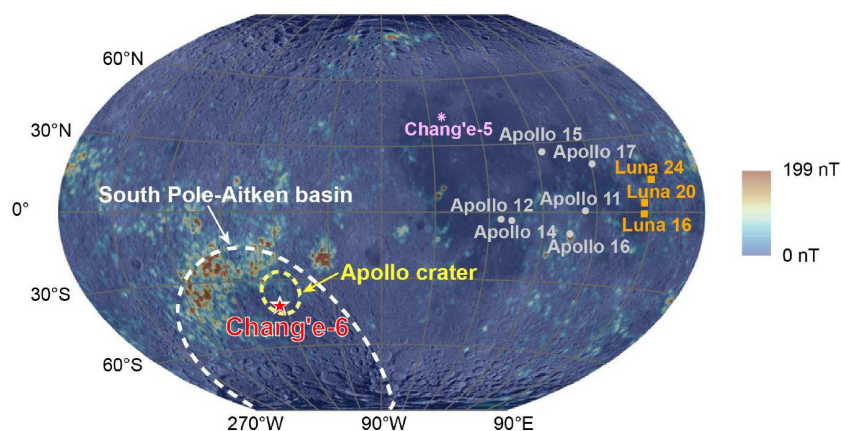


图1 月球表面磁异常及月球探测任务着陆点分布^[14]

Figure 1 Magnetic anomaly on the lunar surface and landing sites of the lunar exploration missions^[14]

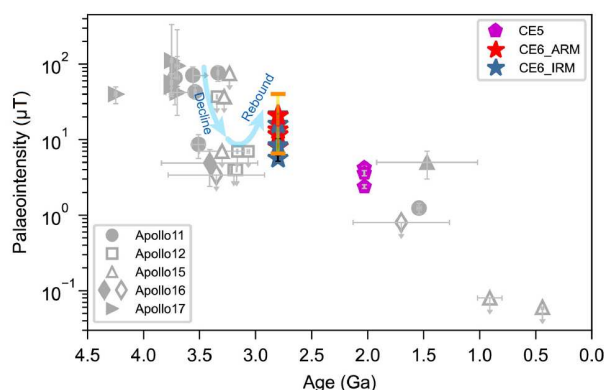


图2 月球磁场强度演化^[14]

Figure 2 Ancient strength variation of the lunar magnetic field^[14]

地心轴向偶极分布,这与其较弱的磁场强度相对应,指示月球磁场发电机可能此时已经处于近乎失稳的低能量状态。但是该推论是基于仅有的4个古强度数据计算结果,具有很大的不确定性,有待更多的高质量数据进一步检验。嫦娥六号样品的研究发现,28亿年前月球的磁场强度在5~21 μT 之间,中值约为13 μT 。这一结果表明,在31亿年前磁场急剧减弱后,月球磁场可能曾出现增强,暗示其内部“发电机”系统的能量来源或驱动机制发生了变化。结合模拟分析,发现这一磁场强度与“基底岩浆洋”模型预测的结果最为吻合,但月球自转轴进动等因素的影响仍不可忽视。此外,月球核心的结晶过

程等其他机制也可能为磁场提供额外能量^[14]。但需要注意的是,由于基底岩浆洋和进动发电机模型仍存在较大的不确定性,月球发电机确切的能量来源还需进一步评估。

此外,阿波罗、嫦娥六号和嫦娥五号数据指示月球发电机的强度可能存在一个随时间指数下降的长期趋势,对古强度数据取对数后,其与时间呈现出弱线性相关关系($r^2=0.3$)。进一步对原始强度数据取对数后再进行线性去趋势处理以探讨该整体下降趋势下的二阶变化,结果表明在39~35亿年的高场强时期之后,月球磁场在35~28亿年间发生显著波动,指示月球发电机此时可能处于不稳定状态,这一发现将为未来月球探测任务寻找可能的磁场倒转提供重要参考。

嫦娥五号的研究结果以封面文章发表在*Science Advances*。期刊同期还发表了国际行星磁学领域著名学者、美国麻省理工学院Benjamin P. Weiss教授为本文撰写的评述性聚焦(Focus)论文,认为嫦娥五号玄武岩是目前返回的最年轻的玄武岩样品,研究团队测得嫦娥五号玄武岩记录的月球磁场古强度,提出月球发电机可能至少持续到月球演化的中期,并创新地利用嫦娥五号独特的地理位置尝试讨论月球磁场形态分布,为认识月球磁场几何形态提供了宝贵信息。嫦娥六号的研究结果发表在*Nature*,审稿人对这项工作给予了高度评价,认为研究团队通过对月球背面采集的玄武岩样品进行磁学分析,提供了高质量的月球磁场古强度数据,填补了关于月球古磁场时空信息的巨大空白,研究结果为我们理解月球的磁场演化提供了全新的视角,对月球演化历史研究具有重大意义。

推荐阅读文献

- 1 Weiss B P, Tikoo S M. The lunar dynamo. *Science*, 2014, 346: 1246753
- 2 Tikoo S M, Weiss B P, Shuster D L, et al. A two-billion-year history for the lunar dynamo. *Sci Adv*, 2017, 3: e1700207
- 3 Mighani S, Wang H, Shuster D L, et al. The end of the lunar dynamo. *Sci Adv*, 2020, 6: eaax0883

- 4 Strauss B E, Tikoo S M, Gross J, et al. Constraining the decline of the lunar dynamo field at ≈ 3.1 Ga through paleomagnetic analyses of Apollo 12 mare basalts. *JGR Planets*, 2021, 126: e2020JE006715
- 5 Jung J I, Tikoo S M, Burns D, et al. Assessing lunar paleointensity variability during the 3.9–3.5 Ga high field epoch. *Earth Planet Sci Lett*, 2024, 638: 118757
- 6 Tarduno J A, Cottrell R D, Lawrence K, et al. Absence of a long-lived lunar paleomagnetosphere. *Sci Adv*, 2021, 7: eabi7647
- 7 Zhou T, Tarduno J A, Cottrell R D, et al. A lunar core dynamo limited to the Moon's first ~ 140 million years. *Commun Earth Environ*, 2024, 5: 456
- 8 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
- 9 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
- 10 Che X, Nemchin A, Liu D, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374: 887–890
- 11 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
- 12 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)
- 13 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
- 14 Cai S, Qi K, Yang S, et al. A reinforced lunar dynamo recorded by Chang'e-6 farside basalt. *Nature*, 2024, doi: [10.1038/s41586-024-08526-2](https://doi.org/10.1038/s41586-024-08526-2)
- 15 Hou Y, Zhang M, He K, et al. A magnetic measurement technique for small rare samples: pre-study for Chang'e-5 returned and other extraterrestrial samples. *Front Earth Sci*, 2023, 11: 1146231
- 16 Cai S, Qin H, Wang H, et al. Persistent but weak magnetic field at the Moon's midstage revealed by Chang'e-5 basalt. *Sci Adv*, 2025, 11: eadp3333