

基于嫦娥四号光谱探测数据发现月球背面幔源物质初步证据

石硕

中国科学院国家天文台, 北京 100101

E-mail: shishuo@bao.ac.cn

Initial *in-situ* identification of candidate lunar mantle-derived materials: Lunar far-side spectroscopic analysis from Chang'E-4

Shuo Shi

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

E-mail: shishuo@bao.ac.cn

doi: 10.1360/TB-2019-0102

月球是地球之外我们研究得最深刻的星球. 与地球一样, 月球也可分为月壳、月幔以及月核. 与地球不同的是, 月球并没有板块运动, 其早期演化历史的痕迹依然存在. 月球就像化石, 我们可以通过对月球的研究一窥地球或其他行星的早期演化历史.

与月球早期演化有关的岩浆洋理论推断, 随着岩浆的演化, 如橄榄石、低钙辉石等较重的镁铁质矿物(富镁和铁)结晶下沉形成月幔. 当约四分之三的岩浆洋结晶固化后, 较轻的斜长石(富钙)组分上浮形成月壳^[1]. 然而, 这一关于月幔物质组成的推论至今没有很好地被证实. 一方面, 从Apollo和Luna任务返回的月球样品中没有发现与月幔具体物质组成有关的直接证据^[2]. 另一方面, 位于月球背面的南极-艾特肯盆地(SPA)是月球表面最古老、最大和最深的撞击构造, 其深度达13 km, 覆盖从月球南极至艾特肯环形坑约2500 km的范围(图1), 最有可能撞穿月壳, 或减薄月幔之上月壳的厚度, 甚至暴露出富含橄榄石的月幔物质^[3]. 然而, 现有的(遥感光谱)研究结果表明, SPA区域并没有橄榄石广泛出露的证据^[4]. 这是否说明富橄榄石的月幔假说是错误的? 嫦娥四号(CE-4)探测器于2019年1月3日成功着陆于SPA内部冯·卡门环形坑内, 并释放玉兔2号巡视器, 其上搭载的可见近红外光谱仪(VNIS)获取的就位反射率光谱数据将为您解答月幔物质的组成提供答案^[5].

2019年5月16日, 中国科学院国家天文台李春来课题组^[6]在*Nature*发表题为“Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials”的研究论文, 通过对VNIS获取的第一月昼两条光谱数据的分析发现,

CE-4着陆区物质成分明显不同于月球正面的玄武质月壤, 主要由橄榄石和低钙辉石组成. 这种矿物组合很可能代表了源自月幔的深部物质. 该研究结果引起了广泛关注.

通过将VNIS获得的就位光谱数据与CE-3获取的光谱数据^[7]以及月壤样品的实验室(Lunar Soils Characterization Consortium)光谱曲线^[6]进行比对分析, 李春来课题组发现, CE-4着陆区的光谱不同于CE-3号雨海区域以及月海样品的光谱, 它们在1和2 μm 吸收中心波长向短波方向移动, 1 μm 吸收相对于纯辉石更宽且不对称, 表现出明显的橄榄石和低钙辉石混合的光谱特征(图2(a)和(b)). 光谱的整体形状和吸收中心波长位置更接近月球高地的物质. 这些特征表明CE-4着陆点的物质富含不同于月海玄武岩的镁铁质组分. 为了进一步确认探测点的矿物类型并估计它们的相对含量, 他们利用修正的高斯模型^[8]对获取的数据进行解混(图2(c)和(d)). 结果显示, CE4_0015和CE4_0016两个探测点的橄榄石:低钙辉石:高钙辉的比例分别为48%:42%:10%和55%:38%:7%, 以橄榄石为主, 低钙辉石次之, 含少量高钙辉石, 与推测的结果一致.

CE-4号探测器的着陆点位于冯·卡门环形坑内部, 早期研究结果证明其表面被后续喷发的玄武岩所填充, 这些不同于玄武岩的深部物质是如何分布在着陆区域内的? 李春来课题组对覆盖着陆区域的CE-1 DOM图像数据和M³高光谱数据的分析结果显示, 着陆器和巡视器位于冯·卡门环形坑玄武岩“平原”的撞击溅射物上, 这些溅射物来自东北方向的芬森(FINSEN)环形坑(图3). 40多亿年前SPA盆地形成时已将月壳减薄或完全剥离. 芬森坑是由小天体撞击

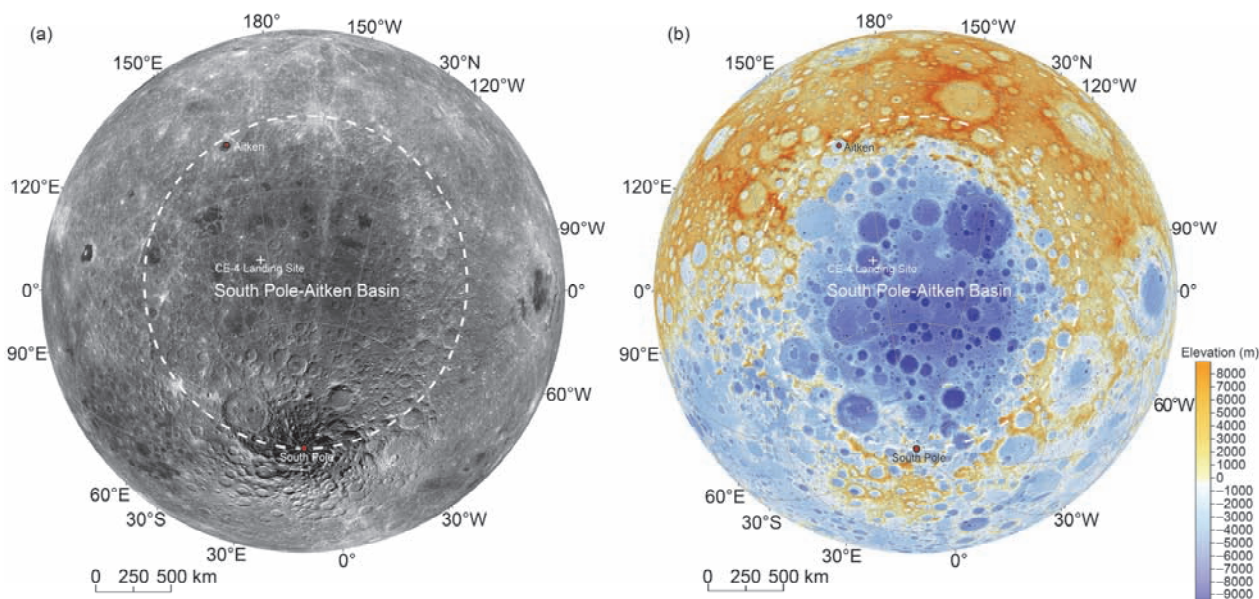


图1 南极-艾特肯盆地(SPA)数字正射影像(DOM)和数字高程模型(DEM). (a) SPA CE-2 DOM; (b) SPA CE-1 DEM. 虚线为SPA盆地边界. 两个红色原点分别表示南极点和艾特肯环形坑

Figure 1 Digital Orthophoto Map (DOM) and Digital Elevation Model (DEM) of South Pole-Aitken (SPA) basin. (a) SPA CE-2 DOM; (b) SPA CE-1 DEM. Dashed line represents boundary of SPA basin. Two red circles represent South Pole and Aitken, respectively

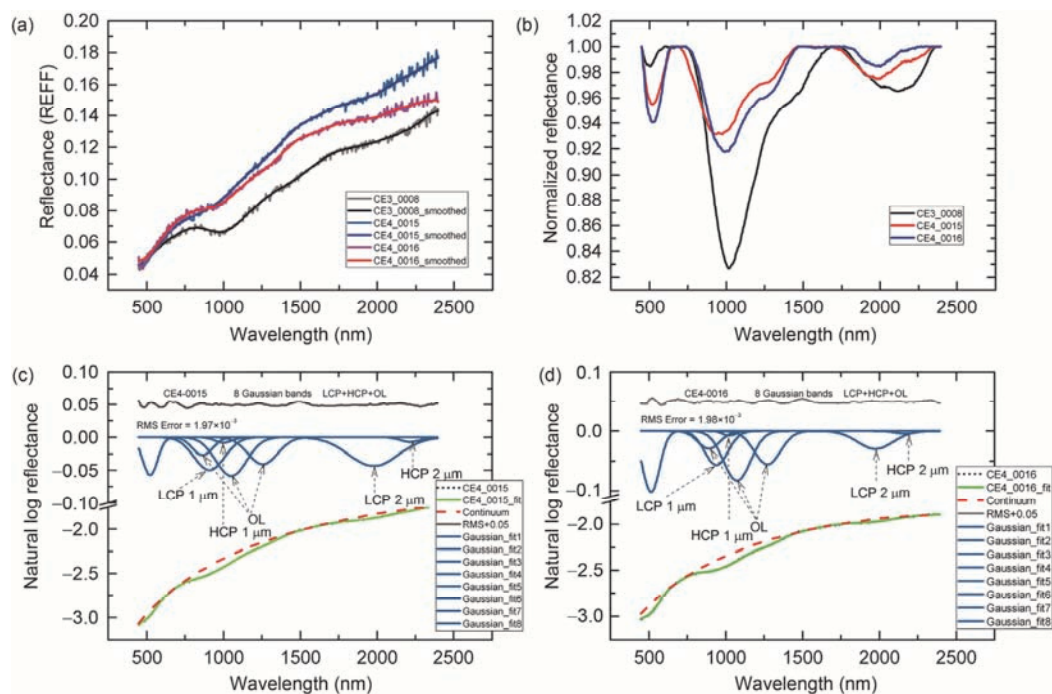


图2 VNIS获取的第一月昼CE-4着陆区反射率光谱曲线. (a) CE-4 VNIS和CE-3 VNIS探测的反射率光谱曲线; (b) 图(a)经包络线去除后的结果; (c), (d) 利用低钙辉石、高钙辉石和橄榄石端元对CE-4两个探测点进行修正高斯模型拟合的结果

Figure 2 Chang'E-4 reflectance spectra acquired by the VNIS during the first lunar day. (a) Reflectance spectra obtained by Chang'E-4 VNIS and the Chang'E-3 VNIS detection point; (b) continuum-removed spectra of (a); (c), (d) MGM-fitting results for CE-4 two detection points using endmember low-Ca pyroxene and high-Ca pyroxene and olivine

SPA盆地内部表面而形成的, 其犹如在SPA表面打的一口“深钻”一般, 进一步将SPA盆地表面以下月球更深部物质

挖掘出, 产生的溅射物四处抛射, 呈辐射线撒布在冯·卡门环形坑“平原”上. 因此, CE-4 VNIS分析到的对象是芬森环

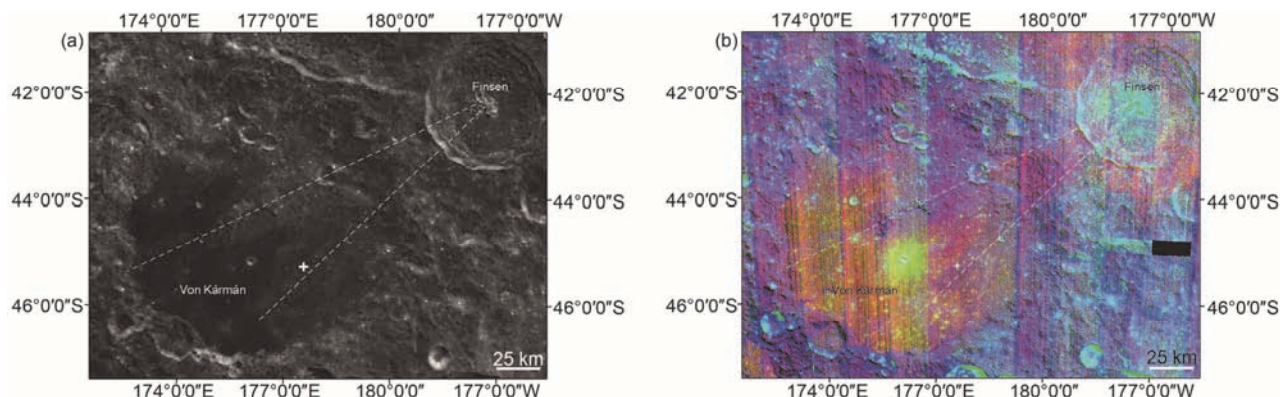


图3 冯·卡门环形坑内芬森环形坑溅射物分布图。(a) CE-1 DOM, 空间分辨率 120 m。(b) M³ 高光谱数据彩色合成图。白色虚线表示芬森环形坑的两条向其中央峰收敛、呈东北至西南走向的溅射物条带。白十字是位于芬森环形坑溅射物上的CE-4 着陆点

Figure 3 Distribution of Finsen ejecta in the Von Kármán crater. (a) CE-1 DOM, spatial resolution 120 m; (b) M³ hyperspectral data color composite. White dashed lines represent two major northeast-southwest ejecta rays of the Finsen crater converging towards its central peak. White cross is the Chang'E-4 landing site, which is located on the ejecta material of the Finsen crater

形坑挖掘、抛射到冯·卡门环形坑表面的月幔物质。

李春来课题组这一工作的意义在于成功地揭示了月幔的物质组成,为研究月球早期岩浆洋的深度、冷却速度等特征提供了新的约束条件。这些特征是我们研究早期岩浆的黏度、对流过程以及后续的岩浆活动不稳定性的基

础^[9]。更为重要的是,他们的发现加深了我们对月球内部的形成及演化的认识,也为未来我国开展月球样品采样返回任务提供了理论依据。后续的探测任务中,李春来课题组将对巡视区域开展更为详实的探测,特别是获取岩块目标的就位光谱数据,进一步验证本文的研究结果。

参考文献

- 1 Wood J A, Dickey J S, Marvin U B, et al. Lunar anorthosites and a geophysical model of the Moon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1970, 1: 965–988
- 2 Shearerz C, Hess P C, Wieczorek M K, et al. Thermal and magmatic evolution of the Moon. *Rev Mineral Geochem*, 2006, 60: 365–518
- 3 Pieters C M, Tompkins S, Head J W, et al. Mineralogy of the mafic anomaly in the South Pole-Aitken basin: Implications for excavation of the lunar mantle. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1903–1906
- 4 Yamamoto S, Yamamoto R, Matsunaga T, et al. Olivine-rich exposures in the South Pole-Aitken basin. *Icarus*, 2012, 218: 331–344
- 5 Wu W R, Li C L, Zuo W, et al. Lunar farside to be explored by Chang'E-4. *Nat Geosci*, 2019, 12: 222–223
- 6 Li C L, Liu D W, Liu B, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 2019, 569: 378–382
- 7 Ling Z, Jolliff B L, Wang A, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'E-3 landing site. *Nat Commun*, 2015, 6: 8880
- 8 Sunshine J M, Pieters C M. Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the modified Gaussian model. *J Geophys Res Planets*, 1993, 98: 9075–9087
- 9 Pinet P. The Moon's mantle unveiled. *Nature*, 2019, 569: 338–339