

嫦娥四号测月雷达揭开月球背面地下浅层结构的神秘面纱

苏彦^{1,2*}, 李春来^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: suyan@nao.cas.cn

The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 lunar penetrating radar

Yan Su^{1,2*} & Chunlai Li^{1,2}

¹ Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: suyan@nao.cas.cn

doi: 10.1360/TB-2020-0217

大约 45 亿年前, 在地球形成后不久月球可能就形成了. 从那时起, 月球灰暗而荒凉的表面就不断遭受陨石和小天体的撞击, 造就了现在这样一个布满碎石和撞击坑的月球表面. 然而, 在地表之下隐藏着最吸引人类探索的那些秘密. 通过探测月球的内部地层结构, 以及撞击形成的陨石坑和溅射物, 人们就能了解月球撞击过程如何改造月球表面和火山活动等不为人知的历史.

早在 1972 年, 阿波罗 17 号搭载的雷达探测仪试验 (Apollo lunar sounder experiment) 首次以非常低的分辨率对月球局部区域进行了探测^[1]. 2007 年, 日本 Kaguya 上搭载的 5 MHz 雷达探测仪 (lunar radar sounder, LRS) 对全月球进行了探测, 获得了月球正面多个月海局部区域深度 1 km 以

内的玄武岩厚度, 次表层分辨率为百米量级^[2]. 受探测深度、分辨率和观测范围等因素的限制, 这些探测器没有获得月球背面次表层分层的精细结构特征, 缺乏嫦娥三号和嫦娥四号具备的雷达探测能力. 2013 年 12 月, 嫦娥三号着陆在雨海北部紫薇撞击坑的溅射毯上, 首次搭载了双通道探地雷达 (lunar penetrating radar, LPR), 其高频观测数据揭示了月球正面紫薇撞击坑溅射毯深度 10 m 以内的结构^[3-5].

北京时间 2019 年 1 月 3 日, 嫦娥四号探测器在月球背面南极-艾特肯 (South Pole-Aitken, SPA) 盆地内的冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑底部成功着陆 (图 1). 玉兔二号月球车搭载的测月雷达是人类历史上第一次对月球背面进行的雷达就位探测. 2020 年 2 月 27 日, 我们在 *Science Advances*

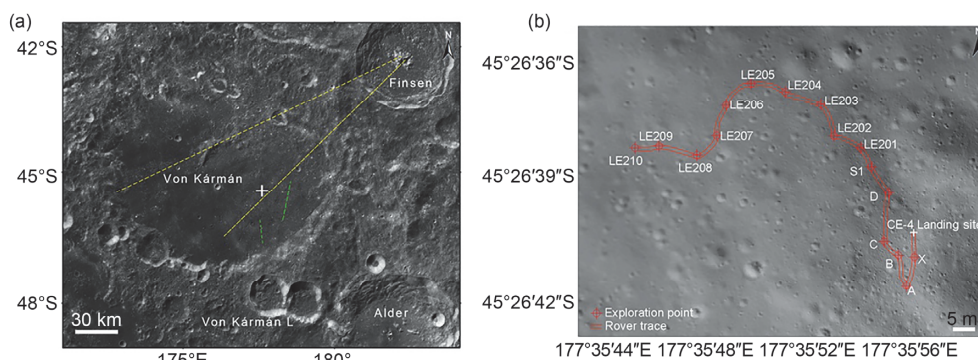


图 1 (网络版彩色) 嫦娥四号着陆区 (a) 和玉兔二号月球车第一和第二月昼行进路线图 (b)^[6]

Figure 1 (Color online) The Chang'E-4 landing region (a) and the Yutu-2 rover route during the first and second lunar days (b)^[6]

发表研究论文,首次揭示了沿着玉兔二号月球车行走的106 m的路径,月球背面着陆区地下40 m深度内的分层结构^[6].

南极-艾特肯盆地形成于前酒海纪,是月球表面最古老、最大的撞击盆地.对南极-艾特肯盆地的研究,可以帮助我们理解大型撞击事件如何塑造地球及其他系内行星.

冯·卡门撞击坑(中心位置44.45°S, 176.3°E; 直径~186.3 km)位于SPA盆地的西北部,整体地形相对平坦,坑底被玄武岩所填充.根据撞击坑大小-频率分布的统计结果,底部玄武岩年龄大约为36亿年.玄武岩表面相当一部分区域又被周边大型撞击坑的溅射物所覆盖,并广泛分布着成人字链状的二次撞击坑.

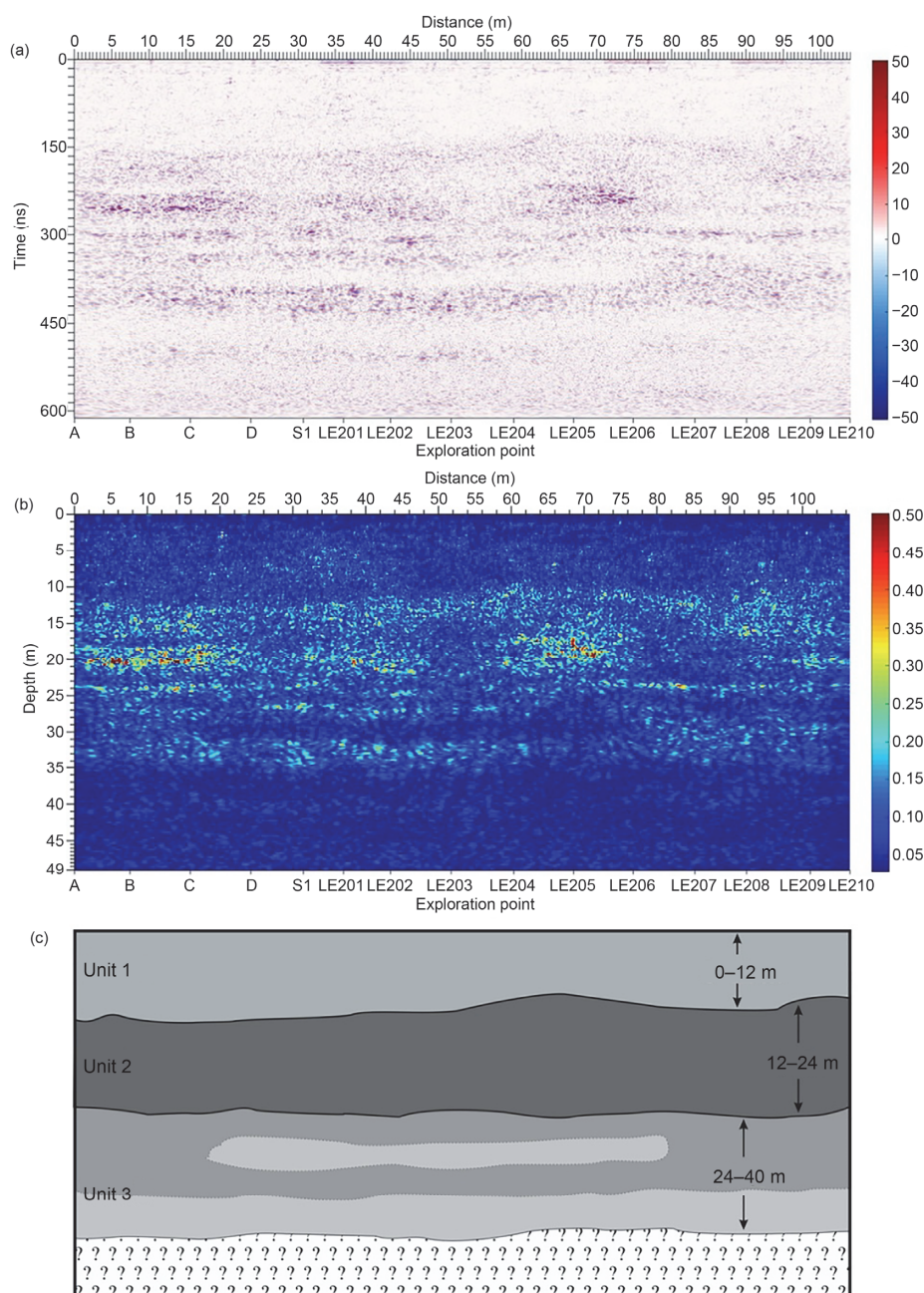


图2 (网络版彩色)测月雷达高频通道(500 MHz)雷达图像^[6]. (a) 经过背景去除、增益调整和偏移处理后的雷达图像; (b) 基于层析反演方法重建的雷达图像; (c) 地层序列示意图

Figure 2 (Color online) LPR image at 500 MHz^[6]. (a) LPR radargram after applying background subtraction, gain compensation and migration; (b) tomographic reconstruction of the radar data; (c) schematic of the stratigraphic sequence

测月雷达(由中国科学院电子学研究所研制)是一种基于月球车巡视探测平台的高分辨率月球表面穿透成像雷达,工作在 60 和 500 MHz 两个频段,空间分辨率分别为米级和优于 0.3 m^[7]。测月雷达于 2019 年 1 月 4 日 9 点 29 分开始工作,在前两个月昼中,共工作 6 小时 28 分钟 53 秒。玉兔二号月球车从 X 点行进到 A 点,为测月雷达参数在轨测试阶段,从 A 点到 LE210 点为探测阶段,不同的参数设置导致雷达图像的不连续性,因此研究团队使用的是从 A 点到 LE210 点的探测数据,通过预处理^[8]、数据拼接、背景去除、带通滤波、幅度补偿和偏移处理等一系列处理,最终获得雷达图像(图 2)。

基于雷达数据,研究团队计算分析了月球浅层物质的特性参数,包括电磁波在月表下物质中的传播速度、介电常数、密度、损耗角正切和钛铁含量等。并利用层析重建算法,反演月表下所埋尺寸大于半波长目标物的大小和分布。

嫦娥四号和嫦娥三号搭载的测月雷达指标和工作状态完全相同。对比两次任务,研究团队发现,玉兔二号月球车携带的探月雷达能够探测到月表以下 40 m 深的地层,其探测深度(双向传输时间)是着陆到月球正面的嫦娥三号的三倍以上。结果显示,嫦娥四号着陆区地下物质对信号衰减更小,钛铁含量更低。

月球的两种大规模活动分别是陨石撞击和火山活动,火山活动形成的月海玄武岩覆盖了冯·卡门撞击坑的底部,随后附近多次陨石撞击事件带来的溅射物逐渐在这里沉积。根据获得的物性参数和雷达图像,在深度 40 m 的溅射物内部呈现出清晰的三层(图 3)。最表层为地下 0~12 m,主要由细粒月壤组成,其中内嵌有少量碎石。此月壤层形成

于多个撞击坑互叠的溅射物之上,这些溅射物可能来自周边的芬森(Finsen)和冯·卡门 L 撞击坑等。第二层为地下 12~24 m,这一层是雷达图像上回波强度最大的区域,表明内部存在大量的粗粒砾石,形成了碎石层和碎石堆,可能是撞击产生的溅射物沉积后又发生了二次撞击。溅射物沉积不仅仅是地毯式的铺散,也伴随着物质之间的剪切、混合、挖掘和二次坑结构扰动等复杂的地质过程。第三层一直延伸到地下 40 m 深,雷达回波明暗交替变化,表明其粒度呈现粗粒和细粒的交叠,是不同时期、更古老的溅射物的沉积和风化产物。深度超过 40 m 时,高频通道雷达信号微弱,已无法推断其物质特性。结合月球的区域地质历史,在嫦娥四号着陆点附近区域,深度超过 40 m 的地方,分布着完整的月海玄武岩。

该如何解释溅射物中这么多的碎石呢?据《科学美国人》(Scientific American)报道,美国 NASA 戈达德航天中心(Goddard Space Flight Center)的月球科学家丹尼尔·莫里亚蒂(Daniel Moriarty,并未参与到新论文中)指出,一种解释是在撞击过程中,底层的月海玄武岩很可能与其他撞击形成的碎屑混在了一起,因此地层中的一些巨砾岩石可能就是这些玄武岩分解后形成的,而不是由附近的撞击带来的。另一种可能就是月幔物质在南极-艾肯特盆地形成的那次撞击中暴露出来,随后又与其他碎屑混合在一起(<https://www.scientificamerican.com/article/chinas-moon-rover-takes-a-deeper-look-at-the-far-side/>)。

这项研究工作通过嫦娥四号测月雷达的直接就位测量,获得了月球背面地下浅层的第一张雷达图像、月表下物质的特性参数,以及溅射物内部地层序列,是人类首次揭开

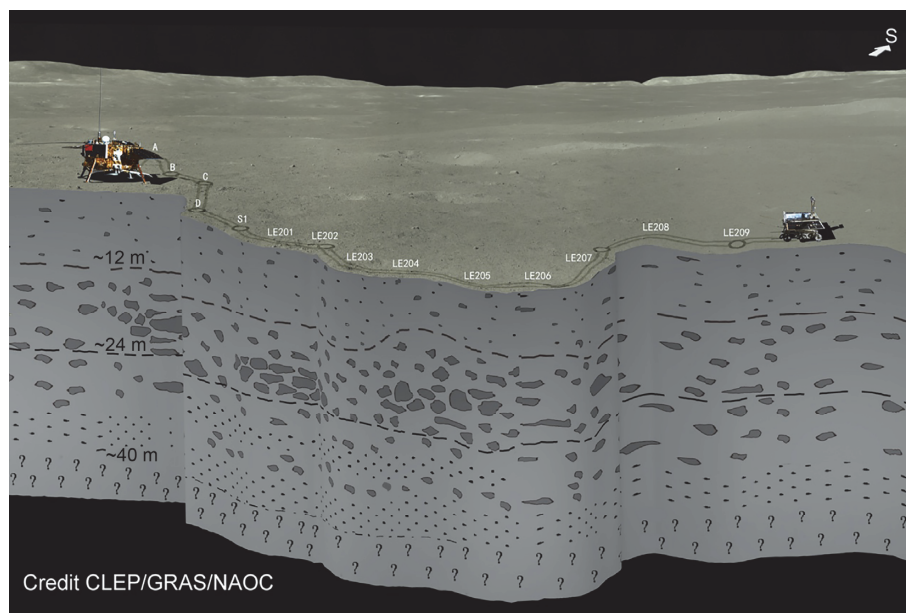


图 3 (网络版彩色)嫦娥四号着陆区地下浅层结构

Figure 3 (Color online) Schematic representation of the shallow subsurface geological structure at the Chang'e-4 landing site

月球背面地下结构的神秘面纱。目前,作为历史上在月球背面工作的唯一的巡视器,玉兔二号月球车仍保持良好的状态在行进,探测更多此前从未涉足的月球区域。我们希望它能够观测到更大范围内地下层位以及地层中撞击

碎屑尺寸的变化,从而揭露出月球古老的撞击历史中的更多细节,极大地增进我们对月球陨石撞击和火山活动历史的了解,并为月球背面的地质演化过程研究提供新的启示。

推荐阅读文献

- 1 Peeples W J, Sill W R, May T W, et al. Orbital radar evidence for lunar subsurface layering in Maria Serenitatis and Crisium. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3459–3468
- 2 Ono T, Kumamoto A, Nakagawa H, et al. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside Maria of the Moon. *Science*, 2009, 323: 909–912
- 3 Fa W Z, Zhu M H, Liu T T, et al. Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 10179–10187
- 4 Zhang J H, Yang W, Hu S, et al. Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. *Proc Natl Acad Sci-USA*, 2015, 112: 5342–5347
- 5 Xiao L, Zhu P M, Fang G Y, et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 2015, 347: 1226–1229
- 6 Li C L, Su Y, Pettinelli E, et al. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar. *Sci Adv*, 2020, 6: eaay6898
- 7 Fang G Y, Zhou B, Ji Y C, et al. Lunar penetrating radar onboard the Chang'e-3 mission. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1607–1622
- 8 Su Y, Fang G Y, Feng J Q, et al. Data processing and initial results of Chang'E-3 lunar penetrating radar. *Res Astron Astrophys*, 2014, 14: 1623–1632