

· 成果快报 ·

月球科学的新认识:嫦娥三号月球车探测成果

肖龙^{1*} 凌宗成² 张昊¹ 法文哲³

(1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074; 2. 山东大学(威海), 威海 264209; 北京大学, 北京 100871)

[关键词] 月球探测; 矿物组成; 层状结构; 月壤; 嫦娥三号

我国的嫦娥探月工程进展顺利,已经顺利完成“绕、落、回”三步走的前二步,即将实施第三步采样返回。在过去的近10年中,嫦娥探月工程的科学成果产出持续增加,获得了不少新认识^[1,2],已经引起了国际行星科学界的高度关注。其中嫦娥三号是阿波罗任务结束后40多年来首个在月面成功着陆的探测器,着陆在雨海北部最晚一期火山岩之上,获得了极其珍贵的探测数据,为研究雨海纪以来月球的火山活动和地质演化历史提供了前所未有的机遇。根据对嫦娥三号“玉兔”月球车搭载的四种科学载荷所获得探测数据的分析研究,目前取得了以下主要成果和认识。

1 解译了着陆区月表地质特征

利用多源遥感数据,对着陆区的地质背景进行了综合研究,分析了该区域的地形特征,对撞击坑和皱脊的形貌进行了研究和分类,发现区域内存在不同形成机制的两类皱脊,识别出了埃拉托逊纪后新形成的断裂构造^[3]。利用高分辨率的多波段成像仪数据,反演了区域内FeO和TiO₂含量,将研究区域划分为两个主要的玄武岩单元。以此为基础,综合嫦娥三号探测区域的地质背景信息,制作了着陆点区域内的地质图(图1)。

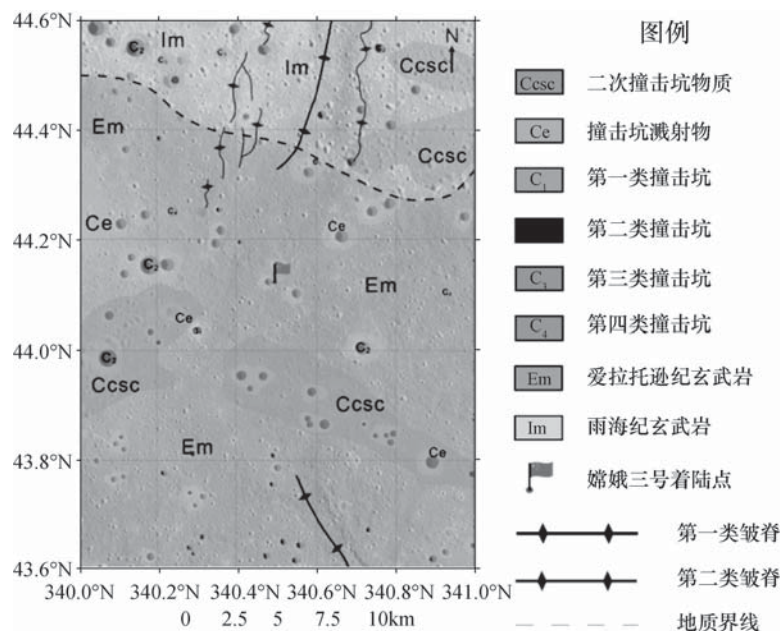


图1 嫦娥三号着陆区地质图及主要地质事件(详见文献[3])

收稿日期:2016-04-06;修回日期:2016-04-21

* 通信作者,Email: longxiao@cug.edu.cn

2 发现了新的月表岩石类型

根据岩浆洋模型,月表的矿物成份和空间分布是由月球早期全球范围内的岩浆洋分异和后期岩浆活动所决定的。因此,确定月表不同区域的元素和主要矿物(橄榄石、辉石、斜长石和钛铁矿)的含量是理解月球演化历史的重要途径。

结合嫦娥三号“玉兔号”月球车上搭载的粒子激发 X 射线谱仪(APXS)和红外成像光谱仪(VNIS),获得了嫦娥三号着陆区附近的月球岩石的成分和矿物学信息^[4-6]。结果表明,与已有 Apollo 和 Luna 月球取样以及月球陨石收集到的月海玄武岩不同,“玉兔号”发现“广寒宫”附近的月海玄武岩是一种新型月海玄武岩,含有较为丰富的橄榄石和钛铁矿矿物,使得嫦娥三号着陆区(“广寒宫”)成为新的月球遥感研究地面定标点,为月球晚期火山活动和岩浆演化机制提供了新的约束。利用我国嫦娥一号干涉成像光谱仪(IIM)、日本 Kaguya 多谱段成像仪(MI)、印度 Chandrayaan-1 矿物绘图仪(M³)、美国 LRO 热红外辐射计(Diviner)等月表物质成分探测数据,从月球遥感角度对于嫦娥三号着陆区的镁指数和岩石类型分布、铁镁质矿物含量、月海玄武岩的年龄成因及地质意义等进行了深入研究并有了新的认识^[7-12]。

3 获得了表层月壤风化物物理性质和结构组成的信息

表层月壤是月球地质演化历史记录的重要载体,尤其在研究无大气天体的空间风化过程中,以及月面探测方面意义重大。全景相机在第一个月昼就拍摄到了强烈的月表“冲效应”(The opposition effect)。该效应是在零度相角附近月表对阳光反射的强烈增强的现象,在很多无大气天体表面都会出现。我们从全景相机影像中提取出了阿波罗时代以来的首条月表就位相曲线,其相角覆盖范围 2—141°。由于该相曲线在前向散射方向延伸至 141°,大于以往任何就位或空基测量,使我们能进行可靠的光度反演,推测出造成冲效应的颗粒粒径在亚微米到毫米级,颗粒孔隙度约为 0.68,坡度角 11—18°等风化物物理性质^[13]。这些参数对于今后载人登月等探测项目具有实际意义。

以测月雷达高频通道数据为主,结合着陆区降落相机、地形相机所获得的光学影像图,对着陆区浅表层结构进行了系统研究,结果表明从表面到深约 20 m 处存在 4 个分层结构:表面风化层(<1 m)、溅射毯层(2—6 m)、古月壤层(4—11 m),以及下伏玄武岩^[7,14]。浅表风化层为细粒级月壤,很少存在米级石块,该层可进一步分为 2 至 5 层,是紫微撞击坑表面溅射毯空间风化的结果。连续溅射毯内富含石

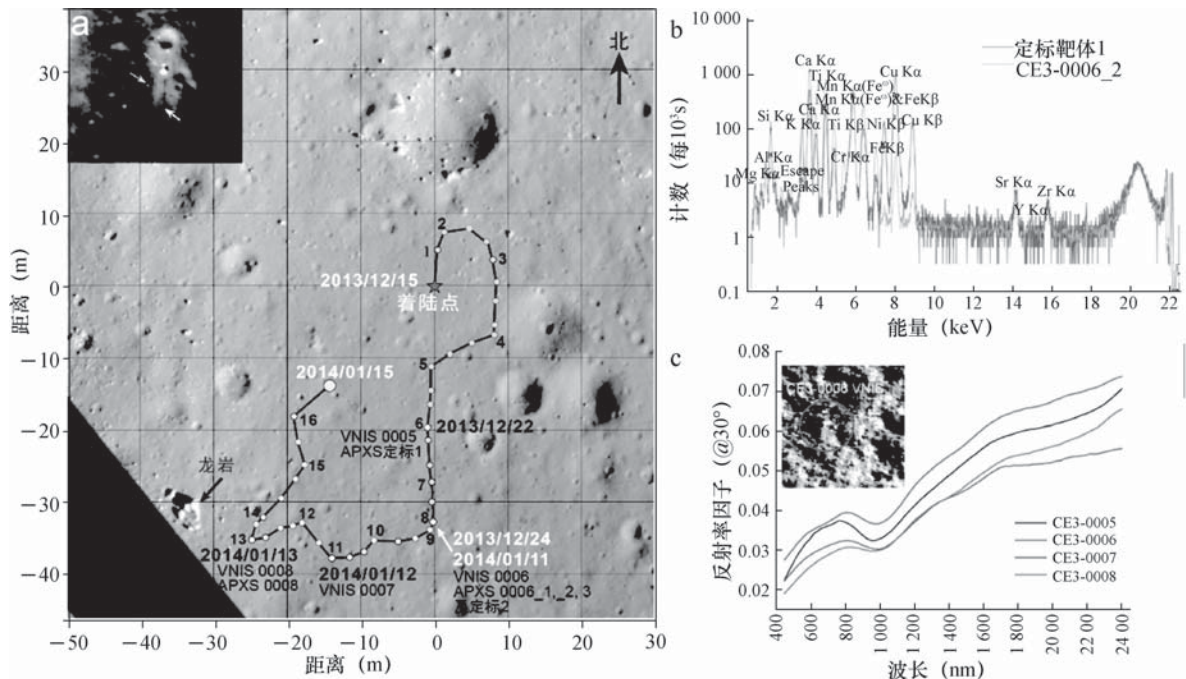


图2 玉兔号月球车在月表巡视路线及物质成分就位探测数据^[6,7](a) 玉兔号月球车在月表巡视路线;(b) 粒子激发 X 射线谱仪(APXS)在 CE3-0006 位置获取的光谱及指认;(c) 红外成像光谱仪(VNIS)在四个位置获取的光谱数据及采集的图像(以 CE3-0006 位置为例)。

块,石块丰度随深度而增加,在 2 m 处达到最大,之后随深度增加而减小。石块丰度随深度的变化,是紫微撞击坑形成之后溅射毯空间风化的结果。结合月壤厚度的估算表明,表面月壤的生成速率要高于之前 Apollo 着陆点的估计结果^[14]。获得了相对准确的月壤厚度和月亮浅表结构,为研究月球火山活动历史和估算月球氦-3 资源量提供了较为可靠的结构约束^[4]。

4 解析了内部浅层地质结构,对月球晚期岩浆活动和地质演化过程提出了新的认识

对嫦娥三号月球车探测数据的综合研究表明,嫦娥三号着陆在一个年轻(年龄小于 8 千万年)的撞击坑(紫微)外缘溅射毯上,周边分布有大量被挖掘出来的粗粒结构的玄武岩质石块^[7, 10]。对浅表层的

地质结构分析说明,在距月球表面不到 400 米的深度,共有 7 个主要地质界面,分别代表了雨海纪(39—32 亿年)和埃拉托逊纪(32—15 亿年)多期次玄武岩及火山碎屑岩对雨海的充填事件,以及多个火山事件间隙期形成的月壤层、紫微撞击坑的溅射物和表层月壤层等(图 3)^[7]。

对雷达数据的地质解译,结合区域地质演化历史分析及与雨海其他着陆点的对比研究^[15-16]发现,月球晚期火山活动的样式多样,包括平静的溢流式和剧烈的爆发式,说明晚期岩浆中仍然有大量的挥发分^[7]。这一成果显示,雨海经历的火山事件和撞击改造及空间风化事件异常复杂,需要重新思考月球的火山地质与热演化历史。

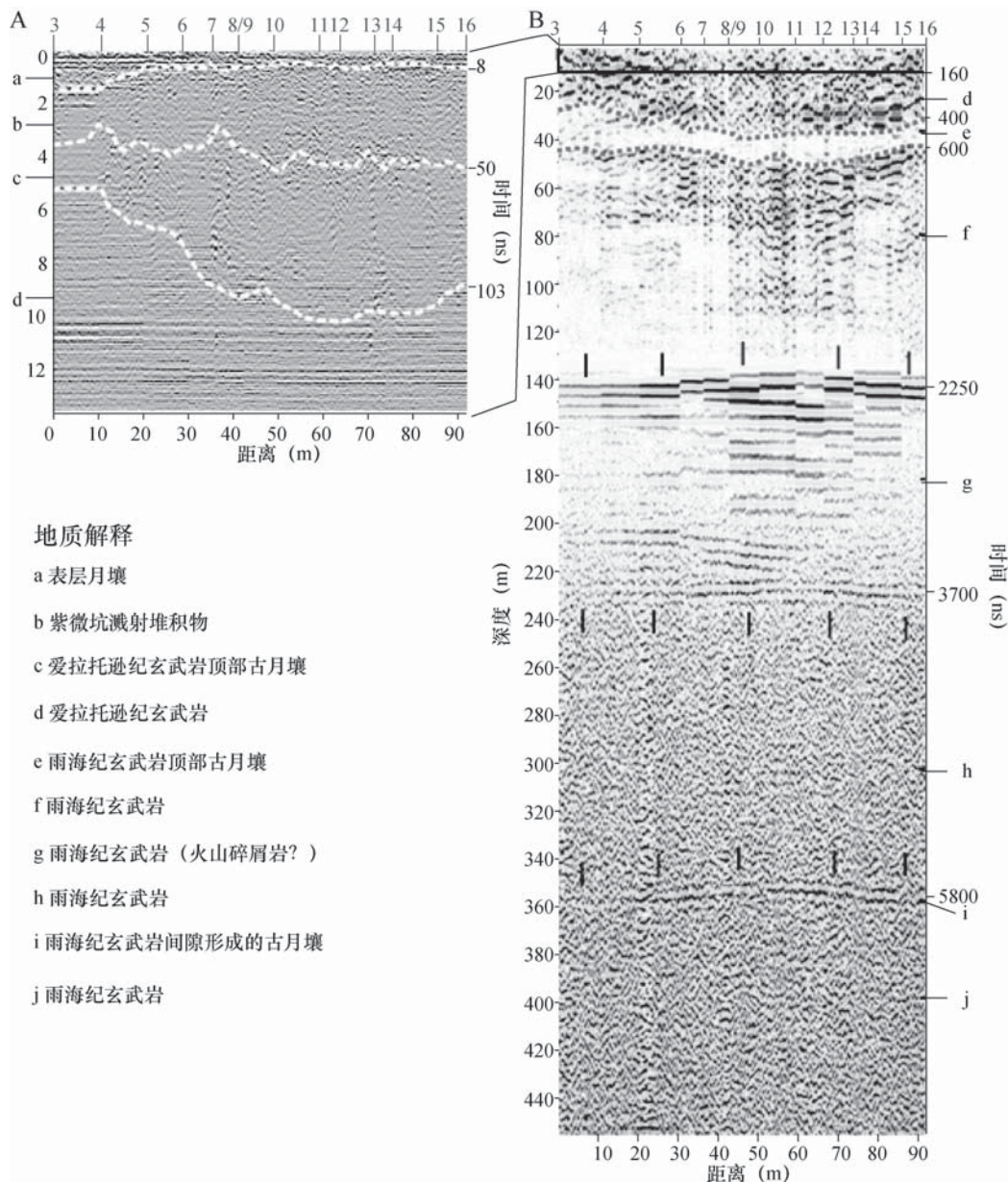


图 3 嫦娥三号探月雷达解译和地质解译剖面图^[7]

5 小结与展望

嫦娥三号着陆在一个以往未探测的区域,玉兔月球车在月面工作 2 个月球日后,停留在紫微坑的边缘,将永久地驻守着广寒宫。尽管玉兔工作时间不长,但所携带的 4 个主要科学载荷工作正常,获得了宝贵的探测数据,使我们对月球表面形貌、月壤性质、矿物组成、岩石类型、表面和浅表层地质构造有了客观的认识,揭示了更多月球的秘密,为认识月球和促进月球科学发展作出了显著贡献。随着嫦娥五号和后续探月及深空探测工程的实施,使我们有理由相信中国必将为增添对月球等未知世界的认识,丰富人类知识宝库作出更大贡献。

致谢 本研究得到国家自然科学基金(41373066, 41473065, 41071229, 41276180, 41373068, 41490634, U1231103)、中国科学院重点部署项目(KGZD-EW-603)和山东省杰出青年基金(JQ201511)的资助。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等. 嫦娥一号的初步科学成果. 自然杂志, 2010, 32(5): 249—254.
- [2] 欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果. 自然杂志, 2013, 35(6): 391—395.
- [3] Zhao J, Huang J, Qiao L, Huang, Wang J, He Q, Xiao L, 2014. Geologic characteristics of the Chang'E-3 exploration region. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 57(3): 1—8.
- [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(17): 5342—5347.
- [5] Zhang H, Yang YZ, Yuan Y, et al. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium 1: Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 6945—6950.
- [6] Ling ZC, Jolliff BL, Wang AL, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site. *Nat Commun*, 2015, 6: 8880 doi: 10.1038/ncomms9880 (2015).
- [7] Xiao L, Zhu PM, Fang GY, et al. A Young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by ChangE-3 Mission. *Science*, 347(6227): 1226—1229.
- [8] Qiao L, Xiao ZY, Zhao JN, Xiao L. Subsurface Structures at the Chang'e-3 Landing Site: Interpretations from Orbital and in-situ Imagery Data. *J. Earth Science*. 2016, doi: 10.1007/s12583-015-0655-3.
- [9] 李勃,凌宗成,张江,陈剑,孙灵芝,赵昊炜. 嫦娥三号着陆区月海玄武岩的年龄、成因及地质意义. *岩石学报*, 2016(1). 32(1): 19—28.
- [10] 李勃,凌宗成,张江,武中臣,倪宇恒,陈剑. “嫦娥三号”着陆区月壤下伏玄武岩单元划分和充填过程研究. *地学前缘*, 2014, 21(6):155—164.
- [11] 孙灵芝,凌宗成,张江,李勃,郭弟均. 基于辐射传输模型的月表铁镁质矿物定量反演:以嫦娥三号着陆区为例. *岩石学报*. 2016 32(1): 43—52.
- [12] 凌宗成,刘建忠,张江,李勃,武中臣,倪宇恒,孙灵芝. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图:以月球雨海—冷海地区(LQ-4)为例. *地学前缘*, 2014, 21(6): 107—120.
- [13] Jin WD, Zhang H, Yuan Y, et al. In-situ optical measurements of Chang'E 3 landing site in Mare Imbrium 2: Photometric properties of the regolith. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 8312—8319.
- [14] Fa W Z, Zhu M, Liu T, et al. Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by Lunar Penetrating Radar. *Geophys Res Lett*, 2015, doi:10.1002/2015GL066537.
- [15] 乔乐,刘小倩,赵健楠,魏榆,肖龙. 月球雨海地区三个着陆点的地质特征对比研究. *中国科学:物理学力学天文学*, 2016,46:029603. Doi: 10.1360/SSPMA2015-00489.
- [16] Basilevsky A. T., A. M. Abdrakhimov, J. W. Head, C. M. Pieters, Yunzhao Wu, Long Xiao. 2015. Geologic characteristics of the Luna 17/Lunokhod 1 and ChangE-3/Yutu landing sites, Northwest Mare Imbrium of the Moon. *Planetary and Space Science*, 2015, 117: 385—400.

The new lunar science findings by Yutu Rover, Chang'E-3 mission

Xiao Long¹ Ling Zongcheng² Zhang Hao¹ Fa Wenzhe³

(1, China University of Geosciences, Wuhan 430074; 2, Shandong University, Weihai 264209; Peking University, Beijing 100871)

Key words lunar exploration; mineral assemblage; lunar regolith; layered structure; Chang'E-3