中国科学: 物理学 力学 天文学 2016 年 第 46 卷 第 2 期: 029603
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica phys.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文 月球科学与探测专题

月球雨海地区三个着陆点的地质特征对比研究

乔乐*, 刘小倩, 赵健楠, 魏榆, 肖龙

中国地质大学(武汉)行星科学研究所, 武汉 430074
*联系人, E-mail: Le.Qiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2015-10-05; 接受日期: 2015-12-18; 网络出版日期: 2016-01-06
国家自然科学基金(批准号: 41373066)、国家留学基金(编号: 201406410040)和中国科学院重点部署项目(编号: KGZD-EW-603)资助

摘要 雨海盆地是月球正面最显著的地体单元之一, 也是月球软着陆探测的重点目标之一, 迄今为止已有前苏联月球 17 号、美国阿波罗 15 号和我国嫦娥 3 号在该地区成功实施了软着陆探测. 本文基于三次任务获取的月面影像及其他数据, 对雨海地区三个着陆点的地质特征进行了对比研究, 重点分析了三个着陆点的区域地质背景、撞击坑、月表石块及月壤特征. 本文研究发现, 月球 17 号与嫦娥 3 号均着陆于较为年轻的爱拉托逊纪玄武岩单元, 在一些小撞击坑的坑壁和坑缘出露了大量玄武质石块, 并且一些石块表现出柱状节理构造. 而阿波罗 15 号着陆于较老的雨海纪熔岩平原, 月表石块分布很少, 在哈德利月溪内壁上出露的玄武岩表现出明显的层状特征, 月溪底部和边缘出露的部分石块也观测到了柱状节理. 在一些月面影像数据上观测到了一些可能的"线性"特征, 本文通过光照实验证实了这些"线性"特征是由微小起伏月表在较低角度太阳光照射下引起的. 三个着陆区对比分析揭示了月球撞击历史、火山活动、空间风化等重要地质过程存在较大的地区和区域不均一性, 未来更多的月面就位及采样返回探测将有助于我们更全面地了解月球的地质演化历史.

关键词 雨海, 月球, 嫦娥 3 号, 地质特征, 月球探测

PACS: 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.12.Xy, 96.20.Br

1 引言

雨海盆地是月球正面最大的多环撞击盆地, 主环直径达 1160 km. 该盆地的中心坐标为 35°N, 17°W, 并发育了六个环状特征, 由内往外直径依次为 550, 790, 1160, 1700, 2250 和 3200 km[1]. 雨海也是月球第二年轻的大型撞击盆地, 其形成年龄一般认为在距今 3.85 Ga 左右[2,3]. 雨海盆地南西部内部还发育了月球表面保留程度最为完整的多期爱拉托逊纪熔岩流, 单次熔岩流的厚度达 30–35 m[4]. 由于雨海盆地在大型撞击作用、月球早期年代学、月球火山活动等月球科学方面的重要性, 所以一直是月球探测和科学研究的重点区域, 也是测试新的研究手段的试验场.

迄今为止, 已有三次探测任务成功在雨海地区实施了软着陆探测(图 1), 包括前苏联的月球 17 号(1970 年 11 月 17 日着陆)、美国的阿波罗 15 号(1971

引用格式: 乔乐, 刘小倩, 赵健楠, 等. 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
Qiao L, Liu X Q, Zhao J N, et al. Geological investigations of Luna 17, Apollo 15 and Chang'E-3 landing sites at Mare Imbrium of the Moon (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 029603, doi: 10.1360/SSPMA2015-00489

© 2016《中国科学》杂志社

年 7 月 31 日着陆)及我国的嫦娥 3 号(2013 年 12 月 14 日着陆). 这三个任务类型多样, 包括月面就位探测、巡视探测及采样返回探测, 取得了丰富的科学成果, 加深了我们对月球的认知, 也为未来的月球探测提供了宝贵的经验.

本文利用上述三次探测任务获得月面影像等数据, 对各个任务探测区域的地质背景、撞击坑、石块、月壤等地质特征进行了描述和对比研究, 并对阿波罗 15 号和嫦娥 3 号月面影像数据揭示的疑似"线性"特征进行了研究, 并通过相关模拟实验对这些"线性"特征的成因进行了探讨.

2 雨海西北边缘: 月球 17 号探测区

1970 年 11 月 17 日, 前苏联的月球 17 号探测器, 携带着月球车 1 号(Lunokhod 1)巡视器成功着陆于雨海西北部、赫拉克莱特(Heraclides)海角南西方向约 75 km 处(38.24°N, 35.00°W). 在 301 地球日的月面巡视探测中, 月球车 1 号首先往南行驶, 然后返回至着陆点, 继而向北行驶, 在环绕了探测区域最大撞击坑

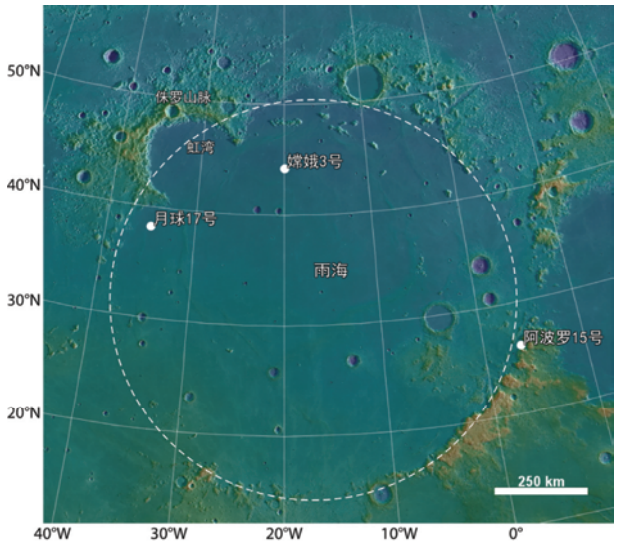


图 1 (网络版彩图)月球雨海地区软着陆点分布图, 底图为 LROC WAC 低太阳高度角影像叠加基于 LROC WAC 影像数据制作的 DEM 数据(GLD100), 投影方式为倾斜等距离圆柱投影, 中央纬线为 35°N, 中央子午线为 15°W

Figure 1 (Color online) Locations of the three soft-landing sites in Mare Imbrium region. The context map is colored LROC WAC DEM (GLD100) overlain on LROC WAC low-sun global mosaic. The panel is projected into oblique equidistant cylindrical projection, with center line of 35°N, and center meridian of 15°W.

Borya 坑(直径约为 470 m)的西侧坑缘之后继续北进, 最终停留在着陆点北部约 2.3 km 处(38.315°N, 35.00°W), 总共在月面行驶了 9.93 km(图 2[5]), 月球车 1 号与地球控制中心的最后一次通讯是 1971 年 9 月 30 日月夜前夕. 月球车 1 号利用其搭载的四台全景相机、X 射线荧光谱仪 RIFMA、月表物质力学性质测量仪 PROP 等探测仪器, 获取了月面 211 幅全景影像、超过 25000 幅影像, 并在 537 个站点进行了月壤力学性质考察, 在 25 个站点进行了地球化学探测实验. 基于 LROC NAC 的地形数据分析表明, 月球车 1 号探测区域地形较为平坦, 绝对高差约为 50 m, 月面巡视路线的高程起伏不超过 25 m, 巡视路径地形坡度一般低于 10°(基线约为 2 m). 撞击坑统计分析表明, 该着陆点位于爱拉托逊纪玄武岩单元, 表面绝对模式年龄约为 3.1 Ga, 并且接近爱拉托逊纪玄武岩单元和雨海纪玄武岩单元边界[6–8].

2.1 撞击坑

月球车 1 号返回的月面影像数据表明, 着陆区的主要地貌特征为形态、大小各异的小型撞击坑(图 3). 基于这些小型撞击坑的退化状态[10], 可以将这些撞击坑分为三大类(A, B, C)和两个过渡类型(AB 和 BC). A, AB, B, BC 及 C 类撞击坑一般分别占月表小型撞击坑总体数量的 0.5%–1%, 2%–3%, 15%–20%, ~30% 及~50%[10], 依次代表了月表小型撞击坑的不同演化阶段, 其中 A 类撞击坑代表最新形成的撞击坑, 而 C 类代表了退化最严重的撞击坑. 图 4 列举了月球车 1 号探测区域各个类型撞击坑的典型代表. 月球小型撞击坑的退化程度取决于撞击坑的年龄和大小: 撞击坑直径越小, 其从 A 类撞击坑演化为 C 类撞击坑的速度越快. 通过不同大小撞击坑的交切关系分析以及与阿波罗着陆区若干具有同位素定年数据的小型撞击坑的形貌特征对比, Basilevsky 等人[11]对月表不同类型和大小的撞击坑的寿命进行估算: (1)对于直径小于~150 m 的撞击坑, 撞击坑的寿命 T 和撞击坑直径 D 存在简单的线性关系, T=2.5×D, 其中 T 的单位为 Ma, D 的单位为米; (2)对于直径大于~150 m 的撞击坑, 撞击坑寿命和直径的关系为 T(Ma)=8D(m)–900(Ma). 比如, 对于一个直径为 100 m 的撞击坑, 其估计寿命约为 250 Ma. 而该直径大小的 A 类撞击坑代表了整个撞击坑演化周期的前 0.5%–1% 阶段, 所以其形成年龄应该小于 1.2–2.5 Ma. 月球车

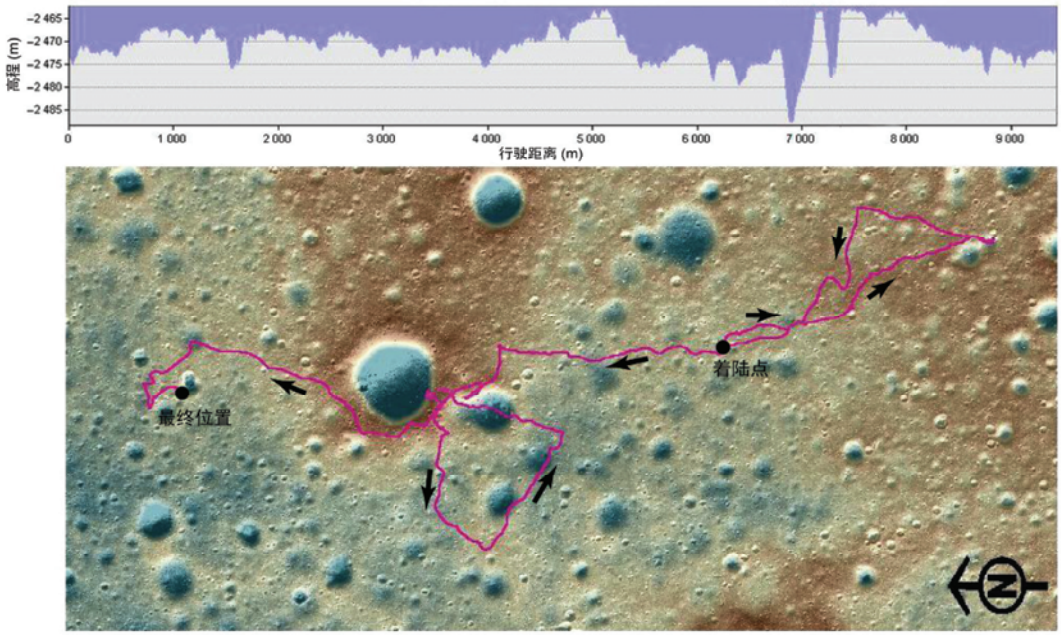


图 2 (网络版彩图)月球车 1 号月面巡视轨迹图, 上图为沿月球车行进路线的高程剖面[9]. 底图为 LROC NAC 正射图叠加伪彩色 DEM, 蓝色表示较低高程, 黄色代表较高高程, 图中黑点指示了着陆点及月球车最终位置, 黑色箭头指示了月球车行使方向

Figure 2 (Color online) Traverse route of Lunokhod 1 rover. The upper panel shows the topographic profile derived from LROC NAC DTM [9]. The context map is colored DEM overlain on LROC NAC orthoimage, in which blue color means lower elevation and yellow color means higher elevation. The black points mark the landing site and final stop of Lunokhod 1 rover, and the black arrows indicate the traverse directions of the rover.

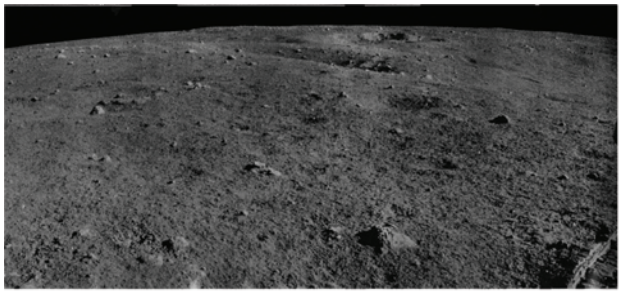


图 3 (网络版彩图)月球车 1 号探测区域的典型地貌特征. 基于全景相机影像 L1_D09_S05_P10, 其中 L1 代表月球车 1 号, D09 为工作天数, S05 为当天工作阶段, P10 为全景相机在该工作阶段获取影像数据的编号, 下文中月球车 1 号的影像数据也遵循此编号规律

Figure 3 (Color online) Portion of panorama camera image frame L1_D09_S05_P10 shows typical geomorphology at the Lunokhod 1 exploration region. Here and below, the panorama camera images are named by: L1–Lunokhod 1, D09–lunar working day number, D05–number of the working session during this lunar day, P10–number of the panorama camera image taken in this working session.

1 号探测区域的大多数撞击坑直径小于 5–10 m, 所以这些撞击坑的估计寿命小于 12–25 Ma, 而探测区域的最大撞击坑 Borya (B 类撞击坑, 直径 470 m)年龄估计为 100–500 Ma.

2.2 石块

月球车 1 号获取的月面影像数据表明, 探测区域的大多数石块都分布在较大(直径几十到上百米)撞击坑的坑缘和坑壁(图 5(a)), 预示着这些石块可能是撞击作用挖掘溅射出的浅表层石块[12,13]. 从图 5(a)可以看出 Borya 撞击坑坑缘分布的石块形貌特征较为退化, 说明这些石块在月面暴露了较长的时间, 基于对月表石块寿命的分析[14], 可以估算出这些石块的年龄老于 10 Ma. 而 Borya 撞击坑坑壁的石块分布棱角较为锋利(图 5(b)), 说明这些石块在月表暴露的时间比较短, 可能是新形成的小撞击坑挖掘出来的新鲜石块.

玄武质岩浆在冷却结晶过程中, 会产生垂直于冷却收缩方向的张性裂隙, 形成垂直于接触面的张节理, 产生横切面呈流变性的柱状节理, 若节理受到限制, 也可能形成五边形或四边形的柱状节理[15], 所以地球上的玄武岩经常可以观测到典型的柱状节理

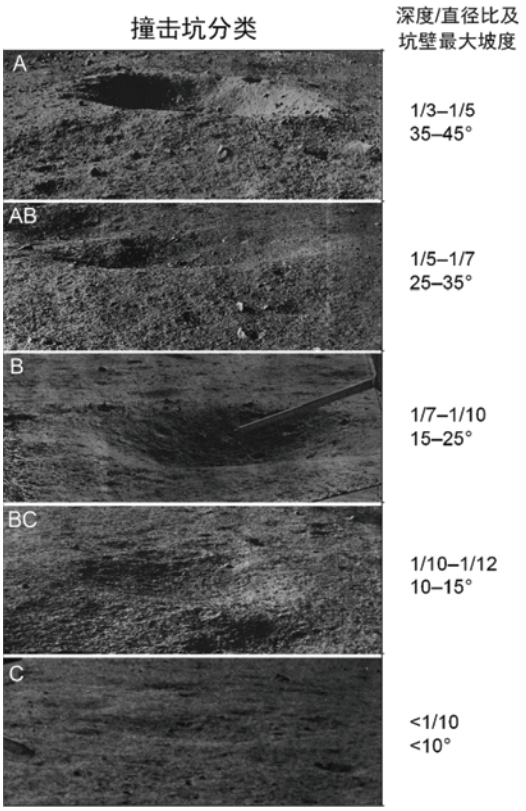


图 4 (网络版彩图)月球车1号探测区域撞击坑分类. 影像分别来自全景相机影像 L1_D08_S03_P05, L1_D10_S03_P04, L1_D09_S02_P03, L1_D03_S07_P15 及 L1_D_032_S04_P25, 图中右栏显示了各类型撞击坑典型深度/直径比值和坑壁的最大坡度

Figure 4 (Color online) Classification on the morphology of small impact craters at the Lunokhod 1 exploration region. Portions of panorama camera image L1_D08_S03_P05, L1_D10_S03_P04, L1_D09_S02_P03, L1_D03_S07_P15 and L1_D_032_S04_P25, correspondingly. Typical depth/diameter ratios and maximum slope angel of the crater wall are shown at the right column of the panel.

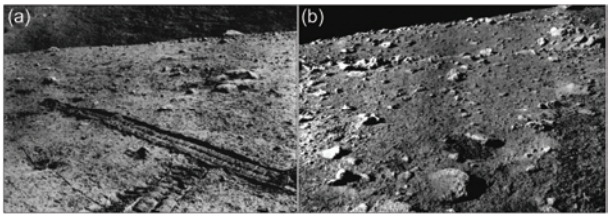


图 5 (网络版彩图)Borya 撞击坑西南西侧坑缘(a)和西侧坑壁(b)分别分布了中等密集程度和高密集程度的石块[11]. 分别基于全景相机影像 L1_D07_S04_P08 和 L1_D06_S02_P03

Figure 5 (Color online) (a) Portion of panorama camera image L1_D07_S04_P08 shows the WSW rim of the crater Borya, with moderate rock abundance; (b) western wall of crater Borya with higher rock abundance, portion of panorama camera image L1_D06_S02_P03.

构造特征, 但是由于月表巨大的昼夜温差、陨石的高速撞击等特殊环境导致月表石块呈现出多样化的外形. 即使如此, 仍有少部分月表石块具有玄武岩典型的柱状节理特征(如图 6). 从图 6 可以看出月球车在行驶过程中, 车轮碾过了该石块(长约 50 cm, 宽约 30 cm), 导致了部分石块沿节理面的脱落(图 6 中箭头所指). 该石块位于 Borya 撞击坑的西南西侧坑缘隆起, 通过撞击坑直径(470 m)可估算出该撞击坑的挖掘深度约为 40 m[16]. 一般来说坑缘隆起代表了撞击溅射过程中最深部物质聚集的地方[16], 所以该具有柱状节理的石块的来源可能为~40 m 深的浅表层.

2.3 月壤

月球车 1 号获取的月面影像数据显示, 月球车的整个探测路径周围都被月壤所覆盖, 没有显示出较大范围的基岩出露. 基于探测区域小型撞击坑的直径及其溅射毯石块丰度特征, 估计出该区域的月壤厚度约为 4–6 m[17]. 在一些较大(直径 200–500 m)撞击坑的坑缘, 撞击事件之前的月壤可能被撞击坑溅射毯所覆盖, 而长期的空间风化作用又在溅射毯表层形成一层较薄的月壤层, 从而形成多层月壤的浅表层结构. 在较大撞击坑坑缘, 表层月壤经常夹杂了较多的岩屑颗粒, 而当表层中岩屑很少时, 一般呈现出较为光滑或者团块状纹理特征. 图 7 展示了未受扰动的表层月壤和受到月球车车轮翻动之后的表层月

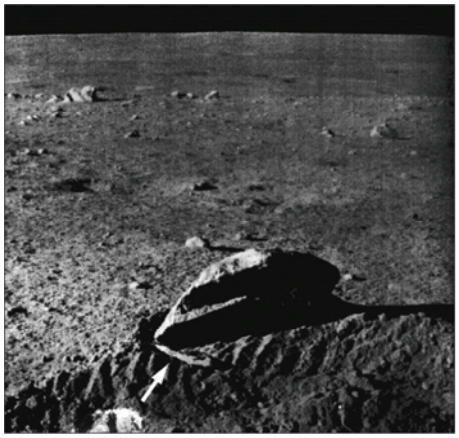


图 6 (网络版彩图)Borya 坑西南西侧坑缘隆起的石块, 可见明显的柱状节理(白色箭头). 基于全景相机影像 L1_D05_S01_P01

Figure 6 (Color online) A boulder exposed at the WSW rim of crater Borya, obvious columnar jointing is observed (white arrow). Portion of panorama camera image L1_D05_S01_P01.

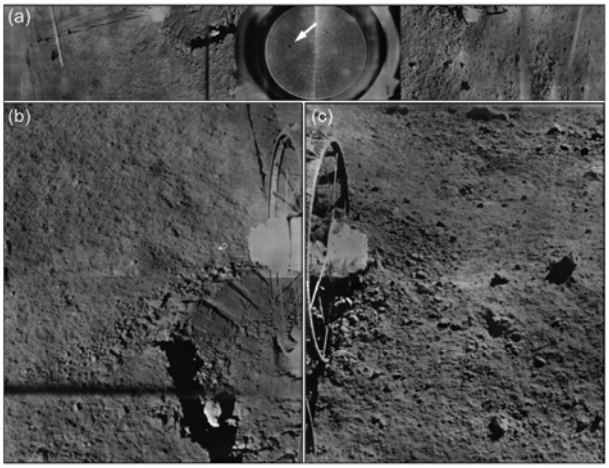


图 7 (网络版彩图) (a)全景相机影像 L1_D1_S04_P10, 图中左半部分为月球车后视影像, 右半部分为前视影像, 图中部的圆形物体标记了全景相机转动的角度(白色箭头标示). (b)和(c)分别为图(a)左、右部分影像的局部放大影像

Figure 7 (Color online) panorama camera image L1_D1_S04_P10. The left portion of this panel shows the lunar surface behind the rover, and the right portion shows the surface ahead. The circular object in the center of the image marks the rotating angle of the panorama camera (white arrow). (b) and (c) are locally enlarged images of the left and right parts of (a), respectively.

壤, 可以看出, 表层月壤在受到月球车车轮的压实和剪切破坏之后, 表面变得较为光滑(图 7(b)), 或者月壤颗粒被堆积起来, 表面显示出一些厘米尺寸大小的月壤团块(图 7(c)), 这说明了月壤具有一定的黏性.

月球车 1 号利用其搭载的 X 射线荧光谱仪和月表物质力学性质测量仪对探测区月壤的地球化学特征和力学性质进行了测量. 力学性质测量结果显示探测区月壤物质的承载力为 0.04–1.44 kg/cm^2(众数值为 0.45 km/cm^2), 剪切强度为 0.02–0.1 kg/cm^2(众数值为 0.05 km/cm^2), 并且, 探测区月壤物质的承载力和剪切强度随着地面坡度从~2°增加到 12°而减少了 3–4 倍, 这一测量结果也与月球车 2 号在澄海北部的测量结果较为相似[18]. X 射线谱仪测量的探测区月壤的主量元素丰度(质量百分比)为: SiO_2=36.4%–51.4%, FeO=10.3%–16.7%, CaO=8.4%–12.6%, Al_2O_3=11.3%–18.9%, TiO_2<6.7%, K_2O<1.2%–2.4%[11], 显示探测区月壤的原岩为低钛玄武岩.

3 雨海东部边缘: 阿波罗 15 号探测区

1970 年 7 月 30 日, 阿波罗 15 号探测器携带的“猎鹰”号登月舱成功着陆于雨海东缘、亚平宁山脉山脚的哈德利—亚平宁区域[19](26.1°N, 3.7°E, 图 8). 距离该着陆点南东方向约 1.5 km 处, 发育了月球上规模最大的月溪之一, 哈德利月溪. 该月溪长 33.23 km, 最宽达 0.72 km, 最深达 139.35 m[20]. 着陆点的东侧, 则是亚平宁山脉, 为雨海盆地环峰的一部分, 而在着陆点西侧, 则是广袤的凋沼(Palus Putredinis)熔岩平原[21]. 阿波罗 15 号此次任务的主要目的即为对亚平宁山脉前缘(一般认为其代表了雨海溅射物和前雨海纪物质)进行实地考察并采集样品, 以及对哈德利月溪进行考察和采样, 探究月溪的特征和成因.

阿波罗 15 号是“阿波罗”计划中的首次 J 任务(J 代表了阿波罗系列探测任务的最高层次, 最明显的特征为启用月球车在月面实施时长达 3 地球日的探

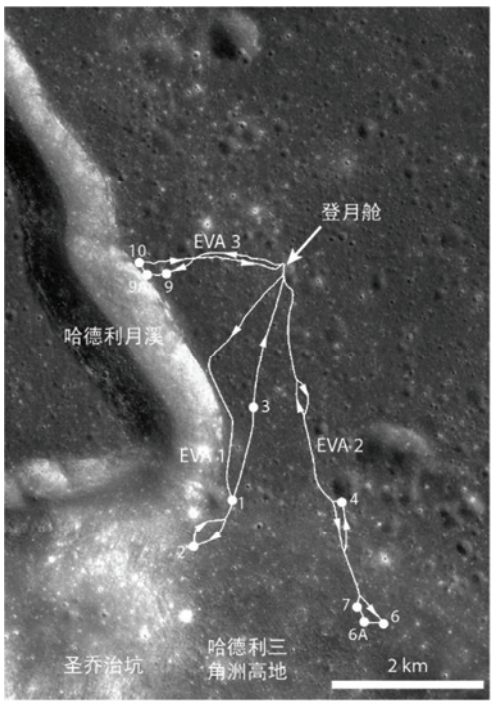


图 8 (网络版彩图)阿波罗 15 号着陆区影像及月球车巡视路径, 底图为 LROC NAC 影像 M106855508L/R, EVA 1/2/3 分别表示三次月面活动(Extravehicular Activity)的探测路径, 沿路径的数字则标注了各采样站点的编号(底图来源: http://lroc.sese.asu.edu)

Figure 8 (Color online) Apollo 15 landing area and traverse path shown on LROC NAC image M106855508L/R. The white arrow marks the location of Lunar Module, and the white curves (EVA 1/2/3) illustrate the traverse paths during the three extravehicular activities. The numbers along the paths label the number of sampling sites. Image credit: Arizona State University.

测), 并且此次探测活动都聚焦于特定的科学目标. 月球车总共进行了三次巡视探测活动, 每次 7 h 左右. 此次任务共采集了 77 kg 月球样品, 包括四个岩芯样品, 此次探测也通常被认为是阿波罗计划中科学产出最丰富的任务[22].

3.1 撞击坑

阿波罗 15 号探测任务获取的月面影像数据表明, 探测区域的月面也分布了大小、形状及岩石类型各异的撞击坑(图 9), 与嫦娥 3 号(见下文第 4 节)及月球 17 号(见上文第 2 节)探测区域相比, 阿波罗 15 号探测区域的撞击坑退化程度也更为严重, 预示着探测区域月海玄武岩的年龄介于晚雨海纪到早爱拉托逊纪之间, 这也与阿波罗 15 号采集的玄武岩样品的同位素定年结果(3.21–3.37 Ga[23])相符合. 该区域大多数小型撞击坑都未见明显的溅射毯, 且坑壁和坑缘也都被月壤所覆盖, 未见下伏基岩的出露(图 9), 说明该区域表层月壤较厚, 这些小型撞击坑未能穿透表层月壤.

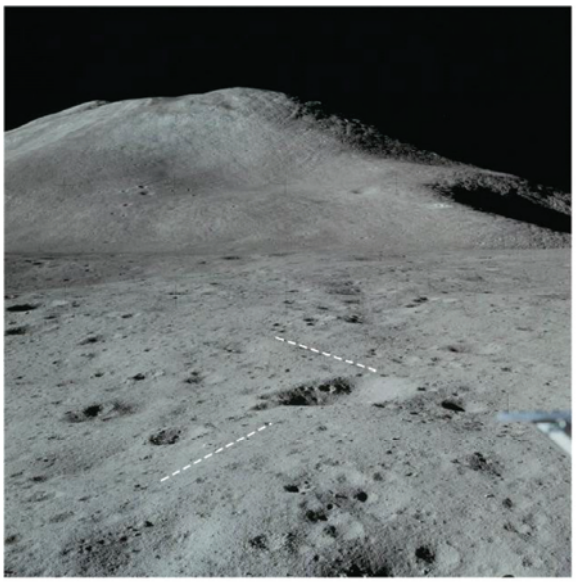


图 9 (网络版彩图)阿波罗 15 号探测区域月表典型地貌特征, 远处的山为哈德利山(Mt. Hadley, Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11750). 注意, 照片中可见北东向和北西向两组较为密集的"线性"特征(白色虚线标示)

Figure 9 (Color online) Typical landforms at Apollo 15 exploration region. The mountain in the distance is Mt. Hadley. Two sets of lineaments with direction of NE-SW and NW-SE, respectively, are observed (marked by white dashed lines). Hasselblad 70 mm image AS15-87-11750.

在阿波罗 15 号月面影像数据中发现了一类特殊的坑底富含玻璃质物质的撞击坑[19], 这类撞击坑直径介于 0.3–15 m 之间. 阿波罗 15 号宇航员对该类撞击坑进行了详细的形貌学记录、成像和采样探测. 该类撞击坑中直径较小的坑一般保存程度较好, 可能代表了该区域最年轻的一类撞击坑. 该类撞击坑中最大的一个发现于第 9 站点(图 10(a)), 位于哈德利月溪东侧约 300 m 处. 该坑直径约为 15 m, 坑缘高度约为 1 m, 并且发育了完整溅射毯, 溅射毯从坑缘隆起大约向坑外延伸了 15–20 m. 该坑内部深度约为 3 m, 坑壁较为陡峭, 坡度约为 20°, 并且坑壁呈现出明显的阶地构造(图 10(b)). 该坑内部出露了大量石块, 并且部分石块为玻璃质(图 10(c)), 这些玻璃质物质可能代表了撞击作用形成的熔融物质, 或者是撞击体的部分碎片[19].

3.2 石块

阿波罗 15 号着陆区的岩石露头较少, 石块大约

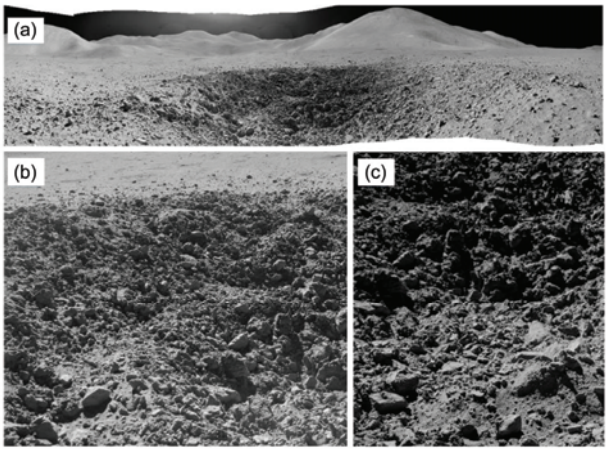


图 10 (网络版彩图)内部出露了大量石块的撞击坑(第 9 站点). (a) 该撞击坑全景图(基于 Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11076–11089 制作的拼图), 远处左侧的山为哈德利山, 右侧的山为哈德利三角洲高地, 中间的若干山头组成了斯旺山脉(Swann Hills); (b) 该坑坑壁发育的阶地状构造(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11097); (c) 坑内出露的大量石块(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11082)

Figure 10 (Color online) A crater with massive boulders exposed within at the Station 9, Apollo 15 landing area. (a) A mosaic of this crater based on Hasselblad 70 mm images AS15-87-11076–11089. The mountain in the left distance is Mt. Hadley, Hadley Delta is in the right distance, and Swann Hills is in the middle; (b) well-developed bench structure at the crater wall, Hasselblad 70 mm image AS15-87-11097; (c) boulders exposed within the craters, Hasselblad 70 mm image AS15-87-11082.

只覆盖了该区域月表面积的 1%[24], 这可能是由于着陆区表面年龄太老, 导致小型撞击坑挖掘的石块大部分已被完全风化, 或者是由于该区域所在的月海表面覆盖了较厚的表层月壤, 使得小型撞击作用未能穿透表层月壤而暴露出下伏基岩. 而在一些较大且新鲜的撞击坑的周围, 以及在哈德利月溪内壁, 则出露了大量的石块. 由于该区域复杂多样的地貌特征, 加上较长的月面巡视勘察时间, 使得此次任务揭示了不同岩石类型丰富的形貌特征.

月面影像数据初步分析表明, 阿波罗 15 号所在月海区域出露的石块大多数为玄武岩, 并且含有大量粗粒、黄绿色到棕色的辉石和橄榄石斑晶. 一些出露的玄武岩具有大量的气孔构造(图 11), 说明在形成该区域玄武岩的岩浆中可能含有一定比例的挥发分, 同时在此次任务返回的样品中, 还发现了大量绿色火山玻璃(如 15401 样品), 说明该区域部分玄武岩可能是爆烈式火山喷发的产物.

该区域的部分玄武岩还表现出典型的层状特征, 尤其是哈德利月溪内壁出露的大量玄武岩. 由于哈德利月溪的内壁很陡, 使得月壤无法在内壁堆积, 所以哈德利月溪成为研究月球玄武岩浅表层结构的绝佳地点. 该月溪深度超过 100 m, 在部分内壁出露了厚度达 60 m 的玄武岩(图 12). 该岩壁表现出明显的

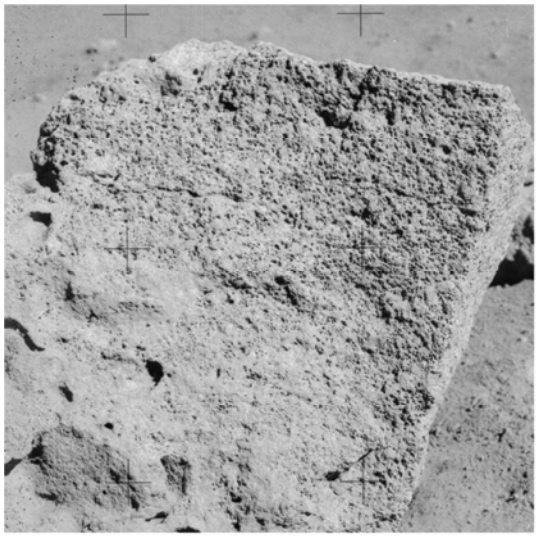


图 11 (网络版彩图)阿波罗 15 号探测区域出露的玄武岩石块的气孔构造(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11190)

Figure 11 (Color online) Vesicular structure observed in the basaltic rock at Apollo 15 exploration area, Hasselblad 70 mm image AS15-87-11190.

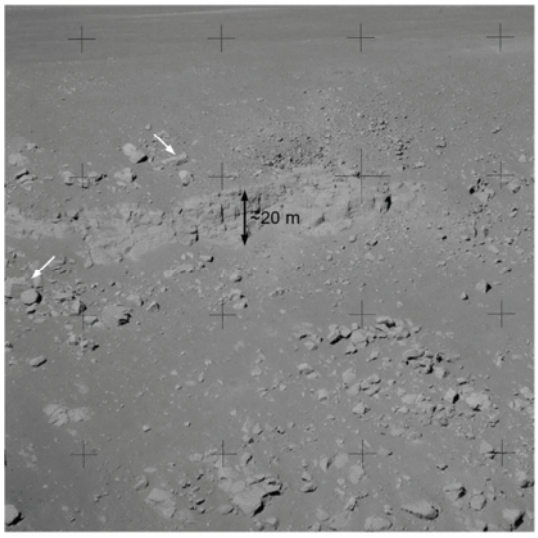


图 12 (网络版彩图)哈德利月溪内壁出露的岩层及底部、边缘出露的大石块(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-89-12115), 一些大石块可见柱状节理构造(白色箭头所示)

Figure 12 (Color online) Bedded basaltic deposits exposed at the wall of Hadley Rille, and larger boulders present at the rille floor and rim, columnar jointing structure is observed at some of these boulders (marked by white arrows). Hasselblad 70 mm image AS15-89-12115.

分层结构, 每层的厚度为 10–20 m, 且每层岩石的表面纹理和反照率都差异较大, 预示着多期次成分差异较大的岩浆充填事件. 同时, 在哈德利月溪的底部和边缘出露了一些直径达 20 m 的巨大石块, 这说明在形成该月溪时巨大的岩浆通量(Magma Flux), 而部分石块也可见地球玄武岩典型的柱状节理构造(图 12).

3.3 月壤

从阿波罗 15 号返回的月面影像数据可以看出(图 9), 着陆区表面大部分区域被月壤所覆盖, 大石块出露很少. 基于地震探测数据反演得到该区域的月壤厚度约为 4.4 m[25]. 对此次任务返回的月壤组成成分初步分析表明, 该区域月壤组成成分类似于早期阿波罗任务返回的月壤样品, 主要由 5 部分构成: 黏合集块岩和棕色玻璃球聚合物、不同纹理特征的玄武岩碎片、矿物碎片、微角砾岩以及不同颜色、形状的玻璃质物质.

此次任务对着陆区表层月壤进行了钻探取样, 分别采集了 3 个岩芯样品(Core Tube)和一个深钻样品(Deep-drill Corestem). 其中三个岩芯样品最大采样深度达 70 cm, 深钻样品最大深度达 2.4 m, 这也是

首次在月表实施冲击旋转式钻探取样. X 射线成像数据表明, 深钻样品中不同深度的月壤的密度变化较大, 可以区分出 50 多层, 每层的厚度为 0.5–21 cm. X 射线成像探测也发现了岩芯样品的层状特征, 以及不同层之间的纹理和颗粒大小差异, 这说明了月壤在纵向上物质成分、颗粒大小和充填模式等方面的不均一性, 说明了月壤有着复杂的地质历史.

由于月表月壤对探测器软着陆、宇航员月面活动、月球车行驶等一系列月面探测活动的重要影响, 此次探测任务还进行了月壤力学实验, 对月壤的若干物理及力学性质进行了就位测量, 包括颗粒大小及其分布、颗粒形状、颗粒密度、力学强度和压缩系数. 得益于此次任务较大的月面活动范围以及若干探测技术装备的优化, 此次任务在月壤物理力学性质方面获得了大量的探测结果[26], 包括:

(1) 虽然从月面影像数据来看, 整个探测区表层月壤形貌特征较为一致, 但是此次月壤力学实验发现月壤物理力学性质区域性差异很大, 这也在宇航员月面行走过程中留下的足迹深度的不同得到的直观体现(图 13), 同时不同深度月壤性质也有较大差异;

(2) 月面就位测量表明, 阿波罗 15 号探测区域的月壤密度差异较大, 变化范围为 1.36–2.15 g/cm^3, 这预示着该区域表层月壤的力学强度和压缩系数也变化较大;

(3) 部分地点发现了月壤滑坡运动的证据, 但是没有发现深位月壤坍塌的现象;

(4) 月壤颗粒的摩擦角大约为 50°, 内聚力约为 1 kN/m^2(第 8 站点测量结果), 这些测量结果高于之前任务的测量值.

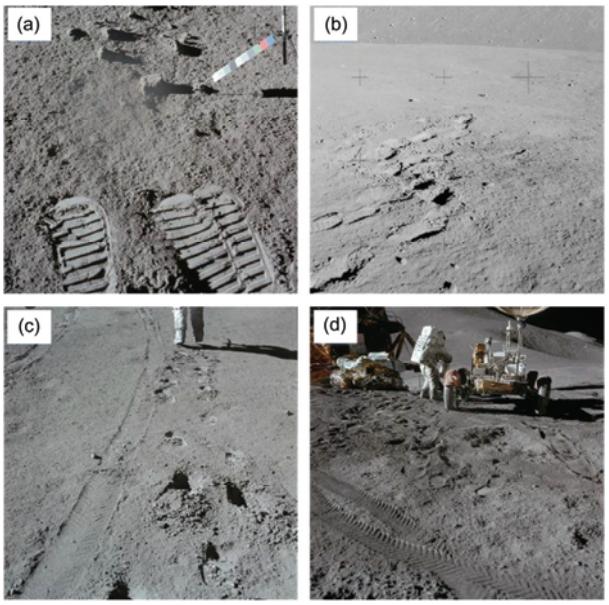


图 13 (网络版彩图)阿波罗 15 号宇航员在月面留下的足迹, 可以看出不同探测区域表层月壤力学性质的差异: (a) 第 1 站点较为坚固的月壤(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11534); (b) 第 2 站点松软的月壤(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11424); (c) 第 6 站点非常松软的月壤(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11654); (d) 着陆点中等坚固的月壤(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-87-11599)

Figure 13 (Color online) Astronaut footprints on the lunar regolith at the Apollo 15 landing area, indicating various mechanical properties at different sites. (a) Moderately firm regolith at Station 1 (AS15-87-11534); (b) soft regolith at Station 2 (AS15-87-11424); (c) very soft regolith at Station 6 (AS15-87-11654); (d) medium-strong regolith at the landing site (AS15-87-11599).

4 雨海北部: 嫦娥 3 号着陆区

2013 年 12 月 14 日, 嫦娥 3 号着陆器携带着玉兔月球车成功着陆于月球正面的雨海北部地区(坐标为 44.12°N, 19.51°W[27,28], 图 1), 该着陆点比之前任何软着陆探测器的纬度都高. 嫦娥 3 号是时隔近 40 年以后, 人类首次实施月面软着陆探测. 嫦娥 3 号着陆器上搭载了降落相机、地形地貌相机、月基天文望远镜和极紫外相机, 玉兔月球车上搭载了全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪和粒子激发 X 射线谱仪. 月球车的主要任务是获取行走路线沿途的地形地貌、月壤的成分和测月雷达数据, 完成月表形貌、地质构造和月表物质成分调查, 探测浅表层地质结构等科学目标.

嫦娥 3 号粒子激发 X 射线谱仪探测表明, 着陆区所在地区的月海玄武岩的 TiO_2 含量约为 4.0wt.%–4.2wt.%[29], 可划分为中钛玄武岩[30]. 嫦娥 3 号着陆区所在的玄武岩单元还表现出富橄榄石和富钍(Th)等不相容元素的特征[31,32]. 而嫦娥 3 号着陆区北面 10 km 处的玄武岩单元 TiO_2 含量约为 1.4wt.%[28], 可划分为低钛玄武岩[30], 预示着该地区经历了两次成分迥异的玄武岩充填事件(图 14). 利用撞击坑统计定年方法, 计算得到北部低钛玄武岩的形成于雨海纪(>3.2 Ga), 而嫦娥 3 号着陆区所在玄武岩单元的表面年龄约为 2.5 Ga[33]. 嫦娥 3 号探测区域的玄武岩年龄明显比之前返回的月球玄武岩的年龄小[34], 嫦娥 3 号

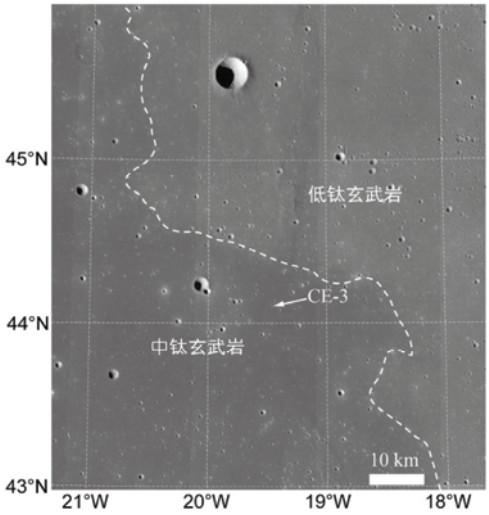


图 14 (网络版彩图)嫦娥 3 号着陆区影像, 白色虚线划定了着陆区中钛玄武岩单元和北部低钛玄武岩单元的界限. 底图为 LORC WAC 影像, 兰勃特正形投影, 投影中心为 44.47°N, 19.49°W

Figure 14 (Color online) LROC WAC image shows the Chang'E-3 landing site. The dashed white curve marks the boundary between the medium-titanium basalts at the landing area and the northern low-titanium basalts. The image is projected into lambert conformal projection and centered at 44.47°N, 19.49°W.

的月面就位探测有望对研究月球晚期岩浆活动提供重要约束.

4.1 撞击坑

嫦娥 3 号着陆器搭载的着陆相机获取的影像数据显示, 嫦娥 3 号着陆点位于一个直径约 450 m 的撞击坑(紫微坑)东侧坑缘约 50 m 处, 而玉兔月球车的整个巡视路线也局限在紫微坑的连续溅射毯上. 对紫微撞击坑连续溅射毯上进行撞击坑"直径-频率分布"分析结果显示, 紫微撞击坑大约形成于距今 27–80 Ma 之间[35]. 分析 Kaguya TC 立体影像数据获取的着陆区高程数据, 发现该坑的深度约为 68 m(深部/直径~0.15), 而坑缘隆起高出周围约 20 m, 坑壁的最大坡度约为 20°–25°, 基于撞击坑的退化状态[10], 可将该撞击坑划为 AB 类到 B 类的过渡类型. 玉兔月球车在第二月昼的月面巡视考察过程中, 向坑缘隆起方向行进了约 25 m, 一度非常接近坑缘隆起, 月面探测数据也揭示了该撞击坑的诸多细节特征[35]. 基于全景相机影像数据, 我们制作了完整覆盖该撞击坑的镶嵌影像(图 15). 从图 15 可以看出, 紫微坑的坑壁和坑缘出露了大量形态、尺寸各异的石块, 说明这些石块在月面暴露的时间不长, 这也与紫微撞击坑较年轻的形成年龄相符合. 而在该撞击坑的北部坑壁, 则出露了较少的石块, 这可能是由于倾斜撞击导致的溅射物不均匀分布, 或者坑壁地形坡度的差异, 导致坑壁石块块体移动规模的不同.

玉兔月球车搭载的探月雷达揭示了紫微撞击坑溅射毯的浅表层结构. 探月雷达总共有两组不同探测频率的天线. 频段 1 工作于甚高频(VHF)波段, 主频为 60 MHz, 工作频率为 40–80 MHz, 深度分辨率约为 1 m, 探测深度约大于 400 m. 频段 2 工作于超高频 (UHF) 波段, 主频为 500 MHz, 工作频率为 250–750 MHz, 深度分辨率约为 30 cm, 最大探测深度约为 30 m. 频段 2 中的 B 天线获取的数据分析表明[35], 紫微撞击坑的连续溅射毯的厚度分布不均一, 靠近坑缘的区域连续溅射毯最厚, 可达~4 m, 远离坑缘, 连续溅射毯逐渐变薄, 最薄处只有 1 m 左右, 这也与模拟计算得到的撞击坑连续溅射毯厚度径向分布相符合[36]. 同时, 雷达数据还揭示了在连续溅射堆积层中掩埋了很多大石块, 直径可达 0.3–1 m.

4.2 石块

嫦娥 3 号着陆器和玉兔月球车获取的影像数据显示, 探测区域出露了大量的石块, 且这些石块主要



图 15 (网络版彩图)紫微撞击坑全景镶嵌影像, 撞击坑直径约为 450 m, 前方的大石块长约 4 m, 高约 1.5 m

Figure 15 (Color online) Mosaic of Chang'E-3 panorama camera images shows the crater Zi Wei, with diameter of ~450 m. The large boulder (Loong Rock) in the near part of this image is about 4 m in length, and 1.5 m in height.

与撞击坑相关联, 这也与月球 17 号的探测区域有相似之处. 而石块最密集的区域位于紫微撞击坑的坑壁和坑缘, 玉兔月球车在第二月昼的月面巡视探测中, 也对这些石块进行了详细的成像探测.

距离玉兔月球车最近的一块长约 4 m, 高约 1.5 m 的大石块(“龙岩”)可能代表了探测区域出露石块的典型特征(图 15). 该石块的纹理特征非常特殊(图 16), 显著不同于以往阿波罗任务获得的月球玄武岩样品, 而表现出组成矿物的粗粒结构, 其中一些浅色矿物颗粒可能为斜长石或斜长石和其他铁镁质矿物的聚合物, 该石块的岩石类型可能是粗粒玄武岩或者辉绿岩, 说明形成这种岩石时岩浆的冷却速度很慢. 另外, 在该石块的表面还发现了一些微小陨石撞击的形迹[11], 类似于阿波罗任务采集的一些玄武岩样品, 如阿波罗 15 号样品 15555(图 16), 该样品在月表的暴露时间约为 76–90 Ma[37], 也与“龙岩”的暴露时间较为接近(27–80 Ma).

在紫微撞击坑挖掘出来的大量石块中, 也观测到了玄武岩典型的柱状节理构造特征(图 17). 这些石块的直径约为 20 cm, 且分布在紫微坑坑沿隆起附近, 说明其来源深部接近于紫微撞击坑的最大挖掘深度(~40 m). 与在月球 17 号着陆区观测到的具有柱状节理的石块相比(图 6), 嫦娥 3 号着陆区观测到的石块的棱角较为锋利, 说明其在月面暴露时间更短.

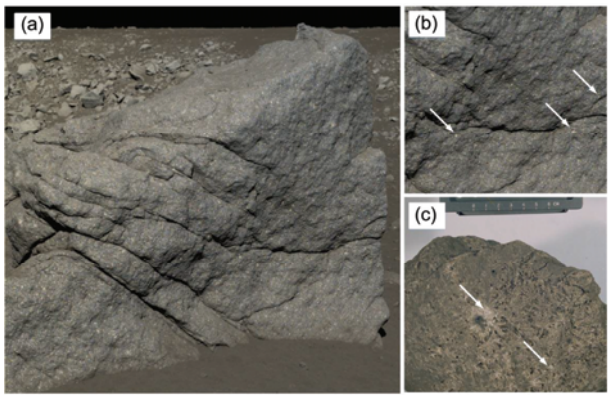


图 16 (网络版彩图)(a) “龙岩”的右半部分影像; (b) “龙岩”的细节纹理特征, 可见粗粒矿物颗粒和微小陨石撞击的痕迹(白色箭头所示); (c) 阿波罗 15 号任务采集的玄武岩样品 15555, 同样可见微小陨石撞击痕迹(白色箭头所示)

Figure 16 (Color online) (a) Image of the right part of the Loong Rock; (b) detailed texture characters of Loong Rock, coarser mineral particles and microcraters (white arrows) are observed; (c) Lunar basalt sample 15555 collected by the Apollo 15 mission, white arrows point to microcraters.

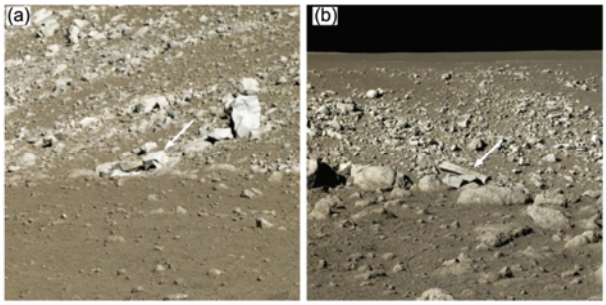


图 17 (网络版彩图)嫦娥 3 号着陆区紫微撞击坑坑壁和坑沿出露的大量石块, 其中部分石块可见柱状节理构造(白色箭头所示), (a) 北东侧坑沿隆起附近, 全景相机影像 201401131-91104; (b) 南部坑沿隆起附近, 全景相机影像 2014011319-1458

Figure 17 (Color online) Massive boulders exposed at the wall and rim of crater Zi Wei, Chang'E-3 landing area, some of these boulders present obvious columnar jointing structures (white arrows). (a) Areas near the northeastern rim crest, Chang'E-3 panorama camera image 20140113191104; (b) areas near the southern rim crest, Chang'E-3 panorama camera image 20140113191458.

4.3 月壤

根据“上新下老”的地层顺序, 可以推断, 北部雨海纪的玄武岩延伸到了嫦娥 3 号着陆区所在爱拉托逊纪玄武岩的下部[13]. 同时, 在两期玄武岩充填事件之间约 0.5 Ga 的时间间隔里, 由于空间风化和陨石轰击作用, 在两层玄武岩之间形成了一层月壤物质. 在表层的爱拉托逊纪玄武岩完成充填之后, 空间风化和陨石轰击成为改造月表形貌的主要地质过程, 从而在爱拉托逊纪玄武岩顶部形成另外一层月壤物质. 接着, 在距今不到 1 亿年时, 一次较大的撞击事件形成了当今嫦娥 3 号着陆点西侧的直径约 450 m 的紫微撞击坑, 同时在撞击坑周围形成了大量的撞击溅射堆积物. 而在撞击坑形成之后的较短时间里, 空间风化作用也在溅射毯之上形成了一层较薄的月壤物质. 这样, 通过区域地质演化历史, 我们可以推断出, 嫦娥 3 号的次表层包含了三层形成于不同时间、厚度各不相同的月壤层.

探月雷达系统获取的大于 400 m 深度的次表层结构清晰地揭示了各层月壤物质的厚度(图 18). 由于后续撞击作用的影响, 最表层月壤在巡视路径的不同位置厚度也不尽相同: 在靠近着陆点的区域, 表层月壤厚度约为 1–2 m, 而在其它探测区域, 表层月壤厚度约为 1 m[35], 这也与基于着陆相机影像数据对探测区域若干撞击坑直径和坑壁石块出露情况对表层

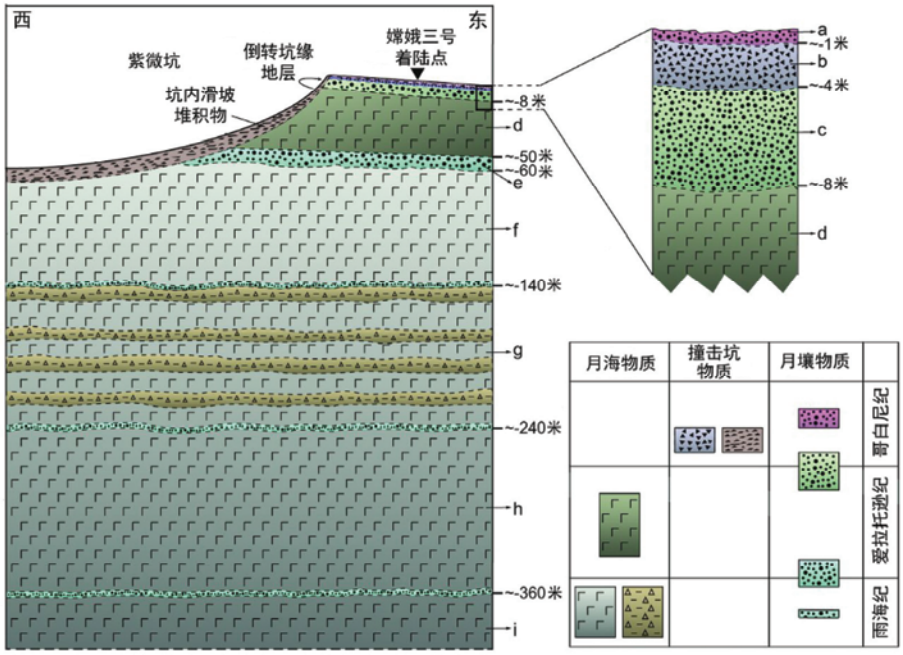


图 18 (网络版彩图)嫦娥 3 号着陆点地质地球物理综合解译剖面[35]

Figure 18 (Color online) Sketched geological cross section of the Chang'E-3 landing site [35].

月壤厚度的估计结果(~1 m)较为一致[13]. 而连续溅射毯和爱拉托逊纪玄武岩层之间的古月壤层的厚度约为 2–6 m, 说明月壤厚度在一个较小的范围可以呈现较大的变化幅度, 这可能是由于月壤形成的不均衡性, 或者后续撞击事件的扰动. 最底层的月壤, 即位于爱拉托逊纪玄武岩和雨海纪玄武岩单元之间的月壤, 厚度约为 10 m, 这一些结果高于基于月壤产出速率的估计结果, 说明可能应该重新考虑月球的空间风化速率.

5 着陆区"线性"特征及其成因

在嫦娥 3 号和很多阿波罗任务(包括阿波罗 15 号)获取的月表影像数据上, 观测到了大量明显的"线性"特征(图 19). 在嫦娥 3 号着陆区, 大部分"线性"特征呈两个走向展布, 并且这两个不同方向的"线性"特征互相交织在一起. 对于这些"线性"特征的成因, 一直争议较大, 包括反冲火箭的喷射所致、光照所致或撞击溅射纹[35,38,39]. 在嫦娥 3 号着陆区, 虽然受到了着陆器反冲火箭喷射气体的影响, 但是火箭喷气应该在着陆区月表形成以着陆点为中心的放射状线性特征, 这与嫦娥 3 号着陆区观测到的"线性"特征的分布情况不一致.

Schaber 和 Swann[38]基于月面影像数据对阿波罗 11 号和 12 号着陆区"线性"特征的方位进行了统计分

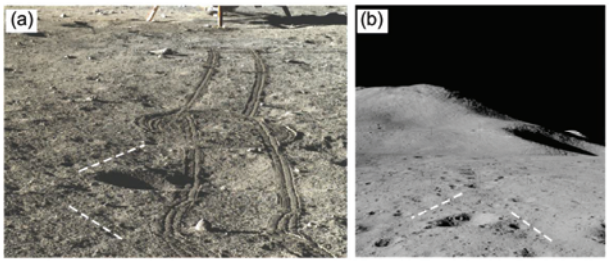


图 19 (网络版彩图)(a) 玉兔月球车全景相机获取的着陆器附近月表影像, 图中白色虚线指示了两套分别沿北西-南东和北东东-南西西方向发育的"线性"特征(影像编号 201312-24192152); (b) 阿波罗 15 号着陆区哈德利山脚影像, 图中白色虚线标注了两套分别沿北东-南西和北西-南东方向发育的"线性"特征(Hasselblad 70 mm 影像 AS15-85-11374HR)

Figure 19 (Color online) (a) Chang'E-3/Yutu panorama camera image of the lunar surface near the landing site. The white dashed lines mark the two sets of lineaments with direction of NW-SE and NEE-SWW, respectively (Chang'E-3 panorama camera image 20131224192152); (b) Hasselblad 70 mm image AS15-85-11374HR of the lunar surface at the foot of Mt. Hadley of Apollo 15 landing area. The white dashed lines also show the two set of lineaments with direction of NE-SW and NW-SE, respectively.

析, 认为这些“线性”特征受到了下伏断裂构造(如玄武岩表面的节理)的控制. 然而在阿波罗 15 号着陆区发现的类似“线性”特征并没有受到地形坡度和朝向的影响, 同时该着陆区表层较厚的月壤理应可以覆盖下伏基岩的结构特征, Wolfe 和 Bailey[39]认为这些观测到的“线性”特征可能由特殊的光照条件下引起的. Xiao 等人[35]认为着陆区观测到的这些“线性”特征可能是由微小起伏月表在较低角度太阳光照射下引起的, 本文通过相关的光照实验进行了验证.

我们将 CUG-1A 模拟月壤(粒径<1 mm[40])在水平木板上堆砌成圆柱状(顶面直径约 60 cm, 厚约 10 cm), 并将表面压平. 然后用筛子在压平的月壤均匀筛洒约 2 mm 厚的模拟月壤, 以模拟实际月表表层月壤的疏松多孔结构.

根据月面影像中出现“线性”特征的明显程度不同, 我们推断这主要取决于相机、太阳光和拍摄对象三者的角度关系. 据此, 我们通过控制变量法, 分别改变光源和相机之间的水平夹角 α、光源入射的高度角 β 及相机拍摄的高度角 γ, 然后拍摄观测“线性”特征在不同条件下所表现出的特征, 进而分析“线性”特征与光源入射角度和相机拍摄角度之间的因果关系. 实验示意图如图 20 所示.

另外, 我们还用直径约 5 cm 的不规则玄武岩块撞击模拟月壤表面, 产生一个有溅射纹的“撞击坑”, 以模拟月表的小型撞击作用; 还用气球对模拟月壤表面喷气, 以模拟火箭喷射作用. 同时也对这两套模拟实验产生的月壤表面纹理特征进行了成像记录和定性描述.

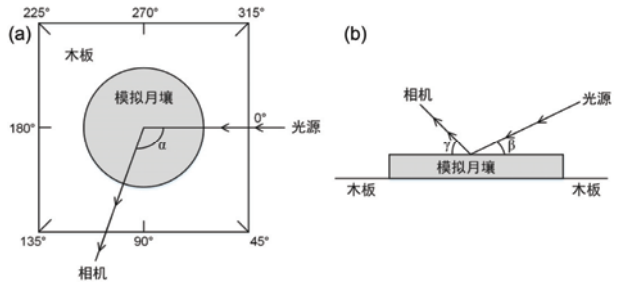


图 20 “线性”特征模拟实验示意图. (a) 为实验装置的俯视图; (b) 为实验装置的侧视图. 定义 α 为光源和相机之间的水平夹角, 重合为 0°, 顺时针增加至 360°; β 为光源入射的高度角, 水平为 0°, 垂直为 90°; γ 为相机拍摄的高度角, 水平为 0°, 垂直为 90°

Figure 20 Schematic diagram of the model experiments for lunar lineaments. (a) Overhead view and (b) side view of the experimental setup. α is defined as the horizontal angle between the light source and the camera, α=0° when the light source and camera are in the same direction, and then increases clockwise to 360°. β is the incidence angle, defined as the angel between light path and horizontal plane. γ is the camera observing angles, defined as the angle between the scattered light path and the horizontal plane.

本文模拟实验发现: (1) 光源入射角度越低, “线性”特征越明显(图 21); 当光源入射高度角 β 达到 60°时, “线性”特征的可见程度达到临界状态(图 22), 当光源入射高度角 β>60°时, “线性”特征现象消失. (2) 相机拍摄的高度角 γ 越小, “线性”特征越明显, 但在光源入射高度角足够小的情况下, “线性”特征只会随相机拍摄角度的增加而减弱, 并不会消失. (3) “线性”特征的表现特征不随相机与光源之间的夹角 α 的变化而改变. (4) 模拟撞击作用及喷气作用所产生的纹理为放射状(图 23), 由溅射物堆积而成, 其存在不受光照条件的限制. 所以在月面影像中观测到的疑似“线性”特征应为较低的太阳光入射角引起, 而与撞击、喷气作用无关.

6 结论

本文利用月球 17 号、阿波罗 15 号及嫦娥 3 号获取的月面影像及其他数据, 对雨海地区三个着陆点

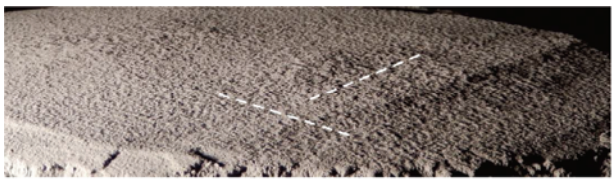


图 21 (网络版彩图)表现明显的“线性”特征(光源高度角 0°, 相机拍摄高度角 0°, 相机与光源夹角 315°). 图中白色虚线标注了两组不同方向发育的“线性”特征

Figure 21 (Color online) Obvious lineaments observed on the lunar regolith simulant (α=315°, β=0°, γ=0°). The white dashed lines mark the two set of lineaments with different directions.



图 22 (网络版彩图)表现为临界状态的“线性”特征(光源高度角 60°, 相机拍摄高度角 25°, 相机与光源夹角 270°)

Figure 22 (Color online) Lineaments at the critical state of observations (α=270°, β=60°, γ=25°).

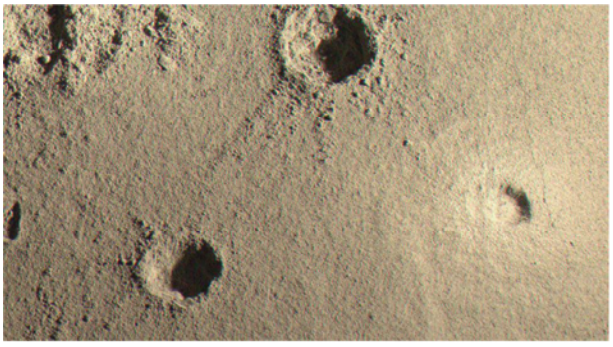


图 23 (网络版彩图)模拟撞击作用和火箭喷气作用在模拟月壤上形成的坑及其相关辐射纹, 图中上方中间位置的坑为模拟撞击过程形成的坑, 而图中右边较小的坑为模拟火箭喷气过程形成的坑. 可见这两种作用形成的线性特征均呈放射状分布

Figure 23 (Color online) Small craters and associated ray formations produced by simulated impacting process and rocket jets. The larger crater in the upper center of the image is produced by simulated impacting process, and the smaller crater in the right is produced by simulated rocket jets. One can readily observe the radial distribution pattern of lineaments produced by these two types of processes.

的区域地质背景, 月表小型撞击坑的退化程度、坑壁坑缘形貌、坑深/直径比及形成年龄, 月表出露石块的出露丰度、大小、表面纹理、节理特征及层状沉积特征, 月表月壤的物理力学性质、厚度及化学成分等地质特征进行了初步的分析及对比研究. 本文结论如下:

(1) 月球 17 号和嫦娥 3 号分别着陆于雨海西北边缘和北部较年轻的爱拉托逊纪熔岩平原, 而阿波罗 15 号着陆于雨海东部边缘较老的雨海纪玄武岩地质单元. 月球 17 和嫦娥 3 号着陆点的玄武岩显著年轻于月球返回玄武岩样品揭示的月球火山活动结束时间, 代表了月球晚期火山活动的产物.

(2) 典型月表的主要地貌特征为形态、大小各异的小型撞击坑, 根据这些小型撞击坑的退化状态, 可以将这些撞击坑分为三大类(A, B, C)和两个过渡类型(AB 和 BC). 不同类型的撞击坑代表了月表小型撞击坑的不同演化阶段, 并可以根据各类撞击坑的数量占比及月表撞击坑的寿命来估计月表小型撞击坑的形成年龄, 由此估计月球 17 号探测区最大的撞击坑 Borya 年龄约为 100–500 Ma. 根据撞击坑连续溅射毯上小型撞击坑“直径-频率分布”估计嫦娥 3 号着陆区最大的撞击坑紫微的年龄为 27–80 Ma. 而阿波罗 15 号着陆区月表的小型撞击坑退化程度比较严重. 在一些撞击坑坑壁, 发育了明显的阶地构造, 说明月表小型撞击坑也可能经历了复杂的撞击过程, 并且在坑底发现了富含玻璃质物质, 可能为撞击熔融物质, 或者撞击体碎片.

(3) 在月球 17 号与嫦娥 3 号着陆点的一些小撞击坑的坑壁和坑缘出露了大量玄武质石块, 说明这些石块为撞击作用挖掘的浅表层基岩, 最大来源深度可达 40 m. 这些石块表现出不同的形状、大小及表面纹理特征: 部分石块发育了地球玄武岩典型的柱状节理特征; 部分出露玄武岩表现出粗粒结构并富含斜长石矿物, 推测其岩石类型可能为粗粒玄武岩或者辉绿岩. 阿波罗 15 号着陆区月表出露的石块很少, 区域石块出露面积丰度只有~1%, 在一些较大撞击坑坑壁及坑缘, 则分布了较多的岩石露头, 部分出露玄武岩具有气孔构造, 并且富含绿色火山玻璃, 说明可能是爆烈式火山喷发的产物. 在阿波罗 15 号哈德利月溪内壁出露了厚度达 60 m 的玄武岩, 并且表现出明显的层状特征, 单层厚度达 10–20 m, 预示了多期次岩浆充填事件. 在哈德利月溪的底部和边缘, 也出露了大量石块, 且部分石块也观测到了柱状节理构造.

(4) 月表表层月壤在不同着陆区及同一着陆区不同探测点之间表现出差异较大的物理及力学性质(包括承载力、剪切强度、密度、摩擦角、内聚力等)、颗粒大小、厚度及化学成分变化, 同时在浅表层不同深度上月壤性质差异也较大, 说明了月壤在不同尺度横向及纵向上源区物质、充填模式等方面的不均一性, 指示了月壤复杂的地质历史.

(5) 在一些月面影像数据上, 观测到了大量疑似“线性”特征, 并且这些“线性”特征不受区域地形的影响. 本文认为这些线性特征可能是由微小起伏月表在较低角度太阳光照射下引起的, 并通过相关的光照实验进行了验证, 否定了反冲火箭喷射等成因机制.

(6) 月球撞击历史、火山活动、空间风化等重要地质过程存在较大的区域和地区不均一性, 我国及国际未来的月面就位及采样返回探测将有可能革新我们对月球地质演化历史的现有认知.

致谢 本文作者感谢 LPI 提供的阿波罗 15 号月面影像数据、俄罗斯国家科学院沃纳德斯基研究所 Basilevsky 博士提供的月球 17 号月面影像数据.

参考文献

1 Spudis P D. The Geology of Multi-ring Impact Basins. New York: Cambridge University Press, 1993
2 Ryder G. Mass flux in the ancient earth-moon system and benign implications for the origin of life on earth. J Geophys Res, 2002, 107(E4): 5022
3 Wilhelms D E, John F, Trask N J. The Geologic History of the Moon. U.S. Geological Survey Professional Paper 1348. Washington D C: Government Printing Office, 1987
4 Schaber G G. Eratosthenian volcanism in Mare Imbrium: Source of youngest flows. In: Apollo 17: Preliminary Science Report. NASA SP-330, 1973. pp. 30-17–30-25
5 Karachevtseva I, Oberst J, Scholten F, et al. Cartography of the lunokhod-1 landing site and traverse from LRO image and stereo-topographic data. Planet Space Sci, 2013, 85: 175–187
6 Schaber G G. Geologic map of the Sinus Iridum Quadrangle of the Moon, I-602 (LAC-24). Washington D C: US Geological Survey, 1969
7 Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. J Geophys Res, 2000, 105(E12): 29239–29275
8 Qiao L, Xiao L, Zhao J N, et al. Geological features and magmatic activities history of sinus Iridum, the moon (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43(11): 1370–1386 [乔乐, 肖龙, 赵健楠, 等. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43(11): 1370–1386]
9 Gusakova E, Karachevtseva I, Shingareva K, et al. Mapping and GIS-analyses of the Lunokhod-1 landing site. In: 43rd Lunar and Planetary Science Conference, 2012. Abstract #1750
10 Basilevsky A T. On the rate of evolution of small lunar craters. In: Seventh Lunar Science Conference, 1976. Abstract #1011
11 Basilevsky A T, Abdrakhimov A M, Head J W et al. Geologic characteristics of the Luna 17/Lunokhod 1 and Chang'E-3/Yutu landing sites, NW Mare Imbrium of the Moon. Planet Space Sci, 2015, doi:10.1016/j.pss.2015.08.006
12 Schultz P H. Moon Morphology. Austin: University of Texas Press,1976
13 Qiao L, Xiao Z Y, Zhao J N, et al. Subsurface structures at the Chang'e-3 landing site: Interpretations from orbital and in-situ imagery data. In: 46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015. Abstract #1050
14 Basilevsky A T, Head J W, Horz F. Survival times of meter-sized boulders on the surface of the moon. Planet Space Sci, 2013, 89: 118–126
15 桑隆康, 马昌前. 岩石学(第二版). 北京: 地质出版社, 2012
16 Melosh H J. Impact Cratering: A Geologic Process. 1st ed. New York: Oxford University Press, 1989
17 Florensky C P, Basilevsky A T, Zezin R B, et al. Geologic-morphologic studies of lunar surface. In: Mobile Laboratory on the Moon Lunokhod-1, 1978. 2: 102–135
18 Basilevsky A T, Grebennik N N, Gromov V V, et al. Dependence of physic-mechanical properties of lunar soil on characteristics of relief and processes in the study area of Lunokhod-2. Kosm Issled, 1984, 22(2): 243–251
19 Swann G A, Bailey N G, Batson R M, et al. Preliminary geologic investigation of the Apollo 15 landing site. In: Apollo 15 preliminary science report. NASA, 1972. 5-1–5-112
20 Hurwitz D M, Head J W, Hiesinger H. Lunar sinuous rilles: Distribution, characteristics, and implications for their origin. Planet Space Sci, 2013, 79-80: 1–38
21 Carr M H, El-Baz F. Geologic Maps of the Apennine-Hadley Region of the Moon, I-723. Washington D C: US Geological Survey, 1971
22 Spudis P D, Ryder G. Geology and petrology of the apollo 15 landing site: Past, present, and future understanding. Eos Trans Am Geophys Union, 1985, 66(43): 721–726
23 Taylor G J, Warren P H, Ryder G, et al. Lunar rocks. In: Heiken G H, Vaniman D T, French, B M, eds. Lunar Sourcebook. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 183–284
24 Allen J P. Summary of science results. In: Apollo 15 preliminary science report. NASA, 1972. 2-1–2-11
25 Nakamura Y, Dorman J, Duennebier F, et al. Shallow lunar structure determined from the passive seismic experiment. Moon, 1975, 13: 3–15
26 Mitchell J K, Bromwell L G, Carrier W D, et al. Soil-Mechanics expriments. In: Apollo 15 preliminary science report. NASA, 1972. 7-1–7-28
27 Xiao L. China's touch on the moon. Nat Geosci, 2014, 7(6): 391–392
28 Zhao J N, Huang J, Qiao L, et al. Geologic characteristics of the Chang'e-3 exploration region. Sci China-Phys Mech Astron, 2014, 57(3): 569–576
29 Zhang J, 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
30 Neal C R, Wu Y Z, Cui X Z, et al. Regolith at the Chang'E-3 landing site: A new type of mare basalt composition. In: 46th Lunar and Planetary Science Conference, 2015. Abstract #1641
31 Lucey P G. Mineral maps of the Moon. Geophys Res Lett, 2004, 31(8): L08701
32 Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Thorium abundances on the lunar surface. J Geophys Res, 2000, 105(E8): 20307–20331
33 Qiao L, Xiao L, Zhao J, et al. Geological features and evolution history of Sinus Iridum, the Moon. Planet Space Sci, 2014, 101: 37–52
34 Papike J J, Hodges F N, Bence AE, et al. Mare basalts: Crystal chemistry, mineralogy, and petrology. Rev Geophys, 1976, 14(4): 475–540
35 Xiao L, Zhu P, Fang G, et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. Science, 2015, 347(6227): 1226–1229
36 McGetchin T R, Settle M, Head J W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits. Earth Planet Sci Lett, 1973, 20: 226–236
37 Podosek F A, Huneke J C, Wasserburg G J. Gas-retention and cosmic-ray exposure ages of lunar rock 15555. Science, 1972, 175: 423–425
38 Schaber G G, Swann G A. Surface lineaments at the Apollo 11 and Apollo 12 landing sites. In: Proceedings of the Second Lunar Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971. 27–38
39 Wolfe E W, Bailey N G. Lineaments of the Apennine Front-Apollo 15 landing site. In: Proceedings of the Third Lunar Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1972. 15–25
40 He X X, Xiao L, Huang J, et al. Lunar soil simulant development and Lunar soil simulant CUG-1A (in Chinese). Geol Sci Tech Inf, 2011, 30(4): 137–142 [贺新星, 肖龙, 黄俊, 等. 模拟月壤研究进展及 CUG-1A 模拟月壤. 地质科技情报, 2011, 30(4): 137–142]

Geological investigations of Luna 17, Apollo 15 and Chang'E-3 landing sites at Mare Imbrium of the Moon

QIAO Le*, LIU XiaoQian, ZHAO JianNan, WEI Yu & XIAO Long

Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

The Imbrium basin is one of the most prominent geologic units on the lunar nearside, and also significant exploration target for soft-landing missions. Till now, three lunar missions, USSR's Luna 17, American Apollo 15 and Chinese Chang'E-3, have successfully soft-landed and conducted surface investigation at this basin. Employing the surface images and other data acquired by the three missions, we analyze the geologic characteristics of the three landing sites, mainly focusing on the regional geologic context, impact craters, surface boulders and regolith materials. We find that, the Lunar 17 and Chang'E-3 spacecraft landed on the relatively younger Eratosthenian mare basalt units, respectively, where massive basaltic bedrocks are exposed at the wall and rim of some small craters, and some of these exposed boulders present columnar jointing, while the Apollo 15 landed on the relatively older Imbrian lava plains, where surface boulders are seldom present. There exposed some layered basalts at the wall of the Hadley Rille, and columnar jointing structure is also observed at some boulders exposed at the rille floor and rim. We observe some possible lineaments on the surface images. We propose that these possible lineaments are caused by slightly undulant lunar surface illuminated under relatively low sun elevation angles, which is supported by our simulation experiments. The comparison of the three landing sites indicates that impacting history, volcanic activities, space weathering and other important geologic processes are regionally and locally inhomogeneous on the Moon, future lunar surface *in-situ* and sample-return missions will strengthen our understanding of the geologic evolutionary history of the Moon.

Mare Imbrium, Moon, Chang'E-3, geologic characteristics, lunar exploration

PACS: 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.12.Xy, 96.20.Br

doi: 10.1360/SSPMA2015-00489