

文章编号:1672-6561(2017)03-0428-11

月球正面与背面的差异对比与演化分析

姚美娟^{1,2}, 陈建平^{1,2}, 徐 彬^{1,2}, 籍进柱³, 陈 剑^{4,5}

(1. 中国地质大学(北京)国土资源与高新技术研究中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081; 4. 山东大学空间科学研究院, 山东 威海 264209; 5. 山东大学山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209)

摘 要:月球的起源与演化以及月球正面与背面的差异性一直是科学研究的热点问题,月球正面和背面的差异性说明两个半球的演化过程存在不对称性。通过分析月球正面与背面的物理特征、岩石矿物特征和构造特征分布差异,研究形成月球正面和背面差异性的动力过程,进而解释月球正面与背面地质演化差异。结果表明:月球正面和背面的物理特征、岩石矿物特征和构造特征都存在很大的不同;月球正面和背面的地质演化可以划分为以内动力地质作用为主的阶段,内、外动力地质作用并存阶段和以外动力地质作用为主的阶段;以内动力地质作用为主的阶段和内、外动力地质作用并存阶段是造成月球正面和背面地质演化差异的两个主要阶段,而以外动力地质作用为主的阶段对月球正面和背面地质演化差异的形成影响较小。

关键词:月球;演化;正面;背面;物理特征;岩石矿物;构造特征

中图分类号:P184 文献标志码:A

Difference Comparison and Evolution Analysis of Lunar Nearside and Farside

YAO Mei-juan^{1,2}, CHEN Jian-ping^{1,2}, XU Bin^{1,2}, JI Jin-zhu³, CHEN Jian^{4,5}

(1. Institute of High and New Techniques Applied to Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China; 5. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-terrestrial Environment, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China)

Abstract: The origin and evolution of Moon and the difference between lunar nearside and farside are hot topics. The difference between lunar nearside and farside shows the asymmetry evolution of the two hemispheres. Based on the analysis of the physical properties, rock mineral properties and structural characteristics of lunar nearside and farside, the difference of their geological evolution and the dynamic process of their formations were discussed. The results show that the physical properties, rock mineral properties and structural characteristics of lunar nearside and farside are different; the geological evolution history of Moon can be divided into three stages, including the stage of endogenic geological process, the stage of both endogenic and exogenic

收稿日期:2017-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41490634);国家科技基础性工作专项项目(2015FY210500)

作者简介:姚美娟(1989-),女,山东日照人,工学博士研究生,E-mail:lyaomeijuan@163.com。

通讯作者:陈建平(1959-),男,福建闽侯人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:3s@cugb.edu.cn。

geological processes and the stage of exogenic geological process; the differences between lunar nearside and farside are mainly affected by the stage of endogenic geological process and the stage of both endogenic and exogenic geological processes, while the stage of exogenic geological process only takes little effect on lunar nearside and farside.

Key words: Moon; evolution; nearside; farside; physical property; rock mineral; structural characteristic

0 引言

在无探测器的时代,人类利用望远镜观测月球,最先发现的是月球正面的高山和广阔平原,其表面布满了环形山,但无法探测月球背面。直到 1959 年,前苏联发射的探测器“月球 3 号”首次拍摄到月球背面影像,人类才发现月球背面的地形地貌特征与正面是不同的。月球背面的地形比较相似,大部分为“亮”的高地,只有少部分为“暗”的平原,高地地区多以撞击形成的撞击坑、盆地为主。

对比月球正面和背面的地形地貌特征,能够发现两者之间具有明显的“二分性”,即月球正面主要布满大型的月海,而背面则密布撞击坑,且月海的数量很少。形成月球正面和背面“二分性”差异的原因一直是科学界关注的热点,目前主要存在两种不同的观点。一种观点认为月球在距离地球很近的时候就形成了这种差异,即月球的原始不均一性,月球正面和背面的地球引力差异导致两个半球内部岩浆管道不匀称,因此,月球正面发生了大量的岩浆喷发,而背面则保存了原始的月亮厚度。Wood 对月亮进行研究时发现月球背面的月亮厚度比正面厚 15~20 km,认为这种差异源于月球惯性^[1]。Apollo 15 激光高度计数据显示,月球质量中心与月球形态中心存在 2.1 km 的偏移^[2],因此,月球转动的惯性导致月球正面和背面的月亮厚度存在差异。另一种观点认为在月球演化的初期,月球正面遭遇了巨型撞击,撞击出的大量月亮溅射物被抛射到背面,从而使背面的月亮厚度加厚^[1],岩浆则从薄月亮中喷出形成月海。然而,月球背面南极艾肯盆地(South Pole-Aitken)的成因却不支持这种观点。南极艾肯盆地是已确认的月球上最古老的撞击盆地^[3],直径为 2 000~2 600 km^[4-5],深度约为 8 km^[6-7]。通过对南极艾肯盆地的地质研究,发现它是由一颗巨大陨石倾斜撞击形成的。南极艾肯盆地的形成导致月球深部的岩浆转移并集聚到月球正面;在随后的月球演化中,岩浆溢入撞击形成的盆地中形成大量月海^[8]。除此之外,Cadogan 和 Whitaker 分别提出了

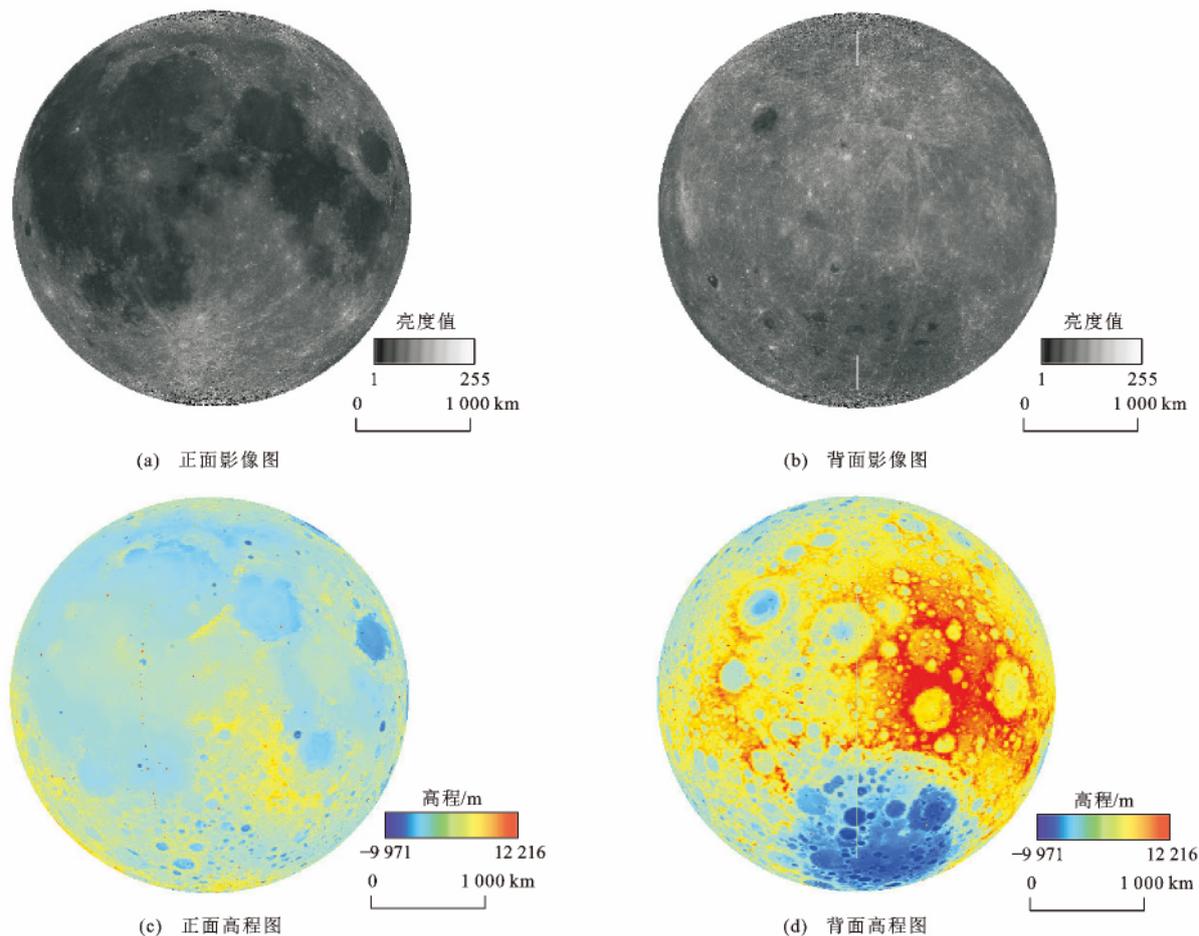
Gargantuan 盆地和风暴洋盆地的假说^[9-10];Feldman 等则提出月球正面中心应该存在盆地的假说^[11];Byrne 通过建立模型来解释月球正面和背面产生“二分性”的原因,认为月球正面应该存在一个撞击形成的大型盆地,即月球正面大型盆地(Nearside Megabasin),其撞击出的溅射物被抛射到月球背面,使背面的月亮变厚,从而形成了月球正面与背面的月亮厚度差异^[12],这与 Wood 提出的假设^[1]相似;但是另一个新的假说(即南极艾肯盆地假说)则认为,在月球背面形成的南极艾肯盆地引起了正面风暴洋区域的变化,这种变化导致月球正面与背面的差异^[8]。

前人从不同方面、不同角度推测了月球正面与背面形成差异的原因,但却没有综合利用重力、地形和影像等数据从月球正面和背面本身的特征进行分析。基于此,本文尝试通过综合利用多源遥感数据分析月球正面和背面的物理、化学和构造特征差异,研究形成月球正面和背面差异性的动力过程,进而分析月球正面与背面的地质演化差异,加深对月球起源和演化的理解,为研究地球乃至太阳系起源与演化提供参考。

1 物理特征差异

1.1 亮度与高程

月球表面并不是光洁平滑的,而是凹凸不平的,月海和高地两大地理单元的亮度也不相同。从“嫦娥一号”三线阵电荷耦合元件(Charge-coupled Device, CCD)获得的影像图[图 1(a)、(b)]和激光高度计(Laser Altimeter, LAM)获得的高程图[图 1(c)、(d)]可以看出,月球正面的整体反照率、高程值与背面具有明显差异。月球正面广泛分布着暗色的月海,反照率和高程低;而月球背面除占大部分区域的高地外,在南半球有很大一片亮度与高程较低的区域,属于月球上最大、最古老的盆地——南极艾肯盆地,其平均高程比月海区域更低。月球正面和背面除了明显的亮度和高程差异外,在影像上最显著的特征就是密集分布的撞击坑,部分年轻撞击坑的辐射纹系统在影像上清晰可见。月海区域演化周期



投影方式为正射投影;参考椭球为 D_Moon_2000;底图为“嫦娥一号”数据

图1 月球正面与背面的影像图和高程图

Fig. 1 CCD and DEM Images of Lunar Nearside and Farside

短,遭受后期撞击少,表面较平坦;而高地和南极艾肯盆地形成时间早,长期的撞击作用严重破坏了早期结构,留下了粗糙的现代月球表面形貌。

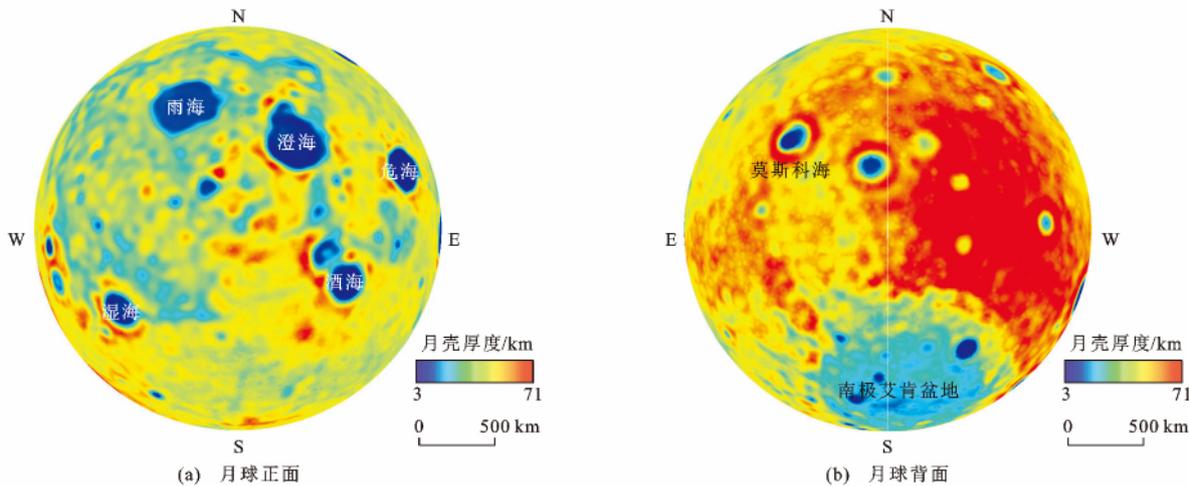
1.2 月壳厚度

月壳厚度是研究月球起源和早期历史主要分异事件的直接证据,因此,分析月球正面和背面的月壳厚度对研究其地质演化差异具有重要的意义。Zuber等通过分析 Clementine 重力和地形数据,发现月球背面的月壳厚度明显高于月球正面,并且月球的质量中心相对形态中心向月球正面偏移了 2 km^[7,13];Ishihara 等利用 SELENE 地形数据和重力数据计算出月壳厚度范围为 0~110 km,最小值在月球背面的莫斯科盆地内,最大值在迪里克利特—杰克逊(Dirichlet-Jackson)盆地南部边缘(6.9°N, 160.30°W),月壳平均厚度约为 53 km^[14];Wieczorek 等分别利用 Clementine 地形图、Lunar Prospector 重力数据以及 LRO 地形图、GRAIL 重力数据,通过建立不同模型来计算月壳厚度(图 2),发现最小值在

月球背面的莫斯科盆地内,其厚度小于 1 km^[15-16],这与 Ishihara 等的结论^[14]相一致。这些研究充分说明月球正面与背面的月壳厚度存在较明显的差异性,月球正面的平均月壳厚度比背面小。通过分析月壳厚度,发现形成月壳厚度差异的原因除自身演化外,撞击作用也起到了重要的作用。

1.3 重力异常

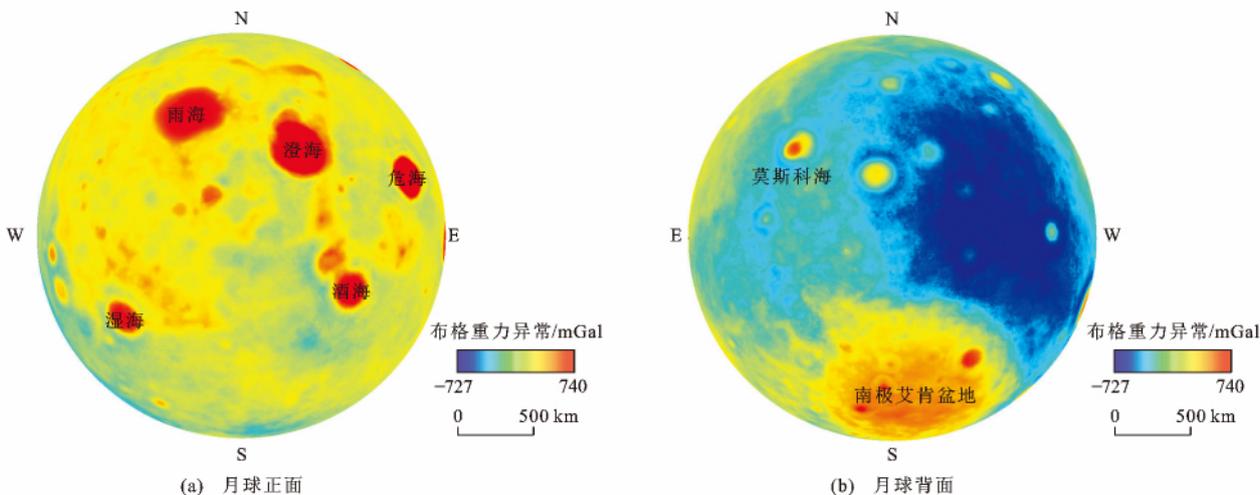
重力场可以反映月球内部结构和物质成分的变化,为研究月球起源与演化提供了重要依据。Zuber 等通过研究不同探测器获取的重力数据,发现月球正面和背面的重力异常存在很大差异^[7,17-18]。从图 3 可以看出:月球背面除了南极艾肯盆地和莫斯科盆地内的重力异常总体程度上较高外,其他区域的重力异常都较低;而月球正面整体的重力异常都较高,且以雨海、澄海、危海、酒海和湿海的重力异常最高。月球的重力异常差异主要分布在由撞击作用形成的盆地当中,说明重力异常的产生与外动力地质作用存在密切关系。



图件数据引自文献[16]

图 2 月亮厚度

Fig. 2 Maps of Lunar Crustal Thickness



图件数据来源于 NASA PDS 影像数据节点

图 3 布格重力异常

Fig. 3 Maps of Bouguer Gravity Anomaly

2 岩石矿物特征差异

起初, 人类认为月球表面只包括两种单元, 即较亮的高地和较暗的月海。然而, 随着月球样品的返回以及对其进行地球物理和岩相学的研究揭示月球经历了复杂的地质演化过程而最终形成现在的月貌^[19]。跟地球一样, 月球表面也存在着不同的岩石类型, 其划分标准有很多。Stoffler 等根据月球样品研究结果将高地岩石划分为火成岩、变质岩、角砾岩^[20]; Taylor 等根据月球样品中钛铁矿含量 (TiO_2 含量) 将月海玄武岩分为高钛、低钛和极低钛玄武岩^[21]; 凌宗成等将月球岩石类型划分为月海玄武岩、高地斜长岩、克里普岩 (KREEP) 和富镁结晶岩套^[22]; Jolliff 等根据地质动力作用将月球岩石类型

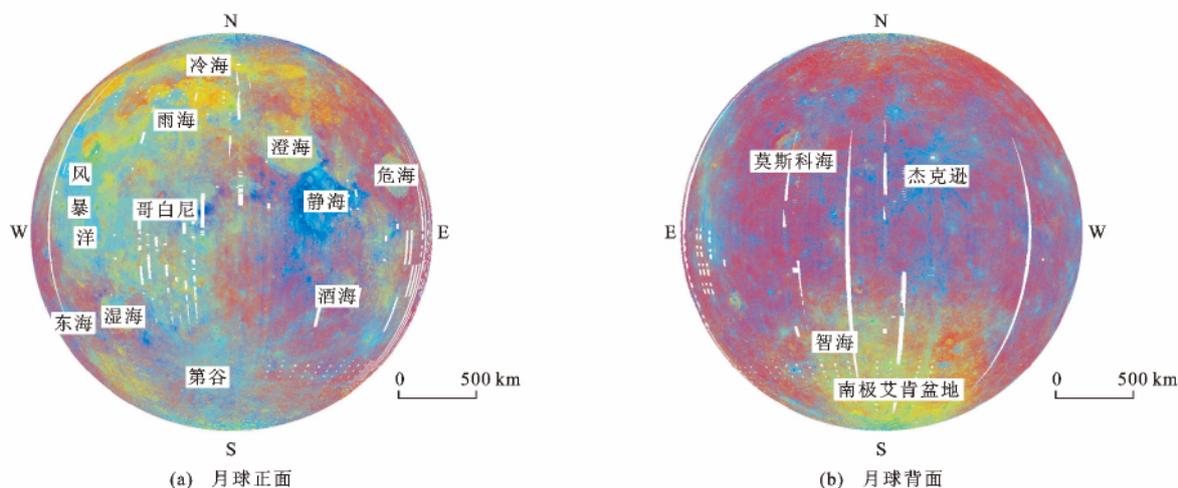
划分为由内动力地质作用形成的非月海岩石、月海岩石和由外动力地质作用——撞击作用形成的新岩石^[23]。本文主要对月球表面的非月海岩石和月海岩石进行分析, 而对由撞击作用形成的新岩石不再进行说明。非月海岩石是月球演化初期岩浆洋分异结晶的产物, 一般具有粗粒深成岩结构; 而月海岩石是由固态月幔熔融喷出形成的岩石, 以月海玄武岩为主^[23]。由于月球正面和背面的非月海区域和月海区域分布极度不均一, 两者表面的岩石矿物特征分布存在很大的差异性。

2.1 岩性

对月球表面整体岩性差异的分析, 一般采用“标准伽利略彩色合成”方法来确定。其主要原理是利用波段比值的方法进行假彩色影像合成。该方法可以

消除地形变化对光谱反射率的影响,能增强显示月球表面的物质差异,对识别月球表面岩性具有较好的参考意义^[24-26]。本文运用此方法,利用 Clementine 探测

器紫外可见吸收光谱(UV-VIS)的 415、750、950 nm 等 3 个波段反射率数据进行假彩色影像合成,整体分析月球正面与背面的岩性分布差异(图 4)。



底图为 Clementine 探测器 UV-VIS 数据;红色(R)表示 750 nm 和 415 nm 波段反射率比值;绿色(G)表示 750 nm 和 950 nm 波段反射率比值;蓝色(B)表示 415 nm 和 750 nm 波段反射率比值

图 4 假彩色合成影像

Fig. 4 False Color Images

Clementine 假彩色合成影像可以较好地揭示月球表面的物质特征和成熟度(图 4):红色反映成熟的斜长岩高地;绿色主要反映矿物中 Fe^{2+} 含量,随着 FeO 含量的增加而凸显绿色;蓝色主要反映成熟度与 Ti 含量(其与钛铁矿含量呈正相关关系)^[27-28]。因此,在非月海区域,红色代表成熟的低铁低钛斜长岩高地物质,蓝色代表年轻的撞击坑掘出物质,成熟度较低;在月海区域,蓝色代表富铁高钛玄武岩,橘黄色、绿色代表富铁低钛玄武岩。从图 4 可以看出,与月球背面相比,月球正面的橘黄色、绿色和蓝色分布的区域较多,说明月球正面的岩石成分富 Fe、Ti,并且正面的蓝色以静海地区和第谷撞击坑(Tycho, 43.4°S , 11.1°W ,哥白尼纪)最为明显。月球背面除了以橘黄色、绿色分布特征为主的南极艾肯盆地和辐射纹以蓝色显示的杰克逊撞击坑(Jackson, 22.4°N , 163.1°W ,哥白尼纪)外,其他区域主体以红色为主,这说明月球背面的岩石类型主要为斜长岩高地。月球正面和背面岩性分布的差异性可以说明月球表面化学分布存在不均一性。

2.2 月海岩石

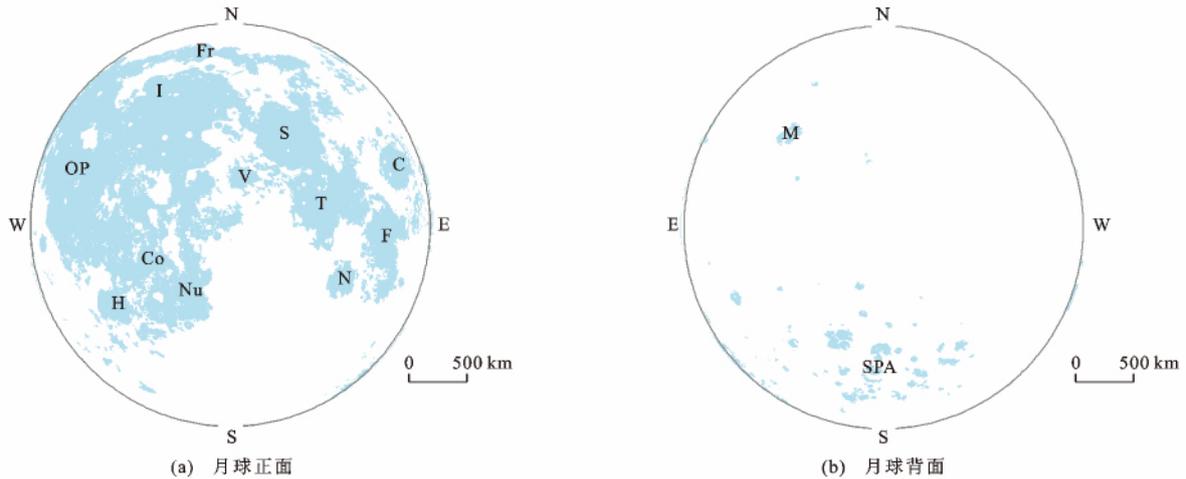
月海岩石以月海玄武岩为主,而月海玄武岩覆盖大约 17% 的月球表面,构成约 1% 的月壳体积^[29],因此,本文对月海岩石的分析主要以月海玄武岩为主。由于绝大多数月海分布在月球正面,并且其分布范围约占整个月球正面表面积的一

半,而只有东海、莫斯科海和智海等位于月球背面,所以月海玄武岩在月球正面和背面的分布极不均一(图 5)。月海玄武岩几乎全部出露在月球正面的盆地中,在月球背面出露得很少。

在月球正面,构成月海的玄武质熔岩流通常都位于大型撞击盆地内,但构成风暴洋的火山熔岩流扩展的范围则比较广。与正面不同,月球背面的熔岩流相对稀少,尽管有一些大型撞击构造(如南极艾肯盆地)也位于此面。这种充填月球盆地的熔岩流在分布和数量上的差异性,说明月球正面盆地的玄武岩溢流程度远远大于背面盆地。导致月海玄武岩这种分布状况的作用可能存在两种^[23]:第一种是玄武质岩浆的喷发可能受控于岩浆输送过程,它阻止月球背面的喷发,促进正面盆地内的喷发,同时可能受到包括诸如月亮厚度变化、岩浆浮力等因素影响;第二种是由岩浆生成作用的空间差异所引起,在这种情况下,月海厚度与下伏月幔产生的熔体量有关,月球背面熔岩流的稀缺性是该半球岩浆产出率低的结果。当然,岩浆产出率和岩浆输送过程都可能影响着月球玄武岩喷发作用的分布。

2.3 非月海岩石

非月海岩石是月球演化初期岩浆洋分异结晶的产物,一般具有粗粒深成岩结构,主要包括高地岩石、克里普岩和南极艾肯盆地岩石^[23]。高地岩石主



C 为危海;Co 为知海;F 为丰富海;Fr 为冷海;H 为湿海;I 为雨海;M 为莫斯科海;N 为酒海;Nu 为云海;OP 为风暴洋;S 为澄海;SPA 为南极艾肯盆地;T 为静海;V 为汽海

图 5 月海玄武岩分布

Fig. 5 Distributions of Mare Basalts

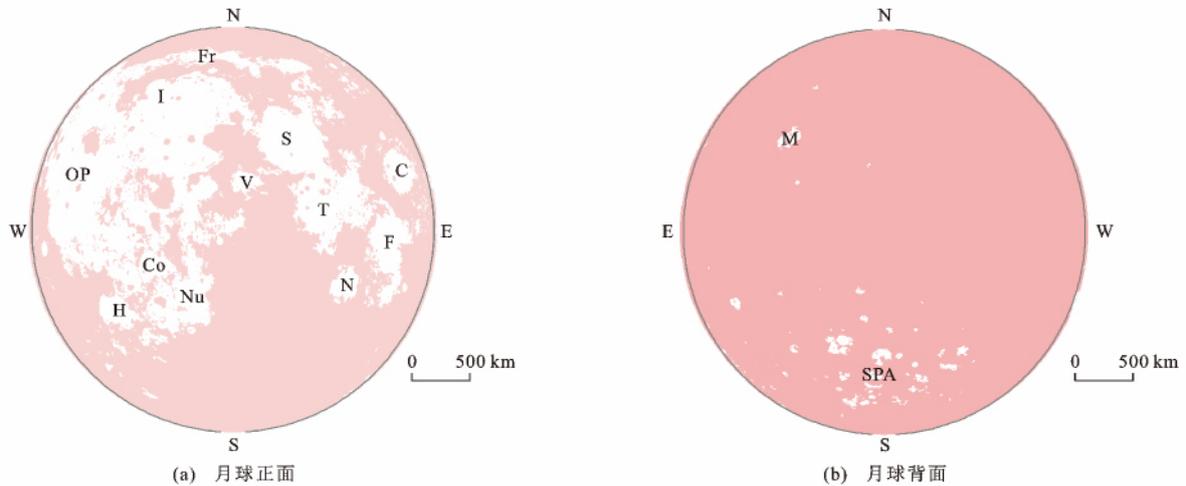
要由斜长石组成,其体积分数超过 70%;克里普岩是月球上富含 K、稀土元素(REE)和 P 的一种特殊岩石^[30];南极艾肯盆地作为特殊地体,其内部的岩石类型也存在特殊性^[31]。

非月海岩石几乎占据了月球的大部分面积。从图 6 可以看出:整个月球背面主要以非月海岩石分布为主,除了南极艾肯盆地内部分布有月海玄武岩,其他地方分布的月海玄武岩面积很小;月球正面由于月海玄武岩的分布范围较广,所以其表面分布的非月海岩石面积比月球背面小。非月海岩石形成的年龄比月海岩石要老,一般为 4.1~4.3 Ga。月球高地区域月亮的主要物质为斜长岩,说明月球在结晶分异时,密度小的斜长石从岩浆洋析出并漂浮在

顶部,逐渐冷却形成高地月亮;而克里普岩是岩浆在结晶分异过程中,由不相容元素混合组成的残留物;南极艾肯盆地的岩石类型则存在多种岩石(如苏长岩、辉长岩、长石和橄榄辉长石)^[32]。

3 构造特征差异

月球构造特征能够清晰地表达不同类型、不同级别的构造形迹和构造层序的时空分布规律以及对岩浆岩和火山活动的控制作用^[33]。月球构造特征主要有环形构造和线性构造两种形式,对其进行研究可以揭示月球区域性或者全球性的撞击作用程度与应力状态,能够加深对月球正面和背面地质演化差异的理解。



字母含义同图 5

图 6 非月海岩石分布

Fig. 6 Distributions of Nonmare Rocks

3.1 环形构造

月球表面环形构造是遥感影像上形态、结构或色调呈现环状的环形体。月球表面环形构造的形成原因主要有火山作用和撞击作用两种。前者包括月海穹窿、火山口等,后者包括撞击盆地、撞击坑等。

为了研究月球正面和背面环形构造分布差异,本文利用“嫦娥一号”数据,在1:2 500 000比例尺下利用 ArcGIS 软件通过人机交互的方式对月球正面和背面的月海穹窿、火山口、撞击盆地、撞击坑(直径不低于5 km)进行识别与提取,并结合前人的研

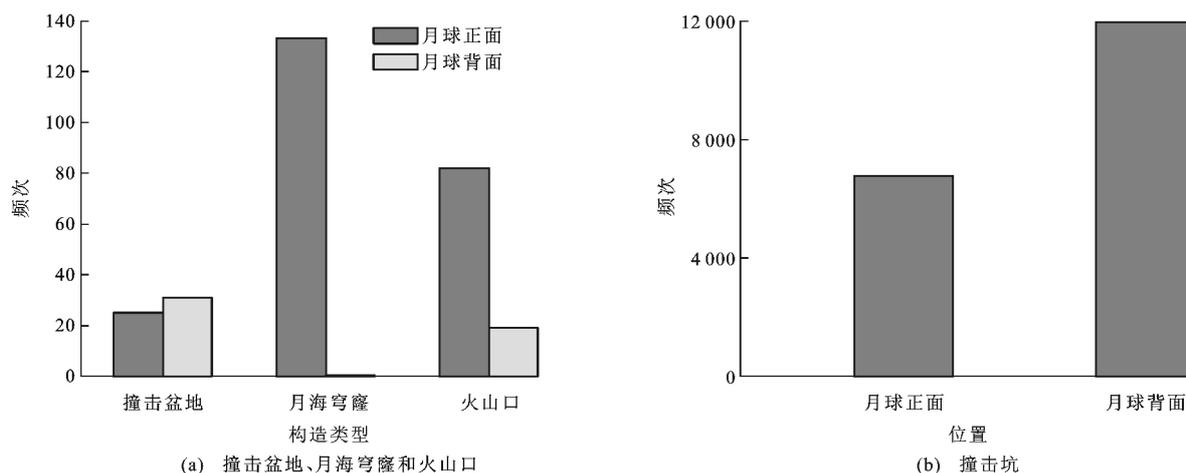


图7 环形构造类型统计直方图

Fig. 7 Histograms of Ring Structures

3.2 线性构造

月球表面线性构造是指月球表面以线状延伸的构造现象。根据线状形迹的形态特征和构造成因,月球表面的线性构造可以划分为多种类型。对于线性构造类型准确的划分,目前国内外还没有统一的标准。本文根据线性构造要素的成因及形态特征,将月球表面的线性构造划分为皱脊、月谷、月溪、地堑、坑链和坑底断裂6种类型^[34]。对线性构造的解译与提取主要使用“嫦娥一号”、“嫦娥二号”CCD及美国轨道探测器获得的LROC影像数据等,根据各构造要素类型的形态、大小、色调、纹理及分布位置等信息进行详细解译,再结合高程数据和美国月球地质图件等进行多源数据综合地质解译。月球表面的线性构造能够反映月球所受到的构造应力状态,对揭示月球内部地质活动具有重要的意义。例如,皱脊代表了区域处于收缩挤压的应力状态,月谷与地堑可指示区域的拉张应力状态等。

本文在对线性构造进行识别与提取时,首先利用 Landsat 软件作为辅助对线性构造进行自动提

取,然后与 CCD 影像对比并进行人工目视识别与手动修改。本文总共提取 2 812 条线性构造,即 1 152 条皱脊、14 条月谷、659 条月溪、204 条地堑、220 条坑链和 563 条坑底断裂(图 8)。提取的线性构造集中分布在月球正面的月海区域,而背面的线性构造则主要分布在南极艾肯盆地中(图 8)。根据线性构造的分布特征,发现皱脊只在月海中存在,并且主要集中在风暴洋及其附近的月海中,其他位置只在东海、洪堡海、史密斯海和莫斯科海中有少量分布。皱脊的分布特征说明皱脊的形成与月海玄武岩充填沉降产生的压缩构造地形有关,暗示着其形成发生在月海玄武岩侵位以后,并且演化跨越了较长的历史时期。月溪与皱脊的分布特征相近,月溪也主要存在于有月海玄武岩分布的地方,在风暴洋及其周围分布集中,但月溪还同时分布在月海盆地边缘和高地周围,其整体上与月海盆地呈同心圆状分布或在盆地边缘分布,其分布区域对应了月海玄武岩沉降区的外边界,暗示了月溪的构造起源,此外在东海盆地和南极艾肯盆地周围也有一些分布。由于

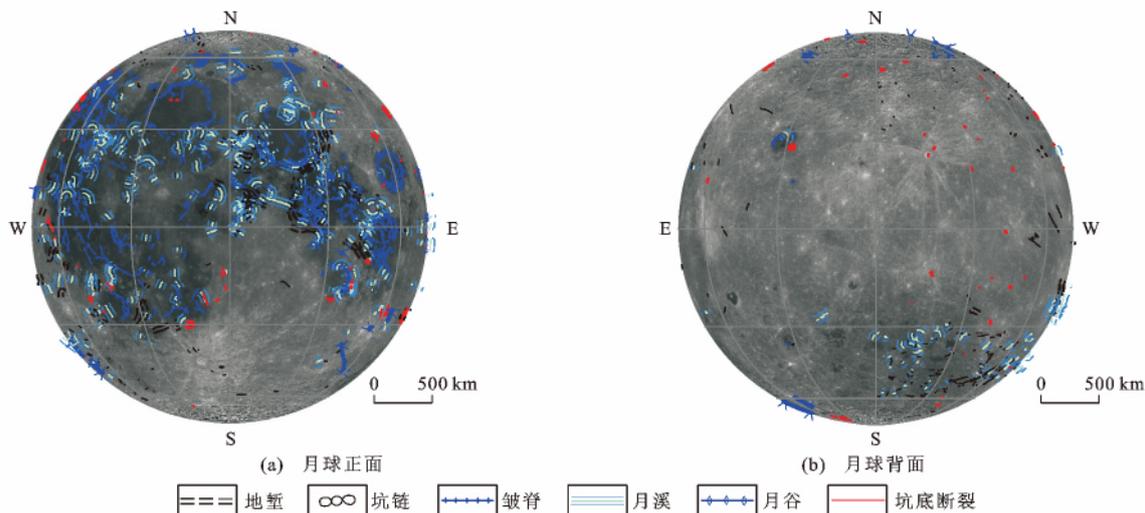


图 8 线性构造分布

Fig. 8 Distributions of Linear Structures

地堑的形成与月海盆地沉降产生的局部张应力或热应力有关,一般分布在盆地边缘,所以在风暴洋四周的盆地附近分布最多,而在月球背面高地地堑分布的数量较少,同时地堑的走向暗示着月球的应力方向。坑底断裂主要分布在中等规模的撞击坑中,并呈同心圆状分布,尤其是靠近风暴洋的撞击坑。月谷主要是由岩浆流动或月壳断裂作用形成的,在月球正面和背面都有分布。

4 地质演化差异

月球正面与背面的“二分性”特征在一定程度上说明了月球正面与背面的地质演化存在明显差异,其差异的形成可能受多种因素影响。基于此,本文通过分析月球正面和背面的物理特征、化学特征及构造特征分布差异来推测月球正面和背面差异形成的演化过程。

对于月球的起源,目前主要存在 4 种假说,分别是共振潮汐分裂假说、捕获假说、共增生假说和大碰撞分裂假说。其中被广泛接受的大碰撞分裂假说认为月球是由行星与地球相撞形成的,在形成的初始阶段,整个月球处于熔融或部分熔融的岩浆洋状态^[35]。月球从岩浆洋状态到目前的面貌经历了不同的演化历史阶段。月球的演化历史主要包括内部的热演化、岩浆演化(内动力地质作用演化过程)和以陨石撞击为主的外动力地质作用演化过程^[29]。根据大碰撞分裂假说,月球形成之后具有全球性的岩浆洋,随着温度降低,岩浆洋冷却结晶形成原始月壳。随后,硬化的月壳遭受古老撞击事件并保存其形成的撞击盆地,虽然在后期又经历了剧烈的改造,

但其大部分的整体形貌特征还能够被识别出来。月球上广阔的玄武岩喷发发生在大型盆地形成之后,在此阶段形成了月球上的 22 个月海。月海事件之后,月球在大约 3.0 Ga 逐渐失去了内动力地质作用,撞击作用成为了控制月球演化的主要因素,形成了后期新鲜的撞击坑。因此,根据驱动力的不同,月球的演化过程可以划分为 3 个阶段:第一阶段以内动力地质作用为主(4.20~4.56 Ga),包括从月球形成到岩浆洋演化结束后月球表面开始形成有记录的撞击事件痕迹;第二阶段为内、外动力地质作用并存阶段(3.16~4.20 Ga),主要事件包括形成大型撞击盆地的撞击事件以及月海玄武岩泛滥;第三阶段以外动力地质作用为主(0~3.16 Ga),月球的内动力地质作用基本结束,不同规模的撞击事件时有发生,月壤形成^[36-38]。

4.1 以内动力地质作用为主的阶段(4.20~4.56 Ga)

月球在以内动力地质作用为主时,岩浆洋发生结晶分异,橄榄石和辉石等矿物析出并下沉形成月幔;密度小、容易漂浮的斜长石则聚集在月球表面形成月壳;不相容的矿物则最终形成克里普岩分布于月壳与月幔之间^[30,35]。岩浆洋的结晶分异导致月球化学特征产生差异。通过分析月球正面和背面岩石矿物特征分布的不均一性,可以推测月球在结晶分异阶段的化学元素存在原始不均一性,从而在随后的撞击盆地及月海玄武岩充填时导致月球化学特征分布的不均一性。Jolliff 等利用月球 Clementine 多光谱数据和 Lunar Prospector 伽马谱数据,根据岩石类型将月球表面划分为风暴洋克里普岩质地体、长石质高地地体和南极艾肯盆地地体 3 种,说明

月球化学特征分布具有明显的差异性^[31]。月球正面和背面的月海区域内玄武岩富含 Ti,而其他高地岩石则富含硅铝酸盐矿物,这说明月球形成月海玄武岩与高地岩石的差异,与月球化学元素分布存在原始不均一性具有密切的联系。

月球正面和背面月海玄武岩分布的高度不均一,说明月球正面的岩浆分布远远大于月球背面,而导致这种分布状况的原因可能有两种:第一种是在月球形成初期,由于月球正面和背面的重力场存在差异,使得月球在转动时更多的岩浆移动到月球正面,而只有少量的岩浆保留在月球背面,导致月球内部岩浆喷发的不对称性;第二种是月球早期的化学成分分布的不均一性,使得月球正面分布的放射性元素比背面多,同时由于放射性元素在加热时温度不同,导致月球正面比背面的温度高,所以在后期月球表面遭受陨石撞击时,撞击体在月球正面受到的阻力小,而背面由于温度低,则受到的阻力大,从而在月球正面更容易形成直径较大的撞击坑。

在月球形成初期,不仅月球内部可能形成初始的差异,月壳厚度也可能形成差异。根据 GRAIL 重力数据反演得到的月壳厚度,可以发现月球正面的平均月壳厚度比背面小,进而推测月壳厚度形成差异的可能性,月球在最终形成月壳时,岩浆洋结晶分异不均一,导致月球背面的月壳比正面厚。因此,月球内部岩浆分布的不均一和月壳厚度的不均一为形成月球正面与背面的地质构造差异提供了初始条件。

4.2 内、外动力地质作用并存阶段(3.16~4.20 Ga)

月球在以内动力地质作用为主的阶段形成月壳厚度及化学成分的初始差异之后,经历了大撞击阶段与玄武岩充填阶段,此过程的形成包含两种动力地质作用,即外动力地质作用和内动力地质作用。大撞击阶段使月球表面形成了很多大型撞击盆地,并且月球正面形成的大型撞击盆地数量比背面多。对于撞击盆地形成的不均一性,Miljkovic 等认为是月球正面与背面内部温度及月壳厚度的差异引起的^[39]。月球正面分布的生热元素和火山活动比背面活跃,导致月球正面的温度比背面高,因此,当撞击体撞击月球表面时,撞击体在月球正面受到的阻力比背面小,从而其表面形成的撞击盆地直径比背面大。

大型撞击事件后发生的月海泛滥,导致大量玄武岩浆溢流出月球表面,填充撞击盆地形成月海,塑造了月球表面最主要的大尺度地形特征^[40-41]。充填

月球盆地的熔岩在分布和数量上存在差异,月球正面盆地的玄武岩溢漫程度远远大于月球背面盆地。月海玄武岩的不对称分布被认为是在月球背面一侧月壳厚度大以及地球引力作用的结果。但月海玄武岩的不均匀分布不单单是由月球厚度控制,应该还有其他控制因素,如后期热流和岩浆产出率的变化等^[9]。

4.3 以外动力地质作用为主的阶段(0~3.16 Ga)

随着月球大量大型撞击作用以及月海充填作用的基本停止,月球正面和背面的演化主要以外动力地质作用为主,包括月球的晚期撞击和月壤的形成阶段。在此期间,月球正面和背面除受小规模陨石撞击之外,还受空间风化作用的影响,使月球表层岩石产生强烈的风化作用,从而形成月壤。因此,在以外动力地质作用为主的阶段,月球正面和背面的地质演化差异基本停止,只有月球表面还在遭受着小规模陨石撞击和空间风化作用,此过程对形成月球正面与背面的差异影响较小。

5 结 语

(1)通过分析月球正面和背面的物理特征、岩石矿物特征及构造特征分布差异,可以解释月球正面与背面的地质演化差异。月球正面和背面的物理特征分布差异可能反映两者内部结构及演化存在不对称性;岩石矿物特征分布差异则可能表明月球正面和背面的化学分布存在原始不均一;构造特征分布差异可能反映两者所受到构造应力的差异。

(2)月球正面和背面的物理特征、化学分布和构造特征都存在很大的不同。以内动力地质作用为主的阶段和内外动力地质作用并存阶段是造成月球正面和背面地质演化差异的两个主要阶段,而以外动力地质作用为主的阶段对月球正面和背面地质演化差异的形成影响较小。

本文所使用的“嫦娥一号”数据来自中国科学院国家天文台,GRAIL 重力数据和 Clementine 数据下载自美国 NASA PDS 影像数据节点,月壳厚度数据使用巴黎地球物理学院 Mark A. Wieczorek 研究员的研究成果,在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献 :

References :

- [1] WOOD A. Asymmetry of the Moon[C]// Lunar and Planetary Institute. Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference: Volume 4. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1973:790-792.

- [2] ROBERTSON F L, KAULA W M. Apollo 15 Laser Altimeter[R]. Washington DC:NASA,1972.
- [3] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, TRASK N J. The Geologic History of the Moon[R]. Washington DC:USGS,1987.
- [4] STUART-ALEXANDER D E. Geologic Map of the Central Far Side of the Moon[R]. Washington DC:USGS,1978.
- [5] WOOD C A, GIFFORD A W. Evidence for the Lunar Big Backside Basin[C]//Lunar and Planetary Institute. Abstracts of Papers Presented to the Conference on Multi-ring Basins: Formation and Evolution. Houston:Lunar and Planetary Institute,1980:121-123.
- [6] SPUDIS P D R A, GILLIS J J, REISSE R A. Ancient Multiring Basins on the Moon Revealed by Clementine Laser Altimetry [J]. Science, 1994, 266: 1848-1851.
- [7] ZUBER M T, SMITH D E, LEMOINE F G, et al. The Shape and Internal Structure of the Moon from the Clementine Mission[J]. Science, 1994, 266: 1839-1843.
- [8] SCHULTZ P. Why Is the Lunar Nearside So Different than the Farside? [J]. Sky and Telescope, 2013 (11):22.
- [9] CADOGAN P H. Oldest and Largest Lunar Basin? [J]. Nature, 1974, 250: 315-316.
- [10] WHITAKER E A. The Lunar Procellarum Basin[C]//Lunar and Planetary Institute. Abstracts of Papers Presented to the Conference on Multi-ring Basins: Formation and Evolution. Houston:Lunar and Planetary Institute,1980:105-111.
- [11] FELDMAN W C, GASNAULT O, MAURICE S, et al. Global Distribution of Lunar Composition: New Results from Lunar Prospector[J]. Journal of Geophysical Research:Planets, 2002, DOI:10.1029/2001JE001506.
- [12] BYRNE C J. A Large Basin on the Near Side of the Moon[J]. Earth, Moon, and Planets, 2007, 101(3): 153-188.
- [13] NEUMANN G A, ZUBER M T, SMITH D E, et al. The Lunar Crust: Global Structure and Signature of Major Basins [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 1996, 101(E7): 16841-16864.
- [14] ISHIHARA Y, GOOSSENS S, MATSUMOTO K, et al. Crustal Thickness of the Moon: Implications for Far-side Basin Structures [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19): 82-90.
- [15] WIECZOREK M A, JOLLIFF B L, KHAN A, et al. The Constitution and Structure of the Lunar Interior [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 221-364.
- [16] WIECZOREK M A, NEUMANN G A, NIMMO F, et al. The Crust of the Moon as Seen by GRAIL [J]. Science, 2012, 339: 671-675.
- [17] NAMIKI N, IWATA T, MATSUMOTO K, et al. Far-side Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya) [J]. Science, 2009, 323: 900-905.
- [18] 鄢建国, 李 斐, 平劲松, 等. 基于“嫦娥一号”跟踪数据的月球重力场模型 CEGM-01 [J]. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2843-2851.
- YAN Jian-guo, LI Fei, PING Jin-song, et al. Lunar Gravity Field Model CEGM-01 Based on Tracking Data of Chang'e-1 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(12): 2843-2851.
- [19] CAHILL J T, LUCEY P G. Radiative Transfer Modeling of Lunar Highlands Spectral Classes and Relationship to Lunar Samples [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, DOI:10.1029/2006JE002868.
- [20] STOEFLER D, KNOELL H D, MARVIN U B, et al. Recommended Classification and Nomenclature of Lunar Highland Rocks: A Committee Report [C] // Lunar and Planetary Institute. Conference on the Lunar Highlands Crust. Houston:Lunar and Planetary Institute, 1980: 51-70.
- [21] TAYLOR G J, WARREN P, RYDER G, et al. Lunar Rocks [M] // HEIKEN G H, VANIMAN D T, FRENCH B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 183-284.
- [22] 凌宗成, 刘建忠, 张 江, 等. 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 [J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 107-120.
- LING Zong-cheng, LIU Jian-zhong, ZHANG Jiang, et al. The Lunar Rock Types as Determined by Chang'e-1 IIM Data: A Case Study of Mare Imbrium-Mare Frigoris Region (LQ-4) [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 107-120.
- [23] JOLLIFF B L, WIECZOREK M A, SHEARER C K, et al. New Views of the Moon [M]. Chantilly: Mineralogical Society of America, 2006.
- [24] MCEWEN A S, ROBZNSON M S, ELIASON E M, et al. Clementine Observations of the Aristarchus Region of the Moon [J]. Science, 1994, 266: 1858-1862.
- [25] PIETERS C M, STAUD M I, FISCHER E M, et al. A Sharper View of Impact Craters from Clementine Data

- [J]. *Science*, 1994, 266: 1844-1848.
- [26] 陈建平, 王翔, 高光大, 等. 基于光谱特征的月球岩性分类方法研究: 以 Apollo 16 登月区域为例[J]. *岩石学报*, 2016, 32(1): 77-86.
CHEN Jian-ping, WANG Xiang, GAO Guang-da, et al. On the Methodology of Lunar Lithological Classification Based on Spectral Characteristics as Exemplified from Apollo 16 Moon Landing Area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(1): 77-86.
- [27] 许延波, 颜丹平, 俞天石, 等. 雨海地区晚雨海世—爱拉托逊纪月海玄武岩充填过程研究[J]. *地质学报*, 2012, 86(8): 1306-1319.
XU Yan-bo, YAN Dan-ping, YU Tian-shi, et al. The Filling Process of Mare Basalts from Late Imbrian to Eratosthenian in Mare Imbrium[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(8): 1306-1319.
- [28] TAYLOR L A, PIETERS C M, KELLER L P, et al. Lunar Mare Soils; Space Weathering and the Major Effects of Surface-correlated Nanophase Fe[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E11): 27985-27999.
- [29] HEAD J W. Lunar Volcanism in Space and Time[J]. *Reviews of Geophysics*, 1976, 14(2): 265-300.
- [30] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
OUYANG Zi-yuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005.
- [31] JOLLIFF B L, GILLIS J J, HASKIN L A, et al. Major Lunar Crustal Terranes: Surface Expressions and Crust-mantle Origins[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4197-4216.
- [32] PIETERS C M, HEAD J W, GADDIS L, et al. Rock Types of South Pole-Aitken Basin and Extent of Basaltic Volcanism [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E11): 28001-28022.
- [33] 郭弟均, 刘建忠, 籍进柱, 等. 月球的全球构造格架初探[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(10): 3543-3554.
GUO Di-jun, LIU Jian-zhong, JI Jin-zhu, et al. Preliminary Study on the Global Geotectonic Framework of the Moon[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3543-3554.
- [34] 陈建平, 王翔, 许延波, 等. 基于多源数据的月球大地构造纲要图编制: 以 LQ-4 地区为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 1-14.
CHEN Jian-ping, WANG Xiang, XU Yan-bo, et al. Compilation of the Lunar Geotectonic Outline Map Based on Multisource Data: A Case Study of LQ-4 Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 1-14.
- [35] WOOD J A, DICKEY J J, MARVIN U B, et al. Lunar Anorthosites and a Geophysical Model of the Moon [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, 1: 965-988.
- [36] 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 等. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 45-61.
GUO Di-jun, LIU Jian-zhong, ZHANG Li, et al. The Methods on Lunar Geochronology Study and the Subdivisions of Lunar Geologic History[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 45-61.
- [37] 张福勤, 李春来, 邹永廖, 等. 月球的构造演化: 嫦娥月图解释的理论基础[J]. *地球化学*, 2010, 39(2): 110-122.
ZHANG Fu-qin, LI Chun-lai, ZOU Yong-liao, et al. Lunar Tectonic Evolution: A Conceptual Basis for Interpreting the Lunar Photographic Images Achieved by Chang'e-1 Orbiter[J]. *Geochimica*, 2010, 39(2): 110-122.
- [38] 丁孝忠, 王梁, 郭弟均, 等. 月球哥白尼纪地层特征与地质演化研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(1): 10-18.
DING Xiao-zhong, WANG Liang, GUO Di-jun, et al. Study on Geological Evolution and Stratigraphic Features of the Copernican Period of the Moon[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(1): 10-18.
- [39] MILJKOVIC K, WIECZOREK M A, COLLINS G S, et al. Asymmetric Distribution of Lunar Impact Basins Caused by Variations in Target Properties[J]. *Science*, 2013, 342: 724-726.
- [40] 姚美娟, 陈建平, 王翔, 等. 基于最优分割分级法的月球撞击坑分级及其演化分析[J]. *岩石学报*, 2016, 32(1): 119-126.
YAO Mei-juan, CHEN Jian-ping, WANG Xiang, et al. The Grading and Evolution Analysis of Lunar Crater Based on Optimum Partition and Grading Method[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(1): 119-126.
- [41] 王娇, 周成虎, 程维明, 全月球撞击坑的空间分布模式[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2017, 42(4): 512-519.
WANG Jiao, ZHOU Cheng-hu, CHENG Wei-ming. The Spatial Pattern of Lunar Craters on a Global Scale[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 512-519.