

doi: 10.12029/gc20231021001

金铭, 丁孝忠, 韩坤英, 陈剑, 刘敬稳, 庞健峰, 王颖, 刘力维. 2024. 基于多源遥感数据的月球智海盆地特征分析及演化模式研究[J]. 中国地质, 51(6): 1807-1821.

Jin Ming, Ding Xiaozhong, Han Kunying, Chen Jian, Liu Jingwen, Pang Jianfeng, Wang Ying, Liu Liwei. 2024. Characteristics analysis and evolution model of Ingenii Basin on the Moon based on multisource remote sensing data[J]. Geology in China, 51(6): 1807-1821(in Chinese with English abstract).

基于多源遥感数据的月球智海盆地特征分析及演化模式研究

金铭^{1,2}, 丁孝忠^{1,2}, 韩坤英^{1,2}, 陈剑³, 刘敬稳⁴, 庞健峰^{1,2}, 王颖^{1,2,5}, 刘力维^{1,2,5}

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局全国地质编图研究中心, 北京 100037; 3. 山东大学空间科学研究学院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209; 4. 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; 5. 中国地质科学院研究生院, 北京 100037)

摘要:【研究目的】月海撞击盆地是月表最重要的地质单元之一, 其地质演化特征受内、外动力地质作用的综合影响。古老的智海盆地位于月球背面南极—艾肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地内的西北部边界位置, 这一特殊的地理位置使其对于认识月球结构与成分、内外动力地质作用演化过程具有重要意义。【研究方法】本文从可见光影像、月壤成熟度、地形、坡度、粗糙度等表面特征, 布格重力异常、月壳厚度等深部特征以及元素、矿物丰度等物质特征多个维度对智海盆地进行综合解析。【研究结果】智海盆地区域具有极不对称性, 其内部地形呈西北高东南低的特征, 发育奇特的漩涡月貌, 除漩涡与陡峭的盆壁及撞击坑壁区域外普遍具有较高的月壤成熟度。形成智海盆地的巨大撞击作用引起高密度月幔岩石圈隆起, 导致盆地中央表现重力正异常, 对应的月壳厚度也最薄。月壳厚度与布格重力异常之间具有线性反比关系, 相关系数 r 为-0.94。盆地内部月海玄武岩充填区相比邻区具有高铁、高钛特征, 智海以外区域的物质成分特征普遍与撞击靶区相近。在对智海盆地表面特征、深部特征及物质成分等多个维度特征进行解析的基础上, 完成智海盆地区域地质演化模式分析。【结论】智海盆地的地貌与成分受到内、外动力地质作用的综合影响, 表现出南极—艾肯地体和长石质高地地体的双重特征, 是理解月球早期演化历史的一个窗口。

关键词: 智海盆地; 月表特征; 深部特征; 物质成分; 地质演化; 月球地质调查工程

创新点: (1)首次对智海盆地从表面特征、深部特征及成分特征等多角度进行全方位综合解析; (2)对地质特征较为复杂的智海盆地区域地质演化历史进行详细分析, 有望为建立月球背面月海盆地系统全面的地质演化模式提供参考。

中图分类号: P237; P184.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)06-1807-15

Characteristics analysis and evolution model of Ingenii Basin on the Moon based on multisource remote sensing data

收稿日期: 2023-10-21; 改回日期: 2024-03-18

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230007, DD20221645)、国家自然科学基金项目(41941003)和科技基础工作专项(2015FY210500)联合资助。

作者简介: 金铭, 女, 1984年生, 助理研究员, 主要从事地质测绘和行星遥感研究; E-mail: jinmingjsh@163.com。

通讯作者: 丁孝忠, 男, 1963年生, 研究员, 主要从事区域地质与地质填图研究; E-mail: xiaozhongding@sina.com。

JIN Ming^{1,2}, DING Xiaozhong^{1,2}, HAN Kunying^{1,2}, CHEN Jian³, LIU Jingwen⁴, PANG Jianfeng^{1,2},
WANG Ying^{1,2,5}, LIU Liwei^{1,2,5}

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *National Geological Mapping Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 3. *Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar–Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, Shandong, China*; 4. *Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China*;
5. *Graduate School of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*)

Abstract: This paper is the result of moon geological survey engineering.

[Objective] Mare basins constitute pivotal geological units on the lunar surface. Their geological evolution characteristics are comprehensively affected by both endogenic and exogenic dynamic geological processes. The ancient Ingenii Basin is located on the northwest rim of South Pole–Aitken Basin on the lunar farside. This special geographical location endows it with great significance for understanding lunar structure, composition, and the evolution of these dynamic geological processes. **[Methods]** This study conducts a comprehensive and multi–faceted analysis of Ingenii Basin, encompassing surface attributes like albedo variations, soil maturity indices, topography, slope gradients, and roughness, alongside deep–seated features such as Bouguer gravity anomalies, crustal thickness, and compositional characteristics in elemental and mineral abundances. **[Results]** The region of Ingenii Basin exhibits pronounced asymmetry, with a topographic profile characterized by elevated northwest regions and lower–lying southeast areas. Distinctive swirl patterns adorn the basin. The majority of the terrain, excluding swirls, steep basin walls, and impact crater walls, generally displays high maturity. The Ingenii Basin–forming impact event uplifted high–density mantle materials beneath the Moho surface, resulting in a positive gravity anomaly at the basin’s center, where the crustal thickness attains its minimum. A linear inverse correlation emerges between crust thickness and Bouguer gravity anomalies, particularly pronounced for gravity anomalies exceeding 200 mGal. Within the basin’s mare basalt regions, FeO and TiO₂ abundances are elevated, while compositional traits outside the Ingenii region generally mirror those of the impacted target. Through a multi–dimensional examination of surface, subsurface, and compositional features, we delineated the regional geological evolution mode of Ingenii Basin. **[Conclusions]** The landform and composition of the Ingenii Basin are comprehensively affected by endogenic and exogenic dynamic geological processes, exhibiting the dual characteristics of the South Pole – Aitken Terrane and the Feldspathic Highlands Terrane, which is a window to understand the early evolutionary history of the Moon.

Key words: Ingenii Basin; surface features; subsurface features; composition; geological evolution; moon geological survey engineering

Highlights: (1) For the first time, an exhaustive and multi–faceted analysis was undertaken encompassing the superficial, subsurface, and compositional attributes of Ingenii Basin, offering a holistic understanding of its characteristics; (2) A detailed analysis of the intricate geological evolution history of Ingenii Basin, characterized by its complex geological features, is anticipated to serve as a pivotal reference in the establishment of a comprehensive geological evolution model for the lunar mare basin system residing on the farside of the Moon.

About the first author: JIN Ming, female, born in 1984, assistant researcher, mainly engaged in geological mapping and planetary remote sensing research; E–mail: jinmingjsh@163.com.

About the corresponding author: DING Xiaozhong, male, born in 1963, researcher, mainly engaged in regional geology and geological mapping research; E–mail: xiaozhongding@sina.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20230007, No.DD20221645), National Natural Science Foundation of China (No.41941003), Science and Technology Basic Work Special Project (No.2015FY210500).

1 引 言

20 世纪 50 年代末,由美国和苏联引领,人类开启了对月球的深空探测。第一次探月高潮持续近

20 年后探月活动进入休眠期,直至 20 世纪 90 年代第二次探月高潮逐渐兴起。美国、欧空局、中国、日本、印度等国家与组织相继发射各种月球探测器,获取了大量轨道和就位巡视探测数据。

月球探测是一个国家综合国力和科学技术水平的重要体现,中国探月工程的“三步走”战略成功实施后,大量高质量科学研究成果不断涌现,如嫦娥五号(Chang'e-5, CE-5)取样返回了目前最年轻的月海玄武岩样品,研究证明在约 20 亿年前月球仍存在岩浆活动,使目前已知的月球地质寿命“延长”了 9 亿年(Che et al., 2021; Li et al., 2021);嫦娥四号(Chang'e-4, CE-4)实现了人类首次月球背面软着陆和巡视勘察。月球背面的南极—艾肯(South Pole-Aitken Basin, SPA)盆地直径约 2500 km,是月球上规模最大、撞击最深且最古老的撞击盆地,对于认识月球壳幔结构与成分、形成演化历史等重大科学问题具有重要意义。CE-4 任务选择在 SPA 盆地内的冯·卡门撞击坑进行软着陆和巡视探测,近年基于其获取的探测数据产生了一系列重要研究成果(Gou et al., 2020; Huang et al., 2020; Lin et al., 2020; Jia et al., 2021; Chen et al., 2022a)。月球南极永久处于阴影中的巨大陨石坑中可能存在冰,能够支持未来人类在月球上居住,因此,在南极—艾肯盆地区域内进行地质研究将有利于对水冰的探测。

月球背面 SPA 盆地内分布有 11 个直径大于 200 km 的大型撞击构造(撞击盆地),其中 8 个撞击盆地底部覆盖有后期岩浆喷涌或溢流产生的玄武岩单元。大型撞击及后期岩浆充填形成的月海盆地是月表最重要的地质单元之一,其地质演化特征受内、外动力地质作用的综合影响,因此研究月海盆地的形成演化具有重要意义(王梁等, 2015; 籍进柱等, 2015; 刘敬稳等, 2016)。位于 SPA 盆地内部靠近 SPA 盆地的边界位置,有一类撞击盆地跨越 SPA 盆地的瞬时坑和改造区,其中阿波罗盆地、智海盆地、薛定谔盆地底部充填内动力地质作用形成的月海玄武岩,这类盆地对于认识 SPA 盆地结构与成分、区域地质作用及演化历史具有重要意义。已有学者对阿波罗盆地(Potter et al., 2018; 郭弟均等, 2018)和薛定谔盆地(Kramer et al., 2013; Hurwitz and Kring, 2015)的地形地貌、物质成分及演化历史等进行了不同程度的解译分析,却鲜有研究对智海盆地的形成演化进行系统剖析。

本文基于多源遥感数据产品围绕智海盆地表面特征、深部特征、物质成分特征进行较为系统的解译与分析,在此基础上建立智海盆地区域地质演化模式,以期窥探月壳幔结构和成分、SPA 盆地

以及月球形成演化过程提供一些线索。

2 研究区概况及研究数据

2.1 研究区概况

智海盆地位于 SPA 盆地西北部边界位置(图 1),直径约 319 km,形成于古老的艾肯纪(4.22~3.92 Ga)(Guo et al., 2024)。智海盆地跨越 SPA 盆地的瞬时坑和改造区,靠近 SPA 盆缘部分的月壳厚度约为 40 km,而靠近 SPA 盆地中心部分的月壳厚度约 20 km,具有极不对称的月壳结构,这一特殊的地理位置使得智海盆地内可能具有不同的物质来源;另外,其盆底大面积充填月海玄武岩,并发育有奇特的漩涡构造。因此,有必要对智海盆地的月壳结构及物质成分进行更为详细的研究。

2.2 使用数据

2009 年美国发射的月球轨道探测器(LRO)上携带的激光高度仪(LOLA)获得的月表高程数据是目前广泛应用的月表地形数据,空间分辨率为 118 m (Smith et al., 2010);本文使用该数据进行表面地形分析。利用 PDS (<https://pds-geosciences.wustl.edu>)上公布的 660 阶重力场模型进行深部特征分析,该数据分辨率为 8 pix/deg。Lemelin et al.(2016)基

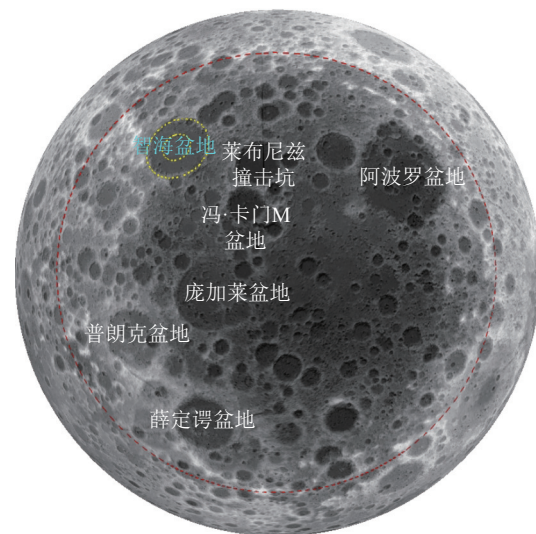


图 1 智海盆地在三维月球的位置示意图(底图为 LOLA 高程图,以 SPA 盆地为中心,其中黄色虚线为智海盆地的内外环,红色虚线为南极—艾肯盆地外环)

Fig.1 Illustrative map of the Ingenii Basin region on the moon surface (featuring a LOLA elevation base map centered on SPA Basin, with yellow dotted line outlining the inner and outer rings of Ingenii Basin, and the red dotted line marking the outer ring of the South Pole-Aitken Basin)

于 Kaguya MI (Multiband Imager) 多光谱数据制作了斜长石、斜方辉石、单斜辉石、橄榄石等四种月球主要矿物的丰度产品数据及 FeO、TiO₂ 含量分布图数据 (<https://astrogeology.usgs.gov/maps/lunar-kaguya-multiband-imager-mosaics>), 空间分辨率为 59 m, 本文使用该数据对智海盆地区域的物质成分分布特征进行解译。另外, 还使用了克莱门汀 (Clementine) 多光谱数据用于月表光谱特征分析。

3 智海盆地月表特征

尽管智海盆地形成于古老的艾肯纪, 由于后期在该区域仅有一些破坏程度有限的小型撞击作用, 使得其在月球轨道遥感影像中依然清晰可见 (图 2a)。智海盆地形成后, 有两次撞击事件完全作用在盆地内部, 形成直径约 120 km 的汤姆孙撞击坑与直径约 100 km 的汤姆孙 M 撞击坑。后期玄武岩泛滥时期, 玄武岩流充填了部分智海盆地的底部, 并淹没了这两个撞击坑底部, 形成智海。

月表发育有一种奇特的地貌类型——漩涡, 具有宽阔、明亮的反照率, 被较暗的非漩涡区域分隔开。Kramer et al. (2011) 对智海盆地中的典型漩涡特征进行了详细的分析。漩涡在智海中广泛分布,

形成漩涡群 (图 2a)。在对应的成熟度图像中可见, 漩涡所在区域普遍具有更高的光学成熟度 (OMAT) 值, 即月壤成熟度更低 (图 2b), 由此推断漩涡形成于智海玄武岩就位之后。漩涡的形成机制长期以来一直存在争议, 普遍认为与磁场异常有关 (Glotch et al., 2015)。也有学者利用米级分辨率的地形数据研究智海中的漩涡, 发现影像中明亮的漩涡区域高程明显低于较暗区域的高程, 而尘埃输运是受高程变化影响最大的过程, 因此其认为该处漩涡形成机制为尘埃输运 (Domingue et al., 2022)。

表面地形特征是识别外动力地质作用形成撞击盆地的重要标志之一。智海盆地所在的西北部与东南部地势呈现西高东低, 具有明显二分性特征 (图 3)。该盆地西北方向的平均地形高程约 3 km, 而东南方向的平均地形高程约 -3 km, 高程骤降 6 km, 而智海盆地撞击事件恰好发生于这一区域中, 其挖掘深度约 10 km, 盆地内部最低高程约 -6 km。由图 3 中西北—东南 (NW—SE) 向剖面图可见, 智海盆地内部由西北至东南向的高程同样逐渐降低, 由 -3 km 降至约 -4 km, 平均高程约为 -3.5 km; 而由西南—东北 (SW—NE) 向剖面图可见, 沿 SPA 盆缘切线方向智海盆地两侧的高程值相近。

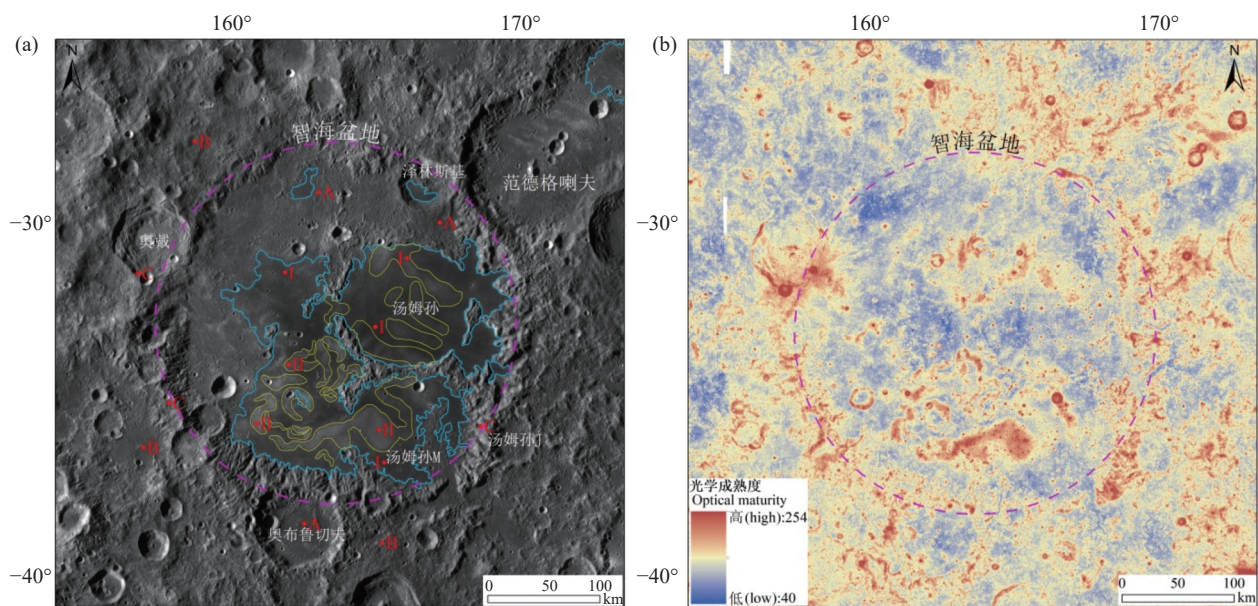


图 2 智海盆地区域 WAC 影像 (a)、光学成熟度 (OMAT) 图像 (b)
蓝色曲线为叠加的月海玄武岩边界, 黄色曲线为典型漩涡区域, 红色标注为图 7 提取光谱点位 (a)

Fig. 2 WAC image (a) and optical Maturity (OMAT) image (b) of the Ingenii Basin region

The blue curve represents the superimposed mare basalt boundary, the yellow curve represents the typical swirl region, and the red annotation indicates the spectral extraction points in Fig. 7

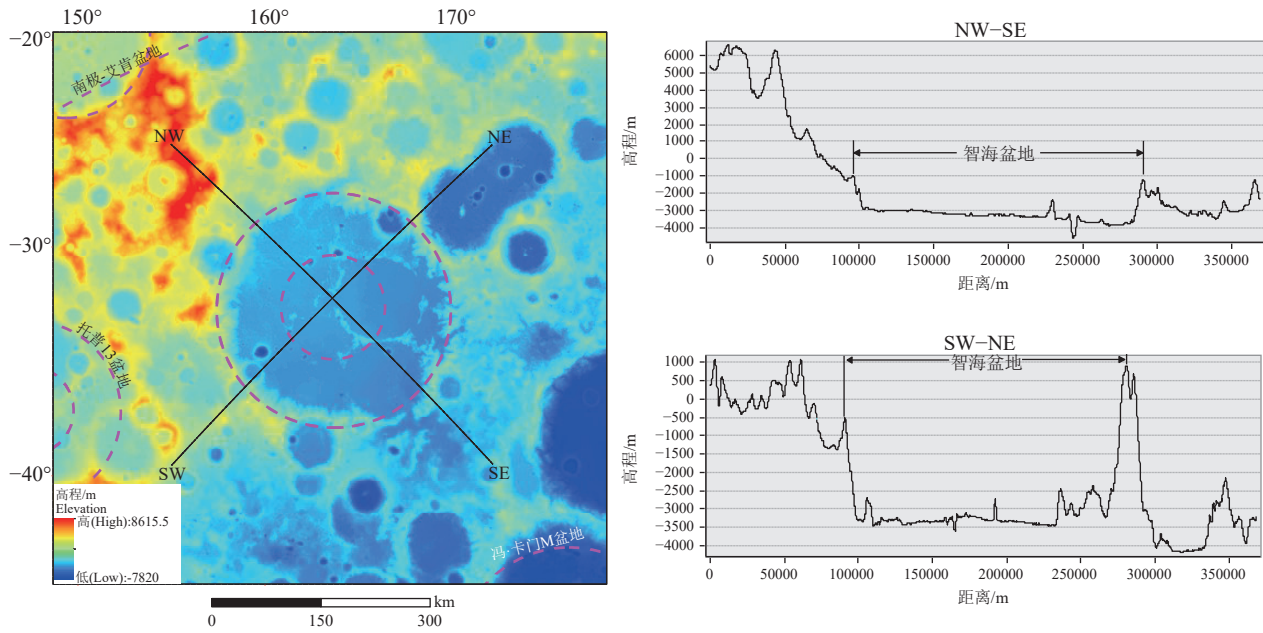


图 3 智海盆地区域 LOLA 高程数据及西北—东南(NW—SE)、西南—东北(SW—NE)方向的高程剖面
Fig.3 LOLA elevation map and elevation profiles along the northwest-southeast (NW—SE) and southwest-northeast (SW—NE) directions within the Ingenii Basin

其东北部范德格喇夫撞击坑形成于更年轻的海海纪(3.92~3.85 Ga),底部高程深达-4 km。尽管其直径小于智海盆地,却具有更低的高程值,这可能是由于撞击过程中的撞击角度不同,或者智海盆地后期遭遇特定地质事件或地质作用,如玄武岩充填抬高了盆地底部高程。综合两幅剖面图可见,智海盆地内部地形整体相对平坦,由于后期撞击作用以及溅射、垮塌等作用的破坏,一些地区表面呈现高程约几百米的凸起或凹陷。

为更好地描述地形起伏情况,本文基于高程数据进行了坡度分析及表面粗糙度分析。利用 LOLA 地形数据基于 ArcGIS 平台提取了智海盆地区域每个像元的坡度,将所有坡度值进行分级渲染(图 4a)。像元坡度值代表局部区域在该点的倾斜程度,高程变化越大则坡度值越大。智海盆地的盆壁与撞击坑的坑壁所处区域具有较大的坡度值,普遍大于 13°。但智海盆地的盆壁较宽,其在瞬时形成后,盆壁物质会因重力等作用发生多次垮塌,因此盆壁的坡度表现出陡坡与缓坡交替出现的阶梯状特征。智海盆地的盆底和撞击坑底部地形较为平坦,坡度值普遍小于 4°。撞击作用挖掘并抛射的溅射物区域坡度值居中,普遍在 4°~13°。

表面粗糙度是另一种刻画月表地形地貌起伏变

化的定量指标,粗糙度指数越高代表月球表面越粗糙。本文使用了 NASA PDS(行星数据系统 <https://pds-geosciences.wustl.edu>)上公布的粗糙度指标数据,空间分辨率约为 3500 m。在粗糙度图(图 4b)中,研究区大致可分为三种类型:智海盆地内月海玄武岩充填区域具有最低的粗糙度,智海盆地底部和大型撞击坑底部没有玄武岩充填的区域具有居中的粗糙度,除此之外的其他区域粗糙度最高。由于粗糙度图像的分辨率远低于坡度图像,在粗糙度图像中很多地形地貌细节被掩盖,因此,粗糙度数据更适用于宏观尺度的地形变化探测,如对于大型撞击的识别;同时,具有平滑表面(如月海玄武岩)的月貌单元在粗糙度图像中具有很高的辨识度,因此,粗糙度数据也适用于识别未被后期破坏作用改造的月海玄武岩单元及亮平原等地区。

4 智海盆地深部特征

重力异常特征与月表地形起伏和月球内部物质分布密切相关,从重力数据中消除地形起伏的效应可以得到仅与内部物质特征相关的布格重力异常(Maria and David, 1994; Wiczorek and Phillips, 1998)。在布格重力异常图(图 5a)上可见,智海盆地中央相比周边具有更高的布格重力异常值,即

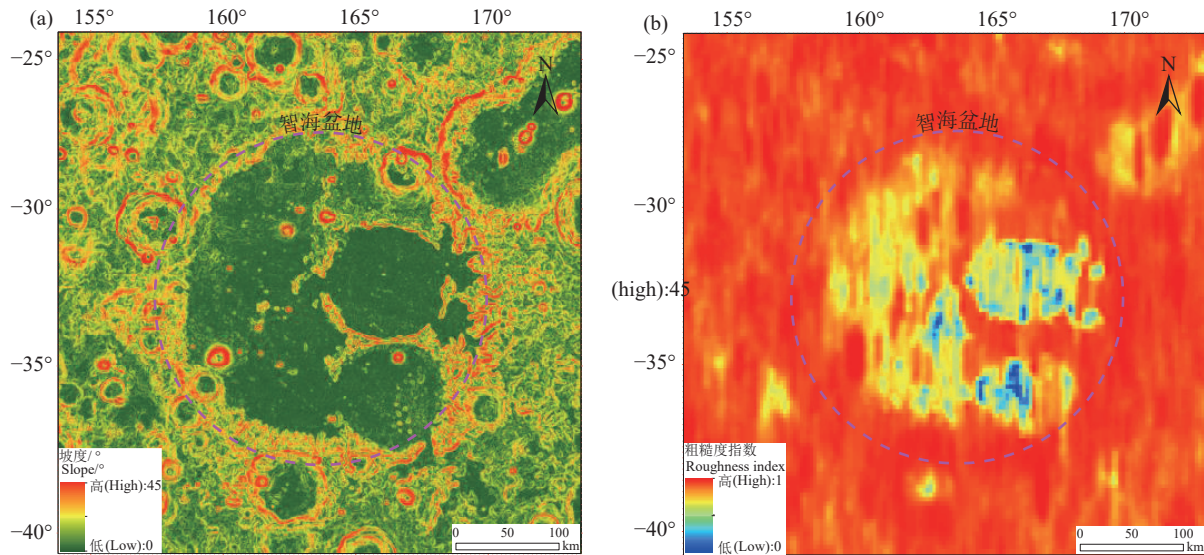


图4 智海盆地地区基于LOLA高程数据计算的坡度图(a)及粗糙度图(b)
Fig.4 Slope distribution (a) and roughness map (b) of Ingenii Basin, derived from LOLA elevation data

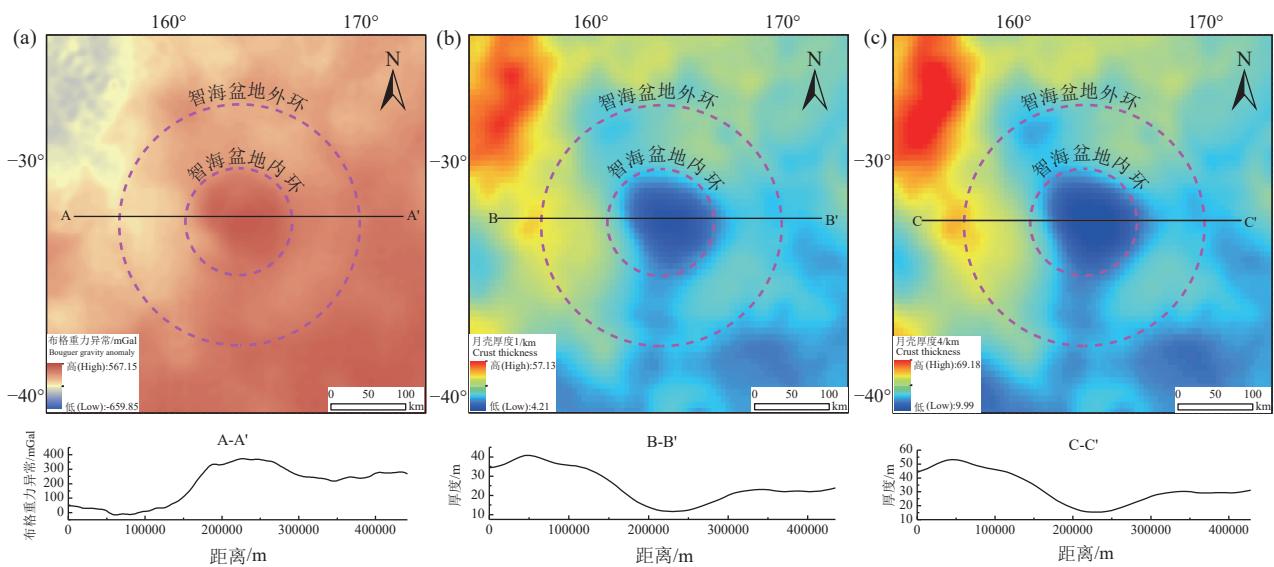


图5 智海盆地地区布格重力异常图(a)、模型1的月亮厚度图(b)、模型4的月亮厚度图(c)(Wieczorek et al., 2013)
Fig.5 Bouguer gravity anomaly map (a), crustal thickness map of Model 1 (b) and Model 4 (c) in the Ingenii Basin region (Wieczorek et al., 2013)

中央表现重力正异常,重力异常区域的直径约为140 km。中央区域较高的布格重力异常指示这一地区内部具有更高密度的物质,这种地质现象普遍称为质量瘤。根据目前的认识,质量瘤的成因大致可归纳为三个方面:高密度的莫霍面下伏月幔抬升、高密度幔源的岩浆充填、高密度陨石物质聚集(杜劲松等, 2010; 陆天启, 2020)。由于智海盆地中央正重力异常区域的表面地形地貌未显示出与周

边区域的明显差别(图3),因此推测智海盆地中央的重力异常可能是形成智海盆地的巨大撞击作用引起莫霍面隆起和(或)月亮底部高密度岩浆局部上涌所致。

另外,基于重力数据与地形数据可以推测月亮厚度。不同学者发展出各种推算月亮厚度的分布模型。Wieczorek et al.(2013)基于GRAIL(Gravity Recovery and Interior Laboratory)重力场数据构建

的 4 个月壳厚度模型应用最为广泛。由于模型计算时选取物质密度的差别, 其中模型 1 与模型 2 模拟的月壳厚度较薄, 而模型 3 与模型 4 的模拟结果更厚, 尽管厚度值有差异, 不同模型展现出的厚度变化趋势是一致的。为便于对比分析, 本文使用 Wiczorek et al.(2013)模型 1 和模型 4 的结果进行分析。如图 5b、5c 所示, 尽管两个模型推测结果的具体数值有差异, 但模型 1 与模型 4 对智海盆地区域月壳厚度的模拟分布图显示出一致的变化趋势, 即在盆地中央具有重力正异常的区域, 其月壳厚度更薄, 而盆地周边重力异常较低的区域具有更厚的月壳。将区域内每个像元对应的布格重力异常值与模型 1 推算的月壳厚度值在二维平面进行投图(图 6), 可见月壳厚度与布格重力异常之间具有相关性, 两者呈线性反比关系, 相关系数 r 为 -0.94 , 尤其在布格重力异常值高于 200 mGal 时, 两者之间的散点图分布更为集中。

智海盆地中央的月壳相较周边更薄, 却具有更高的布格重力异常值, 据此推断导致盆地中央这种深部特征的主因是莫霍面抬升, 即使有高密度岩浆上涌的影响, 也仅为次要因素。根据中央区域的上述深部特征, 可划分出直径约 140 km 的智海盆地内环(图 5), 而盆地外环则根据表面特征确定。

5 智海盆地区域物质成分分析

5.1 光谱特征

不同物质具有不同的反射光谱特征, 因此, 多

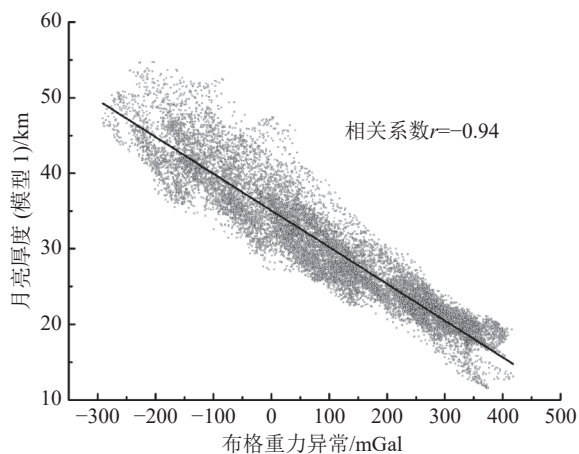


图 6 智海盆地区域布格重力异常值和月壳厚度的散点图
Fig.6 Scatter plot correlating Bouguer gravity anomalies and crustal thickness in the Ingenii Basin region

波段反射光谱影像能够表征不同区域物质成分的差别。Hiesinger et al.(2000)提出利用多光谱影像 415 nm 、 750 nm 和 950 nm 三个波段比值运算进行月海区域地质单元划分的方法, 本文使用该方法基于克莱门汀(Clementine)多光谱数据生成假彩色影像图。 $750 \text{ nm}/950 \text{ nm}$ 反射率比值能够表征 Fe^{2+} 含量的变化趋势和月壤成熟度, 值越高代表 Fe^{2+} 含量越高或月壤成熟度越低; $750 \text{ nm}/415 \text{ nm}$ 和 $415 \text{ nm}/750 \text{ nm}$ 反射率比值能够反映 Ti^{4+} 含量及月壤成熟度的变化趋势, 其中 $750 \text{ nm}/415 \text{ nm}$ 反射率比值越高对应更高的玻璃物质含量或较低的 Ti^{4+} 含量, 而 $415 \text{ nm}/750 \text{ nm}$ 反射率比值越高代表 Ti^{4+} 含量越高或玻璃物质越少; 上述三个反射率比值影像分别赋予红($750 \text{ nm}/950 \text{ nm}$)、绿($750 \text{ nm}/415 \text{ nm}$)、蓝($415 \text{ nm}/750 \text{ nm}$)三色通道, 合成假彩色影像图(图 7a)。区域北部普遍呈现绿色, 代表含有较高玻璃物质的成熟月壤; 智海及南部区域主要为黄绿色, 代表该区域月壤具有高铁、低钛特征; 智海盆地的盆壁位置、撞击坑坑壁及漩涡区域具有明亮的紫色调, 代表具有较高的 FeO 含量且成熟度较低。

“月船 1 号”上携带的 NASA 研制的月球矿物绘图仪(Moon Mineralogy Mapper, M^3)是目前所有月球轨道探测器中光谱分辨率最高的成像光谱仪。本文中, 分别在月海玄武岩、漩涡区域、盆壁/坑壁、撞击溅射物以及未被玄武岩覆盖的盆底区域提取 M^3 高光谱曲线(图 7b、c)。在整个可见光—近红外波段范围内月海玄武岩的反射率普遍低于盆底、盆壁/坑壁与溅射物区域。月海玄武岩、盆底物质、盆地溅射物具有较高成熟度(图 2b), 导致反射光谱曲线中矿物的吸收特征非常微弱(图 7b、c)。智海中漩涡区域相对附近月海非漩涡区域具有更低的成熟度和更高的反射率, 反射光谱曲线在 1000 nm 及 2000 nm 附近具有明显吸收特征, 光谱特征差异指示漩涡区域的物质与普通月海之间具有较大差异。

5.2 FeO 、 TiO_2 含量空间分布特征

光谱特征能够反映月表物质成分的趋势性特征, 而利用多/高光谱数据进行一系列计算能够获取月表物质的定量分析结果。 FeO 和 TiO_2 含量是决定月表岩石类型的主要参考依据, 因此分析 FeO 和 TiO_2 含量的空间分布特征有助于厘清区域物质成

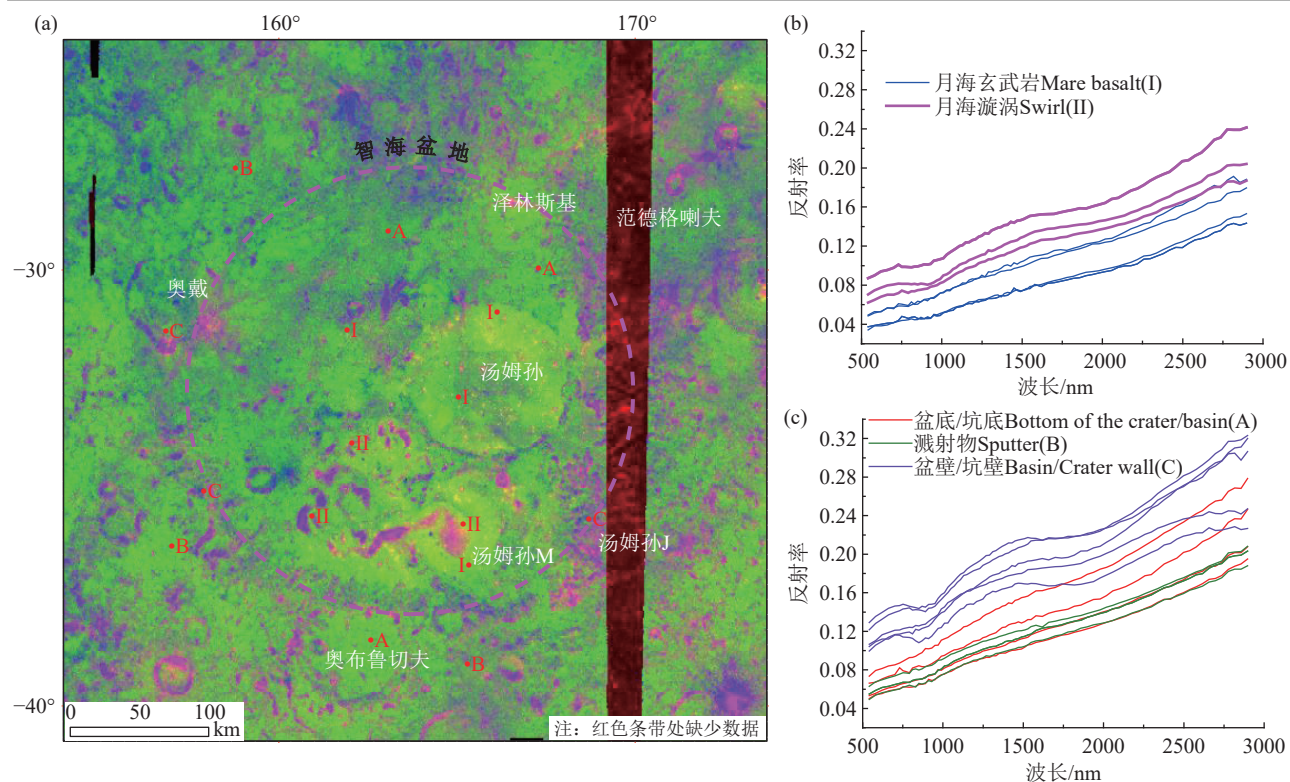


图7 智海盆地区域假彩色影像图(a)及不同位置的典型高光谱曲线(b、c)

Fig.7 False-color composite image (a) and representative hyperspectral curves from different locations (b, c) in the Ingenii Basin region

分差异进而分析地质演化历史。

智海盆地内 FeO 含量分布特征具有高度不均一性(图 8a)。智海由于被月海玄武岩覆盖,其 FeO 丰度远高于其他区域,智海内的 FeO 含量普遍高于 10%,最高可达 29.1%;而智海盆地未被玄武岩充填区域的 FeO 含量为 5%~10%。智海盆地南部与东部靠近 SPA 盆地内侧的 FeO 含量普遍在 8%~15%,而靠近 SPA 盆地外侧的西部及北部区域的 FeO 含量则极低。TiO₂ 含量在智海盆地区域内的空间分布特征与 FeO 高度相近,仅在数值方面小于 FeO。

5.3 矿物空间分布特征

月壤主要由斜长石、辉石、橄榄石、钛铁矿等矿物及大量的玻璃态物质混合而成,这些组分在月海地区的月壤中占比约 95%,在高地地区占比约 99%。

在智海盆地区域,斜长石含量占比最高,其次为斜方辉石、橄榄石、单斜辉石(图 9)。与 FeO、TiO₂ 含量分布特征类似,上述 4 种主要矿物在智海

盆地区域的空间分布同样具有高度不均一性。被月海玄武岩充填的智海区域在斜长石、橄榄石、单斜辉石 3 种矿物丰度图中均具有明显的轮廓特征(图 9a、c、d),而斜方辉石的矿物丰度则与 SPA 盆地内侧含量水平相近(图 9b)。整体而言,智海区域内辉石、橄榄石等镁铁质矿物含量较高,而斜长石含量偏低。在智海以外的其他区域,上述 4 种矿物在空间的分布特征显示出与地形(图 3)的相关性。靠近 SPA 盆地外侧的西北部区域具有类似高地的矿物丰度特征,即斜长石含量较高,辉石和橄榄石含量较低;靠近 SPA 盆地内侧的东南部区域则具有类似智海的矿物丰度特征。因此,可推断智海盆地除月海玄武岩覆盖区的其他区域,其物质特征取决于撞击靶区的物质成分,即形成智海盆地的大型撞击未改变下覆物质成分特征。

智海盆地边界可在表面影像、地形数据中进行辨识,在光谱假彩色图像、FeO、TiO₂ 及矿物含量空间分布图中盆地的边界则难以区分,但均可分辨出月海区域(图 8)。而属于超大盆地的 SPA 盆地,其

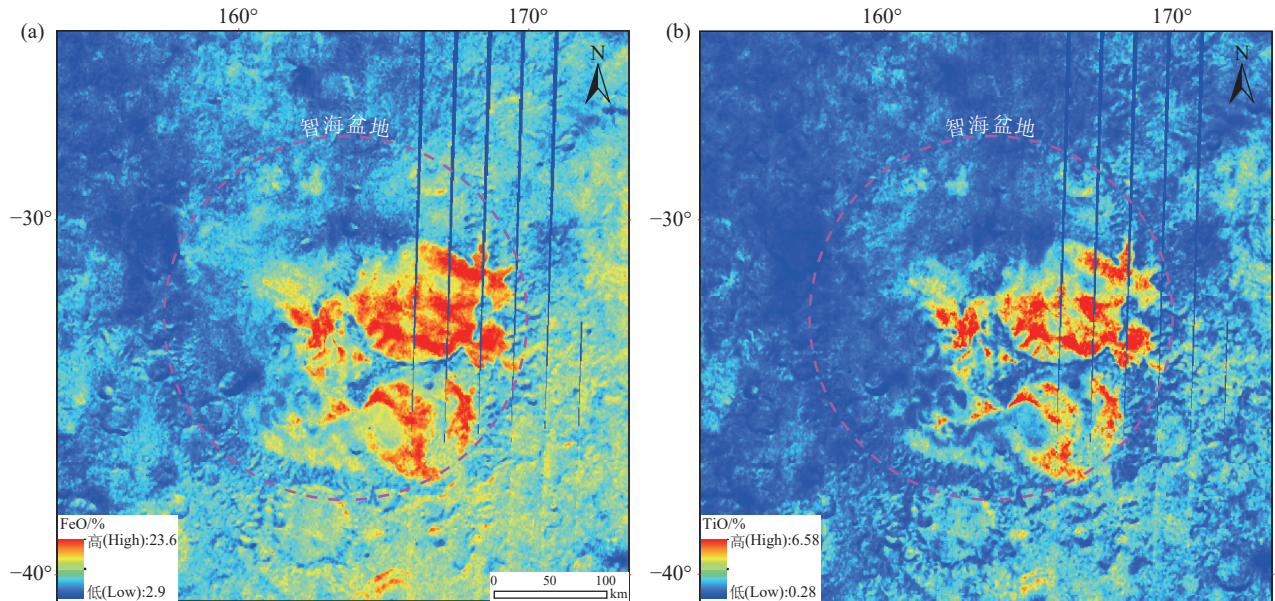


图 8 智海盆地区域 FeO 含量分布图(a)、TiO₂ 含量分布图(b)
Fig.8 Maps illustrating the distribution of FeO (a) and TiO₂ (b) content in the Ingenii Basin region

边界无论在地形图、元素及矿物含量分布图中均有一定辨识度。由此可见,形成 SPA 盆地的超大撞击事件不仅改造了地形,也挖掘出月球深部物质,造成盆地内物质成分的改变,这种物质虽然与月海玄武岩具有相似性,但在 FeO、TiO₂、矿物含量组成比例上具有显著差异,因此,推断形成月海玄武岩的物质与 SPA 超级撞击事件挖掘的深部物质其源区是不同的。

6 智海盆地区域地质演化模式分析

智海盆地区域地质特征较为复杂,拥有较丰富的地质单元类型,对智海盆地区域地质演化历史进行详细分析,有望为建立月球背面月海盆地系统全面的地质演化模式提供参考。

该区域最主要的地貌特征为外动力撞击作用形成的智海盆地与大小不一的撞击坑。智海盆地在 SPA 盆地边界形成后引起深部莫霍面抬升,导致盆地中央具有正重力异常,并可能引发少量岩浆上涌形成小规模月海玄武岩。随后汤姆孙和汤姆孙 M 撞击坑在智海盆地东侧就位,几乎完全位于盆底区域。这三次撞击引发了大规模岩浆上涌,岩浆从智海盆地的盆底区域和两个撞击坑底部涌出,填充了盆地的中部、南部以及汤姆孙与汤姆孙 M 撞击坑底部,从而形成智海。玄武岩充填过程持续

漫长,基于撞击坑大小-频率分布定年法确定的智海中月海玄武岩模式年龄为 2.66 Ga,说明玄武岩充填事件一直持续到爱拉托逊纪。根据影像中撞击坑的叠置关系并参考前期国际月球地质图中标定的撞击坑形成时代,在 4.2~3.92 Ga 的艾肯纪期间,共有十多次大型撞击事件发生在智海盆地区域,如汤姆孙坑、巴尔比耶坑、帕拉切尔苏斯坑等,其中多数位于盆地西北侧。在之后的酒海纪时期,两个大小相近的小天体几乎同时撞击在智海盆地东北部,形成了边界形态极为特殊的范德格喇夫撞击坑,酒海纪期间在智海盆地南部形成数个直径小于 100 km 的撞击坑。进入雨海纪,该区域的撞击事件强度骤然减小,撞击坑直径普遍小于 70 km。在漫长的爱拉托逊纪(3.16~0.8 Ga),仅有 5 个撞击坑形成于此,两个直径在 60 km 左右的名为“奥戴”和“伯克兰”的撞击坑均发育中央峰。进入年轻的哥白尼纪后,区域内未发生较大程度的撞击事件,撞击形成的陨石坑直径普遍小于 20 km。

Chen et al.(2022b)基于 FeO、TiO₂ 等元素含量数据进行了月表岩石类型划分,如根据 FeO 含量可将区域内岩性划分为亚铁斜长岩和亚铁苏长岩,FeO ≤ 10% 的区域为亚铁斜长岩,FeO > 10% 的区域为亚铁苏长岩,亚铁苏长岩位于 SPA 盆地内部

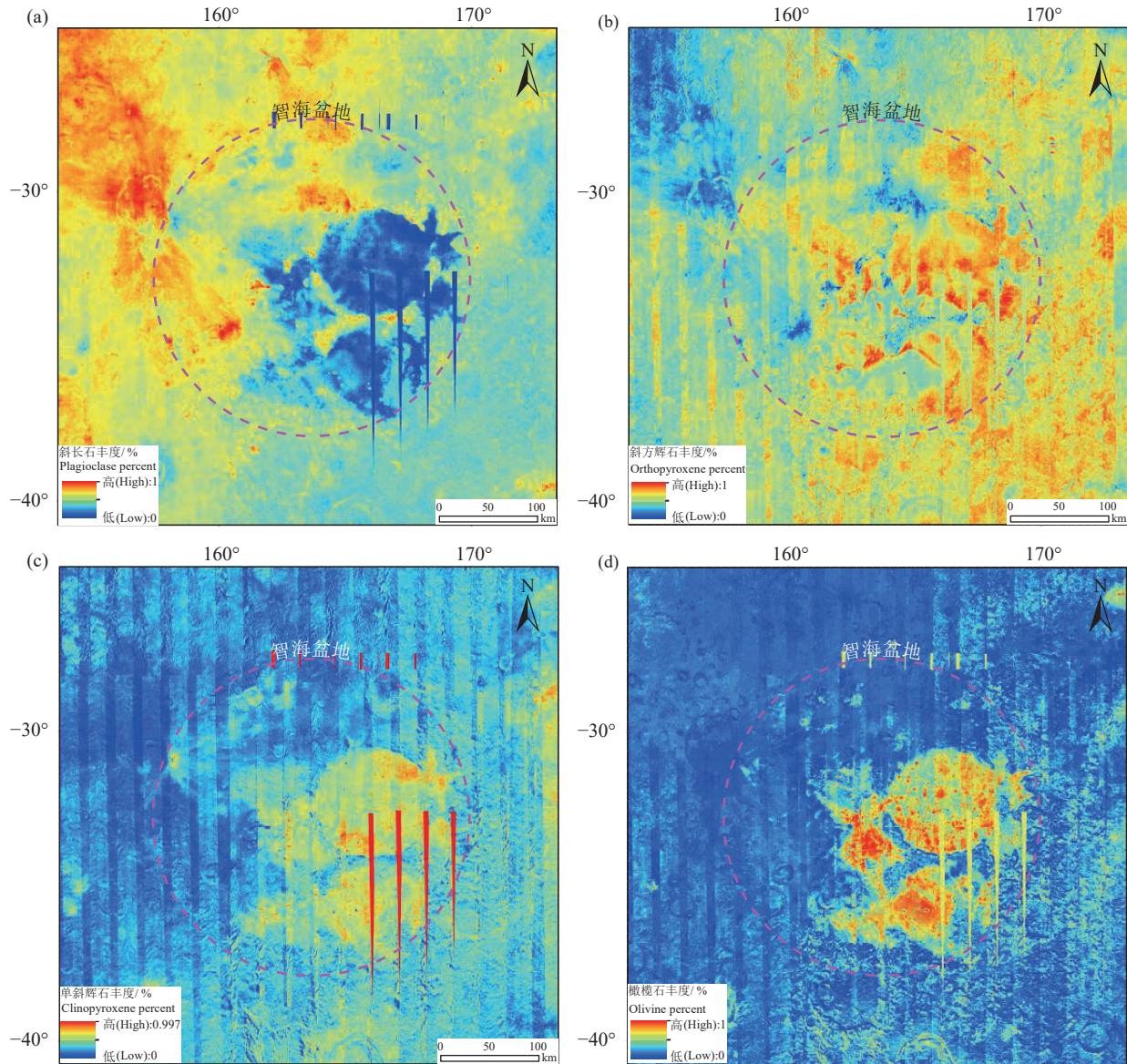


图9 智海盆地区域斜长石(a)、斜方辉石(b)、单斜辉石(c)、橄榄石(d)含量分布图

Fig.9 Maps illustrating the distribution of plagioclase (a), orthopyroxene (b), clinopyroxene (c) and olivine (d) content in the Ingenii Basin region

(图10)。智海盆地形成于SPA边界处,这次撞击未能改变下覆月壤的物质组成;反而是后期导致汤姆孙坑的撞击事件挖掘或形成了一些特殊的岩石类型,如纯斜长岩(Ohtake et al., 2009; Yamamoto et al., 2012; Hanna et al., 2014)和尖晶斜长岩(Pieters et al., 2014; Sun et al., 2017)。

基于影像数据在该区域能够识别出一些典型的构造特征,如浅层断裂、皱脊、月堑、月溪等。智海盆地周边发育十多条呈放射性的浅层断裂,形成于月壳浅部,未切穿月壳。皱脊发育在智海内,具

有呈线状延伸的山岭形态,其规模较小,长度不超过20 km。月堑发育在智海盆地东北部的溅射物附近,为月表较长的直线型或弧形沟谷。智海盆地外环北侧发育一个火山口,由火山口喷出的岩浆向西南方向涌出,由于熔岩通道的侵蚀或熔岩管道的坍塌形成蜿蜒曲折的月溪,一直延伸至智海盆地的盆壁。上述构造特征为内动力地质作用成因,从规模和数量上均远低于月球正面大范围月海区域。在对智海盆地区地质演化模式进行分析的基础上,完成了该区域的地质图(图11)。

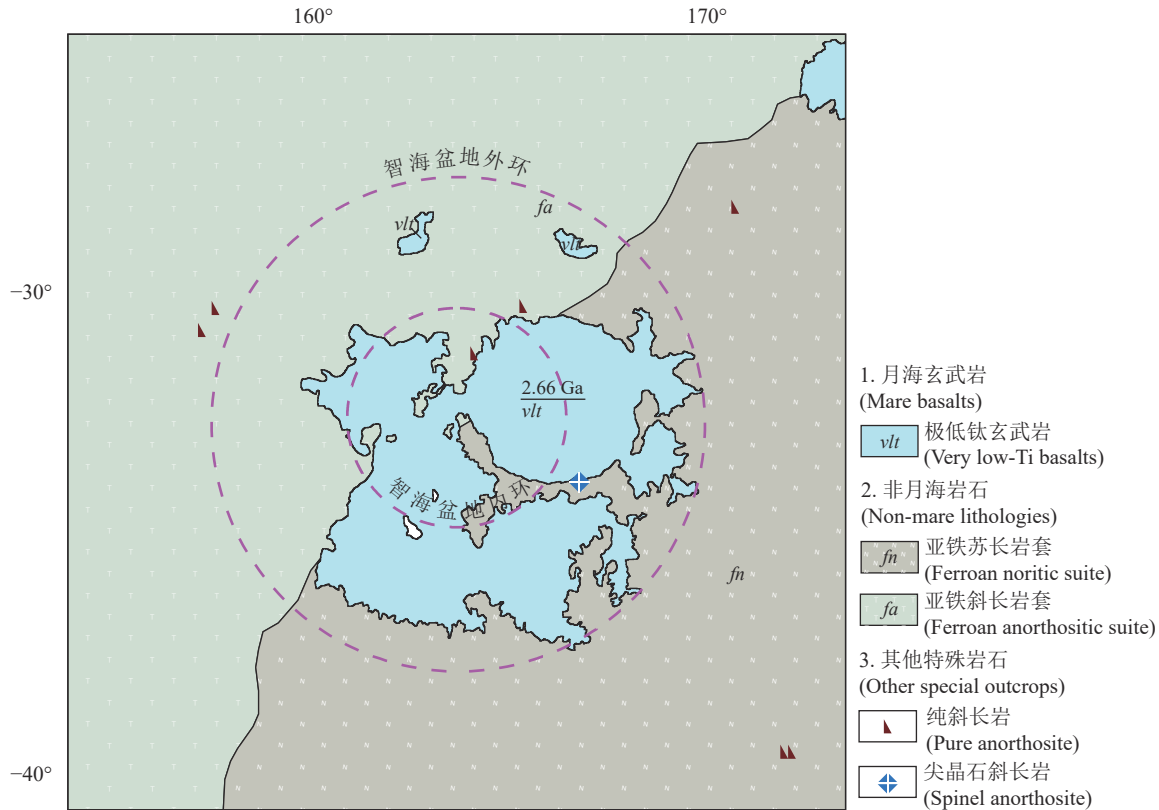


图 10 智海盆地区域岩石类型分布图
Fig.10 Lithologic map of the Ingenii Basin region

7 讨论

7.1 SPA 盆地及智海盆地区域地质演化历史

Apollo 计划采集返回的月球岩石有力支持了月球形成的“大碰撞假说”。在以内动力地质作用为主的岩浆洋纪(许英奎等, 2012; 郭弟均等, 2014; 欧阳自远和刘建忠, 2014), 通过冷凝结晶分异, 形成南极—艾肯盆地外围高地广泛分布的斜长岩月壳。在内、外动力地质作用并重的古月宙, 南极—艾肯盆地形成, 产生大量撞击熔融体, 通常被称作撞击熔融席。熔融体在“艾肯盆地”底部形成了明显有别于月球其他地区的特殊岩性, 即亚铁苏长岩套。之后大量外动力撞击事件作用在原始斜长岩和苏长岩上, 撞击产生的高温高压使原始岩石发生破碎、重熔、胶结, 形成盆地建造及坑物质, 其中大规模撞击事件可能导致月壳深部岩浆喷涌或溢流出月表, 在盆地或大型撞击坑的底部形成月海玄武岩。在长达数十亿年的历史中, 月表岩石在没

有大气层保护的情况下受到陨石、微陨石撞击和宇宙射线、太阳风持续轰击等太空风化作用, 另外大幅度昼夜温差变化等因素共同导致月表岩石被改造为如今细颗粒状的月壤。

在智海盆地区域, 原始斜长岩月壳完全被后期撞击事件改造, 形成了各个地质时代的撞击物质。但在 SPA 盆地内部亚铁苏长岩套覆盖区域, 撞击坑数量相比其他区域降低, 撞击改造月岩的规模相对较小。因此, 太空风化作用在不同区域的速率会有差异, 在后期工作中研究月表不同位置太空风化速率的分布规律, 尤其是 SPA 盆地与其他区域的差异, 对于认识月表物质成分演化规律和构建演化模式具有重要意义。

7.2 SPA 盆地地质“死亡”时间

月球的地质“死亡”时间一直是月球演化历史研究中的重大科学问题, 月球岩浆作用的停止时间被认为是月球在地质意义上的死亡时间。“阿波罗”(Apollo)和“月球”(Luna)计划返回的月球样品中未发现晚于 29 亿年的岩浆活动, 而中国 CE-5 取样返回的月球样品将月球“死亡”时间延长了 9 亿

年(Che et al., 2021; Li et al., 2021)。利用撞击坑大小-频率分布定年法对 SPA 盆地内所有月海玄武岩单元进行定年的结果(Chen et al., 2022b)表明, SPA 盆地内不同区域的月海玄武岩充填时间在 3.7~2.2 Ga(图 12)。同一撞击盆地内多个玄武岩单元的模式年龄也不尽相同,如阿波罗盆地内的 4 个玄武岩单元定年结果分别为 3.4 Ga、3.3 Ga、2.9 Ga,

庞加莱盆地内 3 个玄武岩单元的年龄分别为 3.6 Ga、3.4 Ga、3.3 Ga,冯·卡门 M 盆地内 3 个玄武岩单元分别被定年为 3.4 Ga、3.2 Ga、3.2 Ga,CE-4 着陆在 3.2 Ga 的单元上,可见在这些形成于艾肯纪的古老盆地内发生过多次岩浆喷发或溢流事件,其中智海盆地内的岩浆活动时间最长,一直持续到 27 亿年前。南纬 70°附近的安东尼亚迪盆地是

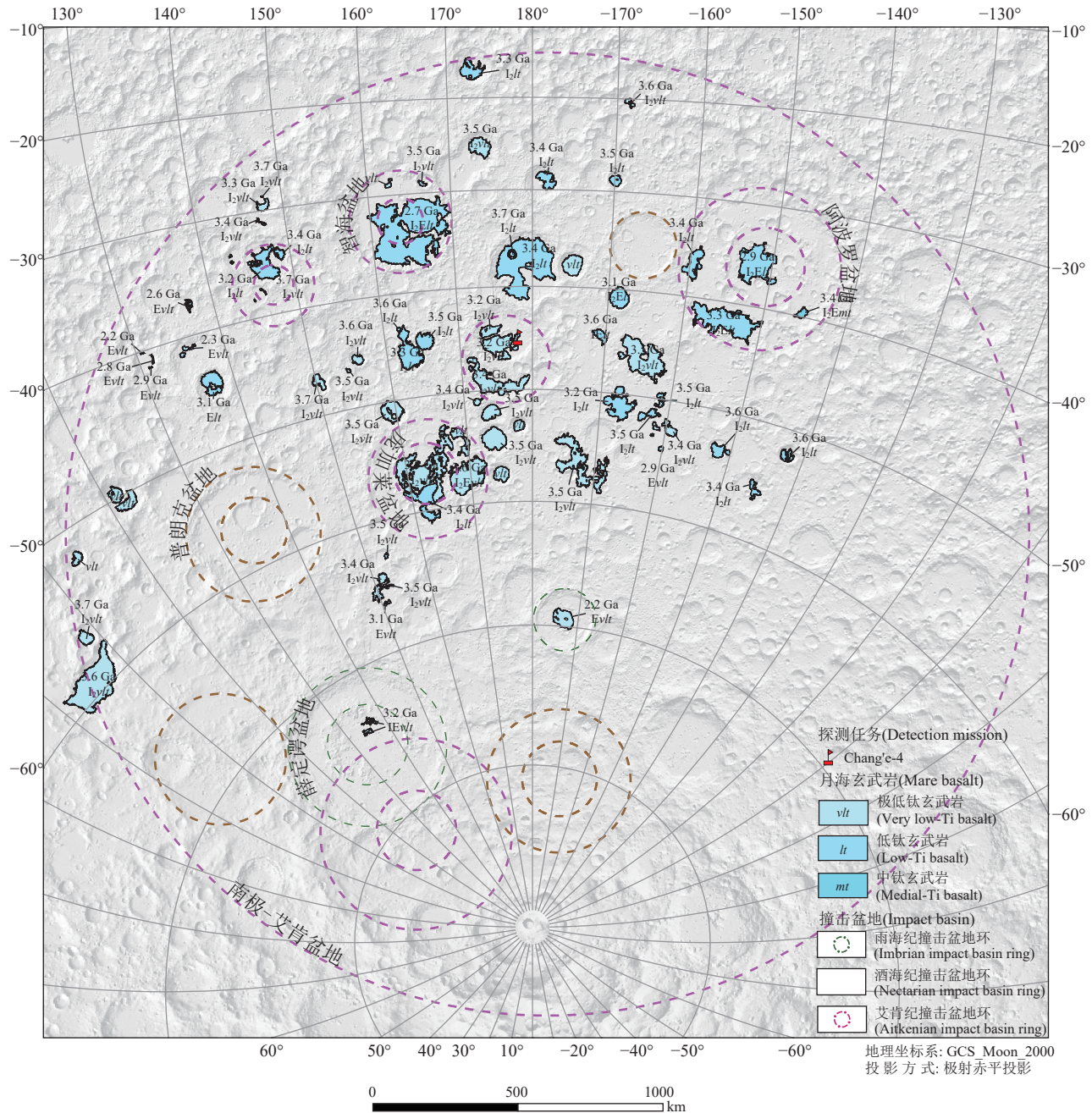


图 12 SPA 盆地内月海玄武岩单元模式年龄(据 Chen et al., 2022b 修改)
Fig.12 Model age of mare basalt units in the SPA Basin (modified from Chen et al., 2022b)

SPA 盆地内最年轻的撞击盆地,形成于雨海纪(3.85~3.16 Ga),内部玄武岩单元根据撞击坑大小-频率分布定年的结果为 2.2 Ga,是 SPA 盆地内最年轻的玄武岩单元。可见,月球不同区域具有不同的“死亡”时间,不同区域内部能量的消亡时间具有空间差异性。

智海盆地形成于 39.2 亿年前,而智海内岩浆活动持续至 27 亿年前,因此,智海盆地中玄武岩充填作用可能跨越了近 12 亿年。这期间是否一直有岩浆活动,或者是多期次间歇性喷发或溢流,月球背面如此长时间的內动力地质作用能量来源于哪里?这一系列科学问题有望在嫦娥六号探测器成功采样返回月壤样品后得到新的认识。

8 结 论

本文以智海盆地为例,从可见光影像、成熟度、地形、坡度、粗糙度等表面特征,布格重力异常、月壳厚度等深部特征以及由光谱反演的 FeO、TiO₂、矿物丰度等物质成分特征等多个维度进行综合分析,在此基础上进行智海盆地区域地质演化模式分析,并对 SPA 盆地及月球相关科学问题进行探讨,得到以下结论:

(1)在艾肯纪时期,智海盆地形成后又遭遇两次撞击,引发长时间玄武岩泛滥直至爱拉托逊纪,玄武岩充填两个撞击坑底部及部分智海盆地的底部,形成智海。

(2)智海盆地中央存在直径约 140 km 的正布格重力异常区域,主要成因为大型撞击作用引起莫霍面抬升,可能伴有月壳底部高密度岩浆局部上涌。

(3)形成智海盆地的撞击未改变下覆靶区的物质成分,这一区域的岩性特征形成于 SPA 撞击。

(4)智海盆地区域内仅发育少量小规模的内动力地质作用成因的构造特征,与月球正面大范围月海区域广泛发育的构造特征具有显著差异。

References

Che X C, Nemchin A, Liu D Y, Long T, Wang C, Norman M D, Joy K H, Tartese R, Head J W, Jolliff B, Snape J F, Neal C R, Whitehouse M J, Crow C, Benedix G, Jourdan F, Yang Z Q, Yang C, Liu J H, Xie S W, Bao Z M, Fan R L, Li D P, Li Z S, Webb T G. 2021. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from

samples returned by Chang'e-5[J]. *Science*, 374: 887-890.

Chen J, Ling Z C, Jolliff B L, Sun L Z, Qiao L, Liu J Z, Fu X H, Zhang J, Li B, Liu C Q, Qi X B, Lu X J, He Z P, Xu R. 2022a. Radiative Transfer Modeling of Chang'e-4 spectroscopic observations and interpretation of the South Pole-Aitken compositional anomaly[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 931: 1-15.

Chen J, Ling Z C, Liu J Z, Chen S B, Ding X Z, Chen J P, Cheng W M, Li B, Zhang J, Sun L Z. 2022b. Digital and global lithologic mapping of the Moon at a 1: 2, 500, 000 scale[J]. *Science Bulletin*, 67: 2050-2054.

Domingue D, Weirich J, Chuang F, Sickafoose A, Palmer E. 2022. Topographic correlations within Lunar swirls in Mare Ingenii[J]. *Geophysical Research Letters*, 49: e2021GL095285.

Du Jinsong, Liang Qing, Chen Chao, Zhou Cong, Chen Bo. 2010. Deep structure and impact evolution of lunar mascon basins[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(5): 134-142 (in Chinese with English abstract).

Glotch T D, Bandfield J L, Lucey P G, Hayne P O, Greenhagen B T, Arnold J A, Ghent R R, Paige D A. 2015. Formation of lunar swirls by magnetic field standoff of the solar wind[J]. *Nature Communications*, 6: 6189.

Gou S, Yue Z Y, Di K C, Wang J, Wan W H, Liu Z Q, Liu B, Peng M. 2020. Impact melt breccia and surrounding regolith measured by Chang'e-4 rover[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 544: 116378.

Guo, D J, Liu J Z, Head J W, Zhang F Q, Ling Z C, Chen S B, Chen J P, Ding X Z, Ji J Z, Ouyang ZY. 2024. A lunar time scale from the perspective of the Moon's dynamic evolution[J]. *Science China Earth Sciences*, 67(1): 234-251.

Guo Dijun, Liu Jianzhong, Zhang Li, Ji Jinzhu, Liu Jingwen, Wang Liang. 2014. The methods of lunar geochronology study and the subdivisions of lunar geologic history[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 45-61 (in Chinese with English abstract).

Guo Dijun, Liu Jianzhong, Head J W, Li Shuai, Potter R W K, Lin Honglei. 2018. Crustal structure and spectral features of lunar Apollo basin region[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 5(5): 488-494 (in Chinese with English abstract).

Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, Head J W. 2000. Ages of mare basalts on the lunar nearside[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 105: 29239-29275.

Hanna K L D, Cheek L C, Pieters C M, Mustard J F, Greenhagen B T, Thomas I R and Bowles N E. 2014. Global assessment of pure crystalline plagioclase across the Moon and implications for the evolution of the primary crust[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 119: 1516-1545.

Huang J, Xiao Z Y, Xiao L, Horgan B, Hu X Y, Lucey P, Xiao X, Zhao S Y, Qian Y Q, Zhang H, Li C L, Xu R, He Z P, Yang J F, Xue B, He Q, Zhong J, Lin G Y, Huang C N, Xie J F. 2020. Diverse rock types detected in the lunar South Pole-Aitken Basin by the Chang'e-4 lunar mission[J]. *Geology*, 48: 723-727.

Hurwitz D, Kring D A. 2015. Potential sample sites for South Pole-Aitken basin impact melt within the Schrödinger basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 427: 31-36.

Ji Jinzhu, Liu Jianzhong, Guo Dijun, Liu Jingwen, Wang Qinglong,

- Zhang Li. 2016. Impact basin of Mare Nubium: Reconstruction and geological evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 127–134 (in Chinese with English abstract).
- Jia M N, Di K C, Yue Z Y, Liu B, Wan W H, Niu S L, Liu J Z, Cheng W M, Lin Y T. 2021. Multi-scale morphologic investigation of craters in the Chang'e-4 landing area[J]. *Icarus*, 355: 114164.
- Kramer G Y, Combe J P, Harnett E M, Hawke B R, Noble S K, Blewett D T, McCord T B, Giguere T A. 2011. Characterization of lunar swirls at Mare Ingenii: A model for space weathering at magnetic anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 116: E04008.
- Kramer G Y, Kring D A, Nahm A L, Pieters C M. 2013. Spectral and photogeologic mapping of Schrödinger Basin and implications for post-South Pole-Aitken impact deep subsurface stratigraphy[J]. *Icarus*, 223: 131–148.
- Lemelin M, Lucey P G, Gaddis L R, Hare T, Ohtake M. 2016. Global map products from the Kaguya multiband imager at 512 ppd: minerals, FeO, and OMAT[C]/47th Lunar and Planetary Science Conference.
- Li Q L, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z Y, Lin Y T, Li J H, Ma H X, Tang G Q, Guo S, Tang X, Yuan J Y, Li J, Wu F Y, Ouyang Z Y, Li C L, Li X H. 2021. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts[J]. *Nature*, 600: 54–58.
- Lin H L, He Z P, Yang W, Lin Y T, Xu R, Zhang C, Zhu M H, Chang R, Zhang J H, Li C L, Lin H Y, Liu Y, Gou S, Wei Y, Hu S, Xue Chang, Yang Jian, Zhong J, Fu X H, Wan W X, Zou Y L. 2020. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool[J]. *National Science Review*, 7: 913–920.
- Liu Jingwen, Liu Jianzhong, Guo Dijun, Ji Jinzhu, Wang Qinglong, Li Shijie. 2016. Comprehensive analysis of lunar Orientale Basin and research of the initial impact condition[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 135–143(in Chinese with English abstract).
- Lu Tianqi. 2020. Study on Remote Sensing Recognition and Evolution of Lunar Tectonics[D]. Changchun: Jilin University, 1–172.
- Maria Z T, David S E. 1994. The shape and internal structure of the moon from the Clementine mission[J]. *Science*, 266: 1839–1843.
- Ohtake M, Matsunaga T, Haruyama J, Yokota Y, Morota T, Honda C, Ogawa Y, Torii M, Miyamoto H, Arai T, Hirata N, Iwasaki A. 2009. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. *Nature*, 461: 236–240.
- Ouyang Ziyuan, Liu Jianzhong. 2014. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Pieters C M, Hanna K D, Cheek L, Dhingra D, Prissel T, Jackson C, Taylor L A. 2014. The distribution of Mg-spinel across the Moon and constraints on crustal origin[J]. *American Mineralogist*, 99: 1893–1910.
- Potter R W K, Head J W, Guo D J, Liu J Z, Xiao L. 2018. The Apollo Peak-Ring Impact Basin: Insights into the structure and evolution of the South Pole-Aitken Basin[J]. *Icarus*, 306: 139–149.
- Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, Lemoine F G, Mazarico E, Torrence M H, McGarry J F, Rowlands D D, Head J W, Duxbury T H, Aharonson O, Lucey P G, Robinson M S, Barnouin O S, Cavanaugh J F, Sun X L, Liiva P, Mao D D, Smith J C, Bartels . E. 2010. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) [J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L18204.
- Sun Y, Li L, Zhang Y Z. 2017. Detection of Mg-spinel bearing central peaks using M³ images: Implications for the petrogenesis of Mg-spinel[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 48–58.
- Wang Liang, Ding Xiaozhong, Han Kunying, Pang Jianfeng, Xu Kejuan, Zheng Hongwei, Wu Hao. 2015. The compilation of the lunar digital geological map and a discussion on the tectonic evolution of the moon[J]. *Geology in China*, 42(1): 331–341 (in Chinese with English abstract).
- Wieczorek M A, Neumann G A, Nimmo F, Kiefer W S, Taylor G J, Melosh H J, Phillips R J, Solomon S C, Andrews-Hanna J C, Asmar S W. 2013. The Crust of the Moon as seen by GRAIL[J]. *Science*, 339: 671–675.
- Wieczorek M A, Phillips R J. 1998. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 103: 1715–1724.
- Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, Ogawa Y, Ishihara Y, Morota T, Hirata N, Ohtake M, Hiroi T, Yokota Y, Haruyama J. 2012. Massive layer of pure anorthosite on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 39: 34–47.
- Xu Yingkui, Zhu Dan, Wang Shijie, Liu Yun. 2012. Recent advances of lunar formation theories[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(5): 516–521(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 杜劲松, 梁青, 陈超, 周聪, 陈波. 2010. 月球“质量瘤”盆地的深部结构与撞击演化[J]. *地质科技情报*, 29(5): 134–142.
- 郭弟均, 刘建忠, Head J W, 李帅, Potter R W K, 林红磊. 2018. 月球阿波罗盆地区域月亮结构及光谱特征[J]. *深空探测学报*, 5(5): 488–494.
- 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 籍进柱, 刘敬稳, 王梁. 2014. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分[J]. *地学前缘*, 21(6): 45–61.
- 籍进柱, 刘建忠, 郭弟均, 刘敬稳, 王庆龙, 张莉. 2015. 云海撞击盆地的恢复及其地质演化研究[J]. *岩石学报*, 32(1): 127–134.
- 刘敬稳, 刘建忠, 郭弟均, 籍进柱, 王庆龙, 李世杰. 2016. 月球东海盆地综合解析与撞击初始条件的研究[J]. *岩石学报*, 32(1): 135–143.
- 陆天启. 2020. 月球构造遥感识别及其演化研究[D]. 长春: 吉林大学, 1–172.
- 欧阳自远, 刘建忠. 2014. 月球形成演化与月球地质图编研[J]. *地学前缘*, 21(6): 1–6.
- 王梁, 丁孝忠, 韩坤英, 庞健峰, 许可娟, 郑洪伟, 吴昊. 2015. 月球数字地质图的编制与研究[J]. *中国地质*, 42(1): 331–341.
- 许英奎, 朱丹, 王世杰, 刘耘. 2012. 月球起源研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 31(5): 516–521.