

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2022.9.11

基于多源遥感数据的月球薛定谔盆地及邻区地质特征和演化分析

王颖^{1,2}, 丁孝忠^{1,2,*}, 韩坤英^{1,2}, 陈剑³, 刘敬稳⁴, 陆天启⁵, 王俊涛⁴,
石成龙^{1,2}, 金铭^{1,2}, 庞健峰^{1,2}

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院, 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 550002
5. 广州海洋地质调查局三亚南海地质研究所, 海南三亚 510075

WANG Ying^{1,2}, DING Xiaozhong^{1,2,*}, HAN Kunying^{1,2}, CHEN Jian³, LIU Jingwen⁴,
LU Tianqi⁵, WANG Juntao⁴, SHI Chenglong^{1,2}, JIN Ming^{1,2}, PANG Jianfeng^{1,2}

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geology Sciences, Beijing 100037, China
2. National Research Center of Geological Mapping, China Geological Survey, Beijing 100037, China
3. Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China
4. Lunar and Planetary Sciences Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
5. Sanya Institute of South China Sea Geology, Guangzhou Marine Geological Survey, Sanya 510075, China

WANG Ying, DING Xiaozhong, HAN Kunying, et al. Geological characteristics and evolution of the Schrödinger basin and adjacent areas: Insights from multi-source remote sensing data. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(4): 525-538

Abstract: The Schrödinger basin is a typical lunar peak-ring basin formed in the Late Imbran with well-preserved, relatively complete basin structure. It is located at the transition zone between the floor and the southwestern rim of the South Pole-Aiken basin on the far side of the Moon. Insights into the geological evolution of the Schrödinger basin can help to better understand the evolution of the peak-ring basins in general. In this paper, using multi-source remote sensing data, combined with previous research results, we created an 1:2500000 geological map of the Schrödinger basin and adjacent area and performed comprehensive geological analysis to investigate the basin's topographic features, lithologic distribution characteristics, structural features, and evolution. Based on the state-of-art remote sensing data and newly updated crater size-frequency distribution we determined the extent of basalt units in the basin and obtained more accurate ages for the basalt units; besides, we identified additional structural features of the study area and developed a more comprehensive view on the regional geological evolution compared to previous studies. According to our analysis, the main rock types in the Schrödinger basin were ferroan anorthosite suite, ferroan norite suite, and magnesian anorthosite suite, along with sporadically distributed basalts, anorthosite, olivine-rich outcrops, and pyroclastic deposits. The absolute model ages of two mare basalt units were 3.26 and 3.36 Ga, respectively, indicating they belong to the Upper Imbran strata. There were nine structural styles identified in the study area, among which crater-floor fractures, mascon, and volcanic vent might have gradually formed, post depositional, during gravitational equilibrium. We concluded that the formation of the Schrödinger basin could be divided into three stages: pre-impact, basin forming, and

收稿日期:2022-06-10;修回日期:2022-09-08

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20221645);国家自然科学基金专项项目(41941003);科学技术部科技基础性工作专项项目“月球数字地质图编研(2015FY210500)”

作者简介:王颖(1997—),女,博士研究生,主要从事月球与行星地质编图与对比研究工作。E-mail: wymaggie0312@163.com

*通信作者简介:丁孝忠(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事区域地质和地质编图研究工作。E-mail: xiaozhongding@sina.com

<https://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2023,30(4)

post-depositional reconstruction.

Keywords: Schrödinger basin; evolution of regional geology; multi-source remote sensing data fusion

摘要:薛定谔盆地位于月球背面南极-艾肯盆地西南部的盆底与盆缘过渡处,盆地结构较为完整,形成于晚雨海世,是典型的峰环盆地,研究该区域地质演化历史有助于研究月球峰环盆地的演化过程。本文利用多源遥感数据并综合前人研究成果,对研究区开展了区域地质综合分析,主要包括地质地貌特征、岩石类型分布、构造要素以及盆地的演化过程等。与前人相比,使用较新的遥感数据和撞击坑统计年代学模型对盆地内的月海玄武岩进行了分布范围厘定和定年,得到了更精确的年龄,丰富了研究区内的构造形迹数据库,探讨了更具综合性的区域地质演化过程。得到的结果如下:研究区内出露的岩石以亚铁斜长岩套、亚铁苏长岩套和镁质斜长岩套为主,月海玄武岩、纯斜长岩、富橄辉岩套以及火成碎屑岩零星分布,两块月海玄武岩单元的绝对模式年龄分别为 3.26 和 3.36 Ga,为晚雨海世玄武岩;研究区内 9 类构造发育,其中坑底断裂、质量瘤和火山口可能是在盆地后续的重力均衡过程中逐渐形成的;薛定谔盆地的形成过程主要分为撞击成盆前、成盆期以及成盆后改造期 3 个阶段。

关键词:薛定谔盆地;区域地质演化;多源遥感数据融合

中图分类号:P184.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2023)04-0525-0014

0 引言

撞击盆地是月球上常见的构造,是月球形成以来,其表面受到外来天体的大型撞击作用所形成的^[1]。月球表面共保留有 81 个直径大于 200 km 的撞击盆地,可以分为单环盆地、峰环盆地、多环盆地以及超大盆地 4 类^[2]。薛定谔盆地是月球上较年轻的、盆地结构较为完整的峰环盆地,对薛定谔盆地进行研究有助于了解峰环盆地的形成条件和成因机制。南极-艾肯盆地(South Pole-Aitken basin, SPA)是月球上最大、最古老的撞击盆地,形成于艾肯纪,代表月球外动力地质作用的开端^[3],薛定谔盆地位于南极-艾肯盆地的盆底与盆缘交界处,是 SPA 区域重要的组成部分(图 1),对其进行深入研究能更好地了解月球的深部物质组成及结构,进而深入研究月球的演化历史。

前人对薛定谔盆地做过较多的研究,Wilhelms 等^[4]于 1979 年初用阿波罗计划获得的资料数据绘制了 1:5 000 000 月球南极幅地质图,初步得到了薛定谔盆地的基本构造轮廓特征。自 1994 年开始,随着新的月球探测热潮的兴起,探测数据也得到了不断的扩展与更新。根据美国发射的克莱门汀(Clementine)探测器和月球勘探者(Lunar prospector)探测器等所获得的新数据解译结果,对该盆地的地质单元划分、各单元地质年代和岩石矿物组分的识别及形成机制的解释有了新的进展^[5-9]。但是,关于构造形迹特征、区域地质演化过程等方面缺少综合性的研究。

本文利用月球勘测轨道飞行器激光高度计数据(LOLA)^[10]及宽视角相机数据(WAC)^[11]、月球重力数据(GRIAL)^[12],以及我国嫦娥工程系列数据(CE-1,CE-2)等多源遥感数据,对薛定谔盆地及其邻区地质地貌特征、岩石分布及构造要素等进行了详细解译分析和综合研究,编制了 1:2 500 000 薛定谔盆地及邻区地质图(经纬度范围为(130°W~70°E,65°S~90°S)(图 2),探讨了薛定谔盆地的区域演化历史。

1 区域地质背景

薛定谔盆地形成于雨海纪,其年龄约为 3.8 Ga^[5],是月球重轰炸阶段晚期的撞击盆地代表之一,与月球上其他大型撞击盆地相比,盆地结构较为完整(图 3),其平均直径约为 315 km,平均深度约为 4.5 km,中心点经纬度为(132.5°E,75°S),内部发育有一个非常显著的峰环,直径约为 125 km,较盆底高出 1~2.5 km。该盆地的溅射物呈辐射状向四周溅射,边缘也极为不规则,是月球上最为典型的峰环盆地。

南极-艾肯盆地是目前月球上可识别出的最大的撞击盆地,直径达到 2 600 km^[6],强烈的撞击作用使得该地区月壳与其他区域相比更薄,溅射出的月球深部物质较多,分布范围较广,可能挖掘出月壳深部甚至是上月幔的物质。随着外来天体的持续撞击,在其上形成了许多不同期次的撞击坑和撞击盆地,这些不同期次的撞击作用将 SPA 撞击挖掘出的深部物质再次改造。按时间顺序(由老到新)依次主

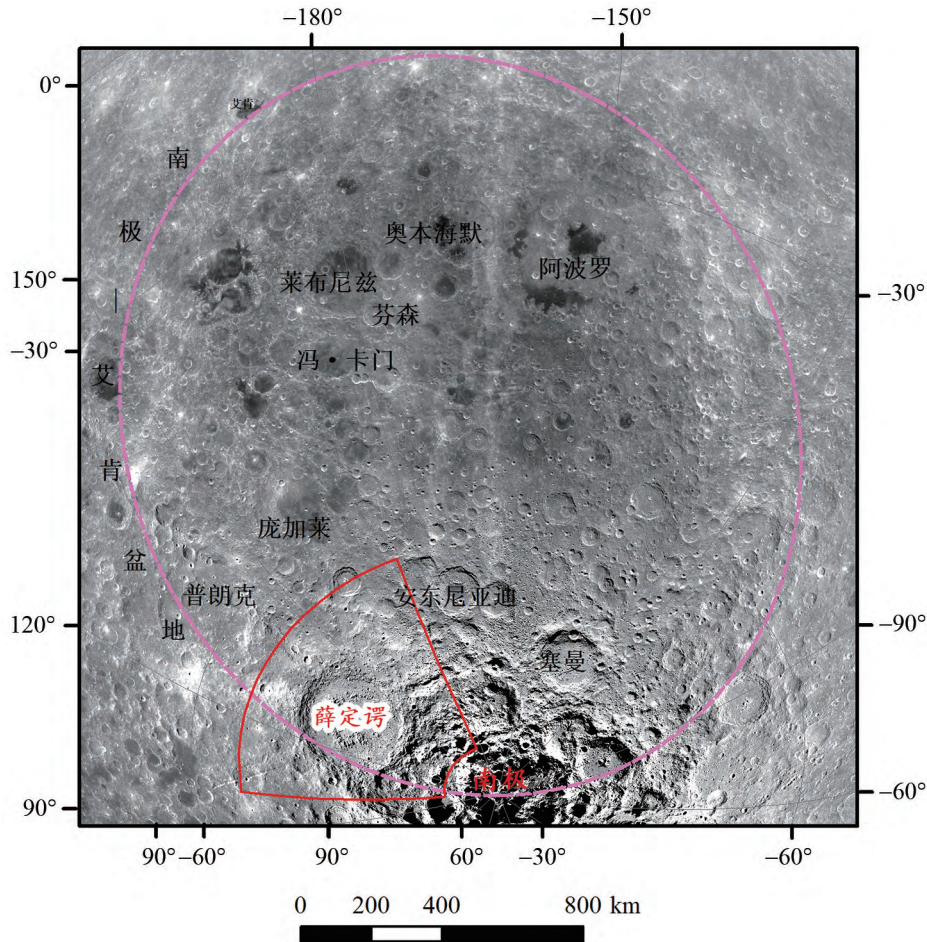


图1 月球南极-艾肯地区影像图

Fig. 1 Satellite image of the South Pole-Aitken region showing the surface features of the lunar peak-ring basins

要发育有艾肯纪的阿蒙森-甘斯文特盆地,酒海纪的薛定谔-塞曼盆地和西科斯基-里滕豪斯盆地,雨海纪的薛定谔盆地、安东尼亚迪盆地、莱曼撞击坑、德福雷斯特撞击坑、海尔撞击坑等(图2)。在薛定谔盆地形成之前,阿蒙森-甘斯文特盆地、薛定谔-塞曼盆地和西科斯基-里滕豪斯盆地就已经在薛定谔盆地的靶体位置处产生了较厚的溅射物质,在薛定谔盆地形成之后,安东尼亚迪盆地以及莱曼、德福雷斯特、海尔撞击坑因其距离较远,撞击能量不足,抛射到薛定谔盆地中的溅射物质极少。因此,薛定谔盆地保存较完整,上覆溅射物覆盖程度低,盆地轮廓清晰。各建造区域界线明显,是研究月球撞击盆地演化的典型地区。

2 薛定谔盆地的多源数据解译

2.1 研究方法

本文利用多源遥感数据对薛定谔盆地及邻区进

行了地形地貌、岩石学以及构造形迹方面的分析,编制了1:2 500 000 薛定谔盆地及邻区地质图。各个地质特征的研究方法阐述如下。

2.1.1 地形地貌

高程数据和影像数据经常用来进行研究区的地形分析。在本文中,笔者以(75°S,132.5°E)为中心,90°~175°E、65°~85°S范围为研究区域,以月球勘测轨道飞行器激光高度计数据(LOLA)及宽视角相机数据(WAC)为背景,并利用LOLA数据绘制了沿A—B、C—D线的高程剖面(图4a、b),用以进行盆地内局部区域的地形细节刻画。盆地单元的划分是根据1:2 500 000全月地质图划分标准进行的^[2]。

坡度、粗糙度也是用来描述地形特征的重要指标。坡度是过地表任意一点的切平面与水平面的夹角,表示地表在该点的倾斜程度;表面粗糙度可以用来反映地表的粗糙程度^[1]。坡度值的大小意味着倾斜程度的高低,坡度值越大,该地越陡峭,坡度值越小,该地越平缓;粗糙度越高,表面地形越粗糙,高程

月球薛定谔盆地及邻区地质图

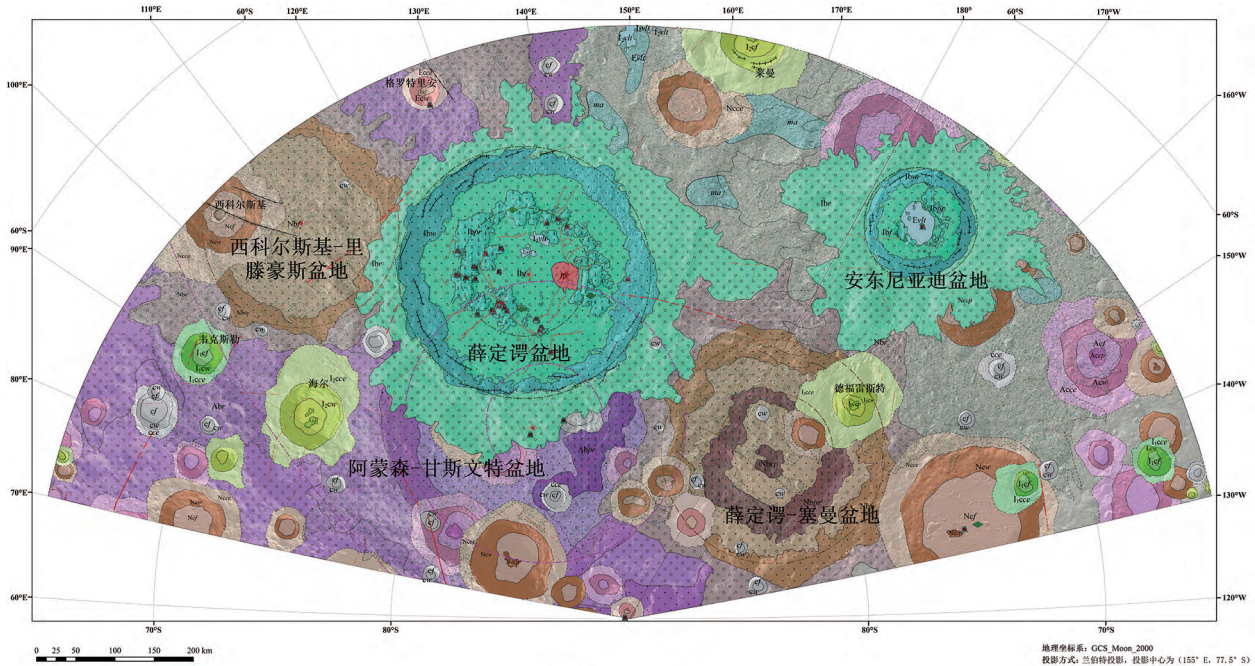


图 例

一、外力地质要素

(一) 撞击坑物质

1. 爱拉托逊纪

- Eccc 连续溅射物
- Ecw 坑壁物质
- Ecf 坑底物质

2. 雨海纪

(1) 晚雨海世

- I₂ccc 连续溅射物
- I₂cw 坑壁物质
- I₂cf 坑底物质
- I₂ccp 中央峰物质

(2) 早雨海世

- I₁ccc 连续溅射物
- I₁cw 坑壁物质
- I₁cf 坑底物质

3. 酒海纪

- Nccc 连续溅射物
- Ncw 坑壁物质
- Ncf 坑底物质

4. 艾肯纪

- Acce 连续溅射物
- Acw 坑壁物质
- Acf 坑底物质
- Accp 中央峰物质

5. 年代未确定

- cce 连续溅射物
- cw 坑壁物质
- cf 坑底物质

(二) 大型盆地建造

- 1. 雨海纪
 - I₂be 溅射物建造
 - I₂br 盆缘建造
 - I₂bw 盆壁建造
 - I₂bf 盆底建造
 - I₂brk 峰环建造
- 2. 酒海纪
 - Nbr 盆缘建造
 - Nbw 盆壁建造
 - Nbf 盆底建造

峰环建造

- Nbrk 峰环建造
- Nbrk 中央峰建造
- 3. 艾肯纪
 - Abr 盆缘建造
 - Abw 盆壁建造
 - Abf 盆底建造
 - Abrk 峰环建造

(三) 构造形迹

- 1. 线性构造
 - cc 撞击坑链 (cc)
 - if 撞击断裂 (if)

二、内动力地质要素

(一) 岩石建造

- 1. 月海玄武岩
 - vlt 极低钛玄武岩
- 2. 非月海岩石
 - ma 镁质斜长岩套
 - fn 亚铁苏长岩套
 - fa 亚铁斜长岩套
- 3. 其他特殊岩石
 - tr 纯斜长岩

富橄榄石岩套

- pj 火成碎屑岩

(二) 构造形迹

- 1. 线性构造
 - ls 叶状陡坎 (ls)
 - cf 坑底断裂 (cf)
 - sf 浅层断裂 (sf)
 - idf 推测深部断裂 (idf)
- 2. 环形构造
 - m 质量瘤
 - v 火山口

图 2 1:2 500 000 薛定谔盆地及邻区地质图

Fig. 2 1:2500000 geological map of the Schrödinger basin and adjacent areas

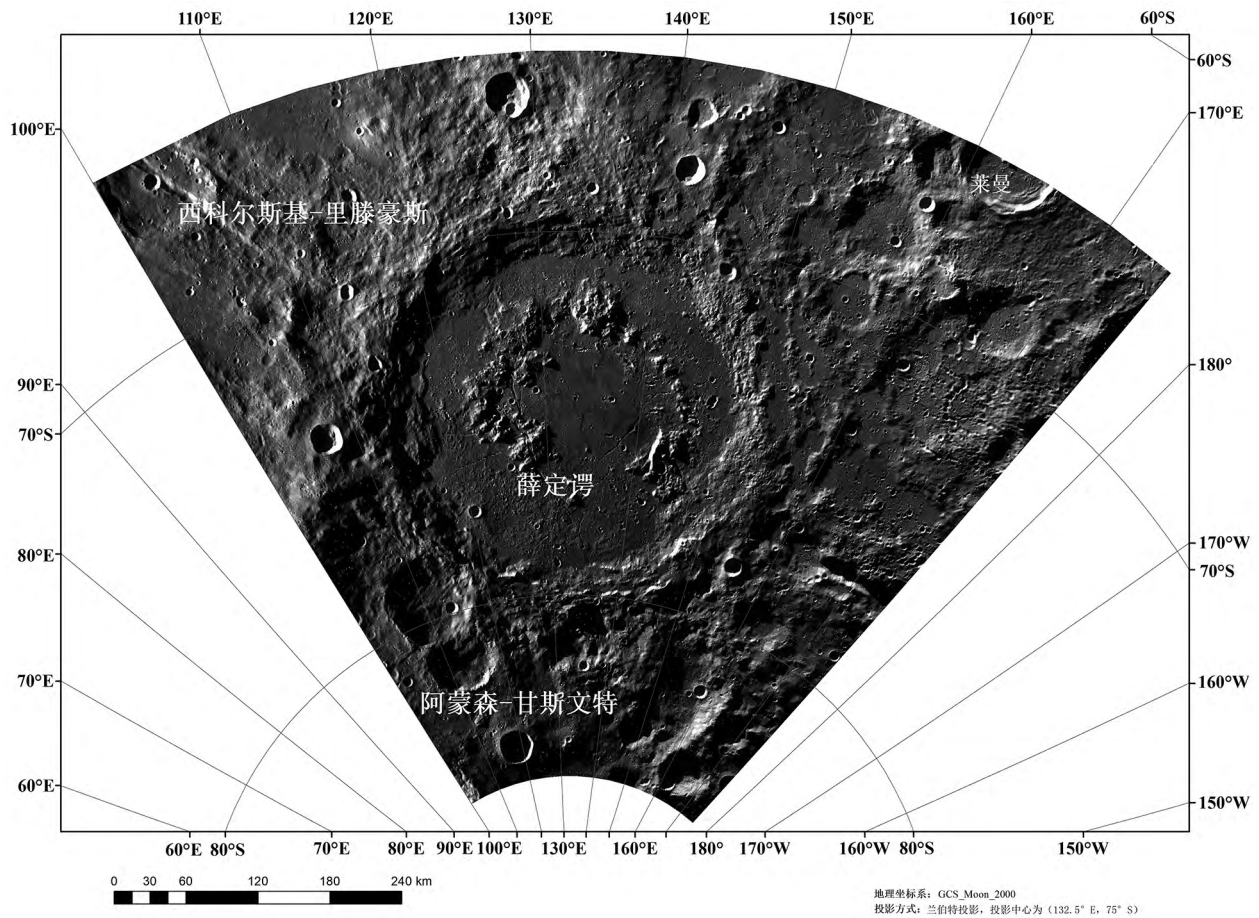


图3 薛定谔盆地的WAC影像图
Fig. 3 WAC image of the Schrödinger basin

变化越大。笔者利用高程数据和全月16像素/度分辨率的均方根高度粗糙度数据^[13]制作了薛定谔盆地及邻区的坡度图和粗糙度图(图4c,d)。

2.1.2 岩石学

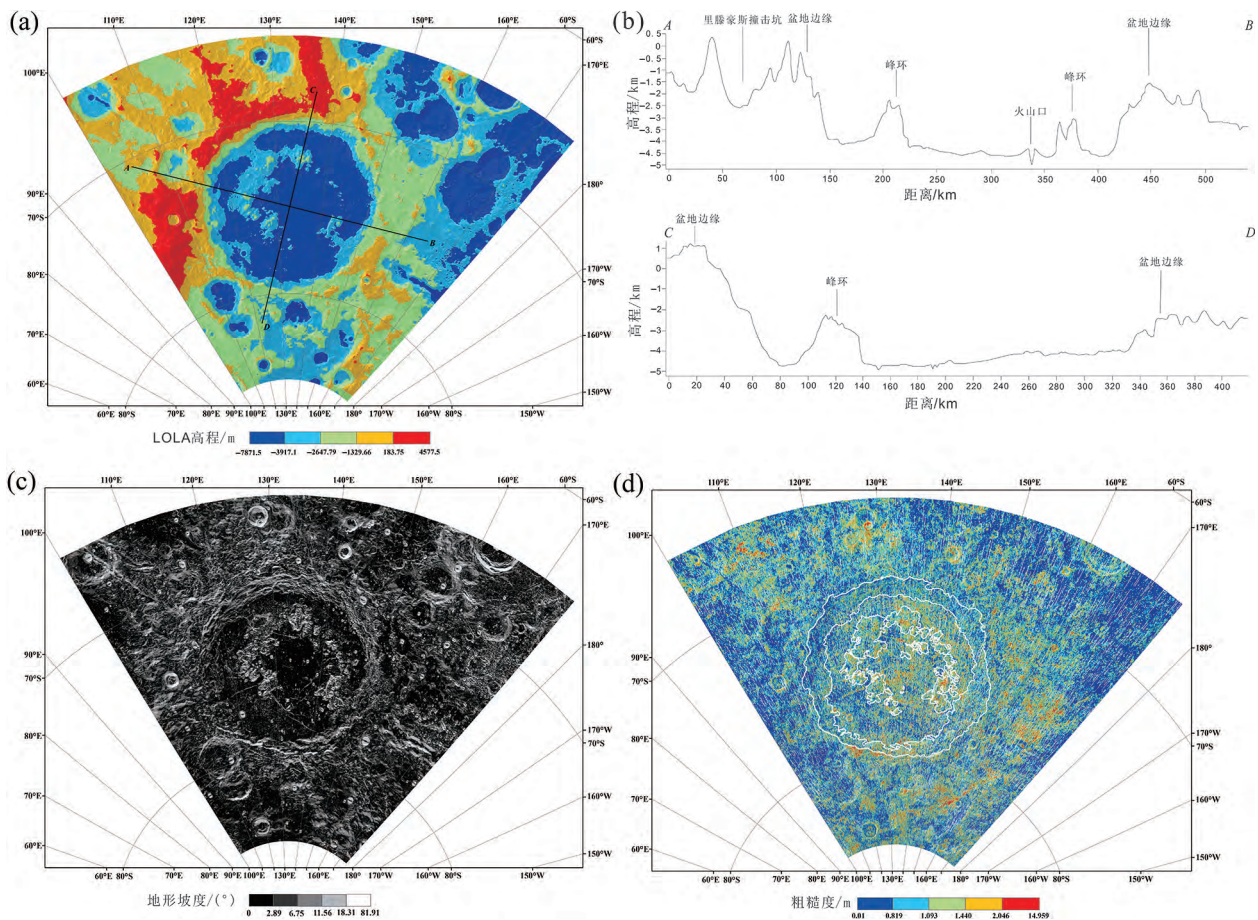
岩石是月球演化过程中保存下来的地质记录,是了解月球形成、演化过程的重要窗口。根据1:2 500 000月球岩石类型分布图划分标准对岩石类型进行划分,岩石可分为月海玄武岩、非月海岩石以及特殊岩石3类。月海玄武岩根据钛含量的高低进一步细分为极低钛、低钛、中钛、高钛和极高钛5类;非月海岩石进一步细分为亚铁斜长岩套、亚铁苏长岩套、镁质斜长岩套、KREEP岩套、KREEP玄武岩、碱性岩套和镁质岩套;特殊岩石又包括纯斜长岩、尖晶石斜长岩、富橄榄石岩套、火成碎屑岩和硅质火山岩^[14]。本文以我国嫦娥系列工程数据为基础,结合国外的月球勘探者号伽马射线谱仪(LPGRS)^[15]、Kaguya多谱段成像仪(MI)^[16]、月船一号

月球矿物绘图仪(M³)^[17]、克莱门汀紫外-可见光(UVVIS)成像光谱^[18]、光谱剖面仪(SP)^[8-9]等数据,综合月球样品、陨石分析以及前人研究成果^[8-9,19-21],在薛定谔盆地及邻区(经纬度范围为90~175°E,65~85°S)内进行岩石类型的判别。

另外,本文针对薛定谔盆地内的月海玄武岩进行了定年:使用Kaguya的TC数据^[22]对盆地内的两处月海玄武岩分布范围进行了重新标定,采用Yue等^[23]的方法,利用CraterTools和craterstats2.0工具^[24-25]分别在两处玄武岩单元内对直径为300~817 m(绿色,图6)的56个撞击坑和350~724 m(红色,图6)的21个撞击坑进行直径-频率分布测量统计定年。

2.1.3 构造形迹

本文的构造形迹分析是参照1:2 500 000月球地质图划分标准来进行的,主要划分为线性构造和环形构造两类;线性构造可进一步细分为推测深部



(a)—LOLA 高程图; (b)—剖面线 AB、CD 对应的剖面图; (c)—坡度图; (d)—表面粗糙度图。

图 4 薛定谔盆地地形特征

Fig. 4 Topographic features of the Schrödinger basin

断裂、浅层断裂、月堑、皱脊、月溪、坑底断裂、叶状陡坎、撞击断裂以及撞击坑链; 环形构造可进一步细分为火山口、穹窿、质量瘤、撞击坑以及撞击盆地^[26]。本文以 WAC 数据、LOLA 数据、GRAIL 布格重力异常影像, 以及月亮厚度影像数据^[27] 为主, 以局部地形剖面分析为辅, 结合陆天启等^[28-29] 关于构造形迹的判别特征研究, 在薛定谔盆地 ($90^{\circ}\sim 175^{\circ}\text{E}$, $65^{\circ}\sim 85^{\circ}\text{S}$) 范围内进行构造类型判别。其中, 薛定谔盆地底部的断裂按上述分类原则应归为坑底断裂, 但为了读者方便理解与本文研究, 笔者在此文中将薛定谔盆地底部的坑底断裂用盆底断裂来表述。

2.2 地质特征解译结果

2.2.1 地形地貌特征

研究区的高程范围是 $-7\ 871.5\sim 4\ 577.5\text{ m}$, 相对高差为 $12\ 449\text{ m}$ 。从整体上来讲, 地势西高东低, 局部范围内落差较大, 主要指薛定谔盆地的盆缘与盆底的过渡区, 即盆壁的高差较大。这种较大的

高差可能是遭受撞击后的强烈挖掘作用造成的。结合 DEM 数据以及沿 A—B、C—D 线的高程剖面可以清晰地看出, 薛定谔盆地具有明显的地势凹陷以及较为完整的峰环盆地结构, 即由外至内可以划分出溅射物建造、盆缘建造、盆壁建造、盆底建造和峰环建造。此外, 沿着剖面线 A—B 还可以很直观地看出里滕豪斯撞击坑以及盆地内部存在的火山口。如图 4(c) 所示, 研究区坡度范围为 $0^{\circ}\sim 81.91^{\circ}$, 约 80% 区域的坡度都在 11.56° 以上, 坡度较高的区域主要位于峰环、盆壁以及撞击坑的坑壁上, 说明这些区域地形具有陡峭的地质特征。如图 4(d) 所示, 绝大部分区域的粗糙度 (单位为 m) 在 1.440 m 以下, 只有约 10% 的区域粗糙度达到 1.440 m 以上, 甚至达到 14.959 m 。粗糙度较高的部分主要分布在盆地的峰环、周围区域撞击坑的坑壁和坑缘上, 且多呈环形, 这可能是峰环凸起、坑壁塌陷时石块滚落堆积导致的, 也说明这些位置露头新鲜, 受侵蚀程度较

小, 是以后着陆器采样的理想位置。

2.2.2 岩石学特征

研究区内月海岩石、非月海岩石及特殊岩石等3种岩石类型都有出露, 主要有极低钛月海玄武岩(*vlt*)、亚铁斜长岩套(*fa*)、镁质斜长岩套(*ma*)、亚铁苏长岩套(*fn*), 以及纯斜长岩(*pa*)、富橄榄石岩套(*ol*)和火成碎屑岩(*py*) (图5), 这些都是由月球的内动力地质作用所形成的岩性。

薛定谔盆地内发育有两块月海玄武岩区域, 都分布在峰环内的盆底建造上, 出露面积约为363 km²。前人对薛定谔盆地内月海玄武岩的研究始于1994年, Shoemaker等^[5]利用克莱门汀影像数据对这两块月海玄武岩进行了撞击坑直径-频率分布测量, 认为该处玄武岩的年代接近雨海纪-爱拉托逊纪的分界线年龄, 为3.2 Ga。Mest等^[6]同样利用克莱门汀影像数据, 采用相同的定年方法, 获得晚雨海世(3.8~3.2 Ga)的测年结果, 认为月海玄武岩单元是整个盆地内最年轻的地质单元。笔者利用探测日期较新的TC系列影像数据重新标定了月海玄武岩范围, 开展了定年研究, 结果分别为3.26 (绿色区域) 和3.36 Ga (红色区域) (图6), 为晚雨海世。薛定谔盆地撞击规模较大, 却仅发育小

面积的月海玄武岩, 笔者认为可能是由于该处月壳较厚或者出现了明显异常的生热元素供给缺失, 并且该玄武岩应该形成于偶然的单次喷发而不是熔岩流。

亚铁斜长岩(*fa*)是研究区内分布面积最大的岩石(图5), 广泛分布在薛定谔盆地西侧和北侧的盆壁、西北部和东南部的盆底建造以及盆地西侧、北侧、南侧外围区域, 总出露面积达到 2.63×10^7 km²。镁质斜长岩(*ma*)呈补丁状分布在亚铁斜长岩和亚铁苏长岩之间, 出露面积为 6.7×10^4 km²。较为特殊的亚铁苏长岩(*fn*)广泛分布在盆地东南方向的盆壁建造以及东侧外围区域, 出露面积达 6.2×10^5 km²。大部分纯斜长岩分布在薛定谔盆地的峰环建造上, 其余零星分布在盆底建造和盆地外围区域。富橄榄石岩套共出露有3处, 2处分布在盆地的峰环建造区域, 剩余1处分布在盆底建造区域, 该岩石的出现表示可能有深部物质出露。另外在盆地内有火成碎屑岩(*py*)沉积, 面积约为996.85 km², 且火山口清晰可见, 对于该火成碎屑岩的年龄, Shoemaker等^[5]认为比盆底内出露的玄武岩更加年轻, 可能形成于爱拉托逊纪晚期-哥白尼纪, 年龄约为1 Ga; Mest等^[6]认为可能形成于晚雨海世

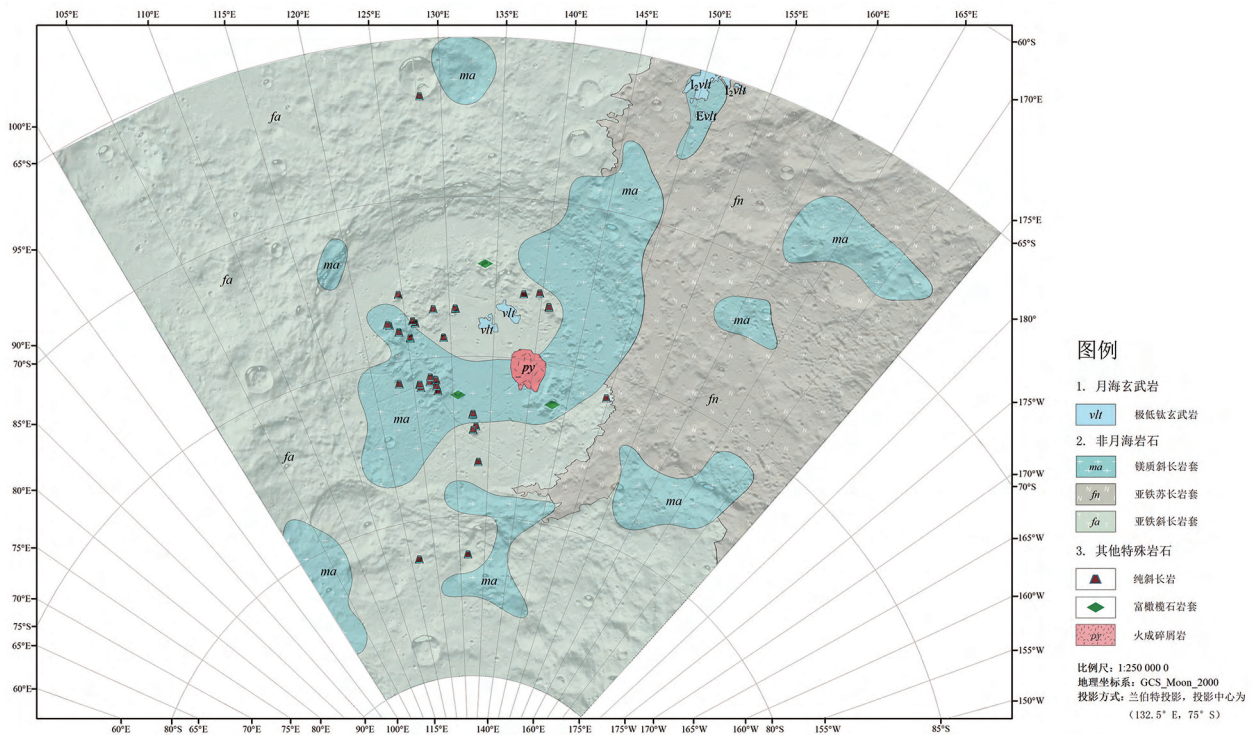
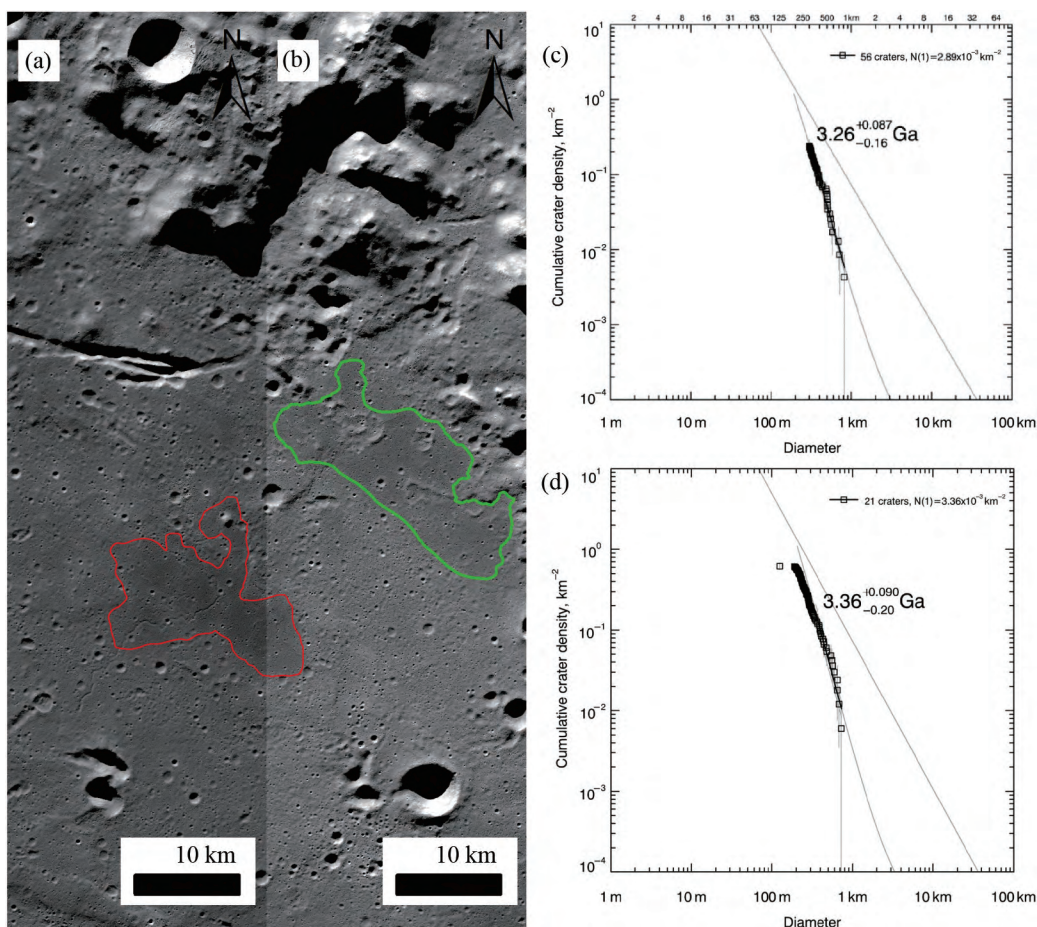


图5 薛定谔盆地岩石分布概略图

Fig. 5 Lithological map of the Schrödinger basin and adjacent area



(a) Kaguya TC 数据 TCO_MAPs02_S72E132S75E135SC; (b) Kaguya TC 数据 TCO_MAPs02_S72E135S75E138SC; (c) 绿色玄武岩单元定年结果; (d) 红色玄武岩单元定年结果。

图 6 薛定谔盆地中月海玄武岩分布位置及定年结果

Fig. 6 Distribution of basalt units in the Schrödinger basin (a, b) and the dating results (c, d)

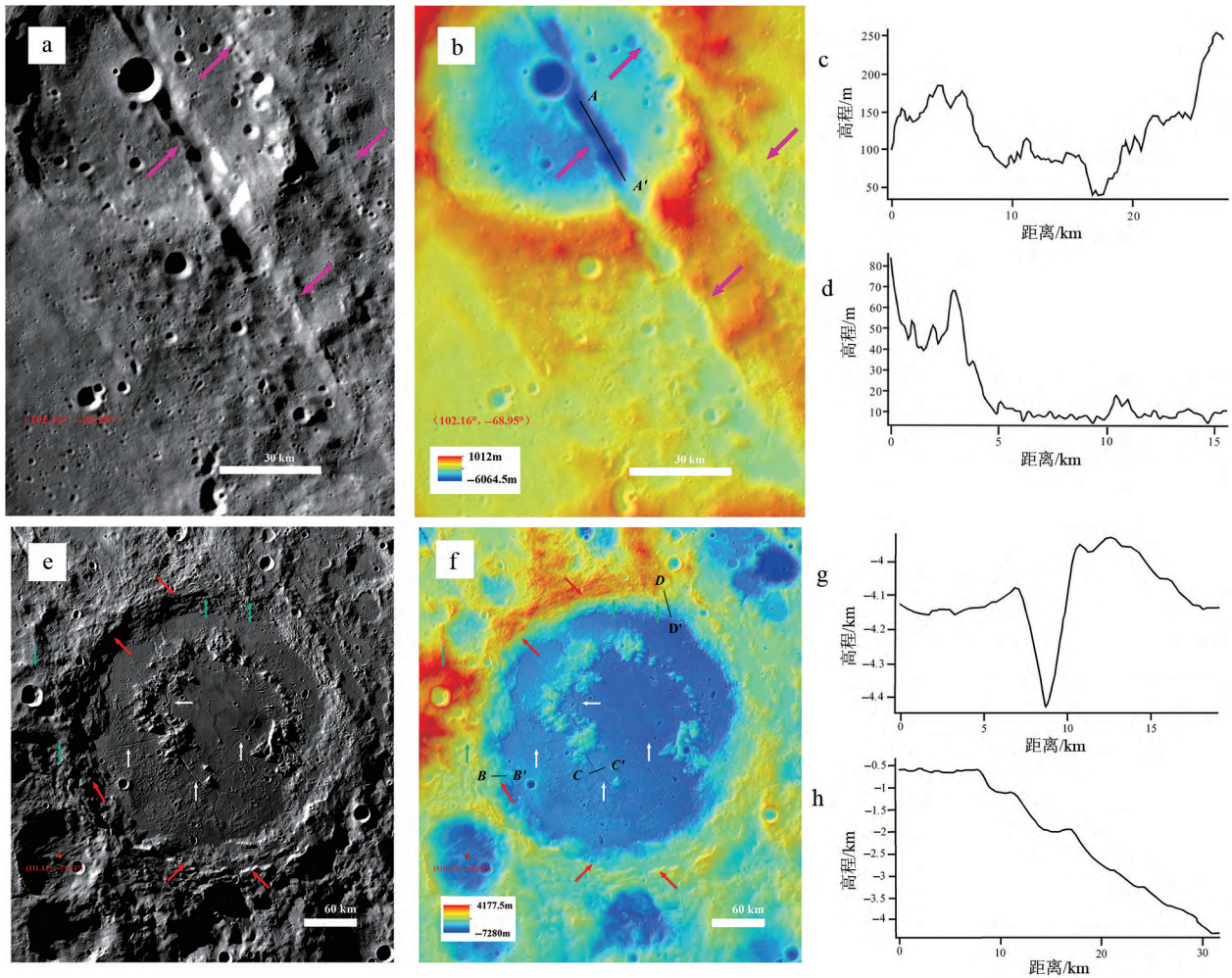
(3.8~3.2 Ga)到早爱拉托逊世(3.2~2.5 Ga)。该火成碎屑岩的形成年龄争议较大。

2.2.3 构造形迹特征

在研究区中,线性构造发育较多,环形构造发育较少。线性构造主要发育有撞击坑链、撞击断裂、盆底断裂、浅层断裂和推测深部断裂;环形构造主要发育有质量瘤、火山口、撞击坑和撞击盆地(图 2)。

研究区内共发育 3 条撞击坑链,方向均呈北西-南东。其中 1 条主要发育在西科斯基撞击坑内,围绕薛定谔盆地呈放射状分布、延伸,名为薛定谔坑链。坑链内凹坑形状复杂多样,呈拉长状,整体纹理结构粗糙,边缘较为模糊。剩余 1 条发育在格罗特里安撞击坑,名为普朗克坑链。经过影像分析认为这 3 条撞击坑链的形成均是大型盆地或撞击坑形成时抛射出的撞击溅射物回落至月球表面时形成的一系列次级撞击坑。其中特征最为明显、长度

最长的一条如图 7a、b 所示,长度约为 125 km,从其局部横切剖面(图 7c)可以辨认出次级撞击坑为简单碗形坑,坑深约 1.2 km,具有清晰、完整的撞击坑结构,坑壁和连续溅射物发育。从高程剖面可以识别出该撞击事件是呈一定角度的斜撞击,故具有坑壁不对称的特征。盆地内共发育 18 条撞击断裂(图 7e、f 中红色箭头指示部分撞击断裂),形成年代全部为晚雨海世。这 18 条撞击断裂分布在薛定谔盆地西北部、西南部和南部的盆缘、盆壁上,呈阶梯状、不规则台阶状展布,影像上断裂两侧的色调有较大差异,具有较为明显的陡立滑坡面(图 7d),从而发生坑壁物质滑落,因此从成因上判断这些撞击断裂为撞击作用和垮塌作用共同形成。盆底断裂在盆地内共发育 39 条(图 7e、f 中白色箭头指示部分盆底断裂),在坑底基本围绕峰环建造呈放射状或同心圆状分布(图 2)。其中较长的两条分别切穿了火山



a—撞击坑链(粉色箭头)分布位置,底图为 WAC 影像;b—A—A' 为撞击坑链高程剖面线,底图为 LOLA 高程数据和 WAC 影像数据叠加;c、d—A—A'、B—B' 的地形剖面;e—撞击断裂(红色箭头)、盆底断裂(白色箭头)和浅层断裂(绿色箭头)分布位置,底图为 WAC 影像;f—B—B'、C—C'、D—D' 分别为撞击断裂、盆底断裂和浅层断裂剖面线,底图为 LOLA 高程数据和 WAC 影像数据叠加;g、h—C—C'、D—D' 的地形剖面。

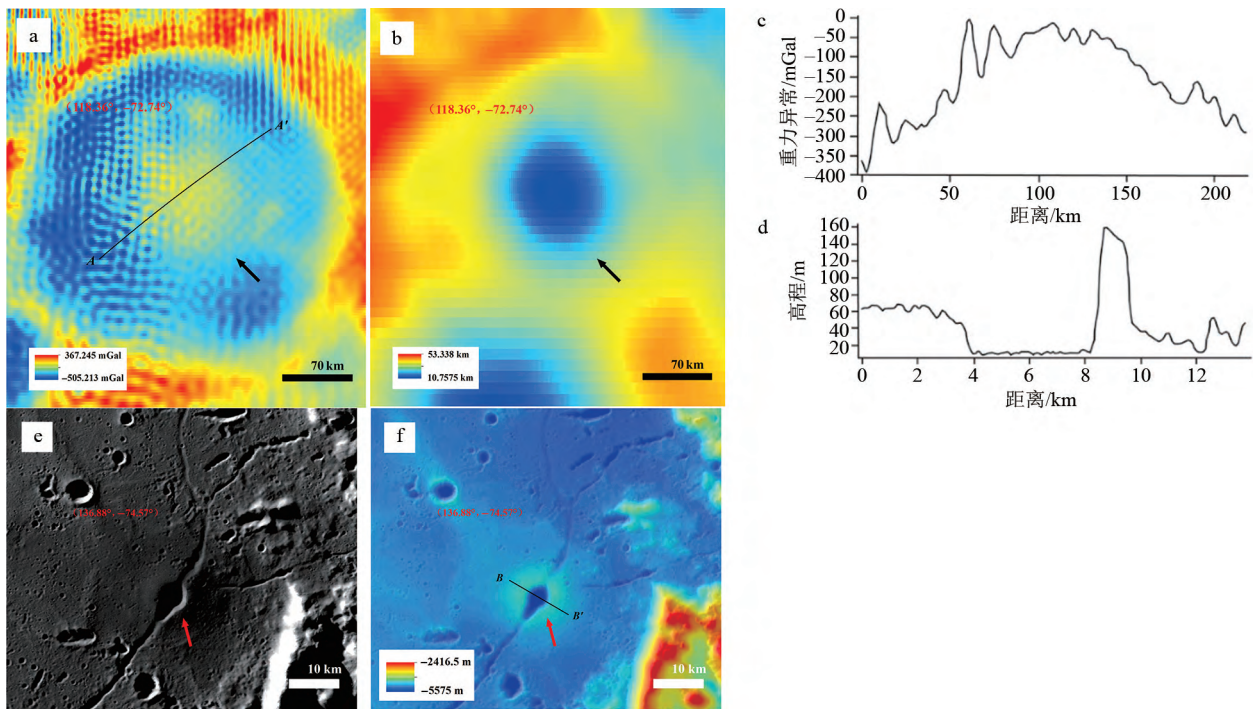
图 7 薛定谔盆地线性构造解译结果

Fig. 7 Interpreted linear structures in the Schrödinger basin

口和峰环。断裂的类型均为张性断裂,局部横切剖面具有明显的“V”字形特征(图 7g)。这些盆底断裂形成于晚雨海世,年代可能同盆底出露月海玄武岩的年代一致或更晚。研究区中共发育 7 条浅层断裂(图 7e,f 中绿色箭头指示部分浅层断裂),影像上均表现为直线状延伸,具有明显的位移特征,地形图上浅层断裂两侧色调有较大差异,剖面图上显示出浅层断裂的高程急剧变化(图 7h)。浅层断裂与撞击断裂的区别在于:浅层断裂呈直线状,撞击断裂则与坑缘或坑壁建造呈弧形平行关系。关于浅层断裂成因,目前认为可能与薛定谔盆地形成时的局部应力作用相关。研究区内发育 4 条推测深部断裂,最长的一条长约 166 km(图 2)。此类构造的成因可能

与月球早期的全球性膨胀有关^[28,30]。

薛定谔盆地内发育质量瘤,中心位置坐标约为 133.48°E, 74.9°S。重力异常数据上体现为规则的圆形且数值明显高于周围地区(图 8a),重力异常剖面上呈现出正异常特征(图 8c),月亮厚度值明显低于周围地区(图 8b)。盆地内发育 1 处火山口(图 8e,f),较周围高出约 450 m,地形剖面上呈现“U”字形特征(图 8d)。该火山口周围沉积了大量的火成碎屑岩。关于这个火山口以及周围沉积的火成碎屑岩,前人做了很多工作,他们在各自的薛定谔地区地质图中都识别出火成碎屑沉积及其范围,也判定了组成该地质体单元的物质成分,但并没有对引起该沉积的构造进行识别、判定及标出^[5-7]。而



a、b—质量瘤(黑色箭头)附近 GRILAB 布格重力异常和月亮厚度数据;c、d—A—A' 的重力异常剖面 and B—B' 的地形剖面;e—火山口(红色箭头)附近 WAC 影像;f—火山口(红色箭头)附近 LOLA 高程数据和 WAC 影像叠加。

图 8 薛定谔盆地环形构造解译结果

Fig. 8 Interpreted circular structures in the Schrödinger basin

Mest 等^[6]只是将其简单称为暗晕火山口(dark-halo crater),在其地质图中也并未明确标出。笔者根据陆天启^[28]关于火山口的判别标志认为,在(139°E, 75°S)处存在火山口构造(图 8e,f),并在地质图中标出该火山口。

3 讨论

区域地质综合研究是科学地恢复、重建研究区形成过程的有效手段,通常能够客观地反映研究区现今的物质组成、结构构造特征和时空演化历史等,将其表面地质和深部地质进行综合对比,区分构造演化的阶段,最终得出动力学演化过程。

通过详细分析薛定谔盆地内的区域地质特征,笔者将其形成过程大致分为撞击成盆前、成盆期以及成盆后改造期 3 个阶段(图 9),具体过程阐述如下。

3.1 薛定谔盆地撞击事件前地质特征与构造演化

在南极-艾肯盆地形成之后、薛定谔撞击事件发生之前,研究区内已发生多次撞击事件(图 2),形成的撞击盆地有阿蒙森-甘斯文特盆地、薛定谔-塞

曼盆地、西科斯基-里滕豪斯盆地等。研究区内的亚铁斜长岩套、亚铁苏长岩套以及镁质斜长岩套等,在薛定谔盆地撞击事件发生之前就已形成,撞击挖掘使得它们溅射、出露、沉积于月表。关于这 3 种岩石的成因做如下讨论。

现有资料研究表明,距今约 46 亿年前,全月球曾处于熔融状态的“岩浆洋”时期,月球温度随时间逐渐下降,“岩浆洋”开始发生结晶分异作用,橄榄石、斜方辉石等密度大的矿物则沉积在岩浆洋的底部,形成超镁铁质月幔堆晶,斜长石密度较小,因而飘浮在岩浆洋的表层,形成了长石质的原始斜长岩月壳^[31-33]。根据返回的月球斜长岩样品发现其中的辉石和橄榄石的 $Mg^{\#}$ 与其他非月海岩石相比更偏亚铁质,因此现在常用亚铁斜长岩套来指代 Apollo 斜长岩样品^[34]。

能量巨大的 SPA 撞击挖掘深度可能已经到达上月幔,产生大量熔融体即撞击熔融池^[35-36]。亚铁苏长岩套是 SPA 盆地内有别于月球其他区域的特殊岩石,这类特殊岩石被解释为:SPA 撞击中挖掘出的深部下月壳岩石、没有分异的撞击熔融重结晶产物或是具有幔源超镁铁质初始成分的熔融席部分

分异后的顶层结晶物质^[35-40]。

在原始的岩浆洋分异开始后不久,就发生了早期堆晶的改造作用。镁质斜长岩套母岩浆的成因可能主要有两种:一是放射性元素衰变累积的热量导致深部月幔发生部分熔融而产生富镁岩浆^[41];二是堆晶体之间发生重力失衡,深部月幔富镁堆晶物质翻转上升到月球底部引发减压熔融而产生富镁岩浆^[42]。这两种情况都可能交代斜长质月壳,产生镁质斜长岩套^[43]。

3.2 成盆期地质特征与构造演化

晚雨海世时期,外来撞击体以约 15 km/s 的速度,与水平方向呈 40°~50°的撞击角斜撞向 SPA 盆地的盆底与盆壁的交界处^[44-47](图 9a),强烈的撞击使得该处形成一个直径约为 95.5 km 的瞬时坑,产生体积约为 $1 \times 10^5 \text{ km}^3$ 的撞击熔融体^[48-49]。靶体物质开始向外溅射(图 9b),在其边缘不断累积形成瞬时坑,也有部分物质二次撞击在盆地西侧的西科斯基-里滕豪斯盆地内,形成了薛定谔坑链。强烈的撞击力导致瞬时坑处产生巨大质量亏损,由于冲击波反弹,坑底开始抬升,坑底的持续抬升以及坑壁的塑性变形使得瞬时坑坑壁的侧向倾角达到最大,形成倾向中心、具有明显陡立滑坡面的正断层,这种正断层形成的位置可能是撞击断裂或浅层断裂(图 9c)。沿着断层滑落向坑中心的坑壁物质和坑底物质不断抬升形成中央峰,因其过高具有不稳定性而发生向下和向外的重力坍塌,坍塌物质向外推覆并堆积在已经坍塌的瞬时坑的坑壁上,逐渐形成薛定谔盆地内部的峰环(图 9d)。

峰环建造是盆地内最古老的地质单元,其上出露的纯斜长岩以及富橄榄石岩套通常能够代表深部的物质组成。如图 5 所示,盆地西侧和东北侧的峰环上存在大量纯斜长岩露头,北侧、西南侧以及东南侧峰环上零星分布富橄榄石岩套露头。纯斜长岩可能形成于月球岩浆洋演化时期,目前人们认为纯斜长岩的分布位置可能在月球 3~30、10~60 或 9~63 km 深度处^[9,19-20],因此这些露头可能是随着盆地底部月幔楔隆起被携带到月表的。经典岩浆洋模型认为橄榄石矿物是月幔的主要成分,其在月表的出露可能指示着该处物质直接来自月幔而未经熔融作用改造。不过,薛定谔盆地内出露的富橄榄石岩套露头是否来源于月幔是存在争议的。在盆地撞击之前,SPA 盆地的形成已经使得该处产生了约 6 km 厚的 SPA 盆地溅射物^[7],随着盆地南侧阿蒙森-甘斯文

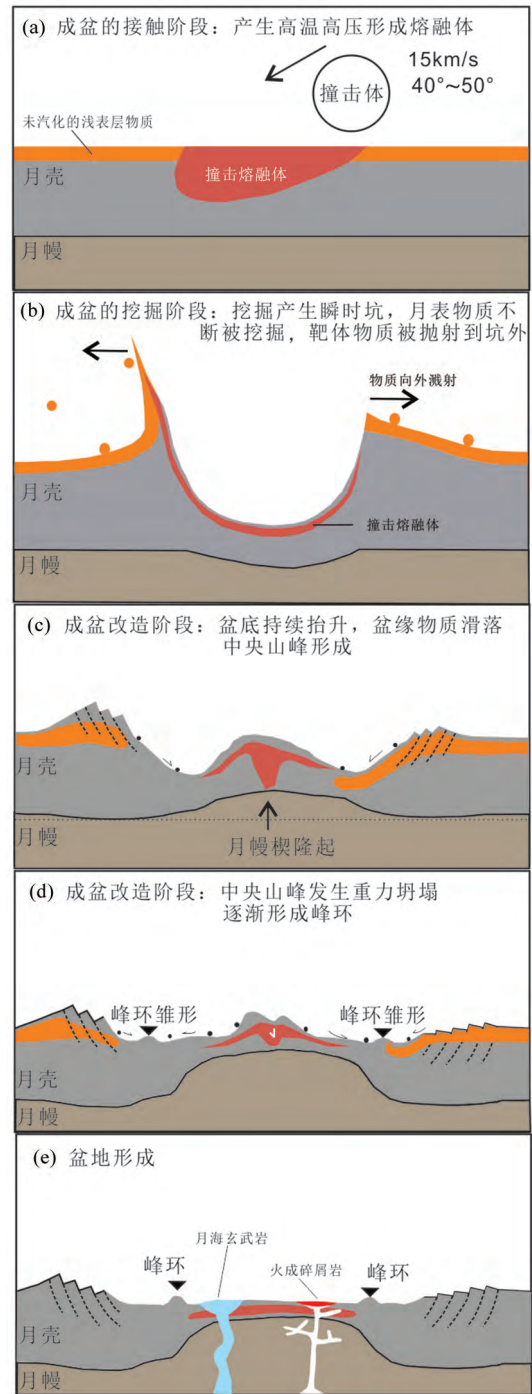


图 9 薛定谔盆地形成演化过程示意图
Fig. 9 Schematic diagram describing the formation and evolution of the Schrödinger basin

特盆地、薛定谔-塞曼盆地和西侧西科斯基-里滕豪斯盆地陆续形成,并向薛定谔撞击的靶区位置再次累积了厚约 8 km 的溅射物,因此在薛定谔盆地形成之前就可能已经有约 14 km 厚的溅射物覆盖^[7,50-53]。前人利用 Diviner 数据发现月表并没有橄榄石含量超过 90% (体积分数) 的岩性(纯橄岩)

露头^[21],结合 Xu 和 Xie^[47]计算的薛定谔盆地挖掘深度(19.6 km),笔者认为薛定谔撞击并没有穿透月壳到达莫霍面,富橄榄石露头更可能是深成岩浆作用所形成,随峰环形成而被带到月表。

3.3 后期改造阶段的地质特征与构造演化

在 36 亿年前,薛定谔盆地区域一直处于构造伸展背景下的张力状态^[28]。在瞬时坑早期物质塌落和峰环形成过程中,薛定谔盆地并没有完全完成重力补偿,而是逐渐接近均衡状态。在这个状态中,形成了质量瘤、月海、坑底断裂和火成碎屑岩。薛定谔撞击后,月幔隆起将盆地下方的莫霍面抬升到一种短暂的平衡状态形成质量瘤^[54]。此后,撞击导致隆起的月幔发生部分熔融而产生岩浆,岩浆沿着减薄和破裂的月壳喷发形成月海玄武岩(图 9e)。与峰环建造呈同心圆状或放射状的盆底断裂成因为:岩浆侵入瞬时坑下方的角砾岩透镜体形成了岩床,经坑底抬升后形成^[55-57]。盆底断裂的形成有时也为深部岩浆的上涌提供了通道,类似于地球上的岩墙。岩浆沿着薛定谔盆底建造东南方向处的一条走向为北东-南西方向的盆底断裂上涌喷发形成火山口,并在附近沉积了火成碎屑岩(图 9e)。

薛定谔盆地形成后,特殊的撞击位置使得盆地的东南侧盆壁及东侧溅射物中出露的岩性为亚铁苏长岩,盆地的西侧、北侧和南侧大部分区域岩性均为亚铁斜长岩。薛定谔盆地内出露的大型斑块状镁质斜长岩有可能在 SPA 盆地撞击之前就已形成,也有可能是 SPA 盆地撞击事件过程中形成的,因薛定谔盆地撞击改造作用而被显露出月表。至此,薛定谔盆地撞击事件结束(图 9e)。

4 结论

(1)研究区内岩性以亚铁斜长岩套、亚铁苏长岩套和镁质斜长岩套为主,零星出露月海玄武岩、纯斜长岩、富橄榄石岩套以及火成碎屑岩。两处月海玄武岩的形成年龄分别为 3.26 和 3.36 Ga。纯斜长岩和富橄榄石岩套随峰环形成出露于月表,火成碎屑岩是薛定谔盆地在构造伸展背景的张力状态下岩浆沿坑底断裂喷涌冷凝形成的。

(2)研究区内主要发育的构造有撞击坑链、撞击断裂、坑底断裂、浅层断裂、推测深部断裂、质量瘤和火山口。其中撞击坑链、撞击断裂和浅层断裂可能是在盆地撞击后很短的时间内所形成的。坑底断

裂、质量瘤和火山口是在盆地后续的重力均衡过程中逐渐形成的。

(3)外来撞击体斜撞向 SPA 盆地的盆底与盆壁交界处形成瞬时坑,并对外抛射前薛定谔物质形成坑缘。由于冲击波反弹,盆底抬升形成中央峰,后因不稳定性发生塌陷。中央塌陷以及瞬时坑的坑缘物质向盆地中心滑落的作用逐渐形成峰环建造、盆壁建造和盆缘建造,最终形成薛定谔盆地。

嫦娥数据集由中国月球与深空探测工程地面应用系统处理制作,由中国国家航天局提供(<http://moon.bao.ac.cn>),在此表示诚挚感谢。

参考文献

- [1] 刘敬稳,刘建忠,郭弟均,等.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,2016,32(1):135-143.
- [2] 刘敬稳.全月盆地地质解译与时空演化研究[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2022:19-25.
- [3] 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.
- [4] WILHELMS D E, HOWARD K A, WILSHIRE H G. Geologic map of the south side of the Moon[M]. Reston, Va.: The Survey, 1979.
- [5] SHOEMAKER E M, ROBINSON M S, ELIASON E M. The south pole region of the moon as seen by clementine[J]. Science, 1994, 266(5192): 1851-1854.
- [6] AMBROSE W A, WILLIAMS D A. Recent advances and current research issues in lunar stratigraphy[M]. Boulder, Colo.: Geological Society of America, 2011.
- [7] KRAMER G Y, KRING D A, NAHM A L, et al. Spectral and photogeologic mapping of Schrödinger Basin and implications for post-South Pole-Aitken impact deep subsurface stratigraphy[J]. Icarus, 2013, 223(1): 131-148.
- [8] YAMAMOTO S, NAKAMURA R, MATSUNAGA T, et al. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(8): 533-536.
- [9] YAMAMOTO S, NAKAMURA R, MATSUNAGA T, et al. Massive layer of pure anorthosite on the Moon[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(13): 34-47.
- [10] SMITH D E, ZUBER M T, JACKSON G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1/2/3/4): 209-241.
- [11] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, et al. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1/2/3/4): 81-124.

- [12] KONOPLIV A S, PARK R S, YUAN D N, et al. The JPL lunar gravity field to spherical harmonic degree 660 from the GRAIL Primary Mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(7): 1415-1434.
- [13] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Initial observations from the lunar orbiter laser altimeter (LOLA) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): 1-6.
- [14] CHEN J, LING Z C, LIU J Z, et al. Digital and global lithologic mapping of the Moon at a 1:2,500,000 scale[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(20): 2050-2054.
- [15] LAWRENCE D J, FELDMAN W C, ELPHIC R C, et al. Iron abundances on the lunar surface as measured by the Lunar Prospector gamma-ray and neutron spectrometers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(E12): 1-26.
- [16] MYRIAM L, LUCEY PAUL G, ALEX C. Compositional maps of the lunar polar regions derived from the Kaguya spectral profiler and the lunar orbiter laser altimeter data [J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3(3):1-14.
- [17] BOARDMAN J W, PIETERS C M, GREEN R O, et al. Measuring moonlight: an overview of the spatial properties, lunar coverage, selenolocation, and related Level 1B products of the Moon Mineralogy Mapper[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: E00G14.
- [18] NOZETTE S, RUSTAN P, PLEASANCE L P, et al. The clementine mission to the moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, 266(5192): 1835-1839.
- [19] DONALDSON H K L, CHEEK L C, PIETERS C M, et al. Global assessment of pure crystalline plagioclase across the Moon and implications for the evolution of the primary crust [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119 (7): 1516-1545.
- [20] OHTAKE M, MATSUNAGA T, HARUYAMA J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. *Nature*, 2009, 461(7261): 236-240.
- [21] ARNOLD J A, GLOTCH T D, LUCEY P G, et al. Constraints on olivine-rich rock types on the Moon as observed by Diviner and M³: implications for the formation of the lunar crust [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(7): 1342-1361.
- [22] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, et al. Planned radiometrically calibrated and geometrically corrected products of lunar high-resolution Terrain Camera on SELENE[J]. *Advances in Space Research*, 2007, 42 (2): 310-316.
- [23] YUE Z Y, DI K C, WAN W H, et al. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples[J]. *Nature Astronomy*, 2022, 6(5): 541-545.
- [24] HARTMANN W K. Does crater "saturation equilibrium" occur in the solar system? [J]. *Icarus*, 1984, 60(1): 56-74.
- [25] NEUKUM G, IVANOV B A, HARTMANN W K. Cratering Records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System[C]//KALLENBACH R, GEISS J, HARTMANN W K. *Chronology and Evolution of Mars*. Dordrecht: Springer, 2001: 55-86.
- [26] LU T Q, ZHU K, CHEN S B, et al. The 1:2,500,000-scale global tectonic map of the Moon[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(19): 1962-1966.
- [27] WIECZOREK M A, NEUMANN G A, NIMMO F, et al. The crust of the moon as seen by GRAIL [J]. *Science*, 2013, 339(6120): 671-675.
- [28] 陆天启. 月球构造遥感识别及其演化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 28-51.
- [29] 陆天启, 陈圣波, 朱凯. 基于 GRAIL 重力数据的月球深部断裂识别和空间分布研究[J]. *地球物理学报*, 2019, 62(8): 2835-2844.
- [30] ANDREWS-HANNA J C, ASMAR S W, HEAD J W, et al. Ancient igneous intrusions and early expansion of the moon revealed by GRAIL gravity gradiometry[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 675-678.
- [31] WOOD J A, DICKEY J S J, MARVIN U B, et al. Lunar anorthosites[J]. *Science*, 1970, 167(3918): 602-604.
- [32] WARREN P H. The magma ocean concept and lunar evolution[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1985, 13: 201-240.
- [33] SHEARER C K. Thermal and magmatic evolution of the moon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 365-518.
- [34] DOWTY E, PRINZ M, KEIL K. Ferroan anorthosite: a widespread and distinctive lunar rock type [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1974, 24(1): 15-25.
- [35] CINTALA M J, GRIEVE R A F. The effects of differential scaling of impact melt and crater dimensions on lunar and terrestrial craters: some brief examples[M]//*Geological Society of America Special Papers*. Boulder: Geological Society of America, 1992: 51-60.
- [36] PIETERS C M, TOMPKINS S, HEAD J W, et al. Mineralogy of the Mafic Anomaly in the South Pole-Aitken Basin: implications for excavation of the lunar mantle [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(15): 1903-1906.
- [37] NAKAMURA R, MATSUNAGA T, OGAWA Y, et al. Ultramafic impact melt sheet beneath the South Pole-Aitken Basin on the Moon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(22): L22202.
- [38] POTTER R W K, COLLINS G S, KIEFER W S, et al. Constraining the size of the South Pole-Aitken Basin impact [J]. *Icarus*, 2012, 220(2): 730-743.
- [39] HURWITZ D M, KRING D A. Differentiation of the South Pole-Aitken Basin impact melt sheet: implications for lunar exploration [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(6): 1110-1133.
- [40] 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.
- [41] SHEARER C K, PAPIKE J J. Early crustal building processes on the moon: models for the petrogenesis of the magnesian suite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69 (13): 3445-3461.
- [42] SHEARER C K, ELARDO S M, PETRO N E, et al. Origin of the lunar Highlands Mg-suite: an integrated petrology, geochemistry, chronology, and remote sensing perspective [J]. *American Mineralogist*, 2015, 100(1): 294-325.
- [43] XU X Q, HUI H J, CHEN W, et al. Formation of lunar Highlands anorthosites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 536: 116138.
- [44] SCHULTZ P H, CRAWFORD D A. Origin and implications of non-radialimbrium sculpture on the moon[J]. *Nature*, 2016, 535(7612): 391-394.
- [45] SCHULTZ P H. Atmospheric effects on ejecta emplacement and crater formation on Venus from Magellan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(E10): 16183.
- [46] PIERAZZO E, MELOSH H J. Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modeling [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 141-167.
- [47] XU L Y, XIE M G. Ejectathickness distribution of the Schrödinger Basin on the moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(12): e2020JE006506.
- [48] CINTALA M J, GRIEVE R A F. Scaling impact melting and crater dimensions: implications for the lunar cratering record[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33(4): 889-912.
- [49] CINTALA M J, GRIEVE R A F. Scaling impact melting and crater dimensions: implications for the lunar cratering record[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1998, 33 (6): 1343.
- [50] FASSETT C I, HEAD J W, SMITH D E, et al. Thickness of proximal ejecta from the Orientale Basin from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: implications for multi-ring basin formation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): L17201.
- [51] GARRICK-BETHELL I, ZUBER M T. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken Basin[J]. *Icarus*, 2009, 204 (2): 399-408.
- [52] CROFT S K. Cratering flow fields: implications for the excavation and transient expansion stages of crater formation [J]. *Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference*, 1980, 11: 2347-2378.
- [53] MCGETCHIN T R, SETTLE M, HEAD J W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: implications for lunar basin deposits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 20(2): 226-236.
- [54] ANDREWS-HANNA J C. The origin of the non-mare mascon gravity anomalies in lunar basins[J]. *Icarus*, 2013, 222 (1): 159-168.
- [55] SCHULTZ P H. Floor-fractured lunar craters [J]. *The Moon*, 1976, 15(3/4): 241-273.
- [56] WICHMAN R W, SCHULTZ P H. Floor-fractured craters in Mare Smythii and west of Oceanus Procellarum: implications of crater modification by viscous relaxation and igneous intrusion models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(E10): 21201.
- [57] WICHMAN R W, SCHULTZ P H. Crater-centered laccoliths on the moon: modeling intrusion depth and magmatic pressure at the crater tarantius[J]. *Icarus*, 1996, 122(1): 193-199.