

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2021.3.11

# 月球佩塔维厄斯幅(LQ-21)数字地质填图与区域地质演化特征

许可娟<sup>1,2</sup>, 丁孝忠<sup>1,2,\*</sup>, 韩坤英<sup>1,2</sup>, 刘敬稳<sup>3</sup>, 凌宗成<sup>4</sup>, 庞健峰<sup>1,2</sup>, 王颖<sup>1,2</sup>

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. 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
4. 山东大学 空间科学院研究学院, 山东 威海 264209

XU Kejuan<sup>1,2</sup>, DING Xiaozhong<sup>1,2,\*</sup>, HAN Kunying<sup>1,2</sup>, LIU Jingwen<sup>3</sup>, LING Zongcheng<sup>4</sup>, PANG Jianfeng<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>

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

XU Kejuan, DING Xiaozhong, HAN Kunying, et al. Compilation of the geological map of the Petavius quadrangle of the Moon (LQ-21) and study on the regional geological evolution. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(2): 354-369

**Abstract:** The Petavius quadrangle (LQ-21) is located at the junction of the near and far sides of the Moon in the transition zone between the mare and highland terrain. Large impact basins such as Nectaris, Foecunditatis, and Smythii basins are developed around this region. Understanding the geological development of this area is helpful for understanding the development and evolutionary history of the Moon. Accordingly, this area is a key area in the digital geological mapping of the Moon. This work combines the Chang'E-1(CE-1) CCD image data, interference imaging spectrometer(IIM) data, laser altimeter (LAM) data, Chang'E-2(CE-2) CCD image data, as well as other lunar geological data, to study the material composition, structural elements, and geochronology of the lunar surface, and to compile the lunar geological map using the ArcGIS platform. So far, we have completed the geological map of the Petavius quadrangle at 1:2.5 million scale, summarized the regional geological evolutionary history, and established a spatial database for the geological map of this region.

**Keywords:** Moon; Petavius; Langrenus; geological evolution; digital geological mapping

**摘要:**佩塔维厄斯幅月球地质图(LQ-21)位于近月面与远月面交接位置,又处于月海和月陆的过渡区,周边邻近酒海、丰富海、史密斯海等大型撞击盆地,是月球数字地质填图工作中的一个典型区域。研究该地区的地质发育概况有助于了解月球的发展演化历史。本文利用中国探月工程所获得的“嫦娥一号”(CE-1)CCD影像数据、干涉成像光谱仪(IIM)数据、激光高度计(LAM)数据和“嫦娥二号”(CE-2)CCD影像数据以及其他已有的月球地质资料,应用 ArcGIS 平台,开展月表物质成分、构造要素、地质时代信息的研究和数字填图工作,编制了 1:2 500 000 佩塔维厄斯幅(LQ-21)数字月球地质图,总结了该地区区域地质演化历史并建立地质图空间数据库。

收稿日期:2020-12-28;修回日期:2021-03-06

基金项目: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);国家自然科学基金专项项目(41941003);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC028)

作者简介:许可娟(1987—),女,博士,主要从事区域地质编图及 GIS 应用的研究。E-mail: 867807379@qq.com

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

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2022,29(2)

关键词:月球;佩塔维厄斯;朗伦努斯;地质演化;数字地质填图

中图分类号:P184.62;P285.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2022)02-0354-0016

## 0 引言

数字地质填图是探索月球及其他类地行星的一部分,有助于我们了解月球及其他类地行星、卫星的物质组成和演化过程,通过对月球表面特征、岩性、构造、样品的观测研究,建立恰当的地层序列,确定地质时代,最终探讨月球区域演化过程<sup>[1-2]</sup>。

1973年,美国地质调查局(USGS)编制出版了1:1 000 000 佩塔维厄斯幅月球地质图(Geologic Map of the Petavius Quadrangle of the Moon, I-794),其资料主要来源于 Lunar Orbiter 影像图,编图范围为50°~70°E,16°~32°S,佩塔维厄斯撞击坑是该幅地质图中最明显的地质要素。在1973年编制的1:1 000 000 朗伦努斯幅月球地质图(Geologic Map of the Langrenus Quadrangle of the Moon, I-739)和1977年编制的1:5 000 000 月球东部地质图(Geologic Map of the East Side of the Moon, I-948)中均对佩塔维厄斯幅(LQ-21)相关范围内的地质要素进行了不同程度的编译<sup>[3-5]</sup>。

2002年,美国启动了新一轮月球地质编图工作,将1:2 500 000 月球地质图划分为30个图幅(LQ-1—LQ-30)(图1),开展全月地质编图。2012年,丁孝忠等编制出版了我国首幅月球地质图——1:2 500 000 虹湾幅月球地质图(LQ-4),并首次探索制定了我国月球地质填图的流程<sup>[6]</sup>。

2015年,在科学技术部科技基础性工作专项的支持下,基于我国自主实施的“嫦娥一号”(CE-1)和“嫦娥二号”(CE-2)科学探测获得的数据和其他已有月球地质资料、研究成果,以 ArcGIS 为平台,开展了30幅1:2 500 000 分幅月球地质图及其他相关系列图件的数字填图工作。

月球正面和背面存在明显的二分性:月球正面相对海拔低,主要为大型撞击盆地发育区,并且大多数盆地中都填充有玄武岩;而月球背面为古老的斜长岩月壳,海拔高,布满中-小型撞击坑。佩塔维厄斯地区位于月球东部近月面(near side of the moon)与远月面(far side of the moon)之间的位置,处于月海和月陆的交界处<sup>[7]</sup>,受大型撞击盆地和撞击坑的复合影响,各时代溅射物、玄武岩及构造要

素均发育,因此,在该地区进行数字地质填图和地质研究,有利于了解月壳的形成及演化过程,丰富海和史密斯海内丰富的岩浆活动也有助于了解月球的火山地质和热演化历史,是月球数字地质填图工作中的一个有代表性的区域。对佩塔维厄斯幅(LQ-21)的详细填图有助于总结近30年累积的研究资料,为在该地区未来开展更详细的科学考察,研究区域内撞击坑形成、火山活动和地质构造演化历史提供参考资料。

## 1 区域地质背景

1:2 500 000 佩塔维厄斯幅月球地质图(LQ-21)数字填图区域位于0°~30°S,45°~90°E(图1),东西长约1 318 km,南北宽约921 km,总面积约125万 km<sup>2</sup>。图幅东缘距离酒海盆地(Basin Nectaris)中心约300 km,北缘距离危海盆地(Basin Crisium)中心约500 km(图1),图幅西北角为丰富海盆地(Basin Foecunditatis),东北角为史密斯海盆地(Basin Smythii)(图2)。LQ-21图幅区域位于月球正面东部边缘地区,通过地形地貌图(图2)可以看出本区东北部和西北部月海地区撞击坑密度较低,地形变化缓慢,地势整体较平坦;其他月陆地区撞击坑密度较高,地形崎岖,地势较高。本地区高程最低点为-5 964.5 m,最高点为3 221.5 m,相对高差达9 185 m。区域地势自西向东整体逐渐增高,地势起伏变化不大,但地形复杂,处于一个从月海平原到月陆高原的过渡带上。

本区内主要有4个撞击盆地,为艾肯纪形成的丰富海多环盆地、巴尔莫-卡普坦(Balmer-Kapteyn)多环盆地、史密斯海多环盆地和雨海纪形成的洪堡(Humboldt)单环盆地。主要大型撞击坑有佩塔维厄斯(Petavius)撞击坑、朗伦努斯(Langrenus)撞击坑、文德利努斯(Vendelinus)撞击坑和赫卡泰奥斯(Hecataeus)撞击坑。其中佩塔维厄斯(直径约188 km)和朗伦努斯(直径约127 km)是丰富海盆地东侧最大的两个撞击坑。文德利努斯撞击坑(直径约131 km)位于朗伦努斯撞击坑和佩塔维厄斯撞击坑之间,赫卡泰奥斯撞击坑(直径约167 km)位于洪堡盆地以北(图2)。

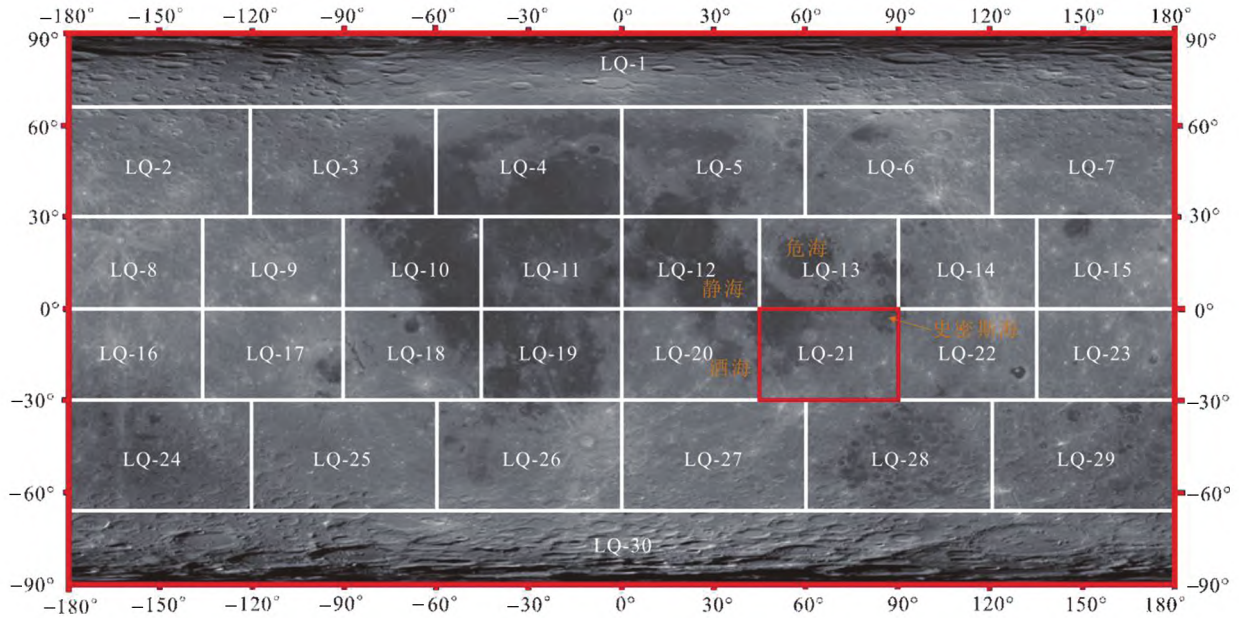


图 1 1:2 500 000 佩塔维厄斯幅(LQ-21)月球地质图位置图  
(底图为 CE-1 CCD 影像数据)

Fig.1 Lunar geological overview map of the Petavius quadrangle (LQ-21) at 1:2.5 million scale (with CE-1 CCD data overlay)

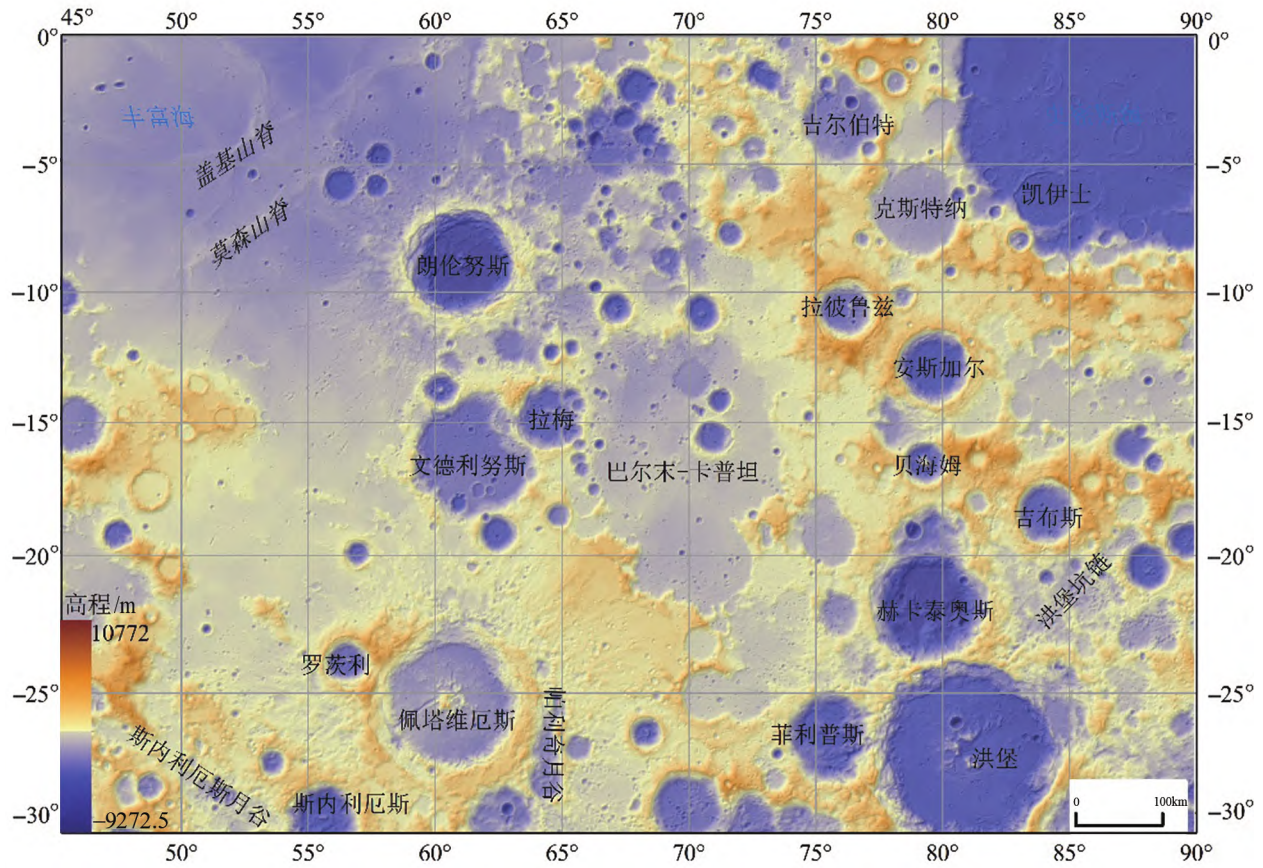


图 2 1:2 500 000 佩塔维厄斯幅(LQ-21)地形地貌图(LOLA 数据叠加山体阴影)

Fig.2 Topographic map of the Petavius quadrangle (LQ-21) (a shaded relief map with LOLA topographical data overlay)

佩塔维厄斯地区其他主要地貌单元有帕利奇月谷(Valley Palitzsch)、部分出露的斯内利厄斯月谷(Valley Snellius)、佩塔维厄斯月溪(Rima Petavius)、莫森山脊(Dorsa Mawson)、盖基山脊(Dorsa Geikie)和洪堡坑链(Catena Humboldt)(图2)。

## 2 月球数字地质填图

### 2.1 基础数据资料

本文以 ArcGIS 为平台进行佩塔维厄斯幅(LQ-21)地质图的数字填图 and 数据分析。所用数据主要包括月球探测工程所获得的“嫦娥一号”(CE-1, 120 m/px)与“嫦娥二号”(CE-2, 50 m/px) CCD 影像数据、CE-1 伽马射线谱仪(GRS,  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ )数据、CE-1 干涉成像光谱仪(IIM, 200m/px)数据等,并借鉴了美国月球勘测轨道相机(LROC, Lunar Reconnaissance Orbiter Camera)宽视角影像图(WAC)、月球轨道激光高度计数据(LOLA, Lunar Orbiter Laser Altimeter)、月表成熟度数据(OMAT)、克莱门汀(Clementine)紫外可见近红外成像光谱数据以及1:1 000 000、1:5 000 000 美国月球地质图等数据资料。影像数据主要用来识别撞击坑的不同相带和地质界线;光谱数据主要用于矿物类型识别及构造单元的解释;地形数据主要用于制作山体阴影、坡度图,识别线性构造和撞击坑边界等。

图幅中所有撞击坑(盆地)的直径和时代都源于2015年版LPI(Lunar and Planetary Institute)月球撞击坑数据库(Lunar Impact Crater Database),该数据库是现有最完整的月球撞击坑数据库。数据库中共计包含8 716个有名称的撞击坑,其中1 675个撞击坑有地层年龄<sup>[8]</sup>。经统计,在佩塔维厄斯幅(LQ-21)地质图中,国际天文联合会(IAU)命名的撞击坑(盆地)有220个,只有60个撞击坑(盆地)有地层年龄限制。

### 2.2 投影及比例尺

月球的长半轴长度为1 738.1 km,短半轴为1 737.1 km,平均半径为1 738 km,扁率为0.002,所以月球表面可以当作一个球面,月球地图投影可以参照地球基于球面进行。投影时为了使各地区变形程度达到最小,在不同纬度地区选择不同的投影方式<sup>[9]</sup>,佩塔维厄斯地区处于月球低纬度地区,采用墨卡托投影(Mercator projection)变形最小。地理坐

标系参考采用 Moon\_2000\_IAU\_IAG 标准椭球体和 D\_Moon\_2000 的基准面,投影参数为中央经线  $67.5^{\circ}\text{E}$ ,标准纬线  $15^{\circ}\text{S}$ 。

制图比例尺与卫星影像精度的关系是:

$$A=L/(1/M)$$

上式中,  $1/M$  为比例尺,  $A$  为比例尺精度,  $L$  为人眼的视觉分辨率<sup>[10]</sup>。CE-1 CCD 影像数据空间分辨率为 120 m 左右,干涉成像光谱仪数据作为岩性分类的主要数据,其空间分辨率为 200 m,人的视觉分辨率为 0.1~0.2 mm。通过计算,理论上月球最大制图比例尺可以达到 1:1 200 000。按照地质编图基本比例尺要求,考虑到图幅整饰及图件打印规格等因素,编图比例尺确定为 1:2 500 000<sup>[11]</sup>。

### 2.3 图面表达内容

佩塔维厄斯幅月球地质图在利用嫦娥卫星任务数据及现有其他月球地质资料数据的基础上,运用月球地质单元形成年代、岩石类型、撞击坑、撞击盆地、构造等内容的最新解译结果<sup>[11-19]</sup>进行图面内容的表达。图面构成包括位置图(图1)、月球地质要素图式图例(图3)、岩石分布概略图(图4)、剖面图、主图、注记、编图说明等信息<sup>[20]</sup>。

#### 2.3.1 地质时代信息

在LPI数据库中撞击坑、撞击盆地年龄细分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪(早/晚雨海世)、酒海纪和前酒海纪<sup>[7]</sup>。郭第均、刘建忠等基于月球动力学演化模型,重新梳理了月球演化历史并建立了“三宙六纪”的地质年代划分方案<sup>[11-12]</sup>。本次佩塔维厄斯地区地质填图,月面历史划分即采用“三宙六纪”方案,时代由新到老依次为新月宙(哥白尼纪(C)、爱拉托逊纪(E))、古月宙(雨海纪(I)、酒海纪(N)、艾肯纪(A))和冥月宙(前艾肯纪(pA)),具体时代划分单元、地质年代单元及代号、年龄界线等见表1。

#### 2.3.2 月表地质要素

月表地质要素按照内外动力地质作用类型分为两大分支体系:外动力地质作用要素和内动力地质作用要素<sup>[1]</sup>(图3)。

(1)外动力地质作用要素包括撞击坑物质、大型盆地建造和部分构造形迹。

撞击坑物质和盆地建造按时代(表1)划分。对于LPI数据库及其他参考资料中没有时代的撞击坑,以及被后期地质作用破坏而无法识别的,根据地层叠置、切割关系也无法确定其相对地质年代的撞



图3 月球地质要素分类体系及图式图例

Fig.3 Classification system of lunar geological elements and map legends

表1 月球地质年代划分表

(据文献[11-12]修改)

Table 1 Geological time scale of the Moon. Modified after [11-12].

地层年代	地质年代单元	年龄/Ga
新月宙 (Neolunarisanian, NL)	哥白尼纪 (Copernican, C)	0.8~0.0
	爱拉托逊纪 (Eratosthenian, E)	3.16~0.8
	雨海纪 (Imbrian, I)	晚雨海世 3.8~3.16 早雨海世 3.85~3.8
古月宙 (Paleolunarisanian, PL)	酒海纪 (Nectarian, N)	3.92~3.85
	艾肯纪 (Aitkenian, A)	4.2~3.92
	冥月宙 (Eolunarisanian, EL)	前艾肯纪 (pre-Aitkenian, pA)

击坑,将其归类为未确定时代撞击坑。撞击坑物质依相带细分为中央峰物质、坑底物质、坑壁物质、坑缘物质、连续溅射物和不连续溅射物。盆地建造依相带分为中央峰建造、峰环建造、盆底建造、盆壁建造、盆缘建造、溅射物建造 6 个亚类<sup>[14,18]</sup>。外动力地质作用为主的构造形迹有撞击盆地、撞击坑、撞击坑链、撞击断裂。

(2)内动力地质作用要素包括月海玄武岩、非月海岩石、其他特殊岩石和其余构造形迹。

月表岩石类型划分月海玄武岩、非月海岩石和

特殊岩石。月海玄武岩按照钛含量高低分为极低钛玄武岩、低钛玄武岩、中钛玄武岩、高钛玄武岩和极高钛玄武岩<sup>[13,21]</sup>。非月海岩石有镁质斜长岩套、亚铁斜长岩套<sup>[13,22]</sup>、亚铁斜长岩套、KREEP 岩套<sup>[23-24]</sup>、KREEP 玄武岩、碱性岩套、镁质岩套<sup>[25]</sup>。特殊岩石有火成碎屑岩<sup>[26]</sup>、硅质火山岩、纯斜长岩<sup>[27-28]</sup>、尖晶石斜长岩<sup>[29]</sup>和富橄榄石岩套<sup>[14]</sup>。内动力地质作用为主的构造形迹有推测深部断裂<sup>[17]</sup>、浅层断裂、月堑、皱脊<sup>[30]</sup>、月溪<sup>[15]</sup>、坑底断裂<sup>[31]</sup>、叶

状陡坎<sup>[30]</sup>、火山口、穹隆和质量瘤<sup>[15,17]</sup>。

### 2.3.3 图面其他内容

图面中其他一些特殊要素包括人类探测器着陆点、剖面线、典型建造发育位置、绝对高程及高程点、地质界线等。因月表大量的撞击坑覆盖了基底岩石,为更清晰地表达基底岩石的分布状况,另增加岩石分布概略图(图4)作为补充说明。佩塔维厄斯幅(LQ-21)分幅地质图中剖面线切过佩塔维厄斯撞击坑、巴尔末-卡普坦盆地和史密斯海盆地,尽量多地通过了本地区主要撞击坑、撞击盆地、玄武岩等地层单元、岩石类型和构造单元。

## 3 佩塔维厄斯地区月球数字地质填图

### 3.1 岩石类型

本图幅内所表达的岩石类型是指内动力地质作用形成的岩石,图幅内出露的主要岩石类型为亚铁斜长岩套(*fa*)、镁质斜长岩套(*ma*)和月海玄武岩(包括极低钛玄武岩(*vlt*)、低钛玄武岩(*lt*)、中钛玄武岩(*mt*)),纯斜长岩、富橄榄石岩套和火成碎屑岩

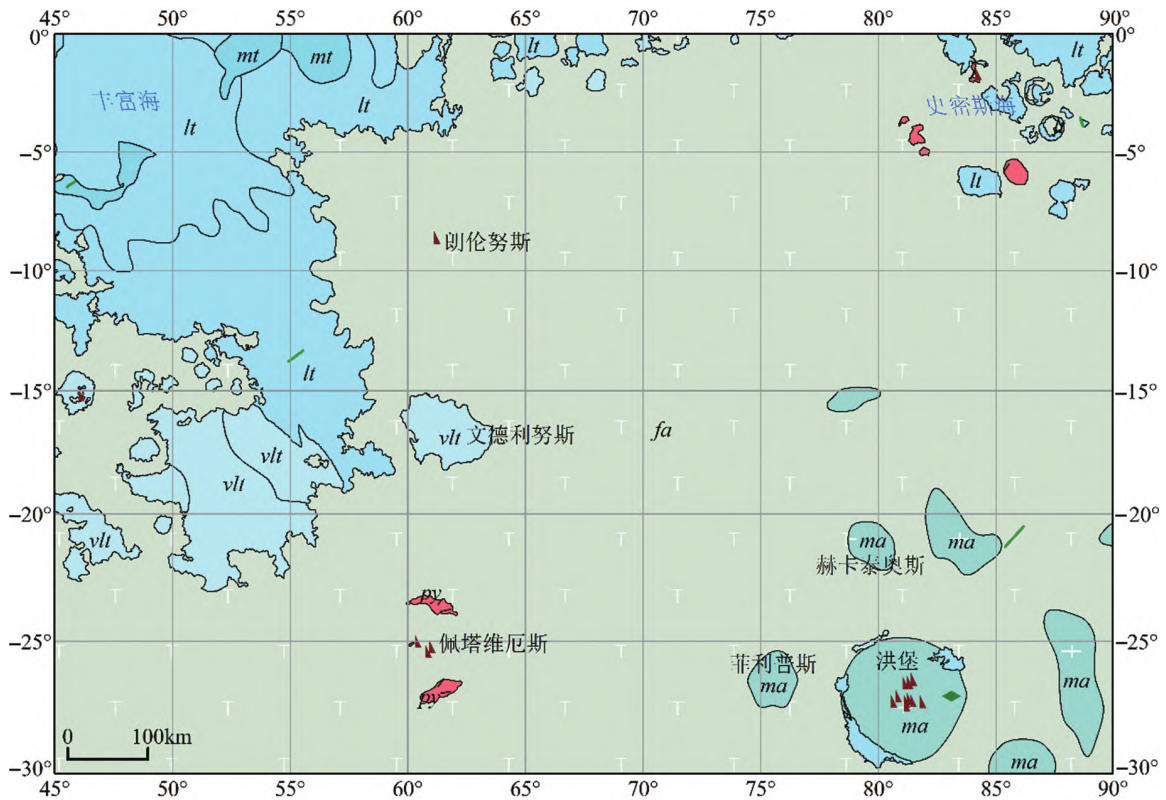
仅在小范围零散分布(图4),均以岩性花纹表示。

#### 3.1.1 月海玄武岩

本图幅内月海玄武岩广泛分布在海拔较低、地势相对平坦的丰富海盆地和史密斯海盆地内(图4),出露面积为23万km<sup>2</sup>,约占图幅总面积的19%。5种类型的玄武岩中,图幅中出露中钛玄武岩、低钛玄武岩和极低钛玄武岩。其中中钛玄武岩不发育,总面积1.1万km<sup>2</sup>,仅出露在Luna16号(0.5°S,56.36°E)和嫦娥一号着陆点(1.5°S,52.36°E)附近。丰富海内发育有极低钛、低钛玄武岩和中钛玄武岩,玄武岩填充时代以晚雨海世为主,爱拉托逊纪为辅<sup>[32-33]</sup>。史密斯海盆地内的玄武岩主要分布在盆地盆底北部,以低钛玄武岩为主,有少量极低钛玄武岩在西南部的盆底建造边缘呈岛状零散出露。洪堡盆地南、北盆底边缘出露4处呈块状分布的玄武岩。

#### 3.1.2 非月海岩石及特殊岩石

本图幅内出露的非月海岩石有亚铁斜长岩套、镁质斜长岩套。亚铁斜长岩套大面积出露,面积约为95万km<sup>2</sup>,占图幅面积的77.4%。镁质斜长岩套



图例详见图3。

图4 佩塔维厄斯幅(LQ-21)岩石分布概略图

Fig.4 Distribution map of rock formations within LQ-21

面积约为 4.1 万 km<sup>2</sup>,全分布在洪堡盆地盆底、赫卡泰奥斯撞击坑及菲利普斯撞击坑附近。

本图幅内特殊岩石出露较少,仅洪堡盆地中央峰建造、佩塔维厄斯中央峰出露纯斜长岩。洪堡盆地坑底西缘出露少量富橄榄石岩套。火成碎屑岩出露面积较少,共计 1 430 km<sup>2</sup>,出露在史密斯海盆地盆底西南缘的盆底建造和峰环建造上,其中面积最大的火成碎屑岩出露在维斯台登(Widmannstatten)撞击坑坑底,佩塔维厄斯撞击坑坑底南北缘出露两块面积较小的火成碎屑岩。

### 3.2 盆地建造和撞击坑物质

#### 3.2.1 盆地建造

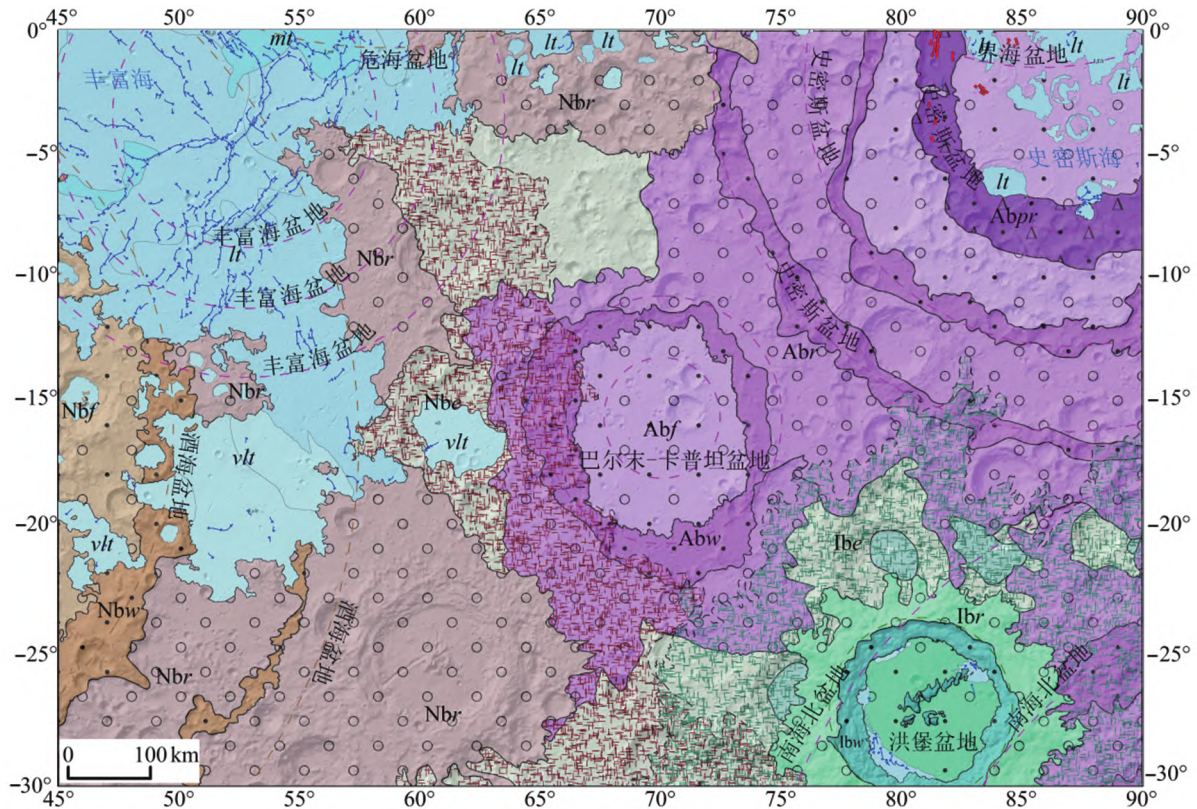
Liu 等<sup>[18]</sup>将直径大于 200 km 的撞击坑视为撞击盆地,根据形态与撞击机制,将撞击盆地分为单环盆地、峰环盆地、多环盆地和超大盆地 4 类。月球上大多数已经被确定的盆地都是在晚期重轰击(LHB, Late Heavy Bombardment)时形成的,这个时间段为 41~38 亿年前,本图幅内主要撞击盆地大多早于该时期形成。撞击盆地由于盆地类型、形成时代的差异及后期受地质作用的破坏,大多只保留

了部分盆地建造<sup>[34]</sup>。

本幅图中大型撞击盆地主要是丰富海盆地、巴尔莫-卡普坦盆地、史密斯海盆地和洪堡盆地。丰富海盆地是图幅中最古老的盆地,也是出露面积最大的盆地,约占图幅面积的 20%左右,但因盆地物质退化严重,且后期被玄武岩充填破坏,仅残留了部分盆壁建造和盆缘建造。巴尔末-卡普坦盆地是本图幅中唯一完整出露的盆地。史密斯海盆地和洪堡盆地的绝大部分面积在图幅中出露,酒海盆地出露面积也较多。南海北(Australe North)盆地、界海盆地在图幅内出露面积非常小,不做详细介绍(图 5)。

#### (1) 丰富海盆地

丰富海盆地(4°S,52°E)是位于酒海盆地以北、静海盆地东南方的多环盆地,目前识别出 3 个盆地环,最外环直径约 690 km,模式年龄为 4.30 Ga,是艾肯纪的古老盆地。盆地退化严重,盆地内直径超过 600 km 的地区后期被玄武岩填充,仅在盆地西北部残留少量盆壁建造和盆缘建造<sup>[34-35]</sup>。盆地内玄武岩主要为低钛和极低钛玄武岩,Luna16 号着陆



图例详见图 3。

图 5 佩塔维厄斯幅(LQ-21)撞击盆地分布概略图

Fig.5 Distribution map of impact basins within LQ-21

点<sup>[7,34]</sup>和嫦娥一号着陆点附近为中钛玄武岩,玄武岩模式年龄跨度为 3.69~3.36 Ga<sup>[35]</sup>,时代为晚雨海世。丰富海内皱脊发育,有 300 多条长短不一的皱脊,单条皱脊长达 2.4 km,方向主体为北东向和北西向(图 5),大多数在晚雨海世形成<sup>[36]</sup>。

丰富海盆地形成后,酒海盆地、危海盆地相继形成(表 2),酒海盆地和危海盆地的溅射物建造先后覆盖了丰富海盆地,本图幅丰富海盆地内大型撞击坑数量较少,主要为一些中小型撞击坑。雨海纪期间,丰富海岩浆活动剧烈,月海玄武岩泛滥,同时期酒海和危海的地质活动有可能也加强了丰富海的岩浆活动,岩浆活动持续了相当久的时间,Hiesinger 等<sup>[32]</sup>推测丰富海岩浆活动从晚雨海世到爱拉托逊纪,持续了约 1 Ga,玄武岩基本填充了整个盆地。

(2) 巴尔末-卡普坦盆地

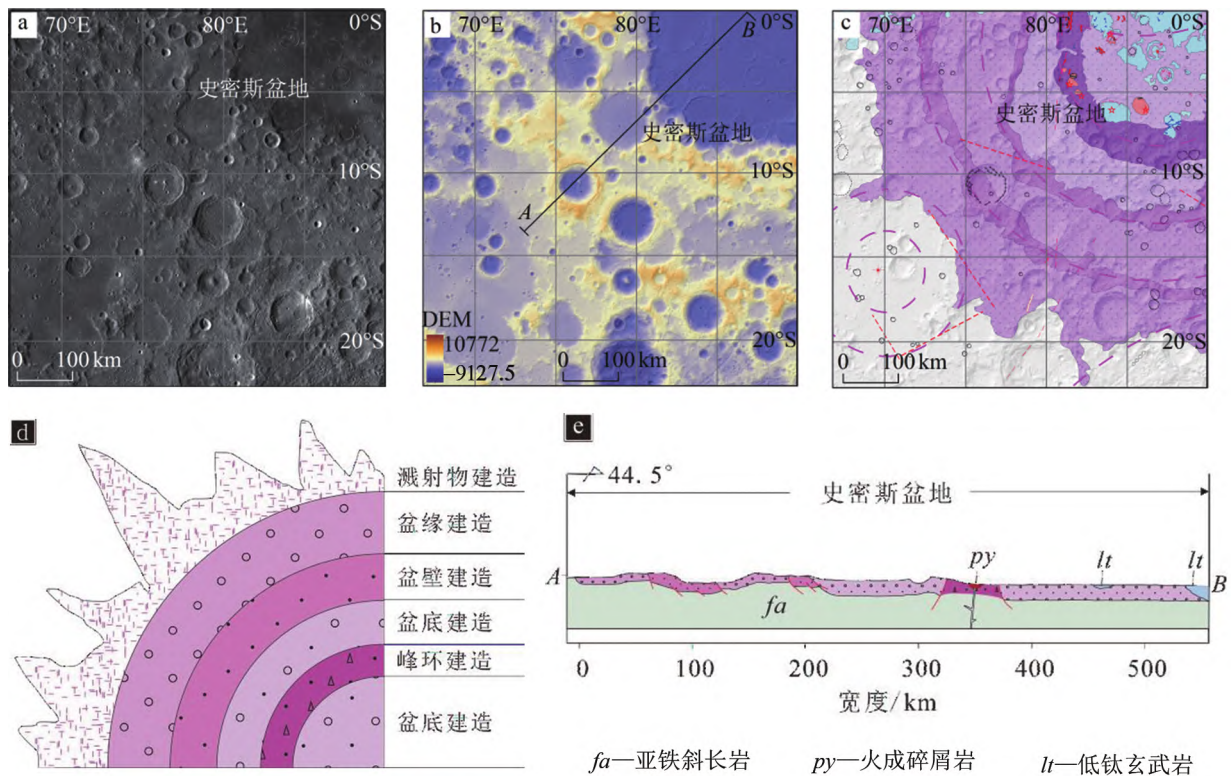
巴尔末-卡普坦盆地(15°S,70°E)是图幅内出露最完整的艾肯纪多环盆地,外环直径约 500 km,盆地周围有多个大型撞击坑。盆地退化严重,内环不明显,外环地形崎岖。盆底非常平坦,有大量小于

10 km 的暗晕撞击坑(dark-halo crater)<sup>[7,34,37]</sup>。地球化学、地球物理和遥感数据表明,巴尔末-卡普坦区域是月球上最大的隐月海区域,隐月海被认为是早期月海玄武岩被后期盆地(撞击坑)溅射物覆盖地区,含有月球热历史、火山活动历史、早期的月幔部分融熔的重要信息<sup>[38-40]</sup>。本次数字填图对隐月海不做编译,本图幅内仅表达其盆地相带。

(3) 史密斯海盆地

史密斯海盆地(2°S,87°E)位于近月面东缘的中部高地上,保存相对完整,是一个近圆形的多环盆地,有 3 个盆地环,最外环直径约 740 km<sup>[34,38]</sup>。盆地模式年龄为 4.26 Ga<sup>[35]</sup>,盆底建造、盆壁建造和盆缘建造保存相对完整,盆底出露玄武岩,盆缘建造表面粗糙崎岖。本图幅内仅出露盆地的东南部,但各相带在图幅内均有出现(图 6)。

史密斯海盆地玄武岩的填充位置受史密斯海盆地盆底结构的控制,玄武岩在盆底北部、东北部大范围出露。图幅内出露的玄武岩仅占史密斯海内玄武岩一小部分,岩性主要为低钛和少量极低钛玄武岩



a—LRO WAC 影像图; b—LOLA DEM 数据,单位为 m; c—史密斯海盆地物质划分图(叠加山体阴影); d—峰环盆地物质类型划分(艾肯纪); e—地质剖面示意图(剖面线由图 b 中切线 AB 生成)。图例详见图 3。

图 6 史密斯海盆地建造解译

Fig.6 Interpretation of Smythii basin mapping results



(图 6c),一部分玄武岩在赤道( $0^{\circ}$ ,  $85^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ )附近分布,另一部分分散填充在凯伊士(Kiess)、高平子(Kao)、黑尔默特(Helmert)、沃纳(Warner)、伦格(Runge)、霍尔丹(Haldane)6个撞击坑坑底及撞击坑附近。赤道地区分布的玄武岩模式年龄约 3.14 Ga,是目前已知的月球上最年轻的玄武岩之一。史密斯海盆地曾发生过大量急剧的火山活动<sup>[33,38-39]</sup>,图幅内火成碎屑岩分布在峰环建造西南部和凯伊士、维斯台登和霍尔丹等撞击坑坑底。史密斯海盆地盆底范围内有 42 条坑底断裂,分布在 7 个撞击坑内,有 5 个火山口,17 条月溪,26 条皱脊。坑底断裂、月溪、火山口和火成碎屑岩呈组合形式出现。

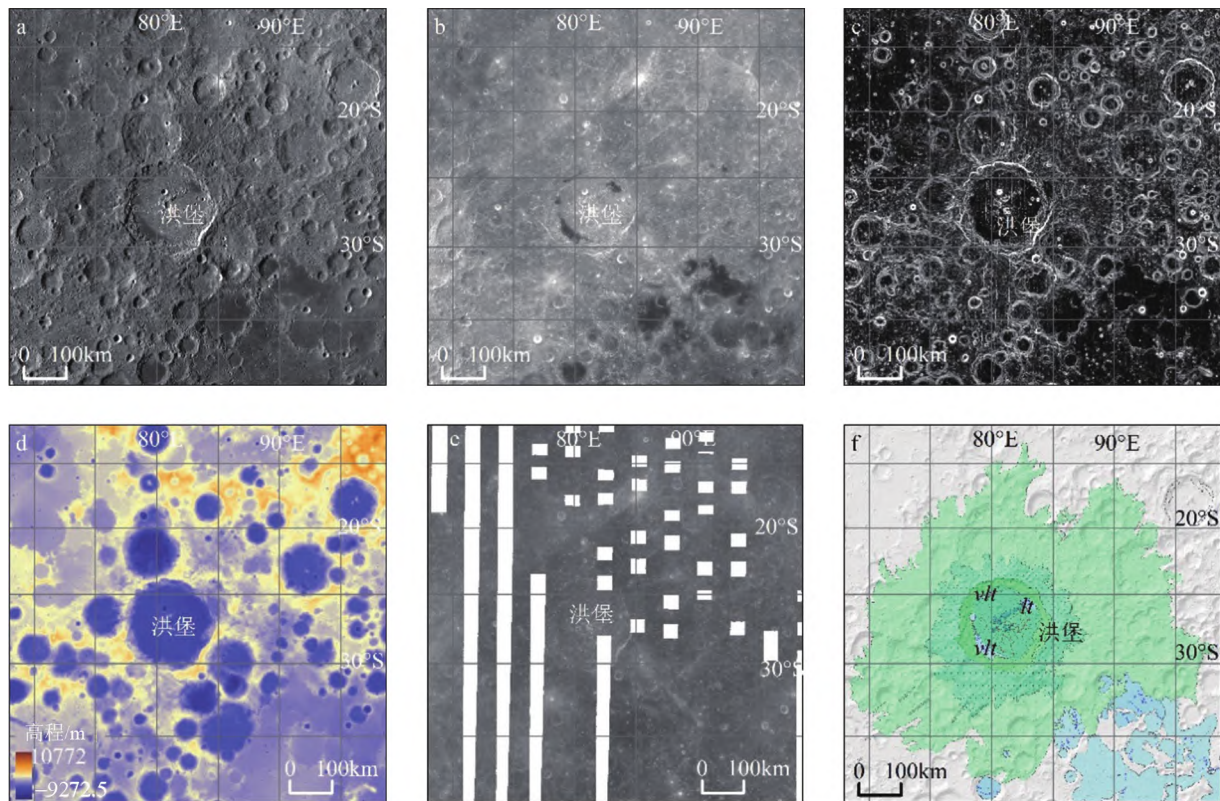
#### (4) 酒海盆地

酒海盆地( $16^{\circ}\text{S}$ ,  $34^{\circ}\text{E}$ )是酒海纪多环盆地,外环直径约 860 km<sup>[7,34]</sup>,图幅中主要出露盆地西部、西北部的盆底、盆壁、盆缘和溅射物建造,出露面积约 40 万 km<sup>2</sup>。史密斯海盆地内玄武岩泛滥之前,酒海盆地建造占据了图幅面积的 50%,图幅东侧完全被

酒海盆地盆缘建造和溅射物建造覆盖,溅射物建造最远至巴尔末-卡普坦盆地盆底和洪堡盆地盆缘(图 5)。晚雨海世史密斯海玄武岩泛滥,破坏了酒海盆地西部、西北部地区的盆缘建造和溅射物建造。后期撞击坑物质,如佩塔维厄斯撞击坑物质覆盖了酒海盆地建造,使得酒海盆地在图幅中出露面积减小。

#### (5) 洪堡盆地

洪堡盆地( $27^{\circ}\text{S}$ ,  $80.9^{\circ}\text{W}$ )是一个复杂的晚雨海世单环盆地(图 5、图 7),直径约 199 km,坑底直径约 157 km,位于南海北盆地(直径约 1 080 km)的西北部边缘。盆地四周有 3 个较大的撞击坑——赫卡泰奥斯撞击坑(直径约 167 km)、菲利普斯撞击坑(直径约 122 km)和巴纳德(直径约 105 km)撞击坑。盆地中央峰建造由数个不规则丘状物散列,呈线性组成,盆底北部中央峰建造呈线状排列,沿西南—东北方向延伸,从撞击坑中心延伸到盆底边缘。洪堡盆地是月球唯一中央峰建造散列呈峰簇状的盆地,基于这一特征,Baker 等<sup>[41]</sup>提出洪堡盆地是峰环



a—LRO WAC 影像图;b—CE1 CCD 影像图;c—坡度图(LOLA DEM 数据制作, $z$  因子为  $3.30\text{E}-5$ );d—LOLA DEM 数据;e—OMAT 数据;f—朗伦努斯撞击坑物质划分图(叠加山体阴影)。图例详见图 3。

图 7 洪堡盆地物质解译

Fig.7 Interpretation of Humboldt basin mapping results

盆地与多环盆地之间的过渡盆地。全月数字高程数据(DEM)显示,洪堡盆地盆底北部海拔略低于南部,中央峰北部的洪堡N(Humboldt N)撞击坑坑底是图幅内的最低点(-5 964.5 m)。盆地北部盆底粗糙,有许多长约1 km左右的土丘,南部盆底表面相对平滑;盆壁物质粗糙,部分垮塌,呈阶梯状,东南部坑壁发育2条撞击断裂;在WAC影像图上可清楚看到洪堡盆地的盆缘物质溅射到赫卡泰奥斯撞击坑和菲利普斯撞击坑内。洪堡盆地盆底与盆壁边缘出露3处低钛玄武岩、极低钛玄武岩,玄武岩内发育皱脊(图7)。中央峰建造出露纯斜长岩,坑底西侧出露富橄榄石岩<sup>[42]</sup>。

洪堡盆地的主要线性构造为坑底断裂(floor-fracture),盆底有107条径向和同心向呈蛛网状坑底断裂,部分坑底断裂贯穿中央峰,Jozwiak、Martinot等认为这些坑底断裂可能是由撞击坑底部的岩浆侵入形成的<sup>[31,43-45]</sup>。图幅内洪堡盆地建造覆盖了南海北盆地的大部分。

### 3.2.2 撞击坑物质

由于彗星、陨石等小天体撞击,月表形成大大小

小的撞击坑,撞击坑是月表最显著的地质单元。当编图比例尺为1:2 500 000时,直径为10 km的撞击坑,图面长度不超过4 mm,大量直径小于4 mm的撞击坑影响图面的美观,受此影响,本图幅内只表达直径大于10 km、小于200 km的撞击坑及撞击坑物质。

在佩塔维厄斯幅月球地质图中,识别出直径大于10 km的撞击坑有383个,只有225个较大的撞击坑划分了坑物质。划分和表达了撞击坑坑物质的撞击坑数量为哥白尼纪撞击坑17个,爱拉托逊纪撞击坑25个,晚雨海世撞击坑14个,早雨海世撞击坑34个,酒海纪撞击坑85个,艾肯纪撞击坑33个,未确定时代的撞击坑17个。未确定时代的撞击坑,在图中用灰色面状要素表示(图3),另一些撞击坑直径近似10 km或退化极为严重的撞击坑,在图中以撞击坑或隐伏撞击坑表示为环形构造,其中136个撞击坑、22个隐伏撞击坑用环状构造表示(图8)。另外,在本幅图中,共计16个有中央峰的撞击坑,主要发育于酒海纪和雨海纪。

图幅内不同时代撞击坑发育齐全,酒海纪撞击

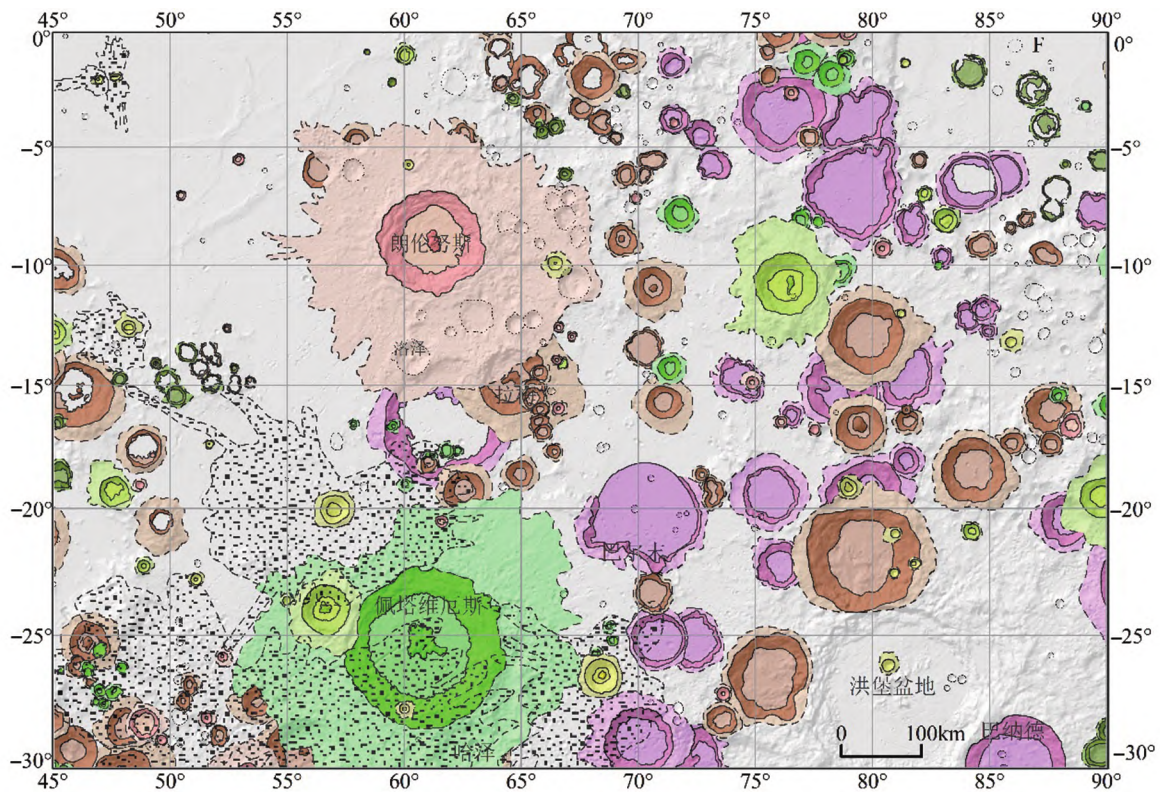
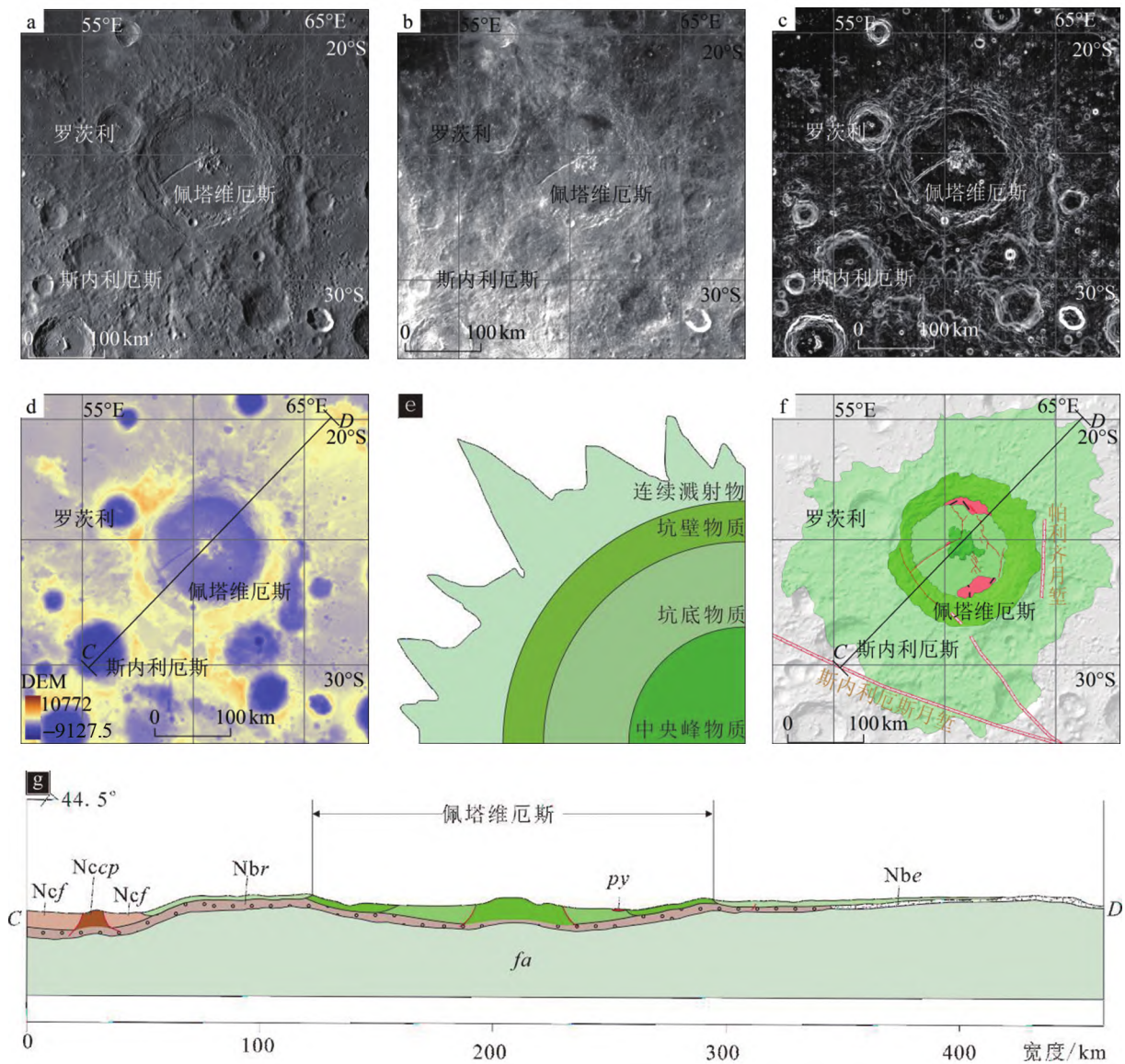


图8 佩塔维厄斯幅内撞击坑分布概略图  
Fig.8 Distribution map of craters within LQ-21

坑数量最多,其次是艾肯纪和雨海纪撞击坑,哥白尼纪和爱拉托逊纪撞击坑数量最少。图幅内两个主要的撞击坑是佩塔维厄斯撞击坑和朗伦努斯撞击坑。

佩塔维厄斯撞击坑(25.39°S,60.78°E)是早雨海世中央峰型撞击坑(图9),位于丰富海盆地南侧,酒海盆地东缘,撞击坑直径184 km。撞击坑中央峰出露纯斜长岩,坑底粗糙,坑底北缘(61.3°E,21.5°S)和南缘(60.7°E,26.9°S)靠近坑壁的地区相对平滑,反射率低,出露火成碎屑岩<sup>[45]</sup>。坑底发育18条长短

不一的坑底断裂,西南部有一条坑底断裂,原名佩塔维厄斯月溪,沿SW至NE方向切穿坑底,横切中央峰物质后向北偏转,延伸至坑底边缘,长度超过127 km,撞击坑坑壁垮塌,塌陷严重,坑壁西侧成阶梯状,坑缘不明显。佩塔维厄斯撞击坑周围撞击坑较少,特征地貌为斯内利厄斯月堑和帕利齐月堑。斯内利厄斯月堑位于图幅西南角,长约700 km,宽约23 km,沟槽较浅,自SE至NW向指向酒海盆地中心,Hartmann<sup>[46]</sup>认为酒海盆地和斯内利厄斯撞击



a—LRO WAC 影像图;b—CE1 CCD 影像图;c—坡度图(LOLA DEM 数据制作, z 因子为 3.30E-5); d—LOLA DEM 数据,单位为 m; e—撞击坑物质类型划分图(早雨海世); f—佩塔维厄斯撞击坑物质划分图(叠加山体阴影); g—地质剖面示意图(剖面线由图 d 中切线 CD 生成)。图例详见图 3。

图 9 佩塔维厄斯撞击坑物质解译

Fig.9 Interpretation of Petavius crater mapping results

坑形成后,酒海盆地的溅射物撞击形成斯内利厄斯月堑。佩塔维厄斯撞击坑下伏丰富海盆地和酒海盆地的溅射物建造。帕利齐月堑长约 150 km,宽 10~40 km,位于佩塔维厄斯撞击坑东侧,比佩塔维厄斯撞击坑更古老,可能是陨石斜向撞击形成<sup>[47]</sup>。

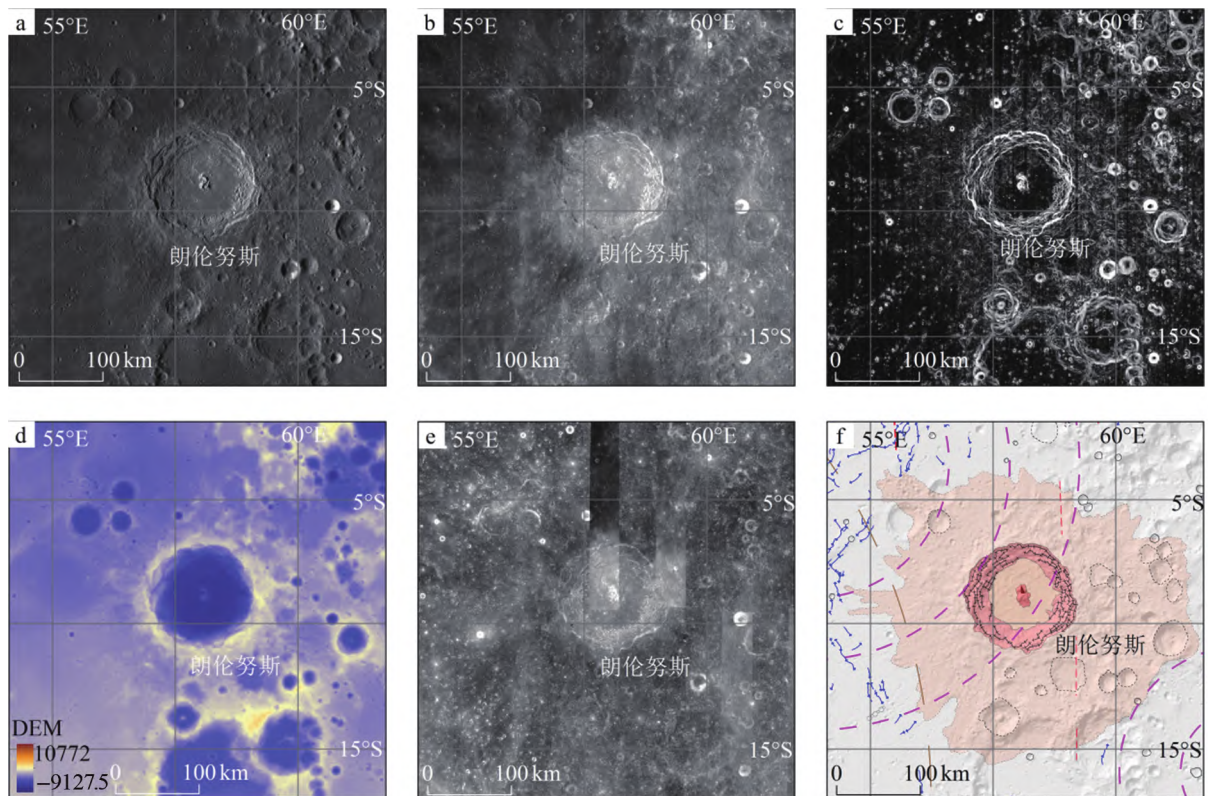
朗伦努斯撞击坑(8.86°S,61.04°E)是爱拉托逊纪中央峰型撞击坑(图 10),直径约 132 km,撞击坑东部和西南部的高地物质是被破坏的史密斯海盆地最外环的一部分,地形崎岖,起伏不平。撞击坑将酒海纪的地壳掘出约 3 km(撞击坑深 3 km),坑底具有两个明显的中央峰隆起,北部的中央峰部分垮塌;坑壁多层垮塌呈阶梯状,坑底部分被滑坡物质覆盖;坑底西北部粗糙,呈丘底状,南部、东南部较平滑,撞击断裂发育;连续溅射物非常发育,面积约 8.2 万 km<sup>2</sup>,整体上呈放射状,由撞击坑中心向外径向分布,西北方向和东南方向连续溅射物沉积范围较广,最长达 150 km。在遥感影像上,朗伦努斯撞击坑坑底反照率很高,东侧连续溅射物的反照率较低,靠近撞击坑边缘的高地上碎屑颗粒大,小尺度非常粗糙,

大尺度非常光滑,随着距离撞击坑中心变远,溅射物逐渐开始光滑,西侧反照率较高,颗粒粗糙(图 10b, e);撞击坑东南约 120 km 处,有一系列浅坑,平均直径约 25 km,呈现出次级撞击坑的重叠链状特征,线性排列指向危海盆地,可能是危海盆地的次级坑。

朗伦努斯撞击坑下伏物质推测依次为丰富海盆地、史密斯海盆地、酒海盆地、危海盆地等的溅射物,晚雨海世期间丰富盆地内玄武岩将撞击坑西部破坏填充,东部的高地上可能还保留一部分完整叠置的溅射物。撞击坑形成后,西侧撞击坑连续溅射物叠置在酒海盆地盆缘建造和丰富海玄武岩之上;东侧撞击坑物质则位于巴尔末-卡普坦盆缘建造、酒海盆地溅射物建造和亚铁斜长岩套之上。

#### 4 构造形迹特征

月球构造类型多样,按照内、外动力作用类型分为两大体系(图 3)。在本图幅中,构造发育,除穹隆外,各类构造类型均有出露(图 11),图幅中构造受



a—LRO WAC 影像图;b—CE1 CCD 影像图;c—坡度图(LOLA DEM 数据制作, z 因子为 3.30E-5);d—LOLA DEM 数据,单位为 m;e—OMAT 数据;f—朗伦努斯撞击坑坑物质划分图(叠加山体阴影)。图例详见图 3。

图 10 朗伦努斯撞击坑坑物质解译

Fig.10 The interpretation of Crater Langrenus Materials

丰富海、酒海、史密斯海、佩塔维厄斯撞击坑几个大型盆地和撞击坑控制<sup>[43]</sup>。

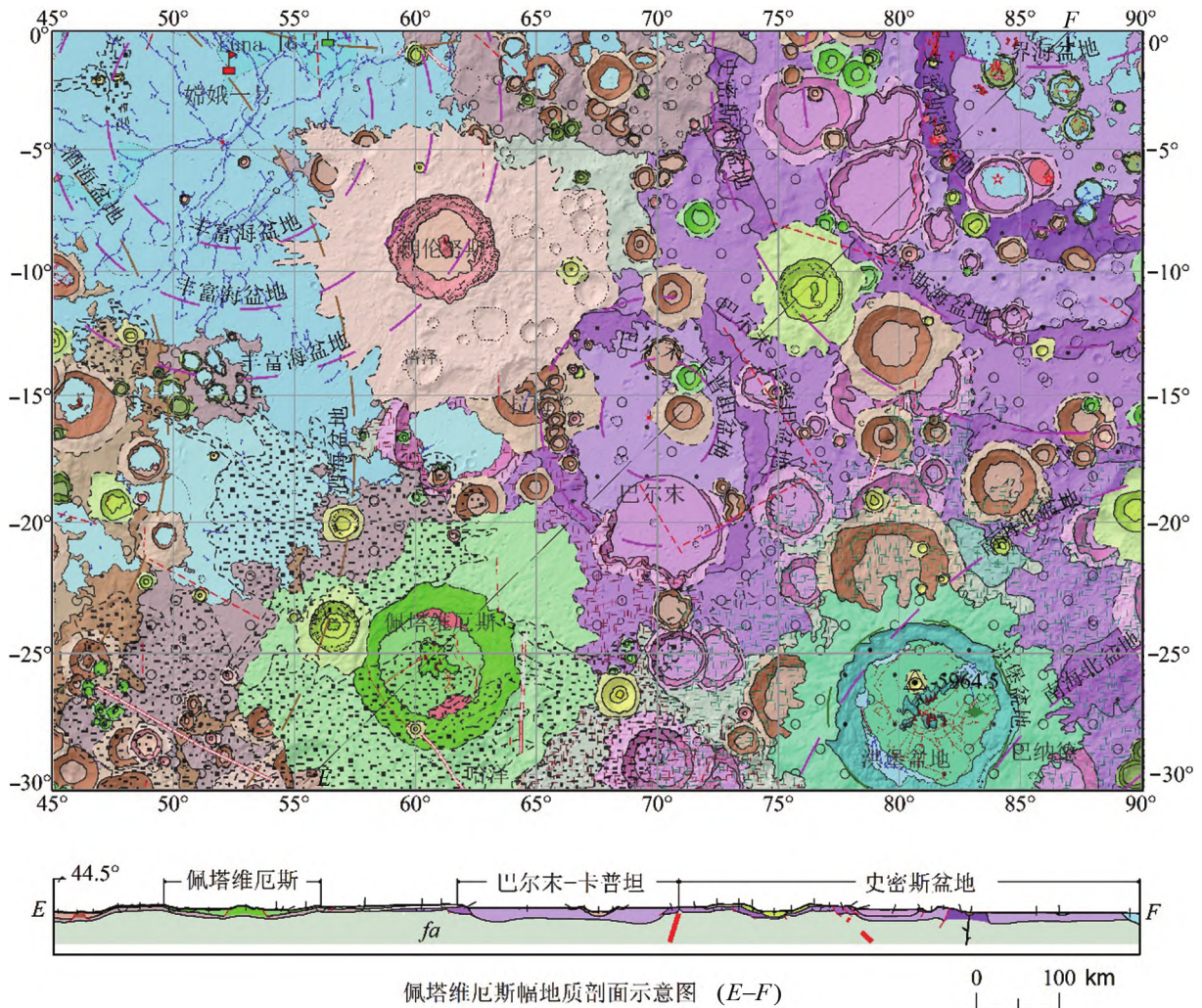
线性构造中, 皱脊数量多, 分布广泛, 特征明显, 共有 370 条, 主要分布在玄武岩充填的丰富海中 (图 5); 坑底断裂是月球最常见的构造, 主要集中在月海及其附近盆地中<sup>[37,43-44]</sup>; 图幅内有 187 条坑底断裂, 分布在佩塔维厄斯撞击坑和洪堡盆地底部, 呈同心状径向分布; 撞击断裂 94 条, 分布在朗伦努斯、拉彼鲁兹、罗茨利、帕利奇 B 4 个年轻的撞击坑坑壁上; 月溪 14 条, 均分布在史密斯海盆地中; 叶状陡坎 7 条, 位于贝海姆 (Behaim) 撞击坑和安斯加尔 (Ansgarius) 撞击坑之间的高地上; 撞击坑链 4 条, 其中洪堡坑链长 34 km; 根据重力异常特征, 解译出 4 条不连续的浅层断裂, 方向为 NE-SW 和 NW-SE, 10 条深部推测断裂; 在环形构造中, 直径大于 10 km

撞击坑 158 个, 含 22 个隐伏撞击坑; 撞击盆地 8 个, 分别是南海北盆地<sup>[48]</sup>、酒海盆地、危海盆地、史密斯海盆地、丰富海盆地、界海盆地、巴尔末-卡普坦盆地和洪堡盆地; 火山口 5 个, 均分布在史密斯海盆地内; 重力异常显示, 史密斯盆地、丰富海盆地、巴尔末-卡普坦盆地和洪堡盆地深部发育质量瘤。

图幅内大多数皱脊、月溪、月堑形成于晚雨海世, 皱脊均分布在月海中, 月堑分布在皱脊附近, 坑底断裂、撞击断裂全部形成于雨海纪之后。

### 5 区域地质发展演化

月球形成的年龄据今约 4.52 Ga<sup>[49]</sup>, 从月球形成到岩浆洋演化结束, 以内动力地质作用为主, 期间完成了壳幔分异, 形成斜长质原始月亮及推测深部



佩塔维厄斯幅地质剖面示意图 (E-F)

图例详见图 3。

图 11 佩塔维厄斯幅(LQ-21)月球地质图

Fig.11 The geological map of Petavius quadrangle (LQ-21) of the Moon

断裂<sup>[11,17,34-35]</sup>。以南极艾肯撞击事件为起点,直到酒海撞击事件发生为止(42~38.5 Ga),月球内外地质作用混合,主要事件是大型撞击盆地的撞击事件<sup>[34]</sup>,此时期内月表大型盆地和撞击坑的分布密度均高于其他任何时代。佩塔维厄斯图幅区域内丰富海盆地、巴尔莫-卡普坦盆地、史密斯海盆地、南海北盆地和酒海盆地在此期间形成。

南极艾肯撞击事件后,丰富海盆地是本地区最古老的大型撞击盆地。丰富海盆地(690 km)、巴尔莫-卡普坦盆地(500 km)、南海北盆地(1 080 km)、史密斯海盆地(740 km)在艾肯纪依次撞击形成<sup>[18]</sup>,这些撞击盆地的一般特征为直径大(表 2),溅射物范围广、厚度深,盆地盆缘、溅射物建造等精细结构和其他伴生构造因后期撞击作用、岩浆活动和风化作用影响而退化严重,图幅内仅史密斯海盆地保存较好。图幅内艾肯纪撞击坑直径中位数为 62 km,大多撞击坑仅保留了模糊的撞击坑形状,没有中央峰,坑底较浅,坑底和坑壁平滑,溅射物难以识别。图幅内没有识别出直径小于 20 km 的艾肯纪撞击坑。

约 3.85 Ga 酒海盆地形成,其溅射物建造自盆缘起向东南方向延伸了近 850 km<sup>[34]</sup>,溅射物厚度达 1 km,覆盖了丰富海盆地及图幅内绝大多数区域,向东远至洪堡盆地。3.93~3.89 Ga 期间,危海盆地形成(表 2),溅射物再次覆盖了丰富海盆地、巴尔末-卡普坦盆地和史密斯海盆地的区域,最远可能到达佩塔维厄斯撞击坑附近;朗伦努斯撞击坑东南部拉梅(Lame)撞击坑附近相互叠置呈链状分布的 7 个酒海纪撞击坑,可能是危海撞击形成的次级

撞击坑。本地区酒海纪经历了大规模陨石撞击事件,形成了大量的撞击坑,与艾肯纪撞击坑相比,酒海纪撞击坑直径大,部分撞击坑保留了中央峰物质,坑底较深,坑壁地形粗糙,部分撞击坑为明显的阶梯状坑壁,坑唇锋利。

酒海纪是本地区外动力地质作用最活跃时期,其后月球外动力地质作用逐步减弱,雨海纪形成的撞击坑数量仅为酒海纪的一半,撞击坑直径减小,以直径小于 23 km 的撞击坑为主,主要撞击坑(盆地)为佩塔维厄斯撞击坑和洪堡盆地。晚雨海世(3.80~3.16 Ga)期间,史密斯海盆地和丰富海盆地内岩浆活动剧烈,岩浆上涌,玄武岩大规模填充盆地,丰富海盆地和史密斯海盆地内叠置的酒海盆地和危海盆地的溅射物建造及撞击坑物质被月海玄武岩所填充,并形成大量的火山口、皱脊、月溪和坑底断裂,受盆地地形控制大多位于盆底和盆壁建造中。

史密斯海内的岩浆活动可能一直持续至爱拉托逊纪早期<sup>[33]</sup>,而月球内动力地质作用在约 30 亿年前逐渐减弱<sup>[32-33]</sup>,新月宙期间,本地区内、外动力地质作用持续减弱至微弱,仅有少量的撞击事件,爱拉托逊纪和哥白尼纪的撞击坑数量少、坑径小,图幅内仅朗伦努斯坑径较大。史密斯海盆地、丰富海盆地、巴尔末-卡普坦盆地和洪堡撞击盆地中质量瘤的存在表明这些盆地的质量均衡补偿已经非常缓慢或者停止,但位于贝海姆撞击坑和安斯加尔撞击坑之间出现的叶状陡坎则说明该地区有一定的微弱的应力收缩<sup>[30]</sup>。

表 2 佩塔维厄斯幅(LQ-21)地质图主要撞击盆地数据

(据文献<sup>[18,32-33,35,45,50]</sup>修改)

Table 2 Basic information on impact basins within the Petavium quadrangle (LQ-21). Modified after <sup>[18,32-33,35,45,50]</sup>.

盆地名称	直径/km	盆地模式年龄/Ga	样品年龄/Ga	岩浆活动年龄/Ga	盆地序列 <sup>[18]</sup>	地质年代单元
丰富海	690	4.30		3.69~3.36	7	艾肯纪
巴尔末-卡普坦	500				10	艾肯纪
史密斯海	740	4.26		3.48~3.14	21	艾肯纪
酒海	860	4.17	3.85±0.01 3.92±0.03 4.22±0.01		53	酒海纪
危海	740	4.07	3.93~3.89	3.2~2.5	55	酒海纪
洪堡	199			3.50	74	晚雨海世

## 6 结论和讨论

本文基于我国月球探测工程所获得的影像、地形、高程等数据资料,结合国外已有的月球影像、地质资料,开展了佩塔维厄斯幅(LQ-21)区域的年代学、岩石类型、构造形迹、撞击盆地和撞击坑的识别和区域地质演化历史的综合研究,编制了1:2 500 000佩塔维厄斯幅数字月球地质图,通过填图得到以下结论。

(1)佩塔维厄斯幅月球地质数字填图综合了月球地质学、年代学、地质制图、遥感和地理信息等多门学科,基于 ArcGIS 平台,在前人工作的基础上,对该地区进行了月球年代学、月表物质成分和构造的数字填图。

(2)佩塔维厄斯地区处于月球东部月海—月陆过渡区,地形地貌、构造形迹和区域地质演化受周边丰富海盆地、史密斯海盆地、危海盆地、酒海盆地、洪堡盆地等大型撞击盆地影响,月陆地区撞击坑密度大于月海地区,撞击坑从艾肯纪到哥白尼纪均有发育,其中艾肯纪、酒海纪和雨海纪形成的撞击坑数量最多,可以推测在这个3个时期内,本地区外动力地质作用活跃,其中最大规模的撞击事件发生在酒海纪,撞击坑数量多达85个,艾肯纪撞击坑因后期撞击作用和风化作用改造破坏而严重退化,数量和雨海纪差不多,总体上,图幅内撞击坑直径中位数是35.6 km,是简单撞击坑到复杂撞击坑过渡的直径范围<sup>[11]</sup>。

(3)图幅内岩石以亚铁斜长岩套、镁质斜长岩套和玄武岩为主,构造以皱脊为主且坑底断裂和撞击断裂发育,均反映了月陆—月海过渡区岩性和构造特征。

(4)佩塔维厄斯地区地质演化受南极艾肯事件、酒海盆地形成、危海盆地形成、丰富海月海玄武岩泛滥等多期地质事件影响。丰富海盆地、史密斯海盆地、酒海盆地和危海盆地的形成,一方面限定了该区域地貌形态和后期构造演化的轮廓,另一方面,几个多环盆地的溅射物分布范围对解释该地区的月球地层分布至关重要。总体而言,外动力地质在酒海纪最活跃,内动力地质作用在雨海纪活跃,哥白尼纪内外地质作用微弱。

谨以此文感谢李廷栋院士多年来在月球地质编图方面的悉心指导。对在月球数字地质填图中付出辛勤劳动的老师和同行们以及各位审稿专家和编辑部老师,一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] 欧阳自远, 刘建忠. 月球形成演化与月球地质图编研[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 1-6.
- [2] 陈建平, 丁孝忠, 王翔, 等. 月球地质研究与编图[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 6-26.
- [3] HODGES C. Geologic map of the Petavius Quadrangle of the Moon[CM]. Reston, VA: US Geological Survey, 1973.
- [4] HODGES C. Geologic map of the Langrenus Quadrangle of the Moon[CM]. Reston, VA: US Geological Survey, 1973.
- [5] WILHELMS D E, FAROUK E B. Geologic map of the east side of the Moon[CM]. Reston, VA: US Geological Survey, 1977.
- [6] 丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 等. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 15-27.
- [7] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, TRASK N J. The geologic history of the Moon[M]. Washington DC: US Geological Survey, 1987.
- [8] LOSIAK A, WILHELMS D E, BYRNE C J, et al. A new lunar impact crater database [C]. Lunar and Planetary Science Conference. Houston: NASA, 2009, 40: 1532.
- [9] 陈琼, 郑勇, 苏牡丹, 等. 月球地图投影理论和方法研究[J]. 测绘通报, 2006(4): 26-30.
- [10] 龚明劫, 张鹰, 张芸. 卫星遥感制图最佳影像空间分辨率与地图比例尺关系探讨[J]. 测绘科学, 2009, 34(4): 232-233, 60.
- [11] 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.
- [12] GUO D J, LIU J Z, ZHANG L, et al. A lunar time scale from geodynamic evolution perspective[C]. Lunar & Planetary Science Conference. Houston: NASA, 2016, 47: 1744.
- [13] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据再校正与全月铁钛元素反演[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 87-98.
- [14] 刘建忠, 籍进柱, 郭弟均, 等. 月球云海地区1:2 500 000地质图编研进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(增刊1): 1-15.
- [15] 罗林, 刘建忠, 张莉, 等. 月球线性构造分类体系研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3285-3301.
- [16] LIU J, GUO D. Lunar geological timescale[M/OL]. // CUD-NIK B. Encyclopedia of lunar science. Berlin: Springer International Publishing, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05546-6\\_63-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05546-6_63-1).
- [17] 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.
- [18] LIU J W, LIU J Z, ZHANG L. New global lunar impact basins' map based on remote sensing interpretation[C]. Lunar & Planetary Science Conference. Houston: NASA, 2020, 51: 1940.
- [19] WANG J T, KRESLAVSKY M A, LIU J Z, et al. Quantitative characterization of impact crater materials on the moon: changes in topographic roughness and thermophysical properties with age[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(10): E006091.

- [20] 许可娟,王梁,韩坤英,等. 1:2 500 000 月球地质图符号库的设计与实现[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2650-2661.
- [21] 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.
- [22] 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, 112(E10): E10007.
- [23] TAYLOR G J, WARREN P, RYDER G, et al. Lunar source book[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 183-284.
- [24] 李泳泉,刘建忠,欧阳自远,等. 月球表面岩石类型的分布特征:基于 Lunar Prospector (LP)伽马射线谱仪探测数据的反演[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1169-1174.
- [25] 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.
- [26] GUSTAFSON J O, BELL J F III, GADDIS L R, et al. Characterization of previously unidentified lunar pyroclastic deposits using Lunar Reconnaissance Orbiter Camera data [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117 (E12): E00H25-1 – E00H25-21.
- [27] 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.
- [28] DONALDSON HANNA 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.
- [29] PRISSEL T C, PARMAN S W, JACKSON C R M, et al. Pink Moon: the petrogenesis of pink spinel anorthosites and implications concerning Mg-suite magmatism[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 403: 144-156.
- [30] WATTERS T R, ROBINSON M S, BANKS M E, et al. Recent extensional tectonics on the moon revealed by the lunar reconnaissance orbiter camera [J]. Nature Geoscience, 2012, 5(3): 181-185.
- [31] JOZWIAK L M, HEAD J W, WILSON L. Lunar floor-fractured craters as magmatic intrusions: geometry, modes of emplacement, associated tectonic and volcanic features, and implications for gravity anomalies[J]. Icarus, 2015, 248: 424-447.
- [32] HIESINGER H, HEAD J W, WOLF, et al. New ages for basalts in Mare Fecunditatis based on crater size-frequency measurements[C]. Lunar & Planetary Science Conference. Houston: NASA, 2006. 37: 1151.
- [33] HIESINGER H, HEAD J W, WOLF U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: a synthesis[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 2011, 477: 1-51.
- [34] SPUDIS P D. The geology of multi-ring impact basins[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [35] ORGEL C, MICHAEL G, FASSETT C I, et al. Ancient bombardment of the inner solar system: reinvestigation of the “fingerprints” of different impactor populations on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2018, 123(3): 748-762.
- [36] YUE Z, LI W, DI K, et al. Global mapping and analysis of lunar wrinkle ridges[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2015, 120(5): 978-994.
- [37] GILLIS J J, SPUDIS P D. Geology of the Smythii and Marginis region of the Moon: using integrated remotely sensed data[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2000, 105(E2): 4217-4233.
- [38] SCHULTZ P H, SPUDIS P D. Beginning and end of lunar mare volcanism[J]. Nature, 1983, 302(5905): 233-236.
- [39] WANG X M, QIU D G. Lunar cryptomare: new insights into the Balmer-kapteyn region[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2018, 123(12): 3238-3255.
- [40] WHITTEN J L, HEAD J W. Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism[J]. Icarus, 2015, 247: 150-171.
- [41] BAKER D M H, HEAD J W, FASSETT C I, et al. The transition from complex crater to peak-ring basin on the Moon: new observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) instrument[J]. Icarus, 2011, 214(2): 377-393.
- [42] GADDIS L R, STAID M I, TYBURCZY J A, et al. Compositional analyses of lunar pyroclastic deposits[J]. Icarus, 2003, 161(2): 262-280.
- [43] JOZWIAK L M, HEAD J W, ZUBER M T, et al. Lunar floor-fractured craters: classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal structure[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(E11): E11005-1 – E11005-23.
- [44] JOZWIAK L M, HEAD J W, WILSON L. An analysis of eruption styles in lunar floor-fractured craters[C]. Lunar & Planetary Science Conference. Houston: NASA, 2016. 47: 1169.
- [45] MARTINOT M, BESSE S, FLAHAUT J, et al. Mineralogical diversity and geology of Humboldt crater derived using moon mineralogy mapper data[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2018, 123(2): 612-629.
- [46] HARTMANN W K. Radial structures surrounding lunar basins, I-Oriente and other systems[J]. Lunar and Planetary Laboratory, 1964, 2(36): 175-192.
- [47] SCHULTZ P H. Floor-fractured lunar craters [J]. The Moon, 1976, 15(3/4): 241-273.
- [48] NEUMANN G A, ZUBER M T, WIECZOREK M A, et al. Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements[J]. Science Advances, 2015, 1(9): e1500852.
- [49] AMBROSE W A, WILLIAMS D A. Recent advances and current research issues in lunar stratigraphy[M]. Boulder: Geological Society of America, 2011: 1-144.
- [50] LEE D C, HALLIDAY A N, SNYDER G A, et al. Age and origin of the Moon[J]. Science, 1997, 278(5340): 1098-1103.