

1:250万月球酒海幅(LQ-20)地质图编研

刘敬稳¹, 刘建忠¹, 朱凯¹, 张敬宜¹, 张珂^{1,2}, 吴聪哲^{3,1}, 雷丹泓¹

1. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 吉林大学, 长春 130012

摘要: 在嫦娥探月数据及其他月球地质资料的基础上, 中国科学院地球化学研究所主导的团队编制了比例尺为1:250万的全月地质图、月球分幅地质图、月球构造纲要图、月球岩石分布图以及30分幅地质图, 其中就包括LQ-20酒海幅。LQ-20图幅以其独特的酒海纪与艾肯纪交界的标志事件——酒海盆地撞击事件而引人注目。本文详细介绍了月球地质图的编研的发展历史、LQ-20分幅图的图幅表达的内容, 并阐述了该图幅表达的岩石类型、撞击盆地和撞击坑物质、构造形迹特征等: 图幅中表达了12类岩石类型、8个盆地的地质信息、260个撞击坑的坑物质、16类构造形迹特征, 涉及了整个三宙六纪的地质信息。最后讨论了该月球图幅区域内从岩浆洋纪到哥白尼纪的整体区域地质演化历史, 并通过对比分析LQ20的制图结果提出中国1:250万月球地质图与美国月球地质图在表达地质信息上的本质区别在于其对月球地质过程整体的地质体系的完整建立与系统表达, 每处地质信息都明确表达其地质作用来源, 每个区域都有层次分明的按形成顺序排列的地质过程, 这充分论证了中国1:250万月球地质图能够为中国乃至全球月球就位探测、科学研究等提供了一份详尽的月球地质背景资料。

关键词: 遥感, 月球地质图, LQ-20, 酒海盆地, 遥感解译, 月球地质演化历史

中图分类号: TP691/P2

引用格式: 刘敬稳, 刘建忠, 朱凯, 张敬宜, 张珂, 吴聪哲, 雷丹泓. 2025. 1:250万月球酒海幅(LQ-20)地质图编研. 遥感学报, 29(2): 553-565

Liu J W, Liu J Z, Zhu K, Zhang J Y, Zhang K, Wu C Z and Lei D H. 2025. 1:2500000 geological map compilation and research of the Nectaris Quadrangle (LQ-20) on the Moon. National Remote Sensing Bulletin, 29(2): 553-565 [DOI: 10.11834/jrs.20243512]

1 引言

月球地质图对研究月球的地形地貌、地质构造及其演化历史具有重要的科学意义(邱凯昌等, 2016), 其编制历史可追溯至公元1600年左右, 当时Gilbert依托望远镜观测数据, 绘制了月球地质图的早期版本(欧阳自远和刘建忠, 2014; 王梁等, 2015)。20世纪60年代起, 在首次月球探测高潮的推动下, 苏联和美国相继完成了月球地形图、地质图和构造图等绘制工作。其中, 苏联主要完成了比例尺为1:1000万、1:3000万的月球正背面构造简图、全月构造简图和地貌图等(Shevchenko

等, 2016), 但内容较为简略。美国在1962年—1979年期间, 以美国地质调查局(USGS)的Wilhelms和McCauley等学者为主导, 绘制了79幅不同比例尺的月球地质图, 包括1幅1:5千、2幅1:1万、5幅1:5万、7幅1:10万、8幅1:25万、6幅1:2.5万、44幅1:100万主要分布于月球正面的月球区域地质图, 以及覆盖了月球表面的6幅1:500万的月球地质图, 从而完成了首版月球全月地质图的编制。2012年, 开启1:250万编图(陈建平 等, 2014), 但截止目前, 仅完成了四幅1:250万的地质图。2013年, 美国对上述6幅1:500万月球地质图及其他月球地质图进行了数字化

收稿日期: 2023-12-09; 预印本: 2024-03-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(编号: 2022YFF0503100); 国家自然科学基金(编号: 42302267, 42202264); 贵州省科技计划项目(编号: 黔科合基础-ZK[2024]一般 670, 黔科合基础-ZK[2023]一般 478); 中国科学院院重点部署(编号: KGFZD-145-2023-15); 中国地调局项目(编号: DD20230007)

第一作者简介: 刘敬稳, 研究方向为行星遥感、数值模拟。E-mail: liujingwen@gyig.ac.cn

通信作者简介: 刘建忠, 研究方向为行星地质学。E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

修复,并发布数字地质图(Fortezzo等,2020),并于2020年美国正式发布了新的1:500万月球地质图(https://astrogeology.usgs.gov/search/map/unified_geologic_map_of_the_moon_1_5m_2020[2020-3-03])。然而数字化修复工作主要针对图中折线和边界的空间调整,以及部分地质单元范围的修订,但月表原始的地质单元分类和地质关系并未重新调整和解释,同时,其单一地质图层的地质图表达方式不能满足探月工程实施的需求。

基于嫦娥探测工程的数据资料,汲取国内月球探测数据和相关研究成果,经过深入探索和精心编制,丁孝忠等(2012)发布了全球首张1:250万月球地质图(虹湾幅(Sinus Iridum Quadrangle)),确立了中国月球地质编图的方法、标准和技术规范。以此为基点,2015年以欧阳自远院士为主导

率领国内百名行星科学专家,在科技部的资助下启动了《月球数字地质图编研》项目,以中国嫦娥探月工程所获得的影像、地形、高程等数据资料为基础,结合国外已有的探测与成果数据,编制了比例尺为1:250万的全月地质图、月球分幅地质图、月球构造纲要图、月球岩石分布图等系列月球数字地质图(刘建忠等,2017)。其中,全月地质图、岩石分布图、构造纲要图陆续正式公布发表(Chen等,2022; Ji等,2022; Lu等,2022)。

1:2500000酒海幅(Nectaris Quadrangle)月球地质图(LQ-20)便是系列图中的一幅(图1),本文将通过对酒海幅的绘制过程、包含内容、区域演化、与美国地质图对比以及其应用等方面论述,来揭示中国1:250万地质图的先进性、创新性与应用前景。

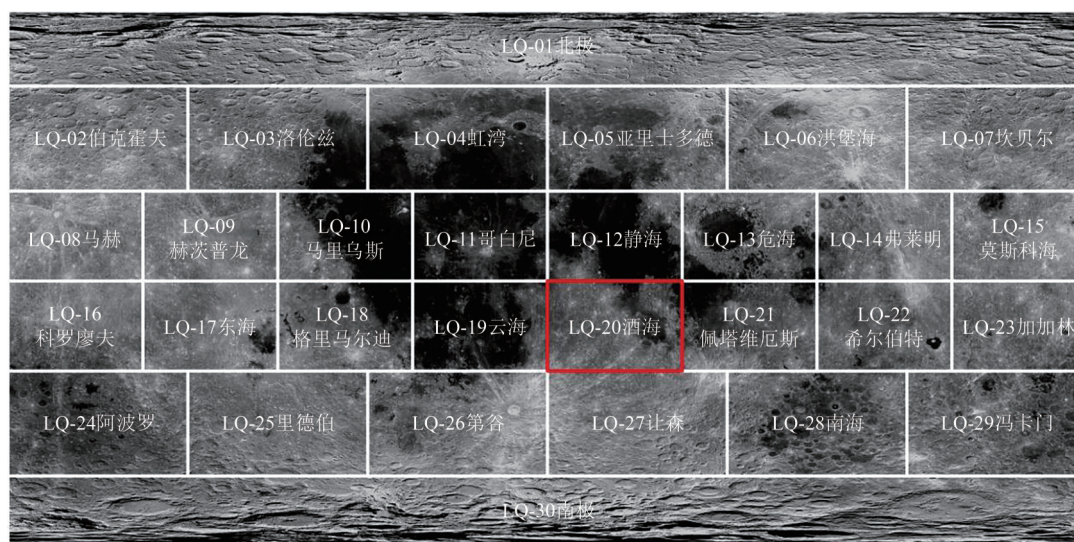


图1 月球地质图30幅分幅地质图的命名编号及LQ-20所在位置示意图,数据使用嫦娥一号CCD影像合成(120 m/pix)

Fig. 1 Schematic diagram of the lunar geological maps, nomenclature numbers, and the position of LQ-20 on Moon using Chang'e-1 CCD images (120 m/pix)

酒海幅几乎包含了酒海盆地(Nectaris)的60%的区域范围,是厘清酒海纪与艾肯纪地质边界线的关键区域。同时,其位于月球正面中低纬区域的月海与高地的交界处,是Apollo 16着陆点所在区域(Hodges和Muehlberger,1981)。经纬度范围为 $45^{\circ}\text{E}-0^{\circ}$, $0^{\circ}-30^{\circ}\text{S}$,面积为 1239421 km^2 ,高程范围是 $-4827.5-4806\text{ m}$,平均高程为 -1648 m ,高差为 9633.5 m ,其处于风暴洋南部的月海和月球高地的过渡地带,主体属于高地构造区(HTU),只有东北角属于月海构造区。区内大型盆地包括酒海盆地、狂暴湾盆地(Asperitatis)、维尔纳-艾

里盆地(Werner-Airy)等盆地,岩石主要以月海玄武岩、亚铁斜长岩为主,以环形构造为主,在图幅北部边缘分布有一些月堑(图2)。

2 月球地质图表达内容

月球地质图,作为揭示月球地质演化历程的关键图件,旨在表达月表各类构造、物质成分以及深部构造和地质时代等方面的信息。编图团队依据当前月球探测的最新成果,对图幅中所表达的构造、岩性、坑物质、成因以及其他特殊要素进行了详尽的分析整理。

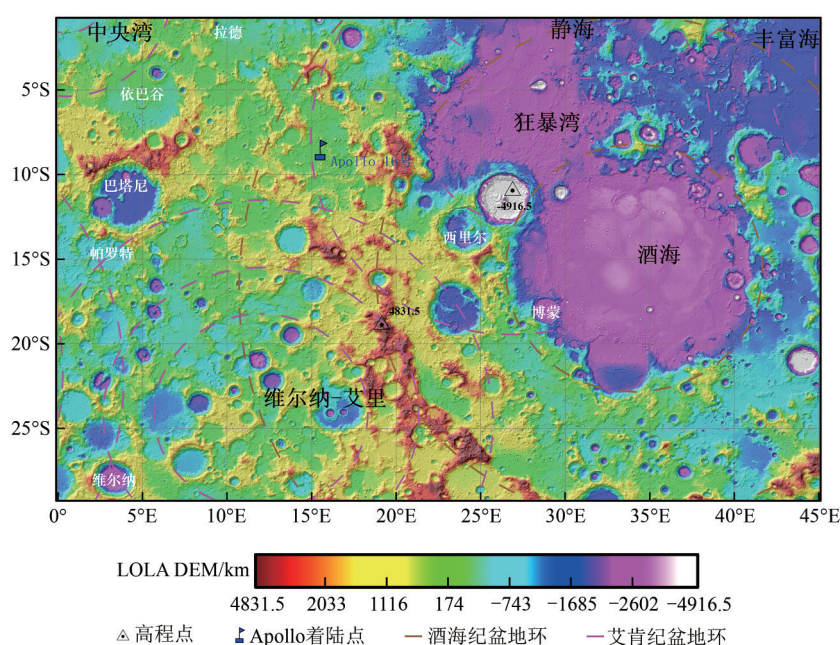


图2 酒海幅(LQ-20)地形图,背景数据为LOLA DEM数据(110 m/pixel)

Fig. 2 Topographic map of the Nectaris Quadrangle (LQ-20), background data is LOLA DEM data (110 m/pixel)

2.1 外动力地质作用岩石建造

外动力地质作用在月球演化过程中具有显著的地质意义, 主要涉及撞击作用, 表现为撞击坑和撞击盆地。

在月球地质学研究中, 直径超过 200 km 的月球撞击构造被定义为撞击盆地。在撞击坑的形成过程中, 由于撞击作用引发的地质过程, 如破碎、熔融、变质以及溅射堆积等, 所产生的物质组成相近、分布范围较小的岩石组合被称为坑物质。受到大型及超大型撞击事件的影响, 与撞击盆地密切相关且在时间和空间上具有连续性的各类岩石组合, 被统称为盆地建造。各阶段撞击坑物质与盆地建造的叠加, 构成了月球的“地层”层序系统。因此, 外动力地质作用所产生的岩石构造主要为撞击坑坑物质与盆地建造。

(1) 撞击坑物质。在本图幅范围内, 仅展示直径大于 10 km 的撞击坑的坑物质。各类时期的撞击坑在区域内广泛分布, 构成了地质图上最为显著的地质特征。根据撞击坑的形成机制和撞击能量大小, 将其划分为 5 类: 碗型坑、平底型坑、丘底型坑、阶梯型坑及中央峰坑。结合坑物质的空间分布特征, 将其分为 5 个亚类: 不连续溅射物、连续溅射物、坑壁物质、坑底物质以及中央峰物质。值得一提的是, 除哥白尼纪的坑物质外, 其他时期的坑物质并未专门区分出不连续溅射物 (Wang 等, 2020; 王俊涛, 2020)。

(2) 盆地建造。本分幅图遵循 1:250 万全月地质编图的盆地分类方案和盆地建造数据库。根据其形态和撞击机制, 撞击盆地可分为单环盆地、峰环盆地、多环盆地和超大盆地 4 类。此外, 以相带为依据, 将盆地建造划分为 6 亚类: 中央峰建造、盆底建造、峰环建造、盆壁建造、盆缘建造和溅射物建造。然而, 由于撞击盆地受到后期地质作用的破坏、盆地类型及形成时代的差异, 大多数撞击盆地仅保存了部分盆地建造 (Liu 等, 2022; 刘敬稳, 2022)。

2.2 内动力成因岩性分布图层

该图层是基于国内外月球探测工程所获取的遥感数据, 对内动力地质作用导致的月球表面岩石类型与岩浆演化历史进行综合研究后绘制而成。图层以 1:250 万月球岩石类型分布图为基础, 呈现在分幅图中。

(1) 岩石分类体系。1:250 万岩石分类体系构建了一个全面考虑月球返回样品、陨石及遥感研究的分类系统, 能够体现月球内动力地质作用下岩浆演化的岩石类型, 共计分为 3 大类 17 种岩石类型:

- 1) 月海岩石, 包括极高钛玄武岩、高钛玄武岩、中钛玄武岩、低钛玄武岩和极低钛玄武岩;
- 2) 非月海岩石, 包括 KREEP 玄武岩、KREEP 岩、碱性岩套、镁质岩套、镁质斜长岩、亚铁斜长岩

和亚铁苏长岩；3）其他特殊岩石，包括纯斜长岩、尖晶斜长岩、富橄榄石岩、硅质火山岩和火成碎屑岩（Chen等，2022）。

（2）岩石图面表达。在月球岩石类型分布图中，大面积分布的岩性以面状要素呈现，而小面积分布的岩性（如纯斜长岩、尖晶斜长岩、富橄榄石岩套、硅质火山岩和火成碎屑岩）则以点状要素表达（Chen等，2022）。

2.3 构造要素

（1）月表构造单元。在1：250万图的构造单元划分方案中，月表被划分为3个一级构造单元，分别为月海构造区、高地构造区和南极—艾肯构造区。进一步地，高地构造区可细分为3个二级构造单元，包括月海—高地过渡构造区、斜长岩高地构造区和北部平原构造区。

（2）区域构造分类体系和图面表达指标确定。月球构造分类体系采用多元指标整合的分类策略，以成因机制与形态特征作为主导指标，同时兼顾月球的动力学背景。将月球上各类型、各类别、各等级和次序的构造，根据主导构造应力的来源及作用方式的具有差异但在动力学机制上具有紧密生成关联的构造类型整体划分为14类：1）内动力成因构造可分为7种线性构造样式（包括推测深部断裂、浅层断裂、月堑、皱脊、月溪、坑底断裂和叶状陡坎）以及3种环形构造样式（火山口、穹隆和质量瘤）；2）外动力构造可分为两类线性构造（撞击断裂和撞击坑链）以及两类环形构造（撞击坑和撞击盆地）。部分撞击坑被后期的溅射物或火山岩覆盖，但地形特征仍然明显，这种类型的撞击坑被视为撞击坑的一个子类，称为隐伏撞击坑。

在分幅图中，叶状陡坎、火山口和质量瘤以点状图层进行展示，其他构造类型则以线性图层表示。对于存在坑物质的撞击坑，不再进行重复表达。对于一些未画坑物质的显著小坑，采用实线描绘其坑缘位置，隐伏撞击坑的坑缘则用虚线表示，撞击盆地的多环结构则采用圆环线进行描绘（Lu等，2022；陆天启，2020）。

2.4 其他要素

在图中，除地质要素外，还标注了月表地理名称标识、各类月球着陆任务着陆点坐标、金钉子位置，以及高程点等关键信息。

2.5 要素年代信息

地质图中的岩石、构造及地层时代是理解月球整体或区域地质演化的重要依据。通过对同位素年代学研究成果、地层覆盖、侵入穿插关系、撞击坑密度、大小—频率分布、撞击坑形态和成熟度等方面的分析，本次地质图编制提出了新三宙六纪的划分方案。三宙分别为冥月宙（4.52—4.31 Ga）、古月宙（4.31—3.16 Ga）和新月宙（3.16 Ga至今），6纪包括岩浆洋纪（4.52—4.31 Ga）、艾肯纪（4.31—3.92 Ga）、酒海纪（3.92—3.85 Ga）、雨海纪（3.85—3.16 Ga）、爱拉托逊纪（3.16—0.8 Ga）和哥白尼纪（0.8 Ga至今）。其中，岩浆洋纪属于冥月宙，艾肯纪、酒海纪及雨海纪属于古月宙，而爱拉托逊纪和哥白尼纪则属于新月宙（郭弟均等，2014，2016，2024；Liu和Guo，2018；郭弟均，2018）。

2.6 月球地质图图式图例、用色标准和表达方式

在编图标准中，对1：250万月球地质图上的符号和注记进行了详细规定。这些符号和注记包括各种面状要素、点状要素和线状要素，并明确了它们的等级、规格和颜色标准。此外，该标准还规定了图幅的整饰规格，以及使用这些符号的原则和要求。在颜色方面，该标准采用了四色油墨叠色，包括青（C）、品红（M）、黄（Y）和黑（Bk），可以叠印出150种颜色。这些颜色被进一步细分为不同的区间，以适应不同的要素表示。例如，1—50的颜色用于表示撞击坑，51—60的颜色用于表示盆地建造，60—70的颜色用于表示建造，71—80的颜色用于表示月海玄武岩，而81—90的颜色则用于表示线性构造和花纹符号。这些规定确保了地质图的准确性和一致性，为月球地质研究提供了重要的参考依据（Xu等，2022；许可娟等，2020）。本论文中的图例，地质单元信息均采用该种图例表达要素内容。

3 酒海幅月球数字地质填图结果

3.1 岩石类型

酒海幅（LQ-20）地区月海玄武岩出露面积约400399.63 km²，占据了图幅面积的32%，主要由酒海盆地以及中央湾盆地（Medii）的盆地中央的极低钛玄武岩，拉蒙特（Lamont）、丰富海

(Fecunditatis) 以及静海 (Tranquillitatis) 盆地边缘的低钛玄武岩, 丰富海中央的中钛玄武岩, 拉蒙特、静海盆地中央的高钛玄武岩组成。根据撞击坑统计定年获得的模式年龄, 这些玄武岩形成年龄约在 38 亿年—35 亿年之间 (Hiesinger 等, 2012, 2010; Hiesinger 和 Head III, 2006)。

在本图幅中, 非月海岩石以亚铁斜长岩套为主, 主要分布在酒海盆地、狂暴盆地、拉蒙特盆

地、静海盆地、丰富海盆地、中央湾盆地的边缘以及维尔纳—艾里盆地的整个区域内, 约占据图幅面积的 85%。然而, 这些亚铁斜长岩套的大部分被盆地建造所覆盖, 仅在酒海盆地和中央湾盆地之间有约 5% 的面积出露。此外, 还有零星的镁质斜长岩套出露于酒海盆地北部的部分坑的内部或边缘以及维尔纳—艾里盆地内部的布兰基努斯坑 (Blanchinus) 内 (图 3)。

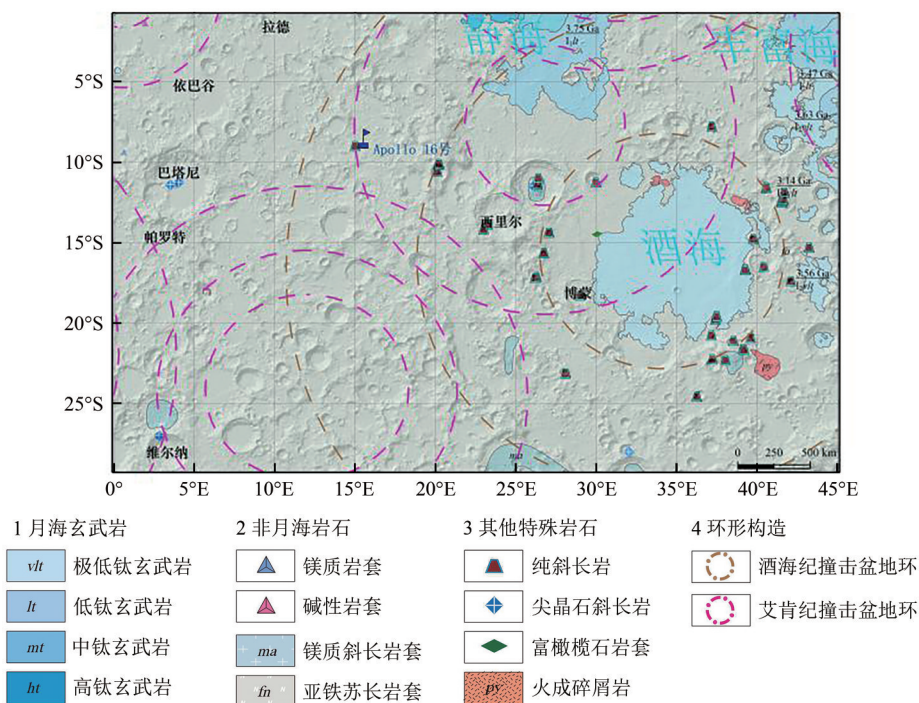


图 3 酒海幅(LQ-20)岩石分布概略图

Fig. 3 Distribution map of rock formations within LQ-20 Nectaris Quadrangle

在 0° — 10° E 范围内, 分布着 2 处碱性岩套、1 处镁质岩套出露, 这些地点以点状形式在图中标出 (图 3)。在酒海盆地第二个环内外, 有 45 处纯斜长岩出露 (分别位于其东北部、南部)。此外, 还有 6 处尖晶石斜长石出露, 其中 2 处位于巴塔尼坑中央峰、1 处位于皮科洛米尼坑 (Piccolomini) 的连续溅射物上的一个未划分年代坑的中央、2 处位于西奥菲勒斯坑 (Theophilus) 的中央峰上、1 处位于维尔纳坑 (Werner) 的坑壁与连续溅射物的接壤处。另外, 还有 4 处富橄榄石岩套出露, 其中 2 处位于酒海的玄武岩、酒海盆地盆底建造、梅德勒坑 (Madler) 的辐射纹的交界处, 2 处位于西奥菲勒斯坑的中央峰上。此外, 有 5 处火成碎屑岩分布, 总面积为 2621.91 km^2 , 其中 1 处位于酒海盆地峰环外的盆底的东南位置, 1 处位于维尔纳—艾里

盆地的盆壁上、艾里坑 (Ary) 的坑底, 2 处位于酒海盆地的峰环内的盆底上的中东位置 (其中一位位于戈迪贝尔坑中, 一个位于戈迪贝尔坑旁边的坑上), 1 处位于酒海盆地的峰环内的盆底上、酒海盆地的中南位置的达盖尔坑的坑缘上 (图 3)。

3.2 撞击盆地和撞击坑物质

酒海幅 (LQ-20) 分幅图的盆地建造分布如图 4 所示, 酒海盆地是面积最大且最重要的盆地, 广泛分布于图幅的中东部, 其盆底建造、盆壁建造、盆缘建造均有分布, 并且具有明显的环形构造 (图 4 (c))。其次是西部的维尔纳—艾里盆地, 盆底建造、盆壁建造、盆缘建造均有分布, 环形构造明显 (图 4 (d))。在西北部, 中央湾盆地四分之一的面积位于本图幅内 (从中心 90° 范围), 包

括其峰环建造、盆底建造、盆壁建造、盆缘建造(图4(d))。此外,酒海西北部的狂暴湾盆地基本全部位于本图幅内,但被酒海盆地覆盖,仅隐约可见其轮廓,重力异常明显(图4(d))。由于酒

海盆地的撞击的破坏和玄武岩的后期喷发,拉蒙特、静海、丰富海的出露面积较少。值得注意的是,本图幅还被大量的雨海(Imbrium)盆地溅射物所覆盖(图4(b))。

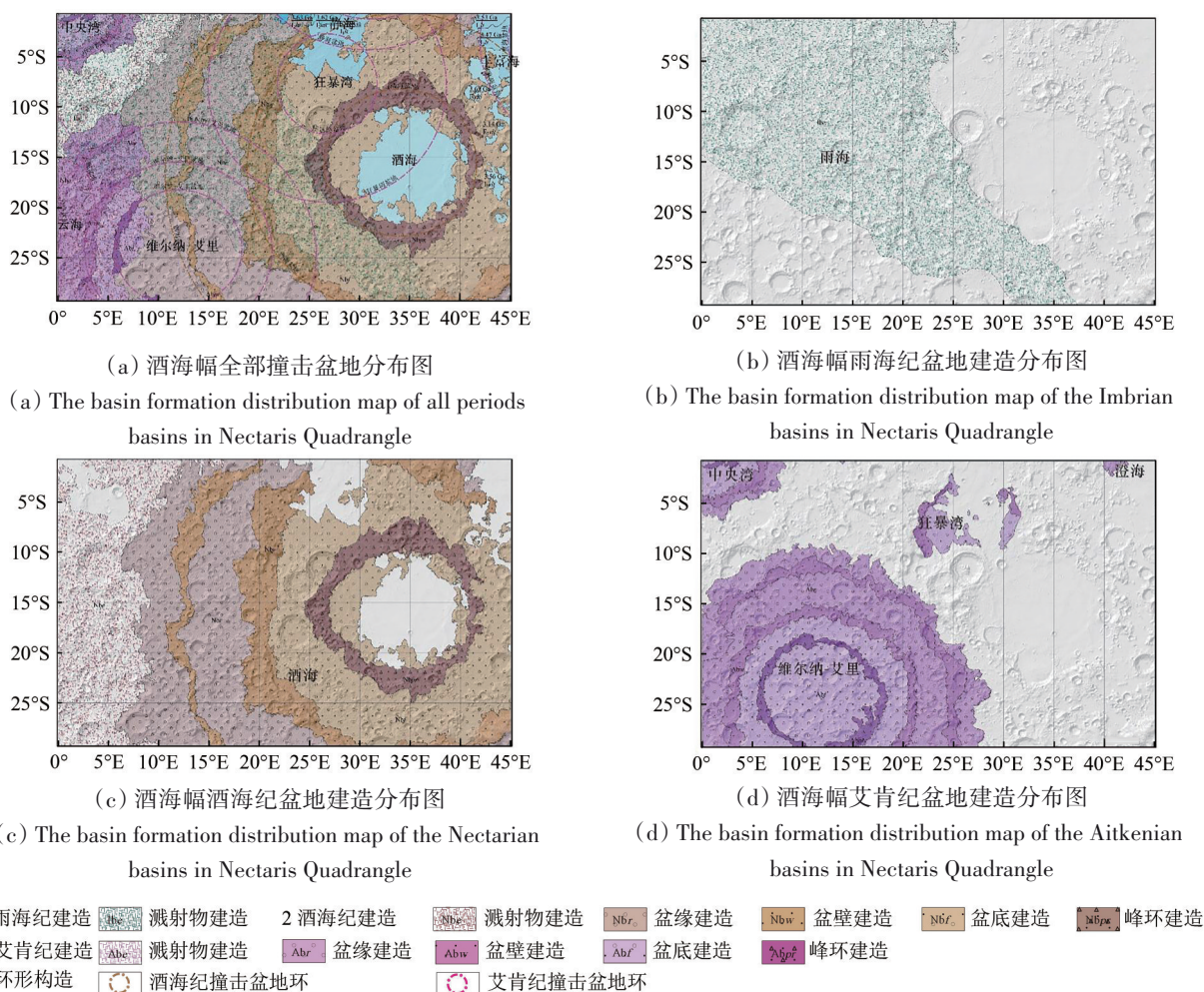


图4 酒海幅(LQ-20)撞击盆地分布概略图

Fig. 4 Distribution map of impact basins within LQ-20 Nectaris Quadrangle

在酒海幅(LQ-20)月球地质图中,我们表达了269个直径大于10 km的撞击坑的坑物质(图5)。这些撞击坑分别属于不同的地质时期,其中哥白尼纪有5个,爱拉托逊纪有9个,晚雨海纪有9个,早雨海纪5个,雨海纪未划分72个,酒海纪有41个,艾肯纪有16个。此外,还有112个撞击坑的年代未得到确定。在这些撞击坑中,有32个是中央峰撞击坑类型,其余则多数呈现出碗型坑和平底型坑的特征。

3.3 构造形迹特征

(1) 外动力地质作用构造(图6)。1) 线性构造。本图幅中外动力地质作用形成的线性构造主

要包括64条撞击断裂和3条撞击坑链。撞击断裂主要分布于酒海盆地西北部的德朗布尔坑(Delambre)、西奥菲勒斯坑内,以及维尔纳—艾里盆地西南部的维尔纳坑内,形成年代与坑形成年代相同,分别为晚雨海纪、爱拉托逊纪、爱拉托逊纪。撞击坑链均分布于维尔纳—艾里盆地和酒海盆地的交界处,无法判断来自哪个撞击坑,更无法确定年代。

2) 环形构造。两种环形构造撞击坑和撞击盆地均分布于图幅的整个图面上,分布较为均匀,撞击坑环278个、隐形撞击坑22个、撞击盆地环17个。撞击盆地环的形成年代与撞击盆地年代一致,见本文档的第二章的2.1节与第三章的3.2节。

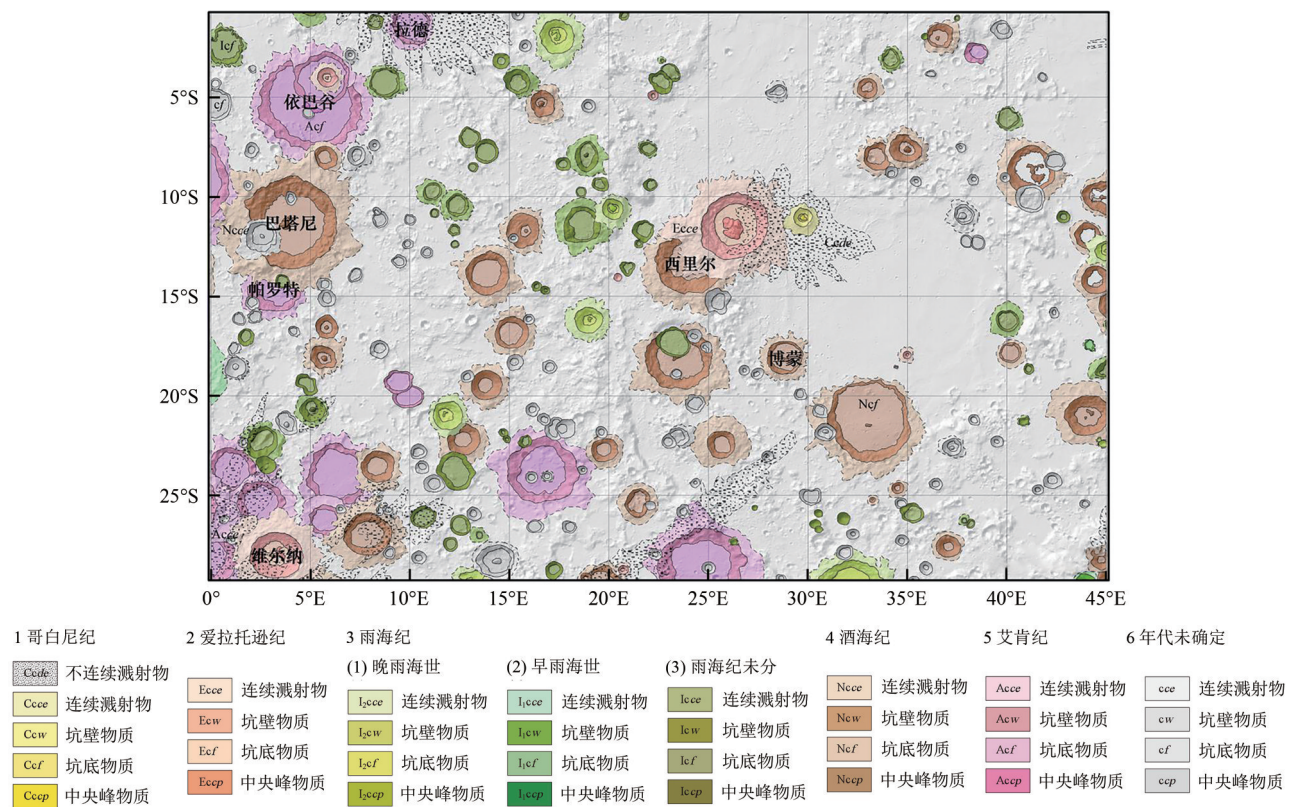


图5 酒海幅(LQ-20)内撞击坑分布概略图

Fig. 5 Distribution map of craters within LQ-20 Nectaris Quadrangle

(2) 内动力地质作用构造(图6)。1) 线形构造。本图幅中包含74条坑底断裂、12条叶状陡坎、45条月堑、10条浅层断裂、10条月溪、227条皱脊、9条深部断裂。坑底断裂集中分布在酒海盆地周边的10个撞击坑以及维尔纳—艾里盆地西北部的Airy撞击坑中, 这些断裂可能是由于撞击事件和岩浆侵入所引发。叶状陡坎主要分布在酒海盆地的西北部以及维尔纳—艾里盆地的西南部。这些叶状陡坎属于较为年轻的地质构造, 形成一般晚于10亿年。月堑主要位于本图幅的东北部(酒海盆地的北部), 主要形成于晚雨海纪。浅层断裂主要分布在酒海盆地的西南位置即维尔纳—艾里盆地和酒海盆地之间的位置, 可能是由于地质作用或撞击事件所引发的。月溪主要位于酒海盆地内的弗拉卡斯托罗坑(Fracastorius)和西奥菲勒斯E坑(Theophilus E)内, 主要形成于爱拉托逊纪。皱脊主要分布于酒海月海区域的东侧以及酒海盆地与丰富海、静海的交界处的玄武岩内。推测深部断裂主要位于图幅北部的拉蒙特盆地边缘位置。

2) 环形构造。内动力地质作用形成的环形构

造包括3类: 火山口、穹隆和质量瘤。本图幅中并未出现穹隆, 只保留了3处火山口, 2处质量瘤。火山口主要分布于酒海盆地内环的戈迪贝尔坑(Gaudibert)和戈迪贝尔B坑(Gaudibert B)内部以及酒海盆地最外环和丰富海盆地最外环的交界处; 质量瘤则位于酒海盆地中心、狂暴湾盆地中心, 形成年代与盆地形成年代一致, 分别为酒海纪、艾肯纪。

3.4 酒海幅月球地质图

酒海幅地质图的主图(图7)将以上3类要素加上标注按照点要素、线要素、山体阴影、面要素进行排列, 面要素又按照从老到新的顺序层层叠置, 形成本图幅的整体图层, 同时加了3个子图, 分别为岩石类型图、图幅接图表、剖面图, 丰富了覆盖在主题图下的更多地质演化信息, 为用户建立了更好的使用体验。

同时, 按照中国地质科学院地质研究所丁孝忠团队设置的分幅图地质图式, 将分幅图的标题、主题、图例、比例尺、出版信息等设置如图, 增加了图幅的可读性。

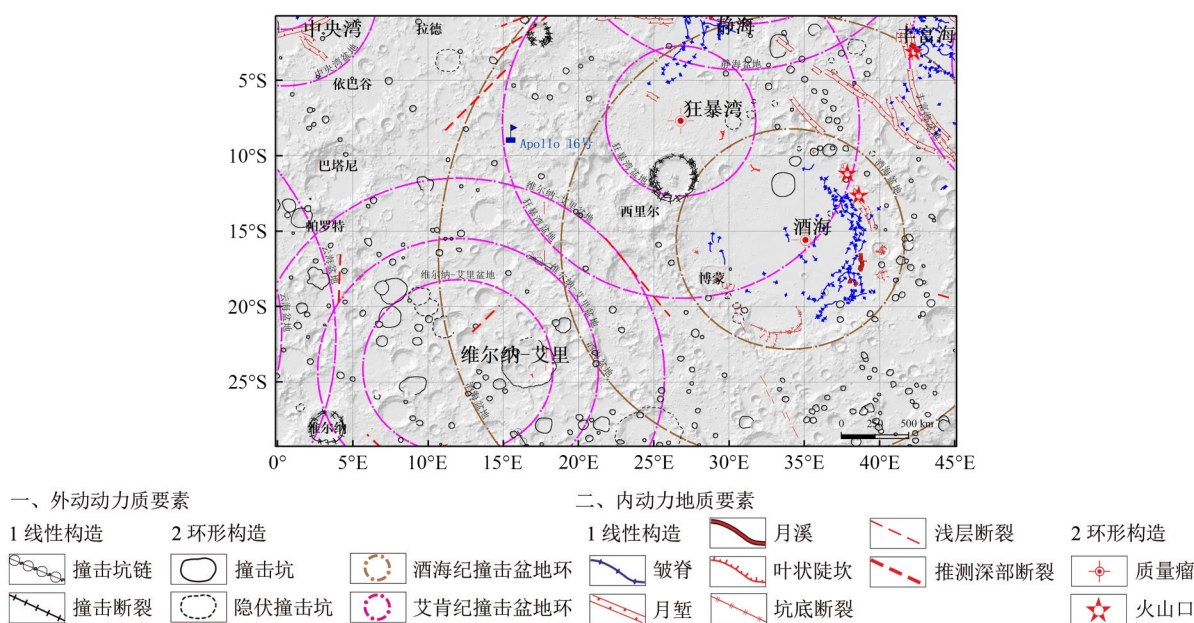


Fig. 6 Distribution map of of structural characteristics within LQ-20 Nectaris Quadrangle

4 讨论

4.1 区域地质演化

在月亮完全固化后,月球内外地质动力作用的痕迹得以记录并保留下来(欧阳自远和刘建忠, 2014)。本图幅中(图7),撞击坑的形成贯穿了整个历史,而盆地主要是在38亿年之前形成的(Zhu等, 2017)。在本幅图中主要的地形特征是由艾肯纪的维尔纳—艾里盆地、湿海、狂暴盆地、拉蒙特、静海、丰富海、中央湾盆地,以及酒海纪的酒海盆地引起的。其中,酒海盆地和狂暴湾盆地中心的质量瘤被保存了下来。在雨海纪的,酒海盆地、中央湾盆地、拉蒙特盆地、静海盆地、丰富海盆地的中央发生了后期玄武岩填充,峰期主要发生在38亿—35亿年之间,之后岩浆活动迅速减弱,并逐渐趋于平静,只有少量的中小型撞击事件发生。在爱拉托逊纪产生了与玄武岩相关的构造,如月堑和月溪,同时产生了系列叶状陡坎。综上,本幅图展示了月亮完全固化后的系列地质演化过程,包括撞击坑的形成、盆地的形成、玄武岩喷溢、岩浆活动的变化以及后期玄武岩填充等地质事件,整个演化过程按照6纪划分如下:

(1) 岩浆洋纪: 根据现有的资料研究,我们了解到约45.2亿年前,在月球的形成初期,整个月球曾处于熔融状态的“岩浆洋”时期(郭弟均等, 2024)。随着温度下降,月表上的“岩浆洋”

开始发生结晶分异作用,最终形成了原始的月幔和斜长岩月壳。在壳幔之间是富KREEP物质的残余岩浆,它们共同构成了月球的各个内部圈层(Chen等, 2022)。在本分幅图(图7)中,除了坡度较大区域出露的原始的亚铁斜长岩以外,大部分的亚铁斜长岩都以撞击坑和撞击盆地表面物质的形式存在,这可能是经过多次历史改造的结果。

(2) 艾肯纪: 在南极艾肯盆地发生撞击后,全月大部分地区被一层南极艾肯盆地的溅射物覆盖,本图幅也不例外。然而,由于本图幅距离南极艾肯盆地相对较远,溅射物成分已经与原有的亚铁斜长岩混合到一起,导致解译困难。随后发生了3次大型撞击事件,形成了图幅内部的维尔纳—艾里撞击盆地、狂暴湾盆地,以及西北角的中央湾盆地。这3次大型撞击事件标志着本图幅内部艾肯纪主体地质构造大致完成,此后的撞击事件规模变小。同时,图幅内仍可发生了至少16次小型撞击事件,形成的撞击坑主要位于未受酒海盆地的盆地建造影响的区域。

(3) 酒海纪: 酒海盆地作为酒海纪时代的标志性特征,其主体结构被本图幅完整揭示,分幅图内部可完整识别出酒海盆地盆壁及峰环所组成的多环构造。酒海盆地峰环内部发育有玄武岩,在玄武岩边缘发育有皱脊及月溪等线性构造,皱脊分布可延伸至酒海盆地的盆底建造,月溪发育数量较少。酒海盆地撞击事件的发生,对已有的艾肯

纪盆地进行了进一步的改造,至此图幅区域内部再未有盆地级的撞击作用发生,图幅内现今主体环形构造已经形成。此后,酒海纪的演化主要受到外动力作用的影响,形成了包括弗拉卡斯托罗、阿尔巴塔尼、希里等41个可识别的较大撞击坑。

(4) 雨海纪:图幅内各区域的雨海纪地质演化既受内动力地质作用的影响,也受外动力地质作用的影响。从内动力地质作用的角度来看,图幅的北部、东北部和西北部的区域,如静海、丰富海和中央湾盆地,发生了大规模的玄武岩溢流事件。这一事件导致酒海盆地的一部分以及中央湾盆地的盆底部分被月海玄武岩所覆盖。此外,在本图幅的东北位置(酒海盆地的北部),晚雨海纪还有月堑的形成。另外,在酒海盆地的峰环附近,还经历了3次火山活动,形成了3处火成碎屑岩。从外动力地质作用的角度来看,图幅内部保留了86个较大的撞击事件形成的撞击坑,并被来自雨海盆地的溅射物覆盖了少半个图幅。

(5) 爱拉托逊纪:在雨海纪之后,图幅内部受到了外动力地质作用的主要影响。在爱拉托逊纪时期,主要形成了9个较为明显的撞击坑,其中规模较大的两个分别为西奥菲勒斯及维尔纳撞击坑,同时,这两个撞击坑内部还出现了撞击断裂。此外,还形成了与内地质作用相关的线性构造,如月溪和叶状陡坎等。

(6) 哥白尼纪:有5个具有明显辐射纹的哥白尼纪撞击坑对图幅区域产生了影响。其中,西北角的酒海盆地和中央湾盆地的盆缘建造之间各有两处辐射纹,这些辐射纹分别来自戈金撞击坑(其覆盖了拉德撞击坑的坑物质)和狄俄尼索斯撞击坑(其覆盖了大赛翁撞击坑的坑物质)。而在西南角的维尔纳—艾里撞击坑西南位置也出现了两处辐射纹,它们均来自第谷撞击坑。

4.2 与美国地质图的差异性

由于1:250万月球地质图是内外动力的角度出发重新建立的月球地质要素体系(欧阳自远和刘建忠,2014)(本文的第2节——月球地质图表达内容),而美国的系列比例尺地质图绘制(Black,2023)过程中:

(1) 仅给出了基本的图幅绘制模板、主要表达要素内容、初始矢量数据、栅格数据与绘制原则(James等,2022;Black,2023),其中的初始矢量数据是阿波罗时代的系列成果的数字化版本。

然而,受当时数据质量的影响与学者认知的限制,该版本无法阐述不同地质作用体系导致的地质单元信息。月球数字编图项目在重启过程中,未能针对不同类型地质作用特征进行深入研究,许多近年来学者的新认知,如构造、岩石、盆地等新的发现、机制、分类、年代信息等,均未得以详细探讨并纳入研究范围。

(2) 囿于阿波罗时代的地质单元划分中无法跳出,目前的美国地质图地质单元以年代为主要划分标志,配以地形地貌特征。命名大致可分为3类:1)年代与地貌单元的组合,例如哥白尼纪坑物质、哥白尼纪坑溅射物、爱拉托逊纪和雨海纪月海等;2)年代、地形描述和地貌单元的组合,例如雨海纪较平原、酒海纪瘤状盆地物质、前酒海纪丘状盆地物质等;3)地名和地质名词的组合,例如雨海盆地亚平宁山脉、东海孟德建造、酒海盆地Jessen建造等。

(3) 地质单元仅揭示了最表面的地质信息,即各矢量面图层间无叠置关系。这种特性导致了一个问题,即使在影像数据清晰可见的情况下,覆盖在哥白尼纪辐射纹和雨海纪盆地不连续溅射物下的地质信息也会丢失。

(4) 不同图幅作为基金项目的形式被分配给不同的单位和人员。这些团队负责完成图幅的所有内容,但由于时间跨度较大,导致对解译内容的理解存在差异。因此,划分的年代地质单元信息更难以被其他学者理解为何属于该年代,也无法用于分析来源信息。

基于这些制图理念的差异性,中国1:250万月球制图中结果(图7)与美国地质图的制图结果(图8)必然存在一定的差异性,以LQ-20酒海幅为例:

(1) 就表达出的地质信息而言,整体上本1:250万地质图表达的信息更具层次性,地质单元都可归属到具体成因来源,一目了然,而美国地质图以地质年代为主来表达地质信息,很难明确给出斑点地质单元的物质来源。以酒海盆地为例,中国的新一轮地质编图表达出了酒海内的玄武岩,从其颜色和标注可知其为低钛玄武岩(图7)。同时,酒海盆地的环信息、盆底、盆缘、溅射物的信息分布可明确看出,而美国地质图中仅可看出其中心区域分布有玄武岩,但未给出属于哪种类型的玄武岩,更未给本图幅中周围的地质单元哪些属于酒海盆地(图8)。

(2) 盆地建造识别更齐全。本编图中的盆地建造由中国科学院地球化学研究所刘建忠团队专业负责, 识别出了81个盆地, 建立了每类盆地的识别标准和亚类划分方案, 并几乎分层绘制出了每个盆地的建造信息(Liu等, 2022)。分布到LQ-20的有雨海、酒海、维尔纳—艾里、中央湾、狂暴湾、澄海、丰富海等盆地地质单元信息。而在美国地质图均未表达, 没有专门盆地建造图层, 仅将零星分布浅橙色的地质单元表达为酒海盆地地质单元, 青绿色表示雨海盆地未分割地质单元, 但其他盆地信息缺失(图7, 图8)。

(3) 增加了岩石建造地质图层。本编图中的岩石建造由山东大学凌宗成团队专业负责(Chen等, 2022), 建立了完整的岩石分类体系与划分指标, 分布在LQ-20的有亚铁斜长岩、4类玄武岩与59处其他特殊岩石。而在美国地质图中仅看到玫红色的一处玄武岩岩石图层, 缺乏其他类型的岩石表达(图7, 图8)。

(4) 增加了构造体系。在本编图由吉林大学陈圣波团队专业负责, 建立了构造分类体系与识别标准(Lu等, 2022), 分布图幅的有6个盆地的环形信息、坑、皱脊、月溪、质量瘤、火山口等造, 清晰地展示了酒海幅的地质构造特征。而美国地质图仅有坑的环形构造与皱脊(图7, 图8)。

(5) 在坑物质的表达上也存在差异。本次1:250万编图将坑物质划分为中央峰、坑底、坑壁、连续溅射物、不连续溅射物, 而在美国地质图中统一表达为坑物质, 仅在其坑壁边缘以环形线性构造划分坑内外物质(图7, 图8)。

(6) 图例: 以内外地质作用、年代分布、进行划分。而美国地质图仅以年代进行划分, 不同年代间的坑物质类型、盆地物质类型、月海物质类型存在一定差异性, 且其线性构造仅6类(图9)。

综上所述, 本编图在表达LQ-20的地质信息方面具有更高的精度和详细程度。这不仅有助于更好地理解该地区的地质特征, 也为地质研究和资源开发提供了更为准确和全面的信息。

5 结 论

作为1:250万地质编图中的30幅分幅图中的一员, 酒海幅因其特殊位置而备受关注: 位于海陆交界处, 覆盖了酒海盆地这一年代划分的标志盆地、Apollo 16位于其内。本文对酒海幅(LQ-20)

区域岩石类型、构造形迹、撞击盆地和撞击坑进行了详细论述, 并给出了该区域地质演化历史的综合研究。同时, 对比美国地质图, 给出了除制图理念以外的, 直观表达地质图中的具体差异所在。

相信中国1:250万月球地质图能够为中国后续多尺度月球地质图编制工作、为中国乃至全球月球就位探测、科学研究等离不开的一份月球地质背景资料。

志 谢 对在1:250万月球数字地质填图团队中付出辛勤劳动的各单位老师们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(References)

- Black S R. 2023. User's Guide to Planetary Image Analysis and Geologic Mapping in ArcGIS Pro. No.11-B14. U.S. Geological Survey
- 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, Liu C Q, Cao H J, Bi X Y, Liu L, Wan S, Qi X B, Zhao Z X, Guo D J, Ji J Z, Liu J W, Wang J T, Zhang K, Zhang J Y, Sun P J, Zhu K, Lu T Q, Wu C Z, Han K Y, Xu K J, Jin M, Wang Y, Zhang C, Deng J Y, Song Y and Ouyang Z Y. 2022. Digital and global lithologic mapping of the Moon at a 1:2500000 scale. *Science Bulletin*, 67(20): 2050-2054 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.09.015]
- Chen J P, Ding X Z and Wang X. 2014. *Lunar Geological Research and Mapping*. Beijing: Geological Press (陈建平, 丁孝忠, 王翔. 2014. 月球地质研究与编图. 北京: 地质出版社)
- Di K C, Liu B, Liu Z Q and Zou Y L. 2016. Review and prospect of lunar mapping using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1230-1242 (邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 邹永廖. 2016. 月球遥感制图回顾与展望. 遥感学报, 20(5): 1230-1242) [DOI: 10.11834/jrs.20166158]
- Ding X Z, Han K Y, Han T L, Ju Y J, Pang J F, Ding W C and Wang L. 2012. Compilation of the geological map of Sinus Iridum Quadrangle of the Moon(LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 19(6): 15-27 (丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 剧远景, 庞健峰, 丁伟翠, 王梁. 2012. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制. 地学前缘, 19(6): 15-27)
- Fortezzo C M, Spudis P D and Harrel S L. 2020. Unified geologic map of the moon 1:5 M // 51st Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Guo D J. 2018. A Lunar Timescale from Geodynamic Evolution Perspective. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (郭弟均. 2018. 基于动力学演化模型的月球地质年代划分方案. 北京: 中国科学院大学)
- 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 and Ouyang Z Y. 2024. A lunar time scale from the perspective of the Moon's dynamic evolution. *Science*

- China Earth Sciences, 67(1): 234-251 (郭弟均, 刘建忠, Head J W, 张福勤, 凌宗成, 陈圣波, 陈建平, 丁孝忠, 籍进柱, 欧阳自远. 2024. 基于月球动力学演化的地质年代划分. 中国科学(地球科学), 54(1): 244-263 [DOI: 10.1360/N072022-0258]
- Guo D J, Liu J Z, Ji J Z, Liu J W, Wang Q L and Ouyang Z Y. 2016. Preliminary study on the global geotectonic framework of the Moon. Chinese Journal of Geophysics, 59(10): 3543-3554 (郭弟均, 刘建忠, 籍进柱, 刘敬稳, 王庆龙和欧阳自远. 2016. 月球的全球构造格架初探. 地球物理学报, 59(10): 3543-3554) [DOI: 10.6038/cjg20161002]
- Guo D J, Liu J Z, Zhang L, Ji J Z, Liu J W and Wang L. 2014. The methods of lunar geochronology study and the subdivisions of lunar geologic history. Earth Science Frontiers, 21(6): 45-61 (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. 地学前缘, 21(6): 45-61) [DOI: 10.13745/j.esf.2014.06.006]
- Hiesinger H and Head III J W. 2006. New views of lunar geoscience: an introduction and overview. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 60(1): 1-81 [DOI: 10.2138/rmg.2006.60.1]
- Hiesinger H, Head III J W, Wolf U, Jaumann R and Neukum G. 2010. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size-frequency distribution measurements. Journal of Geophysical Research: Planets, 115(E3): E03003 [DOI: 10.1029/2009JE003380]
- Hiesinger H, Van Der Bogert C H, Pasckert J H, Funcke L, Giacomini L, Ostrach L R and Robinson M S. 2012. How old are young lunar craters? Journal of Geophysical Research: Planets, 117(E12): E00H10 [DOI: 10.1029/2011JE003935]
- Hodges C A and Muchlberger W R. 1981. Geology of the Apollo 16 Area, Central Lunar Highlands. Professional Paper 1048. United States Government Printing Office
- Ji J Z, Guo D J, Liu J Z, Chen S B, Ling Z C, Ding X Z, Han K Y, Chen J P, Cheng W M, Zhu K, Liu J W, Wang J T, Chen J and Ouyang Z Y. 2022. The 1:2,500,000-scale geologic map of the global Moon. Science Bulletin, 67(15): 1544-1548 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.05.021]
- Liu J Z and Guo D J. 2018. Lunar geological timescale//Cudnik B, eds. Encyclopedia of Lunar Science. Singapore: Springer: 1-3 [DOI: 10.1007/978-3-319-05546-6_63-1]
- Liu J Z, Ji J Z, Guo D J, Wang J T, Luo L, Zhang L, Chen S B, Chen J P, Ling Z C, Ding X Z, Han K Y and Ouyang Z Y. 2017. Progress in compilation and research of 1:2.5 million lunar geological map of the Mare Nubium//Ninth Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry The Second National Member Congress and the 16th Annual Academic Conference. Xi'an: Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry: 1114-1115 (刘建忠, 籍进柱, 郭弟均, 王俊涛, 罗林, 张莉, 陈圣波, 陈建平, 凌宗成, 丁孝忠, 韩坤英, 欧阳自远. 2017. 月球云海地区1:250万地质图编研进展//中国矿物岩石地球化学学会第九次全国会员代表大会暨第16届学术年会文集. 西安: 中国矿物岩石地球化学学会: 1114-1115)
- Liu J W. 2022. The Geological Interpretation and Spatio-Temporal Research of Global Lunar Basins. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (刘敬稳. 2022. 全月盆地地质解译与时空演化研究. 北京: 中国科学院大学)
- Liu J W, Liu J Z, Yue Z Y, Zhang L, Wang J T and Zhu K. 2022. Characterization and interpretation of the global lunar impact basins based on remote sensing. Icarus, 378: 114952 [DOI: 10.1016/j.icarus.2022.114952]
- Lu T Q. 2020. Study on Remote Sensing Recognition and Evolution of Lunar Tectonics. Changchun: Jilin University (陆天启. 2020. 月球构造遥感识别及其演化研究. 长春: 吉林大学)
- Lu T Q, Zhu K, Chen S B, Liu J Z, Ling Z C, Ding X Z, Han K Y, Chen J P, Cheng W M, Lei D H, Mu Y L, Li A Z, Chen J and Ouyang Z Y. 2022. The 1:2,500,000-scale global tectonic map of the Moon. Science Bulletin, 67(19): 1962-1966 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.08.017]
- Ouyang Z Y and Liu J Z. 2014. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping. Earth Science Frontiers, 21(6): 1-6 (欧阳自远, 刘建忠. 2014. 月球形成演化与月球地质图编研. 地学前缘, 21(6): 1-6) [DOI: 10.13745/j.esf.2014.06.001]
- Shevchenko V, Rodionova Z and Michael G. 2016. Lunar and Planetary Cartography in Russia. Singapore: Springer [DOI: 10.1007/978-3-319-21039-1]
- Skinner J A, Huff A E, Black S R, Buban H C, Fortezzo C M, Gaither T A, Hare T M and Hunter M A. 2022. Planetary Geologic Mapping Protocol—2022. No.11-B13. U. S. Department of the Interior and U. S. Geological Survey
- Wang J T. 2020. The Research of Lunar Impact Crater Material Subunits and Implication. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (王俊涛. 2020. 月球撞击坑物质亚类的研究与应用. 北京: 中国科学院大学)
- Wang J T, Kreslavsky M A, Liu J Z, Head J W, Zhang K, Kolenkina M M and Zhang L. 2020. Quantitative characterization of impact crater materials on the Moon: changes in topographic roughness and thermophysical properties with age. Journal of Geophysical Research: Planets, 125(10): e2019JE006091 [DOI: 10.1029/2019JE006091]
- Wang L, Ding X Z, Han K Y, Pang J F, Xu K J, Zheng H W and Wu H. 2015. The compilation of the lunar digital geological map and a discussion on the tectonic evolution of the moon. Geology in China, 42(1): 331-340 (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. 中国地质, 42(1): 331-340) [DOI: 10.12029/gc20150126]
- Xu K J, Ding X Z, Han K Y, Liu J W, Ling Z C, Pang J F and Wang Y. 2022. Compilation of the geological map of the Petavius quadrangle of the Moon (LQ-21) and study on the regional geological evolution. Earth Science Frontiers, 29(2): 354-369 (许可娟, 丁孝忠, 韩坤英, 刘敬稳, 凌宗成, 庞健峰和王颖. 2022. 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. 地学前缘, 29(2): 354-369) [DOI: 10.13745/j.esf.sf.2021.3.11]
- Xu K J, Wang L, Han K Y, Ding X Z, Wang D, Ling Z C, Pang J F and Wang Y. 2020. Design and implementation of symbol library of lunar geological map at 1:2.5 M. Earth Science, 45(7): 2650-2661

(许可娟, 王梁, 韩坤英, 丁孝忠, 王丹, 凌宗成, 庞健峰, 王颖.
2020. 1:250 万月球地质图符号库的设计与实现. 地球科学,
45(7): 2650-2661) [DOI: 10.3799/dqkx.2020.065]

Zhu M H, Wünnemann K and Artemieva N. 2017. Effects of Moon's
thermal state on the impact basin ejecta distribution. *Geophysical Re-
search Letters*, 44(22): 11292-11300 [DOI: 10.1002/2017GL075405]

1:2500000 geological map compilation and research of the Nectaris Quadrangle (LQ-20) on the Moon

LIU Jingwen¹, LIU Jianzhong¹, ZHU Kai¹, ZHANG Jingyi¹, ZHANG Ke^{1,2},
WU Congzhe^{3,1}, LEI Danhong¹

1. Center for Lunar and Planetary Science, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract: Based on the Chang'E lunar exploration data and other lunar geological data, the team led by the Institute of Geochemistry of the Chinese Academy of Sciences has compiled a series of lunar global geological maps. These maps include a 1:2500000-scale global geologic map, a digital global lithologic map, and a global tectonic map. Thirty lunar quadrangle geological maps are also compiled, including the LQ-20 Nectaris Quadrangle map. The LQ-20 map is eye-catching because it depicts the impact event of the Mare Nectaris Basin, which divided the Nectarian and Aitkenian periods, during the Nectarium classic formation event.

This article provides a detailed overview of the development history of lunar geological mapping and discusses the various geological features observed in the LQ-20, including rock types, impact basins, crater materials, and structural characteristics: 12 rock types, basin formations on eight impact basins, crater materials from 260 impact craters, and 16 types of structural characteristics, which cover geological information in the sixth periods.

Finally, this article discusses the regional geological evolution history of the LQ-20 map from the Magmatic Oceanic Period to the Copernican Period. This article also compares the expression of geological features in the LQ-20 map with that of the USGS lunar geological map and highlights the differences and advantages: The fundamental distinction in conveying geological information lies in the comprehensive establishment and systematic representation of the overall lunar geological processes as an integrated geological system. This approach involves providing a clear explanation of the geological causes for each unit and ensuring that each geological feature conveys its origin. Furthermore, each region is characterized by a distinct hierarchy of geological units arranged in chronological order. This project would provide lunar geological background information for lunar exploration, scientific research, and related endeavors, and will benefit not only China but also the global communities.

Key words: remote sensing, lunar geological map, LQ-20, Mare Nectaris, remote sensing interpretation, geological evolution history

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF0503100); National Natural Science Foundation of China (No. 42302267, 42202264); Guizhou Provincial Science and Technology Projects (No. QKHJC-ZK(2024)-670, QKHJC-ZK(2023)-478); Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KGFZD-145-2023-15); Compilation of Chinese Regional Geological Chronicles and Series of Maps (No. DD20230007)