

月球地貌多层次分类方法与体系研究

邓佳音^{1,2}, 程维明^{2,3,4}, 焦毅蒙¹, 刘建忠^{3,4,5}

(1. 河南科技大学土木建筑学院, 洛阳 471023; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230052; 5. 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 550002)

摘要: 月球地貌是其表面高低起伏的状态, 月球自形成后经历了不同的内、外营力作用最终形成了现在的地貌特征。月球地貌分类是月球地貌学研究的基础, 也是月球地貌制图的基础和关键科学问题。本文参考地球地貌分类体系, 提出了月球地貌分类的原则与指标, 综合考虑月球地貌的宏观基本形态、成因、地貌实体形态、组合形态、次级形态、坡面形态、物质组成与岩性及年代等多种分类指标, 构建了月球地貌类型的多层次分类方案, 包括月表高程分级、宏观形态分级、成因类型、形态类型、组合形态亚类、次级形态亚类、坡面形态亚类、物质组成亚类与地貌年代亚类九级。基于本文提出的月球地貌多层次分类方案, 以嫦娥五号采样返回区为典型研究区进行月球地貌制图, 建立嫦娥五号着陆区月球地貌类型数据库。月球地貌类型分类的研究可为月球地貌图编制提供基础参考, 为深入理解月球地貌演化过程提供重要依据。

关键词: 月球地貌; 分类指标; 多层次分类; 形态成因类型; 地貌制图

DOI: 10.11821/dlxb202411004

1 引言

随着嫦娥五号月面采样返回任务的胜利完成, 中国探月工程进入四期阶段, 美国与欧洲国家也启动了重返月球计划, 为月球地貌的研究提供了高分辨率地形数据和影像数据。月球地貌(月貌)是其表面发生的地质和地貌过程的结果, 月貌类型的划分和等级分类体系的构建是月球地貌学研究的基础, 也是月球地貌制图的基础和关键科学问题^[1-2]。

目前对于地球地貌的研究较多, 也较为系统, 中国科学院自然区划工作委员会在《中国地貌区划(初稿)》中, 提出了中国地貌的分类原则与主要类型^[3]。在1987年出版的“中国1:100万地貌图制图规范”中按照高程和地形特征划分出基础地貌形态类型, 如低海拔平原、高海拔山地等, 再结合地貌成因类型和作用性质将地貌划分成基本成因类型, 二者结合形成基本的地貌类型。李炳元等系统探讨了地貌区划的原则、依据和标准, 提出了地貌类型组合和地貌成因类型相结合的地貌区划分类方法^[4]。近年来, 中国地貌学家开展了1:100万中国地貌图编制等许多重要的基础性研究工作, 在区域地貌、地貌分类与制图和各部门地貌学研究方面取得了很大进展, 编制了多种比例尺的地貌类型图^[5-7]。

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: 2024-09-17

基金项目: 中国科学院先导科技专项(XDB41000000); 国家自然科学基金项目(41571388, 42130110); 国家科技基础性工作专项(2015FY210500) [Foundation: Strategic Priority Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDB41000000; National Natural Science Foundation of China, No.41571388, No.42130110; Key Projects of National Basic Work of Science and Technology, No.2015FY210500]

作者简介: 邓佳音(1991-), 女, 河南周口人, 博士, 主要从事数字地貌分析。E-mail: dengjy.20b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 程维明(1973-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 博士生导师, 主要从事数字地貌与行星地貌研究。

E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

李炳元等对起伏高度和海拔高度两个分级指标进行了更进一步的细化, 提出了全国从低海拔平原到极大起伏极高山共28个基本地貌类型^[8]。程维明等基于全国各级比例尺的地貌类型分类方案提出了中国1:100万数字地貌的等级分类方法, 考虑形态、成因、物质和年龄等地貌要素分类指标, 构建了反映地貌特征的三等九级的中国陆地地貌等级分类体系^[6]。

与地球地貌的研究相比, 行星地貌的研究起步较晚。Bue等基于地形统计特征的方法对火星表面的地形进行统计, 并据此提出了以高地、撞击坑、低地地貌等为分界的火星地貌分类体系, 该体系主要依据火星表面的高程特征, 将火星地貌细分为19个子类型^[9]。欧阳自远对月貌类型进行了系统的归类, 并根据其自然形态细分为月海、类月海、撞击坑、山脉、峭壁、月谷、月溪、月湖、月湾、月沼和月面辐射纹等主要类型^[10]。国际天文联合会基于月球地形特征, 将月球地貌概括为撞击坑、月海、月溪、山脉、月谷、月湾、月沼、穹窿等多种类型。程维明等进一步发展了这一研究领域, 提出了基于形态和年代两大特征的全月形貌类型矩阵式多级分类方法, 该方法借鉴地球地貌的分类体系与方法, 综合考虑了形貌特征、物质组成及地质年龄等多项指标进行月貌类型分类^[1]。尽管此方法在月球地貌分类中具有重要的参考价值, 但缺乏对月貌类型形成原因及过程的考虑。此外, 目前构建的月貌分类体系中同一层级的月貌类型中存在一定的包含与被包含关系, 在一定程度上违背了分类的系统性原则。

月球地貌图和月球地质图作为两类重要的月球地学制图成果, 为认知和探索月球表面特征及其形成机制提供数据基础。月球地质图是月壳表层岩相、岩性、“地层”年代、地质构造、岩浆活动、矿产分布等的综合表达^[11]; 而月球地貌图主要描绘月球表面地貌类型的形态成因特征^[12]。月球地质图为理解月球地貌特征的形成机制提供了重要依据, 而月球地貌图又为月球地质调查提供了必要的形貌信息。

本文在借鉴行星地貌嵌套式分类的基础上, 参考地球地貌分类方案, 确定参与分类的特征因子的定量分级标准, 综合考虑月貌的宏观基本形态、成因、月貌实体组合形态、次级形态、坡面形态、物质组成与岩性及地质年代等多种分类指标, 提出月貌多层次分类方案, 并应用到月球着陆区地貌制图中, 对月貌类型进行综合性表达及等级类型划分, 以求形成客观规范, 提高分类体系的普适性。

2 月貌分类原则与方法

2.1 分类原则

月貌类型的多层次分类方案主要参考地球地貌类型的多尺度分类方法, 与地球地貌类型时空演化的复杂性不同, 月球上同一种月貌类型的成因是相对固定的, 但其形态具有多样性。撞击坑是由陨石撞击作用形成的, 但其组合形态从简单型到复杂型各不相同。因此, 在对月貌类型进行分类时, 需首先考虑形态与成因相结合的原则。月貌类型的分类是一个将整体进行分割的过程, 每一层级地貌单元之间都是并列的关系, 不能存在重叠交叉。高一层级的月貌单元与紧邻的低一层级的月貌单元之间应该是一个包含关系, 因此在进行月貌多层次分类体系构建时, 需要遵循先大后小、先综合后单一的系统性原则^[6]。

月貌是月球内、外地质作用形成的空间上连续的实体^[12], 月貌类型分类指标应体现量化原则, 比如高程、起伏度等, 因此数字地形分析是地貌分类过程中的关键一环。地形起伏度、坡度、坡向等指标均可以根据高程数据计算得到, 不同月貌单元上的物质组分差异可以通过对高光谱数据的定量反演得到。此外, 月貌类型具有复杂性, 任何一

个分类体系都不能涵盖完全,对同一个月貌类型,又可以从不同角度进行分类。比如撞击坑,可以从撞击坑规模、撞击坑形态、边界退化程度、坑底形态、综合形态测量学和退化程度、综合撞击坑形态和规模、撞击坑多指标等对其进行分类,因此要求月貌类型的分类系统具有一定的可扩展性,可以不断扩展指标,便于完善。

2.2 分类指标

形态是月貌类型分类的重要指标,包括月貌的宏观形态、组合形态、次级形态指标及坡面形态指标。根据内、外动力地质作用的方式不同,月球会形成不同的月貌类型,因此,成因也是月貌类型分类的关键性指标。此外,对于月貌特征而言,同一月貌类型在不同地质年代的形态特征具有一定差异性,因此将地质年代特征也作为月貌类型的划分指标^[10]。

2.2.1 形态指标 ① 宏观形态指标:高程和起伏度是描述月貌形态的最基本的宏观指标,在对全域或者局域进行地貌分类时,高程和起伏度指标是月貌分类的重要依据^[13-14],二者以矩阵组合的方式共同反映月球球形貌的宏观起伏特征。② 形态类型指标:反映月貌成因的形态类型,如撞击作用形成的月貌类型,撞击盆地、撞击坑、撞击断裂等。③ 组合形态指标:对形态类型划分结果的细化,表达同一地貌的亚类。以撞击坑为例,根据其形成年代不同、靶体物质不同,其组合形态不同,从简单型、过渡型到复杂型,除此之外,也有特殊形态的撞击坑以及由于退化等原因无法确定其组合形态的撞击坑。④ 次级形态指标:是在月貌组合形态类型的基础上对其亚类单元的划分,这种划分可以更加精细地描述同一亚类地貌的结构特征。以撞击坑为例,其次级形态亚类可分为中央峰、坑底、坑壁、坑缘等。不同组合形态的撞击坑的次级形态亚类存在差异性,其亚类单元的形态也存在差异性。复杂型撞击坑可能存在中央峰亚类,且坑壁具有明显阶梯性,而简单型撞击坑不存在中央峰,坑壁相对光滑。⑤ 坡面形态指标:坡度属于微观地形因子,坡度大小直接影响着地表物质流动与能量转换的规模与强度,是研究地形特征的重要因子^[15-16],表示了局部地表的倾斜程度,对于未来登月探测器的着陆、运移、月面试验的开展都有重要影响。

2.2.2 成因指标 月球的地貌演化主要由两大过程控制,陨石撞击作用和岩浆—火山作用,由此产生的撞击地貌和岩浆—火山地貌揭示了月球的演化过程^[10, 17-18]。根据内外动力地质作用方式不同,月貌可以分为不同的成因类型。

2.2.3 月貌分类的其他指标 ① 物质组成指标:月球表面呈现明显“二分性”^[10],月海由玄武岩充填,高地区域则主要是由亚铁斜长岩组成。月海和高地区域同一月貌类型存在形态上的差异性,如月海和高地区域的撞击坑深径比存在明显差异性,在月海中的撞击坑的平均深径比大于高地区域,撞击坑直径小于5 km时,差异性更为突出^[19]。② 地质年代指标:地质年代是月貌分类的重要指标,不同年代的同一月貌类型,其地貌特征存在明显差异性,如年代较老的撞击坑通常模糊、内部塌陷,而年轻撞击坑保存较完好。

3 月球地貌类型多层次分类方案

依据上述分类原则和分类指标,综合考虑月貌的宏观基本形态特征、成因、地貌实体组合形态特征、次级形态特征、坡面形态特征、物质组成与岩性特征及地质年代特征等多种分类指标,提出月球地貌多层次分类方案(表1)。

3.1 宏观形态类型

月貌宏观基本形态类型包括第一级高程等级分类和第二级起伏形态分类。刘橦漪等基于月表高程的整体特征分析,将月球表面划分极低海拔,低海拔,中海拔,高海拔和

表1 月球地貌类型多层次分类方案

Tab. 1 Geomorphological grade classification scheme of lunar surface

宏观形态类型		成因类型		形态类型			其他类型	
高程	起伏度	成因	形态	组合形态	次级形态	坡面形态	物质组成	地质年代
极低高程	平原	撞击	按照成因	同一月貌	同一组合	依据坡度	月貌单元	月貌单元
较低高程	微小起伏	火山	基于形态	类型的不	形态月貌	分级对月	物质组成	物质组成
中等高程	小起伏		进行进一	同组合	类型的次	貌形态的		
较高高程	中起伏		步的分类	形态	级形态	分类		
极高高程	大起伏				亚类			
	极大起伏							
第一级	第二级	第三级	第四级	第五级	第六级	第七级	第八级	第九级

极高海拔5个地貌类型^[13]。邓佳音等基于LOLA（Lunar Orbiter Laser Altimeter）DEM数据及LOLA和SELENE TC（Terrain Camera）融合的DEM数据（SLDEM2015，文中简称SLDEM），利用均值变点法确定月表起伏度计算的最佳窗口，并以起伏度100 m、200 m、300 m、700 m、1500 m及2500 m为阈值将月球表面分为微起伏平原、微起伏台地、微小起伏丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地及极大起伏山地地貌7个类型^[20]。由于台地、丘陵、山地是地球地貌的表述，在月球地貌研究中，用更为中性的描述替代，高程亦然（表2）。参考地球地貌图划分地貌类型的方法，将高程指标与地形起伏度指标进行矩阵组合得到月球30种宏观基本形态类型（表2）。图1为矩阵组合结果图，月貌宏观基本形态类型中实际存在的主要有28种，不存在较高高程微起伏平原和极高高程微起伏平原。

表2 月貌宏观基本形态类型

Tab. 2 The basic geomorphic types of the lunar geomorphology

高程 起伏度	极低高程 (< -2500 m)	较低高程 (-2500~-1500 m)	中等高程 (-1500~1000 m)	较高高程 (1000~3000 m)	极高高程 (≥ 3000 m)
微起伏平原 (<100 m)	极低高程微起伏平原	较低高程微起伏平原	中等高程微起伏平原	较高高程微起伏平原	极高高程微起伏平原
微小起伏地貌 (100~300 m)	极低高程微小起伏地貌	较低高程微小起伏地貌	中等高程微小起伏地貌	较高高程微小起伏地貌	极高高程微小起伏地貌
小起伏地貌 (300~700 m)	极低高程小起伏地貌	较低高程小起伏地貌	中等高程小起伏地貌	较高高程小起伏地貌	极高高程小起伏地貌
中起伏地貌 (700~1500 m)	极低高程中起伏地貌	较低高程中起伏地貌	中等高程中起伏地貌	较高高程中起伏地貌	极高高程中起伏地貌
大起伏地貌 (1500~2500 m)	极低高程大起伏地貌	较低高程大起伏地貌	中等高程大起伏地貌	较高高程大起伏地貌	极高高程大起伏地貌
极大起伏地貌 (≥ 2500 m)	极低高程极大起伏地貌	较低高程极大起伏地貌	中等高程极大起伏地貌	较高高程极大起伏地貌	极高高程极大起伏地貌

3.2 成因类型

月球地貌与地球地貌存在很大不同，月球上没有大气和液态水，因此不存在沉积、搬运、侵蚀等一系列外动力地质作用形成的流水、冰川等地貌类型，也不存在人类活动，对月貌塑造最多的是撞击作用和内动力热演化作用^[14]，根据内外动力地质作用力方式不同，月球地貌可以分为撞击地貌和火山地貌。

3.3 形态类型

3.3.1 形态亚类 撞击地貌中根据撞击成坑机制及撞击规模将其分为撞击坑、撞击盆地、

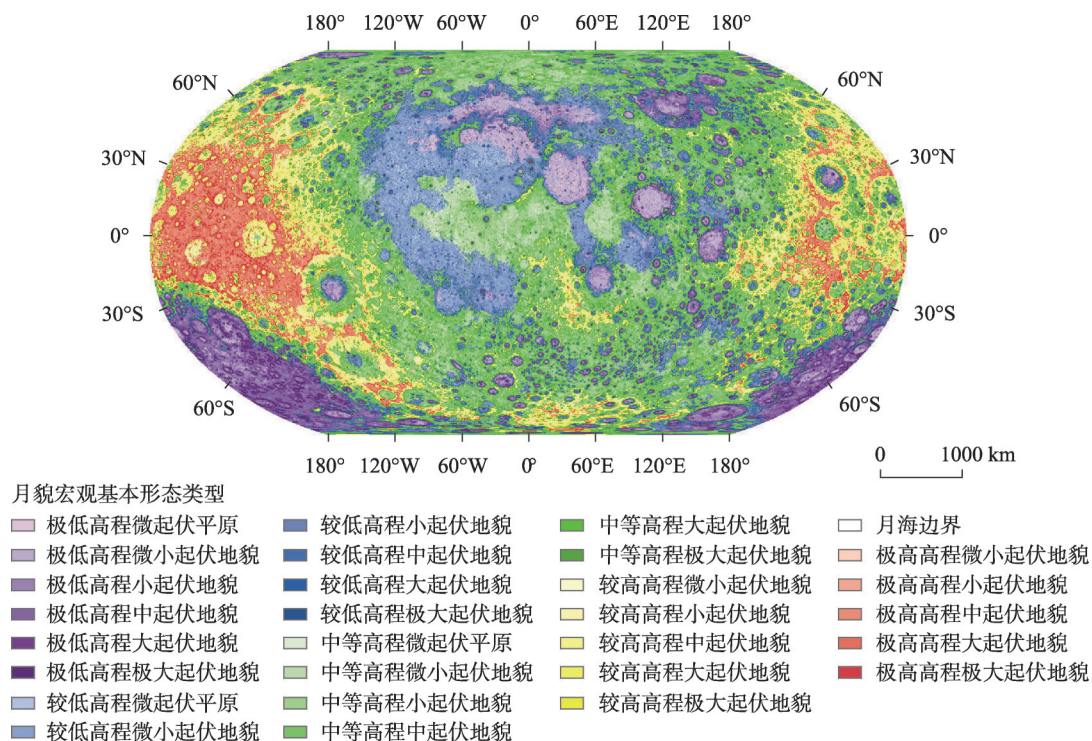


图1 月貌宏观基本形态类型结果

Fig. 1 The basic morphological types of lunar geomorphology

次级坑及撞击断裂4种类型^[21]。火山地貌中根据火山作用模型以岩浆在月壳中上升的位置,将火山地貌分为岩浆上涌未至月表时、岩浆上涌至月表时及岩浆冷却后热演化后期形成的月貌类型^[15]。其中岩浆上涌未至月表形成的月貌类型主要包括月堑、坑链、月堑与坑链组成的复合型月貌及坑底断裂^[15];岩浆上涌至月表形成的月貌类型主要包括月海平原、月溪、大面积熔岩流、火山堆、不规则月海斑块等^[15];热演化后期形成的月貌类型包括皱脊和叶状陡坎。

3.3.2 组合形态亚类 月貌组合形态类型是综合考虑月貌形态及退化特征对第二级月貌成因类型的细化。对于撞击坑,其组合形态随着撞击坑直径的增加,其内部形态复杂性增加,撞击坑组合形态由简单向复杂撞击坑过渡。本文将撞击坑组合形态分为简单型、过渡型、复杂型、特殊型及未分类。对于撞击盆地,其组合形态从原型盆地、峰环盆地、多环盆地过渡到超大型盆地。对于次级坑,由于撞击挖掘的碎片物质大小不同、抛射的速度、角度不同,其存在多种组合形态特征,包括以单个坑形式存在的尺度较小的撞击坑、次级坑链及次级坑簇。撞击断裂的组合形态主要有两种,径向断裂和环状断裂。径向断裂呈现放射状、径向分布在盆地或者大型撞击坑周围,环状断裂呈现环状分布,在重力作用下坍塌形成。

岩浆上涌未至月表时形成月堑、坑链、月堑与坑链组成的复合型月貌及坑底断裂。月堑根据其组合形态将月堑分为深窄型和浅宽型。火山成因的坑链,与撞击成因的次级坑链不同,一般位于月海区域,其形态呈现椭圆形,分布较为分散。月堑及坑链复合月貌类型一般分布在月海中,坑链沿着月堑分布,较为紧凑,与单纯火山成因的分散型坑链存在差异。坑底断裂是撞击坑和撞击盆地底部分布的裂缝状缝隙,呈不规则状,其组合形态较为复杂,不作进一步细分。

岩浆上涌至月表时会形成月海平原、月溪、不规则月海斑块、火山堆。月海平原中根据岩浆上涌至月表的规模将月海平原分为月海、月洋、月湖、月湾及月沼。火山锥是岩浆喷发在出口周围形成,其组合形态通常呈漏斗状或者碗状。月溪一般分布在月海中,呈蜿蜒状,不规则月海斑块也是月海区域中光滑且略有丘陵起伏的火山地貌类型。由于形态固定,月溪和不规则月海斑块的组合形态不再进行划分。

热演化后期,岩浆冷却收缩会形成皱脊,皱脊一般分布在月海中,其组合形态一般划分为绳状、辫状或不规则脉状。叶状陡坎是月球表面相对年轻的地貌类型,由于其尺度较小且组合形态一致,本文不对叶状陡坎的组合形态进行划分(表3)。

3.3.3 次级形态亚类 月貌次级形态亚类是在组合形态类型的基础上对其亚类单元的分类。针对撞击坑和撞击盆地亚类单元划分,主要是根据撞击成坑机制将撞击坑分为中央峰、坑底、坑壁和坑缘4个亚类单元类型(图2);将原型撞击盆地分为盆底、盆壁和盆缘3个亚类单元类型,将峰环盆地和多环盆地分为峰环、盆底、盆壁和盆缘4个亚类单元类型(图3)。撞击成坑的不同阶段会对撞击坑形貌产生不同影响,在挖掘阶段主要对坑外形貌产生影响,形成坑缘单元,改造阶段主要对坑内形貌产生影响,塑造中央峰、坑底、坑壁等地貌单元。在改造阶段由于压力的释放,坑底中央区域的物质发生隆起抬升而形成中央峰,在影像与地形上存在明显的突起;撞击挖掘出的靶体区域物质沿着坑壁形成坑缘,根据改造程度不同,也存在形貌不同的坑底地貌。对于大型撞击坑,瞬时坑形成后,由于重力作用坑壁产生垮塌,形成不同形态特征的坑壁。图2是简单型撞击坑、过渡型撞击坑及复杂撞击坑的次级形态类型,对于退化严重的撞击坑,其次级形态类型之间的边界线相对模糊。

3.3.4 坡面形态亚类 坡面形态亚类主要是基于通用指标坡度对月貌的坡面形态进行分类。中国数字地貌分类体系中以 2° 、 7° 、 15° 、 25° 、 35° 为阈值进行地貌坡度分级^[5],中华人民共和国地貌图集(1:100万)也以此为标准进行编制^[22]。根据着陆区的安全性要求, 8° 是安全着陆和月面作业的阈值^[23],着陆点月面倾角 $\leq 8^{\circ}$ 的条件下可安全着陆,保证着陆器不翻倒^[24-25]。因此,本文将月貌坡度分级分为平坦($\leq 2^{\circ}$)、平缓($2^{\circ}\sim 8^{\circ}$)、微缓坡($8^{\circ}\sim 15^{\circ}$)、缓坡($15^{\circ}\sim 25^{\circ}$)、陡坡($25^{\circ}\sim 35^{\circ}$)及极陡坡($> 35^{\circ}$)。比如可以将月海平原分为平坦月海($\leq 2^{\circ}$)和平缓型月海($2^{\circ}\sim 8^{\circ}$),将撞击坑的坑壁根据坡度数值分为微缓型坑壁($8^{\circ}\sim 15^{\circ}$)、缓型坑壁($15^{\circ}\sim 25^{\circ}$)、陡型坑壁($25^{\circ}\sim 35^{\circ}$)、极陡型坑壁($> 35^{\circ}$)等类型。

3.4 其他类型

3.4.1 物质组成与岩性亚类 参考已有的美国地质调查局1:500万的月球地质图及中国编制的1:250万月球地质图中岩石类型图的结果^[26],月球岩石分为月海玄武岩、非月海岩石和其他特殊岩石。根据铁钛元素的含量差异,当FeO的含量大于10 wt.%时,月球岩石类型为月海玄武岩,根据TiO₂的含量大小,月海玄武岩主要分为极低钛玄武岩(TiO₂ \leq 1.5 wt.%)、低钛玄武岩(1.5 wt.% $<$ TiO₂ \leq 4.5 wt.%)、中钛玄武岩(4.5 wt.% $<$ TiO₂ \leq 7.5 wt.%)、高钛玄武岩(7.5 wt.% $<$ TiO₂ \leq 9.5 wt.%)和极高钛玄武岩(TiO₂ $>$ 9.5 wt.%)^[26];非月海岩石主要包括位于风暴洋KREEP地体的KREEP岩、KREEP玄武岩、镁质岩套、碱性岩套,位于长石质高地地体的亚铁斜长岩套和镁质斜长岩套,及位于南极艾肯地体的亚铁苏长岩套。特殊岩石主要包括纯斜长岩、尖晶石斜长岩、富橄榄石岩套、硅质火山岩和火成碎屑岩。尖晶石斜长岩是镁尖晶石出露的区域,一般出露的面积很小,只有几百米。

3.4.2 地质年代亚类 本文应用的地质年代是郭弟均提出的更符合月球动力学演化历史的“三宙六纪”月球地质年代方案^[27],将月球地质年代分为前艾肯纪、艾肯纪、酒海

表3 月球地貌成因及组合形态分类

Tab. 3 Lunar geomorphological genesis and assemblage classification

月貌成因类型	月貌形态类型	月貌组合形态类型	描述
撞击地貌	撞击坑	简单型	地形剖面呈现碗状，坑壁较为光滑且具有一致性坡度。
		过渡型	坑底较为平坦，坑壁出现坍塌，存在轻微的断层，呈现阶梯状，坑壁到坑底之间的坡度逐渐减小。
		复杂型	坑底存在中央峰，坑壁坍塌却存在阶梯状。
		特殊型	不规则撞击坑及同心环状撞击坑
		未分类	由于退化，无法对撞击坑组合形态进行归类的撞击坑。
		原型盆地	复杂撞击坑向峰环盆地过渡的盆地类型，盆地尺度较小，由于盆地中央隆起的中央峰向外坍塌形成峰环，内部的中央峰环通常小于复杂撞击坑的中央峰高度。
	撞击盆地	峰环盆地	峰环盆地与原型盆地相比，其直径及峰环连续度通常大于原型盆地。
		多环盆地	多环盆地是盆地形态呈现三环以上的盆地类型。
		超大型盆地	南极艾肯盆地
		次级坑	以单个坑形式存在的尺度较小的次级坑。
	撞击断裂	次级坑链	呈现放射状，以链状形式存在的次级坑集合。
		次级坑簇	以簇形态存在的小尺度次级坑的集合。
		径向断裂	撞击成坑的接触压缩阶段产生的断裂，放射状、径向分布在盆地或者大型撞击坑周围。
火山地貌	月堑	环状断裂	大型撞击坑和撞击盆地周围呈现环状的不规则台阶状断裂。
		深窄型	较窄较深且周围存在火山沉积物
		浅宽型	较宽较浅，周围不存在火山沉积物
	坑链	分散型坑链	形态偏椭圆形，较为分散
	月堑及坑链复合地貌	-	沿着月堑内部分布的一连串坑链地貌
	坑底断裂	-	撞击坑坑底产生的断裂状缝隙
	月海平原	月海	玄武岩充填形成
		月洋	玄武岩充填形成
		月湖	玄武岩充填形成
		月湾	玄武岩充填形成
		月沼	玄武岩充填形成
		月溪	熔岩对月表进行热侵蚀和机械侵蚀形成，一般呈现蜿蜒状
	不规则月海斑块	-	月海区域中光滑且略有丘陵起伏的火山地貌类型
	火山堆	漏斗状	组合形态呈现漏斗状的火山堆
		碗状	组合形态呈现碗状的火山堆
		穹窿	一般分布在月海中火山口周围，呈现薄饼状的穹状隆起
	皱脊	绳状	玄武质熔岩冷却、收缩时形成的地貌特征，分布呈现绳状
		辫状	玄武质熔岩冷却、收缩时形成的地貌特征，分布呈现辫状
		不规则脉状	玄武质熔岩冷却、收缩时形成的地貌特征，分布呈现不规则脉状
	叶状陡坎	-	月球表面尺度较小的年轻地貌类型

纪、雨海纪、爱拉托逊纪和哥白尼纪6个地质年代（表4），月貌制图时编码方案以年代地层单元的英文首字母代替。目前月球上针对单个月貌单元的绝对年龄定年包括同位素定年法和撞击坑统计定年法，由于单个月貌的定年难度较大，因此，使用月貌类型所在地质年代的年代表达。在月球地质图的编制过程中，确定了81个撞击盆地和6153

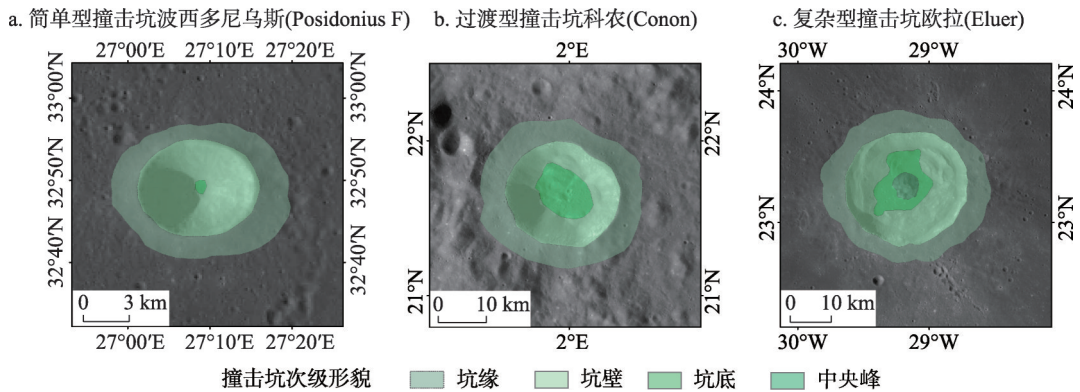


图2 撞击坑的次级形态分类

Fig. 2 The sub-morphology types of craters on the lunar surface

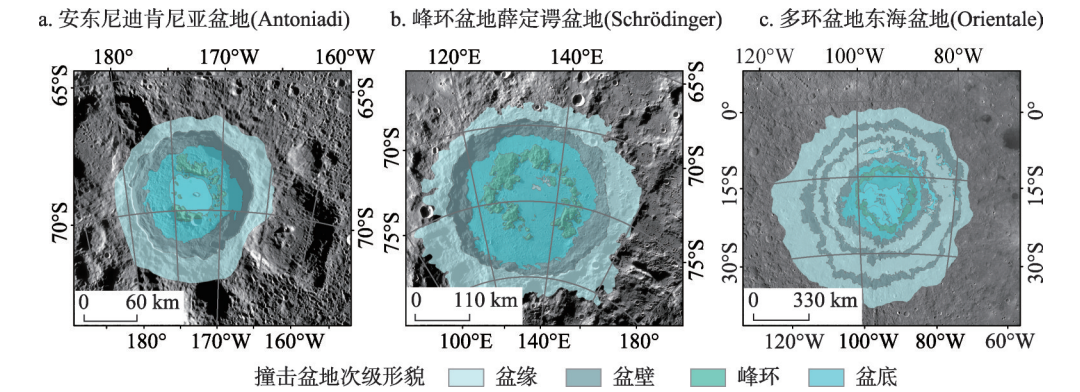


图3 撞击盆地的次级形态分类

Fig. 3 The sub-morphology types of basins on the lunar surface

表4 “三宙六纪”月球年代划分方案

Tab. 4 A lunar timescale with three Eon units and six Period units			
时间/时间—地层单元		主要事件	代号
新月宙/界 (Neolunarisanian/NL)	哥白尼纪/系(Coperinican/Cp)	形成哥白尼坑等带辐射纹撞击坑	C
	爱拉托逊纪/系 (Eratothenian/Er)	晚/上爱拉托逊世/统 早/下爱拉托逊世/统 小规模玄武岩喷发	E
古月宙/界 (Paleolunarisanian/PL)	雨海纪/系 (Imbrian/Im)	晚/上雨海世/统 大规模月海玄武岩泛滥 (主要为中低钛月海玄武岩)	
		早/下雨海世/统 撞击事件 雨海盆地、东海盆地和薛定谔盆地撞击事件; 岩浆作用	I
	酒海纪/系(Nectarian/Ne)	酒海盆地等盆地撞击事件	N
	艾肯纪/系(Aitkenian/Ak)	南极—艾肯盆地等 盆地撞击事件	A
冥月宙/界 (Eolunarisanian/EL)	岩浆洋纪(Magma-oceanian/Mo)	岩浆作用 岩浆洋结晶形成斜长 质原始月壳	P

注：根据郭弟均等^[17]修改。

个撞击坑的年龄^[21], 针对未确定年代的月貌类型, 用该月貌类型所在地质单元的年代表达。

3.5 月貌多层次分类方案与制图表达方式

根据月貌形态成因的基本分类原则, 本文建立了一个多层次的月球地貌分类方案。最高两级分类侧重于明晰月球地貌的宏观基本形态, 涵盖高程与宏观形态(第一级和第二级); 第三级是基于塑造月球表面的主要过程形成的地貌类型大类, 第四级则是对撞击地貌和火山地貌的形态成因进行更细致的划分, 如将撞击地貌细分为不同规模和形态的撞击坑、撞击盆地、次级坑与撞击断裂, 以及根据火山活动模式细化火山地貌; 第五级专注于月貌组合形态的细分, 以撞击坑为例, 将撞击坑分为简单、过渡、复杂型等; 在第六级分类中, 进一步区分月貌单元的次级形貌, 以撞击盆地为例, 将撞击盆地分为盆底、峰环、盆壁和盆缘; 第七级强调坡度特征, 以反映地貌的微观形态; 第八级与第九级分别涵盖月貌的物质组成与地质年代, 强调除形态和成因外的其他重要属性特征, 由于月貌单元的物质组成与地质年代定性成分较大, 在月貌单元划分中, 其显示的特征具有不确定性和宏观性, 故将其列为较低级的等级中。

月球地貌制图比例尺大小不同, 所承载的信息量不同, 表达的内容不同, 比例尺作为地图制作的核心参数, 直接决定了月貌信息的详细程度与展示范围, 影响着月貌分类的粒度与复杂度。小比例尺月貌图中, 月貌的分类倾向于宏观, 分类粗略, 主要用于展示月球的整体地貌格局和构造特征; 而大比例尺月球地貌图则聚焦于局部区域的地貌特征, 分类可达微观层面, 比如撞击坑的坡面形态特征, 图4为月貌多层次分类方案与制图比例尺关系。

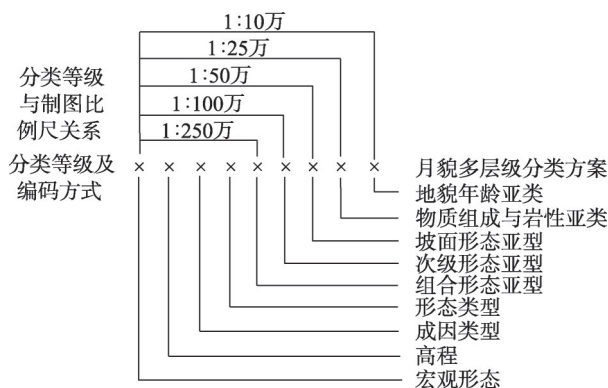


图4 月貌多层次分类方案与制图比例尺关系

Fig. 4 The relationship between the multi-level classification scheme of lunar morphology and the cartographic scale

4 嫦娥五号着陆区地貌制图

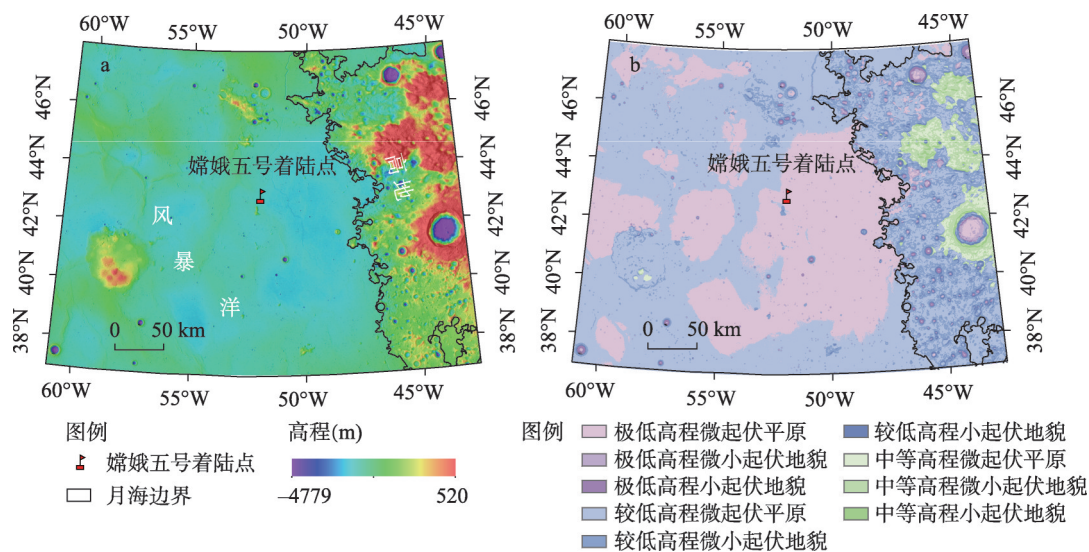
4.1 研究区及数据基础

本文以嫦娥五号采样返回区(CE-5)为研究区, 利用上述构建的月貌多层次分类方案, 编制该研究区1:100万月球地貌图。嫦娥五号是中国首次月球采样返回任务, 着陆点(51.92°W, 43.06°N)位于风暴洋的吕姆克山附近^[28-29], 区域内经历了多次岩浆活动, 后期大规模撞击事件和构造活动发育了该区域内丰富的月貌特征, 包括大面积熔岩流、撞击坑、撞击坑簇、次级坑链、皱脊、月溪及穹窿等^[30]。

本次编制所采用的数据是日本Kaguya (SELENE) 卫星上搭载的地形相机(Terrain Camera, TC)获取的影像数据及高程数据, 其中TC影像的数据分辨率约为10 m/像素^[31], DTM高程的数据分辨率为20 m/像素。制图比例尺与数据分辨率之间的关系是: 比例尺=人眼视觉分辨率/影像分辨率^[11], 人眼的视觉分辨率为0.1~0.2 mm, 通过计算, 理论上CE-5区域月貌图编制的最大比例尺为1:10万, 本文1:100万的制图比例尺满足要求, 月貌制图表达达到次级形态亚类。

4.2 宏观形态类型

嫦娥五号着陆区域的月貌分区主要包括月海分区和高地分区,图中黑色实线为月海和高地分区之间的界线(图5a)。依据宏观形态类型划分方法,将高程与起伏度分级进行矩阵组合得到CE-5采样返回区9种宏观形态类型(图5b)。从月海分区到高地分区,微起伏、微小起伏、小起伏地貌形态类型依次过渡。其中月海分区内主要是极低高程微起伏、极低高程微小起伏、较低高程微起伏及较低高程微小起伏基本形态类型,高地分区主要是较低高程小起伏、中等高程微小起伏及中等高程小起伏基本形态类型。



注:兰伯特投影。

图5 嫦娥五号着陆区域宏观基本形态类型

Fig. 5 The macroscopic basic morphological types of Chang'e-5 sample return region

4.3 形态成因类型

在宏观基本形态类型的基础上基于月貌单元的形态和成因对研究区进行目视解译,CE-5着陆区的月貌类型主要有月海平原、撞击坑、大面积熔岩流、月溪、皱脊等,着陆区内撞击坑的组合形态类型主要有简单型、过渡型、复杂型及未分类,其中简单撞击坑最多,由于退化和其他撞击事件影响无法对撞击坑组合形态分类的未分类撞击坑次之。在组合形态分类后,根据地貌实体的次级形态继续进行下一级的分类,撞击坑的次级形态单元主要分为中央峰、坑底、坑壁和坑缘4个亚类单元类型。该研究区内皱脊和月溪宽度较小,不再进行次级形态亚类单元的划分,最终得到综合考虑宏观基本形态、成因、组合形态、次级形态分类指标的嫦娥五号着陆区月貌类型图(图6)。

5 结论

月球地貌类型分类研究和多层次分类体系的构建是月球地貌学研究的基础,也是月球地貌图制图的基础和关键科学问题。本文遵循地貌分类的基本原则,考虑月球地貌的形态和成因等特征,研究了月貌的多层次分类方案与方法等,主要进展与结论如下:

(1) 提出了月貌分类的基本原则和分类指标,分类指标包括基本形态、成因、地貌实体形态、组合形态、次级形态、坡面形态、物质组成与岩性及地质年代特征。

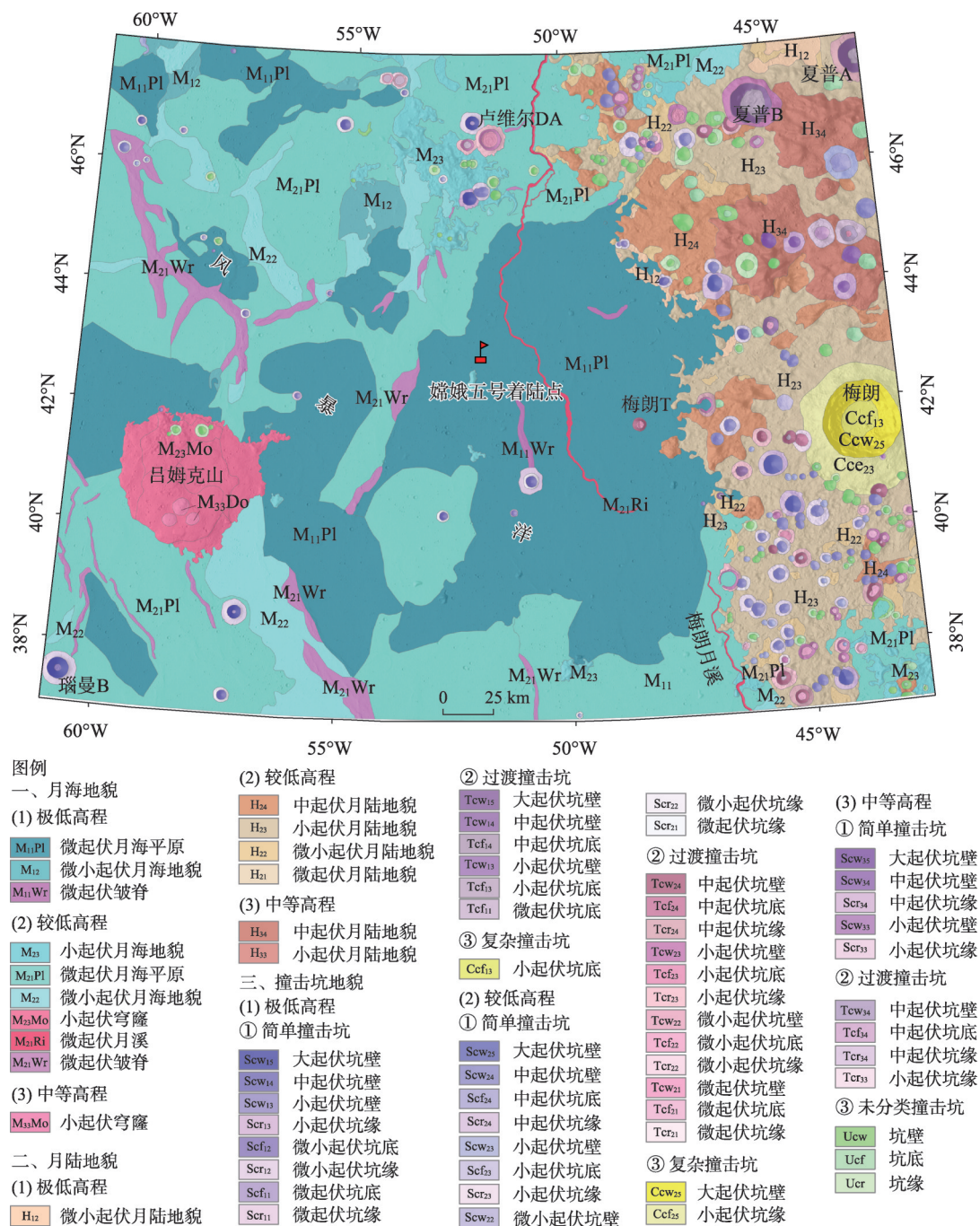


图6 嫦娥五号着陆区的地貌类型

Fig. 6 The landforms of Chang'e-5 sample return region

(2) 构建了月貌类型的九级分类方案。高程与宏观形态（第一级和第二级）明晰月貌的宏观基本形态，第三级是成因分类，第四级是对月貌形态分类，第五级是对月貌实体组合形态的细分，第六级是对月貌单元次级形貌的划分，第七级强调月貌坡度特征，第八级与第九级分描述月貌的物质组成与地质年代。

(3) 根据本文提出的月貌多层次分类方案, 以嫦娥五号采样返回区为典型研究区进行月球地貌制图, 建立嫦娥五号着陆区月貌类型数据库。

本文构建的月球地貌多层次分类方案是月球地貌研究的基础性成果, 对月貌类型进行了综合性表达及等级类型划分, 形成客观规范。研究成果可以对月球地貌的研究起到一定促进作用, 也可在一定程度上为月球多比例尺地貌图的编制提供指导, 同时为相关研究人员提供一个系统化的框架, 以更准确地描述和理解月球表面的地貌特征。

参考文献(References)

- [1] Cheng Weiming, Liu Qiangyi, Wang Jiao, et al. A preliminary study of classification method on lunar topography and landforms. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(9): 885-897. [程维明, 刘樯漪, 王娇, 等. 全月球形貌类型分类方法初探. *地球科学进展*, 2018, 33(9): 885-897.]
- [2] Cheng Weiming, Zhou Zengpo, Wan Cong, et al. *Introduction to Lunar Morphology Science*. Beijing: Geological Publishing House, 2016. [程维明, 周增坡, 万丛, 等. 月球形貌科学概论. 北京: 地质出版社, 2016.]
- [3] Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. *Geomorphological Compartmentalization of China (The First Draft)*. Beijing: Science Press, 1959. [中国科学院地理研究所. 中国地貌区划(初稿). 北京: 科学出版社, 1959.]
- [4] Li Bingyuan, Pan Baotian, Cheng Weiming, et al. Research on geomorphological regionalization of China. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(3): 291-306. [李炳元, 潘保田, 程维明, 等. 中国地貌区划新论. *地理学报*, 2013, 68(3): 291-306.]
- [5] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the Classification System of Digital Land Geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [6] Cheng Weiming, Zhou Chenghu. Methodology on hierarchical classification of multi-scale digital geomorphology. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 23-33. [程维明, 周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 23-33.]
- [7] Li Bingyuan, Li Juzhang. *1:4000000 Geomorphological Map of China*. Beijing: Science Press, 1994. [李炳元, 李钜章. 中国地貌图(1:400万). 北京: 科学出版社, 1994.]
- [8] Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543. [李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 535-543.]
- [9] Bue B D, Stepinski T F. Automated classification of landforms on Mars. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(5): 604-614.
- [10] Ouyang Ziyuan. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. [欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005.]
- [11] Ouyang Ziyuan, Liu Jianzhong. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 1-6. [欧阳自远, 刘建忠. 月球形成演化与月球地质图编研. *地学前缘*, 2014, 21(6): 1-6.]
- [12] Cheng Weiming, Wang Jiao, Zhou Chenghu. Analysis on research progress and tendency of lunar morphological characteristics. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1003-1014. [程维明, 王娇, 周成虎. 月表形貌特征研究进展及趋势分析. *地理研究*, 2014, 33(6): 1003-1014.]
- [13] Liu Qiangyi, Cheng Weiming, Yan Guangjian, et al. Distribution characteristics and classification schemes of lunar surface elevation. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 106-119. [刘樯漪, 程维明, 阎广建, 等. 月表高程分布特征及其分级标准初探. *地理学报*, 2022, 77(1): 106-119.]
- [14] Deng Jiayin, Cheng Weiming, Liu Qiangyi, et al. Morphological differentiation characteristics and classification criteria of lunar surface relief amplitude. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1794-1807. [邓佳音, 程维明, 刘樯漪, 等. 月表地貌起伏形态分异特征及分级标准研究. *地理学报*, 2022, 77(7): 1794-1807.]
- [15] Qiao Le, Chen Jian, Ling Zongcheng. Volcanic landforms on the Moon. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(9): 2678-2691. [乔乐, 陈剑, 凌宗成. 月球火山作用的地貌学特征. *地质学报*, 2021, 95(9): 2678-2691.]
- [16] Tang Guoan, Liu Xuejun, Yan Guonian. *Principle and Method of Digital Elevation Model and Geoscience Analysis*. Beijing: Science Press, 2005. [汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005.]

- [17] Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. Geologic history of the moon. US Geological Survey Professional Paper 1348, Washington DC, 1987.
- [18] Guo Dijun, Liu Jianzhong, Zhang Li, et al. The methods of lunar geochronology study and the subdivisions of lunar geologic history. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 45-61. [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. *地学前缘*, 2014, 21(6): 45-61.]
- [19] Wang Y R, Wu B, Xue H O, et al. An improved global catalog of lunar impact craters (≥ 1 km) with 3D morphometric information and updates on global crater analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): E006728. DOI: 10.1029/2020je006728.
- [20] Deng J Y, Cheng W M, Liu Q Y, et al. Morphological differentiation characteristics and classification criteria of lunar surface relief amplitude. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(11): 2365-2378.
- [21] Ji J Z, Guo D J, Liu J Z, et al. The 1:2500000-scale geologic map of the global Moon. *Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1544-1548.
- [22] Cheng W M, Zhou C H, Chai H X, et al. Research and compilation of the Geomorphologic Atlas of the People's Republic of China (1:1000000). *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(1): 89-100.
- [23] Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E12): 32777-32795.
- [24] Sun Zezhou, Zhang Tingxin, Zhang He, et al. The technical design and achievements of Chang'e-3 probe. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(4): 331-343. [孙泽洲, 张廷新, 张焱, 等. 嫦娥三号探测器的技术设计与成就. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(4): 331-343.]
- [25] Liu J J, Zeng X G, Li C L, et al. Landing site selection and overview of China's lunar landing missions. *Space Science Reviews*, 2021, 217(1): 6. DOI: 10.1007/s11214-020-00781-9.
- [26] Chen J, Ling Z C, Liu J Z, et al. Digital and global lithologic mapping of the Moon at a 1:2500000 scale. *Science Bulletin*, 2022, 67(20): 2050-2054.
- [27] Guo D J, Liu J Z, Head J W, et al. A lunar time scale from the perspective of the Moon's dynamic evolution. *Science China Earth Sciences*, 2024, 67(1): 234-251.
- [28] Wang J, Zhang Y, Di K C, et al. Localization of the Chang'e-5 lander using radio-tracking and image-based methods. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 590. DOI: 10.3390/rs13040590.
- [29] Qiao L, Chen J, Xu L Y, et al. Geology of the Chang'e-5 landing site: Constraints on the sources of samples returned from a young nearside mare. *Icarus*, 2021, 364: 114480. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114480.
- [30] Deng J Y, Cheng W M, Jiao Y M, et al. The geological history of the Chang'e-5 sample return region. *Remote Sensing*, 2021, 13(22): 4679. DOI: 10.3390/rs13224679.
- [31] Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, et al. Data products of SELENE (Kaguya) terrain camera for future lunar missions. *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*, 2014.

A multi-level classification method and schemes for lunar landforms

DENG Jiayin^{1,2}, CHENG Weiming^{2,3,4}, JIAO Yimeng¹, LIU Jianzhong^{3,4,5}

(1. Henan University of Science and Technology, School of Civil Engineering and Architecture, Luoyang 471023, Henan, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230052, China; 5. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: Lunar landforms, characterized by the elevation variations on lunar surface, is a result of diverse internal and external forces acting upon it since its formation. Lunar geomorphological classification serves as the cornerstone of lunar geomorphology research and is crucial for lunar geomorphology mapping. This study draws inspiration from terrestrial geomorphological classification systems to propose a comprehensive framework for categorizing lunar landforms. We consider multiple factors, including macroscopic morphology, genesis, morphological characteristics, combinational morphology, sub-morphology, slope morphology, material composition, and age. Based on these indicators, the paper constructs a multi-level classification scheme for lunar landform types, encompassing nine levels. To demonstrate the applicability of this multi-level classification, we conducted a case study in the Chang'e-5 sample return area. We generated a detailed geomorphological map and established a corresponding database of lunar landform types for the landing area. This research provides a foundational framework for lunar geomorphological mapping and offers valuable insights into the evolutionary processes that have shaped the lunar surface. The proposed classification scheme can serve as a reference for future lunar exploration missions and contribute to a deeper understanding of the evolutionary process of lunar landforms.

Keywords: lunar landforms; classification indicators; multi-level classification; morphogenesis types; geomorphological mapping