

程维明,刘樯漪,王娇,等.全月球形貌类型分类方法初探[J].地球科学进展,2018,33(9):885-897. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.09.0885. [Cheng Weiming, Liu Qiangyi, Wang Jiao, et al. A preliminary study of classification method on lunar topography and landforms [J]. Advances in Earth Science 2018, 33(9): 885-897. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2018.09.0885.]

全月球形貌类型分类方法初探*

程维明^{1,2},刘樯漪^{1,2},王 娇³,高文信^{1,4},刘建忠⁵

(1. 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;
2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国地质大学信息工程学院,北京 100083;
4. 兰州理工大学土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 5. 中国科学院地球化学研究所,贵州 贵阳 550081)

摘 要:月球表面形貌科学研究是月球探测最基础的内容。月球形貌类型单元的划分、月貌图的编研是绕月探测工程遴选的4项科学目标之一。首先回顾了不同研究者提出的月球表面形貌类型,论述了月球形貌类型的划分方法及进展,分析了20世纪70年代美国地质调查局编制全月球1:500万地质图以及中国新一代1:250万地质图的形态及年代的类型划分依据等。考虑到月球表面形貌的现状特征、受宏观营力格局及作用方式、形态变异及组合特征等,提出了基于形态和年代两大类特征相结合全月球形貌类型的矩阵式多级分类方法。年代可分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪、前雨海纪以及两者之间的过渡年代等七大类。全月球形貌类型中,按照宏观形态及营力作用方式,将第一级划分为月海、盆地、月陆和撞击坑四大类。第二级中,按照大类的形态差异性,可将盆地分为盆底平原和环盆地山丘;月海分为月海平原和月海穹丘;月陆分为月陆平原、月陆丘陵和月陆高原;撞击坑按照形态和规模分为特大型撞击坑环形山、特大型撞击平原、次级形成小撞击坑、撞击坑链、带辐射纹撞击坑、不规则和边缘模糊坑、未分形态撞击坑等类型。根据坡面和物质差异,可细化出三级甚至四级形态类型。以H010幅为案例,对2种指标和组合形貌类型进行了制图试验。这将对全月球形貌类型的划分和制图具有一定的指导作用。

关 键 词:月球形貌;形貌特征;地质年代;地貌分类;分类方法

中图分类号: P184.8 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2018)09-0885-13

1 引 言

月球作为地球的唯一卫星,是人类进行深空探测的首要天体,其表面形态特征是人类进行直接观测研究的最佳窗口^[1]。不同于地球表面复杂的大气环境及频繁的地质活动,月球几乎没有大气层和液态水,几乎没有受到较近年代地质活动的影响^[1]。对月球表面形貌塑造的外营力主要体现在月球早期的岩浆活动、外来天体的撞击及昼夜和阴

阳面的温差、太阳风、宇宙射线等,这些作用中除外来天体的撞击外,其他对月球表面地貌的破坏作用相对较弱^[1]。因此,对月球形貌特征进行研究,可了解月球的状态、结构和组成,为探究月球起源和演化历史等科学问题提供直接、可靠的证据,是月球探索过程中必不可少的基础性工作^[2,3]。

通过美国克莱门汀号(Clementine)^[4,5]和近年来各国在月球探测中获得的海量遥感数据^[6,7],国内外学者从不同方面开展对月球形貌的研究,主要

* 收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2018-08-06.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“全月球形貌类型划分方法研究”(编号: 41571388); 中国科学院B类先导专项培育项目“数字月球与地月系统演化”(编号: XDPB11)资助.

作者简介: 程维明(1973-)男,甘肃天水人,研究员,主要从事数字地貌及月球形貌研究. E-mail: chengwm@reis.ac.cn

集中在以下几方面:通过月球地图和地图集的编制表达月球表面形貌^[6~10];基于照片、遥感影像、雷达数据等数据类型和不同方法构建月球地形模型^[11~13]模拟月面环境;基于不同尺度、数据源和方法提取月球基本形貌单元^[14~17]。

从19世纪初就开始从不同角度和层次对月球形貌进行研究^[18],但月球形貌类型的划分并没有引起诸多学者的关注。同时,相对于全月球尺度的形貌特征分析,更多的学者倾向于研究典型月貌类型,如对月球撞击坑依据形态特征进行系统分类^[19]等。尽管对于全月球形貌类型的相关研究不算完善,但前人的工作为后续研究奠定了基础,并且随着日益成熟的探月技术带回优质有效的月球数据,为全月球形貌类型的划分及数字月球形貌图编研工作的大量开展提供了契机。本文先分析了全月球形貌类型的研究进展,在此基础上对比分析月球形貌类型划分的历史和现状,最后提出全月球形貌类型的多级分类指标、分类方法和分类体系,并以H010幅为案例,进行月球形貌类型的制图试验,以期加深对月球形貌过程的认识,服务于月球的演化过程及机理研究。

2 月球形貌特征的分类及提取方法

2.1 月球形貌特征的分类

月球的地貌特征包括形态特征、地质特征、物质特征和年龄特征等多个方面,下面将主要讨论形态和地质特征。

2.1.1 基于形态特征的分类

月球形貌学研究月球表面的起伏形态、分布规律、物质结构、发展历史和开发利用,而划分月球形貌类型是月球形貌研究的基础工作^[1,2]。月球形貌类型远不如地球的地貌类型多变复杂,认为月球不是完美光滑的想法可以追溯到大约公元前450年,当时Democritus相信月球上有“高大的山脉和空旷的山谷”,直到15世纪末人们才开始认真研究月球表面^[20~23]。1645年荷兰天文学家Michael Florent van Langren从望远镜中观察月球表面特征,绘制了被认为是首幅真实的月球图,认为月球表面有月海、陨石坑及山峰和山脉等地貌类型^[20~23]。1651年Giambattista Riccioli推出的现代月球命名体系中还命名了月洋、月湖、月沼、月湾等与“水”有关的地貌类型^[20~23]。1779年Johann Schröter开始对月球特征进行了细致的观察和测量^[20~23]。1791年Johann Hieronymus Schröter发表了题为《对月球表面更精

确了解的月球地形图》的有关月球地形的早期研究,首次提出了可见月球“反射率”的概念^[13~16]。1840年Draper使用一架直径约12.7 cm的反射望远镜拍摄第一张月球银版相片将摄影引入到天文界,1959年前苏联的月球3号发回了首张月球背面的照片,1978年美国宇航局公布了月球地形正射影像图^[20~23],这些观测、研究成果让全世界看到月球最显著的外观是明暗对比区域及坑坑洼洼的凹地,更明亮的部分是月球高地,也被称作月陆,更暗的区域被称作月海,凹地则是撞击坑,这三大地貌单元构成了月球形貌的基本类型^[20~23]。1982年Andersson和Whitaker按照撞击坑、非撞击坑和其他地貌特征三大类型对月球形貌进行分类^[20~23]。之后国际天文联合会(International Astronomical Union, IAU)在1982年分类的基础上将月球形貌类型具体划分为撞击坑、月海和月陆3个一级地貌类型,月洋、月湖、月沼、月湾、月岬、山地、穹丘、皱脊、月谷、陡坡和月溪等二级地貌类型^[24]。2013年程维明等^[2]和周增坡等^[25]借助于遥感影像解译标志特征,将月貌典型类型进行了分类,主要包括月海、月陆、台地、丘陵、山地、撞击坑平原、环形山、撞击坑链、月溪或月谷和月岭等类型(表1)。撞击坑有诸多分类方案^[2,3],王娇等^[26]在对比各种方案后,提出撞击坑形态和规模相结合的比对指标,将全月球撞击坑分为月海残留型、特大复杂型、大环状平原型、中等凹坑平原型、小规模碗型和微状酒窝型六大类,并发现不同类型的撞击坑在月球表面的分布存在很大的差异。

2.1.2 基于地质特征的分类

20世纪70年代,美国地质调查局曾编制了1:500万全月球地质图^[27~32],按照编制的任务分工和完成的先后顺序,全月球共分为6块,即近月面、东面、西面、中远面、北面 and 南面。对比6块地质图信息,可以发现地质信息包括了3层内容:地质年代、地质单元物质、地质单元的地形地貌特征。对于物质特征,综合地质数据信息,可以概括为暗物质、盆地物质、月陆的平原—高原和丘陵物质、撞击坑物质四大类。在年代和物质的控制下,可划分出不同年代和物质背景下的地形地貌单元,月海地貌类型可划分为月海平原、月海丘陵、月海高原和月海穹丘等;大型盆地地貌类型可分为盆底平原和环盆地山丘等;月陆地貌类型可分为月陆丘陵、月陆平原、月陆高原和月陆山脉等;撞击坑按照规模和形态可分为主撞击坑、撞击坑链、不规则撞击坑和未分撞击坑等(表2)。可见,该地质信息的表述采用了矩阵式

表 1 不同时期研究者提出的月球表面形貌类型对比
Table 1 Different types of lunar landform classifications

时间	研究者	分类依据	月貌类型
1645 年	Michael Florent van Langren ^[20-23]	高低特征	月海、陨石坑及山峰和山脉
1651 年	Giambattista Riccioli ^[20-23]	水的特征	月洋、月湖、月沼和月湾
1978 年	美国宇航局 ^[20-23]	形态特征	月海、月陆和撞击坑
1982 年	Andersson 和 Whitaker ^[20-23]	撞击坑	撞击坑、非撞击坑和其他地貌特征
1984 年	IAU ^[24]	形态特征	撞击坑、月海、月陆、月洋、月湖、月沼、月湾、月岬、山地、穹丘、皱脊、月谷、陡坡和月溪等
2011 年	周增坡等 ^[25]	形态特征	月海、月陆、台地、丘陵、山地、撞击坑平原、环形山、撞击坑链、月溪或月谷和月岭等
2016 年	程维明等 ^[2]		

结构,按照物质、年代和地貌类型三者进行组合。

丁孝忠等^[33]和陈建平等^[34]综合对撞击坑和溅射堆积物的分析,依据月坑的形态特征、填充物质的多少和保留程度等,将月球撞击坑划分出 7 种类型 11 个亚类,包括:碗型月坑、中央峰月坑、多环月坑、辐射型月坑、填充月坑、残缺月坑和残余月坑。其中,中央峰月坑又可分为回落堆积型中央峰月坑和陨石残体型中央峰月坑;填充月坑可被分为全填充月坑、满填充月坑、半填充月坑、无填充月坑。

在新一轮月球地质图的编研中,欧阳自远等^[35]

从月球表面构造域和深部构造域角度进行表达,在 2 种构造域中按照形态分为环形构造和线性构造,并在此基础上,按照成因进一步划分^[35,36]。其中对于月球表面构造域的研究即是对于月貌类型的划分。根据构造成因不同,月球表面环形构造域可进一步可划分为撞击坑(含盆地)、冷凝环和火山口 3 类,而月球表面线形构造域则可划分为月岭、断裂、坑链、地堑、月溪、月谷和其他共 7 个类别。对于撞击坑而言,又可进一步划分出中央峰、坑底、坑壁、坑缘、坑唇、辐射纹等。这种分类方式从地质角度出发,包含了构造成因、形态等多种因素。

表 2 美国月球地质图中涵盖的月球形貌类型特征^[27-32]

Table 2 Landform types included by geologic maps of the moon compiled by USGS^[27-32]

物质类型	暗物质	盆地物质	月陆物质	撞击坑物质	年代
地貌类型	月海平原、 月海丘陵、 月海穹丘等	盆底平原、环 盆地山丘等	月陆平原、月陆 高原、月陆丘陵、 月陆山脉等	主撞击坑、撞击坑 链、不规则撞击坑、 未分撞击坑等	哥白尼纪、爱拉拖逊 纪、雨海纪、前雨海纪 (含酒海纪和前酒海纪)

2.2 月球形貌类型识别方法

2.2.1 地形因子计算及识别

Florinsky^[37]基于克莱门汀号重力和地形数据在全月球尺度上计算了 15 个地形因子,其中平面曲率图中能反映出撞击坑所在区域,但是不能分辨出撞击坑的边界,剖面曲率图上能识别出澄海和危海的边界,集水区分布图上能识别出东海和云海的边界,其余 12 个地形因子在月球形貌类型分类上作用不明显。

除了传统的地形因子,近年来有学者用粗糙度来解译月球表面地貌,但地表粗糙度实质上也是用地形因子表征的一个指数,Rosenburg 等^[38]使用月

球侦察轨道器从 2009 年 9 月 17 日至 2010 年 3 月 9 日获取的 3 180 条轨迹数据,计算和分析表面坡度和粗糙度的各种参数,以区分月陆和月海的差异,具体参数分别是平均坡度、平均坡度差和 Hurst 指数(一种和分形相关的指数)。研究发现,月陆和月海对比有截然不同的粗糙度,但不同空间位置的月海粗糙度几乎没有差别,月陆本身也表现出这样的特点。月陆的 Hurst 指数为 0.95 接近于 1,被称为自相似地形,月海的 Hurst 指数为 0.76,这说明月陆在研究尺度不断变大时,其地形粗糙度维持在一个稳定的水平,而月海在大尺度上的地形特征会被平滑。粗糙度常用在月球表面形貌特征的识别和定量表达

上,要结合相应的提取方法才能完成地貌类型的划分工作。奚晓旭等^[39]在月球虹湾地区采用月球轨道飞行器激光测高仪获取的高程数据,利用粗糙度地形指数包括:均方根高程、均方根偏差、均方根坡度和 Hurst 指数对月球表面虹湾地区的地形地貌进行了解译,结果表明虹湾地区月球表面起伏度小,地形地貌样式单一,把区域尺度与全月尺度上的粗糙度对比可以研究区域特殊的历史演化过程。

王琛智等^[40]认为数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)结合其派生地形因子建立指标体系的方法在宏观尺度对月海和月陆进行识别和提取效果理想,在区域尺度上可扩展性差,不同地区难以共用同一套地形因子构建指标体系,而且指标体系中各因子权重设置具有较大的主观性。其在区域尺度上从月球表面地形纹理特征的角度出发,利用灰度共生矩阵模型,以 DEM 数据为基础,量化表达地形纹理特征的指标,筛选出能有效区分 2 类月球表面地貌单元的特征向量,然后选用离差平方和作为识别器自动识别月海和月陆,整体识别率达到 85.7%,在实验区取得了较好的识别结果。

此外, Bue^[41]利用 DEM 获得的地形指标,采用非监督分类在区域尺度上对火星地貌进行自动分类的方法对月球形貌类型划分。针对火星表面撞击坑广泛分布的特殊地形,先采用淹没算法处理高程数据,随后选择高程、坡度、集水区、淹没高程、淹没坡度和淹没集水区 6 个地形因子输入到自组织神经网络模型(隶属于非监督分类)中,将带有地形信息的所有像素划分为相互排斥或相似的地貌单元,相同地貌类型像素具有最大的相似性,最小的差异性,最终在实验区 Terra Cimmeria 区划分出 5 个一级地貌类型,19 个二级类型。

2.2.2 遥感与地形综合识别

周增坡等^[25]基于嫦娥一号全月高程及影像数据,在月球标准分幅 H010 区域,选择高程、坡度、起伏度及影像灰度值 4 个指标先对指标归一化处理,然后应用最大似然法进行月海和月球高地的自动提取,这 4 个指标从不同侧面刻画了月海和月球高地地形及物质反照率的差异,提取结果与美国地质调查局出版的全月球地质数据进行一致性分析,得到 Kappa 系数为 0.78。

李婧等^[42]、李珂等^[43]和王楠^[44]以嫦娥一号影像数据和 LOLA(Lunar Orbiter Laser Altimeter)激光高度计数据和 LRO(Lunar Reconnaissance Orbiter)的宽视角影像数据为基础,分别以澄海、马里纳斯坑

和静海为研究区域,选择地形曲率为提取地表线性特征的地形因子,并利用不同滑动窗口大小和阈值进行线性构造自动提取月岭和月溪,此方法为月球表面线性构造解译提供重要参考,提高了线性构造解译时效性和精度。月球极地和背面的线性特征也被分析和挖掘^[45]。

撞击坑的识别和提取研究非常多,包括人工识别、自动识别^[41~50]等。近年来,随着海量影像和 DEM 数据的不断获取,计算机技术的不断发展,对撞击坑的提取方法不断创新。基于图像的撞击坑自动分类大体上可以分为以下三大类:边缘检测、霍夫变换和机器学习。对于边缘检测类:包括基于某种固定的局部算法^[51,52],如传统的基于模板和梯度的算法、Robert 算子、Sobel 算子、拉普拉斯算子、Prewitt 算子和 Canny 算子等;以能量最小化为准则的全局检测算法,其特点是运用严格的数学方法进行分析,得到最优的一维值代价函数为依据进行边缘提取,如神经网络分析法等^[53];近年来发展起来的以数学形态学、小波变换、分形理论等为代表的图像边缘检测方法,尤其是基于多结构元素、多尺度特征的形态学边缘检测的方法^[54,55];基于模版匹配的方法^[56,57];基于椭圆拟合的方法^[58,59];基于 AI 技术的方法^[60]。霍夫变换类: Honda 等^[61]提出基于组合 Hough 变换的撞击坑检测; Sawabe 等^[62]对月球遥感影像数据进行了边缘检测、二值化、边缘细化、连接、坑心确定等处理,利用模糊霍夫变换识别撞击坑。机器学习类: Burl 等^[63]通过借鉴机器学习和计算机视觉的理论,建立了一套可训练的算法来提取和识别不同尺寸的撞击坑。

基于 DEM 的撞击坑自动分类主要是利用地形信息对撞击坑识别、分类, Wan 等^[64]采用 DEM 填洼、面向对象分类、DEM 填洼的面向对象分类 3 种自动提取方法在 DEM 上进行撞击坑提取试验,表明填洼一面向对象的方法具有更高的提取精度; Salamunićcar 等^[65,66]利用 DEM 数据,运用霍夫变换、特征匹配面向对象等方法对火星和月球上的撞击坑进行了自动提取,得到了一系列撞击坑数据目录; Luo 等^[67]也利用嫦娥一号的 DEM 数据获得的地形指标,获得了全月球直径大于 10 km 的撞击坑边界; Di 等^[68]基于地形数据,利用机器学习方法提取撞击坑。Bue 等^[69]不仅考虑到了坡度信息,还加入了纹理和剖面曲率信息,以提高撞击坑识别的精度; Hawke 等^[70]采用形态和纹理特征对亚公里级别的撞击坑进行识别。

融合遥感影像与 DEM 的识别方法点在于找到一种既适应于基于遥感影像的又适应于基于 DEM 的识别方法^[46~50]。Salamunićcar 等^[71]先用遥感影像重建 DEM,然后基于重建的 DEM 选择以霍夫变换为核心的识别方法提取撞击坑,在特定的区域内,被正确识别的撞击坑数量有显著增加;Wang 等^[72]用嫦娥一号遥感影像重建 DEM 以获得相同分辨率的本底数据,然后再重建的 DEM 上提取坡度因子和剖面曲率因子,加权融合后利用撞击坑边缘点突变性识别撞击坑的边界,建立了直径大于 500 m 的全月球撞击坑数据目录;罗中飞等^[73]先利用太阳光照条件下撞击坑在影像中的特征,通过条件匹配实现撞击坑的自动提取然后在 DEM 中,利用撞击坑坑壁点坡向值的连续性,对影像中误提取的撞击坑进行剔除,最后在 DEM 中通过坑底点云所占比例以及剖面线特征识别撞击坑的类型。具有辐射纹的撞击坑因明显的专家作用遗留的痕迹,为提取撞击坑提供了途径^[74~75]。

2.3.3 人工判读识别

对月球典型形貌特征(如月溪)的提取研究已有很多成果^[76]。近年来,李力等^[77]基于多源数据(嫦娥一号影像、月球轨道飞行器激光测高仪获取的 DEM、月球勘测轨道器相机图像和 Clementine 紫外/可见光多光谱图像)对月球 Aristarchus 地区弯曲月溪的形貌特征从影像特征、形貌特征(长度、宽度、深度、区域坡度和月溪剖面)和物质组成 3 个方面进行解译分析,研究结果支持弯曲月溪的玄武岩熔岩流热侵蚀成因,表明研究区内的弯曲月溪具有相同的物源特征,月球表面坡度是控制月溪的主要因素。

3 全月球形貌类型的分类新方案

3.1 分类原则

鉴于月球地质演化过程、表面现状形貌特征以及现状营力作用方式^[1,2,19,27~32,78],在综合借鉴地球地貌类型分类时遵循的主导性形态成因分类原则的基础上^[79],初步提出适用于月球形貌类型的形态+年代相结合的分类原则:

(1) 主导因素原则。和地球表面不同,月球表面现在未发现大气和水等外力作用,改变表面形貌的外力主要是太阳风及外来物体的撞击。各种营力作用在月球表面,形成现今的月貌形态,同时也影响着月球表面物质的分布。因此,月球表面形貌类型分类的主导因素应该为表面形态特征,它记录了地质历史时期的各种营力在月球表面的作用方式及遗

留痕迹。将地质年代作为辅助分类的指标^[1,2,19,27~32,78]。

(2) 逻辑性原则。跟地球地貌分类相一致,月球形貌分类应该遵循逻辑性原则,对于月球的形貌类型,以反映宏观特征的月海、月陆、撞击坑及盆地作为四大基本形态类型^[1,2,19,27~32,78],再按照外貌形态变化进行逐级细化,以满足先群体后个体、先综合后单一、先大后小、先主后次等逻辑分类次序。

(3) 量化原则。基于精细 DEM 和遥感影像等海量数据源,对月球形貌类型的指标可实现指标的量化,如月海区域玄武岩含量、月陆区域月岩亮度值差异等,撞击坑的大小规模、形状指数、坑深比等,实现月球地貌类型指标的量化^[79]。

(4) 完备性原则。分类方法要求包含多种要素,并能不断扩充分类指标。除了反映月球表面形貌的形态差异性、地质年龄,还可以根据研究需要增加其他指标,以实现分类体系的完备性^[79]。

3.2 分类方法

月貌分类体系中,根据涵盖的地理意义及内涵,指标可以分为不同的类别,如形态指标、年代指标、物质指标等。而在每类指标内部,根据划分的详细程度,指标又可以分为不同等级,如一级形态、二级形态等。因此,月貌分类体系的构建实质上可以认为是类内指标的层级划分以及类间指标的组合。本文类内指标的层级划分使用等级分类方法,类间指标组合采用矩阵式组合方法;采用等级分类方法对每类指标进行等级划分后再以矩阵式组合方法将各类指标组合起来,构成完整的分类体系。

(1) 等级分类。在上述分类原则的指导下,月球形貌类型的分类采用等级分类方法,即按照先群体后个体、先综合后单一等逻辑分类次序,将月球表面形貌类型划分出一级形态、二级形态等不同等级,等级之间类型应存在包含关系,每种等级的形貌类型只能出现在某一特定类型中,避免等级类型的遗漏和重复。

(2) 矩阵式组合方法。为能充分体现月球形貌类型分类的完备性和逻辑性,拟采用矩阵式组合方法作为多类指标的组合方法,以实现不同类别指标的组合,便于形貌类型等级之间的管理编码^[79]。

3.3 分类指标

(1) 地质年代。和地球不同,月球表面无大气覆盖,除小行星的撞击作用和太阳风等作用外,地质历史时形成的地貌特征能较好地保存下来,因此地质年代可清晰地反映出地貌特征形式的过程及变

化^[1 2, 19 27~32, 78]。根据 20 世纪 70 年代美国编制地质图反映的地质年代特征,在 6 个分块中,近正面块的地质年代分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪和前雨海纪 4 个时段。而其他 5 块分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪、酒海纪和前酒海纪 5 个时段^[27~32],为了便于比较,将酒海纪与前酒海纪合并起来,并将其统称为前雨海纪。故该方案中的地质年代可划分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪、前雨海纪及其两者的过渡年代,共 7 个年代。

(2) 形态指标。根据表面形态特征,可将月球形貌类型按等级先划分成月海、盆地、月陆和撞击坑 4 个一级类^[1 2, 27~32, 80 81]。由于改变表面形貌的外力主要是太阳风及外来物体的撞击,而月球表面物质差异同样能够反映出其所在的地貌单元的形成条件,因而由形态指标划分而成的月球形貌的宏观形态与由物质指标划分得到的具有一定的相似性。在实际形态划分中,形貌边界较模糊区域可以辅助以

物质指标,以保证各类型边界的正确性。

以月海、盆地、月陆、撞击坑 4 个一级类为基础,根据形态特征,可以分出二级类。月海可分出月海平原和月海穹丘;盆地分为盆底平原和环盆地山丘;月陆分为平原、高原和丘陵;撞击坑可分为主撞击坑、撞击平原、次级撞击坑、撞击坑链、带辐射纹撞击坑、不规则撞击坑、未分撞击坑等(表 3)。在第三级类型划分中,可以进一步按照形态和坡面特征、规模进行细化。

3.4 形态—年代相结合分类方案

综合考虑已出版的各类月球形貌类型的划分方案,参考地球地貌类型要反映的形态、成因、物质、年代和过程等几大要素,基于月球形貌类型的划分从形态和物质方面考虑较多,对于年代和大的地质事件的反映不够。为能有效地综合反映月球表面的形貌特征、物质差异和成因状况,提出形态—年代相结合的矩阵式新分类方案(图 1 表 3)。

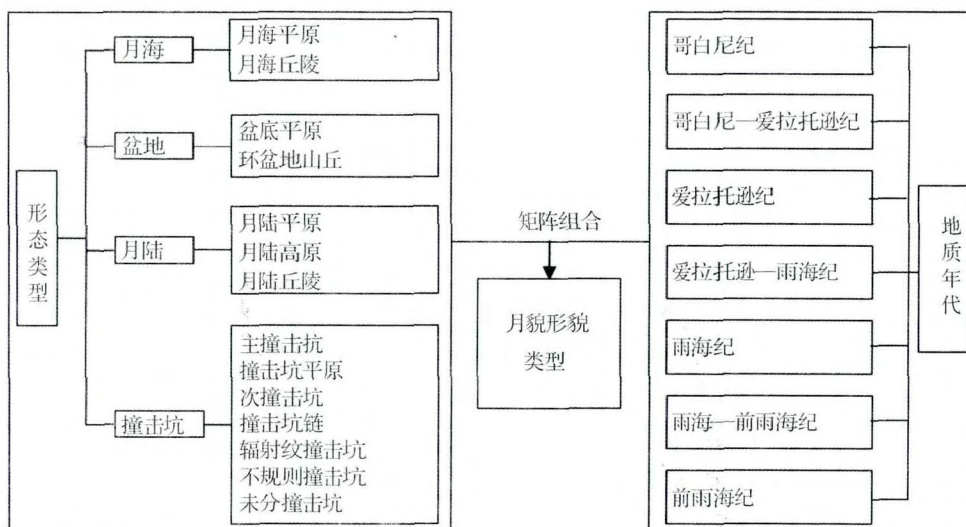


图 1 基于形态特征和地质年代的月球形貌类型分类体系

Fig. 1 Classification system of lunar landform based on morphologic feature and geologic age

图 1 为基于形态特征和地质年代的全月球形貌类型分类体系,采用 2 种指标的矩阵组合形式。表 3 为基于上述 2 种指标的全月球形貌类型分类矩阵表。由此,7 个年代类,4 个一级大类和 14 个二级形态类型,46 种形貌类型被提出(表 3)。

基于以上矩阵式组合分类方案,以 H010 为案例,制作了月球形貌类型图的各要素图及形貌类型图(图 2)。图 2a 为研究区一级形态特征图,共分为月海、盆地、月陆和撞击坑四大类。图 2b 为研究区二级形态特征图,包括月海平原、月海穹丘;环盆地

山丘;月陆平原、月陆高原和月陆丘陵;主撞击坑、撞击坑链、带辐射纹撞击坑、不规则撞击坑和未分撞击坑。图 2c 为地质年代图,包括哥白尼纪、哥白尼—爱拉托逊纪过渡、爱拉托逊纪、雨海纪、雨海纪—前雨海纪过渡、前雨海纪。图 2d 为基于形态特征与地质年代的研究区形貌类型组合。

4 讨论

(1) 地球地貌与月球形貌分类的比较

受地球表面各种外营力及地球自身内营力的共

表 3 基于形态特征和地质年代的月球形貌类型的矩阵式组合分类体系

Table 3 Matrix combination classification system of lunar morphology based on morphologic feature and geologic age

一级形态类型	月海		盆地		月陆			撞击坑							地质年代
二级形态类型	月海	月海	盆底	环盆地	月陆	月陆	月陆	主撞	撞击坑	次级	撞击	辐射纹	不规则	未分	
	(M)	(MD)	(B)	(CB)	(P)	(TP)	(TPL)	(MC)	(CP)	(SC)	(CC)	(RC)	(IC)	(UC)	
								C_TPL	C_MC	C_CP	C_SC	C_CC	C_RC		哥白尼纪(C)
		CE_MD						CE_TD				CE_CC	CE_IC		哥白尼—爱拉托逊纪(CE)
	E_M	E_MD						E_MC		E_SC	E_CC				爱拉托逊纪(E)
形态—年代 月球形貌类型	EL_M	EL_MD													爱拉托逊—雨海纪(EI)
	L_M	L_MD	L_B	L_CB	L_TP	L_TPL	L_TD	L_MC	L_CP	L_SC	L_CC		L_IC	L_UC	雨海纪(I)
				IpL_CB	IpL_TP	IpL_TPL	IpL_TD		IpL_CP				IpL_IC		雨海—前雨海纪(IpI)
		pL_B	pL_CB	pL_TP	pL_TPL			pL_MC	pL_CP	pL_SC	pL_CC		pL_IC	pL_UC	前雨海纪(pI)

注: 月球形貌类型, 下划线左边为地质年代, 右边为形态类型

同作用, 地球地貌的分类采用多采用形态与成因相结合的分类原则, 侧重点在于对内外营力反映程度及表达^[79]。通常在大范围小比例尺地貌类型图上, 多反映板块构造、大地构造及宏观形态特征; 在小范围大比例尺地貌类型上, 多反映地貌形态的差异性、物质组成、坡面特征等。

相比而言, 塑造现状月球表面形貌的内外营力方式与地球差异很大^[1, 2, 27~32, 78], 故月球形貌的分类不能完全借鉴地球地貌的形态与成因相结合的分类方法, 受特殊形态及地质年代的控制, 提出月球表面的形貌类型采用形态与地质年代相结合的分类方法, 以突出月球表面的特殊形貌特征。

(2) 月球表面形态特征的多级多指标表达

以往月球形貌分类体系大多只涉及单一类别指标, 如形态指标、年代指标、物质指标等, 这样一种分类体系往往反映月球表面形貌的单一方面, 在分类体系的完备性上略有欠缺。美国月球地质图中的月球形貌分类虽然包含了年代、形态等多种指标, 但不同类别指标间的关系并不明确, 物质指标与形态指标构成了等级关系, 与年代指标则是并列关系, 不同类别指标间关系的差异不利于整个分类体系

指标的扩充。在本研究提出的分类体系中, 以形态指标替代物质指标进行类型划分, 采用矩阵式组合方法与年代指标结合, 明确统一了不同类别指标间关系, 使得整个分类体系的可扩展性大大增强。

从地貌分类的层次性和逻辑性方面来考虑, 任何星球的地貌类型都存在等级性, 本研究初步提出了月球形态特征的两级类型^[27~32]。提出该分类思路的意图是在大的形态类型上能全充满月球表面, 且大类之间差异明显。月海和月陆的形态差异明显, 已有分类中将两者分开。对大型盆地和撞击坑的分类, 有研究将两者合在一起, 主要认为大型盆地也是撞击作用形成的。本研究中, 考虑到大型盆地不全是撞击坑作用的结果, 将大型盆地和撞击坑分为两大类, 以突出大型盆地和撞击坑的规模和成因差异。在此基础上, 将四大类形态特征依据各自的指标体系逐级进行细化。

(3) 撞击坑形貌分类与表达

目前对撞击坑形貌类型的分类方案研究相对较多, 王娇等^[26]照形态和规模相结合的比对指标, 将全月球撞击坑分为月海残留型、特大复杂型、大环状

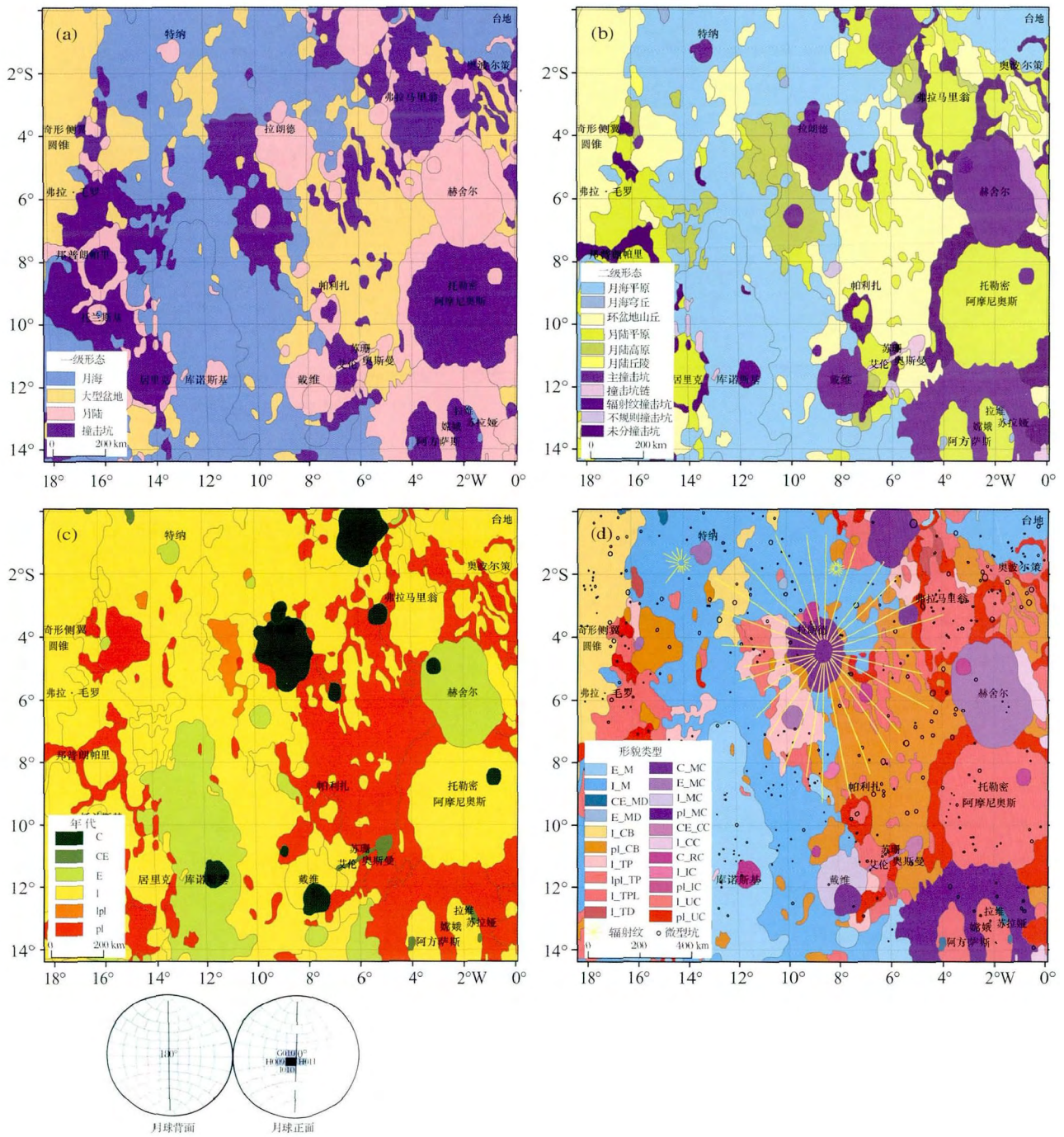


图 2 基于形态类型和地质年代组合而成的 H010 幅形貌类型制图

Fig. 2 Maps of morphologic feature , geologic age and landforms of Sheet H010

(a) 一级形态; (b) 二级形态; (c) 年代; (d) 形貌组合类型

(a) First class morphologic types; (b) Second class morphologic types; (c) Geologic Age; (d) Combined landform types

平原型、中等凹坑平原型、小规模碗型和微状酒窝型六大类,这种分类方案适合于只研究撞击坑类型。考虑到全月球的形貌类型划分,本方案对各种撞击坑分类进行了综合,分为主撞击坑、撞击平原、次级撞击坑、撞击坑链、带辐射纹撞击坑、不规则撞击坑

和未分撞击坑等七大类,将撞击坑链、带辐射纹的撞击坑单独分离出来,以突出它们的形态差异性、撞击作用和时间特征^[27~32]。

(4) 基础地理信息和形貌类型的表达

地貌类型图既要表示各级形貌类型,也要在其

上叠加基础地理的诸多信息,如地名、山脉等^[82-85]。跟地球地貌图相似的是,到目前为止,月球上已命名了多种大小不同的基础地理地名,包括月洋(风暴洋)、月海(包括蛇海、南海、知海、危海、丰富海、冷海、洪堡海、湿海、雨海、智海、岛海、界海、莫斯科海、酒海、云海、东海、澄海、史密斯海、泡海、静海、浪海和汽海,共22个)、月湖(包括夏湖等,共20个)、平原(降落平原)、山脉(包括高加索山脉等,共48个)、山脊(包括阿尔甘山脊等,共39个)、环形坑和卫星坑(已命名的有近9000个)、峭壁(包括阿尔泰峭壁等,共8个)、坑链(包括洪堡坑链等,共19个)、月谷(包括阿尔卑斯月谷等,共14个)、海角(包括开尔文海角等,共9个)、月溪(包括杨森月溪等,共115个)、月湾(包括虹湾等,共11处)、月沼(包括梦沼等,共3处)、反照率特征点(包括赖纳伽马)、月球着陆点(包括博特朗等,共79处)^[84-85]。上述基础地理的部分信息也是较细一级的形貌类型。因此,在较详细的形貌类型分类中,按照相对应的指标体系将其划分出具有一定面积的图斑,在基础地理信息中,也反映出相应的名称。

5 结 论

考虑到月球表面形貌的现状特征、受宏观营力格局及作用方式、形态变异及组合特征等,初步提出了基于形态和年代两大类特征相结合全月球形貌类型的矩阵式多级分类方法。

全月球形貌类型中,按照宏观形态及营力作用方式,可将第一级划分为月海、盆地、月陆和撞击坑四大类。第二级中,按照大类的形态差异性,将盆地分为盆底平原和环盆地山丘;月海分为月海平原和月海穹丘;月陆分为月陆平原、月陆丘陵和月陆高原;撞击坑按照形态和规模分为特大型撞击坑环形山、特大型撞击平原、次级形成小撞击坑、撞击坑链、带辐射纹撞击坑、不规则和边缘模糊坑、未分形态撞击坑等类型。根据坡面和物质差异,可细化出三级甚至四级形态类型。而年代可分为哥白尼纪、爱拉托逊纪、雨海纪、前雨海纪、及两者之间的过渡年代等七大类。

以H010幅为案例,对形态类型、地质年代2种指标和组合形貌类型进行了制图试验。本研究将对全月球形貌类型的划分和制图具有一定的指导作用。

参考文献(References):

[1] Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: Chi-

na Astronautic Publishing House, 2005. [欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.]

- [2] Cheng Weiming, Zhou Zengpo, Wan Cong, et al. Introduction to Lunar Morphology and Landform Science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016. [程维明, 周增坡, 万丛, 等. 月球形貌科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 2016.]
- [3] Cheng Weiming, Wang Jiao, Zhou Chenghu. Analysis on research progress and tendency of lunar morphological characteristics [J]. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1 003-1 014. [程维明, 王娇, 周成虎. 月球表面形貌特征研究进展及趋势分析[J]. 地理研究, 2014, 33(6): 1 003-1 014.]
- [4] Eliason E, Isbell C, Lee E, et al. The Clementine UUVIS Global Lunar Mosaic [R]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999.
- [5] Bussey B, Spudis P. The Clementine Atlas of the Moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [6] Rosiek M R, Kirk R, Howington-Kraus E. Color-coded Topography and Shaded Relief Maps of the Lunar Hemispheres [M]//33rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [7] Zisk S H. A new, Earth-based radar technique for the measurement of lunar topography [J]. *The Moon*, 1972, 4(3/4): 296-306.
- [8] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the Moon from the Clementine lidar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(1): 1 591-1 611.
- [9] Cook A C, Spudis P D, Robinson M S, et al. Lunar topography and basins mapped using a Clementine stereo digital elevation model [C]//33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston, Texas, 2002, 33: 1 281-1 282.
- [10] Burns K N, Speyerer E J, Robinson M S, et al. Digital elevation models and derived products from LROC NAC stereo observations [J]. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 39(6): 483-488.
- [11] Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry [J]. *Science*, 2009, 323(5 916): 897-900.
- [12] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. The global image of the Moon obtained by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography [J]. *Science in China (Series D)*, 2010, 53(8): 1 091-1 102.
- [13] Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model [J]. *Science in China (Series D)*, 2011, 53(11): 1 582-1 593.
- [14] Fok H S, Shum C K, Yi Yuchan, et al. Accuracy assessment of lunar topography models [J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(1): 15-23.
- [15] Ping Jinsong, Huang Qian, Yan Jianguo, et al. Lunar topographic model CLTM-s01 from Chang'E-1 laser altimeter [J]. *Science in China (Series G)*, 2009, 52(7): 1 105-1 114.
- [16] Wu Bo, Guo Jian, Zhang Yunsheng, et al. Integration of Chang'E-1 imagery and laser altimeter data for precision lunar topo-

- graphic modeling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4 889-4 903.
- [17] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection and classification of lunar craters using multiple approached[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 21-27.
- [18] Baldwin R B. The Face of the Moon[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1949.
- [19] Ronca L B, Green R R. Statistical geomorphology of the lunar surface[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, 81(2): 337-352.
- [20] Lewis H A G. The Times Atlas of the Moon[M]. London: Times Newspapers, 1969.
- [21] Bowker D E, Hughes J K. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon[R]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971.
- [22] Sheehan W, Dobbins T A. EpicMoon: A history of Lunar Exploration in the Age of the Telescope[M]. Richmond, Virginia: Willmann-Bell, 2001.
- [23] Whitaker E A. Mapping and Naming the Moon: A History of Lunar Cartography and Nomenclature[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [24] International Astronomical Union Working Group for Planetary System Nomenclature. Gazetteer of Planetary Nomenclature[EB/OL]. [2017-03-11]. <http://planetarnames.wr.usgs.gov/Page/MOON/target>.
- [25] Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Zhou Chenghu, et al. Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 18-26. [周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月球表面形貌特征分析与自动提取[J]. 科学通报, 2011, 56(1): 18-26.]
- [26] Wang Jiao, Cheng Weiming, Zhou Chenghu. A global inventory of lunar craters: Identification, classification, and distribution[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 330-342. [王娇, 程维明, 周成虎. 全月球撞击坑识别, 分类及空间分布[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 330-342.]
- [27] Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic Map of the Near Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-703, 1971.
- [28] Wilhelms D E, El-Baz F. Geologic Map of the East Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-948, 1977.
- [29] Scott D H, McCauley J F, West M N. Geologic Map of the West Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-1034, 1977.
- [30] Stuart-Alexander D E. Geologic Map of the Central Far Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-1047, 1978.
- [31] Lucchitta B K. Geologic Map of the North Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-1062, 1978.
- [32] Wilhelms D E, Howard K A, Wilshire H G. Geologic Map of the South Side of the Moon[M]. Arizona: US Geological Survey, Map I-1162, 1979.
- [33] Ding Xiaozhong, Han Kunying, Han Tonglin, et al. Compilation of the geological map of Sinus Iridum Quadrangle of the Moon (LQ-4)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 15-27. [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.]
- [34] Chen Jianping, Wang Xiang, Xu Yanbo, et al. Compilation of the lunar geotectonic outline map based on multisource data: A case study of LQ-4 Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 1-14. [陈建平, 王翔, 许延波, 等. 基于多源数据的月球大地构造纲要图编制: 以LQ-4地区为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 1-14.]
- [35] Ouyang Ziyuan, Liu Jianzhong. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping[J]. *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[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 1-6.]
- [36] Chen Jianping, Wang Xiang, Wang Nan, et al. The lunar geological mapping based on Chang'E data: Serenitatis-Tranquillitatis area as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 7-18. [陈建平, 王翔, 王楠, 等. 基于嫦娥数据澄海—静海幅地质图编研[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 7-18.]
- [37] Florinsky I V. Global Morphometric Maps of Mars, Venus, and the Moon[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [38] Rosenburg M A, Aharonson O, Head J W, et al. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(E2): 1-11.
- [39] Xi Xiaoxu, Liu Shaofeng, Wu Zhiyuan, et al. The interpretation of land form of Sinus Iridum on the Moon based on the roughness[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2012, 92(1): 95-99. [奚晓旭, 刘少峰, 吴志远, 等. 基于粗糙度的月球表面虹湾地区地形地貌解译[J]. 国土资源遥感, 2012, 92(1): 95-99.]
- [40] Wang Chenzhi, Tang Guoan, Yuan Sai, et al. A method for identifying the lunar morphology based on texture from DEMs[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(1): 45-53. [王琛智, 汤国安, 袁赛, 等. 基于DEM纹理特征的月貌自动识别方法探究[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 45-53.]
- [41] Bue B D, Stepinski T F. Automated classification of landforms on Mars[J]. *Computers and Geosciences*, 2006, 32(5): 604-614.
- [42] Li Jing, Chen Jianping, Wang Nan, et al. A new automated approach to detecting and extracting the linear structures on the lunar surface: A case study on the lunar mare ridge of Mare Serenitatis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 223-228. [李婧, 陈建平, 王楠, 等. 月球表面线性构造自动提取新方法研究: 以澄海地区月岭为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 223-228.]
- [43] Li Ke, Chen Jianping, Tarolli P, et al. Geomorphometric multi-scale analysis for the automatic detection of linear structures on the lunar surface[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 212-222. [李珂, 陈建平, Tarolli Paolo, 等. 基于多尺度数字地形定量分析的月球线性构造自动提取研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 212-222.]
- [44] Wang Nan. Automated Extraction and Evolution Analysis of the

- Lineaments on Mare Tranquillitatis of the Moon [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. [王楠. 月球静海地区线性构造自动提取与演化分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.]
- [45] Chabot N L, Hoppa G V, Strom R G. Analysis of lunar lineaments: Far side and polar mapping[J]. *Icarus*, 2000, 147(1): 301-308.
- [46] Neukum G, König B, Arkanî-Hamed J. A study of lunar impact crater size-distributions[J]. *Moon*, 1975, 12(2): 201-229.
- [47] Yue Zongyu, Liu Jianzhong, Wu Ganguo. Automated detection of lunar craters based on object-oriented approach[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(23): 3 699-3 704.
- [48] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with small depth/diameter ratio I[J]. *Earth, Moon and Planets*, 1979, 21(3): 299-305.
- [49] Grieve R A F, Pesonen L J. Terrestrial impact craters: Their spatial and temporal distribution and impacting bodies [M] // *Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System*. Netherlands: Springer Netherlands, 1996: 357-376.
- [50] Ding Meng, Cao Yunfeng, Wu Qingxian. A method of craters detection from the surface imagery of Moon[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1 243-1 248.
- [51] Du Jun, Miao Fang, Lu Yuhang, et al. Research on appraisal of edge definition of impact craters[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013 49(15): 179-183. [都骏, 苗放, 鲁宇航, 等. 月球撞击坑边缘清晰度评价方法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2013 49(15): 179-183.]
- [52] Bijaoui A, Froeschle M M. A new algorithm to determine image edges—Application to lunar craters[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1980, 87(1/2): 250-251.
- [53] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6): 679-698.
- [54] Salamunić car G, Lončarić S, Mazarico E. LU60645GT and MA132843GT catalogues of Lunar and Martian impact craters developed using a Crater Shape—Based interpolation crater detection algorithm for topography data[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 60(1): 236-247.
- [55] Yuan Yuefeng, Zhu Peimin, Zhao Na, et al. Automatic identification of circular mare craters based on mathematical morphology[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 2013 43(3): 324-332. [袁悦锋, 朱培民, 赵娜, 等. 基于数学形态学的月海圆形撞击坑自动识别方法[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学 2013, 43(3): 324-332.]
- [56] Michael G G. Coordinate registration by automated crater recognition[J]. *Planetary and Space Science*, 2003, 51(9): 563-568.
- [57] Kim J R, Muller J P, Morley J G. Quantitative assessment of automated crater detection on Mars[C] // 2004 ISPRS Congress. Istanbul, Turkey: ISPRS, 2004.
- [58] Leroy B, Medioni G, Johnson E, et al. Crater detection for autonomous landing on asteroids[J]. *Image and Vision Computing*, 2001, 19(11): 787-792.
- [59] He Jiang. Research on Crater Matching Based Navigation Method for Lunar Precise Landing [D]. Haerbing: Harbin Institute of Technology, 2010. [何江. 基于陨石坑匹配的月球精确着陆导航方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.]
- [60] Plesko C S, Werner S C, Brumby S P, et al. A statistical analysis of automated crater counts in MOC and HRSC data[C] // 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas: Lunar and Planetary Institute, 2006.
- [61] Honda R, Iijima Y, Konishi O. Mining of topographic feature from heterogeneous imagery and its application to lunar craters [C] // *Proceeding of the Progress of Discovery Science*. Berlin, Germany: Springer, 2002.
- [62] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection and classification of lunar craters using multiple approaches[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 21-27.
- [63] Burl M C, Stough T, Colwell W, et al. Automated detection of craters and other geological features [C] // 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. United States: NASA Technical Reports Server, 2001.
- [64] Wan Cong, Cheng Weiming, Zhou Zengpo, et al. Automatic extraction of lunar impact craters from Chang'E-1 satellite photographs[J]. *Science China, Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(1): 162-169.
- [65] Salamunić car G, Lončarić S. Method for crater detection from Martian digital topography data using gradient value orientation, morphometry, votes-analysis, slip-tuning and calibration [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2 317-2 329.
- [66] Salamunić car G, Lončarić S, Vinković D, et al. Test-field for evaluation of laboratory craters using a Crater Shape—Based interpolation crater detection algorithm and comparison with Martian and Lunar impact craters [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 71(1): 106-118.
- [67] Luo Lei, Mu Lingli, Wang Xinyuan, et al. Global detection of large lunar craters based on the CE-1 digital elevation model[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7(4): 456-464.
- [68] Di Kaichang, Li Wei, Yue Zongyu, et al. A machine learning approach to crater detection from topographic data[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(11): 2 419-2 429.
- [69] Bue B D, Stepinski T F. Machine detection of martian impact craters from digital topography Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45: 265-274.
- [70] Hawke B R, Blewett D T, Lucey P G, et al. The origin of lunar crater rays[J]. *Icarus*, 2004, 170(1): 1-16.
- [71] Salamunić car G, Lončarić S, Grumpe A, et al. Hybrid method for crater detection based on topography reconstruction from optical images and the new LU78287GT catalogue of lunar impact craters[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(12): 1 783-1 797.
- [72] Wang Jiao, Cheng Weiming, Zhou Chenghu. A Chang'E-1 global catalog of lunar impact craters [J]. *Planetary and Space Science*, 2015, 112: 42-45.

- [73] Luo Zhongfei ,Kang Zhizhong ,Liu Xinyi. The automatic extraction and recognition of lunar impact craters fusing CCD images and DEM data of Chang'E-1 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* ,2014 ,43(9) : 924-930. [罗中飞,康志忠,刘心怡.融合嫦娥一号 CCD 影像与 DEM 数据的月球撞击坑自动提取和识别[J].测绘学报,2014 ,43(9) : 924-930.]
- [74] Wood C A ,Anderson L. New morphometric data for fresh lunar craters [J]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings* ,1978 ,9: 3 669-3 689.
- [75] Morota T ,Furumoto M. Asymmetrical distribution of rayed craters on the Moon [J]. *Earth and Planetary Science Letters* ,2003 ,206(3) : 315-323.
- [76] Oberbeck V R ,Greeley R ,Morgan R B ,et al. Lunar Rilles: A Catalog and Method of Classification [R]. *Space Sciences* ,1971: 83.
- [77] Li Li ,Liu Shaofeng ,Wei Wei ,et al. Interpretation of landform of sinuous rilles on the moon based on multidata of remote sensing [J]. *Remote Sensing for Land and Resources* ,2012 ,94(3) : 16-21. [李力,刘少峰,韦蔚,等.基于多源遥感数据的弯曲月溪地貌特征解译[J].国土资源遥感,2012 ,94(3) : 16-21.]
- [78] Fieder G. Lunar Geology [M]. London: Lutterworth Press ,1965.
- [79] Zhou Chenghu ,Cheng Weiming ,Qian Jinkai ,et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1 : 1000000 in China [J]. *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[J].地球信息科学学报,2009 ,11(6) : 707-724.]
- [80] Stuart-Alexander D E ,Howard K A. Lunar maria and circular basins—A review [J]. *Icarus* ,1970 ,12(3) : 440-456.
- [81] Lucey P G. Mineral maps of the Moon [J]. *Geophysical Research Letters* ,2004 ,31(8) : 1-4.
- [82] Andersson L A ,Whitaker E A. NASA Catalogue of Lunar Nomenclature [M]. United States: NASA Reference Publication ,1982.
- [83] Whitaker E A. Mapping and Naming the Moon: A History of Lunar Cartography and Nomenclature [M]. Cambridge: Cambridge University Press ,2003.
- [84] Compiling Committee of the Chang'E-1 Image Atlas of the Moon. The Chang'E-1 Image Atlas of the Moon [M]. Beijing: SinoMaps Press ,2010. [《嫦娥一号全月球影像图集》编辑委员会.嫦娥一号全月球影像图集[M].北京:中国地图出版社 2010.]
- [85] Compiling Committee of the Chang'E-1 Topographic Atlas of the Moon. The Chang'E-1 Topographic Atlas of the Moon [M]. Beijing: SinoMaps Press ,2013. [《嫦娥一号全月球地形图集》编辑委员会.嫦娥一号全月球地形图集[M].北京:中国地图出版社 2013.]

A Preliminary Study of Classification Method on Lunar Topography and Landforms^{*}

Cheng Weiming^{1 2} , Liu Qiangyi^{1 2} , Wang Jiao³ , Gao Wenxin^{1 4} , Liu Jianzhong⁵

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System , Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100101 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 3. School of Information Engineering , China University of Geosciences , Beijing 100083 , China; 4. School of Civil Engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou 730050 , China; 5. Institute of Geochemistry , Chinese Academy of Sciences , Guiyang 550081 , China)

Abstract: Lunar topography and landform , resulting from endogenous and exogenous geophysical processes of various spatial and temporal scales , carry information of these processes and target properties. Geoscientists use morphometric analysis at different scales to study lunar topography , which is one of the four scientific objectives of China's lunar exploration project. This article first reviewed the lunar topographic types from different researchers , analyzed classifying method and progress , discussed geological mapping method of 1 : 5 000 000 compiled by United States Geological Survey in the 1970s. In consideration of the present situation of the lunar surface morphological characteristics , the pattern of macroscopic forcing , morphologic variation and combination characteristics and func-

^{*} **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Classification method on lunar morphological types" (No. 41571388) ; The Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences " Digital Moon and Earth-Moon system evolution" (No. XDPB11) .

First author: Cheng Weiming(1973-) , male , Tianshui City , Gansu Province , Professor. Research areas include digital geomorphology and lunar topography and landforms. **E-mail:** chengwm@lreis. ac. cn

tion way , etc. , a matrix combining multi-stage classification method was put forward based on the characteristics of the topography and geologic age , which included 7 geologic ages and 14 morphologic classes. Geological ages can be divided into Copernican System (C) , Copernican-Eartosthenian System (CE) , Eartosthenian System (E) , Eartosthenian-Imbrian System (EI) , Imbrian System (I) , Imbrian-PreImbrian System (IpI) and Pre-Imbrian System (pI) . As to topographic types , the first class can be divided into lunar mare , lunar basin , lunar terra and lunar crater. As to their second class according to morphological differences , the lunar basin can be divided into basin plain and circum-basin , and lunar mare can be divided into mare plain and mare dome; lunar terra can be divided into terra plain , plateau and hill , and craters can be divided into main sequence crater , crater plain , secondary crater , crater chains and clusters , rayed craters , irregular crater and undivided crater. Thus , 46 subclasses including geologic and morphologic features were obtained in this classification system. The test mapping method was addressed in Sheet H010 , which shows the combination classification method is reasonable.

Key words: Lunar topography; Morphological features; Geologic ages; Geomorphologic classification; Classification approach.

NOAA: 2017 年多个全球变化指数创新高

2018年8月1日,由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的科学家领导并由美国气象学会(AMS)出版题为《2017年气候状况》(State of the Climate in 2017)的报告。该报告基于全球65个国家的524名科学家的贡献,提供了全球气候指标、极端天气事件和其他重要环境数据的见解。报告指出,2017年全球温室气体浓度、海温、极地海冰融化、海平面上升等全球变化指数均创新高。关键结论包括:

(1) 温室气体含量创历史最高水平。大气中3种主要温室气体(二氧化碳、甲烷和一氧化二氮)的浓度创历史新高。2017年全球二氧化碳平均浓度为405 ppm,成为有大气测量记录以来的最高值,其同等水平最远可追溯到距今80万年的冰芯记录。

(2) 海平面上升达到历史最高值,比1993年的平均水平高约7.7 cm。全球海平面每十年平均上升3.1 cm。

(3) 上层海洋的热量达到历史最高值,反映了全球海洋中最上层2300英尺海水中持续积累的热量。

(4) 全球陆地和海洋表面温度接近历史最高水平。全球平均表面温度比1981—2010年的平均值高0.38~0.48℃,这标志着2017年成为自19世纪中后期有气候记录以来第二或第三温暖的年份。

(5) 海面温度接近历史最高水平。虽然2017年全球平均海表温度(SST)略低于2016年的值,但长期趋势仍然在上升。

(6) 干旱形势在减弱后反弹。全球干旱面积在2017年初急剧下降,然后在今年晚些时候升高到超过平均水平。

(7) 北极最大海冰范围降至历史最低值。2017年,北极海冰最大范围达到了过去38年以来的最低值,2017年9月的海冰最低值成为有记录以来的第八低,比长期平均值低25%。

(8) 南极海冰范围也突破历史纪录,远低于1981—2010年的平均水平。2017年3月1日,海冰面积降至210万平方公里,这是1978年开始进行连续卫星记录以来观测到的最低值。

(10) 前所未有的珊瑚白化事件仍在继续。2014年6月至2017年5月期间发生了全球珊瑚白化事件,对珊瑚礁产生了前所未有的影响。在部分受影响的珊瑚礁地区,95%以上的珊瑚死亡。

(11) 热带气旋总数略高于平均水平。2017年有85个命名的热带气旋,略高于1981—2010年的平均值(82个)。

(刘燕飞 编译)

原文题目: State of the Climate in 2017

来源: https://www.ametsoc.net/sotc2017/StateoftheClimate2017_lowres.pdf