

月表形貌特征研究进展及趋势分析

程维明¹, 王 娇^{1,2}, 周成虎¹

(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)

摘要:在月球探测及科学研究过程中,对月表形貌特征的认识和分析是月球探测计划的关键任务之一,有助于理解和揭示月球的形态特征及空间分异规律,对于分析月球岩石构造、估算月表年龄、反演月壤厚度、恢复月球的起源和演化历史等都具有重要意义。从月表形貌特征的塑造及表达、宏观特征的分析与定量刻画、月表撞击坑的识别与分类及空间分异特征等几方面进行了归纳和分析,提出了未来月表形貌的研究方向,包括全月球形貌特征的多级分区划分、撞击坑类型的划分、全月球撞击坑空间分异特征及规律的研究、基于撞击坑空间分布探讨月球演化、基于形貌特征的比较行星学研究等。

关键词:月表形貌;撞击坑;特征分析;月球科学;比较形貌学

DOI: 10.11821/dljy201406001

1 引言

月球作为地球唯一的天然卫星,自古以来,人类就不断地试图通过各种方法认识月球、了解月球,对月球的探测研究已取得了诸多丰硕的成果。从20世纪50年代末60年代初开始,美国和前苏联进行激烈的空间竞赛所实施的Apollo计划和Luna计划,使人类对月球的探测活动达到了一个高峰,其从月球上带回的岩石和月壤样品,对月球的地貌、空间环境、资源状况等有了一定的了解^[1]。

经过1976年到20世纪90年代初的短暂探月宁静期,美国于1994年和1998年分别发射了Clementine探测器和Lunar Prospector系列探测器,获得了大量的影像数据和测高数据。进入21世纪,世界其他航天大国也相继进行了相关的深空探测计划,已经发射的月球探测器包括欧盟的SMART-1、日本的SELENE (Kaguya)、中国的嫦娥系列、美国的Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)和印度的Chandrayaan-1。正在研制中的探测器包括日本的SELENE2、俄罗斯的Luna Glob、英国的MoonLITE、德国的Lunar Exploration Orbiter和Google资助的Google Lunar X-Prize等^[2]。这些探月计划在测量数据的覆盖范围和分辨率等方面均有较大提高^[3],可进一步开展包括空间环境、地貌、地质构造、起源与演化等的系统性研究,大大丰富和加深了人类对月球的进一步认识,其中月表形貌特征的研究一直是贯穿近几十年月球探测计划的关键任务之一,中国月球探测的绕、落、回各个阶段的科学目标均与月表形貌特征的调查研究密切相关。

目前,月球上没有大气和液态水,对月表形貌塑造的外营力主要体现在月球早期的

收稿日期: 2014-03-15; 修订日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171332); 中科院地理资源所“一三五”战略科技计划项目(2012ZD009); 资源与环境信息系统国家重点实验室自主研究项目

作者简介: 程维明(1973-),男,甘肃人,副研究员,主要从事地貌学研究。E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

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，它们对月表地貌的破坏作用相对较弱，因此，月表形貌特征能直观地反映月表特征及月球目前的状态，同时也记录着月球形成和演化的历史信息^[1]。

在月表复杂的众多地貌特征中，撞击坑是最典型的地貌单元之一，它的大小和分布记载了十几亿年以来月球被彗星和小行星等星体撞击比较完备的历史记录，通过统计各种大小的撞击坑数量，能够估计地球邻近空间较大天体的流量，推断月表地质单元的相对年龄。同时，可以通过月球表面的撞击坑特征历史信息了解和研究月球的成因、演化 and 构造^[4-8]。

在月球探测过程中，月表地貌学研究有助于加深对月表形貌的认识和理解^[8]，对协助研究月球岩石构造^[9]、估算月表年龄^[10]、探测器软着陆地点的修正^[11]、反演月壤厚度^[12]、恢复月球起源和演化历史^[13]等都具有重要意义，同时可为月球资源的开发利用提供基础，为“中国探月工程”贡献力量。有鉴于此，本文将对月表形貌的研究现状和未来发展情景进行总结分析，意在为中国的月球科学与比较行星学研究工作提供科学参考依据。

2 月球形貌特征研究现状

随着计算机和遥感技术的迅速发展，月球探测器获取的海量数据在计算机大容量、高速度的运行下得以有效、快速地处理，复杂多变的地貌形态特征得以被量化模拟，从而使月表形貌从定性描述走入定量分析^[14,15]。本文主要从月表形貌的塑造及表达、月表地貌形态特征分析、撞击坑识别、分类及空间分异特征等三个方面对近年来专家学者的相关研究进行总结和概括。

2.1 月表形貌特征的塑造及表达

月球地图和地图集的编制是月表形貌塑造及可视化表达的最直接形式，是满足人们对月球未知形貌的认识以及对已有知识进行验证的便捷途径。1609年，伽利略制造了一台观测分辨率大于10 km的天文望远镜^[16]，对月球表面特征进行了观察，看到了月球表面的亮区和暗区，阐明了它们与地球上的大陆和海洋相似的特征；确定和描述了若干主要圆形洼地（撞击坑）的位置，并认识到这种地表形态是月球表面的主要特征。他的第一批观察结果和素描图作为第一部概述性著作于1610年在帕多瓦问世^[17]。

前苏联1959年10月4日发射了月球3号，探测器获取的数据制作了月球背面地图集，为人类展示了月球背面的真面目^[18]。1966年1月31日发射了第一颗在月球上成功实现软着陆的月球探测器月球9号，Stooke于2007年根据“月球9号”数据编制了《月球探测国际图册》（The International Atlas of Lunar Exploration）。美国于1960年宣布了“徘徊者”计划，拍摄了大量的月球表面地貌照片^[19]，1969年，Lewis制作了月球正面地图集^[20]；1971年Bowker等利用美国“月球轨道器”（Lunar Orbiter系列）获取的平面图像编制了覆盖月球正面和背面的地图集^[21]。

美国于1994年和1998年分别发射了Clementine探测器和Lunar Prospector系列探测器，获得了大量的影像数据和测高数据。根据Clementine影像数据，Eliason等^[22]1999年制作了月球基本地图；Rosiek等^[23]2002年制作了1:1000万比例尺彩色编码晕渲图；Bussey和Spudis^[24]2004年编制第一个用统一尺度和形式展示月球全貌的地形图集——《月球克莱门汀地形图集》（The Clementine Atlas of the Moon），列出了所有的撞击坑和相关地貌特征，展示了月球表面的成分和物理性质。2000年，月球统一控制网（The Unified Lunar Control Network）的建立为月球制图提供了统一的基准^[25]。此外基于Clem-

entine激光测高数据,国际上得到了第一个全月球模型GLTM 2,该模型局部数据覆盖不全面^[26,27];日本研究人员利用Clementine提供的内插数据产品得到了180阶次的球谐函数展开模型NLT180A^[28]。Margot等利用地基雷达干涉测量得到了Tycho撞击坑的地形模型,其与Clementine得到的模型有近3 km的误差^[29,30]。

21世纪伊始,月球探测进入了又一个活跃期,各航天大国(组织)开始了以重返月球为目标的新的探月行动,如欧盟的SMART-1、日本的SELENE(Kaguya)、中国的嫦娥一号(CE-1)、嫦娥二号(CE-2)、美国的Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO)和印度的Chandrayaan-1在测量数据的覆盖范围和分辨率等方面均有较大提高。

在中国的探月研究中,平劲松等^[31]利用嫦娥卫星的激光观测数据得到了全月球地形模型CLTM-s 01,其在数据覆盖和精度上较Clementine有了很大提高,能有效地分辨出月球的各类地形特征。李春来等^[32]基于嫦娥系列探测器上的三线阵CCD立体相机获取的图像数据以及激光高度计测高数据等辅助数据进行了全月影像图、全月DEM模型、嫦娥一号全月球影像图集和嫦娥二号全月球影像图集的制作,清晰表达了月表地貌特征以及地形细节。此外随着地理信息系统和计算机网络技术的发展,也出现了如Google Moon等月球电子地图^[33,34]。

基于图像数据制作的月球表面三维影像^[35],可以进行月球表面地貌单元的划分、月球三维地形图以及相关专题地图的编制;进行月球表面撞击坑、环形山、辐射纹的形态、大小、分布特征等信息的提取,为未来月球科学研究提供可靠信息。

随着月球探测器精度的不断提高,以及各国对月球探测的频率不断扩大,对月球探测的数据越来越多,故对月球形貌特征的塑造和刻画将会越来越清晰和准确,这将对人类进一步认识月球现状、揭示月球起源和演化提供了数据基础和本底。

2.2 月球形貌特征的宏观分析

月球上99%的表面地形是在30亿年前形成的,有些是在40亿年前形成的^[36]。月球形貌特征是内、外营力长期综合作用的结果,反映了月表的高低起伏形态及空间分布特征^[37,38]。整个月球表面总体上分为月海和高地两大地理单元,国际天文学联合会(International Astronomical Union, IAU)将月球地貌按自然形态分为月海、撞击坑、山脉、峭壁、月谷、月溪、月湖、月湾、月沼和月面辐射纹等18个主要地貌类型^[39],它们分布于月海和高地内部或横跨月海和高地两大地理单元。

在月貌的主要类型中,月陆、月海、撞击坑构成了月貌体系的控制框架。月海是主要被玄武岩质熔岩所覆盖的月面上的黑色斑块,主要分布在月球正面,海拔较低、地势平坦、坡度较小,撞击坑密度也较小,一些小的月海则称为月湖;大小和形貌与月海类似但底部没有被暗黑色玄武岩所填充的类月海主要分布于月球背面。高出月海的那些相对明亮、地势起伏较大、撞击坑密度较大的广大区域被称为月陆^[40];月海延伸进月陆的部分是月湾和月沼;布满月球表面的大大小小、密密麻麻的环形凹坑构造是月面的显著特征撞击坑^[41]。月面也存在着一些大裂缝(峡谷),弯弯曲曲绵延数百千米,宽度从几千米到几十千米不等,把较宽的峡谷称为月谷,而细长的小月谷称为月溪。

从月球表面地貌分析的角度,通过Apollo时期以及近年来的月球探测获得的大量遥感数据,许多学者从不同方面开展了研究^[42]。如樊世超^[43]、张伍等^[44]运用规则格网结合局部复杂地区基于TIN的DEM建模方法对月球地貌环境的模拟,实现了月球表面DEM数据建模,并将其应用于中国月球软着陆探测工程仿真系统中;周增坡等^[45]基于嫦娥一号获取的遥感影像和DEM进行了月表形貌特征分析,发现月球平均高程为742 m,最大高程点和最小高程点均位于月球的背面,月球表面相对平坦,月球高地的坡度值变化较

大,月海坡度变化较小。基于各国不同探测器获得的数据,对月球表面的宏观形态特征进行了归纳,揭示了月球地貌特征的差异性,包括月表的最高点、最低点位置及数值、最大高差及分辨率等(表1)。随着月球探测器获得的月表数据精细程度的不断扩大,对月球精细特征的刻画会越来越真实。

对月球月壤的反演、月壤分布与形貌特征的关系分析也取得了一定的进展。如金亚秋和法文哲等^[46,47]初步建立了月尘、月壤、月岩三层微波热辐射模型,按三层模型提出了月壤层厚度的反演方法,并对月壤中³He含量分布进行了定量估算;Lucey等^[48]利用“Clementine”的紫外/可见光/近红外多光谱仪数据完成了全月矿物填图中单斜辉石、斜方辉石、橄榄石以及斜石的分布;甘甫平^[8]等系统地分析了月表形貌特征和岩石分布的空间耦合关系,在月陆主要分布斜长岩、月海分布玄武岩以及艾肯盆地高FeO的U型月表地貌格局。这些研究总体上反映了月球表面宏观地貌特征和分异表象。

2.3 月表撞击坑分类、识别及空间分异研究

撞击坑作为月表最主要的地貌特征构造单元(表2),对其研究相对深入。本文主要从撞击坑的分类、识别、形态特征表达、揭示月球的演化特征分析等几方面对近年来专家学者的相关研究进行总结和概括。

表 1 月表最高点、最低点、最大高程差的测量结果比较
Tab.1 The comparison of measurement results

数据源	月表最高点		月表最低点		最大高差 (km)	空间 分辨率
	经纬度	高程(km)	经纬度	高程(km)		
CE-1 ^[45]	158.565°W 5.433°N	10.611	146.033°W 56.15°S	-9.430	20.041	0.5 km
CE-1 ^[3,32]	158.656°W 5.441°N	10.629	172.413°W 70.368°S	-9.178	19.807	3 km
SELENE ^[45]	158.64°W 5.44°N	10.750	172.58°W 70.43°S	-9.060	19.810	<0.5°
CE-1 ^[31]	158.625°W 5.375°N	10.440	148.625°W 61.375°S	-8.630	19.070	0.25°
ULCN2005 DEM ^[25]	160.656°W 3.344°N	7.939	169.719°W 69.781°S	-8.910	16.849	<2 km

表 2 月球撞击坑的不同分类依据及类型
Tab.2 The classification criteria and types of lunar craters

研究者	划分依据	划分类型
Baldwin ^[49]	依据边界侵蚀程度	影子型、废墟型、边界破损、边界模糊、边界清晰
Wood ^[51]	从形态学和形态测量学角度出发,考虑一级侵蚀程度	TYC型、TRI型、SOS型、BIO型、ALC型
Heiken ^[52]	形态及规模特征、有无中央峰、有无多环盆地	撞击盆地(亚3类)复杂撞击坑(亚5类) 简单撞击坑
Stöffler ^[53]	根据撞击坑形态特征	撞击盆地、复杂撞击坑、简单撞击坑
何妹珺 ^[54]	撞击坑形态及规模特征	月海残留型、复杂型、同心环型、中央隆起型、平底型、碗型、简单型

2.3.1 撞击坑的宏观分类方法 对撞击坑进行科学的分类可为撞击坑的识别以及形态特征表达等提供基础条件。为了将撞击坑系统性地分类研究,已有研究依据不同的划分以及对撞击坑的不同类型做了归并,例如Baldwin根据边界侵蚀程度,从边界清晰到边界几乎无法辨认将撞击坑分为5类^[49];英国天文学家Fieder以月球地质学为基础提出的分类法把撞击坑分成13种,月面环形构造分成23种^[50];Wood从形态学和形态测量学角度出发,在一级侵蚀程度下将撞击坑以典型撞击坑命名分为5类^[51];根据撞击坑形态,Heiken将撞击坑分为碗型的小型撞击坑、具中央峰的较大型撞击坑、具多环盆地的巨型撞击坑三类^[52];Stöffler等根据撞击坑形态特征将撞击坑分为简单撞击坑、复杂撞击坑和撞击盆地三大类^[53];何姝珩等根据撞击坑形态特征总结概括出7种撞击坑形态类型^[54]。目前最常用的是Stöffler等提出的分类方案,主要考虑撞击坑的边界侵蚀程度、形态和规模的组合等角度进行划分。

2.3.2 撞击坑的识别方法 撞击坑的识别提取方法可分为人工目视识别和自动提取两大类。其中前者比较简单、结果相对准确,但如要研究撞击坑密度等时需要大量的撞击坑,人工提取方法费时费力^[55]。随着计算机技术的飞速发展,撞击坑的识别进入了新阶段——即自动化和智能化识别,通过对现有方法的分析总结,对月球撞击坑识别的方法大致可以归纳为4类:①基于特征匹配的方法。张锋等^[56]提出了利用月表环形构造形态特征等参数自动化识别撞击坑;Urbach和Stepinski^[57]在高分辨率的影像上通过图像预处理提取撞击坑的亮区和暗区,再通过匹配成对的亮区和暗区并结合决策分类树最终确定撞击坑。②基于图像变换与分割的方法。Sawabe^[58]等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;岳宗玉^[59]采用面向对象的方法提取月表撞击坑,选取特征值“相邻像元对比度”和“长/宽比”对撞击坑加以识别;Ding^[60]等提出了基于区域生长的方法用于月球撞击坑的自动识别。③基于机器学习。Burl等^[61]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。④基于地理信息融合的方法。Wan等采用DEM填洼、面向对象分类、DEM填洼的面向对象分类三种自动提取方法在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^[62];Luo等^[63]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;Bue和Stepinski^[64]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;Bandeira等^[65]采用形态和纹理特征对亚公里级别的撞击坑进行识别;同时,以火星撞击坑为例探讨的自动提取方法,对于月球撞击坑提取也有一定的借鉴和参考意义。例如Kim等^[66]以火星为例提出了一种撞击坑自动提取的系统方法,该方法使用模式匹配的寻找撞击坑最佳的拟合椭圆或圆,再基于神经网络的识别方案,剔除错误的撞击坑;Stepinski^[67]融合了基于规则和机器学习的算法提出了一种自动提取撞击坑的方法,对火星上六个地区进行了实证研究,取得了较好的效果。

可以看出,随着月球探测数据源精度的不断提高,识别撞击坑的自动化和智能化方法的不断完善,被识别出的月表撞击坑数量越来越庞大。经统计,月球表面直径大于1 km的撞击坑约有3万多个^[14];直径大于500 m的撞击坑数量约为10万多个,可见撞击坑小于1 km的小型撞击坑在月球表面分布非常密集。且随着探测数据源精度的不断精细化,可识别出的撞击坑数量也会逐渐增加,这将为研究月表撞击坑空间分布特征、撞击坑的演化过程、月表的形貌演化过程提供非常有力的佐证。

2.3.3 撞击坑的形态特征表达 除利用遥感和DEM数据获得撞击坑的轮廓外,在复杂撞击坑的形态指标及表达上也有一定的进展。如Lunar and Planetary Institute^[68]公布了有名

称的月球撞击坑，共9003个，列举了包括位置、大小、形状等多个属性指标，这为研究月球撞击坑复杂形态特征提供了基础；Grosse等^[69]利用DEM计算的坡度、曲率等形态特征参数，包括大小、形状、坡度、方位、中央峰和火山口形态等，建立了火山口的描述方法，基于大量火山口的平面和剖面形态特征的差异性和相似性，设计归纳了利用上述指标刻画火山口的椭圆度和不规则度的测量方法（图1）。因火山口和撞击坑在形态等多个特征非常相似，故该研究为月球表面撞击坑复杂形态的多指标综合描述和表达提供了思路。侯琳^[70]基于上述火山口的形态描述方法，利用坑深与坑口直径比、坑底和坑口直径比对月表36个撞击坑的形态特征进行了分析，初步归纳出这些撞击坑的复杂形态分布模式等。

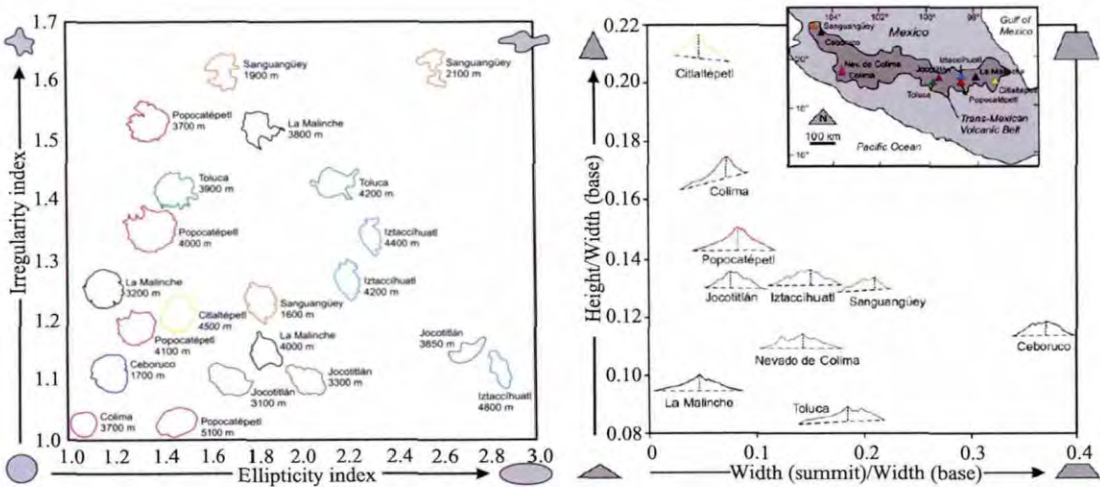


图1 基于超样本统计的火山口平面及剖面形貌特征分异规律^[69]

Fig. 1 Crater plane and profile morphologic characteristics based on the super sample statistics

基于火山口和撞击坑的平面和剖面形态的超样本统计分析，可以将识别的大量撞击坑进行分类，建立不同平面和剖面类型撞击坑的形态特征与其演化历史的相互关系，研究撞击坑边界的清晰度、有无辐射纹、主撞击坑和次级撞击坑的数量和分布关系、坑深比等特征，将对揭示月表的演化过程具有重要意义。

2.4 基于撞击坑的月表演化特征分析

除了对撞击坑的轮廓进行识别之外，利用撞击坑的形貌特征可对月表的相对年龄进行推测。月球表面的撞击是杂乱无章、随机分布的，月表暴露的时间越长，受撞击的机会就越大，撞击坑就会越多。该理论依据认为月球表面的撞击坑的数量一般情况下是与其地质年龄成正比的，月表的年龄越老，撞击坑的数量就越多^[71-73]。基于此，研究者们提出了撞击坑直径频率分布定年方法，简称撞击坑统计定年法，该方法是通过月球表面单位面积上不同直径的撞击坑数量进行统计，以推断月表相对年龄。

除了基于撞击坑直径累积频率进行相对定年外，研究者们还进行月表撞击和演化过程的研究。如Florensky等^[74]发现撞击坑形态和尺寸之间存在关系，以此分析撞击坑结构的时空序列；Moutsoula和Preka^[75,76]将撞击坑的深度和直径的比值作为撞击坑形态分类的标准，按照比值的区间范围对中小型撞击坑的形态进行了描述；Grieve等^[77]用撞击坑的时空分布来研究撞击坑的撞击过程；Craddock等^[78]根据撞击坑的形态和空间分布推测月表地质事件的相对先后顺序；Aittola等^[79]研究多边形撞击坑分布是否和撞击坑的结构及

行星表面的构造有相关性;张新琴等^[44]利用撞击坑的直径和撞击坑数目、深度的关系推算得到撞击坑动力模型;赵健楠等^[80]归纳了当前国际上对月表年龄的四种研究方法,即地层叠覆与切割关系、月球岩石样品的放射性同位素定年、撞击坑遭受侵蚀状况和撞击坑直径频率分布定年,并利用后者对虹湾地区不同地质单元进行了年龄推断。同时,辐射纹的有无和相互叠置关系也是判断撞击坑相对年龄的一种方法^[81]。

利用撞击坑直径频率分布定年方法对于大区域的研究是相对较可信的。但如今随着探测器获得数据的精度越来越高,一些直径较小的撞击坑清晰可辨。最近通过对月球和火星等的进一步研究表明:通常直径较小的撞击体可能主要是次级撞击坑^[82-84],因为有些次级撞击坑在时间和空间上成簇出现,且较难区别这些次级撞击坑是由哪次撞击作用形成的,故判断这些直径较小的撞击坑的年龄比较困难。为了解主撞击坑产生次级撞击坑的比率和提高利用小撞击坑估计小区域年龄的精度,Bart等^[85]根据次级撞击坑和主撞击坑在形状、坑深、撞击坑周围砾块的差异,尝试了区分次级撞击坑与主撞击坑的方法。但该方法在范围广、撞击坑的形态和规模差异大、数量多时也无法取得较好效果。

3 月表形貌研究展望

对全月球形貌特征的研究在地形塑造及表达、宏观形态特征分析、撞击坑的识别与分类及空间分异等方面已取得相当进展,这些研究有力地推动了月球科学的发展,同时,基于形貌特征的相似性,开展以地球为基准的比较行星学研究也开展了一些探索研究,这将大大地推动人类的太空、深空探测研究。

纵观对月球的研究进展及现状,发现不论从宏观特征的表征及塑造、不同形态和大小的撞击坑的识别和分类研究、月壤厚度的估算、月球资源的估算等多个方面来看,对月球科学的研究仍有诸多方面仍需深入开展,下面将从几个方面进行分析。

3.1 全月球撞击坑属性特征描述指标的构建、划分及识别

目前的研究集中在利用遥感影像和DEM的特征进行单个撞击坑形态大致轮廓的识别上,对于复杂撞击坑的形貌特征,包括坑内外特征以及辐射纹等的描述及分析相对较少,没有建立描述复杂撞击坑的指标体系,也没有建立完备的全月球撞击坑数据库;基于撞击坑形态特征区分主撞击坑和次级撞击坑的研究相对较少,仅有利用分布方向、密度和形态等特征判断次级撞击坑的探讨亟需进行大量试验。

因此,需要构建最完备的全月球撞击坑数据库,建立描述撞击坑空间位置、形态、规模等多指标表达和属性,研究主撞击坑和次级撞击坑的区分方法,构建可表征撞击坑演化历史的形貌特征表达范式。

3.2 全月球撞击坑分布特征及规律的研究

目前几个国际组织公布有名称的撞击坑数量相对较少,仅利用这些撞击坑数据很难完全反映全月球撞击坑的分布特征。因此,亟需在识别和构建全月球撞击坑数据库的基础上,分析撞击坑的密度、形态与规模等特征,提出可描述月球撞击坑复杂形态特征的范式,并进行不同级别撞击坑的聚类 and 随机性等的研究,以揭示全月球撞击坑的空间分异规律。

图2展示了基于嫦娥一号(120 m)和二号影像(50 m)数据,采用人工智能化方法获得的全月球直接大于500 m的撞击坑共计106030个。按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、大环状平原型、中等凹坑平原型、小规模碗型、微状酒窝型等六大类。可以看出,不同类型的撞击坑在月球表面的分布存

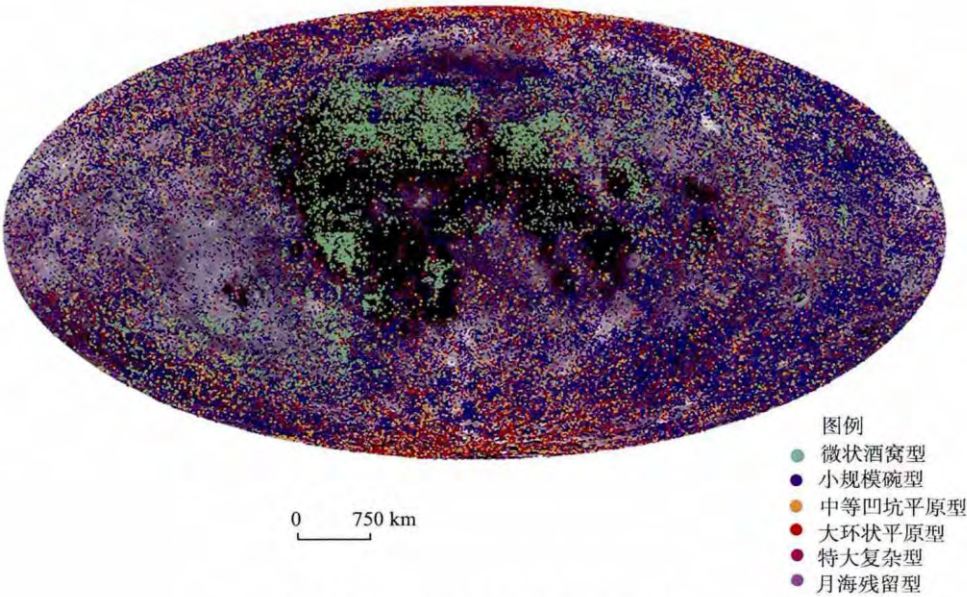


图2 全月球不同类型撞击坑分布图
Fig. 2 Distribution on different types of craters all over the lunar face

在很大的差异。经计算，撞击坑的分布面积达到月球表面及的40%左右，其中全月球撞击坑的累积面积约是月球表面积的3.32倍。随着直径的增加，撞击坑数量显著减少，即撞击坑的数量与其直径存在较强的反向相关关系，反映了月球表面小型撞击事件的发生几率远远大于大型撞击事件的发生概率，小规模碗型撞击坑在全月球各类型撞击坑中数量占绝对优势，这与欧阳自远等^[14]在单位月面上对环形坑的数量与直径的关系研究结果相符合。

3.3 全月球地形地貌特征分区及演化过程的探讨

目前利用遥感影像和DEM对全月球总体地貌特征进行了定量分析，但对于全月球地形地貌特征的分区研究相对较少，部分研究集中在典型示范区地质单元划分上。因全月球地形地貌差异很大，亟需利用多源数据进行全月球地貌单元划分方法的探索研究。借鉴陆地地貌的分区划分方法，基于全月球多源DEM数据获得的多种地形指标特征，包括起伏度、坡度、粗糙度等，以及多源遥感影像的色调、纹理、结构等，研究全月球的地形地貌分区划分的方法，并获得全月球多级地貌分区图。

在全月球地貌分区的基础上，基于撞击坑数据、地貌差异，分析全月球及不同分区的地貌空间分异特征。同时在经典撞击坑直径频率分布定年的基础上，根据撞击坑形态特征指标综合判断撞击坑相对形成年龄，研究后期撞击作用对已有坑的改造程度，探讨月球的演化过程及机理。基于地球地貌的形态和成因特征，研究月球形貌特征的空间分布格局，编制全月球形貌特征图集，反映全月球的宏观形貌特征及现状，揭示月球的演化历史。

由此可见，对月球的探测和研究有诸多的科学问题仍然等待着人类去探索，这将大大推动人类认识地球、认识月球和外太空，在中国大力推进探月及深空的战略进程中，对月球科学和比较行星学的研究必将迈上一个新的台阶。

参考文献(References)

- [1] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. 地球科学进展, 2004, 19(3): 351-358. [OuYang Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(3): 351-358.]
- [2] 熊盛青. 月球探测与研究进展. 国土资源遥感, 2009, 21(4): 1-7. [Xiong Shengqing. A review of lunar exploration and study. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, 21(4): 1-7.]
- [3] Li C L, Liu J J, Ren X, et al. The global image of the Moon obtained by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53 (8): 1091-1102.
- [4] 陈俊勇, 章传银, 党亚民. 月球航天探测和月球测绘. 测绘学报, 2005, 34(3): 189-195. [Chen Junyong, Zhang Chuanyin, Dang Yamin. Lunar spatial exploration, surveying and mapping. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34 (3): 189-195.]
- [5] 邓连印, 崔乃刚. 月球探测发展历程及启示. 哈尔滨工业大学学报: 社会科学版, 2008, 10 (3): 14-19. [Deng Lianyin, Cui Naigang. The development and enlightenment of lunar exploration. *Journal of Harbin Institute of Technology: Social Sciences Edition*, 2008, 10(3): 14-19.]
- [6] Chabot N L, Hoppa G V, Strom R G. Analysis of lunar lineaments: far side and polar mapping. *Icarus*, 2000, 147(1): 301-308.
- [7] O'Keefe J A, Lowman Jr P D. Tektites as a guide to the structure of the Moon. *Tectonophysics*, 1965, 2(4): 319-332
- [8] 甘甫平, 于艳梅, 闫柏琨. 月表形貌格局和物源特征的耦合性初步研究. 国土资源遥感, 2009, 21(4): 14-18. [Gan Fuping, Yu Yanmei, Yan Baikun. A primary study of the relationship between Lunar surface topography and physiognomy and geological information coupling. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2009, 21(4): 14-18.]
- [9] 王翔, 陈建平, 许延波, 等. 基于嫦娥数据的月球虹湾区域 TiO_2 、 MgO 含量反演. 地质前缘, 2012, 19(6): 28-36. [Wang Xiang, Chen Jianping, Xu Yanbo, et al. Inversion of contents of TiO_2 and MgO in Sinus Iridum area of lunar surface based on Chang'E data. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 28-36.]
- [10] Wilhelms D E, Oberbeck V R, Aggarwal H R. Size-frequency distributions of primary and secondary lunar impact craters. In: *Lunar and Planetary Science Conference, 9th, Houston, Tex., March 13-17, 1978, Proceedings. Volume 3. (A79-39253 16-91)* New York: Pergamon Press, Incorporation, 1978: 3735-3762.
- [11] Epp C D, Robertson E A, Brady T. Autonomous landing and hazard avoidance technology. *IEEE Aerospace Conference*, 2008.
- [12] 孟治国, 陈圣波, 刘财, 等. 非均匀月壤介质的被动微波辐射传输模拟. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38 (6): 1070-1074. [Meng Zhiguo, Chen Shengbo, Liu Cai, et al. Simulation on passive microwave radiative transfer in inhomogeneous lunar regolith. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38 (6): 1070-1074.]
- [13] Oberbeck V R, Quaide W L. Genetic implication of lunar regolith thickness variations. *Icarus*, 1968, 9(1-3): 446-465.
- [14] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005. [OuYang Ziyuan. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.]
- [15] 程维明, 周成虎, 柴慧霞, 等. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析. 地球信息科学学报, 2009, 11(6): 725-736. [Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Chai Huixia, et al. Quantitative extraction and analysis of basic morphological types of land geomorphology in China. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(6): 725-736.]
- [16] 欧阳自远. 月球探测的进展与中国的月球探测. 地质科技情报, 2004, 23(4): 1-5. [Ouyang Ziyuan. International lunar exploration progress and Chinese lunar exploration. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 1-5.]
- [17] E. A. 金. 宇宙地质学概论. 王道德, 谢先德, 曹鉴秋, 译. 北京: 科学出版社, 1983. [King E A. *Space Geology: An Introduction*. Translated by Wang Daode, Xie Xiande, Cao Jianqiu. Beijing: Science Press, 1983.]
- [18] Barabashov N P, Mikhailov A A, Lipskii Iu N. *Atlas Obratnoi Storony Luny*. Moskva: Izd-vo-Akademii Nauk SSSR, 1960.
- [19] Stooke P J. *The International Atlas of Lunar Exploration*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [20] Lewis H A G. *The Times Atlas of the Moon*. London: Times Newspapers, 1969.
- [21] Bowker D E, Hughes J K. *Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971.
- [22] Eliason E, Isbell C, Lee E, et al. *The Clementine UVVIS Global Lunar Mosaic*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999.
- [23] Rosiek M R, Kirk R, Howington-Kraus E. Color-coded topography and shaded relief maps of the lunar hemispheres. 33rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [24] Bussey B, Spudis P. *The Clementine Atlas of the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [25] Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. Completion of the Unified Lunar Control Network 2005 and Topographic model. 37th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2006.
- [26] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the Moon from the Clementine Lidar. *Journal of Geophysi-*

- cal Research, 1997, 102(E1):1591-1611.
- [27] Zuber M T, Smith D E, Lemoine F G, et al. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission. *Science*, 1994, 266(5192):1839-1843.
- [28] Ping J S, Heki K, Matsumoto K, et al. A degree 180 spherical harmonic model for the lunar topography. *Advance in Space Research*, 2003, 31(11): 2377-2382.
- [29] Margot J L, Campbell D B, Jurgens R F, et al. The topography of Tycho crater. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(E5): 11875-11882.
- [30] Margot J L, Campbell D B, Jurgens R F, et al. Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap locations. *Science*, 1999, 284(5420): 1658-1660.
- [31] Ping J S, Huang Q, Yan J G, et al. Lunar topographic model CLTM-s01 from Chang'E-1 laser altimeter. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2009, 52(7): 1105-1114.
- [32] Li C L, Ren X, Liu J J, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(11): 1582-1593.
- [33] Dong Y F, Sun Y K, Tang Z S. Interactive visualization of 3D lunar model with texture and labels, using Chang'E-1 data. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, 56(10): 2002-2008.
- [34] Google. <http://www.google.com/moon/>.
- [35] 葛之江, 殷礼明, 林宗坚. 月球遥感立体测绘技术的发展. *航天返回与遥感*, 2005, 26(2): 11-21. [Ge Zhijiang, Yin Liming, Lin Zongjian. Status and trend of development of lunar topography surveying. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(2): 11-21.]
- [36] Miyamoto S. Morphological study of the lunar crust. *Icarus*, 1968, 9(1):373-390.
- [37] Cameron A G W. The impact theory for origin of the moon. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1986: 579-608.
- [38] Hawke B R, Blewett D T, Lucey P G, et al. The origin of lunar crater rays. *Icarus*, 2004, 170(1): 1-16.
- [39] United States Geological Survey. <http://planetarynames.wr.usgs.gov/>.
- [40] Rodionova J F. The morphology of the lunar surface parts in the region of work of the mobile geological laboratory vehicle in Mare Imbrium. *Missions, Technologies, and Design of Planetary Mobile Vehicles*, 1993, 1: 161-165.
- [41] Ronca L B. Meteoritic impact and Volcanism. *Icarus*, 1966, 5(1): 515-520.
- [42] Cook A C, Spudis P D, Robinson M S, et al. Lunar topography and basins mapped using a Clementine stereo digital elevation model. *Lunar and planetary science*, 2002, 33: 1281-1282.
- [43] 樊世超, 贾阳, 向树红, 等. 月面地形地貌环境模拟初步研究. *航天器环境工程*, 2007, 24(1): 15-20. [Fan Shichao, Jia Yang, Xiang Shuhong, et al. A preliminary study on simulation of lunar surface terrain. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(1): 15-20.]
- [44] 张伍, 党兆龙, 贾阳. 月面数字地形构造方法研究. *航天器环境工程*, 2008, 25(4): 301-305. [Zhang Wu, Dang Zhao-long, Jia Yang. Constructing methods for lunar digital terrain. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(4): 301-305.]
- [45] 周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取. *科学通报*, 2011, 56(1): 18-26. [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. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 18-26.]
- [46] 金亚秋, 法文哲, 徐丰. 月球表面微波主动被动遥感的建模模拟与反演. *遥感技术与应用*, 2007, 22(2): 129-134. [Jin Yaqiu, Fa Wenzhe, Xu Feng. Modeling simulation and inversion for microwave active and passive remote sensing of the lunar surface. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(2): 129-134.]
- [47] 法文哲, 金亚秋. 月球表面月壤中³He含量分布的定量估算. *中国科学: 地球科学*, 2008, 38(2): 167-176. [Fa Wenzhe, Jin Yaqiu. Quantitative estimation of distribution of ³He content in the soil on the surface of the Moon. *Science China: Earth Sciences*, 2008, 38(2): 167-176.]
- [48] Lucey P G. Mineral maps of the moon. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(8):1-4.
- [49] Baldwin R B. *The Face of the Moon*. Chicago: University of Chicago Press, 1949.
- [50] Fieder G. *Lunar Geology*. DuFour Editions: Chester Springs, 1967.
- [51] Wood C A, Anderson L. New morphometric data for fresh lunar craters. In: *Lunar and Planetary Science Conference*, 9th, Houston, Tex., March 13-17, 1978, Proceedings. (A79-39253 16-91) New York, Pergamon Press, Inc., 1978: 3669-3689.
- [52] Heiken G H, Vaniman D T, Frend B M. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 62-63.
- [53] Stöffler D, Ryder G, Ivanov B A, et al. Cratering history and lunar chronology. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 519-596.
- [54] 何姝珺, 陈建平, 李珂, 等. 月表典型区撞击坑形态分类及分布特征. *地学前缘*, 2012, 19(6): 83-89. [He Shujun, Chen

- Jianping, Li Ke, et al. The morphological classification and distribution characteristics of the craters in the LQ-4 area. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 83-89.]
- [55] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection and classification of lunar craters using multiple approaches. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 21-27.
- [56] 张锋, 邹永廖, 郑永春, 等. 月表撞击坑自动识别与提取的新方法及其应用. *地学前缘*, 2012, 19(6): 118-127. [Zhang Feng, Zou Yongliao, Zheng Yongchun, et al. A new automated approach to detecting and extracting lunar craters and its application. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 118-127.]
- [57] Urbach E R, Stepinski T F. Automatic detection of sub-km craters in high resolution planetary images. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(7): 880-887.
- [58] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automatic crater detection algorithm for the lunar surface using multiple approaches. *Journal of Remote Sensing Society of Japan*, 2005, 25(2): 157-168.
- [59] 岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国. 应用面向对象分类方法对月球撞击坑进行自动识别. *科学通报*, 2008, 53(22): 2809-2813. [Yue Zongyu, Liu Jianzhong, Wu Ganguo. Object-oriented classification method to automatically identify impact craters of the moon. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(22): 2809-2813.]
- [60] Ding M, Cao Y F, Wu Q X. A method of craters detection from the surface imagery of moon. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 1243-1248.
- [61] Burl M C, Stough T, Colwell W, et al. Automated detection of craters and other geological features. In: *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i-SAIRAS 2001*, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, June 18-22, 2001.
- [62] Wan C, Cheng W M, Zhou Z P, et al. Automatic extraction of lunar impact craters from Chang'E-1 satellite photographs. *Science China, Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55(1): 162-169.
- [63] Luo L, Mu L L, Wang X Y, et al. Global detection of large lunar craters based on the CE-1 digital elevation model. *Earth Science Frontiers*, 2013, 7(4): 456-464.
- [64] Bue B D, Stepinski T F. Machine detection of Martian impact craters from digital topography data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45: 265-274.
- [65] Bandeira L, Ding W, Stepinski T F. Detection of sub-kilometer craters in high resolution planetary images using shape and texture features. *Advances in Space Research*, 2012, 49: 64-74.
- [66] Kim J R, Muller J P, et al. Automated crater detection, a new tool for mars cartography and chronology. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(10): 1205-1217.
- [67] Stepinski T F. Robust automated identification of Martian impact craters. *Lunar and Planetary Science*, 2007, 38: 1202-1203.
- [68] Lunar and Planetary Institute. <http://www.lpi.usra.edu/lunar/surface/>.
- [69] Grosse P, van Wyk de V B, Euillades P A, et al. Systematic morphometric characterization of volcanic edifices using digital elevation models. *Geomorphology*, 2012, 136(1): 114-131.
- [70] 侯琳. 月球撞击坑空间分布及形貌特征的量化描述. 吉林: 东北师范大学硕士学位论文, 2013. [Hou Lin. Moon craters spatial distribution and morphology of the quantitative description. Jilin: Master Dissertation of Northeast Normal University, 2013.]
- [71] Young J. A statistical investigation of the diameters and distribution of lunar craters. *The Journal of the British Astronomical Association*, 1940, 50(9): 309-326.
- [72] Neukum G, Koenig B, Arkani-Hamed J. A study of lunar impact crater size-distributions. *Moon*, 1975, 12(2): 201-229.
- [73] Neukum G, Ivanov B A. Crater size distributions and impact probabilities on earth from lunar, terrestrial planets, and asteroid cratering data. In: Gehrels T, Matthews M S, Schumann A M. *Hazards Due to Comets and Asteroids*, Arizona: University of Arizona Press, Tucson, 1994: 359-416.
- [74] Florensky C P, Basilevsky A T, Grebennik N N. The relationship between lunar crater morphology and crater size. *The Moon*, 1976, (16): 59-70.
- [75] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with small depth/diameter ratio I. *Earth, Moon and Planets*, 1979, 21(3): 299-305.
- [76] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with small depth/diameter ratio II. *Earth, Moon and Planets*, 1980, 23(1): 113-126.
- [77] Grieve R A f, Pesoner L J. Terrestrial impact craters: Their spatial and temporal distribution and impacting bodies. *Earth, Moon and Planets*, 1996, (72): 357-376.
- [78] Craddock R A, Maxwell T A, Howard A D. Crater morphometry and modification in the Sinus Sabaeus and Margaritifer Sinus regions of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(E6): 13321-13340.

- [79] Aittola M, Ohman T, Leitner J J, et al. The characteristics of polygonal impact craters on Venus. *Earth Moon Planet*, 2007, 10(1-2): 41-53.
- [80] 赵健楠, 黄俊, 肖龙, 等. 撞击坑统计定年法及对月球虹湾地区的定年结果. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2013, 38(2): 351-360. [Zhao Jiannan, Huang Jun, Xiao Long, et al. Crater size-frequency distribution measurements and age determination of Sinus Iridum. *Earth Science-Journal of China University of Geoscience*, 2013, 38(2): 351-360.]
- [81] Bart G D. Lunar surface geology from analysis of impact craters and their ejecta. Arizona: Doctoral Thesis of the University of Arizona, 2007.
- [82] Shoemaker E M. Preliminary analysis of the fine structure of the lunar surface in Mare Cognitum. *The Nature of the Lunar Surface*, 1965, 1: 23.
- [83] McEwen A S, Preblich B S, Turtle E P, et al. The rayed crater Zunil and interpretations of small impact craters on Mars. *Icarus*, 2005, 176(2): 351-381.
- [84] McEwen A S, Bierhaus E B. The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, 34(1): 535-567.
- [85] Bart G D, Melosh H J. Distributions of boulders ejected from lunar craters. *Icarus*, 2010, 209(2): 337-357.

Analysis on research progress and tendency of lunar morphological characteristics

CHENG Weiming¹, WANG Jiao^{1,2}, ZHOU Chenghu¹

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

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

Abstract: The study on lunar topography and geomorphology is one of the key tasks of the lunar exploration program, which are essential to expanding understanding of lunar surface. The lunar topography research also had a profound effect on other studies such as the lunar rock formations, the estimation of relative lunar age, the correction of landing sites of detectors, the recovery of the thickness of lunar soil, and the evolution history of the moon.

This paper reviewed the research of lunar surface morphology from the following four aspects: (1) the formation and visualization of lunar topography and geomorphology; (2) the macroscopic analysis and quantitative characterization of lunar topography and geomorphology; (3) the detection, classification and spatial analysis of lunar impact craters; (4) the deduction of lunar relative age based on lunar impact craters. Among the above mentioned four aspects, the emphasis was been placed on the research of lunar impact craters. Finally, we discussed the development of lunar topography and geomorphology.

In the future, the complete lunar impact crater database, including multi index, such as spatial position, morphology, shape, size and ray etc. will be built; methods on how to distinguish main crater and secondary craters need to be strengthened, and thus an expression paradigm for morphological characteristics of impact craters also need to be built to understand and estimate their evolutionary history. Based on multi-sources RS and DEM data, a topographic regionalization map needs to be finished by means of many topographic index and imagery characteristics. Based on the database, the spatial distribution of lunar crater, the lunar evolution and the study of comparative planetology based on lunar topography and geomorphology will be the hot point to be researched.

Key words: lunar topography; impact crater; characteristics; lunar science; comparative planetology