

中国月球地形制图研究进展

曾兴国, 左维, 李春来, 刘建军, 任鑫, 严韦, 刘宇轩, 高兴烨

引用本文:

曾兴国, 左维, 李春来, 刘建军, 任鑫, 严韦, 刘宇轩, 高兴烨. 中国月球地形制图研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 570–578.

ZENG Xingguo, ZUO Wei, LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, YAN Wei, LIU Yuxuan, GAO Xingye. Review on Progress of Lunar Topographic Mapping in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 570–578.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

利用“计算区”进行建筑物短边结构识别和渐进式化简

Recognition and Progressive Simplification of Short-Edge Structure of Buildings Using Calculation Regions

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1782–1790 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200698>

川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

海底地形高次项对海面重力信息影响分析

Influence Analysis of High-order Seafloor Topography on Sea Surface Gravity Information

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1328–1335 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190192>

利用GACOS辅助下InSAR Stacking对金沙江流域进行滑坡监测

Landslide Detection of the Jinsha River Region Using GACOS Assisted InSAR Stacking

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1649–1657 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200675>

四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测

Detection and Monitoring of Potential Landslides Along Minjiang River Valley in Maoxian County, Sichuan Using Radar Remote Sensing

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1529–1537 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210367>



中国月球地形制图研究进展

曾兴国^{1,2} 左维^{1,2} 李春来^{1,2} 刘建军^{1,2} 任鑫^{1,2}
严韦^{1,2} 刘宇轩^{1,2} 高兴焯^{1,2}

1 中国科学院国家天文台,北京,100101

2 中国科学院月球与深空探测重点实验室,北京,100101

摘要:月球地形制图是了解月球形貌构造,开展月球工程探测及科学研究的基础性工作。自从发射嫦娥一号月球探测卫星以来,中国正式步入月球与行星制图研究的行列。首先,回顾了国内外月球探测与地形制图的基本情况;然后,结合中国嫦娥工程中在月球地形制图领域的研究工作,从月球地形制图标准体系建设、月球地形制图产品研制、月球地形制图理论及技术研究3个方面介绍了中国在月球地形制图领域开展的研究进展和取得的初步成果;最后,总结了当前月球地形制图研究领域中存在的关键理论和技术难题,并探讨了下一步亟需开展的研究工作,可为中国未来的月球地形制图研究提供借鉴。

关键词:月球与行星制图;地形图;月球影像;嫦娥工程

中图分类号:P283

文献标志码:A

月球是离地球最近的大型天体,在古代,人类只能通过肉眼观测月球,基于想象描摹月球形貌。直到近代望远镜发明之后,伽利略首次利用望远镜陆续将月球正面的坑、山、海等地物清晰地描绘下来,并制作了大小为8 cm的月球形貌草图,揭开了人类利用现代科技手段开展月球地形制图的序幕^[1]。

月球地形图是月球表面的地理位置、形状和起伏形态在水平面上的投影图,是月球地物形态和地貌的统称。真正意义上的月球地形制图离不开近现代人类开展的月球探测计划。1959年,苏联发射月球3号(Luna 3),成功飞越月球表面,首次获取月球背面影像,在60~70年代又陆续发射了多颗卫星。与此同时,美国则发射了徘徊者、勘测者、月球轨道器和阿波罗系列探测器,实现了绕月探测、着陆探测、采样返回及载人登月等划时代的任务,获取了大量的形貌数据^[2-5]。自美国1994年发射克莱门汀探测器以来,月球探测掀起了新的高潮,各国陆续发射了月球勘探者号^[6]、智慧1号^[7]、月亮女神号^[8]、嫦娥一/二/三/四号^[9-15]、月船一号/二号^[16-17]、月球勘察轨道器(lunar reconnaissance orbiter, LRO)^[18]、圣杯等探

器^[19],积累了海量的高分辨率月球形貌数据^[6-25]。其中,美国LRO携带的窄轨相机获取的影像数据分辨率为0.5 m,宽轨相机获取的影像分辨率为100 m^[18];由日本月亮女神号上搭载的地形相机获取的镶嵌影像数据制作的地形产品分辨率达到7.4 m^[20]。月球形貌探测数据的获取为开展月球地形制图研究提供了基础数据。许多国外的制图学家据此开展月球地形制图及相关研究,例如根据阿波罗月球数据,文献[26]制作了早期的月球形貌地图集;文献[27]根据阿波罗17号的着陆区数据制作了相应的地形图;文献[28-29]根据克莱门汀计划获取的数据制作了克莱门汀月球形貌地图集;文献[30]根据Kaguya计划制作了月球全月地形地貌地图;文献[31-32]基于Lunar Orbiter数据制作了月球高分辨率数字影像图集。

中国的月球地形制图研究是随着嫦娥月球探测工程的开展而发展起来的。一方面是为了满足月球探测任务中对着陆区域选取、探测器导航等工程任务的需要,另一方面则是服务于月球形貌、地质等科学研究,同时也为了促进中国月球探测数据和国外数据的应用共享。基于此,本文开展了详细的月球地形制图研究,对月球制图

收稿日期:2020-03-14

项目资助:国家科技重大专项探月工程(二期)。

第一作者:曾兴国,博士,主要从事月球与行星地形制图及可视化研究。zengxg@nao.cas.cn

通讯作者:李春来,研究员。licl@nao.cas.cn

标准编研、月球形貌地图产品研制、月球制图理论与技术研究等方面进行了具体论述。

1 标准体系研究进展

在开展嫦娥月球探测任务之初,中国国内在月球地形制图领域的研究还处于空白阶段。在实际的工作中,只能采用国外的月球探测数据,沿用国外的月球制图技术和相应标准,或者借鉴针对地球制图的技术和标准。随着 2007 年嫦娥一号的成功发射,国内学者开始利用嫦娥月球数据开展月球地形制图,并发现国外的月球制图标准或已有的地球制图的相关标准尚不能完全满足中国的月球地形制图工作需求。在概念基础层面,国内一直缺乏基本的月球形貌的相关中文术语,对于月球形貌的分类界定在国际上没有统一的标准,对于月球形貌的表达也缺乏相应的依据;在数据处理和制图技术层面,虽然国际上已有月面控制网等月球空间基础^[33-34],但由于缺乏与国外月球数据的空间数据转换标准,导致与国外数据进行数据融合存在一定的困难,同时由于嫦娥月球探测数据覆盖率全和分辨率高的特点,早期的国外标准也并不能完全满足对嫦娥数据的月球多尺度、高分辨率精细制图的需求。

制图标准的缺乏给中国的月球地形制图研究带来了较大的困难。为解决这一问题,在嫦娥月球探测工程项目和空间科学及其应用标准化技术委员会(空标委)的支持下,国内学者开展了具体的月球制图标准研究工作。在基础理论概念层面,文献[35-36]研究并制定了月球与行星科学及其应用术语,月球地形图要素分类、代码与图式等两项国家标准,解决了在月球地形制图领域缺乏科学术语、缺乏月球地形制图表达依据的问题;在数据处理和制图技术层面,文献[37-45]基于国内研究制定了月球空间坐标系、月球影像平面图制作规范等 9 项国家标准,解决了针对嫦娥月球数据处理及多尺度、高分辨率制图问题。

目前中国已经累计形成了 12 项月球与行星数据处理与制图领域的相关国家标准,初步建立了面向嫦娥月球数据的中国月球制图标准体系,有力地支持了中国的月球与深空探测工程任务,保障了后续的月球与行星科学研究。空标委组织武汉大学、信息工程大学、中国科学院地理科学与资源研究所等国内数十家制图研究相关单位专家进行评审和确认,通过评审成为国家标准

的有 11 项,剩下的一项标准月球中文地名与代码和还处于审批当中。

2 地图产品研制现状

2.1 图集产品

嫦娥一号至四号获取了丰富的月球全月和局部影像、地形数据。其中,嫦娥一号全月数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)数据分辨率为 120 m,相对定位优于 240 m,平面定位精度为 100 m~1.5 km^[9],全月数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据分辨率为 500 m,高程精度为 60 m,平面精度约为 445 m^[10];嫦娥二号全月 DOM 和 DEM 数据分辨率达到 7 m,全月地形产品的平面相对位置偏差的平均值为 5 m,标准差为 4 m,高程相对偏差的平均值为 2 m,标准差为 5 m^[11-12];嫦娥三号和嫦娥四号着陆区局部区域地形数据分辨率达到厘米级^[14-15]。利用这些数据,文献[46-50]设计制作了《嫦娥一号全月球影像图集》《嫦娥一号全月球地形图集》《嫦娥二号高分辨率月球影像图集》《嫦娥二号高分辨率月球虹湾地貌图集》《嫦娥三号着陆区地形地貌》共计 5 本月球形貌图集。

《嫦娥一号全月球影像图集》于 2010 年设计制作,采用数据为嫦娥一号全月 DOM 影像数据。该图集将全月球划分为 188 个图幅,分图幅进行详细形貌展示。

2012 年,李春来等^[47]利用嫦娥一号获取的全月 DEM 和等高线数据制作并发布了比例尺为 1:175 万的《嫦娥一号全月球地形图集》。该图集同样将全月球分为 188 个图幅,分幅图采用等高线表示地物的高程信息,采用假彩色晕渲图展现了月表的起伏状态。为了精细表现分幅图中主要地形特征,克服地球地形晕渲图色彩表达月球地形的缺陷,该图集根据月表高程的范围,将月球地形划分为深海、浅海、平原、丘陵、高山 5 种地貌类型进行高程(编码)设色,并对月海、撞击坑、月溪等 17 类主要地名和海拔最值进行了标注。受国际制图分会主席 Henrik 的邀请,在 2013 年第 26 届德累斯顿国际地图制图大会上,《嫦娥一号全月球地形图集》参与专业图集类评比,经过国际地图权威评审团综合评比,认为该图集实现了技术创新,精细地表达了月球地形,并荣获地图集专业评比第三名的殊荣。

2012 年,李春来等^[48]还利用嫦娥二号获取的 DOM 和 DEM 数据,设计制作了《嫦娥二号高分

分辨率月球影像图集》。该图集主要展示了月球表面虹湾区域典型形貌,以中国人名字命名的月球形貌和部分典型的月球形貌区域。

2014年,基于嫦娥二号虹湾地区的嫦娥二号DOM数据和DEM(逐像元匹配获取),李春来等^[49]设计制作了《嫦娥二号高分辨率月球虹湾形貌图集》。该图集采用晕渲图配合影像的展现形式表现虹湾地区,特别是该区域内嫦娥三号着陆区域周边的形貌特征。

2018年,基于嫦娥三号着陆区地形及影像数据,李春来等^[50]设计制作了《嫦娥三号着陆区地形地貌》。该图集从着陆区的选取、着陆区地形数据获取与处理、着陆区地形特征等方面详细展示了嫦娥三号着陆区域的形貌特征。

2.2 多媒体月图产品

在纸质版月球地图集的基础上,中国还制作了多种形式的多媒体月图产品,§2.1提到的月球形貌图集都已经进行了电子化。此外,中国还研制了二维、三维形式展现的在线交互式月球网络地图(底图采用嫦娥一号全月影像数据),访问网址为<http://moon.bao.ac.cn/moonGisMap.search>。针对近年来手机移动端浏览方式,曾兴国等^[51]研究了面向移动端的三维月球可视化方法,并制作了用于月球形貌地图展示的三维月图APP(底图采用嫦娥一号全月影像数据,月球地名参考文献^[47])。

2.3 月球仪

2010年,中国设计制作了直径分别为20 cm、32 cm和106 cm的月球仪,这些月球仪采用嫦娥一号DEM和DOM数据进行了融合,并利用特殊的地图制图技术对月表地形进行了立体增强,在光电技术支持下,以达到“远观月球起伏形态,近辨月表奇异形貌”的视觉效果。其中20 cm尺寸的月球仪在2011年第25届巴黎国际地图制图大会获得金奖。

3 制图理论与技术研究进展

3.1 月球地形制图要素及其符号化表达研究进展

月表没有大气、没有水系、不存在生物活动的迹象,在这种环境下形成的月球形貌体系虽然相对简单,但却有其特色,不能套用地球的形貌体系及其表达方法。早期月球及行星科学家通常按照月表的反射率将月球划分为高地和月海两种形貌,将反射率较高、起伏较大、海拔较高的区域称为月球高地,而将反射率较低、起伏平缓、

地势较低的区域称为月海。随着人类月球探测活动的推动,月球形貌研究的逐渐深入,国际上已经定义并归类的月球地貌形态包括月球山脊、月球山脉、月海等共18类^[47]。在此基础上,文献^[36]结合月球探测和科学研究对地形制图需要,对该体系进行了扩充,并重新按照空间定位基础、探测器及附属设施、自然地形要素、人工地形要素的方式对月球形貌体系进行了详细的梳理和定义,共总结出4个大类、12个中类、56个小类的月球常见形貌要素,即月球地形图要素分类、代码与图式国家标准。

在注记地名符号研究方面,鉴于国际天文联合会已经对月球的主要形貌进行了拉丁文的命名,文献^[47]研究了这些地名的中文译写规则,形成与拉丁文地名一一对应的月球中文地名体系,即月球中文地名与代码标准草案。围绕这些形貌要素、注记,文献^[47]主要从符号设计理念、符号样式、颜色设计等方面研究了月球形貌的地图表达方法。月球形貌要素符号的设计需要充分考虑月球自然条件特点,便于将符号与实际地物进行对应,同时还须区分与地球地貌的联系;在颜色设计方面,针对月球的二元形貌体系进行设色,文献^[47]在设计针对月表高程的设色时,采用由棕黄(暖色调)到深蓝(冷色调)的色带表示由高到低的月球高程,取得了良好的视觉效果。

3.2 月球多尺度地形制图研究

3.2.1 针对于全月制图的研究

嫦娥任务获取的立体影像数据和激光高度计数据都可以支持全月制图。月球全球制图技术的难点主要在于月球上高精度月面控制点较少,需要进行较多的影像几何处理、配准校正,同时开展全月平差以提高数据精度。在此方面,国内的许多学者都开展了针对性的研究。2008年,文献^[9-10]利用嫦娥一号立体影像数据进行图像拼接、几何校正、光度校正,制作得到中国首次月球探测工程全月球影像图,影像分辨率达120 m,同时利用嫦娥一号激光高度计数据进行全月球平差,制作了嫦娥一号全月球地形图,该图水平定位精度为445 m,高程精度为60 m;2010年,文献^[11]继续利用嫦娥二号立体影像数据,制作得到嫦娥二号全月球影像图和嫦娥二号全月球地形图,分辨率均达到7 m;文献^[52-56]利用嫦娥一号激光高度计数据,制作了相应的全月球DEM地形图。

3.2.2 针对于局部区域的高精度制图研究

嫦娥二号探测器利用立体相机在月球虹湾区域获取了 32 轨分辨率为 1.5 m 的立体影像数据,嫦娥三号搭载的降落相机、全景相机、地形地貌相机对嫦娥三号着陆点(19.51°W, 44.12°N)周边区域进行了高分辨率成像,同样嫦娥四号也利用相应的载荷获取了其着陆点周边区域(177.60°E, 45.44°S)高精度形貌数据,可以支持月表局部区域的高精度制图^[14-15]。对月表局部区域进行高分辨率制图技术的难点在于高精度影像的密集匹配、地形融合、地形恢复等,针对这些方面,文献[57-60]开展了针对性的研究。

利用上述数据和制图方法,文献[9-11]制作了月球虹湾区域高分辨率影像图。文献[14-15, 57]、文献[61-62]分别制作了嫦娥三号、嫦娥四号着陆区形貌地图;文献[60]通过融合中国嫦娥一号、日本月亮女神和美国 LRO 测高数据,显著提高了嫦娥五号预着陆区吕姆克山区域的 DEM 精度,开展了嫦娥五号预着陆区的地形制图工作。

3.3 月球地形可视化方法研究

相对于地球,月球表面纹理匮乏、地貌种类较少、地形要素较为单调,如何突出月球地形特征成为月球地形可视化的研究重点。针对此,许多学者主要从纹理融合、地形增强等方面开展了不同的研究。文献[63]提出了一种利用月表影像融合彩色晕渲的地形可视化方法,月表在可见光仍呈灰度影像,将彩色晕渲分解为色调-饱和度-亮度(hue-saturation-intensity, HSI)或 CMYK(cyan, magenta, yellow, black)彩色空间,再利用月球影像替换彩色空间中的部分通道,形成融合之后的地形可视化图像。融合之后得到的地形图可以展现具有晕渲的立体效果,又更能反映月球实际形貌特征。针对于大比例尺地形可视化,文献[64]研究提出了一种基于色差与地形同步渐变的地形增强可视化方法。该方法可以更好地突出月表局部区域的地形变化特征,尤其是在较小范围内的高程变化的细节。

4 亟待继续研究的问题

目前,中国在月球地形数据获取方面已取得巨大进展,然而对月球地形制图的研究却相对滞后,许多数据处于“测而不绘”的状态。为满足后续月球探测对于多尺度、高精度月球形貌地图

的需要,更好地支持全月球形貌相关研究,对于月球地形制图而言,目前还亟需继续研究以下问题:

1) 多源月球探测数据融合

目前,嫦娥月球数据与国外月球探测数据各具优势。嫦娥月球数据在全月表覆盖最全,整体精度较高;美国 LRO 等任务在局部月球区域有分辨率达到米级甚至精度更高的数据,而且其部分数据在获取时的太阳高度角较低,对于地形起伏较小的区域,成像质量更好。如果能将嫦娥数据与之进行融合,则可以得到分辨率更高、质量更好的数据。在进行嫦娥三号着陆探测任务时,有学者研究了多源月球数据影像拼接融合的问题^[14],但现有的方法只能做到半自动,即使利用算法可以进行大致几何定位和初步的光度融合,但精确的拼接融合和匀色需要大量的人工纠正处理工作。研究效率更高、成图效果更好的多源月球探测数据融合制图方法是一个亟待解决的问题。

2) 月球形貌要素定量指标体系与自动化提取

地球形貌体系不仅有定性的界定,也有定量的指标。相对来说,月球形貌体系虽然较为简单,也定性地界定了基础的月球形貌要素,但除了月球环形坑等形貌有了一些定量的指标体系,对于大多数形貌要素,并没有更加具体的定量指标。文献[65]基于影像分类的方法研究了月海与高地的划分,但这些研究仅仅是提取了部分月海和高地的边界,对于月海地貌和高地地貌如何划分的定性指标体系研究尚未明确。如何基于这些界定,提取量化的形貌指标,进而开展成体系的自动化的月球形貌要素的提取,制作内容更加丰富的月球形貌地图,也是月球地形制图的下一个研究目标。

3) 海量月球数据的自动化多尺度综合制图

月球探测获取了海量的月球探测数据,而针对于不同的用图需求,往往需要不同尺度的月球形貌地图。然而对于大多数的用图人员,如何从海量月球数据中筛选出合适的形貌数据,处理并制作所需地图并非易事。现有情况下,主要还是由专业的制图人员人工进行,效率较低。如何基于用图需求,提供服务式的数据筛选,并自动进行数据的几何、辐射、光谱处理得到满足所需的对应尺度的形貌地图,是月球地形制图的另一个研究难点。

5 结 语

月球与行星制图学是地图学在新时期同月球与深空探测研究紧密结合而形成的一个新的研究领域,而月球地形制图研究则是这一领域的第一步。本文对嫦娥工程中的月球地形制图研究情况进行了回顾,在此基础上,对现有的嫦娥月球形貌图研究的标准成果、制图产品成果、制图技术等进行了简要的梳理,并根据相应的研究分析,指出了目前中国月球形貌图制图研究中亟需继续研究的问题,可为未来的月球地形制图研究提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Schenk P M, Bussey D B J. Galileo Stereo Topography of the Lunar North Polar Region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): L23701
- [2] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- [3] Bowker D E, Hughes J K. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon[M]. Washington D C: Government Printing Office, 1970
- [4] Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao, Li Chunlai, et al. The Moon—An Outpost for Human Beings to Enter Deep Space[M]. Beijing: Science Press, 2002 (欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等. 月球——人类走进深空前哨站[M]. 北京: 科学出版社, 2002)
- [5] Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China 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)
- [6] Binder A B. Lunar Prospector: Overview[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1475-1476
- [7] Foing B H, Racca G D, Marini A, et al. SMART-1 Mission to the Moon: Technology and Science Goals[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 31(11): 2323-2333
- [8] Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 897-900
- [9] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. The Global Image of the Moon by the Chang'E-1: Data Processing and Lunar Cartography[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2010, 40(3): 294-306 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 294-306)
- [10] Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. Laser Altimetry Data of Chang'E-1 and the Global Lunar DEM Model[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2010, 40(3): 281-293 (李春来, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球DEM模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 281-293)
- [11] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. Lunar Global High-Precision Terrain Reconstruction Based on Chang'E-2 Stereo Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(4): 485-495 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(4): 485-495)
- [12] Ouyang Ziyuan. Chang'E-2 Preliminary Results[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(6): 391-395 (欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果[J]. 自然杂志, 2013, 35(6): 391-395)
- [13] Ouyang Ziyuan, Li Chunlai, Zou Yongliao, et al. The Primary Science Result from the Chang'E-1 Probe[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2010, 40(3): 261-280 (欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 261-280)
- [14] Li C L, Mu L L, Zou X D, et al. Analysis of the Geomorphology Surrounding the Chang'E-3 Landing Site[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1514-1529
- [15] Liu J J, Ren X, Yan W, et al. Descent Trajectory Reconstruction and Landing Site Positioning of Chang'E-4 on the Lunar Farside[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 4229
- [16] Goswami J N, Annadurai M. Chandrayaan-1 Mission to the Moon[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 63(11): 1215-1220
- [17] Sinha R K, Sivaprahasam V, Bhatt M, et al. Geological Characterization of Chandrayaan-2 Landing Site in the Southern High Latitudes of the Moon[J]. *Icarus*, 2020, 337: 113449
- [18] Vondrak R, Keller J, Chin G, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for Lunar Exploration and Science[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1): 7-22
- [19] Konopliv A S, Park R S, Yuan D N, et al. High-Resolution Lunar Gravity Fields from the GRAIL Primary and Extended Missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(5): 1452-1458
- [20] Isbell C, Gaddis L, Garcia P, et al. Kaguya Terrain Camera Mosaics[C]//Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands, Texas, USA, 2014
- [21] Liu Feng, Yan Qin, Gao Wujun. The Development

- of Lunar Exploration [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(4): 63-66 (刘峰, 燕琴, 高武俊. 月球探测的发展[J]. 测绘科学, 2004, 29(4): 63-66)
- [22] Chen Junyong. Topography Surveying and Geodesy on the Moon [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2004, 29(2): 1-5 (陈俊勇. 月球地形测绘和月球大地测量(1)[J]. 测绘科学, 2004, 29(2): 1-5)
- [23] Chen Junyong, Zhang Chuanyin, Dang Yamin. Lunar Spatial Exploration, Surveying and Mapping [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(3): 189-195 (陈俊勇, 章传银, 党亚民. 月球航天探测和月球测绘[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 189-195)
- [24] Ge Zhijiang, Yin Liming, Lin Zongjian. Development of Lunar Topography Surveying and Its Key Techniques [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(2): 67-74 (葛之江, 殷礼明, 林宗坚. 月球测图技术发展及其关键技术分析[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 67-74)
- [25] Li C L, Liu J J, Ren X, et al. The Chang'E 3 Mission Overview [J]. *Space Science Reviews*, 2015, 190(1): 85-101
- [26] Bowker D E, Hughes J K. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon[M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971
- [27] Tiernan M, Roth L, Thompson T W, et al. Lunar Cartography with the Apollo 17 Ase Radar Imagery [J]. *The Moon*, 1976, 15(1): 155-163
- [28] Kirk R L, Archinal B A, Gaddis L R, et al. Lunar Cartography: Progress in the 2000s and Prospects for the 2010s[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-489-2012
- [29] Bussey B, Spudis P. The Clementine Atlas of the Moon [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
- [30] Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Preliminary Results of Lunar Topography by KAGUYA-LALT Mission [J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 2009, 7(26): 23-25
- [31] Jeffrey J G, Rueb D, Cohen J, et al The Lunar Orbiter Photographic Atlas Digital Archive [C]// Lunar and Planetary Science XXXI, Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA, 2000
- [32] Byrne C J. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the near Side of the Moon[M]. London: Springer London, 2005
- [33] Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. A Report on the Unified Lunar Control Network 2005 and Lunar Topographic Model [C]// European Planetary Science Congress 2006, Berlin, Germany, 2006
- [34] Kong Xiangyuan, Zhang Songlin, Wei Erhu, et al. The Goddess of the Moon' Project with Lunar Geodesy(Selenodesy)[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(1): 117-120 (孔祥元, 张松林, 魏二虎, 等. “嫦娥”工程与月球测绘学[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(1): 117-120)
- [35] SAC/TC312. GB/T 30114.4-2014 Terminology for Space Science and Application—Part 4: Lunar and Planetary Science[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 30114.4-2014空间科学及其应用技术术语 第4部分:月球与行星科学[S]. 北京:中国标准出版社, 2014)
- [36] SAC/TC312. GB/T 37541-2019 Classification, Codes and Symbols for the Features of Lunar Topographic Map[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 37541-2019月球地形图要素分类、代码与图式[S]. 北京:中国标准出版社, 2019)
- [37] SAC/TC312. GB/T 30112-2013 The Lunar Coordinate System[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013 (全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 30112-2013 月球空间坐标系[S]. 北京:中国标准出版社, 2013)
- [38] SAC/TC312. GB/T 32521-2016 Subdivision and Numbering for the Lunar Primary Scale Topographic Maps[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 32521-2016 月球基本比例尺分幅和编号[S]. 北京:中国标准出版社, 2016)
- [39] SAC/TC312. GB/T 33990-2017 Inspection and Acceptance for Lunar Digital Map Quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 33990-2017 月球数字地图质量检查与验收[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [40] SAC/TC312. GB/T 33991-2017 Data Dictionary for Lunar Information Essentials [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 33991-2017 月球信息要素数据字典[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [41] SAC/TC312. GB/T 33996-2017 Hierarchy and Nomenclature of Lunar Exploration Data Products [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国

- 空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 33996-2017 月球探测数据产品分级与命名[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [42] SAC/TC312. GB/T 33997-2017 Specification of Lunar and Planetary Data Products Format [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 33997-2017 月球与行星数据产品格式规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [43] SAC/TC312. GB/T 33998-2017 Lunar Information Metadata [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 33998-2017 月球信息元数据[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [44] SAC/TC312. GB/T 34054-2017 Specifications for Lunar Image Plan Making [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 34054-2017 月球影像平面图制作规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [45] SAC/TC312. GB/T 34055-2017 Production Specifications of Lunar Digital Elevation Model [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017(全国空间科学及其应用标准化技术委员会. GB/T 34055-2017 月球数字高程模型数据制作规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2017)
- [46] Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Linli, et al. The Chang'e-1 Image Atlas of the Moon [M]. Beijing: Sinomap Press, 2010(李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥一号全月球影像图集[M]. 北京:中国地图出版社, 2010)
- [47] Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Linli, et al. The Chang'e-1 Topographic Atlas of the Moon[M]. Beijing: Sinomap Press, 2012(李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥一号全月球地形图集[M]. 北京:中国地图出版社, 2012)
- [48] Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Linli, et al. The Chang'e-2 High Resolution Image Atlas of the Moon [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2012(李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥二号高分辨率月球影像图集[M]. 北京:测绘出版社, 2012)
- [49] Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Linli, et al. The Chang'e-2 High Resolution Image Atlas of Lunar Sinus Iridum [M]. Beijing: Sinomap Press, 2014(李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥二号高分辨率月球虹湾影像图集[M]. 北京:中国地图出版社, 2014)
- [50] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. Topography of Chang'e-3 Landing Site[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2018(李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥三号着陆区地形地貌[M]. 北京:测绘出版社, 2018)
- [51] Zeng Xingguo, Zuo Wei, Mu Lingli, et al. Research on Fast Development of 3D Lunar Topography Representation Platform Based on Mobile Devices [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(3): 42-45(曾兴国, 左维, 牟伶俐, 等. 面向移动端月球形貌展示的快速三维地图平台搭建[J]. 测绘通报, 2017(3): 42-45)
- [52] Wang Renxiang. EFP Bundle Triangulation Using Lunar Imagery Obtained from Satellite Three-Line-Array Camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(4): 5-7(王任享. 月球卫星三线阵 CCD 影像 EFP 光束法空中三角测量[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 5-7)
- [53] Di K C, Hu W M, Liu Y L, et al. Co-registration of Chang'E-1 Stereo Images and Laser Altimeter Data with Crossover Adjustment and Image Sensor Model Refinement [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 50(12): 1615-1628
- [54] Wang Tao, Xiang Lin, Cao Feng. Study on Calculating Three-Line-Array Imagery Obtained from Satellite Chang'e-1 [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(3): 18-20(王涛, 项琳, 曹锋. 月球卫星 CE-1 三线阵影像数据的解算试验[J]. 遥感信息, 2010, 25(3): 18-20)
- [55] Ping Jinsong, Huang Qian, Yan Jianguo, et al. Lunar Topographic Model Based on the Laser Altimetry Observation of Chang'e-1 Satellite [J]. *Science in China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2008, 38(11): 1601-1612(平劲松, 黄倩, 鄢建国, 等. 基于嫦娥一号卫星激光测高观测的月球地形模型 CLTM-s01[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2008, 38(11): 1601-1612)
- [56] Hu Wenmin, Di Kaichang, Yue Zongyu, et al. Crossover Analysis and Adjustment for Chang'e-1 Laser Altimeter Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(2): 218-224(胡文敏, 邸凯昌, 岳宗玉, 等. 嫦娥一号激光高度计数据交叉点分析与平差处理[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 218-224)
- [57] Liu Z Q, Di K C, Peng M, et al. High Precision Landing Site Mapping and Rover Localization for Chang'e-3 Mission [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(1): 1-11
- [58] Wang Fenfei, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. The Methods of Chang'e-2 Image Dense Matching and Lunar DEM Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(7): 918-923(王奋飞, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥二号影像密集匹配及 DEM 制作方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(7): 918-923)
- [59] Peng Man, Wan Wenhui, Wu Kai, et al. Topo-

- graphic Mapping Capability Analysis of Chang'E-3 Navcam Stereo Images and Three-Dimensional Terrain Reconstruction for Mission Operations [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(5): 995-1002 (彭嫚, 万文辉, 吴凯, 等. 嫦娥三号导航相机测图能力分析及地形重建[J]. 遥感学报, 2014, 18(5): 995-1002)
- [60] Li F, Zhu C, Hao W F, et al. An Improved Digital Elevation Model of the Lunar Mons Rümker Region Based on Multisource Altimeter Data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1442
- [61] Di K C, Zhu M H, Yue Z Y, et al. Topographic Evolution of von Karman Crater Revealed by the Lunar Rover Yutu-2[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(22): 12764-12770
- [62] Di Kaichang, Liu Bin, Liu Zhaoqin, et al. Review and Prospect of Lunar Mapping Using Remote Sensing Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1230-1242 (邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 等. 月球遥感制图回顾与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1230-1242)
- [63] Zou X D, Liu J J, Li C L. Applications of the Visualization of Lunar Surface Based on Chang'E-1 Observations [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, 31(1): 100-105
- [64] Zeng X G, Mu L L, Liu J J, et al. Setting Diverging Colors for a Large-Scale Hypsometric Lunar Map Based on Entropy [J]. *Entropy*, 2015, 17(12): 5133-5144
- [65] Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Zhou Chenghu, et al. Characteristic Analysis of the Lunar Surface and Automatically Extracting of the Lunar Morphology Based on Chang'E-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”的月表形貌特征分析与自动提取[J]. 科学通报, 2011, 56(1): 18-26)

Review on Progress of Lunar Topographic Mapping in China

ZENG Xingguo^{1,2} ZUO Wei^{1,2} LI Chunlai^{1,2} LIU Jianjun^{1,2} REN Xin^{1,2}
YAN Wei^{1,2} LIU Yuxuan^{1,2} GAO Xingye^{1,2}

1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Objectives: Lunar topographic mapping is one of the fundamental research work for lunar topographic study and lunar exploration program. Since China launched the Chang'E-1 probe in 2007, we have officially joined the group of lunar and planetary mapping research. With the successive success of the following lunar exploration missions, China has successfully obtained a large number of lunar topographic data. Using these data, scholars have carried out preliminary research on lunar topographic mapping, the main purpose of this paper is to review and sort out these research results and understand the research progress of Chang'E lunar topographic mapping in China. **Methods:** Lunar topographic mapping is a subject integrating science, engineering and application. Therefore, in order to understand the progress of China's lunar topographic mapping in the Chang'E project, this paper conducts research and combing from the following three aspects. Firstly, from the aspect of engineering, mainly starting from the standard development of lunar topographic mapping, this paper reviews how domestic scholars carry out the standard development work according to the needs of Chang'E project and related scientific research, starting from the blank, and gradually establish the preliminary research situation of the relevant standard system of lunar topographic mapping, and summarizes the existing standard research results. Secondly, from the aspect of product application, starting from three more commonly used map products, such as lunar atlas product, multimedia map product and lunar globe product, this paper surveys and reviews in detail how domestic scholars design and use reasonable data processing and mapping methods to develop lunar topographic map product according to the quality characteristics of Chang'E lunar data, and summarizes the lunar map products available. Finally, based on the experience gained from Chang'E lunar topographic mapping and

its application, this paper reviews and combs the research on the theory and technology of lunar topographic mapping in China, starting from the elements and symbolic expression of lunar topographic mapping, multi-scale topographic mapping, and visualization of lunar topography. **Results:** To meet the needs of Chang'E project and lunar scientific research in China, Chinese scholars have successfully developed 10 national standards related to lunar topographic mapping, and initially established a basic lunar topographic mapping standard system in China. Based on Chang'E lunar data, domestic scholars have compiled five atlas products, developed multimedia lunar map products covering map websites, APP and other forms, developed and produced various lunar globes, and these mapping products have won many awards in the field of mapping at home and abroad. At the same time, domestic scholars have preliminarily studied and established the classification system of lunar topography and geomorphology, and have made some progress in the research of cartography theory and visualization technology of multi-scale cartography for the special lunar topography. **Conclusions:** Lunar and planetary cartography could not be carried out without the need and promotion of the corresponding lunar and deep space exploration programs. Based on the Chang'E project, China has obtained a large number of lunar topographic data. Using these data, China has carried out the research on the theory, technology and application of lunar topographic mapping, and made some progress. The corresponding mapping products have been widely recognized by the international cartographic community, which indicates that in the world, China has entered the forefront of research in the field of lunar topographic mapping. In the future, under the guidance of follow-up lunar exploration program and scientific research, Chinese scholars will continue to carry out further research from the difficult problems in the field of lunar topographic mapping, such as multi-source lunar exploration data fusion, quantitative indicators system construction and automatic extraction of lunar topography features, and automatic multi-scale mapping of massive lunar topographic data.

Key words: lunar and planetary cartography; topographic map; lunar image; Chang'E project

First author: ZENG Xingguo, PhD, specializes in lunar and planetary cartography and visualization .E-mail: zengxg@nao.cas.cn

Corresponding author: LI Chunlai, professor. E-mail: licl@nao.cas.cn

Foundation support: The National Science and Technology Major Project, Phase II of China's Lunar Exploration Project.

引文格式: ZENG Xingguo, ZUO Wei, LI Chunlai, et al. Review on Progress of Lunar Topographic Mapping in China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4):570-578. DOI:10.13203/j.whugis20190377(曾兴国, 左维, 李春来, 等. 中国月球地形制图研究进展[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4):570-578. DOI:10.13203/j.whugis20190377)