

王梁, 丁孝忠, 韩坤英, 等. 月球数字地质图的编制与研究[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 331–341.

Wang Liang, Ding Xiaozhong, Han Kunying, et al. The compilation of the lunar digital geological map and a discussion on the tectonic evolution of the moon[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 331–341(in Chinese with English abstract).

月球数字地质图的编制与研究

王 梁^{1,2} 丁孝忠¹ 韩坤英¹ 庞健峰¹ 许可娟¹ 郑洪伟¹ 吴 昊¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 中国月球数字地质图的编制是利用嫦娥一号、嫦娥二号月球科学探测数据和其他已有月球地质资料与研究成果, 通过对月球岩石成分、地质构造和形成时代等要素的研究, 应用 ArcGIS 平台编制 1:250 万月球地质图, 并建立数字地质图空间数据库。本文通过对月球典型地区地质图的编制与研究, 制定了月球数字地质图的编图方案、流程与图示图例, 建立了 Geodatabase 空间数据库, 为有效地对数字地质图进行更新与管理, 开展月球地质综合研究、编制全月球地质图及未来开展其他天体的地质编图工作奠定了基础。通过地质图编制与大量月球资料的综合集成研究, 对月球形成与构造演化进行了初步的探讨。

关键词: 月球数字地质图; 嫦娥一号; ArcGIS; 月球构造演化

中图分类号: P184.62; P184.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)01-0331-11

The compilation of the lunar digital geological map and a discussion on the tectonic evolution of the moon

WANG Liang^{1,2}, DING Xiao-zhong¹, HAN Kun-ying¹,
PANG Jian-feng¹, XU Ke-juan¹, ZHENG Hong-wei¹, WU Hao¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The compilation of the Lunar Digital Geological Map was based on the scientific exploration data obtained by Chang'E-1 and Chang'E-2 and other lunar geological data as well as research results. According to the material compositions, structure elements and the information of geochronology of the Moon, the authors compiled the Lunar Geological Map at a scale of 1:2500000 and established spatial database by using the ArcGIS platform. The authors developed a mapping programs, processes and legends for the Lunar Digital Geological Map, and established a spatial database based on Geodatabase model by compiling and investigating geological map of the typical region, which can effectively update and manage the Digital Geological Map and thus lay the foundation for the geological comprehensive study of the Moon, the geological mapping of the whole Moon, and also the

收稿日期: 2014-10-21; 改回日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41490634)、国家高技术研究发展计划“863”项目(2010AA122201)、中国科学院地球化学研究所月球典型建造与编图标识与规范研究(Y2ZZ031000-02)、国家自然科学基金项目(41373068)联合资助。

作者简介: 王梁, 男, 1989年生, 硕士生, 从事地质编图与 GIS 应用研究; E-mail: wangliang_fighting@163.com。

通讯作者: 丁孝忠, 男, 1963年生, 研究员, 博士, 长期从事区域地质与地质编图研究; E-mail: xiaozhongding@sina.com。

geological mapping of other celestial bodies in the future. This paper also deals with the tectonic evolution of the moon on the basis of summarizing the compilation of the Lunar Digital Geological Map and comprehensive research on a large number of lunar geological data.

Keywords: Lunar Digital Geological Map; Chang'E-1; ArcGIS; tectonic evolution of the Moon

About the first author: WANG Liang, male, born in 1989, master candidate, majors in the study of geological mapping and GIS applications; E-mail: wangliang_fighting@163.com.

About the corresponding author: DING Xiao-zhong, male, born in 1963, senior researcher, doctor, mainly engages in the study of regional geology and geological mapping; E-mail: xiaozhongding@sina.com.

月球地质图早期是通过望远镜观测摹绘的,意大利天文学家伽利略(Galileo)1610年用望远镜观测研究月面地形结构并绘制出第一幅月面图,因此,月球地质图的编绘历史已经长达400余年。自20世纪60年代起,随着对月球科学探测高潮的兴起,人类对月球的认识逐渐深入,先后编制了月球地形图、地质图、构造图等图件^[1]。美国地质调查局(USGS)在20世纪60—70年代利用Lunar Orbiter的影像数据编制了44幅月球正面1:100万比例尺的区域地质图,并在此基础上又综合编制了月球正面、背面、东部、西部、北极和南极等地区1:500万地质图^[2-6]。前苏联也利用Luna月球探测资料编制了1:3000万全月构造简图、地貌图和主要构造单元简图等。同时美国地质调查局还编制了1:5000、1:1万、1:2.5万、1:5万、1:10万和1:25万6种比例尺的阿波罗(Apollo)着陆区或月球典型地区地质图^[7-13]。2002年开始,美国地质调查局在新一轮月球科学探测的基础上提出编制新版月球地质图计划,并将全月划分为30个图幅(编号LQ-1~LQ-30),统一提供相同投影方式和比例尺,应用1994年发射的Clementine与1998年发射的Lunar Prospector月球探测器获得的数据开始编制1:250万月球地质图,并已取得阶段性成果,完成了马里乌斯幅(LQ-10)和哥白尼幅(LQ-11)等4幅地质图编稿图^[13-14]。

2007年10月中国首次月球探测工程发射的嫦娥一号(CE-1)卫星获得了覆盖全月的CCD影像数据、干涉成像光谱仪(IIM)数据及激光高度计(LAM)数据等大量高质量的科学数据。2010年10月中国又发射了探月二期工程先导星嫦娥二号(CE-2)月球探测器,获得了覆盖全月球的7 m和50 m分辨率影像图等数据。2013年12月嫦娥三号(CE-3)携带中国第一辆月球车“玉兔号”,即“月面巡视探测器”,搭载天文月基光学望远镜、极紫外相机、测月

雷达等先进科学仪器,在月球虹湾地区实现中国首次月面软着陆,开展了着陆器的就位探测和月球车的巡视探测,传回了大量实地勘测资料。所以,到目前为止,中国的月球探测工程已经获取了丰富的科学数据资料,中国科研人员通过这些数据进行了研究并取得了一定的成果,如李春来等^[15-16]利用CE-1卫星CCD相机数据获得了月球影像图,制作了月球DEM模型;丁孝忠等^[13-14]、韩坤英等^[17]应用CE-1各类数据和已有月球地质资料编制了中国第一幅月球地质图(虹湾幅(LQ-4), 1:250万),建立了空间数据库,并探索制定了月球数字地质图编制方法、标准与技术规范;陈建平等^[18]利用多源卫星探测数据编制了月球虹湾—雨海地区大地构造纲要图;凌宗成等^[19-20]、王翔等^[21]利用CE-1 IIM数据反演得到了月表TiO₂、FeO和Al₂O₃分布情况,根据Th、Mg、Fe元素质量分数对月球岩石进行了分类。这些研究成果都为我国1:250万月球数字地质图的编制奠定了基础。

月球表面起伏高差较大,根据CE-1测得月球表面最深的深度为9.23 km,位于南极艾肯盆地区域(S 61.375°, E 211.375°),最高处海拔高程约9.84 km,位于科罗列夫月坑以北(S 5.375°, E 201.375°)^[22]。月球表面依据地形高差变化及岩石分布特征,地形地貌可大致分为两种主要的地质类型:一是地形相对低洼的大型盆地,即月海玄武岩平原区,月球正面的月海约占正面面积一半,约占月表总面积的17%,背面月海分布极少^[1];二是月面最古老的地形单元,即月陆斜长岩高原区,大部分是富含斜长石的深成岩^[1],主要分布于月球背面,约占月表总面积83%,一般高出月球水准面约2~3 km。撞击是太阳系内固体行星上主要的地形塑造作用^[23],因此撞击坑是月表最常见的地形地貌。研究发现,月陆地区的撞击坑多以中小型撞击坑为

主,分布密度极高,形成年代较早,而月海地区撞击坑多为年轻的撞击坑,分布密度较低^[24]。月表还分布着各类构造要素,能够反映全月球或者区域性的构造特征和应力状态,在某种程度上能够反映月球内部的地质信息,对研究月球的构造演化有重要的指示意义^[25]。

月球地质图是月球科学研究及未来月球探测和基地建设的重要基础,近年来国际上月球探测与科学研究都取得了长足的进步,但是月球地质图的编制未能适应形势发展,需要进一步加强月球地质图的编研工作。此外我国嫦娥工程探测也取得了世人瞩目的成果,为开展月球地质图编制与研究奠定了基础。因此,广泛吸收国内外的探测资料与成果,编制新一轮月球数字地质图,可以为加深月球起源与演化研究以及月球探测与资源调查等做出贡献。

1 地质图编制资料准备及方案制定

1.1 地质图编制源数据及编图流程

月球数字地质图编制过程中使用的主要数据资料有CE-1 CCD影像数据、IIM数据、LAM数据,CE-2 CCD影像数据,LROC宽视角影像图,LOLA激光高度计数据及其制作的月表粗糙度数据(LDRM),Clementine数据制作的月表成熟度数据(OMAT)以及美国1:100万、1:500万月球地质图等。月球数字地质图编图流程如图1。

1.2 地质图的投影及比例尺

地质图坐标系分为投影坐标系和地理坐标系(经纬度)。为保证月球地质图变形程度达到最小,通过计算,不同纬度地区选择不同的投影方式:赤道地区(-30°~30°)采用墨卡托投影,中纬度地区(30°~65°, -30°~-65°)采用兰伯特正形圆锥投影,两极地区(65°~90°, -65°~-90°)采用极射赤平投影。地理坐标系参考采用Moon_2000_I AU_IAG标准椭球体和D_Moon_2000的基准面。

制图比例尺=影像分辨率/肉眼分辨率。决定地质图比例尺的是所使用的主要数据中分辨率最低的数据,即CE-1 IIM数据,其分辨率为200 m(岩性分类的主要数据),经计算可满足1:200万比例尺制图精度,按照地质编图基本比例尺要求及图幅整饰与出版尺寸等因素,确定编图比例尺为1:250万^[8,10]。由于数

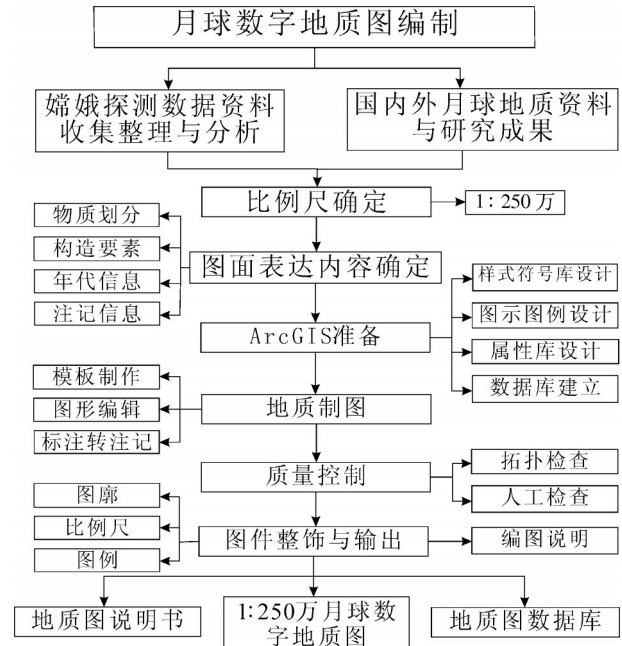


图1 月球地质图编制及建库流程

Fig.1 The process of geological mapping and database construction of the Moon

据分辨率的限制,中国现有数据只能编制1:250万月球地质图,相信随着中国嫦娥探月工程的发展,将会取得更多高分辨率、高质量遥感数据,甚至月球岩石样品,届时我们可以编制1:100万、1:10万、1:5万和1:1万等甚至更大比例尺月球地质图。

1.3 图幅的划分及命名

图2是使用CE-2 CCD数据(分辨率50 m)合成的月球影像图,并参照美国2002年新一轮月球地质图图幅划分方案,将月球划分为30个图幅。美国地质调查局为月球30个1:250万图幅进行了编号,但未公布每个图幅的名称,本文通过研究,根据图幅区域地质特征、盆地及撞击坑发育情况等,为30个图幅拟定了中英文名称(表1)。

1.4 图面表达内容

月球地质图是月亮表层岩相、岩性、“地层”年代、地质构造等的综合表达,是集月球地质、地球化学、地球物理以及测绘科学研究成果的大成者,是月球起源和演化研究的重要手段^[26]。本次数字地质图编制图面主要表达内容有月表物质成分、构造要素、地质时代信息和注记信息等。

(1)月表物质成分信息是编制月球地质图的重要

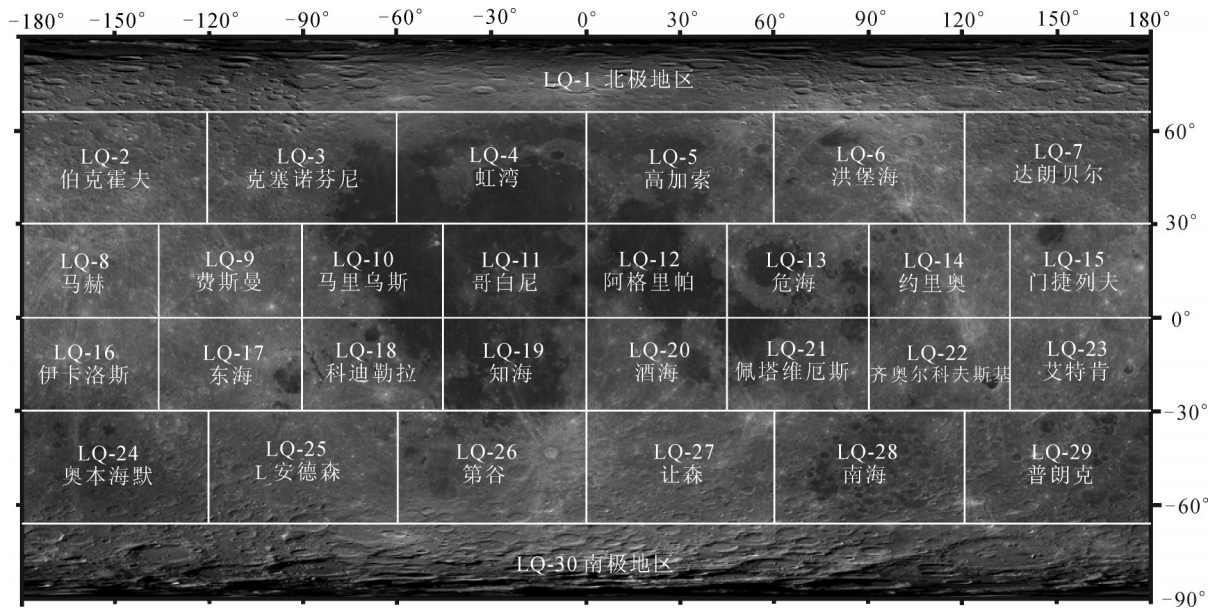


图2 全月球地质图分幅示意图
Fig.2 Framing of lunar geological maps

表 1 1:250万月球地质图图幅命名

Table 1 The proposed names of lunar geological maps at the scale of 1:2500000

图幅号	名称(英文名)	图幅号	名称(英文名)
LQ-1	北极地区 (the Arctic region)	LQ-16	伊卡洛斯(Lcarus)
LQ-2	伯克霍夫(Birkhoff)	LQ-17	东海(Mare Orientale)
LQ-3	克塞诺芬尼(Xenophanes)	LQ-18	科迪勒拉(Cordillera)
LQ-4	虹湾(Sinus Iridum)	LQ-19	知海(Mare Cognitum)
LQ-5	高加索(Caucasus)	LQ-20	酒海(Mare Nectaris)
LQ-6	洪堡海(Mare Humboldtianum)	LQ-21	佩塔维厄斯(Petavius)
LQ-7	达朗贝尔(D'Alembert)	LQ-22	齐奥尔科夫斯基(Tsiolkovskiy)
LQ-8	马赫(Mach)	LQ-23	艾特肯(Aitken)
LQ-9	费斯曼(Fersman)	LQ-24	奥本海默(Oppenheimer)
LQ-10	马里乌斯(Marius)	LQ-25	L 安德森(L Anderson)
LQ-11	哥白尼(Copernicus)	LQ-26	第谷(Tycho)
LQ-12	阿格里帕(Agrippa)	LQ-27	让森(Janssen)
LQ-13	危海(Mare Crisium)	LQ-28	南海(Mare Australe)
LQ-14	约里奥(Joliot)	LQ-29	普朗克(Planck)
LQ-15	门捷列夫(Mendeleev)	LQ-30	南极地区(the Antarctic region)

依据,其特征、分类、形成与演化可以更好地了解月球及其演化历史。月表物质依据成因与成分特征可划分为月海物质单元(月海玄武岩)、高地物质单元、盆地建造单元、坑物质单元和火成碎屑物质单元5种类型^[18]。月表物质类型详细划分如表2所示。

(2)构造要素对于揭示一个地区的构造演化具有重要意义。月球构造要素主要包括深部构造和月表构造等,而月表构造主要包括线性构造和环形构造。构造要素详细分类如表3。

(3)月球地质图中的地质年代信息可以更好地

表2 月表物质类型划分
Table 2 The division of material types on lunar surface

月海玄武岩分类 ^[19-21, 27-30]	高地岩石分类 ^[19]	火山碎屑岩分类	撞击溅射物分类	
			盆地建造	撞击坑物质
极低钛玄武岩(<i>ult</i>) (TiO ₂ 质量分数<4%)	KREEP 岩 (Th 质量分数>7×10 ⁻⁶)	含橄榄石火山碎屑岩 (spl)	中央峰建造 (bcp)	中央峰物质 (ccp)
低钛玄武岩(<i>lt</i>) (4%<TiO ₂ 质量分数<6%)	富镁结晶岩套(Mgs) (Mg>70 mol%)	含尖晶石火山碎屑岩 (ol)	盆底建造 (bf)	坑底物质 (cf)
中钛玄武岩(<i>mt</i>) (6%<TiO ₂ 质量分数<9%)	亚铁斜长岩(Fan) (FeO 质量分数<11%)	未分的火山碎屑岩	盆壁建造 (bw)	坑壁物质 (cw)
高钛玄武岩(<i>ht</i>) (9%<TiO ₂ 质量分数<11%)			盆缘建造 (brh)	坑缘物质 (crh)
极高钛玄武岩(<i>uht</i>) (TiO ₂ 质量分数>11%)			溅射物 (brr)	辐射纹 (crr)

表3 构造要素分类
Table 3 The divisions of structure elements

构造类型	构造要素分类						
线性构造	月岭	月谷	月溪	地堑	坑链	断裂	垮塌构造
环形构造	大型盆地	撞击坑	隐月坑	月海穹窿			
深部构造	深部断裂	质量瘤	地体构造				

了解月球区域与整体地质演化。确定各要素的年代是编图的基础,结合月球地质历史上的撞击事件,将月球地质年代由老到新依次划分为前艾肯纪(pA)、艾肯纪(A)、酒海纪(N)、早雨海世(I₁)、晚雨海世(I₂)、早爱拉托逊世(E₁)、晚爱拉托逊世(E₂)和哥白尼纪(C),详细月球地质年代划分方案如表4。

(4)地质图的注记信息能帮助读图人员对图面

内容的了解,使图面简单易懂,并避免出现混乱。图面注记信息包括:经纬线,高程点注记,月海、盆地、撞击坑和月溪等名称注记,坑物质与盆地建造代号注记,玄武岩厚度注记,中国 Chang'E、前苏联 Luna 与美国 Apollo 探测器登月着陆点注记等。

2 基于 ArcGIS 的数字地质图编制

2.1 ArcGIS 平台下图例与数据库的设计与建立

基于 ArcGIS 的数字地质编图方法较传统编图方法有很大变化,成图过程包括采用的技术流程、系统库制作、色标设计、数据库建立、地质制图与质量控制等^[33]。图示、图例是地质图件的重要组成部分,是表达地质成果内容的形式和手段,是读图的

表4 月球地质年代划分方案^[31-32]
Table 4 The division of lunar geological time^[31-32]

地质单元年代(代号)	年龄界限/Ga	主要事件	
哥白尼纪(C)	0.8~现在	形成具有辐射纹的新撞击坑	
爱拉托逊纪(E)	晚爱拉托逊世(E ₂)	2.8~0.8	形成无辐射纹的撞击坑
	早爱拉托逊世(E ₁)	3.16~2.8	高钛月海玄武岩喷发
雨海纪(I)	晚雨海世(I ₂)	3.8~3.16	大规模月海玄武岩泛滥(中低钛月海玄武岩)
	早雨海世(I ₁)	3.85~3.8	(1)雨海事件:雨海盆地 (2)东海事件:东海盆地
酒海纪(N)	3.92~3.85	形成酒海盆地等10~12个大型撞击盆地	
艾肯纪(A)	4.2~3.92	形成包括南极艾肯(SPA)盆地在内的可识别的30个撞击盆地	
前艾肯纪(pA)	4.56~4.2	斜长岩月壳形成	

共同语言。因此月球地质图图例的设计对于编制月球地质图是非常重要的。地质图中各要素可分为点状符号、线状符号、面状符号、注记类符号4种。此次月球地质图图例的设计参考地球地质图与国外已有的月球地质图的图示图例,遵循不同颜色表示年代要素、各类花纹表达岩性特征、颜色的深浅区分岩相分布等原则,在ArcMap系统下设计制作,先设计并建立系统符号库,再制作图示图例。色标使用系统提供的C、M、Y、K比例进行调色^[17],建立的图例如表5。

月球数字地质图的编制基于ArcGIS平台,并使用Geodatabase(GDB)数据模型建立空间数据库。GDB是一种采用标准关系数据库技术来表现地理信息的空间数据模型,是ArcGIS的数据存储模型和管理框架。GDB使用数据库管理系统(DBMS)对栅格数据集、矢量数据集、TIN数据集以及相关的属性数据等进行存储和管理,并建立丰富的空间关系,可以清晰、准确地反映现实空间对象的信息。在ArcGIS中可方便、准确地对地质图各要素进行增加、修改、删除、查询检索、数据统计及数据输出等操作,有效地对地质图进行更新与安全管理^[34-35]。

2.2 数字地质图的编制

图例与数据库设计建立后,对嫦娥一号影像资料进行遥感解译与图形编辑,然后对图面进行质量检查(包括拓扑检查和人工检查),对检查出来的错误逐一进行修改,修改后添加各类注记信息。为增强地质图立体感,将嫦娥一号DEM数据(分辨率120 m)进行山体阴影处理,生成山体阴影图作为地理底图。此外,为反映研究区地下的地层和构造特征,还需制作地质剖面图,以表示地质体在垂向剖面上的结构、构造及其相互关系^[36]。最后对图幅进行整饰,添加图名、比例尺和图示图例等内容,编写地质图说明书,得到月球数字地质图及空间数据库。2012年国家高技术研究发展计划“863”项目(2010AA122201)已完成中国第一幅月球地质图虹湾幅(LQ-4)(图3)的编制,在此基础上,我们又初步完成北极幅(LQ-1)(图4)和南极幅(LQ-30)等月球地质图的编稿图。

3 月球形成与构造演化探讨

通过1:250万月球数字地质图的编制,对月球

地层、构造和岩石类型和特征的初步分析研究,撞击坑大小变化及相应堆积物的展布与划分,尤其对阿波罗(Apollo)11、12、14、15、16和17号登月岩石样品的测试分析结果和大量影像资料的集成研究,以及一些高分辨率月坑(如第谷月坑等)、月陆、月海地带所获得资料的详细解释,为深入了解月球演化历史,提供十分重要的依据。在上述已有的实际资料的基础上,结合前人已积累的大量资料(尤其是美国地质调查局月球地质图资料)、论文和专著等,以及月球影像资料的详细解释和对比,通过此次月球地质图编制,笔者将月球构造演化由老至新大致划分为3个主要发展阶段,即:(1)“岩浆洋”形成、岩浆分异作用和斜长岩壳形成阶段;(2)月坑大量形成和月海玄武岩喷发充填阶段;(3)月尘、月壤形成阶段。现分别简述如下。

3.1 “岩浆洋”形成和岩浆分异作用和斜长岩壳形成阶段

依据现有资料,在距今约46亿年时期,月球形成之初整个月球曾处于熔融或部分熔融的月球早期“岩浆洋”状态,随着温度的下降,出现结晶分异作用,最终产生了原始月亮——斜长岩壳,壳下形成玄武岩浆层及残余岩浆物质。虹湾幅地质图中北部月陆高原区主要岩石组成为月坑溅射斜长岩堆积物,并且为后期雨海等月坑撞击作用强烈改造,溅射物大面积覆盖。

3.2 月坑大量形成和月海玄武岩充填阶段

随着太阳系的形成发展,月球结构的发育逐渐成熟,完成月球各圈层基本结构特征,使月球具备对周围星云的吸引力作用,由开始时只能吸引一些小陨石,产生小陨击作用,发展为随月球结构的进一步完善,引力的加强,吸引的陨石逐渐加大,大型撞击作用逐渐增多,直至达到南极艾肯盆地、风暴洋和雨海盆地等超大月坑形成。雨海盆地的形成即在3.92 Ga的雨海纪早期,伴有大量的玄武岩充填,柏拉图撞击坑、虹湾撞击坑和阿基米德撞击坑等中型撞击坑相继形成,部分撞击坑周缘出现了深部的残留的克里普物质,内部甚至也有玄武岩充填。距今39~31亿年,月球发生第二次大规模岩浆活动,月海玄武岩喷发,月海被玄武岩充填的次序为雨海西、雨海东、湿海、危海、静海、丰富海、澄海、风暴洋^[37]。由于后期巨大的陨石可能已被吸引坠落

表5 月球地质图图例的制定
Table 5 Legends of lunar geological map

地质名称/代号	C	M	Y	K	图例	地质名称/代号	C	M	Y	K	图例
一、撞击坑物质						盆底建造 <i>Ibf</i>	24	6	65	0	
哥白尼纪/系						中央峰建造 <i>Ibcp</i>	40	10	100	0	
辐射纹 <i>Ccr</i>	0	0	20	0		酒海纪盆地建造					
坑缘物质 <i>Ccrh</i>	0	0	30	4		溅射物 <i>Nbr</i>	15	35	40	0	
坑壁物质 <i>Ccw</i>	0	0	65	0		盆缘建造 <i>Nbrh</i>	20	30	30	0	
坑底物质 <i>Ccf</i>	0	0	40	0		盆壁建造 <i>Nbw</i>	30	50	70	0	
中央峰物质 <i>Cccp</i>	0	0	60	7		盆底建造 <i>Nbf</i>	20	30	50	0	
爱拉托逊纪/系						中央峰建造 <i>Nbcp</i>	40	60	60	0	
坑缘物质 <i>E₂crh</i>	0	13	15	0		艾肯纪盆地建造					
坑壁物质 <i>E₂cw</i>	0	32	35	0		溅射物 <i>Abrr</i>	13	20	0	0	
坑底物质 <i>E₂cf</i>	0	15	22	0		盆缘建造 <i>Abrrh</i>	13	30	0	0	
中央峰物质 <i>E₂ccp</i>	0	40	45	0		盆壁建造 <i>Abw</i>	13	55	0	0	
坑缘物质 <i>E₁crh</i>	0	10	35	0		盆底建造 <i>Abf</i>	13	40	0	0	
坑壁物质 <i>E₁cw</i>	0	15	55	0		中央峰建造 <i>Abcp</i>	30	100	0	0	
坑底物质 <i>E₁cf</i>	0	5	50	0		三、月海玄武岩建造					
中央峰物质 <i>E₁ccp</i>	0	10	70	0		极低钛玄武岩 <i>ult</i>	25	6	0	0	
雨海纪/系						低钛玄武岩 <i>lt</i>	36	9	0	0	
坑缘物质 <i>I₂crh</i>	60	0	60	0		中钛玄武岩 <i>mt</i>	50	11	0	0	
坑壁物质 <i>I₂cw</i>	80	0	80	14		高钛玄武岩 <i>ht</i>	75	20	0	0	
坑底物质 <i>I₂cf</i>	75	0	75	0		极高钛玄武岩 <i>uht</i>	100	18	0	0	
中央峰物质 <i>I₂ccp</i>	90	0	90	16		混合玄武岩 <i>ut</i>	100	18	0	30	
坑缘物质 <i>I₁crh</i>	20	5	50	0		四、高地岩石建造					
坑壁物质 <i>I₁cw</i>	36	9	90	0		亚铁斜长岩 <i>Fan</i>	0	55	55	0	
坑底物质 <i>I₁cf</i>	21	7	70	0		富镁结晶岩套 <i>Mgs</i>	0	70	70	0	
中央峰物质 <i>I₁ccp</i>	30	20	40	0		KREEP 岩	0	95	95	10	
雨海纪/系未分						地质名称/代号	颜色	宽度	大小	图例	
坑缘物质 <i>I_{crh}</i>	16	0	10	10		五、火山碎屑岩					
坑壁物质 <i>I_{cw}</i>	16	0	25	34		含尖晶石 <i>Spl</i> 橄辉石 <i>ol</i>	红		14		
坑底物质 <i>I_{cf}</i>	16	0	0	18		火山口	红		14		
中央峰物质 <i>I_{ccp}</i>	30	0	20	40		六、环形构造					
酒海纪/系						大型盆地	品红		2		
坑缘物质 <i>Ncrh</i>	30	50	50	0		撞击坑	黑		0.3		
坑壁物质 <i>Ncw</i>	40	60	80	0		隐月坑	黑		0.6		
坑底物质 <i>Ncf</i>	25	40	60	0		月海穹窿	黑		0.7		
中央峰物质 <i>Nccp</i>	40	70	70	0		七、线性构造					
艾肯纪/系						断裂	红		0.8		
坑缘物质 <i>Acrh</i>	6	30	0	0		坑链	黑		0.5		
坑壁物质 <i>Acw</i>	13	70	0	0		地堑	黑		0.6		
坑底物质 <i>Acf</i>	6	40	0	0		垮塌构造	黑		0.5		
中央峰物质 <i>Accp</i>	20	90	0	0		月岭	蓝		1.4		
未划分纪/系						月溪	青		5		
坑缘物质 <i>crh</i>	0	0	10	30		月谷	蓝		1.4		
坑壁物质 <i>cw</i>	0	0	25	50		深部断裂(>80km)	红		2.2		
坑底物质 <i>cf</i>	0	0	20	40		深部断裂(<80km)	红		1.2		
中央峰物质 <i>ccp</i>	0	0	20	60		玄武岩厚度	褐		0.6		
二、大型盆地建造						八、其他					
雨海纪盆地建造						CE 着陆点	红			18	
溅射物 <i>Ibr</i>	18	6	60	0		Luna 着陆点	品红			18	
盆缘建造 <i>Ibrh</i>	27	9	80	0		Apollo 着陆点	蓝			18	
盆壁建造 <i>Ibw</i>	28	7	75	0		高程点及注记	黑			15	

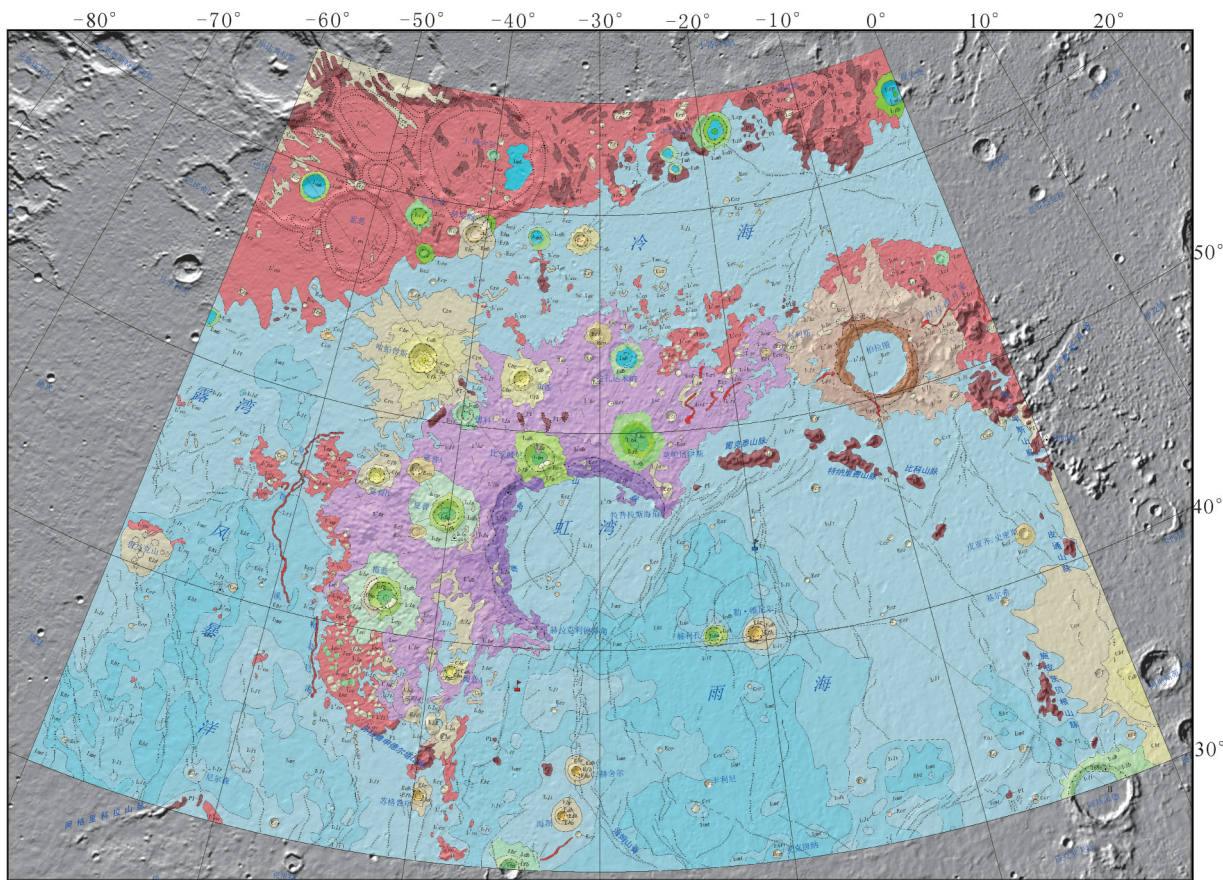


图3 虹湾幅月球地质图(LQ-4, 1:2 500 000)

Fig.3 Lunar geological map of Sinus Iridum Quadrangle

殆尽,或者月球吸引力逐渐向着减小的方向发展,直至今今,只有极少量的较弱的陨击作用产生,并且数量不断减少,显示了月球陨击作用由弱→强→弱变化的历史演化进程。

3.3 月尘、月壤形成阶段

随着月球大量撞击作用的基本停止,使月球进入一个平静的发展阶段——月尘、月壤形成和发展阶段。由于月球表面巨大温差变化,以及在太阳风的强烈电离、辐射等作用下,使月球岩石产生强烈的风化、侵蚀作用,形成颗粒极小、结构松散、成分复杂的风化层——月尘、月壤,全面覆盖于月球表面的每一个角落。月海月壤平均厚度为4~5 m,高地月壤平均厚度为10~15 m^[1]。随着月球内部能量逐渐枯竭,再也没有发生大规模岩浆火山活动和构造事件,但小天体撞击仍在发生。月球表面受哥白尼纪的撞击作用影响,月表形成明显辐射纹,月球正面第谷撞击坑辐射纹尤为壮观,其辐射纹大约覆盖面积560 000 km²,包

括大量稠密的次级撞击坑^[38]。

月球在经历了以上3个主要构造演化阶段之后,形成了今天我们所见到的美丽的月球。

4 结论与讨论

(1)应用国内外月球探测资料,基于 ArcGIS 平台进行月球数字地质图的编制研究,建立空间信息数据库,使各类要素能够在 ArcGIS 中方便而准确地进行增加、修改、删除和查询等操作,可以有效地对数字地质图进行更新与管理。

(2)在地质图编制过程中,将遥感影像图、DEM 图、月表粗糙度等数据及所参考的地质图件叠合在同一参考系的数据框内,建立解译标准进行目视解译,可以提高遥感解译精度与准确性,尤其是对线性构造和环形构造的综合解译与地质图编制质量的提高具有重要意义。

(3)由于月球地质图与地球地质图图面表示内

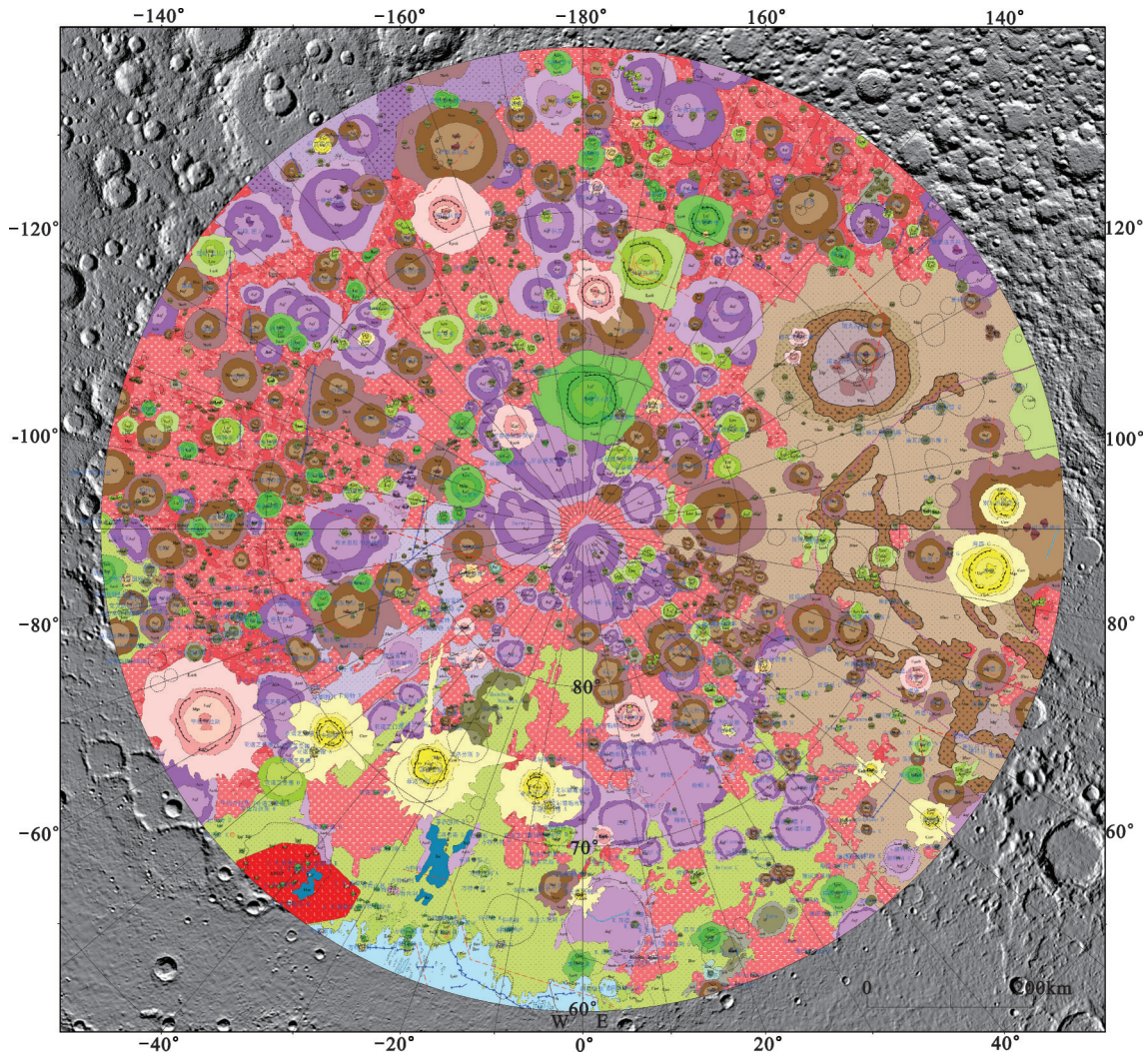


图4 北极幅月球地质图(LQ-1, 1:2 500 000)

Fig.4 Lunar geological preliminary map of the Arctic Quadrangle

容与使用数据资料有所不同,表示方法与地层单元划分标准也不统一,因此建立月球地质图编制流程、图示图例与技术规范,对于今后更大比例尺月球地质图编制(如1:100万比例尺)及其他天体的地质图编制与区域地质综合研究具有重要意义。

(4)本次1:250万月球地质图编制将全月划分为30个图幅,并初步为其拟定中英文名称,目前已完成了虹湾幅(LQ-4)地质图编制及北极幅(LQ-1)和南极幅(LQ-30)等幅编稿图。通过对月球地质图编制的总结与大量月球资料的综合集成研究,将月球构造演化由老至新大致划分为3个主要演化阶段,即①“岩浆洋”形成、岩浆分异作用和斜长岩壳阶段;②月球大量形成和月海玄武岩充填阶段;③

月尘、月壤形成阶段。1:250万月球数字地质图的编制,是中国进入地外天体行星地质图编制与研究的起步。

致谢:审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 88-89.
- Ouyang Ziyuan. Introduction of Lunar Science [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2005: 88-89(in Chinese).
- [2] Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic Map of the Near Side of the Moon[M]. Reston: US Geological Survey, 1971.

- [3] Wilhelms D E, Howard K A, Wilshire H G. Geologic Map of the South Side of the Moon[M]. Department of the Interior, US Geological Survey, 1979.
- [4] Wilhelms D E, El-Baz F. Geologic Map of the East Side of the Moon[M]. Reston: US Geological Survey, 1977.
- [5] Stuart-Alexander D E. Geologic Map of the Central Far Side of the Moon[M]. Reston: US Geological Survey, 1978.
- [6] Scott D H, McCauley J F. Geologic Map of the West Side of the Moon[M]. Reston: US Geological Survey, 1977.
- [7] Howard K A. Geologic Map of the Crater Copernicus (I-840). Geologic Atlas of the Moon. Washington DC: US Geological Survey, 1975.
- [8] Pohn H A. Geologic Map of the Lansberg P region of the Moon (I-627). Geologic Atlas of the Moon, Washington DC: US Geological Survey, 1971.
- [9] Howard K A. Geologic Map of part of the Apennine-Hadley region of the Moon (Apollo 15 pre-mission map) (I-723-2). Geologic Atlas of the Moon, Washington DC: US Geological Survey, 1971.
- [10] Titley S R, Trask N J. Geologic Map of Apollo landing site 5 (I-623). Geologic Atlas of the Moon, Washington DC: US Geological Survey, 1969.
- [11] Rowan L C. Geologic Map of the Oppolzer A Region of the Moon (I-620). Geologic Atlas of the Moon, Washington DC: US Geological Survey, 1971.
- [12] Cannon P J, Rowan L C. Geologic Map of the Sabine EB Region of the Moon (I-679). Geologic Atlas of the Moon, Washington DC: US Geological Survey, 1971.
- [13] 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.
Ding Xiaozhong, Han Kunying, Han Tonglin, et al. Compilation of the digital geological map of sinus iridium Quadrangle(LQ-4) of the Moon[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (06): 15-27(in Chinese).
- [14] Ding X Z, Han K Y, Pang J F, et al. Digital geological mapping of Sinus Iridum area of the Moon based on the Chang'E-1 data[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2013, 87(6): 1643-1657.
- [15] 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(D辑), 2010, (3): 294-306.
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]. Science in China(series D), 2010, (3): 294-306(in Chinese).
- [16] 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: D辑, 2010, (3): 281-293.
Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global Lunar DEM model[J]. Science in China: D series, 2010, (3): 281-293(in Chinese).
- [17] 韩坤英, 庞健峰, 丁孝忠, 等. 基于ArcGIS的月球虹湾地区数字地质图编制研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 104-109.
Han Kunying, Pang Jianfeng, Ding Xiaozhong, et al. A study of digital Lunar geological mapping(Sinus Iridum Quadrangle)based on ArcGIS[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (6): 104-109(in Chinese).
- [18] 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.
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(in Chinese).
- [19] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据FeO反演初步结果[J]. 科学通报, 2010, 55(35): 3373-3377.
Ling Zongcheng, Zhang Jiang, Liu Jianzhong, et al. Preliminary results of FeO mapping from Chang'E-1 IIM data[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(35): 3373-3377(in Chinese).
- [20] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据TiO₂反演初步结果[J]. 科学通报, 2011, 56(16): 1257-1263.
Ling Zongcheng, Zhang Jiang, Liu Jianzhong, et al. Preliminary results of TiO₂ mapping using imaging interferometer data from Chang'E-1[J]. Chinese Sci Bull, 2011, 56(16): 1257-1263(in Chinese).
- [21] 王翔, 陈建平, 许延波, 等. 基于嫦娥数据的月球虹湾区域TiO₂、MgO含量反演[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 25-36.
Wang Xiang, Chen Jianping, Xu Yanbo, et al. Inversion of contents of TiO₂ and MgO in Sinus Iridum Area of Lunar surface based on Chang'E data[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19 (6): 25-36(in Chinese).
- [22] 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(G辑), 2008, 38(11): 1601-1612.
Ping Jinsong, Huang Qian, Yan Jianguo, et al. Lunar Topography Model s01 observed by laser altimetry based on Chang'E-1[J]. Science in China(Series G), 2008, 38(11): 1601-1612(in Chinese).
- [23] 格拉斯 B P. 行星地质学导论[M]. 陈书田译. 北京: 地质出版社, 1986: 6.
Grasse B P. Introduction to Planetary Geology[M]. Translated by Chen Shutian. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 6(in Chinese).

- [24] 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[J]. 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[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 83-89(in Chinese).
- [25] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. A Users Guide to the Moon[M]. London: Cambridge University Press, 1991.
- [26] 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.
Ouyang Ziyuan, Liu Jianzhong. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 1-6(in Chinese).
- [27] Giguere T A, Taylor G J, Hawke B, et al. The titanium contents of Lunar mare basalts[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2000, 35(1): 193-200.
- [28] Taylor G J, Warren P, Ryder G, et al. Lunar rocks[J]. Lunar sourcebook, 1991: 183-284.
- [29] Papike J J, Vaniman D T. Luna 24 Ferrobasalts and the mare basalt suite—comparative chemistry, mineralogy, and petrology[C]// Mare Crisium: The View from Luna 24. 1978, 1: 371-401.
- [30] Neal C R, Taylor L A. Petrogenesis of mare basalts: A record of Lunar volcanism[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(6): 2177-2211.
- [31] 丁孝忠, 王梁, 韩坤英, 等. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图: 以月球北极地区为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 19-30.
Ding Xiaozhong, Wang Liang, Han Kunying, et al. The Lunar digital geological mapping based on ArcGIS: Taking the Arctic Region as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 19-30(in Chinese).
- [32] 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[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 45-61.
Guo Dijun, Liu Jianzhong, Zhang Li, et al. The Methods of Lunar Geochronology Study and the Subdivisions of Lunar Geologic History[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(6): 45-61(in Chinese).
- [33] 韩坤英, 丁孝忠, 范本贤, 等. 基于 GIS 的区域地质编图方法[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 713-717.
Han Kunying, Ding Xiaozhong, Fan Benxian, et al. Methods of regional geological map production based on GIS[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 713-717(in Chinese).
- [34] 王杨刚, 李玉龙, 王新春, 等. 基于 GIS 的地质项目管理系统研究与实现——以战略性矿产远景调查专项项目管理系统为例[J]. 中国地质, 2010, 37(2): 542-549.
Wang Yanggang, Li Yulong, Wang Xinchun, et al. Research and realization of the geologic projects management system based on GIS: A case study of the strategic mineral prospect survey Projects management system[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 542-549(in Chinese).
- [35] 王杨刚, 吴晓红, 李玉龙, 等. 基于 GIS 的地质项目管理系统平台研究[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1396-1404.
Wang Yanggang, Wu Xiaohong, Li Yulong, et al. A study of the Geological Project Management Platform based on GIS[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1396-1404(in Chinese).
- [36] 方世明, 吴冲龙, 刘刚, 等. 基于 GIS 的地质图图切剖面计算机辅助编绘[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 440-444.
Fang Shiming, Wu Chonglong, Liu Gang, et al. The producing of cutting section plane of geology map aided by computer based on GIS[J]. Geology in China, 2002, 29(4): 440-444(in Chinese).
- [37] 欧阳自远. 月球地质学[J]. 地球科学进展, 1994, 9(2): 80-81.
Ouyang Ziyuan. Lunar geology[J]. Advances in Earth Science, 1994, 9(2): 80-81(in Chinese).
- [38] Dundas C M, McEwen A S. Rays and Secondary Craters of Tycho[J]. Icarus, 2007, 186(1): 31-40.