

doi:10.13745/j.esf.2014.06.003

基于 ArcGIS 的月球数字地质填图:以月球北极地区为例

丁孝忠¹, 王 梁^{1,2}, 韩坤英¹, 庞健峰¹, 刘建忠³, 郭弟均³, 丁伟翠⁴, 剧远景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
3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002
4. 中国地质科学院, 北京 100037

DING Xiaozhong¹, WANG Liang^{1,2}, HAN Kunying¹, PANG Jianfeng¹, LIU Jianzhong³, GUO Dijun³, DING Weicui⁴, JU Yuanjing¹

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

DING Xiaozhong, WANG Liang, HAN Kunying, et al. The lunar digital geological mapping based on ArcGIS: Taking the Arctic region as an example. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 019-030

Abstract: The lunar digital geological mapping is based on the data, which includes the Chang'E-1 (CE-1) CCD3C image data, interference imaging spectrometer (IIM) data, laser altimeter (LAM) data, Chang'E-2 (CE-2) CCD3C image data as well as other lunar geological data to study the material compositions of the lunar surface, structures elements and the information of geochronology, to compile the lunar geological map and to establish spatial database of the moon by using the ArcGIS platform and Geodatabase model. In this paper, taking the Arctic region as an example, we have made the standard, process, method and legend for the lunar geological mapping, preliminarily compiled the geological map of the Lunar Arctic Region(YQ-1) at a scale of 1:2.5M and established the spatial database, which have laid the foundation for the geological comprehensive study of the moon, the geological mapping of the global moon, and also the geological mapping of other celestial bodies in the future.

Key words: digital geological mapping; ArcGIS; Geodatabase; lunar Arctic region

摘 要:月球数字地质填图是以中国探月工程获得的“嫦娥一号”(CE-1) CCD3C 影像数据、干涉成像光谱仪(IIM)数据、激光高度计(LAM)数据、“嫦娥二号”(CE-2) CCD3C 影像数据以及其他已有的月球地质资料为基础,通过对月表物质成分、构造要素、地质时代信息的研究,基于 ArcGIS 平台与 Geodatabase 数据模型,编制月球地质图并建立空间数据库。文中以月球北极地区为例,制定月球地质填图的标准、流程、方法和图示图例,编制 1:250 万月球北极地区地质图(YQ-1),建立空间数据库,为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基础。

关键词:数字地质填图; ArcGIS; Geodatabase; 月球北极地区

中图分类号: P184.62 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2014)06-0019-12

收稿日期: 2014-07-22; 修回日期: 2014-08-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2009AA122201); 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”项目(Y2ZZ031000-02); 国家自然科学基金项目(41373068)

作者简介: 丁孝忠(1963—), 男, 研究员, 长期从事区域地质与地质编图研究。E-mail: xiaozhongding@sina.com

月球是离地球最近的天体之一,人类对月球的探测始于17世纪。20世纪50年代起,人类开展了大量载人 and 无人探月活动,美国地质调查局(USGS)在20世纪60—70年代利用 Lunar Orbiter 的影像图编制了44幅比例尺为1:100万的月球正面区域的地质图;在此基础上又编制了1:500万月球正面、东部、南极和北极等地区地质图,第一次完成了覆盖全月球的地质图编制。2002年美国地质调查局又开展了新一轮月球地质图编制工作,将月球划分为30个图幅(命名为LQ-1—LQ-30),统一提供相同投影方式和比例尺的地形数据,应用 Clementine 与 Lunar Prospector 月球探测器数据编制1:250万月球地质图,已取得阶段性成果,完成了哥白尼幅等4幅草图。

21世纪初期,我国首次月球探测工程获得了“嫦娥一号”(CE-1)卫星 CCD 影像数据、干涉成像光谱仪(IIM)数据及激光高度计(LAM)数据等大量各等级数据。李春来等^[1-2]通过“嫦娥一号”卫星 CCD 数据获得了月球影像图,制作了月球 DEM 模型;丁孝忠等^[3-4]应用 CE-1 资料编制了虹湾幅(LQ-4)1:250万地质图,并建立了月球地质数据空间数据库,探索制定了月球数字地质填图技术规范、流程与方法;陈建平等^[5]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^[6-8]利用“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据获取了月表 FeO 和 TiO₂ 分布情况。这些研究成果都为正在开展的“月球数字地质填图”预研究奠定了基础。

在20世纪50—70年代的月球探测活动中,月球北极等高纬度地区受条件的限制获取的资料相对较少。90年代开始的新一轮探月活动中,各国都加强了对月球南北两极地区的研究。2007年10月24日,我国第一个月球探测器“嫦娥一号”卫星(CE-1)发射升空,至2008年5月12日,CE-1探测器的 CCD 立体相机成功获取了月球南北纬70°范围内的影像数据,2008年7月1日,又完整获取了月球两极地区高分辨率(120 m)影像数据,并制作了月球极区影像图^[1]。2010年10月1日,我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,获得了包括南北极区表面的全月球50 m 分辨率影像图,这使得我们能够利用自己国家的月球科学探测数据编制月球极区地质图。

1 月球北极地区地质地貌特征

本文的研究区域为月球北极地区,图幅编号为 YQ-1,经纬度范围为 180°W~180°E,60°~90°N。本次编图是根据“嫦娥一号”CCD 3C 数据合成月球的影像图(分辨率为120 m),将全月划分为12个区域,命名为 YQ-1 至 YQ-12,分区及命名编号如图1。月球上具有两种主要的地质单元:一是表面平整光滑的、亮度非常低的月海区域,主要分布于风暴洋和雨海地区;二是表面崎岖粗糙的、亮度较高的高地区域,主要分布于月球背面。图2为月球北极地区“嫦娥一号”CCD 影像图,该区域大型撞击坑主要有菲洛劳斯(Philolaus)、毕达哥拉斯(Pythagoras)、普莱斯克特(Plaskett)、方特内利(Fontenelle)、施瓦茨席尔德(Schwarzschild)、萨默菲尔德(Sommerfeld)、罗兹德茨芬斯基(Rozhdestvenskiy)和梅顿(Meton)等。

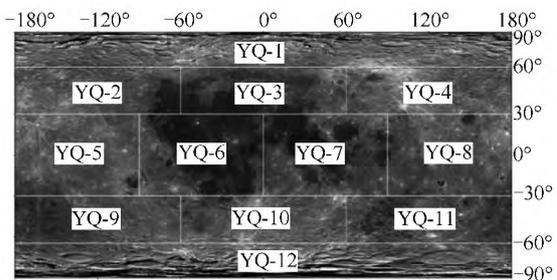


图1 月球地质图分幅、命名编号及北极地区在月面的位置示意图

Fig. 1 The framing of lunar geological maps and the position of the Arctic region (YQ-1)

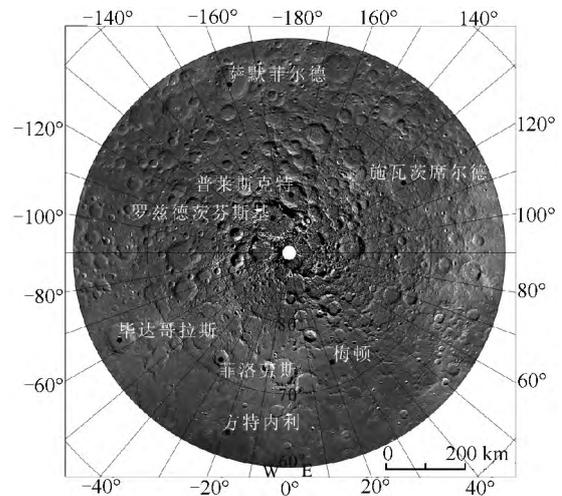


图2 月球北极地区 CE-1 影像图 (极射赤平投影,下同)

Fig. 2 CE-1 image of lunar Arctic region

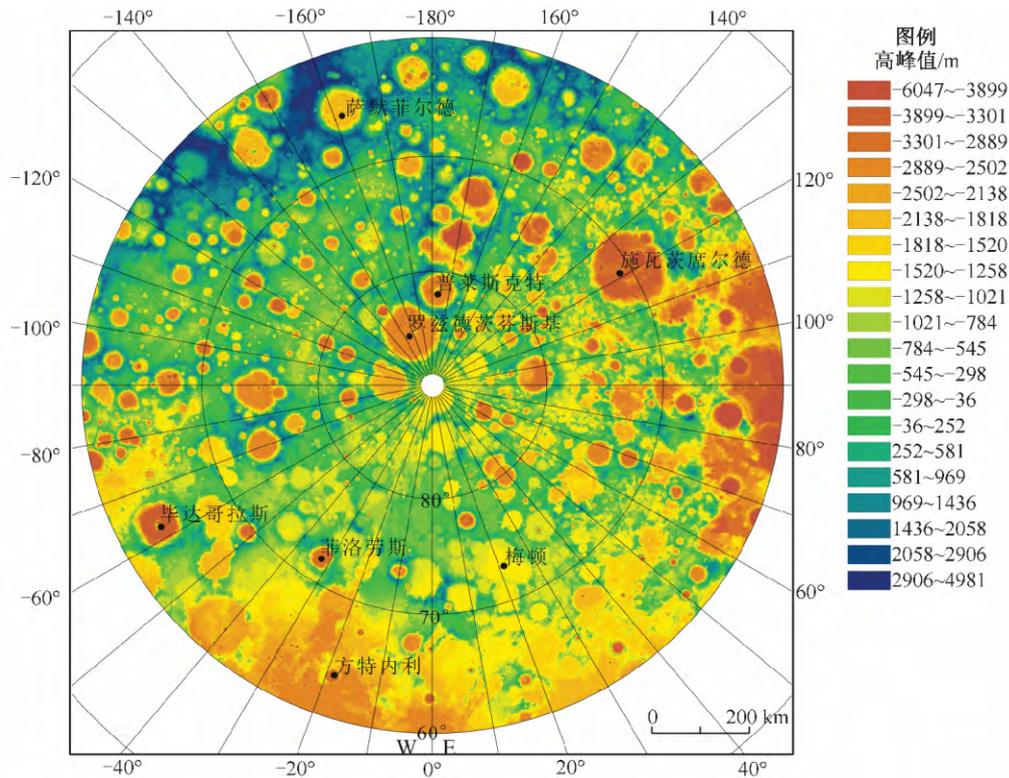


图3 月球北极地区地形地貌特征图

Fig. 3 Geomorphic characteristics of the lunar Arctic region

图3是由美国LRO探测器的LOLA激光高度计数据制作的北极地区的DEM图,其空间分辨率为60 m。通过DEM图可以看出本区的地形地貌特征:北极地区的地形相对较为平坦,极点周围地势平坦,有许多小撞击坑,北极地区最低点为-6 047 m,最高点为4 981 m,就地势而言,北极地区在地势上处于一个从月海到月陆高地的过渡地带,其月球正面一侧70°以下多是月海边缘区域,而其对应的月球背面一侧则是连续分布的月球高地^[9]。月海地区撞击坑密度较低,地势整体上比较平坦,地形变化较缓慢;月陆地区撞击坑密度较高,地形变化幅度较大,尤其在陆海交界和大型撞击坑坑缘,地形起伏最大^[2]。月球北极地区构造要素较少,零星分布有一些坑链、月岭、月谷、断裂、地堑、月溪、垮塌构造、深部断裂和火山口等^[10]。

2 地质填图方案的制定

2.1 填图使用数据资料及填图流程

在本次月球数字地质填图过程中使用到的主要数据资料有“嫦娥一号”(CE-1)CCD3C影像数据、干

涉成像光谱仪(IIM)数据、激光高度计(LAM)数据,“嫦娥二号”(CE-2)CCD3C影像数据,LRO探测器LROC宽视角影像图、LOLA激光高度计数据,月表成熟度数据(OMAT),月表粗糙度数据(LDRM),1:100万、1:500万月球地质图(美国)以及Lunar Impact Crater Database 2011数据库等。其来源与在填图中的用途如表1,填图流程如图4。

2.2 投影及比例尺的确定

不同纬度地区使用不同投影导致地质图变形程度不同,为了使各地区变形程度达到最小,根据计算,本次填图不同纬度地区选择以下不同的投影方式:(1)赤道地区(-30°~30°)采用墨卡托投影(Mercator Projections);(2)中纬度地区(30°~60°)间采用兰伯特正形圆锥投影(Lambert Conformal Conic Projection);(3)两极地区(60°~90°)采用极射赤平投影(Pole Stereographic)。坐标系分为投影坐标系和地理坐标系(经纬度)。因此,在月球北极地区投影坐标系采用的是极射赤平投影(Pole Stereographic),参数为假东0.000 000,假北0.000 000,中央经度0.000 000,缩放比例1.000 000,原点纬度90.000 000,线性单位m;地理坐标系参考采用

表 1 月球地质填图数据源及用途

Table 1 Data sources and the applications of the lunar geological mapping

数据名称	数据描述	数据来源和任务名称	在填图中的用途
CE-1 CCD3C 影像数据	120 m	探月工程“嫦娥一号”探测器	主要用来识别环形构造, 确定月陆、月海和坑物质的各类界线
CE-1 干涉成像光谱仪数据	200 m	探月工程“嫦娥一号”探测器	反演 FeO、TiO ₂ 等含量和分布
CE-1 激光高度计数据	500 m	探月工程“嫦娥一号”探测器	制作 DEM, 制作山体阴影图作为地质图的地理底图
CE-2 CCD3C 影像数据	50 m	探月工程“嫦娥二号”探测器	辅助识别环形构造, 辅助确定月陆月海坑物质的界限
LROC 宽视角影像图	100 m	NASA, PDS 下载获得, LRO 探测器	辅助识别各类线性构造、火山构造、穹窿构造和火山物质
LOLA 激光高度计数据	60 m	NASA, PDS 下载获得, LRO 探测器	制作 DEM, 精度较嫦娥数据高, 主要用来识别线性构造、古老撞击坑和大型盆地边界, 辅助各类物质的划分, 识别古老的坑物质
月表成熟度数据	1 km	NASA, PDS 下载获得, Clementine 数据制作	判定新鲜撞击坑辐射纹
月表粗糙度数据		NASA, PDS 下载获得, LOLA 数据制作	划分大型盆地建造
月球地质图(美国)	1:100 万、1:500 万	USGS 网站下载	参考撞击坑定年及月坑名称等

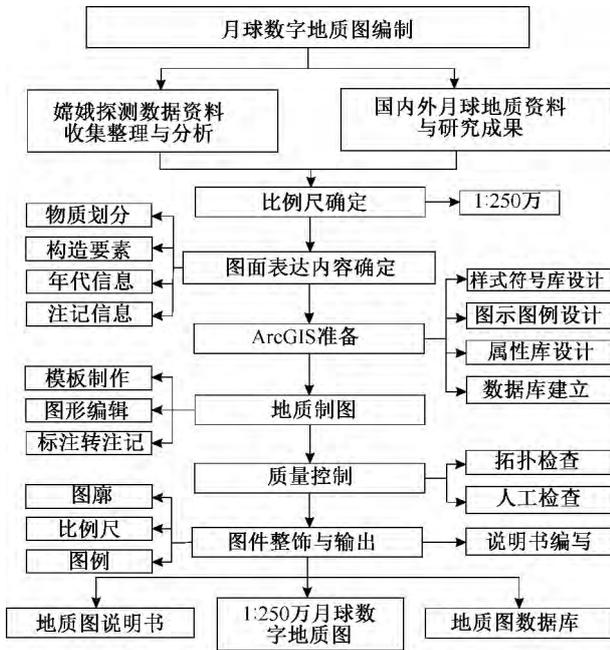


图 4 地质图编图及建库流程

Fig. 4 The process of geological mapping and database building

Moon_2000_IAU_IAG 标准椭球体和 D_Moon_2000 的基准面。

制图比例尺与卫星影像的关系是: 比例尺 = 影像分辨率 / 肉眼分辨率, 因此决定比例尺的是填图所使用的主要数据中分辨率最低的数据, 即 CE-1 干涉成像光谱仪数据 (岩性分类的主要数据), 其空间分辨率是 200 m, 而肉眼的视觉分辨率为 0.1~0.2 mm, 通过计算, 可满足 1:200 万比例尺制图。按照地质编图基本比例尺要求, 以及考虑到图幅整饰与

图幅出版尺寸等因素, 将编图比例尺确定为 1:250 万^[1,4]。

2.3 地质填图方案与图面表示内容

本文是基于 ArcGIS 平台, 使用 Geodatabase 数据模型建立数据库, 利用嫦娥卫星任务数据及现有其他月球地质资料数据进行月表物质成分、构造要素、地质时代信息的研究, 填制月球北极地区 1:250 万比例尺地质图。月球地质图作为反映月球地质演化历史的重要图件, 图面主要表达内容包括月表物质成分、各类构造要素、地质时代信息和注记信息等 4 类。

(1) 月表物质成分信息是编制月球地质图的重要依据。月表物质类型强调物质成分特征, 划分为月海物质单元 (mare units)、高地物质单元 (highland units)、坑物质单元 (crater units)、盆地物质单元 (basin units) 和火成碎屑物质单元 (pyroclastic materials) 5 种类型^[5]。其中月海物质 (玄武岩) 又根据 TiO₂ 的含量分为极低钛玄武岩 (TiO₂ 质量分数 < 4%)、低钛玄武岩 (4% < TiO₂ 质量分数 < 6%)、中钛玄武岩 (6% < TiO₂ 质量分数 < 9%)、高钛玄武岩 (9% < TiO₂ 质量分数 < 11%) 和极高钛玄武岩 (TiO₂ 质量分数 > 11%); 高地物质分为 KREEP 岩、富镁结晶岩套和亚铁斜长岩; 坑物质分为辐射纹 (哥白尼纪特有)、坑缘物质、坑壁物质、坑底物质和中央峰物质; 盆地建造分为溅射物、盆缘建造、盆壁建造、盆底建造和中央峰建造; 火成碎屑物质分为含尖晶石类火成碎屑岩、含橄榄石类火成碎屑岩和未分的火成碎屑岩。

(2) 构造要素包括月表构造要素和深部构造要素等。月表构造要素包括线性构造和环形构造。线性构造又分为月岭、月溪、月谷、地堑、断裂、坑链和坍塌构造; 环形构造分为大型盆地、撞击坑、隐月坑和月海穹窿。深部构造包括深部断裂、质量瘤和地体构造等。

(3) 地质图中地质年代是非常重要的信息, 确定各要素的时代是编图的基础, 可以更好地了解月球区域与整体地质演化。本次填图结合月球地质历史上的撞击事件, 将月球地质历史和演化阶段划分为哥白尼纪(C)、晚爱拉托逊世(E₂)、早爱拉托逊世(E₁)、晚雨海世(I₂)、早雨海世(I₁)、酒海纪(N)、艾肯纪(A)和前艾肯纪(pA), 具体年代划分如表 2。

(4) 地质图上的注记信息是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。图面注记信息包括以下几类要素: ①经纬线, 图中采用经差 10°、纬差 10°; ②地貌要素选取高程点及注记; ③月海名称注记, 月溪名称注记, 撞击坑名称注记; ④坑物质与盆地物质代号注记; ⑤高地物质组成与划分; ⑥玄武岩厚度注记; ⑦我国嫦娥卫星着陆点、前苏联 Luna 登月着陆点与美国 Apollo 登月着陆点注记等。

2.4 Style 样式库的设计

符号是地图的语言, 所有的空间信息都是以符号的形式表现的, 因此地质图符号库的设计与建立对于编制月球地质图是非常重要的。在 ArcGIS 系

统下设计并建立地质图的符号库, 是为数据库的建立和地质填图做准备。

ArcGIS 系统中符号库是使用 Style 文件进行管理, 其格式为 .style。由于月球地质图专业性较强, 系统提供的符号库不能满足填图需求, 因此本次填图需要专门设计满足填图要求的符号库。地质图中各要素可分为点状符号、线状符号、面状符号和注记类符号 4 种。本次填图主要参考地球地质图与国外已有的月球地质图的图示图例, 再根据本次填图方案设计并制作符号库, 符号力求简单明了、通俗易懂。月球地质图图例主要遵循以下几个原则: (1) 不同成分的月海玄武岩均以同色相的不同色调区分, 同一单元不同年代的玄武岩使用代号区分。(2) 年代较新的地层(撞击坑物质)使用浅且亮的颜色, 年代较老的使用较暗的颜色; 盆地建造使用不同颜色区分年代, 花纹区分成分; 高地岩石建造使用同色相的不同色调, 花纹区分岩性。(3) 对于面积较小或呈狭窄长条状分布的地质单元, 选择偏深的颜色, 对于面积较大的选用比较浅的颜色。本次填图的色标使用系统提供的 C、M、Y、K 的比例进行调色^[4]。建立的图示图例如图 5。

2.5 数据库与填图模板的建立

全月数字地质填图是基于 ArcGIS 平台, 使用 Geodatabase 数据模型建立数据库。Geodatabase 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, 是一种统一的、智能的空间数据模

表 2 月球地质年代划分

Table 2 The division of lunar geological time

地质单元年代(代号)		年龄界限 /Ga	主要事件	
新月宙 Neolunarisan	哥白尼纪(C) Copernican Period	0.0~0.8	形成具有辐射纹的新撞击坑	
	爱拉托逊纪(E) Eratosthenian Period	晚爱拉托逊世(E ₂) Late Eratosthenian Epoch	0.8~2.8	形成无辐射纹的撞击坑
		早爱拉托逊世(E ₁) Early Eratosthenian Epoch	2.8~3.16	高钛月海玄武岩喷发
古月宙 Paleolunarisan	雨海纪 Imbrian Period	晚雨海世(I ₂) Late Imbrian Epoch	3.16~3.8	大规模月海玄武岩泛滥(中低钛月海玄武岩)
		早雨海世(I ₁) Early Imbrian Epoch	3.8~3.85	(1) 雨海事件: 雨海盆地 (2) 东海事件: 东海盆地
	酒海纪(N) Nectarian Period	3.85~3.92	形成酒海盆地等 10~12 个大型撞击盆地	
	艾肯纪(A) Aitkenian Period	3.92~4.2	形成包括南极艾肯(SPA)盆地在内的可识别的 30 个撞击盆地	
冥月宙 Eolunarisan	前艾肯纪(pA) Pre-Aitkenian Period	4.2~4.56	斜长岩月壳形成	



图 5 月球地质图图例(部分)
Fig. 5 Legend of lunar geological map

型。Geodatabase 使用数据库管理系统 (DBMS) 存储和管理栅格数据集、矢量数据集、TIN 数据集以及相关的属性数据等, 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。Geodatabase 数据库按结构可分为 Personal Geodatabase (个人空间数据库)、File Geodatabase (基于文件格式的数据库), 建立模型方法是在 ArcCatalog 中新建 Personal Geodatabase, 然后再根据填图方案新建一个或多个要素数据集和要素类。要素数据集可由对象类、要素类、关系类和几何网络构成。一个数据集可包含多个要素类, 并共享同一个空间参考, 数据集内的数据可以建立拓扑关系, 方便数据的检查、修改和更新。存储拓扑要素 (feature) 的要素类必须在要素数据集 (feature dataset) 内, 以确保共同的空间参考。矢量数据是通过 shapefile 格式存储, 栅格数据可直接导入数据库^[11]。建立数据库模型如图 6。

在 ArcGIS 系统平台下, 将地质图地质要素划

分为点状要素类、线状要素类和面状要素类。每类要素需要有一定的属性信息, 因此在创建要素时需要添加相关的属性字段, 例如坑物质需要有类型、时代和地质代号等信息。依据填图需求以点要素类与坑物质类为例设计属性结构表如表 3、4。

表 3 点状要素类属性结构

Table 3 Attribute structure of point elements

字段名称	类型	字段长度	说明
TYPE	文本	10	填写要素类型
Longitude	字符串	20	填写经度
Latitude	字符串	20	填写纬度

表 4 坑物质属性结构

Table 4 Attribute structure of crater material

字段名称	类型	字段长度	说明
Class	文本	10	填写坑物质类型
Symbol	字符串	50	填写时代和代号
Discrible	文本	100	填写判别依据

为了其他图幅方便使用并统一填图, 建立了数

数据库模型与 mxd 工程文件模板, 工程文件图层排列原则是上面的图层压盖下面的图层, 因此从上至下依次为注记图层、点图层、线图层、面图层和数据源。面状图层可根据地质体年代新老关系、内容重要性与图面的美观等因素, 使用符号级别控制每个要素的压盖顺序。建立工程文件模板如图 7 所示。



图 6 基于 Geodatabase 建立数据库

Fig. 6 Establish a database based on Geodatabase



图 7 工程文件模板图层顺序

Fig. 7 Layer sequence of the project file template

3 月球北极地区地质填图

3.1 月表物质成分填图

3.1.1 坑物质解译

撞击是太阳系内固体行星上主要的地形塑造作用^[12], 因此撞击坑是月球表面最常见的地形地貌。坑物质根据其位置分为 5 个相带: 辐射纹(*crr*) (哥白尼纪特有且比较清晰, 其余年代没有)、坑缘物质(*crh*)、坑壁物质(*cw*)、坑底物质(*cf*)和中央峰物质(*ccp*)。坑物质的分类如表 5。坑物质的识别与解译是依据遥感影像的灰度差异、DEM 信息及剖面图曲线等途径^[13]。对于坑壁物质和坑缘物质在影像上不容易区分出来, 可以通过 DEM 数据使用 3D Analyst 工具横穿撞击坑切一条剖面, 再根据剖面图中地形的高低起伏辨别, 撞击坑溅射物堆积形成的相对高峰称为坑唇, 坑唇外侧具有较高反射率的物质为坑缘物质, 坑唇到坑底坡度较大的物质为坑壁物质(如图 8d)。以哥白尼纪塞利坑坑物质的解译为例(如图 8)。

表 5 坑物质分类

Table 5 Crater material classification

名称	定义及特征
辐射纹	陨石撞击月球表面, 喷溅出来的辐射状喷射物, 哥白尼纪特有。亮色、放射状, 与周围物质存在明显反照率差异。
坑缘物质	撞击过程中挖掘出的物质以逆层序堆积形成, 具有较高的反射率。从环形山最高峰到坑外平坦区域之间的过渡地带。
坑壁物质	坑壁上的覆盖物。从环形山最高峰(坑唇)到坑底之间的过渡地带, 多为阶地、断崖、陡坡和垮塌等。
坑底物质	位于坑底, 整体比较平坦, 局部有较小隆起, 系回落的撞击溅射物形成。
中央峰物质	大型撞击坑坑底中央的隆起物质。与坑底物质界限清晰, 根据遥感影像和 DEM 数据进行判别。

坑物质的年代是一个地质图中非常重要的信息, 在月球科学中, 月球地层单元定年可分为绝对定年和相对定年两种方法。绝对定年的方法有样品的同位素测年法和月球成坑计年法两种。相对定年方法又主要可以分为两大类^[14]: 一是基于地层之间的覆盖和交切关系的定年方法, 即地层叠置法; 二是基于撞击坑的定年方法。撞击坑就像地球上的化石一样可以用于单元时代的确定^[15-16]。撞击坑的定年方法又可以分为两类: 一种是基于撞击坑密度统计的方法 CSFD (Crater Size-Frequency Distribution),

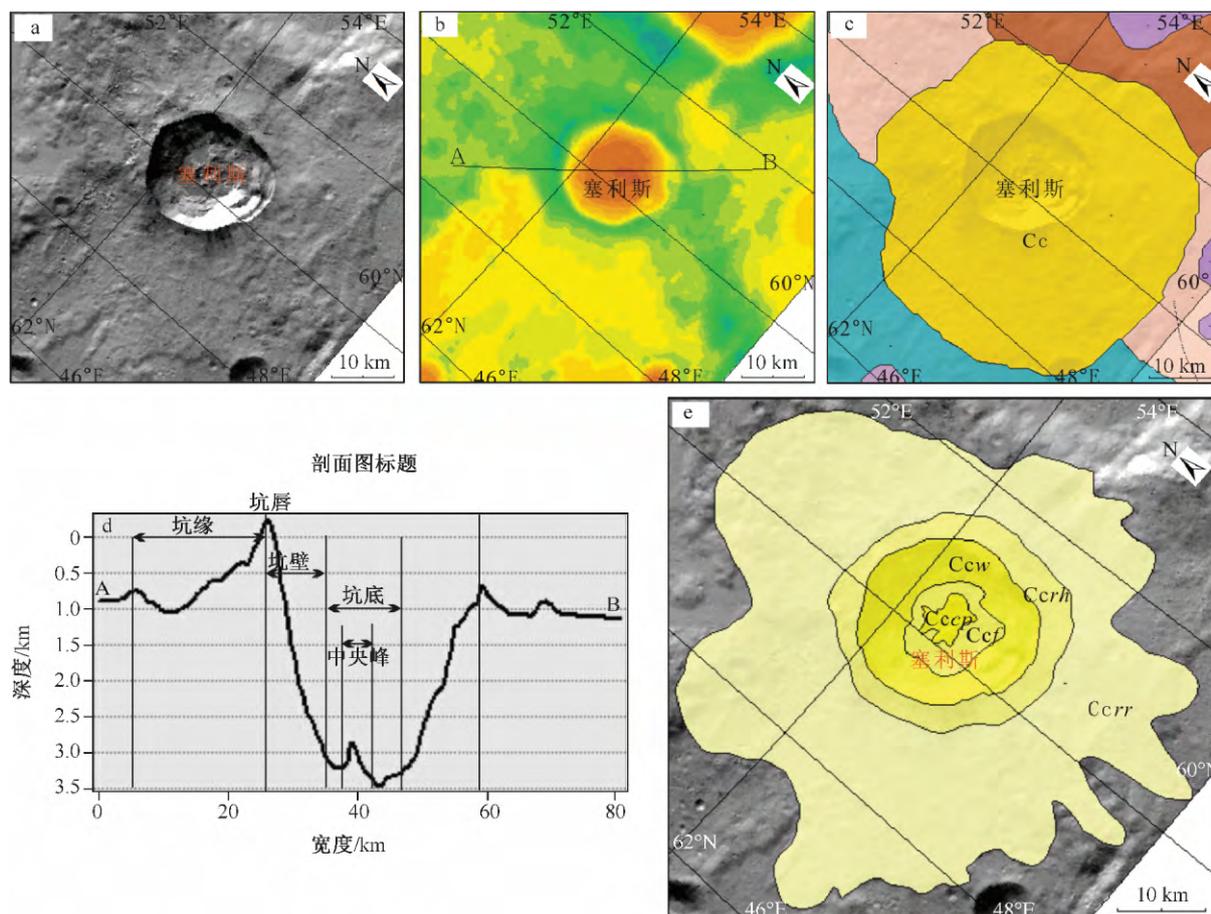


图8 坑物质的解译

Fig. 8 Crater material interpretation

a—CE-1 CCD影像图；b—LOLA DEM数据；c—美国1:500万月球地质图；d—3D Analyst生成的剖面图(沿图b中切线AB生成的剖面图)；e—坑物质划分图。

主要用来确定某一特定的地质单元表面年龄；另一种是基于撞击坑形态的定年方法，用来确定单个撞击坑的形成时代^[5]。本次填图撞击坑坑物质的定年使用该撞击坑形成的年代，以坑壁的年代为准，这样对于其所在单元的表面时代具有一定的限定作用。填图发现，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^[17]。

3.1.2 大型盆地建造解译

大型盆地建造根据位置分为溅射物、盆缘建造、盆壁建造、盆底建造和中央峰建造五个相带。北极地区基本没有完整的盆地，但是靠近月球正面北纬70°以下多为露湾、冷海、雨海、洪堡德和风暴洋等大型盆地的边缘或溅射物，要想准确解译与划分盆地物质，就必须搞清楚这些大型盆地的范围与形成年代。通过查阅相关文献，确定了露湾、冷海与雨海盆地形成于雨海纪，洪堡德海盆地形成于酒海纪，风暴

洋形成于艾肯纪。大型盆地形成年代较早，由于后期撞击等地质事件的破坏，退化程度较高，相带不易划分，可利用月表粗糙度数据(LDRM)辅助进行划分。

3.1.3 高地岩石建造解译

依据相对高差与空间分布，月表岩石主要分为两种类型，月陆(高地)区域和月海区域^[18]，影像上月陆表现为明亮区域，月海为暗色区域。高地岩石主要形成于前酒海纪，即艾肯纪与前艾肯纪，根据Lunar Prospector数据中所含Th、Mg、Fe元素将高地物质划分为KREEP岩、富镁结晶岩和亚铁斜长岩。Th元素含量较高($>7 \times 10^{-6}$)的物质划分为KREEP岩，形成于3.94~4.0 Ga；含Mg元素(Mg指数大于70)的物质划分为富镁结晶岩套，形成于4.2~4.4 Ga；以FeO质量分数11%为基准，将小于11%地区划分为高地地区，该地区的主要岩石类型定义为亚铁斜长岩，形成于4.4 Ga以上。KREEP

岩分布在月海玄武岩区域内, 主要分布在风暴洋和雨海地区^[19]。KREEP 岩在月表分布较少且特征明显, 填图时首先将 KREEP 岩地区圈出, 而富镁结晶岩套的特征相对于亚铁斜长岩突出, 因此再将富镁岩套画出, 最后勾画亚铁斜长岩区域。高地岩石建造的数据是使用“嫦娥一号”干涉成像光谱仪(IIM)数据反演得到。

3.1.4 月海岩石建造解译

月海玄武岩的分布图是利用 Apollo 和 Luna 取样点的干涉成像光谱仪数据和月表 TiO₂ 含量, 使用凌宗成等^[6]结合 Lucey 的方法建立的适合“嫦娥一号”干涉成像光谱仪(IIM)数据的数学模型反演得到的, 并根据 TiO₂ 质量分数将月海玄武岩划分为 5 类^[18,20]: 极低钛玄武岩(TiO₂ 质量分数 < 4%)、低钛玄武岩(4% < TiO₂ 质量分数 < 6%)、中钛玄武岩(6% < TiO₂ 质量分数 < 9%)、高钛玄武岩(9% < TiO₂ 质量分数 < 11%)和极高钛玄武岩(TiO₂ 质量分数 > 11%)。由于爱拉托逊纪和雨海纪等不同时代都有玄武岩, 早爱拉托逊世有月海高钛玄武岩喷发, 晚雨海世有大规模的中低钛月海玄武岩喷发, 因此不同地区的玄武岩还需根据玄武岩划分单元的实际情况, 利用 1983 年 Neukum 提出的应用统计直径 $D \geq 1$ km 撞击坑的累计密度计算玄武岩年龄进行时代判定。北极地区 60°~65°N、0°~30°W 的冷

海边缘区域分布少量月海玄武岩, 主要是极低钛玄武岩, 夹有少量低钛玄武岩。通过计算, 该区域月海玄武岩年龄为晚雨海世(I₂)。北极地区的月海玄武岩与高地岩石分布如图 9。

3.1.5 火成碎屑物质的解译

火成碎屑物质形成于火山岩喷发过程, 主要由喷出的玄武质岩浆快速冷凝固晶形成的细粒玻璃、岩屑和晶屑等物质组成, 富含铁的氧化物、钛铁矿含量表现出一定差异。火山碎屑物质的分布通常与月溪和火山通道等火山机构有关, 覆盖在其他物质之上, 且与下伏的物质表现出渐变的边缘。由于火山碎屑物质的流动性, 其常聚集在洼地、月溪等负地形中。但有时也可因物质的大量填充, 而形成正地形。

火成碎屑岩在遥感影像图上最大特征是反射率低, 因此可根据光谱特征进行矿物成分的反演并确定其类型, 如橄榄岩型、尖晶石型和辉石岩型等。本次填图将火成碎屑物质分为含尖晶石类火成碎屑岩、含橄榄石类火成碎屑岩和未分的火成碎屑岩 3 种。火成碎屑物质面积非常小, 但具有重要意义, 因此用点状符号对其夸大表示。

3.2 线性构造与环形构造的解译

3.2.1 线性构造的解译

线性构造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

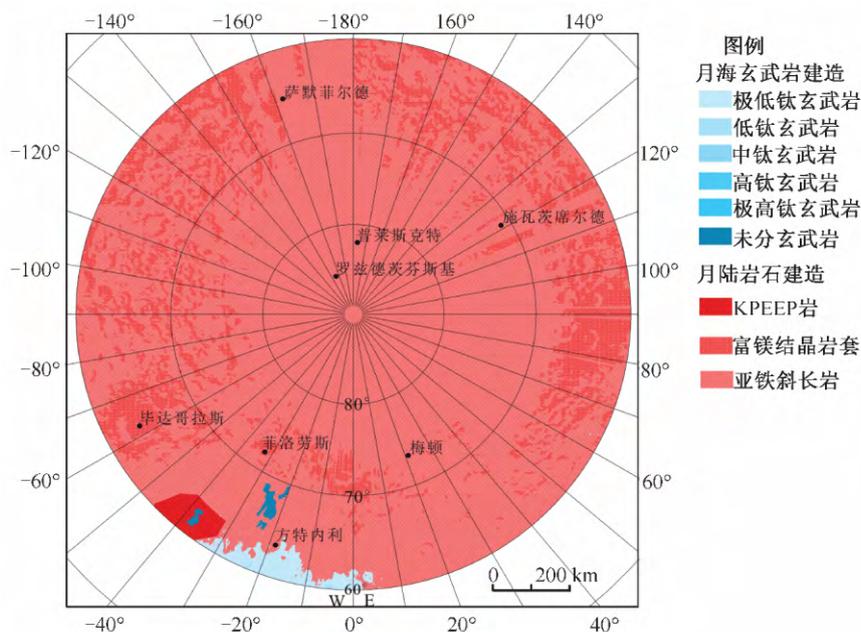


图 9 北极地区高地岩石建造与月海岩石建造分布图

Fig. 9 Distribution map of highland rock and mare rock formations of the Arctic region

地质信息,对研究月球的构造演化有重要的指示意义^[21]。在参考国际天文联合会(IAU)行星命名规则与美国地质图分类方案基础上,根据各类线性构造要素的成因,基于线性构造在月球影像上的形貌

形态特征和 DEM 信息^[5],本次填图方案将月表的线性构造分为:月岭、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链和垮塌构造 7 类,其影像特征、分布位置及成因如表 6。

表 6 月表线性构造分类表^[5]Table 6 Lunar linear structure classification^[5]

中文名	英文名	分布位置	成因分析	影像特征
月岭	Ridges	多分布在月海中	盆地充填形成的挤压力;全球热能收缩;潮汐力影响	正线状地形。形状呈现绳状、辫状、重叠、断续特征
月溪	Rima, rimae	大多分布在月海玄武岩区域	火山作用,熔岩流特征,熔岩通道或者塌陷的熔岩管	负地形,窄的负线状地形,形态曲折盘旋
地堑	Graben	大型撞击盆地边缘	构造作用形成,多在大型撞击盆地边缘,由盆地充填的张应力形成,也与月球热能膨胀有关	负地形,弧状或直线状
月谷	Vallis, valles	多分布在高地	可能由张应力形成	较宽的负线状地形
断裂	Fracture	中等尺寸撞击坑底部	陨石撞击形成的裂隙,与地形隆起有关	负地形,形状不规则
坑链	Catena, catenae	月海和高地	次级撞击坑或者撞击形成的裂缝受后期岩浆侵蚀	线状洼地,圆齿状边缘
垮塌构造	Collapse structure	位于大型撞击坑或盆地环形山的内壁部位	多是由于重力垮塌作用形成的	呈阶梯状,具有明显陡立的滑坡面和块状的滑坡体

线性构造可以运用 Landsferf 软件自动提取作为辅助,再对照影像进行人工识别并手动提取。线性构造要素在“嫦娥一号”影像上不够清晰,需综合影像形态、DEM 高程等多源遥感信息和美国月球地质图件进行综合地质解译。

3.2.2 环形构造的解译

环形构造对于揭示一个地区的构造演化具有重要意义。欧阳自远在《月球科学概论》中把月球上的环形构造分为撞击坑、火山口和月海穹窿 3 种^[22]。月表长期遭受陨石撞击,因此撞击坑和月海盆地是月球上最为常见的环形构造,此外还分布有少量火山口和月海穹窿,而许多早期形成的撞击坑退化程度较高,在影像图上只能看到残留的撞击坑边缘,将其称为隐月坑。在 1:250 万比例尺的地质图上火山口面积小,却是重要的构造要素,因此使用点状符号将火山口夸大表示。基于此,本次数字地质填图将月表环形构造划分为大型盆地、撞击坑、隐月坑与月海穹窿 4 种。

3.3 填图结果

月表物质划分、定年和构造解译之后,对图面进行拓扑检查并修改,方法是在数据集下新建拓扑,然后设置图层、容限值、精度等级以及拓扑关系规则,对检查出来的错误逐一进行修改。图面修改之后添加各类注记,在图层属性中选择字段添加标注,再使

用标注转注记功能,快速添加注记信息。图面注记包括:高程点及高程点注记、月海名称注记、月溪名称注记、撞击坑名称注记、坑物质与盆地建造代号注记和各国探测器登月点等。填图结束后对图幅进行整饰,添加图名、图示图例和比例尺等内容,得到月球北极地区数字地质图,如图 10。

4 结论

这是我国第一次使用嫦娥卫星数据编制月球北极地区地质图,通过填图得到以下结论:

(1)本次月球数字地质填图是基于 ArcGIS 平台,使用 Geodatabase 数据模型建库。月球数字填图综合月球地质学、地质制图、遥感和地理信息系统等多门学科,要求填图人员熟练应用 ArcGIS 软件,例如图层的符号级别、3D Analyst、Hill Shade 和标注转注记等功能,熟练操作软件对填图工作事半功倍。

(2)月球北极地区在地势上处于一个从月海到高地的过渡地带,其月球正面一侧 70°以下多是月海边缘,而其对应的月球背面一侧则是连续分布的月球高地。月球北极地区小半径撞击坑数量较多,无完整大型盆地,要准确解译与划分盆地物质,就必须清楚这些大型盆地的范围与形成年代。基于

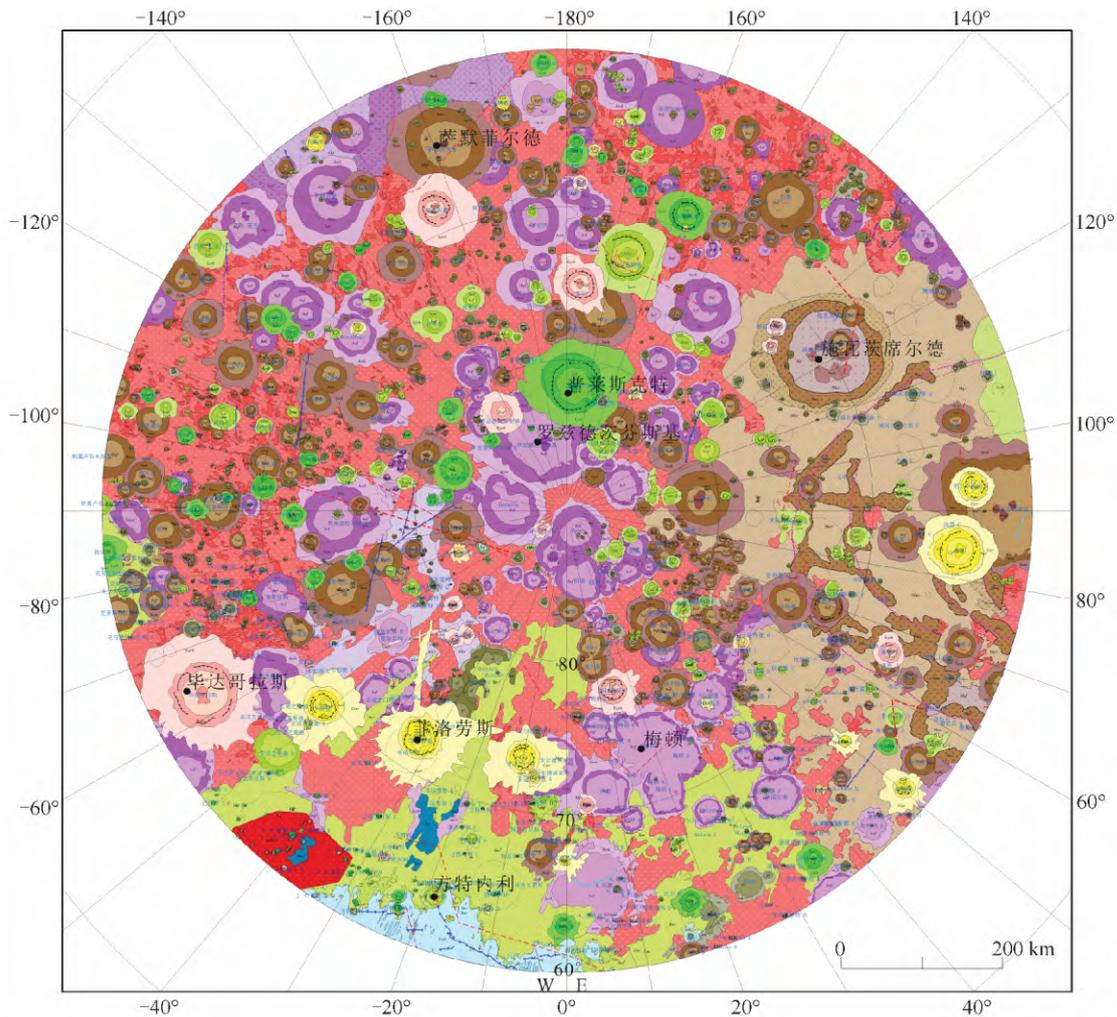


图 10 月球北极地区地质图(YQ-1,1:2 500 000)

Fig. 10 Lunar geological map of the Arctic region

图例详见图 5。

此,将遥感影像图、DEM 及月表粗糙度等数据和参考地质图件等叠合在同一参考系的数据框内,并建立解译标准进行目视解译,以提高解译精度与准确性。

(3)月球北极地区具有从艾肯纪到哥白尼纪的多期地质事件(包括撞击坑、大型盆地与雨海事件等),分布各种线性与环形构造,靠近月球正面一侧分布少量 KREEP 岩与低钛、极低钛月海玄武岩,这些代表了月球丰富的地质演化历史。

(4)由于月球地质图与地球地质图图面表示内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,因此建立月球地质填图图示图例、标准与技术规范,对于今后其他天体的区域地质综合研究与地质填图具有重要意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. “嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据 TiO_2 反演初步结果[J]. 科学通报, 2011, 56(16): 1257-1263.

- [7] 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.
- [8] 凌宗成,张江,武中臣,等. 月球 Aristarchus 地区的物质成分与岩石类型分布[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013(11): 1403-1410.
- [9] 程安云,王世杰,李雄耀,等. 月球南北两极研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1070-1074.
- [10] Cook A C, Spudis P D, Robinson M S, et al. The topography of the lunar poles from digital stereo analysis[C]//Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. 1999, 30: 1154.
- [11] 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, 2006, 32(4): 713-717.
- [12] 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.
- [13] 李珂,陈建平,奚晓旭,等. 基于撞击坑自动识别的月球雨海北部地区(LQ-4)月海玄武岩定年研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(6):47-59.
- [14] Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. The Geologic History of the Moon[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1987.
- [15] Mutch T A. Geology of the Moon[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1972:391.
- [16] McGill G E. Attitude of fractures bounding straight and arcuate lunar rilles[J]. Icarus, 1971, 14(1): 53-58.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Thorium abundances on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 2000, 105(E8): 20307-20331.
- [20] 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.
- [21] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. A User's Guide to the Moon[M]. London: Cambridge University Press,1991.
- [22] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005:88-89.

欢迎向新英文刊《Geoscience Frontiers》投稿

《Geoscience Frontiers》是 2010 年获国家新闻出版总署批准的新英文刊物,由中国地质大学(北京)、北京大学主办,2010 年 10 月创刊出版。《Geoscience Frontiers》的办刊宗旨为:瞄准国际地学领域学科前沿,发表国内外地学前缘研究成果,探索地学前缘发展态势,为推动地学事业和加速我国现代化建设服务。诚邀国内外地学专家向《Geoscience Frontiers》投稿。

本刊参考文献采用著者-出版年制。

投稿系统:<http://www.elsevier.com/locate/gsf>

地址:北京市学院路 29 号 中国地质大学(北京)《Geoscience Frontiers》编辑部

邮编:100083 电话/传真:010-82322283 E-mail:geofrontier@cugb.edu.cn