

月球线性构造分类体系研究*

罗林^{1,2} 刘建忠^{1**} 张莉¹ 籍进柱^{1,2} 郭弟均^{1,2} 刘敬稳^{1,2}
LUO Lin^{1,2}, LIU JianZhong^{1**}, ZHANG Li¹, JI JinZhu^{1,2}, GUO DiJun^{1,2} and LIU JingWen^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081
 2. 中国科学院大学, 北京 100049
 1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
- 2017-02-10 收稿, 2017-07-30 改回.

Luo L, Liu JZ, Zhang L, Ji JZ, Guo DJ and Liu JW. 2017. Research on the classification system of lunar lineaments. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3285 – 3301

Abstract The lineament is one of the most important component in the scientific research to the moon, and building the lineament classification system of the moon is the point of compile and study to the geologic map of the moon. Previous classification system research of the lineaments of the moon mainly based on morphology features of the lunar surface, and the types of lineament division are unreasonable enough, not yet forming an accepted, normative and popular lineaments classification system, which result in a bad relative property and low indicative and operability of the classification result, also go against drawing the lineaments outline map of the moon. The concept confusion and term disunity of the lineaments prejudice the global unified mapping and the exhibition and use of the achievement, further-more, the phenomenon that same things with different names, different meanings with same word spelling, different words with same meanings, or unclear meaning also have the above influence. Given that, this paper use the classification method with several indicators combined, formation mechanism and morphology features as the main indexes combined material composition and dynamic mechanism of forming lineaments, building the new lineaments classification scheme ultimately, which avoid possible disorder if we use morphology as the index only and have better scientificity and operability. In the end, we divided lineaments of the moon in as: lineaments formed with endogenic geologic progress, including wrinkle ridges, rilles, grabens and fractures; lineaments formed with exogenic geologic progress, including crater rim fractures and bottom fractures, and some special lineaments types with several formation mechanism and power source, like crater chains and so on. On that basis, the building of lineaments identification marks with multi-source remote sensing data, which is easy to distinguish and possess strong representativeness can provide typical reference for the global lineaments unity mapping.

Key words Moon; Lineaments; Structural system; Interpretation mark; Map complication

摘要 月球线性构造是月球科学研究中的重要组成部分,建立月球线性构造分类体系是月球地质图编研的关键。前人对月球线性构造的分类研究主要基于月表的形貌特征,划分的线性构造类型参差不齐,尚未形成一个公认的、规范的、具有普适性的线性构造分类体系,以至于分类结果的对比性差、参考性和易操作性较低,不利于月球线性构造纲要图的编制。并且月球线性构造的概念混乱、术语不统一,存在“同物异名、同词异义、异词同义、涵义不明”的现象,不利于全球性的统一制图和成果的展示及使用。鉴于此,本文采用多指标组合的分类方法,以成因机制和形貌特征作为主要指标,兼顾物质组成,再结合线性构造形成的动力学机制,建立了符合月球动力学演化背景的、统一规范的线性构造类型划分的新方案,避免了单以形貌特征为依据来分类出现的混乱状态,具有较好的科学性和可操作性。将月球的线性构造类型划分为:内动力地质作用形成的线性构造,包括皱脊、月溪、地堑、断裂;外动力地质作用形成的线性构造,包括坑缘断裂和坑底断裂,以及多成因机制、多动

* 本文受国家自然科学基金重大项目(41490634、41490635、41490633)及面上项目(41373068、41773065)和国家科技基础性工作专项(2015FY210500)联合资助。

第一作者简介:罗林,男,1991年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 1091282610@qq.com

** 通讯作者:刘建忠,男,1968年生,研究员,博士生导师,从事月球与行星地质研究, E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

力来源作用形成的特殊类型如坑链等。在此基础上,并利用多源遥感数据建立了易于判别且具有代表性的线性构造识别标志,可为全月球线性构造的统一制图提供识别依据。

关键词 月球;线性构造;构造体系;解译标志;编图
中图法分类号 P691

1 引言

月球是地球唯一的天然卫星,是距离地球最近的天体(欧阳自远,2005)。人类对月球已经进行了几十年的科学探测,取得了许多丰硕的成果,获取了月球的地形地貌(Smith *et al.*, 2010; Tooley *et al.*, 2010; Vondrak *et al.*, 2010; 欧阳自远等, 2010; 欧阳自远, 2013)、物质组成(Nozette *et al.*, 1994; Pieters *et al.*, 2009)和重力场(Klipstein *et al.*, 2013; Zuber *et al.*, 2013)等方面的信息。月球地质图是月壳表层岩性、地层年代、地质构造、岩浆活动等内容的综合表达,是国内外月球形貌、物质成分、岩浆活动、地质构造等研究和探测成果的集大成者。而月球又是一个典型的单板星球,演化很不彻底,其地质活动主要局限于撞击作用和岩浆活动(Jaumann *et al.*, 2012),没有形成板块,不存在像地球那样活动剧烈的板块运动。因此,没有大规模的水平运动和位移(Hiesinger and Head, 2006),所以月球演化形成的构造样式与地球不尽相同。

依据地基天文望远镜对月球的观测数据、卫星拍摄的月球地形地貌照片以及阿波罗航天员的实地勘查,探明月球表面存在的构造主要分为两类,即环形构造与线性构造(中国科学院月球与深空探测总体部, 2014)。环形构造是指遥感影像上与地质作用有关的,以结构或色调显示出的圆形、环形或未封闭的弧形等影像特征,包括撞击坑、穹隆、火山口和月海等。线性构造是月表呈线状延伸的构造现象,相比环形构造而言,线性构造能够反映全月球或者区域性的构造特征与应力状态,甚至能够反映月球内部的地质信息,是月球表面构造演化的重要指示标志(Heiken *et al.*, 1991)。但是,并非所有线状地物都能够反映月球的构造应力场,例如,大规模撞击事件产生的溅射物蚀月表形成的线状纹理,这是溅射物降落在月表堆积形成的沉积建造(Head, 1976a),并非构造成因。所以,识别和研究线性构造对月球地质图的编制意义重大。

本文将系统总结月球线性构造的研究现状和存在的问题。根据月球的动力学特征,结合新近的多源探测数据,详细论述月球线性构造的类型及成因机制,提出更加符合月球动力学特征的线性构造分类方案,从而完善月球的地质构造演化体系,为月球线性构造纲要图的编制提供理论依据。同时,可为进一步认识月球现状、揭示月球起源和演化提供地质理论基础,也将为理解和探讨太阳系其他星球的线性构造特征以及演化过程和演化规律提供参考。

2 多源遥感数据准备

线性构造分类体系的建立是月球线性构造纲要图研制的关键,是数字制图的重要基础和前提。而分类是一项被动的研究工作,受数据源的类型、可获取性、分辨率及精度等限制。本文将结合多源探测数据的特征,选用新近的卫星影像数据、形貌探测数据、成分探测数据等多源遥感数据来揭示月球线性构造的发生、发展及时空演化规律,进而建立月球线性构造分类新体系,所需的主要数据源说明如表1所示。此外,在地质图编研中,底图比例尺是一个关键的要素,地图内容的选取、图形要素的表达和地图质量都与比例尺密切相关,其决定着地质图所含信息的精度和详细程度。根据本轮月球地质图编研的设计要求,本文研究的月球线性构造分类体系参考比例尺为1:250万。

3 月球线性构造概念界定及研究进展

3.1 线性构造概念界定

“lineament”一词,最初是由Hobbs(1904)提出,用来描述地貌景观特征,如山脊或隆升区域的边界、水系统、海岸线、岩石类型或露头线的边界等。我国的地质学界普遍倾向于把“lineament”译为“线性体”(林彻和徐成彦,1984),但长期以来,地质学家们对线性体的地质含义理解并不相同。Kelley(1955)提出了构造线性体的概念,认为它们是呈线性排列的构造特征或不同构造单元之间的界线。Lattman(1958)认为线性体是指一些天然的线性特征,如河流、植被、土壤的线性分布。在1973年出版的《地质学术语汇编》中(Gary *et al.*, 1973)对“lineament”一词从月球环境、摄影地质及构造地质三个方面做出了定义性描述。在月球环境中的线性体是指月球表面存在的一种明显的线形特征,如沟壑、皱脊、坑链以及断层;还有一些不易鉴别的地质特征,如长条形谷地、山脉以及撞击坑坑壁的直线段等,线性体可能代表了月球内部区域性应力的表面反映。O'Leary *et al.*(1976)认为,线性体是可在图上绘制的,单一或复合的地表线形特征,呈直线或略呈曲线状排列,与邻近特征的样式截然不同。陈述彭(1990)主编的《遥感大辞典》将线性构造(lineament)定义为:空中和太空像片等各种遥感图像上,被认为与地质作用有关的直线、弧线、折线状的线性(状)影像特征,属于遥感技术专用术语。最新出版的《地质学术语汇编-第五版》(Neuendorf *et al.*, 2011)将“lineament”定义为:

表1 主要数据源及其相关参数

Table 1 Main data sources and their associated parameters

数据类型	分辨率	数据来源	数据用途
CE-1 CCD 2C 影像数据	120m	嫦娥一号探测器	用来识别各类线性构造, 确定构造要素和构造单元
CE-2 CCD 2C 影像数据	50m	嫦娥二号探测器	用来识别各类线性构造, 确定线性构造的表面特征及分布规律
LROC 广角相机影像数据	100m	LRO 探测器	用于识别各类线性构造, 确定线性构造的形貌特征及空间展布
LROC 窄角相机影像数据	0.5m	LRO 探测器	用于线性构造局部细节的精细分析
LOLA 激光高度计数据	60m	LRO 探测器	精确测定月面地形高程, 建立月球数字高程模型, 制作彩色晕渲图作为线性构造识别的辅助数据
Clementine UV/VIS 多光谱数据	200m	Clementine 探测器	反演月球表面的矿物分布, 用于获取线性构造的物质成分
M ³ 高光谱数据	140m	Chandrayaan-1 探测器	反演月表主要矿物和岩石组分

区域范围内呈线性延伸的表面特征, 可反映地壳的构造信息, 例如断层线、排列成直线的火山群、直线型河道等。

国内外大量工作表明, 遥感影像上的线性体存在形式是多种多样的。一类是与人类活动有关的地物, 如道路、水渠、城墙等; 一类是天然地物和水系, 如线状的山脊、线形的湖岸、海岸线、平直的地貌单元分界线等; 还有一类是某些地质体和地质构造所形成的线性影像。将这些在成因上与地质作用有关或受地质构造控制的线性体称之为线性构造(陈华慧, 1984; 陈述彭, 1990; 朱亮璞, 1994)。线性构造强调的是其成因与地质作用有关, 而不是专指构造。线性构造包括的范围很广, 其大致是沿某一方向延伸的, 宽度远小于长度的, 呈平直或略微弯曲的线性实体, 主要为各种呈线状或弧线状的地质界线、各种断裂构造以及成串珠状、链状或线性排列的构造实体。基于月球与地球的对比研究, 月球线性构造的概念和地质意义与地表线性构造并无本质差别。

3.2 月球线性构造研究进展

3.2.1 国外研究进展

从20世纪50年代开始, 人类开展了大量无人和载人的月球探测活动。在1962~1979年间, 美国地质调查局(USGS)利用天文望远镜的观测数据、探月卫星遥感影像数据、阿波罗航天员的实地勘查以及月球样品数据等绘制了79幅8种比例尺的月球区域地质图, 这是对阿波罗时代月球地质研究成果的一次综合展示(<http://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/usgs/>)。在这些区域地质图上, 解译出来的线性构造是以地形地貌为依据, 划分出的构造类型多样, 并且不同比例尺不同区域的线性要素的分类标准也没有形成统一的规范。同时, 线性构造大多只是简单的描绘, 构造意义没有充分体现。

Strom (1964) 按形态特征将月球线性构造划分为8种类型, 分别是月陆脊、月谷、多边形坑缘、线性断层、坑链、线性月溪、月海线性脊、中央峰的线状部分。限于当时的观测条件主要是由望远镜观察到的结果, 所以不是很准确。Melosh (1977) 根据潮汐力的作用方式将月球表面划分成三个构造

带: (1) 赤道地区的逆冲断层带, 大致呈南北走向; (2) 中纬度地区的走滑断层带, 它的走向大致是 N60° E 或 N60° W; (3) 极地正断层带, 断层走向是 E-W 向。Wilhelms *et al.* (1987) 按照线性构造的分布位置和形貌特征将其划分为四种类型, 包括皱脊、弧形月溪、坑底断裂和直月溪。其中, 皱脊、弧形月溪和坑底断裂与大型盆地的形成直接相关。Heiken *et al.* (1991) 也对月表的构造形迹进行了一定的描述, 指出撞击事件形成了许多与复杂撞击坑或者大型撞击盆地相关的构造特征, 玄武岩在盆地内部的充填产生压缩应力可以导致表面压缩进而形成相关的挤压构造。Chabot *et al.* (2000) 根据 Strom (1964) 对月球线性构造的划分标准, 利用 Clementine 影像识别了月球背面和两极地区的线性构造。统计发现, 月球背面的线性构造表现出明显缺乏 E-W 向线性构造, 而在 N-S, NE-SW 和 NW-SE 方位上表现出优选性。Watters and Schultz (2010) 从表面形态特征和浅层结构两个方面将月球的线性构造划分为皱脊、月溪、地堑以及叶状陡崖等, 月球上绝大多数的线性构造特征主要分布于玄武岩填充的撞击盆地及其相邻的高地上。盆地地区的线性构造类型主要是皱脊, 线性和弧形月溪或凹槽。Wilkinson (2011) 也根据形貌特征描述了月表的皱脊、月溪、穹窿、断裂、地堑、月谷等地质构造类型。

目前, 在国际天文联合会 (IAU) 发布的行星名称词典中 (<http://planetarynames.wr.usgs.gov/>) 行星系统命名工作组将月球表面的地质特征按地貌形态划分为坑链、撞击坑、皱脊、月湖、月海、山脉、月沼、海角、月溪、陡崖、月湾、月谷等15种主要的特征类型。其中, 线性构造类型包括坑链、皱脊、月溪、陡崖、月谷。但是, 对于月球表面线性构造的分类和命名未能达成统一认识, 尚存在较大的争论。

3.2.2 国内研究进展

从20世纪80年代开始, 我国对月球也进行了一系列的科学研究和探测。在1977年出版的《月质学研究进展》中将月表的地质形迹按地貌特征划分为: (1) 月面环形构造, 主要包括月海、类月海、月坑等; (2) 月陆、山脉、峭壁; (3) 月谷和月溪; (4) 月面辐射线 (中国科学院贵阳地球化学研究所,

1977)。在2005年出版的《月球科学概论》中将月表地貌按其自然形态特征划分为月海、类月海、撞击坑、山脉、峭壁、月谷、月溪、月湖、月湾、月沼和月面辐射纹等主要地貌类型。而月球表面存在的构造类型主要为断裂构造和褶皱构造。月球表面的断裂构造按照形态和规模可以划分为四类:直线断裂、弧形断裂、折线断裂和裂隙(欧阳自远,2005)。但是,许多科学问题的认识仍然是有争议的,甚至大多数科学问题是模糊不清的,所以关于月球的研究,仍然处于资料积累、认识逐步深化的阶段。

岳宗玉(2008)根据月球地质构造的形态特征,将月球的构造类型划分为环形构造和线性构造。环形构造包括月海穹窿和撞击坑,而线性构造主要包括月岭、断裂、月坑链、撞击坑底部裂隙以及月溪。基于岳宗玉(2008)的研究成果,王杰等(2011)利用嫦娥一号 CCD 影像数据,结合月球构造的地质特征、形貌特征及遥感影像特征,将月球的主要构造形式划分为月海穹窿、撞击坑、月岭、断裂、月坑链、月溪及月谷。丁孝忠等(2012)在对月球的虹湾-雨海地区进行区域地质综合研究时,依据区域内构造现象的分布特征,将图幅范围内的断裂构造大致划分为4种基本类型:(1)月海区域喷溢断裂;(2)月坑堆积岩区域断裂;(3)月陆区域断裂;(4)月坑断裂系统。其中,月坑断裂系统可进一步划分出3种类型:月坑环形断裂、月坑内弧形断裂和龟裂断裂。陈建平(2012)基于月球的形貌特征以及线性构造的形态特征和DEM高程信息,将月表的线性构造分为10类:月岭、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链、山脉、陡坡、垮塌构造和其他未知线性构造。丁孝忠等(2014)在编制月球北极地区的数字地质图时,将构造要素划分为月表构造要素和深部构造要素。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、坑链和垮塌构造。

可见,国内对月球线性构造的分类也没有统一的标准。国家天文台月球与深空探测总体部主要将月球线性构造分为6类,分别是山脉、月谷、月溪、裂隙、撞击坑辐射线以及月海地区的海岭等(中国科学院月球与深空探测总体部,2014)。但是,撞击坑的辐射线是一种表生现象,是溅射物降落在月表堆积形成的沉积建造,不能反映月球的应力状态(岳宗玉,2008)。将它们划分为线性构造需要从成因和形成机制上加以考虑,而不仅仅考虑其形态特征。

3.3 存在的问题

从 Apollo 时代到目前为止,月球线性构造的划分类型多样,划分的标准都是基于观测数据的形貌特征,以影像数据的形态、大小、色调、位置和纹理信息为依据,采用局部的、孤立的、就事论事的研究方法,并且局限于对地质现象的描述和推测解释,导致对线性构造的几何特征、运动方式、动力学演化机制考虑不全。同时,由于各探测仪器的性能、数据特点以及数据精度和研究程度的不同,对线性构造的解译存在难以确定的多解性,划分的线性构造类型参差不齐,在编图

实践中的可操作性不强,以至于尚未形成一个公认的、规范的、具有普适性的线性构造分类体系。所以,月球线性构造体系的划分和判定现在仍然没有一个统一的理论和框架。

月球线性构造的命名也没有统一的规则,多是与地球的形貌特征进行对比而得到,而将地球上各种类似地物的名称应用到月球上,是名不符实的,只不过在大小和形态上有其类似性(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977)。因此,存在“同物异名、同词异义、异词同义、涵义不明”的现象。例如,在1:10000的月球区域地质图上解译出“陡崖,不规则陡崖,月海陡崖”它们同属陡崖,只是因为存在的位置和形态的差异使用了不同的名称,所以存在着“同物异名”的现象,其他比例尺的区域地质图上也有类似情况。而在不同比例尺的区域地质图上“线性构造”的含义笼统且不尽相同,有的解释为断层、岩墙、或熔岩流前峰,有的解释为浅层沟槽或断层陡崖,还有的解释为断层或断裂、节理、山脊、陡崖或凹陷等等,所以存在着“同词异义、含义不明”的现象,令人无法分辨其真正的含义。在一些文献中(McGill,1971;Head,1974;Lucchitta and Watkins,1978),将地堑称为凹槽,弧形月溪和直月溪等,都表征出地堑的形貌特征和地质意义,但使用了不同的术语,所以存在着“异词同义”的现象。这些术语的混乱状态具有多方面的原因。总的来说,缺乏构造术语译名和命名规范是术语混乱的基本原因。同一构造现象应尽可能统一译名,全面考虑构造的形态和成因、尺度和层次、样式和组合等各个方面最终才能构成一个完整的命名体系。

地质构造是地质动力相互作用所形成的各种组合型式和变形样式(曾佐勋和樊光明,2008)。月球构造类型的划分理应根据构造的成因机制并结合构造的形貌特征、运动学特征以及月球的动力学演化特征,而这种综合性的研究还未见相关报道。同时在一幅地质图上,如果构造的类型、概念、名称不统一,将无法全面展示地质构造特征和构造演化过程等内容,会使人难以理解和使用,也无法进行全球性的统一制图。因此,制定规范统一的地质构造分类体系是新一轮月球地质编图迫切需要解决的科学和技术问题,对月球线性构造重新进行系统的分类和成因机制的研究意义重大。

4 月球典型线性构造类型特征分析

根据前人对月球线性构造的分类研究进行统计分析(表2所示),发现目前月球线性构造类型的划分尚未形成统一的标准,划分出的线性构造类型也存在着差异性,并且缺少系统性和完整性的成因分析,忽略了线性构造的力学机制和演化特征。但是由表可知,皱脊、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链是各学者都公认的月球线性构造类型。而其他的线性构造由于使用的数据源和认识的不同,存在着分类不合理或具有成因相同而表现形式不同导致命名不同的现象,同一构造现象应尽可能统一译名,以免术语混乱。皱脊、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链作为月球表面最主要、最常见、最典型的线

表2 已有月球线性构造类型划分方案

Table 2 Existing lineaments type classification scheme for the moon

线性构造类型	主要参考文献
月溪、弯曲月溪、线性月溪、坑链、坑缘、断层、断裂、皱脊、陡崖、地堑、大型凹槽或凹陷等	美国地质调查局(USGS)区域地质图
月陆脊、月谷、多边形坑缘、线性断层、坑链、线性月溪、月海线性脊、中央峰的线状部分	Strom (1964)、Chabot <i>et al.</i> (2000)
皱脊、弧形月溪、直月溪、地堑、坑底断裂	Wilhelms <i>et al.</i> (1987)
皱脊、弯曲月溪、弧形月溪、线性月溪、地堑、凹槽、坑底断裂、直壁正断层、叶状陡崖	Watters and Schultz (2010)
皱脊、弯曲月溪、弧形月溪、线性月溪、断裂、陡崖、地堑、月谷、坑链	Wilkinson (2011)
坑链、皱脊、月溪、陡崖、月谷	国际天文联合会(IAU)
月谷、月溪、峭壁、断裂、褶皱	欧阳自远(2005)
月岭、断裂、坑底裂隙、月溪	岳宗玉(2008)
月岭、断裂、月坑链、月溪、月谷	王杰等(2011)
月岭、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链、山脉、陡坡、垮塌构造和其他未知线性构造	陈建平等(2012)
月岭、月溪、地堑、月谷、断裂、坑链、垮塌构造	丁孝忠等(2014)
山脉、月谷、月溪、裂隙、撞击坑辐射线以及月海海岭	中国科学院月球与深空探测总体部(2014)

性构造类型理应是科学研究与月球制图所关注的焦点。所以,将从这些典型的线性构造入手,对各类线性构造的定义,形态特征和成因机制等方面进行因地制宜的论述,阐明各类线性构造的成因机制和地质特征,为建立基于成因机制和地貌特征的线性构造分类体系提供理论支持。

4.1 皱脊

皱脊是分布在月球表面一种延伸较长而海拔较低的线性构造,主要分布在月海地区,也有一些皱脊从月海边缘延伸到相邻高地,但在高地上的分布较少(Strom, 1970)。皱脊也被称为月岭(Head, 1976b; Wilhelms *et al.*, 1987),而国内有些文献将其译为“海岭”(中国科学院贵阳地球化学研究所, 1977),为了术语的统一,以免造成混乱,本文将通称为皱脊。同时,在水星、金星和火星的火山平原上都有发现皱脊构造,并且在地球的大陆溢流玄武岩中也发现了类似的构造特征(Plescia and Golombek, 1986; Watters, 1988, 1992)。

虽然皱脊在其他行星上都有发现,但它的演化机制与形成过程却一直存在着争论。目前提出的成因机制主要有:(1)火山侵入和/或喷出(Quaide, 1965; Strom, 1970; Scott, 1973);(2)断层和/或褶皱的构造作用(Bryan, 1973; Howard and Muehlberger, 1973; Lucchitta, 1976; Watters and Schultz, 2010);(3)火山和构造作用的结合(Young *et al.*, 1973; Scott *et al.*, 1975; 岳宗玉, 2008)。通过大量地表类似构造的对比研究和分析表明,皱脊与逆冲断层和褶皱作用共同形成的结果最匹配(Plescia and Golombek, 1986; Watters, 1988; Golombek *et al.*, 1991)。所以,关于皱脊火山作用成因与构造作用成因之间的争论已经被褶皱和断层的相对作用所替代,其动力来源可能是月海玄武岩在盆地内部的充填,从而

产生压缩应力导致表面压缩进而形成皱脊(Solomon and Head, 1979)。但在皱脊的形成过程中,逆冲断层的数量和产状,以及断层和褶皱的相互关系还存在分歧(Golombek *et al.*, 1991, 2001; Watters, 1992, 2004; Schultz, 2000; Mueller and Golombek, 2004)。

4.2 月溪

月溪是早期使用地基望远镜观测月球表面时被识别的。不同成因机制的月溪在月球表面会呈现出不同的形态特征。根据形态特征的不同,月溪可划分为弯曲月溪、弧形月溪和直月溪(Wilhelms *et al.*, 1987; Heiken *et al.*, 1991; Watters and Schultz, 2010)。弧形月溪和直月溪与地堑在形貌特征上相似,在成因机制上同理,属于同一构造现象只是使用了不同的术语。考虑成因机制的线性构造分类体系不能将弧形月溪和直月溪与地堑分开而作为另外的构造类型。所以,本文所指月溪特指弯曲月溪,而弧形月溪和直月溪则为构造成因的地堑(McGill, 1971; Head, 1974; Lucchitta and Watkins, 1978; Melosh, 2011)。

月溪的形态特征与地球上玄武岩的熔岩通道类似,并且其主要局限于月海玄武岩中,因此被解释为火山作用的产物(Watters and Schultz, 2010),认为是熔岩通道的侵蚀或熔岩管道的坍塌(Greeley, 1971; Spudis *et al.*, 1988)。在月海火山活动时期大量的熔岩流淌出月球表面,首先通过机械侵蚀作用抹去表层的月壤覆盖层,进而熔岩的热侵蚀作用向下刻蚀下伏基岩形成月溪(Cruikshank and Wood, 1972; Carr, 1974; Hulme, 1982)。若熔岩流持续发生侵蚀,底部熔岩将向两侧进行侧向侵蚀熔融,表面的岩溶流将通道顶部覆盖形成地下熔岩管道,顶部的熔岩流将会不断地冷凝和连接,当出现重力不稳时顶部熔岩发生塌陷,也能导致月溪的产生

(Cruikshank and Wood, 1972)。所以,月球表面呈现的月溪并不是一次侵蚀作用形成的结果。月溪的形成表明月球上的玄武岩岩浆具有较高的熔融温度、较低的黏度和较大的喷发速率(Hurwitz *et al.*, 2012),蕴涵了丰富的月球火山活动信息。

4.3 地堑

地堑是月球表面较细长的沟谷状线性构造,在月海和高地均有发现(Wilhelms *et al.*, 1987; Heiken *et al.*, 1991)。其在月表呈现出直线形或弧形的展布特征,伸展构造特征明显,同一条地堑可以穿过月海和高地,使盆地内部的月海玄武岩和盆地边缘的高地发生变形,而延伸方向变化不大。大多数地堑与月海盆地呈同心状,主要分布在盆地边缘附近(McGill, 1971; Golombek, 1979; Wilhelms *et al.*, 1987),也可以是平行或者交叉出现,或者呈梯队状,也有单独出现的地堑。

月球地堑与地球上的地堑构造类似,主要由两组走向近平行而倾向相反的相邻正断层构成(Lucchitta and Watkins, 1978)。在月球上,地堑的形成与月海盆地沉降产生的局部张应力或月球的热应力有关(Quaide, 1965; McGill, 1971; Golombek, 1979; Golombek and McGill, 1983; Hurwitz *et al.*, 2013)。由于月海玄武岩的密度比下伏的月壳密度大,月海盆地的重力沉降产生的伸展应力场可以导致地堑的形成(Solomon and Head, 1979, 1980)。所以,大部分地堑形成于月海玄武岩侵位之后,大大晚于撞击盆地的形成时间。近来,在月球表面还发现了一些的小型地堑,其长度一般小于10km,宽度小于500m,深度小于2m。这些构造形迹大部分是由于月球的持续冷凝收缩而形成的,与月球的热演化状态密切相关(Watters *et al.*, 2012)。所以,月表地堑的成因机制能够揭示月球早期的岩浆活动和热演化状态等内动力地质作用过程。

4.4 坑链

坑链是一种由一定间距凹坑规则排列组合形成的链式构造,通常呈近直线形或弧形。这些坑链具有类似的直径和完整程度(Strom, 1964)以及相似的规模和形成年代(Bottke *et al.*, 1997),但某些坑链的直径会随着延伸距离的增加而逐渐减小。关于坑链的形成机制有撞击成因、构造成因以及岩浆活动成因等多种观点。

第一种观点认为,坑链是由于底部的断层滑动导致表层的松散介质陷落而形成,这种成因机制的坑链在火星上已有发现和研究(Ferrill *et al.*, 2004)。第二种观点认为,坑链的形成与月表以下的岩浆活动有关(Mège *et al.*, 2002; Scott and Wilson, 2002; Head *et al.*, 2009)。第三种观点认为,当外来撞击体在接近月球表面时,由于受到巨大的引力作用可以将其撕裂分解成许多碎块,在依次向月球表面发生撞击的过程中,有一些撞击碎块会呈线性排列,从而在月球表面形

成链式分布的撞击坑(Melosh and Schenk, 1993; Melosh and Whitaker, 1994; Schenk *et al.*, 1996; Bottke *et al.*, 1997)。第四种观点认为,当大型的原始撞击坑形成时,从原始撞击坑中抛射出的撞击溅射物重新回落至月球表面而形成一系列的次级撞击坑(Oberbeck and Morrison, 1974; Allen, 1979)。这些次级撞击坑往往呈放射状从靠近原始撞击坑的边缘向外延伸,具有串珠状或链状的分布特征(Xiao and Strom, 2012)。

以上这些成因机制都是基于某些天体上不同地区不同形态类型的坑链而提出的,同一天体上不同区域的坑链可能具有不同的成因机制。就月球而言,其演化在30亿年前已基本终结,自此之后只有外来陨石的撞击作用,而大规模的玄武岩喷发等内动力地质作用基本结束,月球的地质活动进入比较宁静的阶段(Tatsumoto and Rosholt, 1970)。所以,月球上因岩浆活动形成的坑链只可能存在于月球的历史早期,近30亿年来没有足够的动力导致这类坑链的产生,并且在月球历史早期形成的坑链也可能被后期的撞击作用抹杀殆尽。因此,月球表面发育的坑链只可能限制在撞击成因或构造成因上,但是撞击成因形成的坑链,既可能是来自撞击坑形成时产生的次级溅射物质的撞击作用,也可能是外来陨石的撞击作用,目前无法进行区分。因断层活动形成的坑链可能与月海盆地沉降产生的局部张应力或全月球的热应力有关(McGill, 1971; Golombek, 1979)。可见,坑链的成因机制复杂多样,动力来源各有不同,不能使用一个统一的形成机制将其完全概括,是月球线性构造的特殊类型。

4.5 月谷

地球上有许多规模巨大的狭长断陷带,如著名的东非大裂谷(Molnar, 1988)。在月球表面不少地区也发现了类似的大型裂谷,延伸长度从几十千米到几百千米,宽度从几千米到几十千米不等(Wilkinson, 2011)。在遥感影像上主要表现为一些暗色的大型裂缝或沟槽,是宽广而延伸较长的线性洼地,具有明显的负地形特征,有些形如地堑或月溪,而有些则形如犁沟。在国际天文联合会(IAU)行星系统命名工作组发布的月球名称数据库中(<https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/MOON/target>),共审批认可了14条月谷构造,其在月海和月陆都有分布,但更多的是分布在大型撞击盆地的边缘。

月球表面最显著的月谷是阿尔卑斯月谷,其位于雨海盆地的东北部边缘,将月面上的阿尔卑斯山拦腰截断,从而连通雨海和冷海,中间为低凹下陷的谷地,底部被来自雨海和冷海的熔岩流覆盖。关于阿尔卑斯月谷的形成机制,目前主流的观点认为是形成于雨海盆地边缘的大型地堑(Head, 1976a; Wilkinson, 2011)。所以,从成因机制上说,阿尔卑斯月谷与地堑并无本质差别,属于同一构造类型,不必将其与地堑分开作为单独的线性构造。

在月海区,环绕Aristarchus台地上的施罗特月谷,被

认为是月球上最大的弯曲月溪(Cameron, 1964)。施罗特尔月谷可能起源于火山活动持续产生的熔岩流导致的热侵蚀作用和机械侵蚀作用(Honda *et al.*, 2009)。所以,关于这类月谷与月溪的划分从成因机制上来说具有一致性,差别在于它们的规模大小,两者只有量的差异而没有质的不同。在考虑成因机制的线性构造分类体系中不能将两者分开,理应归属于月溪而不是单独分类,这样就可以避免在规模大小和成因机制上产生的不一致性。

在上述的月谷数据库中,克莱斯特月谷和克利须那月谷是非常特殊的。因为两条月谷的长度都不超过 3km (Greeley, 1976),即使是在高分辨率的遥感影像上也很难清晰的看到,但也使用了“月谷”对其进行命名。不难得出,使用“月谷”对这种小型构造进行命名是存在问题的,不符合月谷延伸长、宽度大的形态特征,并且探测数据的精度和比例尺的限制也不能对其进行详细研究与制图表达。所以,这两条特殊的构造与“月谷”的命名存在自相矛盾且无法满足制图要求,不属于也不符合本文的研究范畴。

纵观全月球,除以上的月谷外,几乎所有的月谷都分布在大型撞击盆地的边缘向外呈放射状分布,具有长沟状或月坑链状排列的形态特征。比如东海盆地东南部的波瓦德月谷、巴德月谷、英希拉月谷,以及薛定谔盆地北部的普朗克月谷和薛定谔月谷等。这些从撞击盆地边缘向外延伸的大型沟槽是由一系列的撞击坑坑链或次级撞击坑坑群组合而成(Head, 1976a)。其成因机制是撞击盆地形成时受撞击而粉碎的陨石及月面物质以极高的速度重新撞击月表而产生的次级撞击坑坑链(<http://www.lpod.org/cwm/DataStuff/UAI-Rilles.htm>)。这类月谷与坑链在形态特征上类似并且成因机制具有一致性,所以,在考虑成因机制的线性构造分类体系中应属于坑链的范畴,不能划分为月谷的构造类型。

通过对各条月谷构造进行详细分析发现,把月表规模较大的沟谷称之为“月谷”是有问题的,不能准确反映其形态特征且存在自相矛盾的情况。从月谷的形成机制上来说,它们与其他类型的线性构造只有形态特征的差异或规模大小的不同,而成因机制上并未本质差别。例如,施罗特尔月谷与月溪只有规模大小的差异,没有成因机制上的不同。所以,在考虑成因机制的线性构造分类体系中可以对各类月谷进行拆分合并,最终归类到成因机制相同的构造类型中,而没有必要单独划分出来。这样既可以避免上述矛盾,同时也可以使月谷的地质含义更加清晰明确。

4.6 断裂

按照 Strom(1964)关于月球线性构造类型的定义,指出断裂是月球表面规模不等、长短不一、形态各异、走向稳定且具有明显位移特征的线性构造。所以,月表的断裂构造是多种多样的,根据断裂的形态特征和存在位置的不同,有延伸达数百千米的直线形深大断裂,有大型撞击盆地或撞击坑边界的弧形断裂,有分布在撞击坑底部的不规则断裂(Jozwiak

et al., 2012),还有存在于高地或月海的各种线性裂隙等(中国科学院贵阳地球化学研究所, 1977)。可见,依据形态特征来对断裂进行划分,存在类型繁杂,不能完全表征断裂的成因机制和力学性质,且不利于线性构造纲要图的统一编制。因此,本文在形貌特征的基础上结合断裂的成因机制,将月表断裂划分为坑缘断裂、坑底断裂以及断裂。

坑缘断裂:在空间上沿着撞击坑的边缘分布,属于倾向撞击坑中心的正断层。在撞击作用结束之后,月球表面即可形成大小不等的坑缘断裂,其动力来源就是撞击作用。因此可以认为这类断裂是与撞击坑同时产生的(中国科学院贵阳地球化学研究所, 1977),且撞击坑不论大小,坑缘断裂均有发育。此外,在撞击作用结束后的长期改造阶段,由于坑缘断裂的存在可以使某些撞击坑内壁上出现阶梯状或不规则状台阶,这是因重力失衡而导致的岩体的崩塌或下滑,属于坑缘断裂的伴生现象。

坑底断裂:指存在于撞击坑底部规模大小不等的,或呈同心圆状、放射状以及多边形分布的不规则断裂(Schultz, 1976; Jozwiak *et al.*, 2015)。普遍认为,坑底断裂是由外来天体撞击月球表面形成撞击坑之后的反弹隆起所导致的,坑底的隆起是形成坑底断裂的应力来源(Watters and Schultz, 2010)。然而,隆起的原因还不完全清楚。有的学者认为隆起和坑底断裂可能是由粘性松弛导致(Hall *et al.*, 1981)。最近的研究表明,月球物质的刚性过强,所以在撞击坑内部不容易产生粘性反弹的地形恢复作用(Jozwiak *et al.*, 2012)。另外,隆起也可能来自岩浆侵入(Wichman and Schultz, 1995)。Dombard and Gillis (2001)使用了有限元分析模型模拟了类似月壳物质的弹粘塑性变形,得出了地形松弛不能解释绝大多数的坑底断裂的结论,相对于粘性松弛,他们更倾向于岩浆侵入。Jozwiak *et al.* (2015)通过对全球坑底断裂的统计分析,也得出了岩浆侵入以及岩床/岩盖的形成导致的坑底断裂形成的结论。

断裂:除了以上两类与撞击作用密切相关的断裂外,在月球表面还分布着一些长度不等的线性断裂,表现为月表的破裂或张裂,具有明显的位移特征,但它们的成因机制和力学性质与坑缘断裂和坑底断裂完全不同,所以需要单独划分出来。这些断裂在月表构造中的位置是一定的,往往控制着地貌的发育,导致断裂两侧的地形地貌、岩性等物存在明显差异。直壁正断层就是一个很好的示例,在影像上主要表现为呈线状或断线状分布的阶梯状陡崖,断层面的形态特征清晰完整,往往近乎直立,垂向高度差异明显,沿着断层线的垂直移动距离有时可达数千米,断层崖的出现是断裂垂直差异错动的重要标志。所以,这种断裂被认为是月海玄武岩就位之后形成的正断层陡崖(Watters and Schultz, 2010)。

5 月球线性构造分类原则及分类指标

科学的月球线性构造分类有助于认识线性构造的成因

机制和演化规律,有助于厘清线性构造分类的混乱状态,促进月球线性构造研究的深入发展。但是,在进行线性构造划分之前必须明确分类的原则和标准,如果采用的分类原则和指标不同,可能会划分出不同的线性构造类型从而达不到分类的目的。因此,明确线性构造的分类原则和划分指标是月球线性构造类型划分的首要任务。

5.1 线性构造分类原则

地质构造分类的基础是对形成和影响构造发育与演化的各种要素的研究。所以,线性构造分类是以线性构造各基本要素,包括形貌特征、成因机制、运动学特征、力学机制、空间分布特征、演化特征等方面及其客观内在逻辑关系为基础的系统分类。同其它分类体系一样(周成虎等,2009),月球线性构造分类也必须按照一定的原则进行,主要遵循的原则如下:

5.1.1 主导因素原则

月球线性构造形态特征复杂多样,可能涉及多种形态的组合或多种过程的叠加,并且随着月球的动力学演化而发生、发展、甚至消亡。因此,在对月球线性构造进行分类时,应从众多的因素中,确定形成该类线性构造的主导因素,作为线性构造分类的关键指标。主导因素必须是对线性构造的形成与演化具有主控作用的必要和充分条件,且能直观判断而又具有显著的识别特征。

5.1.2 完备性与扩展性原则

月球线性构造分类体系应是一个完整的系统,应尽可能涵盖所有的线性构造类型,分类方案需要具有一定的完备性,以便能描述线性构造空间分布的差异性,体现不同区域线性构造独有的特征。客观上,由于数据源和地图比例尺以及图面表达的限制,任何线性构造分类系统中线性构造类型的缺少或遗漏是在所难免的,而且人类对月球的认识是不断发展和加深的,因而在要求完备性的同时,也要求分类系统具备一定的可扩展性或开放性,以便查缺补漏,直到完善为止。

5.1.3 实用性原则

线性构造分类体系的建立是一项复杂的系统工程,具有很强的实践性。分类的目的是为了使用,且线性构造的分类受限于数据的可获取性、图幅比例尺的大小以及图面所能承载的信息量等,所以既不可能也没必要无限细分。因此,建立月球线性构造分类体系必须结合实际情况,以方便适用、易于操作为导向,力求层次鲜明、通俗易懂、便于实践。

5.2 线性构造分类指标

月球线性构造分类不是对个别要素的分类,而是对整个月球线性构造综合特征的概括和归纳。因此,分类指标的确定是分类系统的基础和关键,直接影响到分类结果的正确性与合理性。同时,分类指标的选取要把握精简和重要性的原则,只有科学、客观、合理的确定分类指标才具有实际意义。

基于线性构造的分类原则和影响要素,为全面地、综合地反映月球线性构造的整体情况,本次线性构造分类体系的分类指标包括形貌特征、成因机制和物质组成,将线性构造的形貌特征作为分类体系的先决条件,成因机制作为本质属性,而物质组成则是重要补充。

月表中的任何一个构造实体,其不仅具有一定的形貌特征,而且还有相应的成因类型,地质构造的地形地貌和成因是因果关系的统一体。所以,客观构造实体的地貌形态既是成因的表现形式也是研究成因的主要依据,成因和地貌形态是各种构造实体必不可分的两个基本单元。可见,形貌特征和成因机制必须是开展月球线性构造分类的主导因素,必将作为线性构造分类的关键指标和分类依据。

5.2.1 形貌特征

月表形貌特征作为地质构造最直观的表现形式,蕴含着丰富的地质含义和构造演化信息。利用多分辨率、多波段、多时相的多源遥感影像对线性构造的宏观及微观形貌特征进行整体形态、细节特征与区域背景的综合解译,有效提高了月表线性构造形貌特征的识别和检测能力。通过这些数据源可以对构造地貌进行多维度、全方位的描述与分析,并获取线性构造的多层次信息。例如,利用月表形貌探测数据可以获取线性构造的排列和组合方式、几何特征、时空展布及其相互关系等信息;依据线性构造在剖面上的形态特征可以推断线性构造的发生和发展过程以及揭示线性构造的运动学特征等。所以,根据不同尺度不同类型的遥感数据对构造信息进行全面的分析与提取,判别出不同的线性构造类型及其形貌特征,为建立月球线性构造分类体系提供了丰富的形貌信息。

5.2.2 成因机制

从成因上来讲,任何构造的形成无外乎受控于以下三个因素:边界条件、物质基础和力源。同时,在地质构造的分析研究中,常常需要对构造的形成、发展、演化以及导致构造变形的动力学机制——构造应力来源进行深入的解析(万天丰,1988)。所以,为了研究月球线性构造的成因机制,必须对产生线性构造的动力来源或应力状态进行深入解析。多年的观测和理论分析表明,月表构造应力的产生与月球的动力学演化过程密切相关。因此,分析月球的动力学演化过程,对于理解月球线性构造的动力来源或应力状态以及作用方式,进而推断线性构造的成因机制和演化过程具有重要意义。

在月球所有的成因理论中,比较合理且得到大多数学者承认的假说是月球可能起源于一次大碰撞事件,撞击后的原始星体残核以及溅射物质通过吸积作用形成了原始月球(Newsom and Taylor, 1989; Canup and Esposito, 1996; Hiesinger and Head, 2006; Canup, 2012; Elkins-Tanton, 2012)。进而经历岩浆演化事件以及挖掘月球表面形成的多期次、多尺度的撞击盆地和撞击坑事件最终形成现今观测到的月球(欧阳自远和刘建忠,2014)。月球岩浆演化事件包

括全球岩浆洋的结晶演化,后期月海玄武岩和非月海玄武岩的形成以及少量的火山喷发事件。而撞击事件在月表分布范围广,在月球演化历史中持续时间最久,对月表的改造最明显(刘建忠等,2015)。所以,月球的撞击事件反映了外动力地质作用的过程,月球岩浆洋演化以及后期的岩浆和火山作用反映了内动力地质作用的过程,这些重要的地质过程,不仅是形成月表地形地貌、地质构造的主要过程,也是太阳系其他类地行星所共有的演化过程(Cordell and Strom, 1977; Grieve and Cintala, 1997; O'Neill et al., 2007)。

对于月球线性构造而言,动力来源可能远比概念上的讨论要复杂(详见月球典型线性构造类型特征分析部分),促使其发生、发展和演化的则是各种地质动力的相互影响、相互制约。但是,对线性构造的成因机制起决定性作用的主导动力才是构造应力来源研究的重点。所以,按照月球动力学演化背景,结合内、外动力地质作用的机制和耦合程度,根据线性构造形成的月球动力学环境以及主导力源的不同,月球线性构造的成因机制可划分为:内动力地质作用形成的线性构造、外动力地质作用形成的线性构造以及多动力来源作用形成的特殊类型,如坑链。

5.2.3 物质组成

月球具有明显的二分特性,存在反照率不同的暗色区域和亮色区域,暗色区域较平整而亮色区域起伏不平,不同的区域发育不同的形貌特征和构造样式(Whitaker, 1978)。传统意义上讲,根据月表的平滑程度和反照率的不同可以将其分为月海和高地,暗色区域的月海与亮色区域的高地具有不同的演化过程和地质改造历史。这可能主要受控于区域内的深部构造特征以及物质成分的不同(郭弟均等,2016)。月海区域主要是覆盖了月表的大型撞击盆地,岩石类型以低反照率的月海玄武岩为主,而月球高地的形成年龄比月海更为古老,主要为斜长质岩石及其经受严重撞击所形成的角砾岩(凌宗成等,2014)。不同的区域位置,具有不同的地质环境、不同的岩性结构,形成属性不同的地质构造,导致构造类型、构造格局以及构造活动程度均有所差别。月表线性构造区域特征差异明显,不同区域发育不同期次、不同性质、不同方向的线性构造,例如皱脊的形成具有明显的地域性,几乎只存在于月海区域,高地上发育的皱脊并不多见。因此,仅利用形貌特征和成因机制不能完全表征不同区域的线性构造特征。从全球来看,月海和高地具有明显的岩性差异,构造类型不尽相同,考量月表不同区域物质组成的差异与线性构造类型及其组合的不同是十分必要的。所以,月表的物质组成也将作为线性构造分类体系中的一个参考指标。

6 月球线性构造分类体系及解译标志

6.1 月球线性构造分类体系

本文研究的线性构造是在一定的区域范围内、同一月球

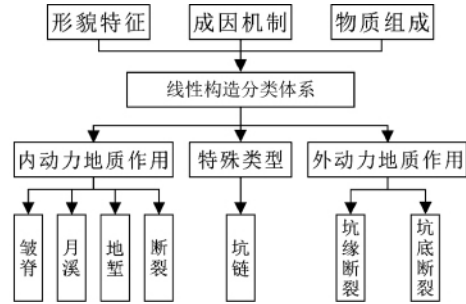


图1 利用多指标组合建立的月球线性构造分类体系

Fig.1 The classification system of lunar lineaments based on multi-index combination

动力学背景下形成的、具有不同几何学和运动学特征的构造样式的集合,而月球表面数量最多、最主要、最常见、最典型的线性构造类型是皱脊、月溪、地堑、断裂、坑链。构造分类体系强调从整体上认识和掌握一个区域内主要构造形迹及其相互之间的成生联系。所以,月球线性构造分类体系采用多指标组合的分类方法,以成因机制和形貌特征作为主要指标,兼顾物质组成,再结合月球的动力学环境,根据主导构造应力来源和作用方式的不同,将月球上不同形态、不同性质、不同等级和序次,但在动力学机制上具有密切成生联系的线性构造类型划分为:内动力地质作用形成的线性构造,包括皱脊、月溪、地堑、断裂;外动力地质作用形成的线性构造,包括坑缘断裂和坑底断裂,以及多成因机制、多动力来源作用形成的特殊类型如坑链等,具体分类方案见图1。与基于形貌特征的线性构造分类体系相比,新的分类体系具有分类原则统一、层次清晰的特点,使得庞杂、多样的线性构造类型条理化、系统化,一定程度上避免了主观分类的偏差,并且更具简明性和实用性。

6.2 月球线性构造解译标志

构建线性构造分类体系是月球线性构造纲要图研制的关键,而编制月球线性构造纲要图的首要任务是识别线性构造类型,建立行之有效且适合数字制图的解译标志,进而服务于全球线性构造的统一制图。

6.2.1 皱脊解译标志

皱脊是一种形态复杂的线性构造。其解译标志如下:在影像图上,皱脊呈断续的绳状、辫状或不规则脉状,其展布形式有单列、组或群、网状或雁列式等(如图2a红色箭头所示)。在晕渲图上,皱脊呈正地形特征,边缘轮廓清晰完整,多为条带状(如图2b红色箭头所示)。在DEM数据截取的地形剖面上,皱脊是由一个宽广的弧形隆起和尖峭的顶部山脊组合而成(Strom, 1970),弧形隆起是宽广平缓的,曲线状的地形突起在剖面上通常是不对称的(Maxwell et al., 1975);顶部山脊是相对狭窄的,表现出强烈的不对称性,一侧是陡崖,而另一侧则相对较平缓(Tjia, 1970),如图2d。

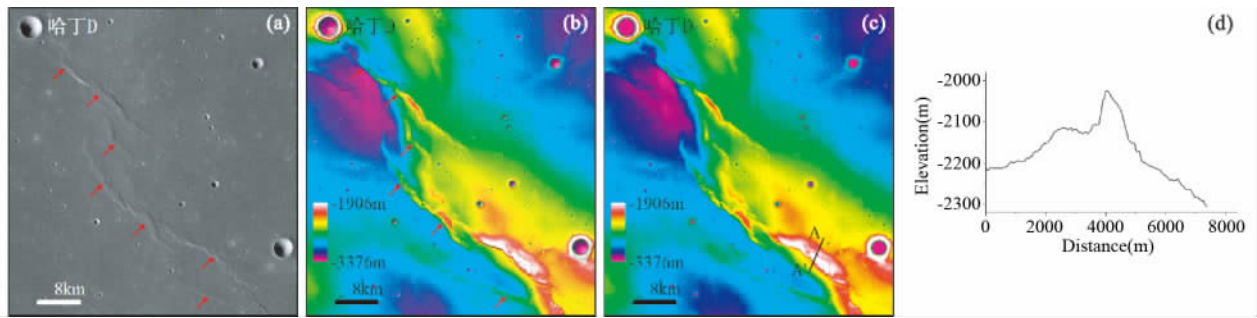


图2 利用多源遥感数据建立的皱脊解译标志

(a) LRO 宽角相机影像数据,分辨率为 100m,红色箭头指示皱脊的位置;(b) 彩色地貌晕渲图,分辨率为 60m,红色箭头指示皱脊的位置;(c) LOLA DEM 数据,分辨率为 60m,AA' 为剖面线;(d) 皱脊的地形剖面图,代表剖面线 AA'

Fig. 2 Wrinkle ridges interpretation mark established by using multi-source remote sensing data

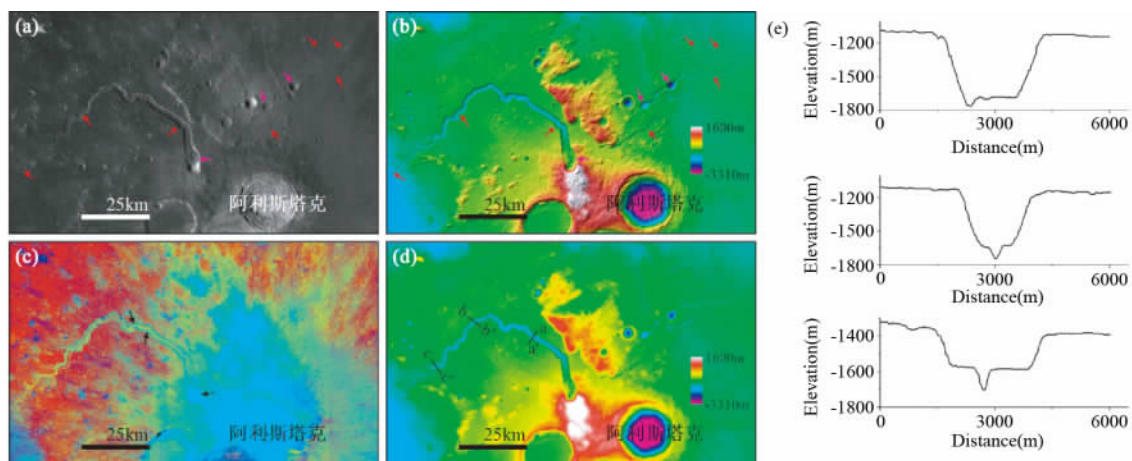


图3 利用多源遥感数据建立的月溪解译标志

(a) LRO 宽角相机影像数据,分辨率为 100m,粉红色箭头指示月溪的源区,红色箭头指示月溪的展布位置;(b) 彩色地貌晕渲图,分辨率为 60m,粉红色箭头指示月溪的源区,红色箭头指示月溪的展布位置;(c) Clementine UV/VIS 多光谱数据波段比值假彩色合成图,由 B_{750}/B_{415} (R)、 B_{750}/B_{950} (G)、 B_{415}/B_{750} (B) 比值合成,并进行了 2% 标准差拉伸,黑色箭头指示了侧壁与源区的物质成分相同;(d) LOLA DEM 数据,分辨率为 60m,aa'、bb'、cc' 为剖面线;(e) 月溪的地形剖面图,从上至下依次代表剖面线 aa'、bb'、cc'

Fig. 3 Rilles interpretation marks established by using multi-source remote sensing data

6.2.2 月溪解译标志

月溪是指月球表面弯曲而细长的线性构造。其解译标志如下:在影像图上,表现为弯曲狭长的沟槽,通常始于局部地势较高的地区,顶端为不规则的凹坑或者类似火山口地貌(图 3a, b 粉红色箭头所示)。在晕渲图上,呈负地形特征,边界清晰且几何特征明显,曲折盘旋似溪流,形似一条干涸的河流 (Fielder, 1963),如图 3b 红色箭头所示。在 Clementine UV/VIS 多光谱数据的波段比值合成图像上,月溪的底部和侧壁与顶端源区呈现出相同的橙黄色(图 3c 黑色箭头所示)为富含铁而含钛较少的玄武质熔岩 (McEwen *et al.*, 1994; Pieters *et al.*, 1994) 暗示了月溪具有相同的物源特征。利用 DEM 数据截取的地形剖面显示,月球上最大的月溪 Schröteri,上部地势总体呈 U 字形,但其底部存在小型

月溪,呈明显的 V 字形特征,向下逐渐变窄加深,说明熔岩流在流动过程中,垂直向下的侵蚀作用开凿基岩使月溪渠道逐渐加深加宽,最终形成上部的 U 字形特征,如图 3d。

6.2.3 地堑解译标志

地堑是月球表面细长的沟谷状线性构造。其解译标志如下:在影像图上,地堑边界清晰完整,形状较规则,表现为直线形或弧形,可以以近似相等的间隔平行展布,也有单独出现的地堑(图 4a)。在晕渲图上,呈明显的负地形构造,且无论地堑的长度和深度怎样变化,地堑的平均宽度相对恒定(图 4b)。在 Clementine UV/VIS 多光谱数据的波段比值合成图像上,地堑的侧壁呈明亮的浅蓝色为富含铁和钛的玄武岩 (McEwen *et al.*, 1994; Pieters *et al.*, 1994),进一步暗示了其成因机制与月海盆地沉降有关(图 4c)。在 DEM 数据截取的地形剖面上,地堑具有高度对称的几何形状,呈 U 字

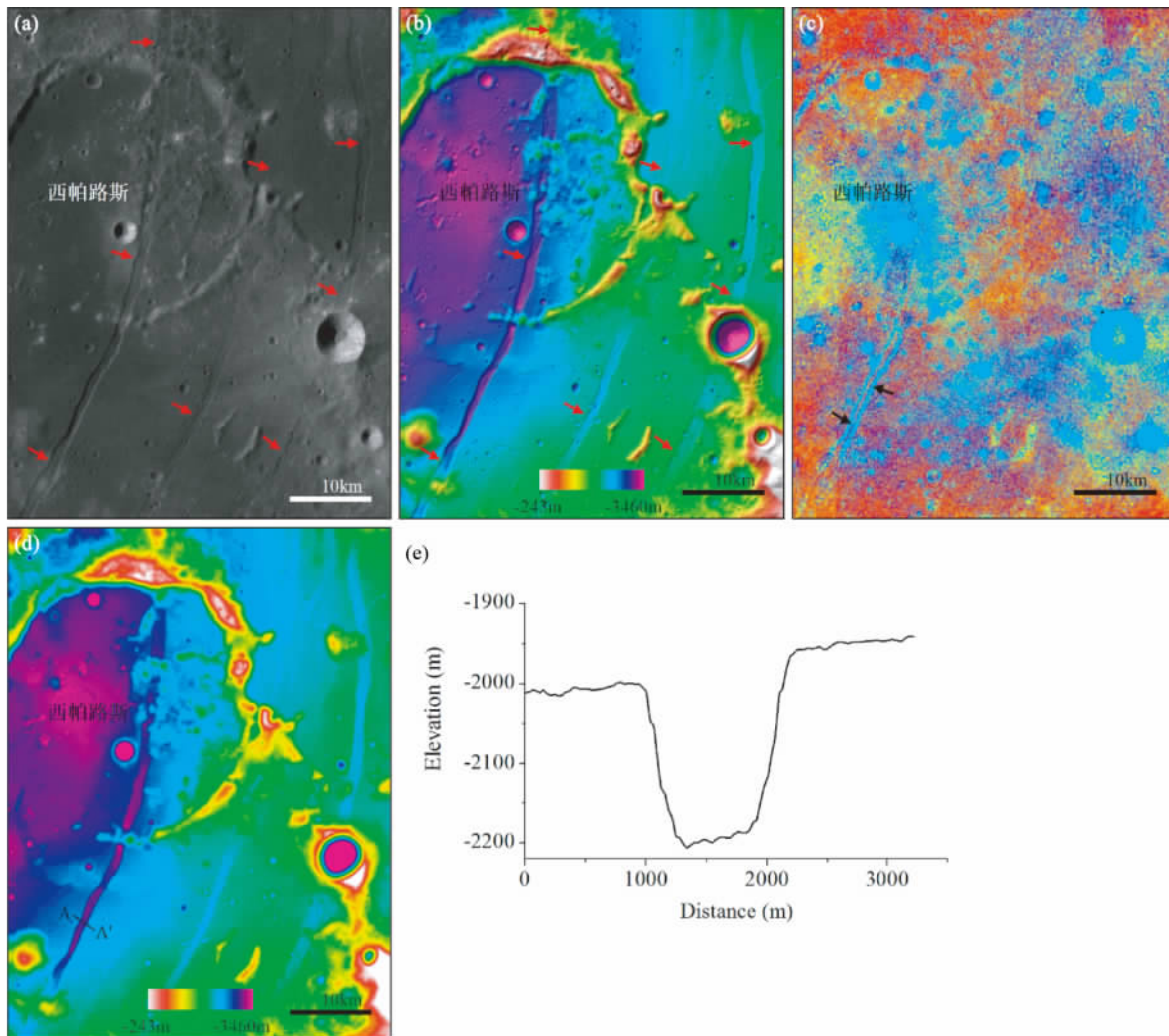


图4 利用多源遥感数据建立的地堑解译标志

(a) LRO 广角相机影像数据,分辨率为 100m,红色箭头指示地堑的展布位置;(b) 彩色地貌晕渲图,分辨率为 60m,红色箭头指示地堑的展布位置;(c) Clementine UV/VIS 多光谱数据波段比值假彩色合成图,由 B_{750}/B_{415} (R)、 B_{750}/B_{950} (G)、 B_{415}/B_{750} (B) 比值合成,并进行了 2% 标准差拉伸,黑色箭头指示了浅蓝色的地堑侧壁;(d) LOLA DEM 数据,分辨率为 60m,AA' 为剖面线;(e) 地堑的地形剖面图,代表剖面线 AA'

Fig.4 Grabens interpretation marks established by using multi-source remote sensing data

形特征,表现为底部地势较平坦而侧壁陡立且向内微倾斜的构造特征(图 4d)。

6.2.4 坑链解译标志

坑链是月球表面一种呈链式分布的线性构造,由于其成因复杂多样,所以形态特征也具有一定的差异性,导致不同成因机制的坑链具有不同的解译标志。具体如下:(1) 构造成因的坑链。在影像图上,此类坑链受构造作用控制明显,表现为延伸方向会随着构造走向的改变而发生改变,整体形态呈直线形或弧形(图 5a)。在晕渲图上,坑链几何特征明显,单个凹坑形状较规则呈圆形或椭圆形,相互连通的凹坑呈葫芦状或串珠状,并且凹坑边缘较为平整无明显突起与断裂边界持平(图 5b)。在 Clementine UV/VIS 多光谱数据的波段比值合成图像上,坑壁物质与地堑侧壁物质相同(图

5c),呈现出明亮的浅蓝色为富含铁和钛的玄武岩(McEwen *et al.*,1994; Pieters *et al.*,1994)。在 DEM 数据截取的地形剖面上,坑链具有 V 字形特征而不同于地堑的剖面形态,暗示坑链因受地堑活动而导致月表物质向下陷落而形成,如图 5e。(2) 撞击成因的坑链。在影像图上,整体纹理结构粗糙,通常围绕某一大型撞击盆地或撞击坑呈放射状分布,延伸长度不一,凹坑形状复杂多样,呈拉长状或沟槽状,具有凹凸不平的隆起边缘,如图 5f。

6.2.5 断裂解译标志

断裂是一种具有明显位移特征的线性构造,在成因机制上有别于坑缘断裂和坑底断裂。在月表,此类断裂构造类型丰富,包括有明显位移的断层及断层带,无明显位移的节理、构造裂隙和构造破碎带等。其解译标志如下:在影像图上,

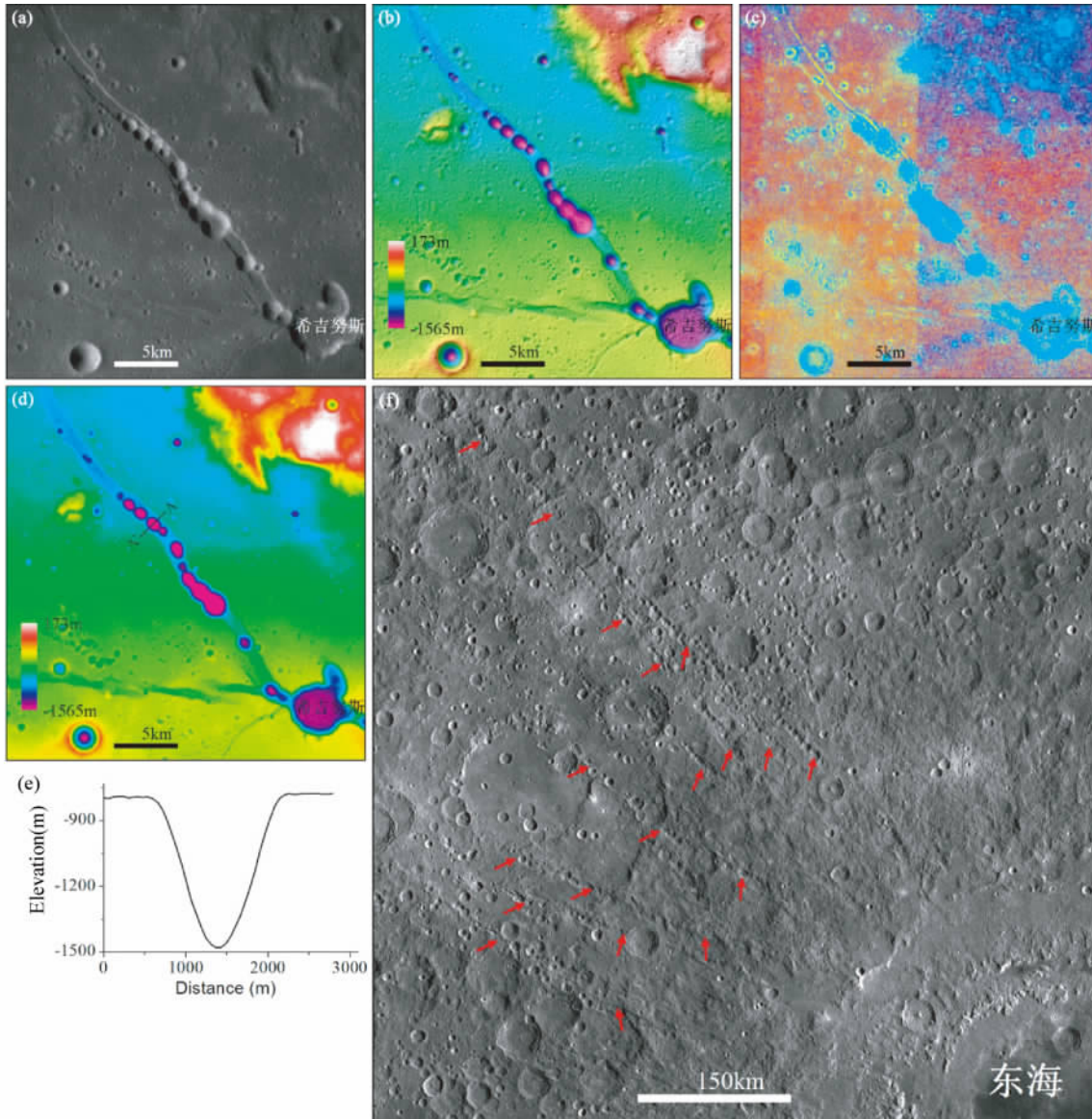


图5 利用多源遥感数据建立的坑链解译标志

(a) LRO 广角相机影像数据,分辨率为 100m; (b) 彩色地貌晕渲图,分辨率为 60m; (c) Clementine UV/VIS 多光谱数据波段比值假彩色合成图,由 B_{750}/B_{415} (R)、 B_{750}/B_{950} (G)、 B_{415}/B_{750} (B) 比值合成,并进行了 2% 标准差拉伸; (d) LOLA DEM 数据,分辨率为 60m, AA' 为剖面线; (e) 坑链的地形剖面图,代表剖面线 AA'; (f) 东海盆地西北部的次级坑坑链,红色箭头指示次级坑坑链的分布

Fig. 5 Crater chains interpretation marks established by using multi-source remote sensing data

断裂边界比较清晰,切割特征明显,表现为月表的破裂或张裂,但位移量没有地堑显著。在晕渲图上,断裂控制的地形地貌形态清晰完整,可以是呈线状或断线状分布的陡崖、陡坎。在图 6a, b 中蓝色箭头所示的直壁正断层就是一个比较明显的示例,呈阶梯状陡坎,断面面的形态特征清晰完整,往往近乎直立。在 DEM 数据截取的地形剖面上,直壁正断层的阶梯状剖面形态更加清晰易辨,形如刀切,具有数百米的垂向位移,如图 6d 中的下图所示。

6.2.6 坑缘断裂解译标志

坑缘断裂是撞击体撞击月球表面形成的一类线性构造。

其解译标志如下:在影像图上,具有明显的几何特征,形状较规则,呈圆形、椭圆形、弧形、半圆环形等多种形态。在晕渲图上,坑缘断裂形态特征明显,都是沿着撞击坑的边缘分布,是撞击坑内、外的分界线,使得撞击坑内外影像色调、纹理、结构等具有明显差异,如图 6a, b 白色箭头所示。形成时代较早的坑缘断裂边界模糊,多呈断续状分布,这是由于后期的撞击坑和其他地质作用改造的结果。坑缘断裂大小不等,规模差异大,当撞击体撞击月表时定会形成坑缘断裂。

6.2.7 坑底断裂解译标志

坑底断裂是一种局限于撞击坑底部的线性构造。其解

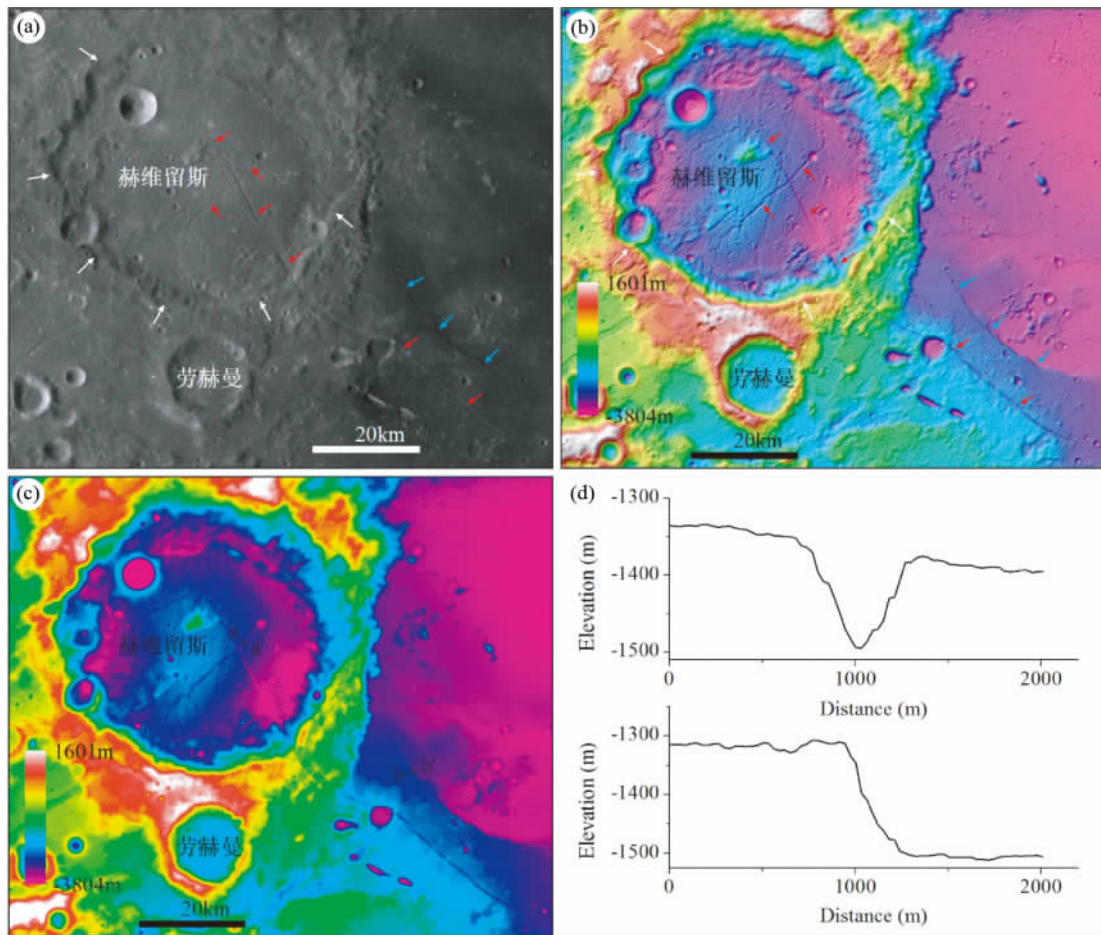


图6 利用多源遥感数据建立的断裂体系解译标志

(a) LRO 广角相机影像数据,分辨率为 100m,蓝色箭头指示一条直壁正断层,红色箭头指示坑底断裂,并且部分坑底断裂已经横穿撞击坑底部向外延伸,白色箭头指示坑缘断裂的位置;(b)彩色地貌晕渲图,分辨率为 60m,蓝色箭头指示一条直壁正断层,红色箭头指示坑底断裂,白色箭头指示坑缘断裂的位置;(c) LOLA DEM 数据,分辨率为 60m,aa'、bb' 为剖面线;(d)断裂的地形剖面图,从上至下依次代表坑底断裂的剖面线 aa'、直壁正断层的剖面线 bb'

Fig. 6 Fracture systems interpretation marks established by using multi-source remote sensing data

译标志如下:在影像图上,主要分布于撞击底部,使底面遭受切割可以形成棋盘状地块。在晕渲图上,坑底断裂形态较不规则,或呈同心圆状、放射状,或呈相互交切、叠加等多种组合形式。坑底断裂的延伸范围取决于撞击坑的大小,一般局限于撞击坑内部,而某些坑底断裂可以跨越整个撞击坑底部,切穿坑缘进而向外延伸,如图 6a, b 红色箭头所示。在 DEM 数据截取的地形剖面上,呈现出明显的 V 字形,随着断裂活动而向下深切的特征明显,是典型的中间较低、边缘高的负地形,如图 6d 中的上图所示。

综上所述,采用目视综合解译配合多源遥感数据从影像特征、地貌特征和物质组成 3 个方面对月球线性构造分类新体系中的 7 类线性构造进行全面、综合地总结;建立了具有代表性和典型性,并且在遥感数据上的特征清晰、层次分明、易于判读的线性构造解译标志。不仅保证了制图结果的统一性,而且提高了编图的效率和制图的精度,为月球线性构

造纲要图的编制奠定了基础,也可为全球线性构造的统一制图提供识别依据。

7 讨论与结论

月球线性构造是月球科学研究中的重要组成部分,建立月球线性构造分类体系是月球地质图编研的关键。从 Apollo 时代到目前为止,前人对月球线性构造的分类研究主要是基于月表的形貌特征,但是限于各观测数据的精度和认识的不同,对线性构造的划分存在多解性,划分的线性构造类型参差不齐,尚未形成一个公认的、规范的、具有普适性的线性构造分类体系,以至于分类结果的可对比性差、参考性和易操作性较低,不利于月球线性构造纲要图的编制。同时,由于对线性构造的成因机制、几何特征、运动方式、动力学演化机制考虑不全,导致线性构造的概念混乱、术语不统

一、存在“同物异名、同词异义、异词同义、涵义不明”的现象,不利于全球性的统一制图和成果的展示及使用。所以,重新厘清线性构造的类型以及建立统一规范的线性构造分类体系是必要的。这不仅有助于月球线性构造纲要图的编制,而且可以完善月球的地质构造演化体系,为进一步认识月球现状、揭示月球起源和演化提供地质理论基础。

本文在系统总结前人研究成果的基础上,从线性构造的提出、演化和发展入手,对月球线性构造研究中存在的问题进行概要论述;从线性构造应用的角度出发,以为编制月球线性构造纲要图提供理论依据为宗旨,进而服务于月球数字地质图的编研。所以,本文研究得出的主要结论如下:

(1) 基于线性构造的成因机制和形貌特征,兼顾物质组成差异,结合线性构造形成的动力学机制以及主导构造应力来源和作用方式的不同,建立了符合月球动力学演化背景的、统一规范的线性构造类型划分的新方案,避免了单以形貌特征为依据来分类出现的混乱状态,并且具有较好的科学性和可操作性。

(2) 利用多分辨率、多波段、多时相、多信息源的多种遥感数据,根据月球线性构造类型划分的新方案,建立了易于判别且代表性极强的线性构造解译标志,具有较强的适用性和操作性,可为全球线性构造的统一制图提供识别依据。

References

- Allen CC. 1979. Large lunar secondary craters: Size-range relationships. *Geophysical Research Letters*, 6(1): 51–54
- Botke Jr WF, Richardson DC and Love SG. 1997. Can tidal disruption of asteroids make crater chains on the Earth and Moon? *Icarus*, 126(2): 470–474
- Bryan WB. 1973. Wrinkle-ridges as deformed surface crust on ponded mare lava. In: *Proceedings of the 4th Lunar Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 103–105
- Cameron WS. 1964. An interpretation of Schröter's Valley and other lunar sinuous rills. *Journal of Geophysical Research*, 69(12): 2423–2430
- Canup RM and Esposito LW. 1996. Accretion of the moon from an impact-generated disk. *Icarus*, 119(2): 427–446
- Canup RM. 2012. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science*, 338(6110): 1052–1055
- Carr MH. 1974. The role of lava erosion in the formation of lunar rilles and Martian channels. *Icarus*, 22(1): 1–23
- Chabot NL, Hoppa GV and Strom RG. 2000. Analysis of lunar lineaments: Far side and polar mapping. *Icarus*, 147(1): 301–308
- Chen HH. 1984. *Remote Sensing Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1–288 (in Chinese)
- Chen JP, Wang X, Xu YB, Yan DP, Liu SF, Zheng YC, Yan BK and Wu YZ. 2012. Compilation of the lunar geotectonic outline map based on multisource data: A case study of LQ-4 Area. *Earth Science Frontiers*, 19(6): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- Chen SP. 1990. *Dictionary of Remote Sensing*. Beijing: Science Press, 447–462 (in Chinese)
- Cordell BM and Strom RG. 1977. Global tectonics of Mercury and the moon. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 15(2–3): 146–155
- Cruikshank DP and Wood CA. 1972. Lunar rilles and Hawaiian volcanic features: Possible analogues. *The Moon*, 3(4): 412–447
- Ding XZ, Han KY, Han TL, Ju YJ, Pang JF, Ding WC and Wang L. 2012. Compilation of the geological map of Sinus Iridum Quadrangle of the Moon (LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 19(6): 15–27 (in Chinese with English abstract)
- Ding XZ, Wang L, Han KY, Pang JF, Liu JZ, Guo DJ, Ding WC and Ju YJ. 2014. The lunar digital geological mapping based on ArcGIS: Taking the Arctic region as an example. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 19–30 (in Chinese with English abstract)
- Dombard AJ and Gillis JJ. 2001. Testing the viability of topographic relaxation as a mechanism for the formation of lunar floor-fractured craters. *Journal of Geophysical Research*, 106(E11): 27901–27909
- Elkins-Tanton LT. 2012. Magma oceans in the inner solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1): 113–139
- Ferrill DA, Wyrick DY, Morris AP, Sims DW and Franklin NM. 2004. Dilational fault slip and pit chain formation on Mars. *GSA Today*, 14(10): 4–12
- Fielder G. 1963. Topography and tectonics of the lunar straight wall. *Planetary and Space Science*, 11(1): 23–30
- Gary M, McAfee Jr R and Wolf CL. 1973. *Glossary of Geology*. Washington DC: American Geological Institute, 1–805
- General Department of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences. 2014. *Lunar and Deep Space Exploration*. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 215–218 (in Chinese)
- Golombek MP. 1979. Structural analysis of lunar grabens and the shallow crustal structure of the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 84(B9): 4657–4666
- Golombek MP and McGill GE. 1983. Grabens, basin tectonics, and the maximum total expansion of the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 88(B4): 3563–3578
- Golombek MP, Plescia JB and Franklin BJ. 1991. Faulting and folding in the formation of planetary wrinkle ridges. In: *Proceedings of the 21st Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 679–693
- Golombek MP, Anderson FS and Zuber MT. 2001. Martian wrinkle ridge topography: Evidence for subsurface faults from MOLA. *Journal of Geophysical Research*, 106(E10): 23811–23821
- Greeley R. 1971. Lunar hadley rille: Considerations of its origin. *Science*, 172(3984): 722–725
- Greeley R. 1976. Photogeology of aratus Ca, Mare Serenitatis. In: *Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 331
- Grieve RAF and Cintala MJ. 1997. Planetary differences in impact melting. *Advances in Space Research*, 20(8): 1551–1560
- Guo DJ, Liu JZ, Ji JZ, Liu JW, Wang QL and Ouyang ZY. 2016. Preliminary study on the global geotectonic framework of the Moon. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(10): 3543–3554 (in Chinese with English abstract)
- Hall JL, Solomon SC and Head JW. 1981. Lunar floor-fractured craters: Evidence for viscous relaxation of crater topography. *Journal of Geophysical Research*, 86(B10): 9537–9552
- Head JW. 1974. Morphology and structure of the taurus-littrow highlands (Apollo 17): Evidence for their origin and evolution. *The Moon*, 9(3–4): 355–395
- Head JW. 1976a. Evidence for the sedimentary origin of Imbrium sculpture and lunar basin radial texture. *The Moon*, 15(3–4): 445–462
- Head JW. 1976b. Lunar volcanism in space and time. *Reviews of Geophysics*, 14(2): 265–300
- Head JW, Murchie SL, Prockter LM, Solomon SC, Strom RG, Chapman CR, Watters TR, Blewett DT, Gillis-Davis JJ, Fassett CI, Dickson JL, Hurwitz DM and Ostrach LR. 2009. Evidence for intrusive activity on Mercury from the first MESSENGER flyby. *Earth and Planetary Science Letters*, 285(3–4): 251–262
- Heiken GH, Vaniman DT and French BM. 1991. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press,

1-756

- Hiesinger H and Head JW. 2006. New views of lunar geoscience: An introduction and overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 1-81
- Hobbs WH. 1904. Lineaments of the Atlantic border region. *GSA Bulletin*, 15(1): 483-506
- Honda C, Morota T, Yokota Y, Ogawa Y, Demura H, Hirata N, Matsunaga T, Ohtake M and Haruyama J. 2009. Morphologic characteristics of the Vallis Schröteri. In: *Proceedings of the 40th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1524
- Howard KA and Muehlberger WR. 1973. Mare ridges and related studies: Part C: Lunar thrust faults in the Taurus-Littrow region. In: Johnson LB (ed.). *Apollo 17: Preliminary Science Report (NASA SP-330)*. Washington DC: NASA, 31-34
- Hulme G. 1982. A review of lava flow processes related to the formation of lunar sinuous rilles. *Geophysical Surveys*, 5(3): 245-279
- Hurwitz DM, Head JW, Wilson L and Hiesinger H. 2012. Origin of lunar sinuous rilles: Modeling effects of gravity, surface slope, and lava composition on erosion rates during the formation of Rima Prinz. *Journal of Geophysical Research*, 117(E12): E00H14
- Hurwitz DM, Head JW and Hiesinger H. 2013. Lunar sinuous rilles: Distribution, characteristics, and implications for their origin. *Planetary and Space Science*, 79-80: 1-38
- Institute of Guiyang Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1977. *Advances in Lunar Geology*. Beijing: Science Press, 1-327 (in Chinese)
- Jaumann R, Hiesinger H, Anand M, Crawford IA, Wagner R, Sohl F, Jolliff BL, Scholten F, Knapmeyer M, Hoffmann H, Hussmann H, Grott M, Hempel S, Köhler U, Krohn K, Schmitz N, Carpenter J, Wieczorek M, Spohn T, Robinson MS and Oberst J. 2012. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. *Planetary and Space Science*, 74(1): 15-41
- Jozwiak LM, Head JW, Zuber MT, Smith DE and Neumann GA. 2012. Lunar floor-fractured craters: Classification, distribution, origin and implications for magmatism and shallow crustal structure. *Journal of Geophysical Research*, 117(E11): E11005
- Jozwiak LM, Head JW and Wilson L. 2015. Lunar floor-fractured craters as magmatic intrusions: Geometry, modes of emplacement, associated tectonic and volcanic features, and implications for gravity anomalies. *Icarus*, 248: 424-447
- Kelley VC. 1955. *Regional Tectonics of the Colorado Plateau and Relationship to the Origin and Distribution of Uranium*. Albuquerque: University of New Mexico Press, 1-120
- Klipstein WM, Arnold BW, Enzer DG, Ruiz AA, Tien JY, Wang RT and Dunn CE. 2013. The lunar gravity ranging system for the gravity recovery and interior laboratory (GRAIL) mission. *Space Science Reviews*, 178(1): 57-76
- Lattman LH. 1958. Technique of mapping geologic fracture traces and lineaments on aerial photographs. *Photogrammetric Engineering*, 24(4): 568-576
- Lin C and Xu CY. 1984. Some problems about lineament. *Seismic Geological Translations*, 6(3): 57-62 (in Chinese)
- Ling ZC, Liu JZ, Zhang J, Li B, Wu ZC, Ni YH and Sun LZ. 2014. The lunar rock types as determined by Chang' E-1 IIM data: A case study of Mare Imbrium-Mare Frigoris region (LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 21(6): 107-120 (in Chinese with English abstract)
- Liu JZ, Guo DJ, Ji JZ, Liu JW and Wang QL. 2015. Lunar tectonic framework and its evolution inhomogeneity. *Journal of Deep Space Exploration*, 2(1): 75-79 (in Chinese with English abstract)
- Lucchitta BK. 1976. Mare ridges and related highland scarps—result of vertical tectonism? In: *Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2761-2782
- Lucchitta BK and Watkins JA. 1978. Age of graben systems on the Moon. In: *Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 3459-3472
- Maxwell TA, El-Baz F and Ward SH. 1975. Distribution, morphology, and origin of ridges and arches in Mare Serenitatis. *GSA Bulletin*, 86(9): 1273-1278
- McEwen AS, Robinson MS, Eliason EM, Lucey PG, Duxbury TC and Spudis PD. 1994. Clementine observations of the Aristarchus region of the Moon. *Science*, 266(5192): 1858-1862
- McGill GE. 1971. Attitude of fractures bounding straight and arcuate lunar rilles. *Icarus*, 14(1): 53-58
- Mège D, Cook AC, Garel E, Lagabrielle Y and Cormier MH. 2002. Surface collapse and volcanic rifting on Mars. In: *Proceedings of the 33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2042
- Melosh HJ. 1977. Global tectonics of a despun planet. *Icarus*, 31(2): 221-243
- Melosh HJ and Schenk P. 1993. Split comets and the origin of crater chains on Ganymede and Callisto. *Nature*, 365(6448): 731-733
- Melosh HJ and Whitaker EA. 1994. Crater chains on the Moon: Records of comets split by the Earth's tides? In: *Proceedings of the 25th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 893-894
- Melosh HJ. 2011. *Planetary Surface Processes*. New York: Cambridge University Press, 1-500
- Molnar P. 1988. Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, 335(6186): 131-137
- Mueller K and Golombek M. 2004. Compressional structures on Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 435-464
- Neuendorf KKE, Mehl Jr JP and Jackson JA. 2011. *Glossary of Geology*. 5th Edition. Alexandria, Virginia: American Geosciences Institute, 570-840
- Newsom HE and Taylor SR. 1989. Geochemical implications of the formation of the Moon by a single giant impact. *Nature*, 338(6210): 29-34
- Nozette S, Rustan P, Pleasance LP, Kordas JF, Lewis IT, Park HS, Priest RE, Horan DM, Regeon P, Lichtenberg CL, Shoemaker EM, Eliason EM, McEwen AS, Robinson MS, Spudis PD, Acton CH, Buratti BJ, Duxbury TC, Baker DN, Jakosky BM, Blamont JE, Corson MP, Resnick JH, Rollins CJ, Davies ME, Lucey PG, Malaret E, Massie MA, Pieters CM, Reisse RA, Simpson RA, Smith DE, Sorenson TC, Breugge RWV and Zuber MT. 1994. The clementine mission to the Moon: Scientific overview. *Science*, 266(5192): 1835-1839
- Oberbeck VR and Morrison RH. 1974. Laboratory simulation of the herringbone pattern associated with lunar secondary crater chains. *The Moon*, 9(3-4): 415-455
- O'Leary DW, Friedman JD and Pohn HA. 1976. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *GSA Bulletin*, 87(10): 1463-1469
- O'Neill C, Jellinek AM and Lenardic A. 2007. Conditions for the onset of plate tectonics on terrestrial planets and moons. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(1-2): 20-32
- Ouyang ZY. 2005. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1-362 (in Chinese)
- Ouyang ZY, Li CL, Zou YL, Zhang HB, Lü C, Liu JZ, Liu JJ, Zuo W, Su Y, Wen WB, Bian W, Zhao BC, Wang JY, Yang JF, Chang J, Wang HY, Zhang XH, Wang SJ, Wang M, Ren X, Mu LL, Kong DQ, Wang XQ, Wang F, Geng L, Zhang ZB, Zheng L, Zhu XY, Zheng YC, Li JD, Zou XD, Xu C, Shi SB, Gao YF and Gao GN. 2010. Primary scientific results of Chang' E-1 lunar mission. *Science China (Earth Sciences)*, 53(11): 1565-1581
- Ouyang ZY. 2013. Chang' E-2 preliminary results. *Chinese Journal of Nature*, 35(6): 391-395 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY and Liu JZ. 2014. The origin and evolution of the Moon and its geological mapping. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 1-6 (in Chinese with English abstract)
- Pieters CM, Staid MI, Fischer EM, Tompkins S and He G. 1994. A sharper view of impact craters from clementine data. *Science*, 266(5192): 1844-1848
- Pieters CM, Boardman J, Buratti B, Chatterjee A, Clark R, Glavich T, Green R, Head J, Isaacson P, Malaret E, McCord T, Mustard J,

- Petro N, Runyon C, Staid M, Sunshine J, Taylor L, Tompkins S, Varanasi P and White M. 2009. The Moon mineralogy mapper (M^3) on Chandrayaan-1. *Current Science*, 96(4): 500–505
- Plescia JB and Golombek MP. 1986. Origin of planetary wrinkle ridges based on the study of terrestrial analogs. *GSA Bulletin*, 97(11): 1289–1299
- Quaide W. 1965. Rilles, ridges, and domes: Clues to maria history. *Icarus*, 4(4): 374–389
- Schenk PM, Asphaug E, McKinnon WB, Melosh HJ and Weissman PR. 1996. Cometary nuclei and tidal disruption: The geologic record of crater chains on Callisto and Ganymede. *Icarus*, 121(2): 249–274
- Schultz PH. 1976. Floor-fractured lunar craters. *The Moon*, 15(3–4): 241–273
- Schultz RA. 2000. Localization of bedding plane slip and backthrust faults above blind thrust faults: Keys to wrinkle ridge structure. *Journal of Geophysical Research*, 105(E5): 12035–12052
- Scott DH. 1973. Mare ridges and related studies: Part D: Small structures of the Taurus-Littrow region. In: Johnson LB (ed.). *Apollo 17: Preliminary Science Report (NASA SP-330)*. Washington DC: NASA, 34
- Scott DH, Diaz JM and Watkins JA. 1975. The geologic evaluation and regional synthesis of metric and panoramic photographs. In: *Proceedings of the 6th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2531–2540
- Scott ED and Wilson L. 2002. Plinian eruptions and passive collapse events as mechanisms of formation for Martian pit chain craters. *Journal of Geophysical Research*, 107(E4): 4-1-4-11
- Smith DE, Zuber MT, Neumann GA, Lemoine FG, Mazarico E, Torrence MH, McGarry JF, Rowlands DD, Head III JW, Duxbury TH, Aharonson O, Lucey PG, Robinson MS, Barnouin OS, Cavanaugh JF, Sun XL, Liiva P, Mao DD, Smith JC and Bartels AE. 2010. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 37(18): L18204
- Solomon SC and Head JW. 1979. Vertical movement in mare basins: Relation to mare emplacement, basin tectonics, and lunar thermal history. *Journal of Geophysical Research*, 84(B4): 1667–1682
- Solomon SC and Head JW. 1980. Lunar Mascon Basins: Lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere. *Reviews of Geophysics*, 18(1): 107–141
- Spudis PD, Swann GA and Greeley R. 1988. The formation of Hadley Rille and implications for the geology of the Apollo 15 region. In: *Proceedings of the 18th Lunar and Planetary Science Conference*. Cambridge: Cambridge University Press, 243–254
- Strom RG. 1964. Analysis of lunar lineaments, I: Tectonic maps of the Moon. *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory*, 2(39): 205–216
- Strom RG. 1970. Lunar mare ridges, rings and volcanic ring complexes. *The Moon*, 51(11): 187–215
- Tatsumoto M and Rosholt JN. 1970. Age of the Moon: An isotopic study of uranium-thorium-lead systematics of lunar samples. *Science*, 167(3918): 461–463
- Tjia HD. 1970. Lunar wrinkle ridges indicative of strike-slip faulting. *GSA Bulletin*, 81(10): 3095–3100
- Tooley CR, Houghton MB, Saylor RS, Peddie C, Everett DF, Baker CL and Safdie KN. 2010. Lunar reconnaissance orbiter mission and spacecraft design. *Space Science Reviews*, 150(1–4): 23–62
- Vondrak R, Keller J, Chin G and Garvin J. 2010. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Observations for lunar exploration and science. *Space Science Reviews*, 150(1–4): 7–22
- Wan TF. 1988. *Paleo Tectonic Stress Field*. Beijing: Geological Publishing House, 1–156 (in Chinese)
- Wang J, Zeng ZX, Yue ZY and Hu Y. 2011. Research of lunar tectonic features: Primary results from Chang' E-1 lunar CCD image. *Chinese Journal of Space Science*, 31(4): 482–491 (in Chinese with English abstract)
- Watters TR. 1988. Wrinkle ridge assemblages on the terrestrial planets. *Journal of Geophysical Research*, 93(B9): 10236–10254
- Watters TR. 1992. System of tectonic features common to Earth, Mars, and Venus. *Geology*, 20(7): 609–612
- Watters TR. 2004. Elastic dislocation modeling of wrinkle ridges on Mars. *Icarus*, 171(2): 284–294
- Watters TR and Schultz RA. 2010. *Planetary Tectonics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1–518
- Watters TR, Robinson MS, Banks ME, Tran T and Denevi BW. 2012. Recent extensional tectonics on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. *Nature Geoscience*, 5(3): 181–185
- Whitaker EA. 1978. Galileo's Lunar Observations and the dating of the composition of "sidereus nuncius". *Journal for the History of Astronomy*, 9(3): 155–169
- Wichman RW and Schultz PH. 1995. Floor-fractured craters in Mare Smythii and west of Oceanus Procellarum: Implications of crater modification by viscous relaxation and igneous intrusion models. *Journal of Geophysical Research*, 100(E10): 21201–21218
- Wilhelms DE, McCauley JF and Trask NJ. 1987. *The geologic history of the Moon*. Professional Paper 1348. Washington DC: U. S. Geological Survey, 1–302
- Wilkinson J. 2011. *The Moon in Close-Up: A Next Generation Astronomer's Guide*. Berlin: Springer, 1–310
- Xiao ZY and Strom RG. 2012. Problems determining relative and absolute ages using the small crater population. *Icarus*, 220(1): 254–267
- Young RA, Brennan WJ, Wolfe RW and Nichols DJ. 1973. Mare ridges and related studies: Part A: Volcanism in the lunar maria. In: Johnson LB (ed.). *Apollo 17: Preliminary Science Report (NASA SP-330)*. Washington DC: NASA, 31
- Yue ZY. 2008. *The tentative study of lunar tectonic features and remote sensing images interpretation*. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1–108 (in Chinese with English summary)
- Zeng ZX and Fan GM. 2008. *Structural Geology*. 3rd Edition. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–226 (in Chinese)
- Zhou CH, Cheng WM, Qian JK, Li BY and Zhang BP. 2009. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1: 1000000 in China. *Journal of Geo-Information Science*, 11(6): 707–724 (in Chinese with English abstract)
- Zhu LP. 1994. *Remote Sensing Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1–202 (in Chinese)
- Zuber MT, Smith DE, Watkins MM, Asmar SW, Konopliv AS, Lemoine FG, Melosh HJ, Neumann GA, Phillips RJ, Solomon SC, Wicczorek MA, Williams JG, Goossens SJ, Kruijzinga G, Mazarico E, Park RS and Yuan DN. 2013. Gravity field of the Moon from the gravity recovery and interior laboratory (GRAIL) mission. *Science*, 339(6120): 668–671

附中文参考文献

- 陈华慧. 1984. *遥感地质学*. 北京: 地质出版社, 1–288
- 陈建平, 王翔, 许延波, 颜丹平, 刘少峰, 郑永春, 闫柏琨, 吴昀昭. 2012. 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. *地学前缘*, 19(6): 1–14
- 陈述彭. 1990. *遥感大辞典*. 北京: 科学出版社, 447–462
- 丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 剧远景, 庞健峰, 丁伟翠, 王梁. 2012. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制. *地学前缘*, 19(6): 15–27
- 丁孝忠, 王梁, 韩坤英, 庞健峰, 刘建忠, 郭弟均, 丁伟翠, 剧远景. 2014. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图: 以月球北极地区为例. *地学前缘*, 21(6): 19–30
- 郭弟均, 刘建忠, 籍进柱, 刘敬稳, 王庆龙, 欧阳自远. 2016. 月球的全球构造格架初探. *地球物理学报*, 59(10): 3543–3554
- 林彻, 徐成彦. 1984. 关于线性体(lineament)的若干问题. *地震地质*

- 译丛,6(3): 57-62
- 凌宗成, 刘建忠, 张江, 李勃, 武中臣, 倪宇恒, 孙灵芝. 2014. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海-冷海地区(LQ-4)为例. 地学前缘, 21(6): 107-120
- 刘建忠, 郭弟均, 籍进柱, 刘敬稳, 王庆龙. 2015. 月球的构造格架及其演化差异. 深空探测学报, 2(1): 75-79
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 1-362
- 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 张洪波, 吕昌, 刘建忠, 刘建军, 左维, 苏彦, 温卫斌, 边伟, 赵葆常, 王建宇, 杨建峰, 常进, 王焕玉, 张晓辉, 王世金, 汪敏, 任鑫, 牟伶俐, 孔德庆, 王晓倩, 王芳, 耿良, 张舟斌, 郑磊, 朱新颖, 郑永春, 李俊铎, 邹小端, 许春, 施硕彪, 高亦菲, 高冠男. 2010. 绕月探测工程的初步科学成果. 中国科学(地球科学), 40(3): 261-280
- 欧阳自远. 2013. 嫦娥二号的初步成果. 自然杂志, 35(6): 391-395
- 欧阳自远, 刘建忠. 2014. 月球形成演化与月球地质图编研. 地学前缘, 21(6): 1-6
- 万天丰. 1988. 古构造应力场. 北京: 地质出版社, 1-156
- 王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 胡焯. 2011. 月球主要构造特征: 嫦娥一号月球影像初步研究. 空间科学学报, 31(4): 482-491
- 岳宗玉. 2008. 月球构造特征与遥感影像解译初步研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-108
- 曾佐勋, 樊光明. 2008. 构造地质学. 第3版. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-226
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1977. 月质学研究进展. 北京: 科学出版社, 1-327
- 中国科学院月球与深空探测总体部. 2014. 月球与深空探测. 广州: 广东科技出版社, 215-218
- 周成虎, 程维明, 钱金凯, 李炳元, 张百平. 2009. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. 地球信息科学学报, 11(6): 707-724
- 朱亮璞. 1994. 遥感地质学. 北京: 地质出版社, 1-202