

月海盆地线性构造展布及其成因分析

李 力^{1,2}, 刘少峰^{1,2}, 吴志远^{1,3}, 韦 蔚^{1,2}, 焦中虎^{1,2}, 奚晓旭^{1,2}

LI Li^{1,2}, LIU Shao-feng^{1,2}, WU Zhi-yuan^{1,3}, WEI Wei^{1,2}, JIAO Zhong-hu^{1,2}, XI Xiao-xu^{1,2}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国地质大学(北京)信息网络中心, 北京 100083

1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Beijing 100083, China;

3. Network Information Center, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

摘要:综合多源遥感数据识别提取月球正面南北纬 50°之间的线性构造,重点分析月岭和月溪的影像特征、分布规律和时空关系,结合月海沉降模型分析两者的成因机制,结合地形和重力场数据预测影响月岭类型的因素。研究表明,在质量瘤盆地,月岭和月溪存在明显的时空关系和构造成因联系,两者主要由月海沉降产生的局部应力引起,前月海时期盆地的均衡状态和月海充填的几何形状可能影响了月岭的分布类型。

关键词:月岭;月溪;质量瘤盆地;月海沉降

中图分类号:P184.8

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2012)06-0943-11

LI L, Liu S F, Wu Z Y, Wei W, Jiao Z H, Xi X X. The distribution and tectonic analysis of lunar lineaments in mare basin. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(6):943-953

Abstract: Lunar lineaments within 50° north and south latitudes of lunar nearside have been mapped based on the Chang'E-1 CCD image data and other lunar scientific data. Landform features and spatial distribution of mare ridges and lunar grabens have been analyzed. Mare subsidence model was used to analyze the genetic mechanism of mare ridges and lunar grabens, and Digital Elevation Model (DEM) data and gravity data were used to predict the distribution of mare ridges. In mascon basins, the genetic connection between mare ridges and lunar grabens was mainly caused by the local stress of mare subsidence. The geometry of the load and the pre-mare isostatic state of the basin probably influenced the distribution of concentric and radial mare ridges.

Key words: mare ridge; lunar graben; mascon basin; mare subsidence

月球的构造信息来源于月表影像、Apollo 登月点地震仪、月亮热状态模型等资料。月球构造活动受外力和内力驱动,外力包括大型撞击作用和地月潮汐力,内力产生的构造活动起因于月球热状况的变化,表现为月球扩张、收缩和火山熔岩流的产生^[1]。在内外力作用下,月表广泛分布着以撞击坑为代表的环形构造和以月岭、月溪为代表的线性构造。

月球线性构造是月表呈线状延伸的构造现象,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,在某种程度上能够反映月球内部的地质信息^[1-2]。月球不存在诸如火星的巨型裂隙和诸如水星的大型逆冲断层,较大尺寸的线性构造通常仅具有局部规模,主要分布在月球正面月海盆地的内部和周围^[3-4],月海盆地线性构造体制和意义可以通过

收稿日期:2011-11-01;修订日期:2012-05-07

资助项目:国家高技术研究发展(863)计划重点项目《绕月探测工程科学数据应用与研究》的子课题《月球数字地质图编制与月球演化模型综合研究》(编号:2009AA12220101)

作者简介:李力(1986-),男,在读硕士,资源与环境遥感专业。E-mail:lili330330@sina.com

月岭、月溪的组合形态和空间展布规律加以判别和解释。

关于月球线性构造研究,Strom^[9]利用地基望远镜观测绘制月球 10000 余条线性地物,指出线性构造系统存在 3 个择优方向和 4 种可能的成因机制。Melosh^[6]通过建立质量瘤平板挠曲模型分析月海盆地断裂的应力源,预测随着与盆地中央距离的增加,月海盆地依次出现放射状逆断层、走滑断层和同轴状正断层。Solomon 等^[7]结合月球岩石圈厚度分析了质量瘤盆地的构造特征,认为月海线性构造由盆地沉降产生的局部应力叠加月球热应力而产生。以上研究对月球线性构造框架有了轮廓性的认识,但由于受影像分辨率和资料丰富程度的限制,这些研究成果具有一些片面性。国内至今缺少月球线性构造研究的成果和资料。

近年来,嫦娥一号、月亮女神(Kaguya)和月球探测轨道器(LRO)获取了高精度的月球探测数据。本文利用最新月球遥感影像和地质图件识别提取月球

正面中低纬度地区的线性构造,在此基础上分析月岭和月溪的形貌特征、空间展布规律和时空关系,结合月海盆地沉降模型讨论其形成机理和影响因素,以期为中国月球数字地质图的编制和月球线性构造演化研究提供第一手资料。

1 实 验

1.1 嫦娥一号影像数据处理

本文采用的嫦娥一号影像数据申请自中国科学院国家天文台月球与深空探测中心,该数据是行星数据系统(Planetary Data System,PDS)格式 2C 级轨道数据,空间分辨率 120m。数据以行对象为单位组织,每个行对象包括卫星时间、行头经纬度坐标、行尾经纬度坐标等信息。基于这种数据文件结构,笔者使用 Python 和 Java 编程语言进行 2C 数据的校正和拼接,从 PDS 头文件中剔除坏数据并自动提取控制点坐标,选取合适控制点对数据进行几何校正,最后镶嵌制图作为线性构造解译的底图(图 1)。

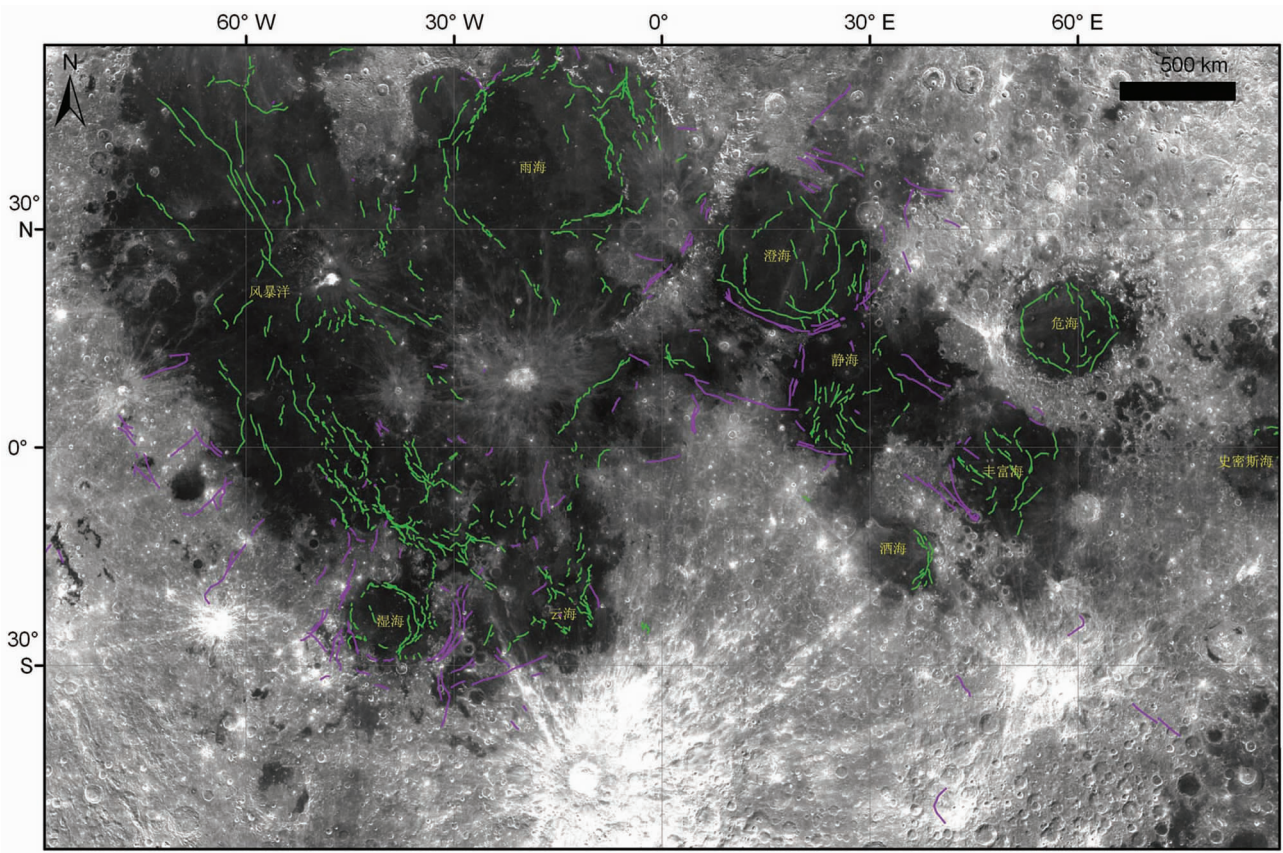


图 1 月海盆地线性构造

Fig. 1 Lineaments of mare basins displayed on CE-1 image

底图为镶嵌生成的嫦娥一号月表影像(120m/pix),绿色线条表示月岭,紫色线条表示月溪

研究区范围是月球正面中低纬地区($50^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{S}$),地理坐标采用球形月固坐标系,参考椭球体为正球体(Moon_2000_IAU_IAG)。为最大限度地保持月表地形地貌特征与地物之间相对位置的对应关系,使用墨卡托投影将嫦娥一号影像和辅助数据统一到相同的 GCS_Moon_2000 基准。

1.2 线性构造的识别提取

月球线状地物种类众多且成因具有多样性,国际天文联合会(IAU)行星命名规则严格定义的月球线性地物包括月岭(Dorsum)、月溪(Rima)、坑链(Catena)、山脉(Mons)、月谷(Vallis)、峭壁(Rupes)等。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抛射物刻蚀月表产生线状纹理,这种线性体是抛射物与月表摩擦产生的碎屑流沉积建造^[8],并非构造成因。因此,进行月球大面积线性构造解译必须注意区分线性体的类型和成因:①本文重点解译能够反映区域应力场且沿走向延伸大于 10km 的月岭和月溪;②区分构造成因和火山成因的月溪,火山成因的月溪不列入本研究范围之内;③区分月岭和叶状陡坡(lobate scarp),两者都是压缩构造地形,但尺寸和成因存在明显差异(后者在米级别分辨率影像上才能被准确识别)。

本文在建立线性构造解译标志的基础上,以 ArcGIS 软件为平台将嫦娥一号影像、月球探测轨道影像(Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, 100m/pix)、月球轨道影像(Lunar Orbiter, 60m/pix)、月球轨道高程计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, 60m/pix) DEM 数据和月球地图(Lunar Astronautical Chart, 1:100 万)配准在相同的地理坐标框架下,通过人机交互的目视解译在研究区识别提取了 1000 余条月岭和 200 余条月溪(图 1)。

2 月海盆地中的线性构造展布

月岭和月溪是月表分布最广、数目最多的大尺寸线性构造,两者主要分布于月球正面的月海盆地内部和周围,是月球构造应力的有效指示器^[9]。

月岭的起源模式包括火山作用、构造作用或为两者的综合作用。大多数学者认为月岭是月海玄武岩充填沉降产生的压缩构造地形,地形剖面分析^[10-11]、地层叠加关系^[12]、阿波罗月球探测实验(ALSE)^[13]、行星皱脊构造对比分析^[14-15]均支持月岭

的构造起源。

月溪基于形态和成因差异分为弯曲月溪(sinuous rilles)、弧形月溪(arcuate rilles)和直月溪(straight rilles)^[1,9]。弯曲月溪是月海火山喷发时期形成的熔岩通道或坍塌的熔岩管^[16-17],这种火山成因的月溪未列入本项研究范围之内。本文研究的“月溪”仅指构造成因的弧形月溪和直月溪,两者被前人统一解释为月壳水平张力产生的地堑(lunar graben)^[18-21]。

2.1 形貌特征

月岭的形态特征复杂,通常由宽阔的微弧形底部隆起和叠加在上面的尖峭脊部两部分组成,月岭通常沿其弧形隆起的顶部和侧面形成窄短弯曲的辫状网^[10]。影像判读显示:①大部分月岭呈雁列式或梯状排列在月海盆地中,表现为明显的挤压或压扭特征(图 2-a),这表明其形成可能与月海玄武岩充填产生的变形相关;少量月岭以断层崖形式从月海边缘延伸到月陆,这暗示月岭的构造起源。②月球 DEM 数据显示,月岭的高度通常只有数百米,剖面呈非对称结构(图 3-a);大部分月岭的两翼坡度只有 $1\sim 6^{\circ}$ ^[12],其不对称形态沿走向交替转换。③月岭使古老和年轻盆地的月海玄武岩发生挤压变形,这暗示其形成发生在月海玄武岩侵位以后,跨越了较长的历史时期。

构造成因的月溪(Lunar graben)在月表呈线性延伸、底部平坦、侧壁陡立的负地形,其伸展构造特征明显,形态类似于地球上结构简单的地堑。月溪多以同轴状、交叉剪切状或梯状分布在月海盆地外围,且相邻月溪通常具有相近的宽度和间距(图 2-b);基于月表影像和高程数据的量测显示,月溪的宽度通常 $1\sim 3\text{km}$,深度 $50\sim 250\text{m}$,断层面倾角 $60\sim 90^{\circ}$ (图 3-b);月溪长度的变化范围较大($20\sim 400\text{km}$),大多数月溪的长度小于 150km ,少数月溪的长度大于 200km (例如静海南部的 Hypatia 月溪的长度达 210km)。

2.2 分布规律

在线性构造遥感解译的基础上,统计分析月岭和月溪的空间分布规律。本文在研究区识别提取约 1600 条月岭(或月岭片段),结果表明月岭广泛分布在月球正面的十大月海盆地,绝大多数月岭发育在月海玄武岩区,质量瘤盆地和非质量瘤盆地的月岭分布类型存在显著的差异。

在质量瘤盆地(雨海、澄海、危海、酒海、湿海和

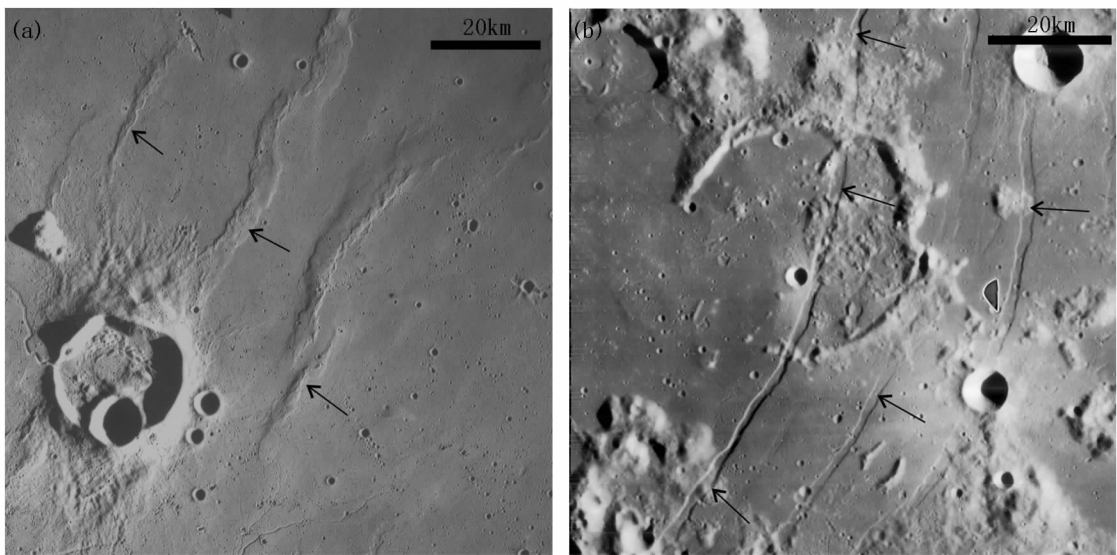


图 2 月岭和月溪的影像特征

Fig. 2 Landform features of mare ridge and lunar graben

(a)月岭的挤压特征,月岭使阿利斯塔高地(Aristarchus Plateau)的年轻玄武岩发生挤压构造变形,底图是AS15-M-2082,中心坐标 45°W/29°N;(b)Hippalus 月溪(Rima Hippalus)以同轴状分布在湿海东南部,底图是LO-IV-132H1,中心坐标 29.2°W /25.5°S

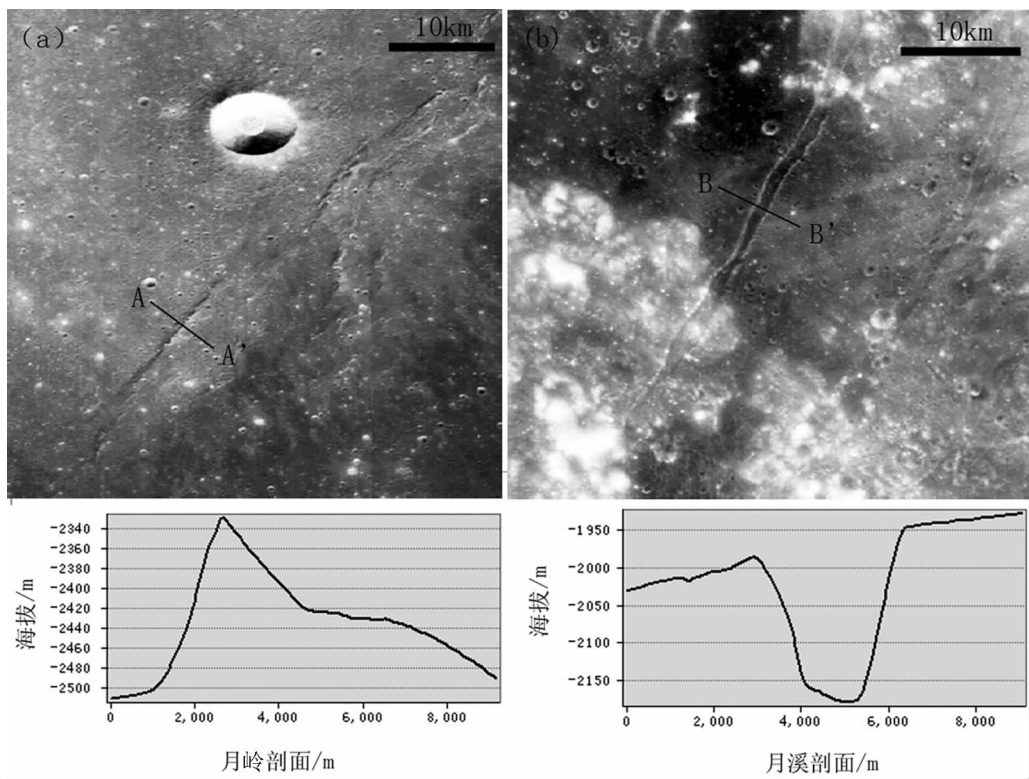


图 3 月岭和月溪的地形剖面

Fig. 3 Topographic profile of mare ridge and lunar graben

影像数据为嫦娥一号影像(120m/pix),剖面数据来源于 LOLA DEM(60m/pix);(a)雨海近虹湾地区的月岭及其剖面,中心坐标 27.3°W /42.2°N;(b)湿海东南部 Hippalus 月溪及其剖面,中心坐标 31.1°W /26.8°S

史密斯海),盆地边缘的月岭数目众多,呈断续的同心圆状;盆地中部月岭发育相对稀少;这种分布规律在雨海、澄海、危海和湿海表现得尤其显著。非质量瘤盆地(静海、丰富海、云海、风暴洋)的月岭无规则地分布在盆地中部,盆地边缘处月岭数量较少;其中,静海西部的月岭主要集中在 Lamont 撞击坑附近,静海东部的月岭发育较少;丰富海月岭的分布呈

(亚)放射状;云海月岭的分布以放射状为主;风暴洋月岭的整体走向与其空间延伸方向一致。典型月海盆地内月岭走向呈玫瑰花图显示,以雨海和湿海为代表的质量瘤盆地的月岭走向无明显的优选方位,而在质量瘤盆地,静海月岭的优选方位为 $N1^{\circ}E$,风暴洋月岭走向的优选方位为 $N35^{\circ}W$ (图 4)。

总之,月球正面的所有质量瘤盆地密集分布着

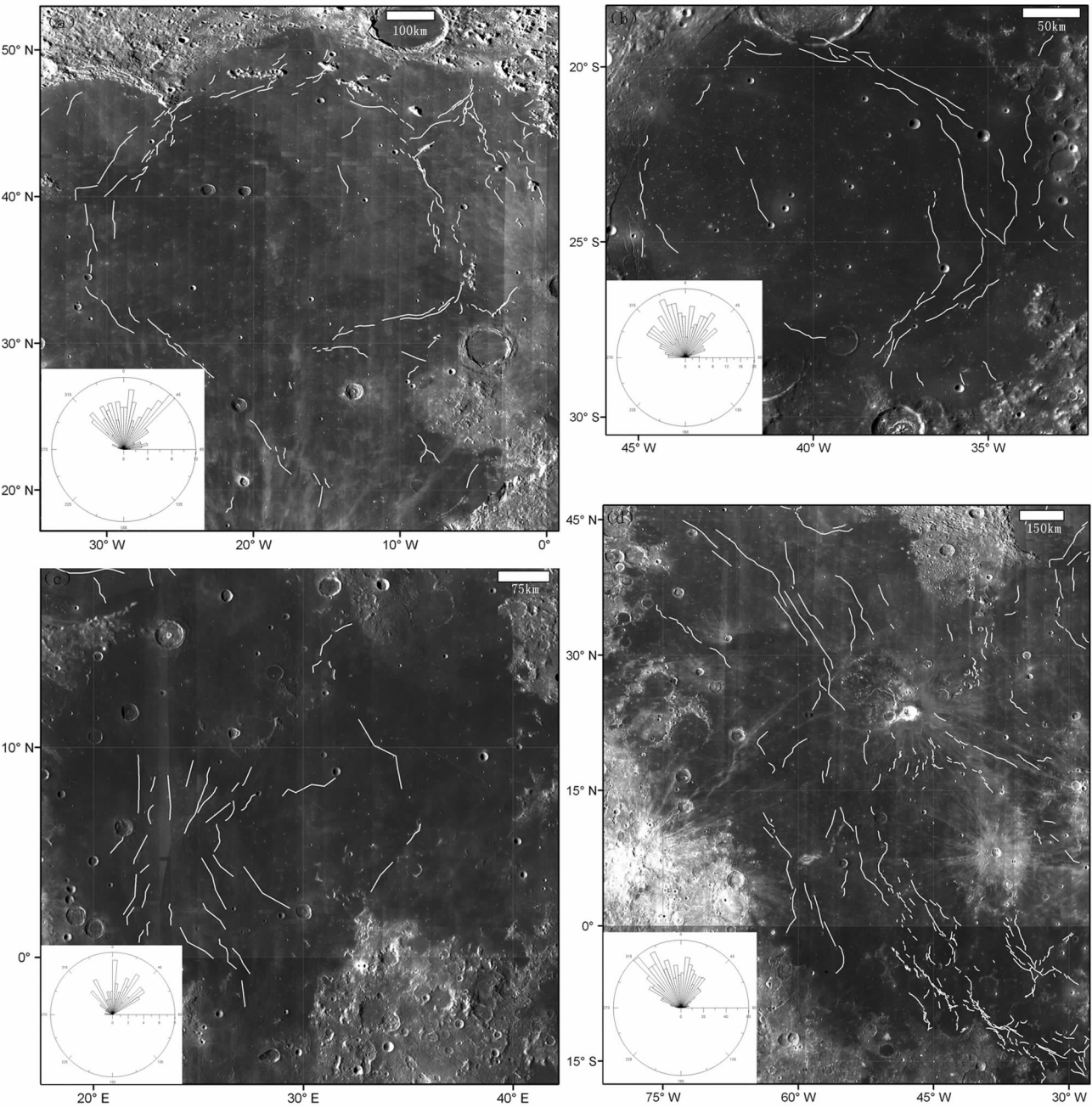


图 4 月海盆地的月岭及走向玫瑰花图

Fig. 4 Orientation distribution of mare ridges in mare basins
质量瘤盆地:(a)雨海;(b)湿海;非质量瘤盆地:(c)静海;(d)风暴洋

同心圆状月岭,非质量瘤盆地的月岭呈(亚)放射状、南北向或与盆地的空间延伸方向一致。

月溪主要分布在月球正面,与月海盆地的空间相关性显著。本文在研究区识别提取约 210 条月溪,结果显示:①与月岭主要分布在月海玄武岩区不同,月溪同时分布在月海盆地边缘和周围高地,这些区域对应月海玄武岩沉降区的外边界,暗示了月溪的伸展构造起源;②月溪切断了月海玄武岩和高地物质,整体上与盆地呈同心圆状或与盆地边缘相切,但在细节上与月海充填的精确边缘不一致;③月溪大多分布于月球正面南北纬 40°之间,密集分布在雨海边缘、澄海南部、东部边缘和湿海东南部,无规则地分布在静海西部和丰富海西南部,极少分布在危海、酒海和史密斯海;④所有环盆地分布的月溪与质量瘤盆地相关,相比之下,不是所有的质量瘤盆地都存在月溪(可能被后期火山玄武岩掩埋)。

以上分析表明,月球正面的月海盆地广泛发育以月岭和月溪为代表的构造特征,在质量瘤盆地月岭和月溪存在明显的空间分布规律(表 1)。

2.3 时空关系

在空间关系上,月岭、月溪和月海盆地三者之间的空间相关性非常显著。在质量瘤盆地,月岭以断续的同心环分布在月海边缘和内部(月海也存在少量放射状月岭,如澄海);月溪以弧状分布在盆地边缘和邻近高地,所有月溪系统分布在月岭系统的外侧(图 5)。月岭和月溪的空间关系暗示两者起源的相

关性。

在构造序列上,月球线性构造的年龄主要通过地物的交切覆盖关系和撞击坑尺寸-频率分布获取,正确评估月岭和月溪的形成时代有利于理解月海盆地的构造应力演化。月岭同时发育在古老和年轻月海盆地的玄武岩表面,使月海玄武岩发生挤压形变,这表明月岭的形成发生在撞击盆地形成和月海玄武岩侵位之后。Hiesinger 等^[2]基于撞击坑尺寸频率分布指出,月球正面月海玄武岩的绝对年龄为 3.9~4.0Ga 至 1.2Ga,最大规模的玄武岩喷发发生在雨海纪(3.6~3.8Ga),全球大面积的岩浆活动停止于爱拉托逊纪(2.5Ga),最年轻的月海玄武岩(1.2Ga)局限于风暴洋阿利斯塔高原南部^[23-25]。月岭使该区玄武岩发生了明显的挤压变形(图 2-a),这表明月岭的形成无疑跨越了较长的历史时期(或许持续到 1.2Ga)。绝大多数月溪叠加在月海盆地边缘和周围高地物质之上,部分月溪无障碍地从月海延伸到高地,这表明月溪的形成晚于撞击盆地,发生在“晚期大轰击”(Late Heavy Bombardment, 3.9Ga)之后。Lucchitta 等^[20]基于地层学和撞击坑尺寸-频率分布指出,所有年龄小于 3.6Ga±0.2Ga 的月海玄武岩没有被月溪切割,与月海盆地相关的月壳伸展停止于 3.6Ga。月岭和月溪的绝对年龄不易确定,但相对年龄表明两者的形成均发生在盆地产生和月海玄武岩侵位之后,且月岭的形成跨越了较长的历史时期。

表 1 月海盆地线性构造展布
Table 1 Spatial distribution of lunar lineaments

月海盆地	中心坐标	重力异常 ^{a)} /mGal	盆地年龄 ^{b)}	月 岭	月 溪
雨海	16°W/33°N	88	LI	同心圆状	弧状(沿亚平宁山分布)
澄海	18°E/27°N	102	N	同心圆状、放射状	弧状(南部、东部、西部)
湿海	39°W/24°S	65	N	同心圆状	弧状(东南部、西部)
危海	58°E/17°N	82	N	同心圆状	无
酒海	34°E/16°S	70	N	同心圆状(东部边缘)	无
史密斯海	86°E/3°S	43	pN	较少	无
静海	30°E/7°N	否	pN	放射状(西部)、南北向(东部)	无规律(西部、东北部)
丰富海	52°E/4°S	否	pN	放射状	无规律(西南部)
云海	15°W/21°S	否	pN	放射状	无
风暴洋	57°W/18°N	否	pN	与风暴洋延伸方向一致	无规律

注:a)六大质量瘤盆地的重力异常以自由空间重力异常值表示,根据文献[22];b)盆地年龄根据文献[9],LI 为早雨海纪,N 为酒海纪,pN 为前酒海纪

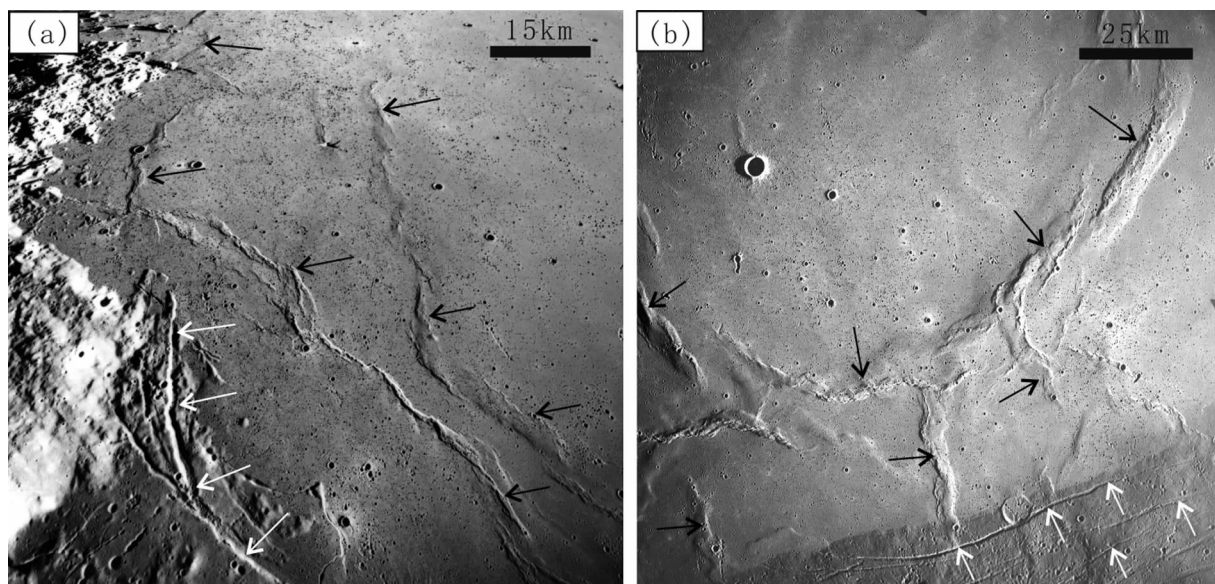


图 5 月岭、月溪和月海盆地的空间关系

Fig. 5 Spatial relationship of lineaments and mare basins

黑色箭头表示同心圆状月岭和放射状月岭,白色箭头表示弧状月溪;(a)是 Buckland 月岭和 Supicius 月溪,数据来源 AS17-M-0952,中心坐标 10.5°E/23.1°N;(b)是 Lister 月岭和 Plinius 月溪,数据来源 AS17-M-0452,中心坐标 24.9°E/19.4°N

3 讨 论

月亮形成后,月球演化主要经历了 3 个过程:大型撞击作用、月海火山活动和以月岭、月溪为代表的构造运动^[1,3]。质量瘤盆地的月岭和月溪存在显著的时空关系,这为研究月海盆地的构造演化历史提供了重要信息。

3.1 月海沉降

讨论月岭和月溪的构造意义首先要分析月岭和月溪的应力源。相关学者建立了解释月岭和月溪成因的构造模型,Bryan^[26]基于半定量模型预测月岭的压缩应力来源,指出月岭是月海玄武岩冷凝收缩和均衡沉降产生的构造形变;Lucchitta^[27]指出月岭的形成与重力沉降导致的玄武岩垂直结构调整有关,月岭由相邻块体之间的差异沉降速率引起的多组高角度逆断层的活动形成;Maxwell^[28]利用有限元模型分析了盆地沉降导致的压缩弹性形变,指出形成月岭的主应力是重力重新调节的结果;Golombek^[19]基于简单伸展模型和纯弯曲模型分析,指出月溪的形成主要受与盆地相关的局部伸展应力的控制。以上模型假设玄武岩沉降呈简单径向对称状,强调了月海沉降对盆地构造演化的作用。

也有学者建立了可以统一解释月岭和月溪成因的构造模型。Melosh^[6]通过建立质量瘤平板挠曲模型(Plate flexure model)预测月海盆地断裂的应力源,指出随着与盆地中央距离的增加,月海盆地依次出现放射状逆断层(月岭)、走滑断层和同轴状正断层(月溪)。该模型可以解释放射状月岭和同轴状月溪的起源,但后期研究表明月海盆地并不存在走滑断层,即平板挠曲模型存在走滑断层的矛盾,Freed 等^[29]预测走滑断层的缺失与月球岩石圈热力状态的变化和月海盆地的充填历史有关。平板挠曲模型的另一个矛盾很少被学者关注,月岭的分布类型在质量瘤盆地和非质量瘤盆地存在显著差异(表 1),质量瘤盆地的月岭主要呈同心圆状而非放射状(与最新高分辨率月表影像和雷达数据的解译结果一致^[30-31]),这显然与平板挠曲模型预测的放射状逆断层不一致,因此本文不支持平板挠曲模型的观点。

Solomon 等^[7]结合月球岩石圈厚度分析质量瘤盆地的构造特征,指出月球岩石圈厚度的变化与玄武岩负载和月球热应力演化存在密切的联系,预测月岭和月溪由月海盆地沉降产生的局部应力叠加月球热应力产生,月球在 3.6Ga 从净扩张转入全面收

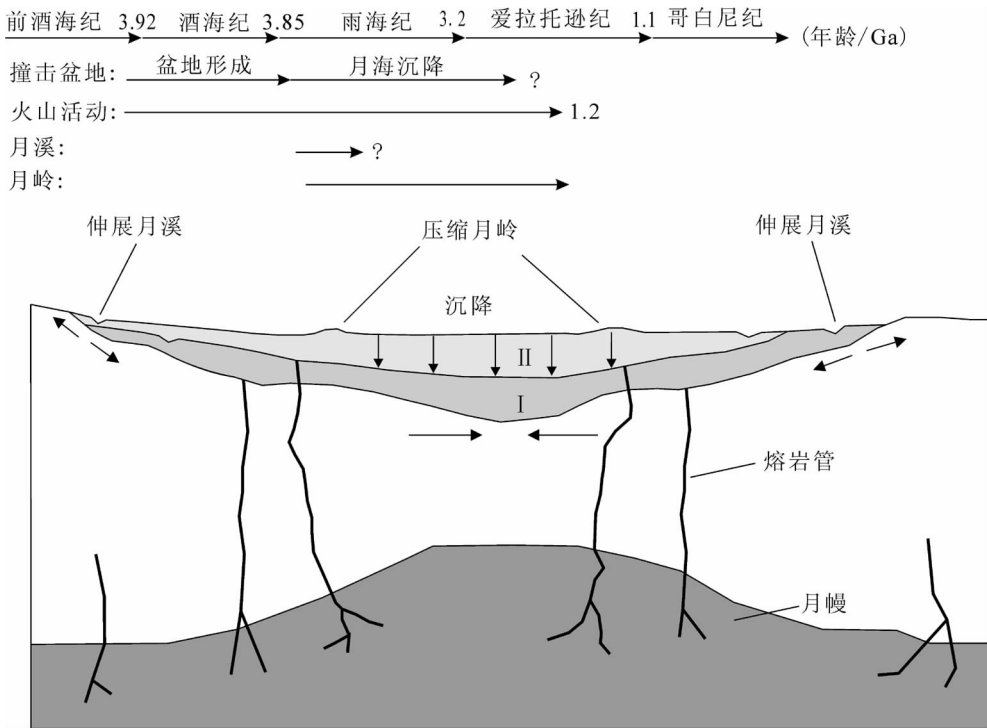


图 6 月岭和月溪的形成与演化(据参考文献[7]修改)

Fig. 6 Schematic illustration of the formation and evolution of lunar lineaments

撞击事件使月海盆地处的月亮减薄,区域性卸载导致月幔上隆,质量瘤盆地的月幔月亮边界表现为明显凸起;玄武岩多期充填,月海沉降拉伸盆地外围产生月溪,压缩盆地中部产生月岭

缩时期,全球热应力的转变导致月溪形成的终止和月岭形成的延长。此观点结合盆地局部应力和全球热应力解释盆地的构造演化,认为月溪的形成结束于 3.6Ga。但月球在 3.6Ga 是否发生过全球热应力转变仍存在争议,并且月海充填和随后的玄武岩沉降跨越了较长的历史时期,不可能终止于 3.6Ga^[23-24]。因此月溪形成的绝对时间尺度存在不确定性。

综合遥感解译结果和前人研究成果,笔者认为,月岭和月溪的形成在月全球范围内可能存在多样性,但与月海沉降相关的盆地局部应力对月溪和月岭的形成起了至关重要的作用;在质量瘤盆地,盆地形成后玄武岩充填使月海发生沉降,盆地边缘产生的水平伸展应力导致月溪的产生,盆地内部产生的压缩应力导致月岭的产生(图 6)。

在构造序列上,月溪和月岭的形成晚于撞击盆地的形成和月海玄武岩的侵位。月岭之所以呈现出较月溪更年轻的构造特征,笔者认为这主要是由月海玄武岩的多期充填历史引起的,早期月海沉降在盆地内部产生的月岭极有可能被后期玄武岩覆盖,

月海盆地现存的月岭主要由相对晚期的月海玄武岩沉降变形产生;而月溪多分布在盆地边缘(高程相对较大)区域,受后期玄武岩影响较小,呈现相对古老的构造特征。另外从力学角度考虑,相同岩石在张力作用下比在挤压力作用下更容易破碎,这也可能影响了月溪和月岭的形成。因此月岭和月溪的形成机制与其呈现的构造序列关系并不矛盾。

3.2 影响因素

研究区六大质量瘤盆地中,雨海、危海、湿海、酒海和史密斯海的月岭以同心圆状为主,而澄海不仅存在同心圆状月岭,还分布着放射状月岭。上文的沉降模型可以解释月岭和月溪的成因,但不能有效解释月岭的分布类型。

月球的质量瘤指具有高幅值重力正异常的区域,是月球重力场最显著的特征之一。质量瘤重力异常由撞击后期玄武岩充填^[32]或高密度月幔物质上涌^[33]引起,或许是两者的综合效应,但由于月亮和月幔物质的不均匀性,两者的贡献比重不易确定^[29,34]。撞击事件发生后,强烈的挤压和大范围的熔融事件

导致月亮壳变薄并向下弯曲,撞击盆地下方的高密度月幔物质迅速上升,盆地底部发生回弹,使月亮壳幔边界垂直隆升;即使排除月海玄武岩负载的影响,前月海(pre-mare)时期的撞击盆地大都处于均衡状态^[35-37]。

GLGM2 重力模型(1997)显示质量瘤重力异常呈同轴对称的高斯状分布,表明如果质量瘤由月海

玄武岩充填引起,则从盆地边缘到盆地中央月海玄武岩逐步变厚^[38]。LP165P 模型(2001)和 SGM90d 模型(2009)显示重力异常基本呈等轴状分布,但异常中部变化平缓(表现为广阔的高台),异常边缘变化急剧,暗示月海玄武岩的厚度在盆地中部总体一致,在盆地边缘急剧变薄^[39-40]。本文通过把月岭和重力数据叠加,发现正重力异常的边缘与同心圆状月岭

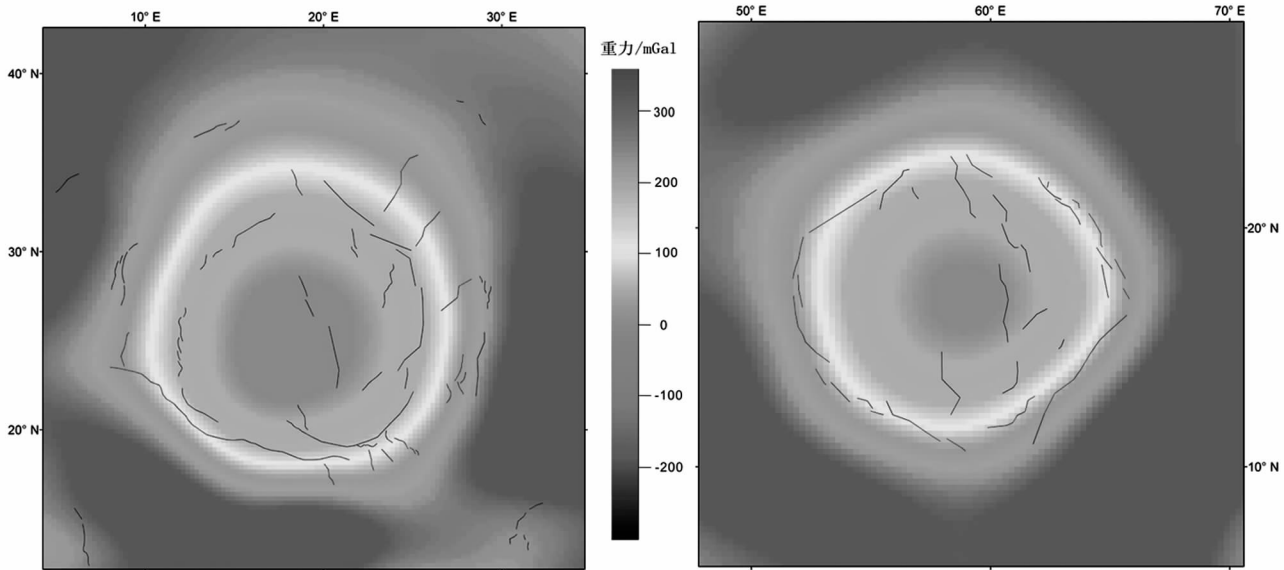


图 7 月岭与重力数据叠加

Fig. 7 Spatial relationship of mare ridge and gravity data

左图为澄海;右图为危海

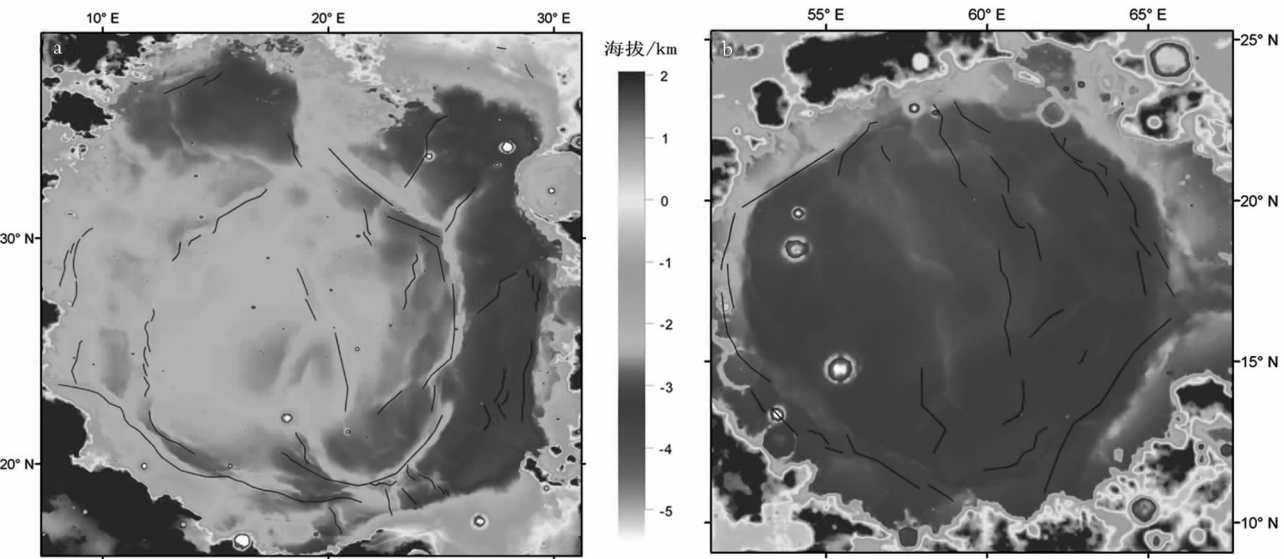


图 8 月岭与地形数据叠加(数据来源 LOLA(60m/pix)DEM)

Fig. 8 Spatial relationship of mare ridge and DEM data

(a)澄海地形表现为中央突起;(b)危海地形相对平坦

存在明显的空间一致性(图 7),这暗示撞击盆地重力均衡调整可能影响了月岭的分布类型。

LOLA 高分辨率 DEM 数据显示,澄海地形表现为中心突起,其高程最小值位于月岭环的外侧(图 8-a),而危海、雨海和湿海的地形相对平坦(图 8-b)。虽然月海表面地形与玄武岩厚度没有直接的对应关系,但澄海的放射状月岭对应澄海高程的低值区域,而地形相对平坦的月海只存在同心圆状月岭,这表明玄武岩充填的几何形状可能影响了月岭的分布类型。

基于此,本文预测前月海时期盆地的均衡状态和月海充填的几何形状可能影响了月岭的分布类型。如果撞击盆地起初处于均衡状态,月海玄武岩充填加强了盆地沉降,则更容易形成同心圆状月岭;撞击盆地起初处于非均衡状态,月海玄武岩侵位后盆地底部发生回弹,则更容易形成放射状月岭;如果月海玄武岩厚度相对均匀,则易形成同心圆状月岭;盆地中央的玄武岩厚度明显大于盆地其它区域玄武岩的厚度,则易形成放射状月岭类型。

如果以上预测正确,根据月岭的主要类型为同心圆状,则前月海时期的盆地主要处于均衡状态,且月海玄武岩充填厚度趋于一致。对于前月海时期盆地的均衡状态仍存在很大争议,Wieczorek 等^[4]认为盆地的均衡状态可能影响了月岭的形成,但并没有详细解释,同时认为月球岩石圈厚度对盆地构造演化起了重要作用。应该指出的是,并非所有月岭和月溪都与质量瘤盆地相关。非质量瘤盆地的月岭和月溪数目相对较少,且与质量瘤盆地存在明显的差异,这一方面表明月海充填沉降对于月岭和月溪的形成起重要作用,另一方面也暗示月岭和月溪成因的多样性。近年来月球探测轨道器在月表探测出分布广泛的叶状陡坡,这些年轻的小尺寸、低角度逆冲断层是月球后期发生热力收缩的有力证据^[3]。本文没有考虑热应力变化所导致的月球扩张和收缩对盆地线性构造的影响,而是从盆地局部应力角度分析质量瘤盆地月岭和月溪的形成机制和影响因素。这种成因机制和影响因素是否适用于非质量瘤盆地,尚需进一步验证。

4 结 论

(1)月球的线性构造主要分布在正面月海的内部和周围,与盆地相关的大尺寸线性构造包括挤压

构造特征的月岭和伸展构造特征的月溪。在质量瘤盆地和非质量瘤盆地中,月岭和月溪的空间分布存在显著的差异。

(2)质量瘤盆地的月岭和月溪存在明显的时空关系。在空间关系上,月岭主要以断续的同心圆状分布在月海内部,月溪以弧状分布在月海边缘和邻近的高地上,所有月溪分布在月岭系统的外侧;在时间序列上,月岭和月溪的形成发生在盆地产生和月海玄武岩侵位之后,月岭的形成跨越了较长的历史时期。

(3)月溪和月岭之间存在构造成因联系,质量瘤盆地的月溪和月岭主要由月海沉降产生的局部应力引起,前月海时期盆地的均衡状态和月海充填的几何形状可能影响了月岭的分布类型。

致谢: 本文所用嫦娥一号影像数据由中国科学院国家天文台探月工程地面应用系统提供,其它数据源自 NASA PDS Geoscience Node Data 中心,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]Heiken G H, Vaniman D T, French B M. Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon[M]. New York: Cambridge University Press, 1991:94-111.
- [2]Hiesinger H, Head J W. New views of Lunar geoscience: An introduction and overview[M]//Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K. New views of the Moon. Washington: Mineralogical Society of America,2006,60(1):44-47.
- [3]Watters T R, Johnson C L. Lunar tectonics[M]//Watters T R, Schultz R A. Planetary tectonics. New York: Cambridge University Press, 2010,11:121-173.
- [4]Carr M H, Saunders R S, Strom R G, et al. The geology of the terrestrial planets[M]. Washington DC: NASA SP-469,1984:196-205.
- [5]Strom R G. Analysis of lunar lineaments: Tectonic maps of the Moon[J]. Commun. Lunar Planet. Lab. Univ. Arizona, 1964, 2: 205-216.
- [6]Melosh H J. The tectonics of mascon loading[C]//Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th.1978:3513-3525.
- [7]Solomon S C, Head J W. Lunar mascon basins: lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere[J]. Rev. Geophys. Space. Phys., 1980,18(1):107-140.
- [8]Head G W. Evidence for the sedimentary origin of imbrium sculpture and lunar basin radial texture[J]. The Moon,1976,15:445-462.
- [9]Wilhelms D E. The geologic history of the Moon[M]. Washington: U. S. Government Printing Office, U. S. Geol. Surv. Prof.,1987:85-96.
- [10]Maxwell T A, El-Baz F, Ward S W. Distribution, morphology, and

- origin of ridges and arches in Mare Serenitatis[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*,1975,86:1273–1278.
- [11]Lucchitta B K. Topography, structure, and mare ridges in southern Mare Imbrium and northern Oceanus Procellarum[C]//*Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 8th*.1977:2961–2703.
- [12]Sharpton V L, Head J W. Lunar mare ridges: Analysis of ridge–crater intersection and implications for the tectonic origin of mare ridges[C]//*Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.18th*.1988:307–317.
- [13]Phillips R J, Adams G F, Brown W E, et al. The Apollo 17 Lunar Sounder [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*,1973,3 (Suppl 4):2821 – 2831.
- [14]Watters T R. Wrinkle ridge assemblages on the terrestrial planets[J]. *J. Geophys. Res.*,1988,93:10236–10254.
- [15]Mueller K, Golombek M P. Compressional structures on Mars [J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*,2004,32:435–464.
- [16]Schubert G, Lingenfelter R E, Peale S J. The morphology, distribution, and origin of lunar sinuous rilles [J]. *Rev. Geophys.*,1970,8: 199–224.
- [17]Humle G. A review of lava flow processes related to the formation of lunar sinuous rilles [J]. *Geophys. Surv.*,1982,5:245–279.
- [18]McGill G E. Attitude of fractures bounding straight and arcuate lunar rilles [J]. *Icarus*,1971,14:53–58.
- [19]Golombek M P. Structural analysis of lunar grabens and the shallow crustal structure of the Moon [J]. *J. Geophys. Res.*,1979,84:4657–4666.
- [20]Lucchitta B K, Watkins J A. Age of graben systems on the Moon [C] // *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 9th*.1978:3459–3472.
- [21]Golombek M P, McGill G E. Grabens, basin tectonics, and the maximum total expansion of the Moon [J]. *J. Geophys. Res.*,1983,88: 3563–3578.
- [22]Potts L V, Von Frese R R B. Crustal attributes of lunar basins from terrain–correlated free–air gravity anomalies [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003,108(E5),10.1029/2000JE001446.
- [23]Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside [J]. *J. Geophys. Res.*,2000,105:29239–29276.
- [24]Hiesinger H, Head J W, Neukum G. Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum [J]. *J. Geophys. Res.*,2003,108:5065–5089.
- [25]Hiesinger H, Head J W, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size–frequency distribution measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010,5:E03003.
- [26]Bryan W B. Wrinkle–ridges as deformed surface crust on ponded mare lava [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*,1973,1(Suppl. 4):93–106.
- [27]Lucchitta B K. Mare ridges and related highland scarps – Result of vertical tectonism? [C]//*Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 7th*.1976:2761–2782.
- [28]Maxwell T A. Origin of multi–ring basin ridge systems: an upper limit to elastic deformation based on a finite–element model [C]// *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.9th*.1978:3541–3559.
- [29]Freed A M, Melosh H J, Solomon S C. Tectonics of mascon loading: Resolution of the strike–slip faulting paradox [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001,106:603–620.
- [30]Head J W, Solomon S C. Tectonic evolution of the terrestrial planets [J]. *Science*,2009,213:62–76.
- [31]Ono T, Kumamoto A, Nakagawa H, et al. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon [J]. *Science*,2009,323:909–912.
- [32]Phillips R J, Conel J E, Abbott E A, et al. Mascons: Progress toward a unique solution for mass distribution [J]. *J. Geophys. Res.*,1972,77: 7106–7114.
- [33]Wise D, Yates M. Mascons as structural relief on a Lunar ‘Moho’ [J]. *J. Geophys. Res.*,1970,75(2):261–268.
- [34]Sinha M, Gopinath N S, Malik N C. Lunar gravity field modeling critical analysis and challenges [J]. *Adv. Space Res.*,2010,45:322–349.
- [35]Neumann G A, Zuber M T, Smith D E, et al. The lunar crust: Global structure and signature of major basins [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996,101:16841–16843.
- [36]Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector [J]. *Science*,1998,281:1476 – 1480.
- [37]Wieczorek M A, Phillips R J. Lunar multiring basins and the cratering process [J]. *Icarus*,1999,139:246–259.
- [38]Lemoine F G R, Smith D E, Zuber M T, et al. A 70th degree lunar gravity model (GLGM–2) from Clementine and other tracking data [J]. *J. Geophys. Res.*,1997,16:339–359.
- [39]Konopliv A S, Asmar S W, Carranza E, et al. Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission [J]. *Icarus*,2001,150:1–18.
- [40]Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the Moon from four–way Doppler measurements of SELENE (KAGUYA) [J]. *Science*,2009,323:900–905.
- [41]Wieczorek M A, Jolliff B L, Khan A, et al. The constitution and structure of the lunar interior [M]//Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al. *New views of the Moon*. Washington: Mineralogical Society of America,2006,60(1):221–364.