

月球雨海北部陆地区域构造及其含义

王敏沛^{1,2}, 陈建平^{1,2}

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学 北京市国土资源信息研究开发重点实验室, 北京 100083)

摘要: 月球雨海北部陆地是雨海多环盆地的第二层, 平均高程约 -1 km。DEM 图像显示, 大量来自虹湾与柏拉图月坑的掘积物使本地区高程变得非常不均一。统计了研究区内的月坑, 并根据其深度与宽度之比(深宽比)将它们划分为4组。深宽比较小而扁率较大的月坑被认为是较古老的月坑。这些古老月坑分布于比较接近月海的位置。对研究区内线性构造的制图研究揭示了3个优选方位, 分别是 E—W、NEE—SWW 和 NW—SE 向。这种分布样式与月球格子构造系统大致匹配, 因而它们很可能形成于雨海事件之前。这些线性构造, 包括断裂与月溪, 在月海玄武岩泛滥时期为玄武质岩浆的侵入提供了大量通道。在研究区内一些地形较低的地点, 玄武岩上侵并出露在月表, 它们的 FeO 平均含量接近但是略低于月海玄武岩。总结了本地区的地质构造演化历史, 并且推论月球上的确存在类月海的陆地。

关键词: 月球区域构造; 雨海; 虹湾; 柏拉图月坑; 嫦娥一号

中图分类号: P184.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)01-0191-07

Regional Structure of the Northern Land of the Lunar Mare Imbrium and the Implication

WANG Min-pei^{1,2}, CHEN Jian-ping^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Beijing Land Resources Information Development, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The northern land of the lunar Mare Imbrium is the second mountain ring around the Imbrium multi-ring basin, and the average elevation is about -1 km. Masses of the ejecta from Sinus Iridum and Crater Plato caused severely non-uniform elevation of this area, which is clearly shown by the DEM. The craters located in this area are counted and divided into four groups based on the depth/diameter ratios. The craters with less depth/diameter ratio and larger oblateness are regarded as older craters. The distributions of older craters are more close to the Mare. The mapping of lineaments in this area reveals three preferred orientations, i. e. E-W, NEE-SWW and NW-SE direction. The style of lineament distribution is roughly matched with the Lunar Grid System and likely formed before the Imbrium event. These lineaments, including fractures and rills, had supplied tunnels for the intrusion of basaltic magma during the period of mare basalt flooding. Some intruded basaltic magma extruded onto the surface of this land in several places with lower elevations. The average content of FeO of extruded magma is close to but lower than that of mare basalt. The features of the geological structure and evolution history of this area were summarized, and it could be concluded that there do exist mare-like lands on the Moon.

Key words: Lunar regional structure; Mare Imbrium; Sinus Iridum; Crater Plato; Chang'e 1

收稿日期: 2011-07-29; 改回日期: 2011-11-28; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家“863”计划项目(2009AA122201)。

作者简介: 王敏沛, 男, 博士研究生, 1978 年出生, 资源与环境遥感专业, 主要从事月球地质构造研究。

Email: wminpei@gmail.com。

通信作者: 陈建平, 男, 教授, 博士生导师, 1959 年出生, 地球探测与信息技术专业, 主要从事矿产资源定量预测评价研究。

Email: 3s@cugb.edu.cn。

0 引言

位于月球雨海北部、冷海南部、风暴洋东部的陆地^[1-6]是一个复杂的区域。自从其从岩浆洋^[7]分异出来以后,这片区域经历了雨海、虹湾和柏拉图等无以计数的撞击事件;因此,这片区域覆盖了大量撞击溅射物与月壳物质的混合物,同时也保存了大量的有用信息。阿尔卑斯山和侏罗山分别位于本区的东部和西部^[5-6],柏拉图月坑和虹湾是本区内最突出的两个地质体,并且均被暗色月海物质所填充。其中虹湾已经被中国探月工程选为登录点,因而受到了广泛的关注。

Wagner^[8]对围绕虹湾溅射物上的撞击坑进行了统计,用于给虹湾撞击事件定年,得到了 3.84~3.7 Ga 的年龄。一些研究者认为这是一片与月海接近的区域。Jolliff 等 2000 年以 FeO 和 Th 元素含量为基础,将本区划入 PKT^[9](风暴洋克里普地体)。张福勤等 2010 年建议这一地区应该归属于 WNMM^[10](正面西主海区)。这些划分方法都说明这片区域有着接近于月海的特征。除了柏拉图月坑、虹湾和阿尔卑斯山等这些明显地质体,前人对本区域所做的研究工作并不多。本文将利用嫦娥一号和美国 LRO LOLA 数据,通过构造解译和成分反演等方法,对本区域的构造演化历史进行探讨。

1 数据处理过程

表 1 列出了本文所使用的数据及其基本参数,其中嫦娥一号(Chang'e 1,下文简称为 CE1)数据的参数来自 Zheng 等^[11]的论文。

CE1 CCD2C 级数据保存了沿卫星飞行方向的地理坐标,可以用于图像校正。在进行了自动校正后,约 50 轨的数据被镶嵌在一起成为本文工作的基础底图。CE1 IIM 2C 数据覆盖了 480~946 nm 的 64 个波段,其数据处理过程包括光谱定标^[12]、坐标校正和图像镶嵌 3 个步骤。光谱定标由增益与偏校正和天线畸变校正过程组成。Pieters 等测定的双向反射率数据^[13-14]被用于将数据 DN 值转换为反射率的绝对定标过程。首先双向反射率数据被重采样到 CE1 IIM 的波段,然后选择 IIM 第 2 225 轨的一个区域作为定标区域^[12]。使用线性经验定标得到反射率数据后,再通过多项式拟合^[15]的方法消除天线畸变引起的行响应不一致。CE1 IIM 2C 所使用的坐标校正和图像镶嵌方法基本同

表 1 本研究所使用的数据及其主要参数

Table 1 The data employed in this study and their major parameters

载荷	参数
CE1 CCD(三线阵立体相机)	空间分辨率: 120 m
	幅宽: 60 km(512 像元)
	预处理: 暗电流校正, 辐射校正, 几何粗校正
CE1 LAM(激光高度计)	数据量: 1 401 轨
	数据间隔: 沿卫星飞行方向约为 1.4 km, 在赤道地区邻轨间距为 7~8 km
	测高距离精度: 5 m
CE1 IIM(干涉成像光谱仪)	空间分辨率: 200 m
	波段范围: 480~960 nm
	波段数: 32
	幅宽: 25.6 km(128 像元)
LRO LOLA (Lunar Orbiter 激光高度计)	预处理: 暗电流校正, 平场校正, 辐亮度转换, 光学归一化($i=30^\circ$, $e=0^\circ$)
	空间分辨率: 60 m

CE1 CCD 2C 的处理方法一致,这里不再赘述。51 轨的 CE1 IIM 2C 数据被镶嵌在一起形成了研究区的光谱反射率影像数据。根据本文研究的需要,基于 Lucey 等 2000 年提出的方法^[16-17]填制了 FeO 和 TiO₂ 含量和 OMAT(光学成熟度)图。Lucey 等^[16-17]提出的 3 个反演公式分别如下:

$$w(\text{FeO}) = \left(-\arctan \left(\frac{\frac{R_{950}}{R_{750}} - 1.19}{\frac{R_{750}}{R_{750}} - 0.08} \right) \times 17.427 \right) - 7.565 \quad (1)$$

$$w(\text{TiO}_2) = 3.708 \times \left(\arctan \left(\frac{\frac{R_{415}}{R_{750}} - 0.42}{\frac{R_{750}}{R_{750}}} \right) \right)^{5.979} \quad (2)$$

$$\text{OMAT} = \left((R_{750} - 0.08)^2 + \left(\frac{R_{950}}{R_{750}} - 1.19 \right)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

其中: R_{950} 、 R_{750} 、 R_{415} 分别为 Clementine UV/VIS 950 nm、750 nm、415 nm 波段的光谱反射率。在本文的填图工作中,使用 CE1 IIM 的 31(918 nm)和 24(757 nm)波段分别替换了反演公式中的 950 nm 和 750 nm 波段,并对系数进行了线性修正。经过与 Lucey 等人基于 Clementine 数据的填图结果进行对比,发现两种数据的填图结果基本一致,可以用于本文的研究工作。

2 地质分析与讨论

2.1 雨海北部陆地高程特征与成因分析

研究区地处雨海多环盆地的中间环, 是位于高地与月海之间的过渡区域^[18]。笔者根据本区的平均高程特征将研究区划分为3个部分, 如图1所示, 分别是西部(区域A)、东部(区域C)和连接部(区域B)。3个部分的平均高程分别是-1 722 m、-2 119 m和-2 546 m。区域A和区域C显然受到虹湾和柏拉图事件的影响, 从图1中可以明显地看出, 这两个区域内的山脉主要都由围绕虹湾和柏拉图月坑的撞击掘击物构成, 因为形成虹湾的撞击事件肯定远大于形成柏拉图月

坑的撞击事件, 因此围绕在虹湾边缘的掘击物要多于柏拉图月坑, 这也就造成了区域A在平均高程上要高于区域C和区域B。区域B因为没有受到类似形成虹湾或者柏拉图月坑的大型撞击事件的影响, 因此覆盖在其上的掘击物相对较少, 这就为保留一些古老的月坑创造了条件。从图1中可以发现, 在本区月陆与雨海之间, 存在3个洼地D、E和F, 它们的平均高程分别是-3 109 m、-3 151 m和-3 121 m。本文将随后讨论这个特别的现象。

根据月球多环盆地的成因模型^[19], 在遭遇巨大的撞击时, 围绕撞击中心会形成若干正断层, 块体沿着这些正断层下滑, 从而形成围绕盆地中心且相对突出的环形山脉(图2)。因此, 这些环

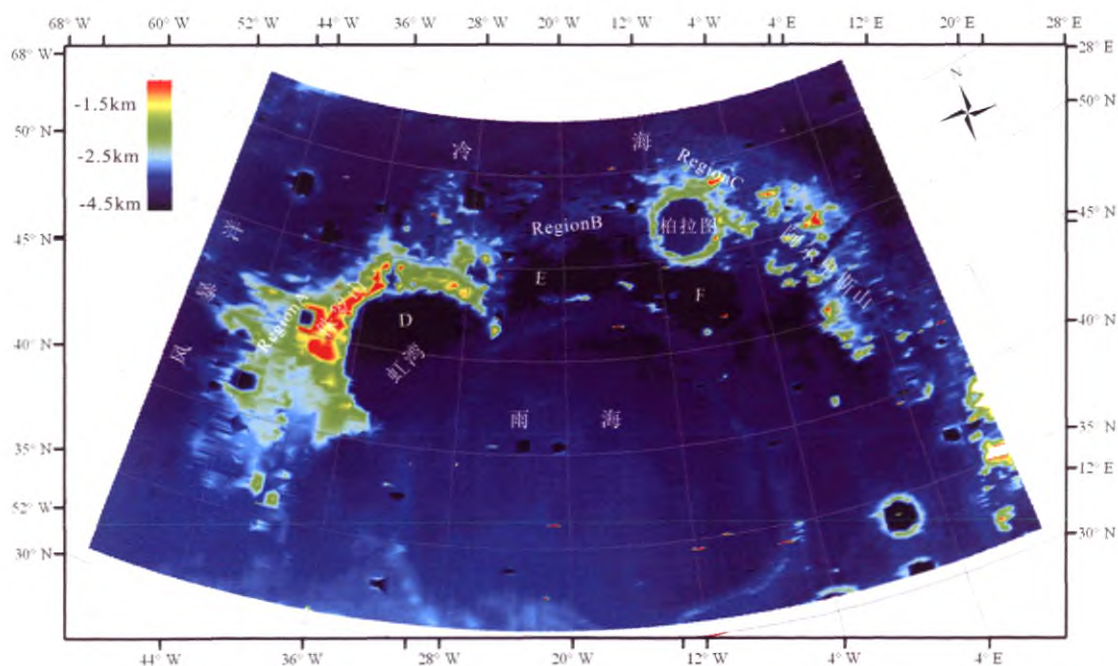


图1 基于 CE1 LAM 2B 数据制作的雨海北部地区 DEM 影像

Fig. 1 DEM image of northern Mare Imbrium created from the data of CE1 LAM 2B

(根据高程特征将研究区划分为区域A、B和C3个部分, D、E和F3个洼陷地区; D_Moon_2000 坐标系, 1 737 400 m 椭球体, 兰伯特等角圆锥投影)

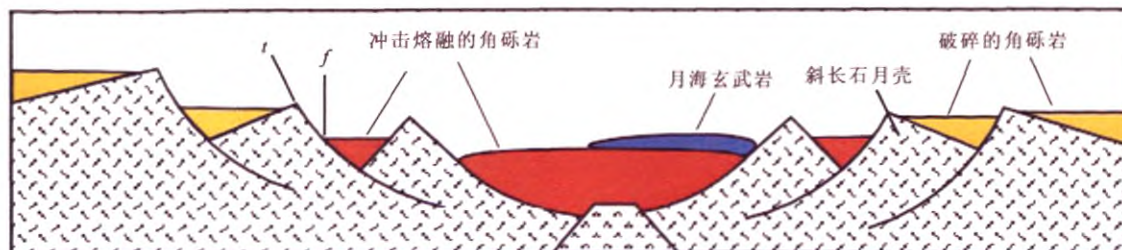


图2 带有滑塌坑壁的复杂月坑成因示意图

(据 Marc^[20] 修改; 研究区位于 t 点; f 点代表了正断层所处位置, 其与图1中的D、E和F相对应)

Fig. 2 Schematic diagram of a large complex crater with slumped walls (adapted from Marc^[20]; the research area located at point t ; point f representing the location of normal faults, where the regions of D, E and F in Fig. 1 located)

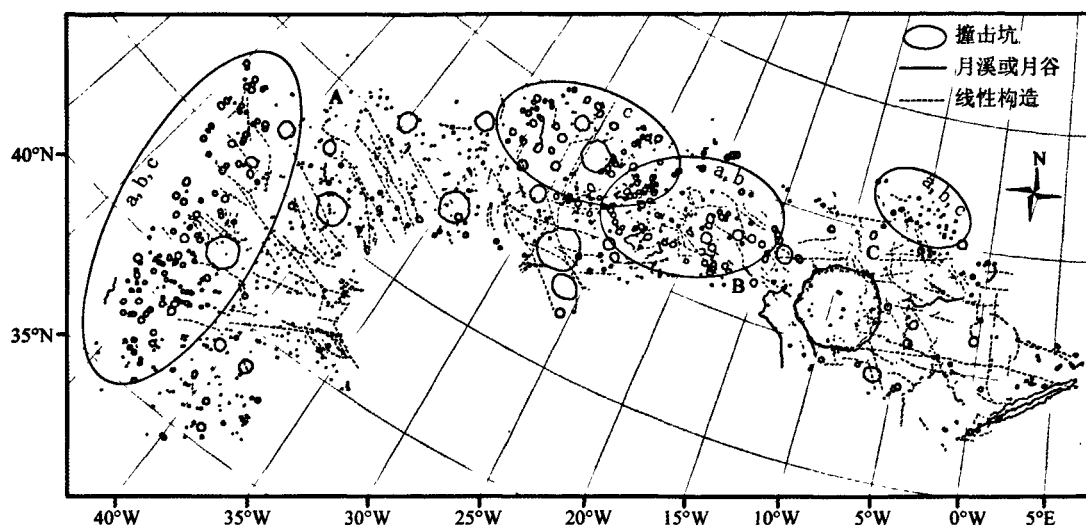


图3 雨海北部陆地月坑与线性构造解译图

(区域 A、B 和 C 内的椭圆形区域代表了表 2 所列举的不同类型月坑的聚集区域)

Fig. 3 The interpretation diagram of craters and lineaments in the land of northern Mare Imbrium

(Three regions of A, B and C ranging by ellipses representing the regions gathering with different types of craters listed in Table 2)

形山脉的平均高程要高于主盆地的平均高程但又低于盆地外围陆地。根据这个模型,在雨海与其北部陆地边界之间很可能也存在着雨海撞击时形成的正断层。笔者认为图 1 中的 3 个洼地 D、E 和 F 就代表了这些正断层所处的位置,只是它们现在已经被月海玄武岩所覆盖而无法直接被观测到。

可以看出,研究区所处的构造部位和大型撞击事件所产生掘积物覆盖的影响,是造成研究区高程差异的两个重要原因。

2.2 区内月坑与线性构造特征

基于 CE1 CCD 影像,本区内 366 条线性体和 1 228 个月坑被解译出来,图 3 显示了解译结果。一些围绕虹湾和柏拉图坑的线性体被确定为撞击溅射形成的沉积纹理。James 1976 年认为这种线性纹理是由溅射物磨蚀和沉积所形成的,纵向延伸不大^[21]。因此,不能将它们称为线性构造,因为它们并不是区域构造应力引起的,而应该归结于与沉积作用有关的表面挖掘过程。将这些线性体排除在外以后,基于以下 4 个条件选出了超过 350 条线性构造进行研究:(1)撞击坑边缘存在的线性构造;(2)具有切割其他地质体现象的线性构造;(3)沿走向具有较长延伸(≥ 10 km)的线性构造;(4)月溪和月谷线性构造。

2.2.1 区内月坑特征与分组

笔者基于 LOLA 的 DEM 数据对 798 个月坑的

深度和直径进行了测量,并且制作了两组对比关系图(图 4)。根据月坑深度/直径比值,可以将它们划分为 4 组,分别为 a、b、c、d,如表 2 所示。

很明显,深度/直径比值较小的月坑其年龄相对较老,因为空间风化作用会磨蚀月坑的坑唇,并且来自周围晚期撞击坑的溅射物会填充其坑底,这两种过程都会导致深度/直径比值的降低。笔者计算了这 4 组月坑的平均扁率,并将计算结果罗列在表 2 中。从表 2 可以看出,从 a 组到 d 组,扁率呈现一个明显的下降趋势,这说明月坑越来越规则,越接近圆形,这也代表了从老到新的变化趋势。表 2 中光学成熟度的变化规律也与这种从老到新的趋势相吻合。根据图 1 和图 3,很明显老的月坑(a、b、c 组)集中分布在区域 B 和区域 A、C 的边缘。很可能很多老月坑已经被虹湾和柏拉图事件产生的溅射物所覆盖或者被破坏,只有那些远离这两次大型撞击事件的古老月坑得以在撞

表 2 雨海北部陆地上月坑分组和相关属性

Table 2 Four groups of craters in the land of northern Mare Imbrium and their properties

分组	深度/ 直径	平均 扁率	平均 高程/m	光学 成熟度	$w(\text{FeO})$ /%	$w(\text{TiO}_2)$ /%
a	< 0.01	0.205	-2 100.2	0.162 7	14.51	2.23
b	0.01 ~ 0.05	0.183	-1 973.6	0.165 9	14.27	2.29
c	0.05 ~ 0.1	0.182	-1 930.8	0.168 0	14.14	2.34
d	> 0.1	0.128	-1 854.7	0.183 7	12.99	2.36

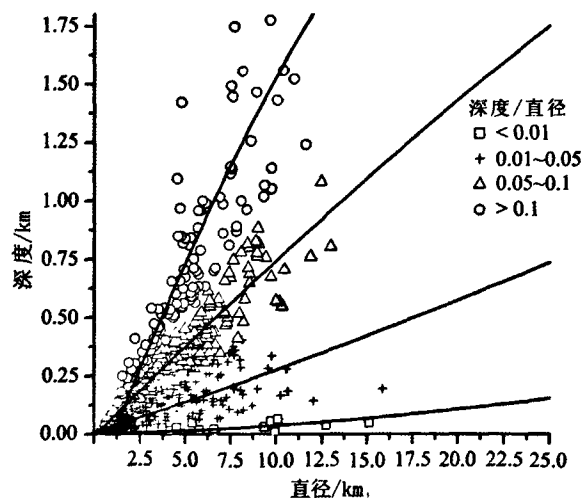


图4 雨海北部陆地撞击坑深度与直径统计关系图
(图中包括了798个撞击坑的数据, 根据深度/直径的比值, 将这些撞击坑划分为4组)

Fig. 4 The depth and diameter values of impact craters in the land of northern Mare Imbrium

击中幸存。表2也列出了这4组月坑所处区域的平均高程, 可以看到老月坑主要位于地势较低的地方, 同时它们也更靠近月海。如果采用 Moore 等 1980 年根据月坑形态确定其相对年代的方法^[22], 可以确定至少 a 组月坑是形成于雨海纪之前的。由此可以推断: 研究区是一片形成于前雨海时期的古老月陆, 区内的山脉, 如侏罗山, 主要是由雨海事件后的掘击物所形成。这一认识与美国地调局编制的月球地质图^[1-6]所反映的内容基本是一致的。

表2还反映出 a 组到 d 组的另外两种趋势, 其一是 FeO 含量的逐渐降低, 其二是 TiO₂ 含量的逐渐升高。计算 FeO 和 TiO₂ 含量的反演方法在本文数据处理部分已经说明, 同时因为本文所统计的撞击坑直径均不大, 属于简单型撞击坑, 可以认为撞击坑内物质成分基本一致, 因此计算含量时直接对撞击坑所覆盖区域进行采样, 然后计算平均值。根据 Morris 等^[23]的理论, 月表覆盖物成熟度(年龄)和 FeO 含量成负相关, 这意味着老的月坑应该含有较少的 FeO。但是表2给出的数据与此理论不符, 笔者认为这是由于周边月海的影响造成了这种不符合现象的出现。上文提到, 老月坑(a、b、c组)分布的位置更靠近周边的3个月海, 即雨海、冷海和风暴洋。图3所圈定的4个椭圆区域与它们周边月海的平均高程差分别为 211 m、307 m、302 m 和 284 m。因此, 很可能在月海玄武岩

泛滥期间, 玄武质基性岩浆侵入了这片以高地斜长岩为主的陆地, 造成了本区组分上的变化。在一些区域, 如柏拉图和 Maupertuis 月坑, 以及一些接近月海的地区, 玄武质基性岩浆出露到地表。这些地区的平均 FeO 含量为 17.3%。位于侏罗山南角, 介于雨海和风暴洋之间的 Gruithuisen 火山穹窿^[8,24]应该就是基性侵入岩浆的喷出点。而这里的3个火山穹窿, 即 γ 、 δ 和 northwestern^[4,8,24]应该是由富辉石的基性侵入岩与富长石的月壳物质混合后演化为富 Si 的粘稠次生岩浆喷出所形成的, 它们的平均 FeO 含量大约为 12.4%。这些证据充分说明基性侵入岩浆对本区域的演化起到了重要的作用。但是这里还有一个关键问题, 侵入岩浆的上升通道是什么呢? 又是如何形成的? 笔者认为本区域内存在的线性构造为基性岩浆的侵入提供了上升的通道。

2.2.2 区内线性构造特征与统计

图5显示了区内线性构造(图3)走向的统计结果。很明显, EW、NEE 和 NW 向是3个主要的优选方位。图5(a)显示与虹湾呈放射状分布的线性构造对总体的线性构造走向的贡献并不大, 这些线性构造主要分布在区域 A。在区域 B, 柏拉图月坑周围的线性构造优选方位主要是 NEE—SWW 和 E—W 向, 而并没有呈现出与柏拉图月坑或雨海呈放射状分布的趋势。这种分布模式提示这些线性构造可能在柏拉图月坑和雨海形成以前就存在^[25]。但是, 笔者注意到柏拉图月溪是指向柏拉图月坑中心的, 其具有两个优选方位, 即 NW 和 NNE 向, 尤其是 NWW 向。根据地下核试验^[26]证实, 柏拉图月溪很可能是在柏拉图撞击事件期间, 沿着古老的裂隙张开所形成的。除了柏拉图月溪, 该区域还存在另外 8 条月溪, 它们的优选方位在图5(b)中也进行了统计, 可以看出该区域月溪的优选方位与区域线性构造总体方位基本一致。因此, 包括这些月溪在内的线性构造, 在基性岩浆上侵时提供了侵入的通道和空间, 并且它们中的部分进一步演化为坍塌的岩浆隧道^[27]。

在对月球格子构造系统^[28]进行分析以后, Glass 1982 年指出, 现今观察到的线性构造主要代表的是古老构造的分布样式, 而非现代构造应力场^[25]。研究区内线性构造的分布特点与这种观点是吻合的, 而潮汐力是引起这些古老裂隙的动力来源。在地月系统形成早期, 月球相对今天的位置要更接近地球^[29], 潮汐力和同步旋转应力会在

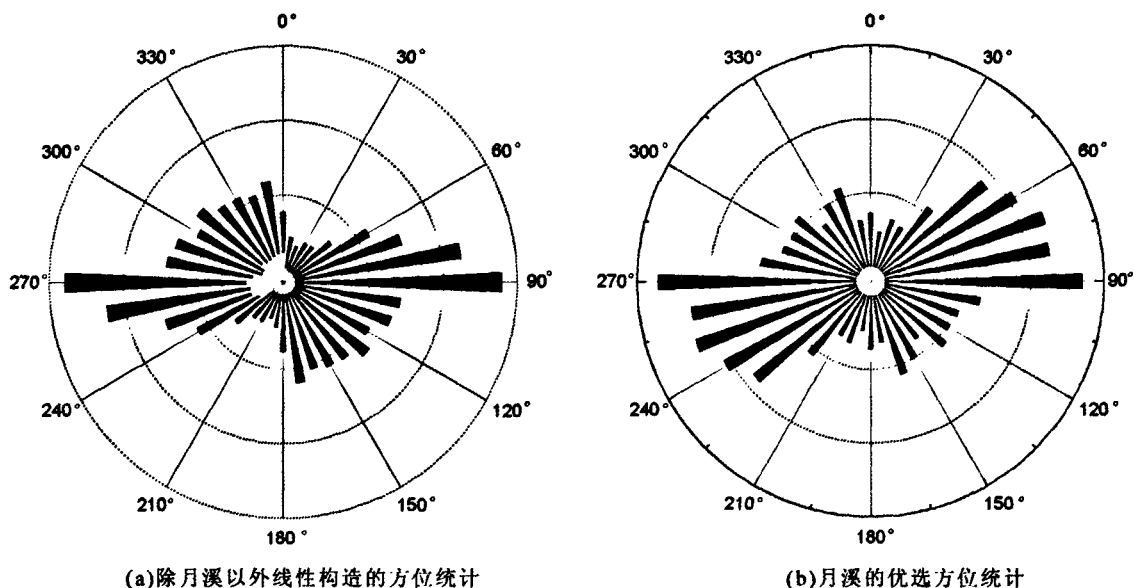


图5 按照10°间隔划分的雨海北部陆地内线性构造方位统计玫瑰花图

Fig. 5 Rose diagrams of lineaments divided into 10° bins based on orientations in the land of northern Mare Imbrium

月球的岩石圈内产生超过 100 kbar (1 bar = 0.1 MPa) 的应力^[30]。这种量级的应力足以引起月球岩石圈的塑性变形。而现今地月间的潮汐力已经很小,不足以在月亮内产生任何破裂^[31]。

Melosh 等认为,像雨海这样规模的撞击事件,有可能挖掘出地表下较深处富含 TiO₂ 的物质^[32-34]。Gillis^[35]等利用 Clementine 反演的全月 TiO₂ 含量分布,也证实本地区的玄武岩中 TiO₂ 含量较高。而虹湾和柏拉图这样的大型撞击事件,对早期的雨海溅射物(如阿尔卑斯建造等)会起到很强的扰动作用,而后期各种规模的撞击还会将不同时期的掘积物质再进行混合。

综上所述,笔者提出是在研究区内存在的众多古老破裂为基性玄武质岩浆的侵入提供了通道,基性岩浆的侵入和后期撞击的混合作用,一起使得研究区在属性上更加接近月海。因此,在进行月表分区和编图时,可以将本区按照类月海或“非月海”地区^[36]处理,即可以将本区划入 PKT 或 WNMM 地质单元。

3 结 论

月球雨海北部陆地是一片古老的区域,覆盖了很多撞击产生的掘积物质。在雨海事件以前,存在着众多的断层和裂隙,其优选方位是 EW 和 NEE—SWW 向,它们大致与月球格子构造系统相吻合。在雨海撞击事件中,围绕雨海中心形成了一些正断层,并使研究区演化为雨海多环盆地的

第二层环形山脉。

晚期大轰击(LHB)造就了本区内虹湾和柏拉图这两个大型撞击坑。在这两次巨大撞击事件的影响下,一些早先存在的断裂沿初始方向再次活动,有的张开成为月溪,其走向至少在 NWW 方向是与研究区内的线性构造优选方向一致的。这些断层、裂隙和月溪在月表下形成了大量的通道。大量玄武质基性岩浆沿着这些通道侵入,甚至在局部地区出露月表。

研究区虽然属于陆地类型,但在各种属性上更接近月海,因此将本区划入 PKT 或 WNMM 是合理的。研究区是月表存在的与月海近似的“非月海”陆地的典型代表,但是对于其物质组成,还需要结合光谱和重力资料,以得到更准确的认识。在今后的工作中,拟运用更多的光谱组分填图结果对物质组成进行进一步分析。其中,区内出露的类月海玄武岩应该被更精细地研究,以加深对月球岩浆演化的了解。

致谢:衷心感谢中国地质大学(北京)万天丰教授在本文撰写过程中提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] Department of the Interior United States Geological Survey. Geologic Atlas of the Moon, I-602(LAC-24) [M]. Washington: United States Geological Survey, 1969: 1.
- [2] Department of the Interior United States Geological Survey. Geologic Atlas of the Moon, I-604(LAC-11) [M]. Washington: United States Geological Survey, 1969: 1.

- [3] Department of the Interior United States Geological Survey. Geologic Atlas of the Moon, I-701(LAC-12) [M]. Washington: United States Geological Survey, 1972: 1.
- [4] Department of the Interior United States Geological Survey. Geologic Atlas of the Moon, I-805(LAC-23) [M]. Washington: United States Geological Survey, 1973: 1.
- [5] United States Geological Survey. 1:1 Million-Scale Maps of the Moon, LAC11-LAC12 [M]. Washington: United States Geological Survey, 2008: 1.
- [6] United States Geological Survey. 1:1 Million-Scale Maps of the Moon, LAC23-LAC24 [M]. Washington: United States Geological Survey, 2008: 1.
- [7] Warren P H. The Magma Ocean Concept and Lunar Evolution [R]. Palo Alto: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1985, 13: 201-240.
- [8] Wagner R J, Head J W, Wolf U, et al. Stratigraphic sequence and ages in the grüthuisen region of the Moon [J]. *Lunar and Planetary Science*, 2002, 33: 1619.
- [9] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(2): 4197-4216.
- [10] 张福勤, 李春来, 邹永廖, 等. 月球的构造演化: 嫦娥月图解释的理论基础 [J]. *地球化学*, 2010, 39(2): 110-122.
- [11] Zheng Y C, Ouyang Z Y, Li C L, et al. China's Lunar Exploration Program: present and future [J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56: 881-886.
- [12] 吴昉昭, 徐夕生, 谢志东, 等. 嫦娥一号 IIM 数据绝对定标与初步应用 [J]. *中国科学: G 辑*, 2009, 39(10): 1387-1392.
- [13] Pieters C M. The Moon as a spectral calibration standard enabled by lunar samples: the Clementine example [R]. Providence: Department of Geological Sciences, Brown University, 1999: RI02912.
- [14] Pieters C M, Head J W, Isaacson P, et al. Lunar international science coordination/calibration targets(L-ISCT) [J]. *Advances Space Research*, 2008, 42: 248-258.
- [15] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing Active and Passive [M]. Volume II. Norwood: Artech House Inc, 1982: 1064.
- [16] Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(8): 20377-20386.
- [17] Lucey P G, David T B L, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(2): 3679-3699.
- [18] 周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取 [J]. *科学通报*, 2011, 56(1): 18-26.
- [19] Taylor S R. Planetary Science: A Lunar Perspective, Chapter 3: Meteorite Impacts, Craters and Multi-Ring Basins [M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1982: 81-84.
- [20] Marc D N. The Lunar cataclysm: Reality or “Mythconception”? [J]. *Elements*, 2009, 5: 23-28.
- [21] James W H. Evidence for the sedimentary origin of Imbrium sculpture and lunar basin radial texture [J]. *The Moon*, 1976, 15: 445-462.
- [22] Moore H J, Boyce J M, Hahn D A. Small impact craters in the lunar regolith: their morphologies, relative ages, and rates of formation [J]. *The Moon and the Planets*, 1980, 23: 231-252.
- [23] Morris R V. The Surface Exposure (Maturity) of Lunar Soils: Some Concepts and I_h/FeO Compilation [M]. Houston: Proceedings of the 9th Lunar Planet Science, 1978: 2287-2297.
- [24] Smith E. Identification, distribution and significance of Lunar volcanic domes [J]. *The Moon*, 1973, 6: 3-31.
- [25] Glass B P. 行星地质学导论 [M]. 陈书田, 译. 北京: 地质出版社, 1982: 191.
- [26] Barosh P J. Relationships of explosion-produced fracture patterns to geologic structure in Yucca Flat, Nevada test site [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1968, 110: 199-217.
- [27] Oberbeck V R, Quaide W L, Greeley R. The origin of lunar sinuous rilles [J]. *Modern Geology*, 1969, 1: 75-80.
- [28] Andlauer G. The Lunar Grid System [M]. Houston: Lunar Science Institute, 1976: 6.
- [29] Thompson A C, Stevenson D J. Two-phase gravitational instabilities in thin disks with application to the origin of the Moon [J]. Pasadena, Lunar and Planetary Science, 1983, 14: 787-788.
- [30] Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al. New Views of the Moon [M]. Washington: Mineralogical Society of America, 2006: 45.
- [31] Binder A B, Gunga H C. Young thrust-fault scarps in the highlands: Evidence for an initially totally molten Moon [J]. *Icarus*, 1985, 6: 421-441.
- [32] Melosh H J. Impact Cratering [M]. New York: Oxford University Press, 1989: 245.
- [33] Chenet H, Lognonné P, Wieczorek M, et al. Lateral variations of lunar crustal thickness from the Apollo seismic data set [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243: 1-14.
- [34] Timothy L G, Michael J K. Lunar mare volcanism: where did the magmas come from? [J]. *Elements*, 2009, 5: 29-34.
- [35] Gillis J, Bradley L J, Rick C E. A revised algorithm for calculating TiO₂ from Clementine UVVIS data: A synthesis of rock, soil, and remotely sensed TiO₂ concentrations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(2): 5009.
- [36] Warren P H, Wasson J T. Pristine nonmare rocks and the nature of the lunar crust [R]. Houston: Proceedings of the 8th Lunar Science Conference, 1977: 2215-2235.