论文

多尺度分析在月球表面哥白尼纪构造形迹研究中的重要性

杨屿^{①②}, 肖智勇^{①②*}, 许晓明^①, 陈维^①, 曾佐勋^{①②}^① 中国地质大学(武汉)行星科学研究所, 武汉 430074;^② 华中构造力学研究中心, 武汉 430074

*联系人, E-mail: zyxiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2014-07-17; 接受日期: 2014-11-03; 网络出版日期: 2015-01-20

中国地质大学(武汉)本科生科研能力提高项目(编号: NSFC J1210043)、中国科学院重点研究项目(编号: KGZD-EW-603)和国家自然科学基金(批准号: 41403053, 41402173)资助项目

摘要 近年来获取的月球高分辨率影像数据使月面哥白尼纪的线性构造形迹(如属于挤压构造的叶片状悬崖和属于伸展构造的地堑)成为行星地质学界的研究热点. 这些构造单元是指示月球地质演化史和热演化史的重要窗口. 本课题组尝试根据月表哥白尼纪线性构造单元的全球分布, 全面分析其可能的成因模式, 验证其应力来源是否只可能是月球晚期的全球收缩, 研究月面区域地质背景对其形成过程的影响. 在整理原始数据的过程中, 作者注意到月球表面很多非构造成因的线性形迹极易与哥白尼纪的小型伸展和挤压构造相混, 造成错误的解译. 藉此, 本文系统地比较了月球表面哥白尼纪构造形迹与月壤台阶、撞击熔融流、二次撞击坑链和月溪等线状形迹之间的相似性及其区别特征, 并提出多尺度分析在研究月球表面哥白尼纪构造形迹中的重要性.

关键词 月球, 哥白尼纪构造形迹, 多尺度分析, LROC

PACS: 96.20.-n, 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka

doi: 10.1360/SSPMA2014-00267

1 前言

月球表面的构造形迹可分为挤压型和伸展型两类. 典型的月表挤压型构造包括叶片状悬崖(Lobate Scarps)和皱脊(Wrinkle Ridges; High-Relief Ridges)^[1], 叶片状悬崖与地球上的逆冲推覆构造的剖面形态相似, 在地形上呈不对称的隆起; 皱脊是由逆冲断层及其反冲断层共同作用形成的, 其剖面结构类似于地

球上的冲起构造^[2]. 典型的月表伸展型构造是地堑(Graben)^[3], 其与地球和火星上的地堑系统相似, 由两个相邻的倾向相反的正断层组成. 以往对月球地质演化史的研究认为月球自哥白尼纪(约 1 Ga^[4])以来缺少内生型的地质活动, 如岩浆活动与构造活动^[5]. 然而, 早在 20 世纪 70 年代的阿波罗计划时期, 国外学者利用较高分辨率的月球轨道器(Lunar Orbiter)影像数据在月球表面发现了年轻的构造形迹, 并提出

引用格式: 杨屿, 肖智勇, 许晓明, 等. 多尺度分析在月球表面哥白尼纪构造形迹研究中的重要性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 039601
Yang Y, Xiao Z Y, Xu X M, et al. The significance of multiscale analysis in the study of Copernican-aged tectonic features on the Moon (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 039601, doi: 10.1360/SSPMA2014-00267

当前的月球依然处于微弱的地质活动期^[6,7]. 该发现与一直以来学界对月球构造演化史的认识相悖, 因而对了解月球更精细的热演化史和当今月球表面的应力场具有重要的指示意义^[6-8]. 但是, 由于阿波罗计划获取的高分辨率影像数据的质量和覆盖率较低, 这些线性构造单元的存在一直未受到足够关注.

自 2009 年来, 美国的月球勘测轨道飞行器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 上搭载的窄角相机 (Narrow-Angle Camera, NAC) 获取了分辨率高达 0.5 m/pixel 的月面影像数据^[9]. 目前 LRO NAC 高分辨率影像数据已覆盖了月球表面超过 ~40% 的区域. 借助这些数据, Watters 课题组^[10-12]在月球表面发现了大量的小型挤压构造叶片状悬崖和伸展构造地堑. 通过分析这些构造形迹与周围地质单元的切割关系及保存状态, Watters 等人认为这些构造单元形成于哥白尼纪, 是月球晚期的内生型构造活动在月球表面的表现形式. 这些发现验证了 Binder^[6]的观点、证明月球在哥白尼纪依然存在着构造活动. 通过估算形成这些构造形迹所需的应力大小, Banks 等人^[12]提出月球内部熔融层持续的冷凝收缩是形成这些哥白尼纪小型叶片状悬崖的原因. 另外, Watters 等人^[8]和 Williams 等人^[13]在月球表面发现了一些小型的伸展构造地堑. 其长度一般小于 10 km, 宽度小于 500 m. 其中一些地堑切割直径小于 8 m 的撞击坑, 且地堑的深度小于 2 m. 根据月球表面的侵蚀速率以及月面撞击坑的保存年龄, Watters 等人^[8]认为这些地堑属于哥白尼纪的伸展构造, 有些地堑的年龄可能小于 ~50 Ma. 由于大多数小型地堑的周围均发育保存状况相似的挤压构造(一般为小型叶片状悬崖), 且这些地堑均位于小型叶片状悬崖的运动方向之后, 在走向上垂直或平行于周围的小型叶片状悬崖. 因而, 这些小型哥白尼纪地堑的成因最可能是在其周围的叶片状悬崖在形成过程中, 在逆冲断层上盘背离运动的方向上形成的拉张应力^[2,8]. 所以, 月球晚期的持续冷凝收缩作用既可以解释哥白尼纪小型挤压构造的成因, 又可以解释哥白尼纪的小型伸展构造的成因.

然而, 月球晚期的全球收缩是否是形成此类哥白尼纪线性构造单元的唯一原因? 该问题的结论依然是不得而知的. 虽然月球表面缺少板块构造运动及大气或水循环、月表地质活动比地球上简单的多, 但是由于月球表面的区域地质背景不尽相同, 不同地点可能受到不同的区域应力的影响, 进而形成各

式各样的地貌单元. 例如, 月表斜坡上由重力驱动发生坡面块体运动而产生应力卸载^[14], 外来天体的撞击作用在月球浅表层形成断裂^[15], 岩浆侵蚀作用改变月表区域的应力状态^[8]等. 从比较行星学的角度而言, 仅考虑月球晚期的全球收缩, 而不考虑区域地质作用的影响, 不足以完整地认识哥白尼纪的构造形迹的成因机制.

本课题组试图结合月球上每条哥白尼纪的构造形迹的地质背景, 分析其可能的成因机制, 重点解析区域应力对其形成过程的影响, 论证月球晚期的全球收缩形成的挤压应力是否是造成所有哥白尼纪的伸展和挤压构造的唯一应力来源. 在原始资料收集与整理的过程中, 笔者注意到在识别月面哥白尼纪线性构造单元以及解译其应力来源时, 除形态分析外, 还需综合考虑其区域地质背景, 注重多尺度分析手段的运用. 多尺度分析, 即利用不同比例尺的影像和高程数据分析某一地貌的整体形态、细节特征与区域背景, 从而探究其本质及可能的成因机制. 例如, Watters 等人^[8]使用 LRO 宽角相机 (Wide-Angle Camera, WAC) 数据发现了几处地堑系统, 其中两处 WAC 数据中并未发现与之伴生的挤压构造, 故他们认为哥白尼纪的浅层岩浆侵入作用是形成该地堑系统的原因. 然而, 利用日本的月亮女神号 (Kaguya/SELENE) 搭载的地形相机 (Terrain Camera, TC)^[16]数据, 肖智勇等人^[17]发现这两处地堑实际上均位于临近的挤压构造的主动盘的运动后方, 更可能是在月球晚期全球收缩的作用下形成的局部伸展构造. 另外, 本课题组发现月球表面具有多种与哥白尼纪小型伸展和挤压构造形态极其相似的线性形迹, 若仅根据其部分的形态与尺度信息, 很容易将其认定为构造成因的地貌单元, 进而造成不恰当的成因解析.

随着我国嫦娥计划的启动, 国内已展开诸多对月球表面构造单元的研究工作^[18,19], 其中对这些小型构造形迹的成因机制分析是热点问题之一. 基于本课题组积累的资料, 本文认为有必要例证多尺度分析在月球表面哥白尼纪构造形迹研究中的重要性, 藉此抛砖引玉, 引起国内同行重视.

2 数据来源

本文主要使用美国宇航局 (National Aeronautics

and Space Administration, NASA)发射的月球勘测轨道飞行器(LRO)和日本宇航局发射的月亮女神号获取的影像数据及 LRO 上搭载的月球轨道飞行器激光测高仪(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)获取的激光高度计数据^[20]研究月球表面的哥白尼纪构造形迹. LRO 上搭载的月球勘测轨道飞行器相机(Lunar Reconnaissance Orbiter Camera, LROC)由宽角相机(WAC)和窄角相机(NAC)组成. 其中 WAC 750 nm 波段的影像数据覆盖了月球全球, 平均分辨率为 100 m/pixel. NAC 数据的分辨率可达 0.5 m/pixel. 月亮女神号上搭载的地形相机(TC)获取了月球全球分辨率约为 10 m/pixel 的影像数据. LOLA 在月球表面每隔 ~57 m 进行一次测量, 每次测量返回 5 个测量点的高程信息. 相邻测量点的间距约为 25 m, 每个测量点的结果代表了直径 20 m 范围内的平均高程信息. 借助这些数据, 可以从不同的尺度去分析月球表面哥白尼纪构造形迹的特征.

JMARS(Java Mission-planning and Analysis for Remote Sensing; <http://jmars.asu.edu/>)是美国亚利桑那州立大学(Arizona State University, ASU)设计开发的一个基于 Java 平台的用于处理行星遥感图像的数据分析工具. ISIS(Integrated System for Imagers and Spectrometers; <http://isis.astrogeology.usgs.gov/>)是美国地质勘探局开发的一个大型行星遥感数据处理软件, 用于处理各种航天器所获得的数据. 本文的原始数据均来源于 NASA 行星数据节点(Planetary Data System, PDS), 利用 ISIS 对原始数据进行相机与航天器轨道姿态校正、光度校正、坐标信息校正和投影变换等标准步骤处理后, 使用 JMARS, ImageJ(<http://rsbweb.nih.gov/ij/>)等软件分析这些数据.

3 月球表面哥白尼纪的构造形迹及与其相似的地貌单元

利用 LROC WAC 和 NAC 数据, 本课题组已在月面发现多处小型哥白尼纪构造形迹, 包括地堑、皱脊、叶片状悬崖. 同时, 在月表还发现多处与哥白尼纪构造形迹极为相似的其他类型的地貌单元. 结合这些地貌单元的形态学特征及成因, 将其划分成如下 4 类: 月壤台阶(Regolith Ripples)、撞击熔融流(Impact Melt Flows)、二次撞击坑链(Secondary Crater Chains)和月溪(Lunar Rilles).

3.1 哥白尼纪的构造形迹

识别月球表面哥白尼纪的伸展与挤压构造形迹的特征标志是有无被该形迹切割改造的地质单元, 如撞击坑. 图 1(b)所示的叶片状悬崖位于 Rhaeticus 撞击坑(4.9°E, 0.0°N; 直径 45 km; 图 1(a))的南东侧. Rhaeticus 撞击坑是一个古老的撞击坑, 其坑缘几乎已经被后期地质作用完全改造(图 1(a)). 该叶片状悬崖具有明显的线状形迹且形态清晰, 说明其受后期侵蚀的程度较低. 其长度约为 1.56 km, 崖面在水平方向的投影距离最宽约为 16 m. 悬崖周围可见数十个小型撞击坑, 直径在 20–80 m 之间, 这些撞击坑大多呈碗形且形态非常清晰. 根据月面平均侵蚀速率, 前人估算出月表直径小于 100 m、形态可辨识的撞击坑大多形成于哥白尼纪, 也即年龄小于 ~1 Ga^[5]. 沿着该叶片状悬崖的走向(140°), 可见一些小型撞击坑被其切割, 如图 1(b)中的白色箭头所示. 这些撞击坑直径小于 100 m, 在 NE-SW 方向上径向缩短, 表明该叶片状悬崖的运动方向为南西至北东, 其形成过程中所受主压应力方向为北东-南西向. 该叶片状悬崖的形成时间要晚于被切割的撞击坑的形成时间, 即其年龄小于 1 Ga.

月球表面的哥白尼纪地堑的规模与哥白尼纪的叶片状悬崖相当. 前人的研究发现, 大部分哥白尼纪地堑的周围存在与之保存状态相当的挤压构造, 且这两组构造单元在走向上相互平行或垂直. 表明地堑形成的张应力主要是附近的挤压构造形成时产生的应力卸载造成的^[8]. 例如, 图 1(d)中所示的地堑系统由多条近平行的地堑组成, 单条地堑的长度在 0.9–1.3 km 之间, 宽度在 20–40 m 之间. 这些地堑保存完好、形态清晰, 且走向基本平行(~67°), 沿走向可以见到一些直径小于 50 m 的小撞击坑被其切割, 说明这套地堑系统的形成时代应为哥白尼纪.

3.2 月壤台阶

在不同尺度上, 月球表面均存在着高度差异. 在重力作用下, 月球表面的物质可能会从高地势向低地势地方迁移. 月壤是月球表面未固结的、细粒、松散的颗粒物质^[21], 较易发生迁移. 其迁移速度非常缓慢、一般是非肉眼可察觉的, 故称月壤蠕移(Regolith Creeping)^[22]. 月壤蠕移中的颗粒之间的剪切力足以产生永久变形, 但不足以产生剪切破裂造成垮塌^[23]. 类似于地球上上坡方向的土壤持续向下缓慢移动形

图 1 典型的月面哥白尼纪挤压型和伸展型构造

(a) 哥白尼纪叶片状悬崖的区域背景图, 图中的撞击坑为 Rhaeticus 撞击坑, 底图: LROC WAC E300S0450, 分辨率: 100 m/pixel; (b) 哥白尼纪叶片状悬崖, 箭头所指为被交切的小撞击坑, 底图: LROC NAC M162270057L, 中心坐标: 5.8°E, -0.4°N, 分辨率: 0.58 m/pixel; (c) 哥白尼纪地堑的区域背景图, 地堑发育在一条皱脊的北西侧, 箭头指示皱脊的位置, 底图: TCO MAPe04 S33E321S36E324SC, 分辨率: 8 m/pixel; (d) 哥白尼纪地堑, 地堑成群分布且走向基本平行, 箭头所指为被交切的小撞击坑, 底图: LROC NAC M104756463R, 中心坐标: 323.9°E, -33.1°N, 分辨率 0.65 m/pixel

Figure 1 Typical Copernican-aged compressional and extensional tectonic features on the Moon. (a) The regional background of a Copernican-aged lobate scarp. The crater in the figure is Crater Rhaeticus. Base map: LROC WAC E300S0450. Resolution: 100 m/pixel. (b) A Copernican-aged lobate scarp. The crosscut crater is pointed by an arrow. Base map: LROC NAC M162270057L. Central coordinate: 5.8°E, -0.4°N. Resolution: 0.58 m/pixel. (c) The regional background of Copernican-aged garben. The garben occurs to N-W of a wrinkle ridge (arrows). Base map: TCO MAPe04 S33E321S36E324SC. Resolution: 8 m/pixel. (d) Copernican-aged garben distributes in groups and their orientation are subparallel. The crosscut crater are pointed by arrows. Base map: LROC NAC M104756463R. Central coordinate: 323.9°E, -33.1°N. Resolution: 0.65 m/pixel.

成土壤台阶(Soil Ripples), 由月壤蠕移形成的地貌称为月壤台阶^[24]. 月壤台阶一般垂直于斜坡倾向呈近平行分布, 且凸向下坡方向. 月壤台阶的形态一般不是直线而是略有弯曲, 有些近似于正弦波形. 本文发现, 按台阶的平均波长与波幅之比以及台阶在走向上的连续性可将月壤台阶分为 3 种类型.

第 1 种类型(I 型)的月壤台阶的波长(~80–100 m)及波幅(~25–35 m)通常较短, 变化范围不大, 波长与波幅之比小于 5:1, 台阶在走向上的连续性一般. 如图 2(b)所示. 当斜坡存在时, 月壤向下蠕移, 最终形成这种“象皮花纹(Elephant Hide)”^[25]状的月壤台阶. 经观察发现, 此种地貌在月球表面分布广泛. 在 I 型

月壤台阶发育的区域, 坡脚处常常可见一些直径小于 100 m 的小撞击坑被月壤向下蠕移的沉积物改造, 造成在平行于下坡方向上的直径减小(图 2(b)). 这种由于月壤蠕移改造的撞击坑形态和被皱脊交切的撞击坑的形态相似. 因此, 在观察到这种地貌时, 可能会误判为此类地貌为年轻的哥白尼纪的构造形迹. 第 2 种类型(II 型)的月壤台阶如图 2(d)所示, 这种月壤台阶的波长(~200 m)与波幅(~25–35 m)之比较大(>8:1). 与 I 型月壤台阶不同, II 型月壤台阶形迹连续, 延伸长度有时可达 1000 m. 因而, 其构成的线状形迹的长宽比可能大于 20:1, 类似于哥白尼纪的挤压构造形迹的规模. 沿其走向偶尔可见被改造的撞

图 2 典型的月壤台阶

(a) I 型月壤台阶区域图, 底图: LRO WAC E300S3150, 分辨率: 100 m/pixel; (b) I 型月壤台阶, 图中箭头所指为被改造的撞击坑, 底图: LROC NAC M1096672886L, 中心坐标: 332.8°E, -8.1°N, 分辨率: 0.92 m/pixel; (c) II 型月壤台阶区域图, 底图: LRO WAC E300N0450, 分辨率: 100 m/pixel; (d) II 型月壤台阶, 图中 4 个白色箭头所指为一条形迹连续的月壤台阶, 底图: LROC NAC M1096158260L, 中心坐标: 51.4°E, 0.2°N, 分辨率: 1.14 m/pixel; (e) III 型月壤台阶背景图, 底图: LROC NAC M173490331R, 分辨率: 0.54 m/pixel; (f) III 型月壤台阶, 底图: LROC NAC M173490331R, 中心坐标: 270.6°E, 55.6°N; (g), (h)和(i)分别为(b), (d)和(e)中虚线的 LOLA 高程剖面

Figure 2 Typical regolith ripples. (a) The regional background of type I regolith ripples. Base map: LRO WAC E300S3150. Resolution: 100 m/pixel. (b) type I regolith ripples. The transformed crater is pointed by an arrow. Base map: LROC NAC M1096672886L. Central coordinate: 332.8°E, -8.1°N. Resolution: 0.92 m/pixel. (c) The regional background of type II regolith ripples. Base map: LRO WAC E300N0450. Resolution: 100 m/pixel. (d) type II regolith ripples. A single unbroken regolith ripple is pointed by four arrows. Base map: LROC NAC M1096158260L. Central coordinate: 51.4°E, 0.2°N. Resolution: 1.14 m/pixel. (e) The regional background of type III regolith ripples. Base map: LROC NAC M173490331R. Resolution: 0.54 m/pixel. (f) type III regolith ripples. Base map: LROC NAC M173490331R. Central coordinate: 270.6°E, 55.6°N. (g), (h) and (i) show LOLA elevation profiles as indicated by dashed lines in (b), (d) and (h), respectively.

击坑, 若仅依据此形态特征和交切关系, 极易将其纳入构造成因的线性形迹的范畴。第 3 种类型(III 型)的月壤台阶的规模较 I 型和 II 型都要大(波长>300 m, 波幅>50 m), 且其分布不似前两者呈紧密排列, 其波

长与波幅之比介于 I 型和 II 型之间, 其台阶形迹连续性较差。如图 2(f)所示。III 型月壤台阶与哥白尼纪构造形迹不仅在形态上具可比性, 在规模尺度上也具有可比性。

上述 3 种类型的月壤台阶和哥白尼纪的构造形迹具有相似的形态特征和撞击坑交切关系. 然而, 从更大尺度上(图 2(a), (c)和(e))观察可发现月壤台阶仅发育在坡面上(图 2(g), (h)和(i))而从不延伸至坡底的平坦区域, 哥白尼纪的构造形迹的分布则不受地形坡度的限制.

3.3 撞击熔融流

陨石撞击作用形成的高温可使撞击体和部分靶体物质气化、熔融, 熔融物在置位过程中流动并形成撞击熔融流地貌. 撞击熔融流与撞击坑的形成关系密切, 因此其分布与撞击坑有一定的空间关系. 大型

撞击坑的坑壁或坑底都可能存在撞击熔融流^[26](图 3).

图 3(a)和(b)显示了发育在 Schorr 撞击坑(89.7°E, -19.5°N; 直径 53 km)坑缘的撞击熔融流, 其中图 3(a)为其区域背景图. 该地貌发育在 Schorr 撞击坑的北东东缘. 在图 3(b)中, 可见到多条线状形迹近平行分布, 长度约 600–800 m, 宽度约 20–30 m. 这些线状形迹形态清晰且与哥白尼纪的小型叶片状悬崖相似, 走向与 Schorr 撞击坑坑缘平行. 图 3(c)和(d)显示了发育在 Li Po 撞击坑(90.6°E, -3.5°N; 直径 15 km)坑底的撞击熔融流, 其中图 3(c)为其区域背景图. 该地貌发育在 Li Po 撞击坑坑底的北东角, 可能是熔融流沿

图 3 月球上典型的撞击熔融流

(a) Schorr 撞击坑, 其北东东缘发育撞击熔融流, 底图: LROC WAC E300S1350, 分辨率: 100 m/pixel; (b) 发育在 Schorr 撞击坑坑壁外缘的撞击熔融流, 底图: LROC NAC M119258450L, 中心坐标: 90.7°E, -19.3°N, 分辨率: 0.72 m/pixel; (c) Li Po 撞击坑, 其坑底北东角发育撞击熔融流, 底图: LROC WAC E300S1350, 分辨率: 100 m/pixel; (d) 发育在 Li Po 撞击坑坑底的撞击熔融流, 3 个箭头所指为一条连续的由撞击熔融流形成的线状形迹, 底图: LROC NAC M128698887L, 中心坐标: 90.5°E, -3.6°N, 分辨率: 0.54 m/pixel

Figure 3 Typical impact melt flows on the Moon. (a) Crater Schorr. The NEE margin of it developed impact melt flows. Base map: LROC WAC E300S1350. Resolution: 100 m/pixel. (b) The impact melt flows were developed in the NEE margin of Crater Schorr. Base map: LROC NAC M119258450L. Central coordinate: 90.7°E, -19.3°N. Resolution: 0.72 m/pixel. (c) Crater Li Po. The N-E of it developed impact melt flows. Base map: LROC WAC E300S1350. Resolution: 100 m/pixel. (d) The impact melt flows were developed in the N-E of Crater Li Po. A single unbroken linear impact melt flow is pointed by three arrows. Base map: LROC NAC M128698887L. Central coordinate: 90.5°E, -3.6°N. Resolution: 0.54 m/pixel.

斜坡流动至坑底后冷凝形成. 这些线状形迹形态清晰, 彼此间大致平行, 且皆凸向撞击坑中心. 其长度在 1.8–2.4 km 之间, 宽度在 30–60 m 之间, 形态及尺度与哥白尼纪小型皱脊相当.

这些撞击熔融流地貌与哥白尼纪小型叶片状悬崖形态相似, 仅在 NAC 图像中易将其误判为挤压构造成因的线性单元. 然而, 此类撞击熔融流一般位于较年轻的撞击坑内和周围, 而典型的哥白尼挤压构造形迹与撞击坑不存在此类空间关系. 因此, 借助此类构造形迹与撞击坑的空间分布关系可判断其成因机制.

3.4 二次撞击坑链

撞击坑形成时向外溅射出大量物质, 高速的溅射物在回落至靶体表面时会进行二次撞击, 形成二次撞击坑. 二次撞击坑一般具有不规则的形态和隆起的边缘. 在月球上, 典型的二次撞击坑呈串或成链分布, 称为二次撞击坑链^[27]. 有些较老的月球撞击坑形成的二次撞击坑链保存状态较差, 其隆起的边缘受后期侵蚀而变得不明显, 因此在形态上与构造成因的地堑(尤其是那些保存状态较差的地堑)极其相似. 图 4 为东海盆地周围的二次撞击坑链, 其边缘清晰、走向基本平行($\sim 62^\circ$)并指向东海盆地中心, 长度在 3.4–4.3 km 之间, 宽度在 160–380 m 之间. 尽管二次撞击坑链的形态与地堑相似, 但在小尺度上, 二次撞击坑链存在隆起的边缘^[28], 显示其撞击成因, 地堑则没有隆起的边缘. 另外, 在区域背景上, 二次撞击

坑链通常围绕某一大型撞击坑呈放射状分布^[29](如图 4(a)所示东海盆地的二次撞击坑链均指向盆地中心), 而地堑在月表的分布则没有这种规律.

3.5 月溪

月溪是月球表面较细长的负地貌, 底部平坦而两侧较陡. 月溪是熔岩流对月表的热侵蚀和机械侵蚀作用留下的痕迹^[30,31]. 如图 5 中的月溪长达数十千米, 宽度约 500 m 且基本保持不变, 长宽比远大于 20:1, 边缘形态清晰. 类似于哥白尼纪的地堑, 沿其走向可见被改造的小撞击坑. 且月溪地貌同哥白尼纪的伸展构造(地堑)一样为负地貌.

月溪具有与地堑相似的负地貌, 若仅在高分辨率影像数据中发现类似的平直的地貌单元, 则难以区分两者. 但在区域尺度上, 月溪的延伸长度往往达数十千米, 而哥白尼纪地堑的延伸长度通常只有几千米, 两者的规模可相差一个数量级. 更重要的是, 月溪往往蜿蜒崎岖, 而构造成因的地堑在走向上相对平直. 因此, 利用分辨率较低的影像数据分析其大尺度上的形态特征, 可区分月溪与哥白尼纪的地堑.

4 多尺度分析在哥白尼纪构造形迹的成因机制研究中的应用

多尺度分析在判断月表的线性形迹是否属于哥白尼纪构造形迹时具有重要作用. 除此之外, 多尺度分析在判定单条构造形迹的应力来源时 also 具有重要作用.

图 4 月球上典型的二次撞击坑链

(a) 具有放射状二次撞击坑链的东海盆地, 底图: LROC WAC, 分辨率: 100 m/pixel; (b) 箭头标示出了两条二次撞击坑链, 底图: LROC NAC M158245851R, 中心坐标: 260.2°E, 2.3°N, 分辨率: 0.57 m/pixel

Figure 4 Typical secondary crater chains on the Moon. (a) Mare Orientale with radial secondary crater chains. Base map: LROC WAC. Resolution: 100 m/pixel. (b) Secondary crater chains (pointed by arrows). Base map: LROC NAC M158245851R. Central coordinate: 260.2°E, 2.3°N. Resolution: 0.57 m/pixel.

例如, 对于图 1(d)中的地堑, Watters 等人^[8]提出这组地堑并没有与之伴生的挤压构造, 因而哥白尼纪晚期的岩浆底辟作用形成的张应力可能是该组地堑的应力来源. 而肖智勇等人^[17]利用 Kaguya TC 数据发现在该组地堑的南侧存在与之保存状态相当的一组皱脊(图 1(c)中白色箭头所示), 表明二者可能具有成因的关联性, 其成因符合月球晚期全球收缩的假说. 因此, 在更大尺度上利用较低分辨率的数据研

究该地堑系统的区域地质背景有助于正确识别其应力来源.

LROC NAC 数据显示在嫦娥三号着陆点附近存在多条不同规模的皱脊^[32]. 图 6 中五角星表示着陆点. 位于着陆点南侧~15 km 的皱脊长~60 km, 宽~4 km; 其规模与位于着陆点北侧~8 km 的皱脊相当. 这些皱脊位于雨海盆地内, 环绕该盆地发育. 区域地质演化研究表明这些皱脊是雨海盆地内的月海玄武岩重力

图 5 典型的月堑

(a) 图中可见延伸范围长达几十公里的月堑, 底图: LRO WAC E300N3150, 分辨率: 100 m/pixel; (b) 月堑的一部分, 箭头所指为被改造的撞击坑, 底图: LROC NAC M1139222021L, 中心坐标: 311.8°E, 16.7°N, 分辨率: 4 m/pixel

Figure 5 A typical lunar rille. (a) The lunar rille of dozens of kilometers. Base map: LRO WAC E300N3150. Resolution: 100 m/pixel. (b) Part of the lunar rille. The transformed craters are pointed by arrows. Base map: LROC NAC M1139222021L. Central coordinate: 311.8°E, 16.7°N. Resolution: 4 m/pixel.

图 6 嫦娥三号着陆点附近的皱脊

(a) 嫦娥三号着陆点及区域地貌, 底图: LRO WAC E300N3150, 分辨率: 100 m/pixel; (b) 着陆点北北西约 8.5 km 处的皱脊, 箭头所指为被交切的撞击坑, 底图: LROC NAC M181302794L, 中心坐标: 340.4°E, 44.4°N, 分辨率: 1.61 m/pixel; (c) 着陆点北北西约 400 m 处的皱脊, 底图: LROC NAC M181302794L, 中心坐标: 340.5°E, 44.1°N; (d) 箭头指示皱脊的位置

Figure 6 Wrinkle ridges near the landing site of Chang'E-3. (a) The regional background of the landing site of Chang'E-3. Base map: LRO WAC E300N3150. Resolution: 100 m/pixel. (b) Wrinkle ridges located about 8.5 km to the NNW of the landing site. The crosscut craters are pointed by arrows. Base map: LROC NAC M181302794L. Central coordinate: 340.4°E, 44.4°N. Resolution: 1.61 m/pixel. (c) A wrinkle ridge located about 400 m to the NNW of the landing site. Base map: LROC NAC M181302794L. Central coordinate: 340.5°E, 44.1°N. (d) The wrinkle ridge is pointed by arrows.

沉降作用形成的. 根据雨海内的玄武岩流与该组皱脊的交切关系可推断此皱脊形成于 3.2–2.0 Ga 之间^[32]. 在距离着陆点北北西方向约 8.5 km 处发育两条小皱脊(图 6(b)), 这两条小皱脊形态清晰, 长度约 2 km, 宽度小于 400 m. 其保存良好且具有清晰的形态, 可见直径小于 300 m 的撞击坑被这些皱脊切割, 如图 6(b)中的箭头所示. 在着陆点北北西方向约 500 m 处发育一更小的皱脊(图 6(c)和(d)), 该皱脊切过直径小于 100 m 的撞击坑. 由皱脊和撞击坑的交切关系可知这些皱脊非常年轻, 形成于哥白尼纪. 根据撞击坑的保存状态估算其绝对模式年龄大约为 5 Ma^[33]. 由图 6(a)可知, 这些皱脊都处在撞击坑密度相对较低的月海区域, 在其周围并没有大型的撞击坑与之伴生, 因而撞击作用产生的区域应力不可能是其应力来源, 月球晚期的全球收缩是其最可能的应力来源.

5 结论

在收集月球表面哥白尼纪的构造形迹的全球分

布数据过程中, 本文发现一些月面线性形迹与哥白尼纪的构造单元形貌特征极其相似, 易于混淆. 多尺度分析可结合局部区域的地质背景识别其可能的本质. 例如, 月壤台阶主要分布在斜坡上; 撞击熔融流与大型撞击坑存在一定的空间关系; 二次撞击坑链在区域尺度上沿大型撞击坑放射状分布; 月溪走向不一, 规模比典型的哥白尼纪地堑至少大一个数量级. 以上 4 种地貌虽然从小尺度上与哥白尼纪构造形迹有一定的相似之处, 但它们所处的区域地质背景具有不同的特点. 这些差别在多尺度研究中易于被发现, 若仅仅是基于高分辨率数据根据其形态及与撞击坑的交切关系, 不足以判别其本质. 除此之外, 多尺度分析在判定单条构造形迹的应力来源时也具有重要作用, 可初步判定全球收缩和区域地质应力在其成因过程中的重要性. 因而, 结合不同尺度的影像数据、利用多尺度分析手段是解译月球表面哥白尼纪线性单元的本质及哥白尼纪构造形迹成因机制的必要步骤.

参考文献

- 1 Strom R G, Trask N J, Guest J E. Tectonism and volcanism on Mercury. *J Geophys Res*, 1975, 80: 2478–2507
- 2 Plescia J B, Golombek M P. Origin of planetary wrinkle ridges based on the study of terrestrial analogs. *Geol Soc Am Bull*, 1986, 97: 1289–1299
- 3 Lucchitta B K, Watkins J A. Age of graben systems on the moon. In: *Lunar and Planetary Science Conference*, 9th. New York: Pergamon Press, 1978. 3459–3472
- 4 Stöffler D, Ryder G. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system. *Space Sci Rev*, 2001, 96: 9–54
- 5 Jaumann R, Hiesinger H, Anand M, et al. Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding. *Planet Space Sci*, 2012, 74: 15–41
- 6 Binder A B. Post-Imbrian global lunar tectonism: Evidence for an initially totally molten Moon. *Earth Moon Planets*, 1982, 26: 117–133
- 7 Binder A B, Gunga H C. Young thrust-fault scarps in the highlands: Evidence for an initially totally molten Moon. *ICARUS*, 1985, 63: 421–441
- 8 Watters T R, Robinson M S, Banks M E, et al. Recent extensional tectonics on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. *Nat Geosci*, 2012, 5: 181–185
- 9 Robinson M S, Brylow S M, Tschimmel M, et al. Lunar reconnaissance orbiter camera instrument overview. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 81–124
- 10 Watters T R, Robinson M S, Beyer R A, et al. Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. *Science*, 2010, 329: 936–940
- 11 Banks M E, Watters T R, Robinson M S, et al. The search for lunar lobate scarps using images from the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. In: *Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2011
- 12 Banks M E, Watters T R, Robinson M S, et al. Morphometric analysis of small-scale lobate scarps on the Moon using data from the Lunar Reconnaissance Orbiter. *J Geophys Res*, 2012, 117: E00H11

- 13 Williams N R, Bell III J F, Watters T R, et al. Small Graben and Recent Tectonic Deformation in Mare Frigoris. In: Lunar and Planetary Science Conference, 44th. New York: Pergamon Press, 2013
- 14 Xiao Z, Zeng Z, Ding N, et al. Mass wasting on the Moon: How active is the lunar surface? *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 376: 1–11
- 15 Melosh H J. *Impact Cratering: A Geological Process*. Oxford: Oxford University Press, 1989
- 16 Kato M, Sasaki S, Tanaka K, et al. The Japanese lunar mission SELENE: Science goals and present status. *Adv Space Res*, 2008, 42: 294–300
- 17 肖智勇, 曾佐勋, Robert G S. 月球表面哥白尼纪与水星表面柯伊伯纪的地质活动对比研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014. 79
- 18 OuYang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. Primary scientific results of Chang'E-1 lunar mission. *Sci China Earth Sci*, 2010, 53: 1561–1581 [欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果. *中国科学: 地球科学*, 2010, 03: 261–280]
- 19 Wang J, Zeng Z X, Yue Z Y. Research of lunar tectonic features: primary results from Chang'E-1 lunar CCD image. *J Space Sci*, 2011, 31: 482–491 [王杰, 曾佐勋, 岳宗玉, 等. 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*, 2011, 4: 482–491]
- 20 Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L18204
- 21 McKay D S, Morris R V, Jurewicz A J. Experimental reduction of simulated lunar glass by carbon and hydrogen and implications for lunar baseoxygen production. In: Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 1991, 22: 49–52
- 22 Highland LM, Bobrowsky P. *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*. Virginia: Geological Survey Circular 1325, 2008. 3–25
- 23 Melosh H J. *Planetary Surface Processes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- 24 Anderson R S, Anderson S P. *Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscapes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 304–347
- 25 Pike R J. Some preliminary interpretations of lunar mass-wasting process from Apollo 10 photography. In: *Analysis of Apollo 10 Photography and Visual Observations*. Washington: NASA Special Publication, 1971. 14–20
- 26 Osinski G R, Tornabene L L, Grieve R A F. Impact ejecta emplacement on terrestrial planets. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 310: 167–181
- 27 Schultz P H, Singer J. A comparison of secondary craters on the Moon, Mercury and Mars. In: Lunar and Planetary Science Conference, 11th, New York: Pergamon Press, 1980. 2243–2259
- 28 Oberbeck V R, Morrison R A. The lunar herringbone pattern. In *Apollo 17: Preliminary Science Report*, 1973, 330: 15–32
- 29 Hawke B R, Blewett D T, Lucey P G, et al. The origin of lunar crater rays. *ICARUS*, 2004, 170: 1–16
- 30 Hurwitz D M, Head J W, Wilson L, et al. Origin of lunar sinuous rilles: Modeling effects of gravity, surface slope, and lava composition on erosion rates during the formation of Rima Prinz. *J Geophys Res*, 2012, 117: E00H14
- 31 Williams J G, Boggs D H, Yoder C F, et al. Lunar rotational dissipation in solid body and molten core. *J Geophys Res*, 2001, 106: 27933–27968
- 32 Xiao Z, Zeng Z, Fa W, et al. Wrinkle ridges at the landing site of Chang'E-3: Potential targets to reveal the nature of thrust faults on the Moon. In: Lunar and Planetary Science Conference Abstract. New York: Pergamon Press, 2014. 45: 1719
- 33 Xiao Z, Zeng Z, Xiao L. Tectonic evolution of the Chang'E-3 landing site. In: *The Proceedings of International Symposium on Lunar and Planetary Science*. Macao: Macau University of Science and Technology, 2014

The significance of multiscale analysis in the study of Copernican-aged tectonic features on the Moon

YANG Yu^{1,2}, XIAO ZhiYong^{1,2*}, XU XiaoMing¹, CHEN Wei¹ & ZENG ZuoXun^{1,2}

¹ Planetary Science Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

² Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, China

Copernican-aged linear tectonic features on the Moon (including lobate scarps formed in compressional stresses and graben formed in extensional environment) has become a hot topic in lunar geology since the availability of new high-resolution imagery data obtained by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. These tectonic features are important in revealing the geological and thermal evolutionary history of the Moon. Based on the global distribution of Copernican-aged linear tectonic features on the Moon, we try to analyze the possible forming models for each of the features, testifying whether or not late-stage global contraction was the only mechanism in their formation and studying the effect of regional geological background on their formation. When building the global inventory of such features, we notice that many other linear features with pristine morphology do not form by tectonism, but they could not be easily distinguished. Such features would cause misidentification and thus inappropriate interpretation. Here we discuss the similarities and differences between Copernican-aged tectonic features and regolith ripples, impact melt flows, secondary crater chains, and lunar rilles to emphasize the importance of multiscale analysis in the study of Copernican-aged linear tectonic features on the Moon.

Moon, Copernican-aged tectonic features, multiscale analysis, LROC

PACS: 96.20.-n, 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka

doi: 10.1360/SSPMA2014-00267