

基于全景相机数据的嫦娥四号着陆区次级坑统计分析

阳梅萍^{1,2}, 岳宗玉^{1,4*}, 邸凯昌^{1,4}, 万文辉¹, 刘建忠^{3,4}, 史珂^{1,2}

1. 中国科学院 空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 中国科学院 地球化学研究所 贵阳 550081; 4. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心 合肥 230026

摘要: 玉兔二号月球车在嫦娥四号着陆区发现了许多坑缘呈破碎石块状的小型撞击坑,其直径大多在亚米级,过去对于这种小尺度撞击坑的研究大多源于 Apollo、Surveyor、Ranger 系列任务,然而当时获取的影像质量较低,且并未覆盖月球背面。小尺度撞击坑在月球表面分布十分广泛,与月球最表层的演化密切相关,因此对其展开研究具有重要的意义。本文利用嫦娥四号任务获取的高分辨率全景影像,统计了 8、9、11~15 月昼影像中新鲜撞击坑的直径、频数、深度等信息,并根据这些撞击坑和周围石块的形态特征,推测这些坑应该形成于不同方向的二次撞击事件,这为揭示玉兔二号月球车行进途中观测物质的来源提供了重要信息。小型二次撞击坑从深径比中难以与一次撞击坑区分,且一般处于饱和状态,因此应避免使用小尺寸的撞击坑进行定年。

关键词: 嫦娥四号; 全景影像; 撞击坑统计

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2021)03-0720-10 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.026

Statistical Analysis of Secondary Craters in the Chang'E-4 Landing Area Based on Panoramic Camera Data

YANG Mei-ping^{1,2}, YUE Zong-yu^{1,4*}, DI Kai-chang^{1,4}, WAN Wen-hui¹, LIU Jian-zhong^{3,4}, SHI Ke^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences Guiyang 550081, China; 4. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology Hefei 230026, China

Abstract: Many fresh small sized (mostly in diameter of sub-meter) impact craters which have blocky-rim exposed in the regolith were encountered by the Yutu-2 rover in the Chang'E-4 landing area. Due to the limitation of low resolution of images, such kind of small sized impact craters were mostly found in images from the Ranger, Surveyor, Apollo missions in the past, nevertheless those images of low quality did not cover the area of lunar farside. Small sized impact craters are widely distributed in the lunar surface and they are closely related to the evolution of lunar regolith. Therefore, it is significant to study these craters in fine scales. In this paper, the very high resolution images acquired by the CE-4 Panoramic camera (Pancam) in 8th, 9th, 11th-15th lunar days are used to analyse information including the diameter, frequency, and depth of these fresh impact craters. Combining with the morphological characteristics of these impact craters and boulders, it is inferred that these craters could be mostly formed by secondary impact events in different directions. This provides important information for revealing the source of the material observed during the journey of the Yutu-2 rover. Small sized secondary impact craters are difficult to be distinguished from primary impact craters in the ratio of depth to diameter, and they are generally in a saturated state. Therefore, small sized craters should be avoided to be used for the size-frequency dating.

Key words: Chang'E-4; panoramic image; craters

收稿编号: 2020-189 2020-11-10 收到 2020-12-08 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41941003)

第一作者简介: 阳梅萍(1997-),女,硕士研究生,研究方向:行星遥感地质学. E-mail: yangmeiping18@mails.ucas.ac.cn.

* 通信作者简介: 岳宗玉(1980-),男,研究员,研究方向:行星遥感地质学. E-mail: yuezy@radi.ac.cn.

0 引言

撞击坑是月球表面最主要的地貌形态,它在月球科学研究中具有重要意义。例如,根据撞击坑的物质成分特征可以推测月球的内部结构信息(Pieters, 1982; Pinet et al., 1993; Yamamoto et al., 2010),依据撞击坑的大小-频率分布规律可以分析月表的地质年龄(Hartman et al., 1981; Neukum, 1983; Neukum et al., 2001)等。此外,许多研究认为小型撞击坑的大小-频率分布规律与大型撞击坑也有所不同,不能用于撞击坑统计定年(Hartmann, 1984; Xiao and Strom, 2012; Xiao and Werner, 2015)。深径比是描述撞击坑形态的一个重要参数,已经积累了大量的研究,典型的一次坑深径比约0.2,二次坑约0.1(Baldwin, 1963, 1965; Bouška, 1968; Pike, 1974; Chappelow, 2013; Daurbar et al., 2014)。小型撞击坑主要形成于月球浅表层,其溅射物是月壤的主要来源(Melosh, 1989),极大地影响了月壤的全球分布,因此小规模撞击坑的研究正受到越来越多的重视。

亚米级的撞击坑及其溅射物通常在轨道影像上难以识别,因此与其相关的研究主要来源于Ranger、Surveyor、Apollo等系列任务(Trask, 1966; Shoemaker et al., 1967; Aldrin et al., 1969; Shoemaker et al., 1969; Swann et al., 1971)。已有的研究表明,百米级以下的撞击坑累积频数-直径分布规律近似于 $N(D) \sim D^{-2}$ [其中 D 表示撞击坑直径, $N(D)$ 表示直径 $\geq D$ 的撞击坑累积个数],当直径超过数百米时,分布规律发生了变化,这两种分布曲线的交点 C_s 则代表了小型撞击坑稳定状态的直径上限。然而,这些任务获取的影像大多质量较低,且任务区域不覆盖月球背面,因此使用最新的高分辨率对月球背面的小型撞击坑进行统计具有重大意义。

2019年1月3日,嫦娥四号成功着陆月球南极艾特肯盆地(SPA)的冯·卡门撞击坑,实现了历史上首次月球背面软着陆。艾特肯盆地是月球上规模最大最古老的盆地,其直径约为2500 km,深约13 km(Shevchenko et al., 2007)。根据直径与最大挖掘深度的关系(Melosh, 1989),艾特肯盆地理论上已经穿透了上月壳,并且很有可能挖掘出了上月幔的物质(Melosh et al., 2017)。冯·卡门撞击坑直径约186 km,深约2.4 km(Huang et al., 2018),形成于古老的前酒海纪(约3.97 Ga),坑底被多期雨海纪玄武岩覆盖。在月海形成之后,坑底又被附近大

型撞击坑溅射物覆盖,玉兔二号探测器光谱数据显示,嫦娥四号着陆区的风化层主要来源于Finsen撞击坑溅射物(Gou et al., 2020a, 2020b)。整体来说,嫦娥四号着陆区十分平坦,很适合玉兔二号月球车行驶。然而,在探测器行进途中,发现了许多的高反射率的小型撞击坑,其直径在几厘米到几米不等,坑缘上堆积了许多石块,与周围暗色的风化层和高度退化的撞击坑形成了鲜明的对比,暗示这些石块是在近期的地质事件中形成的。由于月表持续外来侵蚀作用以及影像分辨率的限制,小型撞击坑及其厘米级溅射物很难被记录下来。因此这些被玉兔二号搭载的全景相机记录下来的撞击坑和石块,为小型撞击坑的研究提供了宝贵的契机,对于揭示嫦娥四号着陆区表面物质来源有着重要的意义。

为了减小阴影和其他遮挡物对撞击坑识别的影响,本文使用8、9、11~15月昼的高分辨率全景相机数据,圈定和识别了玉兔二号月球车路途中遇到的亚米级-米级撞击坑371个,统计和分析了它们的尺寸、空间分布特征,并根据这些撞击坑和周围石块的形态特征,推测这些坑应该形成于不同的二次撞击事件,同时还分析了可能的撞击方向,这为揭示玉兔二号月球车行进途中观测物质的来源提供了重要信息。根据本文的统计结果,小型二次撞击坑从深径比中难以与一次撞击坑区分,且一般处于饱和状态,因此应避免使用小尺寸的撞击坑进行定年。

1 数据和方法

1.1 数据

玉兔二号搭载的全景相机可在彩色成像和全色成像两种模式之间切换,彩色模式的影像分辨率是2352×1728像素,全色成像模式的影像分辨率是1176×864像素,相机视场角为19.6°×14.5°(贾瑛卓等, 2018)。全景相机安装在玉兔二号巡视器的桅杆上,依靠桅杆的上下左右转动,全景相机拍摄站点周围360°的图像,每转一圈可以拍下56幅影像(在两个高度角上不同方位的28对影像),从而实现着陆区和巡视区的地形地貌的三维立体成像(代树武等, 2014)。玉兔二号全景相机可实现从巡视器脚下到视野范围无穷远处清晰成像,在近距离观测的空间分辨率可以达到毫米量级。截止2020年9月24日,嫦娥四号已完成第22月昼工作,为了避免阴影面积过大而遮挡撞击坑,本文使用的数据为8、9、11~15月昼的全景影像。另外文中还使用

了空间分辨率为 0.9 m 的 LRO NAC 影像作为研究区域的底图(影像编号为 M1331814485LE)。

1.2 方法

本文的总体技术路线如图 1 所示。本文利用目视解译的方法识别全景影像中具有破碎石块状坑缘的新鲜撞击坑,由于不同月昼得到的全景影像存在重叠的区域,为了消除统计中重复的撞击坑,使用全景影像数据生成了研究区域数字正射影像图(DOM),将测得的所有撞击坑投影到 DOM 上,对重叠的撞击坑进行判别,删除重复识别的撞击坑,并贴合撞击坑的分布范围选取统计区域,面积为 0.004 km²。之后使用月球摄影测量制图软件(Di et al., 2016)对撞击坑进行测量,首先在左像对撞击坑左右两端坑缘上选取点,右像对会自动匹配出同名点,同时根据影像内外方位参数和计算出对应点的三维地面真实坐标,这两点的距离即为撞击坑直径 D (Barnouin et al., 2012)。最小石块的尺寸至少占三个像素,约 0.4 cm,而最小能被肉眼识别的撞击坑直径在 2 cm 左右。而深度测量仅对影像中露出坑底的撞击坑进行,由于陡坡上的撞击坑深度测量误差较大,不将这类撞击坑纳入深度统计范围以内。为了减小由 DEM 插值带来的二次误差,高度值同样来源于月球摄影测量制图软件中所得到的三维地面坐标,通过对撞击坑中心多个点进行高度的测定,选取最深的点,计算该点与坑缘高度平均值之差即为深度 d 。

2 结果

2.1 撞击坑直径-频数关系

本文共测量了 371 个撞击坑的直径,将其叠加在 LRO NAC 影像底图上得到它们的空间分布图(图 2)(由于并未使用前几个月昼的数据,因此撞击坑只集中在八月昼之后)。撞击坑的频数-直径图和累积频数-直径图如图 3 所示。统计结果表明只有 12 个撞击坑直径大于 1 m,50% 以上的撞击坑直径为 0.1~0.3 m。在全景影像中,存在许多微小的边缘带有细粒石块的撞击坑,但是由于分辨率的限制,无法清晰辨认和测量直径,导致直径小于 0.1 m 的撞击坑数量大幅小于直径为 0.1~0.2 m 的撞击坑数量。整体来说,撞击坑数量随着直径的增加而减少。撞击坑累积频数和直径的关系近似满足 $N(D) = AD^{-b}$ [其中 D 表示撞击坑直径, $N(D)$ 表示直径 $\geq D$ 的撞击坑累积个数, A 是系数, b 是指数,对于本文中嫦娥四号着陆区撞击坑, b 约等于 2.07]。

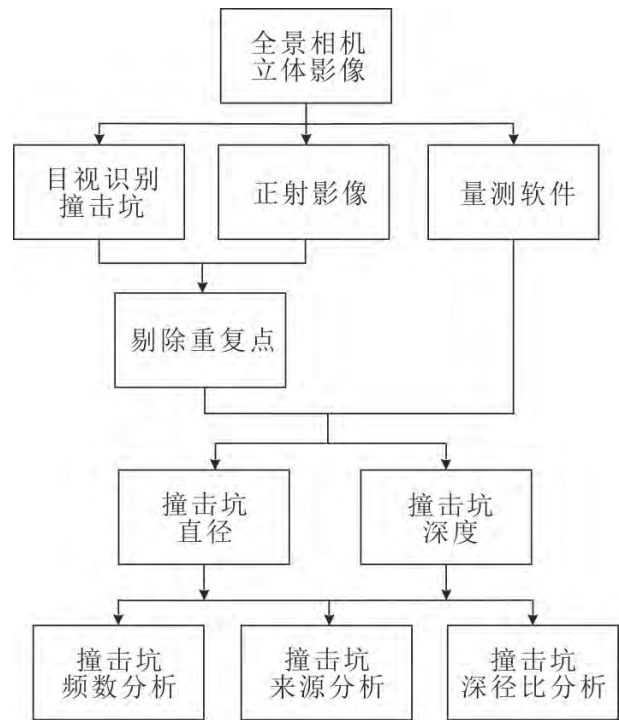


图 1 技术路线图

Fig. 1 The chart of technical procedure

2.2 撞击坑深度-直径关系

本文共测量了 63 个撞击坑的深度,深度与直径的关系如图 4a 所示。从图中可以看出深度和直径呈明显的线性关系。深径比为 0.03~0.18,均值为 0.12,方差约 0.03。超过 78% 的撞击坑深径比为 0.10~0.16。

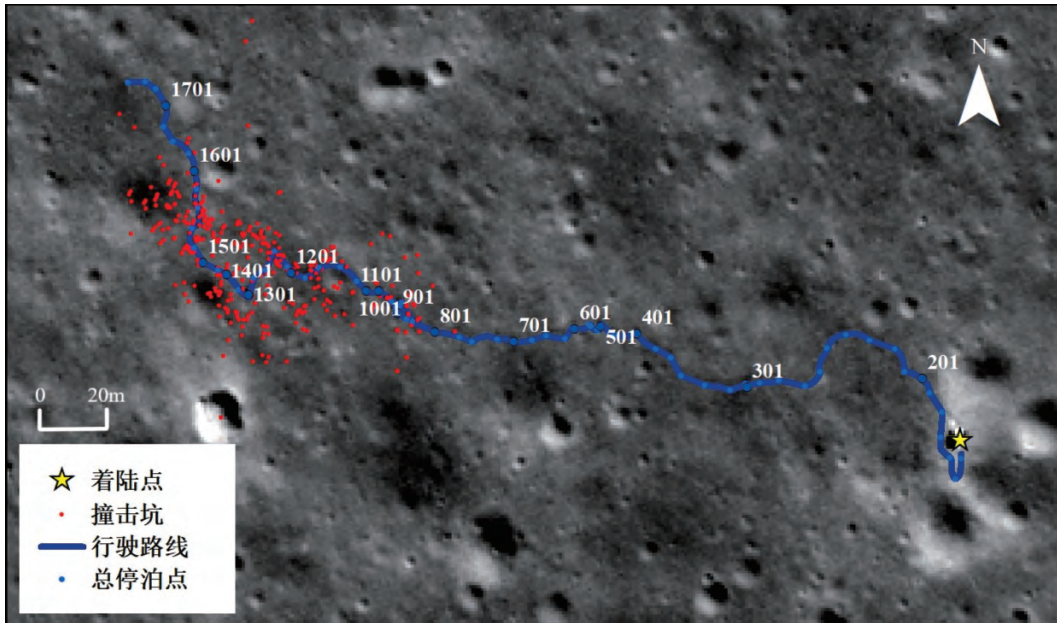
3 讨论

3.1 测量不确定度

根据摄影测量误差传播方程(彭嫄等, 2014),在全景相机中小于 15 m(本文中最大撞击坑约为 15 m)的撞击坑坑缘上的点测量误差 σ_{pmax} 不超过 0.09 m。直径由坑缘上两点的直线距离得到,因此最大误差不超过 $\sqrt{2}\sigma_{pmax}$,约等于 0.13 m。而测量深度的不确定度主要取决于影像分辨率,本文中测量的撞击坑大多分布在巡视器的近处,这个范围内全景影像的分辨率均值 σ_h 约为 0.3 cm,深度测量不确定度为 $\sqrt{2}\sigma_d$,约等于 0.4 cm。

3.2 小型撞击坑的二次撞击特征

着陆区整体地形平坦,颜色黯淡,区域内的小型撞击坑侵蚀程度较低、反射率较高,说明这些撞击坑是最近才暴露在月表的,根据其形成速率(Neukum and Ivanov, 1994; Neukum et al., 2001),



底图为 LRO NAC 正射影像, 蓝线为前 17 个月昼玉兔二号的行驶路线, 沿途停泊点旁的数字标记以月昼序号开头, 代表每个月昼的首个站点

图 2 着陆区测量撞击坑分布图

Fig. 2 The distribution of impact craters in the Chang'E-4 landing area

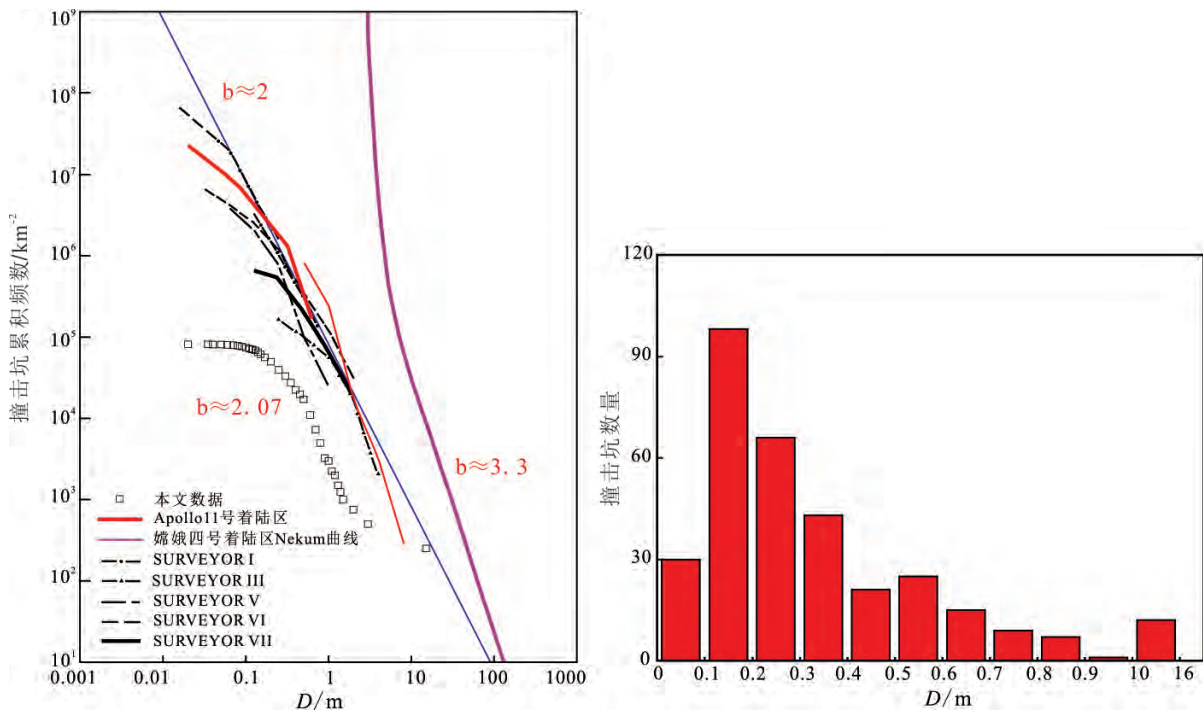


图 3 (a) 撞击坑累积频数-直径图和 (b) 撞击坑频数-直径图

Fig. 3 (a) The diagram of cumulative frequencies versus diameters of impact craters and (b) histogram of frequencies versus diameters of craters

短时间内很难形成如此高空间密度的一次撞击坑, 所以这些撞击坑极有可能是二次撞击形成的(Ding et al. , 2020) , 它们的平均深径比(~0.12) 也小于新鲜的简单一次坑的深径比(~0.2) (Pike , 1974) ,

说明成坑效率较低(Schmidt and Holsapple , 1980) 。除此之外, 这些撞击坑在形态上也表现出与二次坑相同的特征: ①撞击坑附近的石块分布不均匀, 这种不均匀体现在石块数量不均匀(图 5 和图 8) 和大

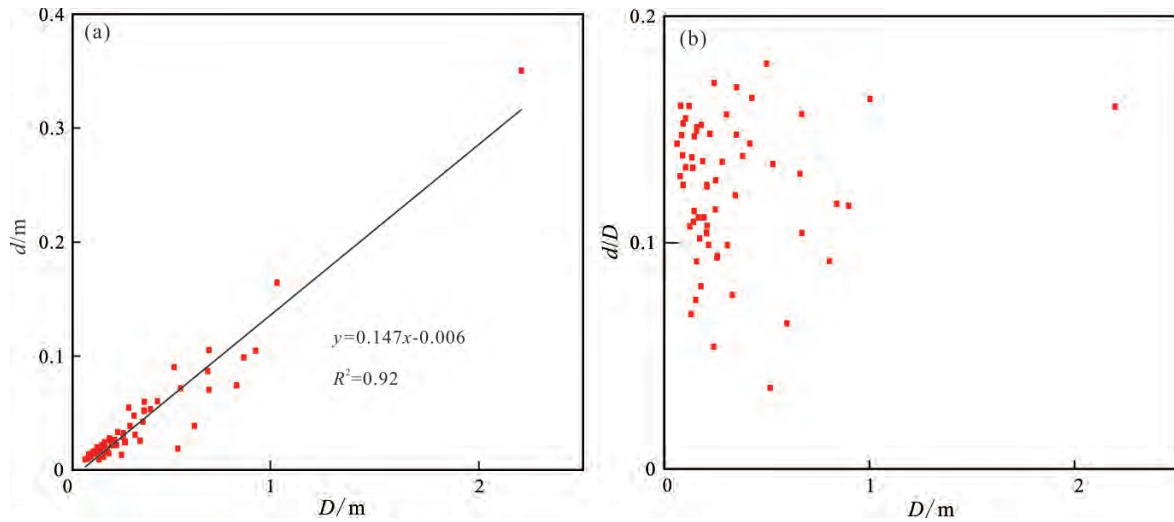
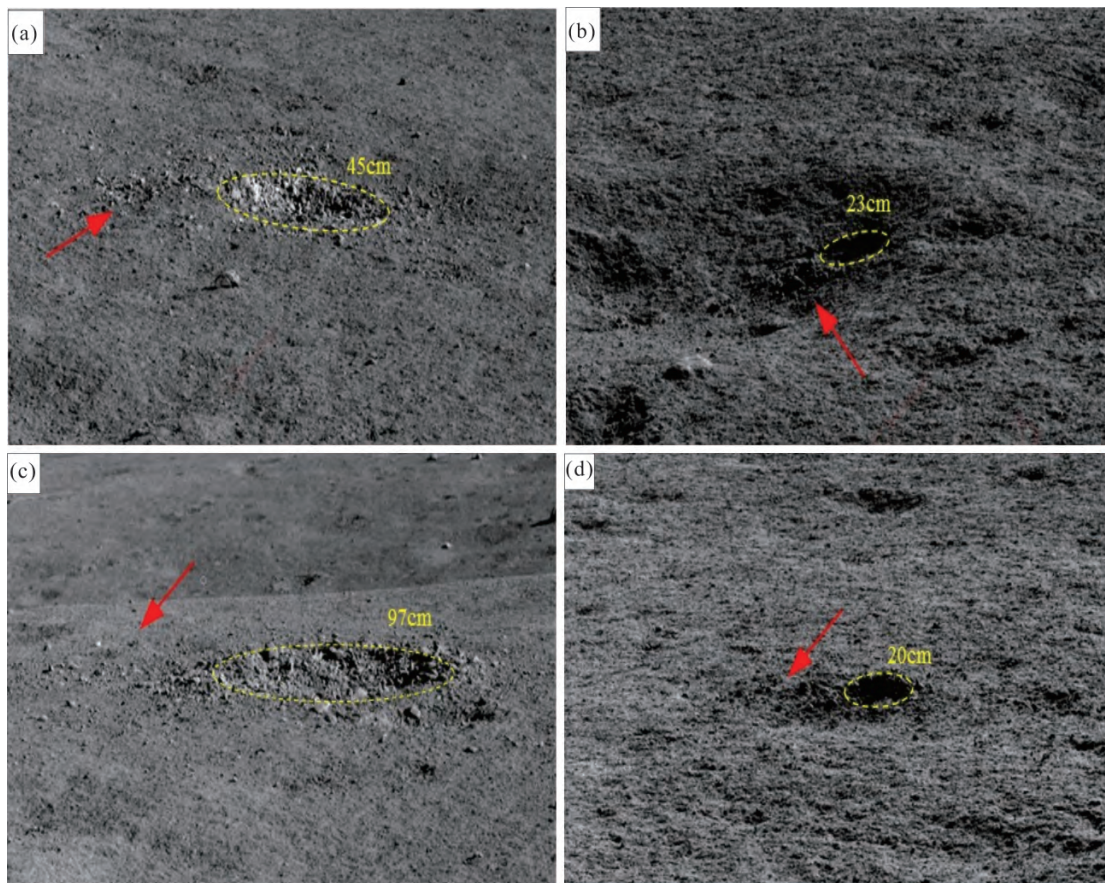


图4 (a) 撞击坑深度-直径图和 (b) 撞击坑深径比-直径图

Fig.4 (a) Plot of depth versus diameter values of craters, (b) Plot of d/D values versus diameters of craters



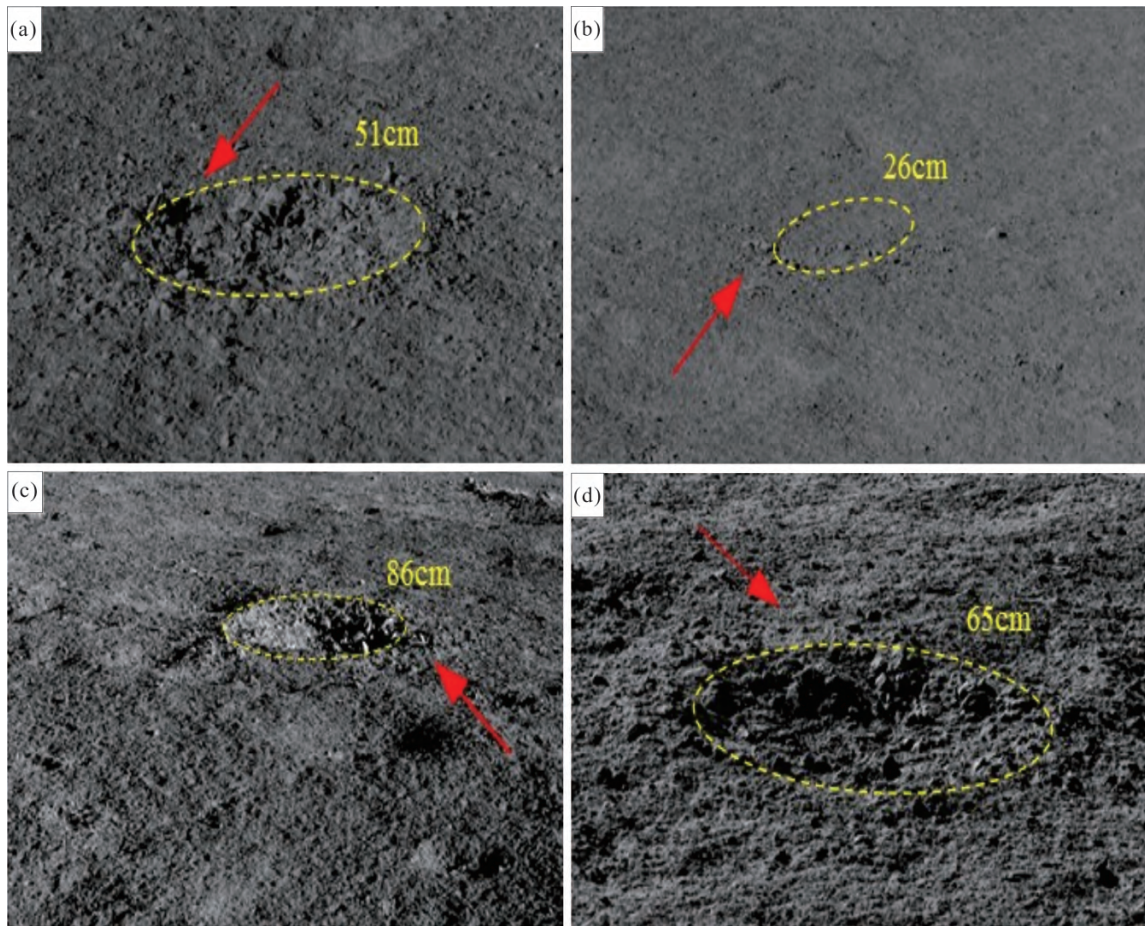
红色箭头所指处石块数量多于其它方向,并且(a)(c)红色箭头所指的石块明显溅射的更远。

图5 石块数量分布不均匀

Fig.5 The nonuniformly distributed boulders around different sized craters

小不均匀(图6)上,通常来说,下靶区的石块溅射物速度更大,分布范围更远(Schultz and Gault, 1985);
 ②撞击坑沿着撞击方向呈拉长的椭圆形(McEwen and Bierhaus, 2006) 图7a 撞击坑西北-东南向长轴

约 17.5 m,西南-东北向短轴约 13.5 m,扁率为 0.23;图8c 中撞击坑西北-东南向长轴约 0.44 m,西南-东北向短轴约 0.36 m,扁率为 0.18;③撞击坑坑缘高低起伏很大,存在明显的某侧坑缘抬升或者凹



箭头所指处石块直径大于其它方向

图6 石块大小分布不均匀

Fig. 6 The nonuniformly distributed various sized boulders around different sized craters

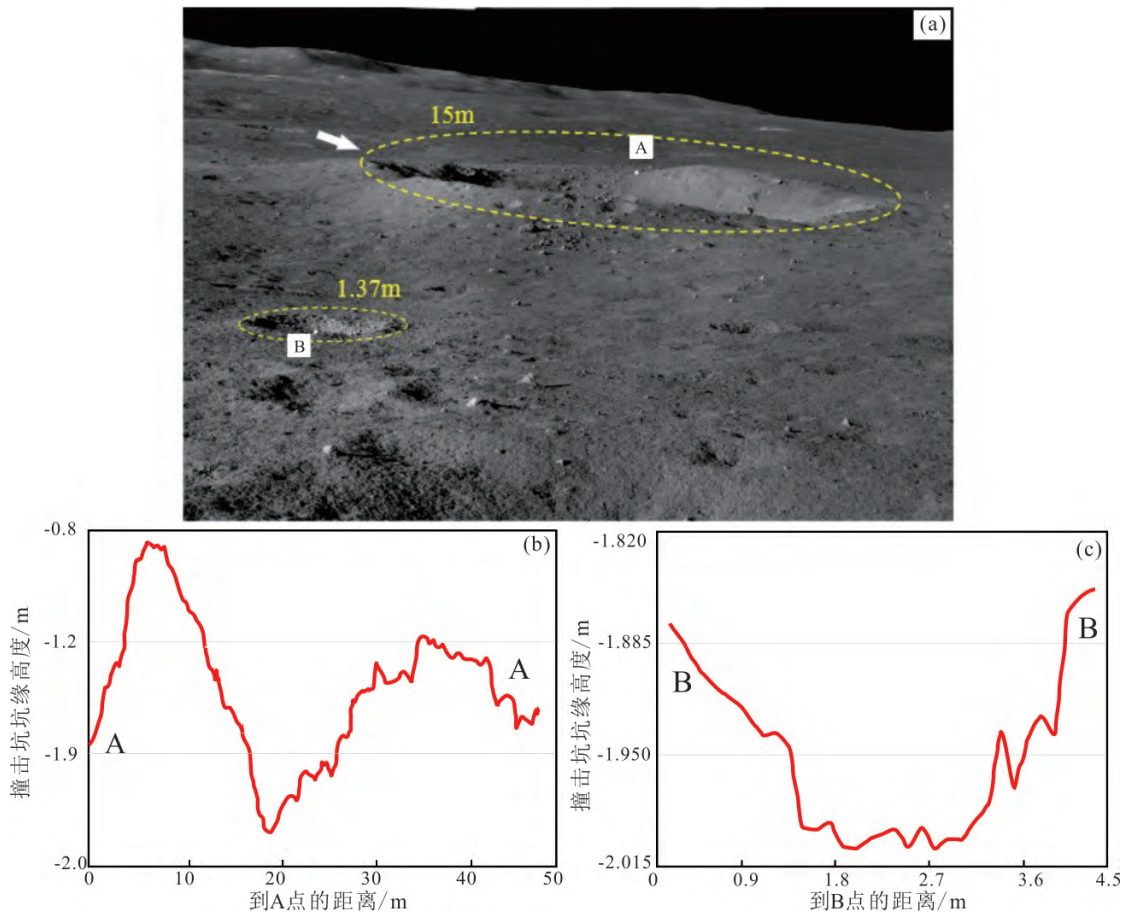
陷(图7)。

3.3 研究区撞击坑统计特征

月球上典型二次坑的深径比约为 0.1 (Pike and Wilhelms, 1978), 略低于本文的统计结果 (0.12), 这是由于撞击坑会在风化作用下逐渐变浅 (Basilevsky, 1976), 而本文选取的撞击坑大多退化程度不高, 其中具有锐利的抬升坑缘且堆积了大量石块的撞击坑深径比大多在 0.15 左右, 与一次坑的深径比 (0.2) 相近 (Pike, 1974); Jia 等 (2021) 使用 NAC 数据对嫦娥四号着陆区具有高反射率溅射物且坑缘明显的撞击坑进行了测量, 得到的深径比均值为 0.14。实际上, 小型撞击坑的深径比在一次坑和二次坑之间差别并不明显, 而是在不同区域内差别较大 (Bouška, 1968)。研究区最上层为松散的月壤, 高孔隙度使得撞击坑的直径减小 (Wünnemann et al., 2005), 从而增大了深径比; 新鲜小型一次坑的退化速度很快 (Fassett and Combellick, 2014), 这些原因导致观察到的一次撞击坑和二次撞击坑深径

比十分接近, 难以辨认, 所以还需要结合撞击坑及其溅射物的平面形态特征来识别二次坑。

分析撞击坑的大小-频数分布 (SFD) 是获取行星表面年龄的重要手段 (Neukum and Ivanov, 1994), 原理是年龄越大的表面, 其遭受撞击的次数越多, 表面累积的撞击坑密度也越高。直径-累积频数 (CSFD) 曲线通常是一个幂律函数, 服从 $N(D) = AD^{-b}$ 的分布关系。Neukum 等 (2001) 统计得到全月的 CSFD 分布曲线在直径 100 m 处的斜率约为 3.3, 随着直径的减小, 曲线也变得更陡 (图 3a); 通常来说, 一次坑的斜率要小于二次坑的斜率 (Shoemaker, 1965; Wilhelms et al., 1978)。本文得到的研究区域的 b 值约为 2.07, 远小于 Neukum 等 (2001) 得到的撞击坑 CSFD 曲线斜率。而 Shoemaker 等 (1969) 对 Surveyor 7 任务中 0.13~4 m 的撞击坑进行统计得到 $b \approx 2$, 十分接近本文的结果; 而从 Lunar Orbiter 5 获取的 Surveyor 7 区域 10 m 以上的撞击坑中解译得到的 $b \approx 2.93$, Surveyor 其他任务以及 Apollo 11

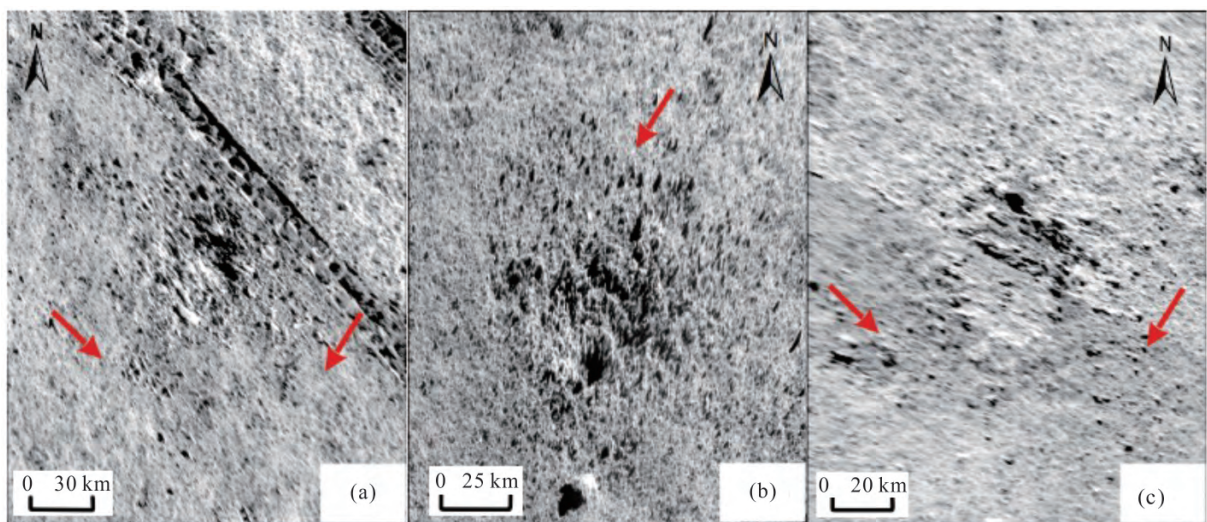


(a) 图白色箭头所指撞击坑西北-东南向长轴约 17.5 m, 西南-东北向短轴约 13.5 m

图 7 (a) 第十三月昼的撞击坑全景相机影像图; (b) 图(a) 中 A 为起始点的坑缘高程图;

(c) 以(a) 中 B 点为起始点的坑缘高程图

Fig. 7 (a) Pancam image of crater in 13th lunar day; (b) Height variation of the crater rim with startingpoint A in the image (a); (c) Height variation of the crater rim with starting point B in the image (a)



红色箭头所指处溅射范围更广

图 8 二次撞击坑正射影像图

Fig. 8 Digital orthophotos of secondary impact craters

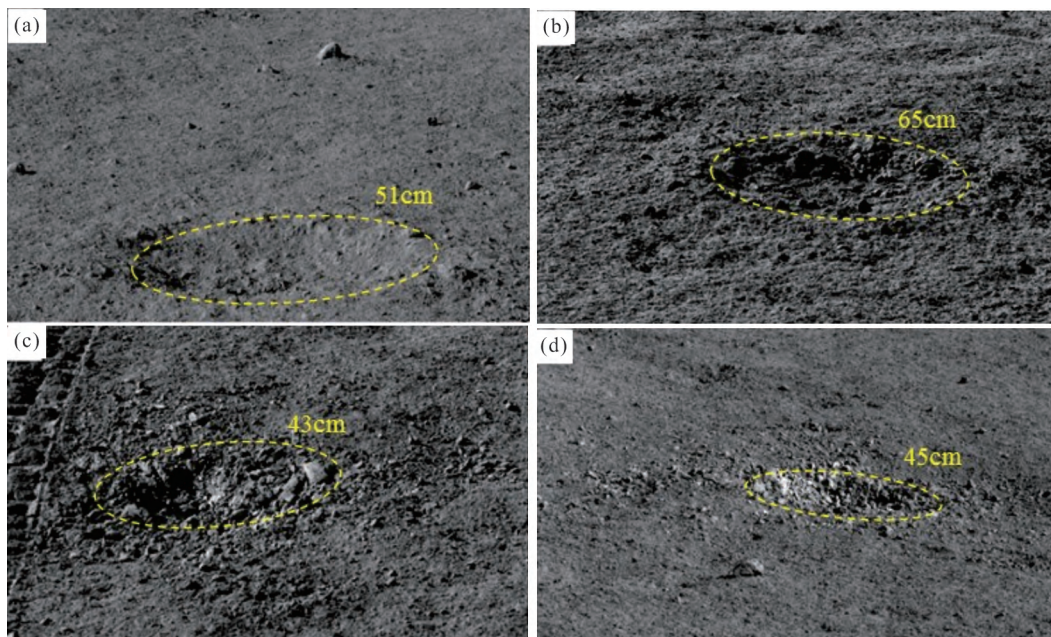
区域的撞击坑同样也有两种分布规律(Shoemaker et al., 1970)。这两种分布曲线的交点被定义为 C_s ，当撞击坑的直径 $\leq C_s$ 时，撞击坑处于一种稳定状态，对于任何不同年龄的区域，其 $b \approx 2$ ；Jia 等 (2021) 使用第一月昼全景数据对嫦娥四号着陆区直径小于 25 m 的一次坑进行直径-频数增量统计(与累积频数斜率相同)，也得到了相同的斜率(~ 2)。因此，结合本文的统计结果，我们认为研究区内的二次撞击已经达到了饱和，满足 $N \sim D^{-2}$ 的分布。风化层的最大厚度约为 $C_s/4$ (Shoemaker et al., 1970)，雷达数据获得的嫦娥四号区域风化层厚度平均值约为 12 m(Li et al., 2020)，因此嫦娥四号着陆区处于稳定状态坑群的上限至少为 48 m， $D \leq 48$ m 的撞击坑中一次坑与二次坑的直径-频数曲线分布与表面年龄无关，且深径比均无显著差别，在进行撞击坑定年时应当避免使用小尺寸撞击坑。

本文中的撞击坑密度略小于勘探者号任务的撞击坑密度，我们推测这种差异主要来源于以下三个因素：①本文中仅统计了带有石块的新鲜撞击坑，而勘探者任务中得到的分布曲线还包括了退化的撞击坑；②全景影像中的阴影以及坡度起伏可能掩盖了部分撞击坑，导致统计数量小于真实的新鲜二次坑数量。③极个别被识别出来撞击坑位于探测器的较远处，导致统计面积的偏大从而降低密度。

3.4 撞击坑的可能来源

随着暴露在风化层表面的时间增加，撞击坑会在持续的外来撞击事件和重力等因素的作用下发生退化(Basilevsky et al., 2013)，并且呈现出不同的侵蚀形态(Basilevsky, 1976)。同样，石块也会在微型撞击事件中逐渐磨损，最终消失。直径 1.85 cm 和 4.0 cm 的石块消失 50% 分别需要 1.9 Ma 和 4.6 Ma，消失 99% 则分别需要 6 Ma 和 14.5 Ma(Basilevsky et al., 2013)。本文测量的石块直径大多为 1~5 cm，撞击坑和石块都表现了不同的退化特征，图 9a 所示撞击坑退化程度较高，周围石块数量较少，与周围风化层对比反射率相近。图 9b 所示撞击坑退化程度较高，但周围石块略多，部分石块可见棱角，与风化层接触界面明显。图 9c、9d 所示撞击坑十分新鲜，且深径比在 0.17 左右，周围分布大量石块，形状不规则，棱角明显，反射率高，和周围灰暗的风化层对比十分明显。根据撞击坑和石块不同的退化特征，我们推测它们可能是不同的撞击事件产生的二次撞击坑。

研究区的地质年代十分古老，表面被多次撞击事件的溅射物覆盖(张健等, 2011)，这使得找到这些二次坑的来源难度较大。图 8a 撞击坑长轴大致为南北向，溅射物向东南方向延伸，应该形成于西北-东南向的二次撞击。图 8b 所示的撞击坑西南



(a) 撞击坑退化程度较高，周围石块数量较少，与周围风化层对比反射率相近；(b) 较高退化程度撞击坑，但周围石块略多，磨圆程度中等，部分石块可见棱角，与风化层接触界面明显；(c) (d) 十分新鲜的撞击坑，周围分布大量石块，形状不规则，棱角明显，反射率高，和周围灰暗的风化层对比十分明显

图 9 不同退化程度的撞击坑

Fig. 9 Images showing impact craters with different degradation degrees

侧坑缘只有少量石块,而东北方向有大量石块堆积,形成了一个溅射扇,溅射距离较远,同时可以发现石块的直径随着到撞击坑的距离增大而减小,根据 Krishna 和 Kumar(2016)对 Censorinus 撞击坑周围石块的分布特征统计结果,上靶区的石块经历了更加复杂的变形,撞击方向附近会形成一个溅射物的“封闭区”,在其周围石块的分布范围较小且石块较集中,下靶区周围石块的分布范围较大离散程度高,这是由于下靶区溅射物速度更大而导致的(McEwen and Bierhaus, 2006),由此推断,该撞击坑应该形成于原始西南-东北向的二次撞击。Ding 等(2020)发现织女坑的一条溅射线穿过了嫦娥四号着陆区,所以织女溅射物到达嫦娥四号着陆区时,很可能形成了一些二次坑。

4 结论

(1) 大多数的撞击坑直径为 0.1~0.3 m,整体上来说,撞击坑的数量随着撞击坑的直径增大而减少。深度和直径呈明显的线性关系,深径比大多数为 0.10~0.16。

(2) 本文统计的撞击坑周围富集石块,反射率高,与周围成熟的暗色月壤形成了鲜明的对比,暗示它们形成于最近的暴露事件。然而,短时间内无法产生研究区内如此高密度的撞击坑,结合撞击坑呈椭圆形、周围石块分布不均匀、某侧坑缘明显抬升或凹陷的形态特征,我们推测它们极有可能形成于二次撞击事件。

(3) 数十米的撞击坑一般处于饱和状态,在不同年龄的区域表面其直径-频数曲线基本相同,且从深径比中很难区分在小尺寸撞击坑中的一次坑和二次坑,因此在撞击坑直径-频数定年统计时应尽量避免使用小撞击坑。

(4) 撞击坑和石块均表现出不同的退化程度,二次坑特征也指示了不同方向的撞击来源,因此它们应该形成于不同的二次撞击事件。织女坑的一条溅射线穿过了研究区,因此织女的溅射物很可能是其中的来源之一。

参考文献 (References):

Aldrin E E Jr, Armstrong N A, Collins M. 1969. Crew observations. In: Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214, 35-40
 Baldwin R B. 1963. The Measure of the Moon. University of Chicago Press, Chicago
 Baldwin R B. 1965. The crater diameter-depth relationship from ranger VII photographs. The Astronomical Journal, 70(8): 545-547
 Barnouin O S, Zuber M T, Smith D E, Neumann G A, Herrick R R,

Chappelow J E, Murchie S L, Prockter L M. 2012. The morphology of craters on Mercury: Results from MESSENGER flybys. Icarus, 219(1): 414-427
 Basilevsky A T. 1976. On the evolution rate of small lunar craters. In: Proceedings of the 7th Lunar Science Conference. Houston T X, 1005-1020
 Basilevsky A T, Head J W, Horz F. 2013. Survival times of meter-sized boulders on the surface of the Moon. Planetary and Space Science, 89: 118-126
 Bouška J. 1968. Crater diameter-depth relationship from ranger lunar charts. Bulletin of the Astronomical Institute of Czechoslovakia, 19: 229
 Chappelow J E. 2013. Simple impact crater shape determination from shadows. Meteoritics and Planetary Science, 48(10): 1863-1872
 Daubar I J, Atwood-Stone C, Byrne S, McEwen A S, Russell P S. 2014. The morphology of small fresh craters on Mars and the Moon. Journal of Geophysical Research: Planets, 119(12): 2620-2639
 Di K C, Xu B, Peng M, Yue Z Y, Liu Z Q, Wan W H, Li L C, Zhou J L. 2016. Rock size-frequency distribution analysis at the Chang'E-3 landing site. Planetary and Space Science, 120: 103-112
 Ding C Y, Xiao Z Y, Wu B, Li Y, Prieur N C, Cai Y Z, Su Y, Cui J. 2020. Fragments delivered by secondary craters at the Chang'E-4 landing site. Geophysical Research Letters, 47(7): e2020GL087361
 Fassett C I, Combellick J R. 2014. The rate of crater degradation and topographic evolution on the Moon: Results from the Maria and Initial comparisons with the highlands. LPI, (1777): 1429
 Gou S, Di K C, Yue Z Y, Liu Z Q, He Z P, Xu R, Liu B, Peng M, Wan W H, Wang Y X, Liu J Z. 2020a. Forsteritic olivine and magnesium-rich orthopyroxene materials measured by Chang'E-4 rover. Icarus, 345: 113776
 Gou S, Yue Z Y, Di K C, Wan W H, Liu Z Q, Liu B, Peng M, Wang Y X, He Z P, Xu R. 2020b. In situ spectral measurements of space weathering by Chang'E-4 rover. Earth and Planetary Science Letters, 535: 116117
 Hartmann W K, Strom R G, Weidenschilling S, Blasius K. R, Voronow A, Dence M R, Grieve R A F, Diaz J, Chapman C R, Shoemaker E M, Jones K L. 1981. Chronology of planetary volcanism by comparative studies of planetary craters. In: Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets. Elmsford N Y: Pergamon Press, 1050-1127
 Hartmann W K. 1984. Does crater "saturation equilibrium" occur in the solar system? Icarus, 60(1): 56-74
 Huang J, Xiao Z Y, Flahaut J, Martinot M, Head J, Xiao X, Xie M G, Xiao L. 2018. Geological characteristics of Von Kármán crater, northwestern south pole-Aitken Basin: Chang'E-4 landing site region. Journal of Geophysical Research: Planets, 123(7): 1684-1700
 Jia M N, Di K C, Yue Z Y, Liu B, Wan W H, Niu S L, Liu J Z, Cheng W M, Lin Y T. 2021. Multi-scale morphologic investigation of craters in the Chang'E-4 landing area. Icarus, 355: 114164
 Krishna N, Kumar P S. 2016. Impact spallation processes on the Moon: A case study from the size and shape analysis of ejecta boulders and secondary craters of Censorinus crater. Icarus, 264: 274-299

- Li C L, Su Y, Pettinelli E, Xing S G, Ding C Y, Liu J J, Ren X, Lauro S E, Soldovieri F, Zeng X G, Gao X Y, Chen W L, Dai S, Liu D W, Zhang G L, Zuo W, Wen W B, Zhang Z B, Zhang X X, Zhang H B. 2020. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar. *Science Advances*, 6(9): eaay6898
- McEwen A S, Bierhaus E B. 2006. The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1): 535-567
- Melosh H J. 1989. *Impact cratering: A geologic process*. New York: Oxford University Press
- Melosh H J, Kendall J, Horgan B, Johnson B C, Bowling T, Lucey P G, Taylor G J. 2017. South Pole-Aitken basin ejecta reveal the Moon's upper mantle. *Geology*, 45(12): 1063-1066
- Neukum G. 1983. *Meteoritenbombardement Und Datierung Planetarer Oberflächen*. Habilitation Thesis for Faculty Membership. Germany: University of Munich
- Neukum G, Ivanov B A. 1994. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data. In: *Hazards due to Comets and Asteroids*. Tucson A Z: University of Arizona Press, 359-416
- Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. *Space Science Reviews*, 96(1): 55-86
- Pieters C M. 1982. Copernicus crater central peak: Lunar mountain of unique composition. *Science*, 215(4528): 59-61
- Pike R J. 1974. Depth/diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data. *Geophysical Research Letters*, 1(7): 291-294
- Pike R J, Wilhelms D E. 1978. Secondary-impact craters on the Moon: Topographic form and geologic process. *Lunar and Planetary Science IX*, 9: 907-909
- Pinet P C, Chevrel S D, Martin P. 1993. Copernicus: A regional probe of the lunar interior. *Science*, 260(5109): 797-801
- Schmidt R M, Holsapple K A. 1980. Theory and experiments on centrifuge cratering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B1): 235-252
- Schultz P H, Gault D E. 1985. Clustered impacts: Experiments and implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B5): 3701-3732
- Shevchenko V V, Chikmachev V I, Pugacheva S G. 2007. Structure of the South Pole-Aitken lunar basin. *Solar System Research*, 41(6): 447-462
- Shoemaker E M. 1965. Preliminary analysis of the fine structure of the lunar surface in Mare Cognitum. In: *The Nature of the Lunar Surface*. Baltimore, MD USA: Johns Hopkins Press, 23
- Shoemaker E M, Batson R M, Holt H E, Morris E C, Rennilson J J, Whitaker E A. 1967. Surveyor V: Television pictures. *Science*, 158(3801): 642-652
- Shoemaker E M, Batson R M, Holt H E, Morris E C, Rennilson J J, Whitaker E A. 1969. Observations of the lunar regolith and the Earth from the television camera on Surveyor 7. *Journal of Geophysical Research*, 74(25): 6081-6119
- Shoemaker E M, Hait M H, Swann G A, Schleicher D L, Dahlem D H, Schaber G G, Sutton R L. 1970. Lunar regolith at Tranquillity Base. *Science*, 167(3918): 452-455
- Swann G A, Bailey N G, Batson R M, Eggleton R E, Hait M H, Holt H E, Larson K B, McEwen M C, Mitchell E D, Schaber G G, Schaffer J B, Shepard A B, Sutton R L, Trask N J, Ulrich G E, Wilshire H G, Wolfe E W. 1971. Preliminary geologic investigations of the Apollo 14 landing site. In: *Apollo 14*. Washington, DC: NASA, 39-86
- Trask N J. 1966. Size and spatial distribution of craters estimated from the Ranger photographs. In: *Ranger VIII and IX, part II, Experimenters' analyses and interpretations*. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 252-264
- Wilhelms D E, Oberbeck V R, Aggarwal H R. 1978. Size-frequency distributions of primary and secondary lunar impact craters. In: *Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 3735-3762
- Wünnemann K, Collins G S, Melosh H J. 2006. A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets. *Icarus*, 180(2): 514-527
- Xiao Z Y, Strom R G. 2012. Problems determining relative and absolute ages using the small crater population. *Icarus*, 220(1): 254-267
- Xiao Z Y, Werner S C. 2015. Size-frequency distribution of crater populations in equilibrium on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(12): 2277-2292
- Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, Ogawa Y, Ishihara Y, Morota T, Hirata N, Ohtake M, Hiroi T, Yokota Y, Haruyama J. 2010. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nature Geoscience*, 3(8): 533-536
- 代树武, 吴季, 孙辉先, 张宝明, 杨建峰, 方广有, 王建宇, 王焕玉, 安军社. 2014. 嫦娥三号巡视器有效载荷. *空间科学学报*, 34(3): 332-340
- 贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 平劲松, 严俊, 宁远明. 2018. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置. *空间科学学报*, 38(1): 118-130
- 彭嫚, 万文辉, 吴凯, 刘召芹, 李力, 邱凯昌, 李立春, 苗毅, 詹磊. 2014. 嫦娥三号导航相机测图能力分析 & 地形重建. *遥感学报*, 18(5): 995-1002
- 张健, 缪秉魁, 廖庆园, 荆元, 王辉. 2011. 月球南极艾特肯盆地的地质特征: 探索月球深部的窗口. *矿物岩石地球化学通报*, 30(2): 234-240, 244

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)