

Apollo 11 和嫦娥四号着陆区撞击坑退化对比分析

史珂^{1,2}, 岳宗玉^{1,4*}, 邸凯昌^{1,4}, 刘建忠^{3,4}, 牛胜利⁵

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 550002; 4. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026;
5. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 澳门

摘要: Apollo 11 和嫦娥四号 (Chang'E-4) 是人类探月历史上的里程碑, 它们的着陆区分别位于月球正面和背面。对两个着陆区内不同退化程度撞击坑的统计和对比分析有助于揭示研究区域的地质年龄和演化历史, 对月球地质研究有着重要的意义。本文使用 LRO NAC 影像和 DTM 产品对两个着陆区附近 1 km² 范围内撞击坑的退化进行分析, 通过目视解译识别撞击坑并根据形貌将其分为不同的类别, 然后对各类撞击坑进行统计, 最后根据统计结果分析区域的地质年龄和撞击坑退化速度。结果表明 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区附近直径在 5~300 m 的撞击坑累计大小频率分布规律基本相同, 撞击坑累积数量随直径的减小呈指数关系增加; 撞击坑最初退化速度较快, 随着退化程度的增加, 退化速度急剧降低; 两个区域的地质年龄相近, 撞击历史相似。

关键词: Apollo 11; 嫦娥四号; 着陆区; 撞击坑

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2021)03-0711-09 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2021.40.027

Comparative Analysis of the Degradation of Impact Craters Between the Apollo 11 and Chang'E-4 Landing Areas

SHI Ke^{1,2}, YUE Zong-yu^{1,4*}, DI Kai-chang^{1,4}, LIU Jian-zhong^{3,4}, NIU Sheng-li⁵

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 550002, China; 4. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China; 5. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau, China

Abstract: The Apollo 11 and Chang'E-4 missions are milestones in the history of lunar exploration. Their landing areas are located in the near and far sides of the Moon, respectively. The statistical and comparative analyses of the degradation states of the impact craters can be helpful to reveal the geological age and evolution history of the study areas in the Moon, and are of great significance to the study of lunar geology. In this paper, by using the LRO NAC images and DTM products, the degradations of impact craters within two 1 km² areas surrounding the two landing points are analyzed. Firstly, the impact craters are identified by using visual interpretation, and then they are classified into five categories according to their morphologies. Subsequently, the statistics of various impact craters are made. Finally, the geological ages of the study areas and the degradation speeds of impact craters are calculated based on the above results of statistical analyses. The results show that the cumulative size-frequency distributions of impact craters with diameters between 5 and 300 meters near the Apollo 11 and Chang'E-4 landing sites are generally similar, and the cumulative number of impact craters is increased exponentially with the decrease of their diameters. The degradation speeds of impact craters are relatively fast at first, and then they are decreased rapidly with the increase of degradation degrees. The geological ages and impact histories of impact craters in the two regions are generally similar.

Key words: Apollo 11; Chang'E-4; landing area; impact crater

收稿编号: 2020-190 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: 史珂(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 行星遥感地质学. E-mail: shike191@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显著的地貌特征,在月球地质学的研究中具有重要地位(欧阳自远等,2002;欧阳自远,2005)。月球的遥感观测起源于20世纪60年代,借助影像数据撞击坑的系统研究也随即展开。例如,Baldwin(1965)和Trask(1967)等开展了撞击坑的统计和形貌研究,Kreiter(1960)和Neukum等(1975)进行了撞击坑年代学的研究,Pike(1967)、Soderblom和Lebofsky(1972)等揭示了月球撞击历史、月球地表演化等信息。但是,早期的影像整体分辨率较低,因此大多数研究只限于对大型撞击坑的分析。近年来,月球勘测轨道器(LRO,Lunar Reconnaissance Orbiter)等探测任务获取了高分辨率的月表影像,为我们在小区域内开展撞击坑的相关研究提供了重要数据来源。1976年Apollo 11任务首次将人类送上月球正面,2019年Chang'E-4任务在月球背面首次实现了软着陆,这两次任务在月球探测史上都具有里程碑意义。有资料表明,Apollo 11和Chang'E-4的着陆区均位于月海玄武岩区,其地形相对平坦,地质特征比较相近(Di et al.,2019;Iqbal et al.,2019)。因此,利用高分辨率数据对这两个着陆区的撞击坑进行详细的对比研究,可为分析月球正面和背面的演化异同提供重要信息,同时也可以为后期的探测任务提供参考。

撞击坑从形成伊始就开始逐渐退化,撞击坑退化特征的研究是撞击坑形貌学的深化,对分析所在区域的撞击历史及其演化历史都具有重要价值。撞击坑的退化过程和微陨石撞击、太阳风等月球内外部环境密切相关,撞击坑的退化会改变撞击坑的形态,退化消失会使撞击坑数量减少,从而影响区域撞击坑的形貌特征和统计特性(李坤,2013)。撞击坑退化的研究起源于20世纪60年代,Marcus(1967)和Soderblom(1970)等在撞击坑形貌学的研究基础上开展了撞击坑的退化分析;之后Mcgill(1974)、Head(1975)和Basilevsky(1976)等对月球表面的撞击坑按照退化程度的不同进行了分类;Craddock和Howard(2000)及Richardson(2009)等借助计算机技术对撞击坑的形态变化、退化速度等进行了量化研究;近年来,借助高分辨率的影像,李坤(2013)、Fassett和Thomson(2014)、Xiao和Werner(2015)、Xie等(2017,2019,2020)对撞击坑的退化规律、区域撞击历史等进行了详细的研究,提升了人们对撞击坑退化的认知。对区域撞击坑退化的研究能够确定区域的相对年龄,进而可以推

测区域地表的撞击历史,这对月球科学研究有着重要意义。

本文依据LRO NAC影像识别研究区域撞击坑,并结合高程数据进行撞击坑的量测和统计,依据量测和统计结果进行撞击坑的分类和退化分析,最后根据统计分析结果对比分析Apollo11和Chang'E-4两个着陆区的撞击坑的退化情况,分析它们的地质年龄和撞击历史。

1 研究区与数据

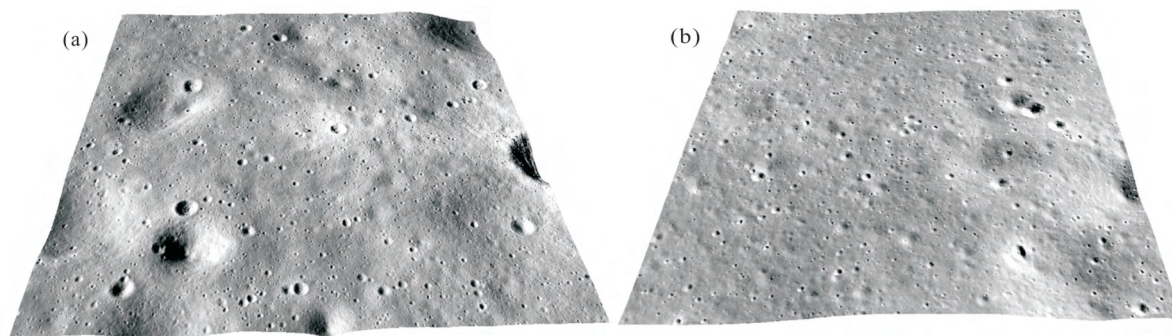
1.1 研究区域概况

Apollo 11探测器在1969年7月20日着陆于月球正面的静海西南边缘,首次将人类送上月球,着陆点的坐标为($0^{\circ}40'27''$ N, $23^{\circ}28'23''$ E)(Iqbal et al.,2019)。静海是一个大型的撞击盆地,边缘很不规则,面积约为42万 km^2 ,其内部被后期的熔岩流覆盖(Rajmon and Spudis,2004)。2019年1月3日,Chang'E-4探测器成功软着陆于月球背面的南极-艾特肯盆地里的冯·卡门撞击坑内,着陆点坐标为($45^{\circ}27'25''$ S, $177^{\circ}35'17''$ E)随后两器分离释放玉兔二号月球车(邱凯昌等,2019)。南极-艾特肯盆地是月球上最大的撞击盆地,直径约2500 km,冯·卡门撞击坑是其内部的一个撞击坑,其坑底被后期喷出的黑色玄武岩充填,较为平坦(Di et al.,2019)。依据着陆区的遥感影像和高程数据分别制作Apollo 11和Chang'E-4着陆点附近1 km^2 的三维地形(图1)。

从图1中可以发现两个着陆区地形总体上起伏均不大,比较平坦,相比之下Apollo 11着陆点周围有几个比较大的撞击坑深度稍微大一些,而Chang'E-4着陆点周围地形更加平坦,撞击坑的深度都不大。

1.2 数据源

LRO是美国国家航空航天局(NASA)“新太空探索计划”的首个任务,于2009年发射升空,已环绕月球拍摄了大量的分辨率影像,其空间分辨率最优为0.5 m,高分辨率的影像是月球小撞击坑退化研究的首选数据源。Apollo 11和Chang'E-4着陆区撞击坑退化的研究使用的是LRO的窄角相机NAC影像和利用NAC立体影像制作的数字地面模型DTM及正射影像产品,数据可从Lunar Orbital Data Explorer网站(<https://ode.rsl.wustl.edu/moon/indexProductSearch.aspx>)下载。我们使用的Apollo 11着陆区正射影像的空间分辨率为0.5 m,DTM的空间分辨率为2 m;Chang'E-4着陆区正射影



(a) Apollo 11 着陆点(着陆点位于图示中心,中心处正上方为北方向)。底图为 LRO NAC 正射影像,编号 NAC_DTM_APOLLO11_M150361817_50CM,高程数据为 NAC DTM,编号 NAC_DTM_APOLLO11; (b) Chang'E-4 着陆点(着陆点位于图示中心,中心处正上方为北方向)。底图为经过正射矫正的 LRO NAC 影像,编号 M1303619844LR,高程数据为 NAC DTM,编号 NAC_DTM_CHANGE4

图 1 着陆点附近 1 km² 的三维地形

Fig. 1 The 3D topographies of two 1 km² areas surrounding the landing sites

像的空间分辨率为 1 m,DTM 的空间分辨率为 5 m。

2 方法

本文基于 NAC 正射影像和 DTM 产品通过人工的目视解译识别和圈定着陆点周围的撞击坑,接着根据撞击坑的形貌按照不同的退化程度进行分类,然后对撞击坑进行统计分析,确定着陆区域的地质年龄以及不同退化程度撞击坑的年龄,最后根据撞击坑的深度直径比值的变化计算撞击坑的退化速度,并根据统计的结果对研究区域的地质年龄和撞击历史进行综合分析,总体技术路线如图 2 所示。

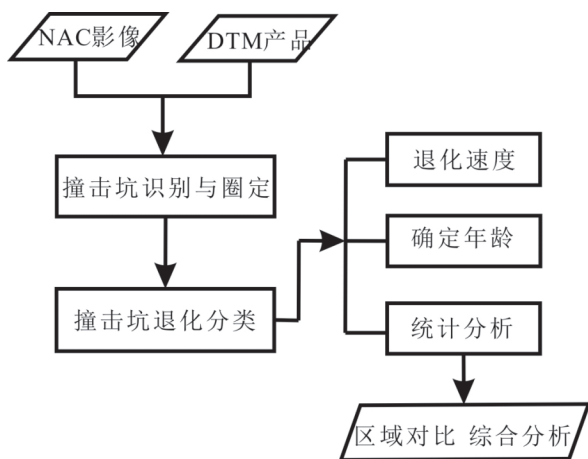


图 2 技术路线图

Fig. 2 The chart of technical procedure

2.1 撞击坑识别与区域定年

撞击坑识别是指从影像中提取和圈定出撞击坑,识别的方法主要有传统的人工目视解译与计算机自动识别两大类(李坤,2013)。其中目视解译方法需要研究人员在影像上手动标绘撞击坑,但是大

区域的撞击坑识别工作量比较大,效率比较低。计算机自动识别是依据影像特征和高程信息,利用合理的算法借助计算机进行自动识别。主要方法有边缘检测、面向对象、霍夫变换等;借助计算机强大的运算能力,这些方法对大区域撞击坑的识别效率很高,但是存在误判、漏判等问题,尤其是对比较小的撞击坑识别精度不是很高(刘宇轩等,2012)。因为本文的研究区域在着陆点附近比较小的范围内,区域内撞击坑尺寸普遍较小,所以我们采用传统的目视解译方法来识别撞击坑。将 NAC 正射影像和 DTM 精确配准,裁剪出着陆点周围 1 km² 的影像,使用 ArcGIS 中的二次开发工具“CraterTools”(Kneissl et al.,2011)通过识别撞击坑边缘均匀分布的三个点圈定撞击坑,之后再使用“CraterSurvey”(Liu et al.,2018)工具计算撞击坑的边缘点、深度等信息。Wang 等(2020)的研究表明在影像上识别和统计出的撞击坑直径大于 10 个像素时比较可靠,所以我们对识别的撞击坑进行筛选,仅将直径大于 5 m 的撞击坑保留下来。

依据撞击坑的大小频率分布可以确定研究区域的地质年龄。Neukum(1983),Stöffler 和 Ryder(2001)的研究指出月球上同一地区在不同时期、相同直径范围的撞击坑大小频率关系是相似的,所以可以根据月球表面撞击坑的生产函数来确定研究区域的地质年龄。结合 Apollo 任务和 Luna 任务采集到的月球样品的同位素绝对定年,Neukum 等(2001)给出了一个修正的月球撞击坑定年方程,研究区域地质单元的年龄 T (Ga) 可以表示为区域中每 km² 内直径大于等于 1 km 的撞击坑个数 $N(1)$ 的函数:

$$N(1) = 5.44 \times 10^{-14} (e^{6.937T} - 1) + 8.38 \times 10^{-4} T \quad (1)$$

依据该关系由研究区域内撞击坑的统计分析就可以确定出该区域的地质年龄。

2.2 撞击坑退化分类与年龄确定

月球表面的撞击坑从形成开始就不断地受到月震、火山、高能粒子、陨石撞击等的影响,其形貌特征一直在变化,从最初的具有新鲜明亮辐射纹、陡峭坑壁的形态,到后来撞击坑边缘模糊直至最后完全消失,这一过程称为撞击坑的退化(Baldwin, 1949)。根据 McGill 和 Wise (1972)、Basilevsky (1976) 等的研究,按照撞击坑不同的退化程度将撞击坑分成 A、AB、B、BC 和 C 五类,其中 A 类为最新的撞击坑, C 类为退化最严重的撞击坑。据此,我们依据撞击坑的形态、阴影等特征,对研究区内不同退化程度的撞击坑进行判别: A 类撞击坑边缘清晰完整尖锐,四周分布有明显的辐射纹或碎石块、溅射物,或某个方向明亮的溅射物分布较远,超过 2 倍的半径,撞击坑深度较大,阴影非常明显; AB 类撞击坑边缘清晰完整较为尖锐,四周有明显的溅射物分布,或某个方向溅射物分布不超过 2 倍的半径,撞击坑深度较大,阴影比较明显,四周看不到明亮的辐射纹或碎石块分布; B 类撞击坑边缘清晰完整较为尖锐,四周看不到明显的溅射物分布,撞击坑深度不大,阴影明显; BC 类撞击坑边缘不完整,某些部分比较模糊,四周看不到溅射物分布,撞击坑深度较小,有阴影但不明显; C 类撞击坑边缘很模糊不完整,退化严重,四周看不到溅射物分布,撞击坑深度很小,基本没有阴影。图 3 展示了不同退化类型撞击坑的示例。

自然状态下撞击坑从形成到完全消失,会经历从 A→C 的连续退化过程,这期间经历的时间为撞击坑的总生命周期。Basilevsky (1976) 的研究表

明,撞击坑刚刚形成时形态为 A,之后大约经过总生命周期的 3% 形态会从 AB 转变到 B,然后大约经过总生命周期的 20% 形态会从 B 转变到 BC,之后大约经过总生命周期的 50% 形态会从 BC 转变到 C。此外 Basilevsky 和 Head (2012) 还给出了一个简单的撞击坑总生命周期估计公式,直径小于 160 m 撞击坑的总生命周期计算式为公式(2),直径大于 160 m 的撞击坑总生命周期则用公式(3)计算:

$$E = 2.5D \quad (2)$$

$$E = 8D - 900 \quad (3)$$

式中 D 为撞击坑的直径(m); E 为撞击坑的总生命周期(Ma)。根据上述的分析及公式(2)和(3),可以计算出不同退化程度的撞击坑的年龄,结果见第 3.2 节。

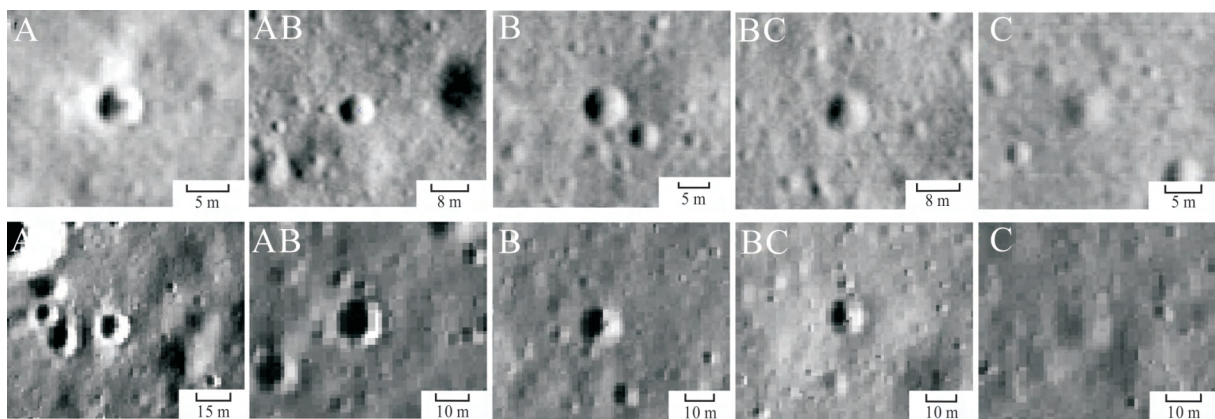
2.3 撞击坑退化速度计算

由于不同大小的撞击坑的退化速度不相同,且撞击坑尺寸越小退化速度越快(Head III et al., 2010),所以对撞击坑退化速度的衡量应采用一个无量纲量。我们通过撞击坑的深度直径比值随时间的变化来衡量撞击坑的退化速度,具体可以通过深径比对时间的偏导数来计算,如式(4)所示(Basilevsky et al., 2014),撞击坑形成之初深度直径比值较大,之后撞击坑退化深径比逐渐减小,到最后撞击坑基本消失时深径比趋于 0。

$$-\frac{\partial(d/D)}{\partial t} = -R \left(\frac{\partial(d/D)}{\partial N} \right) \quad (4)$$

式中 d/D 表示深度直径比; R 为撞击坑的生产率; N 为深径比大于 d/D 的撞击坑个数。对公式(4)积分得到公式(5):

$$d/D = A - BN + (A_0 - A) e^{-CN} \quad (5)$$



第一行为 Apollo 11 着陆区的撞击坑,第二行为 Chang'E-4 着陆区的撞击坑。撞击坑的类别标注在图中左上角,向上为北向

图 3 不同退化类型撞击坑的示例

Fig. 3 Examples of impact craters of different degradation categories

式中 A_0 为撞击坑最初的深度直径比; A 、 B 和 C 是常数, 可以根据研究区域内撞击坑的观测值, 通过最小二乘拟合求得。

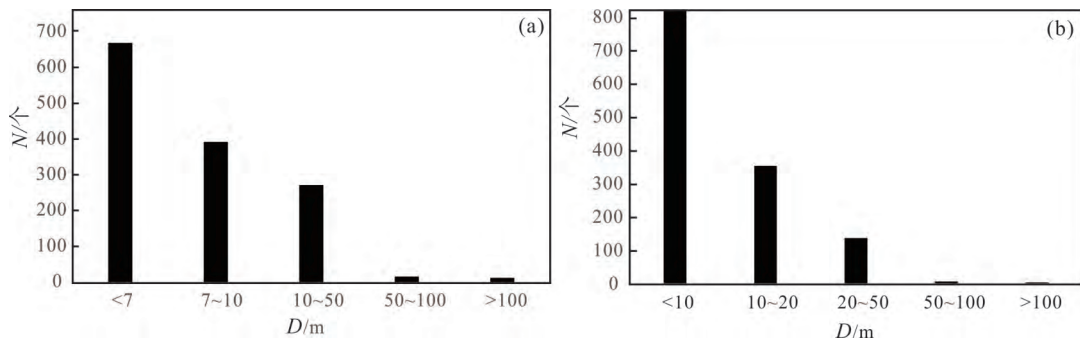
3 结果与讨论

3.1 撞击坑的提取与退化分类

按照前文给出的方法, 在经过处理的正射影像上通过目视解译识别和圈定着陆点附近 1 km^2 内的撞击坑。Apollo 11 着陆点附近共提取直径 5 m 以上的撞击坑 1359 个, 最大的撞击坑直径为 295.68 m , 按照撞击坑的直径将其分为不同的区段, 统计每个区段内撞击坑的个数, 如图 4a 所示, 同时统计撞击坑的总体累计大小频率分布信息, 在对数坐标系下绘制分布图, 如图 5a 所示; 与此类似, 在 Chang'E-4 着陆点附近共提取直径 5 m 以上的撞击坑 1329 个, 最大的撞击坑直径为 317.57 m , 根据撞击坑的直径分为不同的区段, 绘制每个区段的撞击坑个数统计图, 如图 4b 所示, 同时在对数坐标系下绘制着陆点附近撞击坑累计大小频率分布图, 如图 5b 所示。

依据上述不同退化程度的撞击坑的影像特征, 通过目视判别将撞击坑从最新鲜到几乎完全退化分为 A、AB、B、BC 和 C 五类。为了清楚地看到不同退化程度的撞击坑大小频率分布, 我们以撞击坑直径的对数坐标为横轴, 分别统计 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆点附近每一类撞击坑的累计个数并绘制累计大小频率分布图(图 6), 同时根据统计结果分别计算 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆点附近不同退化程度的撞击坑所占的比例, 绘制饼状统计图(图 7)。

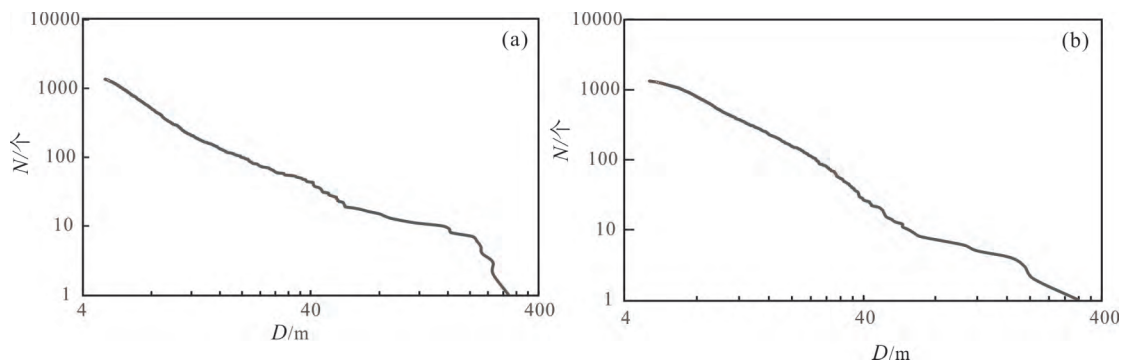
从图 4 和图 5 可以看出, 撞击坑的尺寸越小数量就越多, 撞击坑的累积数量随着撞击坑直径以类似指数的关系增加。图 5 中 Chang'E-4 着陆点附近的撞击坑直径接近 5 m 时累计大小频率分布曲线斜率的绝对值略微有减小的趋势, 这和我们使用的正射影像分辨率有关, 因为在 Apollo 11 着陆区影像的分辨率为 0.5 m , 优于在 Chang'E-4 着陆区的影像分辨率 1 m , 所以在 Chang'E-4 着陆区直径 5 m 的撞击坑已经少于 10 个像素, 可能存在一些漏判导致识别出来的小撞击坑数量减少, 从而使得曲线斜率绝对值减小。通过在双对数坐标中趋势拟合可以发现



(a) Apollo 11 着陆区的统计结果; (b) Chang'E-4 着陆区的统计结果

图 4 不同尺寸的撞击坑个数统计图

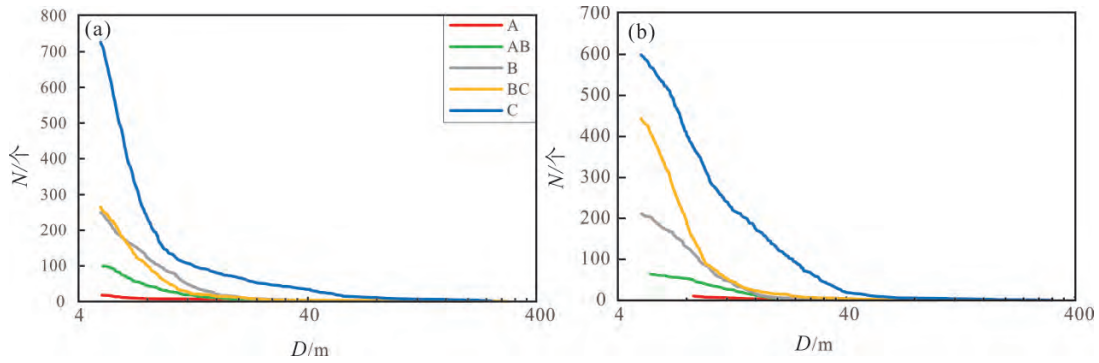
Fig. 4 Statistics of the numbers of impact craters of different sizes



(a) Apollo 11 着陆区的统计结果; (b) Chang'E-4 着陆区的统计结果

图 5 撞击坑累计大小频率分布统计图

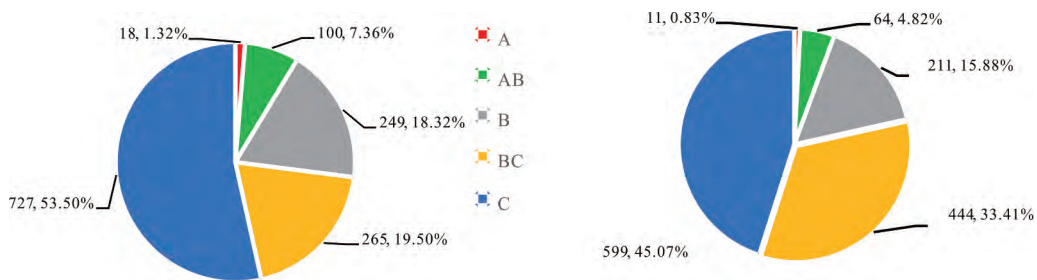
Fig. 5 Statistics of the cumulative size-frequency distributions of impact craters



(a) Apollo 11 着陆区的统计结果; (b) Chang'E-4 着陆区的统计结果

图 6 各类撞击坑累计大小频率分布统计图

Fig. 6 Statistics of the cumulative size-frequency distributions of various impact craters



左图为 Apollo 11 着陆区的统计结果; 右图为 Chang'E-4 着陆区的统计结果

图 7 不同类别撞击坑数量及比例分布统计图

Fig. 7 Statistics of the numbers and proportions of impact craters of different categories

不完全统计的拐点为 6.6 m。这种现象在图 6 中同样可以看出,图 6 中的 C 类、BC 类、B 类撞击坑的累计分布曲线和总体的撞击坑累计分布曲线的变化趋势基本相同,而其他类别的撞击坑因为数量比较少,撞击坑累计大小频率分布随尺寸的指数变化趋势不是很明显。

图 7 给出了不同类别撞击坑的数量分布统计,从中可以发现越是新鲜的撞击坑数量则越少。进一步对比 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区的撞击坑统计信息可以发现, Apollo 11 着陆点附近新鲜的撞击坑和退化严重的撞击坑的数量和比例均比 Chang'E-4 着陆区要多,说明 Apollo 11 着陆区的地质年龄可能比 Chang'E-4 着陆区要大一些(详见 3.2 节)。

3.2 着陆区的地质年龄

分析 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区附近撞击坑的大小频率分布,结合 Neukum 等(2001)生产曲线,选择较大的撞击坑做区域定年分析可以分别得到两个着陆区的地质年龄,如图 8 所示。结果表明两区域地质年龄比较接近, Apollo 11 着陆区地质年龄 $3.70^{+0.052}_{-0.082}$ Ga,与同位素绝对定年的结果 3.53~3.72 Ga 相一致(Iqbal et al., 2019), Chang'E-4 着陆区地质年龄 $3.56^{+0.110}_{-0.610}$ Ga,与前人的研究结果 3.7 Ga 很

接近(Gou et al., 2020)。同时根据前文所述,利用公式(2)和(3)由撞击坑的直径计算出不同退化程度撞击坑的年龄分布范围,将其分别列在表格中如表 1 所示。

从上述结果可以看出, Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区的地质年龄比较接近,不同退化程度撞击坑的年龄范围也比较接近,说明两个区域的地质条件和撞击历史比较相似,使得两区域的对比分析研究很有意义。另外可以发现年龄最大的 C 类撞击坑确定的最大年龄并不等于研究区域的地质年龄,而是远小于研究区域的地质年龄。这个年龄上限主要是较大的撞击坑通过公式(3)计算出来的,说明有大量的撞击坑已经完全退化而无法辨认了。

3.3 撞击坑的退化速度与深径比

使用 ArcGIS 的二次开发工具“CraterSurvey”在 DTM 产品基础上,对前面识别出的每一个撞击坑统计 8 个方向的深度、直径信息,计算并统计每个撞击坑的深度直径比值,如果深径比小于 0.01 则认为撞击坑完全退化。分别统计 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区附近深径比(d/D)大于 0.01 的撞击坑累计个数,结果如图 9 所示。由图 9 可以看出,两个着陆区撞击坑深径比的累积分布曲线形状相似,随着深径

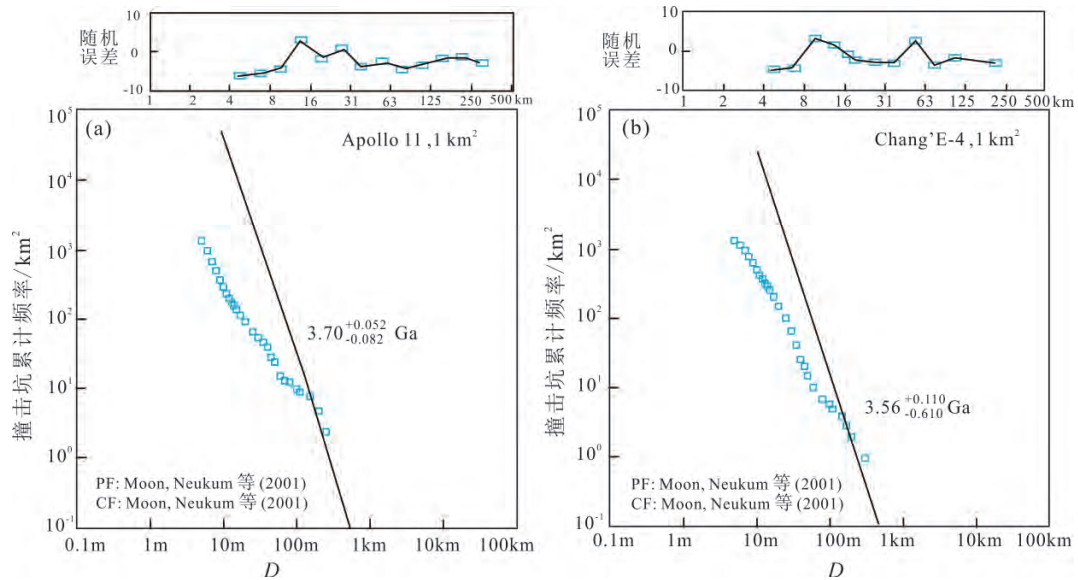


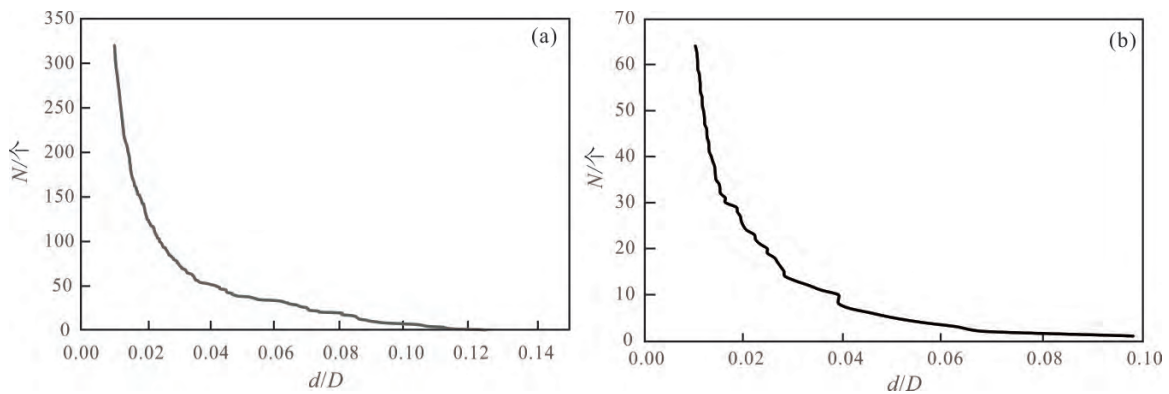
图 8 Apollo 11 着陆区 (a) 和 Chang'E-4 着陆区 (b) 的地质年龄

Fig. 8 Geological ages of the (a) Apollo 11 landing area and (b) Chang'E-4 landing area

表 1 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区不同类型撞击坑的年龄范围

Table 1 Age variations of different categories of impact craters in the landing areas of the Apollo 11 and Chang'E-4

Apollo 11 着陆区				
撞击坑类型	A、AB	B	BC	C
年龄/Ma	0~3.63	3.35~22.39	14.12~293.09	146.09~1122.56
Chang'E-4 着陆区				
撞击坑类型	A、AB	B	BC	C
年龄/Ma	0~4.37	3.63~24.21	12.50~375.40	149.59~1640.18



(a) Apollo 11 着陆区; (b) Chang'E-4 着陆区

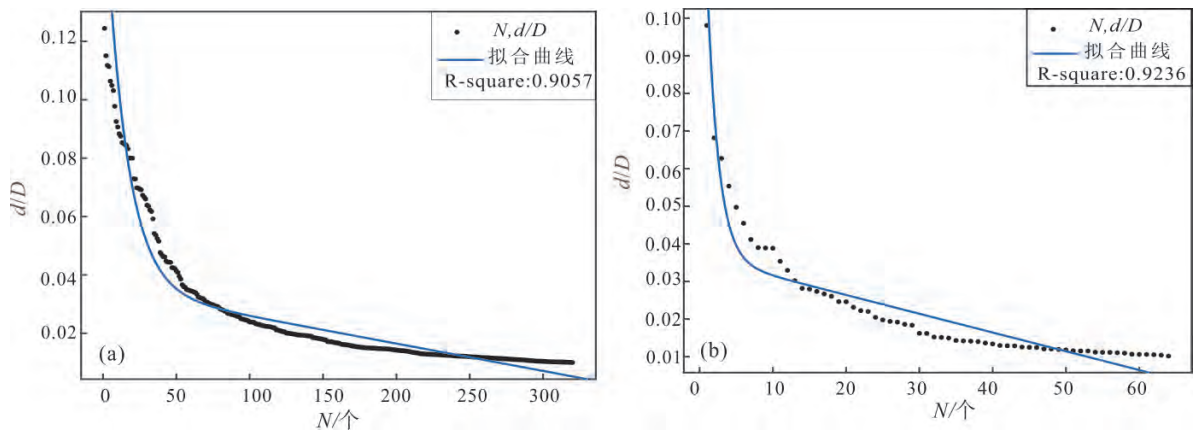
图 9 撞击坑深径比累计频率分布图

Fig. 9 The cumulative frequency distribution diagrams of the crater depths versus diameter ratios of impact craters

比的增大撞击坑个数均急剧减少。但是经过对比能够发现 Chang'E-4 着陆区深径比大于 0.01 的撞击坑数量明显偏少, 累计分布曲线不光滑。接下来分别针对 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区计算撞击坑的退化速度, 依据统计信息绘制撞击坑的深径比 d/D 和累计个数 N 的散点图, 设定公式 (5) 为目标函数进行最小二乘拟合计算, 得到拟合曲线如图 10 所

示。其中拟合参数 A_0 表示撞击坑形成时的初始深径比, 设为 0.18, 计算得到 Apollo 11 着陆区的拟合参数 $A = 0.03523$, $B = 9.373 \times 10^{-5}$, $C = 0.06852$; Chang'E-4 着陆区拟合参数 $A = 0.03639$, $B = 4.990 \times 10^{-4}$, $C = 0.6451$ 。

图 10 显示, Apollo 11 着陆区撞击坑退化速度曲线拟合效果较好, 而 Chang'E-4 着陆区因为撞击



(a) Apollo 11 着陆区; (b) Chang'E-4 着陆区

图 10 撞击坑退化速度曲线拟合

Fig. 10 The fitting curves of degradation velocities of impact craters

坑数量较少及深径比较小拟合效果稍差一些。观察拟合曲线可以发现两个着陆区撞击坑的深径比随撞击坑累计个数的变化趋势是相同的,随着深径比的减小撞击坑的累计个数呈指数关系增加,说明深径比越大撞击坑的退化速度越快。这反映了自然状态下撞击坑的退化不是匀速的,而是最初退化速度很快,随着退化程度的增加,退化速度迅速减慢,直至最终撞击坑完全消失。

4 结论

撞击坑是类地行星表面最常见和最为重要的地质构造之一,在行星科学的研究中有着至关重要的作用。Apollo 11 和 Chang'E-4 是人类探月历史上的里程碑,它们的着陆区是重要的研究区域,本文主要对 Apollo 11 和 Chang'E-4 着陆区附近撞击坑的退化做对比分析,结果表明两个着陆区附近每个不同退化类型的以及总体的撞击坑累计大小频率分布曲线的变化趋势都基本相同,撞击坑的个数随着直径的减小呈指数关系增加,直径在 10 m 以下的小尺寸撞击坑的数量非常多,直径在 100 m 以上的大尺寸撞击坑数量则很少;不同退化类型的撞击坑数量分布并不均匀,越新鲜的撞击坑个数则越少,最鲜的 A 类撞击坑占比很小,而退化严重的 C 类撞击坑占比很大;撞击坑从形成伊始逐渐退化,但是退化速度并不均匀,最初撞击坑的深径比 d/D 较大退化速度较快,随着退化程度的增大,深径比 d/D 呈指数关系迅速衰减退化速度逐渐减慢。两个着陆区的地质年龄和撞击历史比较接近, Apollo 11 着陆区相对更古老一些。

Apollo 11 和 Chang'E-4 的着陆区分别位于月球

正面和背面,具有重要的研究价值,研究区域内撞击坑的统计分析对推断区域的地质年龄和演化历史有着重要的意义,然而撞击坑的形成与演化是一个非常复杂的过程,人们对撞击坑相关科学问题的认知仍然十分有限。受到影像分辨率的限制,我们的统计分析结果存在一些不足之处,有些退化严重的撞击坑可能没有识别出来, Chang'E-4 着陆点附近的撞击坑深径比普遍偏小,在未来借助高分辨率的影像,特别是更加精确的高程模型可以做更加精细的对比分析。

参考文献 (References):

- Baldwin R B. 1949. The face of the moon. Chicago: The University of Chicago Press
- Baldwin R B. 1965. The crater diameter-depth relationship from Ranger VII photographs. *Astronomical Journal*, 70(8) : 545-547
- Basilevsky A T, Head J W. 2012. Age of Giordano Bruno crater as deduced from the morphology of its secondaries at the Luna 24 landing site. *Planetary and Space Science*, 73(1) : 302-309
- Basilevsky A T, Kreslavsky M A, Karachetseva I P, Gusakova E N. 2014. Morphometry of small impact craters in the Lunokhod-1 and Lunokhod-2 study areas. *Planetary and Space Science*, 92: 77-87
- Basilevsky A T. 1976. On the rate of evolution of small lunar craters. In: *Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*, Houston, TX. New York: Pergamon Press, 1005-1020
- Craddock R A, Howard A D. 2000. Simulated degradation of lunar impact craters and a new method for age dating farside mare deposits. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8) : 20387-20410
- Di K C, Zhu M H, Yue Z Y, Lin Y T, Wan W H, Liu Z Q, Gou S, Liu B, Peng M, Wang Y X, Niu S L, Zhang J H, Li J, Xie J F, Xi L H, Yang J F, Xue B. 2019. Topographic evolution of von kármán crater revealed by the lunar rover Yutu-2. *Geophysical Research Letters*, 46(22) : 12764-12770
- Fassett C I, Thomson B J. 2014. Crater degradation on the lunar maria:

- Topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(10): 2255–2271
- 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. 2020. In situ spectral measurements of space weathering by Chang'E-4 rover. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116117
- Head III J W, Fassett C I, Kadish S J, Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, Mazarico E. 2010. Global distribution of large lunar craters: Implications for resurfacing and impactor populations. *Science*, 329(5998): 1504–1507
- Head J W. 1975. Processes of lunar crater degradation: Changes in style with geologic time. *The Moon*, 12(3): 299–329
- Iqbal W, Hiesinger H, van der Bogert C H. 2019. Geological mapping and chronology of lunar landing sites: Apollo 11. *Icarus*, 333: 528–547
- Kneissl T, van Gasselt S, Neukum G. 2011. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments—New software tool for ArcGIS. *Planetary and Space Science*, 59(11–12): 1243–1254
- Kreiter T J. 1960. Dating lunar surface features by using crater frequencies. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 72(428): 393–398
- Liu Z Q, Yue Z Y, Michael G, Gou S, Di K C, Sun S J, Liu J Z. 2018. A global database and statistical analyses of (4) Vesta craters. *Icarus*, 311: 242–257
- Marcus A H. 1967. A Stochastic Model of the formation and survival of lunar craters: VI. Initial depth, distribution of depths, and lunar history. *Icarus*, 6(1–3): 56–74
- McGill G E, Wise D U. 1972. Regional variations in degradation and density of Martian craters. *Journal of Geophysical Research*, 77(14): 2433–2441
- McGill G E. 1974. Morphology of lunar craters: A test of lunar erosional models. *Icarus*, 21(4): 437–447
- 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(1–4): 55–86
- Neukum G, König B, Arkani-Hamed J. 1975. A study of lunar impact crater size-distributions. *The Moon*, 12(2): 201–229
- Neukum G. 1983. Meteoriten bombardement und datierung planetarer oberflächen. Germany: University of München
- Pike R J. 1967. Schroeter's rule and the modification of lunar crater impact morphology. *Journal of Geophysical Research*, 72(8): 2099–2106
- Rajmon D, Spudis P. 2004. Distribution and stratigraphy of basaltic units in Maria Tranquillitatis and Fecunditatis: A Clementine perspective. *Meteoritics & Planetary Science*, 39(10): 1699–1720
- Richardson J E. 2009. Cratering saturation and equilibrium: A new model looks at an old problem. *Icarus*, 204(2): 697–715
- Soderblom L A, Lebofsky L A. 1972. Technique for rapid determination of relative ages of lunar areas from orbital photography. *Journal of Geophysical Research*, 77(2): 279–296
- Soderblom L A. 1970. A model for small-impact erosion applied to the lunar surface. *Journal of Geophysical Research*, 75(14): 2655–2661
- Stöffler D, Ryder G. 2001. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system. *Space Science Reviews*, 96(1–4): 9–54
- Trask N J. 1967. Distribution of Lunar craters according to morphology from Ranger VIII and IX photographs. *Icarus*, 6(1–3): 270–276
- Wang Y C, Xie M G, Xiao Z Y, Cui J. 2020. The minimum confidence limit for diameters in crater counts. *Icarus*, 341: 113645
- 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
- Xie M G, Liu T T, Xu A A. 2020. Ballistic Sedimentation of impact crater ejecta: Implications for the provenance of lunar samples and the resurfacing effect of ejecta on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5): e2019JE006113
- Xie M G, Xiao Z Y, Xu A A. 2019. Time-dependent production functions of lunar simple craters on layered targets with consideration of topographic degradation. *Geophysical Research Letters*, 46(20): 10987–10996
- Xie M G, Zhu M H, Xiao Z Y, Wu Y Z, Xu A A. 2017. Effect of topography degradation on crater size-frequency distributions: Implications for populations of small craters and age dating. *Geophysical Research Letters*, 44(20): 10171–10179
- 邱凯昌, 刘召芹, 刘斌, 王文辉, 彭嫚, 王晔昕, 苟盛, 岳宗玉, 辛鑫, 贾萌娜, 牛胜利. 2019. 多源数据的嫦娥四号着陆点定位. *遥感学报*, 23(1): 177–184
- 李坤. 2013. 月球小型撞击坑形貌特征及退化规律研究. 硕士学位论文. 武汉: 武汉大学
- 刘宇轩, 刘建军, 牟伶俐, 李春来. 2012. 撞击坑识别方法综述. *天文研究与技术*, 9(2): 203–212
- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 刘建忠. 2002. 月球某些资源的开发利用前景. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 498–503
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)