

月球撞击坑辐射纹的形成和消失机制 及可能的年代学应用*

侯旭婷¹ 曹海军¹ 付晓辉^{1,2,3}
张江¹ 李勃¹ 凌宗成^{1,3}

1(山东大学 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室 威海 264209)

2(中国科学院国家天文台 月球与深空探测重点实验室 北京 100101)

3(中国科学技术大学 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 辐射纹是年轻撞击坑周缘呈辐射状分布的明亮细条纹,是月表最显著的地貌特征之一,也是月球科学领域热点研究之一。根据目前对于月球撞击坑辐射纹的形成和类型的认识,分析辐射纹消失相关的空间风化、撞击导致的物质混合等地质过程;比较不同形成年龄撞击坑辐射纹的光学成熟度(OMAT)剖面,发现溅射物逐渐成熟过程中 OMAT 剖面的演变过程,撞击坑辐射纹 OMAT 剖面可采用幂函数描述;OMAT 剖面形态参数与溅射物暴露年龄(撞击坑形成年龄)有很强的相关性。利用已知年龄且存在辐射纹的撞击坑为参考点,建立辐射纹 OMAT 形态参数与撞击坑形成年龄的经验关系,提出了约束撞击坑形成绝对年龄的可行方案。

关键词 辐射纹, 光学成熟度, 年轻撞击坑, 月球

中图分类号 P184

Formation and Degradation of Lunar Crater Ray and Possible Geochronology Application

HOU Xuting¹ CAO Haijun¹ FU Xiaohui^{1,2,3}
ZHANG Jiang¹ LI Bo¹ LING Zongcheng^{1,3}

1(Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Shandong University, Weihai 264209)

2(Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

3(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, University of
Science and Technology, Hefei 230026)

* 国家航天局民用航天技术预研项目(D020201),中国科学院国家天文台月球与深空探测重点实验室开放基金项目和山东大学(威海)青年学者未来计划项目共同资助

2020-10-14 收到原稿, 2021-07-09 收到修定稿

E-mail: fuxh@sdu.edu.cn

Abstract Crater rays are formed during a cratering event as target material is ballistically ejected to distances of many crater radii forming narrow, generally high albedo, approximately linear features extending outward from the crater. The formation and degradation of lunar crater ray is one of the hot topics in lunar science. In this paper, the current understanding of crater ray origin, their different types on lunar surface, and the processes related with degradation of lunar crater ray systems are summarized. After the formation of the crater rays, the fresh and bright ejecta materials around the crater gradually mature under the joint action of a variety of geological processes, and reflectivity gradually disappears in accordance with the background. The OMAT profiles of young craters with various ages were compared. It is found that the average OMAT profile of crater ray could be fitted with the power law function; and that the shape of the OMAT profiles is strongly dependent on the exposure time on lunar surface as well as the crater age. This suggests that by using young crater with ray and known age as the reference, an empirical equation between the shape parameter and age could be built. This study provides a new method for dating young lunar craters.

Key words Crater ray, Optical maturity, Young crater, Moon

0 引言

撞击坑是月球上最显著的地貌特征之一。辐射纹是年轻撞击坑周缘呈辐射状分布的明亮细条纹,一般认为由撞击溅射物中细粒物质组成,自坑缘沿径向向外分布(不一定连续),分布范围达到数个撞击坑直径^[1]。辐射纹在可见光波段的反照率明显高于周缘,在可见光波段的影像图上显示出明亮的特征。在撞击作用或撞击坑相带划分研究中,通常将撞击作用挖掘出并再回落的物质称为溅射物。新鲜撞击坑的辐射纹,相比一般定义的溅射物(1~2倍坑直径范围),分布范围更远,物质组成更细,厚度更小。随着表面物质的不断成熟,古老撞击坑的辐射纹逐渐消失甚至不可见,但溅射物仍然以溅射沉积层或溅射毯的形式保留^[2]。除了月球,撞击坑辐射纹在火星、水星等天体上也有发现^[3, 4]。

辐射纹在月球地质研究中具有重要意义。在月球地质年代划分中,哥白尼纪是月球最年轻的地质年代单元,向前承接爱拉托逊纪。在月球地质编图中,溅射沉积物是运用地层叠置律判断撞击坑新老关系最重要的参考对象。通过撞击坑统计定年法确定撞击坑的年龄需要准确识别相应溅射沉积物的覆盖范围,在此基础上统计后生撞击坑的直径-频率分布^[5]。因此,在月球地质编图中,能否准确识别并表达出特定撞击坑的溅射沉积物分布直接影响地质图的准确性。在月球岩浆作用研究中,依据小型撞击坑溅射物

的光谱特征判断下部玄武岩和表层玄武岩的矿物组成差异,可以推测表层玄武岩厚度和下部玄武岩的成分特征^[6, 7]。

与撞击作用一样,空间风化是月球表面最为活跃的地质过程,风化作用导致表层月壤逐渐成熟。撞击作用挖掘出的新鲜溅射物形成辐射纹后,一方面在空间风化作用下表层5 mm物质逐渐成熟,光谱上表现出可见-近红外波段发生光谱反射率降低、曲线斜率增大、吸收特征弱化等特征^[8];另一方面,陨石撞击作用可挖掘下部新鲜物质并与表层物质不断混合。在这两种机制共同作用下,撞击坑辐射纹逐渐暗淡,由外向内逐渐退缩,最终其光谱特性与背景物质趋于一致。因此,每个撞击坑周缘辐射纹的成熟特征能够反映撞击坑的形成时间或者撞击溅射物的成熟演化历史。

本文根据目前对于月球撞击坑辐射纹的形成和类型,分析了辐射纹消失相关的空间风化等地质过程。基于辐射纹溅射物成熟过程中光学成熟度(OMAT)剖面的演变过程,提出了利用幂函数描述OMAT剖面,建立一种约束撞击坑形成绝对年龄的经验性方案,并对利用撞击坑辐射纹成熟度定年存在的问题和难点进行分析。

1 辐射纹的成因与类型

Shoemaker等^[8]基于对地球上撞击坑的研究,开

展了撞击作用研究。利用地基望远镜获取月表影像, 分析认为辐射纹是主坑和次生坑撞击作用挖掘出的新鲜物质再沉降形成的。随着撞击作用实验模拟和模型计算的进步, 对撞击过程和辐射纹形成的认识不断深化。撞击坑的形成可分为三个阶段^[9]: 压缩、挖掘和改造。在压缩阶段结束后, 撞击点正下方的物质仍向下运动, 不会被溅射出来; 撞击点周围区域获取了向四周辐射的溅射速度, 使得靶区物质向外溅射, 形成溅射幕。对于简单撞击坑, 碎屑物质向外飞溅速度不同。因此, 溅射物厚度从坑缘向外逐渐减小, 溅射物粒度也逐渐变小。Oberbeck 等^[10] 基于对哥白尼撞击坑东南部辐射纹的详细分析, 提出了辐射纹溅射物(primary ejecta)与当地物质(local materials)混合比例及距离有关; 并基于核试验和月球影像的分析结果, 提出了溅射物和当地物质比例随撞击坑大小和距离变化的定量模型。Pieters 等^[1] 定量研究发现在大于 3 个坑半径时, 溅射物与当地物质的比例接近各一半; 在约 6 个坑半径时, 溅射物的含量约为 20%~25%。这一结果与文献 [11] 模型计算的结果基本吻合。

Hawke 等^[2] 观测发现了辐射纹的成因和类型: (1) 物质成分差异, 例如撞击溅射出的高地物质覆盖到暗色的月海之上; (2) 成熟度差异, 撞击挖掘出的新鲜物质覆盖到成熟月表之上; (3) 以上两种过程的共同作用。该研究指出因物质成分差异而形成辐射纹(例如 Lichtenberg 撞击坑), 即使溅射物质达到完全成熟后在月球影像图中仍可辨认, 直到下部物质与溅射物在陨石撞击作用下充分混合才可能最终消失。

2 辐射纹的消失

2.1 与辐射纹消失相关的地质作用

撞击坑辐射纹形成之后, 可能对其改造的地质过程包括: 空间风化导致月壤成熟, 陨石撞击导致物质混合, 局部坡度较大(坡度 $>15^{\circ}\sim 35^{\circ}$)引起物质坡移等。具体而言, 空间风化作用导致月壤可见近红外光谱发生变化^[12]; 陨石/微陨石撞击引起月壤垂直方向的新鲜物质与成熟物质混合、原始溅射物与当地物质混合^[13]; 物质坡移导致坑缘上部新鲜物质暴露, 以及坡角处新鲜物质与成熟月壤的混合^[14]。

撞击坑坑缘沿径向向外, 不同位置辐射纹消失的机制有差异。撞击坑坑缘处一般坡度较大, 坑缘处表面物质不断沿坡下滑, 使得下部新鲜物质不断

暴露。因此, 坑缘处是辐射纹物质成熟度最低的区域。在此区域, 回落的溅射物粒度最大, 抗空间风化能力强。随着与撞击坑距离的增加, 溅射物的厚度逐渐减小。这部分辐射纹消失是在空间风化(space weathering)与物质混合(soil gardening)的共同作用下, 溅射物逐渐成熟, 其反照率与周缘环境逐渐一致。尽管目前尚未有月壤混合和空间风化速率的准确数值, 推测二者最终在溅射物上方形成深度达 5 mm 的空间风化薄层^[15]。

总体而言, 构成撞击坑辐射纹的溅射物厚度从坑缘向外逐渐减薄, 具体厚度值可依据文献 [16] 提出的经验方程估算。陨石撞击挖掘的深度有限, 在溅射物厚度较小区域, 撞击作用可将下部新鲜物质有效挖出并发生空间风化, 最终达到成熟状态。因此, 撞击坑辐射纹总是从外向内逐渐消失。

对于因物质成分差异导致的辐射纹, 其最终消失不但要求物质达到成熟, 而且需要充分的撞击作用翻转, 使得主坑挖掘的溅射物与当地物质充分混合, 溅射物所占比例不断降低。因此, 成分差异形成的辐射纹的存留时间比因成熟度差异而导致的辐射纹要长得多。

2.2 撞击坑辐射纹成熟度剖面演化

通常用以表征月壤成熟度特征参数包括 Is/FeO 比值和 OMAT 光学成熟度两个指标^[13]。前者常用于月壤样品的实验室分析, 后者主要应用于遥感和光谱数据分析。OMAT 是在系统分析月壤光谱特征基础上提出的(定义符号 O_{OMAT}), 其计算公式为^[17]

$$O_{\text{OMAT}} = \left[(R_{750} - x_0) - \left(\frac{R_{950}}{R_{750}} - y_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

其中, R_{750} 表示波长为 750 nm 的光在一个象元或区域中的反射率, R_{950} 表示波长为 950 nm 的光在一个象元或区域中的反射率, x_0 和 y_0 在 Clementine 多光谱数据中的值分别为 0.08 和 1.19。OMAT 值越大表示该像元或区域越不成熟, 形成时间越晚。

Grier 等^[18] 利用 Clementine 月球探测器获取的月表 UV-VIS 5 波段的光谱数据, 反演撞击坑周缘溅射物的光学成熟度 OMAT, 分析月球上直径大于 20 km 撞击坑辐射纹的 OMAT 径向剖面。OMAT 剖面以到撞击坑中心的距离为 x (单位为坑直径/半径的倍数), 光学成熟度 OMAT 平均值为 y 。通常选择撞击坑 15 倍直径外 20 km $\times$ 20 km 区域 OMAT 的平均值

作为背景值,其代表了该区域溅射物完全成熟的状态。

不同成熟特征的辐射纹显示出不同 OMAT 剖面特征。图 1 给出了 Apollo16 着陆区 South Ray 和 North Ray 两个撞击坑及 Autolycus 撞击坑的 OMAT 剖面。由于其形成年龄不同,三者在坑缘处的 OMAT 值及 OMAT 剖面形态显示出明显差异。三者也指示了撞击坑辐射纹在消失的过程,显示了坑缘物质的成熟度和从坑缘向外沿径向成熟度剖面均随时间规律变化。

2.3 辐射纹的存留时间

撞击坑辐射纹在月球地质年代研究中是重要的年代标志。辐射纹的存留时间主要通过研究月球上典型带辐射纹撞击坑的形成时间进行推测。

哥白尼撞击坑(直径 95 km)是月球表面辐射纹系统最显著的大型撞击坑之一,该撞击坑的形成是月球地质历史上的标志性事件。因此,确定哥白尼撞击坑的形成时间,对于认识月球上撞击坑辐射纹的存留时间具有重要意义^[19]。Apollo 12 采样区落在哥白尼撞击坑辐射纹上。Meyer 等^[20]最早提出对此次任务采样返回的 KREEP 玻璃进行同位素定年来确定哥白尼撞击坑的形成时间。Apollo 样品 12032 和 12033 的宇宙射线暴露年龄为 800~850 Ma^[21-23]。而对该样品中霏细岩碎屑的放射性同位素定年结果为 800 ± 15 Ma^[24, 25]。Barra 等^[26]通过对 12032 和 12033 样品的 Ar-Ar 定年,推测哥白尼撞击坑形成时间为 782 ± 21 Ma。针对这些年龄数据的差异,Stöffler 等^[27]提出以下分析:哥白尼撞击坑并未挖掘出 KREEP 层,KREEP 成分玻璃年龄不能代表该撞击坑的形成时间;玻璃样品仅在 Apollo12 着陆区 Heat 撞击坑周围发现,不具有广泛代表意义,也与撞击溅射物广泛分布的特征不符。Stöffler^[27]最终

提出哥白尼撞击坑的形成时间为 800 ± 15 Ma,或者小于 2 Ga。

月面另外一个发育辐射纹的典型撞击坑是位于月球正面南半球的第谷坑。其明亮的辐射纹系统清晰可见,最大长度达 2200 km。Apollo 17 着陆区 South massif 北坡发育的滑坡被认为与该撞击时间中的次生撞击过程有关;着陆区中部的坑群由于与滑坡具有相同的绝对模式年龄,被认为代表了第谷撞击坑的溅射物分布^[28]。实验室中对 Apollo17 任务采集滑坡样品和坑群物质的定年结果为 109 Ma,该年龄值被认为代表了第谷撞击坑的形成年龄^[29]。但是也有学者认为 Apollo17 着陆区的滑坡和坑群等形成与第谷坑撞击事件的关系较为牵强^[30]。

Werner 等^[31]采用特殊的方法研究辐射纹撞击坑的形成时间。以月球南北纬 70°范围为研究对象,统计了该区域内带辐射纹撞击坑,利用撞击坑直径-频率方法研究这些撞击坑辐射纹的存留时间。研究发现,所统计的 1615 个撞击坑落在 750 Ma 等时线上,并且月海和高地因矿物组成不同,其月壤成熟的效率存在微弱差异。基于此结果,Werner 等^[31]建议将哥白尼纪-艾拉托逊纪年龄界限变为 750 Ma。

前文提到,因物质成分差异导致的辐射纹相比因成熟度形成的辐射纹存留时间更长。例如,Lichtenberg 撞击坑(直径 20 km)形成于 1.68 Ga,甚至更早^[32]。根据 Apollo 样品的分析结果,推测 Aristillus (直径 39 km)和 Autolycus(直径 55 km)撞击坑形成年龄为 1.29 Ga^[33]和 2.1 Ga^[34],部分物质成分辐射纹的存留时间甚至达到 3 Ga。如果以 1.1 Ga 为哥白尼-艾拉托逊纪分界线方法,以上撞击坑均应属于艾拉托逊纪,但其发育辐射纹是定义哥白尼纪撞击坑的特征。

3 撞击坑辐射纹定年

3.1 月球年轻地质体定年的难题

撞击坑直径-频率分布定年方法(Crater Size-Frequency Distribution, CSFD),简称撞击坑统计定年法,基于 Apollo 和 Luna 采样返回月球样品的同位素定年结果,通过统计特定地质单元区域内撞击坑直径和频率分布,确定月球表面地质单元年龄^[35]。而且随着月表影像分辨率的提升,还可以通过对撞击坑连续溅射毯的统计定年确定撞击坑形成时间,例如布鲁诺撞击坑^[36]。但是该方法获得的绝对模式年龄会受

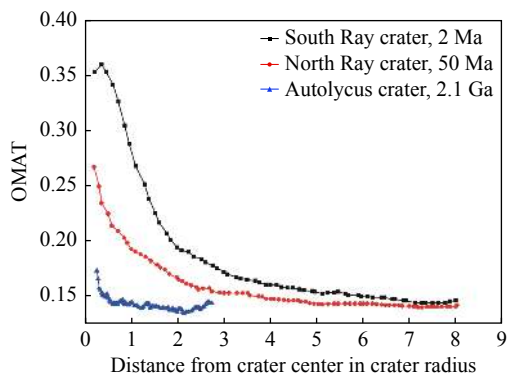


图 1 月球年轻撞击坑辐射纹光学成熟度剖面

Fig. 1 OMAT profile of three lunar young craters

到一系列因素的影响:月球表面的改造过程,例如熔岩流的覆盖、撞击溅射物的覆盖、新撞击坑的叠覆等都会对撞击坑数量统计产生影响;二次撞击坑、火山口则会对撞击坑的识别产生干扰;遥感图像的质量,例如分辨率、太阳高度角、拍摄倾角等也会对撞击坑的统计产生较大影响^[37, 38]。

在月球地质年代划分过程中,关于爱拉托逊纪与哥白尼纪的年龄界限一直没有定论^[30]。并且尚未对哥白尼纪进一步细分。Wang等^[39]和Ding等^[40]尝试将月球哥白尼纪地层划分为3个统,划分依据包括撞击坑辐射纹退化程度、辐射纹色调、小型撞击坑分布的密度等。但是这种划分方式缺乏量化依据,没有将辐射纹成熟度特征考虑在内。

3.2 辐射纹消失时间及对空间风化速率的约束

尽管已开展了大量空间风化效应和过程研究,目前对月球和其他无大气天体表面空间风化速率(space weathering rate)的认知仍十分有限^[41-43]。分析其原因主要包括:除了各种撞击作用,太阳风粒子注入对空间风化作用也有影响;不同天体空间风化作用存在差异;确定年轻地质体/地质单元绝对年龄的方法可能会受到一些因素的影响。一些研究通过实验估算了天体表面新鲜物质经空间风化后成熟并保持光谱性质相对稳定的时间,但这些数值相差较大(2~3个数量级)。Sasaki等^[44]根据脉冲激光烧蚀实验的结果,估计小行星上空间风化的时间为100 Ma。Strazzulla等^[45]基于离子注入实验前后普通球粒陨石可见近红外光谱特征的变化,估算S型近地小行星上空间风化作用造成的类似实验中,光谱变化时间为0.01~1 Ma。Willman等^[46]利用多个不同小行星的光谱特征研究,推测空间风化作用的时间尺度为 570 ± 220 Ma。Vernazza等^[47]则提出空间风化作用速率的阶段性变化,在前1 Ma内小行星表面光谱特征变化明显,之后的 2×10^3 Ma则表现为缓慢的变化,而且小行星自身矿物组成对空间风化速率具有明显影响。Keller等^[48]研究了Apollo月球样品和Itokawa小行星样品,推算月球上月壤成熟的时间尺度为1~10 Ma, Itokawa小行星上为0.1 Ma。

月球撞击坑辐射纹伴随主坑形成。表面物质经历空间风化作用而成熟,辐射纹也逐渐消失。撞击坑周缘辐射纹物质形成的成熟度和从坑缘向外沿径向成熟度的剖面均随时间规律变化。因此,年轻撞击坑

辐射纹可作为研究空间风化作用的试验场。

3.3 利用辐射纹成熟度定年

在月球地质单元年代学研究中,除了撞击坑直径-频率法之外,还发展了其他可用于确定地质体相对和绝对年龄的方法:(1)利用月表物质的光学特征OMAT判断相对年龄^[17, 18];(2)利用撞击坑在形貌上的退化特征判断年龄^[49-53];(3)利用撞击坑雷达图像所显示的亮色不连续溅射物分布确定撞击坑年龄^[54, 55];(4)利用撞击坑周缘溅射物中石块含量确定撞击坑年龄^[56]。这里主要研究月球撞击坑辐射纹成熟度剖面与撞击坑年龄的相关性。

建立辐射纹光学成熟度剖面的定量模型,首先应遴选出已知形成年龄且发育辐射纹的撞击坑作为参考点。表1列出了已知形成年龄的哥白尼纪撞击坑。北辐射纹撞击坑(North Ray crater)、南辐射纹撞击坑(South Ray crater)和科恩撞击坑均为Apollo采样区内的小型撞击坑。返回样品的实验室分析获得了其形成年龄。其他撞击坑年龄是通过撞击坑溅射毯撞击坑直径-频率统计定年得到的。除了形成年龄,还需要对这些发育辐射纹撞击坑的类型、辐射纹物质化学成分、光谱特征等基本属性及所处区域地质背景进行调研、统计和数据整理,建立撞击坑辐射纹数据库,作为撞击坑辐射纹成熟度定年的参考点。撞击坑辐射纹有不同成因,为了简化模型,首先遴选出因成熟度而非物质成分差异导致的辐射纹作为研究对象。利用已获得的全月FeO和TiO₂含量数据圈出全月物质成分分布均匀区域,从月海区和高地区分别遴选出因成熟度差异而显示辐射纹的撞击坑。

截至目前,美国Clementine UV-VIS光谱仪、日本月亮女神矿物成像光谱仪MI、中国嫦娥一号干涉成像光谱仪IIM获取的多光谱/高光谱数据均可用于反演全月的月壤成熟度指数OMAT^[17, 62, 63]。其中,利用MI和IIM计算光学成熟度OMAT的方法借鉴了Lucey等^[17]提出的公式。基于以上光谱数据可获得月球南北纬70°区域光学成熟度填图,提取所研究撞击坑径向及自坑缘向外辐射纹的光学成熟度剖面。鉴于撞击坑辐射纹长度的不均匀性和所选剖面的代表性,建议所选择剖面上的辐射纹应连续,所在区域FeO和TiO₂含量分布均一,且明显无成串和呈链的二次撞击坑;剖面的距离不小于撞击坑半径5倍;每个撞击坑沿不同方向至少提取10条;剖面分

表 1 辐射纹统计定年中可作为参考点的撞击坑
Table 1 Lunar reference crater locations, size and ages

撞击坑名称	纬度/(°)N	经度/(°)E	直径/km	模式年龄/Ma	参考文献
阿里斯塔克斯(Aristarchus)	23.7	312.5	40	175–9.1/+8.8	[57]
比尔吉A(Byrgius A)	–24.6	296.2	18.7	47 ± 14.1	[36]
哥白尼(Copernicus)	9.6	339.9	97	797–52/+51	[19]
布鲁诺(Giordano Bruno)	36	102.9	22.1	4 ± 1.2	[36]
杰克逊(Jackson)	22.1	196.7	72.1	147 ± 3.8	[58]
金(King)	4.9	120.5	77	992–89/+87	[59]
摩尔(Moore F)	37.3	185	23.3	41 ± 12.3	[36]
尼科(Necho)	–5.3	123.3	33	80 ± 24	[24]
第谷(Tycho)	–43.3	348.8	86	85–18/+15	[16]
北辐射纹(North Ray)	–8.82	15.48	0.95	50	[29]
南辐射纹(South Ray)	–9.05	15.38	0.7	2	[60]
科恩(Cone)	–3.65	342.53	0.34	26	[61]

布至少涵盖撞击坑 180°扇形区域。

采用幂函数对撞击坑辐射纹 OMAT 剖面进行拟合,有

$$O_{\text{OMAT}} = (a - b)L^m + b. \quad (2)$$

其中, O_{OMAT} 表示光学成熟度, L 为撞击坑中心距离与撞击坑半径的比值, a 为撞击坑缘最新鲜物质的光学成熟度, b 为撞击坑辐射纹光学成熟度背景值, m 为曲线形态变化因子($m \leq 0$)。参数($a-b$)控制该曲线的高度, m 控制该曲线的弯曲程度。这里研究的撞击坑均为哥白尼纪撞击坑,月面影像上可见明显的辐射纹发育,撞击坑直径小于 100 km。图 2 给出了 Apollo16 着陆区 South Ray 和 North Ray 两个撞击坑 OMAT 剖面拟合结果。二者形成年龄分别为 2 Ma 和 50 Ma, OMAT 背景值接近;坑缘 OMAT 和变化因子 m 相差较大,反映出年龄对二者的控制。

一个撞击坑形成后,其坑缘物质逐渐成熟,光学成熟度数值从大变小。同时其成熟度剖面曲线形态也发生规律性变化。撞击坑形成年龄可通过对其溅射毯上撞击坑的统计定年确定,也可以采用公开发表的撞击坑年龄数据确定。通过建立成熟度剖面形态参数 m 与撞击坑年龄 T 之间的关系,提出一种能够根据 m 约束撞击坑年龄的经验方法。

4 辐射纹定年存在的难题

4.1 辐射纹原始状态确定

撞击坑辐射纹形成后在空间风化作用下不断成熟。为了建立利用辐射纹成熟度 OMAT 剖面确定撞

击坑形成年龄的定量方法,必须对撞击坑原始状态(辐射纹分布范围、长度以及溅射物厚度、物质组成、成熟度等)有明确的认识。确定撞击坑原始状态一方面有赖于对月球上新形成撞击坑的研究^[64],另一方面可以通过模型计算推测撞击坑原始状态。Speyerer 等^[65]报道了利用 LROC 发现的 222 个月球新撞击坑。但是利用这些小撞击坑(直径 < 43 m)状态推测直径 20 km 以上撞击坑辐射纹的分布范围、长度以及溅射物厚度和组成等是否可靠尚存疑问。

对于撞击溅射物厚度及辐射纹长度^[16, 66],目前已建立各种数值模拟方法进行计算。这些模型计算结果与溅射物实际状态的差异尚不清楚,而这些溅射物厚度等是决定溅射物成熟机制和成熟速度的关键参数。

4.2 次生及新撞击坑的影响

次生撞击坑分布不规则,辐射纹不连续,次生撞击坑挖掘物质与溅射物的混合也不均匀,导致局部溅射物厚度很难预测;在撞击坑辐射纹形成之后,新形成的撞击坑溅射物可能覆盖到较老的辐射纹上,这导致辐射纹成熟过程中存在较年轻撞击坑引起的物质横向混合。

总而言之,次生撞击坑和年轻撞击坑的形成均会影响原辐射纹溅射物的物质组成及成熟度等特性,给利用辐射纹成熟度定年引入较大误差。

5 结论与展望

撞击坑辐射纹的形成和消失涉及月面撞击作用、

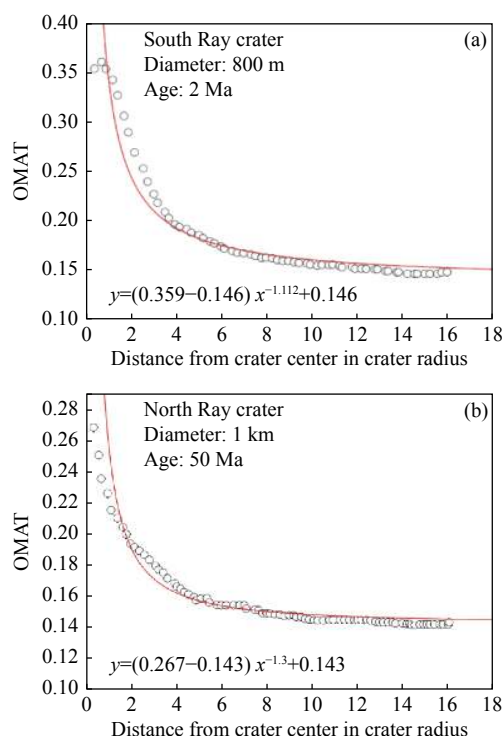


图2 North Ray 和 South Ray 撞击坑 OMAT 幂函数拟合

Fig. 2 OMAT profile of lunar North Ray and South Ray craters

空间风化作用、物质坡移、月壤翻转混合等多种地质过程。撞击坑辐射纹形成后,在其上新鲜、明亮的溅射物多种地质过程的共同作用下发展成熟,反射率逐渐与背景一致而消失。

以二个不同形成年龄撞击坑辐射纹的光学成熟度(OMAT)剖面为例,经比较发现溅射物成熟过程中 OMAT 剖面的演变过程:撞击坑辐射纹 OMAT 剖面可采用幂函数描述;OMAT 剖面形态参数与溅射物暴露年龄(撞击坑形成年龄)有很强的相关性。基于以上观察,提出利用已知年龄且存在辐射纹的撞击坑为参考点,建立辐射纹 OMAT 形态参数与撞击坑形成年龄的经验关系,从而提出约束撞击坑形成绝对年龄的经验性方案。

撞击坑辐射纹厚度、长度和分布的原始状态参数是利用撞击坑辐射纹定年的关键。目前通过已有的数值模拟和经验方程等尚无法给出准确描述。另外,次生撞击坑和年轻撞击坑的形成均会影响原辐射纹溅射物的物质组成、成熟度等性质,对辐射纹成熟度定年引入较大误差。

参考文献

- [1] PIETERS C M, ADAMS J B, MOUGINIS-MARK P J, *et al.* The nature of crater rays: The Copernicus example[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1985, **90**(B14): 12393-12413
- [2] HAWKE B R, BLEWETT D T, LUCEY P G, *et al.* The origin of lunar crater rays[J]. *Icarus*, 2004, **170**(1): 1-16
- [3] MCEWEN A S, PREBLICH B S, TURTLE E P, *et al.* The rayed crater Zunil and interpretations of small impact craters on Mars[J]. *Icarus*, 2005, **176**(2): 351-381
- [4] NEISH C D, BLEWETT D T, HARMON J K, *et al.* A comparison of rayed craters on the Moon and Mercury[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(10): 2247-2261
- [5] NEUKUM G, IVANOV B A, HARTMANN W K. Cratering records in the inner solar system in relation to the Lunar reference system[J]. *Space Science Reviews*, 2001, **96**(1): 55-86
- [6] BUDNEY C J, LUCEY P G. Basalt thickness in Mare Humorum: The crater excavation method[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, **103**(E7): 16855-16870
- [7] THOMSON B J, GROSFILS E B, BUSSEY D B J, *et al.* A new technique for estimating the thickness of mare basalts in Imbrium Basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**: 12
- [8] FU X H, ZOU Y L, ZHENG Y C, *et al.* Effects of space weathering on diagnostic spectral features: results from He⁺ irradiation experiments[J]. *Icarus*, 2012, **219**(2): 630-640
- [9] SHOEMAKER E M. Preliminary Analysis of the Fine Structure of the Lunar Surface in Mare Cognitum[M]. Cambridge, Cambridge: University Press, 1965
- [10] MELOSH H J. Impact Cratering: a Geologic Process[M]. New York: Oxford University Press (Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 11), 1989: 253
- [11] OBERBECK V R. A mechanism for the production of lunar crater rays[J]. *The Moon*, 1971, **2**(3): 263-278
- [12] OBERBECK V R. The role of ballistic erosion and sedimentation in lunar stratigraphy[J]. *Reviews of Geophysics*, 1975, **13**(2): 337-362
- [13] LUCEY P, KOROTEV R L, GILLIS J J, *et al.* Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interactions[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, **60**(1): 83-219
- [14] XIAO Z Y, ZENG Z X, DING N, *et al.* Mass wasting features on the Moon – how active is the Lunar surface[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, **376**: 1-11
- [15] BORG J, COMSTOCK G M, LANGEVIN Y, *et al.* A Monte Carlo model for the exposure history of lunar dust grains in the ancient solar wind[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, **29**(1): 161-174
- [16] MCGETCHIN T R, SETTLE M, HEAD J W. Radial

- thickness variation in impact crater ejecta: implications for lunar basin deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, **20**(2): 226-236
- [17] LUCEY P G, BLEWETT D T, TAYLOR G J, *et al.* Imaging of lunar surface maturity[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, **105**(E8): 20377-20386
- [18] GRIER J A, MCEWEN A S, LUCEY P G. Optical maturity of ejecta from large rayed lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, **106**(E12): 32847-32862
- [19] HIESINGER H, VAN DER BOGERT C H, PASCKERT J H, *et al.* How old are young lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12)
- [20] MEYER JR C, BRETT R, HUBBARD N J, *et al.* Mineralogy, chemistry, and origin of the KREEP component in soil samples from the Ocean of Storms[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1971
- [21] ALEXANDER JR E C, BATES A, COSCIO JR M R, *et al.* K/Ar dating of lunar soils[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1976
- [22] EBERHARDT P, GEISS J, GRÖGLER N, *et al.* How old is the crater copernicus[J]. *The moon*, 1973, **8**(1): 104-114
- [23] SILVER L T. U-Th-Pb isotope systems in Apollo 11 and 12 regolithic materials and a possible age for the Copernican impact[J]. *Eos Transactions AGU*, 1971, **52**: 534
- [24] BOGARD D D, GARRISON D H, SHIH C Y, *et al.* ^{39}Ar - ^{40}Ar dating of two lunar granites: The age of Copernicus[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, **58**(14): 3093-3100
- [25] WENTWORTH S J, MCKAY D S, LINDSTROM D J, *et al.* Apollo 12 ropy glasses revisited[J]. *Meteoritics*, 1994, **29**(3): 323-333
- [26] BARRA F, SWINDLE T D, KOROTEV R L, *et al.* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Apollo 12 regolith: Implications for the age of Copernicus and the source of nonmare materials[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, **70**(24): 6016-6031
- [27] STÖFFLER D, RYDER G, IVANOV B A, *et al.* Cratering history and Lunar chronology[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, **60**(1): 519-596
- [28] NEUKUM G, KÖNIG B. Dating of individual Lunar craters[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1976
- [29] ARVIDSON R, DROZD R, GUINNESS E, *et al.* Cosmic ray exposure ages of Apollo 17 samples and the age of Tycho[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1976
- [30] STÖFFLER D, RYDER G. Stratigraphy and isotope ages of Lunar geologic units: chronological standard for the inner solar system[J]. *Space Science Reviews*, 2001, **96**(1): 9
- [31] WERNER S C, MEDVEDEV S. The Lunar rayed-crater population—Characteristics of the spatial distribution and ray retention[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **295**(1/2): 147-158
- [32] HIESINGER H, HEAD J W, WOLF U, *et al.* Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, **108**(E7).
- [33] BERNATOWICZ T, HOHENBERG C M, HUDSON B, *et al.* Argon ages for imbrium consortium samples 14064 and 15405[C]//Lunar and Planetary Science Conference, 1977
- [34] RYDER G, BOGARD D, GARRISON D. Probable age of autolycus and calibration of Lunar stratigraphy[J]. *Geology*, 1991, **19**(2): 143-146
- [35] NEUKUM G, KÖNIG B, FECHTIG H, *et al.* Cratering in the Earth-Moon system—Consequences for age determination by crater counting[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1975
- [36] MOROTA T, HARUYAMA J, MIYAMOTO H, *et al.* Formation age of the lunar crater Giordano Bruno[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2009, **44**(8): 1115-1120
- [37] XIAO Zhiyong. Comparison between Copernican-aged Geological Activity on the Moon and Kuiperian-aged Geological Activity on Mercury[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013 (肖智勇, 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(武汉), 2013)
- [38] ZHAO Jiannan, HUANG Jun, XIAO Long, *et al.* Crater Size-Frequency Distribution Measurements and Age Determination of Sinus Iridum[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, **38**(2): 351-361 (赵健楠, 黄俊, 肖龙, 等. 撞击坑统计定年法及对月球虹湾地区的定年结果[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, **38**(2): 351-361)
- [39] WANG Liang, DING Xiaozhong, HAN Tonglin, *et al.* The digital geological mapping and geological and geomorphic features of Tycho Crater of the Moon[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, **22**(2): 251-262 (王梁, 丁孝忠, 韩同林, 等. 月球第谷撞击坑区域数字地质填图及地质地貌特征[J]. 地学前缘, 2015, **22**(2): 251-262)
- [40] DING Xiaozhong, WANG liang, GUO Dijun, *et al.* Study on geological evolution and stratigraphic features of the Copernican Period of the Moon[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, **32**(1): 10-18 (丁孝忠, 王梁, 郭弟均, 等. 月球哥白尼纪地层特征与地质演化研究[J]. 岩石学报, 2016, **32**(1): 10-18)
- [41] FU Xiaohui, ZOU Yongliao, ZHENG Yongchun, *et al.* Space weathering processes and effects on the Moon[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(6): 705-715 (付晓辉, 邹永廖, 郑永春, 等. 月球表面太空风化作用及其效应[J]. 空间科学学报, 2011, **31**(6): 705-715)
- [42] LI Yang, LI Xiongyao, WANG Shijie, *et al.* Space weathering origin of microstructure rims of Lunar soil grains[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(6): 603-612 (李阳, 李雄耀, 王世杰, 等. 月壤颗粒微观环带的太空风化成因[J]. 地球科学进展, 2012, **27**(6): 603-612)
- [43] TANG Hong, LI Xiongyao, WANG Shijie, *et al.* The ori-

- gin and simulation of nanophase iron in Lunar soil[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**: 507-514 (唐红, 李雄耀, 王世杰, 等. 月壤中纳米金属铁的太空风化成因及模拟方法分析[J]. 地球科学进展, 2011, **26**: 507-514)
- [44] SASAKI S, NAKAMURA K, HAMABE Y, *et al.* Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering[J]. *Nature*, 2001, **410**(6828): 555
- [45] STRAZZULLA G, DOTTO E, BINZEL R, *et al.* Spectral alteration of the meteorite Epinal (H5) induced by heavy ion irradiation: A simulation of space weathering effects on near-Earth asteroids[J]. *Icarus*, 2005, **174**(1): 31-35
- [46] WILLMAN M, JEDICKE R, NESVORNÝ D, *et al.* Redetermination of the space weathering rate using spectra of Iamini asteroid family members[J]. *Icarus*, 2008, **195**(2): 663-673
- [47] VERNAZZA P, BINZEL R P, ROSSI A, *et al.* Solar wind as the origin of rapid reddening of asteroid surfaces[J]. *Nature*, 2009, **458**(7241): 993
- [48] KELLER L P, BERGER E L, CHRISTOFFERSEN R, *et al.* Direct determination of the space weathering rates in lunar soils and Itokawa regolith from sample analyses[C]//47th Lunar and Planetary Science Conference, 2016
- [49] CRADDOCK R A, HOWARD A D. Simulated degradation of lunar impact craters and a new method for age dating farside mare deposits[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, **105**(E8): 20387-20401
- [50] FASSETT C I, THOMSON B J. Crater degradation on the lunar maria: topographic diffusion and the rate of erosion on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, **119**(10): 2255-2271
- [51] POHN H A, OFFIELD T W. Lunar crater morphology and relative-age determination of lunar geologic units — Part 1. Classification[J]. *US Geological Survey Professional Paper*, 1970: 153-162
- [52] SWANN G A, REED V S. A method for estimating the absolute ages of small Copernican craters and its application to the determination of Copernican meteorite flux[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 1974
- [53] TRANG D, GILLIS-DAVIS J J, BOYCE J M. Absolute model ages from lunar crater morphology[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(4): 725-738
- [54] BELL S W, THOMSON B J, DYAR M D, *et al.* Dating small fresh lunar craters with Mini-RF radar observations of ejecta blankets[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12): n/a-n/a
- [55] THOMPSON T W, ZISK S H, SHORTHILL R W, *et al.* Lunar craters with radar bright ejecta[J]. *Icarus*, 1981, **46**(2): 201-225
- [56] GHENT R R, HAYNE P O, BANDFIELD J L, *et al.* Constraints on the recent rate of lunar ejecta breakdown and implications for crater ages[J]. *Geology*, 2014, **42**(12): 1059-1062
- [57] ZANETTI M, HIESINGER H, VAN DER BOGERT C H, *et al.* Aristarchus crater: Mapping of impact melt and absolute age determination//42nd Lunar and Planetary Science Conference, 2011 (The Woodlands, Texas)
- [58] VAN DER BOGERT C H, HIESINGER H, MCEWEN A S, *et al.* Discrepancies between crater size-frequency distributions on ejecta and impact melt pools at lunar craters: An effect of differing target properties[C]//Lunar and Planetary Science Conference, 2010
- [59] ASHLEY J W, ROBINSON M S, HAWKE B R, *et al.* Geology of the King crater region: New insights into impact melt dynamics on the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12)
- [60] EUGSTER O. Chronology of dimict breccias and the age of South Ray crater at the Apollo 16 site[J]. *Meteoritics and Planetary Science*, 2010, **34**(3): 385-391
- [61] HIESINGER H, SIMON I, VAN DER BOGERT C H, *et al.* How old is cone crater at the Apollo 14 landing site//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015
- [62] LEMELIN M, LUCEY P G, GADDIS L R, *et al.* Global Map Products from the Kaguya Multiband Imager at 512 ppd: Minerals, FeO, and OMAT[C]//Lunar and Planetary Science Conference, 2016
- [63] SUN L Z, LING Z C, ZHANG J, *et al.* Lunar iron and optical maturity mapping: Results from partial least squares modeling of Chang'E-1 IIM data[J]. *Icarus*, 2016, **280**: 183-198
- [64] ROBINSON M S, *et al.* New crater on the Moon and a swarm of secondaries[J]. *Icarus*, 2015, **252**: 229-235
- [65] SPEYERER E J, POVILAITIS R Z, ROBINSON M S, *et al.* Quantifying crater production and regolith overturn on the Moon with temporal imaging[J]. *Nature*, 2016, **538**(7624): 215
- [66] ELLIOTT J R, HUANG Y H, MINTON D A, *et al.* The length of lunar crater rays explained using secondary crater scaling[J]. *Icarus*, 2018, **312**: 231-246

(责任编辑: 宋雅娜)