

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别
作者: 徐箫剑, 叶乐佳, 康志忠, 蒋文宸, 栾栋, 张冬亚
DOI: 10.13203/j.whugis20200345
收稿日期: 2020-07-10
网络首发日期: 2021-02-18
引用格式: 徐箫剑, 叶乐佳, 康志忠, 蒋文宸, 栾栋, 张冬亚. 顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200345>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200345

引用格式:

徐箫剑, 叶乐佳, 康志忠, 等. 顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200345 (Xu Xiaojian, Ye Lejia, Kang Zhizhong, et al. The Identification of Secondary Craters based on the Distribution of Iron Element on Lunar Surface [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200345)

顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别

徐箫剑^{1,2} 叶乐佳³ 康志忠^{1,2} 蒋文宸⁴ 栾栋^{1,2} 张冬亚^{1,2}

1.中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083; 2.教育部深空探测联合研究中心月球与行星探测国际合作研究分中心,北京 100083; 3.中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094; 4.沐城测绘(北京)有限公司,北京 100102

摘要: 月表地质年代的确定是研究月球形成及演化历史,反演月质事件发生过程的基础。在对月表地质单元定年时,由于月球岩石、土壤和岩心样品数量有限,能够利用这些样品做同位素定年的地质单元范围很小,因此更大范围的月球表面的绝对年龄需要采用撞击坑尺寸频率定年法(crater size-frequency distribution, CSFD)测定。然而月球表面次生撞击坑的存在会导致CSFD法得到的定年结果会出现偏差,故在标注撞击坑时有必要对次生撞击坑予以剔除,以便对行星表面的地质单元做较为准确的定年。本文提出一种顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别方法。使用波段比值法获取月表铁元素含量信息,以次生撞击坑内铁元素含量更接近月壤铁元素含量为假设前提,以撞击坑内与月壤铁元素含量的差值为判据分离主撞击坑和次生撞击坑。文中以日本月亮女神MI多光谱数据为实验数据,验证本文方法的有效性和稳健性。实验结果表明,在依据铁元素含量剔除次生撞击坑后的定年结果与已知定年结果之差小于0.04Ga,具有较好的一致性;与其它次生撞击坑剔除方法相比,依据月表铁元素信息剔除次生撞击坑的结果更可靠。

关键词: 次生撞击坑; 撞击坑尺寸频率定年法; 多光谱影像; 铁元素

中国分类号: P691 **文献标识码:** A

收稿日期: 2020-07-10

项目资助: 国家自然科学基金项目(41872207)、国家重点研发计划项目(2019YFE0123300)、国防科工局民用航天技术预先研究项目(D020204)

第一作者: 徐箫剑, 硕士生, 主要从事月球与行星遥感方向研究。2012190007@cugb.edu.cn

通信作者: 康志忠, 博士, 教授, 主要从事数字摄影测量、激光雷达数据处理以及月球与行星遥感等方向研究。zzkang@cugb.edu.cn

随着科技的进步与发展,人们逐渐将关注点从地球延伸至深空,探寻地球、太阳系乃至整个宇宙的起源与演化,尝试移民其它星球。这其中月球作为地球的天然卫星,堪称人类探索深空的前哨,长期以来备受研究人员的关注。在对月球的研究中,确定月表年龄具有重要的科学研究意义及一定工程应用价值,是进行月球地质演化历史研究^[1]、地质单元所属地层确定^[2]、月球地质年代代表编制^[3]等工作所需的重要基础资料。此外在对月球表面定年的过程中,人类对陨石撞击事件、月球的矿物分布有了更加深刻的认识,在此基础上进一步开展古太阳系环境研究,地月系近期撞击流量评估^[1],太阳系内其它行星定年^[4]和月球陨石的源区甄别^[5]等工作。

当前对月球表面地质年龄估计的研究主要依赖于相对定年技术与绝对定年技术。相对定年技术(如地层叠置法、撞击坑形态法)^[6]可给出各类地质事件发生的先后顺序。绝对定年技术以同位素定年法^[6]为基础,通过 U-Pb 法、K-Ar 法、Sm-Nd 法等地球化学方法对月球采样标本中的指标元素进行成分分析,精确获取物质的绝对年龄。现有的月岩样品来自 10 处采样点,无法约束月球表面绝大部分区域的地质年龄。为此科学家提出了撞击坑尺寸频率定年法^[4]。该方法构建了采样点所处地质单元的撞击坑分布与月岩样品绝对年龄间的函数关系,在缺少实物样品的情况下,通过撞击坑统计数据实现了全月表面的地质年龄测定。撞击坑尺寸频率定年法经过了四十多年的发展,1975 年 Neukum 等首先给出了 7 阶多项式表示的撞击坑产生率函数^[7],并将月球岩石样品的放射性同位素定年结果与撞击坑直径-频率的统计相结合,使得撞击坑尺寸频率分布定年法可以对月表地层做绝对定年^[8]。此后 Neukum 将撞击坑产生率函数改进为 11 阶多项式^[9],Ivanov 又对该函数各项系数加以优化^[10]。Hiesinger 等利用多光谱数据划分地质单元,在此基础上运用撞击坑直径-频率分布法定年,进一步提高了这一方法的可靠性^[11]。然而,研究表明次生撞击坑的存在将在一定程度上“污染”目标区域的撞击坑统计数据,进而影响撞击坑尺寸频率定年

法的定年结果^[12-15]。因此在利用该方法进行地质定年前,有必要对次生撞击坑进行识别并剔除。

Bart 发现在撞击坑直径一定时,次生撞击坑会在其周边产生更大的碎片,他利用幂法则 $B = KD^{2/3}$ 来判别撞击坑属性,其中 B 为撞击坑所产生的最大溅射物的直径, D 为撞击坑直径,主撞击坑的 K 为 0.29,次生撞击坑为 0.46^[16]。此外 Bart 指出,准确区分次生撞击坑和主撞击坑有助于提高使用小型撞击坑定年的精度。李坤等通过人工目视的方法剔除次生撞击坑^[17],该方法具有较大主观性,且耗费较大人力及时间。为减少人工干预程度并提高效率,众多学者对次生撞击坑自动识别方法进行了研究。Bierhaus 等在假设主撞击坑源于随机撞击,尝试联合蒙特卡罗模拟、最短距离层次聚类算法以及聚类参数对次生撞击坑进行识别,以一或两倍中误差为界将撞击坑分为强烈聚集、适度聚集及随机分布三类^[18]。Michael 等进行次生撞击坑识别的方法与 Bierhaus 等所提出的方法原理相似,但其指出自动识别次生撞击坑的准则较为重要,并选取撞击坑之间的平均第二近邻距离作为测度^[19]。McEwen 等提出在主撞击坑呈空间随机分布的前提下,根据次生撞击坑呈链状、团状的分布特征进行识别、提取的算法,其使用随机抽样算法评估撞击坑分布是否均匀^[12]。Honda 等亦假设主撞击坑应服从随机分布,随后通过泰森多边形检测非随机分布的次生撞击坑^[20]。Salih 等亦利用泰森多边形检测撞击坑分布的算法,取得了较好的效果^[21]。Savage 等人则使用 DTM 或高分辨率影像,采用 t-SNE 算法得到主撞击坑和次生撞击坑的模型参数来进行聚类,这一方法适用于直径 100 m~600 m 的撞击坑^[22]。郭弟均等人提取了东方海(Mare Orientale)形成的 2728 个次生撞击坑,他们发现大部分次生撞击坑集中在主撞击坑 1~2.5 倍半径的范围,距主撞击坑越远的次生撞击坑,最大直径和平均直径越大,通过对次生撞击坑的研究,他们认为形成东方海的陨石坠落的方位角为 240°~265°,入射角大于 20°^[23]。

以往由于月球多光谱影像空间分辨率较低(数百米),只能用于月表大范围的元素

含量计算和地质单元划分,无法用于对小撞击坑(直径几百米)的研究。2007年日本月亮女神卫星(SELENE)发射后,其搭载的多光谱成像仪(Multi band Imager, MI)提供了空间分辨率 20 m 的高精度多光谱影像,为小直径撞击坑的研究提供了新的数据。本文率先使用多光谱影像在较小的目标区域内(数十千米)获取月表铁元素含量,以此为依据在小直径撞击坑中识别次生撞击坑。本文给出了较为可靠的主撞击坑与次生撞击坑分类阈值,得到的定年结果与其他学者的定年结果之差小于 0.04 Ga,证明了基于月表铁元素含量剔除次生撞击坑是可行的。本文提出的顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别法,有效避免了现有基于空间聚集度的次生撞击坑识别法在撞击坑分布较为稀疏的区域识别效果差,导致定年误差大的问题。

1 基于月表铁元素含量的次生撞击坑识别

本文提出了一种顾及月表铁元素含量的方法来识别次生撞击坑。该方法基于撞击坑内外不同地层的物质含量差异会造成次生撞击坑内的物质含量较主撞击坑更接近月壤物质含量的推论,利用多光谱影像获取撞击坑内的指标物质含量,依据设定的阈值,将撞击坑分为主撞击坑和次生撞击坑,实现对次生撞击坑的识别。对于该方法识别次生撞击坑的准确度,采用 CSFD 地质定年的精度作为标准进行评价。

1.1 次生撞击坑识别的元素指标选取

当前利用多光谱影像可以获得月表铁、

钛两种元素和橄榄石、斜长石两种矿物的含量。这些元素、矿物的分布往往呈现出一定的规律,可以反映出下部地层的露头。然而光谱反演易受空间阴影、地表粗糙度的干扰。在研究小直径撞击坑的时候这种干扰更加严重,因此必须选择合适的元素、矿物作为识别次生撞击坑的依据。图 1 以一个直径 192 米的小撞击坑为例展示了撞击坑内外的元素、矿物分布情况。图 1(a)为 MI 波段 1 (450 nm) 的影像,可以清楚的看到受太阳入射角的影响,撞击坑呈现出强烈的明暗对比,形成明暗两个区域。观察斜长石的分布特征,也表现出相同的特点,只是明暗区域与波段 1 相反(图 1(b)),这说明在获取小撞击坑内斜长石含量时受到空间阴影的严重干扰,没有准确反映坑内斜长石分布特征。橄榄石含量计算需要用到的近红外波段影像空间分辨率为 62 m,无法准确反映本文研究的小撞击坑(直径 128 m~700 m)内的矿物分布特征(图 1(c))。而钛元素在小撞击坑内外的分布并没有表现出显著差异,可以看到其南北剖面无明显规律,在图 1(d)中甚至无法看到撞击坑,因而无法用于识别次生撞击坑。只有铁元素的分布在撞击坑内外有显著的不同,其南北向剖面清晰地展示出撞击坑边缘,较为准确的反映出撞击坑的轮廓(图 1(e))。因而本文采用铁元素作为识别次生撞击坑的依据。

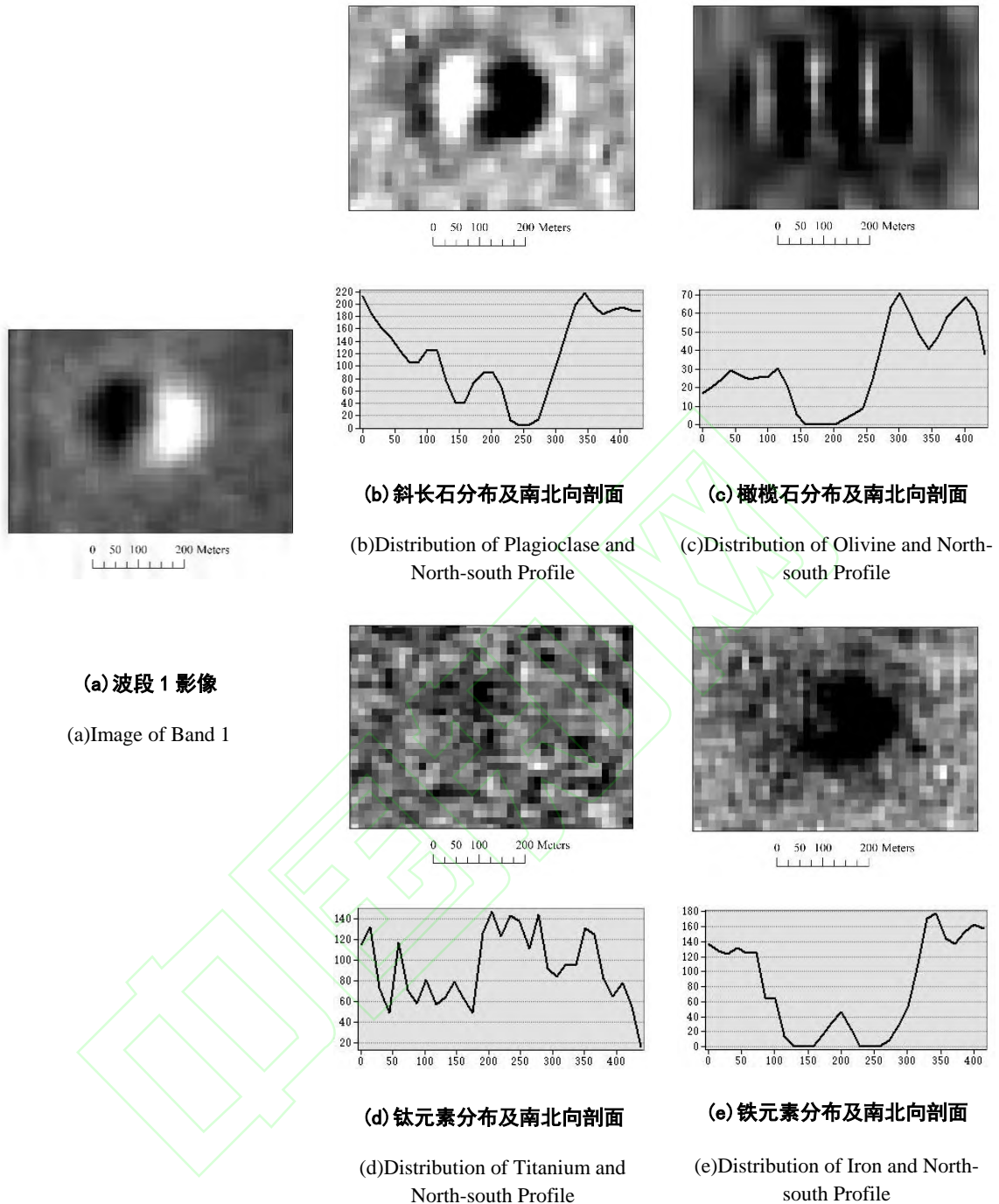


图 1 不同元素、矿物在小撞击坑内的分布图 (剖面图横坐标为剖面线从北到南的像素顺序, 纵坐标为剖面线上的像素灰度值)

Fig.1 Distribution of Elements and Minerals in Small Craters (In the profile, abscissa represents the sequence of pixels on the section line from north to south, ordinate represents the gray value of which)

月表的铁元素含量有显著的区别, 这一铁元素含量信息可利用多光谱影像, 通过波段比值法将 950 nm 波段的影像除以 750 nm 的影像进行粗略提取^[24]。但是在月球上不同地层的铁元素含量与地层所处深度的关系

并非单纯的正相关或负相关, 而是在不同地区呈现出不同的规律。例如在虹湾被月壤覆盖的月海玄武岩地层的铁元素含量较低, 该地区呈现铁元素含量上高下低的特征; 但是跟据 Antonenko 等人的研究, 在南海、席勒

-席卡尔德和巴尔默盆地，撞击事件产生的喷射物在铁元素含量较高的月海玄武岩之上形成了光平原 (light plains) 等沉积层，出现了上部地层的铁元素含量低于下部地层的现象^[25]。此外，Plescia 等发现次生撞击坑深度与直径之比更小为 0.06，而主撞击坑为 0.12^[26]。结合这些研究成果及次生撞击坑的形成过程，可推断次生撞击坑内铁元素含量较主撞击坑内铁元素含量更接近月壤铁元素含量。本文基于这一推断，使用多光谱影像获取铁元素信息，依据撞击坑与月壤的铁元素含量差值识别出次生撞击坑并加以剔除。

以提取月表铁元素含量，具体的波段比值为 950 nm/750 nm。图 2 为实验区域内波段 2 (750 nm)、波段 4 (950 nm)、以及波段 4/2 (950 nm/750 nm) 的影像。可以看到在该实验区域，月壤的铁元素含量明显高于撞击坑的铁元素含量。其次目视选取非撞击坑区域，将得到的月壤铁元素含量与撞击坑内铁元素含量做差，该差值的理论意义为撞击坑内铁元素含量与月壤铁元素含量的接近程度。值得注意的是，为尽可能保证对撞击坑内铁元素含量的测量不被月壤部分所污染，本文采取撞击坑拟合圆的内接正方形范围内的铁元素含量均值作为撞击坑内的铁元素含量 (见图 3)。

识别次生撞击坑前，首先进行波段比值

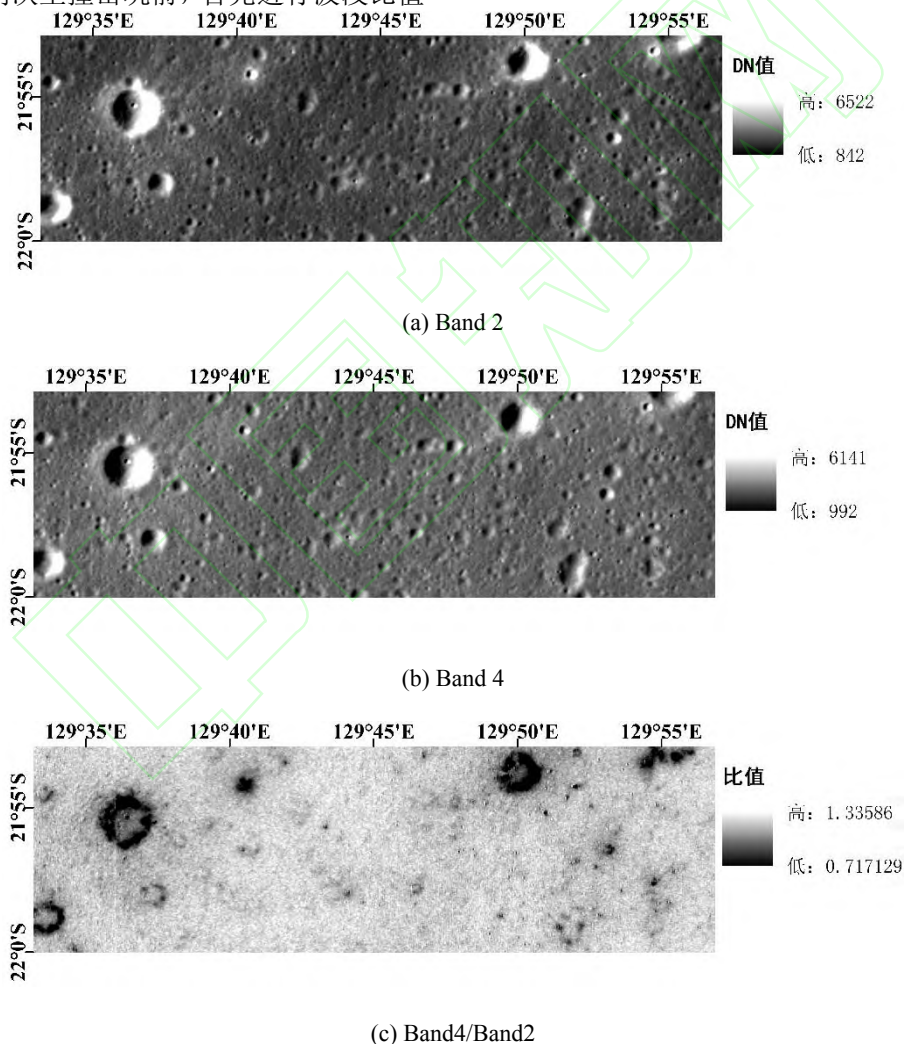


图 2 实验区 1 影像 (a 为波段 2, b 为波段 4, c 为波段 4/2)

Fig.2 Image of Experiment Area 1 (a is band 2, b is band 4, c is band 4 / 2)

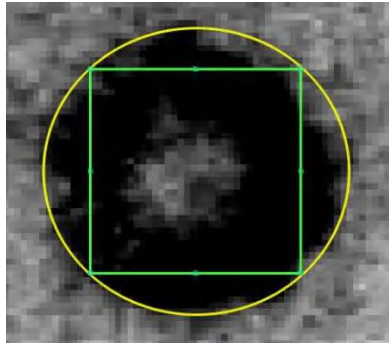


图 3 撞击坑铁元素含量计算示意图

Fig.3 Calculation Diagram of Iron Content in Crater

1.2 次生撞击坑识别阈值确定

在识别次生撞击坑时，设撞击坑铁元素含量与月壤铁元素含量的差值绝对值集为 $|\Delta|$ ， σ 为差值集的标准差， $|\bar{\Delta}|$ 为平均值。根据次生撞击坑内铁元素含量较主撞击坑内铁元素含量更接近月壤铁元素含量的推断，可以合理假设小直径主撞击坑与月壤的铁元素含量差值的绝对值只含有随机误差，而次生撞击坑与月壤的铁元素含量差值的绝对值则含有粗差。参照拉依达准则，在主撞击坑和次生撞击坑之间设置一个“ $k\sigma$ 准则”，即区分两种撞击坑的阈值为 $|\bar{\Delta}| - k \times \sigma$ ，当某一撞击坑内铁元素含量差值的绝对值 $|\Delta_i|$ 小于阈值时该撞击坑被识别为次生撞击坑，反之则为主撞击坑。

利用该方法准确识别次生撞击坑，需要确定一个可靠且广泛适用的阈值。为此先选

取已有研究人员给出定年结果的若干实验区，以这些区域的定年结果作为真值。计算参数 $|\bar{\Delta}|$ 、 σ 、 $|\bar{\Delta}|$ ，之后调整 k ，即改变阈值 $|\bar{\Delta}| - k \times \sigma$ ，据此剔除候选次生撞击坑后利用剩余的撞击坑进行撞击坑尺寸频率定年得到多个定年结果，以定年结果最接近实验区地质年代的阈值作为实验阈值，这一阈值下的候选次生撞击坑即为最终识别出的次生撞击坑。为检验实验阈值的稳定性，再选取几个地质年代已知的区域作为测试区，以实验阈值在测试区剔除次生撞击坑并定年，将得到的定年结果与测试区的地质年代相比较，二者的差值可作为阈值可靠性的评价准则，也是顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别法的评价准则之一。若该差值较小，则实验阈值可视为可靠阈值，顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别法找出的次生撞击坑也是准确的。

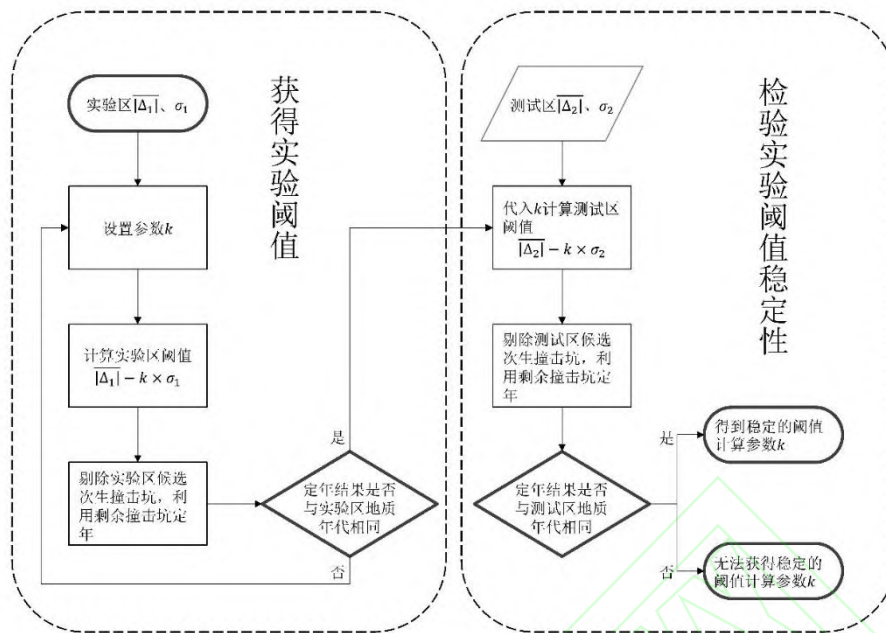


图 4 确定次生撞击坑识别阈值流程图

Fig.4 Determining the Recognition Threshold of Secondary Craters

如果实验和测试效果较好，即本文的定年结果与相应区域的地质年代间具有一致性，说明本文提出的方法具有一定的可靠性，能够为撞击坑尺寸频率定年法提供比较可靠的数据，亦为次生撞击坑的相关研究提供了一定的支撑。另外，在与其它次生撞击坑剔除方法对比时，本文也采用与参考定年结果的差值作为评价准则来判断不同方法识别次生撞击坑的准确度。

如上所述，利用多光谱数据，基于铁元素含量对次生撞击坑进行识别并剔除的方法操作简便、高效，比起蒙特卡罗模拟的方法耗费时间少，能够识别出空间分布特征不显著的距离主撞击坑较远的次生撞击坑。此外，目前分辨率较高的多光谱影像几乎覆盖全月，所以本文的次生撞击坑识别、剔除方法可以在月球上几乎任意区域使用以提高撞击坑尺寸频率定年法定年结果的准确度。

1.3 基于撞击坑尺寸频率定年法的次生撞击坑识别精度评价

由于难以通过人工目视判断出识别的次生撞击坑是否正确，并且绝大多数文献中也没有逐个标出识别到的次生撞击坑，因而

也无法逐一核对提取到的次生撞击坑是否准确，所以本文利用撞击坑尺寸频率分布定年法得到的定年结果来验证提取的次生撞击坑是否正确。

撞击坑尺寸频率分布定年法的基本原理如下：首先，由于风化作用对撞击坑的破坏速率远慢于撞击坑的产生速率，因此月球表面的区域年代越久远其上的撞击坑越密集；其次，对月表不同地质单元的撞击坑直径-频率进行统计，得到一个撞击坑产生率函数 (Production Function, PF)，即单位面积上大于某一直径的撞击坑的数量；最后，利用月球岩石样品的放射性同位素定年结果结合其所在区域的撞击坑产生率函数，确定月表年龄与该区域地质年代的对应关系，即由撞击坑直径-频率分布曲线构成的等时线。对于没有放射性同位素定年结果的区域，则根据其撞击坑直径-频率的统计结果在等时线上寻找其对应的年代。本文在定年时，采用了 2001 年 Ivanov 给出的撞击坑产生率函数^[10]和 2001 年 Hartmann 和 Neukum 给出的等时线^[27]。设撞击坑直径为 D ， N 为大于直径 D 的撞击坑的累积数量， $\lg D$ 与 $\lg N$ 表现出明显的线性关系，因而可以用一个多项式表示这一映射，即撞击坑产生率函数。根据

Neukum 的研究，月球的撞击坑产生率函数为一个 11 阶多项式^[19]：

$$\lg(N_{cum}) = a_0 + \sum_{j=1}^{11} a_j [\lg(D)]^j \quad (1)$$

其中 D 为撞击坑直径， N_{cum} 为大于直

径 D 的撞击坑的累积数量，a 为系数。在多年的研究中，Neukum 和 Ivanov 等人使用不同的撞击坑数据多次修正公式中系数的值以优化撞击坑产生率函数。本文采用 2000 年 Ivanov 给出的系数，具体数值见表 1^[28]。

表 1 撞击坑产生率函数系数值

Table.1 Numerical Value of Production Function

系数	值	系数	值
a_0	-3.0876	a_6	0.019977
a_1	-3.557528	a_7	0.086850
a_2	0.781027	a_8	-0.005874
a_3	1.021521	a_9	-0.006809
a_4	-1.56012	a_{10}	8.25×10^{-4}
a_5	-0.444058	a_{11}	5.54×10^{-5}

选择某一直径对应的撞击坑产生率函数，计算其在月表不同年代地质单元中的数值（累积撞击坑数量），就可以得到撞击坑产

生率函数与地层年代 (T) 的对应关系，即年代函数 (chronology function, CF)。其数学表达式为^[4]：

$$N_{cum}(D > 1km) = 5.44 \times 10^{-14} [\exp(6.93 \times T) - 1] + 8.33 \times 10^{-4} \times T \quad (2)$$

由撞击坑产生率函数和年代函数可以得到最终的等时线图 (图 5^[29])，图上每个撞击坑直径-频率分布曲线对应一个确定的年代。将研究区域的撞击坑直径-频率数据投

影到等时线图上，由与其邻近的撞击坑直径-频率分布曲线内插即可得到研究区域月表地层的年代。

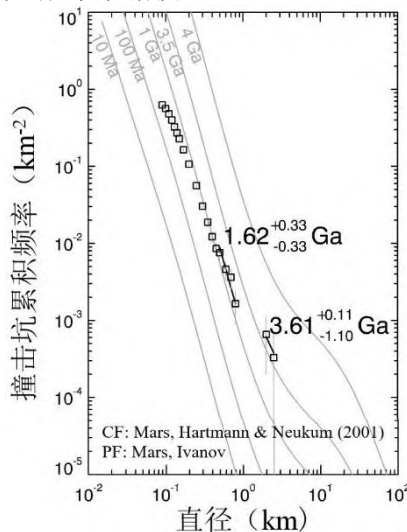


图 5 等时线定年图

Fig.5 Chronology Function

定年结果的误差为^[30]:

$$\pm \sigma_N = \lg\left[\frac{N(1) \pm \sqrt{N(1)}}{A}\right]$$

其中 $N(1)$ 为根据 $N_{cum}(D > 1km)$ 在年代函数中求得的定年结果, A 为研究区域面积。

2 实验与分析

2.1 实验数据区域及评价方法

本次实验设置两个实验区和一个测试区。实验区位于 $129^{\circ} 34' 13.66'' E-129^{\circ} 55' 47.727'' E, 21^{\circ} 54' 9.313'' S-22^{\circ} 14' 51.805'' S$ 处在齐奥尔科夫斯基撞击坑内, 由于所用 MI 数据中没有任何一张影像能够完整地覆盖该区域, 而是由 MI_MAP_03_S21E129S22E130S 和 MI_MAP_03_S22E129S23E130SC 这两张影像分别覆盖该区域的一部分, 故将该区域依照 MI 影像覆盖情况分为两区域, 为简便起见, 将南北两区域分别命名为齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 1 和齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 2。测试区则在虹湾地区, 位于 $31^{\circ}29' 11.74'' W-31^{\circ}59' 27.869'' W, 42^{\circ} 34'$

$55.435'' N-42^{\circ} 57' 13.688'' N$ (虹湾 Area 1)和 $23^{\circ}3' 56.513'' W-23^{\circ}23' 42.772'' W, 44^{\circ} 33' 17.52'' N-44^{\circ} 53' 4.332'' N$ (虹湾 Area 2) 的两个正方形区域, 覆盖上述区域的 MI 影像分别为 MI_MAP_03_N43E328N42E329SC 和 MI_MAP_03_N45E336N44E337SC。上述实验数据全部来自日本月亮女神卫星, 从网站 http://darts.isas.jaxa.jp/planet/pdap/selene/product_search.html 下载。这些区域均处于中低纬度, 影像的地图投影变形较小, 便于提取撞击坑; 另外这些区域都有探测器着陆, 是月球研究中的热点地区。

铁元素信息来自多光谱成像仪获取的多光谱影像, 共计 9 个波段, 5 个可见光波段的中心分别为 415 nm、750 nm、900 nm、950 nm、1000 nm, 空间分辨率为 20m, 4 个近红外波段的中心分别为 1000 nm、1050 nm、1550 nm、1250 nm, 空间分辨率为 62 m, 每张影像覆盖 $30 km \times 30 km$ 的范围。目视提取撞击坑时所用的底图为地形相机 (Terrain Camera, TC) 获取的正射影像, 其空间分辨率为 10 米, 每张影像的覆盖范围为 $90 km \times 90 km$ 。目视提取撞击坑是在 ArcGIS 下利用 Cratertools 插件进行的。

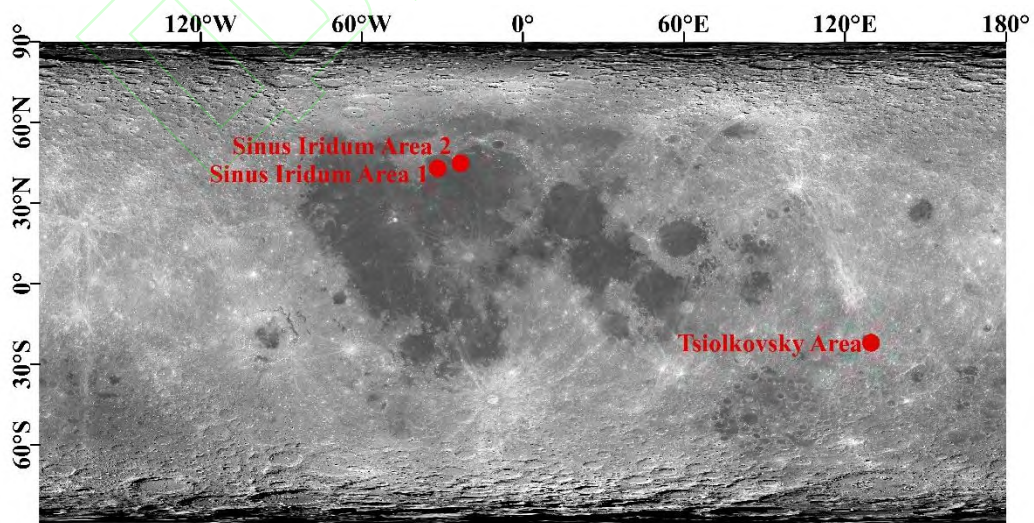


图 6 测试区、实验区分布图

Fig.6 Distribution of Test Area and Experimental Area

由于难以通过人工目视判断出识别的次生撞击坑是否正确,对于顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别效果,本文利用剔除掉次生撞击坑后剩余的主撞击坑进行地质定年并与Pasckert等人的定年结果^[31]进行比较以间接检验次生撞击坑识别的效果。

2.2 次生撞击坑识别

依据铁元素信息识别次生撞击坑时,需要确定一个合适的阈值以区分次生撞击坑和主撞击坑。如前所述,本文经实验、测试两个环节来确定一个较为可靠的阈值。

2.2.1 实验区次生撞击坑识别及实验阈值得出

第一,在实验区做波段比值获取月表铁

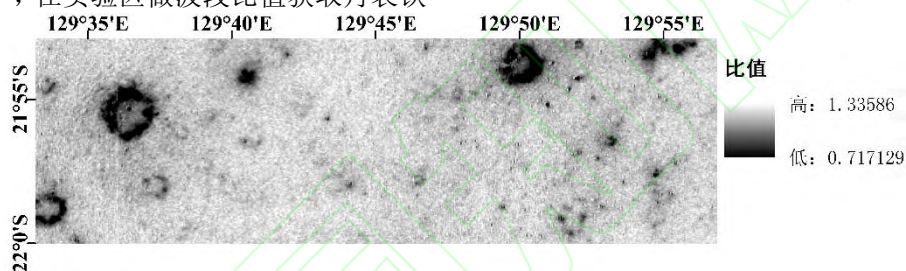


图7 实验区1铁元素含量信息图

Fig.7 Iron Content in Experimental Area 1

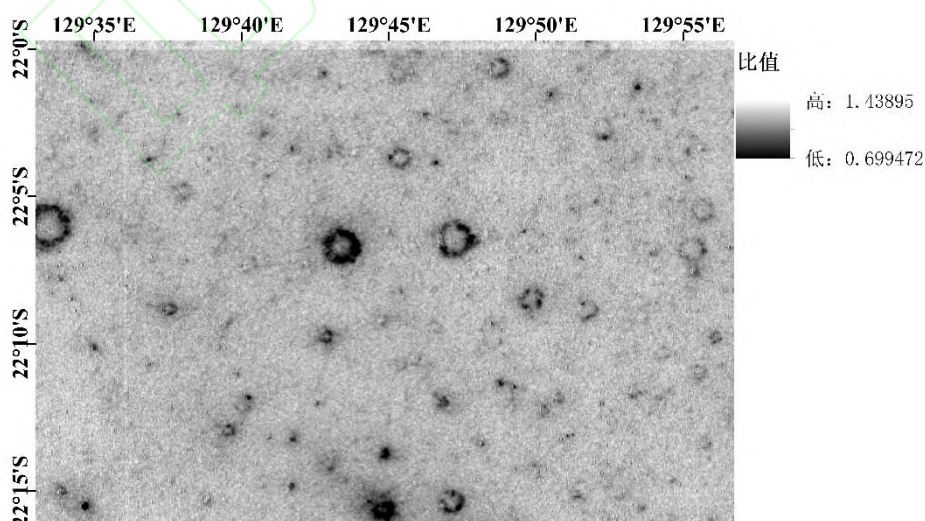


图8 实验区2铁元素含量信息图

Fig.8 Iron Content in Experimental Area 2

元素含量信息。图7、图8为利用波段比值法,即第4波段(950 nm)比上第2波段(750 nm)获取的实验区齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 1、齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 2的月表铁元素含量信息图,图中颜色越亮的区域铁元素含量越高,颜色越暗则铁元素含量越低。从中可以看到有撞击坑的区域颜色明显偏暗,即该实验区撞击坑内的铁元素含量低于月壤的铁元素含量。第二,目视选取非撞击坑区域得到月壤铁元素含量信息并将其与撞击坑内铁元素含量做差,得到两者的差值绝对值集 $|\Delta|$,计算出差值集的标准差 σ 和平均值 $|\Delta|$ 。表2则给出了第二步的各项参数在实验区1、2的具体数值。

表 2 实验区撞击坑铁元素含量与月壤铁元素含量差值的绝对值统计结果

Tab.2 Statistical Results of The Absolute Value of The Difference Between The Iron Content of The Craters and That of The Lunar Soil in The Experimental Area

实验区域	最大值	最小值	平均值 $\overline{ \Delta }$	标准差 σ
齐奥尔科夫斯基 撞击坑 Area 1	0.2355	0.0018	0.0353	0.0334
齐奥尔科夫斯基 撞击坑 Area 2	0.1132	0.0156	0.0482	0.0177

第三,以 $|\Delta| - k \times \sigma$ 为次生撞击坑识别阈值,当撞击坑铁元素含量与月壤铁元素含量的差值小于阈值时,识别为次生撞击坑。最后一步需调整 k 以改变阈值使得剔除次生撞击坑后的定年结果与该区域已有的定年结果较好地吻合。在实验区本文以 Pasckert 等人在 2015 年给出的定年结果为参考^[31],但如前所述,有两张 MI 影像覆盖了实验区的不同部分,因而需要将其分成两个区域。如

图 9^[31]所示,黄线以上为齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area1,齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 2 (黄线位于第二行格网的 1/3 处),每个格网的年代即 Pasckert 等人得出的定年结果。为分别求出两处实验区的参考定年结果,以每个网格的面积为权,分别计算两个实验区覆盖的各网格定年结果的加权平均值得到实验区齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 1、2 的定年结果^[31],分别为 3.29 Ga、3.17 Ga。

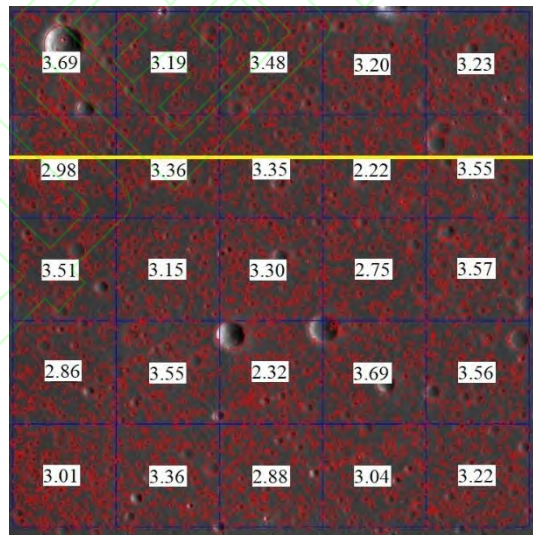


图 9 实验区 1、2 内 Pasckert 等的定年结果

Fig.9 The Dating Results of Paskert et al. In Experimental Areas 1 and 2

在有 Pasckert 等人的定年结果后,反复调整 k 来改变阈值 $\overline{|\Delta|} - k \times \sigma$, 当在某一阈值下实验区齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 1 定年结果与 Pasckert 等人的定年结果吻合时,

再将该阈值应用在实验区齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 2, 观察定年结果是否也与 Pasckert 等人对这一区域的定年结果相符。经过多次调整,确定实验区齐奥尔科夫斯基

撞击坑 Area 1、2 所得实验阈值为平均值减 0.4 倍标准差，即 $k=0.4$ 。

依据铁元素含量剔除次生撞击坑后，地质定年的结果得到显著改善（见表 3），两个实验区的定年结果与 Pasckert 等人的定年结果非常接近，误差小于 0.03 Ga，这一误差小

于 CSFD 地质定年法本身的误差，说明定年精度较高，同时也表明次生撞击坑的识别精度较高。需要注意的是，由于 Pasckert 等人对实验区定年时仅使用了直径大于 128 米的撞击坑，因此本文在求取阈值时也只使用直径大于 128 米的主撞击坑进行地质定年。

表 3 实验区定年结果和阈值（单位：Ga，括号内数字表示 CSFD 地质定年定年误差）

Tab.3 Experimental Area Dating Results And Thresholds (Unit: Ga, Numbers in the in brackets indicate CF-SD dating error)

实验（测试）区域	Pasckert 等人定年结果	未剔除次生撞击坑定年结果	本文定年结果	实验阈值
齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 1	3.29 ^[31]	3.47 (+0.03 -0.04)	3.32 (+0.07 -0.12)	0.0220
齐奥尔科夫斯基撞击坑 Area 2	3.17 ^[31]	3.43 (+0.03 -0.03)	3.17 (+0.08 -0.13)	0.0411

2.2.2 测试区次生撞击坑识别及实验阈值检验

为进一步检验实验阈值的稳定性，选取具有绝对定年结果的虹湾区域作为测试区进行测试。图 10 为该区域绝对定年图，该图的数据来自于 Hiesinger 等人 2011 年的研究成果^[30]，在测试区以这一成果为参考。测试时，首先重复确定实验阈值时的第一二步，再根据实验阈值 $\Delta - 0.4 \times \sigma$ 剔除次生撞击坑，进行 CSFD 地质定年，与 Hiesinger 等人的定年结果^[30]对比，以检验实验阈值的稳定性。

与实验区相同，剔除次生撞击坑后，地

质定年的结果得到显著改善，表 4 展示了两处测试区域的定年结果与 Hiesinger 等人给出的定年结果，可以看到测试的定年结果与 Hiesinger 等人的定年结果之差为 0.02 Ga 和 0.04 Ga，也小于 CSFD 地质定年法本身的误差（软件给出误差为 +0.10 Ga, -0.14 Ga 和 +0.15 Ga, -0.25 Ga），说明该方法得到的定年结果较为准确，证明实验阈值较为可靠，即本文所述方法的次生撞击坑识别效果较好。另外，为了与实验区保持一致，在测试中仍使用直径大于 128 米的撞击坑。

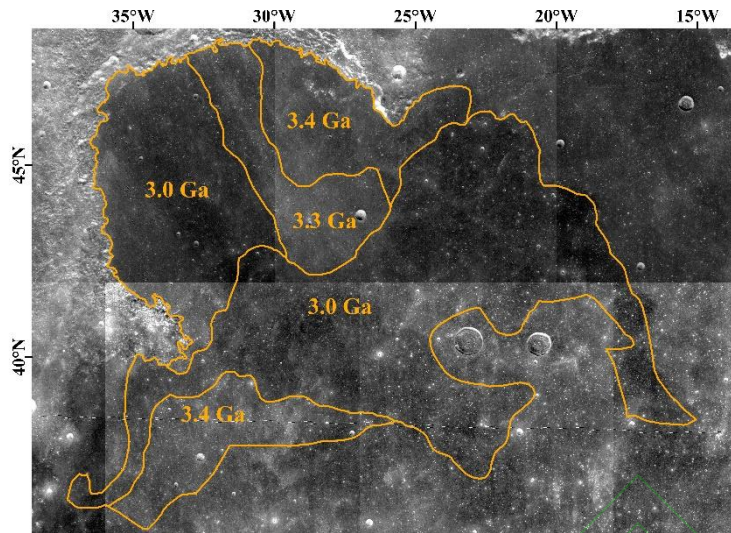


图 10 虹湾地区地质年代图

Fig.10 Geological Chronology of Sinus Iridum Area

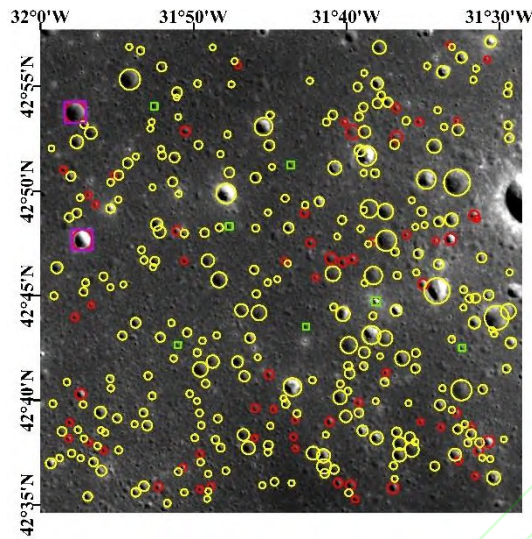
表 4 测试区定年结果 (单位: Ga)

Tab.4 Annual Results of Test Area (Unit: Ga)

实验 (测试) 区域	Hiesinger 等人定年结果	未剔除次生撞击坑定年结果	本文定年结果
虹湾 Area 1	3.0 ^[30]	3.27 (+0.04 -0.06)	3.02 (+0.10 -0.14)
虹湾 Area 2	3.0 ^[30]	3.31 (+0.06 -0.08)	3.04 (+0.15 -0.25)

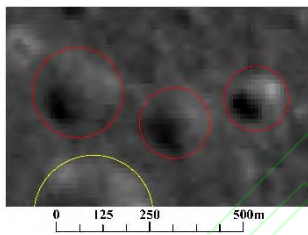
图 11(a)为将本文实验所得阈值应用于测试区中的虹湾 Area 1 所得到的次生撞击坑识别结果。黄色为主撞击坑, 红色为次生撞击坑, 绿色为孤立的次生撞击坑, 粉色为直径大于 400 m 的次生撞击坑。可以发现利用本文所述方法识别出的次生撞击坑既有呈链状的(图 11(b)), 又有部分是孤立的(图 11(c)), 而非与其他撞击坑聚集成团状或线

状, 有的孤立次生撞击坑甚至在其周围 600 米范围内没有任何撞击坑(直径大于 128 米, 图 11(d))。这些次生撞击坑或大或小, 有的直径甚至大于 400 m (图 11(e))。由此可见根据月表铁元素信息可较好地识别出远离主撞击坑的孤立次生撞击坑, 即便这些次生撞击坑的直径较大, 也可以被识别出来。



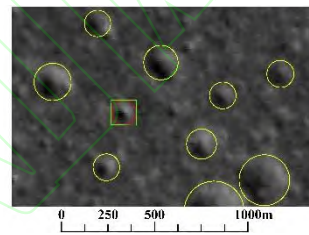
(a) 虹湾 Area 1 次生撞击坑识别图

(a) Identification of Secondary Craters in Sinus Iridum Area 1



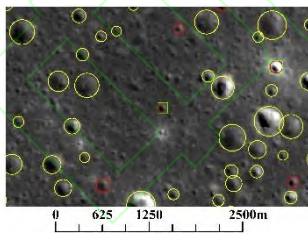
(b) 呈链状分布的次生撞击坑

(b) Secondary Craters distribute in a Chain



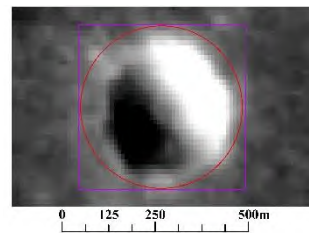
(c) 孤立次生撞击坑 1

(c) Isolated Secondary Crater 1



(d) 孤立次生撞击坑 2

(d) Isolated Secondary Crater 2



(e) 大直径次生撞击坑

(e) Large Diameter Secondary Craters

图 11 虹湾 Area 1 实验结果及细节图，图中仅显示 128 米以上的撞击坑

Fig.11 Sinus Iridum Area 1 Test Results and Details, Only Craters Over 128 Meters are Shown in The Figure

2.3 与其他次生撞击坑探测法的对比

当前多数次生撞击坑剔除算法都是根据撞击坑的空间聚集程度结合蒙特卡罗模拟的实验结果来识别次生撞击坑。蒙特卡罗模拟是利用随机数进行模拟计算的一种方法，也被称为随机模拟方法。该方法利用计算机进行数值计算来对构造的模拟模型作统计实验。在利用蒙特卡罗模拟解决问题时，首先要构建一个用于求解实际问题的模型，使得该模型的参数或特征向量为问题的解，再进行模拟，用随机数进行大量的统计实验来给出模型参数或特征向量的估计值，以得出问题的近似解^[31]。在识别次生撞击坑时，首先构建一个具有与实验区具有相同面积、几何形状、撞击次数、撞击坑直径的模型。在这一模型中，撞击事件随机分布，但撞击坑之间互不重叠。在多次模拟实验区经历的撞击过程后，以模型的撞击坑空间聚集度参数作为识别次生撞击坑的阈值。

有关次生撞击坑自动识别的研究多是基于撞击坑的聚集程度进行识别的。它们以主撞击坑呈随机分布为前提进行蒙特卡罗模拟，并通过如泰森多边形等一系列方法判断撞击坑聚集程度，再设置阈值对次生撞击坑进行识别^[12, 18-21]。Bierhaus 等人以蒙特卡罗模拟的实验结果作为次生撞击坑识别阈值，采用单链层聚类算法评价撞击坑聚集程度^[18]。Salih 等人则利用泰森多边形的面积评价撞击坑聚集程度^[21]，对次生撞击坑识别阈值的设置与 Bierhaus 等人相同。在实验区和测试区，采用 Bierhaus 等人所述的层聚类次生撞击坑探测法和 Salih 等人所述的未分段次生撞击坑探测法进行定年，与本文所述方法进行对比。

如前文所述在实验区和测试区的定年结果与 Pasckert 等人和 Hiesinger 等人的定年结果有较好的一致性，这表明本文所述顾及月表铁元素含量的次生撞击识别方法较为可靠。在此基础上在实验区和测试区比较三种方法的定年结果（见表 5）可以发现：层聚类次生撞击坑探测法得到的定年结果与 Pasckert 等人和 Hiesinger 等人的定年结果相比要早 0.19 Ga~0.31 Ga，明显偏大，表明该方法并未识别出全部次生撞击坑，导致最终剔除的次生撞击坑偏少；未分段次生撞击坑探测法得到的定年结果在虹湾 Area 1 比 Pasckert 等人和 Hiesinger 等人的定年结果早 0.22 Ga，在虹湾 Area 2 却比 Pasckert 等人和 Hiesinger 等人的定年结果晚 0.46 Ga，可见此方法对次生撞击坑的识别效果非常不稳定；以 Pasckert 等人和 Hiesinger 等人的定年结果为参照，本文所述方法的定年结果的中误差仅为 0.05 Ga，远低于层聚类次生撞击坑探测法的 0.44 Ga 和未分段次生撞击坑探测法的 0.63 Ga，定年精度提高了一个数量级，说明这一方法对次生撞击坑的识别最为准确。此外，虽然次生撞击坑多数具有呈链状等群体现象特征，但是仍有一定数量的次生撞击坑距离主撞击坑较远，呈孤立状、圆形等特点^[12]。以空间聚集程度为判据时难以将其与大小相仿的主撞击坑区分开来，本文所述方法则可以找出这类次生撞击坑（图 11(c)、(d)）。由于月表撞击坑密布，因而基于撞击坑聚集程度识别次生撞击坑的这类方法在蒙特卡罗模拟环节存在计算量大，计算时间长的问题。综上，与层聚类次生撞击坑探测法和未分段次生撞击坑探测法相比，顾及月表铁元素含量的次生撞击识别方法更加可靠，计算速度更快，对次生撞击坑的识别更准确。

表 5 与其他次生撞击坑探测法定年定年结果对比（单位：Ga）

Tab.5 Comparison with Other Statutory Dating Results of Secondary Crater Detection (Unit: Ga)

测试、对比区	Pasckert 等人和 Hiesinger 等	层聚类次生撞击坑探测法 ^[20]	未分段次生撞击坑探测法 ^[21]	本文定年结果
	人的定年结果 ^[30]	定年结果	定年结果	
齐奥尔科夫斯基撞击	3.2	3.44	3.37	3.22

坑 Area		(+0.02 -0.03)	6(+0.068 -0.068)	(+0.06 -0.08)
		3.19	3.22	3.02
虹湾 Area 1	3.0	(+0.06 -0.08)	(+0.06 -0.08)	(+0.10 -0.14)
		3.31	2.44	3.04
虹湾 Area 2	3.0	(+0.06 -0.08)	(+0.32 -0.33)	(+0.15 -0.25)

3 结束语

本文提出了一种顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别方法,即以次生撞击坑内的铁元素含量较主撞击坑更接近月壤为假设前提,利用波段比值法得到月表铁元素含量,经测试检验得出可靠阈值后对次生撞击坑进行识别。本文以齐奥尔科夫斯基撞击坑为实验区域,虹湾地区为测试区域,基于日本月亮女神 MI 多光谱数据,对次生撞击坑进行了识别。利用剔除次生撞击坑后剩余的主撞击坑进行地质定年,并将定年结果与实验区和测试区已有定年结果进行比较,两种定年结果具有一致性,实验和测试结果较好,说明本文所述方法对次生撞击坑的识别准确性高。同时,定年结果也表明本文所提方法明显优于层聚类次生撞击坑探测法和未分段次生撞击坑探测法,对次生撞击坑的识别更加准确。这种顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别方法可以为撞击坑尺寸频率定年法提供较为可靠的数据,对次生撞击坑的研究等具有一定意义。

参考文献

- [1] Neal C R. The Moon 35 years after Apollo: What's left to learn?[J]. *Chemie Der Erde-geochemistry*, 2009, 69(1): 3-43
- [2] Ding Xiaozhong, Han Kunying, Han Tonglin, et al. Compilation of the Geological Map of Sinus Iridum Quadrangle of the Moon (LQ-4)[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6):15-27(丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 等. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6):15-27)
- [3] Arvidson R E, Boyce J, et al. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data[J]. *Icarus*, 1979, 37(2):467-474
- [4] Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. Cratering Records in the Inner Solar System in Relation to the Lunar Reference System[M]// *Chronology and Evolution of Mars*. Springer Netherlands, 2001
- [5] Korotev R L, Zeigler R A, Jolliff B L, et al. Compositional and lithological diversity among brecciated lunar meteorites of intermediate iron concentration[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2009, 44(9): 1287-1322
- [6] Guo Dijun, Liu Jianzhong, Zhang Li, et al. The Method of Lunar Geochronology Study and the Subdivisions of Lunar Geologic History[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6):045-061(郭弟均, 刘建忠, 张莉, 籍进柱, 刘敬稳, 王梁. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6):45-61)
- [7] Neukum G, Konig B, Arkanihamed J, et al. A study of lunar impact crater size-distributions[J]. *Earth Moon and Planets*, 1975, 12(2): 201-229
- [8] Neukum, G., B. Koenig, H. Fechtig, and D. Storzer. Cratering in the Earth-Moon system: Consequences for age determination by crater counting, *Proc. Lunar Sci. Conf 6th*, 2597-2620,

-
- 1975b
- [9] Neukum G. Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces[J]. 1984
- [10] Ivanov B A. Mars/Moon Cratering Rate Ratio Estimates[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96(1-4):87-104
- [11] Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2000, 105(E12):29239-29275
- [12] McEwen A S, Bierhaus E B. The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2006, 34(1):535-567
- [13] Werner S C, Ivanov B A, Neukum G. Theoretical analysis of secondary cratering on Mars and an image-based study on the Cerberus Plains[J]. *Icarus*, 2009, 200(2):406-417
- [14] Robbins S J, Hynes B M. The secondary crater population of Mars[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2014, 400(400):66-76
- [15] Xiao Z, Strom R G. Problems determining relative and absolute ages using the small crater population[J]. *Icarus*, 2012, 220(1):254-267
- [16] Bart G D. Lunar surface geology from analysis of impact craters and their ejecta[J]. *Dissertations & Theses - Gradworks*, 2007
- [17] Li Kun, Liu Jianjun, Mou Lingli, et al. Crater Retention Age Calculation of Lunar Geological Unit Using Small-Scale Craters [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2012(s2):452-459(李坤, 刘建军, 牟伶俐, 等. 利用小型撞击坑测算月球地质单元撞击年龄 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012(s2):452-459)
- [18] Bierhaus E B, Chapman C R, Merline W J. Secondary craters on Europa and implications for cratered surfaces[J]. *Nature*, 2005, 437(7062):1125-7
- [19] Michael G, Platz T, Kneissl T, et al. Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements: Spatial randomness and clustering[J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 169-177
- [20] Honda C, Kinoshita T, Hirata N, et al. Detection abilities of secondary craters based on the clustering analysis and Voronoi diagram[C]// *European Planetary Science Congress 2014, EPSC Abstracts*, Vol. 9, id. EPSC2014-119
- [21] Salih A L, Lompart A, Grumpe A, et al. AUTOMATIC DETECTION OF SECONDARY CRATERS AND MAPPING OF PLANETARY SURFACE AGE BASED ON LUNAR ORBITAL IMAGES[J]. 2017, XLII-3/W1:125-132
- [22] Savage R, Palafox L F, Morrison C T, et al. A Bayesian Approach to Subkilometer Crater Shape Analysis Using Individual HiRISE Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10):5802-5812
- [23] Guo D, Liu J, Head J W, et al. Lunar Orientale Impact Basin Secondary Craters: Spatial Distribution, Size - Frequency Distribution, and Estimation of Fragment Size[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(6): 1344-1367
- [24] Lucey P G, Taylor G J, Malaret E R, et al. Abundance and distribution of iron on the moon[J]. *Science*, 1995, 268(5214): 1150-1153
- [25] Antonenko I, Head J W, Mustard J F, et al. Criteria for the detection of lunar cryptomaria[J]. *Earth, Moon, and Planets*, 1995, 69(2):141-172
- [26] Plescia J B. Lunar Crater Forms on Melt Sheets — Origins and Implications for Self-Secondary Cratering and Chronology[C]. *Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference*, 2015
- [27] Hartmann W K, Neukum G. Cratering Chronology and the Evolution of Mars[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96(1-4):165-194
- [28] Ivanov, B. A., Neukum, G., & Wagner, R. Size-Frequency Distributions of Planetary Impact

-
- Craters and Asteroids[M]. 2001, pp. 1–34
- [29] Greg Michael. Measuring the age of planetary surfaces using crater statistics. Planetary surface dating workshop, 6-7 December 2016
- [30] Hiesinger H, Head J W, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 2011, 477(2011):1-51
- [31] Pasckert J H, Hiesinger H, Bogert C H V D. Small-scale lunar farside volcanism[J]. Icarus, 2015, 257:336-354
- [32] Gao Huixuan. Statistical Computation[M]. Peking University Press, 1995:173-176(高惠璇. 统计计算[M]. 北京大学出版社, 1995:173-176)

The Identification of Secondary Craters based on the Distribution of Iron Element on Lunar Surface

XU Xiaojian^{1,2} YE Lejia³ KANG Zhizhong^{1,2} JIANG Wenchen⁴ LUAN Dong^{1,2} ZHANG Dongya^{1,2}

1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083
2. Subcenter of International Cooperation and Research on Lunar and Planetary Exploration, Center of Space Exploration, Ministry of Education of the People's Republic of China, Beijing 100083
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094
4. Beijing Mucheng House Surveying and Mapping Technology Service Co. Ltd., Beijing 100102

Abstract: To determine the geologic age of the lunar surface is the foundation of the research on the formation and evolution of the Moon, and of the inversion of the processes of lunar geological events. Lack of lunar rock and soil samples limits the range of geological units that can be used for isotopic dating. Therefore, the dating using crater size-frequency distribution (CSFD) is employed to obtain the geologic ages of broader regions on the lunar surface. However, the presence of secondary craters will lead to a deviation in geologic age which is obtained by CSFD method. Thus, to get a more accurate geologic age, secondary craters should be eliminated. This paper presents a method to identify secondary craters based on the distribution of iron element on lunar surface. First, the method assumes that the iron content in secondary craters is close to that in lunar regolith. Then, band ratio method is utilized to acquire the iron content. Finally, secondary craters are distinguished from primary ones in terms of the difference of iron content between craters and lunar regolith. The effectiveness and robustness of the proposed method were tested using MI multispectral data of the Japanese Selene Mission. The experimental results show that the geologic age deviation compared

with the known isotopic dated ones is less than 0.04Ga, which shows good consistency. Compared with other secondary craters identification methods, the proposed approach is proven to be more effective and robust.

Key words: secondary craters; crater size-frequency distribution; multispectral images; iron element

First author: XU Xiaojian, master student, specializes in lunar and planetary remote sensing. E-mail: 2012190007@cugb.edu.cn

Corresponding author: KANG Zhizhong, PhD, professor, specializes in digital photogrammetry, LiDAR data processing, lunar and planetary remote sensing. E-mail: zzkang@cugb.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41872207); National Key Research and Development Project (2019YFE0123300); The Pre-research Project on Civil Aerospace Technologies Funded by China National Space Administration (CNSA) (No. D020204)..

网络首发：

标题：顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别

作者：徐箫剑，叶乐佳，康志忠，蒋文宸，栾栋，张冬亚

收稿日期：2020-07-10

DOI:10.13203/j.whugis20200345

引用格式：

徐箫剑, 叶乐佳, 康志忠, 等. 顾及月表铁元素含量的次生撞击坑识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200345 (Xu Xiaojian, Ye Lejia, Kang Zhizhong, et al. The Identification of Secondary Craters based on the Distribution of Iron Element on Lunar Surface [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20200345)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考

许强

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1651-1659.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200043>

使用深度学习方法实现黄土滑坡自动识别

巨袁臻, 许强, 金时超, 李为乐, 董秀军, 郭庆华

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1747-1755. doi: 10.13203/j.whugis20200132

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200132>