

doi: 10.6046/gtzyyg.2019.01.33

引用格式: 张珂,刘建忠,程维明. 月球哥白尼纪次级坑的形态特征及其空间分布[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):255-263.
(Zhang K,Liu J Z,Cheng W M. Morphological features and spatial distribution of the lunar Copernican secondary craters [J]. Remote Sensing for Land and Resources ,2019,31(1):255-263.)

月球哥白尼纪次级坑的形态特征及其空间分布

张 珂^{1,2}, 刘建忠^{1,2}, 程维明^{2,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院地理科学与资源
研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 月球次级坑是月球上的一种地质特征,易与初级坑相混淆,对月表定年影响大,同时对主撞击坑的撞击方向有一定的指示意义,因此识别和筛选出次级坑是一项重要的工作。综合考虑撞击坑空间分布位置和直径关系,选取哥白尼纪 5 个典型撞击坑为研究对象,基于遥感影像和地形数据,通过总结相关学者对特定形态指标与次级坑定量关系的研究,构建 4 个形态指标(不规则度、椭圆度、深径比、坑缘高度与直径比)及其参数范围,进行次级坑的智能化识别、提取与空间分布研究。最终识别出次级坑总数量为 17 811 个,在此基础上构建了包含位置、大小、形状、距离和方向 5 大类的数据库;并研究了距主坑边缘不同距离范围内次级坑的规模和空间分布特征;提出了基于次级坑主轴方向判定撞击坑入射方向的新方法。研究结果表明:①在规模大小上,月海次级坑直径大小主要集中在初级坑直径的(2.7±0.11)% 以下;月陆次级坑直径大小主要集中在初级坑直径的(3±0.3)% 以下;在空间分布上,月海与月陆次级坑分布规律相一致,次级坑数量占总次级坑数量的 90% 时,其分布距离是最大分布距离的(57±7)%;②Tycho 撞击坑的入射方向为 W-E 方向,Copernicus 撞击坑和 Kepler 撞击坑的入射方向为 SE-NW 方向,Aristarchus 撞击坑和 Jackson 撞击坑的入射方向为 NW-SE 方向。这些认识将对更准确地开展撞击坑撞击方向的研究提供参考。

关键词: 次级坑; 哥白尼纪; 形态指标; 次级坑数据库; 空间分析; 撞击方向

中图法分类号: TP 79; P 691 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2019)01-0255-09

0 引言

月球表面次级坑是在初级撞击坑撞击过程的挖掘阶段,由于稀疏波的作用使得物质向外溅射,这些物质在月球重力作用下,撞击月表形成的撞击坑。目前,在月表定年方法中最常使用的是撞击坑的大小-频率分布统计方法^[1],即通过统计某一特定单元面积内撞击坑的密度来估算地质单元的年龄,当初级坑密度越大,地质单元年龄越老,但由于次级坑的存在会使学者在使用该方法定年时产生很大的影响^[2-9],因此识别和剔除次级坑是定年研究中的重要环节。

由于抛射碎片的抛射速度、角度和抛射碎片的大小、重量等不同,导致形成的次级坑也有着不同的大小和形态特征,表现为狭长的、不规则的、带有中

心丘的^[6]、与相同大小的初级坑相比深度更浅的特征,一般以次级坑链(如鱼骨形次级坑链^[10-11])和次级坑簇的形式存在。以形态为基础的次级坑研究中,不同学者使用不同方法对其进行识别。Shoemaker^[12]首次提出了远距次级坑的存在,使用幂律累积频率图将研究区域的撞击坑分为初级坑和次级坑 2 种,较缓斜率涵盖的撞击坑为初级坑,而较陡斜率涵盖的撞击坑为次级坑;Oberbeck 和 Morrison^[10-11]解译了鱼骨形次级坑链,并模拟了鱼骨形次级坑链是由许多抛射出的碎石砾同时或几近同时撞击月表形成;Bart 等^[13]通过研究 Bürg 撞击坑周围石砾大小来区分远端次级坑与相似大小的初级坑,研究表明在低速撞击下次级坑周围碎石砾大小比具有相同大小的初级坑的碎石砾大小更大;Kumar 等^[6]解译了距 Copernicus 撞击坑中心 475 km

收稿日期: 2017-09-06; 修订日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目“全月球形貌类型划分方法研究”(编号: 41571388)、国家科技基础性工作专项项目“月球数字地质图编研”(编号: 2015FY210500)和中国科学院 B 类先导科技专项培育项目课题(编号: XDPB11-3)共同资助。

第一作者: 张 珂(1991-),女,硕士研究生,主要从事行星遥感形貌科学方面的研究。Email: zhangke415@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 刘建忠(1968-),男,研究员,博士生导师,主要从事月球与行星地质研究。Email: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn。

左右处带有中心丘的次级坑,并计算了次级坑的一些形态指标参数(坑直径、深度、中心丘直径、中心丘高度和深径比);McEwen 等^[14]使用 2 种方法来识别 Zunil 撞击坑周围的次级坑,一是根据次级坑有明显的 TI 反照率相,并且径向指向 Zunil 撞击坑,二是使用撞击坑大小频率分布统计法(crater size – frequency distribution, CSFD),其值可达 5.5,得到直径 ≥ 20 m 的次级坑有 10^6 个;Wells 等^[15]在圆偏振比雷达影像上基于溅射毯的不对称性识别靠近月球南极的 Newton 和 Newton – A 撞击坑内相同大小的初级坑和远距次级坑,远距次级坑分布在 Tycho 撞击坑溅射毯上并与辐射纹方向一致,而相同大小初级坑不在溅射毯上;Honda 等^[16]依据次级坑在空间分布上是随机的,提出了 2 种方法识别并进行比较,一是考虑撞击坑的尺度变化,使用群平均法进行聚类分析,二是使用 Voronoi (简称 V) 网格划分影像,估算每个撞击坑所占 V 网格面积(称为 V 区域),因 V 区域与撞击坑聚集相关,所以利用 V 区域来观察撞击坑的空间分布是随机的,经比较认为该方法效果较好。综上可知,前人对次级坑的研究主要集中在某一种特殊形态的识别方面,对孤立次级坑的研究相对较少,缺乏应用的普适性,并缺乏次级坑数据库以及对空间分布规律的研究。

为了更好地研究次级坑,进一步明确次级坑在形态上与初级坑的差别,总结、实验、修改相关学者研究所得的次级坑形态指标参数范围,以此进行次

级坑的筛选与识别;构建哥白尼纪次级坑数据库;研究次级坑尺寸大小及其空间分布规律;提出一种判断撞击体入射方向的新方法,即以次级坑的主轴方向值为主导因素,溅射物分布形态和主坑的坑缘形态特征为辅助因素的方法,旨在为以后更好研究次级坑的影响范围以及定年研究提供参考。

1 数据处理与指标体系

1.1 数据处理

次级坑识别使用的遥感影像是空间分辨率为 100 m 的月球勘测轨道器宽角相机的 7 波段影像^[17]数据和数字地形数据(29 像素/度)。次级坑分布范围(简称 cr)以辐射纹在月表沉降范围为界线,根据一系列的波段选择,最终确定 566 nm(R), 415 nm(G), 321 nm(B)3 波段假彩色合成时次级坑分布范围界线最为明显。

综合考虑撞击坑的空间位置和尺寸大小,选取哥白尼纪 5 个典型撞击坑(Copernicus 撞击坑、Tycho 撞击坑、Jackson 撞击坑、Aristarchus 撞击坑和 Kepler 撞击坑)进行筛选和识别次级坑,研究其形态和分布。空间分布上,5 个撞击坑分别位于月球正面极地地区、月海和月球背面。尺寸大小上,最小的直径为 32 km,最大的直径为 93 km,具有一定的代表性。哥白尼纪 5 个典型撞击坑的基本信息如表 1 和图 1 所示,图 1 采用正射投影坐标系。

表 1 哥白尼纪 5 个典型撞击坑参数
Tab.1 Five typical Copernican primary craters and their characteristics

参数	Copernicus 撞击坑	Tycho 撞击坑	Jackson 撞击坑	Aristarchus 撞击坑	Kepler 撞击坑
经度	20°W	11.2°W	163.1°W	47.4°W	38°W
纬度	9.7°N	43.3°S	22.4°N	23.7°N	8.1°N
年代/Ma	800 ± 40	109 ± 4	80 ~ 150	~ 450	625 ~ 950
直径/km	93	86	71	40	32
空间位置	位于风暴洋的中东部,雨海的南边,靠近月球赤道地区	位于月球正面南纬 45°S 的南部山地	位于月球背面的北半球	位于风暴洋的中部,月球正面的中低纬度地区	位于风暴洋和岛海之间,月球正面的北东侧

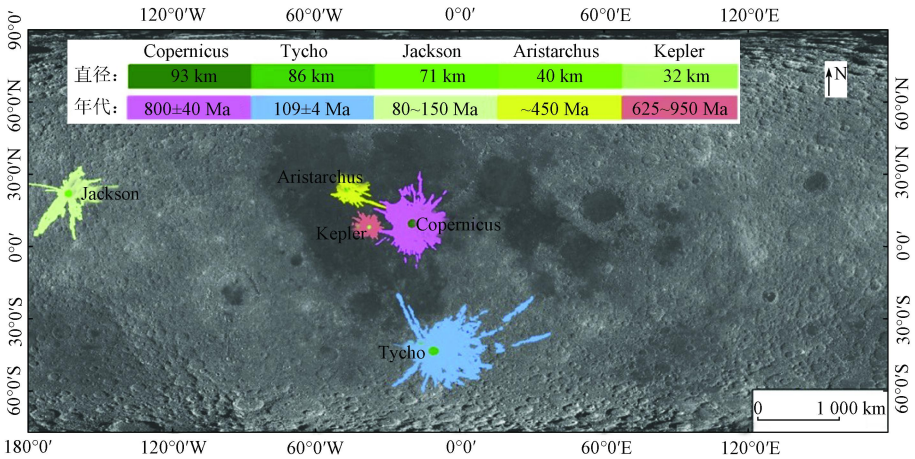


图 1 哥白尼纪 5 个典型撞击坑的空间位置及其次级坑分布界限范围

Fig.1 Spatial locations of the five Copernican lunar primary craters and the maximum distribution range of their secondary craters

次级坑直径大小范围以不同月表地貌单元的不同饱和度直径为标准。次级坑直径下限依据 CSFD 方法,月海撞击坑的饱和度直径为 $300\text{ m}^{[18-19]}$,月陆撞击坑的饱和度直径为 $500\text{ m}^{[4,20]}$ 。次级坑最大直径约为初级坑直径的 5% 左右^{〔21-23〕}。

1.2 哥白尼纪次级坑的识别指标体系

通过总结相关学者对次级坑指标参数的研究,结合次级坑的形态特征,最终确定识别次级坑的指标参数为不规则度、椭圆度、深径比、坑缘高度与直径比(表 2)。

表 2 次级坑形态指标参数

Tab.2 Morphological parameters of the secondary craters

指标参数	用途	公式 ^①
不规则度(Γ)	分析坑缘不规则的程度	$\Gamma = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$
椭圆度(ei)	坑缘的延展程度	$ei = \frac{\pi(L/2)^2}{A}$
深径比(t)	分析次级坑的深浅程度	$t = \frac{H}{D}$
坑缘高度与直径比(γ)	撞击坑隆起高度	$\gamma = \frac{h}{D}$

①式中: P,A 和 L 分别为次级坑坑口周长、面积和主轴长度; H 为次级坑边缘到坑底的深度; D 为次级坑边缘的直径(以坑口面积相等圆的面积计算的直径为次级坑直径); h 为坑缘深度。

1)不规则度(Γ)。Zhou 等^{〔24〕}研究了哥白尼纪 3 个撞击坑(Copernicus 撞击坑、Jackson 撞击坑和 Tycho 撞击坑)与 3 个复杂撞击坑(东海盆地、Antoniadi 撞击坑和 Compton 撞击坑)连续溅射毯上的孤立次级坑的 Γ 为 1.04~1.30; Calef 等^{〔25〕}对火星初级坑与次级坑的 Γ 进行比较研究,得到次级坑 Γ 为 1.06 ± 0.05 (部分 Γ>1.1)。

表 3 次级坑识别的指标参数特征值

Tab.3 Range of morphological parameters used to identify secondary craters

指标参数	研究学者	范围	本文界定范围
不规则度	Zhou 等 ^{〔24〕}	1.04~1.30	Γ≥1.02
	Calef 等 ^{〔25〕}	1.06±0.05	
椭圆度	Guo 等 ^{〔26〕}	0~1.20	ei≥1.20
	Nagumo 等 ^{〔27〕}	≥1.20	
深径比	Moutsoulas 等 ^{〔28〕}	0.12~0.15	0.07≤t<0.20
	Basilevsky 等 ^{〔29〕}	0.025~0.130	
	Grant 等 ^{〔30〕}	0.07	
	Pike ^{〔31〕}	0.104~0.173±0.040	
坑缘高度与直径比	Watters ^{〔32〕}	0.03~0.04	0.02≤γ≤0.04
	Pike ^{〔31〕}	0.02~0.04	
	Pike ^{〔33〕}	0.02	

2 结果和讨论

2.1 识别次级坑数量

根据设定的指标参数范围,5 个撞击坑 cr 内共

2)椭圆度(ei)。Guo 等^{〔26〕}识别了东海盆地辐射纹范围内 1 301 个次级坑,选定 63 个进行形态测量,得出 ei=1.20,并随着次级坑直径的增大而减小,距主坑距离越远而减小; Nagumo 等^{〔27〕}研究月表次级坑形态表明当小型撞击坑 ei≥1.20 时被认为是次级坑。

3)深径比(t)。Moutsoulas 等^{〔28〕}计算得到月表低速低角度撞击作用下形成的次级坑的 t 为 0.12~0.15; Basilevsky 等^{〔29〕}计算了 Copernicus 撞击坑 NE 方向 500 km 内 19 个直径在 350~950 m 范围内的次级坑,得到 t 为 0.025~0.110, Tycho 撞击坑 NE 方向 2 250 km 内直径范围在 250~650 m 内 8 个次级坑 t 为 0.07~0.13; Grant 等^{〔30〕}通过解译火星 Bonneville 撞击坑,得出远距次级坑的 t 为 0.07; Pike^{〔31〕}列举了 28 个次级坑的深度和直径,得到次级坑 t 为 0.104~0.173±0.040。

4)坑缘高度与直径比(γ)。Watters 等^{〔32〕}识别了 75 个次级坑簇,共识别出大于 2 700 个次级坑,直径范围在 40~300 m,撞击速度在 0.4~2 km/s,计算得出 γ 为 0.03~0.04; Pike^{〔31〕}计算了次级坑的直径、深度、边缘高度和外缘边宽,通过计算可得 γ 为 0.02~0.04; Pike^{〔33〕}解译了 29 个直径范围从 450~4 000 m 的次级坑,得到 γ 为 0.02 左右。

为了更好地识别次级坑,综合以上学者研究得出的 4 个指标参数范围,以此为基础对每一个指标参数的范围进行反复实验验证,在实验中不断优化指标参数的范围,最终得出本文所使用的次级坑识别指标参数特征值(表 3)。

识别出了 17 811 个次级坑(19 839 个撞击坑),其中,识别出 Copernicus 撞击坑 cr 内共 2 997 个次级坑(3 319 个撞击坑); Tycho 撞击坑 cr 内共 7 343 个次级坑(8 067 个撞击坑); Jackson 撞击坑 cr 内共 2 637 个次级坑(3 219 个撞击坑); Aristarchus 撞击

坑 cr 内共 2 893 个次级坑(2 971 个撞击坑); Kepler 撞击坑 cr 内共 1 941 个次级坑(2 263 个撞击坑)。

次级坑空间分布如图 2 所示,采用正射投影坐标系,以撞击坑中心位置为投影中心。

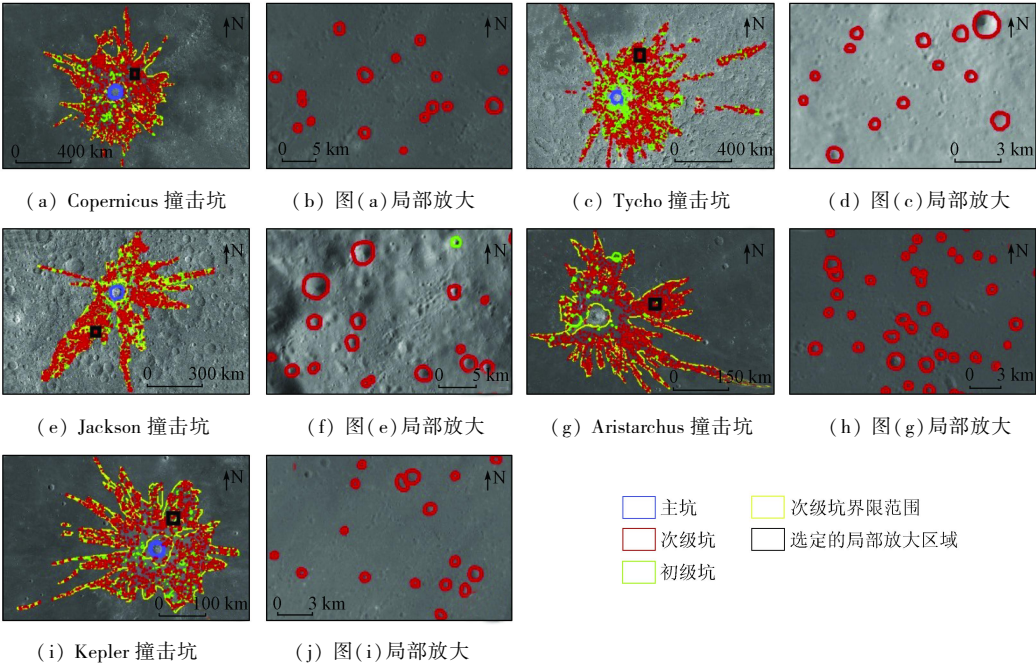


图 2 5 个典型哥白尼纪撞击坑次级坑界限范围内的次级坑分布

Fig.2 Secondary crater distribution in the distribute range of the secondary craters about the five Copernican primary craters

2.2 建立次级坑数据库

为了更好地了解次级坑的形态特征,在筛选识别的研究成果基础上,建立哥白尼纪 5 个撞击坑周

围次级坑数据库,从位置、大小、形状、距离和方向 5 个指标系统性地对次级坑的形态进行表述,数据库属性信息如表 4 所示。

表 4 部分次级坑数据库属性信息
Tab.4 Secondary craters geodatabase attribute

指标	属性类型	Copernicus 次级坑	Tycho 次级坑	Jackson 次级坑	Aristarchus 次级坑	Kepler 次级坑
	FID	1	1	1	1	1
位置	中心点经度	13.55°N	27.55°S	19.10°N	25.09°N	13.09°N
	中心点纬度	29.54°W	22.65°W	166.85°W	41.67°W	35.90°W
大小	面积/km ²	2.23	4.48	3.63	0.20	0.59
	周长/km	5.74	7.84	7.10	1.67	2.82
	直径/km	1.69	2.39	2.15	0.51	0.87
	深度/m	275.0	252.0	274.5	73.5	67.0
	边缘高度/m	53.40	67.35	59.04	12.16	22.32
	主轴长度/km	2.10	3.15	2.63	0.67	1.03
	副轴长度/km	1.60	2.16	2.11	0.46	0.76
形状	不规则度	1.080	1.045	1.050	1.042	1.040
	椭圆度	1.56	1.74	1.50	1.69	1.42
	深径比	0.166	0.105	0.130	0.140	0.080
	坑缘高度与直径比	0.031	0.028	0.027	0.024	0.260
距离	距主坑中心距离/km	311.10	570.00	139.25	181.20	105.69
方向	主轴方向/°	66.72	-66.76	-25.78	38.03	-62.74

2.3 基于直径和距主坑边缘距离的次级坑空间分布

距离主坑边缘的不同半径与次级坑直径关系如图 3 所示,其中 R 为主坑半径, S 为距离主坑边缘的距离。在尺寸大小上, Copernicus 撞击坑周围,直径在 0.99 km 以下的次级坑, 占总次级坑数量的

50.4%; 直径在 2.32 km 以下的次级坑, 占总次级坑数量的 90.0%, 与主坑直径之比为 0.026 (图 3 (a)); Tycho 撞击坑周围, 直径在 1.03 km 以下的次级坑, 占总次级坑数量的 50.1%; 直径在 2.54 km 以下的次级坑, 占总次级坑数量的 90.0%, 与主坑

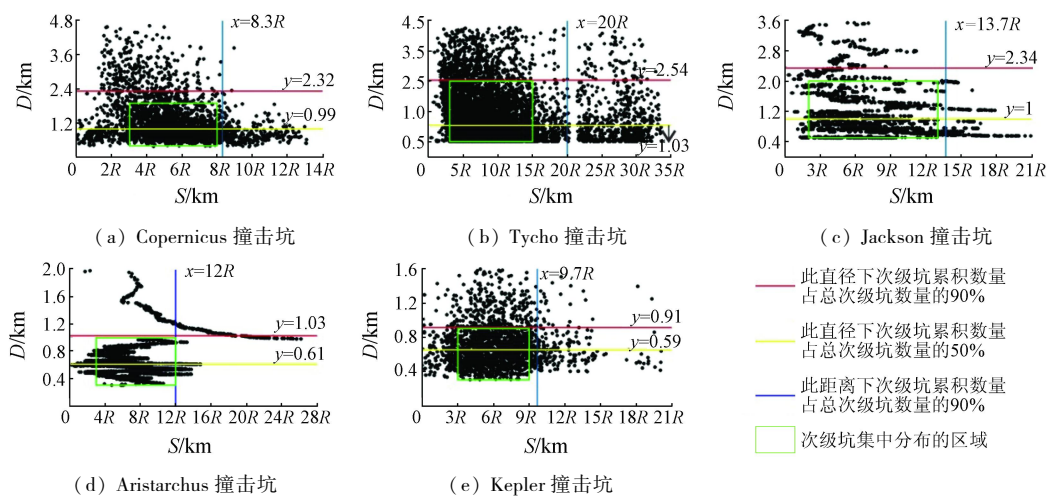


图 3 距离主坑边缘的不同半径与次级坑直径关系

Fig. 3 Relationship between the different radius from the main crater rim crest and secondary crater diameter

直径之比为 0.030(图 3(b)); Jackson 撞击坑周围,直径在 1 km 以下的次级坑,占总次级坑数量的 49.9%,直径在 2.34 km 以下的次级坑,占总次级坑数量的 90.2%,与主坑直径之比为 0.033(图 3(c)); Aristarchus 撞击坑周围,直径在 1.03 km 以下的次级坑,占总次级坑数量的 89.9%,与主坑直径之比为 0.026(图 3(d)); Kepler 撞击坑周围,直径在 0.59 km 以下的次级坑,占总次级坑数量的 49.6%,直径在 0.91 km 以下的次级坑,占总次级坑数量的 89.0%,与主坑直径之比为 0.028(图 3(e))。

在空间分布上,Copernicus 撞击坑周围的次级坑的最大分布距离可达 14R,主要分布在 2R~8R,距主坑边缘 8.3R 范围内时,其数量达总次级坑数量

的 90.1%(图 3(a)); Tycho 撞击坑周围的次级坑的最大分布距离可达 34R,主要分布在 3R~15R,在距主坑边缘 20R 范围内时,其数量达总次级坑数量的 90.4%(图 3(b)); Jackson 撞击坑周围的次级坑的最大分布距离可达 21R,主要分布在 2R~13R,距主坑边缘 13.7R 范围内时,其数量达总次级坑数量的 89.9%(图 3(c)); Aristarchus 撞击坑周围的次级坑的最大分布距离可达 27R,主要分布在 3R~12R,距主坑边缘 12R 范围内时,次级坑数量达总次级坑数量的 89.9%(图 3(d)); Kepler 撞击坑周围的次级坑的最大分布距离可达 21R,主要分布在 2R~9R,距主坑边缘 9.7R 范围内时,其数量达总次级坑数量的 90.2%(图 3(e))。不同次级坑直径及分布距离与次级坑数量占比关系如图 4 所示。

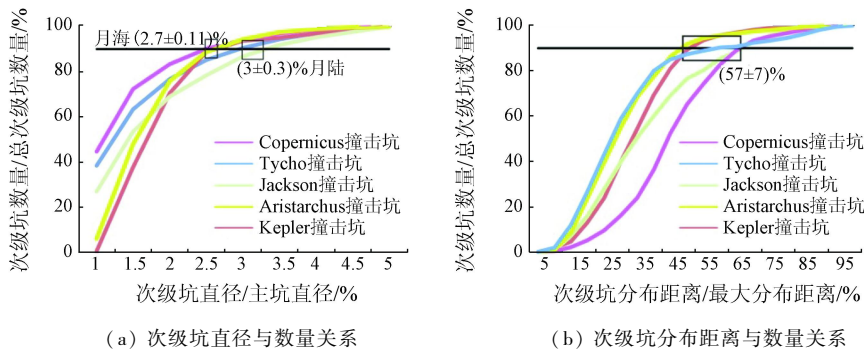


图 4 不同次级坑直径、次级坑分布距离下与次级坑数量占比的关系

Fig. 4 Relationship of secondary crater number with different secondary crater diameter and distance

1)次级坑的尺寸大小在月海和月陆有差别。月海撞击坑周围的次级坑数量占总次级坑数量达到 90%时,其直径是主坑直径的 $(2.7 \pm 0.11)\%$;月陆撞击坑周围的次级坑数量占总次级坑数量达到 90%时,次级坑直径是主坑直径的 $(3 \pm 0.3)\%$ (图 4(a))。

2)次级坑的空间分布模式在月海和月陆上基本一致。①在初级坑周围的次级坑,其数量占总次

级坑数量达 90%时,其分布距离是最大分布距离的 $(57 \pm 7)\%$ (图 4(b))。②次级坑在距离主坑边缘 1R~2R 范围内时,次级坑数量极少。因为在挖掘阶段,撞击坑抬升之后坑缘物质在重力作用下向外转移,而转移结束前的时间和距离内形成的次级坑可能会被掩盖而不被识别出来,因此次级坑在距离主坑边缘 1R 范围内基本不存在,在 1R~2R 范围内数

量也很少。Schenk 等^[34]研究表明,距撞击坑坑缘 $1R \sim 2R$ 范围内是连续溅射物在月表的沉积相,在此沉积相上次级坑的分布很少,次级坑主要分布在连续溅射沉积相的边缘到不连续溅射沉积相上,在辐射纹范围内次级坑的分布数量也很少; Zhou 等^[24]和 Bierhaus 等^[35]研究表明连续溅射沉积相接近撞击坑的边缘,由连续溅射沉积物形成,在此范围内很少有次级坑,近邻次级坑也在连续溅射毯范围之外。

③当次级坑分布距离大于次级坑分布最大距离的 60% 时,次级坑数量锐减。随着溅射物溅射角度、速度的增大,次级坑距主坑边缘也越远。这部分的次级坑主要分布在辐射纹上。根据溅射物在月表分布距离与溅射角度和速度的关系,即

$$d = v^2 \sin(2\theta) / g , \tag{1}$$

式中: d 为溅射物在月表的分布距离; v 为溅射物的初始速度; θ 为溅射物被抛射的角度; g 为月表重力加速度。当溅射物速度越大,且 $\theta < 45^\circ$ 时,次级坑距主坑距离才会更远^[36]。但也由于受溅射能量

与重力作用的限制,距主坑越远时,溅射物数量和形成的次级坑就越少。

2.4 基于次级坑主轴方向的撞击角度

在研究撞击体的入射角度和方向时,很多学者主要从撞击坑坑缘形态和溅射物形态研究^[37-39],然而也有一部分撞击坑虽带有辐射纹特征,但很难通过辐射纹的形态和分布来识别撞击方向。因此,为了更加准确地研究撞击坑入射方向,就需要通过计算次级坑主轴方向,但因计算得到的主轴方向值不包含方位关系,还需要结合主撞击坑的坑缘形态和溅射物形态对初级坑撞击方向进行研究。为了更准确地表述研究撞击坑入射方向,对撞击坑入射方向进行 16 分区划分,每个方向的区间是 22.5° ,以 $(-11.25^\circ, 11.25^\circ)$ 区间内撞击方向为 E 方向。

撞击坑体入射方向判断及综合解译结果如图 5 所示。其中,左侧为主坑的次级坑界限范围内不同主轴方向上的次级坑数量分布图,右侧为主坑的溅射物分布形态,黑色的箭头方向表示撞击坑入射方向。

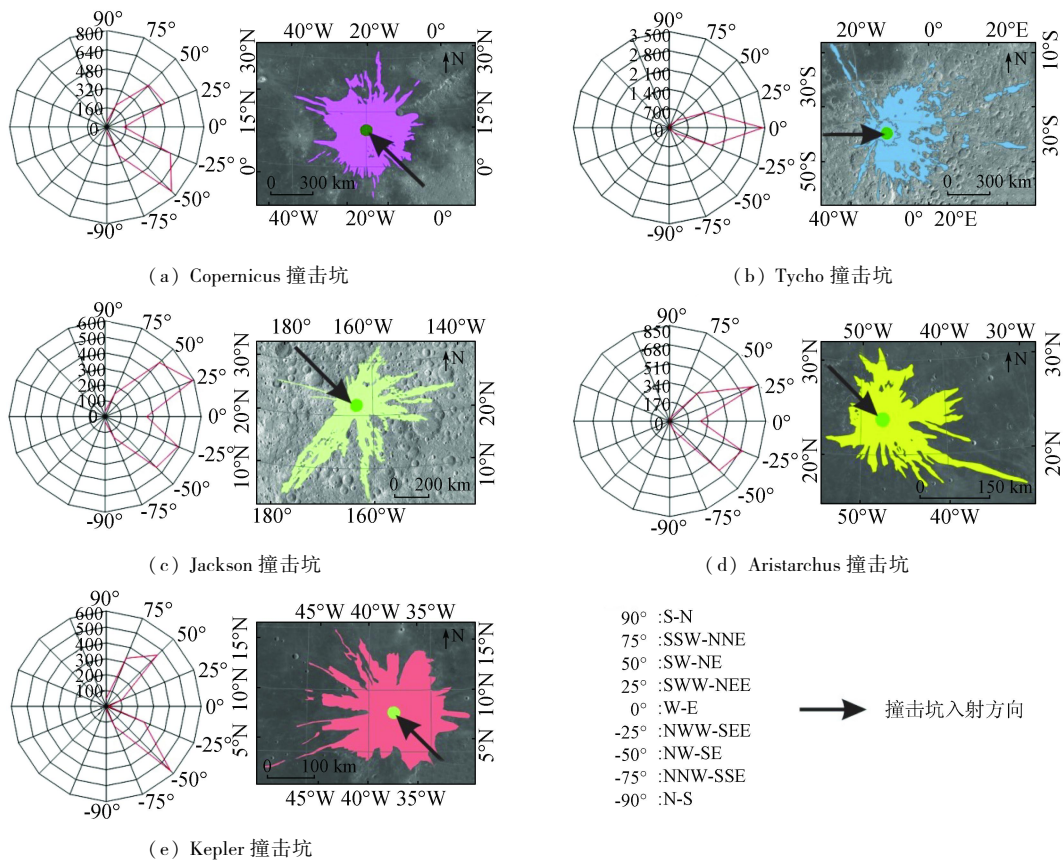


图 5 撞击坑体入射方向判断综合解译

Fig. 5 Comprehensive interpretation of determining the impact directions

由图 5 所示可得, Copernicus 撞击坑的次级坑主轴方向在 NW - SE 的次级坑数量最多,其溅射物呈现六边形的形态,可确定其撞击方向为 SE - NW 方向(与 Shkuratov 等^[40]研究相符)(图 5(a)); Tycho 撞击坑的次级坑主轴方向主要集中在 W - E 方

向,其溅射物主要分布在东边,可以确定其撞击方向为 W - E 方向(与 Hirata 等^[41]研究相符)(图 5(b)); Jackson 撞击坑的次级坑主轴方向在 SWW - NEE 的次级坑数量最多,但其溅射物的分布形态基本上是以 NW - SE 方向为对称轴分布,在 NW 方向

上基本没有溅射物的存在,并且次级坑主轴方向在 NW – SE 的数量仅次于 SWW – NEE 方向上的,所以可得到其撞击方向为 NW – SE 方向(与 Hirata 等^[42]研究相符)(图 5(c)); Aristarchus 撞击坑的次级坑主轴方向在 SWW – NEE 的次级坑数量最多,但其溅射物分布形态以 NW – SE 方向为对称轴分布,在 SE 方向上有一狭长的辐射纹形态,并且次级坑主轴方向在 NW – SE 的数量仅次于 SWW – NEE 方向上,可得到其撞击方向为 NW – SE 方向(与 Mustard 等^[43]研究相符)(图 5(d)); Kepler 撞击坑的次级坑主轴方向在 NW – SE 的次级坑数量最多,其溅射物在 NW 方向呈现狭长延伸形态,可确定其撞击方向为 SE – NW 方向(与 Öhman 等^[44]研究相符)(图 5(e))。

3 结论

基于多源遥感数据对哥白尼纪 5 个典型撞击坑周围的次级坑进行形态特征解译,得出以下结论:

1) 识别出哥白尼纪 5 个撞击坑周围的次级坑共 17 811 个,并研究哥白尼纪次级坑的空间分布,得出当次级坑的累计数量达到总次级坑数量的 90% 以上时,在尺寸大小上,月海和月陆次级坑表现出一定的差异性,而在空间分布上则具有一致性。这为以后更好地研究次级坑影响范围提供了依据。

2) 补充了研究撞击体入射方向的新方法,通过比较发现,本研究所显示的撞击体入射方向与前人研究结果相一致。

由于本文仅对哥白尼纪 5 个大型撞击坑周围的次级坑空间分布进行了研究,尚缺乏不同年代的比较,未来研究将进一步比较不同年代次级坑的特点与次级坑对月表定年的影响。

参考文献(References):

[1] Arvidson R E, Chapman C, Moore H, et al. Standard techniques for presentation and analysis of crater size – frequency data [J]. Icarus, 1979, 37(2): 467 – 474.

[2] Anderson R B, Bell J F I. Geologic mapping and characterization of Gale crater and implications for its potential as a Mars science laboratory landing site [J]. International Journal of Mars Science and Exploration, 2010, 5: 76 – 128.

[3] Bierhaus E B, Chapman C R, Merline W J. Secondary craters on Europa and implications for cratered surfaces [J]. Nature, 2005, 437: 1125 – 1127.

[4] Dundas C M, McEwen A S. Rays and secondary craters of Tycho [J]. Icarus, 2007, 186(1): 31 – 40.

[5] Hartmann W K, Neukum G. Cratering chronology and evolution of Mars [J]. Space Science Reviews, 2001, 96(1 – 4): 165 – 194.

[6] Kumar P S, Kumar A S, Keerthi V, et al. Chandrayaan – 1 observation of distant secondary craters of Copernicus exhibiting central mound morphology: Evidence for low velocity clustered impacts on the Moon [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(9): 870 – 879.

[7] McEwen A S, Bierhaus E B. The importance of secondary cratering to age constraints on planetary surfaces [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2006, 34(1): 535 – 567.

[8] Pike R J, Wilhelms D E. Secondary – impact craters on the Moon: Topographic form and geologic process [C]//Lunar and Planetary Science Conference. Houston, 1978, 9: 907 – 909.

[9] Robbins S J, Hynek B M. Distant secondary craters from Lyot crater, Mars, and implication for surface ages for surface ages of planetary bodies [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 27(8): 1677 – 1690.

[10] Oberbeck V R, Morrison R H. The secondary crater Herringbone pattern [C]//Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 1973, 4: 570 – 571.

[11] Oberbeck V R, Morrison R H. Laboratory simulation of the herringbone pattern associated with lunar secondary crater chains [J]. Moon, 1974, 9(3 – 4): 415 – 455.

[12] Shoemaker E M. Preliminary analysis of the fine structure of the lunar surface in Mare Cognitum [C]//Hess W N, Menzel D H, O'Keefe J A. The Nature of the Lunar Surface. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1965, 2: 33 – 77.

[13] Bart G D, Melosh H J. Using lunar boulders to distinguish primary from distant secondary impact craters [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(7): 1 – 5.

[14] 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.

[15] Wells K S, Campbell D B, Campbell B A, et al. Detection of small lunar secondary craters in circular polarization ratio Radar images [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(e6): 258 – 273.

[16] 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. Portugal, 2014, 9: 119.

[17] Boyed A K, Robinson M S, Sato H. Lunar reconnaissance orbiter wide angle camera photometry: An empirical solution [C]//43rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 2012, 43: 2795.

[18] Hartmann W K. Does crater “saturation equilibrium” occur in the solar system? [J]. Icarus, 1984, 60(1): 56 – 74.

[19] Hartmann W K, Berman D C, Betts B H. Landing site studies using high resolution MGS crater counts and Phobos – 2 Termoskan data [J]. Second Mars Surveyor Landing Site Workshop, 1999: 55.

[20] Chapman C R, Mckinnon W B. Cratering of planetary satellites [M]//Burns J A, Matthews M S. Satellites. Tucson: University of Arizona Press, 1986: 492 – 580.

[21] Allen C C. Large lunar secondary craters: Size – range relationships [J]. Geophysical Research Letters, 1979, 6(1): 51 – 54.

[22] Melosh H J. Impact Cratering: A Geologic Process [M]. New York: Oxford University Press, 1989.

[23] Schultz P H, Singer J. A comparison of secondary craters on the Moon, Mercury, and Mars [C]//Lunar and Planetary Science Con-

ference Proceedings. Texas, 1980, 11 : 2243 – 2259.

[24] Zhou S Z, Xiao Z Y, Zeng Z X. Impact craters with circular and isolated secondary craters on the continuous secondaries facies on the Moon[J]. Journal of Earth Science, 2015, 26(5) : 740 – 745.

[25] Calef III F J, Herrick R R, Sharpton V L. Geomorphic analysis of small rayed craters on Mars: Examining primary versus secondary impacts[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114 (e10) : 538 – 549.

[26] Guo D J, Liu J Z, Head J W. Spatial distribution and geometrics of orientale secondary crater [C]//Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 2017, 2560.

[27] Nagumo K, Nakamura A M. Reconsideration of crater size – frequency distribution on the Moon: Effect of projectile population and secondary craters[J]. Advances in Space Research, 2001, 28(8) : 1181 – 1186.

[28] Moutouls M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with moderate depth/diameter ratio. II – d/D between 0. 12 and 0. 15 [J]. Moon and the Planets, 1981, 25(1) : 51 – 66.

[29] Basilevsky A T, Kozlova N A, Zavyalov I Y, et al. Morphometric studies of the Copernicus and Tycho secondary craters on the Moon: Dependence of crater degradation rate on crater size [J]. Planetary and Space Science, 2017; 1 – 10.

[30] Grant J A, Arvidson R E, Crumpler L S, et al. Crater gradation in Gusev crater and Meridiani Planum, Mars[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2006, 111 (e2) : 516 – 531.

[31] Pike R J. Crater dimensions from Apollo data and supplemental sources[J]. Moon, 1976, 15(3 – 4) : 463 – 477.

[32] Watters W A, Collins G S, Hundal C, et al. Dependence of secondary crater shape on impact velocity [C]//79th Annual Meeting of the Meteoritical Society. Berlin, 2016, 1921 : 6502.

[33] Pike R J. Geometric Interpretation of Lunar Craters [M]. Washington : Washington U. S. Government Printing Office, 1980.

[34] Schenk P M, Ridolfi F J. Morphology and scaling of ejecta deposits on Icy satellites [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(12) : 1 – 4.

[35] Bierhaus E B, Dones L, Alvarellos J L, et al. The role of ejecta in the small crater populations on the mid – sized saturnian satellites [J]. Icarus, 2011, 218(1) : 602 – 621.

[36] Nyquist L E, Bogard D D, Shih C Y, et al. Ages and geologic histories of Martian meteorites [J]. Space Science Reviews, 2001, 96(1 – 4) : 105 – 164.

[37] Poelchau M H, Kenkmann T. Asymmetric signatures in simple craters as an indicator for an oblique impact direction [J]. Meteoritics and Planetary Science, 2010, 43(12) : 2059 – 2072.

[38] Tsikalas F. Mjøltnir Crater as a Result of Oblique Impact: Asymmetry Evidence Constrains Impact Direction and Angle [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2005 : 285 – 306.

[39] Wallis D, Burchell M J, Cook A C, et al. Azimuthal impact directions from oblique impact crater morphology [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 359(3) : 1137 – 1149.

[40] Shkuratov Y, Kaydash V, Rohacheva L, et al. Comparison of lunar red spots including the crater copernicus [J]. Icarus, 2016, 272 : 125 – 139.

[41] Hirata N, Haruyama J, Ohtake M, et al. Morphological analyses of Tycho crater with Kaguya data [C]//Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 2009, 1514.

[42] Hirata N, Haruyama J, Ohtake M, et al. Remote sensing study of a large lunar crater Jackson [C]//41st Lunar and Planetary Science Conference. Texas, 2010, 1533 : 1585.

[43] Mustard J F, Pieters C M, Isaacson P J, et al. Compositional diversity and geologic insights of the Aristarchus crater from Moon mineralogy mapper data [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2011, 116 (e6) : 0 – 12.

[44] Öhman T, Kring D A. Photogeologic analysis of impact melt – rich lithologies in Kepler crater that could be sampled by future missions [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117 (e12) : 295 – 306.

Morphological features and spatial distribution of the lunar Copernican secondary craters

ZHANG Ke^{1,2}, LIU Jianzhong^{1,2}, CHENG Weiming^{2,3}

(1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Lunar secondary crater, a kind of geological feature that is easily confused with the primary craters on the Moon, can introduce significant errors in lunar dating. However, it can be used to determine the impact direction of the primary crater, so it is important to identify secondary craters. In this paper, based on remote sensing data and topography data, comprehensive consideration of the spatial location and diameter of the lunar primary crater, the authors selected five typical Copernican primary craters to study the quantitative morphological indices so as to characterize their secondary craters, including depth – diameter ratio, rim height – diameter ratio, irregularity, and ellipticity. On such a basis, the intelligent identification, extraction and spatial distribution of secondary craters were studied. As a result, a total of 17 811 secondary craters were detected, from which a

geodatabase was established that included five categories according to location , size , morphological indices , distance , and impact direction of secondary craters . The scale and distribution characteristics of secondary craters were studied based on the distance range from primary crater edge . A new method based on secondary crater major axis was developed . Some conclusions have been reached : ① As for craters size , the lunar mare secondary crater diameter is $(2.7 \pm 0.11)\%$ of its primary crater diameter , the lunar highland secondary crater diameter is $(3 \pm 0.3)\%$ of its primary crater diameter . The spatial distribution law is consistent between lunar highland and lunar mare . The secondary distribution distance is $(57 \pm 7)\%$ of the maximum distribution distance . ②The impact direction of the Tycho crater is W – E . The impact directions of the Copernicus crater and the Kepler crater are SE – NW . The impact directions of the Aristarchus crater and the Jackson crater are NW – SE . This study will be helpful for more accurate study of crater impact direction .

Keywords: secondary crater ; Copernican ; morphology index ; secondary crater geodatabase ; spatial distribution ; impact direction

(责任编辑: 陈 理)