

基于“嫦娥一号”数据的月表撞击坑特征的多参数统计分析

王心源¹, 吉 玮², 李 超^{1,3}, 骆 磊^{1,3}

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖 241000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 撞击坑是月表最主要的地貌形态, 相关研究多采用撞击坑深度和坑口直径比值作为月球形貌研究依据。事实上撞击坑的形状不是典型的圆锥, 而是上大下小的截锥形。依据“嫦娥一号”影像图和全月球数字高程模型数据, 获取了 1000 个撞击坑坑唇等效半径 r_1 、坑底等效半径 r_2 , 撞击坑的深度 h , 进而对 r_1 、 r_2 、 h 三个参数进行了统计分析和聚类分析。结果表明: (1) 撞击坑数目与 r_1 和 r_2 的分维数分别为 $D_1=1.88$ 、 $D_2=1.51$, 都大于地球撞击坑的分维数 1.16, 表明月表撞击坑复杂度受到外界的影响较地球低, 且坑唇的复杂度比坑底高; (2) r_1-r_2 之间具有很好的线性正相关关系, 聚类结果将其分为三类, 决定系数分别为 $R_1^2=0.685$ 、 $R_2^2=0.886$ 、 $R_3^2=0.974$; (3) 对 r_1-r_2-h 三者进行线性拟合, 决定系数 $R^2=0.968$, 表明三者之间同样具有显著线性关系, 且月表撞击坑的形成过程以及形成之后都处于相似的动力环境下。

关键词: 月球; 撞击坑; 分维数; 统计分析

文章编号: 1000-0585(2012)02-0369-08

1 引言

作为月表最主要地貌形态的撞击坑, 是由行星、卫星、小行星或其他类地星体通过陨石撞击而形成的一种地形标志或地质构造单元^[1]。由于月球上没有大气, 因此对月球撞击坑的研究对认识月球地貌、月球的岩石构造以及反演月球的起源均具有重要意义^[2,3]。

在二十世纪七十年代的月球研究早期, Neukum 等^[2]讨论了撞击坑的大小与分布, 并将研究结果作为月表区域不同地质年龄的判定依据。月表撞击坑的数量一般和其地质年龄呈正比, 月表年龄越老, 撞击坑数量就越多。因此能够通过某个区域的撞击坑数目来判断其地质年龄^[4]。美国国家航空航天局 (NASA) 曾在研究报告中利用撞击坑深度和直径的比值作为撞击坑相对年龄的判定依据, 将撞击坑分为新鲜、年轻、成熟和老年四类^[5]。Moutsoulas 等^[6~9]利用撞击坑深度和直径的比值作为形态分类的标准, 并按照比值区间对小型和中型环形山的形态特征进行了个体描述。金丽华等^[10]将撞击坑按 4 种类型描述了“嫦娥一号”月面遥感影像上月表撞击坑的形态特征, 并结合白赛尔大地主题反算法,

收稿日期: 2011-06-20; 修订日期: 2011-10-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2010AA122202); 国家自然科学基金项目 (60972141)

作者简介: 王心源 (1964-), 男, 安徽六安人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感考古。

E-mail: xywang@ceode.ac.cn

吉玮 (1986-), 男, 江苏海安人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统和遥感应用。

E-mail: ntweiji@yeah.net

实现撞击坑分布及直径信息提取。然而已往研究存在两方面问题：一是研究中的深度数据来自于 Arthur 使用阴影算法对“月球轨道器 IV”探测器获取的影像计算得出^[11]，而月表地形的起伏、撞击坑自身阴影的叠掩会造成根据太阳照射角度计算出的深度产生误差；二是其研究都仅仅是对坑唇半径和深度做的统计分析，事实上撞击坑的形状不是典型的圆锥，而是上大下小的截锥形。本文依据“嫦娥一号”科学探测的科学研究成果——月球表面三维影像图和全月球数字高程模型数据获取了月表撞击坑的坑唇半径、坑底半径以及深度数据，对月表撞击坑进行了多参数多角度的组合特征分析。

2 研究方法与数据来源

2.1 数据来源

利用“嫦娥一号”探测器上的三线阵 CCD 立体相机获取的图像数据制作的全月球影像图是中国第一幅覆盖全月球的遥感影像图。数据获取于 2007 年 11 月 20 日~2008 年 7 月 1 日，CCD 立体相机采用线阵推扫方式获取图像，像元空间分辨率为 120m，幅宽 60km，相邻轨道影像数据的重叠率 $>40\%$ 。考虑到投影变形的影响，全月影像图的图幅以 70° 为界分为两部分，南北纬 70° 之间采用了正轴墨卡托割 35° 投影，极区采用了方位等角割 70° 投影^[12]。全月 DEM 模型制作使用的是嫦娥一号上搭载的激光高度计于 2007 年 11 月 28 日~2008 年 12 月 4 日获取的约 912 万个探测数据。数据处理中，单轨滤波采用地学统计法，区域滤波采用移动曲面滤波法，数据插值采用克里金算法。DEM 模型的空间分辨率为 500m，平面定位精度为 445m，高程测量精度为 60m^[13]。本文所使用的月表撞击坑的坑唇、坑底半径以及来自 DEM 的撞击坑深度数据都是遥感影像图南北纬 70° 范围内的数据（图 1）。

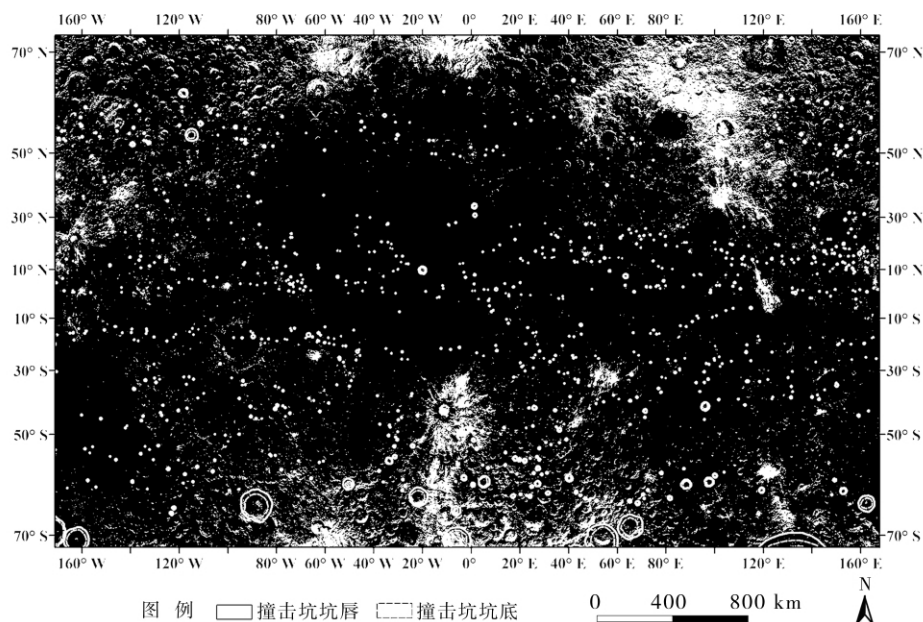


图 1 本文选取的撞击坑

Fig 1 The selected craters in this study

2.2 研究方法

目前对撞击坑的自动识别方法存在提取范围和位置有偏差以及只能提取坑唇范围等缺点^[14~16]，且无法提取坑底信息，因此不能准确研究撞击坑特征。据估计，月球表面的撞击坑总数在 33000 个以上^[17]。本文通过 ArcGIS 软件手工矢量化方式在遥感影像上均匀提取了 1000 个撞击坑的坑唇和坑底边缘（图 1），并对提取的撞击坑坑唇半径进行了分布统计（图 2）。图 2 显示本研究所选取的撞击坑坑唇半径主要集中在 1000~20000m，其中

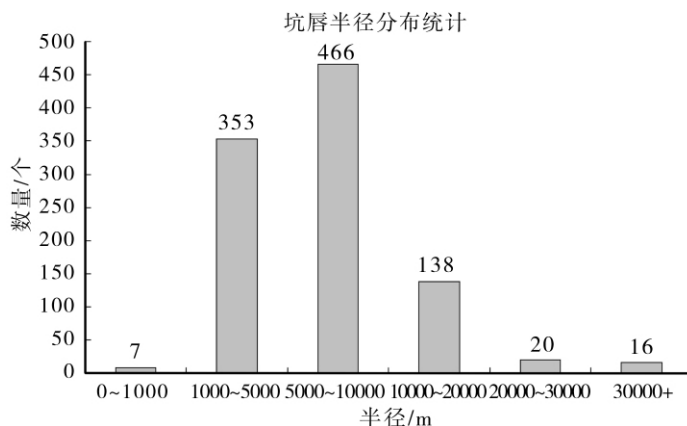


图 2 撞击坑坑唇半径分布统计

Fig. 2 Statistical distribution of craters' radii

5000~10000m 范围内数量最多，有 466 个，样本选取具有一定的代表性。由于撞击坑大多是圆形的，因此通过提取的坑唇和坑底面积计算得出撞击坑的坑唇等效半径 r_1 、坑底等效半径 r_2 。根据全月 DEM 模型，利用坑唇和坑底闭合等高线差求得撞击坑的高度（深度） h ，如图 3 所示。用 r_1 、 r_2 、 h 三个参数比前人能更好地刻画撞击坑的几何特征，从而进行更有效的统计分析。

分形理论的基础是由 Mandelbort 教授在 20 世纪 70 年代建立的^[18]。分形理论的提出为自然界中具有自相似性的复杂现象和过程提供了一种定量描述。分形理论中一个重要的概念就是分维数。分维数是对非光滑、非规则的客体进行定量刻画的重要参数。分维数的定义有多种方式，如 Hausdorff 维数、自相似维数和盒维数等^[19]。考虑到月球撞击坑的实际情况及计算和程序实现等多

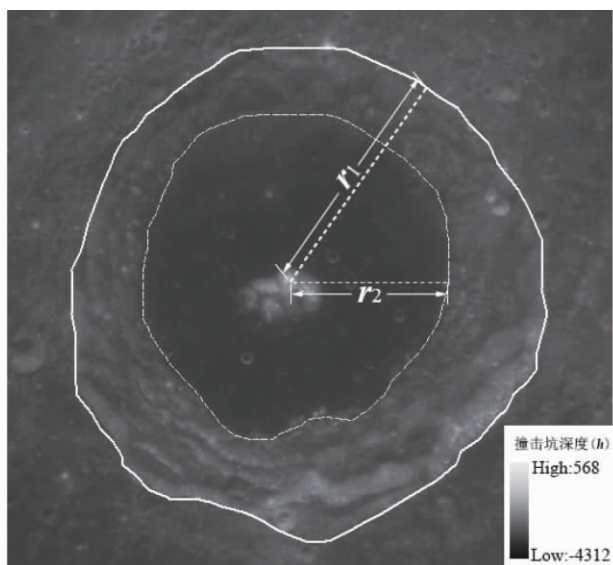


图 3 撞击坑参数示意图

Fig. 3 The sketch of the parameters

方面的因素，本文采用盒维数 D 来研究撞击坑的分形表征。盒维数法也称覆盖法，即用边长为 $\delta \times \delta$ 的正方形格子覆盖待求盒维数的曲线，记录下完全覆盖曲线所需的最少盒子数，利用不断变化边长的正方形重复上述操作，每个边长 δ 都有一个相对应的最少盒子数 $N(\delta)$ ，把覆盖过程中所得的 (δ, N) 数据画成双对数图做最小二乘法回归，所得的直线斜率的负值即为曲线的盒维数 D 。

3 结果分析

3.1 撞击坑几何特征的分形分析

行星表面撞击坑数目与半径大小之间的分布是一种分形^[20]。分维数 D 所表示的数学意义和物理意义分别是撞击坑数目随撞击坑半径这一特征尺度的变化程度以及撞击坑大小分布的集中程度。分维数越大，则撞击坑的集中程度越高。用月表撞击坑的半径 r_1 和 r_2 为横坐标，半径大于 R 的累积撞击坑数 N 为纵坐标作双对数图，再对其做最小二乘法拟合，(图 4) 可得撞击坑数目与坑唇半径 r_1 和坑底半径 r_2 大小之间的分形分布的分维数分别为 $D_1=1.88$ 、 $D_2=1.51$ ，都大于地球撞击坑的分维数 $D=1.16$ ^[20,21]。表明地球由于受到风化剥蚀、流水侵蚀等诸多外力甚至内动力地质作用(如构造运动、岩浆活动等)影响，撞击坑特别是小型撞击坑易于被改造，记录难以保留。而月球由于内、外地质活动性极弱，所以不仅表面存在了大量的由小天体及陨石所形成的撞击坑，而且撞击坑保存比较完好。但由坑唇半径的 D_1 大于坑底半径的 D_2 可以推测，撞击坑坑唇的结构比坑底的要复杂，其原因是由于撞击坑在长时期的演化过程中，由于受到后续撞击作用以及月球内部的

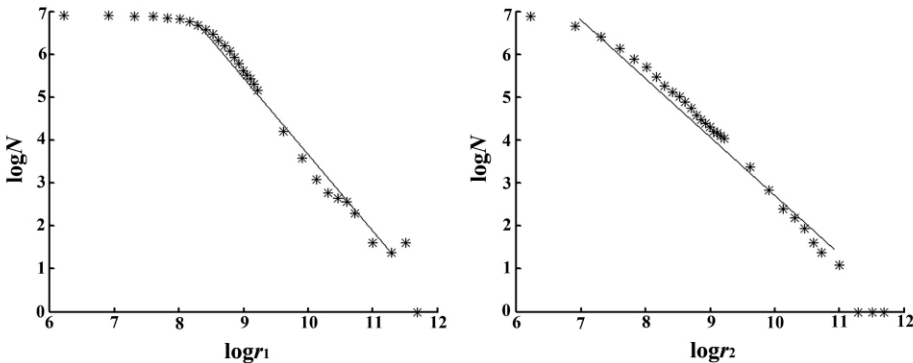


图 4 月表撞击坑 $\log N$ - $\log r$ 关系图 (a) 坑唇; (b) 坑底

Fig 4 The diagrams of $\log N$ - $\log r$ of impact craters on lunar surface
(a) the top edge; (b) the buttom edge

表 1 撞击坑参数统计特征值

Tab 1 Statistical characteristics of impact craters' parameters

	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
r_1 (m)	164457.19	484.95	7867.06	9464.67	1.20
r_2 (m)	122272.63	132.32	3451.43	6762.80	1.96
h (m)	7895	6	2322.37	1060.08	0.46

地质作用的影响,造成坑唇不断坍塌,结构趋于复杂化;而坑唇坍塌的部分极有可能掉落至撞击坑内,出现一种对撞击坑底部进行“回填”的现象,造成坑底结构相对简单。

3.2 统计分析表征

(1) r_1 、 r_2 和 h 数据组分析 根据经典统计方法,对 1000 个撞击坑的 r_1 、 r_2 、 h 分别计算了各变量的最大值、最小值、平均值、标准差以及变异系数(表 1)。平均值是一种反映一组数据内集中程度的度量。表 1 显示 r_1 的平均值比 r_2 大一倍,但两者的最大值却接近, r_1 的最小值接近 r_2 的四倍,反映组内数据很不集中。标准差反映的是组内数据的离散程度。表 1

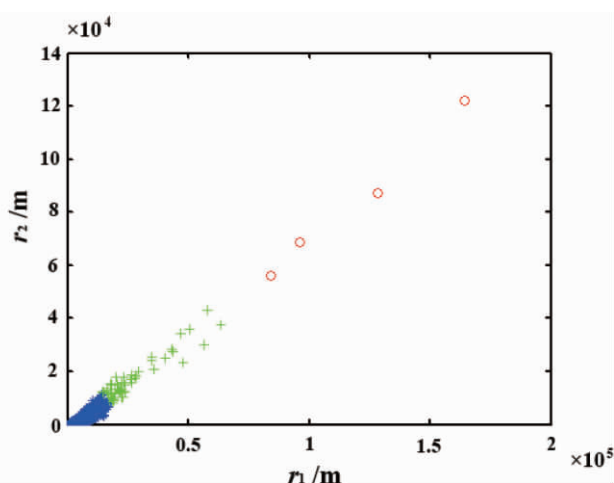


图 5 r_1-r_2 相关关系图

(蓝色点为第 I 类,绿色点为第 II 类,红色点为第 III 类)

Fig 5 The diagram of r_1-r_2

(The blue points are the first kind, the green points are the second kind, and the red points are the third kind.)

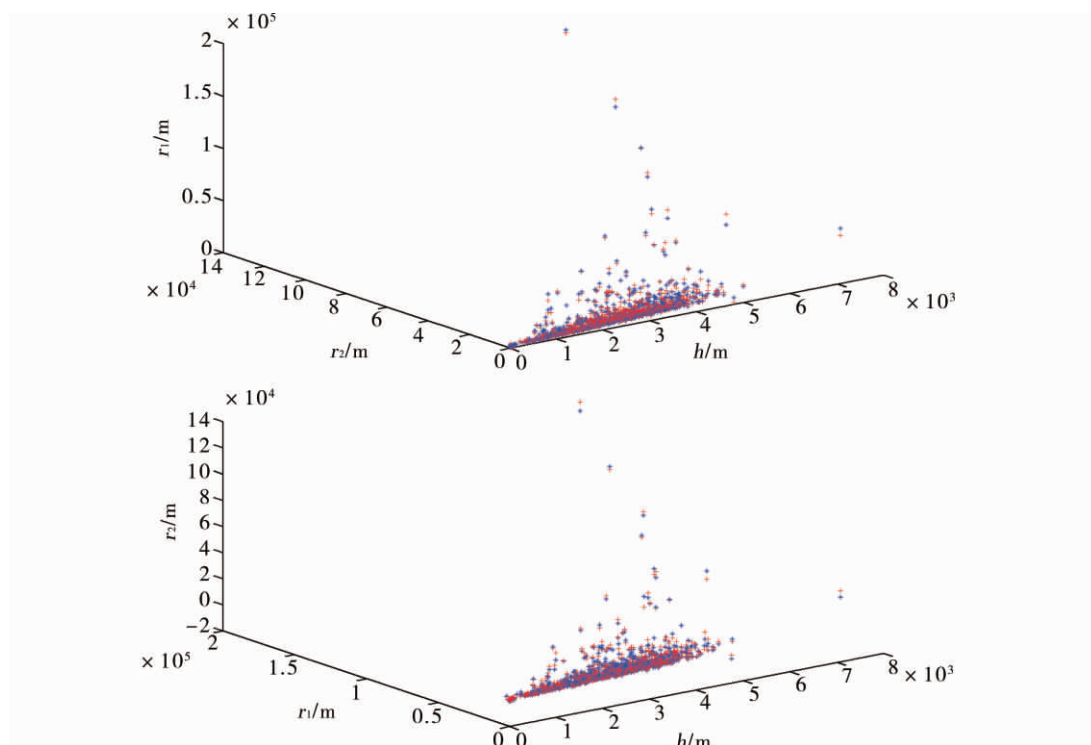


图 6 撞击坑半径实际特征值与估算值的比较

(a) 坑唇; (b) 坑底 (红色“+”点为实际值,蓝色“*”点为估算值)

Fig 6 The comparison of the actual and estimate values of the impact craters' radii (a) the top edge; (b) the bottom edge (The red “+” points are the actual values, while the blue “*” are the estimate values.)

显示 r_1 的标准差大于 r_2 的标准差, 即 r_1 的离散程度大于 r_2 的离散程度, 反映坑唇大小的差异程度比坑底的大, 这与上文的分形分析结果一致。变异系数又称“标准差率”, 是衡量各观测值变异程度的另一个统计量。在表 1 中, 总体看变异系数较大, 但相对而言, h 的变异系数最小, r_1 的变异系数中等, 而 r_2 的变异系数最大, 表明 r_2 相对变化较大。

(2) r_1-r_2 之间的关系分析 为了研究 r_1-r_2 两者的相互关系, 使用 EM 算法^[22] (期望最大化算法) 对 1000 个撞击坑 r_1 、 r_2 数据先进行聚类, 分为 3 类之后再分别对每类进行线性拟合 (图 5), 得到:

第 I 类 (计 939 个撞击坑): $r_2=0.498 \times r_1-831.18$, 决定系数 $R_1^2=0.685$;

第 II 类 (计 57 个撞击坑): $r_2=0.618 \times r_1+695.63$, 决定系数 $R_2^2=0.886$;

第 III 类 (计 4 个撞击坑): $r_2=0.787 \times r_1-10215$, 决定系数 $R_3^2=0.974$ 。

以上分析表明月球表面南北纬 70° 范围内, 坑唇半径 r_1 与坑底半径 r_2 二者呈现显著的线性正相关关系。

(3) r_1-r_2-h 之间的关系分析 对 r_1-r_2-h 进行多种比较分析后, 线性回归最好, 得到关系式: ① $r_1=1.31 \times r_2+0.92 \times h+1213.01$, 该回归模型中决定系数 $R^2=0.968$, 因此认为 r_1 与 r_2 和 h 具有显著线性关系;

② 同理可得 $r_2=0.73 \times r_1-0.56 \times h-1012.30$, 决定系数 $R^2=0.965$, 因此 r_2 与 r_1 和 h 同样具有显著线性关系。

通过以上分析, 表明尽管撞击坑大小相差悬殊, 但是坑唇半径 r_1 与坑底半径 r_2 呈现较好的线性相关, 且 r_1 、 r_2 、 h 同样具有很好的线性关系。说明这些撞击坑所承受外力作用的一致性。这一点可以从撞击的物理过程中得以说明: 在撞击时会产生类似地震波的椭圆型撞击波, 在传播的过程中需要克服来自月表物质的反作用力, 因此就产生了具有特定规律分布的振子能量衰减, 速度产生了差异。这种速度上的差异就表现出了坑唇、坑底与坑深的相同地理单元的不同结构, 并且三者间的相互关系可以用多项式来模拟。

为了进一步分析个别数据受总体数据在线性模拟中的影响, 将撞击坑的实际特征参数值与根据公式得出的估算值进行比较 (图 6), (3) 中①式的平均误差率为 0.058, (3) 中②式的平均误差率为 0.105, 实际值与估算值很接近, 所以其模拟结果具有参考价值。

4 结论

通过对 1000 个撞击坑的坑唇等效半径 r_1 、坑底等效半径 r_2 、高度 h 三个参数组合特征的分析, 可以得出以下结论:

(1) 月球表面南北纬 70° 范围内, 对获取 1000 个撞击坑的 r_1 、 r_2 、 h 变量数据符合正态分布, 表明抽样数据的可靠性。

(2) 对获取的数据分析表明, 组内数据离散程度较大, 不集中。使用 EM 算法对 1000 个撞击坑的 r_1 、 r_2 数据聚类, 可以分为 3 类。线性拟合决定系数分别为 $R_1^2=0.685$ 、 $R_2^2=0.886$ 、 $R_3^2=0.974$, 为显著线性正相关关系。

(3) r_1-r_2-h 三者之间线性拟合, 决定系数 $R^2=0.965$, 表明其同样具有很高的线性关系, 且月表撞击坑的形成过程以及形成之后都处于相似的动力环境下。

(4) 撞击坑数目与坑唇半径 r_1 和坑底半径 r_2 大小之间分形分布的分维数都大于地球撞击坑的分维数, 表明月表撞击坑形成之后环境较地球简单。但是 r_1 分维数大于 r_2 的分维数, 表明撞击坑坑唇在形成之后的环境比坑底的要复杂。

(5) 通过试验表明, 对于再增加样本数, $r_1 - r_2$ 、 $r_1 - r_2 - h$ 之间的线性拟合决定系数变化不大, 表明了上述结论的可靠性。

致谢: 感谢中国科学院国家天文台月球与深空探测科学应用中心提供数据资料。

参考文献:

- [1] Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, *et al.* Primary scientific results of Chang'e-1 lunar mission. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(11): 1565~1581.
- [2] Neukum G, König B, Arkani-Hamed J. A study of lunar impact crater size-distribution. *The Moon*, 1975, 12: 201~229.
- [3] 张新琴, 夏秀文. 月球撞击坑的动力学研究. *地球物理学进展*, 2008, 23(6): 1791~1801.
- [4] 欧阳自远. 月质学研究进展. 北京: 科学出版社, 1977.
- [5] National Aeronautics and Space Administration. *Lunar Surface Models*. Washington, D. C. : 1969.
- [6] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with small depth/diameter ratio. I. *Earth, Moon, and Planets*, 1979, 21(3): 299~305.
- [7] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with small depth/diameter ratio. II. *Earth, Moon, and Planets*, 1980, 23(1): 113~126.
- [8] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with moderate depth/diameter ratio. I ($0.08 < d/D < 0.12$). *Earth, Moon, and Planets*, 1981, 25(1): 51~56.
- [9] Moutsoulas M, Preka P. Morphological characteristics of lunar craters with moderate depth/diameter ratio. II ($0.12 < d/D < 0.15$). *Earth, Moon, and Planets*, 1982, 27(1): 111~130.
- [10] 金丽华, 金晟业, 陈圣波, 等. “嫦娥一号”第一幅月面遥感影像撞击坑特征. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(5): 942~946.
- [11] Arthur D W G. Lunar crater depths from Orbiter IV long-focus photographs. *Icarus*, 1974, 23: 116~133.
- [12] 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 294~306.
- [13] 李春来, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 281~293.
- [14] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection algorithm for the lunar surface using multiple approaches. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 2005, 25(2): 157~168.
- [15] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection and classification of lunar craters using multiple approaches. *Advances in Space Research*, 2006, (37): 21~27.
- [16] 岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国. 应用面向对象分类方法对月球撞击坑进行自动识别. *科学通报*, 2008, 53(22): 2809~2813.
- [17] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [18] 曹汉强, 朱光喜, 李旭涛, 等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(12): 1182~1185.
- [19] You J, Kauhanen K, Raitala J. Fractal properties of crater ejecta outlines on Venus. *Earth, Moon, and Planets*, 1995, 71(1): 9~31.
- [20] 郑丽, 冯金良, 张稳. 行星撞击坑分形及分维数意义探讨. *河北师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 22(3): 347~351.
- [21] Grieve R, Rupert J, Smith J, *et al.* The records of impact craters on Earth. *GSA Today*, 1995, 5(10): 1994~1996.
- [22] Dempster A P, Laird N M, Rubin D B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1977, 39(1): 1~38.

Multi-parameters statistical analysis of impact craters' features on lunar surface based on Chang-e-1

WANG Xin-yuan¹, JI Wei², LI Chao^{1,3}, LUO Lei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Digital Earth; Center for Earth Observation and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China; 2. College of National Territorial Resource & Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: Impact craters are the main geomorphological type on lunar surface. They can provide a large amount of information, including the age of geological unit, the history and evolution of the moon impact. Due to the fact that the current automatic recognition methods for impact craters have deviations of extraction range and locations, simultaneously they can not extract the information of the bottom, thus the whole characters of the impact craters can not be researched deeply. The top and bottom edges of 1000 impact craters have been extracted by manual vectorization in the remote sensing images evenly in this study. The equivalent radius of the top and bottom edges, that is r_1 (top) and r_2 (bottom), are computed by the area of the range of the crater's lip and bottom. And h , the height (depth) of the impact craters, are derived from the digital elevation model of the whole moon. Then all the parameters, r_1 , r_2 and h , are researched by fractal analysis, statistical analysis and cluster analysis. The results show that: (1) The fractal dimension of the impact craters' number with r_1 and r_2 is $D_1=1.88$ and $D_2=1.51$ respectively. They are both larger than the fractal dimension of the impact craters on the earth, indicating that the extraneous interference which decides the complexity of the impact craters on the moon surface is lower than that on the earth's, and the complexity of the top is higher than that of the bottom at the same time. (2) There is a good liner correlation between r_1 and r_2 , and the clustering results will be divided into three categories, with the coefficients of determination being $R_1^2=0.685$, $R_2^2=0.886$, and $R_3^2=0.974$, respectively. (3) The coefficient of determination $R_2=0.968$ is obtained by the liner fit of three parameters r_1-r_2-h , which shows that there is also a good liner correlation among r_1-r_2-h , and the formation of the lunar impact craters is found in the same dynamic environment, the same as the environment after the formation.

Key words: moon; impact craters; fractal dimension; statistical analysis