

基于LOLA数据的冯·卡门地区地形特征分析

王慧慧^{1,2}, 孟治国^{1,2}, 李翠¹, 朱蕴哲¹, 蔡占川², 李向军¹

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130021; 2. 澳门科技大学月球与行星科学实验室, 澳门 999078)

摘要: 冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑位于南极-艾肯 (South-Pole Aitken, SPA) 盆地西北部, 为“嫦娥4号”的预选着陆区。本文基于LRO卫星LOLA数据, 分别采用最大平均值法、均方根高程法和盒维数法, 得到并分析了冯·卡门地区的坡度、粗糙度和分形维数等地形参数信息。结果表明: 冯·卡门撞击坑的海拔低, 其中坑底最南部海拔最低, 其余地区海拔相对较高; 冯·卡门撞击坑内存在很多小的撞击结构; 冯·卡门撞击坑平均坡度为1.3°, 小于2°的地区约占盆地底部面积的85%; 粗糙度值小于20 m的区域占95.1%; 整体上有较大的分形维数。上述结果说明冯·卡门撞击坑整体上地形起伏小, 结构稳定。统计结果表明: 冯·卡门撞击坑南部、东南部及西北部地区都有较小的坡度、粗糙度值和较大的分形维数值, 可满足探测器的着陆要求。与“嫦娥3号”着陆区地形的对比表明, 冯·卡门撞击坑内部的地形条件要优于“嫦娥3号”着陆区。

关键词: LOLA数据; 冯·卡门撞击坑; 着陆区; 地形

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)01-0057-09

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.008

引用格式: 王慧慧, 孟治国, 李翠, 等. 基于LOLA数据的冯·卡门地区地形特征分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5 (1): 57-65.

Reference format: WANG H H, MENG Z G, LI C, et al. Topography characteristics analysis of Von Kármán crater using lola data[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5 (1): 57-65.

0 引言

冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑 (44.8°S, 175.9°E) 位于月球背部的南极-艾肯盆地 (South Pole Aitken, SPA) (图1), 为我国“嫦娥4号” (Chang'e-4) 着陆候选区域^[1]。因此, 冯·卡门撞击坑地形特征的研究, 对“嫦娥4号”着陆区的选择, 具有重要意义。

冯·卡门撞击坑属于前酒海纪, 直径约为180 km^[2]。从成分上来看, 冯·卡门撞击坑FTA (FeO+TiO₂) 含量较高, 盆地底部以玄武岩为主^[3]。美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 提供的冯·卡门区域的地质图和Haruyama等基于Kaguya TC数据以撞击坑定年法得到的玄武岩年龄约为3.35 Ga, 属于雨海纪玄武岩^[5]。冯·卡门位于南极艾肯盆地西北部, 属于Th (钍) 异常区域^[6], 其内部的西南向地区高程较低, 地形起伏平缓。冯·卡门撞击坑所在的南极-艾肯盆地, 直径约2 500 km, 是太阳系中最大、撞击最深的撞击盆地, 我们可以利用SPA盆地进行下月壳和月幔的探测, 其峰环、盆地内以及溅射毯的撞击熔融层及撞击熔融角砾岩都是很好的月幔物质取样区^[7-9]。因此, 对

冯·卡门撞击坑的着陆研究将具有重要的地质和科学价值。

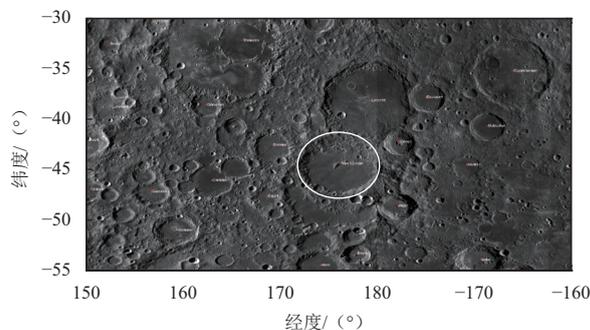


图1 位于南极-艾肯盆地内的冯·卡门撞击坑影像图
Fig. 1 Image of Von Kármán crater located in the South Pole Aitken basin

但是, 由于具有较大的风险, 人类尚未在月球背部进行软着陆。从历次月球软着陆的经验来看, 着陆区地形地貌是安全着陆的首要考虑因素, 而目前对于冯·卡门撞击坑地形的定量探测还是空白。因此, 对冯·卡门地区地形分布特征的研究对“嫦娥4号”的安全着陆具有重要参考意义。

本文利用月球轨道器激光高度计 (LOLA) 数据

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2017-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41371332); 澳门科技大学月球与行星科学实验室开放课题资助项目 (039/2013/A2)

分别对获取到的数据进行最大平均值法、均方根高程法和盒维数法计算并分析了冯·卡门撞击坑地区的表面坡度、粗糙度和分形维数信息。最后与“嫦娥3号”着陆区的地形特征进行了对比分析。

1 研究区概况

1.1 LOLA数据

LOLA (月球轨道器激光测高仪, Lunar Orbiter Laser Altimeter) 是搭载在LRO (月球勘测轨道器, Lunar Reconnaissance Orbiter) 上用于测量月表高程的仪器。LRO的运行轨道是50 km的极地轨道, 形状接近于圆形。LOLA在LRO顺利进入轨道后, 于2009年6月底开始进行数据采集^[10-11]。LOLA将单束激光脉冲分为5束, 通过测量被月球表面反射的不同波束之间的时间差来间接获取月表到仪器之间的距离^[12]。LOLA的垂直分辨率为0.1 m, 精度可达1 m, 数据采样间隔为57 m, 高精度的数据为月表地形的研究提供了基础, 对于之后的着陆点选择也至关重要^[13]。本文采用的是Cao等基于GDRs (Gridded Data Records) 处理得到的高程数据, 数据的空间分辨率为64像元/度^[14]。

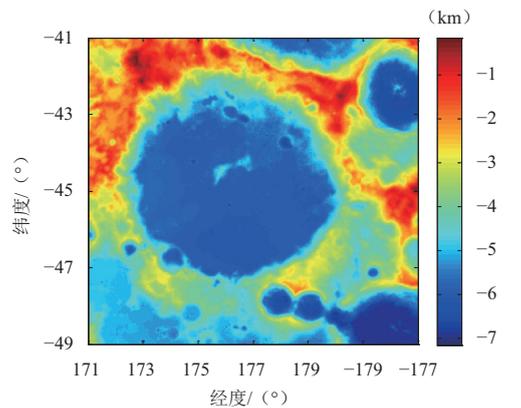
1.2 研究区介绍

研究范围选取冯·卡门撞击坑及其周围地区 (包括芬森 (Finsen) 撞击坑、莱布尼兹 (Leibnitz) 撞击坑的外壁, 阿尔德 (Alder) 撞击坑等), 共选择了393 216个数据点, 有较好的精度, 范围为(41°S~49°S, 171°E~177°W)。冯·卡门撞击坑取(43°S~47°S, 171°E~180°W) 内的不规则区域。

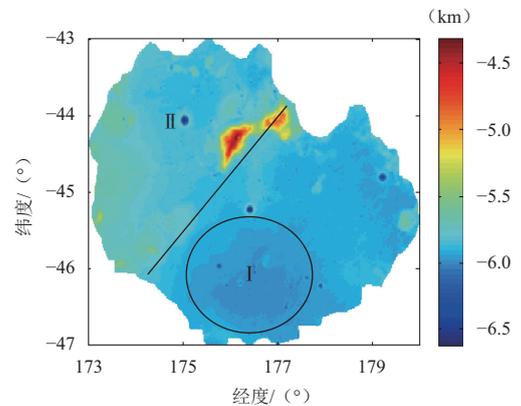
图2(a)为冯·卡门及其周围地区月表高程图, 表明冯·卡门撞击坑是在先前形成的古老撞击坑上叠加出现的一个较新的撞击坑; 冯·卡门撞击坑的直径约为180 km, 其内部有中央峰^[2]。因此, 对冯·卡门撞击坑的着陆探测很可能采集到较纯的原始SPA物质、下月壳样本及上月幔物质。

冯·卡门撞击坑以南存在较大且明显的撞击坑边缘, 同样显示出在冯·卡门撞击坑形成前该区域已经存在一个更大的撞击坑。冯·卡门撞击坑形态不规则, 撞击坑东北部地形改变较大, 退化严重, 表明该地区受Leibnitz和Finsen撞击事件影响较大。东南边缘保存较为完整。西部边缘存在独特的地貌结构特征。总体上, 盆地比东部地区低约4 km, 比南部地区低约2.5 km。盆地东西向长约为200 km, 南北向长约为160 km, 总面积约为37 594.5 km²。撞击坑内部的最大高程值约为-4 323.8 m, 在(175.9°E, 44.5°S)处, 位于中央峰上。最小高程值约为-6 621.3 m, 在(174.9°E, 44.3°S)

点处, 位于盆地底部西北部撞击坑内, 冯·卡门撞击坑的平均高程约为-5 852.0 m。



(a) 冯·卡门撞击坑及周围高程图



(b) 冯·卡门撞击坑底部高程图及区域划分

图2 冯·卡门撞击坑高程图

Fig. 2 The elevation map of Von Kármán crater

相对来说, 冯·卡门撞击坑最南部 (I 区域) 平均海拔最低, 约为-5 963.4 m。该地区地形起伏不大, 撞击坑数量少, 表明该地区年龄较新。撞击坑中部、东部和北部大部分地区的平均海拔约为-5 848.4 m, 相对于南部区域有较高的高程值。其中, 整个西北部 (II 区域) 地形较为复杂, 存在较大的撞击坑, 表明该地区年龄较老。

在冯·卡门撞击坑的内部有一个中央峰, 长约45.5 km, 宽约13.7 km, 面积为800.75 km², 高程最大值为-4 324 m, 最小高程值为-5 835 m, 平均高出南边底部区域约650 m。

1.3 三维地形

为了深入分析冯·卡门撞击坑的地形分布特征, 进一步提取了撞击坑底部数据 (图3(a)), 制作了三维高程图。

图3(a)再次表明, 撞击坑南部地势最低, 地形平坦, 撞击坑分布很少。撞击坑北部海拔相对较高, 地形起伏较大, 撞击坑分布也较多。而在撞击坑西部, 出现了3个区域 (从北向南依次标注为A、B、

C)。A区域处地形微微凸起，中心点相比于东西南北方向边缘分别高出200 m、175 m、170 m和180 m。B区域地形由撞击坑底部最西侧向中央峰方向均匀降低，高差约为175 m。C区出现3个独立的高程中心，分别在(173.5°E, 46.0°S)、(174.0°E, 45.8°S)、(174.5°E, 45.5°S)点处，分别比其下边缘高50 m、110 m、70 m，呈线性排列。这些地区在地形上呈现中央高、周围低的特征，疑似隆起或火山高地。

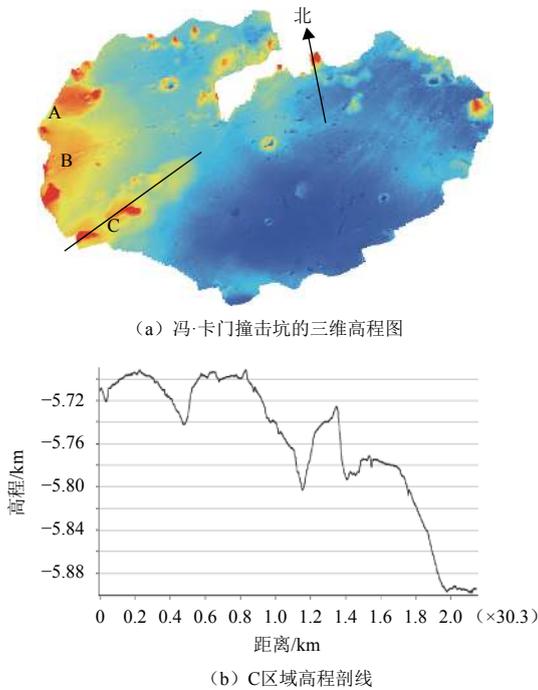


图3 冯·卡门撞击坑的三维高程图及C区域高程剖面

Fig. 3 Three-dimension elevation map of Von Kármán crater and the elevation profile of region C

Snape等(2010)认为西部地区是一个火山穹窿，并将该地区作为冯·卡门撞击坑的首选着陆区，可以采集到侵入或喷出的玄武岩样本^[2]。但是，这些地区没有明显的成分异常^[8]。另外，我们对C区域沿3个高程中心做了剖面图(图3(b))，表明尽管该地区出现了3个高程中心，但总体上，该地区呈现西高东低的趋势，为典型的重力滑坡特征。这也表明，在撞击坑西侧出现的高地是撞击坑西坡退化造成的，受Oresme等撞击坑的影响较大。C区域的边坡退化规模非常大，深入撞击坑内部达60 km，总体积达3 873 km³，表明这是月表地形演化的一种新形式，有必要结合着陆探测和相关模型，对造成西部地区地形退化的原因做深入研究。

冯·卡门撞击坑内部存在很多小的撞击结构，撞击坑边缘的高程略大于周围地区。明显的撞击坑有12个，其中10个分布在北部地区。较为典型的撞击坑出现在(176.1°E, 45.3°S)处，Lucy等的研究表明，

在该地区出现明显的以该撞击坑为中心的FTA异常^[8]。该撞击坑不具备火山机构特征，因此，造成该地区FTA异常的成因很有可能是该地区下垫面FTA含量较高，而该撞击事件将下伏的高FTA物质挖掘出来。这也从另一方面展示了月壤物质纵向分布的不均匀性。对该地区的就位探测也可以验证这一发现。

2 冯·卡门撞击坑地形分析

2.1 冯·卡门撞击坑坡度分析

月球坡度是从高程数据中提取的重要地形信息，坡度的大小直接影响着地形的稳定性，对月球着陆点的选择及月球的演化研究具有重要意义。而坡度的变化，还暗含着月球演化信息^[13]。

利用LOLA数据采用最大平均值法得到冯·卡门地区的坡度数据(图4(a))^[15]。利用所求坡度点处及其周围高程值进行计算。选择以中心像元为中心的3×3个像元进行中心像元处坡度值的计算。

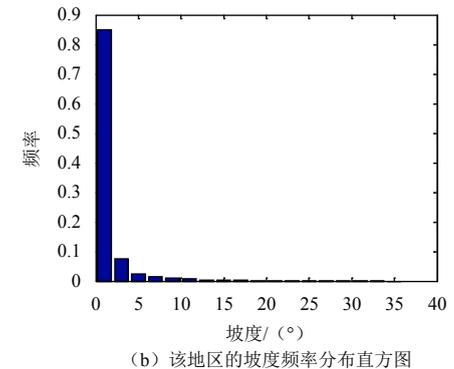
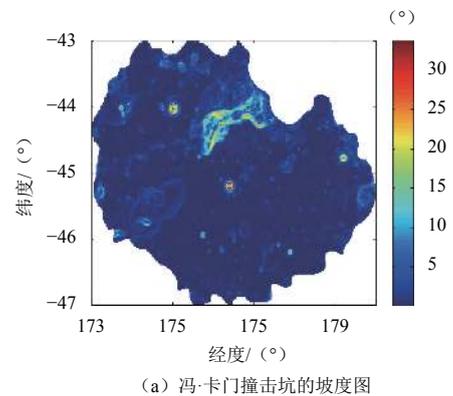


图4 冯·卡门撞击坑的坡度图及坡度频率分布直方图

Fig. 4 The slope map of Von Kármán crater and he frequency distribution histogram of slope of the area

利用高差计算坡度值

$$\text{slope} = \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2}\right) \times 180^\circ \div \pi \quad (1)$$

结果见图4(a)。由图4(a)知冯·卡门撞击坑

的坡度均较小, 区域坡度最大值为 33.7° , 主要分布在撞击坑和中央峰附近, 最小值为 0° , 平均坡度 1.3° 。坡度小于 2° 的地区面积达 $13\,793.3\text{ km}^2$, 约占撞击坑底部面积的85% (图 4 (b)), 也就是说冯·卡门撞击坑内部地形起伏十分平缓, 地形结构稳定, 基本上都可以满足“嫦娥4号”着陆器的着陆要求。坡度大于 6° 的区域主要分布在中央峰和内部撞击坑地区, 面积约为 776.0 km^2 。中央峰地区的平均坡度为 10.5° , 最大坡度值为 26.2° , 最小坡度值为 0.2° 。部分小形撞击坑内部及边缘地区坡度值大于 6° 。

2.2 冯·卡门撞击坑粗糙度

月表地形是月球表面经过侵蚀、沉降、隆升等综合作用的结果, 对月表地形进行粗糙度的定量分析可以用于研究月球的地质构造过程, 粗糙度是描述地形的一种常用参数^[16]。月表粗糙度也是用来确定月表地质单元相对地质年龄的一种有效方法^[17]。本文中粗糙度用一定尺度下的均方根高程来表示。

均方根高程 (Root Mean Square Height) 是最普遍的获取粗糙度的方法之一。在自然界的各种实际粗糙面模型中, 常常假设二维粗糙面具有各向同性, 这样, 就可以将二维粗糙表面简化为一维曲线来进行计算。

均方根高程

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [h_i - \bar{h}]^2} \quad (2)$$

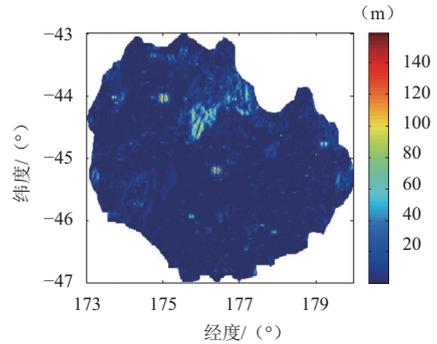
公式 (2) 中, N 是剖面中滑动窗口内像元点的个数; h_i 为窗口中第 i 个点的高程值, \bar{h} 为剖面上滑动窗口内像元的平均高程值。

其中

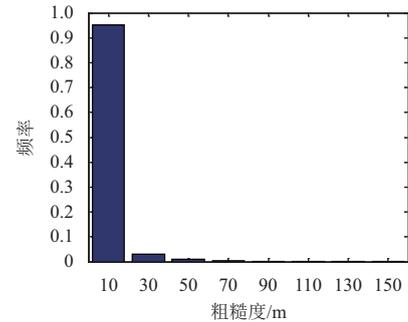
$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (3)$$

得到结果如图 5 (a) 所示。

从图 5 (a) 中可知, 冯·卡门撞击坑粗糙程度较低, 平均粗糙度值为 7.71 m 。在冯·卡门撞击坑内部, 中央峰表现为最粗糙地形, 粗糙度均值为 33.15 m , 北边区域次之, 均值为 17.37 m , 南边区域最平缓, 平均粗糙度为 3.57 m 。无论从均值还是标准差方面, 南边区域都表现为平缓地形。冯·卡门撞击坑粗糙度最大值出现在南部撞击坑内。结合图 5 (b) 的粗糙度频率分布直方图可知, 冯·卡门撞击坑绝大多数区域粗糙度值小于 20 m , 该区域占整个冯·卡门撞击坑的 95.1% , 几乎所有地区粗糙度值都小于 80 m , 粗糙度值大于 80 m 的区域不足整个底部的 1% 。



(a) 冯·卡门撞击坑粗糙度



(b) 该地区的粗糙度频率分布直方图

图 5 冯·卡门撞击坑粗糙度及粗糙度频率分布直方图

Fig. 5 The roughness map of Von Kármán crater and the frequency distribution histogram of roughness of the area

冯·卡门撞击坑属于前酒海纪撞击坑, 其东北边缘受莱布尼兹撞击坑的影响, 其地形趋于粗糙。而冯·卡门撞击坑南边区域上只有小型撞击坑, 较少受到大型撞击的影响, 除撞击坑内部小型撞击坑外, 其内部的粗糙度变化不大。

2.3 分形维数

用分形维数定量表示月表地形的分形特征。盒维数法是用来计算 n 维 ($n = 1, 2, \dots$) 空间分形形体的一种重要的有效方法。通过周宏伟等提出的盒维数法来计算局部表面的分形维数, 采用三维立方体覆盖月球局部表面^[18-19]。通过计算在所选择的盒子尺度下覆盖一定范围内表面所需的盒子总数, 来确定该范围区域的分形维数。

分形维数是对形体分形性质的定量表述。对于地形数据, 其分形维数范围为 $2 \sim 3$ 。分形维数越小, 则表明该地区的地形越复杂, 分形维数越大, 地形越简单平缓^[20]。

分形维数 FD (Fractal Dimension) 与 Hurst 指数^[13] 有如下关系

$$FD = 1 + d - Hurst \quad (4)$$

其中, d 代表表面维数, 在这里, $d=2$ ^[13], 得到结果见图 6。

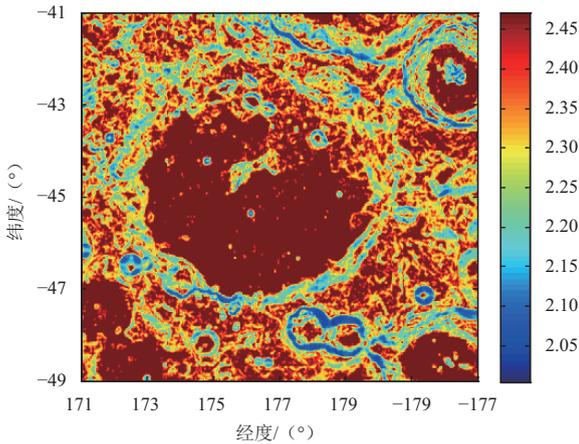


图 6 冯·卡门地区分形维数图
Fig. 6 The FD map of Von Kármán crater

图 6 为冯·卡门地区的分形维数图。图 6 表明，冯·卡门撞击坑及其周围地区的分形维数最大值为 2.47，最小值为 2.0，平均值为 2.36。由图可知冯·卡门撞击坑整体上有较大的分形维数，地形较为平滑。冯·卡门撞击坑的中央峰北部，受周围撞击坑的影响，分形维数与撞击坑周围地区相一致，具有较小的分形维数，其地形已经趋于粗糙。中央峰以南及西北部地区分形维数普遍为最大值，其地形较为简单，保存完好。

在冯·卡门撞击坑内部，有明显较大的分形维数。从分形维数上看，内部有维数较小的斑点状特征，斑点连线为西南至东北走向。冯·卡门内部分形维数均值为 2.46，最小值为 2.05，从图上看，绝大多数地区都表现出最大的分形维数，说明冯·卡门撞击坑地形简单平滑。

3 典型地区的地形特征

为了更好地分析冯·卡门撞击坑的地形特征，选取部分典型区域（图 7），对其地形参数进行对比，分别代表撞击坑边缘退化（A 区）、可能适合“嫦娥 4 号”着陆的南部（B 和 C 区）、表面较粗糙的北部（D 区）以及可能为不同成因的中央峰单元（E 和 F 区）。

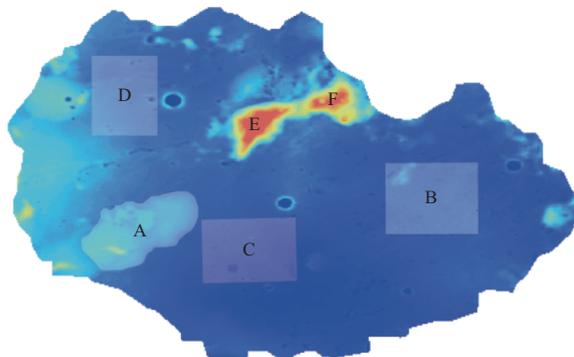


图 7 冯·卡门撞击坑选取的典型区域图示
Fig. 7 The diagram of selected typical areas in Von Kármán crater

3.1 区域地形特征

针对所选择的典型地区，我们提取了高程、坡度、粗糙度和分形维数数据，从区域最大值、最小值、平均值和标准差方面做了统计分析（表 1~4）。

表 1 表明，代表撞击坑南部的 B 区和 C 区具有全区最低的高程值，其平均高程分别为 -5 918.95 m 和 -5 946.69 m；较小的标准差值分别为 11.09 m 和 28.57 m，说明该地区的地形波动不大。其次为代表撞击坑北部的 D 区，平均高程为 -5 842.47 m，较南部高约 104 m；标准差为 29.37 m，只比 C 部标准差大 0.8 m，表明这里地势虽高，但是地形平坦。而代表西坡退化的 A 区平均高程比撞击坑底部高约 170 m，但标准差仅为 58.34 m，表明这里地势高，但地形波动不大。区域 E 和 F 具有全区最大的高程值、均值和标准差，但 E 区的平均高程较 F 区大 76 m，而标准差是后者的 1.84 倍，表明尽管 E 区和 F 区都位于中央峰地区，但其地形特征相差非常大。

表 1 选择区域的高程统计

Table 1 Elevation Statistics of selected typical areas				
高程位置	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
A	-5 468.50	-5 906.90	-5 776.07	58.34
B	-5 661.60	-6 082.40	-5 918.95	11.09
C	-5 865.02	-6 243.09	-5 946.69	28.57
D	-5 761.49	-6 008.92	-5 842.47	29.37
E	-4 306.60	-5 792.00	-5 123.37	331.38
F	-4 805.20	-5 644.30	-5 199.15	180.98

表 2 表明，代表撞击坑南部的 B 区和 C 区和代表撞击坑北部的 D 区都有撞击坑内较小的坡度均值，分别为 0.42°、0.49°、0.57°。从标准差上看，B<D<C，分别为 0.41°、0.82°、1.16°，这些地区的坡度和坡度变化都很小，表示地形起伏平缓，结构稳定。代表西坡退化的 A 区坡度均值为 1.4°，标准差为 1.14°，表示该地区虽然高差较大，但是坡度不大，坡度标准差只比 D 区大 0.59°。说明该地区的地形变化较均匀。中央峰的 E 区和 F 区，与其他地方相比，有非常大的坡度值。就两者之间来看，E 区在坡度均值上比 F 区大约 3.2°，标准差大 0.6°，从坡度均值和标准差上看，E 区与 F 区相差较大。

表 3 表明，B 区、C 区和 D 区有较小的粗糙度值，粗糙度均值分别为 1.75 m、1.76 m、2.0 m。B 区和 C 区有相近的粗糙度均值，且粗糙度标准差较小。D 区较 B、C 区的粗糙度值大，但是 D 区的粗糙度标准差为 3.34 m，比 C 区略小。表明 B、C、D 区的地形较平滑。A 区的粗糙度均值为 4.46 m，与代表南部的 B、C 区和代表北部的 D 区相比有较大的粗糙度值，标准差为

4.66 m, 表明A区地形比较粗糙, 但地形变化均匀。E区和F区有非常大的粗糙度均值, 且粗糙度标准差很大, 表明中央峰地区地形粗糙。从数值上看, E区粗糙度均值约是F区的1.6倍, 标准差为F区的2.1倍。表明, 中央峰的两个地区在地形上有所不同。

表2 选择区域的坡度统计

Table 2 Slope statistics of selected typical areas

坡度位置	最大值/(°)	最小值/(°)	平均值/(°)	标准差/(°)
A	13.59	0.01	1.40	1.41
B	5.22	0.01	0.42	0.41
C	15.17	0.00	0.49	1.16
D	10.26	0.00	0.57	0.82
E	22.56	0.69	11.64	4.34
F	21.90	0.21	8.46	3.74

表3 选择区域的粗糙度统计

Table 3 Roughness statistics of selected typical areas

粗糙度位置	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
A	45.11	0.00	4.46	4.66
B	46.35	0.00	1.75	2.54
C	68.03	0.00	1.76	5.02
D	50.59	0.00	2.00	3.34
E	116.20	0.13	40.19	40.19
F	93.42	0.01	25.87	18.29

表4表明, A、B、C、D区域的分形维数均值都为2.47, B区域标准差为0.01, 其余地区标准差为0.02, 标准差都很小。从分形维数上看, 整个冯·卡门撞击坑区域有十分简单的地形。E区与F区有冯·卡门地区最小的分形维数值, 标准差均为0.06, 表明中央峰地区地形复杂。E区比F区分形维数小0.06, 表明E区与F区地形特征上不同。

表4 选择区域的分形维数统计

Table 4 FD statistics of selected typical areas

FD位置	最大值	最小值	平均值	标准差
A	2.47	2.27	2.47	0.02
B	2.47	2.29	2.47	0.01
C	2.47	2.25	2.47	0.02
D	2.47	2.29	2.47	0.02
E	2.47	2.11	2.26	0.06
F	2.47	2.17	2.32	0.06

综上所述, 撞击坑南部(B、C区)和西北部(A区)有冯·卡门撞击坑内较平滑稳定的地形, 适宜着陆。A区域为西坡退化地形, 虽然有较大的高差, 但其地形起伏也较平缓, 地形变化均匀, 但坡度值较

大, 不适宜做着陆区。E区与F区有冯·卡门撞击坑最粗糙的地形, E区与F区在地形特征上表现有所不同, 其原因需要进一步分析。

3.2 地质意义分析

表1~4表明, 基于地形参数可以生成对月表地质单元的新认识。

美国地质调查局提供的地质图, 将冯·卡门撞击坑归为两类地质单元: 位于撞击坑南部较年轻的玄武岩平原单元和东部较老的覆盖有撞击坑的沟槽和山丘单元^[21-22]。而本研究中发现, 冯·卡门撞击坑至少可以分为4个地形结构单元: 撞击坑内部地形平坦单元、撞击坑西部的撞击坑边坡退化地形单元、原始的中央峰单元和可能退化的中央峰单元。

撞击坑内部又可以分为地形较为平坦的南部单元和地形起伏相对较大的北部单元。尽管北部单元的高程、坡度等参数较大于南部, 但总体上, 撞击坑内部的地形参数要明显低于其它三个地形单元。

撞击坑西坡, 比撞击坑底部高约170 m, 且坡度、粗糙度都要高于撞击坑底部, 表明这里是一个孤立的地形单元。相近的分形维数表明这里的地形特征与撞击坑内部一样, 是较为简单的地形单元。

同属于中央峰的E区和F区, 地形参数相差非常大。高程上, E区比F区平均高约70 m, 且E区的地形起伏更大; 坡度上, E区较F区大3.18°, 且具有更大的坡度标准差, 都表明E区比F区的地形变化复杂; 两个区域在粗糙度上的差异最大, E区的均值和标准差都是F区的2倍左右; 而分形维数参数表明, E区的地形复杂度要高于F区。这些结果都表明, E区和F区应该属于不同的地形单元。从影像图(图1)上看, F区更多的受到东北部Finsen撞击事件的影响, 可能造成中央峰F区的退化。其具体成因有待结合实地考察结果做深入分析。

4 “嫦娥3号”着陆区对比

4.1 “嫦娥3号”着陆区

“嫦娥3号”探测器是中国软着陆的探测器, 于2013年12月2日送入太空, 14日成功着陆于月球雨海西北部, 着陆中心点为(19.51°W, 44.12°N)。“嫦娥4号”预选着陆区的冯·卡门撞击坑在纬度上与“嫦娥3号”着陆区接近。

图8为“嫦娥3号”着陆点及其周围区域高程图, 选取了以着陆点(图8中黑点)为中心的与冯·卡门撞击坑相一致的范围进行分析。

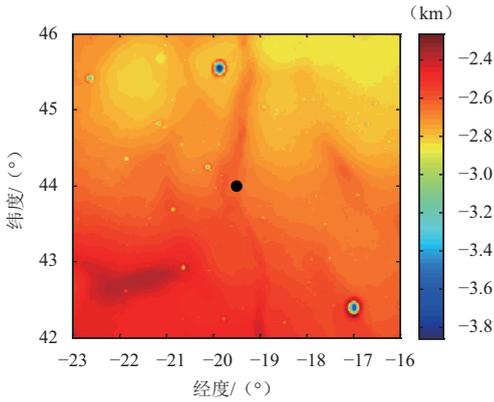


图 8 “嫦娥3号”着陆区高程图（黑点为着陆点位置）

Fig. 8 The elevation map of landing area of CE-3 and the black pot is the location of landing site

从高程图上看，该地区高程由西南向东北方向减小，与冯·卡门撞击坑中心到南边趋势相一致，高程由较低纬度向高纬度减小。从高程值上来说，“嫦娥3号”着陆区的最大高程值为 $-2\ 265.2\ \text{m}$ ，最小值为 $-3\ 857.5\ \text{m}$ ，平均海拔 $-2\ 661.5\ \text{m}$ ，而冯·卡门撞击坑除去中央峰外最大高程值为 $-5\ 263.0\ \text{m}$ ，最小高程值为 $-6\ 621.3\ \text{m}$ ，平均海拔 $-5\ 871.3\ \text{m}$ 。“嫦娥3号”的最大高差为 $1\ 592.3\ \text{m}$ ，而冯·卡门撞击坑的最大高差为 $1\ 358.2\ \text{m}$ ，说明冯·卡门撞击坑地形适宜着陆。且冯·卡门撞击坑相比于“嫦娥3号”着陆点海拔低约 $3\ 209.8\ \text{m}$ ，冯·卡门撞击坑较小的高程说明该地区月壳较薄，或能探测到上月幔物质。

4.2 地形参数对比分析

为进一步对比分析“嫦娥3号”着陆区与冯·卡门撞击坑地形特征，统计了“嫦娥3号”着陆区的地形参数（表5），与上文中冯·卡门撞击坑地形参数统计信息作对比。

表 5 “嫦娥3号”着陆区地形参数统计

Table 5 Statistics of topography parameters of Chang'e-3 landing area

	最大值	最小值	平均值	标准差
高程/m	-2 265.2	-3 857.5	-2 661.5	121.4
坡度/°	31.86	0.00	0.49	1.52
粗糙度/m	173.87	0.00	1.60	6.03
分形维数	2.47	2.04	2.47	0.03

“嫦娥3号”着陆区最大坡度为 31.9° ，最大坡度出现在两个较大撞击坑的边缘，该撞击坑离着陆点有较远的距离。坡度整体上都很小，该地区坡度均值为 0.5° ，说明该地区地形起伏不大，结构稳定。从表2中看，冯·卡门撞击坑坡度均值为 1.3° ，其坡度和坡度的变化与“嫦娥3号”着陆区相比都较大。但是在冯·卡门南部和东南部地区，其坡度和坡度的变化程度都与“嫦娥

3号”相差不多，甚至地形表现得更加平缓。

从粗糙度来看，“嫦娥3号”粗糙度最大值为 $173.9\ \text{m}$ ，均值为 $1.6\ \text{m}$ 。大多数区域粗糙度值都很小，其粗糙度小于 $20\ \text{m}$ 的地区占所选择总面积的 99.13% 。冯·卡门撞击坑粗糙度均值为 $4.43\ \text{m}$ ，与“嫦娥3号”相比有较大的粗糙度值，但其南部和东南部与嫦娥3号相比，粗糙度值和粗糙度变化都略小于“嫦娥3号”着陆区。

从分形维数上看，整个冯·卡门撞击坑、南部地区和东南部地区与“嫦娥3号”着陆区分形维数相差不大，其南部和东南部地形比“嫦娥3号”地形更为平滑。

综上，冯·卡门撞击坑的南部和东南部地区与“嫦娥3号”地形相差不大。结合第3节的发现，冯·卡门撞击坑西北部与南部地区地形特征相似，表明整个冯·卡门撞击坑都是较适宜着陆的地区。

5 结 论

本文基于获取的 LOLA 月表高程数据，利用最大平均值法、均方根高程法和盒维数法分别得到冯·卡门撞击坑的坡度、粗糙度和分形维数信息。从4个方面对冯·卡门撞击坑及其底部区域进行地形分析。并将该区域与“嫦娥3号”着陆区地形进行对比。得到结论如下

1) 冯·卡门撞击坑高程值很小，比北边区域低约 $4\ \text{km}$ ，比南边区域低约 $2.5\ \text{km}$ 。撞击坑内没有大的撞击坑，其南部高程最小。南部地区（I区）撞击坑数量少，年龄较新。西北部地区（II区）撞击坑数量较多，年龄较老。西南部的C区为重力滑坡地形。

2) 冯·卡门撞击坑内坡度小于 2° 的地区面积约占撞击坑底部面积的 85% ；粗糙度值小于 $20\ \text{m}$ 的区域占整个冯·卡门撞击坑的 95.1% ；冯·卡门撞击坑整体上分形维数很大。从3个地形参数上看，冯·卡门撞击坑有平滑稳定的地形结构。

3) 从不同地区的地形参数统计信息来看，撞击坑南部（B、C区）和西北部（D区）地形平滑稳定，适宜着陆。A区域虽然有较大的高差，但其地形起伏也较平缓，地形变化均匀。E区与F区有冯·卡门撞击坑最粗糙的地形，E区与F区在地形特征上表现不同。该研究发现冯·卡门撞击坑至少可以分为4个地形结构单元：撞击坑内部地形平坦单元、撞击坑西部的撞击坑边坡退化地形单元、原始的中央峰单元和可能退化的中央峰单元。

4) 与“嫦娥3号”着陆区进行对比，发现，冯·卡门撞击坑高程在整体上比该区域低 $3\ 209.8\ \text{m}$ 。冯·卡门撞击坑内部与“嫦娥3号”着陆区地形相接近，甚至比“嫦娥3号”着陆区更平滑、地形起伏更小、结构更稳定，表明冯·卡门撞击坑内部整个区域都适宜着陆。

致谢

感谢澳门科技大学月球与行星科学实验室——中国科学院月球与深空探测重点实验室伙伴实验室开放课题（澳门科学技术发展基金资助编号：039/2013/A2）资助。

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 111-117.
WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.
- [2] SNAPE J F, FAGAN A L, ENNIS M E, et al. Science-rich mission sites within South Pole-Aitken basin, Part 2: Von Kármán Crater [C]/Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2010: 1857.
- [3] 郭弟均, 刘建忠, 籍进柱, 等. 月球的全球构造格架初探[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3543-3554.
GUO D J, LIU J Z, JI J Z, et al. Preliminary study on the global geotectonic framework of the Moon [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3543-3554.
- [4] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, TRASK N J. The geologic history of the Moon, 86-600177 (BKS3) [R]. Washington: U. S. G. P. O., 1987.
- [5] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE terrain camera [J]. Science, 2009, 323: 905-908.
- [6] 焦中虎, 刘少峰, 奚晓旭, 等. 南极-艾肯盆地Th异常的富集特征和机理[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2012(1): 95-106.
JIAO Z H, LIU S F, XI X X, et al. The South Pole-Aitken basin thorium anomaly and its enrichment characteristics and mechanisms [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2012(1): 95-106.
- [7] SPUDIS P D, REISSE R A, GILLIS J J. Ancient multiring basins on the moon revealed by Clementine Laser Altimetry [J]. Science, 1994, 266(5192): 1848-51.
- [8] LUCEY P G, TAYLOR G J, HAWKE B R, et al. FeO and TiO₂ concentrations in the South Pole-Aitken basin: Implications for mantle composition and basin formation [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 1998, 103(E2): 3701-3708.
- [9] 肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2016, 46(2): 029602.
XIAO L, QIAO L, XIAO Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 1998, 103(E2): 3701-3708.
- [10] SMITH D E, ZUBER M T, JACKSON G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission [J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1-4): 209-241.
- [11] ZUBER M T, SMITH D E, ZELLAR R S, et al. The lunar reconnaissance orbiter laser ranging investigation [J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1-4): 63-80.
- [12] FRANK J R, 小弗兰克·莫林, 马援. 月球勘测者“月球勘测轨道器”[J]. 国际航空, 2006(3): 83-83.
- [13] ROSENBERG M A, AHARONSON O, HEAD J W, et al. Global surface slopes and roughness of the moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2011, 116(E2): 1161-1172.
- [14] CAO W, CAI Z C, TANG Z S. Lunar surface roughness based on multiscale morphological method [J]. Planetary and Space Science, 2015, 108: 13-23.
- [15] LLOYD, CHRISTOPHER D, MCDONNELL, et al. Principles of geographical information systems [J]. Oxford University Press, 1998, 12(1): 102-102.
- [16] 奚晓旭, 刘少峰, 吴志远, 等. 基于粗糙度的月表虹湾地区地形地貌解译[J]. 国土资源遥感, 2012, 24(1): 95-99.
XI X X, LIU S F, WU Z Y, et al. The Interpretation of the land form of Sinus Iridum on the moon based on the roughness [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, 24(1): 95-99.
- [17] CORD A, BARATOUX D, MANGOLD N, et al. Surface roughness and geological mapping at sub hectometer scale from the High Resolution Stereo Camera onboard Mars Express [J]. Icarus, 2007, 191(1): 38-51.
- [18] 周宏伟, 谢和平, Kwasniewski M A, 等. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学报, 2000, 20(6): 455-459.
ZHOU H W, XIE H P, KWASNIEWSKIMA, et al. Fractal dimension of rough surface estimated by the cubic covering method [J]. Tribology, 2000, 20(6): 455-459.
- [19] ZHOU H W, XIE H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock [J]. Surface Review & Letters, 2012, 10(05): 751-762.
- [20] CAO W, CAI Z, TANG Z. Fractal structure of lunar topography: an interpretation of topographic characteristics [J]. Geomorphology, 2015, 238: 112-118.
- [21] STUART-ALEXANDER D E. Geologic map of the central far side of the moon [J]. Alexander, 1978: 1-5.
- [22] PASCKERT J H, HIESINGER H, BOGERT C H V D. Lunar farside volcanism in and around the South Pole-Aitken basin [J]. Icarus, 2017, 299: 538-562.

作者简介:

王慧慧(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 地图学与地理信息系统, 遥感定量反演。

孟治国(1978-), 男, 教授, 主要研究方向: 微波遥感。本文通讯作者。
通信地址: 吉林大学地球探测科学与技术学院(130026)

电话: (0431)88502362

E-mail: mengzg@jlu.edu.cn

Topography Characteristics Analysis of Von Kármán Crater Using LOLA Data

WANG Huihui^{1,2}, MENG Zhiguo^{1,2}, LI Cui¹, ZHU Yunzhe¹, CAI Zhanchuan², LI Xiangyue¹

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Lunar and Planetary Science Laboratory, MUST- Partner Laboratory of Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, CAS. MUST, Macau 999078, China)

Abstract: Von Kármán crater, located in the northwest of SPA, is the candidate landing site for Chang'e-4. In this paper, LOLA (onboard LRO satellite) data are processed by the maximum mean method, the root mean square height method and the box counting method respectively to acquire and analyze the slope, roughness and fractal dimension information of Von Kármán crater. The results show that the elevation of Von Kármán crater is low and the most-south area has the lowest elevation and the rest areas have respectively higher elevation. There are many impact structures in Von Kármán crater. The mean slope of Von Kármán basin is 1.3° and there are about 85% areas having the slope less 2° . There are 95.1% areas having roughness of less than 20m and the FD (Fractal Dimension) of the whole Von Kármán basin is high. All of these show that Von Kármán basin has smooth topography and stable structure. The statistical results hint that the south, southeast, and northeast parts of Von Kármán basin have lower slope, lower roughness and higher FD, which makes the basin is appropriate for the Chang'e-4's landing. What's more, the comparative analysis presents that the topography condition in Von Kármán basin is better than that in Chang'e-3 landing area.

Key words: LOLA data; Von Kármán crater; landing site; topography

High lights:

- The Elevation, slope, roughness and FD of Von Kármán Crater were analyzed.
- The topographic features of Von Kármán Crater were compared with that of Chang'e-3 landing area.
- Suitability of Von Kármán basin for landing was analyzed.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]