基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究

张吉栋[1,2,3]，孟治国[1,2,3]，朱蕴哲[1]，曾昭发[1]，平劲松[3]

（1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026；
2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室，北京 100101；
3. 中国科学院 国家天文台月球与深空探测重点实验室，北京 100012）

摘　要： 冯·卡门（Von Kármán）撞击坑是“嫦娥4号”的候选着陆区之一。基于LOLA高程数据，对当前的月球光照模型做出改进，建立了月表太阳辐射模型，对冯·卡门地区2018年太阳辐射进行了数值模拟分析。结果表明：地形对太阳辐射的影响很大，撞击坑的南部坑壁、中央峰北部以及内部小撞击坑南部坑壁接收的太阳辐射能较多，坑底平原大部分地区接收的太阳辐射能在（0.9~1）× 10^{10} J/m^2之间；不考虑月面坡度时，太阳辐射能量主要受纬度的影响，计算区域的变化范围为（0.87~1.01）× 10^{10} J/m^2。结合月表坡度和光照条件提出了两个候选着陆区（S1区和S2区）：S1区位于坑底南部平原，地势更平缓，日出更早，光照时间更长；S2区位于中央峰西北侧，接收的太阳辐射能量更多。两区全年平均接收的太阳辐射能分别为9.31 × 10^9 J/m^2和9.65 × 10^9 J/m^2，7月份光照时间最长，更适宜着陆。

关键词： 太阳辐射；月球光照模型；冯·卡门撞击坑；着陆区

中图分类号： P184　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 2095-7777(2018)01-0012-08

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.002

引用格式： 张吉栋，孟治国，朱蕴哲，等. 基于LOLA数据的冯·卡门撞击坑太阳辐射研究[J]. 深空探测学报，2018，5（1）：12-19.

Reference format: ZHANG J D，MENG Z G，ZHU Y Z，et al. Research on solar radiation of Von Kármán crater using LOLA data[J]. Journal of Deep Space Exploration，2018，5（1）：12-19.

0　引　言

太阳辐射是月面物质受到的最主要辐射源[1]。由于没有大气层的保护，太阳辐射不仅控制着月表温度的昼夜变化，造成太空风化作用，同时也会影响月球巡视探测器的工作性能以及航天员的人身安全。月表太阳辐射研究可以提高月表温度的反演精度，为着陆区提供可靠的太阳能源信息参考，也是人类构建月表科研基地的前提和条件之一，具有十分重要的理论和现实意义[2-5]。

辐照度是定量描述和研究太阳辐射的重要参量之一。目前，月表太阳辐照度大多作为温度反演的参数，而大部分研究都将太阳辐照度设为常数，或者简单地按照某种余弦变化考虑。Wesselink等首先对月表热物理特性进行反演，研究中将太阳有效辐照度简单地按余弦或傅里叶级数变化方式进行模拟[6]；Jaeger等对月表温度进行研究时也仅简单考虑了太阳辐射随时间的变化情况[7]；Cremers等基于Apollo 12样品研究登陆点的月表温度时，将太阳辐照度按余弦变化方式进行考虑[8]；Jones等也考虑了月球表面太阳有效辐照度随时间的变化情况，并将日食参数引入到月表温度计算，然而并没有进一步考虑地形对太阳辐照度的影响[9]；Racca等构建的月球稳态和非稳态的月表温度模型中，太阳辐照度仅按照常数的方式进行了计算[10]；李雄耀等根据月表有效的太阳辐照度模型与太阳常数、太阳辐射入射角及日月距离的关系，对月表有效太阳辐照度进行实时计算，但没有考虑地形的影响[2]。基于改进的Racca模型和“嫦娥1号”LAM数据，Meng等研究了地形对月面温度分布的影响，没有考虑太阳辐射能量随时间的变化情况[11]。张吉栋基于DE/LE430月球行星历表和LOLA地形数据，通过几何关系建立月表光照模型，对全月光照特性做了模拟分析，但缺乏对太阳辐照度和辐射能的研究[12]。

“嫦娥4号”着陆器和巡视器将于2018年后进行发射，拟着陆于月球背面南极–艾肯（South-Pole Aiken，SPA）盆地内的冯·卡门（Von Kármán）撞击坑，有望实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察[13]。太阳辐射条件研究是了解着陆区的热环境特性、保证着陆器

收稿日期：2017-11-06　修回日期：2017-12-06

基金项目：国家自然科学基金项目（41371332，41590851）；遥感科学国家重点实验室开放基金资助（OFSLRSS201706）

正常运行的重要参考。因此，本文在文献[12]构建的月球光照模型基础上，进一步考虑月面地形对太阳辐射的影响，定量得到并分析了冯·卡门撞击坑2018年太阳辐射能量条件，并综合光照条件和坡度条件提出两个候选着陆区，最后给出各区域中心点每个月球日的起止光照时刻和光照时长，为“嫦娥4号”着陆提供太阳能量信息参考。

1　数据和方法

1.1　数 据

美国国家航空航天局（NASA）月球勘测轨道飞行器（Lunar Reconnaissance Orbiter，LRO）所搭载的月球轨道激光高度计（The Lunar Orbiter Laser Altimeter，LOLA）提供了目前空间分辨率最高、精度最好的月表高程数据[14]。LOLA GDRs（Gridded Data Records）[14-15]是由长期积累的RDR（Reduced Data Records）数据和LROC（Lunar Reconnaissance Orbiter Camera）影像数据处理得到的月球规则矩形格网地形数据集[16]，提供了包括1/64°在内的多种空间分辨率的全月数字高程模型（LOLA Digital Elevation Models，LDEMs）数据，其高程值可视为多值影像的像素点，不仅能实现对月面地形的数字化模拟，而且易于存储和处理，因而得到了广泛的使用[17-19]。

基于LOLA GDRs数据，Cao等对全月月表粗糙度做了研究，本文采用其1/64°的地形数据[19]。图 1为截取的冯·卡门撞击坑高程图，范围为（171°~183°E，41~49°S）。图 1表明，冯·卡门撞击坑地区地势起伏明显，高程变化很大，北部坑壁外侧高程最高，约–1 000 m，坑内最低处出现在中央峰西北侧的一小型撞击坑内，高程为–6 621 m。中央峰是坑内最高的地方，高程约–4 500 m；坑底平原高程均小于–5 000 m，中央峰南侧坑底平原部分是高程变化最小的地区。

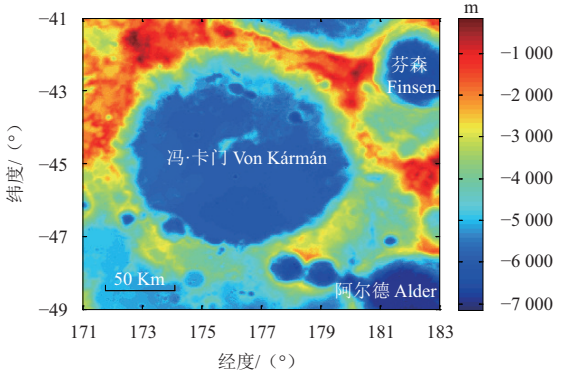


图 1　冯·卡门撞击坑高程图

Fig. 1　Elevation map of the Von Kármán crater

1.2　月表太阳辐射模型

如图 2所示，月面任意坡面的法向量$\boldsymbol{N}_{slp}$与月面点—日心方向向量$\boldsymbol{R}$所成太阳入射夹角z的余弦值cos（z）反映了太阳辐射强度投射到月表的光照比，则月面受到的有效太阳辐照度（I）可以表示为月表太阳辐照度（E）与cos（z）的乘积，即

$$I = E \cdot \cos(z) \tag{1}$$

式中，I和E的单位为W/m^2。式（1）表明影响月表有效辐照度的因素包括太阳辐照度E和太阳入射夹角z两方面。

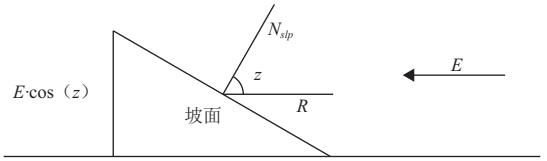


图 2　太阳入射方向与坡面关系示意图

Fig. 2　The diagram of the relationship between solar incident direction and lunar surface slope

在不考虑其它天体和宇宙尘埃对太阳辐射产生的影响下，月表太阳辐照度可由日月距离的修正得到[20-21]，关系如式2所示

$$E = A_0(\mathrm{AU}/D)^2 \tag{2}$$

其中：D为该时刻下月面点与日心的距离；A_0为一个天文单位（AU）下的太阳常数，这里取1 365.5 W/m^2[2]。在某一计算时间段t内月球表面积S所得到的有效太阳辐射能W由式（3）计算表示

$$W = I \cdot S \cdot t \tag{3}$$

太阳入射夹角z主要考虑$\boldsymbol{N}_{slp}$和$\boldsymbol{R}$的关系。当$\boldsymbol{N}_{slp}$与$\boldsymbol{R}$方向相同时，cos（z）取最大值1；当z不小于90°时，cos（z）取最小值0。因此，应对$\boldsymbol{N}_{slp}$和$\boldsymbol{R}$进行计算。

根据所使用坡度数据的特点，本文建立了如图 3所示的坡度计算模型。设Y_0为待求坡度的月面点，经纬度为（$Ylon_0$，$Ylat_0$），Y_3和Y_7分别为格网地形数据点Y_0东、东南方向最邻近高程数据空间分辨率下的月面点，经纬度分别为（$Ylon_0$+c，$Ylat_0$）和（$Ylon_0$+c，$Ylat_0$-c），c为地形数据的空间分辨率，这里取1/64°。$\boldsymbol{N}_Y$为月心—月面点方向向量，向量$\boldsymbol{Y_0Y_3}$和向量$\boldsymbol{Y_0Y_7}$构成平面的法向量$\boldsymbol{N}_{slp}$为月面点Y_0的坡面法向量，则月面点坡度slp和太阳入射夹角z可以通过式（4）~（6）计算得出

$$\overrightarrow{\boldsymbol{N}_{slp}} = \overrightarrow{\boldsymbol{Y_0Y_7}} \times \overrightarrow{\boldsymbol{Y_0Y_3}} \tag{4}$$

$$slp = \arccos(\overrightarrow{\boldsymbol{N}_Y} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{N}_{slp}}) \tag{5}$$

$$z = \arccos(\overrightarrow{\boldsymbol{N}_{slp}} \cdot \overrightarrow{\boldsymbol{R}}) \tag{6}$$

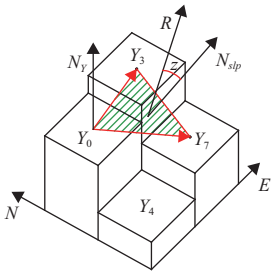


图 3 坡度计算模型

Fig. 3 Slope calculation model

基于NASA喷气推进实验室（Jet Propulsion Laboratory，JPL）推出的DE系列高精度历表，以及美国海军天文台天体测量软件（Naval Observatory Vector Astrometry Software，NOVAS）可以得到不同时刻太阳和月球在各种坐标系下的数据，测量计算精度可达到亚毫米级，完全可以满足本文的需要[22-23]。通过将$\boldsymbol{N}_{slp}$和$\boldsymbol{R}$转化至月心J2000.0天球坐标系，通过式（6）可得到太阳入射夹角z。

本文在文献[12]构建的光照模型基础上，进一步考虑太阳入射夹角的影响对月面辐照度和接收太阳辐射能做计算。由式（3）可知，当计算面积S一定时，接收有效太阳辐射能W取决于有效太阳辐照度I与照射时间t的乘积。本文采用求各时段平均太阳辐照度的方法计算W。

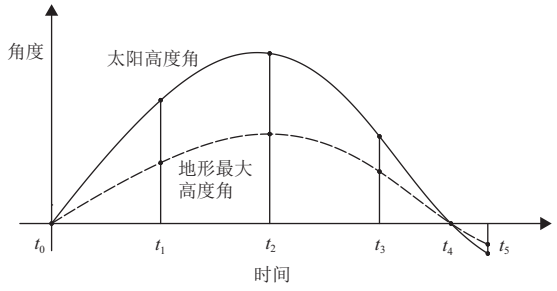


图 4 平均太阳辐照度计算时刻示意图

Fig. 4 Diagram of average solar irradiance calculation time

如图 4所示，设（t_0，t_4）是月面点可以受到连续光照的一个时段，从t_0时刻起等时间间隔取样计算，对应时刻分别为t_0、t_1、t_2、t_3，I_i为各时刻下的太阳辐照度，由式（1）~（6）及图 4所示的时段内月面得到的有效太阳辐射能W可表示为

$$W = \frac{I_0 + I_1 + I_2 + I_3}{1+1+1+1} \cdot S \cdot (t_4 - t_0) \tag{7}$$
$$I_i = E_i \cos(z_i) = A_0 (\mathrm{AU}/D_i)^2 \cos(z_i) \quad (i = 0,1,2,3)$$

2 结果与讨论

2.1 太阳辐射能量分布

基于上述理论和模型，对2018年冯·卡门撞击坑地区接收总的太阳辐射能量做了计算，时间分辨率为3 h，空间分辨率为1/64°，结果如图 5（a）所示。从图中可以看出，太阳辐射能分布呈现出明显的地形特征。撞击坑边缘地区和中央峰是太阳辐射能变化比较大的区域。在冯·卡门撞击坑、芬森撞击坑（182.1°E，42.0°S）、阿尔德撞击坑（182.6°E，48.6°S）等撞击坑内都表现出南侧向阳坡坑壁接收到太阳辐射能量明显大于北侧背阴坡的特征。计算区域内太阳辐射能量变化幅度很大，约1.21 × 10^{10} J/m^2，最大值为1.32 × 10^{10} J/m^2，最小值仅为1.07 × 10^9 J/m^2。在图 5（a）所示黑色椭圆范围内，冯·卡门撞击坑中央峰北侧接收到的太阳辐射能最高，约为1.23 × 10^{10} J/m^2，是中央峰南侧最小值的2.8倍。坑底北部地势起伏明显，太阳辐射能受地形的影响很大；而坑底南部大部分地区是坡度较小的平原区，除其内部零散的小型撞击坑外，绝大部分地区太阳辐射能量都在（0.9~1）× 10^{10} J/m^{2}之间。图 5（b）是不考虑月面地形时冯·卡门撞击坑区域的太阳辐射能量分布。结果表明，在不考虑地形的情况下，受月球赤道面与黄道平面夹角以及物理天平动的影响，太阳辐射能等值线近似东西向，呈现东部比西部略高的特征。与考虑地形的计算结果相比，太阳辐射能随纬度变化更加明显，纬度越高，太阳辐射能越低，但变化幅度明显减小，计算范围内的全年接收总的太阳辐射能最大值和最小值分别为1.01 × 10^{10} J/m^{2}和8.73 × 10^9 J/m^2，变化量仅为1.37 × 10^9 J/m^2。这说明，地形和月面地理位置都会对月面太阳辐射造成影响，考虑地形时太阳辐射能量发生更大的变化也说明地形是更重要的影响因素。

为更好地了解冯·卡门撞击坑太阳辐射能在纬度方向的变化情况，在图 5（a）黑色椭圆所示的撞击坑区域内，选取中心经线176.125°E（图 5（a）蓝色实线）做坡度与纬度的太阳辐射能变化分析。图 6中L1为考虑坡度下的太阳辐射能变化。由于撞击坑北部地势起伏较大，43°S附近的坡度和太阳辐射能变化比较明显，在43.5°S附近地势较为平坦，太阳辐射能变化也比较小。中央峰地区坡度出现明显变化，太阳辐射能由北向南先急剧增大后急剧减小；中央峰以南的坑底平原，坡度变化很小，随纬度的升高，太阳辐射能逐渐降低，这与不考虑地形的情况吻合。中途经过一个小型撞击坑C1（176.125°E，45.343 75°S），是撞击坑内地势起伏和太阳辐射能变化最明显的地区，坡度为34.3°，太阳辐射能为1.53 × 10^9 J/m^2，仅为坑底平原区的五分之一。最后到达南部坑壁，由于其属于向阳坡，太阳辐射能明显大于坑底平原区。L2为不考虑坡

度的太阳辐射能变化，随着纬度的升高，太阳辐射能持续减少，变化量为1.39 × 10^9 J/m^2，在坑底平原处与考虑地形时的太阳辐射能量值基本吻合，这再次说明地形是影响月面接收太阳辐射能的重要因素。

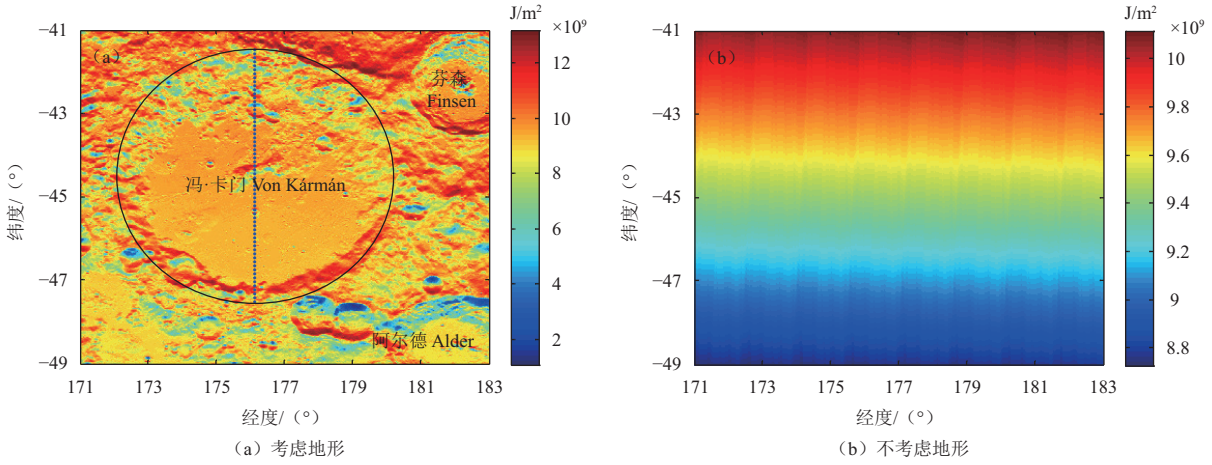


图 5　考虑地形（a）和不考虑地形（b）的太阳辐射能量分布图（黑色椭圆代表撞击坑范围；蓝色实线代表撞击坑中央经线）

Fig. 5　Distribution of solar radiation energy when considering （a） and without considering topography （b）（black ellipse：range of crater；blue line：central longitude of crater）

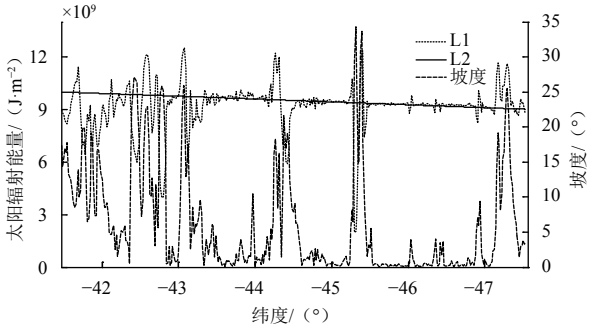


图 6　2018年太阳辐射能（L1：考虑坡度；L2：不考虑坡度）与坡度在经度为176.125°E的纬向变化图

Fig. 6　The latitudinal variations of solar radiation （L1：considering slope；L2：without considering slope）and slope at the longitude of 176.125°E in 2018

2.2　着陆区选择建议

月表坡度和光照条件是影响着陆区选择的重要参考因素[24-25]。当月表坡度大于15°时会影响着陆器的安全[24]。月面探测任务受能源和温度的影响很大，良好的月面光照条件可提供比较充足的太阳能源，保证着陆器可以开展更长时间的月面探测工作。因此，本文从月表坡度和光照条件的角度出发，综合太阳辐射条件，对冯·卡门撞击坑底着陆区的选择提出建议。

图 7（a）是基于本文坡度模型得到的坡度分布图，空间分辨率为1/64°。结果表明：撞击坑底东北部坡度变化较大，局部地区坡度超过30°，不适宜着陆器着陆。中央峰西北侧存在一个面积较大的平原区。除个别小型撞击坑外，坑底南部大部分地区地势平坦，坡度均不超过5°，可提供良好的地形条件，保证着陆器的安全性和可操控性。

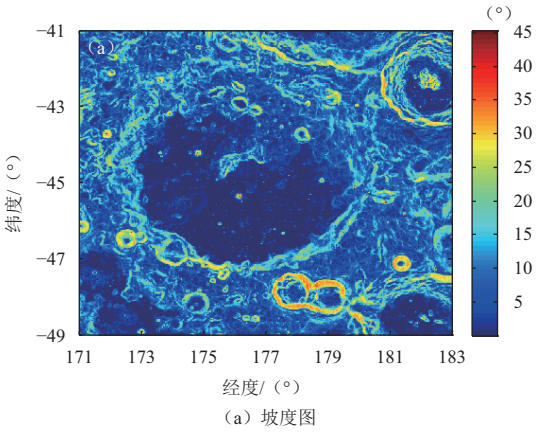
文献[12]基于DE/LE历表和LOLA高程数据建立的光照模型可对月面任意区域和年份的光照条件进行计算。基于此模型，对冯·卡门撞击坑2018年光照率做了计算，结果如图 7（b）所示。计算结果表明：坑底南部平原、中央峰北侧和南部坑壁的光照条件最好；中央峰南北两侧光照差异比较明显，坑底平原内的几个小撞击坑是光照时长最短的地区。图 7（c）更好体现了撞击坑底大于44%的光照分布。结果表明：中央峰顶部山脊处光照条件最好，光照率为49%；中央峰以南的大部分平原区光照率都在48%以上，在临近撞击坑四周坑壁的地区，光照率略低，约为47%；撞击坑北部也存在面积较大的光照良好区，光照率在47.5%左右；中央峰东北方尽管也存在较多光照条件良好的地方，但面积比较小，分布不连续。坑底光照率最小值仍出现在C1处，仅为17.2%。

基于上述结果，本文在冯·卡门撞击坑底选取两个面积为100 km^2左右的着陆区进行分析，其位置如图 7（d）中S1和S2所示。

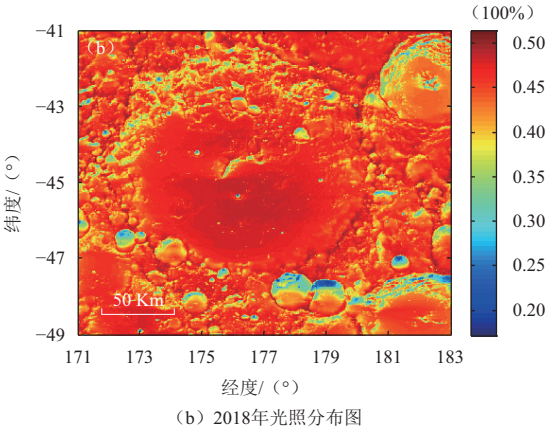
S1区域位于坑底高程最低的南部平原，中心经纬度为（176.062 5°E，45.75°S），紧邻小撞击坑C1。该地区最大坡度不超过5°，平均坡度仅为0.48°，地势平缓；2018年光照率在46.12%~48.54%之间，平均光照率为48.32%，太阳能源最充足，也有利于保证着陆器的安全和工作性能，平均太阳辐射能为9.31 × 10^9 J/m^2。S1区域的光照率约为C1的2.7倍，太阳辐射能最大是C1的6倍，可用于研究太阳辐射对月面物质演化的影响。

S2候选着陆区位于中央峰西北侧平原，中心经纬

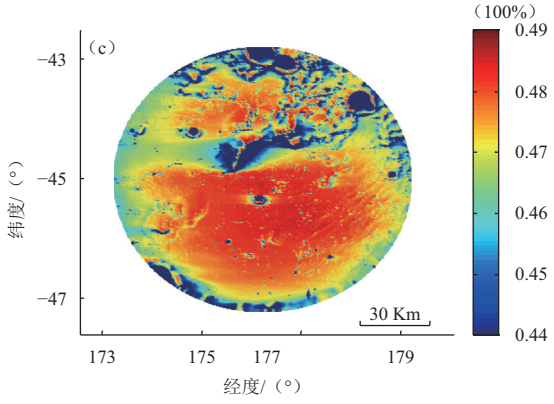
度为（175.218 75°E，43.968 75°S）。与S1区相比，该地区地势变化更大，平均坡度为1.06°，最大坡度约8°。该区域的光照率范围变化较大，为44.29%~47.90%，平均光照率为47.55%，但由于其纬度较低，接收到的太阳辐射能最多，约为9.65×10^9 J/m^2。在S2区西南方有一个小型撞击坑C2，中心经纬度为（174.812 5°E，44.187 5°S），最小太阳辐射能仅为3.1×10^9 J/m^2，而东南方的中央峰地区最大约为1.23×10^{10} J/m^2，是同时近距离研究高太阳辐射能、低太阳辐射能对月面演化作用的理想区域。



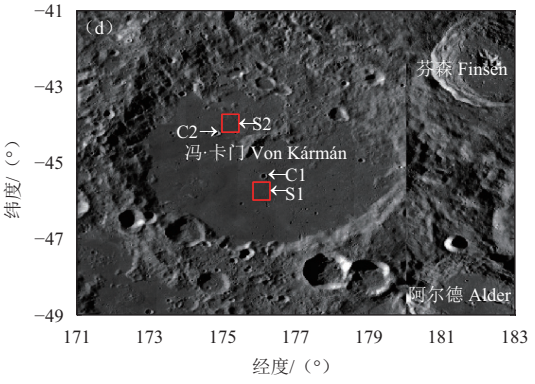
（a）坡度图



（b）2018年光照分布图



（c）坑底光照分布图



（d）着陆区位置分布图

图 7 冯·卡门撞击坑坡度图、2018年光照分布图、坑底光照分布图和着陆区位置分布图

Fig. 7 Slope map，illumination distribution in 2018，illumination distribution of the bottom and the distribution of landing sites of the Von Kármán crater

为更加详细地了解两个着陆区的光照条件，对两个着陆区中心点每个月球日日出与日落的UTC（Coordinated Universal Time）时刻以及光照时长做了计算，如表 1所示。结果表明：S1区每个月球日的光照时间均在14天12时07分以上，其中，1月份最短，7月份最长，最大光照时长约为11 h。与S1区中心点相比，S2区中心点每个月球日光照时长更短，日出时间也更晚，1月份光照时间最短，为14天07时40分；7月份光照时间最长，为14天7时43分，最大时长差异约10 h。两个区域都在7月获得最多的光照时间，因此更适宜在7月着陆。

3 结束语

本文对月球光照模型进行改进，充分考虑坡度条件以及日月距离对太阳常数的影响，建立了月面太阳辐射计算模型，对“嫦娥4号”拟着陆的冯·卡门撞击坑2018年接收到的太阳辐射能量做了定量计算，并结合坡度条件和光照条件提出了两个候选着陆区，并给出了2018年两个地区中心点每个月球日日出和日落的UTC时刻和光照时长。

太阳辐射计算结果表明，冯·卡门撞击坑太阳辐射能分布与地形呈现出了较好的一致性。撞击坑南部坑壁和中央峰北侧是太阳辐射能接收较多的地区。除个别小型撞击坑外，坑底平原2018年接收到的太阳辐射能的范围为（0.9~1）$\times 10^{10}$ J/m^2。撞击坑南北方向太阳辐射能研究结果表明，月面坡度变化越大，对太阳辐射能的影响也越大，随纬度的增加，太阳辐射能逐渐减小。受月球赤道面与黄道平面夹角以及物理天平动的影响，在不考虑坡度的情况下，太阳辐射能受纬度变化的影响更大，等值线近似东西向，呈现东部比

西部略高的特点，计算区域内2018年接收总的太阳辐射能变化范围为（0.87~1.01）$\times 10^{10}$ J/m^2。

本文在坑底平原选取了两个候选着陆区，S1区域位于坑底高程最低的南部平原区，平均坡度仅为0.48°，最大坡度不超过5°，地势平缓；平均光照率为48.32%，年平均太阳辐射能为9.31 $\times 10^9$ J/m^2，可用于研究太阳辐射对月面物质演化的影响。S2区域位于中央峰西北侧附近，平均坡度为1.06°，最大坡度约8°，坡度略高；平均光照率为47.55%，年平均太阳辐射能为9.65 $\times 10^9$ J/m^2，是研究高太阳辐射能、低太阳辐射能对月面演化作用的理想区域。2018年每个月球日的光照结果表明，与S2区相比，S1区的日出更早，光照时间更长，S2区接收的太阳辐射能更多。两区域七月份光照时间最长，更适宜着陆。

表 1　2018年两个候选着陆区中心点每个月球日日出日落时刻及光照时长分布表

Table 1　The distribution of sunrisesunset time and illumination time for each lunar day at two candidate landing centers in 2018

月份	S1着陆区中心点			S2着陆区中心点		
	日出时刻	日落时刻	光照时长	日出时刻	日落时刻	光照时长
01	13日 08:53	27日 21:00	14天12时07分	13日 10:34	27日 18:14	14天07时40分
02	11日 22:31	26日 11:52	14天13时21分	12日 00:16	26日 11:59	14天11时43分
03	13日 10:59	28日 04:33	14天17时34分	13日 12:10	28日 02:33	14天14时23分
04	11日 22:15	26日 17:55	14天19时40分	12日 00:46	26日 14:56	14天14时10分
05	11日 08:59	26日 05:47	14天20时48分	11日 12:02	26日 02:59	14天14时57分
06	09日 19:19	24日 17:48	14天22时29分	09日 22:04	24日 14:58	14天16时54分
07	09日 06:09	24日 05:13	14天23时04分	09日 09:02	24日 02:45	14天17时43分
08	07日 18:06	22日 14:54	14天20时48分	07日 21:10	22日 11:58	14天14时48分
09	06日 06:44	21日 01:36	14天18时52分	06日 09:11	20日 23:55	14天14时44分
10	05日 20:43	20日 11:57	14天15时14分	05日 23:33	20日 10:49	14天11时16分
11	04日 11:24	18日 23:55	14天12时31分	04日 12:14	18日 23:27	14天11时13分
12	04日 02:19	18日 14:44	14天12时25分	04日 03:23	18日 11:51	14天08时28分

本研究构建的太阳辐射计算模型定量反映了冯·卡门撞击坑的太阳辐射情况，为“嫦娥4号”着陆提供了重要的太阳辐射信息和光照参考。本文所建立的模型适用全月范围，对了解月面其他区域的太阳辐射条件具有重要的参考价值。

参　考　文　献

[1] 邹永廖，欧阳自远，徐琳，等. 月球表面的环境特征[J]. 第四纪研究，2002，22(6)：533-539.
ZOU Y L，OUYANG Z Y，XU L，et al. Lunar surface environmental characteristics [J]. Quaternary Sciences，2002，22(6)：533-539.

[2] 李雄耀，王世杰，程安云. 月表有效太阳辐照度实时模型[J]. 地球物理学报，2008，51(01)：25-30.
LI X Y，WANG S J，CHENG A Y. A Lunar surface effective solar irradiance real-time model [J]. Chinese Journal of Geophysics，2008，51(01)：25-30.

[3] 王世杰，李雄耀，唐红，李阳. 月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨[J]. 地球化学，2010，39(1)：73-81.
WANG S J，LI X Y，TANG H，LI Y. Lunar surface environment and properties of lunar soil [J]. Geochimica，2010，39(1)：73-81.

[4] 于雯，李雄耀，王世杰. 月球探测中月面热环境影响的研究现状[J]. 地球科学进展，2012，27(12)：1337-1343.
YU W，LI X Y，WANG S J. Effect of thermal environment on Lunar exploration：a review [J]. Advances in Earth Science，2012，27(12)：1337-1343.

[5] 张吉栋，孟治国，平劲松，等. 基于LOLA数据的Aristarchus高原光照特性初步研究[J]. 深空探测学报，2017，4(2)：171-177.
ZHANG J D，MENG Z G，PING J S，et al. Preliminary study of illumination characteristics of Aristarchus plateau using LOLA data [J]. Journal of Deep Space Exploration，2017.4 (2)：171-177.

[6] WESSELINK A J. Heat conductivity and nature of the lunar surface material [J]. Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands，1948，10：351-363.

[7] JAEGER J C. The surface temperature of the Moon [J]. Australian Journal of Physics，1953，6 (1)：10-21.

[8] CREMERS C J，BIRKEBAK R C，WHITE J E. Lunar surface temperatures from Apollo 12 [J]. The Moon，1971，3 (3)：346-351.

[9] JONES W P，WATKINS J R，CALVERT T A. Temperatures and thermophysical properties of the lunar outermost layer [J]. The Moon，1975，13 (4)：475-494.

[10] RACCA G D. Moon surface thermal characteristics for Moon orbiting spacecraft thermal analysis [J]. Planetary & Space Science，1995，43 (6)：835-842.

[11] MENG Z G，XU Y，CAI Z C，et al. Influence of lunar topography on simulated surface temperature [J]. Advances in Space Research，2014，54(10)：2131-2139.

[12] 张吉栋. 基于LOLA数据的月球光照及应用研究[D]. 长春：吉林大学，2017.
ZHANG J D. Research on the illumination model of the Moon using LOLA data and its significance [D]. Changchun：Jilin University，2017.

[13] 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.

[14] 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 Sci. Rev. 2010a，150：209-241.

[15] SMITH D E，ZUBER，M T，NEUMANN G A，et al. Initial observations from the Lunar Oribiter Laser Altimeter（LOLA）[J]. Geophys. Res. Lett. 2010b，37：L18204.

[16] ROBINSON M S，BRYLOW S M，TSCHIMMEL M，et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera（LROC）instrument overview [J]. Space Science Reviews，2010，150 (1-4)：81-124.

[17] DINESH S. Computation and characterization of surface roughness of catchments extracted from simulated digital elevation models [J]. Appl. Sci. Res，2007，3 (12)：1969-1978.

[18] AHMAD-FADZIL M H，DINESH S，VIJANTH-SAGAYAN A. Computing surface roughness of individual cells of digital elevation models via multiscale analysis [J]. Computers & Geosciences，2012，43：137-146.

[19] CAO W，CAI Z C，TANG Z S. Lunar surface roughness based on multiscale morphological method [J]. Plantary and Space Science，2015，108：13-23.

[20] OWCZAREK S. Vector model for calculation of solar radiation intensity and sums incident on tilted surfaces. Identification for the three sky condition in Warsaw [J]. Renewable Energy，1997，11 (1)：77-96.

[21] MAXWELL E L. METSTAT--the solar radiation model used in the production of the National Solar Radiation Data Base（NSRDB）[J]. Solar Energy，1998，62 (4)：263-279.

[22] KAPLAN G，BANGERT J，BARTLETT J，et al. User's Guide to NOVAS 3.0 [Z]. Washington DC，USNO，2009.

[23] WILLIAMS J G，BOGGS D H，FOLKNER W M. Jet propulsion laboratory california ins-titute of technology，2013，interoffice memorandum，iom 335-jw，db，wf-20080314-001 [R]. USA：[s. n.]，2013.

[24] ROSA D D，BUSSEY B，CAHILL J T，et al. Characterisation of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project [J]. Planetary & Space Science，2012，74 (1)：224-246.

[25] 李飞，张熇，吴学英，等. 月球南极着陆区关键特性分析[J]. 航天器工程，2015，24(1)：103-110.
LI F，ZHANG H，WU X Y，et al. Analysis of key characteristics of Lunar south pole for landing [J]. Spacecraft Engineering，2015，24(1)：103-110.

作者简介：

张吉栋(1992–)，男，博士研究生，主要研究方向：地球探测与信息技术。通信地址：吉林省长春市朝阳区西民主大街938号吉林大学朝阳校区(130026)

电话：15568898941

E-mail：zhangjd14@mails.jlu.edu.cn

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)

E-mail：mengzg@jlu.edu.cn

Research on Solar Radiation of Von Kármán Crater Using LOLA Data

ZHANG Jidong[1, 2, 3]，MENG Zhiguo[1, 2, 3]，ZHU Yunzhe[1]，ZENG Zhaofa[1]，PING Jinsong[3]

（1. College of Geoexploration Science and Technology，Jilin University，Changchun 130026，China；
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science，Institute of Remote Sensing and Digital Earth，
Chinese Academy of Sciences，Beijing 100101，China；
3. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration，National Astronomical Observatory，
Chinese Academy of Sciences，Beijing 100012，China）

Abstract：The Von Kármán crater is one of the candidate landing sites of Chinese CE-4 mission. An effective solar radiation model was established through the improvement of the lunar illumination model based on LOLA data. Then the solar radiation condition of Von Kármán crater in 2018 was numerically simulated and analyzed. The results are as followings. Firstly，the topography strongly impacts the solar radiation，that is，there is more solar radiation in the south crater wall，the north side of the central peak and the south wall of the small craters. What's more，the solar radiation energy received by the most areas of bottom plain is about （0.9~1） × 10^{10} J/m^2. Also，the solar radiation is more easily affected by latitude without considering the surface slope，the range of which is between 0.87 to 1.01 × 10^{10} J/m^2 from the north end to the south. Thereafter，two candidate landing areas，named regions S1 and S2，were proposed based on surface slope and illumination conditions. The Region S1 is located in the bottom of the southern plain with more flat terrain，sunrise earlier and longer illumination time；while the Region S2 is located in the northwest side of the central peak with more solar radiation energy. The annual average solar radiation energy of the two regions are 9.31 × 10^9 J/m^2 and 9.65 × 10^9 J/m^2，respectively. The longest illumination time is in July，which is more suitable for landing.

Key words：solar radiation；lunar illumination model；Von Kármán crater；landing areas

High lights：

- An effective solar radiation model of the Moon was established using LOLA data.
- The solar radiation condition of Von Kármán crater in 2018 was numerically simulated and analyzed.
- Two candidate landing areas were proposed from the viewpoint of illumination and slope conditions.

[责任编辑：高莎，英文审校：朱恬]