



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

月球南极区域不同高度光照条件计算方法及其在着陆点选址中的应用

苏秀中 葛平 张天馨 康焱 周艾玉 李云飞 胡震宇

A method for calculating illumination at different elevations in the lunar south pole and its application in landing site selection

SU Xiuzhong, GE Ping, ZHANG Tianxin, KANG Yan, ZHOU Aiyu, LI Yunfei, HU Zhenyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2023190>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[月球极区着陆环境特性对比及探测建议](#)

Comparison of the landing environments in lunar poles and some suggestions for probing
航天器环境工程. 2019, 36(6): 615–621 <https://doi.org/10.12126/see.2019.06.013>

[着陆器着陆缓冲性能试验方法研究](#)

The vehicle-level test of the landing gear system for lunar lander
航天器环境工程. 2020, 37(6): 576–581 <https://doi.org/10.12126/see.2020.06.007>

[“嫦娥五号”月球探测器着陆姿态模拟装置设计](#)

Design of a landing attitude simulator for Chang'e-5 spacecraft
航天器环境工程. 2020, 37(1): 65–72 <https://doi.org/10.12126/see.2020.01.011>

[“嫦娥五号”月球探测器隔热组件高温模拟与控制技术](#)

High temperature simulation and control for multilayer insulation of Chang'e-5 lunar lander
航天器环境工程. 2019, 36(2): 171–175 <https://doi.org/10.12126/see.2019.02.012>

[绕月与月面探测热环境及影响因素研究](#)

The thermal environment of circumlunar orbit satellite or lunar rovers and influence factors
航天器环境工程. 2019, 36(6): 629–634 <https://doi.org/10.12126/see.2019.06.015>

[火星环境对着陆探测任务的影响及设计考虑](#)

Effects of Mars environment on landing probe mission and related design considerations
航天器环境工程. 2021, 38(3): 240–247 <https://doi.org/10.12126/see.2021.03.002>

月球南极区域不同高度光照条件计算方法及其在着陆点选址中的应用

苏秀中¹, 葛平^{2,3}, 张天馨^{2,3}, 康焱^{2,3}, 周艾玉¹, 李云飞¹, 胡震宇¹

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100190;
3. 深空探测实验室, 北京 100195)

摘要: 针对目前月球南北极探测中多数月面光照条件计算方法得出的结果误差大, 难以在航天任务规划和科学研究中应用的问题, 提出考虑高精地形的月球南北极光照条件实时计算方法: 基于目前已有的最高精度地形数据, 通过逐方位角搜索地平线并计算仰角, 再结合太阳高度角和太阳圆盘视直径, 得到该地点光照条件的计算结果。该方法的光照条件计算结果准确, 同时可自定义地形搜索范围和精度, 进一步可输出任意时间跨度的当地光照情况。基于该方法选取月球南极若干点作为预选着陆点, 计算各着陆点在离地高度分别为 2、5、8、10、15 m 处的全年平均光照率, 并分析离地高度对光照条件的影响规律, 为后续任务设计提供参考。

关键词: 月球南极; 数字高程模型; 光照条件; 着陆点选址

中图分类号: P184.5; V476.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2024)04-0397-07

DOI: [10.12126/see.2023190](https://doi.org/10.12126/see.2023190)

A method for calculating illumination at different elevations in the lunar south pole and its application in landing site selection

SU Xiuzhong¹, GE Ping^{2,3}, ZHANG Tianxin^{2,3}, KANG Yan^{2,3}, ZHOU Aiyu¹, LI Yunfei¹, HU Zhenyu¹

(1. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

2. Lunar Exploration and Space Engineer Center, Beijing 100190, China;

3. Deep Space Exploration Laboratory, Beijing 100195, China)

Abstract: At present, the results obtained by most methods for calculating lunar illumination conditions in the lunar polar exploration often have large errors, making them difficult to be applied in space mission planning and scientific research. Therefore, a real-time calculation method for illumination conditions in the lunar polar regions considering high-precision terrain was proposed in this paper. Based on the currently available highest resolution terrain data, the calculation results of illumination conditions at a specific location were achieved by searching the horizon and calculating the elevation angle with azimuth, and by combining the solar zenith angle and apparent solar disk diameter. This method provides accurate calculations of illumination conditions and allows for the customization of terrain search range and accuracy. Furthermore, it outputs illumination conditions for any desired time span. Based on the method, several locations in the lunar south pole were selected as candidate landing sites. The annual average illumination rate for each landing site at elevations of 2, 5, 8, 10, 15 m were calculated and the influence of elevations on the illumination condition were analyzed. The proposed study may provide a reference for the subsequent missions.

Keywords: lunar south pole; digital elevation model (DEM); illumination condition; landing site selection

收稿日期: 2023-12-25; 修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国家重大科技专项工程

引用格式: 苏秀中, 葛平, 张天馨, 等. 月球南极区域不同高度光照条件计算方法及其在着陆点选址中的应用[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(4): 397-403

SU X Z, GE P, ZHANG T X, et al. A method for calculating illumination at different elevations in the lunar south pole and its application in landing site selection[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(4): 397-403

0 引言

进入 21 世纪,世界掀起了新一轮的月球探测热潮。欧洲空间局 SMART-1 月球探测器验证了太阳能等离子体发动机,开展了十多项技术试验和科学研究。美国航空航天局主导启动“阿尔忒弥斯 (Artemis) 计划”,拟将月球南极作为着陆区,实现重返月球、建设月球基地的目标。俄罗斯规划了“月球-26 号 (Lunar-26)”“月球-27 号 (Lunar-27)”“月球-28 号 (Lunar-28)”等一系列任务,目标为在月球南极建立永久性基地^[1]。印度于 2023 年发射了“月船三号 (Chandrayaan-3)”月球探测器,并在月球南纬 69° 区域着陆。我国规划在月球南极设立国际月球科研站,牵头组织国际月球科研站大科学工程,开展长期的月球科学研究任务^[2]。

未来月球探测的热点逐渐聚焦于资源富集的月球南极,尤其是富含水冰的永久阴影区。该地区长时间的连续特殊光照条件为开展复杂探测任务提供可能。探测区域的光照条件分析对月球南极的探测任务具有极高的应用价值和工程意义。目前国内已有学者和研究机构对月球南极地区的光照条件开展了研究^[3-6]。Gläser 等采用地形最大高度角法建立光照模型,分析了月球南极几个潜在着陆区域的光照条件,同时通过分析 0 m、2 m、10 m 这 3 个不同高度的光照条件,总结了高度对光照条件的影响^[7];张吉栋等基于地形数据和日、地、月三者的轨道数据建立了月面光照模型,分析了月球南极 7 个重点区域的平均光照率^[8];刘丹等使用最大高度角法计算极区的光照条件,同时讨论了离地 2 m 高度处的光照条件和最长月夜时间对探测任务的收益^[9]。目前已有的月球南极光照条件计算方法均未考虑日地距离对太阳视半径的影响,同时往往以小时或天为步长进行分析,缺少高时间分辨率的光照条件分析^[10]。

本文提出考虑高精地形的月球南北极光照条件实时计算方法,基于目前已有的最高精度地形数据,通过逐方位角搜索地平线并计算仰角,再结合太阳高度角和太阳圆盘视直径,得到该地点光照条件的计算结果。基于数字高程模型 (DEM),针对即将于 2028 年开展的月球探测活动,计算了高时间

分辨率下选取的不同着陆点分别在离地 2、5、8、10、15 m 高度处的全年平均光照率和最长月夜天数,分析了不同离地高度对光照条件的影响,可为月球南极的探测活动和探测器设计提出相关建议。

1 光照条件计算方法

本文采用最大高度角搜索法来计算光照条件,其中月表地形数据来源于美国月球勘测轨道飞行器 (LRO) 搭载的月球轨道激光高度计 (LOLA)^[11]。LOLA 是高速率多光束激光高度计系统,使用波长 1064.4 nm 的激光束对月面高度进行测量,输出光束的测量直径为 5 m,总采样率可达 140 s^{-1} 。LRO 在 50 km 的平均飞行高度上接近圆形轨道飞行,其水平方向分辨能力优于 10~12 m,高度测量精度优于 0.1 m,所能得到的月表地形测量数据是目前分辨率和精度最高的:针对月球南纬 85° 以上区域,在水平方向具有 10 m 分辨率;针对月球南纬 87.5° 以上区域,在水平方向具有 5 m 分辨率^[12-13]。

1.1 坐标系定义

光照条件计算的输入包括当前位置的经纬高坐标,在月面某一地点观测太阳时,通过当地水平坐标系 (也称北东地坐标系) 来表示太阳和周围地形最大高度的位置,简称 LH (Local Horizontal) 坐标系,其定义如图 1 所示: z 轴指向当地天底方向。 xy 平面为当地水平面,垂直于月球球体法线。

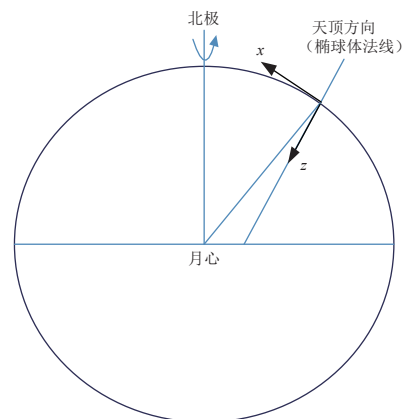


图 1 月面某点当地水平 (LH) 坐标系定义

Fig. 1 Definition of local horizontal (LH) coordinate system of a point on the lunar surface

计算太阳位置时,月面某点的当地水平坐标系中,太阳的方位角 (Azimuth, 简称 θ_A) 和高度角 (Elevation, 简称 θ_E) 的定义如图 2 所示: 方位角

θ_A 为 x 轴与太阳方向矢量在 xy 平面内的投影矢量的夹角, $+x$ 轴为零点, 向 $+y$ 轴方向为正; 高度角 θ_E 为太阳方向矢量与 xy 平面的夹角, 向 $-z$ 轴方向为正。

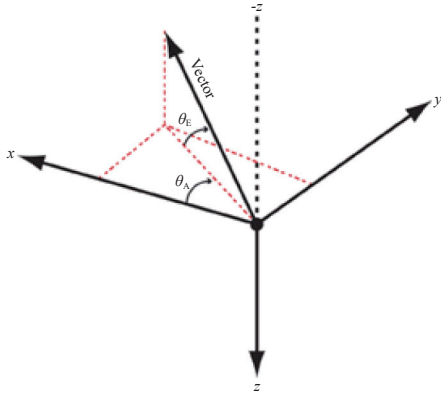


图 2 月面某点当地水平坐标系中的太阳方位角和高度角定义

Fig. 2 Definition of solar azimuth and elevation angles in the local horizontal coordinate system of a point on the lunar surface

根据以上定义, 实际计算时, 首先求得某时刻太阳(通常为视太阳)在当地水平坐标系的位置, 设为

$$\mathbf{R}_s = [x_s, y_s, z_s]^T, \quad (1)$$

则太阳方位角 θ_A 和高度角 θ_E 计算如下:

$$\begin{cases} \theta_A = \arctan2(y_s, x_s) \\ \theta_E = \arcsin(-z_s/|\mathbf{R}_s|) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 光照计算模型

光照计算模型通过定义光照强度为太阳圆盘被遮挡的比例, 表示当前时间的月夜、月昼或部分遮挡情况, 可以进一步说明当地的月夜、月昼或半影时间, 从而更精细地说明当地在考虑周围高精地形时的光照条件。

在精确计算光照和阴影的时间时, 必须考虑太阳圆盘的大小——被遮挡的部分大小以及当地水平面附近地形遮挡的影响。月面某点的光照状态分为以下 3 种情形:

- 1) 光照。太阳圆盘完全不被遮挡, 当地处于完全光照状态, 太阳光照强度为 1。
- 2) 半影。太阳圆盘部分被遮挡, 当地处于半影状态, 太阳光照强度在 0~1 之间。
- 3) 全影。太阳圆盘完全被遮挡, 当地处于完全阴影状态, 太阳光照强度为 0。

如图 3 所示, 某时刻, 以观测点为中心, 视太阳

方向的地形最大仰角为 α_t , 视太阳中心(即太阳位置)方向与地形最大仰角方向的夹角为 α_g , 太阳圆盘视半径角度为 α_s 。在不考虑地形时 $\alpha_t=0$, α_g 即为视太阳方向与当地水平面的夹角, 即太阳高度角 θ_E 。

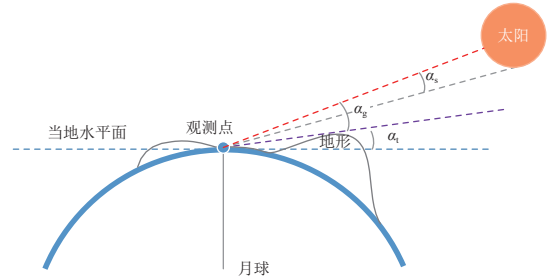


图 3 月面某点的光照计算模型示意

Fig. 3 Schematic of the illumination calculation method of a point on the lunar surface

本方法中太阳圆盘视半径角度为

$$\alpha_s = \arcsin\left(\frac{R_o}{|\mathbf{R}_s|}\right), \quad (3)$$

式中, R_o 为太阳圆盘半径, 695 700 km, 对应的视半径角度约为 0.27° 。视半径角度具体数值与当前时刻月球与太阳距离有关。

根据上述光照计算模型, 太阳光照状态的判别依据为

$$\begin{cases} \text{光照: } \alpha_g > \alpha_s \\ \text{阴影: } \alpha_g < -\alpha_s \\ \text{半影: } -\alpha_s \leq \alpha_g \leq \alpha_s \end{cases} \quad (4)$$

1.3 当地地形数据库

在定义当地的光照计算模型后, 需要指定当地光照条件计算的地形搜索精度、地形搜索范围、光照计算跨度、光照计算间隔等参数。从而加载指定的地形数据库, 搜索、计算出观测点周围 360° 地形的最大高度角, 建立当地的地平线数据库。

在光照计算模型中涉及地形遮挡的问题, 需要根据具体的地形数据精确计算地形遮挡对光照条件的影响。地形遮挡的计算通常采用地形遮罩模型, 即地形最大高度角模型。地形遮罩数据的计算流程为:

- 1) 给定当地(观测点)位置, 加载周围区域的高精度地形数据;
- 2) 以当地北向为方位角零点, 每隔 0.5° 或 1° 计算 360° 全方位的地形遮挡仰角;
- 3) 保存方位角-地形遮挡仰角参数, 即地形遮

罩参数;

4)根据地形遮罩参数可视化展示观测点的地形遮罩范围,同时根据太阳的具体方位角进行方位角插值,精确计算出对应方位角的地形最大高度角,从而进一步判别当地的太阳光照状态。

1.4 光照条件计算

在笛卡儿坐标系中,可以很方便地通过正切值来计算任意方位、任意距离处的地形最大仰角,取其最大值即为地平线仰角。在计算当地的地平线数据库之后,通过 DE430 星历^[14],根据指定的时间序列进一步计算出与太阳相关的一系列参数,如指定时刻的太阳高度角、太阳方位角、太阳圆盘半径角度等,即可计算当地的光照条件。

2 月球南极着陆点的光照条件分析

2.1 计算选点

“嫦娥七号”月球探测器计划于 2026 年前后发射,着陆区选址在月球南纬 85°以上有较好光照条件的南极艾特肯盆地区域,开展月球南极的环境与资源勘查。“嫦娥八号”月球探测器计划于 2028 年前后发射,着陆月球南极开展月球资源利用试验验证,构建月球科研站基本型。NASA 于 2022 年 8 月 19 日公布了 Artemis 计划中载人登月第三阶段的 13 个候选着陆区,均位于月球南纬 84°以上区域。

从工程角度考虑,长期的连续光照和较短的月夜可以显著延长探测器的工作寿命,增强其探测能力^[15]。因此,本文针对 2028 年计划的月球探测活动,选取月球南极附近的 4 个区域高点开展光照条件分析,同时选取高于地面 2、5、8、10、15 m 的 5 种高度分析离地高度对光照条件的影响。

选取的 4 个位置均位于月球南纬 88.5°以上区域内,如图 4 所示,具体位置为:P1(88.805 7°S, 123.619 7°E),富含水冰的沙克尔顿坑东侧高地的高点^[16];P2(88.861 2°S, 132.238 4°E),即 P1 点西侧 5.5 km 山峰的高点;P3(89.297 7°S, 129.513 7°E),沙克尔顿坑东侧边缘的高点;P4(89.439 1°S, 137.200 5°W),沙克尔顿坑西南连接脊的高点。由图 5^[17]可见,P1、P2、P4 与 Artemis 计划的载人登月候选着陆区重合。

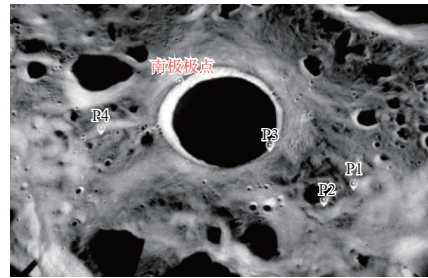


图 4 月球南极点附近的光照计算选点与永久阴影区
Fig. 4 Selected sites for illumination calculation and permanent shadow zone near the lunar south pole

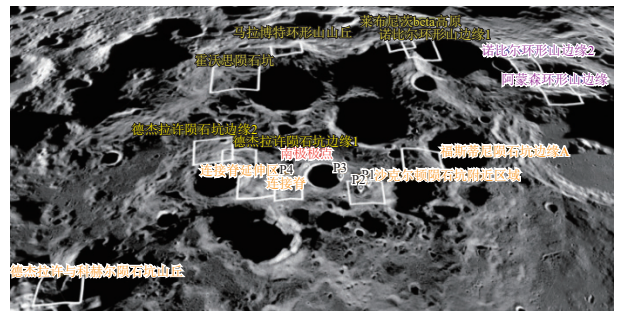
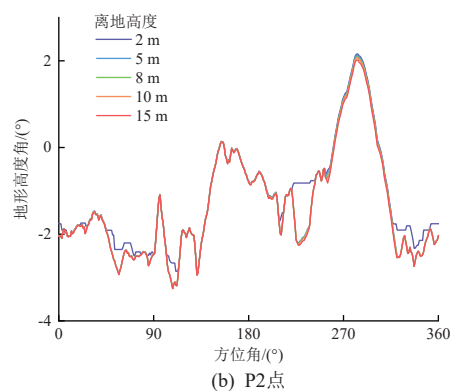
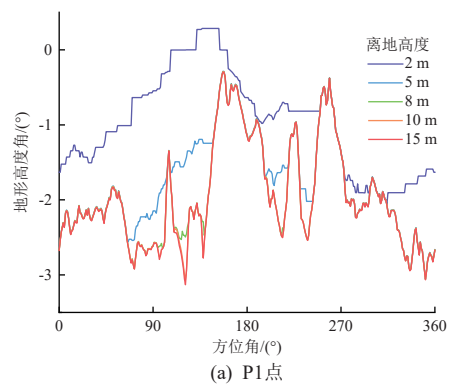


图 5 本文选点与 Artemis 载人登月计划 13 个候选着陆区
Fig. 5 Thirteen candidate manned lunar landing sites announced by Artemis and proposed sites in this paper

2.2 地形数据库计算

首先建立每个选取点周围地形高度角的数据库,计算各选取点周围 360°的地形高度角。每个点的地形搜索精度为 0.5°,地形搜索距离为 180 km,搜索步长为 5 m。结果如图 6 所示。



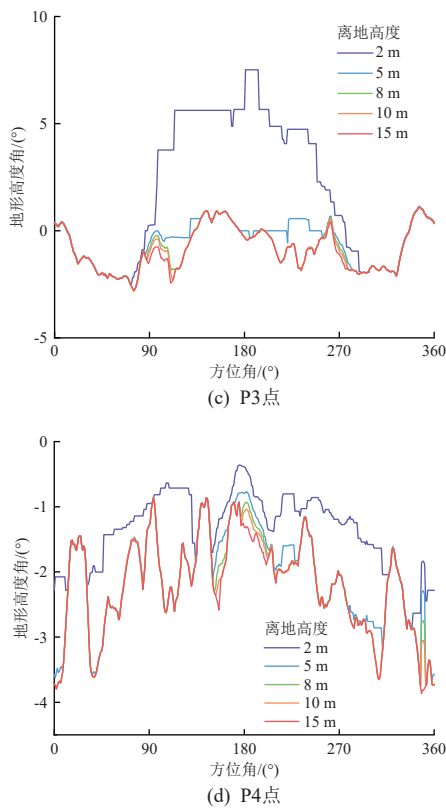


图 6 各选取点当地地形高度角
Fig. 6 Local terrain elevation angles of selected sites

由图 6 可以看到，各选取点的地形高度角受地形影响，离地高度越高，地形高度角越小，其中 P2 点的地形高度角受离地高度影响较小。P1、P4 点的地形高度角几乎全部小于 0°，由此可推断这两点的光照条件最佳，且增加离地高度对光照条件的提升更明显。各选取点离地高度为 10 m、15 m 处的地形高度角曲线几乎重合，由此可推断当离地高度提升至 10 m 以上时，增加离地高度对光照条件的提升作用已不明显。受限于地形数据精度，在选点高度为距地面 2 m 时，地形高度角曲线均出现不同程度的马赛克状变化，可见提升地形数据的分辨率有助于提升选点离地高度较低时的计算准确性。

2.3 光照强度计算

基于 2.2 节计算得到的地形数据库，计算 4 个选取点不同离地高度处在 2028 年全年的光照强度，时间分辨率为 10 min，计算结果如图 7 所示。

由图 7 可以看到：离地高度越高，光照时间越长、阴影时间越短，其中 P2 点的光照条件受离地高度影响有限；离地高度提高至 10 m 以上时，增加离地高度对光照条件的提升作用已不明显，印证

了 2.2 节的推测；P1、P4 点在距地面 5 m 以上处，2028 年内可获得 100 d 以上的连续光照；P2、P3 点增加离地高度有助于改善光照条件，但无法获得大于 30 d 的连续光照。

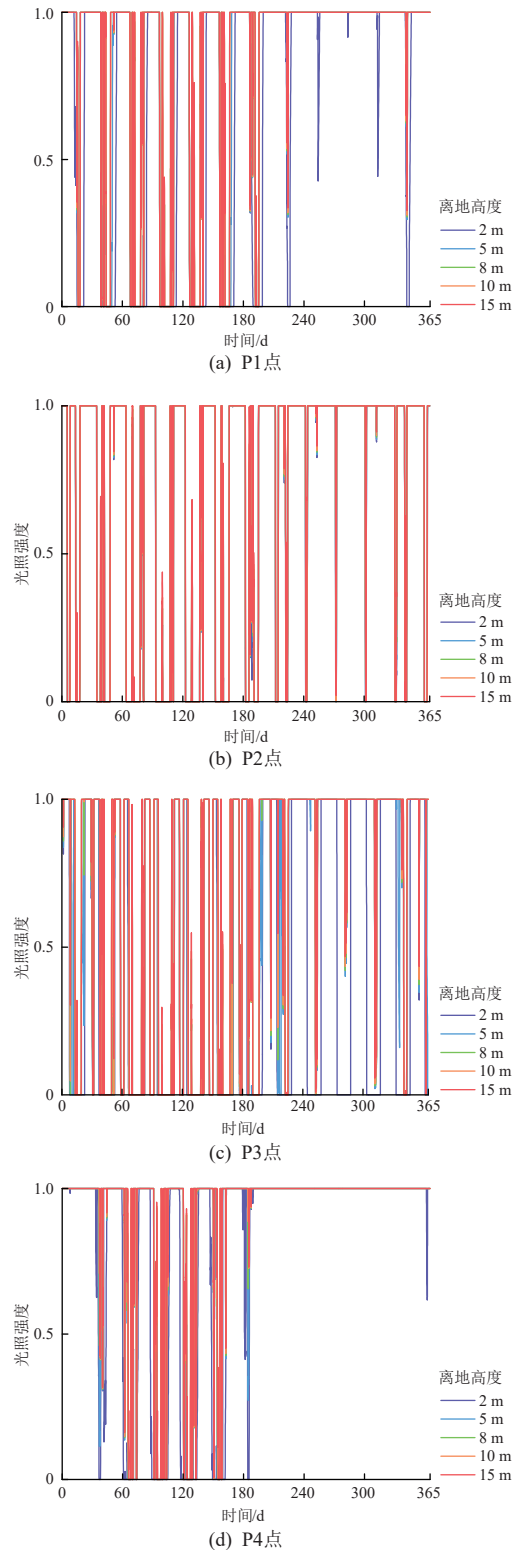


图 7 各选取点 2028 年全年光照强度
Fig. 7 Calculated annual illuminance of selected sites in 2028

3 选址与任务规划建议

基于2.3节各选取点的光照强度计算结果,进一步计算各选取点不同离地高度处的2028年全年平均光照率,并统计最长月夜天数,结果分别如图8和图9所示。

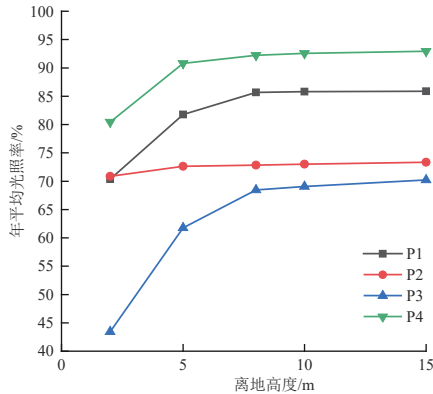


图8 各选取点不同离地高度处的2028年全年平均光照率
Fig. 8 Annual average illumination rate of selected sites at various elevations in 2028

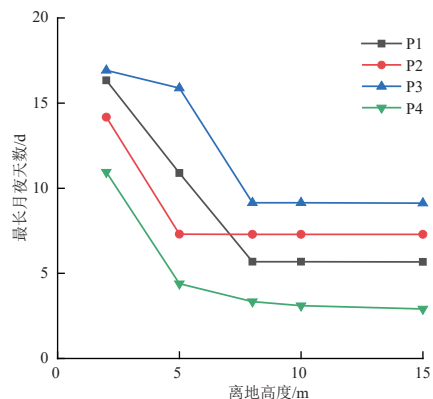


图9 各选取点在不同离地高度处的最长月夜天数
Fig. 9 The maximum lunar nights at various elevations of selected sites

由图8可见:当离地高度由2 m提高至5 m时,P1点的年平均光照率由70%提升至81%,P2点的年平均光照率对高度影响不敏感,P3点的年平均光照率由43%提升至61%,P4点的年平均光照率由80%提升至90%;而当离地高度由8 m进一步提升至15 m时,各点的年平均光照率变化都不明显。

由图9可见:当离地高度由2 m提高至5 m时,P1点的最长月夜天数由16.3 d缩短至10.8 d,P2点的最长月夜天数由14.2 d缩短至7.3 d,P3点的最长月夜天数由16.9 d缩短至15.8 d,P4点的最长月夜天数由10.9 d缩短至4.4 d;当离地高度继续提高至8 m时,P1点的最长月夜天数可进一步缩短至5.7 d;当离地高度由10 m进一步提升至15 m时,各点的最长月夜天数变化都不明显。

根据以上计算结果可以看出:在月球南极极点附近区域,随着离地高度的增加,光照时间变长,月夜时间缩短;在高于月面5 m以上处,随着离地高度进一步升高,平均光照率的上升以及月夜天数的减少均放缓;不同选取点的平均光照率与最长月夜天数的变化趋势相同。

针对2028年的月球南极探测任务,综合考虑光照率与最长月夜天数,认为P4点是预选着陆点中光照条件最优的一个。规划该点着陆的月球探测任务,当探测器的太阳电池阵高度为距月面8 m时可得到全年92%的平均光照率,以及最长只有3.3 d的短暂月夜。基于此,可设计不依赖同位素热源的探测器月夜生存方案以及探测任务规划,十分适合建立永久科研设施。

针对P4点的月夜任务规划,以2028年6月的1次月夜为例,以1 min为步长计算了UTC时间2028年6月1日至6月5日P4点离地8 m高处的光照条件,结果如图10所示:UTC时间2028-06-02 T14:46至2028-06-05T11:01,该处的光照强度 <0.5 ,为月夜时间;2028-06-02T14:46进入月夜时,太阳方位角为 199.8° ;2028-06-05T11:01进入月昼时,太阳方位角为 164.1° 。据此可以设计:在2028-06-02 T14:46进入月夜前,探测器准备进入月夜生存模式,并将太阳电池阵指向由 199.8° 转至 164.1° ;待到2028-06-05T11:01可获得一半的太阳光照强度,再将探测器唤醒。

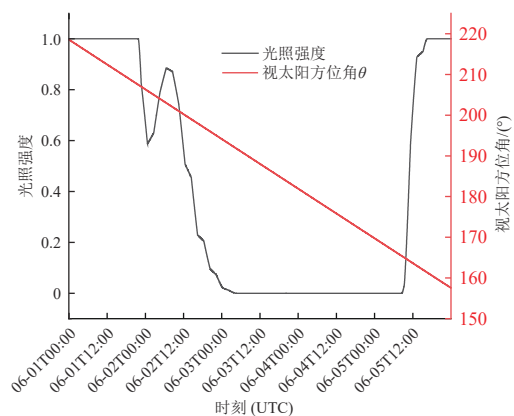


图10 UTC时间2028年6月1日至6月5日P4点在离地高度8 m处的光照条件

Fig. 10 Illumination of P4 at elevation of 8 m during June 1st - June 5th, 2028 UTC time

4 结束语

本文提出了一种考虑高精地形的月球南北极光照条件实时计算方法,基于目前已有的高精度

DEM地形数据,使用最大高度角法实时计算当地光照条件,计算结果准确,且计算参数(如搜索步长、搜索范围等)自由可调,可用于月球探测任务中的工程选址分析和任务规划。基于2028年的月球探测任务,对月球南极极点附近区域的4个着陆选取点开展2028年全年光照条件分析,讨论了各选取点光照条件随离地高度的变化规律,并给出工程选址建议。本文提出的光照条件计算方法和分析结果可为未来探月活动设计和规划提供参考。

需要说明的是,本方法目前仅支持单一位置的光照条件计算,当需要计算某一区域的光照条件时,计算量会呈指数增加,可通过提前建立目标区域基于DEM数据的地形遮罩数据库来有效提升区域目标的光照条件计算效率。

参考文献(References)

- [1] 王赤,林杨挺,裴照宇,等.月球科研站的关键科学问题[J].中国科学基金,2022,36(6):830-840
WANG C, LIN Y T, PEI Z Y, et al. Key scientific questions related to the lunar research station[J]. Science Foundation in China, 2022, 36(6): 830-840
- [2] 裴照宇,刘继忠,王倩,等.月球探测进展与国际月球科研站[J].科学通报,2020,65(24):2577-2586
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577-2586
- [3] DE ROSA D, BUSSEY B, CAHILL J T, et al. Characterization of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar Lander project[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 224-246
- [4] NODA H, ARAKI H, GOOSSENS S, et al. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24). doi: <https://doi.org/10.1029/2008GL035692>
- [5] MAZARICO E, NEUMANN G A, SMITH D E, et al. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography[J]. Icarus, 2011, 211(2): 1066-1081
- [6] 郝卫峰,李斐,鄢建国,等.基于“嫦娥一号”激光测高数据的月球极区光照条件研究[J].地球物理学报,2012,55(1):46-52
HAO W F, LI F, YAN J G, et al. Lunar polar illumination based on Chang'E-1 laser altimeter[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(1): 46-52
- [7] GLÄSER P, SCHOLTEN F, DE ROSA D, et al. Illumination conditions at the lunar south pole using high resolution Digital Terrain Models from LOLA[J]. Icarus, 2014, 243: 78-90
- [8] 张吉栋,李向月,平劲松.月球南极月基平台选址分析[J].深空探测学报(中英文),2022,9(3):292-299
ZHANG J D, LI X Y, PING J S. Potential Moon-based platform sites of lunar south polar regions[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 292-299
- [9] 刘丹,甘红,魏广飞,等.基于光照和坡度约束的月球南极着陆选址分析[J].深空探测学报(中英文),2023,10(5):544-556
LIU D, GAN H, WEI G F, et al. Lunar south polar landing area selection constrained by illumination conditions and slopes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5): 544-556
- [10] 张吉栋.基于LOLA数据的月球光照模型及应用研究[D].长春:吉林大学,2017:4-5
- [11] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(18). doi: <https://doi.org/10.1029/2010GL043751>
- [12] 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: 209-241
- [13] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, et al. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview[J]. Space Science Reviews, 2010, 150: 81-124
- [14] FOLKNER W M, WILLIAMS J G, BOGGS D H, et al. The planetary and lunar ephemerides DE430 and DE431[J]. Interplanetary Network Progress Report, 2014, 196(1): 42-196
- [15] SPEYERER E J, ROBINSON M S. Persistently illuminated regions at the lunar poles: ideal sites for future exploration[J]. Icarus, 2013, 222(1): 122-136
- [16] ZUBER M T, SMITH D E. Topography of the lunar south polar region: implications for the size and location of permanently shaded areas[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24(17): 2183-2186
- [17] NASA. NASA identifies candidate regions for landing next Americans on moon[EB/OL]. (2022-08-19)[2024-07-25]. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-identifies-candidate-regions-for-landing-next-americans-on-moon/>

(编辑:冯露漪)

一作简介: 苏秀中,工程师,主要从事航天器总体设计方向研究。