

月球南极探测着陆工程选址建议

张 焱, 杜 宇, 李 飞, 张 弘, 马继楠, 盛丽艳, 吴 克

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要: 目前人类已经成功实现了对月球中纬度地区的着陆探测, 而对于月球极区的探测, 尤其是在科学和工程上普遍认为探测意义重大的南极区域, 尚属空白。对月球南极极区环境, 包括温度、地形地貌、光照和测控等条件进行了初步分析。针对月球南极区域具有温度低、地形地貌复杂(撞击坑多、坡度较大)、太阳高度角低(南极点的太阳高度角在 $\pm 1.54^\circ$ 之间变化)且遮挡情况严重、对地不可见弧段较长等特点, 提出了工程着陆选址的原则。着陆探测任务首先要选取合适的着陆区, 不仅要满足科学目标需求, 而且还应具备工程可实现性, 尽可能地保证着陆安全, 经过对撞击坑周围环境的比较讨论分析初步选择了4个区域(沙克尔顿撞击坑、霍沃思撞击坑、舒梅克撞击坑和坎布斯撞击坑), 10个着陆点, 可为未来工程实现提供参考。

关键词: 温度; 地形地貌; 光照; 测控; 软着陆

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)03-0232-09

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191003002

引用格式: 张焱, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 232-240.

Reference format: ZHANG H, DU Y, LI F, et al. Proposals for lunar south polar region soft landing sites selection[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 232-240.

引 言

作为地球唯一天然卫星, 以及距离最近的天体, 月球一直以来被视为人类飞出地球, 迈向深空领域的重要门户。从1959年苏联发射第1个月球探测器至今, 人类共开展了118次无人和载人探月活动, 参与国家和组织包括美国、俄罗斯、中国、欧洲、日本、印度、以色列等。20世纪50—70年代, 人类掀起了第1轮月球探测高潮, 主要是出于政治和军事的需求。从20世纪90年代开始, 国际上又掀起了第2轮探月高潮, 已经转换为科学驱动引领和资源利用目标。这20多年间, 人类共开展了17次探月活动, 获得了大量的月球探测数据, 并积累了宝贵的工程经验。随着对月球科学认识的不断加深, 人类已经从最开始的对月球探索性研究, 到如今的全面深入研究、资源利用探索, 甚至是月球基地的构想。

20世纪90年代“克莱门汀号”(Clementine)探测器发回的数据显示: 在月球南极的永久阴影区的地表层下很可能存在着水冰, 自此以后, 月球南极便成为了新一轮探月活动的热点区域。第2轮探月高潮后, 包括

月球极区探测的任务共9次, 均为遥感探测, 尚未有国家和组织对月球南极开展过着陆探测任务。未来, 各国都将对月球南极的着陆探测视为抢占先机、开发资源、展示自身航天实力的大好机会。美国特朗普政府已经启动了重返月球计划, 联合多个国家建造“月球轨道平台-门廊”, 作为着陆月球和通往深空的“跳板”, 预计于2024年再次实现载人登月; 同时批准多家私营公司登陆月球, 将无人月球探测任务交由商业公司, 而月球南极也成为着陆探测的重点区域。欧洲提出了“月球村”概念, 计划以国际合作的方式在月球南极建立集科学研究、商业、旅游业于一身的永久太空基地。俄罗斯规划的“月球25号”(Luna-25)、“月球26号”(Luna-26)、“月球27号”(Luna-27)、“月球28号”(Luna-28)都将月球南极作为探测的目标区域。此外, 日本和印度等国家也对月球南极探测跃跃欲试, 并实施了相应的计划。总之, 世界航天强国或组织争相在月球“跑马圈地”, 且目标大多瞄准月球南极。我国也在规划后续月球南极着陆探测的任务。月球南极着陆探测具有非常重要的科学价值, 同时也面临技术挑战。

科学方面: 月球上最古老、规模最大的南极-艾特肯 (South Pole Aitken, SPA) 盆地的边缘位于该区域。对该区域的研究, 有望揭示月球深部物质组成、内部结构和热流特征等以及岩浆洋结晶和壳幔分异的机理。由于纬度和地形遮挡, 该地区存在永久阴影区, 有望对可能存在的水冰进行直接证认, 有助于了解月表水及其他挥发分的性质、来源和储量。

工程方面: 由于纬度和海拔的原因, 在一些地势较高的区域 (如山顶、山脊、撞击坑的坑缘处等), 存在着较月球中纬度地区更长时间的光照区域, 部分区域全年光照时间甚至可以达到80%。良好的光照条件可以提供持续的太阳能, 这为开展长时间复杂的探测活动提供了可能。不过月球南极环境具有持续低温、地形地貌特征复杂、太阳高度角低、对地无法连续可见等特点, 为工程实施带来了极大的难度和挑战。

着陆探测任务首先要选取合适的着陆区, 不仅要满足科学目标需求, 而且还应具备工程可实现性, 在选择着陆区时主要关注着陆区的光照、地形地貌、温度和测控通信等条件。

1 光照条件分析

着陆区的光照条件是设计着陆器太阳翼的重要考虑因素, 另外也影响着陆期间光学敏感器的效果, 是着陆区选择的重要参考条件之一。同时月球两极附近可能存在挥发物, 且挥发物主要储存在无光照的永久阴影区^[1], 因此, 月球两极附近的光照条件一直是学者研究的重要方面。

月球北极指向与黄道面北极指向存在 1.54° 的夹角^[1], 在不考虑地形高程前提下, 以一个恒星月为周期标

准, 月球模型的南极点的太阳高度角在约 $\pm 1.54^\circ$ 之间变化, 方位角在 $0\sim 360^\circ$ 变化。然而, 由于太阳高度角较低, 且地形比较复杂, 在分析光照条件时, 必须要考虑地形高程对于光照的遮挡。由于对月球极区附近环境的了解不足, 使得早期的工作无法对极区地形建立前瞻性模型, 直到有了卫星拍摄图像, 才为极地光照的条件分析提供了最初的约束^[2]。从“克莱门汀”任务开始, 历次环月遥感任务均通过光学相机和激光高度计获得了极区高程数据, 并且识别出永久阴影区和长时间持续光照区。目前, 对于月球极区光照条件最新的研究结果来自于对LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) 上搭载的激光高度计LOLA (Lunar Orbit Laser Altimeter) 获得的数据进行模拟计算, 并加入了散射光的影响, 长时间的对两极光照条件进行模拟, 精确地描述了月球极区特有的永久阴影区和长时间持续光照区的特点。

通过对LOLA数据的分析仿真, 得到了若干个月球章动周期 (18.6年) 内的月球极区光照情况^[3], 如图1所示。科学家对该区域的照度和光照时间进行了分析, 发现在 89.5°S 区域, 照度和光照时间都达到了最大值 (80%以上), 即所谓的连续光照区, 在月球 80°S 以南区域, 平均太阳光照时间超过80%的区域总面积可达 5 km^2 ^[4]。除持续光照区外, 科学家们还对太阳光始终无法直射的永久阴影区进行了分析, 研究结果显示永久阴影区存在于 86° 以上的纬度范围, 并给出了月球南极永久阴影区的分布图, 如图2所示。LOLA的探测结果表明月球南极永久阴影区总面积为 $16\,055\text{ km}^2$, 约占南极总面积的5.8%, 且多集中于南极点附近^[3]。

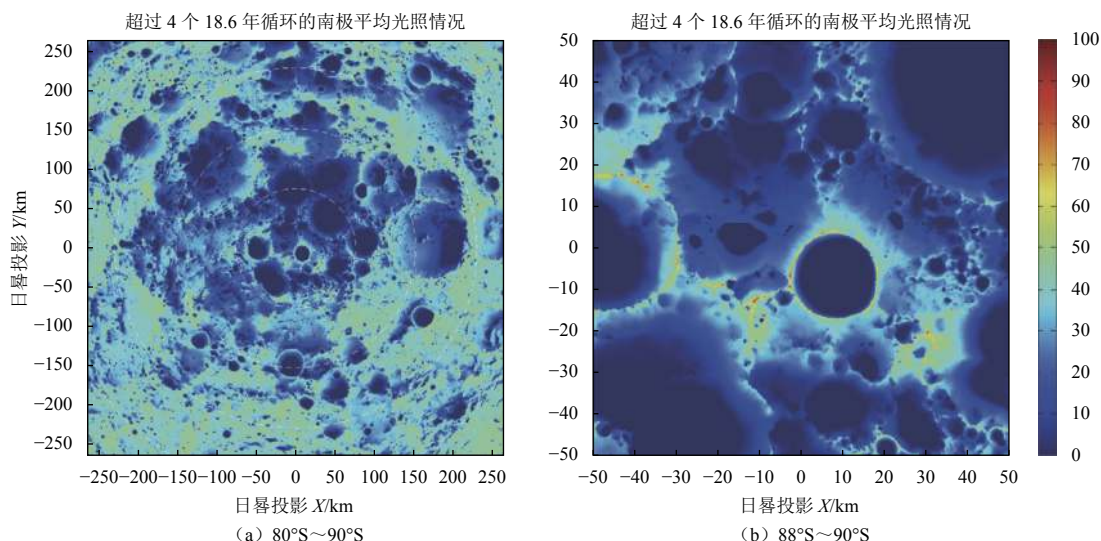


图1 月球极区的平均光照情况 (百分比)

Fig. 1 Average illumination of the lunar polar region (percentage)

因此,为满足着陆就位科学探测任务和水冰探测任务的完成,着陆区应尽量选取高程较高的持续光照区,且在此前提下应尽量靠近永久阴影区,以方便水冰探测任务的实施。

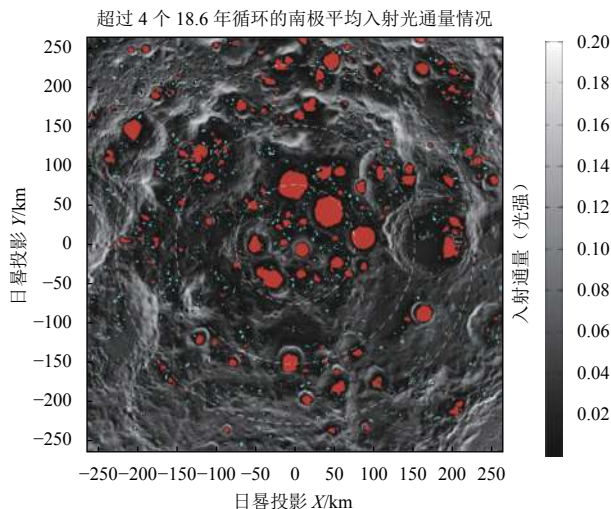


图2 月球南极永久阴影区分布(红色区域代表较大区域的永久阴影区,蓝色区域代表较小区域的永久阴影区)^[1]

Fig. 2 Distribution of permanent shadow regions at the Moon's south pole (red regions represent permanent shadow regions of larger regions, and blue regions represent permanent shadow regions of smaller regions)^[1]

2 地形地貌条件分析

月面遍布着大大小小的撞击坑和石块,月海相对平坦,高地则比较崎岖。着陆点的局部地形情况,包括坡度、撞击坑和石块等,对着陆器能否安全着陆并保持稳定姿态有重要影响。探测数据表明,月球南极地形复杂,软着陆探测的工程难度要高于中低纬度区域。典型区域的高程、坡度和石块分布情况如下文所述。

利用LRO的数据对南极地形地貌进行分析(85°S~90°S之间),其高程分布如图3所示。由图3可知:

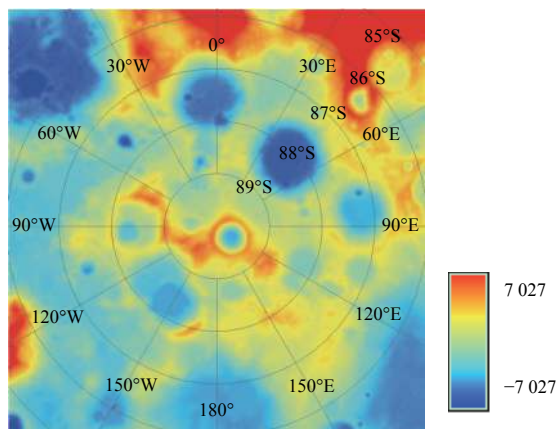


图3 月球南极高程测量结果(85°S~90°S)

Fig. 3 Measurement results of the south pole elevation of the Moon (85°S~90°S)

月球南极的平均高程~1 km,最高处约为7 027 m,最低处约为-7 297 m。

1) 撞击坑分布

撞击坑是月球南极表面最常见的地质结构,科学上比较关注的撞击坑,如沙克尔顿(Shackleton)撞击坑、舒梅克(Shoemaker)撞击坑、霍沃斯(Howarth)撞击坑和斯蒂尼(Faustini)撞击坑内均存在可能存在水冰的永久阴影区,上述撞击坑分布如图4所示。

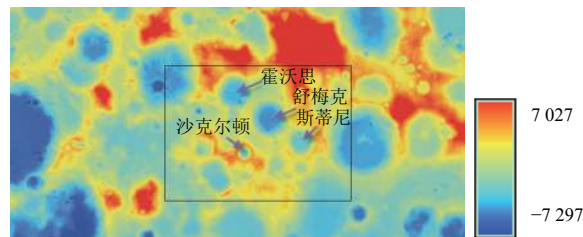


图4 沙克尔顿撞击坑、舒梅克撞击坑、霍沃斯撞击坑和斯蒂尼撞击坑位置分布

Fig. 4 The location distribution of Shackleton crater, Shoemaker crater, Haworth crater and Faustini crater

撞击坑也是影响着月球表面着陆安全的重要因素^[5]。较大的撞击坑内由于地形的遮挡,光照、通信及温度条件都极为恶劣,探测器若着陆在撞击坑内,将很难长时间生存。一般而言,撞击坑附近表面的地形起伏和坡度很大程度上取决于它的尺寸^[6]。撞击坑的深度(一般为直径的20%)和坑缘的高度(一般为直径的4%)导致的落差可能会使坑内表面地形起伏超过50 cm。直径在4~10 m的撞击坑坑内会有地形起伏较大的隐患。直径大于10 m的撞击坑,内部可能会存在表面坡度过大的问题。另外,由于月球南极地区的太阳高度角很低,撞击坑内可能会形成阴影区,但南极附近的撞击坑多为成年撞击坑,坑内的坡度一般小于15°,坑缘也较低,没有进一步增大着陆的难度。

2) 坡度分布

月球南极不同于中纬度地区,高程变化较大,因此坡度也较中纬度区域复杂得多。对LRO的LOLA获得的月球南极区域高程数据进行坡度分析,40 m基线的分析结果如图5~6所示,可以看出,大部分地区的坡

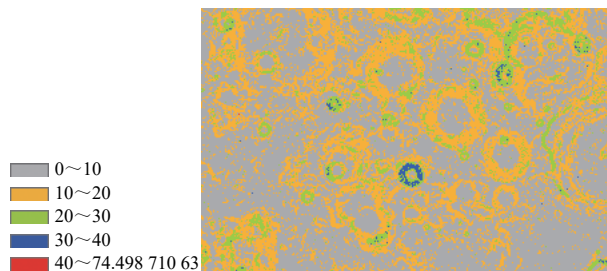


图5 月球南极区域坡度分布

Fig. 5 Slope distribution in the south polar region of the Moon

度在 10° 以内。撞击坑坑壁和坑缘处的坡度较大,一般在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间。 32° 以上坡度几乎不存在,该区域整体平均坡度约为 10° 。

LRO的窄视角相机 (Lunar Reconnaissance Orbiter

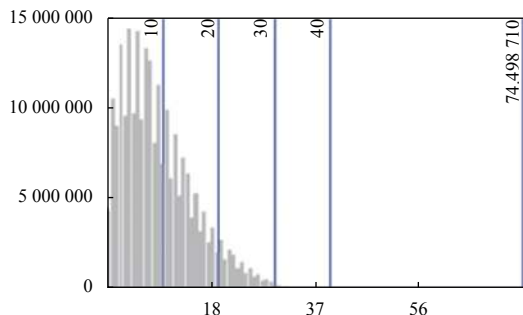


图6 月球南极区域坡度统计

Fig. 6 Slope statistics of the south polar region of the moon

Camera Narrow Angle Camera, LROCNAC) 和 LOLA提供了月球南极极点处沙克尔顿撞击坑附近的高程数据,如图7所示^[7],其中LROCNAC的基线为8 m, LOLA的基线为10 m。分析结果表明该区域坡度主要分布在 $0 \sim 30^\circ$, 部分区域坡度较高,甚至可以达到 70° 以上,但本文作者认为这些坡度异常高的点为数据异常点。

为验证上述数据,进一步对沙克尔顿附近的区域进行坡度分析。选择了沙克尔顿撞击坑的一个截面,跨越两侧坑缘,利用LRO的激光高度计数据,分析得出沿着截面的坡度分布,剖面图及坡度分布图如图8所示。可以看出最大坡度出现在坑壁处,可达到 35° 左右。坑底最为平坦,最大坡度在 10° 左右,坑缘处坡度介于坑壁坡度和坑底坡度之间,最大坡度在 20° 左右。

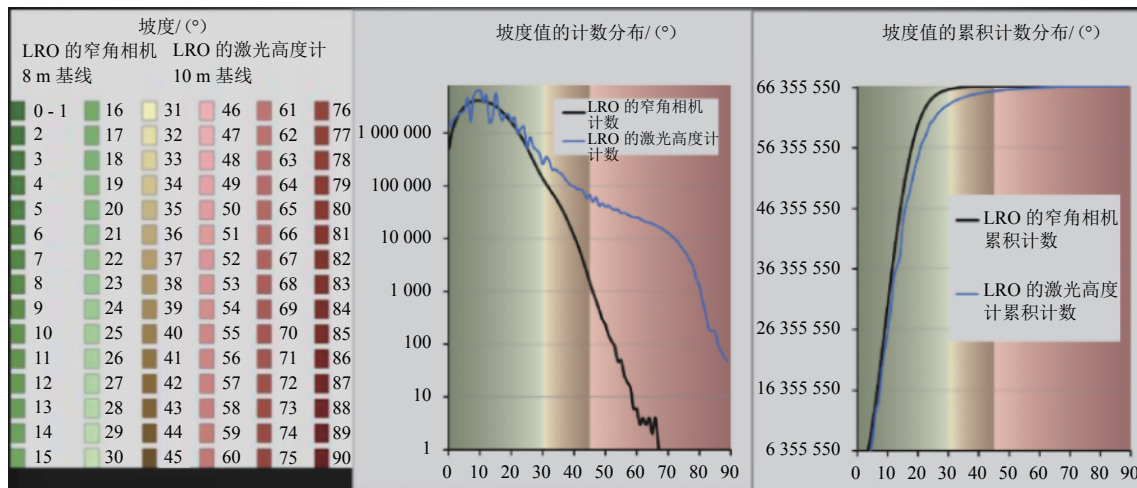


图7 LROC和LOLA对同一区域的坡度测量结果^[7]

Fig. 7 Slope measurements of the same area by LROC and LOLA^[7]

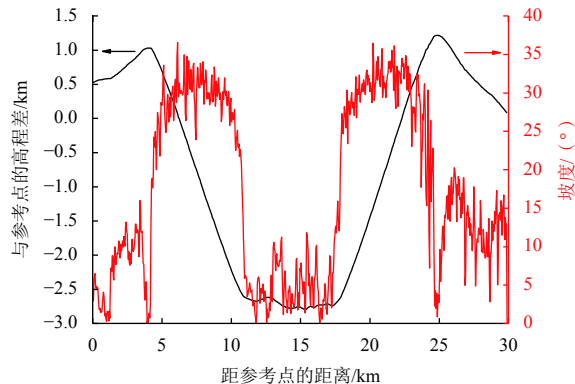


图8 沙克尔顿撞击坑截面与坡度分布 (80 m基线)

Fig. 8 Shackleton crater cross section and slope distribution (80 m baseline)

综上所述,月球南极的坡度基本上在 35° 以内,撞击坑的坑壁是坡度最大的区域,坑缘次之,坑底和其

他区域坡度较为平缓。

3) 石块分布

大的石块在月球表面也十分常见,会为着陆器的着陆带来隐患,有可能导致着陆时着陆器部分结构损坏。因此需要对潜在着陆点附近的石块进行详尽的分析,NAC像素尺度在 $0.6 \sim 1.0$ m之间,可以识别到小至 $1 \sim 2$ m的石块。

根据LRO数据,对南极部分区域的石块数目进行统计,结果发现在所有研究的区域里,并没有发现石块均匀分布的区域。石块经常以几十块或者上百块的团簇形式分布,而团簇的尺寸也大小不一。在沙克尔顿坑坑缘附近的 $4 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ 范围内,发现的石块数量为820个,最大的石块直径为18 m,最小的为1.3 m^[5]。

综上所述,月球南极地形地貌较为复杂,主要体现在撞击坑多、坑壁和坑缘处坡度较大、坑底处相对

平坦,但石块分布并无异常。

3 温度条件分析

对于着陆器的月面生存,温度是一个重要的环境因素。对于月球极区的永久阴影区(如撞击坑底部),由于阳光永远无法照射,永久阴影区内温度极

低,表层和次表层温度常年维持在40 K左右;而在海拔比较高的区域,如撞击坑坑缘、山顶、山脊等地区,往往能得到长时间连续的光照,温度也相对较高。利用模型对月球两极太阳辐照度进行分析,南北极地区地表太阳辐照度范围在 $0 \sim 38 \text{ W/m}^2$,地表温度约为 $100 \sim 160 \text{ K}$ ^[9],月球两极变化曲线如图9所示。

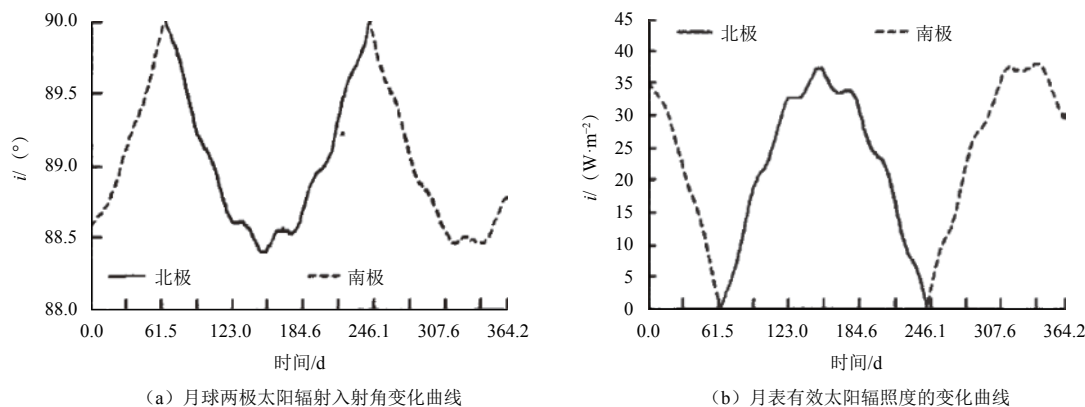


图9 月球两极时间变化曲线^[9]

Fig. 9 Time variation curves of solar radiation at lunar poles^[10]

LRO搭载的月球探测辐射计(Diviner Lunar Radiometer Experiment, DLRE)绘制了月球南极区域的热辐射红外光谱图,如图10所示^[10]。结果表明,月球南极表面白天温度约为160 K,部分地势较高区域,由于光照条件较好,温度可达200 K以上;而夜晚表面温度降至约100 K甚至更低,部分持续光照区由于仍可接受到太阳光的照射,温度依然可达200 K以上;温度最低的区域就是较大撞击坑底部的永久阴影区,始终维持在40 K左右的温度。研究表明这些区域唯一的热源来自于较远处可接受到阳光照射的坑壁的红外辐射。由于坑底地形的因素,这微弱的红外辐射也会被一定程度的遮挡,从而导致极度寒冷的局部区域,以至于正午测得的辐射亮度可低至29 K。来自月球内部的热量流动可能会导致这些最冷的表面的整体热量平衡,但与此季节的散射光和红外辐射相比,它的作用微乎其微。

文献[10]研究显示当某一区域的最高温度低于110 K的时候,水冰和挥发分将无法逃逸,对于月球南极纬度高于 82.5° 的区域,发现处在这种低温环境下的区域仍有约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。主要集中在南极点附近几个受关注度最高的撞击坑,如沙克尔顿撞击坑、舒梅克撞击坑、霍沃思撞击坑和斯蒂尼撞击坑,该区域全年最高温和平均温度的分布如图11所示。对比这几个坑的最高温,发现最冷的是霍沃思撞击坑,最高温度约为 $60 \sim 80 \text{ K}$;其次是舒梅克撞击坑,最高温约为

$70 \sim 95 \text{ K}$;斯蒂尼撞击坑的最高温约为 $85 \sim 95 \text{ K}$;温度最高的是沙克尔顿坑,最高温度约为 $95 \sim 105 \text{ K}$ 。而对于全年平均温度,沙克尔顿坑约为70 K,其他3个撞击坑的全年平均温度都在40 K左右。这可能是因为沙克尔顿坑相比其他3个撞击坑尺寸较小,且周围地势较高,受光照影响,该区域温度较高,受月球内部的热流影响较大^[10]。

综上,月球南极表面整体呈现低温状态,永久阴影坑内更是深低温的温度环境,因此在着陆区的选择上,应尽量选取温度较高的区域,即海拔比较高的区域。尽管如此,着陆器仍然要面临着低温的挑战,特别是水冰探测任务,将在几十K的温度环境下进行。

4 测控条件分析

探测器着陆后,着陆器须保证与地面站的通信。着陆区是否直接对地可见,对于通信链路的设计至关重要。在理想球状态下,分析了月球南极对地可见弧段。经计算发现对地连续每日可见的最高纬度在 82°S , 83°S 以上无法实现对地每日可见,需要利用中继星进行对地通信。

以沙克尔顿坑一点(89.6°S , 148.2°W)为例来分析全年对地的测控弧段及俯仰角和方位角的关系,如图12所示。分析表明,沙克尔顿坑每月有半个月每日均对地可见,可见弧段一般在9~17.8 h内变化(不考

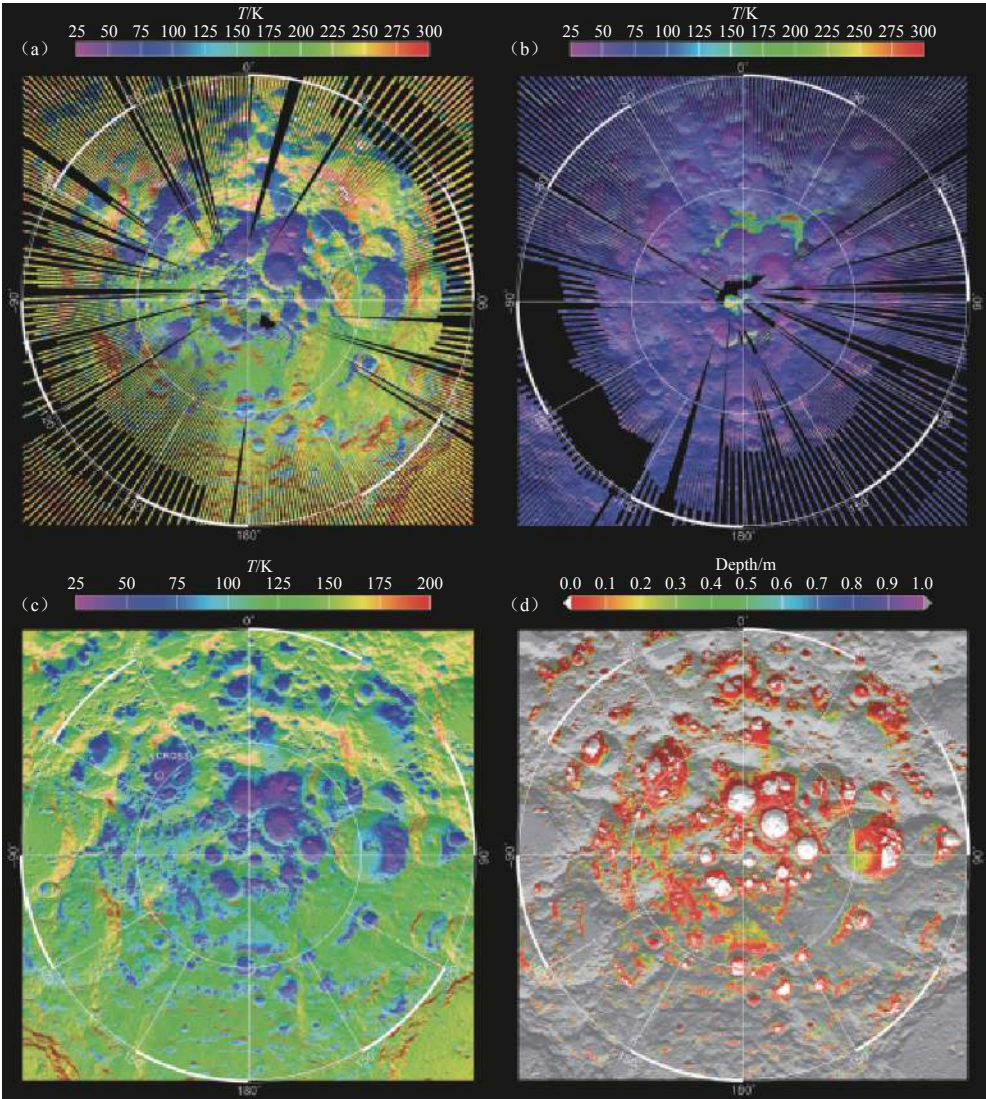


图 10 月球探测辐射计在月球南极极昼期间测得的月球南极区（80°S至南极点）范围内的表面和次表面温度分布图，（a）正午期间表层和潜表层的温度分布情况；（b）午夜期间表层和潜表层的温度分布情况；（c）全年平均温度分布情况；（d）模型计算出的水冰在月壤中升华率低于 1 kg/m^2 每10亿年的深度^[10]

Fig. 10 The surface and subsurface temperature profiles of the moon's south pole region (80°S to South Pole) during the polar day of the moon's south pole as measured by the lunar probe radiometer (a) the temperature distribution of surface and subsurface layers during noon; (b) the distribution of surface and subsurface temperatures during midnight; (c) annual average temperature distribution; (d) the sublimation rate of water ice in lunar soil calculated by the model is less than 1 kg/m^2 per billion years

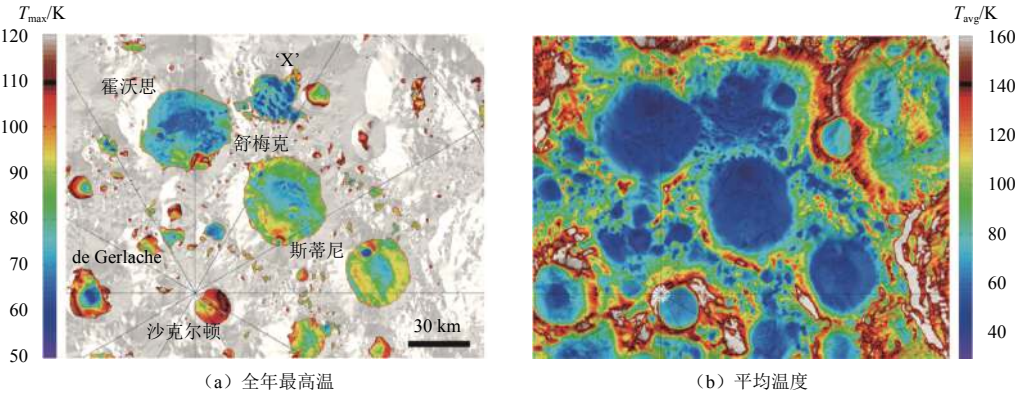


图 11 沙克尔顿撞击坑、舒梅克撞击坑、霍沃思撞击坑和斯蒂尼撞击坑附近温度

Fig. 11 Temperature near Shackleton, Shoemaker, Haworth and Faustini crater

虑个别出现的最小弧长约5 min)。对地方位角的变化范围是149°~163°,对地俯仰角的变化为0~6.5°,如图13所示。

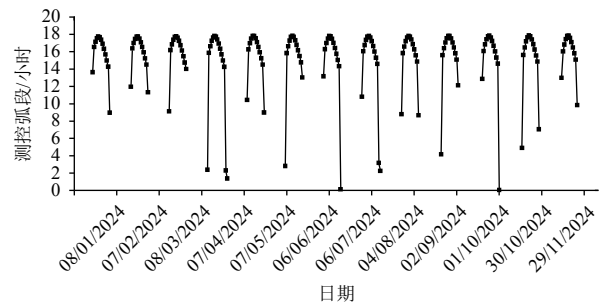


图 12 沙克尔顿坑全年对地的测控弧段

Fig. 12 The communication duration of Shackleton Crater throughout one year

如果选取83°S以上区域作为着陆区,可实现每日直接对地可见,但是方位角变化较小,俯仰角较低,易受遮挡影响,且在永久阴影坑对水冰进行探测的时候,无法实现与地面的通信,中继链路对于月球南极着陆探测任务是必要的。

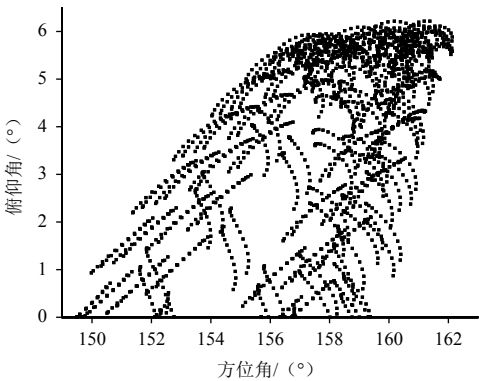


图 13 沙克尔顿坑全年对地测控的俯仰角和方位角关系

Fig. 13 The relationship between the elevation angle and the azimuth angle of the earth in Shackleton Crater

5 着陆区选择建议

与以往的月球探测着陆区选择不同,在月球南极表面,太阳光几乎平行于月表,形成了既有永久阴影区又有长时间连续光照区的特殊光照条件,且光照极易受地形条件遮挡,这都为着陆区的选取增加了难

表 1 目标撞击坑及其附近初选着陆点汇总

Table 1 Summary of target craters and their adjacent primary landing sites

序号	撞击坑	撞击坑特点	着陆点编号	着陆点位置	着陆点高程/m	到坑底平缓区域距离/km	着陆点特点
1	沙克尔顿 Shackleton	① 直径小、坑底浅、温度较高; ② 坑缘光照条件好; ③ 水冰赋存存在一定争议	P1	148°11'24"西, 89°34'48"南	1 580	~12	距离永久阴影区距离较近,附近区域有大面积相对平缓的高地
2			P2	137°11'43"西, 89°26'24"南	1 958	~18	在允许的直径范围内,海拔最高,但距离探测目标地点稍远
3			P3	156°15'47"西, 89°46'44"南	1 737	~9	距离探测目标地距离最近,但处于Shackleton坑坑缘位置,对着陆器的着陆精度和坡度适应能力要求较高
4			P4	54°0'54"东, 89°48'13"南	1 443	~9	位于月球正面,更有利于着陆过程的跟踪,但处于Shackleton坑坑缘位置,对着陆器的着陆精度和坡度适应能力要求较高
5	霍沃斯 Haworth	① 直径大、坑底深、温度低; ② 附近高地距离较近,且光照条件相对较好; ③ 探测结果显示存在水冰的可能性极大; ④ 与Cabeus坑有连接的高山,可以考虑多坑探测	HP1	2°3'45"东, 85°59'18"南	5 174	~40	高程值较高;距离东部高地更近,有可能存在遮挡光照的情况;距离较近的仅Haworth一个撞击坑
6			HP2	23°12'44"西, 86°21'54"南	2 842	~40	高程值较低;东部和西北部高山相对较远,遮挡情况较HP1初步估计更好;该位置的西北方向还有Cabeus坑,也是水冰探测的可能撞击坑,该点可考虑多坑探测的可能
7	舒梅克 Shoemaker	① 直径大、坑底深、温度低; ② 附近高地距离撞击坑较远,增加了水冰探测能力需求,且可选的着陆点位置地形相对复杂	SP1	36°35'34"东, 85°13'51"南	6 800	~80	高程值较高;附近有更多的高地可作为备选;距离Shoemaker撞击坑较远;其附近的其他高地有可能成为遮挡其光照的因素
8			SP2	49°10'5"东, 86°40'38"南	2 387	~35	高程值较低;备选区域为狭长地带;距离Shoemaker撞击坑较近;其附近的小撞击坑也可作为一个附加的探测目标
9	坎布斯 Cabeus	① 直径最大但距高地距离近; ② 与Haworth坑有连接的高山,可以考虑多坑探测; ③ LCROSS已撞击过,明确有水,但已被探测过,工程展示度略差	CP1	34°0'46"西, 83°36'36"南	5 689	~55	高程值较高;纬度较低,是一个相对独立的高地,附近遮挡较少;距离较近的仅Cabeus一个撞击坑
10			CP2	23°12'44"西, 86°21'54"南	2 842	~55	高程值较低;该位置的东南方向还有Haworth坑,也是水冰探测的可能撞击坑,该点可考虑多坑探测的可能

度。基于光照条件的考虑,着陆区应选取在海拔较高的持续光照区,而这种区域往往出现在撞击坑的边缘或高山的山顶,崎岖的地形也为后续的软着陆和巡视探测等带来了挑战。月球南极就位探测最大的亮点是对永久阴影区的水冰就位证认,为兼顾该科学目标,着陆区不宜与目标永久阴影区相距过远。在此基础上,选择局部地势较为平坦的区域,以尽可能保证着陆安全。基于以上原则,初步选取了4个区域(沙克尔顿撞击坑、霍沃思撞击坑、舒梅克撞击坑和坎布斯撞击坑),10个着陆点,归纳总结如表1所示。

6 结 论

针对月球南极极区环境进行了初步分析,包括光照、地形地貌、温度和测控等条件,提出了南极着陆区选择的原则:应选取在海拔较高的持续光照区,且不宜与目标永久阴影区相距过远。基于以上原则,初步选取了4个区域,10个着陆点,为后续月球极区着陆任务的实施提供参考。

参 考 文 献

- [1] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [2] ARNOLD J R. Ice in the lunar polar regions[J]. *Journal of Geophysics Research Solid-Earth*, 1979, 84(B10): 5659-5668.
- [3] 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.
- [4] NODA H, ARAKI H, GOOSSENS S. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE)laser altimeter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): 1-5.
- [5] ROSA D D, BUSSEY B, CAHILL J T. Characterisation of potential landing sites for the European Space Agency's Lunar lander project[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74(1): 224-246.
- [6] MELOSH H J. Impact cratering: a geologic process[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989.
- [7] ROSIEK M R. Lunar south pole digital elevation models from Lunar reconnaissance orbiter narrow angle camera[C]//44th Lunar and Planetary Science Conference. Flagstaff: [s.n.], 2013.
- [8] 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(1): 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(1): 25-30.
- [9] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 479-482.
- [10] HAYNE O P, HENDRIX A, SEFTON-NASH E, et al. Evidence for exposed water ice in the Moon's south polar regions from Lunar Reconnaissance Orbiter ultraviolet albedo and temperature measurements[J]. *Icarus*, 2015(255): 58-69.

作者简介:

张焱(1970—),女,研究员,主要研究方向:航天器总体设计。

通讯地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话:(010)68745805

E-mail: zhanghe_maoqiu@163.com

杜宇(1987—),男,工程师,主要研究方向:航天器总体设计。**本文通讯作者。**

通讯地址:北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话:(010)68745777

E-mail: yudu0119@163.com

Proposals for Sites Selection of Soft Landing on Lunar South Polar Region

ZHANG He, DU Yu, LI Fei, ZHANG Hong, MA Jinan, SHENG Liyan, WU Ke

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Human-beings have achieved lunar soft-landing on the surface of mid or low latitude regions. However no one has realized the exploration mission for the polar regions, especially for the south polar region, which attracts most attention because of its high scientific and technological value. In this article, the environment of lunar south polar region is analyzed, including the temperature condition, topography, illumination condition and earth visibility. Different from the regions with mid or low latitude, the temperature for lunar south polar region is very low (from 100 K to 160 K). The topography is more complicated (more craters, greater slope, scattered stones). The sun elevation angle is very small (which is between -1.54° and 1.54° for the south pole) and there are more shadows because of the high mountains. And there are long durations of earth-invisibility. All these environment conditions will much affect the lunar south polar region soft landing mission. According to the analysis of lunar south polar environment, some engineering suggestions for the lunar south polar region soft landing mission are proposed, which will provide reference for the implement of engineering.

Keywords: temperature; topography; illumination; earth-visibility; soft landing

Highlights:

- The principles and suggestions for project site selection are proposed for lunar south pole landing exploration.
- The preliminary selections of landing site and the selection reasons are proposed.
- Illumination, topography, temperature and communication conditions for the area of lunar south pole are surveyed and analyzed.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]

(上接第231页)

Research on the Main Scientific and Technological Issues on Lunar Polar Exploration

WU Weiren¹, YU Dengyun², WANG Chi³, LIU Jizhong¹, TANG Yuhua¹, ZHANG He⁴,
ZOU Yongliao³, MA Jinan⁴, ZHOU Guodong¹, ZHANG Zhe¹, LU Liangliang¹

(1. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100186, China;

2. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

3. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

4. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Lunar polar exploration is a strategic point to for all space powers to compete with each other. Based on the brief summary of the development of lunar exploration in domestic and globe, the main scientific and technical issues that need to be solved are studied and analyzed in order to provide a reference for China's future polar exploration.

Keywords: Lunar polar region; main scientific issues; key technology

Highlights:

- The trend and hot spots of international lunar exploration are briefly analyzed.
- The main scientific and application issues of the moon exploration are put forward innovatively, which can guide scientific research.
- The key technologies are reviewed to guide tasks to tackle key technologies in advance.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]