

载人月球探测科学目标及着陆区选址建议

牛冉¹, 张光¹, 牟伶俐¹, 林杨挺², 刘建忠³, 薄正¹, 代巍¹, 张鹏¹

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081)

摘要: 聚焦月球探测和应用的前沿科学问题, 基于载人航天和月球探测的技术能力以及月球与行星科学研究水平, 围绕月球科学研究、月基科学研究和资源勘查利用 3 个方面, 提出了载人月球探测任务的科学目标, 包含 9 个顶层目标和 38 个具体目标。依据科学目标和国内外载人月球探测着陆区选择现状与发展趋势, 提出了我国载人月球探测着陆区选择基本原则和流程。结合科学价值和载人登月任务的工程实施条件, 提出了 30 个精选着陆区, 并给出了后续确定着陆区地址需考虑的因素。科学目标和着陆区选址建议是载人月球探测工程的重要牵引和顶层输入, 将为工程的方案设计和后续实施提供支撑。

关键词: 载人登月; 月球探测; 科学目标; 着陆区选址

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2023)09-1280-11

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.09.002

Scientific Objectives and Suggestions on Landing Site Selection of Manned Lunar Exploration Engineering

NIU Ran¹, ZHANG Guang¹, MU Lingli¹, LIN Yangting², LIU Jianzhong³, BO Zheng¹,
DAI Wei¹, ZHANG Peng¹

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: Focusing on cutting-edge scientific issues related to lunar exploration and applications, 9 overarching goals and 38 specific objectives for manned lunar exploration program have been proposed, leveraging China's technical capabilities in manned spaceflight and lunar exploration, as well as its expertise in lunar and planetary science, the objectives center on scientific research, lunar-based scientific research, and resource exploration and utilization. Based on these scientific goals and trends in domestic and international manned lunar exploration landing site selection, basic principles and processes for selecting landing sites have been established. Thirty prime landing sites have been identified, and relevant factors considered in the further selection of landing sites are given, taking into account scientific value and engineering implementation conditions. These scientific objectives and landing site selection recommendations will serve as important guidance and top-level input for the design and implementation of manned lunar exploration program.

Key words: Manned lunar landing; Lunar exploration; Scientific objectives; Landing site selection

0 引言

载人月球探测是一项技术难度极高、对全人类

具有重大意义的科技工程^[1]。实施载人月球探测任务, 可获得原位探测数据、月球样品和人类月球科考经验, 为开展有人参与的多学科实验和原位资源

利用提供支撑,从而带动一系列重大基础科学和应用技术的突破与发展,为建设科技强国、航天强国和人类文明发展作出重大贡献^[2]。

科学与应用目标是载人月球探测这一复杂工程的重要牵引,是工程总体方案设计的顶层输入之一,用于回答在载人月球探测和人类向深空发展的过程中需要解决什么问题,优先和利于开展什么研究,怎样才能更好地实现人类在地外的长期生存等^[3-5]。

月球探测通过60多年的发展,也逐步从表面向内部深入认知、利用月球和长期月面生存方向转变^[6-7]。载人月球探测应制定特色鲜明、成果显著的科学与应用目标。

载人月球探测着陆区选址支撑科学目标的实现,需综合考虑整个工程的总体目标、实施方案、技术途径、实施周期、经济效益以及工程可实现性、系统安全性等因素^[8-10],涉及到科学研究与应用价值分析、科学目标的着陆区需求分析、飞行器约束条件分析、月面驻留与活动支持能力分析等关键环节,是工程约束与科学需求相互迭代的复杂过程^[11-12],在开展载人月球探测的过程中选择什么样的区域着陆与认识月球、利用月球以及月面生存都具有密切的直接关系,需提出满足科学需求的月面着陆区选择。

1 月球探测现状与启示

1.1 国内外已经完成的月球探测任务

到目前为止,人类已开展数十次月球探测任务,如图1所示。在第一次月球探测高潮中,苏联和美国相继通过人造卫星和飞船靠近或登陆月球。其中苏联的“月球”(Luna)和“探测”(Zond)系列探测器通过飞掠、环绕、月面硬着陆、月面软着陆和自动采样(301g)返回等诸多方式对月球开展了全月制图、地形地貌、地质构造、月壤特性、空间环境等历史性探测。为实施载人登月计划,美国先期实施了“徘徊者”(Ranger)、“勘测者”(Surveyor)和“月球轨道器”(Lunar Orbiter)等系列探测任务,获取了大量高清月球图像,制作了大量地形地貌图,并开展了大量月表载人着陆试验,为“阿波罗”一系列载人登月任务的实施提供了坚实的技术支撑。“阿波罗”计划成功执行了6次12人登月任务,获取大量就位探测数据及381.7kg月球样品,在月球的地形地貌、表面环境、地质构造、内部结构、化学成分、岩石组成与分布、起源与演化历史等方面的科学认识有了革命性的改变,奠定了迄今为止对月球的绝大多数科学认识,是人类探索外太空的标志性事件和人类文明发展的重要里程碑^[13]。

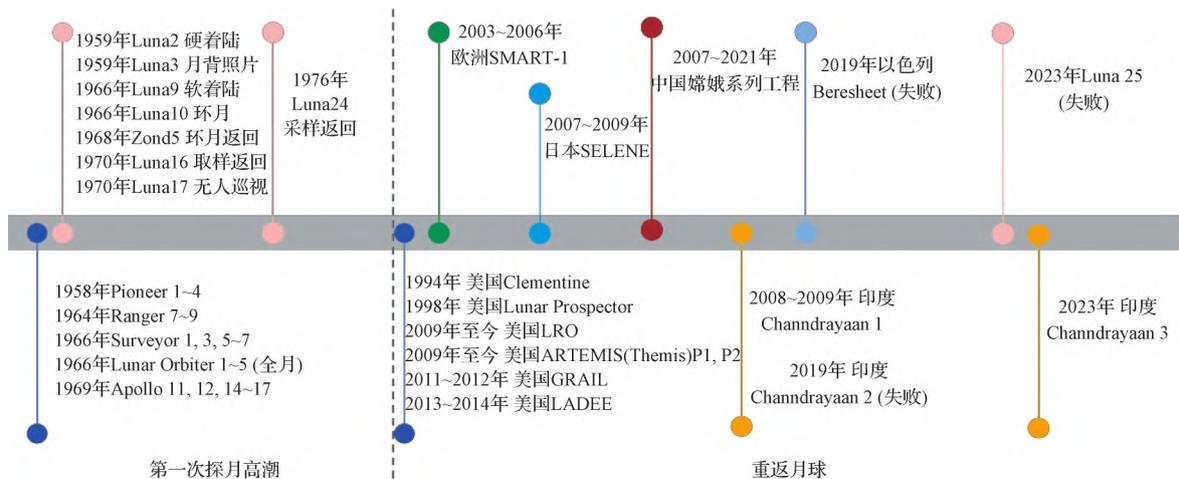


图1 月球探测任务

Fig. 1 Lunar exploration missions

在第二次月球探测高潮中,美国、欧洲、日本、印度等相继成功发射了“克莱门汀”(Clementine)、月球勘测者(Lunar Prospector)、智慧一号(SMART-1)、“月亮女神”(SELENE)、月球勘测轨道飞行器

(LRO)、“月船一号”(Chandrayaan 1)、月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)、月球重力回溯和内部实验室(GRAIL)等探测器,先后开展了全球性月球地形地貌调查、月球资源调查、月球空间环境调查、水

以及极区水冰调查,为载人月球探测奏响了人类重返月球和建立月球基地的序曲。NASA 于 2004 年制定了星座计划的探测目标,计划在 2008 ~ 2014、2015 ~ 2020 年间逐步开展无人月球探测和载人月球探测,2030 年后以月球为跳板进行载人火星探测。目前该计划已经执行了月球勘察轨道器(LRO)、月球坑观测和遥感卫星(LCROSS)任务。2012 年后逐步发展和试验月球资源原位利用、发电和自主系统构建所需技术,为就位利用月球资源做准备^[14]。阿尔忒弥斯计划是对星座计划的部分继承和 LRO 任务的延续,该计划力求实现“月球南极着陆”和“建立可持续月球基地”等更进一步的月球探索^[15]。2022 年,NASA 执行了阿尔忒弥斯-1 任务,实现了为期 25.5 天的无人绕月飞行任务后返回地球,完成了“猎户座”飞船和太空发射系统(SLS)的首次组合体飞行测试任务。2023 年 8 月,“月船三号”探测器在月球上软着陆,使印度成为首个在月球南极成功实施软着陆的国家。

中国无人月球探测(嫦娥工程)分为“绕、落、回”

三个阶段,已经顺利完成卫星绕月飞行对月球资源进行宏观探测、着陆器和巡视器勘查着陆区岩石与矿物成分及周围环境、月面自动采样返回任务^[16]。

1.2 国内外计划开展的月球探测计划

阿尔忒弥斯-2 任务将执行载人月球飞行测试,阿尔忒弥斯-3 任务将实现载人登陆月球南极,之后持续探测月球并筹备前往火星。阿尔忒弥斯计划不会重复阿波罗计划的探测内容,重点是进行月球资源的原位开发和利用,主要任务包括:勘测月球地形和地质、寻找水和矿产资源、建造月球基地相关的电力供应、通讯设施、采矿设备、基地建设等^[17]。

中国探月工程四期将构建月球科研站基本型,实现月球演化考古、巡天揭秘宇宙演化、日地全景环境观测、月面植物及生态科学实验等目标,目前具体方案处于论证立项阶段。

进入新世纪以来,月球在人类开发利用太空和进军深空中的地位日益凸显,正成为航天大国战略角逐的制高点。欧、日、印、中等相继发布了未来无人月球探测计划,如表 1 所示。

表 1 未来无人月球探测任务和目标

Table 1 Future lunar exploration plans and objectives

序号	任务	国家/组织	科学与技术目标
1	嫦娥六号	中国 2022—2024	月背样品采集与返回
2	VIPER	NASA 2023	月球极区巡视探测与极区科学研究,特别是挥发分的探测
3	LUPEX	JAXA/ISRO 2023/24	极区着陆与巡视探测;极区科学探测以及挥发分分布和特征
4	月球-26	俄罗斯国家航天集团 2024	验证极区科学轨道器以及极区挥发分制图
5	月球-27	俄罗斯国家航天集团 2025	极区科学探测以及挥发分勘探和采样;验证钻取技术
6	EL3-ISRU DM	ESA 2027/2028	月球原位月壤端对端氧气提取
7	月球-28	俄罗斯国家航天集团 2027	低温极区挥发分样品返回
8	嫦娥七号	中国 2023—2030	极区着陆与探测
9	嫦娥八号	中国 2023—2030	国际月球研究站(ILRS)的基础型
10	韩国月球着陆器	KARI 2030	技术验证

通过对以上月球相关探测计划的分析^[18-19],国际月球探测呈现以下趋势:1) 未来月球探测重点从掌握技术逐步转向科学探测和资源勘查与开发利用;2) 未来月球探测模式从短期探测向长期驻留转变;3) 未来月球探测区域逐渐聚焦于资源富集区和月球南极;4) 国际合作是月球探测的大趋势,由于月球探测技术难度大、风险高、投入大,通过国际合作,分担经费和风险,共享成果和发展。

1.3 国际上关注的前沿科学问题

通过对国内外未来月球探测计划和探测目标的

分析,总结出国际上普遍关注的前沿科学问题主要围绕月球科学研究、月基科学研究和资源勘查利用 3 个方面。

月球科学研究前沿科学问题主要包括月球起源问题涉及的撞击过程、撞击体特性、岩浆洋的深度、固化的时间、矿物的结晶序列、岩浆洋固化后期是否发生重力失衡而翻转、月球正面-背面差异的产生机制、月球的内部物质组成均一性等;月球内动力演化问题涉及的月球内部各圈层的厚度及其可能在横向上的变化、月球是否曾经存在偶极磁场、磁场强度

及其存续时间、月球自固化以来的岩浆活动历史、火山碎屑岩的分布与喷发机制以及玄武岩熔岩的结晶过程等^[20-26];月球外动力演化问题涉及的小天体撞击通量和撞击体类型分布随时间的变化,重大撞击事件的时间、以及风暴洋的成因、月壤的太空风化机制及其对光谱的影响、注入月壤颗粒中太阳风和地球风的组成及其随时间的变化、以及月表的辐射特性等重要科学问题^[27];月球水和挥发分问题涉及的月球深部或早期是否存在大量的水和挥发分、小行星和彗星撞击如何影响水和挥发分的含量和分布、浅层水和挥发分分布和赋存、永久阴影区的水资源如何分布等^[28]。

月基科学研究前沿科学问题主要包括月基观测与物理实验研究涉及的宇宙早期演化历史、太阳/恒星磁活动的精细物理过程、日冕加热的本质、太阳爆发活动的物理机制、恒星磁活动与系外行星是否具有宜居性、月基观测固体地球宏观运动、月球低重力条件下应用物理和基础物理的现象及机制等;月球环境生命科学研究涉及的地球生命对月面辐射环境、月面亚磁环境和低/变重力等环境的适应性响应机制等^[29]。

月球资源勘查利用前沿科学问题主要包括月球矿产资源勘查与开发涉及的潜在资源靶区的圈定、矿石的物质组成、元素的赋存状态和矿产开发技术验证等;月面资源原位利用涉及的温差发电、月球水冰资源的提取、月球水冰存储和利用技术的验证等^[30]。

1.4 国内外月球探测启示

通过对比国内外月球探测计划、梳理前沿科学问题,给载人月球科学与应用目标论证带来如下启示:

1) 载人月球探测任务应该立足于国情和历史现状,抢抓机遇,制定特色鲜明、成果显著的科学与应用目标;

2) 应加快载人月球探测步伐,抢占月球探测和月球资源开发利用发展先机;

3) 载人月球探测可利用航天员在月面采集种类更典型、地质年龄更年轻或更古老、面积更广、取样更深的月球样品,并通过布设电、磁、热、震等精密地球物理仪器设备,获取精细探测数据,以突破已有探测方式的局限性;

4) 航天员利用独特的高真空、强辐射、大温差、弱磁场、低重力、低频射电、高稳定等月球空间环境

和位置资源,开展地外基础学科和应用实验以及月基观测,将突破人类对空间生物学、应用物理学、地球科学与天文学等的认知;

5) 载人月球探测将为人类长期月面生存和月球资源开发利用提供关键技术验证,为建立月面科考站和未来载人深空探测提供技术支撑。

2 载人月球探测科学与应用目标

2.1 科学与应用总目标

瞄准月球前沿热点科学与应用问题,充分发挥载人月球探测的特点和人在月球探测任务中的优势,系统持续开展科学考察、月球资源开发及相关技术试验。面向科学前沿,在月球科学、月面环境和地月系统起源与演化方面取得突破性成果;开展月基实验,在人类月面生存与防护、低重力物理、特色月基天文等方面取得显著进展;验证关键技术,为逐步实现月球资源开发与利用打下坚实基础。

2.2 科学与应用顶层和具体目标

提出载人月球探测科学与应用目标体系,涉及月球科学研究、月基科学研究和资源勘查利用3大方向,包括9个顶层目标和38个具体目标,具体内容见图2。

3 基于科学需求的载人月球探测着陆区选址建议

着陆区选址的本质上是为科学目标服务的一项工作,在载人登月工程实施层面,着陆区选址是工程约束与科学需求相互迭代的复杂过程,涉及科学研究与应用价值分析、科学目标的着陆区需求分析、飞行器约束条件分析、月面驻留与活动支持能力分析等关键环节。

3.1 载人月球探测着陆区选择现状与发展趋势

阿波罗计划中的载人登月着陆点全部处于北纬 26.11° 至南纬 8.60° 以内、西经 23.45° 至东经 30.80° 之间的月球正面低纬度的中心区域,如图3所示。这是因为月球正面中低纬度的中心区域着陆技术难度最小。随着月球着陆技术的进步,月球着陆区的选择范围也随之扩大,从阿波罗计划初期的 0° 度附近逐渐扩展到北纬 45° 以上区域^[1,30],同时着陆场的地形也越来越复杂,从平坦的月海平原逐渐扩大到月海和高地的边界,并进一步扩展到地形崎岖的高地^[31]。

NASA在星座计划中充分吸取阿波罗计划的经验,更注重可持续性发展^[32-33],对载人登月着陆区

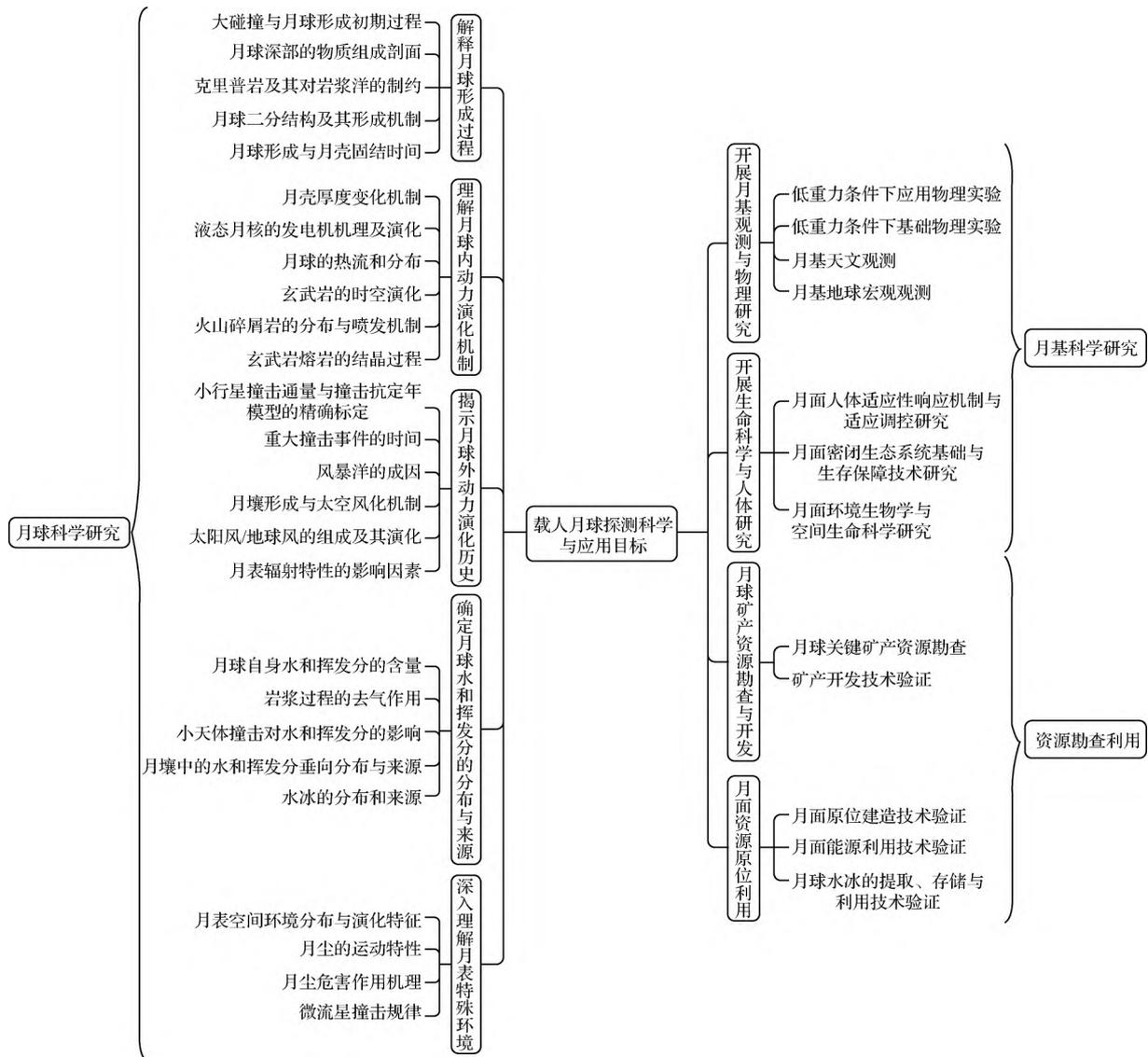


图 2 载人月球探测科学与应用目标体系

Fig. 2 Scientific and utilization objectives of manned lunar exploration

选择也相应提出了与过去不同的要求,即强调对资源的勘探和未来航天员在月面长期居住的可能性^[34]。近期,NASA 公布了 2023 年即将发射的极区挥发分探测月球车(VIPER)着陆区。该月球车为阿尔忒弥斯计划的关键环节之一,目的是探测月球极区的资源,为后续载人登月做支撑。选择的着陆区为月球南极 Nobile 撞击坑以西,该区域地形相对平坦,容易着陆,且科学探测价值和水冰资源利用价值较高^[35]。

可见未来载人月球探测着陆区选择有以下几个方面的趋势:

1) 随着月面移动设施机动能力的提升,未来载人月球探测范围将从“公里级”向上逐步扩大;

2) 载人月球探测目标逐步由“登月”向“驻月”转变;

3) 两极地区和月球背面是未来载人月球着陆区选择的重点关注区域。

3.2 载人月球探测着陆区选择的基本原则

调研国内外月球探测任务的着陆区选择背景、原则、流程等,总结国内外月球探测着陆区选择的经验^[36-39],载人月球探测着陆区选择包括两条基本原则:

3.2.1 科学价值最大化

选择的着陆区应具有突出的科学价值^[40],如:着陆区是否有望解决月球内部结构与过程、表面组成与地质活动、月球演化历史等月球科学关键问题;

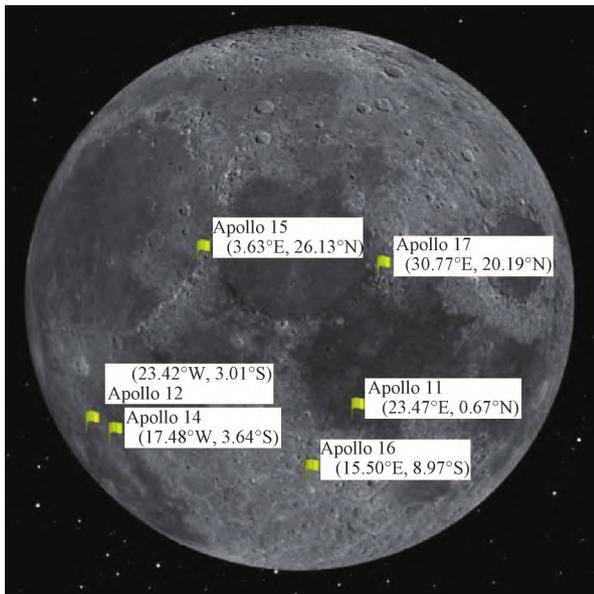


图3 阿波罗载人登月着陆区分布

Fig. 3 Distribution of Apollo manned lunar landing sites

着陆区是否满足开展月基科学研究(月基天文观测、月面实验、对地观测等)的需求;着陆区是否有利于开展资源利用,支撑航天员的月面活动。具体考虑的科学价值要素主要包括:

1) 月球科学研究:月球科学涉及解释月球形成过程、理解月球内动力演化机制、揭示月球外动力演化历史、确定月球水和挥发分的分布与来源、深入理解月表特殊环境等。总体而言,月球科学研究对着陆区的需求包括:备选着陆区应尽可能位于月海/高地的接触地带,地质单元多样,岩石类型丰富,能采集到更多不同种类的样品;或着陆区位于多环盆地的附近和内部,有利于进行月表下的结构研究(可能也是浅层月震中心的附近);或着陆区位于构造类型丰富多样的区域,有利于进行月球和月幔的地震研究;或着陆区位于磁场异常区,或不同年代月海玄武岩岩浆流完整的区域,有利于进行古地磁研究;或着陆区远离月海和高地交界地带,有利于进行热流地球物理研究等。

2) 月基科学研究:包括开展月基观测与物理研究、开展生命科学与人体研究等内容。针对天文观测,InSAR观测倾向于中低纬度区域,恒星磁与行星宜居性倾向于中高纬度或极区、逆VLBI倾向于中高纬度区域。月球表面的高真空、低重力、强辐射环境可满足月基物理实验研究的需求。对于生命科学与人体研究方面的内容,主要着重于安全和维持正

常的生命活动。但以上研究均要求地形平坦,便于架设备。

3) 资源勘查利用:从月球资源利用的角度出发,着陆区选取应基于月球资源利用的潜力来确定。具体包括:玄武岩资源、KREEP资源、水冰和挥发分资源、火山碎屑资源、月壤资源等。玄武岩中的钛铁矿可以用于开展月面制水和生产氧气,高钛月海地区有利于进行氧提取和制水处理;KREEP岩石中含有丰富的稀土元素资源;水冰和挥发分主要分布于月球极区,可用于提取水、氧气和氢等资源;火山碎屑中含有一定量的S、Zn、Cu等资源;月壤含有丰富的氢资源,月壤成熟度越高,资源越丰富。为满足月球矿产资源勘查与开发、月面资源原位利用等方面的需求,着陆区应分布丰富的资源,且满足后期勘查利用的条件。

3.2.2 工程安全可行

在现有技术水平前提下,选取的载人月球探测着陆区需具备适宜的地形地貌、温度、光照、辐射等环境,以满足着陆安全性、测控通信、航天员月面活动、月球车月面巡视、能源供应等条件^[41-44]。具体而言,着陆区选择考虑的工程安全要素主要包括:

- 1) 地形平坦:要求着陆区地形平缓,坡度较缓,撞击坑稀疏,大岩块分布少;
- 2) 光照充足:具有良好的光照条件,能保障太阳能能源的供应;
- 3) 满足探测轨道需求:利于探测器安全降落月球,并满足从月球返回地球的轨道设计;
- 4) 避开高山和深坑:有利于探测器安全降落,月面活动以及地月之间的通信和测控。

3.3 载人月球探测着陆区选择流程

通过调研国内外月球探测着陆区选择的论证过程及流程^[45-48],制定了载人月球探测着陆区选择的流程(见图4),分4个阶段开展工作:着陆区“海选”、着陆区初选、着陆区精选和着陆区建议。各阶段具体内容包括:

1) 着陆区海选阶段:通过调研阿波罗载人月球探测任务、星座计划、嫦娥工程等开展着陆区选择的过程及结果,围绕探测任务需求,梳理国内外月球探测重点关注的着陆区,并结合科学家提出的月球探测着陆区选择意见,获得载人月球探测的海选着陆区结果。

2) 着陆区初选阶段:针对“海选”获得的着陆区,通过与月球地质、月球物理、天文观测、对地观测

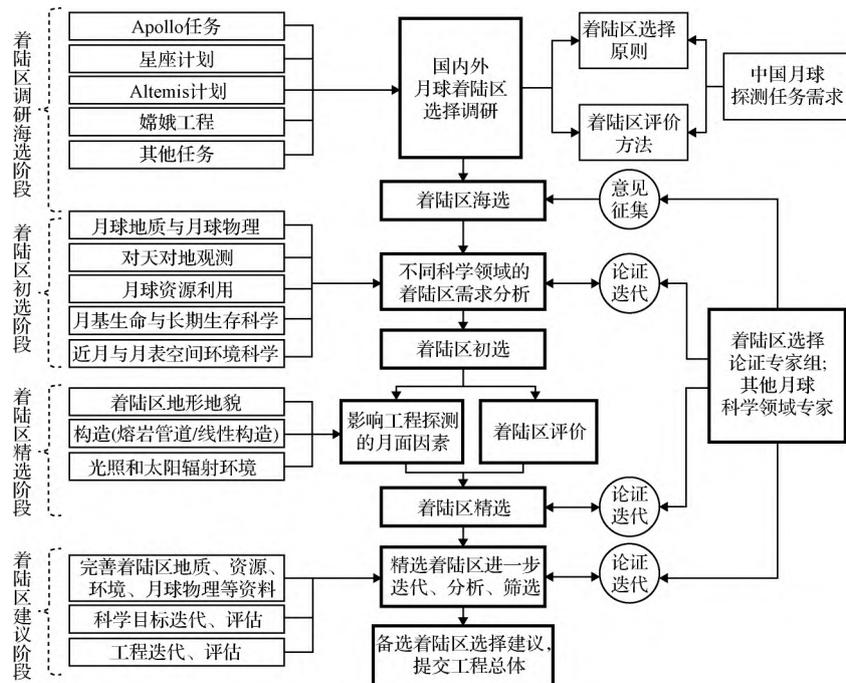


图 4 着陆区选择流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of landing site selection process

月球资源利用等研究领域的专家进行着陆区研讨, 实现着陆区初选。

3) 着陆区精选阶段: 对初选着陆区进行科学价值评估, 并开展影响工程探测的月面因素(如: 地形地貌、构造、光照条件等)分析, 将整个月球划分网格单元, 利用证据权和分形相结合的方法实现着陆区精选^[49]。

4) 着陆区建议阶段: 针对精选的着陆区, 进一步开展科学目标和工程迭代, 进行着陆区的筛选、调整和排序, 提出基于科学需求的载人月球探测备选着陆区建议。

3.4 着陆区初选

调研国际上规划的 67 个月球探测着陆区和国内征集获得的 39 个着陆区, 共计 106 个着陆区作为载人月球探测着陆区的“海选”结果。

针对“海选”着陆区, 排除其中具有与已有探测点较近、位置重复、科学价值不突出等特点的着陆区, 首轮初选获得了 68 个着陆区。通过与不同研究领域专家的广泛研讨与交流, 充分考虑各研究领域对着陆区的实际需求, 对已有的 68 个区域进行整合: 对于具有同一种地质现象的着陆区, 选取相对典型的区域; 对于分布于同一地质单元内的着陆区, 选取综合价值较高的区域。遴选后获得了 50 个初选着陆区, 包括 22 个赤道至低纬度($0 \sim 20^\circ$) 着陆区、

18 个中高纬度($20^\circ \sim 60^\circ$) 着陆区和 10 个极区($> 60^\circ$) 着陆区, 如图 5 所示。

3.5 着陆区精选结果

针对 50 个初选着陆区的地质背景、岩石/资源/地球物理特点、地形地貌、构造、熔岩管道和实时光照等进行数据分析, 构建了初选着陆区的特征数据库, 充分考虑 50 个初选着陆区的区域特点、探测条件、潜在价值等因素, 对存在同一地质现象的区域进行整合, 剔除了地形地貌复杂、现阶段探测条件明显难度较大的区域, 并进一步剔除了在 50 个着陆区中探测价值相对较弱的区域, 获得了 30 个覆盖全月面的精选着陆区, 详细信息如表 2 所示。

3.6 后续着陆区选址建议思考

在精选着陆区基础上, 进一步筛选载人月球探测任务着陆区, 后续需考虑以下因素: 归纳整合精选着陆区的构造种类、岩石类型、资源丰富程度、地球物理特点等, 并结合月球科学研究、月基科学研究和资源勘查利用 3 个方向的科学目标, 分析各精选着陆区对科学目标的支撑情况; 考虑首次载人登月任务的区域探测安全性需求; 分析载人飞船和着陆器的发射资源; 分析科学研究与应用载荷配置能力和物资上下行资源, 使得备选着陆区能够保证任务期间的科学产出效率和价值。

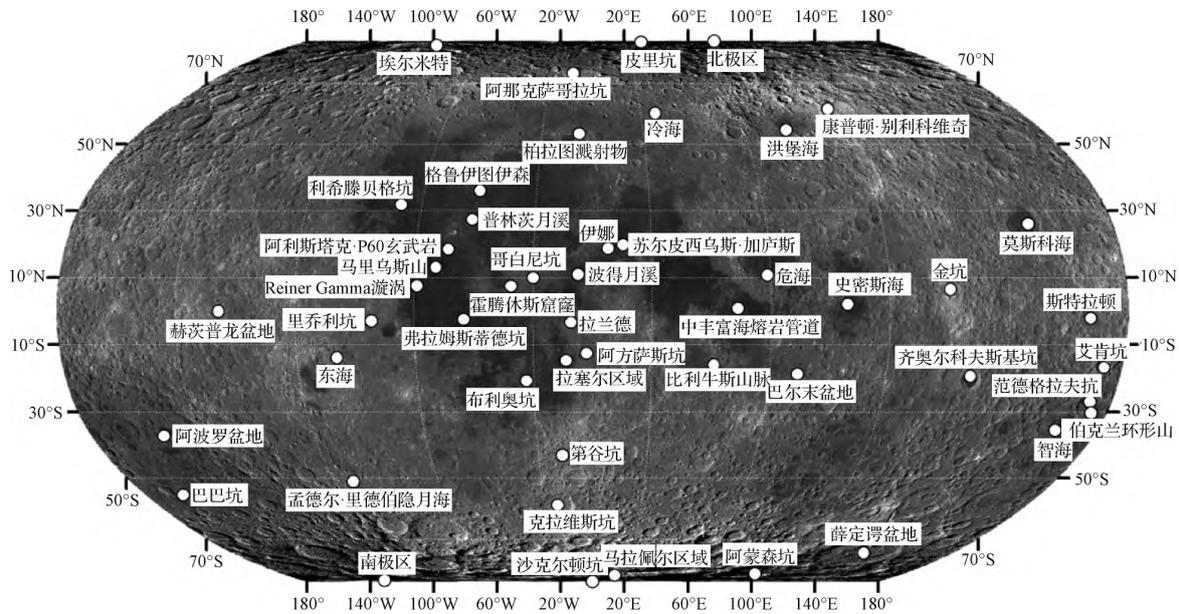


图 5 载人月球探测 50 个初选着陆区分布

Fig. 5 Distribution of 50 primary selected landing sites for manned lunar exploration

表 2 载人月球探测 30 个精选着陆区及其特征

Table 2 Characteristics of 30 selected landing sites for manned lunar exploration

位置	编号	中文名	经度	纬度	着陆区特点与探测价值
	1	伊娜	5.3	18.66	月球特殊火山活动区域; 成因与形成年龄存在争议(可能小于 100Ma)
	2	Reiner Gamma 漩涡	-59	7.5	月球磁异常区域; 磁异常可达 20 nT ~ 1 000 nT(月球表面); 相对周围区域表现出较弱的 OH 吸收特征
	3	马里乌斯山	-53	13	月球特殊火山活动区域(穹窿); 可研究内部挥发分
	4	波得月溪	-4.755	10.956	高 Ti 火山碎屑物质, 面积可达 7 000 km ² ; 月表反射率低的区域; 岩石和构造多样; 探测到来自月幔深部的包体物质; 适合开展对地观测(正面低纬度平坦区域)
	5	拉塞尔区域	-9.04	-14.65	富硅质火山活动; 古老地层单元(~4.0 Ga); 热点(hot spots) 区域
低纬度	6	中丰富海熔岩管道	48.66	0.92	熔岩管道(存在斜坡入口); 地势平坦的玄武岩区域
	7	齐奥尔科夫斯基坑	128.51	-19.35	不同类型斜长岩; 中央峰; 撞击熔融物和角砾岩; 撞击过程
	8	里乔利坑	-74.28	-3.04	东海撞击溅射物; 薄层玄武岩; 丰富的氦-3 资源; 利于观测地球; 月-海交界地带
	9	艾肯坑	173.48	-16.76	背面月海区域; 揭示 SPA 撞击过程; 出现中央峰(深部物质)
	10	阿方萨斯坑	-2.16	-12.56	火山和构造丰富的区域; 13 处火山碎屑岩; 复杂火山通道; 火山口
	11	苏尔皮西乌斯·加卢斯	10.37	19.87	橙色月壤(火山碎屑); 复杂火山活动; 月幔包体; 高地物质
	12	拉兰德	-7	-4	月球极富 Th 的区域; 高地月壤; 古老月壳物质; 可能采到真正的 KREEP 岩石
	13	斯特拉顿	166.88	-2.08	高地月壤; 高地古老岩浆活动
	14	东海	-86.5	-14	多环撞击盆地; 撞击过程; 盆地地质
	15	阿利斯塔克	-49	20	分布多种岩石; 区域地质过程复杂; 分布月球年轻玄武岩(P60 玄武岩单元); 火山与构造活动复杂; 研究月球撞击过程与历史
	16	格鲁伊图伊森	-40.14	36.03	火山穹窿(富硅质); 富 KREEP 月壤; 年轻火山单元
中高纬度	17	巴巴坑	-164.5	-55.1	SPA 盆地内的特殊地质单元; 撞击过程; 深部(下月壳)物质; SPA 撞击熔融物
	18	莫斯科海	150.47	26.19	月球背面古老撞击坑(~4.1 Ga); 出现多期次(2.6 ~ 3.9 Ga)玄武岩活动; 磁学异常区域
	19	孟德尔-里德伯隐月海	-93.07	-51.14	古老月海; 隐月海; 磁异常

续表 2

位置	编号	中文名	经度	纬度	着陆区特点与探测价值
中高 纬度	20	洪堡海	77.14	54.54	分布不同年龄和不同组成的物质;玄武岩年龄和组成;盆地熔融物
	21	柏拉图溅射物	-5.21	53.37	雷达异常区域;高地月壤;火山碎屑
	22	范德格拉夫坑	172.08	-26.92	磁异常区域;Th 异常区域;撞击过程
	23	阿波罗盆地	-153.72	-37.05	背面月海;斜长质高地物质;撞击盆地内环;撞击地质过程;纯斜长岩
	24	智海	164.42	-35.48	背面月海,分布熔岩洞穴;磁异常区域;撞击过程
极区	25	第谷坑	-11.2	-42.99	年轻撞击坑(~110 Ma);对比研究不同地质单元(撞击熔融区、高地月壤、粗糙区域等)的月壤演化过程;中央峰;撞击过程
	26	薛定谔盆地	135	-75	露出月球分异演化各阶段的产物,如:月幔物质、壳-幔交界物质、SPA 形成挖掘物质等;分布多种月壳岩石;重力异常;可研究撞击坑形成过程
	27	康普顿-别利科维奇	99.5	61.1	Th 异常区域;KREEP 异常;高地月壤;富硅质岩浆活动
	28	阿蒙森坑	93.8	-84.2	极区撞击坑;永久阴影区;正面适合着陆的南极区域
	29	沙克尔顿坑	0	-89.9	形成 ~3.6 Ga(雨海纪);分布着南极 SPA 撞击溅射物;主要由斜长石组成,含有少量辉石;岩石类型主要为亚铁斜长岩;探测到水冰和大量挥发分的存在
	30	埃尔米特	-92.2	85.9	北极撞击坑;撞击过程;北极适合着陆的平坦区域

4 结束语

载人月球探测任务科学与应用目标是任务创新性、前瞻性的体现,需结合不同任务场景特点,充分发挥载人月球探测任务优势。结合现阶段我国载人航天与月球探测工程已有成果及技术能力,提出了符合国家发展战略,对人类进步有重大贡献,能够彰显国家形象与科技实力,且能满足载人登月和月面科考不同阶段的、具有延续性的载人月球探测科学目标。预期能够加深人类对月球、地月系统以及太阳系的认识;促进月基物理和观测等领域的科学与技术发展;探索人在地外天体和深空的生存方式、生存能力和生理心理变化,逐步实现人类月面长期生存;获得月球资源利用的知识和经验,验证相关关键技术,为更长远的载人深空探测奠定基础。

围绕提出的载人月球探测科学目标和探测需求,在调研国内外月球探测着陆区选择基础上,制定了载人月球探测着陆区海选、着陆区初选、着陆区精选和着陆区建议 4 个阶段的选址方案,提出了 30 个精选着陆区,并给出了后续确定载人月球探测任务地址需考虑的因素。载人月球探测未来将向大范围移动实验室、短期有人值守的月面实验室和长期无人智慧运行的月球科考站等方面发展,未来任务的着陆区和科考站的选址将从地形平坦、地质单元多样、地质现象丰富等特点,逐步向融合矿产丰富、资源可用率高、可长距离探测等多因素发展。

月球探测是一项长期的、持续性的工作,载人月

球探测任务将在无人探月任务的基础上,充分发挥有人参与的月面探测和实验验证的任务优势,在科学目标指引下,在空间科学若干重要领域方向做出具有世界先进水平的科技成果,力争形成更好的科技产出,并为建立月面科考站和未来载人深空探测提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 果琳丽,王平,朱恩涌. 载人月球基地工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2013: 56-96.
- [2] 张崇峰,许惟扬,王燕. 载人月球探测月面活动发展设想[J]. 上海航天(中英文),2021,38(3): 109-118.
ZHANG Chongfeng, XU Weiyang, WANG Yan. Development ideas of manned lunar surface exploration[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 109-118.
- [3] 周建平,吴季. 统筹空间科学、空间技术、空间应用协调发展的思考[J]. 中国工程科学,2023,25(2): 59-66.
ZHOU Jianping, WU Ji. Coordinated development of space science, space technology, and space application in China[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 59-66.
- [4] 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略[J]. 地球科学进展,2004,19(3): 351-358.
OUYANG Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 351-358.
- [5] GRANT H, DAVID V, BEVAN M F. Lunar source book: A user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [6] NORBERG C. Human spaceflight and exploration[M]. Berlin: Springer, 2013.
- [7] 欧阳自远,邹永廖,李春来,等. 月球某些资源的开发利用前

- 景[J]. 地球科学, 2002, 27(5): 498-503.
- OUYANG Ziyuan, ZOU Yongliao, LI Chunlai, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources [J]. Earth Science, 2002, 27(5): 498-503.
- [8] 李志杰 果琳丽 彭坤. 载人月球基地选址的几个基本因素[J]. 载人航天, 2015, 21(2): 158-162.
- LI Zhijie, GUO Linli, PENG Kun. Research on site selection of manned lunar base [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(2): 158-162.
- [9] ECKART P, ECKART P, ALDRIN B. The Lunar Base Handbook: An Introduction to Lunar Base Design, Development, and Operations [M]. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2006.
- [10] JIA Y T, LIU L, WANG X C, et al. Selection of lunar south pole landing site based on constructing and analyzing fuzzy cognitive maps [J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4863.
- [11] HOWARD A, SERAJI H. A fuzzy rule-based safety index for landing site risk assessment [C]. The 5th Biannual World Automation Congress, Orlando, USA June 9-13, 2002.
- [12] 吴伟仁 王大轶 毛晓艳, 等. 基于月面单幅图像的软着陆障碍识别与安全区选取方法[J]. 深空探测学报, 2014, 1(4): 262-268.
- WU Weiren, WANG Dayi, MAO Xiaoyan, et al. Obstacle recognition and safe area selection method in soft landing based on a single lunar image [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(4): 262-268.
- [13] 欧阳自远. 月球探测的进展与中国的月球探测[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 1-5.
- OUYANG Ziyuan. International lunar exploration progress and Chinese lunar exploration [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 1-5.
- [14] MERANCY N F, SANRAFIN M, GRUBER J. Human lunar mission design: Then and now [C]. The 70th International Astronautical Congress, Virtual Events, October 12-14, 2020.
- [15] PETERSEN D, CHARVANT J, SOMERS J, et al. Apollo to Artemis: Mining 50-Year Old Records to Inform Future Human Lunar Landing Systems [C]. NASA Human Research Program Investigators' Workshop, Galveston, USA, January 27-30, 2020.
- [16] 孙泽洲 孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785-791.
- SUN Zezhou, MENG Linzhi. Current situation and sustainable development trend of deep space exploration in China [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015, 47(6): 785-791.
- [17] VON EHRENFRIED M. The Artemis lunar program: Returning people to the Moon [M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [18] 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 Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [19] CHEN C, CHEN H, JING Q. A research on evaluation system for site selection of manned lunar base [C]. International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel, October 12-16, 2015.
- [20] 林杨挺. 尚未解决的关键科学问题: 后续月球探测的科学目标 [C]. 中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会, 杭州, 2019年4月19-22日.
- LIN Yangting. Unsolved key scientific problems: Scientific objectives of the follow-up lunar exploration [C]. The 17th Annual Academic Conference of the Chinese Society of Mineral and Petrology Geochemistry, Hangzhou, April 19-22, 2019.
- [21] 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): 9-30.
- XIAO Long, QIAO Le, XIAO Zhiyong, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2016, 46(2): 9-30.
- [22] LIU J C, LI J. Solidification of lunar core from melting experiments on the Fe-Ni-S system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 530: 115834.
- [23] GLEIBNER P, SALME J, BECKER H. Magmatic fractionation and degassing of siderophile volatile elements in lunar magmatic rocks [C]. The 52nd Lunar and Planetary Science Conference, Virtual Events, March 15-19, 2021.
- [24] GONG S X, WIECZOREK M A. Is the lunar magnetic field correlated with gravity or topography? [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(4): 006274.
- [25] TAGUCHI M, MOROTA T, KATO S. Lateral heterogeneity of lunar volcanic activity according to volumes of mare basalts in the farside basins [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2017, 122(7): 1505-1521.
- [26] 杨蔚 胡森 李秋立, 等. 月球火山活动究竟能持续多久? [J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3789-3791.
- YANG Wei, HU Sen, LI Qiuli, et al. How long can lunar volcanic activity last? [J]. Earth Science, 2022, 47(10): 3789-3791.
- [27] 杨亚洲 刘洋. 嫦娥四号在月球背面发现碳质球粒陨石撞击残留物[J]. 地球与行星物理论评, 2022, 53(2): 233-235.
- YANG Yazhou, LIU Yang. The Chang'e-4 rover detected impact remnants rich in carbonaceous chondrite on the far side of the Moon [J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 2022, 53(2): 233-235.
- [28] VERMA P A, CHAUHAN M, CHAUHAN P. Lunar surface temperature estimation and thermal emission correction using Chandrayaan-2 imaging infrared spectrometer data for H₂O & OH detection using 3 μm hydration feature [J]. Icarus, 2022, 383: 115075.
- [29] WU C, DENG J S, GUYONNET A, et al. A new serial-direction trail effect in CCD images of the lunar-based ultraviolet telescope [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128(968): 105007.
- [30] 刘建忠 李雄耀 朱凯, 等. 月球原位资源利用及关键科学与

- 技术问题[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 907-918.
- LIU Jianzhong, LI Xiongyao, ZHU Kai, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 907-918.
- [31] TAYLOR L A, TAYLOR D H S. Location of a lunar base: a site selection strategy [C]. The 5th International Conference on Space, New York, USA, June 1-6, 1996.
- [32] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, et al. The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the moon [C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, March 7-14, 2020.
- [33] BRIDENSTINE J. Artemis plan: NASA's lunar exploration program overview[R]. Washington D. C., USA: National Aeronautics and Space Administration, 2020.
- [34] FULLER S, LEHNHARDT E, ZAID C. Gateway program status and overview[J]. Journal of Space Safety Engineering, 2022, 9(4): 625-628.
- [35] COLAPRETE A, ELPHIC R C, SHIRLEY M, et al. The volatiles investigating polar exploration rover (VIPER) mission update[R]. Mountain View, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2021.
- [36] 葛丹桐, 崔平远. 地外天体着陆点选择综述与展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(3): 197-203.
- GE Dantong, CUI Pingyuan. Overview and prospect of planetary landing site selection [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(3): 197-203.
- [37] SPENCER D A, ADAMS D S, BONFIGLIO E, et al. Phoenix landing site hazard assessment and selection [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2009, 46(6): 1196-1201.
- [38] GRANT J A, GOLOMBEK M P, GROTZINGER J P, et al. The science process for selecting the landing site for the 2011 Mars Science Laboratory [J]. Planetary and Space Science, 2011, 59(11-12): 1114-1127.
- [39] SMITH H J, GURSHTAIN A A, MENDELL W. International manned lunar base: beginning the 21st century in space [J]. Science & Global Security, 1991, 2(2-3): 209-233.
- [40] FLAHAUT J, BLANCHETTE-GUERTIN J F, JILLY C, et al. Identification and characterization of science-rich landing sites for lunar lander missions using integrated remote sensing observations [J]. Advances in Space Research, 2012, 50(12): 1647-1665.
- [41] SHEVCHENKO V V. Manned lunar base site selection [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 1995, 48(1): 15-20.
- [42] KASCHUBEK D, KILLIAN M, GRILL L. System analysis of a Moon base at the south pole: Considering landing sites, ECLSS and ISRU [J]. Acta Astronautica, 2021, 186: 33-49.
- [43] LIU X, LI S, JIANG X Q, et al. Planetary landing site detection and selection using multilevel optimization strategy [J]. Acta Astronautica, 2019, 163: 272-286.
- [44] GOLOMBEK M, GRANT J, KIPP D, et al. Selection of the Mars science laboratory landing site [J]. Space Science Reviews, 2012, 170(1): 641-737.
- [45] FUQUA HAVILAND H, WEBER R C, NEAL C R, et al. The lunar geophysical network landing sites science rationale [J]. The Planetary Science Journal, 2022, 3(2): 40.
- [46] MOU N, LI J, MENG Z, et al. Multi-factor analysis for selecting lunar exploration soft landing area and the best cruise route [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-3: 1291-1298.
- [47] 钟振, 鄢建国, 贺怀宇, 等. 中国后续月球探测候选着陆区沙克尔顿撞击坑的光照及其风化层温度 [J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(2): 403-415.
- ZHONG Zhen, YAN Jianguo, HE Huaiyu, et al. Illumination and regolith temperature at China's next candidate lunar landing site Shackleton crater [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2023, 53(2): 403-415.
- [48] 乔乐, 刘小倩, 赵健楠, 等. 月球雨海地区三个着陆点的地质特征对比研究 [J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, 46(2): 31-45.
- QIAO Le, LIU Xiaoqian, ZHAO Jiannan, et al. Geological investigations of Luna 17, Apollo 15 and Chang'e-3 landing sites at Mare Imbrium of the Moon [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2016, 46(2): 31-45.
- [49] CAO Y Q, WANG Y Z, LIU J Z, et al. Selection of whole-moon landing zones based on weights of evidence and fractals [J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4623.

作者简介:

牛冉(1990-),女,博士,工程师,主要从事载人航天空间应用系统研制、月球探测数据集成与应用、系统建模仿真等方面的研究。

通信地址:北京市海淀区邓庄南路9号(100094)

电话:(010)82981309

E-mail: niuran@csu.ac.cn

张光(1986-),男,博士,研究员,主要从事载人月球探测及月面原位资源开发利用科学问题研究及关键技术攻关等方面的研究。

通信地址:北京市海淀区邓庄南路9号(100094)

电话:(010)82981309

E-mail: zhangguang@csu.ac.cn

张鹏(1981-),男,博士,研究员,主要从事载人航天空间应用系统研制、月球探测新方法、月球探测大数据处理与集成技术、地月空间数字孪生和月球原位资源利用等方面的研究。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区邓庄南路9号(100094)

电话:(010)82981318

E-mail: zhangpeng@csu.ac.cn