

# 载人月球探测科学研究发展概述与趋势分析

张 鹏<sup>1</sup>, 代 巍<sup>1</sup>, 白一帆<sup>1</sup>, 张 光<sup>1</sup>, 牛 冉<sup>1</sup>, 刘成保<sup>1</sup>, 王 之<sup>1</sup>,  
郑海菠<sup>1</sup>, 杨瀚哲<sup>1</sup>, 刘光辉<sup>1</sup>, 刘 欣<sup>1</sup>, 童小华<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院空间应用工程与技术中心, 北京 100094; 2. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092;  
3. 同济大学 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 月球是具有重要科学价值与战略价值的自然天体, 开展载人月球探测, 实现中国人首次登陆地外天体, 将成为航天强国建设的重要标志。在载人月球探测过程中, 可利用月球特殊条件及资源, 开展有人参与的科学研究活动, 获取月球科学、月基科学和月球资源利用等方面的研究成果。首先回顾了阿波罗计划、阿尔忒弥斯计划、嫦娥工程等月球探测任务, 针对其中的科学研究任务实施情况及关键成果进行了总结, 并分析了后续载人月球科学任务发展趋势。在此基础上, 对人类在开展未来载人月球探测任务过程中重点部署的方向提出了建议, 涉及月球样品采集、月球科学探测, 以及月球原位资源利用等方面。对载人月球探测科学研究发展趋势的分析及建议, 可为未来载人登月相关论证设计提供参考。

**关键词:** 载人月球探测; 科学研究与应用; 月球样品采集; 月球科学探测; 原位资源利用

中图分类号: V57

文献标志码: A

## Development Overview and Trend Analysis of Scientific Research in Manned Lunar Exploration

ZHANG Peng<sup>1</sup>, DAI Wei<sup>1</sup>, BAI Yifan<sup>1</sup>, ZHANG Guang<sup>1</sup>,  
NIU Ran<sup>1</sup>, LIU Chengbao<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>, ZHENG Haibo<sup>1</sup>,  
YANG Hanzhe<sup>1</sup>, LIU Guanghui<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>1</sup>,  
TONG Xiaohua<sup>2,3</sup>

(1. Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. College of Surveying and Geo- Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Key Laboratory for Planetary Mapping and Remote Sensing for Deep Space Exploration, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Lunar is a near-Earth celestial body with great scientific and strategic value. Implementation of manned lunar exploration with the first Chinese landing on an extraterrestrial body will be the significant milestone in building a strong aerospace country. In manned lunar exploration engineering, the special conditions and resources of Lunar can be fully utilized to carry out a series of scientific activities with manned participation, which can contribute to new achievements in lunar science, lunar-based science and utilization of lunar resources. In this paper, the lunar exploration engineering such as Apollo program, Artemis Program and Chang 'e Engineering are analyzed, especially the mission implementation and key achievements with regard to scientific research domain, and the development tendency of scientific mission in manned lunar exploration is summarized. Furthermore, the preliminary implementation suggestions of scientific research in manned lunar exploration are put forward, which involves the lunar samples collection, the scientific exploration of lunar, and the in-situ resources utilization on lunar surface. The analyze of development tendency and the implementation suggestions of scientific research in manned lunar exploration can provide design reference of future missions.

**Keywords:** manned lunar exploration; scientific research and utilization; lunar samples collection; lunar science exploration; in-situ resources utilization

作为地球唯一的天然卫星, 月球探测和研究对

收稿日期: 2024-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(42307451)

第一作者: 张鹏, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为月球探测新方法、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。E-mail: zhangpeng@csu. ac. cn

共同通信作者: 刘成保, 高级工程师, 硕士生导师, 理学博士, 主要研究方向为数字月球建模、星载遥感数据处理与地月空间光学数字孪生等。E-mail: liuchengbao@csu. ac. cn

共同通信作者: 童小华, 中国工程院院士, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为航天测绘遥感与深空探测。

E-mail: xhtong@tongji. edu. cn



论文  
拓展  
介绍

理解太阳系的形成与演化、生命起源和系外行星宜居性等科学问题具有重要的价值<sup>[1]</sup>。月球特殊的空间环境、独特的空间位置和特有的自然资源,使其不仅成为载人深空探测的首要目标,更是人类走向深空的理想基地和前哨站<sup>[2]</sup>。随着月球探测的不断深入,人们对月球的认识愈加清晰,月球的重要性也日益凸显,已成为世界各强国在航天领域发展和竞争的焦点。因此,月球探测尤其是载人月球探测不仅具有显著的科学意义,而且还具有重大的战略意义。

随着我国航天事业的快速发展,基于载人航天工程和月球探测工程所取得的巨大成就<sup>[3-6]</sup>,我国的载人月球探测工程已逐渐具备实施的条件。2024年4月,中国载人航天工程新闻发言人、中国载人航天工程办公室副主任林西强表示:“载人月球探测工程登月阶段任务经中央政府批准启动实施,总体目标是2030年前实现中国人登陆月球,目前各系统正按计划开展研制建设。”在载人月球探测工程任务实施过程中,将面向月球科学研究的前沿和热点问题,充分利用月球特殊条件,并发挥航天员月面自主活动的优势,设计并实施一系列月面科学探测活动和任务,获取月面巡视探测、科学实验等数据以及不同类型月球样品,为月球科学研究取得突破性研究成果提供第一手资料。

本文首先对阿波罗计划、阿尔忒弥斯计划、嫦娥工程等国内外月球探测工程中涉及的月球及月基科学探测、月球样品采样返回、月面科学研究等方面的内容进行了回顾及梳理,列举了相关核心科研成果。在此基础上,总结了未来月球探测相关的科学探测、科学实验与应用研究等领域发展趋势,提出未来载人月球探测科学任务的发展建议。

## 1 国内外发展情况

### 1.1 阿波罗计划

阿波罗计划是目前人类唯一成功实施的载人月球探测计划,共执行了6次12人登月任务,在月球表面共开展科学探测仪器安装和调试、月球地质考察、月球内部结构探测、月球环境探测和月球样品采集等近30项科学探测和实验。在环月阶段,阿波罗计划对月球高程、月球尘埃、月表物质成分、月表气体、次表层结构和流星体进行了探测,尤其对预选区域进行了大量精细化勘查,为载人登月的成功实施提供了有力保障<sup>[7]</sup>。

在载人登月阶段,阿波罗计划开展了大量月球遥感和就位观测,并通过航天员在月面多个不同区域的舱外活动(图1),布设了热、磁、震等一系列科学探测载荷。更重要的是通过表采、钻采等手段,取样带回了381.7 kg月球样品。基于这些探测数据及样品的研究成果,人类在月球的地形地貌、月表环境、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改变,从而奠定了迄今为止对月球的基础性科学认识<sup>[8]</sup>。

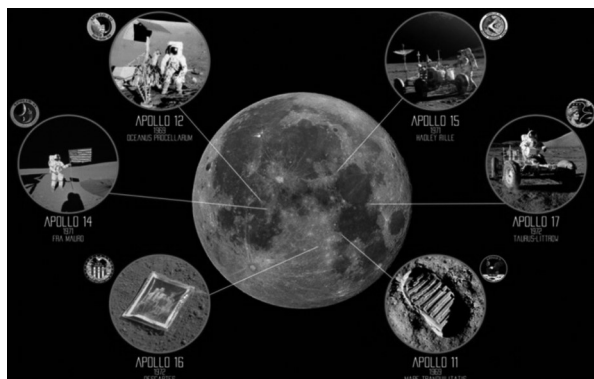


图1 阿波罗计划历次任务

Fig.1 Series of the Apollo missions

### 1.2 阿尔忒弥斯计划

目前美国正在实施阿尔忒弥斯计划,该计划已在2022年11月发射阿尔忒弥斯-1开展无人绕月飞行试验,2024年1月发射了“奥德修斯”号着陆器着陆月球南极附近。后续计划于2025年执行阿尔忒弥斯-2首次载人月球飞行测试,并通过阿尔忒弥斯-3实现载人登陆月球南极。在持续探测月球的同时筹备前往火星(图2),期间还将对南极水和挥发分开展探测,从而为未来月面资源利用奠定基础<sup>[9]</sup>。

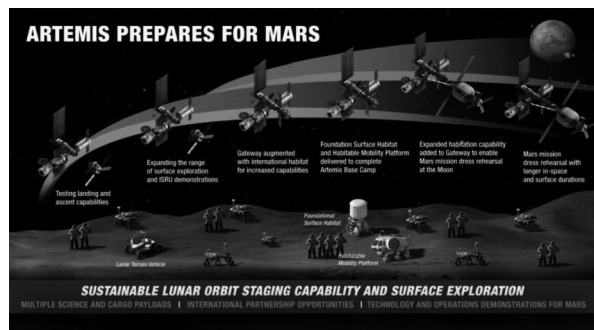


图2 阿尔忒弥斯计划示意图

Fig.2 Schematic diagram of the Artemis Project

阿尔忒弥斯计划预计开展的科学探测及实验项目包括中子光谱探测、线性能量转移探测、月表羽流观测、

近地月球表面低频无线电观测、温度及热导率探测、激光测距实验、月面环境监控(含质谱仪、月震仪、磁强计、微流星监测)、静电月尘分析、新一代月面角反射器等。这些项目将通过“商业月球有效载荷服务”(Commercial Lunar Payload Services, CLPS)计划来实施,该计划向月面不同着陆区发射一系列固定或移动探测器(表 1),预计可提高月球的科学、探索及商业开发能力。

表 1 阿尔忒弥斯无人任务部分科学载荷规划<sup>[10]</sup>

Table.1 Part of the planned scientific payload of the unmanned mission of Artemis <sup>[10]</sup>				
序号	公司	着陆器	预期着陆点	主要载荷
1	Astrobotic	Peregrine	Lacus Mortis 陨石坑	中子光谱仪、线性能量转移光谱仪、激光角反射器等
2	Intuitive Machines	Nova-C (IM-1)	风暴洋	月表羽流观测、近地月球表面低频无线电观测、导航多普勒激光雷达等
3	Intuitive Machines	Nova-C (IM-2)	月球南极附近	极地资源冰挖掘装置 PRIME-1
4	Masten Space Systems	XL-1	月球南极附近	月表红外成像探测、月表辐射环境探测、近红外挥发物谱仪等
5	Firefly Aerospace	Blue Ghost	危海	风化层附着特性探测、月球 GNSS 接收机实验、月球地下快速热探测仪等
6	Intuitive Machines	Nova-C (IM-3)	Reiner Gamma 漩涡	月面小型移动机器人、月球空间环境探测器、磁强计等

在月球样品采集及分析方面,阿尔忒弥斯计划规划了机械式地质工具包、自动表层月壤采集—筛选—探测载荷、自动样品采集与输运载荷、风化层样品原位分析载荷等<sup>[11]</sup>。基于上述月面科学活动,阿尔忒弥斯计划将致力于在了解行星过程、了解挥发分周期、解释地—月系统撞击史、揭示太阳系远古历史、利用独特的月基位置观测宇宙、在月球环境下开展科研实验、研究深空探索对人体的风险及减缓措施等方面取得科学突破<sup>[12]</sup>。

1.3 嫦娥工程

在无人月球探测领域,我国目前已经成功实施了嫦娥工程的“绕”、“落”、“回”3大阶段任务,未来将在月球南极建立月球科研站基本型<sup>[13]</sup>。嫦娥工程一到四期任务示意图如图 3 所示。

在科学研究方面,嫦娥工程各阶段主要取得的成果包括:嫦娥一号、二号通过卫星绕月飞行探测,获取月球表面三维立体影像、分析月球表面有用元素及物质类型的含量和分布、测量月壤厚度和评估氦—3 资源量、探测地—月空间环境<sup>[14]</sup>;嫦娥三号、四号以软着陆的方式,进行月表形貌与地质构造调查、月表物质成分和可利用资源调查、地球等离子体层探测和月基光学天文观测、月球背面巡视区浅层结构探测研究、月表空间环境探测与研究、月基低频射电天文观测研究等,嫦娥四号巡视器目前仍在月表执行巡视探测任务<sup>[15]</sup>。

嫦娥五号任务携带月球采样返回器,软着陆在月球表面吕姆克山附近,采样返回器利用表采机械臂和钻取采样装置分别获得了月球表层和剖面样品(图 4),共计 1 731g(最大深度 0.97m),经密封封装后安全返回地球<sup>[16]</sup>。目前嫦娥五号返回样品已先后发放了 7 批,极大促进了我国月球科学研究发展。嫦娥六号于 2024 年 6 月着陆于月球背面南极—艾特肯盆地,成功实施了人类首次月背采样返回,所采集样品深度达到 1.1m,重量为 1 935.3g,突破了人类只拥有月球正面样品的局限。由于南极—艾特肯盆地是现在发现的月球上最大、最深、最古老的盆地,因此嫦娥六号所采集样品可能包含月球深部甚至月幔的物质,为研究月球内部物质成份提供宝贵数据,并且有助于揭示月球背面特有的地质构造和物质成份的差异,更全面地理解月球的地质演化历史。

后续嫦娥工程将通过多次发射任务构建月球科研站基本型,实现月球科学综合研究、月基观测与实验研究和月球资源就位利用试验等目标。

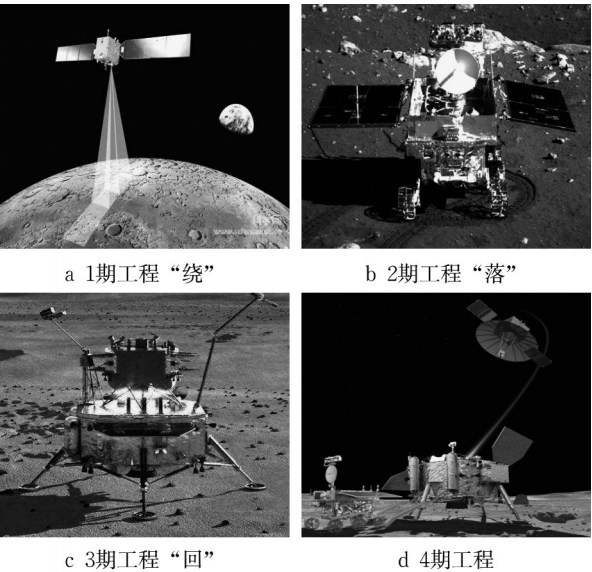
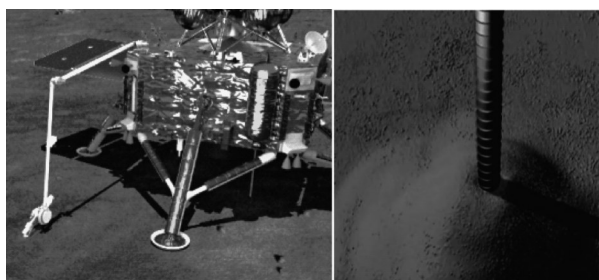


图 3 嫦娥工程历次任务

Fig.3 Series of the Chang'e missions



图4 嫦娥五号采样示意图<sup>[17]</sup>Fig.4 Lunar sampling of Chang'e-5<sup>[17]</sup>

## 2 载人月球探测科学研究任务发展趋势

通过国外载人月球探测和我国无人月球探测任务中科学研究方面的发展情况和取得的科学发现,结合载人月球探测的任务特点,对未来载人月球探测科学研究任务的发展趋势进行梳理。

### 2.1 人机协作的月面高效活动

在载人月球探测过程中,可以充分发挥航天员的自主性,开展人机协作的月面高效活动,在活动范围、活动效率和科学产出方面取得新的突破。航天员的精细化操作,可以在科学研究仪器部署、样品采集封装、科学活动点位选择等方面取得更好的效果,具有无人探测所不具备的灵活性。航天员通过驾驶月球车在月面大范围快速移动,可以大幅拓展月面科学活动的范围,显著提升月面科学探测、科学实验等活动的效率和科学产出价值。因此,人机协作的月面高效活动是载人月球探测的重要优势之一,下文对科学研究仪器部署和样品采集两个方面进行深入分析。

#### 2.1.1 更加灵活的科学研究仪器部署

在国外月球探测工程和我国嫦娥工程实施过程中,各类探测器对月球空间与表面环境、月球地形地貌、地层与地质构造、月表土壤与岩石的分布、月球的物理参数等进行了系统探测,这些探测数据在解决月球岩浆活动和热演化历史、月球撞击历史和内太阳系撞击通量等重大科学问题上提供了重要支持,并为理解地月系统及太阳系天体的形成与演化提供了有效科学约束<sup>[18-21]</sup>。

美国克莱门汀探测器发现了高地月壳、南极艾肯盆地和正面雨海盆地等区域的铁含量差异<sup>[22]</sup>,月球勘探者号的中子谱测定结果支持月球正面雨海地区 and 月球背面南极艾肯盆地区铁含量高的结论<sup>[23]</sup>。我国“玉兔号”发现“广寒宫”附近的月海玄武岩是一种新型中钛月海玄武岩,含有较为丰富的橄榄石和

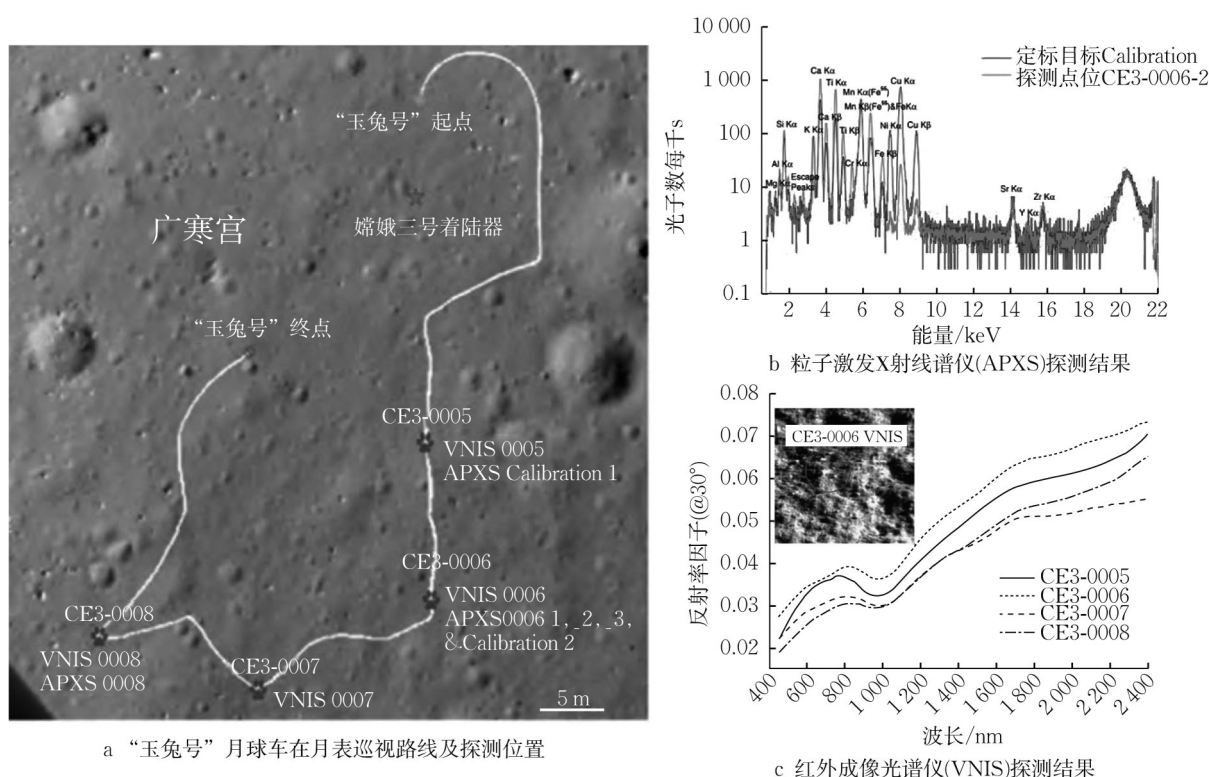
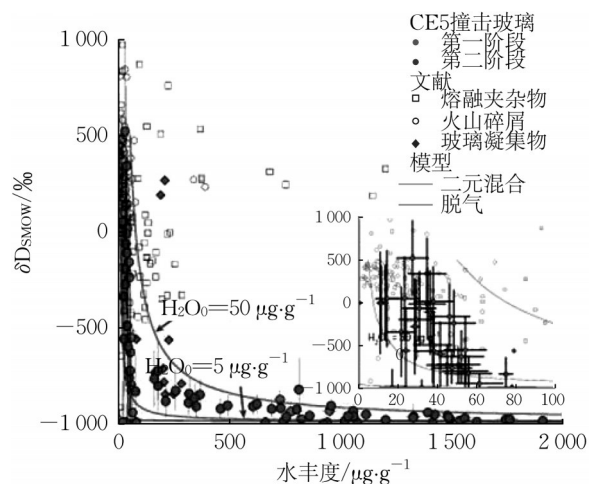
钛铁矿矿物,使得嫦娥三号着陆区(“广寒宫”)成为新的月球遥感研究定标点(图5),为月球晚期火山活动和岩浆演化机制提供了新的约束<sup>[24]</sup>。“玉兔号”载荷的探测数据还表明月球在晚至25亿年左右仍存在大规模火山喷发,对月球晚期活动和活动地质演化过程提出了新的认识<sup>[25]</sup>。以上月球探测的科学成果主要通过月球轨道或少数月球表面位置开展探测所取得的,探测手段和探测范围较为有限。在载人月球探测中,可充分发挥航天员灵活部署科学研究仪器的优势,开展月球科学探测、月基科学实验和月基天文观测研究。

例如,在月球物理和环境方面,可通过构建包括重力场、磁场、电场、月震、热流等多物理场,以及带电粒子、月尘等特殊环境的月球物理综合观测台站网络,实施长距离、大范围、长时间、高精度的科学探测。所获得的多物理场协同探测及联合定标结果能够为月球内部科学研究提供更为充足的约束。在月基科学实验方面,航天员可灵活部署基础物理、空间应用物理和弱重力物理等科学实验设施,并完成复杂精细的实验操作。在月基天文观测方面,可在月面采用人机联合的方式布设天文观测设备,充分发挥月面超净空、甚低频、超稳定等环境条件优势,开展低频射电天文观测、天文望远镜观测、引力波探测、月球动力学观测、宇宙黑暗时代测量、系外行星探索等观测与探索,可以显著拓宽人类对天文观测的手段和观测范围,有利于新的重大天文发现。

#### 2.1.2 高效高质量的样品采集与研究

月球样品记录了丰富的月球形成与演化过程的重要信息。月球表面厚达2~10多m的月壤记录了长达几十亿年的月表地质演化历史;月表上的一些撞击坑,将深部的月壤挖掘到表面,能够反映月壤深度剖面在横向上的变化信息;月表各类石块的来源极其复杂,其中大块的岩体能够保存明确的地质产状信息,古老的玄武岩层可记录月球古磁场的信息。因此,月球样品采集是提升人类对月球认知水平的基础。

在阿波罗计划中采集的月球样品,奠定了人类现有的月球科学框架,形成了对月球演化历史乃至地球早期演化历史的科学认知<sup>[26-27]</sup>。我国科学家通过嫦娥五号月壤的研究也取得了一系列国际领先水平的研究成果,例如证实了月球在19.6亿年前仍存在岩浆活动、建立了新的更精确的月球年代函数模型、发现了撞击玻璃珠是月表水的重要储存库等(图6)。

图5 嫦娥三号月球车巡视路线和就位探测结果<sup>[24]</sup>Fig.5 The survey route and in-situ exploratory data of Chang'e 3 rover<sup>[24]</sup>图6 在嫦娥五号样品撞击玻璃微珠中测定的水丰度和 $\delta D$ 值<sup>[28]</sup>Fig.6 Water abundances and  $\delta D$  values measured in CE5 impact glass beads<sup>[28]</sup>

通过现有月球样品的研究,科学家已经在月球形成机制、月球演化历史和月球物质成分组成等方面得到了丰富的认识。但是,在月球岩浆活动及月壳改造过程、月壤多层序剖面特性及改造历程和资源赋存及开发等方面仍需大量的高质量月球样品研究。因此,高质量月球样品的采样返回在载人月球探测任务中将具有重要的地位。综合阿波罗和嫦娥

工程月球样品采集的经验,后续有人月球采样可以在采样区域、采样类别、决策方式、筛选及封装方式等方面取得新的发展。

在采样区域方面,无人月球探测的采样活动受制于着陆器的移动能力,主要集中在着陆点附近进行采样,采样范围较为有限,而且采样形式也受到一定限制。载人月球探测可以充分发挥航天员月面高效移动的优势,实现长距离、大范围采样。在样品采集类型方面,载人登月可以充分发挥航天员的主观能动性,携带各种采样和封装工具,灵活采集所需的各种尺寸及矿物类别的样品,使样品采集类型尽可能多样,实现有人采样科学价值最大化。

在采样决策方式方面,美国、前苏联月球采样和我国嫦娥五号月球采样,均为航天员或探测器自主开展,科学家未直接参与。在未来载人月球探测工程中,可引入原位勘测手段和实景取样智能引导方法,以地月交互为手段,使地面科学家深度参与采样过程,对具体采样点、样品类型和采样方式的决策提供直接的支撑,显著提高采样活动的效率和科学产出。在样品分类及封装方式方面,受返回重量资源的限制,航天员需要对采集的样品开展原位分类筛选,挑选更有价值的样品带回地球。同时,根据不同类型样品返回后的科学研究需求,需要对各种样品



的封装方式进行合理区分,例如含挥发分样品与月岩块对高真空封装的需求不同,表层铲取月壤与钻取月壤对保序封装的需求也不同。基于样品科学价值选用不同的封装方式,可以在满足工程资源约束的同时,使返回样品的组合达到最优。

## 2.2 月球研究发展到边认识边利用

已有的无人和有人月球探测任务中,大部分聚焦于通过原位科学探测或采样返回的方式,从不同角度开展月球表面地形地貌、月球物理及化学特性、月球及月地空间环境等科学问题的研究,属于“认识月球”的范畴。而未来的月球探测工程,将逐步向边认识边利用的方向发展,目前国内外在该领域的研究仍处于起步阶段,现有结果以概念方案设计和地面原理实验为主,尚无月面原位的技术验证和研究。下文对原位资源利用中较为重要的两个方面:生存物资原位获取和月面原位建造进行深入分析。

### 2.2.1 生存物资原位获取

在载人月球探测任务中,航天员驻月能力主要取决于上行资源的约束,由于同时兼顾航天员落月及返回需求,且携带月面生存物资有限,对航天员驻月时间有较大的限制。而在未来的载人月球探测中,将不可避免地面临人在月面长期驻留和生存的需求,如建设月球科研站、月球基地等(图7),这将使月面物资的补给量大大提升<sup>[29-30]</sup>。基于现有火箭运载能力,地月运输的生存物资补给将受到运输成本、技术难度和任务灵活性的严格限制。因此必须考虑充分利用月球表面的原位资源,实现生活物资乃至生产物资的原位获取,最大程度地减小地月运输的补给需求。

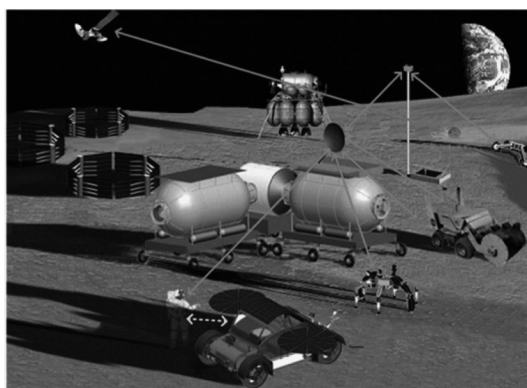


图7 月球基地想象图<sup>[2]</sup>

Fig.7 General conception of short-term lunar base<sup>[2]</sup>

基于这一现状,在未来载人月球探测工程中,有必要着眼于提高人类“利用月球”的能力,尽快完善

水、氧气和食物等生存物资原位获取技术体系。

原位水资源是月球探测活动中最重要的战略资源,可以通过水冰开采和月壤氢还原两种方法实现月面原位水资源获取。在月球中低纬度,富含钛铁矿的区域,可以采用月壤矿物还原的方法获取水资源。利用氢气、甲烷等还原气与富氧矿物在特定条件下反应制取水,这种方法对月面选址要求低,原材料储量大、分布范围广、获取难度低,对于载人月球探测是较为合适的原位水资源获取技术手段。

氧气是载人月球探测最重要的物质资源之一,月面原位制氧将是实现长期月球驻留的基本保障之一,既能为月面生存提供氧气资源,也能为潜在的月面航天器发射提供原位燃料制备所需的基础物质。月面氧资源来源于风化层月壤,虽然储量极大,但基本是以含氧矿物形式存在,性质非常稳定,这对氧气制取的反应条件控制、设备研制和能源供给等具有很大挑战。需深入评估不同技术方案的资源适应性、氧元素转化率、能源消耗和经济性等指标,形成优选的技术路线。

月面原位食物获取是指利用月面原位物资栽培植物,甚至更进一步饲养动物,将极大地减低地球食物补给依赖。美国NASA研究人员利用“阿波罗”探月任务采集的月壤样品进行了拟南芥培育实验,结果表明月壤直接用于拟南芥培育会导致萌发率减低、营养吸收不良和生长严重受阻等问题<sup>[31]</sup>,因此月壤改良将是月壤植物培育的基本前提,未来需在月壤改良技术与装备、月面植物培育设施与制度等方面开展深入探索。

### 2.2.2 月面原位建造

在月球探测任务中以月壤、月尘等月面原位资源为主要建筑材料,在不依赖或少量依赖地面资源的条件下,进行月球基地建设所需各类基础设施,可以充分降低月面建造活动对地面上行资源的需求,显著提高载人月球相关的任务效率,降低任务成本,拓展航天员的地外活动能力。具体可建造的设施包括载荷防护结构、居住设施(航天员的生活舱和工作舱)、交通设施、功能设施(太阳能电站、通讯站、发射场等)和科研设施(如射电望远镜支架)等。现有的月面原位建造技术手段主要包括D-Shape技术、微波烧结、太阳能烧结、月壤/聚合物熔融挤出成型等,目前主要技术难点包括月壤固化成型、防护结构设计和低重力约束下的金属3D打印工艺等方面。

### 3 载人月球探测科学研究领域发展建议

通过上文的分析,在未来载人月球探测过程中,可充分利用航天员月面自主活动的优势开展月面科学任务,如月面较大范围高效移动和部署、人机联合探测、天地协同采样、开展有人参与的科学实验等,实现月面科学探测、科学实验和应用研究的新突破。同时,载人月球探测的科学任务也将重点关注人在月球乃至深空长期驻留相关的问题,从科学和工程等方面为未来人类深空探测积累基础。在此基础上,对我国载人月球探测工程首次登月的科学研究与应用任务,以及未来月球科考阶段的发展提出了初步建议。

#### 3.1 首次登月科学研究与应用

基于我国载人月球探测科学目标<sup>[32]</sup>,在首次登月阶段,可开展月球样品采样返回、月球科学探测及研究、原位资源利用实验等任务。具体包括:通过种类丰富的样品研究与多学科月面综合探测,为未来人在月面的活动提供丰富的月球地质、资源、空间环境等方面的信息,支撑人在月面的活动安全保障和中长期驻留点位的筛选。通过开展月面长期驻留必需的生存物资原位获取实验,以及破解生命在月面环境下生长发育之谜的生物培养实验等,支撑人在月面中长期驻留的物资保障和生存方式规划。通过上述任务实施,在月球科学、月基科学和资源利用等方面取得突破性进展,大幅提升月球探测与研究水平。

##### 3.1.1 月球样品采样返回

我国载人探月任务首次登月目标着陆区位于月球正面中低纬度,与阿波罗计划6次任务、前苏联月球号3次任务的着陆点在空间分布和地质构造上存在相似性,发现和采集到有重要价值的、新类型的月球样品难度更大。如何在有限的资源条件下,取得科学的重大发现,是我国载人月球探测任务面临的巨大挑战,因此需要在样品采集方法上实现创新。

在航天员采样路径规划及决策方面,可通过手持月面样品引导判别,为航天员提供集成物质成分光谱探测、光谱成像等多种探测数据,通过快照式多光谱成像、小型化高可靠度快速连续对焦等技术,获取月表岩石、月壤成分光谱和矿物填图,提供对采样区域的充分认知。基于数字月球平台,运用人工智能方法,针对多源月球勘探数据,包括光学图像数据、光谱数据等,开展AI边缘计算与月面实景引导样品判别,为航天员月表取样点位筛选、取样路径规

划等任务决策提供高水平支撑。

在采样方式上,可发挥航天员灵活操作的优势,开展铲取、拾取、表层月壤粘取、保序采样、钻取等灵活多样的采样。由于遭受上亿年的陨石撞击和溅射,月表岩石的碎屑、冲击熔融的玻璃、胶结的角砾以及残留的微陨石等复杂物质互相混杂且重叠分布。通过类型丰富的样品采集为月球科学研究提供充足的原材料,而且通过钻取得到的覆盖不同地质年代的月壤,可以为解密月球二分起源提供更好的支持,持续推动月球及行星科学研究发展。

在样品采集过程中,基于样品分类研究的科学需求和返回重量资源的工程约束,月球样品的分类筛分和采集技术是不可或缺的。通过颗粒粒径筛分、磁性筛分等手段,可以实现月面原位获取特定目标类型的样品(图8),提高样品科学研究的价值,同时还可以为后续月基科学实验和资源勘察与利用等领域的创新突破提供技术储备。



图8 月球样品分类筛分技术<sup>[33]</sup>

Fig.8 Classification and screening of lunar soil<sup>[33]</sup>

##### 3.1.2 月球科学探测及研究

在已有的月球探测任务中,一系列月面及在轨探测器针对月面环境、地形地貌、地质与资源、月球物理等开展了大量科学探测及研究,但是相对月面大面积和复杂的演变机制,现有探测数据和研究的覆盖性仍不充分。其中,对月面特殊环境的认识,是载人登月任务顺利开展和宇航员安全保障、月面活动规划和危险规避的关键输入,并且是揭示日一地一月空间环境特征及其与月球相互作用过程和机理这一重大科学问题的前提。因此,在载人月球探测过程中,对月面特殊环境及其作用机制开展深入的探测和实验研究是十分有必要的。



### (1)月面特殊环境探测

月球表面的特殊环境由太阳风、地球风、地球磁场、宇宙射线、微陨石等多种外部条件共同形成,并耦合月球表面地形地貌、月球尘埃、局部磁异常等多种因素,机理十分复杂(图9)。例如,微陨石轰击、高能粒子辐射以及太阳辐射产生的热交变作用会引起月壤颗粒性质的变化,而太阳紫外辐射引起光电发射以及等离子体环境下的带电粒子在月壤颗粒上的积累会引起颗粒带电,从而发生静电迁移过程。

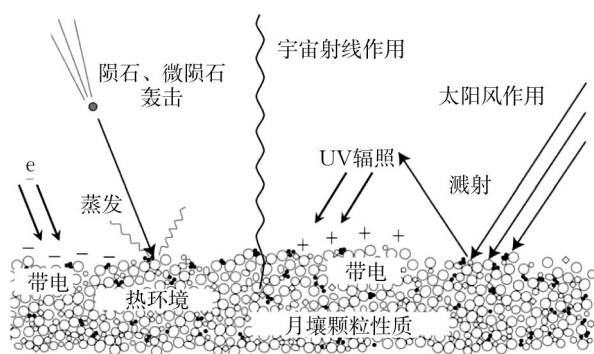


图9 月面主要环境因素及作用机制<sup>[34]</sup>

Fig.9 The main factors and mechanism of lunar surface environment<sup>[34]</sup>

为了深入研究着陆区附近月面特殊环境及其与月壤演变规律的关联,可开展粒子辐射、月尘、磁场、月壤风化等各类探测。其中,月面粒子辐射探测包括太阳风、地球风、宇宙线等外界粒子,以及上述入射粒与月表相互作用产生的次级粒子,以破解月面风化/大白斑起源/日地月物质交换等科学谜题;月尘环境探测包括月尘颗粒特征和浮扬月尘廓线探测,开展月尘粒子参数、月尘行为和特性驱动力分析,以及月尘浮扬高度分布、迁移规律和月尘宏观运动行为分析;磁场环境探测可获取月球表面剩余磁场及其梯度分布规律等探测数据,支撑月表地质过程、月球内部结构研究;月壤风化探测通过对月壤微观形貌,如粒径、形貌特征等探测,以及月壤及月岩物质成分,如水赋存状态分布、矿物种类、矿物化学等探测,揭示太空风化机制与月壤演化过程。

(2)月面特殊环境下生命体的适应性与响应机制研究

月面强辐射、弱磁场、大温差、低重力的特殊环境,可能对生命活动引起DNA损伤、神经递质异常、氧化胁迫和节律变化等一系列作用机制,从而产生代谢紊乱、行为异常、生长抑制等影响。因此,在载人登月以及后续长期有人月球探测任务中,需要充

分研究月面特殊环境下生命体的适应性与响应机制,为长期月面驻留活动提供保障。为了实现这一目标,可在首次登月期间在月面开展原位生物培养实验,利用微生物、植物、低等动物等多种生物,开展月面环境下的培育,并进行基因表达变化、pH值、溶解氧等关键指标测试,分析神经行为变化、微生物代谢变化、宏观生长变化等规律。相关研究成果不仅可以揭示月面生物环境适应性与响应机制,还能够为研究特殊环境对人体健康的影响、生物食物补给、地外密闭生态系统构建等月球长期驻留探测所面临的问题提供必要的基础。

### 3.1.3 月球原位资源利用

在载人登月及未来长期月球探测过程中,水/氧等物资是航天员生存和深空航天器发射的基本保障。因此,在我国载人月球探测首次登月中可优先考虑水/氧原位获取,部署相关科学实验,开展以满足人在月面长期驻留为核心目标的技术验证。

在月面长期驻留过程中,航天员所必需的水资源约为 $2\sim 3\text{ kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,通过环控生保技术可以将水资源部分循环利用,但难以长期持续。利用氢气与月壤加热发生氢还原反应可以获取月壤矿物中的氧元素,进而生成水<sup>[35]</sup>。在实现稳定持续反应的前提下,可以达到月面水资源原位高效、稳定和可靠补给的目的,并且可进一步实现原位氢氧转化利用(图10)。相关实验可为未来月面驻留与科考活动中开展规模化原位获取水氧等生存物资的实施提供依据。其成果可为增强人类月面驻留和持续生存能力、降低人类地外生存所必须的水/氧补给成本、摆脱地球水资源补给依赖提供可行的技术路径。

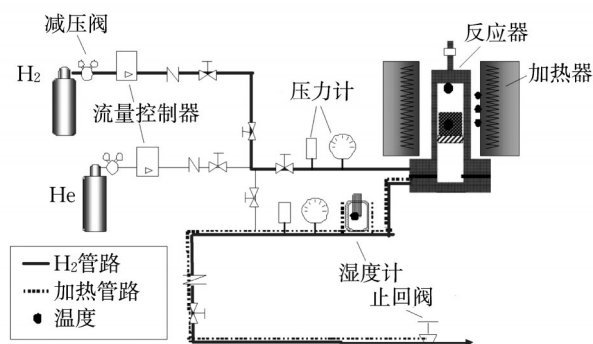


图10 月壤氢还原制水技术<sup>[36]</sup>

Fig.10 Hydrogen reduction of lunar soil to produce water<sup>[36]</sup>

### 3.2 载人月球探测远期发展

在首次载人登月的基础上,我国未来将持续开



展长期有人月球探测,利用月面移动实验室或实验舱,建立短期有人值守、长期无人智慧运行的科考站。这个阶段将充分利用首次登月科学研究与应用所取得的成果,充分发挥科考站的技术、设备与探测方式等优势,深化对月球起源与演化、资源调查、成矿机理等的认知,服务于月球利用。月基实验的规模可以显著扩大,支撑对空间应用物理与基础物理、空间天文与全球变化、生命科学与人体等方面的新认知。此外,还可深入开展月球资源开发与利用等关键技术验证,推进对月球资源的利用。在上述几个领域,预期开展的科学探测和实验包括:

#### (1)月球科学探测

在科考阶段,可充分利用航天员月面长期驻留探测的优势,部署月球多物理场固定台网,开展月球科学观测。具体可包括:通过月球重力场探测解答外核存在与否的难题,核幔边界处的流变学属性,并估算月球潮汐摩擦生热量;通过月球电性结构探测获取月球500km以浅的电性结构分布及其横向差异,进而确定下地幔温度和物质组成;通过月震探测记录天然月震和撞击事件,探测月球内部圈层结构,实现全球月震空间位置高精度台网定位和月震统计分析;通过深部热流探测实现月壤内部温度梯度、导热系数的测量以及热流等参数的反演计算,估算月壤热物性与生热元素分布,研究月球热状态,推演月球热演化历史。

此外,还可开展原位实验与分析,包括面向行进途中定点采样、封装的随车钻采,分类收集巡视途中具有代表性的特殊月壤,样品原位制备和进样,以及原位实现月壤显微矿物、水和挥发分气体分析、放射性同位素定年等。

#### (2)月基科学实验及天文观测

在月球物理实验方面,可开展月面原位月壤参数测量与承载力评估、低重力微纳米颗粒物絮凝、低重力气液界面与热流密度场测量等实验。以月壤力学相关实验为例,通过原位力学参数测量与承载力评估,可以揭示月壤宏微观的力学解耦性质及月壤剪切破坏的内禀物理机制、月壤在低微重力环境下的极高内摩擦角/粘滞性物理机制、以及极大温差/高真空等复杂月表环境对月壤力学特性影响机制。

在生命科学方面,通过开展月面全自动植物培养、建立月面密闭人工生态系统、生物样品月面原位检测实验、月面辐射生物风险预估/预警与新型防护等生命科学实验,可以揭示各层次生物体系、人体对

月面特殊环境的响应机制,为地外生存提供技术保障。

在月基天文观测方面,可在科考阶段瞄准宇宙黑暗时期探索、双星系统形成与并合、地月系统物质输运演化、月球形成和内部结构、月基大规模组装等热点问题,发展月面低频射电天文阵列、月基引力波探测、地月系统物质输运测量、月球自转测定、月面望远镜模块化轻量化高精度拼接等方面的技术。

#### (3)月球原位资源开发利用

在长期有人月球探测期间,为满足人类月面长期驻留和生存面临的资源补给需求,需要进一步深化月球原位资源开发相关的技术研究和工程应用。可持续开展月球资源详细勘查与评估、月面原位制氧、水资源获取、燃料生产、食物原位生产、矿物冶炼和原位制造与建造等涉及的科学实验和关键技术验证,有规划性地逐步搭载相关科学实验载荷和技术验证载荷,稳步实现月球资源开发利用各项技术的技术性突破、工程化研制和小规模应用。

通过月球原位资源开发利用相关技术的持续研发,不断进行装备研制与迭代,在月面逐步部署有人科考基地设施,将最终实现人类月面长期驻留和生存所必须的水、氧、食物、能源和燃料等物资补给,实现防护舱原位建造和月面宜居环境构建,有力支撑长期载人月球探测任务顺利实施,为发展可持续载人深空探测任务奠定技术基础。

## 4 总结

载人月球探测是未来一个时期我国航天事业发展的重要标志性项目,科学探测、科学实验及应用研究是载人月球探测任务实施的核心内容。本文在梳理国内外发展情况的基础上,总结了月面科学研究任务的发展趋势,在科学研究仪器部署、月球样品采集与研究、生存物资原位获取以及原位建造等方面详细剖析了未来发展方向。在此基础上,提出未来载人月球探测科学研究与应用发展建议,如天地协同支撑有人采样、月球样品原位分选、月球特殊环境探测及研究,以及月面原位制水科学实验等。并梳理了科考阶段重点发展的领域和具体方向。整体目标是发挥航天员在月面活动的主观能动性优势,达到科学成果产出最大化,并为人在月球乃至深空的长期驻留提供支撑,后续可作为载人月球科学研究任务方案论证和设计的参考。

## 作者贡献声明:

张鹏:负责论文总体架构设计,月球探测总体发展趋势分析,论文撰写过程指导与审阅;

代巍:负责文章逻辑梳理及行文思路设计,各章节素材分析、具体内容撰写及修改完善;

白一帆、张光:负责国内外发展情况调研及月球原位资源利用方向发展趋势分析及建议;

牛冉、刘成保:负责月球科学探测方向发展趋势分析及建议;

王之、郑海菠、杨瀚哲:负责月球样品采样及月基科学实验方向发展趋势分析及建议;

刘光辉、刘欣:协助完成月球原位资源利用方向发展趋势分析及建议;

童小华:负责论文学术指导,论文修改与审阅。

## 参考文献:

- [1] 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(4): 1.  
OUYANG Ziyuan. International lunar exploration progress and Chinese lunar exploration [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2004(4): 1.
- [2] 侯建文, 赵晨, 常立平, 等. 未来月球探测总体构想[J]. 载人航天, 2015, 21(5): 425.  
HOU Jianwen, ZHAO Chen, CHANG Liping, *et al.* General conception of future Lunar exploration [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(5): 425.
- [3] 杨宏. 从空间实验室到空间站的总体设计思路[J]. 航天器工程, 2022, 31(6): 7.  
YANG Hong. System design from space laboratory to China space station[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 7.
- [4] 王翔, 张峤, 王为. 中国空间站建设系统方案特点与展望[J]. 航天器工程, 2022, 31(6): 26.  
WANG Xiang, ZHANG Qiao, WANG Wei. System characteristics and prospect of China space station [J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 26.
- [5] 刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 等. 中国月球探测进展(2001—2010年)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 544.  
LIU Jianzhong, OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, *et al.* China national moon exploration progress (2001—2010) [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5): 544.
- [6] 李春来, 刘建忠, 左维, 等. 中国月球探测进展(2011—2020年)[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 68.  
LI Chunlai, LIU Jianjun, ZUO Wei, *et al.* Progress of China's lunar exploration (2011—2020) [J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 68.
- [7] 韩鸿硕, 蒋宇平. 各国登月计划及载人登月的目的与可行性简析[J]. 中国航天, 2008, 365(9): 30.  
HAN Hongshuo, JIANG Yuping. Analysis of the purpose and feasibility of lunar landing planning and manned Lunar exploration internationally [J]. Aerospace China, 2008, 365(9): 30.
- [8] 邓连印, 崔乃刚. 月球探测发展历程及启示[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2008(3): 14.  
DENG Lianyin, CUI Naigang. The development and enlightenment of lunar exploration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2008(3): 14.
- [9] VON E M. The Artemis lunar program[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [10] Commercial Lunar Payload Services (CLPS) Deliveries [EB/OL]. [2023-12-10]. <https://science.nasa.gov/lunar-discovery/deliveries>.
- [11] AMIT K, MARK K. Artemis I - IV Mission Over-view and Status [EB/OL]. [2022-10-31]. [https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nac\\_october\\_2022\\_artemis\\_final\\_rev\\_b.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nac_october_2022_artemis_final_rev_b.pdf).
- [12] 张家铭, 闫赟彬. 美国宇航局“Artemis”月球探测计划新进展[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 127.  
ZHANG Jiaming, YAN Yunbin. The progress of NASA's Artemis lunar exploration program [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(2): 127.
- [13] 裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线[J]. 深空探测学报, 2015, 2(2): 99.  
PEI Zhaoyu, WANG Qiong, TIAN Yaosi. Technology roadmap for Chang'e program [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(2): 99.
- [14] 刘建军, 任鑫, 牟伶俐, 等. 嫦娥二号卫星有效载荷与科学探测[J]. 生命科学仪器, 2013, 11(Z1): 31.  
LIU Jianjun, REN Xin, MOU Lingli, *et al.* Payload configuration and scientific exploration of Chang'e-2 satellite [J]. Life Science Instruments, 2013, 11(Z1): 31.
- [15] 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(12): 1783.  
WU Weiren, YU Dengyun, WANG Chi, *et al.* Technological breakthrough and scientific achievement of Chang'e-4 [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2020, 50(12): 1783.
- [16] 姜生元, 梁杰能, 赖小明, 等. 嫦娥五号月壤剖面钻进取芯状态分析与解译[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 348.  
JIANG Shengyuan, LIANG Jieneng, LAI Xiaoming, *et al.* Analysis on drilling and coring process and Lunar regolith stratification interpretation in Chang'e-5 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(10): 348.
- [17] 李阳, 郭壮. 嫦娥五号返回样品的科学研究前景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 245.  
LI Yang, GUO Zhuang. The scientific research prospect of Chang'e-5 samples [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(1): 245.
- [18] 张巧玲. “嫦娥三号”任务及其初步科学成果[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 85.  
ZHANG Qiaoling. Preliminary scientific achievements of Chang'e-3 mission [J]. Bulletin of Chinese Academy of



- Sciences, 2017, 32(1): 85.
- [19] 赵桢铭, 胡腾, 桑洋, 等. “嫦娥三号”降落区溅射物空间分布关系[J]. 遥感信息, 2020, 35(4): 141.
- ZHAO Anming, HU Teng, SANG Yang, *et al.* Spatial Distribution of ejecta in landing area of Chang'e-3[J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(4): 141.
- [20] 宋文鹏, 李静, 熊洪强, 等. 嫦娥四号探月雷达数据成像及月壤分层结构解释[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 2051.
- SONG Wenpeng, LI Jing, XIONG Hongqiang, *et al.* Imaging of Chang'e-4 Lunar penetrating radar data and regolith structure and stratigraphy interpretation [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 2051.
- [21] 孟治国, 唐天琦, 董学纲, 等. 嫦娥五号等着陆区的月壤微波热辐射特性及地质意义分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53(3): 105.
- MENG Zhiguo, TANG Tianqi, DONG Xuegang, *et al.* Analyzing the microwave thermal emission features of lunar regolith in Chang'e landing sites and its geo-logic significance [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2023, 53(3): 105.
- [22] COOK A C, OBERST J, ROATSCH T, *et al.* Clemen-tine imagery: Selenographic coverage for carto-graphic and scientific use[J]. Planetary & Space Science, 1996, 44(10): 1135.
- [23] LAWRENCE D J, FELDMAN W C, ELPHIC R C, *et al.* Iron abundances on the lunar surface as measured by the Lunar Prospector Gamma-ray and neutron spectrometers [J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2002, 107(E12): 1.
- [24] LING Z C, BRADLEY L J, ALIAN W, *et al.* Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site[J]. Nature Communications, 2015, 6(8880): 1.
- [25] ZHANG J H, YANG W, HU S, *et al.* Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(17): 5342.
- [26] ALLEN C, ALLTON J, LOFGREN G, *et al.* Curating NASA's extraterrestrial samples: Past, present, and future [J]. Chemieder Erde, 2011, 71: 1.
- [27] RYDER G. Lunar samples, lunar accretion and the early bombardment of the Moon [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1990, 71(10): 313.
- [28] HE H, JI J, ZHANG Y, *et al.* A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads[J]. Nature Geoscience, 2023: 16(4): 294.
- [29] 果琳丽, 李志杰, 齐玢, 等. 一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设计[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(6): 1.
- GUO Linli, LI Zhijie, QI Bin, *et al.* An overall tentative plan and construction blueprint of manned Lunar base[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(6): 1.
- [30] 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, 2021, 38(3): 109.
- ZHANG Chongfeng, XU Weiyang, WANG Yan. Development ideas of manned lunar surface exploration [J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(3): 109.
- [31] PAUL A L, ELARDO S M, FERL R. Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration [J]. Communications Biology, 2022(5): 382.
- [32] 牛冉, 张光, 牟伶俐, 等. 载人月球探测科学目标及着陆区选址建议[J]. 宇航学报, 2023, 44(9): 1280.
- NIU Ran, ZHANG Guang, MU Lingli, *et al.* Scientific objectives and suggestions on landing site selection of manned lunar exploration engineering [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(9): 1280.
- [33] BERGGREN M, ZUBRIN R, JONSCHER P, *et al.* Lunar soil particle separator [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA. 2011: 1-18.
- [34] 李雄耀, 李阳, 唐红, 等. 月面环境过程研究评述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(3): 443.
- LI Xiongyao, LI Yang, TANG Hong, *et al.* A review of environmental processes on lunar surface [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(3): 443.
- [35] ZHANG P, DAI W, NIU R, *et al.* Overview of the lunar in-situ resource utilization techniques for future lunar missions[J]. Space: Science & Technology, 2023(3): 37.
- [36] KANAMORI H, WATANABE T, AOKI S. Power requirements for the construction and operation of a Lunar oxygen plant [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26: 160.