

张大帅, 渠裴亮, 宗钟凌, 等. 月球南极水冰探测方法综述[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 13-32. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.002

ZHANG Dashuai, QU Peiliang, ZONG Zhongling, et al. Review of detection methods for water ice at lunar south pole[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 13-32. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.002

月球南极水冰探测方法综述

张大帅¹, 渠裴亮¹, 宗钟凌¹, 赵红华^{2,3}, 谢青海¹, 孟金鑫¹

(1. 江苏海洋大学, 江苏 连云港 222000; 2. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 大连理工大学 力学与航空航天学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 【目的】月球南极永久阴影区由于低温和长期无日照的特点, 成为月球水冰的关键储集区域。明确该区域水冰的分布范围、丰度和赋存形态是揭示月球水源起源和演化过程的核心科学问题, 也是实现月球原位资源利用和可持续深空探测的关键前提。【方法】已有研究方法包括轨道遥感技术与间接分析手段等。在轨道遥感方面, 应用中子与伽马射线光谱、近红外与热红外光谱及雷达极化成像技术, 分析其原理和探测能力。在间接分析方面, 采用撞击羽流分析、热环境建模和微冷阱分析方法评估水冰的稳定性。【结果】原位钻探和热释放气体分析被确立为水冰存在的最终验证技术。通过 Lunar Prospector、Chandrayaan-1、Lunar Reconnaissance Orbiter 及 LCROSS 等任务的数据分析, 评估了不同探测方法的精度、适用场景和局限性, 揭示了各方法在水冰分布探测中的表现差异。【结论】未来的技术发展方向包括突破高空间分辨率遥感技术, 以提升水冰分布制图精度; 发展具备自主导航和精细采样能力的月面移动机器人, 支持复杂地形的原位探测; 构建“轨道-原位-模拟”多尺度数据融合框架, 形成对月球水冰从宏观分布到微观机理的全面认知, 为月球基地建设及深空探测提供技术支撑。

关键词: 月球南极; 水冰; 永久阴影区; 轨道探测; 原位资源利用

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0013-20



Review of detection methods for water ice at lunar south pole

ZHANG Dashuai¹, QU Peiliang¹, ZONG Zhongling¹, ZHAO Honghua^{2,3}, XIE Qinghai¹, MENG Jinxin¹

(1. Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222000, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 3. School of Mechanics and Aerospace Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: [Objective] The permanently shadowed regions (PSRs) at the lunar south pole, due to their low temperatures and prolonged absence of sunlight, have become key reservoirs for lunar water ice. Clarifying the distribution, abundance, and form

收稿日期: 2025-10-23; 修回日期: 2025-11-12; 录用日期: 2025-11-13; 网络出版日期: 2025-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52408177); 连云港市重点研发计划(CG2402); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX25_2102)

作者简介: 张大帅(1995—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程、原位测试等方面的研究。E-mail: zhangdashuai1010@163.com

通信作者: 宗钟凌(1979—), 男, 教授, 研究生院院长, 博士, 主要从事超高性能混凝土以及桩基础的研究。E-mail: Jouzongzhl@Jou.edu.cn

孟金鑫(1996—), 男, 副教授, 博士, 主要从事低温环境下力学性能的研究。E-mail: caracalna@gmail.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

of occurrence of water ice in this region is a core scientific question for understanding the origin and evolution of lunar water sources. It is also a critical prerequisite for enabling in-situ resource utilization and sustainable deep space exploration on the Moon. [Methods] Existing research method include orbital remote sensing technologies and indirect analytical techniques. In terms of orbital remote sensing, neutron and gamma-ray spectroscopy, near-infrared and thermal infrared spectroscopy, and radar polarimetric imaging techniques are applied to analyze their principles and detection capabilities. For indirect analysis, methods such as impact plume analysis, thermal environment modeling, and micro-cold trap analysis are employed to evaluate the stability of water ice. [Results] In-situ drilling and thermal gas release analysis have been established as the final verification techniques for the presence of water ice. Through data analysis from missions such as Lunar Prospector, Chandrayaan-1, Lunar Reconnaissance Orbiter, and LCROSS, the accuracy, applicable scenarios, and limitations of different detection method are evaluated, revealing differences in their performance in detecting the distribution of water ice. [Conclusion] The future directions of technological development include breakthroughs in high-spatial-resolution remote sensing technologies to improve the accuracy of water ice distribution mapping; the development of lunar surface mobile robots equipped with autonomous navigation and precise sampling capabilities to support in-situ exploration in complex terrains; and the establishment of an “orbital-in-situ-simulation” multi-scale data fusion framework. This will form a comprehensive understanding of lunar water ice from macroscopic distribution to microscopic mechanisms, thereby providing technical support for lunar base construction and deep space exploration.

Keywords: lunar south pole; water ice; permanently shadowed regions; orbital detection; in-situ resource utilization

0 引言

月球极区长期以来是行星科学和深空探测研究的核心区域, 其独特的地形与轨道条件孕育了关键的物质储集环境。由于月球轨道倾角仅 1.5° , 太阳光始终以极低角度入射, 南北两极的环形山等起伏地形背阴面可长期处于阴影中, 形成总面积约 $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的永久阴影区 (Permanently Shadowed Regions, PSRs), 其中南极 PSRs 因环形山密度高、地形复杂, 成为水冰储集的重点区域(见图 1)。这些区域因太阳光难以直射, 表面温度常年维持在 $40 \sim 110 \text{ K}$ (远低于水冰升华温度 273 K)^[1-3], 可通过“冷阱效应”抑制水冰分子热运动, 从而为水冰和其他挥发性物质(如甲烷、氨)的长期保存提供独特环境。水冰在月球科学研究和应用开发中具有双重价值: 从科学价值看, 它是理解月球起源、演化及内太阳系物质循环的关键证据^[4]; 从应用价值看, 它是未来月球原位资源利用(In-Situ Resource Utilization, ISRU)的核心原料——通过热解或电解技术, 水冰可转化为水(供航天员饮用)、氧气(生命保障)和氢气(推进剂), 从而降低深空探测对地球物资的依赖, 为载人月球基地建设 with 火星探测中转任务提供支撑^[5]。因此, 厘清月球南极 PSRs 水冰的分布、含量与赋存形态, 是当前行星科学与深空探测领域的核心议题。

1 探测进展与存在问题

1.1 探测进展与典型成果

人类对月球南极水冰的探测历经“奠基—突

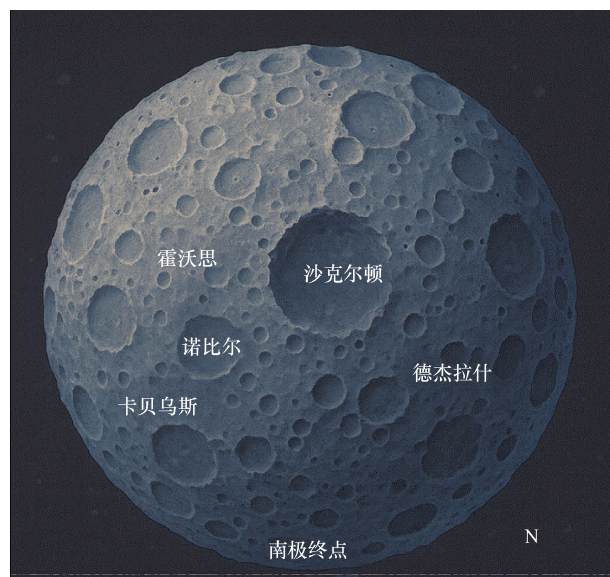


图 1 月球南极区域概况^[5]

Fig. 1 Overview of lunar south pole region^[5]

破—深化”三阶段, 逐步构建“轨道遥感找线索—实验确证存在—原位探测探细节”的证据链, 关键任务与成果如图 2 所示。

1.1.1 奠基阶段(1998—2008 年): 全球性线索与表面水冰提示

该阶段的核心目标是寻找月球极区水冰存在的间接与直接线索。1998 年, ASA 发射的 Lunar Prospector(LP)任务搭载中子谱仪, 首次在全球尺度上测得月球南北极氢丰度异常, 南极极区氢含量达 $50 \sim 300 \text{ ppm}$, 明显高于月表平均水平 ($< 10 \text{ ppm}$), 虽无法区分氢的存在形式(水冰或羟基), 但为水冰

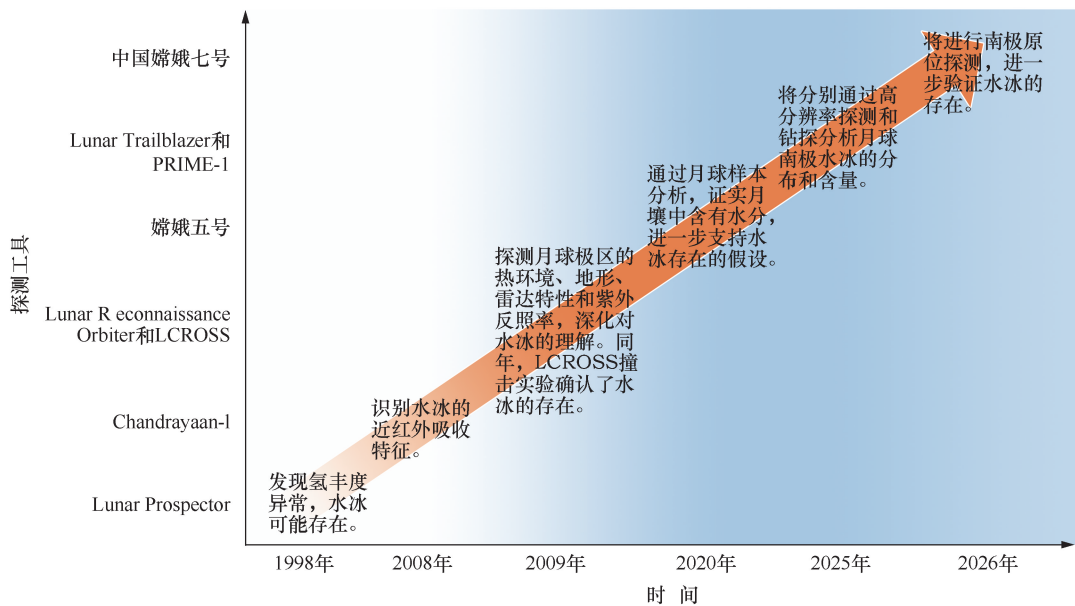


图2 月球南极水冰探测进展与典型成果时间线

Fig. 2 Timeline of advances and representative achievements in water ice detection at lunar south pole

存在提供了首个全球性间接证据^[6]。2008年, 印度 Chandrayaan-1 任务搭载的 Moon Mineralogy Mapper (M^3) 近红外光谱仪, 在沙克尔顿环形山、马拉柏特环形山等 PSRs 表面识别出 $3\ \mu\text{m}$ 水冰特征吸收峰, 证实表层水冰的存在, 并估算水冰覆盖面积约 $200\sim 500\ \text{km}^2$, 这是人类首次直接观测到月球极区表面水冰^[7]。

1.1.2 突破阶段(2009—2019年): 表面-地下水冰的实验确证

2009年是月球南极水冰探测的关键突破年, 通过“轨道遥感+撞击实验”的协同, 首次证实水冰的实质性存在。一方面, NASA的 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 任务搭载多载荷开展系统探测: Diviner 红外辐射计测得 PSRs 最低温度达 38K , 为冷阱效应提供精准温度证据^[8]; Mini-RF 雷达在 Cabeus 环形山底部探测到 $1\sim 10\ \text{m}$ 深度的高圆极化比 ($\text{CPR}>0.3$) 信号, 提示地下水冰储集^[9]; LAMP 紫外光谱仪通过紫外反照率异常 (波长 $250\ \text{nm}$ 处反照率 <0.05), 进一步佐证水冰的广泛分布^[10]。另一方面, NASA的 LCROSS 任务通过撞击 Cabeus 环形山, 在撞击羽流中检出 H_2O 浓度约 5.6% (质量占比), 同时发现甲烷 (0.01%)、氨 (0.001%) 等挥发物^[11], 直接证实 PSRs 内水冰的存在, 为“冷阱假说”提供实验确证。至此, 月球南极水冰的研究形成“轨道遥感—实验确证”的完整证据链。

1.1.3 深化阶段(2020年至今与未来规划): 非极区参考与极区原位探测

该阶段聚焦水冰的精细特征与原位验证, 同时拓

展非极区数据以支撑极区研究。2020年, 中国嫦娥五号任务成功采集月球风暴洋非极区月壤样本, 通过实验室热解-质谱分析测得月壤中羟基 (OH) 含量约 $120\ \text{ppm}$, 证实月表水的广泛存在, 为极区水冰的来源 (如太阳风注入) 研究提供参考^[12]。未来, 极区原位探测将成为核心方向: 中国嫦娥七号 (计划 2026 年发射) 将搭载原位钻探系统 (最大钻探深度 $2\ \text{m}$)、近红外光谱仪与热解气体分析仪, 聚焦南极 PSRs 的水冰原位定量探测, 首次获取极区原位水冰的纯度与赋存形态数据^[13]; NASA 的 Lunar Trailblazer (计划 2025 年发射) 将以 $100\ \text{m}$ 空间分辨率获取近红外光谱数据, 将水冰分布制图精度提升至现有技术的 5 倍^[14]; PRIME-1 (计划 2025 年发射) 任务则计划在南极钻探 $1\sim 2\ \text{m}$ 深度, 通过热解分析地下样本的水冰含量, 填补地下水冰量化研究的空白^[15]。

1.2 存在问题

尽管月球南极水冰探测已取得系列突破, 但当前研究仍面临技术局限、数据不确定性、应用空白三重核心挑战, 亟需通过系统综述厘清关键问题。

1.2.1 探测技术的固有局限

轨道遥感技术存在“分辨率-深度”的固有权衡: 中子与伽马射线光谱 (如 LP 载荷) 的空间分辨率约 $20\sim 50\ \text{km}$, 仅能反映大区域平均氢丰度, 无法定位环形山内部的小尺度水冰富集区; 近红外光谱 (如 M^3) 受光子穿透深度限制, 仅能探测表层 $<1\ \text{mm}$ 的水冰, 对地下 $1\ \text{m}$ 以深的储集状态完全无法覆盖; 雷达极化成像 (如 Mini-RF) 虽能实现 $1\sim 10\ \text{m}$ 深度探测,

但信号易受岩屑堆积干扰当环形山底部岩屑粗糙度大于 1 m 时, 其散射信号会掩盖水冰的高 CPR 特征, 导致水冰存在性误判。

原位探测则面临“覆盖范围-探测精度”的矛盾: 已执行的原位任务(如嫦娥五号)仅覆盖非极区, 极区原位探测尚未开展; 即便未来嫦娥七号、PRIME-1 等任务实现极区探测, 也受限于着陆点选择(需避开陡峭地形与大型岩块), 仅能获取点状数据, 难以反映 PSRs 内部水冰的空间异质性。此外, 现有原位设备仅能定量检测水冰总含量, 无法区分赋存形态(吸附态、游离态或晶格包裹态), 而不同形态水冰的提取难度差异较大, 直接影响 ISRU 技术路径选择。

1.2.2 数据解释的多解性与验证缺失

当前数据解释存在不确定性, 核心源于单一技术无法区分干扰因素, 且缺乏多技术交叉验证标准。例如: Mini-RF 观测的高 CPR 信号($CPR > 0.3$)既可能源于水冰, 也可能由玄武岩岩块的棱角散射引起——LRO 对沙克尔顿环形山的观测中, 约 30% 的高 CPR 区域经近红外光谱验证无 $3\ \mu\text{m}$ 吸收峰, 证实地形干扰的影响; 近红外 $3\ \mu\text{m}$ 吸收峰易受空间风化玻璃质外壳(厚度 100~500 nm)掩盖。实验室模拟显示, 当玻璃质覆盖率 $> 50\%$ 时, 水冰含量估算值会低估实际值 40% 以上; 中子谱仪测得的氢丰度异常, 可能来自水冰、羟基或氨, 嫦娥五号样本证实月壤羟基含量达 120 ppm, 若仅依赖中子数据易导致水冰含量误判。

更关键的是, 现有研究尚未建立“多技术融合验证”的标准流程: 未明确“雷达高 CPR+近红外 $3\ \mu\text{m}$ 吸收峰+中子氢丰度异常”的联合判据阈值, 也缺乏误差量化模型, 导致不同任务结果难以对比——如 Chandrayaan-1 估算沙克尔顿环形山水冰覆盖率约 20%, 而 LRO 的 Mini-RF 反演结果仅为 5%, 无法通过交叉验证确定可信值。

1.2.3 资源应用导向的研究空白

从 ISRU 需求出发, 当前研究存在三大核心空白: 一是可采性评估数据缺失, 水冰纯度需达 10% 以上才具备经济提取价值, 但迄今仅 LCROSS 测得羽流水冰纯度约 5.6%, 且未明确其分布比例; 埋藏深度直接影响钻探设备设计(1 m 以浅用机械钻, 1~10 m 需热钻), 但现有雷达数据仅能给出深度范围, 无法精准定位富集层。二是环境适应性研究不足, PSRs 极端环境(温度 38 K、月尘浓度 $10^5\ \text{particles}/\text{m}^3$)对 ISRU 设备的性能影响尚未量化, 如低温会导致密

封材料脆化, 月尘会堵塞热解反应器气孔, 但缺乏“提取效率-环境参数”关联模型。三是储量估算偏差大, 当前南极水冰总储量估算值差异达 3 个数量级($10^8 \sim 10^{11}\ \text{kg}$), 源于探测覆盖仅 10% 的 PSRs、反演模型假设不同, 而百人规模月球基地每年需 $10^6\ \text{kg}$ 水, 现有数据远无法支撑规划。

1.2.4 综述核心价值

综合上述问题, 本综述的核心价值体现在三方面: 从学术层面, 整合 2020 年后嫦娥五号、Lunar Trailblazer 等新任务进展, 建立“非极区-极区”“表面-地下”的数据链条, 为月球水成因模型(太阳风注入、陨石携带)提供更全面约束; 从技术层面, 梳理“轨道-原位-撞击”技术的特性与场景, 建立“探测目标-技术选择”匹配框架, 为未来任务载荷配置提供指导; 从应用层面, 首次将“探测方法”与“资源可采性”深度关联, 提出 ISRU 导向的探测指标体系(纯度 $\geq 10\%$ 、埋藏深度 $\leq 2\ \text{m}$ 、分散度 $\leq 10\ \text{kg}/\text{m}^3$), 明确优先探测区域(沙克尔顿环形山底部、马拉柏特环形山边缘), 搭建“科学探测-工程应用”的桥梁。

2 月球南极水冰探测方法

针对月球南极水冰的探测, 科学界发展出多种互补的方法体系, 月球水冰探测的主要物理方法如表 1 所列。这些方法涵盖了从轨道遥感到原位实验的不同尺度与技术路线, 既包括基于粒子与辐射探测的中子与伽马光谱法, 也包括利用电磁波与光谱特征的雷达极化法、近红外光谱法以及紫外/可见光谱法, 还包括通过撞击试验羽流分析获取直接证据的手段。此外, 结合温度建模与冷阱分析能够揭示冰的热稳定性, 而原位探测(钻探/质谱)则为确认水冰的物理和化学性质提供了最直接的证据。不同方法各具优势与局限, 但通过多源数据的交叉验证, 可以有效降低单一技术的多解性, 形成相互支撑的证据链。

2.1 轨道遥感技术

2.1.1 中子与伽马射线光谱法

中子与伽马射线光谱法是目前探测月球极区氢丰度及推测水冰分布的重要手段, 中子与伽马射线光谱法的原理如图 3 所示。其基本原理是: 高能宇宙射线轰击月球表面物质时会产生中子, 这些中子在逸出过程中与月壤中的原子发生散射。由于氢对中子具有极强的减速作用, 当表层存在氢(可能以水冰或羟基的形式存在)时, 热中子与超热中子的计数率会下降^[32-34]。因此, 通过对中子能谱的观测, 可以间接

表 1 月球水冰探测的主要物理方法

Table 1 Main physical methods for lunar water ice detection

方法/技术	原理简介	优势	局限性
中子与伽马光谱法 ^[16]	通过探测高能宇宙射线与月壤作用产生的中子 γ 射线, 推算氢丰度	可探测至 1 m 深度, 适合研究极区大尺度氢分布	空间分辨率低(几十千米), 无法确定氢的赋存状态
近红外光谱法 ^[17]	利用水和羟基在 2.7~3.0 μm 等波段的吸收特征探测水合物	光谱信号直接对应 $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$ 特征, 定性能力强	受热辐射、空间风化干扰, 需要校正
雷达极化法 ^[18-20]	分析雷达回波极化特性, 区分岩石粗糙度与潜在水冰	可穿透表层, 获取地下信息	高 CPR 可能由粗糙地形而非水冰引起, 存在多解性
紫外/可见光谱法 ^[21-23]	在紫外/可见波段分析反照率与发射谱线, 检测霜层或羽流中的 $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$	对低温霜层敏感, 可在 PSRs 中探测表面水冰	灵敏度有限, 需依赖冷阱环境背景
撞击羽流分析 ^[24-25]	撞击产生羽流, 通过光谱分析识别 OH 、 H_2O 及伴生挥发物	提供最直接的原位证据, 能检测羽流成分	空间范围有限, 结果受撞击点选取影响
温度建模与冷阱分析 ^[26-28]	通过红外测温与数值模拟, 估算 PSRs 内温度分布及水冰稳定性	揭示热环境与冰稳定区, 提供冷阱分布预测	只能间接推测, 需与其他方法交叉验证
原位探测(钻探/质谱) ^[29-31]	使用钻探或质谱直接分析月壤或羽流, 测定水冰含量和同位素组成	直接测量水冰物理/化学性质, 最具确定性	技术复杂、覆盖范围有限, 受任务寿命限制

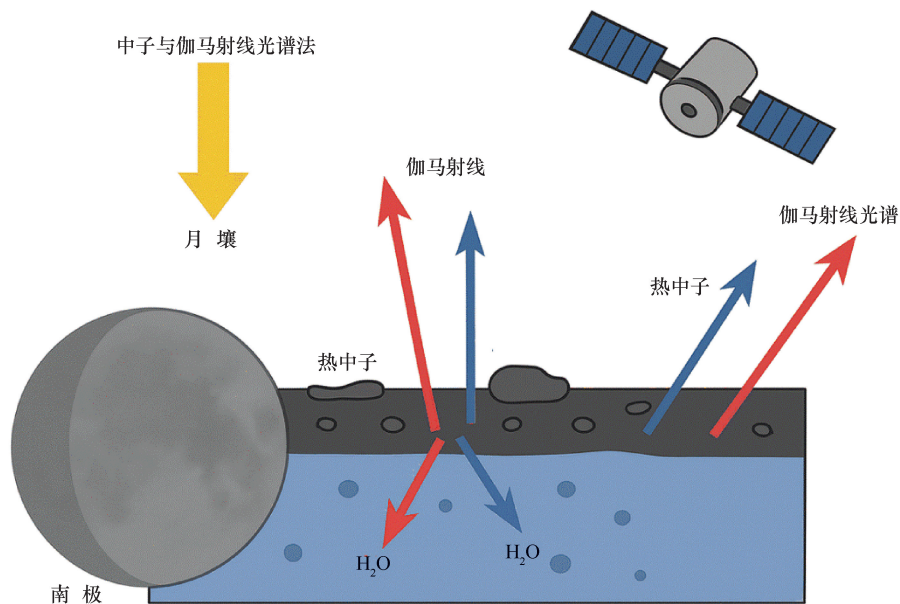


图 3 中子与伽马射线光谱法的原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of principle of neutron and gamma-ray spectroscopy

反演氢的丰度与分布。与此同时, 伽马射线光谱法通过探测特定能量的伽马射线谱线, 可对月壤中的主要元素进行识别和定量, 为中子光谱结果提供补充信息^[35]。

该方法的优势在于探测深度较大, 可穿透至约 1 m 的风化层范围, 相比光学和红外手段更适合研究冷阱内的埋藏水冰^[36]。但其局限性同样明显: 由于空间分辨率一般在数十千米量级, 仅能给出区域尺度的统计信息, 难以区分氢的具体赋存状态, 例如分子水冰、羟基化合物或太阳风俘获氢等^[37]。

2.1.2 近红外/热红外光谱法

近红外和可见光红外光谱是识别月球表面水和羟基的重要手段。其基本原理在于, 水分子在 1.5 μm 、2 μm 和 3 μm 附近具有特征吸收峰, 通过光谱分析可以直接揭示表层(毫米级)水合物的存在与丰度^[38]。为降低热辐射对观测的干扰, 研究人员通常需对 4.0~4.5 μm 范围的热信号进行校正, 从而清晰展现 2.7~3.6 μm 波段水合特征的完整结构, 近红外光谱法原理如图 4 所示。

多项任务提供了关键证据。Chandrayaan-1 搭载的 Moon Mineralogy Mapper (M^3) 在不同纬度和不同观测时相均检测到稳定的水合吸收特征, 确认了极区水冰与低

纬度羟基的广泛存在。与此同时, Cassini/VIMS 在 1999 年飞越月球时获取的光谱数据, 展示了 OH 与 H_2O 在 1.5 μm 、2 μm 、3 μm 的吸收峰, 进一步验证了月球表层存在水和羟基。撞击实验的光谱观测也提供了新的视角, 例如对喷射羽流中 OH 及 NH 、 CO_2 、 H_2S 等挥发物的识别, 不仅揭示了水冰的存在, 也反映了月壤中复杂的物质组成及演化过程。

在方法层面, 红外光谱探测可通过分析分子振动和转动特征峰来确定水的存在及赋存状态, 甚至估算

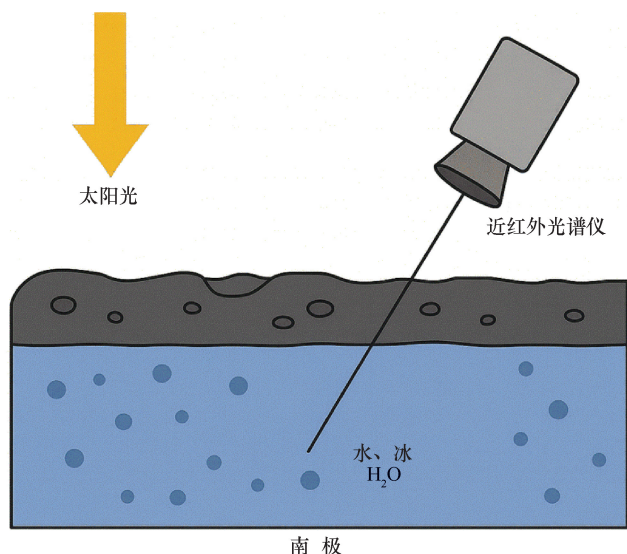


图4 近红外光谱法原理

Fig. 4 Principle of near-infrared spectroscopy

含量。例如, 水在红外光谱中具有五个典型吸收带, 这为定量分析提供了可能。综合 Cassini、Deep Impact 和 Chandrayaan-1 等多次观测结果, 可以看出水的分布具有纬度依赖性, 呈现由低纬度向极区富集的趋势, 并与温度和物质成分密切相关。

然而, 红外光谱数据的解释仍存在一定争议, 特别是在热辐射校正方法上。改进后的热模型显示, 月球两极约 3.5% 的永久阴影区含有水冰, 其中约 30% 可能以“脏冰”的形式与风化层混合存在。这提示红外光谱法虽能直接识别水合物特征, 但仍需与热环境建模和其他探测方法结合, 才能更准确约束水冰的真实丰度和赋存状态。

2.1.3 雷达极化成像

雷达极化成像是研究月球极区水冰赋存状态的另一重要手段, 其核心参数为圆极化比 (Circular Polarization Ratio, CPR)。在光滑表面, 入射与散射回波的极化差异较大, 而在粗糙表面或高介电常数物质 (如水冰) 存在时, CPR 值通常升高, CPR 被广泛用作判别月球表面粗糙度与潜在水冰分布的重要指标。早期, Arecibo 天文台的地基雷达观测就曾在极区永久阴影区识别出高 CPR 信号, 引发了关于冰存在的讨论。然而, 这类信号并非水冰所独有, 复杂地形和风化层粗糙度也会导致类似效应, 从而增加了解释的不确定性。为提高探测精度, NASA 的 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 搭载了 Mini-RF 仪器, 该设备具备混合双极化观测能力, 可计算斯托克斯参数并提取 CPR 特征, 从而对极区进行系统性成像分析^[39]。以 Cabeus 陨石坑为代表的多个区域被多次观

测, 结果显示在小双基地角条件下, 局部区域的 CPR 值高于周边, 表现出与水冰存在相关的典型响应模式。这些结果与理论模拟和其他任务的观测相互印证, 进一步支持了永久阴影区内存在埋藏冰的可能性^[40]。

总体而言, 雷达极化成像能够探测到数米至数十米深度范围的地下结构, 是研究水冰分布的有效工具。其优势在于能够穿透表层风化层, 识别潜在的埋藏冰, 而不仅限于表层。但由于 CPR 信号存在非唯一性解释, 单一雷达结果仍不足以完全确认水冰, 需要与热环境模型、光谱探测和撞击实验等多源数据结合, 才能更可靠地约束月球极区水冰的丰度与空间分布。

2.2 试验验证与建模分析

2.2.1 撞击羽流分析

撞击羽流分析为确认月球极区永久阴影区水冰的存在提供了直接证据。其基本思路是利用高速撞击将冷阱内可能存在的水冰与挥发物抛射到可观测高度, 并通过光谱仪对羽流进行成分分析。与遥感方法相比, 这种方式能够直接识别物质组分及丰度, 是对间接探测的重要补充。

2009 年实施的 LCROSS 任务是最具代表性的案例。HAYNE 等^[41]在撞击产生的羽流中, 在整个 4 分钟的观测窗口内检测到多种水相关信号, 包括 OH (309 nm) 发射、矿物结合 OH (1.4 μm)、金属结合 OH (2.2 μm)、结合 H₂O (1.9 μm), 以及 1.5 μm 和 2 μm 吸收带位置所对应的冷结晶水冰。EKE 等^[42]进一步分析表明, 撞击区域含有大量水和挥发物, 证实了永久阴影区内存在水冰。

后续研究对撞击羽流进行了深入解读。FELDMAN 等^[43]通过地基成像时间序列结合中子探测结果, 发现两极存在水冰的证据。FELDMAN 等^[44]基于 LCROSS 光谱数据, 估算羽流中水蒸气和水冰总量达 155 ± 12 kg, 对应撞击点月壤中水冰浓度约为 $(5.6 \pm 2.9)\%$ 。MITROFANOV 等^[45]利用 LRO/LAMP 的紫外与近红外观测, 识别出羽流中羟基化合物的光谱特征及 OH 发射谱线, 直接确认 Cabeus 陨石坑内水冰的存在。ENNICO-SMITH 等^[46]通过对溅射物的进一步分析, 也得出了水冰丰度的定量结论。

LCROSS 撞击羽流分析不仅为月球南极水冰存在提供了直接证据, 而且揭示了多种挥发物的共存特征, 表明冷阱保存的物质成分复杂。这一结果完善了“轨道探测-撞击验证”的证据链, 为未来极区原位取样和利用研究奠定了坚实基础。

2.2.2 热环境建模与微冷阱分析

热环境建模与中子探测在理解月球极区冷阱的形成机制和水冰保存条件方面发挥了关键作用。基于 LRO 数据的建模结果显示, 极区冷阱的分布远比早期认识复杂。ENNICO 等^[47] 提出大量此前未被识别的小尺度“微冷阱”增加了月球的冷阱面积, 总面积约 40 000 km², 其中约 60% 位于南极, 约占永久冷阱总面积的 10%~20%。这些微冷阱的存在表明, 水的捕获与保存机制可能比预期更加高效, 也为未来水资源探测提供了更丰富的目标区域。

中子光谱探测结果进一步印证了冷阱与氢丰度之间的相关性。STRYCKER 等^[48] 利用 pixon 图像重建方法分析 Lunar Prospector 超热中子数据, 发现极地氢丰度集中于永久阴影区, 局部浓度可相当于约 1wt% 水。COLAPRETE 等^[49] 通过热中子与快中子联合分析发现, 极区多个 30 km 级阴影陨坑内超热中子计数率明显下降, 而快中子通量无明显变化, 符合埋藏于 40 cm 厚干燥风化层下水冰的模型, 推算两极可能各含约 3×10⁹t 水冰。吴言蔚等^[50] 利用 LRO/LEND 的准直中子数据确认了南极多个通量抑制区, 揭示出表层氢元素存在富集, 空间分辨率可达 10 km 量级。

在理论与模型层面, 学者不断完善对冷阱形成和稳定性的理解。王鹏伟等^[51] 指出, 微冷阱是否能长期保存冰是一个可检验的假设。如果在光照表面下发现冰透镜, 可能意味着它们是喷射沉积与地形扩散掩埋的遗迹, 暗示月球可能经历过突发式的水输入事件。COSTELLO 等^[52] 通过热物理模型研究了地形粗糙度、辐射平衡与热传导对冷阱稳定性的影响, 分析了不同环境下冰的分布与稳定性, 为极区冰的理论研究提供了方法参考。

基于光谱数据的反演为冷阱中冰的丰度提供了量化约束。RUBANENKO 等^[53] 结合光谱模型和 LAMP 的“off-band/on-band”反照率比值, 推算温度低于 110 K 的冷阱若冰与风化层混合, 其质量浓度约为 0.1%~2.0%; 若为纯冰暴露, 则局部 250 m 尺度区域覆盖率可达 10%。进一步研究显示, 从 1 km 至小于 <1 cm 的不同尺度阴影均可能成为冷阱, 尤其是微冷阱增加了月球的水捕获面积。尽管直径小 1 m 的微冷阱仅占冷阱总面积约 2%, 对应潜在体积约 10⁻⁵, 但因数量庞大, 仍可能对整体水保存产生重要贡献。

早期的理论研究也为冷阱模型提供了物理依据。HAYNE 等^[54] 基于冷阱与稀薄大气条件提出的挥发物稳定性模型表明, 水在冷阱中是相对稳定的, 其存在可反映月球化学演化过程。ZWIERZYŃSKI 等^[55] 的建

模结果显示, 两极超热中子计数率降低的最佳解释是氢的存在, 平均丰度约 100~150 ppm, 被 10±5 cm 的干燥风化层覆盖, 而南极部分区域丰度甚至可能达到 1 700 ppm (约 1.5 ± 0.8 wt% H₂)。在此基础上, WATSON 等^[56-58] 利用 LunaH-Map 轨道数据和数值模拟生成高分辨率中子计数图, 对 Lunar Prospector 数据进行了再分析, 进一步约束了永久阴影区内潜在的水当量氢分布。

总体来看, 热环境建模、中子观测与微冷阱研究相互印证, 揭示了从千米级陨坑到厘米级微冷阱的多尺度水冰保存机制。这些研究不仅丰富了对冷阱分布和稳定性的认识, 也为未来极区原位探测与资源利用奠定了理论和实验基础。

2.3 原位探测与验证技术

在地外水冰探测研究中, 地球上的天然气水合物探测为理解潜在的水冰赋存状态提供了重要类比。吴庐山等^[59] 通过钻孔沉积物的地球化学指标推测水合物的存在, 识别信号包括: 沉积物顶空气中甲烷的高异常, 孔隙水中硫酸盐浓度呈现陡峭梯度及浅层的硫酸盐-甲烷界面(SMI), 以及 Cl⁻ 浓度下降同时伴随 δ¹⁸O 与 D 同位素组成升高等。这些方法显示了通过综合气体异常、离子分布与稳定同位素变化来约束水合物存在的可行性, 也为月球极区冰的探测提供了潜在的地球化学类比思路。

与此同时, 未来月球极区任务规划了多种原位探测方案, 以更直接地揭示水冰及挥发物的含量、组成与成因。李想等^[60] 总结了国际上正在筹划的代表性任务。例如, 美国的 VIPER 任务拟采用近红外挥发分光谱仪与月表挥发分质谱仪, 获取水冰的分布和丰度信息; 欧洲的 LUVMI-X 配备了激光烧蚀分析仪和浅层月壤挥发物采样分析仪, 用于对月壤中的冰与挥发物进行原位测量; 俄罗斯的 Luna 系列则计划利用激光电离飞行时间质谱仪和 ProSPA 挥发物分析仪, 以开展水冰成分和来源研究。这些仪器从不同角度切入, 能够在成分、丰度、来源和地质背景等方面提供互补信息, 为理解月壤水冰提供全面数据支持。月球南极水冰探测方法如图 5 所示。

3 典型探测任务与成果

月球极区水冰探测作为月球科学与深空探测的重要方向, 历经二十余年的任务积累, 逐步从“氢异常的间接线索”发展到“多源观测的综合验证”与“撞击实验的直接证据”。下文选取 Lunar Prospector、Chandrayaan-1/M³、LRO 与 LCROSS 四个关键任务,

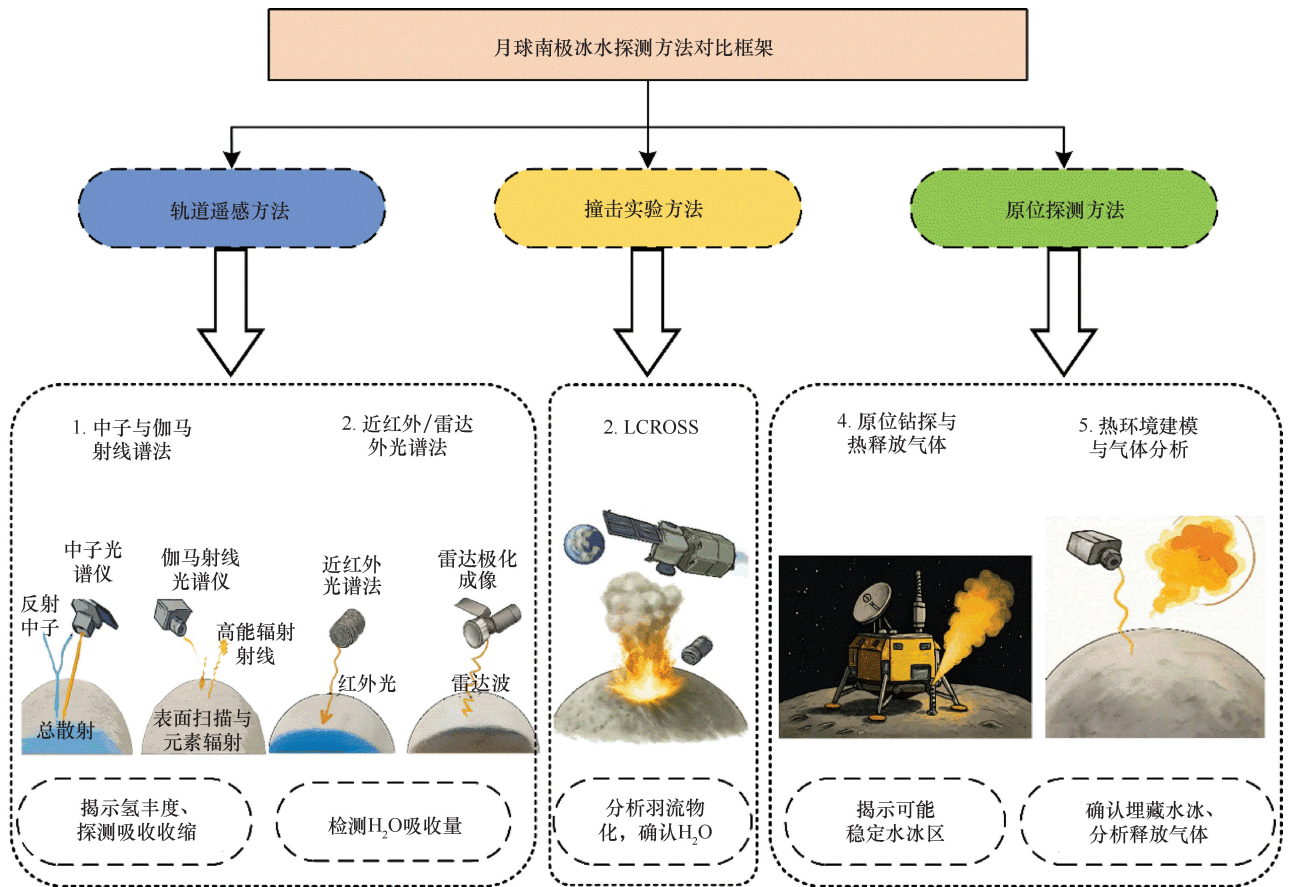


图 5 月球南极水冰探测方法对比框架

Fig. 5 Comparative framework of detection methods for water ice at lunar south pole

表 2 主要国际任务与成果

Table 2 Key international missions and achievements

任务名称	时间	方法/载荷	关键成果
Lunar Prospector	1998 年	中子光谱仪	首次发现极区氢丰度异常
Chandrayaan-1/M ³	2008 年	Moon Mineralogy Mapper (M ³) 近红外高光谱成像仪	在南极 PSRs 识别水冰吸收特征
LRO	2009 年至今	Diviner (红外辐射计)、Mini-RF (合成孔径雷达)、LAMP (紫外光谱仪) 等多载荷协同探测	提供温度、雷达极化、紫外反照率数据
LCROSS	2009 年	撞击实验与可见光/紫外/近红外光谱分析	确认撞击羽流中含 5.6wt% 水冰及挥发物
PLO / ShadowCam	2022 年至今	ShadowCam 超弱光成像仪 (灵敏度为 LRO/NAC 的 200 倍)	未观察到大面积裸露冰, 表面裸冰可能较少或被覆盖
Lunar Flashlight	2022—2023 年	四波段近红外激光反射计 (主动光谱探测)	在轨技术验证成功, 方法成熟
Chandrayaan-3	2023 年	ChaSTE (热探针)、LIBS (激光诱导击穿光谱仪)、APXS (X 射线光谱仪) 等原位载荷	测获表层温度剖面 (峰值达 355 K) 与元素组成 (如硫)
SLIM	2024 年	高精度视觉导航相机与 LEV-1/LEV-2 微型巡视器	实现米级精度着陆, 展示微型巡视器移动与避障能力
CLPS / VIPER	2024—2025 年	VIPER: 挥发物原位巡视车 (搭载 NIRVSS、MSolo 等光谱与质谱仪); CLPS: 商业载荷服务平台	VIPER 任务调整; IM-1 成功着陆

回顾其探测手段、主要发现及科学意义。主要国际任务及其成果总结如表 2 所列。

3.1 Lunar Prospector (1998 年)

1998 年, NASA 发射了 Lunar Prospector (LP) 环月探测器, 这是首次将中子光谱仪应用于月球极区氢分布的探测任务, Lunar Prospector 任务概述如图 6 所

示。LP 搭载的中子探测仪 (LPNS) 观测到月球南北极区域存在明显的慢中子通量减少, 表明这些区域氢丰度相对升高^[61]。这一结果直接支持了极区永久阴影陨坑中可能保存水冰或氯化物的推测, 是月球水冰研究的里程碑。

LP 的观测具有重要科学意义。一方面, 它首次

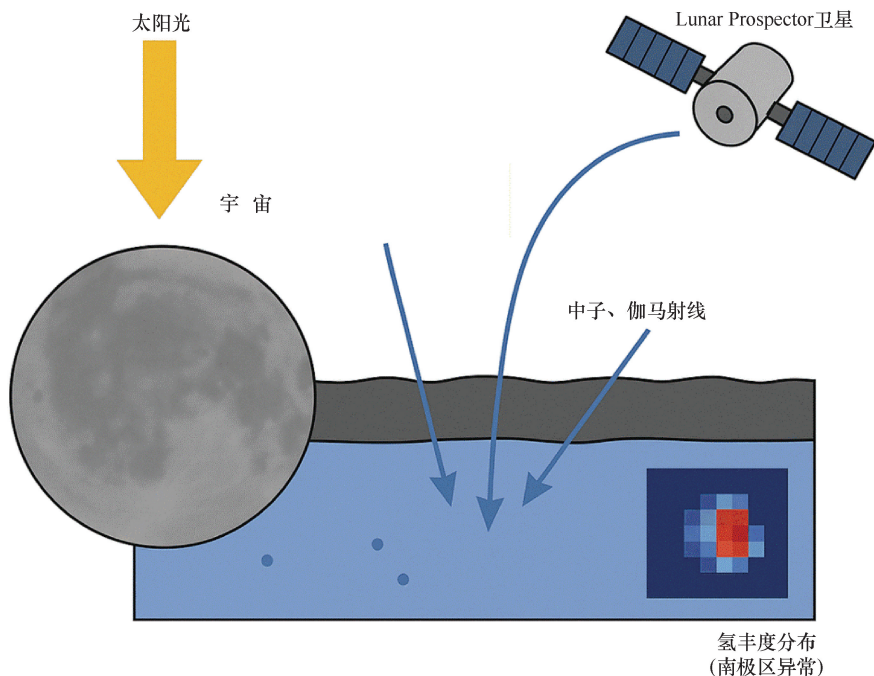


图6 Lunar Prospector 任务概述

Fig. 6 Overview of Lunar Prospector mission

在全球尺度上确认了极区氢的空间异常，为后续 Chandrayaan-1、LRO 等任务提供了坚实的科学动机；另一方面，它揭示了水冰可能以非均匀的方式分布于极区，显示极区环境在挥发物捕获与保存方面的独特性。然而，LP 的观测分辨率有限（约 45 km），只能提供区域平均值，无法解析小尺度冷阱或明确氢的赋存形式。因此，虽然 LP 成果不能直接证明分子态水冰的存在，但它为“冷阱假说”提供了最早的观测支持，并奠定了后续任务深入研究的方向。

3.2 Chandrayaan-1/M³ (2008 年)

2008 年，印度发射的 Chandrayaan-1 搭载了由美国研制的 Moon Mineralogy Mapper (M³) 高光谱成像仪，这是首次对月球表面开展高光谱反射测量。M³ 数据在南极永久阴影区 (PSRs) 中清晰识别出 1.0 μm、1.25 μm 和 1.5 μm 的水冰特征吸收带^[62]。与 Lunar Prospector 提供的间接氢丰度信息不同，M³ 的结果为月球极区水冰存在提供了直接的光谱学证据，图 7 为 Chandrayaan-1 任务和 M³ 光谱图。

进一步的分析显示，这些水冰并非以大块形式存在，而更可能是以细小颗粒的形态分布，或

与月壤混合形成“脏冰”状态，并主要集中在部分永久阴影陨坑的表层。这一发现不仅在观测手段上与中子光谱互为补充，而且在证据链上加强了极区水冰的存在性。

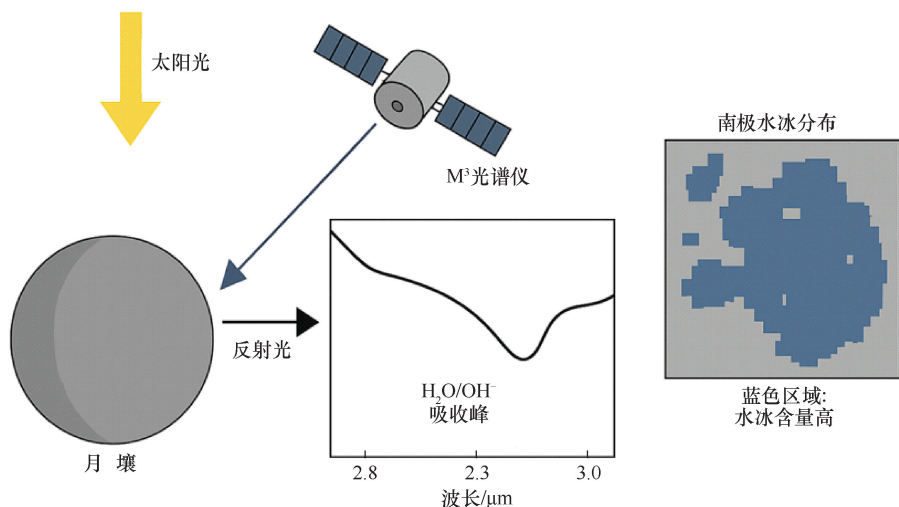
然而，M³ 光谱结果也存在一定的不确定性。例如，月表空间风化作用可能改变吸收特征的深度与形态，而表面温度的变化亦可能对 1~2 μm 波段的水合物吸收带产生干扰。这些因素在一定程度上增加了对水冰丰度和分布的解释难度。

总体而言，Chandrayaan-1/M³ 的观测首次提供了直接的光谱证据，表明极区永久阴影陨坑中确实存在表层水冰。这一成果在证据链上紧密衔接了 Lunar Prospector 的氢丰度观测与后续 LRO/LCROSS 的验证，为月球水冰探测研究迈出了关键一步。

3.3 Lunar Reconnaissance Orbiter (2009 至今)

2009 年，NASA 发射的 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 至今仍在运行，为月球极区水冰探测提供了前所未有的多源数据支持，LRO Mini-RF 雷达数据如图 8 所示。LRO 搭载的多种科学仪器在温度、地形、雷达、光谱四个方面取得了突破性进展。

Diviner 红外辐射计首次绘制了极区的表面温度分布，发现部分永久阴影区的温度可低至 40~60K，为水冰的长期稳定保存提供了热环境依据。LOLA 激光高度计则建立了高精度的极区地形模型，明确了永

图7 Chandrayaan-1 任务和 M³ 光谱数据Fig. 7 Chandrayaan-1 mission and M³ spectral data

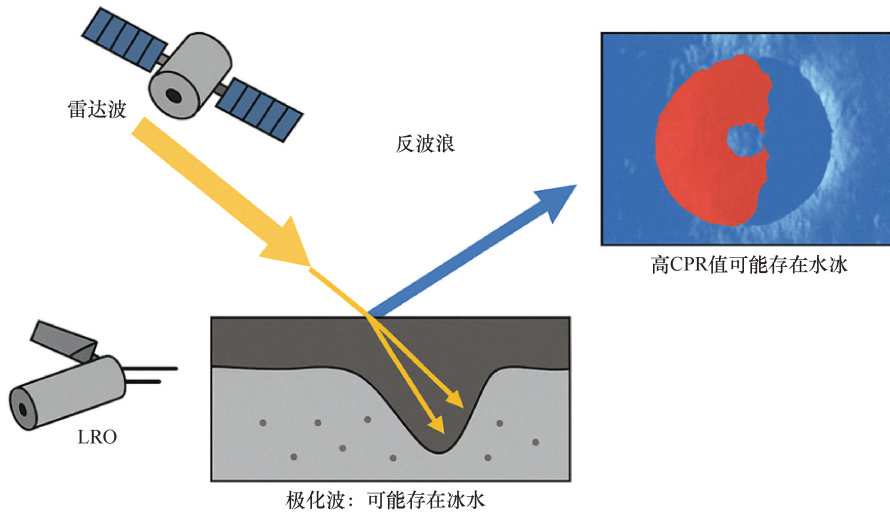


图8 LRO Mini-RF 雷达数据

Fig. 8 LRO Mini-RF radar data

久阴影区的分布范围与几何形态, 为后续任务的着陆点选择与科学探测提供了关键参考^[63]。

在遥感探测方面, Mini-RF 合成孔径雷达在部分极区陨坑中探测到高圆极化比(CPR)信号, 被部分研究解读为水冰存在的迹象^[64]。然而, 也有学者指出高 CPR 值同样可能源自表面粗糙度或岩石堆积效应, 导致其解释存在歧义^[65]。另外, LAMP 紫外光谱仪通过测量永久阴影区的紫外反射率, 发现其反照率特征与冰霜分布趋势一致, 为表层霜层的存在提供了观测支持^[66]。

总体而言, LRO 通过多载荷的协同观测, 建立了涵盖热环境、地形约束、雷达散射特性与紫外光学特征的综合分析框架, 极大地推动了人们对极区环境与水冰分

布的认识。然而, 由于各探测手段在敏感深度和空间分辨率上存在差异, 数据解释不可避免地具有多解性, 为未来任务结合更高精度的原位探测加以验证。

3.4 LCROSS(2009年)

为验证遥感与轨道光谱探测的推测, NASA 于 2009 年实施了 Lunar Crater Observation and Sensing Satellite(LCROSS) 撞击实验。该任务利用上级火箭和观测器相继撞击月球南极 Cabeus 陨石坑, 产生的羽流被多台遥感光谱仪捕获。分析结果显示, 羽流中含有约 5.6wt%的水冰, 以及羟基(OH)、氨(NH₃)、二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)等多种挥发性物质^[67]。

LCROSS 的成果是迄今为止最直接、最确凿的月球极区水冰证据之一, 图 9 为 LCROSS 撞击实验羽流

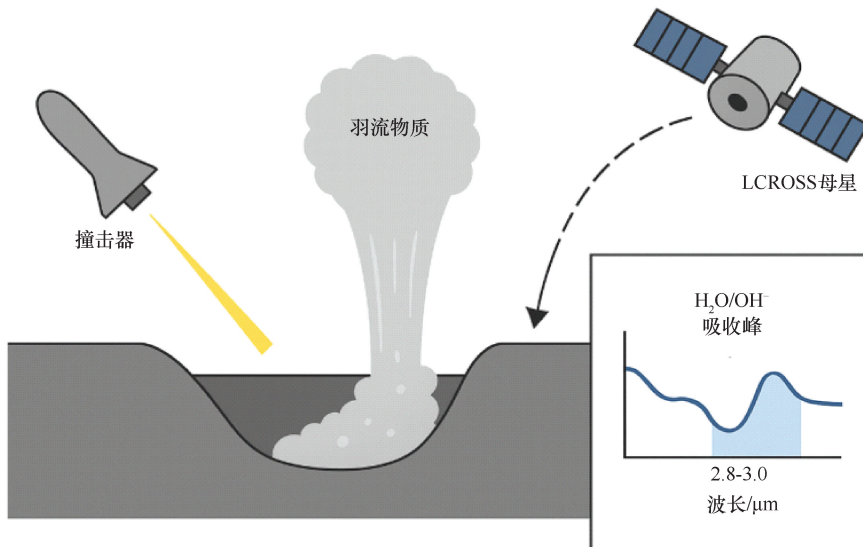


图9 LCROSS 撞击实验羽流数据

Fig. 9 LCROSS impact experiment ejecta data

数据。它不仅首次在原位尺度上确认了永久阴影区 (PSRs) 中水冰的存在, 还揭示了水冰与多种挥发物的伴生关系, 表明极区环境可能保存了一系列复杂的挥发物沉积。这一发现对理解月球水循环与外源物质累积机制具有重要意义, 为未来开展原位资源利用提供了关键的科学依据。

从研究脉络上看, Lunar Prospector 首次揭示了极区氢丰度异常, Chandrayaan-1/M³ 提供了直接的光谱学证据, LRO 通过多载荷协同观测实现了多维度综合分析, 而 LCROSS 撞击实验则以最直接的方式确认了水冰与伴生挥发物的存在。四个典型任务共同构建了从“假设提出—间接观测—多源验证—直接证据”的完整研究链条, 为未来探测和月球资源评估奠定了坚实的基础。

3.5 最新国际任务进展

近年来, 国际月球任务的快速发展, 特别是在月球极区水冰探测领域, 提供了更加精确和多维度的数据。这些任务包括: KPL0 (韩国月球探测器)、Lunar Flashlight (美国)、Chandrayaan-3 (印度)、SLIM (日本)、以及 CLPS 计划 (NASA) 等, 均在月球南极水冰探测中发挥了重要作用, 推动了对月球极区环境的认知, 并为未来月球资源利用提供了关键基础。

3.5.1 KPL0/ShadowCam (2022 至今)

韩国发射的 KPL0 (Korea Pathfinder Lunar Orbiter) 搭载了专为月球极区设计的高灵敏度成像仪 Shadow Cam。相较于 LRO/NAC, Shadow Cam 的灵敏度提高了 200 倍, 能够在极区“二次照明”条件下捕捉更精细的表面特征^[68-69]。最近的影像数据显示,

月球南极部分区域, 尤其是 Cabeus 陨坑, 高反照率区域并不像预期的那样普遍, 这一发现可能挑战了此前关于裸露水冰分布的假设^[70-71]。Shadow Cam 提供的数据对修正现有的月球水冰分布模型具有重要意义, 并为后续任务, 如 Lunar Flashlight 的激光反射方法, 提供了验证支持。KPL0 Shadow Cam 的成像数据如图 10 所示。

在 KPL0 任务中, 搭载的 Shadow Cam 仪器提供了大量月球南极区域的高分辨率成像数据, 特别是在 Cabeus 陨坑区域。这些数据对科学研究具有重要意义, 具体表现在以下几个方面。

(1) 分辨率和灵敏度提升: Shadow Cam 的灵敏度相比 LRO/NAC 提高了 200 倍, 能够在极区低光照条件下精确捕捉月球表面的微小特征。这使得 Shadow Cam 能够探测到月球南极区域微弱的反射信号, 尤其是在“二次照明”条件下。

(2) 高反照率区域分布: 最新影像数据显示, 在月球南极的部分区域, 特别是 Cabeus 陨坑, 较为广泛的高反照率区域并不常见。这一发现与之前关于月球南极裸露水冰分布的假设相矛盾, 表明水冰的分布可能不像先前认为的那样广泛。

(3) 对水冰分布模型的影响: Shadow Cam 的影像数据对修正现有的月球水冰分布模型具有重大意义。数据提供了更精确的水冰存在区域定位, 有助于科研人员重新评估月球南极水冰的分布范围和赋存特征。

(4) 数据验证与任务验证: Shadow Cam 的数据不仅有助于完善月球水冰分布模型, 还为后续任务 (如

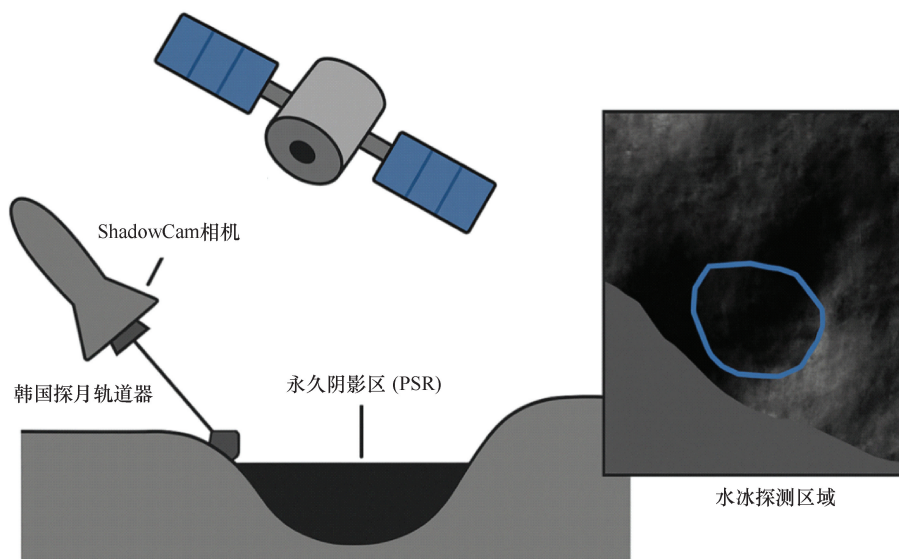


图 10 KPL0 Shadow Cam 成像

Fig. 10 KPL0 Shadow Cam imaging

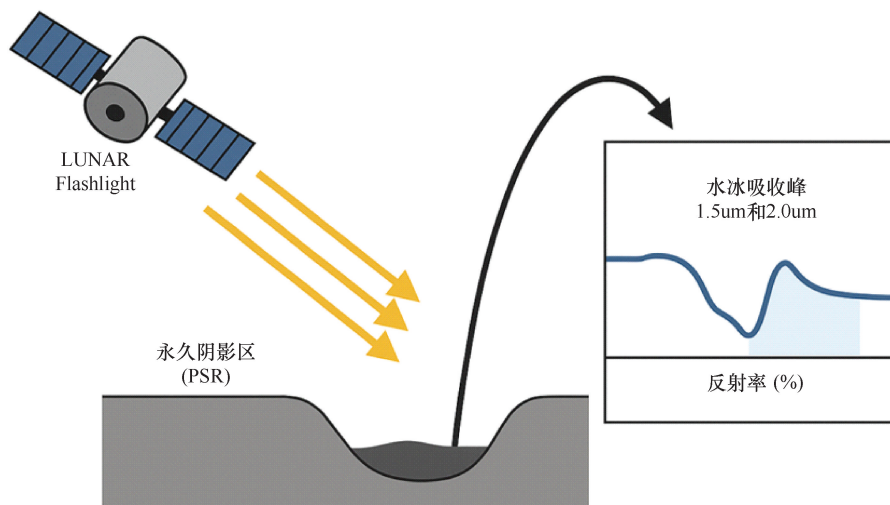


图 11 Lunar Flashlight 激光反射法

Fig. 11 Lunar Flashlight laser reflection method

Lunar Flashlight 的激光反射方法) 提供了验证支持。Lunar Flashlight 任务计划利用激光反射技术进一步探测月球南极水冰, 而 Shadow Cam 的影像数据为这一方法提供了初步验证。

这些新发现和数据为进一步理解月球南极水冰的分布和特性提供了重要依据, 并为未来的月球探测任务提供了宝贵的参考。

3.5.2 Lunar Flashlight(2022—2023 年)

美国的 Lunar Flashlight 任务原计划通过四波段近红外激光($1.064\ \mu\text{m}$) 主动照射月球极区的永久阴影区(PSRs), 并通过测量反射回来的光谱信号探测水冰的分布^[72-74]。Lunar Flashlight 的激光反射方法如图 11 所示。尽管由于推进系统故障, 该任务未能进入月球轨道, 但在飞行阶段, 激光反射计的技术已成功验证^[75-78]。这一技术验证为未来类似的小型任务提供了宝贵的经验, 并为月球极区水冰探测技术的发展做出了重要贡献。

尽管任务未能完成对月球南极的完整探测, 但在飞行阶段, Lunar Flashlight 任务成功验证了其近红外激光反射计的工作原理和技术可靠性。反射计能够稳定捕捉反射信号, 在深空环境中展现了较高的探测灵敏度和准确性。此外, 反射信号的测试结果表明, 激光反射计能够在月球极区低光照条件下有效地探测到月球表面微弱的反射信号, 验证了激光反射技术的有效性和稳定性。

Lunar Flashlight 任务的验证数据对水冰探测具有重要意义。特别是在月球南极永久阴影区, 激光反射技术展现出强大的应用潜力, 能够有效探测水冰的分布。尽管未能完成全部探测任务, 该技术的成功验证

为未来月球南极水冰探测提供了有力的技术支持和实践经验。

此外, Lunar Flashlight 任务的成功验证还为小型深空探测任务提供了重要的技术经验, 展示了低成本、紧凑型探测器在复杂深空环境中的应用潜力, 为今后类似任务的设计和实施了宝贵的参考。

3.5.3 Chandrayaan-3(2023 至今)

印度的 Chandrayaan-3 任务于 2023 年成功着陆月球南极近地表, 成为首次在南极高纬度区域实施着陆探测的任务^[79]。该任务搭载的 ChaSTE 热探针成功测量了月球表层至 10 cm 的温度剖面, 结果显示, 月球表面微地形(如坡度)对温度分布有明显影响, 特别是在一些高坡区域, 表面峰值温度可达到 355 K, 这揭示了月球极区水冰的稳定性受地形因素的直接影响^[80-86]。虽然任务未能直接探测到水冰, 但 ChaSTE 提供的精确温度数据明显缩小了现有水冰分布模型的不确定性, 为水冰可能存在的区域提供了更加明确的温度依据。

LIBS(激光诱导击穿光谱)和 APXS(α -粒子 X 射线光谱)仪器成功确认了月壤中硫等元素的存在, 这些化学数据为理解水冰与其他挥发性物质的相互作用提供了重要线索, 进一步支持了月球南极水冰研究的化学背景。尽管没有直接探测到水冰, Chandrayaan-3 的结果为现有水冰分布模型的修正提供了有力的数据支持, 特别是在月球南极的高纬度区域, 通过精确的温度数据和化学成分分析, 任务为未来的水冰探测提供了更加明确的理论依据。

这些数据结果进一步推动了对月球南极水冰分布

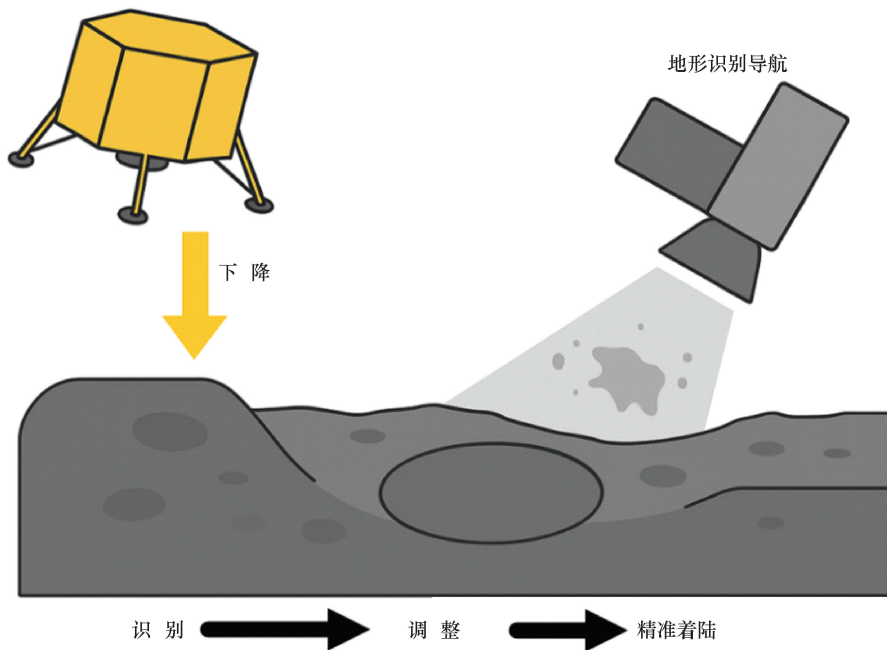


图 12 SLIM 高精度着陆技术示意

Fig. 12 Schematic diagram of SLIM high-precision landing technology

及其稳定性的理解, 为未来探测任务和资源开发提供了宝贵的参考。

3.5.4 SLIM(2024 年)

日本的 SLIM(Smart Lander for Investigating Moon) 任务计划于 2024 年执行, 旨在实现月球表面的高精度米级着陆。SLIM 任务的成功将为月球极区的高风险着陆提供新的技术路径, 尤其是在月球极区狭小的“阳光窗口”和复杂地形中^[87-89]。尽管该任务的主要目标并非水冰探测, 但其精确的着陆技术和微型巡视器的能力, 将对极区水冰探测任务中的地形识别和避障能力产生重要影响。SLIM 的高精度着陆技术如图 12 所示。

SLIM 任务的核心技术创新之一是其米级精度着陆技术。该技术采用先进的视觉导航系统, 通过实时拍摄月面图像并修正着陆轨迹, 确保在复杂地形中实现精准着陆。特别是在月球极区, 受限于狭小的阳光窗口和恶劣的地形条件, SLIM 能够在有限的光照条件下完成精确着陆, 从而避免地形复杂性带来的风险。此外, SLIM 任务还将搭载微型巡视器, 用于执行地形识别与避障任务。这些微型巡视器将在月球表面规划探测路径, 避开可能的障碍并保障探测器的安全, 尤其是在复杂的月球极区地形中。

尽管 SLIM 任务本身并不以水冰探测为主要目标, 其技术的成功实施将在未来的水冰探测任务中发挥重要作用。精确的着陆技术和微型巡视器的结合将

使未来的极区水冰探测任务能够在月球南极等复杂区域进行更精细的地形分析, 为科学家提供更加准确的水冰分布数据, 并为月球极区的资源开发提供关键的技术支撑。

这些技术进展不仅为 SLIM 任务本身提供了重要的数据和经验, 也为月球极区水冰探测任务铺平了道路, 展示了 SLIM 在高精度着陆和地形识别方面的潜力。

3.5.5 CLPS 与 VIPER(2024—2025 年)

CLPS(Commercial Lunar Payload Services) 是 NASA 的一项计划, 旨在通过商业伙伴提供月球载荷服务^[90]。其中, VIPER(Volatiles Investigating Polar Exploration Rover) 任务原计划于 2024 年执行, 负责对月球南极的水冰进行原位探测。然而, 随着任务计划的调整, VIPER 的执行受到影响, NASA 正通过 CLPS 与商业公司合作实现南极任务的其他目标。与此同时, IM-1(由 Intuitive Machines 执行) 于 2024 年进行月球软着陆, 验证私营平台的月球交付能力, 这为极区的水冰探测任务提供了技术支持。

近年的国际任务表明, 月球极区水冰探测正在进入一个新的阶段。这些任务从方法验证(如 Lunar Flashlight), 到原位数据采集(如 Chandrayaan-3), 再到高精度着陆技术(如 SLIM), 都为月球水冰的研究提供了强有力的支持。这些成果不仅扩展了现有的探测技术, 也为未来月球资源利用(ISRU)奠定了基础,

表3 月球水冰探测的主要挑战与应对策略

Table 3 Main challenges and countermeasures for lunar water ice detection

挑战类型	具体表现	未来发展方向
空间分辨率 探测深度 数据多解性 技术验证不足	中子光谱分辨率低, 难以定位小尺度冷阱 光谱方法仅探测表面, 难以探测深埋水冰 雷达 CPR 与粗糙度干扰, 光谱受热校正影响 小型任务成功率有限, 如 Lunar Flashlight 故障	提升分辨率(如 ShadowCam, VIPER 原位测量) 雷达与钻探结合, 提升深层探测能力 多源数据融合, 结合建模与实验室对照 提升小型探测器的可靠性和冗余设计

逐步构建了多源验证、原位探测和高精度探测的综合框架。

4 技术挑战与发展趋势

尽管近年来月球南极水冰探测取得了诸多突破性进展, 但仍面临技术手段有限、数据解释复杂、极端环境制约明显以及资源利用潜力不明确等问题。这些挑战不仅影响当前对水冰存在状态与分布特征的科学认知, 还直接决定了未来资源开发的可行性。因此, 总结现有问题并展望技术发展趋势, 对于后续任务的科学设计和工程规划具有重要意义。月球水冰探测的主要挑战与应对策略如表3所示。

4.1 空间分辨率与探测深度不足

现有轨道遥感技术的空间分辨率主要处于数十至数百米量级, 而中子探测器仅能反演米级深度的氢丰度分布, 难以满足对冰体三维赋存状态的解析需求。例如, Lunar Prospector 的中子光谱仪提供了极区氢元素的全球分布, 但其空间分辨率仅约 45 km, 无法准确界定富氢区的位置; LRO 搭载的 Mini-RF 虽然揭示了部分高 CPR 信号, 但其波段限制使得穿透深度有限, 难以确认冰的埋藏厚度。为了解决这些挑战, 未来技术发展的方向将主要集中在提升空间分辨率和拓展探测深度。

在提升空间分辨率方面, 未来将通过发展亚米级光学/红外成像载荷和新一代极区雷达系统, 以绘制更精细的冰分布图谱^[91]。具体实施过程中, 将启动高分辨率探测载荷的原型设计和验证, 采用先进的图像处理技术提升空间分辨率, 并针对极区的特殊环境进行优化。此外, 将与小型化传感器开发团队合作, 提升光学、红外和雷达成像的分辨率, 并结合新一代极区雷达系统进行优化。在数据处理方面, 将开发自动化处理平台, 处理高分辨率图像并准确标定水冰的分布, 确保数据的一致性和高效性。

为了拓展探测深度, 未来将结合低频合成孔径雷达(P-band)和浅层地震勘探等手段, 结合原位钻探实验, 构建“表层—近地表—地下”三维结构模型^[92-94]。这一发展将突破现有探测深度的限制, 使

得月球南极区域的水冰探测能够深入到地下。通过低频雷达与原位钻探技术的联合探测, 可以实现对地下水冰的深度探测, 进一步分析冰体的埋藏状态和稳定性。在实验阶段, 将进行小范围的低频雷达与地震勘探联合实验, 评估其在月球极区探测中的深度与精度。最终, 通过整合雷达和钻探数据, 将构建多层次的地下结构模型, 为水冰埋藏深度和分布提供更精准的估计。

4.2 数据解释歧义性

多源遥感数据虽为水冰探测提供了丰富的信息, 但其解释仍存在明显不确定性。例如, 高 CPR 值既可能由透明冰层产生, 也可能是粗糙地表散射所致; 近红外吸收带可能来源于 OH 基团或表面风化矿物的羟基, 而非真正的冰信号^[95]。LCROSS 撞击实验虽直接检测到水冰, 但其局部性结果无法代表整个极区。因此, 未来的研究需要在数据解释上克服这些歧义, 并提高水冰探测的准确性。

为解决这一问题, 未来的发展方向主要集中在多源数据的融合和人工智能辅助的数据处理上。通过将中子通量、红外光谱、雷达回波和紫外反照率等不同物理敏感量进行联合反演, 可以减少单一数据带来的歧义^[96-98], 并获得更加全面的水冰存在区域分析。具体实施路径包括建设多源数据的协同处理平台, 将来自不同传感器的数据进行整合, 对水冰的存在区域进行多方验证。此外, 结合机器学习方法, 利用已有的观测数据训练模型, 对数据中的潜在歧义进行识别和纠正, 从而提升水冰探测模型的准确度^[99]。同时, 开发更为先进的反演算法, 以提高不同物理参数之间的关联度, 并实现数据的高效整合。

在人工智能与数据处理方面, 利用机器学习方法进行大规模观测数据的模式识别和不确定性分析将是未来的关键。通过使用现有任务数据训练人工智能模型, 可以提高对水冰分布的预测精度, 并对不同数据集进行交叉验证, 确保解读结果的准确性和可信度。这一过程不仅能减少数据的不确定性, 还能水冰探测提供更加可靠的支持。

表 4 极区环境对 ISRU 设备的关键挑战与应对策略

Table 4 Key challenges and countermeasures for ISRU equipment in polar environments

环境挑战	对设备/任务的影响	量化参数/效应	应对策略与任务案例
超低温 (40~110 K)	材料脆化、润滑失效、电子器件性能衰退、能源短缺	普通橡胶密封件在~150 K 以下失效; 锂电池容量衰减超 50%	采用特种低温材料与润滑剂; 使用同位素热源 (RHU/RTG) 为关键部件保温
月尘环境	磨损机械结构、堵塞过滤器、覆盖光学镜头与太阳能板、导致热控失效	月尘浓度可达 10^5 particles/m ³ ; 尖锐棱角状颗粒加剧设备磨损	表面防护: 采用低表面能防粘涂层。 主动清除: 设计负压吸尘系统, 在钻探取样口实时清除月尘
长期阴影 (能源)	太阳能供电中断, 任务寿命受限	极夜可持续数个地球月, 期间无光照	复合能源系统: 如 VIPER 任务采用“RTG+太阳能电池板”组合, 利用短暂光照为电池充电, 支撑阴影区作业
复杂地形	着陆风险高, 巡视器移动受阻, 影响探测范围。	坡度>15°即对多数巡视器构成移动挑战	高精度着陆: 采用 SLIM 任务的视觉导航技术, 实现米级精度着陆, 规避危险区 先进移动平台: 研发适应松软月壤和陡坡的步履式或轮步复合式移动系统

4.3 极端环境适应性

月球南极永久阴影区 (PSRs) 的极端环境——包括超低温 (40~110 K)、长达数月的极夜、高磨蚀性月尘以及复杂地形——对着陆器、巡视器及原位探测设备的电源、热控、结构、通信等分系统提出了极其严峻的挑战^[100-103]。传统依赖太阳能的探测器难以在此类区域长期生存。为实现极区水冰的就位探测与未来资源利用, 必须对环境影响进行量化分析, 并发展针对性的工程技术。表 4 系统总结了极区环境对 ISRU 设备的主要挑战及其应对策略。

4.3.1 能源系统多样化与热控优化

极区的能源供给是确保任务成功的关键。在极端环境下, 传统的太阳能依赖方式无法满足长时间运行需求, 因此, 未来的任务必须发展复合能源系统, 例如结合放射性同位素热电发生器 (RTG) 与太阳能电池的方案。这一方案能够确保能源的持续供应和高效利用。在实施方面, 需要开发并验证 RTG 与太阳能电池的复合能源系统, 其中 RTG 为月球探测器提供基础电力, 而太阳能电池则利用月球极区某些地区的短暂光照对电池进行充电。在设计过程中, 应考虑高效的电池管理系统, 使其能够根据不同的光照条件智能调节能源来源, 确保充电与放电的平衡, 从而实现稳定和持续的能源供应。

此外, 针对极端低温环境的挑战, 开发新型的低温绝热材料对于减少设备热损失至关重要。这些材料应具备极高的热隔离性能, 以确保核心部件在严寒环境下保持稳定温度。智能热控系统的研发也是解决这一问题的关键, 它能够自动调节热量分布, 确保系统在低温条件下的正常运作。借鉴 VIPER 等任务中的热能管理系统, 结合任务需求进行适当的改进, 以提高整体系统的热稳定性。

在低温环境下, 机械系统的设计和优化也必须针对极端条件进行特别考虑。选择适应低温环境的特种合金、复合材料及润滑剂至关重要, 这些材料和润滑剂能有效避免在极低温下发生脆性断裂或卡死。此外, 在机械系统的设计过程中, 结合低温测试实验, 确保所有关键部件在超低温环境下能够持续高效地运作, 以保证任务的顺利进行。

4.3.2 月尘防护与机械系统适应性

月尘是极区任务中的隐性威胁, 特别是对机械系统的损伤问题尤为突出, 因此, 防止月尘对钻探设备和其他关键系统的危害成为未来任务设计中的一项重要挑战。为此, 防尘技术的开发将结合嫦娥七号钻探系统的设计理念, 采用负压吸尘系统与低表面能防粘涂层相结合的防尘方案。在钻头旋转取样时, 负压气流将即时抽离产生的月尘, 并将其收集到专门容器中, 以防止月尘对仪器的污染。同时, 钻探装置表面将涂覆低表面能防粘涂层, 以减少月尘的黏附, 确保在长期操作过程中设备的良好工作状态。

此外, 防尘涂层与材料的优化也至关重要。所有关键设备 (包括采样器、钻探头和光学镜头) 表面都将施加专门的防尘涂层, 这些涂层不仅能防止月尘的附着, 还能降低月尘对表面材料的磨损。为了确保长期运行下防护效果的持久性, 必须开发能够适应极端低温和高磨蚀性的月尘防护材料。这些材料将保障设备在极端环境中仍能保持稳定性并有效防护月尘的侵害, 确保任务的顺利进行。

4.3.3 任务设计与导航系统的优化

月球极区复杂的地形为任务的设计与执行带来了巨大挑战, 特别是在着陆、巡视和数据传输方面。为了提高极区任务的可操作性和安全性, 未来任务将重点发展高精度自主着陆技术、极区中继通信星座和任

务设计优化^[104]。具体实施措施包括, 首先, 采用基于视觉导航的米级精度着陆技术, 这一技术已在日本 SLIM 任务中成功演示。针对月球南极的高风险着陆区域, 将优化视觉导航算法, 结合地形的实时分析, 确保在复杂地形中实现高精度着陆。在着陆过程中, 着陆器将利用激光雷达、视觉传感器和 IMU(惯性测量单元)等多种传感器配合, 确保其精确定位, 从而确保任务的成功。

此外, 为了克服月球南极永久阴影区(PSRs)内探测器与地球之间的通信障碍, 计划在月球南极地区建立高效的中继通信星座, 通过多个中继卫星提供稳定的通信支持。中继卫星将采用低轨道设计, 以提供高带宽、低延迟的通信链路, 确保任务期间数据的实时传输。这一星座的建立将有效解决极区任务的通信问题, 为后续探测任务提供持续的支持。

在任务设计方面, 优先选择极区的“日照峰”与 PSRs 交界地带作为着陆区, 以充分利用可用的光照资源, 同时兼顾科学价值和能源获取。在设计阶段, 进行详细的地形分析和环境评估, 确保在高风险区域能够安全着陆并展开科学探测。这一系列优化措施将大大提高极区任务的执行效率和安全性, 为月球探测任务提供坚实的技术保障。

4.4 资源可采性评估及多方法融合与任务协同

探测结果表明, 极区可能富含水冰的存在。然而, 水冰的“存在”并不等同于其“可利用性”。水冰资源的可采性不仅取决于其赋存状态、含量和纯度, 还与其埋藏深度密切相关。因此, 未来的研究将从简单的存在性研究转向更为复杂的可利用性评估。这一过程将涉及开发适应极区环境的水冰资源化技术, 并进行原位开采及挥发物收集实验, 以深入评估水冰的提取效率和可行性。

在实施过程中, 首先需要开发高效的水冰采集技术, 并在不同环境条件下测试其提取效率。通过这些实验, 可以更好地评估水冰在不同深度和环境条件下的可提取性。特别是结合原位采样与温度控制实验, 将进一步验证水冰在极端环境下的可利用性。此外, 随着技术的进步, 结合数值模拟和人工智能的应用, 将有助于更精确地预测不同区域的水冰分布, 从而为后续任务设计提供科学依据。

此外, 多方法数据融合与国际任务协同将对水冰资源可采性评估提供有力支持。通过跨学科的合作, 整合轨道遥感、原位探测和数值建模等多源数据, 能够构建更加精准的水冰分布预测模型。在实施过程中, 建立国际合作的数据共享平台至关重要, 该平台

将集成来自不同国家和任务的数据, 为资源评估和任务设计提供准确的数据支持。未来, 借助人工智能技术, 可以对大规模数据进行统一同化, 提升预测模型的精度与可靠性, 从而为月球极区水冰资源的开发与利用提供更加可靠的决策依据。

5 结论与展望

通过对月球南极水冰探测方法与典型任务成果的梳理, 得到以下几点结论。

(1) 水冰存在的多重证据已得到确立: 多项任务从不同尺度提供了证据链: Lunar Prospector 揭示了极区氢异常, Chandrayaan-1/M³ 识别了近红外吸收特征, LRO 提供了温度、地形、雷达和紫外数据的多维信息, LCROSS 撞击实验则直接确认了水冰与伴生挥发物的存在。这些成果共同构建了从间接观测到直接验证的完整逻辑体系。

(2) 探测方法各具优势与不足。中子和伽马射线探测适合区域尺度氢含量分析, 但分辨率有限; 红外光谱有助于识别水冰, 但受温度和风化干扰较大; 雷达探测具备穿透能力, 但易受表面粗糙度影响而产生假阳性; 撞击实验虽能提供直接证据, 但仅限于单点验证, 难以推广至极区整体。

(3) 极区环境有利于水冰长期保存但挑战巨大。永久阴影区温度可低至 40~110K, 冷阱效应使水冰与挥发物在地质时间尺度得以保存。然而, 极区的长暗期、极低温与复杂地形对电源、热控及任务实施提出了极高的工程挑战。

(4) 科学意义与应用价值并重。从科学角度, 水冰是研究月球热演化、外源物质输运及太阳风作用的重要证据; 从应用角度, 水冰作为原位资源可用于制取水与燃料, 为月球长期驻留与深空探测提供战略支撑。

随着月球南极水冰探测任务的不断推进, 未来的研究将呈现出如下主要发展趋势。

(1) 技术发展方向: 月球南极水冰的探测将从传统的“单点探测”模式逐步过渡到“轨道遥感-原位探测-模拟实验”深度融合的智能探测体系。此转变将使不同探测技术相互补充, 从而提供更全面的月球南极水冰数据, 特别是在空间分辨率、探测深度和数据精度方面。具体实施路径包括发展亚米级光学/红外成像载荷, 结合低频雷达和浅层地震勘探等技术, 提升空间分辨率和探测深度。通过多源数据融合平台, 实现不同探测手段的协同工作, 从而获得更加精确的水冰分布图。同时, 发展具备自主导航和精细采

样能力的月面探测器, 以实现月球极区复杂地形中的原位探测, 特别是在低温、低光照环境下的操作。此外, 结合轨道遥感、原位探测和数值模拟技术, 建立完整的水冰分布模型, 为水冰的资源化应用提供数据支持。

(2) 科学目标转变: 未来的研究将从“证实水冰的存在”转向“评估水冰的可利用性”。随着月球探测技术的进步, 水冰的研究不再局限于其存在与分布, 更将深入探讨水冰的提取性、长期稳定性及其在月球基地建设中的应用价值。具体实施路径包括研发高效的水冰采集技术与资源化系统, 进行原位开采与资源转化实验, 评估水冰在月球极端环境中的可提取性与稳定性。同时, 开展长期稳定性研究, 特别是针对月球南极水冰在低温环境中的保存问题, 为水冰的长期储存提供技术保障。

(3) 国际合作的重要性: 月球极区探测任务面临高成本和高技术风险等挑战, 因此, 通过国际合作可以实现资源共享、技术互补及风险共担。目前, 国际月球科研站、Artemis 计划等合作框架的推进为此类合作提供了有力平台。未来, 建立统一的科学目标、标准化的数据共享机制和联合任务实施框架将加速月球水冰认知与资源利用的进程, 最终为月球基地的选址与建设提供科学依据和定量支持, 助力人类在月球的长期驻留与深空探索的实现。

参考文献 (References):

[1] SCHÖRGHOFER N, RUFU R. Past extent of lunar permanently shadowed areas[J]. *Science Advances*, 2023, 9(37): 4302.

[2] BICKEL V T, MOSELEY B, LOPEZ-FRANCOS I, et al. Peering into lunar permanently shadowed regions with deep learning [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5607.

[3] SARGEANT H M, BICKEL V T, HONNIBALL C I, et al. Using boulder tracks as a tool to understand the bearing capacity of permanently shadowed regions of the moon [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(2): e2019JE006157.

[4] MAHANTI P, ROBINSON M S, HUMM D C, et al. Preliminary characterization of secondary illumination at shackleton crater permanently shadowed region from Shadow Cam observations and modeling[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2023, 40(4): 131-148.

[5] MCGILL G E. Morphology of lunar craters: A test of lunar erosional models[J]. *Icarus*, 1974, 21(4): 437-447.

[6] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, et al. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the lunar polar regions[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 479-482.

[7] PAIGE D A, WOOD S E, VASAVADA A R. The thermal stability of water ice at the poles of mercury[J]. *Science*, 1992, 258(5082):

643-646.

[8] SPUDIS P D, BUSSEY D B J, BALOGA S M, et al. Evidence for water ice on the Moon; results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(10): 2016-2029.

[9] HURLEY D M, SIEGLER M A, CAHILL J T S, et al. Surface volatiles on the moon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 787-827.

[10] FA W Z, WIECZOREK M A, HEGGY E. Modeling polarimetric radar scattering from the lunar surface: Study on the effect of physical properties of the regolith layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(E3): E03005.

[11] FARRELL W M, HURLEY D M, POSTON M J, et al. The young age of the LAMP-observed frost in lunar polar cold traps [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 8680-8688.

[12] STERN S A, COOK J C, CHAUFRAY J Y, et al. Lunar atmospheric H₂ detections by the LAMP UV spectrograph on the Lunar Reconnaissance Orbiter[J]. *Icarus*, 2013, 226(2): 1210-1213.

[13] MITROFANOV I G, ZEINYI L M, TRET' YAKOV V I, et al. Luna-25: The first polar mission to the moon [J]. *Solar System Research*, 2021, 55(6): 485-495.

[14] COLAPRETE A, EIPHIC R C, HEIDMANN J, et al. An overview of the lunar crater observation and sensing satellite (LCROSS) [J]. *Space Science Reviews*, 2012, 167(1): 3-22.

[15] HERMALYN B, SCHULTZ P H, SHIRLEY M, et al. Scouring the surface: Ejecta dynamics and the LCROSS impact event[J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 654-665.

[16] REISS P. Exploring the lunar water cycle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(52): e2321065121.

[17] HARPER L D, NEAL C R, POYNTER J, et al. Life support for a low-cost lunar settlement: No showstoppers[J]. *New Space*, 2016, 4(1): 40-49.

[18] FEGLEY B, SWINDLE T D. Lunar volatiles: implications for lunar resource utilization [J]. *Resources of Near-Earth Space*, 1993, 24(24): 367-426.

[19] SOWERS G F, DREYER C B. Ice mining in lunar permanently shadowed regions[J]. *New Space*, 2019, 7(4): 235-244.

[20] CRAWFORD I A, ANAND M, BARBER S, et al. Lunar resources [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 829-868.

[21] WANG C, ZHANG G Q, WANG Y H, et al. A review of lunar environment and in-situ resource utilization for achieving long-term lunar habitation[J]. *Galaxies*, 2025, 13(5): 103.

[22] SCHÖRGHOFER N, BENNA M, BEREZHNOY A A, et al. Water group exospheres and surface interactions on the Moon, Mercury, and Ceres[J]. *Space Science Reviews*, 2021, 217(6): 74-76.

[23] GLÄSER P, SANIN A, WILLIAMS J, et al. Temperatures near the lunar poles and their correlation with hydrogen predicted by LEND [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2020JE006598.

[24] WILCOSKI A X, HAYNE P O, ELDER C M. Thermal environments and volatile stability within lunar pits and caves [J]. *Journal of*

- Geophysical Research: Planets, 2023, 128(7): e2023JE007758.
- [25] PAIGE D A, FOOTE M C, GREENHAGEN B T, et al. The lunar reconnaissance orbiter diviner lunar radiometer experiment[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 125-160.
- [26] 季节, 张伟伟, 杨旭, 等. 月球极区水冰采样探测技术综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 101-113.
- JI J, ZHANG W W, YANG X, et al. Overview of water ice sampling and detection techniques in the lunar polar region[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 101-113.
- [27] 张玉征, 乔乐, 陈剑, 等. 月球南极阿蒙森(Amundsen)地区地质特征及演化历史研究[J]. 遥感学报, 2025, 29(2): 506-523.
- ZHANG Y Z, QIAO L, CHEN J, et al. Geological characteristics and evolution history of the Amundsen Crater at the south polar region of the Moon[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(2): 506-523.
- [28] 吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 223-231.
- WU W R, YU D Y, WANG C, et al. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar region exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 223-231.
- [29] SUNSHINE J M, FARNHAM T L, FEAGA L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact spacecraft[J]. Science, 2009, 326(5952): 565-568.
- [30] CLARK R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon[J]. Science, 2009, 326(5952): 562-564.
- [31] SCHULTZ P H, HERMALYN B, COLAPRETE A, et al. The LCROSS cratering experiment[J]. Science, 2010, 330(6003): 468-472.
- [32] 李雄耀, 魏广飞, 曾小家, 等. 极区月壤和水冰形成演化机制及物理特性研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 123-133.
- LI X Y, WEI G F, ZENG X J, et al. Review of the lunar regolith and water ice on the poles of the moon[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 123-133.
- [33] 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.
- [34] NOZETTE S, SPUDIS P D, ROBINSON M S, et al. Integration of lunar polar remote-sensing data sets: evidence for ice at the lunar south pole[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E10): 23253-23266.
- [35] PUTREVI D, TRIVEDI S, DAS A, et al. L-and S-band polarimetric synthetic aperture radar on Chandrayaan-2 mission[J]. Current Science, 2020, 118(2): 226.
- [36] NOZETTE S, SPUDIS P, BUSSEY B, et al. The lunar reconnaissance orbiter miniature radio frequency (Mini-RF) technology demonstration[J]. Space Science Reviews, 2010, 150(1): 285-302.
- [37] 梁雷, 郭华东, 李新武. 基于微波辐射计的南极冰盖冻融时空变化分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(2): 430-438.
- LIANG L, GUO H D, LI X W. Analysis of spatio-temporal variation of snowmelt in Antarctica derived from microwave radiometer data [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(2): 430-438.
- [38] 崔祥斌, 孙波, 田钢, 等. 冰雷达探测研究南极冰盖的进展与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 392-402.
- CUI X B, SUN B, TIAN G, et al. Progress and prospect of ice radar in investigating and researching Antarctic ice sheet[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 392-402.
- [39] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [40] HENDRIX A R, RETHERFORD K D, GLADSTONE G R, et al. The lunar far-UV albedo: indicator of hydration and weathering[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2012, 117(E12): 2012JE004252.
- [41] HAYNE P O, AHARONSON O, SCHÖRGHOFER N. Micro cold traps on the moon[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(2): 169-175.
- [42] EKE V R, TEODORO L F A, ELPHIC R C. The spatial distribution of polar hydrogen deposits on the Moon[J]. Icarus, 2009, 200(1): 12-18.
- [43] FELDMAN W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles[J]. Science, 1998, 281(5382): 1496-1500.
- [44] FELDMAN W C, MAURICE S, LAWRENCE D J, et al. Evidence for water ice near the lunar poles[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2001, 106(E10): 23231-23251.
- [45] MITROFANOV I G, SANIN A B, BOYNTON W V, et al. Hydrogen mapping of the lunar south pole using the LRO neutron detector experiment LEND[J]. Science, 2010, 330(6003): 483-486.
- [46] HAYNE P O, GREENHAGEN B T, FOOTE M C, et al. Diviner lunar radiometer observations of the LCROSS impact[J]. Science, 2010, 330(6003): 477-479.
- [47] ENNICO K, SHIRLEY M, COLAPRETE A, et al. The lunar crater observation and sensing satellite (LCROSS) payload development and performance in flight[J]. Space Science Reviews, 2012, 167(1): 23-69.
- [48] STRYKER P D, CHANOVER N J, TEMME R L, et al. Time series analysis methods and detectability factors for ground-based imaging of the LCROSS impact plume[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): 37.
- [49] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. Science, 2010, 330(6003): 463-468.
- [50] 吴言蔚, 贺佳峰, 王国光. 月球内部水和月表水冰资源的评估研究[J]. 高校地质学报, 2024, 30(2): 165-177.
- WU Y W, HE J F, WANG G G. Evaluation of water in lunar interior and water ice on lunar surface[J]. Geological Journal of China Universities, 2024, 30(2): 165-177.
- [51] 王鹏伟, 耿健, 杨喆, 等. 面向水冰探测的月尘防护研究综述[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(1): 1-19.
- WANG P W, GENG J, YANG Z, et al. Review of lunar dust mitigation for lunar water ice detection[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2024, 44(1): 1-19.
- [52] COSTELLO E S, LUCEY P G. The age and evolution of lunar micro cold traps at the scale of surface exploration[J]. Geophysical

- Research Letters, 2024, 51(1): e2023GL105369.
- [53] RUBANENKO L, SCHORGHOFER N, GREENHAGEN B T, et al. Equilibrium temperatures and directional emissivity of sunlit airless surfaces with applications to the moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(6): e2020JE006377.
- [54] COSTELLO E S, GHENT R R, LUCEY P G. Secondary impact burial and excavation gardening on the moon and the depth to ice in permanent shadow[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2021JE006933.
- [55] ZWIERZYŃSKI A J, CIAŁ ŻELA J, BOROŃ P, et al. Lunar cold microtraps as future source of raw materials: Business and technological perspective[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13030.
- [56] 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.
- [57] LAWRENCE D J, FELDMAN W C, ELPHIC R C, et al. Improved modeling of Lunar Prospector neutron spectrometer data: Implications for hydrogen deposits at the lunar poles[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2006, 111(E8): 2005JE002637.
- [58] HARDGROVE C, STARR R, LAZBIN I, et al. The lunar polar hydrogen mapper cubesat mission [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(3): 54-69.
- [59] 吴庐山, 邓希光, 梁金强, 等. 南极陆缘天然气水合物特征及资源前景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(1): 95-107.
WU L S, DENG X G, LIANG J Q, et al. The characteristics and resource potential of gas hydrates in the Antarctic margins[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2010, 30(1): 95-107.
- [60] 李想, 王兴平, 卢文振, 等. 月球极区水冰就位分析方案设计[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2023, 10(6): 618-630.
LI X, WANG X P, LU W Z, et al. Design for in-situ water ice analysis in the lunar polar region [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, 10(6): 618-630.
- [61] JIA Y Z, ZHANG Z L, QIN L, et al. Research of lunar water-ice and exploration for China's future lunar water-ice exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 26.
- [62] SUN T X. Hydrogen ice within lunar polar craters[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(82): 34825-34830.
- [63] LI S, MILLIKEN R E. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins [J]. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701471.
- [64] TRABACCHIN N, OCHNER P, COLOMBATTI G. A physical and spectroscopic survey of the lunar south pole with the galileo telescope of the asiago astrophysical observatory [J]. *Aerospace*, 2024, 11(9): 693-698.
- [65] SCHÖRGHOFER N, WILLIAMS J P, MAZARICO E. Lunar north polar cold traps based on diurnally and seasonally varying temperatures [J]. *The Planetary Science Journal*, 2024, 5(5): 126.
- [66] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry [J]. *Science*, 2009, 323(5916): 897-900.
- [67] CARTER L M, CAMPBELL B A, NEISH C D, et al. A comparison of radar polarimetry data of the Moon from the LRO mini-RF instrument and earth-based systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1915-1927.
- [68] TAKEKURA S, MIYAMOTO H, KOBAYASHI M. Detecting lunar subsurface water ice using FMCW ground penetrating radar: Numerical analysis with realistic permittivity variations [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(6): 1050.
- [69] MAGAÑA L O, RETHERFORD K D, BYRON B D, et al. LRO-LAMP survey of lunar south pole cold traps: implication for the presence of condensed H₂O [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2022, 127(11): e2022JE007301.
- [70] HORANYI M, STERNOVSKY Z, LANKTON M, et al. The lunar dust experiment (LDEX) onboard the lunar atmosphere and dust environment explorer (LADEE) mission [J]. *Space Science Reviews*, 2014, 185(1): 93-113.
- [71] HUANG G, XU W. A review of lidar technology in China's lunar exploration program [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4354.
- [72] STARR M. Development of tactical and strategic operations software for NASA's lunar flashlight mission [J]. *Journal of Small Satellite Technology*, 2023, 11(2): 1-5.
- [73] RENJU R, RAJU C S, MISHRA M K. High-resolution thermal profiles of lunar regolith over a southern high latitude location using in situ observations from ChaSTE/Chandrayaan-3 lander [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2025, 538(4): 2330-2338.
- [74] MOSHER T J, LUCEY P. Polar night: A lunar volatiles expedition [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59(8-11): 585-592.
- [75] ITO T, UEDA S, YOKOTA K, et al. Terminal powered descent guidance for the smart lander for investigating moon [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2025, 48(6): 1298-1313.
- [76] HUSSAIN B, GUO J D, FAREED S, et al. Robotics for space exploration: From Mars rovers to lunar missions [J]. *International Journal of Ethical AI Application*, 2025, 1(1): 1-10.
- [77] QIAO L, XU L Y, HEAD J W, et al. Geological evidence for extensive basin ejecta as Plains terrains in the Moon's South Polar Region [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5783.
- [78] ROBINSON M S, BRYLOW S M, CAPLINGER M A, et al. ShadowCam instrument and investigation overview [J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2023, 40(4): 149-171.
- [79] MARTIN A C, DENEVI B W, SPEYERER E J, et al. Imaging in shadows: A comparison of craters observed in primary and secondary illumination with the lunar reconnaissance orbiter camera [J]. *The Planetary Science Journal*, 2024, 5(9): 207.
- [80] YANG Y, WANG Q G, GU J P, et al. Numerical simulation of mass and heat transfer for water extraction from icy lunar regolith [J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(11): 6205-6221.
- [81] WATKINS R N, OSTRACH L R, VALENCIA S N, et al. The role of the next generation lunar scientists and engineers (NextGen) group in lunar science and exploration [J]. *Bulletin of the AAS*, 2021, 53(2): 1-8. DOI: 10.3847/25c2efeb.9a3e0c6a.
- [82] LIN Y T, YANG W, ZHANG H, et al. Return to the Moon: New perspectives on lunar exploration [J]. *Science Bulletin*, 2024, 69

- (13): 2136-2148.
- [83] BHANDARI N S. Scientific challenges of CHANDRAYAAN-1: the Indian lunar polar orbiter mission[J]. *Current Science*, 2012, 86: 1489-1498.
- [84] THOMAS V, ANTONY R, RAJA A, et al. India's Chandrayaan-3 success: implications, obstacles and future path[J]. *Astropolitics*, 2024, 22(1/2): 69-83.
- [85] VADAWALE S V, MITHUN N P S, SHANMUGAM M, et al. Chandrayaan-3 APXS elemental abundance measurements at lunar high latitude[J]. *Nature*, 2024, 633(8029): 327-331.
- [86] MATHEW N, PRABHU M R, AASIK V, et al. Operational insights and measurements of ChaSTE on the Chandrayaan-3 Vikram lander [J]. *Advances in Space Research*, 2025, 76(2): 1196-1203.
- [87] MATHEW N, PRASAD K D, VAJJA D P, et al. Chandra's surface thermophysical experiment (ChaSTE) onboard Chandrayaan-3 lander [J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(7): 5936-5945.
- [88] SINHA R K, PANWAR N, SRIVASTAVA N, et al. Primitive lunar mantle materials at the Chandrayaan-3 landing site [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 321.
- [89] KUMAR C, MISHRA S K, KUMAR J, et al. Higher surface temperatures near south polar region of the Moon measured by ChaSTE experiment on-board Chandrayaan-3 [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6: 153.
- [90] KAWAMURA T, KOBAYASHI N, TANAKA S, et al. Lunar Surface Gravimeter as a lunar seismometer: Investigation of a new source of seismic information on the Moon [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(2): 343-358.
- [91] MANE S. Chandrayaan-2: India's lunar exploration mission to the moon[J]. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*, 2023, 11(7): 1116-1123.
- [92] MATHAVARAJ S, NEGI K. Chandrayaan-3 trajectory design: Injection to successful landing [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2025, 62(1): 159-166.
- [93] CHEN Y S, HAN J J, FAN Y, et al. Overview of the latest scientific results of China's lunar exploration program[J]. *J. Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(5): 626-642.
- [94] VAQUERO T S, DADDI G, THAKKER R, et al. EELS: Autonomous snake-like robot with task and motion planning capabilities for ice world exploration[J]. *Science Robotics*, 2024, 9(88): eadh8332.
- [95] LIU H X, WANG Y Z, WEN S B, et al. Comprehensive evaluation of the lunar south pole landing sites using self-organizing maps for scientific and engineering purposes[J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(9): 1579.
- [96] COHEN B A, HAYNE P O, GREENHAGEN B, et al. Lunar flashlight: illuminating the lunar south pole[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2020, 35(3): 46-52.
- [97] REACH W T, LUCEY P G, HONNIBALL C I, et al. The distribution of molecular water in the lunar south polar region based upon 6 μm spectroscopic imaging[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, 4(3): 45.
- [98] GADDIS L R, JOY K H, BUSSEY B J, et al. Recent exploration of the Moon: Science from lunar missions since 2006[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 1-51.
- [99] UDOVICIC T C J, FRIZZELL K R, KODIKARA G R L, et al. Buried ice deposits in lunar polar cold traps were disrupted by ballistic sedimentation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(5): e2022JE007567.
- [100] 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(6): 549-566.
- [101] WILLIAMSON M. Lunar exploration and development: A sustainable model[J]. *Acta Astronautica*, 2005, 57(2-8): 161-166.
- [102] LIU J J, LIU B, REN X, et al. Evidence of water on the lunar surface from Chang'E-5 in-situ spectra and returned samples[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3119.
- [103] LEONE G, AHRENS C, KORTENIEMI J, et al. Sverdrup-Henson crater: A candidate location for the first lunar South Pole settlement [J]. *iScience*, 2023, 26(10): 107853.
- [104] XU Y C, TIAN H C, ZHANG C, et al. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle latitude [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(51): e2214395119.

(责任编辑 王海锋)