

LI Xiang, LU Wenzhen, QIU Zhenwei, CUI Shanshan, GUO Meiru, REN Zhengyi, SUN Jian, LUO Pengwei, ZHANG Xiaoping, CHEN Rui, XU Zhenyu, YAO Lu, RUAN Jun, ZHANG Chi, CHEN Kan, LI Yan, CAO Nailiang. Ground Calibration Test Method for Chang'E-7 Lunar Soil Water Molecule Analyzer (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 465–474. CSTR:32142.14.cjss.2025–0151. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0151

»嫦娥七号任务有效载荷定标方法

## 嫦娥七号月壤水分子分析仪地面定标试验方法\*

李 想<sup>1</sup> 卢文振<sup>4</sup> 裘桢炜<sup>1</sup> 崔珊珊<sup>1</sup>  
郭美如<sup>2</sup> 任正宜<sup>2</sup> 孙 健<sup>3</sup> 罗朋威<sup>4</sup> 张小平<sup>4</sup>  
陈 锐<sup>4</sup> 许振宇<sup>1</sup> 姚 路<sup>1</sup> 阮 俊<sup>1</sup>  
张 驰<sup>1</sup> 陈 侃<sup>1</sup> 李 妍<sup>1</sup> 曹乃亮<sup>1</sup>

1(中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

2(中国空间技术研究院 兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

3(中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640)

4(澳门科技大学 月球与行星科学全国重点实验室 澳门 999078)

**摘 要** 月球极区水冰探测对揭示月球演化、支撑未来月球科研站建设至关重要。然而,通过现有遥感手段与返回样品难以精确获取其赋存形态、含量及来源。嫦娥七号(Chang'E-7)飞跃器将搭载月壤水分子分析仪(LUWA),首次对月球南极永久阴影区水冰开展就位探测。本文分析了 LUWA 的组成、原理及其与水冰钻取装置协同实现“钻探采样—接样密封—加热分析”的探测过程。为确保载荷在轨实现高灵敏度、宽动态范围的水冰含量探测和高精度水同位素分析,针对三个测水功能模块搭建了地面定标试验装置,提出了定标方法;围绕整机性能指标,搭建了月壤水冰就位探测模拟试验平台,模拟极区水冰的钻采、接样、密封、加热与分析全过程,为在轨月壤水冰含量等数据反演提供重要支撑。

**关键词** 月壤水分子分析仪(LUWA),永久阴影区,极区水冰探测,地面定标方法

**中图分类号** P184

## Ground Calibration Test Method for Chang'E-7 Lunar Soil Water Molecule Analyzer

LI Xiang<sup>1</sup> LU Wenzhen<sup>4</sup> QIU Zhenwei<sup>1</sup> CUI Shanshan<sup>1</sup>  
GUO Meiru<sup>2</sup> REN Zhengyi<sup>2</sup> SUN Jian<sup>3</sup> LUO Pengwei<sup>4</sup>  
ZHANG Xiaoping<sup>4</sup> CHEN Rui<sup>4</sup> XU Zhenyu<sup>1</sup> YAO Lu<sup>1</sup> RUAN Jun<sup>1</sup>

\* 国家重点研发计划战略性先导专项项目(2024YFE0201000)和国家自然科学基金项目(62205346)共同资助

2025-09-22 收到原稿, 2026-01-24 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ZHANG Chi<sup>1</sup> CHEN Kan<sup>1</sup> LI Yan<sup>1</sup> CAO Nailiang<sup>1</sup>

1(*Anhui Institute of Optics Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

2(*Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000*)

3(*Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640*)

4(*State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University  
of Science and Technology, Macau 999078*)

**Abstract** The lunar pole's water ice is essential for understanding the Moon's evolution and building future lunar research station. Nevertheless, existing orbital remote-sensing missions and returned samples remain insufficient to resolve the key unknowns of polar water, including its occurrence modes (*e.g.*, adsorbed water/hydroxyl, pore-filling ice, or ice-cemented regolith), its abundance and vertical variability, and its potential origin and evolutionary pathways. To address this gap, the Chang'E-7 mini-flying probe will carry the Lunar soil Water molecule Analyser (LUWA) to conduct in-situ detection of water ice at the permanently shadowed region for the first time. This paper describes the compositional structure of LUWA and the detection approach, comprising drilling, sampling, sealing, heating and analysis. We detail the calibration parameters, apparatus, and procedures for its three core analytical modules: the Tunable Diode Laser Absorption Spectrometer (TDLAS), the Time-of-Flight Mass Spectrometer (TOF-MS), and the Differential optical Absorption Spectrometer (DAS). The operational chain is designed to release water through thermal extraction, quantify water content with high sensitivity across a wide dynamic range, and enable the determination of  $D/H$  isotopic signatures. A systematic ground calibration methodology and a unified calibration framework are established for three functional modules dedicated to water measurement. The framework defines calibration objectives, procedures, and traceability pathways to characterize module response functions, assess background and temperature-dependent effects, verify detection limits and linearity, and evaluate accuracy and repeatability, thereby supporting robust conversion from raw observables to calibrated water-content and isotope products in flight. In parallel, a dedicated lunar in-situ exploration test platform is developed to replicate LUWA's full operational workflow using lunar regolith simulants, including drilling, sampling, sealing, heating, and analysis. Integrated tests validate key performance metrics and the measurement workflow, providing crucial technical support for interpreting Chang'E-7 LUWA data and for assessing the abundance and occurrence of water ice in lunar soil within PSRs.

**Key words** Lunar soil Water molecule Analyzer (LUWA), Permanently shadowed regions, Polar water ice detection, Ground calibration methods

## 0 引言

月球极区水冰探测不仅对揭示月球演化历史、太空风化过程以及月表挥发分迁移机制具有重要科学意义,也将为未来月球科研站的建设与水冰资源原位利用提供关键支撑<sup>[1-3]</sup>. 月球极区因太阳高度角极低(约  $1^\circ \sim 4^\circ$ ), 撞击坑形成的永久阴影区 (Permanently Shadowed Regions, PSRs) 具有极低温特点, PSRs 内的冷阱效应可长期捕获并保存外部来源的水, 包括

太阳风与月壤氧结合生成的水、微陨石撞击带入的水以及彗星贡献的水冰等<sup>[4-6]</sup>.

近年来, 多项国际遥感探测任务, 例如 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) 和 Chandrayaan-1, 借助中子谱仪、红外光谱和雷达等技术, 先后发现月球极区存在氢异常现象, 为水冰的存在提供了间接证据<sup>[7-9]</sup>. LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) 撞击实验进一步证实了极区存在水冰, 其溅射物中水冰质量含量估计约为 5%<sup>[10]</sup>. 近年

来, 中国嫦娥五号、六号任务返回的月球样品同位素分析也为水冰来源提供了新线索, 例如发现太阳风植入氢具有极低的  $D/H$  值, 并识别出月壤玻璃珠等介质具有对水的捕获与保存作用<sup>[11-13]</sup>. 尽管如此, 现有遥感手段受空间分辨率和穿透深度的限制, 仍难以精确探测水冰的赋存形态、分布特征和准确含量; 返回样品亦难以代表原位状态, 尤其不能反映永久阴影区内的水冰真实状况. 因此, 极区水冰的赋存机制、含量、分布特征以及来源等关键科学问题仍需要通过就位探测进行研究.

嫦娥七号月球探测任务计划于 2026 年发射, 其候选着陆点位于月球南极的沙克尔顿陨石坑附近<sup>[14-16]</sup>. 该任务包括轨道器、着陆器、巡视器、飞跃器以及鹊桥二号中继星, 共有 18 台科学探测载荷. 嫦娥七号任务的主要科学任务之一是对月球南极的水冰进行遥感和就位探测. 月壤水分子分析仪 (LUWA) 作为飞跃器上的主载荷, 将首次深入极端环境下的永久阴影区, 通过钻探“采样—密封加热—气体传输—质谱/光谱分析”流程, 直接检测月壤中的水冰及其挥发分, 并对其同位素进行分析. 该载荷的核心科学目标是证认水分子存在并定量分析其含量, 通过水同位素

分析 ( $D$ ,  $^{17}O$ ,  $^{18}O$ ) 确定月壤水冰的来源, 进而研究极区水冰的分布特征和演化. 图 1 为 LUWA 搭载在飞跃器上开展月球南极永久阴影区水冰探测示意.

上述目标的实现对载荷的探测性能和定量准确性提出了极高要求. 首先, 月球极区水冰可能以多种形式存在, 其含量跨度极宽, 覆盖从质量含量低于 0.01% 的矿物结合水, 到 LCROSS 检测到的质量含量高达 5% 的冰壤混合物. LUWA 需同时具备极高的检测灵敏度与较宽的动态范围. 其次, 水源识别依赖高精度激光光谱同位素测量技术, 尤其在低水含量条件下,  $D/H$  测量仍需保持一定的信噪比, 以区分太阳风 ( $D/H$  约 900‰)、彗星 ( $D/H$  达 +1000‰) 以及小行星等多种来源. 第三, 挥发分的定性定量分析, 要求质谱在宽进气压力范围内实现高质量分辨率, 以准确识别和定量分析  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$  等挥发物组分.

除仪器本身的性能要求外, 月表极端环境与样品处理流程也引入了测量不确定性. LUWA 需在月表高真空和超低温背景下, 通过加热方式提取月壤中的水冰及其挥发分. 在这一过程中, 系统泄漏、管壁吸附、热致升华以及加热速率与时长控制等因素, 均可能显著影响水冰提取效率与定量结果的准确性.

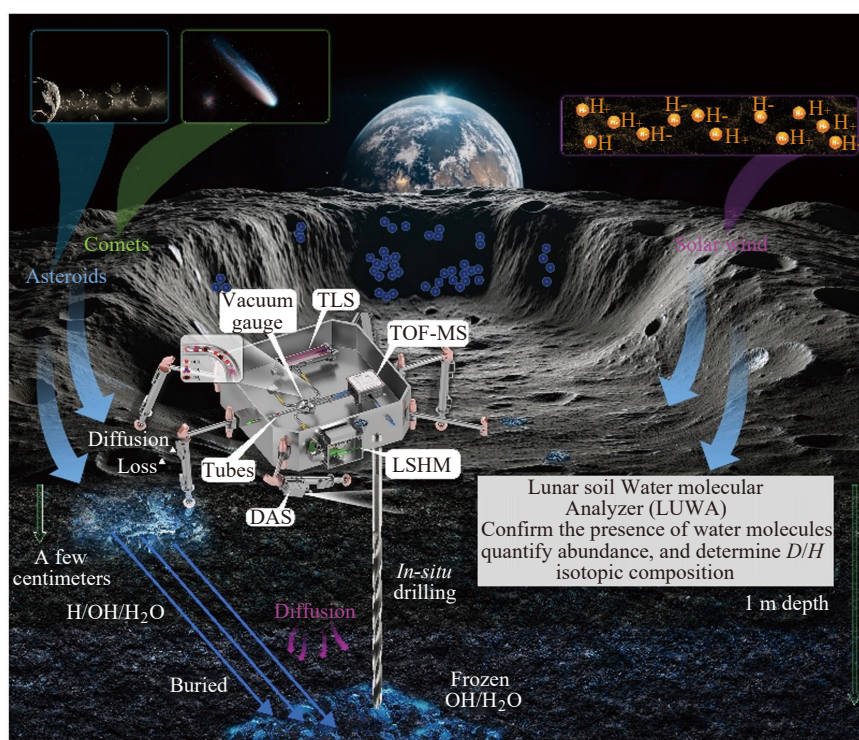


图 1 月球永久阴影区水冰探测

Fig. 1 Water ice detection in lunar permanently shadowed regions

LUWA 在发射前需要开展充分的地面定标及验证, 修正系统误差并给出仪器的测量偏差, 分析并校正各环节水冰损失以及同位素分馏, 从而提供准确的月壤水冰含量及其同位素比等科学数据.

为确保上述科学目标的实现, 必须在地面对 LUWA 载荷探测水冰及挥发分性能进行系统性标定与验证. 为此, 构建一套地面定标试验方法, 包括基于标准样品的仪器灵敏度、检出限与动态范围标定, 同位素比值测量精度验证, 多组分挥发分的质谱定标, 以及模拟月表低温真空环境下整机水冰提取—传输—分析全流程试验. 通过系统定标与验证工作, 为嫦娥七号首次月球极区水冰就位探测提供数据质量保障.

## 1 LUWA 组成与原理

LUWA 主要由 6 个单元组成, 分别为差分吸收光谱仪 DAS (Differential Absorption Spectrometer)、月壤加热模块 LSHM (Lunar Soil Heating Module)、可调谐激光光谱仪 TLS (Tunable Laser Spectrometer)、飞行时间质谱仪 TOF-MS (Time-of-Flight Mass Spectrometer)、管路组件以及电子学单元, 如图 2 所示<sup>[17]</sup>.

在遥感探测模式下, DAS 采用中心波长分别为 1.272, 1.512, 1.854, 2.004  $\mu\text{m}$  的窄线宽激光, 在 30~80 cm 距离内对月壤表面进行主动照射, 并通过测量各波长处的反射率特征, 判断采样区表层是否存在冻霜层以及钻采样品是否含水. 在月壤加热探测模式下, LSHM 加热含水月壤以提取其中的水冰及挥发

分, 其气体沿管道传输到 TLS 和 TOF-MS 进行定量分析. 其中 TLS 利用波长 2.73  $\mu\text{m}$  的可调谐 DFB 激光器测量  $\text{H}_2\text{O}$  及其同位素 ( $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) 吸收谱峰, TOF-MS 主要分析  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  等分子量在 1~100 amu 范围内的挥发成分, 利用真空计组件对加热提取的气体总压进行测量.

## 2 极区水冰探测全流程分析

LUWA 对水冰的探测流程包括三个阶段: 第一阶段为钻探采样, 通过水冰钻具精准获取目标区域月壤样本, 在钻探采样的过程中利用 DAS 对钻削月壤含水特征进行遥感探测; 第二阶段为接样密封, LSHM 通过运动机构将采集的月壤样品转移至炉托并完成密封; 第三阶段为加热分析, 在密封条件下, 将月壤加热至 200 $^{\circ}\text{C}$  以上, 有效提取月壤中的挥发分, 挥发分经管路传输至 TLS 和 TOF-MS 进行气体组分及含量分析. 各环节严格按照预设程序顺序执行, 确保水冰探测任务的完整性和可靠性, 流程如图 3 所示.

### 2.1 钻探采样过程

与嫦娥五号、六号的钻探采样返回模式相比, 嫦娥七号月壤水冰采样任务面临更严苛的技术要求. 为防止样品转移过程中的水冰升华, 探测系统集成多层级温控设计. 该设计基于高灵敏温度传感器的实时反馈, 通过优化钻取机构的动作程序实现最小化摩擦生热, 并严格控制转移环节的时序以缩短暴露时间, 最大限度维持样品的低温状态.

永久阴影区的水冰以“脏冰”形式存在于月壤次表层至数米深度内, 该类月壤样品具有埋藏较深且密

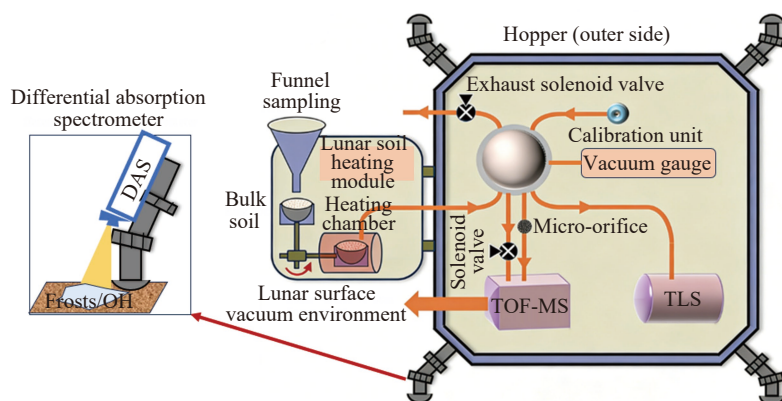


图 2 LUWA 载荷组成结构

Fig. 2 Schematic of LUWA payload configuration

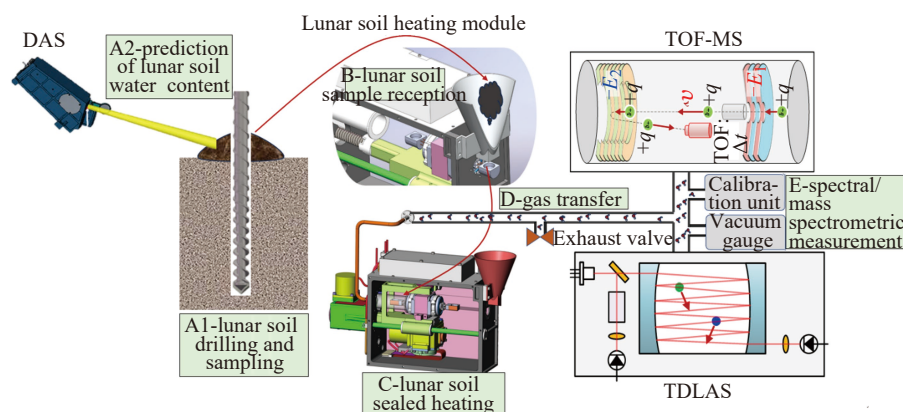


图 3 探测流程

Fig. 3 Schematic diagram of the detection process

实度高和硬度大等特点. 考虑到飞跃器自身质量有限, 采样钻进下压力小, 通过突破深槽螺旋钻采样钻进技术, 可实现在低支反力条件下对含水月壤的高速稳定钻进. 此外, 在回旋钻进遭遇卡滞的情况下, 还可切换至冲击钻进模式以维持钻进并提高拔钻可靠性, 避免钻具卡滞的风险.

## 2.2 接样密封过程

接样密封过程分为接样和转移密封两个阶段. 接样阶段通过刷样将螺旋钻槽内的月壤样品转移至暂存舱, 再经水冰钻取装置的摆转、抛洒等动作, 将月壤样品转移至 LSHM 的炉托中, 转移密封阶段则通过机构运动将炉托中的样品密封至炉膛.

为降低抛洒送样过程中月壤的黏附、大颗粒堵塞等风险, 将漏斗尾端锥度设计为  $40^\circ$  以促进样品流动, 并结合漏斗斜口结构设计, 既可防止大颗粒堵塞, 又能自动调节进样量.

为减小样品在密封过程中因炉托接触温升导致水冰升华损失, 炉托接样温度保持在  $-20^\circ\text{C}$  以下, 并通过炉托内集成的温度传感器实时监测温度, 基于该在轨实测温度修正月壤水冰在转移过程中的水损失.

## 2.3 加热分析过程

含水月壤加热过程是水冰探测的关键步骤. 针对月壤低热导率导致的升温速率慢和月壤温度不均匀等问题, 采用高效陶瓷加热体, 并将样品质量控制在  $1\text{ g}$  以内, 确保月壤样品温度超过  $200^\circ\text{C}$ , 充分释放月壤中挥发分和水冰.

加热释放的水汽及挥发分经管路传输到飞跃器舱内的 TOF-MS 和 TLS. 两个仪器互为冗余备份, 以

提高系统的可靠性. 同时, 管路上集成了真空计组件, 可实时监测管路内气体压力; 在管路上还设有排气阀, 在管路压力高于  $1000\text{ Pa}$  时启动动态排气, 使压力维持在仪器探测范围内.

## 3 仪器定标方法

为保障在轨测试精度, 需在地面对 LUWA 的三个测水功能模块开展定标试验, 确定仪器系统误差和定标参数.

### 3.1 可调谐激光光谱仪定标方法

TLS 地面定标试验旨在确定其对水汽压力和  $D/H$  比的测量精度, 通过水同位素标准物质消除系统误差, 保障在轨数据的可溯源性<sup>[18,19]</sup>. 具体指标如下.

(1) 最小可探测水汽压力:  $5\text{ Pa}$ .

(2) 信噪比:  $> 1000$  ( $31\text{ Pa}$ ).

(3) 水汽压力测量精度和校准系数:  $< \pm 5\%$  ( $50 \sim 1000\text{ Pa}$ ).

(4) HDO 同位素相对丰度测量精度和校准系数:  $< \pm 50\%$  ( $D/H: -433\text{‰} \sim +642\text{‰}$ ).

TLS 采用免标的可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS) 进行水汽压强测量. 该技术利用特定波长激光, 扫描目标水分子的特征吸收光谱轮廓, 通过计算吸收量推导水分子含量. 具体来说, 当可调谐激光穿过含有水蒸气的气体时, 水分子会在其特征吸收波长处选择性地吸收光子能量, 导致该波长处的透射光强显著减弱, 形成明显的吸收谱线. 根据 Beer-Lambert 定律, 通过测量吸收峰积分面积值  $A$ , 并结

合已知的吸收线强度、光程长度及环境温压条件, 可以计算得到待测水汽分压, 即

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = Px = \frac{k_B T}{L S_T} \int -\ln\left(\frac{\phi_t}{\phi_0}\right) d\nu = \frac{k_B T}{L S_T} A. \quad (1)$$

式中,  $P$  为气体总压,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为吸收路径温度,  $L$  为吸收路径长度,  $S_T$  代表温度为  $T$  时的谱峰线强度.

水同位素的吸收光谱特性因其质量和振动频率的差异而不同, 在 TDLAS 超高光谱分辨率下可以有效分辨这些同位素分子各自的吸收谱线, 通过同时扫描  $\text{HD}^{16}\text{O}$  与  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  的特征吸收峰, 分别计算其吸收峰的积分面积, 根据下式可以计算  $R_{D/H}$ , 即

$$R_{D/H} \approx x_{\text{HDO}}/(2x_{\text{H}_2\text{O}}) = \frac{1}{2} \frac{A_{\text{HDO}}}{A_{\text{H}_2\text{O}}} \frac{S_{\text{H}_2\text{O}}}{S_{\text{HDO}}}. \quad (2)$$

将该比值与国际标准水 (VSMOW) 进行比较, 可以计算得到水的同位素丰度 ( $\delta$ ) 值, 有

$$\delta = \left( \frac{R_{D/H}}{R_{\text{VSMOW}}} - 1 \right) \times 1000. \quad (3)$$

可调谐激光光谱仪定标装置主要由液态水自动进样器、加热炉、标准压力计、干燥剂和恒温真空罐等组成, 如图 4 所示. 液态水自动进样器按照设定程序定量吸取  $0.5 \sim 5 \mu\text{L}$  标准水样, 并将其注入到加热炉中气化产生  $50 \sim 1000 \text{ Pa}$  压力范围的纯水汽. 水汽经电磁阀控制, 通过管路扩散并传输至真空罐内的光谱单元腔体. 光谱单元同步采集内外光路的探测器信号, 通过光谱的反演处理得到水汽压强和同位素比值. 根据反演的水汽压强结果与管路上标准压力计数

据的线性拟合, 得到水汽压强的标定参数. 根据同位素比值与水样的同位素标准值数据的线性拟合, 得到同位素  $\delta\text{D}$  值的标定参数.

### 3.2 飞行时间质谱仪定标方法

TOF-MS 定标的目的是建立  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  等挥发分的主管路压力与离子流强度的对应关系 (即比例系数  $K$ )<sup>[20,21]</sup>, 具体如下.

- (1) 质量数范围:  $1 \sim 100 \text{ amu}$ .
- (2) 质量分辨率: 半峰宽 (FWHM)  $< 1 \text{ amu}$ .
- (3) 管路压力:  $10 \sim 2000 \text{ Pa}$ .
- (4) 离子流强度与管路压力的比例系数  $K$ .

质谱仪标定装置主要由液体标准样品制备系统、气体标准样品制备系统、液气样品混合进样系统、平衡室及抽气室、抽气机组以及温控系统等组成, 如图 5 所示. 通过样品制备系统可分别产生不同压力的水汽及  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  多种混合标准气体, 这些气体经管路中的限流小孔进入待定标 TOF-MS. 在开展比例系数  $K$  标定之前, 首先对 TOF-MS 的质量数范围等性能进行验证, 确保仪器在月球样品分析过程中既能检测到高分子有机物, 也能响应低质量数的  $\text{H}^+$  离子信号等. 针对挥发分含量的定量标定, 测量  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$  等气体压力与 TOF-MS 对应离子流强度之间的响应关系. 具体地, 利用电容薄膜真空计监测平衡室内气体压强变化量  $\Delta p$ , 并同步采集 TOF-MS 输出离子流的变化量  $\Delta I$ , 得到比例系数  $K_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta I / \Delta p$ .

### 3.3 差分吸收光谱仪定标方法

DAS 定标旨在确定仪器对质量占比  $0.5\%$  水冰

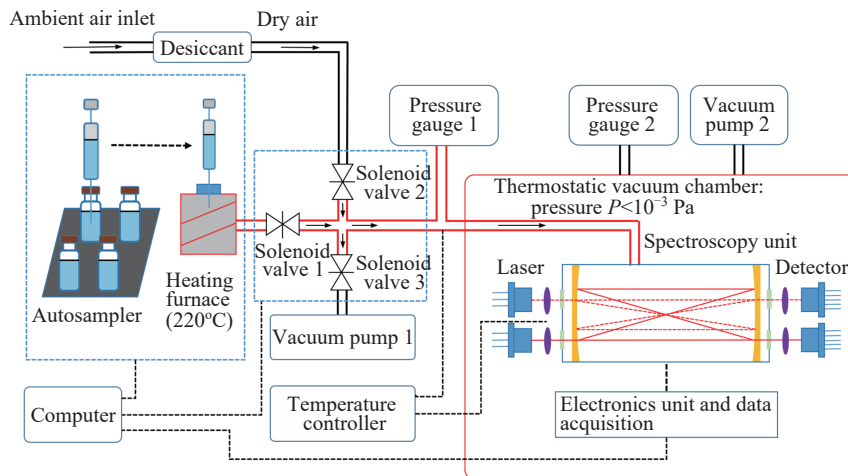


图 4 可调谐激光光谱仪定标装置原理

Fig. 4 Schematic of the tunable laser spectrometer calibration device

检测限的判定能力与置信度, 并建立样品水冰含量与仪器响应参数的定量关系<sup>[22]</sup>, 具体包括: 辐射校正系数标定, 即根据分光光度计测得的定标板反射率确定校正系数  $k$ ; 样品含水量标定, 即针对不同观测距离和不同含水量样品确定定标系数; 观测角度标定, 即在典型距离 45 cm 条件下, 针对不同观测角度和不同含水量样品确定定标系数; 置信度试验, 即通过重复测量质量占比为 0.5% 的水冰样品, 确定仪器对含水信号的识别概率 > 80%。

DAS 通过标定 1.5  $\mu\text{m}$  和 2.0  $\mu\text{m}$  吸收带的反射率/吸收特征随水冰含量变化规律, 实现水冰含量反演. 仪器响应 DN 值 (定义符号  $N_D$ ) 与待测水冰反射率  $R$  的关系可用线性模型描述, 有

$$N_D = mI_{\text{laser}}R\eta_{\text{laser}} + b = kR + b. \quad (4)$$

式中,  $m$  为线性系数,  $I_{\text{laser}}$  为出射激光光强,  $\eta_{\text{laser}}$  为探测器响应度,  $b$  为暗电流/杂散光等产生的本底项,  $k$  为辐射校正系数, 综合表征光源、光路、探测器的

增益项. 反射率信号通过对吸收带峰-谷波段的 DN 差分/比值获得, 在 1.5  $\mu\text{m}$  吸收带对比 1270 nm 与 1512 nm 两波段的 DN 值获取吸收带表征量, 在 2.0  $\mu\text{m}$  吸收带对比 1854 nm 与 2004 nm 两波段的 DN 值, 进行水冰含量识别. 考虑在轨应用中光源功率与探测器响应可能随时间衰减, 为降低系统漂移影响, 引入在轨定标板系数补偿. 设在轨定标板获得的校正系数为  $k_1$ , 地面定标板获得的校正系数为  $k_2$ , 利用  $k_1/k_2$  对地面标定结果进行增益补偿.

差分吸收光谱仪的定标装置集样本制备、测试、转运于一体, 包括手套箱、非标液氮罐、控制器等, 如图 6 所示. 手套箱内置电子分析天平、测试架、温湿度计、差分吸收光谱仪等, 手套箱自带制冷功能, 通过内充高纯氮气, 保持低湿环境; 待手套箱内达到低湿环境后, 往液氮腔注入液氮, 维持样品腔内低温环境. 将制备好的不同含水量水冰样品置入样品舱, 通过可调测试架设定 DAS 的观测距离与角度, 采集各工况下的 DN 数据.

#### 4 地面全流程模拟试验方法

地面全流程模拟试验过程包括含水模拟月壤的制备、试验平台搭建、全流程模拟试验等, 旨在验证 LUMA 载荷在模拟月面低温高真空条件下, 按在轨飞行程序完成“钻采—接样—密封—加热提取—分析”的全流程执行, 评估载荷的功能有效性与性能指标符合性, 具体包括: 验证月壤水冰含量测量误差 < 50%; 验证载荷对钻采月壤水冰的检测限, 即质量占比 < 0.01%; 验证可调谐激光光谱仪、飞行时间质谱仪



图 5 质谱仪定标装置

Fig. 5 Calibration device for the mass spectrometer

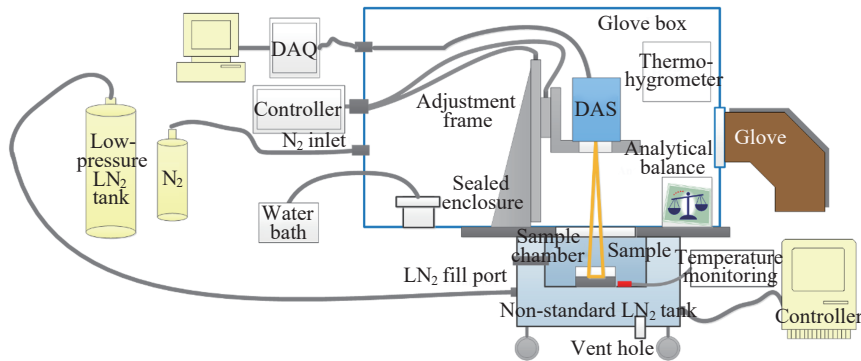


图 6 差分吸收光谱仪定标装置原理

Fig. 6 Schematic diagram of the differential absorption spectrometer calibration device

和真空计压力测量结果的一致性;验证载荷在月球真空、低温、月尘等环境下的稳定性与可重复性。

#### 4.1 含水月壤的制备与标定

含水月壤的制备与标定是全流程试验的首要步骤,依据嫦娥五号带回的月壤成分和粒径级配,制备不同粒径与组分的模拟月壤样品,形成质量占比覆盖 0.01% 低含水、0.1%~5% 中含水以及大于 20% 高含水的试验样品,用于载荷的检测限、测量误差等评估。首先,将模拟月壤置于 200℃ 真空干燥箱中烘干 48 h 以上,最大限度消除地球水污染;然后,在无水氮气氛围手套箱中,将干壤与标准水混合后搅拌均匀,密封静置 12 h,促进水分在颗粒间的再分配与均匀化后再摇晃均匀;最后,将样品置于 -80℃ 超低温冰箱中冷冻保存,试验时随机抽取 3 份样品采用卡尔费休法测量水含量,通过真空抽提装置与高精度激光光谱同位素分析仪 (Picarro L2130 i) 测定月壤水冰氢氧同位素值。

#### 4.2 模拟试验平台搭建

为开展高真空 (优于  $10^{-5}$  Pa)、低温 (-180℃) 环境下月壤水冰全流程模拟试验,搭建了月壤水冰就位探测模拟试验平台,如图 7 所示<sup>[23]</sup>。平台主要包括手

套箱 (样品制备, 常温常压), 预处理室 (样品液氮预冷冻, 20 Pa 低压), 过渡室 (真空转移,  $10^{-3}$  Pa), 样品低温存储库 (样品存储, 真空低温), 真空罐 (样品操作, 真空低温), 真空机械手等, 各试验舱通过闸板阀串接并保持独立真空环境。

真空机械手负责将月壤样品从过渡室传递到真空罐。真空罐内的六自由度机械手和功能模块 (真空天平、空心加热管、样品密封加热装置、光谱/质谱分析仪) 协同, 实现模拟月球环境下的接样/密封过程中含水月壤的热致损失、加热提取效率、月壤水含量测定等功能。该平台通过模拟原位月壤采样、传递、加热、分析、弃样、排气等全过程, 为月球极区水冰探测精度研究以及在轨数据天地一致性分析提供试验保障。

#### 4.3 全流程模拟试验流程

在全流程模拟试验中, LUWA 被安装于月壤水冰就位探测模拟试验平台的真空罐内。在环境达到预定的真空度和温度后, 首先对 LUWA 载荷进行 70℃ 烘烤加热, 去除其表面的吸附水, 降低本底水汽与记忆效应。随后开展全流程模拟试验, 包括两类工况: 原位月壤采样分析试验和含水月壤真空传递分析试验。

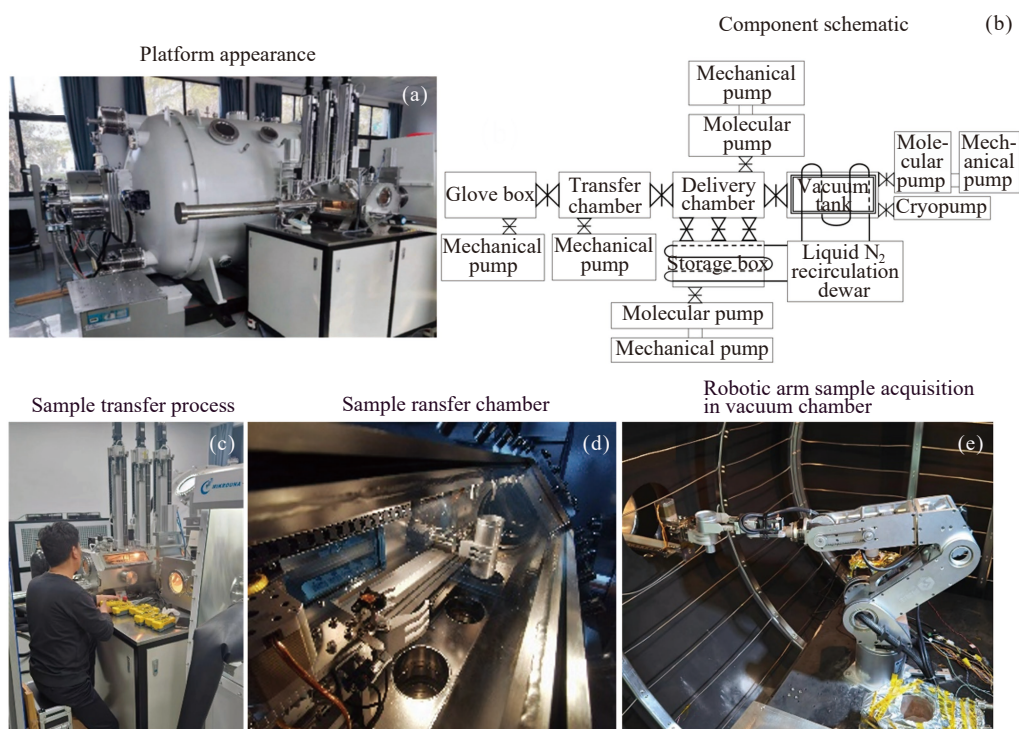


图 7 月壤水冰就位探测模拟试验平台

Fig. 7 Simulation test platform for *in-situ* detection of water ice in lunar regolith

两类工况均遵循统一的数据处理与反演流程: 根据 TLS, TOF-MS 和真空计测量加热提取后的气相水汽压强, 再通过真空泄漏、升华损失、提取效率、管壁吸附的过程修正, 反推水冰质量, 最后根据其与 LUWA 的定容接样杯中样品总质量之比得到真实月壤含水率。

原位月壤采样分析试验. 在真空罐内放置液氮冷冻的含水模拟月壤样品, 通过罐内集成的六自由度机械手模拟月面采样工况, 机械手末端的执行机构实现月壤的抓取、钻采等操作, 并将模拟月壤样品送到 LSHM 模块进行加热分析。

含水模拟月壤真空传递分析试验. 在无水氮气氛围手套箱中制备不同含水率月壤, 质量占比覆盖范围为 0.1%~20%, 采用串联传递与低压液氮冷冻相结合的方式, 在样品暴露于真空非密封环境下, 完成含水月壤样品从常压手套箱到就位探测模拟真空室的高保真低损耗传递, 满足多种试验工况需求。

## 5 结论

为保障嫦娥七号月壤水分子分析仪对月球南极水冰的就位探测精度, 开展了从单机定标到整机全流程系统验证的地面定标试验方法研究。首先, 阐述了月壤水分子分析仪的组成及其对极区月壤水冰探测全流程, 包括在钻探采样过程中, 通过差分吸收光谱仪对表层月壤和钻削壤水冰进行遥感探测; 在月壤样品分析过程中, 通过接样密封实现含水月壤的低损耗转移, 并通过加热分析实现月壤水冰挥发分的定量探测。针对差分吸收光谱仪、可调谐激光光谱仪与飞行时间质谱仪三个测水功能单元, 分别提出了定标方法和装置设计。最后, 搭建了模拟月面低温真空环境的月壤水冰就位探测模拟试验平台, 利用模拟月壤水冰对“钻采—接样—加热—分析”全流程进行试验验证, 该定标试验方法为载荷在轨科学数据的定量反演与可靠性评估提供了重要支撑。

## 参考文献

- [1] HAURI E H, SAAL A E, NAKAJIMA M, *et al.* Origin and evolution of water in the Moon's interior[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, **45**: 89-111
- [2] 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**: 0037
- [3] HU T, YANG Z, LI M, *et al.* Possible sites for a Chinese international lunar research station in the lunar south polar region[J]. *Planetary and Space Science*, 2023, **227**: 105623
- [4] CRIDER D H, VONDRAK R R. Hydrogen migration to the lunar poles by solar wind bombardment of the moon[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **30**(8): 1869-1874
- [5] 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
- [6] HONNIBALL C I, LUCEY P G, LI S, *et al.* Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(2): 121-127
- [7] CHAKRABORTY T, SYED T H, HEGGY E, *et al.* On the reachability and genesis of water ice on the Moon[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, **211**: 392-405
- [8] ZHU F L, ZHANG W W, WANG L X, *et al.* Modeling and analysis for volatile characteristics of lunar water ice[J]. *Acta Astronautica*, 2024, **220**: 162-172
- [9] 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
- [10] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, *et al.* Detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, **330**(6003): 463-468
- [11] 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
- [12] HE H C, JI J L, ZHANG Y, *et al.* A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads[J]. *Nature Geoscience*, 2023, **16**(4): 294-300
- [13] HE H C, LI L X, HU S, *et al.* Water abundance in the lunar farside mantle[J]. *Nature*, 2025, **643**(8071): 366-370
- [14] 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**: 0026
- [15] YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, *et al.* Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2023, **10**(6): 567-576 ((余后满, 饶炜, 张益源, 等. “嫦娥七号”探测器任务综述 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2023, **10**(6): 567-576)
- [16] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, **11**(2): nwad329
- [17] LI Xiang, WANG Xingping, LU Wenzhen, *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 (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)
- [18] CHEN R, LU W Z, LI X, *et al.* Chang'E-7 Lunar Soil Wa-

- ter Molecule Analyzer (LSWMA) prototype for high-precision measurement of water content and hydrogen isotope ratio[J]. *Journal of Earth Science*, 2024, **35**(6): 2180-2182
- [19] LI X, CAO N L, KAN R F, *et al.* Miniaturized tunable laser spectrometer for the simultaneous detection of water ice and hydrogen-oxygen isotopes for the Chang'E-7 lunar soil water molecule analyzer[J]. *ACS Sensors*, 2025, **10**(6): 4679-4686
- [20] GENG J, WANG X D, TAO W Z, *et al.* Study on the provision of traceable flow rate of water vapor for calibrating a time-of-flight mass spectrometer[J]. *Measurement*, 2024, **234**: 114869
- [21] SUN J, NIU H Z, TAN G B, *et al.* Miniaturized time-of-flight mass spectrometer for lunar water detection[J]. *Vacuum*, 2022, **204**: 111312
- [22] MA Ruqi, QIU Zhenwei, PAN Bo, *et al.* Design and verification of rapid in-situ prediction sensors for lunar soil moisture characteristics[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, **43**(10): 1399-1409 (马如奇, 裴桢炜, 潘博, 等. 月壤含水特性原位快速预判传感器设计与验证 [J]. 宇航学报, 2022, **43**(10): 1399-1409)
- [23] LU Wenzhen, WANG Xingping, LI Xiang, *et al.* Establishment and test of ground simulation experimental platform

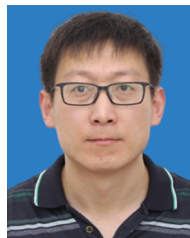
for in-situ detection of water-ice in lunar polar regions[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2025, **20**(4): 534-545 (卢文振, 王兴平, 李想, 等. 月球极区水冰就位探测地面模拟平台的建立与试验分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2025, **20**(4): 534-545)

## 作者简介



**李 想** 女, 1995 年 9 月出生于安徽省芜湖市, 现为中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所副研究员, 主要研究方向为痕量气体及同位素高灵敏检测技术。

E-mail: xlee@aiofm.ac.cn



**曹乃亮 (通信作者)** 男, 1984 年 8 月出生于山东省泰安市, 现为中国科学院合肥物质科学研究院安徽光机所副研究员, 主要研究方向为月球及深空光谱探测技术。

E-mail: nlcao@aiofm.ac.cn