

# 月球极区水冰就位分析方案设计

李想<sup>1</sup>, 王兴平<sup>1</sup>, 卢文振<sup>1</sup>, 郭美如<sup>2</sup>, 黄正旭<sup>3</sup>, 张小平<sup>4</sup>, 许振宇<sup>1</sup>,  
姚路<sup>1</sup>, 阮俊<sup>1</sup>, 阚瑞峰<sup>1</sup>, 曹乃亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院合肥物质研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031; 2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;  
3. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广州 510632; 4. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078)

**摘要:** 结合以Luna 25、Luna 27、Viper为典型月球极区就位探测应用的光谱-质谱联用技术, 介绍了包括探测机制、工作模式及仪器的功能、性能与应用; 设计了“嫦娥七号”月球极区水分子分析仪, 其中激光吸收光谱仪负责H<sub>2</sub>O和HDO的就位分析, 飞行时间质谱仪实现H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>等质量数< 200 amu气体分子的分析, 通过地面试验验证了方案的可行性, 可为月球南极着陆探测水冰就位探测提供支撑。

**关键词:** 月球极区; 月球水冰; 原位分析; 水分子分析仪

**中图分类号:** V11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2023)06-0618-13

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230106

**引用格式:** 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.

**Reference format:** 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.

## 引言

20世纪六七十年代,“阿波罗号”(Apollo)和“月球1号”(Luna 1)探测器首次探测月球,通过返回的月壤样品分析得出“月球是无水行星体”的结论,直到20世纪90年代末及21世纪初的轨道遥感探测结果重新为人类认识月球拉开了序幕。目前,对月球两极水冰来源、存在形式及储量的深入研究仍然是月球探测的主要目标之一。

美国在1994年和1998年发射的“克莱门汀号”(Clementine)环月轨道探测器<sup>[1]</sup>和“月球勘探者”(Lunar Prospector, LP)<sup>[2]</sup>、印度在2008年发射的首次深空任务“月船1号”(Chandrayaan 1)<sup>[3-4]</sup>、月球撞击坑观测和传感卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)和月球探测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)<sup>[5]</sup>表明月球两极存在羟基/水冰。此外,“卡西尼号”(Cassini)飞越月球期间利用可见-近红外测绘光谱仪观测到月面在2.8、3 μm处水和羟基吸收信号<sup>[6]</sup>，“深度撞击号”(Deep Impac)在将月球作为校准源观测期间利用高分辨率红外光谱仪探测到2.8、2.95和3.14 μm附近符合水合物特征的吸

收峰<sup>[7]</sup>,地基观测发现直射月球表面反射谱在6.1 μm处有区别于羟基(O-H键)的水分子吸收峰<sup>[8-9]</sup>。由于遥感技术的局限性、间接性,尚无法对水冰赋存状态、含量、分布、来源、迁移和保存机制等进行科学分析。为解决此问题,有必要在月球永久阴影区进行着陆就位探测和分析,利用具备物质成分识别与定量反演能力的光谱-质谱探测技术,找到是否存在水冰的确切证据,并获得其挥发分 and 同位素组成。

迄今为止,规划和开展的月球水冰就位探测任务主要有4个,分别来自美国、俄罗斯、印度和中国。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)在“阿尔忒弥斯”(Artemis)任务中将在月球极地释放挥发物探测漫游车,其主要任务目标是通过表征月球极地水和挥发物位置与分布,理解月球极地挥发物的起源并评估原位资源利用<sup>[10-13]</sup>;俄罗斯计划开展的“月球”(Luna)系列3次月球探测任务,分别是“月球25号”(Luna 25)、“月球26号”(Luna 26)和“月球27号”(Luna 27),目标是从月壤中寻找水冰和挥发物,研究月壤成分和内部结构,并探测月面附近的尘埃等离子体环境<sup>[14-17]</sup>;“月船3号”(Chandrayaan 3)探测任务成功着陆月球南极区域,

收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(62205346); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2022451)

其科学目标是探索月球南极水冰的含量、分布及来源<sup>[18-20]</sup>；“嫦娥七号”将围绕月球极地撞击坑底部永久阴影区水冰含量、分布特征和来源研究，在月球南极附近进行科学探索，其目标之一是获取着陆点水分子和氢同位素的准确数据，研究水冰的来源和含量<sup>[21-22]</sup>。此类任务的共同点是基于就位勘探平台，在月球极区指定区域或规划路径钻采处理月壤样品，并利用光谱或质谱等就位分析技术对其释放的水及挥发分组分进行定性或定量分析，以达到详细科学调查和资源勘探目的。

本文结合国际规划的多项月球极区水冰挥发分就位探测任务，重点介绍就位水冰及挥发分分析载荷中仪器探测机制、工作模式及针对水冰挥发分的地面模拟试验验证情况，并对“嫦娥七号”月壤水分子分析仪载荷中光谱、质谱仪功能、性能及探测方案进行说明，最后介绍地面验证试验情况。

## 1 月球极区水冰挥发分就位分析技术

### 1.1 VIPER就位分析仪器

#### 1.1.1 近红外挥发分光谱仪器

近红外挥发分光谱仪器是月球极地挥发物探测漫游车（Volatiles Investigating Polar Exploration Rover, VIPER）携带的有效载荷，其主要任务是在巡视或采矿期间，对月表月壤和钻具采集地下10 cm月壤堆进行近红外光谱成像，表征月表及剖面月壤水含量（包括吸附水和羟基）、月表温度、岩石矿物成分及精细地形地貌。

近红外挥发分光谱仪器（Near Infrared Volatiles Spectrometer Subsystem, NIRVSS）如图1所示<sup>[23]</sup>，由光谱仪、前置探测组件、光纤及电缆组成。其中光谱仪是双通道近红外光谱仪，两个独立通道分别测量短波和长波反射谱，联合实现对水冰（2.0、3.0 μm波段

附近）、硅酸盐的Fe<sup>2+</sup>（1.8~2.4 μm波段范围）及羟基（2.2~2.4 μm和2.7~2.8 μm波段附近）的振-转吸收谱特征测量，主要技术指标如表1所示<sup>[24]</sup>。

表1 近红外挥发分光谱仪主要技术指标  
Table 1 Key technical parameters of NIRVSS

序号	参数	光谱	
		短波	长波
1	光谱范围/nm	1 600~2 400	2 300~3 400
2	分辨率	~9 nm	~12 nm
3	视场角	36°	
4	信噪比	>100 (@2~3 mm)	
5	辐射精确度	<25%	
6	功耗	光谱仪: 12 W 前置探测组件: 5.26 W 主动光源: 12.3 W	
7	重量/kg	3.75 kg	
8	物理尺寸/cm	光谱仪: 18 × 18 × 8.5 前置探测组件: 20.4 × 13 × 15.1	

前置探测组件包括红外灯、钻孔观测相机（Drill Observation Camera, DOC）、长波定标传感器（Longwave Calibration Sensor, LCS）、LED等，光纤与光谱仪输入端透镜系统连接，通过电缆与光谱仪供电连接。其中，红外灯装有滤光片（>1 100 nm）的钨丝灯（Helioworks公司，型号EP-4317），允许在有无光照地形巡航和钻孔时照射并进行红外观测；DOC是400万像素CMOS图像传感器，通过7组LED为成像提供照明，其波长分别是348、410、540、640、740、905和940 nm；LCS利用4个热电堆传感器独立测量表面温度，通过观测9、10.6、14和25 μm波长附近热发射谱校正光谱测定的OH/H<sub>2</sub>O浓度数据。最终NIRVSS仪器通过对月表及钻削过程中月壤连续采集成像光谱以及温度数据，实现对水冰探测灵敏度优于0.25wt%<sup>[25]</sup>。

#### 1.1.2 月表挥发分质谱仪

月表挥发分质谱仪是VIPER巡视器上的有效载荷，其主要任务是提供月壤表面释放挥发分、组成分及含量。MSolo仪器如图2所示<sup>[26]</sup>，由商用四极杆质谱改装航天电子学和结构而来。增加的航天接口单元为仪器电源和通信系统提供连接，内置已知混合气体的校准气体系统允许仪器周期性校准。MSolo不仅能够测量质量数范围为1~100 amu的气体组分，包括H<sub>2</sub>、He、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>等，还具有水分子的同位素组成和丰度探测能力，通过测定太阳风成因水（~20 ppm）和彗星水（>200 ppm）D/H值和<sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O之间的差异，表征月壤水冰来源。主要技术指标如表2所示<sup>[27]</sup>。

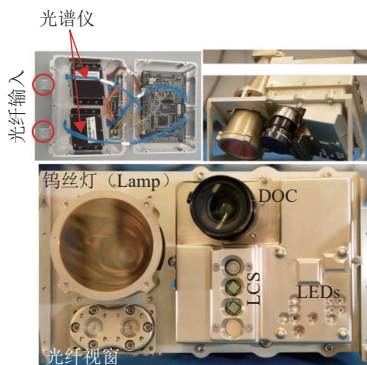


图1 近红外挥发分光谱仪器  
Fig. 1 NIRVSS

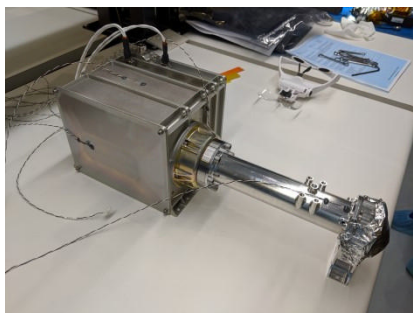


图2 月表挥发分质谱仪  
Fig. 2 MSolo

表2 月表挥发分质谱仪主要技术指标  
Table 2 Key technical parameters of MSolo

序号	参数	质谱仪
1	质量数范围	1~100 amu
2	分辨率	1 amu
3	视场角	40°
4	探测器真空度/ Torr	法拉第杯: MDPP (Minimum Detectable Partial Pressure) $1.5 \times 10^{-12}$ 电子倍增器: MDPP $1.0 \times 10^{-12}$
5	功耗	35 W
6	重量	6 kg
7	物理尺寸/ cm	15.5 × 20 × 46

MSolo每4 s完成一次连续扫描离子流强度-质荷比图,通过地面提前标定的数据运算关系将谱峰强度转化为定量的水含量值,其初始测量试验,测量重复性良好。在水含量大于15 ppm时,95%置信度区间( $2\sigma$ )测量差异的相对标准偏差1%~3%<sup>[28]</sup>。

## 1.2 LUVMI-X就位分析仪器

### 1.2.1 月表挥发分激光烧蚀分析仪

月表挥发分激光烧蚀分析仪是安装在月球挥发物探测巡视器前端的有效载荷,采用激光诱导击穿光谱技术,主要任务是在月球挥发物移动仪器漫游车(Lunar Volatiles Mobile Instrumentation-Extended, LUVMI-X)巡视路径通过激发和探测月壤表面的等离子体羽流中H、O原子、离子或电子等,表征月表水冰含量,通过检测和定量分析Mg、Ti、Al、Si、Ca、Na和K等岩石成分,表征月壤及矿物学岩石组成。

挥发分激光烧蚀分析仪(Volatiles Identification by Laser Analysis Instrument, VOILA)如图3所示<sup>[29]</sup>,由可调整聚焦光学部件、光谱仪和电子学控制单元等组成。可调整聚焦光学部件包括LIBS激光器和聚焦机构,用以对准月球车前方月面300~500 mm工作距离的不同目标。聚焦机构通过集成LED照明和LUVMI-X前向凸轮上相机检测表面光斑距离实现聚焦;LIBS

激光器是一台紧凑型Yb:YAG激光器,其发射波长1030 nm,脉冲频率10 Hz,持续时间8 ns。聚焦后激光器指向月壤目标所激发的等离子体发射光被口径50 mm的共轴型光学组件收集,并以光纤耦合的方式进入交叉Czerny-Turner微型光谱仪被识别和定量分析,实现对位于486.1 nm和656.3 nm处的氢发射谱线、777.4 nm处氧发射谱线以及Ca、Mg、Si、Fe、Al、O等其它主要岩石成分发射谱线探测,技术指标如表3所示<sup>[30]</sup>。

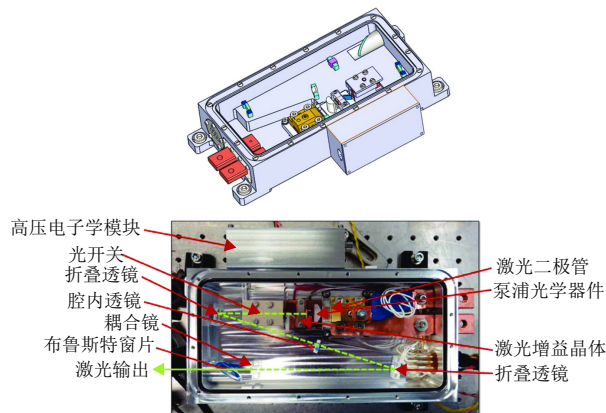


图3 月球挥发分激光烧蚀分析仪  
Fig. 3 VOILA

表3 月球挥发分激光烧蚀分析仪主要技术指标  
Table 3 Key technical parameters of VOILA

序号	参数	光谱仪
1	光谱范围	350~790 nm
2	分辨率	0.5 nm
3	视场角	40°
4	光斑大小	<190 μm
5	压强	<10 <sup>-3</sup> mbar
6	电离总剂量	2krad(Si)(@2mmAl shielding)
7	非电离总剂量	1E10 protons/cm <sup>2</sup> (60MeV) (@2mm Al shielding)
8	功耗	峰值功耗22.9 W 测量模式8.9 W
9	重量	<3 kg

月球表面高真空环境对VOILA产生的等离子体羽流大小和发射率均有显著影响,因此,通过脉冲激光能量与光谱强度的关系研究<sup>[31-33]</sup>,获得在低压<10<sup>-3</sup> mbar激光脉冲能量为15 mJ的情况下,LIBS光谱可达到最大SNR值,最终实现对岩石或月壤表面样品中H<sub>2</sub>O检测限为0.5 wt%时,氢和氧浓度检测SNR值≥10,在H<sub>2</sub>O含量≥5 wt%时,氢和氧浓度检测SNR值≥30。

### 1.2.2 浅层月壤挥发物采样分析仪

浅层月壤挥发物采样分析仪是安装在LUVMI-X后端的有效载荷。LVS是集月壤采样、气体提取处理一

体的原位分析仪器,其主要任务是对月面着陆点、永久阴影区附近以及孤石两侧暂时性阴影区进行原位采样分析,通过对钻削约15 cm深度的月壤热真空收集和测量,表征浅层月壤水冰和其它挥发性物质随深度垂直分布的情况。

LVS仪器如图4所示<sup>[34]</sup>,由插入月壤的空心钻具、中央加热元件、压力传感器、参考气体系统、电子学单元以及用于分析释放挥发物的小型化离子阱质谱仪组成。空心钻具通过有刷直流电机旋转插入月壤,长度150 mm,内径38 mm,最大可采样体积163 cm<sup>3</sup>,对应体积密度在1.5 ~ 1.7 g/cm<sup>3</sup>之间月壤的质量为245 ~ 277 g;中央加热元件在高真空下以15 W恒功率加热90 min,其最高500 °C的温度足够使月壤中水冰升华及脱附;释放后的部分水及挥发物通过小孔与空心钻头内样品室相连,被ITMS和压力传感器检测到;参考气体系统存有少量已标质谱图的化合物,如全氟三丁胺,用于ITMS在轨校准。ITMS借鉴了2014年Rosetta着陆器Philae上首次对彗星67P挥发分和有机物原位测量的质谱仪设计<sup>[35]</sup>,采用四极离子阱质谱测量方式,主要技术指标如表4所示。

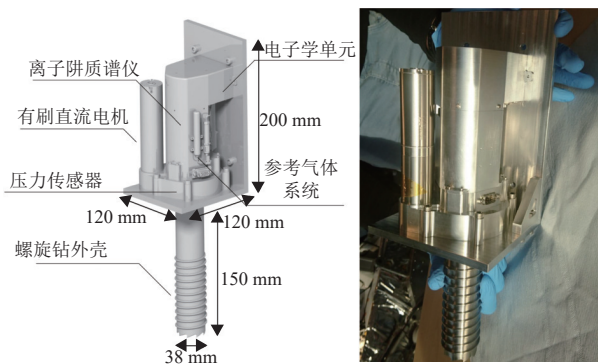


图4 浅层月壤挥发物采样分析仪  
Fig. 4 LVS

表4 浅层月壤挥发物采样分析仪主要技术指标  
Table 4 Key technical parameters of LVS

序号	参数	质谱仪
1	质量数范围	10~200 amu
2	分辨率	2 amu
3	检测下限	10 <sup>-10</sup> mbar
4	最大工作压力	10 <sup>-3</sup> mbar
5	压强范围	10 <sup>-3</sup> ~ 10 mbar
6	功耗	< 20 W
7	重量	1.9 kg
8	物理尺寸	12 cm × 12 cm × 40 cm

根据LVS对不同含水率(0.6~5.3 wt%)月壤取样、加热及分析能力的验证结果,含水率越高,释放

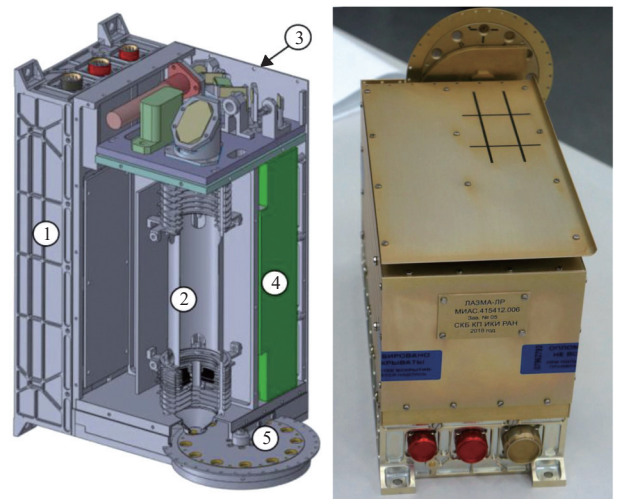
的水汽挥发物初始压力上升幅度越大,压力传感器越早饱和,然而释放后的挥发物因滞留在空心钻具或通过月壤向下逃逸,实际通过小孔向ITMS传输的气体比例难以定量,只能通过与地面校准数据仔细比较,估计出挥发物丰度数量级。

### 1.3 Luna系列就位分析仪器

#### 1.3.1 激光电离飞行时间质谱仪

激光电离飞行时间质谱仪是Luna 25和Luna 27上配合月球机械臂操纵综合体取样分析的有效载荷<sup>[36]</sup>。LAZMA-LR对LMC挖掘传送的月壤样品脉冲激光辐射电离后进行元素和同位素组成分析,可定量月壤中Fe、K、Al、Mg、Ti等化学元素与其氧化物浓度及比例,获取太阳风注入月壤中的元素含量(如H、C、N、He、Ne、Ar、Kr、Xe等),表征着陆点地质特征,测定月球风化层中化学结合水含量。

LAZMA-LR仪器如图5所示<sup>[37]</sup>,由质量分析器、激光模块、电源及电子学控制单元、样品接收单元等组成。质量分析器采用轴对称设计,由静电离子反射器和探测器组成;带聚焦光学系统的激光模块包括输出波长为1.06 μm的Nd:YAG激光器、聚焦透镜和激光辐射衰减器,其脉冲输出能量15 mJ,宽度7 ns,辐射发散度3 mrad;电源及电子学控制单元控制质谱仪、数据存储及遥测传输等,并提供衰减器、分析器栅极和微通道板(Microchannel Plates, MCP)等单元高压电源(1 000~2 200 V);样品接收单元是12孔的圆盘,将样品固定或移动引入激光照射区域。主要技术指标如表5所示。



注:①电子学模块;②质量分析器;③带聚焦光学系统的激光模块;④激光模块电源及控制单元;⑤样品接收单元。

图5 激光电离飞行时间质谱仪

Fig. 5 LAZMA-LR

表5 激光电离飞行时间质谱仪主要技术指标

Table 5 Key technical parameters of LAZMA-LR

序号	参数	质谱仪
1	质量数范围	1~250 amu
2	分辨率	<1 amu
3	动态范围	10 <sup>4</sup>
4	激光辐射光斑	30~50 μm
5	功率密度	10 <sup>9</sup> W/cm <sup>2</sup>
6	功耗	Mean Operating Power: 8 w
7	重量	2.8 kg
8	物理尺寸	13 cm × 20.6 cm × 25.4 cm

LASMA-LR分析采样月壤的绝对样品质量下限为 $5 \times 10^{-14}$  g, 检测限为50 ppmA, 经100张谱图平均时检测限可提升为5 ppmA, 相对误差 $\leq 10\%$ 。然而, 由于不同特性样品元素电离能差异以及对激光能量的非均匀吸收, LASMA-LR分析还需利用地面实验室模拟标准矿物/岩石样品分析结果引入标定系数来校正系统误差。

### 1.3.2 ProSPA 挥发物分析仪

ProSPA 挥发物分析仪 (Prospect Sample Processing and Analyzer, ProSPA) 是欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 计划搭载Luna 27完成月球资源开采、勘探、运输目标的样品处理与分析单元<sup>[38]</sup>, 也计划搭载NASA月球有效载荷服务<sup>[39-40]</sup>。ProSPA对钻具收集的月面1.2 m左右深处月壤样品进行加热提取和ITMS分析, 获取水冰及挥发物的含量、同位素丰度等, 表征月球极地地区的挥发物质资源储量。

ProSPA挥发物分析仪如图6所示<sup>[41]</sup>, 由进样系统 (Sample Inlet System, SIS) 和ProSPA科学实验室两大部分组成。SIS旋转盘上设有25个可密封加热的样品托, 以 $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率梯度或直线加热至 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 加热释放的挥发物传输至Pro SPA实验室; ProSPA科学实验室包含离子阱质谱装置和用于稳定同位素分析的扇形磁场质谱仪, 以及驱动阀、微反应器、压力传感器、标准物质等组件<sup>[42]</sup>。其中, 进样系统和离子阱质谱仪是基于“罗塞塔号”(Rosetta)、“菲莱号”(Philae)任务彗星表面成分化学分析系统和

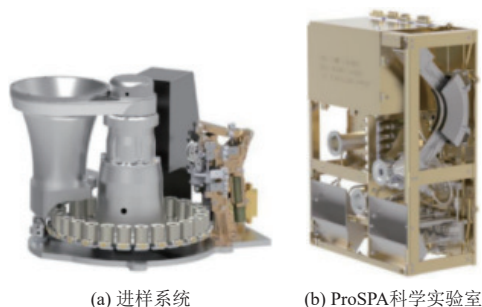


图6 ProSPA挥发物分析仪

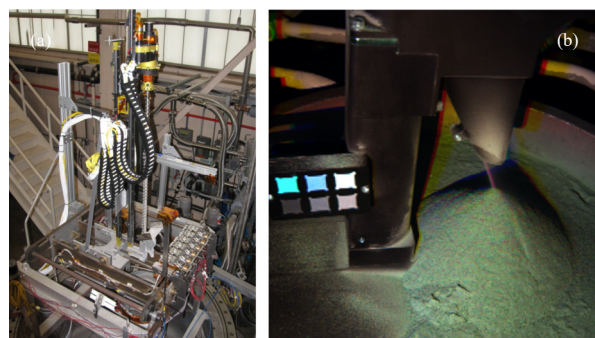
Fig. 6 ProSPA

ExoMars Rover火星探测器系统研制<sup>[43-44]</sup>, 扇形磁场质谱仪是基于“猎犬2号”(Beagle 2)火星着陆器气体分析系统研制<sup>[45]</sup>。

### 1.4 水冰挥发分测量地面模拟

#### 1.4.1 “VIPER”载荷测量水冰挥发分试验

2016年, Glenn研究中心为试验VIPER载荷测量钻孔月壤水冰含水率精度而设计了大型低温真空室装置(VF-13), 如图7(a)所示。通过真空系统将环境压力降至 $5\sim 6 \times 10^{-6}$  Torr, 并用液氮循环持续冷却, 以模拟月球环境。将制备的已知含水率模拟月壤(干壤: NU-LHT-3M, NU-LHT-2M)分别装填入2个圆管柱中, 并预先在不同深度及同一土层不同位置埋设热电偶, 监测配置含水月壤管柱内温度。待土壤平均温度达到178 K, 钻机以10 cm间隔钻取5个孔, NIRVSS光谱和LSC照明交替采集钻头提取土堆图像, 如图7所示, 将 $30\sim 40$  cm深的土壤传递至加热炉提取挥发气体供质谱仪连续测量。



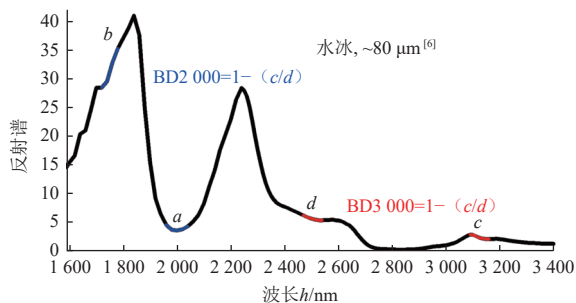
(a) 低温真空室

(b) NIRVSS和MSolo仪器测量模拟月壤堆积样品图

图7 低温真空室及NIRVSS和MSolo仪器测量模拟月壤堆积样品图

Fig. 7 Cryogenic vacuum chamber setup, and Simulated lunar soil accumulation measured by NIRVSS and MSolo instruments

月壤水冰含水率是通过对比实验室标称颗粒度( $80\text{ }\mu\text{m}$ )水冰反射光谱计算得到<sup>[46]</sup>。水分子在 $1\text{ }600\sim 3\text{ }400\text{ nm}$ 波段泛频、基频振动, 引起 $2\text{ }000\text{ nm}$ 附近和 $2\text{ }750\sim 3\text{ }100\text{ nm}$ 内分别产生低反射率包络, 如图8所示。

图8 粒度 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的水冰反射光谱Fig. 8 Reflection spectrum of water ice with a particle size of  $80\text{ }\mu\text{m}$

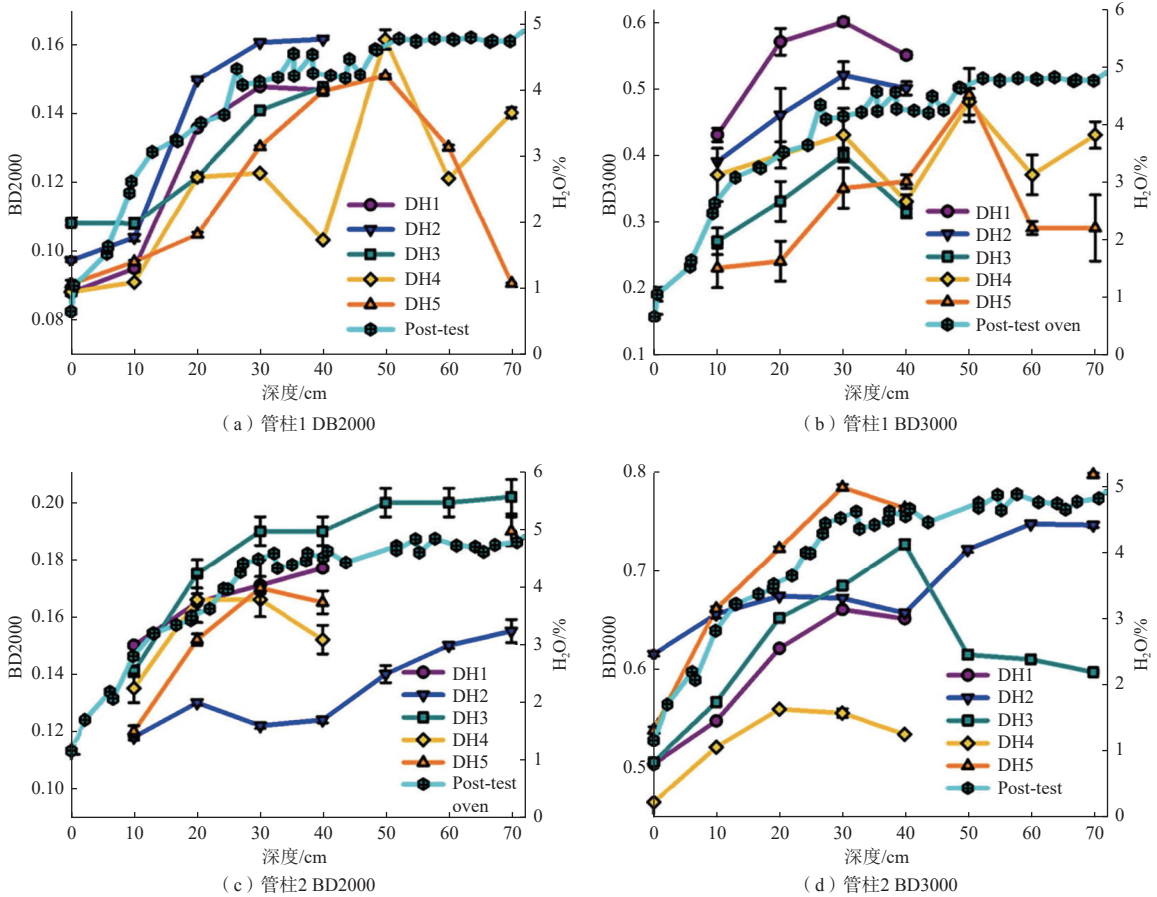
利用极小值区域内点和位于极小值区域外的连续点, 获取波段深度 (BD) 随着反射谱极小值区域内外比值的变化<sup>[47]</sup>, 其中, 相对波段深度BD2000和BD3000定义为

$$\begin{cases} \text{BD2000} = 1 - (a/b) \\ \text{BD3000} = 1 - (c/d) \end{cases} \quad (1)$$

因此水含量越高或颗粒尺寸越大的月壤样品会导致整体反射率更低, 表现为图8中a和c的反射率极小值更低, 在最大值b或d的透明区域最强, 并以此根据

BD值反映水冰的相对含量随深度变化。

试验对比随钻孔切削进程变化NIRVSS测量BD值与实际制备样品H<sub>2</sub>O质量分数, 如图9所示。随深度增加至30~40 cm处实际含水率保持在4~5 wt%之间, 不确定度为0.3 wt%。2个管柱的测量BD值也在30~40 cm处增加至稳定或在更深钻孔位置下降, 表明BD值与管柱内实际含水率具有一致趋势, 更大深度处的含水率降低可能是切削堵塞导致未有实际钻孔深度的样品堆放表面。



注: DH<sub>i</sub>表示第*i*个钻孔。

图9 NIRVSS仪器测量随钻孔深度月壤BD值与实际含水率对比  
Fig. 9 Comparison of BD values of pipe columns with two actual water content

#### 1.4.2 LUVMI-X载荷测量水冰挥发分试验

2021年, DLR光学传感系统研究所为验证月球VOILA载荷测量月球水冰性能而设计了地面试验装置, 如图10所示<sup>[48]</sup>。VOILA仪器安装在装置真空室上方, 固定工作距离400 mm。为足够模拟月面低压环境条件, 该装置使用涡轮泵将真空度降至10<sup>-3</sup> Pa, 利用液氮循环装置冷冻样品台上样品, 使用XYZ三轴机械手移动、调整样品台位置, 以便激光聚焦对准样品。

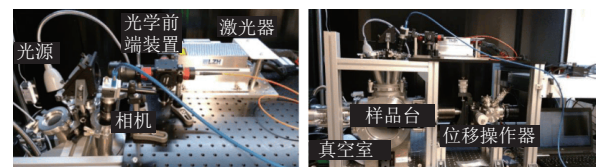


图10 VOILA载荷地面试验装置  
Fig. 10 Ground test device for VOILA

试验通过配置不同含水率的月壤, 并测量H、O的光谱线吸收强度与含水率关系。样品选用Exolith公司

制备的月壤模拟物LMS-1, 与水混合得到水冻冰的高含水模拟月壤, 与石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )混合得到低含水模拟月壤, 前者将干壤平铺轻压在样品台后滴入蒸馏水, 再利用液氮冷冻至水冰, 其含水量受大气水吸附、真空升华等影响; 而后者利用真空低压下结合水不易损失特性, 可去除吸附水干扰, 最终实现含水量从0 wt%增加到8 wt%<sup>[49]</sup>。

在0~8 wt%含水率范围, VOILA检测到不同含水率模拟月壤在656.46 nm处光谱H(I)平均信号强度变化关系(已被777.5 nm处的O(I)信号归一化)如图11所示。结果表明, H谱线信号强度随着样品中水含量增加而上升, 且当样品含水率大于1 wt%时, H(I)信号信噪比大于15。根据检测信号的阈值信噪比为3.3, 估计VOILA仪器可以检测含水率低于0.25 wt%的月壤样品, 其等效氢浓度0.03%。

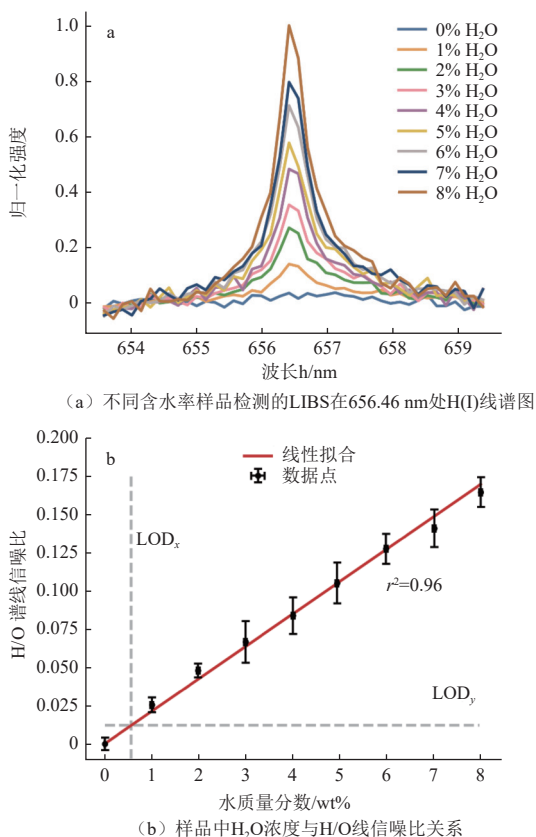


图11 VOILA仪器测量含水月壤样品H(I)/O(I)谱图及其信噪比  
Fig. 11 H(I)/O(I) spectra and signal-to-noise ratios of lunar soil samples measured by VOILA

#### 1.4.3 月壤水冰就位探测模拟试验

2022年, 中国科学院合肥物质科学研究院为开展月球永久阴影区水冰就位探测, 设计了地面水冰就位探测模拟试验平台, 如图12所示; 该平台由手套箱、

预处理室、转移过渡室、样品低温存储库、模拟试验舱、真空机械手等组成; 模拟原位月壤采样、传递、加热、分析、弃样、排气等过程, 为月球极区水冰含量探测精度研究提供重要支撑, 为在轨数据分析提供天地一致性试验保障。

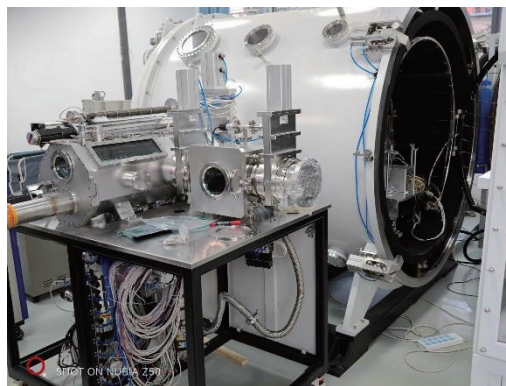


图12 地面水冰就位探测模拟试验平台  
Fig. 12 Ground test device for water ice in-situ detection simulation

## 2 “嫦娥七号”水冰挥发分就位探测

### 2.1 月壤水分子分析仪

月壤水分子分析仪(Lunar Water Molecular Analyzer, LWMA)是“嫦娥七号”任务安装在飞跃器上的科学载荷, 将对月球南极永久阴影区内水冰挥发分就位探测<sup>[50-51]</sup>。LWMA具备H<sub>2</sub>O分子和甲烷等有机分子的测定及其H同位素组成的分析功能, 以及多次样品就位采集分析功能, 配合其它有效载荷共同完成3项行星科学和资源探索科学目标: 月球永久阴影区水和挥发分含量和分布研究, 评估资源量; 区分月球永久阴影区水冰赋存状态(吸附水、水冰和从水合矿物中释放的水); 利用D/H同位素和挥发分组成, 研究月球永久阴影区水和挥发分来源; 确证月球南极永久阴影区是否存在有机质, 并测定其组成及含量。

LWMA仪器示意图如图13所示, 由飞跃器舱外取气单元, 舱内质谱单元、光谱单元、管路组件以及标定组件等组成。工作过程是取气单元接样漏斗承接来自飞跃器剖面钻采模块和浅层钻采模块采集的微量月壤样本, 并完成定容接样和加热, 进而提取其中的月壤水冰挥发分; 挥发分经管路组件进入舱内的光谱及质谱单元完成对水分子的谱分析, 其中质谱通过电磁阀和微孔两种进气方式保证宽工作压力范围; 标定组件内装有热稳定性良好的固体标样, 通过在轨产生CO<sub>2</sub>等气体对仪器进行自检和定标; 分析完成后打开排气电磁阀, 利用月球低温、高真空的背景环境将分析的气体排出。

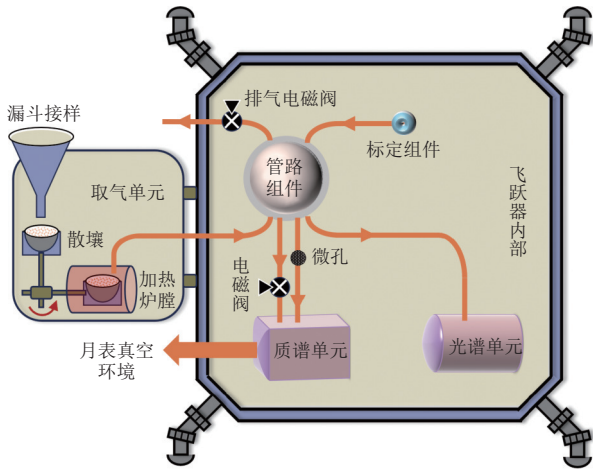
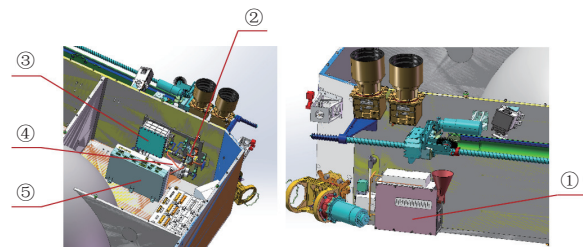


图 13 月壤水分子分析仪原理示意图  
Fig. 13 LWMA schematic diagram

LWMA 仪器在飞跃器安装位置及结构如图 14 所示。具体功能指标是取气单元实现不少于 30 次、不低于 1 g 的低温月壤有效进样, 以不低于 200 °C 有效温度加热提取月壤中挥发气体成分; 质谱单元分析月壤中 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、NH<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub> 等挥发分; 光谱单元对月壤中的水冰含量及 D/H 同位素进行高精度测量分析; 电子学单元实现对载荷内各功能模块的控制和信息处理; 管路组件将月壤中挥发出来的水分子传输到质谱腔和光学腔内实现测量; 线缆组件连接电子学控制箱和质谱、光谱物理部件间的电信号传输。



注: ①取气; ②管路组件; ③质谱; ④光谱; ⑤电子学。  
图 14 月壤水分子分析仪结构示意图  
Fig. 14 LWMA structural schematic

### 2.2 测量仪器及方案

LWMA 对飞跃器上机械臂钻采的指定深度月壤进行双炉托交替定容收集、送入加热炉提取后, 采用光学质谱联用分析方式测定其水分子及挥发物含量。

LWMA 质谱单元采用飞行时间质谱技术, 由进气管、排气管、离子源、质量分析器 (包括加速区、无场飞行区、反射区) 和检测器等部分组成, 内部结构如图 15 所示, 其原理是利用不同质荷比 ( $m/q$ ) 的带电离子通过静电场加速区, 获得相同动能后凭惯性进入一段紧凑型无场区 (长度  $L$ ) 自由飞行, 最后到达同一终点被检测的时间不同。因离子的速度与其质荷比的

平方根成反比, 通过检测离子到达终点的飞行时间  $T_f$  区分其质荷比, 飞行时间由采集系统计算起始与结束信号差值而获得, 每 2 个起始信号之间为一个飞行周期。

为实现轻量化、小型化, 质谱单元设计了垂直引入式离子源配合反射式飞行时间质量分析器, 在体积保持不变的情况下增加了离子的飞行距离, 如图 16 所示, 由调制区、加速区、无场飞行区、反射区和检测器组成, 物理部分整体体积 147 mm × 147 mm × 76 mm。

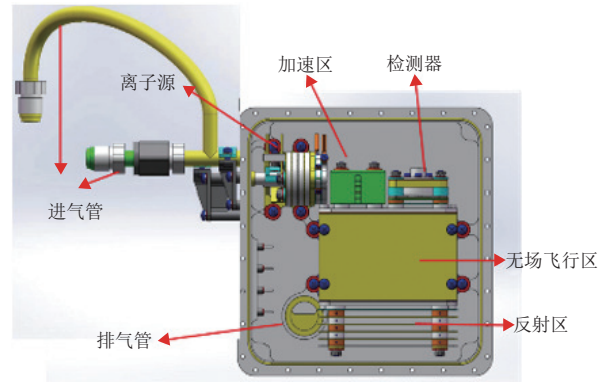


图 15 月壤水分子分析仪质谱单元  
Fig. 15 LWMA mass spectrometry unit

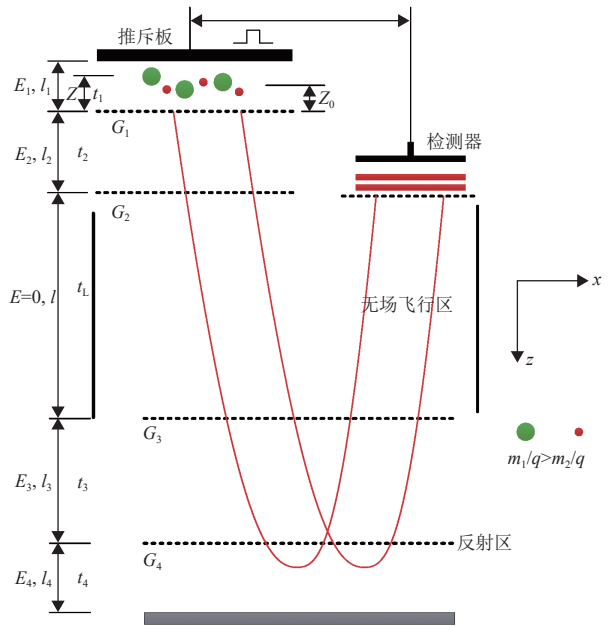


图 16 反射式飞行时间质谱系统工作原理  
Fig. 16 Reflectance Time-of-Flight Mass Spectrometry (RTOFMS) system working principle

离子的总飞行时间为

$$t(z) = t_1 + t_2 + 2(t_3 + t_4 + t_5) \tag{2}$$

其中:  $t_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 分别是离子在调制区、加速区、无场飞行区、第一级反射区和第二级反射区的飞行时间。

$$\begin{cases} t_1 = \frac{1}{E_1} \sqrt{\frac{2m}{q}} (\sqrt{zE_1}) \\ t_2 = \frac{1}{E_2} \sqrt{\frac{2m}{q}} (\sqrt{zE_1 + l_2E_2} - \sqrt{zE_1}) \\ t_3 = \sqrt{\frac{2m}{q}} \frac{l}{2\sqrt{zE_1 + l_2E_2}} \\ t_4 = \frac{1}{E_3} \sqrt{\frac{2m}{q}} (\sqrt{zE_1 + l_2E_2 + l_3E_3} - \sqrt{zE_1 + l_2E_2}) \\ t_5 = -\frac{1}{E_4} \sqrt{\frac{2m}{q}} (\sqrt{zE_1 + l_2E_2 + l_3E_3}) \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $E_1$ 是排斥极与 $G_1$ 之间的电场强度;  $E_2$ 是 $G_1$ 与 $G_2$ 之间的电场强度;  $E_3$ 是 $G_3$ 与 $G_4$ 之间的电场强度;  $E_4$ 是 $G_4$ 与反射板之间的电场强度;  $Z$ 是离子初始位置距 $G_1$ 的距离。得到总的飞行时间 $t(z)$ 为

$$t(z) = \sqrt{\frac{2m}{qE_1}} \left[ \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \sqrt{z} + \dots \left(\frac{E_1}{E_2} - 2\frac{E_1}{E_3}\right) \sqrt{z + \frac{l_2E_2}{E_1}} + \dots \frac{l}{\sqrt{z + \frac{l_2E_2}{E_1}}} \right] + \dots 2 \left(\frac{E_1}{E_3} - \frac{E_1}{E_4}\right) \sqrt{z + \frac{l_2E_2}{E_1} + \frac{l_3E_3}{E_1}} \quad (4)$$

LWMA光谱单元采用可调谐激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)探测水分子的同位素( $H_2^{16}O$ 、 $H_2^{18}O$ 、 $H_2^{17}O$ 、 $HD^{16}O$  4种主同位素)组成,定量水冰含量及D/H同位素丰度,其原理是利用输出特定波长的激光,扫描目标气体分子的特征吸收光谱轮廓,通过计算气体分子的吸收量来获取目标气体分子的含量信息。TDLAS测量满足Beer-Lambert定律

$$I = I_0 \exp(-k_v L) \quad (5)$$

其中:  $I$ 为透过光强;  $I_0$ 为初始光强;  $L$ 为总的气体吸收光程;  $k_v$ 为吸收系数,是吸收气体的分压 $P$ 、分子的吸收线强 $S(T)$ 、分子的吸收线型函数 $g(\nu - \nu_0)$ 的函数

$$k_v = NS(T)g(\nu - \nu_0) \quad (6)$$

对式(5)进行积分处理

$$A = \int \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) d\nu = \int S(T)g(\nu - \nu_0) NL d\nu \quad (7)$$

其中:  $A$ 是中心波数为 $\nu_0$ 的吸收谱线的积分面积,且 $\int g(\nu - \nu_0) d\nu = 1$ ,得到准确的分子数密度信息

$$PX = \frac{A}{S(T)L} \quad (8)$$

为提高光谱单元检测灵敏度,结合光学长程技

术,设计了双光路Herriott型多次反射池,实现了低耗气量体积(<380 mL)的折叠式吸收光程,分别为9 m和4 m,内部结构如图17所示,由激光器组件、探测器组件、Herriot多次反射池、光学准直系统等部分组成,激光器1和2出射光经耦合透镜1和2准直后入射光学多通池,在池内反射镜的外圈进行多次反射后出射,由聚焦透镜1和2聚焦到探测器1和2上,形成探测光路1和2,其物理部分整体体积为280 mm × 90 mm × 90 mm。

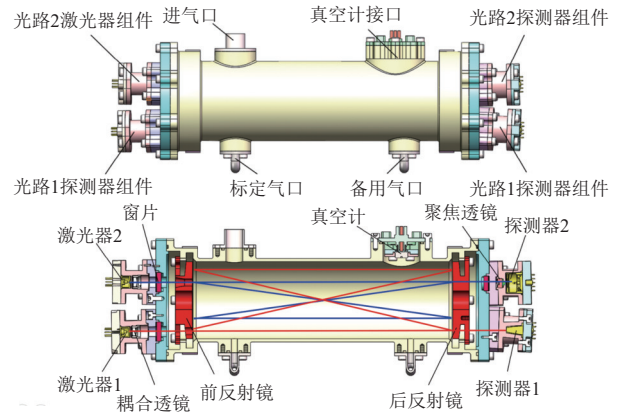


图17 月壤水分子分析仪光谱单元  
Fig. 17 LWMA spectroscopy unit

LWMA的主要参数和性能如表6所示,针对水冰及挥发分测量,载荷整机技术指标根据探测任务分为两类:一是 $H_2O$ 检测限和含水量测试精度,实现对高于0.01 wt%含水率的水冰样品识别,以及在含水率大于0.1 wt%时,水含量测量误差优于50%;二是H同位素分析误差,在样品水冰含量大于0.5 wt%时D/H检测精度优于50%。

表6 月壤水分子分析仪光/质谱主要技术指标

Table 6 Key technical parameters of LWMA

序号	参数	光谱单元	参数	质谱单元
1	光谱范围	3 659.5~3 662.5 $cm^{-1}$	质量数范围	1~200 amu
2	分辨率	<1‰ $cm^{-1}$	分辨率	<1 amu@ 1~100 amu<5 amu@ 101~200 amu
3	信噪比	1 000 @水汽压力>31 Pa	动态范围	10 <sup>4</sup>
4	$H_2O$ 检测限	优于0.01 wt%	最低检测限	4 × 10 <sup>-5</sup> Pa
5	H同位素 分析误差 (@>0.5 wt%)	优于50‰	进气压力 范围	4 × 10 <sup>-2</sup> ~ 2 000 Pa
6	样品水冰含 量测量误差	优于50% (@>0.1 wt%)		
7	功耗	峰值功耗 ≤ 70 W 平均功耗 ≤ 50 W		
8	重量	≤ 8.5 kg		
9	寿命	≥ 3 months		

### 2.3 水冰挥发分载荷比较

目前国内计划就位探测月球永久阴影区水冰和

挥发分的任务多采取月面钻取含水冰月壤方式, 结合挥发分提取和载荷分析系统对水冰挥发分含量及成分进行测量。除月壤挥发物提取结构方面的显在差异外, 其功能与指标差异主要源于不同载荷分析技术。VIPER、Luna 25及Luna 27任务中采用宽波段红外光谱技术测量水冰, 具备区分羟基、吸附水、水冰等赋存形态的能力, 而LWMA采用窄线宽激光吸收光谱技术, 一方面, 激光吸收光谱技术由于其分辨率高, 可以实现分子单根谱线测量, 在定量分析水冰挥发分方面具有更高精度; 另一方面通过准确定量特定谱段水分子的同位素, 能确定同位素丰度, 判断月球水冰来源。

### 3 “嫦娥七号”水冰及挥发分测量地面模拟应用验证

基于中国科学院合肥物质研究院搭建的月球水冰就位探测模拟试验平台, LWMA已完成多项针对水冰及挥发分测量的机构性能测试、仪器标定、探测全流程模拟等地面验证试验, 本文分别针对极低含水率月壤工况是否能给出有无水判断、不同加热提取温度对同位素测量影响这2个方面验证, 给出极低水含量的光/质谱测量性能验证、不同加热提取温度含水月壤D/H值测量试验。

#### 3.1 极低水含量的光/质谱测量性能试验

首先模拟极低水含量试验条件, 根据月球表面高真空环境导致微量的水分子是以极性吸附形式与月壤结合, 其月壤比表面积介于 $0.02 \sim 0.78 \text{ m}^2/\text{g}$ 之间, 取典型值为 $0.50 \text{ m}^2/\text{g}$ , 月壤平均粒径为 $68 \mu\text{m}$ , 以及吸附水分子直径为 $2.75 \text{ \AA}$ 的有效表面积约为 $6 \text{ \AA}^2$ , 计算出单层水分子的表面覆盖率, 得到 $1 \text{ g}$ 月壤的单层吸附水质量分数约为 $0.0252 \text{ wt}\%$ 。根据 $PV = nRT$ 公式, 对应容积为 $437 \text{ mL}$ 的LWMA中水汽压强为 $80.8 \text{ Pa}$ , 根据对极低含水率月壤加热提取和管壁吸附损失试验结果, 提取效率和气体传输过程损失比例分别为 $30\%$ 和 $50\%$ , 剩余进入光谱和质谱腔体的水汽压强约为 $12 \text{ Pa}$ 。

试验系统主要由水汽发生单元、静态膨胀进样管路、光谱-质谱测量单元和真空抽气系统4部分组成。其中水汽发生单元利用PAL自动进样器向高温汽化室中注入微量液态水并汽化, 汽化室容积为 $V_1$ , 汽化温度为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ , 充分汽化后等效于稳压室, 经静态膨胀进样管路连接的光谱-质谱测量单元体积为 $V_2$ , 根据波义耳-马略特定律有

$$p_1 V_1 = p_{1,2} (V_1 + V_2) \quad (9)$$

其中:  $p_1$ 为前级定量进样量对应的水汽压强;  $p_{1,2}$ 为膨胀后实际光谱-质谱单元内水汽平衡压强, 可由体积

比准确计算或皮拉尼真空计测量。真空抽气系统通过抽气泵组持续抽真空排空干扰水汽, 在光谱和质谱单元测量腔室内真空度达 $10^{-2} \text{ Pa}$ 后, 打开阀控将微量 $11 \text{ Pa}$ 水汽以气压差驱动的形式通过管路组件和限流微孔分别进入光谱和质谱。

在质谱离子源内部电离后经质量分析器被检测器检测不同质荷比的离子强度, 质谱图如图18所示; 在光谱Herriot光学池内吸收特定波段激光后经光电探测器检测随波长变化的归一化吸光度信号, 光谱图如图19所示。

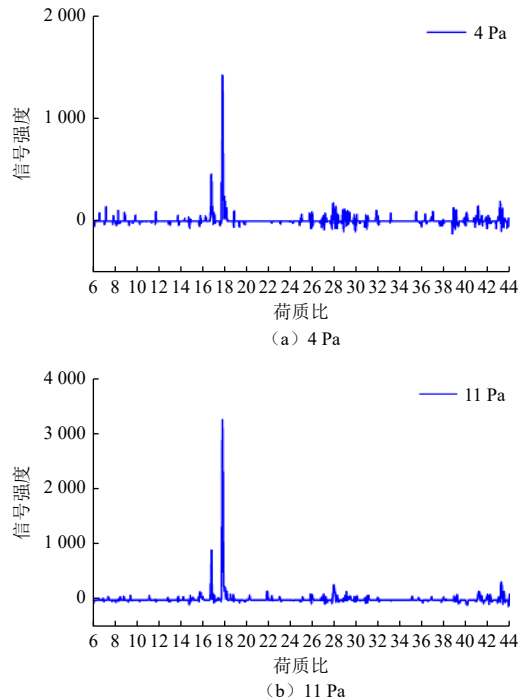


图 18 低含水量 (4 Pa、11 Pa) 测量不同荷质比质谱图  
Fig. 18 Signal intensity of different mass ratios measured by mass spectrometry at low water content (4 Pa, 11 Pa)

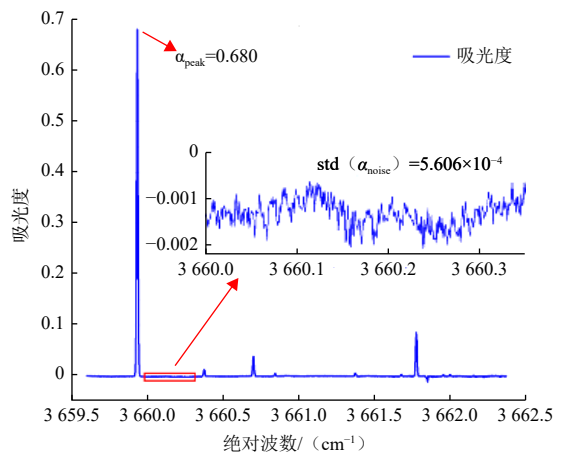


图 19 低含水量 (11 Pa) 不同波长吸光度光谱图  
Fig. 19 Absorbance plots at different wavelengths for spectral measurements at low water content (11 Pa)

根据试验结果,表明在限流微孔前低至4~11 Pa的水汽压强条件下,质谱单元可明显检测荷质比为18 amu的水分子,且随压强增加,谱峰强度增加;在11 Pa水汽压强下,光谱单元在3 659.92  $\text{cm}^{-1}$ 处 $\text{H}_2^{16}\text{O}$ 水汽吸收强度达到0.68,而光谱噪声标准偏差为0.000 5,按3倍噪声为光谱仪的检测限计算(为0.001 5),当前灵敏度下对水汽压强的检测限为0.02 Pa,考虑到航天环境下,光谱性能可能会变差,留1个量级的余量,水的检测限依然有0.2 Pa。结果均验证了光谱和质谱性能满足在极微量含水月壤样品工况下仍能给出有无水的判断。

### 3.2 不同加热温度含水月壤D/H值测量

考虑月球极区阴影区能量资源的有限性,LWMA需在指定功率指标及加热时间内实现月壤样品水及挥发分的提取。为验证有限加热时长内加热温度是否会对水的D/H同位素造成分馏影响,试验利用采用的典型粒径级配月壤样品,粒径级配参考“嫦娥五号”和“阿波罗16号”(Apollo 16)返回样品组构信息模拟。通过加入液态标准水样( $\delta D = -63.4\%$ )后液氮冷冻的方式制备1wt%含水模拟月壤(即脏冰),并对比等水量纯冰样品在分别加热200  $^{\circ}\text{C}$ 和400  $^{\circ}\text{C}$ 温度工况下,提取的水汽通入LWMA光谱单元,所获得连续测量随加热15 min时长变化的 $\delta D$ 值,取最后 $\delta D$ 值稳定阶段结果,每组试验重复5次,并获得标准偏差,结果如图20所示。

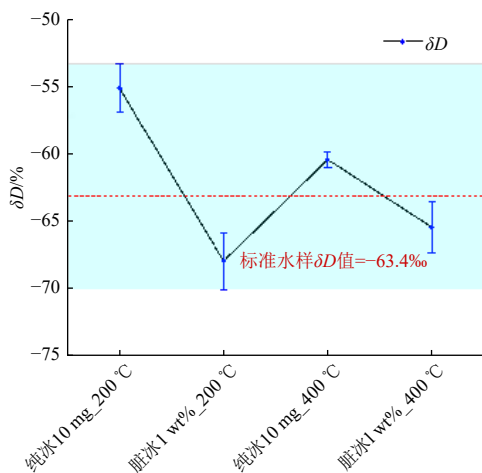


图20 不同加热温度下纯冰/脏冰LWMA光谱测量 $\delta D$ 对比

Fig. 20 Comparison of  $\delta D$  measured by pure/dirty ice LWMA spectra at different heating temperatures

根据试验结果,表明等水量纯冰样品测量得到的 $\delta D$ 值相较标准水样原始 $\delta D$ 值以及脏冰样品测量 $\delta D$ 值均呈现富氘趋势,偏差为+3%~+10%,并且高加热温度工况,富氘趋势愈不明显,推测原因是纯冰加热提取过程中因管壁吸附过程D和H同位素的质量分馏导致

H同位素相较D同位素比率减小;而脏冰样品测量得到的 $\delta D$ 值相较标准水样原始 $\delta D$ 值呈现贫氘趋势,偏差为-3%~-7%,并且高加热温度工况,贫氘趋势愈不明显,推测原因是脏冰加热提取过程中因月壤对D和H同位素的吸附分馏导致更多比率D同位素相较H同位素滞留在月壤中。验证了在200  $^{\circ}\text{C}$ 加热温度和时长有限情况下LWMA仪器对含水月壤加热提取过程同位素测量偏差在15%左右。

## 4 结论

本文在研究月球极地水冰就位探测分析技术现状的基础上,分析了目前针对月壤水冰及挥发分地面相关模拟应用验证情况,最后介绍了中国针对月球水冰探测研究的科学有效载荷探测方案和仪器性能,以及针对水冰及挥发分相关科学目标的地面验证试验结果,为未来的资源勘探任务中确定水冰含量、分布特征和来源研究提供重要支撑。

## 参考文献

- [1] NOZETTE S. The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [2] FELDMAN W C. Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998, 281(5382): 1496-1500.
- [3] PIETERS C M. Character and spatial distribution of OH/ $\text{H}_2\text{O}$  on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 568-572.
- [4] SRIDHARAN R. Direct evidence for water ( $\text{H}_2\text{O}$ ) in the sunlit lunar ambience from CHACE on MIP of Chandrayaan I[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(6): 947-950.
- [5] COLAPRETE A. Supporting online material for: detection of water in the LCROSS ejecta plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 463-468.
- [6] CLARK R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 562564.
- [7] SUNSHINE J M. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 565-568.
- [8] HONNIBALL C I. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(2): 121-127.
- [9] HONNIBALL C I. Regional map of molecular water at high southern latitudes on the Moon using 6  $\mu\text{m}$  data from the stratospheric observatory for infrared astronomy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(9): e2022GL097786.
- [10] ANTHONY C. An overview of the volatiles investigating polar exploration rover (viper) mission[C]//Proceedings of AGU Fall Meeting Abstracts. [S. l.]: AGU, 2019.
- [11] GERALD S. Nasa lunar ISRU strategy[C]//Proceedings of "What next for space resource utilisation" Workshop. [S. l.]: NASA, 2019.
- [12] SMITH K E. The VIPER mission, a resource-mapping mission on another celestial body[C]//Proceedings of SRR XXII Meeting Colorado

- School of Mines. Golden, Co: Colorado School of Mines, 2022.
- [13] CHIODINI S. Mars rovers localization by matching local horizon to surface digital elevation models[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). [S. l.]: IEEE, 2017.
- [14] DAVID H. The ESA prospect payload for LUNA 27: development status and science activities[C]// Proceedings of EPSC2021-291. Copernicus Meetings. Held Virtually: European Space Research and Technology Centre, 2021.
- [15] TRETYAKOV V I, ZELENYI L M, MITROFANOV I G. Overview of Luna-27 science instruments[C]//The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3. Moscow, Russia: Space Research Institute, 2020.
- [16] DJACHKOVA M V. Selection of Luna-25 landing sites in the south polar region of the Moon[J]. *Solar System Research*, 2017, 51: 185-195.
- [17] MITROFANOV I G. Luna-25: the first polar mission to the Moon[J]. *Solar System Research*, 2021, 55: 485-495.
- [18] MYLSWAMY A. Chandrayaan-2: India's first soft-landing mission to Moon[C]//Proceedings of 39th COSPAR Scientific Assembly. [S. l.]: COSPAR, 2012.
- [19] SUNDARARAJAN V. Overview and technical architecture of India's Chandrayaan-2 mission to the Moon[C]//Proceedings of 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. [S. l.]: AIAA, 2018.
- [20] LAXMIPRASAD A S. Laser induced breakdown spectroscopy on Chandrayaan-2 rover: a miniaturized mid-UV to visible active spectrometer for lunar surface chemistry studies[J]. *Current Science*, 2020, 118(4): 573-581.
- [21] 王帅. 2021年全球深空探测领域发展综述[J]. *国际太空*, 2022(2): 20-24
- [22] 冯华, 吴伟仁. 探月工程四期还将实施3次任务[J]. *国防科技工业*, 2022(3): 17.
- [23] ROUSH T L, COLAPRETE A, COOK A M, et al. Volatile monitoring of soil cuttings during drilling in cryogenic, water-doped lunar simulant[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(5): 1025-1033.
- [24] ROUSH T L. The Volatiles Investigating Polar Exploration Rover (VIPER) Near Infrared Volatile Spectrometer System (NIRVSS)[C]//Proceedings of 52nd Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: ESA, 2021.
- [25] RYAN V. VIPER: chasing volatiles, running from shadows[C]//Proceedings of NASA Ames Summer Series Talk. Moffett Field, CA, US: Ames Research Center, 2020.
- [26] RYAN V. VIPER-volatiles investigating polar exploration rover: mission overview[C]//Proceedings of International Small Satellite Conference. Virtual, US: Committee on Space Research, 2020.
- [27] ZACNY K. TRIDENT drill for VIPER and PRIME-1 Missions to the Moon[J]. *Earth and Space*, 2022, 2021: 465-474.
- [28] STEVEN O. Use of a dynamic radioisotope power source for a long duration lunar science rover[C]// Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space (NETS-2022). Cleveland, OH, US: American Nuclear Society, 2022.
- [29] JEREMI G, DIEGO A U. LUVMI-X: an innovative instrument suit and versatile mobility solution for lunar exploration[C]//Proceedings of International Astronautical Congress. Dubai, United Arab Emirates: International Astronautical Federation, 2021.
- [30] Ganceta J. LUVMI-X rover: test results and prospects[C]//Proceedings of International Astronautical Congress. Paris, France: International Astronautical Federation, 2022.
- [31] CHUMIKOV A E. LASMA-LR laser-ionization mass spectrometer onboard Luna-25 and Luna-27 missions[J]. *Solar System Research* 55 (2021): 550-561.
- [32] VOGT D, SCHRDER S, HÜBERS H W, et al. LIBS for volatile detection in the lunar polar region[C]//Proceedings of 51st Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute (LPI) and NASA Johnson Space Center (JSC), 2020.
- [33] LOSEKAMM, MARTIN J. Assessing the distribution of water ice and other volatiles at the lunar south pole with LUVMI-X: a mission concept[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3: 229.
- [34] BISWAS J, SHERIDAN S, PITCHER C, et al. Searching for potential ice-rich mining sites on the Moon with the Lunar Volatiles Scout[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 181: 104826.
- [35] MORSE A. Low CO/CO<sub>2</sub> ratios of comet 67P measured at the Abydos landing site by the Ptolemy mass spectrometer[J]. *Astron. Astrophys.* 2015, 583, 42.
- [36] CHUMIKOV A E, CHEPTSOV V S, MANAGADZE N G. Accuracy of analysis of the elemental and isotopic composition of regolith by laser time-of-flight mass spectrometry in the future Luna-Glob and Luna-Resurs-1 missions[J]. *Solar System Research*, 2020, 54: 288-294.
- [37] CHUMIKOV A E, CHEPTSOV V S, WURZ P, et al. Design, characteristics and scientific tasks of the LASMA-LR laser ionization mass spectrometer onboard Luna-25 and Luna-27 space missions[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2021, 469: 116676.
- [38] BARBER S J, SMITH P H, WRIGHT I P, et al. ProSPA: the science laboratory for the processing and analysis of lunar polar volatiles within PROSPECT[C]//Proceedings of 48th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute (LPI) and Universities Space Research Association, 2017.
- [39] COHEN B A, FARRELL W M, BARBER S J, et al. In-situ studies of the lunar water cycle using a CLPS-delivered ion-trap mass spectrometer (PITMS)[C]//Proceedings of Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group. Washington, DC: Universities Space Research Association (USRA), 2019.
- [40] COHEN B A, BARBER S, FARRELL W M, et al. The Peregrine Ion Trap Mass Spectrometer (PITMS): A CLPS-Delivered Ion-Trap Mass Spectrometer for In-Situ Studies of the Lunar Water Cycle[C]//Proceedings of 51st Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Houston, Texas, USA: Lunar and Planetary Institute, 2020.
- [41] BARBER S J. ProSPA: analysis of lunar polar volatiles and ISRU demonstration on the Moon[C]//Proceedings of 49th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute, 2018.
- [42] EMILY T, PHILIPP H. Thermal analysis and early design considerations for ESA's ProSPA package on-board the roscosmos Luna-27 lander[C]//Proceedings of International Conference on Environmental Systems (ICES), 2020, Held Virtually. [S. l.]: ICES Technical Organizing Committees, 2020.
- [43] FINZI A E, ZAZZERA F B, DAINESE C, et al. SD2-How to sample a comet[J]. *Space science reviews*, 2007, 128: 281-299.
- [44] WRIGHT I P, SHERIDAN S, BARBER S J, et al. CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko

- revealed by Ptolemy[J]. *Science*, 2015, 349(6247): aab0673.
- [45] WRIGHT I P. Meteorites, Mars and Beagle 2—from novel analysis in the laboratory to pioneering experiments in space[J]. *Analyst*, 2003, 128(11): 1300-1303.
- [46] BALDRIDGE A M, HOOK S J, GROVE C I, et al. The ASTER spectral library version 2.0. [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 711-715.
- [47] CLARK R N. Water frost and ice: the near-infrared spectral reflectance 0.65-2.5  $\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1988, B4: 3087-3096.
- [48] RICHTER L, DEIML M, GLIER M, et al. Development of the VOILA LIBS instrument for volatiles scouting in polar regions of the Moon[C]//*Proceedings of SPIE 11852, International Conference on Space Optics — ICSO 2020, 1185211*. Dubrovnik: Croatia, European Space Agency, 2021.
- [49] VOGT D S, SCHRÖDER S, RICHTER L, et al. VOILA on the LUVMI-X Rover: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for the Detection of Volatiles at the Lunar South Pole[J]. *Sensors*, 2022, 22, 9518.
- [50] JIA Y Z. Research of Lunar Water-Ice and Exploration for China's Future Lunar Water-Ice Exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 0026.
- [51] LIU, Y W. Water extraction from icy lunar regolith by drilling-based thermal method in a pilot-scale unit[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202: 386-399.

作者简介:

**李想**(1995–), 女, 特任副研究员, 主要研究方向: 痕量气体及同位素高灵敏在线检测及标定方法研究。

通信地址: 中国安徽省合肥市蜀山湖路350号安徽光学精密机械研究所综合楼(230031)

电话: (0551)65591539

E-mail: [xlee@aiofm.ac.cn](mailto:xlee@aiofm.ac.cn)

**曹乃亮**(1984–), 男, 副研究员, 主要研究方向: 月球及深空光谱探测技术研究。**本文通信作者。**

通信地址: 中国安徽合肥市蜀山湖路350号安徽光机所综合楼(230031)

电话: (0551)65591539

E-mail: [yinf.1984@163.com](mailto:yinf.1984@163.com)

## Design for In-Situ Water Ice Analysis in the Lunar Polar Region

LI Xiang<sup>1</sup>, WANG Xingping<sup>1</sup>, LU Wenzhen<sup>1</sup>, GUO Meiru<sup>2</sup>, HUANG Zhengxu<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>4</sup>,  
XU Zhenyu<sup>1</sup>, YAO Lu<sup>1</sup>, RUAN Jun<sup>1</sup>, KAN Ruifeng<sup>1</sup>, CAO Nailiang<sup>1</sup>

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangzhou 510623, China;

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

**Abstract:** It is crucial to directly confirm the presence of water by detecting water ice and its content in the lunar polar region in situ. Spectroscopy and mass spectrometry are both important tools for identifying and quantifying material composition. They can complement each other to achieve comprehensive detection of water ice, volatile content, and H isotope abundance in the lunar polar region. The paper introduces the spectroscopy and mass spectrometry technique with Luna 25, Luna 27 and Viper as examples of typical in-situ detection applications. It includes the detection mechanism, operating mode and instrument functions, performance and applications. In last, we provided a brief introduction to the upcoming application of the “Chang’e-7” lunar polar region water molecule analyzer. This instrument comprises a laser absorption spectrometer, which is responsible for the in-situ analysis of  $\text{H}_2\text{O}$  and HDO, and a time-of-flight mass spectrometer that enables the analysis of gas molecules with mass numbers  $< 200$  amu, such as  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$ . The scheme can support in-situ analysis of water ice for lunar south pole landing missions.

**Keywords:** lunar polar region; lunar water ice; in-situ exploration; lunar water molecular analyzer

### Highlights:

- For water ice volatiles, a review of in-situ water ice detection technique with different equipment is summarized.
- The ground verification tests of lunar icy soil analysis from international expected lunar water ice detection mission are introduced.
- The characteristics and performance of Chang’e 7 lunar soil water molecule analyzer and its ground verification tests are analyzed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]