

## 月球表面原位光谱探测技术研究与应用 (特约)

何志平, 李春来, 吕 刚, 袁立银, 徐 睿, 王建宇

(中国科学院空间主动光电技术重点实验室 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 探测月球与行星表面物质化学成分是了解其起源及演化历史的关键, 而光谱探测技术则是物质成分识别与定量反演研究的重要手段。原位 (In-Situ) 光谱探测有别于空间探测中的环绕器遥感及采样返回探测, 是指在目标现场进行的近距离光谱探测。我国“嫦娥三号”任务科学研究与资源勘查, 需要开展月球表面原位光谱探测技术研究, 突破凝视型时序扫描的新型声光光谱探测关键技术, 研发适应表面恶劣环境的高性能、轻小型、高可靠仪器, 在国际上率先实现月球表面光谱原位探测及分析。论文结合以“嫦娥三号、四号”为典型应用的红外成像光谱仪, 介绍据此发展起来的月球表面原位光谱探测技术, 包括探测机制、工作模式及仪器的功能、性能与应用; 最后, 也简要介绍了即将应用的“嫦娥五号”月球矿物光谱分析仪。

**关键词:** 月球探测; 光谱技术; 原位探测

**中图分类号:** P237      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201006

## Research and applications of In-Situ lunar surface spectral detection technology (Invited)

He Zhiping, Li Chunlai, Lv Gang, Yuan Liyin, Xu Rui, Wang Jianyu

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Exploring the chemical composition of materials on the surface of the moon and planets is the key to research its origin and evolution history. Spectral detection technology is the major methods of material composition recognition and quantitative inversion. In-Situ spectral detection is different from remote sensing and sampling return detection, it refers to the short distance spectral detection performed at the target site. The lunar science research and resource exploration of "Chang'e-3" mission need to implement the first In-Situ spectral detection technology on the lunar surface, by breaking through the key technologies of the new acousto-optic spectroscopic detection of staring time series scanning, we have developed high-performance, light and small, highly reliable instruments, adapted to the harsh surface environment, and become the first in the world to realize In-Situ spectral detection and analysis on the lunar surface of the moon. The paper takes "Chang'e-3 and 4" as typical applications, and introduces the In-Situ spectral detection technology of the lunar surface, including detection mechanism, working mode and the function, performance and application of the instrument; Finally, the "Chang'e-5" lunar mineral spectrometer was introduced which will be applied soon.

**Key words:** lunar surface detection; spectral technology; In-Situ spectral detection

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (11941002); 上海市优秀学术/技术带头人计划 (19XD1424100)

作者简介: 何志平 (1977-), 男, 研究员, 主要从事光电技术与系统方面的研究。Email: hzping@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

月球与行星科学主要研究天体的运动和轨道、表面形貌、物质组成、内部结构、空间环境等<sup>[1-2]</sup>。月球表面主要是由大小不同且形状各异的矿物组成,如辉石、斜长石、橄榄石和钛铁矿等<sup>[3]</sup>。这些矿石在可见近红外谱段表现出独特的光谱特征,获取其光谱信息一直是月球表面矿物成分识别与定量反演的重要手段之一,科学成果也很丰富<sup>[4-5]</sup>。

原位 (In-Situ) 光谱探测,是指在目标现场进行的近距离光谱探测<sup>[6-7]</sup>。相对环绕探测及采样分析而言,原位光谱探测因现场、实时探测且同时具备高分辨、高性能且不损伤目标等优势,成为当前各航天大国竞相攻关,重点突破的核心技术。

面向我国探月工程中“嫦娥三号”任务的科学研究与资源勘查的战略需求,我国开展了月球表面原位光谱探测技术研究,克服了月球表面原位场景中低光照、宽温度等极端恶劣空间环境影响,研制了“嫦娥三号”、“嫦娥四号”红外成像光谱仪,在国际上首次成功实现月球表面原位光谱探测。

论文结合红外成像光谱仪,重点介绍了原位光谱技术的探测机制、工作模式及典型应用,并对后续应用的“嫦娥五号”月球矿物光谱分析仪的功能、性能及探测特性进行了说明,最后介绍了其在月球表面的应用状况。

## 1 月球表面原位光谱探测仪器

### 1.1 红外成像光谱仪

红外成像光谱仪 (Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer, VNIS) 是“嫦娥三号、四号”巡视器 (月球车) 载有效载荷<sup>[4,8]</sup>,红外成像光谱仪由光谱仪探头及电控箱组成,通过电缆组件连接,其中探头安装于巡视器舱外,而电控箱部分安装在巡视器箱内。红外成像光谱仪的主要任务是在巡视器停止时,对月表目标进行可见近红外光谱成像及短波红外光谱探测,获取月表目标的光谱和几何图像数据,完成巡视区探测点矿物组成、含量 (丰度) 和与化学成分的原位分析。

红外成像光谱仪如图 1 所示<sup>[4]</sup>,由可见近红外光

谱成像通道 (0.45 ~ 0.95  $\mu\text{m}$ ) 和短波红外通道 (0.9 ~ 2.4  $\mu\text{m}$ ) 组成,通过接收月表目标漫反射的太阳辐射来完成对目标光谱的探测,主要技术指标如表 1 所示<sup>[4]</sup>。红外成像光谱仪采用声光可调滤光器 (AOTF) 作为核心分光元件,其系统框图如图 2 所示,具体包括声光调制分光光学系统、超声驱动定标防尘隔热一体化组件、轻型复合结构、数据获取及处理模块,主控系统等<sup>[5,9]</sup>。月球表面矿物反射的太阳辐射,进入成像光谱仪,由仪器首先准直成平行光束,再由声光调制滤光器 (AOTF) 调制,形成某一波长的准单色光,会聚到探测器上,由此得到月表观测目标的单波段光谱及图像。红外成像光谱仪采用轻型超声电机实现定标、防尘、隔热功能,满足仪器在月面的昼、夜生存、防尘等环境适应性以及轻小型化要求。

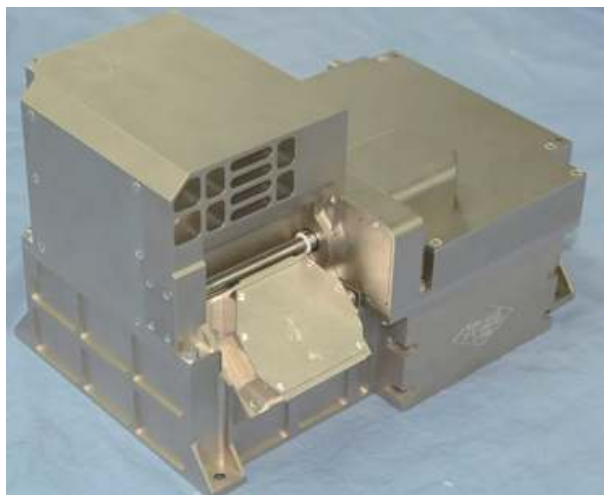


图 1 红外成像光谱仪

Fig.1 VNIS

表 1 红外成像光谱仪主要技术指标

Tab.1 Key technical parameters of VNIS

No.	Parameters	Spectra	
		VNIR	SWIR
1	Spectral range/nm	450-950	900-2 400
2	Resolution	2-7	3-12
3	FOV/ (°)	8.5×8.5	Φ3.6
4	SNR/dB	≥31@9% Solar reflectance	
5	Power consumption/W	19.8	
6	Weight/kg	4.675(probe)	~0.7(electronics)

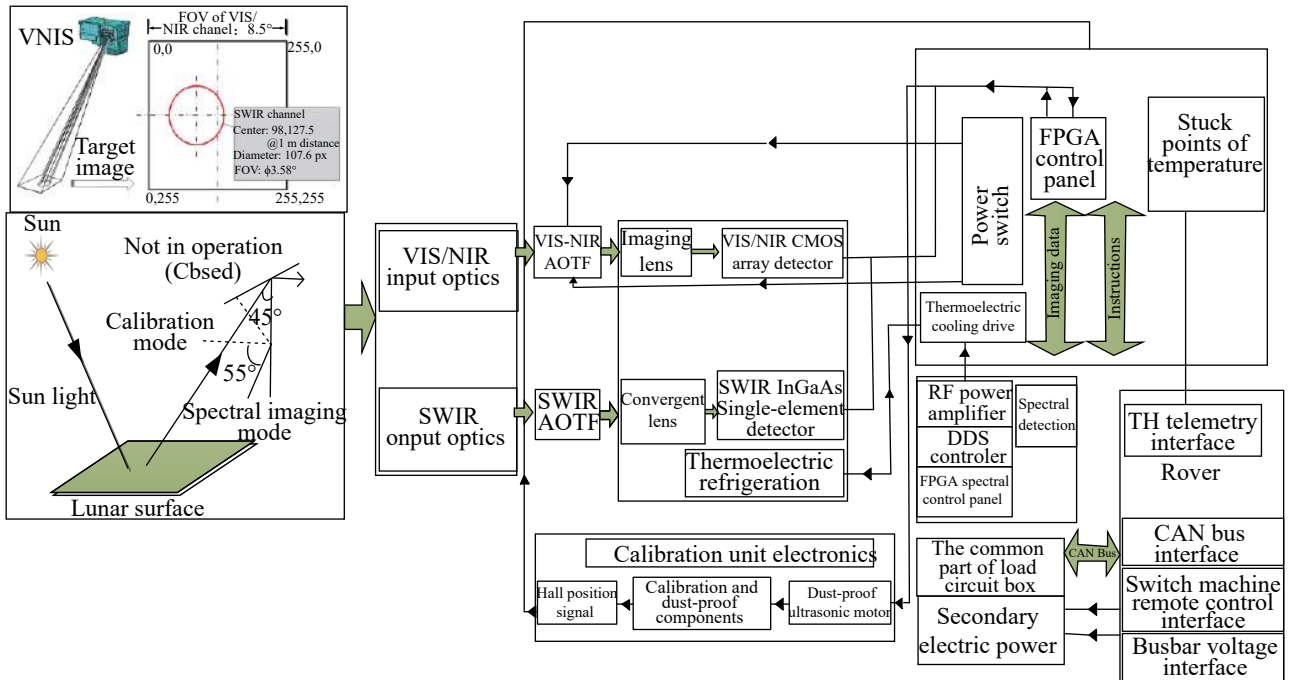


图 2 红外成像光谱仪系统框图

Fig.2 Block diagram of VNIS system

1.2 月球矿物光谱分析仪

月球矿物光谱分析仪 (Lunar Mineralogical Spectrometer, LMS) 是“嫦娥五号”任务探测器上的主要有效载荷,用以完成对月面目标的光谱探测和分析任务,为采样区月表物质成分和资源勘察,以及样品实验室测量结果比对研究提供科学数据。

月球矿物光谱分析仪照片如图 3 所示<sup>[8]</sup>,其探测

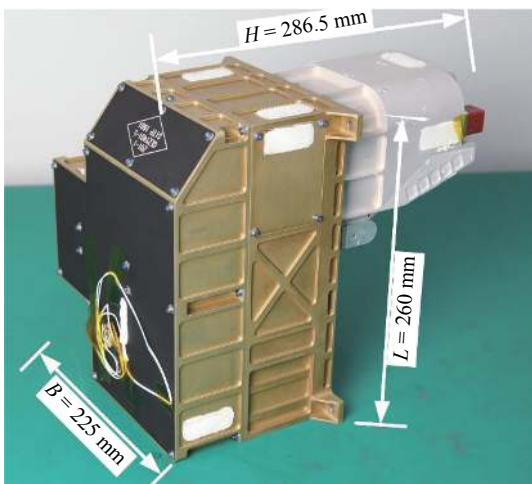


图 3 月球矿物光谱分析仪照片

Fig.3 Photo of LMS

原理为:来自月球外的太阳辐射经月球表面的矿物反射后,入射到光谱分析仪的视场内,经声光可调滤光器分光(AOTF)后,形成某一波长的准单色光,如通过会聚镜会聚到单元探测器上,则得到目标的光谱信息,如会聚到面阵探测器上,则得到目标的光谱图像。通过改变 AOTF 的调制频率,从而改变透过 AOTF 的光波波长,最终获得所需的光谱曲线及指定波长的光谱图像。同时,通过集成设计的二维转动指向机构,按要求转动指向镜,实现对采样点的指向调整探测,从而满足对采样区的多点探测的任务需求。

月球矿物光谱分析仪工作原理框图如图 4 所示,其设计探测区域为大于 2 m×2 m,指向镜转折角度范围为 57.09°~117.09°,探测距离范围为 1.6~5 m。

月球矿物光谱分析仪基于着陆器平台,主要沿用了 VNIS 的技术,但其将红外光谱范围从 2.4 μm 扩展到 3.2 μm,且是一种集扫描、光谱可编程于一体的成像光谱仪,满足了科学应用及工程任务要求。

月球矿物光谱分析仪主要技术指标如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

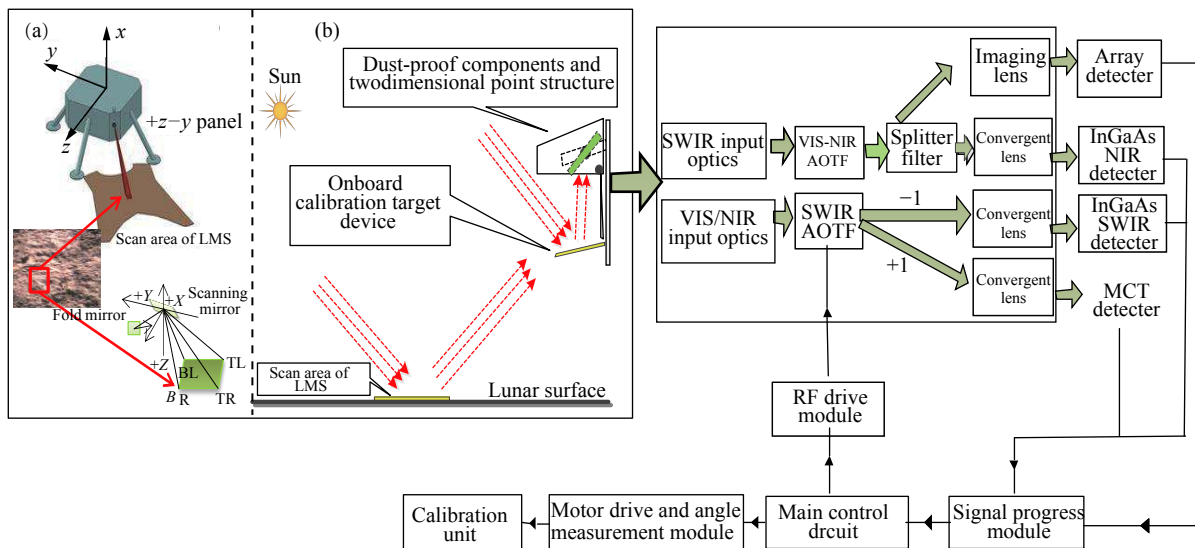


图 4 月球矿物光谱仪系统框图

Fig.4 Block diagram of LMS system

表 2 月球矿物光谱分析仪主要技术指标

Tab.2 Key technical parameters of LMS

Description	Specification requirements	
	VIS/NIR	SWIR
Spectral coverage/nm	480–950	900–3 200
Spectral resolution/nm	5.0–25.0	5.0–25.0
FOV/(°)	≥ 3.0 × 3.0	≥ 3.0 × 3.0
Effective pixels	256 × 256	1
Quantization/bits	≥ 10	≥ 10
SNR (dB, albedo is 9% and solar incident angle is 45°)	≥ 30	≥ 30
Spectral sampling interval/nm	5	
Power consumption/W	16.0	
Weight/kg	5.6	

## 2 月球表面探测应用验证

### 2.1 嫦娥三号应用

红外成像光谱仪安装在“玉兔号”月球车的前面,它由可见近红外成像光谱仪(450~950 nm)和短波红外光谱仪(900~2 400 nm)组成,实现我国基于声光可调滤光器分光的凝视型成像及光谱探测技术,以及超声电机驱动的月面定标防尘一体化集成技术的首次空间应用。“嫦娥三号”红外成像光谱仪于北京时间 2013 年 12 月 23 日上午 10 点 10 分首次开机进行探测及定标,随后获取了多组不同探测点的月壤光谱图像及光谱数据,用于巡视区矿物和化学成分综

合研究。红外成像光谱仪月面获取的探测与定标图像,以及光谱数据为原始的光响应信号,经过数据处理后供科学应用。图 5 为红外成像光谱仪获取的月壤初步探测结果<sup>[5]</sup>,图(a)为单带灰度图像,图(b)为白圆为 ROI 的 DN 曲线平均值,图(c)为 SWIR 通道的 DN 曲线,图(d)为入瞳的理论光谱辐射,初步分析其光谱具有辉石与橄榄石矿物月壤的典型吸收峰特征。

红外成像光谱仪分别于月面的 4 个位置进行了探测,获取了宝贵的科学数据,部分科学应用成果已形成论文在自然子刊(Nature communication)<sup>[10]</sup>、美国科学院院刊(PNAS)杂志<sup>[11]</sup>、RAA<sup>[5]</sup>等发表。

如图 6 所示,凌宗成团队通过对“嫦娥三号”着陆地点及在着陆地点附近的新陨石坑中岩石和土壤的原位分析,揭示了该地区年轻月海玄武岩的化学成分特征(含有较为丰富的橄榄石和钛铁矿矿物)。此项研究成果不仅证实了之前遥感研究的推测,而且更为确切地表明橄榄石矿物成分趋向于富铁的矿物端元<sup>[10]</sup>。

林扬挺团队利用被修正的高斯模型(MGM)法从 4 个 VNIS 光谱数据中提取出了月球土壤的矿物模态组成,如表 3 所示,对其矿物和化学成分进行研究后发现大约 25 亿年前月球还泛滥着火山喷发的熔岩<sup>[12]</sup>,而科学家此前普遍认为月球在 31 亿年前就逐渐沉寂而少有地质活动了。

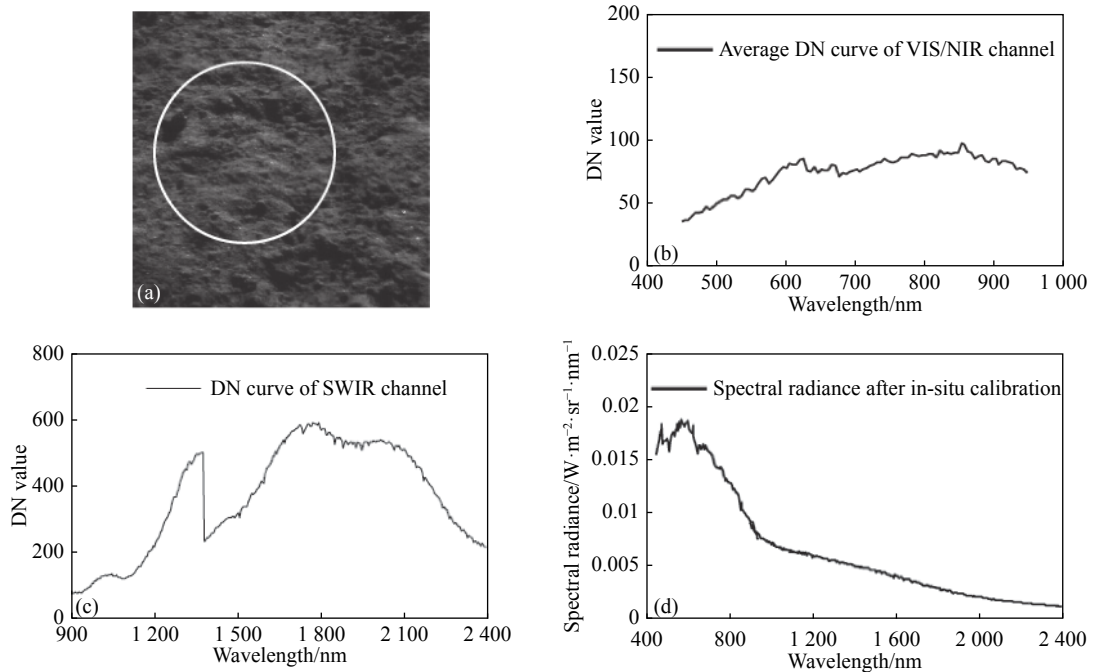


图 5 2013 年 12 月 23 日 VNIS 探测数据

Fig.5 Detection data of VNIS on Dec. 23, 2013

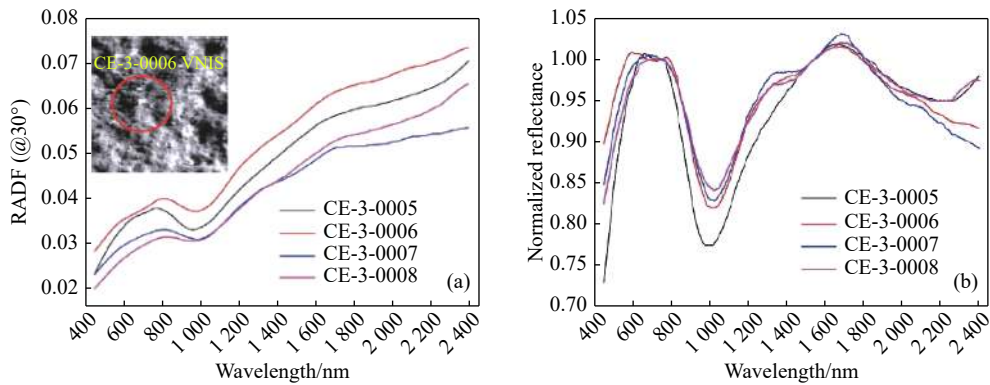


图 6 “嫦娥三号”光谱性质和矿物化学特性

Fig.6 Spectral properties and mineral chemistry of "Chang'e-3" soils

表 3 从月球土壤的 VNIS 谱中提取的结果

Tab.3 Decoded results from the VNIS spectra of the lunar

	Distance/m	R				ΘTi	TiO <sub>2</sub>	ΘFe	FeO	OMAT	Plagioclase	Pyroxene
		450 nm	415 nm	750 nm	950 nm							
CD005	19.79	0.043	0.043	0.070	0.061	1.175	5.8%	1.487%	18.8	0.312	15%	20.6%
CD006	32.06	0.033	0.033	0.030	0.057	1.154	5.3%	1.482%	18.7	0.157	16.6%	20.3%
CD007	38.72	0.027	0.027	0.025	0.047	1.195	6.4%	1.534%	19.5	0.158	17.5%	17.8%
CD008	40.89	40.89	0.032	0.029	0.051	1.274	9.0%	1.489%	18.8	0.098	16.3%	13%
Avg							6.6%		18.9	0.181	16.4%	17.9%

2.2 “嫦娥四号”应用

“嫦娥四号”红外成像光谱仪在“嫦娥三号”(CE-3)的基础上<sup>[13]</sup>,进一步开展月球背面巡视勘测任务。

2019 年 1 月 4 日,“嫦娥四号”红外成像光谱仪于月球背面展开工作,获得了月球背面近距离高分辨率的光谱数据,实现了人类历史上首次对月球背面的软着陆

原位探测。“嫦娥四号”(CE-4) 红外成像是光谱仪前 3 个月昼共在 12 个探测点进行了探测, 其中 8 个探测点进行了同步在轨定标(目前已工作 17 个月昼, 获取

了约 100 个探测点的数据), 如图 7 所示。基于“嫦娥四号”的探测数据研究结果, 成功揭示了月球背面的物质组成, 进一步丰富了人类对月球形成与演化的认识。

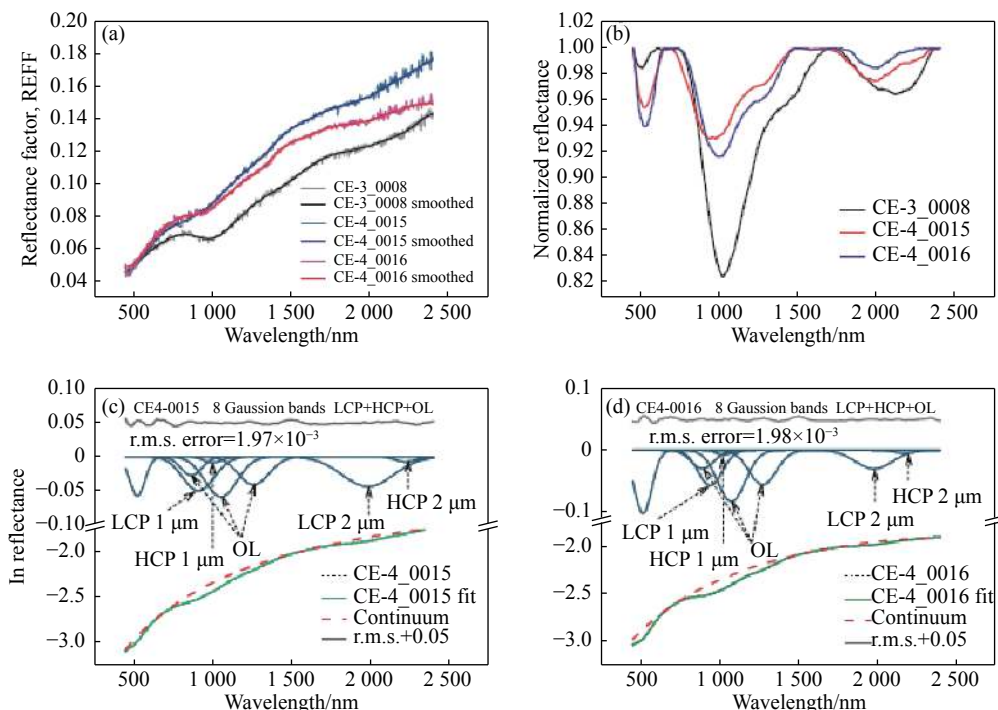


图 7 第一个月昼, “嫦娥四号”VNIS 获得的反射率光谱

Fig.7 "Chang'e-4 "reflectance spectra acquired by the VNIS during the first lunar day

“嫦娥四号”着陆于南极-艾特肯 (SPA) 盆地, 为探测月球内部的组成提供了难得的机会。“嫦娥四号”红外成像光谱仪科学数据研究成果之一 (Nature 期刊): 李春来团队利用光谱初始观测结果推断出, 月球背面存在以低钙辉石和橄榄石矿物为主的月球深部物质<sup>[13]</sup>, 不仅为解答长期困扰国内外学者的有关月幔物质组成问题提供了直接证据, 也为完善月球形成与演化模型提供了支撑。

林杨挺团队利用玉兔二号在第 4 个月昼测量的光谱, 首次推导出覆盖可见光-近红外波段的月表原位光度函数, 获得了更准确的月壤 FeO 含量和成熟度。研究发现月球风化层岩石的光谱在 1 μm 和 2 μm 处显示最大吸收, 可以被用来区分低钙辉石和高钙辉石检测得出月壤中橄榄石存在的可能性<sup>[14]</sup>。

### 3 “嫦娥五号”地面验证

“嫦娥五号”月球矿物光谱分析仪突破了红外宽

谱段谱段的分光器性及探测器性能提升, 将光谱范围从“嫦娥三号、四号”红外成像光谱仪的 450 ~ 2 400 nm 扩展到了 480 ~ 3 200 nm, 除了能探测月球表面主要矿物辉石、橄榄石等, 还具备探测 3 000 nm 附近的羟基吸收峰特征的能力。此外, 结合“嫦娥五号”月面取样的工作任务, 月球矿物光谱分析仪可以对月表采样前后的采样区域进行光谱探测, 比较不同深度、不同风化程度下的月壤光谱特征, 与后期返回样品的实验室光谱对比分析。在发射之前为验证月球矿物光谱分析仪所测月面数据的可靠性, 并对其探测流程、地面数据处理方法、数据产品质量等进行真实性检验, 开展了月球矿物光谱分析仪地面验证试验。试验采用多种矿物及矿物混合样品, 在不同试验环境下获取月球矿物光谱分析仪的探测数据, 分析研究月球矿物光谱分析仪的矿物成分探测能力, 并结合标准比对仪器光谱进行光谱分析。同时, 在实验室条件下测试并验证目标温度变化引起的光谱辐亮度变化, 包括七元

模拟月壤单矿物混合样品和普通沙土,为目标辐射温度效应校正反演算法的研究提供了基础数据,如图 8、图 9 所示。实验表明月球矿物光谱分析仪具有较好的光谱数据质量,也验证了其光谱数据分析识别月球表面物质的矿物组成的能力,包括含水矿物,为月球的形成过程、月球地质演变及岩石-水交互作用的研究提供了数据支撑。

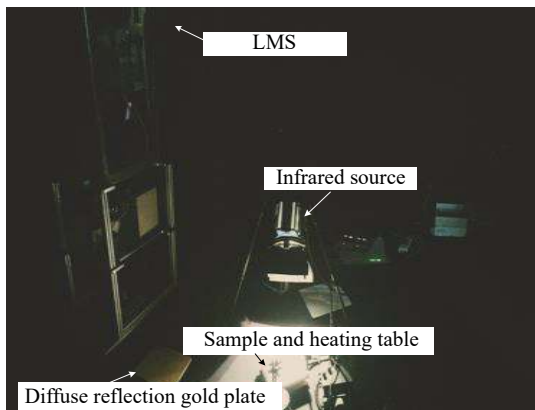


图 8 地面验证试验实物图

Fig.8 Photo of ground verification test

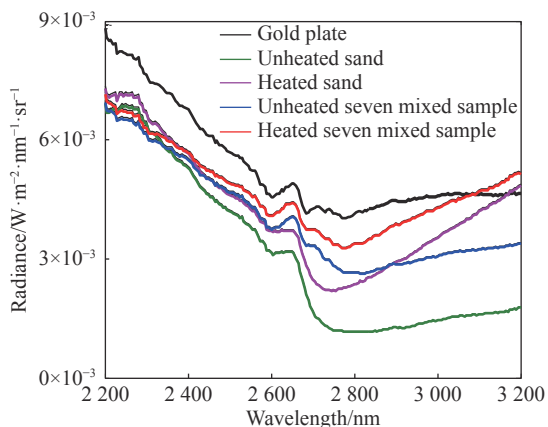


图 9 不同温度下金板/样品的光谱响应结果

Fig.9 Spectral response result of the gold board/sample at different temperatures

## 4 结 论

月球表面原位光谱探测技术研究是围绕我国探月工程重大战略需求而开展的。该研究突破了凝视型时序扫描的新型声光光谱探测关键技术,解决了月球表面光照、温度变化的复杂环境中原位光谱高性能探测的技术问题及难点。据此研发了可适应表面恶

劣环境的高性能、轻小型、高可靠的红外成像光谱仪,应用于“嫦娥三号”、“嫦娥四号”任务,在国际上率先成功实现了月球正面、背面原位光谱探测。目前,该技术进一步突破了红外宽谱段谱段的分光器性及探测器性能提升,完成的月球矿物光谱分析仪研制,将光谱范围从“嫦娥三号”、“嫦娥四号”红外成像光谱仪的 450~2 400 nm 扩展到了 480~3 200 nm,将为我国“嫦娥五号”任务提供新型仪器,继续不断应用于我国后续月球及深空探测任务。该技术也正推广应用用于其他军、民领域,预计将不断产生经济及社会效益。

## 参考文献:

- [1] Ouyang Ziyuan, Zou Yongliao, Li Chunlai, et al. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry [J]. *Lunar Exploration and Containable Development for Human Society*, 2003(4): 328-333. (in Chinese)
- [2] Ye Peijian, Peng Jing. Deep space exploration and its prospect in China [J]. *Engineering Science*, 2006(10): 13-18. (in Chinese)
- [3] 欧阳自远, 邹永廖. 月球的地质特征和矿产资源及我国月球探测的科学目标[J]. 国土资源情报, 2004(1): 36-39.
- [4] He Z P, Wang B Y, Lv G, et al. Visible and near-infrared imaging spectrometer and its preliminary results from the Chang'E 3 project [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 1.
- [5] Zhiping He, Binyong Wang, Gang Lv, et al. Operating principles and detection characteristics of the visible and near-infrared imaging spectrometer in the Chang'e-3 [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1567-1577.
- [6] Zhenchao Wang, Yunzhao Wu, Xiaomeng Zhang, et al. Mineralogy of northern nearside mare basalts [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(4): 35-42.
- [7] Wu Y, Hapke B. Spectroscopic observations of the Moon at the lunar surface [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2018, 484: 145-153.
- [8] He Z, Li C, Xu R, et al. The spectrometers based on AOTF for in-situ lunar surface measurement [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12: 2324437.
- [9] He Zhiping, Shu, Rong, Wang JianYu. Imaging spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2011, 8196(3): 819625.
- [10] Ling Z, Jolliff B L, Wang A, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site [J].

- Nature Communications*, 2015, 6: 8880.
- [11] Zhang J, Yang W, Hu S, et al. Volcanic history of the imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(17): 5342–5347.
- [12] He Zhiping, Li Chunlai, Xu Rui, et al. Spectrometers based on acousto-optic tunable filters for in-situ lunar surface measurement [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 2019, 13(2): 27502.
- [13] Li C, Liu D, Liu B, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far - side mantle - derived materials [J]. *Nature*, 2019, 569(7756): 378–382.
- [14] Lin Honglei, He Zhiping, Yang Wei, et al. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA impact melt pool [J]. *National Science Review*, 2019(14): 183.