

基于地面试验的嫦娥五号月球矿物光谱分析仪数据质量分析

蔡婷妮^{1,2}, 李春来^{1*}, 何志平³, 任鑫¹, 刘斌¹, 徐睿³

1. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 中国科学院国家天文台, 北京 100012
2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049
3. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

摘要 探月工程三期项目将完成“绕、落、回”三个阶段中的采样返回任务,将在未来发射嫦娥五号(CE-5)探测器,执行月面着陆、采样并返回地球的任务。嫦娥五号月球矿物光谱分析仪(LMS)是探月工程三期重要的数据来源,通过LMS光谱数据分析识别月球表面物质的矿物组成,包括含水矿物,同时有助于判断岩石类型,辅助地层学分析。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数据支撑。相比于嫦娥三号红外成像光谱仪,LMS将光谱范围从450~2400 nm扩展到了480~3200 nm,除了能探测月球表面主要矿物辉石、橄榄石等,还可以探测3000 nm附近的羟基吸收峰特征,为月球表面是否存在“水”提供强有力的证据。此外,嫦娥五号月面工作任务将获取月表以下物质,LMS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,且与后期返回样品的实验室光谱对比分析。为保证LMS月面数据的可靠性,在探测器发射之前开展了LMS地面验证试验,采用多种矿物及矿物混合样品,在不同试验环境下获取LMS的探测数据,分析研究LMS的矿物成分探测能力,并结合标准比对仪器光谱进行光谱质量分析。计算了所有实验样品的光谱不确定度参数。除了具有低反射率的钛铁矿外,所有样品都具有高质量的光谱数据。同时,在相同条件下,LMS光谱特征与标准比对仪器得到的光谱数据相一致,表明LMS整体数据质量高。

关键词 嫦娥五号;月球矿物光谱分析仪;光谱质量

中图分类号: P575 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0257-06

引言

在近期月球探测任务中,高光谱遥感探测数据的获取为月球研究提供了高空分辨率的光谱数据,其可见近红外(VNIR)反射光谱由于存在典型月表矿物的电磁频谱信息,被广泛用于研究月球表面成分组成^[1,7-9,11,17]。国内外多次月球探测任务中搭载了光谱仪,包括美国的Clementine^[15],欧空局的SMART-1^[4],日本的Kaguya/SELENE^[18],美国的Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)^[10],印度的Chandrayaan-1^[5]以及中国的嫦娥三号(CE-3)^[2],均利用其光谱数据进行月球表面岩石和矿物等物质成分调查。

嫦娥五号探测将完成探月工程第三阶段任务,设计在月表着陆并采集月球样品返回地球。探月工程三期的科学目标有两部分,其中之一是着陆区的现场调查和分析。针对该任

务目标,嫦娥五号搭载的主要有效载荷之一月球矿物光谱分析仪,将原位分析着陆区矿物组成和分布,同时开展物质成分和资源勘察。月球矿物光谱分析仪(lunar mineralogical spectrometer, LMS)的光谱范围为480~3200 nm,覆盖大部分矿物的光谱特征,其中包括3000 nm附近的羟基吸收峰特征,因此也具有探测含水矿物的能力。嫦娥五号初选着陆区覆盖范围为41°—45°N,49°—69°W,处于月球正面风暴洋东北侧,5号标称着陆区为41.5°—44.5°N,58.7°—64.7°W,位于预选采样区的中部(见图1)。

为了保证LMS数据分析的可靠性,必须在前期开展LMS地面科学验证试验,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。本文将针对嫦娥五号LMS地面科学验证试验数据质量评价做重点描述,前几章介绍探月三期任务及科学目标、LMS概况以及地面验证试验开展的工作介绍。希望通过本文的研究,有助于后期嫦娥

收稿日期: 2017-12-18, 修订日期: 2018-04-22

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11403049)资助

作者简介: 蔡婷妮,女,1991年生,中国科学院国家天文台博士研究生 e-mail: caitn@nao.cas.cn

* 通讯联系人 e-mail: licl@nao.cas.cn

五号着陆后返回地面数据的处理及分析工作。

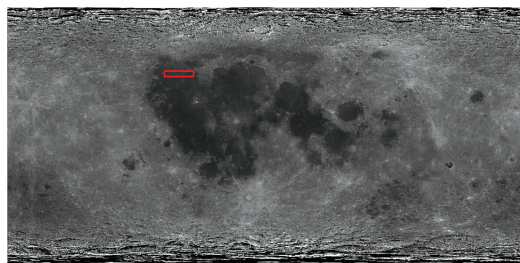


图 1 CE-5 可能的着陆区(嫦娥一号 CCD 图像, 数据来自探月工程数据发布与信息服务系统)

Fig. 1 CE-5 possible landing zone (CE-1 CCD image, data from Data Publishing and Information Service System of China's Lunar Exploration Program)

1 实验部分

1.1 LMS 仪器

月球矿物光谱仪由中国科学院上海技术物理研究所设计与研制。仪器包括二维指向机构及光谱仪主体, 光谱仪主体根据分光器件及探测器特点, 按波段分为可见近红外子模块, 红外子模块二个部分。其中可见近红外模块由 480~950 nm 谱段的成像光谱仪及 900~1 450 nm 的光谱仪组成; 红外子模块由 1 400~2 450 nm 谱段及 2 400~3 200 nm 的光谱仪组成。同时, LMS 携带有定标漫反射板, 如图 2 所示, 具备在轨定标功能。

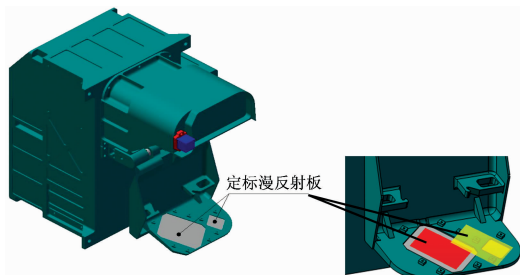


图 2 矿物光谱分析仪及其携带的月面定标装置

Fig. 2 LMS and the onboard calibration target device

1.2 地面验证试验

本 LMS 地面科学验证试验共计开展两次, 分别于上海技术物理研究所与丽江天文观测站。试验评估 LMS 完成着陆区矿物成分探测任务的能力, 试验目的包括三个方面: 评价 LMS 探测数据质量、验证 LMS 数据处理算法的精度及验证 LMS 矿物成分探测能力。

1.3 仪器

为了验证 LMS 数据质量, 试验设备选择地物光谱仪 ASD (Fieldspec 4 Hi-res) 和傅里叶变换红外光谱分析仪 (D&P 102F)。前者光谱范围 350~2 500 nm, 后者光谱范围 2 000~16 000 nm, 与 LMS 同时获取 480~3 200 nm 光谱数据并比对。此外还有辅助设备全站仪、太阳照度计等。

样品选择结合嫦娥三号红外成像光谱仪验证试验积累的经验^[13], 采用与嫦娥五号预选着陆区矿物光谱相同或接近

的样品, 包括单斜辉石(普通辉石)、斜方辉石(紫苏辉石)、橄榄石、钛铁矿、磷灰石和斜长石。试验样品除了单种矿物样品, 还分别准备了二元混合矿物样品(紫苏辉石和普通辉石不同比例混合)、三元混合矿物样品(紫苏辉石、橄榄石和斜长石不同比例混合)和七元混合矿物样品(斜方辉石、橄榄石、斜长石、钛铁矿、磷灰石、熔融玻璃和单斜辉石不同比例混合), 用来开展矿物光谱识别与反演建模研究, 同时也考察 LMS 的矿物光谱识别与定量反演能力。同时, 为了尽量模拟真实月壤成分信息, 在混合样品中加入熔融玻璃样品^[14]。结合原始低钛月球模拟样品的烧结实验研究^[3], 在箱式烧结炉中, 1 250 °C 恒温烧结 6 h, 然后在水中淬火, 制备得到了熔融玻璃样品。

1.4 数据处理

在完成试验数据获取工作后, 对两个参比光谱仪器(地物光谱仪、傅里叶变换红外光谱分析仪)和 LMS 的数据进行一系列处理。地物光谱仪 ASD 和傅里叶变换红外光谱分析仪可直接获取待测样品的光谱数据(辐亮度数据和反射率数据), 按照 LMS 光谱分辨率对地物光谱仪和傅里叶变换红外光谱分析仪获取的光谱数据进行光谱重采样。LMS 数据处理主要包括图像椒盐噪声扣除、暗电流校正、温度校正、辐射校正、反射率计算、光谱数据拼接等步骤。然后对两个探测器数据进行反射率反演计算, 获得最终的反射率数据。

2 结果与讨论

LMS 科学验证试验很重要的一个目的就是评价仪器获取的光谱数据质量。试验测量的所有矿物样品、熔融玻璃、二元混合样品(2mix2, 2mix3, 2mix4, 2mix6, 2mix7)、三元混合样品(3mix1, 3mix2, 3mix3, 3mix4, 3mix5, 3mix6)、七元混合样品(7mix1, 7mix2, 7mix3, 7mix4, 7mix5, 7mix6, 7mix7)的 LMS 和标准比对仪器在 480~3 200 nm 范围内的全波段标准光谱曲线对比如图 3 所示, 其中 LMS 光谱数据为一次测量数据[图 3(a,c,e,g)], 经过平滑处理, 标准比对仪器光谱数据为 10 次测量平均值[图 3(b,d,f,h)]。

通过所有样品的全波段光谱对比可以看出, LMS 与标准比对仪器 ASD 和 DP102F 测得的样品全波段光谱数据, 从光谱形状和反射率幅值两方面结果相近, 从图 3 中也可以看出, ASD 光谱数据与 DP102F 在 2 500 nm 波段附近两个探测器的连接处光谱存在明显的抖动现象, LMS 在相同范围的光谱曲线明显优于 ASD 数据, 但 LMS 在可见近红外波段 480~950 nm 波段范围内数据存在光谱抖动。分析其主要原因, 实验室光源强度在可见近红外波段明显弱于太阳光, 导致 LMS 在这一波段范围内信噪比较差。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{S_{LMS,i} - S_{SS,i}}{S_{SS,i}} \right|}{N} \times 100\% \quad (1)$$

不确定度 δ 作为评价指标, 见式(1), 其中, $S_{LMS,i}$ 为 LMS 测得样品的第 i 个波段的 BR, $S_{SS,i}$ 为 ASD 或 DP102F 获得的第 i 个波段的 BR, N 为波段数。

计算各个样品在三个波段范围内的不确定度, 结果(见

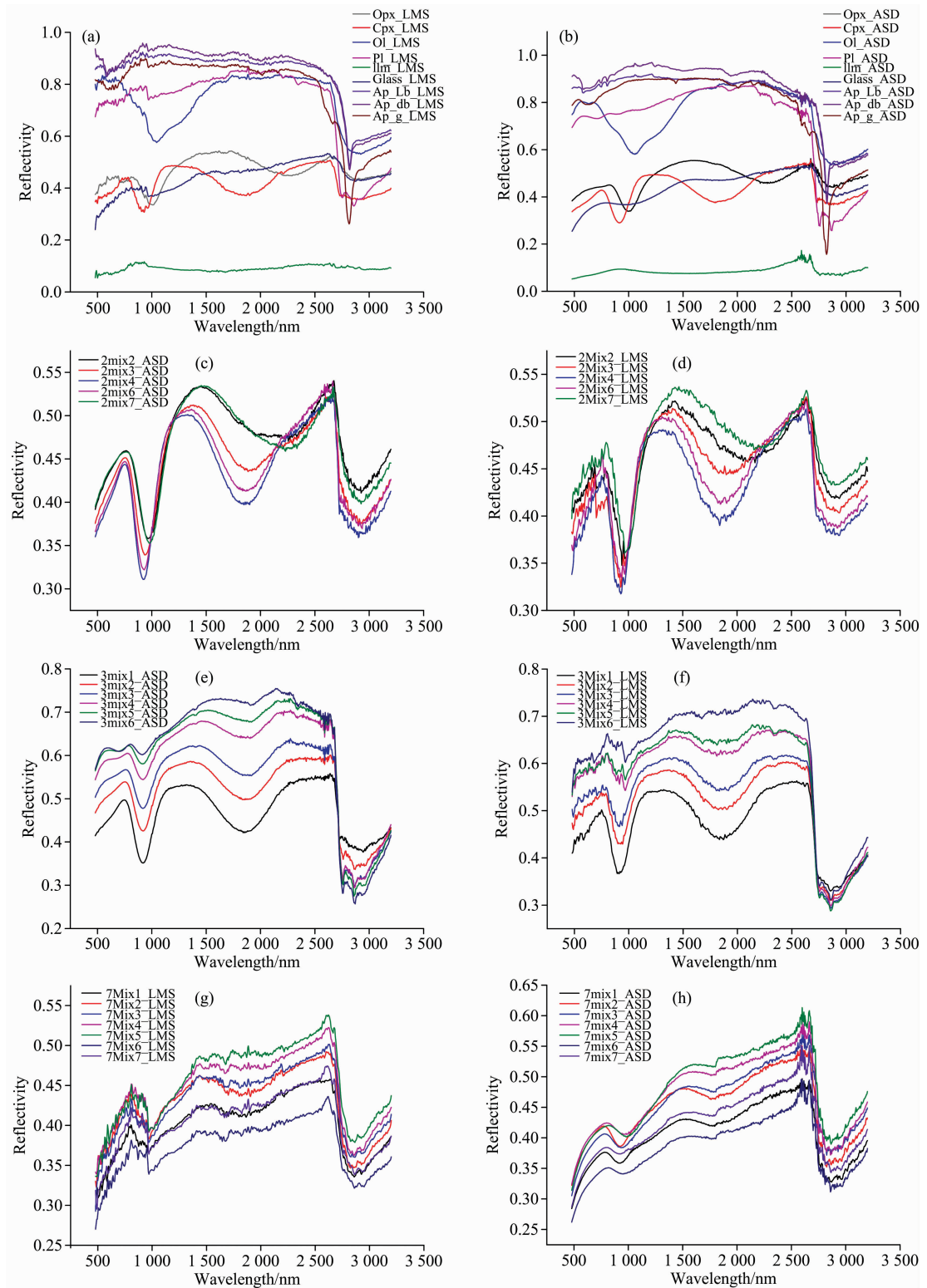


图 3 各样品全波段对比图

(a, c, e, g): LMS 数据; (b, d, f, h): ASD 及 DP102F 数据

Fig. 3 Comparison of the full spectra of each sample

(a, c, e, g) for LMS data; (b, d, f, h) for ASD and DP102F data

图 4)显示除钛铁矿样品外,其余样品光谱不确定度在各波段都优于 10%,且大部分都在 5%以内,表明 LMS 具有较好的

光谱数据质量。此外,480~700 和 700~2 200 nm 范围的不确定度较 2 200~3 200 nm 范围小,光谱质量在低波长范围

相对较优。其中，造成钛铁矿高不确定的原因与样品反射率过低有关系，其反射率数据仅为 0.1 左右，使得仪器探测信号弱，信噪比下降。

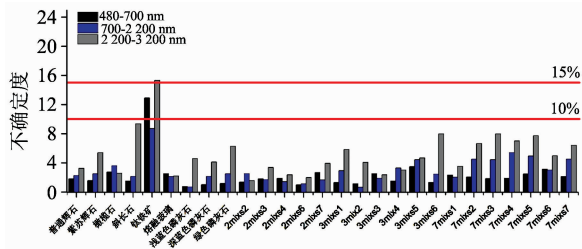


图 4 各波段样品不确定度指标 (%)

Fig. 4 Spectral Uncertainty in each band (%)

目前在月球探测中，利用高光谱遥感进行矿物含量的反演方法主要有三种，即：统计分析方法、基于辐射传输模型

(Hapke 模型)的光谱线性解混方法以及修正的高斯模型方法 (MGM)^[6,12]。本文主要采用修正的高斯模型方法 (MGM)。修正的高斯模型方法认为物质成分实际的光谱特征吸收是由一系列具有正态分布高斯曲线形状的吸收带叠加而成^[16]。通过对矿物光谱每个吸收特征谱线进行高斯曲线拟合，直到所有高斯曲线叠加之和与实际光谱之间的误差达到可以接受的程度。高斯分布曲线间的吸收峰位置、吸收深度等参数与矿物样品的相对含量存在相应的定量关系，通过这种定量关系可以计算出矿物的相对含量。

LMS 在月面工作时，首先应具备矿物识别的能力。普通辉石和紫苏辉石两种纯单矿物样品在 1 000 和 2 000 nm 附近具有明显的吸收峰特征，利用修正的高斯模型方法分别拟合计算了 LMS 和标准比对仪器获取的这两种单矿物样品光谱数据，通过分析 LMS 和标准比对仪器对样品 1 000 和 2 000 nm 附近吸收峰位置偏差的比较，定量评价 LMS 对矿物特征吸收峰定性识别的能力。

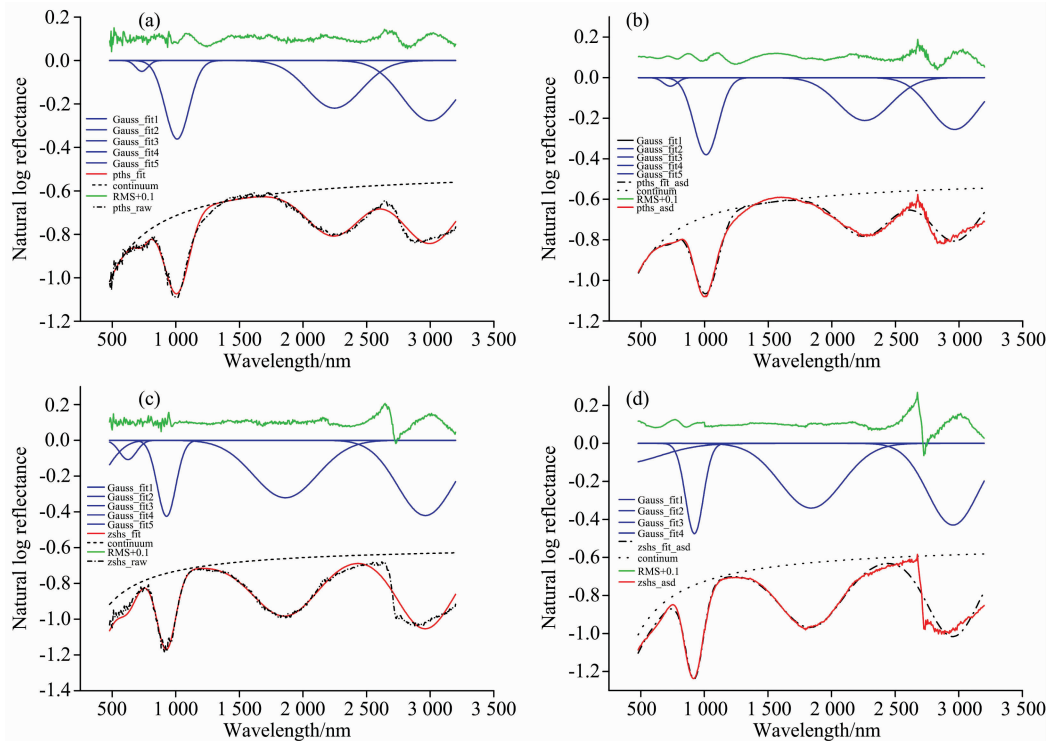


图 5 样品全谱段 MGM 拟合结果

(a): 普通辉石 LMS; (b): 普通辉石 ASD 和 DP102F; (c): 紫苏辉石 LMS; (d): 紫苏辉石 ASD 和 DP102F

Fig. 5 Full spectra of MGM sample fitting results

(a): Augite LMS; (b): Augite ASD and DP102F; (c): Hypersthene LMS; (d): Hypersthene ASD and DP102F

从以上两种单矿物吸收峰中心位置波长差的对比可以看出，LMS 测得的两种具有明显吸收峰特征的单矿物样品光谱特征满足 1 000 nm 附近吸收峰中心位置误差 < 10 nm，2 000 nm 附近吸收峰中心位置误差 < 20 nm，说明 LMS 具有较好的矿物吸收峰特征定性识别能力。

3 结论

探月工程三期的科学目标之一，对着陆区进行现场调查和分析将使用多台物质成分探测设备，其中 LMS 可分析识别月球表面物质的矿物组成，包括含水矿物，同时有助于判断岩石类型，辅助地层学分析开展物质成分和资源勘察。为

表 1 两种辉石 LMS 与标准比对仪器吸收峰位置偏差

Table 1 Two pyroxene absorption peak position deviation measured with LMS and standard instruments

| 吸收峰位置/nm | 普通辉石 | | | 紫苏辉石 | | |
|----------|----------|-----------|--------|----------|-----------|--------|
| | LMS/nm | ASD_DP/nm | 波长差/nm | LMS/nm | ASD_DP/nm | 波长差/nm |
| 1 000 | 1 009.89 | 1 011.36 | 1.47 | 927.45 | 920.07 | 7.38 |
| 2 000 | 2 247.18 | 2 258.90 | 11.72 | 1 861.39 | 1 842.60 | 18.79 |

保证未来在轨数据有效可靠,开展了 LMS 的地面科学验证试验,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。本试验完成了矿物及混合物共 26 种待测样品光谱数据获取,通过光谱不确定度计算,针对科学验证试验大纲选定待测样品光谱特征,除反射率很低的钛铁矿外,其余样品光谱不确定度在各谱段都优于 10%,且大部分都在 5%以内,表明 LMS 具有较好的光谱数据质量。其次,

针对矿物识别能力,LMS 所有样品光谱数据与标准比对光谱仪符合较好,能够有效的识别样品的光谱特征和吸收峰特征,通过对具有明显吸收峰特征的普通辉石和紫苏辉石样品吸收峰中心位置误差进行计算,结果在 1 000 nm 附近吸收峰中心位置误差 <10 nm,2 000 nm 附近吸收峰中心位置误差 <20 nm,具有较高的精度。

References

- [1] Cheek L C, Hanna K, Pieters C M, et al. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(9): 1805.
- [2] Di Kaichang, Xu Bin, Peng Man, et al. *Planetary and Space Science*, 2016, 120: 103.
- [3] Dingwell D B. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(9): 3403.
- [4] Foing B H, Racca G D, Marini A, et al. *Advances in Space Research*, 2006, 37: 6.
- [5] Green R O, Pieters C M, Mouroullis P, et al. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(E10): 6.
- [6] Hapke B. *Icarus*, 1986, 67(2): 264.
- [7] Harald H, James W. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60: 1.
- [8] Isaacson P J, Pieters C M. *Icarus*, 2010, 210(1): 8.
- [9] Jin S, Arivazhagan S, Araki H. *Advances in Space Research*, 2013, 52(2): 285.
- [10] Keller J W, Petro N E, Vondrak R R. *Icarus*, 2016, 273(SI): 2.
- [11] Klima R L, Dyar M D, Pieters C M. *Meteoritics & Planetary Science*, 2011, 46(3): 379.
- [12] Klima R, Hapke B. *Meteoritics & Planetary Science*, 2012, 47(8): 1403.
- [13] Liu Bin, Liu Jianjun, Zhang Guangliang, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2013, 13(7): 862.
- [14] Pieters C M, Head J W, Sunshine J M, et al. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E9): 17127.
- [15] Pieters C M, Staid M I, Fischer E M, et al. *Science*, 1994, 266(5192): 1844.
- [16] Sunshine J M, Mcfadden L A, Pieters C M. *Icarus*, 1993, 105(1): 79.
- [17] Varatharajan I, Srivastava N, Murty S. *Icarus*, 2014, 236: 56.
- [18] Yamamoto, Nakamura Ryosuke, Matsunaga Tsuneo, et al. *Nature Geoscience*, 2010, 3(8): 533.

Experimental Ground Validation of Spectral Quality of the Chang' E-5 Lunar Mineralogical Spectrometer

CAI Ting-ni^{1, 2}, LI Chun-lai^{1*}, HE Zhi-ping³, REN Xin¹, LIU Bin¹, XU Rui³

1. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
2. School of Physical and Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract As the last stage of China's Chang'e (CE) lunar program, the Chang'e-5 lunar rover will land on the surface of moon, obtain lunar samples and then return back to Earth. The Lunar Mineralogical Spectrometer (LMS) is one of CE-5's on-board payloads, which is an important data source for the lunar exploration project. LMS spectral data is used to identify the composition of lunar minerals to aid in rock classification and stratigraphic analysis—all of which provide data required to support research on moon formation, geologic evolution and rock-water interactions. Compared with the CE-3 VIS/NIR imaging spectrometer (VNIS), the CE-5 LMS extends the spectral range from 450~2 400 to 480~3 200 nm. In addition to identifying the major minerals such as pyroxene and olivine, it can also detect absorption peaks around 3 000 nm characteristic of hydrous minerals. In addition, Chang'e-5 will sample thematerialbelow the surface of the moon, and LMS can detect the area before and after sampling, to analyze the spectral characteristics of lunar soil under different depths and weathering degrees, then compared with the laboratory spectra of the later return samples. In order to ensure the reliability of LMS lunar data, a pre-flight LMS ground validation experiment was carried out, using a variety of minerals and mineral mixed samples, collecting the detection data of LMS under different test environment, combining with a standard instrument to analyze the spectral quality. In this paper, spectral uncertainty parameters of all experiment samples were calculated and evaluated. Moreover, the LMS spectral data were consistent with those simultaneously obtained from standard comparison spectrometers under the same conditions, indicating that LMS could effectively identify the spectral profile and absorption peak of the targets.

Keywords Chang'e-5; Lunar mineralogical spectrometer; Spectral quality

(Received Dec. 18, 2017; accepted Apr. 22, 2018)

* Corresponding author