

光学遥感月球矿物探测：方法、挑战与展望

郑盼¹, 苏红军², 吴翌月³

1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100;

2. 河海大学 地理与遥感学院, 南京 211100;

3. 奥胡斯大学 生物学院, 奥胡斯 8000

摘要: 月球矿物组成的识别与丰度反演对于理解月球的起源与演化、资源潜力评估及未来载人探测任务规划具有重要意义。光学遥感作为当前月球探测任务中应用最广泛的技术手段之一, 凭借其大范围、非接触、高精度的优势, 在月表矿物识别与丰度反演中发挥着核心作用。本文系统梳理了月球光学遥感矿物探测的基本原理, 整理了探月任务中配置的轨道与原位光学载荷及其获取的数据资源。在方法层面, 本文对当前主流的矿物识别与反演方法开展综述分析, 将其归纳为光谱特征表征与数据驱动映射、物理前向建模与后向反演及光谱解混3类方法。同时, 总结了轨道与原位探测在矿物类型识别、丰度分布制图及演化历史推断等方面的代表性进展。在此基础上, 进一步分析了光学遥感用于月球矿物探测在预处理误差和方法验证、混合像元效应、月表复杂环境影响等方面面临的关键挑战。最后, 展望了月表矿物探测任务未来在多模态数据融合、高精度反演建模等方向的发展趋势。

关键词: 月球, 光学遥感, 原位探测, 轨道遥感, 矿物识别, 光谱解混, 丰度反演

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 郑盼, 苏红军, 吴翌月. 2026. 光学遥感月球矿物探测: 方法、挑战与展望. 遥感学报, 30(7): 1957-1981

Zheng P, Su H J and Wu Z Y. 2026. Optical remote sensing for lunar mineral detection: Methodologies, advances, and challenges. National Remote Sensing Bulletin, 30(7): 1957-1981 [DOI: 10.11834/jrs.20265444]

1 引言

月球作为地球唯一的天然卫星, 不仅是稳定而庞大的“天然空间站”, 也是研究地月系统起源与演化的关键天体 (欧阳自远, 2005)。月球矿物多形成于月球岩浆洋的结晶分异和后期撞击、火山活动等地质过程, 记录了月球乃至太阳系早期的热演化历史。研究月球的矿物类型和丰度分布, 不仅有助于理解月球的地质演化过程, 也对资源开发、未来探测任务选址及深空探测规划具有重要意义。光学遥感是最为普遍和核心的月球矿物探测技术之一, 几乎所有月球探测任务均搭载了不同类型的光学载荷, 波谱范围覆盖伽马射线、X射线、紫外、可见光、近红外、红外和微波等。凭借空间信息丰富、波段覆盖宽、成像直观等优

势, 该技术广泛应用于月表地貌测绘、矿物识别及空间物质分布反演等研究 (何志平等, 2022)。

根据月球探测阶段和任务的演变, 各阶段光学遥感载荷的功能呈现出明显变化, 经历了二维成像到光谱识别, 定性到定量的发展过程。同时, 探测手段也由远程遥感拓展至原位探测分析, 实现了从大范围矿物分布识别向关键区域矿物组成精细解析的能力提升。总体来看, 月球探测任务的发展可分为4个阶段: 第1阶段为初始探索期 (1959年—1976年), 该阶段以月面巡视与采样返回为核心, 以苏联的月球号 (Luna) 系列和美国阿波罗 (Apollo) 系列为代表性探测任务 (Wu和Moore, 1980; Shevchenko等, 2016)。其中, 月球3号拍摄了世界上首张月球背面影像; 阿波罗11号于1969年首次实现载人登月任务并带回月球样品,

收稿日期: 2025-11-05; 预印本: 2026-05-21

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: U24A20588, 42371327, 42122008); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (编号: KYCX23_0733)

第一作者简介: 郑盼, 研究方向为高光谱影像解混及行星遥感的理论 and 应用。E-mail: zhengpan1013@163.com

通信作者简介: 苏红军, 研究方向为长时序遥感与全球变化、流域遥感智能感知、资源环境遥感及高光谱遥感信息智能处理等。E-mail:

hjsu@hhu.edu.cn

任务中宇航员使用哈苏中画幅胶片相机手动拍摄月球光学图像；月球16、20和24号任务实现了3次采样返回；阿波罗15、16和17号任务配备了月球地形相机和全景相机，拍摄了月面地貌特征、地质构造和样品采集等场景，这些任务共同奠定了人类对月球的初步认知（Hiesinger 和 Head III, 2006）。第2阶段为探测宁静期（1977年—1993年），该阶段虽未有新任务发射，但光学遥感相关理论研究取得长足发展，研究者基于阿波罗任务样品等构建哈普克（Hapke）月表物理模型，并建立早期月表矿物光谱库，为后续轨道成像和反演奠定了基础。第3阶段为轨道遥感复兴与原位探测探索期（1994年—2020年），光学载荷在此期间进入了高分辨率和高光谱的时代。以1994年美国的克莱门汀（Clementine）任务为起点，多国陆续发射月球轨道器并配备高性能光学遥感载荷。克莱门汀搭载紫外/可见光和近红外多光谱相机，首次实现了月球表层成分的探测（Nozette 等，1994）。随后，美国的月球勘探者（Lunar Prospector）与月球勘测轨道飞行器 LRO（Lunar Reconnaissance Orbiter）分别在元素探测与高分辨率影像方面取得突破，特别是2009年，LRO搭载的LROC系统实现了0.5 m分辨率的月表成像数据（Vondrak 等，2010）。2007年中国嫦娥一号搭载干涉成像光谱仪 IIM（Interference Imaging Spectrometer）获取了480—960 nm 波谱范围的高光谱图像，覆盖了月表约80%的区域，空间范围分布在南北纬70°之间（Ouyang 等，2010）。同年日本辉夜号（Kaguya）配备多光谱成像仪 MI（Multi-band Imager）、立体照相机 TC（Terrain Camera）以及光谱剖面仪 SP（Spectral Profiler）。其中，TC实现了全球月面地形采集，MI提供了光谱定标及光度校正后的纬度 $\pm 50^\circ$ 范围内有效的多光谱影像，SP则提供波谱范围为0.52—2.60 μm 的高光谱数据（Haruyama 等，2008；Kato 等，2010）。2008年印度发射了月船一号（Chandrayaan-1）搭载月球矿物绘图仪 M³（moon mineralogy mapper）实现在轨0.43—3.00 μm 波谱范围的近红外高光谱成像（Green 等，2011）。全月多光谱及高光谱影像系统构建了全球月面矿物识别与地形测绘的遥感数据基础，与此同时，光学探测手段也由轨道遥感延伸至原位探测。2013年嫦娥三号在月球正面成功着陆，携带可见光近红外成像光谱仪 VNIS（Visible and Near-

infrared Image Spectrometer），首次在月面开展原位成分探测及光谱测量，获取了矿物组成及物理特征的直接证据，2019年嫦娥四号实现了人类首次月球背面软着陆，并利用红外成像光谱仪 VNIS 在冯·卡门撞击坑内开展原位光谱测量和地质调查，揭示了月背表面物质的新特征（Xiao 等，2015；Wu 等，2019）。第4阶段始于2020年，在此期间嫦娥五号进一步实现了原位光谱探测与样品返回的结合，推动月球光学探测从单一遥感观测向多手段联合观测过渡，此后月球探测逐渐进入以资源开发和可持续发展为目标的新阶段，开启了重返月球的新篇章，多个国家将探测重点转向极区资源调查、矿物开发潜力评估及原位资源利用技术验证（高楠 等，2022）。光学遥感作为不可或缺的技术手段，在本阶段任务中持续发挥关键作用。以中国嫦娥五号任务为例，其搭载的月球矿物光谱分析仪 LMS（Lunar Mineralogy Spectrometer）、全景相机和任务相机，实现了着陆区的原位光谱探测及成像，获取了高分辨率、多角度的地形和矿物信息。最终，任务成功返回1731 g月壤样品，完成了遥感支持、原位观测与样品分析的完整链条（Xu 等，2022）。2024年，嫦娥六号在月球背面的南极—艾特肯盆地着陆，其搭载的全景相机、LMS等光学载荷，用于着陆区环境成像、地形成像和矿物光谱探测。最终，任务成功采集并返回1935 g月背样品（Zeng 等，2023）。随着嫦娥三号“玉兔号”、嫦娥四号“玉兔二号”巡视器，以及嫦娥五号、六号着陆器和巡视器所获取的原位光谱数据不断积累，基于原位观测的矿物学探测与分析已成为月球光学研究的重要组成部分，对理解月表矿物组成、成因过程及资源潜力具有重要的科学意义。后续的嫦娥七号、嫦娥八号等任务将进一步强化对极区资源、矿物组成等信息的遥感识别与原位利用能力，同时，国际月球科研站 ILRS（International Lunar Research Station）和阿尔忒弥斯（Artemis）计划也提出构建多载荷协同的遥感体系，旨在实现对月球资源与环境的长期、动态监测（Lin 等，2024）。

在月球探测任务发展的4个阶段中，光学遥感始终是连接月球科学认知、地质解析与资源开发的重要技术主线，成为理解月壤组成、辨识关键矿物并支撑资源评估的基础手段。伴随探月任务的相继实施，月球光学数据在光谱分辨率、空间

覆盖与观测角度上实现了前所未有的扩展，月表矿物遥感的科学能力正在经历快速跃迁。然而，数据和载荷的迅速丰富也带来了新的挑战：尽管月球矿物探测研究成果丰硕，但人们难以从整体层面认识光学遥感矿物探测的发展脉络、关键问题及其内在逻辑联系。在当前国际月球探测迈向新阶段的大背景下，矿物探测正从定性识别、定量反演逐渐走向资源利用可行性评估的综合需求，亟须一套对观测原理、数据基础与方法体系进行系统化凝练的综述，以支撑新任务的数据解释和科学规划。因此，本文从光学遥感矿物探测原理出发，梳理月球矿物探测数据和载荷，提出统一的矿物光谱识别与反演表达式。在此基础上，将现有方法规约为3类，以解决以往方法分类重叠的问题，同时构建多维度方法对比框架。结合典型任务与区域案例，综合评述月球矿物探测进展，进一步归纳当前面临的主要问题与挑战，并展望未来发展方向。本文旨在应对数据激增与科学需求升级所带来的挑战，为光学遥感在月球矿物识别、丰度反演与资源探测中的应用建立更清晰的知识结构和方法指引，从而为后续月球探测任务的科学解释、算法设计和资源开发规划提供理论基础与技术参照。

2 光学遥感月球矿物探测原理

2.1 月球遥感成像环境特征及影响因素

月球具有无大气包层、真空状态、长期空间风化作用及极端昼夜温差等环境特性，显著区别于地球自然环境条件。这些因素改变了遥感成像的物理过程与光谱响应机制，进而影响了月球光学遥感数据的亮度特征及光谱形态等。

具体而言，首先月球表面缺乏大气层覆盖，太阳辐射在到达月表及月表反射信息传输至传感器的过程中几乎不受大气散射和吸收的影响，这一观测环境使遥感图像呈现较高的亮度对比与视觉锐度，且由于没有大气弥散光干扰，地貌轮廓和阴影边界更加清晰（欧阳自远，2005）。在无大气的月表环境下，太阳入射角与传感器观测角度的变化对月表反射率的影响更直接，导致同一地区在不同观测几何条件下表现出光谱差异。反射率对观测几何条件的这种敏感性，降低了数据在

跨时相、多角度下的可比性，给月表矿物的识别和反演带来挑战。其次，月球的另一个显著特征是空间风化作用的广泛存在。长期暴露于太阳风、宇宙射线及微陨击环境下的月球矿物表面，逐渐形成了纳米尺度的金属铁颗粒覆盖层，从而改变了原始矿物的光谱反射特征。这些变化主要表现为反射率曲线整体向长波方向倾斜，并伴随着矿物典型吸收特征的弱化，特别是1 μm 和2 μm 波长位置附近由 Fe^{2+} 引起的吸收带深度明显减弱（Denevi等，2023；Noble等，2007）。空间风化效应导致遥感光谱数据与实验室测量纯净矿物光谱产生系统性偏差，需对该光谱变化建模校正，或采用包含风化效应的光谱库进行分析。此外，月昼与月夜温差极大，白昼温度可超过120 $^{\circ}\text{C}$ ，而夜间则降至-170 $^{\circ}\text{C}$ ，月球不同区域因矿物热惯量的差异，在热响应过程中表现出不同的升温与降温行为。尤其在月昼期间，高温条件下产生的热辐射会在近红外波段叠加于反射信号中，从而抬高光谱基线，干扰矿物的真实吸收特征，特别是在2 μm 及更长波长位置影响尤为显著（Clark，1979；Singer和Roush，1985）。具体表现为吸收带深度减弱，可能导致矿物丰度被低估，同时2 μm 处辉石吸收带中心会随温度升高出现系统漂移，进而引起矿物化学成分判读的偏差。在3 μm 波长附近区域，热辐射效应更可能削弱或掩盖 H_2O 与OH吸收特征，因而需要结合温度建模或采用热辐射校正方法加以处理。最后，月球极区全年处于极低太阳高度角的照射条件下，部分地形洼地形成了大面积的永久阴影区。该区域缺乏直接光照，可见光与近红外波段几乎无法获取有效信号，构成了光学遥感的“观测盲区”。即使在部分短时受光区域，由于太阳入射角极小，地表反射率极低，接收信号往往接近仪器噪声水平，进一步增加了光谱解译的难度（Lucey等，2021）。对永久阴影区的探测，通常需依赖激光测高仪、多角度观测或雷达等主动式遥感手段，以突破传统光学成像的观测限制。

月球特殊的环境塑造了月球光学遥感数据的特殊性，也对后续光谱反演与矿物识别提出更高要求，在理解月球遥感成像机制的基础上，有必要进一步探讨矿物光谱的物理形成过程及光谱响应特征，为矿物定量反演提供理论依据。

2.2 光谱识别矿物的物理机制

月球表面矿物的光学遥感识别, 基于反射光谱对物质化学组成和晶体结构的敏感性, 其核心在于电磁波在与月壤相互作用的过程中所表现出的波长依赖性吸收与散射特征。如图1所示, 当太阳辐射入射至月球表面时, 一部分能量在颗粒表面发生反射, 另一部分进入颗粒内部, 经历多次散射与吸收后逸出, 其能量随波长变化形成的反射光谱最终被遥感传感器接收, 辐射传输过程中能量损耗由吸收机制主导, 遵循比尔(Beer)定律(Lenoble, 1985):

$$I = I_0 e^{-kx} \quad (1)$$

式中, I 为经过光程 x 后的透射光强度, I_0 为入射光强度, k 为吸收系数, x 为光程长度。矿物吸收系数 k 又与其复折射率的虚部 K 有关 (Hapke, 2012; Bohren 和 Huffman, 2008), 公式为

$$k = \frac{4\pi K}{\lambda} \quad (2)$$

式中, λ 为波长。从式(2)可以看出, 在近真空、无大气的月球环境中, 反射光谱主要受制于矿物自身的光学性质及微观结构, 特别是复折射率所决定的吸收能力和散射行为。

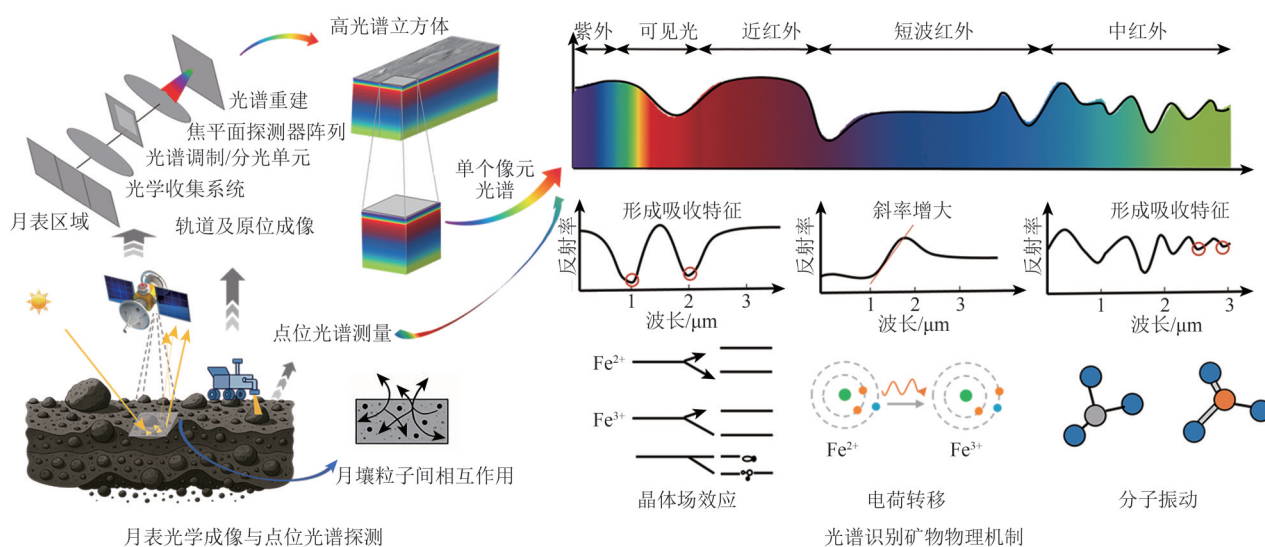


图1 月表成像过程及矿物识别原理示意图

Fig.1 Schematic of lunar surface imaging process and mineral identification principle

矿物光谱吸收特征主要由两类微观物理机制引起: 电子过程与分子振动过程(吴昀昭, 2014)。如图1所示, 电子过程通常表现于可见光到近红外波段, 在月球光谱遥感中最常见的机制为晶体场效应和电荷转移。晶体场效应指的是过渡金属离子(如 Fe^{2+} 和 Fe^{3+})在晶体场作用下能级发生分裂, 从而在 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 波长范围附近产生特征吸收带。该现象广泛存在于辉石和橄榄石等含铁矿物中。电荷转移吸收则涉及离子之间的电子跃迁, 如 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 转移, 通常在可见光至紫外波段形成强吸收, 是铁氧化物类矿物呈现红色或褐色的主要原因。分子振动过程则主要作用于近红外至中红外波段, 由 OH 、 H_2O 、 CO_3^{2-} 、 Si-O 等基团间的拉伸、弯曲或其组合振动引起特征性吸收带。例如 OH 和 H_2O 在 $1.4\ \mu\text{m}$ 、 $1.9\ \mu\text{m}$ 与 $2.7\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ 波长范围处产生合频带; CO_3^{2-} 的特征吸收位于 2.3--

$2.5\ \mu\text{m}$ 波长范围内; 而 Si-O 基团在中红外波段存在强烈基频吸收, 可用于识别辉石、橄榄石、斜长石等硅酸盐矿物。

除了吸收机制外, 散射过程也显著影响月壤反射光谱的形态。月壤为多孔、松散的颗粒介质, 光子在其中发生“随机游走”式的多次散射, 导致光程不确定性显著增加, 从而放大弱吸收特征或扭曲吸收带形态(Hapke, 2012)。反射光谱不仅反映了矿物的组成和结构, 还受到诸如粒径效应、混合机制、表面粗糙度、空间风化等因素的共同影响。粒径效应源于颗粒内部光的吸收与散射过程随粒径而发生的系统变化。根据Hapke)辐射传输模型, 粒径越大, 光在颗粒内部的有效路径越长, 吸收概率增加, 单次散射反照率降低, 最终表现为整体反射率减小、特征吸收带加深。相反, 当粒径较小时, 光的有效路径缩短, 颗粒

内部多次散射比例升高，出射光增强，表现为反射率升高、吸收带减弱（Hapke，1981）。空间风化作用是月壤演化的关键过程，在太阳风与微陨石等长时间轰击下，月壤颗粒表面形成纳米级金属铁 npFe^0 ，导致整体反射率降低、吸收特征减弱及光谱红移（Colwell等，2007）。与此同时，月壤主要由橄榄石、辉石、斜长石、钛铁矿和撞击熔融玻璃等物质混合而成。由于颗粒间的多重散射和空间风化作用，月壤光谱并非单一矿物光谱的线性叠加，而是呈现复杂的非线性紧密混合特征，使得其整体光谱较单一矿物更为复杂（Papike等，1982）。

月表光学遥感中反射光谱的形成是多尺度、多机制综合作用的结果，不同机制对最终光谱的影响差异显著，深入理解物理机制，利用模型对其进行建模校正，是实现高精度矿物识别和反演的理论前提，也是月表矿物遥感探测技术发展的基础。

2.3 月球典型矿物光谱特征

为系统分析月表典型矿物的光谱响应特征，本文从Relab（Reflectance experiment laboratory）光谱库中选择了源于月表返回样品的代表性矿物材料的光谱数据，包括橄榄石、斜长石、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石、钛铁矿、火山玻璃和冲击熔融玻璃（吴昀昭，2014）。所选取的样品覆盖了月壤中主要的造岩矿物及典型风化产物，各样品的编号、矿物类别和属性信息列于表1，反射率曲线如图2所示，波谱范围为0.3—2.6 μm ，反映了各矿物在可见光至近红外波段的光谱响应特征。

表1 Relab光谱库矿物光谱标签号		
Table 1 Relab mineral spectra and corresponding labels		
矿物类型	编号	粒径范围/ μm
橄榄石	LS-CMP-169	0—125
斜长石	LR-CMP-171	0—125
单斜辉石	LR-CMP-172	0—125
斜方辉石	LR-CMP-173	0—125
尖晶石	SP-CMP-133-B	0—45
钛铁矿	LR-CMP-178	0—125
火山玻璃	LR-CMP-052	—
冲击熔融玻璃	LS-CMP-018-A	0—125

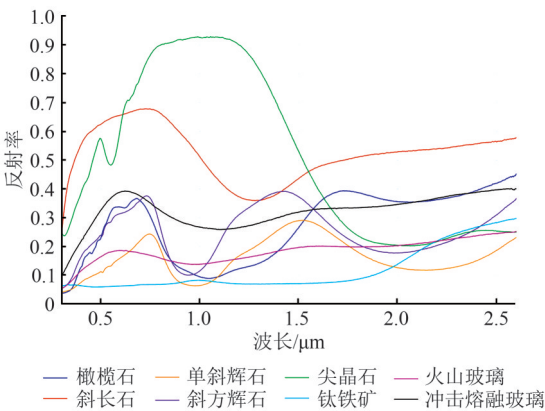


图2 月球典型矿物光谱曲线
Fig.2 Spectral curves of representative lunar minerals

从图2可以看出，橄榄石由3个吸收特征共同作用，主要表现为在1250 nm波长位置处存在一个宽而不对称的吸收带，该特征源于 Fe^{2+} 离子在晶体八面体结构中M1、M2位点的晶体场跃迁（Burns，1993）。橄榄石在2 μm 波长位置处无明显吸收带，因此1 μm 波长附近的单一宽吸收峰成为遥感识别该矿物的关键特征（Sunshine和Pieters，1998）。斜长石通常具有较高的整体反射率，光谱曲线在近红外波段呈缓慢上升趋势，反映其含铁量较低。在1.25 μm 波长位置附近可见弱吸收带，同样是由于少量 Fe^{2+} 离子进入晶格位点引起的晶体场效应所致，吸收深度较浅，且在短波红外2 μm 波长位置处基本无吸收（Adams和Goullaud，1978）。单斜辉石和斜方辉石是月球表面常见的辉石类矿物，它们在遥感光谱中均表现出典型的1 μm 和2 μm 波长处吸收带特征，但其吸收特征存在显著差异（Cloutis和Gaffey，1991）。单斜辉石的1 μm 吸收带中心在1.0—1.05 μm 波谱范围内，2 μm 吸收带位于1.9—2.3 μm 波谱范围内，吸收带较宽且深，整体位置偏向长波方向，这主要与钙组分对晶体结构的调制作用有关，同时铁镁组成比例的变化也会引起吸收带位置的小幅偏移和带深增强，而斜方辉石的吸收带中心分别位于0.9—1.0 μm 和1.8—2.0 μm 波长范围处，吸收带相对较窄、较浅，位置偏短波方向（Cloutis，2002）。遥感解译通常通过比较1 μm 和2 μm 吸收带中心波长位置来对单斜辉石与斜方辉石进行定性区分，在此基础上结合吸收带深度、光度效应校正、光谱解混结果以及区域地质背景进行综合分析，从而推断岩石类型与成分（Adams，1974）。尖晶石类矿物无明显的2 μm 波长位置吸收带，此特征是其与辉石类矿

物最显著的差别，尖晶石类矿物在 2 μm 波长位置附近反射率通常升高，在 0.55—0.7 μm 波谱范围内出现 Fe^{3+} 引起的弱吸收，同时具有较高的整体光谱反射率，是月球高地特定岩相的重要组成部分 (Pieters 等, 2014)。钛铁矿的光谱特征表现为整体反射率低，尤其在可见光至近红外波段的 0.4—1.5 μm 范围内呈现暗色、平坦的光谱曲线，且缺乏显著的吸收特征 (Lucey 等, 2000)。钛铁矿的低反射率主要归因于其高 Fe^{2+} 和 Ti^{4+} 含量所致的强电荷转移吸收效应。尽管其本身缺乏特定的晶体场吸收特征，但它的存在会显著降低岩石的整体反射率，并削弱其他矿物（如辉石）的吸收特征 (Adams 和 McCord, 1970)。月球包含两类玻璃：火山玻璃和冲击熔融玻璃。虽然玻璃不属于矿物范畴，但其光谱特征及分布对月表矿物有重要影响。火山玻璃在近红外区域可能出现轻微吸收谷，但整体表现为红化趋势，反映其非晶结构及风化后形成的纳米铁吸收作用 (Besse 等, 2014)。冲击熔融玻

璃则更加平坦、暗色，是撞击事件导致矿物结构破坏后形成的高风化样品代表。玻璃类材料的光谱特征为遥感识别月表熔融物质与风化产物提供了重要证据 (Tompkins 和 Pieters, 2010)。

3 月球矿物探测任务中的光学载荷及数据资源

月球遥感任务中的光学载荷设计紧密契合科学目标的演变。随着深空探测技术的持续演进，光学遥感载荷在月球矿物探测领域展现出核心支撑作用 (何志平等, 2022)。总结表 2 中光学载荷的发展历程，其技术路径可划分为探测平台的多元化、光谱范围的持续扩展和探测任务的精细化演进 3 条主线。从最初的可见光成像到覆盖远紫外、短波红外及热红外的多维观测体系，月表矿物探测实现了从目标识别向定量反演与资源评估的跨越。

表 2 目前月球矿物探测光学载荷及数据
Table 2 Optical instruments and datasets used for lunar mineral detection

年份	国家/地区	探测器	任务类型	光学仪器	波谱范围/ μm	空间分辨率/m	通道	主要用途
1959	苏联	月球 3 号 (Luna 3)	飞越	Yenisey-2 光电电视相机	可见光范围 (无固定数值)	—	1	首次拍摄月球背面图像
1972	美国	阿波罗 16 号 (Apollo 16)	着陆器	远紫外相机	0.12—0.40	—	—	月球首次天文观测
1994	美国	克莱门汀 (Clementine)	轨道器	紫外/可见光相机	0.42—0.95	100—200	6	矿物识别、
				高分辨率相机	0.42—0.80	7—20	5	高分辨率图像获取、
				近红外相机	1.10—2.69	150—500	6	地形分析、
				长波红外相机	8.00—9.50	约 60	1	月球热辐射探测
2004	欧洲	智慧一号 (SMART-1)	轨道器	月球高级微型成像仪 (AMIE)	0.75—0.85	—	4	多光谱可见光成像
				红外光谱仪 (SIR)	0.94—2.40		256	矿物识别
2007	日本	月亮女神/辉夜号 (SELENE/Kaguya)	轨道器	多光谱成像仪 (MI)	0.42—1.60	20/62	9	全球高精度地形数据获取
				光谱剖面仪 (SP)	0.52—2.60	500	296	月表矿物组成与分布探测
2007	中国	嫦娥一号 (CE-1)	轨道器	干涉成像光谱仪 (IIM)	0.48—0.96	200	32	月表矿物分布探测
2008	印度	月船一号 (Chandrayaan-1)	轨道器	地形测绘相机 (TMC)	0.50—0.85	5	1	矿物组成、水/OH 探测
				高光谱成像仪 (HySI)	0.40—0.95	80	64	
				近红外光谱仪	0.93—2.40	—	—	
				月球矿物绘图仪 (M^3)	0.43—3.00	70—140	261	
2009	美国	月球勘测轨道飞行器 (LRO)	轨道器	LROC 窄角相机	0.40—0.75	0.5	1	分辨米级地貌特征、
				LROC 广角相机	0.32—0.68	100/400	7	探测极区矿物分布、
				月球辐射计 (DLRE)	0.30—3/7.8—200	180—500	9	反演表面温度与热惯量、
				莱曼阿尔法成像仪 (LAMP)	0.05—0.19	100—260	—	识别极地水冰、探测极区永久阴影区成分

								续表
年份	国家/ 地区	探测器	任务 类型	光学仪器	波谱范围/ μm	空间 分辨率/ m	通道	主要用途
2009	美国	月球环形山观测与 遥感卫星(LCROSS)	撞击器	可见光相机	0.40—0.70	150—200	1	追踪羽流演变、 OH 自由基演变
				近红外相机	0.90—1.70/		1	监测撞击前后热图像
				中红外相机	1.40—1.70	150—200	1	撞击区热辐射、
				近红外光谱仪	6—10/6—13.5	300	1	热信号扩展
				紫外/可见光光谱仪	1.20—2.45	—	1024	监测水蒸气、
					0.26—0.65		100	冰和水合矿物
								识别羽状物 OH、水、 金属元素
2013	中国	嫦娥三号 (CE-3)	月球车	可见光近红外成像 光谱仪(VNIS)	0.45—0.95/ 0.90—2.40	—	256/ —	获取巡视点位 光谱分析成分
2019	中国	嫦娥四号 (CE-4)	月球车	可见光近红外成像 光谱仪(VNIS)	0.45—0.95/ 0.90—2.40	—	256/ —	月球背面南极—艾肯盆地 矿物定性识别与反演
2019	印度	月船二号 (Chandrayaan-2)	轨道器	成像红外光谱仪(IIRS)	0.80—5.00	约 80	256	水、羟基和矿物丰度反演
2020	中国	嫦娥五号 (CE-5)	着陆器	月表矿物光谱分析仪 (LMS)	0.48—3.20	—	256	着陆风暴洋光谱探测和分析
2024	中国	嫦娥六号 (CE-6)	着陆器	月表矿物光谱分析仪 (LMS)	0.48—3.20	—	—	分析月球背面月壤矿物成分
2025	美国	月球先锋号 (Lunar Trailblazer)	轨道器	挥发物与矿物成像仪 (HVM3) 月球热测绘仪(LTM)	0.40—3.60 7—10/6—100	—	— 11/4	探测月表 OH/H ₂ O 的 丰度及分布 探索月球表面温度特性

3.1 探测平台与载荷集成方式的多样化

月球矿物遥感能力的提升体现在观测平台构型、传感器集成方式及数据资源体系的持续演进。目前遥感观测已由早期轨道器主导的单一模式，演变为轨道器、着陆器、月球车和撞击器协同运行的多平台体系。轨道器（如月船一号、克莱门汀、嫦娥一号）提供覆盖范围广、空谱信息丰富的数据，是开展大范围及区域持续矿物分布研究的重要基础；着陆器（如嫦娥五号）专注于着陆区域的局部反演，并兼备采样与同步光谱获取能力（林红磊 等，2021）；月球车（如玉兔二号）执行点位原位光谱分析任务；撞击器通过动能撞击在月表制造高能量事件，由随行航天器携带载荷对喷射羽流进行观测，从而获取永久阴影区物质的光谱信息（Colaprete 等，2012）。多平台的协同部署构建了从全球覆盖到着陆点位的多尺度观测网络，显著提升了月壤探测的空间覆盖性与尺度适应性。

在载荷配置方面，复合型光谱载荷配置成为月球探测的发展方向。将可见光、高光谱成像仪、短波红外成像仪、热红外测温仪、激光高度计等多种传感器集成，有望构建多维度、多模态的观

测能力体系。例如近期任务在探测器中部署了近红外和热红外传感器，协同获取光谱和温度信息，有助于区分真实的矿物吸收特征和热辐射干扰，增强月球水及挥发物反演的准确性和鲁棒性（Ehlmann 等，2022）。

在数据资源层面，月球光谱遥感数据已由早期的单一图像发展为多源、多波段的观测数据，包括多光谱图像、高光谱立方数据、热红外辐射计观测数据和激光测高数据等，在此基础上通过系统化处理进一步生成热辐射图、反射率图像、数字高程模型 DEM（Digital Elevation Model）、温度场、地质地貌图等数据产品（邸凯昌 等，2025）。与此同时，全球主要航天机构也不断完善数据储存与开放共享机制。例如中国的探月工程数据发布系统和美国的行星数据系统等为历史任务与新一代任务的数据融合分析提供了数据支持（Li 等，2025；Prockter 等，2021），并为跨任务、多源、时间序列联合解译创造了条件。

3.2 光谱范围与矿物诊断能力

月球矿物遥感识别的关键在于传感器波段设置对诊断性吸收特征的覆盖与解析能力，并要求具备较高的光谱分辨率和响应灵敏度，以有效区

分不同矿物的光谱差异。早期的探月任务，如月球3号与阿波罗系列，多采用可见光成像相机，仅部署了单通道可见光成像设备，主要服务于地形识别与地貌配景，对矿物成分的识别能力极为有限（Masursky等，1978）。克莱门汀任务首次搭载跨越紫外至长波红外的多通道成像系统，不仅涵盖可见光反射特征，还引入了关键的近红外和热红外波段，实现了5个紫外/可见光波段和6个近红外波段的多通道粗分光能力，为月球矿物的初步类型分类提供了依据（McEwen和Robinson，1997）。同时，该任务利用热红外单波段观测开展表面温度与热辐射分析，为理解月球热环境奠定了基础（Lawson等，2000）。随着光谱探测需求的增强，后续任务逐步引入近红外与短波红外高光谱成像仪。例如欧洲航天局智慧一号与印度的月船一号等任务部署的高光谱仪器，能够精准解析辉石、橄榄石、斜长石等典型矿物的特征吸收峰，同时引入对水合矿物的响应波段，大幅增强了月表矿物种类识别的谱域支持（张鹏等，2025）。

中国嫦娥系列任务持续推动光谱范围与分辨能力的提升。中国研制的矿物光谱成像仪实现了光谱范围从0.48 μm 至3.2 μm 的拓展（林红磊等，2023），并维持了高光谱的分光能力。在空间分辨率方面，轨道器成像能力通常处于数十至百米量级。例如嫦娥一号IIM影像空间分辨率约为200 m（Ouyang等，2010），月船一号M³影像在目标模式下分辨率可达70 m（Green等，2011），而LRO搭载的窄角相机可实现最高0.5 m的分辨率（Robinson等，2010）。相比之下，月球车与着陆器开展的原位探测可在点位实现厘米级的高精度测量，实现了从轨道广域扫描到表面局域验证的协同框架构建。新一代任务（如月球先锋号）在光谱配置上更加强调宽谱段与多模态集成，结合热红外测绘仪，能够实现对OH/H₂O各种赋存状态（如冰、羟基、结合水）及表面热物理属性的同步解译。通过可见—近红外—热红外波段协同观测，其数据具备多源交叉验证与联合反演潜力（Ehlmann等，2022）。

总体来看，月球探测光学载荷波谱范围的持续拓展与细化，光谱分辨率与空间分辨率的双向提升，使得遥感数据可支持从“定性识别”向“丰度估算”乃至“状态分型”的演进，推动月球矿物遥感能力迈向高精度、高维度、高应用价值

阶段。

3.3 探测目标与数据用途的逐步深化

随着光学遥感载荷性能的提升，月球遥感任务的科学目标由形貌识别逐步深化至成分辨别、定量反演及可利用资源的状态解析（Li等，2019b；Lin等，2024）。整体来看，月球探测任务在实施时间上相互交叉，但其科学目标与数据用途已演化出清晰的体系结构。

月球表面形貌识别是光学遥感最早且最基础的用途。例如月球3号获取了月球背面影像（Barabashov等，1961），阿波罗系列着陆器亦部署了可见光成像相机，用于软着陆区的地貌配景与取样记录（Masursky等，1978）。这些早期光学遥感数据主要服务于地形地貌判读和航天器操作辅助，空间分辨率较低、波段单一，任务目标以“场景记录”为主。随着多光谱和高光谱载荷的部署，月壤组成分析成为核心任务之一。克莱门汀搭载多波段相机显著提升了对月球主要矿物的区分能力；月船一号部署了M³；辉夜号配备SP；中国的嫦娥一号搭载IIM。这些任务均具备数十至数百通道的细分光能力，使得矿物吸收特征的位置、深度与形态得到系统解析，实现了月表矿物的类型判别及其空间分布格局识别，从而为建立月壤成分区域划分提供了光谱基础（刘建军等，2015）。随着原位探测技术逐渐成熟，光学探测任务逐渐聚焦于着陆区域矿物的遥感反演与交叉验证。中国嫦娥三号成功着陆于月球正面虹湾地区，首次部署可见光—近红外成像光谱仪，实现月壤点位反射光谱采集，迈出了原位光谱识别的关键一步（Wu和Hapke，2018）。嫦娥四号作为人类首个月背着陆任务，在南极—艾特肯盆地的冯·卡门撞击坑成功软着陆并开展巡视，进一步补充了此前任务未覆盖的月背地质数据（Li等，2019）。嫦娥五号则将任务目标升级为“着陆+采样+光谱分析”的综合模式，在风暴洋吕姆克山脉北部区域采集月壤样品的同时，利用月表矿物光谱仪获取同步光谱信息，实现遥感数据与返回样品的交叉验证（Liu等，2022）。最新的嫦娥六号更进一步，将着陆点选址于月背阿波罗撞击坑边缘，旨在探测极区月壤深部结构与挥发物赋存特性（Yan等，2025）。同一时期，美国的月球先锋号提出以“成像光谱+热测绘”双重载荷模式，实现对极区

冷陷区 OH/H₂O 的状态分类与丰度定量，将遥感目标拓展至“冰—羟基—结合水”的多态鉴别，具备资源可开采潜力评估价值（Ehlmann 等，2022）。

当前光学遥感任务已实现从形貌成像、矿物识别，到资源空间分布与状态反演的跃迁。任务平台从轨道器扩展至着陆器与月球车，遥感维度由二维影像拓展至多维谱图，数据分析模式由配景支撑转向面向资源的科学解译。任务目标的不断深化，正为未来月球资源原位利用、人类驻留选址与长期基地建设提供关键参考与数据支撑（Zhang 等，2023b）。综上所述，月球遥感矿物探测已形成以矿物识别为牵引、以高光谱解译为核心、以多平台协同为支撑、多模态数据融合的任务架构。该演化体系不仅支撑全月矿物识别及丰度图的构建，也为极区资源调查与未来人类驻月提供可持续的技术路线。

4 月球矿物识别与反演方法

针对月球光谱数据开展矿物类型识别与丰度反演，是当前月球遥感研究的重要方向。受限于

太空风化、混合像元与弱吸收特征等因素，构建鲁棒且可推广的反演模型仍面临挑战。月球矿物识别与丰度反演的核心目标是由观测反射光谱 $x(\lambda)$ 推断矿物学目标量 $\hat{y}$ （如矿物类别、端元光谱或丰度），并在尽可能明确的物理与统计约束下保证其可解释性与泛化能力。为统一不同研究路线，本节给出通用公式，将光谱特征表征与任务映射纳入同一优化框架：

$$\hat{y} = f_w\left(\phi\left(\sum_{k=1}^K a_k s_k(\lambda; \theta_k)\right)\right) \tag{3}$$

式中，矿物端元光谱或带形模型记为 $s_k(\lambda; \theta_k)$ ，对应丰度为 a_k ，物理或带形参数为 θ_k ； $\phi(\cdot)$ 为光谱域变换或光谱表征算子； $f_w(\cdot)$ 为从特征到目标量的映射模型。在此基础上，按照优化目标与约束的不同，可将现有方法划分为 3 类：第 1 类为光谱特征表征与数据驱动映射；第 2 类为以拟合物理参数为主的物理前向建模与反演；第 3 类为以求解丰度 a 为主、满足非负与“和为 1”约束的光谱解混模型。表 3 为 3 类的代表性方法及优缺点和适用范围。

表 3 3 类月球矿物识别与反演方法的系统对比

Table 3 Comparison of three classes of lunar mineral identification and inversion methods

类型	第 1 类	第 2 类	第 3 类
代表方法	光谱指数法、光谱匹配法、 基于光谱库的查找表、修正高斯模型、 经验回归模型、深度网络映射法	Hapke 前向+最小二乘法/牛顿迭代法/ 查找表法、Shkuratov 快速前向法	端元提取+最小二乘法、 稀疏解混法、深度网络解混法、 Hapke 域解混法
输出量	目标量 $\hat{y}$ （如矿物类别、丰度）	物理参量、 丰度（通过后向反演计算）	端元光谱及丰度
是否显式求丰度	否	否（由物理参数派生）	是
是否显式物理建模	否	是	Hapke 域解混法显式
优势	简单高效、易全月推广	物理可解释性强	直接计算丰度、贴合混合像元本质
局限	物理可解释性弱，受太空风化、 光照条件等影响	参数耦合/不适定、 需定标、计算复杂度高	端元依赖强、 非线性模型计算复杂度高
适用范围	快速全局制图、 先验较少的初判或筛选	区域反演、 参数敏感性分析	丰度制图、 盆地边缘或熔融物区等混合严重区

4.1 光谱特征表征与数据驱动映射

光谱特征表征与数据驱动映射方法不显式反演端元丰度或物理参数，而是对观测光谱进行特征表征，并直接学习光谱到目标之间的映射关系，其公式为 $\hat{y} = f_w(\phi(x(\lambda)))$ 。其中 $x(\lambda)$ 为反射光谱； $\phi(\cdot)$ 为光谱表征算子，如连续体去除后的带位、带宽、带深、斜率等带形参数、波段指数/比值或

其他特征； $f_w(\cdot)$ 为从特征到目标量（矿物类型、丰度、氧化物含量等）的经验、回归、传统机器学习或深度映射模型；参数 w 由样本监督估计。基于这种框架，典型方法可概括为 4 类：（1）依据光谱物理启发构造特征进行判读或回归的参数或指数方法，如光谱指数法、波段比值法（Lucey 等，2000；Tompkins 和 Pieters，1999；Suárez -

Valencia 等, 2024); (2) 基于晶体吸收机理的光谱解析方法, 如修正高斯模型 MGM (Modified Gaussian Model); (3) 将光谱库或查找表与已知样本建立对应, 实现快速识别与估计的光谱匹配或查找表方法 (Clark 等, 1990; Clark, 2004); (4) 在样品化学分析、在轨或原位标注的监督下, 学习 $f_w(\cdot)$ 参数的数据驱动回归或映射方法, 包括基于样品的经验回归与传统机器学习及端到端深度神经网络。

参数/指数方法根据反射光谱的特征构造 $\phi(\cdot)$, 如波段比值、指数等, 再通过显式规则或回归得到目标量。Lucey (1998) 采用克莱门汀紫外—近红外多光谱数据, 设计了基于 950 nm/750 nm 和 415 nm/750 nm 波段反射率比值的光谱指数方法, 绘制了全月球 FeO 和 TiO₂ 含量分布图。该指数至今仍被广泛使用, Chen 等 (2020) 采用嫦娥四号 VNIS 原位数据, 开发系统处理流程, 通过提取带形参数与矿物指数, 对着陆区镁铁质矿物组合进行判别。MGM 方法依据晶体场吸收机制, 通过多个高斯函数或修正高斯函数重建吸收包络, 从而对 1 μ m 和 2 μ m 波长位置附近的特征吸收带进行解析。例如, Sunshine 和 Pieters (1993) 首次将 MGM 应用于月球高地斜长岩的光谱解译, 通过一个高斯函数或多个高斯函数的组合来识别矿物吸收带, 成功分离了辉石与橄榄石的吸收峰, 并实现了其丰度的定量估计; Gou 等 (2020) 应用 MGM 反卷积方法, 对嫦娥四号月球车获取的原位光谱进行分析, 通过计算 5 种矿物归一化带强度比, 估算了相对矿物含量。光谱匹配和查找表方法以光谱库或查找表为中介, 将待测光谱的表征量与库中模版建立相似度或插值关系, 并直接映射到目标量。例如, Pieters 等 (2009) 采用光谱匹配法基于 M³ 数据对月表 OH 和 H₂O 分布进行了定性分析; Qian 等 (2023) 将 M³ 高光谱影像与实验室样本数据库相结合, 估算了风暴洋克里普地体 (Procellarum-KREEP-Terrane) 区域的矿物丰度, 为月球晚期火山活动演化研究提供了重要支持。数据驱动回归或映射方法在有监督样本条件下直接学习从特征到目标量的函数。例如, 吴昀昭等 (2010) 通过建立矿物吸收中心和驻点波长的关系, 反演得到月球矿物吸收中心分布图; Blewett 等 (1997) 利用克莱门汀任务的多光谱数据和阿

波罗任务中采样的站点数据, 构建回归模型估计 FeO 含量, 并绘制了全球 FeO 分布图。支持向量机、集成学习等传统机器学习算法也被用于构建光谱与矿物丰度之间的回归模型, 并在局部区域验证了其有效性 (Bian 等, 2024; Bhatt 等, 2019; Thoresen 等, 2024)。而 Korokhin 等 (2008) 于 2008 年首次构建了人工神经网络, 使用月球样品光谱作为训练标签, 实现 TiO₂ 含量与多个光谱指数之间非线性关系的建模, 并成功将模型应用于克莱门汀多光谱数据, 实现了全月尺度的 TiO₂ 丰度估算 (Korokhin 等, 2008)。近年来, Xia 等 (2019) 基于 39 个月球任务采样点训练神经网络模型, 建立反射率与多种氧化物丰度之间的映射关系, 并将其应用于 IIM 数据, 获取了月表中低纬度 6 种氧化物的丰度分布图。Qiu 等 (2022) 利用 SELENE (Kaguya) 多光谱成像数据构建卷积神经网络模型, 反演了 FeO 和 TiO₂ 的丰度分布, 并将结果与传统的线性回归与随机森林模型进行对比, 发现卷积神经网络模型在拟合精度和非线性建模能力方面均表现更优。在此基础上, Zhang 等 (2023a) 进一步利用嫦娥五号样品结果验证了模型的可靠性; Yang 等 (2023) 将嫦娥五号采样点实测氧化物丰度作为训练目标, 建立卷积神经网络模型与 SELENE 的多光谱 MI 数据之间的映射关系, 完成了 6 种主要氧化物纬度 $\pm 60^\circ$ 范围内的反演制图; Ma 等 (2022) 则结合 48 个样点光学成熟度校正因子, 构建反向传播神经网络模型, 实现了月壤氧化物丰度的区域反演与推广。

总体而言, 光谱表征与数据驱动映射模型具有计算高效、实现简洁的特点, 在月表矿物的大尺度分布估计中具备较高的应用效率与可行性, 尤其适用于初步分析和区域对比研究; 参数/指数方法与 MGM 模型提供了物理启发性强、可解释性好的低维特征; 光谱匹配及查找表方法能够迅速给出稳定的目标量估计; 数据驱动模型则能捕获复杂非线性关系并在大样本条件下取得更高精度, 但局限也较为明显, 这类方法对太空风化、粒径与观测几何变化的鲁棒性有限, 通常依赖大量高质量样本或完备光谱库, 缺乏对复杂混合机制与风化效应的建模能力, 难以支撑矿物丰度的高精度、定量反演。

4.2 物理前向建模与反演模型

物理前向建模与反演模型以光谱辐射传输理论为核心，模拟光在月壤颗粒介质中的多次反射、吸收与散射过程。该类方法以辐射传输为前向模型，通过拟合观测光谱直接求解物理参数，再将得到的物理参量按既定关系派生为矿物丰度或其他指标，其优化问题写作 $\theta^* = \arg \min_{\theta} \|x(\lambda) - F_{\text{phys}}(\theta; \lambda, i, e, g)\|^2 + \mathcal{R}(\theta)$, $\hat{y} = h(\theta^*)$ 。其中 F_{phys} 来源于 Hapke 模型 (Hapke, 1981; Hapke 和 Wells, 1981; Hapke 等, 1993) 和 Shkuratov 模型 (Shkuratov 等, 1999) 等物理前向模型； θ 表示粒径、npFe⁰、相函数、粗糙度等物理参数； λ, i, e, g 表示已知量，分别是波长、入射角、出射角、相位角； $\mathcal{R}$ 为物理先验正则，当需要丰度或其他矿物指标时，可利用 $h(\cdot)$ 将反演的 θ^* 转为目标量。典型方法涵盖 Hapke 前向建模—后向反演模型以及 Shkuratov 快速前向模型，具有理论基础扎实、解释性强等特点。

Hapke 前向建模—后向反演模型是月球反射率建模中应用最广泛的模型之一，已在月表矿物定量反演研究中取得大量代表性成果，其中后向反演主要采用查找表法、最小二乘法及牛顿迭代法等方法 (Aster 等, 2018; Kelley, 2003)。例如，Lucey (2004) 利用 Hapke 模型模拟 4 种典型矿物的反射率光谱，构建不同丰度水平下的查找表用于矿物丰度反演；Denevi 等 (2008) 在 Hapke 模型中引入纳米铁 (SMFe) 和粒径影响，模拟 6 种矿物的光谱特征；Cahill 等 (2009) 进一步基于 Hapke 前向建模—后向反演模型研究了月壳成分变化与矿物丰度分布 (Cahill 等, 2009)。以上应用多结合查找表方法实现大尺度反演，但通常需要预设离散丰度区间，限制了反演的连续性与精度。近年来后向反演求解方法也不断优化。例如，Li 和 Li (2011) 采用最小二乘法结合牛顿迭代法推导关键光学参数，并将其应用于月球样品光谱数据集；Liu 等 (2015) 在其基础上进一步改进模型结构与求解策略。然而，Hapke 模型在实际应用中仍面临计算复杂、模型参数获取困难等挑战，特别是在矿物混合复杂区域，建模精度存在局限，限制了其在大范围高分辨率反演中的推广应用。

Shkuratov 模型是另一种常用的光谱辐射传输模型，由 Shkuratov 等 (1999) 于 1999 年提出。该模型同样基于颗粒介质多次散射机制，但采用更为简洁的数学表达形式，并通过光程积分的方法计算反射率。Shkuratov 模型将月壤视为由不同矿物颗粒组成的散射体，适合用于大尺度矿物识别和分类。Poulet 和 Erard (2004) 首次验证了其在月球表面矿物识别中的适用性；Korokhin 等 (2024) 则将其应用于 M³ 数据，开展月表矿物成分及物理参数的反演研究。与 Hapke 模型相比，Shkuratov 模型在计算效率上具有明显优势，且参数更为简明，适用于大数据处理和全球尺度的矿物图谱生成。然而，其部分模型参数缺乏明确物理解释，对于光谱吸收特征复杂的矿物，拟合精度和反演能力仍有限。

综上所述，基于辐射传输理论的物理前向建模—后向反演模型在月球矿物遥感反演中占据重要地位，其强可解释性支撑了定量化、具物理基础的矿物丰度估计。其中，Hapke 模型更适用于高精度区域反演，而 Shkuratov 模型则更适用于大尺度矿物分类。未来可探索将二者与混合像元分解、统计推断和深度学习模型相集成的技术路径，以提升物理模型的实用性与适应性。

4.3 光谱解混模型

月表遥感数据中普遍存在混合像元现象，即单个像元中包含多种矿物组分，其光谱表现为多个矿物光谱的叠加。光谱解混作为处理混合像元的核心方法，旨在从观测光谱中反演出端元光谱及其丰度比例，是实现高精度矿物丰度制图的关键技术之一。根据建模机制，光谱解混可划分为线性解混模型与非线性解混模型。前者假设光谱为各端元光谱的加权线性组合，适用于成分分布均匀且尺度较大的混合场景，后者则考虑光在月壤细小颗粒之间的多次散射和吸收，使光谱混合呈现非线性关系，是更符合月壤实际的解混机制。根据式 (3)，光谱混合模型为 $y = f(Sa)$ 。其中， $y = \phi(x) \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ 为波段数为 L 的光谱，此处 y 既可以为观测光谱 x ，又可以为利用 Hapke 模型等或预处理技术进行域变换后的光谱； $S = [s_1, s_2, \dots, s_K] \in \mathbb{R}^{L \times K}$ ，为 K 个端元的矩阵； $a = [a_1, a_2, \dots, a_K]^T$

$\in \mathbb{R}^{K \times 1}$ 为对应的丰度向量; f 为线性或非线性的函数, 由此可得到光谱解混模型的通用表述为 $\mathbf{a}^* = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{y} - f(\mathbf{S}\mathbf{a})\|^2 + \mathcal{R}(\mathbf{a})$ s.t. $\left(a_k \geq 0, \sum_{k=1}^K a_k = 1 \right)$ 。

其中, $a_k \geq 0$ 和 $\sum_{k=1}^K a_k = 1$ 分别表示丰度非负约束与和为一约束, 残差项衡量模型与观测的一致性, $\mathbf{a}^*$ 为模型估计的丰度向量, $\mathcal{R}(\mathbf{a})$ 为作用于丰度向量的正则化项, 用于向模型注入先验信息以提升稳健性, 广泛使用的先验信息包括稀疏、空间平滑等。

在线性解混模型中, 应用最广泛的是全约束最小二乘法与稀疏解混方法 (Heinz 和 Chein-I-Chang, 2001; Iordache 等, 2011)。前者在最小二乘法求解中需满足非负与“和为 1”的约束, 即 $a_k \geq 0, \sum_{k=1}^K a_k = 1$, 以保证丰度结果的物理意义。

Ahmad 等 (2022) 结合月船一号 M³ 与月船二号 IIRS 数据, 基于 N-FINDR 提取端元并采用全约束最小二乘法反演月表矿物丰度, 验证了其在实测高光谱数据中的可行性。Shuai 等 (2013) 和帅通等 (2012) 构建了考虑空间风化效应的多端元解混框架, 基于嫦娥一号 IIM 数据生成了 3 种主要矿物的丰度图。稀疏解混方法则利用 L_1 范数正则项挖掘光谱库中与当前像元最相关的少数端元, 以提升解混稳定性与泛化能力。例如, 帅通 (2014) 在 IIM 数据上开展了月表大尺度稀疏解混; 宋蜜等 (2023) 将稀疏解混用于嫦娥五号 LMS 数据, 获得了着陆区矿物丰度的反演结果。线性解混方法在结构清晰、计算高效方面具有优势, 但由于其不显式建模光谱的多重散射等物理混合机制, 在实际应用中可能存在估算偏差。为适应月壤环境中常见的非线性混合机制, 研究者进一步发展了非线性解混方法, 其中深度网络解混是一个重要方向。通过利用深度网络建模端元光谱的非线性组合过程, Zheng 等 (2024, 2025) 首次在嫦娥三号 VNIS 原位探测影像中引入扩散模型进行非线性解混, 并构建了物理驱动扩散模型以反演大范围月球典型矿物丰度, 展示了新一代生成模型在矿物识别中的潜力。为提高模型物理可解释性, 以 Hapke 辐射传输理论为基础, 将反射率转换为单次散射反照率等物理量, 再结合线性或稀疏解混方法估算丰度。例如, 林红磊等 (2019) 将 Hapke 模

型与稀疏解混方法结合, 对嫦娥三号 VNIS 高光谱数据进行了矿物丰度反演, 展示了物理建模与数据驱动方法融合潜力; 宋蜜等 (2023) 采用 Hapke 变换与稀疏解混联合方法, 实现了嫦娥五号 LMS 数据的矿物丰度反演。这类方法显式引入 Hapke 模型, 使解混过程具备更强的物理约束, 从而有效提升矿物丰度反演的可靠性与精度。

综上, 光谱解混方法为解决混合像元问题提供了有效路径, 在全月尺度丰度绘制和原位数据高精度反演中均显示出广泛的应用潜力。当前线性模型方法成熟稳定, 适用于区域至全月尺度的大规模丰度反演; 而非线性模型更贴近物理机制, 尤其在月壤颗粒尺度较细、光谱重叠严重的区域表现更优。未来趋势将聚焦于提升非线性模型的适用性与效率, 并推动其与物理模型、深度网络的深度融合, 提升月表矿物反演的精度与适应性。

5 典型月球矿物探测进展

随着多国月球探测任务的推进, 轨道光谱、地面遥感与月面原位探测等多模态观测手段不断融合发展, 深化了对月表矿物组成、分布特征及其成因演化的系统认知。在这一框架下, 月球矿物遥感研究范式不再依赖单一数据源, 逐步迈向以高光谱成像、元素丰度反演与原位光谱验证相结合的综合探测体系。矿物光学遥感探测已在全球填图、区域解析、原位验证及 OH/H₂O 识别等多个方面取得重要进展, 为月壤成分演化、深源物质暴露与水资源形成机制等关键科学问题提供了重要的观测支撑。

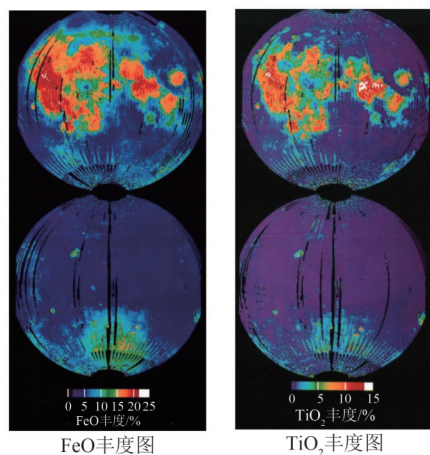
5.1 月表大尺度矿物光谱识别与填图

月表大尺度矿物填图依托轨道光学遥感数据实现。现有月球光学传感器在波谱范围、光谱连续性与空间覆盖上各具特征, 从而在矿物识别、丰度反演和大范围制图中提供了不同层次的科学成果, 实现从经验参数提取到定量填图的跨越。在基于关键波段的矿物识别方面, 克莱门汀紫外可见光相机和辉夜号 MI 获取的多光谱图像虽然波段数量有限, 但其波段覆盖主要矿物吸收特征的关键位置, 因而能够构建稳定且可大尺度推广的参数化模型。克莱门汀多光谱图像实现了 TiO₂ 和 FeO 含量的定量反演, 如图 3 (a) 所示。Lucey 等 (1998) 提出了反照率与 FeO 参数化模型方法, 清

晰区分了斜长岩高地与玄武质月海。随后, Lucey (2004) 进一步利用辐射传输方法生成了全月斜长石、正交辉石、单斜辉石和橄榄石的分布图, 揭示了矿物在地理位置上的分布规律。Pieters 等 (2006) 基于克莱门汀紫外可见光图像并结合阿波罗任务样品, 绘制了不同种类辉石及凝聚物的全月分布图。随后, MI 多光谱数据基于查找表技术实现了纬度 $\pm 60^\circ$ 范围内的橄榄石、低钙辉石、单斜辉石与斜长石的大尺度丰度反演, 并进一步被应用于铁含量与月壤光学成熟度的制图 (Lemelin 等, 2016)。这些成果证明了多光谱数据在矿物学反演中的长期价值。相比多光谱数据, 高光谱图像对矿物类型及其吸收结构的判别能力显著增强。日本辉夜号任务引入的连续光谱观测 SP 数据揭示, 高纯度斜长石主要集中于月球高地, 支持了岩浆洋晚期浮选结晶模型, 并绘制了纬度 $\pm 60^\circ$ 范围内的铁、钛丰度图 (Ohtake 等, 2009; Otake 等, 2012)。此外, 辉夜号的 SP 数据在多个撞击盆地及边缘区域 (如虹湾、欧几里得坑及南极—艾特肯盆地南缘) 探测到典型橄榄石暴露光谱, 表现为低反照率、近 $1\ \mu\text{m}$ 波长位置附近的宽吸收带, 以及 $2\ \mu\text{m}$ 波长位置处吸收特征的缺失, 这被认为是壳幔边界物质遭撞击至地表的直接证据 (Yamamoto 等, 2010)。月船一号 M^3 影像覆盖 $0.43\text{--}3.0\ \mu\text{m}$ 波段, 能够区分辉石种类及橄榄石、斜长石的光谱特征, 同时首次在极区识别出 $3\ \mu\text{m}$ 波段 OH 吸收, 表明月壤中可能存在 OH 或 H_2O , 挑战了传统的“干燥月球”假设 (Pieters 等, 2009),

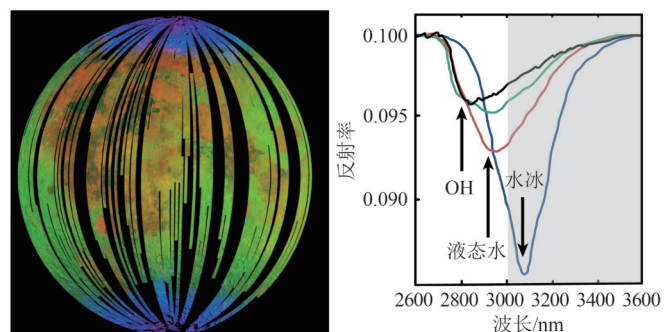
近期, Korokhin 等 (2024) 结合新兴机器学习技术进一步对 M^3 数据进行矿物填图, 验证了其在大面积高精度矿物填图的潜力。嫦娥一号任务搭载的 IIM 高光谱图像虽波谱范围有限, 但通过对月表矿物吸收中心进行制图, 成功构建出中低纬度铁镁质矿物及斜长石的丰度分布图, 如图 3 (c) 所示, 为后续高光谱填图方法的推广提供了技术储备 (吴昀昭等, 2010; Wu, 2012)。Shuai 等 (2013) 利用稀疏解混方法, 基于 IIM 高光谱影像反演斜长石、单斜辉石和橄榄石丰度图 (Shuai 等, 2013)。

除中低纬度外, 已有研究将矿物填图扩展至极区高纬度区域。受极区极端光照条件影响, 矿物反演精度受限。Lemelin 等 (2022) 利用 SP 数据与月球轨道激光高度计数据构建了适用于极区定标的光谱数据, 在南北纬 $50^\circ\text{--}90^\circ$ 范围内获取了氧化铁及纳米铁含量的定量分布, 结果表明两极以斜长岩物质为主、低钙辉石为主要镁铁质矿物, 并在沙克尔顿陨石坑周围识别出斜长石富集带。Wang 等 (2024) 基于 M^3 数据的南极区域高光谱制图进一步揭示南极—艾特肯盆地内环辉石含量高、高地单元以斜长岩为主, 并在部分陨石坑边缘检测到赤铁矿吸收特征。这些成果表明, 高光谱数据已逐步实现对极区的可靠覆盖, 为未来极区着陆点选择和资源调查提供了关键矿物学约束。综上所述, 从克莱门汀的多波段指数分析到 M^3 与 IIM 高光谱矿物填图, 轨道光学遥感任务建立起多参数的大尺度矿物分布图, 为后续构造解释、岩浆源分析与资源评价提供可量化的基础数据。



(a) 克莱门汀多光谱图像反演的全月正面与背面 FeO、TiO₂ 丰度分布

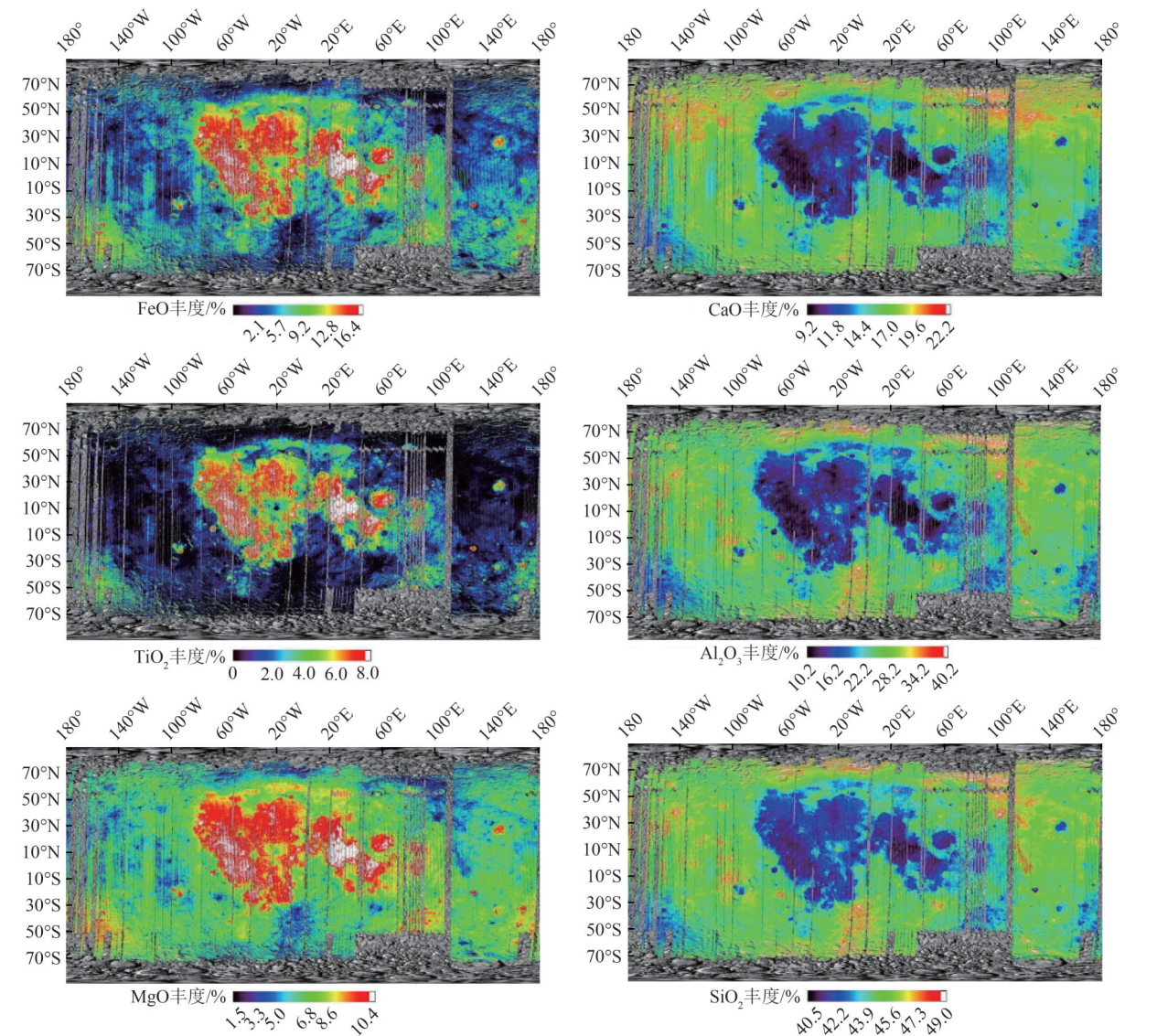
(a) Global FeO, TiO₂ abundance distribution derived from Clementine multispectral data



基于 M^3 数据构建的月球正面三波段合成影像: 蓝色代表与 OH/ H_2O 相关的 $3\ \mu\text{m}$ 波长处吸收, 绿色表示 $2.4\ \mu\text{m}$ 波长处的反射太阳辐射亮度; 红色对应含铁辉石在 $2\ \mu\text{m}$ 波长处产生的特征吸收。

(b) M^3 数据观测到 OH/ H_2O 的证据
(b) OH/ H_2O detection evidence from M^3 data

液态水 (红色) 和水冰 (蓝色) 在 $3\ \mu\text{m}$ 波长附近吸收带呈现出明显吸收特征; OH 的吸收位于较短波段, 斜长石 (绿色) 与月球玻璃 (黑色) 则无明显 $3\ \mu\text{m}$ 波长处吸收; 灰色表示 M^3 未覆盖波段范围。



(c) 干涉成像仪高光谱图像反演的全月六种矿物丰度分布图
(c) Global Abundance Maps of Six Lunar Minerals Retrieved from IIM Hyperspectral images

图3 月球矿物光学遥感探测典型成果图(丰度以湿重(wt)计)
Fig.3 Representative results of optical remote sensing for lunar mineralogy (Abundance is calculated based on wet weight (wt))

5.2 区域尺度光谱特征与构造单元解译

在全月遥感建立初步矿物分布格局的基础上，区域尺度的遥感分析不断深化，揭示了月球不同地质背景下的矿物组合变异及成分与构造演化特征。虹湾地区位于风暴洋西北边缘，是具有代表性的晚期高钛玄武岩单元。嫦娥三号着陆于此，月球车的可见光近红外成像光谱数据显示，该区玄武岩富含高钙铁辉石与富铁橄榄石，构成了一种此前未被采样的新型高钛玄武岩（Ling 等，2015）。该发现不仅与大尺度轨道遥感反演结果高度一致，还表明岩浆源区经历了辉石和钛铁矿的残余堆积，并伴有橄榄石的次级混合过程。Yang

等（2023）利用嫦娥五号返回样品的化学组分和深度学习模型，对比了多个年轻玄武岩单元，发现虹湾玄武岩与鲁克山月海的相似，矿物中以高铁辉石和钛铁矿为主，橄榄石含量较低。该发现推翻了早起遥感推测该地区橄榄石富集的假设，表明该地区光谱特征可能源于辉石吸收增强，而非橄榄石的独立贡献。南极—艾特肯盆地是月球最大的撞击盆地，中心地势低、构造复杂。Yamamoto 等（2010）根据辉夜号 SP 数据分析发现，南极—艾特肯盆地具有典型橄榄石暴露特征，支持了壳幔边界物质可能被撞击至表面的观点。嫦娥四号首次实现了对月幔深源物质的原位光谱

探测, Li等(2019a)利用可见光近红外数据识别出低钙辉石与镁橄榄石组合, 结合撞击地貌特征推断其来源于芬森(Finsen)撞击坑挖掘的深部岩相。后续研究通过Hapke模型与稀疏解混方法进一步揭示, 着陆区物质具有南极—艾特肯盆地撞击熔融岩与月海喷发单元叠加的混合特性, 表明撞击重构过程可能驱动了深部岩浆物质的上涌与表面暴露(Zeng等, 2021)。美国的月球勘测轨道器任务搭载的LROC广角相机相机提供了多波段成像数据, 在320—690 nm范围内支持大尺度矿物对比研究(Robinson等, 2010)。研究者结合LROC光谱与地形数据, 精确划定了橄榄石富集区的分布边界, 尤其在南极—艾特肯盆地环形构造、高反差地貌与撞击环坑区域表现突出。欧几里德环形坑于月球南部高地与月海边界处, 其内部存在典型橄榄石谱型, 克莱门汀、M³和IIM数据均在该区域获得一致结果。该区域被识别为月球壳幔边界物质局部露出的候选区, 具有撞击环构造背景, 揭示了橄榄石的暴露与后期撞击作用的关联。总体来看, 区域尺度的光学遥感探测揭示了月球构造单元的矿物成分差异, 深化了月球并非同质壳体的认识, 而盆地边缘、撞击坑内外等区域的矿物谱型异常, 已成为研究月壳厚度变化、幔源物质暴露机制及岩浆活动记录的关键记录, 也为未来着陆与采样任务提供了重要的选址依据。

5.3 月球原位光谱与样品对比分析

嫦娥系列任务搭载的VNIS和LMS实现了月表的原位光谱观测, 为轨道遥感反演结果的精度验证与地质解释深化提供了关键参照, 在矿物组成及丰度、主要氧化物组成及热物理参数等方面提供重要定量基准, 从而支撑轨道遥感、原位观测与样品分析结果之间的一致性约束与交叉校准。Wu等(2018)将嫦娥三号VNIS与SP数据、M³和IIM进行对比, 发现着陆点平均可见波段反射率仅为3.86%, 远低于轨道估计值, 验证了该区为暗玄武岩代表区, 并提出其具备作为月球遥感定标参考场的潜力。嫦娥四号VNIS原位探测揭示了该区域表面以橄榄石、辉石、斜长石为主的橄榄石苏长岩特征, 细化了轨道遥感矿物识别类型(Lin等, 2020a), 而月球车巡视路径上识别到被碎屑覆盖的浅表坑, VNIS光谱数据显示碎屑呈现玻璃质特征, 揭示了撞击、碎屑堆积与熔融作用的空

间尺度与地质时标(Lin等, 2020b)。此外, Wu等(2021)基于嫦娥四号VNIS的短波红外原位观测指出, 毫米级粗糙度引起的非朗伯辐射效应显著影响了温度及热物理反演。研究还表明, 即使在2.39 μm 反射辐射占主导的条件下, 仍可从该谱段中分离热辐射分量并反演月表温度。在原位光谱用于验证与定标的同时, 近年来的研究进一步引入原位观测真值参考与观测几何约束, 构建可检验的丰度反演框架。Zhao等(2024)构建了月表主要氧化物的定量估计模型, 并通过嫦娥三号VNIS及嫦娥五号LMS数据验证了模型的可靠性, 为嫦娥四号着陆区的化学组成提供了可对比的基准。针对嫦娥四号月球车的复杂观测场景, Liu等(2024)设计了面向局部异质性的反演策略, 利用VNIS原位数据获得沿巡视路径的精细氧化物丰度分布。进一步地, Du等(2025)基于嫦娥四号VNIS长时序原位光谱构建了月壤矿物端元库, 定量估计多种矿物丰度, 并结合撞击坑抛射物影响, 评估了二次撞击对局部矿物组成的扰动效应。

嫦娥五号任务中, 原位LMS探测光谱结果与轨道高光谱数据在辉石丰度空间分布上表现出一致性, 为轨道矿物反演结果提供了可追溯的原位光谱参照(Wu等, 2022)。针对嫦娥五号返回月壤的实验室光谱研究进一步显示, 表层与约10 cm深度的亚表层具有更高反射率、更深吸收与更小连续谱斜率的光谱特征, 为年轻月海玄武岩的矿物反演与风化成熟度评估提供新的真值参考(Wu等, 2024)。同时, 样品分析亦可纠正遥感反演中的系统性偏差。Liu等(2022)指出, 西部月海以富铁高钙辉石为主, 纠正了此前遥感中将其误判为橄榄石的错误(Liu等, 2022)。该误判主要源于辉石与橄榄石在吸收带上的重叠, 表明遥感矿物反演在多矿物混合条件下仍需真值进行校准。此外, 嫦娥五号样品首次鉴定出磷酸盐类新矿物Changesite-(Y), 展现了月壤在微观成分上的复杂性, 丰富了月球矿物光谱库。2024年嫦娥六号在月球背面成功采样, 岩石同位素年龄测定识别出4.2 Ga与2.81 Ga两期喷发事件, 分别对应克里普(KREEP)富集与KREEP型幔源玄武岩, 反映出月球背面存在持久热源和复杂的岩浆演化史(Zhang等, 2025)。着陆区的高精度成像与光谱分析显示, 其表层玄武质物质可能源自附近小型撞击坑的抛射体, 成分混合性强(Yan等, 2025);

铲取与钻取样品主要来源于附近小撞击坑的近源抛射物与局部风化层 (Xu 等, 2024), 为轨道及原位探测地层学解释提供了更可信的地质约束。综上, 原位光谱测量与样品分析不仅为遥感解译模型提供了重要参考, 也为建立物理约束下的反演算法提供了关键支持, 并将在后续任务中持续发挥数据验证、定标基准与模型训练的作用。

5.4 OH/H₂O 的光谱探测与形成机制

除月球典型造岩矿物外, 光学遥感在 3 μm 波段范围识别出另一类重要物质的吸收特征, 即羟基 (OH) 和水 (H₂O) 的特征, 该吸收特征通常叠加于典型矿物吸收特征之上。M³ 作为月船一号任务核心高光谱载荷, 实现了全球成像光谱获取, Pieters 等 (2009) 首次在近 2.8—3 μm 波段范围探测到 OH/H₂O 的吸收带, 如图 3 (b) 所示。OH/H₂O 的吸收特征在不同地形单元中的分布差异表明, 其并非来自月球内部的挥发释放, 而更可能源于太阳风质子与月球矿物中悬挂氧键反应所致的表面羟基化过程 (McCord 等, 2011)。M³ 进一步观测到, OH/H₂O 的吸收特征表现出明显的昼夜变化趋势: 在高纬度地区, 早晨和傍晚的吸收特征强于中午, 表明 OH 可能在月日照周期内形成与消散; 而低纬度的 OH 吸收则更为稳定 (Wöhler 等, 2017)。Grumpe 等 (2019) 在此基础上建立时间依赖模型, 模拟太阳风注入、扩散损失与 OH 光解的动态平衡关系, 并指出另一种稳定的、区域相关的 OH 成分不易被扩散和光解去除, 具有遥感可识别性。后续的月船二号任务将波段拓展至 5 μm , 并通过热辐射校正技术, 系统揭示了 OH 与 H₂O 在纬度、矿物类型及温度之间的耦合关系, 明确了太阳风注入在月表形成羟基过程中的重要作用 (Verma 等, 2022)。嫦娥六号利用下降段羽流扰动与细粒再分配的原位观测过程, 在着陆区将水含量的空间差异与浅表层结构联系起来, 给出了表层及浅表层双层含水结构的直接证据: 暴露的浅表层细粒平均含水量约 76×10^{-6} , 低于表层的 105×10^{-6} ; 同一地点在不同地方时的重复观测还显示, 含水量在正午附近出现最低值, 且整体趋势与 M³ 所揭示的日变化一致, 强化了太阳风注入和撞击作用控制月球水形成和分布的假设 (Liu 等, 2025)。与光谱观测结果相互印证的还有对月壤返回样品的微观分析。基于嫦娥五号返回样品, He

等 (2023) 在月壤中发现了太阳风水储存介质——撞击玻璃珠, 玻璃珠在表层表现出明显的富水区, 其氢同位素组成亦表明水源主要来自太阳风。该研究从样品层面证实 OH/H₂O 的形成过程, 进一步验证了 M³ 观测到的空间分布及其与撞击地貌的对应关系, 解释了月球 OH/H₂O 的来源、动力学过程及资源价值 (He 等, 2023)。

光学遥感作为月球矿物探测的核心手段, 支撑了从全球填图到局部解析的多尺度研究。轨道光学影像实现了主要矿物的识别与丰度制图, 揭示了月壳结构与演化规律; 区域尺度遥感分析揭示了典型构造单元中深源物质的暴露机制; 原位光谱与样品对比为遥感反演提供了校验与物理约束; 近 3 μm 波段的 OH/H₂O 吸收探测则拓展了遥感在月球表面水循环研究中的应用边界。光学遥感已成为揭示月球成分组成、演化过程与资源潜力不可替代的关键技术。未来, 随着嫦娥七号、阿尔忒弥斯等任务的推进, 围绕月幔物质识别、挥发分空间分布及极区水资源成因的光学探测, 仍将是月球科学的关键前沿方向。

6 光学遥感月球矿物探测挑战

6.1 月表环境影响

月球表面长期暴露于真空、强辐射和频繁撞击的极端空间环境中, 导致其光谱响应受到多种非理想因素的干扰。其中, 最显著的是太空风化效应, 主要包括太阳风注入、微陨石撞击和高能粒子辐照 (Pieters 等, 2000)。月球表面复杂的环境促使月壤颗粒表面生成纳米级金属铁 (npFe⁰), 导致反射率整体下降、吸收带减浅, 并引起谱形红移 (Keller 和 Clemett, 2001), 使原始矿物吸收特征在遥感光谱中变得模糊甚至不可辨识, 严重干扰了矿物识别与丰度估算。此外, 粒径效应亦是不可忽视的因素: 月壤为微米至毫米级的颗粒堆积体, 颗粒尺寸影响光子路径长度、散射效率和吸收强度, 进而改变吸收带深度与形态。实验研究表明, 粒径越大, 吸收越强、光谱越暗, 吸收带加深; 粒径越小, 散射增强但吸收带变浅 (Shkuratov 等, 1999)。由于遥感系统无法直接获取粒径信息, 若未建模修正, 极易造成矿物含量反演的系统性误差。与此同时, 月表复杂的地形与极区低太阳高度角条件导致阴影普遍存在, 尤其是在撞击坑内部和极地永久阴影区 (Bussey 等,

1999; Lucey 等, 2021)。此类区域入射角大、光照时间短, 遥感图像中常出现低亮度或缺失像元, 影响反照率归一化和吸收特征提取, 若未进行光度归一化处理, 将进一步加剧区域反演误差。月球环境因素不仅改变了反射光谱的形态, 还会使不同区域或不同深度样品的光谱特征产生变异性 (McCord 等, 1972)。尤其在风化程度强烈的月海、极区永久阴影区以及撞击熔融物富集区, 遥感数据与实测样品光谱差异显著, 成为当前遥感数据应用的不确定性来源。

6.2 数据预处理误差

高质量的光谱矿物丰度反演不仅依赖传感器硬件性能, 也高度依赖遥感数据的预处理质量。在月球遥感中, 由于轨道高度变化、太阳入射角变化、月面起伏差异显著, 加之成像区域跨度大、探测条件差异大, 遥感数据在原始状态下往往存在明显的观测几何畸变与辐射不一致性 (邱凯昌等, 2025; Jankowski 和 Squyres, 1991)。一方面, 光度校正不准确将导致同一矿物在不同观测角下的反射率出现显著偏差, 使得矿物反射特征发生偏移或形态畸变 (Hapke, 2012)。另一方面, 条带噪声在高光谱影像中常常形成沿轨迹方向的波动带, 从而在光谱中引入非真实吸收谷, 掩盖了真实的吸收特征 (Zhao 等, 2022); 而多景拼接后, 不同影像在边缘区域可能出现亮度不连续或谱形断裂, 严重干扰区域图谱的一致性与定量反演可靠性 (Edwards 等, 2011)。此外, 当前各国探月任务在定标方式、反射率转换方法、几何校正算法上均无统一标准, 导致相同区域在不同任务下观测结果存在差异, 影响跨任务联合反演与时序对比研究的可靠性, 为跨任务联合解译与长时序分析变化带来挑战。若缺乏对数据误差在反演中传递机制的定量建模, 将难以保障最终矿物分布图的精度与一致性。

6.3 月壤紧密混合

月球表面由细碎、疏松、无胶结的颗粒堆积构成, 不同矿物颗粒在一个像元尺度下通常呈现紧密混合状态, 即光子在亚像元尺度内穿越多个矿物颗粒, 经历非选择性的多次散射与吸收过程, 形成典型的非线性混合光谱 (Papike 等, 1982)。该混合机制下, 混合光谱与端元光谱在形态、吸收带中心和带宽上均出现明显偏离, 在辉石与橄

榄石混合区、撞击熔融物分布区、风化玻璃含量高的极区等区域尤为显著。例如, 当辉石和橄榄石以细颗粒共存于紧密混合状态时, 其 $1\ \mu\text{m}$ 波长位置处吸收带中心将发生偏移, 且吸收带宽度显著加宽, 导致端元提取出现误差, 从而影响线性解混模型的丰度结果 (Gault 等, 1974)。目前, 常用的线性光谱解混方法在处理大范围数据时具有较高效率, 但忽略了紧密混合产生的非线性扰动, 在物理机理复杂区域易造成丰度估算偏差 (吴昀昭, 2014); 而 Hapke 模型虽可缓解该问题, 但依赖大量物理参数, 难以在大尺度区域推广; 基于深度学习的非线性解混网络虽然在局部区域表现出较好的拟合效果, 但其泛化能力与结果解释性仍待验证。因此, 在矿物混合机制复杂的区域, 如何实现高鲁棒性、高精度的非线性解混, 仍是亟须突破的关键问题。

6.4 目标与载荷限制

尽管当前光学遥感系统在分辨率与光谱覆盖方面已取得长足进步, 但针对月球复杂环境与多源数据融合的系统设计仍存在结构性瓶颈。首先, 在关键波段覆盖方面, 部分任务在识别辉石的 $2\ \mu\text{m}$ 波长附近吸收带、判别 $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ 的 $2.7\text{--}3\ \mu\text{m}$ 波长范围内的吸收带信噪比较低, 尤其在热背景干扰严重的波段, 受限于传感器热控制与定标精度, 吸收带易被噪声掩盖, 导致挥发物识别能力受限 (桂裕华等, 2022)。其次, 极区与高纬度区域由于太阳高度角低、地形遮蔽强, 常年存在长时间阴影区, 常规被动反射式遥感系统在此类区域观测能力有限 (Speyerer 和 Robinson, 2013)。目前虽已部署紫外、热红外与激光激发等载荷, 但仍处于试验阶段, 尚难实现全面覆盖。最后, 跨任务遥感系统在波段划分、光谱响应函数、定标机制等方面差异较大, 缺乏统一标准, 导致不同任务间难以直接拼接或对比。即使在同一区域, 不同任务数据所表现出的反射率曲线亦存在非物理性差异, 严重影响联合解译与模型泛化能力。

6.5 真实参考与方法评价基准不足

尽管轨道光学遥感为月表矿物识别提供了丰富的数据基础, 但用于约束和验证反演结果的真实参考仍十分有限。目前能够提供可靠成分信息的观测主要包括少量着陆区的原位光谱测量以及阿波罗和嫦娥任务返回样品的实验室分析。然而,

这些数据在空间分布上极不均衡,难以覆盖典型的高地、月海、撞击熔融物及极区等多样地质单元。同时,返回样品与轨道光谱在粒径、风化程度与观测几何方面存在明显差异,使得二者之间的对应关系仍需深入建立。由于缺乏覆盖广泛地质背景、可用于跨任务和跨方法比较的统一参考基准,当前矿物丰度反演的评价方式主要依赖局部区域的间接验证,难以对模型的泛化能力、系统误差或不同方法间的差异做出客观判断。这一限制不仅影响反演结果的可信度,也制约了全球尺度矿物制图在地质演化研究与资源评估中的应用深度。

7 结 语

光学遥感作为月球探测任务中最核心的遥感技术之一,已在月表矿物识别、丰度反演与资源评估等方面取得了系列重要成果。本综述基于对观测原理、数据载荷和主要反演方法的系统梳理,总结了现有研究中具有代表性的共性规律,并从统一视角揭示了影响技术发展与方法差异的若干关键因素:(1)矿物光谱特征的可检测性不仅取决于仪器性能,还受到空间风化、颗粒尺度与观测几何等因素制约,这些因素是矿物丰度反演的核心瓶颈;(2)现有矿物反演方法间的差异,本质上源于对光谱混合机制物理性的不同假设与约束强度,据此本文归纳为3类路径,各自适用于不同数据条件与应用需求;(3)覆盖多种地质单元的原位光谱与返回样品分析数据仍十分有限,难以为轨道反演提供充分的真实参考。不同任务、不同方法生成的矿物丰度结果难以在同一基准下比较,导致模型性能评价与结果一致性研究面临困难。

综合当前的研究基础与所面临的挑战,未来月球矿物遥感的发展将呈现以下5个趋势。

(1)在太空风化、粒径效应与阴影的共同影响下,月表遥感光谱常表现出特征弱化、反照率偏差与谱形畸变等问题。未来的预处理流程应集成风化指数校正、粒径响应建模、入射/观测角归一化等机制,并结合数字高程模型与双向反射效应函数,实现区域阴影掩码与光度一致性重建,从而构建具有物理约束的数据标准化处理链,为后续反演提供高质量输入。

(2)面对月壤颗粒紧密混合与非线性光谱耦

合问题,未来的矿物解译将不再依赖单一模型,而是融合辐射传输理论、数据驱动模型与不确定性估计方法,构建更具泛化性与鲁棒性的联合反演框架。物理模型如Hapke模型、Shkuratov模型提供物理边界约束,深度结构如生成模型、注意力机制网络提供非线性表达能力,同时强化对端元变异性、丰度估算与不确定性输出的耦合建模,从而实现可解释性与预测性兼具的智能解译体系。

(3)当前多源遥感系统集成成了高光谱影像、热红外测温、激光高程、雷达成像与中子/ γ 元素谱图等多种观测手段。未来矿物遥感应构建统一的光谱响应标准与几何配准体系,推动光学数据与非光学载荷之间的信息融合,发展跨波段、跨平台的协同反演模型。同时,引入多模态深度融合技术与任务级语义图谱机制,实现观测数据、模型算法与应用需求之间的智能匹配,为构建月球遥感资源感知系统提供技术支撑。

(4)随着月球探测目标从科学认知逐步延伸至资源利用与工程建造,未来月球光学遥感将从矿物制图进一步拓展至可直接支撑任务论证与工程决策的资源产品体系构建。一方面,需将矿物丰度、粒度、成熟度等关键成分与可开采性指标协同表达,在全球及区域尺度上形成可利用资源富集区的统一圈定方法,并给出不同探测条件下的可开采矿物丰度的可靠区间与不确定性边界;另一方面,面向着陆区与作业区的工程需求,应在光学矿物产品基础上联合地形、热环境、阴影时空分布与表面力学相关代理指标,构建融合可进入性、安全性、可作业性多约束的作业适宜性分区与路径、取材半径评估框架,为选址论证、作业规划与风险控制提供遥感产品支撑。

(5)面向月面原位建造的增材制造应用,对月球遥感产品提出了更高的可解释性与可验证性要求,未来应推动月球矿物产品与材料工艺约束的深度耦合。一方面,月壤作为原位建造的直接原料,月球光学遥感需在月壤矿物丰度反演的基础上,进一步发展面向工程的原料属性表征指标与空间分区方法,并与热红外、雷达等观测形成互补约束,用以推断与成形、烧结、微波加热响应等工艺敏感的关键参数;另一方面,应推动光学遥感从资源类型分布识别向工程可用性约束能力拓展,判定不同区域月壤对建筑构件成形、路面固化与防护层构筑等应用场景的适宜性,并量

化其对应的可行工艺路线与关键参数区间，从而为科研站建设阶段的原料遴选、取料半径优化、配比设计与全寿命运维提供可量化、可验证的决策依据。

总之，光学遥感矿物探测作为连接月壤成分认知与资源开发规划的重要桥梁，正朝着高精度反演、大尺度适应与智能化决策支持的方向快速演进。随着在轨载荷不断丰富、多平台探测任务持续推进以及物理模型与数据驱动算法的融合深化，月球光学遥感将不仅推动行星遥感理论的发展，更将在支持人类月球基地建设与深空资源探测等重大工程中发挥不可替代的核心作用。

参考文献 (References)

- Adams J B. 1974. Visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes as applied to remote sensing of solid objects in the solar system. *Journal of Geophysical Research*, 79(32): 4829-4836 [DOI: 10.1029/JB079i032p04829]
- Adams J B and Goulaud L H. 1978. Plagioclase feldspars-visible and near infrared diffuse reflectance spectra as applied to remote sensing//Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Pergamon Press: 2901-2909
- Adams J B and McCord T B. 1970. Remote sensing of lunar surface mineralogy: implications from visible and near-infrared reflectivity of Apollo 11 samples//Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Houston: Pergamon Press: 1937-1942
- Ahmad T, Chakraborty T, Lyngdoh R B, Bhattacharya S and Misra A. 2022. Spectral unmixing analysis for the lunar surface mineralogy using Chandrayaan-2 IIRS imagery. *Planetary and Space Science*, 220: 105537 [DOI: 10.1016/j.pss.2022.105537]
- Aster R C, Borchers B and Thurber C H. 2018. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier
- Barabashov N P, Mikhailov A A and Lipsky Y N. 1961. *An Atlas of the Moon's Far Side: The Lunik III Reconnaissance*. New York: Interscience Publishers
- Besse S, Sunshine J M and Gaddis L R. 2014. Volcanic glass signatures in spectroscopic survey of newly proposed lunar pyroclastic deposits. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(2): 355-372 [DOI: 10.1002/2013JE004537]
- Bhatt M, Wöhler C, Grumpe A, Hasebe N and Naito M. 2019. Global mapping of lunar refractory elements: multivariate regression vs. machine learning. *Astronomy and Astrophysics*, 627(16): A155 [DOI: 10.1051/0004-6361/201935773]
- Bian C F, Zhang K F, Wu Y Z, Wu S Q, Lu Y, Shi H T, Li H Z, Zhao D S, Duan Y B, Zhao L and Wu H J. 2024. Mapping the spatial distributions of oxide abundances and Mg# on the lunar surface using multi-source data and a new ensemble learning algorithm. *Planetary and Space Science*, 245: 105894 [DOI: 10.1016/j.pss.2024.105894]
- Blewett D T, Lucey P G, Hawke B R and Jolliff B L. 1997. Clementine images of the lunar sample-return stations: refinement of FeO and TiO₂ mapping techniques. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E7): 16319-16325 [DOI: 10.1029/97JE01505]
- Bohren C F and Huffman D R. 2008. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Hoboken: John Wiley & Sons
- Burns R G. 1993. *Mineralogical Applications of Crystal Field Theory*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press [DOI: 10.1017/CBO9780511524899]
- Bussey D B J, Spudis P D and Robinson M S. 1999. Illumination conditions at the lunar south pole. *Geophysical Research Letters*, 26(9): 1187-1190 [DOI: 10.1029/1999GL900213]
- Cahill J T S, Lucey P G and Wicczorek M A. 2009. Compositional variations of the lunar crust: results from radiative transfer modeling of central peak spectra. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E9): E09001 [DOI: 10.1029/2008JE003282]
- Chen J, Ling Z C, Qiao L, He Z P, Xu R, Sun L Z, Zhang J, Li B, Fu X H, Liu C Q and Qi X B. 2020. Mineralogy of Chang'e-4 landing site: preliminary results of visible and near-infrared imaging spectrometer. *Science China Information Sciences*, 63(4): 140903 [DOI: 10.1007/s11432-019-2768-1]
- Clark R N. 1979. Planetary reflectance measurements in the region of planetary thermal emission. *Icarus*, 40(1): 94-103 [DOI: 10.1016/0019-1035(79)90056-3]
- Clark R N. 2004. Chapter 2. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy//King P L, Ramsey M S and Swayze G A, eds. *Infrared Spectroscopy in Geochemistry, Exploration Geochemistry and Remote Sensing*. [s.l.]: Mineralogical Association of Canada [DOI: 10.3749/9780921294771.ch02]
- Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A and Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8): 12653-12680 [DOI: 10.1029/JB095iB08p12653]
- Cloutis E A. 2002. Pyroxene reflectance spectra: minor absorption bands and effects of elemental substitutions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E6): 6-1-6-12 [DOI: 10.1029/2001JE001590]
- Cloutis E A and Gaffey M J. 1991. Pyroxene spectroscopy revisited: spectral-compositional correlations and relationship to geothermometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 96(E5): 22809-22826 [DOI: 10.1029/91JE02512]
- Colaprete A, Elphic R C, Heldmann J and Ennico K. 2012. An overview of the lunar crater observation and sensing satellite (LCROSS). *Space Science Reviews*, 167(1): 3-22 [DOI: 10.1007/s11214-012-9880-6]
- Colwell J E, Batiste S, Horányi M, Robertson S and Sture S. 2007. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2006 [DOI: 10.1029/2005RG000184]
- Denevi B W, Lucey P G and Sherman S B. 2008. Radiative transfer modeling of near-infrared spectra of lunar mare soils: theory and measurement. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E2): E02003 [DOI: 10.1029/2007JE002929]
- Denevi B W, Noble S K, Christoffersen R, Thompson M S, Glotch T

- D, Blewett D T, Garrick-Bethell I, Gillis-Davis J J, Greenhagen B T, Hendrix A R, Hurley D M, Keller L P, Kramer G Y and Trang D. 2023. Space weathering at the Moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 89(1): 611-650 [DOI: 10.2138/rmg.2023.89.14]
- Di K C, Liu B, Peng M, Wan W H, Wang Y X, Liao W C and Liu Z Q. 2025. On the geometric accuracy of remote sensing mapping in lunar exploration. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1724-1738 (邸凯昌, 刘斌, 彭嫚, 王文辉, 王晔昕, 廖伟聪, 刘召芹. 2025. 月球探测中遥感制图几何精度问题. *遥感学报*, 29(6): 1724-1738) [DOI: 10.11834/jrs.20254405]
- Du K C, Liu S C, Tong X H, Du Q, Xie H, Feng Y J and Jin Y M. 2026. Mineral quantitative inversion based on in-situ spectral observations from Yutu-2: anomalous sample origin and mineral composition variations on the rover's path. *Icarus*, 444: 116821 [DOI: 10.1016/j.icarus.2025.116821]
- Edwards C S, Nowicki K J, Christensen P R, Hill J, Gorelick N and Murray K. 2011. Mosaicking of global planetary image datasets: 1. techniques and data processing for Thermal Emission Imaging System (THEMIS) multi-spectral data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10): E10008 [DOI: 10.1029/2010JE003755]
- Ehlmann B L, Klima R L, Seybold C C, Klesh A T, Au M H, Bender H A, Bennett C L, Blaney D L, Bowles N, Calcutt S, Copley-Woods D, Dickson J L, Djotni K, Hanna K D, Edwards C S, Evans R, Felder E, Fogg R, Green R O, Hawkins G, House M, Islas S, Lantoin G, Linch S, Mccaa T, Mckinley I, Merkley T F, Miura J K, Pieters C M, Santiago W, Scire E, Sherwood R, Shirley K, Smith C, Sondheim M, Sullivan P, Temples J, Thompson D R, Waldorff K I, Williamson W R, Warren T J, Wood J L and Zareh S. 2022. NASA's lunar trailblazer mission: a pioneering small satellite for lunar water and lunar geology//2022 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE: 1-14 [DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843663]
- Gao N, Xu Y K, Luo T Y, Ling Z C, Zhu D, Li Y, Li X Y and Liu J Z. 2022. Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(2): 222-230 (高楠, 许英奎, 罗泰义, 凌宗成, 朱丹, 李阳, 李雄耀, 刘建忠. 2022. 月球矿产资源勘查进展及展望. *矿物学报*, 42(2): 222-230) [DOI: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.025]
- Gault D E, Hoerz F, Brownlee D E and Hartung J B. 1974. Mixing of the lunar regolith//Proceedings of the 5th Lunar Science Conference. Houston: Pergamon Press: 2365-2386
- Gou S, Di K C, Yue Z Y, Liu Z Q, He Z P, Xu R, Liu B, Peng M, Wan W H, Wang Y X and Liu J Z. 2020. Forsteritic olivine and magnesium-rich orthopyroxene materials measured by Chang'e-4 rover. *Icarus*, 345: 113776 [DOI: 10.1016/j.icarus.2020.113776]
- Green R O, Pieters C, Mouroulis P, Eastwood M, Boardman J, Glavich T, Isaacson P, Annadurai M, Besse S, Barr D, Buratti B, Cate D, Chatterjee A, Clark R, Cheek L, Combe J, Dhingra D, Essandoh V, Geier S, Goswami J N, Green R, Haemmerle V, Head J, Hovland L, Hyman S, Klima R, Koch T, Kramer G, Kumar A S K, Lee K, Lundeen S, Malaret E, Mccord T, McLaughlin S, Mustard J, Nettles J, Petro N, Plourde K, Racho C, Rodriguez J, Runyon C, Sellar G, Smith C, Sobel H, Staid M, Sunshine J, Taylor L, Thaisen K, Tompkins S, Tseng H, Vane G, Varanasi P, White M and Wilson D. 2011. The Moon Mineralogy Mapper (M^3) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10): E00G19 [DOI: 10.1029/2011JE00379]
- Grumpe A, Wöhler C, Berezhnoy A A and Shevchenko V V. 2019. Time-of-day-dependent behavior of surficial lunar hydroxyl/water: observations and modeling. *Icarus*, 321: 486-507 [DOI: 10.1016/j.icarus.2018.11.025]
- Gui Y H, Li J N, Wang M Z and He Z P. 2022. Research and application of spectroscopic techniques in lunar and Mars exploration missions. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 41(1): 74-84 (桂裕华, 李津宁, 王梅竹, 何志平. 2022. 月球及火星探测任务中光谱技术研究与应用. *红外与毫米波学报*, 41(1): 74-84) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.004]
- Hapke B. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 3039-3054 [DOI: 10.1029/JB086iB04p03039]
- Hapke B. 2012. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press
- Hapke B and Wells E. 1981. Bidirectional reflectance spectroscopy: 2. experiments and observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B4): 3055-3060 [DOI: 10.1029/JB086iB04p03055]
- Hapke B W, Nelson R M and Smythe W D. 1993. The opposition effect of the Moon: the contribution of coherent backscatter. *Science*, 260(5107): 509-511 [DOI: 10.1126/science.260.5107.509]
- Haruyama J, Matsunaga T, Ohtake M, Morota T, Honda C, Yokota Y, Torii M, Ogawa Y and LISM Working Group. 2008. Global lunar-surface mapping experiment using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE. *Earth, Planets and Space*, 60(4): 243-255 [DOI: 10.1186/BF03352788]
- He H C, Ji J L, Zhang Y, Hu S, Lin Y T, Hui H J, Hao J L, Li R Y, Yang W, Tian H C, Zhang C, Anand M, Tartèse R, Gu L X, Li J H, Zhang D, Mao Q, Jia L H, Li X G, Chen Y, Zhang L, Ni H W, Wu S T, Wang H, Li Q L, He H Y, Li X H and Wu F Y. 2023. A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads. *Nature Geoscience*, 16(4): 294-300 [DOI: 10.1038/s41561-023-01159-6]
- He Z P, Gui Y H, Li J N, Lü G, Xu R and Wang M Z. 2022. Spectral imaging for lunar orbit exploration: research status and technical challenges. *Acta Optica Sinica*, 42(17): 1730001 (何志平, 桂裕华, 李津宁, 吕刚, 徐睿, 王梅竹. 2022. 面向月球环绕探测的光谱成像: 研究现状与技术挑战. *光学学报*, 42(17): 1730001) [DOI: 10.3788/AOS202242.1730001]
- Heinz D C and Chein-I-Chang N. 2001. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(3): 529-545 [DOI: 10.1109/36.911111]
- Hiesinger H and Head J W III. 2006. New views of lunar geoscience: an introduction and overview. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 1-81 [DOI: 10.2138/rmg.2006.60.1]

- Iordache M D, Bioucas-Dias J M and Plaza A. 2011. Sparse unmixing of hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6): 2014-2039 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2098413]
- Jankowski D G and Squyres S W. 1991. Sources of error in planetary photoclinometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 96(E4): 20907-20922 [DOI: 10.1029/91JE02209]
- Kato M, Sasaki S, Takizawa Y and The Kaguya Project Team. 2010. The Kaguya mission overview. *Space Science Reviews*, 154(1): 3-19 [DOI: 10.1007/s11214-010-9678-3]
- Keller L P and Clemett S J. 2001. Formation of nanophase iron in the lunar regolith//32nd Annual Lunar and Planetary Science Conference. Houston: [s.n.]: 2097
- Kelley C T. 2003. Solving Nonlinear Equations with Newton's Method. Philadelphia: SIAM
- Korokhin V, Surkov Y, Mall U, Kaydash V, Velichko S, Velikodsky Y and Shalygina O. 2024. Applying machine learning to a nonlinear spectral mixing model for mapping lunar soils composition using Chandrayaan-1 M³ data. *Planetary and Space Science*, 244: 105870 [DOI: 10.1016/j.pss.2024.105870]
- Korokhin V V, Kaydash V G, Shkuratov Y G, Stankevich D G and Mall U. 2008. Prognosis of TiO₂ abundance in lunar soil using a non-linear analysis of Clementine and LSCC data. *Planetary and Space Science*, 56(8): 1063-1078 [DOI: 10.1016/j.pss.2008.02.001]
- Lawson S L, Jakosky B M, Park H S and Mellon M T. 2000. Brightness temperatures of the lunar surface: calibration and global analysis of the Clementine long-wave infrared camera data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E2): 4273-4290 [DOI: 10.1029/1999JE001047]
- Lemelin M, Lucey P G and Camon A. 2022. Compositional maps of the lunar polar regions derived from the Kaguya spectral profiler and the Lunar Orbiter Laser Altimeter data. *The Planetary Science Journal*, 3(3): 63 [DOI: 10.3847/PSJ/ac532c]
- Lemelin M, Lucey P G, Gaddis L R, Hare T and Ohtake M. 2016. Global map products from the Kaguya Multiband Imager at 512 ppd: minerals, FeO, and OMAT//47th Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: [s.n.]: 2994
- Lenoble J. 1985. Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures. Hampton: A. Deepak
- Li C L, Liu D W, Liu B, Ren X, Liu J J, He Z P, Zuo W, Zeng X G, Xu R, Tan X, Zhang X X, Chen W L, Shu R, Wen W B, Su Y, Zhang H B and Ouyang Z Y. 2019a. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 569(7756): 378-382 [DOI: 10.1038/s41586-019-1189-0]
- Li C L, Wang C, Wei Y and Lin Y T. 2019b. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 365(6450): 238-239 [DOI: 10.1126/science.aax990]
- Li D R, Wang M, Guo H N and Jin W J. 2025. On China's earth observation system: mission, vision and application. *Geo-Spatial Information Science*, 28(2): 303-321 [DOI: 10.1080/10095020.2024.2328100]
- Li S and Li L. 2011. Radiative transfer modeling for quantifying lunar surface minerals, particle size, and submicroscopic metallic Fe. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E9): E0900 [DOI: 10.1029/2011JE003837]
- Lin H L, Chen J, Li C, Ding C Y, Xiao X, Huang J, Ji J Z, Gou S, Zhang J H, Wei Y and Lin Y T. 2023. Research progress of remote sensing for the Chang'E lunar exploration mission. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(3): 478-493 (林红磊, 陈剑, 李超, 丁春雨, 肖潇, 黄俊, 籍进柱, 苟盛, 张金海, 魏勇, 林杨挺. 2023. 嫦娥工程月球探测任务遥感科学研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 42(3): 478-493) [DOI: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.061]
- Lin H L, Ding C Y, Xu X S, Zhang J H, Wei Y and Lin Y T. 2021. Review on the in-situ spectroscopy and radar remote sensing on the Moon. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 373-390 (林红磊, 丁春雨, 许学森, 张金海, 魏勇, 林杨挺. 2021. 月球就位光谱和雷达遥感科学研究进展. *地球与行星物理论评*, 52(4): 373-390) [DOI: 10.16738/j.dqyxx.2021-031]
- Lin H L, He Z P, Yang W, Lin Y T, Xu R, Zhang C, Zhu M H, Chang R, Zhang J H, Li C L, Lin H Y, Liu Y, Gou S, Wei Y, Hu S, Xue C B, Yang J F, Zhong J, Fu X H, Wan W X and Zou Y L. 2020a. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool. *National Science Review*, 7(5): 913-920 [DOI: 10.1093/nsr/nwz183]
- Lin H L, Lin Y T, Yang W, He Z P, Hu S, Wei Y, Xu R, Zhang J H, Liu X H, Yang J F, Xing Y, Yu C W and Zou Y L. 2020b. New insight into lunar regolith-forming processes by the lunar rover Yutu-2. *Geophysical Research Letters*, 47(14): e2020GL087949 [DOI: 10.1029/2020GL087949]
- Lin H L, Zhang X, Yang Y Z, Guo D J, Wu X and Qi W C. 2019. Retrieval of the mineral abundance and particle size distribution at the landing site of Yutu rover with hyperspectral remote sensing data. *National Remote Sensing Bulletin*, 23(5): 831-840 (林红磊, 张霞, 杨亚洲, 郭弟均, 吴兴, 戚文超. 2019. 玉兔号月球车巡视点矿物丰度及粒径分布高光谱反演. *遥感学报*, 23(5): 831-840) [DOI: 10.11834/jrs.20197531]
- Lin Y T, Yang W, Zhang H, Hui H J, Hu S, Xiao L, Liu J Z, Xiao Z Y, Yue Z Y, Zhang J H, Liu Y, Yang J, Lin H L, Zhang A C, Guo D J, Gou S, Xu L, He Y Y, Zhang X G, Qin L P, Ling Z C, Li X Y, Du A M, He H Y, Zhang P, Cao J B and Li X H. 2024. Return to the Moon: new perspectives on lunar exploration. *Science Bulletin*, 69(13): 2136-2148 [DOI: 10.1016/j.scib.2024.04.051]
- Ling Z C, Jolliff B L, Wang A L, Li C L, Liu J Z, Zhang J, Li B, Sun L Z, Chen J, Xiao L, Liu J J, Ren X, Peng W X, Wang H Y, Cui X Z, He Z P and Wang J Y. 2015. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site. *Nature Communications*, 6(1): 8880 [DOI: 10.1038/ncomms9880]
- Liu B, Zeng X G, Xu R, Li S, Liu J J, Guo L, Ren X, Liu D W, Yan W, Chen W L, Li J N, He Z P and Li C L. 2025. Lunar surface and subsurface water revealed by Chang'e-6. *Nature Astronomy*, 9(12): 1776-1784 [DOI: 10.1038/s41550-025-02668-7]
- Liu D W, Wang X, Liu J J, Liu B, Ren X, Chen Y, Chen Z P, Zhang H B, Zhang G L, Zhou Q, Zhang Z B, Fu Q and Li C L. 2022. Spectral interpretation of late-stage mare basalt mineralogy unveiled by Chang'E-5 samples. *Nature Communications*, 13(1): 5965

- [DOI: 10.1038/s41467-022-33670-6]
- Liu D W, Li L and Sun Y. 2015. An improved radiative transfer model for estimating mineral abundance of immature and mature lunar soils. *Icarus*, 253: 40-50 [DOI: 10.1016/j.icarus.2015.02.013]
- Liu J J, Ren X, Wang F F, Mu L L, Wang W R and Tan X. 2015. Progress in the lunar optical remote sensing and mapping research. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 461-470 (刘建军, 任鑫, 王奋飞, 牟伶俐, 王文睿, 谭旭. 2015. 月球光学遥感与制图研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 461-470) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.03.002]
- Liu S C, Du K C, Tong X H, Xie H, Feng Y J, Jin Y M, Wang C, Zhao H and Zhang J. 2024. In-situ mapping of iron and titanium with the visible and near-infrared image spectrometer (VNIS) along the Yutu-2 rover traverse on the farside of the Moon. *Icarus*, 412: 116003 [DOI: 10.1016/j.icarus.2024.116003]
- Lucey P G. 1998. Model near-infrared optical constants of olivine and pyroxene as a function of iron content. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E1): 1703-1713 [DOI: 10.1029/97JE03145]
- Lucey P G. 2004. Mineral maps of the moon. *Geophysical Research Letters*, 31(8): L08701 [DOI: 10.1029/2003GL019406]
- Lucey P G, Blewett D T and Hawke B R. 1998. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E2): 3679-3699 [DOI: 10.1029/97JE03019]
- Lucey P G, Blewett D T and Jolliff B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20297-20305 [DOI: 10.1029/1999JE001117]
- Lucey P G, Hayne P O, Costello E S, Green R, Hibbitts C A, Goldberg A, Mazarico E, Li S and Honniball C. 2021. The spectral radiance of indirectly illuminated surfaces in regions of permanent shadow on the Moon. *Acta Astronautica*, 180: 25-34 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.11.032]
- Ma M, Li B Z, Chen S B, Lu T Q, Lu P, Lu Y and Jin Q. 2022. Global estimates of lunar surface chemistry derived from LRO Diviner data. *Icarus*, 371: 114697 [DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114697]
- Masursky H, Colton G W, El-Baz F and Doyle F J. 1978. *Apollo over the Moon: A View from Orbit*. Washington: National Aeronautics and Space Administration
- McCord T B, Charette M P, Johnson T V, Lebofsky L A, Pieters C and Adams J B. 1972. Lunar spectral types. *Journal of Geophysical Research*, 77(8): 1349-1359 [DOI: 10.1029/JB077i008p01349]
- McCord T B, Taylor L A, Combe J P, Kramer G, Pieters C M, Sunshine J M and Clark R N. 2011. Sources and physical processes responsible for OH/H₂O in the lunar soil as revealed by the Moon Mineralogy Mapper (M3). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E6): E00G05 [DOI: 10.1029/2010JE003711]
- McEwen A S and Robinson M S. 1997. Mapping of the moon by clementine. *Advances in Space Research*, 19(10): 1523-1533 [DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00365-7]
- Noble S K, Pieters C M and Keller L P. 2007. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. *Icarus*, 192(2): 629-642 [DOI: 10.1016/j.icarus.2007.07.021]
- Nozette S, Rustan P, Pleasance L P, Kordas J F, Lewis I T, Park H S, Priest R E, Horan D M, Regeon P, Lichtenberg C L, Shoemaker E M, Eliason E M, McEwen A S, Robinson M S, Spudis P D, Acton C H, Buratti B J, Duxbury T C, Baker D N, Jakosky B M, Blamont J E, Corson M P, Resnick J H, Rollins C J, Davies M E, Lucey P G, Malaret E, Massie M A, Pieters C M, Reisse R A, Smith D E, Sorenson T C, Breugge R W V and Zuber M T. 1994. The clementine mission to the moon: scientific overview. *Science*, 266(5192): 1835-1839 [DOI: 10.1126/science.266.5192.1835]
- Ohtake M, Matsunaga T, Haruyama J, Yokota Y, Morota T, Honda C, Ogawa Y, Torii M, Miyamoto H, Arai T, Hirata N, Iwasaki A, Nakamura R, Hiroi T, Sugihara T, Takeda H, Otake H, Pieters C M, Saiki K, Kitazato K, Abe M, Asada N, Demura H, Yamaguchi Y, Sasaki S, Kodama S, Terazono J, Shirao M, Yamaji A, Minami S, Akiyama H and Josset J L. 2009. The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature*, 461(7261): 236-240 [DOI: 10.1038/nature08317]
- Otake H, Ohtake M and Hirata N. 2012. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on SELENE (Kaguya) Multiband Imager data//43rd Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: LPI: 1905
- Ouyang Z Y. 2005. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: China Astronautical Publishing House (欧阳自远. 2005. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社)
- Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, Zhang H B, Lu C, Liu J Z, Liu J J, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Zhao B C, Wang J Y, Yang J F, Chang J, Wang H Y, Zhang X H, Wang S J, Wang M, Ren X, Mu L L, Kong D Q, Wang X Q, Wang F, Geng L, Zhang Z B, Zheng L, Zhu X Y, Zheng Y C, Li J D, Zou X D, Xu C, Shi S B, Gao Y F and Gao G N. 2010. Chang'E-1 lunar mission: an overview and primary science results. *Chinese Journal of Space Science*, 30(5): 392-403 [DOI: 10.11728/cjss2010.05.392]
- Papike J J, Simon S B and Laul J C. 1982. The lunar regolith: chemistry, mineralogy, and petrology. *Reviews of Geophysics*, 20(4): 761-826 [DOI: 10.1029/RG020i004p00761]
- Pieters C, Shkuratov Y, Kaydash V, Stankevich D and Taylor L. 2006. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data. *Icarus*, 184(1): 83-101 [DOI: 10.1016/j.icarus.2006.04.013]
- Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, Annadurai M, Boardman J, Buratti B, Combe J P, Dyar M D, Green R, Head J W, Hibbitts C, Hicks M, Isaacson P, Klima R, Kramer G, Kumar S, Livo E, Lundeen S, Malaret E, Mccord T, Mustard J, Nettles J, Petro N, Runyon C, Staid M, Sunshine J, Taylor L A, Tompkins S and Varanasi P. 2009. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1. *Science*, 326(5952): 568-572 [DOI: 10.1126/science.1178658]
- Pieters C M, Hanna K D, Check L, Dhingra D, Prissel T, Jackson C, Moriarty D, Parman S and Taylor L A. 2014. The distribution of Mg-spinel across the Moon and constraints on crustal origin. *American Mineralogist*, 99(10): 1893-1910 [DOI: 10.2138/am-2014-4776]
- Pieters C M, Taylor L A, Noble S K, Keller L P, Hapke B, Morris R V,

- Allen C C, McKay D S and Wentworth S. 2000. Space weathering on airless bodies: resolving a mystery with lunar samples. *Meteoritics and Planetary Science*, 35(5): 1101-1107 [DOI: 10.1111/j.1945-5100.2000.tb01496.x]
- Poulet F and Erard S. 2004. Nonlinear spectral mixing: quantitative analysis of laboratory mineral mixtures. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109(E2): E02009 [DOI: 10.1029/2003JE002179]
- Prockter L, Tiscareno M S, Grayzeck E J, Acton C H, Arvidson R E, Bauer J M, Beebe R, Besse S, Chanover N, Crichton D J, Gaddis L R, Gordon M K, Hare T M, Baker D M H, Hughes J S, Law E S, McAuley M, Mcclanahan T, Padams J H, Raugh A C, Showalter M R, Stein T and Walker R J. 2021. The planetary data system: a vital component in NASA's science exploration program. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 53(4): 459 [DOI: 10.3847/25c2cfb.c3deebea]
- Qian Y Q, She Z B, He Q, Xiao L, Wang Z C, Head J W, Sun L Z, Wang Y R, Wu B, Wu X, Luo B J, Cao K N, Li Y H, Dong M T, Song W L, Pan F B, Michalski J, Ye B L, Zhao J W, Zhao S Y, Huang J, Zhao J N, Wang J, Zong K Q and Hu Z C. 2023. Mineralogy and chronology of the young mare volcanism in the Procellarum-KREEP-terranes. *Nature Astronomy*, 7(3): 287-297 [DOI: 10.1038/s41550-022-01862-1]
- Qiu D G, Li F, Yan J G, Gao W T and Chong Z. 2022. Machine learning for inversing FeO and TiO₂ content on the Moon: method and comparison. *Icarus*, 373: 114778 [DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114778]
- Robinson M S, Brylow S M, Tschimmel M, Humm D, Lawrence S J, Thomas P C, Denevi B W, Bowman-Cisneros E, Zerr J, Ravine M A, Caplinger M A, Ghaemi F T, Schaffner J A, Malin M C, Mahanti P, Bartels A, Anderson J, Tran T N, Eliason E M, McEwen A S, Turtle E, Jolliff B L and Hiesinger H. 2010. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview. *Space Science Reviews*, 150(1): 81-124 [DOI: 10.1007/s11214-010-9634-2]
- Shevchenko V, Rodionova Z and Michael G. 2016. *Lunar and Planetary Cartography in Russia*. Cham: Springer
- Shkuratov Y, Starukhina L, Hoffmann H and Arnold G. 1999. A model of spectral albedo of particulate surfaces: implications for optical properties of the Moon. *Icarus*, 137(2): 235-246 [DOI: 10.1006/icar.1998.6035]
- Shuai T. 2014. *Quantitative Deep-Space Mineral Abundance Retrieval Based On Hyperspectral Unmixing Technology*. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences (帅通. 2014. 基于混合光谱分解技术的深空矿物丰度定量反演研究. 合肥: 中国科学院大学)
- Shuai T, Zhang X, Zhang M, Liu B and Baig M. 2012. Accuracy analysis of lunar mineral endmembers extraction using simulated Chang'E-1 IIM data. *National Remote Sensing Bulletin*, 16(6): 1205-1221 (帅通, 张霞, 张明, 刘波, Baig M. 2012. 利用嫦娥一号 IIM 模拟数据提取月表矿物端元的精度分析. *遥感学报*, 16(6): 1205-1221) [DOI: 10.11834/jrs.20121332]
- Shuai T, Zhang X, Zhang L F and Wang J N. 2013. Mapping global lunar abundance of plagioclase, clinopyroxene and olivine with Interference Imaging Spectrometer hyperspectral data considering space weathering effect. *Icarus*, 222(1): 401-410 [DOI: 10.1016/j.icarus.2012.11.027]
- Singer R B and Roush T L. 1985. Effects of temperature on remotely sensed mineral absorption features. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B14): 12434-12444 [DOI: 10.1029/JB090iB14p12434]
- Song M, Zhong Y F, Ding C Y, Liu Y Z, Huang S P and Li Q Q. 2023. Regolith mineral detection and abundance estimation based on the LMS spectral data of Chang'E-5 lander. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 53(3): 239607 (宋蜜, 钟燕飞, 丁春雨, 刘远周, 黄少鹏, 李清泉. 2023. 基于嫦娥五号月球矿物光谱仪数据的采样区矿物光谱识别与丰度反演. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 53(3): 239607) [DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0318]
- Speyerer E J and Robinson M S. 2013. Persistently illuminated regions at the lunar poles: ideal sites for future exploration. *Icarus*, 222(1): 122-136 [DOI: 10.1016/j.icarus.2012.10.010]
- Suárez-Valencia J E, Rossi A P, Zambon F, Carli C and Nodjoumi G. 2024. *MoonIndex*, an open-source tool to generate spectral indexes for the Moon from M³ data. *Earth and Space Science*, 11(6): e2023EA003464 [DOI: 10.1029/2023EA003464]
- Sunshine J M and Pieters C M. 1993. Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the modified Gaussian model. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E5): 9075-9087 [DOI: 10.1029/93JE00677]
- Sunshine J M and Pieters C M. 1998. Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E6): 13675-13688 [DOI: 10.1029/98JE01217]
- Thoresen F, Drozdovskiy I, Cowley A, Laban M, Besse S and Blunier S. 2024. Insights into lunar mineralogy: an unsupervised approach for clustering of the Moon Mineral Mapper (M3) spectral data. *arXiv preprint arXiv: 2411.03186* [DOI: 10.48550/arXiv.2411.03186]
- Tompkins S and Pieters C M. 1999. Mineralogy of the lunar crust: results from Clementine. *Meteoritics and Planetary Science*, 34(1): 25-41 [DOI: 10.1111/j.1945-5100.1999.tb01729.x]
- Tompkins S and Pieters C M. 2010. Spectral characteristics of lunar impact melts and inferred mineralogy. *Meteoritics and Planetary Science*, 45(7): 1152-1169 [DOI: 10.1111/j.1945-5100.2010.01074.x]
- Verma P A, Chauhan M and Chauhan P. 2022. Lunar surface temperature estimation and thermal emission correction using Chandrayaan-2 imaging infrared spectrometer data for H₂O and OH detection using 3 μ m hydration feature. *Icarus*, 383: 115075 [DOI: 10.1016/j.icarus.2022.115075]
- Vondrak R, Keller J, Chin G and Garvin J. 2010. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): observations for lunar exploration and science. *Space Science Reviews*, 150(1): 7-22 [DOI: 10.1007/s11214-010-9631-5]
- Wang W W, Jin Q, Chen X J, Jiao H Y, Cai W, Lu Y, Xu T Y and Wu Y Z. 2024. Character and spatial distribution of mineralogy at the lunar south polar region. *Planetary and Space Science*, 240: 105833 [DOI: 10.1016/j.pss.2023.105833]

- Wöhler C, Grumpe A, Berezhnoy A A and Shevchenko V V. 2017. Time-of-day-dependent global distribution of lunar surficial water/hydroxyl. *Science Advances*, 3(9): e1701286 [DOI: 10.1126/sciadv.1701286]
- Wu S C and Moore H J. 1980. *Experimental Photogrammetry of Lunar Images*. Reston: U.S. Geological Survey
- Wu W R, Li C L, Zuo W, Zhang H B, Liu J J, Wen W B, Su Y, Ren X, Yan J, Yu D Y, Dong G L, Wang C, Sun Z Z, Liu E H, Yang J F and Ouyang Z Y. 2019. Lunar farside to be explored by Chang'e-4. *Nature Geoscience*, 12(4): 222-223 [DOI: 10.1038/s41561-019-0341-7]
- Wu X, Liu Y, Yang Y Z, Guo D J, Du J, Li S, Lin H L, Fu X H, Xiao Z Y, Xu Y C, Xu R, He Z P, Zhang F, Lin Y T and Zou Y L. 2022. Mineralogy and regolith maturity at the Chang'E-5 landing site inferred from the Lunar Mineralogical Spectrometer. *Earth and Planetary Science Letters*, 594: 117747 [DOI: 10.1016/j.epsl.2022.117747]
- Wu Y Z. 2012. Major elements and Mg# of the Moon: results from Chang'E-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 93: 214-234 [DOI: 10.1016/j.gca.2012.07.011]
- Wu Y Z. 2014. Reflectance spectroscopy of the Moon and its application. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 74-87 (吴昀昭. 2014. 月球反射光谱学及应用. *地学前缘*, 21(6): 74-87) [DOI: 10.13745/j.esf.2014.06.008]
- Wu Y Z, Chai Y M, Lu Y, Chen X J, Wang W W and Jin Q. 2024. Visible and near-infrared spectral results of Chang'E-5 surficial and subsurface soils. *Astronomy and Astrophysics*, 682: A112 [DOI: 10.1051/0004-6361/202347577]
- Wu Y Z and Hapke B. 2018. Spectroscopic observations of the Moon at the lunar surface. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 145-153 [DOI: 10.1016/j.epsl.2017.12.003]
- Wu Y Z, Kürt E, Grott M, Jin Q, Xu T Y, Helbert J, Hamm M, Qin N N, Ma J S, Vincent J B and Hayne P. 2021. Chang'E-4 rover spectra revealing micro-scale surface thermophysical properties of the Moon. *Geophysical Research Letters*, 48(4): e2020GL089226 [DOI: 10.1029/2020GL089226]
- Wu Y Z, Wang Z C, Cai W and Lu Y. 2018. The absolute reflectance and new calibration site of the Moon. *The Astronomical Journal*, 155(5): 213 [DOI: 10.3847/1538-3881/aabaf5]
- Wu Y Z, Zheng Y C, Zou Y L, Tang Z S, Xu A A, Yan B K, Gan F P and Zhang X. 2010. Processing, analysis and application of Chang'E-1 IIM data I: global lunar mineral absorption-center distribution map. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 40(11): 1343-1362 (吴昀昭, 郑永春, 邹永廖, 唐泽圣, 许敖敖, 闫柏琨, 甘甫平, 张霞. 2010. 嫦娥一号IIM数据处理分析与应用之一: 全月表矿物吸收中心分布图. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 40(11): 1343-1362) [DOI: 10.1360/972010-1475]
- Xia W X, Wang X M, Zhao S Y, Jin H Z, Chen X S, Yang M P, Wu X Y, Hu C D, Zhang Y Z, Shi Y W, Gao X and Wang X. 2019. New maps of lunar surface chemistry. *Icarus*, 321: 200-215 [DOI: 10.1016/j.icarus.2018.10.031]
- Xiao L, Zhu P M, Fang G Y, Xiao Z Y, Zou Y L, Zhao J N, Zhao N, Yuan Y F, Qiao L, Zhang X P, Zhang H, Wang J, Huang J, Huang Q, He Q, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X and Gao Y Z. 2015. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226-1229 [DOI: 10.1126/science.1259866]
- Xu L Y, Qiao L, Xie M G, Wang Y R, Zhu M H and Yan J G. 2024. Chronology, local stratigraphy, and foreign ejecta materials at the Chang'e-6 landing site: constraints on the provenance of samples returned from the Moon's farside. *Geophysical Research Letters*, 51(24): e2024GL111311 [DOI: 10.1029/2024GL111311]
- Xu R, Li C L, Yuan L Y, Lv G, Xu S, Li F F, Jin J, Wang Z D, Pan W, Wang R, Wang M Z, Xie J N, Yang J, Wang J Y and He Z P. 2022. Lunar mineralogical spectrometer on Chang'E-5 mission. *Space Science Reviews*, 218(5): 41 [DOI: 10.1007/s11214-022-00910-6]
- Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, Ogawa Y, Ishihara Y, Morota T, Hirata N, Ohtake M, Hiroi T, Yokota Y and Haruyama J. 2010. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. *Nature Geoscience*, 3(8): 533-536 [DOI: 10.1038/ngeo897]
- Yan W, Zeng X G, Ren X, Chen W L, Gao X Y, Zuo W, Liu B, Zhang Z B, Fu Q, Liu J J and Li C L. 2025. Geological characteristics of Chang'E-6 landing area in micro-scale unveiled by new observation data. *Nature Communications*, 16(1): 4219 [DOI: 10.1038/s41467-025-59443-5]
- Yang C, Zhang X M, Bruzzone L, Liu B, Liu D W, Ren X, Benediktsson J A, Liang Y C, Yang B, Yin M H, Zhao H S, Guan R C, Li C L and Ouyang Z Y. 2023. Comprehensive mapping of lunar surface chemistry by adding Chang'e-5 samples with deep learning. *Nature Communications*, 14(1): 7554 [DOI: 10.1038/s41467-023-43358-0]
- Zeng Q H, Chen S B, Zhang Y Z, Mu Y L, Dai R, Yang C Y, Li A Z and Lu P. 2021. Mineralogical and chemical properties inversed from 21-lunar-day VNIS observations taken during the Chang'E-4 mission. *Scientific Reports*, 11(1): 15435 [DOI: 10.1038/s41598-021-93694-8]
- Zeng X G, Liu D W, Chen Y, Zhou Q, Ren X, Zhang Z B, Yan W, Chen W L, Wang Q, Deng X J, Hu H, Liu J J, Zuo W, Head J W and Li C L. 2023. Landing site of the Chang'e-6 lunar farside sample return mission from the Apollo basin. *Nature Astronomy*, 7(10): 1188-1197 [DOI: 10.1038/s41550-023-02038-1]
- Zhang L, Zhang X B, Yang M S, Xiao X, Qiu D G, Yan J G, Xiao L and Huang J. 2023a. New maps of major oxides and Mg # of the lunar surface from additional geochemical data of Chang'E-5 samples and KAGUYA multiband imager data. *Icarus*, 397: 115505 [DOI: 10.1016/j.icarus.2023.115505]
- Zhang P, Dai W, Niu R, Zhang G, Liu G H, Liu X, Bo Z, Wang Z, Zheng H B, Liu C B, Yang H Z, Bai Y F, Zhang Y, Yan D, Zhou K F and Gao M. 2023b. Overview of the lunar in situ resource utilization techniques for future lunar missions. *Space: Science & Technology*, 3: 0037 [DOI: 10.34133/space.0037]
- Zhang P, Liu W Y, Liu C B, Bo Z, Niu R, Han D X, Lin Q, Zhang Z Y and Ma M Z. 2025. Current status and future challenges of key technologies for processing lunar hyperspectral orbit data. *Journal of Geo-information Science*, 27(4): 787-800 (张鹏, 刘琬玥, 刘成保, 薄正, 牛冉, 韩东旭, 林茜, 张子怡, 马铭泽. 2025. 月球高光

- 谱轨道器数据处理关键技术发展现状及未来挑战. 地球信息科学学报, 27(4): 787-800 [DOI: 10.12082/dqxxkx.2025.240467]
- Zhang Q W L, Yang M H, Li Q L, Liu Y, Yue Z Y, Zhou Q, Chen L Y, Ma H X, Yang S H, Tang X, Zhang G L, Ren X and Li X H. 2025. Lunar farside volcanism 2.8 billion years ago from Chang'e-6 basalts. *Nature*, 643(8071): 356-360 [DOI: 10.1038/s41586-024-08382-0]
- Zhao S H, Yuan Q Q, Li J, Hu Y Z, Liu X X and Zhang L P. 2022. A fast and effective irregular stripe removal method for Moon Mineralogy Mapper (M3). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4600119 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3054661]
- Zhao Z X, Yang Y Z, Wu X, Liu Y, Zhang F, Xu R, He Z P, Lin Y T and Zou Y L. 2024. A quantitative model to estimate major oxide abundances on the Moon based on in situ reflectance spectral data of Chang'e missions. *Icarus*, 411: 115962 [DOI: 10.1016/j.icarus.2024.115962]
- Zheng P, Su H J, Wu Z Y, Haut J M and Paoletti M E. 2025. A physics-guided diffusion unmixing model for global lunar mineral abundance mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2026, 19: 7320-7340 [DOI: 10.1109/JSTARS.2026.3657892]
- Zheng P, Wu Z Y, Paoletti M E, Haut J M, Hu J and Su H J. 2024. Typical mineral abundance estimation of Chang'e-3 Yutu rover with hyperspectral data based on diffusion autoencoder unmixing model//IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 6109-6112 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642898]

Optical remote sensing for lunar mineral detection: Methodologies, advances, and challenges

ZHENG Pan¹, SU Hongjun², WU Zhaoyue³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. College of Geography and Remote Sensing, Hohai University, Nanjing 211100, China;
3. Department of Biology, University of Aarhus, Aarhus 8000, Denmark

Abstract: Understanding the mineralogical composition and abundance distribution of the lunar surface is essential for deciphering the origin and evolution of the Moon, assessing its resource potential, and supporting future crewed and robotic exploration missions. Owing to its wide spatial coverage, non-contact observation, and sensitivity to diagnostic spectral absorption features, optical remote sensing has become one of the most important techniques for lunar mineral detection. This review provides a systematic overview of optical remote sensing for lunar mineral exploration, focusing on its observational principles, payload development, data resources, inversion methodologies, representative achievements, current challenges, and future prospects.

This review first outlines the physical basis of lunar mineral detection using optical remote sensing, including the spectral response mechanisms of typical lunar minerals and the influence of the lunar surface environment on reflectance spectra. It then summarizes representative optical payloads and data products from orbital and in-situ lunar exploration missions. Based on this, existing mineral identification and inversion methods are classified into three categories: spectral feature characterization with data-driven mapping, physics-based forward modeling with inverse retrieval, and spectral unmixing. Their theoretical assumptions, output variables, advantages, limitations, and applicable scenarios are compared to establish a unified methodological framework for lunar mineral remote sensing.

Optical remote sensing has advanced lunar mineral detection from global mapping to regional interpretation and in-situ validation. Multispectral and hyperspectral datasets from Clementine, Kaguya, Chang' E-1, Chandrayaan-1, and other missions have enabled the mapping of FeO, TiO₂, optical maturity, and major minerals such as pyroxene, olivine, plagioclase, spinel, and volcanic glass. These observations have revealed compositional differences between mare basalts and highland anorthosites, as well as possible exposures of deep-seated materials around impact basins and crater margins. In-situ spectral measurements from Chang' E-3, Chang' E-4, Chang' E-5, and Chang' E-6 have further provided local constraints and validation for orbital retrievals. In addition, the detection of OH/H₂O absorption near 3 μm has expanded lunar optical remote sensing from mineral mapping to hydration detection and resource-related studies.

Optical remote sensing has become a key approach for linking lunar mineral composition, geological evolution, and resource assessment. However, lunar mineral retrieval still faces uncertainties caused by space weathering, grain-size variation, illumination and shadow effects, preprocessing errors, nonlinear spectral mixing, and limited ground truth validation. Future studies should focus on physically constrained preprocessing, nonlinear unmixing, uncertainty quantification, and the fusion of orbital, in-situ, laboratory, and multimodal remote sensing data. These efforts will improve the accuracy, reliability, and geological interpretability of lunar mineral detection and provide stronger support for future lunar exploration, resource evaluation, and in-situ resource utilization.

Key words: lunar, optical remote sensing, in-situ exploration, orbital remote sensing, mineral identification, spectral unmixing, abundance estimation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U24A20588, 42371327, 42122008); Postgraduate Research and Practice Innovation Program of Jiangsu Province (No. KYCX23_0733)