

月球及火星探测任务中光谱技术研究与应用

桂裕华^{1,2}, 李津宁^{1,2}, 王梅竹^{1*}, 何志平^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 光谱仪器获取目标光谱信息或光谱图像, 具备物质成分无损识别和定量反演能力, 已成为国内外月球和火星探测任务重点配置的科学载荷, 为表面物质成分及矿产资源、形成与演化历史及资源利用等研究提供重要依据。本文简要介绍了近年来国内外月球及火星探测任务中光谱技术的研究进展与应用现状, 概述了中国探月工程及天问一号探测任务中七台光谱仪器及其应用状况, 进一步介绍了月球及火星光谱探测的典型应用成果。最后, 对光谱技术在月球及深空探测领域的应用前景和发展趋势进行了展望和探讨。

关键词: 光谱技术; 月球探测; 火星探测; 深空探测

中图分类号: Oxx

文献标识码: A

Research and application of spectroscopic techniques in lunar and Mars exploration missions

GUI Yu-Hua^{1,2}, LI Jin-Ning^{1,2}, WANG Mei-Zhu^{1*}, HE Zhi-Ping^{1*}

(1. Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Spectral instruments have the ability to acquire spectral information and images for targets, and can realize nondestructive identification and quantitative interpretation of the mineral composition, which has become the key scientific payloads in lunar and Mars exploration missions, and provides an important basis for the study in aspects of surface composition and mineral resources, formation and evolution history and resource utilization. This paper briefly illustrates the research progress and application status of spectroscopic technology in lunar and Mars exploration missions at the domestic and international level in recent years. The seven spectral instruments and their application status in China's Lunar Exploration Program (CLEP) and Tianwen-1 mission are summarized. In addition, this paper further introduces the typical scientific outputs for lunar and Martian spectral data. Finally, the application prospect and development trend of spectral instruments in the field of lunar and deep space exploration are discussed.

Key words: spectroscopic technology, Lunar exploration, Mars exploration, deep space exploration

引言

月球和火星探测一直是国际深空探测的热点, 表面物质成分分析与资源勘查是月球和火星探测的主要目标之一^[1]。光谱仪器可获取表面目标的光谱信息, 是物质成分无损识别和定量反演的重要手

段。因此, 目前大部分月球及火星探测任务均配备光谱探测类科学载荷, 为其表面物质成分及矿产资源、形成与演化历史及资源利用等研究提供科学数据^[2]。

月球及火星光谱探测方式主要包括轨道器环

收稿日期: 2021-12-07, 修回日期: 2021-12-27

Received date: 2021-12-07, Revised date: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(62125505, 11941002); 上海领军人才项目; 上海市学术/技术带头人项目(19XD1424100), 中国科学院重点部署项目(ZDBS-SSW-JSC007)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62125505, 11941002); the Shanghai Outstanding Academic Leaders Plan; the Program of Shanghai Academic/Technology Research Leader (19XD1424100), Key Research Program, CAS (ZDBS-SSW-JSC007)

作者简介(Biography): 桂裕华(1997—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要研究领域为光谱探测及成像, E-mail: yhgui@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: mzhwang@mail.sitp.ac.cn, hzping@mail.sitp.ac.cn

绕遥感探测以及着陆、巡视器原位探测。环绕遥感探测获取天体米至千米级空间尺度的光谱数据,为宏观大区域的物质分布和矿物勘探提供参考,典型任务及配置的光谱仪器有印度月船一号(Chandrayaan-1)上的月球矿物绘图仪(M³)^[3]、美国月球环形山观测与遥感卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)上的可见/近红外光谱仪(Visible/Near Infrared Spectrophotometer, VNIRS)^[4]、欧空局火星快车(Mars Express)上的光谱仪OMEGA^[5]、美国火星勘测轨道探测器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)上的火星小型侦察成像光谱仪(Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM)^[6]、以及中国嫦娥一号(CE-1)上搭载的干涉成像光谱仪(Imaging Interferometer, IIM)^[7]和天问一号(TW-1)上搭载的火星矿物光谱分析仪(Mars Mineral Spectrometer, MMS)^[8,9]。表面原位光谱探测可在月球及火星表面近距离实现毫米至厘米级空间尺度的局部精细探测,典型仪器任务及配置的光谱仪器有美国好奇号搭载的ChemCam^[10]、美国毅力号上搭载的SuperCam^[11,12],以及中国嫦娥三号/嫦娥四号搭载的红外成像光谱仪(Visible/Near Infrared Imaging Spectrometer, VNIS)^[13]、嫦娥五号搭载的月球矿物光谱分析仪(Lunar Mineral Spectrometer, LMS)^[14]。上述光谱仪器获取了大量科学数据,为人类认知月球与火星表面热辐射、矿物组成、元素丰度、空间风化等方面做出了重要贡献。

本文首先简述月球及火星探测任务中光谱探测技术及其仪器,然后重点介绍我国的相关光谱技术研究情况,并对典型的科学研究成果进行介绍。最后,讨论了光谱技术在未来深空探测的发展趋势与应用前景。

1 研究现状

20世纪50年代苏联成功发射“月球一号”月球探测器,开启了人类地外天体探测的新篇章。月球和火星无疑已成为深空探测的重点领域,迄今为止,人类已经实施了超过170次的月球及火星探测任务,包括飞越、环绕、软着陆及巡视探测、返回样品分析等诸多方面^[15]。这些任务中,针对月球的探测任务超过130次,火星探测任务超过45次,主要通过配备相机、光谱仪、探测雷达等科学载荷,不断增强人类对月球与火星的形貌、资源以及空间环境等情况的认知^[16,17]。

光谱仪器作为物质成分分析的有效手段,特别

在几十年的探测任务中应用广泛。表1所示为近年来国际上主要月球及火星探测任务搭载的典型光谱载荷情况。从表中可以看出,21世纪以来,中、美、欧、日、印等国先后进行了多次月球及火星探测任务,其中月球探测任务中,包括日本“月亮女神”探测器、印度“月船一号”及“月船二号”探测器、美国“月球环形山观测卫星”,中国的“嫦娥一号”、“嫦娥三号”、“嫦娥四号”、“嫦娥五号”探测器均配置了光谱类科学载荷,对月球进行科学探测;火星探测任务中,欧洲“火星快车”及“火星探测计划 ExoMars 2016”,美国的“火星轨道探测器”、“好奇号”、“毅力号”,中国的“天问一号”均配置了光谱类科学载荷,对火星进行科学探测。

从探测方式来看,中、美、欧、日、印等国均已具备遥感光谱探测能力,但仅中、美成功实现表面原位近距离的光谱探测,其中,美国首先实现火星表面的原位光谱探测,中国首先实现月球表面的原位光谱探测,2020年也成功实现火星表面的原位光谱探测。在重量、功耗的严酷限制下,抑制探测场景中温度、光照等效应对所探测光谱数据质量及定量化水平的影响,是月球与火星遥感与原位探测的共性技术难题,涉及探测机制、核心器件、定标方法、环境适应性等多方面技术突破。典型的如声光可调滤光器等新型分光技术与器件的研发及其在火星快车、嫦娥三号、嫦娥四号、嫦娥五号、天问一号、毅力号等任务的广泛应用。科学探测需求一方面促进光谱探测由被动,向主动及主被动结合发展,如激光诱导击穿光谱(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)及拉曼(Raman)光谱技术的研发与应用;另一方面也推动技术向宽谱段、高分辨、高精度、定量化等方面发展。图1所示为近年来国际上主要月球及火星探测任务搭载的典型光谱载荷的光谱范围,从图中可以看出,红外光谱已成为了月球及火星探测任务中载荷探测的重要谱段。

2 “探月工程”光谱仪器

中国月球探测按照“绕”、“落”、“回”三步走的总体部署,已实现了环绕探测、月面软着陆探测与月球车巡视勘察,以及月球样品采样返回的既定目标,成就辉煌^[18]。迄今,“探月工程”共配备了如图2所示4台光谱仪器。嫦娥一号搭载的干涉成像光谱仪(IIM)实现了中国首次月球遥感光谱探测;嫦娥三号搭载在玉兔号无人月球车上的红外成像光谱仪(VNIS)实现了国际首次月球原位光谱探测;嫦娥四

表 1 近年主要月球及火星探测任务中典型光谱类载荷

Table 1 Typical spectral payloads of major lunar and Mars exploration missions in recent years

目标	时间	国家	探测任务	光谱载荷	光谱范围	探测方式
月球	2007	日本	月亮女神 SELENE	多光谱成像仪 MI	—	遥感
				连续光谱测量仪 SP	0.5~2.6 μm	遥感
	2007	中国	嫦娥一号 CE-1	干涉成像光谱仪 IIM	0.48~0.96 μm	遥感
	2008	印度	月船一号 Chandrayaan-1	超光谱成像仪 HySI	0.4~0.95 μm	遥感
				近红外光谱仪 SIR-2	0.93~2.4 μm	遥感
				月球矿物测绘仪 M3	0.43~3.0 μm	遥感
	2009	美国	月球环形山观测 与遥感卫星 LCROSS	可见近红外光谱仪 VNIRS	0.26~0.66 μm 1.40~2.40 μm	遥感
	2009	美国	月球勘测轨道器 LRO	月球辐射度计 Diviner	0.3~400 μm	遥感
	2013	中国	嫦娥三号 CE-3	红外成像光谱仪 VNIS	0.45~2.4 μm	原位
	2018	中国	嫦娥四号 CE-4	红外成像光谱仪 VNIS	0.45~2.4 μm	原位
2019	印度	月船二号 Chandrayaan-2	红外成像光谱仪 IIRS	0.8~5.0 μm	遥感	
2020	中国	嫦娥五号 CE-5	月球矿物光谱仪 LMS	0.48~3.2 μm	原位	
火星	2003	欧空局	火星快车 Mars Express	可见光和红外矿物测绘光谱仪 OMEGA	0.36~5.08 μm	遥感
				紫外与红外大气光谱仪 SPICAM	0.11~0.32, 1.0~1.70 μm	遥感
	2005	美国	火星轨道探测器 MRO	火星小型侦察成像光谱仪 CRISM	0.36~3.92 μm	遥感
	2016	欧空局	ExoMars 2016	痕量气体轨道器 TGO	0.7~1.65 μm	遥感
	2011	美国	好奇号 Curiosity	ChemCam-LIBS	0.24~0.85 μm	原位
	2020	美国	毅力号 Perseverance	超级分析相机 SuperCam-LIBS	0.24~0.85 μm	原位
				超级分析相机 SuperCam-VISIR	0.4~0.85, 1.3~2.6 μm	原位
	2020	中国	天问一号 TW-1	火星矿物光谱分析仪 MMS	0.38~3.42 μm	遥感
				火星表面成分探测仪 MarSCoDe	0.24~2.4 μm	原位
				多光谱相机 MSCam	—	原位

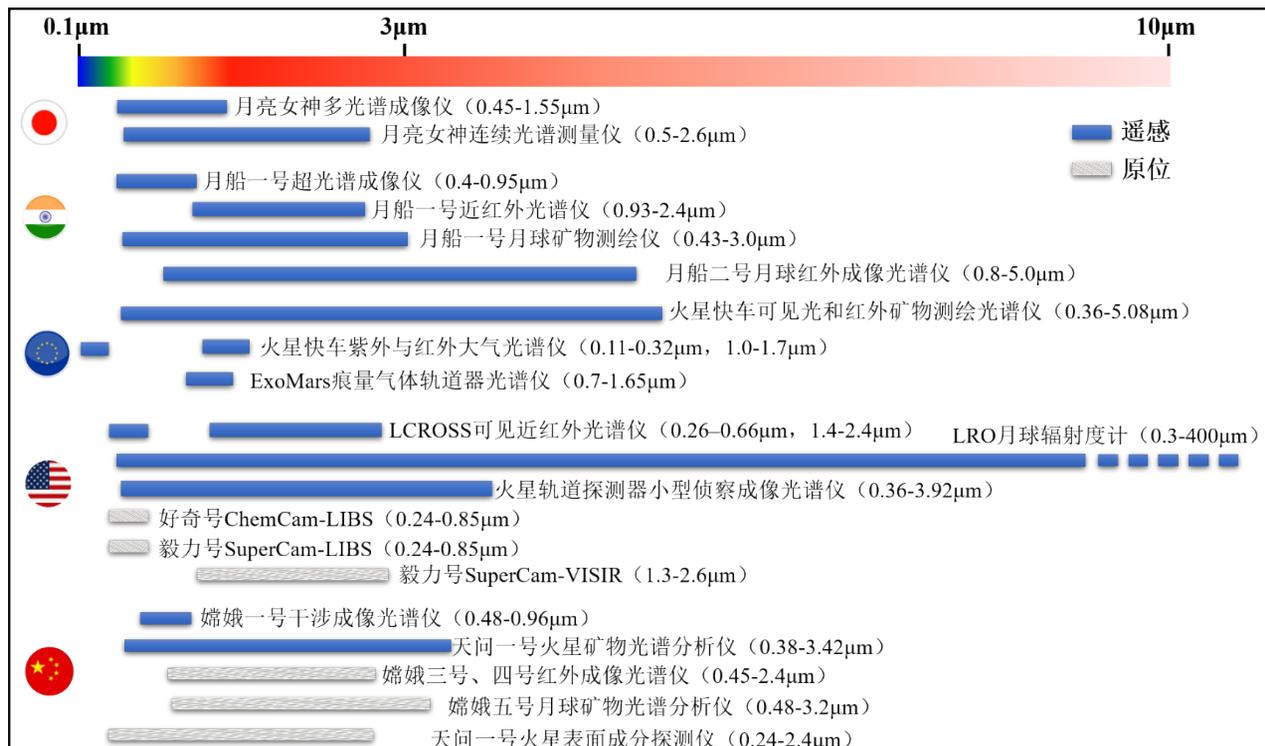


图 1 近年国际主要月球及火星探测任务中典型光谱载荷光谱范围示意图

Fig. 1 Spectral range of typical spectral payloads in major international lunar and Mars exploration missions in recent years

号红外成像光谱仪成功完成在月球背面开展巡视区光谱探测任务;嫦娥五号搭载的月球矿物光谱分析仪(LMS)实现了采样区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。表2为“探月工程”探测任务中光谱载荷的主要性能指标。

嫦娥一号干涉成像光谱仪IIM是一台Sagnac型傅里叶变换干涉成像光谱仪^[7],相对于色散分光型成像光谱仪,IIM具有无光谱混叠、能量利用率高、数据量低等特点。IIM通过遥感推扫实现月球南北纬70°范围内84%区域的光谱探测,光谱范围为0.48~0.96 μm,包括32个光谱通道,光谱分辨率325 cm⁻¹(7.5~30 nm)。在距月面200 km圆形轨道探测时,空间分辨率为200 m/pixel,成像幅宽为25.6 km。像元数为256×256(2×2像元合并后),信噪比大于100,图2(b)为IIM仪器照片。

嫦娥三号红外成像光谱仪(VNIS)是搭载在“玉兔号”上的光谱探测载荷,VNIS采用AOTF分光,是首台实现深空原位探测的AOTF高光谱成像光谱仪^[19]。相比于传统色散分光和傅里叶分光光谱仪,AOTF光谱仪通过可编程电控调节射频频率实现高效时序分光,具有波长调节灵活、探测波段宽、结构紧凑、无移动部件等优势,针对低光照、宽温度恶劣环境的综合适应性好,VNIS仪器照片如图2(d)所示。VNIS包含VIS-NIR和SWIR 2个探测通道,两通道视场分别为8.5°×8.5°和Φ3.6。VIS-NIR通道

采用CMOS面阵探测器获取0.45~0.95 μm光谱范围内的光谱图像,光谱分辨率为2~7 nm;SWIR通道采用InGaAs单点探测器采集0.9~2.4 μm光谱范围内的光谱数据,光谱分辨率为3~12 nm。VNIS探测距离为0.7~1.3 m,可观测0.2 m²范围内目标^[20]。嫦娥四号任务巡视器“玉兔二号”上同样搭载了VNIS,如图2(f)所示。

嫦娥五号月球矿物光谱分析仪(LMS)继承了VNIS的技术体系,探测光谱范围从0.45~2.4 μm扩展到0.48~3.2 μm,除了可以分析月球常见矿物组成,同时具备研究月球矿物风化层水合作用的能力。LMS工作原理与VNIS相似,包含四个探测通道,依次是VIS(480~950 nm),NIR(900~1450 nm),SWIR(1400~2300 nm),MWIR(2200~3200 nm),除VIS通过CMOS实现光谱成像外,其他三个通道为红外(IR)光谱探测通道,均使用红外单元探测器,其中近红外和短波采用铟镓砷(InGaAs)探测器,中波红外采用碲镉汞(MCT)探测器。LMS各通道FOV均为4.17°×4.17°,可观测距离范围为1.6~5 m。VIS光谱分辨率为2.4~9.4 nm,IR通道光谱分辨率为7.6~24.9 nm。在太阳入射角45°,目标反照率15%条件下,VIS通道信噪比大于34 dB,IR通道信噪比大于39 dB。具体LMS实物图与安装位置如图2(g)和(h)所示。

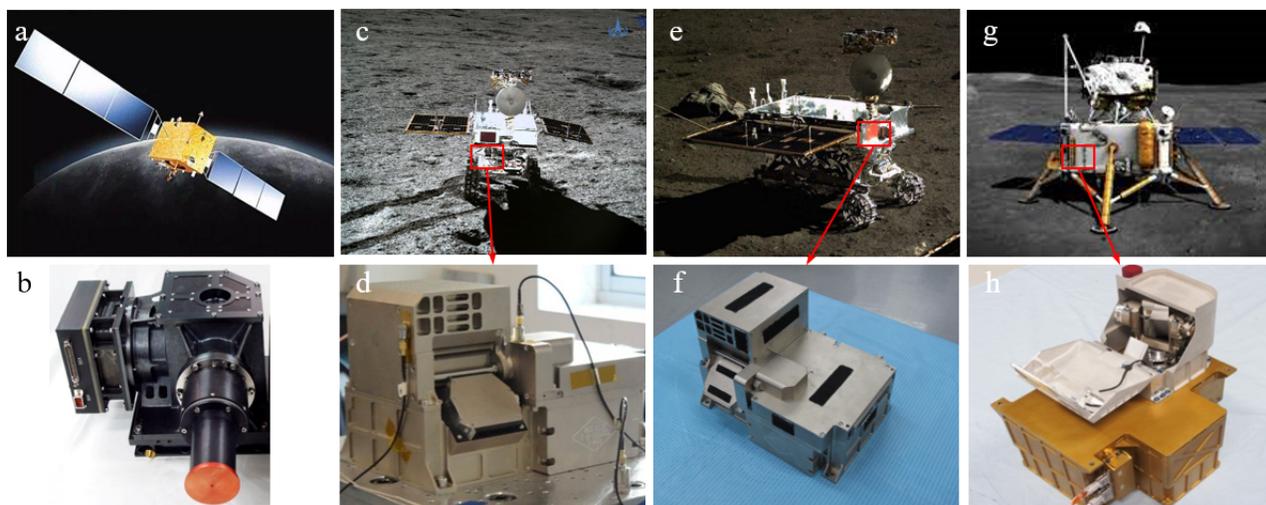


图2 探月工程系列探测器及光谱探测载荷:(a)嫦娥1号示意图,(b)IIM照片,(c)嫦娥3号玉兔号月球车月面图像,(d)VNIS照片@CE-3,(e)嫦娥4号玉兔二号月球车月面图像,(f)VNIS照片@CE-4,(g)嫦娥五号着上组合体示意图,(h)LMS照片
Fig. 2 Series of CLEP and infrared spectral payloads: (a) the schematic diagram of CE-1, (b) photo of IIM, (c) CE-3 Yutu rover on lunar surface, (d) photo of VNIS @ CE-3, (e) CE-4 Yutu-2 rover on lunar surface, (f) photo of VNIS @ CE-4, (g) the schematic diagram of CE-5 lander ascender combination (LAC), (h) photo of LMS

表2 “探月工程”探测任务中的光谱载荷及其性能指标^{[7] [20-22]}

Table 2 Performance indicators for spectroscopy payloads on Chang-e exploration mission

载荷名称	嫦娥一号 IIM	嫦娥三号 VNIS		嫦娥四号 VNIS		嫦娥五号 LMS	
主要通道		VIS-NIR	SWIR	VIS-NIR	SWIR	VIS-NIR	SWIR-MWIR
光谱范围/nm	480~960	449~950	900~2400	450~950	900~2400	480~1450	1400~3200
光谱分辨率/nm	7.62~29	2~7	3~12	2.4~6.5	3.6~9.5	2.4~9.4	7.6~24.9
总视场/°	∅7.3	8.5×8.5	∅3.6	8.5×8.5	∅3.6	4.17×4.17	4.17×4.17
像元数	256×256	256×256	1	256×256	1	256×256	1
信噪比/dB	≥100@ 太阳高度角 60°	≥31@ 反照率9%, 太阳高度角 45°	≥32@ 反照率9%, 太阳高度角 15°	≥33@ 反照率9%, 太阳高度角 45°	≥31@ 反照率9%, 太阳高度角 15°	≥34@ 反照率9%, 太阳高度角 45°	≥39@ 反照率9%, 太阳高度角 15°
功耗 /w	—	19.8		16.95		15.17	
重量/kg	—	4.675/探头 ~0.7/电学箱		4.675/探头 ~0.7/电学箱		5.57	
工作温度/°C	—	-20 ~ +55		-20 ~ +55		-25 ~ +65	
分光方式	傅里叶干涉	AOTF		AOTF		AOTF	
探测方式	环绕遥感	原位		原位		原位	

3 “天问一号”光谱仪器

“天问一号”作为中国首次火星探测任务,在国际上首次同时实现环绕探测、软着陆后原位巡视探测,主要配置3台光谱类载荷仪器,包括火星矿物光谱分析仪(MMS)、火星表面成分探测仪(Mars Surface Composition Detector, MarSCoDe)和火星多光谱相机(Mars MultiSpectral Camera, MSCam),如图3所示。

MMS是搭载在“天问一号”环绕器上的主要科学载荷之一,是典型的推帚式成像、光栅分光型成像光谱仪。其主要科学探测任务是获取火星表面可见近红外(0.4~1.0 μm)及近中红外(1.0~3.4 μm)谱段高分辨率光谱图像数据,分析火星表面矿物的类型、含量和空间分布,为火星化学成分和地质演化历史研究、火星资源勘探等研究提供科学数据。MarSCoDe和MSCam是搭载在祝融号火星车上的原位光谱探测载荷。MarSCoDe利用激光诱导击穿光谱(LIBS)主动光谱探测技术实现火星表面240~850 nm谱段高分辨率光谱数据,同时集成了短波红外(SWIR)光谱仪,共同实现火星表面主被动融合的光谱探测。MSCam通过多种滤光片滤光,实现多谱段的成像测量。MMS遥感探测与MarSCoDe和MSCam原位探测共同服务于火星表面物质成分的

调查和分析、巡视区矿物和岩石类型探测,表3展示了其性能指标。

火星矿物光谱分析仪MMS包括可见近红外(V-NIR)模块和近中红外(N-MIR)模块:V-NIR通道覆盖0.379~1.079 μm光谱范围,光谱采样间隔2.73 nm/band,光谱分辨率优于4 nm,利用CCD阵列探测器获取光谱图像;N-NIR通道覆盖1.033~3.425 μm光谱范围,光谱采样间隔7.5 nm/band,光谱分辨率优于11 nm,利用碲镉汞焦平面阵列(MCT FPA)获取光谱图像。MMS的瞬时视场(Instantaneous Field Of View, IFOV)为0.5 mrad,具有416个单元阵列用于星下观测,通过线阵推扫获取火星表面的光谱和空间信息,并利用像元合并实现空间及光谱维多种高光谱模式或多光谱成像模式光谱组合。MMS实物图如图3(b)所示。

火星表面成分探测仪MarSCoDe中LIBS光谱范围覆盖紫外至短波红外(240~850 nm),光谱分辨率在240~340 nm谱段约为0.19 nm,在340~540 nm谱段约为0.31 nm,在540~850 nm谱段约为0.45 nm。最佳探测距离为1.6~5 m。最远可探测7 m范围内目标。显微图像分辨率小于100 μrad。SWIR基于AOTF分光,光谱范围覆盖850~2400 nm,光谱采样间隔5 nm,光谱分辨率小于12 nm。MarSCoDe实物

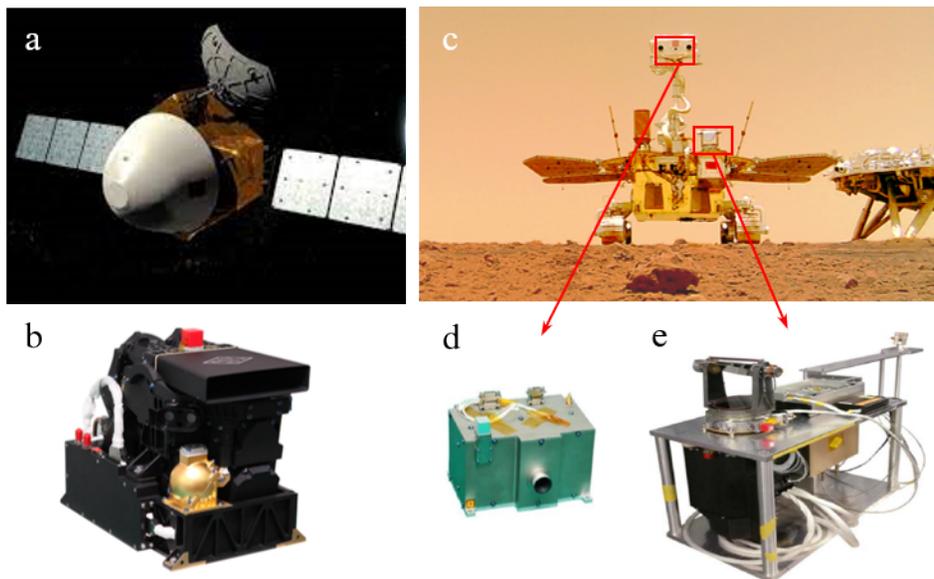


图3 天问一号及其光谱探测载荷:(a)天问一号环绕器示意图,(b)MMS实物图,(c)天问一号祝融号火星车实拍图,(d)MS-Cam实物图,(e)MarSCoDe实物图

Fig. 3 Tianwen-1 and its spectral detection payloads: (a) the schematic diagram of Tianwen-1 orbiter, (b) MMS, (c) image of Tianwen-1 Zhurong Mars rover taken on Mars, (d) MSCam, (e) MarSCoDe

表3 “天问一号”探测任务中的光谱载荷及其性能指标^{[8] [23] [24]}

Table 3 Performance indicators for near-infrared spectroscopy payloads on Tianwen-1 exploration mission

载荷名称	天问一号 MMS		天问一号 MarSCoDe		天问一号 MSCam
主要通道	V-NIR	N-MIR	LIBS	SWIR	
光谱范围/nm	379~1076	1033~3425	240~850	850~2400	480、525、650、700、800、900、950、1000
光谱分辨率/nm	2.96~3.90	8.36~10.91	0.19 @ 240~340 0.31 @ 340~540 0.45 @ 540~850	3~12	20@480、20@525、12@650、15@700、25@800、30@900、50@950、50@1000
总视场/deg	12	12	—	—	—
像元数	512×255	512×255	—	—	—
信噪比/dB	≥45 @ 太阳入射角 45°, 目标反照率 15%	≥33 @ 太阳入射角 45°, 目标反照率 15%	≥40	≥40 @ 太阳入射角 30°, 目标反照率 30%	—
功耗/W	44.9		64	≤8	
重量/kg	7.26/单机 0.83/热控件		16.4	1.65	
分光方式	光栅		光栅	AOTF	滤光片
探测方式	环绕遥感		原位	原位	

图和指向镜安装位置如图3(e)所示,通过向探测目标发射高能激光脉冲,高温烧蚀并气化产生等离子体,检测等离子体冷却过程中的特征发射光谱,实现目标元素成分组成的远程分析。MarSCoDe-LIBS能探测包括硅、铝、铁、镁、钙、钠、氧、碳、氢、锰、钛、硫在内的十余种元素,是我国首次将该项技术应用于深空探测领域。

火星多光谱相机 MSCam 服务于火星表面形貌特征与物质类型分布科学任务,配备八个窄带滤光片和一个对太阳成像的全色滤光片,可以获取9个谱段的成像及光谱数据;同时还设置了6个调焦补偿镜,可对不同成像距离探测目标实现遥感指令调焦或自动调焦。MSCam 位于祝融号桅杆顶部双目导航地形相机之间,如图3(d)所示。正常成像距离

是 1.5 m 至无穷远,有效像元数量 2048×2048。探测谱段和相应光谱分辨率为 480(20 nm)nm、525(20 nm)nm、650(12 nm)nm、700(15 nm)nm、800(25 nm)nm、900(30 nm)nm、950(50 nm)nm、1000(50 nm)nm 和全色谱段^[25]。

4 典型应用成果

4.1 月球光谱探测

如前所述,近年来光谱技术广泛应用于月球探测任务,由此产生了一系列重要科学成果,为月表矿物组成、空间风化以及月球的起源及演化等研究提供了独特视角的科学数据。月船 1 号上搭载的 M³ 首次获得了月球矿物、含水区域及温度分布图,如图 4(a)所示;特别是 2009 年 Pieters 等人^[26]利用 M³ 月球高光谱数据证实了月球两极区域可能存在 OH-或 H₂O,这改变了人们对月球是一个干燥星球的认识,使月球含水量探测成为国际研究热点。美国月球勘测轨道器上 LRO 搭载的 Diviner 对月球表面热环境进行了长期监测,获得了大量辐射测量数据,图 4(b)为由 Diviner 数据集得到的以月球中午(10~14 时)为中心的平均辐射亮温分布;J. P. Williams 等人^[27]据此创建了全月 0.5°/像素的空间分辨率,0.25 h 本地时间分辨率的昼夜温度网格地图数据集,有助于深入了解月球风化层的辐射和热物理特性。由该数据集生成的地图提供了月球表面能量平衡的全球视角,并揭示了月球表面热环境的复杂和极端性质。

嫦娥三号、四号搭载的 VNIS 成像光谱仪以及嫦娥五号搭载的 LMS 月球矿物光谱分析仪均已成功实现月面原位探测应用,获取了大量月表毫米级空间分辨率的原位成像及光谱探测数据。凌宗成团队^[28]利用嫦娥三号 VNIS 原位光谱数据分析获得了嫦娥三号着陆区及其附近新陨石坑中岩石和土壤成分和矿物学信息,发现了月表的一种新型月海玄武岩,该类岩石含有较为丰富的橄榄石和钛铁矿矿物,与之前的遥感研究推测一致。这项研究更为确切地表明橄榄石矿物成分趋向于富铁的矿物端元,将有助于月球晚期火山活动和岩浆演化机制研究。林扬挺团队^[29]利用嫦娥三号 VNIS 光谱数据研究着陆区月壤的化学组成和矿物组成,提取出了月球土壤的矿物模态组成,由此提出月球该区域在 25 亿年前仍可能泛滥大规模火山喷发熔岩的新观点,而不是之前科学家们认为的 31 亿年前。这项研究为月球晚期岩浆活动和地质演化提供了新的认识。李

春来团队^[30]对嫦娥四号 VNIS 在第一个月昼采集到的反射光谱数据做进一步分析,如图 4(c)和(d)所示,证明了月球背面南极-艾特肯盆地存在以橄榄石和低钙辉石为主的深部物质。该发现为解答有关月幔物质组成的问题提供了直接证据,对了解月球起源和演化模型提供了重要支撑。刘洋团队^[31]基于嫦娥四号在巡视区获取的新鲜撞击坑成像及光谱数据,首次在月表原位识别了年龄在一百万年以内的碳质球粒陨石撞击残留物。这将为月球水的起源、地月撞击体成分和类型的演化历史提供参考。图 4(e)和 4(f)为嫦娥四号探测到碳质球粒陨石的撞击坑光谱探测区域和 N66 区域的玻璃状物质修正的反射光谱。

4.2 火星光谱探测

迄今为止,人类通过对火星的探测,积累了大量火星光谱探测科学数据,形成了一系列科学研究成果,加深了对火星的认识与了解。Jean-Pierre Bibring 等人^[32]利用火星快车航天器上的 OMEGA 光谱仪绘制了火星全球矿物学地图,如图 5(a)所示,并提供了有关火星地质和气候历史的新信息。他们在最古老的地形中发现了火星历史早期由水蚀变形成的层状硅酸盐,硫酸盐是在第二个时代的酸性环境中形成的。从大约 35 亿年前开始,无水氧化铁是在缓慢的表面风化作用下逐渐形成,而液态水在演化历史上不起主要作用。John F. Mustard 等人^[33]利用火星勘测轨道器 CRISM 光谱仪也对火星上的水合硅酸盐矿物进行了观测,图 5(b)展示了 CRISM 和实验室探测的水合硅酸盐矿物的反射光谱。他们通过鉴定高岭石、绿泥石、伊利石或白云母,以及一类新的水化硅酸盐(水合硅酸盐),扩充了火星层状硅酸盐矿物学的多样性,表明了火星诺亚纪时代丰富多样的环境有利于居住。

火星上是否存在生命是人类火星探测最为关心的问题,甲烷的发现可能是火星生命存在的标志之一,2004 年,火星快车 Mars Express 探测器的行星傅里叶光谱仪(Planetary Fourier Spectrometer, PFS)首次探测到火星存在痕量甲烷的证据^[34],2012 年,好奇号火星车着陆火星表面后开始对大气中的甲烷进行检测,最早的探测并未成功检测出甲烷的痕迹,在持续观测五年后,根据好奇号的数据,Webster C R 报道火星甲烷背景值为 0.41±0.16 ppbv,且呈现重复性的季节波动^[35]。2016 年,欧空局与俄罗斯联合发射的痕量气体轨道器(Trace Gas Orbiter,

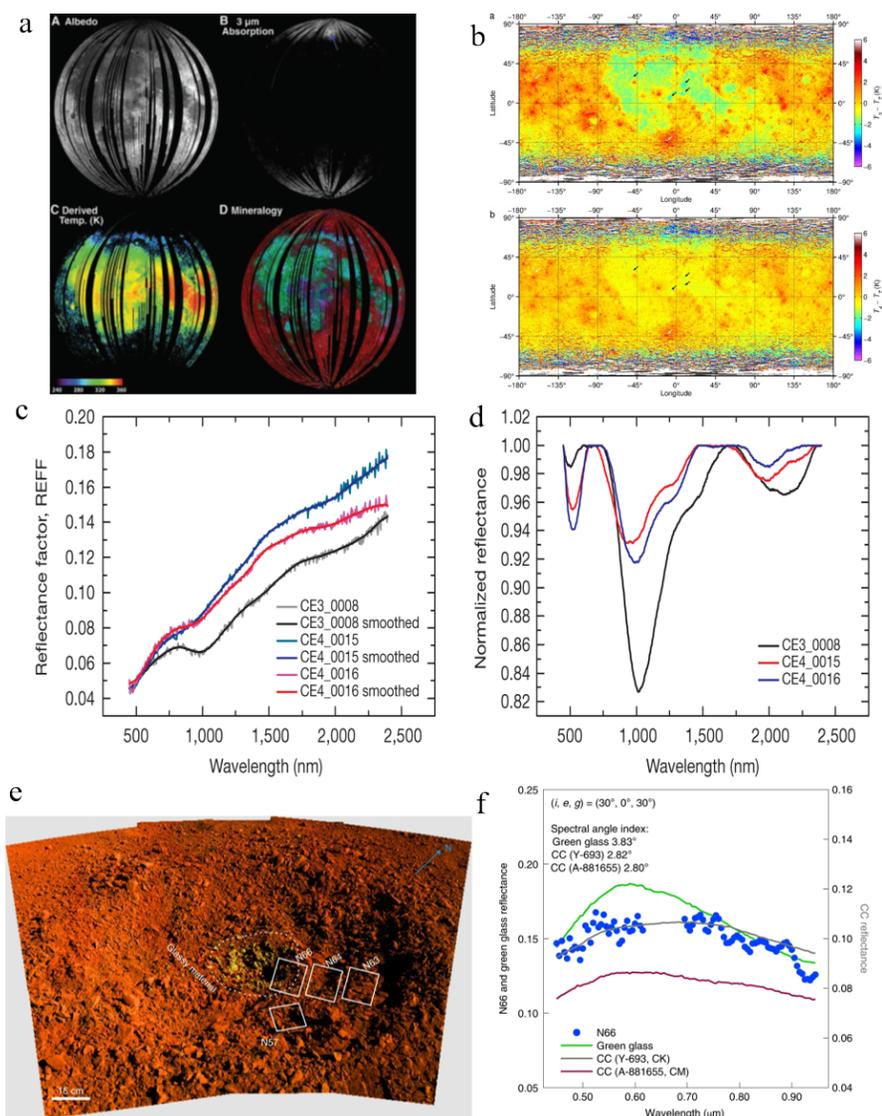


图4 近年光谱技术应用于月球探测任务产出的主要科学成果(a)基于M³高光谱数据得到的月球矿产、含水区域及温度分布图,(b)基于Diviner数据得到的月球辐射平均亮温分布,(c)VNIS获取的第一月昼月表CE4_0015、CE4_0016,以及CE3_0008探测点REFF数据光谱反射率,(d)包络线去除后归一化反射率,(e)嫦娥四号探测到碳质球粒陨石的撞击坑光谱探测区域,(f)VNIS探测区域N66玻璃状物质修正的反射光谱

Fig. 4 The main scientific results of spectroscopic techniques applied to lunar exploration missions in recent years (a) distribution of minerals, watery region and temperature on the moon detected by M³, (b) lunar thermal distribution obtained based on Diviner data, (c) spectral reflectance of the first lunar day lunar surface CE4_0015, CE4_0016, and REFF data at detection point CE3_0008 acquired by VNIS, (d) normalized reflectance after continuum removal, (e) impact crater spectral detection region of carbonaceous spherical meteorites detected by Chang'e-4, (f) VNIS reflectance spectra corrected for glassy material in N66

TGO)搭载更高灵敏度的光谱载荷,试图探究火星甲烷的奥秘,但是通过对南北半球的多个高度进行探测,暂未发现甲烷存在的信号^[36],还需更多的探测数据去揭开火星甲烷的谜团。

5 总结与展望

国内外光谱载荷在深空探测中获取了大量数据,成为多项科学产出的基础。我国的探月工程与

火星探测任务顺利开展,光谱载荷获取了大量新的科学数据,将不断在月球及火星科学研究展现中国智慧、贡献中国力量。光谱类载荷在深空探测领域的重要作用将日益显著,未来国际深空领域探测任务中基本都规划配置光谱载荷,美国2019年批准的月球开拓者(Lunar Trailblazer)小卫星计划,着重于了解月球的水的赋存形态(冰, H₂O 或 OH)、丰度和

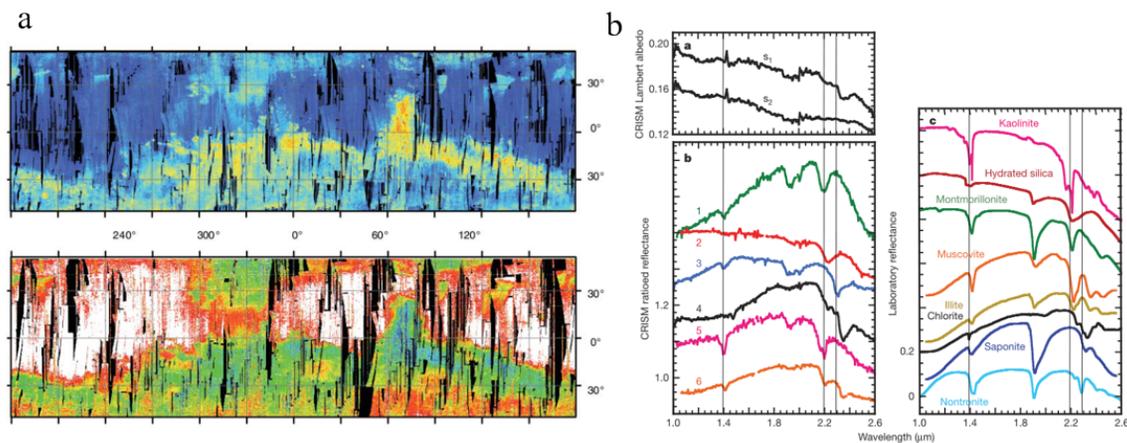


图5 (a) 辉石(上图)和无水纳米氧化铁(下图)的火星全球分布地图(b) CRISM和实验室探测的水合硅酸盐矿物的反射光谱
Fig. 5 (a) Global map of pyroxene (top) and anhydrous iron oxide nanoparticles (bottom), (b) reflectance spectra of hydrated silicate minerals probed by CRISM and laboratory

分布,以及月球潜在的随时间变化的水循环,搭载的高分辨率挥发物和矿物月球制图仪(High-resolution Volatiles and Minerals Moon Mapper, HVM3)和英国月球热成像仪(Lunar Thermal Mapper, LTM),通过对选定的关注区域进行联合测量,可以同时测量成分、温度和热物理性质。美国宇航局的挥发物调查极地探测巡视器(Volatiles Investigating Polar Exploration Rover, VIPER)将于2023年底被送至月球南极,其上携带有近红外挥发物光谱仪(NIRVSS)可获取1.6~3.4 μm光谱信息,近距离观察水冰的位置和浓度。用于探测木星特洛伊小行星群的“露西号”任务已于2021年10月发射升空,在接下来的12年探测中,将相继探访8颗不同大小、类型和位置的小天体。“露西号”载有两台光谱仪器:L’Ralph和L’TES,其中,L’Ralph由一台红外成像光谱仪和一台多光谱可视相机组成,用于探测特洛伊小行星表面硅酸盐、冰、有机物等的存在与分布;L’TES是一台热发射光谱仪,通过观察热红外光谱来测量特洛伊小行星的表面温度,了解表面物质的物理性质。NASA用于探测木卫二的欧罗巴快帆(Europa Clipper)任务预计在2024年发射,2030年抵达木星系,其上搭载的木卫二测绘成像光谱仪(Mapping Imaging Spectrometer for Europa, MISE)可以识别有机物、盐分、酸性水合物、水冰相、蚀变硅酸盐和放射性化合物,并绘制分布图。我国还规划对月球南极、小行星及彗星、太阳系边际、木星系等进行探测,其中嫦娥七号任务上将配备宽谱段红外光谱成像分析仪,宽谱段红外光谱成像分析仪在光谱范围将覆盖0.45~10 μm,光谱分辨率及空间分辨率等关

键性能指标具备综合优势,且具备更强的月表矿物、水、丰度的测量能力,重点针对月球南极及重点区域等实现更高精度的分布测量,了解月球水循环,确定水的丰度、局部分布和形式,为未来人类和机器人对月球及其资源的探索和利用提供支撑。我国也规划在2025年前实施近地小行星2016HO3及主带彗星311P的探测,通过单次任务实现小行星的伴飞、附着、采样返回和主带彗星的环绕探测。目前小行星探测任务共规划三台光谱仪器:可见红外成像光谱仪用来获取小行星及彗星表面0.45~5 μm谱段的高分辨率成像光谱数据,探测小天体表面物质组成;热辐射光谱仪用于获取小行星表面5.0~50 μm的热辐射光谱数据,探测小行星表面的热辐射特性、亚尔可夫斯基效应、表面矿物质分布;多光谱相机用于对小行星着陆区及采样区进行多光谱成像,用于小行星表面形貌和物质类型研究及辅助采样区目标选择。在2035年前后,我国还计划建设月球科研站,开展月球资源探测、月基对地对天观测、月球原位资源利用等科学活动和技术试验。

鉴于光谱仪的无损物质成分探测能力,光谱类载荷将会是未来国际深空领域探测任务重点配置的科学载荷之一,为更多的科学认知提供研究基础,推动人类对太阳系的认知,在研究天体起源与演化、找寻宇宙中其他生命存在的证据、分析地外天体的宜居性、探索太阳系的演变历程中发挥重要作用,为人类了解过去、探索未来提供依据。深空探测任务除继续追求性能提升,以及载荷的轻小型、低功耗、低数据率外,特别对环境适应能力有极

高的要求。如光谱仪在地外天体表面进行原位观测时,表面工作环境对光谱探测影响很大,温度(月球环境温度约 $-180\sim+130\text{ }^{\circ}\text{C}$,火星环境温度约 $-130\sim+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等^[37])、尘土影响(月尘、火星沙尘暴等)、未知杂光干扰等恶劣环境对光谱仪器的适应性提出考验;同时,原位光谱探测还面临探测目标的动态范围广、定量化溯源需求高的问题;遥感探测时,依据科学需求,往往需要探测低照度区域,如对月球南极进行水冰探测,对木星及其卫星的探测,目标光照极弱。

因此,进一步的深空探索,对光谱技术及其载荷提出了更高要求,需要突破的关键技术包括但不限于以下几个方面:1)光、机、电高度集成、低功耗设计;2)中长波光谱探测需要突破低温光学背景抑制;3)低照度目标,需要突破新型微弱目标信号检测技术;4)长寿命及高精度定量化技术;5)智能化、自适应探测技术。

同时,光谱探测模式不仅限于单一的遥感或者原位探测,而是向着实现环绕器和巡视器相互结合的探测模式发展;从单一被动或主动光谱探测向主被动光谱探测融合、多载荷协同探测模式转变;探测谱段从可见短波红外向中波、长波红外拓展。总体而言,通过理论、方法、技术、器件、系统、应用等多方位的科技突破,不断促进更多重大原创性的科学发现产生,服务于深空资源勘查及利用,是深空探测光谱技术领域永恒的追求,任重道远。

References

- [1] Li C, Wang C, Wei Y, *et al.* China's present and future lunar exploration program [J]. *Science*, 2019, **365**(6450): 238-239.
- [2] SUN H X, LI H J, ZHANG B M, *et al.* Achievements and Prospect of Payloads Technology in Chinese Lunar and Deep Space Exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*(孙辉先,李慧军,张宝明,等.中国月球与深空探测有效载荷技术的成就与展望. *深空探测学报*), 2017, **4**(6): 495-509.
- [3] Green R O, Pieters C, Mouroulis P, *et al.* The Moon Mineralogy Mapper (M3) imaging spectrometer for lunar science: Instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, **116**(E10).
- [4] Ennico K, Shirley M, Colaprete A, *et al.* The Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) Payload Development and Performance in Flight [J]. *Space Science Reviews*, 2012, **167**(1-4): 23-69.
- [5] Langevin Y, Poulet F, Bibring J P, *et al.* Summer evolution of the north polar cap of Mars as observed by OMEGA/Mars express [J]. *Science*, 2005, **307**(5715): 1581-1584.
- [6] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, *et al.* Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(E5).
- [7] ZHAO B C, YANG J F, CHANG L Y, *et al.* Optical Design and On-orbit Performance Evaluation of The Imaging Spectrometer for Chang'e-1 Lunar Satellite [J]. *Acta Photonica Sinica*(赵葆常,杨建峰,常凌颖,等.嫦娥一号卫星成像光谱仪光学系统设计与在轨评估. *光子学报*), 2009, **38**(03): 479-483.
- [8] He Z, Xu R, Li C, *et al.* Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) on the Tianwen-1 Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(2).
- [9] He Z P, Wu B, Xu R, *et al.* The detection mechanism and instrument characteristics of the Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) for the Tianwen-1 orbiter [J]. *Sci Sin Tec*(何志平,吴兵,徐睿,等.“天问一号”环绕器火星矿物光谱分析仪探测机理与仪器特性. *中国科学:物理学 力学 天文学*), 2021.
- [10] Wiens R C, Maurice S, Barraclough B, *et al.* The ChemCam Instrument Suite on the Mars Science Laboratory (MSL) Rover: Body Unit and Combined System Tests [J]. *Space Science Reviews*, 2012, **170**(1-4): 167-227.
- [11] Wiens R C, Maurice S, Robinson S H, *et al.* The SuperCam Instrument Suite on the NASA Mars 2020 Rover: Body Unit and Combined System Tests [J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(1).
- [12] Reess J M, Bonafous M, Lapauw L, *et al.* International Conference on Space Optics — ICSO 2018, 2018.
- [13] 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]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, **85**(8): 083104.
- [14] Zhou C, Jia Y, Liu J, *et al.* Scientific objectives and payloads of the lunar sample return mission—Chang'E-5 [J]. *Advances in Space Research*, 2021.
- [15] Liu J Z, Hu C B, Pang F C, *et al.* Strategy of deep space exploration [J]. *Sci Sin Tech*(刘继忠,胡朝斌,庞涪川,等.深空探测发展战略研究. *中国科学:技术科学*), 2020, **50**: 1126-1139.
- [16] Lin H L, Ding C Y, Xu X S, *et al.* Review on the in-situ spectroscopy and radar remote sensing on the Moon [J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*(林红磊,丁春雨,许学森,等.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*), 2021, **52**(4): 373-390.
- [17] Pei Z Y, Hou J, Wang Q. Applications of optical technology in lunar and deep space exploration in China (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*(裴照宇,侯军,王琼.光学技术在中国月球和深空探测中的应用(特约). *红外与激光工程*), 2020, **49**(05): 19-27.
- [18] LI C L, LIU J J, ZUO W, *et al.* Progress of China's Lunar Exploration (2011-2020) [J]. *Chinese Journal of Space Science*(李春来,刘建军,左维,等.中国月球探测进展(2011-2020年). *空间科学学报*), 2021, **41**(01): 68-75.
- [19] Korablev O I, Belyaev D A, Dobrolenskiy Y S, *et al.* Acousto-optic tunable filter spectrometers in space mis-

- sions [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2018, **57** (10) : C103-C119.
- [20] He Z P, Wang B Y, Lu G, *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.
- [21] Li C L, Xu R, Lv G, *et al.* Detection and calibration characteristics of the visible and near-infrared imaging spectrometer in the Chang'e-4 [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, **90**(10): 103106.
- [22] He Z P, Li C L, Xu R, *et al.* Spectrometers based on acousto-optic tunable filters for in-situ lunar surface measurement [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, **13**(2).
- [23] Xu W, Liu X, Yan Z, *et al.* The MarSCoDe Instrument Suite on the Mars Rover of China's Tianwen-1 Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2021, **217**(5).
- [24] Zou Y, Zhu Y, Bai Y, *et al.* Scientific objectives and payloads of Tianwen-1, China's first Mars exploration mission [J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67** (2) : 812-823.
- [25] LI C L, LIU J J, GENG Y, *et al.* Scientific Objectives and Payload Configuration of China's First Mars Exploration Mission [J]. *Journal of Deep Space Exploration* (李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置. 深空探测学报), 2018, **5**(5) : 406-413.
- [26] Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, *et al.* Character and Spatial Distribution of OH/H₂O on the Surface of the Moon Seen by M-3 on Chandrayaan-1 [J]. *Science*, 2009, **326**(5952): 568-572.
- [27] Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, *et al.* The global surface temperatures of the moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment [J]. *Icarus*, 2017, **283**: 300-325.
- [28] 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**(1) : 8880.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Yang Y, Li S, Zhu M-H, *et al.* Impact remnants rich in carbonaceous chondrites detected on the Moon by the Chang'e-4 rover [J]. *Nature Astronomy*, 2021.
- [32] Bibring J, Langevin Y, Mustard J, *et al.* Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data [J]. *Science*, 2006, **312** (5772) : 400-404.
- [33] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S M, *et al.* Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument [J]. *Nature*, 2008, **454** (7202): 305-309.
- [34] Formisano V, Atreya S, Encrenaz T, *et al.* Detection of methane in the atmosphere of Mars [J]. *Science*, 2004, **306**(5702): 1758-1761.
- [35] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, *et al.* Background levels of methane in Mars' atmosphere show strong seasonal variations [J]. *Science*, 2018, **360** (6393) : 1093(-+).
- [36] Korablev O, Vandaele A C, Montmessin F, *et al.* No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations [J]. *Nature*, 2019, **568** (7753) : 517-520.
- [37] Shen Z C, Ouyang X P, Gao H. Demand for Aerospace Materials and Technology for China's Deep Space Exploration [J]. *Aerospace Materials & Technology* (沈自才, 欧阳晓平, 高鸿. 我国深空探测对航天材料及工艺的需求. 宇航材料工艺), 2021, **51**(05): 1-14.