

# 嫦娥工程月球探测任务遥感科学研究进展

林红磊<sup>1</sup> 陈剑<sup>2</sup> 李超<sup>1</sup> 丁春雨<sup>3</sup> 肖潇<sup>4</sup> 黄俊<sup>4</sup> 籍进柱<sup>5</sup> 苟盛<sup>1</sup>,  
张金海<sup>1</sup> 魏勇<sup>1</sup> 林杨挺<sup>1\*</sup>

1.中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029; 2.山东大学,山东 威海 264209; 3.深圳大学,广东 深圳 518060;  
4.中国地质大学(武汉),武汉 430074; 5.中国科学院 地球化学研究所,贵阳 550081

**摘要:** 我国嫦娥一号至嫦娥五号任务已经成功完成了“绕、落、回”三步走战略,在月球全球和区域尺度、月表原位尺度、样品微观尺度获得了许多重要的研究成果,深化了对月球的认识。本文从月表物理特性、月表形貌及地质结构、月表物质组成和月表浅层结构四个方面回顾了嫦娥工程月球探测任务近 10 年来在遥感科学方面的部分研究进展,并展望了未来月球遥感科学的研究方向。

**关键词:** 月球; 嫦娥工程; 遥感; 光谱; 雷达; 地形地貌

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2023)03-0478-16 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2023.42.061

## Research progress of remote sensing for the Chang'E lunar exploration mission

LIN Hong-lei<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, LI Chao<sup>1</sup>, DING Chun-yu<sup>3</sup>, XIAO Xiao<sup>4</sup>, HUANG Jun<sup>4</sup>, JI Jin-zhu<sup>5</sup>,  
GOU Sheng<sup>1</sup>, ZHANG Jin-hai<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>1</sup>, LIN Yang-ting<sup>1\*</sup>

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
2. Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China;  
3. Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;  
4. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;  
5. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** China's Chang'E mission, from Chang'E-1 to Chang'E-5, has successfully completed the three-step strategy of "orbiting, landing and returning", and obtained many important scientific results at the global and regional scales of the Moon, the in situ scales of the lunar surface, and the microscopic scale of lunar samples, which have greatly deepened the understanding of the Moon. This article reviews the research progress in remote sensing science in the past 10 years of the Chang'E lunar exploration mission from four aspects: physical characteristics of the lunar surface, morphology and geological structure of the lunar surface, material composition of the lunar surface, and shallow lunar surface structure. In addition, the future research directions of lunar remote sensing science are prospected.

**Key words:** Moon; Chang'E mission; remote sensing; spectra; radar; topography

## 0 引言

自 20 世纪 50 年代末开始,月球探测就进入了空间探测器时代,并很快达到登月探测的一个高潮。1966 年苏联月球 9 号(Luna 9)任务首次实现了月球的软着陆,1969 年美国阿波罗 11 号(Apollo

11) 实现了人类首次载人登月,1970 年苏联月球 17 号(Luna 17)任务释放了第一个月球车。美国阿波罗计划的 6 次采样任务返回了约 382 kg 月球样品,建立起了对月球形成和演化认知的基本框架,为现代行星科学奠定了基础(Crawford, 2012; Pernet-Fisher et al., 2019)。基于月球样品的年代学分析,

收稿编号: 2023-046 2023-3-4 收到 2023-4-3 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42241106, 42241139, 42102280, 41941002); 中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目(IG-CAS-202001, IGGCAS-202203); 中国科学院重点部署项目(ZDBS-SSW-TLC001)

第一作者简介: 林红磊(1992—) 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: linhonglei@mail.iggcas.ac.cn.

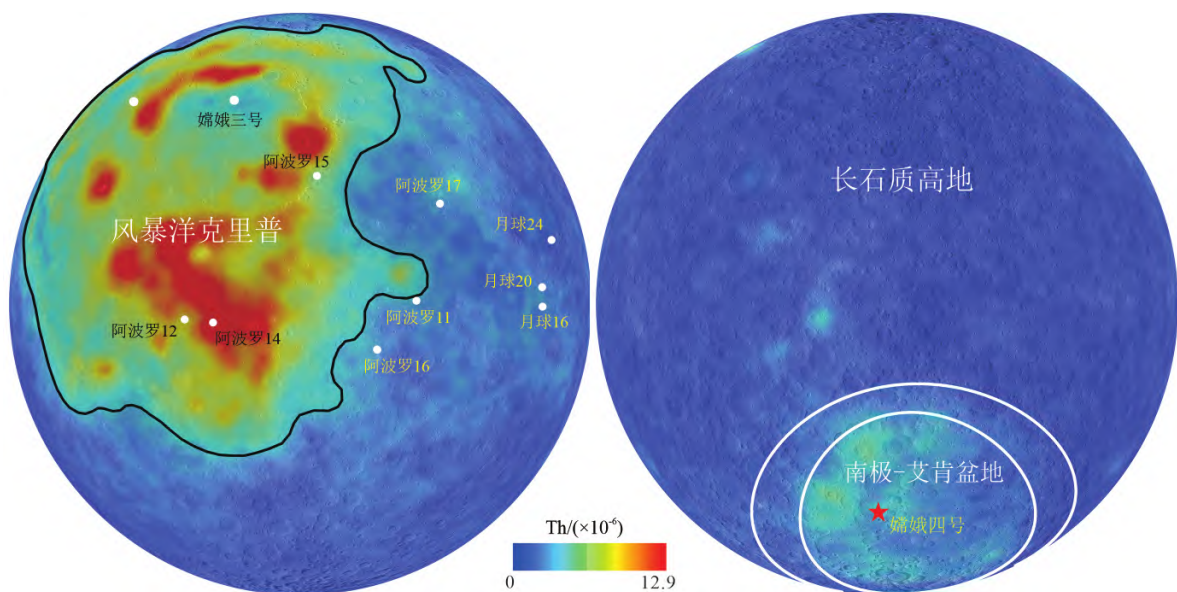
\* 通信作者简介: 林杨挺(1962—) 男, 博士, 研究员, 研究方向: 行星科学. E-mail: linyt@mail.iggcas.ac.cn.

建立了利用月球表面撞击坑估算年代的模型,刻画了月球早期的撞击历史,模型还应用于推断整个太阳系行星表面的年龄;月球样品的同位素组成等分析为月球起源提供了大量地球化学证据,验证并丰富了月球的形成理论,这不仅对了解地月系统演化至关重要,而且有助于我们对行星形成模型的一般理解;月球样品的研究约束了岩浆洋演化模型和月壳形成过程,以及早期岩浆作用和火山活动过程等;月壤样品记录了太阳风粒子、宇宙射线、微陨石等信息,揭示出空间环境与月面的作用过程。虽然阿波罗样品提供了月球科学的众多一级约束,但仍有许多问题需要进一步的探测和研究,比如有限采样位置的样品是否能够指示全球信息?样品实验室的分析结果是否能够代表原位未扰动月表风化层的情况?月球背面与正面特征二分性的原因?月球深部的物质组成?月球火山活动的结束时间?

为获得对月球全球性的认识,20世纪90年代,人们开始把关注点放在月球轨道遥感探测上,主要包括克莱门汀和月球勘探者号,利用它们所携带的相机、激光高度计、光谱仪等载荷提供月球地形地貌、矿物元素和地球物理方面的全球视图,并基于这些信息划分月球的主要地体,包括风暴洋克里普地体(PKT)、长石质高地地体(FHT)和南极-艾肯地体(SPA)(Jolliff et al., 2000),体现了月球全球的不均一性(图1),在全球和区域尺度上获得了对月球演化的新认识,其中月球样品的实验室分析为遥感探测提供了重要的标定。进入21世纪,日本、印

度、美国等国家相继发射了月球轨道探测器,以更高分辨率和更全面的方式进行遥感观测,获得了月球演化的新认识,比如,绘制了月球上纯斜长岩的全球分布情况(Ohtake et al., 2009)、获得了月球水的分布和含量及主要来源(Pieters et al., 2009; Li and Milliken, 2017)、发现了相比于阿波罗样品更年轻火山活动的分布(Braden et al., 2014)。

我国于2007年和2010年分别发射了嫦娥一号和嫦娥二号探测器,实现了对月球的全球性、整体性和综合性的环绕探测(李春来等, 2021),利用探测器携带的CCD立体相机、激光高度计、 $\gamma$ 射线谱仪、X射线谱仪、干涉成像光谱仪(IIM)和微波探测仪等载荷,获得了诸如国际上最高空间分辨率的全月数字地形模型、全月主要矿物和元素含量分布、国际上首次采用被动微波遥感技术测量获得全月表面月壤热物理特性和厚度等成果。继1976年月球24(Luna 24)采样返回任务之后,我国嫦娥三号任务再次成功完成了月球表面的软着陆(图1),着陆点位于雨海北部地区(44.12°N, 340.49°E),“玉兔号”月球车在着陆区进行了巡视,在巡视路径中利用全景相机、红外成像光谱仪、测月雷达和粒子激发X射线谱仪(APXS)对月表进行了原位探测,在着陆区形貌、月壤物理性质、物质组成和浅层结构方面获得了许多开创性的认识。在此基础上,嫦娥四号任务进行了难度升级,采用着陆器+巡视器+中继星的方案,于2019年成功着陆在月球背面的南极-艾肯盆地(45.457°S, 177.588°E),实现了人类



主要地体分布图据 Jolliff 等(2000)

图1 月球主要地体分布和原位探测任务着陆点

Fig. 1 Major lunar terranes and landing sites of in situ exploration missions

首次在月球背面的原位探测(Wu et al., 2019)。“玉兔二号”与“玉兔号”月球车携带的主要载荷基本相同,但由于嫦娥四号着陆区所处的位置特殊,在月球背面的撞击历史、太空风化作用、深部物质组成等方面带来了新的认识,对月球科学的发展具有重要的贡献。嫦娥五号任务是采样返回任务,基于返回样品获得了月球年轻火山活动的成因机制,除此之外,在采样之前着陆器上搭载的全景相机、月球矿物光谱仪和月壤探测雷达也对着陆区进行了原位的观测,获得了着陆区水含量、月壤结构、太空风化等方面的重要成果。本文主要介绍近10年来利用嫦娥一号至嫦娥五号探月任务数据在月球遥感科学研究中所取得的主要进展。

## 1 月表物理特性

### 1.1 月表风化层的热物理特性

全面了解月表风化层的热物理性质对于理解月球的撞击过程、火山活动及月壤演化过程具有重要意义,同时在模拟月球挥发物的潜在位置和含量方面也具有重要作用。其中,月表的温度是关键性的物理参量。嫦娥一号和二号任务搭载的微波辐射计可以探测月球表面的微波辐射亮温、估算月表物理温度(Ouyang et al., 2010)。基于微波辐射计探测数据获得了全月面微波亮温的空间分布(Zheng et al., 2012)、月表物理温度(Gong and Jin, 2012; 李芸等, 2013; Meng et al., 2019)。为了多维度地观测月球浅表层的亮温分布,微波辐射计使用四个频率不同的通道,分别为3、7.8、19.35和37 GHz(Ouyang et al., 2010),不同频率的通道对于月球浅表层的探测深度和垂直分辨率存在差异性(Zheng et al., 2012)。全月球表面微波亮温的分布图可以用于全月球月壤厚度的反演以及月球内部热流的研究(Fa and Jin, 2007; Zheng et al., 2012)。

月表温度在光谱上也有明显的响应。“玉兔号”月球车获取的嫦娥三号着陆区光谱表明,月表高温热辐射会导致 $2\ \mu\text{m}$ 之后的反射率抬升(Wu and Hapke, 2018)。“玉兔二号”月球车通过对月表同一区域在同一月昼不同时刻进行光谱测量,得到与“玉兔号”月球车相同的结论(Lin et al., 2021; Wu et al., 2021),并利用模型反演出,嫦娥四号着陆点当地时间14:28~14:41期间的表面温度为 $(346\pm 8)\text{ K}$ (Lin et al., 2021)。此外,Wu等(2021)还利用蒙特卡洛反演方法直接求解了月壤温度与发射率,并发现月表热辐射特性受微尺度粗糙度影响显著,与平面模型温差可达7~10 K。过去对月表

温度特性的研究主要依靠宏观遥感数据以及热红外波段,嫦娥四号在微观尺度和短波方面为月壤温度研究提供了补充。

嫦娥四号着陆器还首次直接原位测量了月球背面的月壤温度(Xiao et al., 2022)。在着陆器的底部安装有四个温度测量设备,它们与月面直接接触并每900 s测量一次数据(精度为0.3 K)。结果表明,月昼时的月表温度主要与太阳辐射和周围环境热辐射有关,而月夜时的月表温度变化主要受月壤的热物理性质影响,利用月夜温度变化通过数值模拟方法得到了月壤的热导率,其热传导分量在表面约为 $1.53\times 10^{-3}\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,在1 m深度约为 $8.48\times 10^{-3}\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Xiao et al., 2022)。月面的热物理性质原位测量为遥感观测提供了重要的地面真值,对未来全球温度观测的分析和解译至关重要。

### 1.2 月表风化层的介电性质

微波辐射计还可以在大尺度全球范围内得到月表介电常数的分布(王振占等, 2009),结果表明全月表的介电常数值与阿波罗月壤样品的实验室测量结果一致。阿波罗样品的测量表明典型月壤样品的介电常数值约为3。基于嫦娥三号测月雷达图像中的双曲线回波特征,得到了月表风化层内介电常数的分布情况(Ding et al., 2020)。结果表明,嫦娥三号着陆区最上层4 m的风化层平均介电常数为~3.2,表明嫦娥三号浅层~4 m内均为细粒的月壤物质。同时也得到了嫦娥四号着陆区月壤层的介电常数分布,反映着陆区的月壤层更厚(Dong et al., 2020; Song et al., 2021)。在探测月球次表层时,一些探测区域存在电磁波被吸收的现象,从而限制了雷达的探测深度,前人认为这是与当地浅表层的钛铁含量较高有关,钛铁含量与月壤的损耗角正切有直接关系。基于嫦娥二号微波辐射计的数据反演得到了全月球表面损耗角正切的分布情况,表明在月球高地地区和富含钛铁矿的区域损耗角正切存在明显的差异性(Feng et al., 2020; Feng and Siegler, 2021)。例如,大部分月球高地的损耗角正切在0.007至0.008之间,而在富含钛铁矿的区域其损耗角正切通常在0.01至0.017之间。同时,在一些撞击坑和新鲜溅射毯上也显示高损耗角正切的特性(Feng and Siegler, 2021)。

### 1.3 月表风化层的光度特性

目前月球采样返回任务、遥感观测所获取的样品和数据基本都属于月表风化层的信息,因此研究其光度特性有助于了解月壤的演化过程。利用嫦娥一号IIM光谱数据提取出了不同月表区域

的相位曲线,并反演了光度参数,进而对光谱数据进行光度校正,有效提高了全球数据的镶嵌拼接质量(Wu et al., 2013)。通过提取和拟合“玉兔号”月球车全景相机所拍摄图像的相位曲线,得到了月表风化层的光度物理参数(Jin et al., 2015),结果表明嫦娥三号着陆点附近月壤颗粒前向散射较强,并观测到显著的冲效应。同样地,利用“玉兔二号”月球车全景相机数据反演出了嫦娥四号着陆区月表的光度特性,发现与嫦娥三号相比,嫦娥四号着陆区月壤具有更强的前向散射(Jiang et al., 2021)。此外,“玉兔二号”月球车的红外成像光谱仪获取了同一目标在不同观测几何角度条件下的光谱,据此推导出可见光-近红外全谱段的月壤光度参数。利用 Hapke 辐射传输模型反演得到了相函数参数来描述月表的光度特性,包括 Henyey-Greenstein(HG)相函数和 Legendre 多项式形式的相函数(Lin et al., 2020a; Yang et al., 2020b),结果表明月表风化层的光度参数随波长而变化,表现出前向散射特征,与全景相机分析结果一致。基于月表光度参数可以构建光谱的光度校正模型,将月球车所获取的数据校正到标准角度,便于与实验室和其他载荷数据进行对比分析,并有助于光谱的正确解译(Lin et al., 2020b; Qi et al., 2020)。嫦娥三号和嫦娥四号任务获取的原位月壤光度特性参数为遥感光谱的光度校正、解混提供了重要参数输入和标定参考信息。

#### 1.4 月表风化层的成熟度

空间风化是无大气天体表面暴露在严苛的空间环境中所经历的一系列变化过程的总称。月球几乎没有大气和强磁场,流星体、微流星体、太阳风、宇宙射线等长期作用于裸露的月球表面,使得月表物质的物理化学性质发生改变。月壤颗粒表面存在很薄的一层由太空风化作用产生的亚微米尺度非晶质层,还分布有纳米级大小的亚微观铁单质颗粒。亚微观铁的含量可以指示月表的成熟度,即月壤在空间环境中的暴露程度。利用“玉兔号”月球车原位光谱反演出的亚微观铁含量表明,嫦娥三号着陆区的月壤属于亚成熟月壤,这与嫦娥三号着陆区的年轻玄武岩地层一致(Wang et al., 2017)。另外,月面最表层未受着陆器降落时羽流影响的月壤与受影响区域月壤相比表现出更强烈的空间风化特征(Wang et al., 2017)。而嫦娥四号着陆区的月壤属于成熟月壤,这与着陆区已经历 30 多亿年空间风化作用的地质背景相一致(Gou et al., 2020a)。但是,月壤的亚微观铁含量随月球车

与着陆器距离远近并未产生明显变化,说明嫦娥四号着陆区月壤的快速形成过程充分混合了最表层已高度成熟的月壤。结合嫦娥五号采样区的原位光谱和月壤样品的实验室光谱数据,得到嫦娥五号采样区风化层的成熟度较高,月表暴露年龄约为 2.4~3.0 亿年,表明富铁玄武岩中亚微观金属铁产率更高(Lu et al., 2023)。通过对嫦娥五号采样前后未扰动和扰动月表的可见-近红外反射光谱分析,发现其光学成熟度和亚微观铁含量并未发生明显变化,可能表明月壤表层经历了快速翻耕和充分混合作用(Wu et al., 2022)。嫦娥三号、嫦娥四号和嫦娥五号在月球正面和背面的原位测量以及与样品的实验室测量对比研究,提供了国际上前所未有的光谱数据集,来探究未受扰动月表和实验室月壤样品之间的光谱差异及其揭示的空间风化特征,对于开展月球正面和背面空间风化作用比较分析,以及深刻认识空间风化作用的全球性特征具有重要意义。

## 2 月表形貌及地质结构

月球形貌与构造特征是理解月球地质演化过程的重要指示,基于嫦娥一号和嫦娥二号的 CCD 立体相机和激光高度计数据获得了月球全球的高分辨率影像,其中利用嫦娥二号数据获得了月球全球 7 m 分辨率的三维立体影像(Zhao et al., 2011),综合嫦娥二号影像数据和 LRO 激光高度计数据,利用组合的区域网平差确保月球地形模型的精度,获得了 20 m 分辨率的数字高程模型(Wu et al., 2014a)。基于嫦娥一号和嫦娥二号的高分辨率影像和地形数据,结合国际数据,进行全月撞击坑自动识别(魏士俨等, 2013; 王娇等, 2014)指出撞击坑的数量与其直径存在较强的反向相关关系,反映了月球表面小型撞击事件的发生几率远大于大型撞击事件的发生概率。Yang 等(2020a)基于嫦娥探月任务全球地形产品利用深度神经网络迁移学习的方法,识别出 109 956 个新撞击坑,极大更新了现有的月球撞击坑数据库,为月表定年、月球撞击历史等问题的研究提供了重要支撑。通过地形建模、图像处理、撞击坑识别等分析结果全面地认识了嫦娥三号着陆区的地质特征(Wu et al., 2014b),在着陆区具有许多小的、新鲜的撞击坑,具有不同退化程度、岩石碎屑,而岩石碎屑主要位于新鲜撞击坑的内部和边缘,为嫦娥三号的着陆探测提供了重要参考。

嫦娥三号、四号和五号任务是就位探测和采样

返回任务,所携带的降落相机、地形地貌相机、全景相机及测月雷达,为在更精细的尺度上研究月球形貌与构造提供了丰富可靠的数据。嫦娥三号着陆在一个直径约为450 m的年轻撞击坑边缘,“玉兔”月球车在这个撞击坑的溅射毯上行走了约114 m,获得了沿途高分辨率的影像。形貌分析和解译表明,这个450 m直径的撞击坑形成于哥白尼纪。在该撞击坑很多大的石块中,距离“玉兔”行走路线最近的“龙岩”长约4 m,高约1.5 m,表面显示粗粒结构,可能是由粗粒斜长石和/或辉石、橄榄石等矿物(集合体)构成,与地球上的辉长岩较为相似,而显著不同于以往阿波罗采集到的月海玄武岩样品(Xiao et al., 2015)。在“玉兔”月球车的7个路径点,识别了582块直径大于0.05 m的岩块,对岩石的直径-频率分布进行统计,有助于认识该地区的地质历史以及对着陆与月球车导航具有重要意义(Di et al., 2016)。嫦娥四号任务的“玉兔二号”月球车在月球背面进行了更长时间的巡视探测,在更大的范围获得了月表的精细化地形地貌特征,利用全景立体影像制作的5 cm分辨率DEM及已有中低分辨率的DEM,识别和量测了着陆区的线性溅射物地形特征,发现着陆区所覆盖的溅射物厚达约70 m,最上层的东北-西南向线性溅射物来自芬森坑,叠加在东南-西北向的艾德勒坑的溅射物上,结合撞击坑数值模拟,发现玉兔二号所探测的月球物质是来自南极-艾肯盆地基底,而不是着陆区下部的玄武岩(Di et al., 2019)。利用轨道器影像、着陆器降落相机影像、巡视器导航相机及全景相机影像等多源数据,基于摄影测量地形制图和视觉定位方法技术,制作了米级至厘米级分辨率的数字高程模型和数字正射影像图等产品,业务化应用于巡视器月面遥操作任务,并支持着陆区形貌与地质构造分析等科学研究(Liu et al., 2020)。

月球表面的地质构造要素主要包括环形构造、线性构造、地体构造及大型盆地构造等,对月球构造的识别,对理解和重建月球地质构造演化历史具有重要意义。陈建平等(2014)基于嫦娥一号数据完成了全球首幅覆盖月球典型区域的构造纲要图——《1:250万虹湾幅月球构造纲要图》的编制,对月球的构造类型进行了系统详细的描述和解释,并编制了澄海-静海地质图(陈建平等, 2014)。丁孝忠等(2014)编制的月球北极地质图,也充分体现了月表构造类型及空间展布特征。李婧等(2014)和王楠等(2014)以嫦娥一号影像数据和LOLA激光高度计数据为基础,分别以澄海、静海等为研究区

域,进行线性构造的自动提取和定量提取,提高了解译线性构造的效率和精度,为进一步研究构造演化提供了基础。以嫦娥工程数据为基础,结合国际其他探测数据,研究月表形貌、构造、物质组成、年代特征等内容,完成了世界第一幅1:250万月球全月地质图(Ji et al., 2022),系统表达了月壳的综合地质信息(图2)。该图件将为未来国际月球探测提供基础性数据参考。

## 3 月表物质组成

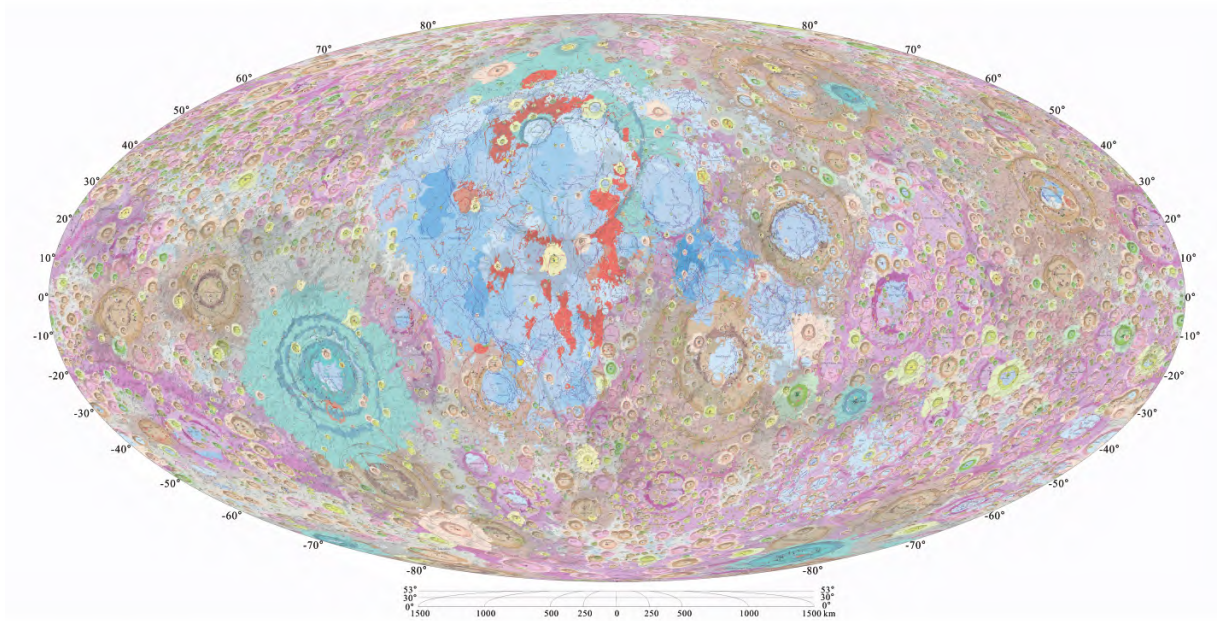
### 3.1 轨道遥感探测

嫦娥一号IIM作为我国首个月球探测成像光谱仪,致力于获取月表可见近红外光谱信息并分析物质成分,在轨期间获得了大量成像高光谱数据,覆盖了月表南北纬70°范围内约84%面积(Ling et al., 2011; Wu et al., 2012; Yan et al., 2012)。Shuai等(2013)基于IIM数据利用多端元解混的方法绘制了月球主要矿物的分布图,Wu(2012)基于IIM光谱数据利用偏最小二乘回归方法获得了全月主量元素和镁值的高分辨率分布图,凌宗成等(2016)通过对IIM数据重新定标获得了更为准确的光谱数据,在此基础上反演得到全月FeO、TiO<sub>2</sub>丰度分布图。随着神经网络等机器学习算法在月球科学研究领域的推广,化学成分与光谱特征之间的非线性关系也得到了更好的体现,有利于基于光谱反演更为准确的元素含量。利用支持向量机改进了基于嫦娥一号IIM数据的月表TiO<sub>2</sub>丰度反演方法,与月壤样品的实验室化学成分真值相比,该方法的预测均方根误差仅为0.27%,预测值与真实值的相关性高达99.72%(Wang and Zhu, 2013)。Xia等(2019)则利用神经网络算法,获得了高分辨率(~200 m)的月表主量元素与Mg<sup>#</sup>分布图。

除了可见近红外成像光谱数据之外, $\gamma$ 射线与X射线等高能探测数据也可以解译全月化学元素分布。Chen等(2016)利用嫦娥一号 $\gamma$ 射线谱仪数据获得了全月放射性元素(K、Th、U)的丰度分布图。相比嫦娥一号,嫦娥二号 $\gamma$ 射线谱仪具有更高的能量分辨率、探测效率和稳定性。采用能窗技术的初步分析结果表明,嫦娥二号获取的月表 $\gamma$ 射线谱中放射性元素与主量元素的特征峰分布明显,数据质量优于月球勘探者号的观测(马涛等, 2013)。根据嫦娥二号 $\gamma$ 射线谱仪数据反演出的月表K元素丰度分布图与以往的观测结果基本一致,但首次发现危海与东海的K元素丰度与周围区域相比更高,说明这两个盆地的成盆撞击事件可能穿透了月壳



全月地质图



一、外动力地质要素

(一) 撞击坑物质

- 1 哥白尼纪
  - Cccc 不连续溅射物
  - Cccc 连续溅射物
  - Ccw 坑壁物质
  - Ccf 坑底物质
  - Cccp 中央峰物质
- 2 埃拉托逊纪
  - Eccc 连续溅射物
  - Ecw 坑壁物质
  - Ecf 坑底物质
  - Eccp 中央峰物质
- 3 雨海纪
  - (1) 晚雨海纪
    - Iccc 连续溅射物
    - Icw 坑壁物质
    - Icf 坑底物质
    - Iccp 中央峰物质
  - (2) 早雨海世
    - Iccc 连续溅射物
    - Icw 坑壁物质
    - Icf 坑底物质
    - Iccp 中央峰物质

(二) 大型盆地建造

- (3) 雨海纪末细分
  - Iccc 连续溅射物
  - Icw 坑壁物质
  - Icf 坑底物质
  - Iccp 中央峰物质
- 4 酒海纪
  - Nccc 连续溅射物
  - Ncw 坑壁物质
  - Ncf 坑底物质
  - Nccp 中央峰物质

- 5 艾肯纪
  - Acce 连续溅射物
  - Acw 坑壁物质
  - Acf 坑底物质
  - Accp 中央峰物质
- 6 未确定时代
  - ccc 连续溅射物
  - cw 坑壁物质
  - cf 坑底物质
  - ccp 中央峰物质

- 1 雨海纪
  - Ibc 溅射物建造
  - Ibg 盆缘建造
  - Ibw 盆壁建造
  - Ibb 盆底建造
  - Ibr 峰环建造
  - Ibp 中央峰建造
- 2 酒海纪
  - Nbc 溅射物建造
  - Nbg 盆缘建造
  - Nbw 盆壁建造
  - Nbb 盆底建造
  - Nbr 峰环建造
  - Nbp 中央峰建造

(三) 构造形迹

- 1 线性构造
  - 撞击坑链
  - 撞击断裂
- 2 环形构造
  - 撞击坑
  - 隐伏撞击坑
  - 雨海纪撞击盆地环
  - 酒海纪撞击盆地环
  - 艾肯纪撞击盆地环

二、内动力地质要素

(一) 岩石建造

- 1 月海玄武岩
  - vl 极低钛玄武岩
  - l 低钛玄武岩
  - ml 中钛玄武岩
  - h 高钛玄武岩
  - vht 极高钛玄武岩
- 2 非月海岩石
  - 镁质岩套
  - 碱性岩套
  - KREEP玄武岩
- 3 其他特殊岩石
  - KREEP岩套
  - 镁质斜长岩套
  - 亚铁斜长岩套
  - 亚铁斜长岩套
  - 纯斜长岩
  - 尖晶石斜长岩
  - 富橄辉石岩套
  - 火成碎屑岩
  - 硅质岩套

(二) 构造

- 1 线性构造
  - 皱脊
  - 月槽
  - 月溪
  - 叶状陡坎
  - 坑底断裂
  - 浅层断裂
  - 推测深部断裂
- 2 环形构造
  - 穹窿
  - 质量瘤
  - 火山口

三、特殊要素

- 嫦娥探测器着陆点
- Luna探测器采样点
- Apollo探测器着陆点
- 高程点及高程/m
- 金钉子位置
- 地质界线
- 推测地质界线
- 岩石地层单元模式年龄

据 Ji 等(2022) 修改

图2 月球地质图

Fig. 2 Geologic map of the Moon

而挖掘出更深处的物质 (Zhu et al., 2013)。结合 K 元素、FeO 丰度分布图和玄武岩单元模式年龄数据, 发现东海盆地内的月海玄武岩可能是由同一个相对均一的源区多次喷发形成 (Zhu et al., 2015)。Wang 等(2016) 基于嫦娥二号  $\gamma$  射线谱仪反演获得了 Th 元素丰度分布图, 由于缺少中子谱仪数据的配合, 嫦娥轨道器  $\gamma$  射线谱仪数据在反演月表非放射性的主量元素丰度方面存在困难。鉴于嫦娥二

号与月球勘探者号任务具有相同的运行轨道高度, 陈剑等(2016) 借助月球勘探者号中子谱仪数据对嫦娥二号  $\gamma$  射线谱仪数据进行了热中子校正, 最终获得了首张源自我国  $\gamma$  射线谱仪遥感探测数据的全月 Fe 元素丰度分布图, 可与 IIM 等成像光谱数据解译的 FeO 丰度分布图进行对比验证。

X 射线谱探测技术通常作为  $\gamma$  射线谱探测的重要补充。由于在轨运行期间时值宁静期, 太阳活动

水平较低,嫦娥一号 X 射线谱仪未能获得有效的数据积累用于全月化学成分解译。随着太阳活动周期变化,嫦娥二号 X 射线谱仪经历了多次太阳爆发事件,得以实现全月化学成分探测。Dong 等(2016)基于嫦娥二号 X 射线谱仪数据解译了首个全月 Mg/Si、Al/Si 分布图,发现月海区域的 Mg/Si 更高,月陆区域偏低,而 Al/Si 的分布则与 Mg/Si 相反。Ban 等(2014)利用一次太阳 M 级爆发事件期间嫦娥二号 X 射线谱仪的监测数据,定量反演出了风暴洋中 6 个探测区域的 Mg、Al、Si、Ca、Fe 元素丰度。

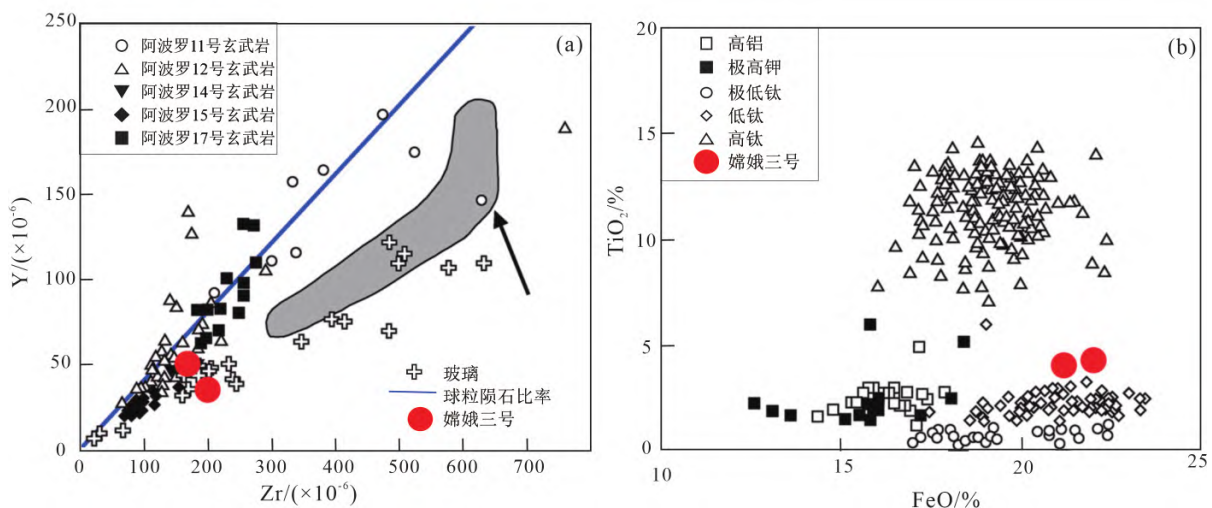
嫦娥一号和嫦娥二号任务获取的元素分布对于识别月壳物质类型和评估全月不同地体的元素含量发挥了重要作用,为理解月球的形成和演化历史提供了重要信息,同时也为编制基于我国自主探测数据的月球岩石类型分布图提供了第一手资料(Wang and Zhao, 2017)。基于此建立了一套月球表面岩石分类体系,通过制定分类指标、编图流程和方法、图示图例,应用 GIS 平台完成了 1:250 万月球岩石类型分布图,总结了月表不同岩性单元的岩石学特征及其构造环境(Chen et al., 2022a; Ji et al., 2022)。嫦娥一号和嫦娥二号的红外光谱和  $\gamma$  射线、X 射线谱仪数据在月表物质成分尤其是主量元素反演方面仍具有较大的应用潜力,有待进一步挖掘。

### 3.2 原位遥感探测

嫦娥三号和嫦娥四号任务月球车携带的全景相机和红外成像光谱仪可以获取超高分辨率( $< 1 \text{ mm/pixel}$ )的月表影像与高光谱数据,在获取巡视区物质成分特征与岩石类型等方面发挥了重要作用(林红磊等, 2021)。另外,嫦娥三号月球车

上的 APXS 能够测量月表的主微量元素含量。嫦娥五号任务除了采样返回之外,同样也获取了采样区的图像和红外光谱数据,反演得到采样区的矿物组成和水含量(Lin et al., 2022; Liu et al., 2022; Wu et al., 2022)。

基于“玉兔号”月球车获取的嫦娥三号着陆区的月表红外光谱数据,利用光谱匹配、Hapke 辐射传输模型、修正高斯模型等方法获得了着陆区的矿物组成,结果表明着陆点风化层中具有较高含量的橄榄石和高钙辉石(Zhang et al., 2015a; Ling et al., 2015; Wu and Hapke, 2018),结合 APXS 的元素含量结果(图 3),确定嫦娥三号探测到了一种新型玄武岩,并提出可能是由富含 Fe 和 Ti 的月幔源区低程度部分熔融形成,或在其母岩浆形成和上侵过程中混入了克里普组分(Ling et al., 2015; Zhang et al., 2015b)。嫦娥四号作为嫦娥三号的备份任务,着陆在月球背面的南极-艾肯盆地,由于该盆地具有大且深的特点(深达 13 km),提供了探测月球深部成分信息的机会,这对于限定月球的形成与演化历史至关重要。基于“玉兔二号”测量的嫦娥四号着陆区月表光谱,利用不同模型方法从不同角度对着陆区物质的来源和成因以及对月球深部物质的启示进行了约束(Li et al., 2019a; Hu et al., 2019; Gou et al., 2019, 2020b; Chen et al., 2020, 2022b; Huang et al., 2020; Lin et al., 2020c; Ma et al., 2020; Liu et al., 2021; Zeng et al., 2021; Liu et al., 2022)。在“玉兔二号”巡视路线上识别出多种岩石类型,指出了不同物源储库(冯·卡门玄武岩、南极-艾肯撞击熔融、月幔物质、壳源溅射物)来源的可



据 Zhang 等(2015b) 修改

图 3 嫦娥三号着陆区物质组成

Fig. 3 Composition of the lunar soils at the Chang'E-3 landing site



能性。

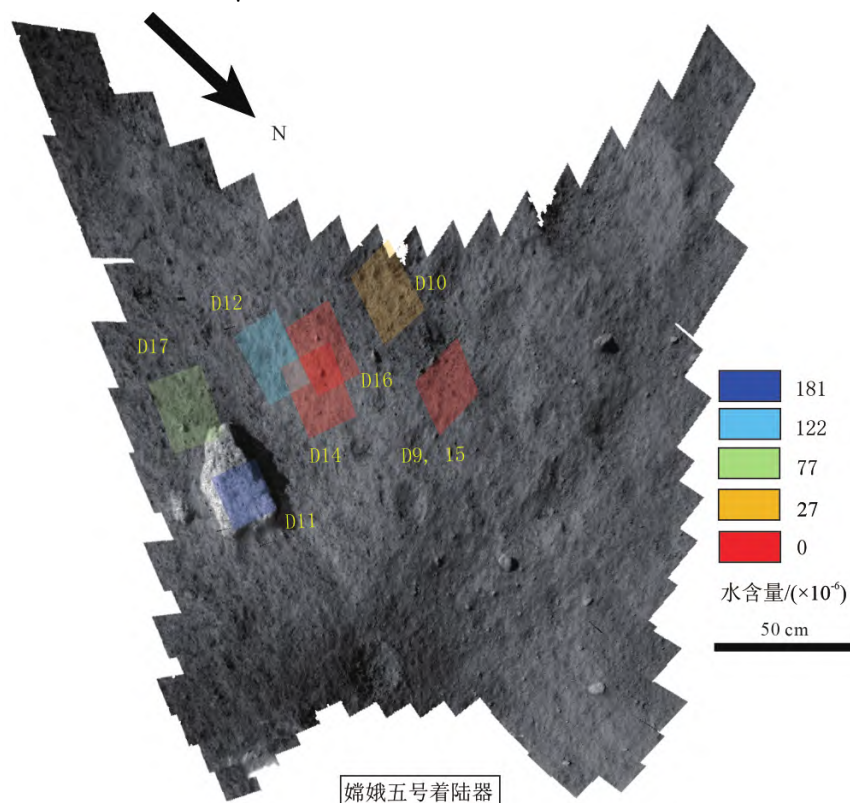
“玉兔二号”月球车在巡视过程中发现月球表面存在许多充满表土角砾的小撞击坑,与被细粒月壤覆盖的普通撞击坑明显不同。仅在任务的前12个月昼里,月球车在行驶路径上就观测到了超过45个随机分布的这种小撞击坑,它们的直径从几十厘米至几米不等(Lin et al., 2020d)。月球车抵近了其中一个充满表土角砾的小坑进行了详细探测,发现了具有特殊光泽的神秘“胶状”物质,通过光谱分析发现它们与阿波罗月球样品中的撞击熔融角砾岩类似(Gou et al., 2020c),在其中识别出大量的撞击玻璃(Lin et al., 2020d),据此提出月壤形成中的循环过程——月壤是在反复撞击砸细又重新胶结成岩的过程中不断演化成熟,这为进一步理解月壤的形成机制提供了新的视角(Lin et al., 2020d)。通过进一步的定量化分析, Yang等(2021)推测其中可能还存在外来碳质小行星撞击体物质的混入,该“胶状”物质中碳质陨石组分质量占比达到40%以上。这些观测对于理解月球的撞击过程和月壤演化过程提供了新的认识。

嫦娥五号着陆器携带的光谱仪在嫦娥三、四号任务的基础上将波长范围延长至 $3.2\ \mu\text{m}$ ,除了探测

月表矿物组成外,还具备了测量月表水的能力(Xu et al., 2022)。通过光谱解混得到了与嫦娥五号样品实验室分析结果以及着陆区轨道光谱分析结果一致的矿物组成,单斜辉石是采样区月壤中的主要铁镁质矿物(Wu et al., 2022)。Lin等(2022)和Liu等(2022)通过校正嫦娥五号原位光谱的月表高温热辐射影响,在 $3\ \mu\text{m}$ 附近识别出水( $\text{OH}+\text{H}_2\text{O}$ )的光谱特征。根据光谱吸收强度估算出采样区月表风化层中最高含有 $120\times 10^{-6}$ 的水(图4),并推测这些水应主要来自太阳风的注入;此外,着陆器附近的一块浅色岩石比周围的风化层表现出更强的水吸收特征,成分分析表明它可能来自一个比嫦娥五号着陆区更古老的玄武岩单元,如果估算月表风化层含水量的模型适用于岩石,那么这块岩石中约含 $180\times 10^{-6}$ 的水,可能表明除了太阳风注入外,还有月球内部挥发分的贡献(Lin et al., 2022)。

#### 4 月表浅层结构

月表浅层结构是月球内部岩浆活动和外部陨石撞击共同作用的结果,记录了浅层物质的运移过程。早期频繁的火山活动和陨石撞击,重塑了月球表面的地形地貌。嫦娥三号、四号和五号携带的测



据 Lin 等(2022) 修改

图4 嫦娥五号采样区月表水含量

Fig. 4 Water content of the lunar surface at the Chang'E-5 landing site



月雷达清晰揭示了月表浅层的精细分层结构,探明了月壤厚度,发现了多期次岩浆活动,加深了我们对月壤成壤机制、月球动力学演化和岩浆-热演化的认识,为月球地质演化提供了关键约束。

#### 4.1 嫦娥三号着陆区浅层结构

嫦娥三号任务的“玉兔号”月球车上配置有两个通道的测月雷达(Fang et al., 2014; Su et al., 2014):第一通道是低频通道,为偶极子天线雷达,主频为60 MHz,能够以米级分辨率探测几百米的深度;第二通道是高频通道,为蝶形天线,主频为500 MHz,能够以0.3 m的分辨率探测10 m左右的深度。嫦娥三号是人类首次在地外天体进行巡视雷达探测任务,通过原位雷达探测,以前所未有的分辨率对地外天体进行浅层结构成像,取得了许多重要的科学认识(Xiao et al., 2015; Fa et al., 2015; Zhang et al., 2015b)。由于测月雷达对地下结构的有力约束,自嫦娥三号之后,嫦娥四号(Lai et al., 2020; Li et al., 2020; Lv et al., 2020; Zhang et al., 2020, 2021a, 2021b, 2021c; Li and Zhang, 2021)、嫦娥五号(Shen et al., 2021; Feng et al., 2022; Li et al., 2022b; Su et al., 2022)、天问一号(Zhou et al., 2020; Li et al., 2022a)以及美国的毅力号(Hamran et al., 2022)都携带了次表层探测雷达,通过高精度的雷达成像结果,有效地约束了地下结构和地质演化过程。嫦娥三号拉开了国际深空探测巡视雷达技术应用与科学研究的大幕。

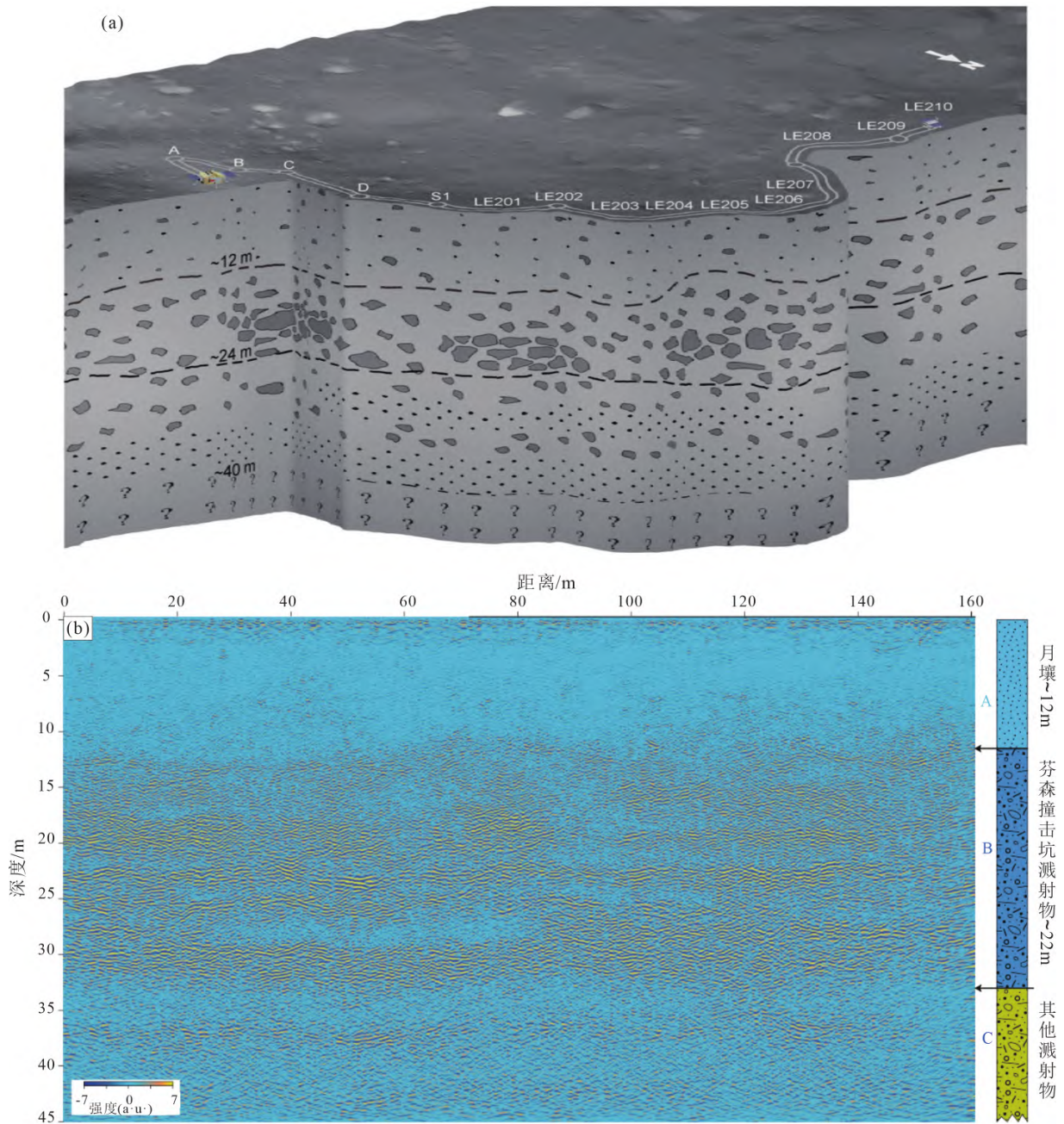
Xiao等(2015)根据测月雷达高频通道成像结果,将嫦娥三号着陆区浅层10 m之内的结构划分为三层:第一层深度为0~1 m,为月壤层,月壤层是覆盖整个月球的最表层物质,由频繁的陨石撞击和长期的空间风化而形成,记录了月球地质和撞击历史的重要线索,同时也是清洁能源<sup>3</sup>He的重要储库(Fa et al., 2015; Zhang et al., 2015b);第二层深度为1~4 m,为撞击溅射物层,粒径相对较粗,其物质主要来源于着陆点周围的撞击溅射物;第三层深度为4~10 m,为古月壤层,是由前两层物质未形成前古月表物质经过长期风化作用形成的。Zhang等(2015b)同样利用高频通道测月雷达数据,将着陆区浅层5 m之内月壤的结构划分为两层:第一层深度为0~0.7 m,是经历了频繁小陨石撞击而充分风化的均匀月壤层,这与阿波罗17号钻探获取的结果基本一致;第二层深度为0.7~5 m,是未彻底风化的月壤层,雷达反射剖面能量不均一,且底界面存在一定程度的起伏。进一步地, Fa等(2015)将着陆区浅层20 m之内的结构划分为四层:第一层深度为0~1

m,是重塑区,该层可进一步划分为2~5层,其成因可能是多期次直径小于10 m的陨石撞击产生的溅射物堆叠的结果;第二层深度为2~6 m,是具有起伏界面的撞击溅射物层,内部含有一定数量的石块,粒径较粗;第三层是4~11 m,是古月壤层,粒径较细,雷达反射剖面中该层反射能量较弱;第四层是深度超过11 m的雨海玄武岩物质。Ding等(2021a)发现月表下约2 m处存在一个高度约为3.1 m的潜在地下空洞,并综合分析了其周围的地质背景排除了熔岩管道的可能,认为其为紫微撞击坑形成过程中挖掘破碎基底玄武岩所形成的月表下空洞结构。

Xiao等(2015)和Zhang等(2015b)利用嫦娥三号测月雷达低频通道数据,获得了着陆区几百米深度范围内的高精度图像。结果表明,嫦娥三号着陆区发生过多期次的岩浆活动,岩浆活动停止时形成的古月壤层由于和玄武岩之间的高介电常数对比,而在测月雷达低频剖面上显示出清晰的反射同相轴。Yuan等(2020)基于“玉兔号”月球车行驶轨迹,对低频雷达数据进行插值,重建了地下层位走向趋势,发现岩浆流的充填方向均为西南方向。

#### 4.2 嫦娥四号着陆区浅层结构

嫦娥四号携带的“玉兔二号”月球车搭载的测月雷达与嫦娥三号测月雷达配置相同,都是由低频和高频两个通道的雷达组成。Li等(2020)根据测月雷达高频通道成像结果,将嫦娥四号着陆区浅层40 m之内的结构分为三层(图5):第一层0~12 m是非常细粒的月壤层;第二层12~24 m是粒径较粗的溅射物层;第三层24~40 m,其内部物质粒径小于第二层,是由来自比芬森撞击坑更古老的撞击溅射物和细粒沉积物交织堆叠形成。同样地,Zhang等(2021a)也将着陆区浅层划分为三层结构(图5):浅层12 m雷达图像反射较少,表明内部物质均一,是月壤层;第二层12~34 m是来自芬森撞击坑的多期次撞击溅射物;第三层34~45 m是来自其他撞击坑的撞击溅射物。除了分层结构,Zhang等(2021c)在第二层溅射物层中还识别出一个长150 m、深10 m的“凹陷”结构,并认为是一被掩埋的古撞击坑。此外,Ding等(2021b)和Zhou等(2022)还对浅层月壤层进行了精细研究,揭示了月壤层中差异风化过程。Lai等(2019)和Dong等(2021)对比了嫦娥三号和四号高频雷达结果,发现在相同的雷达配置下,嫦娥四号测月雷达探测深度更深,雷达回波衰减更小,表明嫦娥四号着陆区钛铁物质含量远低于嫦娥三号着陆区,且月壤中的岩石丰度更小。



据 Li 等(2020) 和 Zhang 等(2021a) 修改

图 5 嫦娥四号测月雷达高频通道揭示的着陆区浅表层结构

Fig. 5 Shallow subsurface structure of the Chang'E-4 landing area revealed by the high-frequency channel of lunar penetrating radar

Zhang 等(2021a) 利用嫦娥四号测月雷达低频通道数据,结合雷达图像反射能量变化和撞击坑数值模拟,将着陆区 450 m 浅层结构划分为三层:上层反射能量最强,由多期次大粒径撞击溅射物堆叠形成,厚度为 130 m;中间层反射能量较弱,是多期次岩浆活动形成的月海玄武岩,内部物质致密均一,厚度为 110 m;(3) 底层反射能量相对较强,是来自莱布尼兹撞击坑的撞击溅射物,厚度超过 200 m。

Lai 等(2020) 认为,冯卡门撞击坑内部主要发生了四次岩浆充填活动,产生了厚度分别为 12、33、34 和 96 m 厚的玄武岩层,期间夹杂着多层撞击溅射物。

Pettinelli 等(2021, 2022) 基于未去背景的嫦娥三号 and 四号低频通道雷达数据具有相似衰减的特征,以及短距离低频雷达剖面同相轴较为平直(Li et al., 2018) 的特征,认为嫦娥三号 and 四号低频雷达观测到的反射同相轴主要是雷达自身系统噪声产生

的假象。Zhang 等(2021b)进一步分析和处理了嫦娥三号、四号低频雷达数据,经过去除背景和合适的滤波频带后,发现嫦娥三号和四号低频雷达数据在  $1.1 \mu\text{s}$  之后衰减特征具有明显的差异,而且存在显著的空间变化特征,尤其是在  $1.4 \sim 1.8$ 、 $2.0 \sim 2.2$  和  $4.4 \sim 5.0 \mu\text{s}$  之间的强反射同相轴发生了明显的斜率变化,表明  $1.1 \mu\text{s}$  后的强反射同相轴并非是雷达自身的系统噪音,而是真实地下层位起伏变化的响应。

#### 4.3 嫦娥五号着陆区浅层结构

嫦娥五号携带的月壤探测雷达在仪器配置上不同于嫦娥三号、四号携带的测月雷达,这是首次在地外天体部署阵列式天线雷达(Li et al., 2019b)。嫦娥五号月壤探测雷达共有 12 个天线,频带范围是  $1 \sim 3 \text{ GHz}$ ,中心频率为  $2 \text{ GHz}$ 。在探测月壤类物质时,其垂直分辨率可达  $5 \text{ cm}$ 。其主要的科学目标是探测  $3 \text{ m}$  深度内的月壤精细结构,识别地下潜在风险以协助嫦娥五号钻探取样任务顺利完成。

Feng 等(2022)和 Su 等(2022)利用嫦娥五号月壤探测雷达对月壤结构进行了精细成像,结果表明在  $2.5 \text{ m}$  厚的月壤内着陆区浅层没有发现连续的层位,但存在较多石块,尤其是在嫦娥五号钻孔下方  $30 \text{ cm}$  深度和  $70 \text{ cm}$  深度存在两组石块堆,极大地增加了钻头继续向下钻进难度。为了保障钻孔样品安全返回地球,在钻探深度达到  $1 \text{ m}$  左右提前完成钻孔采样任务。

## 5 展望

近十年来,基于我国嫦娥工程月球探测任务获取的遥感科学数据,我国科学家在 *Nature*、*Science*、*NSR*、*Nature Astronomy*、*Nature Communications*、*Nature Geosciences*、*Science Advances*、*PNAS* 等国际顶级期刊发表多项研究成果,得到了国际上月球科学界的高度关注。尤其是嫦娥四号开展人类首次月背巡视探测以来,国际月球与行星科学大会已连续多年设立特别主题会场,邀请我国科学家介绍嫦娥工程等月球与行星探测任务的科学研究成果。另外,随着嫦娥工程探测任务获取数据质量的提升,越来越多的国外科学家开始使用嫦娥任务获取的月球遥感数据开展研究。自嫦娥四号任务起,我国月球与行星探测任务开始搭载国际载荷,目前业已取得了不少国际合作研究成果。

我国嫦娥工程已经成功完成了“绕”“落”“回”三步走战略,探月四期的嫦娥六、七、八号任务也正

紧锣密鼓地开展中,后续将进入载人登月、国际月球科研站阶段。随着我国嫦娥工程等深空探测战略的实施和月球科学研究的深入,对月球遥感探测的广度和深度都在加强,相机获取的月表影像分辨率更高、光谱仪的光谱范围覆盖更广、空间分辨率更高、雷达探测的结果更精细化,从而进行月球科学的综合研究。比如,从嫦娥一号的 IIM 到嫦娥五号的月球矿物光谱仪,嫦娥工程中所搭载的成像光谱仪探测谱段逐渐向宽谱段覆盖拓展,嫦娥七号任务的轨道光谱仪谱段范围将拓宽到  $10 \mu\text{m}$ ,空间分辨率也将大幅提升,并首次在月球着陆/巡视器上搭载拉曼光谱仪开展物质成分探测。更为重要的是,进一步提高数据信噪比也将会是我国未来月球遥感探测中的一个重要内容。单一数据的分析也已经不能满足科学研究的需要,正向多源数据的联合交叉分析发展。对于嫦娥工程月球任务已经获取的数据利用更先进的方法重新分析,也是获得新科学发现的重要途径,特别是目前仍在运行的“玉兔二号”月球车,多源、海量数据的积累也需要新分析方法的开发。

在国家重大任务的牵引下,我国月球遥感科学的研究实力逐步加强、研究队伍不断扩大,基于自主探测数据的研究成果显著提升了人类对于月球起源与演化的认识。在“认识月球”为主向“认识月球”和“利用月球”并重转变的背景下,月球遥感科学也将持续在全月的地质资源详查中发挥重要作用。

#### 参考文献 (References):

- Ban C., Zheng Y. C., Zhu Y. C., Zhang F., Xu L., Zou Y. L. 2014. Research on the inversion of elemental abundances from Chang'E-2 X-ray spectrometry data. *Chinese Journal of Geochemistry*, 33(3): 289-299
- Braden S. E., Stopar J. D., Robinson M. S., Lawrence S. J., Van Der Bogert C., Hiesinger H. 2014. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. *Nature Geoscience*, 7(11): 787-791
- Chen J., Ling Z. C., Li B., Zhang J., Sun L. Z., Liu J. Z. 2016. Abundance and distribution of radioelements in Lunar Terranes: Results of Chang'E-1 gamma ray spectrometer data. *Advances in Space Research*, 57(3): 919-927
- 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., 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): 191-202
- Chen J., Ling Z. C., Liu J. Z., Chen S. B., Ding X. Z., Chen J. P., Cheng W. M., Li B., Zhang J., Sun L. Z., Liu C. Q., Cao H. J., Bi X. Y., Liu L.,



- Wan S, Qi X B, Zhao Z X, Guo D J, Ji J Z, Liu J W, Wang J T, Zhang K, Zhang J Y, Sun P J, Zhu K, Lu T Q, Wu C Z, Han K Y, Xu K J, Jin M, Wang Y, Zhang C, Deng J Y, Song Y, Ouyang Z Y. 2022a. Digital and global lithologic mapping of the Moon at a 1: 2 500 000 scale. *Science Bulletin*, 67(20): 2050–2054
- Chen J, Ling Z C, Jolliff B L, Sun L Z, Qiao L, Liu J Z, Fu X H, Zhang J, Li B, Liu C Q, Qi X B, Lu X J, He Z P, Xu R. 2022b. Radiative transfer modeling of Chang'E-4 spectroscopic observations and interpretation of the south Pole-Aitken compositional anomaly. *The Astrophysical Journal Letters*, 931(2): L24
- Crawford I. 2012. The scientific legacy of Apollo. *Astronomy & Geophysics*, 53(6): 6.24–6.28
- Di K C, Xu B, Peng M, Yue Z Y, Liu Z Q, Wan W H, Li L C, Zhou J L. 2016. Rock size-frequency distribution analysis at the Chang'E-3 landing site. *Planetary and Space Science*, 120: 103–112
- Di K C, Zhu M H, Yue Z Y, Lin Y T, Wan W H, Liu Z Q, Gou S, Liu B, Peng M, Wang Y X, Niu S L, Zhang J H, Li J, Xie J F, Xi L H, Yang J F, Xue B. 2019. Topographic evolution of Von Kármán crater revealed by the Lunar Rover Yutu-2. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 12764–12770
- Ding C Y, Li C L, Xiao Z Y, Su Y, Xing S G, Wang Y C, Feng J Q, Dai S, Xiao Y, Yao M J. 2020. Layering structures in the porous material beneath the Chang'E-3 landing site. *Earth and Space Science*, 7(10): E2019EA000862
- Ding C Y, Xiao Z Y, Su Y. 2021a. A potential subsurface cavity in the continuous ejecta deposits of the Ziwei crater discovered by the Chang'E-3 mission. *Earth, Planets and Space*, 73(1): 42–53
- Ding C Y, Xiao Z Y, Wu B, Li Z J, Su Y, Zhou B, Liu K J, Cui J. 2021b. Rock fragments in shallow lunar regolith: Constraints by the lunar penetrating radar onboard the Chang'E-4 mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(9): E2021JE006917
- Dong W D, Zhang X P, Zhu M H, Xu A A, Tang Z S. 2016. Global Mg/Si and Al/Si distributions on the lunar surface derived from Chang'E-2 X-ray spectrometer. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 16(1): 004
- Dong Z H, Fang G Y, Zhao D, Zhou B, Gao Y Z, Ji Y C. 2020. Dielectric properties of lunar subsurface materials. *Geophysical Research Letters*, 47(22): E2020GL089264
- Dong Z H, Fang G Y, Zhou B, Zhao D, Gao Y Z, Ji Y C. 2021. Properties of lunar regolith on the moon's farside unveiled by Chang'E-4 lunar penetrating radar. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(6): E2020JE006564
- Fa W Z, Jin Y Q. 2007. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. *Icarus*, 190(1): 15–23
- Fa W Z, Zhu M H, Liu T T, Plescia J B. 2015. Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar. *Geophysical Research Letters*, 42(23): 10179–10187
- Fang G Y, Zhou B, Ji Y C, Zhang Q Y, Shen S X, Li Y X, Guan H F, Tang C J, Gao Y Z, Lu W, Ye S B, Han H D, Zheng J, Wang S Z. 2014. Lunar penetrating radar onboard the Chang'E-3 mission. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(12): 1607–1622
- Feng J Q, Siegler M A, Hayne P O. 2020. New constraints on thermal and dielectric properties of lunar regolith from LRO diviner and CE-2 microwave radiometer. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(1): e2019JE006130
- Feng J Q, Siegler M A. 2021. Reconciling the Infrared and Microwave observations of the lunar South Pole: A study on subsurface temperature and regolith density. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(9): e2020JE006623
- Feng J Q, Siegler M A, White M N. 2022. Shallow regolith structure and obstructions detected by lunar regolith penetrating radar at Chang'E-5 drilling site: 14. *Remote Sensing*, 14(14): 3378
- Gong X H, Jin Y Q. 2012. Diurnal physical temperature at Sinus Iridum area retrieved from observations of Chinese Chang'E-1 microwave radiometer. *Icarus*, 218(2): 807–816
- Gou S, Di K C, Yue Z Y, Liu Z Q, He Z P, Xu R, Lin H L, Liu B, Peng M, Wan W H, Wang Y X, Liu J Z. 2019. Lunar deep materials observed by Chang'E-4 rover. *Earth and Planetary Science Letters*, 528: 115829
- Gou S, Yue Z Y, Di K C, Wan W H, Liu Z Q, Liu B, Peng M, Wang Y X, He Z P, Xu R. 2020a. In situ spectral measurements of space weathering by Chang'E-4 rover. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116117
- 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, Liu J Z. 2020b. Forsteritic olivine and magnesium-rich orthopyroxene materials measured by Chang'E-4 rover. *Icarus*, 345: 113776
- Gou S, Yue Z Y, Di K C, Wang J, Wan W H, Liu Z Q, Liu B, Peng M, Wang Y X, He Z P, Xu R. 2020c. Impact melt breccia and surrounding regolith measured by Chang'E-4 rover. *Earth and Planetary Science Letters*, 544: 116378
- Hamran S E, Paige D A, Allwood A, Amundsen H E F, Berger T, Brovoll S, Carter L, Casademont T M, Damsgård L, Dypvik H, Eide S, Fairén A G, Ghent R, Kohler J, Mellon M T, Nunes D C, Pletemeier D, Russell P, Siegler M, Øyan M J. 2022. Ground penetrating radar observations of subsurface structures in the floor of Jezero crater, Mars. *Science Advances*, 8(34): Eabp8564
- Hu X Y, Ma P, Yang Y Z, Zhu M H, Jiang T, Lucey P G, Sun L Z, Zhang H, Li C, Xu R, He Z P, Lin H Y, Huang C N, Sun Y X. 2019. Mineral abundances inferred from in situ reflectance measurements of Chang'E-4 landing site in South Pole-Aitken basin. *Geophysical Research Letters*, 46(16): 9439–9447
- Huang J, Xiao Z Y, Xiao L, Horgan B, Hu X Y, Lucey P, Xiao X, Zhao S Y, Qian Y Q, Zhang H, Li C L, Xu R, He Z P, Yang J F, Xue B, He Q, Zhong J, Lin H Y, Huang C N, Xie J F. 2020. ER-RATUM: Diverse rock types detected in the lunar South Pole-Aitken Basin by the Chang'E-4 lunar mission. *Geology*, 48(7): 723–727
- Ji J Z, Guo D J, Liu J Z, Chen S B, Ling Z C, Ding X Z, Han K Y, Chen J P, Cheng W M, Zhu K, Liu J W, Wang J T, Chen J, Ouyang Z Y. 2022. The 1: 2 500 000-scale geologic map of the global Moon. *Science Bulletin*, 67(15): 1544–1548
- Jiang T, Hu X Y, Zhang H, Ma P, Li C L, Ren X, Liu B, Liu D W, Yang J F, Xue B, Jin W D, Zhu M H, Huang C N, Lin H Y. 2021. In situ lunar phase curves measured by Chang'E-4 in the Von Kármán Crater, South Pole-Aitken basin. *Astronomy & Astrophysics*, 646: A2

- Jin W D , Zhang H , Yuan Y , Yang Y Z , Shkuratov Y G , Lucey P G , Kaydash V G , Zhu M H , Xue B , Di K C , Xu B , Wan W H , Xiao L , Wang Z W. 2015. In situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophysical Research Letters* , 42( 20) : 8312-8319
- Jolliff B L , Gillis J J , Haskin L A , Korotev R L , Wicczorek M A. 2000. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research: Planets* , 105( E2) : 4197-4216
- Lai J L , Xu Y , Zhang X P , Xiao L , Yan Q , Meng X , Zhou B , Dong Z H , Zhao D. 2019. Comparison of dielectric properties and structure of lunar regolith at Chang'E-3 and Chang'E-4 landing sites revealed by ground-penetrating radar. *Geophysical Research Letters* , 46( 22) : 12783-12793
- Lai J L , Xu Y , Bugiolacchi R , Meng X , Xiao L , Xie M G , Liu B , Di K C , Zhang X P , Zhou B , Shen S X , Xu L Y. 2020. First look by the Yutu-2 rover at the deep subsurface structure at the lunar farside. *Nature Communications* , 11( 1) : 3426
- Li C , Zhang J H. 2021. Velocity analysis using separated diffractions for lunar penetrating radar obtained by Yutu-2 rover. *Remote Sensing* , 2021 , 13( 7) : 1387
- Li C , Zheng Y K , Wang X , Zhang J H , Wang Y B , Chen L , Zhang L , Zhao P , Liu Y K , Lv W M , Liu Y , Zhao X , Hao J L , Sun W J , Liu X F , Jia B J , Li J , Lan H Q , Fa W Z , Pan Y X , Wu F Y. 2022a. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. *Nature* , 6107931: 308-312
- Li C L , Xing S G , Lauro S E , Su Y , Dai S , Feng J Q , Cosciotti B , Di Paolo F , Mattei E , Xiao Y , Ding C Y , Pettinelli E. 2018. Pitfalls in GPR data interpretation: False reflectors detected in lunar radar cross sections by Chang'E-3. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 56( 3) : 1325-1335
- 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 , Ouyang Z Y. 2019a. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature* , 569( 7756) : 378-382
- Li C L , Su Y , Pettinelli E , Xing S G , Ding C Y , Liu J J , Ren X , Lauro S E , Soldovieri F , Zeng X G , Gao X Y , Chen W L , Dai S , Liu D W , Zhang G L , Zuo W , Wen W B , Zhang Z B , Zhang X X , Zhang H B. 2020. The Moon ' s farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar. *Science Advances* , 6( 9) : eaay6898
- Li J , Bai L G , Liu H. 2022b. Numerical verification of full waveform inversion for the Chang'E-5 lunar regolith penetrating array Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* , 60: 5903710
- Li S A , Milliken R E. 2017. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution , abundance , and origins. *Science Advances* , 3( 9) : e1701471
- Li Y X , Lu W , Fang G Y , Zhou B , Shen S X. 2019b. Performance verification of lunar regolith penetrating array radar of Chang'E-5 mission. *Advances in Space Research* , 63( 7) : 2267-2278
- Lin H L , Yang Y Z , Lin Y T , Liu Y , Wei Y , Li S , Hu S , Yang W , Wan W H , Xu R , He Z P , Liu X H , Xing Y , Yu C W , Zou Y L. 2020a. Photometric properties of lunar regolith revealed by the Yutu-2 rover. *Astronomy & Astrophysics* , 638: A35
- Lin H L , Xu R , Yang W , Lin Y T , Wei Y , Hu S , He Z P , Qiao L , Wan W X. 2020b. In situ photometric experiment of lunar regolith with visible and near-infrared imaging spectrometer on board the Yutu-2 lunar rover. *Journal of Geophysical Research: Planets* , 125( 2) : e2019JE006076
- 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 , Zou Y L. 2020c. 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
- 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 , Zou Y L. 2020d. New insight into lunar regolith-forming processes by the lunar rover Yutu-2. *Geophysical Research Letters* , 47( 14) : e2020GL087949
- Lin H L , Li S , Lin Y T , Liu Y , Wei Y , Yang W , Yang Y Z , Hu S , Wu X , Xu R , Li C L , He Z P. 2021. Thermal modeling of the lunar regolith at the Chang'E-4 landing site. *Geophysical Research Letters* , 48( 6) : e2020GL091687
- Lin H L , Li S , Xu R , Liu Y , Wu X , Yang W , Wei Y , Lin Y T , He Z P , Hui H J , He H Y , Hu S , Zhang C , Li C L , Lv G , Yuan L Y , Zou Y L , Wang C. 2022. In situ detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander. *Science Advances* , 8( 1) : eabl9174
- Ling Z C , Zhang J , Liu J Z , Zhang W X , Bian W , Ren X , Mu L L , Liu J J , Li C L. 2011. Preliminary results of FeO mapping using Imaging Interferometer data from Chang'E-I. *Chinese Science Bulletin* , 56( 4-5) : 376-379
- Ling Z C , Jolliff B L , Wang A , 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 , Wang J Y. 2015. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'E-3 landing site. *Nature Communications* , 6: 8880
- Liu C , Liu L , Chen J , Cao H , Qu H , Qiao L , Zhang J , Qi X , Lu X , Xu R , Wang Z , He Z , Ling Z. 2021. Mafic mineralogy assemblages at the Chang'E-4 landing site: A combined laboratory and lunar in situ spectroscopic study. *Astronomy & Astrophysics* , 658: A67
- Liu J J , Liu B , Ren X , Li C L , Shu R , Guo L , Yu S Z , Zhou Q , Liu D W , Zeng X G , Gao X Y , Zhang G L , Yan W , Zhang H B , Jia L H , Jin S F , Xu C H , Deng X J , Xie J F , Yang J F , Huang C N , Zuo W , Su Y , Wen W B , Ouyang Z Y. 2022. Evidence of water on the lunar surface from Chang'E-5 in-situ spectra and returned samples. *Nature Communications* , 13( 1) : 3119
- Liu Z Q , Di K C , Li J , Xie J F , Cui X F , Xi L H , Wan W H , Peng M , Liu B , Wang Y X , Gou S , Yue Z Y , Yu T Y , Li L C , Wang J , Liu C K , Xin X , Jia M N , Bo Z , Liu J , Wang R Z , Niu S L , Zhang K , You Y , Liu B , Liu J G. 2020. Landing site topographic mapping and rover localization for Chang'E-4 mission. *Science China Information Sciences* , 63( 4) : 140901
- Lu X J , Chen J , Ling Z C , Liu C Q , Fu X H , Qiao L , Zhang J , Cuo H J , Liu J Z , He Z P , Xu R. 2023. Mature lunar soils from Fe-rich

- and young mare basalts in the Chang'E-5 regolith samples. *Nature Astronomy*, 7(2): 142–151
- Lv W M, Li C, Song H J, Zhang J H, Lin Y T. 2020. Comparative analysis of reflection characteristics of lunar penetrating radar data using numerical simulations. *Icarus*, 350: 113896
- Ma P, Sun Y X, Zhu M H, Yang Y Z, Hu X Y, Jiang T, Zhang H, Lucey P G, Xu R, Li C L, He Z P, Xue B, Yang J F, Huang C N, Lin H Y. 2020. A plagioclase-rich rock measured by Yutu-2 Rover in Von Kármán crater on the far side of the Moon. *Icarus*, 350: 113901
- Meng Z G, Li X Y, Chen S B, Zheng Y C, Shi J C, Wang T X, Zhang Y Z, Ping J S, Lu Y. 2019. Thermophysical features of shallow lunar crust demonstrated by typical Copernican craters using CE-2 CELMS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2565–2574
- 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, Jossot J L. 2009. The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature*, 461(7261): 236–240
- Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, Zhang H B, Lü 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, Gao G N. 2010. Primary scientific results of Chang'E-1 lunar mission. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1565–1581
- Pernet-Fisher J, McDonald F E, Zeigler R A, Joy K H. 2019. 50 years on: Legacies of the Apollo programme. *Astronomy & Geophysics*, 60(4): 4.22–4.28
- Pettinelli E, Lauro S E, Mattei E, Cosciotti B, Soldovieri F. 2021. Stratigraphy versus artefacts in the Chang'E-4 low-frequency radar. *Nature Astronomy*, 5(9): 890–893
- Pettinelli E, Cosciotti B, Lauro S E, Mattei E. 2022. An overview of GPR subsurface exploration of planets and moons. *The Leading Edge*, 41(10): 672–680
- Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, Annadurai M, Boardman J, Burratti 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, Varanasi P. 2009. Character and spatial distribution of OH/H<sub>2</sub>O on the surface of the Moon seen by M<sup>3</sup> on Chandrayaan-1. *Science*, 326(5952): 568–572
- Qi X B, Ling Z C, Zhang J, Chen J, Cao H J, Liu C Q, Qiao L, Fu X H, He Z P, Xu R, Liu J Z, Zou Y L. 2020. Photometric normalization of Chang'E-4 visible and near-infrared imaging spectrometer datasets: A combined study of in-situ and laboratory spectral measurements. *Remote Sensing*, 12(19): 3211
- Shen S X, Zhou B, Li Y X, Lu W, Liu Q, Tang C J, Fang G Y, Wang L. 2021. The design of payload lunar regolith penetrating radar on Chang'E-5 lander. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 36(2): 4–16
- Shuai T, Zhang X, Zhang L F, 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
- Song H J, Li C, Zhang J H, Wu X, Liu Y, Zou Y L. 2021. Rock location and property analysis of lunar regolith at Chang'E-4 landing site based on local correlation and semblance analysis. *Remote Sensing*, 13(1): 48
- Su Y, Fang G Y, Feng J Q, Xing S G, Ji Y C, Zhou B, Gao Y Z, Li H, Dai S, Xiao Y, Li C L. 2014. Data processing and initial results of Chang'E-3 lunar penetrating radar. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(12): 1623–1632
- Su Y, Wang R G, Deng X J, Zhang Z Y, Zhou J F, Xiao Z Y, Ding C Y, Li Y X, Dai S, Ren X, Zeng X G, Gao X Y, Liu J J, Liu D W, Liu B, Zhou B, Fang G Y, Li C L. 2022. Hyperfine structure of regolith unveiled by Chang'E-5 lunar regolith penetrating radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5110414
- Wang X M, Zhu P M. 2013. Refinement of lunar TiO<sub>2</sub> analysis with multi-spectral features of Chang'E-1 IIM data. *Astrophysics and Space Science*, 343(1): 33–44
- Wang X M, Zhang X B, Wu K. 2016. Thorium distribution on the lunar surface observed by Chang'E-2 gamma-ray spectrometer. *Astrophysics and Space Science*, 361(7): 234
- Wang X M, Zhao S Y. 2017. New insights into lithology distribution across the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(10): 2034–2052
- Wang Z C, Wu Y Z, Blewett D T, Cloutis E A, Zheng Y C, Chen J. 2017. Submicroscopic metallic iron in lunar soils estimated from the in situ spectra of the Chang'E-3 mission. *Geophysical Research Letters*, 44(8): 3485–3492
- Wu B, Hu H, Guo J. 2014a. Integration of Chang'E-2 imagery and LRO laser altimeter data with a combined block adjustment for precision lunar topographic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 1–15
- Wu B, Li F, Ye L, Qiao S, Huang J, Wu X Y, Zhang H. 2014b. Topographic modeling and analysis of the landing site of Chang'E-3 on the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 257–273
- 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, Ouyang Z Y. 2019. Lunar farside to be explored by Chang'E-4. *Nature Geoscience*, 12(4): 222–223
- Wu X, Liu Y, Yang Y Z, Guo D J, Du J, Li S, Lin H L, Fu X H, Xiaoz Y Z, Xu Y C, Xu R, He Z P, Zhang F, Lin Y T, 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
- Wu Y Z. 2012. Major elements and Mg<sup>#</sup> of the moon: Results from Chang'E-1 interference imaging spectrometer (IIM) data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 93: 214–234
- Wu Y Z, Xue B, Zhao B C, Lucey P, Chen J, Xu X S, Li C L, Ouyang



- Z Y. 2012. Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang'E-1 IIM data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E2): E02001
- Wu Y Z, Besse S, Li J Y, Combe J P, Wang Z C, Zhou X F, Wang C. 2013. Photometric correction and in-flight calibration of Chang'E-1 Interference Imaging Spectrometer (IIM) data. *Icarus*, 222(1): 283-295
- Wu Y Z, Hapke B. 2018. Spectroscopic observations of the Moon at the lunar surface. *Earth and Planetary Science Letters*, 484: 145-153
- Wu Y Z, Kühr E, Grott M, Jin Q, Xu T Y, Helbert J, Hamm M, Qin N N, Ma J S, Vincent J B, Hayne P. 2021. Chang'E-4 rover spectra revealing micro-scale surface thermophysical properties of the Moon. *Geophysical Research Letters*, 48(4): e2020GL089226
- 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, Wang X. 2019. New maps of lunar surface chemistry. *Icarus*, 321: 200-215
- 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, Gao Y Z. 2015. A young multilayered terrane of the northern mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226-1229
- Xiao X, Yu S R, Huang J, Zhang H, Zhang Y W, Xiao L. 2022. Thermophysical properties of the regolith on the lunar far side revealed by the *in situ* temperature probing of the Chang'E-4 mission. *National Science Review*, 9(11): nwac175
- 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, He Z P. 2022. Lunar mineralogical spectrometer on Chang'E-5 mission. *Space Science Reviews*, 218(5): 41
- Yan B K, Xiong S Q, Wu Y Z, Wang Z C, Dong L N, Gan F P, Yang S M, Wang R S. 2012. Mapping Lunar global chemical composition from Chang'E-1 IIM data. *Planetary and Space Science*, 67(1): 119-129
- Yang C, Zhao H S, Bruzzone L, Benediktsson J A, Liang Y C, Liu B, Zeng X G, Guan R C, Li C L, Ouyang Z Y. 2020a. Lunar impact crater identification and age estimation with Chang'E data by deep and transfer learning. *Nature Communications*, 11(1): 6358
- Yang Y Z, Lin H L, Liu Y, Lin Y T, Wei Y, Hu S, Yang W, Xu R, He Z P, Zou Y L. 2020b. The effects of viewing geometry on the spectral analysis of lunar regolith as inferred by *in situ* spectrophotometric measurements of Chang'E-4. *Geophysical Research Letters*, 47(8): e2020GL087080
- Yang Y Z, Li S, Zhu M H, Liu Y, Wu B, Du J, Fa W Z, Xu R, He Z P, Wang C, Xue B, Yang J F, Zou Y L. 2021. Impact remnants rich in carbonaceous chondrites detected on the Moon by the Chang'E-4 rover. *Nature Astronomy*, 6(2): 207-213
- Yuan Y F, Wang F H, Zhu P M, Xiao L, Zhao N. 2020. New constraints on the young lava flow profile in the northern mare Imbrium. *Geophysical Research Letters*, 47(16): e2020GL088938
- Zeng Q H, Chen S B, Zhang Y Z, Mu Y L, Dai R, Yang C Y, Li A Z, Lu P. 2021. Mineralogical and chemical properties inferred from 21-lunar-day VNIS observations taken during the Chang'E-4 mission. *Scientific Reports*, 11(1): 15435
- Zhang H, Yang Y Z, Yuan Y, Jin W D, Lucey P G, Zhu M H, Kaydash V G, Shkuratov Y G, Di K C, Wan W H, Xu B, Xiao L, Wang Z W, Xue B. 2015a. In situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophysical Research Letters*, 42(17): 6945-6950
- Zhang J H, Yang W, Hu S, Lin Y T, Fang G Y, Li C L, Peng W X, Zhu S Y, He Z P, Zhou B, Lin H Y, Yang J F, Liu E H, Xu Y C, Wang J Y, Yao Z X, Zou Y L, Yan J, Ouyang Z Y. 2015b. Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(17): 5342-5347
- Zhang J H, Zhou B, Lin Y T, Zhu M H, Song H J, Dong Z H, Gao Y Z, Di K C, Yang W, Lin H Y, Yang J F, Liu E H, Wang L, Lin Y, Li C, Yue Z Y, Yao Z X, Ouyang Z Y. 2021a. Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in south Pole-Aitken basin. *Nature Astronomy*, 5(1): 25-30
- Zhang J H, Zhou B, Lin Y T. 2021b. Reply to: Stratigraphy versus artefacts in the Chang'E-4 low-frequency radar. *Nature Astronomy*, 5(9): 894-897
- Zhang L, Li J, Zeng Z F, Xu Y, Liu C, Chen S B. 2020. Stratigraphy of the von Kármán crater based on Chang'E-4 lunar penetrating radar data. *Geophysical Research Letters*, 47(15): e2020GL088680
- Zhang L, Xu Y, Bugiolacchi R, Hu B, Liu C, Lai J L, Zeng Z F, Huo Z J. 2021c. Rock abundance and evolution of the shallow stratum on Chang'E-4 landing site unveiled by lunar penetrating radar data. *Earth and Planetary Science Letters*, 564: 116912
- Zhao B C, Yang J F, Wen D S, Gao W, Chang L Y, Song Z X, Xue B, Zhao W. 2011. Overall scheme and on-orbit images of Chang'E-2 lunar satellite CCD stereo camera. *Science China Technological Sciences*, 54(9): 2237-2242
- Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, Zou Y L, Zhang F, Ouyang Z Y. 2012. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: The role of local time in global imaging. *Icarus*, 219(1): 194-210
- Zhou B, Shen S X, Lu W, Liu Q, Tang C J, Li S D, Fang G Y. 2020. The Mars rover subsurface penetrating radar onboard China's Mars 2020 mission. *Earth and Planetary Physics*, 4(4): 345-354
- Zhou H Q, Feng X, Ding C Y, Dong Z J, Liu C, Liang W J. 2022. Heterogeneous weathering process of lunar regolith revealed by polarimetric attributes analysis of Chang'E-4 lunar penetrating radar data acquired during the Yutu-2 turnings. *Geophysical Research Letters*, 49(13): e2022GL099207
- Zhu M H, Chang J, Ma T, Ip W H, Fa W Z, Wu J, Cai M S, Gong Y Z, Hu Y M, Xu A A, Tang Z S. 2013. Potassium map from Chang'E-2 constrains the impact of Crisium and Orientale basin on the Moon. *Scientific Reports*, 3: 1611
- Zhu M H, Chang J, Xie M G, Fritz J, Fernandes V A, Ip W H, Ma T, Xu A A. 2015. The uniform K distribution of the mare deposits in the Orientale Basin: Insights from Chang'E-2 gamma-ray spectrometer. *Earth and Planetary Science Letters*, 418: 172-180
- 陈剑, 凌宗成, 李勃, 孙灵芝, 张江, 刘建忠. 2016. 嫦娥二号  $\gamma$  谱数据反演月表 Fe 元素分布. *中国科学: 物理学·力学·天文学*,

46(2): 59-66

陈建平,王翔,王楠,李婧,姚美娟,李洪克. 2014. 基于嫦娥数据澄海-静海幅地质图编研. 地学前缘, 21(6): 7-18

丁孝忠,王梁,韩坤英,庞健峰,刘建忠,郭弟均,丁伟翠,剧远景. 2014. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图: 以月球北极地区为例. 地学前缘, 21(6): 19-30

李春来,刘建军,左维,苏彦,欧阳自远. 2021. 中国月球探测进展(2011-2020年). 空间科学学报, 41(1): 68-75

李婧,陈建平,王楠,何姝珺. 2014. 月表线性构造自动提取新方法研究: 以澄海地区月岭为例. 地学前缘, 21(6): 223-228

李芸,姜景山,王振占,张德海,张晓辉. 2013. 利用嫦娥一号卫星微波探测仪数据反演月球表面物理温度. 中国工程科学, 15(7): 106-112

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

凌志成,张江,刘建忠,李勃,武中臣,倪宇恒,孙灵芝,陈剑.

2016. 嫦娥一号干涉成像光谱仪数据再校正与全月铁钛元素反演. 岩石学报, 32(1): 87-98

马涛,常进,张南,蔡明生,宫一忠,唐和森,张仁健,王楠森,于敏,胡一鸣. 2013. 嫦娥二号伽玛射线谱仪. 天文学报, 54(3): 291-299

王娇,程维明,周成虎,赵敏. 2014. 全月球撞击坑形貌特征的识别与多指标表达. 地理研究, 33(7): 1251-1263

王楠,陈建平,王翔,李婧,何姝珺. 2014. 月表线性构造定量提取与演化分析: 以静海月岭、月溪为例. 地学前缘, 21(6): 229-242

王振占,李芸,姜景山,李涤微. 2009. 用“嫦娥一号”卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和<sup>3</sup>He 资源量评估的方法及初步结果分析. 中国科学: 地球科学, 39(8): 1069-1084

魏士俨,张建利,彭松,刘少创. 2013. 虹湾地区月面撞击坑自动提取. 计算机仿真, 30(8): 74-77

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)

## •亮点速读•

### 原始富氢大气塑造了地球

地球的水、氧化还原状态和金属核密度是地球的基本化学特征。系外行星的研究为阐明这些化学性质提供了有用的背景。行星的形成和演化模型表明,系外的类地行星通常是由富氢大气所覆盖,而大气中的氢气也随时间流失。这些发现表明,地球的原始大气也可能是富含氢气的。

为了探索早期地球大气的富氢模式,美国加州大学洛杉矶分校和卡

耐基研究所的研究团队开展了热力学模拟,研究了大气、硅酸盐地球和金属地核的平衡。结果表明,地球的水、地核密度和整体的氧化状态都可以通过其起源行星胚胎中富含氢气的原始大气和岩浆洋之间的平衡来获得。岩浆洋中的氧气与氢发生反应时,水可以从干的顽辉石球粒陨石物质中产生。来自大气层的氢进入岩浆洋,最终在平衡状态下进入金

属地核,造成与地球相当的地核密度亏损。硅酸盐地球从类似太阳的氧逸度氧化为类似地球的氧逸度,随之产生的还有硅、氢和氧元素,均与铁结合进入地核。因此,富氢大气、硅酸盐和金属平衡的反应为地球的基本化学特征提供了一个简单的解释,这些特征与银河系各处类地行星的形成是一致的。

[以上成果发表在国际著名科学期刊 *Nature* 上: Edward D. Young, Anat Shahar & Hilke E. Schlichting. 2023. Earth shaped by primordial H<sub>2</sub> atmospheres. *Nature*, 616: 306-311.

(夏群科 编译)

## 专栏作者简介



刘洋,1984年生,美国圣路易斯华盛顿大学地球与行星科学系博士,现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师。主要从事月球与行星科学研究,入选国家“万人计划”科技创新领军人才、中国科学院“百人计划”。担任中国探月四期首席科学家助理,中国

载人探月科学研究与应用系统论证专家组成员、天问一号首次火星探测任务和月球样品专家委员会秘书组成员。《中国科学:物理学 力学 天文学》《地球科学》《空间科学学报》和 *Earth and Planetary Physics* 等期刊编委。在 *Nature Astronomy*、*Science Advances* 等国内外高水平期刊发表论文 50 余篇,一项成果入选中央广播电视台 2022 年度中国十大科技新闻,获北京市自然科学奖二等奖(1/10)。



杨蔚,1981年生,2007年在中国科学技术大学地球化学专业获博士学位,现为中国科学院地质与地球物理所研究员、博士生导师。长期从事岩石地球化学、比较行星学、离子探针分析技术研究。2013年获国家优秀青年科学基金,2016年获中国矿物岩石地球化学学会侯德封奖。嫦娥三号、四号任务科学家团队成员,嫦娥五号月球样品使用

责任人,载人航天工程月球与行星科学专家组专家,在嫦娥三号、四号着陆区月壤物质组成,嫦娥五号月球玄武岩地球化学特征和形成机制等研究中取得系列成果。在 *Nature*、*PNAS*、*NSR* 等国内外高水平期刊发表论文 100 余篇,SCI 总引 4000 余次, h-index 33。



肖智勇,1986年生,中山大学教授、博导,行星环境宜居性研究实验室常务副主任。从事行星地质学的教学和科研。发表第一和通讯作者 SCI 论文 50 余篇,其中包括多篇 *Nature Geoscience*、*Nature Communications*、*Nature Astronomy*、*Geology*

等刊物论文。现为 *JGR-Planets* 副主编,中国科学院比较行星学卓越研究中心高级研究员。获 AOGS 杰出青年科学家和 NASA MESSENGER 团队贡献奖,入选第二届中国科协青年人才托举工程和国家重大人才工程计划。



林红磊,1992年生,中国科学院地质与地球物理所副研究员,硕士生导师。从事行星遥感研究,目前是首届月球样品专家委员会秘书处成员、嫦娥四号探月任务核心科学家团组成员,入选中国科协青年人才托举工程项目、中国科学院青促会会员,主持国家重点研发计划青年科学家项目、基金委青年项目,以第一作者在 *Science Advances*、

*NSR* 等期刊上发表论文 10 余篇。现为中国地质学会遥感地质专委会委员、中国测绘学会深空探测遥感测绘工委委员,《空间科学学报》编委、*EPP* 青年编委。



李阳,1984年生,中国科学院地球化学研究所项目研究员。主要从事月壤的形成与时空演化历史研究,在太空风化产物与光谱改造效应等方面取得多项原创性研究成果。共发表 SCI 收录学术论文 45 篇,其中以第一/通讯作者在 *Nature Communications*、*Nature Astronomy*、*Science Bulletin*、*Geochimica et Cosmochimica Acta* 等期刊上发表

论文 20 篇。现任中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心副主任、中国科学院地球化学研究所公共技术中心分中心主任,入选中国科学院特聘骨干岗位、中国科学院青年创新促进会会员,中国地质学会纳米地球科学专业委员会委员,《空间科学学报》编委等。