



中国月球探测促进月球与行星科学创新发展

李春来^{1*}, 严韦¹, 刘建军¹, 欧阳自远^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 月球与深空探测重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

* 通讯作者, E-mail: licl@nao.cas.cn

收稿日期: 2022-05-06; 收修改稿日期: 2022-10-27; 接受日期: 2022-11-14; 网络版发表日期: 2023-04-28

摘要 月球一直是人类探测太阳系的起点和首选目标. 中国的探月工程(嫦娥工程)于2004年立项启动, 目前已成功完成了“绕、落、回”三步走的探测规划. 围绕地月空间环境、月表物质、形貌、地质构造、月球次表层结构与内部结构、月球的起源与演化等当前月球科学研究的基本问题取得了一系列瞩目的研究成果, 进一步加深了人类对于月球的认识. 文章简要回顾了我国探月工程的发展历程, 对主要研究成果和科学认识进行了总结, 并对中国月球与行星探测的未来发展做出了展望.

关键词 月球探测, 月球科学, 嫦娥工程, 科学成果, 未来展望

1 引言

月球作为地球唯一的天然卫星、距离最近的天体, 是人类向浩瀚宇宙迈进的第一个目标, 人类探测太阳系往往以月球探测为开端. 截至目前, 已经有110多个月球探测器被成功发射, 其中, 美国完成了6次载人登月, 获取共计382kg月球样品, 在月球科学重大问题方面取得了一系列突破性的进展, 对科学的创新与技术的突破起到了极大的推动作用. 借助这些探测活动, 高新技术进步得以引领, 一大批新型工业群体得以催生和建立, 经济的发展和文明的昌盛得以推进(刘建忠等, 2013). 当前, 月球综合科学探测和资源开发利用逐渐得到了世界航天活动的广泛关注, 已成为必然的趋势和竞争的热点, 必将更好地增进人类科学认知, 拓展人类生存空间, 服务人类社会的可持续发展(裴照宇

等, 2020).

中国的科技工作者心怀科学的追求和强国的梦想, 一直希望探索月球、向深空迈进. 人造地球卫星的发展、载人航天工程的成功实施, 使得中国能够适时开展深空探测, 月球探测是其中的主要活动. 从1993年开始, 中国开启了关于月球探测科学目标与工程实现的综合论证, 历时10年, 提出了中国月球探测分为三个阶段的设想, 分别是无人月球探测阶段、载人登月探测阶段和建设月球基地开发利用阶段. 其中, 第一阶段即无人月球探测, 共包含“绕”、“落”、“回”三期的实施和发展规划, 具体包括如下内容: 第一期, “绕”月探测工程, 对月球进行环绕探测, 实现全球性、整体性和综合性探测; 第二期, “落”月探测工程, 在月球表面实现软着陆, 进行月面上的就位探测和巡视勘察; 第三期, 月球样品自动取样并安全返“回”地

中文引用格式: 李春来, 严韦, 刘建军, 欧阳自远. 2023. 中国月球探测促进月球与行星科学创新发展. 中国科学: 地球科学, 53(11): 2437-2456, doi: [10.1360/SSTe-2022-0137](https://doi.org/10.1360/SSTe-2022-0137)

英文引用格式: Li C, Yan W, Liu J, Ouyang Z. 2023. Innovative developments in lunar and planetary science promoted by China's lunar exploration. Science China Earth Sciences, 66(11): 2399-2418, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1030-8>

球(欧阳自远, 2005).

截至目前, 中国已圆满完成了探月工程无人月球探测阶段的“绕”、“落”、“回”三期既定目标, 获取了大量的科学探测数据, 为科学研究提供了宝贵的第一手基础信息. 中国的月球科学探索得以从调查研究和跟踪研究, 转变为自主研究和自由探索, 由此取得了丰硕的研究成果(李春来等, 2021). 截至2022年4月, 与嫦娥工程数据(Chang'e data)相关并利用其发表的科研论文已达800余篇(源自Web of Science统计), 内容包括了第一阶段月球探测工程科学目标规定的所有领域.

本文将回顾中国月球探测工程的发展历程, 重点总结在月表环境及地月空间环境、月球次表层结构与内部结构、月球的起源与演化等3个月球科学基本问题上的研究进展和科学认识, 及其对发展月球和行星科学的促进作用.

2 中国月球探测工程的发展历程

2.1 科学论证

1989年, 美国的重返月球计划在中国引起了强烈的反响. 1994年, 在天体化学家欧阳自远和空间探测专家褚桂柏的带领下, 完成了中国第一个完整的《中国开展月球探测的必要性与可行性研究报告》. 1998年, 在国家863计划的支持下, 由中国科学院地球化学研究所和中国科学院空间科学与应用研究中心等单位专家共同完成了《中国月球探测发展战略与长远规划研究》, 提出了中国月球探测发展的总体规划, 以欧阳自远为首席科学家完成了《中国首次月球资源探测卫星科学目标与有效载荷配置》的研究报告, 提出了被广泛接受并作为国家发展战略的“绕”、“落”、“回”月球探测设想, 并成为绕月探测工程的设计输入. 2000年11月, 《中国的航天》白皮书正式宣布了“开展以月球探测为主的深空探测的预先研究”作为中国航天发展近期发展的目标之一. 2001年, 中国科学院启动了以欧阳自远为首席科学家的“月球探测关键科学技术研究”, 完成了中国月球探测一期工程的科学论证和后续二、三期工程科学目标与有效载荷的预先研究. 2002年12月, 在孙家栋的领导下, 以实现科学目标为出发点, 开展了月球探测一期工程的综合立项论证, 涉及卫星、运载火箭、测控、发射场, 以及地面应用等各

个方面. 该论证对一期探测工程的总体方案和关键技术进行了分析, 全面细致且深入, 形成了绕月探测工程的总体实施方案. 2003年4月, 开展了月球探测工程的关键技术攻关. 2004年1月, 月球探测工程一期即“绕月探测工程”(代号“嫦娥工程”)正式立项, 中国月球探测工程正式进入实施阶段(刘建忠等, 2013; 欧阳自远和李春来, 2015).

2.2 月球环绕探测

中国的环绕月球探测包括嫦娥一号和嫦娥二号两次任务, 以获取月球表面三维影像、分析月球表面主要元素含量和物质类型的分布特点、探测月壤的特性以及探测地月空间环境为主要科学目标, 分别配置了8台和7台科学载荷(见表1).

嫦娥一号探测器于2007年10月24日在西昌卫星发射中心升空, 成为中国首个月球探测器, 2007年11月20日CCD(Charge-coupled Device, 电荷耦合元件)立体相机成功开机探测, 标志着中国地外科学探测的开始. 嫦娥一号共在轨飞行了494天, 完成了预定的全部科学探测任务、空间技术试验任务. 2009年3月1日, 在地面控制下撞击落入月球正面的丰富海区域, 顺利完成了其历史使命.

嫦娥二号探测器是嫦娥一号的备份星, 于2010年10月1日发射, 在7个多月的环绕月球科学探测期间, 完成了预定的月球科学探测任务和技术试验. 2011年6月, 嫦娥二号飞离月球轨道, 奔向150万公里外的第2拉格朗日点(L2点), 开展了235天的空间环境探测. 2012年6月, 嫦娥二号再次飞离第2拉格朗日点, 于2012年12月13日在距离地球706万公里处与4179号小行星Toutatis相遇, 实现对该小行星的第一次近距离飞越探测(Huang等, 2013; Zou等, 2014; Zhu等, 2014; Jiang等, 2015). 随后, 嫦娥二号成为一个环绕太阳运行的人造小天体, 并将于2029年前后再次进入地球临近轨道.

2.3 月球软着陆探测

中国月球着陆探测, 是以在月球表面开展月球科学就位和巡视探测为目标的探测任务, 包括嫦娥三号 and 嫦娥四号两次任务, 分别配置了8台和9台科学载荷(见表1). 嫦娥三号探测器——包括着陆器、巡视器(“玉兔号”月球车)——于2013年12月2日从西昌发射,

表1 中国月球探测工程的科学目标和科学载荷相关配置

| 探测任务 | 科学目标 | 科学载荷 |
|------|--|---|
| 嫦娥一号 | (1) 对月球表面的三维影像进行获取 (2) 对月球表面的元素含量和物质类型分布特点进行分析 (3) 对月壤特性进行探测, 估算月壤厚度和氦-3资源量 (4) 对地月空间环境进行探测 | CCD立体相机、激光高度计、干涉成像光谱仪、X射线谱仪、 γ 射线谱仪、高能粒子探测器、微波探测仪、太阳风离子探测器, 共8台 |
| 嫦娥二号 | (1) 以优于10m的分辨率对月球表面三维影像进行获取 (2) 对月球物质成分进行探测 (3) 对月壤特性进行探测 (4) 对地月与近月空间环境进行探测 | CCD立体相机、激光高度计、X射线谱仪、 γ 射线谱仪、高能粒子探测器、微波探测仪、太阳风离子探测器, 共7台 |
| 嫦娥三号 | (1) 调查月球表面形貌和地质构造 (2) 调查月球表面物质成分与可利用资源 (3) 探测地球等离子体层, 开展月基光学天文观测 | 着陆器: 降落相机、地形地貌相机、月基光学望远镜、极紫外相机 巡视器: 全景相机、近红外成像光谱仪、测月雷达、粒子激发X射线谱仪, 共8台 |
| 嫦娥四号 | (1) 月基低频射电天文观测与研究 (2) 探测和研究月球背面巡视区的形貌和矿物组分 (3) 探测和研究月球背面巡视区的浅层结构 (4) 对月球表面中子辐射剂量、中性原子等月球环境开展试验性的探测研究 | 着陆器: 降落相机、地形地貌相机、月表中子与辐射剂量探测仪、低频射电频谱仪 巡视器: 全景相机、测月雷达、近红外光谱仪、中性原子探测仪, 共8台 |
| 嫦娥五号 | (1) 着陆区的现场调查和分析. 对着陆点的区域形貌进行探测, 对其地质背景开展勘察, 获取和月球样品相关的现场分析数据, 对现场探测数据与实验室分析数据建立关联 (2) 月球样品的分析和研究. 系统、长期地进行月球样品实验室研究, 对月壤结构、物理特性、物质组成进行分析, 对月球成因和演化历史进行进一步深入研究 | 降落相机、全景相机、月球矿物光谱分析仪、月壤结构探测仪, 共4台 |

12月14日着陆在月球(19.51°W, 44.12°N)的雨海北部预选着陆区, 实现了中国在地外天体的第一次软着陆. 着陆后的着陆器、巡视器(月球车), 各自对月球表面开展了科学探测, 就位调查了月表形貌、地质构造和次表层结构, 分析了月表物质的化学和矿物成分, 开展了地球等离子体层的全貌监测和月基光学天文观测, 在“测月、观地、巡天”方面取得了重大的创新成果.

嫦娥四号探测器于2018年12月8日在西昌发射, 2019年1月3日着陆在月球背面的冯·卡门坑内, 国际上首次实现了月球背面与地球间的连续可靠中继通信、月球背面复杂崎岖地形自主避障和高精度着陆(吴伟仁等, 2020), 开拓了人类月球背面软着陆及科学探测的历史. 截至2022年4月8日, 嫦娥四号着陆器和巡视器(“玉兔二号”月球车)完成了41个月昼的探测工作, 于月球背面完整度过了1192个地球日, 巡视器累积行驶约1142m, 获得了大量科学数据. 嫦娥四号的着陆点位于月球背面的南极-艾特肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地内, 在月球深部物质探测和低频射电天文观测方面具有独特的优势, 取得独创性的科学成果(Li等, 2019a).

2.4 月球采样返回

探月三期工程任务是发射嫦娥五号探测器、嫦娥六号探测器, 完成月球采样返回. 月球采样返回的科学目标包括两个独立而又相互联系的任务, 分别是着陆区的现场调研与分析, 以及月球样品的分析和研究. 其中, 通过着陆点区域形貌、地质背景探测和月面物质就位分析, 可以获取与月球样品相关的月面现场分析数据, 从而为现场探测数据和实验室分析数据之间建立关联提供依据. 嫦娥五号配置了4台科学载荷(见表1)来完成月面采样点的地质背景探测和分析.

嫦娥五号探测器于2020年11月4日在海南文昌发射升空, 12月1日着陆于月球正面风暴洋东北部预选着陆区, 12月17日, 嫦娥五号返回器携带样品顺利返回地面, 采集到了1731g月壤样品. 嫦娥六号预计在2024年发射, 将第一次实现月球背面的样品采集和返回.

可以看出, 中国探月工程“绕”、“落”、“回”三期各次任务的科学目标均紧紧围绕月表环境及地月空间环境、月球内部结构、月球的起源与演化等关于月球的科学问题, 成功实施探月工程展示了中国在月球科学探测方面开展相关研究的能力, 并将在促进月球深入认识方面做出重要贡献.

3 月表环境及地月空间环境探测和研究

3.1 月表形貌与地质构造研究

月球表面形貌和地质结构一直是月球探测不可或缺的重要内容。基于月球表面的影像数据和地形数据, 可以开展月表地理单元、基本构造与地质单元的识别和划分, 撞击坑形态、大小、分布、密度等的测量和分析等研究工作, 这些数据是人类理解月球表面演化历史和月球内部结构的基础信息。中国探月工程绕月探测和就位探测期间获取了丰富的影像数据, 依此研制出多种类型的全月球及局部区域影像图和地形数据集(李春来等, 2010, 2012, 2013, 2014), 准确地刻画了月表形貌特征、地理单元和地质构造。嫦娥二号线阵CCD立体相机于2010年10月24日至5月20日期间获取了384轨影像数据, 基于摄影测量方法研制出的全月球地形数据集(CE-2TMap2015, 图1), 涵盖了7、20和50m三种不同分辨率类型的数据, 实现了全月球范围内的无缝镶嵌和高精度定位(李春来等, 2018; Ren等, 2019)。7m分辨率的全月球正射影像和地形数据仍然是目前国际上空间分辨率最高的全月球数字产品, 是研究月球形貌、地质、构造和火山活动历史的基础数据。

基于CE-2TMap2015数据集开展了多项月表形貌与地质构造相关的科学研究。例如, 在Cauchy区域识别出了39个穹窿地形, 其中11个为还未被目前数据库收录的新穹窿, 增强了对月球火山作用的认识(Liu等, 2019b); 综合分析了嫦娥三号着陆点及其周边区域的地形、地貌、地质, 以及月尘等, 研究了着陆点的区域形貌特征和地质特点, 验证和形成了着陆区选择的科学判据和策略(Li等, 2014)。

嫦娥工程获得的高精度地形数据在月球测绘、形貌研究和工程应用中同样发挥着重要的作用。CE-2TMap2015数据集和降落相机图像数据, 实现了嫦娥三号和嫦娥四号着陆点的精确定位, 其精度达到了国际上现有先进水平; 嫦娥三号着陆点位置的精确定位, 建立了月球地理位置目前最北端的高精度月面控制点(图2), 有效地扩大了目前月面控制网的空间范围, 控制面积从约123万平方公里增加到约150万平方公里(增加了22%)(Liu等, 2014; Wang等, 2014); 嫦娥四号在月球背面的下降和着陆点的精确定位, 主要依赖于全球遥感获得的CE-2TMap2015数据集。使用降落相机

获得的图像和CE-2TMap2015数据集, 对嫦娥四号在月球背面的粗避障、精避障, 以及悬停避障等自主导航降落过程进行了精细重构(图3a~3c)。地面观测设备无法直接观测月球背面, 因此无线电测量工作无法直接进行, 探测器的遥测参数也十分有限, 对探测器下降轨迹的重构、对着陆点的精确定位均带来很大困难。通过摄影测量方法实现了探测器在月球背面的精确定位(图3d和3e), 这提供了嫦娥四号着陆器和巡视器(“玉兔二号”月球车)的科学探测背景信息, 同时也提供了位置基准, 使其成为月球背面的第一个测绘控制点(Liu等, 2019a)。

3.2 月球表面成分探测

月球表面物质是研究月球形成和演化历史最为直接的对象, 获取月面物质的化学成分、矿物组成、岩石类型及其分布规律是月球科学最为基础的工作。

遥感探测是获取全球尺度月球表面成分的重要手段。嫦娥一号干涉成像光谱仪获取了706轨有效探测数据, 绘制了铁、钛、镁、铝、钙和硅等六种月表主量元素, 以及镁指数的高分辨率分布图(图4), 其中, 镁指数全球分布图是国际上首次完成的成果, 可被广泛应用于确定月球高地的地壳异质性、寻找高铝玄武岩、评估地层和月球的平均元素丰度, 有助于进一步了解月球的起源和演化过程(Wu, 2012)。研究结果表明, 月表高地各元素的平均含量顺序是 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{FeO} > \text{TiO}_2$, 而对于月海地区, 顺序是 $\text{SiO}_2 > \text{FeO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{TiO}_2$ 。嫦娥一号伽马射线谱仪获取了1103轨探测数据, 分析、绘制了分辨率在 $150\text{km} \times 150\text{km}$ 量级的铀、钍、钾等元素的全月面分布(Zou等, 2011), 对于研究KREEP物质在全球尺度, 特别是大型盆地区域的分布情况, 了解月球撞击和火山活动历史具有关键意义。根据嫦娥二号伽马射线谱仪观测数据进一步绘制了全新的全月球钾元素分布图(图5), 其全球平均丰度为 $(620 \pm 615)\text{ppm}$ ($1\text{ppm} = 1\mu\text{g g}^{-1}$), 上限为 3240ppm , 与美国月球勘探者号(Lunar Prospector, LP)、日本月亮女神号(Kaguya)和嫦娥一号的探测结果基本一致, 同时, 指出在危海和东海区域内, 钾元素的丰度相对较高(Zhu等, 2013)。

月表就位探测在探测精度和研究深度上能够对全球尺度的研究成果进行拓展和提升, 促进整体全局知识与局部精确认识的高度融合, 实现科学理性认识的

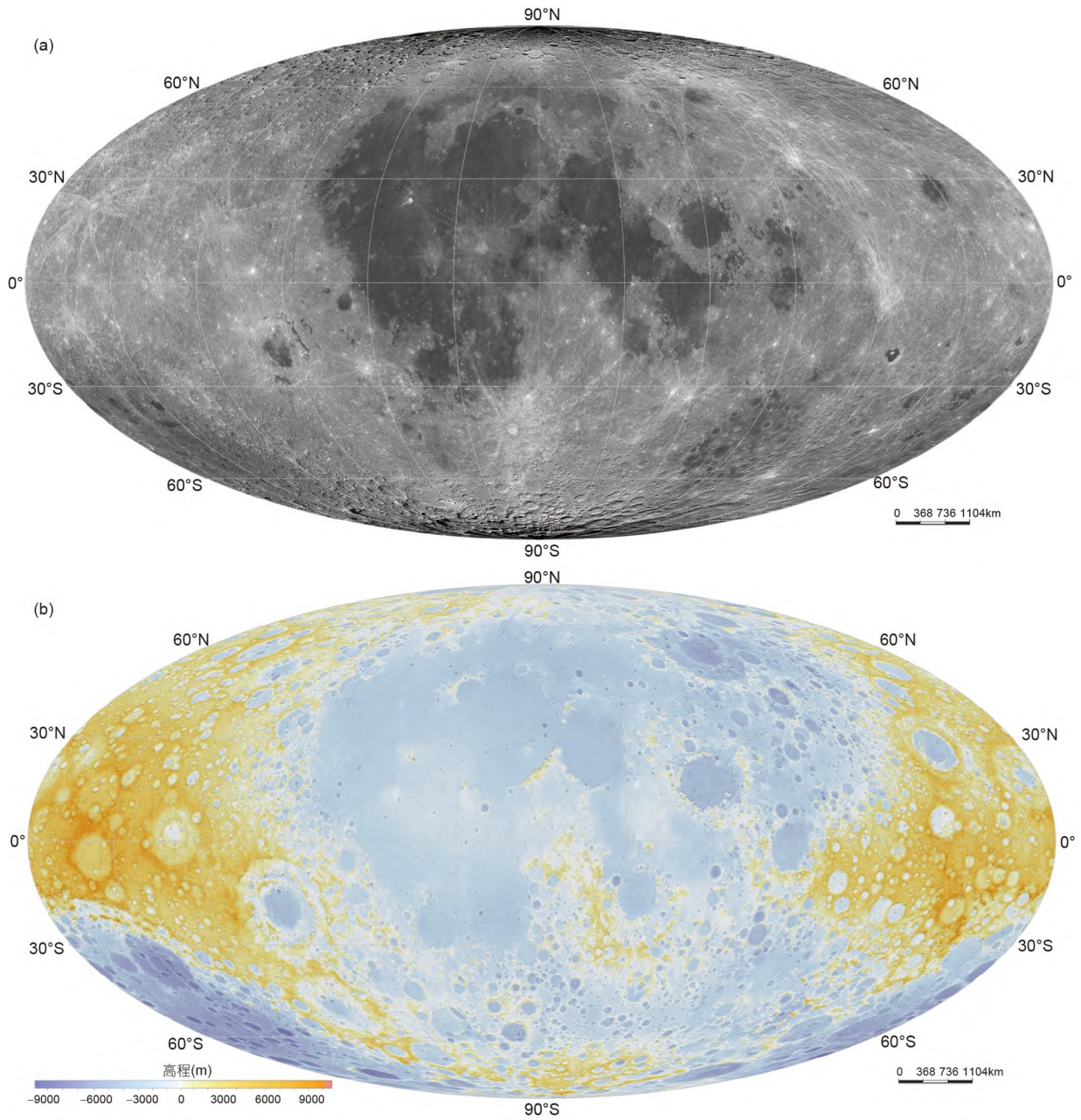


图1 嫦娥二号全月7m分辨率正射影像(a)和地形数据(b)
据李春来等(2018)和Ren等(2019)

升华. 嫦娥三号“玉兔号”月球车上所搭载的粒子激发X射线谱仪(APXS), 以及可见近红外成像光谱仪(VNIS)的探测数据的综合研究, 获得了月表着陆区月壤、岩石的化学成分和矿物学信息, 发现“广寒宫”附近的岩石是一种新型月海玄武岩, 含有较为丰富的橄榄石和钛铁矿, 使得嫦娥三号着陆区成为新的月球遥

感研究的定标点(图6; Ling等, 2015); 嫦娥四号红外成像光谱仪(VNIS)首次实现了对月球背面的就位光谱探测(Li等, 2019a; Gou等, 2019; Huang等, 2020; Lin等, 2020), 其中, 利用嫦娥四号“玉兔二号”月球车上搭载的VNIS获得的0.4~2.4 μm 波段的反射光谱, 发现嫦娥四号着陆点的物质存在低钙辉石和橄榄石的矿物组

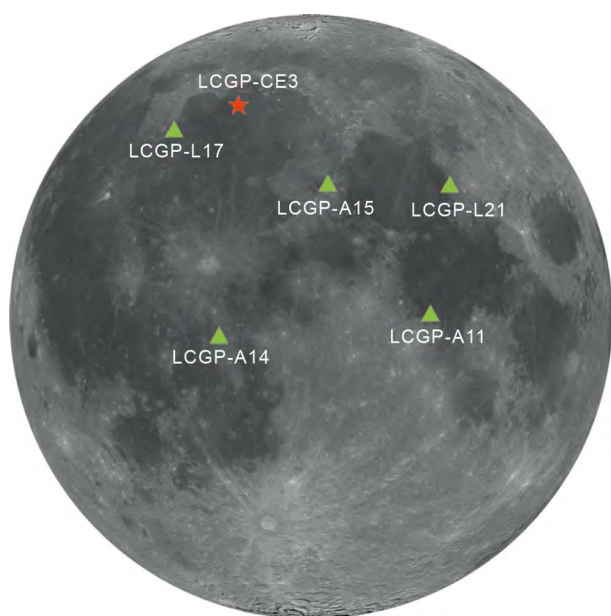


图2 嫦娥三号着陆点作为月面绝对控制点
据Wang等(2014)

合,这可能代表了源于月壳下部,甚至源于月幔的深部物质(图7; Li等, 2019a)。这些“意外”的发现,更新了我们对月球物质构成、分布和火山活动的认识。

嫦娥五号样品的实验室分析和研究工作,进一步对月壤的物质成分进行了定量测量,并可服务于月球年代学的认识。嫦娥五号月球样品已开展了大量基础特征综合分析与研究(Li等, 2022; Zhang等, 2022; Guo等, 2022; Gu等, 2022; Mo等, 2022),极大地促进了国内的样品处理和分析技术的发展。初步研究结果发现,嫦娥五号月壤的矿物组成主要为斜长石、辉石、橄榄石、钛铁矿和玻璃物质等,其中斜长石以高钙含量的培长石为特征,辉石主要以普通辉石为主,易变辉石次之,几乎不含斜方辉石;橄榄石主要为铁橄榄石,玻璃物质的含量低(相对于阿波罗月球样品),仅约20%。化学成分上,嫦娥五号月球样品表现出低SiO₂和碱性元素含量,中等TiO₂和Al₂O₃含量,以及高FeO含量,而K、U、Th和REE含量均低于KREEP物质,代表了一类可能年轻的、“全新的”分异型月海玄武岩(图8; Li等, 2022)。

3.3 月壤微波特性研究

月壤通过其与太阳风的相互作用,可以记录太阳的辐射历史,这对于研究月球物质的暴露年龄,乃至

对于研究太阳活动的演化、太阳对地球气候变化影响,均提供了便捷的途径。月壤的研究也有利于了解全月球的物质组成,甚至岩石类型的分布,月表撞击坑分布、月壤的厚度和成熟度能够为月表物质暴露年龄和撞击计年研究等提供依据。利用微波辐射技术,可以获得月壤的厚度数据,为进一步研究月球的物质组成提供信息。嫦娥一号配备了微波辐射计用于测量月球表面的自然微波辐射,通过测量不同频率下的亮温数据(brightness temperature, TB),分析月壤的分布和属性。嫦娥一号微波辐射计获取的探测数据共计1690轨,包括四个频段的全月球微波辐射数据,分别是3.0、7.8、19.35和37.0GHz,空间分辨率达到几十公里量级,在国际上开创了“微波月亮”研究的先河,并由此得到了全月球表面月壤层的分布及厚度变化(图9)、估算了月壤中氦-3的分布与资源总量(Zheng等, 2012)。从微波辐射亮温分布图可明显分辨出月球上月陆、月海和大型撞击坑等主要地质单元,表明月表亮温分布和物质组分分布有着明显的相关性,同时也受到地形的影响。月海区主要分布着玄武岩,亮温相对较高。而高地(月陆)分布的是斜长岩,亮温相对较低。

就位探测为月壤成熟度的研究提供了更好的机会。借助“玉兔二号”月球车采集的地形数据,研究了月球车车轮与月壤之间相互作用的效果,可以反映出嫦娥四号与嫦娥三号着陆点区域月壤强度的差异,可能表明与形态和空间风化程度有很大关系(Tang等, 2020)。嫦娥四号着陆点位于冯·卡门(Von Kármán)坑内区域,附近撞击坑的喷射物覆盖了该区域,月壤成熟度较高。

实验室样品分析,尤其是月壤不同层位样品的岩石矿物学特征、全岩化学组成等方面的综合研究,有望对月壤的形成和演化等获得新的认识。嫦娥五号月球样品的研究(Li等, 2022; Zhang等, 2022; Guo等, 2022; Gu等, 2022; Mo等, 2022; Xi等, 2022)表明,嫦娥五号月壤中,95%重量的颗粒粒径分布在4.84~432.27μm(平均值49.80μm),显示出较高的成熟度。嫦娥五号月球样品堆积密度仅约1.2389g cm⁻³,但真密度可达3.1952g cm⁻³,比表面积为0.56m² g⁻¹,说明月壤样品很疏松。

3.4 月地空间环境研究

嫦娥一号和嫦娥二号探测器都搭载了高能粒子和

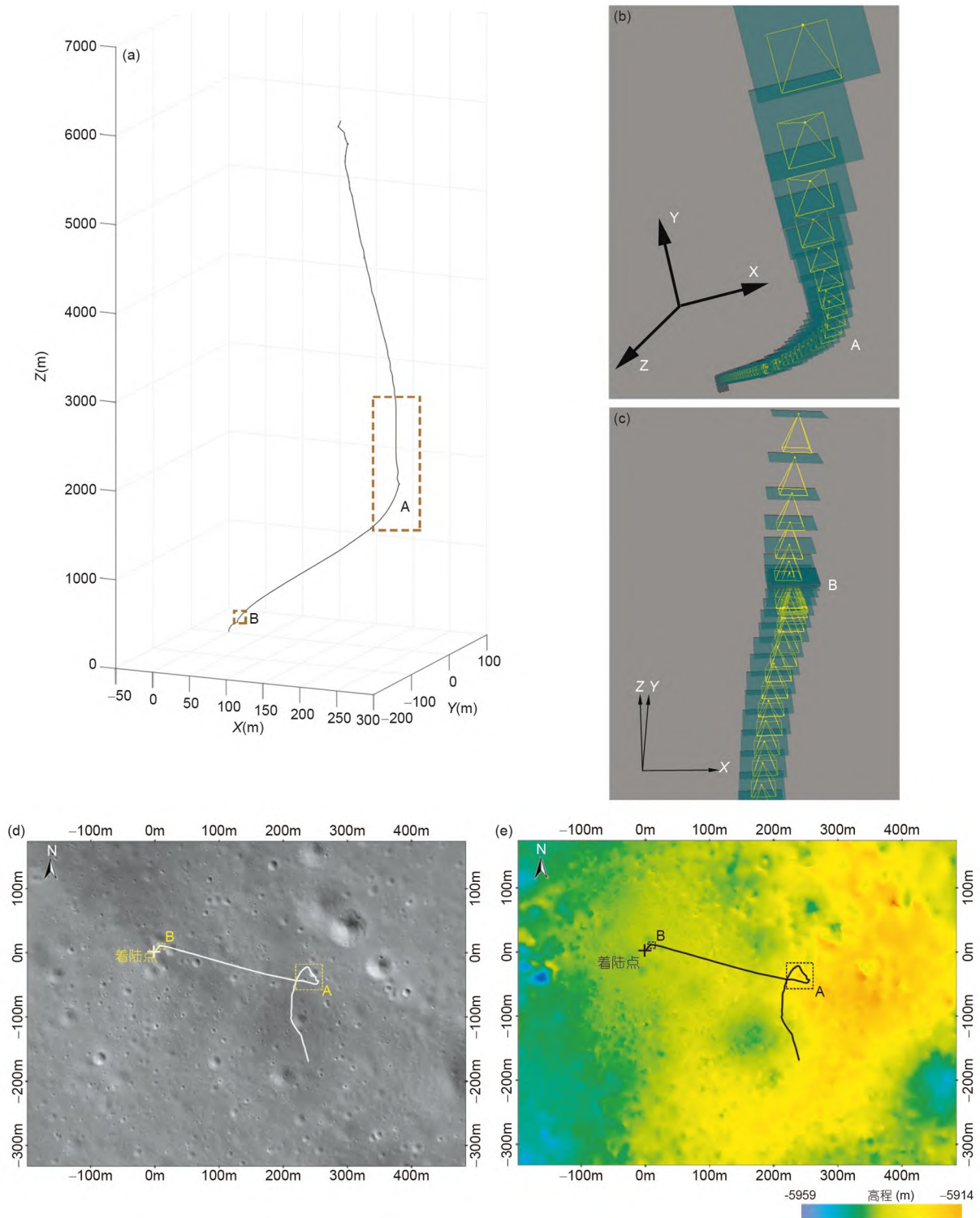


图3 嫦娥四号探测器动力下降轨迹图及定位结果

(a)显示从轨道高度6000m到月球表面的嫦娥四号动力下降轨迹; (b)和(c)分别为下降轨迹中A和B区域的放大图像, 其中绿色方框表示降落相机(LCAM)焦平面的位置, 黄色圆锥体表示降落相机的视场; (d)中的白线为下降轨迹在LCAM DOM上的投影; (e)中的黑线为下降轨迹在LCAM DEM上的投影. 据Liu等(2019a)

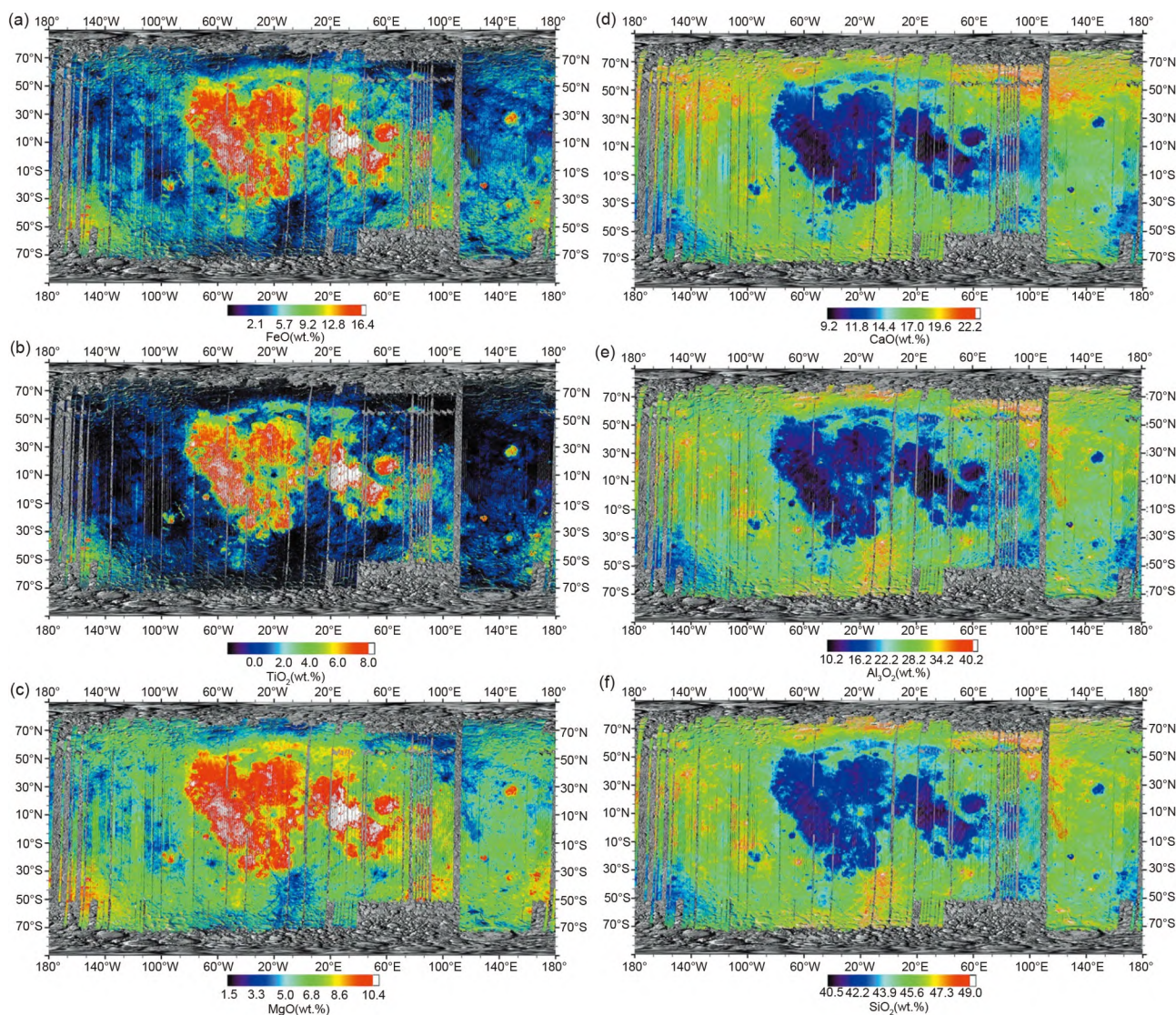


图4 月表六种主量元素丰度分布图
据Wu(2012)

太阳风离子探测器, 可用于探测地月和近月的空间环境. 嫦娥一号太阳风离子探测器探测到月球两极日夜交界面粒子的加速现象(Wang等, 2010), 揭示了太阳风等离子体在月表的物理过程及其与月球的相互作用方式. 嫦娥二号太阳风离子探测器在4个环月轨道上获得的光谱数据, 发现了在近月等离子体环境中存在一个质子密度降低和温度升高的区域, 表明近月空间中可能存在与磁场异常的微磁层, 能够有效地屏蔽和加热入射的太阳风质子(图10; Wang等, 2012), 这一发现为月球空间环境以及月球演化的研究提供了新的重要

参考.

嫦娥三号极紫外相机全方位并长期地检测了地球等离子体层产生的30.4nm辐射, 在此过程中, 地球等离子体整体的范围及其变化特征得以全面观测, 并成功获取了地球的等离子体层三维图像(Feng等, 2014). 此外, 观测发现在磁层亚暴的影响下, 地球等离子体层边界会发生凸起, 这揭示了太阳活动对地球空间环境有影响, 并确认了地球等离子体层的尺度, 以及与地磁活动强度反向相关的关系. 该研究提出了一个新的观点, 即指出了等离子体层的空间结构会受到地球磁场

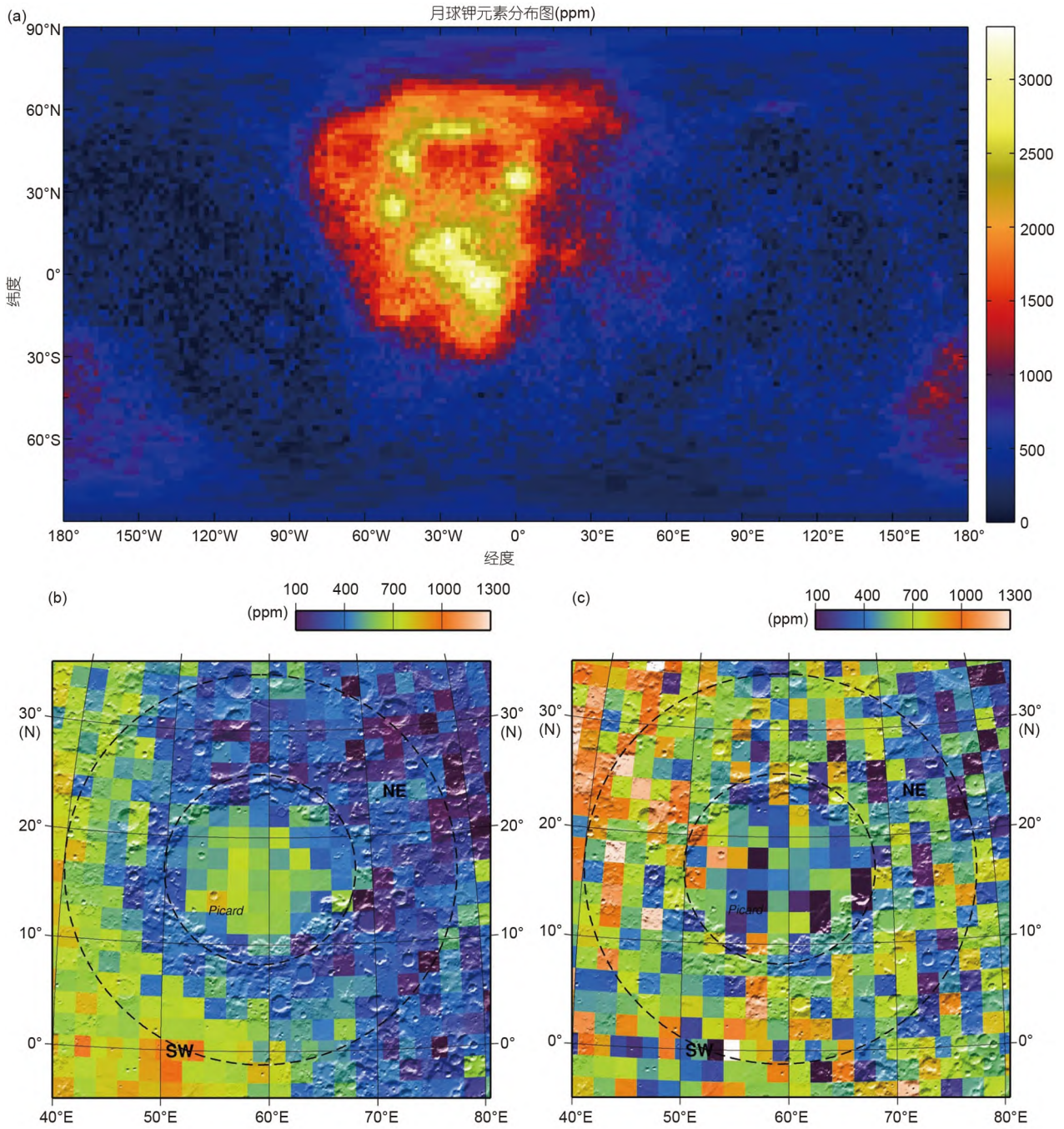


图 5 全月球钾元素丰度分布图(a)以及危海盆地区域钾元素丰度图((b), (c))
(b)为CE-2 GRS数据结果, (c)为LP GRS结果. 据Zhu等(2013)

和电场的约束及控制(图11; He等, 2016).

嫦娥四号任务开展了月球背面粒子辐射环境的探测与研究, 这是一项极具试验性的工作. 根据月表中子与辐射剂量探测仪的观测数据, 月背表面存在强烈的辐

射(Zhang S Y等, 2020). 中性原子探测仪发现, $0.1E_{sw}$ (E_{sw} 是太阳风离子能量)以下的中性原子通量明显高于以往遥感观测的结果(Zhang A B等, 2020), 这对开展太阳风与月表相互作用的研究来说是一种重要的支

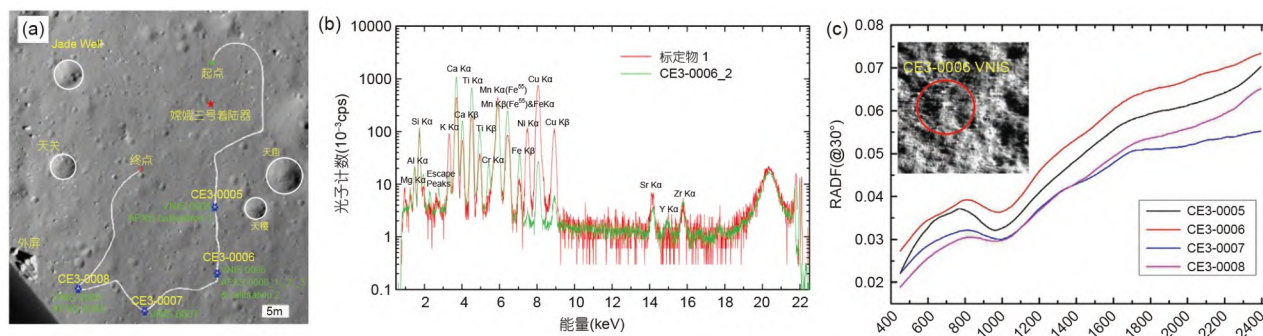


图6 “玉兔号”月球车在月表巡视路线及物质成分就位探测数据

(a) “玉兔号”月球车的巡视路线图以及APXS和VNIS测量的位置; (b) CE3-0006_2号APXS光谱在校准光谱上的叠加图; (c) 0005、0006、0007和0008站点的综合VNIS光谱(450~2400nm), 图中是CE3-0006站点处的750nm处的VNIS(450~950nm)图像. 据Ling等(2015)

撑, 促进了关于月表辐射危害的评估和防护设计。

嫦娥三号月基光学望远镜对8颗掩食双星和天琴座RR变星开展了长时标光变监测(Li等, 2015), 得到了月球外逸层中羟基(水)密度上限值的最新值, 发现该值的最低上限值为 10^4cm^{-3} , 此结果是迄今为止所获得的外逸层中羟基密度的最低上限值(Wang等, 2015), 对月球物质水的含量、逃逸和近月空间环境研究具有重要意义。

4 月球次表层结构与月球内部结构

对月球内部结构的探测, 不仅有助于清楚认识月球的状态、结构和组成, 还有助于了解和研究月球的起源以及其演化历史, 是进行这类研究最可靠, 也是最直接的证据。中国探月工程搭载了测月雷达来获取月球次表层的结构信息, 并结合环绕器的轨道跟踪数据和国内外探测数据, 研究了月球重力场分布和反演月球内部结构(鄯建国等, 2011)。

嫦娥三号任务使用雷达回波探测方法对着陆区月球地下浅层结构和月壤厚度进行了探测, 建立了月球次表层结构的识别技术和方法(Su等, 2014; Fa等, 2015; Li等, 2018)。“玉兔号”月球车的测月雷达数据发现嫦娥三号着陆点地下具有明显的分层结构, 在400多米的深度范围内存在多达9个地层(Xiao等, 2015)。而在月球背面, 嫦娥四号“玉兔二号”月球车测月雷达获得了更为清晰的成像结果, 高频雷达(500MHz)数据显示, 嫦娥四号月球车巡视路线地下主要由低损耗、疏松的月壤和石块构成, 识别出三个不同的次表层地层

单元, 发现该区域月海玄武岩的深度应大于42m(Li等, 2020)。基于低频雷达(60MHz)探测数据, 还获得了着陆区深度约500m的深部溅射物, 以及玄武岩等的分层结构(Zhang等, 2021)。

嫦娥五号月壤结构探测仪是第一个采用天线阵列形式部署的地外天体探测雷达, 雷达成像数据揭示了采样点月壤顶部2.5m厚度范围内的超精细地下结构, 分辨率达到5cm。分析结果显示, 采样点月壤下表层主要是由细小的月壤颗粒和不均匀分布的岩石碎块组成的。雷达数据“看”到的月壤层被扰动的深度, 与其他遥测数据和月球钻孔样品复核的深度基本一致, 也验证了测月雷达数据解译方法的正确性(图13; Su等, 2022)。

5 嫦娥五号月球样品对月球起源与演化研究的贡献

阿波罗和Luna月球样品的研究表明, 最年轻的月球样品也要老于31亿年, 即使一些月球陨石获得过约28亿年的玄武岩结晶年龄, 通常认为约30亿年前月球已停止了火山地质活动。嫦娥五号选择了在纬度较高的风暴洋东北地区采样, 地质背景分析表明, 嫦娥五号采样点可能采集到较年轻的、受溅射物污染较少的玄武岩物质。

嫦娥五号月球样品返回地球后, 基础特征的研究结果表明, 它是一种分异的、非典型KREEP型的玄武岩组分(Li等, 2022; Zhang等, 2022), 撞击计年和初步的年龄分析表明其形成年龄可能要小于20亿年(Che等, 2021)。Pb-Pb同位素分析进一步精确地将嫦娥五号

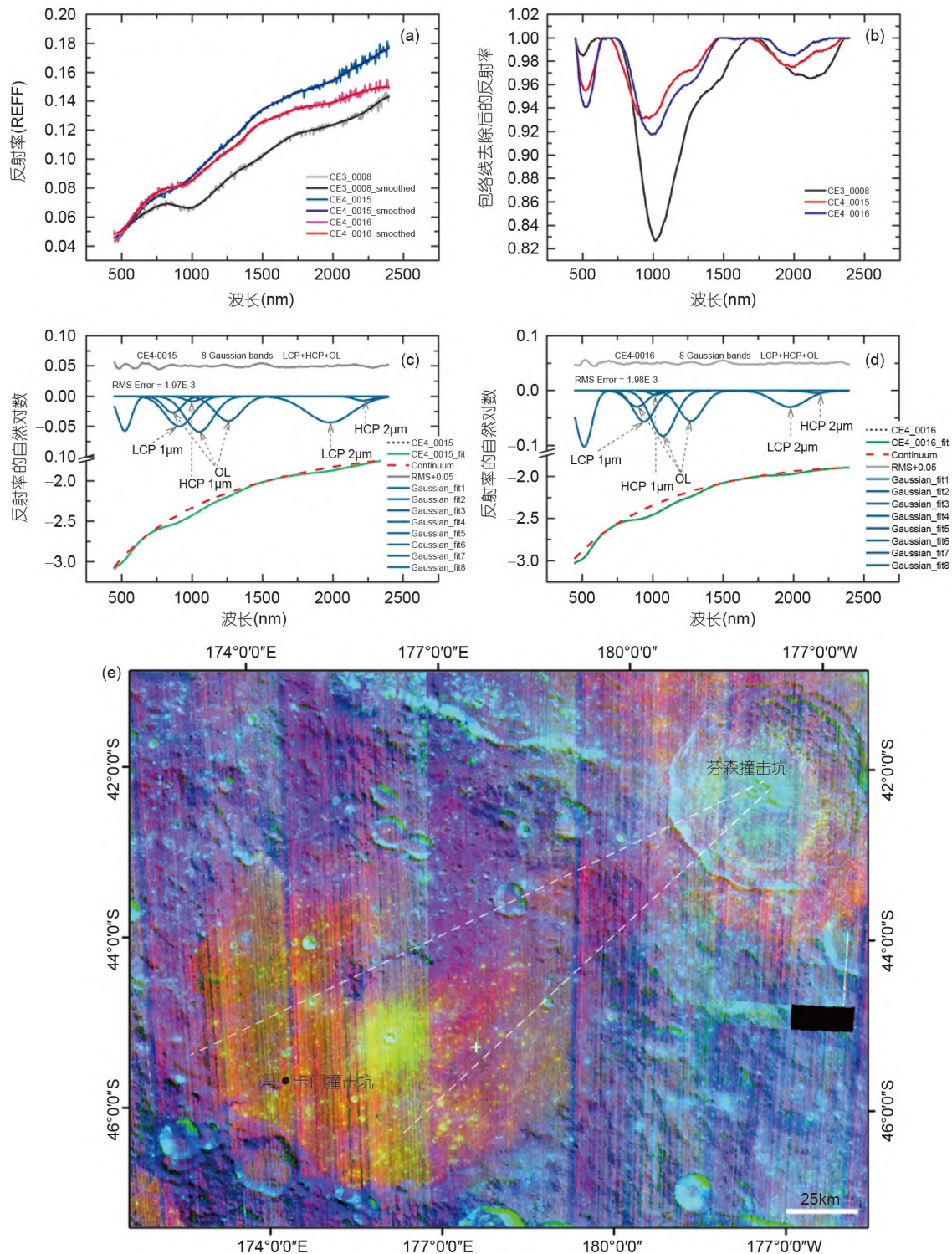


图7 嫦娥四号着陆区光谱探测结果

(a) 嫦娥四号(CE4_0015和CE_0016站点)和嫦娥三号(CE3_0008站点)VNIS反射光谱(REFF)对比图; (b) 包络线去除后的(a)的光谱; (c), (d) 利用低钙辉石(LCP)、高钙辉石(HCP)和橄榄石为端元, 分别对CE4_0015和CE4_0016站点光谱进行修正高斯模型(MGM)拟合的结果; (e) 冯·卡门撞击坑内溅射物分布示意图(M3假彩色合成图)。据Li等(2019a)

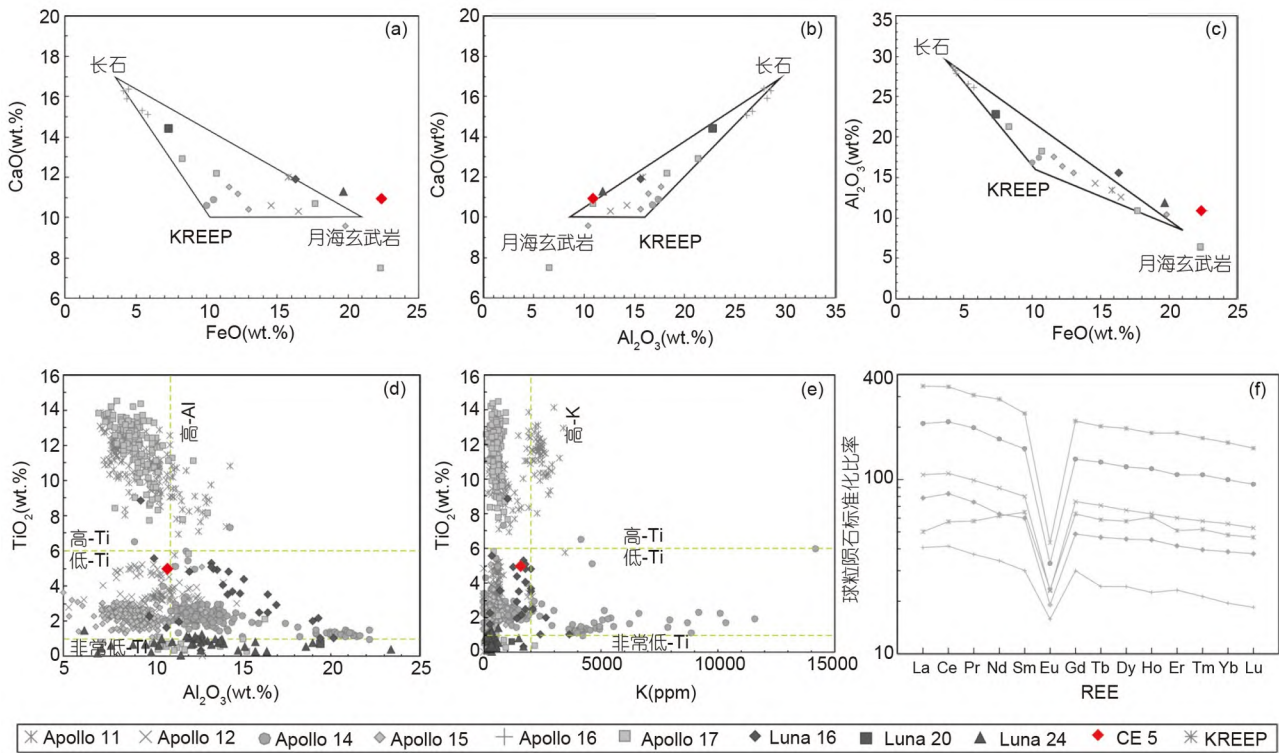


图 8 嫦娥五号样品与Apollo和Luna月球样品的化学成分比较

(a)-(c) Al₂O₃、CaO和FeO的元素变化; (d)、(e) 月海玄武岩中的TiO₂、Al₂O₃和K分类方法; (f) 月壤稀土元素(REE)含量的球粒陨石标准化图。据Li等(2022)

月球样品中玄武岩碎屑的结晶年龄限定为(2030±4) Ma(Li等, 2021), 确认了嫦娥五号玄武岩比所有月球样品还要年轻约800Ma, 证明至少在20亿年前月球仍然存在火山作用, 这极大地延长了月球的“地质生命”, 改变了月球岩浆在30亿年前就已停止地质活动的传统认知。嫦娥五号月壤样品中磷酸盐和硅酸盐矿物的原位U-Pb同位素分析, 限定了其初始铅的组成, 推算出其源区具有低U/Pb比值, 指出玄武岩源区不含KREEP组分(图14; Li等, 2021)。嫦娥五号这种珍贵的、不同寻常的月球样品, 以其显著年轻的年龄和显著不同的类型和成分, 改变了人类对月球演化的认知, 开启了月球科学研究的新时代。

嫦娥五号样品约20亿年结晶年龄的研究结果, 更新了目前广泛应用的撞击年代学模型——Neukum模型, 为撞击坑统计定年曲线提供了关键锚点(图15; Yue等, 2022), 更新的模型可能得到更可靠的撞击年龄, 对内太阳系的年代学和撞击历史具有重要的影响。

中国探月工程的研究成果, 尤其是嫦娥五号返回

样品的研究成果, 对于解答月球的起源与演化这一月球科学基本问题做出了重要贡献, 在月壤的形成演化与太阳活动记录、月球表面撞击事件、月球火山活动史、月壳的形成和演化等月球演化历史问题提供了多项全新的认识。

遥感探测的结果推测, 月球上年轻的(<28亿年)火山活动可能主要分布在风暴洋KREEP地体上。一个流行的假说是富含放射性元素U、Th、K等的KREEP组分为月球持续的火山活动提供了热源。嫦娥五号月球玄武岩屑中的矿物学和Sr-Nd同位素研究表明, 玄武岩形成时并未卷入KREEP物质, 其高的稀土含量产生于岩浆形成时的低比例熔融和高程度分离结晶。嫦娥五号样品的特性说明, 在月球晚期的岩浆活动中, 排除了岩浆源区应富含放射性生热元素的主流假说(图16; Tian等, 2021)。

月球的水含量及其分布是揭示月球起源、岩浆洋结晶分异和月球火山活动的持续时间等重大月质事件最重要的约束。目前关于月球水(OH/H₂O)的含量、分

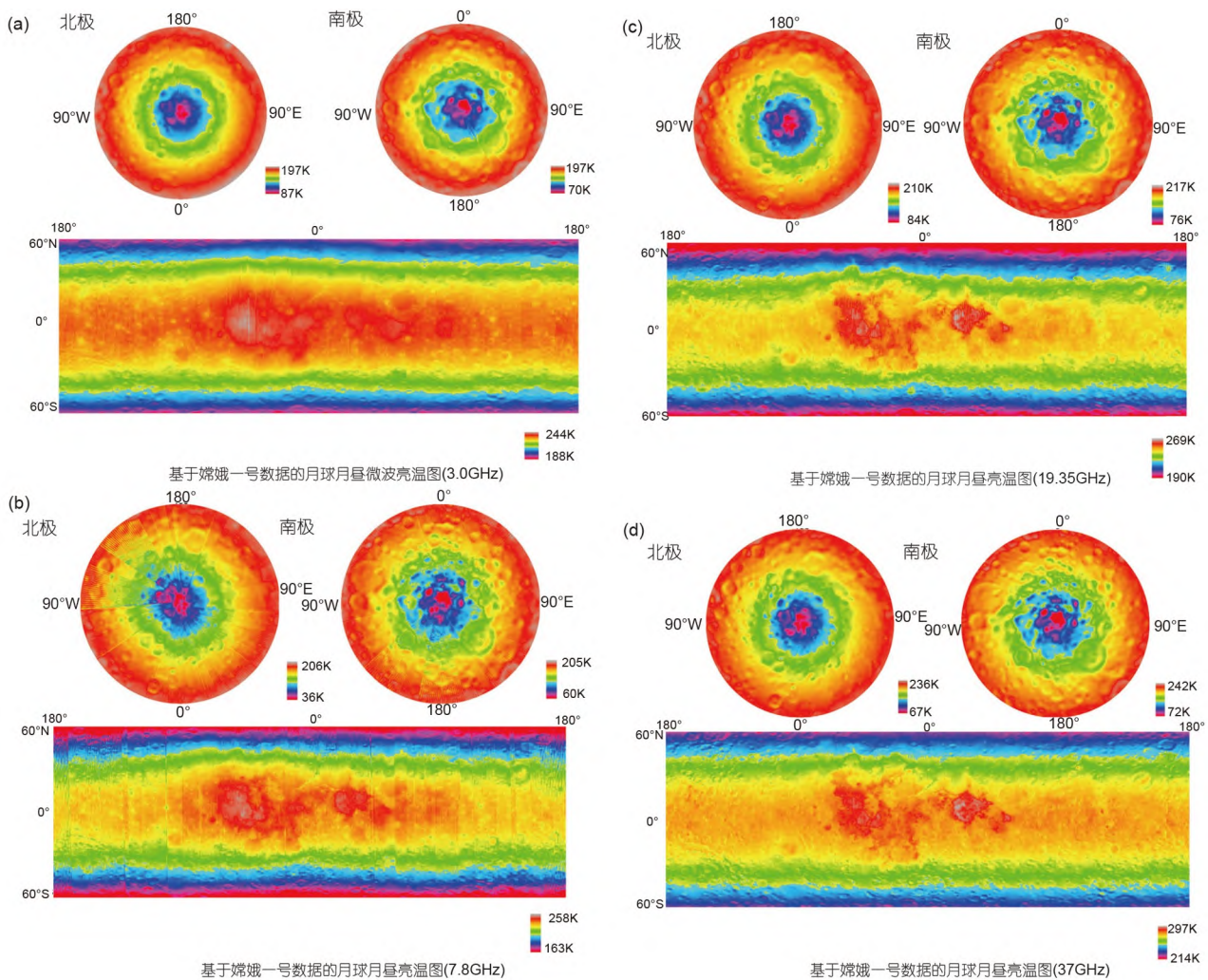


图9 3.0、7.8、19.35和37.0GHz四个频段的全月球月昼微波辐射亮温数据
据Zheng等(2012)

布特征、随时间变化规律及其来源仍然存在很大的争议。对嫦娥五号岩屑中的磷灰石和钛铁矿中的熔体包裹体的水含量和氢同位素分析显示，嫦娥五号样品这一最年轻玄武岩的成因并不是其月幔源区富水所致。而风暴洋地下月幔源区的水含量随时间呈现降低的趋势，可能是该区域持续不断的火山活动一直在抽取月幔源区的水(Hu等, 2021)。而在嫦娥五号月面就位探测光谱数据中，发现了 $2.85\mu\text{m}$ 处羟基水的明显吸收特征(Lin等, 2022; Liu等, 2022)，经月壤样品的矿物学分析证实，该羟基水的来源主要(至少)为月球样品中的羟基磷灰石，而不是太阳风，说明嫦娥五号月球样品中存在内生水(Liu等, 2022)，在晚期玄武岩浆的形成

和结晶过程中水的作用应该是存在的。

月球岩浆洋模型显示，月表的矿物成分与其空间分布，均由早期全月球范围内的分异事件和岩浆活动所决定。所以，确定月表不同区域的元素、月表的主要矿物的含量，是理解月球演化历史的重要途径。嫦娥三号着陆点“广寒宫”附近的月海玄武岩的研究结果为月球晚期火山活动和岩浆演化机制提供了新的信息(Ling等, 2015)。测月雷达甚至识别出嫦娥三号着陆区存在三个阶段的火山喷发，进而提出在25亿年后可能仍有大规模火山活动的观点(Zhang等, 2015)。结合嫦娥一号干涉成像光谱仪、日本Kaguya多波段成像仪、印度Chandrayaan-1矿物绘图仪、美国LRO 热红

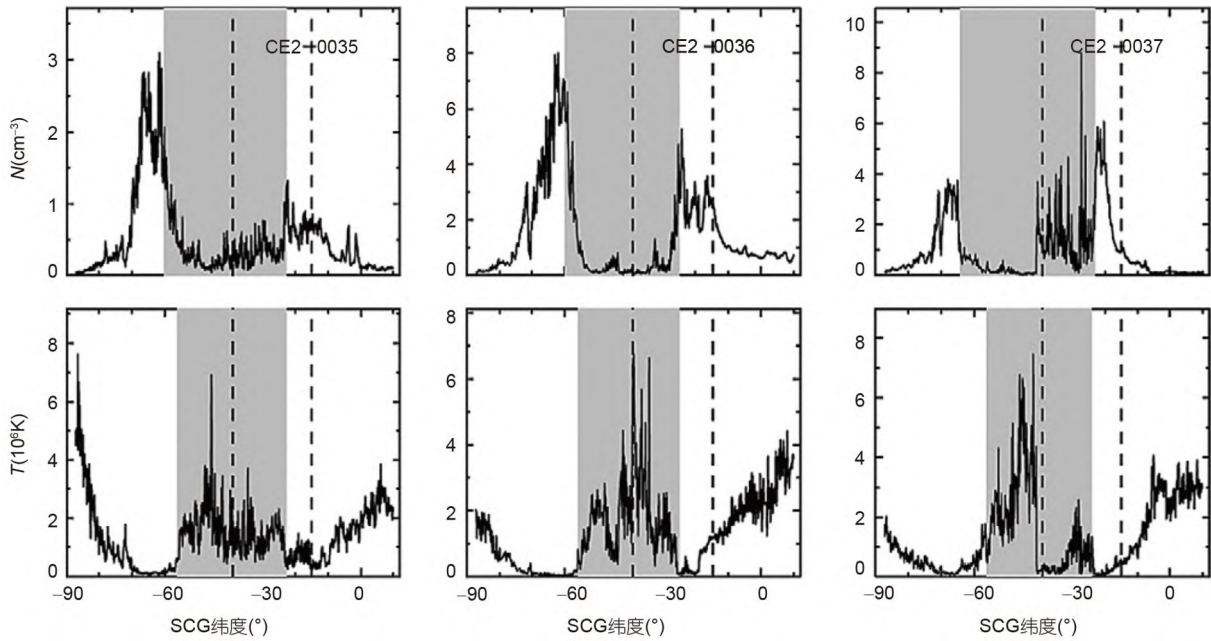


图 10 利用嫦娥二号卫星太阳风离子探测器的科学数据证实了月表微磁层的存在

几个靠近质子腔的嫦娥二号月球轨道中获得的质子密度(上层图示)和温度(下层图示)的剖面图。SCG纬度指月心地理纬度, 阴影区域显示出明显的质子密度降低和质子温度增强。据Wang等(2012)

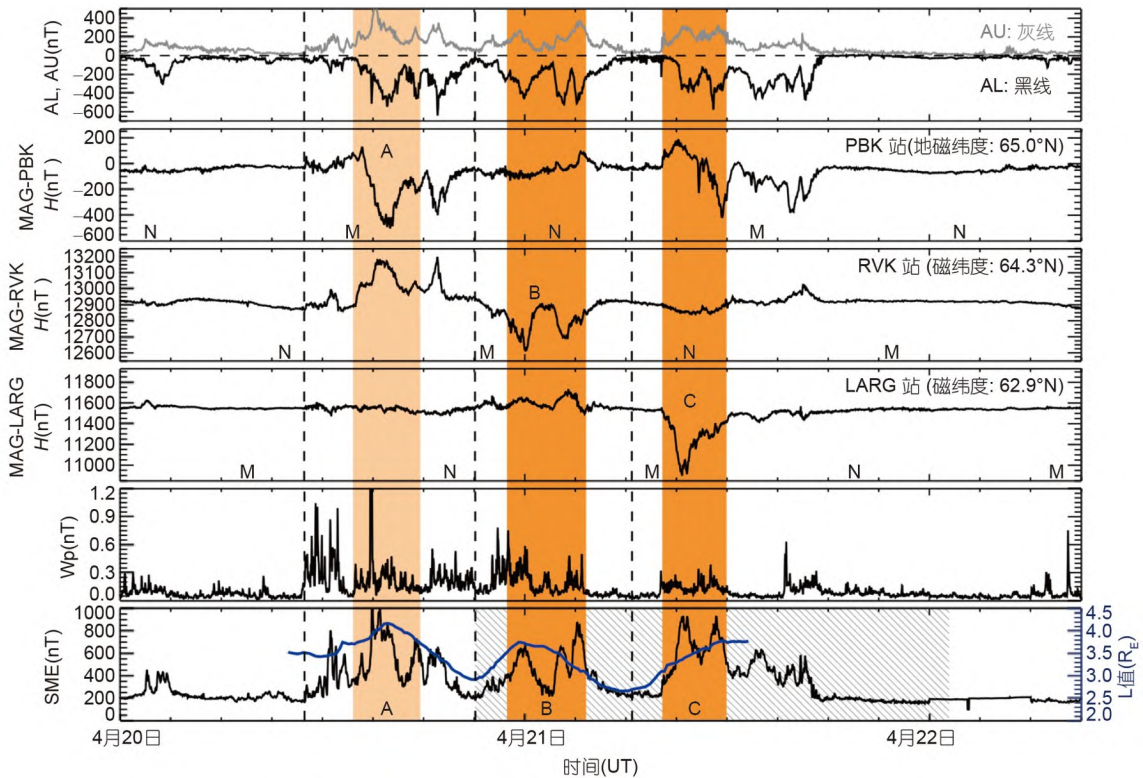


图 11 地球等离子体层边界磁层亚暴凸起观测结果

据He等(2016)

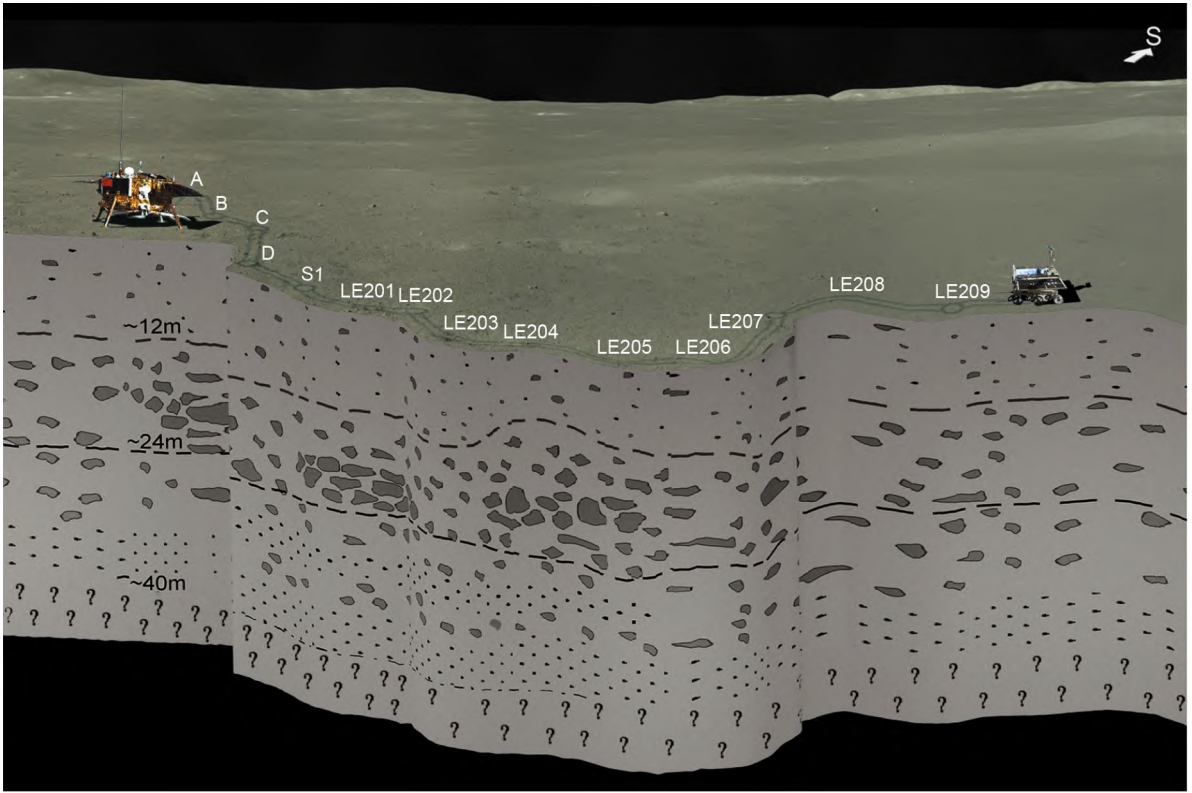


图 12 月表下层40m深度喷射沉积序列的首幅高分辨率图像
据Li等(2020)

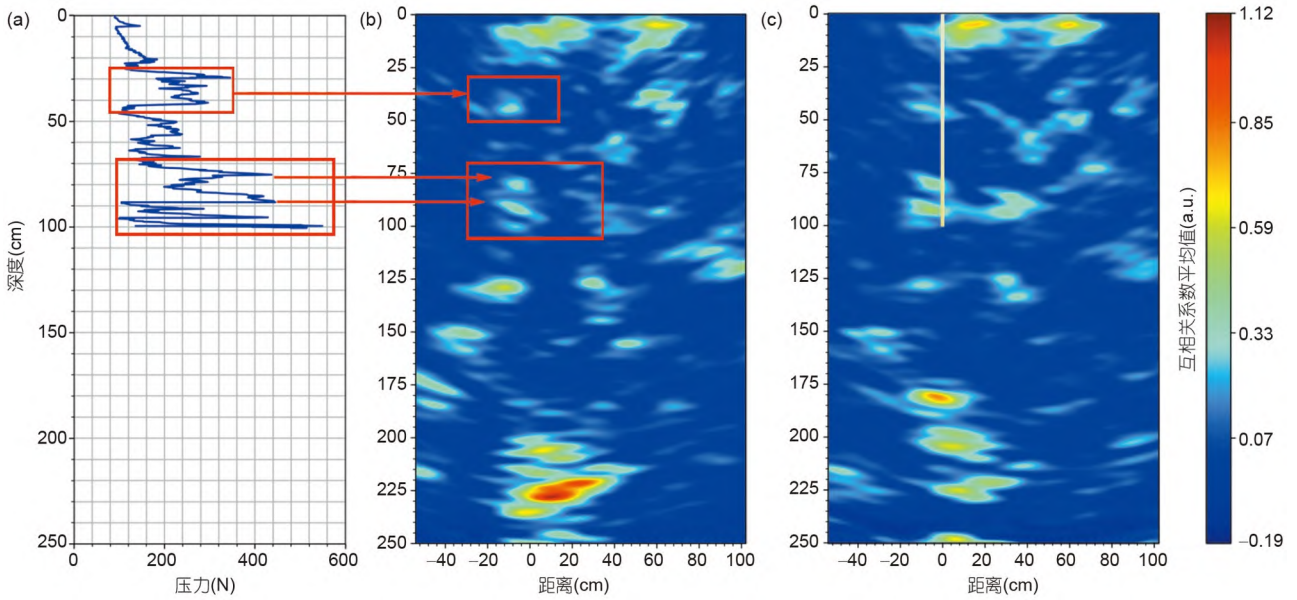


图 13 嫦娥五号月壤结构探测仪采样区月壤探测结果

(a) 钻头受力沿深度的变化; (b) 经过采样时间校准、带通滤波、时延校准、背景去除、球面指数补偿(SEC)增益、互相关性改进等处理后的钻孔前LRPR雷达图像; (c) 钻孔后雷达图像, 处理方法与(b)相同. 据Su等(2022)

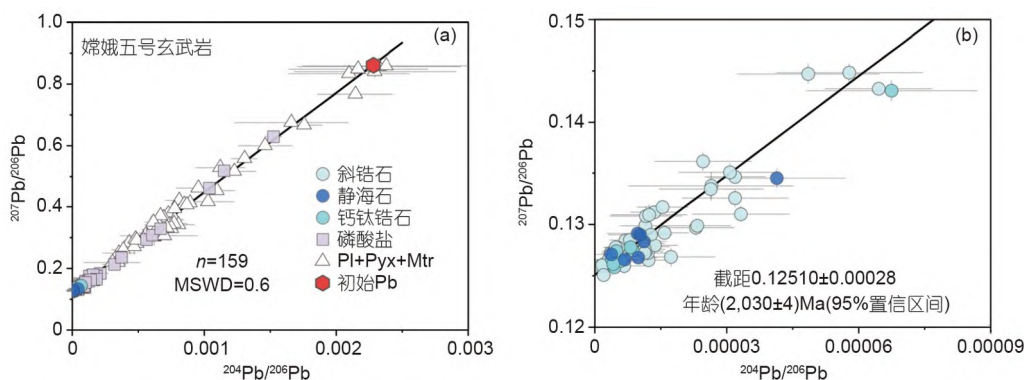


图 14 嫦娥五号月球玄武岩的Pb-Pb等时线图

(a) 全矿物Pb-Pb等时线图; (b) 等时线图中左下角的局部放大图, 突出了含锆(Zr)矿物的测量结果. 据Li等(2021)

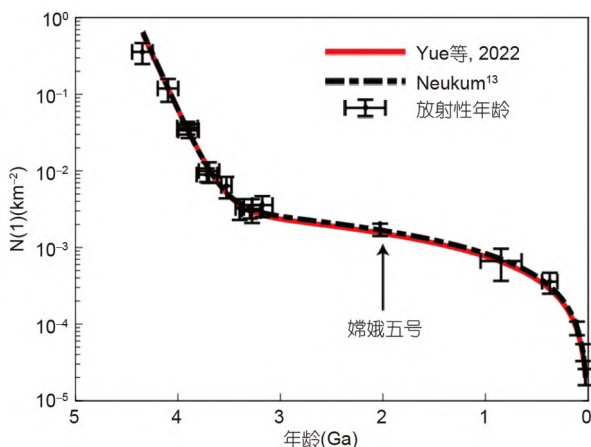


图 15 基于嫦娥五号月球样品的年代学模型
据Yue等(2022)

外辐射计等月表物质成分探测数据, 从月球遥感角度对于嫦娥三号着陆区的镁指数、铁镁质矿物含量、岩石类型分布、月海玄武岩的年龄及其地质意义等进行了深入研究, 并产生了新的认识。

嫦娥四号获取的着陆区就位光谱探测数据, 对于解答月幔、月亮和月核的物质成分, 以及如何影响月球形成与演化等疑问提供了最可能的直接证据。月球背面的就位光谱探测研究结果显示, 着陆器和巡视器位于冯·卡门坑玄武岩“平原”的撞击溅射物上, 首次在月球背面发现了可能代表月球深部的物质成分, 可能揭示了月幔的物质组成, 为研究月球早期岩浆洋的深度、冷却速度等特征提供了新的约束条件, 也为未来中国开展月球样品采样返回任务提供了有益信息(Li等, 2019a)。

6 未来研究展望

截至2020年底嫦娥五号任务完成月面采样返回, 中国探月工程实现了从嫦娥一号开始的“五战五捷”, 完成了“绕”、“落”、“回”三步走的目标, 逐渐建立起了月球探测标准规范和知识体系, 受到高度关注的一系列科学研究成果扩展和丰富了人类对月球的认识。中国月球和行星科学的发展得到了极大的、积极的推动, 并由此培养和诞生了一批行星科学领域的人才, 形成了月球和行星科学的研究生态。

2005年, 在中国探月工程论证过程中, 欧阳自远等人总结了当前月球科学研究中存在的14个主要问题(欧阳自远, 2005; Li等, 2019b)。美国国家研究委员会在《月球探测的科学背景》(NRC, 2007)报告中提出了8个月球探测关键科学问题, 月球与行星研究所月球探索分析组织在此基础上发布了《推进月球科学》报告(LEAG, 2017), 更新完善了月球探索的11个核心科学概念, 以及针对这11个科学概念的研究建议。2019年, 欧洲航天局(European Space Agency)提出未来十年优先开展的7项月球科学活动(ESA, 2019)。围绕这些科学问题, 中国月球探测工程在月表环境及地月空间环境、月球次表层结构与内部结构、月球的起源与演化等研究方面做出了重要贡献, 促进了月球与行星科学的创新发展。代表性的研究成果主要包括: (1) 获取了一大批月球基础数据, 如国际上目前空间分辨率最高的全月球数字地形产品, 构建月背首个控制点; 在国际上首次采用被动微波遥感技术探测并获得了全月球的微波辐射亮温数据(包括3.0、7.8、19.35和37.0GHz四个频段), 开创了“月亮微波”的研究先河, 成功获取

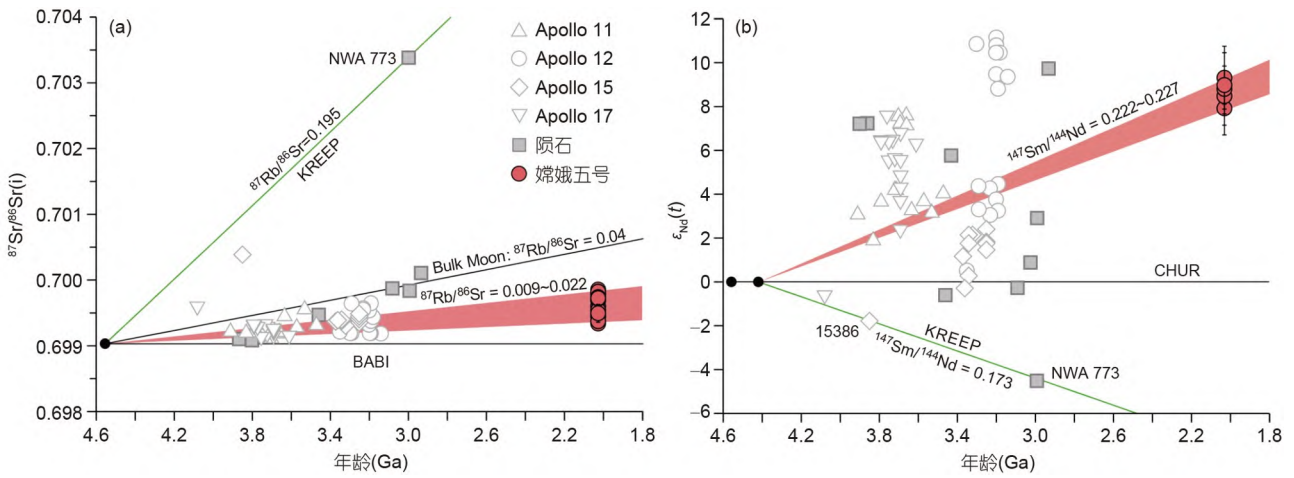


图 16 嫦娥五号月球样品的Rb-Sr和Sm-Nd同位素演化线
 (a) 嫦娥五号玄武岩源区中的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值; (b) 嫦娥五号玄武岩源区中的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值. 据Tian等(2021)

| 2004~2020年已实施任务 | | | | | | 2020~2030年计划实施任务 | | | |
|-----------------|------------|--------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------|---------|---------------|
| CE-1 | CE-2 | CE-3 | CE-5T | CE-4 | CE-5 | CE-6 | CE-7 | CE-8 | |
| 2007年 | 2010年 | 2013年 | 2014年 | 2018年 | 2019年 | ? | ? | ? | 无人探测 和载人探测 |
| 轨道器 | 轨道器 | 着陆器/巡视器 | 轨道器/返回器 | 中继星着陆器/巡视器 | 采样返回 | 采样返回器 | 着陆器/科研站 | 着陆器/科研站 | |
| 200km轨道 | 100/15km轨道 | 雨海北部 44.1260°N 19.5014°W | 地月转移轨道 | 冯·卡门环形坑 45.4448°S 177.5991°E | 风暴洋 43.0581°N 51.9160°W | 南极-艾特肯盆地 | 南极 | ? | |
| 全球探测 | 高分辨率全球探测 | 月面就位探测 | 高速再入返回地球 | 月球背面就位探测 | 月表采样 | 月球采样返回 | 月球科学研究 | 月球科学研究 | |

图 17 中国月球探测规划
 据Li等(2019b)

了全月球表面月壤层的分布及其厚度变化情况, 月壤中核聚变原料氦-3的分布和资源总量得以估算; 对全月球表面的铁、钛、镁、铝、钙、硅、铀、钍、钾等元素的含量分布, 以及主要矿物的含量分布开展了系统性的研究, 各种元素含量的分布图、全月表主要矿物的分布图也由此得以编制. (2) 首次实现月基地球等离子体层全貌监测和月基光学天文观测, 特别是开拓了月球背面科学研究, 发现月背幔源物质初步证据, 揭开月背地下浅层结构, 获得月背粒子辐射环境特征等原创科学成果, 更新了月球物质构成、分布、火山活动和月球空间环境的认识. (3) 通过嫦娥五号月球样品的研究, 为月球晚期岩浆活动历史提供了多项全新的认识, 开启了月球科学研究的新时代.

在完成“三步走”目标之后, 中国月球探测的目标将由“发展月球探测能力”逐渐向“月球科学深化研究与资源综合利用”转变(裴照宇等, 2020). 未来中国月球探测重点从掌握技术逐步转向科学探测和资源探查与开发利用, 科学目标的牵引作用越来越突出, 着

陆区倾向于选择月球最古老深度最深的南极-艾特肯盆地, 以及资源丰富的月球南极地区, 有望在月球关键科学问题上取得进一步的突破, 如月球演化历史中的“一老”与“一新”问题, 月球的水冰之谜, 月球的内部物质成分、内部圈层结构与形成过程等.

月球与行星科学是当今科学技术的前沿, 月球探测仍将是深空探测的重要领域和科学研究的生长点. 美国已启动全新的载人登月计划——阿尔忒弥斯计划(Artemis Program), 计划开展常态化的地月驻留和科学探测, 并着眼于火星载人登陆和科学考察. 根据中国探月工程四期任务的规划, 在2020~2030年期间将实施一系列月球科学探测, 包括月球综合研究、月基观测与实验研究以及月球资源就位利用试验, 计划建成兼具科学探测、科研试验和资源利用技术验证等综合功能的月球科研站(图17; Li等, 2019b). 中国的月球探测将进入快速发展阶段, 月球的科学研究也将进入一个新的阶段, 并向应用研究拓展, 这将对月球科学的发展、以及比较行星学的学科发展带来极大的促进

作用, 同时, 将有利于建设世界一流的行星科学人才队伍, 为推动中国由航天大国迈向航天强国贡献力量。

参考文献

- 李春来. 2013. 嫦娥一号三线阵CCD数据摄影测量处理及全月球数字地形图. *测绘学报*, 42: 853–860
- 李春来, 刘建军, 牟伶俐, 任鑫, 左维, 曾兴国, 刘宇轩, 张洪波, 苏彦, 温卫斌, 王奋飞, 王文春, 严韦, 高兴辉, 张晓霞, 李路, 邹小端, 杨一曼. 2014. 嫦娥二号高分辨率月球虹湾地貌图集. 北京: 中国地图出版社
- 李春来, 刘建军, 牟伶俐, 左维, 任鑫, 张洪波, 刘建忠, 苏彦, 温卫斌, 王晓倩, 张舟斌, 邹小端. 2012. 嫦娥二号高分辨率月球影像图集. 北京: 中国地图出版社
- 李春来, 刘建军, 任鑫, 牟伶俐, 邹永廖, 张洪波, 吕昌, 刘建忠, 左维, 苏彦, 温卫斌, 边伟, 赵葆常, 杨建峰, 邹小端, 汪敏, 许春, 孔德庆, 王晓倩, 王芳, 耿良, 张舟斌, 郑磊, 朱新颖, 李俊铎, 欧阳自远. 2010. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图. *中国科学: 地球科学*, 40: 294–306
- 李春来, 刘建军, 任鑫, 严韦, 左维, 牟伶俐, 张洪波, 苏彦, 温卫斌, 谭旭, 张晓霞, 王文春, 付强, 耿良, 张广良, 赵葆常, 杨建峰, 欧阳自远. 2018. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建. *武汉大学学报·信息科学版*, 43: 485–495
- 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: 68–75
- 刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 邹永廖. 2013. 中国月球探测进展 (2001~2010年). *矿物岩石地球化学通报*, 32: 544–551
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社
- 欧阳自远, 李春来. 2015. 绕月探测工程科学目标专题研究. 北京: 科学出版社
- 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 康焱, 邹永廖, 张焯, 张玉花, 贺怀宇, 王琼, 杨瑞洪, 王伟, 马继楠. 2020. 月球探测进展与国际月球科研站. *科学通报*, 65: 2577–2586
- 吴伟仁, 于登云, 王赤, 刘继忠, 唐玉华, 张焯, 张哲. 2020. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展. *中国科学: 信息科学*, 50: 1783–1797
- 鄢建国, 平劲松, Koji M, Sander G, 唐歌实, 李斐, 刘俊泽, 李金岭. 2011. 嫦娥一号绕月卫星对月球重力场模型的优化. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 41: 870–878
- Che X C, Nemchin A, Liu D Y, Long T, Wang C, Norman M D, Joy K H, Tartese R, Head J, Jolliff B, Snape J F, Crow C, Benedix G, Jourdan F, Yang Z Q, Yang C, Liu J H, Xie S W, Bao Z M, Fan R L, Li D P, Li Z S, Webb S G. 2021. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'E-5. *Science*, 374: 887–890
- ESA. 2019. ESA Strategy for Science at the Moon. <https://exploration.esa.int/web/moon/-/61371-esa-strategy-for-science-at-the-moon>. Accessed: 8 October 2019
- 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. *Geophys Res Lett*, 42: 10,179–10,187
- Feng J Q, Liu J J, He F, Yan W, Ren X, Tan X, He L P, Chen B, Zuo W, Wen W B, Su Y, Zou Y L, Li C L. 2014. Data processing and initial results from the CE-3 Extreme Ultraviolet Camera. *Res Astron Astrophys*, 14: 1664–1673
- 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 Planet Sci Lett*, 528: 115829
- Gu L X, Chen Y J, Xu Y C, Tang X, Lin Y T, Noguchi T, Li J H. 2022. Space weathering of the Chang'e-5 lunar sample from a mid-high latitude region on the Moon. *Geophys Res Lett*, 49: e97875
- Guo Z, Li C, Li Y, Wen Y Y, Tai K R, Li X Y, Liu J Z, Ouyang Z Y. 2022. Nanophase iron particles derived from fayalitic olivine decomposition in Chang'E-5 lunar soil: Implications for thermal effects during impacts. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL097323
- He H, Shen C, Wang H N, Zhang X X, Chen B, Yan J, Zou Y L, Jorgensen A M, He F, Yan Y, Zhu X S, Huang Y, Xu R L. 2016. Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'e 3. *Sci Rep*, 6: 32362
- Hu S, He H C, Ji J L, Lin Y T, Hui H J, Anand M, Tartese R, Yan Y H, Hao J L, Li R Y, Gu L X, Guo Q, He H Y, Ouyang Z Y. 2021. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5. *Nature*, 600: 49–53
- 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. Diverse rock types detected in the lunar South Pole-Aitken Basin by the Chang'E-4 lunar mission. *Geology*, 48: 723–727
- Huang J C, Ji J H, Ye P J, Wang X L, Yan J, Meng L Z, Wang S, Li C L, Li Y, Qiao D, Zhao W, Zhao Y H, Zhang T X, Liu P, Jiang Y, Rao W, Li S, Huang C N, Ip W H, Hu S C, Zhu M H, Yu L L, Zou Y L, Tang X L, Li J Y, Zhao H B, Huang H, Jiang X J, Bai J M. 2013. The ginger-shaped asteroid 4179 Toutatis: New observations from a successful flyby of Chang'e-2. *Sci Rep*, 3: 3411
- Jiang Y, Ji J H, Huang J H, Marchi S, Li Y, Ip W H. 2015. Boulders on asteroid Toutatis as observed by Chang'e-2. *Sci Rep*, 5: 16029
- Li C L, Mu L L, Zou X D, Liu J J, Ren X, Zeng X G, Yang Y M, Zhang Z B, Liu Y X, Zuo W, Li H. 2014. Analysis of the geomorphology surrounding the Chang'e-3 landing site. *Res Astron Astrophys*, 14: 1514–1529
- Li C L, LIU J J, REN X, Zuo W, Tan X, Wen W B, Li H, Mu L L, Su Y, Zhang H B, Yan J, Ouyang Z Y. 2015. The Chang'e 3 mission

- overview. *Space Sci Rev*, 190: 85–101
- Li C L, Xing S G, Lauro S E, Su Y, Dai S, Feng J Q, Cosciotti B, Paolo F D, 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 Trans Geosci Remote Sens*, 56: 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: 378–382
- Li C L, Wang C, Wei Y, Lin Y T. 2019b. China's present and future lunar exploration program. *Science*, 365: 238–239
- Li C L, Su Y, Pettinelli E, Xing S G, Ding C Y, Liu J J, Ren X, Lauro S, 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. *Sci Adv*, 6: eaay6898
- Li C L, Hu H, Yang M F, Pei Z Y, Zhou Q, Ren X, Liu B, Liu D W, Zeng X G, Zhang G L, Zhang H B, Liu J J, Wang Q, Deng X J, Xiao C J, Yao Y G, Xue D S, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y. 2022. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *Natl Sci Rev*, 9: nwab188
- Li Q L, Zhou Q, Liu Y, Xiao Z, Lin Y, Li J H, Ma H X, Tang G Q, Guo S, Tang X, Yuan J Y, Li J, Wu F Y, Ouyang Z, Li C, Li X H. 2021. Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts. *Nature*, 600: 54–58
- Lin H, 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. *Sci Adv*, 8: eabl9174
- 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, Gou S, Wei Y, Hu S, Xue C B, Yang J F, Zhong J, Fu X H, Wan W X, Zou Y L. 2020. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA-impact melt pool. *Natl Sci Rev*, 7: 913–920
- 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, Wang J Y. 2015. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site. *Nat Commun*, 6: 8880
- Liu J J, Yan W, Li C L, Tan X, Ren X, Mu L L. 2014. Reconstructing the landing trajectory of the CE-3 lunar probe by using images from the landing camera. *Res Astron Astrophys*, 14: 1530–1542
- Liu J J, Ren X, Yan W, Li C L, Zhang H, Jia Y, Zeng X G, Chen W L, Gao X Y, Liu D W, Tan X, Zhang X X, Ni T, Zhang H B, Zuo W, Su Y, Wen W B. 2019a. Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang'E-4 on the lunar farside. *Nat Commun*, 10: 4229
- Liu J J, Li C L, Wang W R, Zeng X G, Mu L L, Yang Y M. 2019b. Extraction of lunar domes from Chang'E-2 data with new method. *Icarus*, 321: 29–33
- 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. *Nat Commun*, 13: 3119
- Lunar Exploration Analysis Group (LEAG). 2017. Advancing Science of the Moon: Report of the Specific Action Team. Houston, TX, USA
- Mo B, Guo Z, Li Y, Zhu D, Zeng X J, Li X Y, Liu J Z, Wu Y X. 2022. *In situ* investigation of the valence states of iron-bearing phases in Chang'E-5 lunar soil using FIB, AES, and TEM-EELS techniques. *AtSpectrosc*, 43: 53–59
- National Research Council (NRC). 2017. Scientific Context for the Exploration of the Moon. Washington: National Academies Press
- Ren X, Liu J J, Li C L, Li H H, Yan W, Wang F F, Wang W R, Zhang X X, Gao X Y, Chen W L. 2019. A global adjustment method for photogrammetric processing of Chang'E-2 stereo images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57: 6832–6843
- 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. *Res Astron Astrophys*, 14: 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 Trans Geosci Remote Sens*, 60: 1–14
- Tang Z C, Liu J J, Wang X, Ren X, Chen W L, Yan W, Zhang X X, Tan X, Zeng X G, Liu D W, Zhang H B, Wen W B, Zuo W, Su Y, Yang J F, Li C L. 2020. Physical and mechanical characteristics of lunar soil at the Chang'E-4 landing site. *Geophys Res Lett*, 47: e89499
- Tian H C, Wang H, Chen Y, Yang W, Zhou Q, Zhang C, Lin H L, Huang C, Wu S T, Jia L H, Xu L, Zhang D, Li X G, Chang R, Yang Y H, Xie L W, Zhang D P, Zhang G L, Yang S H, Wu F Y. 2021. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the Procellarum KREEP Terrane. *Nature*, 600: 59–63
- Wang F F, Liu J J, Li C L, Ren X, Mu L L, Yan W, Wang W R, Xiao J T, Tan X, Zhang X X, Zou X D, Gao X Y. 2014. A new lunar absolute control point: Established by images from the landing

- camera on Chang'e-3. *Res Astron Astrophys*, 14: 1543–1556
- Wang J, Wu C, Qiu Y L, Meng X M, Cai H B, Cao L, Deng J S, Han X H, Wei J Y. 2015. An unprecedented constraint on water content in the sunlit lunar exosphere seen by Lunar-based Ultraviolet Telescope of Chang'e-3 mission. *Planet Space Sci*, 109-110: 123–128
- Wang X D, Bian W, Wang J S, Liu J J, Zou Y L, Zhang H B, Lü C, Liu J Z, Zuo W, Su Y, Wen W B, Wang M, Ouyang Z Y, Li C L. 2010. Acceleration of scattered solar wind protons at the polar terminator of the Moon: Results from Chang'E-1/SWIDs. *Geophys Res Lett*, 37: L07203
- Wang X Q, Cui J, Wang X D, Liu J J, Zhang H B, Zuo W, Su Y, Wen W B, Rème H, Dandouras I, Aoustin C, Wang M, Tan X, Shen J, Wang F, Fu Q, Li C L, Ouyang Z Y. 2012. The Solar Wind interactions with Lunar Magnetic Anomalies: A case study of the Chang'E-2 plasma data near the Serenitatis antipode. *Adv Space Res*, 50: 1600–1606
- Wu Y Z. 2012. Major elements and Mg# of the Moon: Results from Chang'E-1 interference imaging spectrometer (IIM) data. *Geochim Cosmochim Acta*, 93: 214–234
- Xi J X, Ma L Y, Xian H Y, Wang G F, Xing J Q, Wei J M, Zhu J X, He H P. 2022. *In situ* micro-XRD methods for identifying glass and minerals in extraterrestrial samples. *AtSpectrosc*, 43: 19–27
- 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, Ouyang Z 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: 1226–1229
- Yue Z Y, Di K C, Wan W H, Liu Z Q, Gou S, Liu B, Peng M, Wang Y X, Jia M N, Liu J Z, Ouyang Z Y. 2022. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples. *Nat Astron*, 6: 541–545
- Zhang A B, Wieser M, Wang C, Barabash S, Wang W J, Wang X D, Zou Y L, Li L, Cao J B, Kalla L, Dai L, Svensso J, Kong L G, Oja M, Liu B, Alatalo V, Zhang Y T, Takonen J, Liu W L. 2020. Emission of energetic neutral atoms measured on the lunar surface by Chang'E-4. *Planet Space Sci*, 189: 104970
- Zhang H, Zhang X, Zhang G, Dong K Q, Deng X G, Gao X S, Yang Y D, Xiao Y, Bai X, Liang K X, Liu Y W, Ma W B, Zhao S F, Zhang C, Zhang X J, Song J, Yao W, Chen H, Wang W H, Zou Z G, yang M F. 2022. Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'E-5 mission. *Sci China-Phys Mech Astron*, 65: 229511
- 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. 2021. Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole-Aitken basin. *Nat Astron*, 5: 25–30
- 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. 2015. Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. *Proc Natl Acad Sci USA*, 112: 5342–5347
- Zhang S Y, Wimmer-schweingruber R F, Yu J, Wang C, Fu Q, Zou Y L, Sun Y Q, Wang C Q, Hou D H, Bottcher S I, Burmeister S, Seimetz L, Schuster B, Knierim V, Shen G H, Yuan B, Lohf H, Guo J N, Xu Z G, Forstner J L F V, Kulkarni S R, Xu H T, Li J, Zhang Z, Zhang H, Berfer T, Zhang B Q, Chen Y S, Geng H, Quan Z D. 2020. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Sci Adv*, 6: EAAZ1334
- 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 crisisium and orientale basin on the moon. *Sci Rep*, 3: 1611
- Zhu M H, Fa W Z, Ip W H, Huang J C, Liu T T, Meng L Z, Yan J, Xu A A, Tang Z S, Wang X L, Qiao D. 2014. Morphology of asteroid (4179) Toutatis as imaged by Chang'E-2 spacecraft. *Geophys Res Lett*, 41: 328–333
- Zou X D, Li C L, Liu J J, Wang W R, Li H, Ping J S. 2014. The preliminary analysis of the 4179 Toutatis snapshots of the Chang'E-2 flyby. *Icarus*, 229: 348–354
- Zou Y L, Zhang L Y, Liu J Z, Mu L L, Ren X, Zhang G L, Chang J, Yan J, Zhang N, Zhang H B, Lu C, Liu J J, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Wang M X C, Li C L, Ouyang Z Y. 2011. Data analysis of Chang'E-1 gamma-ray spectrometer and global distribution of U, K, and Th elemental abundances. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 85: 1299–1309
- 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: 194–210

(责任编辑: 沈冰)