中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 10 期: 3238 ~ 3250
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

我国行星科学研究新进展

潘永信[1*], 林巍[1], 秦礼萍[2]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学技术大学岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026
* 通讯作者, E-mail: yxpan@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2025-03-13; 收修改稿日期: 2025-08-26; 接受日期: 2025-09-01; 网络版发表日期: 2025-09-23

摘要 行星科学是系统研究行星、卫星、小天体和系外行星等天体的起源与演化、行星表面和内部过程、潜在生命和宜居性以及地外资源评估利用等的一门交叉学科, 是人类从理解地球向认知其他天体的天然延伸. 进入21世纪以来, 我国启动并实施的月球和行星探测系列工程, 揭开了我国行星科学研究的新篇章. 本文聚焦我国行星科学发展和国家深空探测的科学需求, 梳理了我国学者在月球、火星、小天体和系外行星等研究领域取得的新进展, 并展望我国行星科学未来的发展方向.

关键词 行星科学, 地球科学, 火星, 月球, 宜居性

1 引言

行星科学研究行星、卫星、小行星、彗星等天体的基本特征、内部结构和物质组成、形成与演化过程、宜居环境、资源探测利用等问题, 主要聚焦行星的物质成分、内部结构、圈层及耦合过程, 建立行星差异演化和资源环境新理论, 研发行星科学探测与利用的新技术和新方法. 因此, 行星科学是牵引和驱动深空探测的核心力量(潘永信和王赤, 2021; 王赤等, 2022). 行星科学在继承地球科学、天文学等科学理论和技术方法体系的基础上, 形成了行星地质学、行星化学、行星物理学、行星大气、天体生物学等方向的理论、研究方法和技术体系.

我国行星科学起步较晚, 但发展很快. 近年来, 随着我国探月工程和行星探测工程的实施, 我国行星科学进入快速发展时期. “嫦娥”系列任务和“天问”系列任务推动了月球与火星等研究. 嫦娥系列任务在月球探测和月球科学研究取得了一系列重要进展; 天问一号任务成功实现了对火星的环绕和巡视探测, 使我国成为世界上第二个成功开展火星表面巡视探测的国家. 国家航天局、中国科学院、国家自然科学基金委员会等机构相继部署行星科学的研究项目, 推动了我国行星科学的研究与发展.

20世纪我国学者以陨石样品为主的实验室分析, 实现了对地外样品微区分析突破, 并通过阿波罗月球样品开启了地-月系统的初步研究. 2004年, 我国首次月球探测工程正式立项实施, 建立了月球遥感、月球地质、月球物理等研究团队以开展探测技术研发和科学研究. 2020年, 嫦娥五号月球采样返回任务与天问一号首次火星探测任务的成功实施, 标志着中国深空探测和行星科学进入了新阶段. 通过这些工程任务的实施, 我国学者利用获得的宝贵第一手科学数据和月球

中文引用格式: 潘永信, 林巍, 秦礼萍. 2025. 我国行星科学研究新进展. 中国科学: 地球科学, 55: 55(10): 3238–3250, doi: 10.1360/SSTe-2025-0053
英文引用格式: Pan Y, Lin W, Qin L. 2025. Recent advances in China’s planetary science research. Science China Earth Sciences, 68(10): 3108–3120, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1685-3

© 2025 《中国科学》杂志社

样品开展创新研究，改变了我国行星科学从原先只能利用国外资料和数据的跟踪研究的现状，并陆续产出了一批重大科学研究成果．2021年，我国行星科学一级学科建立，行星科学呈现出学科化、建制化、体系化的发展趋势，重点推进行星宜居性及演化等重大科学问题的研究，开始建立跨学科、全链条、一体化的研究平台和大科学装置，为深空探测实现工程技术和科学研究“双轮驱动”奠定了基础.

聚焦我国行星科学发展和国家深空探测的科学需求, 2023年10月28~29日在北京召开了“行星科学”科学与技术前沿论坛，从多学科、多维度研讨了月球的形成与演化、火星宜居性演化、小行星和彗星以及系外行星宜居性探测等科学问题．本文梳理了论坛上专家汇报的新成果和新观点，并展望我国行星科学的发展方向.

2　月球科学研究进展

月球是地球唯一的天然卫星，其形成和演化与地球息息相关，也是人类探测次数最多和迄今唯一一个成功载人登陆过的天体．从最初使用望远镜观测，到美国和苏联发射多种探测器进行抵近探测，再到美国阿波罗计划载人登月和采样返回，人类对月球形成和演化的认识不断深化，对地-月系统有了更深入的认识．自20世纪90年代以来，美国、欧洲、日本和印度等相继开展了新一轮的月球精细探测与勘察，我国的探月工程也持续推进．2020年，嫦娥五号任务成功从月球采集并返回了约1731g月壤样品，这是继美国阿波罗计划和苏联月球采样计划之后，时隔44年人类再次成功从月球采样并返回地球，为月球科学研究开启了新的篇章(王赤等, 2023; 贺怀宇等, 2024). 我国科学家对嫦娥五号月球样品开展了综合研究，取得了一批重要成果.

2.1　月表物质和挥发分

月球表面被几米到十几米厚的月壤所覆盖．月壤是固化后的月壳经过长期太空风化作用形成的，主要是玄武岩和斜长岩在长期受陨石和微陨石撞击、太阳风和宇宙射线轰击等物理风化的产物，是月球物质演化和月表环境演变信息的重要载体(Crawford等, 2012)．月壤是本地风化和外来撞击溅射物的混合物，包括岩屑、矿物碎屑、角砾、玻璃及其胶结物等，同时也可以保存太阳风注入的氢和氦以及陨石撞击的残片(Heiken等, 1991). 与地球土壤不同, 月壤贫水、缺乏有机物以及生命物质.

嫦娥五号探测器于2020年12月在月球正面风暴洋的吕姆克山脉以北地区着陆, 成功采集到1731g月壤并顺利返回地球，国内科研院所和高校科研团队对返回样品开展了系统的研究．嫦娥五号月壤颗粒普遍小于500μm(Li等, 2022b)．凝集物呈不规则形状，由撞击形成的玻璃熔合相邻的岩屑和矿物碎屑组成．玻璃含量约占10%~25%(体积)，球状玻璃珠通常为棕色至黑色，不规则的玻璃碎片通常颜色较浅，含有辉石、橄榄石、斜长石和钛铁矿等矿物包裹体，以及少量的石英和磷灰石．嫦娥五号月壤主要为本地玄武岩(>90%)，含少量其他地区溅射的月球物质和陨石残片(Wu等, 2024)，全岩分析结果显示铕负异常．嫦娥五号玄武岩富铁贫镁, 铁含量超过了20%, 镁指数为26~32(Tian等, 2021; Lu等, 2023), 结合钛含量推断其可能来源于月幔的低比例熔融和岩浆的高度分异(Tian等, 2021; Luo等, 2023).

阿波罗时代最重大的科学成就之一就是发现月球几乎无水(<1ppb, 1ppb=1μg kg^{-1}; Taylor等, 2006), 支持了月球大碰撞起源假说(Hartmann和Davis, 1975). 随着微区分析技术的进步，首次在月球火山玻璃中发现微量的水含量，且呈现去气特征，进而推算月球岩浆的水含量可达745ppm(1ppm=1mg kg^{-1})(Saal等, 2008)，掀起了研究月幔水的热潮．随后，在不同的月球样品中，通过磷灰石、熔体包裹体，以及名义上无水矿物开展了大量的水含量与氢同位素测试(Boyce等, 2010; Hauri等, 2011; Hui等, 2013)，形成了月球富水的观点，甚至有的岩浆水含量可高达1400ppm，引发了月球富水和贫水的争议(Sharp等, 2010)．基于嫦娥五号玄武岩的水含量与氢同位素研究估算其月幔源区水含量为1~5ppm(Hu等, 2021), 相比于阿波罗样品更低, 可能是由于水含量随着时间演化逐渐降低. 总体而言, 月球玄武岩的月幔源区水含量小于20ppm，部分火山玻璃可能相对富水．月幔的水含量可能与地球上地幔相当(McCubbin等, 2023).

对嫦娥五号月球样品的地球化学分析发现，月壤中的纳米铁存在歧化反应、撞击热分解、共析反应等多种成因机制(Li等, 2020; Li等, 2022a), 可能存在由撞

击过程形成的磁铁矿和蓝辉铜矿. 月球表面水和其他挥发分如H_2S、H_2、CO_2、N_2、CH_4、NH_3和稀有气体等的分布和来源也是月球研究的热点问题, 对未来月球原位资源利用具有重要的参考价值. 嫦娥五号着陆点位于中纬度地区, 为验证月表水的分布和来源提供了很好的机遇. 研究发现, 嫦娥五号月壤颗粒表层和撞击玻璃珠可以保存高含量的太阳风成因水(Xu Y等, 2022; Zhou等, 2022; He等, 2023). 撞击玻璃珠含水量从外缘到内部逐渐降低, 外缘含水量大于1500ppm, 内部非常低, 很可能是由太阳风注入的氢从外缘扩散到内部所造成的.

月球水的来源、分布和含量仍存在较大不确定性. 月球矿物绘图仪(Moon Mineralogy Mapper, M^3)获取的光谱数据显示, 月球南极永久阴影区水含量达到0.07%(Honniball等, 2020). 月球坑观测和传感卫星LCROSS撞击Cabeus坑发现近红外-紫外光谱显示LCROSS撞击点含有平均5.6wt%的水, 以及H_2S、NH_3、C_2H_2、CO_2和CH_3OH等挥发分(Colaprete等, 2010). 目前认为月球两极的永久阴影区可能富集水等挥发分, 挥发分含量相差较大, 分布可能很不均匀, 来源尚不确定. 太阳风成因水得到了遥感和样品分析数据的支持, 但小行星和彗星撞击加入和早期岩浆活动继承的水及其他挥发分还有待进一步验证, 需要对月表挥发分进行准确测量. 我国嫦娥七号探测器将前往月球南极, 通过水分子分析仪和挥发分测量仪对挥发分及其同位素进行系统测量(Wang等, 2024).

2.2 月球撞击历史和撞击坑年代学

撞击作用是月球形成和早期演化中重要的地质营力, 撞击通量影响着天体表面的改造速率及其宜居性演化, 同时也是估算地外天体表面模式年龄的依据. 月球表面岩浆活动较弱, 能较完整地记录太阳系的撞击历史. 由于内太阳系天体可能经历了类似的撞击过程, 所以月球是校正其他天体上陨石坑统计模式年龄和内太阳系天体撞击历史的“定标板”(岳宗玉等, 2021; Yue等, 2022).

目前主要认为月球在形成早期遭受了高频率的撞击, 而后30多亿年间的撞击频率较低且趋于稳定. 撞击坑统计定年结果的误差主要来源于月球撞击通量估算和撞击溅射物来源的不确定性, 包括弹道溅射物、撞击熔体和撞击玻璃珠的来源多解, 沉积模式的预测不足, 样品属性争议较大(Xiao等, 2021, 2022). 背景二次坑污染, 撞击溅射物碎片分布不均, 导致二次坑密度和等效模式年龄差异较大(Chang等, 2021). 撞击坑地形的差异退化影响, 撞击坑的地形退化速率与撞击坑尺寸相关, 不同模型计算的初始撞击坑的产率和模式年龄差异较大(Xie等, 2017, 2019).

月球南极-艾特肯盆地是月球上已经确认的最大、最深、最古老的撞击盆地, 占月表面积10%, 直径达到2500km, 挖掘深度达到100km(Garrick-Bethell和Zuber, 2009). 南极-艾特肯盆地一直是月球探测的热点区域, 基于撞击坑模式年龄, 南极-艾特肯盆地被认为形成于42亿年前从南向北的一次倾斜的撞击(Fernandes等, 2013), 撞击作用显著影响了月球的地质演化, 挖掘溅射出深部月幔物质(Yamamoto等, 2012), 形成月球三大地体格局(南极-艾特肯盆地地体、风暴洋克里普岩地体和斜长岩高地地体), 可能直接或间接促成了月球二分性的形成(Zhang N等, 2022), 引发了月球的不对称热演化(月海玄武岩差异分布)(Wilson和Head, 2017; Zhao J等, 2023). 月球南极-艾特肯盆地经历了40多亿年的撞击改造和火山活动, 是认识月球壳幔结构、月幔不均一性、太阳系早期超大型盆地的形成、晚期大撞击事件等关键科学问题的重要区域.

2.3 月球形成与早期演化

目前学术界普遍接受的关于月球形成的假说是“大碰撞起源模型”, 即在45.2~44.2亿年之前, 一个火星大小的天体撞击到原始地球, 抛射出的物质吸积成为月球, 最终形成了目前的地-月系统(Hartmann和Davis, 1975). 大撞击成月过程导致月球表面形成了一个全球性的岩浆洋. 岩浆洋经过结晶分异以后, 逐步形成了月幔和月壳, 以及可能存在着克里普层(富集生热元素的、壳幔之间的一层), 岩浆洋的固结时间被认为是在44~42亿年前, 这是月球壳幔分异的基本模型. 在大约39亿年前, 月球可能经历了一期密集的撞击(称为晚期大撞击事件), 形成了一些大型盆地, 包括现在月海区域的盆地. 晚期大撞击事件可能对太阳系中的类地行星也产生了重要影响. 在几乎同一时期, 地球上形成了陆壳, 并且出现了最早的生命. 不能排除晚期大撞击事件可能与这些地质和生物事件存在直接或间接的关联(Chen等, 2023; Wu等, 2024).

传统观点认为月球体积小, 冷却快. 基于阿波罗返

回样品和收集到的月球陨石的定年数据，月海玄武岩的年龄大概在39~30亿年前，月球陨石的年龄最晚可以追溯到28亿年前(Borg等, 2004). 然而，撞击坑年代学方法推算显示, 月球部分地区的岩浆活动年龄, 特别是在风暴洋克里普岩地区, 可能只有十几亿年. 嫦娥五号探测器的着陆点位于月球正面风暴洋北部，其纬度相较于美国阿波罗和苏联月球号任务的着陆点更高. 对嫦娥五号返回样品的精确定年分析表明，月球玄武岩年龄为20亿年(Che等, 2021; Li Q L等, 2021), 这一发现将月球岩浆活动历史延长了约8亿年, 刷新了我们对月球演化中期岩浆活动和热演化的认识.

嫦娥五号样品研究发现，玄武岩月幔源区亏损钾、铷、铀、钍等放射性生热元素和克里普组分，可能经历了低比例的熔融和高程度的分离结晶(Tian等, 2021)，说明生热元素不是月幔升温熔融的原因. 水和挥发分的加入也能有效降低固相线温度，从而导致月幔熔融. 然而，嫦娥五号玄武岩月幔源区在20亿年前贫水，这个低水含量可能和持续的幔源岩浆活动有关(Hu等, 2021)，氟、氯、硫等挥发分的含量也较低(Ji等, 2022; Liu X等, 2022). 因此, 月球演化中期的月幔熔融可能有其他成因. 嫦娥五号玄武岩相比于阿波罗任务的样品，具有更高的钙和钛含量(Su等, 2022)，其月幔源区钙和钛的含量也相对较高. 其中钙来自单斜辉石，钛主要来自钛铁矿，这两种矿物都是岩浆洋晚期结晶形成的. 当月幔源区含有较多的岩浆洋晚期形成的单斜辉石-钛铁矿堆晶体时, 源区的熔点或者固相线会降低, 从而有助于形成年轻的火山作用. 但是嫦娥五号玄武岩的Sr-Nd-Hf放射性同位素特征不支持这些后期岩浆洋晚期堆晶物质的大量加入(Shen等, 2025). 至于是什么原因导致月球冷却速率慢，还有待进一步研究.

3　火星科学研究进展

2020年7月23日我国首次火星探测任务天问一号探测器成功发射, 2021年2月10日顺利实现火星捕获, 5月15日着陆器携带祝融号火星车成功软着陆于火星北半球乌托邦平原的南侧预选着陆区，祝融号火星车随后开展火面巡视探测. 我国在国际上首次实现一次任务完成火星“绕、着、巡”，也成为继美国之后第二个开展火面巡视探测的国家. 天问一号的祝融号火星车和环绕器共携带了13套科学载荷，开展火星地形与地质构造特征、表面物质组成、火壤特征与水冰分布、大气电离层与空间环境、物理场与内部结构等系统研究(Wan等, 2020; 潘永信等, 2021; 张荣桥, 2021; Li C等, 2021).

3.1　火星的水活动

火星早期古老的地形保存了与河流、湖泊甚至海洋相关的地貌(Liu Z等, 2021), 因此推断40亿年前火星表面存在着流动的液态水. 尽管有较为充足的地质证据，但确定支持表面液态水持续时长的气候条件仍十分困难. 火星在其最初的数亿年中接收到的太阳辐射通量很低, 结合CO_2等温室气体的低增温效率, 这可能意味着火星在早期大部分时间里的气候是寒冷的. 但是层状硅酸盐黏土矿物在诺亚纪高原的广泛分布又表明至少在诺亚纪曾经存在过温暖湿润的气候(Mustard, 2019), 短暂变暖导致冰雪的融化和暂时活跃的水文循环, 形成河谷网络和其他河流侵蚀地貌, 但偶发性变暖事件背后的驱动机制仍不清楚. 亚马逊纪时期液态水活动有限, 冰川作用显著, 风成地貌分布广泛, 发现了疑似跟卤水冻融相关的季节性斜坡条纹等地表改造过程. 我国学者利用天问一号高分相机、导航地形相机的立体影像数据，开展了乌托邦平原南部着陆区高分辨率地形数据重建和制图，识别出凹锥、岩石、沙丘、壁垒撞击坑、沟槽等地貌(Liu J等, 2021, 2023a; Ye等, 2021; Zhao等, 2021; Wu等, 2022). 祝融号火星车在着陆区发现的一系列晚亚马逊纪时期的水活动新证据(Li等, 2022c; Liu Y等, 2022; Qin等, 2023; Zhao Y Y S等, 2023)表明, 火星近期的气候可能没有传统观点认为的那么干旱. 但火星亚马逊纪时期水活动的性质、强度和持续时间等仍有待深入研究.

火星陨石研究是揭示火星水活动的途径之一. 目前已经确认和命名的火星陨石有390余块，绝大部分发现于沙漠和南极. 其中，我国学者在南极格罗夫山发现了两块玄武岩质火星陨石，其年龄分别为(177±5) Ma和(192±10)Ma(Jiang和Hsu, 2012), 而其代表的母岩浆源区特征分别为中等亏损型和富集型，并据此提出二阶段结晶分异模型(Lin等, 2005, 2013). 火星陨石的水含量与H同位素分析显示岩浆侵入融化地下冰川/冻土可以形成地下水系统，并据此计算得到地下水的H同位素组成为δD=6034‰±72‰，而火星幔源区水含量

较低, 为38~75ppm(Hu等, 2014; Usui等, 2015). 对火星陨石Tissint的研究发现, 火星有机碳具有轻C同位素的组成特征(Lin等, 2014).

火星早期水系的发育特征显示, 晚诺亚世和西方纪火星北部平原区可能曾存在大面积的水体, 形成了广泛分布于克里塞-乌托邦区域的沉积地层-北方荒原组(Head等, 2002). 由于以往没有开展对北方荒原组的原位探测, 对该套地层的岩性解释存在很大的不确定性和争议. 我国学者对祝融号火星车获取的乌托邦平原南部的第一手科学观测数据的研究发现, 着陆区结壳层中有水活动形成的矿物, 指示了这些地方可能曾经有地下水的活动(Liu Y等, 2022). 在巡视路径沙丘表面发现的泥裂、团块等构造可能表明有短暂的液体水活动, 甚至可能在当前环境下仍有盐水活动(Liu J等, 2023b; Qin等, 2023). 祝融号火星车的研究结果发现, 着陆区可能存在含水矿物相(林红磊等, 2023), 可能的矿物种类包括水合硫酸盐/水合二氧化硅以及由火山碎屑土壤蚀变而形成的水铝英石、伊毛缟石/蛋白石等, 证实了乌托邦平原可能存在一定程度的水岩相互作用, 反映亚马逊纪火星北部的水活动较之前人们认为的更为活跃(Liu C等, 2022).

对祝融号火星车获得的高分辨率影像数据分析显示, 暴露在表面的石块具有潮汐沉积层理构造, 部分支持发育古海洋的假说(Xiao等, 2023). 通过祝融号雷达数据的介电常数反演提取地层物性信息发现, 乌托邦平原南部自晚西方纪(35~32亿年)以来经历了多期次火星表面改造事件, 至中晚亚马逊纪(大约16亿年以来)仍可能存在水活动相关的地质过程; 现今祝融号巡视区域浅表80m之上未发现大量液态水或水冰存在的证据, 但不排除存在盐冰的可能性. 这项工作指示了北方荒原组沉积覆盖地区在晚西方纪时期曾经经历显著的水活动, 后来演变到现在比较干燥、基本没有液态水的活动(Li等, 2022c).

3.2 火表物质组成和环境变化

2023年4月我国发布了首次火星探测火星全球影像图, 分辨率达到百米以内. 我国学者在祝融号的巡视路径上发现了沙丘、石块、结壳层等(Liu J等, 2021; Ding等, 2022), 原位成分探测表明其主要由玄武质岩石在寒冷少水环境中风化而形成. 利用环绕器的高分相机对乌托邦平原南部的2000多个沙丘进行统计分析, 发现亮沙丘和暗沙丘代表的古风向出现了70°的转变, 这个转变意味着火星的古环境和古气候, 特别是风场方向, 发生了大幅度变化(Liu J等, 2023a). 综合前人对火星北极地区冰层沉积物的研究结果, 这个转变可能跟火星倾角的变化有关. 根据陨石坑定年, 风向改变发生在约40万年前(Liu J等, 2023a). 此外, 利用环绕器的高分相机在祝融号着陆区类比分析得出了小型山丘的熔岩穹隆成因, 指示火星小规模的岩浆活动(Lin等, 2023).

火星表面环境的氧化还原条件及演化是研究火星气候、地质和生命演化的重要线索, 对火星生命的探寻和认识有机物/潜在生命物质的产生和保存也有着重要意义. 火星地质记录了丰富的信息, 矿物组合、元素、有机物等反映了水体和环境的氧化还原条件, 铁锰氧化、含氧酸盐循环、大气成分演化等的研究进展也带来了对古环境认识的争论(Hurowitz等, 2007; Zhao等, 2018; Deng等, 2020; Qu等, 2022; Mitra等, 2023; Wen等, 2023), 未来火星样品返回任务有望为探索火星环境演化和生命痕迹带来突破.

3.3 火星电离层和大气层

我国学者利用天问一号环绕器获得的科学数据开展了火星电离层研究. 天问一号探测器揭示出火星的大气和电离层结构以及太阳风变化(Hu等, 2022; Zhang A B等, 2022). 大气逃逸被认为是驱动火星从早期温暖潮湿状态过渡到当前寒冷干燥状态的一个重要驱动力, 同时, 碳、氮、氧、氢等元素的逃逸也显著影响了火星宜居性条件的演化. 国际上目前对于火星大气逃逸的研究往往聚焦于当前的火星大气状态, 而实际上火星宜居性演化更多取决于在整个45亿年的演化历史中其大气状态如何发生改变(Dong等, 2018). 利用天问一号火星磁强计、MAVEN的磁强计和离子探测器的高分辨率观测, 揭示了火星弓激波对太阳风分钟级扰动的实时快速响应, 太阳风动压变化、行星际磁场旋转以及典型的太阳风不规则扰动引起的火星弓激波快速振荡(Wang Y M等, 2023; Cheng等, 2024). 早期火星具有十分浓密的大气圈层, “逃逸”在其演化中扮演了什么样的角色, 早期火星大气到底有多少通过凝结丢失或通过逃逸丢失, 早期的暗弱太阳条件和火星磁场条件如何影响火星大气逃逸, 以及星子撞击到底对火星大气起到增强作用还是削弱作用? 这些问题

仍是火星科学研究的前沿. 揭开火星大气逃逸和演化的真相, 已经超越了传统大气学科和空间物理学科的研究范畴, 需要充分借鉴天文学、地质学、地球物理学乃至基础物理学和化学中的研究经验和成果, 实现广泛的学科交叉及融合.

火星沙尘暴是一种重要的火星大气活动现象, 它对火星大气环境、地形地貌、空间环境、火星探测安全等具有重要影响. 火星沙尘暴发生频繁、时空尺度跨度较大、分布广泛, 但预报困难, 是火星科学研究的前沿方向之一. 为保障和服务我国火星探测任务的实施, 近年来, 我国科学家在充分梳理当前火星沙尘暴活动研究的基础上(王誉棋等, 2023; 周旭等, 2024), 对天问一号着陆区的尘暴时空活动分布和沙尘活动趋势开展了深入分析(魏勇等, 2022), 为未来天问三号的着陆区选址提供了科学建议(He等, 2024; Tian等, 2024), 并提出了未来开展卫星监测火星沙尘暴活动的设想和探测方案(何飞等, 2023; 戎昭金等, 2023). 此外, 在火星大气模式与沙尘暴模拟研究方面我国科学家也取得了可喜进展, 自主研发的大气模式具备了模拟火星沙尘暴的能力(Wu等, 2022; 董理等, 2024; 周旭等, 2024).

3.4　火星物理场与内部结构

火星内禀磁场演化对理解火星空间环境和内部动力学过程具有重要意义. 现今火星失去了其内禀磁场, 但南半球火壳剩余磁场强且范围较广, 而北半球火壳磁化则缺乏. 我国学者根据建立的祝融号磁强计在轨定标改进的信号提取方法, 揭示出巡视路径上存在极弱磁场, 平均强度仅约为10nT(Du等, 2023), 这对进一步讨论乌托邦平原磁化历史以及火星内禀磁场的演化具有重要意义.

对火星内部结构的认识前期主要依据火星陨石的地球化学数据, 以及惯性矩和潮汐勒夫数等轨道物理数据. 洞察号火星震观测数据分析结果确认了火星存在壳-幔-核的圈层结构. 通过相似火星震分析, 揭示火星幔顶部可能存在持续的岩浆活动(Sun和Tkalčić, 2022).

基于祝融火星车采集的低频雷达数据, 通过精细分析和成像, 我国学者首次获得了长约1171m剖面的高精度地下(深度<80m)结构分层图像, 发现该区域火表数米厚的风化层下约10~30m和30~80m深度存在两套向上变细的沉积层序(Li等, 2022c). 此外, 雷达信号发现有更进一步的地下结构, 观察到了西方纪水活动遗留的次表层多边形地貌(Zhang等, 2024).

4　太阳系小天体和系外行星科学研究进展

太阳系内的小天体主要包括小行星、彗星、矮行星、天然卫星等. 小天体记录了太阳系在各演化阶段的重要信息, 是了解太阳系历史的独特窗口. 我国正在实施的天问二号和计划实施的天问四号任务主要针对太阳系的近地小行星、主带彗星以及木星系进行探测. 对于这些天体的研究有助于揭示太阳系的形成、星际有机分子来源以及地外宜居环境等行星科学重要科学问题中的部分内容, 也将为地外生命探测、地外资源探测与利用、小行星防御等重大科技与工程任务提供参考(李春来等, 2019).

4.1　小行星

小行星主要是指围绕太阳公转, 体积和质量小于行星和矮行星, 且几乎不释放气体和尘埃的天体. 小行星的大小大概介于0.01~1000km, 至今已确认的小行星数量超过130万颗, 其中90%以上都聚集在火星与木星轨道之间的小行星带上, 其余则分布在地球轨道、木星轨道、木星与海王星之间以及海王星外空间. 对小行星的分类系统主要基于光谱学所指示的化学成分, 分为石质(S型)、碳质(C型)、X型和其他类型(徐伟彪和赵海斌, 2005).

对小行星物质组成的认识主要依靠对陨石样品的研究. 随着高精度金属同位素测试技术的发展, 对不同类型陨石中同位素异常的研究为认识类地行星的物质来源提供了新的制约(Qin等, 2010, 2011). 研究发现, 不同类型的小行星具有特定的同位素异常特征. 这反映了核合成异常——继承自不同的前太阳系恒星的信号, 在行星盘上分布不均. 同源的样品通常具有相近的同位素异常值, 可以用于未知天体样品溯源. 例如, Zhang等(2020)把^{54}Cr异常和O同位素组成联用确证NWA 8321陨石来自灶神星, 并发现其记录了灶神星内部经历了硫化物的交代过程. Li等(2024)用相同的方法证实了亚铁斜长岩NWA 15118陨石来自灶神星, 并以此作为其曾经存在岩浆洋的证据. 而短半衰期放射性同位素定年可以为太阳系早期事件提供时间制约. 结

合短半衰期放射性同位素定年和同位素异常信息，可反演太阳系物质储库的时空分布特征. 通过对原始球粒陨石和铁陨石中Mn-Cr短周期放射性同位素体系和Cr同位素异常联合研究，发现内太阳系的物质随时间快速混合，而外太阳系的物质不均一性得到了更好的保存(Zhu等，2019). 这对类地行星的物质来源提供了新的认识.

近年来，小行星的采样返回是深空探测的一个热点领域. 天问二号任务的目标之一是对近地小行星2016 HO3进行返样. 国内学者已对其空间轨道、与太阳风相互作用、光谱类型、形成机制、演化过程等多方面理化性质进行了前期调研(Feng等，2022; Hu等，2023; Li等, 2023), 以理解近地小行星轨道和化学演变的复杂性. 此外, 我国还计划发射动能撞击器模拟小行星防御, 撞击近地小行星2019 VL5, 并通过此次撞击实验对其成分特征和动量传递规律进行研究(Wang K D等, 2023).

4.2 彗星

彗星是一类能够释放喷发气体和尘埃物质的小天体, 一般具有彗核、彗发和彗尾, 大小与小行星的尺寸范围相似, 在海王星外的柯伊伯带广泛存在, 也分布在小行星主带. 主要组成为水冰、气体、易挥发物质、松散土壤或尘埃颗粒等. 天问二号的环绕器计划在完成2016 HO3探测及采样任务后前往311P/PAN-STARRS彗星(简称311P)，这是一颗主带彗星，又因其与小行星的轨道特征极其相似，因此被归类为活跃小行星. 目前对311P彗星知之甚少，我国部分学者对其特殊的多彗尾部特征开展了前期调研，推进了对311P活动机制的认知(Liu B等，2023)，但仍有待绕飞任务开始后的数据进一步揭示其实际结构以及彗核、彗尾的化学组成.

4.3 冰卫星

木星和土星都拥有为数众多的冰卫星. 有的冰卫星有地下海洋，是地外生命探测的重要目标. 在木星的卫星中，木卫二有着主要由冰组成的表面以及广阔的冰下海洋. 木卫三是太阳系中最大的卫星，同时还具有全球内禀磁场，根据所含盐分、深度和压力的不同，其冰下世界也许是由多层水和冰的分层构成. 木卫三和木卫四表面的年龄比木卫二要老，可能暗示着这两颗冰卫星的表面-内部物质交换程度没有木卫二高(Mueller和McKinnon，1988). 基于对木星系典型冰卫星的认识，我国天问四号任务拟探测木卫四. 在以往的国际冰卫星探测历史中，对木卫四的研究相对缺乏. 可以预见，天问四号任务结合国际其他木星系探测任务将有助于深入理解木星冰卫星的化学组成和演化特征.

4.4 系外行星

系外行星是人类寻找系外宜居环境以及理解太阳系形成与演化的重要研究对象. 随着20世纪90年代第一颗系外行星的发现，人类探测系外行星的步伐越来越快，直至今日已确认的系外行星接近6000颗. 目前对于系外行星探测所使用的主要手段包括凌星法、视向速度、微引力透镜、直接成像、天体测量等(周济林等, 2024). 由于距离遥远, 对于系外行星的观测和研究集中在大气光谱学分析. 国际上成功在近地空间放置了8台空间望远镜，包括哈勃空间望远镜、斯皮策红外望远镜、CoRoT空间卫星、开普勒空间望远镜、盖亚空间望远镜、TESS卫星、CHEOPS卫星和韦伯空间望远镜.

我国的系外行星探测计划发展迅速，国家天文台、南京大学等利用兴隆观测基地和中国南极天文观测设备发现了多个系外行星和上百颗新的系外行星候选体(Liu等，2009; Zhang等，2019). 近年来，我国开启了空间站巡天望远镜CSST的设备研发项目, 主要设计一套系外行星成像星冕仪用于研究系外冷行星(Zhu等，2021). 未来其他项目还将涉及地球2.0探测、系外行星大气演化和生命信号探测等(Zhang，2020; Ge等，2022).

5 展望及建议

我国行星科学研究目前已进入快速发展时期. 为了更好地推进我国行星科学前沿突破并进一步提升行星科学在国家深空探测工程中的驱动力，建议加强以下几方面的工作.

5.1 依托国家深空探测任务, 聚焦前沿科学问题研究

我国嫦娥五号任务返回月球样品的科学研究已取得一系列创新性成果, 带来了月球科学研究新高潮. 嫦

娥六号任务首次从月球背面采集月壤样品，为人类研究月球背面地质和月球演化带来机遇. 2030年之前，嫦娥七号、八号任务计划在月球南极附近着陆，将携带月震仪等仪器，探测月球内部结构、磁场、二分性等重要前沿科学问题. 月球热模拟的研究将进一步探究月幔演化和月球的热演化历史，研究月幔冷却速率和年轻火山活动的触发机制. 月球水和挥发分研究仍是未来重要方向，通过月球南极挥发分探测任务，探索月球挥发分运移机制，预测月球挥发分的分布. 在月壤特性研究方面，需要加强模拟实验和广域、深钻采样，理解月壤宏微观特性和演化过程，支撑无人和载人月球探测工程任务的规划和实施，并适时开展面向月面资源利用的月壤工艺矿物学的关键参数分析和技术攻关. 同时, 继续深化嫦娥五号、六号月球返回样品的多学科研究.

我国首次火星探测任务天问一号的科学数据尚需要深入挖掘和研究. (1) 乌托邦平原南部的综合地质研究: 继续挖掘祝融号数据, 探讨晚西方纪到亚马逊纪期间的地质构造演化、古环境和古气候的变化; (2) 火星全球探测: 通过环绕器携带的相机对火星两极沉积物进行长期观测，研究古环境的演化，利用多个火星环绕器联合观测数据研究，探测火星空间环境、大气和磁场变化, 并为天问三号的选址提供支持; (3) 火星重-磁-震等物理方法研究: 反演火星内部圈层结构，为未来火星表面开展地球物理探测作准备，探讨圈层过程对宜居性的控制作用; (4) 大气环流模型研究: 通过遥感观测和大气环流模型研究，深化对火星大气演化的认识; (5) 天问三号任务火星采样返回(Hou等, 2024): 这将成为火星探测的新里程碑，重点开展火星环境演变、生命痕迹探寻等研究.

我国正在开展和将开展小行星探测和采样、木星系探测以及地外宜居行星搜寻等，将进一步丰富对太阳系各类天体特征和演化的认识. 探索地外宜居环境和生命信号是行星科学和深空探测的重要科学目标, 也是天体生物学研究的主要内容(林巍等, 2022). 当前我国天体生物学研究正处于快速发展的关键期，需要立足国家深空探测战略，以前沿科学问题为牵引，构建具有国际竞争力的研究体系. 我国天体生物学研究在未来可聚焦以下几个发展方向: (1) 地球生命起源及其环境约束，研究生命如何从化学过程向生物过程的演化, 探索其环境背景; (2) 地球极端环境生命及其适应机制，开展地球代表性类地外极端环境中生命的生存和适应机制研究，重点关注生命过程产生的各种信号, 并将其应用于地外生命探测研究中; (3) 太阳系内行星宜居性刻画及生命信号探寻，研究火星、冰卫星、金星等太阳系天体的环境演化，评估生命可能存在的条件, 开发先进的探测技术与方法; (4) 系外宜居行星探测, 开展系外行星探测, 评估行星的宜居性并探索潜在生命信号.

5.2　加速推动科学研究和工程技术的融合发展

行星科学学科发展离不开多学科交叉和科工结合、协同创新. 行星科学不仅涉及地球科学、天文学和空间科学，还融合了物理学、化学、生物学和计算机科学等多个学科. 通过多学科的交叉合作，全面系统理解行星的结构与演化、环境与资源，揭示太阳系内外行星的复杂性. 加速技术创新和应用，包括探测技术、数据处理与分析技术、智能系统与自主控制技术等. 加快行星科学的发展, 牵引未来月球与行星探测任务的科学目标论证、方案设计、载荷研制与科学应用.

5.3　加强国际合作, 助力行星科学发展

面对日益激烈的大国科技竞争形势，我国行星科学的发展需要加强国际合作. 积极与其他国家和地区的科学家、工程师和机构合作，共享资源、经验和专业知识，共同攻克行星科学研究中的重大问题，促进科学研究的不断深入. 国际合作还可以促进科学家之间的交流与互动，激发新的思想和创新. 在应对全球性挑战，如太空探索、行星保护等方面，国际合作更是必不可少的. 通过国际合作提升我国行星科学竞争力和影响力，通过共同努力实现更广阔的科学目标, 为人类探索宇宙贡献智慧和力量.

5.4　加快完善我国行星科学人才培养体系建设

行星科学的发展离不开完备的高质量行星科学人才培养体系. 鼓励通过任务带学科的科教融合育才模式，夯实教育-理论-技术-应用全链条研究体系. 科学与教育的融合可以促进知识的传播与交流，通过将最新的科学研究成果和前沿技术引入教学内容中，激发青年学生的兴趣，提高他们的科学素养和创新能力. 同时，教育也为科学研究提供了人才支持和智力资源,

为行星科学的发展注入新的活力和动力. 高校和科研院所应共同担负起培养满足我国未来深空探测需求的行星科学学科人才的重要责任, 尽快形成从本科生到研究生不同层次的培养梯队, 培养具备国际视野和创新能力的多学科交叉背景的行星科学人才, 打造与我国航天强国建设战略需求相适应的高水平科技力量. 行星科学研究将不断地拓展现有对宇宙认知的边界, 又为全面理解人类家园地球的形成、运行和演化提供新维度和新途径.

致谢 本文在中国科学院学部第150次科学与技术前沿论坛专家报告和讨论启发基础上完成. 在此衷心感谢论坛共同主席郑永飞院士和常进院士的指导以及所有与会专家的贡献. 龚剑明、周济林、惠鹤九、胡森、田恒次、戎昭金、陈妍、申建勋、张慧卿等在文稿撰写中提供了帮助. 感谢两位审稿专家对初稿提出的建设性意见.

参考文献

董理, 普业, 李艺苑, 刘鸿波, 刘娟娟, 邓世雅, 黄叶薇, 刘明宇, 刘帅, 王斌. 2024. 新一代火星大气模式GoPlanet-Mars V1的研制. 科学通报, 69: 1343–1350

何飞, 魏勇, 戎昭金, 任志鹏, 闫丽梅, 谭宁, 王誉棋, 范开, 周旭, 高佳维. 2023. 火星沙尘暴监测方法. 科学通报, 68: 2046–2057

贺怀宇, 柳骊, 何雨旸, 魏勇. 2024. 嫦娥五号月球样品研究前沿与进展. 北京: 科学出版社

李春来, 刘建军, 严韦, 封剑青, 任鑫, 刘斌. 2019. 小行星探测科学目标进展与展望. 深空探测学报, 6: 424–436

林红磊, 林杨挺, 魏勇, 芶盛, 张驰, 阮仁浩, 潘永信. 2023. “祝融号”在轨定标光谱揭示火星北部低地卤水活动的矿物学证据. 中国科学: 地球科学, 53: 2506–2515

林巍, 申建勋, 潘永信. 2022. 关于我国天体生物学研究的思考. 地球科学, 47: 4108–4113

潘永信, 王赤. 2021. 国家深空探测战略可持续发展需求: 行星科学研究. 中国科学基金, 35: 181–185

潘永信, 张荣桥, 王赤, 李春来. 2021. 火星探测的科学研究进展. 见: 2021科学发展报告. 北京: 科学出版社

戎昭金, 魏勇, 何飞, 高佳维, 范开, 王誉棋, 曹露, 闫丽梅, 任志鹏, 周旭, 谭宁, 余涛. 2023. 我国未来在轨监测火星沙尘暴的设想和方案. 科学通报, 68: 716–728

王赤, 白青江, 时蓬, 宋婷婷, 李明, 范全林. 2022. 美国行星科学2023–2032年规划及启示. 科技导报, 40: 6–15

王赤, 时蓬, 白青江, 王琴, 范全林. 2023. 2022年空间科学与深空探测热点回眸. 科技导报, 41: 79–102

王誉棋, 魏勇, 范开, 何飞, 戎昭金, 周旭, 谭宁. 2023. 沙尘暴对火星表面探测器的影响: 回顾与展望. 科学通报, 68: 368–379

魏勇, 何飞, 范开, 戎昭金, 王誉棋. 2022. 祝融号火星车巡视区2022年沙尘暴活动趋势初步分析. 科学通报, 67: 1938–1944

徐伟彪, 赵海斌. 2005. 小行星深空探测的科学意义和展望. 地球科学进展, 20: 1183–1190

岳宗玉, 邸凯昌, 刘建忠. 2021. 行星表面撞击坑统计定年原理及应用. 矿物岩石地球化学通报, 40: 1130–1142

张荣桥. 2021. 中国首次火星探测工程. 北京: 中国宇航出版社

周济林, 谢基伟, 葛健, 季江徽, 窦江培, 东苏勃, 刘慧根, 王炜, 郭建恒, 余聪, 白雪宁, 冯发波, 刘倍贝. 2024. 空间系外行星探测与研究进展. 空间科学学报, 44: 5–18

周旭, 魏勇, 吴兆朋, 任志鹏, 谭宁, 范斯腾, 何飞, 戎昭金, 闫丽梅, 王誉棋, 范开, 高佳维. 2024. 火星全大气模式与沙尘活动模拟研究: 回顾与展望. 科学通报, 69: 1058–1067

Borg L E, Shearer C K, Asmerom Y, Papike J J. 2004. Prolonged KREEP magmatism on the Moon indicated by the youngest dated lunar igneous rock. Nature, 432: 209–211

Boyce J W, Liu Y, Rossman G R, Guan Y, Eiler J M, Stolper E M, Taylor L A. 2010. Lunar apatite with terrestrial volatile abundances. Nature, 466: 466–469

Chang Y, Xiao Z, Liu Y, Cui J. 2021. Self-secondaries formed by cold spot craters on the Moon. Remote Sens, 13: 1087

Che X, Nemchin A, Liu D, Long T, Wang C, Norman M D, Joy K H, Tartese R, Head J, Jolliff B, Snape J F, Neal C R, Whitehouse M J, Crow C, Benedix G, Jourdan F, Yang Z, Yang C, Liu J, Xie S, Bao Z, Fan R, Li D, Li Z, 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

Chen Y, Hu S, Li J H, Li Q L, Li X, Li Y, Liu Y, Qian Y, Yang W, Zhou Q, Lin Y, Li C, Li X H. 2023. Chang’e-5 lunar samples shed new light on the Moon. TIG, 1: 100014

Cheng K W, Rozel A B, Golabek G J, Ballantyne H A, Jutzi M, Tackley P J. 2024. Mars’s crustal and volcanic structure explained by southern giant impact and resulting mantle depletion. Geophys Res Lett, 51: e2023GL105910

Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, Wooden D, Shirley M, Ennico K, Hermalyn B, Marshall W, Ricco A, Elphic R C, Goldstein D, Summy D, Bart G D, Asphaug E, Korycansky D, Landis D, Sollitt L. 2010. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. Science, 330: 463–468

Crawford I A, Anand M, Cockell C S, Falcke H, Green D A, Jaumann R, Wieczorek M A. 2012. Back to the Moon: The scientific rationale for resuming lunar surface exploration. Planet Space Sci, 74: 3–14

Deng Z, Moynier F, Villeneuve J, Jensen N K, Liu D, Cartigny P, Mikouchi T, Siebert J, Agranier A, Chaussidon M, Bizzarro M.

2020. Early oxidation of the martian crust triggered by impacts. Sci Adv, 6: eabc4941

Ding L, Zhou R, Yu T, Gao H, Yang H, Li J, Yuan Y, Liu C, Wang J, Zhao Y Y S, Wang Z, Wang X, Bao G, Deng Z, Huang L, Li N, Cui X, He X, Jia Y, Yuan B, Liu G, Zhang H, Zhao R, Zhang Z, Cheng Z, Wu F, Xu Q, Lu H, Richter L, Liu Z, Niu F, Qi H, Li S, Feng W, Yang C, Chen B, Dang Z, Zhang M, Li L, Wang X, Huang Z, Zhang J, Xing H, Wang G, Niu L, Xu P, Wan W, Di K. 2022. Surface characteristics of the Zhurong Mars rover traverse at Utopia Planitia. Nat Geosci, 15: 171–176

Dong C, Lee Y, Ma Y, Lingam M, Bougher S, Luhmann J, Curry S, Toth G, Nagy A, Tenishev V, Fang X, Mitchell D, Brain D, Jakosky B. 2018. Modeling martian atmospheric losses over time: Implications for exoplanetary climate evolution and habitability. Astrophys J Lett, 859: L14

Du A, Ge Y, Wang H, Li H, Zhang Y, Luo H, Huang C, Shan L, Han F, Liu Y, Zou Y, Wang C, Pan Y, Liu Q, Mitchell R N, Jia Y, Chen B, Jin S, Jiang Y, Zhang T, Zhu R, Gubbins D, Zhang K. 2023. Ground magnetic survey on Mars from the Zhurong rover. Nat Astron, 7: 1037–1047

Feng J, Hou X, Di Lizia P, Armellin R, Santeramo D A. 2022. Sensitivity analysis of the orbital motion around 469219 Kamo'oalewa (2016 HO3) to uncertainties on asteroid mass and solar radiation pressure. Adv Space Res, 69: 1602–1618

Fernandes V A, Fritz J, Weiss B P, Garrick-Bethell I, Shuster D L. 2013. The bombardment history of the Moon as recorded by ^{40}Ar-^{39}Ar chronology. Meteorit Planet Scien, 48: 241–269

Garrick-Bethell I, Zuber M T. 2009. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin. Icarus, 204: 399–408

Ge J, Zhang H, Deng H, Howell S B. 2022. The ET mission to search for earth 2.0s. Innovation, 3: 100271

Hartmann W K, Davis D R. 1975. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. Icarus, 24: 504–515

Hauri E H, Weinreich T, Saal A E, Rutherford M C, Van Orman J A. 2011. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. Science, 333: 213–215

He F, Rong Z, Wu Z, Gao J, Fan K, Zhou X, Yan L, Wang Y, Wei Y. 2024. Martian dust storms: Reviews and perspective for the Tianwen-3 Mars sample return mission. Remote Sens, 16: 2613

He H, Ji J, Zhang Y, Hu S, Lin Y, Hui H, Hao J, Li R, Yang W, Tian H, Zhang C, Anand M, Tartèse R, Gu L, Li J, Zhang D, Mao Q, Jia L, Li X, Chen Y, Zhang L, Ni H, Wu S, Wang H, Li Q, He H, Li X, Wu F. 2023. A solar wind-derived water reservoir on the Moon hosted by impact glass beads. Nat Geosci, 16: 294–300

Head III J W, Kreslavsky M A, Pratt S. 2002. Northern lowlands of Mars: Evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in the Hesperian Period. J Geophys Res, 107: 3-1–3-29

Heiken G, Vaniman D, French B. 1991. Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press

Honniball C I, Lucey P G, Ferrari-Wong C M, Flom A, Li S, Kaluna H M, Takir D. 2020. Telescopic observations of lunar hydration: Variations and abundance. J Geophys Res-Planets, 125: e2020JE006484

Hou Z, Liu J, Xu Y, Pang F, Wang Y, Qin L, Liu Y, Zhao Y Y S, Wei G, Xu M, Jiang K, Hao C, Ji S, Zhu R, Yu B, Liu J, Sheng Z, Wang J, Zhang C, Li Y. 2024. The search for life signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars sample return mission. Natl Sci Rev, 11: nwae313

Hu S, Lin Y, Zhang J, Hao J, Feng L, Xu L, Yang W, Yang J. 2014. NanoSIMS analyses of apatite and melt inclusions in the GRV 020090 Martian meteorite: Hydrogen isotope evidence for recent past underground hydrothermal activity on Mars. Geochim Cosmochim Acta, 140: 321–333

Hu S, He H, Ji J, Lin Y, Hui H, Anand M, Tartèse R, Yan Y, Hao J, Li R, Gu L, Guo Q, He H, Ouyang Z. 2021. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5. Nature, 600: 49–53

Hu S, Li B, Jiang H, Bao G, Ji J. 2023. Peculiar orbital characteristics of Earth quasi-satellite 469219 Kamo'oalewa: Implications for the Yarkovsky detection and orbital uncertainty propagation. Astronom J, 166: 178

Hu X, Wu X, Song S, Ma M, Zhou W, Xu Q, Li L, Xiao C, Li X, Wang C, Liu Q, Chen L, Chen G, Cao J, Wang M, Li P, Chu Z, Xia B, Yang J, Tu C, Liu D, Zhang S, Zhang Q, Li Z. 2022. First observations of Mars atmosphere and ionosphere with Tianwen-1 radio-occultation technique on 5 August 2021. Remote Sens, 14: 2718

Hui H, Peslier A H, Zhang Y, Neal C R. 2013. Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon. Nat Geosci, 6: 177–180

Hurowitz J A, Tosca N J, McLennan S M, Schoonen M A A. 2007. Production of hydrogen peroxide in Martian and lunar soils. Earth Planet Sci Lett, 255: 41–52

Ji J, He H, Hu S, Lin Y, Hui H, Hao J, Li R, Yang W, Yan Y, Tian H, Zhang C, Anand M, Tartèse R, Gu L, Li J, Zhang D, Mao Q, Jia L, Chen Y, Wu S, Wang H, He H, Li X, Wu F. 2022. Magmatic chlorine isotope fractionation recorded in apatite from Chang'e-5 basalts. Earth Planet Sci Lett, 591: 117636

Jiang Y, Hsu W. 2012. Petrogenesis of Grove Mountains 020090: An enriched "lherzolitic" shergottite. Meteorit Planet Sci, 47: 1419–1435

Li C, Zhang R, Yu D, Dong G, Liu J, Geng Y, Sun Z, Yan W, Ren X, Su Y, Zuo W, Zhang T, Cao J, Fang G, Yang J, Shu R, Lin Y, Zou Y,

Liu D, Liu B, Kong D, Zhu X, Ouyang Z. 2021. China's Mars Exploration mission and science investigation. Space Sci Rev, 217: 57

Li C, Guo Z, Li Y, Tai K, Wei K, Li X, Liu J, Ma W. 2022a. Impact-driven disproportionation origin of nanophase iron particles in Chang'e-5 lunar soil sample. Nat Astron, 6: 1156–1162

Li C L, Hu H, Yang M F, Pei Z Y, Zhou Q, Ren X, Liu B, Liu D, 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, Zuo W, Su Y, Wen W B, Ouyang Z Y. 2022b. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. Natl Sci Rev, 9: nwab188

Li C, Zheng Y, Wang X, Zhang J, Wang Y, Chen L, Zhang L, Zhao P, Liu Y, Lv W, Liu Y, Zhao X, Hao J, Sun W, Liu X, Jia B, Li J, Lan H, Fa W, Pan Y, Wu F. 2022c. Layered subsurface in Utopia Basin of Mars revealed by Zhurong rover radar. Nature, 610: 308–312

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

Li S, Lucey P G, Fraeman A A, Poppe A R, Sun V Z, Hurley D M, Schultz P H. 2020. Widespread hematite at high latitudes of the Moon. Sci Adv, 6: eaba1940

Li S, Zhang D, Shu Q, Bao H, Cao X, Liu J, Qin L, Fan Y, Zhou S, Shen D, Li M. 2024. An anorthositic meteorite supporting an ancient magma ocean on Vesta. Nat Astron, 8: 739–747

Li X, Scheeres D J, Qiao D, Liu Z. 2023. Geophysical and orbital environments of asteroid 469219 2016 HO3. Astrodynamics, 7: 31–50

Lin Y, Zhao J, Wang L, Huang J, Zhang L, Xiao L. 2023. Evaluation of small-sized mounds formation mechanisms in China's Zhurong landing region. Icarus, 389: 115256

Lin Y T, Guan Y, Wang D, Kimura M, Leshin L A. 2005. Petrogenesis of the new lherzolitic shergottite Grove Mountains 99027: Constraints of petrography, mineral chemistry, and rare earth elements. Meteorit Planet Sci, 40: 1599–1619

Lin Y T, Hu S, Miao B, Xu L, Liu Y, Xie L, Feng L, Yang J. 2013. Grove Mountains 020090 enriched lherzolitic shergottite: A two-stage formation model. Meteorit Planet Sci, 48: 1572–1589

Lin Y T, El Goresy A, Hu S, Zhang J C, Gillet P, Xu Y C, Hao J L, Miyahara M, Ouyang Z Y, Ohtani E, Xu L, Yang W, Feng L, Zhao X C, Yang J, Ozawa S. 2014. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. Meteorit Planet Sci, 49: 2201–2218

Liu B, Liu X, Jia X, Li F, Zhao Y, Yu L L. 2023. Active Asteroid 311P/PanSTARRS: Rotational Instability as the Origin of its Multitails? Astronom J, 166: 156

Liu C, Ling Z, Wu Z, Zhang J, Chen J, Fu X, Qiao L, Liu P, Li B, Zhang L, Xin Y, Shi E, Cao H, Tian S, Wan S, Bai H, Liu J. 2022. Aqueous alteration of the Vastitas Borealis Formation at the Tianwen-1 landing site. Commun Earth Environ, 3: 280

Liu J, Li C, Zhang R, Rao W, Cui X, Geng Y, Jia Y, Huang H, Ren X, Yan W, Zeng X, Wen W, Wang X, Gao X, Fu Q, Zhu Y, Dong J, Li H, Wang X, Zuo W, Su Y, Kong D, Zhang H. 2021. Geomorphic contexts and science focus of the Zhurong landing site on Mars. Nat Astron, 6: 65–71

Liu J, Liu Y, Wan W, Zhou X, Zhao Z, Wu Y, Zhang C, Wang X, Wu X, Zou Y. 2023a. Orbital and *in situ* observation of transverse aeolian ridges at Zhurong landing site. J Geophys Res-Planets, 128: e2023JE007857

Liu J, Qin X, Ren X, Wang X, Sun Y, Zeng X, Wu H, Chen Z, Chen W, Chen Y, Wang C, Sun Z, Zhang R, Ouyang Z, Guo Z, Head J W, Li C. 2023b. Martian dunes indicative of wind regime shift in line with end of ice age. Nature, 620: 303–309

Liu X, Hao J, Li R, He Y, Tian H, Hu S, Li J, Gu L, Yang W, Lin Y. 2022. Sulfur isotopic fractionation of the youngest Chang'e-5 basalts: Constraints on the magma degassing and geochemical features of the mantle source. Geophys Res Lett, 49: e2022GL099922

Liu Y J, Sato B, Zhao G, Ando H. 2009. A planetary companion orbiting the intermediate-mass G giant HD 173416. Res Astron Astrophys, 9: 1–4

Liu Y, Wu X, Zhao Y Y S, Pan L, Wang C, Liu J, Zhao Z, Zhou X, Zhang C, Wu Y, Wan W, Zou Y. 2022. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars. Sci Adv, 8: eabn8555

Liu Z, Liu Y, Pan L, Zhao J, Kite E S, Wu Y, Zou Y. 2021. Inverted channel belts and floodplain clays to the East of Tempe Terra, Mars: Implications for persistent fluvial activity on early Mars. Earth Planet Sci Lett, 562: 116854

Lu X, Chen J, Ling Z, Liu C, Fu X, Qiao L, Zhang J, Cao H, Liu J, He Z, Xu R. 2023. Mature lunar soils from Fe-rich and young mare basalts in the Chang'e-5 regolith samples. Nat Astron, 7: 142–151

Luo B, Wang Z, Song J, Qian Y, He Q, Li Y, Head J W, Moynier F, Xiao L, Becker H, Huang B, Ruan B, Hu Y, Pan F, Xu C, Liu W, Zong K, Zhao J, Zhang W, Hu Z, She Z, Wu X, Zhang H. 2023. The magmatic architecture and evolution of the Chang'e-5 lunar basalts. Nat Geosci, 16: 301–308

McCubbin F M, Barnes J J, Ni P, Hui H, Klima R L, Burney D, Day J M D, Magna T, Boyce J W, Tartèse R, Kaaden K E V, Steenstra E, Elardo S M, Zeigler R A, Anand M, Liu Y. 2023. Endogenous lunar volatiles. Rev Mineral Geochem, 89: 729–786

Mitra K, Moreland E L, Ledingham G J, Catalano J G. 2023. Formation

of manganese oxides on early Mars due to active halogen cycling. Nat Geosci, 16: 133–139

Mueller S, McKinnon W B. 1988. Three-layered models of Ganymede and Callisto: Compositions, structures, and aspects of evolution. Icarus, 76: 437–464

Mustard J F. 2019. Sequestration of volatiles in the martian crust through hydrated minerals. In: Volatiles in the Martian Crust. Elsevier. 247–263

Qin L, Alexander C M O, Carlson R W, Horan M F, Yokoyama T. 2010. Contributors to chromium isotope variation of meteorites. Geochim Cosmochim Acta, 74: 1122–1145

Qin L, Nittler L R, Alexander C M O, Wang J, Stadermann F J, Carlson R W. 2011. Extreme ^{54}Cr-rich nano-oxides in the CI chondrite Orgueil—Implication for a late supernova injection into the solar system. Geochim Cosmochim Acta, 75: 629–644

Qin X, Ren X, Wang X, Liu J, Wu H, Zeng X, Sun Y, Chen Z, Zhang S, Zhang Y, Chen W, Liu B, Liu D, Guo L, Li K, Zeng X, Huang H, Zhang Q, Yu S, Li C, Guo Z. 2023. Modern water at low latitudes on Mars: Potential evidence from dune surfaces. Sci Adv, 9: eadd8868

Qu S Y, Zhao Y Y S, Cui H, Yin X Z, Jackson W A, Nie X, Wu Z C, Wang J H, Zhou D S, Qi C, Li X Y, Liu J Z. 2022. Preferential formation of chlorate over perchlorate on Mars controlled by iron mineralogy. Nat Astron, 6: 436–441

Saal A E, Hauri E H, Cascio M L, Van Orman J A, Rutherford M C, Cooper R F. 2008. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. Nature, 454: 192–195

Sharp Z D, Shearer C K, McKeegan K D, Barnes J D, Wang Y Q. 2010. The chlorine isotope composition of the Moon and implications for an anhydrous mantle. Science, 329: 1050–1053

Shen J, Zhang Y, Wang Z, Zuo Z, Che X, Li W C, Wang F, Li S, Hu Y, Hui H, Qin L. 2025. A pristine low-Ti cumulate source for Chang'e 5 basalts revealed by Sr-Nd-Hf isotopes. Geochem Persp Let, 33: 44–50

Su B, Yuan J, Chen Y, Yang W, Mitchell R N, Hui H, Wang H, Tian H, Li X H, Wu F Y. 2022. Fusible mantle cumulates trigger young mare volcanism on the cooling Moon. Sci Adv, 8: eabn2103

Sun W, Tkalčić H. 2022. Repetitive marsquakes in Martian upper mantle. Nat Commun, 13: 1695

Taylor S R, Pieters C M, MacPherson G J. 2006. Earth-Moon system, planetary science, and lessons learned. Rev Mineral Geochem, 60: 657–704

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

Tian Y, Li B, Rong Z, Qu S, Chen S. 2024. Martian dust storm spatial-temporal analysis of tentative landing areas for China's Tianwen-3 Mars Mission. Earth Space Sci, 11: e2024EA003634

Usui T, Alexander C M O D, Wang J, Simon J I, Jones J H. 2015. Meteoritic evidence for a previously unrecognized hydrogen reservoir on Mars. Earth Planet Sci Lett, 410: 140–151

Wan W X, Wang C, Li C L, Wei Y, Liu J J. 2020. The payloads of planetary physics research onboard China's First Mars Mission (Tianwen-1). Earth Planet Phys, 4: 331–332

Wang C, Jia Y, Xue C, Lin Y, Liu J, Fu X, Xu L, Huang Y, Zhao Y, Xu Y, Gao R, Wei Y, Tang Y, Yu D, Zou Y. 2024. Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission. Natl Sci Rev, 11: nwad329

Wang K D, Li M T, Zhou Q, Wang Y R. 2023. Targets selection and mission optimization of kinetic impact deflection test mission for small size asteroids. Adv Space Res, 72: 3477–3498

Wang Y M, Zhang T L, Wang G Q, Xiao S D, Zou Z X, Cheng L, Pan Z H, Liu K, Hao X J, Li Y R, Chen M M, Zhang Z B, Yan W, Su Z P, Wu Z Y, Shen C L, Chi Y T, Xu M J, Guo J N, Du Y. 2023. The Mars orbiter magnetometer of Tianwen-1: In-flight performance and first science results. Earth Planet Phys, 7: 216–228

Wen K, Yang P, Zhu M. 2023. Mineral surface-catalyzed oxidation of Mn(II) by bromate: Implications for the occurrence of Mn oxides on Mars. Geochim Cosmochim Acta, 360: 151–162

Wilson L, Head J W. 2017. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 1: Theory). Icarus, 283: 146–175

Wu F Y, Li Q L, Chen Y, Hu S, Yue Z Y, Zhou Q, Wang H, Yang W, Tian H C, Zhang C, Li J H, Li L X, Hui H J, Li C L, Lin Y T, Li X H, Delano J W. 2024. Lunar evolution in light of the Chang'e-5 returned samples. Annu Rev Earth Planet Sci, 52: 159–194

Wu Z, Li T, Heavens N G, Newman C E, Richardson M I, Yang C, Li J, Cui J. 2022. Earth-like thermal and dynamical coupling processes in the Martian climate system. Earth-Sci Rev, 229: 104023

Xiao L, Huang J, Kusky T, Head J W, Zhao J, Wang J, Wang L, Yu W, Shi Y, Wu B, Qian Y, Huang Q, Xiao X. 2023. Evidence for marine sedimentary rocks in Utopia Planitia: Zhurong rover observations. Natl Sci Rev, 10: nwad137

Xiao Z, Ding C, Xie M, Cai Y, Cui J, Zhang K, Wang J. 2021. Ejecta from the orientale basin at the Chang'e-4 landing site. Geophys Res Lett, 48: e2020GL090935

Xiao Z, Yan P, Wu B, Ding C, Li Y, Chang Y, Xu R, Wu Y, Wang Y, Ma Y, Cui J. 2022. Translucent glass globules on the Moon. Sci Bull, 67: 355–358

Xie M, Zhu M, Xiao Z, Wu Y, Xu A. 2017. Effect of topography

degradation on crater size-frequency distributions: Implications for populations of small craters and age dating. Geophys Res Lett, 44: 10,171–10,179

Xie M, Xiao Z, Xu A. 2019. Time-dependent production functions of lunar simple craters on layered targets with consideration of topographic degradation. Geophys Res Lett, 46: 10987–10996

Xu Y, Tian H C, Zhang C, Chaussidon M, Lin Y, Hao J, Li R, Gu L, Yang W, Huang L, Du J, Yang Y, Liu Y, He H, Zou Y, Li X, Wu F. 2022. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle latitude. Proc Natl Acad Sci USA, 119: e2214395119

Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, Ogawa Y, Ishihara Y, Morota T, Hirata N, Ohtake M, Hiroi T, Yokota Y, Haruyama J. 2012. Massive layer of pure anorthosite on the Moon. Geophys Res Lett, 39: 2012GL052098

Ye B, Qian Y, Xiao L, Michalski J R, Li Y, Wu B, Qiao L. 2021. Geomorphologic exploration targets at the Zhurong landing site in the southern Utopia Planitia of Mars. Earth Planet Sci Lett, 576: 117199

Yue Z, Di K, Wan W, Liu Z, Gou S, Liu B, Peng M, Wang Y, Jia M, Liu J, Ouyang Z. 2022. Updated lunar cratering chronology model with the radiometric age of Chang'e-5 samples. Nat Astron, 6: 541–545

Zhang A B, Kong L G, Li W Y, Li L, Tang B B, Rong Z J, Wei Y, Ma J J, Zhang Y T, Xie L H, Wang Y X, He J S, Liu B, Wang W J, Su B, Li J W, Tan X, Wang F, Jin T F, Qiao F H, Wurz P, Zhu Y, Bai Y F, Li Y R, Zhu X B, Sun Y Q, Zou Y L, Wang C. 2022. Tianwen-1 MINPA observations in the solar wind. Earth Planet Phys, 6: 1–9

Zhang A C, Kawasaki N, Bao H, Liu J, Qin L, Kuroda M, Gao J F, Chen L H, He Y, Sakamoto N, Yurimoto H. 2020. Evidence of metasomatism in the interior of Vesta. Nat Commun, 11: 1289

Zhang H, Yu Z, Liang E, Yang M, Ashley M C B, Cui X, Du F, Fu J, Gong X, Gu B, Hu Y, Jiang P, Liu H, Lawrence J, Liu Q, Li X, Li Z, Ma B, Mould J, Shang Z, Suntzeff N B, Tao C, Tian Q, Tinney C G, Uddin S A, Wang L, Wang S, Wang X, Wei P, Wright D, Wu X, Wittenmyer R A, Xu L, Yang S, Yu C, Yuan X, Zheng J, Zhou H, Zhou J, Zhu Z. 2019. Exoplanets in the Antarctic Sky. II. 116 transiting exoplanet candidates found by AST3-II (CHESPA) within the southern CVZ of TESS. Astrophys J Suppl Ser, 240: 17

Zhang L, Li C, Zhang J, Zhou B, Zhao Y Y S, Liu Y, Di K, Mitchell R N, Li J, Zhang Z, Chen L, Liang X, Sun W, Liu Y, Zhao X, Hao J, Xu C, Zheng Y, Wang Y, Wang X, Zhao P, Lv W, Li Y, Lan H, Li Y, Wang W, Lu Y, Lin H, Fang P, Lin W, Wei Y, Chen L, Fang G, Lin Y, Yao Z, Pan Y. 2024. Buried palaeo-polygonal terrain detected underneath Utopia Planitia on Mars by the Zhurong radar. Nat Astron, 8: 69–76

Zhang N, Ding M, Zhu M H, Li H, Li H, Yue Z. 2022. Lunar compositional asymmetry explained by mantle overturn following the South Pole-Aitken impact. Nat Geosci, 15: 37–41

Zhang X. 2020. Atmospheric regimes and trends on exoplanets and brown dwarfs. Res Astron Astrophys, 20: 099

Zhao J, Xiao Z, Huang J, Head J W, Wang J, Shi Y, Wu B, Wang L. 2021. Geological characteristics and targets of high scientific interest in the Zhurong landing region on Mars. Geophys Res Lett, 48: e2021GL094903

Zhao J, Qiao L, Zhang F, Yuan Y, Huang Q, Yan J, Qian Y, Zou Y, Xiao L. 2023. Volcanism and deep structures of the Moon. Space Sci Technol, 3: 0076

Zhao Y Y S, McLennan S M, Jackson W A, Karunatillake S. 2018. Photochemical controls on chlorine and bromine geochemistry at the Martian surface. Earth Planet Sci Lett, 497: 102–112

Zhao Y Y S, Yu J, Wei G, Pan L, Liu X, Lin Y, Liu Y, Sun C, Wang X, Wang J, Xu W, Rao Y, Xu W, Sun T, Chen F, Zhang B, Lin H, Zhang Z, Hu S, Li X Y, Yu X W, Qu S Y, Zhou D S, Wu X, Zeng X, Li X, Tang H, Liu J. 2023. *In situ* analysis of surface composition and meteorology at the Zhurong landing site on Mars. Natl Sci Rev, 10: nwad056

Zhou C, Tang H, Li X, Zeng X, Mo B, Yu W, Wu Y, Zeng X, Liu J, Wen Y. 2022. Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals. Nat Commun, 13: 5336

Zhu K, Liu J, Moynier F, Qin L, Alexander C M O, He Y. 2019. Chromium isotopic evidence for an early formation of chondrules from the Ornans CO chondrite. Astrophys J, 873: 82

Zhu Y T, Dou J P, Zhang X, Zhao G, Guo J, Infante L. 2021. Portable adaptive optics for exoplanet imaging. Res Astron Astrophys, 21: 082

(责任编委: 惠鹤九)