

5-20-2024

New frontier in race for deep space exploration: Lunar water resources

Yong WEI

College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China,
weiy@mail.iggcas.ac.cn

See next page for additional authors

Recommended Citation

WEI, Yong; LIN, Honglei; HE, Fei; and ZHANG, Hui (2024) "New frontier in race for deep space exploration: Lunar water resources," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 5 , Article 12.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240108002>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss5/12>

This High Ground of Science and Innovation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



New frontier in race for deep space exploration: Lunar water resources

Abstract

Deep space exploration has become the commanding heights of science and technology competition. Since the beginning of the 21st century, China has successfully completed the lunar exploration missions of “orbiting, landing, and returning” in just twenty years, and upgraded to a new roadmap of “survey, construction, and utilization”. Meanwhile, lunar exploration worldwide has shown a trend towards normalization and commercialization. The research on lunar water resources has sparked widespread interest and intense competition among countries and space agencies, marking a new focus in human’s deep space exploration. The exploration of lunar water can help reveal crucial processes in the formation and evolution of the Earth-Moon system and even the entire solar system. It stands as a forefront in planetary science research and a key focus in discipline construction. The development of lunar water resources can provide fuel for future deep space exploration missions and ensure the long-term survival of humans on the Moon. It is an inevitable choice for countries and organizations worldwide to expand and deepen international cooperation, jointly utilizing extraterrestrial resources for the benefit of humanity. Combining the status and future trends of lunar water resource exploration, this study analyzes the opportunities and challenges in China’s deep space exploration program and the development of planetary science disciplines. It proposes strategies and suggestions based on the national context to seize the commanding heights of science and technology competition.

Keywords

commanding heights of science and technology, deep space exploration, planetary science, lunar water resources, the fourth phase of CLEP

Authors

Yong WEI, Honglei LIN, Fei HE, and Hui ZHANG

引用格式: 魏勇, 林红磊, 何飞, 等. 深空探测科技制高点上的新焦点: 月球水资源. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 899-906, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240108002.
Wei Y, Lin H L, He F, et al. New frontier in race for deep space exploration: Lunar water resources. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 899-906, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240108002. (in Chinese)

深空探测科技制高点上的新焦点: 月球水资源

魏勇^{1,2*} 林红磊² 何飞^{1,2} 张辉^{1,2}

1 中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049

2 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029

摘要 深空探测已经成为科技竞争的制高点。中国探月工程用20年的时间圆满完成“绕、落、回”并升级形成“勘、建、用”的新构想；同时，世界各国的月球探测发展已呈现出常态化和商业化的趋向。月球水资源的探测研究利用引发了各国和航天机构之间的广泛兴趣和激烈竞赛，成为科技制高点上的新焦点。月球水能够帮助揭示地月系统乃至太阳系形成演化的关键过程，是行星科学研究的前沿和学科建设的重要着力点；月球水资源的开发能够为未来的深空探测任务提供燃料和保障人类在月球上长期生存，是各国各机构扩展深化国际合作、共同利用地外资源造福人类的必然选择。文章结合月球水资源的探测研究现状和未来发展趋势，分析我国深空探测工程和行星科学学科发展的机遇与挑战，立足我国国情提出抢占科技制高点的对策与建议。

关键词 科技制高点，深空探测，行星科学，月球水资源，探月工程四期

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240108002

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240108002

我国的深空探测，历经“两弹一星”时期从无到有的技术积累，到21世纪以来中国探月工程20年的高速发展，再到新时代以来行星探测工程突飞猛进和近几年行星科学一级学科的爆发式发展，已经成长为

建设航天强国的一支主要力量。目前，美国、欧洲、俄罗斯、日本、印度，以及一些新兴航天机构和企业纷纷将深空探测目标转向月球，一场科技制高点争夺竞赛已然开始。与20世纪的美苏太空竞赛完全不同，

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金重点项目（42241106）

修改稿收到日期：2024年5月8日

本轮竞赛以月球南极的水冰为新焦点，水资源的开采利用是各方努力的目标。探索太阳系的起源和演化、建立可持续的地外人类驻留地、支撑未来深空探测任务，是人们对月球水的重要作用的关键共识，彰显了这一研究主题在推动构建人类命运共同体方面的重要意义。

1 月球水研究的2个阶段

水是理解太阳系起源与演化的重要线索，指引着人类对地外宜居环境的搜寻，在行星科学研究中受到极为广泛的关注。

第1阶段。关于月球上是否有水的争论源自伽利略时代，17世纪初的天文学家使用低倍率望远镜观察月表，认为黑色的区域被液态水覆盖，用“海”“洋”“溪”“湾”等描绘水系形态的字、词来命名月表不同区域。19世纪中叶，人们开始认为月球是干燥且没有空气的，随后又出现了各种理论来反驳这一观点，甚至有人提出月球背面可能存在水海洋和生命。20世纪30年代开始，科学家通过理论计算和数值模拟说明了月球上，特别是在极区的永久阴影区，有水的可能性。20世纪60—70年代，美苏太空竞赛加强了对月球水的探索，极大促进了行星科学的发展，增进了人类对月球水的理解。美国在其实施的“阿波罗计划”6次载人登月任务中，宇航员带回了381.7千克月球岩石和土壤样品，但对这些样品的研究结果没有显示出月球水的存在。苏联实施了3次无人取样返回任务，带回0.327千克样品，也没有获得确定的月球水存在的证据。从此，月球无水成为主流观点。“阿波罗计划”之后，探月活动进入低潮期，月球水研究的第1个阶段宣告结束。

第2阶段。该阶段始于20世纪90年代，美国的“克莱门汀号”（Clementine）发现了月球两极附近永久阴影区存在水冰的证据。其后发射的“月球勘探者号”（Lunar Prospector）的探测结果支持了月球极区存

在水冰的观点。于是，人们开始把注意力集中在月球极区。重大的突破出现在2008年，美国学者利用新技术重新分析阿波罗月壤样品的工作取得进展，找到了明确的水存在的证据^[1]；同期，印度的“月船一号”（Chandrayaan-1）任务搭载的月球矿物学绘图仪（M³）检测到了月球表面的羟基/水分子，且在月球极区尤为富集^[2-4]，重塑了人们对月球水合作用的理解。2009年，美国的“月球陨石坑观测和传感卫星任务”（LCROSS）进行了月球极区的撞击实验，对撞击溅射物的观测分析结果证实了水的存在^[5]。随着这些任务积累的数据不断增多，月球水的研究也逐渐深入，确认了月球上的水比之前认为的要多。到了2020年，美国的平流层红外天文观测站（SOFIA）检测到永久阴影区之外的水分子，尽管其浓度相对较低（与撒哈拉沙漠上层土壤相似），但它在月球表面的广泛分布引发了极大的关注^[6]。更为重大的突破来自中国“嫦娥五号”月壤样品的研究，这些样品并非取自永久阴影区，但是分析结果表明含水量和分布范围都远超之前的理论估计^[7-9]。这一阶段形成的主流观点是月球上的水普遍存在，月球两极的永久阴影区最为富集。

回望4个世纪的探索，人们对月球水的认知跌宕起伏又动人心魄。从遥望的艺术想象逐渐走到行星科学的前沿，每一次技术的进步都带来观念的反转；从美苏太空竞赛到当前的多国竞赛，月壤的取样返回和实验室分析都是综合国力和科技竞争的最前线。现在，月球水的分布比半个世纪前认为的更加复杂和动态，人们对月球的看法已经从一颗干燥、荒凉的卫星演变为一个拥有重要资源的天体，特别是水资源，可能支撑人类深空探测走入新时代。探索月球水的历史进程不仅为我们的行星科学知识增添了重要的篇章，而且凸显了月球在人类航天事业中的核心作用。由此而开启的深空探测新阶段将对行星科学、探索宇宙、太空经济，甚至人类文明的发展进程都会产生深远的影响。

2 聚焦水资源的月球探测全球竞争

寻找月球水是现代深空探测中最雄心勃勃的挑战之一。随着人类将活动范围延拓到地球之外，月球必将成为人类在太空中持续活动的关键基石。月球水至少具有3个方面的重要意义。

(1) **科学意义**。月球形成之初的大撞击事件可能导致了全球范围内岩浆洋的形成，水存在于原始岩浆洋中，影响着岩浆的流动性和物理化学性质，对岩浆洋的结晶序列和月壳厚度具有很大的制约作用。水的存在还可以降低月幔岩石的熔点及岩浆的黏度，导致火山喷发更为活跃和剧烈，由此可见，水是约束月球热演化历史的关键线索，也持续影响着月表的地貌特征。由于板块构造活动，地球表面极少保留太阳系早期的信息，而月球是一个地质时间胶囊，有可能揭示早期太阳系的状况。月球两极永久阴影陨石坑中发现的水冰可能含有古老的有机化合物和挥发物，月球表面的月壤中可能储藏了大量来自地球早期的挥发物^[10]，为我们研究太阳系的起源和早期演化提供了独特的研究资料。因此，获取月球高精度、高分辨率的水含量及其分布是未来探测的重点内容。

(2) **经济意义**。月球水开采可能产生丰厚的回报。太空采矿的概念已经受到关注，水是开采的主要目标，因为它有可能转化为氢和氧，而氢和氧是有价值的火箭推进剂成分。这将使月球能够充当航天器的补给站，从而大大降低从地球运送补给品的相关成本。此外，由开采月球水牵引出的技术突破也必然能应用于地球资源的开采、提纯、转化和利用，实现降本增效必然会带来经济回报。确定水在月球的含量、存在形式和储存状态是水资源开发与利用的关键。

(3) **战略意义**。采集和利用月球资源的能力是国家威望和地缘政治影响力的标志。月球上水的存在使其成为一种战略资产，有能力决定太空中新的联盟和竞争。各国都热衷于利用月球资源来确保其在太空的

自主权，并为未来的太空事业奠定基础。对月球水的共同兴趣可以成为国际合作的催化剂，促进弥合政治经济分歧的伙伴关系。当然，建立国际合作极具挑战性，这需要一个公认的国际框架来负责任地管理月球资源的开采和使用，涉及解决法律、环境、道德和地缘政治问题，以防止冲突并确保可持续与和平利用太空。

认识到月球水的重要性，多个国家的航天机构和实体已加入到定位、评估并最终提取这些资源的全球竞赛中。这场竞赛将科学研究、经济利益和国家战略结合起来，推动国际太空合作与竞争的新时代。目前，已公开的主要探测任务包括：

美国。美国正在实施“阿尔忒弥斯计划”（Artemis）再次载人登月，将在月球南极进行调查、实验和采集样品，建设基地支撑人类在月球表面的长期活动。2024年底，美国航空航天局（NASA）将发射VIPER（Volatiles Investigating Polar Exploration Rover）月球车，前往月球南极寻找水冰和其他潜在资源，为确定载人任务的着陆点提供信息，并确定月球资源的开采方式以支持未来的深空探测。另外，NASA还计划在近期发射另一项小型创新探测任务“月球开拓者号”（Lunar Trailblazer），该任务将通过环绕探测专门研究水在月球上的分布情况。

中国。中国探月工程4期计划中，月球南极被确定为重点探测区域。“嫦娥六号”计划于2024年在月球背面的南极-艾肯盆地进行取样返回；2026年，“嫦娥七号”将以绕、落、巡、撞的方式对月球南极的水资源进行详细探测；“嫦娥八号”将在2030年之前初步形成长期科学探测与实验、原位资源利用、科研站长期自主运行等综合能力，构建国际月球科研站的基本框架。此外，中国已正式发布了载人探月的初步方案，计划在2030年前后实现载人登月并进行科学探索。

欧洲。德国航空航天中心的LUWEX项目正在进

行月球水的提取和纯化技术验证，进一步推进了月球水资源利用的前景，开创了从月壤中提取水的先河，使其成为饮用、制氧的可行来源，并成为氢基火箭推进剂的重要组成部分。同时欧洲航天局（ESA）还计划发射月球挥发分和矿物测绘轨道器（VMMO），寻找月球南极永久阴影区的水冰。

印度。“月船一号”轨道器首次提供了月球上存在羟基和水分子的证据，“月船二号”轨道器的目标是继续寻找月球上的水，于2023年发射的“月船三号”探测器则着陆在靠近南极的月球表面，未来的“月船四号”任务将完成月球样品的取样返回。印度与日本合作的“月球极区探测任务”（LUPEX）计划在2026年之后向月球南极发送着陆器和巡视器，进行月球水的探测。

俄罗斯。延续了苏联Luna月球探测任务，2023年发射的Luna 25未成功软着陆；计划在2027年发射Luna 26月球轨道器，以研究月球上可用的自然资源；2028年发射Luna 27月球着陆器，前往月球南极-艾肯盆地，对月球南极的水等挥发性物质进行探测。

日本。小型登月探测器SLIM（Smart Lander for Investigating Moon）在2024年1月着陆月球表面，实现了月球表面100米以内的精确软着陆，为月球极区小区域的精准探测提供了技术支撑。

韩国。2022年发射了韩国“探路者月球轨道器”（KPLO）调查月球水冰等资源，绘制永久阴影区域内的反射率图，以寻找水冰沉积物存在的证据。

其他。月球探测逐渐迈向商业化，越来越多的商业公司也开启了月球探测任务，进行资源的调查。例如，美国的Intuitive Machines公司计划在2024年向月球南极附近发送2个着陆器，进行水冰的勘测，并从月表以下采集水冰，在2024年2月第1次任务已经成功软着陆月球；Astrobotic公司于2024年1月发射了“游隼号”着陆器，计划在雨海西侧着陆探测，虽未成功，但寻找月表水是任务制定的重要目标之一；日

本的iSpace公司计划于2024年末发射月球着陆器和月球车，开展对月球资源的勘探。

可以看到，人们围绕月球水资源的重要性已经形成了普遍共识。尤为值得注意的是，这次科技竞赛吸引了国家航天机构以外的商业公司参与其中。这一方面反映出月球水的经济价值从理论想象过渡到了市场行为，另一方面也标志着深空探测已经突破了政府主导基础研究计划所特有的中长期性，开始向规模化和短平快的趋势发展。这意味着，抢占深空探测科技制高点不仅需要长期坚持的大型系列任务规划，还应有小快灵和时效性强的机动型任务规划。

3 我国月球水探测的形势分析与建议

3.1 当前我国深空探测与行星科学发展不协调

中国探月工程立项以来的20年，取得了举世瞩目的伟大成就。“嫦娥三号”月球探测器首次实现了中国航天器在地外天体软着陆和表面巡视探测，“嫦娥五号”探测器实现了我国首次地外天体采样返回，“天问一号”火星探测器一次任务就实现了火星环绕、着陆和巡视探测，在火星上首次留下中国人的印迹。深空探测六战六捷，我国的航天工程技术实现了从人造地球卫星和载人航天，到地月系统，再到行星际探测的跨越式发展。未来我国将继续实施探月工程4期和行星探测工程，我国航天工程的步伐将迈向外太阳系，全面开启建设航天强国新征程。

然而，与航天工程技术辉煌的成就相比，我国的行星科学研究却还处在起步阶段。2021年10月，国务院学位委员会正式批准中国科学院大学行星科学一级学科博士学位授予权。2022年，行星科学正式列入普通高等学校本科专业目录。由于学科发展和人才培养体系的不健全，相应的行星探测前沿技术、行星探测应用与研究平台、行星科学前沿研究、人才队伍建设等各方面均不能与深空探测大国的地位相匹配，更无法满足深空探测强国的需求，凸显出了战略布局中的

薄弱环节。当前，我国深空探测发展的主要矛盾就是行星科学学科发展与航天工程技术发展不协调不匹配的矛盾。

习近平总书记指出，“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦”。中国始终把发展航天事业作为国家整体发展战略的重要组成部分，始终坚持为和平目的探索和利用外层空间。但放眼当今世界，随着太空中的信息获取和态势感知对地面军事活动的信息支援作用越来越强，美国、俄罗斯、法国、澳大利亚等国都相继成立了太空军，依托国家级投资和扶持商业航天，不断扩大和强化太空军事力量，抢占未来太空制高点。近年来，美国甚至计划将太空态势感知拓展至地球同步轨道至拉格朗日L2点之间的地月空间，目前正在开发地月空间监视和态势感知技术。面对国外这种日益加剧的太空军事化倾向与我国和平利用太空的发展理念的矛盾，我们唯有加快抢占相关领域的科技制高点，才能从容应对未来的挑战。

近年来，有些国家在航天领域对我国采取了工程技术严加封锁、科学研究禁止合作的态度，同时发起诸如《阿尔忒弥斯协定》之类的探月协议，试图继续长期维持先发优势，对他国的科技进行围堵打压。在这种情况下，走出一条科技自立自强的道路，发展有中国特色的深空探测事业，建设有中国特色的行星科学学科，是抢占科技制高点的最佳选择。

3.2 我国的成功经验和优势

20世纪50—60年代，依靠举国体制优势，我国突破西方国家技术封锁，取得了“两弹一星”工程的巨大成功，孕育形成了伟大的“两弹一星”精神。在“两弹一星”的带动下，我国建立了现代化的学科体系，支撑了工程任务的顺利实施，培养了连续坚实的人才梯队，也把我国的科学研究和技术研发都带上了高水平发展之路。在此过程中，中国科学院形成了规模宏大、特色鲜明的高水平学科建制化，造就了学科

门类丰富、人才储备雄厚、平台技术先进的局面，为国家的科技发展作出了巨大贡献。

我国实施深空探测工程以来，孕育出了“追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、合作共赢”的探月精神，行星科学从无到有，发展迅猛。越来越多的行星科学研究者毅然归国，一批又一批的自然科学研究者把研究领域拓展到行星科学上来。中国科学院大学牵头建设行星科学一级学科^[1]，2019年偕北京大学、香港大学、澳门科技大学等27所高校成立了“行星科学联盟”。短短数年，行星科学学科的研究生和本科生的招生工作迅速在多个研究所和多所大学开展起来。2023年，中国科学院大学为中国首位行星科学博士颁发了学位证。2021和2023年两次全国性行星科学会议的参会人数均超过千人。这一大好局面再次证明了我科技界和教育界正在传承“两弹一星”精神，有决心和能力围绕国家战略需求和科学前沿重大问题迅速组建建制化研究团队，开展建制化科研攻关，抢占科技制高点。

3.3 关于我国抢占月球水资源科技制高点的建议

人类航天的发展总体来看有2个需求：一个是飞向更遥远的目标，另一个是更贴近目标。1957年苏联发射第一颗卫星以来，低地球轨道（LEO）成为各国必争之地。截至2023年，已有70多个国家，出于科研、军事或商业等各类目的，向地球LEO轨道发射了超过1万颗人造卫星。2010年前后的年发射量仅为10—60不等，近年来，随着发射技术进步、发射成本降低和社会效益大幅提升，这一数字持续飙升，2020年达到1300颗，2021年更是超过1400颗。未来，将有更多人造卫星抵达近地球轨道，包括Space X、OneWeb、Amazon和StarNet/GW在内的多家机构已经提出总数超6.5万的LEO卫星计划。LEO卫星呈现“星链”或“星座”特征，单是卢旺达提出的“Cinnamon”星座中，卫星数量或超32万颗。

作为人类深空探索的首站，月球的战略地位、科

学意义和商业价值不言而喻，但月球探测的现状与此不相匹配。早在人类社会进入卫星时代肇始，探测月球已然成为焦点。20世纪90年代以前，总体以美苏太空竞赛为基调，实施多达91次的月球探测计划。20世纪90年代以来，中国、美国、欧洲、日本、印度和以色列等国家和地区实施了约20次探测任务，掀起月球探测第二次热潮。这次热潮总体呈现多国参与和国际合作势态，将月球水等资源勘查及和平利用作为主要目标。然而，与地球LEO轨道相比，目前在轨的绕月卫星屈指可数，日常的近月轨道卫星更是寥寥。没有能充分利用月球无大气、便于抵近连续运行的轨道优势，没有实现近月轨道（30千米以下）的连续高分测量，不利于月球资源普查利用，制约探索月球科学规律。我国应当布局“近月轨道星座化”多学科交叉探测任务，实现星间、星-月和星-地的立体连续感知，抢占月球资源勘探、环境监测和科学研究科技制高点。

月球探测是人类共同的事业，行星科学牵引月球探测的进程，而探测技术则是月球探索活动的保障。将月球探索纳入“人类命运共同体”框架，建议加强实施中国探月工程，加快推进新任务的论证和立项，积极主导和参与国际月球探测新项目平台，通过交流和借鉴各国先进技术和经验，共同推动月球和深空探测事业的发展。行星科学，作为新兴交叉学科，引领月球和深空探测任务的规划布局和实施，然而，传统地学和探测技术已不能满足深空探测学科交叉综合性需求。建议依托行星科学的学科建设契机，加大社会科普教育和宣传力度，广纳人才，持续推进行星科学“科教融合”，培养行星科学综合性科技人才和管理人才，为探月工程提供有力的支撑。持续鼓励技术研发和科学创新，推动关键技术、理论的突破和应用，进一步提升卫星平台技术、多物理场探测技术和数据处理技术，“为人所不为，为人所不能”，加快和平开发利用月球的进度。

总之，行星科学是系统性交叉学科，其发展需要从多个方面入手，包括持续实施深空探测任务、加强技术研发和创新、加强国际合作与交流、重视科普教育和宣传、培养专业人才、鼓励社会参与和支持等。只有这样，才能够更好地推动我国探月和深空事业的发展。

4 展望

展望未来，月球水的争夺将在未来太空探索中扮演重要角色。它有潜力在太空中孵化新的经济基础设施，支撑几代人的科学研究，并为人类文明走向太空奠定基础。在这场全球竞赛中，技术创新蓬勃发展。国家航天机构、组织、企业等纷纷致力于开发和完善用于精确着陆的导航系统、用于探索和取冰的机器人、用于扩展任务的生命支持系统等。我们将在这个时代再次见证“阿波罗计划”式的溢出效应——深空探测的推动带来许多突破，渗透到地球的日常生活中。

随着各国在合作与竞争之间寻求微妙的平衡，前往月球南极的征途已经不仅仅是一场科技竞赛。它代表着国家的梦想蓝图的水平以及将其实现的能力，体现了人类的探索精神和对进步的不懈追求，无论是在地球、其天然卫星还是更远的地方。月球水资源竞赛正在参与塑造深空探测、国际关系和技术创新的未来。我国在这场新的竞赛中的进展，依赖于科技、教育、经济、国际合作等各领域的协同发展，有了“两弹一星”精神的传承，我国倡导的和平发展理念也将推动世界科技的进步，为人类发展谋求更大的福祉。

参考文献

- 1 Saal A E, Hauri E H, Cascio M L, et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature*, 2008, 454: 192-195.
- 2 Clark R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon. *Science*, 2009, 326: 562-564.

- 3 Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M³ on Chandrayaan-1. *Science*, 2009, 326: 568-572.
- 4 Sunshine J M, Farnham T L, Feaga L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact spacecraft. *Science*, 2009, 326: 565-568.
- 5 Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. *Science*, 2010, 330: 463-468.
- 6 Honniball C I, Lucey P G, Li S, et al. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA. *Nature Astronomy*, 2021, 5: 121-127.
- 7 He H C, Ji J L, Zhang Y, et al. A water reservoir on the Moon revealed by water diffusion in the Chang'E-5 impact glasses. *Nature Geoscience*, 2023, 16: 294-300.
- 8 Xu Y C, Tian H C, Zhang C, et al. High abundance of solar wind-derived water in lunar soils from the middle latitude. *PNAS*, 2022, 119(51): e2214395119.
- 9 Zhou C J, Tang H, Li X Y, et al. Chang'E-5 samples reveal high water content in lunar minerals. *Nature Communications*, 2022, 13: 5336.
- 10 Wei Y, Pu Z Y, Zong Q G, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, (394): 94-98.
- 11 白春礼. 序言：行星科学引领深空探测. *中国科学院院刊*, 2019, 34(7): 739-740.
- Bai C L. Preface: Planetary science leads deep space exploration. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(7): 739-740. (in Chinese)

New frontier in race for deep space exploration: Lunar water resources

WEI Yong^{1,2*} LIN Honglei² HE Fei^{1,2} ZHANG Hui^{1,2}

(1 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Deep space exploration has become the commanding heights of science and technology competition. Since the beginning of the 21st century, China has successfully completed the lunar exploration missions of “orbiting, landing, and returning” in just twenty years, and upgraded to a new roadmap of “survey, construction, and utilization”. Meanwhile, lunar exploration worldwide has shown a trend towards normalization and commercialization. The research on lunar water resources has sparked widespread interest and intense competition among countries and space agencies, marking a new focus in human’s deep space exploration. The exploration of lunar water can help reveal crucial processes in the formation and evolution of the Earth-Moon system and even the entire solar system. It stands as a forefront in planetary science research and a key focus in discipline construction. The development of lunar water resources can provide fuel for future deep space exploration missions and ensure the long-term survival of humans on the Moon. It is an inevitable choice for countries and organizations worldwide to expand and deepen international cooperation, jointly utilizing extraterrestrial resources for the benefit of humanity. Combining the status and future trends of lunar water resource exploration, this study analyzes the opportunities and challenges in China’s deep space exploration program and the development of planetary science disciplines. It proposes strategies and suggestions based on the national context to seize the commanding heights of science and technology competition.

Keywords commanding heights of science and technology, deep space exploration, planetary science, lunar water resources, the fourth phase of CLEP

魏 勇 中国科学院地质与地球物理研究所研究员。中国科学院大学地球与行星科学学院副院长,中国科学院可持续发展研究局副局长。主要从事行星物理学研究。E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

WEI Yong Professor of planetary physics at the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (CAS). Vice Dean of the School of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, and Deputy Director of the Bureau of Sustainable Development Research, CAS. His research focuses on planetary physics. E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

■责任编辑: 张帆

*Corresponding author