科学通报 2020 年 第 65 卷 第 24 期: 2577 ~ 2586
进 展
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

月球探测进展与国际月球科研站

裴照宇[1], 刘继忠[1], 王倩[1], 康焱[1*], 邹永廖[2], 张熇[3], 张玉花[4], 贺怀宇[5], 王琼[1], 杨瑞洪[1], 王伟[1], 马继楠[3]

1. 中国国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190;
2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
4. 上海航天技术研究院, 上海 201108;
5. 中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: kangyan416@163.com

2020-05-15 收稿, 2020-07-06 修回, 2020-07-07 接受, 2020-07-08 网络版发表
国家重点研发计划(2020YFE0202100)和民用航天技术预先研究项目(D020206)资助

摘要 月球作为地球唯一的天然卫星, 因其独一无二的位置资源、极具特点的环境资源、丰富的物质资源, 是人类进行空间探测和开发利用太空的首选目标. 地月系是太阳系探测的试验场, 月球是迈向更远深空的中转站. 月球科学研究对推动空间科学发展具有重要作用. 月球资源开发利用对人类的可持续发展具有重要意义. 近年来, 我国月球探测取得了举世瞩目的成就, 在完成“绕落回”三步走后, 必将以更好地服务于月球科学探测和资源开发利用为目标, 增进人类科学认知, 拓展人类生存空间, 服务人类社会可持续发展. 本文梳理和评述了国内外月球探测发展现状与发展趋势, 归纳了未来月球探测所涉及的主要任务、前沿科学问题和关键技术, 提出我国月球探测发展建议. 月球探测是建设航天强国的重要标志, 当前我国正从航天大国迈向航天强国, 在月球探测方面应该有大国思维, 保持战略定力, 继续发挥优势, 牵头组织国际月球科研站大科学工程.

关键词 月球探测, 月球资源利用, 国际合作, 国际月球科研站, 月球基地

地球是人类的摇篮, 目前约70亿人寄居在地球, 人类赖以生存的空间和资源日益紧张, 寻求和拓展地外生存空间和资源是人类繁衍的必然. 月球是距离地球最近的天体, 蕴藏了地球、太阳系起源和演化的无穷奥秘, 拥有丰富的特有资源[1].

广义的月球资源包括位置资源、环境资源和物质资源. 位置资源是指月球相对于地球独特的位置和运行规律, 如月球一面永远面对地球, 非常有利于不间断的地球观测; 另一面永远背对地球, 电磁环境非常“安静”, 很适合射电天文观测等科学探测活动. 环境资源是指月球独特的高真空、低重力、弱磁场、大温差、高辐射等环境特点, 可用于特定的科学实验和物质制造. 月球物质资源主要包括矿产资源、能源资源和可再生资源, 如图1所示. 矿产资源包括钛、铁、铬、镍等金属矿产资源, 月壤、玄武岩和低浓度挥发物(H、He、C、N)等非金属矿产资源, 以及氧资源和陨石资源等. 能源资源包括氦-3资源、水冰资源和太阳能资源等. 月球可再生资源是指人机活动产生的可再生资源, 主要包括设备废弃物、实验废弃物和生活废弃物.

月球资源是地球资源的重要补充, 对人类社会的可持续发展具有深远影响, 是国家利益新的战略制高点. 我国探月工程从2004年正式实施以来, 实现了“五战五捷”, 得到了国际社会的高度关注, 尤其是嫦娥四号扩大了中国探月的国际合作, 提升了工程的国际影

引用格式: 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站. 科学通报, 2020, 65: 2577–2586
Pei Z Y, Liu J Z, Wang Q, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2577–2586, doi: 10.1360/TB-2020-0582

© 2020《中国科学》杂志社

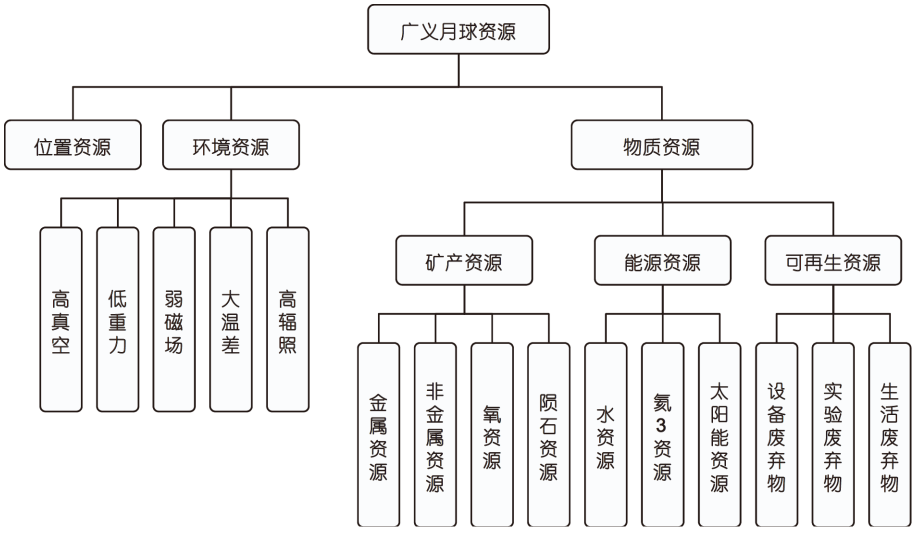


图 1 广义月球资源组成
Figure 1 Generalized lunar resource composition

响力[2]. 2019年11月, 嫦娥四号任务团队获英国皇家航空学会2019年度团队金奖, 成为该年度全球唯一获此殊荣的团队, 这也是英国皇家航空学会成立153年来首次向中国项目颁发的奖项(http://www.xinhuanet.com//2019-11/26/c_11252776-34.htm). 2019年2月, 习近平总书记在接见嫦娥四号参研参试人员代表时强调: 我们愿同世界各国一道, 坚持共商共建共享, 加强基础科学研究国际交流, 推动大科学计划、工程和中心建设. 本文在分析国内外月球探测发展现状与发展趋势的基础上, 以月球科学探测和资源开发利用为出发点, 提出我国月球探测发展建议: 共商共建共享国际月球科研站大科学工程.

1 国外月球探测现状与趋势

1.1 发展现状

1958年苏联发射了首个月球探测器, 拉开了人类月球探测的序幕[3]. 截至目前, 国际月球探测活动共实施126次, 期间出现两个探月高潮: 20世纪50~70年代, 美苏两个航天大国之间的竞争引起第一轮探月高潮; 20世纪末至今, 各航天国家意识到月球探测的战略意义, 纷纷提出月球探测计划并积极实施, 掀起第二轮探月热潮[1].

在新一轮探月热潮中, 除已实施过月球探测任务的美国、俄罗斯(苏联)外, 欧洲空间局(简称欧空局, ESA)、日本、印度、以色列等国家和组织先后加入月球探测的行列, 英国、韩国等也跃跃欲试. 2018年以来, 多个国家和组织纷纷更新月球探测计划, 月球正成为各国太空战略新的聚集点.

2018年1月, 国际空间探索协调组(ISECG)发布了第三版全球空间探索路线图, 如图2所示[4], 呈现出"近地轨道-地月空间-火星"的深空探测发展态势. 月球探测作为深空探测的前沿, 正成为主要深空探测国家的首要探测目标, 美国、俄罗斯、欧空局、日本等国家和组织2025年前将实施月球探测任务, 并把在月面建立大型科研设施、开展长期月球探测作为远期目标.

美国继2017年12月特朗普总统签署1号航天政策令宣布重返月球以来, 2018年2月发布《NASA战略规划2018》, 目的是在美国领导下重返月球、开展长期空间探索和利用, 乃至载人登陆火星(https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_2018_strategic_-plan.pdf). 2018年9月发布《国家太空探索活动报告》(https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nationals paceexploration campaign.pdf), 确定了2018~2024年的深空探测路线图, 规划了11次任务, 与月球相关的任务8次, 计划通过国际合作在2026年前建造"深空之门(Gateway)"月球轨道空间站[5]. 2019年3月副总统彭斯在国家航天委员会上宣布"5年内完成载人登月, 登月地点位于月球南极"(https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/remarks-vice-presi-dent-pence-fifth-meeting-national-space-councilhuntsville-al/). 美正加紧推进"阿耳忒弥斯(Artemis)"计划, 计划在2024年

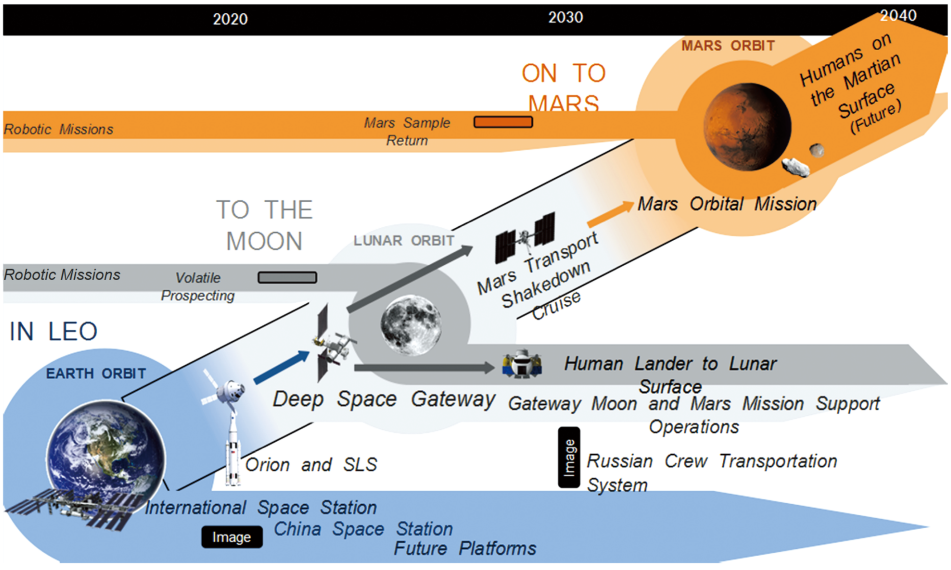


图 2 第三版全球探索路线图
Figure 2 The 3rd Global Exploration Roadmap

载人登陆月球南极, 2025年起持续探索月球, 建立月球基地, 并筹备前往火星(https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/america-to-the-moon-2024-artemis-20190523.pdf). 2020年4月, NASA公开了《NASA月球持续探索和发展计划》, 系统描述了美月球探索计划和愿景(https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/a_sustaion_lunarpresence_napc_presence_report4220final.pdf), 5月NASA宣布选择Blue Origin、SpaceX和Dynetics三家宇航公司为其研制能在2024年载人登月的着陆器(https://www.nasaspaceflight.com/2020/04/nasa-blue-origin-dynetics-spacex-hls-aremis/).

俄罗斯在《2016~2025联邦航天计划》中提出, 将月球探测列为优先发展方向之一, 计划实施一系列月球探测任务, 将在2025年前实施Luna-25月球南极着陆任务、Luna-26绕月探测任务、Luna-27月球南极着陆巡视等任务(http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/%D0%A0% D0% B5% D1% 88% D0% B5% D0% BD% D0%B8%D0%B5%20%D0%9D% D0%A2%D0%A1-%D0%A1%D0%9A%D 0%A0%D0%90%D0%9D.pdf). 2019年2月公布《月球综合探索与开发计划草案》, 提出在2036~2040年建设月球基地(http://tass.com/science/1033291, https://www.cosmos.esa.int/documents/1866264/1866292/Call_for_Voyage_2050_Topical_-Team_members.pdf/18bff3d0-b754-cf75-bb7d-95a1fb65c301).

欧空局在21世纪初实施了一次小型绕月探测任务. 2016年, 沃尔纳就任欧空局局长时发出全球建设“月球村”的倡议[4], 号召有能力的国家共同参与, 试验新技术、实现新发现、共享新成果, 在月球上建设进行科研、采矿、太空旅游等活动的永久基地. 2019年7月, 欧空局提出了以科学和开发利用为双轮驱动的探月新规划, 包括2023年月球南极原位资源探测任务、月球通信星座规划等(https://www.esa.int/Newsroom/Press_-Releases/ESA_ministers_commit_to_biggest_ever_budget). 2019年12月, 欧空局部长级理事会同意在未来3年向欧空局提供125亿欧元资助, 月球探测是其新的增长点(http://global.jaxa.jp/projects/sat/slim/).

日本宇航研究开发机构(JAXA)先后开展了“飞天”号月球探测、月亮女神计划, 新规划了“月球探索智能着陆器”计划(SLIM)、水冰勘查等无人探测任务, 并在2018年发布《第四期中长期发展规划》(2018~2025年), 修订了SLIM发展规划(https://www8.cao.go.jp/space/comittee/27-kiban/kiban-dai47/pdf). 印度在2008年成功发射月船一号, 2019年月船二号软着陆失败, 但轨道器成功绕月探测, 随后, 印度加紧研制月船三号再次着陆任务, 并与日本达成未来探月的合作意向(https://indianexpress.com/article/technology/science/chandrayaan-3-isro-gaganyaank-sivan-6195411/). 2019年4月, 以色列太空公司(SpaceIL)研制的“创世纪”在着陆月球的过程中主发动机发生故障, 坠毁在月球表面

(https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/nasa-is-aboard-first-private-moon-landing-attempt), 这是首个私营公司的探月任务.

1.2 发展趋势

进入新世纪, 月球在人类开发利用太空和进军深空中的地位日益凸显, 正成为航天大国战略角逐的制高点, 国际月球探测呈现以下趋势: (1) 未来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. (2) 未来月球探测模式从单点短期探测, 向建设月面基础设施开展长期探测转变. (3) 未来月球探测区域逐渐聚焦于资源富集的月球南极, 尤其是位于南极的富含水冰的永久阴影. (4) 国际合作将来是月球探测的大趋势, 由于月球探测技术难度大、风险高、投入大, 通过国际合作, 分担经费和风险, 共享成果和发展.

1.3 未来主要任务

通过人类航天器近60多年的探测活动, 对月球的地形地貌、矿物组成、近月空间环境有了基本认识[3], 在基本具备了月球探测的技术基础之后, 必将以更好地服务于月球科学探测和资源开发利用为目标, 开展更长周期、更大范围的月球探测. 未来月球探测主要任务及对应的前沿科学问题和关键技术内容如下.

(1) 科学探测. 与月球探测相关的科学问题主要包括三类. 一是月球自身科学问题: 通过形貌、构造、成分、电、磁、重、震、热等内营力要素, 以及撞击事件、宇宙射线辐射和太阳风作用等外营力要素等的综合探测和研究, 重塑月球起源理论, 再造月球演化精细历史, 系统开展月球地质学、月球物理学和月球化学等研究, 揭示月球的岩浆洋形成与演化、内部圈层结构及其物质分布特性等系列核心科学难题, 厘定月球空间和表面环境特征及其作用机理等. 前沿科学问题包括但不限于: 深部月壳和月幔的组成、火山活动及热历史、月球早期及现今撞击通量、月核大小和月幔的结构、水及挥发份的分布、月壤和月尘的性质、月球资源和环境等[6]. 二是与月球相关的科学问题: 基于电磁波散射传播原理, 开展以大视域、长期连续为特征的地球宏观科学现象的月基观测研究, 构建远距离作用以及大尺度观测条件下地球宏观科学现象的月基观测模型, 建立地球宏观科学现象月基观测方法体系, 研究日-地-月空间环境耦合机理, 厘定太阳风与月球的相互作用机理等研究. 前沿科学问题包括但不限于: 地球板块构造、地球辐射平衡、热异常、火山和地震等新的重大理论体系. 三是利用月球开展的科学问题: 开展以低频射电、紫外光学等为主线的天文观测, 填补这一在地面上无法开展的空白, 开创时域天文学研究领域的“新战场”, 对来自太阳系行星和太阳系以外宇宙空间低频辐射电场进行观测. 例如: 观测研究来自木星等太阳系行星的低频射电爆发, 观测研究银河系低频大尺度高分辨率辐射特性, 探测强脉冲星低频射电辐射特性, 实现宇宙起源和演化相关重大科学问题的理论创新, 探测绘制银河系空间在着陆区可见区域及干涉可见区域电离氢的分布, 揭示与甚低频辐射关联的超新星遗迹演化特征和宇宙线产生机制[7].

(2) 科学实验. 利用月球高真空、低重力、弱磁场、大温差、粒子辐照等特殊环境资源, 构建地外科学实验基地. 一是开展空间生命科学、材料科学、物理学、化学等基础学科实验, 推动基础科学跨越发展; 二是开展空间生态系统循环实验、月面光资源和月尘资源等原位利用实验[8], 发展人类长期驻月所需基础理论; 三是开展新的生物制品、特效药物和特殊材料等的研制、开发和试验性生产, 推动新材料和新药物的发展.

(3) 空间技术试验. 把国际月球科研站作为未来空间探索技术试验场. 一是开展空间核能源、大功率无线能量传输、月面设施建造、在轨维修维护、人员驻留与生命保障等深空探测共性关键技术试验, 大幅提升空间探测能力; 二是开展先进科学载荷、智能机器人探测、人机联合探测等空间科学探测技术试验; 三是开展矿产资源开发、月壤3D打印、水氢氧原位制备等原位资源利用技术试验, 带动航天技术跨越式提升, 提高空间科学与空间应用能力.

(4) 资源勘察与利用. 开展月球矿产资源和能源资源的勘察和评价, 查明资源类型、特征、储量、分布规律与成因, 对资源利用经济性进行评估; 开展不同阶段表层、浅层和大纵深剖面样品/样本的采集、封装和返回; 开展相关资源的提取、处理、运输、加工、生产、循环利用, 为未来建设能够自给自足的地外家园积累基础.

(5) 深空探测中转. 利用月球环境弱引力、富资源、高真空等优势, 把国际月球科研站作为人类进入深空的“跳板”和中转站, 支持物资补给、推进剂补加、大型构件组装建造、深空通信中继等, 降低深空探测风险和成本, 支持常态化的深空探测.

2 我国月球探测发展现状与特点

2.1 发展现状

2004年起，我国探月工程按照如图3(a)所示的“绕、落、回”三步走的规划正式实施[9,10]. 已圆满完成前两步目标, 实现了“五战五捷”: 嫦娥一号实现绕月飞行探测[11]; 嫦娥二号实现多目标多天体探测[12]; 嫦娥三号实现月面软着陆和巡视探测[13]; 嫦娥5T(月地高速载入返回)实现第二宇宙速度半弹道跳跃式月地高速安全返回[14]; 嫦娥四号在国际上首次实现月球背面软着陆和巡视探测, 成为人类太空探索新的里程碑[15,16]; 预计2020年实施嫦娥五号任务, 实现月球采样返回, 开展月球样品分析研究[17].

通过“绕、落、回”三步走规划的实施，突破了环月探测、全自主避障月球软着陆、月地高速再入返回、地月中继通信、极端环境长期生存等一系列关键技术, 掌握了月球探测的基本技术; 建成了一批先进的月球探测仿真、试验方法和特种试验设施; 历次任务获取的大量原始探测数据，为科学研究提供了宝贵的第一手基础信息.

该发展规划是在总结前人探月实践、研究分析探月发展规律基础上提出的，以列入国家中长期科技发展规划的形式得以持续推进、有序衔接[18]，十几年的工程实践使得我国迅速进入这一领域的先进行列，达到了“起步晚、但起点高”“任务次数少、但涵盖内容多”“投入少、但产出多”的良好效果.

2.2 发展特点

在2020年前后完成“三步走”之后，我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



图 3 我国月球探测情况. (a) 我国探月工程“绕、落、回”三步走; (b) 我国月球探测未来发展特点

Figure 3 China lunar exploration. (a) CLEP three steps “orbiting, landing and sample return”; (b) the future development characteristics of China lunar exploration

研究与资源综合开发利用”转变，有人和无人两种探测形式将同步开展、互为补充，呈现如图3(b)所示的特点. 具体包括: (1) 持续开展机器人月球探测, 构建机器人月球科研站能力体系. 即将实施的探月工程四期计划在月球南极地区开展嫦娥六号采样返回、嫦娥七号极区综合勘查、嫦娥八号月球科研站关键技术验证等3次任务，形成长时段、复杂环境下的月球探测能力. (2) 同步进行有人探月技术攻关, 掌握载人登月技术能力. 重点围绕航天员“去登回”，突破重型运载、载人地月往返、月面出舱等核心关键技术，解决保障航天员在长期任务中的健康和安全问题，满足有人参与的月球探测对精确性、安全性和可靠性的更高要求. (3) 未来可开展人机联合探测, 实现月球资源开发利用. 掌握月球科研站长期运行与保障、人机联合探测、月球资源规模化开发应用等关键技术，支持长期、大规模的科学探测、技术试验和月球资源开发利用，促进月球探测可持续发展, 为人类空间探索提供历史新机遇.

3 我国月球探测发展建议: 共商共建共享国际月球科研站

3.1 目标及意义

月球探测是航天强国的重要标志. 我国月球探测发展方式正从独立自主走向开放合作，嫦娥四号首次搭载了多个国家的科学仪器, 开展了中外联合探测, 开创了以我国为主的航天国际合作新局面. 当前, 我国正从航天大国迈向航天强国，在月球探测领域应该有大国思维，保持战略定力，继续发挥优势，牵头组织国际月球科研站大科学工程.

从2016年起，我国在与国外航天机构会谈时即开始宣介月球科研站，倡议共建国际月球科研站(International Lunar Research Station, 简称ILRS). 国际月球科研站是指由多国参与，按照“共商共建共享”的原则，在月面建设和运营的科学实验实施，支持开展长期、较大规模的月球轨道与月面探测、天文与对地观测、基础科学实验、资源开发利用和技术验证等, 如图4所示. 未来国际月球科研站的基本能力体系如图5所示.

国际月球科研站是解决月球科学关键问题、实现重大原创性科学发现的有力工具；是带动航天技术跨越式提升、推动多学科融合创新发展的重要引擎；是开发利用月球资源、发展地月经济圈的重要平台；是聚集全球优势科技资源、构建新型太空治理体系的重要支撑.

3.2 构建理念

国际月球科研站可采用如下构建理念:

(1) 多科学、多目标、多主体. 国际月球科研站以月球科学探测与资源开发利用为牵引，科学、技术、应用并举，要支持在大动态复杂月球环境下开展多项科学研究和多样化作业活动，要把各国的任务目标、优势技术和产品资源整合起来，具有多科学、多目标、多主体的特点.

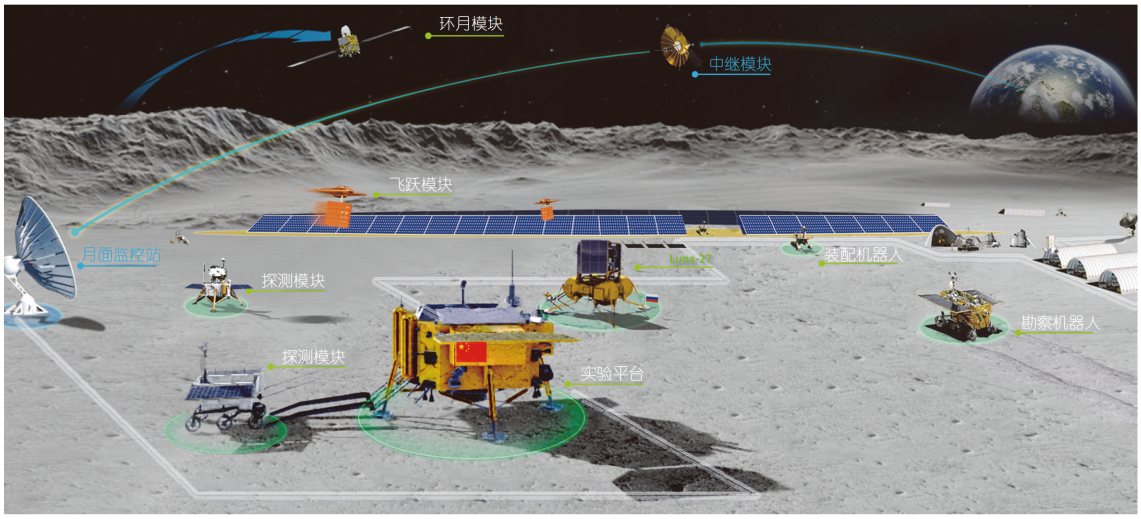


图 4 国际月球科研站概念图
Figure 4 Conceptual graph of ILRS

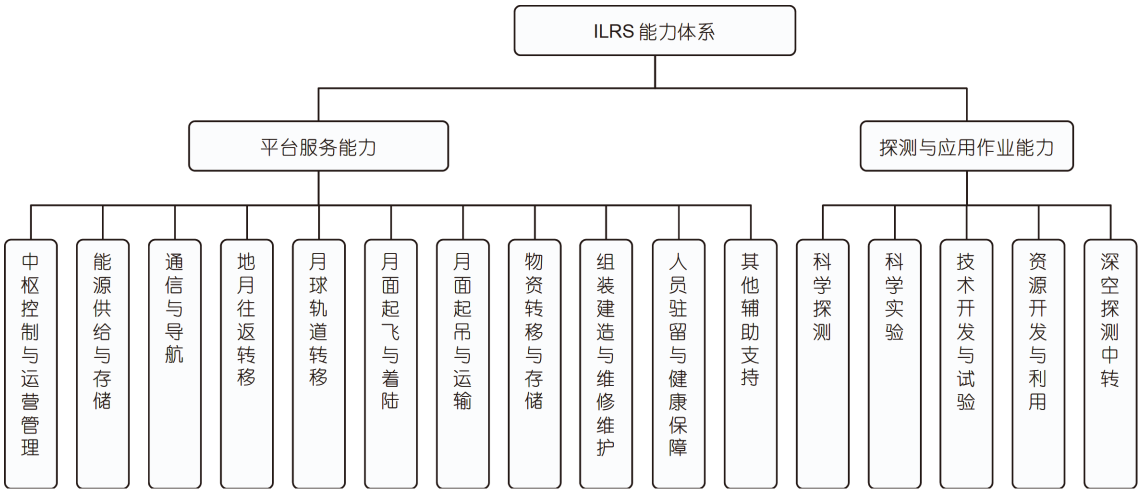


图 5 国际月球科研站能力体系
Figure 5 Capability system of ILRS

(2) 功能区、模块化、可扩展、可维护. 国际月球科研站任务多样、系统庞大, 参与方多, 其建设和运行是一个循序渐进的长期过程, 需分批次发射, 在轨组装, 协同运行. 可按功能区、模块化、可扩展、可维护的模式, 实现基本功能模块化, 机、电、液、信息、能源等的接口标准化, 便于在轨组装、系统扩展、协同运行和在轨维护.

3.3 国际合作建议

国际月球科研站作为建设在月面支持长期、可持续的月球探测和月球资源开发利用的基础设施和共享平台, 较之单次探测方式, 技术难度更大、任务周期更长, 投资强度更大, 对任何国家来说, 独立完成都比较困难. 因此, 通过国际合作, 充分利用各国已有的探测任务、技术基础和科研成果, 把各国的优势技术和产品资源整合起来, 可大幅提高投资效益, 降低实施风险, 共同推进月球资源开发利用.

国际月球科研站可采用“规划对接、联合论证、任务设计、技术合作、联合实施、成果共享”的国际合作思路, 支持国际伙伴在项目的各个阶段, 任务的各个层级, 以实物和非实物的形式作出各自的贡献, 如资金、技术、产品或设施、智力等不同形式的贡献, 如图6所示.

规划对接是指与在国际上广泛开展发展战略、发展方向、发展规划和发展路线的对接, 达成发展目标的共识; 联合论证是指基于共同的发展目标, 联合对科



图 6 国际月球科研站国际合作模式
Figure 6 International cooperation model of ILRS

学目标、工程目标、任务构成和实施路线等开展联合论证, 完成可行性论证, 具备立项条件; 任务设计是指基于批复的项目, 联合开展任务的协同设计、仿真和试验验证, 形成各任务设计方案; 技术合作是指基于各任务设计方案, 开展技术交流、技术交换和联合AIT等, 完成产品研制; 联合实施是指联合开展发射、测控、运营和探测等实施活动; 成果共享是指开展技术成果共享、科学数据共享和联合科学研究等.

3.4 建设思路建议

基于可持续、高效益的原则, 采取持续推进机器人探测、稳步推进人机联合探测的策略, 依托我国探月工程四期嫦娥系列任务[1]、俄罗斯Luna系列任务及其他国家或组织的探月任务, 按“用好存量、统筹内外、共谋增量”的思路, 可分三步建设国际月球科研站, 如图7所示.

(1) 国际月球科研站基本型阶段. 依托我国探月工程四期嫦娥系列任务, 以我为主开展国际合作, 建成国际月球科研站基本型, 形成长时段、复杂环境条件下的月球探测能力, 开展极区科学探测、资源勘察和应用验证, 积累国际月球科研站持续扩展的技术基础.

(2) 国际月球科研站拓展型阶段. 统筹中国、俄罗斯、欧空局等国或组织的探测任务, 共同开展科研站规模、功能的扩展和科学探测活动, 突破多国、多模块协同工作和综合管理等关键技术, 掌握未来科研站长期运行与保障、月球资源应用等关键技术, 建成国际月球科研站拓展型.

(3) 国际月球科研站综合型阶段. 与国际伙伴共同谋划投资增量, 进一步完善国际月球科研站, 支持长期、大规模的科学探测、技术试验和月球资源开发利用, 为人类空间探测提供历史新机遇, 推动空间物理、空间天文、行星地质、行星化学等学科的跨越式发展, 逐步实现人机联合月球探测和深空探测中转.

在完成第一个综合型科研站的建造和试运营后, 可分两个方向继续发展: 一是在月球科研站基础上, 建设实用型月面科学实验室、月面工厂等, 进而建设月球基地、月球村. 二是以已建成的月球科研站作为主站, 根据月球不同位置的地形地貌、资源分布等特点, 在月面不同位置分布式建站, 如: 月背天文观测站、虹湾区移动式科研工作站等. 主站可为分布在月面不同位置的工种站提供综合控制与管理、测控通信等公共服务, 保障各分站间分工协作.

4 结语

月球是距离地球最近的天体, 因其独特的位置、环境和物质资源, 正成为人类发展的新空间. 人类通过60多年的探月活动, 基本掌握了月球探测的主要技术. 月球探测正从发展探测技术向科学探测和资源勘察与开发利用转变, 更好地服务于空间科学和空间应用将成为月球探测下一步的主要目的.

国际月球科研站以月球科学探测和月球资源开发利用为牵引, 旨在打造解决空间科学关键问题、有效利用月球资源、发展地月经济圈的基础设施和共享平台, 既能很好地继承已掌握的探月技术, 又能为未来的

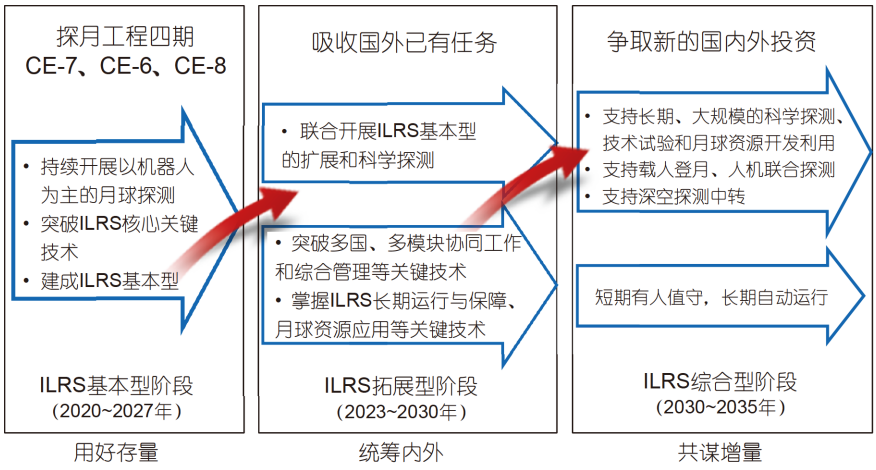


图 7 (网络版彩色)国际月球科研站建设思路设想
Figure 7 (Color online) Envision of ILRS implementation

发展奠定基础. 由我国提出的共建国际月球科研站倡议, 得到了国际上的广泛关注、高度认可和积极响应.

目前, 国际月球科研站已成为我国首批国际大科学工程培育项目. 中国将与国际伙伴联合开展科学目标研究、工程可行性论证和联合实施方案设计, 提出组织管理模式和运行机制, 组建国际核心专家队伍和国际化实施团队, 共同完成国际月球科研站大科学工程的培育, 共商共建共享国际月球科研站.

参考文献

1 Wu W R, Liu J Z, Tang Y H, et al. China lunar exploration program (in Chinese). J Deep Space Explor, 2019, 6: 405–416 [吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程. 深空探测学报, 2019, 6: 405–416]

2 Wang C, Yang F, Zhang F, et al. Hot topics of space science in 2019 (in Chinese). Sci Technol Rev, 2020, 38: 135–147 [王赤, 杨帆, 张凤, 等. 2019年空间科学热点回眸. 科技导报, 2020, 38: 135–147]

3 Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 543–558 [叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 543–558]

4 Liu J Z, Zou Y L, Wang W, et al. Casting Brilliant-Scientific Achievements of China Lunar Exploration Program Volume (in Chinese). Beijing: China Astronautics Press, 2019. 1753–1762 [刘继忠, 邹永廖, 王伟, 等. 铸就辉煌——中国探月工程科学成果第一辑. 北京: 中国宇航出版社, 2019. 1753–1762]

5 Wang Q, Zou Y L, Fan Q L. NASA announces plans for deep space launch in the next six years to accelerate the construction of the Lunar Orbital Platform-Gateway (in Chinese). Chin J Space Sci, 2018, 38: 844 [王琴, 邹永廖, 范全林. 美国公布未来6年深空发射计划, 加快月球轨道空间站建设. 空间科学学报, 2018, 38: 844]

6 Xiao L, Qiao L, Xiao Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 029602 [肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 029602]

7 Ji Y C, Zhao B, Fang G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far side (in Chinese). J Deep Space Explor, 2017, 4: 150–157 [纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究. 深空探测学报, 2017, 4: 150–157]

8 Lin W. Life in the near space and implications for astrobiology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1297–1304 [林巍. 临近空间生物研究及其天体生物学意义. 科学通报, 2020, 65: 1297–1304]

9 Pei Z Y, Wang Q, Tian Y S. Technology roadmap for Chang'e program (in Chinese). J Deep Space Explor, 2015, 2: 99–110 [裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线. 深空探测学报, 2015, 2: 99–110]

10 Luan E J, Sun J D. System engineering ideas in the first Chinese Lunar Exploration Project (in Chinese). Def Sci Technol Ind, 2008, (1): 17–20 [栾恩杰, 孙家栋. 首次月球探测工程中的系统工程理念. 国防科技工业, 2008, (1): 17–20]

11 Lunar Exploration and Space Engineering Center. Chang'e Project Engineering Technical Manual (in Chinese). Beijing: Lunar Exploration Program Center of COSTIND, 2007 [探月与航天工程中心. 嫦娥工程技术手册. 北京: 国防科工委月球探测工程中心, 2007]

12 Wu W R, Zhang R Q, Hao X F. Chang'e-2 Engineering Technical Manual (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010 [吴伟仁, 张荣桥, 郝希凡. 嫦娥二号工程技术手册. 北京: 中国宇航出版社, 2010]

13 Wu W R, Pei Z Y, Liu T J. Chang'e-3 Engineering Technical Manual (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2013 [吴伟仁, 裴照宇, 刘彤杰. 嫦娥三号工程技术手册. 北京: 中国宇航出版社, 2013]

14 Hu H, Sun W G, Qian W P, et al. Engineering Technical Summary of Moon-to-Earth High Speed Re-entry Test (in Chinese). Beijing: Lunar Exploration and Space Engineering Center, 2014 [胡浩, 孙为钢, 钱卫平, 等. 月地高速再入返回工程技术总结. 北京: 探月与航天工程中心, 2014]

15 Feng H, Liu S Y, Yu J B. CE-4 made the historictouchdown on the far side of the moon, with the world's first close-up back to Earth (in Chinese). People's Daily, 2019-01-03 [冯华, 刘诗瑶, 余建斌. 人类首次! 嫦娥四号成功登陆月球背面传回世界第一张近距离拍摄月背影像图. 人民日报号外, 2019-01-03]

16 Jia Y Z, Zou Y L, Xue C B, et al. Scientific objectives and payloads of Chang'e-4 mission (in Chinese). Chin J Space Sci, 2018, 38: 118–130 [贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置. 空间科学学报, 2018, 38: 118–130]

17 Ye P J, Zou L Y, Wang D Y, et al. Development and prospects of deep space exploration in China (in Chinese). Space Int, 2018, (10): 4–10 [叶培建, 邹乐洋, 王大轶, 等. 中国深空探测领域发展及展望. 国际太空, 2018, (10): 4–10]

18 Luan E J. China's lunar exploration program—The third milestone for China's space industry (in Chinese). Eng Sci, 2006, 8: 31–36 [栾恩杰. 中国的探月工程——中国航天第三个里程碑. 中国工程科学, 2006, 8: 31–36]

Summary for “月球探测进展与国际月球科研站”

Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station

Zhaoyu Pei[1], Jizhong Liu[1], Qian Wang[1], Yan Kang[1*], Yongliao Zou[2], He Zhang[3], Yuhua Zhang[4], Huaiyu He[5], Qiong Wang[1], Ruihong Yang[1], Wei Wang[1] & Jinan Ma[3]

[1] *Lunar Exploration and Space Engineering Center, China National Space Administration, Beijing 100190, China;*
[2] *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
[3] *Beijing Aerospace Vehicle Design Department, Beijing 100094, China;*
[4] *Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201108, China;*
[5] *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*
* Corresponding author, E-mail: kangyan416@163.com

As the only natural satellite of the Earth, the Moon is the first target for human space exploration, due to its unique location, highly characteristic environmental resources and abundant material resources. The Earth-Moon system is the proving ground for the exploration of the solar system, and the Moon is a transit point towards farther deep space. Lunar science plays an important role in promoting the development of space science. The development and utilization of lunar resources is of great significance to the sustainable development of mankind. In recent years, China’s lunar exploration has achieved remarkable achievements. After completing the three steps strategy of “orbiting, landing and sample return”, it will aim to better serve the lunar scientific exploration and *in situ* resource utilization (ISRU), to enhance human scientific cognition and expand Human living space, and to serve the sustainable development of human society. This paper reviews the status and trend of Chinese and international lunar exploration, and summarizes the main tasks, cutting-edge scientific questions and key technologies involved in future lunar exploration and puts forward recommendations for the development of the Chinese lunar exploration. Driven by lunar scientific exploration and lunar ISRU, the International Lunar Research Station (ILRS) aims to create infrastructure and shared platforms for solving key space science questions, effectively using lunar resources, and developing the Earth-Moon Economic Circle. In this article, the main mission requirements, and functional architecture of the station are analyzed. A three-step construction plan is proposed, involving (1) making good use of planned missions; (2) coordinating home and abroad missions; and (3) seeking for joint missions. In the first stage, relying on series missions of the fourth phase of China Lunar Exploration Program, we will carry out international cooperation and build up the basic type of the ILRS with capabilities of exploration under a long-term scale and complex environmental conditions. The ILRS will contribute to polar region scientific exploration, ISRU, and application verification for the future expansion. In the second stage, international lunar missions will be coordinated with the objective of expanding the scale, and the technical and scientific activities of the ILRS, therefore making a breakthrough in multi-national and multi-module collaborative work and in integration management or other key technologies. Key technologies, including the long-term operation and guarantee of future scientific research stations, and the application of lunar resource, will be mastered. In the third stage, international partners will contribute to upgrade the station in support of long-term and large-scale scientific exploration, technical experiments and the utilization of lunar resources by jointly investment of new missions. New era of human space exploration will be cultivated, and space physics, astronomy, planetary geology, planetary chemistry and other disciplines will be promoted by international cooperation. International cooperative methods planning integration, joint demonstration, mission design, technical cooperation, collaborative implementation, and achievement sharing are analyzed, all of which paving the way for the demonstration and implementation of the international big scientific projects the ILRS. At present, ILRS has become China’s first batch of international major scientific engineering cultivation projects. Along with international partners, China will carry out scientific objective research, engineering feasibility demonstration and joint implementation plan. Organizational management models and operating mechanisms will be proposed, international expert team and international implementation team will be established, on the basis of which the cultivation of the large-scale scientific project the ILRS will be completed under the principle of wide consultation, joint contribution and shared benefits.

lunar exploration, lunar resource utilization, international cooperation, International Lunar Research Station, Moon base

doi: 10.1360/TB-2020-0582