

国际月球科研站资源利用发展路线战略构想

裴照宇, 王 琼

(探月与航天工程中心, 北京 100041)

摘 要: 以中国倡导的国际月球科研站总体架构和创新发展需求为依据, 对月球环境、位置和物质3类广义资源的内涵概念进行了梳理和界定, 对资源利用活动及高价值利用方法进行了分类研究, 对月球资源利用关键技术问题以及工程实施准则进行了剖析, 提出了近-中-远三期月球资源综合利用的发展目标和发展路线构想。本文的研究成果, 可为相关任务论证设计和有针对性的科学技术预先研究提供参考。

关键词: 月球资源; 资源分类; 综合利用; 发展路线

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2024)04-0625-13

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2024.04.014

Strategic Concept of Resource Utilization Development Route of the International Lunar Research Station

PEI Zhaoyu, WANG Qiong

(Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100041, China)

Abstract: Based on the overall architecture of the International Lunar Research Station project advocated by China and the innovative development requirements, the connotations and concept of the three categories of generalized resources of the lunar environment, location and matter are systematically sorted out and defined. The resource utilization activities and high-value utilization methods are classified and studied, and the key technical issues of the utilization of lunar resources and the implementation criteria of the project are analyzed. The near-term, medium-term, and long-term development goal and development roadmap of the comprehensive utilization of lunar resources are put forward. The research results can provide reference for the demonstration design of related space missions and targeted science and technology research in advance.

Key words: Lunar resources; Resource classification; Comprehensive utilization; Development route

0 引 言

月球是距离地球最近的自然天体,也是人类开展深空探测活动的前哨站。纵观上世纪以来人类月球探测活动的发展历程,呈现出了从认识月球到利用月球的历史必然。

1959年至1976年间,以苏联的月球(Luna)系列和美国的阿波罗(Apollo)计划系列探月活动为代表,人类掀起了第一轮探月高潮。在当时的历史条件下,美-苏两国共同创造了人类月球探测的多个先河:首次环绕探测,首次软着陆探测,首次巡视探测,

首次把月球样品带回地球,首次把航天员送上月球并安全返回。美苏两国开启了人类深空探测活动的序幕,建立了人类深空探测活动的工程体系,深化了人类对月球的科学认识。在当时的历史背景下,由于美苏两个大国都以谁抢先、谁更有体制优势为竞争要素,探月活动难以可持续推进。1976年苏联的Luna 24任务实施后,人类的探月活动进入沉寂期。

1994年,美国发射了克莱门汀号(Clementine)环月探测器,首次找到了在月球极区的永久阴影坑内可能存在水冰物质的遥感证据,开启了人类第二轮探月高潮。继美国之后,欧洲空间局(ESA)、日

本、中国、印度等国家或组织也陆续开展了月球探测活动,月球环境科学、月球资源勘查成为第二轮探月的主要目标。截至2020年,中国圆满完成了“绕、落、回”三期探月工程,实现了中国的首次环月探测、首次着陆巡视探测、首次采样返回以及人类首次月球背面着陆巡视探测,中国的月球探测能力和探月成果得到了国际社会的高度认可。

当前,月球正成为人类发展新的战略空间。美国启动了规模宏大的阿尔忒弥斯计划,联合30多个国家,拟在月球南极建立阿尔忒弥斯大本营(Artemis base camp),把航天员送上月球,并利用人机协同的方式部署建造基础设施,开展月球资源利用等新技术试验,并将载人月球探测的成果和经验外延至火星。中国提出了国际月球科研站(International Lunar Research Station, ILRS)大科学工程计划,联合国,拟在月球南极构建国际月球科研站,通过长期无人自主、短期有人参与的形式,实施月球科学研究、资源利用和月基建造等任务活动。中美两国均将月球探测的单次任务模式推向多次集群任务模式,其目的不仅在于深化月球科学认知,还均将月球资源利用作为亮点任务,这标志着人类月球探测活动的核心目的已从“认识月球”转变为“认识与利用并重”。

在月球探测进入认识与利用并重阶段这一新的时代背景下,为实现中国月球探测高效率、高效益、可持续的高质量发展,国际月球科研站大科学工程计划应运而生。在月球科研站总体架构下,如何实现月球资源利用的创新发展和国际引领,如何以月球资源利用为抓手推动形成地-月空间经济新产业,亟需解决月球资源利用发展目标、发展路线、任务规划等顶层战略问题。围绕这些问题,本文对月球资源利用的概念内涵和活动分类,发展愿景、目标以及主要战略资源的利用策略,关键技术体系和工程实施准则,发展建议等进行了初步探讨。

1 月球资源利用发展趋势和需求

1.1 国际发展趋势

2017年,美国总统签署了“1号太空政策令”,正式批准了阿尔忒弥斯计划。该计划由NASA主导,目前已有30多个国家参与。其核心目标是,把航天员送上月球并安全返回,利用人机协同方式开展资源利用与月基建造等新技术试验,并建立常态化驻

留机制,为未来的火星载人登陆任务铺就道路。与此同时,美国也率先发起了太空资源利用法规研究。2015年,美国制定了《2015外太空资源探索与利用法》,提出了“谁先勘探,谁先拥有”的外太空资源商业开发原则。2020年,美国总统签署了有关“鼓励国际社会支持空间资源回收和利用”的行政令,鼓励美国公民开发太空资源,吹响了太空资源开发的竞争号角。

ESA计划于2025年前登上月球并主导建立国际月球村,利用月壤作为3D打印的材料来建造居住舱;从阴影坑里获取水,在月球表面种植农作物^[1]。俄罗斯联邦航天局在《2016—2025年联邦航天规划》中将月球定位为深空探测的研究重点,计划于2025年前完成月球南极着陆和巡视任务,旨在验证原位资源利用技术^[2-4]。

2021年中国发布了《国际月球科研站合作伙伴指南》^[5],旨在通过国际合作的方式共建国际月球科研站。中国正在实施的探月四期嫦娥七号任务,拟对月球南极永久阴影区内的月壤水冰和挥发分赋存状态实施采样详查;嫦娥八号任务也将着陆于月球南极地区,构建月球科研站中枢,并开展月壤资源原位利用新技术验证。通过嫦娥七号和八号任务的实施,构建月球科研站的基本型,为后续国际月球科研站的规模化构建与高效益运营奠定基础。与此同时,中国也正在实施载人月球探测工程登月阶段任务,将于2030年前实现中国人首次登月。

纵观美国、欧洲和中国的月球探测规划,针对月球资源利用的发展趋势,可概述如下:

1) 认识与利用并重,成为后续月球探测活动的新特点。进入21世纪以来,美国、欧洲、中国等航天大国纷纷提出了在月球上构建长期无人自主运行、短期有人值守的月球科研站或月球基地的规划,并把认识月球和利用月球作为同等重要的科学目标。月球探测的核心目的,已从“认识”过渡到“认识与利用并重”。月球上独特的物质、位置和环境资源的获取与有效利用,是月球科研站总体方案和运营活动规划的重中之重。

2) 月球资源利用水平和深度,是科研站可持续发展的牵动性因素。月球资源利用既具有科学引领性、技术带动性,又具有经济回报性,其综合效率和效益指标将成为月球科研站建设与运营成效、可持续发展能力的核心评价要素。在月球资源利用

的初期,有望实现科研站基础设施、部分生保物资制备、部分稀贵金属提取与转化利用新技术验证,为载人登月活动补充部分物资;在月球资源利用的中期,可以实现水/氧气/氢气等生保物资和推进剂的规模化生产,可利用月基矿物资源提取并制造零部件、建造小规模月基建筑,部分物资将不依赖于地球;在月球资源利用的远期,可构建出网点化功能站,如极区水冰提取站、月基冶炼站、月基制造站、月基发射场等,大多数物资将不依赖于地球的运载投放,月球科研站将成为人类地月同系活动的主场地,形成地-月系统之间的经济圈和产业链。

3) 月球资源利用刚刚开始,尚未形成个别国家绝对引领态势。美国在世界上率先启动了月球资源利用预先研究和月球资源评估工作。针对月球物质资源的利用,月球水冰的开采与氢氧转化、月壤熔融制氧、从月壤中提取氦-3(^3He)、月壤3D打印等成为预先研究的重点,并在地面上开展了实验室级别的试验验证。美国虽起步较早,但因航天任务立项和经费制约,相关成果多处于地面验证阶段,暂未形成绝对引领地位。

1.2 创新发展需求

在未来的20~30年间,中国倡导的国际月球科研站与世界各航天大国的月球探测与资源利用计划将在同一历史节点、同一场景(如:月球南极)展开比对性竞争。中国的月球科研站需具备理念/模式/体系架构等层面的创新,以实现多快好省的建设目标。在运营模式与内涵产出方面,资源利用水平、新技术试验、月地空间经济/商业活动等,将成为科研站获得经济回报、与其他国家具有比较优势的切入点。因月球资源利用尚属于新生事物,中国为实现本领域的创新和国际引领性发展,需要高度关注并系统性解决以下问题。

1) 顶层规划:相比于认识月球阶段的单点/单次/单目标/短期服役模式,月球资源利用活动与科研站模式下的多次/定点集群/长期服役等月基装备投送与运维活动深度耦合,月球资源利用涉及的体系更为庞杂、月基作业模式更为复杂多样、月面作业模式和作业目标更有针对性。科研站选址、科研站装备投放及时序编排、月基装备移动及作业能力等都会影响月球资源利用的效率和效益。为此月球资源利用的顶层规划必定要与月球科研站的建设与运维方案相匹配,需要站在国家航天领域创新

发展的层面开展顶层规划,需具有战略性、全局性、时效性和可持续性等多维度考量。

2) 发展路线:对于月球资源利用来说,会涉及无人、有人、人机结合等多种模式,也会涉及战略性资源采集与利用的优先级问题。长期无人自主/短期有人参与模式下,中国版月球资源利用发展路线图如何规划成为当下需重点解决的问题。亟需开展月球资源利用科学目标、工程实施路线图、核心技术体系、国际合作方案等的系统规划与论证等工作。

3) 能力建设:面向月球资源利用这一新生事物,世界各国的底蕴性差距在于月球资源利用基础研发能力体系。在充分继承中国探月工程已有能力体系的基础上,亟需重点突破月球资源详查及可利用性评估、资源赋存等效型模拟物制备、资源利用地面拟实验验证与评价条件等建设工作,瞄准科学前沿,构建具有世界领先水准的月球资源勘查与利用载荷研发平台。这些工作对后续资源利用方案论证及工程实施具有支撑性战略意义。

4) 集群创新:月球资源利用与科研站所在地址条件、科研站作业装备能力息息相关,月基资源利用可借鉴,但不能直接照搬地球上工业化资源开发与利用的方法体系和技术手段。需在月基资源可用性、月基矿冶理论与工艺方法、月基装备设计准则、月基资源综合利用等多个领域开展新理念/新模式/新方法/新技术等多个维度的集群创新。

5) 月球环保:在月球资源开发与利用过程中,应遵照必要的环境保护条款,对月基资源利用的行为和后果做环境耐受性评估。从地球上投送至月面的物质需满足行星保护条款,不能让地球投送物对月面环境造成污染;月面上的资源开采、运输、选矿、冶炼等过程,应限制其作业对自然条件的扰动阈值,限制上述作业过程直接或间接产物在月面扩散阈值。月球环保是一个新问题,其内涵和外延在后续工程进展中会不断加深和拓展。

6) 国际法规:月球资源是人类共有的自然财产,应秉持人类命运共同体的理念,在联合国外空委层面出台并颁布星球资源利用公约。美国等国家牵头制定了一些针对地外空间资源利用的法规,但尚未形成普遍认可的国际共识。中国在月球资源利用体系和方案规划过程中,需要积极参与国际合作,推动月球资源利用领域国际法律法规的制定

和完善,确保资源利用活动在国际法规框架下进行,并维护自身的合法权益。

2 月球资源利用概念与内涵定义

鉴于月球独特的环境与位置条件,以及因月球形成和演化历史所导致的独特物质属性,月球资源利用与地球资源利用的场景条件和内涵具有重大差异。月球上固有的“物质”也不能泛泛而谈地被视为“资源”,应该充分考虑运载能力、可达性等工程约束,需在满足“主观需要、客观可用”的原则下予以实施。为此,在开展月球资源利用顶层规划和工程实施过程中,需首先对月球资源利用的概念内涵和活动分类等进行合理定义。

2.1 相关概念与场景

相比于地球资源开发与利用,月球资源利用行为方式受科研站所在位置的月面资源赋存条件、月基装备作业能力等因素制约,月球资源利用的目的和方法手段具有自身的独特性。参照国际月球科研站构建目标及对资源利用的内涵需求,对月球资源利用的概念及分类做以下界定:

1) 资源利用场景:面向未来的月球资源利用活动发展预期,资源利用活动场景可分为月面资源采集、月面资源利用、月轨资源利用3类场景。月面资源采集,是资源利用的前置动作,本文所指的资源采集活动,默认为全部发生在月球表面;月面资源利用,依托着陆于月球表面的智能装备,通过无人自主或人机联合方式,在月面上实施的资源采集、物质/能量的转化、物质/能量的二次利用等行为;月轨资源利用,特指在环月轨道飞行的轨道舱/月轨空间站上发生的物质转化与利用等行为。

2) 广义月球资源:广义的月球资源有环境资源、位置资源、物质资源3大类别。

3) 环境资源:涉及探测器在月轨、月面环境中所处的环境条件,如微/低重力场、高真空、大温差、强辐照、微陨石撞击、太阳风辐照、月壤剖面恒温层等环境条件。在广义资源利用模式和实施工艺中,应主动将上述环境条件作为有利条件加以“化危为机”式的正向运用。

4) 位置资源:涉及日-地-月位置、科研站落区所决定的月球区域位置、探测器所在的地理位置等内涵,特指因独特的空间位置优势所具有的资源转化潜能,如光照条件佳的月球南极“永昼峰”、适

于低频射电观测的月球背面等。

5) 物质资源:特指在月面上赋存的月壤、月岩等物质形态资源,从高价值利用的角度一般重点指向月球水冰、钛铁矿、氦-3等战略性物质资源。

6) 原位资源:特指赋存于月球科研站、探测器可达范围内的位置/环境/物质资源。原位资源与地球上带来的物质资源具有明确区分度,倡导尽量少带或不带地球辅料物质。

7) 原位利用:特指在科研站、探测器月面可达范围内的资源采集和资源转化利用行为。

8) 离位利用:特指将物质载体长距离转移至其他科研站站址、月球轨道等场所的资源利用形式。如从月面某个科研站长距离转移至另一科研站、从月面转移至月轨、从月面或月轨转移至地球等资源利用模式。

9) 月基制造:以金属或非金属材料为主要原料,在月面或月球轨道上利用增材、减材、等材等制造手段,通过特定装备将特种物资材料转化为功能零部件或特需装置等制造活动的总称。

10) 月基建造:以月壤或月岩为主要原料,利用智能装备在月球表面或地下构建基础设施、修建庇护场所等活动的总称。

2.2 典型利用活动分类

面向高收益资源活动开展并支撑科研站可持续构建等目标需求,可将月球资源利用活动划分为能源获取与利用、矿物开采与转化、月基建造与运维3大类。其中,能源获取与利用是月球资源利用的前提和保障,主要目标是合理应用月面上的太阳能^[12]和月壤剖面的温差能;矿物开采与转化是月面资源利用的主要物质对象,核心目标是利用好月壤水冰、钛铁矿两大类物质资源;月基建造与运维是资源利用的活动模式载体,机器人自主作业和人机协同作业是主要技术支撑。

本文依据国内外月球资源利用现状及发展趋势,特别是以支撑近-中-远期月球科研站的可持续高效构建与高收益运营为目标,规划了原位资源利用活动的利用模式、利用方法和用途,可为国内各专业团队开展有针对性研究提供参考。

2.3 资源综合利用准则

月面资源利用活动不仅限于狭义的月面物质资源的采集与转化应用,它与科研站模式下智能装备的支持条件高度耦合,还与周边的环境条件、位

表1 广义月球资源分类及应用潜能

Table 1 Generalized classification and potential applications of lunar resources

类别	对象	特性评估	应用面向
环境资源	低重力	月表重力约为地球重力的1/6 ^[6]	航天器月基发射;新物种培育;新材料科学研究
	高真空	月球表面大气密度只有地球的 10^{-12} ^[6] ;真空度约 3×10^{-10} Pa ^[7]	真空冶金;新材料开发 ^[8] ;工程材料表面科学研究;精密电子元器件生产
	强辐射	月表辐射源于银河宇宙射线/太阳高能粒子/太阳风/微流星体;月表平均辐射剂量当量达1 369 μ Sv/d ^[9]	人体辐射防护;特定科学实验探究;抗辐射航天设备研制;生物育种
	太阳光	因无大气,月面光照条件好于地球。月球全年光能: 1.2 $\times 10^{13}$ kW;能量密度:1 353 W/m ² ^[10-11]	月基光伏发电;月基光热取能
	大温差	月表高温达127℃,低温达-183℃,剖面恒温层在-23℃左右 ^[11-12] ;月球两极阳照区和永久阴影区的温差可达100℃以上 ^[13]	月基温差发电;月基温差取能
位置资源	永久阴影区	月球两极大型撞击坑;长期无太阳光照射,温度110 K以下;面积:北极大约5 300 km ² ,南极约13 000 km ² ^[14-16]	水及其他挥发分的科学研究及其开采利用 ^[17] ;开展极端低温环境科学实验;高分辨天文观测
	阳照区	高纬度、高海拔山峰区域,持续光照;高达70%~82%的光照率 ^[18] ,随太阳能电池阵列塔高度增加可达95%以上 ^[19]	装备电能供给以支持月夜生存;为永久阴影区挥发分探测与开采提供能量
	月球熔岩管	高温熔岩流过后冷凝形成的管道空间;熔岩管洞穴数量达200多个;熔岩管历史成因、潜在形态和尺寸分布仍难以估量 ^[20]	温度恒定、防辐射、防月尘,具备成为人类月球居住地的潜力 ^[21-22] ;为月球地质演化提供新的证据;可能存在水冰等挥发分资源
	月背屏蔽区	地球上无法直接观测 ^[6] ;地球电磁干扰小	月基低频射电观测的理想站点;月球演化研究
物质资源	月壤	受撞击破碎、太阳风辐照、物理风化等因素形成;月壤厚度:约3~20 m ^[23-24]	是月球矿产资源的主要载体;是月基建造的主要材料
	钛铁矿	赋存:月海高钛玄武岩;含量:2%~20% ^[25] ;总资源量预估150万吨,优质钛铁矿(TiO ₂ >4.2%)达1.2万吨 ^[10]	铁、钛等金属冶金;还原制水和氧 ^[24,26] ;月基建造所需的结构材料 ^[25] ;推演月球内部地质活动及月表形成和演化
	水	游离态:主要赋存于月球两极永久阴影区内。月壤水冰含量:可达5.6 \pm 2.9 wt% ^[17] ;来源、分布含量及赋存形态尚不明确	是月球水资源的主要载体,可转化为生保物质,分解获得氧气和氢气;揭示月球形成、内部物质的时空演化规律 ^[27]
		结构水:主要存在于光照区,以-OH形态存在于矿物晶格中。含量可达283 \pm 22 ppm ^[16,28]	结构水的有效提取需在100~300℃,甚至接近1 200℃的高温条件下进行 ^[23] ,因而开采成本高,利用价值相对较低
	克里普(KREEP)岩	富含钾、稀土元素、磷和钍、铀等难熔元素;主要分布于风暴洋克里普地体(Procellarum KREEP terrane, PKT)区域 ^[29] ;总储量可达2.2 $\times 10^{17}$ m ³	稀土金属冶炼;钾、磷:作为生命必需元素,用于月基农业和生保物质制备;利用钍-钍等进行核裂变发电;蕴含着关于月球形成及演化的重要科学信息
	氦-3	主要赋存于月球正面钛铁矿月壤中 ^[30] ;清洁、高效、安全的核聚变发电燃料;总储量可达100~500万吨 ^[31]	大规模发电:1吨氦-3一年可产生10 GW的电能 ^[32] ;开采方案:加热提取 ^[33] ,采用机械破碎氦气泡方法开采等 ^[34] 。

置条件息息相关。本着“资源可分类,利用需综合”的月面资源利用方针,本文规划了月面资源利用场景(图1),表达了能源动力、物质转化、月基建造的拓扑关系,以及各类资源利用活动之间的内涵关联和拓展应用关系。

面向月面资源综合利用活动的规划及载荷设备配置需求,本文提出以下准则:

1) 因地制宜原则:资源利用应与科研站站址的地理和地质条件、环境条件、月基装备作业能力等综合条件相匹配。科研站对各类物质资源的利用是有优先级的,地理差异巨大的资源利用,可在不同的科研站中予以实施。

2) 效率与效益优先原则:在规划月面资源利用模式与实施方案过程中,应统筹考虑资源开采、运

输、分选、冶炼、提取、功能化建造等环节所需代价,并合理预估目标产出物所带来的关联效益,实现经费比最大化。

3) 点-线-面内涵关联原则:在资源利用过程中,需要构建能源动力、物质采集与转化、月基制造/建造等内涵要素之间的工艺和时序匹配性关系,由点扩成为某条支线,多条支线间构建形成全面的资源利用关联关系矩阵。为此,脱离具体约束泛泛而谈某种物质的资源利用是没有工程意义的。

4) 边建边用原则:在科研站构建过程中,资源利用载荷与月基作业装备同等重要。应转变完全依赖地球投送的建设理念,尽可能地采用原位资源利用的方式,实现科研站部分设施的构建。

5) 循序渐进原则:在科研站构建过程中,尊重

表2 典型月面资源利用活动分类

Table 2 Classification of typical lunar resource utilization activities

类别	资源利用活动	高价值利用方法与用途
(A)能源获取与利用	太阳能获取	1) 光伏发电:将太阳能转化为电能;2) 光热提取:将太阳能直接转换为热能,为月壤熔融成型、矿物冶炼等提供高效率热能
	月壤蓄能取能	1) 月壤储能:利用月壤或其结构物,在月昼期间利用太阳能实施储能,在月夜期间提供热能;2) 地热能利用:利用月壤恒温层特性,通过主动挖掘坑道或利用自然熔岩管等方式,实现温差发电、地热能利用
(B)矿物开采与转化	典型矿物开采	1) 月壤水冰:从永久阴影区内获取水资源,为生保物质制备、推进剂制备、冶炼中间剂制备提供初级原料;2) 钛铁矿:利用高品位钛铁矿,为月壤制氧、金属冶炼、氦-3提取提供高品位初级原料;3) 氦-3:通过热提取、破壁提取等方式,从钛铁矿月壤原料中提取氦-3气体,经分馏提纯后实施加压存储,运回地球或在月面上开展后续能源化利用
	生保物资制备	以永久阴影区中提取的水物质为主要原料,经分馏提纯、电解、去毒处理后转化为航天员可用的1) 饮用水;2) 氧气
	推进剂制备	以永久阴影区中提取的水物质为主要原料,电解制备氢气、氧气;并加压液化、收集存储,为探测器发动机提供液氢推进剂;1) 液氢;2) 液氧
	功能材料制备	1) 月壤催化材料:将月壤原料转化为水氢氧电解、分馏提纯等所需的月壤基高效催化剂;2) 月壤改性材料:以月壤为基础原料,辅以人体排泄物、生物质原料等物质,制备出生命科学实验、月基植物栽培试验等所需的月壤培养基改性材料
	金属/非金属材料制备	1) 金属冶炼:以现场采集的月壤为原料,利用月面的真空、低重力等有利条件,通过高温冶炼、物质提纯等方式,获得钛、铁、铝等金属材料,为后续的月基制造提供原料;2) 非金属冶炼:以现场采集的月壤为原料,通过特定的载荷和制备工艺,获得单晶硅、透明玻璃、月壤纤维等材料
(C)月基建造与运维	月基制造	1) 零件素材:利用原位获得的金属和非金属材料,以及工程废弃物拆解件,通过增材、减材等材制备工艺,在轨定制亟需的特种零件;2) 功能部件:通过月面组装等方式,通过机器人作业,将在轨制备的零件、工程废弃物拆解件等组装为功能部件
	月基建造	1) 月壤成型:利用3D打印、压力粘结成型、切割成型等手段,将月壤/月岩赋型赋性,为月基建造活动提供定制化基础构件;2) 地基整备:通过铲掘、压实、烧结熔融、摊铺、组砌砌筑等方式,构建科研站运载装备所需的道路、发射场地基、载荷支撑平台等设施;3) 功能建筑物构建:通过连续3D打印、砌块组砌、充气展开与月壤填充复合等方式,构建月基建筑,为月基装备和载人舱等提供安全屏蔽所(防陨石撞击、防热、防辐照等)
	循环利用	1) 工程废弃物:以月基退役装备、部分失效组件、残余推进剂等为资源对象,利用拆解再制造、废料再利用等方式,实现月基工程废弃物的资源化循环利用;2) 人体排泄物:以航天员呼吸气体、汗液/尿液、粪便等排泄物为资源对象,优先开展水物质、二氧化碳的资源化再利用;除此之外,将人体排泄物与月壤物质相耦合,利用特种理化工艺,实施月壤的生物学改性,为月基生命科学和植物栽培等提供培养基原料
	智能作业	1) 自主智能:通过机器人月基自主智能、地面支持与服务等方式,实现月基矿物原料详查、开采、分选、利用的在轨操控与效能评价;2) 人机协同:通过月基人-机协同的手段,高效率开展科研站模式下资源利用任务模式规划、高效高可靠运营

科学技术的自然发展规律,本着由简到繁、循序渐进的原则开展资源利用载荷的投放与月基运营,在保证可靠实施的前提下,提高月球资源利用的效率与效益指标。

3 月球资源利用发展路线战略构想

3.1 国际月球科研站

早在2016年,国家航天局就提出了构建国际月球科研站的战略构想,并于2020年获得科技部国际大科学工程培育项目支持。国际月球科研站是中国联合多国共同建设,在月球表面与月球轨道,长期无人自主运行、短期有人参与,可扩展可维护的综合性大型科学实验设施。科研站由地月运输系统、月面长期运行保障系统、月面运输与操作系统、

月面科研设施系统、地面支持及应用系统5大基础设施构成,具备能源供应、中枢控制、通信导航、天地往返、月球科考和地面支持等保障能力,可支持开展科学探测研究、资源开发利用、前沿技术验证等多学科、多目标、大规模科学和技术活动。

国际月球科研站提出了月球考古、巡天揭秘、日地联系、科学实验、资源利用5大类科学目标。

国际月球科研站的预期建站地址是月球南极区域,拟通过多次定点着陆任务,向月面投送功能装备,并在科研站架构下,开展资源利用、新技术试验等科学任务。嫦娥八号是国际月球科研站的先导任务,将在月球南纬80°以上极区内进行现场地形勘查,选定科研站建址中心;将初步建立指挥通信中枢,并开展月球原位资源利用的小型原理验证

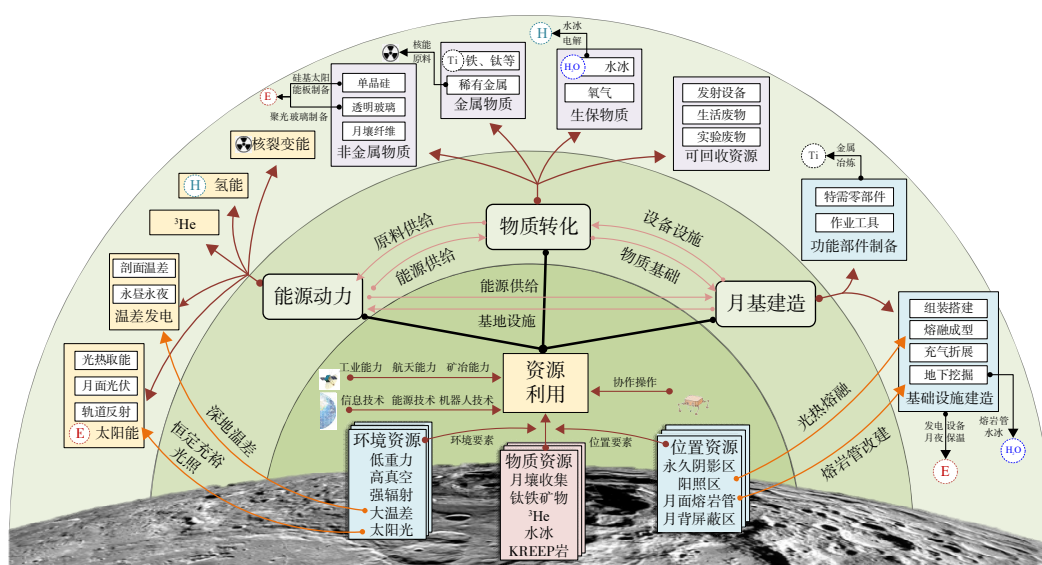


图1 月面资源综合利用场景及内涵关联拓扑场景规划

Fig. 1 Planning of comprehensive utilization scenarios and connection related topological scenarios for lunar resources

实验。在此基础上,我国将分步骤在月面构建国际月球科研站。

3.2 月球资源利用发展愿景

面向月球及深空资源利用的长期发展愿景,规划了4个发展阶段。第1阶段将在月面和环月轨道上开展月球原位资源利用;第2阶段将月球资源带回地球利用;第3阶段将在更远深空开展原位资源利用;第4阶段将深空资源带回月球或地球利用。资源利用的整体场景覆盖时间久远,而第1阶段是

未来资源利用模式的开端,核心目的是构建月球资源利用科学、技术和工程实施新体系,推动科研站可持续构建与高效益运营。

面向月球资源利用,从时间维度可将科研站资源利用活动进一步划分为建设阶段、验证阶段、规模化应用阶段;从功能实现维度,可循序渐进地在月面上开展能源获取、资源详查、资源开采、资源转化和原位利用等活动。本文规划了各阶段的资源利用活动内容及功能递进发展路线(图2)。



图2 月球资源利用时序性功能递进发展路线

Fig. 2 Roadmap of sequential functional progression on lunar resource utilization

3.3 典型战略资源利用规划

从狭义的月面物质资源开采与利用角度出发,月壤是未来可利用物质资源的主要对象和载体。纵观国际上对月壤物质资源的利用,从利用效率与效益的角度出发,月面上最有利用价值、世界各国抢占性获取的战略资源有钛铁矿、月球水冰、氦-3 等 3 大类。

钛铁矿:高品位钛铁矿是月壤制氧、金属冶炼、氦-3 提取的优良原料。

月壤水冰:主要分布在月球南北两极永久阴影区内,有表面霜冻层、剖面水冰两种赋存形态。因水物质是生保物质、氢氧推进剂的主要原料,是资源利用时代月面上最具有开发潜力的战略资源。

氦-3:源于太阳风与月壤物质的相互作用,富集于高钛玄武质月壤颗粒表面微纳结构内。通过加热等方式可实现提取,可作为核聚变燃料。

截至目前,对上述月面物质资源的研究结果表明:钛铁矿广泛分布于月球表面,月壤是钛铁矿的主要承载体;月壤水冰分布在永久阴影区内,开采难度较大;氦-3 物质富集于高钛玄武质月壤内,提取和存储困难,如何对核聚变燃料加以应用还有很

多难题等待解决。

在这一历史背景下,本文提出以科研站近-中-远 3 个阶段发展规划为主线,从科学认识、技术可达性、工程可实现性 3 个维度预估上述 3 类战略资源开采利用的发展目标,为国家后续任务规划和工程化实施方案制定提供参考。

在科学认识方面,分为推断性、充分性、量化性 3 个成熟度等级;在技术可达性方面,分为原理验证、实施验证、经济运行 3 个成熟度等级;在工程可实现性方面,分为实施受限、实施平衡、实施可达 3 个成熟度等级。在月面资源利用历史发展过程中,科学认识、技术可达性、工程可实现性的成熟度等级是循序渐进、逐渐拓展的,钛铁矿、月球水冰和氦-3 等战略资源的利用深度也是与时俱进的。

本着效率与效益优先的原则,本文规划了在科研站近-中-远 3 个阶段,上述 3 类战略资源的利用策略(图 3)。初步结论如下:在科研站构建的初中期,钛铁矿、月球水冰具备一定的可利用条件;在科研站构建的远期,钛铁矿、月球水冰可规模化开采利用,并能获得显著效益,氦-3 资源也已具备开采利用价值。

表 3 月球资源利用可实现度三维度评价指标解释

Table 3 Explanation of three dimensional evaluation indicators for realizability of lunar resource utilization		
评价维度	评价指标	内涵解释
科学认识 维度	推断性	通过理论或间接手段推断某类资源存在
	充分性	通过多点采集、模型建立的方法充分确知资源的存在性
	量化性	通过全月普查、近点详查的方式量化估计区域内资源的储量和丰度,能够结合实际需要进行经济性开发评估
技术可达 维度	原理论证	建立资源利用的技术路线和原理方案,开展地面实验室级的原理验证
	实施验证	通过月面载荷,在月面环境边界下完成资源利用开发,并通过地月镜像实验对比开展工艺流程优化
	经济运行	通过已优化的工艺流程,能够在月面实现高效费比资源利用与开发
工程实现 维度	实施受限	由于资源利用工程载荷复杂度、运载能力、资源赋存的位置和环境因素,限制资源利用的规模与量级,资源利用尚处投入研发阶段
	实施平衡	综合当前工程能力和环境边界等因素,能够进行一定程度妥协优化,通过额外的投入实现资源利用与转化,综合效益平衡
	实施可达	能够通过成熟的工艺流程,实现高效费比的资源利用与开发,使综合收益为正,初步构建起地月经济圈

3.4 月球资源利用发展目标构想

面向中国主导建设的国际月球科研站历史背景和工程需求,月球资源利用的实际效果是月球科研站建设水平、运营效能、可持续发展潜力的重要影响因素。本着边建边用、效率与效益优先的原则,中国的月球资源利用活动可规划为“近-中-远” 3 个历史阶段。

近期发展目标:在 2020 ~ 2035 年间,形成中国版月球资源利用战略发展规划,开展先期技术攻关

和地面支撑条件建设;完成月壤成型、水冰开采及氢氧转化、月壤制氧等原位资源利用月基验证。

中期发展目标:在 2035 ~ 2045 年间,构建形成覆盖全球的“1 主站+X 分站”分布式科研站布局,并在各站实施资源利用独立运营与站间资源协同试验,月基资源利用得到全面验证。

远期发展目标:在 2045 年后,中国的月球资源利用实现国际引领,在能源获取与利用、矿物开采与转化、月基建造与运维 3 大领域开展规模化应用,

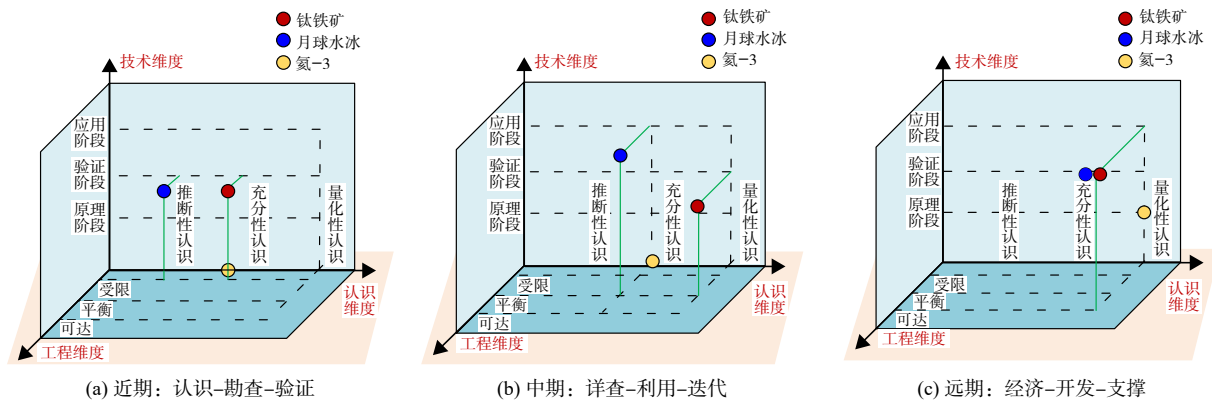


图3 国际月球科研站3类战略资源利用潜能预测模型

Fig. 3 Prediction model for utilization potential of three types of strategic resources for ILRS

部分月基资源利用活动取得显著经济回报。月球成为深空探测的前哨站,启动实施火星科研站建设及火星资源利用拓展。

依据团队前期研究成果并结合国家各轮专家论证情况,本文对中国月球资源利用近-中-远3期具体建设内容和拟达目标进行了阐述(表4),相关内容可作为国内同行的参考。

4 月球资源利用关键问题

4.1 关键技术体系

面向月球科研站模式下的规模化资源利用活动,因地-月环境条件差异、月壤物质特性、运载能力、资源利用效费比等制约,与地面矿冶工程具有重大差异,需高度关注并解决如下技术问题:

1) 月球矿产资源精准勘查技术。在科研站模式下开展的资源利用活动,可参考遥感数据,但更需要月基装备搭载近景详查载荷和矿物勘查与甄选载荷。为此,亟需突破月面矿物资源高精度分布式详查、月壤剖面资源纵深分布详查等关键技术。

2) 月球矿物资源高效开采技术。在月面资源开采过程中,必定要引入矿物品位、主观利用匹配度、开采效费比、物料载运可达性等指标。为此,亟需突破高分辨率矿物辨识与预判、月基典型矿物开采方法与技术(水冰、钛铁矿等)、矿物分选方法与技术(力、磁、电等)等关键技术。

3) 月基矿冶工艺技术。常规的月球探测习惯于将月球的低重力、高真空、大温差等环境条件作为恶劣而苛刻的条件对待。在科研站模式下的月壤/水冰冶炼和转化过程中,一方面要合理而巧妙地利用好上述条件,另一方面不能简单移植地面上的

冶炼和转化工艺。为此,亟需突破月壤基原位冶炼物质分离与分馏机理、月基冶炼工程热物理、状态监测与智能调控、月基冶炼装备设计规范与方法、月基冶炼效费比评价体系等关键技术。

4) 月基原位制造技术。在月面开展金属和非金属材料的制造,同样会涉及减材、增材和等材3类制造工艺^[24],但受制于运载能力、月面热环境等因素,不能简单照搬地面常规制造方法和工艺。为此,亟需开展月基制造功能型谱规划^[25]、地-月制造场景及条件差异机理与应对策略、月基高效率高效益制造方法与技术、月基制造安全与环保应对措施、小型化可扩展月基制造体系研究等关键技术的研究。

5) 月基原位建造技术。面向以月壤剖面结构为支撑体,以月壤为主要原料的月基建造活动场景,应充分引入月面环境条件、月壤原料特性、月基装备作业能力等新制约,相关工艺和建造能力与地面建造具有重要差异^[26]。为此,亟需突破月基制造功能型谱规划、月基建造物需求分析、地-月建造场景及条件差异机理与应对策略、月基高效率高效益建造方法与技术、月基建造安全与环保应对措施等关键技术。

6) 地面拟实验证与定标技术。截至目前,中国已初步具备月球采样探测所需的试验验证条件,但无法支撑月球资源勘查载荷、资源利用载荷研发需求。为此,亟需突破资源赋存等效型模拟月壤制备、月球矿物综合物性近景详查载荷研发平台构建、资源开采-分选-转化载荷研发平台构建、资源利用过程多物理场无损观测与效能评估等关键技术。

表 4 月球资源利用建设规划与发展目标

Table 4 Construction planning and development goals for lunar resource utilization

发展阶段	建设与运营内容	具体工作
(A) 近期阶段 2020 ~ 2035	A1 资源利用	面向月球资源利用创新发展和国际引领需求,以基础研究和资源勘查/利用载荷研发条件建设为抓手,构建具有世界一流水准的研发平台,并面向国内外开放使用。具体工作:1) 月球资源利用国际研发平台建设;2) 月球资源利用核心技术体系攻关;3) 国内/国际研发团队的培育与共建
	A2 能力体系建设	面向嫦娥八号、ILRS 近期工程(2035 年前)的资源利用载荷高起点研发需求,重点开展以下建设任务:1) 嫦娥八号资源利用载荷研制与验证;2) 月球科研站基本型数据关联及任务模式拓展;3) ILRS 近期(2035 年前)任务体系/体系架构/工程实施方案论证与优化
	A2 资源利用 月基试验	
(B) 中期阶段 2035 ~ 2045	B1 载荷研制 与月面投放	面向大规模能源获取、大规模物资开采、大体量月基建造等功能需求,开展以下工作:1) 资源勘查/利用/建造载荷产品研制;2) 按任务时序编排分次集群投送载荷;3) 在科研站区域内以机器人自主作业形式完成载荷的布设与月基联调联试,形成月基规模化资源利用能力体系。
	B2 资源利用 开放运营	面向月球资源规模化验证与开放运营需求,开展以下工作:1) 月壤制氧/水、水冰中水/氢/氧/挥发分的提取与转化、矿物资源采集与提炼、金属基零部件生产、月基建筑物建造等工程应用试验;2) 在科研站体系保障下开展能源、物质、建造三条主线“点-线-面”结合/耦合应用模式拓展试验,形成“月基资源利用载荷群”规模化应用模式与在轨应用方案矩阵,构建形成月基资源利用开放应用平台。
	B3 月基人机协同 试验验证	面向长期无人自主、短期有人参与的月球科研站建设目标,开展以下工作:1) 利用月球科研站的资源利用设备,制备和供给生保物资,搭建庇护场所,为航天员造访提供物资和生存条件保障;2) 实现月球科研站人机协同模式验证,有人、无人月球探测活动深度融合,为后续的火星等深空探测模式提供先验经验。
	B4 国际共建 与共享	开展的主要工作:1) 大比例获得国际共建资金,有偿搭载资源利用、新技术验证载荷和其它商业载荷并获得显著经济回报;2) 国际合作生态圈进一步加强,中国的领导力进一步增强。
	B5 科学与技术 推进	开展的主要工作:1) 实现月基资源利用能力体系建设,并开展试运营;2) 构建广域千公里量级、纵深百米量级的月基资源勘查能力体系,将人类月球探测水平提上新高度,月基科学探测能力得到跨代发展。
	B6 火星资源利用 先导任务	在月球科研站建设与试运行期间,及时归纳提炼成果,择机启动火星科研站先导任务,为后续的火星科研站工程实施积累经验。
(C) 远期阶段 2045 ~	C1 大规模 资源利用	开展的主要工作:1) 月基原位能源获取,达到 1 000 kW 水平;2) 水/氧气等生保物资每地球天产能达到 100 kg 量级;3) 可利用增材复合方式制造功能级零部件;4) 能利用机器人实现功能零部件的组装及月基装备的自主维修;5) 能建造月球工厂、实验室等 100 m ² 量级大尺度建筑物;6) 实现氢/氧液体推进剂的月基自主生产,支撑月基发射。
	C2 科研站 运维与拓展	开展的主要工作:1) 月基资源采集与利用,能为科研站提供 100% 能源自给,部分物资和功能器件实现月基自给;2) 能为 10 人组载人登月提供 100% 的氧气和水;3) 通过地面投送与月基建造的复合方式,在月球上网点式构建水冰开采站、月壤制氧站、功能器件制造站等,形成“1 主站+X 分站”的网点式月球科研站完备构型,科研站活动范畴覆盖全月球。
	C3 地月经济 运营	开展的主要工作:1) 月球科研站的主站扩建、分站拓建,将得到 50% 以上国际投资;2) 商业载荷搭载、新技术验证、月球文旅等经济活动达到盈亏平衡点,为中国地月空间经济圈建设提供月面依托场景和平台赋能效应;3) 中国成为人类深空探测活动的引领者。
	C4 火星资源 利用拓展	开展的主要工作:1) 由中国主导,提出并实施“国际火星科研站”大科学工程,将月球科研站构建与运营的优秀模式与经验,延展至火星;2) 面向人类命运共同体需求的深空探测、深空资源利用事业,迈入新时代。

以上的关键技术体系构成了实现月球资源利用的基础和框架。这些技术相互关联、互为基础、相互作用,共同推动月球资源利用的发展。

4.2 工程实施准则

月球资源维度多、分布广,月面环境复杂,工程支持能力有限,资源利用工程实施的难度大。为确保月球资源利用工程实施的有效性,需要建立评价

准则来指导工程方案设计,优选评价相关载荷。

按照评估因素的重要性顺序,构建了如图 4 所示的资源利用方案设计及载荷配置判定准则。

匹配性:匹配性是评估资源利用工程实施的首要条件,关系到资源利用任务是否符合客观实际,是否可持续发展;在功能上考虑能否接驳,能否有标准化和互操作化的接口设计;在任务上考虑能否

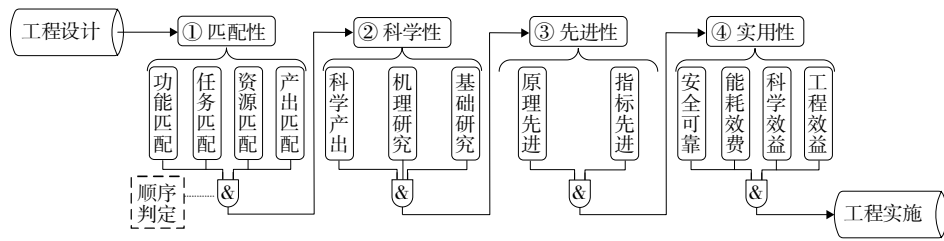


图4 月球资源利用工程实施优先级判定准则

Fig. 4 Criteria for prioritizing engineering implementation of lunar resource utilization

进行投送,能否适应环境布设开展相关作业任务;在资源上考虑能否获得稳定有效的能源支持,是否具有丰富可开采的特定资源;在产出上考虑是否具有可持续开采价值,能否产出支持月面活动的资源产品。

科学性:科学性是指应当以科学目标为导向设计相关载荷,实施工程任务。以科学产出为目标,设计相关工程任务实施方案,尊重科学实验性工程任务的客观规律,实现科学产出与工程实现并重。以机理和基础研究为目标,工程设计应当向机理和基础研究的实验条件倾斜。

先进性:先进性是指工程实施的原理先进,综合性能指标先进,其最终效率和产出效益达到国际领先水平。工程设计的原理上,要考虑月球特殊环境,工程设计和实施模式要“应景”,规避地面系统“等比缩小”的错误设计思维;设计的总体指标上,确保资源利用产出效率和效益指标领先,确保相关工程设计综合指标领先。

实用性:实用性是指工程设计应当综合考虑资源利用过程中的安全性问题、效费比问题和科学工程效益问题。在资源利用高效产出的基础上,提高工程实施的效率效能,做到“多、快、好、省”。

5 结 论

在月球探测的核心目标从认识月球转变为认识与利用并重的历史阶段,本文以中国倡导的国际月球科研站总体架构为依据,针对月球资源利用这一新事物,对相关场景和概念做了定义,提出了月球资源利用顶层规划和发展目标构想,并阐述了相关科学问题、技术体系和工程实施准则。本文形成的主要结论和建议如下:

1) 月球资源利用发展潜力巨大,是撬动月球科研站可持续发展的战略杠杆。综合利用月球上的环境、位置和物质资源,可实现生保物资、火箭推进

剂、工程材料和器件的原位生产,改变了单纯依赖地球投送的深空探测模式,还可进一步推进月基装备的在轨维修与拓展、进一步实现月基建造和基地拓建。为此,月球资源利用是撬动国际月球科研站可持续构建与高效益运营的战略杠杆,也是中国 and 世界各国协同利用外空资源、促进人类命运共同体和谐发展的重要切入点。建议在国际月球科研站建设规划中,重点推进月球资源利用领域的新理念/新模式/新概念/新技术研究。

2) 尽早启动月球科研站工程,抢占月球资源利用创新发展先机。美国、欧洲等发布的未来探月计划,均把月球资源利用作为亮点任务予以实施。可以预见,在未来的20~30年间,中国的国际月球科研站将与美国的阿尔忒弥斯计划等在同一历史节点、同一场景(月球南极)展开比对性技术和运营效率竞争,月球资源利用的水平将成为核心竞争点。为此,建议国家尽早启动国际月球科研站大科学工程,及时制定并发布国家层面的月球资源利用发展路线图,引导国内相关单位开展有针对性、有明确约束条件的有效研究。

3) 高水准构建基础研发能力体系,支撑中国月球资源利用工程实践需求。单点单次探测时代的工程试验验证体系,不适用于科研站模式下的资源详查、开采、矿物分选、冶炼提取。面向月球资源利用新技术研发,亟需满足资源赋存等效型月球模拟物制备、月基资源勘查拟实场景与测试条件构建等新需求,美国等国家在此方面也没有独特的优势。为此,建议国家加大对月球资源利用基础研发平台的支持力度,以世界领先水准为目标,采取国内与国际相结合的方式,构建月球资源利用地面大科学设施群,以此为基础推进基础和应用研究、推进国际合作。

4) 注重顶层战略规划研究,推动国内研发资源的有组织高效协同。月球资源利用是一个新生事

物,且与科研站顶层规划和战略部署高度耦合。国际月球科研站架构下的月球资源利用战略规划研究内涵深刻、时序和功能接口关系复杂,承载的支撑科研站可持续发展历史责任重大。为此,建议国家层面注重月球资源利用顶层战略研究,科学制定科学目标和工程实施路线图。引导国内各研发单位,积极参与国家层面的顶层论证,引导国内同行在充分理解国家创新发展战略的前提下,面向国际月球科研站总体架构与可持续发展需求,开展有组织、有针对性的高效协同研究,共同促进中国月球资源利用事业的创新发展。

参 考 文 献

- [1] KÖPPING ATHANASOPOULOS H. The moon village and space 4.0: the 'open concept' as a new way of doing space?[J]. Space Policy, 2019, 49: 101323.
- [2] MAROV M Y. Exploration of the moon by automatic spacecraft [J]. Cosmic Research, 2023, 61(1): 46–69.
- [3] MURTAZIN R, SEVASTYANOV N, CHUDINOV N. Fast rendezvous profile evolution: from ISS to lunar station[J]. Acta Astronautica, 2020, 173: 139–144.
- [4] SOLOV'EV V A, KOVALENKO A A. Manned cosmonautics: achievements and prospects[J]. Herald of the Russian Academy of Sciences, 2021, 91(6): 620–625.
- [5] 国家航天局. 国际月球科研站合作伙伴指南[EB/OL]. (2021–06–16)[2024–02–05]. <https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6812148/content.html>.
- [6] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [7] Moon | Features, phases, surface, exploration, & facts | Britannica [EB/OL]. (2023–07–14)[2023–07–25]. <https://www.britannica.com/place/Moon>.
- [8] 车浪, 王彬, 赵鹏飞, 等. 月壤原位利用技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(11): 1433–1446.
- CHE Lang, WANG Bin, ZHAO Pengfei, et al. Research progress in the in-situ utilization of lunar soil [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(11): 1433–1446.
- [9] 吴伟仁, 王赤, 刘洋, 等. 深空探测之前沿科学问题探析[J]. 科学通报, 2023, 68(6): 606–627.
- WU Weiren, WANG Chi, LIU Yang, et al. Frontier scientific questions in deep space exploration[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(6): 606–627.
- [10] 刘建忠, 李雄耀, 朱凯, 等. 月球原位资源利用及关键科学与技术问题[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 907–918.
- LIU Jianzhong, LI Xiongyao, ZHU Kai, et al. Key science and technology issues of lunar in situ resource utilization [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 907–918.
- [11] 谢和平, 李存宝, 孙立成, 等. 月球原位能源支撑技术探索构想[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 1–9.
- XIE Heping, LI Cunbao, SUN Licheng, et al. Conceptualization of In-situ energy support technology on the moon [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 1–9.
- [12] PALOS M F, SERRA P, FERERES S, et al. Lunar ISRU energy storage and electricity generation [J]. Acta Astronautica, 2020, 170: 412–420.
- [13] WILLIAMS J P, GREENHAGEN B T, PAIGE D A, et al. Seasonal polar temperatures on the moon [J]. Journal of Geophysical Research (Planets), 2019, 124(10): 2505–2521.
- [14] ROSS A K, RUPPERT S, GLÄSER P, et al. Preliminary quantification of the available solar power near the lunar South Pole [J]. Acta Astronautica, 2023, 211: 616–630.
- [15] 郑永春, 张锋, 付晓辉, 等. 月球上的水: 探测历程与新的证据[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1069–1078.
- ZHENG Yongchun, ZHANG Feng, FU Xiaohui, et al. Water on the moon: exploration history and new evidence [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1069–1078.
- [16] 李雄耀, 魏广飞, 曾小家, 等. 极区月壤和水冰形成演化机制及物理特性研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(2): 123–133.
- LI Xiongyao, WEI Guangfei, ZENG Xiaojia, et al. Review of the lunar regolith and water ice on the poles of the moon [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(2): 123–133.
- [17] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume [J]. Science, 2010, 330(6003): 463–468.
- [18] GLÄSER P, OBERST J, NEUMANN G A, et al. Illumination conditions at the lunar poles: implications for future exploration [J]. Planetary and Space Science, 2018, 162: 170–178.
- [19] GLÄSER P, SCHOLTEN F, DE ROSA D, et al. Illumination conditions at the lunar south pole using high resolution digital terrain models from LOLA [J]. Icarus, 2014, 243: 78–90.
- [20] SAURO F, POZZOBON R, MASSIRONI M, et al. Lava tubes on Earth, Moon and Mars: a review on their size and morphology revealed by comparative planetology [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 209: 103288.
- [21] 石耀霖, 胡才博, 张怀, 等. 对中国月球科研站开展特定固体月球动力学研究的一些思考[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 895–906.
- SHI Yaolin, HU Caibo, ZHANG Huai, et al. Some thoughts on the special research of solid lunar dynamics in China's lunar scientific research station [J]. Bulletin of National Research Science Foundation of China, 2022, 36(6): 895–906.
- [22] 黄澜, 于兆玮, 丁亮, 等. 面向熔岩管探测的星球子车及其参数化设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1): 19–34.
- HUANG Lan, YU Zhaowei, DING Liang, et al. Planetary child rover for lava tube exploration and its parametric design [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1): 19–34.

- [23] KESZTHELYI L P, COYAN J A, BENNETT K A, et al. Assessment of lunar resource exploration in 2022[R]. Virginia, USA: United States Geological Survey, 2023.
- [24] ANAND M, CRAWFORD I A, Balat-Pichelin M, et al. A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial in situ resource utilization (ISRU) applications[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 42–48.
- [25] 唐红, 王世杰, 李雄耀, 等. 月壤钛铁矿微波烧结制备月球基地结构材料的初步设想[J]. 矿物学报, 2009, 29(2): 229–234.
- TANG Hong, WANG Shijie, LI Xiongyao, et al. A preliminary design for producing construction materials for the lunar base: microwave sintering ilmenite of lunar soil[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(2): 229–234.
- [26] SCHWANDT C, HAMILTON J A, FRAY D J, et al. The production of oxygen and metal from lunar regolith[J]. Planetary and Space Science, 2012, 74(1): 49–56.
- [27] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. 科学通报, 2020, 65(24): 2577–2586.
- PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, et al. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577–2586.
- [28] 王赤, 林杨挺, 裴照宇, 等. 月球科研站的关键科学问题[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 830–840.
- WANG Chi, LIN Yangting, PEI Zhaoyu, et al. Key scientific questions related to the lunar research station[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(6): 830–840.
- [29] ZHANG J Y, HEAD J, LIU J Z, et al. Lunar procellarum KREEP terrane (PKT) stratigraphy and structure with depth: evidence for significantly decreased Th concentrations and thermal evolution consequences[J]. Remote Sensing, 2023, 15(7): 1861.
- [30] 徐琳, 邹永廖, 刘建忠. 月壤中的氦-3[J]. 矿物学报, 2003, 23(4): 374–378.
- XU Lin, ZOU Yongliao, LIU Jianzhong. Helium-3 in lunar regolith[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2003, 23(4): 374–378.
- [31] FA W Z, JIN Y Q. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer[J]. Vicarius, 2007, 190(1): 15–23.
- [32] KULCINSKI G L, ASHLEY P, SANTARIUS J, et al. The development of lunar ^3He resources: near-term applications and long-term resources[C]. The 4th International Conference on Exploration and Utilisation of the Moon, Noordwijk, The Netherlands, July 10–14, 2000.
- [33] LI A, CHEN X, SONG L J, et al. Taking advantage of glass: capturing and retaining the helium gas on the moon[J]. Materials Futures, 2022, 1(3): 035101.
- [34] HU S, HE H C, JI J L, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang'e-5[J]. Nature, 2021, 600: 49–53.

作者简介:

裴照宇(1966-),男,研究员,长期从事月球与深空探测任务总体设计和工程管理。

通信地址:北京市石景山区群明湖南路6号院5号楼探月与航天工程中心(100041)

E-mail: peizhaoyu@cnsa.gov.cn

王 琼(1983-),男,研究员,长期从事月球与深空探测任务总体设计和工程管理。

通信地址:北京市石景山区群明湖南路6号院5号楼探月与航天工程中心(100041)

E-mail: wangq2006@163.com