

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球科研站的关键科学问题*

王 赤^{1,2**} 林杨挺³ 裴照宇⁴ 邹永廖^{1,5}
徐 琳^{1,5} 程惠红⁶ 任 杰⁷ 于 晟¹

1. 中国科学院 国家空间科学中心/空间天气学国家重点实验室,北京 100190
2. 中国科学院 国家空间科学中心/太阳活动与空间天气重点实验室,北京 100190
3. 中国科学院 地质与地球物理研究所/地球与行星物理院重点实验室,北京 100029
4. 国家航天局 探月与航天工程中心,北京 100048
5. 中国科学院 月球与深空探测总体部,北京 100090
6. 国家自然科学基金委员会 地球科学部,北京 100085
7. 北京大学 地球与空间科学学院,北京 100871

[摘要] 基于第302期“双清论坛”,本文总结了基于月球科研站的科学研究进展,围绕月球地质、近月空间环境、月基观测、月基生命实验和资源利用等领域,梳理了月球科研站的研究方向及总体科学目标,凝练了该领域未来5~10年的关键科学问题,探讨了前沿研究方向和发展战略。

[关键词] 月球科研站;深空探测;行星科学;基础研究

自1959年苏联发射第一颗月球探测卫星以来,人类已经进行了100多次月球探测活动。通过环绕、着陆和巡视探测、以及对月球样品和月球陨石的研究,已极大地丰富了人类对月球的认识,初步建立了月球形成与演化的框架模型。但已有的认识更多是源于对月球浅表层的探测,尤其集中在月球正面很有限的区域,月球背面还只有我国的“嫦娥四号”一次探测任务抵达。而对于月球的高纬度地区、绝大部分月背区域以及月球内部的探测与研究,仍属于空白区域。

进入21世纪,月球再次成为世界主要航天国家的探测热点。2018年国际空间探索协调组发布了最新的全球探索路线图,采用了“近地轨道—地月空间—载人探火”的深空探测发展思路,2019年美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, United States, NASA)发布《前往月球:NASA月球探索战略规划》,正式启动了“阿尔忒弥斯(Artemis)计划”,明确了无人月球探测、载人月球探索、开发利用月球和初期载人火星探索的发展路线图,突显了月



王赤 中国科学院国家空间科学中心主任,中国科学院院士。1998年获得美国麻省理工学院博士学位,2000年至今任中国科学院国家空间科学中心研究员。长期从事空间物理和空间天气研究,在*Nature*、*Science*等国际学术期刊上发表论文200余篇。现担任空间科学战略性先导专项(二期)负责人、嫦娥4号工程副总设计师、中欧联合空间科学任务“太阳风—磁层相互作用全景成像卫星”(SMILE)中方首席科学家。

球正成为世界主要航天国家的首要探测目标。另一方面,月球探测已从过去纯粹的科学研究向“科学与应用并重”转变,月球探测不再是单次独立的工程任务,而是在整体规划下,通过多次任务逐步实施,在月面建立科研台站设施。欧洲航天局(以下简称“欧空局”)提出了“月球村”的概念,美国提出重返月球计划。我国自2007年发射第一颗绕月轨道卫星“嫦娥一号”以来,探月工程五战五捷,随着2020年“嫦娥五号”成功发射并顺利采样返回,探月工程的一、二、三期(“绕、落、回”)宣告取得圆满成功。目前,探

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-06-08

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: cw@spaceweather.ac.cn

月工程四期(“嫦娥六号”“嫦娥七号”“嫦娥八号”)已立项,拟对月球南极开展科学与应用研究。在此基础上,我国率先提出了国际月球科研站计划,联合多国参与,拟在月球南极建设和运营人类首个标志性共享平台,共同开展长期、连续的月球探测、月基观测和实验研究,以及原位资源开发利用,旨在长期可持续研究月球、利用月球。

研讨基于月球科研站的前沿重要科学问题,凝练总体科学目标,推进我国月球与深空探测领域的战略规划、科学研究和技术发展,为国际月球科研站的建设奠定基础。在此背景下,2021年11月8~9日,国家自然科学基金委员会地球科学部、数学物理学部、交叉科学部和计划与政策局共同主办了主题为“月球科研站的关键科学问题”的第302期双清论坛,来自国内20多所高校和科研院所的近80名专家学者应邀以线上和线下的方式参加了本期论坛。与会专家围绕月球科研站建设、月球科学探测与应用的发展现状和趋势、未来主要研究方向和重大科学问题等进行了热烈研讨。会议凝聚了月球探测科学研究的共识,提出了国家自然科学基金在相关领域的发展战略。

1 月球科研站的重大机遇与挑战

1.1 月球探测的发展现状与问题

1959年1月苏联成功发射了人类第一颗无人月球探测器“月球1号”飞掠月球,拉开了月球探测的序幕。美国在1961—1972年实施了举世瞩目的“阿波罗载人登月计划”,通过6次载人登月,先后把12位宇航员送上月球。“阿波罗计划”带动了整个科技的发展与工业的繁荣,也改变了人类对月球的认知,美国的行星科学领域也因此飞速发展。苏联于1970—1976年间实施了3次无人采样返回任务。美国和苏联先后实施的采样返回任务总共带回382 kg的月球样品。但是,这9次采样返回任务均分布在月球正面的低纬度区域,仅能代表全月面5%~8%的区域,而且其中的玄武岩年龄分布在40亿~30亿年的有限区间。我国嫦娥五号任务成功采集并返回了1.73 kg的月壤样品,对样品的分析结果将玄武岩的年龄延续到20亿年,也将采样区域拓展到中纬度。即便如此,人类对月球的着陆巡视探测区域和采样返回的数量仍然十分有限。

20世纪90年代起,月球探测进入新阶段,我国开启了探月工程,美国提出重返月球计划,欧空局倡议建立“月球村”。为此,中国、美国、日本、印度以及

欧空局等国家或机构,对月球开展了一系列全面、高精度和高空间分辨的遥感探测,获得大量月球的多元数据,不仅深化了对全月球的认识,并为后续月球探测提供了重要的数据支撑。但是,月球环绕探测主要是获取月球表层的信息,且遥感信息对于月球起源、核—幔—壳分异、岩浆演化、太空风化及其影响等重要科学问题的约束较为有限。

月球探测面临的共同科学问题包括:如何突破对现有月球科学的认识?突破口是什么?采取什么样的最佳探测方案?如何在未来月球科学探测的同时,实现对月球平台和原位资源的有效利用?另外,随着月球与深空探测的推进,如何利用月球也逐渐受到重视。

1.2 月球科研站是月球科学的发展机遇与挑战

进入21世纪,月球再次成为世界主要航天国家的探测热点。美国NASA目前重点推进的“深空之门”和“阿耳忒弥斯”任务,将月球南极作为着陆区,并计划在2026年前建造“深空之门”月球轨道空间站,以此为基础实现重返月球、建设月球基地的目标,并将月球作为探索火星等更遥远深空的中转站。俄罗斯也将月球探测计划列为优先发展方向之一,计划实施一系列月球无人探测任务,主要考察月球南极地区。通过实施“月球-25号(Luna 25)”“月球-26号(Luna 26)”“月球-27号(Luna 27)”“月球-28号(Luna 28)”任务以及载人登月,将在月球建立永久性基地。欧空局曾提出建设月球村的计划,以及载人登月货运支援月球着陆器“Heracles计划”。日本在2007年成功发射“月亮女神1号”之后,积极参与NASA的“深空之门”和“阿耳忒弥斯”计划,以及欧空局的“Heracles计划”。印度也开展了月球探测,2008年10月成功发射了“月船1号”,2019年7月发射了“月船2号”(在软着陆过程中出现故障,坠毁在月球表面)，“月船3号”早前计划2021年初发射,但因故推迟。

我国在成功实施嫦娥探月工程“绕、落、回”之后,目前正在开展探月工程四期(“嫦娥六号”“嫦娥七号”和“嫦娥八号”)。同时,根据我国月球探测的长远规划,启动了“国际月球科研站”的论证工作。月球科研站的建设,不仅大大提升我国月球科学的探测能力,也为长期、持续的月球探测提供最重要的工程支撑和平台支撑,从而实现我国在月球科学上的突破。同时,月球科研站还为利用月球这一特殊平台和月表特殊环境开展月基对天、月基对地、月基基础科学实验以及月球资源原位开发利用等提供支

撑,实现月球探测从科学探索到科学与应用并重的重大转变,极大地促进我国月球科学与技术的发展,支撑我国率先实现科技强国的梦想。

“国际月球科研站”是由我国倡导并提出,按照共商、共建、共享的原则,计划在月球轨道/表面建设和运营人类首个标志性共享平台。涵盖的学科领域包括:月球与比较行星学、天文学、空间科学、生命科学、材料科学等。该平台的建设不仅是月球科学的重大挑战,更是月球科学发展的重大机遇,不仅可以获得月球科学的新知识、新发现,还将对今后的月球探测乃至深空探测产生重要而深远的影响。

2 月球科学研究进展

2.1 月球的地形地貌

月球形成和演化过程受到内动力和外动力的共同驱动,其动力过程的作用造就了月球现今的地形地貌与地质构造格局和体系。目前,利用高分辨率的月球探测传感器将可为月球地形地貌演化提供更多的有力证据。主要包括:

(1) 玄武岩时空演化形貌与构造特征研究,确定月表火山活动时限。火山作用的研究是认识了解行星热历史的主要方法^[1, 2]。目前对于月球火山活动的开始与结束时间仍然有多个不同的认识^[3-5]。研究最古老的玄武岩地块与最年轻的火山与岩浆活动产物,可以限定月球火山活动的时限,辅助月球表面地质演化历史研究。

(2) 叶状陡坎综合探测,挖掘月表地质构造内外动力形成机制。叶状陡坎是月球表面内外动力的直接表现,目前共识别出了3200条复合坎^[6, 7],其发育往往以成群成簇的形式出现并形成复合坎,陡坎面朝向常发生与皱脊相似的朝向变换现象^[8]。月球叶状陡坎的分布及其年代学特征研究^[9-11]表明,其可能受热收缩应力^[7]、潮汐力^[8, 12]和离心力^[7]三者叠加形成的非各向同性应力场。对叶状陡坎的研究有助于理解和解释于月球浅层结构的应力状态和月球新构造的形成机制。

(3) 全月熔岩管等浅表层结构探测,揭示月表岩浆转运规律。月面熔岩管记录了月球的火山地质历史、撞击作用和空间风化历史,可能赋存挥发分或水冰,具有巨大的可利用地下空间,其物质组成可揭示月球岩浆活动性质^[13]。月面熔岩管多次被美国宇航局与欧空局列为未来月球基地的首选或优先考虑的区域^[14-16]。确定熔岩管空间分布及其地下结构,有助于理解月球表面火山活动及岩浆喷发、传输

和重铺的内外地质过程,解译月球表面火山活动历史研究,并为未来熔岩管原位探测与利用奠定基础。

2.2 月球的内部结构

月球内部圈层结构的形成与岩浆洋演化、密度分异、物质反转和磁场演化等重要过程均密切相关,探测月球内部的圈层结构对于深入理解月球的演化过程具有重要意义。举世瞩目的阿波罗计划从第一次任务起,每次登月都安装了月震仪,由四台月震仪形成了上千公里间距的月面台阵^[17],并且持续工作了近8年,记录到了上万次月震和陨石撞击等事件,这些珍贵的记录是我们研究月球内部结构和月震的关键资料。然而,由于当时的仪器性能太低,本底噪音很大而且动态范围很小,因此没有检测到可靠的来自月球深部微弱的关键反射震相。到目前为止,月球内部的圈层结构仍是未解之谜,尚未形成广泛的科学共识。由于数据质量的原因,不同学者获得的月壳厚度和月核半径千差万别,存在严重的学术争议,制约了月球科学的进步^[18]。

由于受到软着陆、仪器性能及长期驻留等方面的限制,行星内部结构探测一直是行星探测的短板,最新的“洞察号”在2019年着陆火星,这意味着行星内部结构探测的新时代刚刚来临,也是阿波罗任务50年后人类第一次在地外天体成功布设高性能地震仪。由此可见,月震仪布设的发展潜力大,重大成果可期,将开启行星科学探测的新局面。2021年,“嫦娥七号”月震仪立项^[19],将与月球科研站拟布设的月震仪联合测量,成为首个高精度月震台网,有望取得关于月球内部结构和月震规律方面的新认识,实现阿波罗时期由于仪器性能限制无法完成的探测任务。

2.3 月球的水和挥发分

月球水和挥发分的分布和来源是月球科学研究的重大问题之一,是理解月球形成和演化的关键。其含量与月球起源、岩浆洋演化、后期物质加入等科学问题直接相关^[20-22],包括大碰撞和岩浆洋固化之后月球自身存在的水和挥发分的含量和同位素组成、岩浆洋阶段和火山喷发过程发生的去气作用及其产生的同位素分馏、小天体撞击对月球的贡献、月壤深度剖面上水和挥发分的分布和影响因素,以及月球永久阴影区水冰的存在与否、含量和来源等。此外,水是未来月球开发利用的重要资源,月球两极永久阴影区中的水、冰是未来月球开发和利用的关键资源。已有的样品分析已明确证实了月球内部含水,但是水的分布并不均一,局部水含量甚至和地球

上地幔相似^[23, 24]。此外,月球斜长岩中水的测量证实月球岩浆洋含水,也就是月球形成时就已含水^[25, 26]。然而目前月球中水和挥发分的研究仍有一系列尚需解决的问题,包括大撞击形成过程和岩浆洋过程对月球的水和挥发分的影响、壳幔分异和后期演化对月球内部水和挥发分不均一性的影响、月球中水和挥发分的主要来源等重要科学问题等等。

通过月球探测任务查清水和挥发性组分在浅层月壤中的含量和分布及其同位素组成,可评估其水资源储量,揭示水和挥发分的赋存状态,理解太阳风注入月壤水的循环过程和机制,进而可获得月球内部自身水和挥发分的含量和随时空演化的特征。

2.4 月球的物质组成

阿波罗计划返回的样品和月球陨石样品构建了月球物质组成的基本框架,“嫦娥五号”样品为月球物质组成和火山活动的时间和性质等提供了新的认识^[27-29]。基于月球样品研究提出的月球岩浆洋假说是目前最广为接受的关于月壳和月幔组成和分异结晶过程的理论体系^[30-33]。但受限于阿波罗计划的采样区域和样品类型不全,早期对月球关键科学问题的认识不足,基于月球物质科学的很多重大科学问题尚没有解决^[34, 35]。因此,寻找能够代表月球岩浆洋阶段分异结晶形成的堆晶岩、克里普岩、古老玄武岩、最年轻玄武岩、火山碎屑岩和其他深部来源岩石样品,是解决月球起源和壳幔分异亟待突破的技术瓶颈。

在撞击体特征、撞击过程及物质重新分配研究方面,获取岩浆洋未经分异的原始样品和最古老样品是验证月球经历过大碰撞与岩浆洋事件的最直接证据^[31, 36, 37]。在月球深部的物质组成研究方面,月壳和月幔的物质组成以及它们在空间分布上的不均一性,是岩浆洋理论和月幔倒转模型最直接的证据^[38, 39]。在月球成分二分结构及其形成机制研究方面,对二分结构在深部的延伸情况不清楚,对其他矿物岩石地球化学特征的二分性和形成机制也不了解^[40-42],集合研究不同地体的月壳和月幔深成岩,从岩石学和地球化学等综合对比上述三大地体及其岩石样品,厘清二分结构的空间和成分特征。在限定大撞击和月壳固结的时间研究方面,月球岩浆洋冷却结晶的热模拟模型和月球样品获得的岩浆洋结晶和月球形成年龄仍有很大的不确定性^[43-45],需要对更多的原始月壳样品进行热历史研究和高精度定年。

月球火山活动是揭示深部物质组成的探针,形

成的火山岩是揭示月球热演化的样本^[46-48]。目前已经发现了多种地球化学类型的玄武岩^[49-51],但它们的形成时间跨度很大^[3, 5, 52],空间分布不均匀,一些特殊火山地貌的形成仍没有得到很好的解释^[53]。“嫦娥五号”采集的年轻玄武岩的形成机制尚不清楚^[29, 54]。

2.5 月球磁场

月球磁场是由其内部液态金属流体形成的磁场发电机产生的。磁场发电机的启停过程在一定程度上能够反映月球内部圈层结构和状态,是探索月球演化历史的一个重要窗口。月球表面不同年龄的岩石剩磁记录了其形成时磁场发电机的运行状态。因此,月球表面的磁场探测对研究磁场发电机过程以及月球演化历史具有重要的科学意义^[55]。

从1959年的“Luna 2号”卫星到2019年的SpaceIL月球着陆器,大部分探测器都搭载了测量月球磁场的磁强计,它们的磁场观测数据和月球岩石样品的剩磁表明在42亿年前可能存在液态金属核和磁场发电机。然而,受制于早期磁强计的精度以及岩石样品所覆盖的年龄,并不能给出月球磁场发电机完整的演化历史。尤其在15亿年到30亿年之间缺乏磁场观测记录,这段时间磁场发电机是否经历了从热对流向成分对流的演化过程仍然是悬而未决的科学问题之一^[56]。“嫦娥七号”月球车拟着陆在岩石覆盖年龄范围较广的南极沙克尔顿坑附近,对其剩磁的探测和研究将有助于完善月球磁场发电机的演化历史。

月球轨道卫星不仅能够获取卫星高度月球磁异常精细结构,还能够研究月表磁场微磁层的三维结构。已有的研究表明月球微磁层控制着太阳风与月表的相互作用,对漩涡结构等典型月貌地质特征的形成起重要作用^[57]。由于目前还缺少磁异常区的内部探测,微磁层的三维结构及其形成原因还有待进一步研究,“嫦娥七号”月球表面磁场探测仪将为研究月球南极沙克尔顿坑附近微磁层三维结构及其和太阳风的相互作用提供重要的数据支撑。

“嫦娥七号”月球表面磁场探测仪的设计寿命为8年,结合月球轨道磁强计,能够与月球科研站拟布设的磁强计联合探测,这将是首个月球空间一表面多点同时观测,有望对月球磁场发电机的演化历史、月球微磁层的形成机制以及月球内部电导率结构反演等方面取得新认识。

2.6 日—地—月空间环境

日—地—月空间作为天然空间物理(空间等离子体)实验室,是研究等离子体与类月星体(无大气

且无全球磁场)相互作用的重要平台。随着各国月球探测计划的推进,日一地一月空间环境逐渐成为国际研究热点,其中不仅包括常规监测月球空间天气(地球风、太阳风、带电粒子和高能粒子辐射与波动环境、中子环境、外逸层和月尘环境等),保障人类探月登月的空间环境安全;也包括空间中的粒子与月表相互作用过程中(太阳风、地球风与月球相互作用,月球表面水,月球尾迹和“迷你”磁层,尘埃环境/月面电场),发现新的物理现象与机制,探寻太阳系中不同天体空间物质循环过程与辐射环境的差异及其产生原因,从而拓展我们对地球和行星宜居性的认识。

日一地一月空间中充满着具有辐射危害的高能粒子,由于月球无全球磁场无大气,这些高能粒子与月表物质直接相互作用可产生大量的次级粒子,这些粒子对于探月和登月的航天员和设备等都可能产生不可逆的损害^[58];其次,宇宙线、太阳风、地球风及微流星体轰击月表会使月表带电,造成月尘的静电悬浮和输运,这些漂浮的月尘也会对航天员和设备等带来诸多危害^[59];因此,对近月表带电粒子和高能粒子辐射与波动环境、尘埃环境/月面电场的研究以及月表辐射环境受何种因素影响依然是日地月空间环境的重要研究方向。

虽然月球没有全球性磁场,但是存在广泛的磁异常区,是可以阻碍太阳风轰击月表的天然屏障——形成“迷你”磁层,导致月表形成神秘的月球漩涡,其二者的形成条件及物理机制仍是日一地一月空间的研究热点。此外,太阳风、地球风与月表相互作用在日侧可产生水和羟基^[60, 61]、赤铁矿^[62]、中性原子^[63]、月源粒子^[64]等物质;在夜侧形成仅具有磁场的等离子体空腔,称为月球尾迹^[65]。太阳风和地球风在成分、能量及数量上都有很大不同,太阳风中主要包含氢离子;地球风中不仅包含氢离子,还有氧离子且在磁暴期间大幅增加^[66-70]。其中,氢离子和月壤中的含氧矿物相互作用产生的水对载人登月和建立月球基地意义重大,是日地月空间环境的研究重点。地球风中的氢、氧等可传输并保存在月表^[71],可能记录了地球大气和磁场演化信息^[72, 73]。我们已经初步了解了地球风对月球水的作用^[60],而太阳风和地球风对月球水的相对贡献,地球风对月表氧化过程、地球演化、尾迹如何影响太阳风和地球风与月表相互作用以及如何通过月表辐射产生的中子能谱反演月表物质(包括水)信息等问题目前有待研究。目前,太阳风、地球风与月表相互作用,月球

表面水等方向,由于涉及多学科交叉研究正处于起步阶段,有待于深入研究。

2.7 月基天文观测与研究

天文学研究内容广泛,研究手段丰富,不仅有传统的全电磁波观测手段,还有未来可期的引力波、中微子等途径。同时,天文学虽然是个小学科,但却存在诸多悬而未决的大科学,例如 *Science* 杂志在创刊125周年时列出的125个科学难题中,直接的天文学难题就多达11个。基于月球科研站要开展的重点研究内容包括:

(1) 研究恒星形成和活动规律。恒星形成率是表征星系演化的主要探针,而星系演化是揭示宇宙和天体形成、演化两大起源问题的桥梁;恒星活动性及其变化影响着其行星系统形成和演化全过程,也是寻找生命可能的起源地——系外宜居行星必须研究的内容;近邻宇宙的高能暂现源为天体演化理论提供独特限制。超宽谱段覆盖的多波段详查结合超大视场快速巡天是研究以上问题的利器,而月基使这成为可能。

(2) 构建宇宙演化的完整图像。在宇宙大爆炸结束之后,第一代恒星和星系形成之前,宇宙处于黑暗时代,氢原子产生的21 cm辐射是这一时期几乎唯一可用的观测探针,这一辐射今天红移到了超长波波段。通过超长波观测,可以了解宇宙黑暗时代和黎明时代的演化历史。利用月基的优异条件,建立一定规模的超长波射电阵列,从而实现中性氢成像观测,可以探测到大量原始的、未被后续演化所破坏的原初扰动,还原极早期宇宙的历史,解开宇宙起源之谜。

(3) 监测月球精细的空间运动变化。月球科研站为月球自身作为观测目标的整体天文观测,提供了直接且优越的场景,可以构建更完备的测量网,精密测量月球轨道运动变化、自转的空间摆动,将揭示月球内部特别是核心区域的构造演化特征和起源。同时,月球科研站是直接连接国际天球参考架(International Celestial Reference Frame, ICRF)、行星历表和地球卫星三类不同天球参考架的唯一选择。

2.8 月基对地宏观观测与研究

研究发生在地球系统上的大尺度地球宏观科学现象,分析其空间相关性是地球科学的前沿课题。地球各个圈层相互作用研究,需要在全局尺度上实现长期、一致的综合观测^[74, 75]。虽然基于星载—机载—地面观测平台可观测大气、陆地和海洋变化,但是难以实现全球尺度上的时间一致性和空间连续

性。地球宏观科学现象的各个方面在复杂的地球系统中具有紧密联系,需要星球尺度多传感器的空间信息观测能力。月球独一无二的位置和月表特殊环境为全球尺度地球观测提供了独特的超大平台空间,可以形成稳定构型并具有观测范围大、平台寿命长、长期观测的优势^[74, 76, 77]。基于月球科研站布设多波段、多极化、主被动仪器对地球进行观测,可以实现对几乎整个地一月空间和地球近月面的不间断监测,获得地表、次地表、多圈层立体探测信息。

月球科研站多传感器的宏观对地观测潜力将为行星地球尺度多圈层综合研究提供空前的保障,实现从地球系统动力学的角度对全球多圈层相互耦合的一系列关键的科学问题给出全新的解答,特别是全球能量平衡、固体地球动态变化等现象^[74]。

以地球宏观科学现象为观测对象,未来月球科研站对地观测系统具有独特优势,将可获取星载对地观测技术难以得到的地球科学信息,开辟全新的对地观测科学与技术发展方向,也是实现地球系统科学研究重大突破的需求。

2.9 月基生命科学研究

载人航天未来的发展趋势是载人月球探测、建立月球基地,远期目标是实现人类到达火星。月球是人类空间探测的首站,为保障人员在月面驻留期间的生存和健康,需先期开展月面生命科学研究,为人类驻月提供科学基础。因此,月面生命科学是月球科学的一个非常重要的研究内容。

生物再生生命保障系统(Bioregenerative Life Support System, BLSS)是基于陆生生态系统原理的人工生态系统,可再生氧气、水和食物,是月面长期驻留所必需。然而,月面的低重力、低磁场和长时间低剂量辐射的环境条件与地面差异很大,对各生物单元及其互作的影响不明,这关系到月面 BLSS 的实现。植物是 BLSS 的核心生物单元^[78],是 BLSS 稳定发挥生保功能的关键。近地轨道空间研究和地面模拟研究已证实微重力、辐射、人工大气/光照都会影响植物细胞结构、光合生理和物质代谢^[79]。因此,地外环境对植物属于逆境,必须开展月面实验揭示植物对月面环境的响应规律,为月面 BLSS 的构建提供重要理论基础。

在 BLSS 中植物不可能长期无菌,只能与微生物共存。要保证月面环境植物健康,需要阐明植物与其共生微生物的相互作用。植物为微生物提供碳源,也可分泌模拟微生物所产生的自诱导剂信号以调节微生物行为^[80]。植物根际稳定的微生物群落

结构可以增强宿主抗逆抗病能力^[81]。空间环境中的植物对根际真菌病害的敏感性增加^[82]。中国“月宫一号”团队发现模拟微重力下生防菌 *P. kiredjianiae* A4 对小麦根腐病菌 *F. graminearum* 的抗性减弱^[83],以及小麦的内生微生物组发生显著改变,与植物抗逆密切相关的细菌物种在根内明显减少^[84]。因此,月面环境对植物与根际微生物的互作稳态影响重大,影响植物健康,而月面植物—微生物相互作用研究目前还是空白。

月面 BLSS 中植物的高效生产必须充分利用原位月壤资源以减少地面的栽培基质运输。模拟月壤具有生物可利用性改良潜力^[85]，“月宫一号”团队也初步探明了模拟月壤生物改良的机理,但仍然缺少真实月壤的机理实验。月壤生物可利用性和月壤可种植性改良的生物改良过程的阐明将为月壤的原位利用提供理论基础。

BLSS 是陆生生态系统的微缩模型,但目前为止,生态系统的空间效应研究都是针对单一种类的植物/动物的空间搭载研究^[86],二元或多元生物链环的陆生生态系统的空间研究尚未开展。月球生物实验仅开展过单一种类的植物/动物搭载^[87],而月面生态系统搭载实验尚无人提出。因此,月面 BLSS 的物质循环/能量流动的规律和各部件的月面生物学效应均尚不清晰。

2.10 月球资源利用

月球科研站的建设和运转,人类月面生存和生活的保障,月面科学实验和深空探测等都需要强大的资源、能源和物质保障。按照目前的研究结果,有两种解决途径,一是从地面携带,二是月面的原位利用。按照目前的技术水平,地一月之间每公斤的运输成本约在 50 000~90 000 美元之间,通过飞船往返地一月来运送物质支持人类在月面活动耗费巨大、效率较低、可行性较低^[88]。根据目前的探测结果,月球上富含多种类型的资源、能源及基础建设材料^[89, 90],通过原位资源利用技术,可以提供宇航员在月球上所需的生命支持物质、从月球返回以及走向深空的推进剂、辐射防护材料、生产金属和陶瓷作为月球基地建设的必需材料和太阳能电池板的支架等^[91],降低地月之间运输的运输量和运输成本,提高月球科考站的自我维持能力和航天员的月面生存时间。因此,如果可以在月面实现原位综合利用,那将为人类的月面活动提供强有力的支撑。

未来要建设短期有人值守,长期无人智慧运行的月球基地,可以进行月面建筑、运输、采矿、材料加

工和各项科学研究,适合航天员的中长期月面生存,成为人类共有的科学实验室,开展深空探测的试验基地和物资转运站,载人登陆火星和太阳系其他天体的前哨阵地^[92]。

3 未来5~10年月球科研站的发展目标及资助重点

3.1 发展目标

月球探测推动了月球科学、比较行星学、太阳系起源与演化学、天文学及空间科学技术的快速发展。通过月球探测,不仅可以了解月球本身,还可以认识地球的起源及早期的演化历史,揭示太阳系小行星撞击历史和太阳辐射历史。但目前仍然有很多月球的关键科学问题需要进一步了解。因此,在未来5~10年,需针对国际月球科研站的重大科学问题,围绕月球科学、日一地一月空间环境、月基观测与研究、生命保障和资源利用几个方面,深入开展科学与应用研究,推动空间科学、空间技术与空间应用的全面发展。

3.2 资助重点

本次双清论坛与会专家经过深入研讨,凝练了依托月球科研站可解决的关键科学问题,并建议未来5~10年基于月球科研站重点发展的月球科学、月基观测、月基科学实验和原位资源利用等领域共15个研究方向。

3.2.1 月球科学领域

(1) 玄武岩时空演化与月表形貌和构造特征:月球表面最古老玄武岩地块与最年轻火山活动的表面空间分布、发育规模等形态信息;月球表面叶状陡坎形成机制;月表玄武岩的喷发规模、覆盖范围、物质含量等时空演化规律。

(2) 月球熔岩管及其岩浆源区探测:熔岩流厚度、全月熔岩管分布、发育规模、埋藏深度以及出露天窗口;月球表面火山活动的岩浆源头、发育机理与表面喷发输送机制;月球火山活动内外地质过程。

(3) 月震波模拟与单台站信息反演:月震仪的数量有限,需要提前研制相关的处理方法,以提升数据挖掘能力;同时,三维数值模拟对于验证模型和识别关键震相至关重要。建议重点发展月震波数值模拟方法研究、月震信号增强、智能识别和成像方法研究等方向。

(4) 月球磁场模型及内部电导率结构:月球高分辨率磁场模型是研究月球磁场发电机的演化历史的重要手段;基于月表和绕月磁测数据反演月球内

部电导率结构对于认识月球内部结构有重要意义。建议重点发展月球高分辨率磁场建模及月球内部电导率结构反演方法等方向。

(5) 月球深度物质组成与热演化历史:最古老和最年轻火山岩及其形成机制;克里普岩及其对岩浆洋的制约;深部物质剖面的揭示和月幔的不均一性;月球火山动力学与火山岩浆活动的时空关系研究。

(6) 月球水和挥发分的分布与来源:月表物质的宇宙射线成因稀有气体的暴露年龄;太阳风粒子注入挥发分及其演化历史;不同挥发分在岩浆去气和撞击去气过程中的效应;月幔中水等挥发分的含量与来源以及月球内部水和挥发分的时空演化;月球永久阴影区水的储量和来源。

(7) 太阳风/地球风的组成及其演化:研究太阳风、地球风粒子在地月空间的输运过程;太阳风、地球风对月球水的产生、迁移、沉积及损失等物理过程的影响;不同能量段氢离子对水的产率的影响,以及太阳风和地球风对月球水的相对贡献;地球风对月表的空间风化作用;太阳风,地球风,陨石轰击月壤产生的中性原子对月球外逸层的相对贡献。

(8) 月表空间环境及其演化:研究月球尾迹的形成机制和三维结构等,包括不同太阳风和磁层条件下月球尾迹的结构;尾迹对行星际扰动的响应以及月球尾迹的不对称性和三维结构;“迷你”磁层的形成条件及内部结构特征;“迷你”磁层和月球漩涡的可能关联;月表空间波动的时空分布与变化特性及其形成机制。

3.2.2 月基观测领域

(1) 太阳剧烈活动现象的长期监测和机理:太阳活动日地空间传播的监测手段和预报;灾害性空间天气从太阳源头到月、地系统响应的全因果链监测预报机制。

(2) 月球表面低频射电小型阵列关键技术:月面干涉观测,监测太阳爆发和行星射电信号。

(3) 月基紫外超大视场全天域巡天:紫外天文小望远镜阵列技术研究,完成阵列技术模块化单元研制。

(4) 月基对地宏观观测研究:远距离作用以及大尺度观测条件下多圈层、多波段同步半球立体观测地球宏观科学现象的月基观测机理、模型;月基对地观测传感器优化设计与观测方法;月基对地观测系统平台环境及月基对地观测基地选址。

3.2.3 月面实验与原位资源利用

(1) 月球关键资源勘查规范的研究和制定:通

过资源利用全链条工艺及其成本的对比研究,提出月球钛铁矿、稀土等关键资源的勘查规范。

(2) 月面氧气制备及基建的关键技术:开展不同制氧方案的关键技术研究,制定出适宜于月面制氧的工艺;针对不同的月壤材料开展月面基建方案的筛选,并针对相应流程中涉及的在超高真空、低重力、无磁环境中的基础物理和化学问题开展研究。

(3) 生物再生生命保障系统:植物对月面环境的感知和响应;月面环境下植物和与微生物相互作用;月壤的生物可利用性及生物改良月壤方法和机制;以月壤植物栽培为核心的陆生生态系统的构建方法。

(4) 空间环境下航天员多系统功能的失衡及对抗:空间微/低/超重力、亚磁、辐射等特殊环境因素影响肌骨、心血管、免疫以及自主神经功能的机制,器官系统之间相互作用的整合,有效的整体防护方法和措施。

4 结 语

我国的月球探测虽然起步较晚,但起点高,技术进步很快,部分领域已迈入世界先进行列。目前我国探月工程四期(“嫦娥6号”“嫦娥7号”和“嫦娥8号”)已立项,并且正在全力推动国际月球科研站的论证工作,将联合多国在月球轨道、月球表面,建设并运营人类首个标志性共享平台。通过这些任务的实施,将进一步提高我国月球与深空探测的工程技术能力、全月面科学探测能力、以及月球和行星科学的自主创新能力。

针对月球科研站建设的关键科学问题,提出了未来5~10年月球科学与应用问题的发展目标及资助重点。今后需进一步对月球科研站的总体科学目标进行进一步凝练,更加突出原始创新和前瞻引领,立足月球重大科学问题 and 应用需求,在技术和经济可行性的约束条件下有针对性地明确基于国际月球科研站的阶段性科学目标和探索任务,为我国后续的月球探测任务提供重要参考。

致谢 感谢参加双清论坛的全体专家及相关领域科学家。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京:中国宇航出版社, 2005.
- [2] 林扬挺. 月球形成和演化的关键科学问题. 地球化学, 2010, 39(1): 1—10.
- [3] Terada K, Anand M, Sokol AK, et al. Cryptomare magmatism 4. 35? Gyr ago recorded in lunar meteorite Kalahari 009. *Nature*, 2007, 450(7171): 849—852.
- [4] Whitten JL, Head JW. Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism. *Icarus*, 2015, 247: 150—171.
- [5] Hiesinger, H., Head, J. W., Wolf, U., Jaumann, R., and Neukum, G., Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis. *Geological Society of America Special Papers*, 2011, 477: 1—51.
- [6] Watters TR, Robinson MS, Banks ME, et al. Recent extensional tectonics on the moon revealed by the lunar reconnaissance orbiter camera. *Nature Geoscience*, 2012, 5(3): 181—185.
- [7] Watters TR, Robinson MS, Collins GC, et al. Global thrust faulting on the Moon and the influence of tidal stresses. *Geology*, 2015, 43(10): 851—854.
- [8] Banks ME, Watters TR, Robinson MS, et al. Morphometric analysis of small-scale lobate scarps on the Moon using data from the Lunar Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, doi: 10.1029/2011je003907.
- [9] Clark JD. Characterization of thrust faults on the moon using fault dynamics and three-dimensional visualizations. The University of Texas at El Paso, EL Paso: 2012
- [10] van der Bogert CH, Clark JD, Hiesinger H, et al. How old are lunar lobate scarps? 1. Seismic resetting of crater size-frequency distributions. *Icarus*, 2018, 306: 225—242.
- [11] Senthil Kumar P, Sruthi U, Krishna N, et al. Recent shallow moonquake and impact-triggered boulder Falls on the Moon: new insights from the Schr? dinger Basin. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(2): 147—179.
- [12] Watters TR, Robinson MS, Beyer RA, et al. Evidence of recent thrust faulting on the moon revealed by the lunar reconnaissance orbiter camera. *Science*, 2010, 329(5994): 936—940.
- [13] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(11): 87—100.
- [14] Halliday WR. Terrestrial pseudokarst and the lunar topography. *Bulletin of the National Speleological Society*, 1966, 28(4): 167—170.
- [15] Haruyama J, Sawai S, Mizuno T, et al. Exploration of lunar holes, possible skylights of underlying lava tubes, by smart lander for investigating moon (SLIM). *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2012, 10(ists28): Pk_7—Pk_10.
- [16] Hurwitz DM, Head JW, Hiesinger H. Lunar sinuous rilles: Distribution, characteristics, and implications for their origin. *Planetary and Space Science*, 2013, 79/80: 1—38.

- [17] Nunn C, Garcia RF, Nakamura Y, et al. Lunar seismology: a data and instrumentation review. *Space Science Reviews*, 2020, 216(5): 1—39.
- [18] Garcia RF, Khan A, Drilleau M, et al. Lunar seismology: an update on interior structure models. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 1—47.
- [19] 张翔, 张金海. 月震研究进展与展望. *地球与行星物理论评*, 2021, 52(4): 391—401.
- [20] Pahlevan K, Karato SI, Fegley B. Speciation and dissolution of hydrogen in the proto-lunar disk. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 104—113.
- [21] Barnes JJ, Kring DA, Tartèse R, et al. An asteroidal origin for water in the Moon. *Nature Communications*, 2016, 7: 11684.
- [22] Charlier B, Grove TL, Namur O, et al. Crystallization of the lunar *Magma ocean* and the primordial mantle-crust differentiation of the Moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 234: 50—69.
- [23] Saal AE, Hauri EH, Cascio ML, et al. Volatile content of lunar volcanic glasses and the presence of water in the Moon's interior. *Nature*, 2008, 454(7201): 192—195.
- [24] Hauri EH, Weinreich T, Saal AE, et al. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions. *Science*, 2011, 333(6039): 213—215.
- [25] Hui HJ, Peslier AH, Zhang YX, et al. Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 177—180.
- [26] Hui HJ, Guan YB, Chen Y, et al. A heterogeneous lunar interior for hydrogen isotopes as revealed by the lunar Highlands samples. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 473: 14—23.
- [27] Che XC, Nemchin A, Liu DY, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374 (6569): 887—890.
- [28] Li QL, Zhou Q, Liu Y, et al. Two-billion-year-old volcanism on the moon from chang'e-5 basalts. *Nature*, 2021, 600(7887): 54—58.
- [29] Tian HC, Wang H, Chen Y, et al. Non-KREEP origin for Chang'e-5 basalts in the procellarum KREEP terrane. *Nature*, 2021, 600(7887): 59—63.
- [30] Rapp JF, Draper DS. Fractional crystallization of the lunar magma ocean: Updating the dominant paradigm. *Meteoritics & Planetary Science*, 2018, 53(7): 1432—1455.
- [31] Elardo SM, Draper DS, Shearer CK Jr. Lunar *Magma Ocean* crystallization revisited: bulk composition, early cumulate mineralogy, and the source regions of the Highlands Mg-suite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(11): 3024—3045.
- [32] Elkins-Tanton LT, Burgess S, Yin QZ. The lunar *Magma ocean*: Reconciling the solidification process with lunar petrology and geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 326—336.
- [33] Warren PH. Lunar anorthosites and the magma-ocean plagioclase-flotation hypothesis; importance of FeO enrichment in the parent magma. *American Mineralogist*, 1990, 75(1): 46—58.
- [34] Taylor SR. Lunar science: an overview. *Journal of Earth System Science*, 2005, 114(6): 587—591.
- [35] Taylor SR, Taylor GJ, Taylor LA. The moon: a Taylor perspective. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70 (24): 5904—5918.
- [36] Longhi J, and Boudreau AE. Complex igneous processes and the formation of the primitive lunar crustal rocks// *Proceedings Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1979, 10: 2085—2105.
- [37] Walker D, Grove TL, Longhi J, et al. Origin of lunar feldspathic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 20(3): 325—336.
- [38] Dygert N, Hirth G, Liang Y. A flow law for ilmenite in dislocation creep; implications for lunar cumulate mantle overturn. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (2): 532—540.
- [39] Elkins Tanton LT, van Orman JA, Hager BH, et al. Re-examination of the lunar *Magma ocean* cumulate overturn hypothesis; melting or mixing is required. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(3/4): 239—249.
- [40] Miljković K, Wiczorek MA, Collins GS, et al. Asymmetric distribution of lunar impact basins caused by variations in target properties. *Science*, 2013, 342(6159): 724—726.
- [41] Parmentier EM, Zhong S, Zuber MT. Gravitational differentiation due to initial chemical stratification; origin of lunar asymmetry by the creep of dense KREEP? *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(3/4): 473—480.
- [42] Zhong SJ, Parmentier EM, Zuber MT. A dynamic origin for the global asymmetry of lunar mare basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 177(3/4): 131—140.
- [43] Borg LE, Cassata WS, Wimpenny J, et al. The formation and evolution of the Moon's crust inferred from the Sm-Nd isotopic systematics of Highlands rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 290: 312—332.
- [44] Nemchin A, Timms N, Pidgeon R, et al. Timing of crystallization of the lunar *Magma ocean* constrained by the oldest zircon. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 133—136.
- [45] Snape JF, Nemchin AA, Bellucci JJ, et al. Lunar basalt chronology, mantle differentiation and implications for determining the age of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 451: 149—158.
- [46] Shearer CK, Papike JJ. Magmatic evolution of the moon. *American Mineralogist*, 1999, 84(10): 1469—1494.
- [47] Shearer CK, Hess PC, Wiczorek MA, et al. Thermal and magmatic evolution of the Moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 365—518.
- [48] Snyder GA, Taylor LA, Neal CR. A chemical model for generating the sources of mare basalts: combined equilibrium and fractional crystallization of the lunar magmasphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56 (10): 3809—3823.

- [49] Neal CR, Taylor LA. Petrogenesis of mare basalts: A record of lunar volcanism; *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(6): 2177—2211.
- [50] Papike JJ, Ryder G, Shearer CK. Lunar samples. *Planetary Materials*, 1998, doi: 10.1007/s002690050100.
- [51] Taylor GJ, Warren P, Ryder G, et al. Lunar rocks// Heiken GH, Vaniman DT, French BV, et al, eds. *Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, 183—284.
- [52] Tartèse R, Anand M, Gattacceca J, et al. Constraining the evolutionary history of the moon and the inner solar system: a case for new returned lunar samples. *Space Science Reviews*, 2019, 215(8): 1—50.
- [53] Head JW, Wilson L. Generation, ascent and eruption of *Magma* on the Moon: new insights into source depths, *Magma* supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: predicted emplacement processes and observations). *Icarus*, 2017, 283: 176—223.
- [54] Hu S, He HC, Ji JL, et al. A dry lunar mantle reservoir for young mare basalts of Chang' e-5. *Nature*, 2021, 600(7887): 49—53.
- [55] Mighani S, Wang H, Shuster DL, et al. The end of the lunar dynamo. *Science Advances*, 2020, 6(1): eaax0883.
- [56] Weiss BP, Tikoo SM. The lunar dynamo. *Science*, 2014, 346(6214): 1198—1209.
- [57] Hemingway DJ, Tikoo SM. Lunar swirl morphology constrains the geometry, magnetization, and origins of lunar magnetic anomalies. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(8): 2223—2241.
- [58] Dobynde MI, Guo J. Radiation Environment at the Surface and Subsurface of the Moon: Model Development and Validation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(11): e2021JE006930.
- [59] Xie L, Zhang X, Li L, et al. Lunar dust fountain observed near twilight craters. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(23): e2020GL089593.
- [60] Wang HZ, Zhang J, Shi QQ, et al. Earth wind as a possible exogenous source of lunar surface hydration. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 907(2): L32.
- [61] Li S, Milliken RE. Water on the surface of the Moon as seen by the Moon Mineralogy Mapper: Distribution, abundance, and origins. *Science Advances*, 2017, 3(9): e1701471.
- [62] Li S, Lucey PG, Fraeman AA, et al. Widespread hematite at high latitudes of the moon. *Science Advances*, 2020, 6(36): eaba1940.
- [63] Wieser M, Barabash S, Futaana Y, et al. Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(14/15): 2132—2134.
- [64] Yokota S, Saito Y, Asamura K, et al. First direct detection of ions originating from the Moon by MAP-PACE IMA onboard *SELENE* (KAGUYA). *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(11): L11201.
- [65] Lyon EF, Bridge HS, Binsack JH. Explorer 35 plasma measurements in the vicinity of the Moon. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1967, 72(23): 6113—6117.
- [66] Fu SY, Wilken B, Zong QG, et al. Ion composition variations in the inner magnetosphere: individual and collective storm effects in 1991. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A12): 29683—29704.
- [67] Zong QG, Wilken B, Reeves GD, et al. Geotail observations of energetic ion species and magnetic field in plasmoid-like structures in the course of an isolated substorm event. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, 102(A6): 11409—11428.
- [68] Zong QG, Wilken B, Woch J, et al. Energetic oxygen ion bursts in the distant magnetotail as a product of intense substorms: three case studies. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, 103(A9): 20339—20363.
- [69] Yue C, Bortnik J, Li W, et al. The composition of plasma inside geostationary orbit based on van Allen probes observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(8): 6478—6493.
- [70] Yue C, Bortnik J, Li W, et al. Oxygen ion dynamics in the earth's ring current: van Allen probes observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, 124(10): 7786—7798.
- [71] Ozima M, Yin QZ, Podosek FA, et al. Toward understanding early Earth evolution: prescription for approach from terrestrial noble gas and light element records in lunar soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(46): 17654—17658.
- [72] Wei Y, Zhong J, Hui H, et al. Implantation of Earth's atmospheric ions into the nearside and farside lunar soil: Implications to geodynamo evolution. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3): e2019GL086208.
- [73] Wei Y, Pu ZY, Zong QG, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: implications to mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 394: 94—98.
- [74] Guo H, Liu G, Ding Y, et al. Conceptual research of lunar-based earth observation for global environmental change// 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012, 39: 684.
- [75] Ren YZ, Guo HD, Liu G, et al. Simulation of moon-based observation for large-scale Earth science phenomena. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, IEEE, : 6253—6256.
- [76] Guo HD. Space-based observation for sensitive factors of global change. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2009, 23(4): 226—228.
- [77] Liu G, Guo HD, Hanssen RF. Characteristics analysis of moon-based earth observation under the ellipsoid model. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(23): 9121—9139.

- [78] Fu YM, Liu H, Shao LZ, et al. A high-performance ground-based prototype of horn-type sequential vegetable production facility for life support system in space. *Advances in Space Research*, 2013, 52(1): 97—104.
- [79] Zabel P, Bamsey M, Schubert D, et al. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sciences in Space Research*, 2016, 10: 1—16.
- [80] Hartmann A, Schmid M, van Tuinen D, et al. Plant-driven selection of microbes. *Plant and Soil*, 2009, 321 (1/2): 235—257.
- [81] Hacquard S, Spaepen S, Garrido-Oter R, et al. Interplay between innate immunity and the plant microbiota. *Annual Review of Phytopathology*, 2017, 55: 565—589.
- [82] Foster JS, Wheeler RM, Pamphile R. Host-microbe interactions in microgravity: assessment and implications. *Life (Basel, Switzerland)*, 2014, 4(2): 250—266.
- [83] Fu YM, Gao H, Li HY, et al. Change of growth promotion and disease resistant of wheat seedling by application of biocontrol bacterium *Pseudochrobactrum kiredjianiae* A4 under simulated microgravity. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 222—227.
- [84] Qin YC, Fu YM, Chen HW, et al. Microgravity effect on endophytic bacteria communities of *Triticum aestivum*. *Acta Astronautica*, 2018, 143: 297—301.
- [85] Ming DW, Henninger DL. Use of lunar regolith as a substrate for plant growth. *Advances in Space Research*, 1994, 14(11): 435—443.
- [86] Morrow R, Wetzel J, Richter R, et al. Evolution of space based plant growth technologies for hybrid life support systems//47th International Conference on Environmental Systems. Charleston, 2017.
- [87] Vaulina EN, Anikeeva ID, Gubareva IG, et al. Survival and mutability of *Chlorella* aboard the Zond vehicles. *Life Sciences and Space Research*, 1971, 9: 105—110.
- [88] Duke MB. Development of the moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 597—655.
- [89] Crawford IA. Lunar resources. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2015, 39 (2): 137—167.
- [90] Impresario G, Parrella RML, Colucci A, et al. Prospect commercial routes in the earth - moon system's service volume. *New Space*, 2020, 8(4): 220—233.
- [91] Ellery A. Leveraging in situ resources for lunar base construction. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2022, 49(5): 657—674.
- [92] Khartov VV, Zelenyi LM, Dolgoplov VP, et al. New Russian lunar unmanned space complexes. *Solar System Research*, 2011, 45(7): 690—696.

Key Scientific Questions Related to the Lunar Research Station

Chi Wang^{1,2*} Yangting Lin³ Zhaoyu Pei⁴ Yongliao Zou^{1,5}
 Lin Xu^{1,5} Huihong Cheng⁶ Jie Ren⁷ Sheng Yu¹

1. State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
2. Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
3. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
4. Lunar Exploration and Space Engineer Center, China National Space Administration, Beijing 100048
5. General Office of the Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190
6. Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085
7. School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871

Abstract This review is based on the presentations and discussions at the 302nd “Shuanqing Forum” organized by the National Natural Science Foundation of China. The main research progresses based on the lunar research station are introduced. The research direction and overall scientific objectives are preliminarily summarized in terms of lunar geology, near-lunar space environment, lunar-based observation, lunar-based life science and resource utilization. Finally, key scientific questions and focal areas for funding through Natural Science Foundation of China in the next 5 to 10 years are suggested.

Keywords International Lunar Research Station; lunar and deep exploration; planetary science; fundamental research

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: cw@spaceweather.ac.cn