0254-6124/2021/41(1)-068–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Chunlai, LIU Jianjun, ZUO Wei, SU Yan, OUYANG Ziyuan. Progress of China's lunar exploration (2011—2020) (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 68-75. DOI:10.11728/cjss2021.01.068

中国月球探测进展 (2011–2020 年)

李春来[1,2] 刘建军[1,2] 左 维[1,2]

苏 彦[1,2] 欧阳自远[1]

1(中国科学院国家天文台 中国科学院月球与深空探测重点实验室 北京 100101)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 回顾 2011 至 2020 年 10 年来中国月球探测的进展, 重点介绍嫦娥三号和嫦娥四号任务工程实施情况以及取得的主要科学探测成果, 展望中国月球和行星探测的未来发展.

关键词 嫦娥三号任务, 嫦娥四号任务, 月球探测, 科学成果

中图分类号 P 184

Progress of China's Lunar Exploration (2011—2020)

LI Chunlai[1,2] LIU Jianjun[1,2] ZUO Wei[1,2]

SU Yan[1,2] OUYANG Ziyuan[1]

1(*Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract The progress of China's lunar exploration in the past 10 years from 2011 to 2020 was reviewed. The implementation of the Chang'E-3 and Chang'E-4 missions as well as the major scientific achievements were highlighted. The future development of China's lunar and planetary exploration has prospected.

Key words Chang'E-3 mission, Chang'E-4 mission, Lunar exploration, Scientific achievements

0 引言

月球探测是人类走出地球摇篮, 迈向浩瀚宇宙的第一步, 也是人类探测太阳系的历史开端. 进入航天时代以来, 中国的科技工作者一直怀着探索月球、迈向深空的科学追求和强国梦想. 在经历了 30 余年跟踪研究和积累的基础上, 自 1993 年起, 经过长达 10 年科学目标与工程实现的综合论证, 提出了中国月球探测分 "绕" "落" "回" 三步实施的发展规划. 具体包括: 一期工程 "绕" (2004—2008 年), 实现对月球的全球性、整体性和综合性环绕探测; 二期工程 "落" (2008—2014 年), 实现月球软着陆, 对月面进行就位

2020-11-02 收到原稿

E-mail: liujj@nao.cas.cn

探测和巡视勘察; 三期工程 “回” (2011—2020 年), 实现月球样品自动取样并安全返回地球 [1]. 这三个发展阶段分步实施、循序渐进、不断跨越, 保持一定的连续性、继承性和前瞻性, 构成协调完整的月球探测工程. 2004 年初, 月球探测一期工程, 即绕月探测工程立项启动. 继而, 月球探测工程二、三期列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要 (2006—2020)》. 2008 年探月工程二期立项启动, 2010 年探月工程三期获得国家立项 [2].

在探月工程实施之前, 中国月球与行星科学领域既没有专门的人才队伍, 也没有稳定的经费支持, 主要是利用国外探测数据开展零散研究. 中国月球探测工程的成功实施, 使中国科学家开始从月球科学的调查研究和跟踪研究阶段向自由探索和自主研究阶段转变. 在嫦娥工程科学数据分析和研究中, 国内一些年轻的研究者积极参与进来, 研究成果丰硕. 在任务执行过程中, 围绕月球探测的科学目标、科学应用与研究工作, 组织体系从无到有逐渐建立, 管理制度逐步完善和优化 [3]. 为了促进探测工程多出成果、快出成果、出好成果, 主管部门国防科工局成立了科学应用专家委员会, 科技部在国家高技术研究发展计划设立 “绕月探测工程科学数据应用与研究” 重点项目、中国科学院设立 “嫦娥三号任务探测数据科学应用研究” 项目、国家自然科学基金委员会设立 “嫦娥四号任务科学研究” 项目予以专项支持.

据 Web of Science 统计, 截至 2020 年 9 月, 涉及利用嫦娥工程数据 (Chang’E data) 发表的科研论文已达到 600 多篇. 其中, 涉及嫦娥一号和二号科学探测数据的处理及其相关研究的科研论文 200 余篇, 代表性的研究成果如下.

(1) 国际上空间分辨率最高的全月球数字地形产品 (7 m 分辨率全月球数字影像图和全月球数字高程模型).

(2) 国际上首次采用被动微波遥感技术测量的全月球微波辐射亮温数据 (四个频段: 3.0 GHz, 7.8 GHz, 19.35 GHz, 37.0 GHz), 开创了 “微波月亮” 研究先河, 获取了全月球表面月壤层的分布与厚度变化, 并估算月壤中核聚变原料氦–3 的分布与资源总量.

(3) 系统开展了全月球表面硅、铝、钙、镁、铁、钛、锰、铀、钍、钾 10 种元素含量分布和主要矿物含量分布研究, 绘制各种元素含量分布图与全月表主要矿物分布图.

(4) 探测到月球两极日夜交界面粒子加速现象, 证实了月面微磁层的存在.

(5) 近距离获得 Toutatis 小行星 10 m 分辨率的图像, 开展了小行星 Toutatis 的系列研究等. 上述研究内容和成果涉及了包括绕月探测工程四项科学目标规定的所有领域 [3−5].

近 10 年来, 嫦娥三号 (Chang’E-3) 和嫦娥四号 (Chang’E-4) 分别在月球正面虹湾预选着陆区和月球背面冯·卡门撞击坑实现软着陆, 三期工程再入返回飞行试验任务圆满成功. 中国月球探测由全球的 “面” 探测向区域性的 “点、面、内部” 一体化的综合性探测深入与发展, 月球软着陆探测及月面巡视勘察取得了重要进展. 需要特别指出的是, 利用嫦娥四号科学探测数据, 开拓了月背科学研究, 取得系列原创性科学成果.

本文回顾了 2011 至 2020 年 10 年来中国月球探测进展, 重点介绍嫦娥三号和嫦娥四号工程实施情况以及主要科学成果, 展望中国月球和行星探测的未来发展.

1 近 10 年月球探测进展

1.1 工程实施

1.1.1 嫦娥三号任务

2008 年 2 月探月工程二期立项. 二期工程以嫦娥三号任务实现月面软着陆和巡视勘察为成功标志, 这是中国第一次在地外天体实现软着陆. 嫦娥三号由着陆器和巡视器 (玉兔号月球车) 组成 [6].

2013 年 12 月 2 日, 嫦娥三号探测器在西昌卫星发射中心由长征三号乙改二运载火箭成功发射, 12 月 6 日完成近月制动后进入环月轨道, 12 月 14 日从高度约 15 km 的近月点开始动力下降, 经历 687 s 的主减速、快速调整、接近、悬停和缓速下降等过程后, 于 21 时 11 分着陆在月球 19.51°W, 44.12°N 的虹湾预选着陆区 [7]. 着陆后, 巡视器和着陆器先后完成月面初始化、两器分离、两器互拍等工程任务. 之后, 在测控系统和地面应用系统支持下, 各自展开月面科学探测工作. 目前, 着陆器仍在月面持续开展探测, 巡视器累计行驶 114.8 m.

1.1.2 嫦娥四号任务

嫦娥三号任务圆满完成后, 2014 年中国国家航天局牵头组织开展了嫦娥四号任务实施方案调整的

论证工作. 2016 年 1 月嫦娥四号任务正式开始实施, 采用了 “着陆器 + 巡视器 + 中继星” 的总体方案, 以地月 L2 点作为中继位置, 月球背面南极–艾特肯 (South Pole-Aitken, SPA) 盆地内的冯·卡门 (von Kármán) 坑内区域为首选着陆区, 开展月球背面的软着陆和巡视探测.

嫦娥四号探测器由着陆器、巡视器和中继星组成. 其中, 巡视器被命名为玉兔二号, 中继星被命名为 “鹊桥”. 2018 年 5 月 21 日中继星在西昌发射, 进入环绕地月 L2 平动点运行的 Halo 使命轨道, 轨道周期约 14 天. 这是世界上第一颗连通地球与月球背面的中继卫星. 2018 年 12 月 8 日, 嫦娥四号探测器在西昌发射. 2019 年 1 月 3 日, 嫦娥四号探测器成功着陆在月球背面冯·卡门坑 [8].

截至 2020 年 9 月 24 日, 嫦娥四号着陆器和玉兔二号月球车完成第 22 月昼工作期, 在月球背面度过了 630 个地球日, 玉兔二号累积行驶 547.17 m.

1.1.3 三期工程试验任务 (再入返回飞行试验任务)

三期工程的任务是发射嫦娥五号, 实现月面采样返回. 该任务需要突破月面采样、月面起飞、月球轨道交会对接、高速再入返回等 4 项核心关键技术. 为降低工程风险, 在三期工程中安排了一次再入返回飞行试验.

2014 年 10 月 24 日试验飞行器由长征三号丙运载火箭送入绕月自由往返轨道, 11 月 1 日返回器在内蒙古自治区四子王旗预定区域成功高精度着陆. 这标志着中国已全面突破和掌握航天器以接近第二宇宙速度的高速再入返回关键技术, 探月工程三期取得突破性进展, 为确保嫦娥五号任务顺利实施和探月工程持续推进奠定了坚实基础 [9].

1.2 科学探测成果

1.2.1 嫦娥三号任务

嫦娥三号任务的科学目标主要包括月表形貌与地质构造调查、月表物质成分和可利用资源调查、地球等离子体层探测和月基光学天文观测. 针对上述科学目标, 嫦娥三号着陆器携带了地形地貌相机、降落相机、月基光学望远镜、极紫外相机等 4 类科学仪器, 巡视器携带了全景相机、测月雷达、可见近红外成像光谱仪、粒子激发 X 射线谱仪等 4 类科学仪器 [10]. 嫦娥三号科学探测最突出的特点是测月、观地、巡天.

测月: 采用双频段 (60 MHz 和 500 MHz) 超宽带时域脉冲雷达, 探测巡视路线上的月壳浅层结构和月壤厚度. 同时, 利用粒子激发 X 射线谱仪、可见近红外成像光谱仪、全景相机、地形地貌相机、降落相机, 首次获取月面巡视区 “点–线–面” 结合的物质成分、地下结构和地形地貌等数据.

观地: 针对地球等离子体层主要分布在 15 个地球半径区域内的特点, 国际上首次在月面上利用极紫外相机对地球空间等离子体层实施定点、大视域极紫外成像, 获取磁暴发生后等离子体再填充的全过程数据, 研究地球等离子体层整体结构及其与太阳风、地球磁场相互作用的物理机制.

巡天: 针对月球自转缓慢、无大气遮挡和干扰的特点, 国际上首次利用月基光学望远镜开展光变天体的长期连续监测和低银道带的巡天观测, 获取天体的光变曲线以及巡天观测图像、亮度表, 开创国际上直接利用地外天体稳定平台开展紫外波段的天文光学研究新领域.

嫦娥三号开展了测月、观地、巡天科学探测, 在月球形貌、物质成分、浅层结构以及月基天文观测和地球等离子体观测等方面取得了一系列创新性科学研究成果, 具体如下.

(1) 研究了嫦娥三号着陆区的地质特征, 发现了一种新型的月球玄武岩. 在对嫦娥三号着陆点及其周边区域的地形、地貌、地质、月尘等进行综合分析基础上, 利用嫦娥二号高分辨率地形和影像数据、嫦娥三号降落相机图像数据, 分析了着陆点周边 4 km×4 km 区域范围的地形因子、环形坑和石块分布情况, 研究了着陆区的形貌特征和地质特点. 研究认为, 着陆区属于典型的月海地貌, 地形平坦、适于巡视器行走, 地质现象丰富、探测对象多, 有利于开展月表科学探测, 认证了嫦娥三号着陆区选择的科学性 [11]. 根据岩浆洋模型, 月表的矿物成分和空间分布是由月球早期全球范围内的分异事件和岩浆活动决定的. 因此, 确定月表不同区域的元素和主要矿物 (橄榄石、辉石、斜长石和钛铁矿) 含量是理解月球演化历史的重要途径. 利用玉兔号月球车上搭载的粒子激发 X 射线谱仪、可见近红外成像光谱仪的探测数据, 获得了嫦娥三号着陆区附近月球岩石的成分和矿物学信息. 与 Apollo 和 Luna 月球取样以及月球陨石收集到的月海玄武岩不同, 嫦娥三号着陆点 “广寒宫” 附近的月海玄武岩是一种新型月海玄武岩, 该类岩石含有较为丰富的橄榄石和钛铁矿矿物,

为月球晚期火山活动和岩浆演化机制研究提供了新的信息 [12].

(2) 解析了嫦娥三号着陆区浅层地质结构, 对月球晚期岩浆活动和地质演化过程提出了新的认识. 嫦娥三号首次实现了实地就位雷达技术对月球浅层结构及月壤厚度探测. 高频雷达探测得到嫦娥三号着陆区的月壤深度为 4~6 m, 低频雷达探测结果表明雷达能穿透月表以下数百米深 [13]. 基于嫦娥三号测月雷达数据, 建立了月球浅层结构可靠识别的技术和方法 [14−18]. 结合玉兔号搭载的粒子激发 X 射线谱仪、可见近红外成像光谱仪探测数据, 获取了嫦娥三号着陆区月壤的化学组成、矿物组成、月壤厚度及其下覆玄武岩深度等, 识别出该区发生多个阶段火山喷发, 揭示并构建了雨海盆地多次火山喷发的历史 [19,20], 提出了月球在该区 25 亿年后可能仍有大规模火山活动的新观点 [21].

(3) 发现了地球等离子体层边界在磁层亚暴的影响下发生凸起. 利用极紫外相机对地球等离子体层产生的 30.4 nm 辐射进行全方位、长期的监视观测, 成功观测到地球等离子体的范围及其变化特征, 获取了地球等离子体层三维图像. 利用这些探测数据发现了等离子体层存在双卵型结构. 此外, 利用一次磁层亚暴期间的数据, 发现了等离子体层存在三个明显的凸起结构. 这些成果揭示了太阳活动对地球空间环境的影响, 确认了地球等离子体层的尺度与地磁活动强度呈反相关关系, 进而提出了等离子体层空间结构受地球磁场和电场约束及控制的最新观点 [22].

(4) 实现了月基天文观测并分析了观测数据. 利用月基光学望远镜定点观测数据, 对 8 颗掩食双星和天琴座 RR 变星开展了长时标光变监测, 实现了月基近紫外天文观测 [10].

此外, 还利用月基光学望远镜获得了月球外逸层中羟基 (水) 密度上限值的最新值, 分析发现月球外逸层中羟基 (水) 密度的最低上限值为柱密度小于 $10^{11}\,\mathrm{cm}^{-2}$, 体密度不高于 $10^{4}\,\mathrm{cm}^{-3}$. 研究结果比利用美国哈勃空间望远镜获得的上限低了将近 100 倍, 与理论预期值最为接近, 是迄今为止人类所获得的外逸层中羟基密度的最低上限值 [23].

1.2.2 嫦娥四号任务

嫦娥四号着陆器、巡视器和中继星共携带了 9 台科学载荷, 包括低频射电频谱仪 (LFRS)、月表中子与辐射剂量探测仪 (LND)、中性原子探测仪 (ASAN)、低频射电探测仪 (NCLE)、降落相机 (LCAM)、全景相机 (PCAM)、地形地貌相机 (TCAM)、测月雷达 (LPR)、红外成像光谱仪 (VNIS). 其中: 着陆器配置降落相机、地形地貌相机、低频射电频谱仪、月表中子与辐射剂量探测仪, LFRS 和 LND 为新研载荷; 巡视器配置全景相机、测月雷达、可见近红外光谱仪、中性原子探测仪 (ASAN), ASAN 为新研载荷; 中继星配置低频射电探测仪 (NCLE), 该载荷为新研载荷. 通过这些科学载荷共同完成嫦娥四号的科学目标: 开展月球背面低频射电天文观测与研究; 开展月球背面巡视区形貌、矿物组分和巡视区浅层结构探测与研究; 开展地月空间环境探测与研究 [24].

截至 2020 年 9 月, 嫦娥四号着陆器和玉兔二号月球车在月球背面共完成 22 个月昼工作期的科学探测, 获得大量科学探测数据. 科研团队利用科学载荷传回的数据, 获得了对月球背面形貌、内部物质组成、早期撞击历史、岩浆喷发历史、以及月壤形成机制和太空风化特性等的新认识, 取得了若干原创性科学成果.

1.2.2.1 月球背面巡视区形貌和矿物组成

利用降落相机、地形地貌相机、可见近红外光谱仪、全景相机等的观测数据, 精细重构了嫦娥四号月球背面软着陆轨迹和着陆点位置, 获得着陆区形貌, 物质矿物组成、来源及特性等科学成果. 首次通过原位探测直接得到月球深部物质组成, 揭示月球背面特别是南极艾特肯盆地复杂的撞击历史, 给月壤的形成与演化模型提供关键证据, 为后续月球背面、月球南极着陆和巡视探测选址等提供重要参考.

(1) 重构月球背面软着陆轨迹, 精确定位着陆位置. 由于月球背面无法进行直接无线电测量, 而探测器遥测参数有限, 精确重构探测器下降轨迹和着陆点精确定位十分困难. 针对以上问题, 科研人员利用中国自主研制的嫦娥二号 (Chang'E-2) 高分辨率地形数据, 结合嫦娥四号 (Chang'E-4) 下降过程和月面探测期间获得的多源影像数据, 精细重构了嫦娥四号在月球背面粗避障、精避障和悬停避障等自主导航降落过程, 实现了探测器的精准定位 (177.5991°E, 45.4446°S, 高程 −5935 m), 并在不同分辨率的月球影像和地形数据上进行了精确识别. 这些研究为嫦娥四号着陆器和玉兔二号月球车开展科学探测提供了背景信息和位置基准, 也是月球背面控制点研究、高精度月球测绘的基础 [25]. 该成果 2019 年 9 月发

表在*Nature Communications*期刊上.

(2) 发现月球背面幔源物质初步证据. 根据月球岩浆洋理论推断, 随着岩浆的演化, 较轻的斜长石组分上浮结晶形成月壳, 而如橄榄石、辉石等较重的富铁元素的矿物下沉结晶形成月幔. 然而这一关于月幔物质组成的推论至今没有被很好地证实. 玉兔二号月球车上搭载的可见近红外光谱仪首次实现了月球背面的就位光谱探测. 利用光谱仪 0.4~2.4 μm 波段的反射光谱, 解算了着陆区月壤和岩石的矿物含量, 并对这些物质的来源和形成模型开展了深入研究 [26−29]. 研究发现, 着陆区探测点的低钙辉石、高钙辉石和橄榄石三种矿物组成的相对含量分别为 42%:10%:48% 和 38%:7%:55%. 其中, 橄榄石含量最高, 低钙辉石次之, 高钙辉石最少. 这种矿物组合很可能代表着源于月幔的深部物质. 首次在月球背面着陆区域发现了可能代表月球深部的物质成分, 为解答长期困扰科学家的月幔详细物质构成问题提供了新的证据, 有助于进一步认识月球的形成与演化 [26]. 该研究成果于 2019 年 5 月在*Nature*上发表, 入选 2019 年度中国科学十大进展.

1.2.2.2 月球背面巡视区月表浅层结构

根据嫦娥四号测月雷达、相机数据及其他月球探测的多源数据, 研究建立嫦娥四号着陆区地层剖面及多期次溅射物覆盖关系. 研究结果首次揭开月球背面地下结构的神秘面纱, 极大地提高人类对月球撞击和火山活动历史的理解, 为月球背面地质演化研究带来新的启示.

利用测月雷达 500 MHz 的高频通道探测数据, 分析了巡视路线的次表层结构, 结果表明巡视路线地下主要由低损耗、多孔、颗粒材料和不同尺寸的石块构成. 与嫦娥三号相比, 嫦娥四号测月雷达高频通道的探测深度是嫦娥三号的三倍多, 能够识别出三个不同次表层地层单元. 第一单元为从月球表面到月表下面 12 m 的细粒月壤, 内嵌有少量石块, 此月壤层形成于多个撞击坑互叠的溅射物之上, 这些溅射物可能来自周边的芬森 (Finsen) 和冯·卡门 L 撞击坑等. 第二单元从月表下面 12 m 到 24 m, 这是雷达图像上回波强度最大的区域, 表明内部存在大量的石块, 甚至形成了碎石层和碎石堆, 溅射物的沉积不仅是地毯式的铺散, 也伴随着物质之间的剪切、混合、挖掘以及二次撞击坑结构扰动等复杂的地质过程. 第三单元从月表下面 24 m 到 40 m, 雷达回波明暗交替变化, 是不同时期、更古老的溅射物沉积和风化的产物. 月表下面 40 m 以下的雷达信号微弱, 高频通道雷达信号已无法推断其物质特性. 结合区域地质历史, 推测在嫦娥四号着陆点附近, 完整的月海玄武岩存在于月表以下大于 40 m 的深度 [30]. 该研究成果于 2020 年 2 月在*Science Advances*上发表.

此外, 基于测月雷达 60 MHz 的低频通道探测数据, 获得了着陆区深度约 500 m 的深部溅射物和玄武岩等分层结构 [31]. 相关成果在*Nature Astronomy* 在线发表.

1.2.2.3 月球背面辐射环境

嫦娥四号任务试验性地开展了月球背面粒子辐射环境探测. 该探测由月表中子与辐射剂量探测仪和中性原子探测仪来完成. 其中: 月表中子与辐射剂量探测仪安装在着陆器上, 由德国基尔大学研制; 中性原子探测仪搭载于巡视器上, 由瑞典空间物理研究所研制.

中国科研人员利用月表中子与辐射剂量探测仪首次详细测量了月球表面的强烈辐射, 对探测数据分析发现, 宇航员在月球受到的辐射量大约是地球上的 200 倍 [32]. 相关成果在*Science Advances*上发表.

此外, 月表中性原子的参数特征对于研究太阳风与月表的微观相互作用、月表溅射在月球逃逸层形成和维持中的作用等具有重要意义. 利用中性原子探测仪的探测数据, 研究发现月面能量低于 0.1 $E_{\rm sw}$ ($E_{\rm sw}$ 为入射太阳风离子能量) 的中性原子通量明显高于以往遥感观测结果 [33].

这些成果能够为开展太阳风与月表微观相互作用研究提供重要理论支撑, 促进对月表辐射风险的认知, 为未来月球航天员所受月表辐射危害估算及辐射防护设计提供重要参考.

1.2.2.4 月基低频射电天文观测及数据分析

利用月球背面独特的无线电环境, 着陆器配置的 LFRS 和中继星配置的 NCLE 共同开展了月基低频射电天文观测. LFRS 采用三天线单元, 在 0.1~40 MHz 工作频率范围内获取低频电磁波信息, 对太阳的电磁波辐射和着陆区上方的月球等离子环境进行观测.

目前, 利用 LFRS 已在月球背面首次成功开展了低频射电天文观测, 获得了大量有效观测数据. 初步获得了 40 MHz 频率以下的月背着陆区电磁环境本底频谱和低频射电三分量时变波形数据, 这些数据

对于研究太阳低频射电特征和月表低频射电环境具有重要科学意义. NCLE 是中国–荷兰国际合作的载荷, 使用三根独立正交的单极子射电天线, 从空间获取的电场强度及其变化特征并进行研究, 揭示空间环境电场强度变化的天然诱因 (例如太阳和行星的无线电辐射).

1.3 月球科学数据标准规范

通过探月工程的实施, 建立和完善了中国月球探测、数据处理与研究的标准规范体系, 这些标准和规范填补了中国月球与行星科学相关探测技术与标准研究的空白. 目前, 已发布实施了月球与行星探测相关的国家标准 17 项, 包括《月球空间坐标系》《空间科学及其应用术语第 4 部分: 月球与行星科学》《月球基本比例尺地形图分幅和编号》《月球探测数据产品分级与命名》《月球与行星数据产品格式规范》和《月球影像平面图制作规范》等. 这些成果作为探月工程任务中的配套标准应用, 为工程任务的成功实施提供了重要保证; 同时也作为月球科学数据发布的主要参考依据, 为从事月球与行星科学研究与应用的单位和科技人员提供了良好的数据服务, 促进了月球与深空探测及相关研究领域的国际交流与合作, 取得了较好的经济效益和社会效益.

应用自主的标准规范、技术和方法, 形成了中国月球探测的自主知识产权数据产品. 这些产品主要包括嫦娥一号、嫦娥二号、嫦娥三号、嫦娥四号任务接收的所有原始探测数据及由原始探测数据处理生成的各级数据. 这些自主知识产权的数据和产品进一步拓展了中国在月球与行星探测和科学研究领域的发展空间, 使中国在国际月球与行星探测科学研究领域占有了一席之地, 也极大地增强了中国的国际影响力.

为规范着陆区地理实体的名称, 促进科学研究和学术交流, 中国科学家开展了月球地名标准化和系统命名工作. 2015 年 10 月国际天文学联合会 (IAU) 批准中国嫦娥三号着陆区 4 项月球地理实体命名: “广寒宫” 着陆区, “紫微” “天市” “太微” 三个环形撞击坑. 2019 年 2 月, IAU 批准了利用探月工程嫦娥二号和嫦娥四号高分辨月面影像数据申报的嫦娥四号着陆点及其附近 5 个月球地理实体命名, 将嫦娥四号着陆点命名为 “天河基地”, 着陆点周围呈三角形排列的三个环形坑分别命名为 “织女” “河鼓” 和 “天津”, 着陆点所在冯·卡门坑内的中央峰命名为 “泰山”. 嫦娥三号和嫦娥四号着陆区及附近月球地理实体的成功命名: 从文化上将中国符号和元素 “刻上” 了月球, 大力彰显弘扬了中国古代和民族文化传统; 从科学上为科学研究提供了准确的指示信息, 方便了科学研究的开展、交流、传播和应用.

2 未来展望

进入 21 世纪以来, 为了解答月球科学问题, 人类开展了多种形式的月球探测. 欧空局 (Smart-1), 日本 (Selene), 印度 (Chandrayaan-1, Chandrayaan-2), 美国 (LRO, Grail, LADEE), 以色列 (Beresheet) 以及中国 (Chang’E-1~4), 先后开展了多次月球探测, 取得了很多新的发现和科学成果. 中国科学家基于月球关键科学问题的研究进展以及中国的科技、经济条件, 确定了以 “探” 为第一阶段, 分 “绕” “落” “回” 三步实施的嫦娥工程总体规划路线. 2020 年底嫦娥五号任务完成月面采样返回, 实现了嫦娥工程 “回” 的目标. 从 2004 年嫦娥一号正式实施以来, 实现了 “五战五捷”, 在 *Nature*, *Science*, *Nature Geoscience*, *Nature Communications*, *Nature Astronomy*, *Science Advances*, *PNAS* 等国际顶级期刊发表成果 10 余篇, 得到了国际社会的高度关注. 2019 年 Apollo 登月 50 周年, 中国科学家受邀在 *Science* 介绍中国月球探测进展和规划 [34]. 2020 年嫦娥四号工程团队获得国际宇航联合会 “世界航天奖”. 中国月球探测的全球影响力正在快速提升, 这极大地推动了中国月球科学和比较行星学的学科发展, 培养了一批行星科学人才.

在完成 “绕” “落” “回” 三步走后, 中国月球探测工程四期制定了三个主要科学目标: 月球科学综合研究; 月基观测与实验研究; 月球资源就位利用试验. 后续月球探测初步规划了 Chang’E-6~8 等任务, 拟建成具备科学探测、科研试验和资源利用技术验证等综合功能的月球机器人科研站基本型 [1,34,35]. 同时, 未来 10 年结合中国载人航天工程的进展, 将开展载人登月工程可行性的论证工作, 为实现中国人登上月球奠定基础. 行星探测方面也计划实施火星、小行星和木星系探测. 中国的月球和行星探测将进入快速发展阶段.

月球和行星科学是当今科学前沿, 是中国科技战略的重要组成部分. 展望未来, 中国月球和行星探测

等国家科技重大专项和大科学工程的实施, 将极大地促进月球科学和比较行星学的学科发展, 培养世界一流的行星科学人才梯队, 推动中国从航天大国迈向航天强国.

参考文献

[1] PEI Zhaoyu, WANG Qiong, TIAN Yaosi. Technology roadmap for Chang'E program [J]. *J. Deep Space Explor.*, 2015, **2**(2): 99-110 (裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线 [J]. 深空探测学报, 2015, **2**(2): 99-110)

[2] LIU Jianzhong, OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, *et al.* China national moon exploration progress (2001—2010) [J]. *Bul. Miner. Petrol. Geochem.*, 2013, **32**(5): 544-551 (刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 等. 中国月球探测进展 (2001—2010年) [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, **32**(5): 544-551)

[3] OUYANG Ziyuan, LI Chunlai. The Special Study on the Scientific Objectives of Chang'E-1 Lunar Exploration [M]. Beijing: Science Press, 2015 (欧阳自远, 李春来. 绕月探测工程科学目标专题研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015)

[4] OUYANG Ziyuan, LI Chunlai, ZOU Yongliao, *et al.* The primary science result from the Chang'E-1 probe [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2010, **40**(3): 261-280 (欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, **40**(3): 261-280)

[5] OUYANG Ziyuan. Chang'E-2 preprimary result [J]. *Chin. J. Nature*, 2013, **35**(6): 391-395 (欧阳自远. 嫦娥二号的初步成果 [J]. 自然杂志, 2013, **35**(6): 391-395)

[6] WU Weiren, PEI Zhaoyu, LIU Tongjie. Chang'E-3 Engineering Technical Manual [M]. 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 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013)

[7] SUN Zezhou, ZHANG Tingxin, ZHANG He, *et al.* The technical design and achievements of Chang'E-3 probe [J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2014, **44**: 331-343 (孙泽洲, 张廷新, 张熇, 等. 嫦娥三号探测器的技术设计与成就 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, **44**: 331-343)

[8] SUN Zezhou, ZHANG He, WU Xueying, *et al.* Flight results of Chang'E-4 lander summary and evaluation [J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2019, **49**: 1397-1407 (孙泽洲, 张熇, 吴学英, 等. 嫦娥四号着陆器在轨实践总结与评估 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**: 1397-1407)

[9] YANG Mengfei, ZHANG Gao, ZHANG Wu, *et al.* Technique design and realization of the circumlunar return and rentry spacecraft of 3rd phase of Chinese lunar exploration program [J]. *Sci. Sin. Tech.*, 2015, **45**: 111-123 (杨孟飞, 张高, 张伍, 等. 探月三期月地高速再入返回飞行器技术设计与实现 [J]. 中国科学: 技术科学, 2015, **45**: 111-123)

[10] LI Chunlai, LIU Jianjun, REN Xin, *et al.* The Chang'E-3 mission overview [J]. *Space Sci. Rev.*, 2015, **190**: 85-101

[11] LI Chunlai, MU LingLi, ZOU Xiaoduan, *et al.* Analysis of the geomorphology surrounding the Chang'E-3 landing site [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2014, **14**: 1514-1529

[12] LING Zongcheng, JOLLIFF L Bradley, WANG Alian, *et al.* Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'E-3 landing site [J]. *Nat. Commun.*, 2015, **6**: 8880

[13] SU Yan, FANG Guangyou, FENG Jianqing, *et al.* Data processing and initial results of Chang'E-3 lunar penetrating radar [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2014, **14**(12): 1623-1632

[14] LI Chunlai, XING Shuguo, LAURO S Sebastian, *et al.* Pitfalls in GPR data interpretation: false reflectors detected in lunar radar cross sections by Chang'E-3 [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2018, **56**(3): 1325-1335

[15] FA Wenzhe, ZHU Menghua, LIU Tiantian, *et al.* Regolith stratigraphy at the Chang'E-3 landing site as seen by lunar penetrating radar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, **42**: 10179-10187

[16] XING Shuguo, SU Yan, FENG Jianqing, *et al.* The penetrating depth analysis of lunar penetrating radar onboard Chang'E-3 rover [J]. *Res. Astron. Astrophys.*, 2017, **17**(5): 79-90

[17] DING Chunyu, LI Chunlai, XIAO Zhiyong, *et al.* Layering structures in the porous material beneath the Chang'E-3 landing site [J]. *Earth Space Sci.*, 2020, **7**: e2019EA000862

[18] DING Chunyu, XIAO Zhiyong, SU Yan, *et al.* Compositional variations along the route of Chang'E-3 Yutu rover revealed by the lunar penetrating radar [J]. *Prog. Earth Planet Sci.*, 2020, **7**: 32

[19] XIAO Long, ZHU Peimin, FANG Guangyou, *et al.* A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission [J]. *Science*, 2015, **347**(6227): 1226-1229

[20] YUAN Yuefeng, WANG Fenghua, ZHU Peimin, *et al.* New constraints on the young lava flow profile in the northern Mare Imbrium [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2020, **47**: e2020GL088938

[21] ZHANG Jinhai, YANG Wei, HU Sen, *et al.* Volcanic history of the Imbrium basin: a close-up view from the lunar rover Yutu [J]. *Proceed. Natl. Acad. Sci. United Stat. Amer.*, 2015, **112**: 5342-5347

[22] HE Han, SHEN Chao, WANG Huaning, *et al.* Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'E-3 [J]. *Sci. Rep.*, 2016, **6**: 32362

[23] WANG Jing, WU Chao, QIU Yunlei, *et al.* An unprecedented constraint on water content in the sunlit lunar exosphere seen by Lunar-based Ultraviolet Telescope of Chang'E-3 mission [J]. *Planet. Space Sci.*, 2015, **109-110**(1): 123-128

[24] JIA Yingzhuo, ZOU Yongliao, XUE Changbin, *et al.* Scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission [J].

Chin. J. Space Sci., 2018, **38**(1): 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 [J]. 空间科学学报, 2018, **38**(1): 118-130)

[25] LIU Jianjun, REN Xin, YAN Wei, *et al*. Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang'E-4 on the lunar farside [J]. *Nat. Commun.*, 2019, **10**(1): 1-10

[26] LI Chunlai, LIU Dawei, LIU Bin, *et al*. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials [J]. *Nature*, 2019, **569**: 378-382

[27] GOU Sheng, DI Kaichang, YUE Zongyu, *et al*. Lunar deep materials observed by Chang'E-4 rover [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2019, **528**: 115829

[28] HUANG Jun, XIAO Zhiyong, XIAO Long, *et al*. Diverse rock types detected in the lunar South Pole-Aitken Basin by the Chang'E-4 lunar mission [J]. *Geology*, 2020, **48**(7): 723-727

[29] LIN Honglei, HE Zhiping, YANG Wei, *et al*. Olivine-norite rock detected by the lunar rover Yutu-2 likely crystallized from the SPA impact melt pool [J]. *Natl. Sci. Rev.*, 2020, **7**: 913-920

[30] LI Chunlai, SU Yan, PETTINELLI Elena, *et al*. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar [J]. *Sci. Adv.*, 2020, **6**(9): eaay6898

[31] ZHANG Jinhai, ZHOU Bin, LIN Yangting, *et al*. Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole-Aitken basin [J]. *Nat. Astron.*, 2020:1-6. DOI: 10.1038/s41550-020-1197-x

[32] ZHANG Shenyi, WIMMER-SCHWEINGRUBER F Robert, YU Jia, *et al*. First measurements of the radiation dose on the lunar surface [J]. *Sci. Adv.*, 2020, **6**: EAAZ1334

[33] ZHANG Aibing, WIESER Martin, WANG Chi, *et al*. Emission of energetic neutral atoms measured on the lunar surface by Chang'E-4 [J]. *Planet. Space Sci.*, 2020, **189**: 104970

[34] LI C L, WANG C, WEI Y, *et al*. China's present and future lunar exploration program [J]. *Science*, 2019, **365**(6450): 238-239

[35] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al*. Overview of lunar exploration and international lunar research station [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2020, **65**: 2577-2586 (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**: 2577-2586)