

· 专题:交叉科学前沿与发展 ·

国家深空探测战略可持续发展需求:行星科学研究

潘永信^{1,2*} 王 赤^{2,3}

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029
2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院,北京 100049
3. 中国科学院 国家空间科学中心,北京 100191

[摘要] 最近嫦娥五号月球采样成功返回和首次火星探测“天问一号”探测器顺利入轨,以及后续的小行星、木星系和太阳系边际探测任务,标志着我国已迈入深空探测发展新时代。行星科学是深空探测战略高质量可持续发展的重要支撑。行星科学研究涉及地球科学、天文学等自然科学多个学科,具有鲜明的交叉科学特征。本文在分析交叉科学研究和国内外深空探测科技发展基础上,讨论我国行星科学研究现状、机遇和发展策略。

[关键词] 深空探测;行星科学;国家需求;交叉科学

深空探测通常指对月球及其以远的地外天体进行空间探测的活动^[1],旨在探索宇宙奥秘、搜寻地外生命、获得新知识。深空探测是国家高技术科技竞争力的标志,是国家战略权益保障的需要,也是激发公众的民族自豪感和科学热情的重要途径。探索浩瀚宇宙是全人类的共同梦想。嫦娥工程“绕、落、回”圆满收官、首次火星探测“天问一号”成功进入火星轨道,展示出我国深空探测工程发展已达到前所未有的新高度。然而,作为一个崛起中的深空探测大国,我国行星科学发展起步晚,仍然不平衡、不充分、不完备,已成为制约向深空探测强国转型的瓶颈^[2]。因此,加速发展与新时代国家深空探测战略发展相适应的高水平行星科学研究重要而迫切。

行星科学是研究行星、卫星、彗星等天体和行星系的基本特征、形成和演化规律的一门交叉学科,目前多聚焦于太阳系研究,包括揭示天体的地表特征、岩浆活动、大气、海洋、行星物理场和内部动力学过程,理解行星形成和工作机制;探寻地外生命;通过行星和小天体物理化学极端条件研究,发现新的物理和化学法则等等。近年来,系外行星的发现,进一步丰富了行星科学研究内涵。行星科学的建立和发展是以地球科学和天文学为支柱,涉及物理学、化学、



潘永信 中国科学院地质与地球物理所研究员,中国科学院大学地球与行星科学学院岗位教授,中国科学院院士。主要从事地球与行星磁学、生物地磁学等基础研究工作。

生命科学、信息科学等众多学科,具有鲜明的交叉科学特征。

本文从交叉科学研究驱动、国内外深空探测发展需求分析出发,阐述发展我国行星科学的必要性和紧迫性,并提出几点粗浅的思考与建议。

1 交叉科学研究的社会需求驱动和科学问题导向驱动

交叉科学研究发展驱动力主要来自两个方面:一是科学发展内动力驱动,在重大科学问题解决过程中需要两个或多个学科交叉融合,这样的例子在学科发展中不胜枚举,如地球年龄确定、认知地球生命起源和物种消失原因等;二是社会需求驱动,社会发展提出重大科学问题,如全球变暖、重大公共卫生健康与社会可持续发展等的解决需要多学科交叉融合,这类需求在经济社会高速发展和学科高度细化

收稿日期:2021-03-06;修回日期:2021-03-22

* 通信作者,Email: yxpan@mail.iggcas.ac.cn

本文受到国家自然科学基金项目(41942037)的资助。

的今天尤为凸显。交叉科学研究不仅有助于解决社会和科学重大问题,还有助于形成新理论、新方法或新学科分支,推进社会和科学进步。

面向重大问题的跨学科科学研究过程,常常由社会实践和科学实践活动共同驱动,且多具有时代烙印。在特定时期,重大科学问题既是当下社会发展中的重大需求,也是科学界面临的重要问题。一个跨学科研究过程,首先由社会、科研机构、高校和工业界共同形成问题框架,建立相应研究队伍,通过解决问题方案为导向的、可转化新知识的协同努力,形成整合的应用知识体系和给出问题答案,这些研究成果反馈到社会实践和科学实践之中,最终服务于社会发展和科学知识体系完善。当然,跨学科研究的复杂性使其会面临一些挑战和困难,如问题框架共识度、所有权问题、组织和整合研究队伍、创新方法和建立标准等^[3]。

自然科学体系发展在经历了较长时间学科分化与细化后,学科的交叉与融通是发展趋势^[2,4]。针对重大科学问题,特别是社会重大需求和知识体系中的复杂问题,交叉科学研究活动可形成新的研究范式,可极大地提升重大原创能力,可产生重大科学和社会贡献。国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)提出的改革方案中明确了四类自主导向:鼓励探索、突出原创,聚焦前沿、独辟蹊径,需求牵引、突破瓶颈,共性导向、交叉融通^[5]。自然科学基金委于2020年11月正式成立交叉科学部,这是基于对未来科学研究范式变革趋势预判做出的前瞻性布局。

2 国际深空探测发展的启示

深空探测是上个世纪科学技术发展的一个巅峰,在21世纪依然是世界科技发展最前沿、最活跃的领域。日益强大的科技能力,使人类探索宇宙的梦想成为现实,能够探索地外生命、宇宙起源、太阳系演化、行星形成、人类是否孤独等重大科学问题。在过去半个多世纪,先后开展了月球、金星、火星、彗星、小行星、木星、土星、水星等太阳系天体探测,包括美国阿波罗载人登月计划等,总探测任务已超过240次之多,1977年发射的旅行者1和2号探测器已穿越太阳系边际进入星际空间,可谓人类深空探测进入了星辰大海的新航海时代^[6,7]。飞掠、环绕和着陆巡视探测等已经把从前人们仅能在望远镜中

看到的遥远星球(“点”),刻画成了一个个栩栩如生的星球,它们丰富多样的自然现象令人叹为观止。譬如,金星失控温室效应、火星磁场消失和水冰的存在、小行星富有机质、彗星中水冰、土卫二的海洋和土卫六的甲烷湖等^[8-11],这一系列令人振奋的重大科学发现不断地激励人们日益高涨的宇宙探索热情。

深空探测是体现国家综合国力和创新能力的重要标志。开展并持续推进深空探测,对保障国家安全、促进科技进步、提升国家软实力以及提升国际影响力具有重要意义^[12,13]。在20世纪六七十年代,前苏联和美国展开了一场旷日持久的激烈的太空竞争,科学和技术实力更具优势的后者赢得了竞赛;清楚地表明,行星科学与深空探测的紧密结合和协同发展是深空探测强国发展的必由之路。美国航天局实施的“发现”(Discovery)和“新疆域”(New Frontiers)太空计划取得巨大成功充分证明了行星科学研究引领之重要性^[14-17]。国际深空探测发展的重要启示是,行星科学与工程技术相辅相成,如车之双轮、鸟之双翼,缺一不可。

当前,国际深空探测竞争态势愈加激烈,由科学引领的可持续深空探索无疑是未来深空科技发展重要特征。世界航天强国已瞄准地球、月球和火星太空经济圈及太空资源利用,拓展人类生存空间新疆域,从载人登月到载人探火,从地外资源开发到行星移民,将成为世界强国太空竞争的战场^[18,19]。

我国正处在由深空探测大国向强国转型的关键阶段。国家制订了月球、火星、木星及卫星、小行星、彗星和太阳系边际探测发展规划,已开始研究月球科研工作站和火星科学工作站建设工作,并计划适时启动载人探月等探测任务^[1,6,13,21]。今天,深空探测已成为我国极为活跃、高显示度的科技前沿领域之一。国家深空探测任务可持续发展需要科学与技术协同创新,因此,加快发展我国行星科学重要而迫切。

从国际上行星科学学科发展看,行星科学建立和发展根植于地球科学和天文学,涉及多个其他学科。在行星科学研究中,行星地质、行星物理、行星大气、行星海洋、天体生物学等的理论方法主要源于对地球研究所积累的科学研究和技术方法体系^[20]。演化路径和演化阶段不同的行星构成了行星研究的天然实验室;月球、火星、岩石小行星和彗星等天体

上保留了太阳系早期演化的重要信息;通过比较行星学研究,有助于理解地球上板块运动、火山活动、大气和气候变化、全球磁场、宜居环境演变特性。也就是说,行星科学研究不仅揭示太阳系乃至系外行星的形成和演化,搜寻地外生命,还有助于发现地球的密码,更好地理解 and 认识地球家园。天文学是行星科学的另一个根学科,目前光学和射电天文望远镜观测仍是系外行星探测的唯一手段。地外生命探寻活动离不开天文学、地学、化学、生命科学等多学科交叉研究。太阳系气态巨行星和冰巨星及其卫星等天体具有非常极端条件,许多条件是在地球上难以或根本无法模拟的,相关研究发现可揭示自然界新的物理、化学规律。

值得指出的是,行星科学研究非常依赖于通过高灵敏度的小型化科学载荷的遥感和原位测量获得科学数据。科学目标的确定、载荷研制及数据处理离不开科学家、信息技术专家和工程材料专家协同合作。在深空探测任务层面上,任务的规划和立项,需要联合科学家、工程技术专家和管理专家进行多轮迭代论证,以保障科学和工程目标的最优化实现。

3 当前我国行星科学研究面临重要发展机遇

我国航天科技发展已取得世人瞩目的巨大成就。特别是 2020 年 12 月 17 日嫦娥五号成功将月球风暴洋样品顺利返回地球,这是继阿波罗月球采样 44 年之后人类再次从月球表面采回样品,也是我国第一次实现地外采样返回,为月球科学研究带来重大机遇。2020 年 7 月 23 日成功发射的首次火星探测“天问一号”已迈出我国独立开展行星探测的第一步,将通过一次发射实现对火星的“绕、着、巡”,已于今年 2 月 24 日顺利进入火星停泊轨道,随后将开始科学探测,预计在今年 5 月实施火星着陆并开展巡视探测,包括火星的表面形貌、土壤特性、物质成分、水冰、大气、电离层、磁场等探测^[22, 23]。计划在 2030 年前,我国还将实施小行星探测和木星系探测任务,开展近地小行星、主带彗星、木星及卫星等科学探测^[24]。最近已启动论证太阳系边际探测任务,其科学问题包括日球层动力学和结构特性、星际空间环境和介质特征、半人马族小行星和柯伊伯带天体等,探索太阳系天体的起源和演化^[25]。

我国行星科学发展面临重要机遇期。应发挥多学科交叉研究优势,开展月球返回样品的物质成分、年代学、磁学性质等,获得月球演化的新证据和新认识;开展面向嫦娥四期工程(包括月球科研站建设等)科学研究;运用“天问一号”即将获得的火星科学探测数据,开展火星表层形貌、岩石矿物、水冰、磁场、气象和空间环境等研究,并结合国际探测数据,探讨火星的宜居性及演化,并为我国未来火星探测任务的科学目标遴选做好预先研究。我们认为,当下必须凝心聚力打赢月球返回样品和火星探测数据科学研究的硬仗,力争获得一系列有重要国际影响力的创新研究成果。鉴于月球和火星科学研究的时间紧、任务重,建议自然科学基金委快速部署项目予以支持。

认识太阳系行星的形成与演化,理解行星过程,搜寻宜居环境要素和地外生命等仍是未来较长时期内行星科学研究的主旋律,包括行星表面过程、有机质、水和挥发分、圈层动力学和物质能量输运、大气、磁场等研究。在未来 5~10 年,建议围绕下列方向优先部署研究:(1) 太阳系原始物质与行星形成:揭示太阳系早期物质的来源、凝聚和分异历史,挥发份的起源、后增生过程和演化等重要物理过程在行星宜居性形成和太阳系结构演化中的作用;(2) 以火星为重点的类地行星宜居环境演化:从空间和时间两个维度来比较研究类地行星宜居环境、圈层过程等,并探索太阳系其他天体(如木卫二、土卫二、土卫六等卫星)的潜在宜居环境;(3) 地外生命现象:以太阳系和宇宙演化的理论框架为基础,分析潜在的宜居环境、生物标志物保存条件与识别等,探究太阳系生命现象;(4) 系外宜居行星探测:结合空间和天文探测先进技术,认识系外宜居行星类型与分布,搜寻系外生命信号。同时,重点支持具有自主知识产权的高精度和高性能科学载荷研制,提升探测水平,保障深空探测科学目标的可实现性和先进性。

需要看到,我国行星科学研究整体水平与欧美相比仍有较大差距。近年来,在国家深空探测快速发展的需求驱动下,我国行星科学研究队伍正在快速壮大,中国科学院大学地球与行星科学学院在国内已率先启动行星科学一级学科建设^[26, 27],涵盖行星地质、行星物理、行星化学和天体生物学等^[28-30],牵头成立了中国高校行星科学联盟,旨在推进解决行星科学人才培养问题、科学前沿问题和发展战略

问题,共享深空探测和行星科学研究成果的平台,激励协同创新。高校和研究机构拥有一批中青年科学家,先后组建了行星科学研究单元,建设包括国家和部门重点实验室、卓越科学研究中心等研究平台。我国行星科学研究正在由以往从欧美国家公开数据的研究转向为以我国自有深空观测数据和样品的研究,这无疑是我国行星科学研究发展的一个重要转折。

基于国家深空探测发展战略重大需求,及早论证并部署行星科学研究项目。建议尽快部署跨学部、跨学科的研究计划项目,聚焦太阳系行星形成、宜居环境和生命现象等重大科学问题,凝聚优势研究力量集中攻关,推进行星科学研究体系建设和平台发展,夯实研究基础,补齐目前科学研究投入不足和发展相对滞后的短板,大幅提升国家深空探测中的科学研究创新能力。通过多部门、多学科共同努力,建立和完善月球、火星、小行星及木星科学研究理论框架、技术方法等;创新和完善学科交叉、科学与技术的融通,探索适应我国深空探测发展的科学研究范式;培育以青年学者为主力的、具有国际一流水准的科研创新团队,积极开展高水平国际合作,支撑和服务国家深空探测可持续发展重大战略需求,这对于我国向深空探测强国转型具有重大战略意义。

4 结论及建议

(1) 我国已迈入深空探测发展新时代,高质量的深空探测发展离不开科学研究与工程技术协同创新,二者相辅相成、缺一不可;行星科学研究的对象和手段确定了其鲜明的交叉科学研究特色,当前我国行星科学研究进入了黄金发展机遇期。

(2) 依托嫦娥工程 and 天问一号等国家深空探测任务,聚焦月球、火星等研究重大科学问题部署研究项目,充分发挥学科交叉优势力量集中攻关,支持人才培养和平台建设,鼓励高水平国际合作,在当下必要且迫切。

(3) 建立跨部门的统筹联动机制,完善深空探测科学数据共享等制度,积极推进科学与工程技术融合,做好未来国家探测任务的顶层设计和预先科学研究,更好地服务国家深空探测战略的高质量可持续发展。

(4) 做好行星科学科普宣传工作,激发青少年探索宇宙的热情,提升公民科学素养。

致谢 本文撰写得到行星科学战略报告编写组和第258期双清论坛专家讨论启发,以及国家自然科学基金(41942037)资助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 白春礼. 序言:行星科学引领深空探测. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 739—740.
- [3] Lang DJ, Wiek A, Bergmann M, et al. Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles and challenges. Sustainability Science, 2012, 7(1): 25—43.
- [4] 王孜丹,杜鹏,马新勇. 从交叉学科到学科交叉:美国案例及启示. 科学通报, 2021, 66(9): 965—973.
- [5] 周忠和,赵维杰. 以基金改革追求卓越科学:专访国家自然科学基金委员会主任李静海院士. 中国科学基金, 2019, 33(1): 1—4.
- [6] 刘继忠,胡朝斌,庞涪川,等. 深空探测发展战略研究. 中国科学:技术科学, 2020, 50(9): 1126—1139.
- [7] Siddiqi AA. Beyond earth: a chronicle of deep space exploration, 1958—2016. NASA, 2018, 372pp
- [8] Javaux EJ, Dehant V. Habitability: From stars to cells. The Astronomy and Astrophysics Review, 2010, 18(3): 383—416.
- [9] Grotzinger JP, Crisp J, Vasavada AR, et al. Mars science laboratory mission and science investigation. Space Science Reviews, 2012, 170(1): 5—56
- [10] Lammer H, Aubrey LZ, Gebauer S, et al. Origin and evolution of the atmospheres of early Venus, Earth and Mars. The Astronomy and Astrophysics Review, 2018, 26(1): 1—72.
- [11] 林巍,李一良,王高鸿,等. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 2020, 65(5): 380—391.
- [12] 孙泽洲,孟林智. 中国深空探测现状及持续发展趋势. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(6): 785—791.
- [13] 吴伟仁,刘继忠,唐玉华,等. 中国探月工程. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405—416.
- [14] National Research Council. New frontiers in the solar system. New York: The National Academies Press, 2003, 232pp.
- [15] National Research Council. Opening new frontiers in space. New York: The National Academies Press, 2008, 1—72.

- [16] National Research Council. Vision and voyages for planetary science in the decade 2013—2022. New York: The National Academies Press, 2011, 382pp.
- [17] 万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 748—755.
- [18] Messier D. A new era for deep space exploration and development. The White House National Space Council, 2020: 1—17.
- [19] 中国科学院科技战略咨询研究院. 美国 NASA 发布可持续月球探索 and 开发计划. 科技前沿快报, 2020, 6: 1—3.
- [20] 中国科学院学部. 中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)工作启动会在京召开. (2021-01-19)/[2021-03-22]. http://academics.casad.cas.cn/xgdt/202002/t20200219_4554457.html.
- [21] 张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述. 深空探测学报, 2019, 6(5): 417—423+455.
- [22] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. 深空探测学报, 2018, 5(5): 399—405.
- [23] 李春来, 刘建军, 耿言, 等. 中国首次火星探测任务科学目标与有效载荷配置. 深空探测学报, 2018, 5(5): 406—413.
- [24] 国务院新闻办公室. 2016 中国的航天白皮书. (2016-12-27)/[2021-03-06]. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/34102/35723/35727/Document/1537102/1537102.htm>.
- [25] 王赤, 李晖, 郭孝城. 太阳系边际探测的重大科学问题. 2019 科学发展报告, 北京: 科学出版社, 2020.
- [26] 吴福元, 魏勇, 宋玉环, 等. 从科教融合到科学引领——中国特色的行星科学建设思路. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 741—747.
- [27] 魏勇, 朱日祥. 行星科学: 科学前沿与国家战略. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 756—759.
- [28] 戎昭金, 崔峻, 何飞, 等. 我国行星物理学的发展现状与展望. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 760—768.
- [29] 惠鹤九, 秦礼萍. 我国行星化学学科发展现状与展望. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 769—775.
- [30] 李雄耀, 林巍, 肖智勇, 等. 行星地质学: 地质学的“地外”模式. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 776—784.

Developing the Planetary Science Research for the Sustainable Deep Space Exploration of China

Pan Yongxin^{1,2*} Wang Chi^{2,3}

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191

Abstract Recent successful lunar sample returning to the Earth by Chang E-5 mission and the Tianwen-1 spacecraft entering the Mars orbit, as well as the approved exploration to asteroids, Jupiter and its satellite, and solar system boundary, indicate that China starts a new era of deep space exploration. Sustaining deep space exploration demands the planetary science, which has deep roots in earth science, astronomy and others with distinct transdisciplinary feature. Here we first briefly reviewed the transdisciplinary research feature and the development of international deep space exploration, followed by discussion on the current state, future opportunities and development strategic of the planetary science in China.

Keywords deep space exploration; planetary science; demand of the state; transdisciplinary research

(责任编辑 刘敏)

* Corresponding Author, Email: yxpan@mail.iggcas.ac.cn