

美国行星科学 2023—2032 年规划及 启示

王赤, 白青江, 时蓬, 宋婷婷, 李明, 范全林*

中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心, 北京 100190

摘要 《起源、世界和生命: 2023—2032 年行星科学和天体生物学》是美国科学院发布的第 3 份用于指导太阳系探索未来 10 年发展的战略规划文件(简称 2023 规划报告), 涵盖科学探测任务、基础前沿研究和先进探测技术等, 内容丰富前瞻, 引起各界关注。该报告还首次包括了行星防御内容, 新增了对空间科学人文和社会价值的阐述。本文解读了该报告的核心内容, 指出它聚焦行星起源、太阳系天体(不含太阳)的结构和演化、生命和宜居性 3 大科学主题, 建议美国新实施大中小型系列空间科学任务、继续推进既往 2013 规划报告推荐的在研任务, 并力争在探寻太阳系地外生命前沿与交叉科学领先取得重大突破。

关键词 十年调查; 行星科学; 天体生物学; 战略规划; 科学卫星; 太阳系探测

1958 年 10 月, 美国国家航空航天局(NASA)成立。几乎与此同步, 美国国家科学院在其工程和物理学部下专门成立了空间研究委员会(SSB), 根据 NASA 委托, 组建由各领域领衔科学家构成的特设专家委员会, 以 10 年为周期, 持续发布“十年调查”发展战略规划报告(Decadal Survey), 反映了空间科学界取得共识的最重要科学问题以及应优先实施的科学探索任务清单。为适应学科快速发展, SSB 每 5 年发布“十年调查中期评估”报告; 而为了应对最近几次十年调查中面临的挑战, SSB 还于

2015 年发布了《美国空间科学十年调查经验总结和最佳做法》^[1]。

十年调查首份报告来自于天文领域, 即《地基天文学十年计划(1964)》。行星科学是第 2 个开展十年调查的学科, 由 NASA 和美国国家科学基金会(NSF)资助。十年调查报告是 NASA 制定未来空间科学卫星计划和遴选未来项目的重要依据。据不完全统计, NASA 有 90% 甚至更多项目的遴选都遵循了“十年调查”提供的咨询建议^[2], 对美国保持世界空间科学领先地位起到了至关重要作用。

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-06-22

作者简介: 王赤, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为空间物理和空间天文学, 电子信箱: cw@nssc.ac.cn; 范全林(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略、政策和规划论证, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn

引用格式: 王赤, 白青江, 时蓬, 等. 美国行星科学 2023—2032 年规划及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(15): 6-15; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.15.001

中国正在实施探月工程嫦娥任务^[3]和行星探测工程^[4]天问任务,行星科学发展进入新时代^[5]。本文针对美国新发布的十年调查报告《起源、世界和生命:2023—2032年行星科学和天体生物学发展战略》^[6](以下简称2023规划报告)进行全面解读,对中国行星科学的发展提供思考和启示。

1 2023规划报告编制情况

作为新世纪以来的第3份行星科学十年调查报告,2023规划报告由SSB历时2年多完成,于2022年3月24日由美国国家科学院批准发布。该报告所涉及的空间科学任务项目主要在NASA空间科学任务部(SMD)行星科学处(PSD)预算框架下实施,此外,也覆盖了由NSF组织的重要科研活动。

2019年初,PSD向SSB提出请求,请后者确定新版十年调查的相关行动和议题,标志着2023规划报告编制启动。双方经过研讨,至2019年底明确了行星科学、天体生物学和行星防御的定义和研究的迫切性,目前亟需回答的科学问题、目标和挑战,以及未来10年的全方位研究战略等近10个重要事项。

实际上,为完成2023规划报告,SSB从建立专家组、征集项目建议,到开展集同论证、完成优先级排序,相关实践都很有特点。

1) 组建两级专家组。为响应NASA请求,SSB组建了行星科学和天体生物学十年调查专家委员会(简称专委会),包括1个19名成员的指导组以及另外由78名专家组成的6个领域专题组。两个机构职责不同,指导组“自上而下”确定关键科学问题,并在整个专委会达成一致;专题组具体开展水星和月球、金星、火星、巨行星系统、地下海洋和矮行星以及太阳系小天体等6个专题的研究。

2) 征集项目建议。2020年夏天,SSB收到行星科学界“自下而上”超过500份白皮书。它们当中既有已论证过的候选任务,也有新任务概念。

3) 开展集同论证。指导组对经专题组确认的10个新任务概念进行初步优先级排序后,由专题组具体与NASA喷气推进实验室、戈达德航天飞行中心以及约翰斯·霍普金斯大学应用物理实验室的

任务设计团队集同工作,对它们进行深化论证。

4) 完成优先级排序。由相应专题组剖析新任务概念和既往候选任务各自对十年调查科学问题的贡献,由指导组对17个任务概念进行第2轮优先级排序,再由美国航空航天咨询公司(Aerospace Corporation)开展详细的技术风险和成本评估,为形成最终版推荐任务清单奠定基础。

2023规划报告作为一份完整的行星科学发展战略文件,既有对关键科学问题的描述,也包括学界现状、基础研究和数据分析以及先进技术预研等规划内容。其中,投资庞大、最有前景立项实施的未来科学任务的规划、论证和确定过程应是关注重点。

2 2023规划报告的主要内容

2.1 提出3大科学主题和相应科学问题

2023规划报告认为,行星科学、天体生物学和行星防御领域亟需重点关注的3个科学主题为行星起源、天体结构和演化以及生命和宜居性(图1^[6])。

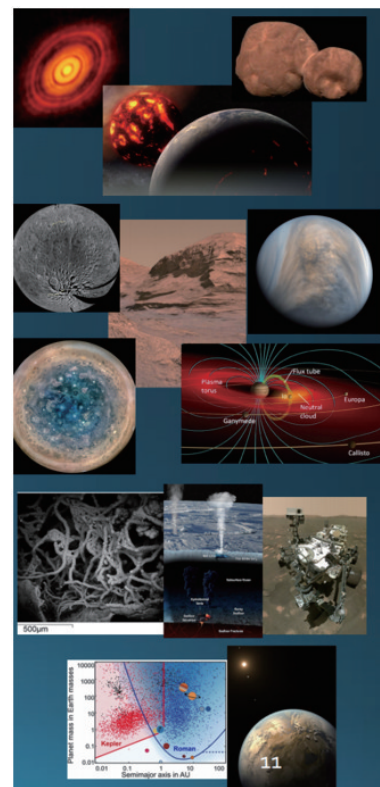


图1 2023规划报告提出了行星科学未来10年的3大科学主题和优先科学问题

指导组根据3个科学主题,统筹载人航天和行星防御2个相关主题的需求,明确了12个应优先研究的科学问题,详见表1。

表1 行星科学未来10年科学主题和科学问题

序号	科学主题	科学问题
1	行星起源	原行星盘是如何演化的?
2		外太阳系天体的吸积过程如何?
3		地球和内太阳系天体的起源是怎样的?
4		大撞击事件及其动力学是怎样的?
5	太阳系天体*的结构及其演化	固体天体的内部结构和表面特性如何?
6		固体天体的大气、外逸层、磁层和气候演化规律怎样?
7		巨行星的结构和演化规律如何?
8		行星环系统是如何形成的?
9	生命和宜居性	地球生命对地外生命的启示如何?
10		宜居性如何动态演化?
11		探寻地外生命
12		系外行星与太阳系的比较研究有何启示? **

注:*不含太阳;**行星科学和生命科学的交叉。

2.2 推荐一系列科学卫星任务

2023规划报告在支持现有行星科学在轨任务及其未来延寿任务的基础上,重点推荐了对未来10年的新科学探索任务,涉及现有的天体生物学计划、火星探索计划、月球探索计划、太阳系各类天体探测、行星防御计划以及行星科学基础研究、先进空间探测技术/有效载荷等。

围绕上述计划及行星科学处的使命,2023规划报告推荐了大、中、小型科学卫星(广义,包括各类深空探测的轨道器、着陆器、巡视器和返回器等)任务:大型即旗舰型(Flagship)任务;中型指新疆域计划(New Frontiers Program, NF);小型主要是指发现计划(Discovery Program)以及新增的小型创新型行星探索任务(SIMPLEx)。中型和小型任务皆由首席科学家领导(PI-LED)。

此次行星科学十年调查,NASA原定的小型任务(不含发射和运行)的成本上限为5亿美元,中型任务投资约5~9亿美元,而大型任务成本超过9亿美元。十年调查专委会仔细研究了上述各型任务的成本结构,建议进行相应调增,按照2025财年的美元价值计算,小型任务上限8亿美元,中型任务约16.5亿美元,大型任务约50亿美元。

2.2.1 新推荐2项大型任务

2023规划报告推荐了2项大型任务——天王星轨道器和大气探测器(UOP)、土卫二环绕和着陆探测器(Enceladus Orbilander)。

UOP(图2)被列为2023—2032十年周期中最高优先级的大型任务,旨在开展环绕天王星的科学探测以及深入天王星大气层的就位探测,将改变我们对于冰巨星特别是天王星系统的认识。UOP的科学目标包括探测天王星的起源、内部结构和大气特性,磁层,以及其卫星、天王星环。

2023规划报告建议NASA于2024财年启动该任务。

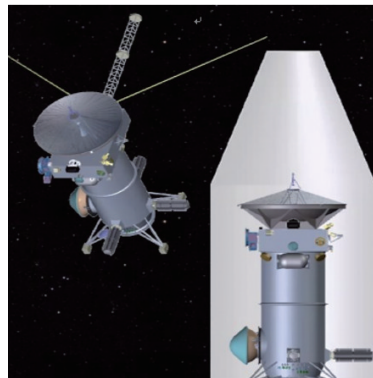


图2 天王星轨道器和大气探测器任务概念(来源:NASA)

土卫二环绕和着陆探测器(图3)可作为第二优先级的大型任务,将在1.5年的环土卫二轨道以及2年的着陆期内,对土卫二的羽流成分进行探测和分析。其主要科学目标是寻找生命证据,并揭示生命探测实验所需的地球化学和地球物理学特性。

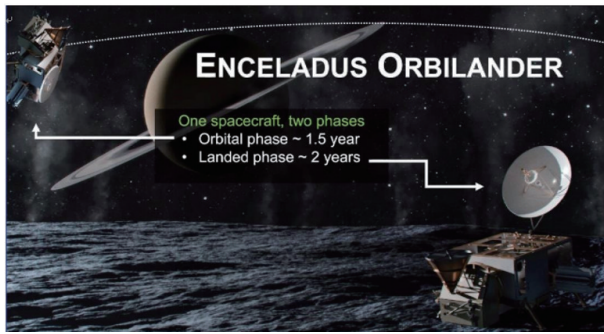


图3 土卫二环绕和着陆探测器任务概念
(来源:NASA)

2023规划报告建议NASA于2029财年启动该任务。假如届时由于NASA预算不足而无法支持该旗舰任务,建议缩减本任务规模,变更为土卫二多次飞越任务(EMF),参与新疆域计划NF6探测主题遴选竞争。

2.2.2 新遴选2+1项中型任务

2023规划报告建议遴选实施2项任务,即NF6和NF7。鉴于2013规划报告中的NF5任务尚未完成遴选,本报告周期内继续推进。

新疆域计划于2003年开始实施,迄今已遴选了“新视野号”冥王星探测器(New Horizons, NF1)、“朱诺号”木星探测器(Juno, NF2)、“冥王号”小行星采样返回探测器(OSIRIS-REx, NF3)和“蜻蜓号”土卫六探测器(Dragonfly, NF4),其中前3个目前均在轨探测,蜻蜓号计划于2026年发射,2034年抵达土卫六(Titan)。

1) 新遴选NF6和NF7两项任务。

2023规划报告认为,NF6和NF7任务的空间探测主题应进一步凝练。这个十年周期的中期时,可评估NF7新增的探测概念。

NF6任务可从以下8个科学探测主题中择优遴选,8进1:(1)半人马座(Centaur)轨道器和着陆器;(2)谷神星(Ceres)采样返回;(3)彗星表面采样返

回(CSSR);(4)土卫二多次飞掠探测;(5)月球“地球物理台网”(LGN);(6)土星探测器;(7)土卫六轨道器;(8)金星原位探测卫星(VISE)。

NF7任务将面向以上8个科学探测主题中未被成功遴选的7个主题以及海卫一(Triton)飞掠探测“三叉戟任务”(TRIDENT)进行遴选,8进1。

2) 继续开展2013规划报告中NF5任务的遴选。

NASA原定于2022年启动NF5任务遴选,然而由于新冠疫情影响,推迟至2024年或以后^[7]。NF5从以下科学探测主题中择优遴选,7进1:(1)彗星表面采样返回任务;(2)月球南极-艾肯特盆地(SPA)采样返回,具体视载人重返月球阿尔忒弥斯计划(Artemis)着陆地点和科学目标而定;(3)地下海洋探索(仅土卫二);(4)土星探测器;(5)金星原位探测卫星;(6)木卫一观测者,具体视发现计划相关飞行任务而定;(7)“月球地球物理台网”。

2.2.3 新遴选5项小型任务

2023规划报告建议,未来10年遴选实施5个新的发现计划任务。

NASA从1994财年正式启动发现计划,通过高频次实施低成本、高效益的小型行星探测任务,回答太阳系起源演化的关键科学问题,确保美国太阳系探索计划的连续性,提高公众对行星科学的关注和支持。迄今发现计划已实施“信使号”水星任务、“黎明号”小行星任务、“洞察号”火星任务等近20项著名的科学卫星任务,并取得了系列原创科学发现和前沿技术突破,详见表2。

此外,在发现计划框架下,2023规划报告建议继续搭载实施系列小型创新型行星探索任务(SIMPLEx),其成本上限不超过0.8亿美元。目前,该计划已遴选4项任务,即杰纳斯号双小行星系统探测双星任务(Janus A&B,搭载“灵神号”发射)、火星大气逸散与等离子体加速动力学探测器(EscapeADE,2024年由火箭实验室/Rocket Lab商业运载火箭发射)、月球开拓者(Lunar Trailblazer,2025年搭载星际测绘与加速探测器/IMAP发射)以及月球极区氢丰度测绘立方星(LunaH-Map,2022年搭载Artemis1号发射)。

表2 NASA行星探测发现计划任务

序号	类别	名称	任务起止时间	任务简介
1		近地小行星交会任务—“苏梅克号”(NEAR Shoemaker)	1996.02.17—2001.02.12	环绕和着陆探测爱神星(433 Eros)小行星
2		火星探路者(Mars Pathfinder)	1996.12.04—1997.09.27	火星着陆器/卡尔·萨根纪念站(Carl Sagan)和索杰纳号(Sojourner)火星车
3		月球勘探者卫星(Lunar Prospector)	1998.01.06—1999.07.31	月球轨道器
4	已退 役	“星尘号”(Stardust)	1999.02.07—2011.03.24	彗星粒子采样返回
5		“起源号”(Genesis)	2001.08.08—2004.09.08	太阳风采样返回
6		“彗核之旅”(Contour)	2002.07.03—2002.08.15	彗核飞越
7		“信使号”(Messenger)	2004.08.03—2015.04.30	水星轨道器
8	独 立 任 务	“深度撞击号”彗星探测器(Deep Impact)	2005.01.12—2013.08.08	彗星撞击和飞越
9		“黎明号”探测器(Dawn)	2007.09.27—2018.10.30	谷神星与灶神星轨道器
10		开普勒空间望远镜(Kepler)	2009.03.06—2018.10.30	Kepler+K2, 系外行星空间观测
11		月球勘测轨道器(LRO)	2009.06.18至今	绘制月表地图;其撞击器(LCROSS)2009.10.09完成撞月
12	在 轨 运 行	“圣杯号”探月双星(GRAIL)	2011.09.09至今	月球重力反演和内部结构探测
13		“洞察号”火星着陆器(InSight)	2018.05.05至今	通过火星震探测火星内部结构
14		“露西号”小行星探测器(Lucy)	2021.10.16—预计2027年抵达	木星特洛伊小行星(Trojan asteroids)飞掠探测
15	研 发 中	“灵神号”小行星探测器(Psyche)	计划2022年发射	16 Psyche小行星交会
16		达芬奇+(DAVINCI+)	不早于2028年发射	金星轨道器+大气探测器
17		“真理号”(VERITAS)	不早于2028年发射	金星轨道器
18		月球矿物测绘仪(M3)	2008.10.22—2009.08.29	搭载印度月船1号(Chandrayaan-1)轨道器,成像光谱探测
19		ASPERA-3空间等离子体和能量原子分析仪	2003.12.19至今	搭载欧洲空间局(ESA)火星快车(Mars Express),研究太阳风和火星大气相互作用
20	有 效 载 荷 搭 载 任 务	“转子号”质谱仪(Strofio)	2018.10.20至今	搭载ESA贝皮·科伦布(BepiColombo)任务水星轨道器(MPO),就位探测水星外逸层成分、丰度和粒子速度
21		“蝰蛇号”极地挥发物探测月球车(VIPER)	计划2023年发射	寻找月球极端环境中的冰和其他潜在资源
22		“眼镜号”火星伽马射线和中子探测器(MEGANE)	计划2024年发射	搭载日本火星卫星探测任务(MMX)
23		气动采样器(P-Sampler)	计划2024年发射	搭载MMX任务着陆器,收集火星一表面材料
24	拓 展 任 务	系外行星观测和深度撞击扩展研究(EPOXI)	2008.01—2013.08	深度撞击任务的拓展,对系外行星观测表征
25		坦普尔彗星新探索(NExT)	2007.07—2011.02	“星尘号”任务的拓展,研究坦普尔1号彗星(Tempel 1)

2.2.4 继续实施2013规划报告中的大型任务

欧罗巴快船任务(Europa Clipper)是2013规划报告推荐的天体生物学大型任务(图4)。



图4 欧罗巴快船任务概念(来源:NASA)

欧罗巴快船计划于2024年10月发射,旨在开展多次飞越,为木卫二(Europa)地下海洋的探索奠定关键基础。需要指出的是,尽管NASA曾于2017年4月宣布木卫二具备生命所需的全部条件,但该任务并非直接探测生命,其主要科学目标旨在确定木卫二表面之下是否存在支持生命的海洋环境和区域。

2.2.5 继续推进火星探索计划

NASA火星探索计划(MEP)始于1993年,是一个科学目标驱动、技术实现支持的、长期持续的行星科学探测项目,其科学目标经历了从“找寻液态水”到“探索宜居性”再到“寻找生命迹象”的发展,实施了包括2001火星奥德赛号(2001 Mars Odyssey)、火星勘测轨道器(MRO)、火星大气与挥发物演化探测器(MAVEN)等轨道器,“凤凰号”(Phoenix)及“洞察号”(InSight)着陆器,“勇气号”(Spirit/MER-A)与“机遇号”(Opportunity/MER-B)、“好奇号”(Curiosity)、“毅力号”(Perseverance)火星车以及采样返回等系列大中小型任务,并将为载人登陆火星铺路。2023规划报告继续推进MEP。

1) 实施大型任务火星采样返回任务第2步。

火星采样返回任务(MSR)^[8]是横跨2013和2023两个10年调查报告周期的大型任务。

MSR分2步实施:第1步即已于2020年发射的“毅力号”火星车,在火星表面采集样本;第2步是2026—2028年通过多次地球发射和火星发射,2031年将约600 g的火星样本返回地球。任务预算非常大,拟由NASA和ESA联合实施。

十年调查专委会提出,MSR的任务成本不应严重影响行星科学其他任务。假如其预算超过2023规划报告建议的53亿美元,或超过该领域每年度预算的35%,NASA应该与美国政府和国会商讨预算增加特别提案。

2) 积极筹备中型任务火星生命探索着陆器。

火星生命探索着陆器(MLE)是MEP计划的下一个火星中型任务(图5)。与火星采样返回任务聚焦古代生命特征不同,MLE将寻找现存生命,并通过探测火星低纬水冰对其目前宜居性进行评估。

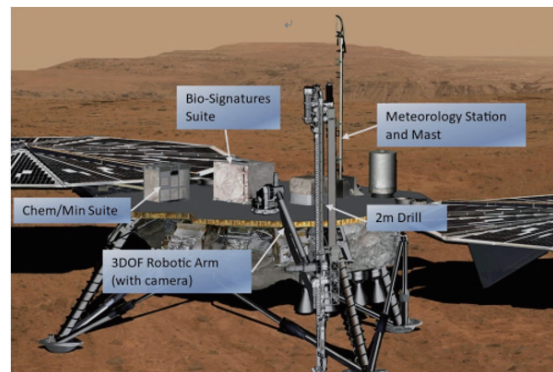


图5 火星生命探索着陆器任务概念(来源:NASA)

2023规划报告建议,在火星采样返回任务研发基本完成后,在2023—2032这10年周期的后期启动火星生命探索着陆器任务。

2.2.6 积极推进月球探索计划的中型任务“坚韧-A”月球车

2023规划报告建议实施中型任务“坚韧-A”(Endurance-A)月球车(图6)。

“坚韧-A”属于月球探索计划(LDEP),旨在采集样本并将其运送至特定地点,等待宇航员将样本带回地球。该任务有望改变人类对月球和太阳系早期历史的理解。

“坚韧-A”包含了一系列创新举措,包括搭载

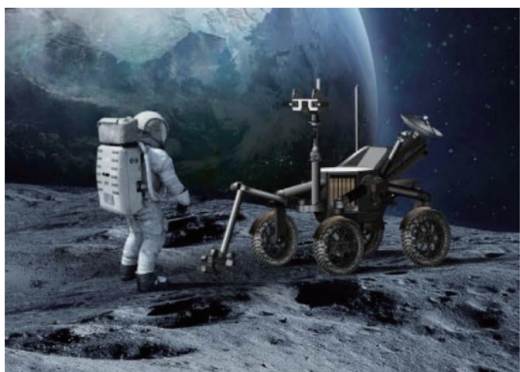


图6 “坚韧-A”月球车任务概念(来源:NASA)

NASA 的商业月球有效载荷快递服务计划(CLPS)发射至月球南极,采集约 100 kg 样本;再由阿尔忒弥斯计划的航天员将样本带回。

2023 规划报告建议,在 2023—2032 周期的中期启动该任务。

2.2.7 全力支持行星防御近地天体勘测者空间望远镜研发

PSD 的行星防御协调办公室(PDCO)负责协调和支撑行星防御相关工作,保护地球免遭地球轨道内的小行星、彗星和其他近地天体(NEOs)的潜在撞击威胁。“飞镖”双小行星重定向测试卫星(DART)已于 2021 年 11 月 24 日发射升空,撞击编号为 65803 的双小行星“迪蒂莫斯”,开展人类首个主动行星防御任务技术试验,未搭载科学载荷。

2023 规划报告建议,全力支持近地天体勘测者空间望远镜(NEO Surveyor)的研发、按时发射和运行。该任务旨在开展空间中红外巡天观测,评估相关干预技术以及表征新发现的危险天体。

此外,在 DART 任务和 NEO Surveyor 之后,具有最高优先级的行星防御验证任务应是一项新的 NEOs 表征任务,使其能够快速部署,对直径约 50~100 m 量级的、很可能对地球造成毁灭性撞击的近地天体开展飞掠勘察,为近地天体撞击威胁短时预警做好准备。

2.3 强调重视基础研究和先进探测技术创新

2.3.1 确保基础研究投入和队伍规模

人类对新知识和新疆域的渴望是开展太阳系探索的重要内在驱动力,发射科学卫星只是手段,必须打通行星科学的“最后一公里”,对相关基础研

究和数据分析进行强有力、稳定的经费支持,实现 4 重目标:(1) 基于深空探测数据的科学产出最大化;(2) 助力科学家深化科学认识,并提出可证实的新理论;(3) 培育未来新的空间科学任务概念;(4) 培养多元化的科学研究队伍。

NASA 行星科学基础研究包括传统的基础研究以及太阳系探索研究虚拟研究所(SSERVI)计划,后者旨在支持 NASA 在月球和行星科学以及太阳系载人探索方面的基础研究。

不过形势并非十全十美,PSD 用于基础研究的预算占比已从 2010 年的 14% 降至 2023 年的 7.7%。2023 规划报告建议,PSD 应持续增加对基础研究的投入,其预算占比最少应达到 PSD 年度总预算的 10%。在这个 10 年周期的中期,NASA 应与一个独立专家组联合评估是否达到推荐的预算水准。与此同时,NASA 和 NSF 联合优化相关机制,促进基础研究计划获得更重大的产出。

关于人才队伍,2023 规划报告建议:梳理行星科学界的人力组成;评估 PSD 基础研究支持的科学队伍规模;为行星科学家提供更多的机会,如加强工业界和学生之间的联系。

2.3.2 部署先进空间探测技术预研

NASA 对行星探测技术的重视程度在当前 10 年调查周期不断改观。实际上,2013—2022 周期之初,NASA 空间科学任务部的技术研发缺乏协调,重点模糊。PSD 采纳了 2013 规划报告的建议,组建了相应的新技术计划;同期 NASA 建立了空间技术任务部(STMD)。到 2013—2022 周期中段已取得了诸多进展。

2017 年 PSD 在格兰研究中心(GRC)组建了行星探索科学技术办公室(PESTO),赋予它重要职责:(1) 推荐年度探测技术经费配置策略,同时考虑空间技术任务部和其他政府组织已布局的内容,以避免重复;(2) 根据未来任务需求更新技术路线图。PESTO 对尚未被卫星任务采用的技术进行管理,统筹 NASA 内部技术经费资源配置等。

以此为基础,2023 规划报告对先进空间探测技术的发展方向和体制机制提出了前瞻判断和政策建议。

1) 提出面向未来10年及以远的先进空间探测技术。

2023规划报告认为行星科学和天体生物学领域需要研发的有效载荷技术要覆盖4类:(1)就位探测仪器;(2)遥感探测仪器;(3)搜寻生命证据的仪器;(4)就位采样、预处理和分析技术。

亟需研发的空间探测共性技术(general technology)包括但不限于:行星自主探测技术、冷/低温采样返回技术、行星保护和污染控制技术、放射性同位素热电发动机/放射性同位素供电系统、次表面介入探测技术等。

2) 增加经费投入,加强总体建设。

2023规划报告建议,亟需增加对先进空间探测技术的经费投入,大力加强总体性机构建设:

(1) 应努力将行星科学探索相关技术投资占到PSD预算的6%~8%;NASA空间技术任务部应确保其对空间科学任务部的投入约占其总预算的30%,在行星科学处的投入不少于其总预算的10%;

(2) 大力加强总体性机构建设,提升PESTO的总体管理权限和能力,使其全面了解所有行星科学、天体生物学和行星防御技术研发工作,总体负责所有技术的研发。

2.4 以行星科学为主但兼顾学科交叉和人文特色

行星科学最初成长于天文学和地球科学,除了传统的太阳系天体探测,系外行星、天体生物学等亦日益引起关注。由此,2023规划报告与之前版本的十年调查报告相比,突出了学科交叉特色,更加强了新兴交叉领域天体生物学,并加入了行星防御的内容。

不过需要指出的是,行星防御的主要动机更关心人类健康和人类安全,而不是增进科学认识。1990年以来,美国国会和政府就指示NASA牵头行星防御工作,近10年来NASA在该方面扮演了越来越重要的作用。实际上,行星科学和探索为探测、跟踪和表征能对地球生命造成威胁的近地天体提供知识和工具,为行星防御策略提供关键输入。

根据SSB和NASA联合发布的任务声明,NASA要求SSB研究行星科学的学界现状(SoP),包

括多样性、公平性、包容性和可及性(DEIA)议题。这是学界现状评估首次进入行星科学领域十年调查报告,反映了其对于行星科学事业的重要性和紧迫性。

3 十年规划实施成效显著

进入21世纪,美国已发布了3份行星科学十年调查报告(图7),分别是《太阳系探索新前沿(2003)》^[9]、《愿景和远航:2013—2022年行星科学》^[10]和《起源、世界和生命:2023—2032年行星科学和天体生物学》。



图7 行星科学3份十年调查报告封面

3份行星科学十年调查报告极大指引了NASA太阳系探索任务的遴选和实施,业已取得多项原创科学突破。

以行星科学领域2013年规划报告为例,其成效尤其显著,其推荐的2个大型任务火星天体生物学发现-收集者(MAX-C)和木星-木卫二轨道器(JEO)皆正在研发中。NASA行星科学处在过去10年的预算也翻了一番。值得指出的是,MAX-C后演变为火星采样返回任务^[11-12];JEO任务后经缩减规模,更名为前文所述的欧罗巴快船任务。

行星科学大中小各型任务已经产出了丰硕的科学成果,更新了人们对太阳系行星起源和演化历史的认知^[13-14]。“洞察号”成功登陆火星,仅使用单台地震仪就揭示了火星内部结构,成为人们了解火星形成和热演化的科学里程碑^[15]。“新视野号”探索了柯伊伯带微行星“2014MU69”(Arrokoth),使之成为人类迄今访问的最远天体,发现了标志性的冥王星之心(Tombaugh Regio)控制着冥王星的大气循环^[16],深化了对外太阳系的科学研究,而其“爱心”

一时亦成为联系公众和科学家的热点话题,激发了社会公众对于科学热点的关注与渴望。

4 思考和启示

中国行星科学起步较晚,但是依托探月工程和行星探测工程建立的地外天体“绕落巡返”能力,迎来了加速发展的新时代。剖析美国 2023 行星科学十年调查报告,其做法对中国深有启发。

4.1 美国行星科学规划坚持科学牵引的诸多做法值得借鉴

2023 规划报告既延续了美国国家科学院系列十年调查的风格,也凸显了行星科学自身特点。2023 规划报告编制过程聚焦科学主题,对自下而上征集的 500 多份科学任务概念白皮书,始终围绕顶层凝练的优先研究的 12 个重大科学问题研讨迭代。为回答这些重大科学问题而推荐的大中小型深空探测任务,充分考虑了投资等资源约束,按理想发展态势和均衡发展态势 2 种发展前景配置项目、推荐任务实施窗口。实际上,2023 规划报告研讨、编制和评议过程中呈现的坚持“顶层谋划、继承开拓,坚持科学牵引、规模合理”的做法对实现行星科学的继承开拓发展极为关键。

与此同时,2023 规划报告也呼吁重视基础科学研究,超前部署先进技术。2023 规划报告真实反映了美国行星科学基础研究投入低于 NASA 空间科学投入平均水平的问题,呼吁增加基础研究投入。另一方面,报告高度重视先进空间探测技术的超前部署,例如次表面介入探测、冷/低温采样返回等,这些前沿技术都需要长期的探索。实际上,欧洲远航 2050 规划^[17]也有类似的安排。了解航天强国的这些动向对于我们把握世界太阳系探索未来动向很有启发。

4.2 中国应直面重大科学前沿开启星际探索新征程

行星科学是空间科学的重要分支学科,是中国月球与深空探测重大航天工程任务彰显科学影响力的引擎。嫦娥五号样品证明了月球直至 19.6 亿年前仍存在岩浆活动,使此前已知的月球地质寿命延长了约 10 亿年^[18],为完善月球演化历史提供了关

键科学证据;“祝融号”(“天问一号”火星车)实现了国际上首次利用巡视器上的短波红外光谱仪在火星原位探测到含水矿物^[19]。2021 年 11 月,国务院学位委员会批准中国科学院大学自主设置行星科学一级交叉学科,对中国继续实施行星探测工程和行星科学研究影响深远。

中国正在加快建设空间科学强国,《2021 中国的航天》白皮书指出中国将实施探月工程四期,开展小行星探测、火星采样返回等天问系列任务,力争在 2049 年实现太阳系边际探测……深空探测未来前景令人鼓舞。

中国的月球与行星探测目前都是国家重大航天工程任务。希望未来国家亦能在科学目标牵引下,“不以大小论英雄”,布局实施一批中小型或机遇任务,加大基础研究支持力度、倾斜支持先进有效载荷研发,为科学家提供更多的太阳系空间探索机会。期待中国行星科学借助深空探测的翅膀,能在关乎天体和生命起源演化认知、拓展人类文明发展的新疆域方面做出独有的贡献。

参考文献 (References)

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. The space science decadal surveys: Lessons learned and best practices (2015)[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2015.
- [2] 吴季. 空间科学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 405-416.
- [4] 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50(9): 1126-1139.
- [5] 万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 748-755.
- [6] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Origins, worlds, and life: A decadal strategy for planetary science and astrobiology 2023—2032 (2022) [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2022.
- [7] NASA moves New Frontiers 5 call to no earlier than 2024 [EB/OL]. (2021-05-13) [2022-05-09]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-moves-new-frontiers-5-call-to-no-earlier-than-2024>.
- [8] 时蓬, 范全林, 汤惟玮. 关于 2030 年前火星采样返回科

- 学任务的展望[J]. 空间科学学报, 2020, 40(3): 301–304.
- [9] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. New frontiers in solar system exploration (2003)[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2003.
- [10] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Vision and voyages for planetary science in the decade 2013–2022[R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.
- [11] Proposed 2018 Mars Astrobiology Explorer-Cacher (MAX-C) mission[EB/OL]. [2022-05-18]. https://mepag.jpl.nasa.gov/reports/decadal/MAX-C_DS_presentation_v-15.pdf.
- [12] Concepts for Mars sample return[EB/OL]. (2020-02-26) [2022-05-16]. <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/mars-sample-return>.
- [13] 时蓬, 王琴, 白青江, 等. 2020年深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 69–87.
- [14] 时蓬, 白青江, 王琴, 等. 2021年空间科学与深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 64–95.
- [15] Science[EB/OL]. [2021-12-08]. <https://www.science.org/toc/science/373/6553>.
- [16] Bertrand T, Forget F, White O, et al. Pluto's beating heart regulates the atmospheric circulation: Results from high resolution and multi-year numerical climate simulations[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2020, 125(12): 1–24.
- [17] 王赤, 时蓬, 宋婷婷, 等. 远航2050: 欧洲空间科学规划及启示[J]. 科技导报, 2022, 40(4): 6–15.
- [18] Che X C, Nemchin A, Liu D, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5[J]. Science, 2021, 374(6569): 887–890.
- [19] Liu Y, Wu X, Zhao Y Y, et al. Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J]. Science Advances, 2022, 8(19): eabn8555.

NASA's Planetary Science Decadal Survey 2023—2032 and its enlightenment

WANG Chi, BAI Qingjiang, SHI Peng, SONG Tingting, LI Ming, FAN Quanlin*

Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract *Origins, worlds, and life: a decadal strategy for planetary science and astrobiology* 2023–2032, the 3rd planetary decadal in 21st century to guide the solar system exploration in the coming 10 years (hereinafter referred to briefly as Decadal 2023), covers a broad range of recommendations such as science missions, research and analysis, and technologies. The article focuses on its three scientific themes, the recommended science program with big, medium and small missions, the deep space probes under development adopted by the previous decadal, and the cross-discipline missions which aim to achieve groundbreaking discovery in search for life elsewhere. Moreover, the Decadal 2023 includes for the first time the elements of planetary defense and state of profession, the latter of which interprets space science's social values. Though the planetary science just started lately in China, it has entered a rapid development phase benefiting from lunar and planetary explorations of China. The article aims to inspire future planetary progress in China through lessons learned from the American planetary decadal practices, e.g., implementing science-driven missions with cutting-edge technology, emphasizing research and analysis, and investing new instrumentation development.

Keywords decadal survey; planetary science; astrobiology; strategic planning; scientific satellites; solar system exploration ●



(责任编辑 王丽娜)