

# 太阳系探测的发展趋势与科学问题分析

郑永春<sup>1</sup>, 欧阳自远<sup>1,2</sup>

(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 100012; 2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

**摘要:** 分析了太阳系探测的发展趋势, 认为从月球到火星是未来太阳系探测的主线, 太阳系探测将从普查性探测向重点天体探测转变, 从技术实现为主向科学牵引转变, 国际合作成为太阳系探测的必然趋势。归纳了太阳系探测的关键科学问题, 认为太阳系与行星系统的起源和演化是探测的终极科学目标, 寻找地外生命和宜居环境是探测的主要驱动力, 预防太阳活动和小天体撞击对地球的危害性影响是探测的现实意义。在探月工程取得进展之后, 中国应以月球和火星探测为主线, 以火星探测为切入点, 有序开展火星、小行星、太阳、金星、木星系统等太阳系探测任务, 牵引航天技术进步, 推动行星科学发展。

**关键词:** 太阳系探测; 发展趋势; 科学问题

**中图分类号:** P181

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2014)02-0083-10

## Development Trend Analysis of Solar System Exploration and the Scientific Vision for Future Missions

ZHENG Yongchun<sup>1</sup>, OUYANG Ziyuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** This paper summarizes the history of solar system exploration and the major scientific achievements. We can find out significant trends for future solar system exploration. Firstly, from the Moon to the Mars is the mainline for future solar system exploration. China has carried out three lunar missions. The next objective body will focus on the Mars. Secondly, the general survey of the solar system is not popular as before. Future solar system exploration will focus on some high interested asteroids, planets and their moons. Thirdly, the solar system exploration in the last century was focused on technology realization, while that in the new century will be driven by science. Fourthly, we must face the technology difficulties, shortage of professionals, and unaffordable budgets in the solar system missions. These problems are difficult for any country to solve by itself. Therefore, international cooperation is necessary and needed. This paper also analyzes the three major science themes of the solar system exploration: the origin and evolution of the solar system and planets, and the search for extraterrestrial life and habitable environment, guard against the catastrophic events of the strong solar activity and asteroid impact on the Earth. With the progress of China's Lunar Exploration Program, China should carry out its Mars mission as soon as possible. After that, China will promote its missions to the asteroids, Sun, Venus, Jupiter system, and other bodies.

**Key words:** solar system exploration; development trend; science theme

## 0 引言

太阳系是以太阳为中心的所有受到太阳引力约束的天体集合体,包括 8 颗行星、165 颗已确认的卫星、5 颗已辨认的矮行星(dwarf planet)和数以亿计的太阳系小天体。这些小天体包括小行星、柯伊伯带(Kuiper belt)的天体、彗星和星际尘埃等。太阳系探测是指利用航天器探测太阳系内各层次天体和行星际空间的深空探测活动。主要探测对象是太阳系内的行星(除地球外)、行星的卫星、矮行星、小天体和行星际空间环境,主要探测方式包括飞越探测、环绕探测、不载人软着陆探测、巡视探测、载人环绕和登陆考察、不载人或载人采样返回等。

1957 年,前苏联发射了第一颗人造地球卫星 Sputnik,开启了人类探测太阳系和宇宙空间的新时代。从 1958 年 8 月 17 日美国发射第一颗月球探测器“Pioneer 0 号”开始,到首次实现对月球、金星、火星、太阳、水星、木星、土星、小行星与彗星等太阳系天体与行星际空间的探测,离地球最远的航天器(1977 年发射的“旅行者 1 号”)甚至已经通过太阳系的日球层(heliosphere)边界。进入 21 世纪以来,又实施了水星探测(“信使号”)、矮行星探测(“黎明号”对谷神星和灶神星,“新地平线号”对冥王星的探测)等任务。截至目前,人类发射的航天器已经探测过太阳系内的所有行星和主要天体类型,形成了我们对太阳系的主要认识。

半个多世纪的太阳系探测取得了丰硕的科学成果,回顾太阳系探测的历程,不难发现它对人类文明进步特别是科学技术发展做出了重要贡献,主要包括:1)显著带动人类社会的科学创新、技术突破和应用拓展;2)加深了我们对宇宙尤其是太阳系的认知、拓展了人类知识疆界<sup>[1]</sup>;3)提高了人类认识和保护地球、拓展生存和活动空间的能力。通过寻找人类潜在的地外宜居地,有助于实现地球和人类社会的可持续发展;4)激励了人类特别是年轻一代的探索、发现和挑战精神。

21 世纪以来,基于推动科学发展和技术进步、争取国家权益和保障国家安全的战略需要,世界各主要航天国家和组织纷纷制定并公布了各自的太阳系探测规划,积极规划各自在行星科学、空间科学和航天活动方面的发展蓝图。通过对月球和火星的重点探测,以及对太阳系各类天体的深入探测,利用这些探测任务获得的新资料和新信息,加上地基和太

空的天文观测、实验室内的分析和相关理论研究等,有望形成对太阳系起源和演化的整体性认识。

中国的太阳系探测从月球起步,作为国家重大科技专项的探月工程共分为“绕、落、回”三期。一期工程为“嫦娥 1 号”,二期为“嫦娥 2 号”“嫦娥 3 号”和“嫦娥 4 号”,三期为“嫦娥 5 号”“嫦娥 6 号”。2007 年 10 月 24 日,中国第一颗绕月探测卫星“嫦娥 1 号”成功发射。2010 年 10 月 1 日,探月二期先导星“嫦娥 2 号”成功发射并取得圆满成功<sup>[2]</sup>。2013 年 12 月 2 日,“嫦娥 3 号”成功发射,使中国成为世界上第 3 个独立实施月球软着陆的国家,标志着我国已进入世界具有深空探测能力的国家行列。预计于 2017 年前后发射的探月三期“嫦娥 5 号”任务正在研制,将实现月表无人自动采样返回<sup>[3]</sup>。随着月球探测的进展,月球之外的其他主要天体已经成为中国航天技术和空间科学发展的重要目标。中国已经开展了深空探测的专项论证,正在推进对太阳系行星、小天体和太阳等的探测活动,我国的太阳系探测将迎来重要的战略机遇期。

## 1 太阳系探测发展趋势分析

### 1.1 从月球到火星是太阳系探测的主线

21 世纪的太阳系探测将以月球和火星探测为主线,从月球走向火星的大方向已经明确,同时将适当开展巨行星及其卫星、金星、小天体和太阳探测。表 1 为截至 2014 年共计 255 次太阳系探测任务的基本情况。从首次探测任务的目标天体来看,人类开展太阳系探测从离地球最近的月球起步,然后逐渐扩展到离地球最近的两颗行星——火星和金星,接着扩展到太阳、太阳系其他天体、巨行星和小天体。

从探测任务次数来看,依次为:月球(123 次)、火星(45 次)、金星(44 次),其他分别为太阳、小行星、木星等。20 世纪 70—80 年代,金星探测的热度超过火星,其中前苏联集中力量探测金星,美国集中力量探测火星。随着火星探测取得的大量新成果,特别是火星上水和生命信息的发现,吸引了科学界越来越多的兴趣和支持,20 世纪 90 年代以来火星探测的热度已经远超金星。因此,虽然太阳系探测的目标天体数量众多,但主线是从月球到火星。

作为地球唯一的天然卫星,月球对地球和人类的重要性不言而喻<sup>[4]</sup>。一是通过多种探测方式,开展月球表面形貌、物质成分、内部结构和空间环境的

表 1 太阳系探测概况(截至 2014 年)  
Table 1 History of Solar system exploration missions(Till to 2014)

对象	首次任务	首次任务时间	最近任务	最近任务时间	任务总次数	失败次数	探测方式
月球	先驱者 0 号	1958.08.17	嫦娥 3 号	2013.12.02	123	51	1~7
火星	Marsnik 1	1960.10.10	MAVEN	2013.11.18	45	23	1,3~5
金星	金星 1A 号	1961.02.04	UNITEC-1	2010.05.20	44	22	1,3,4
太阳	轨道太阳天文台 1 号	1961.03.07	太阳界面区成像光谱仪卫星	2013.06.27	21	1	
其他天体	轨道天文台 1 号	1966.04.08	盖亚太空望远镜	2013.12.19	20	3	
穿越太阳系	先驱者 10 号	1972.03.02	旅行者 1 号	1977.09.05	4	0	
木星	先驱者 10 号	1972.03.02	朱诺号	2011.08.05	7	0	1,3
土星	先驱者 11 号	1973.04.06	卡西尼-惠更斯号	1997.10.15	4	0	
水星	水手 10 号	1973.11.03	信使号	2004.08.03	2		
天王星	旅行者 2 号	1977.08.20			1		
海王星	旅行者 2 号	1977.08.20			1		
彗星	国际日地探险者	1978.08.12	深度撞击号	2005.01.12	14	1	1,
小行星	伽利略号	1989.10.18	嫦娥 2 号	2012.12.13	10		1,3,4,6
冥王星	新视野号	2006.01.19			1		

注:由于判别标准不一,不同统计方式统计的探测任务次数、失败次数有所差异;探测方式包括:1. 飞越探测;2. 硬着陆探测;3. 环绕(伴飞)探测;4. 软着陆(附着)探测;5. 巡视探测;6. 不载人取样返回;7. 载人登陆。

探测,加深对月球和地月系形成演化的认识;二是把月球作为永不坠落的天然空间站和太空实验室,利用月球独特的空间位置、特殊的空间环境和自然资源,开展对地监视、天文观测以及就位资源利用、材料科学、生命科学、信息传输和基础物理等多学科实验和观测;三是把月球作为载人深空探测的演练场和中转站,通过载人登月的发展,逐步降低载人深空探测(特别是载人飞往火星)的技术风险和经济成本。

月球探测是太阳系探测的起点。1958—1976 年第一次月球探测高潮期间,美苏两国共发射 108 颗月球探测器,成功率仅为 48%,美国实现了

6 次载人登月,在美苏太空争霸战中取得最终胜利;1976—1994 年是月球探测的宁静期,期间没有发射过任何月球探测器。1994 年 1 月 25 日发射的 Clementine 探测器<sup>[5]</sup>和 1998 年 1 月 7 日发射的 Lunar Prospector 探测器,开展了对月球的全球性普查<sup>[6]</sup>,掀起了新的月球探测热潮。月球探测的新发现,特别是月球水冰和极区探测的进展<sup>[7]</sup>,重新激发了人类的探索兴趣,目标就是实现载人重返月球和建立月球基地。进入 21 世纪以来,欧洲、日本、中国、美国、印度已经先后开展了 11 次探测任务,如表 2 所示。

表 2 21 世纪已开展的月球探测任务(截至 2014 年)  
Table 2 Lunar missions in the 21 century(Till to 2014)

国家/组织	探测任务	实施时间
欧洲	智慧 1 号(SMART-1)	2003.09.27—2006.09.03
日本	月亮女神号(SELENE)	2007.09.14—2009.06.10
中国	嫦娥 1 号(Chang'E-1,CE-1)	2007.10.24—2009.03.01
印度	月船 1 号(Chandrayaan-1)	2008.10.22—2009.08.31
美国	月球勘测轨道器(LRO)	2009.06.17—
美国	月球坑观测和传感卫星(LCROSS)	2009.06.17—2009.10.09
美国	阿耳忒弥斯(ARTEMIS)	2009.07.20—
中国	嫦娥 2 号(Chang'E-2,CE-2)	2010.10.01—
美国	圣杯号(GRAIL)	2011.09.10—2012.01.01
美国	月球大气与尘埃环境探测器(LADEE)	2013.09.06—2014.04.17
中国	嫦娥 3 号(Chang'E-3,CE-3)	2013.12.01—

通过对月球的全球性勘查和区域详查,为未来载人登月和建设月球基地提供技术基础和科学

支持。在太阳系主要天体中,火星的环境与地球最为

相似,最有可能存在过生命或适宜生命繁衍。因此,火星在太阳系探测中占有最重要的地位。进入 21 世纪以来,各国已经开展了 12 次火星探测任务,

基本上在每隔 26 个月一次的火星探测窗口中都会发射 2 个探测器,如表 3 所示。

表 3 21 世纪已开展的火星探测任务(截至 2014 年)  
Table 3 Mars missions in the 21 century(Till to 2014)

时间	任务名称	国家/地区	探测方式	结果
2001.04.07	火星奥德赛号(Mars Odyssey)	美国	环绕	成功
2003.06.02	火星快车号/小猎犬 2 号(Mars Express/Beagle 2)	欧洲	环绕/软着陆	部分成功
2003.06.10	勇气号(MER-A“Spirit”)	美国	巡视	成功
2003.07.08	机遇号(MER-B“Opportunity”)	美国	巡视	成功
2004.03.02	罗塞塔号(Rosetta)	欧洲	顺路/飞越	成功
2005.08.12	火星侦察轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter)	美国	环绕	部分成功
2007.08.04	凤凰号(Phoenix)	美国	软着陆/巡视	成功
2007.09.27	黎明号(Dawn)	美国	飞越	成功
2011.11.08	萤火 1 号	中国/俄罗斯	环绕	失败
2011.11.26	好奇号	美国	软着陆/巡视	成功
2013.11.05	曼加里安号(Mangalyaan)	印度	环绕	在途中
2013.11.18	马文号(MAVEN)	美国	环绕	在途中

目前,火星探测的技术能力日趋成熟,对火星全球的了解也已不输月球,未来将朝着重点地区精细探测、采样返回、载人环绕和登陆的方向迈进。NASA 在 2013 年 11 月发射 MAVEN 探测器后将不再开展针对火星的小型探测任务,而以经费投入巨大的大型任务为主。如:火星科学实验室(MSL,“好奇号”)耗资 25 亿美元;计划中的火星采样返回任务 MAX-C 将耗资 35 亿美元。这些大型任务将详细了解火星表面环境,预选火星着陆区,为火星采样返回、载人环绕和登陆火星奠定基础。

### 1.2 从普查性探测向重点天体探测转变

通过 50 多年的探测,人类对太阳系的全景已经有了整体认识,类似“旅行者 1 号”“旅行者 2 号”那样的太阳系穿越任务的科学回报将不再显著。未来太阳系探测将聚焦某些重点天体,包括月球、火星、小行星、金星、木星以及木卫一(Io)和木卫二(Europa)、土星以及土卫二(Enceladus)和土卫六(Titan)。同时,适当兼顾其他天体,使探测任务覆盖太阳系内的主要天体类型,精细刻画太阳系的结构。

除月球和火星之外,小天体是未来太阳系探测的重点目标之一。小行星和彗星的探测和采样返回对太阳系的形成和演化、生命的起源和演化这两个基本科学问题的求解具有重要意义,因此在未来太阳系探测中占有重要地位。NASA 未来 10 年可能开展的小天体探测任务包括:针对碳质小行星

1999 RQ36 的原始光谱解译与资源勘查采样探测器(OSIRIS-Rex)、彗星表面采样返回任务(Comet Surface Sample Return)、特洛伊小行星探测计划(Trojan Tour and Rendezvous)。小天体探测的重要意义在于:1)小行星是形成太阳系的原始物料,保留了太阳系形成早期的诸多信息,一些小行星具有重要的经济价值和利用前景;2)小行星和彗星上存在的有机物和生命物质,可能与地球上的生命起源有关;3)小天体撞击地球将导致生物界和人类社会的灾难性后果。

巨行星体积巨大且具有特殊的行星环、磁层和流体运动,其卫星数量较多,一些天然卫星还有液态海洋、适宜生命存在的环境等特征,可以在较大范围内作为检验地球物理、等离子物理、气象学甚至海洋学理论的实验室。未来的巨行星探测一方面将重点探测巨行星本身的环带结构、大气层、磁层、与太阳风的相互作用等,如预计 2016 年进入木星轨道的“朱诺号”(Juno),以及计划中的土星探测器(Saturn Probe)等。另一方面将重点探测木卫一和木卫二、土卫二和土卫六等与地球相似、可能存在原始生命的天然卫星,如 NASA 拟议中的木卫一观测者(Io Observer)等。

### 1.3 从技术实现为主向科学牵引转变

20 世纪 90 年代以前,太阳系探测以技术实现为主要目标,服务于展示国家航天技术能力和国防实力的政治目的。而 90 年代以来的新一轮探测活

动,主要以科学为驱动,并逐渐向科学引领方向转变。

科学驱动体现在太阳系探测的任务建议由科学家提出,在整个任务论证和实施过程中始终围绕科学问题求解、科学目标实现和科学成果的最大化为核心。在技术可实现的前提下,不同探测任务的优选应保证投入的经费获得的科学产出最大化,以所解决的科学问题的重要性来评价探测任务的成果。“科学引领、共同参与、透明公开”已经成为 NASA 未来 10 年在太阳系探测领域的 3 项指导原则。

目前,NASA 太阳系探测的小型任务(侦察型任务,又称发现级,针对“主任务”开展补充性、辅助性的探测)采用首席科学家(Principle Investigator, PI)负责制,完全由科学家提出任务建议并主导任务实施。如 2007 年 8 月 4 日发射的“凤凰号”火星着陆器就是一项典型的小型任务,耗资 4.2 亿美元,设

计寿命 90 天。中型任务(又称“新前沿级”任务,规模中等、适度)通过科学家之间的竞争机制,针对重要科学问题开展太阳系探测。大型任务(旗舰型任务,技术上十分困难和复杂)虽然是由 NASA 直接主导和实施的战略性、综合性探测计划,但探测器上的科学载荷采用竞争机制产生,并实行首席科学家负责制。如原定 2009 年 10 月发射、后被推迟到 2011 年 10 月发射的“火星科学实验室”,属于下一代核动力火星探测器,技术复杂,耗资巨大。

2011 年 3 月,NASA 委托美国国家研究委员会论证与制定未来 10 年的行星科学与太阳系探测规划,共征集 1669 位科学家通过独立或合作的方式递交的 199 份探测任务建议书,最终形成《2013—2022 年行星科学十年规划与展望》报告<sup>[8]</sup>,规划的 25 项科学任务将成为未来 10 年太阳系探测任务优选和实施的基本科学依据和指导性文件,如表 4 所示。

表 4 NASA 太阳系探测的任务规划(2013—2022)  
Table 4 NASA's programs on solar system exploration(2013—2022)

天体	大型任务	中型任务	小型任务	国际合作
原始天体	无任务规划。将突破关键技术,确保 2020 年前实现低温彗星采样返回	提高预算,包括彗星表面采样和特洛伊小行星探测计划	任务频次适当	
内行星	金星气候探测	维持任务频率和预算,包括金星就位探测、月球 SPA 盆地采样、月球地球物理探测网络(LGN)	任务频次适当	以科学家参与相关任务的方式开展
火星	启动火星采样计划,其中最重要的是火星天体生物探测任务(MAX-C)	不含火星的地球物理观测网和火星极区气候探测任务	小型任务同样可获得重大科学发现	独立开展火星采样返回(MSR)任务;国际合作实施微量气体轨道器
巨行星	最重要的探测任务是天王星探测器(Uranus Orbiter and Probe)。通过木卫二—木星系统探测任务(EJSM)保持木星系统探测的科学优先级,轨道设计以实现科学目标为准	当前预算不足以开展该任务,最可能的是土星探测器任务	允许将针对性探测计划和太空望远镜列入小型任务中	
巨行星的卫星	继续开展卡西尼探测任务;未来 10 年将开展木卫二轨道器(EJSM 任务的一部分)、土卫六探测任务、土卫二轨道器	包括木卫一观测者、木卫三轨道器两项任务		积极推动 NASA、欧空局和日本航天局在实施 EJSM 三阶段任务中的合作

#### 1.4 国际合作成为太阳系探测的必然趋势

从 20 世纪 50 年代末到 80 年代,只有前苏联和美国开展过太阳系探测。90 年代至今,欧空局、俄罗斯、日本、中国和印度纷纷开展各类太阳系探测任务,从两强争霸到群雄逐鹿,多国参与和国际合作将成为太阳系探测的必然趋势。

美国:2011 年美国发布《2013—2022 年行星科学十年规划与展望》,详细规划了未来 10 年太阳系探测的科学主题、目标天体、探测任务等<sup>[8]</sup>。2014 年发布的《2014 NASA 战略规划》在太阳系探

测方面的目标包括:(1)扩展人类在太阳系中的活动范围并到达火星表面,以推进探索、科学、创新、人类福祉和国际合作;(2)理解太阳、太阳系及其与地球的相互作用,包括空间天气<sup>[9]</sup>;(3)查明太阳系的内涵、起源和演化及可能的生命。

欧空局:近年来占据太阳系探测的第二位,2003 年发布《曙光计划》(Aurora),确立了未来 30 年欧洲太阳系探测的发展战略和路线,2005 年发布的《宇宙憧憬 2005—2025》描绘了欧洲未来 20 年的空间科学发展蓝图。

俄罗斯:于 2012 年先后制定了《俄罗斯 2030 年前航天活动发展战略》和《俄罗斯 2012—2025 年太阳系探测总体规划》,充分展现了俄罗斯在太阳系探测领域的雄心。

日本:于 2005 年发布《日本宇宙航空研究开发机构长期发展规划——JAXA 2025》,提出了月球与太阳系探测的发展规划,发展潜力不可低估;

印度:虽与中国几乎同时起步,但已实施“月船 1 号”探月计划和火星探测计划,公布了载人航天计划。

未来,德国、英国、巴西等国家也将加入到太阳系探测队伍,参与太阳系探测的国家将越来越多。

随着人类对太阳系认识的加深,科学探测方式将越来越多样化、复杂化、精细化,对航天发射技术、测控技术、航天器生产、科学仪器的创新设计和研制提出了更高要求,技术难度和经费需求显著增加,对

参与任务的科学家和工程师的专业能力要求更高,学科覆盖要求更广。开展太阳系探测所需的技术能力、经费需求、人才储备对任何一个国家而言都越来越难以独立承担。因此,太阳系探测的国家间合作将越来越普遍,多国分工合作,各自发挥技术专长,共同分担经费,合作开展数据分析和科学研究,将成为未来太阳系探测的显著特点。

## 2 太阳系探测的关键科学问题分析

### 2.1 太阳系与行星系统的起源和演化是太阳系探测的终极科学目标

当代太阳系探测的三大科学主题是太阳系的起源和演化、寻找地外生命和宜居环境、行星的起源和演化。只有通过系统的太阳系探测活动,对不同天体目标、用不同探测方式获得有关这些天体的第一手探测资料,才能使这些追根溯源性的基本科学问题得到诠释<sup>[10]</sup>(表 5)。

表 5 未来 10 年太阳系探测的科学主题和优先探测任务  
Table 5 The science topics and prior missions in the next decade

科学主题	关键科学问题	目标天体	对应的探测任务
太阳系的起源和演化	太阳系的形成,星际物质凝缩的初始阶段、条件和过程	彗星、小行星、特洛伊小行星带、柯伊伯带	低温彗星采样返回任务(CSSR) 特洛伊小行星探测计划 发现级小型任务
	木星等巨行星及其卫星系统的形成,轨道迁移的证据	木星及其卫星(木卫一、木卫二、木卫三)、土星、土卫二和土卫六、天王星、海王星、柯伊伯带	木卫二轨道器 天王星轨道探测器 特洛伊小行星探测计划 木卫一观测计划 土星探测器 土卫二探测器
	原始物质吸积形成行星的过程,类地行星中水的形成、化学组成、内部分异及大气层演化,大型撞击对行星演化过程的影响	火星、月球、特洛伊小行星、金星、小行星带及其彗星	火星采样返回任务 金星原位探测器 月球地球物理观测网络(LGN) 月球南极 SPA 盆地采样返回任务 特洛伊小行星探测计划 低温彗星采样返回任务(CSSR) 金星气候探测任务 发现级小型任务
寻找地外生命和宜居环境	太阳系中原始有机物的形成,探索这些合成过程目前是否依然存在	彗星、小行星、特洛伊小行星、柯伊伯带、土卫二、木卫二、火星、土卫六、天王星的卫星	火星采样返回任务 木卫二轨道器 天王星轨道探测器 特洛伊小行星探测计划 低温彗星采样返回任务(CSSR) 土卫二轨道器 发现级小型任务
	探测火星和金星上的古水环境,寻找火星和金星上与早期生命有关的证据	火星和金星	火星采样返回任务 金星原位探测器 金星气候探测任务 发现级小型任务
	寻找适宜人类居住的地外天体,包括人类生存必需的能源、水、有机物等,探测这些天体上的生命信号	火星、木卫二、土卫二、土卫六	火星采样返回任务 木卫二轨道器 土卫二轨道器 发现级小型任务

续表 5

科学主题	关键科学问题	目标天体	对应的探测任务
行星的起源和演化	巨行星与类地行星形成和演化的共性和特性, 巨行星形成对太阳系演化的意义	木星、土星、天王星、海王星	木卫二轨道器 天王星轨道探测器 土星探测器
	太阳系历史上的灾难事件及原因、地球生命延续至今的原因	近地小行星、月球、彗星、木星	低温彗星采样返回任务(CSSR) 发现级小型任务
	研究影响行星大气演化的物理、化学、地质因素, 建立动态变化模型, 以深入认识地球气候变化	火星、木星、海王星、土星、土卫六、天王星、金星	火星采样返回任务 木卫二轨道器 天王星轨道探测器 金星原位探测 土星探测器 金星气候探测任务
	改变太阳系内天体运行、相互作用和演化的物理和化学过程	所有行星	所有探测任务

根据太阳星云演化理论, 约 46 亿年前在原始太阳周围的太阳星云盘物质经分馏、凝聚、吸积、增生等过程, 形成了太阳系。太阳系最初 10 亿年的历史, 决定了地球和其他行星的演化方向。由于后期的地质作用等因素, 地球上缺失了太阳系形成最初 10 亿年历史的地质记录, 使得人类对太阳系早期历史的了解非常有限, 包括行星的形成和演化过程、太阳系早期撞击体大小和通量及其随时间的变化等。但这段历史在月球、水星等后期地质作用较弱的天体上却得以完整保留。小行星作为太阳星云凝聚的残留物, 对恢复太阳系早期历史具有探针作用。通过对太阳系内不同位置、不同层次的天体的探测, 有望恢复太阳星云的物质组成和初始状态。

## 2.2 寻找地外生命和宜居环境是太阳系探测的主要驱动力

寻找地外生命和宜居环境的主要目的是通过探测太阳系中可能存在生命的天体, 研究生命及相关物质的起源, 这已经成为太阳系探测的主要驱动力。关键科学问题包括:

- 1) 生命是如何产生的, 生命的产生需要什么条件? 主要通过太阳系中原始有机物的形成, 探索这些有机物合成过程目前是否依然存在;
- 2) 对生命起源起决定性作用的因素有哪些? 彗星和小行星与地球生命起源的关系?
- 3) 地球之外是否有生命, 哪里有可能存在地外生命? 主要通过探测火星、木星和土星的卫星等地外天体上的水, 回答这些天体是否有适合生命存在的环境;
- 4) 生命怎样随行星环境变化而进化? 太阳系中的生命如何演化?
- 5) 我们能否找到第二个地球? 当人类面临灭顶之灾时, 能否让人类在其他星球上得以延续?

以火星探测为例。作为 NASA 在 2000—

2010 年火星探测的基础科学目标和最高战略目标, “追踪水的痕迹”(follow the water) 在火星探测科学目标制定和探测任务实施中发挥了指导性作用, 从“火星全球勘探者号”(1996—2006 年), 到“火星奥德赛”(2001 年至今), 再到“机遇号”和“勇气号”火星车(2003 年至今), 以及火星勘测轨道器(MRO, 2005 年至今)和“凤凰号”(2007—2008 年), 已经获得了大量火星上存在水的证据。如: “火星全球勘探者号”拍摄到大量火星表面水流冲刷和侵蚀的地貌特征<sup>[11]</sup>; “机遇号”和“勇气号”火星车探测到火星土壤中硅质的沉积物<sup>[12]</sup>; 火星勘测轨道器探测到火星高原地区的层状硅酸岩矿物(Phyllosilicate)<sup>[13]</sup>; “凤凰号”拍摄到火星上在“下雪”, 探测到火星土壤中存在氯酸盐, 并首次获得火星上液态水存在的直接证据<sup>[14]</sup>。这些都说明美国“追踪水的痕迹”的战略目标获得了巨大成功。

从 1996 年《寻找火星上的古老生命: 火星陨石 ALH84001 残存有可能的生命活动痕迹》<sup>[15]</sup> 发表以来, 火星生命信息的探测热情高涨。2007 年 5 月, 美国国家研究委员会发布《火星探测的天体生物学战略》(An Astrobiology Strategy for the Exploration of Mars)<sup>[16]</sup> 研究报告, 指出火星探测的科学目标应从水进一步延伸到生命, 未来火星探测应以火星生命探测为重点, 以“寻找碳”和其他生命相关元素作为火星探测的科学方向。2011 年 NASA 正式宣布美国火星探测的科学战略将从“追踪水的痕迹”正式转变为“搜寻生命信号”(seeking signs of life), 标志着未来 10 年美国火星探测的科学重心将转变为开展与火星生命信号搜寻相关的各类探测活动。

对火星生命的探测, 主要围绕: 探测火星现在有

无生命活动信息、探寻火星过去是否存在过生命、火星生命活动的环境即火星水体的活动与演化等问题开展。总体而言,火星生命探测需要经过 3 个步骤,首先是详细探测火星表面环境,特别是火星曾经有水的证据,回答火星大气中的甲烷是否属于有机成因。其次是探测微生物在火星上生存和繁衍的可能性<sup>[17]</sup>。最后是直接寻找火星上的生命。

此外,对小行星和彗星生命信息的探测,主要是通过探测小行星和彗星中的有机成分和水来研究地球生命物质的来源。目前,一些小行星和彗星的陨石中已经发现有各类烷烃、氨基酸、脂肪酸、多环芳烃和卟啉等有机化合物。对巨行星卫星生命物质的探测,主要探测对象是土卫二、木卫三、木卫四和木卫六。

### 2.3 预防太阳活动和小天体撞击对地球的危害性影响

太阳及其活动对地球和行星际空间环境产生巨大的影响,对太阳及其活动的探测主要有向局部高分辨观测和整体长周期观测两极发展的趋势。一是对太阳的小尺度结构进行高时空分辨率的观测和研究,了解太阳活动的内在本质;二是对太阳大尺度活动和长周期结构与演化进行观测和研究,了解太阳活动的整体行为。

为深入认识和理解太阳磁场基本结构、太阳活动周的形成机制、太阳风暴的起因等热点问题,特别是太阳活动对空间环境的灾害性影响,需要在远离地球的近日空间和太阳极区对太阳进行大尺度、全时域、高分辨、高精度三维立体多波段探测。

从地球生物演化历史看,小天体撞击多次导致地球气候环境灾变和生物灭绝事件,如 6 500 万年前的恐龙大灭绝、100 多年前的通古斯大爆炸等<sup>[18]</sup>。1994 年舒梅克-列维 9 号彗星连串撞击木星,带去巨量的含 S、N 物质和金属元素<sup>[19]</sup>,释放的能量大约相当于 20 亿颗原子弹的爆炸;2013 年 2 月 15 日,俄罗斯车里雅宾斯克(Chelyabinsk)陨石撞击导致人员受伤和建筑物受损<sup>[20]</sup>,而这颗小行星的直径不足 20 m。

通过太阳系探测,确定这些小天体的精密轨道、运动速度、体积、物质组成、内部结构,研究并评估其撞击地球的可能性和灾害程度,提出排危和规避方案,进一步了解并保护地球和人类的安全。我国在近地小行星和空间碎片观测,以及古环境、古气候和陨石学研究方面已有丰富积累,可以支撑这方面的

太阳系探测任务的开展。

## 3 关于我国太阳系探测的科学设想

### 3.1 基本思路

在战略规划层面。随着探月工程的进展,我国目前已具备持续开展太阳系探测的能力,在规划未来任务时:1)应围绕关键和热点科学问题,坚持科学需求牵引、带动技术发展;2)坚持高起点和前瞻性,突出创新和特色;3)坚持有限目标、突出重点,有所为有所不为;4)坚持以我为主,积极开展国际合作。

在战略实施层面。太阳系探测应立足我国现有科技、经济发展水平、航天技术基础和发展能力,总体规划,分步实施,循序渐进,持续发展。用 20 多年的时间,以火星探测为切入点,分为启动、推进、发展 3 个阶段,渐次、有序地统筹开展对小行星、太阳、金星、木星系统等的探测活动。

在科学发展层面。太阳系探测应围绕和针对重大关键科学问题,以火星探测为切入点,统筹开展小行星、太阳、金星、木星系统等探测,在太阳系的起源与演化、太阳和小天体活动对地球的危害性影响、地外生命信息探寻等研究领域取得一批重大科学成果,建立较为完善的太阳系探测的科学研究体系,推动我国天文学、空间科学、行星科学与地球科学等学科发展和空间技术应用。

### 3.2 科学设想

火星探测。自然环境最接近地球的火星是太阳系探测的切入点,通过火星全球遥感探测、着陆巡视探测和采样返回,实现从全球普查到局部详查、着陆就位分析、再到样品实验室分析的科学递进。主要科学目标包括:探测火星地下水体分布与土壤特征,大气层甲烷与二氧化碳的成因,研究火星生命信息和生命存在环境;探测火星磁层、电离层与大气层的结构、成分和演化趋势,研究火星气候的变化及其演化历史;火星全球性地形地貌的类型与特征,研究风、水(冰)、火山、撞击和构造活动在火星表面形貌的形成与改造中的作用,揭示火星地质特征和演化历史;火星表面的化学成分、矿物组成与岩石类型,反演火星岩浆演化历史;火星表面的地质建造与构造区划;探测火星内部物理场(电场、磁场、重力场)和核、幔、壳结构;火星与类地行星的比较研究与火星的演化历史。

小行星探测。通过对近地小行星和主带小行星(如:谷神星)进行飞越、伴飞、附着探测和取样返回,



实现对目标小行星的整体性探测和局部区域的就位分析及样品的系统分析,研究小行星的起源与演化,为将来可能的小行星撞击地球事件的应对措施和早期太阳系形成与演化过程提供科学依据。主要科学目标包括:精确监测对地球有潜在威胁的小行星的大小、形状、结构和运行轨道及其变化,评估其撞击地球的可能性,探测其形貌、结构、物质成分;获取和分析太阳系形成时的早期物质,研究行星的形成与演化;探测小行星的空间风化层,研究太阳风与小行星的相互作用;探测小行星的有机物和可能的生命信息,研究生命起源与演化。

**太阳探测。**通过对太阳的深空定点观测、极轨观测和太阳风暴全景观测,实现由点到面再到体的系统的太阳探测任务目标,研究太阳磁场和太阳活动的起源和演化,探究太阳活动对近地空间环境的灾害性影响,提高对太阳风暴的预报和警报能力。主要科学目标包括:探测太阳矢量磁场、速度场和辐射场,监测太阳活动,研究太阳磁场和太阳活动的起源和演化,揭示太阳耀斑和日冕物质抛射等爆发现象的物理机制,探索太阳活动对近地空间环境的灾害性影响,提高对太阳风暴的预报和警报能力。

**金星探测。**金星是研究地球温室效应和全球变暖的天然实验室,金星探测可以通过环绕和气球浮空探测的方式进行。主要科学目标包括:探测金星大气层、电离层与磁层,研究大气组成与结构、闪电和气辉、温室效应、大气环流等的成因机制以及整体演化过程,研究大气层、电离层与太阳风的相互作用过程,探讨水逃逸的机制;探测地形地貌、地质构造与物质成分,研究金星表面改造的地质营力与地质构造演化史;探测金星重力场与磁场,研究金星内部结构。

**木星系统探测。**木星系统被称为是小太阳系,是研究太阳系起源和演化的关键。木星系统探测需要掌握长期星际飞行、行星际借力飞行、穿越小行星带、长寿命航天器设计、核同位素电源、远距离测控等关键技术,将显著牵引航天技术进步。主要科学目标包括:探测木星的磁层结构,研究太阳风与木星磁场的相互作用;探测木星大气层及其变化,研究大气环流模式和动力学机制;探测金星—地球—木星的行星际太阳风结构,研究太阳风在行星际空间的传播特性;探测木卫二空间环境和表面冰层形貌,研究大气模式和冰层厚度分布特性;开展巡航段飞行器生物舱试验,研究地球生命的地外生存特性。

## 4 结论与展望

1)21世纪是人类全面探测太阳系的新时代,未来的太阳系探测以月球和火星探测为主线,适当兼顾太阳、小行星、木星系统等其他天体的探测;中国在探月工程取得重要进展的同时,应以火星探测为切入点,尽快开展我国的太阳系探测活动。

2)未来的太阳系探测将以科学为主要驱动力,在推动航天技术发展的同时,加深我们对太阳系的认识,拓展人类的知识疆界。其中,太阳系及其行星的起源和演化是太阳系探测的终极科学目标,寻找地外生命和宜居环境是太阳系探测的主要驱动力,预防太阳活动和小天体撞击对地球的灾害性影响是太阳系探测的现实意义。

3)我国的太阳系探测应围绕和针对重大关键科学问题,以月球和火星探测为主线,统筹开展小行星、太阳、金星、木星系统等探测,争取在太阳系的起源与演化、太阳和小天体活动对地球的灾害性影响、地外生命信息探寻等研究领域取得一批重大科学成果,推动我国天文学、空间科学、行星科学、地球科学等学科的发展和空间技术的推广与应用。

### 致谢

中国科学院和国防科工局组织的我国月球与深空探测科学目标论证专家委员会的论证成果对本文帮助极大。严俊、李春来、邹永廖、林杨挺、王世杰、刘建忠、张福勤等带领的研究团队的长期积累是完成本文的主要基础。感谢编辑部和审稿人提出了很好的修改建议。

### 参 考 文 献

- [1] McFadden L A, Weissman P, Johnson T. Encyclopedia of the solar system[M]. [s.l.]: Academic Press, 2006.
- [2] 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. [Ouyanz Z, Li C, Zou Y, et al. Preliminary scientific results of the lunar exploration program[J]. Science China Earth Sciences, 2010,40(3):261-280.]
- [3] 欧阳自远.月球科学概论[M].北京:中国宇航出版社,2005. [Ouyang Z. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.]
- [4] Heiken G, Vaniman D, Frence B M, et al. Lunar sourcebook-a user's guide to the Moon[M]. New York: Cambridge University Press,1991.
- [5] Nozette S, Rustan P, Pleasance L P, et al. The Clementine mission to the Moon: scientific overview[J]. Science, 1994,

- 26:1835-1839.
- [6] Binder A B. Lunar prospector; overview[J]. *Science*, 1998, 281(4):1475-1476.
- [7] 郑永春, 邹永廖, 付晓辉, 等. 月球上的水: 探测历程与新的证据[J]. *地质学报*, 2011, 84(7):1069-1078. [Zheng Y, Zou Y, Fu X, et al. Water on the Moon; exploration history and new evidence[J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2011, 84(7): 1069-1078.]
- [8] National Research Council. (Eds.), *Vision and voyages for planetary science in the decade 2013-2022*[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2011.
- [9] Schmidt W, Quémerais E, Kyrölä E. Space weather prediction in the Solar system [EB/OL]. [2014-05-01]. <http://meetings.copernicus.org/epsc2013>, id. EPSC 2013-183.
- [10] Board S S. *New frontiers in the solar system; an integrated exploration strategy*[M]. Washington, DC: The National Academic Press, 2003.
- [11] Malin M C, Edgett K S. Mars global surveyor Mars orbiter camera; interplanetary cruise through primary mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2001, 106(E10):23429-23570.
- [12] Squyres S, Arvidson R, Ruff S, et al. Detection of silica-rich deposits on Mars[J]. *Science*, 2008, 320(5879):1063-1067.
- [13] Mustard J F, Murchie S, Pelkey S, et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance orbiter CRISM instrument[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 305-309.
- [14] Hecht M H, Kounaves S P, Quinn R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of martian soil at the Phoenix lander site[J]. *Science*, 2009, 325(5936):64-67.
- [15] McKay D S, Gibson E K, Thomas-Keperta K L, et al. Search for past life on Mars; possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001 [J]. *Science*, 1996, 273(5277):924-930.
- [16] National Research Council (Eds.). *An astrobiology strategy for the exploration of Mars*[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2007.
- [17] Glavin D W, Brinckerhoff P, Conrad J, et al. The importance of in situ measurements and sample return in the search for chemical biosignatures on Mars or other solar system bodies [C]. AGU Fall Meeting Abstracts, San Francisco, CA, December 9-13, 2013.
- [18] 欧阳自远. 小天体撞击与古环境灾变——新生代六次撞击事件的研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. [Ouyang Z. Impact of asteroid and palaeoenvironmental catastrophe: study on six cenozoic bolide-impact events[M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 1997.]
- [19] Noll K, McGrath M, Trafton L, et al. HST spectroscopic observations of Jupiter after the collision of comet Shoemaker-Levy 9 [J]. *Science*, 1995, 267(5202): 1307-1313.
- [20] Galimov E M, Kolotov V P, Nazarov M A, et al. Analytical results for the material of the Chelyabinsk meteorite[J]. *Geochem. Int.*, 2013, 51(7):522-539.

作者简介:

郑永春(1977—),男,博士,副研究员,从事月球与行星科学研究,主要研究兴趣为行星地质与行星遥感。

E-mail: zyc@nao.cas.cn

欧阳自远(1935—),男,中国科学院院士,第三世界科学院院士,国际宇航科学院院士,主要从事天体化学与比较行星学研究。

[责任编辑: 宋宏]