0254-6124/2024/44(5)-0753-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HAN Lin, YANG Fan, FAN Weiwei, WANG Haiming. Trends and Strategic Planning Researches of Venus Exploration Abroad (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(5): 753–762. DOI:10.11728/cjss2024.05.2024–yg08

国外金星探测发展态势及战略规划解析*

韩 淋 杨 帆 范唯唯 王海名

(中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190)

摘 要 当前, 欧洲以及美、俄、印等均部署了面向 2030 年左右的金星探测任务, 全球金星探测即将迎来新高潮. 本文系统梳理国外已发射和未来明确规划的金星探测任务, 对美国金星探测路线图进行系统研究, 分析金星探测的科学目标体系、平台任务类型、关键支撑技术体系及成熟度, 揭示国外金星探测任务特点及长期科学和技术战略谋划的新成果、新进展. 通过综合分析国际发展态势, 提出中国应把握时机尽快启动部署金星探测任务, 同时加强支持科学任务规划长期战略研究储备, 以期为中国金星任务研究和规划提供参考.

关键词 金星探测, 任务规划, 科学目标, 路线图

中图分类号 P185

Trends and Strategic Planning Researches of Venus Exploration Abroad

HAN Lin YANG Fan FAN Weiwei WANG Haiming

(*Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract Europe, the United States, Russia and India have planned Venus exploration missions around 2030, and global Venus exploration is about to reach a new peak. This article systematically reviews the global Venus exploration missions that were launched or have been selected to implement in near future, conducts research on the US Venus exploration roadmap, analyzes the scientific goals, mission platforms, key technologies of Venus exploration, and reveals the characteristics of future Venus exploration missions and progress of long-term scientific and technological strategic planning abroad. By comprehensively analyzing the international Venus exploration trends, it is proposed that China should seize the opportunity to initiate Venus exploration as soon as possible, while strengthening support for scientific goals planning and long-term strategic research, hoping to provide reference for China's Venus mission research and planning.

Key words Venus exploration, Mission planning, Scientific objectives, Roadmap

* 中国科学院战略研究专项"科学前沿制高点研究"项目资助 (GHJ-ZLZX-2024-05)

2024-06-24 收到原稿, 2024-08-20 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

0 引言

金星是太阳系的八大行星中, 从太阳向外的第二颗行星, 也是地球最近的行星邻居. 金星在结构和大小上与地球相似, 但却被称为地球的“邪恶双胞胎”[1]. 金星浓厚的大气层将热量困在失控的温室效应中, 使其成为太阳系中最热的行星. 在稠密而经久不散的云层下面, 是拥有火山和变形山脉的灼热地表, 温度足以使铅融化. 距金星地表约 50 km 高度的大气温度约在 30～70℃ 之间, 有可能存在极端微生物, 但尚未发现令人信服的证据.

作为地球的近邻, 金星很早就成为人类深空探测的重要目的地, 是仅次于月球和火星的深空探测目的地. 面向未来, 欧洲及美、俄、印等均部署了面向 2030 年左右的金星探测任务. 总体来看, 全球金星探测在经历了 20 世纪 60－80 年代的高峰期以及随后持续的低谷期后, 即将再次迎来高峰期.

本文采用历史文献研究、科技情报地平线扫描、综合战略研判等方法, 系统梳理国外已发射和未来明确规划的金星探测任务, 调研美国金星探测战略研究报告, 总结分析金星探测的科学目标体系、主要平台任务、关键支撑技术体系及成熟度, 旨在揭示国外金星探测任务的实施概况和未来部署, 以及长期科学和技术战略的核心关切和最新进展, 以期为中国酝酿、规划、设计和实施金星探测任务提供参考.

1 金星探测任务

1.1 已发射的金星探测任务

自 1961 年苏联首次实施金星探测至今, 全球共发射 38 项以金星为主探测目标的探测任务[2], 其中, 苏联发射 29 次, 成功 15 次; 美国发射 7 次, 成功 6 次; ESA 发射 1 次, 成功 1 次; 日本发射 1 次, 成功 1 次. 表 1 列举了全球已发射的以金星为主探测目标的探测任务. 总计 38 项金星任务中, 36 项任务在 20 世纪 60－80 年代发射, 本世纪发射的仅有 ESA 和日本的两项任务, 其中日本拂晓号 (Akatsuki) 是目前唯一仍在运行的金星探测器.

此外, 许多以水星、外太阳系、太阳为目标的探测任务, 往往会利用金星的重力助推, 以节省燃料、时间和成本. 这些探测器会在飞掠金星的同时对金星开展科学观测, 例如信使号 (MESSENGER) 和贝皮–科伦坡 (BepiColombo) 水星探测器, 伽利略号 (Galileo) 木星探测器, 卡西尼号 (Cassini) 土星探测器, 帕克太阳探测器 (Parker Solar Probe) 和太阳轨道器 (Solar Orbiter) 等.

1.2 未来金星任务计划

美国于 2021 年批准“达芬奇+”(“DAVINCI+”) 和真理号 (VERITAS) 两项金星探测任务. ESA 同年批准展望号 (EnVision) 任务. 俄罗斯金星-D(Venera-D) 任务酝酿多年并在规划后续任务. 印度也在推进研制金星轨道器 (VOM) 任务. 这些任务均计划大致在 2030

表 1 全球已发射金星任务

Table 1 List of launched Venus missions

序号	任务	发射时间	国家/地区	任务类型	任务结果
1	Tyazhely Sputnik	1961年2月	苏联	撞击	失败
2	金星-1 (Venera-1)	1961年2月	苏联	撞击	失败
3	水手-1 (Mariner-1)	1962年7月	美国	飞掠	失败
4	2 MV-1 No.1	1962年8月	苏联	着陆器	失败
5	水手-2 (Mariner-2)	1962年8月	美国	飞掠	成功
6	2 MV-1 No.2	1962年9月	苏联	着陆器	失败
7	2 MV-2 No.1	1962年9月	苏联	飞掠	失败
8	3 MV-1 No.2	1964年2月	苏联	飞掠	失败
9	宇宙-27 (Kosmos 27)	1964年3月	苏联	飞掠/着陆器	失败
10	探测器-1 (Zond 1)	1964年4月	苏联	飞掠/着陆器	失败
11	金星-2 (Venera 2)	1965年11月	苏联	飞掠	失败
12	金星-3 (Venera 3)	1965年11月	苏联	着陆器	失败

续表 1

序号	任务	发射时间	国家/地区	任务类型	任务结果
13	宇宙-96 (Kosmos 96)	1965年11月	苏联	飞掠	失败
14	金星-4 (Venera 4)	1967年6月	苏联	大气探测	成功
15	水手-5 (Mariner 5)	1967年6月	美国	飞掠	成功
16	宇宙-167 (Kosmos 167)	1967年6月	苏联	着陆器	失败
17	金星-5 (Venera 5)	1969年1月	苏联	大气探测	成功
18	金星-6 (Venera 6)	1969年1月	苏联	大气探测	成功
19	金星-7 (Venera 7)	1970年8月	苏联	着陆器	部分成功
20	宇宙-359 (Kosmos 359)	1970年8月	苏联	着陆器	失败
21	金星-8 (Venera 8)	1972年3月	苏联	着陆器	成功
22	宇宙-482 (Kosmos 482)	1972年3月	苏联	着陆器	失败
23	水手-10 (Mariner 10)	1973年11月	美国	飞掠	成功
24	金星-9 (Venera 9)	1975年6月	苏联	轨道器/着陆器	成功
25	金星-10 (Venera 10)	1975年6月	苏联	轨道器/着陆器	成功
26	先驱者金星-1 (Pioneer Venus 1)	1978年5月	美国	轨道器	成功
27	先驱者金星-2 (Pioneer Venus 2)	1978年8月	美国	大气探测	成功
28	金星-11 (Venera 11)	1978年9月	苏联	飞掠/着陆器	基本成功
29	金星-12 (Venera 12)	1978年9月	苏联	飞掠/着陆器	基本成功
30	金星-13 (Venera 13)	1981年10月	苏联	飞掠/着陆器	成功
31	金星-14 (Venera 14)	1981年11月	苏联	飞掠/着陆器	成功
32	金星-15 (Venera 15)	1983年6月	苏联	轨道器	成功
33	金星-16 (Venera 16)	1983年6月	苏联	轨道器	成功
34	维加-1 (Vega 1)	1984年12月	苏联	飞掠/大气探测/着陆器	基本成功
35	维加-2 (Vega 2)	1984年12月	苏联	飞掠/大气探测/着陆器	成功
36	麦哲伦号 (Magellan)	1989年5月	美国	轨道器	成功
37	金星快车 (Venus Express)	2005年11月	欧洲	轨道器	成功
38	拂晓号 (Akatsuki)	2010年5月	日本	轨道器	成功, 运行中

注　列表为以金星为主探测目标的任务.

年前后发射.

1.2.1　美国“达芬奇+”和真理号任务

2015 年 NASA 发现 (Discovery) 计划选择了 5 项预研项目, 为每个项目提供 300 万美元资助开展概念设计研究, 其中包括 2 项金星任务, 美国对未来金星任务概念的关注由此可见一斑. 这两项任务分别是达芬奇号 (DAVINCI) 和真理号. 2021 年, NASA 正式批准 2 项任务, 其中达芬奇号改名为“达芬奇+”[3,4]. 每项任务开发成本在 5 亿美元左右.

“达芬奇+”是一项金星大气探测任务 (见图 1), 包括一个航天器和一个 1 m 直径的下落球体探空器, 将分析金星的大气层, 了解其形成演化历史, 探究是否曾有海洋存在, 加深对类地行星形成过程的认知和

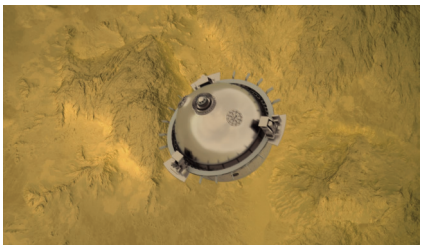

图 1　NASA“达芬奇+”任务

Fig. 1　NASA “DAVINCI+” mission

理解. 航天器将通过测量金星表面浓厚大气辐射到空间的热量来跟踪云层的运动并测绘表面成分. 球体探空器将向下穿透大气层, 探测大气的化学成分、温度、压力和风, 精确测量稀有气体等各类成分, 揭示

金星的大气层如何成为失控的温室. 按照 NASA 目前披露情况, “达芬奇+”将在 2028－2030 年发射. “达芬奇+”将首先开展金星飞掠探测, 完成为期 2 年的遥感任务后释放探空器, 在约 1 h 的下降过程中开展探测, 最后降落在金星表面 Alpha Regio 地区. 航天器搭载 4 台相机和小型紫外至可见光成像光谱仪技术验证仪器, 探空器搭载金星质谱仪 (VMS)、金星可调谐激光光谱仪 (VTLS)、金星大气结构研究 (VASI)、金星下降成像仪 (VenDI)4 个载荷以及金星氧气逃逸率学生合作实验[5]. “达芬奇+”还将首次以高分辨率拍摄金星上被称为 Tesserae (相当于地球上的大陆, 表明金星具有板块构造) 的独特地质特征. 任务的首席科学家是 NASA 戈达德航天飞行中心的 James Garvin, 戈达德航天飞行中心负责项目管理.

真理号是一项轨道器任务 (见图 2), 目标是绘制金星表面的地图, 确定地质历史, 研究金星与地球的演化差异. 按照 NASA 目前披露情况, 真理号将在 2031－2032 年发射. 真理号轨道器将利用合成孔径雷达绘制近全球表面高度, 生成三维地形图, 研究是否存在活跃的板块构造和火山活动. 真理号还将探测金星表面的红外辐射, 测绘目前知之甚少的金星地质情况, 并确定金星火山是否正在向大气中释放水蒸气. 任务的首席科学家是 NASA 喷气推进实验室的 Suzanne Smrekar, 喷气推进实验室负责项目管理. 此外, 德国、意大利、法国将提供红外测绘仪、雷达等部分载荷.

1.2.2 俄罗斯金星-D 任务

2003 年俄罗斯科学院提出金星-D 任务概念 (见图 3), 旨在开发可在金星表面存活 30 天的着陆器任务, 其中 D 代表长寿命[6]. 此后, 俄罗斯科学院对金星-D 任务概念开展长期研究, 并与欧洲和美国开展了国际合作探讨. 2015 年俄罗斯科学院与 NASA 成立了金星-D 任务联合科学定义小组, 并于 2017 年和 2019 年相继发布两份评估报告. 根据 2019 年发布的评估报告[7], 金星-D 任务主题是解析从大气层顶到金星表面和内部的金星系统, 基线任务包括一个轨道器和一个着陆器, 着陆器携带由 NASA 提供的长寿命原位太阳系探测器 (LLISSE). 轨道器运行在周期为 24 h 的近极地轨道, 预期运行寿命不少于 3 年. 着陆器将在下降过程中对大气进行采样并对金星表面成像, 然后降落在金星北半球的高纬度地区, 预期运行 2～3 h. 长寿命原位太阳系探测器将在金星表面运行不少于 60 天, 返回金星近地表风的成分和物理性质等信息. 此外, 为进一步提高任务的科学回报, 还可选择性增加若干任务单元, 包括金星地震和大气探测小型台站、高度可变空中平台、部署在拉格朗日点可环绕金星运行的子卫星等.

2022 年俄美终止金星-D 合作. 2023 年俄罗斯国家航天集团公司 (Roscosmos) 披露已完成金星-D 技术方案制定, 后续将在此基础上开展概念设计、批准技术规范、与承包机构签订合同、成立总设计师委员会. 按照规划, 金星-D 可能将在 2030 年后发射[8]. 此外, 俄罗斯正在研究金星-V(Venera-V) 任务的可行性, 该任务将聚焦金星土壤、大气和气溶胶采样返回, 任务的框架概念包括接续发射探测–返回和着陆航天器[9].

1.2.3 欧洲展望号任务

2021 年 ESA 宇宙憧憬计划 (Cosmic Vision) 正式批准遴选展望号金星探测任务成为第 5 个中型任务 (见图 4) [10], 2024 年 1 月展望号完成研究阶段, 进入开发阶段[11]. 展望号是一项轨道器任务, 将延续金星快车的工作, 重点开展金星大气研究, 此外还将探究金星地质活动性质和当前状态、地质活动与大气的关系, 以便更好理解地球与金星的不同演化路径, 深入了解金星地表的地质演变.

ESA 曾于 2005－2014 年成功运行金星快车, 该任务聚焦金星大气研究, 并发现金星表面可能存在火山活动热点区域. 展望号将延续金星快车的工作, 携带 S 波段合成孔径雷达、地下雷达探测仪、红外成像

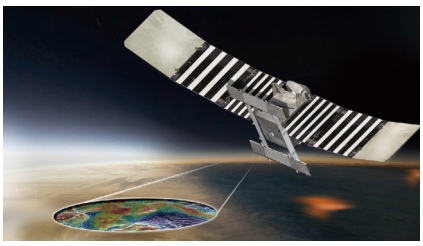

图 2 NASA 真理号任务

Fig. 2 NASA VERITAS mission

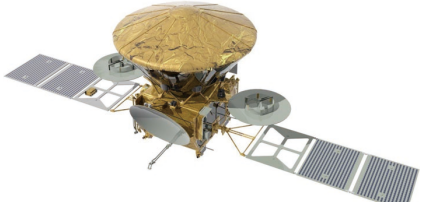

图 3 俄罗斯金星-D 任务

Fig. 3 Russia Venera-D mission

仪、红外光谱仪和紫外线光谱仪等 5 个科学载荷. 其中, 光谱仪旨在监测金星大气中的痕量气体并分析地表成分, 寻找可能与火山活动有关的变化. 由 NASA 提供的雷达将对金星地表开展成像和测绘. 无线电科学实验将探测金星内部结构和重力场, 分析大气结构和组成. 这些仪器将协同工作, 从内部到地表再到大气, 表征金星不同边界之间的相互作用. 展望号还将与 NASA 的“达芬奇+”和真理号开展合作研究.

ESA 于 2016 年启动宇宙憧憬计划第 5 个中型任务征集. 2018 年展望号从 25 个候选提案中脱颖而出, 成为最终入围的 3 个任务概念之一. 展望号最早的发射窗口在 2031 年, 也可选择 2032 和 2033 年. 航天器需要约 15 个月飞抵金星, 另需 16 个月大气制动实现轨道循环, 绕金星准极地 (Quasi-polar) 轨道周期约 92 min, 轨道高度 220～540 km.

1.2.4　印度轨道器任务

印度空间研究组织 (ISRO) 持续推进金星轨道器任务研制开发. 2018 年印度空间研究组织向国际发布金星天基实验机会公告[12]. 公告中披露, 印度计划在 2023 年发射金星轨道器任务, 对金星地下、表面、大气、电离层、等离子体和太阳–金星关系等开展研究. 任务可搭载约 100 kg 的有效载荷, 功率约 500 W, 运行在距离金星 500～60000 km 的高倾斜轨道上. 2020 年, 印度空间研究组织披露任务发射时间推迟至 2024 年 12 月, 备用发射窗口为 2026 年中期, 任务运行时间为 4 年, 核心载荷为改进版双频合成孔径雷达和探地雷达[13]. 2024 年 9 月印度联邦内阁正式批准推进金星轨道器任务, 计划在 2028 年 3 月发射[14].

2　美国金星探测科技战略研究与规划

世界航天强国/地区一直高度重视金星探测战略研究, 特别是美国长期以来持续支持开展涵盖科学目标体系、平台任务规划、技术成熟度评估的金星探测路线图系统研究. 金星探测分析小组 (VEXAG) 是 NASA 于 2005 年发起的科学界论坛, 由科学任务部下属的行星科学处特许, 旨在研究金星探测的科学重点和机遇, 明确科学投入和技术开发计划, 定期评估金星探测目标、科学目标、科研活动和关键探测要求, 为美国国家科学院的系列行星科学十年调查研究和太阳系探索战略路线图提供咨询和建议[15]. 在 NASA 支持下, 金星探测分析小组长期开展金星探测战略规划研究, 分别在 2014 年、2019 年发布两版金星探测路线图系列报告. 2019 年发布的“金星探测目标、目的和研究活动”[16]“金星探测路线图”[17]“金星技术计划”[18]3 份报告, 系统论述了金星探测的科学目标、任务规划和支撑技术.

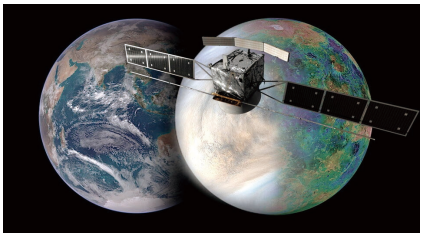

图 4　ESA 展望号任务

Fig. 4　ESA Envision mission

2.1　金星探测的科学目标

“金星探测目标、目的和研究活动”报告旨在反映科学界的共识, 描述填补比较行星学知识空白所需的科学发现, 促进对行星演化和宜居性的理解. 报告提出了金星的早期演化和潜在宜居性、金星大气动力学和组分、金星地质历史及表面与大气相互作用等 3 个科学目标, 并针对每个科学目标提出了待解决的 6 个科学问题 (目的), 以及按照重要度排序的对应研究活动 (见表 2).

2.2　金星探测的任务规划

“金星探测路线图”报告重点描述金星任务规划 (见表 3), 考虑了轨道器、探测器、高空平台、地面平台 (着陆器) 以及利用诸如非金星任务实施飞掠等任务机会等不同探索平台可能的科学贡献, 并分别针对近期 (2020－2022 年)、中期 (2023－2032 年) 和远期 (2033－2042 年) 3 个阶段的任务机会给出了建议.

2.3　金星探测的关键支撑技术

“金星技术计划”报告旨在论述实现路线图所需的关键支撑技术, 评估金星探测技术的成熟度, 总结 NASA 应投资的金星探测技术需求 (见表 4), 针对近期、中期、远期各类任务模式, 从系统级技术、子系统级技术、科学仪器三个层面评估了各项技术的成熟度 (见表 5). 其中技术成熟度“高”表示在其所在时间段飞行准备就绪, 相当于技术成熟度等级 6; “混合”表示部分技术飞行准备就绪, 其他处于不同成熟度水平; “高–中”表示还需少量开发和测试工作; “中”表示需要持续研发工作; “中–低”表示需要较大量研发

表 2 金星探测的目标、目的和研究活动

Table 2 Goals, objectives and investigations of Venus exploration

目标	目的	研究活动 (研究活动与目的的关系分为3类: 至关重要, 重要, 特定)
了解金星的早期演化和潜在宜居性, 为揭示金星大小的(系外)行星的演化提供约束	金星早期是否有温和的地表环境和液态水	水的起源(至关重要): 确定金星是否显示出丰富的硅化火成岩和/或古代沉积岩的证据
		再循环(至关重要): 寻找金星地壳再循环的结构、地貌和化学证据
		大气损失(重要): 量化金星大气向太空失去质量的过程, 包括磁场与入射离子和电子之间的相互作用
		磁性(特定): 表征金星地壳剩余磁性的分布
	金星是如何体现行星演化的各种可能路径的	同位素(至关重要): 测量金星大气中D/H、稀有气体、氧气、氮气和其他元素的同位素比率和丰度
		岩石圈(至关重要): 确定金星上对流变学和潜在地球动力学转变至关重要的岩石圈参数, 包括: 应力状态、含水量、物理结构以及弹性和机械厚度
		热流(重要): 确定金星岩石圈当前的热结构, 并测量原位热流
		金星核(重要): 测量金星核的大小, 确定其是否部分呈现液态
了解金星的大气动力学和组分	驱动金星全球大气动力学的过程是什么	深层动力学(至关重要): 表征金星低层大气(约75 km以下)的动力学特征, 包括逆行纬向超级自转、经向环流、辐射平衡、地形波和角动量传输
		高层动力学(至关重要): 在金星的高层大气和热层, 表征全球动力学以及空间天气与电离层和磁层之间的相互作用
		中尺度过程(重要): 确定中尺度动力学在金星大气层中重新分配能量和动量的作用
	决定金星大气组成的基线和变化以及全球和局部辐射平衡的过程是什么	辐射平衡(至关重要): 表征大气辐射平衡以及辐射传输如何驱动金星大气动力学
		相互作用(至关重要): 表征金星大气各组分之间的物理、化学和可能的生物学相互作用的性质
		气溶胶(重要): 确定金星大气气溶胶随海拔高度变化的物理特征和化学组成, 包括气溶胶类型/组成的区分
		未知吸收剂(重要): 表征金星高层大气中未知的短波吸收剂及其对局部和全球过程的影响
		排气(特定): 确定金星火山排气的产物及其对大气组成的影响
了解金星表面保存的地质历史以及当前金星表面和大气之间的相互作用	塑造金星表面的地质过程是什么	地质史(至关重要): 通过表征地层、改变状态和表面单元的相对年龄, 揭示金星的地质历史
		地球化学(至关重要): 确定金星上具有全球地质单元代表性的地区的元素化学、矿物学和岩石类型
		地质活动(至关重要): 表征改变了金星上的地质单元、撞击坑和喷出物的当前火山、构造和沉积活动
		地壳(重要): 确定金星地壳的三维结构和整个表面的厚度
	金星的大气和表面是如何相互作用的	局部风化(至关重要): 评估金星上具有全球地质单元代表性的地区的表面风化岩石外部的矿物学、氧化状态和化学变化
		全球风化(重要): 确定金星全球风化状态的成因和空间范围
		化学相互作用(特定): 表征金星关键地区和全球从地表到云底的大气组成和化学梯度

工作; “低”表示需要大量研发工作解决重大技术.

3 结论与启示

通过系统分析国外金星探测任务及金星探测的科学目标体系、平台任务类型、关键支撑技术的发展趋势、主要特点和最新战略规划, 得出如下结论与启示.

(1) 全球即将再次迎来金星探测高峰, 中国应把握时机加快部署金星探测任务. 深空探测业已成为全球科技竞争的关键前沿领域, 是彰显国家综合国力和创新能力的重要标志. 过去数十年间全球金星探测任务的断层, 从另一方面酝酿了金星探测产出重大科学

表 3　金星探测路线图任务平台

Table 3　Platforms included in the Venus exploration roadmap

平台类型	子类型	实施周期	平台描述和主要科学目标
轨道器	表面/内部	近期	单个航天器, 运行在圆形轨道、低空轨道、近极地轨道, 可完成大部分针对金星表面和内部的探测, 包括雷达成像、红外测绘、重力测量
	大气层/电离层	近期	单个航天器, 运行在偏心轨道、长周期轨道, 可进行大气遥感和原位电离层、磁层测量
	小卫星或立方星	近期	单个或多个航天器, 特定轨道运行, 开展有针对性的研究, 可为地面和空中平台提供中继和导航支持
大气层进入	飞掠	近期	大气层飞掠, 先在较高高度对金星大气采样, 随后飞离大气层进行样品分析和数据中继
	探针 (probe)	近期	进入大气层并下降到地表, 研究沿单一剖面的大气结构和成分以及近地表成像
	探空器 (sonde)	中期	探空器在下降过程中利用空中平台进行数据中继
地面平台	短期	近期	典型着陆器, 可在金星表面存活数小时, 探测着陆点附近岩石的元素和矿物成分, 包括地表深度的变化
	长期, 探路者	中期	探测器, 可在金星表面运行1个金星日(约116个地球日), 测量温度、风速和主要化学成分, 视情况携带地震传感器
	长期, 先进平台	长期	对大气、热流和地震活动分别开展短时(1个地球日)和长时(2个金星日)地表调查
空中平台	固定高度–中层云	近期	昼/夜漂浮在约20℃、标称高度 55 km 的位置, 6天内完成包括大气和内部探测在内的逆行纬向超旋转(RZS)
	可变高度–中层云	中期	漂浮高度控制在海拔50～60 km, 可探测云层内不同区域的成分和结构
	可变高度–云基	长期	使用被动热控系统将海拔控制在约40～60 km范围内, 保障常规电子设备的使用. 处于暴露位置的传感器须能承受最高150℃温度

表 4　NASA 金星探测技术需求

Table 4　NASA Venus exploration technology requirements

领域	需求
进入技术	资助确保进入技术能力水平不下降
子系统	开发用于金星环境、能力持续提升的高温电子器件、传感器、高密度电源
大气平台	通过竞争性计划确定哪种可变高度气球方案是最可行的
原位仪器	为金星环境专门设计的新仪器系统的飞行演示技术和开发
通信和基础设施	研究建立金星通信和导航基础设施的可行性和方法
先进制冷	对高效机械热转换和冷却设备的投资
下降和着陆	在金星稠密大气层中实施精确下降和着陆避险技术的新概念
自主性	专门用于金星的自动化和自主技术
小平台	开发作为大型任务补充的小型平台, 以及围绕小型平台设计新的任务类型
设备和基础设施	支持仪器和飞行系统所需的实验室设施和能力, 包括避免能力水平下降的关键技术
建模仿真	建立金星建模的系统科学方法
金星探测独特技术	继续并加强对高运行温度技术(HOTTech)等项目和其他技术开发项目的支持

成果的可能时机. 当前, 欧洲及美、俄、印等均部署了面向 2030 年左右的金星探测任务, 全球金星探测高潮即将到来. 与此同时, 中国的深空探测发展战略中尚未确定金星探测任务, 处于“人有我无”的状态. 近年来, 中国月球和行星探测工程取得了举世瞩目的成就, 作为建设航天强国的重要组成部分, 不应错过这一实现关键性突破、跨越式发展的重大机遇. 通过开展金星探测任务为正在崛起的深空探测提供进一步赶超可能, 按照任务规划及研制时间推算, 启动部署金星任务已迫在眉睫.

表 5 近、中、远期任务模式和适用技术

Table 5 Mission modes and applicable technologies for near-, mid- and far-term missions

实施周期	平台类型	系统级技术成熟度	子系统级技术成熟度	科学仪器成熟度
近期	轨道器	大气制动(高)	储能电池(高) 太阳能发电(高) 通信(高)	地表遥感(高) 大气遥感(高)
	小卫星	—	储能电池(高) 太阳能发电(高) 被动热控(高) 通信(高) 制导、导航和控制(高)	地表遥感(高) 大气遥感(高)
	深层探针	进入(高) 下降和部署(高) 空中平台(高)	储能电池(高) 高温机械(高) 中温电子器件(高) 通信(高) 制导、导航和控制(混合)	地表遥感(高) 原位空中平台和探针(高)
	多个浅层探针	进入(高) 下降和部署(高) 空中平台(高)	储能电池(高) 被动热控(高) 高温机械(高) 中温电子器件(高) 通信(高)	原位空中平台和探针(高)
	短期大型着陆器	进入(高) 下降和部署(高) 着陆(高) 空中平台(高) 着陆器(高)	储能电池(高) 被动热控(高) 高温机械(高) 中温电子器件(高) 通信(高) 制导、导航和控制(混合)	地表遥感(高) 原位地表短时(高)
	固定高度空中平台	进入(高) 下降和部署(高) 空中平台(高)	储能电池(高) 太阳能发电(高) 高温机械(高) 中温电子器件(高) 通信(高) 制导、导航和控制(混合)	地表遥感(高) 原位空中平台和探针(高)
中期	先进轨道器	自动化和自主性(中)	储能电池(高) 太阳能发电(高) 被动热控(高) 通信(高) 制导、导航和控制(高)	主动遥感(高–中) 被动遥感(高–中)
	亚卫星/小卫星平台	大气捕获(高–中) 小型平台(中) 自动化和自主性(中)	通信(中) 制导、导航和控制(中)	主动遥感(中) 被动遥感(高–中)
	多个深层探针和探空器	进入(高) 下降和部署(高) 小型平台(中) 自动化和自主性(中)	储能电池(高) 被动热控(中) 中温电子器件(高–中) 高温电子器件(中) 通信(高)	原位空中平台和探针(高)
	时间更长的大型着陆器	进入(高) 下降和部署(高) 着陆(高) 着陆器(中) 自动化和自主性(中)	储能电池(高) 被动热控(中) 主动热控(高) 高温机械(高–中) 通信(高) 制导、导航和控制(高)	—
	长期小平台着陆器	进入(高) 下降和部署(高) 着陆(高) 着陆器(中) 小型平台(中) 自动化和自主性(中)	储能电池(中) 太阳能发电(中) 替代能源发电(中) 被动热控(中) 高温机械(中) 高温电子器件(中) 通信(中)	原位地表高温传感器(中)

续表 5

实施周期	平台类型	系统级技术成熟度	子系统级技术成熟度	科学仪器成熟度
中期	上层和中层云层高度可控空中平台	进入(高) 下降和部署(高–中) 飞行(中) 机动(中) 自动化和自主性(高–中)	储能电池(高) 太阳能发电(高) 被动热控(高) 通信(高–中) 制导、导航和控制(中)	被动遥感(高–中) 原位空中平台和探针(中)
远期	先进轨道器/小卫星网络	大气捕获(高–中) 下降和部署(高) 小型平台(中) 自动化和自主性(中–低)	通信(高) 制导、导航和控制(中–低)	主动遥感(中) 被动遥感(中) 原位空中平台和探针(高)
	所有云层高度可控空中平台	进入(高) 下降和部署(高–中) 飞行(中–低) 机动(中–低) 自动化和自主性(中)	储能电池(高) 太阳能发电(高–中) 被动热控(高–中) 通信(高–中) 制导、导航和控制(中)	被动遥感(高–中) 原位空中平台和探针(中)
	冷却长期着陆器	进入(高) 下降和部署(高) 着陆(高) 飞行(中) 着陆器(中) 自动化和自主性(中)	储能电池(中) 放射性同位素发电(中) 替代能源发电(中) 主动热控(中–低) 高温机械(中) 中温电子器件(中) 高温电子器件(中) 通信(中) 制导、导航和控制(中–低)	原位地表高温传感器(中)
	长期着陆器网络	进入(高–中) 下降和部署(高) 着陆(高) 着陆器(中) 小型平台(中) 自动化和自主性(中)	储能电池(中) 太阳能发电(中–低) 放射性同位素发电(中) 替代能源发电(中) 主动热控(中) 高温机械(中) 中温电子器件(中) 高温电子器件(中) 通信(中) 制导、导航和控制(低)	原位地表高温传感器(中)
	地表机动	进入(中) 下降和部署(中) 着陆(中–低) 机动(低) 小型平台(低) 自动化和自主性(低)	储能电池(中–低) 太阳能发电(低) 放射性同位素发电(中–低) 替代能源发电(中–低) 主动热控(中–低) 高温机械(低) 中温电子器件(中–低) 高温电子器件(低) 通信(中–低) 制导、导航和控制(低)	主动遥感(低) 被动遥感(低) 地表遥感(低) 大气遥感(低) 原位地表高温传感器(中–低) 原位地表长时移动实验室(低)
	云层采样返回	大气捕获(中) 进入(中) 下降和部署(中) 飞行(中–低) 小型平台(低) 自动化和自主性(低)	太阳能发电(高) 制导、导航和控制(低)	原位空中平台和探针(中–低)
	地表采样返回	大气捕获(中–低) 进入(中–低) 下降和部署(低) 着陆(低) 飞行(低) 机动(低) 上升航天器(低) 小型平台(低) 自动化和自主性(低)	储能电池(低) 太阳能发电(低) 被动热控(低) 高温机械(低) 中温电子器件(低) 高温电子器件(低) 制导、导航和控制(低)	—

(2) 世界航天强国/地区高度重视金星探测战略研究, 中国应加强支持科学任务规划长期战略研究, 为相关任务目标凝练和技术方案的形成等提供坚实支撑. 例如, 美国专门成立了科学界论坛组织金星探测分析小组, 长期以来持续开展涵盖科学目标体系、平台任务规划、技术成熟度评估的金星探测路线图系统研究, 此外针对俄罗斯金星-D 任务俄美合作、金星旗舰任务、金星表面平台等多项任务概念开展系列战略研究. 俄罗斯从提出金星-D 任务概念到形成技术方案, 相关专题研究历时也已超过 20 年. 相比之下, 中国对空间科学领域的长期战略研究严重不足. 建议以金星探测等别具特色的深空探测任务研究为抓手, 全面加强空间科学任务长期战略研究, 围绕科学问题、关键技术、任务平台等持续开展研究和储备, 并通过这一长期过程锻炼和培育研究团队, 遴选兼具科学重要性和技术创新性的空间探测任务, 进而深化对宇宙的认知, 验证深空探测技术能力, 加快提升中国在空间探测领域的国际影响力.

参考文献

[1] NASA. Venus facts[EB/OL]. (2024-06-07)[2024-06-07]. https://science.nasa.gov/venus/venus-facts

[2] Wikipedia. List of missions to Venus[EB/OL]. (2024-03-27)[2024-03-27]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_missions_to_Venus

[3] NASA. NASA selects 2 missions to study 'Lost Habitable' world of Venus[EB/OL]. (2021-06-02)[2024-06-07]. https://www.nasa.gov/news-release/nasa-selects-2-missions-to-study-lost-habitable-world-of-venus/

[4] NASA. Discovery Program[EB/OL]. (2024-03-27)[2024-03-27]. https://www.nasa.gov/planetarymissions/discovery-program/

[5] NASA. NASA to explore divergent fate of earth's mysterious twin with Goddard's DAVINCI+[EB/OL]. (2021-06-02)[2024-03-27]. https://www.nasa.gov/solar-system/nasa-to-explore-divergent-fate-of-earths-mysterious-twin-with-goddards-davinci/

[6] FAN Weiwei, HAN Lin, WANG Haiming, *et al*. Analysis of the characteristics of Russia's future Venus exploration mission: Venera-D[J]. *Aerospace China*, 2020(10): 47-52 (范唯唯, 韩淋, 王海名, 等. 俄罗斯未来金星探测任务特点浅析 [J]. 中国航天, 2020(10): 47-52)

[7] VEXAG. Venera-D: Expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus[EB/OL]. (2019-01-31)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/Venera-DPhaseIIFinalReport.pdf

[8] Roscosmos. About the work on the creation of automatic stations for the exploration of Venus[EB/OL]. (2023-05-15)[2024-06-07]. https://www.roscosmos.ru/39231/

[9] TASS. Roscosmos and the Russian academy of sciences are working on the possibility of a mission to deliver soil from Venus[EB/OL]. (2023-05-11)[2024-06-07]. https://tass.ru/kosmos/17718991

[10] ESA. ESA selects revolutionary Venus mission envision[EB/OL]. (2021-06-10)[2024-03-27]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_selects_revolutionary_Venus_mission_Envision

[11] ESA. We're heading for Venus: ESA approves envision[EB/OL]. (2024-01-25)[2024-03-27]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/We_re_heading_for_Venus_ESA_approves_Envision

[12] ForumIAS. ISRO invites foreign 'riders' to Venus [EB/OL]. (2018-11-12)[2024-03-27]. https://forumias.com/blog/isro-invites-foreign-riders-to-venus/

[13] SpaceNews. India's Shukrayaan orbiter to study Venus for over four years, Launches in 2024[EB/OL]. (2020-11-19)[2024-03-27]. https://spacenews.com/indias-shukrayaan-orbiter-to-study-venus-for-over-four-years-launches-in-2024/

[14] Press Information Bureau Government of India. Expanding Horizons in Space Sector: From Lunar Exploration to a National Space Station[EB/OL]. (2024-09-24)[2024-10-11]. https://pib.gov.in/PressNoteDetails.aspx?NoteId=153184&ModuleI=3

[15] VEXAG. Venus exploration analysis group[EB/OL]. (2024-03-27)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/about-us/

[16] VEXAG. Venus goals, objectives, and investigations for Venus exploration[EB/OL]. (2019-10-01)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/VEXAG_Venus_GOI_2019.pdf

[17] VEXAG. Roadmap for Venus exploration[EB/OL]. (2019-10-01)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/VEXAG_Venus_Roadmap_2019.pdf

[18] VEXAG. Venus technology plan[EB/OL]. (2019-10-01)[2024-03-27]. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/VEXAG_Venus_Techplan_2019.pdf

作者简介

韩 淋 女, 1980 年 6 月出生于吉林省吉林市, 现为中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所副研究员, 主要研究方向为空间科技、半导体等领域的科技战略情报和政策研究.
E-mail: hanlin@casisd.cn

杨 帆(通信作者) 女, 1977 年 2 月出生于黑龙江省哈尔滨市, 现为中国科学院科技战略咨询研究院科技战略情报研究所副主任, 空间科技战略和政策研究中心主任, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间科技战略情报研究、空间政策研究、科技前沿和智库决策研究等.
E-mail: yangfan@casisd.cn