0254-6124/2022/42(6)-1047-13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

DONG Xiaolong, LIU Yang, HE Jieying, ZHANG Feng, XU Jian, ZHAO Yuyan, WANG Yu, ZHU Haotian, WANG Yongmei, WANG Wenyu, CAI Zhiming. Venus Volcano Imaging and Climate Explorer Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(6): 1047–1059. DOI:10.11728/cjss2022.06.yg33

金星火山与气候探测任务*

董晓龙[1,2] 刘 洋[1] 何杰颖[1] 张 锋[1]
许 健[1] 赵宇鹓[3,4] 王 宇[5] 朱皓天[1]
王咏梅[1,2] 王文煜[1] 蔡志鸣[6]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心 贵阳 550081)

4(成都理工大学行星科学国际研究中心 成都 610059)

5(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

6(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

摘 要 金星火山和气候探测任务（Venus Volcano Imaging and Climate Explorer，VOICE）聚焦金星火山与热演化历史、水与板块运动、内部结构和动力学、气候演化和生命信息探索等重大科学问题，提出采用极化合成孔径雷达（Polarimetric Synthetic Aperture Radar，PolSAR）、下视与临边结合的微波辐射探测仪（Microwave Radiometric Sounder，MWRS）和紫外–可见–近红外多光谱成像仪（Ultraviolet-Visible-Near Infrared Multispectral Imager，UVN-MSI）等三个先进的有效载荷，在 350 km 圆轨道上对金星全球表面和大气联合探测。PolSAR 将对金星全球表面进行高分辨多极化雷达成像；MWRS 将对金星全球云下大气的热力结构和化学组成，云中可能的宜居环境及与生命相关大气成分进行探测；UVN-MSI 则实现大气全貌成像、表面光谱成像和闪电检测。通过多种先进探测载荷和技术手段的结合，VOICE 任务将揭示金星构造热演化历史和超温室效应机理，探索其宜居性和生命信息。VOICE 任务的实施将实现国际金星研究探索中许多“零”的突破，为理解行星宜居性和太阳系演化提供极为关键的观测支持，对提升中国在国际深空探测与空间科学研究中的地位产生重大影响。

关键词 金星，火山作用，构造活动，大气成分和热力结构，宜居性和生命信息

中图分类号 V476

Venus Volcano Imaging and Climate Explorer Mission

DONG Xiaolong[1,2] LIU Yang[1] HE Jieying[1] ZHANG Feng[1]
XU Jian[1] ZHAO Yuyan[3,4] WANG Yu[5] ZHU Haotian[1]

* 中国科学院空间科学先导专项项目（XDA15072107）和中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目共同资助

2022-11-21 收到原稿，2022-11-25 收到修定稿

通信作者 董晓龙，E-mail：dongxiaolong@mirslab.cn

通信作者 刘洋，E-mail：yangliu@nssc.ac.cn

WANG Yongmei[1,2] WANG Wenyu[1] CAI Zhiming[6]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

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

3(*Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550081)

4(*International Center for Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059)

5(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100194)

6(*Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201304)

Abstract Venus Volcano Imaging and Climate Explorer (VOICE) is an orbiting mission to investigate the Venusian volcanic and thermal evolution history, water and plate tectonics, internal structure and dynamics, climate evolution, possible habitable environment and life information in the clouds. Three state-of-the-art scientific payloads, the Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR), the Microwave Radiometric Sounder (MWRS) and the Ultraviolet-Visible-Near Infrared Multi-Spectral Imager (UVN-MSI), will be flown on a polar-circular orbit of about 350 km. The PolSAR with meter resolution surface imaging capability enables refined exploration of Venusian tectonic and volcanic activity and evolution history. The MWRS, with a combination of a nadir-looking module and a limb-looking module, has the capability to refine the thermal structure and composition of the Venusian atmosphere, including near surface, below-inside and above the clouds, and will reveal the exchange and interaction between the surface and lower atmosphere. The MWRS will also investigate biosignatures, such as PH_3 and NH_3, in the cloud to further the fundamental scientific questions on the habitable environment and life information in Venus' atmosphere. The UVN-MSI can map the global atmosphere and look through the atmosphere with NIR windows. With combined observations by MWRS and UVN-MSI, our understanding of the atmospheric composition and climate evolution of Venus can be greatly improved. The scientific objective of the VOICE mission is to advance the understanding of the geological and thermal history and evolution of Venus, the mechanisms of the global circulation of Venusian atmosphere, past and current habitable environments, and the possible existence of life in the clouds of Venus. Through the combination of the state of art of payloads and technologies, the mission goals are to search for evidence of water and plate tectonic activities, reveal the type of volcanic activity and thermal evolution history of Venus; establish the composition and thermal structure of middle and lower atmosphere of Venus, and break through the understanding of Venusian atmospheric and climatic evolution; reveal the mechanism of runaway greenhouse effect, and explore whether Venus has a habitable environment and whether life (once) existed.

Key words Venus, Volcanic activity, Plate tectonic, Atmospheric composition and structure, Habitability and life information

0 引言

金星作为距离太阳最近的第二颗行星，由于与地球有着相似的大小、质量和初始物质(推测的)组成，以及相近的太阳光照辐射强度，被称为地球的“孪生星”。金星表面主要的地形单元包括主要由玄武岩充填的低海拔平原和由火山作用形成的高山，分布有低洼平原、丘陵、峡谷、高原、冕状地貌等多种构造单

元。轨道雷达数据显示,金星表面的撞击坑数量较少,这说明其表面改造的历史很短[1]。金星的重力略低于地球,但大气压力约为 93 Pa,表面平均温度高达 460℃。金星大气层主要由浓厚的在高温下超临界相的 CO_2 构成,且有着能阻隔太阳光的硫酸云层。活跃的金星对流层上层存在独特的超自转现象,导致其风速高达行星本身自转速度的数十倍[2]。金星两极存在反气旋结构[3]。金星还具有存在强大环流的大气“热层”[4]。虽然金星地表的温度和大气对生命极为严苛,但其上方 50 km 左右的大气压力和温度与地球几乎相同。因此,该区域或许能成为金星表面是否存在宜居环境的探测方向[5]。

太阳系和行星的起源与演化、地外生命宜居环境与生命信息探索是行星科学永恒的主题,开展金星探测对于了解与地球大小相近行星的演化和宜居性至关重要。根据现有太阳系和行星起源理论,推测金星早期具有与地球类似的岩石和大气组成,表面曾经存在大量的水,但后来金星沿着与地球截然不同的路径演化。地球是太阳系目前已知的唯一有生命的行星,而由于灾难性的剧烈温室效应,金星成为一个不宜居的行星[6]。探测和研究金星与地球的差异如何产生、何时产生以及为何产生,是解答太阳系类地行星形成演化、地球宜居性的形成和未来发展、太阳系外宜居星球搜索策略等重大科学问题的关键,也是行星科学的重大前沿问题。

NASA 的金星探索分析组(Venus Exploration and Analysis Group, VEXAG)在多年论证的基础上,提出了金星探测的三大科学目标,具体如下。

(1)理解金星早期演化和可能的宜居性,为相近大小(系外)行星演化提供约束。

(2)理解金星大气动力和化学组成。

(3)理解金星表面地质历史和表面与大气的耦合。

因此,研究金星表面地质形貌特征和物质组成,大气热力结构、化学组成及变化过程,地表(内部)与大气的物质能量交换与耦合等,是实现上述科学目标与解答上述科学问题的关键。金星还遗留着许多亟待探索的一级重大科学问题,包括金星地质构造和热演化历史,金星深层大气特征与气候演化,金星地表与大气相互作用及超温室效应成因机制,金星是否存在宜居环境及是否(曾经)存在生命等。

金星已重新成为行星探测与研究的热点。美国 2021 年已批准实施“真相(VERITAS)”和“达芬奇+(DAVINCI+)”两个金星探测计划;欧空局 2021 年批准实施“展望(EnVison)”金星探测计划;俄罗斯准备从 2029 年开始向金星发射配备有轨道器、着陆器和大气探测模块的金星-D 探测器,后续还计划通过探索-3 任务实现样品返回。金星火山与气候探测任务(Venus Volcano Imaging and Climate Explorer, VOICE)是由中国科学院国家空间科学中心、地球化学研究所和空天信息创新研究院联合提出,多家单位共同参加的空间科学卫星计划,该任务将对金星全球表面进行高分辨率的雷达成像,对全球大气热力结构和化学以及云中可能的生命信息进行探测,目前作为中国科学院空间科学战略性先导专项的候选空间科学卫星工程任务参加遴选。本文将对 VOICE 的科学概念、科学目标、有效载荷配置方案和预期取得的科学突破进行阐述和分析。

1 研究现状与发展趋势

1.1 金星探测历史与研究现状

自 1961 年苏联首次金星探测至今,世界各国共发射了 49 颗金星探测器[7]。其中:苏联发射 33 次,成功 15 次;美国发射 8 次,成功 6 次;欧盟成功发射 1 次;日本成功发射 1 次,其发射的探测器是目前唯一在轨运行的金星探测器。这些任务类型以金星飞掠、环绕和大气层进入探测任务为主(33 次),着陆任务(8 次)和漂浮任务(2 次)相对较少。这些任务大都集中在 20 世纪 60－70 年代,21 世纪以来,仅有欧空局的金星快车(Venus Express)和日本的拂晓号(Akatsuki)两个任务。

国际金星探测的主要方式包括:轨道器对金星表面开展雷达成像探测;轨道器对金星大气进行遥感探测(环绕或飞掠);下投探空器或着陆器,在降落过程中对金星大气及降落点周边很小范围区域开展就位探测和成像;利用气球/浮空器,对金星大气进行就位和成像探测。

由于金星表面具有浓密的大气,对金星地表形貌的探测仅能依靠低频段的微波雷达。1975－1977 年间,美国阿雷西博(Arecibo)天文台利用地基 S 波段(波长 12.6 cm)雷达对金星进行了成像探测,首次得到了金星表面图像,该图像覆盖了约 25% 的金星地

表, 分辨率为 5～20 km[8]。观测结果揭示了大型盾状火山和形貌迥异的熔岩平原等火山地貌, 众多火山口预示了火山作用是金星有效的内部能量散失方式。此外, 直径大于 15 km 撞击坑的低密度分布也揭示了金星熔岩平原的形成年龄较为年轻。1978－1992 年, 美国先驱–金星轨道器、苏联金星 15/16 号和美国麦哲伦号(Magellan)金星探测器利用在轨雷达对金星表面进行了成像探测[9], 获得的图像揭示了金星表面约 80% 由熔岩流组成的低矮平原覆盖, 其上分布着直径大于 20 km 的大型火山超过 1000 座, 最大火山的高度和直径分别为 8.5 km 和 400 km, 此外还有数以万计的小型盾状火山。因此, 火山作用是塑造金星表面的主要力量, 也是驱动金星壳层增生的主要机制。此外, 麦哲伦号绘制了迄今为止最详细的金星地形图, 其表面最高海拔大于 2 km。21 世纪以来, 基于雷达对金星形貌的探测一直处于停滞状态。已有的金星表面雷达探测分辨率仅能达到百米量级, 精度仅相当于 20 世纪 70 年代的火星任务, 无法实现精细的金星火山地貌识别与分类, 特别是无法对金星表面进行地质过程尺度的分析研究, 这严重制约了对金星表面火山类型和分布以及关键区域地质演化的认识。

与金星表面形貌观测相比, 对金星大气的探测数据较为丰富。先驱–金星 2 号、金星(Venera)系列着陆任务和维加 1/2 号开展了金星大气就位观测。这些观测表明, 金星存在比地球更严重的温室效应即超温室效应。观测数据还提供了金星大气热力结构和成分的初步信息, 可作为构建金星大气垂直结构的基础, 是金星中低层大气信息的唯一来源[9]。但由于就位探测的空间局限性, 只能获得经过位置和时刻的大气信息, 无法获得全球尺度范围连续时间变化过程的信息。相比之下, 遥感探测能够更完整地描述金星大气的时空变化特征与过程。早期探测器先驱–金星轨道器、金星 15/16 号和麦哲伦号获取了金星大气部分层位的温度和关键组分(SO_2, H_2O, H_2SO_4 等)的信息。近年来, 金星快车和拂晓号通过长时间环绕遥感探测, 实现了金星大气与气候认识的诸多突破。金星快车绘制了金星全球表面温度图、金星大气的热剖面和热结构、大气化学组成剖面(CO, SO_2, OCS, D/H 比等), 发现了新的大气组分(O_3 和 OH), 为研究金星大气的动力学过程及火山活动提供了重要科学数据[10]。拂晓号发现了金星大气中存在大尺度的弓形特征, 首次报道了赤道区域上方中低云层中存在的急流风, 发现上云层和中云层之间过渡带附近存在小颗粒的厚层云[11], 提出了金星大气超旋的维持机制[12]。由于金星浓密大气的限制, 大气遥感探测主要集中在金星中上层大气, 特别是云层以上大气。当前对 40 km 以下的大气热结构仍缺乏有效地全球性观测, 对 30 km 高度以下 SO_2, H_2O, CO_2, CO 等大气成分的全球性观测仍是空白, 对 12 km 高度以下金星深层大气缺乏探测数据, 金星地表与大气的物质和能量交换过程以及下层大气的运动过程仍然未知。

随着嫦娥工程、天问一号等任务的实施, 中国行星科学研究已展现出良好发展势头, 但从事金星研究的科研力量仍比较薄弱。中国现阶段针对金星的研究还主要集中在空间物理领域, 包括利用国际上的金星快车数据开展金星空间等离子环境、金星磁场特征、金星电离层等方面的研究[13–15]。近年来, 有团队开始探讨金星壳层厚度与内部演化[16,17] 以及金星探测的航天器和轨道设计等[18,19]。由于缺乏相关探测任务, 对金星表面形貌与中低层大气特征与演化的研究还比较少。中国尚未实质开展金星探测, 已经部署和实施的深空探测计划中也没有明确的金星任务规划。但在中国科学院空间科学先导专项的支持下, 先后开展了金星探测的科学目标、任务概念和关键技术需求的论证研究, 为未来实施金星探测任务提供了重要支撑。同时, 随着天问一号火星探测任务的成功实施, 中国已具备开展金星探测的基本能力和条件。针对金星科学重大问题, 表面成像的合成孔径雷达、可实现穿透云雾探测的微波–毫米波–亚毫米波/太赫兹探测技术和多波段光学成像探测等技术都有较好的技术基础, 已经能够支持开展和实施金星探测任务。

1.2 相关卫星计划部署

金星探测任务与月球和火星探测任务相比, 经历了近 30 年的重大探测任务断层, 近年来才重回大众视线, 多国计划在 2030 年左右发射新的金星探测任务。2021 年 6 月, 美国宇航局和欧空局分别批准了前往金星的新任务——“真相(VERITAS)”任务、“达芬奇+(DAVINCI+)”任务和“展望(EnVison)”任务。此外, 俄罗斯、印度也已提出并积极推进各自的金星探测任务。国际上金星探测与科学研究即将迎来新一轮热潮, 这为中国推动学科领域发展提供了重大机遇。

美国“真相(VERITAS)”任务全称“金星发射率、无线电科学、干涉合成孔径雷达、地形学和光谱学”任务[20],其主要科学目标是生成金星全球高分辨率地形图和影像,制成一系列金星全球图文件,包括形变、表面物质组成、热发射和重力场图。VERITAS 试图探索金星是否拥有古老的水环境,以及当前的火山活动是否仅限于地幔柱区域或是有更广泛的分布。美国“达芬奇+(DAVINCI+)”任务全称“金星深层大气稀有气体、化学和成像”任务[6],其通过探空器在下降的 63 min 过程中直接测量金星大气的组成,特别是测量稀有气体、痕量气体及其元素同位素组成,同时测量金星大气的温度、压力及风速。DAVINCI+到达地面之前,还将拍摄金星镶嵌地块影像,以探究其起源及金星构造、火山和风化等地质作用的历史。欧空局“展望(EnVison)”任务利用高分辨率雷达测绘金星地表和研究金星大气[21],其科学目标是寻找活跃的地质过程,测量与活跃火山作用有关的地表温度变化,表征区域和局部地质特征,确定地壳支撑机制,并为刻画金星幔和核的特征提供制约。俄罗斯“金星 D(Venera-D)”任务处于筹备阶段,整个任务概念几经修改,目前基线任务由一个轨道飞行器和一个短寿命(2～3 h)维加式着陆器组成,在主要合作者美国退出后,目前正在寻求新的合作伙伴。印度航天局近年也提出开展金星轨道探测,计划发射“舒柯拉雅一号(Shukrayaan-1)”,拟重点开展金星地表和次地表测绘,并正在积极寻求国际合作。

2 VOICE 任务的科学目标与意义

2.1 科学目标

VOICE 任务以金星地质与气候演化和生命宜居环境为科学主题,针对金星表面地质和热演化历史、大气热力与化学过程、地表和大气的物质交换与耦合、宜居环境与生命探索等关键科学问题,聚焦火山以及云下和云中大气,揭示金星构造热演化历史和超温室效应机理,探索金星宜居性和生命信息。

VOICE 任务将围绕金星火山与热演化历史、水与板块运动、内部结构和动力学、气候演化和生命信息探索等重大科学问题,揭示金星地质活动与中低层大气相互作用规律和物质循环,深化对金星表面与大气物质能量交换过程及其对金星大气运动与演化影响的理解,分析识别潜在宜居环境及与生命相关的大气组分,将为金星地质环境和气候演化及宜居性形成等重大科学问题带来新的突破。

VOICE 任务科学目标实现的主要途径如下。

(1) 利用极化 SAR 对金星表面进行米级高分辨率雷达成像观测,结合透过“窗口”的近红外成像,研究金星地质构造特征及其成因机制,证认金星是否曾经存在水和板块运动,探索发现金星表面“热点”并精细刻画火山分布特征,揭示其地质构造和热演化历史。

(2) 利用下视和临边微波毫米波辐射探测,结合高分辨率多光谱成像,探测金星全球云下和云中大气成分与热力结构,揭示金星大气环流及其成因机制。

(3) 基于对金星深层大气和表面的探测,综合研究金星大气与表面之间物质、能量交换过程和气候特征,改进金星气候模型,探索揭示金星超温室效应机理。

(4) 利用毫米波、亚毫米波临边谱仪对金星的云中大气成分进行精细探测,结合多光谱成像,探索云层中可能的宜居环境和生命信息。

2.1.1 金星地质构造与热演化历史

岩浆和火山作用对研究金星内部演化具有重要意义,其不仅是岩石圈热传导的主要方式,也是塑造地表形貌和环境、影响大气成分的重要驱动力。近年来一些研究显示,金星当下可能还有活火山活动[22–24],带来的重大科学问题包括:金星历史上拥有怎样的内部能量和物质循环机制,是否存在板块运动以及与地球有何不同,液态水是否曾参与金星古陆壳的形成和演化,金星火山具有怎样的全球分布,当下是否仍存在活火山活动。VOICE 任务将获取金星表面形貌的米级高分辨率多极化雷达图像,聚焦火山地貌、冕状构造、撞击坑、镶嵌地形等关键形貌,结合近红外“窗口”成像对表面物质组成的探测,搜寻金星曾经的水活动和板块运动的证据,揭示现代金星是否仍存在活跃的火山和地质构造活动,确定其规模和全球分布特征,揭示金星地质构造和热演化历史。

2.1.2 金星深层大气特征与气候演化

不同于云顶上方,金星深层大气(云顶下方的中低层大气,约低于 75 km 高度)的探测数据非常有限,特别是靠近地表区域(22 km 以下)的大气成分及动力学数据十分缺乏[25]。金星大气的重大科学问题包

括：金星深层大气（地表至云层）的物质组成和特征[26]，云层物质组成和化学特性[27,28]，大气热力学特征[29]，火山活动对大气组分的影响和对气候的扰动[30]等。VOICE 任务将对金星云中和云下大气温度及化学成分的时空分布和变化进行连续观测，精细刻画关键组分 CO，CO_2，SO_2，H_2O（含 H 同位素），ClO 的分布特征等，建立金星中低层大气成分和热结构，揭示金星大气“超旋”等特殊现象的成因，追踪大气与地表间挥发分循环，厘清金星表面与大气物质能量交换过程，实现对金星大气和气候演化认识的突破。

2.1.3 金星地表与大气相互作用及超温室效应成因机制

超温室效应是金星与地球比较研究的重大科学问题[9]。金星火山活动释放的气体可以直接进入大气，缺少液态水的环境使火山排出的 CO_2 无法固化到岩石圈，而是永久积累到大气层[25, 30–32]。现有数据表明，金星深层大气成分与化学平衡不一致，在大气–地表界面发生的反应、大气–地表边界的氧化还原状态以及地表附近重要痕量气体的浓度和空间变化等仍然存在很大的不确定性，金星大气辐射平衡、气候、动力学和化学循环过程仍然不清楚[33]。开展对金星大气以及地表和大气之间的热化学、光化学和动力学过程耦合的研究，将探索揭示金星超温室效应的成因机制。

2.1.4 金星是否存在宜居环境及是否（曾经）存在生命

金星是否曾经有水活动迹象以及金星超温室效应的形成机制，对研究地球宜居性的形成和未来气候演化趋势极具参考意义[34]。此外，金星下云层（47.5～50.5 km）可能存在适合地球微生物生存的温压条件（约 60℃，1 Pa），闪电的发生可为金星大气中复杂化学过程提供条件，浓密而混浊的金星云层可以保护潜在生命免受太阳辐射的伤害，但具有生命信息示踪成分的物质组成不明。VOICE 任务将通过微波轨道器，对金星大气组成和热结构，特别是关键挥发分（H_2O，PH_3，NH_3 等）的时空分布开展近距离观测，探索可能的生命信息[35]。

针对上述重大科学问题，VOICE 任务拟实现以下科学目标。

（1）利用极化 SAR 首次实现金星表面米级高分辨雷达成像，探测金星形貌构造及其变化，研究金星地质构造特征及其成因机制；结合透过“窗口”的近红外成像和下视微波辐射探测，识别金星表面“热点”，揭示金星镶嵌地块的物质组成及成因，证认水和板块运动存在与否，获取金星表面物质组成、火山构造及其分布特征，研究火山作用及其时空演化，进而揭示金星热演化历史。

（2）首次利用微波毫米波辐射计下视探测，结合紫外–可见–近红外多光谱成像，探测金星全球云下和云中大气成分及其分布，揭示金星全球大气热力结构、运动变化及其成因机制，在金星大气环流和气候模型研究方面取得突破。

（3）利用获得的金星大气和表面的探测数据，分析金星火山活动及与之相关的喷发物组分浓度和轨迹变化，综合研究金星大气–地表物质与能量交换过程，探索金星超温室效应的成因机理。

（4）利用毫米波、亚毫米波临边探测和紫外–可见–近红外成像探测，对云层中可能存在的生命相关气体成分进行精细探测，分析闪电产生机理，探索金星可能的生命宜居性。

2.2 科学意义

基于中国近年来在星载微波成像雷达、微波毫米波亚毫米波辐射探测、多波段成像探测等方面的技术发展，VOICE 任务聚焦金星火山活动、中低层大气化学成分与热力结构及过程、物质组成和构造活动特征，以及相关的地表–大气相互作用和潜在宜居环境与生命信息等，将明确当下与金星“热点”有关的内部能量释放方式，刻画火山结构和分布特征，揭示金星热演化历史；明确金星上类“板块”运动方式，揭示液态水是否曾参与金星圈层结构的物质循环；理解金星大气物理和化学过程，揭示金星大气环流模式和气候特征。通过实施 VOICE 计划，将在金星地质和气候演化、超温室效应成因机制，金星宜居环境与生命信息探索研究方面取得重大突破，对理解早期地球演化和宜居性形成以及太阳系形成演化具有重要意义。

3 科学需求

VOICE 的核心任务是对金星地质与气候演化和生命宜居环境的科学主题开展直接观测和原创性科学探索。由于金星拥有独特的大气和表面环境，选择合适的探测技术手段至关重要，也是实现 VOICE 任

务科学目标的关键。

3.1 金星地质构造与热演化历史

VOICE 旨在研究金星地质构造和热演化历史与地球的异同, 为理解太阳系内和系外石质行星的地质和宜居性演化提供关键约束。金星存在浓密的大气层, 光学手段不能实现对金星表面成像, 需要利用微波雷达的强穿透能力来获取金星表面高分辨率图像数据, 从而识别金星表面的特殊地质构造如陨石坑、镶嵌地块、峡谷、火山口及熔岩流等。SAR 是目前探测金星地表特征的唯一有效手段。由于探测距离和技术水平限制, 已有的金星 SAR 图像分辨率较低, 美国阿雷西博(Arecibo)天文台获取的 S 波段(波长 12.6 cm)SAR 数据分辨率为 5～20 km[8], 而麦哲伦号搭载的 SAR 分辨率仅为 120～300 m[36]), 许多科学问题仍无法回答。

VOICE 任务将实现 SAR 分辨率从麦哲伦号的 120～300 m 提高到全球及重点区域 30 m 和局部区域 1～10 m, 并具有多种极化信息的探测能力, 将能够回答地质/构造机制演化的如下科学问题。

(1)金星上目前是否存在活火山[22, 24]。利用高分辨率的雷达数据, 结合近红外“窗口”成像以及紫外–红外波段检测到的金星大气成分的含量变化, 可精确定位火山喷发点及地貌特征。

(2)高分辨率的 SAR 除了可以精细探测大型冕状构造的地貌细节, 从而解译大型冕状构造的成因外, 还可以利用其获得的科学数据揭示规模更小的火山或与“热点”有关的地貌特征, 有助于在全球尺度下了解金星地幔柱–岩石圈相互作用方式[23], 为金星内部热动力学和热演化特征及历史提供约束。

(3)探索发现未知的金星火山地貌特征, 揭示火山地貌类型和喷发机制。高分辨率 SAR 获得的数据有助于分析熔岩流之间的表面粗糙度等特征差异, 确定火山喷发时间序列, 寻找年轻火山活动, 理解金星热演化历史。

3.2 金星气候特征与超温室效应

开展金星气候特征和超温室效应研究, 需要深入、全面了解金星大气化学、物理过程及表面与大气的物质和能量耦合过程。而研究金星大气及其与表面的物质和能量交换, 关键在于获得长时间连续观测金星深对流层的科学数据, 这类观测目前仍是空白。金星中低层大气观测的主要阻碍在于其浓厚的硫酸云层, 这要求探测手段能够全天候全天时不受浓厚硫酸云层影响, 在金星高温高压且以二氧化碳为主要成分的环境下, 具有精确层析金星近地表大气热力结构和大气成分的能力。截至目前, 金星轨道器大气探测以红外、紫外和可见光为主, 受频段自身特性限制, 在穿透硫酸云和全天时探测方面不能兼顾[37]。

为了实现金星中低层大气的探测目标, 获取重要的垂直、水平和时间采样的温度和气体成分科学数据, 需要利用多频段微波特别是低频微波的强穿透能力, 穿透金星硫酸云获取表面温度数据, 并利用二氧化碳、二氧化硫和硫酸气体导致的不同微波频段吸收透过特性的差异, 通过低频和高频微波探测相结合, 精确层析金星中低层大气的温度和硫化物浓度垂直剖面, 获取其随时间和经纬度的变化特征。金星表面温度及大气底层硫化物变化特征, 可辅助 SAR 精确定位可能的喷发源区。对金星中低层大气热力结构、化学组成及变化过程的探测, 能够为大气化学模型提供重要约束, 帮助理解金星气候的成因以及进化过程, 揭示能量在金星大气中的传输过程, 并为开展金星大气动力学研究提供支持。

3.3 金星大气与气候演化

金星是仍有大量待解之谜、复杂多变的地外星球。大量的二氧化碳和水蒸气、二氧化硫等气体, 导致金星上空 50～70 km 高度有浓密的硫酸云覆盖, 叠加金星表面强烈的温室效应, 加剧了金星大气对流[30,38], 使其风场复杂多变。探测金星大气环流是 VOICE 的主要任务之一。此外, 获取金星表面物质成分信息对理解金星是否存在过板块运动以及现今是否依然存在火山活动等关键科学问题非常重要。这就需要具备近地表–云上(0～70 km)不同高度层、近全圆盘和高空间分辨率(2～10 km)成像能力, 穿透浓厚的硫酸云, 探测金星云下大气和地表精细结构。因此, 仅依靠传统的可见光相机是无法实现的。通过紫外–可见和近红外 CO_2 大气窗区(0.28～1.50 μm)多光谱成像, 利用不同波段吸收透过特性的差异, 可以获得金星地表不同高度的图像。特别是利用紫外波段云图明显的对比度, 作为金星云顶动态的示踪剂, 可以对金星大气环流特征、云动态和大气运动过程进行长期、系统性观测, 进而提高对金星大气环流的认识。此外, 通过近红外大气窗区获取地表发射率, 可以用于分析研究金星表面的物质组成。

3.4 金星宜居环境与生命信息

金星大气层 45～55 km 低云区具有存在生命的可能性[35]。金星云中大气热结构及生命相关成分的分布信息，能够为其宜居环境和生命信息探索提供重要支持。利用微波临边观测方式可以避免表面的影响，突出痕量气体的谱线特征。利用 240～270 GHz，530～580 GHz 频段的微波毫米波精细吸收谱探测，可以获取 H_2O，$H_2{}^{17}O$ 及 $H_2{}^{18}O$ 的丰度廓线和 D/H 比等信息。对 PH_3 和 NH_3 是否存在、存在的高度和丰度等进行高置信度的遥感探测，可以为开展生命信息探索提供关键支撑。

通过开展上述探测，在金星地质、大气、地气交换、大气全貌成像等方面实现原始数据积累，可为实现 VOICE 任务的科学目标提供必要保障。

4 探测原理与有效载荷配置

金星火山与气候探测任务（VOICE）以金星地质与气候演化和生命宜居环境为科学主题，针对金星表面地质和热演化历史、大气热力与化学过程、表面和大气的交换与耦合、宜居环境与生命探索等关键科学问题，将采用米级分辨率的极化合成孔径雷达成像、下视和临边结合的多波段微波辐射探测、紫外–可见–近红外成像探测等技术，在金星表面、云中和云下大气、生命信息探测等方面取得变革性突破，实现对金星表面形貌、构造和火山、大气组成及其热力结构和运动变化的新认识或深入认识（见图 1）。

4.1 探测原理

4.1.1 金星地质演化

为实现在金星地质构造和热演化研究方面的重大突破，需要聚焦金星火山构造、熔岩流、冕状构造、撞击坑、镶嵌地形等关键形貌。获取这些关键形貌的米级高分辨率多极化雷达图像，通过分析研究来获得形貌特征。金星存在浓密的大气，光学手段无法实现对金星表面的成像。SAR 是一种主动式高分辨率微波遥感器，具有全天时、全天候工作能力，且对地物具有一定的穿透性。条带 SAR 采用脉冲体制发射信号。线性调频基带信号被载频调制后通过天线发射出去，照射到目标并反射，雷达接收回波，然后下变频解调、数字化采样与存储，再经过距离向压缩和方位向脉冲压缩即可得到二维图像。

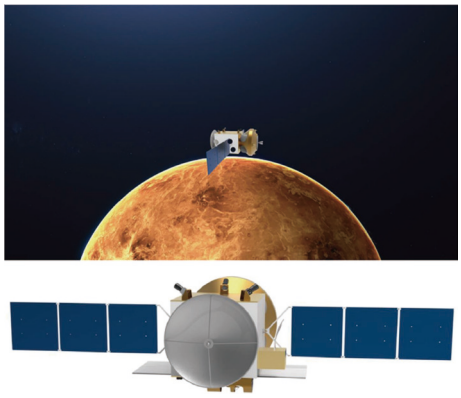

图 1 金星火山和气候探测（VOICE）科学卫星任务概念

Fig. 1 Concept art depicting Venus Volcano Imaging and Climate Exploration (VOICE) Mission

经过对 SAR 探测能力和可行性的分析，并考虑对金星表面进行地质探测的具体需求，VOICE 任务采取 S 波段（3.2 GHz）载频信号，并设计多极化工作模式以获取多维度信息。信号带宽最高 150 MHz，可实现最高 3 m 地距分辨率多极化雷达成像。

4.1.2 金星大气成分与热力结构

金星大气在微波–毫米波频段的光学厚度主要取决于大气层中二氧化碳的压致谱连续吸收以及二氧化硫和硫酸气体的谱线吸收。考虑各种气体的吸收谱线展宽效应后，求解金星大气辐射传输方程，发现在微波–毫米波频段，温度、二氧化硫及硫酸气体的权重函数峰值高度均呈现出随频率升高而升高的规律。通过合理选取观测频率组合，可以观测从金星表面到云顶之间任意高度处的大气。

为了实现对金星中低层大气的探测目标，获取丰富的垂直、水平和时间采样的温度和气体成分数据，需要利用多频段微波、特别是低频微波的强穿透能力，穿透金星硫酸云获取表面温度数据，并利用二氧化碳、二氧化硫和硫酸气体导致的不同微波频段吸收透过特性的差异，通过低频和高频微波探测相结合，精确层析金星中低层大气的温度和硫化物浓度垂直剖面，并获取其随时间和经纬度的变化特征。

4.1.3 金星紫外–可见–近红外成像探测

金星顶部云层在 200～500 nm 的波段范围内对太阳辐射具有丰富的吸收特性。其中金星云层顶部以下的太阳辐射会被 SO_2（<320 nm）和未知的紫外吸收体吸收，这些吸收随着高度的降低而显著减弱。

根据 SO_2 吸收截面, 选取 280 nm 附近的紫外辐射探测, 可以反演出金星云上的 SO_2 浓度分布。

在大于 320 nm 波段, 例如在 Mariner 10 和金星快车(VEX)的探测云图中, 有很多神秘的黑色区域, 即未知紫外吸收体, 由于其在时间和空间分布上的不均匀性, 在金星全貌图上产生了独特的暗区和紫外线特征。未知紫外吸收体的存在使金星在云上吸收了大约 50% 的太阳辐射, 这对整个金星大气的能量平衡和动力学都有重要影响。因此, VOICE 任务在未知紫外吸收体的敏感波段(中心波长约 365 nm)对其形态进行动态监测, 研究其形态的时空变化特征, 进而有助于研究云顶的动力学。

近红外成像光谱(0.85~1.5 μm)有几个重要大气窗区, 例如 1.0 μm, 1.18 μm, 1.27 μm , 1.31 μm 等。选取 1 μm 附近进行探测, 可穿透厚的云层, 感知金星云下信息, 获取的地表发射率可以用来研究金星表面的物质组成。目前已知的是, 金星的低地平原区域覆盖了玄武岩, 而其他的地貌特征如大的盾状火山和熔岩流区域, 在成分上是否为玄武岩质尚不确定。铁镁质玄武岩的风化对判断金星是否依然有活跃的地质活动如火山等至关重要。通过在近红外大气窗区对近地表热辐射进行探测, 可以为金星地表和地貌特征及地质演化研究提供重要数据支撑。

4.2 有效载荷配置

为完全覆盖科学目标, 同时有不同探测手段的相互补充和验证, VOICE 任务计划配置的有效载荷包括一台合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR), 一台微波辐射探测仪(Microwave Radiation Sounder, MWRS)和一台紫外–可见–近红外多光谱成像仪(Ultraviolet-Visible-Near Infrared Multispectral Imager, UVN-MSI), 从而涵盖紫外、可见光、近红外和微波多个频段。有效载荷及其对科学目标的贡献如图 2 所示。有效载荷探测功能和配置列于表 1。

PolSAR 将实现金星全球的高分辨率成像(约 30 m)和表面重点区域的精细成像(米级分辨率), 获取不同尺度盾状火山及熔岩流、冕状构造、镶嵌地形

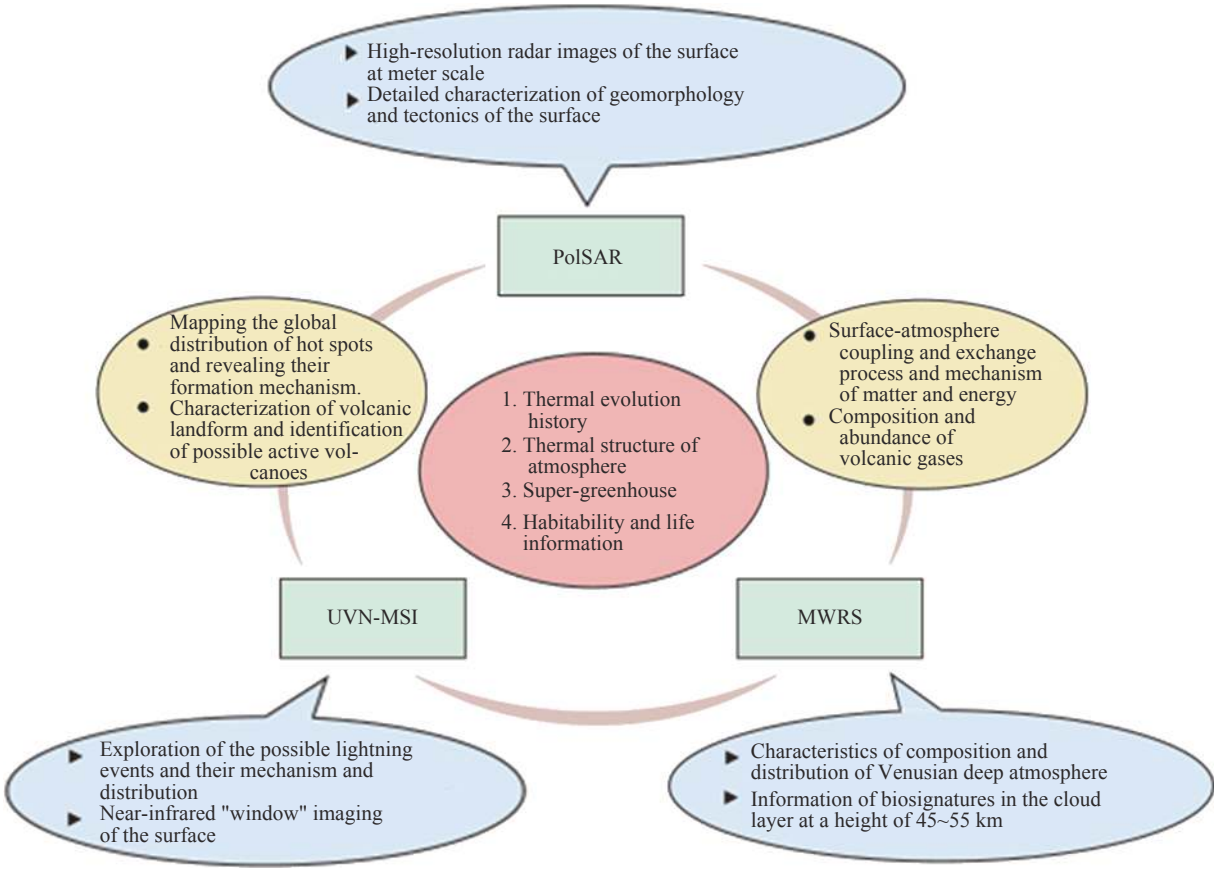

图 2 有效载荷及其对科学目标的贡献

Fig. 2 Payloads and their contribution to scientific objectives

表 1 有效载荷探测功能和配置

Table 1 Configuration scheme of VOICE satellite payloads

有效载荷	探测要素	探测形式	关键技术指标	支持的科学研究
极化SAR (PolSAR)	表面高分辨率成像	多极化成像	分辨率: 3～10 m 幅宽: 10 km 极化: 单极化/简缩极化/全极化	表面构造及演化 火山活动与作用 表面与大气相互作用
微波辐射探测仪（MWRS）	云下大气温度 云下大气成分 云中大气成分 大气风场和水气	下视和临边观测	高度: 地表约100 km 垂直分辨率: 3～6 km 覆盖范围: 全 要素: 温度、SO_2、PH_3、NH_3、H_2O等	大气热力结构与运动 表面与大气的相互作用 云中环境与生命信息 气候特征
紫外–可见–近红外多光谱成像仪（UVN-MSI）	表面多光谱成像 大气全貌成像 闪电检测	多光谱和成像探测	表面成像空间分辨率: 3～10 km 大气全貌成像空间分辨率: <20 km	表面物质组成和构造演化 闪电信息

等关键形貌的空间分布、地层关系、表面粗糙度等定量化信息，为开展对比和时空演化研究提供科学数据。UVN-MSI 的近红外“窗口”成像与 PolSAR 有效互补，可探测金星表面成分信息，用于研究金星古陆壳–镶嵌地形是否与地球大陆成分相似、确定其形成与水和板块运动是否有关。UVN-MSI 还将通过探测近红外波段反射率强度变化，识别金星表面可能的“热点”和较年轻的火山熔岩流，结合 PolSAR 影像精确定位，确定金星表面可能存在的活火山活动。此外，PolSAR 和 UVN-MSI 获取的定量化信息和参数可为进一步建立金星热演化和内部动力学地球物理模型提供重要输入。

MWRS 将获取金星大气关键组分的全球分布和变化过程，构建金星大气剖面的温度廓线及其时空变化，并在金星云层中搜索可能与生命过程相关的大气组分例如 PH_3, NH_3, OCS 等。多光谱成像仪（UVN-MSI）由三个相机单元组成。其中，紫外–可见成像单元能够探测金星大气中的 SO_2 和未知紫外吸收体；闪电成像单元通过快速成像可以捕捉金星闪电；近红外成像单元可以监测大气水气丰度和辨析表面物质成分。

UVN-MSI 与 MWRS 有效互补，可以探测大气中 SO_2、未知紫外吸收体、闪电及大气水气丰度变化等，并对金星大气全貌进行成像。MWRS 和 UVN-MSI 还将探测光谱反照率随时间的变化，大气整体成分的垂直变化，太阳辐射吸收剂的特性、性质和丰度。此外，MWRS 和 UVN-MSI 还将对金星大气运动和大气闪电进行成像，以获得深层大气整体组成的垂向梯度及其对静态稳定性的影响。上述探测数据将为进一步研究金星大气的动力及演化和模型构建提供有力支撑。

与历史上和未来规划的其他国际金星任务相比，VOICE 任务的探测模式和有效载荷配置具有很强的特色和创新性。表 2 给出了 VOICE 的主要探测目标和载荷性能特点以及与国际上最近的三个金星探测任务（美国麦哲伦、欧空局金星快车、日本拂晓号）和已经立项的三个金星探测任务（美国真相号、美国达芬奇+、欧空局展望号）的对比。由表 2 可以看出，VIOCE 雷达成像拥有最高的分辨率，并首次实现金星全球大气微波毫米波观测特别是对云下深层大气的观测，具有很强的先进性。

5 结语

近年来中国在航空航天领域高速发展，这推动了对深空探测的不断深入。无论是嫦娥系列月球探测任务，还是天问一号绕落巡火星探测任务，都实现了国际深空探测中科学和技术上的重大突破。在近 30 年间，过去的金星探测只有麦哲伦、金星快车和拂晓号三个任务，整体技术水平较低。目前对于金星表面地质和形貌的探测程度仅相当于 20 世纪 70 年代的火星探测水平，对金星地表关键区域的认知缺乏高分辨率图像支持，对金星近地表 12 km 大气状态一无所知，对其地质和气候的演化历程以及宜居性了解甚少。任何针对这些重要科学问题的中小型金星任务都将获得极大的科学回报，在国际上产生重大影响。

目前国际金星探测正在开启新纪元，多个金星任务都在立项和实施。中国近年来航天技术快速发展，

表 2 VOICE 任务与国际金星探测任务的有效载荷及性能对比

Table 2 Comparison of payloads and their performance between VOICE mission and international Venus exploration missions

名称	年份/类型	国家或机构	对金星地表形貌探测的有效载荷和性能	对金星大气和气候探测的有效载荷和性能
VOICE	环绕任务	中国	PolSAR: 与历史上的和未来其他国际金星任务相比, 可实现迄今最高分辨率雷达成像; 设计分辨率1～10 m	MWRS: 首次实现金星全球大气微波毫米波观测(穿透云层)。星下点空间分辨率7～10 km。独特性: 历史上的和未来其他国际金星任务未搭载类似载荷, 其轨道器无法实现对云下大气的定量探测。MWRS可实现的观测具体如下。① 可观测PH_3, NH_3, SO_2, H_2O, CO等气体分子及大气温度; ② 可观测地表温度, 测量精度为2 K; ③ 可测量大气温度, 观测高度0～60 km(下视模式); ④ 可测量大气组成, 观测高度0～150 km(下视+临边模式) UVN-MSI: 性能指标与历史上的和未来其他国际金星任务相当。可实现大气全貌成像、表面窗口成像、闪电检测。分辨率: 3 km/20 km
麦哲伦号	1989年/环绕任务	美国	合成孔径雷达: 最高空间分辨率120～300 m	无相关载荷
金星快车	2005年/环绕任务	欧空局	无相关载荷	① 高分辨红外傅里叶光谱仪(PFS), 测量金星大气和表面温度; ② 紫外和红外摄谱仪(SPICAV/SOIR), 测定金星的化学成分; ③ 紫外–可见光–近红外成像摄谱仪(VIRTIS), 探测云层和雾霭特性; ④ 空间等离子体和高能原子分析器(ASPERA), 研究太阳风相互作用; ⑤ 金星监测摄像机(VMC), 可实现近红外、紫外、可见光的广角多频道摄像。这些载荷仅能开展对云上大气的探测
拂晓号	2010年/环绕任务	日本	无相关载荷	主体为5个成像相机, 覆盖紫外至中红外波段, 仅能开展对云上大气的探测
真相号	计划2030年/环绕任务	美国	金星干涉合成孔径雷达(VISAR): 图像空间分辨率为30 m; 数字高程模型精度为水平250 m, 高度5 m	金星发射率测绘仪(VEM): 使用六个大气窗口光谱波段绘制金星表面发射率。仅能开展云上大气的探测
达芬奇+	计划2030年/下落式探测器	美国	金星下降成像仪(VenDI): 在下降位置对镶嵌地块区域进行高对比度成像	金星分析实验室套件(VAL): 在进入大气和下落过程中原位探测大气结构和组成。包含三个相关仪器: ① 金星质谱仪(VMS); ② 金星可调谐激光光谱仪(VTLS); ③ 金星大气结构调查套件(VASI)
展望号	计划2032年/环绕任务	欧空局	金星合成孔径雷达(VenSAR), 空间分辨率为30 m; 金星光谱套件(VenSpec)中的VenSpec-M通道, 对地表岩石成分进行探测; 地下雷达探测仪(SRS)	金星光谱套件(VenSpec)中VenSpec-H and VenSpec-U通道, 分别对大气成分开展高分辨率探测和对含硫物质、云上层紫外吸收剂开展探测

在航天器、飞控、有效载荷技术等方面已取得一系列重大突破, 为抢占金星探测和科学研究制高点, 实现金星科学重大突破提供了关键支撑。VOICE 任务提出以火山活动及其演化历史为中心的表面地质和以热力结构及成分全球分布为中心的深层大气探测方向, 也是国际新一轮金星探测任务的主攻方向, 尽快立项实施 VOICE 科学卫星任务, 将推动中国金星探测任务取得跨越突破。

与国际已有和将要实施的金星探测任务相比, VOICE 计划的探测目标、探测手段具有鲜明的特色和创新。该任务以中国相关领域的技术突破为基础, 体现了高水平自强自立基础上的创新突破, 实施后将进一步促进中国行星科学研究摆脱利用国外数据、跟踪国外思路的状态, 带动学科发展的突破。目前中国的深空探测规划了月球科研站、火星和小天体采样返回、木星系探测、太阳系边际探测等任务方向, 但还

没有关于金星探测的任务规划。通过实施 VOICE 任务，也将推动未来部署和实施旗舰型的金星综合探测重大任务，并为其提供关键支撑。

为了实现金星尚未解决的重大问题的突破，VOICE 任务配置的有效载荷具有很强的创新性，并且规划了先进的探测模式，包括：极化 SAR 具有米级空间分辨率和多种极化模式；MWRS 在国际上首次使用微波毫米波下视和临边两种观测模式；UVN-MSI 采用多波段联合多光谱实现金星全球图像动态监测；综合理解金星火山和中低层大气的探测数据；在 350 km 圆轨道上对金星大气云中、云下的温度、水和气体成分进行垂直廓线探测，并对重点区域进行精细太赫兹辐射谱探测。这些新的、突破性的技术手段和探测模式，使 VOICE 任务能够分析金星特殊地形，确定火山的成因、类型及喷发机制，理解金星地质构造和热演化历史；剖析金星中、低层大气结构和物质循环，深入刻画金星气候演变过程；提升对金星云层的动态追踪；理解金星地表与大气能量交换及大气的运动与演化；开展对金星云层中可能存在的宜居环境的分析。

总之，VOICE 任务的实施将在中国开启利用中小型任务探测太阳系行星的先河，也将在国际首次实现金星表面高分辨率和多极化雷达成像、全球中低层大气成分和热力结构精细探测、探索金星大气中潜在生命信息，有望率先在国际金星探测的空白和热点方向上实现重大科学突破，在新一轮国际金星探测热潮中抢占科技竞争制高点，为中国未来金星探测重大任务提供重要支撑。

参考文献

[1] STROM R G, SCHABER G G, DAWSON D D. The global resurfacing of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1994, **99**(E5): 10899-10926

[2] SVEDHEM H, TITOV D V, TAYLOR F W, *et al*. Venus as a more Earth-like planet[J]. *Nature*, 2007, **450**(7170): 629-632

[3] PICCIONI G, DROSSART P, SANCHEZ-LAVEGA A, *et al*. South-polar features on Venus similar to those near the north pole[J]. *Nature*, 2007, **450**(7170): 637-640

[4] BERTAUX J-L, VANDAELE A-C, KORABLEV O, *et al*. A warm layer in Venus' cryosphere and high-altitude measurements of HF, HCl, H_2O and HDO[J]. *Nature*, 2007, **450**(7170): 646-649

[5] LIMAYE S S, MOGUL R, BAINES K H, *et al*. Way Venus, an astrobiology target[J]. *Astrobiology*, 2021, **21**(10): 1163-1185

[6] GARVIN J B, GETTY S A, ARNEY G N, *et al*. Revealing the mysteries of Venus: the DAVINCI mission[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, **3**(5): 117

[7] ZHAO Yuyan, LIU Jianzhong, ZOU Yongliao, *et al*. Progress and future prospects of Venus exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(09): 2703-2724 (赵宇鸿, 刘建忠, 邹永廖, 等. 金星探测研究进展与未来展望[J]. 地质学报, 2021, **95**(09): 2703-2724)

[8] CAMPBELL D B, HEAD J W, SENSKE D A, *et al*. Styles of volcanism on Venus: New Arecibo high resolution radar data[J]. *Science*, 1989, **246**(4928): 373-377

[9] TAYLOR F W. The Scientific Exploration of Venus [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

[10] DROSSART P, MONTMESSIN F. The legacy of Venus express: highlights from the first European planetary mission to Venus[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2015, **23**(1): 1-23

[11] NAKAMURA M, TITOV D, MCGOULDRICK K, *et al*. Akatsuki at Venus: the first year of scientific operation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2018, **70**(1): 1-3

[12] HORINOUCHI T, HAYASHI Y Y, WATANABE S, *et al*. How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere[J]. *Science*, 2020, **368**(6489): 405-409

[13] CUI J, GALAND M, COATES A J, *et al*. Suprathermal electron spectra in the Venus ionosphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A4). DOI. org/10.1029/2010 JA016153

[14] WEI Y, FRAENZ M, DUBININ E, *et al*. A teardrop-shaped ionosphere at Venus in tenuous solar wind[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **73**(1): 254-261

[15] ZHANG T, BAUMJOHANN W, RUSSELL C, *et al*. A statistical study of the low-altitude ionospheric magnetic fields over the north pole of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(8): 6218-6229

[16] WEI D, YANG A, HUANG J. The gravity field and crustal thickness of Venus[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(9): 2025-2035

[17] XIAO C, LI F, YAN J G, *et al*. Inversion of Venus internal structure based on geodetic data[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**(8): 127

[18] XU M, WANG Z. A new attitude pointing design for Venus spacecraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, **39**: 325-330

[19] ZHENG W, HSU H, ZHONG M, *et al*. Future dedicated Venus-SGG flight mission: accuracy assessment and performance analysis[J]. *Advances in Space Research*, 2016, **57**(1): 459-576

[20] SMREKAR S E, HENSLEY S, DYAR M, *et al*. VERITAS (Venus emissivity, radio science, InSAR, topography, and spectroscopy): a proposed discovery mission[J]. 2020, **48**: 216

[21] GHAIL R C, HALL D, MASON P J, *et al*. VenSAR on EnVision: taking earth observation radar to Venus[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **64**: 365-376

[22] FILIBERTO J, TRANG D, TREIMAN A H, *et al*. Present-day volcanism on Venus as evidenced from weathering rates of olivine[J]. *Science Advances*, 2020, **6**(1): eaax7445

[23] GüLCHER A J, GERYA T V, MONTéSI L G, *et al*. Corona structures driven by plume – lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus[J]. *Nature Geoscience*, 2020, **13**(8): 547-54

[24] SHALYGIN E V, MARKIEWICZ W J, BASILEVSKY A T, *et al*. Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(12): 4762

[25] MARCQ E, AMINE I, DUQUESNOY M, *et al*. Evidence for SO_2 latitudinal variations below the clouds of Venus[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, **648**: L8

[26] BéZARD B, DE BERGH C. Composition of the atmosphere of Venus below the clouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, **112**(E4). DOI. org/10.1029/2006JE002794

[27] ANDO H, TAKAGI M, SUGIMOTO N, *et al*. Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, **125**(7): e2019JE006208

[28] TITOV D V, IGNATIEV N I, MCGOULDRICK K, *et al*. Clouds and hazes of Venus[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(8): 1-61

[29] LIMAYE S S, GRASSI D, MAHIEUX A, *et al*. Venus atmospheric thermal structure and radiative balance[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(5): 1-71

[30] TAYLOR F W, SVEDHEM H, HEAD J W. Venus: the atmosphere, climate, surface, interior and near-space environment of an Earth-like planet[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(1): 1-36

[31] VANDAELE A C, KORABLEV O, BELYAEV D, *et al*. Sulfur dioxide in the Venus atmosphere: I. Vertical distribution and variability[J]. *Icarus*, 2017, **295**: 16-33

[32] VANDAELE A C, KORABLEV O, BELYAEV D, *et al*. Sulfur dioxide in the Venus Atmosphere: II. Spatial and temporal variability[J]. *Icarus*, 2017, **295**: 1-15

[33] HAUS R, KAPPEL D, TELLMANN S, *et al*. Radiative energy balance of Venus based on improved models of the middle and lower atmosphere[J]. *Icarus*, 2016, **272**: 178-205

[34] BAINS W, PETKOWSKI J J, RIMMER P B, *et al*. Production of ammonia makes Venusian clouds habitable and explains observed cloud-level chemical anomalies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, **118**(52): e2110889118

[35] GREAVES J S, RICHARDS A, BAINS W, *et al*. Phosphine gas in the cloud decks of Venus[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(7): 655-64

[36] PETTENGILL G H, FORD P G, JOHNSON W T, *et al*. Magellan: Radar performance and data products[J]. *Science*, 1991, **252**(5003): 260-265

[37] PERALTA J, LEE Y J, MCGOULDRICK K, *et al*. Overview of useful spectral regions for Venus: An update to encourage observations complementary to the Akatsuki mission[J]. *Icarus*, 2017, **288**: 235-239

[38] TITOV D V, BULLOCK M A, CRISP D, *et al*. Radiation in the atmosphere of Venus[J]. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 2007, **176**: 121