

金星探测研究进展与未来展望

赵宇娟^{1,2)}, 刘建忠^{1,2)}, 邹永廖³⁾, 周迪圣^{1,4)}, 王夕予^{1,4)}, 李雄耀^{1,2)}, 王世杰¹⁾

1) 中国科学院地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵州贵阳, 550081;

2) 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥, 230026;

3) 中国科学院国家空间科学中心, 北京, 100190; 4) 中国科学院大学, 北京, 100049

内容提要:金星探测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, 以及外太阳系宜居星球搜索策略的关键。由于金星恶劣的环境条件、对探测技术的多重挑战和相对高昂的探测成本, 金星探测和研究程度远不及月球和火星。自 20 世纪 90 年代后期, 金星探测任务相对匮乏。本文梳理了国际上金星探测研究进展、关键科学问题及技术需求, 提出了未来金星的探测目标和探测方式建议。目前, 对金星大气和气候研究程度最高, 包括大气结构和大气化学, 能量平衡和热结构, 云层和霾层, 大气环流和动力学以及气候演化等。高层大气的物理化学和太阳风与金星的相互作用方面也有重要进展。金星地表和内部的研究则相对滞后, 研究涵盖金星表面形貌特征, 撞击和重塑历史, 火山和构造活动, 地表物质组成, 地表和大气相互作用等, 但受限于数据的空间覆盖率和较低分辨率和精度, 诸多重大问题尚未解答, 迫切需要新的探测数据。除探测任务外, 金星研究还依赖于地基观测、实验室模拟和数值模拟研究。地面模拟设施对支持金星探测任务研发和金星基础科学研究尤为重要。未来十年是中国开展金星探测的契机和研发相关技术的关键时期。本文可为对金星探测、行星科学、太阳系探测感兴趣的科学家和工程人员提供参考。

关键词:金星; 研究进展; 未来展望; 行星科学; 比较行星学

在太阳系的四个类地行星中, 金星有着与地球几乎相同的大小和密度, 可能类似的初始组成, 被称为地球的“孪生星”。然而, 金星却沿着截然不同于地球的路径演化, 成为一个环境极端且不适宜生命居住的星球。金星与地球的差异何时产生、因何产生? 控制太阳系类地行星的演化路径的影响因素是什么? 金星探测是解答这些重大科学问题的核心钥匙。在行星科学领域, 金星可为理解类地行星的起源和多样性、演化路径和制约因素以及控制类地球天体的气候过程等提供重要线索。放眼地球和人类未来, 理解金星演化将有助于了解地球宜居性的形成和维持, 也为寻找外太阳系“类地球”的宜居星球提供搜索的标准和依据。

人类对太阳系行星的探测是从金星开始的。截

至 2021 年, 世界各国共发射了 43 颗金星探测器, 包含金星飞掠/环绕/大气层进入任务 33 次, 着陆任务 8 次, 漂浮任务 2 次, 其中苏联 33 次(成功 15 次), 美国 8 次(成功 6 次), 欧盟 1 次(成功), 日本 1 次(成功)。另外美国伽利略号(Galileo; 1990 年飞掠)和信使号探测器(Messenger; 2006 年飞掠)也在金星重力辅助阶段对金星开展了观测(附表 1)(http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=202109099&flag=1)。金星的主要探测任务集中在 20 世纪 60~70 年代的美苏太空竞赛时期。1961 年, 苏联启动了全面金星探测计划, 包括大气探测器、着陆器、轨道器和气球任务; 其中金星 13 号(Venera 13)着陆器在金星表面存活了 127 min, 记录至今未被打破。维加

注: 本文为中国科学院空间科学战略性先导科技专项空间科学预先研究项目(编号 XDA15011800), 中国科学院战略性先导科技专项(B 类)(编号 XDB41000000), 国家自然科学基金项目(编号 41673072), 中国科学院“西部青年学者”项目, 中国科学院创新交叉团队项目, 中国科学院前沿科学重点研究计划(编号 QYZDY-SSW-DQC028), 北京市科学技术委员会资助(编号 Z181100002918003), 国家自然科学基金重点基金项目(编号 41931077)和中国科学院青促会优秀会员项目(编号 Y201867)联合资助的成果。

收稿日期: 2021-08-05; 改回日期: 2021-08-25; 网络发表日期: 2021-09-01; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 赵宇娟, 女, 1981 年生。博士, 副研究员, 从事行星地质与环境演化研究。E-mail: zhaoyuyan@mail.gyig.ac.cn。

引用本文: 赵宇娟, 刘建忠, 邹永廖, 周迪圣, 王夕予, 李雄耀, 王世杰. 2021. 金星探测研究进展与未来展望. 地质学报, 95(9): 2703~2724. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021274.

Zhao Yuyan Sara, Liu Jianzhong, Zou Yongliao, Zhou Disheng, Wang Xiyu, Li Xiongyao, Wang Shijie. 2021. Progress and future prospects of Venus exploration. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2703~2724.

(Vega)气球展现了浮空器用于空中探测的能力,之后苏联于1985年停止了金星探测活动。美国金星探测始于1962年水手2号(Mariner 2)飞掠金星,1978年发射的“先驱-金星”任务(Pioneer-Venus)对金星大气进行了探测,1989年发射的麦哲伦号(Magellan)绘制了金星98%的表面形貌。20世纪90年代后期美国结束对金星的探测,再未造访金星。21世纪初,欧空局2006年入轨的金星快车(Venus Express)轨道器采用更先进的载荷和不同于“先驱-金星”号的轨道设定,对金星进行了长达8年的探测,获取了大量关于金星大气以及部分金星地表与地质特征的珍贵数据。日本2010年独立发射的拂晓号(Akatsuki)轨道器,在首次入轨失败后抢救,终于在2016年正式进入金星轨道,是当前国际上唯一正在开展探测的金星轨道任务。拂晓号携带多种波长探测仪器,重点是通过金星大气和空间环境的探测,了解金星气候演化。

金星高温、致密、腐蚀性的大气和高热的轨道和地表环境,对探测有着不同寻常的技术挑战。例如,金星表面包裹的致密云层对太阳光反射率高,使得金星轨道的热效应比火星轨道更强;探测器在进入金星大气时所经历的速度和热条件比在地球或火星更严重;探测器在金星云层中还将遭遇强腐蚀的硫酸云等。为实现对金星的环绕或降落/着陆/巡视探测,当前至少需要11个方面的系统、子系统技术发展,包括:①新型轨道技术;②进入金星时的热防护技术;③下降和着陆技术;④空中平台技术;⑤着陆平台技术;⑥采样处理系统;⑦新型能源系统技术;⑧热控技术;⑨适应长时间在高温环境中运行的极端环境技术;⑩测控通信技术;⑪制导、导航与控制技术等。此外,还需要研发适应金星环境特点的科学载荷和建设用于支持金星探测和研究的模拟设施。金星探测比探测其他行星更依赖于技术发展以及探测成本的降低,也更需平衡科学目标的优先性、技术的可行性、探测成本三方面的权重。

金星探测任务与月球和火星任务相比,经历近30年的任务断层,近年来重回大众视线,多国计划在未来十年左右发射新的金星探测任务。未来十年也是中国开展金星探测的契机和研发相关技术的关键时期。在此背景下,本文梳理了金星探测研究进展和未解决的科学问题以及金星探测的关键技术需求,并对未来的金星探测作了展望。本文可为对金星探测与科学研究,比较行星学和太阳系行星研究

感兴趣的科学家和工程人员提供参考。

1 金星探测研究进展

1.1 金星大气与气候

1.1.1 金星大气探测历史

对金星大气的探测研究程度比对金星地表和内部更高。早期的飞掠类探测任务通过搭载的辐射计、紫外相机等对金星大气和云层进行了观测。水手2号(Mariner 2;1962年)用其携带的微波辐射计和红外辐射计对金星进行了扫描,发现金星夜侧、昼侧和晨昏线温度较为均一,并可能存在较厚的云层(Frank et al., 1963)。水手5号(Mariner 5;1967年)利用无线电掩星数据与金星着陆器数据对比分析,发现金星大气层比预期的更浓密(Kliore et al., 1967)。水手10号(Mariner 10;1973年)研究了卷云特征、太阳辐照能、金星大气中原子氧浓度和分层以及给定高度的大气密度、压力和温度等(Shirley, 2003)。

轨道环绕类探测任务可实现对金星大气长期和更为全面的遥感观测。先驱者-金星轨道器(又名先驱者-金星1号;Pioneer-Venus 1或Pioneer 12;1978年),虽然主要任务是使用雷达套件来绘制金星地质表面,但红外探测发现金星北极上方的大气层正在清空;紫外照片显示可见半球的云层存在深色斑点;相机还检测到几乎连续的闪电现象;还观察到金星电离层如何与太阳风相互作用(Hoffman et al., 1979; Scarf et al., 1979)。金星15号和16号(Venera 15和Venera 16;1983年)用红外傅里叶谱仪分析和绘制高层大气图(Zasova et al., 2006)。金星快车(Venus Express;2005年)携带了7种科学载荷对金星大气和气候开展了长达8年的测量。金星快车的探测显著提高了对金星大气超旋转的理解和对极地涡旋的表征;对云层结构和形态进行表征;绘制了金星全球表面温度图;通过紫外和红外光谱仪(SPICAV/SOIR)、金星射电科学(VeRa)和紫外-可见光-近红外成像摄谱仪(VIRTIS)数据,绘制出金星大气的热剖面 and 热结构;绘制出大气化学组成剖面(CO、SO₂、OCS、D/H比等),发现了新的大气组分(O₃和OH);探测了电离层特征,并首次发现电离层中的光电子;提供了频繁闪电的强有力证据;检测到上游等离子体波;大气氢、氧和氦向太空中的逃逸特性;测量了高层大气(130~160 km高度)的密度和变化;在高度约60 km附近的云顶识别出带状风结构的较大波动(Drossart et al., 2015)。拂

晓号(Akatsuki;2010年)搭载了6种科学有效载荷,主体为五个成像相机,覆盖紫外至中红外波段(Nakamura et al.,2011)。截止目前,主要发现了金星大气中存在大尺度的弓形特征;首次发现了赤道区域上方中低云层中存在的急流风;上云层和中云层之间过渡带附近存在小颗粒的厚层云(Nakamura et al.,2018)。基于拂晓号观测数据,科学团队还提出了金星大气超旋的维持机制(Horinouchi et al.,2020)。

降落式探测器/浮空器/着陆器类任务最大的优势是可以建立大气不同层位的特征剖面,并能对大气不同层位开展就位测量。先驱-金星多探测器飞行器(Pioneer-Venus 2或Pioneer 13;1978)测量了在50 km高度以下不同光照区的温度(448~459℃)和地表压力(8.62~9.45 MPa);发现了三层不同特征的云层,以及风速从云层至地面逐渐降低的特征;比地球更加有效的温室效应(Taylor,2014)。“金星”系列着陆任务(Venera 4/5/6/7/8/9/11/12/13/14)建立起不同高度的大气压、温度和光照水平;排除了金星表面存在液体水的可能性,但获取了大气中水蒸气的含量;金星天空光照度和近地表大气没有明显尘埃;观察到猛烈的雷电现象和激烈的湍流;证实了三种不同高度的云层,获得了云层厚度和云底高度;开展了详细的大气组分、云团特性和大气的热平衡研究;云层中存在腐蚀性组分,例如硫酸、盐酸、氢氟酸等;存在显著的温室效应等(Taylor,2014)。维加1号和2号(Vega 1和Vega 2;1984年)漂浮气球携带探测器平台漂浮在金星50~60 km高度,利用金星大气环流带动探测器对金星大气及地表进行短时间、近距离、大范围的探测(Sagdeev et al.,1986)。浮空器检测到大气中含有硫酸和浓度略小的盐酸和氢氟酸;跟踪气球的运动,揭示出金星大气中气团的垂直运动(Sagdeev et al.,1986;Taylor,2014)。

1.1.2 金星大气探测研究进展

1.1.2.1 大气垂向分层和大气组成

基于遥感和大气进入式探测器的数据,一个简化的金星大气垂直分层和平均温度模型及主要作用过程如图1所示。与地球大气类比,金星大气也可分为对流层、平流层、热层、外层/逸散层。需要指出的是,在不同纬度,层位高度有所差异。对不同研究群体而言,金星大气各层位的高度取值范围尚不统一。对流层通常为地表至65 km(Svedhem et al.,2007),其中包含云层(50~70 km;Titov et al.,

2018);但实际对云霾层的研究范围可扩展至30~100 km(Titov et al.,2018);平流层(或称中间层)为65~120 km,以90 km为界细分为上下两层(Patzold et al.,2007);热层为120~220 km,外层/逸散层(即大气层顶)为220~350 km(Patzold et al.,2007)。金星大气99%的质量聚集在对流层,且90%的质量聚集在高度28 km以下高度。但目前,高度12 km以下的金星深层大气缺乏探测数据。

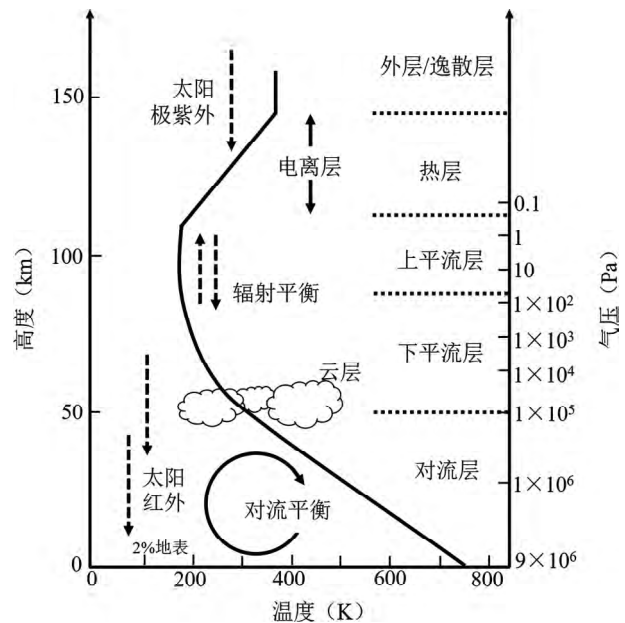


图1 金星大气的垂直结构和平均温度分布图

(据 Taylor, 2014 修改)

Fig. 1 The vertical structure and average temperature of the atmospheric profile of Venus (modified after Taylor, 2014)

金星大气组成由96.5%CO₂,3.5%N₂和其他微量气体组成(表1)。已检测到的重要气体组分包括水蒸气(约30×10⁻⁶),SO₂、CO、HCl、HF以及稀有气体Ar、Kr、Xe、Ne等。通过探测数据和现象推测可能存在但还未被探测到的微量气体(括号中为推测存在高度;检测限)有:NH₃(云顶;<6×10⁻⁹),H₂S(云顶;<23×10⁻⁹)和O₂(~58 km;<3×10⁻⁶)。金星大气水蒸汽具有极高的D/H比,且比值随高度增加而增加,从120±40(26~45 km高度;Debergh et al.,1991)增加至240±25(70~95 km高度;Fedorova et al.,2008),支持氢向太空逃逸的假说。剩余的氢主要形成H₂SO₄、H₂S、HCl和HF(Krasnopolsky,2008)。

1.1.2.2 环流和大气动力学

金星大气的整体循环已探明存在3个主导特征

(Sanchez-Lavega et al., 2017;图 2):① 超级旋转,即高速风沿平行于赤道的方向持续循环;② 哈德利环流,大气沿经向在低纬度和高纬度之间缓慢翻转;③ 极地涡旋,占两个半球各三分之一以上的纬度范围,涡旋中心大致位于两极极心。

表 1 金星和地球大气组成对比
Table 1 Comparison of the atmospheric compositions of Venus and Earth

大气组分	金星	地球	备注/可提供信息
CO ₂	96%	0.03%	主要温室气体
N ₂	3.5%	77.0%	总量类似
Ar	0.007%	0.93%	提供演化信息
Ne	0.0005%	0.0018%	提供演化信息
水汽(H ₂ O)	30×10 ⁻⁶	~1%	火山、云、温室气体
重水汽(HDO)	3×10 ⁻⁶	~1×10 ⁻⁶	早期海洋
SO ₂	150×10 ⁻⁶	0.2×10 ⁻⁹	火山、云、温室气体
羰基硫(COS)	4×10 ⁻⁶	0.5×10 ⁻⁹	火山、云
CO	0.004%	0.12×10 ⁻⁶	底层环流
HCl	0.5×10 ⁻⁶	微量	火山
HF	0.005×10 ⁻⁶	微量	火山
原子氧	微量	微量	高层环流、逃逸过程
羟基(OH)	微量	微量	高层环流、逃逸过程
原子氢	微量	微量	逃逸过程

注:译自 Taylor et al., 2018。

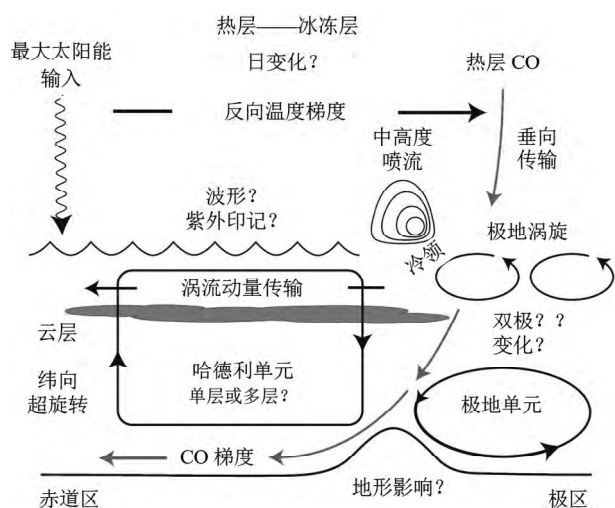


图 2 金星主要环流模型特征示意图

(据 Taylor et al., 2009 修改)

Fig 2 The main circulation model features of Venus
(modified from Taylor et al., 2009)

金星大气超级旋转现象,是指纬向风在 4~5 d 内绕金星赤道运动一周,风速超 100 m/s,比地表旋转速度快约 60 倍。纬向风速在较高层和较低层下降,在平流层顶和地面分别接近零。风在云层上方和下方的减速机制不同。在云层上方,主要是由温度分布导致的压力梯度引起;在云层下方,是由大气变密、阻

力增加引起。金星所有纬向风都与金星自旋方向相同,金星固体的角动量可向上传递至大气并向上传输。波和涡流与主气流之间的相互作用非常复杂(Sanchez-Lavega et al., 2017)。此外,金星快车还发现赤道至南北纬 50°间云顶(>70 km)风速从 2006 年的 300 km/h 增长至 2012 年的 400 km/h,风速的波动可能与当地时间、太阳高度和金星自转周期有关(Khatuntsev et al., 2013)。拂晓号还观察到中低层大气中出现赤道急流(超 80 m/s),但产生的机制未知(Horinouchi et al., 2017)。

两个半球在纬度 65°处哈德利环流终止处出现环流状态剧变。高风形成紧凑的喷射流和环极“冷领”。冷领标志着低纬与极地涡旋之间的过渡带。金星快车发现南极极地涡旋中心形状和内部结构变化很大,其形态以小于 24 h 的时间尺度不断变化;虽然通常呈 S 型或数字 8 形,但也会表现出完全不规则甚至混乱的外观,指示着复杂的天气模式(Luz et al., 2011; Garate-Lopez et al., 2013)。

金星大气中可观察到 4 种波,包括重力波、开尔文波、罗斯比波和热潮(Muller-Wodarg et al., 2016; Navarro et al., 2018; Kashimura et al., 2019)。虽然开尔文波和热潮可以归类为行星尺度重力波,但在金星科学讨论中,仅将小尺度的波称为重力波。此外,声波和兰姆波也被推测可能存在,但未曾被探测到(Sanchez-Lavega et al., 2017)。大气波的动量传输被认为是包括大气超旋在内的总环流中必不可少的组成部分,也被认为是湍流的主要来源,影响着大气的垂直结构(Fukuhara et al., 2017)。

1.1.2.3 云和霾

金星拥有类地行星中最大最复杂的云系统(Titov et al., 2018)。云层位于 50~70 km 高度范围内,上层霾和下层霾各自延伸至约 100 km 和 30 km 高度处。云的特征随空间和纬度明显变化。云顶高度在低纬地区大约为 70 km 高度,而在极地则下降至 62 km 高度。对流层顶分开两个层区,之上是硫酸的光化学生成区(上层云和霾),之下是凝结云区。中云层和下云层位于对流层下方,该区域中对流占主导。云基底在中低纬度位于 48~50 km 处,在极地则可下延至低于 45 km(Barstow et al., 2012)。

低纬度地区云顶形态以斑驳和零散为主,且紫外波长处比极区暗很多,说明存在紫外吸收剂的持续供给(Titov et al., 2012)。在南北半球纬度 50°~60°,云呈条带状,说明水平的层状气流占主导地位。高纬度地区,金星被无特征的紫外明亮的“极帽”覆盖着,

通常包括“冷领”和极地区域,大约与云顶低压区一致。“极帽”的外观从透明霾到密集、明亮且无特征的云盖。“极帽”通常被数百千米宽的深色圆形或螺旋形“凹槽”穿过,这些凹槽可能由局部喷流产生(Markiewicz et al., 2007)。极区云和温度结构有着强烈变化。云顶高度和气溶胶结构的纬向行为与平流层温度场相关(Titov et al., 2018)。

对于金星南北半球,中层云和低层云的形态变化总趋势是,在 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 纬度云几乎透明,而不透明度向着赤道和两极增加(Crisp et al., 1991)。从 60° 至极区,云层变得极不透明,无法通过遥感获取深层云形态。从 40° 往赤道的深层云呈斑片或块状结构。不透明度的不均一性持续时间从几小时至几周不等,较大的不均匀度寿命更长。在深层云中观察到的总不透明度模式表明, 40° 至赤道的活跃对流和在较高纬度的层流环流与云顶相似(Taylor et al., 2018)。

金星云化学是大气化学和光化学紧密相互作用的结果。上云层和上霾层的气溶胶主要由硫酸组成,占云顶质量浓度 $75\%\sim 83\%$,在极区短暂上升至 90% (Krasnopolsky, 2015)。硫酸由二氧化硫和水蒸气通过光化学作用形成。上云层存在的紫外吸收剂具体形态未知,最可能的潜在物质有氯化铁和硫的同素异形体或相关硫类物质,种类可能不止一种。深层大气还存在非硫酸气溶胶,就位化学分析仪检测到除含硫颗粒外,还有相对大量的氯、磷和铁化合物。

金星云由细小颗粒组成,粒径最大约 $10\ \mu\text{m}$ 。极区的深层云中存在异常颗粒,比其他区域的颗粒更大或组成不同(Wilson et al., 2008)。上霾层气溶胶存在亚微米和微米尺寸的颗粒(Luginin et al., 2016),可能由硫酸蒸气与从云顶上涌的星尘和原位成核的液滴混合而成。

长期以来,金星是否存在闪电一直存在争议(Scarf et al., 1988; Gurnett et al., 1991)。轨道器尚未获得清晰的雷电闪电影像。金星快车数据对闪电可能存在提供了支持性证据(Russell et al., 2007)。与地球相比,金星闪电可能发生在更高的高度,平均强度为地球的几倍,产生闪电的电荷分离机制可能与地球不同。金星闪电很可能发生在云间,而不像地球在云与地面之间(Taylor et al., 2018)。

1.1.2.4 温度、能量平衡和热结构

全球大气热结构是控制大气环流和云层结构的关键。金星大气的热结构从地表延伸至约 $200\ \text{km}$ 高度,是辐射和对流过程作用的结果。辐射和对流过程又受大气对入射太阳辐射和来自地面的红外辐射的

散射和吸收所控制。目前对于 $130\ \text{km}$ 高度以上和 $40\ \text{km}$ 高度以下范围的观测数据很少。

云顶温度与入射太阳光处于平衡状态。大多数红外波段都无法穿透金星云顶,在全球平均值($235\ \text{K}$),辐射能量近似黑体。云层上的上层大气不透明性较小(水蒸气浓度低),除了在 $15\ \mu\text{m}$ 附近有二氧化碳的强吸收,大部分辐射能都逃逸至太空(Limaye et al., 2018a)。金星大气在地表至云底($\sim 40\ \text{km}$ 高度)在平均波长意义上是不透明的,这个区间的温度剖面主要受对流控制。

金星大气的水平温度差通常较小。云层内部温差不超过 $10\ \text{K}$ 。在南北半球的高纬度,冷领结构($< 200\ \text{K}$)和极偶极子($> 250\ \text{K}$)两种类型的极地特征表现出非常复杂的空间结构和时间变化,可能与高纬度大气动力学中的波状不稳定性有关。

1.1.2.5 金星高层大气的物理化学

金星的高层大气可分为平流层(或称中间层; $65\sim 120\ \text{km}$),热层($120\sim 220\ \text{km}$)和散逸层($220\sim 350\ \text{km}$)。下平流层还可分成两层,较低的一层约为 $62\sim 73\ \text{km}$,与云盖顶部相接,温度大约是一 43°C ;较高的一层约为 $73\sim 95\ \text{km}$,温度随高度增加持续下降,至平流层顶 $95\ \text{km}$ 时为一 108°C ,也是金星昼半球大气层最低温处。高度 $95\sim 120\ \text{km}$ 的平流层和热层交界部分,温度持续上升至大约 $27\sim 127^{\circ}\text{C}$,与热层普遍温度类似。相比之下,金星夜半球的热层是金星温度最低之处,只有一 173°C (Gerard et al., 2017)。

金星平流层和热层的环流模式与对流层完全不同。在 $90\sim 150\ \text{km}$ 高处的气流自昼半球向夜半球移动,并在昼半球上升,夜半球下降。昼半球气体中携带氧原子,在夜侧重组后释放波长 $1.27\ \mu\text{m}$ 的红外辐射($90\sim 100\ \text{km}$ 高度),可被遥感手段观测到。高层大气组分 O_2 、 NO 、 CO 、 CO_2 在紫外、可见光和近红外波段均表现出非局部热平衡辐射(Drossart et al., 2007)。金星快车在 $90\sim 120\ \text{km}$ 高度探测到薄臭氧层,厚度约为 $5\sim 10\ \text{km}$,密度只有地球臭氧层的千分之一;金星大气可能还存在类似地球的氯化化合物对臭氧的破坏(Montmessin et al., 2011)。金星快车还首次在地外大气中探测到羟基(OH),羟基的位置和强度随时间变化(Piccioni et al., 2008)。

金星电离层几乎与热层重合。高度电离的状态只在昼侧出现,夜侧电子的浓度几乎为零。金星电离层总共可分为3层: $120\sim 130\ \text{km}$ 高的 v_1 层, $140\sim 160\ \text{km}$ 高的 v_2 层和 $200\sim 250\ \text{km}$ 高的 v_3 层。在接近 $180\ \text{km}$ 高度可能还存在另一层。最大电子单位密

度是在接近日下点的 v_2 层中,达到 $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 。电离层顶位于高度约 220~375 km 处,并且分隔诱发磁层内的等离子体和来自行星的等离子体。 v_1 和 v_2 层中的离子主要是 O_2^+ , 而 v_3 层则是 O^+ 。

目前金星还未探测到内生磁场,只有由太阳磁场诱发的感应磁层(Zhang et al., 2008)。诱导磁场有弓激波、磁层鞘、磁层顶和包含电流片的磁尾。在太阳日下点处,在太阳极小期测量的金星弓激波在金星表面以上 1900 km 处;在太阳极大期时弓激波距离可能会是极小期时的数倍。磁尾则延伸至 10 倍金星半径处,是金星磁层中活动最剧烈处。磁力线重新连结的过程和粒子加速都在磁尾发生。此外,在太阳周期的固定阶段,日冕物质抛射事件也会造成感应磁场的剧烈变化(Zhang et al., 2012)。金星大气的散失主要通过磁尾散逸,主要的离子为 O^+ 、 H^+ 和 He^+ 。氢和氧的散逸摩尔比大约是 2,相当于水分子的流失(Barabash et al., 2007)。高能中性原子也存在逃逸,但通量小于离子逃逸。低能原子难以测量,对其通量并不清楚,但预计通量较低(Gerard et al., 2017)。

1.1.2.6 当前气候和气候演化

(1)当前气候。金星与地球的大气结构和气象条件相比,两者温度-压力曲线在共有范围内非常相似。主要区别是地球的平流层温度最高(臭氧层吸收紫外辐射生热),而金星没有对应现象。其他较小差异主要由于金星大气中二氧化碳的比例较大以及与太阳的距离不同造成的(Taylor et al., 2009)。金星氮气净含量与地球类似。地球表面存在持续将气体二氧化碳转变为碳酸盐的过程,这一过程所消耗的二氧化碳与当前金星大气中存在的二氧化碳含量相似(Lecuyer et al., 2000)。因此,金星和地球初始都具有高压高温的表面和二氧化碳为主的大气,但地球大气的二氧化碳被固定在碳酸盐中,而金星的则停留在大气中。目前对于金星为何如此干燥尚无任何解释。较具倾向的假说是金星和地球最初水含量、二氧化碳和氮含量均相似,但金星在其演化的早期阶段损失了水(Taylor, 2014)。如前文所述,金星大气中水的 D/H 比和金星快车检测到的水分子逃逸似乎支持这一假说,但尚无定论。

(2)气候演化。由于缺乏金星样品,对金星早期地质和气候历史的研究非常困难,比对其他星球的研究都更依赖于理论研究、地球类比和模型研究。金星目前的气候演化模式,最受追捧的是“失控温室”模型(Ingersoll, 1969)。在这个模型中,金星在被水和二氧化碳造成的温室效应控制之前,被描述为具有温和

气候和液态海洋的星球。但事实上目前并没有观测数据和理论证据表明金星曾经凉爽,或者具有类似地球海水的水丰度。金星早期的温压条件可能比现在更为严苛(Lebrun et al., 2013)。对比地球和金星的演化,如果假设金星和地球具有类似的初始组成和大气质量,影响两个星球演化的关键因素可能包括不同的公转轨道、大气逃逸的效率、挥发分俯冲至内部的过程等。目前的诸多气候演化模型正在探讨,如果金星与地球互换了位置,金星距离太阳一个天文单位,缓慢逆行自转,金星大气组成和表面温压是否会有显著不同?金星是否会成为具有板块构造和海洋的行星,并孕育生命?另外,气候演化的另一个研究方向是探讨金星当前轨道状态下的未来气候演变。一个推测是,随着火山活动的减少,金星表面压力可能会下降,最终停止向大气输送大量气体(类似当前的火星)。大气向太空逃逸以及通过地表的化学风化作用将以不同的速率从大气中清除某些气体种类,直到大气主要以氮为主(类似地球)(Taylor et al., 2009)。

(3)大气层中宜居环境。金星表面是否存在类似地球上的嗜极微生物,尚需进一步探测。金星表面的温度超过 450°C , 高于地球上灭菌所需温度,嗜极生物能存活的上限仅为 100°C 以上数十度。然而,地球有些非嗜极生物可以在比云层高的高空中生存并繁殖,因此有学者提出生命可能在金星的相同区域存活。特别是金星下云层(47.5~50.5 km)存在适合地球微生物生存的温压条件($\sim 60^\circ\text{C}$, 1 个大气压),同时存在微米级的硫酸气溶胶,呈酸性。浓密而混浊的金星云层中,潜在的微生物也许可以利用大气中的硫化物躲避太阳辐射的伤害。近年来,地基望远镜观察到金星云层可能存在磷化氢(PH_3)物质,可能指示着潜在的生命活动和宜居环境(Greaves et al., 2020),虽然这一探测结果目前仍存在争议(Villanueva et al., 2021)。金星云层是否存在生命物质是未来重要的探测目标(Limaye et al., 2018b; Cockell et al., 2021)。

1.1.3 未解决的重大科学问题

当前,金星大气仍主要处于观测数据积累阶段。关键现象和特征及其成因机理和时空分布演化仍是当前和未来任务的重点。新的观测也将为大气和气候模型的构建和验证提供关键数据。重大科学问题包括:

- (1)金星大气超旋转现象的成因?
- (2)金星大气剖面特征及变化?金星深层大气

(地表至云层)的物质组成和特征?

(3)金星反照率的时空变化?

(4)金星云层的组成和化学性质?紫外线吸收剂的成分和性质是什么;控制其空间分布和演变的因素是什么?如何区分无机/有机/生物的紫外吸收剂?

(5)金星是否存在闪电?若有,闪电形成的机理及其对大气成分演化的影响?

(6)太阳风与金星大气的相互作用及其对金星大气的演化逃逸、感应磁场、高层大气物理和电离层等的影响?

(7)夜侧气辉发射现象中所观察到的变化成因是什么?地形对气辉亮度和形态分析有何影响?

(8)金星夜侧极光的特征和轨迹?氧绿线增强与紫外线之间的关联?带电粒子沉降对局部或全球热平衡的影响?

(9)金星大气的热力学,量化具有不同超临界点的气体混合物的热力学特性。

(10)哪些机制造成了当前的气候过程?辐射在金星大气演变中的作用?早期温室效应和金星水的流失过程?

(11)金星地表重塑过程对大气组分的影响和对气候的扰动?

1.2 金星表面与内部探测研究进展

1.2.1 探测历史

对金星地表与内部探测主要依赖历史上系列降落任务和轨道器的雷达遥感。由于金星浓密大气的包裹和极端严苛的表面环境,对金星地表和内部的探测存在诸多挑战,因此探测研究程度和数据非常有限,亟待新的探测任务获取金星表面形貌、构造、物质组成等基础数据。

目前对金星地表的主要认识源于 1994 年之前苏联和美国的金星探测竞争时代的系列任务(Taylor, 2014)。苏联于 1961~1984 年间通过“金星”系列任务(Venera)对金星表面开展了系统探测。“金星”系列后期的着陆器不断延长在金星地表的存活时间,从 23 min(第一个探测器)延长至约 2 h(最后的探测器)。其中,金星 7 号实现了金星表面软着陆,排除了现代金星上有液态水存在的可能性;金星 8 号机载伽马射线光谱仪测量了地表岩石的 U/Th/K 比值,认为与花岗岩中比值相似;金星 9 号首次返回金星表面黑白图像,照片显示没有阴影,空气中没有明显尘埃,许多 30~40 cm 小的岩石没有被侵蚀;金星 10 号着陆点属于平原地区,该地区岩石很平整,密度为 2.7 g/cm³;金星 13 号和 14 号地面覆盖褐色的沙砾,岩石

结构像光滑层状板块,钻取的岩石化学组成为黑色碱性辉长岩类(金星 13 号)和大洋拉斑玄武岩(金星 14 号)。金星 15 号和 16 号环绕器用综合口径雷达测绘金星表面地质图,成功绘制了北纬 30°以北 25%的金星表面地形图,发现特大型盾状火山。1984 年,苏联“维加”(Vega)金星-哈雷彗星探测器维加 1 号和维加 2 号分别发射,在抵达金星的几天前,两个飞行器分别释放包含了着陆器和探测气球的下降模块,无控进入金星大气。最终,气球都成功地进入金星大气,着陆器也都实现了软着陆,并获取了地表岩石样品的物质组成。

美国对金星地表的探测主要集中在 1978 年的先驱-金星 1 号(Pioneer-Venus Orbiter)和 1989 年的麦哲伦号(Magellan)两个轨道器任务(Taylor, 2014)。先驱-金星 1 号轨道器使用雷达测绘了第一张金星地形图,并发现金星地形和地球相类似,有山脉、平原、火山、巨型峡谷和撞击坑等形貌特征。麦哲伦号也称为金星雷达测绘仪,1990 年 8 月抵达金星。在为期 4 年的观测期里,麦哲伦合成孔径雷达(SAR)发布了迄今为止最高分辨率的金星地形图,以约 100~300 m 的水平分辨率和 5~15 km 的高程分辨率绘制了金星表面的 98%。成功对撞击坑、丘陵、山脊和其他地质构造进行详细的成像和分析,其程度与其他行星的可见光测绘相当。麦哲伦号任务所揭示的最大惊喜是金星表面的撞击坑数量、分布和特征。麦哲伦号还通过全球测高和辐射观测测量了地表形貌和介电特性。麦哲伦通过空气制动进入圆形轨道还获得了金星全球重力图。直到目前,麦哲伦号数据制作的金星全球地形图仍然是现存最详细的金星地形来源。

1.2.2 金星表面与内部的探测研究进展

1.2.2.1 表面形貌特征

金星表面相对平坦。基于测高数据,金星的地貌可划分为 3 类地质单元:低地、沉积平原和高地(图 3)。大约 80%的金星表面被光滑的火山平原覆盖,其中 70%的火山平原存在褶皱山脊,10%的火山平原或平滑或存在断裂。两块高地占据了金星剩余的 20%表面,一块位于北半球(Ishtar Terra),另一块位于赤道以南(Aphrodite Terra)。金星上最高山脉 Maxwell Montes(最高峰高于金星平均半径 11 km 以上)位于 Ishtar Terra 范围内。

沉积平原的平均高程(相对于金星平均半径)为 0~2 km,低地一般位于零高程以下,主要由侵蚀高原所产生的细粒物质堆积而成。由于金星缺乏现代高精度形貌探测数据,目前对金星表面各种特征的解释

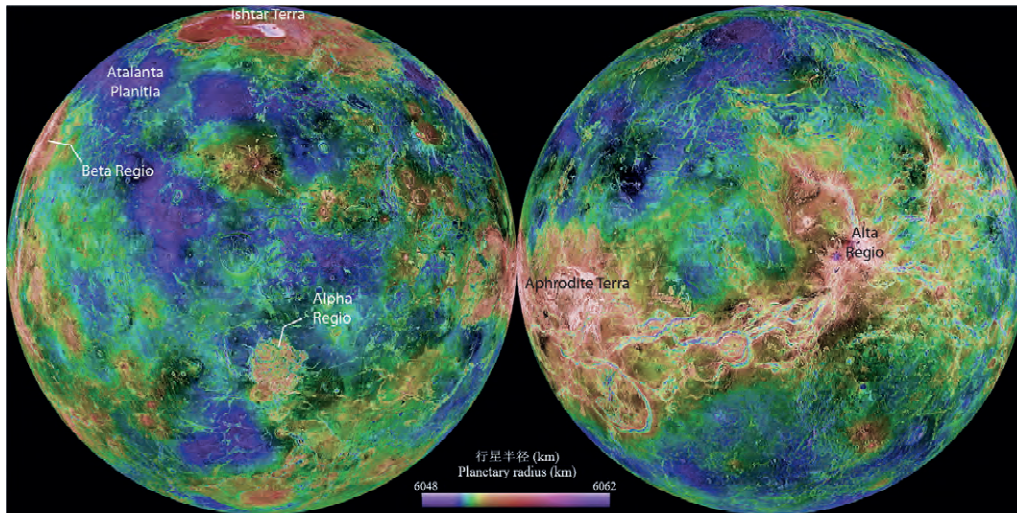


图3 金星全球地形图(基于麦哲伦号数据;图来源 <http://explanet.info>)

Fig 3 The global topographic map of Venus (based on Magellan data; source <http://explanet.info>)

都存在诸多争议。金星平原普遍存在构造变形,这与月球、地球和火星上水平产状的相对未形变的玄武岩平原有很大区别。地球上类似的强烈变形只发生在板块边界附近。金星平原还存在至少约 200 条独特的渠道,表面平滑,形貌类似地球河流般蜿蜒,但没有支流,宽度为 1~2 km。许多渠道长度超过 500 km,最长的 Baltis Vallis 延伸约 6800 km(宽 1 km,深 20 m)。这些渠道推测是由低黏度熔岩流形成,可能富碳酸盐(Taylor et al., 2008)。

金星主要的高原省有 Aphrodite Terra、Ishtar Terra 和 Lada Terra, Beta Regio, Phoebe Regio 和 Themis Regio, 其他一些高原区群还包括 Alpha Regio, Bell Regio, Eistla Regio 和 Tholus Regio。高地的一些区域具有高雷达反射率,猜测可能是由于局部高地的岩石含有高介电常数的矿物或被其以风化层形式覆盖,并且这些矿物只能稳定存在于高地的温压条件下,而不能在平原区稳定存在(Gilmore et al., 2017)。目前这类候选矿物还存在很大争议,已被提出的有黄铁矿、氯磷灰石等(Pettengill et al., 1996)。此外,金星高地是否成份上类似地球花岗岩大陆地壳,是目前还未解答的关键科学问题。

1.2.2.2 撞击坑分布与特征

金星表面仅保留了约 940 个撞击坑(图 4a)。由于浓密大气过滤了小型撞击体,因此直径小于 30 km 的撞击坑很少,小于 5 km 的近乎缺失。有 72 个为峰环盆地,直径在 31~109 km 之间,其中有 4 个可能属于多环撞击盆地。小型撞击坑通常形状不规则,并且成群出现,指示着撞击体的减速或破碎。成群出现的

撞击坑约占撞击坑总数的 16%。金星表面同时也缺乏大型撞击坑(Taylor et al., 2008)。现存的撞击坑年龄都相对年轻,很少被熔岩流充填,说明这些撞击坑形成时该区域的火山活动已经减弱。雷达数据显示这些撞击坑表面粗糙,未有足够的时间被侵蚀(Ivanov et al., 2011)。由于缺乏其他随机分布的地表特征作类比,金星撞击坑的空间分布是否随机暂时无法分辨(Ghail et al., 2018)。

金星撞击坑形貌的独有特征之一,是撞击坑边缘的溅射物有部分缺失(图 5f),主要是由于撞击体在进入大气和撞击时与大气的相互作用所致。另一个独有特征是大规模产生冲击熔融体,有些溢流范围超过撞击坑直径几倍。金星撞击形成的冲击熔融体比地球高 25%,这主要是由于金星表面温度较高(Taylor et al., 2008)。

1.2.2.3 火山和构造作用

(1)火山。金星火山平原上点缀着一百多座孤立的大型盾状火山,以及数以百万的直径小于 20 km 的小火山(图 5e)或火山相关结构。大型盾状火山宽度约几百千米,但平均高度仅为 1.5 km,非常平坦。一类火山看起来具有薄饼状扁平的圆顶,高度小于 1 km,在一些区域以成百上千的群落式出现,被称为“薄饼火山”(pancake volcano),可能是高黏性富硅岩浆在金星高压下喷发形成(图 5d; Taylor et al., 2008)。金星具有独特的火山-构造特征,包括放射状岩墙(Nova)、蛛网结构(Arachnoid)和冕状结构(Coronae)(图 5a~c)。放射状岩墙是由大量岩浆侵入地表形成,具有高雷达反射率。蛛网结构形似蜘蛛

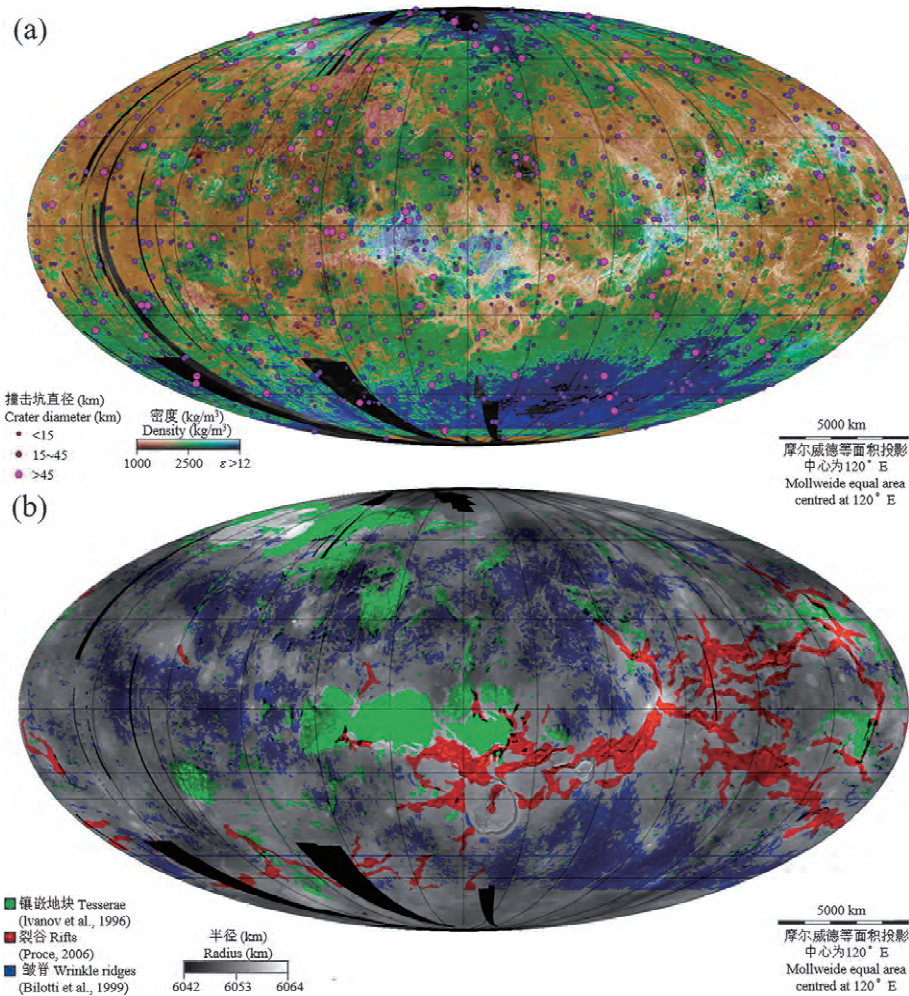


图 4 金星全球撞击坑分布(a)和火山构造特征(b)(据 Ghail et al., 2018 修改)

Fig 4 The global distribution of impact craters on Venus (a) and volcanic and structural features (b)

(modified from Ghail et al., 2018)

(a)中:粉红色—疏松沉积物,棕色—沉积或风化的岩石,绿色—火山岩,蓝色—低介电常数物质;(b)—裂谷跟随沿着大圆弧的地形上升,类似于地球的中洋脊;皱脊主要分布在低地;镶嵌地块跨越一定高度的高形变地形,成分上可能类似地球大陆壳

(a): Pink—loose sediments; brown—sedimentary or weathered rocks; green—volcanic rocks; blue—low dielectric constant materials. (b)—Rifts follow topographic rises along great circle arcs, similar to Earth’s mid-ocean ridges; wrinkle ridges are predominantly in the lowlands; tesserae are highly deformed terrain across a range of elevations, and are possibly continental crust

网,由多个同心椭圆环绕中心并具有类似放射状岩墙的放射状特征,目前已识别出约 250 个。冕状结构由山谷和山脊形成的同心环组成,直径通常在 150~1000 km 之间,可能是热地幔上涌所致(Taylor et al., 2008)。关于金星是否存在火山作用的争论一直持续,但由于缺乏地面探测任务,难以找到直接证据。金星快车的观测贡献了三个支持金星存在活跃火山作用的证据:① Imdr、Themis 和 Dione 三个热点地区存在异常高的热辐射发射值,可能与活动的熔岩流有关(Smrekar et al., 2010);② 局部区域出现高于预期温度的特征,可能与火山喷发或新鲜熔岩流有关(Shalygin et al., 2015);③ 金星大气中检测到二氧化

硫含量的剧烈波动,一种解释是由于火山喷发所释放的火山灰向上漂浮造成(Marcq et al., 2013)。

(2)构造。虽然金星似乎缺乏板块构造运动,但金星仍然存在多样的构造特征。活跃的火山活动形成了多尺度的构造变形,最终形成与火山关联的全球构造网络(图 5b)。镶嵌地块(tessera)是形如镶嵌地板的特殊挤压——扩张变形地貌。镶嵌地块包含由平原环抱的一些几十千米的孤立块。在镶嵌地块内不同方向的平行脊、断裂、地堑交叉,伴随少量的火山活动。一些出露较好的区域包括 Aphrodite Terra、Alpha Regio、Beta Regio、Fortuna Tessera 和 Ovda Regio。大峡谷(chasma)是由平行的谷和断层组成的

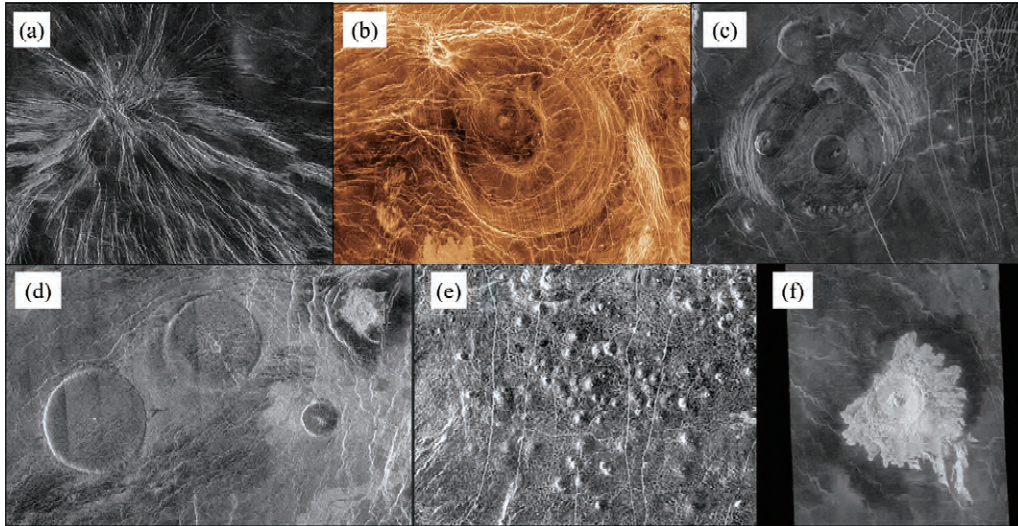


图5 金星表面典型形貌特征(来源 NASA/JPL)

Fig 5 Typical morphological features of the surface of Venus (Source: NASA/JPL)

(a)—放射状岩墙(250 km 宽);(b)—蛛网膜特征结构(Trotula Corona);(c)—冕状结构(Aine Corona);(d)—薄饼火山;

(e)—小型盾状火山群落(图总宽 120 km);(f)—Aurelia 撞击坑(直径 32 km;溅射物部分缺失)

(a)—Nova (250 km wide); (b)—the characteristic structure of arachnoid (Trotula Corona); (c)—coronae structure (Aine Corona);

(d)—pancake volcanoes; (e)—group of small shield volcanoes (image width 120 km);

(f)—Aurelia impact crater (32 km in diameter; part of the ejecta is missing)

扩张变形,金星上 5 个主要大峡谷 Paga、Hecate、Dali/diana、Devana、Ganis,均延展几千千米,深度达几千千米,主要与地幔柱扩张和上涌有关。金星上还普遍存在多种脊带(ridge belts)、皱脊(wrinkle ridges)、近直线的线性断裂和多角形(Ghail et al., 2018)。

(3)金星地球化学。金星密度(5.24 g/cm^3)比地球密度(5.514 g/cm^3)约低 5%。未压缩密度金星为 3.9 g/cm^3 ,地球 3.96 g/cm^3 ,两者非常接近。金星与地球相似的密度和金星的玄武质壳是假定金星和地球具有大致相似组成和内部结构的重要基础(Taylor et al., 2008)。对于金星的整体元素丰度,目前主要基于模型推测。金星的主量元素(Si、Ti、Al、Fe、Mg、Ca)和生热元素(K、Th、U)含量可能都与地球相近。在获取更多探测数据之前,金星整体化学组成的最佳参照依然是地球(Taylor et al., 2008)。目前对金星表面物质组成知之甚少。金星的重力和浓密的大气阻碍了金星陨石的获取。苏联的“金星”和“维加”系列金星着陆器虽然开展了对着陆点的物质组成探测,但由于轨道器空间分辨率不佳,对着陆点的确切降落位置存在十几千米的误差。此外,已有的金星着陆点几乎全分布在占金星表面 80%的熔岩平原,未能对其他种类繁多的地貌类型进行采样,例如火山和构造区域(Taylor, 2014)。同时,已有的着陆器地球化学

数据具有很大的不确定性,无法进行概括性的解释。“金星”和“维加”系列任务通过 X 射线荧光(XRF)对主量元素进行了分析,但其中缺乏 Na 数据,限制了对岩石类型的分类。Mg 和 Al 的测量数据与误差相近。通过伽马射线对 K、U 和 Th 的分析不精确,可用的数据仅有金星 8 号的高 K 含量($\sim 4\%$ 的 K_2O)和金星 9 号的非球粒陨石 U/Th 丰度比。着陆器未能测到其他主量元素和微量元素(如 Cr、Ni 等)数据。尽管如此,从仅有的几个测量还是可以得出金星具有地球化学多样性。玄武岩中既包含贫不相容元素(例如 K、U、Th)的样品,也包含着非常富不相容元素的样品,指示着显著的岩浆或地幔分异。非球粒陨石的 U/Th 比不可能通过硅酸盐岩浆分异实现,可能指示着其他流体(例如水或碳酸盐岩)的作用(Treiman, 2013)。

(4)金星内部结构。迄今尚无金星内部的直接探测数据,尤其缺乏地震数据。金星核可能部分呈液态,但由于金星尚未探测到内生磁场,以此推断金星核对流可能被抑制。金星在核组成、分层、冷却历史、地幔干燥度和刚性等因素上与地球的差异,可能是抑制核对流的原因。缓慢自转并不是金星缺乏内生磁场的主要原因,反而被认为可能有利于磁场产生。金星的缓慢自转被解释为由太阳引力和热潮引起的减速旋转,以及与金星浓密大气在地表造成的拖曳效应

有关(Correia et al., 2001)。金星缺乏天然卫星,也可能对自转造成影响。近年来新假说认为,金星可能存在极其微弱的内生磁场,需要在地表或近地表进行新的测量(O'Rourke et al., 2019)。金星表面可见的地质历史上(<1 Ga)缺乏类似地球的全球板块构造运动,因此金星幔对流的性质和内能散失机制等仍是金星地质演化的关键问题。金星壳的平均厚度在 8~25 km 之间。模型表明弹性岩石圈厚度可能在 10~40 km 之间变化,冕状结构和其他变形地形的表面热流估计值为 45~100 mW/m² (James et al., 2013)。金星可能具有活跃的火山活动和去气作用。地幔柱上涌造成地表隆升和近期的火山作用,但又不不足以驱动内核发电机。某些位置可能存在诱导俯冲(Davaille et al., 2017; Smrekar et al., 2010)。当前的活火山是否存在于“热点”之上,是一个重要的问题。如果是,则意味着上地幔干燥,而下地幔更易挥发(Smrekar et al., 2012)。火山碎屑流与大气中硫含量的波动表明金星仍然存在去气作用(Campbell et al., 2017; Marcq et al., 2013)。有学者提出俯冲和分层可能会将挥发分再循环回到金星内部(Elkins-Tanton et al., 2007),但目前尚不清楚金星是否存在这样的再循环过程。

(5)演化历史。由于撞击坑数量太少,金星表面不同区域的年龄难以通过撞击坑统计定年方法确定。基于对撞击通量的估计,撞击坑所代表的年龄跨度在 1 Ga~300 Ma。最佳年龄估计值为 750 Ma。因此现有的金星壳不是原生壳,而是次生壳。次生壳的形成过程是金星全球重塑事件。该事件可能发生在距今 750 Ma 之前,用了不到 100 Ma 的时间。目前对这个过程的速率缺乏制约,存在灾变式和缓慢平衡式两种假说(Taylor et al., 2008)。

金星表面可观测的地质历史可以为 3 个阶段。早期阶段(Fortunian 时期),涉及剧烈的变形和构造,产生了由镶嵌地块和类高原组成的较厚区域。之后是 Guineverian 时期,在该时期的前半部分延续了早期阶段,密集的构造运动产生了平原、山脉带和区域互连的沟带。大多数冕状结构也开始形成。Guineverian 时期的后半部分,形成了数以万计的小型盾形火山,大量熔岩流涌出填充了低地,广阔的熔岩平原覆盖了金星表面大部分地区。持续的轻微沉降和变形在火山平原上形成收缩皱脊。第三阶段,Atlian 时期,涉及裂谷网络和进一步火山作用,形成了明显的裂谷带和熔岩流区域,而皱脊并未改变。该时期的火山活动一直持续到现在,但对当前火山活动

和地质作用的程度尚不确定。前两个阶段(强烈构造变形和大量熔岩流)发生在很短的时间内,而第三阶段(局部裂谷和有限的火山作用)占据了金星可观测地质历史的绝大部分(Ivanov et al., 2011, 2013, 2015)。

有学者在金星全球地质图(Ivanov et al., 2011)基础上绘制了单位地层序列(Kreslavsky et al., 2015),发现:① 重叠在每个单元上的撞击坑大小—频率分布一致;② 区域平原和地层较老的单元具有相似的撞击坑保存年龄;③ 较年轻的单元平均撞击坑保存年龄明显小于该地区的平原。这些结果支持了金星快速全球重塑的假说。这些新研究促进了对金星重塑历史假说的重新审视。

1.2.3 未解决的关键科学问题

金星地表和内部的探测缺乏数据,特别是新一代科学载荷仪器测量的高质量高分辨率探测数据。目前有诸多一级重大问题缺乏制约,包括:

(1)金星是否具有板块构造作用?如果没有板块构造,金星如何散热?金星有板块俯冲吗?是否存在产生板块构造的先兆?

(2)金星是否经历了全球重塑事件?这一事件是灾变性的还是缓慢平衡的?这一事件对金星内部演化的启示是什么?重塑事件是散热的有效方式吗?

(3)金星表面的平均年龄是多少?是 100 Ma 还是 1 Ga?

(4)金星的去气作用仍然进行着吗?是否所有的“热点”都活跃?“热点”是当今火山活动的唯一来源吗?

(5)镶嵌高地矿物相和元素组成;镶嵌高地是长英质/花岗岩质的吗?金星壳经过分异吗?

(6)金星壳是否存在剩磁?金星有没有内生磁场?

(7)金星高地表层可能覆盖的半导体物质的化学组成?

2 金星探测的主要手段和科学目标

2.1 金星探测研究的主要手段

金星研究的主要手段除探测任务外,还包含地基观测、实验室模拟和数值模拟研究(Glaze et al., 2018)。

金星探测任务根据探测器类型,可分为轨道探测、空中就位探测和地面就位探测任务 3 种。轨道探测是相对而言技术最为成熟,轨道器在已有的金星任务中占绝对主体。轨道器可以开展对金星大气、空间

物理、地面地质与地球物理的探测。20世纪以来,金星快车和拂晓号都是主要针对金星大气和气候变化的轨道器,特别缺乏针对金星地质和地球物理方向的轨道器。空中就位探测是通过空中平台(例如浮空气球)和下降式探测器/探空器开展,优势在于空中平台可在金星云层中(温压条件与地球表面相近)条件相对适宜的情况下开展针对云层和大气的探测,或在云层下方开展金星深层大气(60 km 高度至金星地表)的探测。地面就位探测任务可获取金星地表物质组成,大气与地表的相互作用和地震等信息,但金星地表的严苛环境是探测器存活时间的主要制约。基于存活时间,可将探测器分为短寿命工作站(< 24 h)、长寿命工作站(> 24 h)、可移动金星车(> 24 h)等类型。

金星同样适合地基观测或近地球观测。地基观测是飞行器任务的重要补充,可观测大气组分、大气动力学和金星地质等。对于大气组分,地基观测可提供比飞行器更宽的光谱波段覆盖范围,最佳光谱分辨率可以与飞行器互补。新建的地面观测设施还有望发现新的大气物质,从而指引新的轨道器载荷设计。对于大气动力学,地面观测站可以长时间追踪一些关键目标和现象,基于地面的空间映射还可弥补金星探测器的视觉几何。对于金星地质,地基雷达可以观测金星表面影像,特别是影像中包含的极化信息已被有效地用于绘制覆盖金星镶嵌地块的撞击坑溅射物和帮助识别爆发性火山碎屑物质的颗粒(Campbell et al., 2017)。未来的平方千米阵(SKA)还将有效的增加收集面积的数量级,有助于绘制金星表面特性图,观测火山和构造引起的变化和金星自转速率的变化等(Navarro et al., 2018)。

实验室模拟研究是解译观测数据和数值模拟结果的基础。例如,解译地表物质光谱需要全面表征复杂温度对矿物和岩石近红外光谱的影响;支持未来遥感探测需要实验获取关键气体组分在高温高压下近红外波段的光谱特征;运用实验制约造成麦哲伦雷达发射率随高度变化的半导体和铁电物质的种类等。诸多金星表面过程也需要实验制约,包括可能由地幔柱驱动的有限俯冲作用所形成的独特地表特征,金星表面的风化环境,玄武质玻璃表面 10 μm 厚的赤铁矿风化层(形成速率和所需时间),金星表面硫酸盐形成的反应速率等。对于金星大气,还特别需要通过实验研究在特定高度范围内所发生的化学反应以及厚云层中气溶胶的物理化学特征。诸多研究领域还迫切需要兴建新的实验设施。

数值模拟研究主要用于对现有观测数据的解释和对未来观测的计划。金星快车和拂晓号任务获取的观测数据,快速推动了大气建模的发展。通过数值模拟可以开展的关键研究领域包括:辐射传输模型(Lebonnois et al., 2015),化学动力学模型(Zhang et al., 2012),云微物理学(McGouldrick et al., 2007)和大气环流模型(Lebonnois et al., 2016)。此外,金星内部动力学和地幔柱形成条件等的数值模拟研究近年来取得较大进展(Smrekar et al., 2012)。

2.2 金星探测的科学目标和研究前沿

金星探测的目标和研究前沿,可大致分为3个部分:①金星大气的形成、演化和气候历史;②金星的表面和内部的演化;③金星内部—表面—大气间的相互作用和演化历史(VEXAG, 2019)。相关的科学问题和所需的探测内容见表2。

3 金星探测研究的技术需求

金星探测的工程目标有:①获取第一手的金星探测数据;②验证深空探测所需要的若干共性关键技术;③验证金星探测工程系统设计的正确性与可行性。

3.1 系统/子系统关键技术

为了实现对金星的环绕/降落/着陆/巡视探测,当前至少需要11个方面的技术发展(Hou Jianwen et al., 2015; Cutts, 2019)。

(1)新型轨道技术。主要包括:借力飞行轨道技术,气动减速轨道技术,大气俘获技术和小推力过渡轨道技术等。在金星轨道设计时,考虑借力飞行轨道技术的可行性,将有助于节省推进剂。“麦哲伦”任务和金星快车任务都采用了气动减速轨道技术。气动减速技术已趋成熟,但是探测器的设计(尤其是太阳能电池板的设计)必须能承受金星的热量和压力。大气俘获技术对于实现金星样品返回器的轨道非常有用。

(2)进入金星大气时的热防护技术。主要包括:传统碳酚醛材料,三维编织热保护系统和适应性可部署的进入和放置技术(ADEPT)。所有进入金星大气的探测任务都面临高温考验。20世纪苏联和美国宇航局的一些探测任务都曾经成功进入金星大气,但目前老的热防护技术已不再使用,需要研发新的热防护技术。碳酚醛是过去金星任务中曾使用过的一种材料,但由于制造工艺的问题难以复制。三维编织热保护系统目前正在研发,有望在未来几年

中加入到金星探测器的研发中。适应性可部署的进入和放置技术(ADEPT)通过布置一个伞状的大面积隔热罩来降低有效载荷的弹道系数。这个技术将不需要研发更先进的热保护材料。ADEPT 方法还有充气版本(超音速充气空气动力学减速器 HIAD),并已开展了地球返回实验的测试。

(3)下降和着陆技术。下降技术主要针对进入式探测器和着陆器。部署主要针对空中平台和下降式就位探测器和探空器等。着陆技术的研发包括针点着陆技术和自动避障技术等。金星浓密的大气使得下降、部署空中平台和着陆金星比在火星更为容易。下降可以利用已有的材料和技术实现。对于进入式探测器,必须在下降期间控制速度和姿态,提供足够的时间来采集/分析不同区域的大气,同时限制在恶劣环境阶段(如高温和腐蚀性环境)的停留时间。对于着陆任务,任务的目标通常是使着陆器尽快的降落至地面,从而使着陆模块的热输入最小化。部署空中平台,需要建立起成功部署空中平台的必需条件,目前已知对于空中平台在金星大气的中部(57~65 km)云层中部署较容易实现。从空中平台部署的下投式探空仪(drop-sondes)可用于对多个位置的大气进行采样,并可以与部署它们的空中平台联用,用于中继传输大量潜在着陆点的高分辨影像数据。但目前,近地表附近生成影像还需要技术研发。针点着陆技术通过将着陆器下降时获取的图像和金星表面的背景地图关联,引导着陆器抵达预选的着陆点,目前该技术的成熟度高。避障技术将使用下降最后阶段获取的表面信息(影像,激光雷达和雷达)来识别危险区域并主动避开,但目前相关认知还非常匮乏。

(4)空中平台技术。主要包含 3 个主要类别:固定高度气球(超高压气球、零压气球等),可变高度气球(相变气球、金属波纹管气球、高度循环气球),以及空中飞行器(太阳能飞机和混合动力飞艇)。基于各种平台的科学回报、平台的尺寸和复杂性以及技术成熟度对比,目前综合科学探索潜力最高的是可变高度气球。此外,小卫星(SmallSat)和立方星(CubeSat)对空中平台是中继通讯,连续追踪和姿态测定的一种经济高效的方法。目前仍需进一步开发空中平台与小卫星/立方星技术和系统的协同。

(5)着陆平台技术。短寿命着陆器(24 h 以内),长寿命着陆器(24 h 以上)以及地表或近地表移动平台。目前已有的研发工作已经可以将着陆器的寿命延长至 24~25 h,使科学家能有机会对获取

的数据做出回应并作有限的后续观察。而如果想要更好的调查金星内部结构和当前活动性质,需要研发长寿命着陆器平台,特别是需要主动冷却技术和高温电子原件(在中长期任务计划中更为可行)。对于移动平台而言,还需要有效载荷舱中的仪器能够在金星温度下运行。为实现高保真、可见成像和遥感红外测量通常需要将传感器冷却到远低于地球环境温度。目前能够在金星温度下运行的电源和冷却系统仍需要研发。

(6)采样处理系统。例如采样上升系统和就地钻探系统等。金星探测规划将金星采样返回设定为长期目标。在高温高压条件下如何获取样品、如何将样品送入真空容器中,需要在已有的技术基础上做进一步的研究。相对容易的样品采样返回是采集距地面 55 km 高度附近的“宜居层”云样本。由于金星采样返回技术的挑战巨大,应当同时考虑是否有实现相同科学目标的其他探测手段。

(7)新型能源系统技术。例如太阳能技术,核能源技术,可利用的风能或其他能源的技术方法以及能量储存技术。相对而言,太阳能应用较广,然而在一些距离太阳较远的深空探测任务中只能依靠核能源,新型能源的应用潜力巨大。

(8)热控技术。包括主动热控和被动热控。被动热控包括表面处理技术、隔热技术、热管技术等。对于金星着陆器而言,短寿命着陆器(2~3 h)的被动热控技术成熟度非常高。对于微型探测器和探空器而言,热控技术的进展将提高这些探测器的性能。但目前还不清楚采用传统硅技术可以将探测器做到多小并可在金星近表面环境下运行。主动热控包括无源主动热控(如百叶窗与旋转盘和导热通道热开关)和有源主动热控(如加热和冷却回路或液体循环换热装置)等。主动冷却技术在长期着陆器中必不可少。

(9)适应长时间在高温环境中运行的极端环境技术。主要包括高温电子器件(中温、高温半导体电子器件,高温数字真空器件,高温储存电路)和高温机械技术(适合地面技术的高温机械,用于样品采集和储存的高温机械)。其中,发展中温(200~300℃)电子器件不仅在技术上比在金星表面高温下运行的电子器件难度小,且在地球上具有商业价值。高温半导体电子器件主要指正在研发的碳化硅和氮化镓电子器件。前者可在 500℃ 下长期运行数千小时,但内存非常有限,功耗相对较高。氮化物电子器件增加了电路的复杂性,但技术的成熟度仍相当低。

高温数字真空器件和高温存储电路极具潜力,但还不成熟。

(10)测控通信技术。例如深空测控网站技术和光通信技术。

表 2 金星优先探测科学目标

Table 2 The scientific targets of priority for future Venus exploration

探测主题	探测目标	调查和测量	
金星大气	大气演化	金星和地球是否源于相似的太阳星云组分 测量 Ne、O 同位素的相对丰度, Xe、Kr 和其他稀有气体的丰度, 确定金星和地球是否源自类似的太阳星云组分, 是否大型冰彗星向金星和地球传送了显著量的初始挥发分	
		金星大气逃逸 测量稀有气体(尤其是 Xe 和 Kr)的同位素, D/H, ¹⁵ N/ ¹⁴ N 以及逸散层底的离子、电子和磁场, 制约当前和过去过程以及在太阳安静和活跃期大气逃逸的驱动因素	
	辐照平衡、气候和超旋转	全球大气环流 从地表至均质层顶, 通过测量纬向和经向风以及能量在不同高程和时间的能量传输, 表征和理解全球环流, 包括深层大气超旋转, 上层大气在日下点-避日点的环流模式和行星尺度波。利用大气环流模型综合不同时期、高程高度和纬度区域上采集的观测数据	
		辐照平衡 从地表至均质层顶, 确定大气辐射平衡和温度剖面, 表征太阳能在云层中的沉积和云下方的再辐射, 包括广泛存在的紫外吸收剂的作用	
		垂向运动 表征小规模的垂向运动, 确定对流和局部(例如重力)波在热量和质量的垂直传输中的作用及其在全球循环中的作用	
	云和霾	云化学 通过在一天内所有时间和一定纬度范围内对云形成和消散过程进行测量, 表征云层的动态气象和化学特征。分析云气溶胶, 包括其粒径、数量/质量密度, 总体组成和垂向运动。研究其主要母体物质类别(例如 SO ₂ 、H ₂ O 和 H ₂ SO ₄)的丰度以及次要云成分的丰度	
		温室气体组分 确定温室气溶胶和气体(包括硫循环产生的物质和紫外线吸收剂)的成分以及产生和损失的机理, 及其在云层辐射平衡中的作用	
		闪电 表征闪电/放电强度, 频率以及一天中的时间和纬度变化。确定闪电在产生微量气体组分和气溶胶中的作用	
		生物相关化学 表征与生物有关的云和气体化学, 包括 ¹³ C/ ¹² C 和复杂有机分子	
	金星表面与内部	大地动力学	地层学和构造变形 通过高分辨率影像和地形图, 表征地表面单元的地层和变形, 建立金星地质历史中的事件序列。评估火山和构造形式的演化, 寻找和分析过去水平位移的证据
			去气作用 测量大气中放射成因的 ⁴ He、 ⁴⁰ Ar 和 Xe 同位素的混合比, 确定金星地质历史中的平均去气速率
		分异	内部 将地球物理测量结果与地表观测结果相结合, 表征金星内部的结构, 动力学和演化历史及其对表面地质的影响。相关的地球物理方法包括但不限于重力、电磁学、热流、旋转动力学、剩磁和地震
活火山和构造运动 通过观察当前和近期的活动来确定现代火山和构造活动的速率, 例如评估热特征和化学特征, 重复图像分析, 地面变形研究以及去气观测			
金星表面与内部	局部表面组成	岩石绝对年龄 确定关键区域产出岩石的绝对年龄	
		大范围成分变化 使用遥感手段确定大尺度上岩石的成分信息, 获取对区域地球化学过程的认识	
	金星壳结构	金星壳结构 通过高分辨率地球物理测量(地形、重力、地震学等)确定金星壳结构, 及其在空间和深度上的变化, 为金星壳体积和岩石圈结构与过程的估算提供制约	
		金星幔和核结构 确定金星核的大小、状态以及金星幔结构, 制约金星早期分异过程和热演化历史	
		金星壳中的放射性元素评估金星壳中放射源生热元素含量, 更好的制约金星整体元素丰度、分异和热演化	
次表面分层 表征次表面分层和地下深度约几千米以内的地质界面			

续表 2

探测主题	探测目标	调查和测量
金星内部/表面/大气的相互作用	液态水和温室效应	源自同位素的水历史 确定大气中 D/H 同位素比, 制约水历史。确定大气中 ¹⁵ N/ ¹⁴ N、 ¹⁷ O/ ¹⁶ O、 ¹⁸ O/ ¹⁶ O、 ³⁴ S/ ³² S 和 ¹³ C/ ¹² C 的同位素比, 以制约化学失衡模型
		水在镶嵌地块形成中的作用 识别并表征产生自与当前地质环境或气候环境截然不同的区域。确定水在镶嵌地块形成中的作用
	地质历史中内部-表面与大气的相互作用	含水矿物和沉积物的证据 寻找含水矿物, 水成沉积物和表层岩石所捕获的温室气体证据, 了解金星水储量和大气成分随时间的变化
		大气的源和汇 表征金星大气和固体样品中的稀有气体元素组成和同位素比值(特别是 Xe、Kr、 ⁴⁰ Ar、 ³⁶ Ar、Ne、 ⁴ He 和 ³ He), 用于理解源和汇分布, 制约大气演化和去气过程
		岩石风化研究 理解金星岩石风化的化学和物理过程, 确定现代速率并识别过去气候条件下的产物。在大尺度上确定风化区形成的原因和空间范围(水平和垂直)。在局部区域, 评估风化层的特征并与未风化的岩石进行比较
		大气高度剖面中的活性组分 确定活性大气组分(OCS、H ₂ S、SO ₂ 、SO ₃ 、H ₂ SO ₄ 、HCl、HF、ClO ₂ 和 Cl ₂), 温室气体, H ₂ O 和其他可冷凝物质的丰度和高度剖面, 表征大气中化学不平衡的来源并获取其对当前气候的影响
		硫从地表的去气过程 通过测量固体样品中 D/H、 ¹⁵ N/ ¹⁴ N、 ¹⁷ O/ ¹⁶ O、 ¹⁸ O/ ¹⁶ O、 ³⁴ S/ ³² S 和 ¹³ C/ ¹² C 的同位素比值以及大气中 SO ₂ 、H ₂ O ₂ 、OCS、CO、 ³⁴ S/ ³² S 和硫酸气溶胶(H ₂ SO ₄), 确定当前硫去气速率和表征大气和金星表面的硫循环

(11)制导、导航与控制技术。例如探测器智能自主导航控制技术、表面巡视探测器自主导航控制技术和针对金星任务的导航控制技术。

3.2 有效科学载荷研发

金星的有效科学载荷可按搭载平台和类型划分为:轨道飞行器上的遥感仪器(如雷达、可见近红外光谱仪),下降式探测器或气球上的大气探测仪器,着陆器(短寿命着陆器、长寿面着陆器和长寿命移动平台)携带探测仪器。(1)主动遥感仪器。由于金星的浓密大气,常用于无大气天体和火星的表面遥感探测技术(如可见光成像,伽马射线探测和红外探测)很难派上用场。对于金星而言,雷达是地表特征有效的探测工具。目前,雷达技术的进步可以获取更高分辨率的图像。此外,还有许多主动遥感技术可以用于表征金星大气,例如金星快车和拂晓号。目前遥感仪器的主要需求是提高探测精度,提高探测仪的空间/光谱分辨率等。

(2)大气就位探测仪器—下落式探测器和空中平台。目前,各类大气下落式探测器和高空平台所需的仪器,在保持仪器内部温度远低于金星表面环境方面已经相对成熟。由于空中平台载重受限,需要尽量减少仪器的质量和体积,因此对有效载荷质量、功率和体积都有较为严苛的要求。仪器的小型化是一个重要的研发方向。

(3)就位探测仪器——着陆器。着陆就位探测的重点是对金星表面元素、矿物学和岩石学进行分析。由于探测器寿命有限,时间至关重要,因此需要

能够快速准确测试的方法手段。以下仪器的技术发展将对金星着陆探测产生重大影响。① X 射线衍射和荧光(XRD/XRF):相比好奇号火星车上的“化学和矿物学”仪器(CheMin)27 h 的积分时间,金星需要更快的分析速度。美国金星旗舰参考任务建议使用基于碳纳米管(CNT)发射器的高通量 X 射线源作为解决方案,可将分析时间缩短至 2 h,但该技术仍需要进一步研发;② 激光诱导击穿光谱(LIBS/Raman):该技术已在美国火星车“毅力号”上成功部署,不含拉曼模式的类似 LIBS 仪器也已在我国祝融号火星车和我国好奇号火星车上成功部署,并可进一步考虑用于快速分析金星表面元素组成。LIBS 方法可以远程对金星表面岩石和风化层开展探测,而不需要收集样品放入着陆器/巡视器。LIBS 模式在金星环境需要降级,但拉曼模式不会受到明显影响;③ (显微)精细的元素和矿物学分析:火星任务的发展越发强调精细成像、精细元素分析和精细矿物学对火星地质研究的重要性。类似需求在金星也将变得重要。虽然目前技术上极具挑战性,但研发就位开展进行此类测量的技术将突破性的提升金星科学研究的维度;④ 伽玛射线探测仪:未来的着陆任务如若需要制造这类仪器,必需显著改善其性能并减少校准要求;⑤ 热流测量仪:由于金星表面上昼夜和季节温度变化不大,因此可以使用通量板进行热通量测量,且不需要长的平衡时间。

(4)就位探测仪器—长寿命着陆任务(移动实验室)。对于长时间的地面实验室而言,大多数任务概

念都将仪器置于压力舱中,并控制该舱体的温度接近地球地表环境温度,从而使在实验室或火星条件下开发的仪器可以运行。但在现实中,这可能难以实现。因此,更重要的是了解在金星表面环境温度下可运行的传感器都能做什么,特别是对于使用复杂的仪器,难度更大。随着热控技术的进一步发展,研制用于这些仪器的高温电子系统,传感器,储存器等,也将成为下一步的需求。

3.3 地面模拟设施建设

金星探测需要实验室测量的支持,才能最大限度地提高探测任务的科学回报。目前,迫切需要开展实验研究的领域包括:①云上大气的化学物质和反应过程;②含硫酸云层的物理和化学性质;③云下大气中不同分子组分的光学性质;④过热地表的表面矿物的风化速率和光谱参数,测量表面物质的电导率和基本热物理数据。

模拟实验和测量还需兴建金星环境测试和模拟设施,用于模拟金星表面压力、温度、大气成分随高度的变化,从而开展金星科学研究和科学仪器/探测(子)系统的研发测试。金星环境模拟舱和金星环境仿真系统,对确保着陆器、巡视车、低空气球的安全运行都至关重要。

目前,中国缺乏针对金星模拟的相关基础设施。相较而言,美国在金星模拟的相关基础设施居于世界领先水平,主要包括:①美国宇航局埃姆斯研究中心(Ames Research Center;ARC),电弧喷射互动加热设施(IHF)和金星环境模拟与仿真;②美国宇航局格伦研究中心(GRC),世界级的极端环境舱(GEER),可精确模拟太阳系中任何行星的大气条件,包括金星表面高温腐蚀的大气环境;③美国宇航局戈达德太空飞行中心(GSFC)和喷气推进实验室(JPL)的金星仪器舱;④美国宇航局兰利研究中心(Langley Research Center),金星表面条件下气体的物理和化学性质的环境模拟与仿真。但国际上还未有能进行全尺度模拟试验的金星环境模拟舱。

4 金星探测未来展望

4.1 计划中的未来金星任务

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——真相号(VERITAS)、达芬奇号+(DAVINCI+)和展望号(EnVision)。即将开启金星探测与金星科学研究的新纪元。

美国宇航局的真相号和达芬奇+号是两个高度互补的任务,属于“发现”级任务(每个预算约5亿

美元),计划2030年左右发射。真相号是聚焦金星地表的遥感轨道器(Smrekar et al., 2020)。达芬奇+是聚焦大气原位探测的下落式探测器(Glaze et al., 2016)。此外,美国宇航局还选择了一对技术演示搭载在这两个任务中。其中,真相号将搭载深空原子钟,而达芬奇+将搭载紧凑型紫外可见光成像光谱仪(CUVIS),用于确定金星大气中未知的紫外线吸收剂的性质。

真相号全称是“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(Smrekar et al., 2020)。任务主要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件,包括变形、表面组成、热发射和重力场图。还将尝试确定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。真相号计划任务期2年,搭载2台仪器和重力科学实验。金星发射率测绘仪(Venus Emissivity Mapper; VEM)将由德国航空航天中心(DLR)提供,在五个大气“窗口”使用六个光谱波段绘制金星表面发射率。金星干涉合成孔径雷达(Venus Interferometric Synthetic Aperture Radar; VISAR)将生成数字高程模型(DEM),其精度为水平250 m × 高度5 m。雷达图像空间分辨率为30 m。重力科学实验将使用航天器的通讯系统进行。

达芬奇+号任务全称是“金星深层大气稀有气体、化学和成像”任务,其科学目标为:①金星大气起源和演化;②大气成分和地表的相互作用;③地表特性:提供对镶嵌地块起源及其构造,火山和风化历史的认识(Glaze et al., 2016)。由于已有的金星探测任务主要基于遥感探测,目前对占金星大气质量2/3的深层大气一无所知。达芬奇+号通过下降式探测器,在下降的63 min过程直接测量金星大气的组成,测量稀有气体,痕量气体及其同位素组成,测量金星大气的温度、压力、风和成像来解答金星的高优先级科学问题。在到达地面之前,达芬奇+探测器将为金星镶嵌地块拍摄照片,以探究其起源以及构造,火山和风化历史。主要科学载荷是金星分析实验室套件(Venus Analytic Laboratory; VAL)。VAL的设计基于“好奇号”火星车上的火星样品分析仪(SAM)。该套件中含有4个科学仪器:①金星质谱仪(VMS),将开展金星上稀有气体和痕量气体的综合就位调查;②金星可调谐激光光谱仪(VTLS),将对金星上的目标痕量气体和相关同位素比值进行高灵敏度的就位测量;③金星大气结构

调查套件(VASI),可在进入和下降期间提供对金星大气层结构和动态变化的测量,为重建探测器下降过程提供化学测量的背景信息;④金星下降成像仪(VenDI),将在下降位置提供镶嵌地块区域的高对比度图像。这四个科学仪器将在探测器下降期间提供高保真协同测量。

欧空局展望号(EnVision)号是继欧空局金星快车之后计划的金星革命性新任务,计划2032年发射,预算5.44亿欧元。展望号是一个基于轨道的金星地表高分辨率雷达测绘和大气研究任务(Ghail et al., 2018)。具体的科学主题包括:①金星当前地质活动:确定当前活动的水平和性质,例如火山活动,构造运动,块体坡移,风化,沉积,挥发分的源和汇;②金星地质历史:确定产生其表面特征的地质事件顺序,例如地层,古环境,古老地形,古海洋标志物,气候变化;③金星挥发分:评估金星是否曾经存在海洋或是否宜居,例如水,二氧化硫,云,火山气体,动态过程;④金星内部演化:了解控制着金星地质历史时期内热释放的金星动力学组织框架,例如大地测量学,自旋,组织,构造,内部结构和长期演变。展望号携带3个科学仪器和1个科学实验:①金星合成孔径雷达(VenSAR);②金星光谱套件(VenSpec);③地下雷达探测仪(SRS);④无线电科学与重力实验。

4.2 其他论证中的金星任务概念

俄罗斯金星D(Venera-D)已经批准拨款并处于筹备阶段,标志着俄罗斯重返金星的决心。金星D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。除基线任务外,还有一系列潜在要素处于论证中,例如气球、子卫星、长寿命(24 h)地面站等。2013年美国宇航局与俄罗斯成立了联合科学工作组,将合作开展此次探测任务(Zasova et al., 2019)。

美国自麦哲伦号之后,金星学界一直在积极建议新的概念任务。除最近入选的真相号和达芬奇十号外,论证程度较高的其他任务还包括“金星旗舰参考任务”(包含轨道器、空中平台、地面工作站等多元素综合任务),聚焦金星气候的旗舰级任务VCM(Grinspoon et al., 2010),聚焦着陆探测的VISE(Esposito, 2019)及一批类似的任务,包括SAGE(Esposito, 2011),VOX(Smrekar et al., 2018),VICI(Glaze et al., 2017),VISAGE(Esposito et al., 2017),目标着陆在镶嵌地块上的VITaL(Gilmore et al., 2010)和金星表面可移动任务

VME(Glaze et al., 2009)。此外,基于小卫星和立方星的小型金星任务也不断涌现,例如,立方星紫外实验(CUVE)(Cottini et al., 2017)和用小卫星进入式探测器原位测量金星上层大气中的稀有气体等。应对美国宇航局提出的2亿美元预算,学界还提出了“金星桥”概念任务(Grimm et al., 2018),分别由美国宇航局格伦研究中心指南针工程团队(GRC Compass)和美国宇航局喷气推进实验室(JPL)进行了不同的概念设计。GRC提出了一个轨道器加一个小型着陆器的设计,JPL则借鉴了一些受资助研发的小卫星概念,提出了8项任务概念(5项轨道器和3项就位探测器),这些任务还可以适当组合,以解决重要科学问题。

印度航天局近年提出将开展金星轨道器任务,重点是开展金星地表和次地表测绘,并积极寻求国际合作。

4.3 金星探测的未来展望

金星探测即将进入崭新的阶段。随着美国、欧空局和俄罗斯新任务的研发和探测,针对金星大气与气候,金星表面和金星内部特征及其演化将出现诸多突破性的重大进展。对金星表面的探测将由空间和外层大气和云层,向深层大气和近地表不断深入。对金星表面不同地质体的形貌特征、物质组成等也将获取全新的认识。从探测任务的类型上来说,对于近中期任务(当前至2030年),主要考虑轨道器、空中平台和短寿命着陆器。对于长期任务(2030~2050年),可在中期任务的基础上考虑研发长寿命着陆器和巡视器,以及金星就位采样分析和样品返回的可能性。

对中国而言,金星是挑战与机遇并存的重要探测目标。金星是太阳系比较行星学中的极重要组成,是地球演化和发展的最佳对标,也是太阳系内和系外宜居天体形成条件和演化路径的关键制约。未来十年(至2030年)是中国开展金星探测和相关技术研发的关键时期。主要原因在于:①国际金星探测任务在近三十年间出现断层,尤其缺乏针对金星深层大气和表面地质的探测任务。例如,目前对金星表面形貌和高程的认知及数据精度仅相当于20世纪70年代的火星,对金星近地表12 km大气状态一无所知,对金星地表关键区域(例如镶嵌地块)的认知停滞不前,缺乏必要的地球化学数据。因此即使是针对以上几个方面其中某一点的小型金星任务,都将获得极大的科学回报,性价比极高;②金星探测的科学目标和关键技术需求已得到较为充分的

论证,只待新的探测任务获取新的高质量数据;③虽然金星的恶劣环境对探测技术提出多方面挑战,但利用已有的相对成熟的探测技术已足以做出诸多重大科学发现,例如利用轨道器对金星地形和重力场进行高精度测绘,利用空中平台对金星云层中的气体物质组成和同位素以及有机物进行就位测量,均可解决重大科学问题。这些都是中国开展金星探测任务,迎头赶上的契机。

目前我国的金星探测还处于初级论证阶段,国内从事金星研究的科研力量薄弱,迫切需要我国行星科学界积极行动起来,在了解国际探测和研究前沿的基础上,提出我国金星探测的科学目标和探测任务的概念方案建议,为我国未来的深空探测计划和潜在金星探测任务提出科学需求和理论依据。同时,进一步完善我国行星极端环境模拟设施和仿真平台,并建立相应的科学家和工程师团队。

此外,金星的极端条件也为我国航天和各关键技术领域的技术发展提出了新的要求和挑战,包括通信、导航控制、制动、热控、动力源、电池、高温电子、高温机械、高性能机器人和相关仪器载荷、传感器的研发等等。因此,针对金星探测的技术研发也将极大促进和提高我国装备和探测技术科学载荷的设计和制造水平,提升我国深空探测的实力。

5 结论

金星探测是解答太阳系类地行星形成和演化,探测地球宜居性的形成和未来,制定外太阳系宜居星球搜索标准的关键。虽然人类对太阳系行星的探测从金星开始,但由于金星恶劣的环境条件、多重的技术挑战和高昂的探测成本,过去近30年金星探测任务匮乏,金星探测和研究程度远不及月球和火星。金星科学的重大科学问题可以归纳为三个方面,金星大气与气候、金星表面和内部、金星大气与地表的相互作用。目前对金星的大气和气候研究程度最高,包括金星大气的垂向结构和大气化学,大气温度、能量平衡和热结构,云和霾,环流和大气动力学以及气候演化等有所认识。金星高层大气的物理化学研究和金星与太阳风的相互作用方面也有重要进展。金星表面与内部的研究相对滞后,除金星快车和拂晓号的部分数据外,主要数据来源仍是20世纪苏联和美国的金星任务探测数据。已有研究包括金星表面地貌特征,撞击和重塑历史,火山和构造活动,地表物质组成,地表和大气相互作用等,但受限于数据的空间覆盖率和较低的分辨率及精度,尚有

诸多重大问题未有解答。金星研究除探测任务外还有赖于地基观测、实验室模拟和数值模拟研究。地面模拟设施对支持金星探测任务研发和科学研究尤为重要。未来十年(至2030年)是中国开展金星探测和相关技术研发的关键时期。建议考虑利用技术相对成熟的探测手段(遥感和空中平台/下落式探测器)开展针对金星深层大气和云层的就位探测和针对表面地形、重力场、地表成分等的探测。金星探测不仅是世界的,也是我国未来深空探测中的重要挑战和契机。建立科学家和工程团队,建设完善我国行星极端环境模拟设施和仿真平台,发展适应金星极端环境的关键技术和仪器设备,将极大促进和提高我国装备和探测技术科学载荷的设计和制造水平,提升我国深空探测的综合实力。

References

- Barabash S, Fedorov A, Sauvaud J J, Lundin R, Russell C T, Futaana Y, Zhang T L, Andersson H, Brinkfeldt K, Grigoriev A, Holmstrom M, Yamauchi M, Asamura K, Baumjohann W, Lammer H, Coates A J, Kataria D O, Linder D R, Curtis C C, Hsieh K C, Sandel B R, Grande M, Gunell H, Koskinen H E, Kallio E, Riihela P, Sales T, Schmidt W, Kozyra J, Krupp N, Franz M, Woch J, Luhmann J, McKenna-Lawlor S, Mazelle C, Thocaven J J, Orsini S, Cerulli-Irelli R, Mura M, Milillo M, Maggi M, Roelof E, Brandt P, Szego K, Winningham J D, Frahm R A, Scherrer J, Sharber J R, Wurz P, Bochsler P. 2007. The loss of ions from Venus through the plasma wake. *Nature*, 450: 650~653.
- Barstow J K, Tsang C C C, Wilson C F, Irwin P G J, Taylor F W, McGouldrick K, Drossart P, Piccioni G, Tellmann S. 2012. Models of the global cloud structure on Venus derived from Venus Express observations. *Icarus*, 217: 542~560.
- Campbell B A, Morgan G A, Whitten J L, Carter L M, Glaze L S, Campbell D B. 2017. Pyroclastic flow deposits on Venus as indicators of renewed magmatic activity. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122: 1580~1596.
- Cockell C S, Higgins P M, Johnstone A A. 2021. Biologically available chemical energy in the temperate but uninhabitable Venusian cloud Layer: what do we want to know? *Astrobiology*, ahead of print, doi: 10.1089/ast.2020.2280.
- Correia A C, Laskar J. 2001. The four final rotation states of Venus. *Nature*, 411: 767~770.
- Cottini V, Aslam S, D'Aversa E, Glaze L, Gorius N, Hewagama T, Ignatiev N, Piccioni G. 2017. CUVE-Cubesat UV Experiment: unveil Venus' UV absorber with Cubesat UV mapping spectrometer. *European Planetary Science Congress 2017*, EPSC2017-771.
- Crisp D, McMuldroch S, Stephens S K, Sinton W M, Ragert B, Hodapp K W, Probst R G, Doyle L R, Allen D A, Elias J. 1991. Ground-based near-infrared imaging observations of venus during the galileo encounter. *Science*, 253: 1538~1541.
- Cutts J. 2019. Venus technology plan. National Aeronautics and Space Administration. Washington, DC, 1~28.
- Davaille A, Smrekar S E, Tomlinson S. 2017. Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus. *Nature Geoscience*, 10: 349~355.
- Debergh C, Bezaud B, Owen T, Crisp D, Maillard J P, Lutz B L. 1991. Deuterium on Venus-observations from Earth. *Science*, 251: 547~549.
- Drossart P, Montmessin F. 2015. The legacy of Venus Express:

- highlights from the first European planetary mission to Venus. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 23: 1~23.
- Drossart P, Piccioni G, Gerard J C, Lopez-Valverde M A, Sanchez-Lavega A, Zasova L, Hueso R, Taylor F W, Bezdard B, Adriani A, Angrilli F, Arnold G, Baines K H, Bellucci G, Benkhoff J, Bibring J P, Blanco A, Blecka M I, Carlson R W, Coradini A, Di Lellis A, Encrenaz T, Erard S, Fonti S, Formisano V, Fouchet T, Garcia R, Haus R, Helbert J, Ignatiev N I, Irwin P, Langevin Y, Lebonnois S, Luz D, Marinangeli L, Orofino V, Rodin A V, Roos-Serote M C, Saggin B, Stam D M, Titov D, Visconti G, Zambelli M, Tsang C, Team V I-V E T, Ammannito E, Barbis A, Berlin R, Bettanini C, Boccaccini A, Bonello G, Bouye M, Capaccioni F, Cardesin A, Carraro F, Cherubini G, Cosi M, Dami M, De Nino M, Del Vento D, Di Giampietro M, Donati A, Dupuis O, Espinasse S, Fabbri A, Fave A, Veltroni I F, Filacchione G, Garceran K, Ghomchi Y, Giustizi M, Gondet B, Hello Y, Henry F, Hofer S, Hüntzinger G, Kachlicki J, Knoll R, Kouach D, Mazzoni A, Melchiorri R, Mondello G, Monti F, Neumann C, Nuccilli F, Parisot J, Pasqui C, Perferi S, Peter G, Piacentino A, Pompei C, Reess J M, Rivet J P, Romano A, Russ N, Santoni M, Scarpelli A, Semery A, Soufflot A, Stefanovitch D, Suetta E, Tarchi F, Tonetti N, Tosi F, Ulmer B. 2007. A dynamic upper atmosphere of Venus as revealed by VIRTIS on Venus Express. *Nature*, 450: 641~645.
- Elkins-Tanton L T, Smrekar S E, Hess P C, Parmentier EM. 2007. Volcanism and volatile recycling on a one-plate planet: applications to Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112: E04S06.
- Esposito L W. 2011. SAGE New Frontiers mission to Venus. 42nd Lunar and Planetary Science Conference, Abstract # 1519.
- Esposito L W, Atkinson D H, Baines KH, Allwood A, Altieri F, Atreya S, Bullock M, Colaprete A, Darrach M, Day J, Dyar M, Ehlmann B, Farley K, Filiberto J, Grinspoon D, Head J, Helbert J, Madzunkov S, Piccioni G, Possel W, Ravine M, Treiman A, Yung Y, Zahnle K. 2017. The New Frontiers Venus in situ atmospheric and geochemical explorer (VISAGE) mission proposal. *European Planetary Science Congress 2017*, EPSC2017~275-1.
- Esposito L W. 2019. Mission Concept: Venus in situ Explorer (VISE). Input to the Decadal Survey Inner Planets Panel. <https://www.lpi.usra.edu/vexag/VISE/>.
- Fedorova A, Korablev O, Vandaele A C, Bertaux J L, Belyaev D, Mahieux A, Neefs E, Wilquet W V, Drummond R, Montmessin F, Villard E. 2008. HDO and H₂O vertical distributions and isotopic ratio in the Venus mesosphere by solar occultation at infrared spectrometer on board Venus Express. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113: E00B22.
- Frank L A, Hills H K, Vanallen J A. 1963. Mariner 2-preliminary reports on measurements of Venus. *Science*, 139: 905~910.
- Fukuhara T, Futaguchi M, Hashimoto G L, Horinouchi T, Imamura T, Iwagami N, Kouyama T, Murakami S Y, Nakamura M, Ogohara K, Sato M, Sato T M, Suzuki M, Taguchi M, Takagi S, Ueno M, Watanabe S, Yamada M, Yamazaki A. 2017. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus. *Nature Geoscience*, 10: 85~88.
- Garate-Lopez I, Hueso R, Sanchez-Lavega A, Peralta J, Piccioni G, Drossart P. 2013. A chaotic long-lived vortex at the southern pole of Venus. *Nature Geoscience*, 6: 254~257.
- Gerard J C, Bougher SW, Lopez-Valverde M A, Patzold M, Drossart P, Piccioni G. 2017. Aeronomy of the Venus upper atmosphere. *Space Science Reviews*, 212: 1617~1683.
- Ghail R, Wilson C, Widemann T, Bruzzone L, Dumoulin C, Helbert J, Herrick R, Marcq E, Mason P, Rosenblatt P, Vandaele A C, Burtz L J. 2017. EnVision: understanding why our most Earth-like neighbour is so different. *arXiv preprint, arXiv:1703.09010v1 [astro-ph.EP]*
- Ghail R C, Hall D, Mason P J, Herrick R R, Carter L M, Williams E. 2018. VenSAR on EnVision: taking earth observation radar to Venus. *The International Journal of Applied Earth Observation*, 64: 365~376.
- Gilmore M S, Glaze L S, Baker C L, Tahu G J. 2010. Venus intrepid tessera lander; mission concept, study report to the NRC decadal survey inner planets panel. https://ia800304.us.archive.org/35/items/VenusIntrepidTesseraLanderConceptStudy/03_Venus_Intrepid_Tessera_Lander.pdf
- Gilmore M, Treiman A, Helbert J, Smrekar S. 2017. Venus surface composition constrained by observation and experiment. *Space Science Reviews*, 212: 1511~1540.
- Glaze L, Garvin J, Johnson N, Arney G, Atkinson D, Atreya S, Beck A, Bezdard B, Blacksberg J, Campbell B, Clegg S, Crisp D, Dyar D, Forget F, Gilmore M, Grinspoon D, Gross J, Guzewich S, Izenberg N, Johnson J, Kiefer W, Lawrence D, Lebonnois S, Lorenz R, Mahaffy P, Maurice S, McCanta M, Parsons A, Pavlov A, Sharma S, Trainer M, Webster C, Wiens R, Zahnle K, Zolotov M. 2017. VICI: Venus in situ composition investigations. *European Planetary Science Congress 2017*, Abstract # EPSC2017-346.
- Glaze L S, Baker C, Adams M, Amato M, Balint T, Jones A L, Karpati G, Marr G, Tompkins S, Venkatapathy E. 2009. Venus mobile explorer; mission concept study report to the NRC decadal survey inner planets panel. http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/VME_FINAL_ITAR_Compliant.pdf
- Glaze L S, DAVINCI Science Team 2016. Deep atmosphere investigation of noble gases, chemistry, and imaging. 47th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract # 1560.
- Glaze L S, Wilson C F, Zasova L V, Nakamura M, Limaye S. 2018. Future of Venus research and exploration. *Space Science Reviews*, 214: 89, doi:10.1007/s11214-018-0528-z.
- Greaves J S, Richards A M S, Bains W, Rimmer P B, Sagawa H, Clements D L, Seager S, Petkowski J J, Sousa-Silva C, Ranjan S, Drabek-Mauder E, Fraser H J, Cartwright A, Mueller-Wodarg I, Zhan Z C, Friberg P, Coulson I, Lee E, Hoge J. 2020. Phosphine gas in the cloud decks of Venus. *Nature Astronomy*, 5: 655~664.
- Grimm R, Gilmore M. 2018. Venus Bridge Study, NASA Planetary Science Division. https://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/Venus_Bridge_Summary_Slides.pdf
- Grinspoon D, Pavlov A, Adams M. 2010. Venus Climate Mission (VCM). http://www.lpi.usra.edu/vexag/reports/VCM_report_FINAL.pdf
- Gurnett D A, Kurth W S, Roux A, Gendrin R, Kennel C F, Bolton S J. 1991. Lightning and plasma wave observations from the Galileo flyby of Venus. *Science*, 253: 1522~1525.
- Hoffman J H, Hodges R R, Jr, McElroy M B, Donahue T M, Kolpin M. 1979. Composition and structure of the Venus atmosphere: results from pioneer Venus. *Science*, 205: 49~52.
- Horinouchi T, Murakami S Y, Satoh T, Peralta J, Ogohara K, Kouyama T, Imamura T, Kashimura H, Limaye S S, McGouldrick K, Nakamura M, Sato T M, Sugiyama K I, Takagi M, Watanabe S, Yamada M, Yamazaki A, Young E F. 2017. Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki. *Nature Geoscience*, 10: 798~798.
- Horinouchi T, Hayashi Y Y, Watanabe S, Yamada M, Yamazaki A, Kouyama T, Taguchi M, Fukuhara T, Takagi M, Ogohara K, Murakami S, Peralta J, Limaye S S, Imamura T, Nakamura M, Sato T M, Satoh T. 2020. How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere. *Science*, 368: 405~409.
- Hou Jianwen, Yang Guang, Feng Jianjun. 2015. *Deep Space Exploration: Venus Exploration*. Beijing: National Defense Industry Press (in Chinese).
- Ingersoll A P. 1969. The runaway greenhouse: a history of water on Venus. *The Journal of the Atmospheric Sciences*, 26: 1191~1198.
- Ivanov M A, Head J W. 2011. Global geological map of Venus. *Planetary and Space Science*, 59: 1559~1600.

- Ivanov M A, Head J W. 2013. The history of volcanism on Venus. *Planetary and Space Science*, 84: 66~92.
- Ivanov M A, Head J W. 2015. Volcanically embayed craters on Venus: testing the catastrophic and equilibrium resurfacing models. *Planetary and Space Science*, 106: 116~121.
- James P B, Zuber M T, Phillips R J. 2013. Crustal thickness and support of topography on Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118: 859~875.
- Kashimura H, Sugimoto N, Takagi M, Matsuda Y, Ohfuchi W, Enomoto T, Nakajima K, Ishiwatari M, Sato T M, Hashimoto G L, Satoh T, Takahashi Y O, Hayashi Y Y. 2019. Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer. *Nature Communications*, 10: 23, doi:10.1038/s41467-018-07919-y.
- Khatuntsev I V, Patsaeva M V, Titov D V, Ignatiev N I, Turin A V, Limaye S S, Markiewicz W J, Almeida M, Roatsch T, Moissl R. 2013. Cloud level winds from the Venus express monitoring camera imaging. *Icarus*, 226: 140~158.
- Kliore A, Levy G S, Cain D L, Fjeldbo G, Rasool S I. 1967. Atmosphere and ionosphere of Venus from the Mariner V S-band radio occultation measurement. *Science*, 158: 1683~1688.
- Krasnopolsky V A. 2008. High-resolution spectroscopy of Venus: detection of OCS, upper limit to H₂S, and latitudinal variations of CO and HF in the upper cloud layer. *Icarus*, 197: 377~385.
- Krasnopolsky V A. 2015. Vertical profiles of H₂O, H₂SO₄, and sulfuric acid concentration at 45-75 km on Venus. *Icarus*, 252: 327~333.
- Kreslavsky M A, Ivanov M A, Head J W. 2015. The resurfacing history of Venus: constraints from buffered crater densities. *Icarus*, 250: 438~450.
- Lebonnois S, Eymet V, Lee C, d'Ollone J V. 2015. Analysis of the radiative budget of the Venusian atmosphere based on infrared net exchange rate formalism. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120:1186~1200.
- Lebonnois S, Sugimoto N, Gilli G. 2016. Wave analysis in the atmosphere of Venus below 100-km altitude, simulated by the LMD Venus GCM. *Icarus*, 278: 38~51.
- Lebrun T, Massol H, Chassefiere E, Davaille A, Marcq E, Sarda P, Leblanc F, Brandeis G. 2013. Thermal evolution of an early magma ocean in interaction with the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118: 1155~1176.
- Lecuyer C, Simon L, Guyot F. 2000. Comparison of carbon, nitrogen and water budgets on Venus and the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 181: 33~40.
- Limaye S S, Grassi D, Mahieux A, Migliorini A, Tellmann S, Titov D. 2018a. Venus atmospheric thermal structure and radiative balance. *Space Science Reviews*, 214: 102, doi:10.1007/s11214-018-0525-2.
- Limaye S S, Mogul R, Smith D J, Ansari A H, Slowik G P, Vaishampayan P. 2018b. Venus' spectral signatures and the potential for life in the clouds. *Astrobiology*, 18: 1181~1198.
- Luginin M, Fedorova A, Belyaev D, Montmessin F, Wilquet V, Korablev O, Bertaux J L, Vandaele A C. 2016. Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data. *Icarus*, 277: 154~170.
- Luz D, Berry D L, Piccioni G, Drossart P, Politi R, Wilson C F, Erard S, Nuccilli F. 2011. Venus' s southern polar vortex reveals precessing circulation. *Science*, 332: 577~580.
- Marcq E, Bertaux J L, Montmessin F, Belyaev D. 2013. Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus' s dynamic atmosphere. *Nature Geoscience*, 6: 25~28.
- Markiewicz W J, Titov D V, Limaye S S, Keller H U, Ignatiev N, Jaumann R, Thomas N, Michalik H, Moissl R, Russo P. 2007. Morphology and dynamics of the upper cloud layer of Venus. *Nature*, 450: 633~636.
- McGouldrick K, Toon O B. 2007. An investigation of possible causes of the holes in the condensational Venus cloud using a microphysical cloud model with a radiative-dynamical feedback. *Icarus*, 191: 1~24.
- Montmessin F, Bertaux J L, Lefevre F, Marcq E, Belyaev D, Gerard J C, Korablev O, Fedorova A, Sarago V, Vandaele A C. 2011. A layer of ozone detected in the nightside upper atmosphere of Venus. *Icarus*, 216: 82~85.
- Muller-Wodarg I C F, Bruinsma S, Marty J C, Svedhem H. 2016. In situ observations of waves in Venus' s polar lower thermosphere with Venus Express aerobraking. *Nature Physics*, 12: 767~771.
- Nakamura M, Imamura T, Ishii N, Abe T, Satoh T, Suzuki M, Ueno M, Yamazaki A, Iwagami N, Watanabe S, Taguchi M, Fukuhara T, Takahashi Y, Yamada M, Hoshino N, Ohtsuki S, Uemizu K, Hashimoto G L, Takagi M, Matsuda Y, Ogohara K, Sato N, Kasaba Y, Kouyama T, Hirata N, Nakamura R, Yamamoto Y, Okada N, Horinouchi T, Yamamoto M, Hayashi Y. 2011. Overview of Venus orbiter. *Akatsuki. Earth Planets Space*, 63: 443~457.
- Nakamura M, Titov D, McGouldrick K, Drossart P, Bertaux J L, Liu H X. 2018. Akatsuki at Venus: The first year of scientific operation. *Earth Planets Space*, 70: 144, doi:10.1186/s40623-018-0916-3.
- Navarro T, Schubert G, Lebonnois S. 2018. Atmospheric mountain wave generation on Venus and its influence on the solid planet' s rotation rate. *Nature Geoscience*, 11: 487~491.
- O'Rourke J G, Buz J, Fu R R, Lillis R J. 2019. Detectability of remanent magnetism in the crust of Venus. *Geophysical Research Letters*, 46: 5768~5777.
- Patzold M, Hausler B, Bird M K, Tellmann S, Mattei R, Asmar S W, Dehant V, Eidel W, Imamura T, Simpson R A, Tyler G L. 2007. The structure of Venus' s middle atmosphere and ionosphere. *Nature*, 450: 657~660.
- Pettengill G H, Ford P G, Simpson R A. 1996. Electrical properties of the Venus surface from bistatic radar observations. *Science*, 272: 1628~1631.
- Piccioni G, Drossart P, Zasova L, Migliorini A, Gerard J C, Mills F P, Shakun A, Munoz A G, Ignatiev N, Grassi D, Cottini V, Taylor F W, Erard S, Team V E T. 2008. First detection of hydroxyl in the atmosphere of Venus. *Astronomy & Astrophysics*, 483: L29~L33.
- Russell C T, Zhang T L, Delva M, Magnes W, Strangeway R J, Wei H Y. 2007. Lightning on Venus inferred from whistler-mode waves in the ionosphere. *Nature*, 450: 661~662.
- Sagdeev R Z, Linkin V M, Kerzhanovich V V, Lipatov A N, Shurupov A A, Blamont J E, Crisp D, Ingersoll A P, Elson L S, Preston R A, Hildebrand C E, Ragent B, Seiff A, Young R E, Petit G, Boloh L, Alexandrov Y N, Armand N A, Bakitko R V, Selivanov A S. 1986. Overview of VEGA Venus balloon in situ meteorological measurements. *Science*, 231: 1411~1414.
- Sanchez-Lavega A, Lebonnois S, Imamura T, Read P, Luz D. 2017. The atmospheric dynamics of Venus. *Space Science Reviews*, 212: 1541~1616.
- Scarf F L, Taylor W W, Green I M. 1979. Plasma waves near venus: initial observations. *Science*, 203: 748~750.
- Scarf F L, Russell C T. 1988. Evidence of lightning and volcanic activity on venus: pro and con. *Science*, 240: 222~224.
- Shalygin E V, Markiewicz W J, Basilevsky A T, Titov D V, Ignatiev N I, Head J W. 2015. Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone. *Geophysical Research Letters*, 42: 4762~4769.
- Shirley D L. 2003. The Mariner 10 Mission to Venus and Mercury. *Acta Astronautica*, 53: 375~385.
- Smrekar S E, Stofan E R, Mueller N, Treiman A, Elkins-Tanton L, Helbert J, Piccioni G, Drossart P. 2010. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. *Science*, 328: 605~608.
- Smrekar S E, Sotin C. 2012. Constraints on mantle plumes on Venus: implications for volatile history. *Icarus*, 217: 510~523.

- Smrekar S E, Hensley S, Wallace M, Lisano M E, Darrach M R, Sotin C, Lehman D, Dyar M D, Helbert J. 2018. Venus Origins Explorer (VOX) concept: a proposed new frontiers mission. 2018 IEEE Aerospace Conference, 1~19.
- Smrekar S E, Dyar M D, Helbert J, Hensley S, Nunes D, Whitten J. 2020. VERITAS (Venus emissivity, Radio science, InSAR, Topography and Spectroscopy): a proposed Discovery mission. Europlanet Science Congress 2020, 14, doi: 10. 5194/epsc2020-447.
- Svedhem H, Titov D V, Taylor F W, Witasse O. 2007. Venus as a more Earth-like planet. *Nature*, 450: 629~632.
- Taylor F, Grinspoon D. 2009. Climate evolution of Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114, doi: 10. 1029/2008JE003316.
- Taylor F W. 2014. *The Scientific Exploration of Venus*. Cambridge: Cambridge University Press, 1~314.
- Taylor F W, Svedhem H, Head J W. 2018. Venus: the atmosphere, climate, surface, interior and near-space environment of an Earth-like planet. *Space Science Reviews*, 214: 35.
- Taylor S R, McLennan S. 2008. *Planetary Crusts: Their Composition, Origin and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 1~402.
- Titov D V, Markiewicz W J, Ignatiev N I, Song L, Limaye S S, Sanchez-Lavega A, Hesemann, J, Almeida M, Roatsch T, Matz K D, Scholten F, Crisp D, Esposito L W, Hviid S F, Jaumann R, Keller H U, Moissl R. 2012. Morphology of the cloud tops as observed by the Venus Express Monitoring Camera. *Icarus*, 217: 682~701.
- Titov D V, Ignatiev N I, McGouldrick K, Wilquet V, Wilson C F. 2018. Clouds and hazes of Venus. *Space Science Reviews*, 214: 126, doi:10.1007/s11214-018-0552-z.
- Treiman A H. 2013. Geochemistry of Venus' surface: current limitations as future opportunities, in: L. W. Esposito E. R. S. a. T. E. C. (Ed.), *exploring Venus as a terrestrial planet*, 7~22.
- VEXAG. 2019. Goals, objectives, investigations for Venus exploration. https://www.lpi.usra.edu/vexag/documents/reports/VEXAG_Venus_GOI_2019.pdf
- Villanueva G L, Cordiner M, Irwin P G J, de Pater I, Butler B, Gurwell M, Milam S N, Nixon C A, Luszcz-Cook S H, Wilson C F, Kofman V, Liuzzi G, Faggi S, Fauchez T J, Lippi M, Cosentino R, Thelen A E, Moullet A, Hartogh P, Molter E M, Charnley S, Arney G N, Mandell A M, Biver N, Vandaele A C, de Kleer K R, Kopparapu R. 2021. No evidence of phosphine in the atmosphere of Venus from independent analyses. *Nature Astronomy*, 5: 631~635.
- Wilson C F, Guerlet S, Irwin P G J, Tsang C C C, Taylor F W, Carlson R W, Drossart P, Piccioni, G. 2008. Evidence for anomalous cloud particles at the poles of Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113: E00B13.
- Zasova L V, Moroz V I, Formisano V, Ignatiev N I, Khatuntsev I V. 2006. Exploration of Venus with the Venera-15 IR Fourier spectrometer and the Venus Express planetary Fourier spectrometer. *Cosmic Research*, 44: 349~363.
- Zasova L, Gregg T, Eismont N, Economou T, Gerasimov M, Gorinov D, Hall J, Ignatiev N, Ivanov M, Jessup K. L, Khatuntsev I, Korablev O, Kremic T, Limaye S, Shuvalov S, Martynov A, Ocampo A, Vorontsov V, Vaisberg O, Voron V. 2019. Venera-D: Expanding our horizon of terrestrial planet climate and geology through the comprehensive exploration of Venus. EPSC-DPS Joint Meeting 2019, 13, EPSC-DPS2019-1938-1.
- Zhang T L, Delva M, Baumjohann W, Volwerk M, Russell C T, Wei H Y, Wang C, Balikhin M, Barabash S, Auster H U, Kudela K. 2008. Induced magnetosphere and its outer boundary at Venus. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113: E00B20.
- Zhang T L, Lu Q M, Baumjohann W, Russell C T, Fedorov A, Barabash S, Coates A J, Du A M, Cao J B, Nakamura R, Teh W L, Wang R S, Dou X K, Wang S, Glassmeier K H, Auster H U, Balikhin M. 2012. Magnetic reconnection in the near venusian magnetotail. *Science*, 336: 567~570.
- Zhang X, Liang M C, Mills F P, Belyaev D A, Yung Y L. 2012. Sulfur chemistry in the middle atmosphere of Venus. *Icarus*, 217: 714~739.

参 考 文 献

侯建文, 阳光, 冯建军. 深空探测:金星探测. 北京:国防工业出版社, 2015.

Progress and future prospects of Venus exploration

ZHAO Yuyan Sara^{*1,2)}, LIU Jianzhong^{1,2)}, ZOU Yongliao³⁾, ZHOU Disheng^{1,4)},
WANG Xiyu^{1,4)}, LI Xiongyao^{1,2)}, WANG Shijie¹⁾

1) *Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang, Guizhou 550081, China;*

2) *CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei, Anhui 230026, China;*

3) *National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;*

4) *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

** Corresponding author; zhaoyuyan@mail.gyig.ac.cn*

Abstract

Venus exploration is the key to answering the formation and evolution of terrestrial planets in the solar system, exploring the formation and future of habitability of Earth, and developing a search strategy for habitable planets in the exoplanets. Due to the harsh environmental conditions on Venus, multiple challenges to technology, and high costs, exploration and scientific study of Venus lags far behind that of the Moon and Mars. Here, we summarize the research progress, critical scientific questions, and technological requirements of Venus exploration and propose objectives and structure element types for future Venus missions. At present, most advances have been made in the study of the atmosphere and climate of Venus, including atmospheric structure and chemistry, energy balance and thermal structure, clouds and haze, atmospheric circulation and dynamics, and climate evolution. There have also been significant advances in the physical chemistry of the upper atmosphere and the interaction of the solar wind with Venus. In contrast, research of the surface and interior of Venus is relatively lagging. Present studies have investigated the topographic characteristics of Venus' surface, the history of impact and resurface, volcanoes and tectonic activities, the composition of surface materials, and the interaction between the surface and the atmosphere. Due to limited spatial coverage and data resolution, many major scientific questions are left unanswered. Besides Venus missions, ground-based observations, laboratory simulations, and numerical simulations are crucial for Venus study. Simulation facilities are essential in supporting mission developments and scientific research. The next decade is crucial for China to consider the Venus exploration mission and a critical period for developing related technologies. This review is intended for Chinese scientists and engineers interested in the science and exploration of Venus, planetary science, and solar system exploration.

Key words: Venus; research progress; future prospects; planetary science; comparative planetology