

陈乐, 张少兵, 余金霏. 2022. 金星: 认识早期地球的窗口. 地球与行星物理论评, 53(1): 66-84. doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-043

Chen L, Zhang S B, Yu J F. 2022. Venus: A planetary window into early Earth. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 53(1): 66-84. doi:10.19975/j.dqyxx.2021-043

金星：认识早期地球的窗口

陈乐¹, 张少兵^{1,2,3*}, 余金霏^{4,5}

1 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

3 行星探索与前瞻性技术前沿科学中心 中国科学技术大学, 合肥 230026

4 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 南京 210023

5 中国科学院行星科学重点实验室 中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

摘要: 无论在行星大小、质量还是轨道速度等方面, 金星都是太阳系中与地球最相似的行星. 自 1960 年代初期开始, 金星一直是人类深空探测的重要目标. 本文简要地回顾了人类探索金星的历史, 总结了对金星已有的认识, 梳理了金星的主要科学问题, 最后介绍了未来的国际探测计划, 并建议了我国的金星探测目标. 早期对金星的探测以苏联的金星计划 (Венера) 和美国的水手系列 (Mariner) 为代表, 后期的探测器以欧盟、日本等国家的“金星快车 (Venus Express)”、“拂晓号 (Akatsuki)”为代表. 这些探测结果为我们认识金星大气成分、地表地形和内部结构提供了重要的数据. 金星的大气组成以 CO₂ 为主, 含少量 N₂, 与现在地球的大气组成显著不同, 类似早期地球的大气组成. 虽然金星地表目前没有液态水, 但部分理论模拟工作表明金星地表可能曾经有液态水. 一系列探测器对金星地表成分的分析表明, 金星地表主要由玄武岩组成. 在地形地貌方面, 由于金星特殊的地表环境, 金星表面风化作用对地表地貌影响很小. 金星的地表主要受控于比较年轻的火山作用, 发育了许多不同于地球的地貌特征, 主要包括区域平原、盾状火山平原、冕状地形以及瓦片状地形等, 其动力学机制可能是地幔柱—岩石圈相互作用或地幔对流, 至今未发现与板块构造相关的地貌. 现阶段金星没有太多大型的、活跃的火山热点, 虽然无法估测准确的火山活动速率, 但相比地球来说火山活动速率小很多. 在内部结构方面, 金星具有与地球类似的核幔壳结构. 金星的内部组成也与地球类似, 例如金星地幔很可能是与地球相似的橄榄岩成分. 不存在内部磁场和缺乏板块构造是金星区别于地球的两个重要特征. 关于金星为什么没有自身磁场, 主流观点是金星地核缺乏对流, 无法演化出磁场. 而针对金星为什么没有演化出板块构造, 目前认为主要有三个可能的原因: 地表温度过高, 没有软流圈, 金星缺乏液态水, 其中液态水的缺乏接受度最广. 从大气组成、地表岩石组合、构造作用等角度来看, 金星都与早期地球非常相似, 是我们理解类地行星演化的天然实验室. 研究金星和地球为什么会朝不同方向演化, 是深入理解包括系外行星在内的行星的宜居性形成与演变的重要途径. 因此, 金星一直是优先级最高的深空探测目标之一. 近几年, 美国、俄罗斯以及欧洲等国家和地区分别针对金星目前主要的科学问题, 例如金星是否存在早期海洋、金星的宜居性以及结构和重力场等, 先后提出各自的金星探测计划. 我国在新的国际竞争中应该、也必然有所作为.

关键词: 金星; 早期地球; 金星大气; 地貌; 板块构造

doi: 10.19975/j.dqyxx.2021-043

中图分类号: P185

文献标识码: A

Venus: A planetary window into early Earth

Chen Le¹, Zhang Shao-Bing^{1,2,3*}, Yu Jin-Fei^{4,5}

1 CAS Key Laboratory for School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 Center of Excellence for Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences (CAS), Hefei 230026, China

3 Frontiers Science Center for Planetary Exploration and Emerging Technologies, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

4 School of Astronomy and Space, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China

5 CAS Purple Mountain Observatory, Nanjing 210034, China

收稿日期: 2021-08-09; 录用日期: 2021-09-14

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB41000000)

Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB41000000)

第一作者: 陈乐 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事前寒武纪地质学研究. E-mail: chenlew@mail.ustc.edu.cn

*通信作者: 张少兵 (1980-), 男, 教授, 主要从事前寒武纪地质学研究. E-mail: sbzhang@ustc.edu.cn



Abstract: Venus is the most similar planet to the Earth in the solar system in terms of planet size, mass and orbital velocity. Since the early 1960s, Venus has been an important target for human deep space exploration. In this contribution, the exploration history of Venus, the known and unknown of Venus, the main scientific problems of Venus, and the future international exploration plan of Venus are briefly reviewed. The early exploration of Venus is represented by the "Behepa plan" of the Soviet Union and the "Mariner series" of the United States, whereas more recent missions are represented by the "Venus Express" and "Akatsuki" launched for other countries. These missions provide valuable data which significantly enhanced our understanding of Venus atmosphere composition, surface topography and internal structure. The atmosphere of Venus is dominated by CO_2 and N_2 , which is different from the atmospheric composition of the present Earth, similar to that of the early Earth. Some modeling results suggest that Venus was once covered by ocean although no liquid water exists any longer on Venus. The analyses of the surface compositions of Venus by a series of explorers show that Venus surface is mainly composed of basalt. In terms of topography, due to the special surface environment of Venus, the surface weathering of Venus is very weak and does not affect surface topography. The topographies of Venus are mainly controlled by volcanic resurfacing and differ with the Earth significantly. The dominant topographies include regional plains, shield plains, corona and tessera, which are produced by mantle plume-lithosphere interaction or mantle convection. No topography related to plate tectonics has been found on Venus. At present, Venus lacks many large and active volcanic hotspots. Although it is difficult to estimate the accurate volcanism rate, the volcanism rate is much smaller than that of the current earth. In terms of internal structure, Venus has a core-mantle-crust structure similar to that of Earth, but there is no internal magnetic field on Venus. In addition, Venus and Earth have similar densities and have similar compositions, for example, the mantle of Venus is likely to be composed of peridotite which is similar to that of Earth. No internal magnetic field and lack of plate tectonics are two important characteristics of Venus. The most popular explanation for the absence of magnetic field on Venus is that Venus lacks convection in its core and cannot develop its own dynamo. Three explanations were proposed to account for the absence of plate tectonics on Venus, the extremely hot surface, the lack of asthenosphere, and the lack of water, among which the last one is the most widely accepted. Considering many aspects including atmosphere composition, surface rock assemblages and tectonics, Venus is very similar to the early Earth. Venus provides the best natural laboratory for us to understand the evolution of the Earth and other terrestrial planets. Understanding why Venus and Earth evolve into different directions is one of the most important means to study the genesis and evolution of planet habitability and has significant bearings for studying the potential habitability of exoplanets. Venus has been one of the highest priority of deep space exploration targets. In recent years, the United States, Russia, Europe and other countries have put forward their own Venus exploration plans for above scientific problems, such as whether there was a sea on the early Venus, the uninhabitability of Venus, and the structure and gravity field. China should and must do something in the new international competition.

Key words: Venus; early Earth; Venus atmosphere; Venus morphology; plate tectonics

0 金星的基本情况

金星 (Venus), 是太阳系八大行星由内向外的第二颗行星, 它在夜空中的亮度仅次于月球, 是第二亮的天然天体, 视星等可以达到-4.7等. 在中国古代称为太白、明星或大嚣, 在晨昏出现时分别称为启明或长庚, 在西汉之后结合五行学说称之为金星. 它的英文名称源自罗马神话的爱与美的女神, 维纳斯 (Venus).

金星在大小、质量等方面与地球相似度极高. 金星的赤道半径为 6 051.8 km, 约是地球的

0.949倍, 金星的质量为 4.8675×10^{25} kg, 约是地球的 0.815倍, 在密度方面, 金星密度为 $5\,243 \text{ kg/m}^3$, 与地球密度 ($5\,514 \text{ kg/m}^3$) 相差不大, 这意味着这两个天体的结构和组分相似. 此外, 金星在表面重力、表面加速度、轨道速度等方面也与地球类似 (表1, 数据来源: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/venusfact.html>).

当然, 金星相比于地球, 也存在着许多差异. 金星地表温度约为 460°C , 是地球表面温度的 30多倍, 大气压是地球的 90多倍. 另外一个独特之处是, 金星全球表面几乎是等温的, 不受昼夜和纬度

表 1 金星与地球的一些重要参数比较

Table 1 Comparison of some important parameters between Venus and Earth

	金星	地球	金星/地球
质量/(10^{24} kg)	4.8675	5.9724	0.815
体积/(10^{10} km ³)	92.843	108.321	0.857
赤道半径/km	6051.8	6378.1	0.949
极半径/km	6051.8	6356.8	0.952
平均半径/km	6051.8	6371	0.95
椭圆度	0.000	0.00335	0
平均密度/(kg·m ⁻³)	5243	5514	0.951
表面重力/(m·s ⁻²)	8.87	9.8	0.905
重力加速度/(m·s ⁻²)	8.87	9.78	0.907
逃逸速度(km·s ⁻¹)	10.36	11.19	0.926
高斯引力常数/(10^6 km ³ ·s ⁻²)	0.32486	0.3986	0.815
球面反照率	0.77	0.306	2.52
几何反照率	0.689	0.434	1.59
太阳辐射/(W·m ⁻²)	2601.3	1361	1.911
转动惯量/(I·MR ²)	0.33	0.3308	0.998
半长轴/(10^6 km)	108.209	149.596	0.723
公转周期/(day)	224.695	365.242	0.615
自转周期/(hour)	5832.6	23.9345	243.69
近日点/(10^6 km)	107.476	147.092	0.731
远日点/(10^6 km)	108.939	152.099	0.716
平均轨道速度/(km·s ⁻¹)	35.02	29.78	1.176
最大轨道速度/(km·s ⁻¹)	35.26	30.29	1.164
最小轨道速度/(km·s ⁻¹)	34.79	29.29	1.188
离心率	0.0067	0.0167	0.401

的影响,温室效应该是金星各区域温差小的原因.除此之外,金星的自转方向与地球相反,自东向西,在金星上会出现太阳“西升东降”的现象.金星的自转速度也比地球慢很多,是八大行星中自转速度最慢的行星,金星自转周期为 243 个地球日,而公转周期为 224.7 个地球日,也就是说金星上的一天比它的一年还长.金星离地球较近,在行星性质大都相同情况下却呈现出截然不同的特征,因此一直是人类深空探测的重要目标.

1 金星探测简史

金星是仅次于月球和火星的探测目标,因为其距离地球最近,因此自太空竞赛开始以来,美国与苏联早期大量尝试了对金星的行星际探测.从 1960 年至今,人类共向金星进行了 49 次探测任务,其中苏联进行了 33 次,美国进行了 11 次,欧空局进行

了 2 次,日本发射了 3 次(表 2),此外还有其他行星际探测任务在飞掠金星时对其进行了探测(数据来源: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/chronology.html>).在所有金星探测器中,大部分探测器都未能成功完成任务,成功或部分成功完成探测任务的总共有 29 次.在对金星的一系列探测过程中,探测器获得了大量数据,不仅对认识金星的大气成分、地表地形和内部结构提供了有力的证据,也为人类理解地球的早期演化提供了重要参照物.

1.1 苏联探测简史

苏联对金星的探测成果集中于 1980 年代的金星(Венера)计划(Harvey, 2007).图 1 展示了金星系列探测器成功着陆的位置.

苏联于 1961 年发射了首个金星探测器“金星-1961”(Венера-1961 也称 Sputnik-7.苏联的航天器命名是在发射成功之后,因此许多任务只有年份代号),但以失败告终.在随后的 5 年里,苏联发射金星、宇宙(Космос)和空间(Зонд)系列的金星探测器均以失败告终,失败的原因包括偏向航道、仪器故障以及在下落过程中被金星内部温度和压力损坏等.1965 年,金星 3 号成为首个进入金星大气层的人类探测器,但未能传回数据.1967 年,金星 4 号首次传回了金星大气数据并在下降过程中被摧毁.1970 年,金星系列中的金星 7 号探测器在金星表面倾倒着陆,但成功传回了金星表面温度、大气压、大气密度等数据,是人类历史上第一个在金星表面着陆的探测器.1972 年,金星 8 号探测器是苏联首个全面成功的探测器,不仅验证金星 7 号探测器的数据,还测量了金星地表的光照度,并测定了地表风化层的成分.

随后的金星系列(金星 9~16)均成功完成任务.其中 1975 年苏联发射的金星 9 号和金星 10 号探测器成为一对环绕金星飞行的人造卫星,两者皆探测了金星的大气结构及其成分,也是首次发回由电视摄像机拍摄的金星表面全景图像.1978 年 9 月,苏联分别发射了金星 11 号和金星 12 号两个探测器,在探测器到达金星后,母舱与着陆器分离,着陆器均实现软着陆,分别工作了 95 min 和 110 min.1981 年发射的金星 13 号和金星 14 号探测器传回了第一张金星的彩色照片,这次探测还测得两次小型地震、土壤强度等数据.1983 年,苏联发射的金星 15 号、金星 16 号两个轨道探测器,首次携带了综合孔径雷达对金星进行了遥感探测,测绘了近

表 2 人类发射金星探测器历史及其任务小结

Table 2 The history and mission of human exploration of Venus

序号	日期	探测器名称	探测器类型	国别	是否成功	结果概述
1	1961-02	金星-1961	撞击/飞掠	苏联	否	运载火箭变压器故障, 未能脱离地球轨道
2	1961-02	金星-1	撞击/飞掠	苏联	否	到达金星轨道, 由于信号中断, 失联
3	1962-07	水手-1	飞掠	美国	否	发射升空后不久由于偏离航向而自毁
4	1962-08	金星-1962A	登陆	苏联	否	进入地球轨道后, 第四级火箭故障, 未能脱离地球轨道
5	1962-08	水手-2	飞掠	美国	是	获得了金星的大气温度和压力等数据
6	1962-09	金星-1962B	登陆	苏联	否	在地球轨道由于燃料阀门未能打开, 未能脱离地球轨道
7	1962-09	金星-1962C	飞掠	苏联	否	在地球轨道由于第四级火箭爆炸, 摧毁了探测器
8	1963-11	宇宙-21	飞掠	苏联	否	第四级火箭点火时发生定向错误
9	1964-02	金星-1964A	飞掠	苏联	否	第三级火箭燃料管线爆裂导致爆炸
10	1964-03	金星-1964B	飞掠	苏联	否	运载火箭故障, 最终失败
11	1964-03	金星-1964C	飞掠	苏联	否	未进入地球轨道
12	1964-03	宇宙-27	飞掠/着陆	苏联	否	进入地球轨道, 未能脱离
13	1964-04	探测器-1	飞掠/着陆	苏联	否	距离金星10万千米飞过, 进入日心轨道后, 与探测器联系中断
14	1965-11	金星-2	飞掠	苏联	否	由于舱内温度过高, 探测器在到达金星前就停止工作
15	1965-11	金星-3	坠落探测	苏联	否	在金星上实现了硬着陆, 由于温度过高使信号中断
16	1965-11	金星-1965A	飞掠	苏联	否	发射失败
17	1965-11	宇宙-96	软着陆	苏联	否	第四级火箭发动机爆炸而失败
18	1967-06	金星-4	着陆/大气探测	苏联	部分成功	测得大气中CO ₂ 含量, 在下降至地面距离25 km左右时, 通信中断
19	1967-06	水手-5	飞掠	美国	是	测得了金星大气的无线电折射率和紫外线发射
20	1967-06	宇宙-167	着陆/大气探测	苏联	否	运载火箭上面级点火失败, 未能离开地球轨道
21	1969-01	金星-5	着陆/大气探测	苏联	部分成功	证实了金星-4发现的高温、高压、大气CO ₂ 成分, 下降至地面25 km左右是被大气压坏
22	1969-01	金星-6	着陆/大气探测	苏联	部分成功	在金星大气层收集了51 min的数据, 下降至11 km左右毁坏
23	1970-08	金星-7	登陆	苏联	部分成功	成功到达金星表面, 传回温度、大气成分等数据, 由于降落伞高温毁坏, 自由降落导致信号传输受到影响
24	1970-08	宇宙-359	登陆	苏联	否	运载火箭变压器故障, 未能脱离地球轨道
25	1972-03	金星-8	登陆	苏联	是	证实了金星-7数据, 测量了地表摄影的光照度, 测定了金星表面风化层并绘制了云层剖面图
26	1972-03	宇宙-482	登陆	苏联	否	计时器发生故障, L级发动机提前关机
27	1973-11	水手-10	飞掠	美国	是	拍摄了数千张金星云层照片
28	1975-06	金星-9	轨道器、软着陆	苏联	是	金星-9和金星-10一起成为第一对绕着金星飞行的人造卫星, 探测了金星大气的结构和特性, 首次发回金星表面全景黑白图像
29	1975-06	金星-10	轨道器、软着陆	苏联	是	金星-9和金星-10一起成为第一对绕着金星飞行的人造卫星, 探测了金星大气的结构和特性, 首次发回金星表面全景黑白图像
30	1978-05	先驱者金星1号	轨道器、大气探测	美国	是	先驱者1号和2号一起对金星进行大气观测, 为伽利略计划进行技术验证, 探测了部分大气数据, 其中有个到达地面的小型着陆器也传回63分钟37秒的数据
31	1978-08	先驱者金星2号	轨道器、大气探测	美国	是	先驱者1号和2号一起对金星进行大气观测, 为伽利略计划进行技术验证, 探测了部分大气数据, 其中有个到达地面的小型着陆器也传回63分钟37秒的数据
32	1978-09	金星-11	飞掠、登陆	苏联	部分成功	金星-11号和金星-12号一起到达金星, 但下降时采样设备被损坏, 采样失败。相机盖也都未能抛去, 未拍摄到金星图像。报告结果包括闪电和雷电迹象, 云层中的硫和氯, 高Ar36/Ar40比率, 在低海拔地区发现CO
33	1978-09	金星-12	飞掠、登陆	苏联	是	金星-11号和金星-12号一起到达金星, 但下降时采样设备被损坏, 采样失败。相机盖也都未能抛去, 未拍摄到金星图像。报告结果包括闪电和雷电迹象, 云层中的硫和氯, 高Ar36/Ar40比率, 在低海拔地区发现CO
34	1981-01	金星-13	飞掠、登陆	苏联	是	金星-13号和金星-14号一起对金星进行大气观测, 为伽利略计划进行技术验证, 探测了部分大气数据, 其中有个到达地面的小型着陆器也传回63分钟37秒的数据
35	1981-11	金星-14	飞掠、登陆	苏联	是	金星-13号和金星-14号一起对金星进行大气观测, 为伽利略计划进行技术验证, 探测了部分大气数据, 其中有个到达地面的小型着陆器也传回63分钟37秒的数据
36	1983-06	金星-15	轨道器	苏联	是	金星-15号和金星-16号首次将综合孔径雷达遥感利用于地外探测, 在长达8个月的测绘工作中, 这两个探测器一起对从北极到北纬30度的区域进行了成像
37	1983-06	金星-16	轨道器	苏联	是	金星-15号和金星-16号首次将综合孔径雷达遥感利用于地外探测, 在长达8个月的测绘工作中, 这两个探测器一起对从北极到北纬30度的区域进行了成像
38	1984-12	维加-1	飞掠、着陆、气球探测	苏联	是	维加-2独自成功完成了表面钻探和土壤分析, 在着陆过程中与维加-1一起进行金星大气的探测和温度分析, 首次利用气球飞行器探测其他星球、首次同时探测两个天体(金星与哈雷彗星)
39	1984-12	维加-2	飞掠、着陆、气球探测	苏联	是	维加-2独自成功完成了表面钻探和土壤分析, 在着陆过程中与维加-1一起进行金星大气的探测和温度分析, 首次利用气球飞行器探测其他星球、首次同时探测两个天体(金星与哈雷彗星)

续表 2

序号	日期	探测器名称	探测器类型	国别	是否成功	结果概述
40	1989-05	麦哲伦号	轨道器	美国	是	最高精度的拍摄了金星大部分地区的地形图像、重力场测量
41	1989-01	伽利略号	重力助推	美国	是	飞掠过程中对金星进行多波段观测并观测了其太阳粒子相互作用,但由于跟踪站因天气关闭,观测数据大量丢失
42	1997-01	卡西尼号	重力助推	美国	是	两次飞掠金星,在最近时观测了金星
43	2004-08	信使号	重力助推	美国	是	两次飞掠金星,在第二次时对金星大气进行多波段成像观测
44	2005-11	金星快车	轨道器	欧空局	是	对金星大气层进行长时间观测
45	2010-05	拂晓号	轨道器	日本	是	2010年12月6日,在未进入轨道后飞过金星,2015年12月7日重新成功进入,对金星观测大气
46	2010-05	伊卡洛斯	飞掠	日本	是	从“破晓号”探测器上释放的实验性太阳帆,2010年12月8日飞过金星,但没进行观测
47	2010-05	深渊号	飞掠	日本	否	日本九州工业大学和鹿儿岛大学学生联合设计的星际探测器,发射后一直未能实现通信
48	2018-08	帕克太阳探测器	重力助推	美国	是	于2018年10月10日、2019年12月26日、2020年7月11日、2021年2月20日、2021年10月16日、2023年8月21日和2024年11月6日飞越金星,更低的近日点进行太阳观测
49	2018-01	贝皮可伦坡号	重力助推	欧空局	是	2020年10月15日和2021年8月11日两度飞掠金星,途中在最近金星时进行了观测

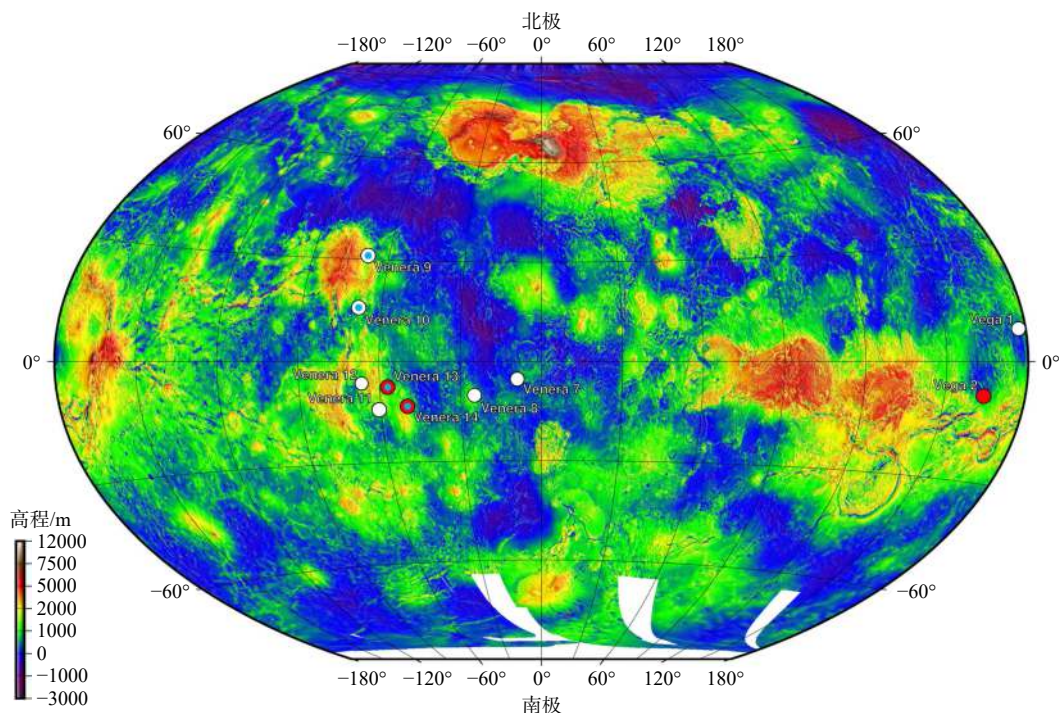


图 1 金星系列探测器着陆位置分布.白色表示成功着陆位置,蓝色代表该着陆点有地表成像,红色表示该着陆点进行了地表样品分析(来源: NASA Ames Research Center, U.S Geological Survey and Massachusetts Institute of Technology)

Fig. 1 Landing positions of Venus Probe. White dots indicate the successful landing position, blue dots represent the positions where the images were returned from the Venus surface, and red dots represent the positions where the surface samples were analyzed. Different colors represent different altitudes (From NASA Ames Research Center, U.S Geological Survey and Massachusetts Institute of Technology)

25% 的金星地形(分辨率为 1~2 km)。

此外,在 1986 年哈雷彗星回归之际,苏联开展了一次多国合作的探测任务,同时探测金星和哈雷彗星,称为维加(Bera,金星与哈雷彗星的俄文字母缩写)计划,1986 年 12 月先后发射维加 1 号和维加 2 号探测器,在靠近金星时释放着陆器,并

利用金星重力助推加速继续探测哈雷彗星.下降过程中,探测气球充气后与着陆器分离,携带气象载荷开展独立的金星大气探测,成为人类首次通过悬浮气球对其他星球进行探测,而着陆器在下降过程中对金星大气的成分和温度进行了分析,并在金星夜间表面着陆,进行了钻孔采样分析。

1.2 美国探测简史

美国在 1962~1973 年期间发射的金星探测器主要是水手 (Mariner) 系列 (数据来源: <https://solarsystem.nasa.gov/missions>)。1962 年 8 月美国发射的水手 2 号是人类史上首个成功抵达金星轨道的探测器。通过这次探测,成功获得了金星大气温度等一系列数据。1967 年 6 月发射的水手 5 号探测器使用无线电波对金星的大气组成进行了探测,证实了 CO_2 是金星大气的主要成分。1973 年 11 月发射的水手 10 号探测器是人类史上第一个同时执行金星和火星任务的探测器,也是第一个带有图像系统的探测器,拍摄了数千张金星云层的照片。

1978 年 5 月和 8 月,为了接下来的外太阳系探测进行技术验证,美国先后发射了金星先驱者 (Pioneer-Venus) 1 号和 2 号探测器的协同探测任务。金星先驱者 1 号为轨道器,负责研究太阳风、金星磁场、电离层。2 号为轨道器与 4 个大气探测器,通过释放 4 个大气探测器进入金星不同位置,在下落过程中获得了一系列关于金星温度压力分布、云层粒子、大气组成的数据。

1989 年 5 月,美国发射了麦哲伦号 (Magellan) 探测器,其携带了精确的综合孔径雷达,在 6 次任务周期中绘制了金星全球地形图,并对金星 95% 的地区进行了高分辨率的重力测量。此次探测获得了金星表面近 98% 的地貌数据,并在最后一次任务中进行了“风车实验”以测量行星高层大气阻力对航天器的影响,于 1994 年坠入金星大气。

1.3 其他国家金星深空探测简史

2005 年 11 月,欧空局发射金星快车 (Venus

Express) 号轨道器,作为欧空局首次金星探测任务,金星快车携带了光谱相机与磁强计等载荷,运行金星极地轨道,并进行了长达 500 天对金星表面、磁场,以及其大气相互作用金星了长期观测。

“拂晓号 (Akatsuki)”是由日本发射的金星探测器,于 2015 年 12 月进入金星轨道。该探测器提供了许多重要的金星大气观测数据,也是目前唯一正在执行任务的金星探测器。

此外,许多以外太阳系和水星、太阳为探测目标的探测器,都会利用金星重力助推以节省燃料、时间和成本。因此,这些探测器都会掠过金星,在飞掠金星时,它们也通过其载荷对金星进行了大量科学观测,如以水星为目标的先锋-10 (1973 年飞掠)、信使号 (2007 年第二次重力助推)、以木星及其卫星为探测目标的伽利略号 (1990 年重力助推),并取得了大量研究成果。

2 探测金星的科学问题

2.1 金星大气

金星是最早被发现存在大气层的地外天体 (1761 年,俄国科学家罗蒙诺索夫根据金星凌日的黑滴现象发现),金星大气的主要成分是 CO_2 (96.5%) 和 N_2 (3.5%),其余为少量 SO_2 (150 ppm)、Ar (70 ppm)、 H_2O (20 ppm) 以及微量酸 (HCl 、 H_2SO_4) 等 (图 2)。相比地球,金星大气不存在 O_2 ,稀有气体含量也更少。一般认为,之所以 CO_2 在金星大气中占据 96.5%,在地球大气中却只有 0.041%,是因为地球上的碳主要被固定在碳酸盐岩、有机物和地球深部 (Walker,

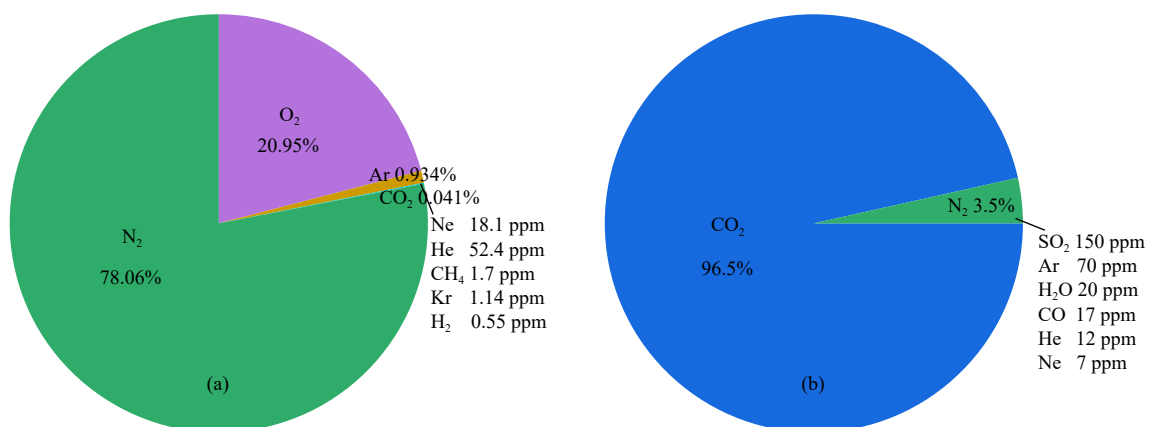


图 2 地球和金星大气成分。(a) 地球大气组成;(b) 金星大气组成。均为体积占比

Fig. 2 Atmospheric composition of Earth and Venus. (a) Earth atmospheric composition. (b) Venus atmospheric composition. Both are volume ratio

1985)。

在距离金星地表 50~65 km 处存在由浓硫酸液滴组成的云层 (图 3)。这些浓硫酸液滴, 一般认为是大气 CO_2 、 SO_2 以及水蒸气在光化学反应过程中形成的。在这一高度, 除了 CO_2 、 SO_2 这些气体外, 还有一些 HCl 、 HF 等成分 (Landis, 2020), 这些成分在高温条件下均具有强烈的腐蚀性。这些由浓硫酸液滴组成的云层可以反射超过 75% 的太阳光, 这是金星在夜空中最亮的一个主要原因。而且这些云层对红光的反射能力大于对蓝光的反射能力, 这也能解释为什么我们平时看到银白色的金星也会带一点金黄色。

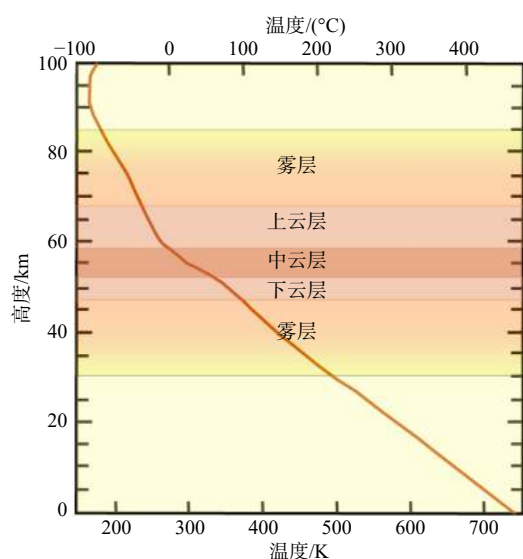


图 3 金星大气层中不同高度的温度, 标出了云层的分布高度 (修改自 Landis, 2020)

Fig. 3 Temperature variations with heights in the atmosphere of Venus with the clouds layer labelled (modified from Landis, 2020)

金星被认为类似地球的早期阶段 (Catling and Zahnle, 2020; Sossi et al., 2020)。从 CO_2 含量来看, 金星大气中的 CO_2 总量与地球大气、地壳和地幔储存的所有 CO_2 总量差不多 (Gillmann et al., 2020)。Catling 和 Zahnle (2020) 给出了太古宙地球大气圈中各气体的大致含量范围, 太古宙 CO_2 和 CH_4 分别是现在的 10~2 500 倍和 100~1 000 倍, N_2 可能比现在略少, O_2 低于现在 O_2 水平的 10^{-6} , 总体上与金星目前的大气成分比较相似。金星和地球的水主要是在主吸积阶段加入的, 在吸积的晚期阶段加入的物质主要是顽火辉石球粒陨石和极少量的含水的碳质球粒陨石 (Gillmann et al., 2020)。由于金星地表温度高达 470 °C, 金星的表面不存在液态水。目前金星大气中气态水的含量为

20 ppm 左右。金星大气中的 D/H 值远高于地球 (Fegley, 2005; Greenwood et al., 2018), 且高层大气中 D/H 比值比低层大气更高 (Krasnopolsky et al., 2013), 这表明与最初的大气层相比, 金星通过氢的逃逸失去了大量的水。这是由于大气中的 H_2O 在太阳紫外线作用下会发生分解, 水分子中的 H 原子相对 D 更容易逃逸到太空中, 使得 D/H 比值升高 (胡中为, 2012)。

根据现有的行星形成模型, 在太阳系形成初期的几百万年内, 年轻的行星体周围会形成主要由 H_2 和 He 组成的原始大气 (Lammer et al., 2018)。这些轻质量数的气体一般都很快速逃逸到太空中了。在类地行星的继续演化过程中, 来自太阳系外的撞击物也会为原始行星提供大量的挥发性气体, 包括 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 NH_3 、HCN 等 (Fischer-Göedde and Kleine, 2017)。类地行星大都经历过岩浆洋阶段, 在这个阶段, 行星内部通常会释放出大量的挥发性物质。对于地球、金星以及火星, 这些挥发性物质主要是 H_2O 和 CO_2 (Marcq et al., 2011; Salvador et al., 2017)。在冥古宙时期, 地球还是以 CO_2 为主的大气, 随着大气—海洋—地表的相互作用, 地球大气中的 CO_2 逐渐通过风化过程转化为碳酸盐 (Walker, 1985; Sleep and Zahnle, 2001; Stewart et al., 2019)。随着大陆的逐渐增生 (Belousova et al., 2010; Dhuime et al., 2012; Smit and Mezger, 2017), 风化过程消耗更多的 CO_2 , 大气中 CO_2 含量逐渐减少; 随着生命的出现和繁衍, 地球大气中的 O_2 逐渐增多, 最终演变出现在以 N_2 和 O_2 为主的大气圈。而金星一直保持以 CO_2 为主的大气。至于为什么金星未能像地球一样继续演化, Salvador 等 (2017) 通过对岩浆洋与大气相互作用热演化的数值模拟发现, 在岩浆洋快速冷却后期, 海洋水的凝结主要取决于行星与恒星之间的距离 (D) 以及初始挥发物的含量。模拟结果显示, 虽然金星到太阳的距离超过了液态水凝聚的临界距离, 但金星偏高的地表温度、高 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比导致其无法维持海洋的稳定存在。

金星与地球同处于太阳系的宜居带, 和地球一样拥有大气层的保护。因此, 从理论上讲, 金星有生命存在的可能。虽然金星表面条件十分恶劣, 地表温度高, 气压大, 但在高层大气中, 仍然存在着相对适宜的温度和压力区域。特别是在 50~60 km 高度, 金星大气层的温度比较适中, 可能适合某些生命的存在。Sousa-Silva 等 (2020) 指出,

如果能够在行星大气中检测到磷化氢 (PH_3) 气体的存在,就意味着该行星可能存在生命.这是因为磷化氢是微生物吸取磷元素之后排出体外的一种气体,被认为是潜在的生物信号,可以作为其他行星和天体上存在生命的证据.最新的一个研究热点是, Greaves 等 (2021) 通过使用阿塔卡玛大型毫米波/亚毫米波天线阵 (ALML) 望远镜和麦克斯韦望远镜 (JCMT) 发现金星大气中存在 PH_3 气体,并估算 PH_3 气体丰度约为 20 ppb,这是地球大气 PH_3 丰度的 1 000 多倍.根据观测结果进行计算,这些 PH_3 气体位处距离金星表面 53~61 km 处,正好位于温度和压力适宜生存的高度. Greaves 等 (2021) 在排除各种可以产生 PH_3 气体可能性后,认定其最有可能是生命活动的产物.对于这一研究结果,也引来许多学者的质疑 (Snellen et al., 2020; Villanueva et al., 2020; Lincowski et al., 2021), 质疑包括在对噪声实验曲线拟合问题,以及 ALMA 数据存在基线校准等问题,麦克斯韦望远镜观察到的 PH_3 气体完全可以用金星大气中层的 SO_2 来进行解释. Greaves 等 (2021) 的研究方法和结论都存在很大的问题,金星上是否存在 PH_3 气体,目前还存在很大的不确定性.至于金星是否存在生命,更是一个未解之谜.

2.2 金星地表是否曾经存在海洋?

金星地表是否曾经存在液态水,也是近年来的一个研究热点.如果形成金星的星云物质与形成地球的星云物质相似,那么金星在形成初期也应该含有一定量的水.传统观点一般认为,金星由于表面温度高以及紫外线的分解作用,水很早就丢失了 (Lécuyer et al., 2000). 同时,金星大气中的 D/H 值远高于地球 (Fegley, 2005; Greenwood et al., 2018), 也暗示金星在历史上已经失去大量的水.与此相反, Yang 等 (2014) 的理论模拟发现,由于金星的自转很慢,科里奥利力很小,云层可以直接从赤道流向两级,导致靠太阳的一侧盖满云层,这种云层能大大增加金星反照率,即使在相当高的日照值下也能维持地表较低的温度,从而使凝结的液态水不会很快丢失.行星的倾角在很大程度上影响其气候和潜在的宜居性, Barnes 等 (2016) 通过数值模型探讨了金星早期倾角变化.发现金星在数 1 Ga 里一直保持低倾角的状态,与地球不同 (受米兰科维奇旋回影响很大),这表明金星在早期历史中甚至可能经历了比地球更稳定的环境.

Way 等 (2016) 对金星早期气候的计算机建模发现,金星在早期演化历史中可能存在近 2 Ga 历史的较浅海洋和适宜居住的地表温度.利用金星的地形数据和轨道参数、2.9 Ga 和 0.715 Ga 的太阳辐照强度估计值、理论估算的金星初始海洋体积 (比地球少一个数量级,海洋深度 310 m) 以及早期估计的大气成分等参数,该研究对金星的气候演化进行模拟计算,发现太阳辐照强度对地表温度影响很小,但提升金星自转速率会使金星地表温度显著升高.如果假设金星的自转速率维持不变,金星地表大气平均温度为 11 °C,普遍处于温和的气候条件.不过,目前只有理论计算推测金星早期曾经存在液态水,而缺少直接证据.

如果金星地表曾经存在液态水,那又是怎么演化成现在的状态呢? Way 和 Genio (2020) 认为金星目前这种温室效应与大火成岩省岩浆活动导致储存于沉积物中的 CO_2 大量释放有关.在金星表面存在早期海洋的假设下,金星也会像地球一样形成大量碳酸盐岩,将 CO_2 固定在地壳中.即使金星地表或者早期地球温度更高,基性—超基性岩石一样能与 CO_2 反应形成碳酸盐岩 (Hao and Li, 2018). 而后期的火山活动会将碳酸盐岩中固定的 CO_2 释放到大气中 (Sleep and Zahnle, 2001; Hansen, 2007; Ernst and Youbi, 2017; Way and Genio, 2020). Way 和 Genio (2020) 模拟发现,多个大规模大火成岩省释放的 CO_2 很可能导致失控的温室效应.在这种状态下,大部分水通过光化学而分解, H_2 迅速逃逸到外太空,而 O_2 逃逸速度大约是 H_2 的一半 (Barabash et al., 2007), 理论上金星早期大气会存在相对多的 O_2 积累 (Luger and Barnes, 2015). 至于早期海洋消失留下的氧气库是如何消失的, Way 和 Genio (2020) 认为可能是与金星地表的大规模的年轻火山岩发生了反应,从而被固定到岩石中.根据麦哲伦探测器的数据,金星近 80% 的地表都比较年轻 (750~180 Ma), 说明金星年轻火山作用非常普遍.金星液态水的耗尽也是目前金星缺乏板块构造的可能原因之一 (后会涉及). 这些理论模拟结果虽然是自洽的,但显然还需要更多的探测结果进一步检验,例如在金星表面寻找残留的沉积碳酸盐岩.

2.3 金星的内部结构

金星具有与地球类似的核幔壳结构.金星地壳主要由玄武质岩石组成,长英质的岩石很少

(Gilmore et al., 2017), 地表的“瓦片状地形 (Tessera)”可能由长英质岩石组成。

在对金星岩石圈进行结构分析时, 大部分学者都是根据麦哲伦号探测器在 1990~1994 年期间获得的重力和地形数据, 采用不同模型进行地壳厚度估计。Anderson 等 (2006) 获得地壳厚度范围为 0~90 km。James 等 (2013) 利用合理的物理参数范围, 通过全球地形和重力数据建模, 将金星地壳平均厚度限制在 8~25 km 的范围内, 并估算地壳质量是金星总质量的 0.2%~0.7%。魏代云等 (2014) 以及 Yang 等 (2016) 利用地幔对流数值模型建立了动力学模型大地水准面地形比, 然后在不同的假设条件下, 分别计算金星的全球地壳厚度, 结果皆指示金星地壳大多在 20~60 km 厚度范围内。Jiménez-Díaz 等 (2015) 同样分析地形和重力数据, 将金星地壳厚度估计 20~25 km。

由于缺乏金星地震数据的探测, 因此目前对于金星地核、地幔的研究涉及很少, 对于金星地核的密度和厚度还不是很清楚。根据金星的重力和地形数据, 一般认为金星可能不存在类似地球上的软流圈 (Kiefer and Hager, 1991; Huang et al., 2013)。根据金星的体积和密度进行估算, 金星地幔应该具有与地球相似的橄榄岩成分 (Fegley, 2005)。与地球一样, 金星的地核很可能至少部分液态, 因为两颗行星的冷却速度大致相同 (Faure, 2007), 尽管不能排除完全固体核心的可能性 (Dumoulin et al., 2017)。Fienga 等 (2019) 使用前人推测的地壳和地幔密度等信息, 推测出金星地核的密度为 9.80 g/cm^3 , 低于地球地核的密度。Fienga 等 (2019) 总结的金星壳幔核密度和厚度如图 4 所示。

金星的一个重要特征是不存在自身磁场。对于地球, 至少 3.45 Ga 之前就已经存在磁场 (Tarduno et al., 2010), 最近基于 Jack Hills 碎屑锆石中矿物包体的研究, 甚至把古地磁存在的时间延伸到冥古宙 (Tarduno et al., 2020)。针对于金星为什么没有演化出磁场, 目前主流观点为金星地核缺乏对流 (Stevenson, 2003): 由于全球磁场的产生需要地核发生对流, 而对流又需要地幔不断抽取地核的热量, Nimmo (2002) 通过热通量估算认为, 金星缺乏磁场的主要原因是金星地幔温度目前正在上升, 金星高地幔温度阻止地核继续向外部散热, 使地核向外传输的热通量变为零, 这导致地核停止对流, 因而无法产生磁场。对于地球这样的行星, 板块构

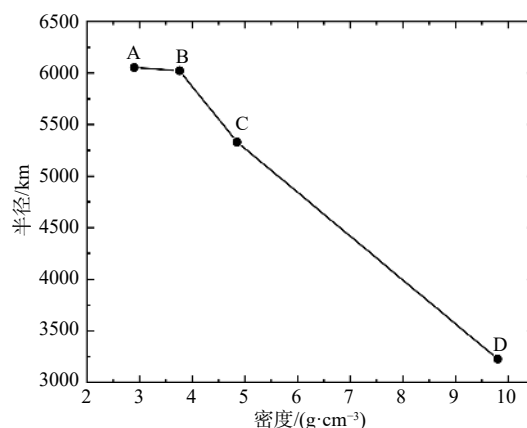


图 4 金星各圈层厚度—密度函数图。A: 地壳, B: 上地幔, C: 下地幔, D: 地核 (修改自 Fienga et al., 2019)

Fig. 4 Thickness-density of Venus layers, A-Crust, B-Upper mantle, C-Lower mantle, D-Core (modified from Fienga et al., 2019)

造的发生是释放热量的过程, 而这一过程需要不断地从地核吸取热量, 这使地核更容易发生对流, 金星不存在磁场可能是缺乏板块构造的结果。Breuer 等 (2010) 认为产生磁场的内部发电机需要一定的驱动力, 这种驱动力可以是固体内核和液体外核之间的组成差异所引起的化学浮力, 也可以是地核与地幔之间温差引起的热浮力, 无论是哪种浮力引起的地核对流, 都强烈依赖于地幔的热传输率, 而金星没有发育板块构造, 使得冷却地核的效率低, 无法演化出磁场。Jacobson 等 (2017) 通过模拟行星吸积、分异以及随后的演化, 认为行星形成过程中以稳定的成分分层生长为主, 而后期的撞击会使内部地核发生搅动, 形成持续运转的发电机, 从而产生磁场。而金星早期可能没有发生巨大的撞击, 一直保持了原有的层状结构, 进而没能形成磁场。

2.4 金星的地表成分

苏联金星系列探测器中的部分着陆器对金星地表样本成分进行了分析 (表 3)。使用 X 射线荧光光谱仪获得的金星地表岩石的主量元素组成与地球上的玄武岩相似。通过伽马光谱仪获得的数据限定了金星表面放射性元素铀、钍和钾的丰度, 也与玄武质岩石组成一致。金星快车通过可见和红外成像光谱仪 (visible infrared thermal imaging spectrometer, VIRTIS) 数据获得了金星全球表面成分的信息。地表发射率的大小与区域岩性特征相关, 金星地表高于全球平均 $1 \mu\text{m}$ 发射率值区域主要是冕状地形、火山以及熔岩流动区域, 高异常的区域被认为与岩浆流动有关, 并被用于帮助识别现代火山活动

表 3 金星地表成分组成 (修改自 Ivanov, 2005)

Table 3 Composition of Venus surface (modified from Ivanov, 2005)

	含量	金星 8	金星 9	金星 10	维加 1	维加 2
伽马射线分析	K ₂ O/(wt%)	4.8 ± 1.4	0.6 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.54 ± 0.26	0.48 ± 0.24
	U/ppm	2.2 ± 0.7	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.3	0.64 ± 0.47	0.68 ± 0.38
	Th/ppm	6.5 ± 0.2	3.7 ± 0.4	0.7 ± 0.3	1.5 ± 1.2	2.0 ± 1.0
	含量/(wt%)	金星 13	金星 14	维加 2		
X射线荧光光谱分析	SiO ₂	45.1 ± 3.0	48.7 ± 3.6	45.6 ± 3.2		
	TiO ₂	1.59 ± 0.45	1.25 ± 0.41	0.2 ± 0.1		
	Al ₂ O ₃	15.8 ± 3.0	17.9 ± 2.6	16.0 ± 1.8		
	FeO	9.3 ± 2.2	8.8 ± 1.8	7.7 ± 1.1		
	MnO	0.2 ± 0.1	0.16 ± 0.08	0.14 ± 0.12		
	MgO	11.4 ± 6.2	8.1 ± 3.3	11.5 ± 3.7		
	CaO	7.1 ± 0.96	10.3 ± 1.2	7.5 ± 0.7		
	K ₂ O	4.0 ± 0.63	0.2 ± 0.07	0.1 ± 0.08		
	S	0.65 ± 0.4	0.35 ± 0.31	1.9 ± 0.6		
	Cl	0.3	0.4	0.3		

(Ivanov, 2005). 而地表低于全球平均 1 μm 发射率值区域主要是瓦片状地形区域, 这些低异常区域的岩性与长英质矿物学特征相符. 发射率的大小与亚铁含量有关, 通常呈反比, 对于金星上的镁铁质岩石化学风化的产物, 镁铁质矿物经过风化, 所有的 Fe 都转化为氧化铁 (缺乏亚铁), 它也能表现出低于 1 μm 的发射率 (Gilmore et al., 2017). 目前认为金星地表主要由玄武岩组成, 这说明金星地表主要是喷出岩, 但对于后文所说的冕状地形、星形地貌以及瓦片状地形, Rozel 等 (2017) 认为一个既有喷出岩又有侵入岩的地壳形成模型更符合现在的金星状态.

2.5 金星地形地貌与构造

麦哲伦探测器的雷达数据显示, 金星表面出露大量的火山活动和构造活动记录, 如区域平原 (Regional plains)、盾状火山平原 (Shield plains)、冕状地形 (Corona) 和瓦片状地形 (Tessera) 等, 各地貌占比见表 4 (82.5°N~82.5°S).

在金星表面散布着数百座大型的盾状火山和数以万计的小型盾状火山, 几乎覆盖了整个星球 (Taylor et al., 2018), 这些火山喷发出的熔岩形成各式各样的火山平原. 因此, 金星地表最主要的地貌是不同类型的火山平原 (图 5), 其中主要火山平原为区域平原和盾状火山平原 (Ivanov et al., 2011). 在所有地貌中, 区域平原面积最大, 约

表 4 金星地表各地貌占比 (修改自 Ivanov and Head, 2011)

Table 4 Proportion of different geomorphologies of Venus (modified from Ivanov and Head, 2011)

地质单元	面积/(10 ⁶ km ²)	百分占比/%
区域平原 1(rp1)	141.8	31.1
盾状火山平原(psh)	79.3	17.4
区域平原 2(rp2)	42.0	9.2
叶状平原(pl)	37.8	8.3
沟槽带(gb)	37.1	8.1
瓦片状地形(t)	33.2	7.3
裂谷带(rz)	22.6	5.0
平滑平原(ps)	10.3	2.3
脊状平原(pr)	9.6	2.1
线状平原(pdl)	7.2	1.6
盾状火山群(sc)	3.3	0.7
撞击坑及其流出物(c,cf)	2.6	0.6
山脉(mb)	1.3	0.3
未知	28.1	6.2
共计	456.3	100.0

182.8×10⁶ km², 占据金星地表 40.3% (图 6c, 6d). 区域平原以地势平坦、地表岩性组成均一为特征, 表面形态相比其它地貌光滑很多, 表面可以存在变形, 这些褶皱山脊可以是不同方向、不同形状. 在金星表面有超过 65 000 条褶皱山脊, 其存在主要与大地水准面和长波长地形有很强的相关性 (Bilotti and Suppe, 1999). 区域平原根据雷达后向散射的特点分为两类, 一种是以狭长、蜿蜒的沟渠

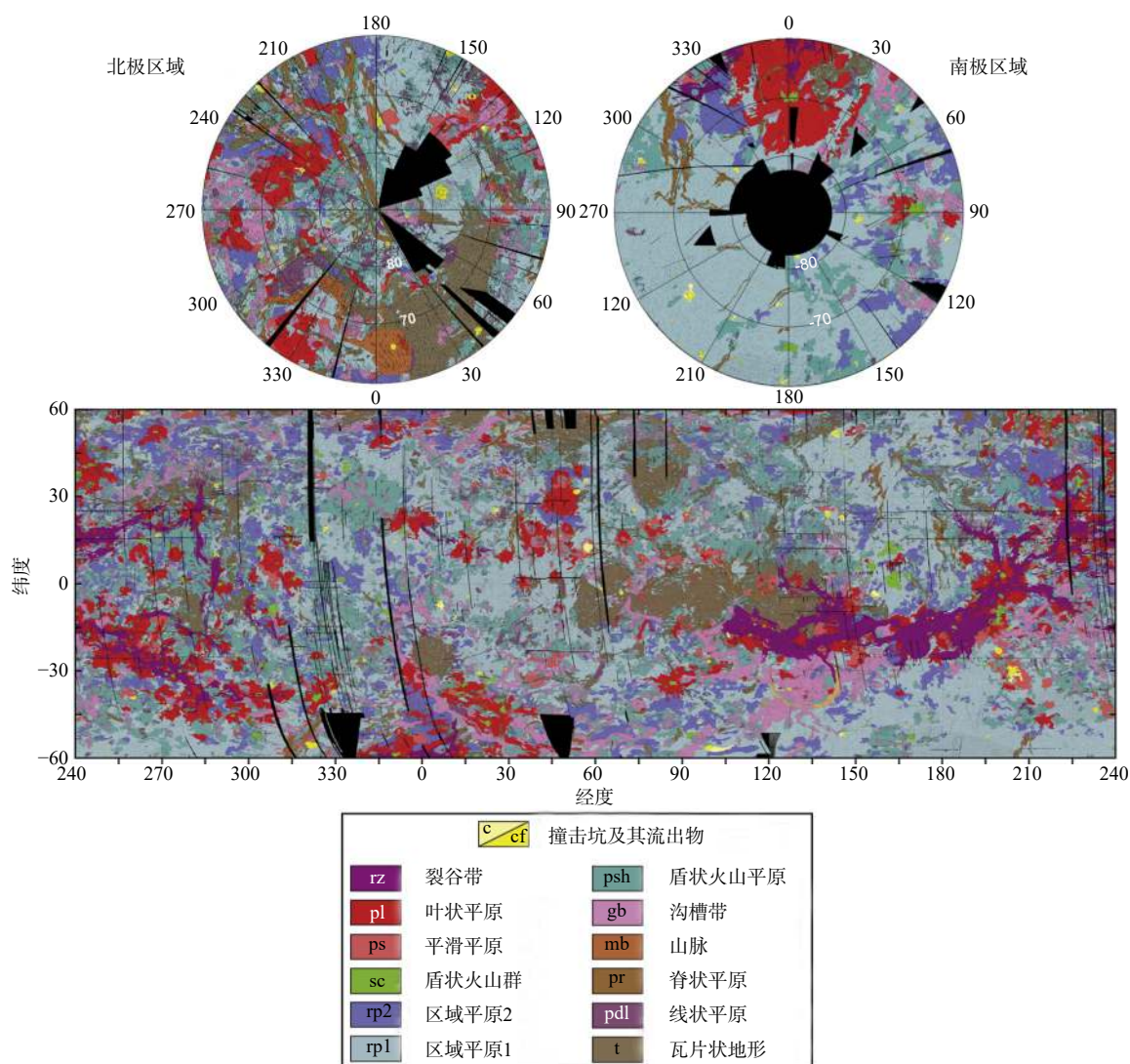


图 5 金星全球地质图 (修改自 Ivanov and Head, 2011). c/cf-撞击坑及其流出物, rz-裂谷带, psh-盾状火山平原, pl-叶状平原, gb-沟槽带, ps-平滑平原, mb-山脉, sc-盾状火山群, pr-脊状平原, rp2-区域平原 2, pdl-线状平原, rp1-区域平原 1, t-瓦片状地形

Fig. 5 Global geological map of Venus (modified from Ivanov and Head, 2011). c/cf- impact craters and crater outflows, rz-Rift zones, psh-shield plains, pl-Lobate plains, gb-Groove belts, ps-Smooth plains, mb- mountain belts, sc-Shield clusters, pr-Ridged plains, rp2-The upper unit of regional plains, pdl-Densely lineated plains, rp1-The lower unit of regional plains, t-Tessera

状为特征的较低雷达反照率的区域平原 (rp1, 图 6d), 另外一种以发育大量狭窄、弯曲的褶皱山脊的较高雷达反照率的区域平原 (rp2, 图 6d). 前者在区域平原总面积中占 77%, 后者相对较少 (约 23%). 反照率的增加意味着地表更加不平整, 也意味着不适合金星着陆器降落, 因此着陆器的着陆地点一般选择较低反照率的地方. Ivanov 等 (2017) 认为低反照率的区域平原物质的玄武岩很可能来自金星的上地幔, 高反照率的区域平原物质很可能是地幔物质在高熔融程度下, 迅速喷出地表形成的, 其源区很可能是低反照率的区域平原形成过程中大量熔岩喷发后残余的亏损地幔. 从形成年

龄上来看, 这两种区域平原都晚于表面山脊的形成时间. 在金星表面观察到很多高反照率的区域平原围绕着低反照率的区域平原, 这表明高反照率的区域平原更加年轻. 除了区域平原, 大量小的盾状火山出现在金星地表的平原, 被称为盾状火山平原, 其面积约 $79.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占金星表面 17.4% (图 6e), 其地貌整体呈现一种丘陵状, 它可能是由壳源物质熔融形成的, 发生这种熔融的火山口半径虽然小, 但是在数量上非常多 (Ivanov et al., 2017). 它相对瓦片状地形略光滑, 有时可能会因褶皱山脊的存在而发生变形. 盾状火山平原形成时代较晚, 该地貌普遍高于区域平原, 年龄较年轻,

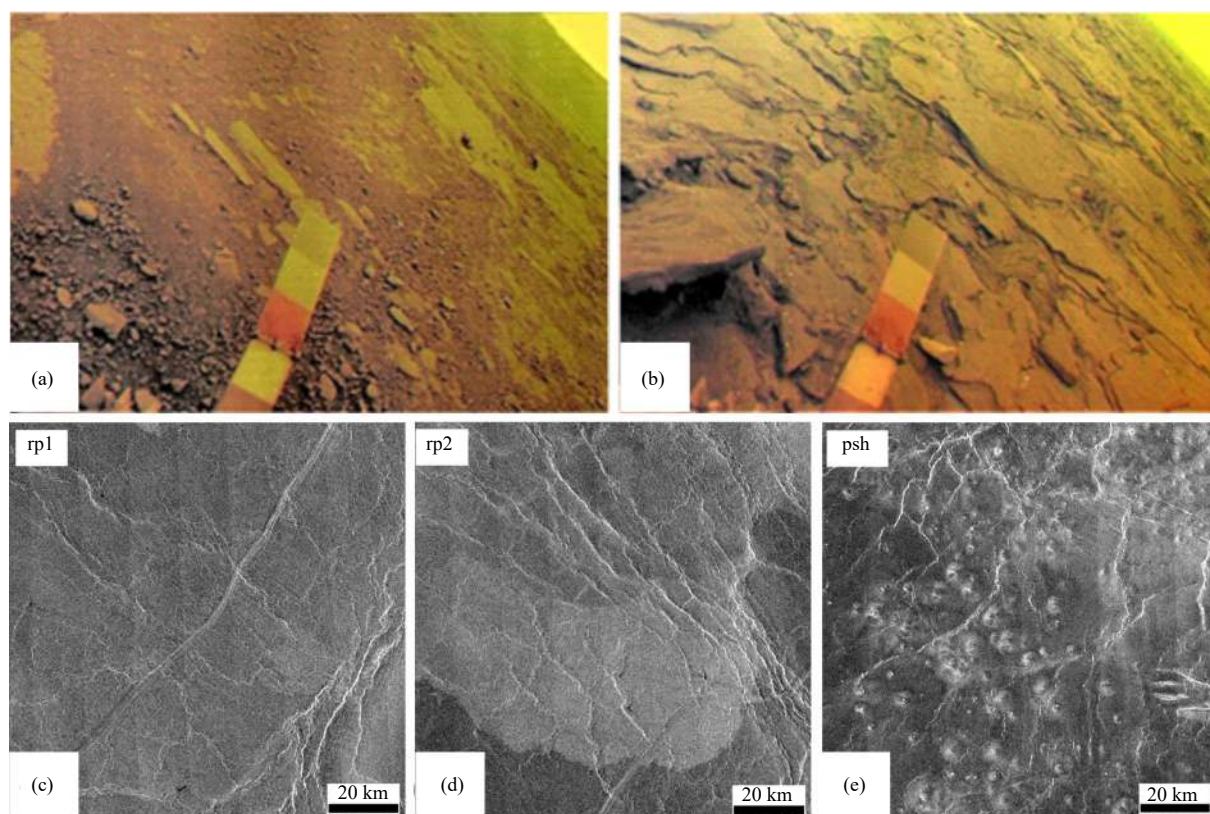


图6 金星平原地貌。(a)、(b)均为火山平原地表,(a)为金星-13拍摄,大约形成于0.75 Ga;(b)为金星-14拍摄,大约形成于几百万年前;(c)为低反照率的区域平原;(d)为高反照率的区域平原;(e)为盾状火山平原[图(a)、(b)引自 http://mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm;图(c)、(d)、(e)修改自 Ivanov and Head, 2011]

Fig. 6 Photos of plains on Venus. (a) and (b) are close photos of volcanic plain surface. (a) was photographed by Venera-13, with age of about 0.75 Ga; (b) was photographed by Venera-14, with age of several millions of years. (c) and (d) are regional plains with low and high albedos, respectively. (e) is shield plain [(a) and (b) are from http://mentallandscape.com/C_CatalogVenus.htm with permission; (c)~(e) are from Ivanov and Head, 2011]

周围都是类似瓦片状地形这样较老的地貌。

在金星表面遍布一种“冕状地形”地貌(图7,图8a),它具有近圆形特征,被同心山脊和裂隙环状环绕(Smrekar and Stofan, 2007; Smrekar et al., 2018),其中心区域可以是穹隆状态,也可以为凹陷状态,不同的冕状地形可能代表着不同的成因,也可能代表不同演化阶段.冕状地形通常被认为是地幔柱在地表的最终产物.目前金星上已经发现超过500个“冕状地形”,其直径大多都大于100 km,目前已观测到最大的一个冕状地形是直径约2600 km的Artemis冕.Gülcher等(2020)使用三维高精度岩浆—热力学地幔柱—岩石圈相互作用模型来探究金星地表冕状地形的形成,通过改变模型中地幔柱的大小、温度、岩石圈强度等参数,模拟出四种地幔柱—岩石圈相互作用的方式,分别为岩石圈地幔滴落、短暂俯冲作用、嵌入式地幔柱以及地幔柱底侵作用(图7).在前三种作用过程中,冕状地形在演化的最后阶段都会由于地壳均衡

调整而发生地形反转,即凹陷地形.而在地幔柱底侵作用中,由于地幔柱未能穿透岩石圈而在软流圈区域扩散,形成类似穹隆状态的地形,能够很好地解释冕状地形的成因.

除此之外,金星上还发现了类似蛛网状的地貌——星形地貌(Novae,图8b),目前已知的星形地貌有64个.它通常表现为密集的放射状断裂和隆起的地形,在一些地方还可以观察到大量的火山活动.Gerya(2014)通过数值模型解释这种蛛网状地貌的形成,认为这种构造可能形成于地幔柱诱导金星地壳发生的内部对流过程中.除此之外,Gerya(2014)认为星形地貌可以通过边缘上升,使整个同心破裂向中心倾斜,在随后中心部分熔融的地壳岩石向外推覆而转化为冕状地形,但星形地貌并不总是向着冕状地形演化(Krassilnikov and Head, 2003).

金星上存在一种独特的地貌——瓦片状地形(图8c),是金星-15/16探测器首次发现的,它

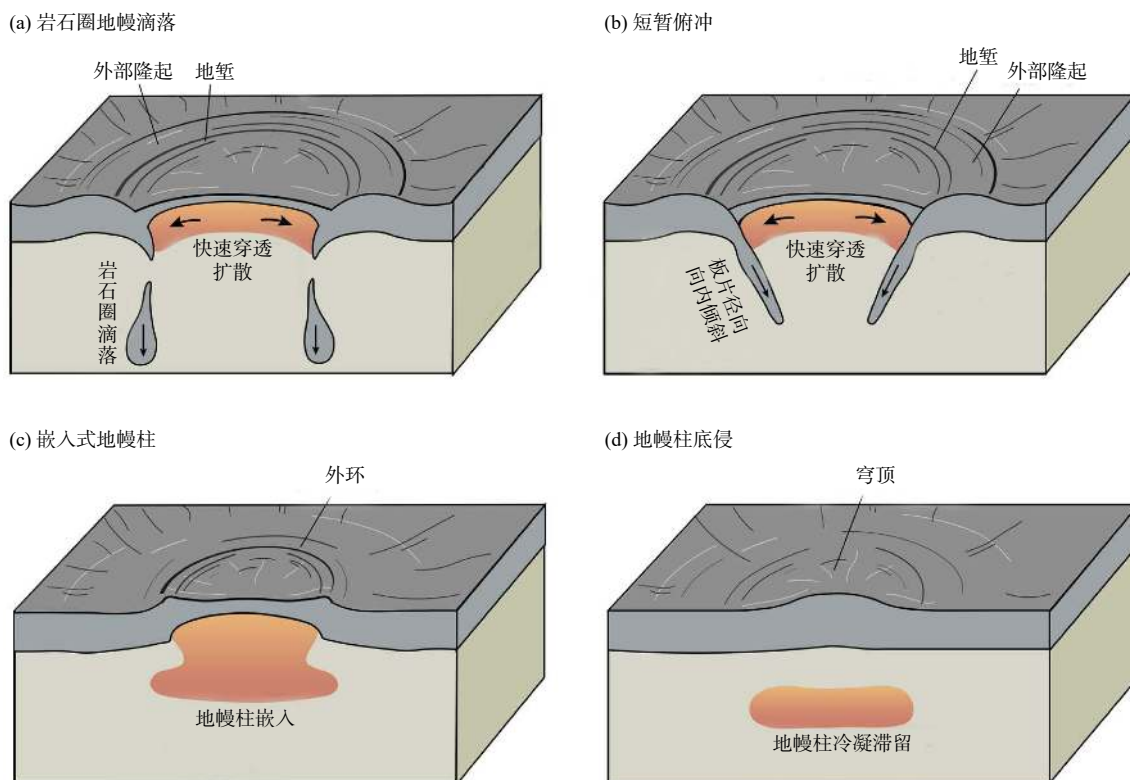


图 7 四种地幔柱—岩石圈相互作用方式的冕状地形 (修改自 Gülcher et al., 2020)

Fig. 7 Corona structures formed by four different ways of mantle plume-lithosphere interaction (modified from Gülcher et al., 2020)

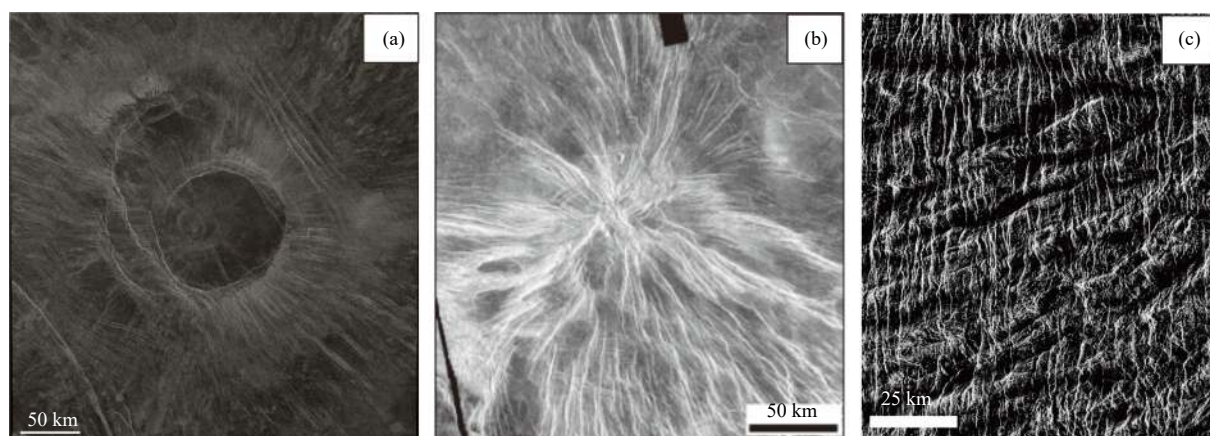


图 8 金星其他地貌。(a) 冕状地形 (修改自 Guseva et al., 2019); (b) 星形地貌 (修改自 Ivanov, 2005); (c) 瓦片状地形 (修改自 Hanmer, 2020)

Fig. 8 Other representative morphologies of Venus. (a) Corona (modified from Guseva et al., 2019); (b) Novae (modified from Ivanov, 2005); (c) Tessera (modified from Hanmer, 2020)

是由不同方向的多个相互交错的变形结构组成的复杂单元, 规模从几百米到几十千米不等, 总面积约 $33.2 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占据金星的地表 7.3%。瓦片状地形高度变形, 因此在雷达图像中非常明显 (Ivanov and Head, 2011)。瓦片状地形的变形特征主要是伸展和挤压。在少数瓦片状地形中, 甚至可以确定出变形的先后顺序。在雷达图像显示的瓦片状地形中, 存在很多类似地球上地层层序的线状特征, 这可能是由于表层地层受到侵蚀形成的。对于这些线状特

征, 普遍认为是层状岩石的褶皱堆叠形成的, 但在形成上是由熔岩溢流还是沉积成因仍然无法确定 (Byrne et al., 2021), 有待仪器精度的提高和探索方法的进一步改进。也有人把瓦片状地形解释为放射状基性岩墙群和火山的共同作用 (Hanmer, 2020)。瓦片状地形通常位于被较年轻的平原环绕的孤立地段, 或者出现在金星主要的高原地区 (图 9)。金星快车通过 VIRTIS 在瓦片状地形观察到低的发射率 (低于 $1 \mu\text{m}$), 而发射率的大小与

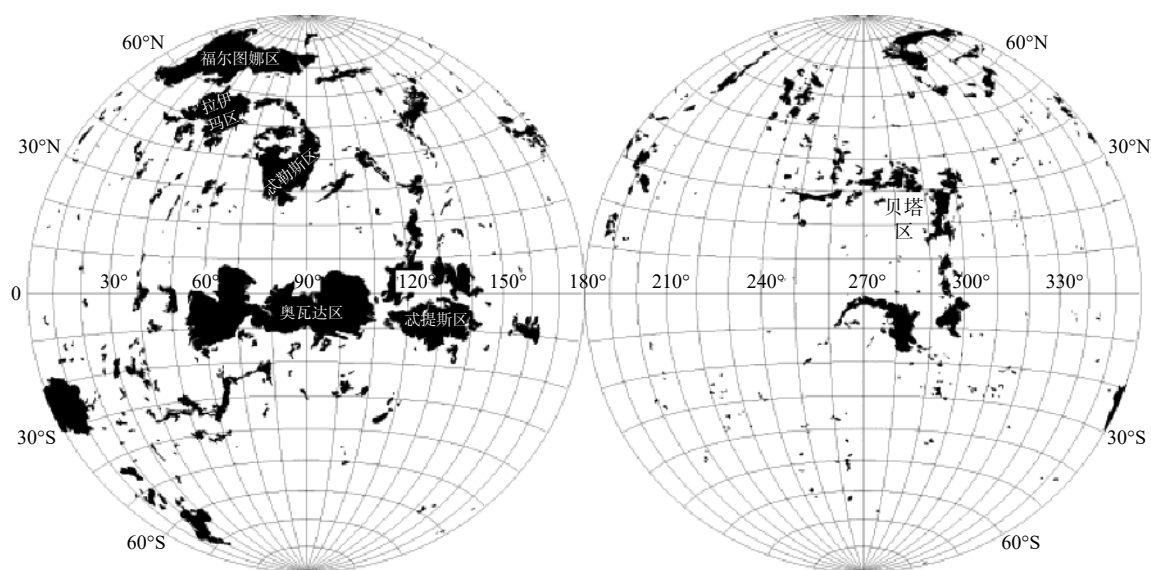


图 9 金星地表瓦片状地形的全球分布图 (修改自 Ivanov, 2005)

Fig. 9 Global distribution of Tessera landform on Venus (modified from Ivanov, 2005)

这些岩石中的铁含量有关, 瓦片状地形的发射率值低于全球平均值 $1 \mu\text{m}$, 说明它们可能含有较多的长英质矿物. 如果这一解释成立, 瓦片状地形相当于金星的陆壳. 但是, 镁铁质矿物经过风化, 所有的 Fe 都转化为氧化铁 (缺乏亚铁), 也能显示出低于 $1 \mu\text{m}$ 的发射率 (Gilmore et al., 2017). 因此, 瓦片状地形可能含有较多的长英质岩石, 也可能是镁铁质岩石经过风化的产物, 还需要进一步的研究.

金星表面还存在很多其他地貌, 如叶状平原 (lobate plain)、沟槽带 (groove belt) 以及脊状平原 (Ridged plains) 等.

由于金星特殊的地表环境, 尤其是大气中以 CO_2 碳为主, 以及金星地表缺乏液态水 (Lammer et al., 2018; Gillmann et al., 2020), 金星表面的风化作用对地表地貌的影响很小, 火山活动和构造活动占据主导地位. 与月球相比, 金星地表只有很少的陨石撞击坑, 说明金星的表面比较年轻, 大约只有 $0.3 \sim 0.6 \text{ Ga}$ (Schaber et al., 1992). 很多证据都表明金星上存在年轻的火山活动, Bondarenko 等 (2010) 对麦哲伦辐射计数据进行分析发现明显的微波热辐射过剩, 这与年轻的熔岩流侵入引起的地下温度升高一致, 表明存在近期火山活动的迹象. Smrekar 等 (2010) 通过金星快车上 VIRTIS 获得的数据, 发现金星部分区域的熔岩完全没有经受过风化, 因此非常年轻. 火山活动对于金星的内部演化具有重要的意义, 它不仅是岩石圈热传递的主要方式, 而且对于塑造地表地貌地表环境, 改造大气

成分也起到很重要的作用. 轨道飞行器获得的地形显示, 金星上没有太多大型的、活跃的火山热点 (Shalygin et al., 2015). 计算金星火山活动速率的方法有多种不同途径. 常见的有形态观测估计, 例如 Strom (1994) 等通过建立模型, 利用火山口密度 (被认为与火山活动速率有关) 获得火山活动速率为 $0.01 \sim 0.15 \text{ km}^3/\text{a}$. 也有学者基于金星表面的方解石与 SO_2 以及火山放气关系来获得火山活动速率为 $0.4 \sim 11 \text{ km}^3/\text{a}$ (Fegley and Prinn, 1989). 除了这些方法之外, Hashimoto 和 Imamura (2001) 提出使用遥感探测技术观察和测量金星熔岩喷发的频率, 并记录观察期喷发事件的数量来估测火山活动的速率. 虽然目前金星的火山活动准确速率尚不清楚, 但相比于地球, 上述学者估计的金星火山活动速率皆远小于地球.

2.6 金星为什么没有板块构造

金星表面的线性山脉、盾状火山平原、裂谷等地貌的地质作用力主要来源于地幔柱—岩石圈相互作用和地幔对流 (杨安等, 2020), 至今未发现与板块构造相关的板块俯冲作用. 金星和地球在行星性质上有很多共同之处, 那么它们在早期的演化过程也很可能是非常相似的. 因此, 理解金星为什么保持了原始的停滞盖层 (stagnant lid) 模式, 有助于我们理解地球为什么会演化出板块构造作用, 也就是说, 我们可以通过研究现在的金星来了解早期地球. 近 20 年来, 板块构造是何时、通过什么机制开始在地球上启动, 已成为固体地球科学最前沿、

最热的研究方向. 金星可以为我们从比较行星学的角度提供新的视角和新的制约. 大洋板片的俯冲是这两种构造模式的重要区别, 因为它使地表和深部之间实现了地球化学循环, 而停滞盖层 (stagnant lid) 模式只允许地幔通过岩浆作用向地表单向迁移物质. 关于金星为什么没有发育出板块构造, 目前主要存在以下几种假说.

Bercovici 和 Ricard (2014) 认为板块构造的出现和演化是多晶颗粒损伤机制和俯冲作用相互作用的结果. 当类地行星岩石圈被破坏 (发生局部剪切和矿物粒度减小), 并发生地幔的快速流动和原生俯冲时, 将导致弱化的板块边界积累, 最终形成完全由俯冲驱动的构造板块. 对于金星是否存在俯冲, Davaille 等 (2017) 给出了相关实验和观测证据. 由岩石圈的破坏程度主要取决于地表温度, 地球上较冷的表面比金星这种热得多的表面更有利于岩石圈脆弱带的形成和保留, 高温易于促进脆弱带的愈合 (Bercovici and Ricard, 2014). 金星极热的地表条件为金星不存在板块构造提供了一个合理的解释.

也有假说认为, 金星没有软流圈是它未能发育板块构造的原因 (Kiefer and Hager, 1991; Richards, 2001; Höink et al., 2012; Huang et al., 2013). 自从板块构造理论建立以来, 人们一直怀疑板块下方的软流圈可能对板块的运动起到了促进作用. 长期以来的观点是, 软流圈的低黏度起到了从下方润滑板块的作用, 这有助于维持板块运动. 而 Richards 等 (2001) 进行了数值模拟, 固定板块内部的地幔的参考黏度, 考察板块之下的地幔不同黏度的影响. 模拟结果表明, 随着板块之下的地幔黏度的增加, 在较宽的岩石圈屈服应力值范围内, 地幔对流可以保持板块构造模式. 当板块之下的地幔黏度等于板块内的地幔时, 板块状表面运动不能维持, 活动的板块构造就转变为停滞盖层 (stagnant lid). Höink 等 (2012) 通过模拟和标度理论对这一模拟结果提供了物理解释, 结果表明, 软流圈提供的不是所谓的润滑效应, 而是软流圈的绝对黏度较低, 地幔之间存在较高的相对黏度对比度而产生的流动通道效应. 软流圈通过放大对流应力有利于维持板块构造, 有助于维持和/或重新使弱的板块边界活跃. Huang 等 (2013) 的研究也支持软流圈的重要性, 即软流圈可以通过增加岩石圈应力来促进局部岩石圈变形, 以及增加地幔对流波长两个方面促进板块构造的产生.

金星缺乏水导致其不存在板块构造, 也是前人

经常提到的一种解释 (Nimmo and McKenzie, 1996; Karato and Jung, 1998; Korenaga, 2013; Stern, 2018). Karato 和 Wu (1993) 提出, 对于大多数停滞盖层的构造模式, 地幔硅酸盐岩石的黏度对温度极为敏感 (与温度成反比), 黏度在顶部边界层上发生数量级的变化, 导致表面呈现刚性的盖子覆盖了整个行星表面, 而地幔对流只在刚性盖子之下发生. 停滞盖层对流模式向板块构造转变需要一种脆性变形机制, 可以理解为通过降低岩石圈摩擦系数来降低顶部边界层的屈服应力, 最终改变停滞盖层的状态. 而降低岩石圈摩擦系数需要水的参与, 岩石圈可以通过发育热的深断裂导致深层发生水化 (Korenaga, 2007), 冷却的岩石圈的热收缩会产生足够高的热应力, 足以使岩石圈最坚硬的部分深度破裂. 金星和地球截然不同的演化路径可能是由于这两个行星挥发物的演化历史不同所致 (Smrekar et al., 2007). 在所有的类地行星中, 只有地球在其大气层和内部保留了丰富的水, 能够降低摩擦系数, 进而发育出板块构造.

3 前景与展望

金星俗称是地球“姊妹星”, 在大小、密度和结构各个方面都与地球非常相似. 为什么相似的两个行星经历了截然不同的演化路线, 这值得我们去思考、去探究. 因此, 对金星的探测和研究是跳出地球认识地球的最佳途径. 例如, 由于金星缺乏板块构造, 不能有效地把地表挥发分异或者氧化性物质再循环到地幔中, 金星的地幔非常有可能完好地保留了核幔分异之后的化学和物理性质, 通过分析金星玄武岩, 可以限定其源区地幔的化学成分, 非常有可能获得地球的原始地幔成分的突破性认识. 例如, Richter 等 (2016, 2020) 推测金星地幔氧逸度为 IW-2 到 IW-1. 除此之外, 研究金星和地球为什么会朝不同方向演化, 是深入理解行星宜居性的形成与演变的重要途径. 在目前已经发现的 4 000 多颗系外行星中, 绝大多数的类地行星位于金星带而非宜居带, 其地表光照强度更类似金星而不是地球 (Kane et al., 2014), 研究行星在两个轨道区域的大气温室效应、评价它们的潜在宜居性是未来的重要研究内容. 由于上述科学研究价值, 金星一直是优先级别最高的探索目标之一. 从上个世纪六七十年代到现在, 人们对金星的探索从未停止. 虽然最近的火星探测热似乎掩盖了我们对金星

的探测需求,但我们有理由相信,在不远的将来,人类探索金星的新一波高潮即将到来。

正如美国航空航天局的金星探测分析小组(The Venus Exploration Analysis Group, VEXAG)白皮书(2019年版)所指出的那样,金星探索的三个主要目标如下:

(1) 了解金星的早期演化和潜在的宜居性,约束类似金星大小的系外行星演化;

(2) 了解金星上的大气的动力学过程和组成;

(3) 了解金星表面地质历史,以及现在金星表面和大气之间的耦合关系。

对于这三个科学目标又可以细化为一些待解决的问题,比如,金星早期有宜居的表面条件和液态水吗?金星如何阐明行星进化的可能途径?哪些过程决定了金星大气组成以及全球和局部辐射平衡的基线和变化?是什么过程驱动了金星的全球大气动力学过程?哪些地质过程塑造了金星的地表?金星的大气与地表如何发生相互作用?为了解决这些问题,金星探测分析小组针对性地提出了23个调查方向,每个方向均具有一定的科学价值。

2021年6月,美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)宣布启动两个以金星为探测目标的项目——金星大气层深部惰性气体、化学性质及成像调查(Deep Atmosphere Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging, Plus, DAVINCI+)和金星的发射率、无线电科学、干涉合成孔径雷达、地形和光谱

(Venus Emissivity, Radio Science, InSAR, Topography, and Spectroscopy, VERITAS),探测器计划在本世纪20年代末发射(信息来源: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-selects-2-missions-to-study-lost-habitable-world-of-venus>)。DAVINCI+主要是针对金星大气层的探测计划,目标是分析大气组成,了解金星大气的形成演化以及金星早期是否存在海洋。DAVINCI+计划穿过稠密大气层,测量大气层到地表的化学组成,特别是惰性气体的丰度。DAVINCI+计划将会让我们对金星的演化有一个全新的认知。VERITAS是轨道器,将通过综合孔径雷达绘制金星高分辨表面,获得堪比地球的地貌数据来判断金星的地质历史以及金星朝着地球不同方向演化的原因。除此之外,VERITAS还将通过绘制金星表面的红外辐射图,来绘制金星的地质图。另外,NASA评估金星宜居性的任务“金星旗舰(Venus flagship)”也将提上日程(2029~

2032年),该探测任务首先要了解金星上挥发物的演化历史,并确定金星是否宜居,其次要获得金星表面的组成和气候史,以及现在金星表面和大气之间的耦合,最后是了解金星地质活动的机制以及金星地质活动目前是否活跃。Venus flagship任务预算大概为20亿美元,携带包括1个轨道飞行器、2个小型轨道器、2个短期着陆器/探测器、1个探空气球以及1个长期着陆器。

同样是在2021年6月,欧空局宣布开始启动金星探测的“远景号(Exciting New Mission To Investigate Venus, EnVision)”项目(信息来源: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_selects_revolutionary_Venus_mission_EnVision),该项目是与NASA合作开展的,新的金星轨道器计划携带NASA研制的合成孔径雷达(Venus synthetic aperture radar, VenSAR),旨在对金星表面进行高分辨率的测量。除了VenSAR之外,欧空局还将为探测器配备一个地下雷达,以详细了解地下分层情况,并配备多种光谱仪,检查金星的大气和地表成分,并另有一个仪器探索其内部结构和重力场。EnVision轨道飞行器预计将于2031~2032年发射。EnVision将以前所未有的分辨率对金星从内核到大气层进行研究,特别是研究其地核和地幔结构、目前活跃和过去地质过程的迹象,以及海洋是否曾经存在。这项计划有利于帮助我们理解为什么金星演化成现在的模样。

俄罗斯联邦航天局一直在规划“金星-D”金星探测项目,此探测任务计划最早将于2029年发射(信息来源: <http://www.russianspaceweb.com/venera-d-2021.html>)。2014年NASA加入此次金星探索计划并共同成立联合科学定义小组(Joint Science Definition Team, JSDT),构想此次金星探测任务的框架。金星-D任务主要由三个部分执行,轨道器、登陆器以及长期原地太阳系探测器(long lived in situ Solar system explorer, LLISSE)。轨道器主要任务是研究金星的大气动力学性质和温室效应;分析大气、风、热力潮的热结构;测定大气组成,研究云层结构、组成、微物理和化学;调查顶部大气层、电离层、磁层、逃逸率以及太阳风相互作用。登陆器主要任务是测定地表或近地表物质的元素丰度和矿物含量;研究大气与地表的相互作用;研究大气结构及其组成;对云层溶胶进行化学分析等。对于LLISSE准备在金星执行任务的3个月期间,主要研究在内近地表风速、风向、温度和气压

的变化；测量入射和反射的太阳辐射；测量近地表大气化学成分；探测金星地震活动、火山活动和闪电等。

印度空间研究组织（ISRO）计划于 2024 年底发射“舒克拉雅（Shukrayaan）”探测器前往金星，对金星展开为期四年的研究（信息来源：<https://en.wikipedia.org/wiki/Shukrayaan-1>）。“舒克拉雅”探测器将搭载几台探测金星环境的仪器，包括一台探测金星表面的合成孔径雷达（SAR），一台瑞典和印度合作研发的金星中性分析器（Venusian Neutrals Analyzer），用于检测来自太阳的带电粒子如何与金星大气相互作用，以及其它光谱仪。

另外，几枚新的航天器也会在不久的将来飞越金星，包括 NASA 用于观测太阳的“帕克”（Parker）太阳探测器，以及目的地为水星的欧洲“贝皮科伦布（BepiColombo）”探测器。这些探测器在越过金星时，也会为我们获取一些有用的数据。综上所述，金星是人类认识早期地球、理解行星宜居性的重要窗口。因此，建议我国科学家和航天部门尽早规划，提出我国的金星探测计划。具体的探测目标，可以更多地注重在大气探测与着陆探测上，包括：（1）针对金星大气中的宜居温度层的大气成分和潜在生命信号，开发能长期探测的气球探测器；（2）针对金星地表火山岩的化学组成、地幔源区和构造背景，着陆器选择高价值区域（如最新的可能的火山喷发地区、古老地区）进行着陆采样分析；（3）针对金星上特殊的恶劣环境，以此为探测目标，可作为我国航天交叉领域的综合极端环境的技术验证。深空探测作为新的国家实力竞争平台，我国在新的国际竞争中应该、也必然有所作为。

References

- Anderson F S, Smrekar S E. 2006. Global mapping of crustal and lithospheric thickness on Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E8): E08006.
- Barabash S, Fedorov A, Sauvaud J J, et al. 2007. The loss of ions from Venus through the plasma wake[J]. *Nature*, 450(7170): 650-653.
- Barnes J W, Quarles B, Lissauer J J, et al. 2016. Obliquity variability of a potentially habitable early Venus[J]. *Astrobiology*, 16(7): 487-499.
- Belousova E A, Kostitsyn Y A, Griffin W L, et al. 2010. The growth of the continental crust: constraints from zircon Hf-isotope data[J]. *Lithos*, 119(3-4): 457-466.
- Bercovici D, Ricard Y. 2014. Plate tectonics, damage and inheritance[J]. *Nature*, 508(7497): 513-516.
- Bilotti F, Suppe J. 1999. The global distribution of wrinkle ridges on Venus[J]. *Icarus*, 139(1): 137-157.
- Bondarenko N V, Head J W, Ivanov M A. 2010. Present-day volcanism on Venus: Evidence from microwave radiometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(23): 817-824.
- Breuer D, Labrosse S, Spohn T. 2010. Thermal evolution and magnetic field generation in terrestrial planets and satellites[J]. *Space Science Reviews*, 152(1-4): 449-500.
- Byrne P K, Ghail R C, Gilmore M S, et al. 2021. Venus tesserae feature layered, folded, and eroded rocks[J]. *Geology*, 49(1): 81-85.
- Catling D C, Zahnle K J. 2020. The archean atmosphere[J]. *Science Advances*, 6(9): eaax1420.
- Davaille A, Smrekar S E, Tomlinson S. 2017. Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus[J]. *Nature Geoscience*, 10(5): 349-355.
- Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, et al. 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago[J]. *Science*, 335(6074): 1334-1336.
- Dumoulin C, Tobie G, Verhoeven O, et al. 2017. Tidal constraints on the interior of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(6): 1338-1352.
- Ernst R E, Youbi N. 2017. How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record[J]. *Palaeogeography*, 48: 30-52.
- Faure G, Mensing T. 2007. *Introduction to Planetary science*[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 183-209.
- Fegley B, Prinn R G. 1989. Estimation of the rate of volcanism on Venus from reaction rate measurements[J]. *Nature*, 337(6202): 55-58.
- Fegley B. 2005. *Meteorites, Comets, and Planets: Treatise on Geochemistry, Volume 1*[M]. Elsevier, 487-507.
- Fienga A, Saliby C, Memin A, et al. 2019. Exploring Venus internal structure and its tidal response[C]//EPSC-DPS Joint Meeting 2019. Geneva, Switzerland.
- Fischer-Gödde M, Kleine T. 2017. Ruthenium isotopic evidence for an inner Solar System origin of the late veneer[J]. *Nature*, 541(7638): 525-527.
- Gerya T V. 2014. Plume-induced crustal convection: 3D thermomechanical model and implications for the origin of novae and coroneae on Venus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 183-192.
- Gillmann C, Golabek G J, Raymond S N, et al. 2020. Dry late accretion inferred from Venus's coupled atmosphere and internal evolution[J]. *Nature Geoscience*, 13(4): 265-269.
- Gilmore M, Treiman A, Helbert J, et al. 2017. Venus surface composition constrained by observation and experiment[J]. *Space Science Reviews*, 212(3): 1511-1540.
- Greaves J S, Richards A M S, Bains W, et al. 2021. Phosphine gas in the cloud decks of Venus[J]. *Nature Astronomy*, 5(7): 655-664.
- Greenwood J P, Karato S, Vander Kaaden K E, et al. 2018. Water and volatile inventories of Mercury, Venus, the Moon, and Mars[J]. *Space Science Reviews*, 214(5): 1-39.
- Gülcher A J P, Gerya T V, Montési L G J, et al. 2020. Corona struc-

- tures driven by plume–lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus[J]. *Nature Geoscience*, 13(8): 547-554.
- Guseva E N, Ivanov M A. 2019. Spatiotemporal relationships of the groove belts, coronal structures, and rift zones of Venus[J]. *Solar System Research*, 53(6): 411-422.
- Hanmer S. 2020. Tessera terrain ribbon fabrics on Venus reviewed: Could they be dyke swarms?[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103077.
- Hansen V L. 2007. LIPS on Venus[J]. *Chemical Geology*, 241(3-4): 354-374.
- Hao X-L, Li Y-L. 2018. Experimental approach to the direct interaction between the H₂O-CO₂ atmosphere and the crust on the earliest Earth: Implications for the early evolution of minerals and the proto-atmosphere[J]. *Frontiers in Earth Science*, 6: 180.
- Harvey B. 2007. Russian planetary exploration: History, development, legacy and prospects[M]. Translated by Hou J W. Beijing: China Astronautic Publishing House (in Chinese).
- Hashimoto G L, Imamura T. 2001. Elucidating the rate of volcanism on Venus: Detection of lava eruptions using near-infrared observations[J]. *Icarus*, 154(2): 239-243.
- Höink T, Lenardic A, Richards M. 2012. Depth-dependent viscosity and mantle stress amplification: implications for the role of the asthenosphere in maintaining plate tectonics[J]. *Geophysical Journal International*, 191(1): 30-41.
- Hu Z W. 2012. Mysterious planet Venus[J]. *Chinese Journal of Nature*, 34(2): 88-95 (in Chinese).
- Huang J, Yang A, Zhong S. 2013. Constraints of the topography, gravity and volcanism on Venusian mantle dynamics and generation of plate tectonics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 362: 207-214.
- Ivanov M A. 2005. Encyclopedia of Geology | SOLAR SYSTEM | Venus[J]. Elsevier: 244-264.
- Ivanov M A, Head J W. 2011. Global geological map of Venus[J]. *Planetary and Space Science*, 59(13): 1559-1600.
- Ivanov M A, Zasova L V, Gerasimov M V, et al. 2017. The nature of terrains of different types on the surface of Venus and selection of potential landing sites for a descent probe of the Venera-D mission[J]. *Solar System Research*, 51(1): 1-19.
- Jacobson S A, Rubie D C, Herlund J, et al. 2017. Formation, stratification, and mixing of the cores of Earth and Venus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 375-386.
- James P B, Zuber M T, Phillips R J. 2013. Crustal thickness and support of topography on Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 859-875.
- Jiménez-Díaz A, Ruiz J, Kirby J F, et al. 2015. Lithospheric structure of Venus from gravity and topography[J]. *Icarus*, 260: 215-231.
- Kane S R, Koppurapu R K, Domagal-Goldman S D. 2014. On the frequency of potential Venus analogs from Kepler data[J]. *The Astrophysical Journal*, 794: L5.
- Karato S, Wu P. 1993. Rheology of the upper mantle: A synthesis[J]. *Science*, 260(5109): 771-778.
- Karato S, Jung H. 1998. Water, partial melting and the origin of the seismic low velocity and high attenuation zone in the upper mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 157(3-4): 193-207.
- Kiefer W S, Hager B H. 1991. A mantle plume model for the equatorial highlands of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 96(E4): 20947-20966.
- Korenaga J. 2007. Thermal cracking and the deep hydration of oceanic lithosphere: A key to the generation of plate tectonics?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B5): B05408.
- Korenaga J. 2013. Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: Theories and observations[J]. *Annual review of earth and planetary sciences*, 41: 117-151.
- Krasnopolsky V A, Belyaev D A, Gordon I E, et al. 2013. Observations of D/H ratios in H₂O, HCl, and HF on Venus and new DCI and DF line strengths[J]. *Icarus*, 224(1): 57-65.
- Krassilnikov A S, Head J W. 2003. Novae on Venus: geology, classification, and evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E9): 5108.
- Lammer H, Zerkle A L, Gebauer S, et al. 2018. Origin and evolution of the atmospheres of early Venus, Earth and Mars[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 26(1): 1-72.
- Landis G A. 2020. Power systems for Venus surface missions: A review[J]. *Acta Astronautica*, 187: 492-497.
- Lécuyer C, Simon L, Guyot F. 2000. Comparison of carbon, nitrogen and water budgets on Venus and the Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 181(1-2): 33-40.
- Lincowski A P, Meadows V S, Crisp D, et al. 2021. Claimed detection of PH₃ in the clouds of Venus is consistent with mesospheric SO₂[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 908(2): L44.
- Luger R, Barnes R. 2015. Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs[J]. *Astrobiology*, 15(2): 119-143.
- Marcq E, Massol H, Lebrun T, et al. 2011. An atmospheric model designed for integration into coupled models of magma ocean planets[C]//EPSC-DPS Joint Meeting 2011. Nantes, France, 540.
- Nimmo F, McKenzie D. 1996. Modelling plume-related uplift, gravity and melting on Venus[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 145(1-4): 109-123.
- Nimmo F. 2002. Why does Venus lack a magnetic field?[J]. *Geology*, 30(11): 987-990.
- Richards M A, Yang W S, Baumgardner J R, et al. 2001. Role of a low-viscosity zone in stabilizing plate tectonics: Implications for comparative terrestrial planetology[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 3(7): 1-1.
- Righter K, Sutton S R, Danielson L, et al. 2016. Redox variations in the inner solar system with new constraints from vanadium XANES in spinels[J]. *American Mineralogist*, 101(9): 1928-1942.
- Righter K, Herd C D K, Boujibar A. 2020. Redox processes in early earth accretion and in terrestrial bodies[J]. *Elements: An International Magazine of Mineralogy*, (3): 161-166.
- Rozel A B, Golabek G J, Jain C, et al. 2017. Continental crust formation on early Earth controlled by intrusive magmatism[J]. *Nature*, 545(7654): 332-335.
- Salvador A, Massol H, Davaille A, et al. 2017. The relative influence of H₂O and CO₂ on the primitive surface conditions and evolution of rocky planets[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(7): 1227-1242.

- 1458-1486.
- Schaber G G, Strom R G, Moore H J, et al. 1992. Geology and distribution of impact craters on Venus: What are they telling us?[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 97(E8): 13257-13301.
- Shalygin E V, Markiewicz W J, Basilevsky A T, et al. 2015. Active volcanism on Venus in the Ganiki Chasma rift zone[J]. *Geophysical Research Letters*, 42(12): 4762-4769.
- Sleep N H, Zahnle K. 2001. Carbon dioxide cycling and implications for climate on ancient Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E1): 1373-1399.
- Smit M A, Mezger K. 2017. Earth's early O₂ cycle suppressed by primitive continents[J]. *Nature Geoscience*, 10(10): 788-792.
- Smrekar S E, Elkins-Tanton L, Leitner J J, et al. 2007. Tectonic and thermal evolution of Venus and the role of volatiles: implications for understanding the terrestrial planets[J]. *Geophysical Monograph Series* 176: 45-71.
- Smrekar S E, Stofan E R. 2007. Venus: Surface and Interior[M]//*Encyclopedia of the Solar System* (Second Edition). Academic Press, 149-168.
- Smrekar S E, Stofan E R, Mueller N, et al. 2010. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data[J]. *Science*, 328(5978): 605-608.
- Smrekar S E, Davaille A, Sotin C. 2018. Venus interior structure and dynamics[J]. *Space Science Reviews*, 214(5): 88.
- Snellen I A G, Guzman-Ramirez L, Hogerheijde M R, et al. 2020. Re-analysis of the 267 GHz ALMA observations of Venus: No statistically significant detection of phosphine[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 644: L2.
- Sossi P A, Burnham A D, Badro J, et al. 2020. Redox state of Earth's magma ocean and its Venus-like early atmosphere[J]. *Science Advances*, 6(48): eabd1387.
- Sousa-Silva C, Seager S, Ranjan S, et al. 2020. Phosphine as a biosignature gas in exoplanet atmospheres[J]. *Astrobiology*, 20(2): 235-268.
- Stern R J. 2018. The evolution of plate tectonics[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical*, 376(2132): 20170406.
- Stevenson D J. 2003. Planetary magnetic fields[J]. *Earth and planetary science letters*, 208(1-2): 1-11.
- Stewart E M, Ague J J, Ferry J M, et al. 2019. Carbonation and decarbonation reactions: Implications for planetary habitability[J]. *Journal of Earth and Planetary Materials*, 104(10): 1369-1380.
- Strom R G, Schaber G G, Dawson D D. 1994. The global resurfacing of Venus[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 99(E5): 10899-10926.
- Tarduno J A, Cottrell R D, Watkeys M K, et al. 2010. Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago[J]. *Science*, 327(5970): 1238-1240.
- Tarduno J A, Cottrell R D, Bono R K, et al. 2020. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(5): 2309-2318.
- Taylor F W, Svedhem H, Head J W. 2018. Venus: The atmosphere, climate, surface, interior and near-space environment of an Earth-like planet[J]. *Space Science Reviews*, 214(1): 1-36.
- Villanueva G L, Cordiner M, Irwin P G J, et al. 2020. No evidence of phosphine in the atmosphere of Venus from independent analyses[J]. *Nature Astronomy*, 5(7): 631-635.
- Walker J C G. 1985. Carbon dioxide on the early Earth[J]. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 16(2): 117-127.
- Way M J, Del Genio A D, Kiang N Y, et al. 2016. Was Venus the first habitable world of our solar system?[J]. *Geophysical Research Letters*, 43(16): 8376-8383.
- Way M J, Del Genio A D. 2020. Venusian habitable climate scenarios: Modeling Venus through time and applications to slowly rotating Venus-like exoplanets[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(5): e2019JE006276.
- Wei D Y, Yang A, Huang J S. 2014. The gravity field and crustal thickness of Venus[J]. *Science China Earth Sciences*, 44(5): 934-944 (in Chinese).
- Yang A, Huang J, Wei D. 2016. Separation of dynamic and isostatic components of the Venusian gravity and topography and determination of the crustal thickness of Venus[J]. *Planetary and Space Science*, 129: 24-31.
- Yang A, Xiang S, Huang J S. 2020. Recent advance in the interior structure and dynamics of Venus[J]. *Advances in Earth Science*, 35(9): 912-923 (in Chinese).
- Yang J, Boué G, Fabrycky D C, et al. 2014. Strong dependence of the inner edge of the habitable zone on planetary rotation rate[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 787(1): L2.

附中文参考文献

- Harvey B. 2007. 俄罗斯行星探测历程: 历史、发展、遗产与展望 [M]. 侯建文, 译. 北京: 中国宇航出版社.
- 胡中为. 2012. 神秘的金星[J]. *自然杂志*, 34(2): 88-95.
- 魏代云, 杨安, 黄金水. 2014. 金星的重力场与地壳厚度[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(5): 934-944.
- 杨安, 相松, 黄金水. 2020. 金星内部结构与动力学研究进展[J]. *地球科学进展*, 35(9): 912-923.