

黄金水, 相松, 杨安等. 2021. 金星的地幔对流、岩石圈演化和表面更新. 地球物理学报, 64(10):3503-3513, doi:10.6038/cjg2021P0519.

Huang J S, Xiang S, Yang A, et al. 2021. Mantle convection, lithosphere evolution and resurfacing of Venus. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(10):3503-3513, doi:10.6038/cjg2021P0519.

# 金星的地幔对流、岩石圈演化和表面更新

黄金水<sup>1,2,3</sup>, 相松<sup>1,2</sup>, 杨安<sup>4</sup>, 王永明<sup>5</sup>

1 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中心, 合肥 230026

3 中国科学技术大学蒙城地球物理野外科学观测研究站, 合肥 230026

4 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071

5 云南大学地球科学学院地球物理系, 昆明 650500

**摘要** 金星在大小、轨道半径等方面与地球非常接近,但现今的观测显示金星在大气、表面温度、重力与地形特征等方面与地球非常不同.对固体金星而言,最显著特征是有火山活动但没有活动的板块构造运动.表面平均大约 $500 \pm 200$  Ma 的年龄显示金星发生过全球性表面快速更新、重力与地形强相关.本文在简要介绍已有工作的基础上,主要介绍我们基于这些观测特征开展的金星动力学研究,包括现今地幔的对流模式、相变对表面更新的影响、地壳厚度、岩石圈演化与表面更新等研究工作和取得的初步认识.

**关键词** 金星地幔对流;金星岩石圈演化;金星表面更新;灾难性表面更新;金星岩石圈拆沉

doi:10.6038/cjg2021P0519

中图分类号 P541, P315

收稿日期 2021-07-22, 2021-08-30 收修定稿

## Mantle convection, lithosphere evolution and resurfacing of Venus

HUANG JinShui<sup>1,2,3</sup>, XIANG Song<sup>1,2</sup>, YANG An<sup>4</sup>, WANG YongMing<sup>5</sup>

1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2 CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China

3 Mengcheng National Geophysical Observatory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

4 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

5 Department of Geophysics, School of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

**Abstract** Venus is very similar to the Earth in size and orbit radius, but the current observations show that Venus is very different from the Earth in atmosphere, surface temperature and also in gravity and topographic features. For the solid part of the Venus, the most prominent characteristics include 1) there are some active volcanisms but no active plate tectonics, 2) an average surface age of  $\sim 500 \pm 200$  Ma indicates that Venus has experienced rapid global resurfacing, and 3) the gravity and the topography are strongly correlated. In this paper, we first give a brief introduction of some previous works and then we focus on our recent studies on the dynamics of Venus that associated with these observational characteristics. The main contents of these studies include the present mantle convection mode of Venus, the effect of phase transition on Venusian resurfacing, the thickness of the Venusian crust, and the lithosphere evolution and resurfacing of Venus. The

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目(42074105,41474082),中国科学院战略性先导科技专项(XDB41000000)以及中国科学院知识创新工程资助.

**第一作者简介** 黄金水,男,博士生导师,主要从事地球与行星的重力场与地幔动力学的研究工作. E-mail:jshhuang@ustc.edu.cn

preliminary results and its implications are listed in the concluding remarks.

**Keywords** Venus mantle convection; Venus lithosphere evolution; Venus resurfacing; Catastrophic resurfacing; Venus lithospheric detachment

## 0 引言

自 1962 年 12 月美国水手 2 号飞船首次成功飞过金星,迄今为止,对金星进行了 40 多次探测.美国航空航天局(NASA)1989 年发射升空的麦哲伦号是目前获取资料最详细的一次探测;欧洲航天局(ESA)2005 年发射升空的金星快车是最近一次成果丰硕的探测.今年,NASA 通过了两项金星探测计划,即 VERITAS(Venus Emissivity, Radio science, Insar, Topography, And Spectroscopy)和 DAVINCI + (Deep Atmosphere of Venus Investigation of Noble gases, Chemistry, and Imaging Plus),预定 2028—2030 年实施.尽管人类对金星的了解没有对地球

的了解那么多,但探测器(包括着陆器)传回的资料数据极大提高了我们对金星的认识(Phillips and Malin, 1984; Phillips et al., 1992; Smrekar et al., 2010).现在,我们知道,就大小、质量、组成和与太阳的距离来说,金星与地球非常接近(Schubert et al., 2001).但金星和地球不一样,其表面温度很高,没有水、没有海洋,96%的大气是温室气体二氧化碳;金星的自转速度非常慢,接近公转速度(Solomon et al., 1992; Schubert et al., 2001).金星的放射性内生热率与地球基本相当(Turcotte, 1995).在金星上也没有观测到内生磁场(Russell et al., 1980; Russell and Vaisberg, 1983; Phillips and Russell, 1987).金星和地球有关参数的对比见表 1.

表 1 金星与地球的有关参数对比

Table 1 Contrasts of some parameters of Venus and Earth

参数	轨道平均半径( $10^6$ km)	平均半径(km)	质量( $10^{24}$ kg)	密度( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	表面重力( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	表面温度( $^{\circ}\text{C}$ )	日长(地球日)	年长(地球日)	自转轴( $^{\circ}$ )	大气成分(占比%)
金星	108.2	6051.8	4.869	5240	8.87	465	243	224.7	177.4	CO <sub>2</sub> (96); N(3)
地球	149.6	6371.0	5.972	5520	9.81	0	1(23h56m)	365.25	23.5	O(21); N(78)

和地球一样,金星有高原和山区、平原以及低洼区域(Solomon et al., 1992).和地球地形海陆两分的格局不同,金星的地形主要以平原为主(图 1).金星表面布满裂谷和碰撞造山带等构造变形特征(Basilevsky and Head, 2003).这些构造特征显示金星表面记录了其发生过的挤压和伸展构造运动.金星也有大量的火山活动特征,有些可能近期发生过喷发(Smrekar, 1994; Smrekar et al., 2010).在金星表面也发现了约 10 个和地球上的夏威夷火山类似的热点构造(Stofan et al., 1995; Smrekar et al., 2010).也具有洋脊与俯冲特征(Davaille et al., 2017; Smrekar et al., 2018),但是在金星上没有发现类似地球的活动板块构造运动的特征(Solomon et al., 1992; Turcotte, 1995; Schubert et al., 2001; Basilevsky and Head, 2003).

对金星重力和地形的进一步研究发现(图 2a 和 2b),在球谐函数展开的低阶项或长波长部分,金星的导纳值(即重力与地形的比值)远高于地球;金星的重力与地形具有很强的相关性,也远远高于地球

(Wieczorek, 2007; Huang et al., 2013; 魏代云等, 2014).这一特征显示,和地球地形与地壳的均衡密切相关不同,金星地形的长波部分可能主要由其内部的动力学过程控制(Kiefer et al., 1986; Kiefer and Hager, 1991; Solomon et al., 1992; Simons et al., 1994; Arkani-Hamed, 1996; Schubert et al., 2001; Pauer et al., 2006; Huang et al., 2013).

金星探测的另一个重要成果就是发现在现今金星表面存在大量均匀分布的陨石坑(Phillips et al., 1992; Schaber et al., 1992; Basilevsky and Head, 2003).陨石坑在金星表面的随机分布以及基本没有遭到改造的现象表明,金星表面没有很古老的也没有很年轻的记录,金星表面年龄基本一致,大约  $500 \pm 200$  Ma(图 2c),这与其他类地行星都不一样(图 2c)(Schaber et al., 1992; Turcotte et al., 1999).表 2 给出部分金星与地球的地球物理与地质特征,更多特征可参考 Solomon 等(1992)、Smrekar 等(2018)和杨安等(2020)以及这些文章中的参考文献.金星表面的年龄特征表明金星表面发生过独特的更新事件.

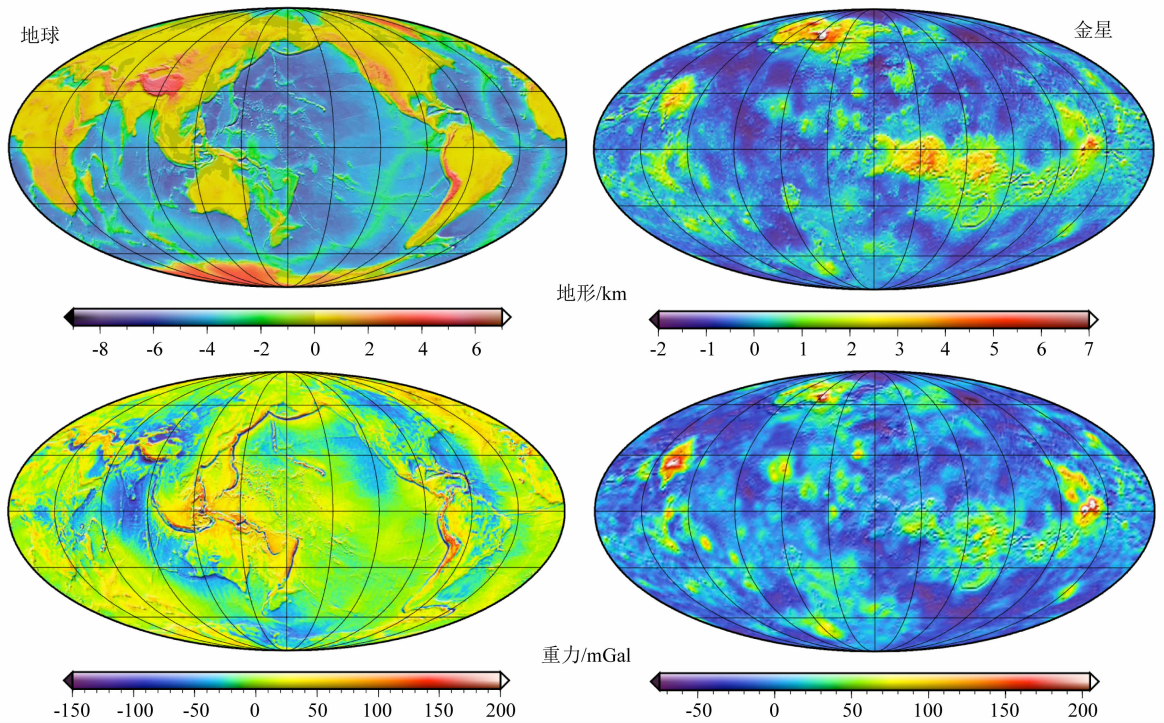


图1 地球和金星的重力与地形图(修改自 Wiczorek, 2007)

Fig. 1 The topography (upper row) and gravity (lower row) of Earth (left) and Venus (right) (modified from Wiczorek, 2007)

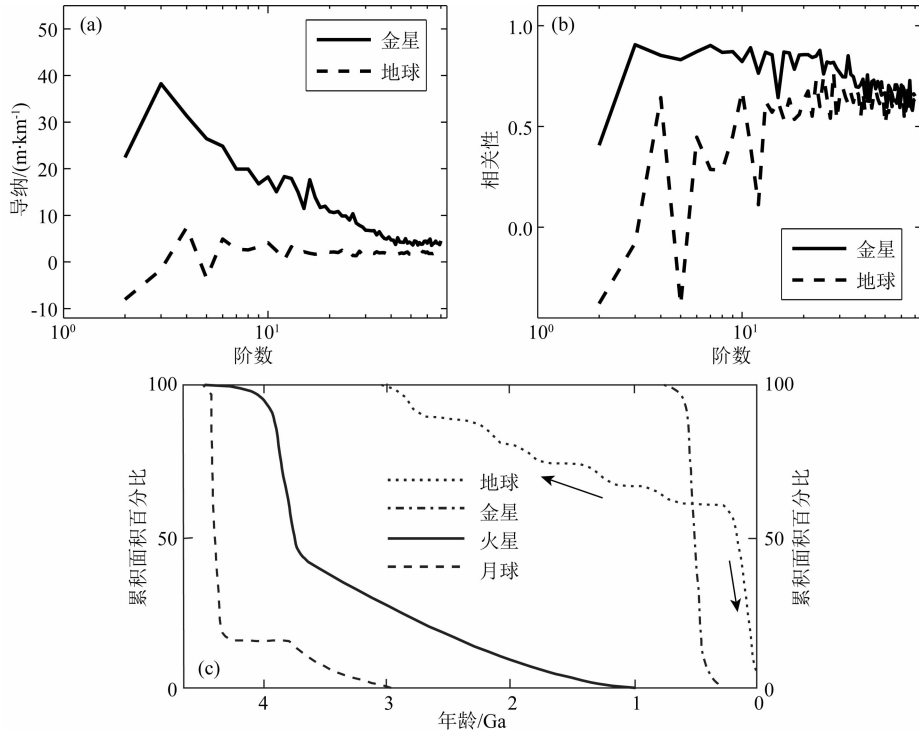


图2 地球和金星的重力场特征与表面年龄(修改自 Schubert et al., 2001; 魏代云等, 2014)

(a) 导纳, 即大地水准面地形比; (b) 重力与地形相关性; (c) 累积面积百分比, 即小于某年龄的面积与整个表面积的比。

Fig. 2 The characteristics of the gravity field and surface age for Earth and Venus

(modified from Schubert et al., 2001; Wei et al., 2014)

(a) Admittance, i. e., the ratio of geoid to topography; (b) Correlation between the gravity and topography; (c) Cumulative area in percentage, i. e., the ratio of the area that smaller than a given age to the total area.

前苏联金星着陆器得到的资料显示金星表面是玄武岩(McKenzie et al., 1992),这也从麦哲伦的雷达影像中得到证实(McKinnon et al., 1997).由此,科学家提出了许多全球性的表面更新模型.但金星的表面更新是一次性的还是周期性的、是均匀还是突发或灾难性的过程则存众多争议(Phillips et al., 1992; Schaber et al., 1992; Nimmo and Mckenzie, 1998; Turcotte et al., 1999; Hansen and Young, 2007).金星表面更新的过程和机制与金星的地幔对流模式和散热方式密切相关.对灾难性的表面更新,其更新机制的概念性模型就有许多,主要有:1)分层对流的雪崩式破坏(Steinbach and Yuen, 1992; Papuc and Davies, 2012);2)亏损地幔岩石圈的拆沉(Parmentier and Hess, 1992);3)对流模式的转变(Solomatov and Moresi, 1996);4)周期性板块构造运动(Turcotte et al., 1999)等.

表 2 金星与地球的相关地球物理与地质特征对比

Table 2 Contrasts of some geophysical and geological characteristics of Venus and Earth

地球物理地质特征量	金星	地球
地形	低洼平原为主;山最高达 11.5 km	海陆两分地形;山高达 8.8 km
重力与地形	高导纳;强相关	低导纳;低阶项弱相关甚至负相关
构造活动	有类夏威夷热点的火山活动,大约 10 个;可能存在俯冲和脊状构造;但无板块构造运动	有热点火山活动,40 多个;以洋脊和海沟为特征的板块构造运动
表面年龄	非常年轻,年龄基本一致,500±200 Ma	海洋大约介于 0~200 Ma;大陆大约介于 0~3600 Ma
磁场	无内生磁场	偶极磁场,场强 30000~70000 nT

地球动力学研究表明地幔中存在着板块模式与地幔柱模式的热对流形式(Davies, 1999),前者与板块构造运动相联系,后者则与夏威夷型(Hawaiian-type)的火山热点直接相关.夏威夷型的火山岩浆活动与起源于地幔底部边界的热柱直接相关,海洋岩石圈是板块模式地幔对流的上部边界(Davies, 1999).岩浆活动和板块构造运动是地球内部热量向外散失的主要方式.板块在洋脊生成,在海沟处俯冲进入地球内部(Davies, 1999; Turcotte and Schubert, 2002).地幔对流是地球内部热量散失的主要机制,而与板块构造运动相联系的热量散失占地幔热量散失总量的约 70%,热柱带出的热量约为 10%(Turcotte, 1995; Davies, 1999; Schubert et al., 2001; Turcotte and Schubert, 2002).缺少活动板块构造运动的金星,

内部热量是如何散失的?目前的模型可总结为两类:岩浆活动和板块构造活动.板块构造活动模式指金星具有某种形式的板块构造运动,如岩石圈的周期性大规模俯冲或拆沉(Parmentier and Hess, 1992; Turcotte et al., 1999)或板块构造运动的突然停止(Solomatov and Moresi, 1996),这类模式也伴随岩浆活动,但岩浆活动不起主导作用.岩浆活动模式指岩石圈基本不动,大规模的岩浆喷发将热量从金星内部带出.最早对岩浆活动模式进行数值模拟分析的是 Steinbach 和 Yuen(1992),他们认为 660 km 相变可使金星地幔对流从分层对流演化到全地幔对流从而造成大规模岩浆喷发.Papuc 和 Davies(2012)研究显示,660 km 处玄武岩密度的变化也可造成周期性的分层对流,而分层对流的破坏可造成大规模的岩浆活动.

金星为什么没有活动的板块构造运动?为什么金星的重力和地形如此高度相关?金星地壳有多厚?全球表面更新的过程、成因和机制又是什么?没有活动板块构造的金星,内部热量是如何散失的?这些问题自先锋号金星探测器传回金星表面图像以来就一直一直是科学家们思考的问题,如今,对这些问题的认识取得进展,但仍有待进一步的研究(Schubert et al., 2001; Smrekar et al., 2018; 杨安等, 2020).下面主要介绍我们针对这些问题开展的金星动力学研究,包括现今金星地幔的对流模式、相变对金星表面更新的影响、金星地壳的厚度、金星岩石圈演化与散热等研究工作和取得的相关认识.

## 1 金星地幔的对流模式

冰后回弹和重力场等地球物理研究显示,地球地幔的黏性结构存在分层特征,即高黏性的岩石圈、低黏性的软流圈和中等黏性的下地幔(图 3a 中模型 2,绿色曲线)(Schubert et al., 2001).但 Kiefer 和 Hager(1991)的基于单一地幔热柱的动力学模型研究显示,热柱作用是造成当今金星重力和地形特征的主要动力学机制,且金星不存在类似地球的软流圈.我们采用三维金星全球地幔对流模型,根据金星表面的重力、地形和岩浆活动特征,探索了各种地幔黏性结构下金星地幔的对流模式(图 3)(Huang et al., 2013).

计算结果显示:1)如果金星地幔存在类地球的软流圈,即高黏性岩石圈下的地幔存在软弱层(图 3 中绿色线条表征的模型 2),则模型的重力与地形特征与地球类似,特别是在低阶项上,重力与地形负相

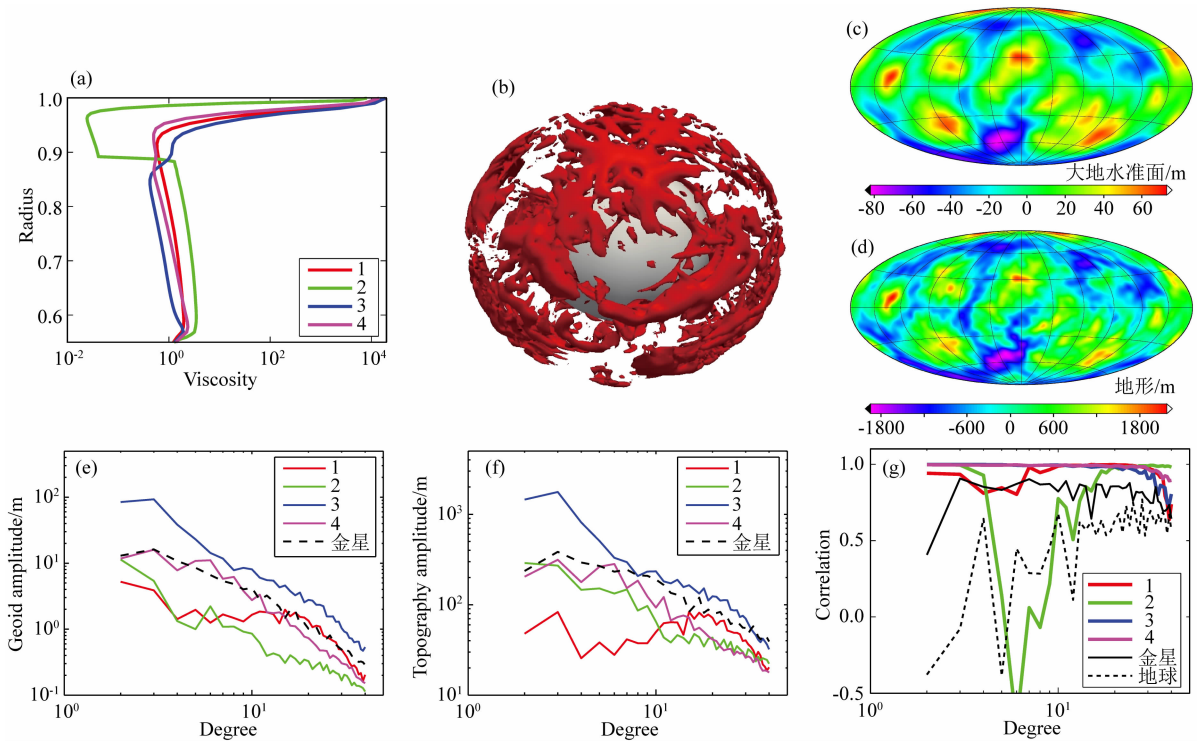


图3 当今金星地幔对流的数值模拟结果

(a) 不同模型的黏性; (b) 模型4的等温面显示的地幔上升流; (c) 模型4的大地水准面高; (d) 模型4的动力地形; (e) 不同模型大地水准面球谐展开阶系数; (f) 不同模型地形球谐展开阶系数; (g) 不同模型的大地水准面与地形相关性. 图中1—4代表不同黏性结构的模型, 分别与Huang等(2013)中的1、4、9和15相对应.

Fig. 3 Numerical results about the present Venusian mantle convection

(a) Viscosity structures of different models; (b) The isotherm of model 4 showing the pattern of mantle upwellings; (c) The geoid of model 4; (d) The dynamic topography of model 4; (e) and (f) are the degree coefficients of the spherical harmonic expansions of geoid and topography for different models, respectively; (g) The correlations of geoid and topography for different models. The number 1—4 denotes numerical models with different viscosity structures, which correspond to models 1, 4, 9 and 15 in Huang et al. (2013), respectively.

关, 这与金星重力与地形特征完全不同(图3g); 2) 根据Kiefer和Hager(1991)的结果, 假定金星岩石圈下的地幔黏性基本均匀(图3中红色线条表征的模型1), 在不考虑相变作用的情况下, 金星重力与地形的相关性得到改善, 即重力与地形强相关(图3g). 但重力与地形的低阶项强度明显偏小, 特别是地形, 这与观测明显不符(图3e和3f). 低阶项偏小, 意味着地幔短波特征明显. 从地幔上升流的个数计算来看, 也确实如此. 计算显示, 这类模型的热柱个数明显偏多, 与金星地幔的大约10个热柱的数量也不符合. 3) 地球地幔的660 km的尖晶石到钙钛矿相变可以抑制地球地幔对流的短波成分. 在金星, 这个吸热相变的作用类似. 计算结果显示, 与金星上的现有观测(地形、重力和热点分布)基本一致的模型的参数应取: 吸热相变Clapeyron斜率 $-3.5 \text{ MPa/K}$ 和地幔黏度 $2 \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (图3).

我们的结果显示, 单一板块下的常黏性地幔对

流可产生高度相关的重力与地形值, 但低阶项明显偏小, 对流结构波长太小. 软流圈弱层的存在可增强地幔的长波长对流结构, 但重力与地形及其相关性与金星不一致. 相变在金星地幔对流中对抑制短波成分具有重要作用. 根据我们的计算, 满足金星的岩浆活动、重力和地形特征的地幔对流模型不存在类似地球软流圈的弱层(Huang et al., 2013). 在Boussinesq近似下, 对流地幔产生上下两个边界层, 中心的温度基本一致(Schubert et al., 2001). 与温度相关的蠕变特性在上部边界产生一个强的岩石圈. 地震探测显示地球岩石圈下存在一个弱的软流圈(Schubert et al., 2001). 尽管对地球软流圈形成机理仍存争议, 一个普遍的共识是软流圈由于部分熔融而存在熔体(Schubert et al., 2001; Debayle et al., 2020), 熔体的存在导致横波速度减小、衰减效应增强, 黏性减小. 尽管目前对软流圈水的来源和具体水含量仍存争议, 但研究显示水对软流圈熔体的



形成具有重要促进作用(Hirth and Kohlstedt, 1996; Mierdel et al., 2007; Karato, 2012). Höink 等(2012)的研究显示,地球的软流圈对产生和维持地球的板块构造运动起着重要作用,前人的结果和我们的计算显示,金星不存在类似地球软流圈的弱层(Kiefer and Hager, 1991; Huang et al., 2013). 一个重要的推测就是由于金星地幔缺水(Kiefer and Hager, 1991; Hirth and Kohlstedt, 1996; Nimmo and Mckenzie, 1998),才导致没有软流圈. 水等挥发性气体在板块构造运动中起着重要作用(Smrekar and Sotin, 2012; Huang et al., 2013). 这或许意味着当今金星之所以没有板块构造运动,可能就是因为金星地幔缺水导致岩石圈下没有软流圈存在.

## 2 吸热相变对金星地幔对流的影响与表面更新

尽管关于金星表面均匀更新的想法一直存在(Hansen and Young, 2007),但表面年龄分布如此集中(图 2c),使得大多数科学家认为全球灾难性的表面更新更符合观测(Nimmo and Mckenzie, 1998; Turcotte et al., 1999). 自 Steinbach 和 Yuen(1992)在二维地幔对流模型得到相变可以造成上下地幔分层对流以及存在分层对流到全地幔对流的转换的模型以来,相变造成的分层对流的雪崩式破坏被认为是金星表面灾难性更新的机制. 我们前述研究(Huang et al., 2013)也显示,相变在金星地幔对流中具有

重要影响. 为此,我们计算了大量的三维模型来探讨相变与表面更新的联系(Yang et al., 2015). 图 4 显示了其中一个模型的结果.

计算结果显示,受初始条件影响,在 1.1 Ga 左右出现一次较大范围的上下地幔物质交换(图 4e 和 4f). 在这个过程中,一开始底部热流增加,地幔对流速度增大,表面热流则略微减小. 随着速度场和底部热流趋于稳定,表面热流则出现较大增加,并逐步趋于稳定. 但总的来说,三维模型在经过这一阶段的短暂的大量的上下地幔物质交换后,就基本处于稳定状态(图 4),而没有出现类似二维模型的重复“雪崩”循环过程(Steinbach and Yuen, 1992).

对短暂的大量的上下地幔物质交换后的稳定过程的分析表明(Yang et al., 2015),相变的 Clapeyron 斜率无论对地幔对流结构还是对上下地幔物质交换都具有显著影响. Clapeyron 斜率的增加,将增加地幔对流的波长或减小地幔热柱的个数,并增强对上下地幔物质交换的阻碍作用. 在其他参数不变的情况下,瑞利数的增大,有增强相变作用的效果,但这种效果并不会明显的反映在相变对上下地幔物质交换的影响上. 瑞利数( $Ra$ )的增加也增大地幔对流的波长或减小地幔热柱的个数,但对界面上下物质交换的影响主要反映在对流强度与  $Ra$  的关系上,即  $Ra$  增加,对流强度增加,上下物质交换增强. 而从吸热相变面的归一化的质量流来看,其变化并不是很大,这不同于二维模型中瑞利数的增加将很大程度上增强上下地幔物质交换的阻碍作用的结论. 吸热

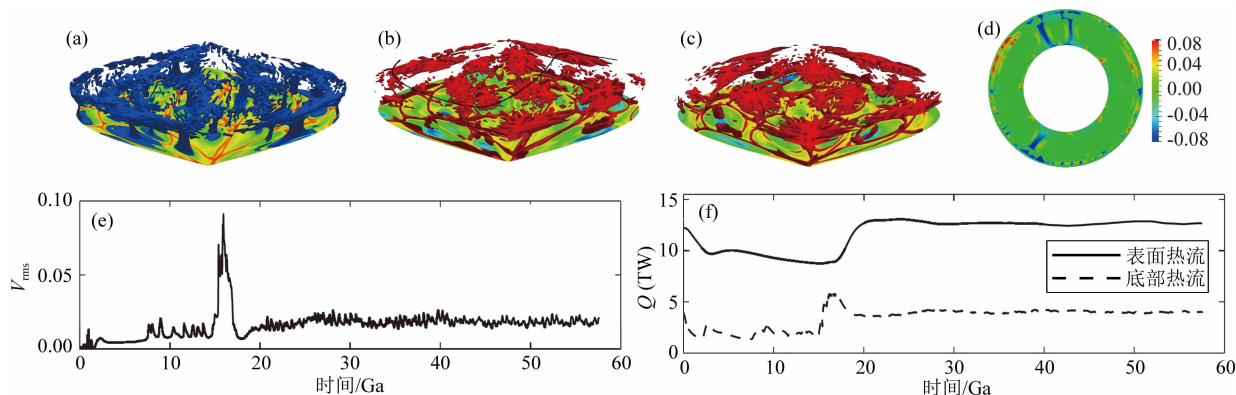


图 4 相变对金星地幔对流影响的数值模拟. 根据 Yang 等(2015)修改

模型在稳定期间的下降流(a)和上升流(b,c), (b)和(c)时间间隔 1.0 Ga. (d)图(b)中细黑线表示的剖面残余温度图. 模型均方根速度(e)和表面与底部热流(f)随时间变化曲线. 图(a)—(c)中底部叠加的是核幔边界的温度场.

Fig. 4 Numerical simulation about the effects of phase transition on Venusian mantle convection.

Modified from Yang et al. (2015)

The downwellings (a) and upwellings (b,c) at steady state of the simulation. The time interval between(b) and (c) is 1.0 Ga. (d) Cross-section of the residual temperature for thin black line in (b). (e) and (f) are time evolution of the root mean square velocity and the surface and bottom heat flux, respectively. Also included in the bottom of (a)—(c) is the temperature field of the core mantle boundary.

相变深度的影响与瑞利数类似,相变深度的增加略微减小了热柱个数,但对相变面上下物质交换影响不大.虽然与已有研究一致,尖晶石到钙钛矿相变能阻碍该界面上下物质交换,但这种阻碍作用导致的物质堆积在三维模型中主要发生在局部区域.全球范围的上下地幔物质交换量随时间变化不大,地幔对流结构相对稳定(图4),这与二维模型中存在周期性的大量物质交换明显不同.因此,如果灾难性表面更新需要二维模型显示的那样在全球范围内从分层对流到全地幔对流的转换(Steinbach and Yuen, 1992),那么三维模型的结果显示吸热相变不足以产生导致金星出现灾难性表面更新的上下地幔的大量物质交换.

分层对流的雪崩式破坏似乎难以满足灾难性表面更新的要求(Steinbach and Yuen, 1992; Yang et al., 2015).其他相关模型也有一些初步探索,但仍需进一步的深入研究(Smrekar et al., 2018; 杨安等, 2020).如地幔对流模式的转变(Solomatov and Moresi, 1996)和岩石圈拆沉(Parmentier and Hess, 1992; Turcotte et al., 1999).地幔对流模式的转变主要是指金星早期存在板块构造运动,但在大约500 Ma前突然停止(Solomatov and Moresi, 1996),这种概念性模型需要导致岩石圈构造运动突然转变的机制(Weller and Kiefer, 2020),气候变化曾作为引起这种突然变化的诱因(Lenardic et al., 2008),这种探索主要受限于对流地幔中产生板块构造运动以及俯冲初始化机制的探索.岩石圈拆沉则涉及地幔岩石圈的重力不稳定性(Parmentier and Hess, 1992; Turcotte et al., 1999).这类模型如果能够发生,可以解决金星表面更新,但其发生的机制与散热效率仍存争议(Smrekar et al., 2018; Uppalapati et al., 2020).后面还将回到这个问题进行讨论.

### 3 金星的地壳厚度

玄武岩金星地壳或许是表面更新时部分熔融的直接产物,它对估算金星表面更新速率、散热效率具有重要影响.由于没有地震观测,金星的地壳的厚度只有通过重力与地形的分析与研究来确定(Wieczorek, 2007).利用重力与地形计算地壳厚度的基本方法可归为两类:1)假定地壳处于均衡,计算地壳的补偿深度或山根的厚度(Smrekar and Phillips, 1991; 魏代云等, 2014);2)假定去掉地形质量影响后的布格重力异常是壳幔边界起伏所导致,利用布

格重力异常反演该界面起伏(Wieczorek, 2007; 魏代云等, 2014).如果地幔动力学过程对地形和重力场产生显著影响,那上述两种方法计算的重力场都会明显存在偏差,因为动力学效应会导致均衡状态发生改变、在布格重力异常中包含很强的来源于地幔的信息(Smrekar and Phillips, 1991; 魏代云等, 2014).我们知道,金星的重力和地形强相关的一个重要原因在于金星内部的动力学过程或地幔对流的作用(Kiefer et al., 1986; Kiefer and Hager, 1991; Huang et al., 2013).因此利用重力与地形来精确确定地壳厚度,需要有效剔除来自于地幔深部的动力学效应导致的重力与地形信息(Pauer et al., 2006; Huang et al., 2013).为此,我们提出了两种在重力和地形中扣除地球动力学效应的方法.其一是根据对重力与地形的分析,认为低阶长波项是深部地幔的贡献,对金星,假定2~40阶是动力学效应(魏代云等, 2014);另外一种方法就是通过金星地幔对流的数值模拟,分析并建立金星的动力学模型的重力和地形的关系,并基于此扣除动力学效应(Yang et al., 2016).两种方法结果相近,图5给出基于第二种方法计算的地壳厚度的结果.

从图5中可以看出,没有扣除动力学效应,直接根据金星的重力与地形计算的地壳厚度值与重力或地形(图1)相关性非常高,这与以前计算的结果类似(Wieczorek, 2007).扣除动力学影响后,地壳厚度的变化出现了很大的变化(魏代云等, 2014; Yang et al., 2016).这表明,动力学效应对地壳厚度计算具有重要影响.

新的计算结果显示,金星地壳厚度主要在20~65 km之间变化,厚度大于50 km区域主要是Ishtar Terra、Ovda Regio和Thetis Regio三个地区,这些山区的均衡效应较为突出.一种可能的解释是,这些地区是残余的古老陆地.Beta, Themis, Dione, Eistla, Bell和Lada等山地的地壳厚度受动力学效应影响较大,扣除动力学影响后计算的厚度明显变小,地壳较薄,与地形的相关性减弱.一种可能的解释是这些山区是内部热柱作用的结果(魏代云等, 2014; Yang et al., 2016).

### 4 岩石圈的周期性拆沉与金星散热

我们在研究地球克拉通岩石圈演化时发现一个有趣的现象,这就是非牛顿流体特性下的克拉通岩石圈会发生幕式拆沉(Wang et al., 2015),且拆沉

过程不仅是底部岩石圈部分,而是整个岩石圈.这说明重力不稳定可以导致岩石圈整体拆沉.为此,我们利用二维地幔对流模型进行了大量的计算分析以探讨岩石圈整体拆沉的物理过程和机制(相松和黄金水, 2020).图 6 显示其中一个模型的计算结果.

计算结果显示,采用应力相关的黏性,地幔岩石

圈会发生周期性拆沉(图 6),与 Turcotte 等(1999)推测的周期性俯冲类似,周期大约 700~800 Ma.对纯热对流模型,岩石圈拆沉过程的持续时间很短,5~10 Ma 左右.这与地球克拉通岩石圈稳定性模型计算结果基本一致(Wang et al., 2015).拆沉过程中,岩石圈全部更新,这个过程可能和金星表面的灾

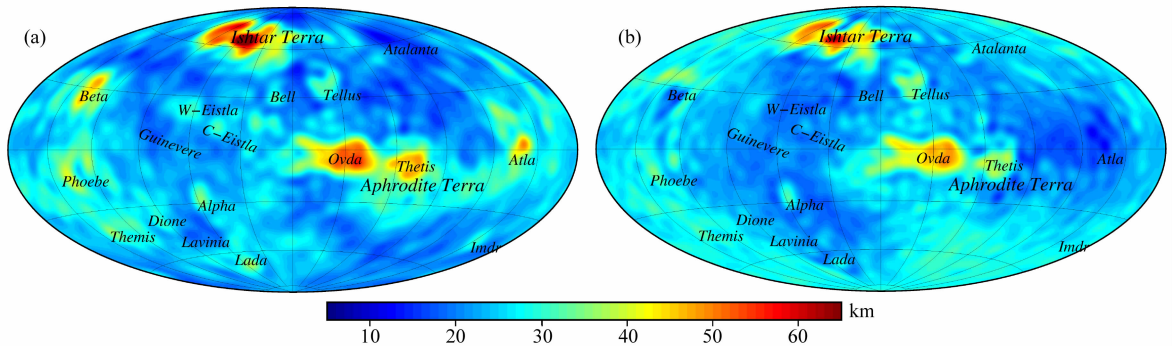


图 5 金星地壳厚度. 修改自 Yang 等(2016)

(a) 直接依据重力和地形计算的地壳厚度; (b) 扣除动力学影响后计算的地壳厚度.

Fig. 5 Crustal thickness of the Venus. Modified from Yang et al. (2016)

(a) Computed crustal thickness directly from gravity and topography; (b) Computed crustal thickness after removing the dynamical effect.

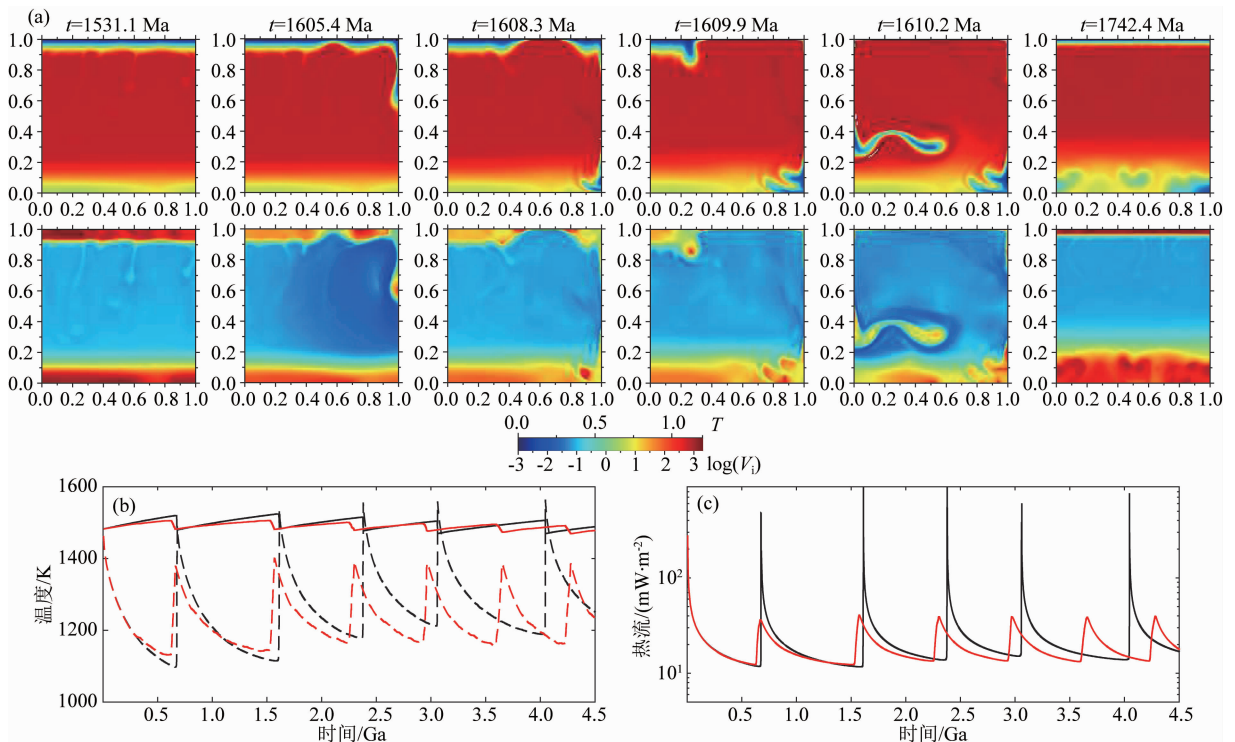


图 6 岩石圈拆沉的数值模拟. 根据相松和黄金水(2020)修改

(a) 温度(上)和黏性(下)时间演化图; (b) 模型下部(0~0.9; 实线)和上部(0.9~1.0; 虚线)平均温度时间变化;

(c) 表面热流时间演化. 图(b)和(c)中黑色和红色分别代表自由边界和固定边界条件的算例.

Fig. 6 Numerical simulation on lithosphere delamination. Modified from Xiang and Huang (2020)

(a) Snapshots for the time evolution of the temperature field (upper row) and viscosity fields (lower row); (b) The time evolution of the average temperature in the lower part of the model (0~0.9, solid line) and in the upper part of the model (0.9~1.0, dash line); (c) Time evolution of the surface heat flux. In (b) and (c), the black and red colors denote models with free-slip boundary condition and no-slip boundary condition, respectively.



难性更新过程相一致。

如果这种周期性拆沉代表金星表面更新的过程,另外一个问题就显现出来:这个过程能将金星内部的热能散失掉吗?换句话说,这个过程的散热效率有多高?在岩石圈冷却逐步稳定的过程中,金星岩石圈的散热效率不高(Turcotte, 1995)。这样,拆沉过程的散热效率就显得非常重要。Wang 等(2015)讨论地球上克拉通岩石圈的拆沉过程中发现克拉通

岩石圈的幕式拆沉过程会适当延长拆沉时间(图 7)。Wang 等(2016)在计算分析拆沉过程的热流时发现拆沉过程的热流是稳定时期的大约 3~5 倍(图 7c)。不过,总体来说,由于拆沉时间不长,拆沉过程的总体热能释放仍然不能满足金星散热要求,岩浆喷发可能占到金星总散热量的 30%左右(相松和黄金水, 2020)。将二维结果外推,可能存在误差,后续我们将在三维模型中探讨岩石圈拆沉过程以及其散热效率。

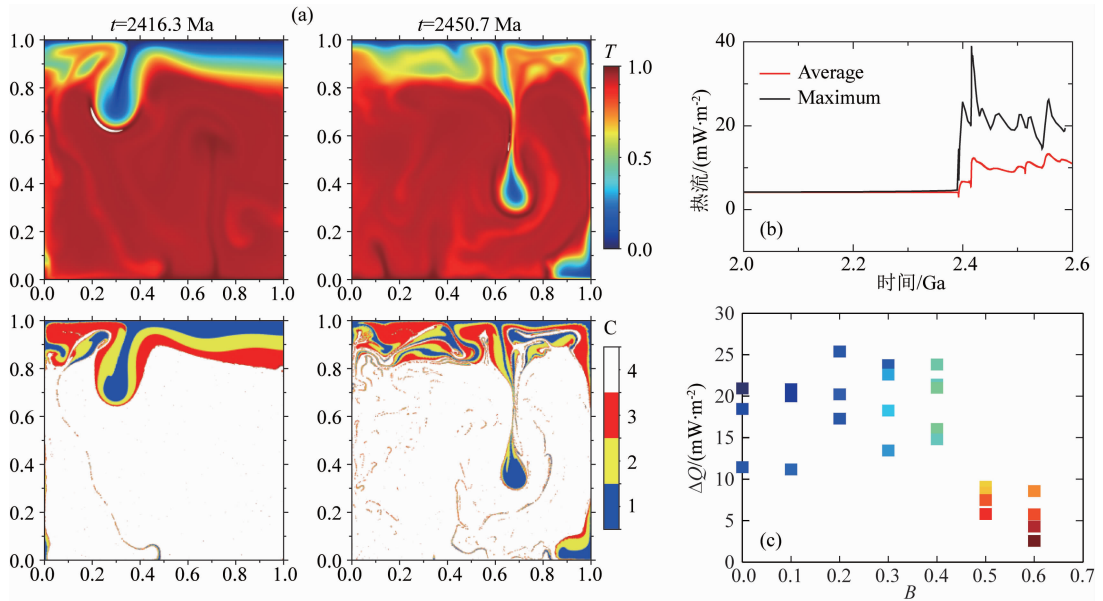


图 7 热化学岩石圈拆沉的数值模拟。根据 Wang et al., 2015, 2016 修改

(a) 温度(上)和组分(下)演化在两个时间步的快照; (b) 岩石圈失稳前后表面热流的时间变化;

(c) 失稳时的热流和稳定期热流的差与浮力数  $B$  的关系。

Fig. 7 Numerical simulations on delamination of thermo-chemical lithosphere. Modified from Wang et al. (2015, 2016)

(a) Snapshots of the temperature field (upper row) and compositional field (lower row) in two different steps; (b) Time evolution of the surface heat flux just before and after the destabilizing of the lithosphere; (c) The relationship of the heat flux difference between the destabilized stage and stable stage with the buoyancy number  $B$ .

## 6 结语

本文介绍了我们近年来针对金星演化过程的动力学问题开展的几个方面的研究工作。我们的研究结果显示:

(1)金星的重力和地形在低阶项高度相关与其当今的地幔对流模式密切相关。金星的重力和地形的低阶项受控于其地幔动力学过程,金星目前处于岩石圈下常黏性地幔对流模式,没有类似于地球地幔的软流圈,该对流模式使得金星的低阶重力和地形高度相关;

(2)由于现今金星不存在类地球软流圈结构,从而失去促进板块构造运动的重要因素,使得金星目

前没有活动的板块构造;

(3)相变对促进金星地幔对流的长波结构具有重要影响,但三维数值模拟结果显示,吸热相变对上下地幔物质的阻碍作用难以导致全球灾难性的表面更新;

(4)在缺少地震观测的情况下,由于金星重力和地形的低阶项主要来源于地幔动力学过程,计算金星地壳需要扣除这部分动力学效应;

(5)金星岩石圈可以发生周期约为 700~800 Ma 的拆沉过程,拆沉过程可以造成岩石圈的整体更新,且持续时间不长,这显示,全球表面更新的过程可能是灾难性的;

(6)二维数值模拟显示岩石圈的 700~800 Ma 的周期性拆沉散热效率没有地球板块构造运动的散

热效率高,这或许意味着岩浆喷发在金星上的散热作用比在地球上大。后续我们将在三维模型中进一步验证相关结果。

**致谢** 感谢纪念王仁先生百年诞辰组委会的邀请,就我们在地球动力学研究方面的工作做简单介绍。王仁先生是中国地球动力学定量研究的为数不多的先驱之一,他在地球应力场、地震危险区预测等方面做出了开拓性的贡献。如今地球和行星动力学已是国际地球科学研究的重要方向和了解地球与行星地质地球物理现象及其机制的重要手段。我们选择介绍近期在金星动力学方面开展的一点研究工作,表达对王仁先生的缅怀和纪念。感谢三位匿名审稿人,其意见和建议使稿件得到改进。

## References

- Arkani-Hamed J. 1996. Analysis and interpretation of the surface topography and gravitational potential of Venus. *J. Geophys. Res.*, 101(E2): 4711-4724.
- Basilevsky A T, Head J W. 2003. The surface of Venus. *Rep. Prog. Phys.*, 66(10): 1699-1734.
- Davaille A, Smrekar S E, Tomlinson S. 2017. Experimental and observational evidence for plume-induced subduction on Venus. *Nat. Geosci.*, 10(5): 349-355.
- Davies G F. 1999. *Dynamic Earth*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Debayle E, Bodin T, Durand S, et al. 2020. Seismic evidence for partial melt below tectonic plates. *Nature*, 586(7830): 555-559.
- Hansen V L, Young D A. 2007. Venus's evolution: A synthesis. // Cloos M, Carlson W D, Gilbert M C, et al eds. *Convergent Margin Terranes and Associated Regions: A Tribute to W. G. Ernst*. Geological Society of America Special Paper 419: 255-273.
- Hirth G, Kohlstedt D L. 1996. Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144(1-2): 93-108.
- 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. *Geophys. J. Int.*, 191(1): 30-41, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05621.x.
- Huang J S, Yang A, Zhong S J. 2013. Constraints of the topography, gravity and volcanism on Venusian mantle dynamics and generation of plate tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 362: 207-214.
- Karato S I. 2012. On the origin of the asthenosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 321-322: 95-103.
- Kiefer W S, Richards M A, Hager B H, et al. 1986. A dynamic model of Venus's gravity field. *Geophys. Res. Lett.*, 13(1): 14-17.
- Kiefer W S, Hager B H. 1991. A mantle plume model for the equatorial highlands of Venus. *J. Geophys. Res.*, 96(E4): 20947-20966.
- Lenardic A, Jellinek A M, Moresi L N. 2008. A climate induced transition in the tectonic style of a terrestrial planet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 271(1-4): 34-42.
- McKenzie D, Ford P G, Johnson C, et al. 1992. Features on Venus generated by plate boundary processes. *J. Geophys. Res.*, 97(E8): 13533-13544.
- McKinnon W B, Zahnle K A, Ivanov B A, et al. 1997. Cratering on Venus: modeling and observations. // Bougher S W, Hunten D M, Phillips R J eds. *Venus II*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 969-1014.
- Mierdel K, Keppler H, Smyth J R, et al. 2007. Water solubility in aluminous orthopyroxene and the origin of Earth's asthenosphere. *Science*, 315(5810): 364-368.
- Nimmo F, Mckenzie D. 1998. Volcanism and tectonics on Venus. *Annu. Rev. Earth Planet.*, 26: 23-51.
- Papuc A M, Davies G F. 2012. Transient mantle layering and the episodic behaviour of Venus due to the 'basalt barrier' mechanism. *Icarus*, 217(2): 499-509.
- Parmentier E M, Hess P C. 1992. Chemical differentiation of a convecting planetary interior: Consequences for a one plate planet such as Venus. *Geophys. Res. Lett.*, 19(20): 2015-2018.
- Pauer M, Fleming K, Čadež O. 2006. Modeling the dynamic component of the geoid and topography of Venus. *J. Geophys. Res.*, 111(E11): E11012.
- Phillips R J, Malin M C. 1984. Tectonics of Venus. *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 12: 411-443.
- Phillips R J, Russell C T. 1987. Upper limit on the intrinsic magnetic field of Venus. *J. Geophys. Res.*, 92(A3): 2253-2263.
- Phillips R J, Raubertas R F, Arvidson R E, et al. 1992. Impact craters and Venus resurfacing history. *J. Geophys. Res.*, 97(E10): 15923-15948.
- Russell C T, Elphic R C, Luhmann J G, et al. 1980. On the search for an intrinsic magnetic field at Venus. // *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1897-1906.
- Russell C T, Vaisberg O. 1983. The interaction of the solar wind with Venus. // Hunten M ed. *Venus*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 873-940.
- 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. Geophys. Res.*, 97(E8): 13257-13301.
- Schubert G, Turcotte D L, Olsen P. 2001. *Mantle Convection in the Earth and Planets*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Simons M, Hager B H, Solomon S C. 1994. Global variations in the geoid/topography admittance of Venus. *Science*, 264(5160): 798-803.
- Smrekar S E, Phillips R J. 1991. Venusian highlands: geoid to topography ratios and their implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 107(3-4): 582-597.

- Smrekar S E. 1994. Evidence for active hotspots on Venus from analysis of Magellan gravity data. *Icarus*, 112(1): 2-26.
- Smrekar S E, Stofan E R, Mueller N, et al. 2010. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. *Science*, 328 (5978): 605-608.
- Smrekar S E, Sotin C. 2012. Constraints on mantle plumes on Venus: implications for volatile history. *Icarus*, 217(2): 510-523.
- Smrekar S E, Davaille A, Sotin C. 2018. Venus interior structure and dynamics. *Space Sci. Rev.*, 214(5): 88.
- Solomatov V S, Moresi L N. 1996. Stagnant lid convection on Venus. *J. Geophys. Res.*, 101(E2): 4737-4753.
- Solomon S C, Smrekar S E, Bindschadler D L, et al. 1992. Venus tectonics: an overview of Magellan observations. *J. Geophys. Res.*, 97(E8): 13199-13255.
- Steinbach V, Yuen D A. 1992. The effects of multiple phase transitions on Venusian mantle convection. *Geophys. Res. Lett.*, 19(22): 2243-2246.
- Stofan E R, Smrekar S E, Bindschadler D L, et al. 1995. Large topographic rises on Venus: implications for mantle upwelling. *J. Geophys. Res.*, 100(E11): 23317-23327.
- Turcotte D L. 1995. How does Venus lose heat?. *J. Geophys. Res.*, 100(E8): 16931-16940.
- Turcotte D L, Morein G, Roberts D, et al. 1999. Catastrophic resurfacing and episodic subduction on Venus. *Icarus*, 139(1): 49-54.
- Turcotte D L, Schubert G. 2002. *Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uppalapati S, Rolf T, Cramer F, et al. 2020. Dynamics of lithospheric overturns and implications for Venus's surface. *J. Geophys. Res.*, 125(11): e2019JE006258.
- Wang Y M, Huang J S, Zhong S J. 2015. Episodic and multistaged gravitational instability of cratonic lithosphere and its implications for reactivation of the North China Craton. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 16(3): 815-833.
- Wang Y M, Huang J S, Zhong S J, et al. 2016. Heat flux and topography constraints on thermochemical structure below North China Craton regions and implications for evolution of cratonic lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 121(4): 3081-3098.
- Wei D Y, Yang A, Huang J S. 2014. The gravity field and crustal thickness of Venus. *Sci. China Earth Sci.*, 57(9): 2025-2035.
- Weller M B, Kiefer W S. 2020. The physics of changing tectonic regimes: implications for the temporal evolution of mantle convection and the thermal history of Venus. *J. Geophys. Res.*, 125(1): e2019JE005960.
- Wieczorek M A. 2007. Gravity and topography of the terrestrial planets. // Schubert G ed. *Treatise on Geophysics*. London: Elsevier, 165-206.
- Yang A, Weng H H, Huang J S. 2015. Numerical studies of the effects of phase transitions on Venusian mantle convection. *Sci. China Earth Sci.*, 58(10): 1883-1894.
- Yang A, Huang J S, Wei D Y. 2016. Separation of dynamic and isostatic components of the Venusian gravity and topography and determination of the crustal thickness of Venus. *Planet. Space Sci.*, 129: 24-31.

## 附中文参考文献

- 魏代云, 杨安, 黄金水. 2014. 金星的重力场与地壳厚度. *中国科学: 地球科学*, 44(5): 934-944.
- 相松, 黄金水. 2020. 金星的岩石圈幕式拆沉及其散热模式. *中国地球科学联合学术年会 2020*: 1136.
- 杨安, 相松, 黄金水. 2020. 金星内部结构与动力学研究进展. *地球科学进展*, 35(9): 912-923.

(本文编辑 何燕)