

李陶, 赖德鑫. 2027. 金星大气超级旋转[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 58(1): 49-64. doi: [10.19975/j.dqyxx.2025-056](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-056).

Li T, Lai D X. 2027. Venus's atmospheric superrotation[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 58(1): 49-64 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2025-056](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-056).

金星大气超级旋转

李 陶, 赖德鑫*

中国科学技术大学 深空探测全国重点实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

摘要: 金星是距离地球最近的行星, 自东向西缓慢自转, 但其稠密大气整体呈快速的向西运动. 在约 65~70 km 高度的云顶, 纬向风速可达 100 m/s, 几乎是行星表面运动速度的 50~60 倍, 这一独特而神秘的现象被称为“大气超级旋转”. 自 20 世纪 60 年代以来, 超级旋转的时空分布特征及其角动量平衡机制一直是行星大气动力学中的核心难题, 相关研究持续至今已逾 60 年. 本文将回顾超级旋转研究的发展历程, 并重点介绍近年来的研究进展. 在垂直结构上, 超级旋转自行星表面随高度增强, 于云顶附近达到最大值, 随后逐渐减弱至约 110 km 的中间层顶, 并过渡至昼夜环流主导区域. 在纬向分布上, 云顶风速在南北纬 50°之间保持近似恒定的极值, 向高纬度逐渐减弱. 普遍认为, 超级旋转的维持依赖于大气环流与大尺度涡动 (如潮汐、行星波等) 共同作用下的角动量输运平衡. 近年的观测与模拟结果表明, 云顶超级旋转的涡动贡献主要由潮汐驱动, 而中低云层 (50~60 km) 则由行星波主导. 此外, 随着长期观测的积累, 超级旋转被发现存在多时间尺度的变化, 从几天、数百天到可能与太阳活动相关的近 12 年周期. 最新模拟研究表明, 云层中约 200 天的准周期变化主要由行星波与环流之间角动量输运的动态平衡所调制. 总体而言, 超级旋转研究正逐步从“维持机制”向“时空演变机制”拓展, 并从大尺度过程延伸至重力波等小尺度过程. 随着数值模式的发展与观测任务的推进, 未来有望在气候学框架下更全面地理解金星大气超级旋转的形成与演化.

关键词: 金星大气; 大气动力学; 大气超级旋转; 大气波动; 角动量平衡

doi: [10.19975/j.dqyxx.2025-056](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2025-056)

中图分类号: P433, P185

文献标识码: A

Venus's atmospheric superrotation

Li Tao, Lai Dexin*

National Key Laboratory of Deep Space Exploration/School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

Abstract: Venus, the planet closest to Earth, has a slowly retrograde rotation in the opposite direction to Earth's, and it has a dense atmosphere that exhibits rapid westward motion. At the cloud top, around 65–70 km in altitude, zonal wind speeds reach up to 100 m/s—about 50–60 times faster than the surface rotation. This striking and enigmatic phenomenon is known as atmospheric superrotation. Since the 1960s, the spatiotemporal characteristics and angular momentum balance mechanisms of superrotation have remained one of the central challenges in planetary atmospheric dynamics, with sustained investigation for over six decades. This review summarizes the historical development of superrotation studies and highlights recent advances. In terms of the vertical structure, superrotation intensifies from the surface upward, peaking near the cloud top, then gradually weakens toward the

收稿日期: 2025-12-05; 录用日期: 2026-02-09

Received Date: 2025-12-05; Accepted Date: 2026-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42130203); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (C 类) (42508018); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (WK2080250235)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42130203), the Young Scientists Fund-Type C of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42508018), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. WK2080250235).

第一作者: 李陶 (1974-), 男, 教授, 主要从事地球与行星大气动力学研究. E-mail: litao@ustc.edu.cn

*通信作者: 赖德鑫 (1997-), 男, 博士后, 主要从事金星大气动力学研究. E-mail: laidexin@mail.ustc.edu.cn



mesopause at around 110 km, where the circulation is dominated by the diurnal cycle. In the latitudinal distribution, the cloud-top winds maintain nearly constant at its maximum values between 50°N and 50°S before decreasing toward the poles. Superrotation is generally understood to be maintained by angular momentum transport through the combined effects of atmospheric circulation and large-scale eddies (such as tides and planetary waves). Recent observations and modeling results indicate that thermal tides primarily drive eddy contributions at the cloud top. In contrast, those in the middle and lower cloud layers (50–60 km) are mainly controlled by planetary waves. Furthermore, long-term observations have revealed multiple timescales of variability in superrotation, ranging from a few days to several hundred days, and possibly up to ~12 years linked to the solar cycle. State-of-the-art modeling studies suggest that the dynamic balance of angular momentum transport between planetary waves and the general circulation largely regulates the quasi-200-day variability in the cloud region. Overall, research on superrotation has been shifting from a focus on its basic maintenance mechanisms to its spatiotemporal variability, and from large-scale processes to smaller-scale phenomena such as gravity waves. With advances in numerical models and future observational missions, a more comprehensive understanding of the origin and evolution of Venusian atmospheric superrotation within a climatic framework is anticipated.

Keywords: Venus atmosphere; atmospheric dynamics; atmospheric superrotation; atmospheric waves; angular momentum balance

0 引 言

金星是距离地球最近的类地行星, 其质量和体积与地球相近, 但其自转方向与地球相反且极为缓慢(周期约 243 地球天). 在太空时代以前, 人们曾认为金星是地球的“姊妹星”, 可能拥有比地球更温暖的湿热大气(Bengtsson et al., 2012). 然而, 随着深空探测和地面观测技术的发展, 人类逐渐认识到金星大气与地球截然不同: 其大气质量约为地球的 92 倍, 极为厚重且干燥, 行星表面温度高达约 460°C, 形成了极端恶劣的不宜居环境(Hall, 2019).

尽管大气厚重, 金星大气整体却相对于缓慢的自东向西行星自转呈现快速的西向运动, 这一现象被称为大气“超级旋转”(superrotation). 自 20 世纪 60 年代苏联 Venera 4-7 号探测器(Dollfus, 1975; Schubert, 1983)以及地基天文观测(Traub and Carleton, 1975)首次揭示这一现象以来, 超级旋转已成为金星大气动力学研究的核心议题, 并在过去 60 余年间得到广泛的理论与数值模拟探讨. 然而, 其产生与维持机制迄今仍存在诸多未解之谜, 例如角动量输运的平衡过程及其时空演变特征(Read and Lebonnois, 2018). 本文将回顾超级旋转研究的发展历程, 并重点介绍随着 Venus Express 任务(Svedhem et al., 2009)和 Akatsuki 任务(Nakamura et al., 2016)的顺利开展, 科学界对金星大气超级旋转的最新认识.

从行星科学的更广视角来看, 潮汐锁定行星普

遍存在大气超级旋转现象(Hu and Ding, 2013; Imamura et al., 2020; Read and Lebonnois, 2018; Showman and Polvani, 2010). 在金星上, 其显著特征是云层自东向西的高速运动. 观测表明, 在云顶约 65~70 km 的高度, 南北纬 50°之间的纬向风速普遍超过 100 m/s(Gonçalves et al., 2020a; Horinouchi et al., 2018; Khatuntsev et al., 2022b), 远高于赤道行星表面仅约 1.81 m/s 的自转速度. 在云顶赤道及 35°~45°中纬度区域, 还可能存在风速高出 5~10 m/s 的急流(Gonçalves et al., 2020a; Horinouchi et al., 2018). 在中低层云(约 48~60 km)中, 赤道风速 70~90 m/s, 并随纬度向两极递减, 伴随可能存在的较弱中纬度急流(Fukuya et al., 2021; Horinouchi et al., 2017; Peralta et al., 2018).

由于浓厚云层遮蔽了深层大气辐射, 目前云层以下的纬向风数据仍十分有限, 仅有早期 Pioneer Venus、Vega 1/2 及 Venera 8-9、13-14 等任务的原位和下降探测结果提供了部分风廓线及行星表面风信息(Gierasch et al., 1997; Schubert, 1983). 在 10 km 以下纬向风速较弱(<2 m/s), 并自 10 km 起随高度逐渐增强直至云顶(Counselman et al., 1980). 受限于观测手段, 深层大气纬向风的水平分布尚缺乏系统统计.

随着 21 世纪 Venus Express 与 Akatsuki 任务的持续观测, 金星大气超级旋转的时空变化特征逐渐得以揭示, 其变化时间尺度从几天的短期扰动延伸至与约 11 年太阳活动周期相关的长期振荡(Hori-

nouchi et al., 2017; Hueso et al., 2015; Khatuntsev et al., 2013, 2022b; Kouyama et al., 2013). 与此同时, 金星全大气环流模式 (general circulation model, GCM) 的发展为理解超级旋转的形成与维持机制提供了重要理论支撑. 近年来, Venus PCM (Lai et al., 2024, 2025a; Lebonnois et al., 2016)、AFES-Venus (Takagi et al., 2022, 2023) 及 AORI GCM (Yamamoto et al., 2023, 2024) 等模式在再现金星大气超级旋转方面取得显著进展, 并逐步揭示了其时空变化可能受多尺度波动与辐射过程耦合的影响. 这些结果表明, 金星大气的角动量输运与能量平衡过程存在显著的时间可变性, 暗示其可能受行星波动、潮汐及热驱动过程的共同调制.

因此, 结合最新的轨道观测与数值模拟成果, 系统分析金星超级旋转的基本形态、维持机制及其长期变化规律, 对于揭示金星大气环流的动力学本质及其类地行星气候系统的普适规律, 具有重要的科学意义.

1 金星大气探测历史

在人类开展金星深空探测之前, 地基望远镜观测已为认识这颗天空中最明亮的行星奠定了基础. 1610 年, Galileo Galilei 首次测量金星的相位特征 (Drake, 1984), 确认其呈现新月状盘面并符合球

面几何, 从而证明金星会经过太阳背后, 进一步验证了 Copernicus 的日心体系. 1761 年, 在金星凌日过程中, 俄罗斯科学家 Mikhail Lomonosov 通过观测弧状光环首次推断出金星存在大气层 (Marov, 2004). 1956 年, 射电天文学发现金星异常强烈的毫米波辐射, 其对应亮温超过 300°C (Mayer et al., 1958). 然而在太阳常数仅为地球 2 倍且大部分入射辐射被高反照率云层反射的情况下, 如此极端的高温难以用常规加热机制解释. 当时学界在“来自电离层电子的非热辐射”与“强温室效应”之间争论不休. 正是在这一背景下, 金星深空探测时代随即拉开序幕.

金星大气的深空探测始于 1961 年苏联发射但未成功的 Sputnik 7 号探测器. 此后, 全球已开展约 40 次金星探测任务, 其中 23 次成功取得了全部或主要科学目标, 涵盖飞掠、环绕及原位探测等多种方式 (图 1) (Hall, 2019).

1962 年, 美国的 Mariner 2 号首次成功飞掠金星, 确认其表面处于极端的高温高压环境 (Sonett, 1963); 1966 年, 苏联的 Venera 3 号在失联前成功向金星大气坠入; 1967 年 Venera 4 号则以下降探测器的形式首次直接测量了金星大气参数 (Reese and Swan, 1968); 1970 年与 1975 年的 Venera 7 号和 Venera 9 号则首次从金星表面传回实测数据与图像 (Avdukevsky et al., 1971; Keldysh, 1977). 与此

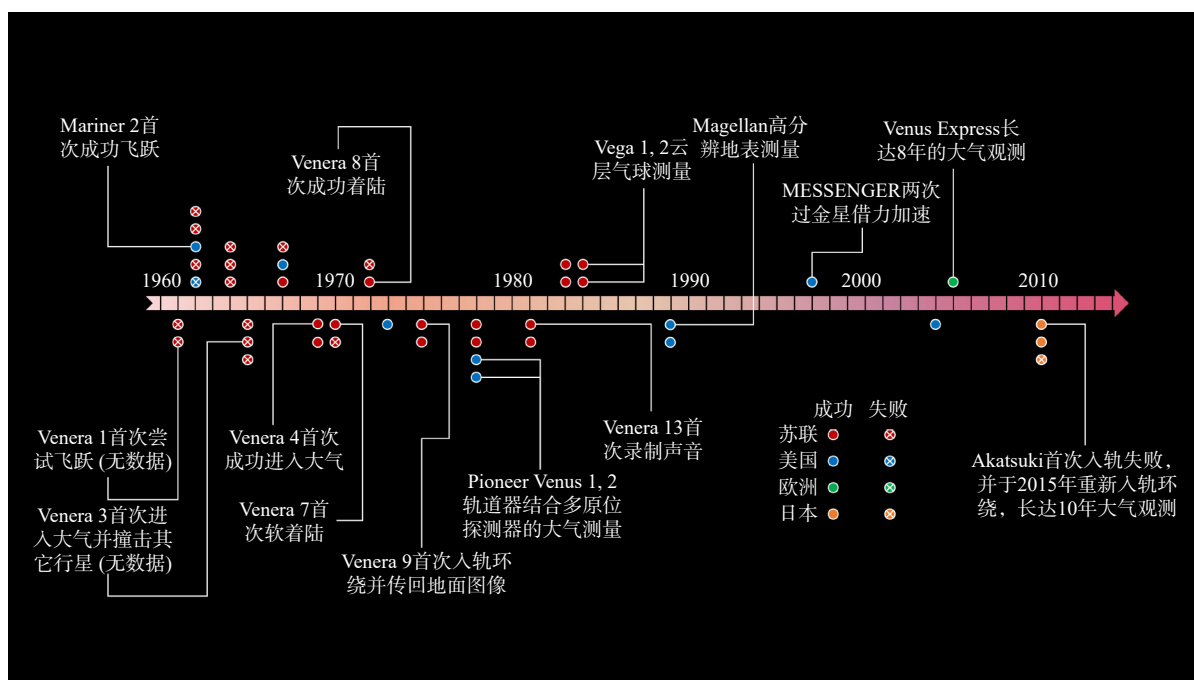


图 1 金星深空探测任务示意图 (包括利用重力助推前往其他行星的飞掠任务). 资料参考 Hall (2019) 以及 Taylor (2014)

Fig. 1 Schematic overview of Venus deep-space exploration missions, including gravity-assist flyby missions en route to other planets. Sources from Hall (2019) and Taylor (2014)

同时, 通过 Venera 4-7 号探测器的多普勒实验及地基观测, 人们首次发现了金星云层快速超级旋转的现象 (Dollfus, 1975; Traub and Carleton, 1975)。

1978 年, 美国的 Pioneer Venus 1 号与 2 号任务对金星大气、行星表面和空间环境进行了系统探测, 并释放了五个大气探测器 (Colin, 1997)。随后, 1984 年苏联的 Vega 1 号与 2 号任务在云层中布放气球, 对风场进行了直接原位测量 (Bertaux et al., 1996)。同一时期, 美国的 Magellan 号在 1989—1994 年间完成了金星表面的高分辨率雷达成像, 极大推进了对金星地质与地形特征的认知 (Head et al., 1992)。

进入 21 世纪, 欧洲航天局的 Venus Express 号 (2005—2014 年) 通过多光谱成像和无线电掩星长期观测, 显著提升了对金星中上层大气结构与环流的认知 (Svedhem et al., 2009)。其成果包括揭示南极区域高度动态的双极涡结构, 以及发现 2006—2014 年间金星大气超级旋转呈持续增强的长期趋势 (Hueso et al., 2015; Luz et al., 2011)。

随后, 日本宇宙航空研究开发机构的 Akatsuki 号 (2015—2024 年) 利用多波段相机和无线电掩星手段持续监测金星大气, 并在紫外至红外波段获取了丰富的数据集 (Nakamura et al., 2016)。得益于这两项任务, 人类积累了近二十年的连续金星大气观测资料, 为研究其极涡与冷圈结构、超级旋转的时空变化及维持机制提供了前所未有的支撑。

2 超级旋转的基本形态与维持原理

大气的超级旋转指大气某处运动速度大于行星固体表面自转角速度的现象。在太阳系中, 典型案例为金星和土卫六。一般而言, 低纬区域半径较大, 相同速度下的大气角动量更高, 因此超级旋转的大气通常表现为赤道及低纬地区的平均风速显著增强。通过比较大气角动量与行星固体表面自转角动量的超出程度, 可以定量表征超级旋转的强弱。Read (1986) 提出了全球超级旋转指数 S_m 和局地超级旋转指数 s 来表征行星整体与局地的大气超级旋转:

$$s = \frac{m}{\Omega a^2} - 1$$

$$S_m = \frac{\iiint \rho m dV}{\iiint \rho \Omega a^2 \cos^2 \phi dV} - 1 \quad (1)$$

其中, 在球坐标下, 绝对角动量 $m = a \cos \phi (\Omega a \cos \phi + u)$ 由纬向风速 u 、纬度 ϕ 、行星自转角速度 Ω 和行星半径 a 定义, dV 是大气单位体积, ρ 为空气密度。地球和火星的全球超旋转指数通常在 10^{-2} 量级, 局地指数在 10^{-2} 至 10^{-1} ; 而金星和土卫六的全球指数分别可达约 7 和 2, 其中金星云顶局地指数甚至可达 50~60 (Read and Lebonnois, 2018)。因此, 科学界常以云顶风速约为行星表面速度的 50~60 倍来直观描述金星大气的超级旋转特征。需要指出的是, 尽管地球平流层赤道存在准两年振荡 (QBO), 其风速相对于行星表面可相差约 $\pm 10 \sim 20$ m/s, 但由于地球本身自转速度高达约 465 m/s, 其局地超级旋转指数仍然很小, 不具备典型超级旋转的动力特征。

在金星上, 大气超级旋转主要分布于热层以下约 0~90 km 的高度范围, 并在 90~110 km 逐渐过渡到由太阳辐射主导的向阳面-背阳面 (SS-AS) 环流, 即典型的昼夜环流区域 (Sánchez-Lavega et al., 2017; Sornig et al., 2008)。在云层以下 (0~10 km), 纬向风速接近 0 m/s; 而自 10 km 起随高度逐渐增强, 在 10~60 km 间增至约 60~80 m/s。于 60~70 km 的高云层区域, 风速进一步增至 100 m/s 以上, 并在云顶附近达到最大值 (Counselman et al., 1980)。

云层以下的直接观测较为有限, 主要依赖苏联与美国探测任务中的气球和入坠探测器所获得的少量风廓线, 因此难以系统刻画其纬向分布特征。相较之下, 云层风场的研究主要基于轨道器的紫外和红外波段成像云追踪反演 (Gorinov et al., 2021; Horinouchi et al., 2018; Khatuntsev et al., 2013; Peralta et al., 2019) 以及地面望远镜多普勒光谱技术反演 (Gonçalves et al., 2020b), 这些结果显示, 云层超级旋转结构具有显著的高度与纬度依赖性: 在中低云层 (50~60 km), 赤道附近常出现不稳定的急流, 风速可达约 85 m/s (Horinouchi et al., 2017); 在高云层区域 60~70 km, 赤道区域以及南北纬 45° 区域会出现明显的急流特征 (速度可达 ~120 m/s)。在高云层 (60~70 km), 赤道与南北纬 45° 区域均可出现明显急流, 速度可达约 120 m/s。因此, 在高云层区域, 南北纬 45° 以内的纬向风通常超过 100 m/s, 而在更高纬度随纬度递减; 在中低云层则呈现随纬度增加而逐渐减弱的趋势 (如图 2 所示)。云层以上的纬向风主要依赖热成风方程, 通过光谱仪或无线电掩星提供的温度剖

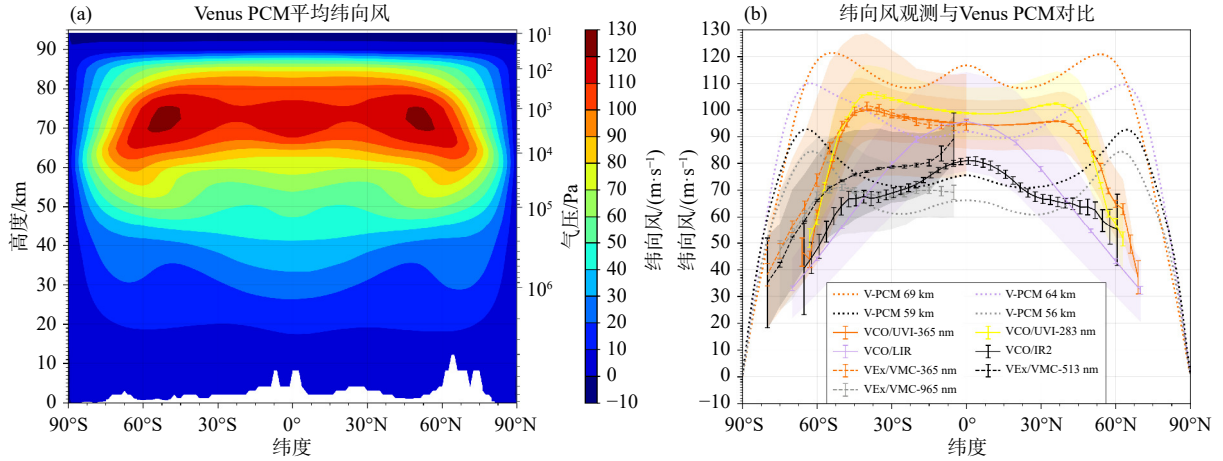


图 2 金星大气背景纬向风分布。(a) Venus PCM 模拟的金星时间与纬向平均纬向风；(b) Venus PCM 模拟结果与不同观测资料的对比。点线表示 Venus PCM 在 69 km（橙色）、64 km（薰衣草色）、59 km（黑色）与 56 km（灰色）的背景纬向风，实线表示从 Akatsuki/UVI-365 nm（橙色，约 70 km）、Akatsuki/UVI-283 nm（黄色，约 70 km）、Akatsuki/LIR（薰衣草色，约 65 km）与 Akatsuki/IR2（黑色，约 57 km）观测得到的平均纬向风，虚线表示从 Venus Express/VMC-513 nm（黑色，约 60 km）与 Venus Express/VMC-965 nm（灰色，约 55 km）观测得到的平均纬向风。误差棒表示 99.6% 置信度范围，阴影表示标准差。模式数据来源：Lai 等（2025a）；观测数据来源：Horinouchi 等（2017, 2018）、Peralta 等（2018）、Khatuntsev 等（2017, 2022b）、Lai 等（2025a）

Fig. 2 Zonal-mean background zonal winds in the atmosphere of Venus. (a) Time- and zonal-mean zonal winds simulated by the Venus PCM; (b) Comparison between Venus PCM simulations and various observations. Dashed lines indicate the background zonal winds in Venus PCM at 69 km (orange), 64 km (lavender), 59 km (black), and 56 km (gray). Solid lines represent the zonal-mean zonal winds derived from Akatsuki/UVI-365 nm (orange, ~70 km), Akatsuki/UVI-283 nm (yellow, ~70 km), Akatsuki/LIR (lavender, ~65 km), and Akatsuki/IR2 (black, ~57 km) observations. Dotted lines show the zonal-mean zonal winds from Venus Express/VMC-513 nm (black, ~60 km) and Venus Express/VMC-965 nm (gray, ~55 km). Error bars indicate the 99.6% confidence interval, and shaded areas represent the standard deviation. Model data are from Lai et al. (2025a). Observational data are from Horinouchi et al. (2017, 2018), Peralta et al. (2018), Khatuntsev et al. (2017, 2022b), and Lai et al. (2025a)

面进行反演。然而，由于热成风方程所基于的气转平衡（cyclotrophic balance）在赤道、高纬以及弱超级旋转区域（如 90 km 以上）适用性有限，反演结果主要揭示了云顶中纬度急流向上延伸至约 85 km 并随高度逐步减弱的结构（Mendonça et al., 2012; Piccialli et al., 2012）。

关于平均态超级旋转的维持机制，相关理论已发展数十年。考虑在二维轴对称、稳定流体中，若闭合曲线 C 内部存在一个角动量 M 的极大值 M_0 ，对角动量形式的大气动量方程沿曲线积分可得：

$$\oint_C \mathbf{M} \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dl = \oint_C \nu \nabla \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} dl \quad (2)$$

式中， $\mathbf{V}$ 表示风场， $\mathbf{n}$ 为垂直于曲线 C 的法向单位向量， dl 表示 C 上的单位曲线线段， ν 为摩擦力系数。由于 C 内围绕 M_0 的梯度应满足 $\nu \nabla \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} < 0$ ，而在 C 内部没有源或汇的情况下，考虑质量守恒，式（2）左边应等于 0。因此，除了在大气下边界层与行星表面存在摩擦力交换外，轴对称环流在稳态下无法维持角动量极大值点，也就无法形成大气超级旋转，该理论即 Hide 理论（Hide, 1969）。基于此，Gierasch（1975）、Rossow 和 Williams（1979）提出了两

种可能的金星大气超级旋转角动量平衡的方案，即经典 Gierasch-Rossow-Williams（GRW）情形与非经典 GRW 情形。这两种方案的大气环流结构是一致的：由赤道-极区加热差驱动的 Hadley 环流，通过其上升支将与行星表面摩擦交换的角动量输送至中层大气，并在中层通过向极输运将角动量传递至高纬度地区（见图 3）。然而，中层 Hadley 环流的向极输运会导致赤道角动量亏损，需要额外机制加以补偿。经典 GRW 情形认为，这一补偿来自水平涡动（eddy）的耗散过程产生的向赤道输运，从而平衡 Hadley 环流的向极输运；而非经典 GRW 情形则认为，主要维持机制是涡动的垂直耗散，通过垂直输运在中层大气赤道区域保持足够高的角动量。

近年来的观测显示，金星的平均经向环流并非 GRW 方案设想的单圈大尺度环流直接从行星表面向上输送角动量，而更可能表现为云层上下的多圈垂直叠加结构（Gorinov et al., 2021）。这一特征在多个金星大气环流模式（GCM）中都存在（Lai et al., 2024; Lee et al., 2007; Mendonça and Read, 2016; Sugimoto et al., 2019），主要是源于金星厚重云层及相关吸收物对太阳辐射的垂直吸收分布高度

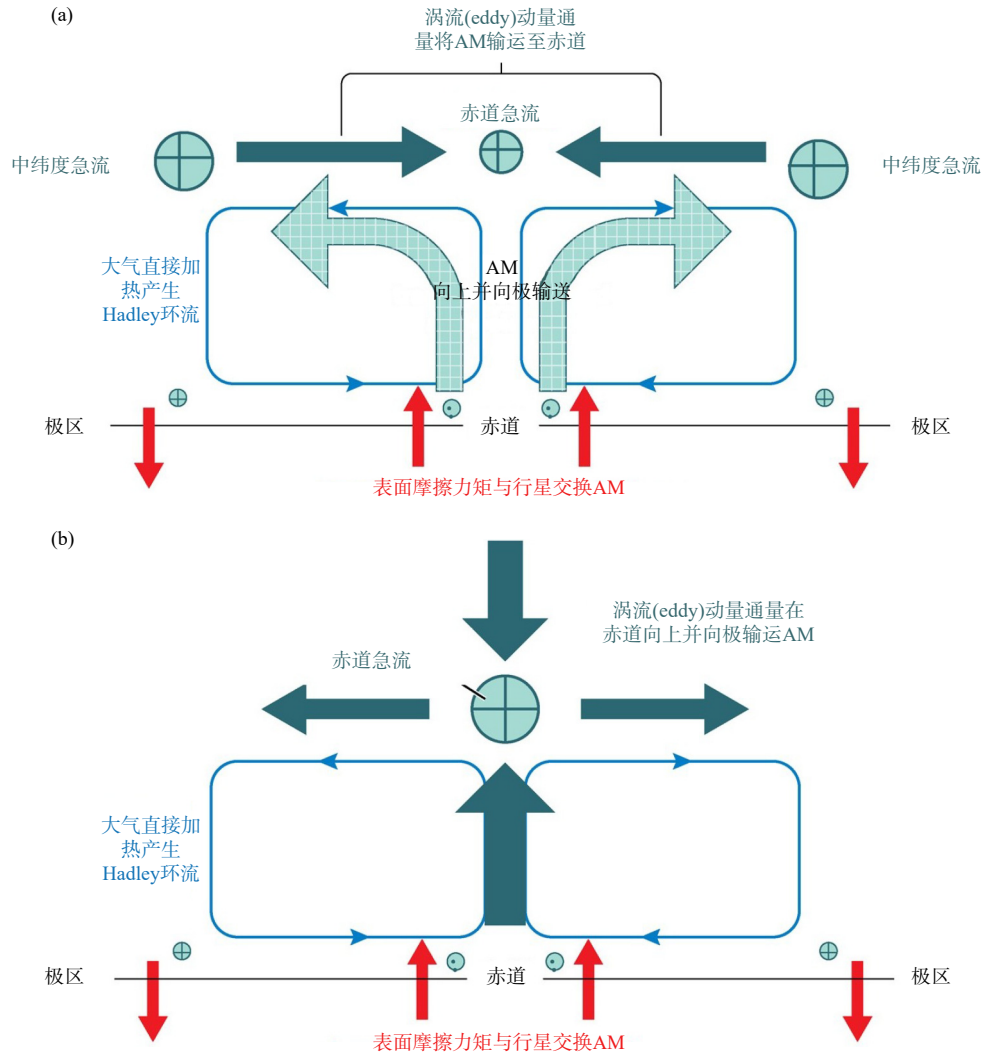


图 3 示意图说明了大气超级旋转的主要维持机制。(a) 经典的 Gierasch-Rossow-Williams 情景；(b) 非经典的替代情景，其中角动量 (AM) 沿垂直方向出现上梯度通量 (引自 Read and Lebonnois, 2018)

Fig. 3 Schematic diagram illustrating the main features of (a) the classical Gierasch-Rossow-Williams scenario and (b) a non-classical alternative scenario for atmospheric superrotation, in which upgradient fluxes of angular momentum (AM) occur in the vertical (from Read and Lebonnois, 2018)

不均 (Horinouchi et al., 2020; Moroz et al., 1985). 尽管不同 GCM 中采用的辐射传输方案和简化各异, 但在 90 km 以下的经向环流大致可以分为 3 个环流的垂直叠加 (Lai et al., 2024; Mendonça and Read, 2016; Sugimoto et al., 2019): 在约 50 km 以上存在一个从赤道向极区输送质量的云层环流单元, 而在约 50 km 以下的低层大气以及近行星表面层各存在一个赤道扩展到极区的环流单元 (图 4). 云层附近经向环流结构在多波段云追踪风场反演中也得到了一定验证 (Gorinov et al., 2021).

用于平衡经向环流角动量运输的另一关键机制是涡动, 在大气中通常以波动和湍流的形式存在. 在金星上, 主要的涡动来源包括大气热潮汐波 (Kouyama et al., 2019)、行星波 (Lai and Li, 2023)、重力波 (Silva et al., 2021, 2024) 以及云层对流

(Jessup et al., 2020). 热潮汐波由强烈昼夜辐射差异驱动, 其水平尺度接近行星尺度, 能够进行显著的纬向与垂直角动量运输; 行星波主要包括 Kelvin 波和 Rossby 波, 受行星自转与纬向剪切约束, 沿纬向传播, 并通过涡动动量通量加速或减速激发与传播区域; 由对流或地形等小尺度扰动激发的重力波, 其特征是向上传播并在破碎或耗散高度处沉积动量, 从而对中高层大气的角动量分布产生重要影响. 受限于探测手段, 涡动研究主要集中在云层及其以上区域. 以往研究表明, 行星尺度的热潮汐、Kelvin 波和 Rossby 波是抵消经向环流向极输运并维持云顶超级旋转的主要动力来源 (Sánchez-Lavega et al., 2017). Akatsuki 的观测进一步显示, 潮汐的向赤道输运与垂直输运能够在云顶有效平衡经向环流的减速作用 (Fukuya et al., 2021; Hori-

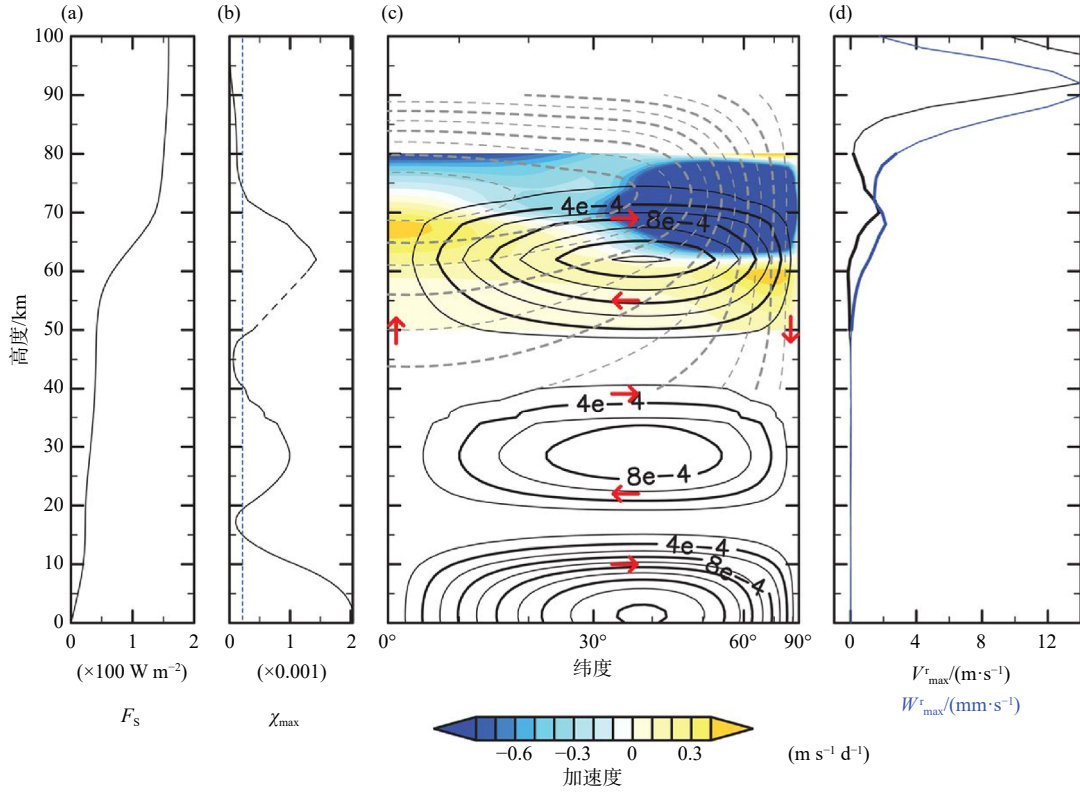


图 4 由太阳辐射加热及理想化纬向角动量 (AM) 平流加速共同决定的经向环流的理想化数值模拟结果. (a) 全球平均向下太阳辐射通量 F_s . (b) 在纬度 $\varphi_{\max}=38.2^\circ$ 条件下, 由太阳辐射加热计算得到的质量流函数 χ ; 虚线表示插值结果, 蓝色点线表示 74 km 高度处的取值. (c) 质量流函数 χ 的半球结构 (黑色等值线, 红色箭头示意流动方向); 40~90 km 高度范围内的理想化角动量 M (灰色虚线); 以及 50~80 km 高度范围内的纬向平流加速项 $-(a \cos \varphi)^{-1} V^r \cdot \nabla M$ (彩色阴影). (d) 在 $\varphi_{\max}$ 处的残余环流经向分量 V^r (黑线) 以及赤道处的残余环流垂直分量 W^r (蓝线). 加粗曲线表示 50~80 km 高度范围内的数值 (引自 Horinouchi et al., 2020)

Fig. 4 Idealized model calculation of the meridional circulation derived from solar heating and the advective acceleration of idealized zonal angular momentum. (a) Global-mean downward solar flux (F_s). (b) The mass stream function χ derived from the solar heating at $\varphi_{\max}=38.2^\circ$. The dashed line indicates interpolation and the blue dotted line indicates the value at 74 km. (c) Hemispheric structure of χ (black contours; flow directions are indicated schematically by red arrows); idealized M between 40 and 90 km (gray dashed contours); and advective zonal acceleration $-(a \cos \varphi)^{-1} V^r \cdot \nabla M$ between 50 and 80 km (color shading). (d) V^r at $\varphi_{\max}$ (black line) and W^r at the equator (blue line). Thicker lines highlight values between 50 and 80 km (from Horinouchi et al., 2020)

nouchi et al., 2020). 然而, 对于整个云层而言, 涡动如何与经向环流共同建立角动量平衡以及各潮汐分量的相对贡献仍有待明确. 此外, 长期观测还显示云层超级旋转可能存在从数天到十多年尺度的周期性振荡 (Horinouchi et al., 2017; Khatuntsev et al., 2022a; Kouyama et al., 2013), 其成因尚不清楚, 需要进一步研究.

3 行星尺度波动与超级旋转长期变化机制

在第 2 节中已提到, 金星高云层中潮汐输运与经向环流之间的角动量平衡已获得一定的观测支持 (Fukuya et al., 2021; Horinouchi et al., 2020; Lebon-

nois, 2020), 但具体的潮汐分量如何贡献输运以及低云层区域的超级旋转角动量平衡机制仍不明确. 为进一步探讨这些问题, Lai 等 (2025a) 利用 Venus Express 和 Akatsuki 长达 16 年的无线电掩星观测解析了金星 50~90 km 的潮汐结构, 并结合 Venus PCM 金星气候模式对潮汐特性进行了对比研究. 结果表明, 全日潮汐在金星高云层角动量输运中可能发挥主导作用.

如图 5 所示, 无线电掩星资料揭示了金星 50~90 km 中层大气的潮汐结构, 其中 60 km 上在不同纬度均表现出显著的全日潮与半日潮特征, 与 Venus PCM 模拟结果高度一致. 高纬度区域受观测点经向漂移和经度分辨率降低影响, 潮汐结构较不规则. 60 km 以下由于大气静力稳定度较低, 潮汐振幅迅速减弱, 现有观测仍不足以确认其结构.

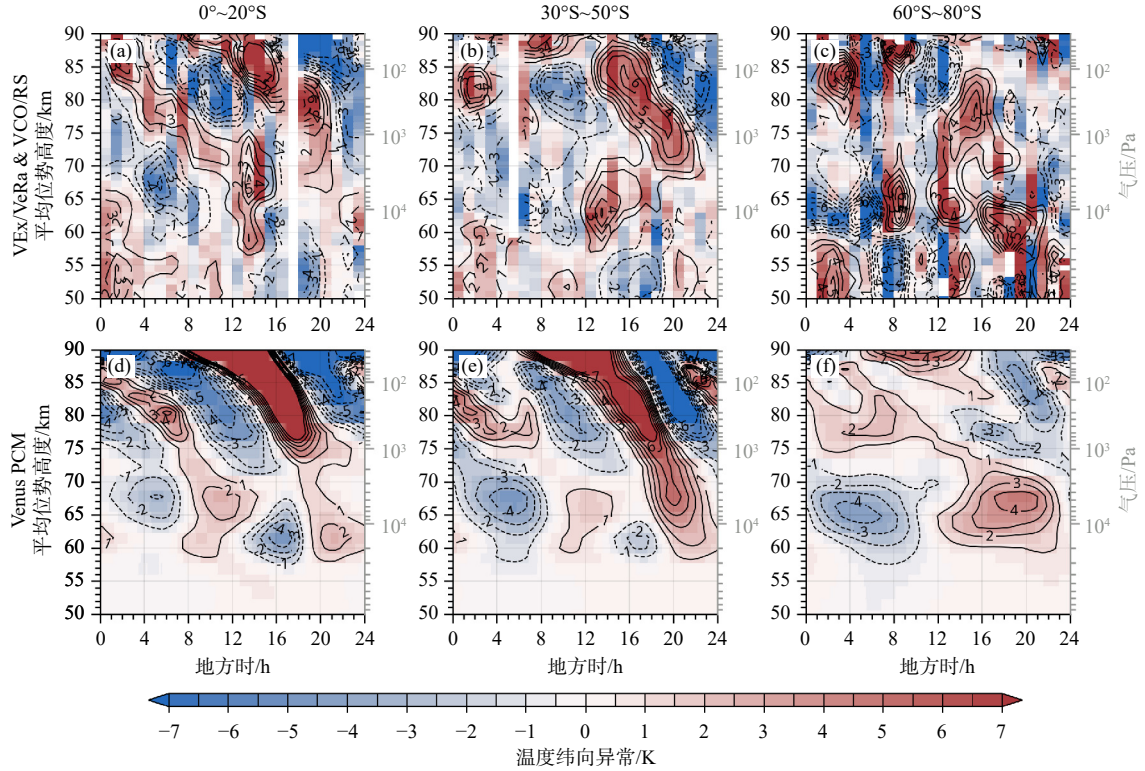


图5 来自无线电掩星 (RO) 观测 (Venus Express/VeRa 和 Akatsuki/RS) 与金星气候模式 (PCM) 模拟的潮汐结构对比。展示了三个纬向带的地方时-高度分布: $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$ (a, d)、 $30^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$ (b, e) 和 $60^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{S}$ (c, f)。其中图 a-c 来自 RO 观测, 图 d-f 来自 Venus PCM 模拟。在 RO 图 a-c 中, 黑色等值线通过对地方时-高度数据 (彩色像素) 进行 3×3 网格卷积平滑得到。注意: 由于金星自转方向与地球相反, 其地方时与标准的柱状投影方向相反。平均纬向风的方向为从左向右 (引自 Lai et al., 2025a)

Fig. 5 Tidal structure comparison between radio occultation (RO) observations (Venus Express/VeRa and Akatsuki/RS) and Venus Planetary Climate Model (PCM) simulations. Local time-altitude distributions derived from RO observations (a-c) and Venus PCM simulations (d-f) are shown for three latitudinal bands: $0^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$ (a, d), $30^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$ (b, e), and $60^{\circ}\text{S}\sim 80^{\circ}\text{S}$ (c, f). In the RO panels (a-c), black contour lines are smoothed using a 3×3 grid convolution applied to the local time-altitude data (color-shaded pixels). Note: Because the opposite rotation direction of Venus compared to Earth, local time is opposite to the standard cylindrical projection. The mean zonal wind direction is from left to right (from Lai et al., 2025a)

低纬度区域则以半日潮为主, 在 75 km 以上叠加明显全日潮分量, 呈现向上的能量传播特征, 结果与 Akatsuki/LIR、Pionner Venus/OIR 以及 Venera-15/IR 等多项观测一致 (Akiba et al., 2021; Schofield and Taylor, 1983; Zasova et al., 2002)。

通过模式诊断发现, 65~70 km 高云层中的角动量加速主要由全日潮汐贡献 (图 6), 而非传统认为占主导作用的半日潮汐垂直输运。早期线性或半谱模型假设的潮汐基于半日潮在中低纬度具有较高的温度振幅和更长的垂直波长 (Pechmann and Ingersoll, 1984; Takagi and Matsuda, 2007), 倾向得出半日潮占主导的结论。而这些假设并不符合现实大气的潮汐结构, 近期观测表明全日潮和半日潮的垂直波长均为~20 km (Akiba et al., 2021)。基于 Akatsuki/UVI 等云追踪反演的风场显示 (Hori-nouchi et al., 2020), 日侧潮汐的水平角动量输运可在云顶中低纬提供约 $0.3\sim 0.8\text{ m s}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 的加速,

几乎抵消大部分纬向环流的减速 (约 $1\text{ m s}^{-1}\text{ d}^{-1}$)。此外, 他们采用潮汐重力波模态假设, 并依据垂直 EP 通量与波能量及群速度关系的估算结果, 得到半日潮垂直输运主导 (约 $1\text{ m s}^{-1}\text{ d}^{-1}$) 这一结论。然而在他们假设的垂直 EP 通量耗散尺度 (10 km) 下, 其实际计算值仅约 $0.3\text{ m s}^{-1}\text{ d}^{-1}$; 另外, 由于全日潮的水平波数仅为半日潮的一半, 在重力波模态框架下计算得到的全日潮垂直贡献会被系统性低估。

Lai 等 (2025a) 利用模式结果比较了潮汐分量的估算值与大气 TEM (transformed Eulerian-mean) 方程的直接计算。TEM 方程的角动量形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{M} + \frac{\nabla \cdot \mathbf{F}}{\rho_0} \quad (3)$$

上式反映了大气平均经向环流 ($-\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{M}$) 和涡动的动量 (即 Eliassen-Palm 或 EP 通量, $\mathbf{F}$) 输运守恒对大气平均纬向风的作用。结果发现, 尽管半日

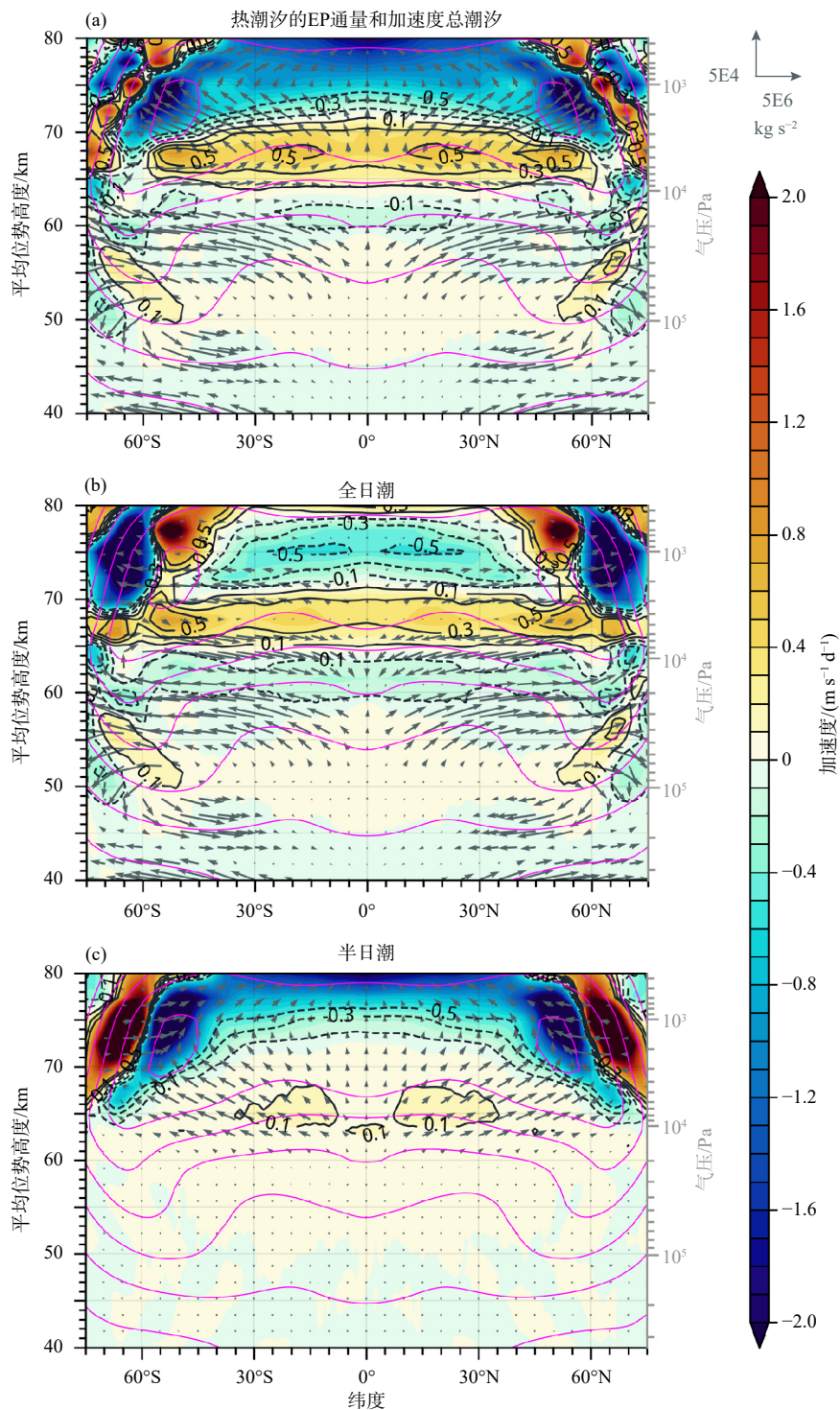


图 6 Eliassen-Palm (EP) 通量及其对应的热潮汐加速度, 以及全日潮与半日潮的分解. (a) 显示了热潮汐的时间平均 EP 通量 (箭头所示), 以及其全日潮 (b) 和半日潮 (c) 分量. 背景着色表示加速度, 黑色等值线标注具体数值. 紫色等值线表示背景风 (引自 Lai et al., 2025a)

Fig. 6 Eliassen-Palm (EP) flux and corresponding acceleration rates of thermal tides, along with decomposition of diurnal and semidiurnal tides. The temporal mean EP flux of thermal tides (a) is shown with arrows, along with their diurnal (b) and semidiurnal (c) components. The color shading corresponds to the acceleration rates, which are contoured with black lines marked with corresponding values. The purple contour line represents the background wind (from Lai et al., 2025a)

潮的云顶垂直 EP 通量与 Horinouchi 等 (2020) 接近, 但由于真实大气与模式中的垂直耗散尺度常大于 20 km, 半日潮的垂直输运贡献实际可能约为 $0.1 \text{ m s}^{-1} \text{d}^{-1}$. 同时, 全日潮的垂直输运更接近

Rossby-重力波模态, 其观测表现也与 Rossby 波特特性更为一致. 这表明在金星厚光学大气的强辐射吸收层, 全日潮在低纬具有不可忽略的垂直耗散与角动量输运作用. Lai 等 (2025a) 进一步通过流函数

和速度势分解潮汐的散度与旋度成分发现: 半日潮更接近重力波模态, 主要由散度控制输运; 而全日潮的水平输运同时由散度与旋度主导, 其垂直输运则主要由散度贡献。结果说明, 在金星这种强辐射吸收、光学厚的大气中, 全日潮作为类 Rossby 波模态的潮汐成分, 其因辐射加热引起的散度加热不能忽略, 是维持高云层角动量加速的关键机制。

除了潮汐以外, 如 Rossby 波和 Kelvin 波等行星波也是金星云层最为活跃的行星尺度波之一, 它们在角动量的输运平衡中也起着重要作用。金星上的 Rossby 波周期约 5~6 地球天, Kelvin 波的周期约为 3~4 地球天, 在金星强西向超级旋转背景下, 这些波动在行星固定参考系中的相速度均向西。Rossby 波的相速度略慢于背景风速, Kelvin 波略快于背景风速, 他们的纬向波数均为 1, 在 Akatsuki/UVI 以及 Venus Express/VMC 中被广泛观测到 (Imai et al., 2019; Kouyama et al., 2013)。在一些金星大气环流模式中也模拟出了具有类似性质的 Rossby 波和 Kelvin 波 (Takagi et al., 2022; Yamamoto et al., 2023), 通常在观测和模式的结果中 Kelvin 波的振幅相对较小, 主要在云顶附近具有一定向赤道输运角动量的贡献, 相比于潮汐的作用较小。

Lai 等 (2024) 利用高分辨率 Venus PCM 金星气候模式系统模拟了金星的超级旋转 (图 2)、大尺度环流及行星尺度波动。模式结果显示, Rossby 波在金星大气中普遍呈现 Rossby-Kelvin 不稳定性 (Lai et al., 2024; Takagi et al., 2022; Yamamoto et al., 2023)。该不稳定性通常在波相速与背景风匹配的临界面附近出现, 由于临界面上下具有相似相位结构, 波动发生共振放大, 使 Rossby 波能够跨越临界面继续传播。此类不稳定性倾向发生在等熵面上, 因此在金星大气中表现为 Rossby 波自低云层中低纬度沿斜向路径向中高纬高云层传播。

在低云层, 约 50 km 附近存在多圈环流的垂直分界: 上层环流的上升支将赤道区域的角动量向高空输送, 导致低纬纬向风减速; 同时, 下层环流的向极输送也在中低纬造成显著减速 (图 7)。在这种普遍的经向环流减速背景下, Rossby 波通过其 Rossby-Kelvin 不稳定性形成的跨层传播通道, 可向上和向极有效携带反向角动量, 从而补偿经向环流造成的损失。这一机制使 Rossby 波成为低云层区域主导超级旋转加速的关键驱动力。

在概述平均态下云层超级旋转的角动量平衡机制之后, 另一个随观测逐渐凸显的问题是: 超级旋

转并非稳定不变, 而是呈现出明显的时间演化特征, 甚至可能具有准周期性的振荡。因此, 超级旋转的时空变化成为近年来金星大气动力学研究的核心议题之一。Kouyama 等 (2013) 基于 Venus Express/VMC 的云追踪风场发现金星云顶纬向风存在约 255 天的变化周期, 并指出 Rossby 波更容易在背景风速较快的时期被探测到。Lai 和 Li (2023) 利用 Akatsuki/LIR 亮温数据进一步发现, 金星高云层的 Rossby 波也表现出约 220 天的长期振荡。

为解释上述现象, Lai 等 (2024) 利用 Venus PCM 进行了长期模拟, 成功再现了云层超级旋转约 163~222 天的准周期振荡 (图 8)。模拟结果表明, 当云层中低纬的纬向风增强时, Rossby 波的能量同步增强, 而云顶中纬急流的变化往往与中低纬风速呈反相关。此外, Rossby 波的中心频率随背景风速的变化而漂移, 可能源于背景流调制了波的临界面位置, 从而影响其周期。

通过分离 Rossby 波、潮汐各 EP 通量分量以及经向环流的贡献, Lai 等 (2024) 进一步分析了典型的云顶中纬急流中心与云底赤道急流中心的纬向风变化及其动力学相关 (图 9)。结果显示, 超级旋转急流的演化由 Rossby 波与经向环流共同调节: 当 Rossby 波增强时, 其在云顶的向极热通量增强, 而在云底的向赤道角动量通量同步增强, 导致云顶中纬急流减速、云底赤道急流加速。由此引起的纬向风经向切变减弱又会降低大气的不稳定性, 反过来抑制 Rossby 波。相反, 当 Rossby 波减弱时, 则会触发与上述相反的反馈, 从而增强 Rossby 波 (图 10)。由此, 金星云层中约 200 天尺度的超级旋转振荡源于 Rossby 波与经向环流之间的耦合调制, 是波-流相互作用在金星大气中的典型体现。

除约 200 天的准周期变化外, 观测还表明超级旋转可能存在其他时间尺度的波动。例如, Khatuntsev 等 (2022a) 基于长期云顶风场记录提出云顶纬向风可能具有约 12 年、接近太阳活动周期的变化; 此外, 低层云赤道急流也被观测到存在数日尺度的快速变化 (Horinouchi et al., 2017)。然而, 关于 12 年周期是否源自真实的太阳活动调制, 还是仅为数据拟合的结果, 仍存在较大争议 (Ando et al., 2025; Encrenaz et al., 2025; Horinouchi et al., 2024)。

针对低层云赤道急流的快速变化, AFES-Venus 模式曾进行过初步探讨 (Takagi et al., 2023), 但其模拟得到的周期远大于观测, 且用于解释其变化的行星尺度波在观测中尚缺乏有力证据。此外,

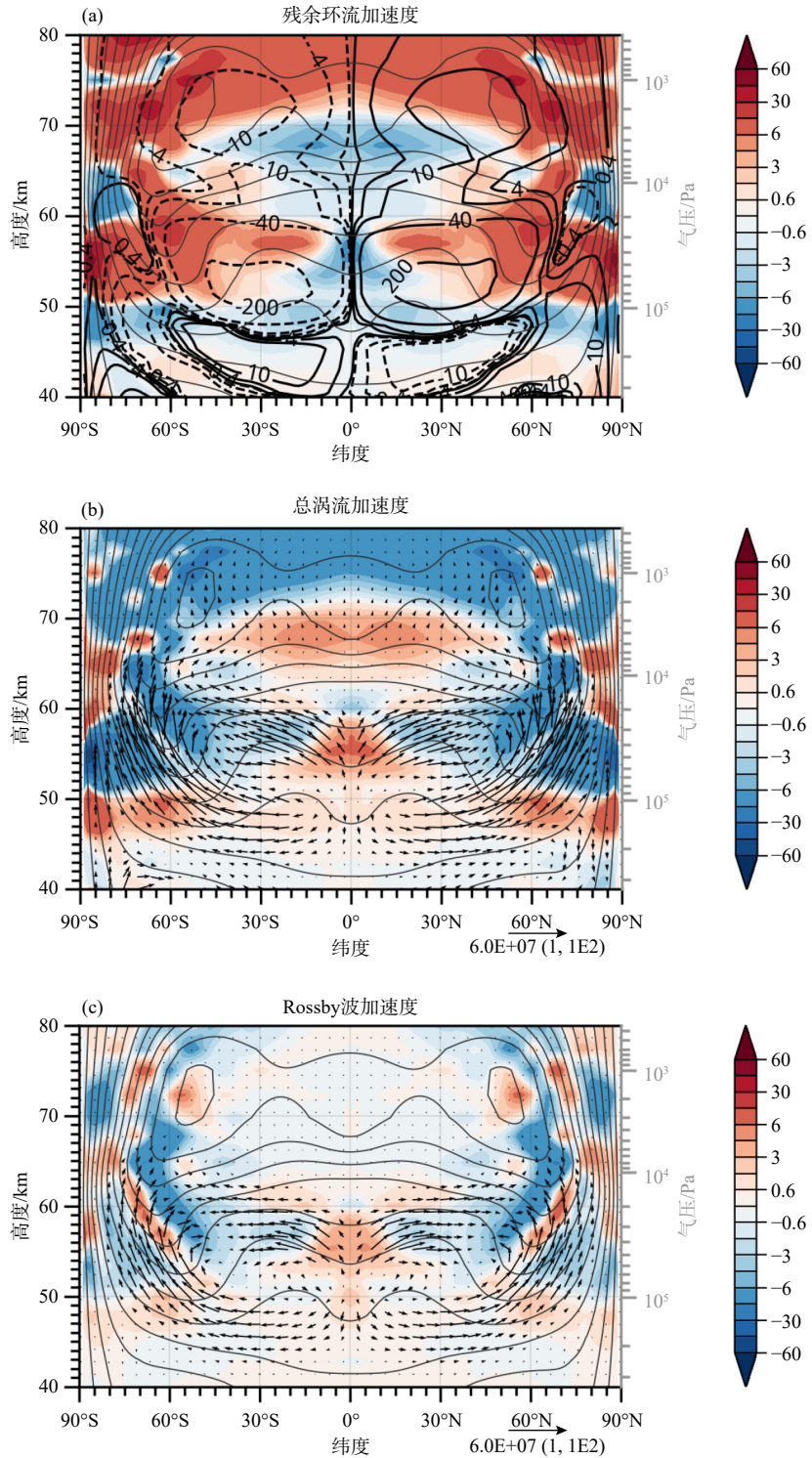


图 7 以色阶显示的经纬度-高度分布: 残余环流 (a)、总涡量 (b) 以及 Rossby 波 (c) 在 15 个金星日时间平均下的加速度. 图 a 中的粗黑等值线为质量流函数 (单位: 10^9 kg s^{-1}), 图 b、c 中的箭头表示 EP 通量 (单位: kg s^{-2}). 细黑等值线为时间-纬向平均的纬向风 (单位: m/s) (引自 Lai et al., 2024)

Fig. 7 The 15 Venus day temporal mean acceleration rate of residual mean meridional circulation (a), total eddies (b), and Rossby waves (c) distributed by latitude and altitude in color shade. The thick black contour in (a) denotes the mass stream function (in 10^9 kg s^{-1}), and the arrow in (b, c) presents the EP flux (in kg s^{-2}). The thin black contour denotes temporal and zonal mean zonal wind (m/s) (from Lai et al., 2024)

近年来随着跨越南北、尺度超过上万公里的巨大的地形波被成功探测 (Fukuhara et al., 2017), 重力波对超级旋转经度结构的调制 (Lai et al., 2025b),

以及其自行星表面上传播至热层并影响昼夜环流的可能性 (Navarro and Schubert, 2024), 也是理解金星大气超级旋转的形态与结构的关键因素.

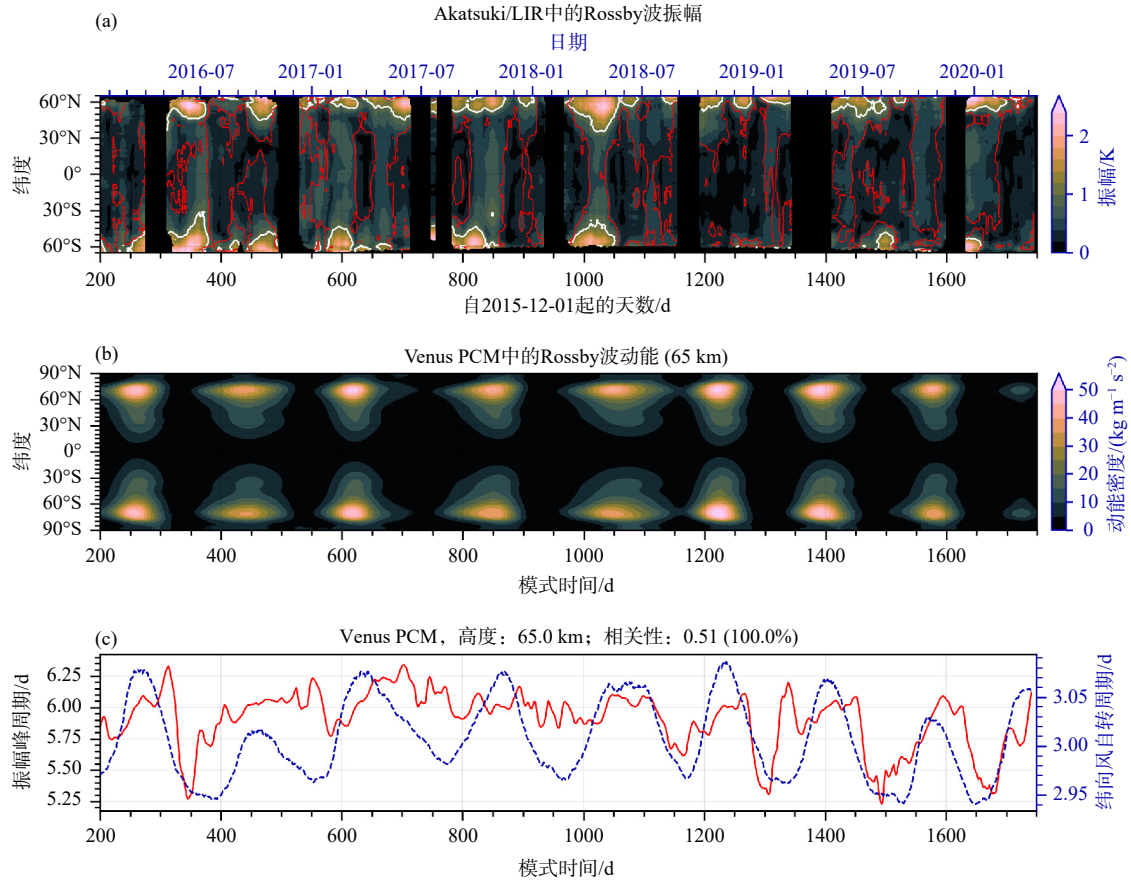


图 8 Akatsuki/LIR 观测和 Venus PCM 模拟的 Rossby 波长期变化。(a) Akatsuki/LIR 观测的 Rossby 波亮温振幅长期变化 (约 65 km 高度), 红色等高线内表示通过 95% 置信度显著性检验的区域, 白色等高线表示振幅 1 K; (b) Venus PCM 模拟在 65 km 高度处的 Rossby 波动能密度; (c) Venus PCM 模拟的 65 km 高度、低纬区域 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) Rossby 波纬向风在 5~6.5 天周期范围内振幅峰值周期与背景纬向风自转周期之间的相关性 (图 a 引自 Lai and Li, 2023; 图 b、c 数据源自 Lai et al., 2024)

Fig. 8 Long-term variations of Rossby waves from Akatsuki/LIR observations and Venus PCM simulations. (a) Long-term variation of the brightness temperature amplitude of Rossby waves from Akatsuki/LIR observations (~65 km altitude), with red contours enclosing regions that pass the 95% confidence significance test and white contours representing an amplitude of 1 K; (b) Rossby wave eddy kinetic energy at 65 km from Venus PCM simulations; (c) Comparison of the peak-period amplitude of zonal wind Rossby waves at 65 km in the low-latitude region ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) within the 5–6.5 day period range and the background zonal wind rotation period in Venus PCM simulations (Fig. a adapted from Lai and Li, 2023; Fig. b, c data from Lai et al., 2024)

4 总结与展望

近年来, 得益于 Venus Express、Akatsuki 以及高分辨率金星气候模式的发展, 我们对金星超级旋转的维持机制已有了更清晰的认识. 观测和模式均显示, 经向环流在云层中低纬持续带走角动量, 而涡动输运是补偿其损失的关键, 其中全日潮在高云层的作用比传统认识更为重要. 与此同时, Rossby-Kelvin 不稳定在低云层建立了有效的角动量输运通道, 使 Rossby 波能跨越临界区传播, 从而维持低云区的超级旋转. 这些新结果逐步完善了超级旋转平均态的角动量平衡图景.

除了平均态机制, 云层超级旋转的时间变化也

逐渐显现新的线索. 约 200 天的准周期振荡已在观测和模式中得到确认, 并可由 Rossby 波与经向环流的相互调制有效解释. 然而, 更长尺度的变化 (如约 12 年周期) 及低层赤道急流的短期波动仍缺乏一致的物理图像, 相关波动及驱动机制也尚未获得可靠观测支持. 此外, 深层大气地形重力波的传播和耗散, 可能进一步影响云层结构与角动量输运及与热层的耦合. 未来需要更系统的三维风场与热结构观测, 并结合能够刻画跟随真实大气辐射、波动和环流耦合过程的改进模式, 以构建更完整金星大气动力学框架.

致谢

本文作者感谢国家自然科学基金 (基金号 42130203、

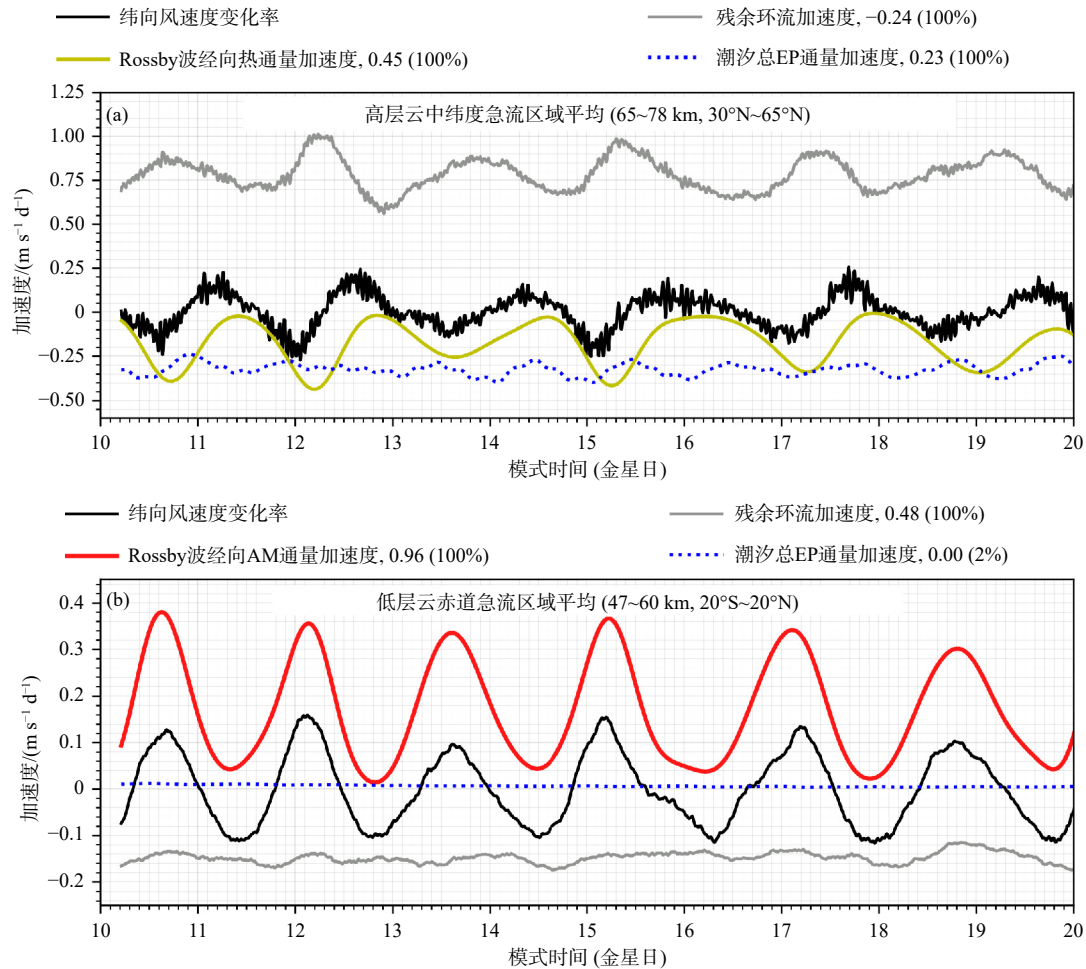


图 9 纬向风时间梯度与由残余环流、与 Rossby 及潮汐波相关的 EP 通量, 以及 EP 通量分解得到的角动量/热通量项所引起加速度之间的 Pearson 相关系数. 具体信息见图例, 图例中的百分比表示显著性水平 (数据源自 Lai et al., 2024)

Fig. 9 Pearson correlation coefficients between the temporal gradient of zonal wind and the acceleration rates induced by the residual circulation, the EP flux associated with Rossby and tidal waves, and the decomposed AM/heat flux terms of EP flux. Details are provided in the legends, with percentages indicating significance levels (data from Lai et al., 2024)

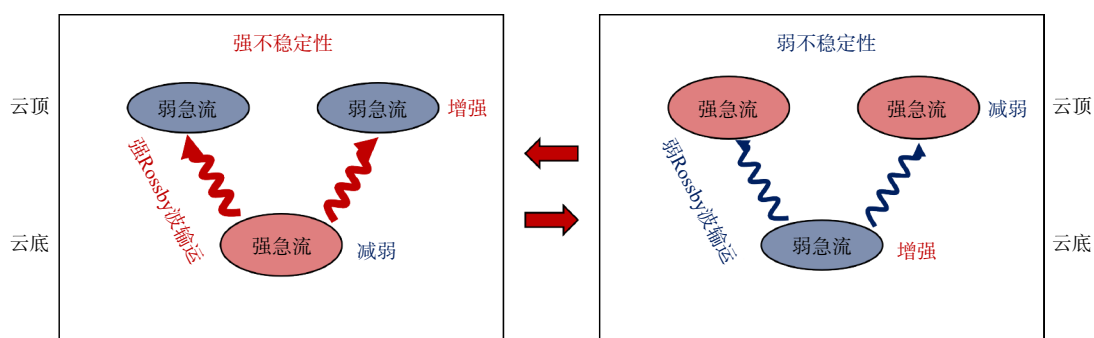


图 10 金星云层约 200 天周期变化的机制示意图

Fig. 10 Schematic illustration of the mechanism responsible for the ~200-day periodic variability in the Venusian cloud layer

42508018)、中央高校基本科研业务费专项资金资助 (基金号 WK2080250235) 的支持. 本文部分内容基于作者参加“第六届青年行星论坛”综述报告内容, 在此一并感谢该论坛的组织者及参与者提供的宝贵建议.

References

Akiba M, Taguchi M, Fukuhara T, et al. 2021. Thermal tides in the up-

per cloud layer of Venus as deduced from the emission angle dependence of the brightness temperature by Akatsuki/LIR[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(10): e2020JE006808.

Ando H, Noguchi K, Imamura T, et al. 2025. Long-term variability of the thermal structure in Venus's low-latitude atmosphere investigated using Venus Express and Akatsuki radio occultations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 130(11): e2025JE009218.

Avduevsky V S, Marov M Y, Rozhdestvensky M K, et al. 1971. Soft

- landing of Venera 7 on the Venus surface and preliminary results of investigations of the Venus atmosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(2): 263-269.
- Bengtsson L, Bonnet R M, Grinspoon D, et al. 2012. Towards Understanding the Climate of Venus: Applications of Terrestrial Models to Our Sister Planet: Vol. 11[M]. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- Bertaux J L, Widemann T, Hauchecorne A, et al. 1996. VEGA 1 and VEGA 2 entry probes: An investigation of local UV absorption (220–400 nm) in the atmosphere of Venus (SO₂ aerosols, cloud structure)[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101(E5): 12709-12745.
- Colin L. 1997. Pioneer Venus Missions[M/OL]//Encyclopedia of Planetary Science. Dordrecht: Springer: 582-584. https://link.springer.com/rwe/10.1007/1-4020-4520-4_307.
- Counselman C C, Gourevitch S A, King R W, et al. 1980. Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 85(A13): 8026.
- Dollfus A. 1975. Venus: Evolution of the upper atmospheric clouds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(6): 1060-1070.
- Drake S. 1984. Galileo Kepler and phases of Venus[J]. *Journal for the History of Astronomy*, 15: 198.
- Encrenaz T, Greathouse T K, Giles R, et al. 2025. HDO and SO₂ thermal mapping on Venus - VII. SO₂ variations with altitude and influence of the solar cycle[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 703: A219.
- Fukuhara T, Futaguchi M, Hashimoto G L, et al. 2017. Large stationary gravity wave in the atmosphere of Venus[J]. *Nature Geoscience*, 10(2): 85-88.
- Fukuya K, Imamura T, Taguchi M, et al. 2021. The nightside cloud-top circulation of the atmosphere of Venus[J]. *Nature*, 595(7868): 511-515.
- Gierasch P J. 1975. Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(6): 1038-1044.
- Gierasch P J, Goody R M, Young R E, et al. 1997. The general circulation of the Venus atmosphere: An assessment[C]//Venus II: Geology, Geophysics, Atmosphere, and Solar Wind Environment: 459. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997veii.conf..459G>.
- Gonçalves R, Machado P, Widemann T, Brasil F, et al. 2020a. A wind study of Venus's cloud top: New doppler velocimetry observations[J]. *Atmosphere*, 12(1): 2.
- Gonçalves R, Machado P, Widemann T, et al. 2020b. Venus' cloud top wind study: Coordinated Akatsuki/UVI with cloud tracking and TNG/HARPS-N with doppler velocimetry observations[J]. *Icarus*, 335: 113418.
- Gorinov D A, Zasova L V, Khatuntsev I V, et al. 2021. Winds in the lower cloud level on the nightside of Venus from VIRTIS-M (Venus Express) 1.74 μm images[J]. *Atmosphere*, 12(2): 186-199.
- Hall S. 2019. Venus is Earth's evil twin — and space agencies can no longer resist its pull[J]. *Nature*, 570(7759): 20-25.
- Head J W, Crumpler L S, Aubele J C, et al. 1992. Venus volcanism: Classification of volcanic features and structures, associations, and global distribution from Magellan data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 97(E8): 13153.
- Hide R. 1969. Dynamics of the atmospheres of the major planets with an appendix on the viscous boundary layer at the rigid bounding surface of an electrically-conducting rotating fluid in the presence of a magnetic field[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(5): 841-853.
- Horinouchi T, Murakami S Y, Satoh T, et al. 2017. Equatorial jet in the lower to middle cloud layer of Venus revealed by Akatsuki[J]. *Nature Geoscience*, 10(9): 646-651.
- Horinouchi T, Kouyama T, Lee Y J, et al. 2018. Mean winds at the cloud top of Venus obtained from two-wavelength UV imaging by Akatsuki[J]. *Earth, Planets and Space*, 70(1): 10-29.
- Horinouchi T, Hayashi Y Y, Watanabe S, et al. 2020. How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere[J]. *Science*, 368(6489): 405-409.
- Horinouchi T, Kouyama T, Imai M, et al. 2024. Long-term variability of mean winds and planetary-scale waves around Venusian cloud top observed with Akatsuki/UVI[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129(3): e2023JE008221.
- Hu Y, Ding F. 2013. Atmospheric circulations and climate of tidal-locking exoplanets[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 43(10): 1356-1368.
- Hueso R, Peralta J, Garate-Lopez I, et al. 2015. Six years of Venus winds at the upper cloud level from UV, visible and near infrared observations from VIRTIS on Venus Express[J]. *Planetary and Space Science*, 113-114: 78-99.
- Imai M, Kouyama T, Takahashi Y, et al. 2019. Planetary-scale variations in winds and UV brightness at the Venusian cloud top: Periodicity and temporal evolution[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(10): 2635-2659.
- Imamura T, Mitchell J, Lebonnois S, et al. 2020. Superrotation in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 216(5): 87-128.
- Jessup K L, Marcq E, Bertaux J L, et al. 2020. On Venus' cloud top chemistry, convective activity and topography: A perspective from HST[J]. *Icarus*, 335: 113372.
- Keldysh M V. 1977. Venus exploration with the Venera 9 and Venera 10 spacecraft[J]. *Icarus*, 30(4): 605-625.
- Khatuntsev I V, Patsaeva M V, Titov D V, et al. 2013. Cloud level winds from the Venus Express monitoring camera imaging[J]. *Icarus*, 226(1): 140-158.
- Khatuntsev I V, Patsaeva M V, Titov D V, et al. 2017. Winds in the middle cloud deck from the near-IR imaging by the Venus monitoring camera onboard Venus Express[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(11): 2312-2327.
- Khatuntsev I V, Patsaeva M V, Titov D V, et al. 2022a. Twelve-year cycle in the cloud top winds derived from VMC/Venus Express and UVI/Akatsuki imaging[J]. *Atmosphere*, 13(12): 2023.
- Khatuntsev I V, Patsaeva M V, Zasova L V, et al. 2022b. Winds from the visible (513 nm) images obtained by the Venus monitoring camera onboard Venus Express[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(4): e2021JE007032.
- Kouyama T, Imamura T, Nakamura M, et al. 2013. Long-term variation in the cloud-tracked zonal velocities at the cloud top of Venus de-

- duced from Venus Express VMC images[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(1): 37-46.
- Kouyama T, Taguchi M, Fukuhara T, et al. 2019. Global structure of thermal tides in the upper cloud layer of Venus revealed by LIR on board Akatsuki[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(16): 9457-9465.
- Lai D, Li T. 2023. Long-term variation of the quasi-five-day wave in the top layer of Venus clouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(4): e2022JE007596.
- Lai D, Lebonnois S, Li T. 2024. Planetary-scale wave activity in Venus cloud layer simulated by the Venus PCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 129(7): e2023JE008253.
- Lai D, Lebonnois S, Li T. 2025a. Contribution of thermal tides to Venus upper cloud-layer superrotation[J]. *AGU Advances*, 6(5): e2025AV001880.
- Lai D, Li T, Lebonnois S, et al. 2025b. Stationary wave dynamics in Venus's upper clouds - Morphology and forcing from Akatsuki /LIR and Venus planetary climate model analyses[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 704: A286.
- Lebonnois S, Sugimoto N, Gilli G. 2016. Wave analysis in the atmosphere of Venus below 100-km altitude, simulated by the LMD Venus GCM[J]. *Icarus*, 278: 38-51.
- Lebonnois S. 2020. Super-rotating the Venusian atmosphere[J]. *Science*, 368(6489): 363-364.
- Lee C, Lewis S R, Read P L. 2007. Superrotation in a Venus general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(E4): E04S11.
- Luz D, Berry D L, Piccioni G, et al. 2011. Venus's southern polar vortex reveals precessing circulation[J]. *Science*, 332: 577.
- Marov M Y. 2004. Mikhail Lomonosov and the discovery of the atmosphere of Venus during the 1761 transit[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2(IAU Colloq. 196): 209-219.
- Mayer C H, McCullough T P, Sloanaker R M. 1958. Observations of Venus at 3.15-cm wave length[J]. *The Astrophysical Journal*, 127: 1.
- Mendonça J M, Read P L, Wilson C F, et al. 2012. Zonal winds at high latitudes on Venus: An improved application of cyclostrophic balance to Venus Express observations[J]. *Icarus*, 217(2): 629-639.
- Mendonça J M, Read P L. 2016. Exploring the Venus global super-rotation using a comprehensive general circulation model[J]. *Planetary and Space Science*, 134: 1-18.
- Moroz V I, Ekonomov A P, Moshkin B E, et al. 1985. Solar and thermal radiation in the Venus atmosphere[J]. *Advances in Space Research*, 5(11): 197-232.
- Nakamura M, Imamura T, Ishii N, et al. 2016. Akatsuki returns to Venus[J]. *Earth, Planets and Space*, 68(1): 75-85.
- Navarro T, Schubert G. 2024. Mountain waves in the upper atmosphere of Venus[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(4): e2023GL104922.
- Pechmann J B, Ingersoll A P. 1984. Thermal tides in the atmosphere of Venus: Comparison of model results with observations[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41(22): 3290-3313.
- Peralta J, Muto K, Hueso R, et al. 2018. Nightside winds at the lower clouds of Venus with Akatsuki/IR2: Longitudinal, local time, and decadal variations from comparison with previous measurements[J]. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 239(2): 29-46.
- Peralta J, Iwagami N, Sánchez-Lavega A, et al. 2019. Morphology and dynamics of Venus's middle clouds with Akatsuki/IR1[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(5): 2399-2407.
- Piccialli A, Tellmann S, Titov D V, et al. 2012. Dynamical properties of the Venus mesosphere from the radio-occultation experiment VeRa onboard Venus Express[J]. *Icarus*, 217(2): 669-681.
- Read P L. 1986. Super-rotation and diffusion of axial angular momentum: II. A review of quasi-axisymmetric models of planetary atmospheres[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112(471): 253-272.
- Read P L, Lebonnois S. 2018. Superrotation on Venus, on Titan, and elsewhere[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46: 175-202.
- Reese D E, Swan P R. 1968. Venera 4 probes atmosphere of Venus[J]. *Science*, 159(3820): 1228-1230.
- Rossow W B, Williams G P. 1979. Large-scale motion in the Venus stratosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 36(3): 377-389.
- Sánchez-Lavega A, Lebonnois S, Imamura T, et al. 2017. The atmospheric dynamics of Venus[J]. *Space Science Reviews*, 212(3): 1541-1616.
- Schofield J T, Taylor F W. 1983. Measurements of the mean, solar-fixed temperature and cloud structure of the middle atmosphere of Venus[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 109(459): 57-80.
- Schubert G. 1983. General Circulation and the Dynamical State of the Venus Atmosphere[M]// Hunten D M, Colin L, Donahue T M, Moroz V I. Venus. Tucson: University of Arizona Press: 681-765. doi: 10.2307/j.ctv25c4z16.25.
- Showman A P, Polvani L M. 2010. The Matsuno-Gill model and equatorial superrotation[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(18): L18811.
- Silva J E, Machado P, Peralta J, et al. 2021. Characterising atmospheric gravity waves on the nightside lower clouds of Venus: A systematic analysis[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 649: A34.
- Silva J E, Peralta J, Cardesín-Moinelo A, et al. 2024. Atmospheric gravity waves in Venus dayside clouds from VIRTIS-M images[J]. *Icarus*, 415: 116076.
- Sonett C P. 1963. A summary review of the scientific findings of the mariner Venus mission[J]. *Space Science Reviews*, 2(6): 751-777.
- Sornig M, Livengood T, Sonnadend G, et al. 2008. Venus upper atmosphere winds from ground-based heterodyne spectroscopy of CO₂ at 10 μ m wavelength[J]. *Planetary and Space Science*, 56(10): 1399-1406.
- Sugimoto N, Takagi M, Matsuda Y. 2019. Fully developed superrotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1776-1784.
- Svedhem H, Titov D, Taylor F, et al. 2009. Venus Express mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E5): E00B33.
- Takagi M, Matsuda Y. 2007. Effects of thermal tides on the Venus atmospheric superrotation[J]. *Journal of Geophysical Research: At-*

- [mospheres](#), 112(D9): D09112.
- Takagi M, Ando H, Sugimoto N, et al. 2022. A GCM study on the 4-day and 5-day waves in the Venus atmosphere[J]. [Journal of Geophysical Research: Planets](#), 127(4): e2021JE007164.
- Takagi M, Ando H, Imai M, et al. 2023. Formation and quasi-periodic variation of equatorial jet caused by planetary-scale waves in the Venusian lower cloud layer[J]. [Journal of Geophysical Research: Planets](#), 128(11): e2023JE007922.
- Taylor F W. 2014. The Scientific Exploration of Venus[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Traub W A, Carleton N P. 1975. Spectroscopic observations of winds on Venus[J]. [Journal of the Atmospheric Sciences](#), 32(6): 1045-1059.
- Yamamoto M, Hirose T, Ikeda K, et al. 2023. Short-period planetary-scale waves in a Venus general circulation model: Rotational and divergent component structures and energy conversions[J]. [Icarus](#), 392: 115392.
- Yamamoto M, Ikeda K, Takahashi M, et al. 2024. Rotational/divergent flow and energy conversion of thermal tides in a Venus general circulation model[J]. [Icarus](#), 411: 115921.
- Zasova L, Khatountsev I V, Ignatiev N I, et al. 2002. Local time variations of the middle atmosphere of Venus: Solar-related structures[J]. [Advances in Space Research](#), 29(2): 243-248.