

宋心仪, 杨军, 魏勇. 2025. 岁星四纪——回望木星大气探测 50 年. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(1): 67-82. doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-011](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-011).

Song X Y, Yang J, Wei Y. 2025. A look-back to the 50-year exploration of Jupiter's atmosphere. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(1): 67-82 (in Chinese). doi:[10.19975/j.dqyxx.2024-011](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-011).

岁星四纪——回望木星大气探测 50 年

宋心仪¹, 杨军^{1*}, 魏勇²

1 北京大学 物理学院 大气与海洋科学系 气候与海-气实验室, 北京 100871

2 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

摘要: 木星是太阳系中最大的行星, 也是自转速度最快的行星. 作为一颗气态巨行星, 木星没有海陆分布、复杂地形等因素的影响, 是研究大气动力学的天然试验场. 木星的大气成分、大气环流、内部结构特征等都具有重要的科学意义. 1973 年 12 月 4 日, 先驱者 10 号飞掠木星, 实现了人类第一次木星大气近距离探测. 如今木星探测已经积累了 50 余年的经验, 发射了 10 次木星任务: 7 次飞掠任务、伽利略号与朱诺号两次环绕任务、正在飞行途中的木星冰卫星探测任务. 本文简要回顾了这 10 次探测任务及其取得的科学成果, 重点关注木星的大气成分、波动和急流、大红斑、极地涡旋等方面取得的进展, 并指出一些尚未解决的科学难题. 我国计划于 2030 年左右发射天问四号, 对木星系进行探测. 回顾过去的木星探测任务, 对于天问四号如何合理设计科学载荷、制定科学目标等具有一定的借鉴意义.

关键词: 木星探测; 大气成分; 大气动力; 急流; 大红斑; 极地涡旋

doi: [10.19975/j.dqyxx.2024-011](https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2024-011)

中图分类号: P185.4

文献标识码: A

A look-back to the 50-year exploration of Jupiter's atmosphere

Song Xinyi¹, Yang Jun^{1*}, Wei Yong²

1 Laboratory for Climate and Atmosphere-Ocean Studies, Department of Atmospheric and Oceanic Sciences,
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2 Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy
of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Jupiter is the biggest and fastest-rotating planet in our solar system. As a gas giant without land-sea distribution or topography, Jupiter is an ideal natural laboratory for studying atmospheric dynamics. Jupiter's atmospheric composition, atmospheric circulation, and internal structure are all topics of scientific significance. On December 4, 1973, Pioneer 10 achieved its closest approach to Jupiter, marking the first successful exploration mission to the Jovian system. Since then, Jupiter exploration has gathered more than 50 years of experience with 10 missions, including 7 flyby missions, 2 orbiting missions, Galileo and Juno, and the still en route mission Jupiter Icy moons Explorer (JUICE). This review takes a brief look-back to these 10 Jupiter missions and their science results, especially the progress on Jupiter's atmospheric composition, waves and zonal jet streams, the Great Red Spot, and polar vortices, as well as the unsolved scientific problems. China plans to launch Tianwen-4 by 2030, targeting the Jovian system. To shed some light on the scientific payloads and target design of Tianwen-4, reviewing the past Jupiter missions has certain significance.

Keywords: Jupiter exploration; atmospheric composition; atmospheric dynamics; zonal jet stream; the Great Red Spot; polar vortex

收稿日期: 2024-02-17; 录用日期: 2024-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42275134, 42075046, 42161144011)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42275134, 42075046, 42161144011)

第一作者: 宋心仪 (2000-), 女, 在读博士研究生, 主要从事系外行星的研究. E-mail: songxinyi@pku.edu.cn

*通信作者: 杨军 (1984-), 男, 长聘副教授, 主要从事系外行星的研究. E-mail: junyang@pku.edu.cn



0 引言

木星对于古老的华夏文明而言并不陌生. 我国的观星历史源远流长, 木星作为太阳系中最大的、距离地球第四远的行星, 很早就被仰望星空的古人注意到, 在文学和史书中记载颇丰. 木星古称岁星, 因为位置在东方, 且五行中东方主木, 因此被称为木星. 西汉司马迁的《史记·天官书》中总结道“察日、月之行以揆岁星顺逆. 曰东方木, 主春”, 说明早在两千年前, 古人就发现了木星逆行的现象, 并且已经懂得以太阳和月球为参考系, 观测木星的顺行和逆行. 木星别名很多, 如摄提、重华、应星、纪星……《汉书·王莽传》中“岁在寿星, 填在明堂, 仓龙癸酉, 德在中宫”, 将位于东方的木星称为苍(仓)龙, 更是一个浪漫的别名. 古人发现木星大约十二年绕天一周, 因此将黄道面分为十二部分, 在此基础上发展出岁星纪年法. 岁星一季为十二年, 由此延伸出十二地支, 《兰亭集序》开篇的“永和九年, 岁在癸丑”, 就是根据岁星纪年法记述的.

1610 年, 伽利略用自己制作的二十倍望远镜观测木星, 发现了木星周围有四颗卫星, 这四颗卫星被称为“伽利略卫星”, 就是今天人们熟知的木卫一伊奥(Io)、木卫二欧罗巴(Europa)、木卫三盖尼米得(Ganymede)、木卫四卡利斯托(Callisto), 不过他们的名字是德国天文学家西门·马利乌斯起的. 马利乌斯在伽利略观测到木星卫星之后不久, 也独立观测到了这四颗卫星. 木卫一是四颗卫星中距离木星最近、地表重力最大的(邹昕等, 2023). 木卫一半径约为 1822 km, 稍大于月球. 木卫一表面分布着至少 400 座活火山, 是太阳系中地质活动最频繁的天体(Anderson et al., 2001). 木卫二是四颗卫星中体积最小的, 表面被米黄色的冰面覆盖, 非常平滑, 只有一些浅棕色裂缝, 这层冰面下很可能存在着液体海洋(胡永云和田丰, 2013; McKinnon et al., 2009). 木卫三是太阳系中体积和质量最大的卫星, 半径 2631 km, 是月球半径的 1.5 倍. 研究推测, 木卫三内部可能存在大量液态水(Vance et al., 2014). 木卫四是四颗卫星中第二大的, 半径大约与水星相当, 但密度和表面重力加速度是四颗卫星中最小的. 木卫四的表面被撞击坑覆盖, 这些撞击可能是影响木卫四地质演化的主要因素, 在木卫四上观测不到任何板块运动、火山活动等地质过程的痕迹和遗留(Greeley et al., 2000).

木卫四表层 10 km 内的主要成分是水冰(胡永云和杨军, 2021), 其地下 100 km 处可能存在液态水(Kuskov and Kronrod, 2005).

1660 年前后, 意大利数学家、天文学家乔瓦尼·卡西尼(Giovanni Cassini)发现了木星表面有色彩丰富的环带和斑点, 形状有些扁圆. 他根据观测估算了木星的旋转周期, 并且发现木星不同纬度的旋转角速度是不同的. 在随后的两个半世纪里, 天文学家对木星的轨道运行和大红斑等进行了更为详尽的观测.

1932 年, 美国天文学家鲁伯特·威尔特(Rupert Wildt)在木星光谱中发现了甲烷和氨气的吸收带(Dunham, 1933; Wildt, 1937), 木星的观测手段从原本的可见光观测上升到光谱分析. Burke 和 Franklin(1955)观测木星的微波波段, 发现木星伴随自转会有规律地发射 22.2 MHz 的十米波, Shain(1956)在此基础上利用十米波的周期信号订正了木星的自转周期.

地基观测在紫外波段有很大短板, 地球大气对短波的吸收与散射, 导致地基获得的木星光谱强度在紫外波段骤降. 1968 年, 人类第一个太空望远镜“轨道天文台”(Orbiting Astronomical Observatory, OAO-2)成功发射, 在 1968 至 1971 年间获得了波段在 2100~3400 Å、分辨率为 25 Å 的木星光谱, 发现木星的反照率在 2500 Å 达到峰值(Moore, 1981). OAO-2 还观测了四颗伽利略卫星, 发现它们的反照率在短波波段下降, 并由此推算出卫星表面被高反照率物质覆盖的范围(Butterworth, 1981).

木星的观测与研究具有重要的科学意义. 木星的水丰度可以反映木星形成初期的位置, 揭示太阳系早期水的输运过程和木星迁移的过程. 在行星形成初期, 强太阳风会导致越靠近太阳的位置含水量越低, 越远离太阳的位置含水量越高, 而太阳辐射会导致离太阳较近的地方温度较高, 水难以沉降. 原位探测木星大气中的水丰度有助于人们进一步理解木星和太阳系的早期形成理论. 木星的大气成分、温度、风场、平流层-对流层转换区域的大气环流、波动、涡旋、大气化学等数据对于巨行星大气物理的理论研究具有重要意义. 以上科学问题的解决离不开原位探测或者近距离遥感探测, 因此发射木星探测器尤为重要. 1972 年, 先驱者 10 号飞向木星, 开启了飞行器探测木星的新时代. 目前已经成功发射了 10 次木星任务, 包括 7 次飞掠任务、伽利略

号与朱诺号两次环绕任务、正在飞行途中的木星冰卫星探测任务.

1 木星探测任务回顾

1.1 1972 年: 先驱者 10 号

先驱者 10 号 (Pioneer 10) 是美国国家航空航天局 (NASA) 第一个探访外行星 (outer planets) 的飞行器, 飞船重 258 kg, 于 1972 年 3 月 3 日发射, 并在 1973 年 12 月 4 日飞掠木星近拱点, 距离木星云顶约 1.3×10^5 km. 先驱者 10 号在任务期间创造了多个“第一”: 它是第一个可以逃离太阳系进入星际空间的飞行器; 第一个飞得比火星轨道还远

的飞行器; 第一个穿越主小行星带的飞行器; 第一个飞掠木星的飞行器; 第一个飞出海王星轨道的飞行器; 第一个全核能发电飞行器 (Hall, 1983; Siddiqi, 2018).

先驱者 10 号共搭载 11 个科学载荷 (见表 1), 载核总重 33 kg, 功率 24 W (Hall, 1974), 其中 6 个在飞掠过程中持续工作 (Siddiqi, 2018). 先驱者 10 号依次拍摄了木卫四、木卫三、木卫二的照片, 但在抵近木卫一的时候, 偏振相机因过量辐射而失灵. 在飞掠木星之后, 先驱者 10 号绕到木星晨昏线背面进行微波掩星实验. 此外, 它还利用红外照度计获得了木星的大气信息.

先驱者 10 号在 1972 年 11 月 6 日至 12 月 31 日期间拍摄了大约 500 张木星大气的照片. 这些照

表 1 七次木星任务搭载仪器

Table 1 Instruments on spacecrafts of major Jovian missions

	1972	1973	1977		1989	2011	2023
	先驱者10号	先驱者11号	旅行者1号	旅行者2号	伽利略号	朱诺号	木星冰卫星探测器
可见光设备	成像偏振测光计 (双色, 蓝光390~490 nm, 红光580~700 nm)				偏振辐射计(三波段410 nm、678 nm、945 nm)		光学成像系统 (375~1 100 nm)
			科学成像系统 (可见光)		固态成像仪 (375~1 100 nm)	朱诺相机(JunoCam) (可见光)	
红外设备	红外辐射计 (14~25 μm, 19~56 μm)		红外干涉光谱仪 (0.3~2.0 μm, 2.5~50 μm)		近红外测绘光谱仪 (700~5 200 nm)	红外极光成像仪 (2000~5 000 nm)	成像光谱仪 (400~5 700 nm)
紫外设备	紫外光度计 (17~140 nm)		紫外光谱仪 (40~180 nm)		(极)紫外光谱仪(113~432 nm)	紫外成像/光谱仪 (68~210 nm)	紫外光谱仪 (55~210 nm)
磁场测量	氦矢量磁强计				磁强计(MAG)	矢量磁强计(MAG)	磁强计(J-MAG)
		三轴磁通门					
微波设备	俘获辐射探测器		行星射电天文学实验			微波辐射计	亚毫米波设备
			无线电科学系统				
粒子探测仪	宇宙射线望远镜						
	带电粒子设备 盖革管式望远镜		低能带电粒子实验		高能粒子探测器		
					重离子计数器		
	四球面等离子体分析仪		等离子体光谱仪			等离子体和高能粒子探测仪	
			等离子体子系统			无线电波/等离子体波传感器	
流星体	流星体探测仪				尘埃探测子系统		粒子环境模块
	西西弗斯小行星/ 流星体探测仪						
重力						重力科学系统	重力&行星物理模块
测高							木卫三激光测高计
雷达							雷达

片的最高空间分辨率 320 km, 对比木星半径 6.99×10^4 km, 得到的木星照片大概是 218×218 像素, 比 360p 的视频还要模糊。

总体来说, 除去一个因木星强辐射而引发的错误命令外, 先驱者 10 号完成了所有既定目标。1976 年 2 月, 先驱者 10 号飞越土星轨道, 记录数据显示木星的磁尾大约有 8 亿千米长。之后先驱者 10 号继续向太空更深处飞行, 保持着飞得最远的人造飞行器的记录。这个纪录在 1998 年 2 月 17 日被旅行者 1 号打破。

2003 年 1 月 23 日, 先驱者 10 号在 122.3 亿千米外向地球发回了最后的信号, 彼时其同位素温差电池已经损坏。

1.2 1973 年: 先驱者 11 号

先驱者 11 号 (Pioneer 11) 是先驱者 10 号的姊妹飞行器, 于 1973 年 4 月 6 日发射, 它是第二个飞掠木星的飞行器, 也是第一个飞掠土星的飞行器。先驱者 11 号共搭载了 12 个科学仪器 (见表 1), 科学载核重约 30 kg, 功率为 25 W (Hall, 1983)。

先驱者 11 号飞行途中小问题不断 (Siddiqi, 2018): 放射性同位素热电机暂时性启动失败、姿态控制推进器小故障、小行星尘埃探测器部分失灵……但都是有惊无险, 并没有危及任务。

1974 年 7 月中旬, 先驱者 11 号安然无恙地穿过小行星带, 随后进行一次变轨, 以比先驱者 10 号更近的距离飞掠木星极地。先驱者 11 号距离木星云顶的最近距离为 4.25×10^4 km, 首次拍到了木星极地的照片, 并拍摄了 200 张木星卫星的照片。

先驱者 11 号利用木星的引力弹弓效应转向土星, 1979 年 9 月 1 日, 它成为第一个飞掠土星的飞行器 (Hall, 1983)。之后, 先驱者 11 号多次穿透土星的弓形激波, 发现土星的磁层会因太阳风的冲击而变形 (Wolfe et al., 1980)。

先驱者 11 号拍摄土星系 440 张照片后, 向先驱者 10 号相反的方向飞去。1995 年 9 月 30 日, 先驱者 11 号在距地球 44.1 AU 之遥与地球进行了最后一次通讯。1995 年 11 月 24 日, 地面又收到了来自先驱者 11 号几分钟长的正常工作信息, 之后便杳无音讯。同先驱者 10 号一样, 先驱者 11 号搭载了一块可能被智能生物识别的信息牌, 向宇宙更深处独自航行。在约四百万年后, 它将飞过天鹰座 λ 。

1.3 1977 年 9 月: 旅行者 1 号

旅行者 1 号 (Voyager 1) 和旅行者 2 号 (Voyager 2) 是同在 1977 年发射的孪生飞行器。旅行者 1 号于 1977 年 9 月 5 日发射, 飞行器重 721.9 kg, 是 NASA 历史上航程最远、时间最长的任务。旅行者 1 号共搭载了 11 个科学仪器 (见表 1)。旅行者 1 号发射时间晚于旅行者 2 号, 但是因为速度更快, 旅行者 1 号在 1977 年 12 月 15 日先于旅行者 2 号穿越了小行星带。

1978 年 4 月, 旅行者 1 号距离木星 1.77 AU, 开始了它的拍照任务。旅行者 1 号在 1979 年 1 月返回的照片显示, 木星的大气湍流相较于 1973—1974 年先驱者 10 号、11 号飞掠期间更为活跃。自 1979 年 1 月 30 日起, 旅行者 1 号开始每 96 s 一帧、持续 100 小时的延时摄影, 最终视频覆盖了木星 10 个自转周期。

1979 年 3 月 5 日, 旅行者 1 号飞抵木星系, 距木星云顶 2.8×10^5 km。旅行者 1 号飞掠木星的时间较短, 在飞掠的几天内主要探测了木星的磁层, 重点放在了木星的卫星和环带上。

旅行者 1 号飞越木星后, 依次飞越木卫五阿玛尔忒亚 (Amalthea)、木卫一、木卫二、木卫三、木卫四。旅行者 1 号同以上卫星最近时也相距几万至几十万千米, 但足以传回大量木卫地形的照片, 促进了行星科学新领域的发展。旅行者 1 号发现了木卫一上存在火山活动 (Strom et al., 1981), 照片显示木卫一表面至少有 8 个活火山, 是太阳系中火山活动最为频繁的天体之一。科学家认为潮汐加热是木卫一火山活动的主要能量来源 (Yoder, 1979)。木卫一的照片色调主要为黄色、橘色、棕色, 可能是火山喷发出的二氧化硫导致的。此外, 旅行者 1 号还首次发现了木星的环带, 并且发现了两颗新卫星: 木卫十四忒拜 (Thebe) 和木卫十六墨提斯 (Metis)。

随后, 在 1979 年 4 月 9 日, 旅行者 1 号先后两次变轨, 以免在飞掠土星时与土卫六相撞。旅行者 1 号发现了土星新环带——G 环带, 还发现了土星的 5 颗卫星。

1990 年 2 月 14 日, 旅行者 1 号在距离太阳 40 AU 外调转相机回望太阳系, 为我们的星系拍摄了 64 张照片, 其中最著名的一张就是因卡尔·萨根教授而家喻户晓的《暗淡蓝点》(Pale Blue Dot), 这张照片也被称作“太阳系全家福”。可惜的是,

水星和金星因为距离太阳太近而无法分辨,火星在照片中展示的是暗淡的背阳面。

1979年4月,旅行者1号关闭了相机,为接下来的星际旅行节省能源。1998年2月17日,旅行者1号距离太阳69.4 AU,打破先驱者10号的记录,成为当时飞得最远的飞行器。2012年,旅行者1号成为了第一个穿越日球层(heliosphere)的飞行器,并在同年8月飞出日球层顶(heliopause)。日球层顶是太阳系的边界,在日球层顶之外,太阳风的影响小于银河系物质的影响。因此,旅行者1号也是第一个飞出太阳系的飞行器。

旅行者1号和2号都携带一块直径为30 cm的镀金唱片,唱片收集了55种语言的问候、地球生命的35种声音、90 min的西方音乐等。时至今日,旅行者1号距离我们至少162 AU,但依旧和地球保持着联系。再过14000年到28000年左右,它才能飞出奥尔特云。

1.4 1977年8月:旅行者2号

旅行者2号于1977年8月20日发射,飞行器重721.9 kg,搭载了和旅行者1号相同的11个科学仪器(见表1; Siddiqi, 2018)。

1979年4月24日起,旅行者2号开始对木星大气环流进行延时摄影。与旅行者1号不同的是,旅行者2号在飞掠木星系期间还对四颗木卫进行了抵近观测。照片显示,木卫一的火山活动仍在持续进行,且地表较旅行者1号探访时有些许改变(Smith et al., 1979; Strom et al., 1981)。旅行者2号确认了旅行者1号拍摄到的木卫二表面条纹就是与地球上的冰表面类似的裂缝。两次旅行者任务的照片覆盖了木卫三和木卫四的大部分地表,制成分辨率5 km的地图(Batson et al., 1980)。

1979年7月9日,旅行者2号飞抵木星近拱点,距离木星云顶约 5.7×10^5 km,发现了木星大红斑颜色、形状、位置的改变,并进行了延时摄影。

由于飞向土星时有特殊的轨道要求,旅行者1号没能飞掠天王星和海王星。旅行者2号弥补了这一遗憾,它是第一个飞掠天王星、海王星的飞行器,也是目前唯一一个飞掠太阳系四颗巨行星的飞行器。

旅行者2号目前距离我们至少136 AU,每年都会调整姿态若干次,以确保天线总是对准地球。2023年7月21日,旅行者2号的天线偏离地球 2° ,一度失联。2023年8月1日,地面科学团队接收到

了旅行者2号的微弱信号,随后在8月4日向旅行者2号发出星际呼唤,远程指挥旅行者2号将天线重新指向地球。这声呼唤历经18.5小时才到达旅行者2号。37小时后,地面科学团队与旅行者2号重新取得联系,飞船失而复得,继续向地球传输数据。

1.5 1990年:尤利西斯号

尤利西斯号(Ulysses)是NASA和欧空局(ESA)的联合任务,于1990年10月6日由美国发现号航天飞机搭载升空,是第一个对黄道面两侧的空间进行探巡的航天任务(Siddiqi, 2018)。

1992年2月8日,尤利西斯号飞抵木星近拱点,距离木星云顶约 3.8×10^5 km,成为第五个到达木星系的飞行器。这次飞掠木星主要是为了利用木星引力变轨,进而从黄道面下侧飞过太阳南极,从黄道面上侧飞过太阳北极(Billings, 2012)。

尤利西斯号飞过木星时观测重点是木星的磁层。尤利西斯号观测了木星高纬度的磁层,发现木星向阳面的磁层顶高度大约为木星半径的105倍(Balogh et al., 1992)。此外,它还区分了磁层中的离子究竟是来自木星电离层、木卫一还是太阳风,发现了逆流电子和逆流离子以及木星高纬度黄昏区磁场线的高能电子和无线电爆发(Smith et al., 1992)。

结束了在木星系17天的飞行后,尤利西斯号返回太阳轨道,并于2004年在远日点转向,再次遥远地观测木星。2009年6月30日,尤利西斯号与地球失去联系,历时18.5年的任务最终落幕。

1.6 1989年:伽利略号

伽利略号于1989年10月18日由亚特兰蒂斯号航天飞机搭载升空。它是第一个环绕外行星飞行的飞行器,也是第一个向外行星大气投放探针的飞行器。伽利略号由环绕器和探针两部分构成。伽利略号的环绕器共搭载了10个科学载荷(见表1),载荷总重118 kg。伽利略号的探针直径127 cm,高91 cm,重约331 kg。探针上的科学载荷共28 kg(Givens et al., 1983),包括6个科学仪器:大气结构探测器、中性质谱仪、氦丰度干涉仪、净通量辐射计、浊度计、雷电仪器/无线电发射器。在飞往木星的旅途中,伽利略号的数据传输主天线展开失败,只能暂时使用低增益天线替代工作,导致原计划的数据传输速率无法实现,任务完成度没有达到

预期 (Siddiqi, 2018)。

伽利略号是为了研究木星及其卫星以及环绕木星周围磁层而设计的飞行器。1995 年 12 月, 伽利略号飞抵木星系, 开始执行任务, 第一次任务历时 23 个月的绕木星 11 周飞行, 10 次飞掠木星主要卫星。NASA 总结了伽利略号的十大科学成果^{a)}有:

(1) 下放探针探测了木星的大气成分, 发现其相对含量与太阳不同, 有助于揭示木星在太阳星云中形成后的演化过程。(2) 第一次在地外行星上观测到了氨云。冰晶形态的氨似乎是从大气深处形成的, 但仅在新生成的云中存在。(3) 木卫一表面的火山活动可能比地球表面强烈 100 倍, 其火山喷发的频率和烈度与地球早期情况类似。(4) 木卫一大气中的等离子体相互作用较为复杂, 可与木星大气耦合产生电流。(5) 为木卫二冰面下存在液体海洋的理论提供了观测证据。(6) 木卫三是第一个被发现拥有自身磁场的卫星。(7) 伽利略的磁测数据证明木卫二、三、四都拥有液态盐水层。(8) 证据显示, 木卫二、三、四都有一层极薄的大气。(9) 木星环带系统主要组分是流星体撞击木星的四颗近邻卫星扬起的尘土。木星最外层的环带实际上是两个嵌套的环带。(10) 首次在巨行星磁层内停留时间长到可以进行木星全球结构与大气动力过程的研究。

1995 年 7 月 12 日, 伽利略号释放探针。探针为锅形, 既没有引擎也没有推进器, 因此环绕器需要在释放探针之前调整姿态, 以确保探针可以落入理想位置。1995 年 12 月 7 日, 在经历了 5 个月的自由落体之后, 探针以每小时 17 万千米的速度像流星一样“砸进”木星大气, 在坠入木星大气层期间所经受的温度约为太阳表面温度的两倍。2 min 后, 探针打开降落伞和隔热板。

探针在木星云层中穿越了约 200 km, 传回了太阳辐射、热通量、气压、温度、风速、闪电以及大气成分的信息。探针的传输器在下落 58 min 后因高温损坏, 不过那时探针已经到达 23 bar 大气压处, 是任务要求的两倍 (Young, 2003)。一小时后, 距离木星云顶约 2×10^5 km 的伽利略号主发动机点火, 将环绕器送至木星环绕轨道。7 个月后, 伽利略号推进器在远拱点再次点火, 避免轨道离木星太近, 从而缓和强辐射环境对飞船传感器和计算机芯片造成的潜在威胁。

伽利略号在执行主要任务时飞掠木卫二 3 次、

木卫三 4 次、木卫四 3 次, 近木点距离是旅行者 1 号和 2 号的 1/1000 至 1/100。

1997 年 12 月, 伽利略号开始了为期 2 年的附加任务: 伽利略木卫二任务。伽利略号连续 8 次抵近木卫二, 获得了更多冰表面的信息, 也引发了科学界关于木卫二冰表面下是否存在海洋的讨论。伽利略木卫二任务期间还 2 次飞掠了木卫一, 收集了木卫一火山活动的新数据。此外, 伽利略木卫二任务还额外飞掠木卫三 4 次。伽利略千禧年任务又让伽利略号额外服务了一年, 飞掠木卫一和木卫三, 并在 2000 年 12 月和卡西尼号 (Cassini) 执行联合任务。

伽利略号在工程上有很多开创性的设计。环绕器采用了创新性的“双旋”设计。大部分航天器在飞行过程中靠绕自旋轴旋转稳定, 或者以太阳和另一颗恒星为参照, 在空间中保持固定的方向。伽利略号的双旋设计结合了这两种方法: 一部分以每分钟 3 转的速度旋转, 另一部分反向旋转, 以确保相机和其他传感器能够保持固定姿态。反向旋转部分配有陀螺仪, 用来检测转速、定向仪器。伽利略号的能源、推进装置和大部分电子器件都在旋转部分上。旋转部分还载有分析磁场和带电粒子的仪器, 它们被放在 11 m 长的吊杆上, 以免受飞行器电子元器件的影响 (如图 1 所示)。

1.7 1997 年: 卡西尼号

卡西尼号 (Cassini) 于 1997 年 10 月 15 日同欧航局的惠更斯号 (Huygens) 探针一同发射, 因此这次任务的全称为卡西尼-惠更斯 (Cassini-Huygens)。卡西尼号是第一个环绕土星并在外太阳系着陆的任务, 也是第一个对地外海洋进行采样的任务。卡西尼号的主要研究目标是土星及其卫星, 它拓展了人们对地外宜居世界的探索, 证实了土卫六泰坦 (Titan) 上存在以甲烷循环为载体的气候系统和以甲烷和乙烷为主的表面海洋, 与地球上的以水循环为载体的气候系统和液态水海洋相似, 为研究地球演化历史提供了新思路 (Siddiqi, 2018)。

2000 年 12 月 30 日, 卡西尼号在距离木星云顶约 9.7×10^6 km 的高度飞过, 在进行引力辅助加速的同时测试软件和仪器。卡西尼号共拍摄了 26000 余张木星系的照片, 其先进的成像仪器有助于研究木星天气和云的生成与演化 (Porco et al., 2003)。

a) <https://science.nasa.gov/mission/galileo/>

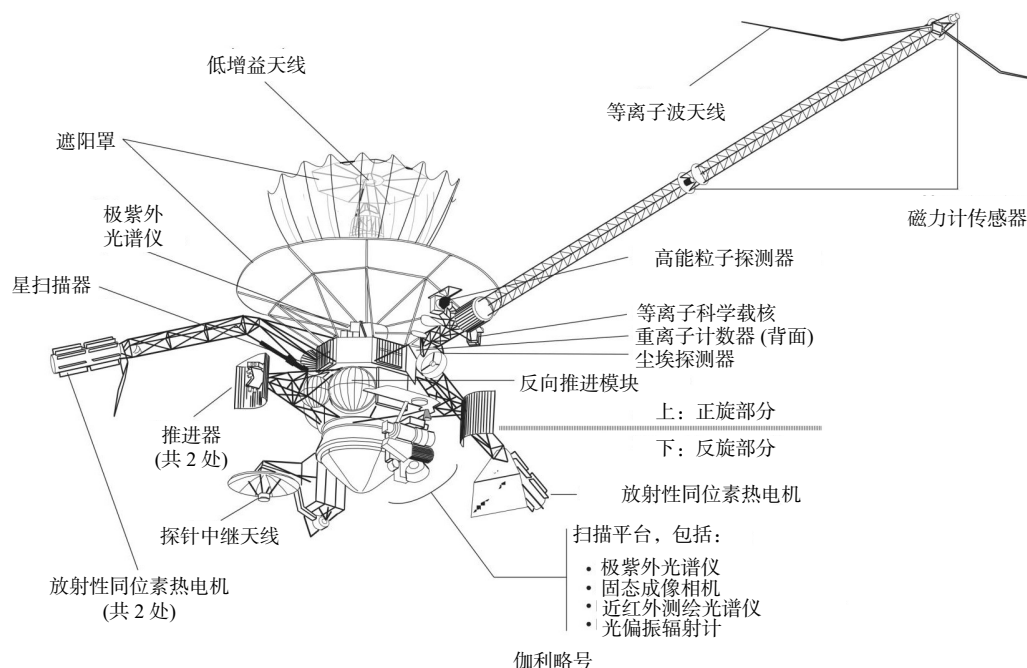


图1 伽利略环绕器及其探测仪器示意图 (引自 NASA/JPL-Caltech)

Fig. 1 A line drawing of the Galileo orbiter and instruments (from NASA/JPL-Caltech)

卡西尼号飞过木星时, 伽利略号正在木星轨道上环绕, 因此科学家们利用几个月的时间, 让两架飞行器同时研究木星. 例如, 当伽利略号在木星磁层内侧测量时, 卡西尼号在太阳风占主导的外侧进行测量, 二者共同研究太阳风带电粒子和磁层的相互作用 (Hospodarsky et al., 2004).

2017年9月15日, 卡西尼号撞向土星, 结束了它20年的任务. 直到最后一刻, 卡西尼号还在向地球传送数据.

1.8 2006年: 新视野号

新视野号 (New Horizons) 于2006年1月19日发射, 重478 kg, 任务目标是研究冥王星及其卫星、以及柯伊伯带的其他天体, 任务范围距离太阳30 AU至50 AU (Siddiqi, 2018).

2007年2月28日, 新视野号飞越木星以进行引力辅助, 对木星进行了为期4个月的观测, 收集了木星大气、环带系统、木星卫星的信息. 尽管观测距离明显远于伽利略号, 新视野号还是传回了木卫一、木卫二、木卫三的精彩照片, 包括木卫一火山喷发的照片. 新视野号对木星卫星进行了可见光和红外波段的观测. 可见光波段的观测结果表明, 木卫二表面相较于其他冰卫星而言, 散射光更偏向于各向同性. 新视野号的红外光谱绘制了水的吸收线, 并且绘制了对流上升区氨云的发展过程 (Reuter et al., 2007).

木星的引力把新视野号加速至14000 km/h, 将其前往冥王星的旅程缩短了3年. 2019年, 新视野号飞过柯伊伯带, 拍摄到了形似双球雪人的天体, 随后被NASA命名为“天空”(Arrokoth), 它是人类近距离探测过的最远的天体. 如今, 新视野号正在以每年约48万千米的速度, 飞向太阳系边缘.

1.9 2011年: 朱诺号

朱诺号 (Juno) 于2011年8月5日发射, 搭载了8个科学仪器 (见表1). 朱诺号是第一个观测木星云层之下世界的飞行器 (Siddiqi, 2018), 它以罗马神话中朱庇特 (Jupiter) 之妻、可以看透云层的女神朱诺的名字命名. 截至2018年, 朱诺号已经大致获得了粗分辨率下的木星全球图像, 随后进行降轨点火, 调整至新轨道, 以飞掠木星的低纬地区. 朱诺号的轨道避开了木星的强磁场, 但每53天会近距离飞掠木星一次, 观测木星的云层、风暴以及闪电 (Bolton et al., 2017).

朱诺号利用引力探测推测出木星的急流深度. 在朱诺号之前, 没人知道木星大气急流有多深. 伽利略号的探针数据显示, 木星的大气十分干燥, 而朱诺号的微波辐射计却显示木星大气可能比先前的测量结果要潮湿许多. 木星赤道区域的水汽体积比约为0.25% (Li et al., 2020a).

朱诺号多次飞越木星, 绘制了木星磁场的三维视图. Moore等 (2019) 将朱诺号的数据同之前的

先驱者 10 号、先驱者 11 号、旅行者 1 号、尤利西斯号等获得的数据进行比对,发现木星的内部磁场随时间轻微变化.此外,Connerney 等 (2022) 还发现木星磁异常区 (大蓝斑) 有非常强的磁场长期变化和漂移现象.学者们认为,正是木星深达 3500 km 的急流和大红斑区域在不断剪切与扭曲着木星的磁场线 (顾炜东等, 2024).

朱诺号是第一个进入木星极轨的飞行器,对木星的南北两极进行了正面细致的观测,这是之前采取赤道平面轨道的飞行器所做不到的.朱诺号的相机 JunoCam 传回了许多精彩的照片,木星的极地是一片广袤的蓝色,点缀着许多地球大小的风暴,这在太阳系中是独一无二的.朱诺号发现木星北极 84° 以内有 9 个涡旋,而南极 84° 以内只有 6 个涡旋.

朱诺号的木星红外极光成像仪 (Jovian Infrared Auroral Mapper, JIRAM) 对木星极区和几处热点 (hot spots) 进行了红外观测,还观测了木星的极光 (Adriani et al., 2017, 2018, 2020). 同地球极光的原理一样,带电粒子束穿过木星的强磁场时也会产生极光.地球极光中的高能粒子大约有几千电子伏特的能量,木星极光中的高能粒子能量可达 40 万电子伏特 (Mauk et al., 2020). 不过,电流能量不是决定木星极光强度的唯一因素,木星上最强的极光还有其他未知过程的参与.木星的半径大约是地球的 11.2 倍,可以想象,电闪雷鸣、狂风骤雨和绚丽多彩的极光共同存在于这样一颗巨大的行星上,是一副多么壮丽的景象.

1.10 2023 年:木星冰卫星探测器 (JUICE)

木星冰卫星探测器 (Jupiter Icy moons Explorer, JUICE) 是由欧空局主导、NASA 参与的木星及其冰卫星探测任务,于 2023 年 4 月 14 日发射.

木星冰卫星探测器将花费大约 8 年时间飞抵木星系.期间将飞越金星、地球和地月系统.飞抵木星系后,木星冰卫星探测器将环绕木星,飞掠木卫二、三、四,并最终环绕木卫三.木星冰卫星探测器上共搭载了 10 个科学仪器 (见表 1).

木星冰卫星探测器的主要任务目标是研究木卫二、木卫三、木卫四这三颗可能拥有海洋的木星卫星,探究其潜在的可宜居性,并且深度探测木星的复杂环境,将木星系作为宇宙中气态巨行星的样板来研究,并最终回答气态巨行星周围可否形成宜居环境这一重大科学问题 (Grasset et al., 2013).

2 木星大气研究进展

木星的大气研究主要分为两个方向:木星的大气成分与含量、木星大气的天气与气候.木星表面丰富多彩的颜色很自然地让人好奇木星的大气构成.木星大气中都有哪些分子,哪些分子造成了木星大气的红棕色,木星平流层和对流层的化学成分有何相同与不同,木星上的云是怎样的,云粒子半径为多少……这些问题从相对静态的角度研究木星大气.从动态的角度看,木星表面电闪雷鸣、风起云涌.木星上的天气是怎样的,木星上急流、波动和涡旋的机制是什么,木星上的波动和涡旋是怎样相互作用的……这些都是很值得探究的动力学问题.下面从木星大气成分、木星的波动和急流、木星的大红斑、木星的极地涡旋这四个方面介绍木星的大气研究进展.

2.1 木星大气成分

在先驱者 10 号发射之前,科学家就利用三维模式、地基或太空望远镜等手段对木星大气进行了研究 (胡永云等, 2014). 对木星的红外波段以及反射太阳光进行频谱分析,再进行适当假设就可以推测木星大气成分 (Ingersoll, 1976). 例如, Houck 等 (1975) 利用木星 16~40 μm 的地基光谱,得出木星氢分子混合比约为 0.89. 先驱者系列的观测结果不仅订正了前人模式中的系数,更将木星大气成分的研究向前推进了一步.先驱者 10 号紫外光度计在 584 $\text{\AA}$ 的观测推算出木星的氦氢比约为 0.18 (Carlson and Judge, 1974). 旅行者 1 号利用红外光谱测得的木星氢分子含量约为 0.897,利用无线电掩星测得的氢分子含量约为 0.880 (Gautier et al., 1981).

对木星水汽的探测比较复杂, Larson 等 (1975) 分析木星的高分辨率发射谱,发现 5 μm 窗区有水汽吸收线,再对比甲烷和氨气的吸收线,得出水汽的摩尔占比约为 10^{-6} . 伽利略探针 (Galileo Probe) 于 1995 年采用质谱仪首次测定了木星大气成分,经过遥感订正后 (Atreya, 2010),发现 H_2 占比 86.1%、He 占比 13.6%、 CH_4 占比 1.95%、 NH_3 占比 0.57%、 H_2O 占比 0.43%、 H_2S 占比 0.078%、Ne 占比 0.0021%,如表 2 所示.值得指出的是,这份原位探测数据只是一次探测的结果,并不代表最终答案,未来需要多次重复性测量.此外,木星大气成分在空间中的分布是不均匀的,尤其是 H_2O

表 2 木星大气成分 (数据来自 Atreya, 2010)

Table 2 Jupiter atmospheric composition (data from Atreya, 2010)

	成分	混合比
主要成分	H ₂	0.861 ± 0.004
	He	0.136 ± 0.003
主要微量成分	CH ₄	$(2.05 \pm 0.49) \times 10^{-3}$
	NH ₃	$(5.74 \pm 2.19) \times 10^{-4}$
	H ₂ O(热点处)	$(4.27 \pm 1.51) \times 10^{-4}$
	H ₂ S	$(7.74 \pm 1.85) \times 10^{-5}$
	Ne	$(2.14 \pm 0.15) \times 10^{-5}$
	Ar	$(1.57 \pm 0.31) \times 10^{-5}$
	Kr	$(7.53 \pm 1.41) \times 10^{-9}$
	Xe	$(7.68 \pm 1.46) \times 10^{-10}$

和 NH₃ 等成分的空间差异很大, 一次探针结果不足以代表真实情况。

氨气冰晶是白色的, 仅仅只是氨气并不能造成木星多彩的云层。红外观测表明, 木星表面的色彩变化和云高有关 (Chase et al., 1974; Keay et al., 1973; Westphal et al., 1974)。高云对应大气上升运动区域, 云顶较高, 云顶温度较低, 主要成分应该是氨冰晶, 呈现白色; 低云对应大气下沉运动区域, 云顶较低、云顶温度较高, 主要成分应该是 NH₄SH, 呈现红褐色。尽管木星表面颜色和云顶高度吻合较

好, 但是单从颜色并不能完全推断出云的化学成分。除了硫化物和磷化物之外, 大分子有机物也可以影响木星的颜色, 例如长波紫外线照射还原性大气所产生的红棕色高分子聚合物和氨基酸 (Khare and Sagan, 1973)。

木星中光谱可识别的氨云 (spectrally identifiable ammonia clouds, SIACs) 只覆盖木星不到 1% 的表面 (Baines et al., 2002)。卡西尼号的集成红外光谱仪 (Composite Infrared Spectrometer) 显示光谱可识别的氨云大多在强对流区域产生, 氨气被强上升气流从大气深处抬升到高层并凝结 (Wong et al., 2004)。新视野号的红外光谱连续测量了五个木星自转周期, 空间分辨率为 140~200 km, 展示了氨冰晶云在强辐合抬升区域的发展过程, 进一步佐证了光谱可识别氨云与木星大气波动和垂直运动间的对应关系 (Reuter et al., 2007)。木星大气上层的化学成分及其光谱特征在一定程度上可以作为木星云层下动力过程的示踪物。

2.2 木星的波动和急流

木星云顶不仅有丰富多彩的颜色, 还有层次分明的亮带 (Zones) 和暗带 (Belts), 它们集中在中纬度地区, 每个带的宽度约为 2~8 个纬度, 如图 2a 所示。亮带和暗带的边界可以根据纬向风涡度

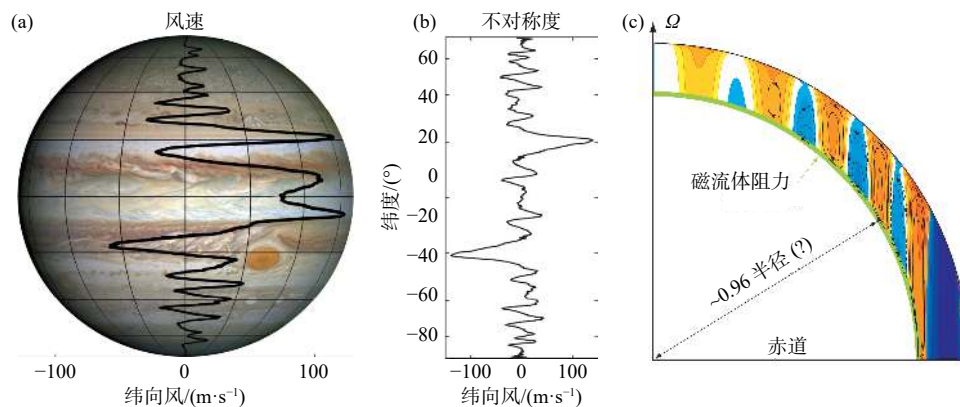


图 2 木星纬向风的不对称性 (引自 Kaspi et al., 2018)。(a) 哈勃宽视场相机拍摄的木星图片 (来自 <https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter>), 浅色区域为亮带 (Zones), 深色区域为暗带 (Belts)。黑色实线为朱诺号于 2016 年 12 月 11 日测量的木星云层平均纬向风 (引自 Tollefson et al., 2017)。网格经向尺度为 45°, 纬向尺度同图 (b)。(b) 木星北半球纬向风与南半球纬向风的差。(c) 木星纬向风与经向环流的模拟示意图 (引自 Schneider and Liu, 2009)。填色代表纬向风速, 橘色为正, 蓝色为负。等高线代表经向质量流函数, 实线为顺时针, 虚线为逆时针

Fig. 2 Asymmetry of Jupiter's zonal flows (from Kaspi et al., 2018). (a) Image of Jupiter by Hubble Wide Field camera (from <https://en.wikipedia.org/wiki/Jupiter>). The bright, light-coloured bands are called "Zones", and the dark-coloured bands are called "Belts". The thick black line shows the zonal mean flows at cloud level, taken by Juno on December 11, 2016 (from Tollefson et al., 2017). The longitudinal spread of grid is 45° and the latitudinal spread is the same as Panel (b). (b) The asymmetry of Jupiter's cloud level zonal flows between the northern hemisphere and the southern hemisphere. (c) Schematic figure for Jupiter's zonal wind and mean meridional circulations (from Schneider and Liu, 2009). The colors show zonal wind. Orange means prograde and blue means retrograde. Contours show the mass flux streamfunction of the mean meridional circulation. Solid line means clockwise and dashed lines means counterclockwise

$\bar{\zeta} = -\partial\bar{u}/\partial\bar{y}$ 的符号定义, 其中 u 代表纬向风, y 代表

处 (Duer et al., 2021), 如图 3a-3d 所示. 旅行者系列对木星低纬度地区的观测结果显示, 在大气压低

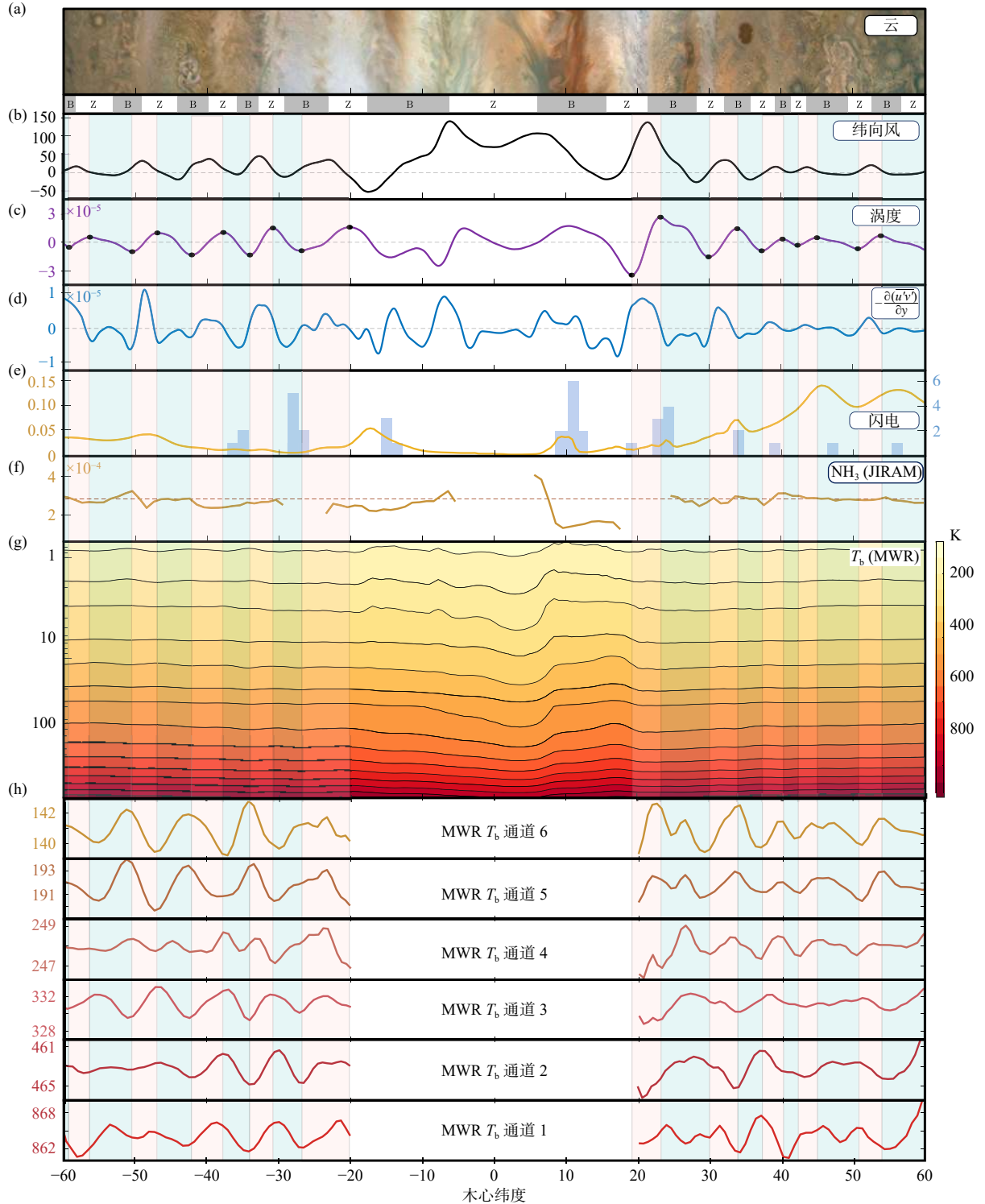


图3 木星大气动力机制 (引自 Duer et al., 2021). (a) 木星大气云顶亮带和暗带. (b) 纬向风. (c) 纬向风涡度 $\bar{\zeta} = -\partial\bar{u}/\partial\bar{y}$. (d) 波动动量通量的辐合 $[-\partial(u'v')/\partial y]$. (e) 闪电随纬度分布. (f) NH_3 随纬度分布. (g) 朱诺号微波辐射计 (MWR) 测量的木星大气~0.7 至~240 bar 的亮温 (T_b). (h) 微波辐射计 6 个不同波段测量的大气不同深度的亮温, 主要代表了深度约为 0、20、50、90、150 和 350 km 的情况 (引自 Janssen et al., 2017)

Fig. 3 Atmospheric dynamics of Jupiter (from Duer et al., 2021). (a) Zones and belts of Jupiter's cloud top; (b) Zonal-wind; (c) Zonal-wind vorticity $(-\partial\bar{u}/\partial\bar{y})$; (d) Eddy momentum flux convergence $[-\partial(u'v')/\partial y]$; (e) Lightning distribution; (f) NH_3 distribution; (g) Brightness temperature (T_b) from ~0.7 to ~240 bar, measured by Juno Microwave Radiometer (MWR); (h) Brightness temperature at different depth, measured by MWR's six microwave channels, showing the atmosphere at 0, 20, 50, 90, 150, and 300 km depth (from Janssen et al., 2017)

于0.5 bar的表层,亮带与上升气流是联系在一起的,温度较低,云对阳光的反射较强;暗带与下沉气流有关,温度较高,云较少(Gierasch et al., 1986).木星的南北半球各有8个波动驱动的经向环流,而地球上类似的经向环流只有一个,即费雷尔环流.原因可能是木星相比地球,不仅自转更快、半径更大,大气也要厚很多.

朱诺号搭载的6个波段的微波辐射计可以覆盖木星0.7~240 bar的大气,朱诺号的微波数据在木星的南北纬60°之间观测到了与16个经向环流相吻合的上升和下沉区.Duer等(2021)以氦气为示踪物,利用简单的数值模拟,复原了这些观测特征,他们认为木星经向环流的动量源来自大气波动,深度至少有几百千米.此外,木星大气的上升支通常与闪电联系在一起,因此可以通过观测闪电发生的位置定位环流的位置(Brown et al., 2018; Little et al., 1999; Porco et al., 2003).

传统的浅层观点认为,木星的风速随着大气深度增加而减小(Ingersoll and Cuzzi, 1969),风只存在于木星大气的浅表层,木星大气的深层像地球的深海一样,相对比较平静.在平静的深层之上,亮带和反气旋处的大气更暖.暖空气上升,冷空气下沉.因此,亮带的大气是缓慢上升的,暗带的大气是缓慢下沉的.从观测结果上看,亮带和反气旋的云顶更高、暗带的云顶更低,与浅层机制吻合良好.另一种深层观点认为,木星上的风在大气深层依旧很强(Busse, 1976).如果大气是正压的,则木星大气的结构为若干个以木星自转轴为中心的共轴空心圆柱体,大气遵守泰勒-普劳德曼定理(Taylor-Proudman theorem),以整柱为单位交替反向旋转(Kundu et al., 2015).体现在木星表层,就是方向交错的纬向风.如果木星大气是斜压的,则泰勒-普劳德曼定理不再适用,大气不以整柱为单位运动.木星的大气环流究竟是浅层还是深层机制,至今没有定论,需要木星大气深层的温度与风速探测来印证(Ingersoll et al., 2004; Vasavada and Showman, 2005).Juno的重力场观测证实了木星急流延伸到云层以下约3000 km的深度(Kaspi et al., 2018),但这并不能完全排除浅层机制(Kong et al., 2018; Showman et al., 2006).

1986年,旅行者系列首次观测到了木星的中尺度波动(Flasar and Gierasch, 1986).新视野号在11~45 km的空间分辨率下观测到了波长300 km、相速度比纬向风大100 m/s的中尺度波动(Reuter

et al., 2007).木星表面的二维湍流和 β 效应共同作用导致了交替的纬向风(Rhines, 1975),动量辐合对应正的风场(自西向东吹、与行星自转方向相同),动量辐散对应负的风场(自东向西吹、与行星自转方向相反).随着纬度升高,纬向风逐渐减弱,最终极地涡度占主导.

红外观测发现,木星的赤道地区平流层存在4~6年周期,振幅约为5 K的温度冷暖交替(Flasar et al., 2004; Friedson, 1999; Giles et al., 2020; Orton et al., 1991; Simon-Miller et al., 2006)与振幅为100 m/s的急流东西交替(Orton et al., 1991, 1994),这一现象被称为准四年震荡(quasi-quadrennial oscillation, QQQ).Leovy等(1991)与Baldwin等(2001)认为,准四年震荡可能与地球上的准两年震荡机制相似.地球上的准两年震荡(quasi-biennial oscillation, QBO)发生在赤道地区,周期约为28个月.一些模拟与理论研究认为,地球准两年震荡是赤道上方的背景流对赤道大气波的选择性吸收引起的(Lindzen and Holton, 1968; Lindzen, 1970, 1971, 1972).木星准四年震荡的周期发生过明显改变.1980—1990年间观测到的准四年震荡周期约为5.7年,而1996—2006年间观测到的周期为3.9年(Antuñano et al., 2021),Lian等(2023)认为,准四年震荡周期的改变可能是位涡的各向异性发展导致赤道深层急流加强造成的.木星上的准四年震荡在1992年和2007年出现了两次中断,同时赤道和低纬度地区伴随着行星尺度的扰动.Antuñano等(2021)认为,木星上的准四年震荡中断和大气深处天气现象产生波动的垂直输送有关,与地球准两年震荡和土星准周期震荡(quasi-periodic equatorial oscillation, QPO)的中断机制不同.不过,对流层与平流层之间的相互作用是行星气候系统的共性,当发生极端天气事件时,行星上的准周期震荡可以在不同模式之间切换.

2.3 木星的大红斑

大红斑位于木星南纬22.3°的一块长期高压区,是一个逆时针旋转的反气旋(Rogers, 1995).人类对大红斑的观测由来已久,1665年卡西尼最早观测到了木星表面的一个“永久斑点”,但是在1713年之后,关于木星表面大红斑的记载暂时消失在历史长河中,直到1831年,木星表面的“大凹陷”才再次被德国天文爱好者海因里希·施瓦贝(Heinrich Schwabe)观测并记录下来.人们如今看

到的木星大红斑与卡西尼所观测到的是不是同一个大红斑,还有待考证(图4)。

大红斑如今的直径大约为 16350 km, 是地球直径的 1.3 倍. 在过去几百年间, 大红斑的面积是逐渐缩小的. 自 19 世纪末, 科学家就发现大红斑在经向跨度上明显收缩, 但是在纬向跨度上变化不明显 (Reese and Solberg, 1966; Rogers, 1995). 旅行者 1 号测得大红斑的纬向跨度为 1.3×10^4 km (Beebe and Youngblood, 1979), 与 1880—1970 年间地基观测到的大红斑跨越 11 个纬度数据相吻合. 大红斑的边缘有几种定义方法, 有时在红光波段边缘更清晰, 有时在蓝光波段边缘更清晰, 有时则用反照率梯度最大值定义 (Simon-Miller et al., 2002). 大红斑的形成机制尚未清楚, 但是根据大气动力原理推测, 大红斑极有可能是由很多小涡旋逐渐合并增长出来的, 对应着能量的反串级 (Choi and Showman, 2011). 最终, 大红斑的大小可能取决于涡旋与急流之间相互作用的结果.

大红斑的旋转周期一直在变化. Reese 和 Smith (1968) 通过追踪照片中大红斑周围的黑点, 测定大红斑的周期为 9~12 天, 风速接近 100 m/s, 比地球上的台风要强好几倍. 1979 年旅行者号直接观测到的大红斑旋转周期为 6~8 天, 利用风速推算的周期在 7 天左右 (Rogers, 2008; Sada et al., 1996), 1996 年根据伽利略号风速数据推算出的大红斑旋转周期约为 5 天 (Vasavada et al., 1998), 而 2000 年, 根据伽利略号风速数据推算出的周期则缩短为 3 天左右 (Rogers, 2008; Simon-Miller et al., 2002). Rogers (2008) 认为, 随着时间推进, 木星的大红斑是越转越快的. 大红斑在 $0.89 \mu\text{m}$ 处的甲烷吸收波段总是很亮, 在 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的红外波段却很暗. 这两个特点表明大红斑的云顶比其他地方更高、温度更低 (Rogers, 1995; Simon-Miller et al., 2002).

2017 年朱诺号第二次飞掠大红斑时, 其微波辐射计测得大红斑深度大约在 100 bar 处 (对应约 240 km), 远远深于木星 0.7 bar 的云层, 但微波探测只能估算大红斑深度的最小值 (Bolton et al., 2021). 引力探测是测量大红斑深度的另一种方法, 因为大红斑处气体的平均密度与大红斑外的气体密度有差别. 朱诺号飞掠大红斑时, 大红斑处的引力异常会改变朱诺号的视向速度, 进而推测大红斑的深度可能不超过 500 km (Parisi et al., 2021).

2.4 木星的极地涡旋

朱诺号对于木星极地的研究贡献很大, 朱诺号之前的任务轨道大多离木星赤道面不远, 先驱者 11 号拍摄木星极区时距离较远且角度较偏, 而朱诺号首次对木星极地做了正面细致的观测.

朱诺号拍摄的可见光和红外波段照片显示, 木星的南北极地区的涡旋都呈多边形结构. 在木星北极观测到了 8 个涡旋围绕一个涡旋旋转的结构, 在木星南极观测到了 5 个涡旋围绕 1 个涡旋旋转的结构, 如图 5. 南极的 6 涡旋结构看起来很稳定, 但朱诺号下一次飞掠时却发现系统中加入了第 7 个略小一些的涡旋, 后续的观测又发现这一小涡旋被踢出了南极区域 (Figure 1 in Mura et al., 2021). 朱诺号的木星红外极光成像仪 (Jovian Infrared Auroral Mapper, JIRAM) 显示, 两极的涡旋都在 84° 附近. 朱诺号连续 5 年的观测发现, 这些涡旋一直在进行振幅 400 km、周期 12 个月的圆周震荡 (Gavriel and Kaspi, 2022). 北极的涡旋以平均每年 3° 、南极的涡旋以平均每年 7.5° 的速度向西漂移 (Adriani et al., 2020; Mura et al., 2021). Li 等 (2020b) 利用浅水方程对木星极地涡旋进行模拟, 发现导致木星极地涡旋不合并的主要因素是屏蔽机制, 即每个涡旋周围的逆涡旋环. 涡旋深度对极地涡旋的稳定性也有一定影响. 如果屏蔽太弱、深度太浅, 则极地涡旋会合并或失去多边形结构; 如果屏蔽机制太强, 则极地涡旋会分散开来. Gavriel 和 Kaspi (2022) 认为, 涡旋震荡而不合并的原因是指向极

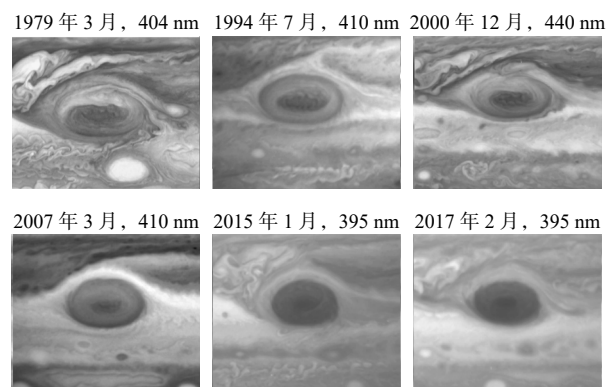


图4 1979—2017 年, 蓝紫波段下木星大红斑的形状演变 (引自 Simon et al., 2018). 1979 年图片来自旅行者号, 2000 年图片来自卡西尼号. 其余图片来自哈勃望远镜

Fig. 4 The evolution of the Great Red Spot's shape from 1979 to 2017, at blue/violet wavelengths (from Simon et al., 2018). The 1979 data from Voyager, the 2000 data from Cassini, and the rest from Hubble

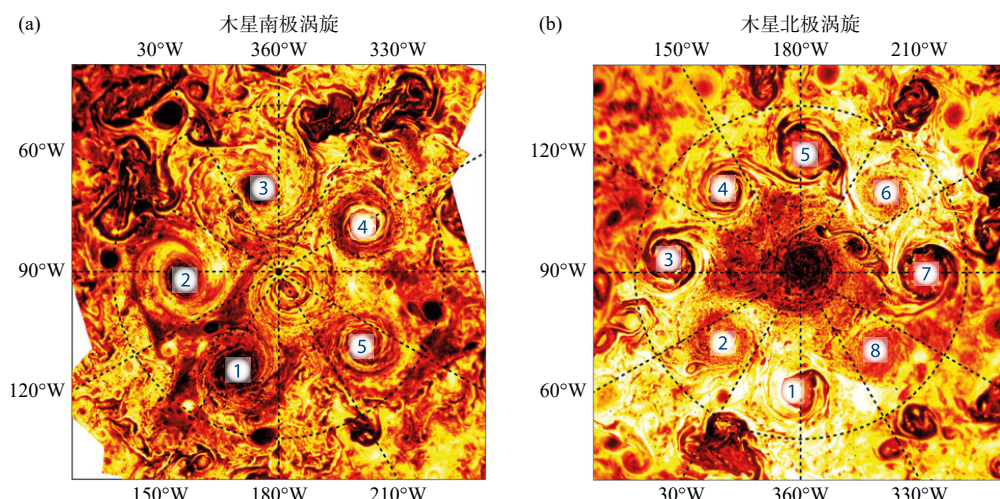


图 5 朱诺号红外极光成像仪于 2017 年 2 月 2 日拍摄的木星极区 (引自 Gavriel and Kaspi, 2023)

Fig. 5 North and south pole of Jupiter, imaged by Jovian Infrared Auroral Mapper instrument onboard Juno on Feb. 2, 2017 (from Gavriel and Kaspi, 2023)

地的 β 漂移和气旋之间的相互排斥, 并建立了模型来验证这一理论. 木星极地涡旋的形成、维持与演化是目前行星大气动力的研究前沿热点.

3 讨论与展望

未来的木星探测任务主要集中在两方面, 一是继续探索关于木星的未解之谜, 二是探究木星卫星是否可孕育生命.

为什么木星内的重元素含量显著高于太阳的重元素含量? 模拟结果显示, 木星的早期轨道可能比现在的轨道远 4 倍, 或许可以解释这个问题 (Pirani et al., 2019). 不过, 现有核心吸积模型的模拟结果并不能与朱诺号测量的木星内核质量相吻合 (Helled et al., 2022). 木星的内核是怎样的, 内核边界是不是稀释的 (Debras and Chabrier, 2019; Wahl et al., 2017), 木星上的水来自哪里, 是否是重元素一起被流星带到木星上的 (Crawford et al., 1994; Sprague et al., 1996). 探究这些问题有助于更好地理解木星的早期形成过程, 更有助于科学家们理解气态巨行星的早期形成和演化, 为更深远的系外行星观测乃至星际探索提供范本.

木星体积大、自转快, 不像地球一样有复杂的地形地貌和海陆分布, 是一个理想的行星流体力学样本. 木星表面的大红斑为什么在逐渐缩小, 木星南北极的涡旋为什么不合并, 为什么南极和北极的涡旋数量不一样, 木星的环流结构究竟是怎样的, 大气的垂直结构在不同地区有何不同……这些关于木星大气的问题也需要进一步的探测和模拟.

木卫二、木卫三和木卫四这三颗冰卫星的内部很可能存在海洋, 可能存在生命宜居环境. 2023 年发射的木星冰卫星探测任务的重要观测目标就是木卫三的海洋层、潜在的地下水库以及冰层的物理特性. NASA 计划在 2024 年 10 月发射欧罗巴快帆 (Europa Clipper), 耐受强磁场的轨道环绕器将在环绕木星的同时多次近距离飞掠木卫二, 进行深入细致的观测. 欧罗巴快帆的主要目的并不是寻找生命, 而是探寻木卫二冰面下是否具有可以维持生命存在的要素. 这次任务计划测量木卫二的冰层厚度、冰下海洋的体积、盐度与物质组成以及冰下海与冰面以上部分是否存在物质交换 (Jackson et al., 2020; Phillips and Pappalardo, 2014).

木卫四孕育生命的可能性在三颗冰卫星中是最小的 (Lipps et al., 2004), 木卫四的海洋仅靠地热维持温度, 而木卫二的海洋除地热外还受潮汐加热. 不过, 木卫四作为一个探测目标也有许多优点: 木卫四距离木星较远, 因此辐射较弱; 木卫四的地下海可能很深, 和地表没有物质交换, 不用考虑污染问题, 可以开展登陆任务.

从 1973 年先驱者 10 号飞掠木星开始, 木星探测任务已经进行了 50 年, 岁星轮转了四季有余. 我们在遥远的过去曾经无数次仰望岁星, 将其编入历法, 刻进岁月, 但没能在现今的木星科学探索上继续领先. 欧航局和美国航天局已经进行了 10 余次很成功的木星探测任务, 我国的木星探测需要科学工作者们提出有价值、同时公众也感兴趣的科学问题, 共同探索, 力求在他人的基础上有所突破. 重新认识木星、探索木星的任务, 现在已经交到了我们手上.

References

- Adriani A, Filacchione G, Di Iorio T, et al. 2017. JIRAM, the Jovian infrared auroral mapper[J]. *Space Science Reviews*, 213: 393-446.
- Adriani A, Mura A, Orton G, et al. 2018. Clusters of cyclones encircling Jupiter's poles[J]. *Nature*, 555(7695): 216-219.
- Adriani A, Bracco A, Grassi D, et al. 2020. Two-year observations of the Jupiter polar regions by JIRAM on board Juno[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(6): e2019JE006098.
- Anderson J D, Jacobson R A, Lau E L, et al. 2001. Io's gravity field and interior structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E12): 32963-32969.
- Antuñano A, Cosentino R G, Fletcher L N, et al. 2021. Fluctuations in Jupiter's equatorial stratospheric oscillation[J]. *Nature Astronomy*, 5(1): 71-77.
- Atreya S K. 2010. Atmospheric moons Galileo would have loved[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 6(S269): 130-140.
- Baines K H, Carlson R W, Kamp L W. 2002. Fresh ammonia ice clouds in Jupiter: I. Spectroscopic identification, spatial distribution, and dynamical implications[J]. *Icarus*, 159(1): 74-94.
- Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al. 2001. The quasi-biennial oscillation[J]. *Reviews of Geophysics*, 39(2): 179-229.
- Balogh A, Dougherty M K, Forsyth R J, et al. 1992. Magnetic field observations during the Ulysses flyby of Jupiter[J]. *Science*, 257(5076): 1515-1518.
- Batson R M, Bridges P M, Inge J L, et al. 1980. Mapping the Galilean satellites of Jupiter with Voyager data[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(10): 1303-1312.
- Beebe R F, Youngblood L A. 1979. Pre-Voyager velocities, accelerations and shrinkage rates of Jovian cloud features[J]. *Nature*, 280(5725): 771-772.
- Billings L. 2012. 50 Years of Solar System Exploration: Historical Perspectives[M]. United States: NASA History Division.
- Bolton S J, Lunine J, Stevenson D, et al. 2017. The Juno mission[J]. *Space Science Reviews*, 213: 5-37.
- Bolton S J, Levin S, Guillot T, et al. 2021. Microwave observations constrain the depth of vortices in Jupiter's atmosphere[J]. *Science*, 374(6570): 968-972.
- Brown S, Janssen M, Adumitroaie V, et al. 2018. Prevalent lightning sferics at 600 megahertz near Jupiter's poles[J]. *Nature*, 558(7708): 87-90.
- Burke B F, Franklin K L. 1955. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 60(2): 213-217.
- Busse F H. 1976. A simple model of convection in the Jovian atmosphere[J]. *Icarus*, 29(2): 255-260.
- Butterworth P S. 1981. Observations of the Galilean satellites of Jupiter from Earth orbit[J]. *Advances in Space Research*, 1(9): 177-184.
- Carlson R W, Judge D L. 1974. Pioneer 10 ultraviolet photometer observations at Jupiter encounter[J]. *Journal of Geophysical Research*, 79(25): 3623-3633.
- Chase S C, Ruiz R D, Mnch G, et al. 1974. Pioneer 10 infrared radiometer experiment: Preliminary results[J]. *Science*, 183(4122): 315-317.
- Choi D S, Showman A P. 2011. Power spectral analysis of Jupiter's clouds and kinetic energy from Cassini[J]. *Icarus*, 216(2): 597-609.
- Connerney J E P, Timmins S, Oliverson R J, et al. 2022. A new model of Jupiter's magnetic field at the completion of Juno's Prime Mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(2): e2021JE007055.
- Crawford D A, Boslough M B, Trucano T G, Robinson A C. 1994. The impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter[J]. *Shock Waves*, 4: 47-50.
- Debras F, Chabrier G. 2019. New models of Jupiter in the context of Juno and Galileo[J]. *The Astrophysical Journal*, 872(1): 100.
- Duer K, Gavriel N, Galanti E, et al. 2021. Evidence for multiple Ferrel-like cells on Jupiter[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(23): e2021GL0.
- Dunham T. 1933. Note on the spectra of Jupiter and Saturn[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 45(263): 42-44.
- Flasar F M, Gierasch P J. 1986. Mesoscale waves as a probe of Jupiter's deep atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43(22): 2683-2707.
- Flasar F M, Kunde V G, Achterberg R K, et al. 2004. An intense stratospheric jet on Jupiter[J]. *Nature*, 427(6970): 132-135.
- Friedson A J. 1999. New observations and modelling of a QBO-like oscillation in Jupiter's stratosphere[J]. *Icarus*, 137(1): 34-55.
- Gautier D, Conrath B, Flasar M, et al. 1981. The helium abundance of Jupiter from Voyager[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A10): 8713-8720.
- Gavriel N, Kaspi Y. 2022. The oscillatory motion of Jupiter's polar cyclones results from vorticity dynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(15): e2022GL098708.
- Gavriel N, Kaspi Y. 2023. The westward drift of Jupiter's polar cyclones explained by a center-of-mass approach[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(19): e2023GL103635.
- Gierasch P J, Magalhaes J A, Conrath B J. 1986. Zonal mean properties of Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared observations[J]. *Icarus*, 67: 456-483.
- Giles R S, Greathouse T K, Cosentino R G, et al. 2020. Vertically-resolved observations of Jupiter's quasi-quadrennial oscillation from 2012 to 2019[J]. *Icarus*, 350: 113905.
- Givens J, Nolte L, Pochettino L. 1983. Galileo atmospheric entry probe system-design, development, and test[R]. 21st Aerospace Sciences Meeting, 98.
- Grasset O, Dougherty M K, Coustenis A, et al. 2013. Jupiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system[J]. *Planetary and Space Science*, 78: 1-21.
- Greeley R, Klemaszewski J E, Wagner R, Galileo Imaging Team. 2000. Galileo views of the geology of Callisto[J]. *Planetary and Space Science*, 48(9): 829-853.
- Gu W D, Wei Y, Yao Z H, et al. 2024. Research on Jupiter's magnetic field: Review and prospect[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 55(6): 638-651 (in Chinese).
- Hall C F. 1974. Pioneer 10[J]. *Science*, 183(4122): 301-302.
- Hall C F. 1983. The Pioneer 10/11 program: from 1969 to 1994[J].

- IEEE Transactions on Reliability, 32(5): 414-416.
- Helled R, Stevenson D J, Lunine J I, et al. 2022. Revelations on Jupiter's formation, evolution and interior: Challenges from Juno results[J]. *Icarus*, 378: 114937.
- Hospodarsky G B, Kurth W S, Cecconi B, et al. 2004. Simultaneous observations of Jovian quasi-periodic radio emissions by the Galileo and Cassini spacecraft[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A9): A09S07.
- Houck J R, Pollack J B, Schaack D, et al. 1975. Jupiter: Its infrared spectrum from 16 to 40 micrometers[J]. *Science*, 189(4204): 720-722.
- Hu Y Y, Tian F. 2013. Planets in the Solar System[M]// Lu T. Modern Astrophysics. Beijing: Peking University Press (in Chinese).
- Hu Y Y, Tian F, Liu J J. 2014. A Review on Planetary Atmospheric Research[M]// Huang R H, Wu G X, Chen W, et al. Decadal Strategies for Atmospheric Research. Beijing: Science Press, 290-333 (in Chinese).
- Hu Y Y, Yang J. 2021. Planetary Cryosphere[M]. Beijing: Science Press, 104-106 (in Chinese).
- Ingersoll A P, Cuzzi J N. 1969. Dynamics of Jupiter's cloud bands[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 26(5): 981-985.
- Ingersoll A P. 1976. The atmosphere of Jupiter[J]. *Space Science Reviews*, 18(5-6): 603-639.
- Ingersoll A P, Dowling T E, Gierasch P J, et al. 2004. Dynamics of Jupiter's Atmosphere[M]// Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere, 105.
- Jackson M, Bayer T, Sheldon C, et al. 2020. Europa clipper mission: Onward to implementation![C]//2020 IEEE Aerospace Conference. IEEE, 1-20.
- Janssen M A, Oswald J E, Brown S T, et al. 2017. MWR: Microwave radiometer for the Juno mission to Jupiter[J]. *Space Science Reviews*, 213: 139-185.
- Kaspi Y E, Galanti E, Hubbard W B, et al. 2018. Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep[J]. *Nature*, 555(7695): 223-226.
- Keay C S L, Low F J, Rieke G H, Minton R B. 1973. High-resolution maps of Jupiter at 5 microns[J]. *The Astrophysical Journal*, 183: 1063-1074.
- Khare B N, Sagan C. 1973. Red clouds in reducing atmospheres[J]. *Icarus*, 20(3): 311-321.
- Kong D, Zhang K, Schubert G, Anderson J D. 2018. Origin of Jupiter's cloud-level zonal winds remains a puzzle even after Juno[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(34): 8499-8504.
- Kundu P K, Cohen I M, Dowling D R. 2015. Fluid Mechanics[M]. Academic Press.
- Kuskov O L, Kronrod V A. 2005. Internal structure of Europa and Callisto[J]. *Icarus*, 177(2): 550-569.
- Larson H P, Fink U, Treffers R, Gautier III T N. 1975. Detection of water vapor on Jupiter[J]. *Astrophysical Journal*, 197: L137-L140.
- Leovy C B, Friedson A J, Orton G S. 1991. The quasiquadrennial oscillation of Jupiter's equatorial stratosphere[J]. *Nature*, 354(6352): 380-382.
- Li C, Ingersoll A, Bolton S, et al. 2020a. The water abundance in Jupiter's equatorial zone[J]. *Nature Astronomy*, 4(6): 609-616.
- Li C, Ingersoll A P, Klipfel A P, Brettelle H. 2020b. Modeling the stability of polygonal patterns of vortices at the poles of Jupiter as revealed by the Juno spacecraft[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(39): 24082-24087.
- Lian Y, Tan X, Hu Y. 2023. Jupiter's equatorial quasi-quadrennial oscillation forced by internal thermal forcing[J]. *The Astrophysical Journal*, 958(1): 50.
- Lindzen R S, Holton J R. 1968. A theory of the quasi-biennial oscillation[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 25(6): 1095-1107.
- Lindzen R S. 1970. Internal equatorial planetary-scale waves in shear flow[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 27(3): 394-407.
- Lindzen R S. 1971. Equatorial planetary waves in shear. Part I[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 28(4): 609-622.
- Lindzen R S. 1972. Equatorial planetary waves in shear: Part II[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 29(8): 1452-1463.
- Lipps J H, Delory G, Pitman J T, Rieboldt S. 2004. Astrobiology of Jupiter's Icy Moons[M]// Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology VIII. SPIE, 5555: 78-92.
- Little B, Anger C D, Ingersoll A P, et al. 1999. Galileo images of lightning on Jupiter[J]. *Icarus*, 142(2): 306-323.
- Mauk B H, Clark G, Gladstone G R, et al. 2020. Energetic particles and acceleration regions over Jupiter's polar cap and main aurora: A broad overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(3): e2019JA027699.
- McKinnon W B, Pappalardo R T, Khurana K K. 2009. Europa: Perspectives on an Ocean World[M]// Pappalardo R T, McKinnon W B, Khurana K. Europa. Arizona: University of Arizona Press, 697.
- Moore K M, Cao H, Bloxham J, et al. 2019. Time variation of Jupiter's internal magnetic field consistent with zonal wind advection[J]. *Nature Astronomy*, 3(8): 730-735.
- Moore V. 1981. Ultraviolet observations of Jupiter from Earth-orbiting satellites[J]. *Advances in Space Research*, 1(9): 185-191.
- Mura A, Adriani A, Bracco A, et al. 2021. Oscillations and stability of the Jupiter polar cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 48(14): e2021GL094235.
- Orton G S, Friedson A J, Baines K H, et al. 1991. Thermal maps of Jupiter: Spatial organization and time dependence of stratospheric temperatures, 1980 to 1990[J]. *Science*, 252(5005): 537-542.
- Orton G S, Friedson A J, Yanamandra-Fisher P A, et al. 1994. Spatial organization and time dependence of Jupiter's tropospheric temperatures, 1980-1993[J]. *Science*, 265(5172): 625-631.
- Parisi M, Kaspi Y, Galanti E, et al. 2021. The depth of Jupiter's Great Red Spot constrained by Juno gravity overflights[J]. *Science*, 374(6570): 964-968.
- Phillips C B, Pappalardo R T. 2014. Europa Clipper mission concept: Exploring Jupiter's ocean moon[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(20): 165-167.
- Pirani S, Johansen A, Bitsch B, et al. 2019. Consequences of planetary migration on the minor bodies of the early solar system[J]. *Astrophysics & Astrophysics*, 623: A169.
- Porco C C, West R A, McEwen A, et al. 2003. Cassini imaging of Jupiter's atmosphere, satellites, and rings[J]. *Science*, 299(5612): 1541-1547.

- Reese E J, Solberg Jr H G. 1966. Recent measures of the latitude and longitude of Jupiter's Red Spot[J]. *Icarus*, 5(1-6): 266-273.
- Reese E J, Smith B A. 1968. Evidence of vorticity in the GRS of Jupiter[J]. *Icarus*, 9: 474-486.
- Reuter D C, Simon-Miller A A, Lunsford A, et al. 2007. Jupiter cloud composition, stratification, convection, and wave motion: a view from New Horizons[J]. *Science*, 318(5848): 223-225.
- Rhines P B. 1975. Waves and turbulence on a beta-plane[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 69(3): 417-443.
- Rogers J H. 1995. The Giant Planet Jupiter (Vol. 6)[M]. Cambridge University Press, 191.
- Rogers J H. 2008. The accelerating circulation of Jupiter's Great Red Spot[J]. *Journal of the British Astronomical Association*, 118: 14-20.
- Sada P V, Beebe R F, Conrath B J. 1996. Comparison of the structure and dynamics of Jupiter's Great Red Spot between the Voyager 1 and 2 encounters[J]. *Icarus*, 119(2): 311-335.
- Schneider T, Liu J. 2009. Formation of jets and equatorial superrotation on Jupiter[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(3): 579-601.
- Shain C A. 1956. 18.3 Mc/s Radiation from Jupiter[J]. *Australian Journal of Physics*, 9(1): 61-73.
- Showman A P, Gierasch P J, Lian Y. 2006. Deep zonal winds can result from shallow driving in a giant-planet atmosphere[J]. *Icarus*, 182(2): 513-526.
- Siddiqi A A. 2018. Beyond Earth: A Chronicle of Deep Space Exploration, 1958-2016 (Vol. 4041)[M]. United States: National Aeronautics & Space Administration.
- Simon A A, Tabataba-Vakili F, Cosentino R, et al. 2018. Historical and contemporary trends in the size, drift, and color of Jupiter's great red spot[J]. *The Astronomical Journal*, 155(4): 151.
- Simon-Miller A A, Gierasch P J, Beebe R F, et al. 2002. New observational results concerning Jupiter's Great Red Spot[J]. *Icarus*, 158: 249-266. DOI: [10.1006/icar.2002.6867](https://doi.org/10.1006/icar.2002.6867).
- Simon-Miller A A, Conrath B J, Gierasch P J, et al. 2006. Jupiter's atmospheric temperatures: From Voyager IRIS to Cassini CIRS[J]. *Icarus*, 180(1): 98-112.
- Smith B A, Soderblom L A, Beebe R, et al. 1979. The Galilean satellites and Jupiter: Voyager 2 imaging science results[J]. *Science*, 206(4421): 927-950.
- Smith E J, Wenzel K P, Page D E. 1992. Ulysses at Jupiter: An overview of the encounter[J]. *Science*, 257(5076): 1503-1507.
- Sprague A L, Bjoraker G L, Hunten D M, et al. 1996. Water brought into Jupiter's atmosphere by fragments R and W of Comet SL-9[J]. *Icarus*, 121(1): 30-37.
- Strom R G, Schneider N M, Terrile R J, et al. 1981. Volcanic eruptions on Io[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 86(A10): 8593-8620.
- Tollefson J, Wong M H, de Pater I, et al. 2017. Changes in Jupiter's Zonal Wind Profile preceding and during the Juno mission[J]. *Icarus*, 296: 163-178.
- Vance S, Bouffard M, Choukroun M, Sotin C. 2014. Ganymede's internal structure including thermodynamics of magnesium sulfate oceans in contact with ice[J]. *Planetary and Space Science*, 96: 62-70.
- Vasavada A R, Ingersoll A P, Banfield D, et al. 1998. Galileo imaging of Jupiter's atmosphere: The Great Red Spot, equatorial region, and white ovals[J]. *Icarus*, 135: 265-275.
- Vasavada A R, Showman A P. 2005. Jovian atmospheric dynamics: An update after Galileo and Cassini[J]. *Reports on Progress in Physics*, 68(8): 1935.
- Wahl S M, Hubbard W B, Militzer B, et al. 2017. Comparing Jupiter interior structure models to Juno gravity measurements and the role of a dilute core[J]. *Geophysical Research Letters*, 44(10): 4649-4659.
- Westphal J A, Matthews K, Terrile R J. 1974. Five-micron pictures of Jupiter[J]. *Astrophysical Journal*, 188: L111-L112.
- Wildt R. 1937. Photochemistry of planetary atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 86: 321.
- Wolfe J H, Mihalov J D, Collard H R, et al. 1980. Preliminary results on the plasma environment of Saturn from the Pioneer 11 plasma analyzer experiment[J]. *Science*, 207(4429): 403-407.
- Wong M H, Bjoraker G L, Smith M D, et al. 2004. Identification of the 10- μ m ammonia ice feature on Jupiter[J]. *Planetary and Space Science*, 52(5-6): 385-395.
- Yoder C F. 1979. How tidal heating in Io drives the Galilean orbital resonance locks[J]. *Nature*, 279(5716): 767-770.
- Young R E. 2003. The Galileo probe: How it has changed our understanding of Jupiter[J]. *New Astronomy Reviews*, 47(1): 1-51.
- Zou X, Peng J, Miao Y M. 2023. Research and prospect of scientific exploration for Jovian system[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 43(6): 1-10 (in Chinese).

附中文参考文献

- 顾炜东, 魏勇, 尧中华, 等. 2024. 木星磁场研究: 回顾与展望[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 55(6): 638-651.
- 胡永云, 田丰. 2013. 太阳系行星[M]// 陆垓. 现代天体物理. 北京: 北京大学出版社.
- 胡永云, 田丰, 刘钧钧. 2014. 行星大气研究进展综述[M]// 黄荣辉, 吴国雄, 陈文, 等. 大气科学和全球气候变化研究进展和前言. 北京: 科学出版社, 290-333.
- 胡永云, 杨军. 2021. 行星冰冻圈[M]. 北京: 科学出版社, 104-106.
- 邹昕, 彭兢, 缪远明. 2023. 木星系科学探测研究与展望[J]. 中国空间科学技术, 43(6): 1-10.