

魏强, 胡永云. 2018. 木星大气探测综述 [J]. 大气科学, 42 (4): 890–901. Wei Qiang, Hu Yongyun. 2018. Spacecraft missions to Jupiter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 890–901, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17295.

木星大气探测综述

魏强 胡永云

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871

摘 要 我国计划在 2030 年发射木星探测飞船, 相关工程技术、科学目标论证的前期准备工作已经开始。为了更好地规划我国木星探测的科学目标, 我们在本文系统地总结了美欧在过去几十年所进行的历次木星探测项目及其大气探测成果。到目前为止, 已成功发射的有关木星的探测飞船共有 9 次, 其中 7 次为飞越探测 (飞船在飞越木星时顺带进行了木星的探测), 另外 2 次为专门探测 (专门为了探测木星而发射的飞船), 分别为伽利略号和朱诺号飞船。这些飞船携带了大量的探测仪器, 对木星大气的动力、物理和化学性质, 磁层、电离层和内部结构等进行了综合探测。我们在本文将主要集中在木星大气探测方面, 对 7 次飞越探测做简要的介绍, 对两次专门的探测进行详细介绍, 并对一部分尚未解决的科学问题进行简单讨论。

关键词 木星 木星大气 行星 深空探测 大气动力

文章编号 1006-9895(2018)04-0890-12

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17295

Spacecraft Missions to Jupiter

Wei Qiang and Hu Yongyun

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

Abstract China is planning to launch the country's first spacecraft to Jupiter and its satellites around 2030. The space mission has organized a series of discussions for scientists and engineers. Proposals of scientific objectives and engineering techniques are being collected. To help formulate the scientific goals of the Jupiter mission, the authors review past missions to Jupiter conducted by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the European Space Agency (ESA). Among the nine space missions that explored Jupiter and its satellites so far, seven are flyby missions. The two others particularly for Jupiter, Galileo and Juno, carried many suites of instruments. Observations are not limited to Jupiter's atmosphere. Rather, they extend to the magnetosphere, ionosphere, and internal structures. In this paper, the authors focus on observations of the Jovian atmosphere. The authors introduce the flyby missions briefly, while the Galileo and Juno spacecrafts are summarized in greater details. The authors also discuss some of the outstanding questions.

Keywords Jupiter, Jovian atmosphere, Planet, Deep space exploration, Atmospheric dynamics

收稿日期 2017-12-05; 网络预出版日期 2018-03-23

作者简介 魏强, 男, 1992年出生, 博士研究生, 主要从事行星大气和行星冰冻圈的研究。E-mail: q.wei@pku.edu.cn

通讯作者 胡永云, E-mail: yyhu@pku.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目41530423、41761144072

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41530423 and 41761144072)

1 引言

木星是太阳系质量和体积最大的行星 (De Pater and Lissauer, 2015)。其质量是地球的 318 倍, 是其他 7 颗行星质量总和的 2.5 倍。由于木星的自转周期不到 10 小时, 其赤道和两极半径的差异比其他行星大得多, 分别为 71,492 km 和 66,854 km, 平均半径约为 69,911 km, 是地球的 11 倍, 其体积是地球的大约 1000 倍。在太阳系 8 颗行星中, 木星由内向外位置排列第五位, 距离太阳 5.2 个天文单位 (地球与太阳的平均距离为一个天文单位 (AU), $1 \text{ AU} \approx 1.5 \times 10^8 \text{ km}$), 围绕太阳的公转周期约为 11.86 年 (Bagenal et al., 2006)。

木星大气的主要成分是氢和氦, 这与太阳大气的成分类似, 均是宇宙大爆炸的原始产物。根据体积比, 木星大气中的氢约占 90%, 氦约占 10%, 由于氦原子的质量是氢原子的 4 倍, 如果按质量比来计算, 二者占比分别为 75% 和 24%。除此之外, 木星大气还包含有 1% 的痕量气体, 如甲烷、氨和水。与地球不同的是, 随着深度增加, 大气的温度和压强远远超过氢和氦的临界点, 氢和氦逐渐由气态过渡到液态。当压力足够大时, 氢将逐渐变为导电的金属性质液体, 与氦不再能够均匀混合, 氦则形成小液滴进入木星深层 (Stevenson, 1975; Nellis et al., 1996; Guillot et al., 2004)。金属氢层从大约 0.78 倍木星半径处向下延伸, 直到可能存在的固态内核 (Elkins-Tanton, 2006)。该层同时也是木星发电机区域的位置, 其对流运动加之木星的自转产生了强大的磁场, 在赤道表面约为 4.3 高斯, 比地球磁场强一个数量级 (Gierasch and Nicholson, 2004; Bagenal et al., 2006)。木星是否存在岩石内核至今仍未有定论。对最新的朱诺号重力场观测数据和内部构造模式分析认为其可能存在一个边界稀释的内核, 即在内核与金属氢层之间没有明确的稳定界限, 一部分内核的重元素溶解在了金属氢中 (图 1)。这一内核质量较小, 约含有 7~25 倍地球质量的重元素 (Stevenson, 1985; Wahl et al., 2017)。就质量而言, 气态大气层和固态内核仅占木星质量的很少一部分, 因此, 也有人称木星和土星这样的巨行星为液态星球。

木星大气的温度在 100 hPa 以下随高度升高而递减, 类似于地球大气的对流层。由对流运动造成的氨气和水汽所凝结成的云层分别分布于 1~3 bar

以及 5~10 bar (1 bar = 1000 hPa), 云层由高到低分别是 NH_3 、 NH_4HS 和 H_2O 云 (Weidenschilling and Lewis, 1973; Vasavada and Showman, 2005)。由局部强对流所生成的强风暴和闪电也在最近被观察到 (Dyudina et al., 2004)。在 100 hPa 之上, 木星大气温度随高度升高而升高, 出现逆温层, 这是甲烷分子通过光化学作用生成的有机气溶胶吸收太阳辐射造成的 (Bagenal et al., 2006)。因此, 木星的对流层顶也位于大约 100 hPa 的位置。木星与地球一个显著的不同是, 其内部释放的热能与木星接收到的太阳辐射能量相当, 而地球的地热与其接收的太阳辐射能量相比基本可以忽略不计。木星之所以能够自内部释放显著的热量, 与其巨大的质量和气态 (液态) 属性有关。因为其质量巨大, 木星的体积在重力作用下不断收缩, 势能转化为热能。木星是人类迄今为止发现的天然卫星最多的行星, 已发现 69 颗卫星。最大的四颗 (木卫一至四) 最早为伽利略所发现, 常被称作伽利略卫星。

木星大气最重要的动力学特征就是多急流和涡旋 (胡永云等, 2014)。木星大气在每个半球都有多个东西风交替的急流带。木星的赤道上空有强的西风急流, 也就是所谓的超级旋转, 最大风速为 100 m s^{-1} 。在中高纬度区域, 木星的东风交替的急流分别对应于亮暗交替的云带。除了急流, 木星的大气层中还有很多不同尺度、颜色和旋转方向的涡旋, 其中最著名的涡旋是“大红斑”, 由 Robert Hooke 于 1664 年首次观测到, 而非伽利略发现 (Lodders and Fegley, 1998)。这个太阳系中最大的涡旋可以装下 2~3 个地球, 并且已经存在了至少 346 年。

与地球大气研究一样, 行星大气研究最重要的是观测。鉴于木星遥远的距离, 加之云层对可见光的阻挡和同步旋转辐射对微波波段的污染, 基于地球的地基观测是远远不够的, 重要的观测手段必须依赖太空飞船。对木星的太空飞船探测大致可以分为两类, 一类是专门探测木星的飞船, 简称专门探测; 另一类是为探测其他行星而发射的飞船, 它们在飞越木星时顺便对木星进行观测, 称为飞越观测。到目前为止, 共有 7 次飞越观测和 2 次专门探测。本文的目的就是综述这些探测成果和相关仪器, 我们将尤其关注 2 次专门探测任务的成果。我国正规划在 2030 年发射专门探测木星的飞船, 我们在本文系统地总结了已有的关于木星大气探测成果, 希望为 2030 年的探测计划提供科学支撑。

这些飞船不仅探测行星大气,其所携带的仪器也探测行星的内部结构、磁场、电离层等,本文将仅集中在行星大气探测部分。

2 飞越观测

7 次飞越观测的飞船均由美国宇航局发射,分别是先锋 10 号 (Pioneer 10, Kliore et al., 1974)、先锋 11 号 (Pioneer 11, Ingersoll et al., 1975)、旅行者 1 号 (Voyager 1, Broadfoot et al., 1979; Smith et al., 1979b)、旅行者 2 号 (Voyager 2, Smith et al., 1979a)、尤利西斯 (Ulysses, Smith et al., 1992)、卡西尼 (Cassini, Brown et al., 2003; Porco et al., 2003) 和新视野号 (New Horizons, Reuter et al., 2007; Stern, 2008)。表 1 给出了 7 次飞越观测飞船的名称、距离木星最近位置的时间以及最近距离。

表 1 7 次飞越木星的太空飞船的名称、最接近木星的时间及其与木星的最近距离

Table 1 Names, dates, and closest distances to Jupiter of the seven flyby missions

飞船名称	最近点时间	与木星的最近距离/km
先锋 10 号 (Pioneer 10)	1973 年 12 月 3 日	130,000
先锋 11 号 (Pioneer 11)	1974 年 12 月 4 日	34,000
旅行者 1 号 (Voyager 1)	1979 年 3 月 5 日	349,000
旅行者 2 号 (Voyager 2)	1979 年 7 月 9 日	570,000
尤利西斯号 (Ulysses)	1992 年 2 月 8 日	408,894
卡西尼号 (Cassini)	2000 年 12 月 30 日	10,000,000
新视野号 (New Horizons)	2007 年 2 月 28 日	2,304,535

2.1 先锋号飞船

人类对木星近距离的观测始于先锋 10 号和 11 号。这两艘太空飞船并非为专门探测木星而设计,它们是后来发射的旅行者 1 号和 2 号的试验品,是美国宇航局太阳系外围探测计划的一部分。美国宇航局在 1960 年代开始酝酿对太阳系外围行星和星际物质的探测,他们为此规划了两批太空飞船。第一批先锋号飞船带有一定的试验性质,而第二批旅行者号则是设计更为周密的太阳系外围行星探测飞船。

先锋 10 号于 1972 年 3 月 2 日发射,于 1973 年 12 月 3 日飞行至距离木星最近的位置,大约是 130,000 km。先锋 10 号不仅首次传回了木星及其卫星的清晰照片,它还使用木星大气掩射电源方法对木星大气的温度层结进行了观测,发现木星大气温度在 100 hPa 和 10 hPa 之间随高度升高,说明有逆

温层存在。我们现在知道该逆温层是由于甲烷光解后生成的长碳链气溶胶吸收太阳短波辐射造成的 (Bagenal et al., 2006)。先锋 10 号也首次证实了木星向外辐射的能量大于其接收到的太阳辐射能量 (Fimmel et al., 1980),说明木星内部具有显著的向外辐射能量的能力。

先锋 11 号于 1973 年 4 月 6 日发射,于 1974 年 12 月 4 日抵达距离木星云层 34,000 km 的位置,传回了更为清晰的木星急流和涡旋的图片,尤其是木星大红斑的照片。此外,它携带的红外辐射计还通过 20 μm 和 45 μm 红外波段的观测,揭示了大气在赤道—极地方向上的温差小于 10 K (Ingersoll et al., 1975),它与地球将近 100 K 的赤道—极地温差有着本质的不同,这可能与木星大气的对流有关。木星内部释放的热量通过对流的形式向上传输,其效率对大气减温率与绝热减温率的差异极为敏感,从而倾向于均匀地加热木星大气 (Ingersoll and Porco, 1978)。先锋 10 号于 2003 年与地球失去联系,其当时的位置距离太阳约 80 AU。先锋 11 号与地球仍有联系,目前的位置距离太阳 92 AU。

2.2 旅行者号飞船

旅行者 1 号和 2 号是美国宇航局发射的专门探测外太阳系的飞船。在有了先锋 10 和 11 号的经验之后,旅行者号所携带的观测仪器在性能上都要优于先锋号所携带的,其飞行速度也更快。旅行者 1 号和 2 号分别于 1977 年 9 月 5 日和 1977 年 8 月 20 日发射 (后者比前者早 16 天发射),目前距离太阳分别为 140 AU 和 115 AU。旅行者 1 号在 1979 年 3 月掠过木星,最近距离为 350,000 km。它所携带的高分辨率相机拍摄了大量的木星照片,其中一些被制作成了动画,展现了木星不同纬度上方向、速度和颜色各异的环流运动,同时确认了木星大红斑是一个不断移动的反气旋 (Marcus, 1993)。旅行者 1 号还对木星的卫星进行了观测,记录下了木卫一冰火山喷发的壮观场景,并观测了木卫三的板块构造与木卫四的陨石坑。旅行者 2 号在 1979 年 7 月飞越木星,最近距离为 570,000 km。旅行者 2 号记录了木星大红斑和不同的云带,其背阳面的闪电,发现了木星的 3 颗新卫星,还揭示了木卫四的冰壳可能存在板块运动特征 (Smith et al., 1979b; Borucki and Magalhães, 1992)。

2.3 卡西尼、尤利西斯和新视野号飞船

卡西尼号飞船是为探测土星而设计的,于 1997

年 10 月 15 日发射, 2017 年 9 月 15 日任务结束, 在人为操控下坠入土星大气层。卡西尼号飞船于 2000 年 12 月 30 日抵达距离木星最近的位置, 通过大量观测第一次揭示了木星大气细微的气流结构, 为研究木星大气运动提供了第一手的资料。其发回的 26,000 张高清晰度照片不仅有效地区分了木星大气不同风向的急流带及其伴随的上升和下沉区, 还揭示了在下沉带中有尺度较小的上升运动。

图 2 是卡西尼号飞船在抵达距离木星最近点前几天拍摄的木星图片。照片展示了反气旋转动的大红斑、尺度较小一些的气旋性涡旋、亮—暗相间的带状急流分布等。较亮的带状区域被认为对应上升运动, 而较暗的带状区对应下沉区。因为氨云和水云均是无色的, 这些不同颜色的云很可能是混合了硫化物的成分。木星大气中有水云, 但因为水的凝结温度远高于氨, 所以水云位于氨云的云底之下 (Vasavada and Showman, 2005)。

这些飞越观测不仅提供了清晰的可见光图片, 也提供了关于木星气象要素的数据。图 3 给出的是旅行者号 (虚线) 和卡西尼号 (实线) 飞船测量的木星纬向风速。木星大气的运动与地球有着诸多差异, 首先, 虽然木星仅接收 50 W m^{-2} 的太阳辐射, 但其最大风速可达 150 m s^{-1} ; 其次, 与地球大气每个半球仅有 1 支西风急流不同, 木星在每个半球有 6~8 支西风急流; 再者, 尽管两次观测的时间相隔 21 年, 但木星大气风场的结构似乎并没有太大变化, 两条线几乎重叠。这说明, 虽然木星大气具有多急流和涡旋等复杂结构, 但大尺度环流尤其是急流的位置还是相当稳定的。图 4 是旅行者号观测的木星大气对流层和平流层温度廓线。在对流层, 温度廓线近似于干绝热递减, 在平流层显示出逆温结构, 并具有波动特征。木星平流层逆温是因为一些长链的碳氢化合物吸收太阳辐射造成的。在垂直方向上的波动成因还不太清楚。

综上所述, 先锋号第一次给出了比地基观测空间分辨率高得多的木星观测结果, 并初步给出了木星大气的垂直结构; 旅行者号以更高的时间和空间分辨率清晰地揭示了木星大气的运动特征, 尤其是根据云的运动速度估算出了木星大气的纬向风速; 卡西尼号则结合了前几次观测的结果, 给出了时空上更为精细的观测结果。尤利西斯和新视野号之所以飞越木星, 是为了借助木星的重力作用获得加速度。它们在飞越木星时仅对木星的磁场、电离层、

以及卫星进行了观测, 没有关于木星大气的观测。尤利西斯号没有携带可见光照相机, 所以, 虽然其第一次飞越木星时距离木星很近, 但却没有留下木星的照片。

3 专门探测

针对木星的探测有两艘太空飞船, 一个是伽利略号 (Galileo), 另一个是朱诺号 (Juno)。伽利略号飞船于 1989 年 10 月 18 日发射, 是专门为探测木星及其卫星而建造的第一艘飞船。在主要任务阶段中, 伽利略号的近木点约在木星云层上方 700,000 km 处, 此后在延伸任务阶段逐渐下降至约 300,000 km 以对木卫一进行观测。在结束任务前的最后一个科学轨道中, 飞船从云层上方约 70,000 km 处飞越木星。在踏上征途 14 年之后, 伽利略号于 2003 年 9 月 21 日结束使命, 受控坠入木星大气 (D'Amario et al., 1992; NASA, 2003)。朱诺号于 2011 年 8 月 5 日发射, 于 2016 年 7 月 4 日进入木星轨道。按照原计划, 朱诺号仅围绕木星飞行约 20 个地球月 (因其轨道距离木星太近, 无法长时间承受木星同步辐射带内的强辐射), 飞船首先进入每圈 53 天的极轨轨道, 然后进入 14 天的轨道。但由于发动机故障, 变轨计划被取消, 因此, 朱诺号在主要任务阶段中将停留在 53 天的轨道上, 最近处距离木星云层顶部不到 5000 km (Bolton et al., 2017), 最远处约 8,000,000 km。这样一个偏心率很大的轨道允许朱诺号在观测时尽可能靠近木星, 同时减少任务期间受到的辐射量。

3.1 伽利略号

伽利略号飞船分为轨道飞行器和大气探测器两部分。轨道飞行器在轨道上环绕木星飞行, 它搭载了包括 CCD 相机 (SSI)、近红外成像仪 (NIMS)、紫外/极紫外光谱仪 (UVS/EUV)、尘埃粒子检测仪 (DDS)、高能粒子检测仪 (EPD)、重离子计数器 (HIC) 和磁强计 (MAG) 等十种科学载荷。大气探测器搭载了质谱仪 (GPMS) 和辐射计等六种仪器, 探测器被抛入木星大气层进行探测 (Johnson et al., 1992)。

伽利略号最具特色也最重要的探测任务就是携带了一个大气探测器。该探测器被抛射到木星大气层后, 在下降过程中能够对木星大气的垂直风速、温度、成分进行探测。大气探测器于 1995 年 7 月 13 日与轨道飞行器分离, 在 12 月 7 日进入木星

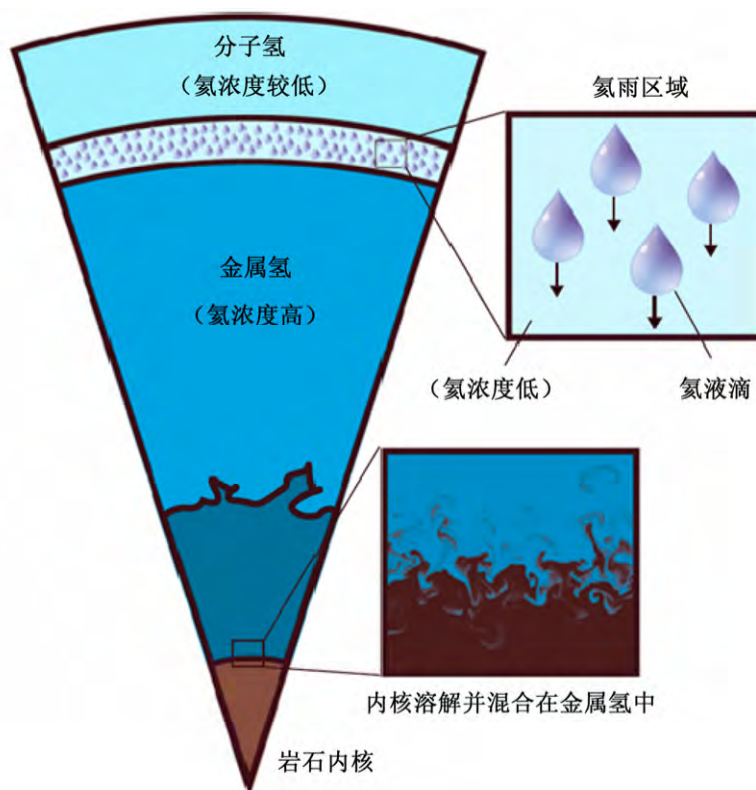


图1 木星结构示意图。修改自 Wahl et al. (2017)

Fig. 1 Schematic plot of Jupiter's structure. Adapted from Wahl et al. (2017)

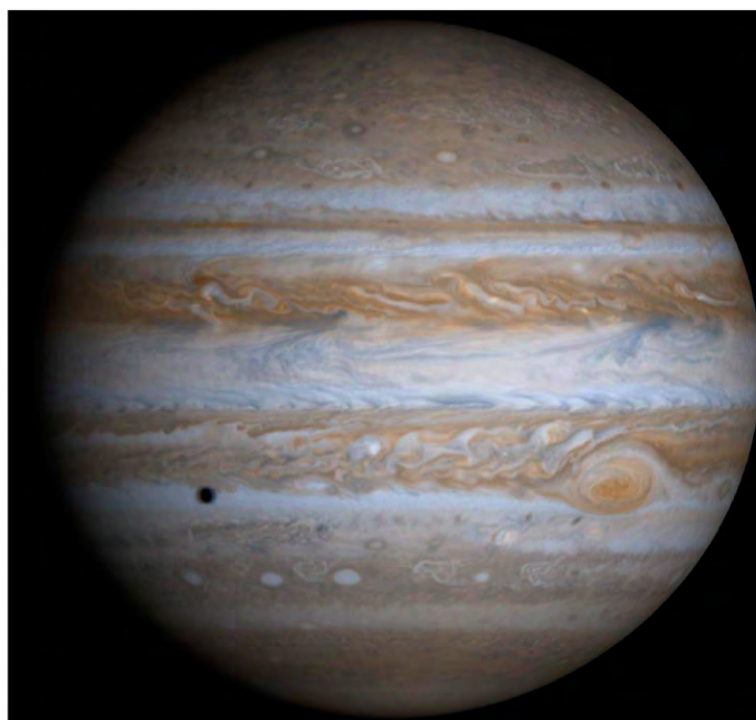


图2 卡西尼号飞船于2000年12月7日拍摄的木星照片, 照片分辨率是每像素144 km。照片中的黑点是木星的卫星欧罗巴(Europa)投射到木星上的影子。照片来自NASA/JPL/University of Arizona

Fig. 2 A photo of Jupiter taken by Cassini spacecraft on 7 December 2000 at a resolution of 144 km per pixel. The black dot is the shadow of Jupiter's satellite, Europa. Image from NASA/JPL/University of Arizona

6.5°N 大气层, 在下降过程中持续观测了 0.4 至 22 bar 约 156 km 厚的大气层的化学组分、风速、温度等, 并将观测数据传输至在轨的轨道飞行器, 再经其传回地球。在 22 bar 之后, 大气探测器与地球失去联系。这些测量使我们第一次了解到木星深厚云层之下的大气结构, 硫化氢、水和氨是木星大气中主要的可凝结物质。伽利略大气探测器的探测结果表明, 木星深层大气中甲烷、氨和硫化氢的混合比都高于太阳大气的丰度, 其中, 氨和硫化氢的混合比随压强增加而增加, 最终趋于恒定的深度约为 10 bar 和 16 bar, 远深于平衡凝结模式 (Equilibrium Cloud Condensation Model) 预测的 2 bar 和 6 bar。探测器的观测表明, 水的含量也随压强增加而增加, 但在质谱仪最深的采样处仍未达到恒定 (Niemann et al., 1996; Folkner et al., 1998; Wong et al., 2004)。考虑到碳、氮、硫、氫、氟、氙元素相对太阳系丰度均为 2~5 倍, 氧的丰度也应当在 3 倍左右 (Ingersoll, 2017)。然而在伽利略号大气探测器落点约 20 bar 处, 水 (对应氧元素) 的混合比却只有原始太阳中水汽丰度的三分之一。目前主流的解释是探测器落点正好位于一个 5 μm 波长下的热区, 水在热区中 20 bar 高度处的混合比并不代表其在木星深层的混合比或者整个木星中水的平均混合比。观测显示, 木星低纬度还有数个这样的热区, 它们在 5 μm 波段上的高亮温反映其云层较为稀薄; 同时这些热区在纬向上分布均匀, 呈现出波的特征 (Ortiz et al., 1998)。数值模拟结果表明, 这些热区可能对应着罗斯贝波的下沉区域 (Showman and Dowling, 2000)。气块的下降将高层大气中可凝结气体的混合比廓线下移, 表现为伽利略号大气探测器所观测到的混合比随着气压增大而增加, 直到 22 bar 时仍然没有达到平衡。

大气探测器测量到 6.5°N 附近纬向风风速从 0.7 bar 处的 90 m s^{-1} 增加到 4 bar 处的 170 m s^{-1} , 然后维持不变直到大约 20 bar (图 5)。需要指出的是, 伽利略大气探测器仅测量了不到巨行星半径 1% 的纬向风的垂直结构, 我们目前还不知道观测到的行星表面纬向风是一直延伸到行星的内部, 还是在云层下就很快消失了。

3.2 朱诺号

朱诺号的科学目标包括大气成分 (尤其是氨和水的丰度)、大气动力学性质、云物理、温度以及木星内部结构、磁层和极光等。此前伽利略号投放

的大气探测器得到的单一位置云高、云下大气成分和温度等信息与预期相差较大, 使得我们迫切地希望对木星深层大气进行全球范围地观测。朱诺号搭载了九个不同的科学载荷, 分别是微波辐射计 (MWR)、木星红外极光成像仪 (JIRAM)、磁强计 (MAG)、重力仪器 (GS)、木星极光分布计 (JADE)、木星高能粒子探测仪 (JEDI)、无线电和等离子束探测仪 (Waves)、木星紫外成像光谱仪 (UVS) 和可见光相机 (JunoCam) (Bolton and The Juno Science Team, 2010)。

朱诺号的初步观测结果以发表在 2017 年《科学》356 期的 2 篇论文 (Bolton et al., 2017; Orton et al., 2017) 和发表在 Geophysical Research Letter 第 44 期的数篇论文为代表 (Grassi et al., 2017; Li et al., 2017; Orton et al., 2017)。关于木星大气探测的主要结果包括: 木星两极地区带状急流的断裂和多涡旋特征; 6 个微波通道测量的深层木星大气温度、氨气浓度垂直分布、热区的水汽含量等。图 6 展示了木星南极的大气运动特征。可以看到, 在中低纬度盛行的东西风交替的带状特征被破坏, 取而代之的是多涡旋的大气运动特征。在极区的边缘, 被涡旋破坏的带状特征仍然可见, 很像是急流不稳定而形成的湍流运动。另外, 极区还存在一些孤立的白色涡旋, 这些涡旋更像是独立的风暴, 围绕极点旋转。在木星的两极没有发现类似土星北极的正六边形大气运动特征。

由于朱诺号极轨轨道的近木点在木星辐射带以下, 微波辐射计接收到的同步加速辐射污染较小, 因此可以使用波长更长、能够穿透大气层更深的微波通道。朱诺号所搭载的微波辐射计有 6 个微波通道, 波长覆盖范围为 1.3~50 cm, 探测深度可达 250 bar 的木星大气深层。微波辐射计的主要目标是探测木星云层下的大气动力学过程, 并确定氨和水含量的全球分布 (Li et al., 2017; Janssen et al., 2017)。图 7 给出的是朱诺号前三次绕木星轨道飞行时微波辐射计测量的氨云顶部之下 6 个不同通道的木星最低亮温。在大气压约为 1.5 bar 的地方, 木星亮温大致是 190 K, 但在赤道附近有一个较大的波动: 在赤道的正上方, 亮温大约是 180 K, 而在 10°N, 亮温增加到 220 K, 温差近 40 K。与背景图片的对照可以看出, 高亮温对应大气的下沉区, 而低亮温对应上升区。如果这一巨大的差异来源于同一高度实际温度的区别, 赤道上的风速将远远大于

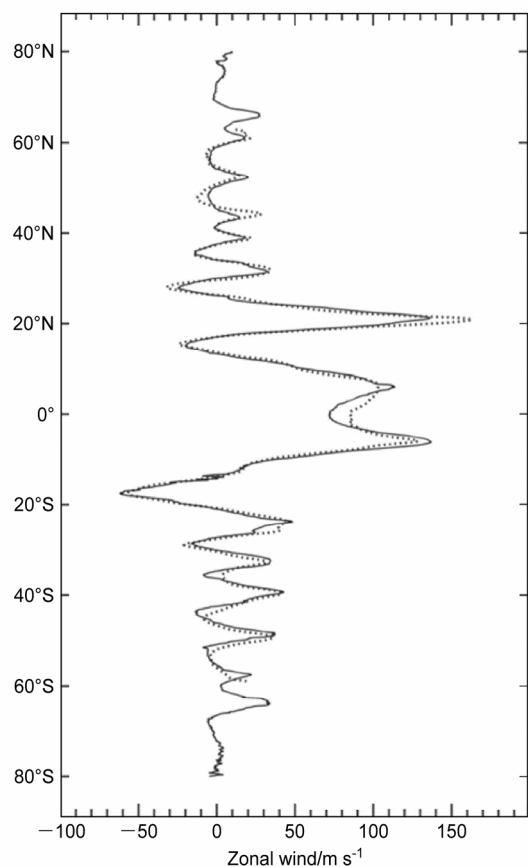


图 3 纬向风随纬度的分布, 虚线是旅行者号在 1979 年观测的纬向风速 (Limaye, 1986), 实线是卡西尼号在 2000 年观测的纬向风速 (Porco et al., 2003)。引自 Ingersoll et al. (2004)

Fig. 3 Zonal wind as a function of latitude, the dashed line is measured by Voyager in 1979 (Limaye, 1986), the solid line is measured by Cassini in 2000 (Porco et al., 2003). Cited from Ingersoll et al. (2004)

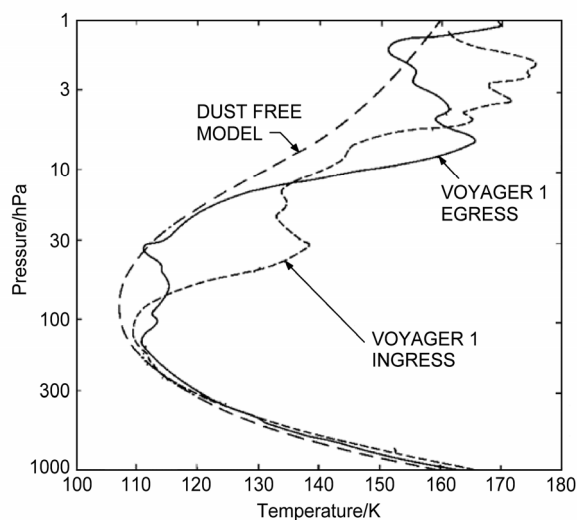


图 4 旅行者号测量的木星大气对流层和平流层温度垂直廓线。引自 Lindal et al. (1981)

Fig. 4 Vertical temperature profiles in the upper troposphere and stratosphere, measured by Voyager 1. Cited from Lindal et al. (1981)

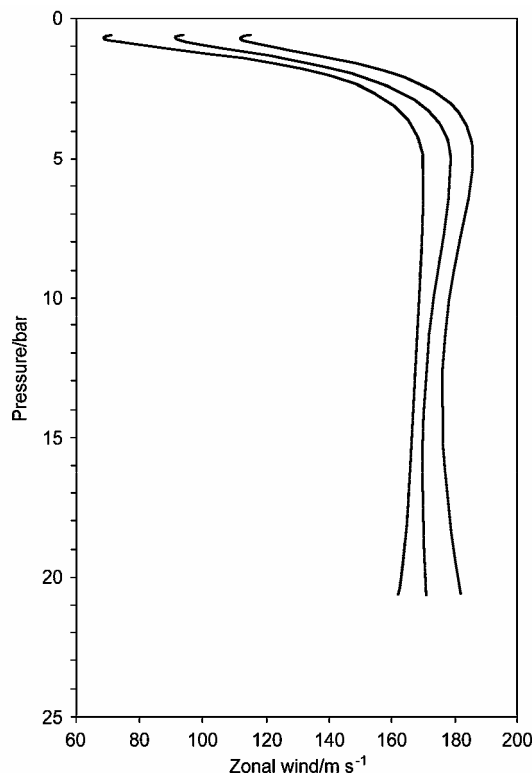


图 5 伽利略探测器测量的纬向风风速随大气层高度的变化。中间实线为测得的风速, 左右两条为误差上界和下界。引自 Atkinson et al. (1998)

Fig. 5 Zonal wind as a function of altitude, measured by the Galileo probe. The upper and lower values envelop the best-fit data (central line). Cited from Atkinson et al. (1998)

观测得到的风速。该差异可能主要由于不同纬度区域的微波波段消光系数不同, 导致接收到的微波发射高度不一致。因此, 测量到的亮温差并非来自同一高度, 其实际反映了不同纬度氨浓度的差异 (Bolton et al., 2017)。

氨气和水汽是木星大气在微波波段的主要吸收气体。使用类似于地球卫星通过红外波段反演温度廓线的方法, 根据不同波段的微波测量就可以得到这些气体的浓度廓线。图 8 是朱诺号在第一个绕木星轨道 (Perijove 1) 上根据微波辐射计观测反演出的氨气体积混合比垂直剖面 (Li et al., 2017)。在赤道附近 ($0^{\circ} \sim 5^{\circ}\text{N}$), 氨气体积浓度高于 300 ppm, 自 50 bar 一直延伸至氨云底形成一个狭窄的高值区 (氨气在大约 0.7 bar 开始凝结形成氨云)。在赤道外, 氨气浓度相对较低, 尤其是在 $5^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ 之间, 存在一个狭窄的低值区, 浓度低于 150 ppm。与图 7 对比可知, 高、低浓度区域分别对应上升区和下沉区, 构成一个狭窄的哈德雷环流。因为木星自转

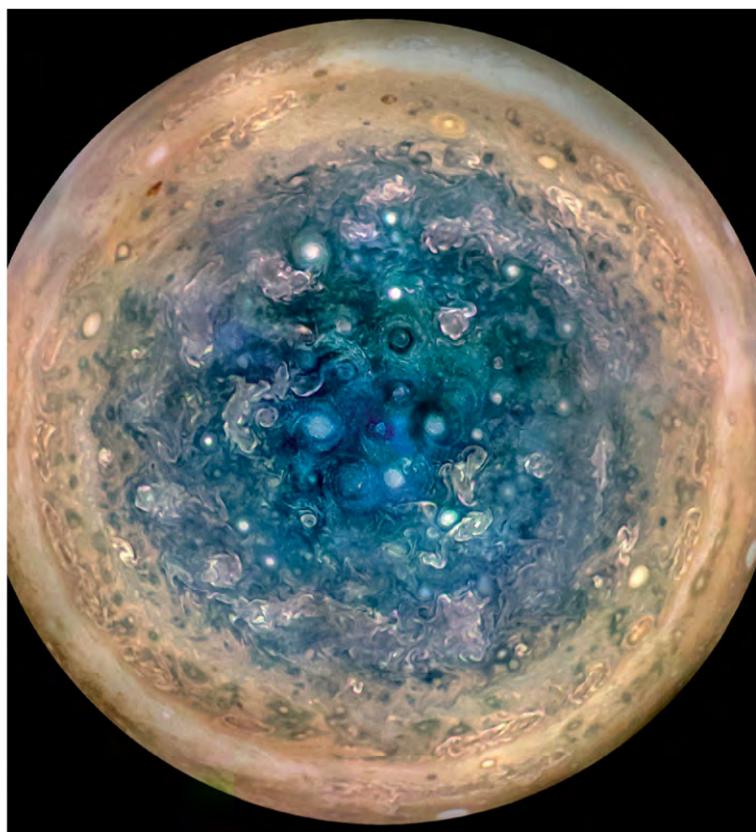


图 6 朱诺号携带的相机于 2017 年 5 月 25 日拍摄的木星南极大气运动状况。照片拍摄时，朱诺号飞船距离木星云顶约 5200 km。照片来自 NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Betsy Asher Hall/Gervasio Robles

Fig. 6 Atmospheric movement of Jupiter's south pole taken by Juno camera on 25 May 2017. Juno was about 5200 km away from the Jupiter's cloud top as the image was taken. Image from NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Betsy Asher Hall/Gervasio Robles

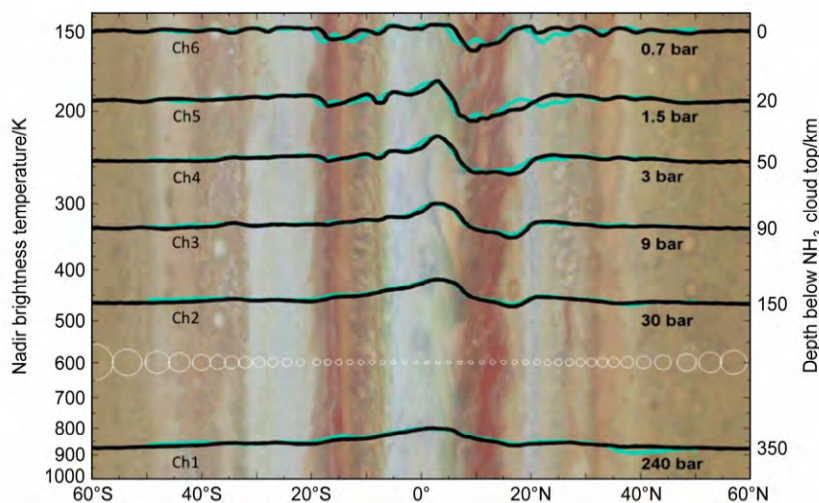


图 7 6 个微波通道测量的最低亮温随纬度的分布，黑色和绿色线是分别于 2016 年 8 月 27 日和 12 月 11 日测量的。左侧垂直坐标表示最低亮温（单位：K），右侧垂直坐标表示氨云顶以下的大气层深度，6 个微波通道对应的气压值也在图中给出。背景图是哈勃太空望远镜于 2016 年 2 月 10 日拍摄的木星可见光照片的一部分（PIA19643）。引自 Bolton et al. (2017)

Fig. 7 Nadir brightness temperatures in the six channels of the microwave versus latitude. The black and green curves are from the Perijove passes on 27 August 2016 and 11 December 2016. The left vertical axis shows nadir brightness temperature (units: K), the right vertical axis shows depth below the top of ammonia clouds, pressures corresponding to the six channels of microwave sounding are also marked on the plot. The background is an image of a Jupiter map taken by the Hubble Space Telescope on 10 February 2016 in the visible wavelength range (PIA19643). Cited from Bolton et al. (2017)

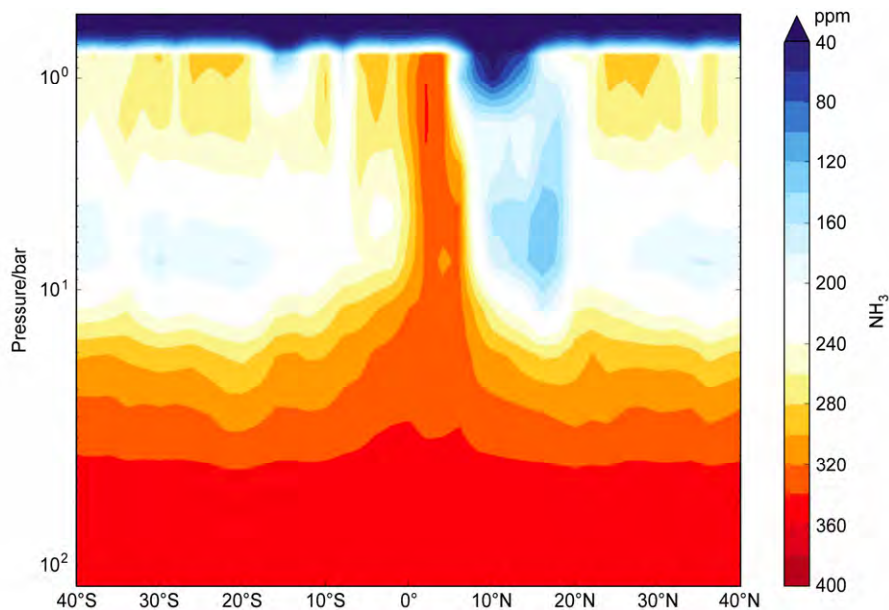


图 8 纬向平均氨气体积混合比垂直剖面。引自 Bolton et al. (2017)

Fig. 8 Vertical cross section of zonal mean ammonia mixing ratio. Cited from Bolton et al. (2017)

速度大于地球的两倍,因此,其经向环流圈较窄。

图 8 还表明氨气在 60 bar 以下几乎是均匀混合的。

朱诺号所搭载的红外成像仪测量了木星大气在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 的热辐射,并反演出了 8°N 附近两个热区中水汽、氨气和磷化氢的含量。一般认为,这些热区中心存在下沉运动,所以,也更为干燥一些。反演的结果表明,在热区中确实存在下沉运动,而边缘区存在上升运动 (Grassi et al., 2017)。而且,热区的水汽相对湿度很低,低于 3%。这一初步的反演结果证实了伽利略号大气探测器给出的结果,也就是热区是干燥的。

美国宇航局的深空网络 Ka 波段雷达对朱诺号进行了精确的多普勒追踪,计算出环绕木星时飞船轨道高度的变化,由此反演出木星重力场的高阶球谐函数系数。其中偶次项代表刚体转动,反映了内部密度结构的变化(状态方程、内核大小等);奇次项则反映南北重力场的不对称,对于刚体转动的巨行星而言,这意味着小于行星尺度的动力运动 (Kaspi, 2013)。朱诺号的测量结果显示木星的重力场在南北方向上不对称,同时重力场的异常与纬向风的带状结构吻合较好。这表明木星大气的环流不仅仅停留在云层附近,还影响了更深层的大气 (Iess et al., 2018)。使用重力场的奇次项系数 (J_3 、 J_5 、 J_7 和 J_9) 对纬向风强度在垂直和南北方向进行拟合可见,纬向风随着深度增加逐渐衰减,在赤道附近

最深能达到云层下约 3000 km 处,越靠近两极地区深度越浅。对密度随深度的分布进行积分可得木星动力学运动的大气层约占木星总质量的 1% (Kaspi et al., 2018)。对偶次项系数的分析证实了这一结论,同时表明木星深层受到磁场阻力影响,接近于刚体旋转。考虑到电导率与行星质量的关系,土星上磁场提供相似摩擦力的深度将大于木星,同为气态巨行星的土星的大气所能够进行非刚体旋转的厚度至少是木星的 3 倍 (Guillot et al., 2018)。

4 结论和讨论

本文简要综述了人造太空飞船时代以来对木星大气的探测成果,包括飞越探测和专门探测。木星大气运动方面,我们的认识从先锋号和旅行者号观测的云层顶的大尺度运动(如带状急流和大红斑)扩展到伽利略号飞船观测的较小尺度的涡旋,再到和朱诺号飞船观测到的极区破损的带状急流和多涡旋运动特征,观测的水平分辨率已达到几十公里。我们不仅认识到了亮、暗急流带分别对应着上升和下沉运动,还初步了解到了大气运动的垂直结构。关于大气成分,我们更深入地认识了氨、水汽等痕量气体的含量,并了解了其垂直分布。

尽管如此,我们对木星和这一类气态巨行星大气运动的垂直结构的了解仍然有限,例如图 2 所示的木星大气的急流带和涡旋向下延伸到多深的深

度,是仅限于木星大气的对流层上层,还是一直延伸到很深的层次?现在大致有两种模型被用于解释木星等气态星球的大气运动特征:浅水模型和深流体模型。浅水模型假定大气运动以准二维运动为主,其垂直尺度远小于水平运动尺度。该模型的理论基础是 Rhines (1975) 提出的地转湍流理论。由于科氏力随纬度是变化的,快速转动的二维流体运动不是各向同性的,湍流动能由小尺度向大尺度传递时,沿径向的输送被随纬度变化的科氏力参数限制,而沿纬向的大尺度不被限制。所以,准地转二维湍流运动倾向于形成纬向急流带。同样,准二维湍流理论也能够很好地解释大红斑涡旋的形成,也就是尺度较小的涡旋通过反串级能量传递合并为尺度较大的涡旋 (Ingersoll, 1990; Marcus, 1993)。浅水模型能够很好地模拟大红斑涡旋的形成。然而,浅水模式模拟不出木星和土星大气的赤道超级旋转急流(赤道上空的西风急流)。Busse (1976) 提出的深流体模型能够更好地解释和模拟木星大气的超级旋转气流。深流体模型认为急流是由行星内部发出的热能驱动的,因为木星在快速自转和大气粘度很小的情况下,大气流速和气压梯度沿自转轴的方向保持不变 (Taylor-Proudman 原理)。所以,大气中的对流单体是平行转轴方向的细柱状结构,对流单体之间的相互作用形成了嵌套在一起、以转轴为中心、并且平行于转轴的柱状结构,这些转速不同的柱状结构相互作用形成了在木星大气中观测到的纬向急流。浅水模型意味着图 2 所示的涡旋和急流仅存在于木星大气对流层上层较浅薄的层次,而深流体模型意味着这些运动一直延伸到木星大气内部。

目前所观测到的木星大气运动主要是云层之上的风向和风速,我们对于云层下面的风向以及风速所知甚少。伽利略号大气探测器证实了急流可以延伸到 20 bar 的深度 (图 5);朱诺号的初步结果表明,赤道附近的急流深度至少可延伸至 50 bar,其后续观测资料表明赤道急流有可能延伸至 3000 km 的深度 (Kaspi et al., 2018)。随着朱诺号绕木星飞行次数的增加,这些结果还有进一步订正的可能。朱诺号能够对木星的重力场进行精确的测量,该测量也将有助于我们认识木星大气急流带向下延伸的深度。因此,朱诺号探测结果的进一步分析将有助于我们认识木星大气在较深层次的运动性质,更好地区分浅水模型和深流体模型。

木星大气中氨和水等的组分、其在水平和垂直方向上的分布以及相关的物理化学反应等也一直是飞船探测所关心的。尤其是水分的含量,不仅涉及木星大气本身的演化,还与太阳系的演化密切相关。因此,搞清楚木星大气的水汽含量还能增进我们对太阳系形成过程的理解。传统的观点认为,木星大气的含水量应与氮、碳等元素相对原始太阳大气丰度的比值相似。但伽利略号得到的木星含水量较少。朱诺号的初步测量结果也表明,在木星大气热区的水汽含量确实较低,但这并不代表木星的深层含水量以及全球平均含水量与其他元素丰度差距很大。无论是飞越探测,还是针对性的探测都表明,伴随着木星大气的对流运动,木星大气中存在频繁的闪电活动,这说明水汽在木星大气运动中存在显著的作用。未来的探测还需要类似伽利略大气探测器那样在多个位置的直接测量。

总体来看,对木星以及类似的气态巨行星而言,探测向深层发展是一个趋势。我们不仅希望搞清楚能够观测到的对流层上层大气运动与深层的关系、氨和水汽的深层分布,我们还希望了解木星的内部结构,如木星大气中气态氨和金属氢的分界线在哪里?木星是否有固体的核,如果有的话大小是多大,其组成成分是什么?对于这些问题,我们一方面等待朱诺号更多的探测结果,也希望未来的飞船能够对木星的深层做出更多的探测。另外,木星深层金属氢的物理性质如何也是一个值得未来研究关注的问题。现有的实验室的结果给出了在有限压力条件下氢的金属特性,对木星的观测也许能够有助于理解更高压力下氢的金属特性。根据尚未正式发表的观测结果,一些学者提出,木星的大红斑有缩小的趋势,这也是未来木星探测特别值得关注的一个重要问题。

在目前已确定的太阳系外行星中,热木星占了很大的比例 (胡永云, 2013)。因此,对太阳系木星大气物理、化学、动力性质的了解,也将有助于我们更好地认识太阳系外巨型气态星球。

参考文献 (References)

- Atkinson D H, Pollack J B, Seiff A. 1998. The Galileo probe doppler wind experiment: Measurement of the deep zonal winds on Jupiter [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (10): 22911–22928, doi:10.1029/98JE00060.
- Bagenal F, Dowling T E, McKinnon W B. 2006. *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

- Bolton S J, The Juno Science Team. 2010. The Juno Mission [C]// Proceedings of International Astronomical Union. Padua: International Astronomical Union, 92–100.
- Bolton S J, Adriani A, Adamtiroaie V, et al. 2017. Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft [J]. Science, 356 (6340): 821–825, doi:10.1126/science.aal2108.
- Borucki W J, Magalhães J A. 1992. Analysis of Voyager 2 images of Jovian lightning [J]. Icarus, 96 (1): 1–14, doi:10.1016/0019-1035(92)90002-O.
- Broadfoot A L, Belton M J S, Takacs P Z, et al. 1979. Extreme ultraviolet observations from Voyager 1 encounter with Jupiter [J]. Science, 204 (4396): 979–982, doi:10.1126/science.204.4396.979.
- Brown R H, Baines K H, Bellucci G, et al. 2003. Observations with the Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) during Cassini's flyby of Jupiter [J]. Icarus, 164 (2): 461–470, doi:10.1016/S0019-1035(03)00134-9.
- Busse F H. 1976. A simple model of convection in the Jovian atmosphere [J]. Icarus, 29 (2): 255–260, doi:10.1016/0019-1035(76)90053-1.
- D'Amario L A, Bright L E, Wolf A A. 1992. Galileo trajectory design [J]. Space Sci. Rev., 60 (1–4): 23–28.
- De Pater I, Lissauer J J. 2015. Planetary Sciences [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dyudina U A, Del Genio A D, Ingersoll A P, et al. 2004. Lightning on Jupiter observed in the H α line by the Cassini imaging science subsystem [J]. Icarus, 172 (1): 24–36, doi:10.1016/j.icarus.2004.07.014.
- Elkins-Tanton L T. 2006. Jupiter and Saturn [M]. New York: Facts on File.
- Fimmel R O, Van Allen J, Burgess E. 1980. Pioneer: First to Jupiter, Saturn, and Beyond [M]. Washington: Scientific and Technical Information Office/NASA, 446.
- Folkner W M, Woo R, Nandi S. 1998. Ammonia abundance in Jupiter's atmosphere derived from the attenuation of the Galileo probe's radio signal [J]. J. Geophys. Res., 103 (E10): 22847–22855, doi:10.1029/98JE01635.
- Gierasch P J, Nicholson P D. 2004. Jupiter [M]. Washington: World Book.
- Grassi D, Adriani A, Mura A, et al. 2017. Preliminary results on the composition of Jupiter's troposphere in hot spot regions from the JIRAM/Juno instrument [J]. Geophys. Res. Lett., 44 (10): 4615–4624, doi:10.1002/2017GL072841.
- Guillot T, Stevenson D J, Hubbard W B, et al. 2004. The interior of Jupiter [M]//Bagenal F, Dowling T E, McKinnon W B. Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere. Cambridge: Cambridge University Press.
- Guillot T, Miguel Y, Militzer B, et al. 2018. A suppression of differential rotation in Jupiter's deep interior [J]. Nature, 555 (7695): 227–230, doi:10.1038/nature25775.
- 胡永云. 2013. 太阳系外行星大气与气候 [J]. 大气科学, 37 (2): 451–466.
- Hu Yongyun. 2013. Atmosphere and climate of extra solar planets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 451–466, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12314.
- 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与前沿. 北京: 科学出版社, 290–333.
- Hu Yongyun, Tian Feng, Liu Junjun. 2014. Review on planetary atmospheric research [M]//Huang Ronghui, Wu Guoxiong, Chen Wen, et al. Progresses and Frontiers of Atmospheric Sciences and Global Climate Changes. Beijing: Science Press, 290–333.
- Iess L, Folkner W M, Durante D, et al. 2018. Measurement of Jupiter's asymmetric gravity field [J]. Nature, 555 (7695): 220–222, doi:10.1038/nature25776.
- Ingersoll A P. 1990. Atmospheric dynamics of the outer planets [J]. Science, 248 (4953): 308–315, doi:10.1126/science.248.4953.308.
- Ingersoll A P. 2017. Three eras of planetary exploration [J]. Nat. Astron., 1 (1): 0010, doi:10.1038/s41550-016-0010.
- Ingersoll A P, Porco C C. 1978. Solar heating and internal heat flow on Jupiter [J]. Icarus, 35 (1): 27–43, doi:10.1016/0019-1035(78)90058-1.
- Ingersoll A P, Münch G, Neugebauer G, et al. 1975. Pioneer 11 infrared radiometer experiment: The global heat balance of Jupiter [J]. Science, 188 (4187): 472–473, doi:10.1126/science.188.4187.472.
- Ingersoll A P, Dowling T E, Gierasch P J, et al. 2004. Dynamics of Jupiter's atmosphere [M]//Bagenal F, Dowling T E, McKinnon W B. Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere. Cambridge: Cambridge University Press, 105.
- Janssen M, Oswald J, Brown S, et al. 2017. MWR: Microwave radiometer for the Juno mission to Jupiter [J]. Space Science Reviews: 1–47, doi:10.1007/s11214-017-0349-5.
- Johnson T V, Yeates C M, Young R. 1992. Space science reviews volume on Galileo mission overview [J]. Space Sci. Rev., 60 (1–4): 3–21, doi:10.1007/BF00216848.
- Kaspi Y. 2013. Inferring the depth of the zonal jets on Jupiter and Saturn from odd gravity harmonics [J]. Geophys. Res. Lett., 40 (4): 676–680, doi:10.1029/2012GL053873.
- Kaspi Y, Galanti E, Hubbard W B, et al. 2018. Jupiter's atmospheric jet streams extend thousands of kilometres deep [J]. Nature, 555 (7695): 223–226, doi:10.1038/nature25793.
- Kliore A, Cain D L, Fjeldbo G, et al. 1974. Preliminary results on the atmospheres of Io and Jupiter from the pioneer 10 S-band occultation experiment [J]. Science, 183 (4122): 323–324, doi:10.1126/science.183.4122.323.
- Li C, Ingersoll A, Janssen M, et al. 2017. The distribution of ammonia on Jupiter from a preliminary inversion of Juno microwave radiometer data [J]. Geophys. Res. Lett., 44 (11): 5317–5325, doi:10.1002/2017GL073159.
- Limaye S S. 1986. Jupiter: New estimates of the mean zonal flow at the cloud level [J]. Icarus, 65: 335–352.
- Lindal G F, Wood G E, Levy G S, et al. 1981. The atmosphere of Jupiter: An analysis of the Voyager radio occultation measurements [J]. J. Geophys. Res., 86 (A10): 8721–8727, doi:10.1029/JA086iA10p08721.
- Lodders K, Fegley B Jr. 1998. The Planetary Scientist's Companion [M]. New York: Oxford University Press.
- Marcus P S. 1993. Jupiter's great red spot and other vortices [J]. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 31: 523–569, doi:10.1146/annurev.aa.31.090193.002515.
- NASA. 2003. Galileo Mission Information [EB/OL]. The Planetary Data System.[https://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewMissionProfile.jsp?MISSION_NAME=GALILEO\[2018-03-14\]](https://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewMissionProfile.jsp?MISSION_NAME=GALILEO[2018-03-14]).
- Nellis W J, Weir S T, Mitchell A C. 1996. Metallization and electrical conductivity of hydrogen in Jupiter [J]. Science, 273 (5277): 936–938.
- Niemann H B, Atreya S K, Carignan G R, et al. 1996. The Galileo probe

- mass spectrometer: Composition of Jupiter's atmosphere [J]. *Science*, 272 (5263): 846–849, doi:10.1126/science.272.5263.846.
- Ortiz J L, Orton G S, Friedson A J, et al. 1998. Evolution and persistence of 5- μm hot spots at the Galileo probe entry latitude [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (E10): 23051–23069, doi:10.1029/98JE00696.
- Orton G S, Hansen C, Caplinger M, et al. 2017. The first close-up images of Jupiter's polar regions: Results from the Juno mission JunoCam instrument [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 44 (10): 4599–4606, doi:10.1002/2016GL072443.
- 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, doi:10.1126/science.1079462.
- 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, doi:10.1126/science.1147618.
- Rhines P B. 1975. Waves and turbulence on a beta-plane [J]. *J. Fluid Mech.*, 69 (3): 417–443, doi:10.1017/S0022112075001504.
- Showman A P, Dowling T E. 2000. Nonlinear simulations of jupiter's 5-micron hot spots [J]. *Science*, 289 (5485): 1737–1740, doi:10.1126/science.289.5485.1737.
- Smith B A, Soderblom L A, Beebe R, et al. 1979a. The Galilean satellites and Jupiter: Voyager 2 imaging science results [J]. *Science*, 206 (4421): 927–950, doi:10.1126/science.206.4421.927.
- Smith B A, Soderblom L A, Johnson T V, et al. 1979b. The Jupiter system through the eyes of Voyager 1 [J]. *Science*, 204 (4396): 951–972, doi:10.1126/science.204.4396.951.
- Smith E J, Wenzel K P, Page D E. 1992. Ulysses at Jupiter: An overview of the encounter [J]. *Science*, 257 (5076): 1503–1507, doi:10.1126/science.257.5076.1503.
- Stern S A. 2008. The New Horizons pluto kuiper belt mission: An overview with historical context [J]. *Space Sci. Rev.*, 60 (1–4): 3–21, doi:10.1007/s11214-007-9295-y.
- Stevenson D J. 1975. Thermodynamics and phase separation of dense fully ionized hydrogen–helium fluid mixtures [J]. *Phys. Rev. B*, 12 (10): 3999–4007, doi:10.1103/PhysRevB.12.3999.
- Stevenson D J. 1985. Cosmochemistry and structure of the giant planets and their satellites [J]. *Icarus*, 62 (1): 4–15, doi:10.1016/0019-1035(85)90168-X.
- Vasavada A R, Showman A P. 2005. Jovian atmospheric dynamics: An update after Galileo and Cassini [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 68 (8): 1935–1996, doi:10.1088/0034-4885/68/8/R06.
- 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]. *Geophys. Res. Lett.*, 44 (10): 4649–4659, doi:10.1002/2017GL073160.
- Weidenschilling S J, Lewis J S. 1973. Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets [J]. *Icarus*, 20 (4): 465–476, doi:10.1016/0019-1035(73)90019-5.
- Wong M H, Mahaffy P R, Atreya S K, et al. 2004. Updated Galileo probe mass spectrometer measurements of carbon, oxygen, nitrogen, and sulfur on Jupiter [J]. *Icarus*, 171 (1): 153–170.