

连雨辰, 胡永云. 2023. 系外行星的大气环流. 地球与行星物理论评 (中英文), 54(1): 56-80. doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-027.

Lian Y C, Hu Y Y. 2023. Atmospheric circulation of exoplanets. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 54(1): 56-80 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2022-027.

系外行星的大气环流

连雨辰, 胡永云*

北京大学 大气与海洋科学系, 北京 100871

摘要: 迄今为止, 已有五千多颗太阳系外行星和两千多颗褐矮星被确认, 它们展现出了丰富的多样性. 伴随着愈来愈多系外行星的发现, 关于系外行星大气的观测和理论研究均在迅速发展. 本文将回顾近几十年来系外行星和褐矮星探测的主要进展, 依序介绍系外行星中的热木星、具有大气层的类地行星, 以及孤立并快速旋转的褐矮星大气环流的基本特征, 这些大气环流特征是未来系外行星探测的基础. 然后, 将介绍基于观测建立的大气模式对这些系外行星和褐矮星大气演化和动力学特征的模拟结果, 包括大气的垂直温度分布、层结的稳定性、辐射传输、大气成分等. 热木星受到强烈辐射且被潮汐锁定, 环流模式预测其具有大的昼夜温差和赤道地区向东的急流. 温木星通常不会被潮汐锁定, 展现出广泛的自转率倾角和轨道偏心率, 导致环流模式与热木星相比有很大不同. 潮汐锁定的类地行星具有类似热木星的大气环流模式, 但可能存在的海洋以及各种化学过程会深刻改变类地行星的气候, 在这一部分本文还将讨论系外行星研究的最终目标——寻找宜居行星. 褐矮星作为行星和恒星之间的过渡状态, 通常是缺乏外部辐射并快速旋转的星体, 内部具有剧烈的对流, 大气表现出云层和温度的不均匀性. 最后, 我们将对系外行星和褐矮星大气这一前沿科学领域未来所面临的关键问题和挑战给出展望.

关键词: 系外行星; 大气环流; 宜居行星; 热木星; 褐矮星

doi: 10.19975/j.dqyxx.2022-027

中图分类号: P401

文献标识码: A

Atmospheric circulation of exoplanets

Lian Yuchen, Hu Yongyun*

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: To date, more than 5000 exoplanets and more than 2000 brown dwarfs have been confirmed, which shows rich diversities in many aspects. With the rapid growth of the planet family, both observational and theoretical research on exoplanet atmosphere is developing rapidly. This paper aims to review the progress of exoplanet atmospheric circulation research, and these atmospheric circulation characteristics are the basis for exoplanet and brown dwarf exploration in the future. First, this paper will review the main progress on exoplanet and brown dwarf detection in recent decades, and introduce the basic characteristics of the atmospheric circulation of hot Jupiters, terrestrial planets with atmosphere, and isolated and rapidly rotating brown dwarfs. Then, the simulation results of the atmospheric evolution and dynamic characteristics of exoplanets based on the atmospheric observations will be introduced, including the vertical temperature distribution of the atmosphere, the stability of the stratification, the radiation transfer, and the atmospheric composition, etc. Hot Jupiters are strongly irradiated and tidally locked. The general circulation models of hot Jupiters predict large day-night temperature differences and equatorial eastward jets. Warm Jupiters are generally not tidally locked, exhibiting a wide range of inclinations, orbital eccentricities and rotation rates, resulting in very different circulation patterns compared with hot Jupiters. At-

收稿日期: 2022-03-25; 录用日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41888101)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41888101)

第一作者: 连雨辰 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事系外行星大气研究. E-mail: lianyu@pku.edu.cn

*通信作者: 胡永云 (1965-), 男, 教授, 主要从事系外行星大气和古地球气候研究. E-mail: yyhu@pku.edu.cn



atmospheric circulation patterns of tidally locked terrestrial planets are similar to those of hot Jupiters, however, the existence of oceans and various chemical processes will largely change the climate of terrestrial planets. Besides, in the part of terrestrial planets, we will discuss the ultimate goal of exoplanet research—searching and characterizing habitable planets. As a transition state between planets and stars, brown dwarfs are rapidly rotating without external irradiation. Their interiors are fully convective, and their atmosphere exhibits clouds and temperature inhomogeneities. Finally, an outlook will be given to the key issues and challenges of exoplanet and brown dwarf atmosphere.

Keywords: exoplanets; atmospheric circulation; habitable planets; hot Jupiters; brown dwarfs

0 引言

截止 2022 年 5 月 10 日, 人类已经确认了 5031 颗太阳系外行星 (简称系外行星), 还有大量观测的候选系外行星有待确认. Mayor 和 Queloz (1995) 在飞马座一颗类太阳恒星附近发现的 51 Pegasi b 是系外行星探测和科学研究进展中的一个里程碑式的成果, 揭开了系外行星探测的序幕. 自那时起, 系外行星研究已成为天文和行星科学的一个热点研究领域. 尤其是他们两人于 2019 年获得了诺贝尔物理学奖, 更是把系外行星探测和研究推向了高潮. 图 1 给出的是逐年发现的系外行星个数. 可以看出, 进入 21 世纪以来, 被确认的系外行星数目整体在逐年增加. 需要说明的是, 2014 年和 2016 年确认的系外行星异常多, 并不是因为这两年观测到的系外行星异常多, 而是开普勒望远镜累积的观测数据经过分析, 在这两年确认了约 2500 颗系外行星.

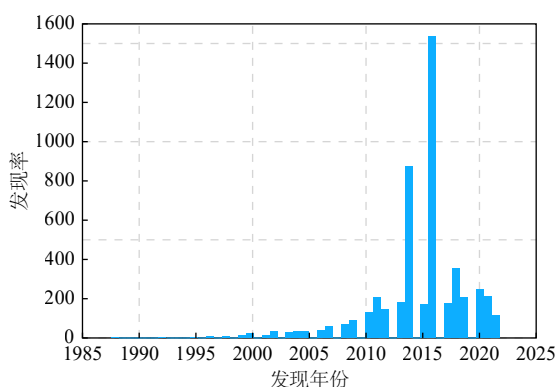


图 1 历年所确认的系外行星个数, 数据来源: exoplanet.eu
Fig. 1 Number of confirmed exoplanets over the years, from exoplanet.eu

系外行星展示了丰富的多样性, 它们的质量、运行轨道、物理属性等与太阳系行星均有很大的不同, 这些改变了我们对太阳系行星的传统认知. 图 2 给出的是系外行星质量与轨道半长轴分布图. 可以看出, 已确认的系外行星质量分布很广, 从木星质

量的 0.001 倍到 10 倍均有. 轨道半长轴最小小于 0.01 AU, 相对应的公转周期只有几个小时 (Malavolta et al., 2018), 而太阳系距离太阳最近的水星轨道半径为 0.39 AU, 公转周期为 88 天. 系外行星公转轨道偏心率最大可达 0.97 (Jones et al., 2006), 而太阳系行星的轨道偏心率均在 0.2 以下.

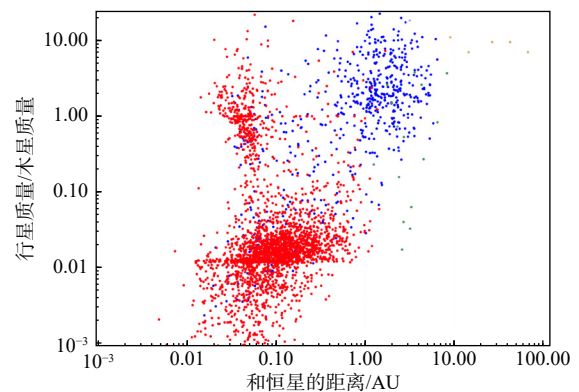


图 2 系外行星质量—公转半长轴分布图. 其中红、蓝、绿和褐色分别代表凌星法、视向速度法、微引力透镜法和直接成像法发现的系外行星. 纵轴以木星质量为单位, 横轴是天文单位 (日地之间平均距离, 大约为 1.5 亿千米). 数据来源: exoplanets.org

Fig. 2 Exoplanet mass-separation relationship. Red, blue, green and brown dots represent exoplanets discovered by the transit method, radial velocity method, microlensing method and direct imaging method, respectively. The vertical axis is in Jupiter mass, and the horizontal axis is in astronomical units (the average distance between the Sun and the Earth, about 150 million kilometers), from exoplanet.org

图 2 所示的系外行星质量—轨道半长轴分布显示系外行星主要集中在三个区域. 这是由于目前的探测方法造成, 而不是系外行星的实际分布规律. 目前最有效的系外行星探测方法是凌星法 (transit) 和视向速度法 (radial velocity), 两者发现的系外行星主要是质量较大和距离恒星较近的行星. 目前发现的绝大多数系外行星的质量都比地球大.

(1) 视向速度法通过分析恒星的光谱变化来确定其附近存在行星. 如果一颗恒星附近存在行星,

恒星和行星围绕他们的共同质心运动, 当恒星远离地球时, 恒星光谱会因多普勒效应而向红端移动, 而当恒星靠近地球时, 恒星光谱向蓝端移动. 因此, 根据恒星光谱的变化, 就可以确定行星的质量范围^{a)}, 目前视向速度法的测量精度在 cm/s 相对运动量级 (Wilken et al., 2012). 视向速度法的缺点是, 恒星光谱的偏移量与行星/恒星质量比和行星轨道与地球视线方向之间的夹角有关, 夹角越大系外行星质量误差越大, 因此只能测量行星的最低质量, 质量小于 0.3 木星质量的行星也难以测量 (窦江培等, 2014). 视向速度法无法像凌星法那样在同一时间观测较多的行星, 另外, 视向速度法无法确定行星的体积.

(2) 凌星法是根据行星对恒星辐射的遮挡探测系外行星的. 当行星运行到恒星前面时, 它将遮挡恒星辐射, 导致恒星光度下降. 如果能够周期性地观测到恒星光度的减弱, 就可以确定有行星围绕恒星运行, 类木行星能遮挡约 1% 的恒星光度. 凌星法更适宜探测距离恒星较近的行星, 因为较远的行星需要更长的探测时间和更苛刻的观测条件, 大部分通过凌星法发现的行星轨道半长轴都小于 1 AU.

图 3 给出的是系外行星的质量分布. 可以发现两个峰值, 一个是质量在地球和海王星之间的次海王星, 另一个大约是木星质量的巨行星, 这两者之间存在质量分离 (mass gap) 现象. 目前还不太清楚这一质量分离现象是行星分布的普遍规律, 还是由于目前探测方法造成的. 这是关于行星形成和演化研究领域的一个热点问题. 根据图 3, 类地行星似乎较少, 这主要是由于凌星法和视向速度法均更适合探测质量和体积较大的行星, 相对来讲, 质量较小的行星质量更难测量.

目前已确认的系外行星, 大致可以分以下几类:

(1) 热木星: 这类行星是气态巨行星, 其质量和体积与太阳系木星相当, 而且靠近其主星. 因为它们距离恒星很近, 大部分热木星被认为处于潮汐锁定状态, 一面永远朝向恒星, 而另一面永远背对恒星 (Showman and Guillot, 2002). 因此, 其朝阳面温度在 1000 K 以上 (Showman et al., 2008a), 甚至高达 4000 K 以上. 与太阳系木星 165 K 的温度相比, 热木星的朝阳面温度显然是很高的, 因此称为热木星.

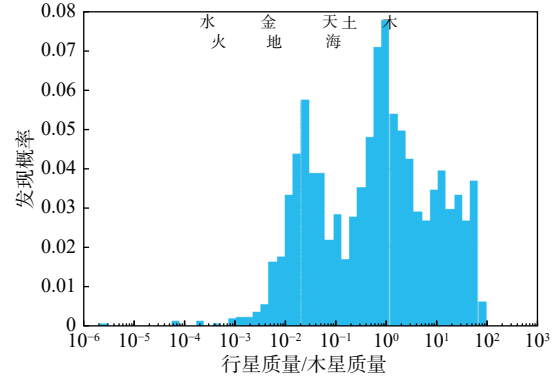


图 3 目前发现的系外行星质量和数量占比关系. 上侧标注了太阳系八大行星所对应的质量大小. 可以看出, 系外行星中数量较多的主要有三类: 质量略大于地球的超级地球 (SuperEarth)、质量小于海王星的次海王星 (SubNeptune) 和质量在木星附近的巨行星 (GiantPlanets), 在这三者之间存在质量分布的不连续 (mass gap). 数据来源: Exarsolar Planets Encyclopedia (2022-05-10)

Fig. 3 The relationship between the mass and the number of exoplanets. The upper marks the masses corresponding to the eight planets in our solar system. The most kinds of exoplanets are three main types: SuperEarth with a mass slightly larger than Earth, SubNeptune with a mass smaller than Neptune, and GiantPlanets with a mass near Jupiter. There are mass gaps between them. From Exarsolar Planets Encyclopedia (May 10, 2022)

(2) 温木星、冷木星和超热木星: 这类行星也是气态巨行星, 因为距离主星较远, 温木星的辐射平衡温度在 300~1000 K 左右, 公转半长轴在 0.1~1 AU, 而冷木星的辐射平衡温度小于 300 K, 公转半长轴大于 1 AU (Showman et al., 2020). 超热木星距离主星相当近, 公转半长轴一般小于 0.03 AU, 因此被完全潮汐锁定, 其朝阳面被强烈加热以至于氢分子发生了热离解 (Arcangeli et al., 2018).

(3) 类地行星: 目前确认的类地行星大约有几百颗. 其中有可能表面覆盖岩浆的行星 (Rouan et al., 2011), 质量与地球相当或略大于地球质量的类地行星超级地球 (Super-Earth) (Borucki et al., 2011), 还有表面覆盖深层海洋的海洋行星 (Charbonneau et al., 2009). 因为银河系恒星超过 80% 是红矮星^{b)} (Charbonneau et al., 2009), 目前所发现的类地行星绝大多数是围绕红矮星运行的. 红矮星的辐射温度大约是 3000 K, 这些类地行星基本上也是潮汐锁定的. 次海王星大小介于地球和海王星之间, 半径在 2~4 个地球半径, 其在分类

a) 恒星光谱偏移测量出的是行星质量与轨道倾角正弦函数的乘积.

b) 红矮星是一类辐射温度低于太阳的恒星, 是光谱型为 K 型和 M 型的主序星.

上也属于岩石行星, 有时候被算作超级地球 (Bean et al., 2020; Innes and Pierrehumbert, 2022)。

除了系外行星之外, 还有一类星体值得注意, 那就是褐矮星. 褐矮星最早在 1990 年代被发现 (Nakajima et al., 1995; Rebolo et al., 1995), 其质量远小于恒星, 大约是木星质量的 10~80 倍, 是介于恒星和行星之间的星体. 其质量不足以点燃内部的氢核聚变反应 (Burrows et al., 1993), 但重力坍缩和氘聚变、锂聚变 (65 个木星质量以上发生) 等反应仍能提供能量 (Millsom and Burrows, 2002; Spiegel et al., 2011), 使其保持最高 2000 K、最低 200K 左右的温度 (Showman et al., 2020). 传统上, 我们认为恒星是依靠内部核聚变反应而发光发热, 而行星仅接收恒星辐射, 其内部释放很弱的热量. 褐矮星的发现颠覆了我们对恒星与行星差别的认知, 因为从质量分布和内部能量释放的角度来讲, 恒星、褐矮星和行星是连续的, 并不存在恒星和行星之间的区分. 褐矮星可以独立存在, 也可环绕恒星运动 (Casewell et al., 2012). 排除磁场特性和组成元素的差异, 在大气环流方面, 褐矮星可以被视作体积较大的、具有更多内部通量的木星, 具有类似木星的条带状风场 (Showman et al., 2019)。

本文将集中综述不同类型系外行星和褐矮星大气环流的研究进展. 目前, 系外行星和褐矮星的大气环流研究主要集中于以下几个方面: (1) 行星和褐矮星的物理学性质, 如自转周期、重力加速度、磁场强度如何影响大气运动; (2) 行星和褐矮星的外部辐射和内部热量如何影响大气运动; (3) 大气成分和云组分如何影响辐射传输和大气运动; (4) 行星和褐矮星大气运动对观测的意义; (5) 类地行星大气环流及其对行星宜居性探测的意义. 本文将按照系外行星和褐矮星的分类对这些方面的进展给与综述. 第 1 节介绍气态巨行星大气环流; 第 2 节介绍类地行星大气和海洋环流、气候和宜居性; 第 3 节介绍褐矮星大气环流; 最后给出总结和该领域的研究展望.

1 气态巨行星

1.1 观测结果

系外气态巨行星的观测可以从多个波段进行, 从可见光波段可以获得行星反射恒星光反射谱, 反射谱可以说明有多少星光进入了行星大气层, 从

而确定行星的能量收支情况 (例如, Brandeker et al., 2022). 反射谱可以用来推测行星的云分布 (Heng and Demory, 2013), 反射谱的吸收线还可以用来确定行星的元素丰度 (Seager and Sasselov, 2000)。

从红外波段可以获得行星自身大气的发射谱 (Knutson et al., 2012). 图 4 给出的是凌星法观测的热木星热辐射通量随时间的变化, 也称为光变曲线. 这里的辐射通量是恒星和行星的总辐射通量. 可以发现, 光变曲线有两个突然下凹的变化. 在凌星

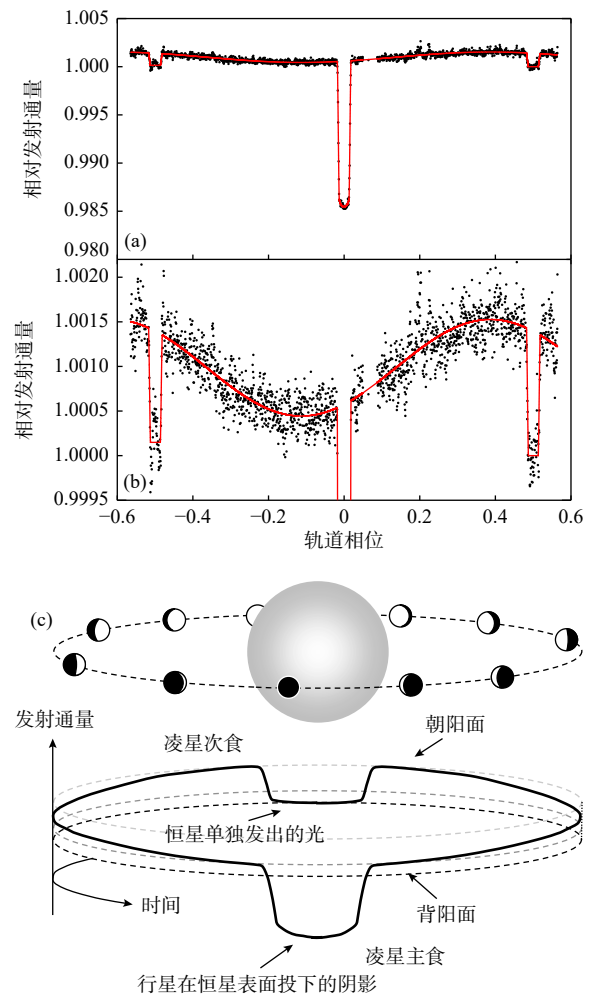


图 4 (a) 热木星 HD 209458b 在 $4.5 \mu\text{m}$ 红外波段发射谱的去相关光变曲线; (b) 放大局部. 凌星主食: 即行星旋转至主星和地球之间; 凌星次食: 即行星旋转至恒星背后. 相位 0.2 处的高值可能是系统误差 (修改自 Zellem et al., 2014); (c) 凌星相位示意图 (修改自 Winn, 2010)

Fig. 4 (a) The decorrelated light curve of the hot Jupiter HD 209458b in the $4.5 \mu\text{m}$ band; (b) The enlarged part. Transit means the planet rotates between the star and the Earth; Occultation (Secondary eclipse) means the planet rotates behind the star. The high value at 0.2 may be a systematic error (modified from Zellem et al., 2014); (c) A schematic diagram of the transit phase (modified from Winn, 2010)

主食时 (图 4a), 总辐射通量降低了大约 1.5%. 在凌星次食时 (图 4b), 因为热木星完全被恒星挡住, 此时辐射通量的减少主要是热木星朝阳面的辐射通量, 约是总辐射通量的 0.5%. 如果周期性地观测到凌星光谱的变化, 就可以确定有行星围绕恒星运转. 图 4a、4b 光变曲线扣除 U 型凌星和次食部分之后类似于正弦曲线, 在凌星主食之前, 曲线处于波谷, 而在进入凌星次食之前, 曲线达到波峰. 这是因为在主食附近, 热木星背阳面朝向地球, 背阳面温度较低, 辐射通量较弱. 在进入次食之前, 热木星朝阳面朝向地球, 朝阳面温度较高, 辐射通量也较大.

如果热木星不存在大气运动, 那么光变曲线的最大值应该对应的是热木星朝阳面星下点的位置, 也就是凌星次食的时候. 但大多数热木星光变曲线均显示了波峰位于次食之前, 而且, 光变曲线波谷也位于主食之前. 这说明大气环流的热量输送使得热木星温度最高点和最低点的位置发生了偏移, 也就是热点偏移 (hotspot shift). 通过将热木星红外发射光谱表征为行星经度的函数, 相位曲线均表明了大多数热木星存在热点东移现象, 与赤道西风有关 (Knutson et al., 2012; Stevenson et al., 2014).

但一些观测表明, 部分热木星的热点不在星下点的东侧而是在西侧, 这可能由多种因素导致. 非潮汐锁定的热木星可能因为赤道东风而导致热点西移 (Rauscher and Kempton, 2014); 热木星大气温度较高, 达到 1500 K 以上时, 热木星大气中的 Na 等元素发生热电离, 带电风场与热木星磁场作用产生的磁应力可能驱动东风, 从而引发热点西移 (Rogers and Komacek, 2014; Rogers, 2017; Dang et al., 2018); 热木星存在的云层会影响朝阳面和背阳面的热输送, 以及朝阳面的辐射加热, 会导致热点偏移量减少 (Parmentier et al., 2021), 也有可能引起热点西移 (Demory et al., 2013; Shporer and Hu, 2015).

超热木星具有和典型热木星一样的向东的热点偏移, 而且光变曲线和典型热木星差别不大. 但偏心率较大的温木星与热木星不同, 其光变曲线形状取决于面对地球的方向. 温木星的自转速度较快, 观测到的温木星的热点和冷点随着温木星旋转而移动, 因此, 光变曲线在一个自转周期内发生震荡 (Langton and Laughlin, 2008; Cowan and Agol, 2011; Lewis et al., 2017).

以上观测结果表明, 系外气态巨行星的热力结

构与大气环流密切相关, 这些观测现象需要用大气环流理论来解释. 数值模式模拟可以帮助我们理解观测行星大气热力结构. 以下, 我们将结合理论和模拟结果综述气态巨行星大气环流研究进展.

1.2 热木星

1.2.1 基本理论

根据目前的行星形成理论, 气态行星在距离恒星较远的雪线, 再迁移到距离恒星较近的轨道 (Lin et al., 1996). 一旦气态行星的轨道靠近其主星, 在恒星引力的作用下, 将被潮汐锁定. 典型热木星进入潮汐锁定状态的时间尺度为 (Guillot et al., 1996):

$$\tau \sim Q \left(\frac{R_p^3}{GM_p} \right) \Omega_p \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 \left(\frac{a_{\text{orb}}}{R_p} \right)^6 \quad (1)$$

其中 G 是引力常量, a_{orb} 是公转半长轴, M_* 是主星质量, M_p 是行星质量, $Q \sim 10^5$ 是潮汐锁定阻力因子, Ω_p , R_p 和 M_p 分别是行星的公转周期、半径和质量. 因此对于半径相当于木星、公转半长轴为 0.05 AU 的经典热木星来说, 潮汐锁定的时间尺度一般在百万年量级, 远小于热木星系统的寿命 (Hurley et al., 2002; Bolmont and Mathis, 2016). 而气态行星和主星距离超过 0.3 AU 之后, 潮汐锁定的时间尺度就会和系统寿命相当, 因此在此距离之外的气态巨行星一般不会被潮汐锁定, 属于温木星或冷木星.

热木星的半径可达上万千米. 随着自上而下气压的增加, 热木星大气的流体属性将发生很大的变化. 例如, 氢气在巨大压力下具有金属属性, 这已超出了普通流体的研究范畴. 一般来讲, 关于热木星的大气环流主要指其天气现象发生的层次, 也就是热木星上层具有热力对流和形成云的大气层. 天气层的大气厚度相对于行星半径是很薄的一层, 所以, 通常认为大气水平运动的尺度远大于垂直运动, 热木星的水平运动尺度大约为 $10^4 \sim 10^5$ km, 垂直运动尺度, 也就是大气标高, 大约为 500 km 左右. 相对应地, 垂直运动速度相对于水平运动也较弱, 大约只有水平运动速度的百分之一. 因此, 一般认为热木星天气层处于准静力平衡状态 (Showman et al., 2008b), 即 $\partial p / \partial z = -\rho g$, 其中 p 是气压, z 是高度, ρ 是密度, g 是重力加速度.

在通常情况下, 大气的风速远远小于声速, 一般假定大气是不可压缩的流体, 无需关注声波. 但

某些热木星的风速有可能接近甚至超过声速, 这带来了大气可压缩的问题. Mayne 等 (2014, 2017)、Mendonça 等 (2016) 对可压缩大气模式进行了测试, 发现在热木星大气数值模式中, 可压缩和不可压缩大气的运行结果差距不大, 风速差异只有不到 10%.

对于旋转流体, 罗斯贝变形半径 (Rossby deformation radius) L_D 被用来衡量大气运动受地转偏向力科里奥利力 (Coriolis force) 影响的程度. 当运动尺度小于罗斯贝变形半径时, 运动中的地转效应可以忽略, 而大于等于时必须考虑科里奥利效应. 罗斯贝变形半径通常可写为 (Andrews et al., 1987):

$$L_{D,eq} = \sqrt{\frac{NH}{\beta}} \quad (2)$$

和

$$L_{D,offeq} = \frac{NH}{f} \quad (3)$$

其中 N 为浮力频率, 可以视为一层流体因为扰动而偏离平衡位置, 在浮力和重力作用下上下振动的本征频率, 而这种振动在旋转流体中向外传播则被称为惯性重力波 (inertial gravity wave). H 为大气标高, β 是科里奥利加速度 f 的经向梯度 $\partial f / \partial y$, $f = 2\Omega \sin \phi$, ϕ 是纬度, Ω 是自转周期, eq 表示赤道区域, offeq 表示在赤道外区域. NH 可以被视作单层大气中重力波传播的相速度.

潮汐锁定的热木星公转和自转周期相等, 平均约 3~5 个地球日. 缓慢的自转导致了热木星相对较弱的科里奥利效应, 赤道区域的罗斯贝变形半径 $L_{D,eq} \sim 5 \times 10^7$ m, 赤道外区域的罗斯贝变形半径 $L_{D,offeq} \sim 4 \times 10^7$ m, 两者都大于行星半径的一半. 相对来讲, 太阳系木星自转周期只有约 10 小时, 相应的罗斯贝变形半径只有其行星半径的十分之一. 因此, 对较小空间尺度的热木星的大气运动而言, 基本可以忽略水平方向的科里奥利力, 而主要考虑作用于垂直运动的科里奥利力. 正如在地球的赤道区域, 对于小尺度的垂直运动, 且水平方向气压梯度力主要由摩擦力和惯性力来平衡, 地转偏向力的作用可以忽略不计. 另一方面, 热木星的罗斯贝变形半径较大, 赤道区域更为宽广, 赤道大气波动甚至可以延伸到中纬度地区.

为描述热木星大气环流, 我们从大气水平动量

方程 (4) 开始, 其中 \mathbf{u} 代表水平速度矢量, ρ 代表密度, p 代表气压, ∇_h 代表水平散度, \mathbf{F} 代表摩擦:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} - \mathbf{f} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla_h p + \frac{1}{\rho} \mathbf{F} \quad (4)$$

$$\frac{U}{T} \quad \frac{U^2}{L} \quad fU \quad (5)$$

将动量方程中的物理量无量纲化, 用具体的尺度表示, 则动量方程中的三项可以变为式 (5) 的形式, U 是风速尺度, L 是水平运动尺度, T 是时间尺度. 通过后两项相除, 可以得到一个无量纲数——罗斯贝数 $R_o \equiv U/fL$. 第一项和第三项相除, 可以得到时间罗斯贝数 $R_{oT} \equiv 1/fT$. 时间罗斯贝数可以用来表示运动受到科里奥利力影响的时间尺度. 在地球上这个时间尺度大约是 3 小时, 小于 3 小时的大气运动可以看作不受地转偏向力影响, 如龙卷风.

当罗斯贝数大于 1 时, 大气运动的旋转效应不显著, 而当 $R_o \ll 1$ 时, 旋转效应和科里奥利效应主导了大气运动. 此时唯一平衡 fU 项的是压强项, 我们可以得到 $\mathbf{f} \times \mathbf{u} = (-1/\rho) \nabla_h p$, 这也恰恰是式 (4) 除以罗斯贝数后的 0 阶方程. 这个关系我们称之为地转平衡, 其中当 $f > 0$ 时, 风场围绕低气压区域逆时针旋转, 围绕高气压区域顺时针旋转. 对于热木星来说, 大部分热木星因为其慢速自转, 往往在两极区域 R_o 才会小于 1, 表现为两级区域的科里奥利效应主导和地转平衡.

对于气态巨行星来说, 当其内部压强大于 1 Mbar、温度在 2000 K 以上时, 氢分子的电子就会变成自由电子, 从而形成高导电率的金属氢 (Nellis, 1997), 金属氢因为旋转而产生的电流激发了感应磁场. 热木星的高温会导致其大气中 Na、K、Ca 等元素的电离 (Batygin et al., 2013), 这种带电粒子的运动和磁场相互作用, 预计会产生强大的欧姆阻力. 较为简单的大气模式会在接近底层的区域添加摩擦阻力项^{c)}来模拟这个效果.

1.2.2 辐射效应

主导热木星大气环流的主要驱动力来自于恒星辐射加热, 恒星辐射造成的朝阳面和背阳面之间巨大的温差是驱动热木星大气运动的主要因素. 热木星大气的加热过程与地球大气不同, 热木星的大气直接吸收恒星辐射而被加热, 也就是恒星辐射先加

c) $\mathbf{F} = -\mathbf{u}/\tau_{\text{drag}}$, 其中 τ_{drag} 为摩擦时间尺度.

热层大气, 再通过红外辐射加热下层大气. 目前, 热木星大气辐射传输过程一般采用简单的处理方式, 比如牛顿冷却模型. 牛顿冷却模型假设大气不同压强处存在一个辐射平衡温度 T_{eq} , 而局地实时温度在固定的时间尺度 τ_{rad} 冷却到辐射平衡温度, 局地冷却速率 q 为:

$$q = -\frac{T(\lambda, \phi, p) - T_{\text{eq}}(p)}{\tau_{\text{rad}}} \quad (6)$$

$$T_{\text{eq}} = \begin{cases} T_{\text{ref}}, \mu \leq 0 \\ T_{\text{ref}} + \Delta T_{\text{eq}} \mu, \mu > 0 \end{cases} \quad (7)$$

辐射平衡温度受到昼夜温差限制:

$$\Delta T_{\text{eq}} = \begin{cases} \Delta T_{\text{top}}, p < p_{\text{eqtop}} \\ \Delta T_{\text{bot}} + (\Delta T_{\text{top}} - \Delta T_{\text{bot}}) \frac{\log(p/p_{\text{eqbot}})}{\log(p_{\text{eqtop}}/p_{\text{eqbot}})} & p_{\text{eqtop}} \leq p \leq p_{\text{eqbot}} \\ \Delta T_{\text{bot}}, p > p_{\text{eqbot}} \end{cases} \quad (8)$$

其中 T_{ref} 是参考温度-气压关系, μ 是入射角的余弦, p_{eqbot} 是星光入射最深处的压强, p_{eqtop} 是模式顶层压强, ΔT_{top} 和 ΔT_{bot} 是顶部和底部温差. 通过比较辐射时间尺度和大气水平运动时间尺度, 可以确定热木星处于强辐射状态还是弱辐射状态.

如果辐射时间尺度大于平流尺度时, 辐射加热将被大气环流输送到背阳面, 朝阳面—背阳面温差较弱. 相反情况下, 恒星辐射加热将很快在朝阳面辐射回太空, 很少被输送到背阳面, 使得热木星的昼夜 (朝阳面—背阳面) 温差变大 (Showman and Guillot, 2002; Komacek and Showman, 2016). 在热木星的光球层附近, 热木星的红外光子能够出射到宇宙空间, 辐射时间尺度的表达式为 (Showman and Guillot, 2002; Cooper and Showman, 2005):

$$\tau_{\text{rad}} = \frac{pc_p}{4g\sigma T^3} \quad (9)$$

其中 c_p 是大气恒压比热容, σ 是玻尔兹曼常数, g 是重力加速度.

另外一种对辐射的处理方法是辐射双流模型 (two streams), 这种模式假设每一点的大气柱都是一维的, 且将入射短波和出射长波分开来积分计算, 通过改变每层大气的透明度来模拟大气对辐射的吸收和发射作用. Perna 等 (2012) 是第一个将这个模式运用于热木星模型的, 证明当全球辐射平衡温度大于 2000 K 时昼夜温差会很大, 而小于 1500 K 时昼夜温差将因为大气平流运动而被削弱很多.

简单的辐射模型并不能很好模拟热木星大气中

的化学和成云过程. 目前, 已有证据表明这些过程存在于热木星大气, 如透射光谱中观察到的瑞利散射信号 (例如, Pont et al., 2013; Heng, 2016; Sing et al., 2016; Barstow et al., 2017) 和次食时的云层反射 (Angerhausen et al., 2015; Esteves et al., 2015). 对于化学反应, 在化学平衡状态下最常见的碳化合物是 CH_4 (Visscher and Moses, 2011; Knutson et al., 2012), 光化学反应还会生成更长碳链的化合物, 形成光化学雾霾 (Kempton et al., 2017). 关于热木星形成过程, 现有的研究表明, MgSiO_3 、 Al_2O_3 、 TiO 等云层在温度高于 1500 K 的大气层形成 (例如, Chen et al., 2021), 而 MnS 、 ZnS 等云层在温度低于 1500 K 的大气层形成 (Wakeford and Sing, 2014). 对于热木星来说, 朝阳面的云会增加短波反照率, 因此朝阳面的云起到降温作用, 而背阳面的云发射长波, 具有温室效应. 总体来讲, 这些云层并不能显著改变热木星的大气环流 (Lee et al., 2016; Parmentier et al., 2016; Roman and Rauscher, 2019).

1.2.3 超级旋转

对于自西向东旋转的行星, 如果在赤道区域出现西风, 说明大气运动速度超过行星自转速度, 这种现象被称为超级旋转. 超级旋转现象已在太阳系行星观测到, 如金星 (Mitchell and Vallis, 2010; Lebonnois et al., 2012)、木星 (Schneider and Liu, 2009)、土星 (Kundt, 1983) 等, 地球大气平流层中下层准两年周振荡的西风位相也是超级旋转.

从角动量守恒的角度描述超级旋转, 就是围绕行星旋转轴的单位质量角动量 $M = (\Omega a \cos \phi + u) a \cdot \cos \phi$ 超过了赤道表面零风场对应的单位角动量 Ωa^2 , 其中 a 代表行星半径. 数值模拟试验表明, 热木星盛行赤道超级旋转 (Liu and Showman, 2012; Cho et al., 2015; Parmentier et al., 2016; Mayne et al., 2017; Mendonça, 2020). 图 5 给出的是热木星温度和风场分布, 可以看到在赤道南北纬 20° 的范围内出现了西风急流. 对于大多数热木星模型来说, 无论采用牛顿冷却模式, 还是包含辐射传输的模型, 只要存在昼-夜强迫的加热情况, 均会激发赤道区域的超级旋转急流. 赤道急流还会影响赤道区域的温度分布, 造成最热点与星下点的偏离.

Showman 和 Polvani (2010, 2011) 首先提出了热木星的超级旋转机制, 并在之后 10 年得到了学界的广泛认可. 热木星大气热力结构的突出特征是巨大的昼夜温差, 尤其在赤道地区. Matsuno (1966)

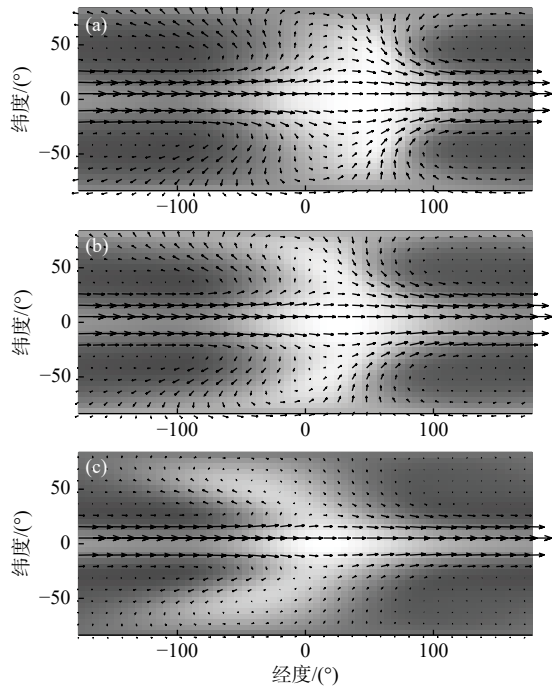


图 5 热木星 HD 209458b 模型在达到稳定后的结果 (修改自 Showman and Guillot, 2002)。(a) 0.4 bar 处的结果; (b) 6 bar 处的结果; (c) 100 bar 处的结果. 灰度显示等压线情况, 矢量显示风向, 最大风速从上到下分别为 1541 m/s、1223 m/s 和 598 m/s

Fig. 5 Results of the hot Jupiter HD 209458b model in equilibrium (modified from Showman and Guillot, 2002) at 0.4 bars, 6 bars and 100 bars from top to bottom. The grayscale map is the isobar map with arrows showing wind directions, and the maximum wind speed from top to bottom is 1541 m/s, 1223 m/s and 598 m/s

和 Gill (1980) 基于地球大气指出, 如果赤道地区存在区域热力异常, 该热力异常将在赤道区域产生罗斯贝波 (Rossby wave) 和开尔文波 (Kelvin wave), 罗斯贝波位于赤道外, 并且向西传播, 而开尔文波沿赤道向东传播, 这便是著名的 Matsuno-Gill 模型. Showman 和 Polvani (2011) 证明了 Matsuno-Gill 模型也适用于热木星的大气强迫.

图 6 显示热木星上赤道区域的开尔文波向东传播, 中纬度区域罗斯贝波向西传播. 热木星大气赤道区域温度高值受超级旋转西风气流影响向东移动, 中纬度地区温度高值向西运动. 在北半球形成西北—东南倾斜的风场, 在南半球形成西南—东北倾斜风场. 这种风场可以通过波动向赤道区域输送角动量, 从而激发和维持赤道区域的超级旋转流 (Showman and Polvani, 2011). 热木星赤道超级旋转流速度可达 3000 m/s 左右 (Tsai et al., 2014; Hammond and Pierrehumbert, 2018).

热木星数值模式对天气层与下层大气之间摩擦

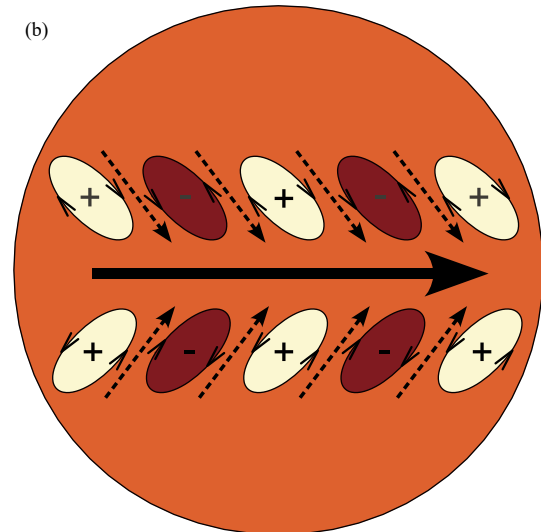
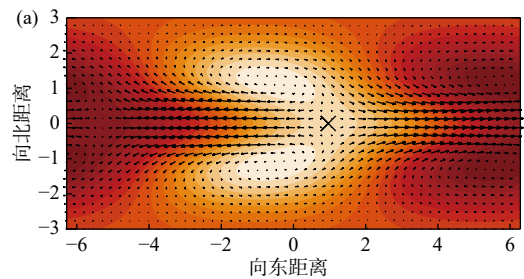


图 6 (a) 热木星浅水方程的数值解, 颜色图代表位势高度场, 箭头代表风向, 经纬 (0°, 0°) 代表星下点, X 号代表最热点; (b) 动量向赤道输送的示意图 (修改自 Showman and Polvani, 2011)

Fig. 6 (a) The numerical solution of the hot Jupiter shallow water cases. The colormap shows the geopotential height, the arrows show the wind, the (0°, 0°) shows the substellar point, and the X shows the hottest spot; (b) The momentum are transported equatorward (modified from Showman and Polvani, 2011)

作用的敏感性试验的结果表明, 在摩擦增大的情况下, 气压梯度力将与摩擦力平衡, 科里奥利力作用减弱, 导致在朝阳面形成辐散, 而背阳面形成辐合, 使罗斯贝-开尔文波的空间结构和倾斜结构被削弱, 赤道超级旋转将消失, 取而代之的是, 从星下点经过两边晨昏线流向背阳面的发散流 (Showman et al., 2012). Liu 和 Showman (2012) 测试了不同初始条件下的热木星流场, 证明初始条件对热木星的超级旋转影响不大, 尽管在 10 bar 处存在一些差异, 但在高层和 中层大气中, 风场状态和温度结构基本不受初始条件影响, 赤道上空西风风速最大值高达 3500 m/s.

1.2.4 非潮汐锁定热木星

Showman 等 (2009)、Rauscher 和 Kempton (2014) 等人探究了非潮汐锁定和零倾角的热木星大气环流情况. Showman 等 (2009)、Rauscher 和

Kempton (2014) 对热木星模型进行了不同旋转速率的测试, 旋转速率分别为潮汐锁定状态的 0.5~2 倍, 而行星倾角为零.

结果显示, 除了赤道区域的超级旋转流依旧存在, 中高纬度区域也出现了西风急流. 一般来说, 当行星自转速率降低, 因为罗斯贝变形半径增大, 行星上的急流会变宽, 但热木星模型中急流变窄, 这说明非潮汐锁定的热木星具有和潮汐锁定的热木星不同的动力学性质. 另一方面, 非潮汐锁定热木星也存在无超级旋转的情况, 如图 7b 所示, 在自

转周期较长时 (6.6 天), 热木星赤道区域的超级旋转可能消失, 而盛行东风. Mendonça (2020) 同样发现自转周期超过 5 天的热木星可能存在赤道东风的现象, 这可能与辐射时间尺度和自转周期有关. 具体辐射时间和自转周期的关系, 我们将在下一节论述.

1.3 温木星

温木星是一类公转周期较长的气态巨行星, 辐射平衡温度 300~1000 K, 由于温木星距离主星较

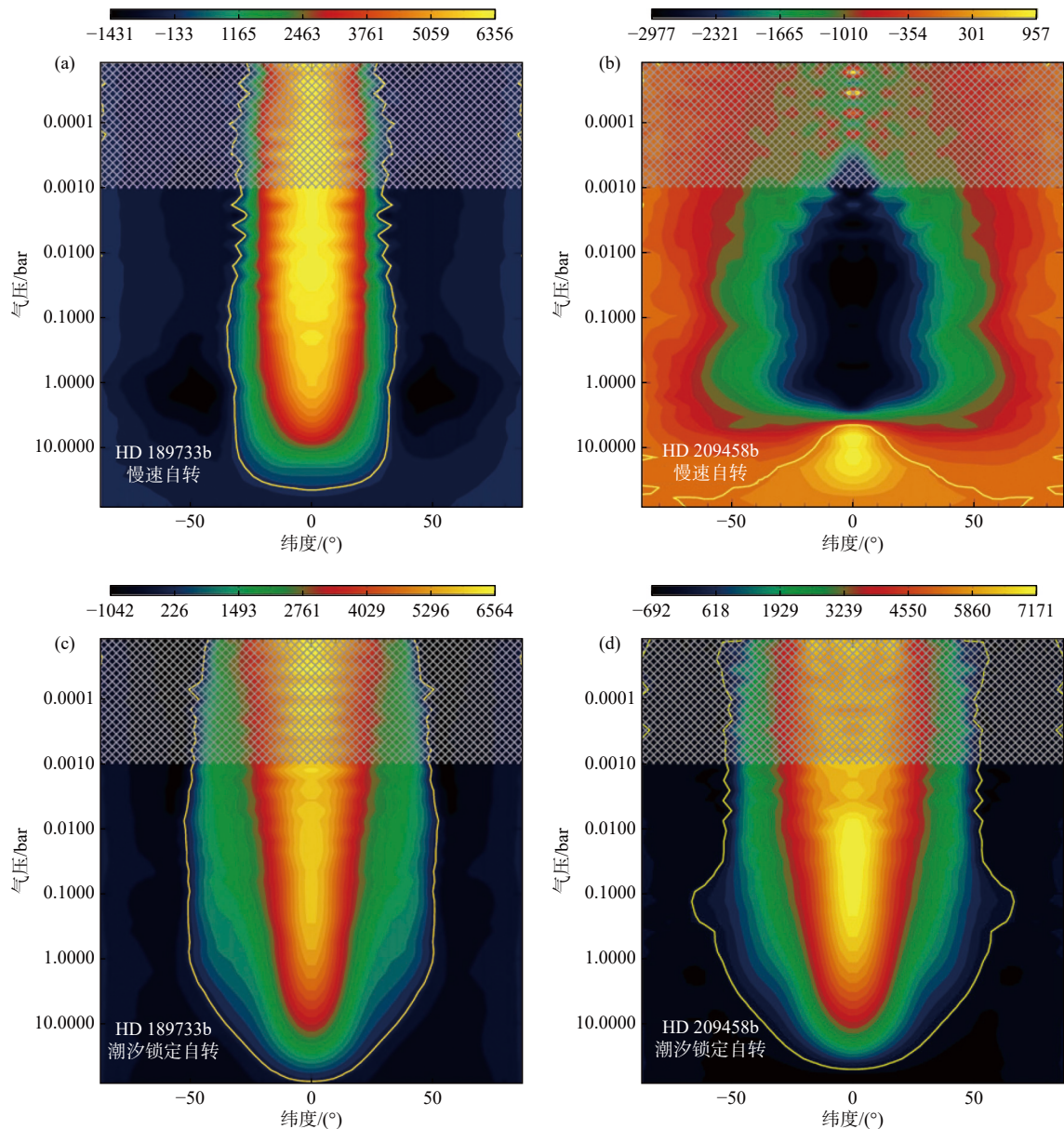


图 7 非锁定热木星模式的平均纬向风场. (a, c) 热木星 HD 189733b 的模拟, 公转周期为 2.2 天; (b, d) 热木星 HD 209458b 的模拟, 公转周期为 3.3 天. 图 (a, b) 自转周期为公转周期的两倍 (4.4 天和 6.6 天); 图 (c, d) 自转和公转周期相等, 处于潮汐锁定状态 (修改自 Rauscher and Kempton, 2014)

Fig. 7 Zonal-mean zonal wind fields for non-synchronously hot Jupiter models. (a, c) A simulation of the hot Jupiter HD 189733b, with an orbital period of 2.2 days; (b, d) The right column is a simulation of the hot Jupiter HD 209458b, with an orbital period of 3.3 days. The rotation period is twice than the orbital period (4.4 days and 6.6 days) at the upper row, and the rotation and orbital periods are equal at the bottom row (modified from Rauscher and Kempton, 2014)

远, 目前探测较为困难, 但通过凌星法、视向速度法和直接成像法还是发现了数十颗温木星. 凌星法发现的温木星公转周期一般在 10~30 天左右, 直接成像法发现的温木星公转周期要长得多 (Ortiz et al., 2014; Brahm et al., 2016; Barragán et al., 2017).

式 (1) 可以用来估计潮汐锁定所需的时间, 对于一颗与木星类似、公转半长轴为 0.3 AU 的温木星来说, 其潮汐锁定时间尺度在数百亿年, 远远超过系统寿命. 因此, 公转半长轴大于 0.2 AU 的温木星不处于潮汐锁定状态, 具有自转速率、倾角和偏心率的多变性. 当辐射时间尺度小于自转周期, 温木星的温度将在较短时间松弛到昼夜强迫的状态, 强烈的昼夜温差会导致类似典型热木星的赤道超级旋转. 而当辐射时间尺度长于自转周期时, 经向温度梯度变弱, 赤道-极地温差占据主导, 从而激发中纬度急流和赤道东风, 温木星的状态就是这两个状态的过渡 (Showman et al., 2015).

考虑到公转半长轴和辐射平衡温度 T_e 的关系:

$$T_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_*}{a_{\text{orb}}}} T_* \quad (10)$$

其中 R_* 和 T_* 分别代表恒星主星的半径和表面温度. 结合 (9) 式和开普勒定律 $P_{\text{orb}}^2 = (2\pi)^2 / [G(M_* + M_p)] a_{\text{orb}}^3$, 对于一颗质量相当于木星的气态巨行星来说, 当公转半长轴达到 0.13 AU 和 0.2 AU 时, 行星的辐射时间尺度比一个行星日分别长 2 天和 4 天. 也就是说, 当行星距离主星公转半长轴达到 0.15 AU 以上时, 主星的星光将不再导致明显的昼夜差异, 而是会导致纬向的均匀加热.

以上是针对倾角为零的温木星. 如果温木星存在自转轴倾角, 恒星星下点将在赤道两侧移动, 从而产生季节变化 (Langton and Laughlin, 2008; Rauscher, 2017; Ohno and Zhang, 2019a, 2019b). 对于倾角较小和温木星辐射时间尺度较大的情况, 倾角对温木星大气运动影响不大. 但倾角一旦超过 54° , 则两极区域收到的辐射平均值会超过赤道, 导致热风方程关系的改变 (Ohno and Zhang, 2019a). 这种情况下中纬度热成风在夏半球 (极地温度高于赤道) 将是东风, 而在冬半球 (赤道温度高于极地) 保持西风. 对于潮汐锁定的行星来说, 如果存在倾角, 恒星星下点将在南北半球成“8”字形往返摆动. Rauscher (2017) 进一步展示了温木星的温度分布有可能落后于辐射加热, 如图 8 所示. 当倾角为 30° 时, 温木星中纬度存在西风, 且赤道温度比

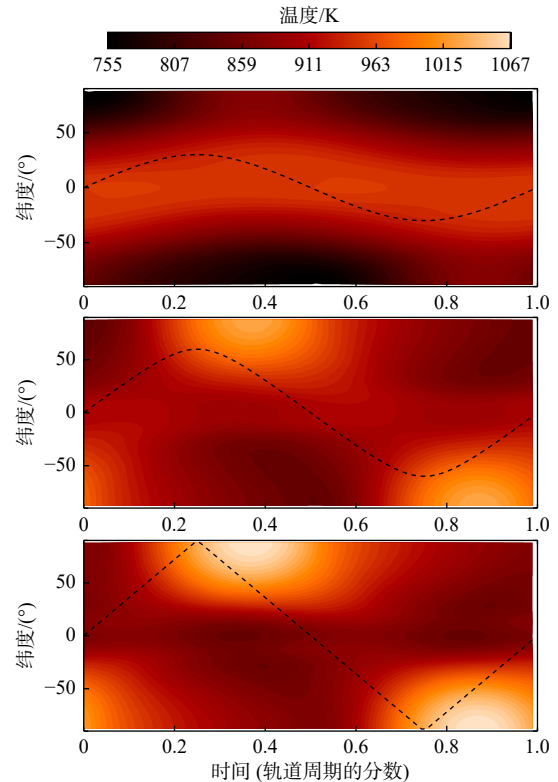


图 8 潮汐锁定不同倾角状态下的相位温度分布, 横轴为时间相位, 黑色虚线表示星下点的南北移动. 从上到下行星倾角分别为 30° 、 60° 和 90° (修改自 Rauscher, 2017)

Fig. 8 Temperature with different eccentricity of tidally locked planets. The horizontal axis shows the time, the black dotted line shows movement of the substellar point, and the planetary inclination from top to bottom are 30° , 60° and 90° , respectively (modified from Rauscher, 2017)

两极高. 倾角在 60° 和 90° 时两极将接受更多的恒星照射, 从而在夏半球中纬度出现随季节变化的东风.

从辐射时间尺度来说, 当辐射时间尺度短于一个自转周期时, 温木星表层产生强烈的昼夜温差对比. 当辐射时间尺度大于自转周期但短于轨道周期, 而且倾角小于 18° 时, 全球温度相对比较平均. 相反, 则出现季节变化. 当辐射时间尺度大于轨道周期, 且倾角小于 54° 时, 赤道温度最高, 季节变化较弱, 中纬度盛行西风. 而当倾角大于 54° 时, 两极温度在夏季最高, 夏半球中纬度盛行东风.

对于潮汐锁定的热木星而言, 不用考虑公转轨道的偏心率, 因为潮汐锁定行星的轨道通常被认为是圆形的. 但对于距离恒星较远的温木星, 其公转轨道可能是椭圆的, 偏心率将导致温木星在近主星点和远主星点之间运动, 从而影响温木星接收的恒星辐射. 对于偏心率较大的温木星来说, 在近主星点附近会受到强大的潮汐力作用, 因此在这一位置温木星会进入“伪锁向”状态, 暂时一个面面对主

星, 这种瞬时加热也会导致赤道波的形成, 从而驱动超级旋转. 温木星的大气响应需要时间, 因此虽然之后温木星会远离主星, 加热的结构也会继续留存, 从而在较长时间内保持赤道超级旋转 (Langton and Laughlin, 2008; Kataria et al., 2013; Lewis et al., 2017). 在这种情况下昼夜强迫激发的超级旋转流

也会遵循大气运动规律, 具有罗斯贝变形半径尺度的空间宽度.

图 9 对所有温木星模式进行了总结. 大气动力学模式可以分成五个类型, 涵盖昼夜强迫、极地强迫和赤道强迫, 风场也分为赤道超级旋转、中纬度西/东风、全球超级旋转等几个类型.

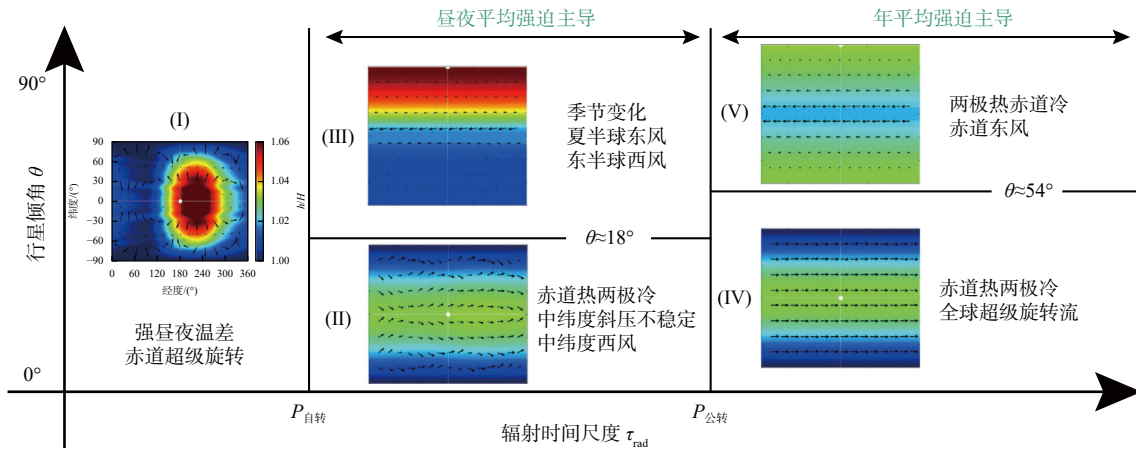


图 9 随自转周期、辐射时间尺度、公转周期和行星倾角而变化的温木星大气运动模式 (修改自 Ohno and Zhang, 2019a)

Fig. 9 Circulation patterns of warm Jupiter influenced by rotation period, radiation time scale, orbital period and planetary inclination (modified from Ohno and Zhang, 2019a)

1.4 冷木星

目前通过视向速度法我们发现了一些冷木星, 公转半长轴在 1~10 AU 之间 (Starovoit and Rodin, 2017; Dalal et al., 2021), 而直接成像法则发现了一些公转半长轴几十 AU 的冷木星 (Christian et al., 2008). 目前发现的冷木星大多数都处于恒星系形成早期, 处于恒星吸积盘之内, 因此这些冷木星还可能吸收物质变得更大 (Christian et al., 2008; Thayne et al., 2022).

排除磁场特性和组成元素区别, 仅从大气环流的角度来看, 这些年轻的冷木星相当于内部热通量更强的木星, 因此具有与褐矮星相类似的大气环流模式, 这种环流模式将在第 3 节论述.

1.5 超热木星

超热木星距离主星小于 0.03 AU, 朝阳面的上层大气受到剧烈的辐射加热, 因此超热木星朝阳面温度通常超过 2200 K. 同时, 超热木星的公转周期相当短, 约为 1~2 天 (Anderson et al., 2018), 最短的只有 16 个小时 (Wong et al., 2021). 超热木星的发射谱与热木星的不同, 存在逆温层等特征 (Haynes et al., 2015; Evans et al., 2017).

与热木星不同, 超热木星大气还涉及热离解过

程. 由于高能恒星辐射的轰击, 超热木星的氢气分子在朝阳面容易分解为氢原子, 氢分子热离解过程带来的“潜热”吸收相当于水蒸发的 100 倍以上 (Bell and Cowan, 2018). 氢分子在朝阳面离解过程中会吸收热量, 而氢原子在背阳面重新聚合为氢分子过程中又会释放热量, 氢原子在这个过程中与水的凝结和蒸发过程一样, 都会携带“潜热”运输. 因此氢原子热离解过程将有助于热量从朝阳面向背阳面的输送, 削弱昼夜温差 (Bell and Cowan, 2018; Komacek and Tan, 2018).

图 10 展示了氢分子的热离解情况, 超热木星的朝阳面氢分子基本已经耗尽, 热离解比率接近 100%, 而大部分的氢分子合成都发生在昼夜分界线附近, 背阳面的一个强热离解点可能来自于赤道急流减速和上涌流带来的温度高值异常. 图 11 表明, 氢分子离解/聚合过程可以显著降低超热木星的昼夜温差. 尽管如此, 在强烈的辐射加热下, 超热木星依然具有较大的昼夜温差, 并且大气环流特征与热木星类似.

2 类地行星

虽然目前已经有上百颗固态系外行星被确认, 其中近 60 颗被认为是可能的宜居行星. 但由于观测

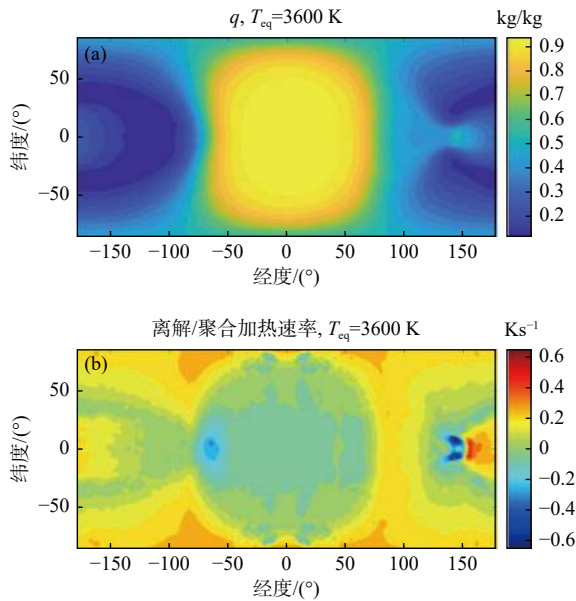


图 10 辐射平衡温度 (T_{eq}) 为 3600 K 的超热木星氢气离解情况 (70 mbar 处)。(a) 氢原子的质量混合比; (b) 离解/聚合加热速率, 离解为负值, 聚合为正值. 超热木星自转周期 2.43 天 (修改自 Tan and Komacek, 2019a)

Fig. 10 (a) The mass mixing ratio of hydrogen atoms and molecules. (b) Heating rate. Positive value shows recombined and negative value shows dissociated. Rotation period of ultrahot Jupiter is 2.43 days, with effective temperature of 3600 K (modified from Tan and Komacek, 2019a)

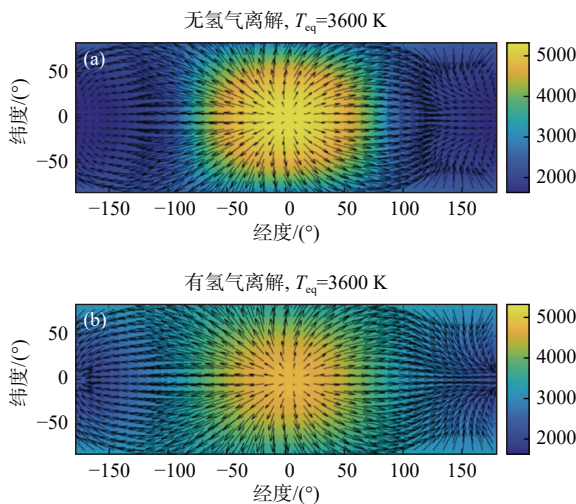


图 11 辐射平衡温度为 3600 K 的超热木星温度和风场分布 (70 mbar 处), 颜色图表示温度, 箭头表示风场。(a) 没有氢气离解过程; (b) 有氢气离解过程 (修改自 Tan and Komacek, 2019a)

Fig. 11 Temperature and wind of ultra-hot Jupiter with effective temperature of 3600 K (at 70 mbar). (a) Without hydrogen dissociation process; (b) With hydrogen dissociation process (modified from Tan and Komacek, 2019a)

技术的限制, 我们目前还无法很好地观测这些类地行星的大气成分以及大气运动特征. 例如, 地球大

气的标高只有 8 km, 这远超出了现有太空望远镜探测系外类地行星大气层的灵敏度. 目前关于系外类地行星大气的认知, 主要是基于大气物理、化学和动力学的基本原理, 并结合数值模式的模拟结果. 所以, 以下介绍主要是根据数值模拟的结果展开.

2.1 大气和海洋环流

目前所发现的系外类地行星绝大多数是围绕红矮星运行的潮汐锁定行星, 具有较短的公转和自转周期. 因此, 这些类地行星的大气环流特征与上面所述的热木星类似, 在赤道存在超级旋转流以及与之相关的赤道外准定常罗斯贝波 (Joshi et al., 1997; Heng et al., 2011; Wordsworth et al., 2011; Hu and Ding, 2013), 正是这些准定常波产生的向赤道西风动量输送, 使得赤道超级旋转流得以维持 (Hu and Ding, 2011; Showman and Polvani, 2011; Showman et al., 2013).

潮汐锁定行星的海洋具有较强的朝阳面向背阳面热输送 (Hu and Yang, 2014). Yang 等 (2019a) 发现当恒星对行星入射辐射通量小时, 朝阳面向背阳面的热量输运由海洋主导, 而入射通量大时, 昼夜热量输运由大气主导. 不通过海表面风应力驱动, 单纯依靠海洋中的准定常波也能直接驱动海洋超级旋转, 海洋超级旋转的宽度受海洋中罗斯贝变形半径影响 (Zeng and Yang, 2021).

目前所发现的非潮汐锁定的系外类地行星不多, 可能宜居的类地行星只有少数几个. Kepler-452b、Kepler-1638b 是目前所发现的少数几颗围绕类太阳恒星运行的可能宜居的、没有潮汐锁定的类地行星 (Jenkins et al., 2015; Morton et al., 2016). 数值模拟表明, Kepler 452b 大气环流与地球类似 (Hu et al., 2017). Penn 和 Vallis (2018) 发现即使非锁定类地行星与潮汐锁定状态只有很小的偏差, 超级旋转模式也会很快转变为中纬度急流模式.

对于潮汐锁定的次海王星, 除了赤道超级旋转之外, 中纬度地区还存在向东的急流. 中纬度急流是由于潮汐锁定的次海王星存在赤道—极地温差, 赤道比极地热, 而通过热风方程关系和角动量守恒关系驱动的 (Drummond et al., 2018; Wang and Wordsworth, 2020; Innes and Pierrehumbert, 2022). 但 Wang 和 Wordsworth (2020) 发现, 运行更长时间之后, 两条中纬度急流都会消失而合并成单一的赤道超级旋转, 说明次海王星大气达到平衡时间比过去研究中的时间要久, 原因在于次海王星深层大

气的长辐射时间尺度.

2.2 类地行星气候和宜居性

类地行星的宜居性取决于类地行星的气候. 我们一般定义宜居性, 最重要的指标是行星上存在大气且有液态水. 虽然液态水存在的温度在 0~100°C 之间, 但行星的辐射平衡温度一旦超过 70°C, 行星上会发生失控温室效应, 所有的水会蒸发并被光解, 因此定义的宜居带应该在 0~70°C 之间 (Ingersoll, 1969; Kasting et al., 1993; Kopparapu, 2013). 图 12 展示了根据上述方法定义的宜居带.

下面的几个指标均有可能直接影响行星宜居性, 或通过影响气候间接影响宜居性 (Madhusudhan et al., 2016):

2.2.1 大气是否存在

行星上来自于原始星云的大气, 我们称之为原生大气 (一次大气), 通过其它来源逐步俘获, 或从行星内部喷出气体形成的大气, 称之为二次大气. 为了保证行星能够获得气体, 行星的温度不能太高以避免气体逃逸, 金斯 (Jeans) 参数 λ 可以用来表征大气逃逸是否显著:

$$\lambda = \frac{GMm}{kTR} \tag{11}$$

其中 G 是引力常数, M 是行星质量, m 是分子质

量, k 是玻尔兹曼常数, T 是温度, R 是行星逃逸半径, 略大于行星半径. λ 越大, 则行星越容易捕获大气, 反之大气会发生逃逸. 行星在吸收原始星云气体时, 行星核心质量大于十倍地球质量则会导致失控气体吸积, 最终形成巨行星 (Venturini et al., 2015), 小于这个质量则有可能会丢失一次大气.

原始行星丢失其以氢气为主的一次大气主要通过两个过程, 一个是极紫外线驱动逃逸 (XUV-driven escape), 大气对极紫外不透明, 导致大气层顶被显著加热引发了热逃逸 (Zahnle and Walker, 1982), 持续大约一亿年; 另一种叫星核驱动质量逃逸 (core-powered mass loss), 是深层大气热量驱动的氢分子逃逸 (Gupta and Schlichting, 2019), 持续大约一千兆年.

对于围绕 M 型红矮星运动的宜居带行星来说, 因为它们距离恒星更近, 会受到更多的 XUV 辐射, 且红矮星寿命长, 具有强星冕活动 (France et al., 2016; Odert et al., 2020), 因此相比于太阳系行星, 这些系外行星更容易丢失他们的一次大气 (Luger and Barnes, 2015; Bolmont et al., 2016). 同时, 重元素有可能被氢分子携带而一起逃逸. 对于混合良好的大气, 所有元素以相同比例损失, 而在中等逃逸率下, 重元素逃逸速度较慢, 更容易留下来 (Hunten et al., 1987). 一些气体, 例如 CO₂, 可以

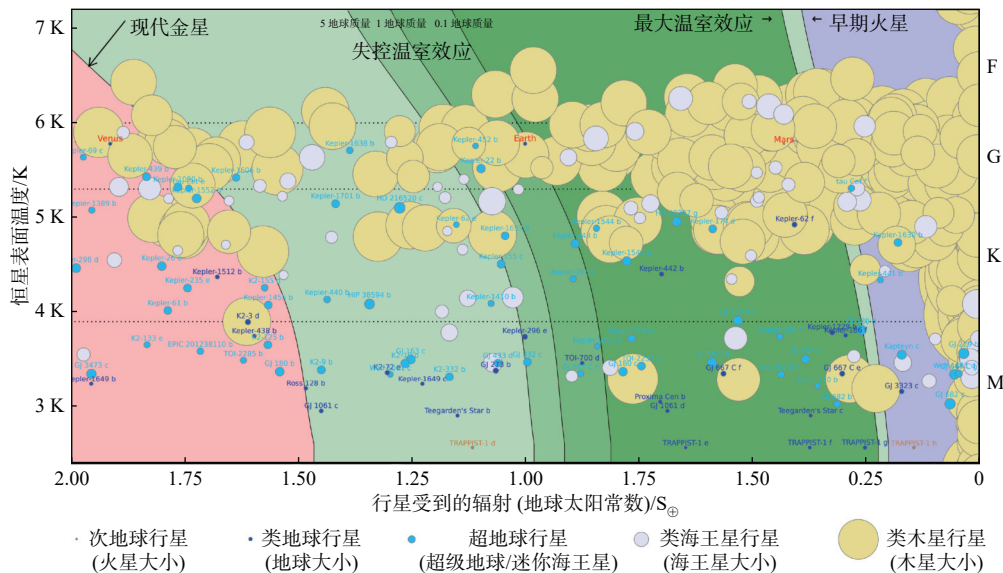


图 12 宜居带附近的所有行星 (深绿色阴影为保守宜居带, 浅绿色阴影为乐观宜居带). 只有小于 10 个地球质量或 2.5 个地球半径的行星被标记. 圆圈的大小对应于行星的半径 (根据质量半径关系估计) (修改自 Kopparapu et al., 2014) (PHL @ UPR Arcibo)

Fig. 12 The figure shows all planets near the habitable zone (darker green shade is the conservative habitable zone and the lighter green shade is the optimistic habitable zone). Only those planets less than 10 Earth masses or 2.5 Earth radii are labeled. The different limits of the habitable zone are described in Kopparapu et al. (2014). Size of the circles corresponds to the radius of the planets (estimated from a mass-radius relationship)

有效冷却系外行星热层大气,从而减弱大气热逃逸 (Tian, 2009)。

如果行星不具有磁场屏蔽作用,行星的大气会被恒星风逐渐剥离,因此强烈的行星地质活动是一个宜居性的潜在条件,这种行星会有较为强大的磁场,抵挡恒星风对大气的剥离作用 (See et al., 2014)。M型红矮星具有较强的恒星风, Vidotto 等 (2013) 认为环绕红矮星运动的、大小与地球类似、磁场强度也类似的系外行星,要维持地球相似强度的磁层,其位置将远远超过宜居带外边缘,而在宜居带内的行星需要比地球更大的磁场强度。See 等 (2014) 认为在红矮星周边行星的磁场环境可能并不足以建立起生命的保护伞。从磁场这一角度来看,红矮星附近行星的宜居性依旧处在争论中。而对于质量稍大的恒星来说,磁场条件的约束要比红矮星小得多。在 Cranmer 和 Saar (2011) 的模型下,对于围绕 0.6~0.8 个太阳质量的恒星,年龄大于 1.5 百万年的接近地球质量的行星,能够维持足够强度的磁场抵御恒星风。

2.2.2 大气类型

二次大气的成分取决于起始物质成分和大气温度 (Schaefer and Fegley, 2010)。行星的温度升高会促进气体组分的逃逸,因此可以定义一些物质的“雪线”,在雪线外行星可以吸积到更多挥发性较强的物质,而雪线内吸积的往往都是挥发性较弱的物质 (Öberg et al., 2011)。以水为例,太阳系中 H₂O 雪线 (2~4 AU) 以外的行星更容易在大气中保留水分 (Dodson-Robinson et al., 2009; Morbidelli et al., 2012)。

行星最初的氢元素含量对水量有巨大影响 (Miller-Ricci et al., 2012)。硅酸盐地壳的放气作用会导致 H₂O、CO₂ 主导的二次大气,而 O₂ 会在高温下的低密度大气中占据主导 (Schaefer et al., 2012)。在高 C/O 比和低温下 CH₄ 可能成为主要大气组分,而高温下 HCN、C₂H₂ 会占据主导地位 (Hu and Seager, 2014)。低 C/O 比下水分会成为主要大气组分 (Tsuji, 1973)。

在行星温度达到 2000 K 左右的时候,行星上的岩石可能会熔化,从而形成岩浆行星 (Hirschmann, 2000)。岩浆海洋预计会存在强烈的对流和大气挥发,且岩浆海洋的凝结过程应该和水、氨海洋不同,岩浆海洋从底部开始向上凝结 (Lebrun et al., 2013)。岩浆海洋会影响行星的大气成分,除了岩浆海洋成分会进入大气以外,岩浆海洋还会消耗大

气中的氧气,例如亚铁离子的氧化反应 (Javoy, 1999); 同时,岩浆海洋对 CO₂ 的溶解度较低,具有岩浆海洋的行星,CO₂ 往往更多地被保存在大气层当中 (Lebrun et al., 2013)。

2.2.3 大气坍塌与冷阱

对于环绕 M 型红矮星转动的行星来说,处于宜居带的行星一定会被潮汐锁定,朝阳面面对恒星,背阳面是永恒的黑暗。而对于这种行星来说,背阳面的低温有可能导致大气凝固,如果朝阳面向背阳面输送的热量不足,极有可能导致行星的大气被全部冻结在背阳面,这被称为大气坍塌 (collapse) (胡永云, 2016)。Joshi 等 (1997) 证明,大气是十分不容易坍塌的,只有当热量传输效率相当低下时才会发生。类地行星只有在大气压强小于 100 mbar、且不存在大质量气体分子,如 CO₂ 的情况下才会坍塌。海洋的存在也会抑制大气坍塌现象,在大气成分和质量与地球类似且有海洋存在的行星上,大气坍塌永远不会发生 (Yang et al., 2014)。

在大气不坍塌的情况下,某些大气组分仍然有可能被困在行星背面的冷阱 (cold trap) 当中,比如水分的凝固,导致行星朝阳面缺乏水分 (Leconte et al., 2013)。组分的凝固会导致大气稀薄热量传输效率降低,从而正反馈地加速凝结过程。对于 CO₂ 这个大气组分,坍塌压强在 0.1~10 bar,对应恒星辐射通量为 500~4000 W/m² (Turbet et al., 2016)。如果行星上存在海洋,海洋的热输送能够将朝阳面的热量通过洋流输送到背阳面,防止背阳面海冰扩大和大气组分凝结。即使 CO₂ 浓度降低到 3.6 ppmv,背阳面的海冰厚度也不会超过 10 m (Yang et al., 2014)。

2.2.4 行星气候

因为水蒸气在红外波段有很强的吸收,因此水蒸气是一种强大的温室气体,经过大气出射的红外辐射被水蒸气吸收而加热大气。另一方面,温度上升又让更多的水蒸发成为水蒸气,这种正反馈如果持续下去,会造成失控温室效应 (runaway greenhouse effect),一直持续到行星上所有液态水都变为水蒸气为止 (Ingersoll, 1969)。恒星演化过程中恒星的辐射密度会随时间增大,这种变化可能导致行星进入失控温室效应,因此过去宜居的行星有可能现在不宜居了,就像金星从过去到现在的演化一样 (Kasting et al., 1993; Abe et al., 2011)。大量的水蒸气进入高层大气后,容易被恒星高能粒子撞击

而光解为氢氧, 氢元素会逃逸入宇宙, 因此行星的水分会被彻底剥离. 甚至本来冰封的冰雪行星, 如果因为主星光照增强, 也会在很短时间里由冰封状态到丢掉所有水分的状态 (Yang et al., 2017). 另外一方面, 如果大气中存在强烈吸收紫外线的物质, 比如臭氧和光化学气溶胶, 这会导致入射恒星光很难到达地面, 引发反温室效应 (anti-greenhouse effect), 高层大气增温而地面降温 (Mckay et al., 1991), 有可能使行星地表温度降低到不适宜居住的温度. 质量更大的行星宜居带内边界会向主星方向移动, 因为增加重力加速度会导致水蒸气柱质量减少, 增大出射长波和减弱温室效应 (Yang et al., 2019).

冰雪的反照率高于陆面, 如果海冰和陆地冰川产生, 则入射短波会被反射回宇宙空间, 造成行星进一步变冷. 这种正反馈会导致行星出现全球冰封现象, 同样, 解封过程也是正反馈过程. 冰封行星干燥区的冰川活动会将尘埃带到表面, 促进冰川融化 (Abbot and Pierrehumbert, 2010); 云对大气辐射长波的吸收和反射作用能够提升地表温度从而导致行星脱离冰封状态 (Abbot et al., 2012).

对于潮汐锁定的行星, 朝阳面接近主星星下点的区域能够维持开阔不结冰的洋面, 形成类似“眼球”状的结构, 提供了宜居性的可能, 海洋的热传输可以有效阻止海冰的推进 (Pierrehumbert, 2011). 排除风生环流作用, 海洋自身也会产生超级旋转和环流 (Zeng and Yang, 2021), 而海洋环流导致海洋对浮冰的搬运作用有可能会限制系外行星海洋开阔洋面的存在 (Yang et al., 2019b; Yue and Yang, 2020). 海洋化学反应也是一个重要的因素. 在水的参与下, 风化的含钙、镁岩石会通过溶解后的离子吸收大气中的 CO_2 (Berner, 2004), 从而影响行星温室效应的程度.

3 褐矮星

3.1 观测结果

大多数褐矮星都是孤立的流浪星球, 在没有恒星辐射的情况下, 其大气运动和热力结构完全受内部能量驱动. 褐矮星的内部辐射通量可以达到 $\sim 10^5 \text{ W/m}^2$, 由于深层大气的光学密度较大, 深层向外的热量释放只能靠对流运动传输, 因此, 褐矮星内部对流剧烈, 垂直温度分布遵循绝热递减率. 随着

大气密度和光学厚度逐渐降低, 在褐矮星的上层, 大气辐射传输成为向外释放热量的主要过程. 褐矮星对流层和辐射层的分界线大致在几个大气压处. 考虑褐矮星内部热量通过对流和辐射向外的发射过程是各向同性的, 那么褐矮星在辐射层的水平温度差异比较小.

褐矮星的光变曲线显示随时间变化的明暗交替现象 (Artigau et al., 2009; Biller et al., 2013), 一些褐矮星表面斑块状现象也被直接成像法观测到 (Apai et al., 2013; Crossfield et al., 2014). 褐矮星大气中存在重的云粒子, 而这些粒子本应受重力而沉降, 它们的出现说明褐矮星上存在强的对流运动 (Tsuji et al., 1996; Alexander et al., 1997; Ruiz et al., 1997), Leggett 等 (2007) 发现了褐矮星还存在化学不平衡的气体分布. 这些观测表明, 褐矮星存在大气环流运动, 而这种运动应该受到褐矮星内部对流运动的影响. Allers 等 (2020) 通过比较近红外与射电测量的旋转周期差异的方法, 证实了褐矮星存在大气运动, Radigan 等 (2012) 根据红外发射光谱变化推算出了褐矮星大气运动的速度, Burgasser 等 (2014)、Karalidi 等 (2016) 根据大气亮点的运动, 推断出褐矮星大气运动速度为 $\sim 600 \text{ m/s}$, 但 Apai 等 (2017) 认为这可能只是大气波动传播的速度.

褐矮星的自转周期较短, 约 1~12 个小时不等 (Snellen et al., 2014), 罗斯贝变形半径 $L_D = NH/f$ 约为几百千米. 这一方面说明, 褐矮星存在空间尺度较小的涡旋运动, 类似木星大气的多涡旋现象. 另一方面说明, 科里奥利力对尺度在数百千米量级的大气运动就有显著影响. 由于褐矮星内部具有正压属性, 具有泰勒柱效应, 因此, 褐矮星大气运动更倾向于纬向流而不是经向流 (Batygin et al., 2013). Rogers 和 Komacek (2014) 耦合了大气方程和电磁阻力方程, 发现在电磁力作用下经向流确实会被削弱.

3.2 辐射效应

与热木星一样, 褐矮星大气辐射过程也可以采用简单的牛顿冷却模型 (Showman et al., 2019). 根据一维辐射模式的计算结果, 褐矮星大气温度从内部对流运动造成的绝热递减逐步过度到近似等温的状态 (Burrows et al., 2006). 需要说明的是, 褐矮星的云和化学反应要比热木星复杂得多, 因为在较低温度情况下, 更易产生物质凝结, 且褐矮星更

多地受到内部红外辐射的影响.

Burrows 等 (2006)、Salmon 和 Marley (2008)、Marley 等 (2010)、Tan 和 Showman (2019b) 使用一维大气模型对褐矮星的云过程进行了模拟. 这些模拟研究假设褐矮星处于辐射平衡状态, 发现在没有大规模环流的影响下, 单纯的云形成过程也能激发对流运动, 在 30 小时时间尺度导致大气热力结构发生变化: 无云区域大气柱接收的红外辐射来自褐矮星的深层, 而有云区域红外辐射来自较低温的云顶, 因此两个区域的空气柱会出现温度差异, 从而导致对流运动.

图 13 展示了褐矮星一维模型在周期约 10 小时的多云—无云循环. 云层逐渐向上延伸, 因此云顶膨胀冷却, 导致从云顶出射的辐射能量降低. 云之上气柱的温度主要由出射长波决定, 出射长波减少, 云之上气柱温度降低, 云内对流增强. 同时, 红外辐射在云底累积, 云底相对于云之下气柱增温, 形成了上热下冷的稳定层结, 导致云下方对流运动被抑制, 从底部进入云的物质减少. 随着云形成的减弱, 云厚度减少, 红外辐射得以重新向上发射, 云底降温而云顶升温, 云下方对流重新开启, 云内对流被抑制, 形成云过程的循环.

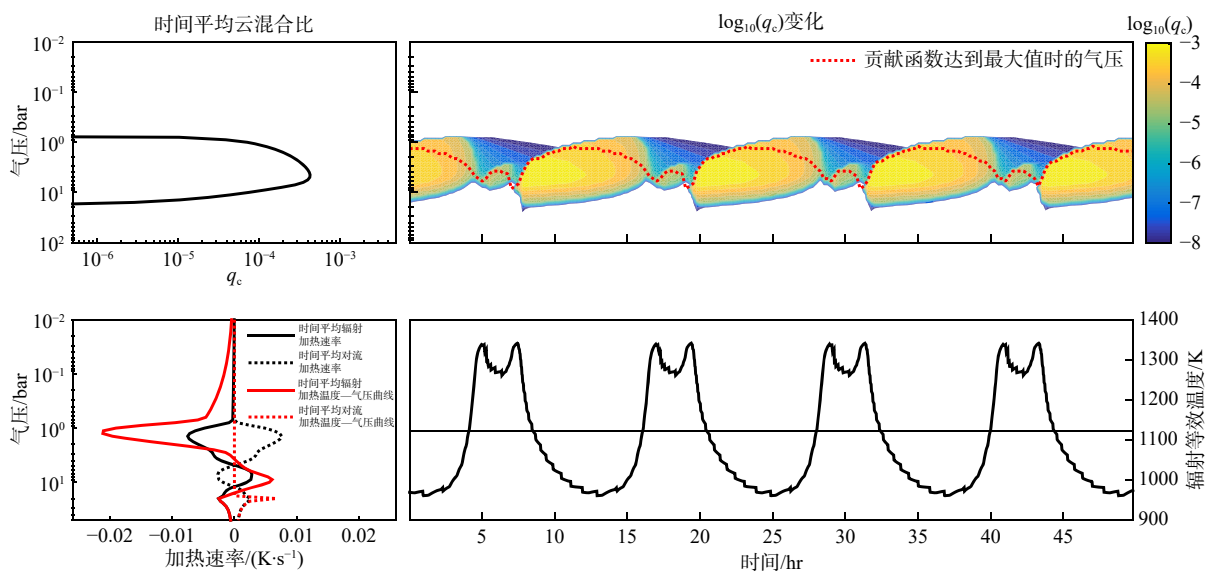


图 13 一维云模式随时间变化的云混合比 (q_c) 和温度结构 (修改自 Tan and Showman, 2019b)

Fig. 13 Cloud mixing ratio and temperature structure in 1D cloud models (modified from Tan and Showman, 2019b)

3.3 大气环流

Freytag 等 (2010) 建立了一个 400 km 空间大小的二维箱式模型, 用来模拟 L 型褐矮星的深层对流. 他们将辐射传输模式和粉尘模型结合起来, 推算硅酸盐尘埃的凝结和汽化以及尘埃的辐射效应. 对流能够混合尘埃, 并且将尘埃向上输送, 在大气中产生几十千米大小的云; 同时, 对流激发出小尺度重力波, 重力波的破碎有助于云的形成. Tremblin 等 (2019) 将地球上的海洋温盐对流推广到了褐矮星, 提出褐矮星上由于 CO/CH₄ 转化引起的辐射对流类似于地球海洋的温盐对流, 有助于降低褐矮星的大气温度梯度.

二维模式无法模拟褐矮星的光变曲线, 也难以

精确描述旋转行为, 因此 Showman 和 Kaspi (2013) 首先尝试了三维褐矮星大气环流模式. 他们在滞弹性系统^{d)} (anelastic system), 模式底部施加了一个热源来强迫系统对流, 发现对流在两极更强, 且两极和赤道的温差可能只有几开尔文. 褐矮星的快速旋转会导致对流结构和垂直速度在大尺度上平行于旋转轴.

Zhang 和 Showman (2014) 在 1.5 层浅水方程模式中添加了随机小尺度的质量输入来代表对流扰动, 发现在辐射冷却和摩擦较弱的情况下, 大气会自发产生风速为每秒百米的带状风场, 而辐射冷却和摩擦强时, 大气会进入湍流和涡旋状态. Showman 等 (2019) 采用了三维原始方程模式来对褐矮星大气进行模拟, 在辐射方案上采用牛顿冷却, 假

d) 平均密度随深度 r 变化的系统, $\rho = \rho(r) + \tilde{\rho}'(r, \lambda, \phi)$.

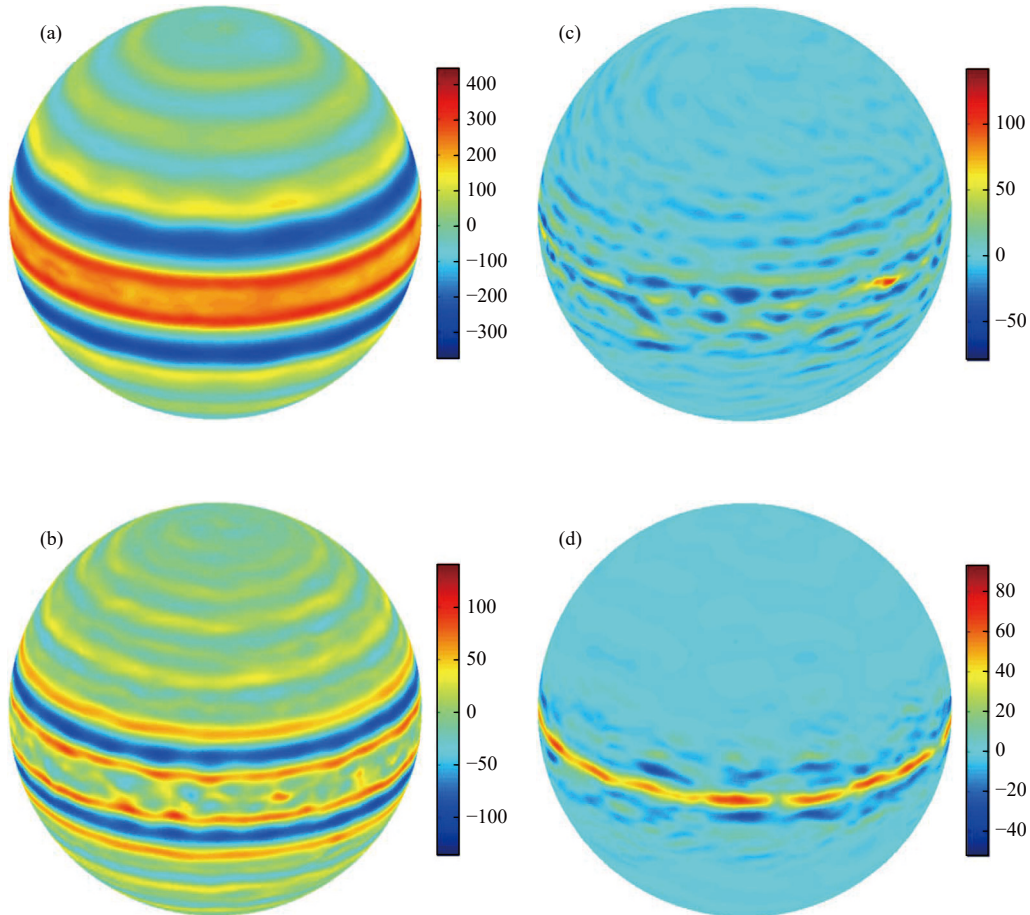


图 14 Showman 等 (2019) 模拟得到的褐矮星纬向风场 (0.77 bars). 从 (a-d) 四个子图, 底部摩擦依次增强

Fig. 14 The simulation results of zonal wind fields at 0.77 bars field by Showman et al. (2019). The bottom drag increases from (a) to (d)

设辐射平衡的温度廓线由底部的绝热线过度到上层的等温线, 同时在底部添加基于球谐函数的热扰动. 结果与 Showman 和 Kaspi (2013) 的预测一致, 急流在摩擦和辐射阻尼较强时只存在于低纬度, 而阻尼较弱时, 急流出现在所有纬度 (图 14).

褐矮星的条带状风场可以用莱茵尺度 (Rhines scale) L_R 来解释:

$$L_R = \sqrt{\frac{U}{\beta}} \quad (12)$$

莱茵尺度一般用来表示湍流状态和大尺度环流状态的过渡尺度. 如果涡流的运动尺度小于莱茵尺度, 则涡流带来的扰动只会引发小规模的湍流; 一旦涡流的运动尺度大于莱茵尺度, 则在空间上 β 效应会显现, 也就是说, 涡流可以“感应”到地转偏向力的经向梯度了, 则 β 效应会迫使湍流按照条带状急流的方式组织起来. 因此, 褐矮星急流的数量

往往跟褐矮星自转速率有关, 褐矮星自转越快, 其表面越容易出现条带, 且出现的条带越多, 对应的是更小的莱茵尺度.

Tan 和 Showman (2021) 在 Tan 和 Showman (2019) 的基础上, 将云效应引入 f 平面^{e)}的褐矮星模式中, 通过添加一个小的云扰动, 最终形成了一个直径万千米量级、时间十小时量级的涡旋. Tan 和 Showman (2021) 证明了除了一维云反馈会导致褐矮星明暗变化, 三维云反馈也会造成更大规模的空间差异, 同时证明褐矮星上存在反向级联. 一般来说扰动会在旋转效应下通过地转调整形成罗斯贝变形半径尺度的涡旋, 但是褐矮星模式中存在更大空间尺度的涡旋, 说明能量存在从小涡向大尺度的转移.

3.4 赤道区域风场震荡

Showman 等 (2019) 发现, 褐矮星赤道区域

e) 科里奥利参数 f 是常数.

风场存在东风西风交替现象, 与地球赤道区域风场交替类似. 地球赤道区域存在周期为 28 个月左右的震荡, 被称为准两年震荡 (quasi-biennial oscillation, QBO), 而同样的震荡也在木星和土星上被发现, 分别被称为准四年震荡 (quasi-quadrennial oscillation, QQQ) 和半年震荡 (semi-annual oscillation). Leovy 等 (1991)、Baldwin 等 (2001) 指出这种相似的震荡极有可能和地球 QBO 是同一种机制导致的. QBO 被认为是赤道上方背景流对赤道大气波选择性吸收引起 (Lindzen and Holton, 1968; Lindzen, 1970, 1971, 1972).

赤道区域的开尔文波有向东的相速度, 混合罗斯贝波有向西的相速度. 背景流对波有饱和作用 (wave saturation), 即波的相速度和背景流速度接近时, 波会破碎并将能量传递给背景流. 赤道开尔文波和混合罗斯贝波被内部热力扰动激发而向上传播, 假如此刻赤道上方存在西风, 则开尔文波会在其中破碎, 并将向东的加速度传给背景流, 因此背景流会在底部向东加速, 西风逐渐下移; 同时西风对混合罗斯贝波透明, 混合罗斯贝波可以一直向上传播到大气层顶并在那里耗散, 激发向西的流场. 因此随着时间推移, 这种机制继续重复, 导致东风西风在赤道上方交替出现并逐步下移 (图 15).

3.5 受到恒星辐照的褐矮星

观测表明, 存在围绕恒星的褐矮星, 包括主星为主序星 (Sahlmann et al., 2011) 和白矮星的褐矮星 (Casewell et al., 2012). 主星为主序星的褐矮星公转周期约 3~5 天, 处于潮汐锁定状态. 这类褐矮星内部热通量有可能与恒星辐射的强度相当, 因此, 其大气环流同时受到内部和外部扰动的影响.

围绕白矮星旋转的褐矮星可能在其早期和恒星伙伴处于相互绕转状态, 恒星吸取了褐矮星大量的气体, 导致褐矮星没有发展为恒星. 主序星阶段结束后, 恒星变为红巨星, 其外部大气膨胀到褐矮星轨道, 给褐矮星带来了较强的阻力, 因此褐矮星的轨道降低. 当恒星从红巨星阶段到白矮星阶段后, 白矮星和褐矮星比之前更为接近, 公转周期减小到数小时. 白矮星的光谱集中在紫外波段, 因此对大气有更强的加热作用. 目前, 已在褐矮星-白矮星系统中观测到类似热木星的热点偏移 (Littlefair et al., 2014; Longstaff et al., 2017; Rappaport et al., 2017). 褐矮星可能存在大气被白矮星吸收而丢失的问题,

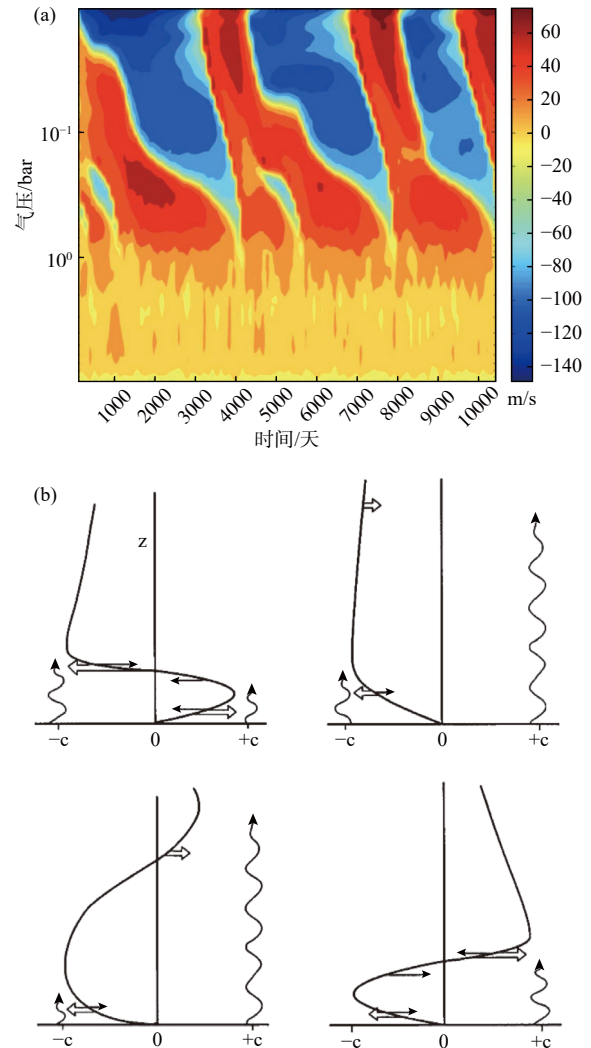


图 15 (a) 褐矮星赤道风场随时间的改变, 红色西风, 蓝色东风, 纵轴为气压 (修改自 Showman et al., 2019); (b) 地球 QBO 的原理, 实线代表风速廓线, 曲线代表上传的赤道波, 白色空心箭头代表加速度方向 (修改自 Plumb, 1977)

Fig. 15 (a) Zonal-mean zonal wind at the equator vs. pressure and time (in Earth days). Eastward wind is shown in red and westward wind is shown in blue (modified from Showman et al., 2019); (b) Schematic of the QBO mechanism. The curvy solid line represents the background zonal-mean zonal flow. The curvy arrows show upward propagating equatorial wave. Preferential absorption of these waves leads to zonal accelerations that are shown by the thick double arrows (modified from Plumb, 1977)

导致褐矮星不再处于静力平衡状态, 星体也变为非球体. Tan 和 Showman (2020)、Lee 等 (2020) 对褐矮星-白矮星系统的褐矮星进行了模拟, 发现了比热木星更窄的赤道超级旋转流. Lian 等 (2022) 的模型包含潮汐锁定的昼夜温差和褐矮星的内部热源, 发现内强迫对赤道超级旋转存在削弱作用, 且当外部强迫减弱时, 赤道区域会出现风场震荡.

4 结论与展望

本文综述了近年来系外行星大气环流方向的研究进展,从观测、理论和模拟三个方面阐述了系外行星大气环流的特征和机制。

关于热木星,恒星辐射所产生的强昼夜温差是驱动大气运动的主控因素。观测和模拟均表明,在强昼夜温差和行星慢速自转作用下,热木星的大气环流基本特征是赤道维持超级旋转气流,中纬度维持准定常罗斯贝波动。这些观测和模拟结果可以在理论上得到完美解释。随着气态巨行星与恒星之间距离的增加,潮汐锁定状态将不复存在,行星自转加快,行星内部热能的作用将愈加显著,气态巨行星的大气环流将受恒星辐射和内部热能共同驱动,大气环流状态将逐步向太阳系木星大气环流状态过度。

关于潮汐锁定类地行星,其大气环流特征与热木星类似,昼夜温差和慢速自转造成赤道超级旋转急流和中纬度罗斯贝波动。与大气环流类似,潮汐锁定类地行星的海洋环流同样具备赤道超级旋转现象和中纬度罗斯贝波动。

潮汐锁定类地行星的大气和海洋环流对行星的宜居性有重要意义。对于位于宜居带内的潮汐锁定类地行星,一个重要的问题是大气和水分是否完全被冻结在其永久的背阳面。现有的模拟结果表明,大气和海洋的热量输送能够有效地加热潮汐锁定行星的背阳面,大气不可能被冻结在背阳面,而且,只要拥有足够深度的海洋,液态水也不可能被冻结在背阳面。模拟试验结果还表明,海洋热量输送和海洋冰动力学对宜居带的宽度有重要影响。

关于褐矮星,特别是孤立的褐矮星,其大气环流主要由内部热能驱动。在这种情况下,大气环流特征取决于内部热能释放和褐矮星的自转速度。当褐矮星的自转速度较慢时,模拟结果表明,褐矮星大气呈现多涡旋状态。而当褐矮星自转速度较快时,其大气环流呈现多急流特征,与太阳系木星的情况类似。观测表明,褐矮星具有快速变化的云层结构,反映了褐矮星内部热能引发的对流运动对褐矮星大气环流的重要性。

目前,关于系外行星大气环流和气候的模拟和理论研究基本已告一段落,下一步是更多的与探测相结合的工作。在开普勒望远镜停止工作之后,美国于 2018 年发射了 TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) 太空望远镜,继续通过凌星法对

系外行星进行观测。这些为模拟结果与观测结果的对比提供了可能。特别地,下一步的系外行星大气探测将侧重类地行星大气成分探测以及系外生命信号的探测。最近发射的美国 JWST 太空望远镜 (James Webb Space Telescope) 具备红外波段探测能力,将会为探测类地行星大气成分甚至生命信号提供帮助。

各国的系外行星探测计划在进一步展开中。欧空局的 PLATO 任务计划于 2020 年代中期发射望远镜前往日地拉格朗日 L2 点,探测系外凌星和星震现象。美国也在其十年规划白皮书《天文 2020》里提出应孵化一个 6 m 口径的紫外光学望远镜,用于系外生命探测。我国的系外行星探测任务包括空间站巡天望远镜 (Chinese Space Station Telescope, CSST)、ET2.0 项目、紫外光学空间望远镜项目和天邻计划。CSST 预计将在 2024 年发射 2 m 口径离轴三反光学系统的空间望远镜,观测波段集中在可见光和红外波段,可能会观测一部分系外行星 (詹虎, 2021)。ET2.0 项目是专项类地行星观测项目,计划于 2026 年发射六台广角凌星望远镜和一台微引力透镜望远镜前往 L2 点,目标观测银河系中心方向的类地行星,预计能发现更多的宜居带类地行星。我国还提出了主要用于宜居行星探测和生命信号搜寻的 L2 点 6 m 口径紫外光学空间望远镜项目,用于探测系外行星光谱中的臭氧等气体生命信号。天邻计划 (HABITATS) 计划发射口径 4~6 m 空间望远镜到 L2 点,对系外行星进行多波段观测,研究系外行星大气温度结构和组成 (Wang et al., 2020)。这些深空探测计划将极大地推动系外行星大气的观测和研究。可以预见,系外行星大气研究将在未来 10~30 年取得重要的进展。

References

- Abbot D S, Pierrehumbert R T. 2010. Mudball: Surface dust and snowball Earth deglaciation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D3): D03104.
- Abbot D S, Voigt A, Branson M, et al. 2012. Clouds and snowball Earth deglaciation[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(20): L20711.
- Abe Y, Abe-Ouchi A, Sleep N H, Zahnle K J. 2011. Habitable zone limits for dry planets[J]. *Astrobiology*, 11(5): 443-460.
- Alexander D R, Allard F, Tamanai A, et al. 1997. Grain formation in atmospheres of cool dwarfs[J]. *Astrophysics and Space Science*, 251(1): 171-175.
- Allers K N, Vos J M, Biller B A, et al. 2020. A measurement of the wind speed on a brown dwarf[J]. *Science*, 368(6487): 169-172.
- Anderson D R, Temple L Y, Nielsen L D, et al. 2018. WASP-189b: An

- ultra-hot Jupiter transiting the bright star HR 5599 in a polar orbit[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, arXiv: 1809.04897.
- Andrews D, Holton J, Leovy C. 1987. *Middle Atmosphere Dynamics*, volume 40[M]. San Diego: Academic Press.
- Angerhausen D, DeLarme E, Morse J A. 2015. A comprehensive study of Kepler phase curves and secondary eclipses: Temperatures and albedos of confirmed Kepler giant planets[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127(957): 1113-1163.
- Apai D, Radigan J, Buenzli E, et al. 2013. HST spectral mapping of L/T transition brown dwarfs reveals cloud thickness variations[J]. *The Astrophysical Journal*, 768(2): 121-136.
- Apai D, Karalidi T, Marley M S, et al. 2017. Zones, spots, and planetary-scale waves beating in brown dwarf atmospheres[J]. *Science*, 357(6352): 683-687.
- Arcangeli J, Désert J-M, Line M R, et al. 2018. H⁺ opacity and water dissociation in the dayside atmosphere of the very hot gas giant WASP-18b[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 855(2): L30-L36.
- Artigau E, Bouchard S, Doyon R, et al. 2009. Photometric variability of the T2.5 brown dwarf SIMP J013656.5+093347: Evidence for evolving weather patterns[J]. *The Astrophysical Journal*, 701(2): 1534-1539.
- Baldwin M P, Gray L, Dunkerton T, et al. 2001. The quasi-biennial oscillation[J]. *Reviews of Geophysics*, 39: 179-229.
- Barragán O, Gandolfi D, Smith A, et al. 2017. K2-139 b: A low-mass warm Jupiter on a 29-day orbit transiting an active K0V star[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475: 1765-1776.
- Barstow J K, Aigrain S, Irwin P G J, et al. 2017. A consistent retrieval analysis of 10 hot Jupiters observed in transmission[J]. *The Astrophysical Journal*, 834: 50-65.
- Batygin K, Stanley S, Stevenson D J. 2013. Magnetically controlled circulation on hot extrasolar planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 776(1): 1567-1579.
- Bean J L, Raymond S N, Owen J E. 2020. The nature and origins of sub-Neptune size planets[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126(1): e2020JE006639.
- Bell T J, Cowan N B. 2018. Increased heat transport in ultra-hot Jupiter atmospheres through H₂ dissociation and recombination[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 857(2): L20-L26.
- Berner R A. 2004. *The Phanerozoic Carbon Cycle: CO₂ and O₂*[M]. Oxford University Press.
- Biller B A, Crossfield I J M, Mancini L, et al. 2013. Weather on the nearest brown dwarfs: Resolved simultaneous multi-wavelength variability monitoring of WISE J104915.57-531906.1AB[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 778: L10-L16.
- Bolmont E, Mathis S. 2016. Effect of the rotation and tidal dissipation history of stars on the evolution of close-in planets[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 126: 275-296.
- Bolmont E, Selsis F, Owen J E, et al. 2016. Water loss from terrestrial planets orbiting ultracool dwarfs: Implications for the planets of TRAPPIST-1[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464(3): 3728-3741.
- Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. 2011. Characteristics of planetary candidates observed by Kepler. II. Analysis of the first four months of data[J]. *The Astrophysical Journal*, 736(1): 19-31.
- Brandeker A, Heng K, Lendl M, et al. 2022. CHEOPS geometric albedo of the hot Jupiter HD 209458 b[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 659: L4-L12.
- Brahm R, Jordán A, Bakos G, et al. 2016. HATS-17b: A transiting compact warm Jupiter in a 16.3 days circular orbit[J]. *Physics*, 151(4): 89-100.
- Burgasser A J, Gillon M, Faherty J K, et al. 2014. A monitoring campaign for Luhman 16AB. I. Detection of resolved near-infrared spectroscopic variability[J]. *The Astrophysical Journal*, 785(1): 48-58.
- Burrows A, Hubbard W B, Saumon D, et al. 1993. An expanded set of brown dwarf and very low mass star models[J]. *The Astrophysical Journal*, 406(1): 158-171.
- Burrows A, Sudarsky D, Hubeny I. 2006. Theory for the secondary eclipse fluxes, spectra, atmospheres, and light curves of transiting extrasolar giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 650(2): 1140-1149.
- Casewell S L, Burleigh M R, Wynn G A, et al. 2012. WD0837+185: The formation and evolution of an extreme mass ratio white dwarf-brown dwarf binary in praesepe[J]. *The Astrophysical Journal*, 759(2): L34-L39.
- Charbonneau D, Berta Z K, Irwin J, et al. 2009. A super-Earth transiting a nearby low-mass star[J]. *Nature*, 462: 891-894.
- Chen G, Palle E, Parviainen H, et al. 2021. Evidence for TiO in the atmosphere of the hot Jupiter HAT-P-65 b[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 913(1): L16-L30.
- Cho J Y K, Polichtchouk I, Thrastarson H T. 2015. Sensitivity and variability redux in hot Jupiter flow simulations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 454(4): 3423-3431.
- Christian M, Bruce M, Travis B, et al. 2008. Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799[J]. *Science*, 322(5906): 1348-1378.
- Cooper C S, Showman A P. 2005. Dynamic meteorology at the photosphere of HD 209458b[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 629(1): L45-L48.
- Cowan N B, Agol E. 2011. A model for thermal phase variations of circular and eccentric exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 726(2): 82-94.
- Cranmer S R, Saar S H. 2011. Testing a predictive theoretical model for the mass loss rates of cool stars[J]. *Astrophysical Journal*, 741(1): 525-536.
- Crossfield I, Biller B, Schlieder J, et al. 2014. A global cloud map of the nearest known brown dwarf[J]. *Nature*, 505(7485): 654-656.
- Dalal S, Kiefer F, Hébrard G, et al. 2021. The SOPHIE search for northern extrasolar planets XVII. A wealth of new objects: Six cool Jupiters, three brown dwarfs, and 16 low-mass binary stars[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 651(1): A11.
- Dang L, Cowan N B, Schwartz J C, et al. 2018. Detection of a westward hotspot offset in the atmosphere of hot gas giant CoRoT-2b[J]. *Nature Astronomy*, 2: 220-227.
- Demory B-O, de Wit J, Lewis N, et al. 2013. Inference of inhomoge-

- neous clouds in an exoplanet atmosphere[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 776(2): L25-L32.
- Dodson-Robinson S, Willacy K, Bodenheimer P, et al. 2009. Ice lines, planetesimal composition and solid surface density in the solar nebula[J]. *Icarus*, 200(1): 672-693.
- Dou J P, Zhu Y T, Ren D Q. 2014. Current research status of exoplanets [J]. *Chinese Journal of Nature*, 36(2): 5-10 (in Chinese).
- Drummond B, Mayne N J, Baraffe I, et al. 2018. The effect of metallicity on the atmospheres of exoplanets with fully coupled 3D hydrodynamics, equilibrium chemistry, and radiative transfer[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 612: A105-A122.
- Esteves L J, De Mooij E J W, Jayawardhana R. 2015. Changing phases of alien worlds: Probing atmospheres of Kepler planets with high-precision photometry[J]. *The Astrophysical Journal*, 804(2): 150-178.
- Evans T M, Sing D K, Kataria T, et al. 2017. An ultrahot gas-giant exoplanet with a stratosphere[J]. *Nature*, 548(7665): 58-61.
- France K, Loyd R, Youngblood A, et al. 2016. The MUSCLES treasury survey. I. Motivation and overview[J]. *The Astrophysical Journal*, 820(2): 89-113.
- Freytag B, Allard F, Ludwig H G, et al. 2010. The role of convection, overshoot, and gravity waves for the transport of dust in m dwarf and brown dwarf atmospheres[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 513(4): 449-456.
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(449): 447-462.
- Guillot T, Burrows A, Hubbard W B, et al. 1996. Giant planets at small orbital distances[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 459: L35-L54.
- Gupta A, Schlichting H E. 2019. Sculpting the valley in the radius distribution of small exoplanets as a by-product of planet formation: The core-powered mass-loss mechanism[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(1): 24-33.
- Hammond M, Pierrehumbert R T. 2018. Wave-mean flow interactions in the atmospheric circulation of tidally locked planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 869(1): 65-84.
- Haynes K, Mandell A M, Madhusudhan N, et al. 2015. Spectroscopic evidence for a temperature inversion in the dayside atmosphere of the hot Jupiter WASP-33b[J]. *The Astrophysical Journal*, 806(2): 146-158.
- Heng K, Menou K, Phillipps P J. 2011. Atmospheric circulation of tidally locked exoplanets: a suite of benchmark tests for dynamical solvers[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 413(4): 2380-2402.
- Heng K, Demory B-O. 2013. Understanding trends associated with clouds in irradiated exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 777(2): 100-111.
- Heng K. 2016. A cloudiness index for transiting exoplanets based on the sodium and potassium lines: Tentative evidence for hotter atmospheres being less cloudy at visible wavelengths[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 826(1): L16-L22.
- Hirschmann M M. 2000. Mantle solidus: Experimental constraints and the effects of peridotite composition[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1(10): 1042-26.
- Hu R, Seager S. 2014. Photochemistry in terrestrial exoplanet atmospheres. III. Photochemistry and thermochemistry in thick atmospheres on super Earths and mini Neptunes[J]. *The Astrophysical Journal*, 784(1): 63-88.
- Hu Y, Ding F. 2011. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 526: A135.
- Hu Y Y, Ding F. 2013. Atmospheric circulations and climate of tidally locked exoplanets[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 43(10): 1356-1368 (in Chinese).
- Hu Y, Yang J. 2014. Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M dwarf stars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(2): 629-634.
- Hu Y Y. 2016. On the habitability of extra-solar planets[J]. *Advance in Meteorological Science and Technology*, 6(1): 110-114 (in Chinese).
- Hu Y, Wang Y, Liu Y, Yang J. 2017. Climate and habitability of Kepler 452b simulated with a fully coupled atmospheric-oceanic general circulation model[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 835(1): L6-L11.
- Hunten D M, Pepin R O, Walker J C G. 1987. Mass fractionation in hydrodynamic escape[J]. *Icarus*, 69(3): 532-549.
- Hurley J R, Tout C A, Pols O R. 2002. Evolution of binary stars and the effect of tides on binary populations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 329(4): 897-928.
- Ingersoll A P. 1969. The runaway greenhouse: A history of water on Venus[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 26(6): 1191-1198.
- Innes H, Pierrehumbert R T. 2022. Atmospheric dynamics of temperate sub-Neptunes. I. Dry dynamics[J]. *The Astrophysical Journal*, 927(1): 38-63.
- Javoy M. 1999. Chemical Earth models[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 329(8): 537-555.
- Jenkins J M, Twicken J D, Batalha N M, et al. 2015. Discovery and validation of Kepler-452b: A 1.6 R_{\oplus} super Earth exoplanet in the habitable zone of a G2 star[J]. *The Astronomical Journal*, 150(2): 56-75.
- Jones H R A, Butler R P, Tinney C G, et al. 2006. High-eccentricity planets from the anglo-australian planet search[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 369(1): 249-256.
- Joshi M M, Haberle R M, Reynolds R T. 1997. Simulations of the atmospheres of synchronously rotating terrestrial planets orbiting m dwarfs: Conditions for atmospheric collapse and the implications for habitability[J]. *Icarus*, 129(1): 450-465.
- Karalidi T, Apai D, Marley M S, et al. 2016. Maps of evolving cloud structures in Luhman 16AB from HST time-resolved spectroscopy[J]. *The Astrophysical Journal*, 825(2): 90-101.
- Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. 1993. Habitable zones around main sequence stars[J]. *Icarus*, 101(1): 108-128.
- Kataria T, Showman A P, Lewis N K, et al. 2013. Three-dimensional atmospheric circulation of hot Jupiters on highly eccentric orbits[J]. *The Astrophysical Journal*, 767(1): 76-95.
- Kempton E M-R, Lupu R, Owusu-Asare A, et al. 2017. Exo-transmit:

- An open source code for calculating transmission spectra for exoplanet atmospheres of varied composition[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129(974): 044402.
- Knutson H A, Lewis N, Fortney J J, et al. 2012. 3.6 and 4.5 μm phase curves and evidence for non-equilibrium chemistry in the atmosphere of extrasolar planet HD 189733b[J]. *The Astrophysical Journal*, 754(1): 22-38.
- Komacek T D, Showman A P. 2016. Atmospheric circulation of hot Jupiters: Dayside–nightside temperature differences[J]. *The Astrophysical Journal*, 821(1): 16-38.
- Komacek T D, Tan X. 2018. Effects of dissociation/recombination on the day-night temperature contrasts of ultra-hot Jupiters[J]. *Research Notes of the AAS*, 2(2): 36.
- Kopparapu R K. 2013. A revised estimate of the occurrence rate of terrestrial planets in the habitable zones around Kepler m-dwarfs[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 767(1): L8-L13.
- Kopparapu R K, Ramirez R M, SchottelKotte J, et al. 2014. Habitable zones around main-sequence stars: Dependence on planetary mass[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 787(2): L29-L35.
- Kundt W. 1983. Atmospheric superrotation on Saturn and Jupiter[J]. *Planetary and Space Science*, 31(11): 1339-1343.
- Langton J, Laughlin G. 2008. Hydrodynamic simulations of unevenly irradiated Jovian planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 674(1): 1106-1116.
- Lebonnois S, Covey C, Grossman A, et al. 2012. Angular momentum budget in general circulation models of superrotating atmospheres: A critical diagnostic[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E12): 12004.
- Lebrun T, Massol H, Chassefière E, et al. 2013. Thermal evolution of an early magma ocean in interaction with the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(6): 1155-1176.
- Lecante J, Forget F, Charnay B, et al. 2013. Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets[J]. *Nature*, 504(7479): 268-271.
- Lee E, Dobbs-Dixon I, Helling C, et al. 2016. Dynamic mineral clouds on HD 189733b. I. 3D RHD with kinetic, non-equilibrium cloud formation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 594: A48.
- Lee G, Casewell S L, Chubb K L, et al. 2020. Simplified 3D GCM modelling of the irradiated brown dwarf WD0137-349B[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496(4): 4674-4687.
- Leggett S K, Geballe T R, Saumon D, et al. 2007. 3.6-7.9 μm photometry of L and T dwarfs and the prevalence of vertical mixing in their atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 655(2): 1079-1094.
- Leovy C B, Friedson A J, Orton G S. 1991. The quasiquadrennial oscillation of Jupiter's equatorial stratosphere[J]. *Nature*, 354(6352): 380-382.
- Lewis N K, Parmentier V, Kataria T, et al. 2017. Atmospheric circulation and cloud evolution on the highly eccentric extrasolar planet HD 80606b[J]. *The Astronomical Journal*, arXiv: 1706.00466.
- Lian Y, Showman A P, Tan X, et al. 2022. Influences of internal forcing on atmospheric circulations of irradiated giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 928(2): 166-180.
- Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. 1996. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location[J]. *Nature*, 380(6575): 606-607.
- Lindzen R S, Holton J R. 1968. A theory of the quasi-biennial oscillation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25(6): 1095-1107.
- Lindzen R S. 1970. Internal equatorial planetary-scale waves in shear flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 27(3): 394-407.
- Lindzen R S. 1971. Equatorial planetary waves in shear: Part I[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(4): 609-622.
- Lindzen R S. 1972. Equatorial planetary waves in shear: Part II[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(8): 1452-1463.
- Littlefair S P, Casewell S L, Parsons S G, et al. 2014. The substellar companion in the eclipsing white dwarf binary SDSS J141126.20+200911.1[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445(2): 2106-2115.
- Liu B, Showman A P. 2012. Atmospheric circulation of hot Jupiters: Insensitivity to initial conditions[J]. *The Astrophysical Journal*, 770(1): 42-57.
- Longstaff E S, Casewell S L, Wynn G A, et al. 2017. Emission lines in the atmosphere of the irradiated brown dwarf WD0137C349B[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(2): 1728-1736.
- Luger R, Barnes R. 2015. Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs[J]. *Astrobiology*, 15(2): 119-143.
- Madhusudhan N, Agúndez M, Moses J I, Hu Y. 2016. Exoplanetary atmospheres-chemistry, formation conditions, and habitability[J]. *Space Science Reviews*, 205(1): 285-348.
- Malavolta L, Mayo A W, Loudon T, et al. 2018. An ultra-short period rocky super-Earth with a secondary eclipse and a Neptune-like companion around K2-141[J]. *The Astronomical Journal*, 155(3): 107-120.
- Marley M S, Saumon D, Goldblatt C. 2010. A patchy cloud model for the L to T dwarf transition[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 723(1): L117-L121.
- Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*, 44(1): 25-43.
- Mayne N J, Baraffe I, Acreman D M, et al. 2014. The unified model, a fully-compressible, non-hydrostatic, deep atmosphere global circulation model, applied to hot Jupiters- ENDGame for a HD 209458b test case[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 561: A1.
- Mayne N J, Debras F, Baraffe I, et al. 2017. Results from a set of three-dimensional numerical experiments of a hot Jupiter atmosphere[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 604: A27.
- Mayor M, Queloz D. 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 378(6555): 355-359.
- Mckay C, Pollack J, Courtin R. 1991. The greenhouse and antigreenhouse effects on Titan[J]. *Science*, 253(5024): 1118-1121.
- Mendonça J M, Grimm S L, Grosheintz L, Heng K. 2016. THOR: A new and flexible global circulation model to explore planetary atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 829(2): 115-133.
- Mendonça J M. 2020. Angular momentum and heat transport on tidally locked hot Jupiter planets[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491(1): 1456-1470.

- Milsom J, Burrow A. 2002. Deuterium burning and Lithium burning in brown dwarfs, American Astronomical Society, 200th AAS Meeting, id. 11.06[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 34: 659.
- Miller-Ricci E K, Zahnle K, Fortney J J. 2012. The atmospheric chemistry of GJ 1214b: Photochemistry and clouds[J]. *The Astrophysical Journal*, 745(1): 3-16.
- Mitchell J L, Vallis G K. 2010. The transition to superrotation in terrestrial atmospheres[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E12): 12008.
- Morbideilli A, Lunine J I, O'Brien D P, et al. 2012. Building terrestrial planets[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1): 251-275.
- Morton T D, Bryson S T, Coughlin J L, et al. 2016. False positive probabilities for all Kepler objects of interest: 1284 newly validated planets and 428 likely false positives[J]. *The Astrophysical Journal*, 822(2): 86-101.
- Nakajima T, Oppenheimer B, Kulkarni S, et al. 1995. Discovery of a cool brown dwarf[J]. *Nature*, 378(6556): 463-465.
- Nellis W J. 1997. Metallic hydrogen at high pressures and temperatures in Jupiter[J]. *Chemistry- A European Journal*, 3(12): 1921-1924.
- Öberg K I, Murray-Clay R, Bergin E A. 2011. The effects of snowlines on C/O in planetary atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 743(1): L16-L21.
- Odert P, Leitzinger M, Guenther E W, Heinzel P. 2020. Stellar coronal mass ejections II. Constraints from spectroscopic observations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 494(3): 3766-3783.
- Ohno K, Zhang X. 2019a. Atmospheres on nonsynchronized eccentric-tilted exoplanets I: Dynamical regimes[J]. *The Astrophysical Journal*, 874(1): 1-20.
- Ohno K, Zhang X. 2019b. Atmospheres on nonsynchronized eccentric-tilted exoplanets II: Thermal light curves[J]. *The Astrophysical Journal*, 874(1): 2-24.
- Ortiz M, Gandolfi D, Reffert S, et al. 2014. Kepler-432 b: A massive warm Jupiter in a 52-day eccentric orbit transiting a giant star[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 573(1): L6.
- Parmentier V, Fortney J J, Showman A P, et al. 2016. Transitions in the cloud composition of hot Jupiters[J]. *The Astrophysical Journal*, 828(1): 22-42.
- Parmentier V, Showman A P, Fortney J J. 2021. The cloudy shape of hot Jupiter thermal phase curves[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(1): 78-108.
- Penn J, Vallis G K. 2018. Atmospheric circulation and thermal phase-curve offset of tidally and non-tidally locked terrestrial exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 868(2): 147-160.
- Perna R, Heng K, Pont F. 2012. The effects of irradiation on hot jovian atmospheres: Heat redistribution and energy dissipation[J]. *The Astrophysical Journal*, 751(1): 59-76.
- Pierrehumbert R T. 2011. A palette of climates for Gliese 581g[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 726(1): L8-L13.
- Plumb R A. 1977. The interaction of two internal waves with the mean flow: Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 34(12): 1847-1858.
- Pont F, Sing D K, Gibson N P, et al. 2013. The prevalence of dust on the exoplanet HD 189733b from Hubble and Spitzer observations show affiliations[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 432(4): 2917-2944.
- Radigan J, Jayawardhana R, Lafrenière D, et al. 2012. Large amplitude variations of an L/T transition brown dwarf: Multi-wavelength observations of patchy, high-contrast cloud features[J]. *The Astrophysical Journal*, 750(2): 1529-1536.
- Rappaport S, Vanderburg A, Nelson L, et al. 2017. WD 1202-024: The shortest-period precataclysmic variable[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471(1): 948-961.
- Rauscher E, Kempton E. 2014. The atmospheric circulation and observable properties of nonsynchronously rotating hot Jupiters[J]. *The Astrophysical Journal*, 790(1): 917-920.
- Rauscher E. 2017. Models of warm Jupiter atmospheres: Observable signatures of obliquity[J]. *The Astrophysical Journal*, 846(1): 69-83.
- Rebolo R, Zapatero Osorio M R, Martin E L. 1995. Discovery of a brown dwarf in the Pleiades star cluster[J]. *Nature*, 377(6545): 129-131.
- Rogers T M, Komacek T D. 2014. Magnetic effects in hot Jupiter atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 794(2): 132-154.
- Rogers T M. 2017. Constraints on the magnetic field strength of HAT-P-7 b and other hot giant exoplanets[J]. *Nature Astronomy*, 1: 0131.
- Roman M, Rauscher E. 2019. Modeled temperature-dependent clouds with radiative feedback in hot Jupiter atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 872(1): 1-16.
- Rouan D, Deeg H J, Demangeon O, et al. 2011. The orbital phases and secondary transits of Kepler-10b. A physical interpretation based on the Lava-ocean planet model[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 741(2): L30-L35.
- Ruiz M T, Leggett S K, Allard F. 1997. Kelu-1: A free-floating brown dwarf in the solar neighborhood[J]. *The Astrophysical Journal*, 491(2): L107-L110.
- Sahlmann J, Segransan D, Queloz D, et al. 2011. Search for brown-dwarf companions of stars[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 525: A95.
- Salmon D, Marley M S. 2008. The evolution of L and T dwarfs in color-magnitude diagrams[J]. *The Astrophysical Journal*, 689(2): 1327-1344.
- Schaefer L, Fegley B. 2010. Chemistry of atmospheres formed during accretion of the Earth and other terrestrial planets[J]. *Icarus*, 208(1): 438-448.
- Schaefer L, Lodders K, Fegley B. 2012. Vaporization of the Earth: Application to exoplanet atmospheres[J]. *The Astrophysical Journal*, 755(1): 41-57.
- Schneider T, Liu J. 2009. Formation of jets and equatorial superrotation on Jupiter[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 66(3): 579-601.
- Seager S, Sasselov D D. 2000. Theoretical transmission spectra during extrasolar giant planet transits[J]. *The Astrophysical Journal*, 537(2): 916-921.
- See V, Jardine M, Vidotto A A, et al. 2014. The effects of stellar winds on the magnetospheres and potential habitability of exoplanets[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 570: A99.

- Showman A P, Guillot T. 2002. Atmospheric circulation and tides of "51 Pegasus b-like" planets[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 385: 166.
- Showman A P, Cooper C S, Fortney J J, Marley M S. 2008a. Atmospheric circulation of hot Jupiters: Three-dimensional circulation models of HD 209458b and HD 189733b with simplified forcing[J]. *The Astrophysical Journal*, 682(1): 559-576.
- Showman A P, Menou K, Cho J Y-K. 2008b. Atmospheric circulation of hot Jupiters: A review of current understanding[C]//Fischer D, Rasio F A, Thorsett S E, Wolszczan A. *Extreme Solar Systems*, ASP Conference Series, 398: 419.
- Showman A P, Fortney J J, Lian Y, et al. 2009. Atmospheric circulation of hot Jupiters: Coupled radiative-dynamical general circulation model simulations of HD 189733b and HD 209458b[J]. *The Astrophysical Journal*, 699(1): 564-584.
- Showman A P, Polvani L M. 2010. The matsuno-gill model and equatorial superrotation[J]. *Geophysical Research Letters*, 37: L18811.
- Showman A P, Polvani L M. 2011. Equatorial superrotation on tidally locked exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 738(1): 71-95.
- Showman A P, Fortney J J, Lewis N K, Shabram M. 2012. Doppler signatures of the atmospheric circulation on hot Jupiters[J]. *The Astrophysical Journal*, 762(1): 65-69.
- Showman A P, Kaspi Y. 2013. Atmospheric dynamics of brown dwarfs and directly imaged giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 776(2): 85-104.
- Showman A P, Wordsworth R D, Merlis T M, Kaspi Y. 2013. Atmospheric Circulation of Terrestrial Exoplanets[M]//Mackwell S J, Simon-Miller A A, Harder J W, Bullock M A. *Comparative Climatology of Terrestrial Planets, Part II: Greenhouse Effect and Atmospheric Dynamics*. University of Arizona Press, 277-327.
- Showman A P, Lewis N K, Fortney J J. 2015. Three-dimensional atmospheric circulation of warm and hot Jupiters: Effects of orbital distance, rotation period, and non-synchronous rotation[J]. *The Astrophysical Journal*, 801(2): 95-116.
- Showman A P, Tan X, Zhang X. 2019. Atmospheric circulation of brown dwarfs and Jupiter- and Saturn-like planets: Zonal jets, long-term variability, and QBO-type oscillations[J]. *The Astrophysical Journal*, 883(1): 4-30.
- Showman A P, Tan X, Vivien P. 2020. Atmospheric dynamics of hot giant planets and brown dwarfs[J]. *Space Science Reviews*, 216(8): 139-186.
- Shporer A, Hu R. 2015. Studying atmosphere-dominated hot Jupiter kepler phase curves: Evidence that inhomogeneous atmospheric reflection is common[J]. *The Astronomical Journal*, 150(4): 112-122.
- Sing D K, Fortney J J, Nikolov N, et al. 2016. A continuum from clear to cloudy hot-Jupiter exoplanets without primordial water depletion[J]. *Nature*, 529(7584): 59-62.
- Snellen I, Brandl B R, Kok R, et al. 2014. Fast spin of the young extrasolar planet beta Pictoris b[J]. *Nature*, 509(7498): 63-65.
- Spiegel D S, Burrows A, Milsom J A. 2011. The deuterium-burning mass limit for brown dwarfs and giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 727(1): 57-66.
- Starovoi E D, Rodin A E. 2017. On the existence of planets around the pulsar PSR B0329+54[J]. *Astronomy Reports*, 61(11): 948-953.
- Stevenson K B, Désert J-M, Line M R, et al. 2014. Thermal structure of an exoplanet atmosphere from phase-resolved emission spectroscopy[J]. *Science*, 346(6211): 838-841.
- Tan X, Komacek T D. 2019a. The atmospheric circulation of ultra-hot Jupiters[J]. *The Astrophysical Journal*, 886(1): 26-46.
- Tan X, Showman A P. 2019b. Atmospheric variability driven by radiative cloud feedback in brown dwarfs and directly imaged extrasolar giant planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 874(2): 111-129.
- Tan X, Showman A P. 2020. Atmospheric circulation of tidally locked gas giants with increasing rotation and implications for white-dwarf-brown-dwarf systems[J]. *The Astrophysical Journal*, 902(1): 27-47.
- Tan X, Showman A P. 2021. Atmospheric circulation of brown dwarfs and directly imaged exoplanets driven by cloud radiative feedback: effects of rotation[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(1): 678-699.
- Thayne C, Kellen L, Glenn S, et al. 2022. Images of embedded Jovian planet formation at a wide separation around AB Aurigae[J]. *Nature: Astronomy*. DOI: 10.1093/mnras/stab060.
- Tian F. 2009. Thermal escape from super Earth atmosphere in the habitable zone of M stars[J]. *The Astrophysical Journal*, 703(1): 905-909.
- Tremblin P, Padiou T, Phillips M, et al. 2019. Thermo-compositional diabatic convection in the atmospheres of brown dwarfs and in Earth's atmosphere and oceans[J]. *The Astrophysical Journal*, 876(2): 144-157.
- Tsai S-M, Dobbs-Dixon I, Gu P-G. 2014. 3D structures of equatorial waves and the resulting superrotation in the atmosphere of a tidally locked hot Jupiter[J]. *The Astrophysical Journal*, 793(2): 141-166.
- Tsuji T. 1973. Molecular abundances in stellar atmospheres. II[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 23: 411-431.
- Tsuji T, Ohnaka K, Aoki W, Nakajima T. 1996. Evolution of dusty photospheres through red to brown dwarfs: How dust forms in very low mass objects[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 308: L29-L32.
- Turbet M, Leconte J, Selsis F, et al. 2016. The habitability of Proxima Centauri b[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 596: A112-A141.
- Venturini J, Alibert Y, Benz W, Ikoma M. 2015. Critical core mass for enriched envelopes: The role of H₂O condensation[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 576: A114.
- Vidotto A A, Jardine M, Morin J, et al. 2013. Effects of M dwarf magnetic field on potentially habitable planets[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 557: A67.
- Visscher C, Moses J I. 2011. Quenching of carbon monoxide and methane in the atmospheres of cool brown dwarfs and hot Jupiters[J]. *The Astrophysical Journal*, 738(1): 72-84.
- Wakeford H R, Sing D K. 2014. Transmission spectral properties of clouds for hot Jupiter exoplanets[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 573: A22.
- Wang H, Wordsworth R. 2020. Extremely long convergence times in a 3D GCM simulation of the sub-Neptune Gliese 1214b[J]. *The Astrophysical Journal*, 891(1): 7-20.
- Wang W, Zhai M, Zhao G, et al. 2020. A space mission dedicated for the characterization of habitable rocky planets[C]//Space Tele-

- scopes and Instrumentation 2020: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 11443. doi: [10.1117/12.2563343](https://doi.org/10.1117/12.2563343).
- Wilken T, Curto G L, Probst R A, et al. 2012. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level[J]. *Nature*, 485(7400): 611-614.
- Winn J N. 2010. Transits and Occultations[M]. University of Arizona Press.
- Wong I, Shporer A, Zhou G, et al. 2021. TOI-2109b: An ultrahot gas giant on a 16 hr orbit[J]. *The Astronomical Journal*, 162(6): 256-284.
- Wordsworth R D, Forget F, Selsis F, et al. 2011. Gliese 581d is the first discovered terrestrial-mass exoplanet in the habitable zone[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 733(2): L48-L53.
- Yang H, Komacek T D, Abbot D S. 2019. Effects of radius and gravity on the inner edge of the habitable zone[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 876(2): L27-L34.
- Yang J, Liu Y, Hu Y, Abbot D S. 2014. Water trapping on tidally locked terrestrial planets requires special conditions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 796(2): L22-L28.
- Yang J, Ding F, Ramirez R M, et al. 2017. Abrupt climate transition of icy worlds from snowball to moist or runaway greenhouse[J]. *Nature Geoscience*, 10(8): 556-560.
- Yang J, Abbot D S, Koll D D B, et al. 2019a. Ocean dynamics and the inner edge of the habitable zone for tidally locked terrestrial planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 871(1): 29-46.
- Yang J, Ji W, Zeng Y X. 2019b. Transition from eyeball to snowball driven by sea-ice drift on tidally locked terrestrial planets[J]. *Nature Astronomy*, 4(1): 1-9.
- Yue W, Yang J. 2020. Effect of sea-ice drift on the onset of snowball climate on rapidly rotating aqua-planets[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 898(1): L19-L32.
- Zahnle K J, Walker J C G. 1982. The evolution of solar ultraviolet luminosity[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20: 280-292.
- Zellem R T, Lewis N K, Knutson H A, et al. 2014. The 4.5 mm full-orbit phase curve of the hot Jupiter HD 209458b[J]. *The Astrophysical Journal*, 790(1): 917-920.
- Zeng Y, Yang J. 2021. Oceanic superrotation on tidally locked planets[J]. *The Astrophysical Journal*, 909(2): 172-188.
- Zhan H. 2021. The wide-field multiband imaging and slitless spectroscopy survey to be carried out by the Survey Space Telescope of China Manned Space Program[J]. *Chinese Science Bulletin*, 66(11): 1290-1298 (in Chinese).
- Zhang X, Showman A P. 2014. Atmospheric circulation of brown dwarfs: Jets, vortices, and time variability[J]. *The Astrophysical Journal*, 788(1): L6-L12.

附中文参考文献

- 窦江培, 朱永田, 任德清. 2014. 太阳系外行星的研究现状[J]. *自然杂志*, 36(2): 5-10.
- 胡永云, 丁峰. 2013. 潮汐锁相行星的大气环流与气候[J]. *中国科学: 物理学、力学、天文学*, 43(10): 1356-1368.
- 胡永云. 2016. 关于太阳系外行星的宜居性[J]. *气象科技进展*, 6(1): 110-114.
- 詹虎. 2021. 载人航天工程巡天空间望远镜大视场多色成像与无缝光谱巡天[J]. *科学通报*, 66(11): 1290-1298.