



潮汐锁相行星的大气环流与气候

胡永云*, 丁峰

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

*联系人, E-mail: yyhu@pku.edu.cn

收稿日期: 2013-05-28; 接受日期: 2013-07-15

国家自然科学基金委杰出青年基金(批准号: 41025018)、The John Templeton Foundation 和国家天文台联合基金资助项目

摘要 红矮星是宇宙中数量最多的恒星, 其表面辐射温度比太阳的辐射温度低得多, 因此, 红矮星的宜居带与恒星的距离非常近. 因为距离其恒星较近, 在强大引力的作用下, 位于红矮星宜居带内的宜居行星很可能是潮汐锁相行星. 锁相行星的特征是其一侧永远面对恒星, 另一侧则永远背对恒星, 从而形成极端不均匀的加热. 我们在本文中使用一个真实的大气环流模式与平板海洋相耦合来研究锁相行星表面的气候要素和大气环流特征. 我们特别针对两种自转速度进行了模拟试验. 结果发现, 在慢速自转条件下(自转和公转周期均为 243 天), 大气环流基本是热力驱动的下层辐合和上层辐散的运动, 行星的表面仅有恒星直射点附近比较湿润, 其他区域均比较干燥, 背阳面尤其寒冷. 在快速自转条件下(自转和公转周期均为 1 天), 科里奥利力的作用比较显著, 大气环流以纬向西风为主, 并呈现波动特征, 赤道上空出现超级旋转的西风急流, 湿润区域显著扩大. EP 通量诊断分析表明, 赤道超级旋转急流是由于热带 Rossby 波随高度向极地方向传播所产生的 EP 通量在赤道附近的辐散造成的.

关键词 太阳系外行星, 潮汐锁相, 大气环流, 红矮星, 大气波动

PACS: 92.70.Cp

doi: 10.1360/132013-252

1 引言

寻找地球之外的生命一直是人类的一个梦想. 自 1995 年第一颗太阳系外行星(简称系外行星)被发现^[1]到 2013 年 4 月 25 日为止, 已有 872 颗太阳系外行星被确认(http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar_planet). 这些行星分别位于 683 个行星系统中, 其中的 130 个是多行星系统. 随着越来越多的太阳系外行星被发现, 人们更期待发现地球之外生命的存在. 然

而, 由于现有的探测技术条件限制, 我们还很难直接探测到太阳系外生命的信息. 科学家们首先希望探测到的是系外行星是否具有适合生命存在的气候环境, 其大气中是否有包含生命信息的化学成分, 也就是系外行星是否具备与地球类似的气候条件, 如适当的温度, 并有液态水存在, 其大气中是否有氧等生命所必需的气体成分. 因此, 探测系外行星的大气动力、物理和化学特征是寻找系外生命的首要一步^[2,3].

引用格式: 胡永云, 丁峰. 潮汐锁相行星的大气环流与气候. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1356-1368

Hu Y Y, Ding F. Atmospheric circulations and climate of tidal-locking exoplanets (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1356-1368, doi: 10.1360/132013-252

行星的气候条件与其恒星有着密切的关系, 恒星辐照度的强弱、行星与恒星之间的距离等在很大程度上决定了行星表面的温度和是否有液态水存在^[2,3]. 在宇宙中, 数量最多、生命期最长的主序恒星是红矮星, 占主序恒星总数量的大约 75%^[4]. 因此, 在红矮星周围发现宜居行星的机率要远高于在其他恒星周围发现宜居行星的机率^[2]. 红矮星的质量比类太阳恒星的质量小得多, 大约介于太阳质量的 0.075–0.5 倍, 其表面辐射温度一般在 3500 K 左右, 远低于太阳的辐射温度(5800 K). 所以, 红矮星周围的宜居行星距离其恒星很近. Kasting 等人^[5]的近似计算表明, 红矮星的宜居带位于距离恒星大约 0.07–0.1 AU 的区域(1.0 AU 代表一个天文长度单位, 等于地球与太阳之间的距离). 由于红矮星的宜居带距离红矮星非常近, 所以, 红矮星与其宜居行星之间的引力非常大, 在强的引力力矩的作用下, 行星的公转和自转会出现潮汐锁相现象, 也就是说, 行星的公转与其自转周期相同. 因此, 行星的一面总是永远对着恒星, 而另一面永远背着恒星. 这与我们永远只能看到月球的一个侧面的道理是一样的. 月球由于引力潮汐的作用也是永远一面对着地球, 而另一面背着地球.

潮汐锁相的结果是, 行星的向阳面一直被恒星照射而温度比较高, 而背阳面则因得不到辐射而温度极低. 那么, 一个需要思考的问题是, 在红矮星的宜居带内, 宜居星球的背阳面有可能因为温度太低而导致大气凝结并完全沉降到地面(在一个大气压的条件下, 氮气和氧气的凝结温度分别是 -195.79°C 和 -182.95°C , 它们的凝固温度分别是 -210.01°C 和 -218.79°C . 二氧化碳在一个大气压的分压条件下的凝结温度是 -78.5°C), 也就是出现所谓的大气坍塌现象^[6]. 如果确实出现大气坍塌现象的话, 即使位于红矮星宜居带内的行星仍有可能是不适于生命存在的. Joshi 等人^[7,8]使用简单的大气环流模式(General Circulation Model, GCM)发现, 如果系外行星的大气层足够厚, 大气环流产生的自向阳面到背阳面热量输送就可以避免出现大气坍塌现象. 具体地说, 只要系外行星表面的大气压力超过 0.1 个大气压, 大气环流产生的热量输送就足以使背阳面的温度超出二氧化碳的凝结温度. Joshi 等人的研究结果被后来的复杂气候模式的模拟结果所证实^[9]. 因此, 研究系外行星大气环流的动力和物理特性对理解红矮星附近的

行星宜居性有着重要的意义.

另外, 由于天文观测方法和设备精度的限制, 目前所观测到的系外行星大多是距离其恒星很近的, 对于距离恒星较远的系外行星, 目前还很难观测到^[2]. 在这些已观测到的距离恒星较近的系外行星中, 有相当一部分是潮汐锁相行星, 包括一些与木星类似的气态巨行星. 这些潮汐锁相的巨型气态行星因其温度较高, 通常被称为热木星(这是因为太阳系木星的温度辐射平衡温度很低). 根据理论分析和数值模拟的结果, Showman 和 Polvani^[10,11]发现锁相类木行星的大气环流特征是, 赤道上空出现超级旋转的西风急流(如果赤道上空盛行西风, 说明大气的运动速度比行星的自转速度还要快, 所以称为超级旋转气流)和类似于地球热带大气中的波动. 他们进一步指出, 该西风急流是由于热带 Rossby 波动造成的, 而这些热带波动是由于行星锁相固有的向阳面与背阳面之间的热力差异强迫的. 他们认为, 这些热带波动的产生机制类似于 Matsuno^[12]和 Gill^[13]在研究地球大气热带波动时所提出的机制. 他们的模拟结果与观测到的热木星温度分布相当一致^[14]. Heng 和 Vogt^[15]使用一个简化的三维大气环流模式模拟了一颗类地锁相行星的大气环流, 发现其大气环流与 Showman 和 Polvani 的结果有类似的特征. Merlis 和 Schneider^[16]使用不同的三维大气环流模式也得到了类似的结果, 但在他们的数值模拟试验中, 赤道上空的超级旋转气流偏弱. 类似的数值模拟研究工作还包括 Rauscher 和 Menou^[17], Thrastarson 和 Cho 等人^[18,19]. 需要指出的是, 以上这些数值模拟结果都是使用简化的大气环流模式给出的, 这些研究更关注热木星高层大气的环流状况或者是类地系外行星的大气环流特征, 因此, 大多数模式中的大气只是干空气、没有包含水汽, 更没有考虑云的辐射效应以及行星表面的气候要素如温度和降水等.

在本篇论文中, 我们将使用一个用于模拟地球气候的包含了各种真实物理过程的气候模式来模拟锁相行星的大气环流和行星表面气候特征. 我们的模拟研究将集中在类地形星, 也就是说该行星具有一个固态的表面. 在第 2 节, 我们将对气候模式的属性以及数值试验的设计给予描述. 在第 3 节, 我们将给出模拟结果, 并将于上面相对较理想的模拟结果进行比较. 讨论和结论将在第 4 节给出.

2 模式和数值实验设计

这里使用的大气环流模式是由美国大气科学研究中心(NCAR)开发的用于模拟地球气候的第三版本(CAM3)^[20]. 模式的水平分辨率为 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$, 在垂直方向上, 模式从地面到 2.0 hPa 共分 26 层. 模式包含有真实气体吸收谱的辐射传输模式、云对流参数化方案、云辐射效应、热力海冰模式等. 因此, 与以上的大气环流模式相比, 该模式能够更真实地模拟行星的三维大气环流和表面气候要素. 在本文的模拟试验中, 恒星辐照度、行星半径、重力以及行星的大气成分和大气压力等均与地球的相同. 不同的是, 我们将改变行星的自转(公转速度来检验行星的自转速度对大气环流的影响. 我们选取两个行星自转速度, 一个是与地球相同, 即每一个地球日行星自转和公转一圈(简称快速自转); 另一个是非常慢的自转速度(简称慢速自转), 自转和公转周期为 243 地球日, 与太阳系金星的自转周期相同. 大气模式的下边界没有陆地, 全球都是一个 50 m 深的平板海洋, 平板海洋并不流动, 但与大气之间有热量、动量和水汽交换. 平板海洋使用一个热力海冰参数化方案^[21], 海冰的形成和融化主要取决于平板海洋的温度, 也就是当海洋温度达到 -1.8°C 时, 海冰形成或融化. 为了使模式达到热力平衡状态, 我们将气候模式积分 100 个地球年, 最后 10 年的平均被用来表征大气环流和地面气候特征. 恒星直射点位于赤道和经度 180° 的位置(见图 1).

3 模拟结果

3.1 地面气候要素

我们首先比较快速和慢速自转情况下的行星表面气候要素. 图 2 给出的是两类行星自转速度条件下的近表面温度和风速的空间分布. 在行星慢速自转的情况下(图 2(a)), 向阳面温度的空间分布呈圆形, 最高温度介于 280 K 和 285 K 之间, 背阳面最低温度介于 260 K 和 265 K. 在向阳面风速自四周向恒星直射点辐合, 而在背阳面是自反恒星点向四周辐散的. 在快速自转情况下的近地面温度的空间分布与慢速自转情况下的有明显的不同(图 2(b)), 向阳面温度分布不是圆形, 而是在东-西方向上拉长了纬向分布, 最高温度超过 310 K, 温度最高点并不是位于恒星直射

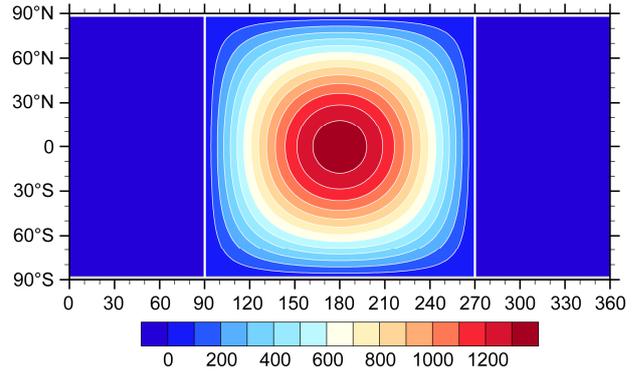


图 1 恒星辐射通量在锁相行星表面的分布图

直射点在赤道和经度 180° , 反恒星点位于赤道和 $0^\circ(360^\circ)$. 恒星辐射可以达到的范围是 $90^\circ-270^\circ$. 彩色标尺的间隔为 100 Wm^{-2}
Figure 1 Distribution of stellar radiation flux on the surface of the tidally locking exoplanet. The substellar point is located at the equator and 180° in longitude, and the anti-stellar point is located at $0^\circ(360^\circ)$ in longitude. Stellar radiation can only reach the region between 90° and 270° in longitude. Color interval is 100 Wm^{-2} .

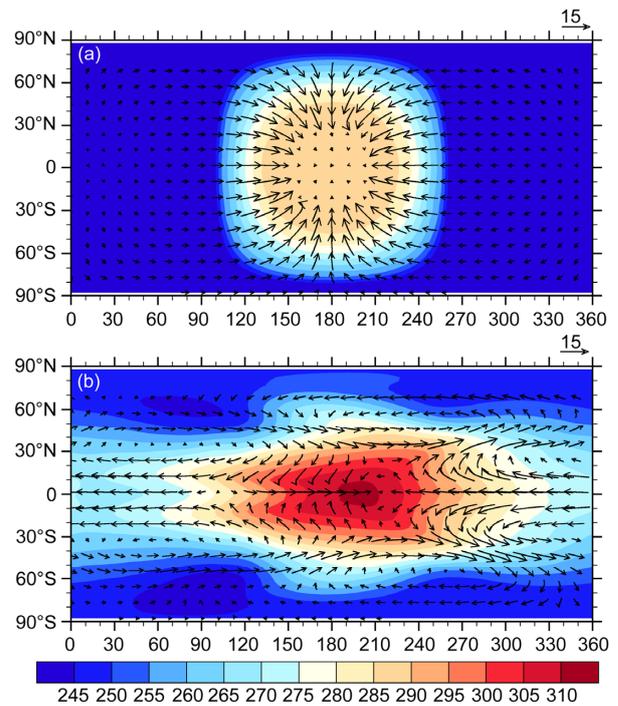


图 2 近地面(1000 hPa)温度和风速分布

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 图中的箭头表示风速, 箭头的方向表示风向, 两图右上角的箭头长度表示 15 ms^{-1} 的风速. 彩色背景表示温度, 彩色标尺的间隔是 5 K
Figure 2 Distribution of near-surface (1000 hPa) air temperature and winds. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Arrows indicate wind velocity, arrow direction indicates wind direction, and the length scale of arrows marked on the upper-right denotes 15 ms^{-1} . Background color shading indicates temperature, and color interval is 5 K.

点, 而是偏向到直射点的东侧. 低温区主要在两极地区, 最低温度达到 240 K, 最低温度位于两个半球的副极区(65°N 和 65°S). 风速的方向也比较复杂, 不再是单纯的在背阳面辐散和在向阳面辐合, 而是由热带的东风为主和高纬度的西风气流所组成, 尽管在 120°E 和 190°E 仍有西风出现并向温度最高点辐合.

图 2(a)与(b)之间的差异正是由于行星的自转速度不同造成. 简单地讲, 当行星自转速度较快时, 科里奥利力变得尤其重要, 热力差异形成的大气运动在科里奥利力的作用下并非以气压梯度力为主, 而是气压梯度力与科里奥利力之间的平衡所决定的. 因此, 对于自转速度较快的行星, 一般来说其纬向(东-西向)的风速较大, 而经向(南-北向)的风速相对较小, 同时, 大气呈现 Rossby 波的特征. 在图 2(a)中, 由于行星的自转速度较慢, 气流主要是由于大气的热力状况决定的, 向阳面地表被恒星辐射加热之后, 大气吸收地表的红外辐射, 温度较高, 密度较小, 因此产生上升运动, 相应地, 周围的空气向恒星直射点为中心的地方辐合. 相对来说, 在图 2(b)中, 由于行星的自转速度较快, 气流以纬向方向为主, 向阳面的热量被大气环流输送到背阳面, 因此, 热带地区温度相对较高的区域被拉伸成东-西向, 而不再是一个圆形. 又因为热量输送主要以纬向为主, 两极地区温度较低. 这里的讨论仅限于地面, 下面我们还将进一步讨论地面大气环流和温度与上层大气环流和温度之间的关系.

在图 2 中, 我们已发现慢速自转条件下的向阳面温度比快速自转条件下的向阳面的温度低将近 30 K. 这一温度差异主要是由于云反照率造成的. 模拟结果表明, 在慢速自转条件下, 向阳面的云覆盖率高达 100%, 尤其是在恒星直射点周围. 这主要是因为, 近地面层气流的强辐合造成强对流运动, 形成了高覆盖率的云层, 这些云层对恒星辐射有强的反照率, 导致地表接受的恒星辐射较少, 所以, 地面温度相对较低. 相对来讲, 在快速自转情况下, 近地面气流并非以辐合为主, 因此, 大气上升运动相对较弱, 云层覆盖率也相对较低, 在 70%左右, 最低云覆盖率只有大约 50%. 除了云层的反射作用, 大气环流的热量输送也对向阳面的温度有重要影响.

行星表面的液态水是生命存在表要条件之一, 也是衡量系外行星宜居性的首要依据^[5]. 因此, 考察系外行星表面的降水分布对理解系外行星的气候环

境非常重要. 图 3 所示的是慢速和快速自转条件下的地面降水分布. 在慢速自转条件下, 降水的空间分布与图 2(a)中的温度空间分基本是一致的, 最大降水区在恒星直射点周围, 因为大气强上升区对应温度最高的区域. 在快速自转条件, 降雨区呈纬向带状分布, 最强降水位于恒星直射点的东侧, 因为那里的近地面辐合上升运动最强. 另外两个雨带分别位于两个半球的中纬度地区. 弱降水区有三个, 分别是两极地区和热带背阳面. 降水的空间分布是与大尺度大气环流联系在一起的. 下面我们将给出进一步说明降水分布与大气环流之间的关系.

3.2 大气环流

地面气候要素的空间分布与三维大气环流结构是密切相关的. 图 4 给出的是大气对流层上层(200 hPa)大气温度和风速的分布. 在慢速自转条件下(图 4(a)), 高层大气有两个低温区, 一个对应于近地面的高温区, 另一个是背阳面. 背阳面温度较低很容易理

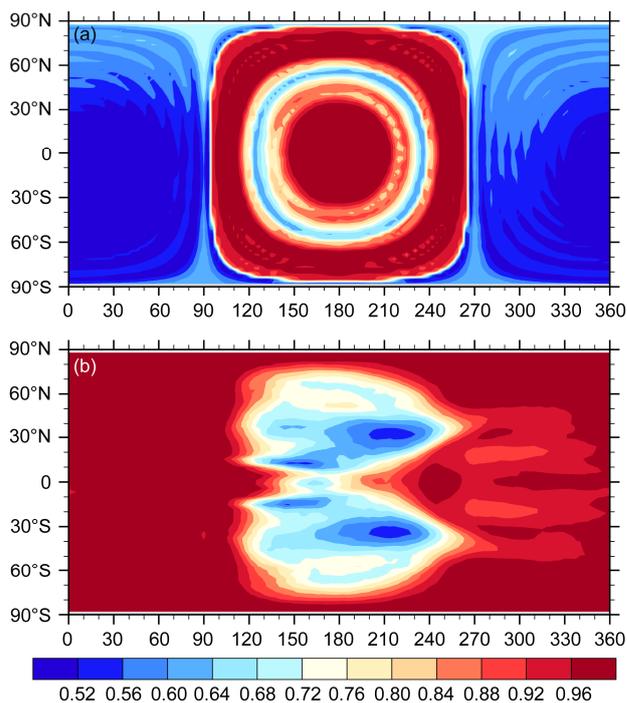


图 3 云覆盖率空间分布

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 云覆盖率以 0.0–1.0 来表征, 1.0 意味着天空 100% 被云层覆盖. 彩色标尺的间隔是 0.04

Figure 3 Spatial distribution of cloud coverage. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Cloud coverage is scaled with the range of 0.0–1.0, and 1.0 indicates sky is completely covered by clouds. Color interval is 0.04.

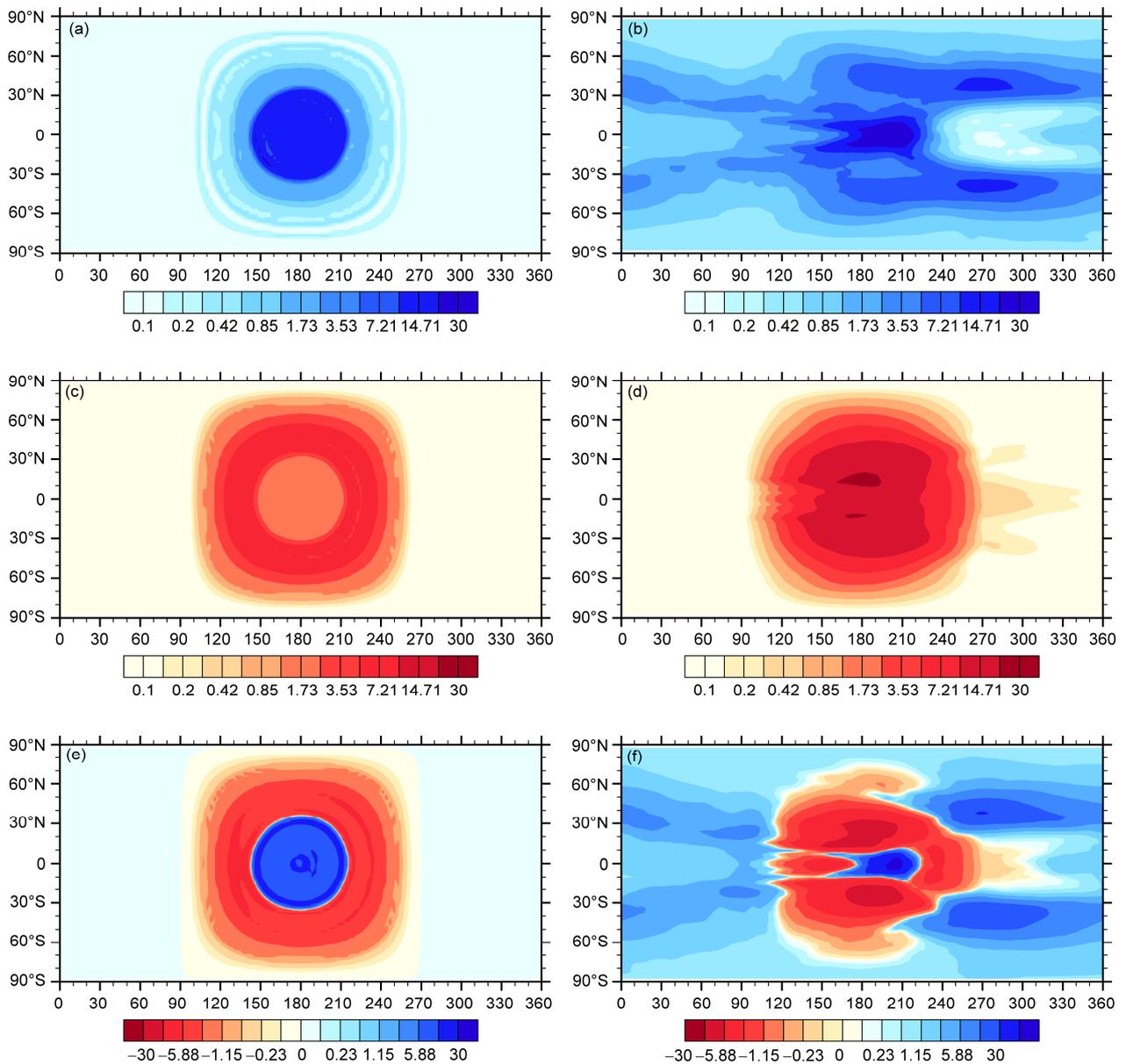


图 4 地表降水、蒸发和降水与蒸发之差

左侧是慢速自转, 右侧为快速自转. 自上而下分别为降水、蒸发、降水减去蒸发. 需要指出的是, 彩色标尺的地间隔是非线性的, 单位是 mm d^{-1}

Figure 4 Precipitation, evaporation, and precipitation minus evaporation. Left panels: slow rotation, and right panels: fast rotation. From top to bottom, panels are for precipitation, evaporation, and precipitation minus evaporation. Note that color interval is nonlinear. Unit is mm d^{-1} .

解, 因为那里接收不到恒星辐射, 地表温度较低, 大气温度也相应地较低. 恒星直射点附近的低温区与大气运动有关. 在图 2(a), 我们已经看到由于热力作用, 恒星直射点附近的低层大气辐合上升. 由于大气压强随高度呈指数降低, 空气在上升过程中将膨胀冷却, 从而导致大气高层温度较周围低. 另外, 云顶

之上水汽含量较少, 大气吸收自下而上的红外辐射也较少. 图 4(a)还表明高层大气自恒星直射点向四周辐散, 这与低层大气辐合上升是一致的. 因此, 低层大气在恒星直射点辐合上升, 高层大气自直射点向四周辐散构成了慢速自转锁相行星三维大气环流的基本特征. 与慢速自转的锁相行星相对照, 高速自转

行星的高层大气温度和环流有根本的不同(图 5(b)). 热带是一条带状的高温区, 气流基本是西风气流, 最大风速中心在赤道附近. 在快速自转条件下, 由热力引起的对流运动不再起决定性的作用, 由于科里奥力的作用, 高层大气以纬向气流为主, 高层的西风与低层地偏东风向对应. 在纬向气流的作用下, 温度也呈带状分布. 由于地面温度较高, 所以, 高层大气的温度也相对较高, 尤其是热带较高的温度与其地面温度较高一致. 这一点还可以从图 6 得到进一步的肯定. 在相同垂直温度递减率的情况下, 地表温度较高时, 其高层大气的温度也必然较高. 从图 6(a)中我们还可以发现, 在慢速自转条件下, 大气对流层顶位于 150–100 hPa 之间, 这与地球大气的对流层顶基本一致. 但在快速自转条件下, 虽然中高纬度的对流层顶与地球大气的对流层顶基本一致, 但热带对流层顶上升到 30 hPa 之上. 图 6(a)也显示出两个半球中高纬度均有逆温层出现, 这是因为热带上升气流在中高纬度下沉所产生的绝热增温造成.

图 7 给出的是赤道附近平均温度的纬向-垂直剖面图. 首先, 比较图 7(a)和 7(b)可以发现, 在慢速自转条件下, 赤道附近的对流层顶位于 150–100 hPa 之间, 而在快速自转条件下, 赤道附近的对流层顶在 30 hPa 之上. 其次, 两图均表明在背阳面有逆温层存在, 尤其是快速自转条件下的逆温层更为明显. 这些

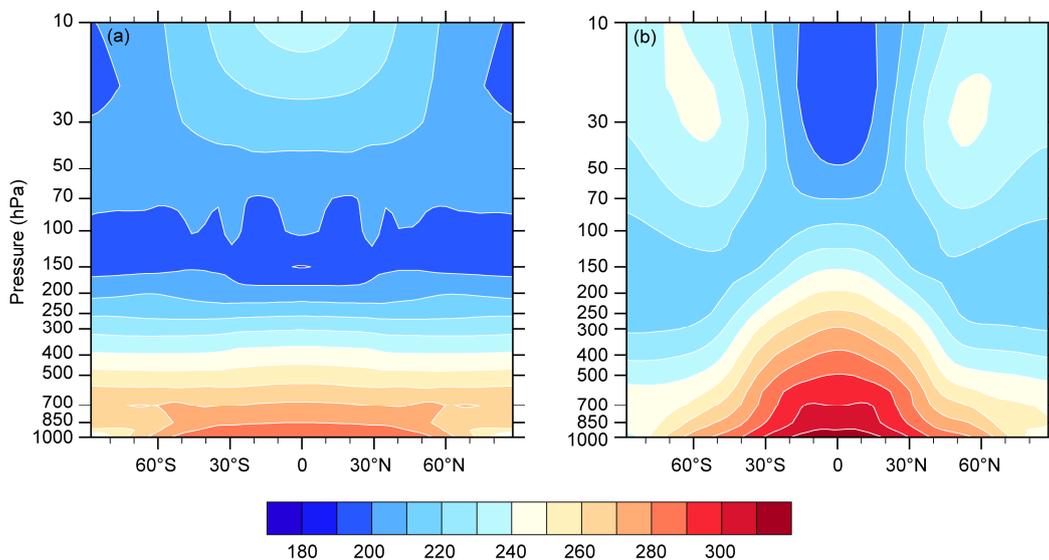


图 6 纬向平均温度垂直剖面图

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 彩色标尺的间隔为 10 K

Figure 6 Vertical cross-section of zonal-mean temperature. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Color interval is 10 K.

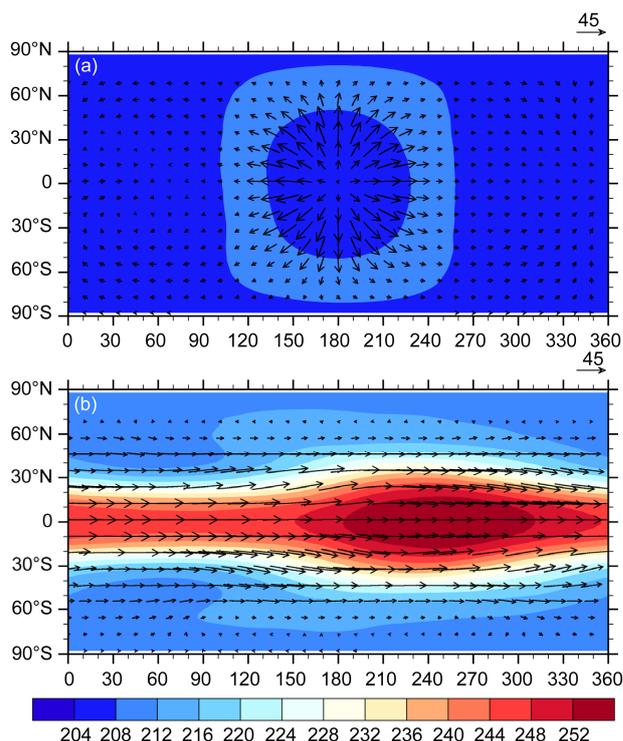


图 5 对流层高层大气(200 hPa)温度和风速的空间分布

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 除了两图的右上角标出的箭头长度表示 45 m s⁻¹, 其他均与图 2 相同

Figure 5 Same as Figure 2, except for upper troposphere (200 hPa) temperature and wind velocity and arrow length scale indicates 45 m s⁻¹.

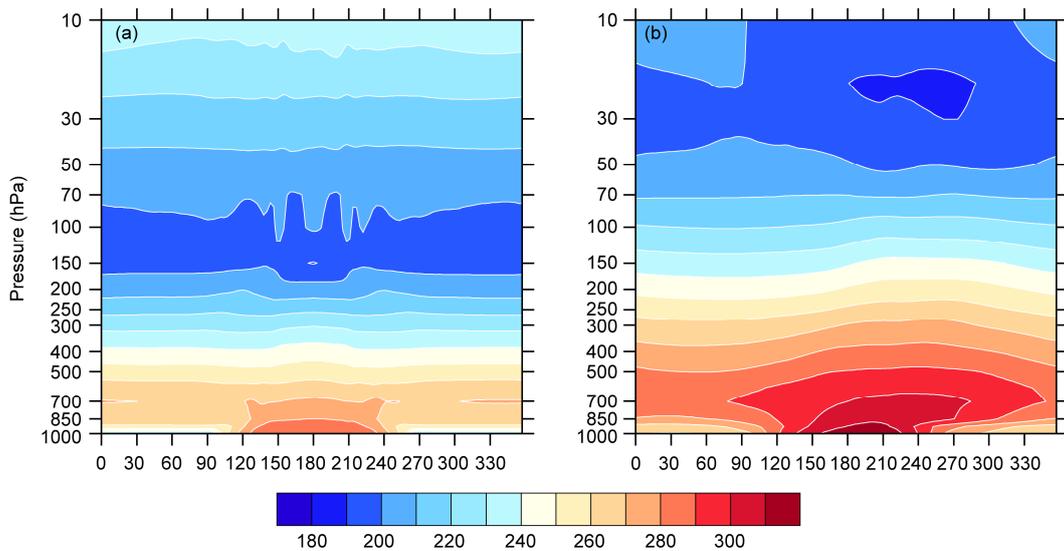


图7 赤道温度垂直剖面图

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 彩色标尺的间隔是 10 K

Figure 7 Vertical cross-sections of equatorial air temperatures. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Color interval is 10 K.

逆温层是因为向阳面大气层温度较高, 气流上升, 并在背阳面下沉产生的绝热增温造成的.

以上我们给出了近地面和对流层高层的风速分布, 为了展示气流在垂直方向上的分布, 在图 8, 我们给出了纬向平均纬向风的垂直剖面图. 在慢速自转条件下(图 8(a)), 30 hPa 以下的纬向平均风很弱, 这是因为如图 2(a)和 5(a)所示的那样, 向东和向西的气流基本是对称的, 所以纬向平均风接近于零. 但在 30 hPa 之上, 风速加大, 西风气流最大速度可达 100 ms^{-1} . 在快速自转条件下(图 8(b)), 纬向风主要以西风为主, 西风在 70 hPa 附近达到最大值, 最大西风大约是 100 ms^{-1} . 两个最大西风中心分别位于赤道两侧, 两极地区和热带近地面有弱的西风. 这样的纬向风分布与过去的模拟结果有相似的地方, 但也有不同^[16]. 相似的是赤道上空均出现超级旋转急流, 但超级旋转急流的强度不同. Merlis 和 Schneider 模拟的赤道西风非常弱, 大约只有 5 ms^{-1} , 而且赤道西风仅位于对流层中层. 该纬向风分布与地球大气有明显的不同, 地球大气的对流层纬向风在中高纬度盛行西风, 在热带地区为东风, 两支副热带急流分别位于南北纬 30° 附近. 在下面, 我们将解释这些与地球大气纬向风的差异正是由于行潮汐锁相形成的地表加热不同造成的.

为了更好地展示锁相行星大气的三维环流结构,

在下面我们使用质量流函数来表征大气运动. 图 9 给出的是两种自转速度条件下的纬向平均质量流函数的垂直剖面图. 在慢速自转条件下, 每个半球只有一个环流圈, 自赤道上升, 在高纬度和极区下沉, 这与地球大气每个半球具有三个环流圈有着本质的差异, 但与金星大气的单圈环流非常相似^[22]. 环流的强度也比地球大气的哈德雷环流强得多, 强大约 3 倍以上. 在快速自转条件下(图 9(b)), 每个半球均呈现三圈环流, 这与地球大气的每个半球具有三圈环流的现象是一致的, 强度也与地球大气环流圈的强度相当. 但锁相行星的三个环流在两个方面与地球大气的环流圈有差异. 首先, 与地球大气环流圈相比, 锁相行星的哈德雷环流圈和费雷尔环流圈都比较窄, 而极区环流圈则比较宽. 地球大气的三个环流圈宽度都大约是 30 个纬度, 而这里的模拟的哈德雷和费雷尔环流圈宽度大致都是 25 个纬度, 极区环流的宽度大约是 40 个纬度. 其次, 锁相行星的环流圈中心更接近地面, 大约在 700 hPa, 而地球大气的环流圈中心位于 400 hPa.

根据理论分析^[23], 哈德雷环流的宽度主要是由行星的自转速度决定的, 这可以由下面的方程来表示

$$Y = \left(\frac{5\delta\theta gH}{3\Omega^2\theta_0} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

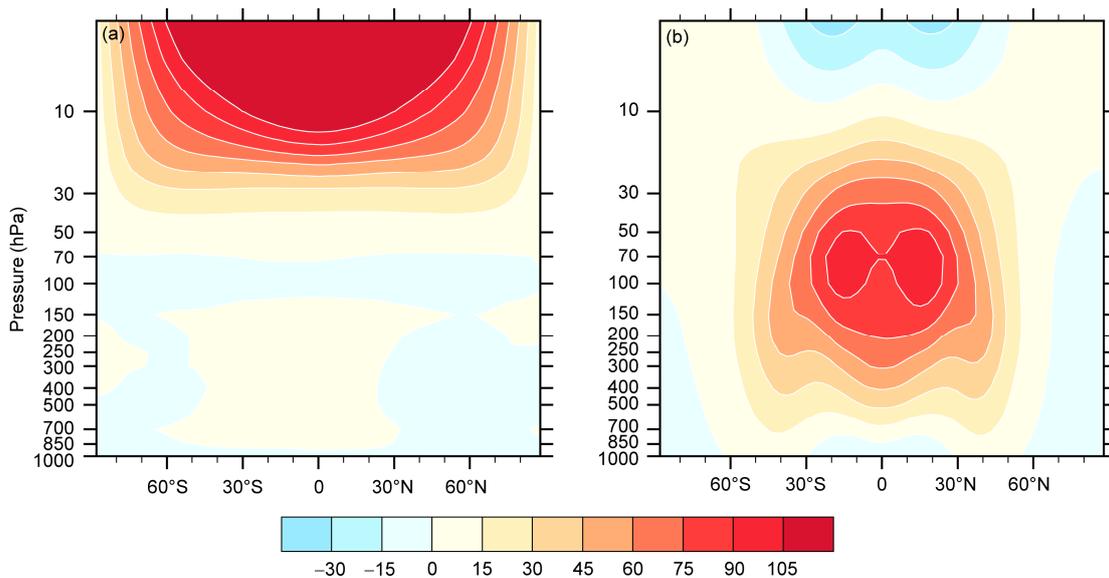


图8 纬向平均的纬向风垂直剖面图

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 彩色标尺地间隔为 15 m s^{-1}

Figure 8 Vertical cross-section of zonal-mean zonal wind. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Color interval is 15 m s^{-1} .

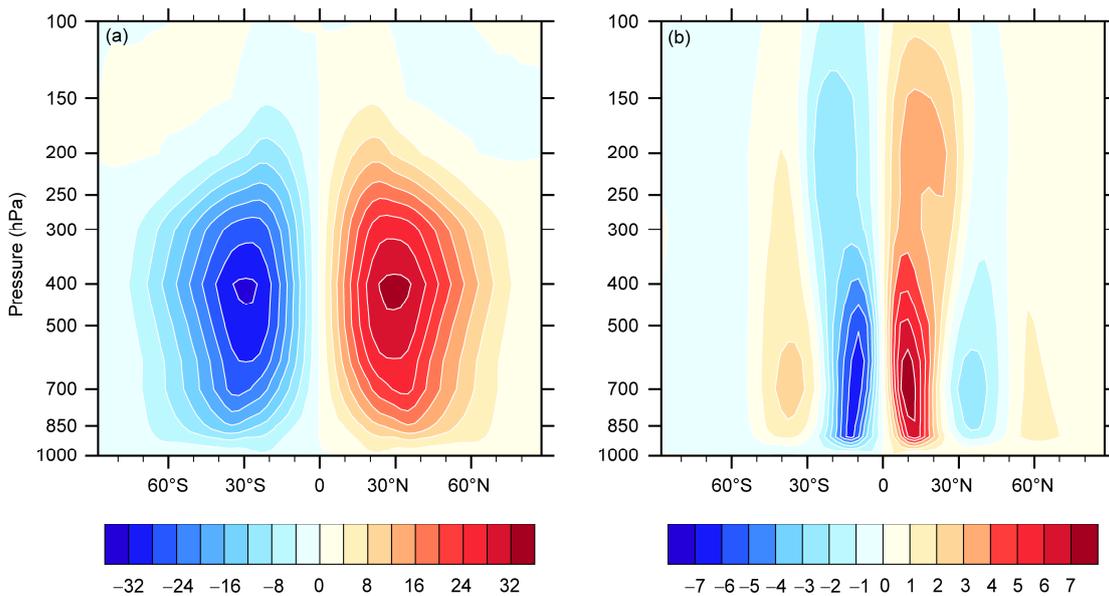


图9 纬向平均的经向质量流函数

橙-红色表示顺时针运动, 蓝色表示反时针运动, 彩色标尺的间隔是: $1.0 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$

Figure 9 Zonal-mean meridional mass streamfunction. Orange-red colors indicate clockwise motion, and blue color indicates anti-clockwise motion. Color interval is $1.0 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$.

这里, Y 代表哈德雷环流的宽度, $\delta\theta, g, H, \Omega, \theta_0$ 分别代表赤道-极地之间的温差、行星重力加速度、行星大气标高、行星自转速度和全球平均地表辐射平衡温度. 可以看出, 在其他参数不变的条件下, 行星自转

越快, 其哈德雷环流越窄. 因此, 图 9(a)中单圈环流正是由于极慢的自转速度造成的, 金星大气的单圈环流也是因为其极慢的自转速度造成的. 因为快速自转的周期与地球相同, 所以, 其三圈环流基本与地

球大气的三圈环流接近, 而哈德雷环流和费雷尔环流稍偏窄, 估计与南-北温度梯度偏弱有关.

锁相行星在垂直方向和东-西方向(纬向)的剖面图如图 10 所示. 在慢速自转条件下(图 10(a)), 东西半球各有一个环流圈, 大气在恒星直射点上升, 在反恒星点下沉, 环流圈的高度仅限于 150 hPa. 综合图 2(a), 5(a), 9(a)和图 10(a), 我们可以更清楚地看到, 在慢速自转条件下, 锁相行星的三维大气环流基本是以热力驱动的下层由背阳面向恒星直射点辐合上升、上层由直射点向背阳面辐散下沉所组成的. 在快速自转条件下(图 10(b)), 在恒星直射点附近(东侧)也存在一对环流圈, 环流圈非常深厚, 甚至达到 30 hPa, 但环流圈较窄, 而且随高度呈现向东倾斜的结构. 直射点东侧的顺时针环流圈与地球大气的沃克环流有相似的地方. 地球大气的沃克环流在热带西太平洋暖池上空上升, 在热带东太平洋较冷的洋面下沉^[13]. 但这里的沃克环流在中高层很窄, 而且没有下沉到地面, 相反, 在经度 330°附近又再次上升, 并构成了一个顺时针旋转的环流圈. 整体来看, 在东西方向有四个环流圈组成. 在下面, 我们将看到, 这样的环流圈与大气波动有关.

3.3 大气波动与超级旋转

在图 5 和图 8 中, 我们已经发现, 锁相行星在赤道上空的气流是西风气流. 说明赤道上空的大气运动比行星的自转速度还要快, 这意味着一定有某些机制向赤道气流输送了能量或西风动量, 从而使得大气的运动速度比行星的自转速度还要快. 在地球大气的对流层, 整体来讲热带盛行东风, 只有在热带中东太平洋上空(200 hPa)附近有弱的西风, 该西风与沃克环流是密切联系在一起的^[13]. 在地球的平流层中下层, 热带气流既有东风出现, 也有西风出现, 东西风大约每 2 年转换一次, 这一现象被称为准两年周期振荡(QBO)^[24]. 研究表明, QBO 是由于地球大气热带波动驱动的, 尤其是 QBO 的西风位相是由于热带向东传播的 Kelvin 波和混合的 Rossby-重力波在热带平流层中下层产生波动动量辐合造成的, 因为这些波动均携带西风动量^[25,26]. 在太阳系其他行星大气中, 也存在赤道超级旋转气流, 如金星、木星和土星都存在赤道超级旋转气流, 而且风速还很强^[2], 这些行星的超级旋转气流也是由于波动驱动的. Showman 和 Polvani^[10,11]发现, 热木星赤道超级旋转气流也是由热带波动驱动的.

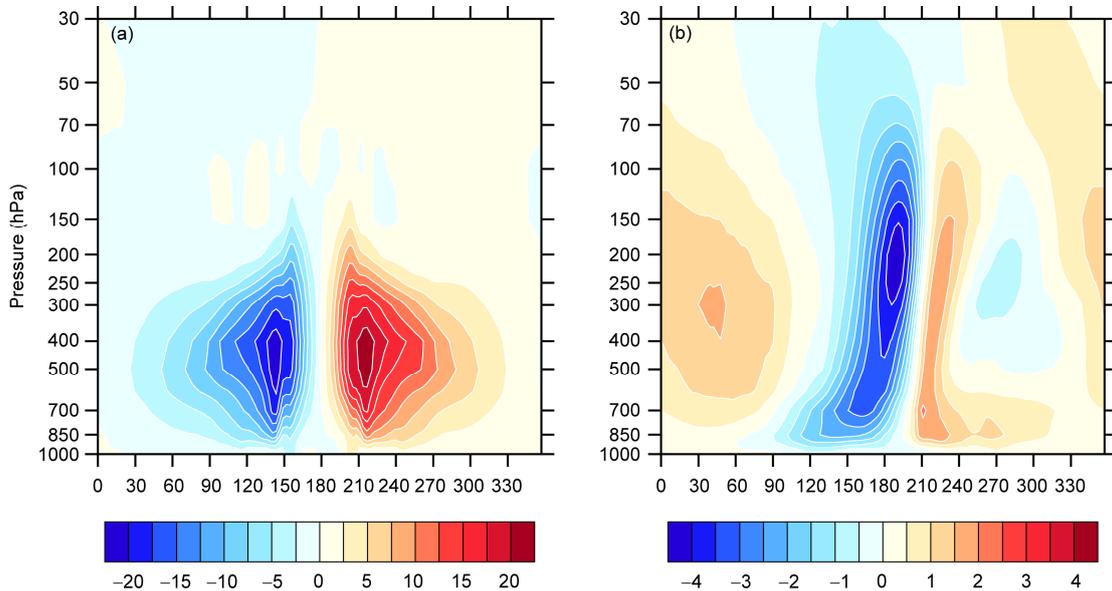


图 10 热带经向平均的纬向质量流函数

与计算纬向平均质量流函数不同, 在计算经向质量流函数时, 我们首先计算出辅散风分量, 然后利用赤道附近(5°S-5°N)平均的辅散风分量计算经向质量流函数. 彩色标尺的间隔为 $0.5 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1}$, 橙-红色表示顺时针运动, 蓝色表示逆时针运动

Figure 10 Meridional-mean zonal mass streamfunction along the equator. Differing from the calculation in Figure 8, we first calculate the divergence-wind component, then, we use this component averaged over 5°S-5°N to calculate mass streamfunction. Color interval is $0.5 \times 10^{11} \text{ kg s}^{-1}$. Orange-red colors indicate clockwise motion, and blue colors indicate anti-clockwise motion.

根据波-流相互作用理论^[24], 波动对气流的驱动可以简单地用下面的方程来表示

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = f \bar{v}^* + \frac{\nabla \cdot \mathbf{F}}{\rho_0 a \cos \phi}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \left[-\rho_0 a \cos \phi \overline{u'v'}, \rho_0 a \cos \phi \overline{fv'\theta'} \right], \quad (3)$$

$$f = 2\Omega \sin \phi.$$

这里, \bar{u} 表示纬向平均的纬向风, \mathbf{F} 表示波动通量, 也就是 Eliassen-Palm (EP)通量, f 是科里奥利力, a 是行星半径, ϕ 代表纬度, \bar{v}^* 是残余环流经向分量, u', v' 和 θ' 分别表示纬向风、经向风和位势温度的波动分量 (实际风减去纬向平均值). 从方程(2), 我们可以看出, 当某一个区域的 EP 通量是辐散的, 那么西风气流是加速的, 也就是波动将产生西风气流. 反之, 如果 EP 通量是辐合的, 波动将时西风气流减速, 或者说产生东风气流.

图 11 给出的是减去纬向平均值的位势高度异常分布. 在慢速自转条件下(图 11(a)), 位势高度异常主要是由于热力作用造成的, 正位势高度异常位于恒星指射点周围, 负位势高度异常位于背阳面. 这是因为地表加热导致该区域的位势高度升高, 而背阳面较低的地表温度导致大气层位势高度偏低. 在快速自转条件下, 科里奥利力的作用比较明显, 位势高度异常呈现波动的特征. 两个正位势高度异常中心位于经度 220° 附近的赤道两侧, 两个负位势高度异常中心位于经度 40° 附近的赤道两侧, 位势高度异常沿东-西向呈一波型分布. 这些异常分布很类似 Matsuno^[12]所提出的地球大气中的热带 Rossby 特征. Gill 发现, 如果热带洋面或地表存在固定的热源(如热带西太平洋暖池)或热源扰动, 大气的响应是在赤道两侧对称于赤道的 Rossby 波和沿赤道的 Kelvin 波^[13]. 对锁相行星来讲, 其固定热源是其固有的, 因此, 图 11(b)中的波动特征是锁相行星大气的固有特征. 但值得注意的是, 在图 11(b)中, 我们并没有发现 Kelvin 波动的特征, 这很可能是因为, Kelvin 波动被大气低层的西风气流所抑制, 无法向上传播到较高的层次. Kelvin 波动是向东传播的, 当其相速度等于西风气流的速度时, Kelvin 波将破碎^[24], 并将其西风动量传递给西风气流, 从而使赤道西风气流得到维持. 在图 8(b)中, 我们可以发现, 赤道西风一直延伸到 850 hPa. 因此, Kelvin 波动无法向上延伸到高层大气.

Kelvin 波动有可能对图 8(b)中的赤道低层大气

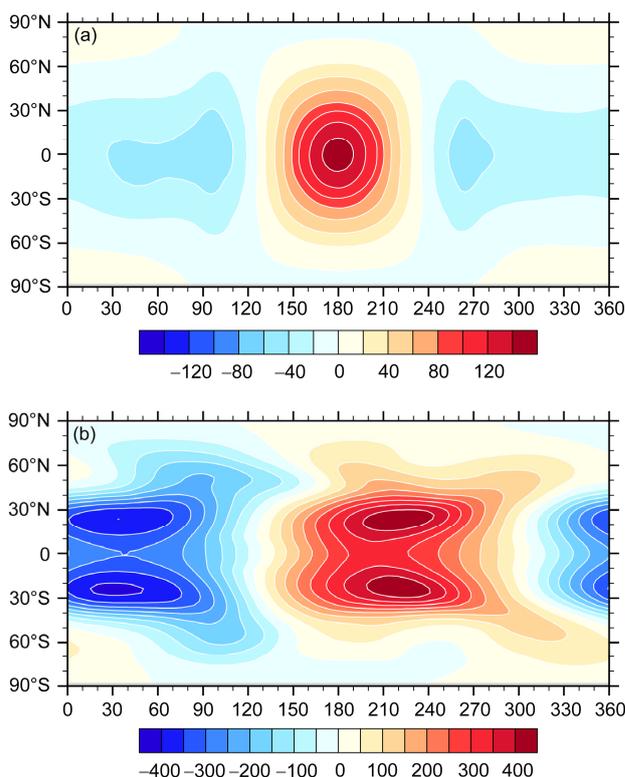


图 11 300 hPa 位势高度异常分布

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 这里的位势高度异常指的是各纬度的位势高度均减去纬向平均位势高度, 因此, 这里的位势高度异常也代表了 300 hPa 大气的波动特征. 彩色标尺的间隔为 50 位势米

Figure 11 Geopotential height anomalies at 300 hPa (zonal mean is removed). (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. Color interval is 50 m.

西风有重要的贡献, 但不能解释为什么在 70 hPa 处存在西风急流. 为了解释这一点, 我们在图 12 中给出了定常波 EP 通量矢量的分布(瞬变波没有考虑在内). EP 通量矢量的方向代表波动在高度-纬度垂直剖面图上的波动传播方向. 在图 12(a)中, 我们可以发现, EP 通量普遍较弱, 除了在 400 hPa 附近存在较强的波动. 因此, 波动不可驱动较强的西风气流. 的确, 我们从图 8(a)中发现, 30 hPa 以下的热带西风确实比较弱. 30 hPa 以上的强西风很可能与模式层顶边界条件的设置有关. 例如, 如果模式层顶人为给定的拖曳力较弱的话, 该拖曳力无法有效地耗散掉在大气高层积累的西风动量, 从而形成了高层大气较强的西风. 另一方面, 波动分析表明, 在慢速自转条件下, 30 hPa 以上却是有 Rossby 波存在, 但比较弱. 这说明, 即使在慢速自转条件下, 大气波动仍有可能在高层

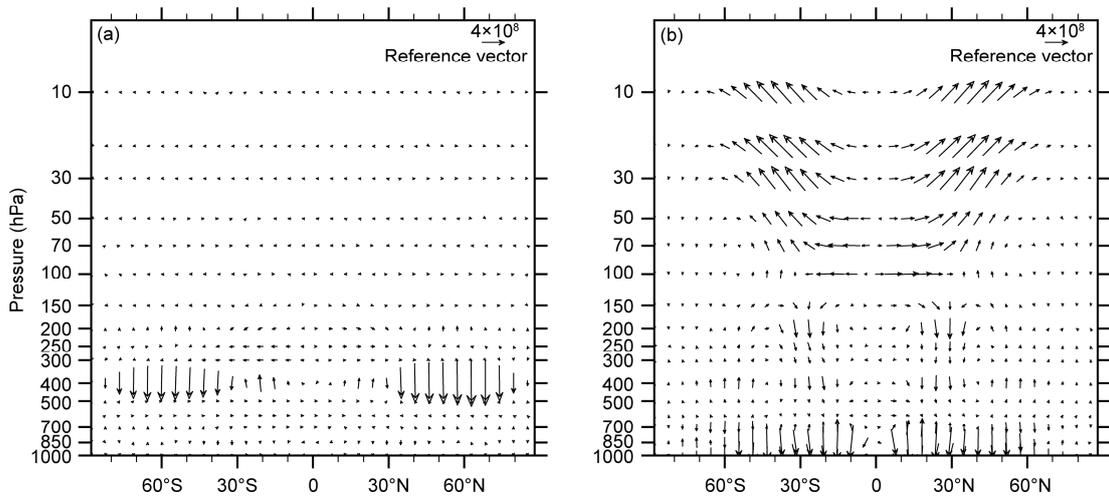


图 12 EP 通量矢量垂直剖面图

(a) 慢速自转, (b) 快速自转. 为了展示高层的 EP 通量矢量, 各层的 EP 通量矢量均除以背景空气密度 $\rho_0(z)$, EP 通量的垂直分量乘以 2×10^4 . EP 通量矢量的标度在右上角给出, $4 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$

Figure 12 Cross-sections of EP flux vectors. (a) Slow rotation, and (b) fast rotation. To demonstrate EP flux vectors at upper levels, EP flux vectors are all divided by the background air density $\rho_0(z)$. The vertical component is multiplied by 2×10^4 . The scale length is marked in the upper right corner of the plots, $4 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$.

大气产生西风动量, 并形成西风气流, 这一点需要在将来的研究中进一步分析. 在图 12(b)中, 一个突出的特征是, 100 hPa 之上的波动从赤道向两极和向上传播, 而 100 hPa 之下, 波动向下传播, 从而在热带大气 100 hPa 附近产生强的 EP 通量辐散. 根据方程 (2), 我们可以得出, 如此的波动传播将产生或维持西风气流. 从图 11(b), 我们知道这些波动应主要是热带 Rossby 波. 所以, 图 8(b)中的赤道超级旋转急流是因为 Rossby 波向极地传播造成的. 这与 Showman 和 Polvani^[10,11]对热木星大气的赤道超级旋转气流的解释是同样道理.

4 结论与讨论

本文使用真实的大气环流模式模拟了红矮星宜居带内潮汐锁相行星的地面气候条件和大气环流特征, 我们还特别比较了自转速度对行星表面气候特征和大气环流气候要素和大气环流的影响. 模拟结果表明, 在慢速自转条件下, 锁相行星的大气环流主要是由热力驱动的, 在近地面, 气流由背阳面向以恒星直射点为中心的区域辐合, 并且上升; 而在大气高层, 气流自直射点向四周辐散, 并且下沉. 由于极慢的自转速度, 其哈德雷环流非常宽, 从赤道延伸到极

地, 很类似金星大气的哈德雷环流. 其地面气候要素是背阳面温度很低, 降水大于蒸发的区域仅限于恒星辐射点周围, 其他地方均比较干燥、宜居性较差. 在快速自转条件下, 科里奥利力的作用变得较为重要, 在科里奥利力的作用下, 中高层气流主要以西风为主, 并有明显的波动特征, 其经向环流类似于地球大气的三圈环流, 但热带哈德雷环流和中纬度费雷尔环流均较地球大气窄. 在这样的大气环流作用下, 纬向大气热量输送较为显著, 其背阳面温度明显高于慢速自转条件下的背阳面温度, 湿润区域较大, 行星的宜居面积更宽广.

在不同自转速度的条件下, 均有超级旋转气流出现. 在慢速自转条件下, 对流层纬向平均风较弱, 但平流层有明显西风急流. 我们现在还不太清楚平流层的超级旋转气流是由于高层大气波动产生的真实西风气流, 还是由于模式顶层边界条件的设置造成的. 金星大气在对流层顶附近也有极强的超级旋转气流出现(大约是 100 m s^{-1}), 从这一点来讲, 慢速自转条件下的平流层大气西风也许是真实的. 但需要指出的是, 金星大气极为厚重, 其温室效应极强. 虽然自转速度较慢, 但地表温度是很均匀的, 没有锁相行星那样背阳面和向阳面有巨大的温差. 因此, 即使这里模拟的平流层超级旋转气流是真实的, 它与

金星大气超级旋转气流的形成原理也不尽相同。

在高速自转条件下, 由于行星表面固定热源的地强迫, 锁相行星存在明显的 Matsuno-Gill 型热带波动, 尤其是热带 Rossby 波非常强, 这些波动随高度向极地传播, 在赤道上空产生 EP 通量辐散, 从而形成热带西风急流. 热带 Kelvin 波动很可能被低层西风所抑制而无法向上传播, 所以, 其对对流层中高层的西风急流的形成和维持基本不起作用. 我们还比较了定常波和瞬变波对超级旋转气流所起的作用, 发现超级旋转气流主要是由于定常波造成的, 而瞬

变波所起的作用是次要的(图没有给出).

在本文中, 我们仅考虑了下垫面是一个平板海洋的情形, 在这种情形下, 海洋是静止的, 不存在海洋热量输送. 更真实的情况是, 如果有动态的海洋存在, 海洋热量输送也是至关重要的, 因为我们从地球气候的研究中知道, 海洋热量输送与大气热量输送同等的重要. 如果把海洋热量输送考虑进去, 预期地表气候要素和大气环流都将有很大的改变. 由于篇幅的限制, 我们在这里没有给出使用海-气耦合的气候模式研究潮汐锁相行星宜居性的结果.

参考文献

- 1 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 2 Hu Y. Exoplanetary atmospheres and climates (in Chinese). *J Atmos Sci*, 2013, 37(2): 451–466 [胡永云. 太阳系外行星大气与气候. *大气科学*, 2013, 37(2): 451–466]
- 3 Hu Y, Ding F. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d. *Astron Astrophys*, 2011, 526: A135
- 4 Rodono M. The atmospheres of M dwarfs: Observations. In: Johnson H R, Querci F R, eds. *The M-Type Stars*. Washington D C: NASA SP-492, U S Govt Printing Office, 1986. 409–453
- 5 Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 1993, 101: 108–128
- 6 Haberle R M, McKay C P, Tyler D. Can synchronously rotating planets support an atmosphere? In: Doyle L R, ed. *Circumstellar Habitable Zones: Proceedings of the First International Conference*. Menlo Park C A: Travis House Publications, 1996
- 7 Joshi M M, Haberle R M, Reynolds R T. Simulations of the atmospheres of synchronously rotating terrestrial planets orbiting M-dwarfs: Conditions for atmospheric collapse and implications for habitability. *Icarus*, 1997, 129: 450–465
- 8 Joshi M M. Climate model studies of synchronously rotating planets. *Astrobiology*, 2003, 3(2): 415–427
- 9 Pierrehumbert R T. A palette of climates for Gliese 581g. *Astrophys J Lett*, 2011, 726: L8
- 10 Showman A P, Polvani L M. The Matsuno-Gill model and equatorial superrotation. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L18811
- 11 Showman A P, Polvani L M. Equatorial superrotation on tidally locked exoplanets. *Astrophys J*, 2011, 738: 71–94
- 12 Matsuno T. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area. *J Meteorol Soc Jpn*, 1966, 44: 25–43
- 13 Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 447–462
- 14 Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E. A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b. *Nature*, 2007, 447: 183–186
- 15 Heng K, Vogt S S. Gliese 581g as a scaled-up version of Earth: Atmospheric circulation simulations. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 2145–2157
- 16 Merlis T M, Schneider T. Atmospheric dynamics of Earth-like tidally locked aquaplanets. *J Adv Model Earth Syst*, 2010, 2: 1–17
- 17 Rauscher E, Menou K. Three-dimensional modeling of hot Jupiter atmospheric flows. *Astrophys J*, 2010, 714: 1334–1342
- 18 Thrastarson H T, Cho J Y-K. Effects of initial flow on close-in planet atmospheric circulation. *Astrophys J*, 2010, 716: 144–153
- 19 Thrastarson H T, Cho J Y-K. Relaxation time and dissipation interaction in hot planet atmospheric flow simulations. *Astrophys J*, 2011, 729: 117–127
- 20 Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model: CAM3.0. Technical Note, NCAR/TN-464 STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2004
- 21 Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, Version Three. Technical Note, NCAR/TN-463 STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 2004
- 22 Williams G P, Holloway J L. The range and unity of planetary circulations. *Nature*, 1982, 297: 295–299
- 23 Held I M, Hou A Y. Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 515–533
- 24 Andrews D G, Holton J R, Leovy, C B. *Middle Atmosphere Dynamics*. London: Academic Press, 1987
- 25 Lindzen R S, Holton J R. A theory of the quasi-biennial oscillation. *J Atmos Sci*, 1968, 25: 1095–1107
- 26 Holton J R, Lindzen R S. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1076–1080

Atmospheric circulations and climate of tidal-locking exoplanets

HU YongYun* & DING Feng

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

M-dwarfs have the highest population in the Universe. Because M-dwarfs have much lower luminosity than Sun's, the habitable zone around M-dwarfs is very close to stars. Thus, habitable exoplanets orbiting M-dwarfs are very likely to be tidally locked to their primaries due to strong gravity force, causing one side of these habitable exoplanets facing stars permanently and the other side remaining dark. The very uneven heating causes strong temperature contrast between day and night sides. In the present paper, we use a modified Earth atmospheric general circulation model, which is coupled with a slab ocean, to study surface climate and atmospheric circulations of tidal-locking exoplanets around M-dwarfs. Two types of simulations are carried out. One is slow rotation with a rotating and orbiting period of 243 Earth days, and the other one is fast rotation with rotating period of 1 Earth day. Results show that in the case of slow rotation, atmospheric circulations are mainly driven by thermal contrast with convergent flows at lower layers and divergent flows at higher layers, and that the region with liquid water is a small area around the substellar point. By contrast, in the case of fast rotation, the Coriolis force becomes effective, atmospheric circulations are dominated with strong zonal flows and tropical wave modes, and regions with liquid water are much broader. Especially, zonal flows demonstrate equatorial super-rotation jet stream. EP flux diagnostics show that the equatorial super-rotation flow is due to poleward propagation of tropical Rossby waves, which generates EP flux divergence over the equator. It is the EP flux divergence that generates and maintains the equatorial super-rotation.

extra-solar planet, tidal-locking, atmospheric circulation, M-dwarf star, atmospheric waves

PACS: 92.70.Cp

doi: 10.1360/132013-252