

关于太阳系外行星的宜居性

胡永云¹

北京大学 物理学院 大气与海洋科学系 气候与海气实验室

摘要

愈来愈多的太阳系外行星的发现激发了人们对发现太阳系外生命的热情期待。在诸多决定生命存在的因素中，液态水的存在是一个关键性的因素。因此，确定一颗太阳系外行星是否是宜居的，其首要条件是该行星的表面温度是否能够保证液态水的长期存在。本文将简要介绍位于红矮星宜居带内的行星的宜居性研究进展。由于潮汐锁相作用，该类行星的一面永远面对恒星，较为温暖，而另一面永远背对恒星，极端寒冷。极低的温度有可能导致大气成分和水分完全冻结在背阳面，并导致行星不适宜生命存在。在此，我们将讨论大气和海洋环流能否输送足够多的热量到背阳面，并加热背阳面，从而避免大气和水分的完全冻结。我们将根据地球大气和海洋环流以及热量输送的知识对这些问题加以阐述。

关键词：太阳系外行星、宜居性、大气海洋热量输送、行星气候

¹ 胡永云，1965年生。联系方式：北京大学物理学院大气与海洋科学系，北京，100871，email: vyhu@pku.edu.cn。项目资助：国家自然科学基金委杰出青年基金(41025018)和面上项目(41375072)共同资助。

On the habitability of extra-solar planets

Yongyun Hu

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

Abstract

Discoveries of more and more extra-solar planets (exoplanets) stimulate our great enthusiasm in searching for extra-solar life in deep space. Among many factors that life requires, permanent existence of liquid water is considered the most critical one. Thus, the first criterion in determining the habitability of an exoplanet is whether its surface temperature guarantees the existence of liquid water, which is a problem of climate. The present paper will briefly introduce the progress of research in the habitability of exoplanets in the habitable zone of M dwarfs. Exoplanets in the habitable zone around M dwarfs are very likely tidally-locked planets due to strong gravitational forces because they are so close to their M dwarfs. That is, such exoplanets are in the synchronous rotating state, with which one side of these exoplanets permanently faces their primaries and is warm, while the other side remains dark and cold. If the nightside temperature is sufficiently low, atmosphere compositions and water would be all frozen over the nightside, and such tidal-locking exoplanets are uninhabitable. Here, we will address, with our knowledge of Earth's climate system, that atmosphere and ocean are able to transport sufficient heat from the dayside to the nightside to prevent atmosphere collapse and water being frozen on the nightside.

Key words: exoplanets, habitability, atmospheric and oceanic heat transport, planetary climate

1、引言

地球生命²在宇宙中是否是唯一的？太阳系外是否存在适宜生命存在的宜居星球？这些是长久以来人类一直探索和期待答案的问题。自 1995 年第一颗太阳系外行星（简称系外行星）被发现到 2014 年 3 月 16 日为止，已有 1771 颗系外行星被确认 (<http://exoplanet.eu/>)，其中的 20 颗被认为是有可能适宜生命存在的宜居行星 (<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>)。这 20 颗行星都是质量略大于地球质量的系外行星，通常被称为“超级地球”。

尽管决定生命存在的因素有很多，但目前公认的适宜类似地球生命存在的最关键的条件是液态水的存在。因此，一颗行星是否适宜生命存在的关键是其表面温度是否能够保证液态水的长期存在，也就是说，其表面温度应介于大约 0 °C - 70 °C 之间。如果行星的表面温度低于 0 °C，行星将是冰封的；如果高于 70 °C（不需要达到 100 °C），行星将进入温室逃逸状态，其表面液态水将完全被蒸发，进入大气层，并最终被光解 (Ingersoll, 1969, Pierrehumbert, 2010)。因为行星的表面温度在很大程度上取决于与其恒星之间的距离，所以，上面所说的温度范围 (0 °C - 70 °C) 意味着只有当行星位于距离其恒星适当的带状区域内才有可能宜居的，如果距离其恒星太远，行星的表面温度将太低而进入全冰封，而如果太近，则进入温室逃逸状态。该围绕恒星的带状区域通常被称为恒星的宜居带 (Kasting, 1993)。对于太阳系来讲，地球基本位于太阳宜居带的中央，金星基本超出了宜居带的内侧范围，而火星则位于太阳宜居带外侧的边缘。所以，金星很可能在早期经历了温室逃逸过程，其现在表面温度高达 480 °C，已没有液态水存在。而火星的表面温度则低至 -60 °C，也不可能存在生命 (胡永云和田丰, 2014)。

红矮星是宇宙中数量最多的恒星，占宇宙恒星总数量的大约 75% (Rodono, 1986)。所以，我们在红矮星附近探测到宜居行星的几率远比在其它类型恒星附近发现宜居行星要高得多。红矮星的质量比较小，大约是太阳质量的 0.075 - 0.5 倍，其内部核聚变反应较弱，所以，其辐射温度大约在 3500 K 左右，远低于太阳的辐射温度 6000 K，因此，红矮星的宜居带距离恒星较近。把地球距离太阳

² 这里所说的生命并非仅指具有高度智力的人类，而是包括最为简单的原始生命等各种地球生命。

的距离定义为一个天文单位（1 AU），红矮星的宜居带位于大约 0.1 AU 的区域。由于目前的天文探测技术更易于探测到距离恒星较近的行星（目前所观测到的系外星大部分是距离其恒星很近的恒星）。因此，人类很可能首先在红矮星附近发现宜居行星。

根据牛顿万有引力定律，当恒星与行星距离很近时，恒星与行星之间的引力将很强，强的引力力矩导致行星被潮汐锁相，也就是行星的一面永远面对红矮星（永久白天），而另一面永远背对红矮星（永久黑夜）。换句话说，就是行星的自转周期和公转周期相同。例如，月球就被地球潮汐锁相，所以，我们在地球上永远只能看到月球的一面，而看不到其另一面。这一行星与其恒星之间特殊的运行方式势必造成行星的朝阳面和背阳面之间的加热不均匀，朝阳面因一直被恒星照射而温度较高，而背阳面因得不到恒星辐射则极为寒冷。由此而产生的严重问题是，尽管该类行星的朝阳面温度适于液态水存在，但其背阳面由于极端寒冷有可能导致，以至于所有的大气成分和水分都被冻结在背阳面，从而不适宜生命存在。

近几年来，围绕位于红矮星宜居带内的类地行星是否是适宜生命存在的这一问题开展了许多研究。本文将简要介绍这一领域的研究进展，并主要针对两个问题给予介绍，一个是关于潮汐锁相行星背阳的大气坍塌现象，另一个是关于水分是否会完全冻结在背阳面。

2、潮汐锁相性的宜居性

2.1、关于大气坍塌问题

任何大气成分都有其凝结点和凝固点，以地球大气的成分为例，在一个大气压的条件下，氮气（ N_2 ）、氧气（ O_2 ）和二氧化碳（ CO_2 ）的凝固点分别是-210，-218.79，-78.5 $^{\circ}C$ 。如果把地球表面气温从现有的温度下降到-78.5 $^{\circ}C$ ， CO_2 将首先凝固成干冰。而一旦 CO_2 从大气中沉降到地面，大气温室效应消失，地表温度将降低到辐射平衡温度（-18 $^{\circ}C$ ）。如果把地表温度继续降低到-210 $^{\circ}C$ ，地球大气中的氮气将凝固并沉降到地面；如果再继续把地表温度降低到-219 $^{\circ}C$ ，大气中的 O_2 也将凝固。其结果是所有大气成分都沉降到地表，以至于地球没有大气层，或只有极为稀薄的大气层。联想到潮汐锁相行星的背阳面，因为恒星辐射永远无法照射到这一区域，所以，背阳面的温度有可能极低，大气成分有可能全

部沉降到背阳面，形成所谓的大气坍塌现象。如果大气坍塌现象出现，即使朝阳面温度高于 0 °C，但由于没有大气层，行星也是部适合生命存在的。大气成分凝固的现象已经在太阳系火星被观测到 (Toon et al., 1980)。火星大气成分的 95% 是 CO₂，由于极夜期间极地非常寒冷，CO₂ 在极地凝结成干冰冰盖 (火星极地冰盖的部分是水冰)，每年冬季冻结在火星极地的 CO₂ 大约是火星大气总质量的 25% - 30%。如果火星两极冻结的 CO₂ 干冰完全升华并进入火星大气层，火星大气压将有显著的升高。火星大气 CO₂ 在极地冻结为担心潮汐锁相行星背阳面发生大气坍塌现象提供了依据。

使用能量平衡模式，Haberle et al. (1996) 首先粗略地估计了从朝阳面向背阳面的大气热量输送是否能够使背阳面温度上升到足以阻止 CO₂ 沉降的温度。他们的结果表明，如果行星表面的大气压力达到 0.15 个大气压，大气热量输送将足以使背阳面的温度高于 CO₂ 的凝固点。只要 CO₂ 不会沉降，大气的温室效应将保证其它成分也不会产生凝固和沉降。Joshi et al. (1997) 使用简化的三维大气环流模式肯定了上述结果，他们的模拟结果给出的大气压阈值是 0.1 个大气压。Pierrehumbert (2011) 和 Hu and Yang (2014) 使用更为复杂和更为接近真实的气候模式给出的模拟结果表明，大气坍塌现象确实不会在红矮星附近的潮汐锁相行星上出现。他们的结果所展示的是，潮汐锁相行星的背阳面温度将远高于 CO₂ 的凝固温度。图 1 所示的是使用修改过的地球气候模式 (CAM3) 模拟的位于红矮星系 Gliese 581 宜居带内的一颗行星 (Gl 581g) 的表面温度和海冰覆盖率 (Hu and Yang, 2014)。Gl 581g 是一个没有正式被确认的系外类地行星，其质量大约是地球的 1.5 倍，自传和公转周期都是 36.7 个地球日，恒星辐射常数是 866 Wm⁻²。在进行模拟试验时，CAM3 的相关参数都用这些行星参数来替代，模式中给定的 CO₂ 浓度是 355 ppmv，其余大气成分均与地球大气相同。另外，我们把 CAM3 与一个 50 m 深的平板海洋相耦合 (图 1 中的上面两图)。可以看到，朝阳面的表面最高温度高于 8 °C，背阳面的温度大约是 -70 °C。该结果表示，背阳面大气非但不会产生大气坍塌现象，而且由于朝阳面的温度高于水的冰点温度，所以，朝阳面有液态水存在 (图 1 中的左上图)。朝阳面的开放海域成圆形，看起来很像一个眼球，因此被称为“眼球”状气候态 (eyeball climate pattern) (Pierrehumbert, 2011)。

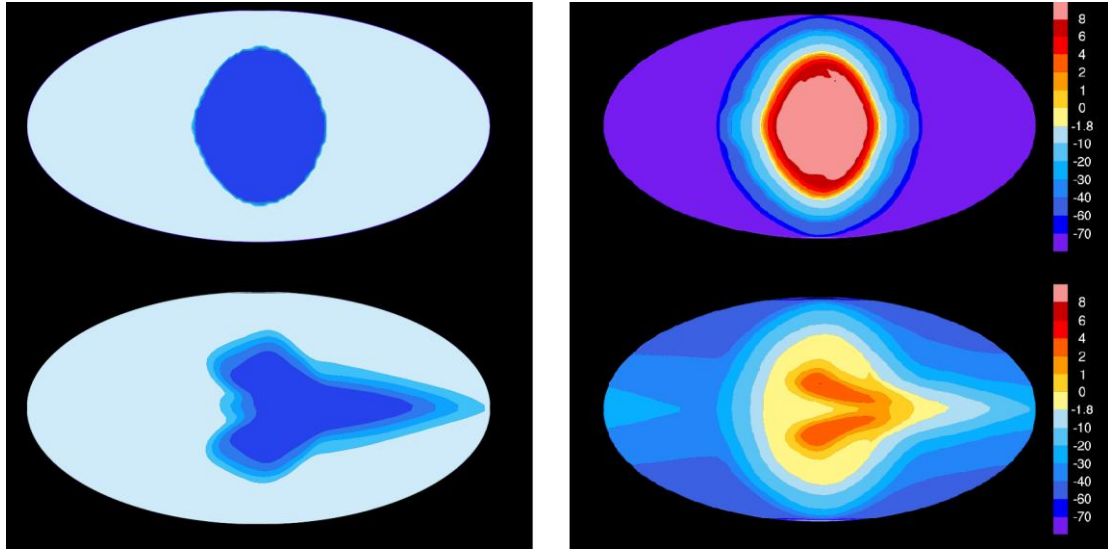


图 1、数值模式模拟的海冰覆盖率和表面温度分布。上两图：静止海洋条件下的模拟结果，下两图：动态海洋条件下的模拟结果。左侧两图是海冰覆盖率，图中的蓝色表示开放海域，白色表示冰封海域。右侧两图是表面温度，彩色标尺的单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。恒星直射点位于图中央。

Figure 1. Spatial distributions of simulated sea-ice coverage and surface air temperatures. Top panels: simulation results with a slab ocean, and bottom panels: simulation results with a dynamic ocean. Left panels: sea-ice coverage, blue colors indicate open ocean, white indicates ice. Right panels: surface air temperatures, and color scale is $^{\circ}\text{C}$. The substellar point is at the equator and 180 degree in longitude.

根据地球气候的知识，我们知道海洋热量输送对全球气候的影响与大气热量输送差不多同等重要，那么，海洋热量输送势必对潮汐锁相行星的气候环境产生重要的影响。只不过对于潮汐锁相行星来讲，我们更关心的热量输送主要是朝阳面和背阳面之间的热量输送，而不像研究地球气候时，我们关注的是自热带向两极的地热量输送。根据现有的行星形成理论，一个固态类地行星的质量愈大，其所包含的水分愈多 (Lissauere, 1999)。又由于超级地球重力较大，其山峰较低，超级地球的表面有可能完全被海洋所覆盖，因此，超级地球很可能是一个“水世界”。一旦考虑了海洋的动力作用，我们还需要考虑海冰-反照率的正反馈和海冰的动力学作用，因为海冰正反馈有可能导致行星进入全冰封状态，从而形成一个冰雪地球。在地球历史上，冰雪地球曾经分别在大约 23 亿年前和 6-7 亿年前多次出现过 (胡永云等, 2005)。但另一方面，根据冰雪地球的研究结果，海洋热量输送也有可能有效地阻止行星进入全冰封状态，而在恒星直射点附近区域保留开放的海域 (Yang et al., 2012a, b, c)。因此，当考虑了动力海洋的作用之后，整个气候系统将更为复杂一些。鉴于这些原因，在模拟试验中，我们假定超级地球

是一个“水世界”。图 1 中的下面两张图是考虑了动力海洋条件下（海气耦合模式）模拟的海冰覆盖率和表面气温。在考虑了海洋热量输送之后，开放海域不再是圆形，而是类似于“龙虾”状，两只“钳子”对称地位于赤道两侧，长长的“尾巴”一直延伸到背阳面。这里的两只“钳子”是热带罗斯贝波，而长长的尾巴是开尔文波（Hu and Yang, 2014）。这一海洋环流特征与 Gill（1980）提出的大气和海洋对热带海洋温度异常的响应是一致的。从图 1 中也可以看出，动力海洋与平板海洋所模拟的结果中非常不同的一点是：在平板海洋模式中，当 CO_2 浓度增加到 0.2 大气压时，开放海洋的面积没有增加太多，背阳面的温度也没有升高太多；而在海气耦合模式中，当 CO_2 升高到 0.2 个大气压之后，朝阳面的温度升高不多，但背阳面的温度则有很大的升高。这是因为海洋环流把热量从朝阳面输送到背阳面， CO_2 温室效应产生的加热作用主要被用来加热背阳面，以至于全球温度都高于 $0\text{ }^\circ\text{C}$ ，背阳面的海冰也全部融化。这说明海洋热量输送能够有效地改变潮汐锁相行星的气候特征。

2.2、水分是否会被全部冻结在背阳面

上面的结果表明，大气与海洋热量输送足以把潮汐锁相行星的背阳面加热到类似地球大气各主要成分的凝固点之上，亦即潮汐锁相行星不会产生大气坍塌的现象。但还存在一个问题，那就是水分是否会完全冻结在潮汐锁相行星的背阳面，因为水的凝固温度（ $0\text{ }^\circ\text{C}$ ）比大气成分的凝固点高得多。图 2 给出的是水分被完全冻结在行星背阳面的一张卡通图。该图所表示的大致意思是，朝阳面液态水不断蒸发，通过大气环流输送到潮汐锁相行星的背阳面，水汽在背阳面凝固并形成降雪，在背阳面形成冰川。另一方面，冰川自背阳面向朝阳面缓慢移动，在朝阳面融化并形成液态水。当这两者达到平衡之后，背阳面冰川的厚度基本决定了有多少水分被冻结在背阳面。考虑到冰川自背阳面向朝阳面的移动极为缓慢，远低于自朝阳面向背阳面输送水汽的速度，因此，一个可能的情形是朝阳面的液态水在完全蒸发并在背阳面沉降之后，而冰川推进和融化也仅存在于朝阳面和背阳面的交界处而无法推进到朝阳面，最后导致液态水全部冻结在背阳面。如果水分完全冻结在背阳面，即使朝阳面的温度在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 之上，因为朝阳面没有液态水，行星也是不适宜生命存在的。

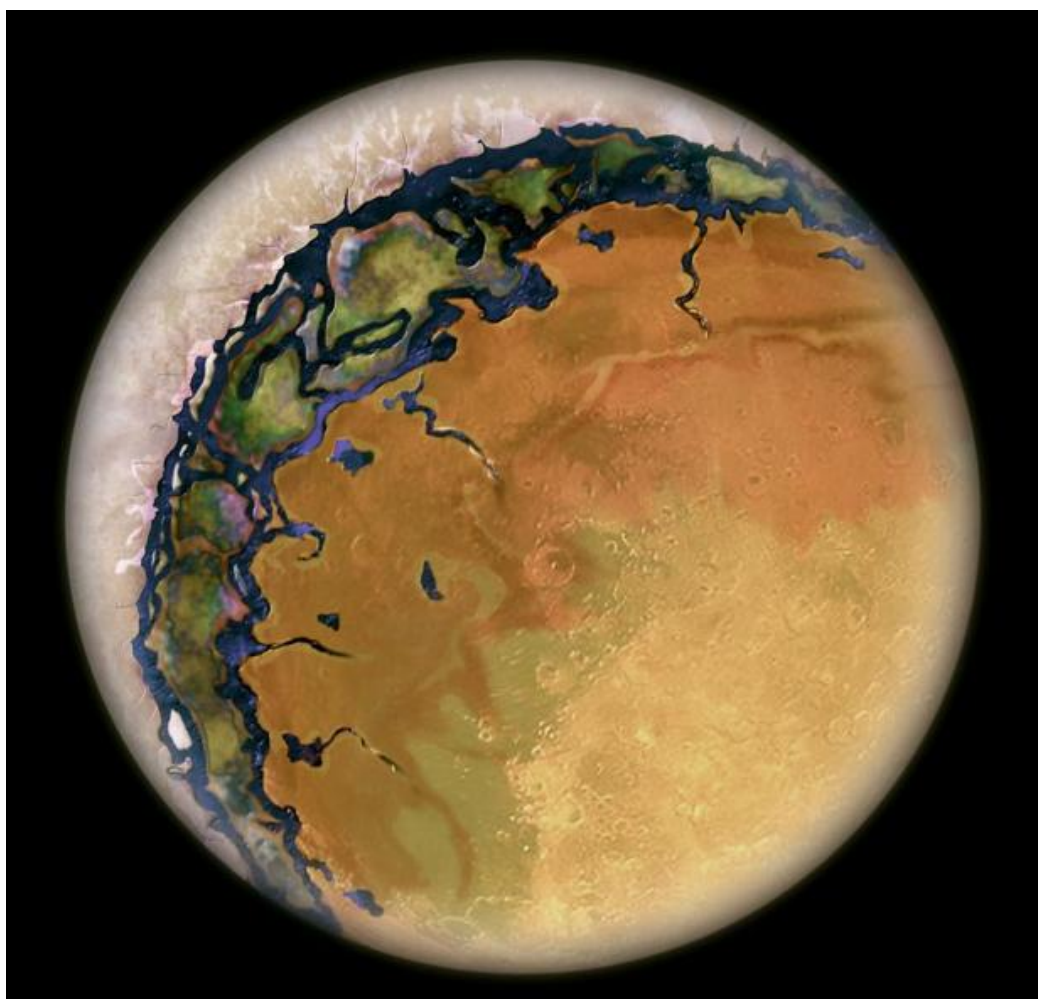


图 2、水分完全被冻结在潮汐锁相行星的背阳面卡通图。图的中心是极点，右下侧是朝阳面，黄色表示荒漠；左上侧是背阳面，白色表示冰盖。选自 Beau.TheConsortium。

Figure 2. A cartoon of trapped water on the nightside of a tidally locked exoplanet. The pole is located at the center of the figure, the upper-left is the nightside, and the lower-right is the dayside. Yellow color indicates desert, and white color denotes ice cap. Adopted from Beau.TheConsortium.

海洋热量输送同样对该问题有着重要的意义。如果不考虑海洋热量输送，平板海洋模式给出的结果是背阳面海冰最大厚度可达到 4.5 km，平均厚度大约是 2 km (Menou, 2013)。这意味着，如果全球平均海洋深度低于 1 km，那么全部海水将冻结在背阳面；而如果海洋深度大于 1 km，则仍有部分水分可以保留在朝阳面。但如果考虑了动力海洋的作用或者说考虑了海洋热量输送，背阳面的海冰其实非常薄。图 3 所示的是海气耦合模式给出的海冰厚度分布图，朝阳面海冰厚

度基本小于 3 m，背阳面赤道附近的海冰大约 1 m，最大海冰厚度基本小于 5 m，位于在背阳面副极地地区。海冰很薄的原因是海洋环流把大量的热量输送到背阳面，温暖的海水从海冰的下面加热冰层，使得海冰不能向下增长。模拟结果还表明，即使大气 CO₂ 浓度降低到 3.6 ppmv，背阳面最大海冰厚度也不会超过 10 m。这些结果说明，潮汐锁相行星的水分是不大可能完全冻结在背阳面。

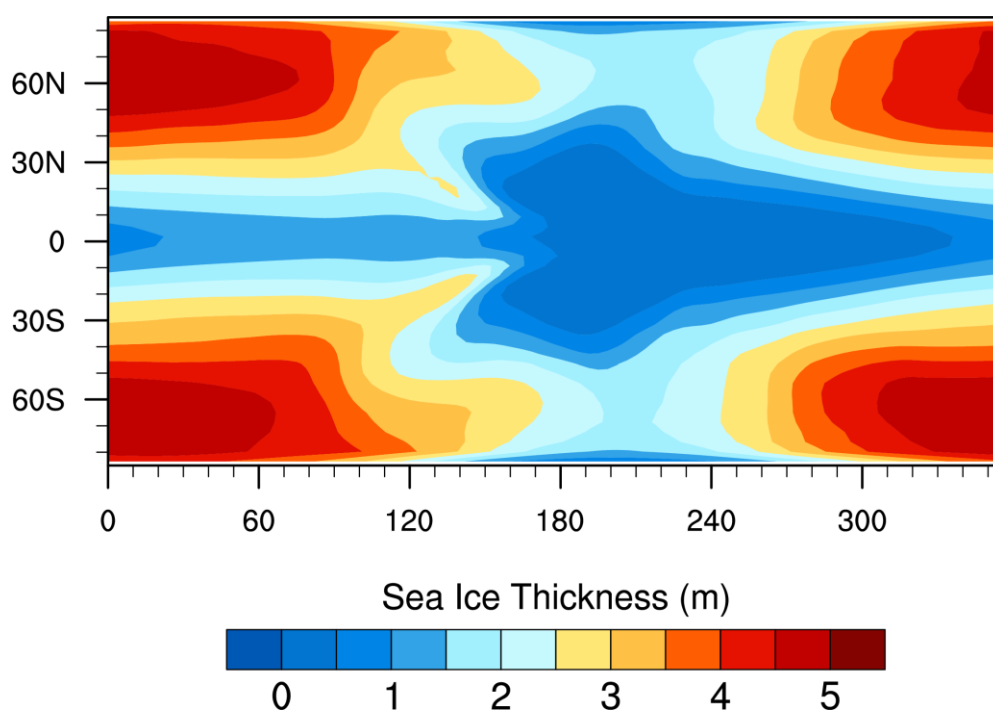


图 3、海气耦合模式模拟的潮汐锁相行星的海冰厚度。该模拟试验中的 CO₂ 浓度是 355 ppmv，图中的彩色标尺间隔是 1 m。选自 Hu and Yang (2014)。

Figure 3. Sea-ice thickness simulated by coupled atmospheric and oceanic model. CO₂ concentration is set to 355 ppmv in the simulation, color interval is 1 m. adopted from Hu and Yang (2014).

以上考虑的是潮汐锁相行星完全是一个水世界的情况。如果海洋被陆地所隔离，海洋环流的热量输送能力将大大降低，海冰或陆地冰川的厚度将有可能增加，但水分是否可能冻结在背阳面是值得探讨的问题。我们在这里只给出两种简单的例子来说明这一问题。如果朝阳面是陆地，而背阳面是海洋，海洋热量输送将不起作用，仅靠大气无法输送足够多的热量到背阳面，背阳面温度很类似于图 1 右上图所示，大约在 -70 °C，则背阳面的海洋最终将完全冰封，行星将不适宜生

命存在。相反，如果背阳面是陆地，而朝阳面是海洋，海洋热量输送将同样不起作用，则背阳面温度将很低。在此情况下，朝阳面是否有海水存在取决于背阳面的陆地冰川厚度。根据冰川动力学理论，冰川的厚度大致取决于背阳面的降水、地热通量和重力等因素。目前还没有这方面的定量结果，还需要进一步的研究。

3、总结和讨论

本文简要介绍了位于红矮星宜居带内的潮汐锁相行星的气候环境和宜居性问题。现有的研究表明：1) 在仅考虑大气热量输送的条件下，大气环流自朝阳面向背阳面的热量输送足以使背阳面表面温度升高到避免出现大气坍塌现象的数值；2) 海洋热量输送能够更有效地加热背阳面，即使在低浓度 CO_2 的情况下，背阳面海冰厚度仍低于 10 m；在高 CO_2 浓度的条件下，背阳面的海冰能够完全融化；3) 动力海洋大大地改变了潮汐锁相行星的气候模态，开放海域的空间分布不再是“眼球”状的，而是更像一只“龙虾”。图 1 所给出的气候空间模态将有助于未来识别系外行星是否适宜居行星。虽然目前的天文观测技术还无法做到这一点，但计划中的太空望远镜将很有希望达到这一目标。所以，这些结果为未来识别系外行星的宜居性提供了重要的理论基础。这些研究表明，位于红矮星宜居带内的潮汐锁相行星的朝阳面气候条件很可能是适合生命存在的。需要指出的是，即使背阳面的海冰完全融化，但仍因无法进行光合作用而不适宜生命长期存在。在 Gl 581 星系中，除了 Gl 581g，另外两颗行星也是科学家所关注的，它们是 Gl 581c 和 Gl 581d，分别位于 Gl 581g 的内外两侧，于 2007 年被发现。最初的研究表明，这两行星有可能是宜居的 (Selsis et al., 2007)。但后来的研究表明，Gl 581c 不在宜居带之内，其表面温度太高，而 Gl 581d 则位于宜居带的外侧边沿，需要大约 7 个大气压的 CO_2 才能使地表温度升高到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 以上 (Hu and Ding, 2011)。

除了气候环境，空间环境也对红矮星附近潮汐锁相行星的宜居性有重要影响。红矮星的辐射谱缺乏紫外辐射，我们还不清楚这将对生命的存在有何重要影响。另一方面，红矮星的远紫外辐射则很强，这些超强辐射能够导致气体分子光解和逃逸，尤其是对磁场较弱的行星来说，这将给行星吸附大气层造成困难。此外，由于红矮星的宜居带距离恒星如此近，强的恒星风更容易吹走行星的大气层。

因为红矮星的辐射温度较低，其辐射光谱偏向红光波段，其峰值波长大约是 $0.9 \mu\text{m}$ (Hu and Ding, 2011)，位于近红外区域，因此，红矮星看起来呈红色。这与太阳光谱不同，太阳光谱的辐射峰值波长大约是 $0.55 \mu\text{m}$ ，位于蓝-绿光波段。假定红矮性附近的宜居行星有类似地球高等生命存在，这些生命将对红光波段更为敏感。

太阳系外行星的发现是一件激动人心的事情，甚至有预测首先发现太阳系外行星的几位天文学家很有可能在未来几年获得诺贝尔物理学奖。地球是目前唯一有生命存在的星球，地球大气和气候环境的知识将帮助我们认识太阳系外行星的宜居性。反过来，对太阳系外宜居行星大气和气候环境的认识将有助于我们更深入地认识地球气候的演化历史及其对生命进化的意义。虽然我们现在还无法真正确定某一颗行星是宜居的，但期望在不久的将来能够达到这一目标。

参考文献

- Gill A. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1980, 106(449): 447–462.
- Haberle R, McKay C, Tyler D, Reynolds R. Can synchronously rotating planets support an atmosphere? In *Circumstellar Habitable Zones*. Travis House, Menlo Park, CA, 1996.
- Hu Y, Ding F. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d. *A&A*, 2011, 526: A135, doi:10.1051/0004–6361/201014880.
- Hu Y, Yang J. Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M-dwarf Stars. *PNAS*, 2014, 111: 629-634.
- Ingersoll A P. The runaway greenhouse: A history of water on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 1969, 26: 1191–1198.
- 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.

Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable zones around main sequence stars. *Icarus*, 1993, 101: 108–128.

Lissauer J J. How common are habitable planets? *Nature*, 1999, 402: C11-14.

Menou K. Water-trapped world. *Astrophys. J. Lett.* 2013, 774: 51.

Pierrehumbert R T. A palette of climates for Gliese 581g. *Astrophys. J. Lett.*, 2011, 726: doi: 10.1088/2041-8205/726/1/L8.

Pierrehumbert R T. *Principles of Planetary Climate*. Cambridge University Press, 2010, 652 pp.

Selsis F, Kasting J F, Levrard B, Paillet J, Ribas I, Delfosse X. Habitable planets around the star Gliese 581? *A&A*, 2007, 476: 1373–1387, doi:10.1051/0004-6361:20078091.

Toon O B, Pollack J B, Ward W, Burns J A, Bilski K. The astronomical theory of climate change on Mars. *Icarus*, 1980, 44: 552–607.

Yang J, Peltier W R, Hu Y. The initiation of modern soft and hard Snowball Earth climates in CCSM4. *Clim. Past*, 2012a, 8: 907-918.

Yang J, Peltier W R, Hu Y. The initiation of modern "soft Snowball" and "hard Snowball" climates in CCSM3. Part I: the influence of solar luminosity, CO₂ concentration and the sea-ice/snow albedo parameterization. *J. Climate* , , 2012b, 25: 2721-2736, doi:10.1175/JCLI-D-11-00189.1.

Yang J, Peltier W R, Hu Y. The initiation of modern "soft Snowball" and "hard Snowball" climates in CCSM3. Part II: climate dynamic feedbacks. *J. Climate*, 2012c, 25: 2737-2754, doi:10.1175/JCLI-D-11-00190.1.

胡永云. 太阳系外行星大气与气候。大气科学, 2013, 37: 451-466. Hu Y. Extra-solar planetary atmospheres and climates. *The Chinese Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 37: 451-466.

胡永云、丁峰, 2013: 潮汐锁相行星大气环流和气候。中国科学, 43(10): 1356-1368. Hu Y, Ding F. Atmospheric circulations and climate of tidal-locking exoplanets. *Science China*, 2013, 43(10): 1356-1368.

胡永云, 闻新宇. 冰雪地球研究进展。地球科学进展, 2005, **20**: 1226-1233. Hu Y, Wen X. On studies of Snowball Earth. *Advances in Earth Science*, 2005, 20: 1226-1233.

胡永云、田丰, 2014: 太阳系行星, 陆琰编《现代天体物理》, 北京大学出版社。Hu Y, Tian F. Planets in the solar system. In *Modern Astrophysics*, eds. T. Lu, Peking University Press, 2013.