

太阳系外行星大气与气候

胡永云

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

摘要

1995 年以来, 已有 800 多颗太阳系外行星 (简称系外行星) 被确认。系外行星大气和气候的研究正方兴未艾。这篇文章的目的就是为了简要综述系外行星大气和气候的最新研究进展。为了把系外行星大气和气候与太阳系行星大气和气候相比较, 我们将首先简要介绍太阳系行星大气的基本知识, 就像通常把太阳系行星大气与地球大气相比较一样。然后, 我们介绍系外行星观测的进展以及关于恒星的宜居带和系外行星的宜居性等基本概念。文章的重点将放在综述系外行星大气的物理、化学和动力学性质的研究进展, 还将介绍系外行星可能的气候环境和系外生命存在的可能性。我们对这些进展的介绍将包括观测、模拟和理论等内容。

关键词: 系外行星大气, 系外行星气候, 系外生命, 宜居带, 宜居行星

文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12314

Abstract

There have been more than 800 extra-solar planets (exoplanets) identified since 1995. Study in exoplanetary atmosphere and climate is one of the most frontier fields in exoplanetary sciences. The purpose of the present paper is to review the most recent progresses in exoplanetary atmospheres and climates. To compare with planetary atmospheres and climate in our own solar system, we will first briefly introduce some basic knowledge of solar planetary atmospheres and climates, just like that the Earth atmosphere and climate are always the reference for studies in solar planetary atmospheres and climates. Then, we introduce concepts of the habitable zone of stars and the habitability of exoplanets. We will mainly focus on recent observational, simulation, and theoretical results of physical, chemical, and dynamical properties of exoplanetary atmospheres. We will also introduce possible climate environments of habitable exoplanets around M-type dwarfs.

Key words: exoplanetary atmosphere, exoplanetary climate, extraterrestrial life, habitable zone, exoplanet habitability

1. 引言

尽管人们一直相信银河系或宇宙其它恒星也像太阳一样拥有行星，但在 20 世纪 90 年代之前，人类并没有太阳系外行星的确切观测证据。直到 1995 年 10 月 6 日，一颗围绕类太阳恒星的行星（被称为 51 Pegasi b）被发现（Mayor and Queloz, 1995），后来又被其它的观测所证实，人类才真正确认了太阳系外有行星存在。太阳系外行星通常被简称“系外行星”（extra-solar planet，简称 exoplanet），截至 2012 年 11 月 14 日，共有 850 颗系外行星被确认，还有 2000-3000 颗候选系外行星的信号已被初步观测到，但还需要进一步确认。

寻找系外行星并不仅仅是由于科学的好奇心所驱动，还有一个非常重要的目的是试图寻找地球之外是否有生命存在。“地球生命是否是孤独的？”这是一个古老而迷人的话题。但到目前为止，太阳系除地球之外，还没有在其它行星发现有生命存在的迹象。木星、土星、天王星和海王星是气态巨行星，不具备存在生命的条件，水星和金星表面温度太高，也不可能有生命存在。火星早期是否有生命存在，目前还没有定论，但火星现在极其寒冷的气候条件是不适合生命存在的。因此，寻找地球之外的生命只能寄希望于发现适合生命存在的太阳系外行星。现在，随着愈来愈多的系外行星被发现，我们正愈来愈接近找到这一古老问题的答案。大气层是生命赖以存在的重要环境，也是确定行星表面气候环境的关键因素之一，太阳系外生命存在的信号最有可能最先从系外行星大气层的探测中发现。因此，系外行星大气和气候的研究是系外行星科学一个重要方向。

如果说观测和发现系外行星主要是天文学界关心的问题，那么认识这些系外行星大气层和内部结构的物理化学性质以及他们是否适合生命存在则更多地是与大气科学和整个地球科学联系在一起的，因为我们对太阳系行星的理解通常以地球为参照物，而对系外行星的认识也是以太阳系行星作为参照系。在这里，我们关于地球大气的知识对认识系外行星大气在两个方面起着非常重要的作用。第一，大气成分在很大程度上决定了一颗行星的气候环境。例如，一颗行星的地面温度不仅取决于该行星与其恒星的距离和恒星的亮度，还取决于大气层中温室气体的浓度，如果大气层含有很高浓度的温室气体，其地面温度将太高，反之，地面温度将太低。第二，大气层是探测生命迹象的窗口。地球大气与相邻的两颗行星的大气层最重要的差别是，地球大气中有氧气和臭氧，而金星和火星大气主要

以二氧化碳（ CO_2 ）为主。氧气是生命存在的必要条件，如果能够在太阳系外行星的大气层中探测到氧和臭氧，该行星适合生命存在的可能性就非常大。

本篇论文的目的在于综述近年来系外行星大气的研究进展。为了对照，我们将首先简要地介绍太阳系行星大气的基本知识。然后，我们介绍目前所发现的系外行星的基本特征和分类，所观测到的行星大气的成分、大气环流及其物理化学性质，一些类地行星的气候环境。

2、太阳系行星大气

如图 1 所示，太阳系的 8 颗行星大致可以分为两大类：靠近太阳的 4 颗内围行星（水星、金星、地球、火星）是固态星球，它们的体积和质量相对较小。外围的 4 颗行星（木星、土星、天王星和海王星）是气态星球，它们的体积和质量都较内侧的固态星球大得多。如木星的质量大约是地球的 318 倍，而其体积是地球的 1300 倍。现有的模型可大致模拟出太阳系行星的形成过程和固态以及气态星球的分布（Raymond et al., 2006）。但随着系外行星的发现，这些模拟的太阳系行星形成的概念也将经历挑战。

太阳系固态星球和气态星球大气成分截然不同。在固态星球中，水星的大气层非常稀薄，基本可以忽略不计，金星和火星的主要大气成分都是 CO_2 ，而地球的主要大气成分是氮气（ N_2 ）和氧气（ O_2 ）。外围 4 个气态星球的主要大气成分都是氢气（ H_2 ）和氦气（ He ）。为什么靠近太阳的行星是固态星球，而外围的是气态星球？为什么固态星球与气态星球的大气成分截然不同？简单地讲，在太阳系形成之初，距离太阳较近的范围温度较高，易气化的物质都在高温下挥发，仅留下岩石和金属性的物质，这些密度较大的物质经碰撞并逐步汇集形成了固态行星，一些分子量较大的气态物质也储存在固态行星内部，后来这些气态物质逐步从固态星球内部通过板块运动和火山爆发等地质活动释放出来形成了固态星球的次生大气层。固态星球最初的大气层也是由 H_2 和 He 组成，但在太阳的早期，太阳内部核反应非常剧烈，太阳风非常强，强劲的太阳风很快把这些原生大气吹走。因此，上面所说的通过固态星球内部排气过程而产生的大气层被称为次生大气。在太阳系外围，温度相对较低，水和其它气体以固态存在，如冰或含冰的物质，这些含冰的物质和硅等金属形成气态星球的核。这些行星的质量快速增长到

其引力足以吸引周围分子量较小的气体（如 H_2 和 He ），从而形成巨型气态星球，因此，宇宙大爆炸形成的主要成分 H_2 和 He 构成了这些星球的大气层。固态和气态星球的范围由位于火星和木星之间的所谓的“雪线”分离开来(de Pater, 2010, Taylor, 2010.)。

虽然同为固态行星，但地球大气成分与金星和火星有显著的不同，地球大气以氮气和氧气为主，但金星和火星大气均以 CO_2 为主（ CO_2 在两颗行星大气中的含量大约都是 95%）。为什么地球大气的化学成分与金星和火星如此不同？有两个因素起着关键的作用：一个是地球有液态水，另一个是地球有生命存在。在液态水的作用下，固态星球大气中的 CO_2 可以形成弱的碳酸，并与地表岩石（如硅酸盐岩石等）发生化学反应（风化反应），最终形成碳酸盐岩沉降到海底；地球内部的碳酸盐岩在高温作用下分解出 CO_2 ，并通过地质过程（火山、大洋中脊等）使得 CO_2 重新进入大气中，这就是所谓的碳酸盐-硅酸盐负反馈循环。地球大气正是由于这一负反馈机制的存在使目前大气 CO_2 维持在 400 ppmv 的水平。图 2 是地球大气演化示意图。原始大气 H_2 和 He 在地球形成之后很短的时间内就被剧烈的太阳风吹走了。在地球形成之初，表面还比较炎热的环境下，内部排气过程产生的水汽是大气的主要成分。随着地表温度的降低，水汽凝结通过降雨到地面，汇集成海洋，与此同时，剧烈的火山活动释放大量的 CO_2 ，大气成分变成以 CO_2 为主。地球大气层中丰富的氮气最初很可能是由氨气分解而来，因为氨气很容易光解为氮和氢，当氢逃逸向太空后，留下的氮气成为地球大气层的主要成分。在降水的作用下，大气中的 CO_2 浓度因风化反应而逐渐降低， N_2 的相对含量逐渐增加。在大约 23 亿年前，由于生命的光合作用， O_2 含量经历一次迅速的升高，在大约 6-7 亿年前， O_2 经历了第二次迅速的升高，达到目前的含量。

虽然有证据表明，金星和火星在早期也曾有液态水存在，但通常认为，金星后来出现了温室逃逸，液态水被全部蒸发，并被光解，氢原子逐步逃逸。因此，金星至少在最近二、三十亿年没有液态水存在。由于没有了水循环，金星内部释放的 CO_2 便全部累积在大气中，从而形成了很高浓度的 CO_2 。火星因为温度太低，也没有液态水存在，所以，其大气成分也以 CO_2 为主。但因为火星的质量较小，其引力不足以维持浓密的大气层，其表面大气压力只是地球大气压力的 1%。综上所述，地球大气的成分之所以与金星和火星不同，是因为地球上存在液

态水和生命的存在，水循环降低了地球大气中的 CO_2 含量，生物的光合作用产生氧气。

除了行星具有大气层，太阳系的一些卫星也具有大气层，最典型的是土星的第六颗卫星（简称土卫六）。土卫六是土星最大的卫星，它的体积甚至比水星还要大（半径大约是 2500 km）。其地表大气压力为 1.467 个地球大气压，大气的主要成分是氮气，占大气总质量的 95%，其余为甲烷。为什么一个质量比火星还小的卫星能够拥有比地球还厚重的大气层，而火星只有很稀薄的大气层，这至今还没有确定的答案。土卫六大气层中丰富的氮气也很可能是由氨气分解而来。土卫六的自转速度比较慢，自转周期大约是 16 个地球日，所以，在很多方面，土卫六大气的环流特征与金星可比较（Liu et al., 2008）。土卫六大气也具有超级旋转现象，即赤道上空盛行西风气流，但在某些层次也有东风出现（Li et al., 2012）。土卫六的对流层顶高达 40 km，有利于垂直对流运动和丰富“天气现象”以及风暴的发生。伴随着风暴活动，有两种“降水”发生，一种是较缓慢和较重的有机气溶胶粒子，另一种是液态甲烷等，“卡西尼”飞船甚至观测到了闪电的发生。

3、系外行星

图 3 所示的是近 20 年来每年所发现的系外行星数目的分布。在 1995 年以前，虽然也有系外行星被发现，但当时都没得到很好的证实。自 1995 年，51 Pegasi b 被发现和确认之后，愈来愈多的系外行星被发现。目前所观测到的 841 颗系外行星是从 663 颗恒星系统观测到的，其中包括 126 个多恒星系统。初步估计表明，50% 以上的类似太阳的恒星至少拥有一颗行星。系外行星的发现得益于天文观测技术精度的不断提高。图 3 也给出了各种不同的天文观测方法所发现的系外行星数目。可以看出，视向速度和掩星方法是发现系外行星最多的两种方法。视向速度方法是根据行星与其恒星在围绕着它们共同的质心旋转时所产生的视向速度变化来间接推测行星的存在及其质量的。通过测量恒星的视向速度变化，根据恒星的质量即可推出行星的质量（实际上是最小质量，即 $M_p \sin i$ ， i 为行星轨道平面和视线的夹角）。该观测方法的特点是行星的质量必须比较大而且距离其恒星不能太远，否则行星通过引力对其恒星运动速度的扰动将比较微弱，目前的观测精度很难观测到太弱的扰动。例如，地球对太阳视向速度的扰动只有 8.94 厘米/

秒，低于目前最好设备的最高精度（约 1 米/秒）大约一个量级，因此，我们无法利用该方法探测到类似地球质量和距离其恒星如此远的系外行星。相反，51 Pegasi b 的质量大约是木星质量的 0.45 倍（地球的 150 倍），它围绕一颗类太阳恒星（51 Pegasi）公转的轨道半径约 0.05 AU（天文距离单位，1 AU = 149 598 000 公里，也就是地球与太阳之间的距离），它所产生的视向速度振幅约为 57 米/秒，因此，这样的系外行星可以被视向速度方法所探测到。掩星方法的原理是，当行星运动到恒星和观测者之间时，行星会遮挡部分恒星视面，造成观测到的恒星光度降低，呈现 U 型光度变化，通过对恒星光度变化的测量可以确定行星的存在及其体积。光度变化的大小取决于行星与恒星半径比值的平方，木星对太阳的掩食造成太阳光度的变化大约为 1%，因此，这种方法可以用来探测类似木星这样的系外行星。但如金星这样体积的系外行星，其凌日造成的太阳光度变化则非常小，因此，掩星方法很难观测到体积较小的系外行星。利用掩星法可以测量行星的半径，结合视向速度方法即可得行星的真实质量。对系外行星探测方法的详细介绍已超出了本文的范围，有兴趣的读者可以参考王伟等的综述文章（王伟等，2012）。

图 4 是目前所观测到的系外行星质量相对于其公转轨道半长轴的散点图。可以看出，目前所观测到的系外行星大部分是质量与木星相当的巨型行星，而质量与地球相当的系外行星则相当少。这类巨型行星因为距离其恒星非常近，所以，其温度非常高，通常称为热木星（hot Jupiter，太阳系木星因距离太阳比较远，其温度相当低）。如上所述，这一特征是因为现有的观测方法所产生的偏差，并不表明系外行星都是质量偏大的行星，随着观测技术精度的提高，将有更多的类地行星被发现。另外，图 4 还显示系外行星的分布相对集中在两个区域：一个集中在小于 0.1 AU，另一个集中在 1 AU，这也是由于观测方法所造成，因为相对于视向速度方法，掩星方法更容易观测到距离恒星较近的系外行星。大量的距离恒星很近的类木星系外行星的发现对我们原有的太阳系行星形成的模型是一个很大的挑战。在太阳系，木星距离太阳的距离是 5.2 AU，为什么那么多的类木星系外行星距离其恒星这么近？现有的理论解释是，行星形成后受其它因素的影响而发生轨道迁移，导致原本距离恒星较远的巨型星向其恒星靠近（Lin, 2008）。由此来看，行星系统是多样性的，并非都像太阳系行星那样分布。而太阳系行星

是否曾发生过轨道迁移？其现在的公转轨道是否是其形成时的轨道也需要进一步的验证。

虽然并没有严格的界限，在系外行星研究中，人们通常把地球质量的 10 倍作为区分固态和气态行星的界限，把质量小于地球质量 10 倍的行星看作是固态星球，而把质量大于地球 10 倍的行星看作是气态星球。需要指出的是，这一定义并没有确切的观测依据，因为到目前为止，还没有观测结果可以说明气态与固态行星之间是否存在严格的界限，或是逐渐过渡的。更具体地，天文学界把质量与地球质量相当的系外行星称为类地行星，把质量介于地球质量 2.0-10.0 的行星称为“超级地球”（Super-Earth），把质量介于地球质量 10-30 倍的系外行星称为“系外海王星”（Exo-Neptune）（海王星的质量大约是地球质量的 17 倍），并认为这类星球像海王星一样属于冰行星，而把质量大于地球质量 30 倍的系外行星称为类木行星（也就是与木星类似），这类行星是气态行星。

4、恒星的宜居带和行星的宜居性

一颗行星是否有生命的存在是由许多因素决定的，最关键的因素之一是该行星有液态水存在，因为生命的内在物质循环和光合作用都需要液态水。因此，目前被广泛接受的观点是，一颗行星是否是宜居星球主要取决于其表面温度是否适合液态水的长期存在。一颗恒星的宜居带指的是距离该恒星的某一环状区域，位于该区域的行星表面温度能够维持液态水的长期存在。假定一颗恒星的亮度是 L ，在距离该恒星为 d 的行星温度可由下面的方程式来确定，

$$L = 4\pi d^2 \sigma T^4 \quad (1)$$

这里， σ 是斯蒂芬-伯尔兹曼常数。因此，一颗行星的表面温度取决于其恒星的亮度（辐射强度）以及该行星与其恒星的距离。因为液态水可在 273 K 至 373 K 的温度范围内存在，所以，恒星的宜居带是一个带状区域。如图 5 所示，对太阳系而言，地球大致位于太阳宜居带的中心位置，而金星和火星分别位于太阳宜居带的内外两侧（金星距离太阳太近，温度太高，而火星距离太阳太远，温度太低）。对于亮度比太阳强的恒星，宜居带距离恒星较远，而对于亮度最弱的恒星，例如红矮星，其宜居带距离恒星不到 0.1 AU。

宜居带的范围受行星反照率的影响，因为反照率降低了行星吸收的恒星辐

射，所以，行星反照率有助于把宜居带的内边界向靠近恒星的一侧扩展。宜居带的范围也受行星大气温室效应的影响，大气的温室效应有助于升高地面温度，所以，温室效应可以使宜居带的外边界向外扩展。需要指出的是，宜居带的内侧边界并非由水的沸点温度（373 K）所决定，而是由温室逃逸的阈值温度所确定。目前大致估计的温室逃逸阈值温度大约是 340 K（Ingersoll, 1969）。也许有人会认为，宜居带的外边界可以无限地向外延伸，只要温室气体的含量足够高就可以。但实际情况是，任何温室气体在温度较低的情况下都会达到饱和，超过该饱和点，温室气体将凝结或凝固并沉降到行星表面。例如，CO₂ 的三相点温度和大气压是 -56.6 °C 和 5.18 个大气压，超过该压力和温度阈值，CO₂ 将以干冰的形式沉降出大气。Kasting 等（1993）使用 1 维辐射-对流模式给出的太阳宜居带内外边界分别为 0.95 和 1.15 AU。

红矮星的亮度很低，其表面辐射温度大约是 3200 – 3500 K。但红矮星是银河系中数目最多的恒星，占恒星总数的大约 75%（Rodono, 1986）。因此，在红矮星附近发现类地宜居行星的几率远高于在类太阳恒星附近发现宜居行星。红矮星的质量和直径都比类太阳恒星小将近一个量级，现有观测技术能够探测到红矮星附近的行星质量也比类太阳恒星附近的行星质量小一个量级，因此，在红矮星附近更容易探测到类地系外行星。另外，红矮星的宜居带距离恒星较近，比太阳宜居带与太阳的距离小一个量级，约 0.07-0.1 AU。位于这个区域的同样质量的行星对红矮星视向速度的影响是对类太阳恒星影响的 3 倍左右。总的来说，红矮星附近的宜居星对其恒星视向速度的影响比类太阳恒星的宜居行星的视向速度影响大 30 倍，探测难度大大降低。对于掩星观测来说，测量难度也降低了大约 10 倍。因此，在红矮星附近发现宜居行星的几率比在类太阳恒星系发现宜居行星的几率要高得多。又因为红矮星的宜居带距离红矮星非常近，所以，宜居星球与其恒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，行星的公转与其自转周期相同，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面的道理是一样的，因为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。其结果是，行星的朝阳面一直被恒星照射而温度比较高，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极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),也就是出现大气坍塌现象。如果确实是这样的话,即使位于红矮星宜居带的行星仍有可能是不适于生命存在的。

图6给出的是目前被认为最有可能适宜生命存在的6颗宜居系外行星与地球的相似性对比,自左向右,与地球的相似性逐步降低。这些行星被发现的日期也在图中给出。其中,Gl 581d是最早被认为适合生命存在的系外行星之一(Udry et al., 2007),另一颗是Gl 581c。这两颗行星都围绕红矮星Gliese 581运行,分别位于Gliese 581宜居带的外侧和内侧边沿,它们的最小预估质量大约是地球的5和8倍,所以被认为是宜居行星。但其实际质量仍有可能超出地球质量的10倍以上,所以,也有可能是类似海王星那样的冰行星,而非类地行星。Gl 581g是2010年9月发现的另外一颗围绕Gliese 581的系外行星(Vogt et al., 2011),位于Gl 581c和Gl 581d之间,正好位于Gliese 581的宜居带中间,而且它的质量只有地球的3.5倍,所以,被认为是比Gl 581c和Gl 581d更适合生命存在的星球。可是,这颗行星是否真的存在还没有得到完全确认(Gregory, 2011)。Kepler-22b是迄今为止发现真正位于一颗类太阳恒星的宜居带中的行星,但其半径是地球的2.4倍,其质量还不清楚。如果其平均密度与地球相同,则其质量将是地球质量的14倍,超出了固态星球的质量界限。因此,Kepler-22b很可能是一颗类似于海王星的冰行星,而非类地行星(http://exoplanet.eu/catalog/kepler-22_b/ [2012-11-10])。HD 85512b的质量大约是地球的3-4倍,距离其恒星0.26 AU,辐射平衡温度大约是300 K (Pepe et al., 2011)。Selsis et al. (2007)指出,如果一颗行星的辐射平衡温度超过270 K,该行星将出现温室逃逸,因为其对流层顶的温度(大约等于其辐射平衡温度)将允许大量的水汽进入平流层,水汽将被紫外线光解而出现H逃逸。因此,除非HD 85512b有很厚的云层反射其恒星辐射,否则,将出现温室逃逸现象。Gliese 163c是最近发现的(http://exoplanet.eu/catalog/gl_163c/ [2012-11-10]),是一颗围绕红矮星Gliese 163运行的系外行星。它的最小质量大约是地球的7倍,属于超级地球范畴,而其实质量有可能超出超级地球的范畴。Gliese 667Cc(简称GJ 667Cc)的情况与其它几个星球不同,其恒星是一个三恒星系统中的一颗(Gliese 667C),也就是说,

GJ 667Cc 有三个“太阳”，另外两颗恒星（Gliese 667A 和 Gliese 667B）不仅对 GJ 667Cc 的运行轨道产生影响，而且也会有辐射能量的影响，但 GJ 667Cc 主要受 Gliese 667C 的影响（Bonfils et al., 2011）。GJ 667Cc 的最小质量大约是地球的 4 倍，而且正好位于 Gliese 667C 的宜居带中间，所以，是最有希望的宜居星球。但一个共同的问题是，上面这些系外行星的质量都比地球质量大得多，它们与地球是否具有类似性，其大气成分如何，现在还不太清楚，这些都将影响到它们的宜居性。

5、系外行星大气

由于距离的遥远，现有的天文观测技术能够提供给我们的关于系外行星大气的化学成分、热力结构和大气环流特征还非常有限（Seager and Deming, 2010）。但根据第 2 节所简述的太阳系行星大气的知识，可以推测系外行星大气化学成分大致有以下几种类型。

质量远小于地球质量的系外行星是固态星球，但很可能没有大气层。这是因为质量较小的行星的引力也较小，其大气层的气体分子的热力运动速度很容易达到行星的逃逸速度，导致气体分子逃逸到太空。而且，太阳风也很容易侵蚀大气层，并把气体分子吹向太空。如水星的质量大约是地球质量的 5.5%，水星的大气压力大约是 10^{-13} 个大气压，基本没有大气层；火星的质量大约是地球质量的 10%，其表面大气压不到地球的百分之一。但如果质量较小的系外行星距离恒星较远，大气层温度较低，气体分子的热力速度较慢，不易发生气体分子逃逸，这些小行星仍有可能拥有大气层，如土星的第六颗卫星（通常简称土卫六）和冥王星的质量均比地球质量小得多，但仍有大气层存在，土卫六的大气压甚至比地球大气压还稍高一些，主要以氮气为主。

质量远大于地球质量的系外行星，尤其是质量大于地球质量 30 倍以上的类木行星，其大气主要成分应该与太阳系木星和土星的大气成分类似， H_2 和 He 的含量占大气总质量的 99% 以上（ H_2 和 He 所占的比例大约是 89% 和 10%），这两种成分是宇宙大爆炸后留下的原始星云的主要成分，也是宇宙中丰度最高的物质（胡永云和田丰，2012）。质量介于地球质量 10-30 倍的系外行星，其大气成分也应该是以 H_2 和 He 为主，类似于太阳系的天王星和海王星。但在天王星和海

王星大气层中， H_2 所占的比例较木星和土星的要低一些，大约是 80%，而 He 所占的比例则相对高一些，大约是 18%。冰质行星大气中甲烷和氨等成分的含量较巨型气态星球的要高（胡永云和田丰，2012）。但即使是气态系外行星的大气成分，也可能具有多样性，如 WASP-43b 是一颗热木星类型的气态行星，它的质量是木星质量的 1.78 倍，但其半径与木星的半径接近，说明其密度是木星 1.78 倍（Hellier et al., 2011）。与 WASP-43b 相反，WASP-17b 的半径大约是木星半径的 2.0 倍，但其质量却只有木星的一半，也就是说其平均密度不到木星的十分之一（Anderson et al., 2010）。这两颗系外热木星与太阳系木星密度之间的差异，一方面有可能反映了它们内部成分的差异，另一方面也反映了它们大气成分的差异。

固态系外行星的大气成分是由很多因素决定的。首先，一个固态星球的大气成分与其固态成分密切相关，因为固态行星的大气成分主要来源于星球内部的排气过程。如第二节所述，太阳系固态行星的大气层的主要成分基本都是这些行星内部排气产生的次生大气。其次，固态行星的大气成分还与其表面温度有关。有理论认为，如果固态系外行星的表面温度高于 1500 K，那么行星所包含的一些较轻的化学成分如 H、C、N 和 S 等都有可能逃逸掉，因此，这些较热的系外行星的大气成分则很可能主要是气态的硅酸盐等金属成分以及氧化硅分解生成的氧分子和硅原子（Léger et al., 2009）。一个典型的例子是系外行星 CoRoT-7b（Léger et al., 2009），该行星的质量大约是地球的 2-8 倍，距离其母星（一颗类太阳的恒星）非常近，大约 0.017AU，围绕其恒星的公转周期不足 1 个地球天（0.85 地球天），其表面温度高达 1300-1800 K。理论模拟表明，CoRoT-7b 的大气成分很可能是 Na、 O_2 、O 和 SiO（Schaefer and Fegley, 2009）。但到目前为止，还没有这方面的观测证据。如果固态系外行星的表面温度比较低，则这些行星的大气成分有可能类似于金星和火星的大气成分。

现有的理论认为，固态星球的质量愈大，其含水量也愈多，所以，超级地球的整个表面都很可能被深厚的海洋所覆盖（Lissauer, 1999），有学者甚至认为一些超级地球的水含量可以达到整个行星质量的 50%（Rogers and Seager, 2010）。图 7 所示的是两个与地球化学组成类似，但质量不同的行星与地球对比示意图（Lissauer, 1999），中间的星球是地球。假定这些星球有同样的化学组成成分，

那么体积较地球小的星球拥有较小的密度,因为星球内部承受的压力也较地球内部的压力小。又因为其重力较地球的重力弱,所以,其山峰比地球的山峰要高,例如,金星的最高山峰高达 11 km,而火星最高山峰高达 22 km (胡永云和田丰, 2012)。加上这样的星球含水量较少,所以,其表面陆地与海洋的面积之比要比地球大得多。相反,星球的体积越大,密度越高,在重力作用下,山峰越低,加上其含水量较多,整个星球表面都有可能被深厚的海洋所覆盖,被称为水球或海洋世界。例如, GJ 1214b 的质量大约是地球的 6.5 倍,半径是地球的 2.7 倍,它的平均密度大约是 1870 kgm^{-3} , 比地球的平均密度小得多(地球的平均密度是 5515 kgm^{-3}) (Charbonneau et al., 2009)。因此, GJ 1214b 很可能拥有一层深厚的海洋,而不可能是像地球那样完全由岩石成分组成。它的核心很可能与地球类似,由岩石组成,而岩石物质的外层是由冰相物质(水在巨大压下形成的具有超级流体性质的水冰,状态形式是固体,但又具有流体的力学特性),所以,其平均密度较小。

对于类似 GJ 1214b 这样的超级地球来讲,如果其温度在水的沸点以上和 1000 K 以下,其大气的主要成分很可能是水汽 (steam atmosphere)。例如, GJ 1214b 的恒星是一颗红矮星,两者之间的距离只有 0.014 AU, GJ 1214b 的公转周期只有 1.58 个地球天,它的辐射平衡温度大约是 400-500 K (Charbonneau et al., 2009)。在这样的温度下,将有大量的液态水蒸发而进入到大气层中,所以,其大气主要由水汽构成的很厚的大气包层。根据现有的观测结果, GJ 1214b 很可能有较厚的云层,所以,它的大气层更可能是主要是由水汽组成的 (Bean et al., 2010)。另一方面,因为超级地球的质量较大,其引力足以吸附 H_2 等较轻的气体分子,因此,超级地球的大气层包含有 H_2 。氢气也可以来源于固态行星的内部排气,因为 H_2 可以通过 H_2O 或 CH_4 光解产生,而水汽和甲烷在行星形成时有可能包含在固态行星内部。但排气不可能产生 He, 因为固态行星在形成时, He 不可能存在于固态岩石中。

目前,对系外行星大气的精确观测仍然是相当困难的,主要是因为系外行星距离我们太遥远。目前所观测到的距离我们最近的系外行星是 Alpha Centauri Bb (Dumusque, et al., 2012), 它距离太阳系也在 15 光年之外。尽管如此,现在还是得到了一些系外行星大气成分的初步结果。例如,现有的观测很好地证实了热

木星 HD 189733b 大气中含有水汽和甲烷。HD 189733b 的质量和半径均与太阳系的木星类似，但它距离其恒星（HD 189733）非常近，大约是 0.03 AU，所以，HD 189733b 是一颗潮汐锁相的热木星，其向阳面的表面温度超过 1000 K (Bouchy et al., 2005)（太阳系木星在 1 个大气压处的温度大约是 165 K）。图 8 是使用哈勃天文望远镜观测的 HD 189733b 大气成分与辐射传输模式模拟结果的对比 (Swain et al., 2008)。模拟的水汽在 1.9 μm 和 1.5 μm 附近的吸收带（蓝色谱线）与观测结果十分接近，但在 2.2 μm 附近，模拟的单纯水汽吸收带与观测结果并不一致，当在模式中增加一定浓度的甲烷之后（桔黄色谱线），2.2 μm 附近的吸收谱与观测的结果非常接近。但该观测和模拟结果还不能很好地区分氨和一氧化碳的含量。

需要指出的是，目前对于行星大气成分的观测还仅限于热木星一类的巨型气态星球，还很难对超级地球等体积较小或温度较低的行星大气进行观测。因为目前对系外行星大气的观测方法是掩星法 (Ehrenreich et al., 2006)，也就是当行星运行到于地球和其恒星在一条直线上并且遮挡恒星时（“凌日”），使用地基或太空望远镜观测恒星辐射的透过谱（或者是行星大气的吸收谱）。这需要行星的大气层足够浓密并且有较大标高 ($H=kT/Mg$ ，这里 H 是大气层的标高， k 、 T 、 M 和 g 分别是波尔兹曼常数、大气温度、平均分子质量和重力加速度)，浓密的大气意味着大气层对恒星辐射有较大的光学厚度，而较大的标高意味着大气分子分布在较大的垂直尺度上，这样才能够较强的吸收/透过谱信号。热木星的大气成分以 H_2 和 He 为主，分子量较小，但温度较高（超过 1000 K），因此其大气标高超过 100 km，满足现有观测精度的要求。相对而言，太阳系木星的标高大约是 27 km（因为大气温度较低），而地球大气的标高大约是 8 km。现有的观测技术还不能使用“凌日”法对类地行星的大气成分进行观测。

对太阳系外生命的探索是系外行星科学的重要目标之一。鉴于直接探索系外行星表面是否存在生命是极为困难的，太阳系外生命迹象的信号需要首先从探测系外行星大气中包含有生命迹象的气体成分开始。 O_2 、 O_3 、 N_2O 和 CH_4 通常被认为是表征生命存在的气体，因为根据地球生命的知识，这些气体是与生命的存在直接联系在一起。 O_2 是生命存在的必要条件，也是光合作用的产物，但单纯的 O_2 并不意味着生命的存在，因为如果一颗行星发生温室逃逸，在水汽光解后，

H 逃逸向太空，而 O₂ 则累积在大气中，所以，在发生温室逃逸的行星大气层中虽然含有丰富的 O₂，但不可能有生命存在。O₃ 在 9.6 μm 波段有一个强的吸收带，因此，O₃ 比较容易被观测到。但 O₃ 和 O₂ 一起也不能被作为生命存在的证据，因为只要有 O₂ 存在，就有 O₃ 存在。总之，需要与其它气体成分如 N₂O 等综合考虑来确定生命的存在。

6、系外行星气候

一颗行星的气候环境是由多方面因素确定的，包括恒星的辐射强度、行星与恒星之间的距离、行星的内部组成和大气化学成分、恒星-行星系统的历史演化进程等等。全面论述系外行星多样性的气候特征已超出了本节范围，我们在这里的讨论仅集中在宜居带内固态系外行星的气候特征，在诸多因素中，我们尤其关注大气成分对行星气候的影响，我们也将特别强调红矮星宜居带内固态行星的气候环境以及这些行星的气候环境是否适于生命存在。

最早被认为适于生命存在的系外行星是 Gliese 581c 和 Gliese 581d（简称 Gl 581c 和 Gl 581d）（Udry et al., 2007）。Gl 581c 和 Gl 581d 的恒星是一颗红矮星，它们与其恒星之间的距离分别是 0.073 和 0.21 AU，其质量都在超级地球的范畴。Udry 等（2007）通过简单的辐射平衡计算认为这两颗系外行星分别位于红矮星 Gliese 581 的宜居带的内侧和外侧边沿，因此，他们认为这两颗系外行星为宜居行星。当时，这一发现在学术界和媒体曾引起了巨大的反应。Selsis 等（2007）根据太阳系固态行星（尤其是金星和火星的气候特征和历史演化）针对这两颗系外行星的宜居性进行了全面的评估，他们认为 Gl 581c 是一颗炎热的星球，很可能类似太阳系的金星，而 Gl 581d 则有可能是一颗宜居星球。von Bloh 等（2007）从另外的角度研究了这两颗行星的宜居性，他们关注的是行星大气中 CO₂ 循环以及 CO₂ 是否足以维持行星表面生命的光合作用。他们的模拟结果也表明，Gl 581c 不适宜生命的存在，而 Gl 581d 则有可能适宜于某种形式的生命存在。

但以上两项研究都没有使用真实的辐射-对流模式计算这两颗超级地球的可能表面温度。Hu 和 Ding（2011）使用辐射-对流模式分别计算了这两颗行星的可能表面温度，他们假设这两颗系外行星于太阳系固态星球有着类似的大气成分（或类似的内部排气过程），也就是 CO₂ 是大气中的温室气体。图 9 所示的是他

们的模拟结果。对于 Gl 581c, 即使是干大气中包含 50 ppmv 的 CO_2 , 其全球平均地表温度也高达 310.6 K。如果加入与地球大气相同的水汽含量, 其表面温度升至 332 K, 接近温室逃逸的极限 340 K, 但地表相对湿度只有 3.4%, 不足以维持地表液态水的存在。如果设置与地球大气相同的相对湿度, 则水汽的正反馈很快使模式崩溃, 即使很厚的云层也不足以避免温室逃逸的出现。这说明 Gl 581c 并不适合生命存在, 相反, 它很像太阳系金星一样已经历了温室逃逸。如果 Gl 581c 的含水量足够多, 则其大气将主要由水蒸汽组成, 水汽的温室效将使得该星球温度极高。如果它的含水量不足以抵消水光解后产生的氢逃逸量, 其很可能类似于金星, 大气主要成分是以 CO_2 为主, 并包含大量的硫酸云和二氧化硫气溶胶。

图 9 中的下图是 Gl 581d 的模拟结果。当 CO_2 含量是 5 个大气压时, 地表温度大约是 258 K, 当 CO_2 含量达到 10 个大气压时, 地表温度升高到 292 K。二者的差分表明大约需要 7 个大气压的 CO_2 才能够使 Gl 581d 的表面温度升高到 273 K。其他学者使用不同的模式也得到了类似的结果 (Wordsworth et al., 2010, von Paris et al., 2010)。一个重要的问题是, Gl 581d 如何保持如此高浓度的 CO_2 ? 我们可以想象, 既然金星大气中有将近 90 个大气压的 CO_2 (胡永云和田丰, 2012), 那么 Gl 581d 大气拥有 7 个大气压的 CO_2 并非没有可能性。但金星大气高浓度的 CO_2 是因为液态水存在, 大气中的 CO_2 只有源, 而没有汇。因此, Gl 581d 在液态水存在的情况下并拥有高浓度 CO_2 的前提条件是, CO_2 的源大于其汇, 或者二者之间的平衡足以让大气中的 CO_2 维持 7 个大气压之上。一个可能的情形是, Gl 581d 完全被海洋所覆盖, 或者说只有很少部分的陆地 (或岛屿), 而大部分是海洋, 只有这样, CO_2 与陆地表面硅酸盐岩石之间的风化反应才能被切断或很微弱, 而行星内部排放的 CO_2 得以在大气中累积。另一种可能是, Gl 581d 表面有大面积的陆地存在, 但其气候态在冰雪地球和温暖气候之间振荡 (Selsis et al., 2007, Hu and Ding, 2011)。这是因为一旦有大面积的陆地存在, 风化反应将降低大气中的 CO_2 含量, 而一旦 CO_2 含量低于某一阈值, 将出现类似地球在 6-7 亿年前新元古代时期的冰雪地球 (胡永云和闻新宇, 2005); 而当冰雪星球形成之后, CO_2 在大气中累积, 经过百万年甚至千万年时间尺度的积累, 将达到融化冰雪星球的阈值, 导致星球进入温暖气候。

在前面我们已经提到，位于宜居带内的系外行星，其气候特征在很大程度上是由其大气成分决定的，地球历史气候的演化也很好地说明了这一点。在第 5 节，我们介绍了系外行星大气成分的多样性，如此多样性的的大气成分必将对系外行星气候产生重要的影响。在地球大气中， N_2 虽然含量很高，但并不是温室气体， N_2 对地球气候的影响可以忽略不计（但氮是生命的重要组成成分）。但对系外行星而言， N_2 则有可能是重要的温室气体（Pierrehumbert, 2011）。 N_2 由于分子碰撞在波长大于 $40\ \mu\text{m}$ 的波段有连续性的吸收带，在低气压的情况下，该吸收带非常微弱。但当大气压力高过 5 个大气压时，该吸收带所产生的温室效应就会变得非常明显（Courtin, 1988）。考虑到超级地球的引力比地球大，其大气层也有可能超出 5 个大气压，因此， N_2 的温室效应也有可能非常重要。在第 5 节，我们曾提到过超级地球的大气层有可能包含 H_2 。在大气压力较大的情况下，分子碰撞可以使 H_2 在红外波段也具有显著的连续吸收带（Borysow, 2002），所以， H_2 在压力较大时也是温室气体。例如， H_2 对红外波段的吸收决定了木星或土星大气的热力结构。因此，对于超级地球来讲， H_2 的温室效应也将对气候有着重要的影响（Pierrehumbert and Gaidos, 2011）。 SiO_2 的结构与 CO_2 类似，所以，气态的 SiO_2 也是一种温室气体。一些温度极高的固态星球如 CoRot-7b 的大气层有可能拥有 SiO_2 成分，因为其表面的硅酸盐岩石在高温下挥发成为气态。以上所述的温室气体都是地球大气中不存在的。

大气环流对系外行星气候也有着重要的影响，就像地球大气环流对地球气候系统的能量输送和再分布起着关键的作用是一样的。目前对系外行星大气环流的研究主要集中在潮汐锁相行星的大气运动。如前面所述，这一方面是因为目前所发现的系外行星有相当一部分都距离其恒星比较近，位于潮汐锁相的范围内，所以，对其大气环流的研究对更好地观测这些系外行星有很重要的意义。另一方面，潮汐锁相行星接收其恒星的辐射极端不均匀，一面永久性地接受恒星辐射，而另一面永远得不到恒星辐射，背阳的一面是否会因为极低的温度产生大气坍塌现象？在如此极端的加热不均匀的情况下，行星大气的环流特征是什么？这些问题都是太阳系行星大气所没有的，因此是很重要的科学问题。另外，因为在红矮星附近发现宜居行星的几率要高于其它恒星，而位于红矮星宜居带内的行星基本是潮汐锁相的。

虽然潮汐锁相行星的背阳面永远无法得到恒星辐射，但大气运动将输送热量从向阳面到背阳面，从而加热背阳面的地面和大气。另一方面，背阳面地面和大气向外辐射红外辐射。因此，背阳面的温度取决于来自向阳面大气的热量输送和背阳面向外的红外辐射冷却之间的平衡。为了研究大气热量输送是否足以使潮汐锁相行星的背阳面不出现大气坍塌现象，Joshi 等使用一个简单的三维大气环流模式（辐射部分采用的是灰体大气）计算了在不同大气压力的情况下潮汐锁相行星背阳面的温度。他们的模拟结果表明，只要地表大气压大于 100 hPa，大气的经向热量输送将足以使背阳面的温度高于 CO_2 的凝结温度，也就是说，只要潮汐锁相行星的大气层不太稀薄，就能够输送足够热量到背阳面，使大气成分在背阳面的温室气体不至于凝结或凝固而沉降到地面。因此，位于红矮星宜居带内的行星仍有可能是宜居星球。

因为还没有系外固态行星大气的真实成份的观测资料，对这些行星的气候模拟只能根据太阳系固态行星大气成分的现有知识来做出假设，通常假定其大气成分与地球大气类似，来检验在不同温室气体（主要是 CO_2 ）含量的情况下的地表温度。Pierrehumbert（2011）使用一个修改的地球气候模式与平板海洋相耦合，模拟了 Gl 581g 的表面气候特征。其模拟结果表明，在 CO_2 浓度足够高的情况下，向阳面可以维持一个以恒星辐射直射点为中心的开放海洋区域（也就是该区域的温度高于 273 K），而极区和背阳面则是冰封，但不会出现大气坍塌现象。

平板海洋模式并没有考虑海洋的热量输送。根据海洋热量输送对地球气候的重要性，我们知道海洋在向阳和背阳面之间的热量输送也同等重要，尤其是对如超级地球那样可能完全被海洋覆盖的水世界。另外，冰雪-反照率反馈对于红矮星宜居带内的宜居行星也有特殊的意义。这一方面是因为在红矮星的宜居带内，即使宜居行星的背阳面温度没有低到可以产生大气坍塌的程度，但足以低到水的冰点之下，所以，其背阳面以及向阳面的部分区域很可能是冰封的，那么冰雪-反照率反馈仍有可能使宜居带内的行星进入冰雪地球的状态而不适宜生命存在。另一方面，与类太阳恒星将近 6000 K 的辐射温度相比，红矮星的辐射温度较低，一般在 3500 K 左右，因此，红矮星的辐射峰值波长是在 $0.9\ \mu\text{m}$ 附近（相对于太阳的辐射峰值波长 $0.55\ \mu\text{m}$ ），更靠近近红外波段（Hu and Ding, 2011）。而冰和雪对近红外的反照率远小于对可见光波段的反照率，所以，冰雪-反照率正反馈

机制对红矮星辐射应该较弱。同样是因为红矮星的主要辐射能量靠近近红外波段，当红矮星辐射在大气中传输时，将有相当一部分被大气中的水汽所吸收（水汽在近红外波段（1.0-3.5 μm ）有很强的吸收带），相应地，地表接收的红矮星辐射将减少。正是由于这些原因，我们使用包含真实大气辐射传输和动力海冰模块的海-气耦合气候模式（CCSM3）对 Gl 581g 的气候进行了模拟，假定 Gl 581g 是一个海洋世界。图 10 所示的是当大气中 CO_2 浓度在 355 ppmv 的条件下，Gl 581g 表面的海冰分布、海表面温度、海冰和表层海水的运动速度。在恒星辐射直射点周围有开放的海洋（蓝色），开放海域并非是一个圆形的区域，而是类似“龙虾”型的（图 10a）。强赤道洋流把温暖的海水吹向直射点的东侧，把背阳面的海冰输送到直射点附近。在图 10b 中，最高温度中心并非在恒星直射点，而是位于赤道的两侧，温度最高值大约是 5°C ，温度高于 0°C 的范围大约在南北纬 30° 和经度 150° 和 250° 之间，背阳面温度相当均匀，最低温度位于两个半球的副极区，最低温度值高于 -60°C ，远高于 CO_2 的凝结（凝固）温度阈值。这些说明冰雪-反照率正反馈机制不足以使潮汐锁相行星进入冰雪地球的气候状态，而且海洋对潮汐锁相行星的热量输送是非常重要的。洋流的波动特征很类似 Gill (1980) 所给出热带波动形状，在直射点南北两侧是两个气旋性 Rossby 波动，沿赤道的长尾巴是 Kelvin 波动。赤道附近的洋流较中高纬度洋流速度大得多，形成一支赤道急流。虽然 Gl 581g 的自转速度（自转周期大约是 37 个地球日）较地球自转慢得多，但洋流速度远大于地球的洋流速度，这是因为没有陆地阻挡洋流的结果，很像地球上的绕南极洋流。

红矮星附近的热木星也是潮汐锁相行星，其大气环流特征也是目前的研究热点。Showman 等 (2010, 2011) 使用浅水方程从理论上研究了热木星的大气环流特征和波动。他们发现热木星赤道上空大气盛行超级旋转气流，也就是西风气流，而赤道附近的准定常行星波动呈 Gill 型特征，也就是两个对称气旋分别位于赤道的两侧，赤道附近有一 Kelvin 波动。潮汐锁相行星的大气环流之所以具有超级旋转气流和 Gill 型准定常热带波动与其固定的热源有关，向阳一面始终被加热，这一定常热源类似于地球热带西太平洋的暖池。潮汐锁相行星的大气环流特征也被其它三维大气环流模式和观测所证实 (Heng and Vogt, 2011, Merlis and Schneider, 2010, Knutson et al., 2007)。

即使位于宜居带内的行星的气候条件类似于地球的气候条件，但并不能保证有生命存在，因为这些行星的宜居性还受许多其它因素的影响。红矮星的辐射温度虽然比类太阳恒星的辐射温度低得多，但其紫外辐射和更高能的射线都比类太阳恒星的在这些波段的辐射强得多。实际上，类太阳恒星在早期的活跃期虽然总体辐射强度较弱，但其紫外和高能辐射比现在强。红矮星的活跃期可以持续数 10 亿年（West et al., 2008）。这些高能射线对有机体的杀伤力很大，不适宜生命的存在，这些高能射线也有可能加速大气逃逸（Lammer et al., 2007）。另外，如前所述，红矮星周围的宜居行星的自转速度很慢，其磁场很可能很弱。这是因为行星的磁场强度与其自转运动的速度有关，如果自转较慢，其磁场通常较弱。例如，金星几乎没有磁场，一般认为这与其极慢的自转速度有关（其内部是否具有类似地球那样的液态铁核也是一个问题）。如果磁场太弱，类似太阳风那样的恒星高能粒子流很容易侵蚀大气层，并导致大气逃逸。这些因素都将对系外行星的宜居性产生重要影响。

7、总结

随着愈来愈多的系外行星的发现，系外行星大气和气候的研究正在成为系外行星科学的一个热点研究领域。一方面，我们目前对系外行星大气的理解在很大程度上都是基于太阳系行星大气的知识。另一方面，对系外行星大气和气候的研究也大大地加深和扩展了我们对太阳系行星大气和气候的认识。从目前有限的观测结果来看，系外气态行星的大气成分与太阳系气态巨行星的大气成分没有本质上的差别，其主要成分是 H_2 和 He ，但痕量气体成分的比例有可能有很大的差别，尤其是热木星的痕量气体成分与太阳系木星和土星的成分应该有显著的差异。对于固态系外行星的大气成分，目前还没有可靠的观测结果。因此，对系外固态星球大气成分的认识主要是根据太阳系固态星球大气成分、演化的知识，还有基于固态系外行星的温度和可能固态组成成分的推测。在短时期内，人们关于气态系外行星大气成分的观测将会进一步加深，尤其是在更高分辨率的 James Webb 太空望远镜发射之后（计划于 2014 年发射），但对体积较小、大气标高较小的固态系外行星大气成分的观测还比较困难。

目前对于系外行星其后的研究还处于刚开始的阶段，主要是因为我们还没有

系外行星大气成分和固体成分的观测结果。现阶段的研究主要集中在红矮星宜居带内、潮汐锁相超级地球的可能气候环境，因为目前所发现的最有可能适合生命存在的超级地球大多位于红矮星周围（如图 6 所示）。这些研究工作主要是基于假定超级地球的大气成分与地球大气成分类似的模拟研究，在这样的假设条件下，模拟结果表明，这些超级地球的气候环境是适合生命存在的。

需要指出的是，宇宙的生命很可能是多样化的，而我们这里所指的生命仅仅是与地球上生命相类似的，主要以碳和水为主要组成成分的有机体，所以，这里所说的适合生命存在的气候环境是指与地球气候环境类似的。另外，即使是类地固态行星，生命也只能在行星形成后一定的时期内才能够出现。例如，地球最初生命的出现是在其形成将近 10 亿年之后（大约 35 亿年前），在大约 40 亿年后才出现动物（动物出现在寒武纪之后，大约 5.4 亿年前），而人类的出现是在 300 万年前。因此，即使是类地球系外行星，生命也可能只存在于行星历史中的某一时期。

项目资助：国家自然科学基金委杰出青年基金项目（41025018）

作者简介：胡永云，男，1965 年 5 月出生，博士，教授，研究领域：气候动力学和气候模拟，古气候，行星大气。yyhu@pku.edu.cn

参考文献:

1. Anderson D R, Hellier C, Gillon M, Triaud A H M J, Smalle B., et al. 2010. Wasp-17b: An ultra-low density planet in a probable retrograde orbit [J]. *ApJ*, 709: 159-167, doi: 10.1088/0004-637X/709/1/159.
2. Bean J L, Kempton E M-R, Homeier D. 2010. A ground-based transmission spectrum of the super-Earth exoplanet GJ 1214b [J]. *Nature*, 468: 669–672. doi: 10.1038/nature09596.
3. Bonfils X, Delfosse X, Udry S, Forveille T, Mayor M, et al. 2011. The HARPS search for southern extra-solar planets? XXXI. The M-dwarf sample [J]. *arXiv:1111.5019*.
4. Borysow A. 2002. Collision induced absorption coefficients of H₂ pairs at temperatures from 60K to 1000K [J]. *A&A*, 390: 779-782.
5. Bouchy F, Udry S, Mayor M, Moutou C, Pont F, et al. 2005. ELODIE metallicity-biased search for transiting Hot Jupiters [J]. *A&A*, 444: L15-L19, doi: 10.1051/0004-6361:200500201.
6. Charbonneau D, Berta Z K, Irwin J, Burke C J, et al. 2009. A super-Earth transiting a nearby low-mass star [J]. *Nature*, 462: 891–894. doi: 10.1038/nature08679.
7. Courtin R. 1988. Pressure-induced absorption coefficients for radiative transfer calculations in Titan's atmosphere [J]. *Icarus*, 75: 245–254, doi: 10.1016/0019-1035(88)90004-8.
8. de Pater I, Lissauer J J. 2010. *Planetary Sciences* [M]. New York: Cambridge University Press.
9. Dumusque X, Pepe F, Lovis C, Ségransan D, Sahlmann J, et al. 2012. An Earth mass planet orbiting Alpha Centauri B [J]. *Nature*, 490, doi:[10.1038/nature11572](https://doi.org/10.1038/nature11572).
10. Ehrenreich D, Tinetti G, Lecavelier des Etangs A, Vidal-Madjar A, et al. 2006. The transmission spectrum of Earth-size transiting planets [J]. *A&A*, 448: 379–393, doi: 10.1051/0004-6361:20053861.
11. Gill A E, 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 106: 447–462.

12. Gregory P. 2011. Bayesian Re-analysis of the Gliese 581 Exoplanet System [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 415: 2523–2545, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.
13. Hellier C, Anderson D R, Cameron A C, Gillon M, Jehin E, et al. 2011. WASP-43b: the closest-orbiting hot Jupiter [J]. *A&A*, 535: L7, doi: 10.1051/0004-6361/201117081.
14. Heng K, Vogt S S. 2011. Gliese 581g as a scaled-up version of Earth: atmospheric circulation simulations [J]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 415: 2145–2157.
15. Hu Y, Ding F. 2011. Radiative constraints on the habitability of exoplanets Gliese 581c and Gliese 581d [J]. *A&A*, 526: A135, doi: 10.1051/0004-6361/201014880.
16. 胡永云, 闻新宇. 2005. 冰雪地球的研究综述. *地球科学进展*, 20, 1226-1233.
Hu Y, Wen X. 2005. On studies of Snowball Earth. *Adv. Earth Sci.*, 20: 1226-1233.
17. Ingersoll A P. 1969. The runaway greenhouse: A history of water on Venus [J]. *J. Atmos. Sci.*, 26: 1191-1198.
18. 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 implications for habitability [J]. *Icarus*, 129, 450–465.
19. Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. 1993. Habitable Zones around Main Sequence Stars [J]. *Icarus* 101: 108-128.
20. Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E, Fortney J J. 2007. A map of the day–night contrast of the extrasolar planet HD 189733b [J]. *Nature*, 447: 183-186, doi: 10.1038/nature05782.
21. Lammer H, Lichtenegger H I M, Kulikov Y N, Grießmeier J-M, Terada N, et al. 2007. Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. II. CME-induced ion pick up of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones [J]. *Astrobiology*, 7: 185–207.
22. L éger A, Rouan D, Schneider J, Barge P, Fridlund M, et al. 2009. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission VIII. CoRoT-7b: the first Super-Earth with measured radius [J]. *A&A*, 506: 287–302.

23. Li J, Liu D, Coustenis A, Liu X. 2012. Possible physical cause of the zonal wind collapse on Titan [J]. *Planet. Space Sci.*, 63-64: 150-157.
24. Lissauer J, 1999. How common are habitable planets? [J] *Nature*, 402, C11–C14.
25. Lin, D N C, 2008. The Genesis of Planets [J]. *Scientific American*, 298 (5): 50–59, doi:10.1038/scientificamerican0508-50.
26. Liu, X, Li, J Coustenis A. 2008. A transposable planetary general circulation model (PGCM) and its preliminary application to Titan [J]. *Planet. Space Sci.*, 56: 1618-1629, doi:10.1016/j.pss.
27. Mayor M, Queloz D. 1995. A Jupiter-mass companion to a solar-type star [J]. *Nature*, 378: 355–359, doi: 10.1038/378355a0.
28. Merlis T M, Schneider T. 2010. Atmospheric dynamics of Earth-like tidally locked aquaplanets [J]. *J. Adv. Modeling Earth Systems*, 2: Art. #13, 1-17, doi: 10.3894/JAMES.2010.2.13.
29. Pepe F, Lovis C, Ségransan D, Benz W, Bouchy F. 2011. The HARPS search for Earth-like planets in the habitable zone. I. Very low-mass planets around HD 20794, HD 85512, and HD 192310 [J]. *A&A*, 534: A58, doi: 10.1051/0004-6361/201117055.
30. Pierrehumbert R T. 2011. A palette of climates for Gliese 581g [J]. *ApJ Lett*, 726: L8, doi: 10.1088/2041-8205/726/1/L8.
31. Pierrehumbert R T, Gaidos E. 2011. Hydrogen greenhouse planets beyond the habitable zone [J]. *ApJ Lett*, 734: L13, doi:10.1088/2041-8205/734/1/L13.
32. Raymond S N, Quinn T, Lunine J I. 2006. High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets [J]. I. Terrestrial accretion and dynamics [J]. *Icarus*, 183: 265-282.
33. Rodono M, 1986. The atmospheres of M dwarfs: Observations [M]// *The M-Type Stars*. Johnson H R, and Querci F R, Eds. NASA SP-492, pp. 409–453. Washington D C: U.S. Govt. Printing Office.
34. Rogers L A, Seager S. 2010. Three possible origins for the gas layer on GJ~1214b [J]. *ApJ*, 716: 1208-1216.
35. Schaefer L, Fegley Jr B. 2009. Chemistry of silicate atmospheres of evaporating

- super-Earths [J]. *ApJ, Lett*, 703: L113-L117.
36. Seager S, Deming D. 2010. Exoplanet Atmospheres [J]. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 48: 631–672.
 37. Selsis F, Kasting J F, Levrard B, Paillet J, Ribas I, et al. 2007. Habitable planets around the star Gliese 581? [J] *A&A*, 476: 1373–1387, doi: 10.1051/0004-6361:20078091.
 38. Showman A P, Polvani L M. 2010. The Matsuno–Gill model and equatorial superrotation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L18811, doi: 10.1029/2010GL044343.
 39. Showman A P, Polvani L M, 2011. Equatorial superrotation on tidally locked exoplanets [J]. *ApJ*, 738: 71-94, doi: 10.1088/0004-637X/738/1/71.
 40. Swain M R, Vasisht G, Tinetti G. 2008. The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet [J]. *Nature*, 452: 329–331.
 41. Taylor F W. 2010. Planetary Atmospheres [M]. New York: Oxford University Press.
 42. Udry S, Bonfils X, Delfosse X, Forveille T, Mayor M, et al. 2007. The HARPS search for southern extra-solar planets, XI. Super-Earths (5 and 8 M_{\oplus}) in a 3-planet system [J]. *A&A*, 469: L43–L47, doi:10.1051/0004-6361:20077612.
 43. Vogt S S, Butler P, Rivera E J, Haghighipour N, Henry G W, et al. 2010. The lick-Carnegie exoplanet survey: A 3.1 M_{\oplus} planet in the habitable zone of the Nearby M3V Star Gliese 581 [J]. *ApJ*, 723: 954-965, doi: 10.1088/0004-637X/723/1/954.
 44. 胡永云, 田丰. 2012. 太阳系行星 [M] // 陆埏. 现代天体物理. 北京, 北京大学出版社。Hu Y, Tian F. 2012. Solar planetary system [M]. Lu T. Modern Physics. Beijing, Peking University Press.
 45. von Bloh W, Bounama C, Cuntz M, Franck S. 2007. The habitability of super-Earths in Gliese 581 [J]. *A&A*, 476: 1365-1371, doi: 10.1051/0004-6361:20077939.
 46. von Paris P, Gebauer S, Godolt M, Grenfell J L, Hedelt P, et al. 2010. The extrasolar planet Gliese 581d: a potentially habitable planet [J]? *A&A*, 522: A23,

doi: 10.1051/0004-6361/201015329.

47. 王伟, 刘玉娟, 胡永云, 田丰. 2012. 太阳系外行星系统的搜寻和研究[C]//陆垠. 现代天体物理. 北京, 北京大学出版社. Wang W, Liu Y, Hu Y, Tian F. 2012. Discovery and research of extra-solar planets (in Chinese) [C]. Lu T. Beijing, Peking University Press.
48. West A A, Hawley S L, Bochanski J J, Covey K R, Reid I N, et al. 2008. Constraining the age-activity relation for cool stars: The Sloan Digital Sky Survey Data release 5 low-mass star spectroscopic sample [J]. *Astron. J.*, 135: 785-795, doi: 10.1088/0004-6256/135/3/785.
49. Wordsworth R D, Forget F, Selsis F, Madeleine J-B, Millour E, et al. 2010. Is Gliese 581d habitable? Some constraints from radiative-convective climate modeling [J]. *A&A*, 522: A22, doi: 10.1051/0004-6361/201015053.

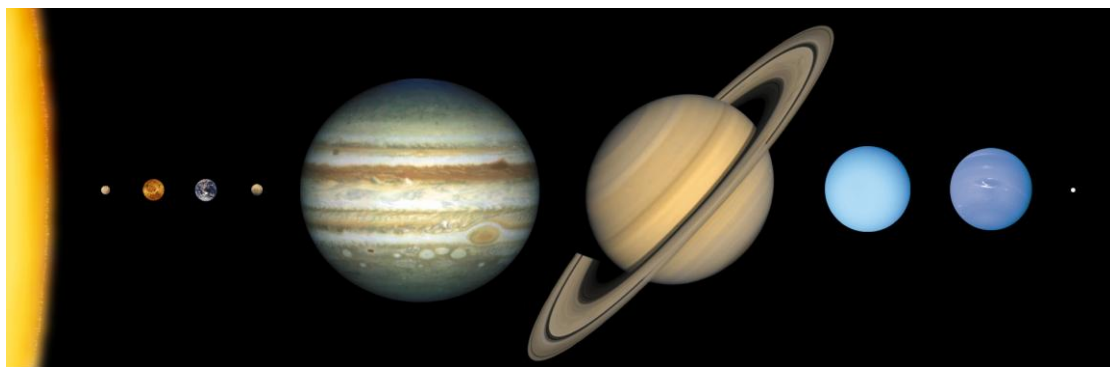


图 1、太阳系行星的体积对比。

Figure1. Size comparison of solar planets.

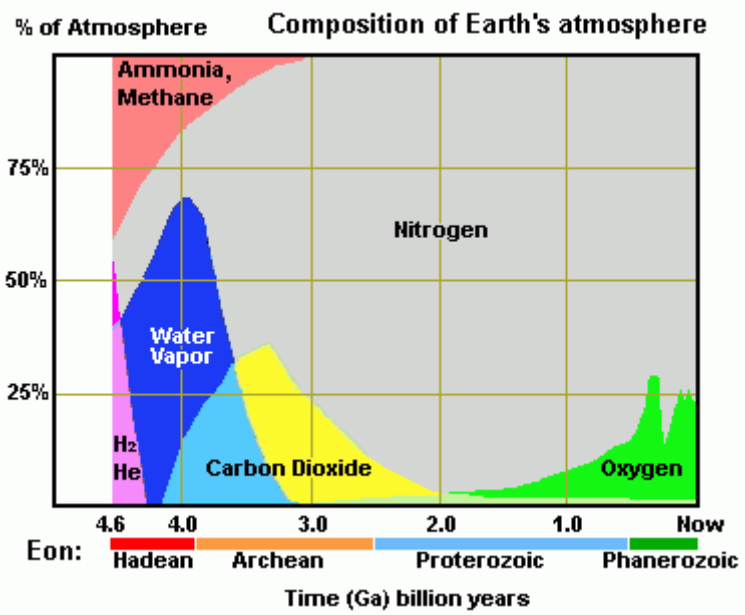


图 2、地球大气成分的历史演化。

Figure 2. Schematic plot of composition evolution of Earth's atmosphere.

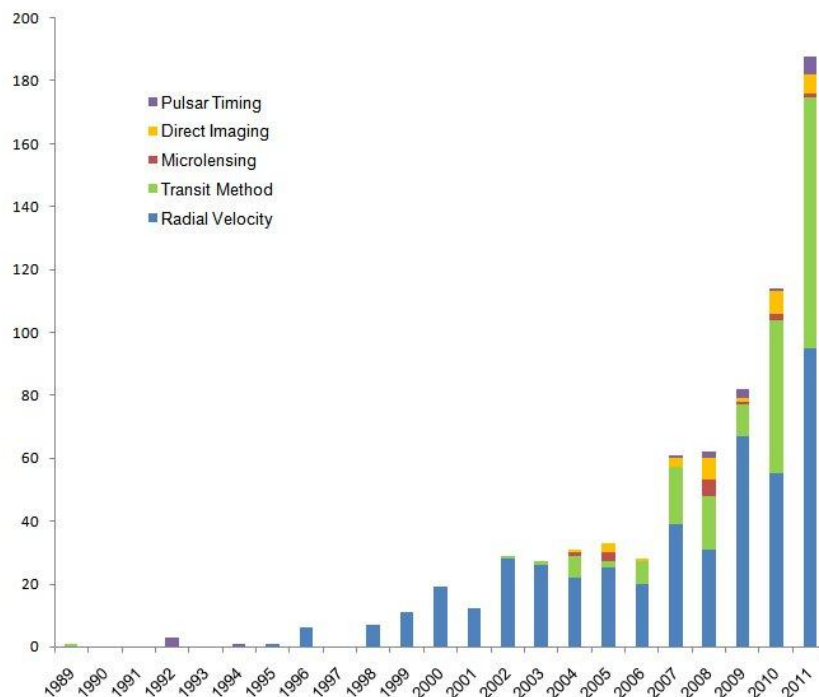


图 3、每年所发现的系外行星数目分布图。颜色对应发现系外行星所使用的探测方法。图中的紫色、黄色、暗红、绿色和蓝色分别表示使用精确计时、直接成像、微引力透镜、掩星和视向速度方法观测到的系外行星。数据来自行星百科网站：<http://exoplanet.eu/index.php> [2012-11-10]。

Figure 3. Exoplanets discovered, by years. Colors indicate exoplanets by discovery methods. Purple, yellow, dark red, green, and blue denote pulsar timing, direct imaging, microlensing, transit, and radial velocity methods, respectively. From <http://exoplanet.eu/index.php> [2012-11-10].

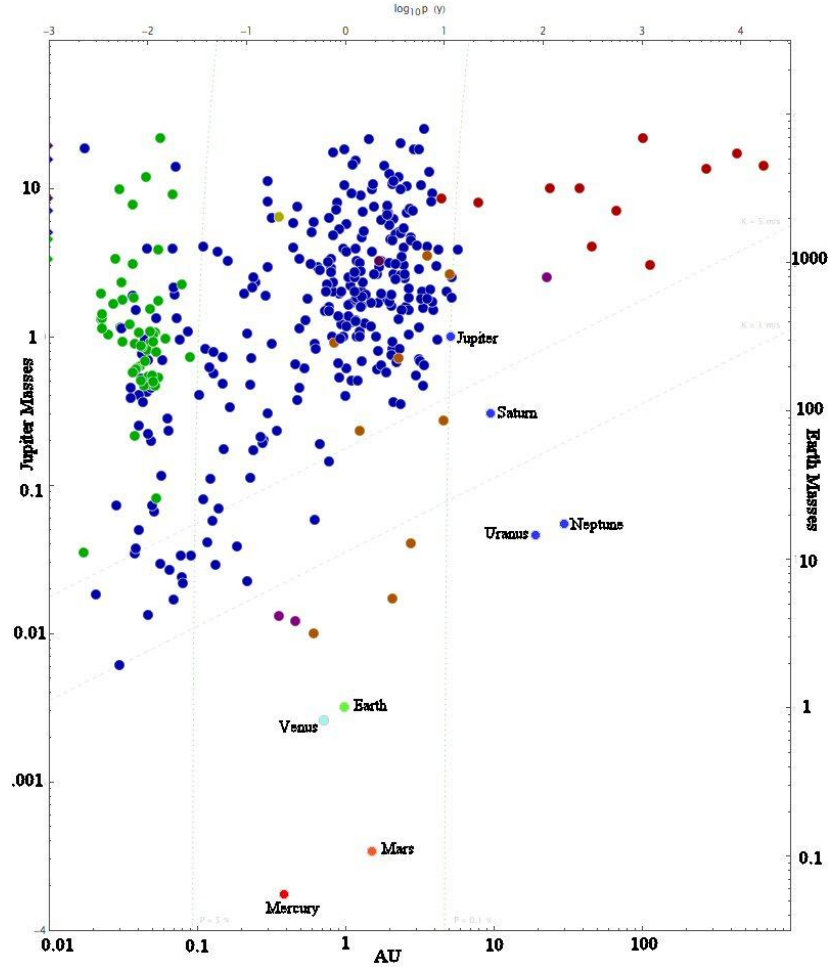


图 4、系外行星质量对轨道半长轴分布散点图。纵坐标为系外行星相对于地球（右侧）和木星（左侧）的质量（系外行星的质量下限）。横坐标是行星公转轨道半长轴，单位是 AU。纵横坐标都是对数坐标。图中的绿色、蓝色、暗红、橘色、紫色等分别表示掩星、视向速度、直接成像、微引力透镜、精确计时等方法观测到的系外行星。为了对比，太阳系各行星也标示在图中。该图摘自维基百科网站（http://en.wikipedia.org/wiki/Extrasolar_planet [2012-11-10]）。

Figure 4. Scatter plot of mass vs. orbital semi-axis of identified exoplanets. Solar planets are also marked in the plot. Horizontal axis is orbital semi-axis, and vertical axis is exoplanet mass relative to Jupiter's mass. Green, blue, dark red, orange, and purple denote transit, radial velocity, direct imaging, microlensing, and pulsar timing methods.

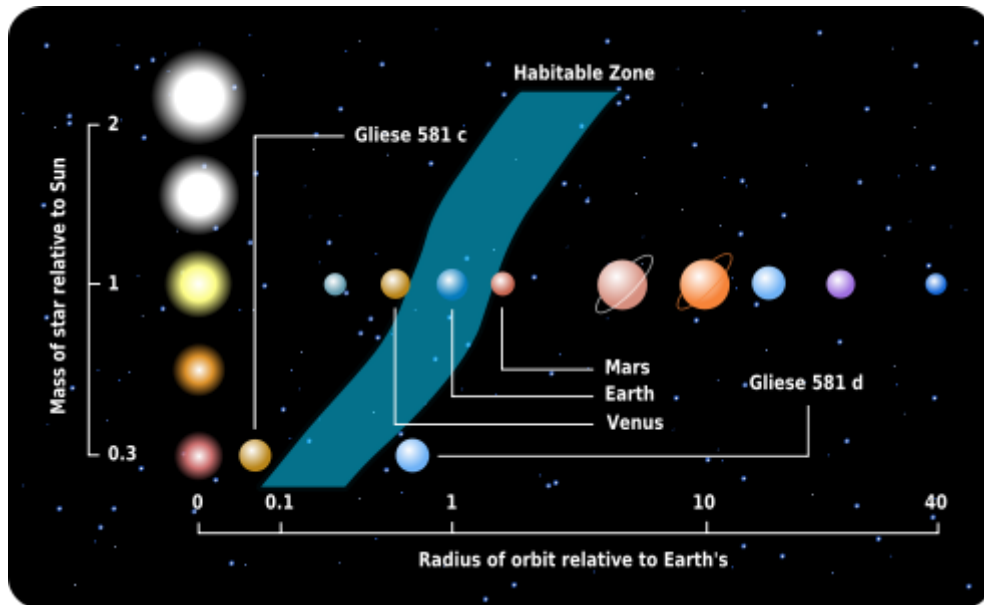


图 5、太阳系以及其它类型恒星的宜居带（来自维基百科：<http://en.wikipedia.org/> [2012-11-10]）。

Figure 5. Distances of habitable zones around all types of stars. From Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/> [2012-11-10].

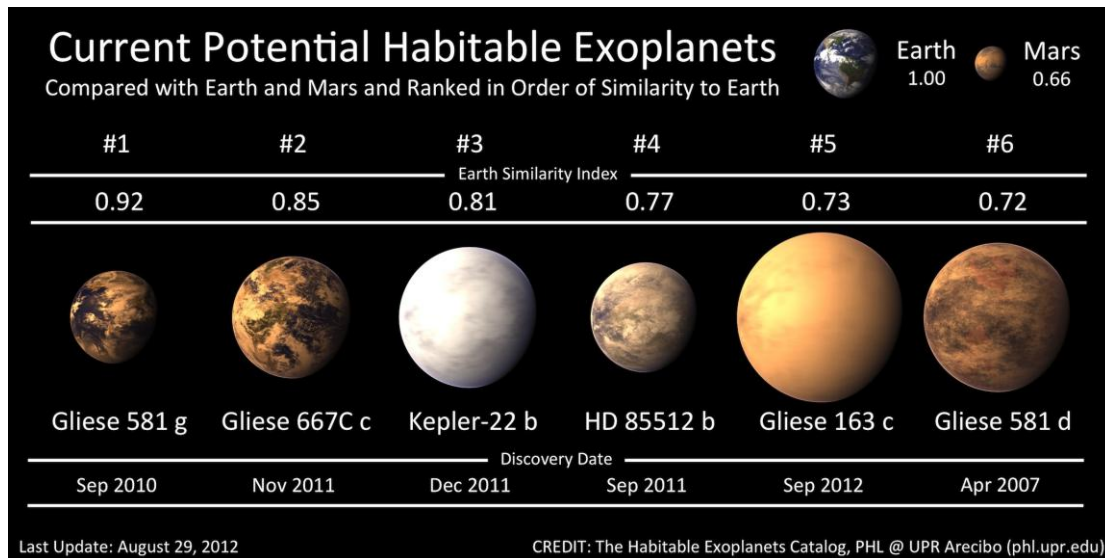


图 6、目前所发现的 6 颗有可能适合生命存在的宜居系外行星。来自 <http://phl.upr.edu/> [2012-11-10]。

Figure 6. Similarity of 6 potentially habitable exoplanets to Earth. From <http://phl.upr.edu/> [2012-11-10].

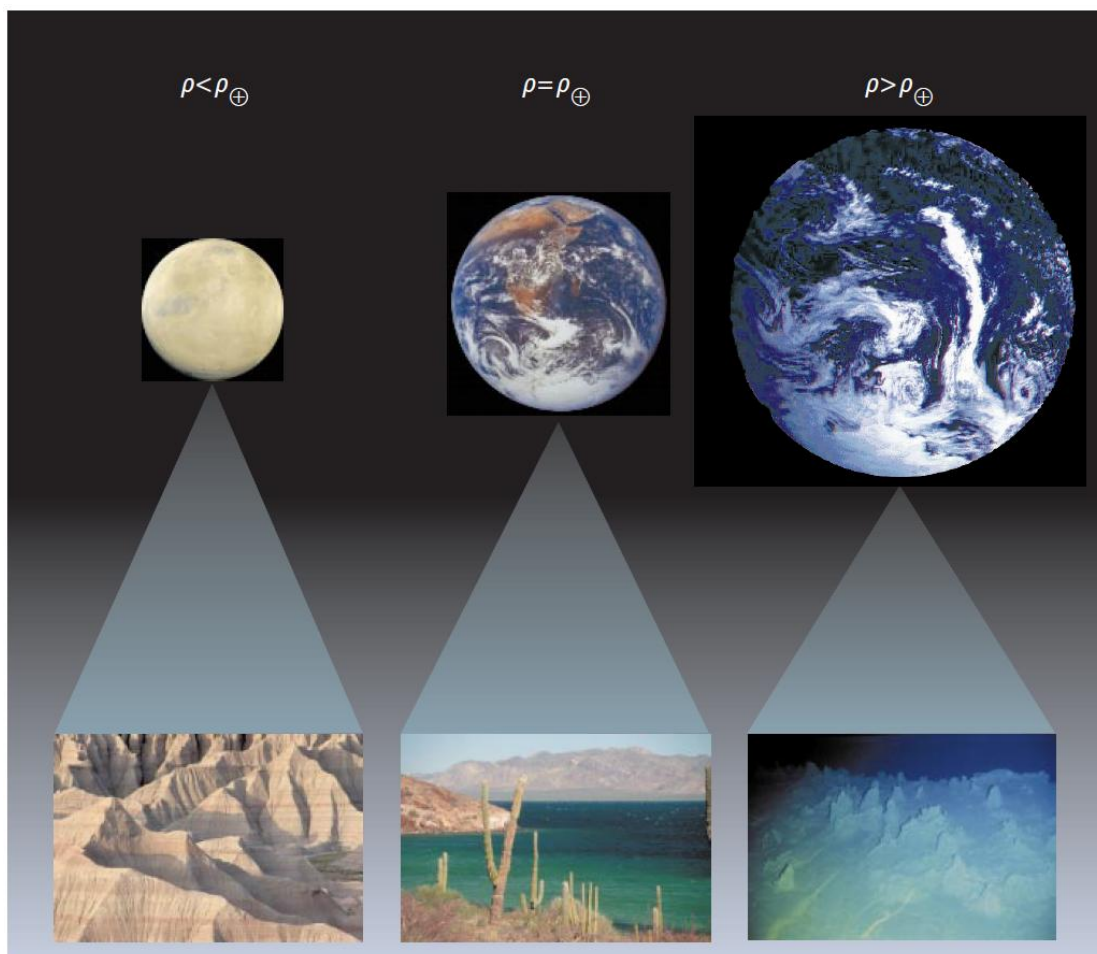


图 7、类地系外行星的体积和表层水覆盖率示意图。中间是地球，左侧的星球比地球的质量和体积小，右侧的星球是所谓的超级地球。摘自参考文献 22。

Figure 7. Environments of Earth-like planets. Earth is in the middle. A smaller planet (left) made of the same material as Earth would have lower ocean coverage, but larger areas of continents, and a larger planets could be an ocean world. From reference 22.

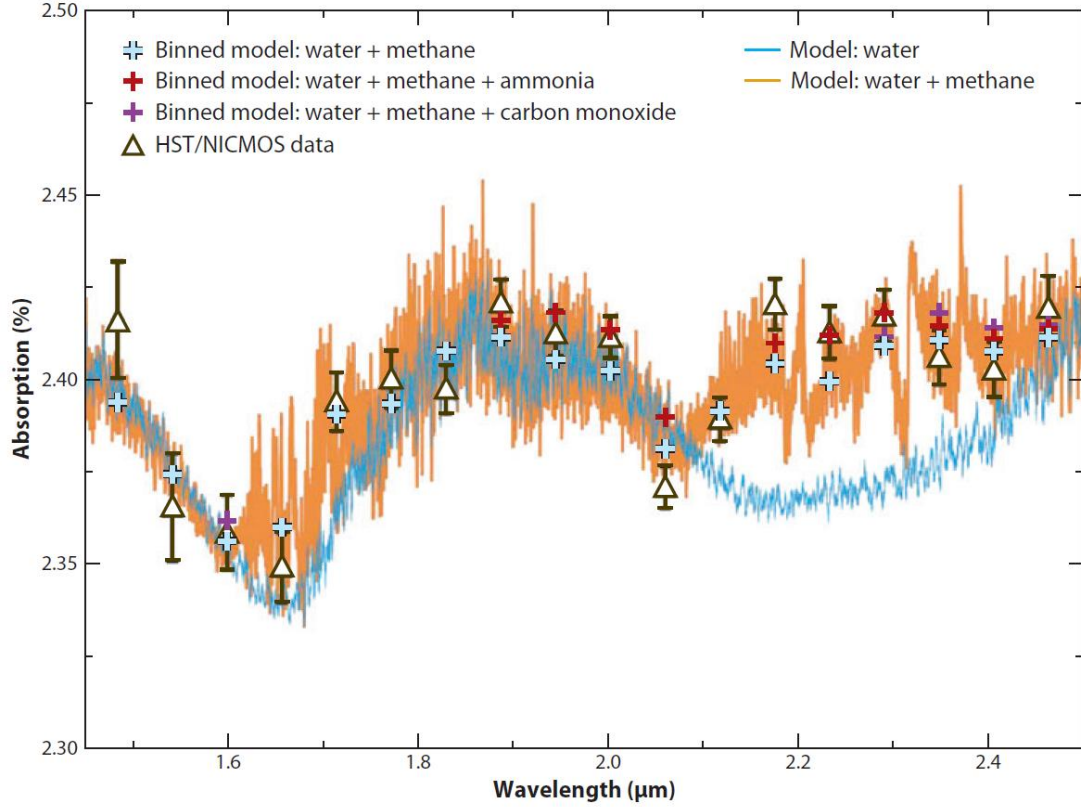


图 8、观测和模拟的热木星 HD 189733b 大气的吸收谱。黑色三角表示的是哈勃太空望远镜近红外相机和多目标光谱仪观测的热木星 HD 189733b 大气在不同波段上的吸收率。其它是使用辐射传输模式模拟的水汽、甲烷、氨和一氧化碳的吸收谱。其中蓝色和桔黄色分别是使用线积分辐射传输模式模拟的水汽以及水汽和甲烷的吸收谱，三种不同颜色的十字符号分别是使用带积分模式模拟的水汽+甲烷 ($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4$)、水汽+甲烷+氨 ($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4+\text{NH}_3$)，水汽+甲烷+一氧化碳 ($\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4+\text{CO}$) 的吸收谱。横坐标是波长，纵坐标是吸收率。摘自参考文献 28。

Figure 8. Comparison of observed and simulated transmission spectra of transit planet HD 189733b. Hubble Space Telescope observations are shown by the white triangles. Two different models highlight the presence of methane in the planetary atmosphere. From reference 28.

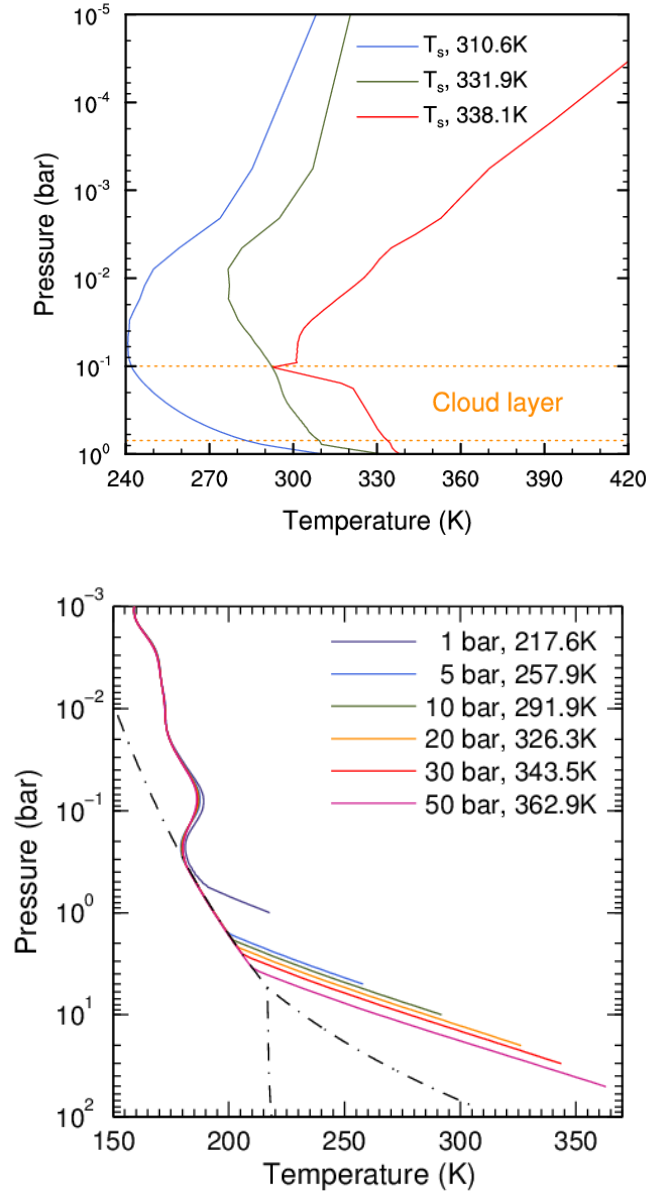


图 9、辐射-对流模式模拟的 Gl 581c（上图）和 Gl 581d（下图）的大气垂直温度廓线。在上图中， CO_2 含量均为 50 ppmv，蓝色线代表干大气（仅考虑辐射平衡），绿色线代表湿大气（水气混合比与地球大气相同），红色线代表固定相对湿度的模拟结果（模式无法达到平衡）。在下图中，对流调整使用的是干绝热大气递减率，地表反照率是 0.15，不同地表温度所对应的大气 CO_2 含量均标示在图中。摘自参考文献 31。

Figure 9. Simulated vertical temperature profiles for Gl 581c (top) and Gl 581d (bottom). From reference 31.

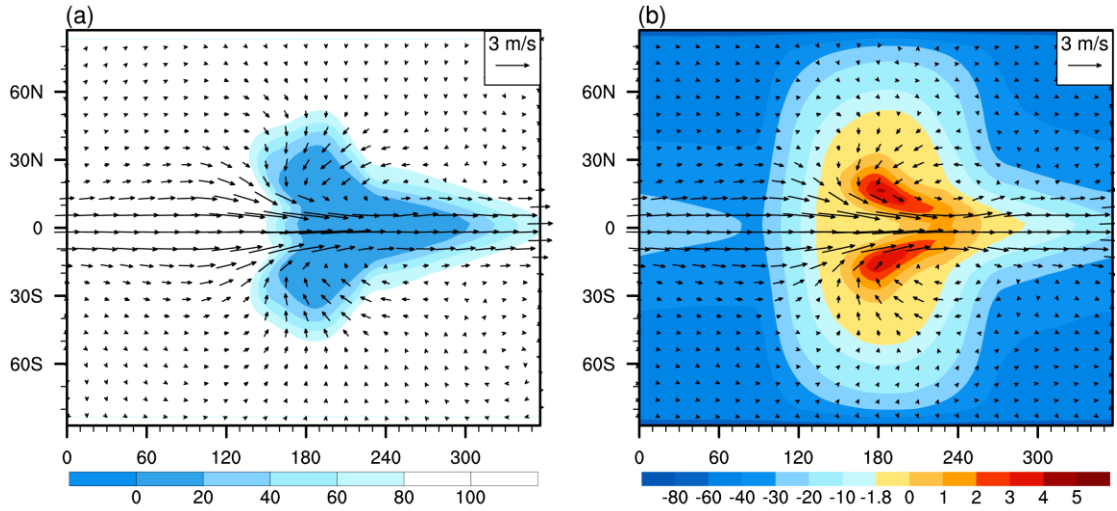


图 10、海-气耦合气候模式模拟的 GISS 581g 的海冰覆盖率和海-冰运动速度 (a) 以及海表气温和洋流速度 (b)。在图 (a) 中，箭头代表海冰运动速度，白色表示 100% 海冰覆盖，蓝色表示完全开放的海洋。在图 (b) 中，箭头代表表层海水的运动速度，彩色背景表示表层海水的温度，彩色标尺不是线性的。

Figure 10. Simulated sea-ice coverage and sea-ice velocity (a) and surface air temperature and ocean velocity (b). In plot (a), colors indicate sea-ice coverage, and arrows indicate sea-ice velocity. In plot (b), colors indicate surface air temperatures, and arrows indicate ocean velocity.