

Are we alone in the universe?

宜居环境与地外生命

田丰

清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084

E-mail: tianfengCO@tsinghua.edu.cn

2016-01-09 收稿, 2016-04-18 修回, 2016-04-18 接受, 2016-06-12 网络版发表

摘要 到2005年人们发现了150颗左右的行星, 但不知道任何宜居系外行星的存在, 对太阳系其他地方是否适宜地球生命也不太清楚, 因此在*Science*创刊125周年专辑中重点强调了利用射电波段“聆听”地外智能生命所发出的信号. 从更广义的角度来讲, 人们关心地外生命是否存在; 而这正与*Science* 125个科学问题中的第56个问题“太阳系的其它星球上现在和过去是否存在生命”相符合. 在这篇解读中主要围绕以下4个方面讨论: (1) 非碳基生命; (2) 太阳系天体的宜居性; (3) 太阳系外天体的宜居性; (4) 发现宜居环境和地外生物的展望.

关键词 系外行星, 地外生命, 深空探测

众所周知太阳系包括8大行星、矮行星、小行星、彗星等天体, 但是目前只有地球上发现了生命. 是生命的起源和演化太复杂了, 对环境的要求太挑剔了, 使得地球成为独一无二的生命的摇篮? 是我们对地球以外的环境了解得还太少, 没有得到足够多的数据来展现那些已经存在的生命? 还是我们这些地球生命过于以自我为中心, 忽视了其他生命形式的可能? 这些是长久以来萦绕在无数人心头的问题. 人类科学发现史上最重要的事件之一是发现处于主序恒星周围的太阳系外行星^[1]. 近年来对宜居环境的发现成为太阳系深空探测的中心, 而对太阳系外行星的研究重点也从起初的大量发现系外行星逐步转移到对宜居行星的发现、观测和研究. 未来10~20年在这些科学前沿方向的工作不仅将更好地回答“地球人类在宇宙中是否独一无二?”这个问题, 还可能革命性地改变我们对地球本身宜居性的认识.

1 非碳基生命的普遍性

地球生命所需的元素是氢、碳、氮、氧、磷、硫和其他一些微量元素如铁、锰、钼等. 当人们讨论地

外生命的时候, 比较常问到的一个问题是“地外生命是否一定像地球生命一样是基于碳元素的?” 现在发现的地球生命都来源于一个祖先. 这个祖先以蛋白质作为构成细胞的基础, 以RNA和DNA传递生命遗传特征, 并且利用ATP/ADP来完成新陈代谢; 而蛋白质, RNA, DNA和ATP/ADP都是碳基的. 由于硅和碳属于元素周期表内的同一族, 很多科幻小说中描述了以硅为基础的地外生命. 但是硅基生命是否像碳基生命一样普遍呢?

首先让我们来看看元素的多少. 我们知道比氢和氦重的元素都是在恒星内部通过聚变过程形成的, 在这个过程中碳、氮、氧先形成, 更重的元素后形成, 因此绝大多数恒星和行星所诞生的分子云都应该有更多的碳, 而硅在银河系中的元素丰度比碳要少7倍. 但是在地球上碳和硅含量是差不多的, 而且在地壳里硅还比碳多. 这是因为在地球这一类行星的形成过程中恒星风驱散了分子云中大部分挥发性物质, 其中包括大多数含碳的分子, 而大多数硅以尘埃的形式留了下来. 因此单单从硅和碳的物质总量来讲硅基生命可以像碳基生命一样普遍.

引用格式: 田丰. 宜居环境与地外生命. 科学通报, 2016, 61: 2093–2100

Tian F. Habitable planetary environments and extraterrestrial life (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2093–2100, doi: 10.1360/N972016-00030

硅基生命的主要问题是化学方面^[2]. 碳基生命利用碳和其他原子所组成的分子完成其功能, 碳与氢、氮、碳和氧元素形成一阶键的键能彼此相差不大, 形成二阶键的键能彼此相差也不大, 这就使得碳与其他元素之间能够形成很多不需要太多能量就能够变化的不同分子结构. 如果硅基生命也如此作为的话将有一些问题. 硅-氧键的键能比硅与氢、氮、碳和硅本身形成一阶键时的键能要大很多, 这就造成硅在有氧存在的环境(在行星所形成的分子云中有氧元素)里容易形成沙子(沙子的主要成分是二氧化硅, 其中每个硅原子与4个氧原子相连, 每个氧原子与2个硅原子相连, 都是一阶键). 此外在乙烯(C_2H_4)和乙炔(C_2H_2)分子中碳与碳之间发生 $2s2p^2$ 轨道杂化形成一个 σ 键, 而且碳与碳之间间距约150 pm, 这样2个碳原子未杂化的 $2p$ 电子就能形成键能与 σ 键差不多的 π 键. 因此碳与碳二阶键键能是一阶键键能的2倍, 三阶键键能是一阶键键能的3倍, 有利于形成更加复杂的碳基分子. 当硅形成二阶键的时候发生 $3s3p^2$ 轨道杂化, 但是硅与硅之间间距约220 pm, 不能形成键能大的 π 键, 因此硅与硅之间的二阶和三阶键都非常不稳定, 不利于形成复杂硅基分子. 随着计算机技术的发展, 人工智能将会愈来愈先进, 可以想象有一天人类创造出智能生命; 但是这种单质硅基生命不会在自然界自发形成. 因此我们可以说在一般的行星形成和演化环境里硅基生命不像碳基生命一样普遍.

2 太阳系天体的宜居性

金星是太阳系中质量和离太阳距离都最接近地球的行星, 但是其表面温度因为浓厚的二氧化碳大气而过高. 最新的理论^[3,4]认为由于金星距离太阳过近, 其上的海洋在最初的1亿年左右的时间里逃逸了, 因此很早就失去了生命发生、发展的机遇; 而地球因为距离太阳不太近, 因而能够维持自己的海洋.

过去10年人们对火星的探测发现一些早期火星表面或次表面液态水活动的证据^[5,6], 获得了今天火星大气和表面矿物中的碳、氮、氧、氢、惰性气体和其他几种元素的更精确的同位素含量^[7~10], 初步探测了火星次表面的成分^[11,12]. 但就像所有的科学研究一样, 更多的发现带来了更多科学问题. 对火星表面碳酸盐矿物和碳同位素的分析认为距今38亿年前的火星大气二氧化碳压强不超过50000 Pa^[13], 这就对

早期火星保持长期温暖气候带来重大挑战, 也同时引出了火星碳缺失的问题. 如果火星与地球的元素构成大致相仿的话, 目前唯一能解释目前火星的低碳含量的理论是早诺亚时期的快速二氧化碳大气逃逸^[14]; 如果这一理论成立的话, 因为火星质量远小于地球, 这颗行星从其演化的早期就与地球分道扬镳了. 现在一般认为火星次表面可能存在地球微生物可以适应的环境^[5], 下一阶段的火星探测将聚焦于探测火星次表面可能存在的生命.

冰卫星木卫二有内部海洋是早就为人所知的, 人们也一直关注木卫二海洋的宜居性. 2005年之前人们一般认为这个海洋的存在与木卫一的火山活动一样都是木星的4个伽利略卫星之间的引力共振造成的, 但2005年卡西尼探测器关于土卫二南极喷泉的发现和观测^[15~20]很大程度上改变了这个看法^[21]. 由于土卫二质量小、引力弱, 喷泉中的绝大部分水汽分子可以脱离土卫二的引力场^[22]. 观测发现喷泉中不仅包含水汽分子、盐和冰颗粒^[23,24], 从而可以形成土星的E环^[18], 还含有一些简单的有机分子^[20]和纳米大小的硅酸盐颗粒^[25]. 最新的对土卫二南极喷泉测量数据的分析认为其内部海洋很有可能支持地球生命^[26]. 目前国际上已经有科学团队提出计划发射新的探测器专门针对土卫二的喷泉开展观测以发现其内部海洋中可能存在的生命. 在土卫二喷泉发现后人们还在木卫二上也发现了喷泉的迹象, 目前正在努力确认和重复这一发现.

长期以来人们知道土卫六的浓厚大气以氮气和甲烷为主, 因此认为这颗卫星的大气光化学过程很可能在一定程度上反映了地球生命起源时期的大气光电化学. 卡西尼探测器对土卫六的观测在其大气中发现了上百种复杂的有机分子和非常复杂的正、负离子^[27], 这些观测和随后的理论工作^[28~30]极大地丰富了人们对早期地球大气光电化学过程和地球生命起源的认知. 有趣的是最近有研究利用与土卫六环境中有机物相似的物质在实验室中形成了类似于细胞膜的结构^[31], 这进一步增添了土卫六作为太阳系内可能有生命天体的吸引力.

除了上述天体外, 近年来对灶神星和谷神星的探测^[32]揭示了早期内部分异过程和内部水冰的存在, 谷神星表面的几处亮点可能源于水蒸气羽流^[33]. 2015年“新地平线号”探测器飞越冥王星^[34], 发现了复杂的地貌现象^[35]、表面成分分布^[36]和分层的大气

气溶胶^[37], 这意味着即使在太阳系边缘的库珀带天体仍然存在复杂地质活动和大气化学反应. 因为灶神星、谷神星和冥王星被认为是早期太阳系行星形成时期残留下来的星子遗迹, 这些探索可能对我们了解早期太阳系的演化和生命在太阳系的环境提供重要的背景信息. 有人认为这些小天体能够满足生命存在所需的3个基本条件——液态水、能量来源和化学成分(碳、氢、氮、氧、磷、硫等), 因此在未来太阳系生命探测的过程中不应该完全忽视它们.

3 太阳系外天体的宜居性

1992年人们发现了脉冲星周围的一颗系外行星^[38], 1995年人们发现了太阳类型恒星周围的一颗系外行星^[1], 这些发现揭开了系外行星研究的新篇章. 到2016年系外行星的数目超过了3000颗, 还有数千颗候选行星. 尽管其中绝大多数是非宜居行星, 距地球50光年之内有数颗确认存在的疑似宜居系外行星(表1). 下一步对这些行星的宜居性的分析会革命性地改变我们对地球宜居性的认识. 从这个意义上

讲, 回答“地球人类在宇宙中是否独一无二?”这个问题在过去的20年间已经向前迈出了巨大的一步.

地球殊异假说(Rare Earth hypothesis)^[39]认为地球上复杂(多细胞)生命的形成需要影响生命进化的天文和地质条件及偶然事件的不同寻常的结合. 这些条件和事件包括了星系和恒星周围的宜居带、行星系统中存在距离恒星较远的类木行星、宜居行星要有合适的质量、磁场、板块运动、岩石圈、大气圈、海洋, 并且拥有一颗巨大天然卫星(比如月球)、宜居行星的演化过程中要发生小行星撞击、大规模火山和岩浆活动等等. 国际科学界对地球殊异假说有比较大的争议, 近年来系外行星研究在与此相关的领域取得了一些新进展, 比如我们现在知道类似地球质量的岩石行星是比较普遍的现象^[40], 对宜居行星的存在概率的认识也比2000年深刻得多^[41,42]. 尽管我们对行星演化的理解仍然是很片面的, 重要的是我们在不远的未来有可能利用对系外行星的实际观测检验这一假说.

行星宜居性目前是系外行星研究的热点问题之

表 1 50 光年以内的疑似宜居系外行星和部分太阳系天体

Table 1 Potentially habitable exoplanets within 50 light years and some solar system bodies

行星名	距离(光年)	质量	恒星类型	表面温度	发现状态	发现年代
金星		0.815	G	热		
地球		1	G	适中		
火星		0.107	G	寒冷		
木卫二		0.008	G	寒冷		
土卫二		0.00002	G	寒冷		
土卫六		0.023	G	寒冷		
Tau Ceti e	11.9	4.3	M	热	未确认	2012
Kapteyn b	12.7	4.8	M	寒冷	确认存在	2014
Gliese 832 c	16.1	5.4	M	适中	确认存在	2014
Gliese 682 c	16.6	4.4	M	寒冷	未确认	2014
Gliese 581 g	20.2		M	适中	可疑	2010
Gliese 581 d	20.2	6	M	寒冷	未确认	2007
Gliese 667 Cc	23.6	4	M	适中	确认存在	2011
Gliese 667 Cf	23.6	3	M	适中	可疑	2013
Gliese 667 Ce	23.6	3	M	寒冷	可疑	2013
Gliese 180 c	39.5	6	M	适中	未确认	2014
Gliese 180 b	39.5	8	M	热	未确认	2014
Gliese 422 b	41.3	10	M	适中	未确认	2014
HD 40307 g	41.7	8.2	K	适中	确认存在	2012
Gliese 163 c	48.9	7	M	热	确认存在	2012

一. 严格意义上讲, 行星宜居性反映了行星环境对生命多样性、生产率或空间覆盖率的支持程度. 科学界充分意识到: (1) 液态水(海洋)的存在是地球生命的必要条件, 而非充分条件; (2) 迄今为止地球是我们所知的唯一存在生命的天体, 关于行星宜居性的研究在很大程度上依赖于地球生命的研究; (3) 宜居行星的适当定义提供了理解其他天体上存在或者缺乏生命迹象的前提. 考虑到人们目前只对地球生命的新陈代谢活动有所了解, 目前对太阳系外生命天体的研究仍然主要关注适宜液态水在行星表面存在的环境. 从这个角度讲, 影响一颗系外行星宜居性的主要是行星的质量、其恒星的光度和恒星-行星间距离. 符合这些条件的行星可以称为疑似宜居系外行星, 其宜居性和生命是否存在最终要靠对行星大气成分或行星表面的观测来确定.

表1当中的绝大多数疑似宜居系外行星的恒星都是红矮星. 基于目前对于系外行星的统计数据, 宜居行星出现在太阳类型恒星周围的概率为5%~20%, 出现在红矮星(质量约为太阳质量的一半以下)周围的概率为20%~50%^[41,42]. 由于红矮星的数目远远超过太阳类型和更大质量的恒星, 人们目前搜寻宜居系外行星的努力主要针对红矮星. 红矮星周围的类地行星因为潮汐锁定的原因可能一面永远面向恒星, 只要有一定的大气和海洋存在, 阳面的能量可以被大气和海洋传输到阴面, 从而能够有效避免行星大气和海洋在阴面凝结^[43~45]. 因此红矮星周围宜居行星的气候稳定性本身没有太大的问题. 如果考虑所有恒星的话, 可能有生命的系外行星离地球仅有~10光年^[42].

影响红矮星周围行星宜居性的主要问题不在于气候稳定性, 而在于恒星早期演化对其大气圈和水圈的影响. 近期多组独立理论研究工作显示红矮星早期光度有接近一个量级的降低, 造成其周围宜居带向内迁移, 因此一颗成年红矮星周围宜居带内的类地行星可能曾经经历过快速大气逃逸和脱水^[46~48]. 这一过程对行星宜居性的影响是现在理论研究的热点之一.

4 发现宜居环境和地外生物的展望

表1当中的绝大多数疑似宜居系外行星的质量都比地球大, 质量大的行星比较容易被观测到, 通过观测行星反射和发射光谱也便于搜寻生命信号. 与此相比太阳系内的可能存在生命的地外天体质量均较

小, 而且表面温度都很低, 可能存在生命的环境都在次表面或深部, 在这些地方发现地外生命的可能性是存在的. 太阳系内的火星、木卫二、土卫二和土卫六因为其次表面或内部存在生命的可能性较高, 被外层空间条约^[49]列为第一级行星保护目标. 这意味着任何发射前往这些天体的有着陆可能的探测器都必须经过严格的灭菌程序, 以保护这些天体上面可能存在的土著生命不受地球生命的破坏^[50]. 由于探测火星、木卫二和土卫六上可能存在的生命要求对其次表面进行钻探, 这些探测计划都会比以前的探测项目难度大很多. 对土卫二喷泉的探测可以避免钻探的需求, 但缺点是很难知道喷泉中的物质在多大程度上代表了土卫二的内部海洋中的物质组成. 对于太阳系内天体我们可以发射探测器和钻探器来研究其次表面和内部, 也有可能获得样品返回地球来作更加详尽的分析; 当然保护地球不被地外生命污染也是外层空间条约行星保护条文的重要部分. 由于经费限制, 当前国际上确定的地外生命探测计划的焦点是火星, 同时美国正计划对木卫二开展轨道器和着陆器探测, 而对土星系统开展生命探测的计划可能要等到几十年以后才会真正实行.

目前发现的疑似宜居系外行星个数远多于表1中所列出的, 美国航天局的开普勒天文卫星就发现了十几颗^[51]. 但开普勒卫星所发现的疑似宜居系外行星都在距地球500光年以外, 难以用未来望远镜来观测以确定其宜居性, 更无法通过观测来发现上面的生命. 目前国际上正在进行的利用地基和空间望远镜搜寻系外行星的计划有近50个, 这里只列举一二: 地基望远镜EPRESSO(欧洲南方天文台, 2016年)将利用视像速度法搜寻太阳类型恒星周围的岩石行星^[52]; 地基望远镜NGTS(2015年开始运行)将利用掩星法搜寻太阳附近的超级地球和迷你海王星^[53]; TESS空间卫星(美国航天局, 2018年)将利用掩星法搜寻红矮星(<0.5太阳质量)周围的疑似宜居行星^[54]; Plato 2.0空间卫星(2024年欧洲航天局)将利用掩星法搜寻K型和太阳类型恒星周围的疑似宜居行星^[55]. 据估计这些系外行星搜寻计划将在不久的未来发现成百上千颗太阳附近的岩石行星.

对系外行星开展生命探测与太阳系内地外生命探测最大的不同是对系外行星在可预见的将来是不可能做到就位探测和钻探, 也不能采样返回, 只能依靠生命对其所处环境(大气成分、表面反射率等)的影

响来判断地外生命是否存在。就这一点而言,对系外行星生命的探测是有其局限性的。从另一个角度来讲,太阳系内可能的宜居天体寥寥无几,而太阳附近可能有成百上千的宜居行星可以观测。因此在概率意义上发现系外生命的可能性不比发现太阳系内的地外生命的可能性小。

虽然地基望远镜受地球大气层的限制,目前国际上正在建设中的30~40 m级地基望远镜^{1,2)}和即将在2018年发射的下一代空间望远镜JWST^[56]也都有明确的对系外行星生命信号开展观测的计划。这些望远镜将可能获得环绕小质量红矮星(<0.2太阳质量)

宜居带内岩石行星的大气成分、行星组成和演化等方面的信息。目前对这类恒星周围行星的宜居性还有较大争议^[46~48,57],未来的观测可能会发现这些行星上的生命信号,也可能发现这些行星并非宜居的。在后一种情况下,在2035~2040年左右实施的未来超大口径空间望远镜^[58]将会给人们带来地球附近的类地行星上生命是否存在这个问题的比较确定的答案。无论如何,千万年以来一直困扰着人类的关于生命的问题将有可能在这一时代得到部分的但是重要的答案——人类对世界的认识将会改变。那么中国在这一历史时刻会有何作为呢?让我们拭目以待。

参考文献

- 1 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-Mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 2 Plaxco H W, Gross M. *Astrobiology: A Brief Introduction*. 2nd ed. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2011
- 3 Hamano K, Abe Y, Genda H. Emergence of two types of terrestrial planet on solidification of magma ocean. *Nature*, 2013, 497: 607–610
- 4 Lebrun T, Massol H, Chassefiere E, et al. Thermal evolution of an early magma ocean in interaction with the atmosphere. *J Geophys Res Planets*, 2013, 118: 1155–1176
- 5 Michalski J R, Cuadros J, Niles P B, et al. Groundwater activity on Mars and implications for a deep biosphere. *Nat Geosci*, 2013, 6: 133–138
- 6 Martín-Torres F J, Zorzano M P, Valentín-Serrano P, et al. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nat Geosci*, 2015, 8: 357–361
- 7 Webster C R, Mahaffy P R, Flesch G J, et al. Isotope ratios of H, C, and O in CO₂ and H₂O of the Martian atmosphere. *Science*, 2013, 341: 260–263
- 8 Wong M H, Atreya S K, Mahaffy P N, et al. Isotopes of nitrogen on Mars: Atmospheric measurements by Curiosity's mass spectrometer. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 6033–6037
- 9 Mahaffy P R, Webster C R, Stern J C, et al. The imprint of atmospheric evolution in the D/H of Hesperian clay minerals on Mars. *Science*, 2015, 347: 412–414
- 10 Shaheen R, Niles P B, Chong K, et al. Carbonate formation events in ALH 84001 trace the evolution of the Martian atmosphere. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 336–341
- 11 Ehlmann B L, Wray J J. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars. *Science*, 2008, 322: 1828–1832
- 12 Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the Martian surface. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 291–315
- 13 Hu R, Kass D M, Ehlmann B L, et al. Tracing the fate of carbon and the atmospheric evolution of Mars. *Nat Commun*, 2015, 6: 10003, doi: 10.1038/ncomms10003
- 14 Tian F, Kasting J F, Solomon S C. Thermal escape of carbon from the early Martian atmosphere. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, doi: 10.1029/2008GL036513
- 15 Dougherty M K, Khurana K K, Neubauer F M, et al. Identification of a dynamic atmosphere at Enceladus with the Cassini Magnetometer. *Science*, 2006, 311: 1406–1409
- 16 Hansen C J, Esposito L, Stewart A I F, et al. Enceladus' water vapor plume. *Science*, 2006, 311: 1422–1425
- 17 Porco C C, Helfenstein P, Thomas P C, et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 2006, 311: 1393–1401
- 18 Spahn F, Schmidt J, Albers N, et al. Cassini dust measurements at Enceladus and implications for the origin of the E ring. *Science*, 2006, 311: 1416–1418
- 19 Spencer J R, Pearl J C, Segura M, et al. Cassini encounters Enceladus: Background and the discovery of a south polar hot spot. *Science*, 2006, 311: 1401–1405

1) Thirty Meter Telescope Detailed Science Case, 2015

2) An Expanded View of the Universe: Science with the European Extremely Large Telescope

- 20 Waite J H, Combi M R, Ip W H, et al. Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure. *Science*, 2006, 311: 1419–1422
- 21 Hedman M M, Gosmeyer C M, Nicholson P D, et al. An observed correlation between plume activity and tidal stresses on Enceladus. *Nature*, 2013, 500: 182–184
- 22 Tian F, Stewart A, Toon O, et al. Monte Carlo simulations of the water vapor plumes on Enceladus. *Icarus*, 2007, 188: 154–161
- 23 Postberg F, Schmidt J, Hillier J, et al. A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus. *Nature*, 2011, 474: 620–622
- 24 Schmidt J, Brilliantov N, Spahn F, et al. Slow dust in Enceladus' plume from condensation and wall collisions in tiger stripe fractures. *Nature*, 2008, 451: 685–688
- 25 Hsu H W, Postberg F, Sekine Y, et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. *Nature*, 2015, 519: 207–210
- 26 Sekine Y, Shibuya T, Postberg F, et al. High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments in the chondrite-like core of Enceladus. *Nat Commun*, 2015, 6: 8604
- 27 Waite J H, Niemann H, Yelle R V, et al. Ion neutral mass spectrometer results from the first flyby of Titan. *Science*, 2005, 308: 982–986
- 28 Atreya S K, Adams E Y, Niemann H B, et al. Titan's methane cycle. *Planet Space Sci*, 2006, 54: 1177–1187
- 29 Vuitton V, Yelle R V, McEwan M J. Ion chemistry and N-containing molecules in Titan's upper atmosphere. *Icarus*, 2007, 191: 722–742
- 30 Krasnopolsky V A. A photochemical model of Titan's atmosphere and ionosphere. *Icarus*, 2009, 201: 226–256
- 31 Stevenson J, Lunine J, Clancy P. Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome. *Sci Adv*, 2015, 1: e1400067, doi: 10.1126/sciadv.1400067
- 32 Russell C T, Raymond C A. *The Dawn Mission to Minor Planets 4 Vesta and 1 Ceres*. New York: Springer Publications, 2012
- 33 Nathues A, Hoffmann M, Schaefer M, et al. Sublimation in bright spots on (1) Ceres. *Nature*, 2015, 528: 237–240
- 34 Stern S A, Bagenal F, Ennico K, et al. The Pluto system: Initial results from its exploration by New Horizons. *Science*, 2015, 350: aad1815, doi: 10.1126/science.aad1815
- 35 Moore J M, McKinnon W B, Spencer J R, et al. The geology of Pluto and Charon through the eyes of New Horizons. *Science*, 2016, 351: 1284–1293.
- 36 Grundy W M, Binzel R P, Buratti B J, et al. Surface compositions across Pluto and Charon. *Science*, 2016, 351: 1283–1291
- 37 Gladstone G R, Stern S A, Ennico K, et al. The atmosphere of Pluto as observed by New Horizons. *Science*, 2016, 351: aad8866, doi: 10.1126/science.aad8866
- 38 Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257+12. *Nature*, 1992, 355: 145–147
- 39 Ward P, Brownlee D E. *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe?* Göttingen: Copernicus Publications, 2000
- 40 Howard A W. Observed properties of extrasolar planets. *Science*, 2013, 340: 572–576
- 41 Petigura E A, Howard A W, Marcy G W. Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 19273, doi: 10.1073/pnas.1319909110
- 42 Dressing C D, Charbonneau D. The occurrence of potentially habitable planets orbiting M dwarfs estimated from the full Kepler dataset and an empirical measurement of the detection sensitivity. *Astrophys J*, 2015, 807: 45–68
- 43 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
- 44 Joshi M M, Haberle R M. Suppression of the water ice and snow albedo feedback on planets orbiting red dwarf stars and the subsequent widening of the habitable zone. *Astrobiology*, 2012, 12: 3
- 45 Hu Y, Yang J. Role of ocean heat transport in climates of tidally locked exoplanets around M dwarf stars. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 629–634
- 46 Tian F, Ida S. Water content of Earth-mass planets around M dwarfs. *Nat Geosci*, 2015, 8: 177–180
- 47 Ramirez R M, Kaltenegger L. The habitable zones of pre-main-sequence stars. *Astrophys J Lett*, 2014, 797: L25
- 48 Luger R, Barnes R. Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs. *Astrobiology*, 2015, 15: 119–143
- 49 Ireland N. *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and other Celestial Bodies*. 1967
- 50 Tanczer J D, Rummel K L, Lévai G. Planetary protection policy overview and application to future missions. *Adv Space Res*, 1989, 9: 181–184
- 51 Jenkins J M, Twicken J D, Batalha N M, et al. Discovery and Validation of Kepler-452b: A 1.6 R_⊕ Super Earth Exoplanet in the Habitable Zone of a G2 Star. *Astron J*, 2015, 150: 56
- 52 Pepe F A, Cristiani S, Lopez R R, et al. ESPRESSO: The Echelle spectrograph for rocky exoplanets and stable spectroscopic observations.

-
- In: SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2010, 77350, doi: 10.1117/12.857122
- 53 Wheatley P J, Pollacco D L, Queloz D, et al. The Next Generation Transit Survey (NGTS). EPJ Web Confer, 2013, 47: 13002, doi: 10.1051/epjconf/20134713002
- 54 Ricker G R, Vanderspek R K, Latham D W, et al. The Transiting Exoplanet Survey Satellite Mission. In: American Astronomical Society Meeting Abstracts 224. 2014
- 55 Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. The PLATO 2.0 mission. Exp Astron, 2014, 38: 249–330
- 56 Gardner J P. The James Webb Space Telescope. Space Sci Rev, 2006, 123: 485–606
- 57 Tian F. Thermal escape from super earth atmospheres in the habitable zones of M stars. Astrophys J, 2009, 703: 905–909
- 58 Dalcanton J, Seager S, Aigrain S, et al. From cosmic birth to living earths: The future of UVOIR space astronomy. AURA Report. New York: Association of Universities for Research in Astronomy, 2015

Habitable planetary environments and extraterrestrial life

TIAN Feng

Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Arguably one of the most important discoveries in the history of human being is the detection of a planet orbiting a main sequence star beyond the solar system. By the time *Science* celebrated its 125th anniversary, ~150 exoplanets have been discovered. However, there was no known habitable exoplanet. Neither was it clear whether there is habitable environment in the solar system beyond the Earth. Thus the possibility to “listen” to radio signals emitted by extraterrestrial intelligence was a focus of the 11th science question “Are we alone in the universe?”. We equally care about the 56th question “Is/Was there life elsewhere in the solar system?”. In this essay we discuss the following 4 aspects: (1) non-carbon-based life; (2) habitability of solar system planets/moons; (3) habitability of exoplanets; (4) prospects of detecting habitable environments and extraterrestrial life.

exoplanet, extraterrestrial life, solar system exploration

doi: 10.1360/N972016-00030



田丰

1973 年 12 月出生，理学博士，清华大学地球系统科学研究中心教授。主要从事行星大气演化、行星宜居性和系外行星生命信号探测研究，在早期地球、火星和系外行星研究方向取得了一些有影响的成果。