天体生物学研究进展和发展趋势

林巍^{1,2*}, 李一良³, 王高鸿⁴, 潘永信^{1,2,5}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;

3. 香港大学地球科学系, 香港;

4. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072;

5. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: weilin@mail.iggcas.ac.cn

2019-08-13 收稿, 2019-10-31 修回, 2019-11-01 接受, 2019-11-04 网络版发表

中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA17010501)和国家自然科学基金(41822704, 41621004)资助

摘要 天体生物学旨在研究宇宙演化背景下生命的起源、演化、分布和未来。天体生物学研究始于20世纪中期, 已在生命起源、生命与环境协同演化、宜居环境、地外生命探测、生命星际传输、行星开发和保护等方面获得了一系列新发现和新认识, 深刻改变了人们对生命和宜居环境的理解。天体生物学是一门交叉性和探索性很强的学科, 其发展不仅推动了生命科学、地球科学、行星科学、空间科学、天文学等不同学科的交叉融合, 也增强了科研人员与工程技术人员、科学家与公众之间的对话和沟通。近年来, 我国探月工程取得了举世瞩目的成就, 酝酿中的火星、木星等深空探测旨在探索浩瀚宇宙, 给我国的天体生物学研究提出了更高要求。本文综述了国内外天体生物学的研究现状、主要方向、关键科学问题和研究进展等, 并对我国的天体生物学研究提出了若干建议。

关键词 天体生物学, 生命起源, 宜居环境, 生命探测, 极端环境生物

从我国古代夸父追日、嫦娥奔月的神话传说到17~19世纪对月球和火星存在生命的猜想, 人类对宇宙的好奇心有增无减。20世纪中叶以来, 随着航天技术的迅猛发展和现代科学的革命进步, 人类真正实现了探索太空的愿望, 逐步实施了对月球、火星及太阳系内其他天体的探测, 并开始探讨生命起源、地外生命、宜居星球、宇宙演化等终极科学问题。天体生物学(Astrobiology或Exobiology, 旧称Cosmobiology或Bioastronomy)这一学科正是在这个背景下应运而生^[1~3]。

天体生物学简而言之是研究宇宙中的生命, 在宇宙演化的背景下探究生命的起源、演化及其在宇宙中的分布和未来^[4,5]。这是一门交叉性很强的学科, 不仅涉及生命科学、地球科学、行星科学、空间科学、天文

学等多个学科的交叉融合, 也需要基础科学和工程技术的通力合作。天体生物学研究手段多样, 包括地基/天基观察、飞行探测、野外调查、实验室研究、计算模拟等。我们从哪里来? 我们是否孤独? 寻找地外生命是人类探索宇宙最本源的驱动力, 也是天体生物学研究的核心。地球是目前唯一已知存在生命的星球, 因此天体生物学特别关注行星地球宜居环境的形成和演化, 以及地球生命如何起源、何时起源、演化路径、生存极限等, 并以此为基础和依据, 搜寻太阳系内/外的宜居星球和生命。

天体生物学与深空探测相辅相成, 前者的发展离不开后者技术的进步, 而前者又是后者的重要科学目标之一。深空探测是衡量世界各国综合国力和科技水

引用格式: 林巍, 李一良, 王高鸿, 等. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 2020, 65: 380–391

Lin W, Li Y L, Wang G H, et al. Overview and perspectives of Astrobiology (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 380–391, doi: [10.1360/TB-2019-0396](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0396)

平的一个重要标志,我国已把深空探测作为国家中长期发展的重要战略规划,因此在现阶段推进并加强我国的天体生物学研究具有重要的科学和战略意义。近年来,国内外天体生物学在研究的深度和广度上都有了长足进步,已从早期的以生命科学为研究核心,发展到以宜居环境、生命起源以及生命-环境协同演化的综合研究为主线。本文简要概述国内外天体生物学发展历程、主要研究方向和进展,为推进我国天体生物学的发展提供建议,以期更好地服务我国深空探测的国家战略需求。

1 发展历史和现状

天体生物学名词最早出现在1903年的一本科幻小说中^[6,7],1935年法国学者Sternfeld^[8]首次对该名词进行了定义。20世纪中叶DNA双螺旋结构的发现^[9]以及米勒-尤里实验^[10]等极大地促进了生命科学的进步以及人类对地球生命本源的认识,随之而来的美国和苏联太空争霸推动了航天技术的革命,催生了天体生物学这一研究领域的正式形成。美国是最早开展天体生物学的国家,也是当前该研究领域的“佼佼者”,其发文量占全球天体生物学发文量的一半以上,处于引领地位(图1(a))。美国国家航空航天局(NASA)自20世纪50年代成立之初就开始资助地外生命探测仪器和科学载荷的研制,直到1975年海盗号火星生命探测计划的实施。然而海盗号任务没有在火星表面发现生命存在的确切证据,天体生物学研究随即进入了一个相对低谷的阶段^[11,12]。到了20世纪90年代,极端环境微生物研究的发展^[13]、系外行星的发现^[14]、火星陨石ALH84001上观察到疑似生命遗迹^[15]、木卫二具有液态海洋^[16]以及NASA天体生物学研究所(NASA Astrobiology Institute)的成立^[17]等,标志着天体生物学进入了黄金发展期,天体生物学的发文量在这一时期也开始显著增加(图1(b))。一系列探测器的成功发射(如探测火星的“勇气号”、“机遇号”、“凤凰号”、“好奇号”、“洞察号”等,探测水星的“信使号”等,探测巨行星及其卫星的“伽利略号”、“卡西尼-惠更斯号”、“朱诺号”等)使人类具有了对太阳系天体近距离或原位探测的能力,相关科研产出呈现出强劲的增长趋势,天体生物学研究和深空探测进入新的时代(图1(b))。

经过多年的发展,天体生物学研究领域已经获得了一系列重要认知。前生命化学反应新途径的发现使我们更好地认识从化学反应向生命反应的跨越^[18];生

图1 天体生物学研究领域发文量检索统计和代表性的深空探测任务。(a) 天体生物学领域总发文量排名前20的国家或地区。(b) 1960~2019年天体生物学领域总发文量的时间趋势和代表性的深空探测任务。数据来源于Web of Science数据库核心合集,利用主题词(astrobiology OR exobiology OR cosmobiology OR bioastronomy)进行检索,检索时间为2019年9月21日

Figure 1 Publication trends of Astrobiology in the Web of Science (WoS) and representative astrobiology missions. (a) Percentage of publications by top 20 countries or regions. (b) Trends in the total number of publications between 1960 and 2019. Data were retrieved in September 21, 2019 from the WoS Core Collection through the following search query: Astrobiology OR exobiology OR cosmobiology OR bioastronomy

命可能在更早期的地球(如40亿年前的冥古宙)就已经出现^[19,20],极端环境微生物的发现和研发极大地拓展了对生命生存极限的认识,也为理解地球生命起源和早期演化以及地外生命可能的生存方式提供了新思路^[13]。在行星研究方面,月球上发现水的存在^[21]、火星早期可能具有温暖或寒冷但湿润的宜居环境和大面积的湖泊或海洋^[22-25]、现代火星的部分区域仍可能存在地下液态水^[26]、木卫二和土卫二等卫星具有液态海洋^[27-29]、陨石和彗星中存在许多氨基酸和复杂有机物^[30],以及越来越多系外宜居行星的发现等^[31,32],都暗示生命可能不是地球所独有。过去20年,许多国家纷纷成立天体生物学相关的学术或研究机构。如1999年成

立的西班牙天体生物研究中心(Spanish Astrobiology Center)、2000年成立的墨西哥天体生物学学会(Mexican Astrobiology Society)、2001年成立的欧洲天体生物学联合会(European Astrobiology Network Association)、2002年成立的俄罗斯天体生物学中心(Russian Astrobiology Centre)和澳大利亚天体生物研究中心(Australian Center for Astrobiology)、2011年成立的英国天体生物研究中心(UK Centre for Astrobiology)、2015年成立的日本天体生物学中心(Japan Astrobiology Center)以及2019年成立的欧洲天体生物研究所(European Astrobiology Institute)等, 标志着天体生物学在全球范围快速发展。

2 主要研究方向和取得的重要进展

生命和宜居环境在宇宙中如何形成和演化是天体生物学的核心科学问题。围绕这一问题, 当前天体生物学的主要研究方向包括生命的起源与演化、宜居环境、地外生命探测、生命星际传输、行星开发和保护等。

2.1 生命起源与早期演化

地球是目前已知唯一存在生命的星球, 认识地球生命的起源、复制和维持机制是天体生物学的重要研究领域, 也为探寻地外生命提供基本前提。主要研究内容包括: (1) 生命起源的行星际和地球化学环境; (2) 组成生命的小分子物质的来源以及它们如何形成核酸、蛋白质、磷脂双分子层等高分子物质; (3) 早期生命的生理代谢方式。上述研究不仅可以用于评判地球以外其他可能存在生命的区域, 也有助于更好地地区分地外生命探测中获得的可能生命信号和非生物化学反应产生的信号等。地球已有约45.6亿年的历史, 地球生命至少在35~38亿年前就已经出现^[33,34], 甚至更早^[35,36]。前生命化学过程, 即从非生命物质逐步演化到原始生命的过程, 可能发生的更早, 因为在43~44亿年前地球表面的温度已经冷却到可以支持液态水的存在^[37,38]。地球上最早出现的生命由当时环境中已经存在的简单有机分子组装形成, 而这些有机分子可能产生于地球早期的大气、海洋等环境中, 也可能形成于早期的太阳星云和小行星、彗星等天体中, 并由陨石、彗星等携带来到地球^[36,39,40]。生命起源研究的主要科学问题包括: 早期地球环境如何演化、有机分子通过何种方式聚集、它们是如何形成高分子化合物直至产生早期生

命、地球生命起源了一次还是多次, 以及如何界定前生命化学反应和生命的生化过程等。

制约生命起源研究的主要瓶颈是生命的定义或者生命与非生命的区别还没有准确界定。尽管科学家尝试总结了地球生命的共同特征, 如有序结构、生殖、生长发育、能量利用、对环境做出反应、体内平衡、演化适应等^[41], 但尚不清楚这些特征是宇宙中所有生命共有的, 还是仅为地球生命所特有^[42,43]。生命是能够进行达尔文式演化的一种自我维持的化学系统(self-sustaining chemical system capable of Darwinian evolution), 这是NASA在开展天体生物学研究中使用的工作定义^[44]。前生命化学过程演化到早期生命是在何种环境下进行的, 这是生命起源研究的热点。目前的假说包括可能发生在海底热液口附近^[45]、海洋表面^[46]、潮汐池^[47]、陆地热泉^[48]、矿物-水-大气界面^[49]、火山含水层^[50]等。对于这些极端环境中生物的多样性、适应机制和演化的研究将有助于更好地认识生命起源和早期演化。微生物可能是地球之外其他天体上最可能存在的一种生命形式, 研究生命起源和早期演化的一个重要手段就是探究地球上所有微生物的共同祖先(LUCA)可能具有的代谢特点及其起源和演化的环境^[51]。未来将深空探测、实验研究以及理论模拟相结合, 从演化的视角来研究前生命化学反应中单个分子/化合物的功能、原始生命体的生理代谢、早期生命复杂体系的形成等, 将有助于更好地认识地球生命的起源和早期演化。

古老岩石可以记录地球早期的部分环境信息, 为研究生命起源和早期演化的背景环境提供了部分线索^[52]。地球是一个活跃的星球, 板块运动引起的海陆变迁、气候变化等诸多因素导致地质历史早期的许多线索都难以保存下来。现代太阳系中的一些天体, 如土卫六等, 可能具有与地球生命起源时类似的行星化学环境, 对这些天体的探测和深入研究将为认识前生命化学反应向原始生命体过渡提供线索。此外, 地球早期的物质由于陨石撞击等事件可能溅射到距离较近的月球和火星上, 并在这些星球上保存下来, 这可能为揭开地球生命起源之谜与早期环境提供另一条途径^[53]。

地球的历史是一部生命与环境之间相互作用和协同演化的历史。生命自起源伊始就受到地球环境的制约, 从前生命化学反应向原始生物过程的过渡是环境对生命的最早作用。在随后的演化中, 生物逐渐产生了各种复杂的生理结构和代谢过程以更好地适应地球环

境。地质历史时期一些重大的环境事件对地球生物圈的多样性、演化速率、演化方向等都产生了重要影响。如新元古代的“雪球地球”事件引起了全球气候环境的变化,促进了后来多细胞生物的繁盛^[54,55]。地幔对流、板块运动、火山活动、地磁场变化等地质活动和环境演变都会对生物圈的演化产生重要影响^[56]。地球生命又通过各种生理代谢活动深刻影响和改变了地球的大气、海洋和表面地球化学等环境特征^[57]。如地质历史早期的铁氧化细菌、铁还原细菌、趋磁细菌等微生物可能参与了前寒武纪条带状铁建造(BIF)的沉积,这些铁建造是当前世界上重要的铁矿资源^[58-60]。产氧光合微生物的出现则促使地表从还原环境转变为氧化环境,引起了水圈和大气圈中氧气浓度的增加,改变了地球表层的环境和后续生物圈演化的方向^[61]。地表和深部生物圈中的微生物在全球元素的地球化学循环中发挥了不可或缺的作用^[62]。这些生物参与和主导的过程逐渐成为生物圈对地质圈层的精细调节,进一步维系了地球的宜居环境。

2.2 宜居环境

宜居环境指具有适宜任何形式生命出现或生存的环境,其空间范围可以大至一个行星系统,也可以小至微生物生存的微尺度环境^[63]。在天体生物学的理论框架中,是否支持液态水的存在是衡量环境宜居性的一个核心指标。此外,能量(太阳能或化学能)、生命所需的基本元素(CHONSP)的丰度等也是影响环境宜居性的重要参数。板块运动、全球或局部磁场等则可能有助于形成类似地球的、具有长期演化历史的大型生态系统^[64]。在行星宜居环境研究中,除了考虑空间尺度,还要在时间尺度上以演化的视角进行探讨。生命起源的环境与其繁盛的环境可能截然不同,当前宜居的环境过去不一定适宜生命的发生,而现在不宜居的环境过去可能可以支持生命起源和演化。地球在生命出现之前就已经具有宜居环境,早期地球的环境与现在环境差别巨大,从形成初期的高温和高辐射环境到液态水和早期海洋的出现^[65],从还原缺氧的表层环境到氧气的出现和臭氧层的形成^[61],从被冰川覆盖的“雪球地球”到全球升温变暖的极热事件^[66,67]。地球在地质历史时期经历过多种不同的环境,说明同一个天体在不同演化阶段可以具有截然不同的宜居环境,而生命也会不断地适应环境并在一定程度上改造宜居环境。从空间和时间尺度上共同探究行星宜居环境是该领域的发

展趋势。

对地外天体宜居环境的判别主要依据对地球类似极端环境的类比研究。截止到2017年,人们已经发现了至少37个不同的类比研究地点或环境^[68],包括我国柴达木盆地类火星环境和地貌^[69,70]。对这些极端环境中微生物的研究改变了人们对生命生存极限的认识。目前已在40~70 km高度的临近空间、一万米以下的深海、120°C的高温环境、零下17°C的低温环境、常年干燥的沙漠、南极永久冻土带等极端环境中都发现了微生物的存在^[13],这拓宽了宜居环境的定义和范畴^[71]。这些极端环境可以类比太阳系内一些天体,如临近空间、沙漠、南极永冻土带可以类比现在的火星环境,深海和冰下湖可以类比土卫二和木卫二内部的海洋环境等。对极端环境及其微生物的研究可以帮助我们更加准确地评判地外天体是否具有宜居环境。

火星是除地球以外研究最为深入的行星。早期火星具有大量液态水甚至海洋^[72],具有核、幔、壳分层和全球磁场^[73,74],可能发生过板块运动^[75,76],气候湿润^[77],这些证据表明火星可能一度具有类似于早期地球的宜居环境。现代火星地表环境恶劣,但其地下可能具有支持类似于地球微生物等生命形式生存的条件,当前对火星宜居环境和生命的探索已逐渐从地表转入地下^[78]。

太阳系内的一些冰卫星,如木卫二、木卫三、木卫四、土卫二、土卫四和海卫一等,在其表面冰层以下可能存在液态的海洋,具有一定的宜居性^[29]。在这些冰卫星中,木卫二和土卫二尤为引人关注。木卫二的海洋与其岩石层直接接触,推测可能存在类似地球的深海热液喷口,为生命的起源和演化提供了必要的能量和营养元素^[79]。土卫二表面向外溅射出含水冰颗粒和有机物的羽状物,暗示其内部可能存在液态水和一些生命活动或类似于地球的前生命化学反应过程等^[27,80]。土卫六大气中存在着较复杂的有机合成反应,其表面存在富含烷烃的海洋,被认为是研究太阳系生命起源和早期生命演化的天然实验室^[29]。对这些太阳系冰卫星潜在宜居环境的研究使人们认识到宇宙中宜居环境具有多样性。

寻找可能具有宜居环境的系外行星也是当前天体生物学的热点。截止到2019年9月,已发现超过4000颗确定的系外行星,另有1000多颗尚待进一步确认。尽管人们已经认识到系外行星无论从其本身特点还是其所处的行星系统都可能与地球及太阳系的其他

行星有显著的差异,它们具有的潜在宜居环境也千差万别,但是目前对宜居系外行星的基本定义依然是其星球表面的温度、压力等物理环境可以维持液态水存在的“超级地球”^[81].该标准可以帮助人们从越来越多被发现的系外行星中优先选择最可能具有宜居环境的天体开展深入研究.

2.3 地外生命探测

随着对地球生命和宜居环境的深入认识以及各种探测技术的进步,人类已经具备搜寻地外生命的能力.地外生命探测研究的核心科学问题包括:如何区分生命和非生命信号、选择何种生物标志物或生命信号(biosignatures)来准确指示现在或过去存在过生命,以及如何检测和识别这些生物标志物或信号等.目前用于地外生命探测的生物标志物或生命信号主要包括活体生命、化石(宏体化石、微化石、遗迹化石等)、生命过程产生的物质(如甲烷、氧气、磁铁矿等)、生命活动的化学信号(生物大分子、氨基酸的纯手性、同位素分馏、化学不平衡等)、高等生命科技活动产生的信号(如无线电波、灯光、激光、大气中工业来源污染物、巨型建筑等)等.

在地外生命探测中,常用的方法有遥感探测、原位探测和采样返回/陨石分析等.基于地基和天基望远镜的遥感探测是太阳系内地外生命探测的最主要手段,更是目前系外行星探测的唯一手段.对于太阳系内星体,遥感技术可以在一定程度上实现对云层、地貌甚至地表流体等探测;但对于系外行星,目前主要集中在对其行星大气进行遥感分析,包括可见光和红外光谱、大气化学不平衡(如同时存在氧气和甲烷)、光合色素、透射光谱等信号.此外,系外行星上可能存在的智能生物产生的信号也是地外生命探测中关注的潜在生命信号^[82].2018年美国国会要求NASA规划搜寻地外技术信号(Technosignatures)的相关研究,以更好地寻找可能存在的高等外星生命^[83].

原位探测是人类发射探测器到目标天体进行原位分析和探测.原位检测手段主要有质谱法、气相色谱法-质谱联用、拉曼光谱、免疫分析技术和荧光光谱等.目前原位地外生命探测任务主要集中在火星,其中最具代表性的是20世纪70年代的“海盗号”火星表面探测任务和2011年发射的“好奇号”巡视器.“海盗号”专门设计了3项实验来研究火星表面是否存在生命^[11,12].“好奇号”上搭载了多个科学载荷用于环境监测、元素分

析、矿物学分析、有机质探测等,其主要任务是研究火星的环境变化、地质过程、大气演化等,评判火星过去或现在支持生命存在的可能性^[84].

陨石是目前最容易获得的地外样品,截止到2019年9月,国际陨石命名委员会数据库已收录了超过61000块陨石,超过65%的陨石由美国、日本、中国、欧洲等在南极发现^[85],其中我国已在南极收集到超过12000块陨石^[86].已发现陨石的源区包括月球、火星、小行星、彗星等,这些陨石为开展太阳系内地外生命探测研究提供了直接研究对象.发现自南极的火星陨石ALH84001无疑是其中最引人关注的.1996年,美国学者McKay等人^[15]在这块陨石中发现了疑似微生物化石以及可能由微生物(如趋磁细菌^[59]等)活动产生的矿物和有机物.尽管后续研究表明,这些疑似生命活动产生的化石、矿物和有机物都可以通过非生物过程生成或可能来自地球的污染,但对该陨石的深入研究极大地推动了后续火星探测计划的实施,也带动了地外样品分析测试技术的进步,促进了天体生物学相关研究的跨越发展^[87].我国学者近期在提森特火星陨石中发现了来源于火星的、具有类似地球生物成因特点的有机碳,可能是火星曾存在过生命的证据^[88].人类已成功实现了月球样品的取样返回,中国、美国等也已经规划了火星取样返回的深空探测任务,可以预见在不久的将来对返回火星样品的研究将揭开地外生命探测的新篇章.

2.4 生命的星际传输

组成地球原始生命体的小分子有机物是形成于地球还是来源于地外,目前尚无定论.但可以确定的是在宇宙空间中存在很多有机分子,其中一些是地球前生命化学反应中活跃分子,如氰化氢、氨、甲醛、甲酸等,它们可以“搭乘”彗星、小行星等在太阳系内或星际间传输.一些学者甚至认为地球上的生命可能最初也是来源于地外,通过陨石、彗星等在40多亿年前到达地球,然后逐渐演化成现在的地球生物圈,该假说称为胚种论(Panspermia)^[89].胚种论认为生命的“种子”在宇宙中已经存在,它们可以在不同天体间传播.如果胚种论假说成立,那么某个天体是否具有生命将在很大程度上取决于该天体是否具有合适的宜居环境以及能否接收到生命“种子”.基于此假说,现今地球可能依然接收许多来自地外的生命.微陨石或星际尘埃到达地球后可以漂浮在临近空间(海平面之上20~100 km高

度的空间), 因此对临近空间中微陨石和微生物的研究可以为地球生命的可能来源提供新认识^[90]。值得注意的是尽管胚种论可以在一定程度上解释生命在宇宙中分布和传播, 但该假说没有回答生命的起源问题, 即宇宙中最初的生命“种子”是如何产生的。

研究生命在星际间的可能传播, 需要解决的关键科学问题是它们如何克服星际中高辐射、真空、温度巨变、微重力等极端环境, 并在降落时如何承受高冲击、高温等剧烈过程。围绕这些科学问题, 生命星际传输研究主要有4个途径。一是基于计算机的理论模拟工作; 二是对地球上一些极端环境(如沙漠岩石表层和孔隙中)的微生物开展类比研究, 检测岩石是否可以保护生物免受太阳辐射、温度变化等影响; 三是进行模拟实验, 开展高辐射、高冲击、低真空等极端环境对代表性生物影响的研究; 四是将代表性生物样品运送至国际空间站或近地轨道空间开展原位暴露实验。现有研究表明, 在特定的条件下(如微生物以孢子形式生存于陨石或彗星内部)生命在太阳系内短距离传输可能可以实现^[91]。

2.5 行星开发与行星保护

建立可持续自主运行的地外基地一直是人类开展深空探测所追求的高级目标。在近期的规划中, 月球将建立基地并成为人类迈向深空的中继站。美国已经规划“阿耳忒弥斯”(Artemis)计划载人重返月球, 在此基础上建立月球基地^[92]。欧洲太空局构想建立“月球村”(Moon Village), 拟在月球建立永久基地作为人类深空探测的下一步任务^[93]。俄罗斯也计划在2030年以后实现宇航员登陆月球, 并建设一个月球基地, 开展相关科研工作。

由于外星环境与地球环境差别很大, 建立地外基地面临极大的挑战。近年来兴起的空间合成生物学(Space Synthetic Biology)为载人深空探测、地外基地建设乃至未来的行星开发等提供了可能的技术支持^[94,95]。空间合成生物学指根据空间探测需求而开展的合成生物学相关研究, 主要研究内容涉及: (1) 空间资源原位利用, 通过极端环境生物充分开发地外天体原位资源(如矿质元素、气体等)进行物质合成, 减轻从地球携带资源的负担; (2) 地外基地建设生物制造, 利用微生物沉积岩石中的钙或铁等制造建设地外基地所需的生物水泥或生物多聚物等建筑材料; (3) 地外生命维持系统, 利用生物实现地外基地人类生存所

需要的氧气、食物、洁净水和废物循环等; (4) 空间医学与宇航员健康, 研究长时间太空飞行过程中的宇航员疾病预防、治疗和辐射防护等; (5) 空间控制论, 建立和运行基于合成生物学的空间控制系统, 应用于空间环境下的生物制造; (6) 地外天体地球化, 利用生物或地质过程实现地外天体环境的全部或部分向类地球环境转化^[96]。

人类已经有能力将生物样品(包括人类本身)送至太阳系内的其他天体上, 随之而来的问题就是地球生物(特别是微生物)和有机物质可能会污染具有一定宜居性的天体; 反之, 未来的火星或其他天体的样品返回和飞行器返回等也可能增加地球受到其他天体物质(甚至地外生命)污染的风险^[97]。行星保护就是针对上述潜在风险, 采取有效措施以避免或尽可能降低地球与其他天体之间可能的生物和有机物交叉污染^[98]。行星保护(早期称为“行星隔离”)政策不仅保护地球以及其他天体可能存在的生物圈或生态系统, 而且可以保障探索地外生命科学研究的可信性(如排除地球生物污染等)^[99]。值得注意的是, 有少数学者认为地球生命由于种种原因(如冲击溅射并通过星际传输到达火星、早期火星探测任务可能已携带地球微生物到达火星等)可能已经存在于火星上, 现行的行星保护政策太过严格, 极大地增加了深空探测的预算成本, 限制了人类探测火星的进程^[100,101]。但该观点受到了一些天体生物学家的强烈反对^[102]。

随着人类深空探测的发展, 现有的行星保护政策也将受到挑战, 需要不断调整更新。例如, 美国已计划在2030年以后开展载人火星计划, 一些学者认为当宇航员踏上火星起, 现有的行星保护政策将不再有效, 因为人体内和体表上含有大量不同种类的微生物, 这些微生物具有污染火星的潜在威胁^[101]。未来人类还将实施对木卫二、土卫二等可能具有宜居环境的冰天体的原位探测。在未来的深空探测中如何有效避免地球生物对太阳系这些天体的污染, 将是行星开发和保护研究领域的重要研究内容。

3 我国的天体生物学研究和未来发展建议

从20世纪80年代利用返回式卫星和高空气球开展空间诱变育种到20世纪90年代开始实施的载人航天工程、从神舟系列飞船到我国首颗微重力科学实验卫星实践十号、从嫦娥四号搭载的生物科普试验载荷到即将开启的空间站任务, 我国科研人员已成功研制了多

个天体生物学的装置和载荷,开展了数十项生物实验研究,在微重力、辐射等空间极端环境对生物的影响等方面取得了重要进展^[103]。近年来,国内学者相继出版了《空间微生物学基础与应用研究》^[104]、《生物再生生命保障系统理论与技术》^[105]、《宇宙生物学》^[106]、《中国学科发展战略·地球生物学》^[107]、

《空间生物学与空间生物技术》^[108]等著作或译著,标志着天体生物学研究在我国进入了快速发展期。一些全国性学会成立了与天体生物学相关的委员会,如中国空间科学学会的“空间生命专业委员会”和“空间生命起源与进化专业委员会”、中国宇航学会的“航天医学工程与空间生物专业委员会”、中国矿物岩石地球化学学会下的“陨石及天体化学专业委员会”、中国微生物学会下的“地质微生物专业委员会”等,并开始制订一些学科发展战略规划,如中国科学院地学部组织的“地球生物学与天体生物学学科发展战略研究”等。

在此背景下,国内许多科研机构 and 高校成立了与天体生物学相关的研究机构和实验室,初步培养了一批天体生物学研究队伍。近年来,我国学者在有机磷化学与生命起源、生命与环境协同演化、地磁场变化对生物圈影响、类火星地貌与环境、极端环境微生物、火星陨石有机质与水的发现和同位素分析、行星磁场与行星宜居性演化、系外行星大气与宜居环境等天体生物学研究领域取得了一系列新进展。2019年初,中国科学院大学地球与行星科学学院及中国科学院地质与地球物理研究所联合在中国科学院大学增设“行星科学”一级学科^[109-111],正式将“天体生物学”列为“行星地质学”二级学科下的一个重要研究方向^[112],该研究方向的建立将促进我国天体生物学的高层次交叉人才培养,提升我国天体生物学研究的国际影响。

我国的天体生物学研究目前还处于起步阶段,同美国和欧洲国家相比我国的天体生物学研究无论在成果产出和影响、还是队伍规模、经费支持、人才培养等方面都存在较大差距。为促进我国天体生物学的快速发展,我们提出以下几点建议。

(1) 将宜居环境和地外生命研究作为我国深空探测科学研究的重要内容,通过顶层设计尽快制定符合我国国情的天体生物学发展路线图和战略规划。近年来我国深空探测在工程技术方面发展迅速,已成功实施5次月球探测任务,特别是嫦娥四号首次实现了人类在月球背面软着陆,标志着我国深空探测技术进入世界前列。与深空探测在工程技术方面取得的巨大进步

相比,我国在深空探测基础科学研究方面还有所欠缺,特别是鲜有国际影响力的重大科学发现。天体生物学是深空探测基础科学的重要研究内容,也是未来深空探测有可能取得重大突破的领域。美国NASA和欧洲空间局(ESA)都把天体生物学列为其主要发展方向予以优先支持。NASA分别于1998^[2]、2003^[113]和2008年^[4]发布了3版天体生物学发展路线图,并于2015和2019年制定了两版天体生物学的战略规划^[114,115],为美国天体生物学未来20年的发展指明了方向。ESA于2016年发布其天体生物学路线图^[5],并于2019年成立了欧洲天体生物研究所,总体规划欧洲未来开展的天体生物学研究和主要发展方向。中国前期的载人航天、月球探测等工程中也开展了与天体生物学相关的初步研究工作。近期我国已经规划了包括空间站、月球、火星、木星及其卫星、近地小行星、主带彗星等在内的系列探测计划。应结合我国深空探测的战略总目标,借鉴美国、欧洲国家等成功经验^[17,116],通过顶层设计,总体规划并制定符合我国国情的天体生物学发展路线图和战略规划,凝练重大科学问题,明确优先发展方向,确保经费稳定支持,首先实现在若干个研究方向上的突破,以点带面,全面提升我国在天体生物学领域的研究能力和国际影响力,服务国家深空探测重大战略需求。

(2) 下大力气加强天体生物学的学科建设和复合型人才的培养,加强天体生物学实验技术支撑平台的建设。天体生物学作为一门前沿交叉学科,需要研究人员具有一定的生命科学、地球科学、空间科学、行星科学等不同学科的基本知识背景,需要参与相关载荷的设计、研制和优化,这都对天体生物学的人才培养提出了很高的要求。美国、欧洲国家等非常重视天体生物学人才的培养,许多高校都开设天体生物学相关课程,具有较完备的学科体系,可授予天体生物学博士学位,培养造就了一大批活跃在深空探测领域的天体生物学家。我国的天体生物学研究经过多年的发展已经初具规模,一些科研机构和高校也开始探索天体生物学的学科建设和人才培养模式,取得了可喜的进展。但我们认识到在我国的学科设置中还没有天体生物学这个学科,天体生物学师资队伍匮乏。此外,天体生物研究所获得的样品量较少、实验周期较长、样品分析所需的精度和灵敏度较高,这对相关的实验技术平台提出了更高的要求。依托当下我国深空探测的迅猛发展,一方面应该打破固有的学科壁垒,设立天体生物学本科生/研究生课程,编写天体生物学教材,完善天体

生物学的人才培养体系,培养青年人才队伍,推进天体生物学学科建设和发展;另一方面应加强天体生物学相关实验技术支撑平台建设,为实现我国天体生物学的跨越式发展提供重要保障。

(3) 加强天体生物学科普宣传与教育。宇宙和生命是引起人们无限遐想两个永恒主题,天体生物学是研究宇宙中的生命,它关注的一些问题甚至涉及哲学、宗教、社会科学等方面^[117],对各个年龄段的公众都具有天然的神秘感和吸引力,是开展科普宣传和教育的最佳领域^[118,119]。美国NASA天体生物学研究所自成立之初就要求每个成员机构必须开展本科生/研究生/博士后教育以及中小学生和公众的科普宣传^[17]。英国天体生物研究中心把教育(大学生和中小学生等)、培训(中小学教师和航天员等)和公众科普作为其主要发展方向之一^[116]。天体生物学研究和深空探测任务具有挑战性强、周期长等特点,一些任务可能要几代科学家的共同努力才能完成,需要吸引和培养更多青年后备人才,形成良好的人才梯队。加强天体生物学的科普宣传和教育在我国现阶段具有重要的科学和现实意义:一是扩大我国深空探测成果的影响力,提升民族的自豪感;二是加强科研人员与公众的对话和沟通,

增强公众对科学的理解;三是提高民众的科学素养,激发青少年的科研热情,培育深空探测工程与科学研究的后备人才。

4 结语

50年前,“阿波罗”计划完成人类首次登月任务,实现了千百年来人类走出地球的梦想。回顾天体生物学半个多世纪的发展历程,美国一直引领着该学科的发展,欧洲国家紧随其后,产出了一系列重大发现和成果,培养了一批具有国际影响力的领军人才和天体生物学团队。今天,中国的探月工程和深空探测取得了举世瞩目的成就,已经崛起为深空探测的大国。我国包括天体生物学在内的行星科学的发展必然经过前期以工程任务为主、中期科学与工程并重、后期以科学问题为导向来制定探测任务这一发展阶段。可以预计未来20~30年将是我国深空探测科学研究发展的黄金期。应该抓住这个难得的历史机遇,建成符合中国国情的天体生物学研究和人才培养体系,通过顶层设计聚焦重大科学问题,产出具有原创性和国际影响力的科研成果,助力我国从深空探测大国迈向深空探测强国,早日实现“探索浩瀚宇宙、和平利用太空”的人类共同梦想。

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所胡森博士提供陨石研究方面的资料和建议,感谢中国科学院地质与地球物理研究所刘海韵、刘佳、纪润佳等在撰文中的帮助,感谢审稿人提出的建设性意见。

参考文献

- 1 Lederberg J. Exobiology: Approaches to life beyond the Earth. *Science*, 1960, 132: 393–400
- 2 Morrison D. The NASA Astrobiology Program. *Astrobiology*, 2001, 1: 3–13
- 3 Li Y L. Outline of Astrobiology (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2011, 29: 66–74 [李一良. 天体生物学概要. 科技导报, 2011, 29: 66–74]
- 4 Des Marais D J, Nuth III J A, Allamandola L J, et al. The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 2008, 8: 715–730
- 5 Horneck G, Walter N, Westall F, et al. AstRoMap European Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 2016, 16: 201–243
- 6 Sweven G. Limanora: The Island of Progress. New York: GP Putnam's Sons, 1903
- 7 Noack L, Verseux C, Serrano P, et al. Astrobiology from early-career scientists' perspective. *Int J AstroBiol*, 2015, 14: 533–535
- 8 Briot D. A possible first use of the word Astrobiology? *Astrobiology*, 2012, 12: 1154–1156
- 9 Watson J D, Crick F H C. Molecular structure of nucleic acids: A structure for deoxyribose nucleic acid. *Nature*, 1953, 171: 737–738
- 10 Miller S L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions. *Science*, 1953, 117: 528–529
- 11 Klein H P, Horowitz N H, Levin G V, et al. The viking biological investigation: Preliminary results. *Science*, 1976, 194: 99–105
- 12 Klein H P. The Viking biological investigation: General aspects. *J Geophys Res*, 1977, 82: 4677–4680
- 13 Rothschild L J, Mancinelli R L. Life in extreme environments. *Nature*, 2001, 409: 1092–1101
- 14 Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 1995, 378: 355–359
- 15 McKay D S, Gibson E K, Thomas-Keptra K L, et al. Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH84001. *Science*, 1996, 273: 924–930
- 16 Carr M H, Belton M J S, Chapman C R, et al. Evidence for a subsurface ocean on Europa. *Nature*, 1998, 391: 363–365
- 17 Soffen G. Astrobiology. *Adv Space Res*, 1999, 23: 283–288
- 18 Braakman R, Smith E. The compositional and evolutionary logic of metabolism. *Phys Biol*, 2013, 10: 011001

- 19 Abramov O, Mojzsis S J. Microbial habitability of the Hadean Earth during the late heavy bombardment. *Nature*, 2009, 459: 419–422
- 20 Harrison T M. The Hadean crust: Evidence from >4 Ga zircons. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2009, 37: 479–505
- 21 Anand M. Lunar water: A brief review. *Earth Moon Planets*, 2010, 107: 65–73
- 22 Solomon S C, Aharonson O, Aurnou J M, et al. New perspectives on ancient Mars. *Science*, 2005, 307: 1214–1220
- 23 Hurowitz J A, Grotzinger J P, Fischer W W, et al. Redox stratification of an ancient lake in Gale crater, Mars. *Science*, 2017, 356: eaah6849
- 24 Eigenbrode J L, Summons R E, Steele A, et al. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars. *Science*, 2018, 360: 1096–1101
- 25 Ramirez R M, Craddock R A. The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars. *Nat Geosci*, 2018, 11: 230–237
- 26 Orosei R, Lauro S E, Pettinelli E, et al. Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*, 2018, 361: 490–493
- 27 Deamer D, Damer B. Can life begin on Enceladus? A perspective from hydrothermal chemistry. *Astrobiology*, 2017, 17: 834–839
- 28 Barge L M, White L M. Experimentally testing hydrothermal vent origin of life on Enceladus and other icy/ocean worlds. *Astrobiology*, 2017, 17: 820–833
- 29 Hendrix A R, Hurford T A, Barge L M, et al. The NASA roadmap to ocean worlds. *Astrobiology*, 2019, 19: 1–27
- 30 Botta O, Bada J L. Extraterrestrial organic compounds in meteorites. *Surv Geophys*, 2002, 23: 411–467
- 31 Mayor M, Queloz D. From 51 Peg to Earth-type planets. *New Astron Rev*, 2012, 56: 19–24
- 32 Grenfell J L. A review of exoplanetary biosignatures. *Phys Rep*, 2017, 713: 1–17
- 33 Allwood A C, Grotzinger J P, Knoll A H, et al. Controls on development and diversity of early Archean stromatolites. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 9548–9555
- 34 Allwood A C, Walter M R, Burch I W, et al. 3.43 billion-year-old stromatolite reef from the Pilbara Craton of Western Australia: Ecosystem-scale insights to early life on Earth. *Precambrian Res*, 2007, 158: 198–227
- 35 Dodd M S, Papineau D, Grenne T, et al. Evidence for early life in Earth's oldest hydrothermal vent precipitates. *Nature*, 2017, 543: 60–64
- 36 Santosh M, Arai T, Maruyama S. Hadean Earth and primordial continents: The cradle of prebiotic life. *GeoSci Front*, 2017, 8: 309–327
- 37 Mojzsis S J, Harrison T M, Pidgeon R T. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4300 Myr ago. *Nature*, 2001, 409: 178–181
- 38 Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 2001, 409: 175–178
- 39 Lazcano A, Miller S L. The origin and early evolution of life: Prebiotic chemistry, the pre-RNA world, and time. *Cell*, 1996, 85: 793–798
- 40 Ruiz-Mirazo K, Briones C, de la Escosura A. Prebiotic systems chemistry: New perspectives for the origins of life. *Chem Rev*, 2014, 114: 285–366
- 41 Campbell N A, Reece J B. *Biology*. 6th ed. New York: Benjamin Cummings Publishing Company, 2002
- 42 Domagal-Goldman S D, Wright K E, Adamala K, et al. The Astrobiology Primer v2.0. *Astrobiology*, 2016, 16: 561–653
- 43 Lv K P, Norman L, Li Y L. Oxygen-free biochemistry: The putative CHN foundation for exotic life in a hydrocarbon world? *Astrobiology*, 2017, 17: 1173–1181
- 44 Benner S A. Defining life. *Astrobiology*, 2010, 10: 1021–1030
- 45 Baross J A, Hoffman S E. Submarine hydrothermal vents and associated gradient environments as sites for the origin and evolution of life. *Orig Life Evol Biosph*, 1985, 15: 327–345
- 46 Michaelian K. Thermodynamic dissipation theory for the origin of life. *Earth Syst Dynam*, 2011, 2: 37–51
- 47 Towe K M. Environmental conditions surrounding the origin and early Archean evolution of life: A hypothesis. *Precambrian Res*, 1981, 16: 1–10
- 48 Djokic T, Van Kranendonk M J, Campbell K A, et al. Earliest signs of life on land preserved in ca. 3.5 Ga hot spring deposits. *Nat Commun*, 2017, 8: 15263
- 49 Hazen R M. Geochemical origins of life. In: Knoll A H, Canfield D E, Konhauser K, et al., eds. *Fundamentals of Geobiology*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. 315–332
- 50 Washington J. The possible role of volcanic aquifers in prebiologic genesis of organic compounds and RNA. *Orig Life Evol Biosph*, 2000, 30: 53–79
- 51 Weiss M C, Sousa F L, Mrnjavac N, et al. The physiology and habitat of the last universal common ancestor. *Nat Microbiol*, 2016, 1: 16116
- 52 Eriksson P G, Catuneanu O, Nelson D R, et al. Events in the Precambrian history of the Earth: Challenges in discriminating their global significance. *Mar Pet Geol*, 2012, 33: 8–25
- 53 Bellucci J J, Nemchin A A, Grange M, et al. Terrestrial-like zircon in a clast from an Apollo 14 breccia. *Earth Planet Sci Lett*, 2019, 510: 173–185
- 54 Moczyłowska M. The Ediacaran microbiota and the survival of Snowball Earth conditions. *Precambrian Res*, 2008, 167: 1–15
- 55 Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Sci Adv*, 2017, 3: e1600983
- 56 Javaux E J, Dehant V. Habitability: From stars to cells. *Astron Astrophys Rev*, 2010, 18: 383–416

- 57 Xie S C, Yang H, Luo G M, et al. Geomicrobial functional groups: A window on the interaction between life and environments (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2012, 57: 3–22 [谢树成, 杨欢, 罗根明, 等. 地质微生物功能群: 生命与环境相互作用的重要突破口. *科学通报*, 2012, 57: 3–22]
- 58 Kendall B, Anbar A D, Kappler A, et al. The global iron cycle. In: Knoll A H, Canfield D E, Konhauser K, et al., eds. *Fundamentals of Geobiology*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. 65–92
- 59 Lin W, Bazylinski D A, Xiao T, et al. Life with compass: Diversity and biogeography of magnetotactic bacteria. *Environ Microbiol*, 2014, 16: 2646–2658
- 60 Wu W F, Li Y L, Pan Y X. Microbial mineralization in Precambrian banded iron formations (in Chinese). *Chin J Geol*, 2012, 47: 548–560 [吴文芳, 李一良, 潘永信. 微生物参与前寒武纪条带状铁建造沉积的研究进展. *地质科学*, 2012, 47: 548–560]
- 61 Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 2014, 506: 307–315
- 62 Colman D R, Poudel S, Stamps B W, et al. The deep, hot biosphere: Twenty-five years of retrospection. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 6895–6903
- 63 Cockell C S, Bush T, Bryce C, et al. Habitability: A review. *Astrobiology*, 2016, 16: 89–117
- 64 Shahar A, Driscoll P, Weinberger A, et al. What makes a planet habitable? *Science*, 2019, 364: 434–435
- 65 Hao X L, Li Y L. Experimental approach to the direct interaction between the H₂O-CO₂ atmosphere and the crust on the earliest Earth: Implications for the early evolution of minerals and the proto-atmosphere. *Front Earth Sci*, 2018, 6: 1–14
- 66 Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A neoproterozoic snowball earth. *Science*, 1998, 281: 1342–1346
- 67 Kennett J P, Stott L D. Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene. *Nature*, 1991, 353: 225–229
- 68 Martins Z, Cottin H, Kotler J M, et al. Earth as a tool for Astrobiology—A European perspective. *Space Sci Rev*, 2017, 209: 43–81
- 69 Xiao L, Wang J, Dang Y, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Sci Rev*, 2017, 164: 84–101
- 70 Anglés A, Li Y. The western Qaidam Basin as a potential Martian environmental analogue: An overview. *J Geophys Res Planets*, 2017, 122: 856–888
- 71 Merino N, Aronson H S, Bojanova D P, et al. Living at the extremes: Extremophiles and the limits of life in a planetary context. *Front Microbiol*, 2019, 10: 1–39
- 72 Lunine J I, Chambers J, Morbidelli A, et al. The origin of water on Mars. *Icarus*, 2003, 165: 1–8
- 73 Stevenson D J. Mars' core and magnetism. *Nature*, 2001, 412: 214–219
- 74 Acuna M H, Connerney J E P, Lin R P, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars global surveyor MAG/ER experiment. *Science*, 1999, 284: 790–793
- 75 Breuer D. Early plate tectonics versus single-plate tectonics on Mars: Evidence from magnetic field history and crust evolution. *J Geophys Res*, 2003, 108: 5072
- 76 Connerney J E P, Acuña M H, Ness N F, et al. Tectonic implications of Mars crustal magnetism. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 14970–14975
- 77 Haberle R M, Catling D C, Carr M H, et al. The early mars climate system. In: Haberle R M, Clancy R T, Forget F, et al., eds. *The Atmosphere and Climate of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 526–568
- 78 Michalski J R, Onstott T C, Mojzsis S J, et al. The Martian subsurface as a potential window into the origin of life. *Nat Geosci*, 2017, 11: 21–26
- 79 Russell M J, Murray A E, Hand K P. The possible emergence of life and differentiation of a shallow biosphere on irradiated icy worlds: The example of Europa. *Astrobiology*, 2017, 17: 1265–1273
- 80 Seewald J S. Detecting molecular hydrogen on Enceladus. *Science*, 2017, 356: 132–133
- 81 Seager S. Exoplanet habitability. *Science*, 2013, 340: 577–581
- 82 Kraus J. We wait and wonder. *Cosm Search*, 1979, 1: 31
- 83 Participants NTW. NASA and the search for technosignatures: A report from the NASA Technosignatures Workshop. 2018, arXiv: 1812.08681
- 84 Meyer M. Foreword: Mars science laboratory, the first Astrobiology mission to Mars since Viking. *Space Sci Rev*, 2012, 170: 3–4
- 85 Wang K, Korotev R. Meteorites. In: Hamacher D W, Bank K, eds. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Oxford: Oxford University Press, 2019. 1–55
- 86 Miao B, Xia Z, Zhang C, et al. Progress of Antarctic meteorite survey and research in China. *Adv Polar Sci*, 2018, 29: 61–77
- 87 Martel J, Young D, Peng H H, et al. Biomimetic properties of minerals and the search for life in the Martian meteorite ALH84001. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 167–193
- 88 Lin Y, El Goresy A, Hu S, et al. NanoSIMS analysis of organic carbon from the Tissint Martian meteorite: Evidence for the past existence of subsurface organic-bearing fluids on Mars. *Meteorit Planet Sci*, 2014, 49: 2201–2218

- 89 Wesson P S. Panspermia, past and present: Astrophysical and biophysical conditions for the dissemination of life in space. *Space Sci Rev*, 2010, 156: 239–252
- 90 Wickramasinghe N C, Wickramasinghe D T, Steele E J. Comets, Enceladus and panspermia. *Astrophys Space Sci*, 2018, 363: 244
- 91 Moissl-Eichinger C, Cockell C, Rettberg P, et al. Venturing into new realms? Microorganisms in space. *FEMS Microbiol Rev*, 2016, 40: 722–737
- 92 Witze A. Can NASA really return people to the Moon by 2024? *Nature*, 2019, 571: 153–154
- 93 Foing B. Towards a moon village: Vision and opportunities. *EGU Gen Assem*, 2016, 18: EPSC2016-15695
- 94 Menezes A A, Cumbers J, Hogan J A, et al. Towards synthetic biological approaches to resource utilization on space missions. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 20140715
- 95 Rothschild L J. Synthetic biology meets bioprinting: Enabling technologies for humans on Mars (and Earth). *Biochem Soc Trans*, 2016, 44: 1158–1164
- 96 Menezes A A, Montague M G, Cumbers J, et al. Grand challenges in space synthetic biology. *J R Soc Interface*, 2015, 12: 20150803
- 97 Rummel J D. Planetary exploration in the time of astrobiology: Protecting against biological contamination. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 2128–2131
- 98 Meltzer M. When Biospheres Collide: A History of NASA's Planetary Protection Program. Washington DC: US Government Printing Office, 2012
- 99 Rummel J D. From planetary quarantine to planetary protection: A NASA and international story. *Astrobiology*, 2019, 19: 624–627
- 100 Fairén A G, Schulze-Makuch D. The overprotection of Mars. *Nat Geosci*, 2013, 6: 510–511
- 101 Fairén A G, Parro V, Schulze-Makuch D, et al. Searching for life on Mars before it is too late. *Astrobiology*, 2017, 17: 962–970
- 102 Rummel J D, Conley C A. Four fallacies and an oversight: Searching for Martian life. *Astrobiology*, 2017, 17: 971–974
- 103 Shang P, Hu Y T, Yang Z Q, et al. Tendency and critical scientific issues of space life science in China (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 796–808 [商澎, 呼延霆, 杨周岐, 等. 中国空间生命科学的关键科学问题和发展方向. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 796–808]
- 104 Liu C T, Chang D. *Space Microbiology Basic Research and Application* (in Chinese). Beijing: Peking University Medical Press, 2016 [刘长庭, 常德. *空间微生物学基础与应用研究*. 北京: 北京大学医学出版社, 2016]
- 105 Liu H, Gitelson II, Hu E Z, et al. *Theory and Technology of Bioregenerative Life Support System* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [刘红, Gitelson II, 胡恩柱, 等. *生物再生生命保障系统理论与技术*. 北京: 科学出版社, 2009]
- 106 Gerda H, Zhuang F Y. *Astrobiology* (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010 [格尔德·霍内克, 庄逢源. *宇宙生物学*. 北京: 中国宇航出版社, 2010]
- 107 Chinese Academy of Sciences. *Development Strategy of China Disciplines · Geobiology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015 [中国科学院. *中国学科发展战略·地球生物学*. 北京: 科学出版社, 2015]
- 108 Shang P, Yang P F, Lü Y. *Space Biology and Space Biotechnology* (in Chinese). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016 [商澎, 杨鹏飞, 吕毅. *空间生物学与空间生物技术*. 西安: 西北工业大学出版社, 2016]
- 109 Wu F Y, Wei Y, Song Y H, et al. From fusion of research and teaching to leading of science—Strategy to build planetary science program with Chinese characteristics (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 741–747 [吴福元, 魏勇, 宋玉环, 等. 从科教融合到科学引领——中国特色的行星科学建设思路. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 741–747]
- 110 Wan W X, Wei Y, Guo Z T, et al. Toward a power of planetary science from a gain of deep space exploration (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 748–755 [万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 748–755]
- 111 Wei Y, Zhu R X. Planetary science: Frontier of science and national strategy (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 756–759 [魏勇, 朱日祥. *行星科学: 科学前沿与国家战略*. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 756–759]
- 112 Li X Y, Lin W, Xiao Z Y, et al. Planetary geology: “Extraterrestrial” model of geology (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 776–784 [李雄耀, 林巍, 肖智勇, 等. *行星地质学: 地质学的“地外”模式*. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 776–784]
- 113 Des Marais D J, Allamandola L J, Benner S A, et al. The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 2003, 3: 219–235
- 114 Board S S, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe*. Washington DC: National Academies Press, 2019
- 115 Hays L, Archenbach L, Bailey J, et al. *NASA Astrobiology Strategy*. Washington DC: NASA, 2015
- 116 Cockell C S, Biller B, Bryce C, et al. The UK Centre for Astrobiology: A virtual Astrobiology centre. Accomplishments and lessons learned, 2011–2016. *Astrobiology*, 2018, 18: 224–243
- 117 Dunér D. Introduction: The history and philosophy of Astrobiology. *Astrobiology*, 2012, 12: 901–905
- 118 Quinlan C L. Bringing Astrobiology down to Earth. *Am Biol Teach*, 2015, 77: 567–574
- 119 Staley J T. Astrobiology, the transcendent science: The promise of astrobiology as an integrative approach for science and engineering education and research. *Curr Opin Biotech*, 2003, 14: 347–354

Summary for “天体生物学研究进展和发展趋势”

Overview and perspectives of Astrobiology

Wei Lin^{1,2*}, Yiliang Li³, Gaohong Wang⁴ & Yongxin Pan^{1,2,5}

¹ Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

³ Department of Earth Sciences, the University of Hong Kong, Hong Kong, China;

⁴ Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

⁵ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: weilin@mail.iggcas.ac.cn

Astrobiology concerns with the origin, evolution, habitability, and future of life on Earth and elsewhere in the context of cosmic evolution. More than 50 years after the emergence of the science of Astrobiology, mankind has made tremendous progress in understanding the origin of life, co-evolution of life and Earth environments, planetary habitability, life detection, and planetary protection and exploration. The multidisciplinary nature of Astrobiology has stimulated interdisciplinary collaborations between Life Sciences, Earth and Planetary Sciences, and Space Sciences. The search for extraterrestrial life in the solar system and beyond is the driving force behind the exploration of the universe. Earth is the only known planet on which life has been developed; therefore, the formation and evolution of habitable environments as well as life on Earth are of great interest to astrobiologists. Studies regarding prebiotic chemistry and early Earth planetary environments could lead to a better understanding of the emergence of life. The tolerance of microorganisms towards planetary field analogue extreme environments on Earth provides great insights into the physical and chemical boundaries of life. The requirements for life on Earth and its environmental limits further provide useful information to assess the habitability of other bodies within our solar system (such as Mars, Jupiter's moon Europa, and Saturn's moon Enceladus) and beyond. Recent exploration has suggested that ancient Mars had experienced periods of warmer climate with liquid water on the surface and that at least five planetary objects in our solar system (such as Europa and Enceladus) contain subsurface oceans. Till now, more than four thousand exoplanets have been discovered, which holds the promise to identify and characterize potentially Earth-like habitable worlds beyond our solar system. Here, we review the history of and major advances that built Astrobiology, with emphases on the origin and early evolution of life on Earth, the formation and evolution of habitable planets, the search for life in the universe, the propagation of life in space, and the planetary exploration and protection. Recently, China launched a long-term strategy on deep space exploration, which provides a great opportunity to develop Astrobiology. We provide here perspectives on the development of Astrobiology in China, including the development of China Astrobiology roadmap and strategies for deep space exploration, the establishment of the Astrobiology Society of China, the corresponding higher education system, and the public education.

Astrobiology, origin of life, habitability, life detection, life in extreme environments

doi: [10.1360/TB-2019-0396](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0396)