

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.013>



从地球生物学到天体生物学

罗根明¹, 王 畅¹, 殷宗军^{2,3}, 沈 冰⁴, 林 巍⁵, 屈原皋⁶

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 行星地质与深空探测湖北省重点实验室, 地球科学学院, 湖北武汉 430074
2. 中国科学院南京地质古生物研究所, 古生物学与油气地层应用全国重点实验室, 江苏南京 210008
3. 中国科学院大学南京学院, 江苏南京 211135
4. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 地球与空间科学学院, 北京 100871
5. 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
6. 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚 572000

摘 要: 我们在宇宙中是否独一无二? 地球生命是在何处以及如何起源? 这些全人类孜孜以求的重大科学问题正是天体生物学研究的核心问题. 伴随着深空探测技术的提高和工程任务的开展, 我们比以往任何时候都更有可能回答上述问题. 地球是迄今为止唯一确认孕育生命的星球, 地球生物学的研究对地外生命的探寻具有重要的指导意义. 为了更好地推动天体生物学的发展, 本文介绍了地球生物学和天体生物学内涵和简要发展历史. 在此基础上, 围绕天体生物学所关注的宜居性和生命的形成与演化这两个不同层次的核心科学问题, 阐述了天体宜居性所要满足的条件, 分析如何判断宜居环境是否孕育了生命. 最后提出了地球生物学需要加强的 3 方面研究, 分别为早期地球宜居性演化、极端环境的生命特征和记录, 以及生命信号的构建.

关键词: 宜居性; 生命信号; 早期地球; 极端环境; 地质微生物; 天体生物学; 生态系统.

中图分类号: P52

文章编号: 1000-2383(2025)03-857-20

收稿日期: 2024-12-20

From Geobiology to Astrobiology

Luo Genming¹, Wang Chang¹, Yin Zongjun^{2,3}, Shen Bing⁴, Lin Wei⁵, Qu Yuangao⁶

1. State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes, Hubei Key Laboratory of Planetary Geology and Deep-Space Exploration, School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
2. State Key Laboratory of Paleobiology and Petroleum Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
3. Nanjing College, University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China
4. MOE Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
5. CAS Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
6. Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China

Abstract: Are we alone in the Universe? How and where did life on Earth arise? These are the fundamental questions that

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42425305).

作者简介: 罗根明 (1984-), 男, 教授, 博士, 从事地球生物学和天体生物学方面的研究及教学工作. ORCID: 0000-0001-5496-6474. E-mail: gmluo@cug.edu.cn

引用格式: 罗根明, 王畅, 殷宗军, 沈冰, 林巍, 屈原皋, 2025. 从地球生物学到天体生物学. 地球科学, 50(3): 857-876.

Citation: Luo Genming, Wang Chang, Yin Zongjun, Shen Bing, Lin Wei, Qu Yuangao, 2025. From Geobiology to Astrobiology. *Earth Science*, 50(3): 857-876.

we assiduously seek to solve and the core questions of astrobiology. With the significant advances in deep space exploration technology, we are much closer than ever before to answering these questions. Since Earth is the only planet known to have been supporting life with a history spanning over 3.5 billion years, the study of geobiology can effectively promote the development of astrobiology. In order to speed up the development of astrobiology, this paper first introduces the connotations and brief development histories of geobiology and astrobiology and demonstrates the two core scientific issues of astrobiology, namely habitability and the origin and evolution of life. The following session discusses the four components of the habitability of celestial bodies and how to determine whether the habitable environment produces life. The paper proposes three aspects that require further enhancement to connect geobiology and astrobiology: the evolution of early Earth's habitable environment, the features of life in extreme environments, and the identification of biosignature.

Key words: habitability; biosignature; early Earth; extreme environment; geomicrobiology; astrobiology; ecosystems.

我国流传的许多诸如嫦娥奔月、吴刚伐桂等古老神话传说,都体现了我们对地球之外存在生命的美好期待.太阳系之外的宇宙是否存在这么一座“广寒宫”目前不得而知,而太阳系大概率是不可能有的.“我们在宇宙中是否独一无二”,这是国际著名期刊 Science 在其创刊 125 周年之际总结发布的 125 个重大科学问题中的前 25 个亮点问题之一 (Kerr, 2005),其中与之相伴的另一个亮点问题是“地球生命是在何处以及如何起源”(Zimmer, 2005).

上述这些重大科学问题正是天体生物学 (Astrobiology) 这一新兴学科的核心研究内容.天体生物学是一门研究宇宙背景下生命的起源、演化、分布和未来的交叉学科,涉及地球科学、生命科学、行星科学、化学和天文学等众多学科领域.天体生物学的研究对象是整个宇宙中的天体,理应包括我们所居住的地球本身.不仅如此,地球也是我们当前所知的唯一具有生命的星球,且具有长达约 35 亿年甚至更长时间的生命演化史 (Westall and Xiao, 2024).研究地球生命的起源、演化、分布和未来发展趋势不仅是天体生物学的核心内容之一,更是探索地外天体是否存在(过)生命,以及存在什么样的生命等科学问题的基石.

随着全球新一轮深空探测任务的推进,我们比以往任何时候都更加接近上述两个重大科学问题的答案 (Green *et al.*, 2021).通过几代人的积累和努力探索,我国在深空探测领域也取得了长足的进步,并逐渐进入国际深空探测队伍的前列.尤其是,我国在地外生命探测领域进行了长远的布局,最新制定的国家空间科学中长期发展规划(2024—2050 年)将探索太阳系天体和系外行星的宜居性,开展地外生命探寻(“宜居行星”主题)列为 5 大优先发展方向之一.与此对应的,我国将于 2028 年发射的天问三号任务将其首要科学目标设立为探索火星上

是否存在或者曾经存在生命 (Hou *et al.*, 2024).

为了推动天体生物学的发展,更好地服务我国未来的深空探测任务,需进一步加强地球生物学相关领域的研究,强化构建地球生物学和天体生物学之间的联系.基于此,本文将简要介绍地球生物学和天体生物学的内涵和发展历史,聚焦天体生物学关注的天体宜居性和生命起源与演化这两个核心科学问题,进而提出服务于地外生命探测所要强化的研究领域.为了讨论方便,本文将研究地外生命的天体生物学称作狭义的天体生物学,即关注地外生命起源、演化、分布和未来演化趋势.狭义的天体生物学也称作地外生物学 (Exobiology),由诺贝尔奖获得者、美国分子生物学家 Joshua Lederberg 于 1960 年提出 (Lederberg, 1960).在无特别说明的地方,本文后续内容讨论的天体生物学是指狭义的天体生物学内涵,所讨论的生命都是我们所熟知的地球生命模式.

1 学科内涵及发展简史

地球生物学 (Geobiology) 是以地球作为研究对象,包括现在和过去地球上生命存在的自然体系,旨在揭示生物圈与地球其他圈层相互作用的机理、过程及其演化历史的科学 (谢树成, 2023).从科学史的角度看,地球生物学源于古生物学,兴起于地球系统科学大发展的背景下,它是地球科学与生命科学两大基础自然科学交叉所形成的新兴学科,重点研究地球系统的生物(化学)学过程.地球生物学的研究对认识生命起源及其与地球环境协同演化的过程、部分重要矿产资源的形成、重大气候环境事件及人与自然的和谐发展具有重要的参考价值 (殷鸿福, 1994; 谢树成等, 2018).

地球生物学的思想发展较早,早在 1926 年,苏联科学家 Vernadsky (1926) 就撰文强调了生物圈对

地球表层系统的作用,并认为该作用贯穿了地球的整个生命史.1934年,荷兰生物学家Baas-Becking首次提出了“Geobiology”一词,强调生命系统和地球系统的相互作用,包括其机制、过程和演化历史(Baas-Becking, 1934).英国学者James Lovelock在20世纪60~80年代提出并完善的“盖亚假说”更加充分地体现了地球生物学的思想.该假说认为地球系统类似一个有机体,可以依靠自身韧性和恢复力有效地调节地球的宜居性,达到生物与环境的协同发展(Lovelock, 1979).21世纪以来,随着地球系统科学的发展,地球生物学在国内外都得到了迅猛的发展,主要表现在资助体系、学术期刊和专著以及学术组织和学术交流等方面(谢树成和罗根明,2023).我国地球生物学的发展起步于20世纪90年代初期.殷鸿福(1994)阐述了地球生物学的思想.经过十多年的发展,谢树成等(2006)较为系统地阐述了从古生物学到地球生物学的发展历程,并详细介绍了地球生物学的形成背景、主要研究方向、有待突破的分支学科和相关领域,以及地球生物学发展所面临的挑战.

地球生物学的研究领域涵盖3个主要方向,分别为:(1)地球环境演变对生物圈的影响,包括地球各圈层(水圈、大气圈、岩石圈及深部地球)的波动对生物圈的影响;(2)生物(含病毒)地质作用机理及其环境效应,包括地质微生物功能群的代谢机理、生物成岩成矿作用、生物风化作用等;(3)生物与环境相互作用的动力学过程和规律,揭示生物与环境协同演化的历史并预测未来发展趋势.地质微生物因其高的功能多样性,悠久的演化历史,广泛的分布范围等特点,是地球宜居性演化的重要动力(Falkowski *et al.*, 2008; 谢树成等, 2012; Louca *et al.*, 2016).因而,与传统古生物学重点关注宏体化石相比,地质微生物(一般难以保存为实体化石)是地球生物学的一大特色,其如何作用于地球环境也是地球生物学亟需突破的挑战性难题(谢树成等,2022a, 2022b; Luo *et al.*, 2024).

广义的天体生物学是以宇宙中的天体及星际空间为研究对象,研究宇宙演化背景下生命的起源、演化、分布和未来发展趋势.地球是宇宙中的一个天体,以地球为研究对象的地球生物学理应是广义天体生物学的一个重要分支学科.除地球生物学以外,广义天体生物学的一大特色是地外生物学(Lederberg, 1960),即基于对地球生命的认知来探究地球之外其他天体的宜居性及其

存在生命的潜力.天体生物学的终极目标是回答“我们在宇宙中是否独一无二”这一科学问题.

天体生物学的快速发展得益于20世纪50年代的一系列重大科学发现和60~70年代深空探测技术的进步.以米勒-尤里实验为代表的前生命化学合成取得的重大进展(Miller, 1953),推动了通过实验模拟探索生命起源研究的序幕.美-苏之间的航天争霸进一步为地外生命探测提供了条件,突出的代表就是“水手号”系列探测任务对火星的飞掠探测,以及“海盗I号”和“海盗II号”在火星的就位探测.但由于这些任务未能找到火星存在生命的证据(Biemann *et al.*, 1976),地外生命的探测经历了一个长达十几年的低潮期.直到20世纪90年代,有关地外生命探寻的研究才迎来新一轮的高潮.这一方面得益于地球各类极端环境中嗜极微生物的发现和研究(Horowitz *et al.*, 1972; Cavicchioli, 2002),另一个重要原因是火星陨石ALH84001中疑似生命记录的报道(McKay *et al.*, 1996).美国航空航天局(NASA)于1998年顺势成立了天体生物学研究所(NASA Astrobiology Institute, 简称NAI),专门致力于天体生物学研究.

进入21世纪以来,天体生物学取得了空前的发展,全球越来越多的国家都成立了天体生物学的研究机构和学术组织,并创立了天体生物学期刊《Astrobiology》和《International Journal of Astrobiology》,美国NASA和欧洲ESA都制定了天体生物学发展路线图(Des Marais *et al.*, 2008; Horneck *et al.*, 2016).近十几年来,我国学者也逐渐关注到天体生物学的主要研究方向并推动其在我国的发展(李一良, 2011; 林巍等, 2020; 国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2022).美国作为天体生物学的引领者,开展了一系列针对火星、金星、水星、小行星、类木行星及其卫星,以及系外行星的深空探测(见林巍等(2020)的总结).如仅在本世纪,美国就已经向火星发射了6次着陆器/巡视车对火星进行探测,其中与天体生物学密切相关(水活动的演化历史、宜居环境的类型、可能含有生命信号样品的采集等)的包括“勇气号”(2003)、“机遇号”(2003)、“凤凰号”(2007)、“好奇号”(2012)和“毅力号”(2020),取得了丰硕成果.我国于2020年成功实施天问一号火星探测任务,一次性实现了“绕-着-巡”三大探测目标,展现了深空探测的强大实力.可以预见,未来以火星为

对象的深空探测会更加频繁, 并会取得更大的突破. 我国和美国都制定了在 21 世纪 30 年代初期实现火星样品返回的任务, 这些任务必将会极大地促进地外生命探测领域的发展 (Hou *et al.*, 2024).

2 天体生物学研究的核心科学问题

天体生物学的相关研究需要回答两个核心科学问题: 一是目标天体是否存在宜居环境, 及其持续的时间 (或者说宜居环境的寿命); 二是这种宜居环境是否孕育了生命, 若存在, 究竟是何种生命形式. 宜居环境是生命存续的基础, 能很好地限定地外生命探测目标.

2.1 天体的宜居性

宜居性 (Habitability) 是指具有适宜任何形式生命出现或生存的环境特性, 包括具有能产生生命 (内源性) 或维持外来进入该环境生命 (外源性) 幸存乃至繁衍的潜能 (Hays, 2015). 宜居性是生命起源和繁衍的必要条件, 但不是充分条件, 也就是说宜居环境的存在并不代表一定有生命的存在 (Cockell, 2014, 2016). 此外, 宜居性的范畴是处于动态变化的 (dynamic habitability). 首先, 不同的生命形式或生命演化的不同阶段对环境宜居性的要求是不一样的, 如适合好氧生物的宜居环境对氧气含量有明确要求, 而氧气对严格厌氧生物来说具有很大的毒性, 氧化的环境对其而言并不宜居. 其次, 宜居性也可能具有很强的空间异质性, 宜居环境可以大至一个行星系统, 也可以小至某些区域 (热液、冷泉、冻土、极地等), 甚至特定的微生境 (地下含水层、深海水-岩界面、极地冰-水界面等). 此外, 天体的宜居性可能存在明显的时间演化特点, 如大量的研究表明虽然当前火星表面环境条件恶劣, 并不宜居, 但早期火星表面可能有持续时间较长的大量液态水, 宜居性较高 (Hurowitz *et al.*, 2017; Ramirez and Craddock, 2018; 赵健楠等, 2021).

在天体生物学的理论框架中, 可以从天体是否位于恒星的宜居带 (Habitable Zone)、是否具有生命所需的基本要素、是否具有维持生命代谢所需的能量 (太阳能、化学能、放射能、潮汐能 (注: 冰卫星主要靠潮汐能) 等) 以及适宜的物理化学条件这 4 个层面进行评估, 只有同时满足了所有条件的环境才是宜居环境 (图 1).

2.1.1 是否处于恒星的宜居带 恒星宜居带是指一个恒星系统内能维持行星表面存在液态水的轨

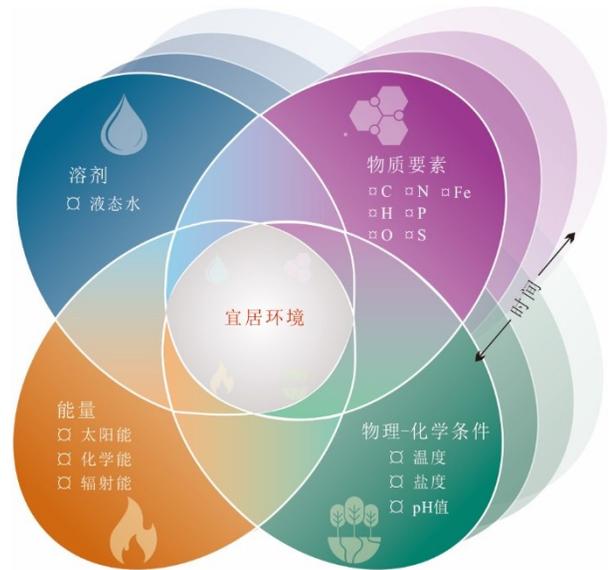


图 1 环境宜居性的 4 个核心要素

Fig.1 The four principal components of the habitability of an environment

只有当 4 个要素全部满足时才是宜居环境. 时间表示环境宜居性不是永恒不变的, 而是随时间呈动态变化. 修改自 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2023)

道空间, 最早由华裔美国理论天体物理学家 Su-Shu Huang (黄授书) 于 1959 年太平洋天文学协会的年会上提出来 (Huang, 1959). 恒星的宜居带主要取决于行星与恒星的距离和恒星本身的演化阶段, 以及行星所具有的大气压力与成分 (Huang, 1960; Kasting *et al.*, 1993). 这一思想主要还是从地球生命特征出发, 体现了液态水对于生命的重要性, 这也是前期指导 NASA 开展地外生命探测的一条宗旨: Follow the water (Hubbard *et al.*, 2002). 当行星大气压力和组成一定时, 其表面温度主要受控于其所获得的来自恒星的辐照. 行星距离恒星越近, 所获得的能量越多、温度越高, 而距离越远, 所获得的能量就越少、温度也就越低, 两者都不利于液态水的存在. 因而, 宜居带一般位于距离恒星特定的范围内. 需要注意的是, 随着恒星亮度的变化, 宜居带的位置也会逐渐发生迁移. 这也就导致有一些行星可能一开始处于宜居带内, 但随着宜居带的向外扩张, 行星表面就会变得越来越热, 越来越干, 进而变得不宜居. 行星处于宜居带的时间 (宜居性寿命) 越长, 生命起源的可能性就越大.

对于太阳系的宜居带范围 (图 2), 目前学界也还存在一些不同意见 (Fogg, 1992; Kasting *et al.*, 1993). 保守观点认为太阳系宜居带的内带位于金星

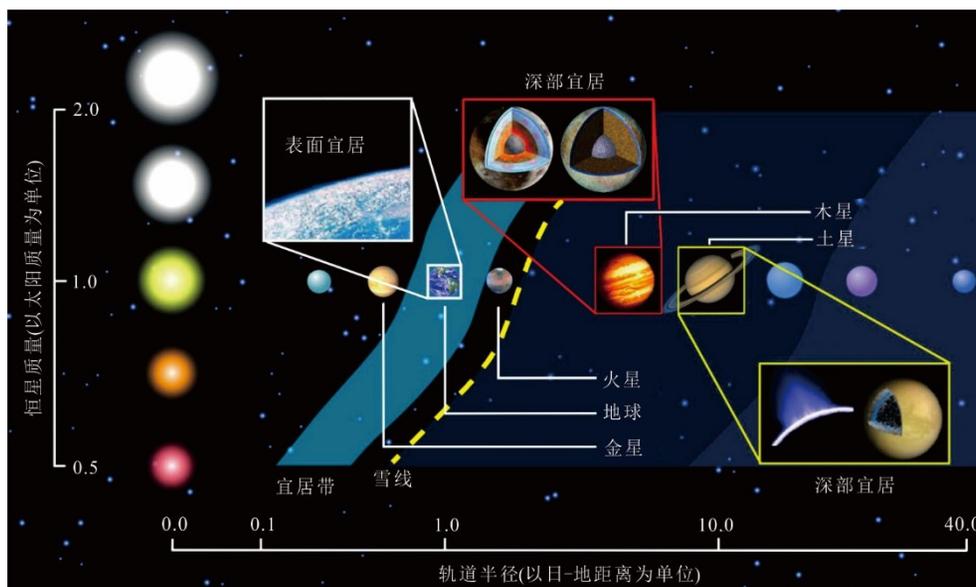


图2 基于恒星大小及行星距恒星的距离所划分的宜居带 (habitable zone), 该宜居带范围可以维持行星表面保留液态水
Fig.2 The original model of the habitable zone according to the relative size of the host star and the distance of the planet from this star to model where water could be present in surface environments

冰质卫星 (Europa、Titan、Ganymede 和 Enceladus) 的发现表明在传统宜居带之外的天体的地下深部可存在液态水, 拓宽了宜居带的范围. 修改自 Grasset *et al.* (2013)

的轨道附近, 而外带处于火星的轨道附近 (Kasting *et al.*, 1993). 然而, 由于金星高的大气压力和温室气体含量, 其表面温度高达 462°C , 无法满足液态水的存在, 而火星由于目前只有稀薄的大气, 平均温度显著低于水的冰点. 因而, 目前金星和火星表面存在液态水的可能性都很低, 是不宜居的, 虽然其早期可能是宜居的. 与这两个行星不一样的是, 地球一直处于太阳系的宜居带内, 加上其合适的大气压力和大气组成, 地球表面的液态水存在了长达 40 多亿年的时间 (Mojzsis *et al.*, 1996; Valley *et al.*, 2014). 这是当今地球有如此丰富多彩生命的前提保障. 有研究表明, 随着太阳亮度的不断升高, 在 20~30 亿年之后, 我们的地球也将会变得不宜居 (Ward and Brownlee, 2000; Rushby *et al.*, 2013).

除了来自恒星的辐射热之外, 潮汐作用和放射性衰变也会提供大量热量, 进而导致在远离恒星的行星及其卫星的地下可能存在大量的液态水 (图 2), 如现代火星的部分区域仍可能存在地下液态水 (Orosei *et al.*, 2018), 土星的卫星 Titan 和 Enceladus, 以及木星的卫星 Europa 和 Ganymede 都存在冰下海洋 (McMahon *et al.*, 2013). 地球深部生物圈的发现表明这些地下的液态水海洋也可能是宜居性很高的环境 (中国科学院“深部地下生物圈”项目组, 2020).

2.1.2 是否存在生命所需的基本要素 从地球生命的视角来看, 细胞是构成生命的全部 (单细胞生物) 或基本单元 (多细胞生物), 其主要的生化组分包括蛋白质、DNA/RNA、脂类、以及多糖等. 因而, C、H、N、O、P 和 S (CHNOPS) 是生命所需的基本元素. 同时, 生命还需要大量的微量元素作为辅酶因子, 如 Fe、Mo、Ni 等, 也是生命所必须的元素. H、C、O 和 N 主要以 H_2O (也有液态水)、 CO_2 和 N_2 的形式存在于类地行星的大气中, 并且可以与其他储库进行交换, 而 P、S 以及微量的金属元素主要赋存于硅酸盐等矿物. 这些元素对火星、金星等类地行星, 以及冰质卫星 (如 Enceladus、Europa 等) 可能都不缺乏 (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023, 及其参考文献).

除了需要这些基本的元素之外, 更需要的是有条件将这些元素组合成构成生物大分子的各种单体 (如氨基酸、碱基等), 进而将这些单体聚合成复杂的生物大分子, 以及将大分子有机协调起来的特定空间 (原始细胞). 米勒-尤里实验简单明了地告诉大家, 在富 CH_4 、 NH_3 等还原性大气的背景下, 闪电作用就可以合成大量的氨基酸 (Miller, 1953), 极大地激发了人们对前生命化学过程的兴趣. 实际上, 太阳系存在大量不同类型的有机物质, 包括可溶性有机质和不可溶性有机质, 以后者为主体 (Yesiltas and Ke-

bukawa, 2024). 代表太阳系初始物质组成的碳质球粒陨石有机碳的含量最高可达 5%, 含有类型庞大的有机分子. 例如, 不同学者已在降落型碳质球粒陨石 Murchison 中(1969 年 9 月 28 日降落于澳大利亚维多利亚州默奇逊地区)检测到了上万种复杂的有机分子, 包括氨基酸、脂肪族和芳香族烃类化合物、羧酸、核酸碱基和糖类等(Kvenvolden *et al.*, 1970; Schmitt-Kopplin *et al.*, 2010; Yesiltas and Kebukawa, 2024). 类似的有机质也在星际尘埃、彗星、小行星等天体中检测到(Botta and Bada, 2002). 这些有机质大概率是非生物成因的, 与地球上生物成因的有机质在同位素组成、手性等方面都截然不同. 据估算, 每年大约有 10^9 kg 的星际有机分子被输送到早期地球上, 可能为地球生命的起源提供了基础的原料, 促进了前生命的化学演化(Chyba and Sagan 1992; Martins and Pasek, 2024).

2.1.3 是否能提供生命代谢所需的能量 持续从外界获取能量是生命维持一个热力学不平衡化学体系的前提, 也是生命活动(幸存(survival)、维持(maintenance)、生长(growth)和繁殖(reproduction))的基础. 因此, 能量的可获得性是环境宜居性的重要参数. 就地球生命来说, 生命所需的能量来源主要有太阳能、化学能和放射性辐射能等.

现代地球表层生态系统所需的能量主要来自太阳能. 光合生物将太阳能转换成化学能, 进而通过食物链把有机物中的化学能向上传递给各类复杂生物. 这样的生态系统也称作光合生态系统. 地球上的光合生物包括产氧光合生物和非产氧光合生物, 前者利用 H_2O 作为电子供体, 代谢的副产物是 O_2 , 而后者利用还原性的物质(Fe^{2+} 、 H_2S 等)作为电子供体, 代谢的副产物是其对应的氧化物(谢树成和罗根明, 2023).

在光合生物出现之前(起源时间见 3.1 节), 生物无法利用太阳能, 只能寻求其他能量来源——化学能, 这类生物也称作化能微生物(包括自养和异养)(谢树成和罗根明, 2023). 20 世纪 70 年代大洋勘探发现地球上还存在一个黑暗生态系统, 其生物所需的能量主要来自氧化还原反应, 而非太阳能(Lonsdale, 1977). 这类生态系统由化能自养微生物利用氧化还原反应释放出来的能量合成有机质, 继而通过食物链将能量传递给其他异养生物. 在当前富氧的地球表层环境中这类生态系统分布有限, 主要见于因还原态金属硫化物与氧气反应形成的酸性废坑水体(acid mine

drainage, 简称 AMD, 典型代表就是西班牙 Rio Tinto 河(Bigham and Nordstrom, 2000))和氧化还原分层的湖泊和海洋(Sun *et al.*, 2024), 以及海底的热液喷口, 包括富硫化物的高温黑烟囱(Wirth, 2017)和富甲烷/氢气的较低温白烟囱(Kelley *et al.*, 2005). 黑暗生态系统需要还原性物质与氧化性物质, 从氧化还原电位的角度来看, H_2 、 H_2S 、 CH_4 等是最好的还原性物质, 也是海底热液系统中最常见的物质(Diehl and Bach, 2020). 当前地球上最常见且氧化还原电位高的氧化剂是自由氧. 由于其主要由产氧光合生物所形成, 在行星演化的早期其含量可能非常有限. 如古元古代大氧化事件(Great Oxidation Event, 简称 GOE)发生之前($> \sim 23.3$ 亿年前, Luo *et al.*, 2016), 地球表层几乎没有氧气, 类似的环境可能也存在于火星等类地行星. 行星演化早期氧化能力较强的氧化剂可能与光化学过程有关, 包括 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 等(Braterman *et al.*, 1983; Farquhar *et al.*, 2000).

放射性辐射能主要来自放射性元素的衰变. 这种能量无法被生物直接利用, 但其可以裂解 H_2O 分子, 形成还原性的物质(例如 H_2)和氧化性的物质(例如 H_2O_2). 这些物质遇到其他氧化性(相对于 H_2)和还原性的物质(相对于 H_2O_2)会发生化学反应, 进而为生物的代谢提供能量. 从这个层面讲, 也是一种化学能. 已有计算表明火星地下深部和海洋沉积物中由放射性元素衰变产生的能量通量可能足以维持生物体的生存(Bouquet *et al.*, 2017; Altair *et al.*, 2018; Sauvage *et al.*, 2021; Tarnas *et al.*, 2021). 在缺乏大气的天体上, 太阳风和宇宙射线也是重要的能量来源, 如 Europa 的冰层表面接受了大量来自木星的粒子流和太阳风辐射, 也可以产生相似的产物, 进而为氧化还原反应提供所需的强氧化剂(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023 及其参考文献).

2.1.4 是否具有适宜的物理化学条件 适宜的物理化学条件是生命起源和繁衍的重要因素, 主要包括盐度、温度、压力、pH 值、UV 辐射和电离辐射等, 也是环境宜居性的重要参数. 一旦超过生物承受范围, 这些因素会显著影响细胞的整体结构、关键生物分子的功能、细胞膜的渗透性和流动性等, 进而影响生命的维持. 随着地球极端环境微生物研究的深入, 学术界对生命能适应的物理化学条件边界的了解在不断拓展(中国科学院“深部地下生物圈”项目组, 2020; 国家自然科学基金委员会和中国科学

院, 2022)。现代极端环境微生物对极端环境的耐受性可能是经历长时间(几亿年, 甚至是几十亿年)演化的结果。不同的生物类型对极端物理化学条件的耐受性也存在很大差别。以温度为例, 古菌能耐受的极限温度最高, 可达 122 °C, 而细菌一般不会超过 100 °C, 真核生物更低, 一般不会超过 60 °C (Clarke, 2014)。

2.2 天体的宜居性是否孕育了生命

目前学术界对生命还没有一个广为接受的定义, 从地球生命的特征来看, 生命是一个以(类)细胞为基本单元、能够自我维持且进行达尔文式演化的化学系统。生命的活动就是通过其代谢功能从环境中获取物质和能量来维持其不平衡的化学体系。因此, 生命活动会与环境发生相互作用, 进而留下其存在的指纹。

要回答一个宜居的天体是否孕育了生命, 就需要探索该天体是否留下了生命存在的确切记录, 也就是生命信号(biosignature)。生命信号是指由生命活动直接或间接产生, 能指示生命存在的任何记录。理想的生命信号不仅能证实其由生命活动直接或间接产生, 还能排除其来自非生命过程的可能(Des Marais *et al.*, 2008; Gillen *et al.*, 2023)。生命信号包括生物体本身(活着的生物或者化石)、生物相关的有机分子(DNA/RNA、蛋白质、脂类等)及其同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 等)、生命活动相关的沉积构造(叠层石、MISS(微生物诱导的沉积构造)等)、生命代谢活动的产物(CH_4 、 O_2 、矿物等)(Mustard *et al.*, 2013; Hays *et al.*, 2017)。在这些生命信号里面, 活着的生物本身或者化石是最理想的生命信号, 生物相关的有机大分子相对来说指纹性也比较高, 如DNA/RNA、胆固醇等脂类分子等。然而其他生命信号的指纹性较低, 需要综合多方面的要素进行综合评估, 比如 CH_4 。虽然现代地球上绝大部分 CH_4 是由微生物过程产生, 但也有少部分 CH_4 是由非生物过程产生, 如蛇纹石化过程(Proskurowski *et al.*, 2008)。因而, CH_4 作为生命信号, 还需要和其他指标结合起来, 如 CH_4 的C/H同位素, 乃至C-H的团簇同位素(Wang *et al.*, 2015)。

构建理想的生命信号是开展地外生命探测的核心任务, 这需要开展全面而深入的类天体环境条件下生命信号的保存过程研究(见下文3.3节)。生命信号的存在是确认地外是否存在生命的充分但非必要条件, 取决于这些生命信号是否可以被检测到(Summons *et al.*, 2011)。当宜居环境中这些生命

信号产生的速率低于非生物过程导致的破坏速率, 如风化过程、成岩过程、高温变质过程、电离/紫外辐照过程, 以及撞击过程等, 虽然发育于生命, 但这些生命信号无法被检测到。同样, 当生命信号的丰度低于仪器的检测限时, 它们也不能被检测到, 因而也会得到假阴性结论。检测能力与采取的探测方式有关, 如就位探测一般比轨道探测具有更低的检出限, 样品返回地球实验室的分析具有更高的灵敏度。除了改进探测方式之外, 提高仪器的灵敏度也是重要的手段之一。

3 地球生物学向天体生物学拓展

地球是已知唯一具有生命的天体。对地球宜居环境以及生命起源和演化的探索是地球生物学研究的核心内容之一, 同时也是开展天体生物学研究的基础和出发点(李一良和孙思, 2016)。地球生物学的研究思路、研究方法和研究成果可以拓展到天体生物学所关注的其他天体。从目前的认识来看, 太阳系中其他天体如果存在生命, 大概率是比较简单的微生物。因此, 地球生物学可以从推进早期地球宜居环境演化、极端环境的生命特征和记录、生命信号的构建等方面的研究工作为地外生命探测做出贡献(图3)。

3.1 早期地球的宜居环境演化

地球宜居性的演化是当前地球系统科学研究的重点(2021—2030地球科学发展战略研究组, 2021; 郑永飞等, 2024)。地球的宜居性演化具有显著的阶段性, 从不宜居到满足原核微生物的宜居, 再到满足简单真核生物的宜居, 最后到满足复杂动植物的宜居, 前后大约经历了约30亿年的时间(Westall and Xiao, 2024)。本文重点讨论太古宙及其之前的早期地球宜居环境演化及潜在生命记录(图4)。

有证据表明地球早期存在一个幕式的岩浆洋时期(Elkins-Tanton, 2012)。模型研究表明每一幕岩浆洋持续的时间大约为数个至数十个百万年, 最后一幕结束于月球形成的那次大撞击之后不久(Elkins-Tanton, 2012; Tucker and Mukhopadhyay, 2014)。岩浆洋的形成对地球固体圈层分异和大气、海洋的形成, 以及后期地球磁场的产生具有重要意义(Rubie *et al.*, 2007; Zahnle *et al.*, 2007)。岩浆洋固结的过程中会释放大量挥发份, 形成高达上百个大气压的富含水蒸气和二氧化碳的大气(Sleep *et*

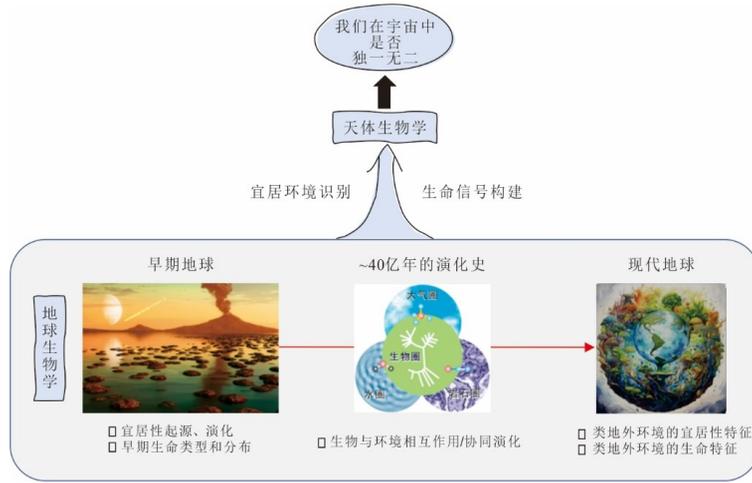


图 3 地球生物学基于早期地球、现代地球极端环境和~40亿年的生物与环境相互作用和协同演化历史的研究,通过宜居环境识别和生命信号构建两个途径服务于天体生物学研究

Fig.3 Research topics in Geobiology, such as the habitability of early Earth, life in the extreme environments of modern Earth, and the ca. 4.0 billion-year history of the interactions and coevolution of life and environment, which provide insights into the research of astrobiology from the perspectives of habitability identification and biosignatures reconstruction

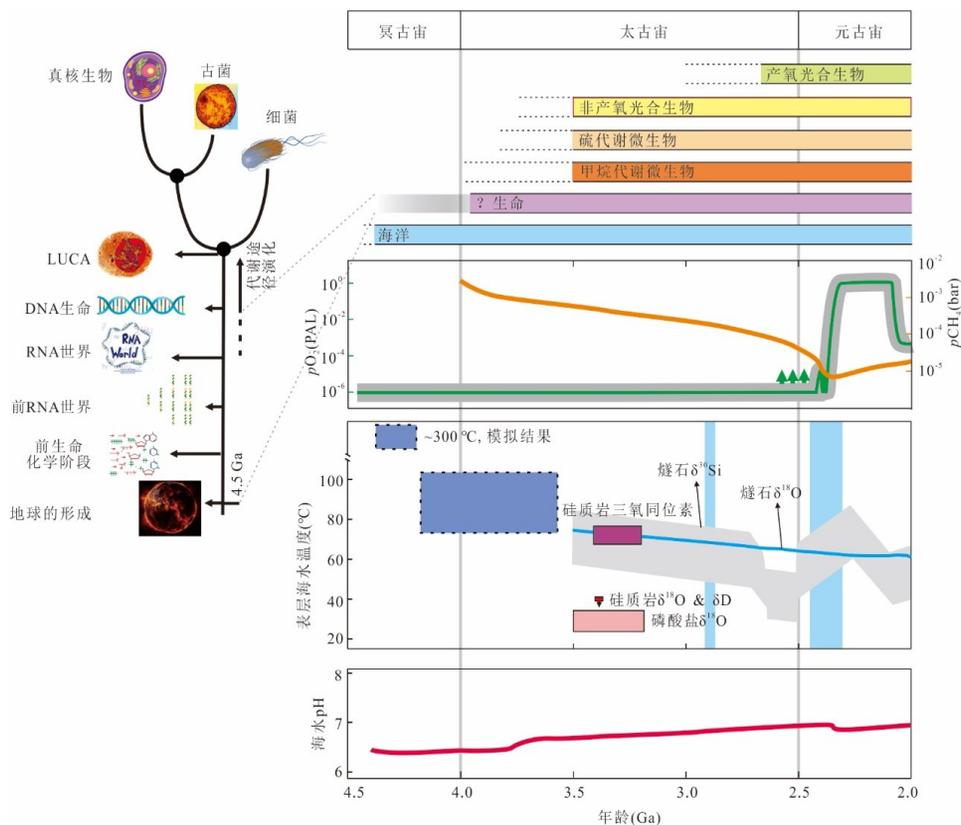


图 4 早期地球主要环境参数和潜在生命信号揭示的早期生命演化特征(右,参考文献见正文)及前生命进化的主要阶段(左, Joyce, 2002)

Fig.4 The main environmental parameters of early Earth and the characteristics of early life on Earth revealed by the potential biosignatures (right, see the main text for the references), and the main stages of prebiotic evolution are summarized in the left panel (Joyce, 2002)

修改自 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2023).LUCA. 最后共同祖先. 文献来源: pO_2 参考 Luo *et al.* (2022); pCH_4 来自 Catling and Zahnle (2020); 温度的记录参考 Knauth and Lowe (2003)、Robert and Chaussidon (2006)、Hren *et al.* (2009)、Blake *et al.* (2010)和 Lowe *et al.* (2020); 海水 pH 值修改自 Halevy and Bachan (2017)

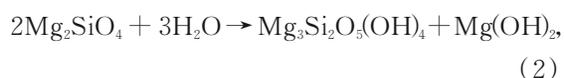
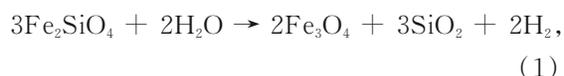
al., 2001; Elkins-Tanton, 2008). 尽管不排除在幕式岩浆洋的间隔期存在局部宜居环境,但总体来说这时期的地球对生命来说是不宜居的. 岩浆洋结束之后很长一段时间,地球表面仍遭受了大量的地外撞击事件(晚期重轰炸事件可能持续到38亿年前),总体宜居性比较差. 然而很有可能存在局部的宜居环境,适合生命的起源和早期演化. 下面将从前述宜居性的4个方面来看地球早期的宜居性特点.

澳大利亚西部 Jack Hills 地区碎屑锆石氧同位素组成表明地球表层液态水的存在可以追溯至~44亿年前或者更早 (Mojzsis *et al.*, 1996; Valley *et al.*, 2014). 地球上最古老的海相沉积岩可以追溯到大约38.7亿年前西格陵兰 Akilia 地区的条带状铁建造和37亿年前西格陵兰南部 Isua 表壳岩带中保存的深海沉积岩(可能为浊积岩). 这些地质记录表明太古宙早期已有广泛的海洋存在 (Rosing *et al.*, 1996; Nutman *et al.*, 1997). 同时, Sr 和 Nd 同位素的记录表明38~40亿年前现今大陆地壳的10%~15%已经发育 (Taylor and McLennan, 1995), 其成分主要来自含水玄武岩的部分熔融 (Martin and Moyen, 2002), 也说明这一时期地表有大量的液态水 (Pinti, 2005). 这为宜居环境的形成奠定了基础.

由于极高的大气压力及其温室效应,模型分析表明,最初形成的海洋水体温度可能高达300℃ (Pinti, 2005及其参考文献),大大超出了地球生命所能耐受的上限,此时的海洋是不宜居的. 但该时期海水温度的下降速度是非常快的 (Zahnle *et al.*, 2007), 如锆石氧同位素的记录表明地表海水的温度在44亿年前已经下降到200℃左右 (Valley *et al.*, 2002), 之后可能在42~43亿年左右下降到适合嗜热微生物适应的温度(即100℃左右). 虽然目前对太古宙早期及其之前海水温度的认识不足,但已有的研究结果都表明太古宙早期表层海水温度明显低于100℃ (Knauth and Lowe, 2003; Blake *et al.*, 2010). 这为宜居环境的形成提供了适合的温度条件,也意味着岩浆海时期大气中巨量的CO₂可能通过地质过程进入地幔,降低了其温室效应 (Zahnle *et al.*, 2007, 但如何维持地球温室状态也还是当前正在研究的问题). 此外,这时期的海洋是一个缺氧的水体 (Catling and Zahnle, 2020), pH值比现代海水要更偏酸性(~6左右, Knauth, 2005; Halevy and Bachan, 2017), 总体盐度比现代海洋稍微偏高,以NaCl为主 (Pinti,

2005). 因而,冥古宙-太古宙之交的海洋已经为宜居环境的形成提供了合适的物理化学条件.

海洋的出现也为生命的起源和繁衍提供了物质和能量来源. 在海洋形成的早期阶段,广泛的地质活动使得岩石产生大量裂隙,提高了孔隙度和渗透率,在宏观尺度上为水岩相互作用提供了反应场所. 当时超基性岩石与海水的接触面积远高于现在,形成大量类似热液喷口的浅水系统 (Sleep *et al.*, 2004; Westall, 2012; 李一良和孙思, 2016). 热液流体通过孔隙/裂隙度非常发育的基性/超基性岩石系统会促发大规模的水岩反应,包括蛇纹石化过程,主要的反应如下:



上述水岩反应过程会产生大量的蛇纹石、磁铁矿、水镁矿和蛋白石等矿物,并释放大热量和H₂,形成高pH值(最高可达12)的微环境. Kasting and Kirschvink (2012)估算在生命起源之前,大气的H₂分压(*p*H₂)可以高达0.1%. 由于H₂具有非常低的氧化还原电位,在催化剂(如蛇纹石化过程产生的磁铁矿)的作用下会与环境中的CO₂、N₂以及S等反应产生CH₄(含其他小分子有机物)、NH₃和H₂S等 (Shen *et al.*, 2024). 其次,蛇纹石化过程也会释放大量的微量金属元素(如Ni等)和磷酸盐等,虽然部分磷酸盐会被水镁矿吸附,但在高pH值下也会释放出来. 综上,蛇纹石化过程会形成一系列物理化学梯度,包括温度、氧化还原程度、地球化学组成、孔隙度和pH值等,以及大量具有催化性质的矿物(磁铁矿、Fe-S化合物和粘土矿物等)、微量金属和磷酸盐等生命所需的营养要素. 水岩作用和矿物蚀变过程中矿物表面是小分子有机物反应的重要界面,矿物表面的吸附和催化作用促使小分子有机物合成大分子有机物,为原始细胞的形成提供物质和结构基础. 因此蛇纹石化的热液喷口被认为是地球生命起源最理想的场所之一 (Russell *et al.*, 1994; Martin and Russell, 2007; Lane and Martin, 2010). 然而,需要注意的是,早期的热液喷口可能不同于现代的深海热液喷口 (李一良和孙思, 2016),更多的是有利于干湿交替的浅水基性/超基性岩蚀变区 (Sasselov *et al.*, 2020).

生命起源之后,基性/超基性岩石的热液蚀变

环境仍是重要的生境 (van Kranendonk, 2006; Michalski *et al.*, 2013; Westall *et al.*, 2015). 现代高温热液喷口 (黑烟囱) 和低温热液喷口 (白烟囱) 是地球黑暗生态系统的典型代表 (Kelley *et al.*, 2005). 这些生态系统的能量主要来自海底岩浆活动、水岩蚀变过程产生的还原性流体 (H_2 、 H_2S 、 CH_4 等) 与海水中氧化剂 (O_2 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等) 的氧化还原反应. 在早期海洋中, 化能自养微生物生存最不利的条件可能是缺乏氧化性较高的氧化剂, 如 O_2 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等. 如前所述, GOE 之前地球的大气圈和水圈都是处于几乎没有氧气的状态 (Holland, 2006). 在产氧光合生物出现之前, 地球表层氧气的来源是非常有限的, 主要由 CH_4 光解之后 H 的逃逸 (Catling *et al.*, 2001), 以及水动力较强的浅水地区硅酸盐矿物机械摩擦等非生物过程产生的少量 O_2 (He *et al.*, 2021). 在富 Fe^{2+} 的海洋中, 这些 O_2 也很难积累起来. 因氧气的缺乏, 海水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等氧化剂浓度也极低. 例如, 太古宙及更早期海水的硫酸盐浓度可能在 $10 \mu\text{mol/L}$ 以下 (Habicht *et al.*, 2002; 现代海洋是 28 mmol/L), 可能主要来源于 SO_2 的光化学过程 (Farquhar *et al.*, 2000). 这时期主要的氧化剂可能是 $Fe(OH)_3$ 和 CO_2 . 因而, 在光合生物起源之前, H_2 营养型的产甲烷微生物功能群和铁还原型甲烷氧化细菌可能是这时期最重要的生物类型 (Ueno *et al.*, 2006).

光合生物起源进一步拓展了宜居性的范围, 同时显著提高了生物过程对能量的需求, 极大地提高了地球表层的生物量, 更容易留下更多的潜在生命信号. 根据电子供体的不同, 光合生物可分为非产氧光合生物和产氧光合生物两种类型. 地球早期还原性物质的富集 (H_2 、 Fe^{2+} 、 H_2S 等) 使得光合生物很容易获得电子, 而不需要去攫取水中的电子 (Olson and Blankenship, 2004; Olson, 2006). 这也意味着非产氧光合生物出现时间很可能要早于产氧光合生物起源的时间, 这与分子生物学的研究结果一致 (Xiong *et al.*, 2000). 目前一般认为非产氧光合生物在 37 亿年前可能已经出现了 (Czaja *et al.*, 2013), 并且在 35 亿年前已经有较为广泛的分布, 相应的证据是当时广泛分布的叠层石等微生物岩 (Noffke *et al.*, 2013; Schopf, 2024). 非产氧光合生物要求有还原性的电子供体. 早期地球最重要的电子供体为 Fe^{2+} , 也包括局部环境存在的少量 H_2S 等. 靠近陆源

输入、富 Fe^{2+} 等的透光层可能是非产氧光合生物的主要生境, 主要的限制因子包括电子供体的浓度和生物可获得的营养盐的浓度等, 能量不是最主要的限制因子. 产氧光合生物的起源是生命演化和地球环境演变的里程碑, 是真核生物等复杂生命起源和演化的前提. 目前产氧光合生物的起源时间还存在很大的不确定性, 目前的估计是不晚于 25 亿年前, 很可能在 29 亿年前甚至更早就出现了 (Sánchez-Baracaldo *et al.*, 2014; Planavsky *et al.*, 2014; Robbins *et al.*, 2023).

地球早期宜居性特征及其演化的研究需要围绕宜居环境的 4 个方面进行综合分析, 包括地质样品分析、类似环境现代过程分析, 以及实验室模拟和模型计算分析. 从能量角度看, 水岩反应产生的还原性物质的氧化所产生的化学能是重要的能量来源之一 (Shen *et al.*, 2024), 因而, 需要进一步加强对水岩蚀变过程的分析, 如基于矿物学 (包括矿物包裹体) 和实验模拟重建水岩相互作用所形成的微环境物理化学参数, 以及水岩相互作用产物的类型和通量, 进而探讨可能的生物过程和非生物过程, 并建立其区别和联系. 除化学能之外, 太阳能很可能也是太古宙早期生物 (非产氧光合生物) 的重要能量来源, 需要进一步探讨透光层水体的物理化学性质, 如温度、pH 值、电子受体的浓度、营养盐和微量金属浓度等, 尤其是在高紫外辐射、强缺氧大气背景下这些物理化学性质如何影响非产氧光合生物的代谢等.

3.2 极端环境的生命特征及其记录

随着分析技术的提高, 特别是分子生物学技术的成熟, 我们似乎很难在地球表面找到一个未被生物所居住的地方, 从强酸性、高温热泉、极端干旱、极端高盐等, 到处都能找到生命的痕迹 (国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2022). 不仅如此, 在大陆的深部地下、海洋的深部地下以及高层大气 (临近空间) 也都能找到生命的痕迹 (Smith, 2013; Bryan *et al.*, 2019; 中国科学院“深部地下生物圈”项目组, 2020). 正如早在 1934 年, Geobiology 一词的提出者 Baas-Becking 所说的一句著名的话 “Everything is everywhere, but the environment selects” (Baas-Becking, 1934).

由于地外天体的可到达性极低, 直接研究的经费和时间成本都很高, 地球上类地外天体极端环境地球生物学的研究是一个重要途径, 能有效提高地

外生命的探测能力和效率。当前,国内外学者对不同类型极端环境开展了大量不同维度的研究,获得了极端环境的物理/化学参数、微生物的丰度和多样性、微生物的代谢功能(适应策略),进而尝试揭示极端环境微生物所介导的生物地球化学循环及其对极端环境的改造作用(国家自然科学基金委员会和中国科学院,2022及其参考文献)。这些极端环境微生物的研究不仅丰富了我们生命应对极端环境所呈现出的强大能力的认识,更是拓展了我们对环境宜居性的认识(拓展了生命的边界),进而更好地服务于地外生命探测。截至2017年,全球已建立了37个针对太阳系天体特征的天体生物学类比研究点,其中,有21个是类比火星极端环境的,包括西班牙的Rio Tinto河(潮湿酸性)、美国黄石国家公园(高温热泉)、南极干谷(干冷)、智利的阿塔卡马沙漠(干旱)和我国的柴达木盆地(干湖泊)(Martins *et al.*, 2017)。

现代分子生物学技术和地球化学分析技术的快速发展,极大地提高了我们对极端环境微生物类型及其代谢功能的认识。然而,如何更好地服务于地外生命探测,亟需加强不同类型极端环境生命信号的重建,包括当前仍然活着的生命和过去存在过的生命。由于极端环境微生物一般代谢缓慢、多样性和生物量都很低、且空间差异巨大,特别是不能够获取,或者仅能获取极少量样品以开展实验室分析工作,在此条件下构建明确的生命信号是一个重大挑战性难题。以下几个方面需要重点突破:(1)极端环境现代微生物过程所产生代谢产物及其对周边环境物理/化学条件的改变;(2)极端环境过去微生物过程所形成的生命信号,包括矿物特征、同位素地球化学特征、以及有机分子特征等;(3)针对极端环境微生物弱的生命信号识别的分析仪器技术平台。

此外,需要注意的是,当前地球极端环境微生物是微生物经历了长期(几百万甚至上亿年)适应性演化的结果,这对宜居环境的寿命有非常高的要求。因而,还需要加强两方面的工作:一方面,加强对地质历史时期不同类型极端环境微生物过程及其生命记录的分析,构建其时间演化的特点;另一方面,加强对当前不同类型极端环境微生物演化生物学的研究,刻画微生物适应极端环境功能的时间演化过程,进而寻找早期就适应极端环境的生物类型。

3.3 生命信号的构建

如前所述,生命信号的构建是地外生命探测的基础,也是核心任务(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023)。前期的研究已提出了不同类型的生命信号,包括生物本身(实体/生物有机分子)和生物活动所产生的物理和化学记录(Hays, 2015)。然而,需要注意的是,这些生命信号的应用也都有很多限定条件,需要综合考虑,才能获得可靠的认识,否则很容易产生假阳性(False positive)认识。

地球是目前唯一已知具有生命的星球,地球早期生命记录是构建地外生命信号最重要的抓手之一。自20世纪50年代中期开始(Tyler and Barghoorn, 1954),学者们已开展了大量的尝试,目前已提出的潜在生命信号包括微生物的实体化石(Schopf *et al.*, 1993; Dodd *et al.*, 2017; Schopf, 2024)、微生物活动所形成的沉积构造(Tice and Lowe, 2004; Allwood *et al.*, 2006)、C/S同位素记录(Mojzsis *et al.*, 1996; Rosing, 1999; Shen *et al.*, 2001; Ueno *et al.*, 2006; Tashiro *et al.*, 2017)等。基于这些不同类型的潜在生命信号,目前对地球生命最早出现时间的认识如下(图3):(1)41亿年前(Bell *et al.*, 2015, 锆石中石墨包裹体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值);(2)37.7~42.8亿年前(Dodd *et al.*, 2017, 变质条带状铁建造中出现了大量微米级的赤铁矿丝状和管状体);(3)39.5亿年前(Tashiro *et al.*, 2017, 富有机质变质沉积岩中石墨的 $\delta^{13}\text{C}$ 值);(4)~38亿年前(Mojzsis *et al.*, 1996; Rosing, 1999; Hassenkam *et al.*, 2017, 强变质条带状铁建造磷灰石中碳质包裹体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值);(5)37亿年前(Nutman *et al.*, 2016, 单一的微生物沉积构造,不同意见参考Allwood *et al.*, 2018);(6)~35亿年前(Schopf *et al.*, 1993, 2017; Schopf, 2024, 微生物实体化石及化石同位素组成;Shen *et al.*, 2001, 2009, 硫同位素记录;Furnes *et al.*, 2004, 枕状玄武岩边部可能的生物溶蚀构造;Allwood *et al.*, 2006, 形态多样的微生物沉积构造;Ueno *et al.*, 2006, CH_4 气体包裹体及 $\delta^{13}\text{C}$ 值)。

从上述地球的早期记录来看,在~35亿年前出现了多种不同类型的潜在生命信号,包括生物物理的(不同类型的微生物岩和枕状玄武岩边部的生物溶蚀构造)和生物化学的(C/S同位素组成和 CH_4 的气体包裹体)记录。这些生命信号组合一方面说明地球上最早的生命至少在35亿年前已经形成,另一

方面也说明这时地球的生命已经较为繁盛,微生物代谢多样性较高.然而,对于上述更早期的基于单一潜在生命信号的认识也都存在很大的争议(Westall and Xiao, 2024 及其参考文献).这主要是因为这时期的地层都经历了复杂的变质作用,许多生命信号的指纹性/可靠性还有待提高,很多非生物过程可能会产生相似的特征,特别是低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值.例如,在高温热液变质过程中,可以形成很多包括石墨在内的含碳物质,它们也可以出现很低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,与生物成因的有机质在碳同位素上有很大的重叠(van Zuilen *et al.*, 2002; Leland *et al.*, 2002, 2005; Papineau *et al.*, 2010, 2011).此外,比较行星学研究表明太古宙早期地球深部可能比现代更还原,其岩浆过程形成的碳也可能具有非常低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(House, 2015).因而,单一的碳同位素证据不足以确切指示生命的存在.

要基于地球早期生命记录,建立可靠的生命信号,亟需加强以下几方面的工作.首先,加强早期地球典型环境样品的分析,挖掘潜在的生命信号.南非、西澳、加拿大 Quebec 地区和格陵兰地区的表壳岩带是现存最古老的沉积记录(后两者的年龄要老于前两者,同时变质程度也要显著高于前两者),主要的岩性有变质条带状铁建造、硅质岩、碳酸盐岩等,主要形成于热液系统(van Kranendonk, 2006).需要综合利用最

新的分析技术,如聚焦离子束扫描透射电子显微镜(FIB-STEM)、球差校正透射电子显微镜(AC-TEM)、激光共聚焦显微拉曼光谱(LCM-Raman)、傅里叶变换显微红外光谱(FTIR)、纳米二次离子质谱(NanoSIMS)和三维原子探针(3D-APT)等对这些代表性样品开展深入分析,包括有机质和矿物的空间分布、热演化历史、微观结构和C-N-S等多同位素组成,进而将形态结构与化学组成统一起来,构建可靠的生命信号.

其次,进一步加强对年轻地层中和现代类似环境样品生命信号的挖掘.如前所述,地球上这些古老的地质记录都经历了非常强的后期变质变形的改造,很多生命信号可能被完全破坏.然而火星等其他天体因缺乏强烈的板块构造运动,其经历的变质变形改造会弱很多,许多生命信号可能更容易保存.因而,需要加强对现代类似环境样品,以及类似环境不同变质程度的地质样品生命信号的分析,并结合室内变质过程模拟实验分析,提取易于保存的生命信号,并构建其与变质改造之间的相关性.除了利用最新的分析技术揭示生命信号,还可以利用高分辨率气相/液相质谱(GC-MS-MS、LC-MS-MS)和飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)等开展生物标志化合物的分析,乃至不同化合物碳同位素组成分析,建立这些典型环境样品的脂类特征及其与变质程度之间的关系.

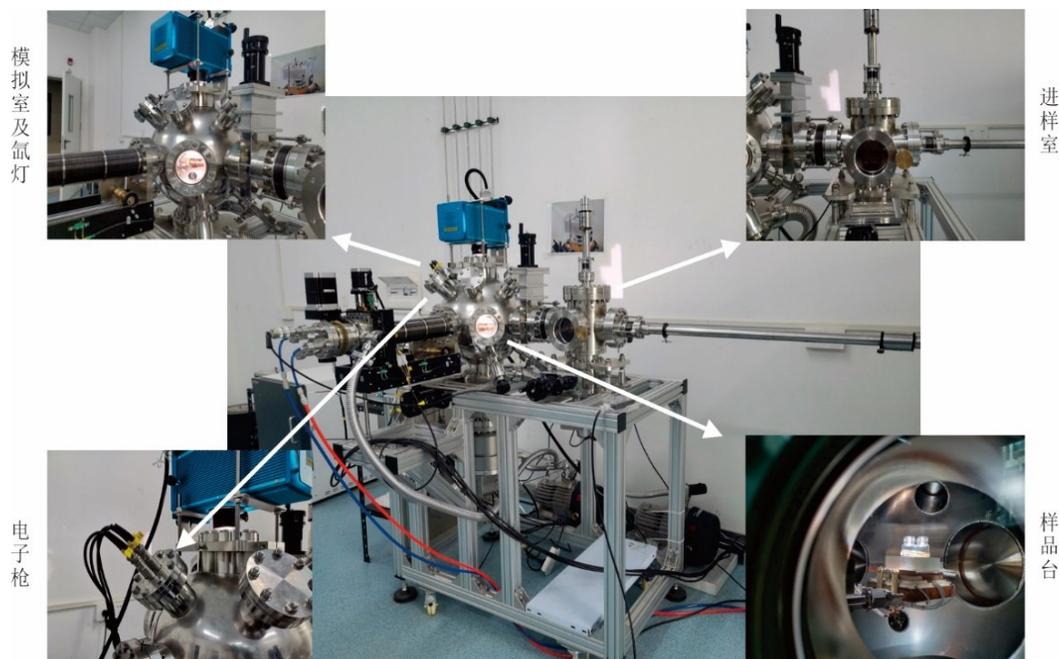


图5 地外环境模拟舱的主体组成部分,包括球形腔体及各种外置设备

Fig.5 Facility of laboratory simulation of space environments, including the spherical main chamber and many inlet subsystems

需要注意的是,地外天体不仅经历了与地球显著不同的成岩过程,而且表层环境也与地球有较大差异.以火星为例,其微重力环境、高强度的紫外辐射和电离辐射、低的大气压力和高丰度的氧化剂(氯酸盐、高氯酸盐、次氯酸盐等)(Patel *et al.*, 2002; Hassler *et al.*, 2014; Lasne *et al.*, 2016),与地球环境有显著差别,这些过程对潜在生命信号的影响可能与地球过程也有很大不同.因而,建立类火星环境条件下生命信号(特别是不同类型的有机分子)的演化过程,是构建火星环境条件下确切生命信号的重要途径(Martin *et al.*, 2018).这方面的工作需综合利用不同的设施开展深入研究,包括基于空间站的长时间暴露实验和基于临近空间的短期暴露实验,以及实验室类火星环境模拟舱.基于这些设施,国内外学者已开展了针对不同类型有机质的模拟实验,包括氨基酸、核酸和色素等(ten Kate *et al.*, 2006; Lyon *et al.*, 2010; Baqué *et al.*, 2016).近年来,中国地质大学(武汉)地质微生物与环境国家重点实验室也构建了一台类火星环境模拟舱(图5),目前可以模拟的环境参数包括UV紫外辐射(波长范围250~2 000 nm,可根据需要调整)、大气压力和成分(>常压到 10^{-4} Pa,模拟不同气体组成)、电子轰击(0~500 eV)、温度变化(样品台温度从 -55°C 至 25°C).该设施重点聚焦类火星环境条件下生物脂类的转换特征,以期构建火星环境下可靠的脂类生命信号.

4 结论

地球是当前唯一已知具有生命的星球,深入认识地球生命的起源、分布、及其与环境的相互作用和协同演化过程是地球生物学的核心,因而也是广义天体生物学研究的重要内容,同时也是开展地外生命探测的基石.为了更好地服务于地外生命探测,地球生物学亟需加强地球宜居性起源和早期演化特征、微生物适应极端环境的极限及应对策略等方面的研究.同时,需要综合使用高新技术方法揭示地球早期各类宜居环境及现代对应环境中的生命信号,并结合不同尺度类天体环境的实验模拟研究,构建指纹性高的生命信号体系.最终实现从地球生物学向天体生物学的跨越,更好地服务我国深空探测任务中的天体生物学目标.

致谢:谨以此文祝贺恩师殷鸿福院士90华诞!感谢香港大学李一良教授和其他两位匿名

审稿人对本文所提出的建设性修改意见.赵璐璐博士协助了部分图件的绘制!

References

- 2021–2030 Earth Science Development Strategy Research Group, 2021. Development Strategy of Earth Science in 2021–2030: The Past, Present and Future of the Habitable Earth. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Allwood, A. C., Rosing, M. T., Flannery, D. T., et al., 2018. Reassessing Evidence of Life in 3 700-Million-Year-Old Rocks of Greenland. *Nature*, 563: 241–244. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0610-4>
- Allwood, A. C., Walter, M. R., Kamber, B. S., et al., 2006. Stromatolite Reef from the Early Archaean Era of Australia. *Nature*, 441: 714–718. <https://doi.org/10.1038/nature04764>
- Altair, T., de Avellar, M. G. B., Rodrigues, F., et al., 2018. Microbial Habitability of Europa Sustained by Radioactive Sources. *Scientific Reports*, 8: 260. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18470-z>
- Baas-Becking, L. G. M., 1934. Geobiologie of Inleiding tot de Milieukunde. W. P. Van Stockum & Zoon, Den Haag.
- Baqué, M., Verseux, C., Böttger, U., et al., 2016. Preservation of Biomarkers from Cyanobacteria Mixed with Mars-Like Regolith under Simulated Martian Atmosphere and UV Flux. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 46(2): 289–310. <https://doi.org/10.1007/s11084-015-9467-9>
- Bell, E. A., Boehnke, P., Harrison, T. M., et al., 2015. Potentially Biogenic Carbon Preserved in a 4.1 Billion-Year-Old Zircon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(47): 14518–14521. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517557112>
- Biemann, K., Oro, J., Toulmin, P., et al., 1976. Search for Organic and Volatile Inorganic Compounds in Two Surface Samples from the Chryse Planitia Region of Mars. *Science*, 194(4260): 72–76. <https://doi.org/10.1126/science.194.4260.72>
- Bigham, J. M., Nordstrom, D. K., 2000. Iron and Aluminum Hydroxysulfates from Acid Sulfate Waters. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 40(1): 351–403. <https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.7>
- Blake, R. E., Chang, S. J., Leland, A., 2010. Phosphate Oxygen Isotopic Evidence for a Temperate and Biologically Active Archaean Ocean. *Nature*, 464: 1029–1032. <https://doi.org/10.1038/nature08952>
- Botta, O., Bada, J. L., 2002. Extraterrestrial Organic Com-

- pounds in Meteorites. *Surveys in Geophysics*, 23: 411–467.
- Bouquet, A., Glein, C. R., Wyrick, D., et al., 2017. Alternative Energy: Production of H₂ by Radiolysis of Water in the Rocky Cores of Icy Bodies. *The Astrophysical Journal Letters*, 840(1): L8. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa6d56>
- Braterman, P. S., Cairns-Smith, A. G., Sloper, R. W., 1983. Photo-Oxidation of Hydrated Fe²⁺—Significance for Banded Iron Formations. *Nature*, 303: 163–164. <https://doi.org/10.1038/303163a0>
- Bryan, N. C., Christner, B. C., Guzik, T. G., et al., 2019. Abundance and Survival of Microbial Aerosols in the Troposphere and Stratosphere. *The ISME Journal*, 13(11): 2789–2799. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0474-0>
- Catling, D. C., Zahnle, K. J., 2020. The Archean Atmosphere. *Science Advances*, 6(9): eaax1420. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1420>
- Catling, D. C., Zahnle, K. J., McKay, C., 2001. Biogenic Methane, Hydrogen Escape, and the Irreversible Oxidation of Early Earth. *Science*, 293(5531): 839–843. <https://doi.org/10.1126/science.1061976>
- Cavicchioli, R., 2002. Extremophiles and the Search for Extraterrestrial Life. *Astrobiology*, 2(3): 281–292. <https://doi.org/10.1089/153110702762027862>
- China Academy of Sciences "Deep Underground Biosphere" Project Group, 2020. Deep Underground Biosphere. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Chyba, C., Sagan, C., 1992. Endogenous Production, Exogenous Delivery and Impact-Shock Synthesis of Organic Molecules: an Inventory for the Origins of Life. *Nature*, 355: 125–132. <https://doi.org/10.1038/355125a0>
- Clarke, A., 2014. The Thermal Limits to Life on Earth. *International Journal of Astrobiology*, 13(2): 141–154. <https://doi.org/10.1017/s1473550413000438>
- Cockell, C. S., 2014. Habitable Worlds with no Signs of Life. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 372(2014): 20130082. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0082>
- Cockell, C. S., Bush, T., Bryce, C., et al., 2016. Habitability: A Review. *Astrobiology*, 16(1): 89–117. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1295>
- Czaja, A. D., Johnson, C. M., Beard, B. L., et al., 2013. Biological Fe Oxidation Controlled Deposition of Banded Iron Formation in the ca. 3 770 Ma Isua Supracrustal Belt (West Greenland). *Earth and Planetary Science Letters*, 363: 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.12.025>
- Des Marais, D. J., Nuth, J. A. III, Allamandola, L. J., et al., 2008. The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 8(4): 715–730. <https://doi.org/10.1089/ast.2008.0819>
- Diehl, A., Bach, W., 2020. MARHYS (MARine HYdrothermal Solutions) Database: A Global Compilation of Marine Hydrothermal Vent Fluid, End Member, and Seawater Compositions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(12): e2020GC009385. <https://doi.org/10.1029/2020gc009385>
- Dodd, M. S., Papineau, D., Grenne, T., et al., 2017. Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates. *Nature*, 543: 60–64. <https://doi.org/10.1038/nature21377>
- Elkins-Tanton, L. T., 2008. Linked Magma Ocean Solidification and Atmospheric Growth for Earth and Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1–4): 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.062>
- Elkins-Tanton, L. T., 2012. Magma Oceans in the Inner Solar System. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 113–139. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105503>
- Falkowski, P. G., Fenchel, T., Delong, E. F., 2008. The Microbial Engines that Drive Earth's Biogeochemical Cycles. *Science*, 320(5879): 1034–1039. <https://doi.org/10.1126/science.1153213>
- Farquhar, J., Bao, H., Thieme, M., 2000. Atmospheric Influence of Earth's Earliest Sulfur Cycle. *Science*, 289(5480): 756–759. <https://doi.org/10.1126/science.289.5480.756>
- Fogg, M. J., 1992. An Estimate of the Prevalence of Biocompatible and Habitable Planets. *Journal of the British Interplanetary Society*, 45(1): 3–12.
- Furnes, H., Banerjee, N. R., Muehlenbachs, K., et al., 2004. Early Life Recorded in Archean Pillow Lavas. *Science*, 304(5670): 578–581. <https://doi.org/10.1126/science.1095858>
- Gillen, C., Jeancolas, C., McMahon, S., et al., 2023. The Call for a New Definition of Biosignature. *Astrobiology*, 23(11): 1228–1237. <https://doi.org/10.1089/ast.2023.0010>
- Grasset, O., Dougherty, M. K., Coustenis, A., et al., 2013. JUPITER ICy Moons Explorer (JUICE): An ESA Mission to Orbit Ganymede and to Characterise the Jupiter System. *Planetary and Space Science*, 78: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002>
- Green, J., Hoehler, T., Neveu, M., et al., 2021. Call for a

- Framework for Reporting Evidence for Life beyond Earth. *Nature*, 598: 575–579. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03804-9>
- Habicht, K. S., Gade, M., Thamdrup, B., et al., 2002. Calibration of Sulfate Levels in the Archean Ocean. *Science*, 298(5602): 2372–2374. <https://doi.org/10.1126/science.1078265>
- Halevy, I., Bachan, A., 2017. The Geologic History of Seawater pH. *Science*, 355(6329): 1069–1071. <https://doi.org/10.1126/science.aal4151>
- Hassenkam, T., Andersson, M. P., Dalby, K. N., et al., 2017. Elements of Eoarchean Life Trapped in Mineral Inclusions. *Nature*, 548: 78–81. <https://doi.org/10.1038/nature23261>
- Hassler, D. M., Zeitlin, C., Wimmer-Schweingruber, R. F., et al., 2014. Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover. *Science*, 343(6169): 1244797. <https://doi.org/10.1126/science.1244797>
- Hays, L. E., 2015. NASA Astrobiology Strategy. NASA, Houston.
- Hays, L. E., Graham, H. V., Des Marais, D. J., et al., 2017. Biosignature Preservation and Detection in Mars Analog Environments. *Astrobiology*, 17(4): 363–400. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1627>
- He, H. P., Wu, X., Xian, H. Y., et al., 2021. An Abiotic Source of Archean Hydrogen Peroxide and Oxygen that Pre-Dates Oxygenic Photosynthesis. *Nature Communications*, 12: 6611. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26916-2>
- Holland, H. D., 2006. The Oxygenation of the Atmosphere and Oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 361(1470): 903–915. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1838>
- Horneck, G., Walter, N., Westall, F., et al., 2016. AstRo-Map European Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 16(3): 201–243. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1441>
- Horowitz, N. H., Cameron, R. E., Hubbard, J. S., 1972. Microbiology of the Dry Valleys of Antarctica. *Science*, 176(4032): 242–245. <https://doi.org/10.1126/science.176.4032.242>
- Hou, Z. Q., Liu, J. Z., Xu, Y. G., et al., 2024. The Search for Life Signatures on Mars by the Tianwen-3 Mars Sample Return Mission. *National Science Review*, 11(11): nwae313. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae313>
- House, C. H., 2015. Penciling in Details of the Hadean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(47): 14410–14411. <https://doi.org/10.1073/pnas.1519765112>
- Hren, M. T., Tice, M. M., Chamberlain, C. P., 2009. Oxygen and Hydrogen Isotope Evidence for a Temperate Climate 3.42 Billion Years Ago. *Nature*, 462: 205–208. <https://doi.org/10.1038/nature08518>
- Huang, S. S., 1959. The Problem of Life in the Universe and the Mode of Star Formation. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 71: 421. <https://doi.org/10.1086/127417>
- Huang, S. S., 1960. Life-Supporting Regions in the Vicinity of Binary Systems. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 72: 106. <https://doi.org/10.1086/127489>
- Hubbard, G. S., Naderi, F. M., Garvin, J. B., 2002. Following the Water, the New Program for Mars Exploration. *Acta Astronautica*, 51(1–9): 337–350. [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(02\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(02)00067-X)
- Hurowitz, J. A., Grotzinger, J. P., Fischer, W. W., et al., 2017. Redox Stratification of an Ancient Lake in Gale Crater, Mars. *Science*, 356(6341): eaah6849. <https://doi.org/10.1126/science.aah6849>
- Joyce, G. F., 2002. The Antiquity of RNA-Based Evolution. *Nature*, 418: 214–221. <https://doi.org/10.1038/418214a>
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., Reynolds, R. T., 1993. Habitable Zones around Main Sequence Stars. *Icarus*, 101(1): 108–128. <https://doi.org/10.1006/icar.1993.1010>
- Kasting, J., Kirschvink, J., 2012. Evolution of a Habitable Planet. In: Impey, C., Lunine, J., Funes, J., eds., *Frontiers of Astrobiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 115–131. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511902574.010>
- Kelley, D. S., Karson, J. A., Früh-Green, G. L., et al., 2005. A Serpentinite-Hosted Ecosystem: The Lost City Hydrothermal Field. *Science*, 307(5714): 1428–1434. <https://doi.org/10.1126/science.1102556>
- Kerr, R. A., 2005. Are we Alone in the Universe? *Science*, 309(5731): 88. <https://doi.org/10.1126/science.309.5731.88>
- Knauth, L. P., 2005. Temperature and Salinity History of the Precambrian Ocean: Implications for the Course of Microbial Evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219(1–2): 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2004.10.014>
- Knauth, L. P., Lowe, D. R., 2003. High Archean Climatic Temperature Inferred from Oxygen Isotope Geochemistry of Cherts in the 3.5 Ga Swaziland Supergroup, South

- Africa. *Geological Society of America Bulletin*, 115: 566–580. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)1150566:hactif>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)1150566:hactif>2.0.co;2)
- Kvenvolden, K., Lawless, J., Perring, K., et al., 1970. Evidence for Extraterrestrial Amino-Acids and Hydrocarbons in the Murchison Meteorite. *Nature*, 228: 923–926. <https://doi.org/10.1038/228923a0>
- Lane, N., Martin, W., 2010. The Energetics of Genome Complexity. *Nature*, 467: 929–934. <https://doi.org/10.1038/nature09486>
- Lasne, J., Noblet, A., Szopa, C., et al., 2016. Oxidants at the Surface of Mars: A Review in Light of Recent Exploration Results. *Astrobiology*, 16(12): 977–996. <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1502>
- Lederberg, J., 1960. Exobiology: Approaches to Life beyond the Earth. *Science*, 132(3424): 393–400. <https://doi.org/10.1126/science.132.3424.393>
- Lepland, A., Arrhenius, G., Cornell, D., 2002. Apatite in Early Archean Isua Supracrustal Rocks, Southern West Greenland: Its Origin, Association with Graphite and Potential as a Biomarker. *Precambrian Research*, 118 (3–4): 221–241. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00106-7)
- Lepland, A., van Zuilen, M. A., Arrhenius, G., et al., 2005. Questioning the Evidence for Earth's Earliest Life—Akilia Revisited. *Geology*, 33(1): 77–79. <https://doi.org/10.1130/g20890.1>
- Li, Y. L., 2011. Outline of Astrobiology. *Science & Technology Review*, 29: 66–74 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. L., Sun, S., 2016. The Origin of Life on Earth. *Chinese Science Bulletin*, 61(28–29): 3065–3078 (in Chinese).
- Lin, W., Li, Y. L., Wang, G. H., et al., 2020. Overview and Perspectives of Astrobiology. *Chinese Science Bulletin*, 65(5): 380–391 (in Chinese).
- Lonsdale, P., 1977. Clustering of Suspension-Feeding Macrobenthos near Abyssal Hydrothermal Vents at Oceanic Spreading Centers. *Deep Sea Research*, 24(9): 857–863. [https://doi.org/10.1016/0146-6291\(77\)90478-7](https://doi.org/10.1016/0146-6291(77)90478-7)
- Louca, S., Parfrey, L. W., Doebeli, M., 2016. Decoupling Function and Taxonomy in the Global Ocean Microbiome. *Science*, 353(6305): 1272–1277. <https://doi.org/10.1126/science.aaf4507>
- Lovelock, J., 1979. Gaia: A New Look at Life on Earth. Oxford University Press, Oxford.
- Lowe, D. R., Ibarra, D. E., Drabon, N., et al., 2020. Constraints on Surface Temperature 3.4 Billion Years ago Based on Triple Oxygen Isotopes of Cherts from the Barberton Greenstone Belt, South Africa, and the Problem of Sample Selection. *American Journal of Science*, 320(9): 790–814. <https://doi.org/10.2475/11.2020.02>
- Luo, G. M., Liu, D., Yang, H., 2024. Microbes in Mass Extinction: An Accomplice or a Savior? *National Science Review*, 11(1): nwad291. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad291>
- Luo, G. M., Ono, S., Beukes, N. J., et al., 2016. Rapid Oxygenation of Earth's Atmosphere 2.33 Billion Years ago. *Science Advances*, 2(5): e1600134. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600134>
- Luo, G. M., Zhu, X. K., Wang, S. J., et al., 2022. Mechanisms and Climatic-Ecological Effects of the Great Oxidation Event in the Early Proterozoic. *Science China Earth Sciences*, 65(9): 1646–1672. <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9934-y>
- Lyon, D. Y., Monier, J. M., Dupraz, S., et al., 2010. Integrity and Biological Activity of DNA after UV Exposure. *Astrobiology*, 10(3): 285–292. <https://doi.org/10.1089/ast.2009.0359>
- Martin, H., Moyen, J. F., 2002. Secular Changes in Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Composition as Markers of the Progressive Cooling of Earth. *Geology*, 30(4): 319–322. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0300319:scittg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0300319:scittg>2.0.co;2)
- Martin, W. F., Bryant, D. A., Beatty, J. T., 2018. A Physiological Perspective on the Origin and Evolution of Photosynthesis. *FEMS Microbiology Reviews*, 42(2): 205–231. <https://doi.org/10.1093/femsre/fux056>
- Martin, W., Russell, M. J., 2007. On the Origin of Biochemistry at an Alkaline Hydrothermal Vent. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362(1486): 1887–1925. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1881>
- Martins, Z., Cottin, H., Kotler, J. M., et al., 2017. Earth as a Tool for Astrobiology—A European Perspective. *Space Science Reviews*, 209(1): 43–81. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0369-1>
- Martins, Z., Pasek, M. A., 2024. Delivery of Organic Matter to the Early Earth. *Elements*, 20(1): 19–23. <https://doi.org/10.2138/gselements.20.1.19>
- McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keprta, K. L., et al., 1996. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science*, 273(5277): 924–930. <https://doi.org/10.1126/science.273.5277.924>
- McMahon, S., O'Malley-James, J., Parnell, J., 2013. Circumstellar Habitable Zones for Deep Terrestrial Bio-

- spheres. *Planetary and Space Science*, 85: 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.07.002>
- Michalski, J. R., Cuadros, J., Niles, P. B., et al., 2013. Groundwater Activity on Mars and Implications for a Deep Biosphere. *Nature Geoscience*, 6: 133–138. <https://doi.org/10.1038/ngeo1706>
- Miller, S. L., 1953. A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions. *Science*, 117 (3046): 528–529. <https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528>
- Mojzsis, S. J., Arrhenius, G., McKeegan, K. D., et al., 1996. Evidence for Life on Earth before 3, 800 Million Years ago. *Nature*, 384(6604): 55–59. <https://doi.org/10.1038/384055a0>
- Mustard, J. F., Adler, M., Allwood, A., et al., 2013. Report of the Mars 2020 Science Definition Team. Mars Exploration Program Analysis Group, Houston.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2023. Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023–2032. The National Academies Press, Washington, D.C..
- National Natural Science Foundation of China, China Academy of Sciences, 2022. Microbiology in Extreme Geological Environment. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Noffke, N., Christian, D., Wacey, D., et al., 2013. Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the Ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia. *Astrobiology*, 13(12): 1103–1124. <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1030>
- Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., et al., 2016. Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3 700-Million-Year-Old Microbial Structures. *Nature*, 537(7621): 535–538. <https://doi.org/10.1038/nature19355>
- Nutman, A. P., Mojzsis, S. J., Friend, C. R. L., 1997. Recognition of ≥ 3 850 Ma Water-Lain Sediments in West Greenland and Their Significance for the Early Archaean Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(12): 2475–2484. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00097-5)
- Olson, J. M., 2006. Photosynthesis in the Archean Era. *Photosynthesis Research*, 88(2): 109–117. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9040-5>
- Olson, J. M., Blankenship, R. E., 2004. Thinking about the Evolution of Photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 80(1–3): 373–386. <https://doi.org/10.1023/b:pres.0000030457.06495.83>
- Orosei, R., Lauro, S. E., Pettinelli, E., et al., 2018. Radar Evidence of Subglacial Liquid Water on Mars. *Science*, 361(6401): 490–493. <https://doi.org/10.1126/science.aar7268>
- Papineau, D., De Gregorio, B. T., Cody, G. D., et al., 2010. Ancient Graphite in the Eoarchean Quartz-Pyroxene Rocks from Akilia in Southern West Greenland I: Petrographic and Spectroscopic Characterization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(20): 5862–5883. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.05.025>
- Papineau, D., De Gregorio, B. T., Cody, G. D., et al., 2011. Young Poorly Crystalline Graphite in the >3.8 -Gyr-Old Nuvvuagittuq Banded Iron Formation. *Nature Geoscience*, 4: 376–379. <https://doi.org/10.1038/ngeo1155>
- Patel, M. R., Zarnnecki, J. C., Catling, D. C., 2002. Ultraviolet Radiation on the Surface of Mars and the Beagle 2 UV Sensor. *Planetary and Space Science*, 50(9): 915–927. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00067-3)
- Pinti, D. L., 2005. The Origin and Evolution of the Oceans. In: Gargaud, M., Barbier, B., Martin, H., & Risse, J., eds., Lectures in Astrobiology. Springer, Berlin, 83–112. https://doi.org/10.1007/10913406_4
- Planavsky, N. J., Asael, D., Hofmann, A., et al., 2014. Evidence for Oxygenic Photosynthesis Half a Billion Years before the Great Oxidation Event. *Nature Geoscience*, 7: 283–286. <https://doi.org/10.1038/ngeo2122>
- Proskurowski, G., Lilley, M. D., Seewald, J. S., et al., 2008. Abiogenic Hydrocarbon Production at Lost City Hydrothermal Field. *Science*, 319(5863): 604–607. <https://doi.org/10.1126/science.1151194>
- Ramirez, R. M., Craddock, R. A., 2018. The Geological and Climatological Case for a Warmer and Wetter Early Mars. *Nature Geoscience*, 11: 230–237. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0093-9>
- Robbins, L. J., Fakhraee, M., Smith, A. J. B., et al., 2023. Manganese Oxides, Earth Surface Oxygenation, and the Rise of Oxygenic Photosynthesis. *Earth-Science Reviews*, 239: 104368. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104368>
- Robert, F., Chaussidon, M., 2006. A palaeotemperature Curve for the Precambrian Oceans Based on Silicon Isotopes in Cherts. *Nature*, 443(7114): 969–972. <https://doi.org/10.1038/nature05239>
- Rosing, M. T., 1999. ^{13}C -Depleted Carbon Microparticles in >3 700 Ma Sea-Floor Sedimentary Rocks from West Greenland. *Science*, 283(5402): 674–676. <https://doi.org/10.1126/science.283.5402.674>

- Rosing, M. T., Rose, N. M., Bridgwater, D., et al., 1996. Earliest Part of Earth's Stratigraphic Record: A Reappraisal of the >3.7 Ga Isua (Greenland) Supracrustal Sequence. *Geology*, 24(1): 43–46. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)0240043:epoess>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)0240043:epoess>2.3.co;2)
- Rubie, D. C., Nimmo, F., Melosh, H. J., 2007. Formation of Earth's Core. In: Schubert, G., ed., *Treatise on Geophysics*, 1st Edition, Volume 9: Evolution of the Earth. Elsevier, Amsterdam.
- Rushby, A. J., Claire, M. W., Osborn, H., et al., 2013. Habitable Zone Lifetimes of Exoplanets around Main Sequence Stars. *Astrobiology*, 13(9): 833–849. <https://doi.org/10.1089/ast.2012.0938>
- Russell, M. J., Daniel, R. M., Hall, A. J., et al., 1994. A Hydrothermally Precipitated Catalytic Iron Sulphide Membrane as a First Step Toward Life. *Journal of Molecular Evolution*, 39(3): 231–243. <https://doi.org/10.1007/bf00160147>
- Sánchez-Baracaldo, P., Ridgwell, A., Raven, J. A., 2014. A Neoproterozoic Transition in the Marine Nitrogen Cycle. *Current Biology*, 24(6): 652–657. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.01.041>
- Sasselov, D. D., Grotzinger, J. P., Sutherland, J. D., 2020. The Origin of Life as a Planetary Phenomenon. *Science Advances*, 6(6): eaax3419. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax3419>
- Sauvage, J. F., Flinders, A., Spivack, A. J., et al., 2021. The Contribution of Water Radiolysis to Marine Sedimentary Life. *Nature Communications*, 12(1): 1297. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21218-z>
- Schmitt-Kopplin, P., Gabelica, Z., Gougeon, R. D., et al., 2010. High Molecular Diversity of Extraterrestrial Organic Matter in Murchison Meteorite Revealed 40 Years after Its Fall. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(7): 2763–2768. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912157107>
- Schopf, J. W., 1993. Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life. *Science*, 260: 640–646. <https://doi.org/10.1126/science.260.5108.640>
- Schopf, J. W., 2024. Pioneers of Origin of Life Studies—Darwin, Oparin, Haldane, Miller, Oró—And the Oldest Known Records of Life. *Life*, 14(10): 1345. <https://doi.org/10.3390/life14101345>
- Schopf, J. W., Kudryavtsev, A. B., Osterhout, J. T., et al., 2017. An Anaerobic ~ 3.4 Ga Shallow-Water Microbial Consortium: Presumptive Evidence of Earth's Paleoproterozoic Anoxic Atmosphere. *Precambrian Research*, 299: 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.precambres.2017.07.021>
- Shen, J. X., Liu, C. Z., Pan, Y. X., et al., 2024. Follow the Serpentine as a Comprehensive Diagnostic for Extraterrestrial Habitability. *Nature Astronomy*, 8: 1230–1236. <https://doi.org/10.1038/s41550-024-02373-x>
- Shen, Y. A., Buick, R., Canfield, D. E., 2001. Isotopic Evidence for Microbial Sulphate Reduction in the Early Archean Era. *Nature*, 410: 77–81. <https://doi.org/10.1038/35065071>
- Shen, Y. A., Farquhar, J., Masterson, A., et al., 2009. Evaluating the Role of Microbial Sulfate Reduction in the Early Archean Using Quadruple Isotope Systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(3–4): 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.018>
- Sleep, N. H., Meibom, A., Fridriksson, T., et al., 2004. H₂-Rich Fluids from Serpentinization: Geochemical and Biotic Implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(35): 12818–12823. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405289101>
- Sleep, N. H., Zahnle, K., 2001. Carbon Dioxide Cycling and Implications for Climate on Ancient Earth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E1): 1373–1399. <https://doi.org/10.1029/2000je001247>
- Smith, D. J., 2013. Microbes in the Upper Atmosphere and Unique Opportunities for Astrobiology Research. *Astrobiology*, 13(10): 981–990. <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1074>
- Summons, R. E., Amend, J. P., Bish, D., et al., 2011. Preservation of Martian Organic and Environmental Records: Final Report of the Mars Biosignature Working Group. *Astrobiology*, 11(2): 157–181. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0506>
- Sun, F. N., Luo, G. M., Pancost, R. D., et al., 2024. Methane Fueled Lake Pelagic Food Webs in a Cretaceous Greenhouse World. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(44): e2411413121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2411413121>
- Tarnas, J. D., Mustard, J. F., Sherwood Lollar, B., et al., 2021. Earth-Like Habitable Environments in the Subsurface of Mars. *Astrobiology*, 21(6): 741–756. <https://doi.org/10.1089/ast.2020.2386>
- Tashiro, T., Ishida, A., Hori, M., et al., 2017. Early Trace of Life from 3.95 Ga Sedimentary Rocks in Labrador, Canada. *Nature*, 549: 516–518. <https://doi.org/10.1038/nature24019>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geo-*

- physics*, 33(2): 241–265. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- ten Kate, I. L., Garry, J. R. C., Peeters, Z., et al., 2006. The Effects of Martian near Surface Conditions on the Photochemistry of Amino Acids. *Planetary and Space Science*, 54(3): 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.12.002>
- Tice, M. M., Lowe, D. R., 2004. Photosynthetic Microbial Mats in the 3 416-Myr-Old Ocean. *Nature*, 431(7008): 549–552. <https://doi.org/10.1038/nature02888>
- Tucker, J. M., Mukhopadhyay, S., 2014. Evidence for Multiple Magma Ocean Outgassing and Atmospheric Loss Episodes from Mantle Noble Gases. *Earth and Planetary Science Letters*, 393: 254–265. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.050>
- Tyler, S. A., Barghoorn, E. S., 1954. Occurrence of Structurally Preserved Plants in Pre-Cambrian Rocks of the Canadian Shield. *Science*, 119(3096): 606–608. <https://doi.org/10.1126/science.119.3096.606>
- Ueno, Y., Yamada, K., Yoshida, N., et al., 2006. Evidence from Fluid Inclusions for Microbial Methanogenesis in the Early Archaean Era. *Nature*, 440: 516–519. <https://doi.org/10.1038/nature04584>
- Valley, J. W., Cavosie, A. J., Ushikubo, T., et al., 2014. Hadean Age for a Post-Magma-Ocean Zircon Confirmed by Atom-Probe Tomography. *Nature Geoscience*, 7: 219–223. <https://doi.org/10.1038/ngeo2075>
- Valley, J. W., Peck, W. H., King, E. M., et al., 2002. A Cool Early Earth. *Geology*, 30(4): 351–354. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)0300351:acee>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)0300351:acee>2.0.co;2)
- van Kranendonk, M. J., 2006. Volcanic Degassing, Hydrothermal Circulation and the Flourishing of Early Life on Earth: A Review of the Evidence from C. 3490–3240 Ma Rocks of the Pilbara Supergroup, Pilbara Craton, Western Australia. *Earth-Science Reviews*, 74(3–4): 197–240. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.09.005>
- van Zuilen, M. A., Lepland, A., Arrhenius, G., 2002. Reassessing the Evidence for the Earliest Traces of Life. *Nature*, 418: 627–630. <https://doi.org/10.1038/nature00934>
- Vernadsky, V. L., 1926. The Biosphere. Translated by Langmuir, D.B., 1998. Copernicus, New York.
- Wang, D. T., Gruen, D. S., Lollar, B. S., et al., 2015. Nonequilibrium clumped Isotope Signals in Microbial Methane. *Science*, 348 (6233): 428–431. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4326>
- Ward, P. D., Brownlee, D., Krauss, L., 2000. Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe. Copernicus Books, New York.
- Westall, F., 2012. The Early Earth. In: Impey, C., Lunine, J., Funes, J., eds., *Frontiers of Astrobiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 89–114. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511902574.009>
- Westall, F., Foucher, F., Bost, N., et al., 2015. Biosignatures on Mars: What, Where, and How? Implications for the Search for Martian Life. *Astrobiology*, 15(11): 998–1029. <https://doi.org/10.1089/ast.2015.1374>
- Westall, F., Xiao, S. H., 2024. Precambrian Earth: Co-Evolution of Life and Geodynamics. *Precambrian Research*, 414: 107589. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107589>
- Wirth, R., 2017. Colonization of Black Smokers by Hyperthermophilic Microorganisms. *Trends in Microbiology*, 25(2): 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.11.002>
- Xie, S. C., 2023. Geobiology. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, S. C., Luo, G. M., 2023. Opportunities and Challenges for the Development of Geobiology. *Acta Palaeontologica Sinica*, 62(4): 454–462 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Gong, Y. M., Tong, J. N., et al., 2006. Leap from Paleontology to Geobiology. *Chinese Science Bulletin*, 51(19): 2327–2336 (in Chinese).
- Xie, S. C., Jiao, N. Z., Luo, G. M., et al., 2022b. Evolution of Biotic Carbon Pumps in Earth History: Microbial Roles as a Carbon Sink in Oceans. *Chinese Science Bulletin*, 67(15): 1715–1726 (in Chinese).
- Xie, S. C., Luo, G. M., Zhu, X. C., et al., 2022a. Geological Agents of Microbes in Deep Sea, Deep Earth, Deep Space and Deep Time: From Climate and Environment Changes to Ecological Crisis. *Geological Review*, 68(5): 1575–1583 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Yang, H., Luo, G. M., et al., 2012. Geomicrobial Functional Groups: A Window on the Interaction between Life and Environments. *Chinese Science Bulletin*, 57(1): 3–22 (in Chinese).
- Xie, S. C., Yin, H. F., Liu, D., et al., 2018. On Development from Paleontology to Geobiology: Overview of Innovation and Expansion of Application Fields. *Earth Science*, 43(11): 3823–3826 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, J., Fischer, W. M., Inoue, K., et al., 2000. Molecular Evidence for the Early Evolution of Photosynthesis.

- Science*, 289(5485): 1724–1730. <https://doi.org/10.1126/science.289.5485.1724>
- Yesiltas, M., Kebukawa, Y., 2024. Extraterrestrial Organic Matter: An Introduction. *Elements*, 20(1): 7–12. <https://doi.org/10.2138/gselements.20.1.7>
- Yin, H. F., 1994. Biogeology. *Advances in Earth Science*, 9(6): 79–82 (in Chinese).
- Zahnle, K., Arndt, N., Cockell, C., et al., 2007. Emergence of a Habitable Planet. *Space Science Reviews*, 129(1): 35–78. <https://doi.org/10.1007/s11214-007-9225-z>
- Zhao, J. N., Shi, Y. T., Zhang, M. J., et al., 2021. Advances in Martian Water-Related Landforms. *Acta Geologica Sinica*, 95(9): 2755–2768 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Guo, Z. T., Jiao, N. Z., et al., 2024. A Holistic Perspective on Earth System Science. *Science in China (Series D)*, 54(10): 3065–3090 (in Chinese).
- Zimmer, C., 2005. How and where Did Life on Earth Arise? *Science*, 309(5731): 89. <https://doi.org/10.1126/science.309.5731.89>
- ### 中文参考文献
- 2021–2030 地球科学发展战略研究组, 2021. 2021–2030 地球科学发展战略: 宜居地球的未来、现在与过去. 北京: 科学出版社.
- 中国科学院“深部地下生物圈”项目组, 2020. 深部地下生物圈. 北京: 科学出版社.
- 李一良, 2011. 天体生物学概要. 科技导报, 29: 66–74.
- 李一良, 孙思, 2016. 地球生命的起源. 科学通报, 61(28–29): 3065–3078.
- 林巍, 李一良, 王高鸿, 等, 2020. 天体生物学研究进展和发展趋势. 科学通报, 65(5): 380–391.
- 国家自然科学基金委员会, 中国科学院, 2022. 极端地质环境微生物学. 北京: 科学出版社.
- 谢树成, 2023. 地球生物学. 北京: 高等教育出版社.
- 谢树成, 罗根明, 2023. 地球生物学发展的机遇与挑战. 古生物学报, 62(4): 454–462.
- 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 等, 2006. 从古生物学到地球生物学的跨越. 科学通报, 51(19): 2327–2336.
- 谢树成, 焦念志, 罗根明, 等, 2022b. 海洋生物碳泵的地质演化: 微生物的碳汇作用. 科学通报, 67(15): 1715–1726.
- 谢树成, 罗根明, 朱秀昌, 等, 2022a. “四深”微生物的地质作用——从气候环境变化到生态灾难. 地质论评, 68(5): 1575–1583.
- 谢树成, 杨欢, 罗根明, 等, 2012. 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, 57(1): 3–22.
- 谢树成, 殷鸿福, 刘邓, 等, 2018. 再谈古生物学向地球生物学的发展: 服务领域的拓展与创新. 地球科学, 43(11): 3823–3836.
- 殷鸿福, 1994. 生物地质学. 地球科学进展, 9(6): 79–82.
- 赵健楠, 史语桐, 张明杰, 等, 2021. 火星水成地貌研究进展. 地质学报, 95(9): 2755–2768.
- 郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等, 2024. 地球系统科学研究态势. 中国科学(D辑), 54(10): 3065–3090.