

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.883>



关于我国天体生物学研究的思考

林巍¹, 申建勋¹, 潘永信^{1,2}

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. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

摘要: 探索地外宜居环境和生命信号是深空探测的重要科学目标. 天体生物学在宇宙演化的背景下研究生命的起源、演化、分布和未来, 是由地球科学、生命科学、空间科学、天文学、化学等多学科融合形成的一门前沿交叉学科. 随着人类深空探测的不断进步, 天体生物学研究内涵在不断拓展, 其研究方式也更趋于多元和交叉. 概述了天体生物学的内涵和发展态势, 研判我国天体生物学研究所面临的机遇与挑战, 并对我国在该领域的发展提出了建议.

关键词: 天体生物学; 宜居环境; 地外生命探索; 行星探测; 交叉科学.

中图分类号: P149

文章编号: 1000-2383(2022)11-4108-06

收稿日期: 2022-10-24

On Astrobiological Research in China

Lin Wei¹, Shen Jianxun¹, Pan Yongxin^{1,2}

1. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The search for extraterrestrial habitable environments and signs of life is one of the major scientific objectives of deep space exploration. As a disciplinary regime that studies the origin, evolution, distribution, and future of life associated with the evolution of planetary systems, astrobiology systematically enlists practices across multiple disciplines, such as earth science, life science, space science, astronomy, and chemistry. In recent decades, the research of astrobiology has been progressively extended as the understanding of other celestial bodies is improved. Here we review the research content and development of astrobiology, discuss relevant opportunities and challenges in China, and provide prospects for the future.

Key words: astrobiology; habitable environments; search for extraterrestrial life; planetary exploration; interdisciplinary sciences.

1 天体生物学的内涵

天体生物学 (Astrobiology) 是一门前沿交叉学科, 主要探究生命在宇宙中的起源、演化、分布和未来 (Board, 2019). 天体生物学在形成之初是以探索地外生命为其主要研究内容, 但随着深空探

测的不断深入, 天体生物学的内涵也在不断延拓, 逐渐发展到以生命起源、宜居环境以及生命-环境协同演化的综合研究为主线 (林巍等, 2020).

天体生物学以综合系统的视角来审视天体宜居环境和生命的起源与演化, 探索地外宜居环境与生命信号是其重要科学目标. 天体生物学研究内

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41621004); 中国科学院重点部署项目 (No. ZDBS-SSW-TLC001); 中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目 (Nos. IGGCAS-201904, IGGCAS-202102).

作者简介: 林巍 (1983—), 男, 研究员, 天体生物学专业. E-mail: weilin@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 林巍, 申建勋, 潘永信, 2022. 关于我国天体生物学研究的思考. 地球科学, 47(11):4108-4113.

Citation: Lin Wei, Shen Jianxun, Pan Yongxin, 2022. On Astrobiological Research in China. *Earth Science*, 47(11):4108-4113.

容主要包括地球生命研究及启示、地外宜居环境探索、地外生命信号探测 3 个方面。地球是目前已知唯一存在生命的星球,对地球生命的起源和演化的审视,以及对地球各种生态系统(特别是极端环境)中生命的生存和适应机制的研究,有助于深化对地外生命可能存在形式的理解。地外宜居环境的研究主要探讨太阳系内外可能存在的宜居环境及其如何形成、是否支持生命存在等问题。近年来,人们逐渐认识到天体的环境是动态变化的,可以从宜居过渡到不宜居,或从不宜居转变为宜居,需要从时间和空间两个维度进行系统研究(林巍等, 2020; Mojzsis, 2021)。地外生命信号主要研究指示现在或过去存在生命的各种信号,以及这些信号的遴选、探测与解译等。

2 天体生物学的发展态势

2.1 研究内容不断拓展

天体生物学的前身是地外生物学(Exobiology),主要探索地外生命的存在形式。随着研究的不断深入,从宇宙演化的角度来看,地球也是一颗天体,是目前唯一已知具有生命的星球,因此人们逐步把地球生命纳入了该研究领域进而融合成为现代天体生物学(Soffen, 1997)。早期对于地外生命的探索追求一步到位的研究模式,最典型的例子是 20 世纪 70 年代美国国家航空航天局(NASA)实施的“海盗 1 号”和“海盗 2 号”火星任务,携带了生命探测实验系统(Klein *et al.*, 1976),期望能够探查到火星生命,但结果令人失望。1996 年,人们在火星陨石 ALH84001 中发现了多环芳烃、碳酸盐球体、有序排列的近似地球趋磁细菌磁小体化石的显微结构等(McKay *et al.*, 1996),重燃火星生命研究之火,但遗憾的是,经过科学界的反复争论后人们发现无机过程也可以解释这些疑似生命信号的形成。正是由于这些开拓性的研究,人们逐渐认识到地外生命探测需要建立一个体系化的研究思路 and 理论框架(Green *et al.*, 2021)。进入 21 世纪,以火星和其他潜在宜居星球为研究目标的天体生物学将研究中心转为寻找水源和评估地外环境的宜居性,并逐步拓展至探索可靠生命信号的判别指标和厘清生命-环境协同演化的模式(Cabrol, 2018)。

火星一直是天体生物学研究的重要目标天体(潘永信和王赤, 2021)。经过几十年的探测与研究,发现尽管现代火星表面的环境恶劣,但火星在形成初

期的 10~20 亿年间可能存在较宜居的环境,是研究宜居环境演变和地外生命信号探测的理想天体(Solomon *et al.*, 2005)。地貌学和矿物学研究表明早期火星拥有热液系统、地下含水层、盆地湖泊、硫酸盐/氯化盐盐湖、风化土壤等,并可能存在于地表降水与大型湖泊甚至海洋(Ehlmann and Edwards, 2014; Liu *et al.*, 2022)。“机遇号”火星车发现火星早期存在酸性盐湖(Knauth *et al.*, 2005),地球上的嗜酸微生物或可以在这里存活,因此该区域具有孕育生命的潜力。“勇气号”火星车发现了类似火山热液泉形成的硅华沉积(Squyres *et al.*, 2008),在地球上与此类似的生态系统是一些极端微生物的温床。“好奇号”火星车在盖尔撞击坑里发现了大约 35 亿年前的低盐度、pH 中性的湖泊,该湖泊系统内具有生命必需的元素,并且至少到 27 亿年前都有间歇性的地下水流出(Rampe *et al.*, 2020),此外盖尔撞击坑的泥质沉积岩中还发现了长链有机物(Eigenbrode *et al.*, 2018)。火星轨道器在极地和中纬度地区发现了地表冰、冰盖和冰川,一些季节性斜坡线纹也暗示着暖季里可能有液态水活动的存在(Dundas *et al.*, 2017)。有趣的是,在盖尔撞击坑等地发现了痕量甲烷(Webster *et al.*, 2018),但探测精度更高的 ExoMars 微量气体轨道器却未在大气中检测到甲烷(Korablev *et al.*, 2019)。火星上甲烷生成的机制尚不明确,对其进行深入的天体生物学研究将有助于揭示更多关于火星宜居环境和潜在生命的信息(湛佳伟等, 2020)。天体生物学致力于探索是什么过程导致火星局部的宜居环境能够延续数亿年,又是什么过程导致了火星大气逃逸和后续环境的恶化(Jakosky *et al.*, 2018)。可以预计未来我国的火星采样返回任务和 NASA 的采样返回任务将揭晓更多关于火星环境演化和是否存在(过)生命的秘密(叶培建等, 2018; Kminek *et al.*, 2022)。

太阳系的冰天体(如巨行星的冰卫星)具有大量水/冰,也是天体生物学研究的重要天体。冰卫星的表面几乎被冰层覆盖,许多冰卫星可能具有冰下液态水和内部加热现象(Hendrix *et al.*, 2019)。不同冰卫星还有自身独有的特征,例如土卫二南极裂缝中发现溢出的水汽,土卫二、土卫六和海卫一上发现了支持生命存在的基本元素(碳、氢、氮、氧、磷、硫),木卫二、土卫二和土卫六上含有甲烷和复杂有机物,土卫二和土卫六具有氧化还原梯度的微环境,土卫六拥有大气层,木卫三有全球磁场等(Kivelson *et al.*, 2009; Lopes

et al., 2013; Postberg *et al.*, 2018; Hansen *et al.*, 2021; Jia and Kivelson, 2021). 欧洲航天局 (ESA) 的木星冰月探测器 (JUICE) 和 NASA 的欧罗巴快船 (Europa Clipper) 任务预计先后于 2023 年和 2024 年发射, 其主要科学目标之一是探索木星系冰卫星的宜居条件, 包括冰下海洋、地化成分、地质活动、行星大气和磁场强度等。

2.2 研究方式更加交叉

天体生物学是一门高度交叉的前沿研究领域, 由地球科学、生命科学、空间科学、天文学、化学等不同学科交叉融合形成, 主要研究手段涵盖野外调查、实验室分析和模拟、数值模拟、遥感观测、就位探测等, 在空间尺度上将地球系统、近地空间、地月空间、深空等有机结合。天体生物学研究主要依托航天器探测和望远镜观测, 同时地球上类地外环境研究、实验室模拟行星环境研究、理论/计算建模等也在天体生物学中发挥着重要作用。

当今天体生物学的发展趋势是逐渐将理论研究、实验研究、遥感探测、深空探测等不同方式相结合以开展综合交叉研究。利用地球化学、地质学等手段可以研究地球早期的表面和内部过程 (如大气条件、火山活动、板块运动、陨石撞击等) 以及化学储备 (挥发分、有机物等) (Onstott *et al.*, 2019), 探究地球宜居环境的形成以及地球生命的起源等重大科学问题 (Bottke and Norman, 2017)。基于生物在岩石圈、水圈、大气圈、冰冻圈的生存和分布特征, 研究地球生命的生存极限, 界定宜居环境的理化边界条件 (Ménez *et al.*, 2018)。综合利用生物学、地学、化学等手段研究地球生命的演化历程和地质记录, 遴选指示生命存在的关键信号指标 (Baross *et al.*, 2020)。研究生物 (特别是微生物) 应对环境胁迫并建立其代谢模型, 多维度地认知重要环境因子 (如 pH、温度、压力、盐度、氧化还原势、能源、营养物质等) 如何影响生物的生存和生理代谢 (Liu *et al.*, 2020), 评估地外生命可能的存在形式 (Hoehler *et al.*, 2020)。病毒、类病毒和朊病毒的深入研究有助于更准确地定义生命的概念, 指导地外生命探索 (Koonin *et al.*, 2021)。

地外宜居环境的判据主要包括 3 个方面。第一, 是否具有形成生命的基本要素, 如生源要素 (碳、氢、氮、氧、磷、硫) 的丰度、比例和相态, 无机分子和有机物储备等; 第二, 是否具有适宜生命起源的理化条件, 如水的相态、能源、温度、辐射、压力、磁场等; 第三, 是否具有支持生命长期生

存和演化的地质条件, 如矿物丰度、岩石种类、火山和地震等地质事件的频率与类型等 (Conrad *et al.*, 2013; Schulze-Makuch *et al.*, 2011)。未来可以通过对不同天体开展多维度的遥感探测、就位探测、返回样品分析等以更好地评估地外环境的宜居程度 (Weller and Lenardic, 2018)。

探索地外生命信号的重要突破口是理解从无机过程演化到生命反应的必要条件以及指示生命存在和活动的各类信号指标。常用的生命信号包括化石、有机分子、手性、元素/同位素、生物代谢产物 (如生物矿物、生物气体等)、时间差异性、色素反射比、高等文明科技信号等类型 (Hays *et al.*, 2015)。准确探测和区分生命信号与非生命信号, 需要明确两者之间的模糊地带以及所选择目标信号的可靠程度, 结合可靠性检验来确认是否可能存在生命现象 (Chan *et al.*, 2019)。

3 我国天体生物学的机遇与挑战

我国深空探测的快速发展给天体生物学带来重要机遇。着眼未来, 需要建立起通过科学需求引领深空探测任务的新模式, 提出天体生物学研究的重大科学问题, 以科学目标来带动工程任务, 推动未来行星探测新任务的立项。

我国首次火星探测任务“天问一号”的成功实施 (Liu *et al.*, 2021, 2022; 耿言等, 2022; Li *et al.*, 2022), 推动我国行星探测工程开启了新征程, 为我国“天问二号”、“天问三号”和“天问四号”三个任务的规划实施提供了坚实基础。“天问二号”是将在 2025 年前后发射的小行星探测任务, 计划开展近地小行星 2016HO3 采样返回和主带彗星 311P/PanSTARRS 的伴飞探测。“天问三号”的核心目标是火星采样返回, 预计在 2028 年前后发射。紧随其后, 预计在 2029 年前后发射的“天问四号”是一次木星及其卫星探测以及天王星飞跃探测的任务。此外, 中国空间站的成功建设也将开启一系列天体生物学的实验研究。目前国内的深空探测聚焦于太阳系内, 但随着太空望远镜技术的飞跃发展, 我国也逐渐转向对空间望远镜的研发和制造, 预计将于 2023 年发射我国首个大型空间巡天望远镜 (Gibney, 2022)。这些空间和行星探测工程将为我国天体生物学研究带来前所未有的机遇。

火星生命信号探测研究有望成为天体生物学

研究的重大突破(Shen *et al.*, 2022).利用比较行星学的科学思路,对地球上可以类比火星演化不同阶段环境特征的类火星区域进行研究,从而遴选出火星生命探测中的可靠生命信号及其主要探测技术手段.面向我国即将实施的“天问三号”火星探测任务,当前天体生物学研究可以根据火星地质环境信息建议若干宜居潜力较大的预选研究区,通过这些地区与地球上对应的类火星环境进行比较研究,关注地球类火星环境中生命(特别是微生物)的生存方式和代谢产物,从而遴选出可用于火星生命探测的可靠目标信号,在此基础上提出火星就位探测的技术方案并开展科学载荷研发,助力火星采样返回任务(Shen *et al.*, 2022).值得注意的是,火星地质环境研究可以对疑似生命信号的准确解译提供重要约束,利用基于地球类火星环境中生命活动和生命信号的认知来指导火星生命探测,并加强生命信号探测技术和载荷的研究、设计和开发.

“天问二号”和“天问四号”任务为开展小行星和冰天体的天体生物学研究提供了契机.小行星是太阳系早期形成的天体,有助于了解太阳系的形成以及地球生命的起源.近期在小行星“龙宫”的返回样品中发现了多种氨基酸和其他有机物,为天体生物学研究带来了极大的鼓舞(Nakamura *et al.*, 2022).聚焦地外生命信号探测以及太阳系生命起源等重大科学问题,我国的天体生物学家已经开始参与小行星探测任务科学目标的制定.除火星之外,冰天体被认为是太阳系中最有可能存在地外生命的天体,特别是木卫二、土卫二、土卫六等冰卫星,未来“天问四号”任务有望在木星冰卫星的探测和研究中取得新突破.

4 我国天体生物学发展的建议

天体生物学的发展需要多学科的深度融合和渗透.地球科学和生命科学的交叉研究有助于认识地球宜居环境的形成、生命的起源和早期演化,通过研究地球上类地外环境中生物(主要是微生物)的种类、生存方式和适应机理等,指导地外宜居环境和生命信号探测研究.地外宜居环境研究需要地球科学、空间科学、天文学等学科开展综合研究,特别是太阳系以及行星的起源和演化对于认识地外宜居环境的形成和分布具有重要意义.地外生命信号探索包括有效生命信号的遴选、地外生命信号的检测、疑似生命信号的研判等,需要生物、化学、

地学、天文等多学科的知识和技术手段.基于可靠生命信号的研究和遴选,研发生命信号探测技术和载荷是近期天体生物学研究的发展方向之一.

加强与工程任务的深度融合,开展建制化的天体生物学科学研究,支持兴趣导向的前沿探索研究.我国的天体生物学研究应以行星探测任务为契机,进一步凝练出重大科学问题,制定天体生物学研究路线图,规划中长期科学目标,提出研究方案和探测任务规划,并加强对相关核心技术(特别是科学探测载荷)的研发和攻关.行星探测工程的成功是科学研究的基础和保障,天体生物学提出的科学目标可以指导工程遴选目标天体、规划探测任务、设计研发科学载荷、制定探测方案等,科学为工程任务提供牵引,工程任务促进科学认知的发展.同时,面向前沿科学问题,鼓励兴趣导向的探索研究,提出“中国问题”,力争规划出以天体生物学为主要科学目标的新的行星探测任务.

天体生物学的发展需要加强人才队伍建设和长期稳定支持.鉴于天体生物学在我国刚起步,在借鉴美欧天体生物学人才培养成功经验的基础上,结合我国行星探测任务需求,规划我国天体生物学的学科体系和人才培养体系,培育天体生物学后备人才.在科技资助体系方面,一方面完善评价机制,针对天体生物学兼具基础科学研究和工程任务的交叉属性,需要探索有针对性的人才评价、资助和激励措施;另一方面,鉴于天体生物学对公众的天然吸引力,除了继续增大国家层面的投入之外,还可以推动民营资本的介入和支持,共同推进我国天体生物学的发展.

致谢:本文得益于中国科学院地质与地球物理研究所火星探测研究工作任务组的多次讨论.感谢张慧卿和王喆在撰文中提供的帮助!

References

- Baross, J. A., Anderson, R. E., Stüeken, E. E., 2020. The Environmental Roots of the Origin of Life. In: Meadows, V. S., Arney, G. N., Schmidt, B. E., et al., eds., *Planetary Astrobiology*. University of Arizona Press, Tucson, 71–92.
- Board, S. S., 2019. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: An Astrobiology Strategy for the Search for Life in the Universe. National Academies Press, Washington.
- Bottke, W. F., Norman, M. D., 2017. The Late Heavy Bombardment. *Annu. Rev. Earth Pl. Sc.*, 45: 619–647.

- <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020131>
- Cabrol, N. A., 2018. The Coevolution of Life and Environment on Mars: An Ecosystem Perspective on the Robotic Exploration of Biosignatures. *Astrobiology*, 18(1): 1–27. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1756>
- Chan, M. A., Hinman, N. W., Potter-McIntyre, S. L., et al., 2019. Deciphering Biosignatures in Planetary Contexts. *Astrobiology*, 19(9): 1075–1102. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1903>
- Chen, J. W., Ge, J. W., Feng, L., et al., 2020. Methane Flux Characteristics and Its Relationship with Soil Microbial Community Composition of Dajiuhe Peatland in Shennongjia. *Earth Science*, 45(3): 1082–1092 (in Chinese with English abstract).
- Conrad, P. G., Archer, D., Atreya, S., et al., 2013. Habitability Assessment at Gale Crater: Implications from Initial Results. 44th Lunar and Planetary Science Conference, Woodlands.
- Dundas, C. M., McEwen, A. S., Chojnacki, M., et al., 2017. Granular Flows at Recurring Slope Lineae on Mars Indicate a Limited Role for Liquid Water. *Nat. Geosci.*, 10: 903–907. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0012-5>
- Ehlmann, B. L., Edwards, C. S., 2014. Mineralogy of the Martian Surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 291–315. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-055024>
- Eigenbrode, J. L., Summons, R. E., Steele, A., et al., 2018. Organic Matter Preserved in 3-Billion-Year-Old Mudstones at Gale Crater, Mars. *Science*, 360(6393): 1096–1101. <https://doi.org/10.1126/science.aas9185>
- Geng, Y., Zhang, R. Q., He, R. W., et al., 2022. The Science - Technology and Management Innovation for China's First Mars Exploration Mission. *Frontiers of Science and Technology of Engineering Management*, 41(1): 3–8 (in Chinese with English abstract).
- Gibney, E., 2022. Asteroids, Hubble Rival and Moon Base: China Sets out Space Agenda. *Nature*, 603(7899): 19–20. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00439-2>
- Green, J., Hoehler, T., Neveu, M., et al., 2021. Call for a Framework for Reporting Evidence for Life beyond Earth. *Nature*, 598(7882): 575–579. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03804-9>
- Hansen, C. J., Castillo-Rogez, J., Grundy, W., et al., 2021. Triton: Fascinating Moon, Likely Ocean World, Compelling Destination! *The Planetary Science Journal*, 2: 137. <https://doi.org/10.3847/psj/abffd2>
- Hays, L., Archenbach, L., Bailey, J., et al., 2015. NASA Astrobiology Strategy. NASA, Washington.
- Hendrix, A. R., Hurford, T. A., Barge, L. M., et al., 2019. The NASA Roadmap to Ocean Worlds. *Astrobiology*, 19(1): 1–27. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1955>
- Hoehler, T. M., Bains, W., Davila, A., et al., 2020. Life's Requirements, Habitability, and Biological Potential. In: Meadows, V.S., Arney, G.N., Schmidt, B.E., et al., eds., *Planetary Astrobiology*. University of Arizona Press, Arizona, 37–70.
- Jakosky, B. M., Brain, D., Chaffin, M., et al., 2018. Loss of the Martian Atmosphere to Space: Present-Day Loss Rates Determined from MAVEN Observations and Integrated Loss through Time. *Icarus*, 315: 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.05.030>
- Jia, X., Kivelson, M. G., 2021. The Magnetosphere of Ganymede. In: Maggiolo, R., André, N., Hasegawa, H., et al., eds., *Magnetospheres in the Solar System*. Wiley, Hoboken, 557–573. <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch35>
- Kivelson, M. G., Khurana, K. K., Volwerk, M., 2009. Europa's Interaction with the Jovian Magnetosphere. In: Pappalardo, R. T., McKinnon, W. B., Khurana, K. K., eds., *Europa*. University of Arizona Press, Arizona, 545–570.
- Klein, H. P., Horowitz, N. H., Levin, G. V., et al., 1976. The Viking Biological Investigation: Preliminary Results. *Science*, 194(4260): 99–105. <https://doi.org/10.1126/science.194.4260.99>
- Kminek, G., Meyer, M. A., Beaty, D. W., et al., 2022. Mars Sample Return (MSR): Planning for Returned Sample Science. *Astrobiology*, 22: S1–S4.
- Knauth, L. P., Burt, D. M., Wohletz, K. H., 2005. Impact Origin of Sediments at the Opportunity Landing Site on Mars. *Nature*, 438(7071): 1123–1128. <https://doi.org/10.1038/nature04383>
- Koonin, E. V., Dolja, V. V., Krupovic, M., et al., 2021. Viruses Defined by the Position of the Virosphere within the Replicator Space. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, 85(4): e0019320. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00193-20>
- Korablev, O., Vandaale, A. C., Montmessin, F., et al., 2019. No Detection of Methane on Mars from Early ExoMars Trace Gas Orbiter Observations. *PLoS One*, 568(7753): 517–520. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1096-4>
- Li, C., Zheng, Y., Wang, X., et al., 2022. Layered Subsurface in Utopia Basin of Mars Revealed by Zhurong Rover Radar. *Nature*, 610(7931): 308–312. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05147-5>
- 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).

- Liu, J. J., Li, C. L., Zhang, R. Q., et al., 2021. Geomorphic Contexts and Science Focus of the Zhurong Landing Site on Mars. *Nature Astronomy*, 6: 65–71. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01519-5>
- Liu, R., Ma, T., Qiu, W., et al., 2020. The Environmental Functions and Ecological Effects of Organic Carbon in Silt. *Journal of Earth Science*, 31(6): 834–844. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1349-z>
- Liu, Y., Wu, X., Zhao, Y. S., et al., 2022. Zhurong Reveals Recent Aqueous Activities in Utopia Planitia, Mars. *Science Advances*, 8(19): eabn8555. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn8555>
- Lopes, R. M. C., Kirk, R. L., Mitchell, K. L., et al., 2013. Cryovolcanism on Titan: New Results from Cassini RADAR and VIMS. *J. Geophys. Res.-Planet.*, 118: 416–435. [10.1002/jgre.20062](https://doi.org/10.1002/jgre.20062)
- McKay, D. S., Gibson, E. K., Thomas-Keperta, 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>
- Ménez, B., Pisapia, C., Andreani, M., et al., 2018. Abiotic Synthesis of Amino Acids in the Recesses of the Oceanic Lithosphere. *Nature*, 564(7734): 59–63. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0684-z>
- Mojzsis, S. J., 2021. Habitable Potentials. *Nature Astronomy*, 5: 1083–1085. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01529-3>
- Nakamura, E., Kobayashi, K., Tanaka, R., et al., 2022. On the Origin and Evolution of the Asteroid Ryugu: A Comprehensive Geochemical Perspective. *Proceedings of the Japan Academy Series B, Physical and Biological Sciences*, 98(6): 227–282. <https://doi.org/10.2183/pjab.98.015>
- Onstott, T. C., Ehlmann, B. L., Sapers, H., et al., 2019. Paleorock-Hosted Life on Earth and the Search on Mars: A Review and Strategy for Exploration. *Astrobiology*, 19(10): 1230–1262. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1960>
- Pan, Y. X., Wang, C., 2021. Developing the Planetary Science Research for the Sustainable Deep Space Exploration of China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 35(2): 181–185 (in Chinese with English abstract).
- Postberg, F., Khawaja, N., Abel, B., et al., 2018. Macromolecular Organic Compounds from the Depths of Enceladus. *Nature*, 558(7711): 564–568. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0246-4>
- Rampe, E. B., Blake, D. F., Bristow, T. F., et al., 2020. Mineralogy and Geochemistry of Sedimentary Rocks and Eolian Sediments in Gale Crater, Mars: A Review after Six Earth Years of Exploration with Curiosity. *Geochemistry*, 80: 125605. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125665>
- Schulze-Makuch, D., Mendez, A., Fairen, A. G., et al., 2011. A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets. *Astrobiology*, 11: 1041–1052. <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0592>
- Shen, J., Chen, Y., Sun, Y., et al., 2022. Detection of Biosignatures in Terrestrial Analogs of Martian Regions: Strategical and Technical Assessments. *Earth and Planetary Physics*, 6(5): 431–450. <https://doi.org/10.26464/epp2022042>
- Soffen, G. A., 1997. Astrobiology from Exobiology: Viking and the Current Mars Probes. *Acta Astronautica*, 41(4–10): 609–611. [https://doi.org/10.1016/s0094-5765\(98\)00055-1](https://doi.org/10.1016/s0094-5765(98)00055-1)
- Solomon, S. C., Aharonson, O., Aurnou, J. M., et al., 2005. New Perspectives on Ancient Mars. *Science*, 307: 1214–1220. <https://doi.org/10.1126/science.1101812>
- Squyres, S. W., Arvidson, R. E., Ruff, S., et al., 2008. Detection of Silica-Rich Deposits on Mars. *Science*, 320(5879): 1063–1067. <https://doi.org/10.1126/science.1155429>
- Webster, C. R., Mahaffy, P. R., Atreya, S. K., et al., 2018. Background Levels of Methane in Mars' Atmosphere Show Strong Seasonal Variations. *Science*, 360(6393): 1093–1096. <https://doi.org/10.1126/science.aag0131>
- Weller, M. B., Lenardic, A., 2018. On the Evolution of Terrestrial Planets: Bi-Stability, Stochastic Effects, and the Non-Uniqueness of Tectonic States. *Geosci. Front.*, 9: 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.03.001>
- Ye, P. J., Zou, L. Y., Wang, D. Y., et al., 2018. Development and Prospect of Chinese Deep Space Exploration. *Space International*, (10): 4–10 (in Chinese).

附中文参考文献

- 谌佳伟, 葛继稳, 冯亮, 等, 2020. 神农架大九湖泥炭湿地甲烷通量特征及其与土壤微生物群落组成的关系. *地球科学*, 45(3): 1082–1092.
- 耿言, 张荣桥, 赫荣伟, 等, 2022. 首次火星探测任务的科技与管理创新. *工程管理科技前沿*, 41(1): 3–8.
- 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.
- 潘永信, 王赤, 2021. 国家深空探测战略可持续发展需求: 行星科学研究. *中国科学基金*, 35(2): 181–185.
- 叶培建, 邹乐洋, 王大珩, 等, 2018. 中国深空探测领域发展及展望. *国际太空*, (10): 4–10.