

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.036>

Short Survey



地球生物学的内涵、研究进展与挑战

陈中强

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室,湖北武汉 430078

地球生物学(Geobiology)是地球科学与生命科学交叉融合形成的一级学科(谢树成等, 2006, 2011; 殷鸿福等, 2009), 重点关注生命与地球环境的相互作用及其协同演化历史和过程. 自国家自然科学基金委于 2005 年正式将该学科引入我国地质学研究以来(刘羽, 2005), 地球生物学在我国得到跨越式发展, 取得许多振奋人心的新发现和新认识.《地球科学》期刊从一开始就参与该学科的发展, 在 2015 年组织了第一部地球生物学专辑, 小结该学科在我国发展第一个 10 年以来的研究成果. 今年是地球生物学在我国发展的第 20 个年头,《地球科学》组织第二个地球生物学专辑, 旨在总结近 10 年以来我国地球生物学取得的研究成果、学科现状、服务领域的拓宽与创新、以及面临的挑战. 专辑主要由中国地质大学(武汉)地球科学学院和地质微生物与环境全国重点实验室的专家学者以及少量其他单位的同行专家专门撰文, 献给我国地球生物学学科发展的奠基人——殷鸿福院士 90 华诞和从事地质科学研究和教育事业 70 周年. 此外, 专辑也概述了地球生物学的研究内涵、与其他学科的关联、目前的研究热点、我国的研究现状以及面临的挑战和展望等内容.

1 地球生物学研究内涵、学科发展与研究热点

1.1 地球生物学的学科发展历程以及研究内涵与外延

“地球生物学”这个术语最早由荷兰微生物学家

Lourens Baas-Becking 于 1934 年提出, 用以表达生物与环境的化学作用过程(Knoll *et al.*, 2012). 后来, Sylvester-Bradley(1972)正式提出地球生物学(Geobiology)学科的概念, 并认为它与地球物理学(Geophysics)和地球化学(Geochemistry)并列, 成为地质学的三大支柱学科. 其中, 地球生物学最为复杂, 关注生命与地球环境的协同演化. 同时, Sylvester-Bradley(1972)还预测与地球生物学相关的古生物地理学、分子古生物学、古生物化学和地质微生物学在将来会得到快速发展.

在 21 世纪初, 地球生物学快速发展为一门独立的学科, 关注生命-地球相互作用过程和演化规律(Olszewski, 2001). 地球生物学把地球看成一个复杂的多圈层系统, 生命只是其中的一部分. 地球多变的环境冲击生命演化; 同时, 生命活动反过来也影响地球的演化(Noffke, 2005). 该学科的学术刊物《Geobiology》由 Wiley-Blackwell 出版商于 2003 年创刊, 标志着地球生物学学科的发展上升到一个新的高度. 2004 年, 美国自然科学基金会地球科学部将地球生物学单独列为一个研究计划(program), 予以稳定的支持. 自 2008 年开始, 全球范围许多地球生物学家呼吁成立国际地球生物学学会并组织召开学术年会(Kump, 2008). 后来, 国际地球生物学学会于 2016 年正式成立, 并于 2017 年开始每两年举行学术会议, 并命名为戈登地球生物学会会议(Gordon Research Conference of Geobiology). 自此, “地球生物学”成为国际地学重大学术会议如 IGC、AGU、GSA、EGU 等的主要议题之一, 该学科方向的研究热度一直未曾下降. 2024 年,《Nature》期刊的

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41930322).

作者简介: 陈中强(1968—), 男, 教授, 主要从事地球生物学方向的科研与教学工作. ORCID: 0000-0001-5341-6913. E-mail: zhong.qiang.chen@cug.edu.cn

引用格式: 陈中强, 2025. 地球生物学的内涵、研究进展与挑战. 地球科学, 50(3): 805–814.

Citation: Chen Zhong-Qiang, 2025. Disciplinary Concepts, Research Advances and Challenges of Geobiology in China. *Earth Science*, 50(3): 805–814.

子刊《Nature Communications》还在征集地球生物学成果,组织地球生物学研究进展的专辑(<https://doi.org/10.1038/s41467-024-53619-1>).目前,地球生物学得到空前的发展,其研究已经全方位地深入到深时、深地、深海、深空各领域(谢树成等,2011,2018,2023).

地球生物学研究生命与地球环境之间,或者生物圈与地圈之间的相互作用和协同演化(谢树成等,2011; Knoll *et al.*, 2012).因此,该学科不但强调环境对生物的影响,而且更注重生物对环境的作用,其研究核心是地质微生物学.如果从深时的角度来看,古生物学和生物地球化学是地球生物学的支柱学科.不过,在揭示生物与其化学和物理环境之间的相互作用方面,我们需要超越所有学科边界,加强多种交叉学科融合才能解决问题(Saraswati, 2022).由于生物与环境相互作用涉及多学科协同研究,地球生物学的学科边界是动态变化的(Knoll *et al.*, 2012).从研究对象和范围来看,由地球生物学衍生出来的学科主要包括如下15个学科方向.其中,有些学科比地球生物学出现早得多,但与地球生物学在研究对象和内容上有交叉重叠.比如,古生物学是一门最古老的地学学科之一,但它研究的对象和内容是地球生物学的重要组成部分,重点研

究深时生物及其演化,通过化石记录揭示生命演化历史.生物地层学则利用化石记录进行地层划分和对比,帮助确定地质年代.演化生物学研究生物的进化过程及其机制,涵盖分子进化、种群遗传学等.生态学研究生物与其环境的相互关系,涵盖个体、种群、群落和生态系统等层次.古生态学研究古代生态系统的结构和功能,重建古环境.微生物生态学重点关注微生物在生态系统中的作用及其与环境的关系.地质微生物学是目前地球生物学研究的最核心内容,关注微生物在地质过程中的作用,如矿物形成和降解过程等.生物地球化学探讨深时和现代生物活动对地球化学循环的影响,如碳、氮、硫等元素的循环.环境生物学研究生物与环境的相互作用,特别是人类活动对生态系统的影响.分子古生物学利用分子生物学技术研究古代生物的遗传信息.微生物矿物学研究生物矿化作用以及生物如何形成矿物结构,如骨骼、贝壳等.生物气候学研究生物与气候的相互作用,特别是生物对气候变化的响应.古遗传学研究古代生物的遗传信息,揭示其演化历史.生物地理学研究生物在地球上的分布及其成因.天体生物学研究地球以外生命的可能性及其

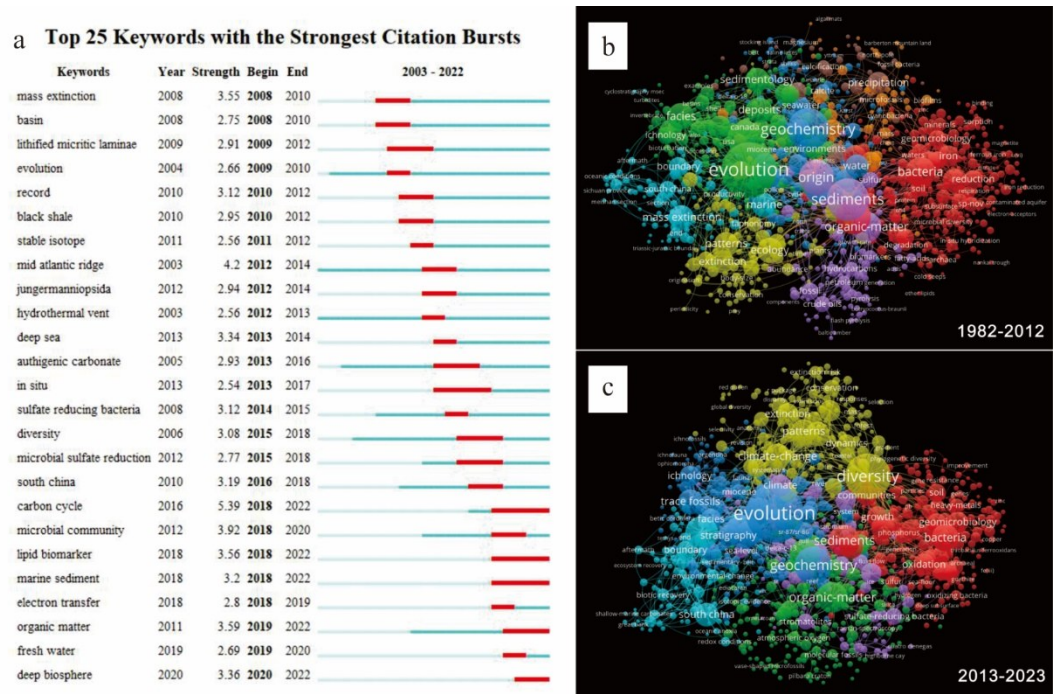


图1 Web of Sciences文献检索展示地球生物学关键热点领域分布

Fig.1 Hotspot fields of geobiology demonstrated by bibliometrics from Web of Science

a. 2003—2023年地球生物学文章排名前25突变词及其年代分布;b. 1982—2012年地球生物学文章关键词热力图;c. 2013—2023年地球生物学文章关键词热力图

生存环境.这些学科相互交叉,共同推动对生命与地球/或天体环境协同演化过程的理解.

1.2 地球生物学的研究热点

目前,地球生物学的研究热点主要集中在以下几个方向.(1)地质微生物和微生物地球化学方面:重点关注微生物如何驱动地球化学循环,如碳、氮、硫等元素的循环.特别是,深海热液喷口和极端环境中的微生物生态系统成为研究热点.(2)早期生命与地球环境:探索地球早期生命的起源及其与环境的相互作用,并通过研究地球早期的岩石和化石记录,揭示早期地球的环境条件.(3)生物/或微生物矿物学:研究生物如何通过矿化过程形成矿物,如骨骼、贝壳等,以及生物矿化在材料科学和医学中的广泛应用.(4)全球变化与生物响应:研究全球气候变化对生物多样性和生态系统功能的影响,以及微生物对环境的反馈作用,同时预测未来环境变化对生物圈的潜在影响.(5)天体生物学:探索月球的宜居性,以及其他行星和卫星上可能存在生命的条件,特别是,月球、火星、木卫二等天体成为研究重点.

此外,文献计量分析结果显示(图1):近20年来,地球生物学发展可分为两个阶段,早期主要侧重生物本身的古生物学、地层学研究.近10年来侧重地球环境与生命系统的相互作用方面的内容,包括地质微生物、碳循环、同位素、大数据模拟等.

其中,一些关键领域方向,比如演化(evolution)和地球化学(geochemistry)研究是地球生物学贯穿始终的研究热点(图1b~1c;刘建辉等,2022).文献分析结果表明,地球生物学已经从探索生物对环境的响应深入到生物对环境的作用,但当前更重要的价值体现在其可以为解决当今一些全球性问题提供强有力科学支撑上.例如,在关键带领域,解剖碳循环与水循环之间的内在联系;在深地生物圈领域,查明对地下环境有害或者有益的微生物功能群分布及其地质作用等等.

2 我国地球生物学的发展

在我国,地球生物学的发展基本与国际同步,我国科学家被称为“是发展地球生物学的一支重要的国际领导力量”(Benton and Xie, 2014; Bottjer, 2015).在20世纪90年代殷鸿福院士就提出地质学与生物学交叉的“生物地质学”,后来,很快就从生物地质学上升到了由生命科学与地球科学交叉融合的地球生物学.因此,“地球生物学”这个术语于

1994年就开始在中国的正式出版物上出现(殷鸿福,1994).在这之前的1962年,张文佑先生在给中国科学院领导的信函里多次提到地球生物学,认为它与地球物理和地球化学一样重要,是地质学的三个重要分支学科.显然,张文佑先生与英国学者Sylvester-Bradley(1972)英雄所见略同,并比后者早10年就提出地球生物学学科概念,彰显我国老一辈科学家在发展地球生物学方面高瞻远瞩的战略眼光.

2005年以来,我国多个高校开设地球生物学课程,召开了多次地球生物学的学科建设研讨会,并于2008年10月举办了地球生物学国际研讨会.2009年,中国科学院地学部将“地球生物学”列为21世纪基础研究重点之一.2011年,我国第一部比较系统的地球生物学著作《地球生物学:生命与地球环境的相互作用与协同演化》(谢树成等,2011)出版.随后,由殷鸿福院士任学术委员会主席分别于2010、2012、2014、2017年连续召开了四届地球生物学国际会议,这是国际地球生物学领域最早组织的系列重要国际会议之一.2015年,由殷鸿福院士任项目负责人出版了《中国学科发展战略·地球生物学》,这是我国第一次将地球生物学作为一个独立学科出版学科发展战略报告.2018年成立了中国古生物学会地球生物学会(谢树成任理事长)、中国微生物学会地质微生物学会(董海良任理事长).2019年,中国科学院和国家自然科学基金委员会联合资助启动了《极端地质环境微生物的学科发展战略》(殷鸿福负责)研究.2020年,《深部地下生物圈》(殷鸿福等)学科发展战略出版.2023年,高等教育出版社出版发行了由谢树成院士主编的《地球生物学》教材,目前被全国80多所高等学校和科研院所使用.2024年,国际地球生物学学会主席Kurt Konhauser在武汉参加首届国际生物沉积学大会期间对我国地球生物学的蓬勃发展盛赞有加,认为“国际地球生物学学科发展的希望在中国”,并希望中国力量更多地加入到国际地球生物学的发展之中.

在地球生物学研究成果方面,以地球生物学“Geobiology”及其相关学科词汇为关键词在Web of Science核心合集数据库对1993—2023年的成果进行检索,共搜到11 163篇文献.从被引频次上看,地球生物学文章被引频次从1993年到2009年缓慢增长,但从2010开始迅速增长,并一直持续至今(图2a).从地球生物学论文发表数量看,处于国际前十

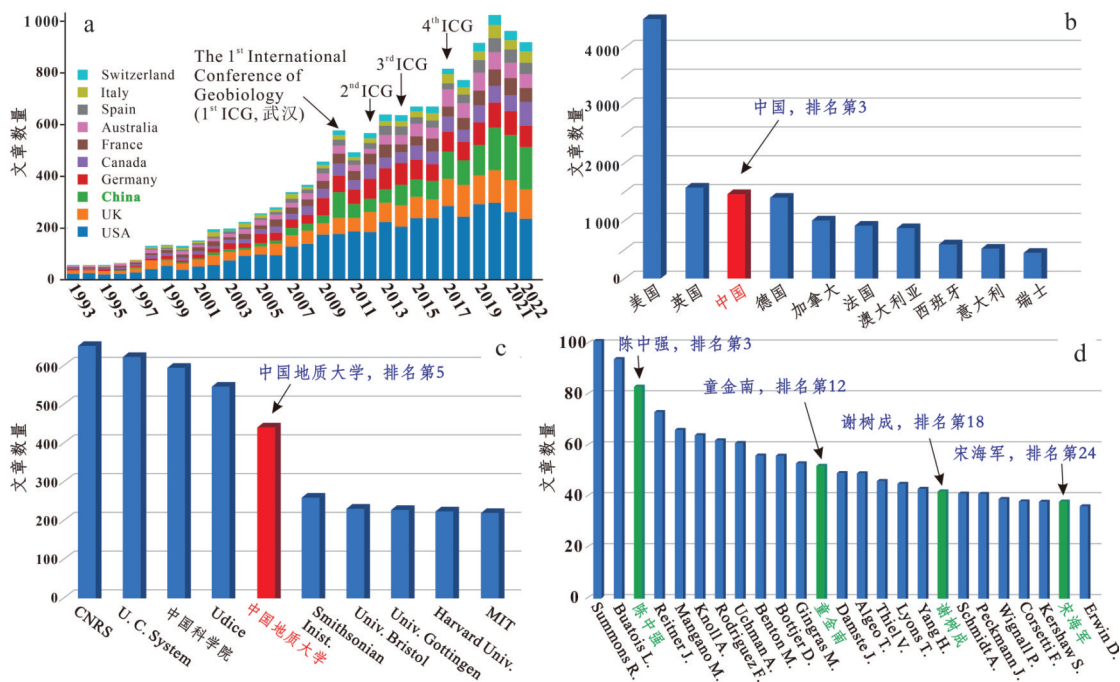


图2 Web of Sciences 文献检索揭示地球生物学文章的全球排名情况

Fig. 2 Publication ranks of geobiology papers worldwide from Web of Science

a. 1993—2023 年历年地球生物学文章发表数量及国家分布 (由于数据截至 2023 年 10 月, 故未列 2023 年); b. 地球生物学文章发文量排名前十的国家; c. 地球生物学文章发文量排名前十的科研机构; d. 地球生物学文章发文量排名前 25 的科学家

大研究机构的包括法国国家科学研究中心、加州大学系统、中国科学院、法国研究型大学联盟、中国地质大学、史密森学会、布里斯托大学、哥廷根大学、哈佛大学和麻省理工学院 (图 2c). 从个人文章发表数量来看, 我国学者的成果产出名列前茅 (图 2d). 我国在地球生物学论文发表数量上排名全球第三, 仅次于美国和英国 (图 2b). 我国的历年发文量也比较稳定, 特别是, 2010 年在武汉召开的地球生物学国际会议使得我国发文量显著提升 (图 2a). 总体上, 我国地球生物学研究处于全球三强 (美国、欧洲和中国) 之一.

3 地球生物学专辑的内容概述

本专辑收集了 24 篇文章, 其内容涵盖了殷鸿福院士曾经和当前正在领导学科团队致力探索和研究的各个主要方向. 这些文章分成地球生物学与流域发展、地球生物科学研究方法的创新与实践以及地球生物学的应用与新技术三个板块论述本学科最近 10 年来的研究成果、研究领域拓宽以及最新的研究方法和技术手段.

3.1 地球生物学与流域发展

地球生物学的重要使命除了引领全球致力于

地球生命与环境协同演化和地球宜居性的国际前沿科学问题研究外, 同时需要满足国家重大战略需求. 特别是在我国各学科发展日新月异的今天, 如何有效地利用地球生物学的理论思想和方法体系服务于国家提出的流域发展重大战略任务显得尤为重要. 因此, 地球生物学需要将其研究领域拓宽到流域地球系统科学, 解决国家区域发展背后的关键科学问题. 专辑特别邀请了谢树成院士团队系统论述流域地球系统科学与区域发展战略相结合的构想, 强调流域系统的深浅联动及其资源效应、生物与环境的相互作用与协同演化, 以及流域环境和人类文明的关系这三个层次的研究主题. 以长江流域为例, 作者认为流域的水、热、碳直接关系到区域的大生态状况, 对区域经济社会发展异常重要 (谢树成等, 2025). 顾延生等 (2025) 利用地球生物学的研究方法揭示了位于长江中游的古云梦泽 4 000 年来沉积地貌演变过程与区域新构造运动、气候变化、河道变迁和人类活动的关系, 也为预测未来长江中游地区江湖关系演变和现代江汉湖群保护和开发提供了重要参考. 流域发展的另一个重要科学问题是, 如何做好开发与环境保护的平衡, 特别是如何利用地球生物学服务于国家的双碳目标, 比如

河湖中的泥炭地既是全球重要的碳汇,又是最重要的天然甲烷排放源,如何调控两者的关系是解决国家双碳目标背后的关键科学难题之一。黄咸雨等(2025)评价了升温、水位下降等因素对泥炭地碳库稳定性的影响,认为温度升高不但加速泥炭地氧化层和缺氧层的分解,而且导致释放的甲烷/二氧化碳比值增大,导致全球增温潜势;干旱事件导致水位下降,引起大量CO₂释放,影响碳库稳定性。

3.2 地球生物学研究方法的创新与实践

地球生物学最重要的一个研究方向就是地质微生物学,其核心内容就是地质微生物与环境的相互作用及其演化。微生物是地球的元老,统治地球生命演化的5/6阶段。因此,地质微生物是研究地球早期生命和环境演化的重要抓手。地球生物学和地质微生物学也是研究地球宜居性演化的不可或缺的学科,其技术手段也可用于探索地外生命活动和天体宜居性,也是地球生物学研究领域拓宽的重要方面。罗根明等(2025)介绍了地球生物学和天体生物学研究内涵和技术方法的相互关系,提出地球生物学需要加强早期地球宜居性演化、极端环境的生命特征和记录等方面的研究,以更好地服务于天体生物学发展,对地外生命的探寻具有重要的指导意义。蒋宏忱和王北辰(2025)在地球生物学理论的指导下全面综述了青藏高原湖泊中微生物调控碳氮循环的机理及其对盐度变化的响应,认为“有机质输入增加”、“温度增高”与“盐度降低”等气候环境条件变化对咸盐湖泊碳氮循环微生物作用等影响明显。袁媛和刘勇勤(2025)则关注青藏高原湖泊的铁和硫循环,全面总结了参与这两类元素循环的微生物类型、代谢途径及环境影响因子,强调微生物在其中发挥着主导作用,是循环中不可或缺的环节。

地球生物学除了为解决现代湖泊的生物地球化学循环科学难题提供技术方法外,也为重建海洋氧化还原状态和极端气候变化提供理论指导。王家生等(2025)解剖了现代海洋冷泉系统的生物沉积学过程,发现天然气水合物赋存于海区沉积物中硫酸盐-甲烷转换带(SMTZ)内,甲烷厌氧氧化作用(AOM)成因的黄铁矿莓球粒径出现异常增大现象,这与前人利用草莓状黄铁矿粒径大小判别海水氧化还原状态的标准不一致,并认为草莓状黄铁矿的粒径>20 μm或莓球内核粒径平均>12 μm、标准偏差>3 μm的莓球状黄铁

矿可能是海洋“甲烷事件”发生时的产物。孙军等(2025)对西菲律宾海盆东部的QYZ01孔样品沉积物开展了详细的岩石磁学和古磁学研究,推算钻孔底部年龄为~2.43 Ma,并识别出早-中更新世界线,发现2.43 Ma以来东亚冬季风强度和亚洲内陆风尘输入出现整体和阶段性加强的现象,为深入理解亚洲内陆气候变化和东亚季风演变提供了新的认识。

地球生物学的重要使命之一是以古鉴今,揭示地球深时极端环境气候变化和生物响应机制,并运用到应对当代气候变化、生物多样性锐减和生境退化三大生态危机的研究中。其中,古今对比研究的最大难点在于古今案例的时间尺度不一致,如何将地球深时的案例精准地指导当代脆弱生态系统管理并预测将来的演变模式长期困扰地球生物学家,是该学科面临的重要挑战之一(陈中强和黄元耕,2022;黄元耕等,2025)。本专辑收录了三篇研究方法创新的文章,分别从现代培养模拟实验再现古代极端事件场景、数值模型模拟计算提高化石时间分辨率以及复杂模型模拟重建古环境古气候变化这三个方面提出地球生物学的解决方案,打通古今对比研究的卡脖子难题。徐珍等(2025)以二叠纪-三叠纪之交(P-Tr)大灭绝期间残存和复苏期植物的现代亲缘种(分别为南洋杉、苏铁和银杏)为研究对象,通过为期一年的培养实验,发现温度升高10℃后,南洋杉根际微生物的相对丰度高于苏铁和银杏;当温度下降时,根际微生物在这两类植物中的表现则相反;因此,从微生物的角度揭示了P-Tr大灭绝后植物适应极端温室气候的机制,为理解深时植物-微生物-环境相互作用提供了重要数据支撑。黄元耕等(2025)以浙江煤山P-Tr界线金钉子剖面为例,利用PyRate贝叶斯模拟方法对所有物种在剖面上真实首现与末现时间进行了重新估算,克服化石记录的不完备性及其在地层记录的低时间分辨率这些“以古鉴今”研究中的卡点,探讨以不同时间分辨率划分古群落的方案,从5万年提高到1千年,构建了连续的古群落序列,量化评估了群落组成并模拟食物网稳定性/或抗灾能力在P-Tr之交的演变过程,为开展高分辨率深时生态系统演化及古今对比研究提供了新思路。吴玉祥等(2025)总结了P-Tr之交火山活动过程中岩浆脱气组分及其排放规模,包括二氧化碳、甲烷、二氧化硫、卤素和重金属,归纳了岩浆脱气直接引发的全球变暖、海洋酸化、火山冬天、酸雨、臭氧层破坏和重金属毒化等环境效

应,通过模拟评估了这些环境变化对海洋和陆地生物灭绝的具体贡献,最后,将P-Tr之交的碳排放与现代工业碳排放进行对比,发现现代碳排放速率和升温速率可能处于过去 2.52 亿年以来的最高值。

三叠纪是中生代的开始,见证了地球重大地质转折时期发生的生物与环境剧烈波动,因此,三叠纪的地球生物学特征特别吸引了众多地质学家的关注。何卫红等(2025)通过对全球 30 个海相剖面的化石和古环境记录综合研究,发现深水环境较浅水环境的生态系统衰退发生较早,浮游生态系统的衰退早于底栖生态系统的衰退。冯学谦等(2025)报道了产自我国西秦岭地区深海相P-Tr地层的遗迹化石,发现大灭绝前后深海环境中的遗迹化石属种多样性没有变化,但早三叠世出现了大量的雕画迹。大灭绝之后,深海环境中的造迹生物的生态空间利用和生态系统工程参数相比于灭绝前表现出显著的下降,说明深海环境可能并不是大灭绝之后底栖生物的避难所。袁爱华等(2025)详细研究了大灭绝后介形虫个体大小等生态特征的大数据,发现大灭绝后,介形虫的种群年龄结构、生长速率和体型大小均发生了一定程度的异常变化,表明该类群应对大灭绝所采取的生存策略具有主动性和复杂性。在P-Tr大灭绝之后,中三叠世海洋生物完全复苏并繁盛(Chen and Benton, 2012)。海洋生物经历卡尼中期极端气候事件短暂打击之后,很快复苏并繁盛起来。江海水和陈龔(2025)综述了晚三叠世诺利期极端温室气候事件和地质背景,发现诺利期极端温室气候伴随着重要的生物演化事件,同时,发生全球板块运动、火成岩省活动、地球化学指标显著变化等众多地质事件,这些作者认为我国发育有良好的诺利期地层序列,是东特提斯地区研究这一极端温室期气候变化与生物演化的理想区域。

前寒武纪的生物界由微生物主宰,形成二维的扁平生态系统,该时期的生命与环境之间的相互作用和演化进程是地球生物学重要的研究对象之一。其中,新元古代成冰纪以两次雪球地球事件为特色,是地球生命系统和环境演化的重要转折期。陈欣阳等(2025)统计了产自全球 28 个剖面碎屑岩样品的主量元素数据,计算当时全球平均化学风化强度,并重建其演化趋势,发现冰期的启动和结束均与化学风化作用息息相关。我国中元古代的地层序列非常完整,是研究该时期生命和环境协同演化的重要地区之一。谢宝增等(2025)以华北中元古代末

期长龙山组为研究对象,开展了沉积学和矿物学分析,发现长龙山组沉积期华北浅海的氧化还原条件存在显著的时空差异,增氧促进了龙凤山藻的出现,但氧化水体分布的时空不连续性限制了它们的持续演化与广泛分布。史青等(2025)则对华北~1.48 Ga 雾迷山组硅质岩开展了综合研究,揭示中元古代浅海硅循环和硅质岩形成机制。同时,发现微小蓝细菌和其他可聚硅微生物在浅海的繁盛对中元古代硅循环有重要影响,并促进了浅海环境的硅质岩沉积。

3.3 地球生物学的新技术与应用

地球生物学的发展过程伴随着其研究方法和分析技术的不断革新,其诸多新的分支学科方向都是由研究方法和技术创新驱动而创立的。其中,分子古生物学是一个典型例子,古DNA是该分支学科研究的主要抓手之一。盛桂莲等(2025)总结了古DNA在生物系统发生学、生物谱系地理学、保护生物学及第四纪古环境古气候重建等地球生物学领域的典型应用实例。特别是,不断提高、创新的古DNA提取和富集技术可以直接从沉积物中识别出古DNA,而不需要完全依赖于生物实体,大大拓宽了该分支学科的研究领域。地球生物学另外一个重要使命就是恢复深时生物赖以生存的古海洋环境的化学条件。牙形石是一类已灭绝的、分类不明的海洋脊索动物的口部摄食器官,釉质的牙冠部分几乎不受成岩作用影响,记录了原始海水的地球化学信号,因此是可靠的古海洋化学记录载体。张磊等(2025)总结了牙形石形貌、显微结构和古生态特征,以及其稀土元素和氧、锶、钙同位素地球化学研究的新进展,牙形石的地球化学特征在揭示古海洋氧化还原状态、古海洋酸碱程度、海水表层温度、大陆风化作用和古气候变化等方面发挥了关键作用。

此外,地球生物学也可为揭示许多沉积型矿产的形成机制提供新思路。余文超等(2025)强调了微生物作用与沉积环境效应共同控制了锰元素在沉积物中的富集过程,提出(1)显微观察模块、(2)光谱分析模块、(3)同位素信号模块以及(4)综合分析模块这四个技术模块可有效识别出微生物成矿相关证据,包括:微生物成因的显微结构与构造、生物成因的自生矿物、生物信号的碳-硫及其他稳定同位素特征、与微生物代谢活动相关的元素/官能团富集现象及生物标志物等有机地球化学信号等。地球生物学的系统研究工

作离不开地质调查,后者也需要从地球生物学的新视角进行开拓创新(黄长生等,2022)。在地球生物学与地层学理论的指导下,张克信等(2025)重建青藏高原造山域各演化阶段各构造-地层区划单元的大洋板块地层序列,构建了首个青藏高原造山域显生宙大洋板块地层格架和时空演化模式。

由实验技术创新驱动的地球生物学创新仍在进行中,专辑还收录了两篇介绍超级原位微区分析技术的文章,可望在不久的将来进一步拓宽地球生物学的研究领域方向。方谦等(2025)全面介绍了三维原子探针(APT)技术及其在地球生物学的应用前景。APT可在亚纳米(近原子)尺度实现对几乎所有元素/同位素同时三维成像与定量分析,在微生物矿化、地质微生物的残存信号识别、生物材料等微生物-矿物相互作用等领域具有重要的应用价值,可为重建微生物-矿物相互作用过程提供近原子尺度、高灵敏度分析,为地球生物学的重要分支学科——地质微生物矿物学提供技术支撑。纳米离子探针(NanoSIMS)是超级原位微区分析的另一种重器,因具高空间分辨率和高化学灵敏度而成为目前国际上最先进的原位微区分析手段之一,在地质微生物学和生物沉积学研究中展现出重要应用潜力甚至在某些方向的研究中不可或缺。仇鑫程等(2025)重点阐述了NanoSIMS技术在微生物群落功能研究、深时碳酸盐矿物沉淀、生物地球化学循环、地球早期生命信号的识别以及地外生命探索等方面的应用实例,认为该技术的发展有效地推动地球生物学迈向更高精度和分辨率的微观世界研究领域,为探索地球生命起源和地外星球宜居性提供了前所未有的机遇。

4 地球生物学面临的挑战和展望

谢树成和殷鸿福(2014)指出,尽管全球学者在重大地质突变期的地球生物学、地质微生物与全球环境变化以及极端环境地球生物学这三大方向取得重大进展,但也存在难以解决的科学问题。在重大地质突变期的地球生物学方面,深时生物与环境的协同演化机制和动力还悬而未决。在地质微生物与全球环境变化方面,人们对不同地质微生物功能群是如何通过协同作用而改变环境还了解得很少。在极端环境地球生物学方面,尽管有些学者从一些极端环境中(比如深海、冰川冻土、地下水、洞穴和热泉等)发现和分离出

一些重要的微生物,但识别微生物的指标和技术方法还亟需研发,以真正做到极端环境地球生物学研究,极端环境地质微生物的地球化学功能也还远未查明。十年过去了,这些地球生物学研究的短板依然突出(谢树成和罗根明,2023)。特别是,地质微生物学作为地球生物学的核心学科,它的发展还极不平衡。在地质微生物学衍生的分支学科中,我们在现代微生物学、海洋微生物学、微生物矿物学、微生物沉积学、微生物古气候学、微生物地球化学等领域方向开展了大量的工作,并取得一系列重要的新认识。不过,在微生物演化、深部生物圈、地质病毒学(Xie *et al.*, 2023)、天体生物学以及微生物生态学(与动物、植物之间的相互作用)等方面还知之甚少,有待加强。

总体上,尽管地球生物学取得了显著进展,但在如下四个方面仍面临诸多挑战。(1)研究对象和学科融合的复杂性:地球与生命系统的相互作用极为复杂,涉及多个学科,难以全面理解。(2)地质微生物甄别技术的限制:极端环境中的微生物研究需要更先进的技术手段,如深海探测和高分辨率成像等国际前沿的高精分析技术。(3)数据整合难度大:来自不同学科的数据整合和分析是一大挑战,需开发新的跨学科研究方法、革新研究范式。(4)时间尺度跨度大:地球生物学研究涉及从秒到数十亿年的不同时间尺度,如何整合这些不同尺度的数据是一个难题。

未来,地球生物学的发展仍然依赖于跨学科合作和实验技术的不断创新。以下是一些潜在的对策:(1)跨学科合作:加强生命科学、地球科学、化学等学科的合作,推动地球生物学的全面发展;(2)提高极限探测能力:开发新的原位微区检测技术,突破地质微生物的探测极限,如高通量测序、纳米技术和人工智能,以应对复杂研究的挑战;(3)倡导研究范式创新:加强国际合作,共享数据和资源,建立全球地球生物学大数据(Sperling *et al.*, 2019),高效地利用人工智能(AI)技术,开展复杂大模型的数值模拟。

总之,地球生物学作为一门新兴的交叉学科,具有广阔的研究前景和重要的科学意义。它将大大拓展生物与环境相互作用过程研究的时空范畴,在能源资源和全球变化领域具有广阔的应用前景。地球生物学需要多学科的协同研究,加强全球地质微生物学、生物地球化学循环的数据库建设和量化

模型、各类典型地质环境条件,以及生物与物理化学环境相互作用过程的耦合研究.通过不断克服挑战,地球生物学将为理解生命与地球环境的相互作用过程与机制提供新的视角和解决方案.

致谢:感谢郑子杰、刘丹娜帮助收集材料和数据,黄元耕为本文提供了图 1 和图 2.感谢匿名审稿专家的建设性意见建议!

References

- Benton, M. J., Xie, S. C., 2014. Defining the Discipline of Geobiology. *National Science Review*, 1(4): 484–485. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwu052>
- Bottjer, D. J., 2015. Geobiology Comes of Age. *National Science Review*, 2(1): 6. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwu053>
- Chen, X. Y., Li, B., Li, C., 2025. Chemical Weathering during the Neoproterozoic Snowball Earth Events. *Earth Science*, 50(3): 1048–1065 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. -Q., Benton, M. J., 2012. The Timing and Pattern of Biotic Recovery Following the End-Permian Mass Extinction. *Nature Geoscience*, 5: 375–383. <https://doi.org/10.1038/ngeo1475>
- Chen, Z. -Q., Huang, Y. G., 2022. How to Evaluate Quantitatively Collapse and Recovery Processes of Ecosystems during and after Mass Extinctions? *Earth Science*, 47(10): 3827–3829 (in Chinese).
- Fang, Q., Yang, L., Qiu, X. C., et al., 2025. A New Tool for Unraveling Mineral - Microbe Interactions: Atom Probe Tomography (APT). *Earth Science*, 50(3): 1201–1219 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. Q., Chen, Z. -Q., Zhao, L. S., et al., 2025. The Evolution of Trace Fossils across the Permian-Triassic Mass Extinction in Deep Marine from the Western Qinling. *Earth Science*, 50(3): 1000–1022 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Y. S., Guan, S., Li, Y. N., 2025. The Formation and Evolution of the Paleo - Yunmeng Lake Group in the Jiangnan Plain and Its Influencing Mechanism. *Earth Science*, 50(3): 830–845 (in Chinese with English abstract).
- He, W. H., Wu, Y. Y., Zhang, K. X., et al., 2025. Gradual Collapse of Global Marine Ecosystem in the Late Permian and Its Link to the Anoxia. *Earth Science*, 50(3): 983–999 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. S., Yao, H. Z., Li, X., et al., 2022. Innovative Geological Survey Work Based on Geobiology. *South China Geology*, 38(2): 189–194 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. Y., Zhang, Y. M., Xue, J. T., et al., 2025. Influence of Warming and Water Level Drawdown on the Stability of Peatland Carbon Stock. *Earth Science*, 50(3): 846–856 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y. G., Xin, B. L., Guo, Z., et al., 2025. Modeling Method Enhances Temporal Resolution of Deep-Time Food Web Stability Evolution: A Case Study on Permian-Triassic Ecological Record from the Meishan Section. *Earth Science*, 50(3): 951–963 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. C., Wang, B. C., 2025. Microbial Role in Carbon and Nitrogen Cycling in Lakes on the Qinghai-Xizang Plateau. *Earth Science*, 50(3): 877–886 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, H. S., Chen, Y., 2025. Geological Events during the Extreme Greenhouse Interval of Norian, Late Triassic. *Earth Science*, 50(3): 1037–1047 (in Chinese with English abstract).
- Knoll, A. H., Canfield, D. E., Konhauser, K. O., 2012. Fundamentals of Geobiology. Wiley-Blackwell, London.
- Kump, L., 2008. Geobiology - Quo Vadis? *Geobiology*, 6: 423–424. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2008.00175.x>
- Liu, J. H., Ye, M., He, Q. Y., 2022. Analysis on the Evolution Trend of Geobiology Based on Bibliometrics. *Advances in Earth Science*, 37(2): 212–220 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., 2005. The National Science Foundation on Strategic Development in Paleontology during 2000–2010 and Paleontology Research in China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 19: 347–351 (in Chinese).
- Luo, G. M., Wang, C., Yin, Z. J., et al., 2025. From Geobiology to Astrobiology. *Earth Science*, 50(3): 857–876 (in Chinese with English abstract).
- Noffke, N., 2005. Introduction: Geobiology-A Holistic Discipline. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 219: 1–3.
- Olszewski, T., 2001. Geobiology: A Golden Opportunity and a Call to Action. *PALAIOS*, 16(6): i–ii.
- Qiu, X. C., Yang, H., Zheng, Z. J., et al., 2025. NanoSIMS Techniques and Its Important Implications in Geomicrobiology and Biosedimentology. *Earth Science*, 50(3): 1220–1233 (in Chinese with English abstract).
- Saraswati, P. K., 2022. Geobiology: Deep Time Perspectives. *Journal of Geological Society of India*, 98: 727–730. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2060-8>
- Sheng, G. L., Tao, H. L., Song, S. W., et al., 2025. Appli-

- cations of Ancient DNA Research in the Field of Geobiology. *Earth Science*, 50(3): 1105—1121 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Q., Shi, X. Y., Jiang, G. Q., et al., 2025. Microbial Silicon Cycling Promoted Shallow-Sea Chert Deposition in Mesoproterozoic Ocean. *Earth Science*, 50(3): 1082—1104 (in Chinese with English abstract).
- Sperling, E. A., Tecklenburg, S., Duncan, L. E., 2019. Statistical Inference and Reproducibility in Geobiology. *Geobiology*, 17: 261—271. <https://doi.org/10.1111/gbi.12333>
- Sun, J., Wu, H. C., Huang, W., et al., 2025. Magnetic Records of Quaternary Sediments in the Eastern West Philippine Sea Basin and Its Paleoclimatic Implications. *Earth Science*, 50(3): 918—933 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester-Bradley, P. C., 1972. Geobiology and the Future of Paleontology. *Journal of the Geological Society, London*, 28: 109—117.
- Wang, J. S., Song, Q., Lin, Q., et al., 2025. Enlargement of Pyrite Framboid Size in Sulfate-Methane Transition Zone of Marine Sediments and Its Implying of Marine Methane Event. *Earth Science*, 50(3): 908—917 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. Y., Song, H. J., Chu, D. L., et al., 2025. Environmental Impacts and Biotic Responses to Volcanism during the Permian-Triassic Transition. *Earth Science*, 50(3): 964—982 (in Chinese with English abstract).
- Xie, B. Z., Tang, D. J., Liu, Y. J., et al., 2025. Authigenic Clay Minerals from North China Reveal Spatiotemporal Variations in Shallow Seawater Redox Conditions during the Terminal Mesoproterozoic. *Earth Science*, 50(3): 1066—1081 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Gong, Y. M., Tong, J. N. et al., 2006. Disciplinary Shift from Paleontology to Geobiology. *Chinese Science Bulletin*, 51(19): 2327—2336 (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., Yan, D. T., Zhu, Z. M., et al., 2025. Earth System Science in Drainage Regions Connected with Societal Development. *Earth Science*, 50(3): 815—829 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Yin, H. F., 2014. Progress and Perspective on Frontiers of Geobiology. *Science China Earth Sciences*, 44(6): 1072—1086 (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—3836 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Yin, H. F., Shi, X. Y., et al., 2011. Geobiology: Interaction and Coevolution of Life with Earth Environments. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, S. C., Zhu, X. C., Algeo, T., Qiu, X., 2023. Geovirology: Viruses and Their Roles in Geological History. *Science Bulletin*, 68: 379—382. <http://doi.org/10.1016/j.scib.2023.02.001>
- Xu, Z., Yu, J. X., Peng, N., et al., 2025. Modern Climate-Controlled Plant Growth Experiments Exploring the Microbial Drivers of Terrestrial Vegetation Succession after the Permian-Triassic Mass Extinction. *Earth Science*, 50(3): 934—950 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., 1994. Biogeology. *Advances in Earth Science*, 9(6): 79—82 (in Chinese).
- Yin, H. F., Xie, S. C., Tong, J. N., et al., 2009. On the Significance of Geobiology. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 293—301 (in Chinese with English abstract).
- Yu, W. C., Polgári, M., Zhou, Q., et al., 2025. Geobiological Perspective for the Formation of Manganiferous Deposit: Principle, Evidence, and Model. *Earth Science*, 50(3): 1142—1161 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, A. H., Wan, J. Y., Zhao, K., et al., 2025. Differential Response of Ostracod Ontogeny after the End Permian Mass Extinction. *Earth Science*, 50(3): 1023—1036 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y., Liu, Y. Q., 2025. Research Progress on Microbes Involved in Lacustrine Iron/Sulfur Cycling. *Earth Science*, 50(3): 887—907 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Song, B. W., He, W. H., et al., 2025. Distribution and Evolution of the Tethyan OPS in the Central-Southern Qinghai-Xizang Region. *Earth Science*, 50(3): 1162—1200 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhao, H., Lü, Z. Y., et al., 2025. Progress in Study of Conodont Bioapatite Geochemistry. *Earth Science*, 50(3): 1122—1141 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈欣阳, 李彪, 李超, 2025. 新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用. *地球科学*, 50(3): 1048—1065.
- 陈中强, 黄元耕, 2022. 如何定量评价大灭绝时期生态系统的坍塌与重建过程? *地球科学*, 47(10): 3827—3829.
- 方谦, 杨僚, 仇鑫程, 等, 2025. 矿物-微生物相互作用研究的新利器: 三维原子探针 (APT). *地球科学*, 50(3): 1201—1219.

- 冯学谦,陈中强,赵来时,等,2025. 西秦岭地区二叠纪-三叠纪之交深海遗迹化石演化特征. 地球科学, 50(3): 1000-1022.
- 顾延生,管硕,李越南,2025. 江汉平原古云梦泽形成演化及其影响机制. 地球科学, 50(3): 830-845.
- 何卫红,吴攸攸,张克信,等,2025. 晚二叠世全球海洋生态系统逐步坍塌与缺氧的可能联系. 地球科学, 50(3): 983-999.
- 黄长生,姚华舟,李璇,等,2022. 从地球生物学视角创新地质调查工作. 华南地质, 38(2): 189-194.
- 黄咸雨,张一鸣,薛建涛,等,2025. 升温和水位下降对泥炭地碳库稳定性的影响. 地球科学, 50(3): 846-856.
- 黄元耕,辛佰仑,郭镇,等,2025. 计算模拟方法提高深时食物网稳定性演变的时间分辨率:以煤山剖面二叠纪-三叠纪生态记录为例. 地球科学, 50(3): 951-963.
- 蒋宏忱,王北辰,2025. 青藏高原湖泊碳氮循环微生物作用. 地球科学, 50(3): 877-886.
- 江海水,陈龔,2025. 晚三叠世诺利期极端温室期地质事件. 地球科学, 50(3): 1037-1047.
- 刘建辉,叶玫,何清吟,2022. 基于文献计量学的地球生物学发展和演变趋势分析. 地球科学进展, 37(2): 212-220.
- 刘羽,2005. 国家自然科学基金古生物学2000-2010年发展战略及中国古生物学研究. 国家自然科学基金通信, 19: 347-351.
- 罗根明,王畅,殷宗军,等,2025. 从地球生物学到天体生物学. 地球科学, 50(3): 857-876.
- 仇鑫程,杨浩,郑子杰,等,2025. 纳米离子探针分析技术在地质微生物学和生物沉积学研究中的应用与展望. 地球科学, 50(3): 1220-1233.
- 盛桂莲,陶华林,宋世文,等,2025. 古 DNA 研究在地球生物学领域的应用. 地球科学, 50(3): 1105-1121.
- 史青,史晓颖, Jiang Ganqing, 等,2025. 中元古代微生物硅循环促进浅海硅岩沉积. 地球科学, 50(3): 1082-1104.
- 孙军,吴怀春,黄威,等,2025. 西菲律宾海盆东部第四纪沉积物磁学记录及其古气候意义. 地球科学, 50(3): 918-933.
- 王家生,宋强,林杞,等,2025. 海洋沉积物 SMTZ 带黄铁矿莓球粒径增大现象的甲烷事件意义. 地球科学, 50(3): 908-917.
- 吴玉祥,宋海军,楚道亮,等,2025. 二叠纪-三叠纪之交火山活动及其环境效应和生物响应. 地球科学, 50(3): 964-982.
- 谢宝增,汤冬杰,刘亚婕,等,2025. 华北自生黏土矿物指示中元古代末期浅海氧化还原条件的时空差异性. 地球科学, 50(3): 1066-1081.
- 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,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,严德天,朱宗敏,等,2025. 流域地球系统科学与区域发展战略. 地球科学, 50(3): 815-829.
- 谢树成,殷鸿福,2014. 地球生物学前沿: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 44(6): 1072-1086.
- 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.
- 谢树成,殷鸿福,史晓颖,等,2011. 地球生物学: 生命与地球环境的相互作用和协同演化. 北京: 科学出版社, 345.
- 徐珍,喻建新,彭念,等,2025. 现代植物培养实验探索二叠纪-三叠纪大灭绝事件后陆地植被演替的微生物驱动力. 地球科学, 50(3): 934-950.
- 殷鸿福,1994. 生物地质学. 地球科学进展, 9(6): 79-82.
- 殷鸿福,谢树成,童金南,等,2009. 谈地球生物学的重要意义. 古生物学报, 48(3): 293-301.
- 余文超, Márta Polgári, 周琦, 等,2025. 地球生物学视角下的富锰沉积形成过程: 原理、证据与模式. 地球科学, 50(3): 1142-1161.
- 袁爱华,万俊雨,赵奎,等,2025. 二叠纪末生物大灭绝后介形虫个体发育的差异响应. 地球科学, 50(3): 1023-1036.
- 袁媛,刘勇勤,2025. 湖泊铁硫循环微生物研究进展. 地球科学, 50(3): 887-907.
- 张克信,宋博文,何卫红,等,2025. 青藏中-南部特提斯洋板块地层分布与演化. 地球科学, 50(3): 1162-1200.
- 张磊,赵赫,吕政艺,等,2025. 牙形石生物磷灰石地球化学研究进展. 地球科学, 50(3): 1122-1141.