



地球生物学发展的机遇与挑战*

谢树成** 罗根明

中国地质大学(武汉), 生物地质与环境地质国家重点实验室, 地球科学学院, 武汉 430074

提要 地球生物学已经引起了人们的广泛关注, 目前面临着机遇与挑战并存的发展局面。得益于现代技术方法的大发展, 地球生物学的研究对象经历了从宏体动植物向微体古生物再向地质微生物和地质病毒的发展, 研究主题从气候环境对生物演化的影响进一步拓展到生物演化如何影响气候环境乃至深地过程, 进而回答生命是如何塑造地球的宜居性这个地球科学的根本性难题。研究对象和研究主题的拓展也提升了地球生物学服务人类社会的能力, 资源能源安全的保障、气候—环境—生物多样性危机的协调应对等都需要地球生物学的支撑。同时, 地球生物学的发展也面临着诸多挑战。它首先需要技术方法的进一步革新来带动认识的创新, 其次需要回答生物演化的驱动力问题, 更需要破解生物演化如何影响深地过程, 包括板块运动、火山活动等地质过程, 只有这样才能全面而正确地评估生物是否改变了宜居地球的演化方向, 以及如何应对当前人类所面临的诸多全球性难题。

关键词 地质微生物学 地质病毒学 全球变化 生物与环境协同演化 跨圈层相互作用

中文引用 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. DOI: 10.19800/j.cnki.aps.2023025

英文引用 Xie Shu-cheng, Luo Gen-ming, 2023. Opportunities and challenges for the development of geobiology. Acta Palaeontologica Sinica, 62(4): 454–462. DOI: 10.19800/j.cnki.aps.2023025

Opportunities and challenges for the development of geobiology

XIE Shu-cheng, LUO Gen-ming

State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract At the present time, geobiology has attracted a great attention and faces both opportunities and challenges for its disciplinary development. The innovation of technology and methodology in modern days has led to the progressive shift in the study objects from macrofossils to microfossils and finally to geomicrobes and geoviruses. Meanwhile, the themes of geobiology have shifted from environmental impacts on biotic evolution to biotic impacts on paleoclimatic and paleoenvironmental changes and even on the deep processes, which enable us to decipher the fundamental issues related to the Earth's habitability. The broadening of both the study objects and the disciplinary themes has greatly enhanced the support for societal services from the perspective of geobiology, including the supply of resources and energy, and the coordinated resilience to the crises in climate, environments, and biodiversity in modern days. However, the deep-going disciplinary development of geobiology awaits the innovation of more techniques and methods. It is further needed for geobiology to decipher not only the underlying dynamics of biotic evolution but also the biotic impacts on the deep processes including the plate movements and volcanisms, which in turn helps to

收稿日期: 2023-08-12; 改回日期: 2023-10-17; 录用日期: 2023-10-18

* 国家自然科学基金创新研究群体项目(41821001)资助。

** 通讯作者: 谢树成, 教授, e-mail: xiecug@163.com

evaluate whether the biosphere changed the directions or routines of the evolution of the habitable Earth, and to provide implication for coping with the crises of climate, environments, and biodiversity loss in modern days.

Key words geomicrobiology, geovirology, global change, coevolution of life with environment, interactions among spheres in Earth

1 引言

地球生物学作为地球科学与生命科学交叉融合而形成的学科, 主要探索生物圈与地球其他圈层的相互作用与协同演化关系(谢树成等, 2006, 2011)。当今学科的发展呈现出两方面的特点。一方面, 重大科学难题的出现使得学科之间交叉融合越来越广泛而深入, 学科间的界线就变得越来越模糊, 导致交叉学科不断涌现。另一方面, 人类社会可持续发展面临的新难题对一些传统优势学科提出了新问题, 需要这些古老学科不断地开拓创新, 特别是以技术方法创新带动新领域的发展。地球生物学实际上就是在这两大背景下出现并得到快速发展的, “百年未有之大变局”在地球生物学这一学科上体现得淋漓尽致, 它既孕育着无限的发展潜力, 又面临着巨大的挑战。

2 发展机遇

2.1 研究对象的拓展

地球生物学的发展极大地拓展了学科的研究对象(图1)。人们对地质时期各类生物的研究是随着技术的发展而不断地扩展的。宏体动植物化石一般用肉眼或放大镜就可以开展研究。尽管当今许多高精尖的手段也不断地应用于这些宏体化石的研究, 但宏体动植物化石研究一开始主要是宏观形貌学的工作。之后, 随着显微镜的出现, 人们可以开展微体古生物的研究, 但这个阶段主要还是局限于真核微生物的研究, 包括藻类、原生动物等。对于细菌、古菌等原核微生物, 一般的显微镜难以开展研究, 而需要借助于分子和同位素技术。因此, 从物理形貌学到化学的技术转变, 实现了地球生物学研究对象从宏体动植物化石到真核微生物再到原核微生物的发展。特别是, 地质微生物成了地球生物学的重要研究对象之一, 它主要包括地质时期的各类微生物(细菌、古菌、藻类、真

菌、原生动物等), 但也涉及一些正在现代自然环境起地质作用的微生物。地质病毒学(geovirology)已经正式提出(Xie *et al.*, 2023)。它不仅研究地质时期病毒本身, 还要研究病毒的地质作用过程及其效应。地质病毒主要是指地质历史时期起重要地质作用的那些病毒, 将成为地球生物学的另一个关注研究对象。

技术手段的发展和研究对象的扩大极大地拓展了地球生物学的时空范畴。地球生物学特别关注细菌、古菌等地质微生物, 这些微生物可以说是无处不在。它们的分子遗迹不仅出现在宏体化石出现的层位, 而且还出现在没有其他生物化石的所谓哑地层中; 不仅出现在地球表层系统, 而且还出现在深地、深空等诸多极端地质环境; 不仅出现在有大量宏体生物的显生宙, 而且还可以出现在没有宏体动植物化石的元古宙早期、太古宙乃至冥古宙。正因为如此, 地球生物学利用分子古生物学、分子有机地球化学、同位素地球化学、地球物理学等技术手段特别重视地质时期细菌、古菌等地质微生物的研究, 以拓展古生物学的时空范畴。地球生物学从实体化石到分子化石的发展, 极大地拓展了研究的时空范畴, 孕育了无限的发展可能。这正是技术创新带动学科变革的一大体现。

2.2 学科内涵的延伸

地球生物学极大地拓展了学科的内涵(图1)。地球生物学特别强调生物圈与地球其他圈层之间的相互作用关系, 不仅研究环境条件对生命起源和生物演化的影响, 更突出生物的演化对气候环境变迁的影响。地球生物学不仅要回答生物圈本身的难题, 而且还要解决其他圈层的难题。地质时期的海洋环境条件如何, 又是怎么演化的; 大气圈的成分是什么, 又是如何演化的, 与生物作用是否有关系; 生物的风化和侵蚀作用、搬运和沉积作用、成岩和成矿作用等地质作用是否对岩石圈产生重要影响, 生物演化与板块构造是否具有协同演

研究对象	宏体古生物 → 微体古生物 → 地质微生物（细菌、古菌等） → 地质病毒			
细胞大小	100 → 10 → 1			
一般技术	肉眼/ 放大镜 → 显微镜 → 分子与同位素技术 → 各类技术融合			
主题内涵	1) 生命起源与生物演化 → 生态系统不同生物之间相互作用 2) 气候环境与深地对生物演化的影响 → 生物对气候环境乃至深地系统的影响 3) 油气资源 → 资源与能源安全保障、气候-环境-生物多样性危机协同应对			
时空范畴	地球表层系统 → 地球表层系统 + 深海、深地、深空 以显生宙为主 → 显生宙、元古宙、太古宙、冥古宙			

图 1 地球生物学在研究对象、技术方法、主题内涵和时空范畴方面的发展(注: 细胞大小是相对的)

Fig. 1 Disciplinary development of geobiology related to study subjects, techniques and methodology, themes, and spatio-temporal ranges (Note: the relative cell size is indicated)

化关系。这些重大科学难题都有待于地球生物学去解答。例如, 关于地球早期的蓝细菌, 古生物学关注地球早期蓝细菌是如何起源的, 有哪些化石记录; 地球生物学则更关注蓝细菌起源以后对大气圈和水圈产生怎样的影响, 地球表层系统这些变化反过来又会对生物圈产生怎样的影响(Knoll *et al.*, 2003)。可以说, 为了解答生物与环境之间的相互作用与协同演化这一主题, 地球生物学的研究对象早已经从生物圈拓展到地球的其他圈层。

如果说生物圈与地球表层系统其他圈层之间存在密切关系是在情理之中, 那么生物圈与深地系统、外星体之间的关系还存在许多未解之谜, 有待于探索。地球生物学与其说关注地球表层系统, 倒不如说更关注深海、深地乃至深空系统, 只有这样才能解决地球系统演化的难题, 才能回答生物对地球宜居性的实质性贡献。例如, 对于大家熟知的古生代绿藻优势被中—新生代的红枝藻系优势所取代这一显生宙生物圈的重大演化事件(Falkowski *et al.*, 2004), 古生物学关注它们之间是如何取代的, 化石记录有哪些; 而地球生物学更关注这种真核微生物的取代过程对深海沉积物产生怎样影响, 深海沉积物又如何进一步影响板块俯冲, 进而影响深地过程。地球生物学作为地球系统科学的一大支柱学科, 已经从表层系统进一步拓展到深海、深地和深空系统。这些“三深”系统主要发育有细菌、古菌等地质微生物, 正是地球生物学可以大显身手的广阔天地, 能够解答地质微生

物与极端地质环境之间的关系。

2.3 服务能力的提升

地球生物学绝不仅仅是停留在解决地球系统科学的重大前沿难题上, 它在服务人类社会的可持续发展方面也毫不含糊(图1)。在当前新发展格局下, 学科发展正不断地向科学技术的广度和深度进军, 坚持“四个面向”, 着力解决世界科技前沿、经济主战场、国家重大需求和人民生命健康等领域所面临的重大难题。地球生物学在解决地球系统科学的世界科技前沿难题基础上极大地提升了服务经济社会、国家战略需求的支撑能力。从资源能源到气候环境, 从生态安全到生命健康, 从工业生产到农业活动, 地球生物学均具有十分广阔的应用前景(谢树成等, 2018)。

古生物学的发展对油气资源的勘探做出了巨大贡献, 主要得益于微体古生物学及其相关的生物地层学研究。当前, 地球生物学的发展再一次为服务经济社会提供了强大的支撑能力(谢树成等, 2018)。越来越多的证据显示, 地质微生物参与了白云岩等油气储层的形成(Vasconcelos *et al.*, 1995; Qiu *et al.*, 2017), 可以对储存页岩气的黏土矿物的形成、转变和改造及其纳米孔隙做出重要贡献(Liu *et al.*, 2015), 也很早就应用于油气藏驱油和煤脱硫等诸多资源能源领域(Westlake *et al.*, 1974; Eligwe, 1988)。可以说, 地球生物学全方位地服务资源能源的评价、勘探和开采等全过程。

生物圈不仅极大地影响了气候环境的变迁,而且许多生物学指标成了评估古温度、干湿古气候和大气CO₂含量变化的关键指标(谢树成等, 2013; Lu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2021)。生物圈的细菌、病毒等极大地影响了生态安全和生命健康,各类地质体里的细菌既可以活化一些有毒的重金属,也可以沉淀这些重金属,决定了重金属的活化、迁移等生物地球化学过程和循环,从而影响了生态安全和生命健康(国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2021)。

在深海、深地、深空、热泉等一些极端地质环境里,人们可以分离出一些具有特殊功能的基因和生物酶,广泛应用到各类工农业生产上,包括冶金工业、环境保护、医药、化妆品工业、食品工业、植物改良等等(蒋宏忱等, 2023),体现了地球生物学在应用领域的巨大发展潜力。

2.4 学科地位的变化

地球生物学的发展极大地提升了学科地位。古生物学无疑是地质学的一大主干学科,没有古生物学,地质学的许多难题难以解答。地球生物学则与地球化学、地球物理学一起构建了地球系统科学的主干学科,分别探索地质时期生命过程、化学过程和物理过程及三者交织在一起的动力学过程对地球系统的影响(谢树成等, 2006),地球生物学因而涉及跨圈层的相互作用这一地球系统科学的重大难题。例如,生物圈不仅对表层系统的大气圈、水圈和岩石圈产生重要影响,而且影响了地球的深部过程,特别是对其中的碳循环和水循环产生重要影响(谢树成等, 2022)。反过来,地球深部过程也强烈地影响了生物圈及其生物过程。构造微生物学的提出体现了板块构造对微生物分布及其地质作用的影响(张传伦等, 2018)。地球深浅之间的跨圈层联动能够很好地记录在生物圈里,地球生物学因而是研究深浅联动的一大关键抓手(谢树成等, 2024)。

以上有关研究对象的拓展、学科内涵的延伸、对经济社会的巨大贡献以及学科地位的提升等诸多方面都很好地体现了地球生物学在地球系统科学时代所带来的巨大发展机遇。地球生物学的发展

不是弱化了古生物学,而是实现了古生物学的转型升级,以地球生物学为特征的古生物学又迎来了一个大发展时代,孕育了学科发展的许多可能。

2.5 与其他相关学科的互馈效应

地球生物学的一大发展机遇来自于生物地球化学、生态学、微生物学等相关学科的互馈效应。一方面,地球生物学的发展需要这些相关学科在技术方法、理论认识上的支撑,特别是许多地球生物学现代过程的调查需要涉及生物地球化学、生态学或微生物学方面的工作,以此为研究地质记录提供机制解释、原理探索等方面的知识。同时,现代自然环境的生态学和微生物学调查工作还为地球生物学的研究提出了前沿科学难题和未来可能需要努力的方向。例如,一些地质微生物功能群的指纹性分子化石指标就是对现代自然环境的微生物脂类分子开展系统研究而建立起来的。又例如,依据碳、氮、硫等同位素组成的地质记录来探索一些特征性的地球生物学过程(如甲烷释放、固氮作用、硫化作用),也是从现代环境的生物地球化学、生态学或微生物学调查开始的。可以说,如果没有现代自然环境相关的生物地球化学、生态学和微生物学的研究,地球生物学将面临着极大的发展瓶颈。

另一方面,地球生物学的研究成果反过来又能促进生态学、微生物学和生物地球化学的发展,促进这些相关学科与地球科学的交叉融合。地球生物学揭示的一些关键地质时期出现地质微生物功能群的爆发,促进了现代自然环境相关微生物功能群的生态学和生物地球化学研究。地质记录反映的微生物地质演化与相关地质环境条件的耦合关系促进了微生物分子演化研究,促进了极端环境条件微生物过程的模拟研究,并由此带动天体生物学的发展。

3 面临挑战

犹如生物演化一样,由于受到环境因素的影响,发展并不是一帆风顺的,一些生物得以不断地发展壮大,而另一些生物则出现了灭绝。新学科的发展,特别是交叉学科的发展,也从来不是一

蹴而就的,面临着巨大风险挑战 and 不确定性。地球生物学的发展也不例外,面临着多方面的挑战。当然,人们的思想观念是当今社会许多发展的关键所在,学科也一样,但这里暂不讨论人们的思想观念问题。

3.1 如何突破技术方法体系

技术方法的突破是地球生物学发展的一大关键。如前所述,从物理形貌学到化学的技术方法转变,实现了从宏体化石研究深入到分子化石研究,使得地球生物研究对象不断拓展(图1)。当前,依托地质脂类分子和同位素方面的技术,人们可以开展地质时期各类地质微生物功能群的研究。例如,3-甲基藿类可以示踪甲烷好氧化细菌,臧花烷(crocoetane)等地质脂类可以揭示甲烷的厌氧氧化过程,一些四醚化合物则可以示踪产甲烷古菌,由此地质时期的甲烷循环可以依托地质脂类的分子和同位素技术实现。

然而,这仅是地质时期微生物参与生物地球化学循环的冰山一角,微生物地质地球化学过程还有许多未解之谜,亟需一些强有力技术方法的突破,特别需要地质学技术与分子生物学技术的融合。例如,生物的基因信息是经过长期的地质演化而不断积累的,蕴含着与许多地质过程、地质环境条件有关的信息,但目前还难以从现代生物的基因信息里挖掘出地质信息,人们仅仅利用了分子钟与分子系统学技术来探索生物的亲缘关系和地质演化。如何实现从岩石矿物记录到生物基因信息的链接是地球生物学需要尽快突破的一大关键技术。当前,初步研究发现,趋磁细菌的磁小体形态可能与功能基因相关,这为链接地质记录与生物学基因信息提供了一个关键突破点,也是地球科学与生命科学实现深度交叉融合的一个关键点(Liu *et al.*, 2022; Xie, 2022)。

当前,地质病毒的研究开始提上了日程(Xie *et al.*, 2023),但如何才能实现地质病毒的研究目前还没有很好的技术方法手段。尽管一些古代病毒可以依靠分子生物学的手段开展研究(Katzourakis, 2013),但深时地质病毒是难以靠分子生物学手段实现的。地质病毒的突破不能停留在单纯的分子生

物学手段上,还需要分子有机地球化学、矿物学等多方面技术方法的融合才行。又例如,一些生物壳体的同位素分析技术为人们探索气候环境变化提供了强有力的手段。大家非常熟悉的牙形石磷灰石氧同位素组成可以很好地用于估算古温度变化,新生代海洋有孔虫氧同位素组成则可以反映南北极冰盖的消长,等等(Waelbroeck *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2012)。这些同位素技术如果与生态学结合,那就可以进一步探索海洋不同水深的温度等环境条件(孙亚东等, 2023)。黄铁矿微区原位的铁、硫同位素耦合关系的分析技术则可以提供有关硫代谢微生物的作用信息(Liu *et al.*, 2022)。这体现了地质学、地球化学和生态学等学科技术融合的重要性。

以上这些都是与地质学、生物学、生态学结合而产生的一些重要技术方法。未来,地球生物学将与数学、计算机科学、信息科学等结合形成一些关键技术,包括大数据与AI技术、数值模拟技术等。地球生物学技术已经从实验模拟走向数值模拟,从单矿物单一分析走向微区原位多技术融合分析,从少量数据走向海量数据分析等方向发展。

3.2 如何回答重大生物演化事件的驱动力

在古生物学着重研究生物化石本身的基础上,地球生物学需要进一步回答地质时期重大生物演化事件的驱动因素。这是地球生物学解决生物圈难题的体现,涉及重大生物演化事件的环境致因,以及生物之间的相互作用。例如,显生宙5次生物大灭绝的致因问题,一些重要生物类群起源的生物学因素与环境背景条件,等等。所有这些生物演化事件不仅涉及生物本身因素,还涉及气候环境条件(沈树忠等, 2024); 不仅涉及地球表层系统各圈层之间的相互作用,还涉及深部过程与表层系统之间的复杂关系,因而是地球系统的跨圈层相互作用过程(殷鸿福和宋海军, 2013)。

随着研究的深入,人们越来越重视多因素联合的作用,导致了一些事件的驱动因素越来越复杂,致因越来越多。例如,有关生物大灭绝问题,几乎所有的地内和地外因素都被涉及到了,让人觉得特别复杂。然而,这种不断复杂化的现象并不是科学研究的初心。科学研究的本质是要把自然界

复杂的过程尽可能简单化,抓住最主要、最本质的矛盾,只有这样才能更好地让公众掌握自然规律并付诸行动,进而服务社会的发展。正因为如此,有关生物大灭绝尽管原因很多,但人们开始区分它的“trigger”和“killer”了,开始关注从全球变暖(global warming)到全球异变(global weirding)事件。也就是在长时间尺度全球变暖的背景下,人们开始关注那些短时间尺度的全球异变事件,只有这样才能和人类时间尺度的事件联系起来,才能对当前人类保护宜居地球有现实的意义(Sweeney, 2014)。那么问题来了,到底是哪些全球异变事件在全球变暖背景下成为“压死骆驼的最后一根稻草”?这可能是人们最想知道的关于生物危机的一大本质问题。

3.3 如何解剖重大地质事件的生物学驱动机制

古生物学虽然在一定程度上能够解决生物圈演化的一些基本问题,但很难回答重大地质事件的生物学驱动机制,这更需要地球生物学的支撑。回答地质时期一些重大地质事件(例如:大氧化事件、极热事件、岩石圈减薄与演化等等)的生物因素,这是地球生物学需要解决的有关地球其他圈层的大难题。

一方面,生物可以灵敏地响应气候环境变化,因而古温度变化、干湿古气候的变化、古海洋环境的变化等都可以用生物学指标进行示踪和评估。藻类的长链不饱和烯酮化合物、细菌的支链四醚类化合物、古菌的异戊二烯四醚类化合物等都可以用来定量评估古温度的变化。来源于好氧细菌的泥炭湿地藓类通量、细菌与古菌的四醚类化合物比值等可以用来示踪干湿状况的变化。这是当前地球生物学开展得最多的有关生物与环境关系的研究,也体现了地球生物学对全球变化及其应对具有重要的科学与实践意义(谢树成等, 2013)。

另一方面,重大气候环境变化还与生物学因素有关。大家熟知的盖娅(Gaia)假说和雏菊世界(daisy world)模型都阐述了生物对地球环境的重要贡献。地球生物圈的微生物、植物、动物乃至人类都对气候环境产生重要影响:“千里之堤,毁于蚁穴”,是对动物物理作用破坏地质体的形象写照;

“前人种树,后人乘凉”,是植物影响气候环境的体现;“微观尺度的物质能够产生宏观尺度的效应”,是对微生物巨大作用的生动描述。尽管各类生物的作用巨大,生命塑造了宜居的地球,但地质时期一些重大环境转型主要归因于非生物过程,包括超大陆的聚散、火山活动、地球轨道参数等等。实际上,这些物理过程很可能通过生物地质过程或者生物地球化学过程起作用的,特别是地质微生物可能起了重要作用。也就是说,生物过程与这些物理、化学过程交织在一起的动力学过程控制着宜居地球的演化及其发展方向。随着研究的深入,人们发现不仅仅是诸如大气圈和水圈等地球表层系统受到生物的强烈影响(图2),甚至深地系统和深地过程也受到生物的影响(Müller *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023)。因此,地球生物学需要把生物过程与物理化学过程结合起来,把表层系统与深地系统统一起来开展研究,这再一次体现了地球生物学对发展地球系统科学的重要性。

同时,生物过程还涉及不同生物之间的相互作用,存在植物与微生物、动物与微生物之间的复杂相互作用(图1)。海洋里的生物泵就是一个动物与微生物之间的相互作用过程,微生物产生的颗粒有机质通过动物粪球粒而更快地进入沉积物埋藏(谢树成等, 2022)。土壤有机质埋藏过程实质也体现了植物与微生物的作用过程,刚开始主要是植物有机体的输入,随着时间的延长,这些高等植物的有机质逐渐被微生物利用,导致微生物有机质在土壤总有机质的占比随时间推移而越来越高(Liang *et al.*, 2021)。

4 结论与展望

古生物学向地球生物学的转型发展,研究对象从宏体真核生物拓展到细菌、古菌等原核微生物,并开始涉及地质病毒,研究的时空范畴大幅度扩展,深地、深海乃至深空这“三深”系统都开始出现地球生物学的身影。研究内涵也从环境对生命起源和生物演化的影响进一步延伸到生物演化对气候环境的影响,生命如何塑造宜居地球是地球生物学需要回答的核心主题。地球生物学不仅面向

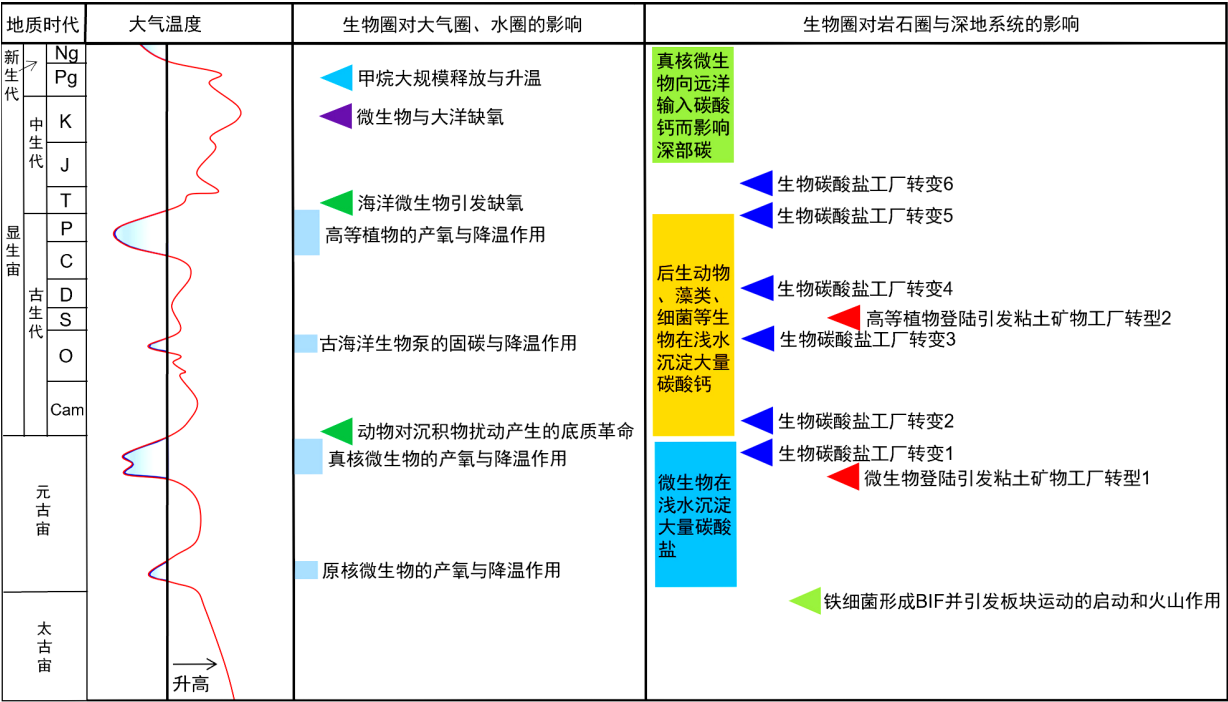


图 2 地质时期的生物圈对地球表层系统与深地系统的影响

Fig. 2 Biotic impacts on Earth's surface system and deep Earth in the geologic past

6次生物碳酸盐工厂转变都是指颗粒灰岩向钙质微生物岩转变，显示了碳酸盐沉淀中宏体生物作用向微生物作用的转变。2次黏土矿物工厂转变分别指微生物和高等植物两次生物登陆引发黏土矿物大量形成和沉淀，从而使得泥岩丰度增加。主要资料来源：生物碳酸盐工厂转变综合自Chen等(2019)和Pomar (2020)，两次黏土矿物工厂变化来自Kennedy等(2006)和McMahon等(2018)，微生物通过BIF对深地的作用来自Zhang等(2023)和Keller等(2023)。示意的大气温度来自<http://www.scotese.com>。Cam-寒武纪，O-奥陶纪，S-志留纪，D-泥盆纪，C-石炭纪，P-二叠纪，T-三叠纪，J-侏罗纪，K-白垩纪，Pg-古近纪，Ng-新近纪(地质年代最顶部的第四纪未在图中表示出来)。

Each of the 6 horizons of carbonate factory transitions is shown to indicate the shifts from grainstones to calcimicrobialites, inferring biotic carbonate precipitation from macro-organisms to micro-organisms (Chen *et al.*, 2019; Pomar, 2020). The 2 horizons of clay mineral transitions indicate the landing of microorganisms and higher plants, respectively, to greatly induce the formation of clay minerals which in turn cause the increase in the abundance of clay-stones (Kennedy *et al.*, 2006; McMahon *et al.*, 2018). Microbial roles on the deep processes via the BIF are from Zhang *et al.* (2023) and Keller *et al.* (2023), and the atmospheric temperature is from <http://www.scotese.com>. Cam-Cambrian, O-Ordovician, S-Silurian, D-Devonian, C-Carboniferous, P-Permian, T-Triassic, J-Jurassic, K-Cretaceous, Pg-Paleogene, Ng-Neogene (Quaternary at the most top is not shown here).

地球系统科学的重大科技前沿难题，而且还服务于经济社会的发展，解决国家重大需求和人们生命健康方面的难题。正因为如此，地球生物学与地球化学、地球物理学一样，是地球系统科学的主干学科，具有广阔的发展前景，在新发展格局下具有强大的生命力。

地球生物学作为一个新型交叉学科，它的发展又面临着巨大挑战。地球生物学首先需要突破一些关键技术方法的瓶颈，多学科技术的融合是地球生物学技术发展的关键，特别是地质学、地球化学与分子生物学、生态学技术的融合。地球生物学还需要尽快与数学、计算机科学、信息科学等结合形成一些关键技术，以实现从实验模拟走向数值模拟，从单矿物单一分析走向微区原位多技术融

合分析，从少量数据走向海量数据分析等方向的大发展。在形成特色融合技术基础上，地球生物学不仅需要回答生物圈演化的驱动力问题，更需要解剖气候环境演化的生物学因素，后者是学科发展的关键，更是学科发展的难点。甚至包括火山活动、板块运动等一些深部过程都或多或少地受到了生物过程的影响，超大陆聚散与生物过程的关系、生物演化与板块构造的关系、火山活动与生物演化的互馈效应等等这些地球系统科学的重大难题都有待于地球生物学去破解，这也是未来地球系统科学的重大发展方向之一。

参考文献 (References)

国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2021. 中国学科发展战略•

- 极端地质环境微生物学. 北京: 科学出版社. 303.
- 蒋宏忱, 2023. 第二十章, 工业应用地球生物学. 见: 谢树成(主编). 地球生物学. 北京: 高等教育出版社. 565–570.
- 沈树忠, 张飞飞, 王文倩, 王向东, 樊隽轩, 陈吉涛, 王博, 曹剑, 杨石岭, 张华, 李高军, 邓涛, 李献华, 陈骏, 2024. 深时重大生物和气候事件与全球变化: 进展与挑战. 科学通报, 69: 268–285.
- 孙亚东, 黄俊华, 朱振利, 2023. 第六章, 地球生物学的同位素技术. 见: 谢树成(主编). 地球生物学. 北京: 高等教育出版社. 143–176.
- 谢树成, 殷鸿福, 刘邓, 邱轩, 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: 3823–3836.
- 谢树成, 龚一鸣, 童金南, 史晓颖, 赖旭龙, 冯庆来, 王红梅, 杜远生, 王永标, 颜佳新, 张克信, 殷鸿福, 2006. 从古生物学到地球生物学的跨越. 科学通报, 51: 2327–2336.
- 谢树成, 黄咸雨, 杨欢, 秦养民, 2013. 示踪全球环境变化的微生物代用指标. 第四纪研究, 33: 1–18.
- 谢树成, 焦念志, 罗根明, 李东东, 汪品先, 2022. 海洋生物碳泵的地质演化: 微生物的碳汇作用. 科学通报, 67: 1715–1726.
- 谢树成, 罗根明, 朱宗敏, 2024. 地球表层系统对深部圈层时空演变的影响. 科学通报, 69: 149–159.
- 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.
- 殷鸿福, 宋海军, 2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合. 中国科学: 地球科学, 10: 16–29.
- 张传伦, 林间, 李三忠, 董海良, 王风平, 谢树成, 2018. 构造微生物学: 地球生物学研究的新理念. 中国科学: 地球科学, 48: 956–959.
- Chen Zhong-qiang, Tu Chen-yi, Pei Yu, Ogg J, Fang Yu-heng, Wu Si-qu, Feng Xue-qian, Huang Yuan-geng, Guo Zhen, Yang Hao, 2019. Biosedimentological features of major microbe-metazoan transitions (MMTs) from Precambrian to Cenozoic. *Earth-Science Reviews*, 189: 21–50. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.01.015
- Eligwe C A, 1988. Microbial desulphurization of coal. *Fuel*, 67: 451–458. DOI: 10.1016/0016-2361(88)90338-9
- Falkowski P G, Katz M E, Knoll A H, Quigg A, Raven J A, Schofield O, Taylor F J, 2004. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 305: 354–360. DOI: 10.1126/science.1095964
- Jiang Hong-chen, 2023. Chapter 20, Applied geobiology in industry. In: Xie Shu-cheng (ed.), *Geobiology*. Beijing: Higher Education Press. 565–570 (in Chinese).
- Katzourakis A, 2013. Paleovirology: inferring viral evolution from host genome sequence data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 368: 20120493. DOI: 10.1098/rstb.2012.0493
- Keller D S, Tassara S, Robbins L J, Lee C-T A, Ague J J, Dasgupta R, 2023. Links between large igneous province volcanism and subducted iron formations. *Nature Geoscience*, 16: 527–533. DOI: 10.1038/s41561-023-01188-1
- Kennedy M, Droser M, Mayer L M, Pevear D, Mrofka D, 2006. Late Precambrian oxygenation; inception of the clay mineral factory. *Science*, 311: 1446–1449. DOI: 10.1126/science.1118929
- Knoll A H, 2003. The geological consequences of evolution. *Geobiology*, 1: 3–14. DOI: 10.1046/j.1472-4669.2003.00002.x
- Liang Chao, Zhu Xue-feng, 2021. The soil microbial carbon pump as a new concept for terrestrial carbon sequestration. *Science China Earth Sciences*, 64: 545–558. DOI: 10.1007/s11430-020-9705-9
- Liu Deng, Dong Hai-liang, Wang Hong-mei, Zhao Lin-duo, 2015. Low-temperature feldspar and illite formation through bioreduction of Fe(III)-bearing smectite by an alkaliphilic bacterium. *Chemical Geology*, 406: 25–33. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.04.019
- Liu Pei-yu, Zheng Yue, Zhang Rong-rong, Bai Jin-ling, Zhu Ke-lei, Benzerara K, Menguy N, Zhao Xiang, Roberts A, Pan Yong-xin, Li Jin-hua, 2022. Key gene networks that control magnetosome biomineralization in magnetotactic bacteria. *National Science Review*, 10: nwac238. DOI: 10.1093/nsr/nwac238
- Liu Ya-rong, Ding Wei-ming, Lang Xian-guo, Xing Chao-chao, Wang Rui-min, Huang Kang-jun, Fu Bin, Ma Hao-ran, Peng Yong-bo, Shen Bing, 2022. Refining the early Cambrian marine redox profile by using pyrite sulfur and iron isotopes. *Global and Planetary Change*, 213: 103817. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2022.103817
- Lu Jia-yi, Yang Huan, Griffiths M L, Burls N J, Xiao Guo-qiao, Yang Ji-long, Wang J K, Johnson K R, Xie Shu-cheng, 2021. Asian monsoon evolution linked to Pacific temperature gradients since the Late Miocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 563: 116882. DOI: 10.1016/j.epsl.2021.116882
- McMahon W J, Davies N S, 2018. Evolution of alluvial mudrock forced by early land plants. *Science*, 359: 1022–1024. DOI: 10.1126/science.aan4660
- Müller R D, Mather B, Dutkiewicz A, Keller T, Merdith A, Gonzalez C M, Gorczyk W, Zhirovic S, 2022. Evolution of Earth's tectonic carbon conveyor belt. *Nature*, 605: 629–639. DOI: 10.1038/s41586-022-04420-x
- Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences, 2021. Strategic disciplinary development in China: Microbiology in extreme geological environments. Beijing: Science Press. 303 (in Chinese with English abstract).
- Pomar L, 2020, Chapter 12 - Carbonate systems. In: Scarselli N, Adam J, Chiarella D, Roberts D G, Bally A W (eds.), *Regional Geology and Tectonics (Second Edition)*. Elsevier. 235–311.
- Qiu Xuan, Wang Hong-mei, Yao Yan-chen, Duan Yong, 2017. High salinity facilitates dolomite precipitation mediated by *Haloferax volcanii* DS52. *Earth and Planetary Science Letters*, 472: 197–205. DOI: 10.1016/j.epsl.2017.05.018
- Shen Shu-zhong, Zhang Fei-fei, Wang Wen-qian, Wang Xiang-dong, Fan Jun-xuan, Chen Ji-tao, Wang Bo, Cao Jian, Yang Shi-ling, Zhang Hua, Li Gao-jun, Deng Tao, Li Xian-hua, Chen Jun, 2024. Deep-time major biological and climatic events versus global changes: Progresses and challenges. *Chinese Science Bulletin*, 69: 268–285 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ya-dong, Huang Jun-hua, Zhu Zhen-li, 2023. Chapter 6, isotopic geochemistry techniques in geobiology. In: Xie Shu-cheng (ed.), *Geobiology*. Beijing: Higher Education Press. 143–176 (in Chinese).
- Sun Ya-dong, Joachimski M M, Wignall P B, Yan Chun-bo, Chen Yan-long, Jiang Hai-shui, Wang Li-na, Lai Xu-long, 2012. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse. *Science*, 338: 366–370. DOI: 10.1126/science.1224126

- Sweeney J A, 2014. Command-and-control: alternative futures of geoenvironmental engineering in an age of global weirding. *Futures*, 57: 1–13. DOI: 10.1016/j.futures.2013.12.005
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, Grujic D, Tiens A J, 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377: 220–222. DOI: 10.1038/377220a0
- Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, Duplessy J C, McManus J F, Lambeck K, Balbon E, Labracherie M, 2002. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records. *Quaternary Science Reviews*, 21: 295–305. DOI: 10.1016/S0277-3791(01)00101-9
- Wang Can-fa, Bendle J A, Yang Huan, Yang Yi, Hardman A, Yamoah A, Thorpe A, Mandel I, Greene A E, Huang Jun-hua, Xie Shu-cheng, 2021. Global calibration of novel 3-hydroxy fatty acid based temperature and pH proxies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 302: 101–119. DOI: 10.1016/j.gca.2021.03.010
- Westlake D, Jobson A, Phillippe R, Cook F D, 1974. Biodegradability and crude oil composition. *Canadian Journal of Microbiology*, 20: 915–928. DOI: 10.1139/m74-141
- Xie Shu-cheng, 2022. Linking minerals to bacterial genes. *National Science Review*, 10: nwac265. DOI: 10.1093/nsr/nwac265
- Xie Shu-cheng, Huang Xian-yu, Yang Huan, Qin Yang-min, 2013. An overview on microbial proxies for the reconstruction of past global environmental change. *Quaternary Sciences*, 33: 1–18.
- Xie Shu-cheng, Jiao Nian-zhi, Luo Gen-ming, Li Dong-dong, Wang Pin-xian, 2022. Evolution of biotic carbon pumps in Earth history: Microbial roles as a carbon sink in oceans. *Chinese Science Bulletin*, 67: 1715–1726 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shu-cheng, Luo Gen-ming, Zhu Zong-min, 2024. Surface system impact on the spatiotemporal evolution of deep Earth. *Chinese Science Bulletin*, 69: 149–159 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shu-cheng, Yin Hong-fu, Liu Deng, Qiu Xuan, 2018. On development from paleontology to geobiology: overview of innovation and expansion of application fields. *Earth Science*, 43: 3823–3836 (in Chinese with English abstract).
- Xie Shu-cheng, Yin Hong-fu, Shi Xiao-ying, et al., 2011. *Geobiology: Interaction and coevolution of life with Earth environments*. Beijing: Science Press. 345 (in Chinese).
- Xie Shu-cheng, Zhu Xiu-chang, Algeo T, Qiu Xuan, 2023. Geovirology: viruses and their roles in geological history. *Science Bulletin*, 68: 379–382. DOI: 10.1016/j.scib.2023.02.001
- Xie Shu-cheng, Gong Yi-ming, Tong Jin-nan, Shi Xiao-ying, Lai Xu-long, Chen Zhong-qiang, Feng Qing-lai, Wang Hong-mei, Du Yuan-sheng, Wang Yong-biao, Yan Jia-xin, Zhang Ke-xin, Yin Hong-fu, 2006. Disciplinary shift from paleontology to geobiology. *Chinese Science Bulletin*, 51: 2327–2336 (in Chinese).
- Yin Hong-fu, Song Hai-jun, 2013. Mass extinction and Pangea integration during the Paleozoic-Mesozoic transition. *Science China: Earth Sciences*, 56: 1791–1803. DOI: 10.1007/s11430-013-4624-3
- Zhang Chuan-lun, Lin Jian, Li San-zhong, Dong Hai-liang, Wang Feng-ping, Xie Shu-cheng, 2018. Tectonobiology: a new paradigm for geobiological research. *Science China Earth Sciences*, 61: 494–498. DOI: 10.1007/s11430-017-9159-y
- Zhang Sheng-xing, Li Yi-liang, Leng Wei, Gurnis M, 2023. Phototrophic bacteria initiated plate tectonics in the Neoproterozoic. *Geophysical Research Letters*, 50: e2023GL103553. DOI: 10.1029/2023GL103553