

从古生物学到地球生物学的跨越

谢树成 龚一鸣 童金南 史晓颖 赖旭龙 Z. Q. Chen 冯庆来
王红梅 杜远生 王永标 颜佳新 张克信 殷鸿福

(中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074; 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003; School of Earth & Geographical Sciences, The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley, WA 6009, Australia. E-mail: xiecu@163.com)

摘要 以学科体系和科学问题为导向, 对当前国际上出现的地球生物学从学科分类体系、形成背景、主要研究方向、亟待突破的分支学科及其与之相关的研究领域进行了评述. 作为地球科学与生命科学相结合而形成的新兴交叉学科, 地球生物学在地球科学中应具有独立的一级学科地位, 类似于地球化学和地球物理学. 地球生物学主要研究地球系统的生命运动, 涉及地球环境与生命系统的相互作用. 它的形成与发展既是当今科学技术发展的结果, 也是当今世界对所面临重大人类-环境-资源问题的响应. 分子地球生物学、地球微生物学、地球生态学、地球生理学等地球生物学中的二级学科还有待尽快突破, 以形成地球生物学的成熟理论框架和方法体系.

关键词 地球生物学 分子化石 微生物 环境 生命之树 协同演化

中国具有得天独厚的地层古生物资源, 通过几代人的长期积累和努力探索, 中国古生物学家在早期生命、中生代热河生物群、新生代动物辐射和生态环境变化、高精度年代地层学等领域取得了举世瞩目的成绩, 在国际权威刊物《Nature》和《Science》上发表相关论文数十篇, 引起国际同行的广泛关注. 为了巩固和发展现有的国际地位, 中国古生物学家既要发掘传统优势, 更要开拓新领域. 其中, 学科的创新和深入发展是根本. 近几年, 国际上出现了一系列与古生物学密切相关的新术语和研究主题. 在此, 我们着重围绕地球生物学这一涉及古生物学重大变革问题进行分析 and 阐述, 以促进中国相关研究领域的准确定位和切入.

1 学科分类位置

地球科学(earth science, geoscience)是人类认识、利用、改造和保护自己家园——地球的基础科学, 它是数、理、化、天、地、生六大基础自然科学之一, 其传统一级学科¹⁾包括地质学、地理学、地球化学、地球物理学、海洋科学及大气科学. 这当中, 只有地球化学和地球物理学是地球科学与化学、物理学两大基础学科交叉而形成的独立一级学科. 地球科学与其他基础学科(如数学、天文学、生物学)交叉没有形成

独立的一级学科, 而只是作为二级学科散布在其他一级学科中. 例如, 生物学与地球科学交叉形成的古生物学和生物地球化学, 分别放在地质学和地球化学学科中.

古生物学这一传统古老学科经历了从 paleontology 到 paleobiology, 再到 geobiology 的发展历程. Paleontology 着重于地质体中的古生物化石记录, 突出其地质学意义, paleobiology 则是从 paleontology 到 geobiology 的中间过渡环节, 更加关注生物学方面的意义. 当前国际上出现的地球生物学(geobiology), 则突出了生命系统和地球系统的相互作用. 它应是生物学与地球科学交叉而形成的独立一级学科. 中国国家自然科学基金委员会地球科学部也建议将其正式单独列为一个学科²⁾. 在学科分类上, 它等同于地球化学(geochemistry)、地球物理学(geophysics)(表 1), 它们分别是研究地球物质的物理(地球物理学)、化学(地球化学)和生命(地球生物学)这些基础运动形式. 由此, 在地球系统中, 物理、化学、生命三大基本过程都形成各自相对独立的学科体系(表 1).

有关地球生物学的定义, 虽有很多, 但基本雷同. 它强调生命系统和地球系统的相互作用, 包括其机制、过程和演化历史等^[1-4]. 生物地质学(biogeology)

1) 中华人民共和国教育部与中国国家自然科学基金委员会的学科分类体系有一定差异, 本文的学科分类体系沿用中国国家自然科学基金委员会的体系, 其一级学科相当于中华人民共和国国家标准学科分类与代码(GB/T 13745-92)的二级学科

2) 刘羽, 姚玉鹏, 陈准. 地球生物学——充满挑战的新领域. 国家自然科学基金委员会情况交流, 2005-09-22

主要是利用生物学的知识来服务于地质学 [1,5], 是地球生物学的一部分. 近年出现的biogeosciences(生物地质学)主要研究生命(包括其他行星上的生命)与地球的大气圈、水圈和岩石圈的相互作用 [6], 它更强调将生物学方法与地球物理和地球化学的方法联合起来研究地球系统¹⁾, 而且还涉及太空生物学(astrobiology——应是“生”与“天”两大基础学科交叉结合而形成的).

作为地球科学领域的一级学科, 地球生物学将来有可能发展出较多的二级学科, 但目前的体系结构还很不完善(表1). 总体上来说, 表中所列的这些二级学科可以归纳为如下 3 类:

(1) 分子地球生物学(molecular geobiology, 包括分子古生物学、分子地层学、分子生态学、分子考古学等)、地球微生物学(geomicrobiology)和传统古生物学, 主要着眼于不同尺度(分子、微观、宏观等)的不同对象.

(2) 地球生态学(geoecology, 包括古生态学、生态地层学、生态地质学、古生物地理学)和地球生理学(geophysiology), 主要强调生物与环境的相互作用.

(3) 生物地球化学、生物地球物理学(如生物磁学)和生物地质学(包括生物地层学、生物成岩成矿学等 [1]), 侧重于研究生物对地球系统的作用. 它们是地球科学各一级学科之间交叉结合的产物, 即分别是地球生物学与地球化学、地球物理学、地质学相互交叉结合的产物. 其中的生物地球化学分类位置一直放在地球化学学科中. 最近, Cutter [7]已提出, 将生物地球化学作为地球生物学这个学科的一个重要组成部分.

另外, 国际上出现的生物地貌学(biogeomorphology)主要研究地貌与生物之间的相互影响 [8], 可以作为生物地质学(生物对地貌的作用)和地球生态学(地貌对生物的影响)的一部分内容.

2 形成背景

当今出现的地球生物学思想, 其酝酿和萌芽阶段可以追溯到两个世纪以前Hutton [9]对地球表层的研究, 那时已经认识到生物对地球的作用, 但同时也认为生命系统对地球系统动力学过程所起的作用很小. 1934 年, 荷兰生物学家Bass Becking [10]开始使用“地球生物学(geobiology)”这个术语. 随后, Lovelock [11]从地球生理学角度, 把地球作为一个有机体, 研究生命系统对地球表层环境的影响. 从此, 人们开始突出了地球生物学的研究主题, 即强调生物圈与地圈的相互作用, 或生物界与非生物界的相互作用²⁾, 并很快形成了一个全新的研究领域 [12]: 2000 年, 在美国微生物科学院召开的讨论会上正式把地球生物学描述为“试图了解生物圈与地圈相互作用的研究”; 2001 年, 美国地质学会成立了地球生物学会; Elsevier 和 Blackwell出版社则分别于 2002, 2003 年推出了刊物《Virtual Journal of Geobiology》和《Geobiology》; 2004 年, 美国国家科学基金会地球科学部正式将地球生物学单独列为一个项目组(program), 予以稳定的支持; 同时, 南加州大学Wrigley环境研究所则开办了地球生物学的国际培训班; 2005 年, 中国国家自然科学基金委员会地球科学部邀请著名学者Derek Briggs

表 1 地球生物学与其他学科的关系及其二级学科

		一级学科	二级学科(建议)
地球科学	研究对象性质	地质学(固体地球)	略
		海洋科学(液)	
		大气科学(气)	
		地理学(地球表层)	
	物质运动形式	地球物理学(物理运动)	分子地球生物学(分子古生物学、分子地层学、分子生态学、分子考古学、古生物化学)、地球微生物学、古生物学(古动物学、古植物学、演化生物学等); 地球生态学(古生态学、生态地质学、生态动力学、生物地理学)、地球生理学; 生物地球化学、生物地质学(生物地层学、生态地层学、生物成岩成矿学、生物矿物学、生物地貌学)、生物地球物理学(生物磁学等)等
		地球化学(化学运动)	
		地球生物学(生命运动)	

1) Hedin L, Chadwick O, Schimel J, et al. Linking Ecological Biology & Geoscience: Challenges for Terrestrial Environmental Science. White Paper report to the National Science Foundation, 2002. 18
2) Nealson K, Ghiorse W A. Geobiology: Exploring the Interface between the Biosphere and the Geosphere. American Society for Microbiology Report, 2001. 23

进行了有关地球生物学方面的讲座。

地球生物学的这种快速大发展,既是当今自然科学和技术发展的必然结果,也是对 20 世纪中后期以来社会所面临的人类-环境-资源问题的响应,它将为解决当今全球性问题提供强有力的科学支撑。当前,随着人口剧增和社会经济的发展,自然资源(矿产、化石能源、水、土地等)形势更为严峻,生态系统加速恶化,生命支持系统负担日益加重^[12],这些全球性问题的出现,迫切要求我们从全球视野来看待这些问题。同时,自然系统出现的这些全球性问题并不是孤立的,它们之间通过各种物理、化学、生物过程相互影响、相互作用。例如,地表植被的大规模破坏将引发生态系统的变化、物种的消失,引起土壤侵蚀、水土流失乃至荒漠化的发展,并通过地球化学循环,可能影响全球气候变化、海平面的变化、灾害性天气和气候的出现,最终危及人类的生存和安全。因此,要全面解决这些问题,必须首先要树立系统化、整体化的思想。地球生物学就是在这样的背景下发展起来的。

一方面,得益于对地、对日等卫星观察技术的发展,使得人们不仅能够从外太空来看和认识地球这个行星,而且将大气圈、水圈、生物圈、岩石圈、地幔和地核作为一个完整的系统,研究由力学、物理、化学和生命四大基本过程联系起来的复杂非线性多重耦合系统——地球系统的运行机制^[13],从而形成了地球系统科学。因此,研究生命运动的地球生物学是地球系统科学的重要组成部分,它与地球化学、地球物理学、地球动力学应构成地球系统科学的四大物质运动基础。从地球系统科学角度来看,地球生物学的形成并不是学科分异和多样化的反映,相反,它是学科整合的体现^[14],是当前地球科学的发展要求人们融合各相关学科来研究地球系统的结果。

另一方面,在 21 世纪,生命科学将可能发展成新一轮自然科学革命的中心,并将跨越物理世界和生命世界不可逾越的鸿沟,使无机界与有机界统一起来^[15]。特别是分子生物学技术的发展,使得地球科学家能够从分子水平上研究和认识生物对地球系统的影响和响应机制,克服了传统古生物学只注重“摆事实、讲故事”,缺乏深入探讨机制的状况。同时,生态学又向具有复杂功能的生态系统和生物圈方向发展。微观与宏观的结合使地球科学家能够

在不同尺度上研究生态系统,研究不同营养水平上的生物,以及它们与地球在不同尺度上(宏观、微观、分子)的相互作用。这些都为地球生物学的发展创造了条件。

需要指出的是,在地球表层系统四大圈层(表壳岩石圈、水圈、生物圈、大气圈)中,对其他圈层作用反馈最灵敏,又具有最大再生产(再循环)能力的生物圈是关键的一环(图 1):根据它的变革与演替划分地球演化阶段(如古生代、中生代、新生代等)是地球科学领域的共识;在各圈层物质和能量交换中,生物圈都发挥了重大作用(如碳循环、硫循环);一些地学难题一经注意生物作用,往往豁然开朗,形成了新的理论(如生物灭绝—新灾变论),认识了新的地质作用(如生物成矿作用)^[11]。因此,地球生物学作为一个完整的学科体系虽然还处在发展初期,但它一经提出,就受到了科学界的广泛关注:与之有关的网页条目近 30 万个、相关期刊不断推出、新的研究成果层出不穷、一些独立研究机构相继形成。虽然它目前还难以与业已成熟的地球化学和地球物理(约有千万个网页条目)相比,但生命运动是一种更复杂、更高级的运动形式,它本身也包括了力学、物理和化学运动。因此,地球生物学也涉及力学、物理和化学这些基础运动形式,应具有广泛的应用前景和发展空间。

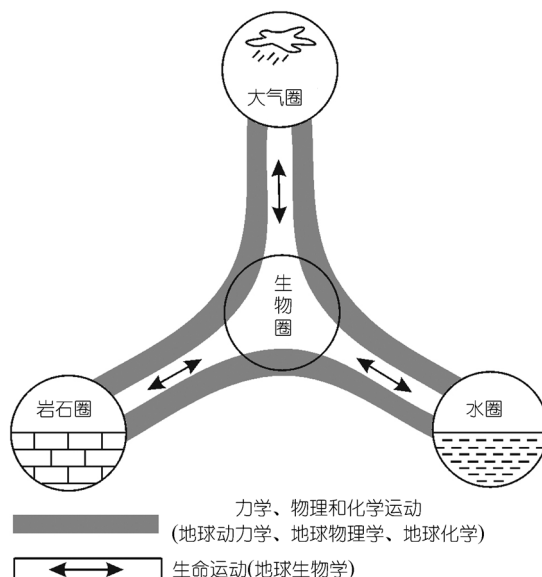


图 1 生物圈通过力学、物理、化学和生命四大基本过程与地表其他圈层的相互作用

3 主要研究方向

20世纪后期以来, Plenum 出版社出版了一系列地球生物学主题丛书, 如水生生物的骨骼生长、动物与沉积物的关系、化石记录中捕食与被捕食生物间的相互作用、地球生物圈中的碳、新元古代的地球生物学与化石生物学等。2003年由 Blackwell 出版社推出的期刊《Geobiology》列出了9个主要领域, 它与耶鲁大学生物圈研究所所长 Derek Briggs 在中国国家自然科学基金委员会的交流¹⁾中提出的9个主要研究方向一致。它们分别是: (1) 生命的起源和演化; (2) 大气圈、水圈和生物圈的演化; (3) 地球演化关键转折期沉积岩记录和地球生物学; (4) 古生物学和演化生态学; (5) 生物标志物; (6) 分子生态学和谱系演化; (7) 环境微生物学; (8) 生物地球化学和全球元素循环; (9) 微生物与矿物的相互作用。

实际上, 概括以上的主题和方向, 地球生物学主要研究两个最基本的方面。一是地球各圈层对生物圈的影响和作用, 包括以上的第(1)~(6)项内容, 涉及的学科主要是传统古生物学领域的一些学科, 如演化生物学、生物地层学、生态地层学、生物地理学。这方面的工作不仅是为了理解地球上生命的起源和演化, 而且也为了研究太空生物学服务。二是生物圈对地球其他圈层的作用和影响, 包括以上的第(7)~(9)项内容, 涉及的学科主要散布在非古生物学领域的一些地质学科中, 如生物地球化学(地球化学)、生物成矿学(矿床学)、生物成岩作用(沉积学、岩石学)等。这个方向的研究工作是为了更加深刻地理解全球规模的环境变化, 以及为预测未来的变化服务。因此, 从古生物学跨越到地球生物学, 不仅仅是从地球科学的二级学科拓展到地球科学的一级学科, 更重要的是其研究内容在广度和深度上均发生了实质性的变化: 更加关注生物圈在不同尺度上对地球系统的作用; 在传统古生物学注重记录的基础上, 更加关注作用的过程和机制。

4 有待突破的分支学科和相关领域

地球生物学作为一个备受人们关注的新兴学科, 有待突破的分支学科和研究领域很多。在此重点讨论在为地球系统科学服务中, 地球生物学需突破的一些重要方面。

4.1 分子地球生物学(molecular geobiology)——追溯生命之树和全球环境的分子记录

分子地球生物学是美国国家研究理事会NRC(2000)创用的词, 意指分子生物学、分子古生物学和地球科学相结合的研究^[4]。研究对象是生物分子(核酸、蛋白质和氨基酸、类脂物、纤维素等)。它对应于生命科学领域的分子生物学。主要研究重点有:

() 生命起源和生物演化的分子记录

包括地学记录和生物学记录两个方面。

地学记录——分子化石: 通过对矿物表面有机反应的研究, 可以了解地球历史早期生物出现之前有机化合物是如何形成的, 为生命起源提供可能的线索。通过沉积岩中地质类脂物分子化石及其同位素组成特征的研究^[16], 可能追溯生命演化中重要新陈代谢过程出现的时间、顺序及其作用^[17~20]。例如, 分子证据表明, 至少在27亿年前, 具有复杂结构的真核细胞生物就可能已经出现^[18], 这比已知的最古老的真核化石早5~6亿年。根据地质类脂物分子化石, 有可能建立生物标志化合物的生命之树^[21], 以验证某些生物学记录(如校准分子钟)等。

当然, 太古代和元古代地质类脂物分子研究所面临的巨大挑战是污染问题。尽管Brocks等人^[18]想尽许多办法来克服污染, 但其结果仍然被一些学者认为可能是污染造成的^[22], 看来这方面的工作还有待更多资料的积累。

生物学记录——分子钟和分子演化树: 由于相当一部分蛋白质分子进化速度具有恒定性, 可以根据生物DNA之间的差异, 对分子演化树的各分支标定时间, 建立起分子钟^[23]。大多数动物的核心进化基因是相同的, 植物亦是如此。根据生物分类单位的基因相似性, 可建立起包含全部生物门类的分子演化树^[24]。

当前的重点是如何将地学记录与生物学记录结合。演化树、分子钟与年代地质学相结合, 并与化石记录中新类别的出现年代相检验, 可建立起包含演化树各主要分支事件的地质年代代表^[25]。从最早的多细胞动物出现到脊椎动物各纲的分化, 都可以一一标识。地质化石和古DNA数据可用来校准分子钟; 分子钟也可以帮助建立其他缺乏丰富化石记录的系统谱系。古DNA和地质类脂物的结合已经开始^[26]。

1) 同第2327页脚注2)

中国学者在早期生命过程^[27~30]和中生代热河生物群^[31~35]等领域积累了大量高水平的国际成果,为校准分子钟提供了重要的地质学和古生物学依据。

() 地球环境变化的分子标志

作为地质历史时期生物有机体遗留下来的有机分子,特别是其中具有生物学意义的分子化石,能精细记录各种不同时间分辨率的全球气候、环境、植被变化信息。当前研究载体已涉及全球变化的诸多关键载体,如海相沉积物^[36~38]、湖泊和泥炭沉积物^[39]、雪冰和冰芯^[40]、黄土-古土壤系列^[41]、洞穴石笋^[42]等。比较典型的例子有海洋沉积物长链烯酮的不饱和度与海水表面温度的定量关系^[43,44],全球性古火灾(如古近纪/白垩纪)的分子标志^[45]等。

当前,人类活动加剧了各类地球环境的变化。在当代环境污染研究中,已明确提出了环境污染的化石生物标志物和人类活动标志物^[46]。前者指化石燃料和沉积物中的分子化石造成的现代环境污染,最典型的例子是海洋中石油泄漏造成的污染。后者指人类在利用这些分子化石过程中所引起的环境污染,如人工合成的DDT、PCB(多氯联苯)、PAH(多环芳烃)等的有机污染。这些有机污染物已影响到了大气圈、水圈(冰冻圈)、生物圈和土壤圈,有关这些污染源的形成功和消除都离不开对分子化石本身地球化学性质的研究。另外,这些环境污染物通过食物链对不同生物的影响过程和机理,也是分子地球生物学和生态学的一项研究内容。当然,这些工作也都是环境科学、地球化学等学科的重要研究内容。

4.2 地球微生物学(geomicrobiology)——探索全球变化过程中生态系统底层的状况和作用

在国际上,传统古生物学的研究工作主要集中在真核生物方面。例如,显生宙 5 次生物集群灭绝事件主要是根据地层中的真核生物(主要是动物化石)得出的结论。如果从生态系统来考虑的话,过去的工作仅涉及到生态系统上层的一小部分成员,目前还缺乏对生态系统底层的大部分成员的系统研究工作。如果从现行的生命构成来看,在古细菌、真细菌和真核生物三大类群中,过去的工作几乎没有或很少涉及前两大类。但恰恰是这些地球微生物,对全球变化以及地球表层系统起着重要乃至关键的作用,是地球生命的支持系统^[47~53]。因此,要对地质历史时期生态系统和全球变化做全面的了解,必须开展生态系统底层——地球微生物(也称地微生物)的研究^[54,55]。

当前人们关注的关键科学问题有:不同背景条件下微生物群落维持的机制,包括其能量来源、生长方式等;微生物的多样性;微生物之间的相互作用;微生物与宏体生物之间的相互作用等。例如,在富有机质沉积物附近的砂岩中(如白垩纪砂页岩中),一些异氧厌氧细菌主要靠有机物提供能量;在火成岩缺少有机物的地方,高分异度的微生物主要以 H_2 作为能量来源^[56];而深海沉积物中的微生物群落主要依靠厌氧微生物的新陈代谢和硫酸盐还原作用。当前主要关注的研究领域有:

() 微生物的起源和演化

有关微生物分子演化树各节点出现的时间还远未查明,目前备受人们关注的是蓝细菌、硫酸盐还原菌、甲烷菌等强烈影响地球其他圈层的微生物。生命科学家主要从分子钟来推算。地球科学家主要从微生物的形态学^[57]、沉积组构(如叠层石)^[58]、碳和硫同位素^[59]、分子化石^[18]等开展研究。就形态学来说,有两个问题需慎重:一是如何把微生物个体与物理、化学作用形成的有机体区分开;二是如何进一步从形态上把生物学工作提升到生理学上,以便区分不同生理功能的微生物^[60]。这对地球生物学的研究至关重要。例如,一般细菌与营光合作用蓝细菌的区分,可以探讨产氧光合作用问题。值得注意的是,同位素^[58]和分子化石方面^[18]的重要进展,不仅对不同微生物的起源提供重要线索,也为生命早期的微生物地球化学过程研究提供了切入点。值得注意的是,作为当代海洋主要生产力的三大微生物类群(颗石藻、硅藻、沟鞭藻)^[61],其起源的时间和机制也还不完全清楚,它们的起源与环境条件的关系更是个谜。

() 全球生物危机期间的微生物状况和作用

已引起人们关注的是,在一些生物集群灭绝期或期后,出现了钙质微生物岩(microbialite)或微生物的繁盛,如志留纪/奥陶纪、晚泥盆世弗拉期/法门期、三叠纪/二叠纪界线等。这些微生物岩为研究地球微生物生态系统提供了窗口。钙质微生物岩主要由各种微生物席(microbial mats)捕获沉积物或直接使矿物沉淀而形成,这类岩石在前寒武纪时期曾经很常见,多样性高。然而,随着寒武纪多细胞生物的辐射演化,动物对微生物席的破坏使钙质微生物岩在显生宙剧减^[62]。很有意义的是,在显生宙重大地史转折期,在一些动物集群灭绝的同时或期后,这些钙质微生物岩又大量出现,如早三叠世^[63,64]、晚泥盆世

[65]、晚奥陶世 [62]等。这些钙质微生物岩被认为是环境变化的标志 [66]，对地史重大转折期生物危机发生时的特殊生态系统的研究具有重要意义。因此，与动物集群灭绝相伴的这些微生物岩受到人们的关注，它们是研究地球微生物的重要载体。

() 微生物对全球气候和环境变化的响应和反馈

由不同生物组成的生态系统对全球或区域气候环境变化的响应和反馈并非千篇一律，而在时间、空间和强度上都存在一定的差异。仅就强度而言，地球微生物对突变事件的响应可能与其他生物有所不同。在陆地生态系统中，微生物对突变气候的响应可能与植被不同。地球微生物对气候、环境变化的响应直接关系到陆地风化作用、碳循环等一系列全球性的重大地球科学问题 [67]，进而又反馈气候环境的变化。目前，植被与气候变化的相关性备受人们的关注 [68~70]，而有关微生物与气候、环境变化的相互关系目前还知之甚少。

() 极端环境微生物

近年来已取得突出的进展。随着大洋钻探研究计划、冰川和极地的科学考察以及大陆超深钻的实施，特别是由于微生物学家与地质学家联合发展了能避免外部微生物污染的采样方法 [71]，各种极端环境下微生物的陆续发现 [56,72,73]，使生物圈的范畴在不断扩大，由空中到地下 [54]、由冰川 [74,75]到热泉喷口 [76,77]、由深海和深湖 [78]到深部地壳 [79~81]，等等。极端环境微生物正在以崭新的面貌诠释着生命的含义，同时也改变了人们的思维方式。了解极端环境下的微生物种类，有助于地质学家更加清晰地认识极端环境下的地质和地球化学过程。极端环境微生物的研究也为生物学家探索生命的起源、发现新的微生物代谢途径和生存对策等提供了前所未有的机遇 [54]。例如：利用有机大分子(干酪根)的微生物代谢作用 [50]，利用 H_2 作为能源的微生物 [56]，厌氧环境微生物对甲烷的氧化作用 [49]，一些新的微生物的发现和分离 [82]，等等。

4.3 地球生态学(geocology)和地球生理学(geophysiology)——诠释生物与环境协同演化的机制和过程

地球生态学由地貌学家Troll [83]提出，起初用来描述自然地理学和生态学的联系，主要研究生态系统的结构和功能，重视环境中生物与非生物因子之间的复杂作用 [84]。至今，发展相对比较成熟的地球

生态学强调当代生物圈(特别是人类)与作为其生存环境的地球系统的相互作用，以及对未来的预测及对策 [85]。其中，人类干预下的水资源、土地资源等特别受到地球生态学家的关注。Lovelock [11]较早使用地球生理学这个术语，把地球看成是由生物界和物理界紧密耦合的系统进行研究 [86]，特别强调把地球当作一个有机体，研究这个有机体中的生物与地球的相互作用 [87~89]。

地球生态学和地球生理学就是着眼于生物与地球环境的相互作用。地球自从有了生命，生物与环境就成为一对互相制约、互相促进的共同体。生物界的每一次突变都与地球环境的重大变化密切相关 [90]。例如，新元古代后期多细胞生物群的繁盛，是在地球从冰冻的雪球状态解冻之后；寒武纪初的生命大爆发，其先决条件之一是当时大气与海洋具备了足够的氧气；古生代、中生代之交剧烈的全球变化与生物大灭绝同时发生；中生代、新生代之交恐龙的灭绝，则与外星体撞击造成的环境剧变有关。

在生物与地球环境的相互作用、协同演化过程中，当前研究比较薄弱的环节是生物对地球系统的作用 [60]。生物的风化侵蚀作用对水圈、土壤圈的影响 [91,92]，生物活动对大气圈的影响 [93]，生物沉积和成岩作用对岩石圈的影响 [94,95]，等等。例如，一些微生物利用金属元素来获得能量，就像人类需要氧气一样。这方面工作的深入必然涉及其机制问题，它是地球生理学的重要工作。因为微生物在其中起了关键作用 [96]，它又是地球微生物学的内容。而机制的深入有待于分子水平上工作的突破，例如对金属元素起氧化或还原作用的微生物某种基因的筛选等¹⁾，所以它又是分子地球生物学的内容。因此，生物对地球系统的作用需要这些二级学科的联合攻关才能深入，这可能也是这方面研究相对滞后的原因之一。当前，这方面的一些工作已进行了一些定量化的数学模拟工作，如生物对碳循环的影响，体现了生物学、地球科学和数学这三大基础学科的结合。

在地球生理学研究，值得注意的是生物膜(biofilms)的工作 [97~99]，生物膜中的微生物重量是所有宏体生物的1000倍。一些生物对矿物的作用是通过生物膜起作用的 [98]。全球板块构造的形成、地壳的演化都直接或间接地与生物膜作用有关 [100,101]。生物

1) Cervini-Silva J, Fakra S, Gilbert B, et al. A molecular approach towards understanding the biogenic formation of CeO_2 and its interactions with biomolecules. Abstract of AGU Fall Meeting, 2005. 126

膜的作用还使一些浮游生物能发生自沉积作用 (self-sedimentation), 在地质体中形成一些富有机质纹层. 它一方面避免了动物对它的捕食和破坏, 另一方面通过自沉积作用改变生物地球化学循环、生态动力学结构等. 因此, 地质历史时期生物膜以及与之相关的自沉积作用的识别对全球重大地质事件的研究具有重要意义^[102]. 当前, 生命科学领域已经对生物膜开展了广泛的研究^[103,104], 但在地球科学领域, 这才刚刚开始.

另外, 在地球环境演化过程中, 生物多样性的变化、生态动力学等问题正引起人们广泛关注. 在现代生命科学领域进行了大量的生物多样性和生态动力学工作, 但在地质历史时期, 除了几大生物集群灭绝外^[105], 有关生物多样性的变化都是一些粗线条的工作, 其生态动力学原因还知之甚少. 例如, 在化石记录中, 在不同环境背景、不同生物多样性条件下, 作为生物与生物之间相互作用重要形式之一的捕食者与被捕食者的关系 (predator-prey) 及其对生态系统和生物演化的影响, 虽已引起注意^[106], 但还需系统和深入.

5 面临的挑战

由地球科学和生命科学交叉所形成的地球生物学给传统古生物学的发展提供了机遇, 同时也给传统古生物学的研究带来了巨大的挑战^[107].

5.1 传统古生物学与生命科学的联合与突破

如前所述, 传统古生物学关注地质记录, 即注重“摆事实、讲故事”, 但“故事”中的道理难以讲透, 即对机制问题的研究不够深入. 现代生命科学却非常关注机制问题, 是一个能够讲透“道理”的学科. 另一方面, 地质历史上生命系统的研究可以为现代生命科学的研究提供历史事实、演化记录等信息. 探讨生物与环境协同演化的问题则必须建立在生命科学与地球科学的联合上, 尽管生命科学可以依据分子钟建立分子演化树, 但地质历史时期环境条件的变化必须依靠地学记录来解决. 因此, 如何整合地球科学和生命科学领域的成熟技术和方法^[108], 实现地球生物学与生命科学的真正交叉、融合, 需要两个领域的科学家不断进行自觉的碰撞. 这些都需要时间和过程, 毕竟地球科学和生命科学这两个领域的研究在时间尺度上存在巨大差异, 它们有着不同的目标, 其研究方法也很少有雷同^[14]. 特别是, 当前生命科学

领域的重大进展, 例如, 基因水平转移、生命之树 (tree of life) 或生命之环 (ring of life) 以及极端环境的生命系统等, 将为地球生物学在相关领域的突破创造条件.

当然, 更高层次上的多学科交叉联合也将促使地球生物学更深入的发展, 如生命科学、地球科学与数学这三大基础学科的结合将促进地球生物学的定量化研究, 这些工作也才刚刚开始, 这种大学科的联合还需更长时间的积累.

5.2 地球生物学和地球化学、地球物理学的联合

地球生物学要为地球系统科学服务, 需要与地球化学、地球物理学这些一级学科联合^[7,109~112]. 而且, 生命运动本身包括力学、物理和化学运动, 地球生物学又必须与地球动力学、地球物理学和地球化学联合. 地球生物学所要研究的生物与地球环境协同演化, 其研究深度、广度绝非古生物学这一单一学科所能解决的. 就拿产氧光合作用来说^[60], 传统古生物学主要关注与产氧光合作用有关的蓝细菌是如何和何时起源的, 地质体中最早的蓝细菌记录是什么 (形态学、沉积构造、同位素或分子化石) 等问题. 而地球生物学则更加关注在产氧光合作用出现以后, 大气圈和海洋的氧化-还原状态是如何发生改变的, 它需要在传统古生物学研究的基础上, 结合其他能够反映大气圈和海洋氧化-还原状态的地质学、地球化学和地球物理学记录, 这样才能探讨生物圈对地球其他圈层的作用、影响和反馈.

与地球化学、地球物理学相比, 地球生物学的理论框架还未真正建立. 如何跳出传统研究的思想框架, 从地球系统科学的视野来研究地球生物学, 还需要一个较长期的积累过程. 当前地球动力学的发展, 也将进一步促进地球生物学的动力学过程研究.

5.3 形态学与分子水平的结合

现代分子生物学的发展成了生命科学的主流. 目前涌现出的大量研究成果表明, 分子生物学对生命科学的意义就像了解原子结构对物理学一样重要. 虽然地球科学家也正在开展分子古生物学 (古 DNA、地质类脂物等) 的工作, 但要传统形态学工作与分子水平工作相结合, 还需要时间. 即使在形态学方面, 虽然积累了大量资料, 但许多古生物资料是零散的. 如何集成传统古生物学的资料, 为地球生物学的发展服务, 是迫切需要我们解决的问题. 在分子古生物

学内部,古DNA和地质类脂物的结合也才刚刚开始[25]。

致谢 感谢老一辈古生物学家在开拓和发展中国地球生物学各分支学科所付出的艰辛努力,他们在引领中国古生物学的国际地位、培养国际水平的人才队伍方面做出了突出的贡献,这些工作为形成中国地球生物学领域的完整学科体系奠定了坚实的基础。感谢中国国家自然科学基金委员会地球科学部在地球生物学领域所起的引领和导向作用。本文思想(如生命运动与地球生物学及其学科分类位置等)得益于与张本仁院士(化学运动与地球化学)、金振民院士(力学、物理学运动与地球动力学、地球物理学)的多次交流与深入讨论以及中国地质大学(武汉)地球生物学系所进行的多次学科建设研讨会。感谢两位审稿专家对本文提出的建设性意见。本文受中国国家杰出青年科学基金(批准号:40525008)、中国国家自然科学基金重点项目(批准号:40232025)和中国国家自然科学基金创新研究群体项目资助。

参 考 文 献

- 殷鸿福,杨逢清,谢树成,等.生物地质学.武汉:湖北科学技术出版社,2004.264
- Pennisi E. Geobiologists: As diverse as the bugs they study. *Science*, 2002, 296: 1058—1060[DOI]
- Knoll A H, Hayes J M. Geobiology: Articulating a concept. In: Lane R H, Lipps J, Steining F F, et al, eds. *Paleontology in the 21st Century*. Frankfurt, International Senckenberg Conference. Kleine Senckenberg, 1997, 25: 105—108
- Knoll A H, Hayes J M. Geobiology: Problems and Prospects. In: Lane R H, Steining F F, Kaesler R L, et al, eds. *Fossils and the Future: Paleontology in the 21st Century*. Senckenberg-Buch, 2000, 74: 149
- 殷鸿福. 生物地质学. *地球科学进展*, 1994, 9(6): 79—82
- Banfield J F, Marshall C R. Genomics and the geosciences. *Science*, 2000, 287: 605—606[DOI]
- Cutter G A. Biogeochemistry: Now and into the future. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 191—198[DOI]
- Naylor L A. The contributions of biogeomorphology to the emerging field of geobiology. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 35—51[DOI]
- Hutton J. An investigation of the laws observable in the composition, dissolution and restoration of Land upon the Globe. *Trans R Soc Edinb*, 1788, 1(): 413—429
- Bass Becking L G M. *Geobiologie of inleiding tot de milieukunde*. The Hague: W P Van Stockum & Zoon. 1934
- Lovelock J E. Geophysiology: A new look at earth science. *Bull Am Meteorolog Soc*, 1986, 67: 392—397
- Committee on Facilitating Interdisciplinary Research, Committee on Science, Engineering and Public Policy. *Facilitating Interdisciplinary Research*. Washington D C: The National Academies Press, 2004. 142—143
- 陈宜瑜,陈泮勤,葛全胜,等.全球变化研究进展与展望. *地学前缘*, 2002, 9(1): 11—18
- Noffke N. Geobiology—a holistic scientific discipline. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 1—3[DOI]
- 毕思文. *地球系统科学*. 北京: 科学出版社, 2003. 389
- 王红梅,谢树成,赖旭龙,等.分子地质微生物学研究方法述评. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 664—670
- Summons R E, Jahnke L L, Hope J M, et al. 2-Methylhopanoids as biomarkers for cyanobacterial oxygenic photosynthesis. *Nature*, 1999, 400: 554—557[DOI]
- Brocks J J, Logan G A, Buick R, et al. Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science*, 1999, 285: 1033—1036[DOI]
- Olcott A N, Sessions A, Corsetti F A, et al. Biomarker evidence for photosynthesis during Neoproterozoic glaciation. *Science*, 2005, 310: 471—474[DOI]
- Knoll A H. A new molecular window on early life. *Science*, 1999, 285: 1025—1026[DOI]
- Brocks J J, Pearson A. Building the Biomarker Tree of Life. *Rev Mineral Geochem*, 2005, 59: 233—258[DOI]
- Kopp R E, Kirschvink J L, Hilburn I A, et al. The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *Proc Natl Acad Sci*, 2005, 102: 11131—11136[DOI]
- Cooper A, Grassly N, Rambaut A. Using molecular data to estimate divergence times. In: Briggs D E G, Crowther P R, eds. *Palaeobiology*. Oxford: Blackwell Publishing, 2001. 532—534
- Wang Y C, Kumar S, Blair H S. Divergence time estimates for the early history of animal phyla and origin of plants, animals and fungi. *Proc R Soc Lond B*, 1999, 266: 163—171[DOI]
- Ayala F J, Rzhetsky A. Origin of the metazoa phyla: molecular clocks confirm paleontological estimates. *Proc Natl Acad Sci*, 1998, 95: 605—611
- Coolen M J L, Hopmans E C, Rijpstra W I C, et al. Evolution of the methane cycle in Ace Lake (Antarctica) during the Holocene: response of methanogens and methanotrophs to environmental change. *Org Geochem*, 2004, 35: 1151—1167[DOI]
- Zhu M, Yu X. A primitive fish close to the common ancestor of tetrapods and lungfish. *Nature*, 2002, 418: 767—770[DOI]
- Shu D, Conway Morris S, Zhang Z J, et al. A new species of *Yunnanozoa* with implications for Deuterostome evolution. *Science*, 2003, 299: 1380—1384[DOI]
- Dong X, Donoghue P C J, Cheng H, et al. Fossil embryos from the Middle and Late Cambrian period of Hunan, south China. *Nature*, 2004, 427: 237—240[DOI]
- Chen J, Bottjer D J, Oliveri P, et al. Small bilaterian fossils 40 to 55 million years before the Cambrian. *Science*, 2004, 305: 218—222[DOI]
- Wang Y, Hu Y, Meng J, et al. A fossilized Meckel's cartilage in two Cretaceous mammals and origin of the mammalian middle ear. *Science*, 2001, 294: 357—361[DOI]
- Sun G, Qiang J, Dilcher D L, et al. Archaeofractaceae, a new basal angiosperm family. *Science*, 2002, 296: 899—904[DOI]
- Luo Z, Ji Q, Wible J R, et al. An Early Cretaceous tribosphenic mammal and metatherian evolution. *Science*, 2003, 302: 1934—1940[DOI]

- 34 Xu X, Zhou Z, Wang X, et al. Four-winged dinosaurs from China. *Nature*, 2003, 421: 335—340[DOI]
- 35 Zhou Z, Zheng S. The missing link in Ginkgo evolution. *Nature*, 2003, 423: 821—822[DOI]
- 36 Kienast M, Steinke S, Stattegger K, et al. Synchronous tropical south China Sea SST change and Greenland warming during deglaciation. *Science*, 2001, 291: 2132—2134[DOI]
- 37 Hinrichs K, Hmelo L R, Sylva S P. Molecular fossil record of elevated methane levels in late Pleistocene coastal waters. *Science*, 2003, 299: 1214—1217[DOI]
- 38 Jenkyns H C, Forster A, Schouten S, et al. High temperatures in the Late Cretaceous Arctic Ocean. *Nature*, 2004, 432: 888—892[DOI]
- 39 Huang Y, Street-Perrott F A, Metcalfe S E, et al. Climate change as the dominant control on glacial-interglacial variations in C₃ and C₄ plant abundance. *Science*, 2001, 293: 1647—1651[DOI]
- 40 Xie S, Yao T, Kang S, et al. Geochemical analysis of a Himalayan snowpit profile: implication for atmospheric pollution and climate. *Org Geochem*, 2000, 31: 15—23[DOI]
- 41 Zhang Z, Zhao M, Lu H, et al. Lower temperature as the main cause of C₄ plant declines during the glacial periods on the Chinese Loess Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 214: 467—481[DOI]
- 42 Xie S, Yi Y, Huang J, et al. Lipid distribution in a subtropical southern China stalagmite as a record of soil ecosystem response to paleoclimate change. *Quat Res*, 2003, 60: 340—347[DOI]
- 43 Sachs J P, Lehman S J. Subtropical North Atlantic temperatures 60,000 to 30,000 years ago. *Science*, 1999, 286: 756—759[DOI]
- 44 Sachs J P, Anderson R F, Lehman S J. Glacial surface temperatures of the southeast Atlantic Ocean. *Science*, 2001, 293: 2077—2079[DOI]
- 45 Venkatesan M I, Dahl J. Organic geochemical evidence for global fires at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 1989, 338: 57—60[DOI]
- 46 Eganhouse R P. *Molecular Markers in Environmental Geochemistry*. Washington D C: American Chemical Society, 1997. 1—415
- 47 Ehrlich H I. *Geomicrobiology*. New York: Marcel Dekker, 2002
- 48 Banfield J F, Nealson K H. *Geomicrobiology: Interactions Between Microbes and Minerals*. Review in mineralogy. Washington D C: Mineralogical Society of America, 1997
- 49 Orphan V J, House C H, Hinrichs K, et al. Methane-consuming archaea revealed by directly coupled isotopic and phylogenetic analysis. *Science*, 2001, 293: 484—487[DOI]
- 50 Petsch S T, Eglinton T I, Edwards K J. ¹⁴C-dead living biomass: evidence for microbial assimilation of ancient organic carbon during shale weathering. *Science*, 2001, 292: 1127—1131[DOI]
- 51 Kasting J F, Siefert J L. Life and the evolution of Earth's atmosphere. *Science*, 2002, 296: 1066—1068[DOI]
- 52 Torsvik V, Øvreås L, Thingstad T F. Prokaryotic diversity—magnitude, dynamics and controlling factors. *Science*, 2002, 296: 1064—1066[DOI]
- 53 Michaelis W, Seifert R, Nauhaus K, et al. Microbial reefs in the Black Sea fueled by anaerobic oxidation of methane. *Science*, 2002, 297: 1013—1015[DOI]
- 54 Krumholz L R. Microbial communities in the deep subsurface. *Hydrogeol J*, 2000, 8: 4—10
- 55 Xie S, Pancost R D, Yin H, et al. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. *Nature*, 2005, 434: 494—497[DOI]
- 56 Stevens T O, McKinley J P. Lithotrophic microbial ecosystems in deep basalt aquifers. *Science*, 1995, 270: 450—454
- 57 Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3235-million-year-old volcanogenic massive sulphide. *Nature*, 2000, 405: 676—679[DOI]
- 58 Allwood A C, Walter M R, Kamber B S, et al. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, 2006, 441: 714—718[DOI]
- 59 Shen Y, Buick R, Canfield D E. Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archaean era. *Nature*, 2001, 410: 77—81[DOI]
- 60 Knoll A H. The geological consequences of evolution. *Geobiology*, 2003, 1: 3—14[DOI]
- 61 Falkowski P G, Katz M E, Knoll A H, et al. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 2004, 305: 354—360[DOI]
- 62 Sheehan P M, Harris M T. Microbialite resurgence after the Late Ordovician extinction. *Nature*, 2004, 430: 75—78[DOI]
- 63 Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, et al. Permian-Triassic boundary sections from shallow-marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, south China: Implications for oceanic conditions associated with the end-Permian extinction and its aftermath. *Palaio*, 2003, 18: 138—152
- 64 Pruss S B, Corsetti F A, Bottjer D J. The unusual sedimentary rock record of the Early Triassic: A case study from the southwestern United States. *Palaeoogeogr Palaeclimatol Palaeoecol*, 2005, 222: 33—52[DOI]
- 65 Stephens N P, Sumner D Y. Famennian microbial reef facies, Napier and Oscar Ranges, Canning Basin, western Australia. *Sedimentology*, 2003, 50: 1283—1302[DOI]
- 66 Riding R, Liang L. Geobiology of microbial carbonates: metazoan and seawater saturation state influences on secular trends during the Phanerozoic. *Palaeoogeogr Palaeclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 101—115[DOI]
- 67 Miltner A, Richnow H, Kopinke F, et al. Assimilations of CO₂ by soil microorganisms and transformation into soil organic matter. *Org Geochem*, 2004, 35: 1015—1024[DOI]
- 68 Hallett T B, Coulson T, Pilkington J G, et al. Why large-scale climate indices seem to predict ecological processes better than local weather. *Nature*, 2004, 430: 71—75[DOI]
- 69 Jennerjahn T C, Ittekkot V, Arz H W, et al. Asynchronous terrestrial and marine signals of climate change during Heinrich events. *Science*, 2004, 306: 2236—2239[DOI]
- 70 Hughen K A, Eglinton T I, Xu L, et al. Abrupt tropical vegetation response to rapid climate changes. *Science*, 2004, 304: 1955—1959[DOI]
- 71 Fredrickson J K, Phelps T J. Subsurface drilling and sampling. In: Knudsen G, Stetzenbach L, McInerney M M, et al., eds. *Manual of Environmental Microbiology*. Washington D C: ASM Press, 1996. 526—540
- 72 Edwards K J, Bond P L, Gihring T M, et al. An archaeal iron-oxidizing extreme acidophile important in acid mine drainage. *Science*, 2000, 287: 1796—1799[DOI]
- 73 Walker J J, Spear J R, Pace N R, et al. Geobiology of a microbial endolithic community in the Yellowstone geothermal environment.

- Nature, 2005, 434: 1011—1014[DOI]
- 74 Priscu J C, Adams E E, Lyons W B, et al. Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica. *Science*, 1999, 286: 2141—2144[DOI]
- 75 Karl D M, Bird D F, Björkman K, et al. Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok, Antarctica. *Science*, 1999, 286: 2144—2147[DOI]
- 76 Reysenbach A, Shock E. Merging genomes with geochemistry in hydrothermal ecosystems. *Science*, 2002, 296: 1077—1082[DOI]
- 77 Reysenbach A-L, Liu Y, Banta A B, et al. A ubiquitous thermoacidophilic archaeon from deep-sea hydrothermal vents. *Nature*, 2006, 442: 444—447[DOI]
- 78 Fisk M R, Giovannoni S J, Thorseth I H. Alteration of oceanic volcanic glass: textural evidence of microbial activity. *Science*, 1998, 281: 978—980[DOI]
- 79 Sharma A, Scott J H, Cody G D, et al. Microbial activity at gigapascal pressures. *Science*, 2002, 295: 1514—1516[DOI]
- 80 Cowen J P, Giovannoni S J, Kenig F, et al. Fluids from aging ocean crust that support microbial life. *Science*, 2003, 299: 120—123[DOI]
- 81 Zhang G, Dong H, Xu Z, et al. Microbial diversity in ultra-high-pressure rocks and fluids from the Chinese Continental Scientific Drilling Project in China. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71: 3213—3227[DOI]
- 82 Bräuer S L, Cadillo-Quiroz H, Yashiro E, et al. Isolation of a novel acidiphilic methanogen from an acidic peat bog. *Nature*, 2006, 442: 192—194[DOI]
- 83 Troll C. Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology-A terminological study. *Geoforum*, 1971, 8: 43—46
- 84 Huggett R J. *Geocology: An Evolutionary Approach*. London: Routledge, 1995. 320
- 85 Trofimov V T. Ecological geology-a novel branch of geological sciences. *Earth Sci Front*, 2001, 8: 27—35
- 86 Lovelock J E. Geophysiology, the science of Gaia. *Rev Geophys*, 1989, 27: 215—222
- 87 Lovelock J E, Kump L R. Failure of climate regulation in a geophysiological model. *Nature*, 1994, 369: 732—734[DOI]
- 88 McMenamin M A S, McMenamin D L S. *Hypersea: Life on Land*. New York: Columbia Uni Press, 1996
- 89 Volk T. *Gaia's Body: Towards a Physiology of Earth*. New York: Copernicus/Springer Verlag, 1998
- 90 张弥曼, 陈旭. 20世纪古生物学的重大进展及21世纪战略重点. *地球科学进展*, 2001, 16(5): 624—628
- 91 Sterflinger K. Fungi as geological agents. *Geomicrobiol J*, 2000, 17: 97—124[DOI]
- 92 Burford E P, Fomina M, Gadd G M. Fungal involvement in bioweathering and biotransformation of rocks and minerals. *Mineral Mag*, 2003, 67: 1127—1155[DOI]
- 93 Berner R A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 2003, 426: 323—326[DOI]
- 94 Gorbushina A A, Boettcher M, Brumsack H-J, et al. Biogenic forsterite and opal as a product of biodeterioration and Lichen Stromatolite formation in table mountain systems (Tepuis) of Venezuela. *Geomicrobiol J*, 2001, 18: 117—132[DOI]
- 95 Visscher P T, Stolz J F. Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 87—100[DOI]
- 96 Markoš A. The ontogeny of Gaia: the role of microorganisms in planetary information network. *J Theor Biol*, 1995, 176: 175—180[DOI]
- 97 Brehma U, Gorbushina A, Mottershead D. The role of microorganisms and biofilms in the breakdown and dissolution of quartz and glass. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 219: 117—129[DOI]
- 98 Decho A. Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms. In: Riding R, Awramik S M, eds. *Microbial Sediments*. Berlin: Springer, 2000. 9—15
- 99 Arp G, Reimer A, Reitner J. Photosynthesis-induced biofilm calcification and calcium concentrations in phanerozoic oceans. *Science*, 2001, 292: 1701—1704[DOI]
- 100 Anderson D L. The Earth as a planet: Paradigms and paradoxes. *Science*, 1984, 223: 347—354[DOI]
- 101 Krumbein W E, Stal L J. Geophysiology of marine cyanobacterial mats and biofilms. *Kieler Meeresforschungen*, 1991, 8: 137—145
- 102 Grimm K A, Lange C B, Gill A S. Self-sedimentation of phytoplankton blooms in the geologic record. *Sediment Geol*, 1997, 110: 151—161[DOI]
- 103 Ramey B E, Koutsoudis M, von Bodman S B, et al. Biofilm formation in plant-microbe associations. *Curr Opin Microbiol*, 2004, 7: 602—609[DOI]
- 104 Fux C A, Costerton J W, Stewart P S, et al. Survival strategies of infectious biofilms. *Trends Microbiol*, 2005, 13: 34—40[DOI]
- 105 Jin YG, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 2000, 289: 432—436[DOI]
- 106 Kelley P H, Kowalewski M, Hansen T A. *Predator-Prey Interactions in the Fossil Record*, Topics in Geobiology Series. New York: Kluwer academic/Plenum Publishers, 2003. 1—464
- 107 周忠和, 骆永明, 董云社, 等. 浅谈中国地球环境与生命过程研究中的一些科学问题. *科学通报*, 2005, 50(2): 195—200
- 108 汪品先. 中国的地球系统科学研究向何处去. *地球科学进展*, 2003, 18(6): 837—851
- 109 Papida S, Murphy W, May E. Enhancement of physical weathering of building stones by microbial populations. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2000, 46: 305—317[DOI]
- 110 Gorbushina A A, Krumbein W E, Volkmann M. Rock surfaces as life indicators: new ways to demonstrate life and traces of former life. *Astrobiology*, 2002, 2: 203—213[DOI]
- 111 Tsuda A, Takeda S, Saito H, et al. A mesoscale iron enrichment in the Western Subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom. *Science*, 2003, 300: 958—961[DOI]
- 112 汪品先. 探索大洋碳库的演变周期. *科学通报*, 2003, 48(21): 2216—2227

(2006-04-29 收稿, 2006-08-16 接受)