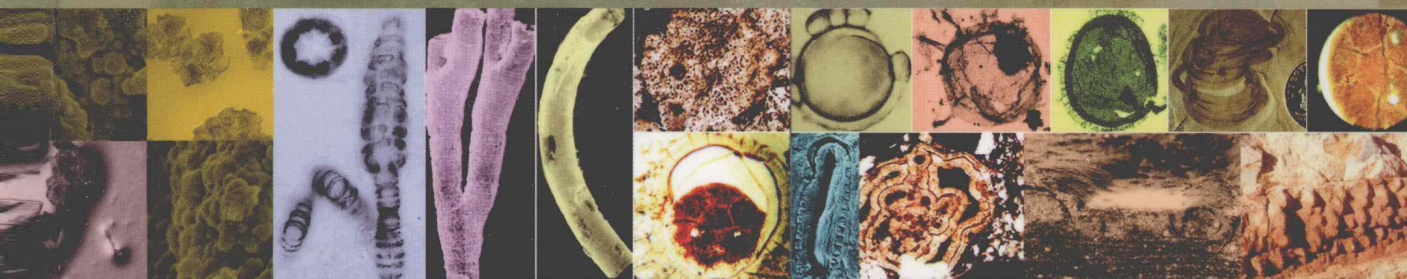


地球生物学系列

地球生物学

生命与地球环境的相互作用和协同演化



谢树成 殷鸿福 史晓颖 等 / 著



科学出版社

地球生物学系列

地球生物学

生命与地球环境的相互作用和协同演化

谢树成 殷鸿福 史晓颖 等 / 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了地球科学与生命科学交叉结合形成的新学科——地球生物学在一些关键领域的重要研究进展,着重论述了生命与环境之间的相互作用和协同演化。具体内容分为三部分,第一部分主要是地球生物学的学科体系和基本任务;第二部分涉及地球生物学的若干重要分支学科,包括分子地球生物学、地球微生物学和地球生态学(礁生态系、菌藻生态系和热带雨林生态系);第三部分涉及重大地质突变期(前寒武纪、显生宙最大生物灭绝期和当代)的地球生物学研究。每部分内容在综述相关领域的国际现状和进展基础上,介绍著者们的研究成果。本书既有地球生物学方面的实际研究例子,也有国际最新研究成果的系统总结,是目前国内涉及地球生物学各分支比较广的专著。

本书适用于古生物学、沉积学、地层学、地质微生物学、分子有机地球化学、生物地球化学、地质生态学等领域的工作者,是大专院校相关专业师生的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

地球生物学:生命与地球环境的相互作用和协同演化/谢树成等著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030201-4

I. ①地… II. ①谢… III. ①地球科学-研究②生命科学-研究 IV. ①P②Q1-0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 019764 号

责任编辑:胡晓春 / 责任校对:何艳萍

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 3 月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—2 000 字数:527 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

两个多月前，在中国地质大学（北京）国际交流中心开会，谢树成教授把这本书的初稿复印件送给我，一眼看到《地球生物学：生命与地球环境的相互作用和协同演化》的醒目标题，引起了我的注意。谢教授邀我写“序”，我说这么厚厚的大作要读多长时间啊，一时是写不出来的，他说不忙，出版还有几个月的。我答应要花时间读一读。

我一般对书的前言总是要看看的，想知道作者写书时有什么想法和打算。本书前言不长，值得一看，它简要论述了地球生物学的研究对象，以及作为一门交叉学科十多年来在我国的诞生和发展概况。作者们在前言中指出，本书着重“对相关领域的国内外研究情况进行初步的总结，涉及地球生物学的学科体系、分子地球生物学、地球微生物学、典型生态系统（礁生态系统、菌藻生态系统和热带雨林生态系统）的地球生物学过程以及重大地质突变期（前寒武纪、显生宙最大生物灭绝期和当代）的地球生物学过程”。作者们还指出，本书是“中国地质大学地层学与古生物学科多年来集体研究成果的总结”。

本书的主体共七章，分别对上述主题进行详细论述，从中可以看到地球科学长期以来关注的一些重大问题以及当前热点问题国内外研究的新进展。

国外对地球生物学（Geobiology）的发展有过这样的描述：不到十年光景，定义了一门新学科，发表了研究结果，建立了研究机构，出版了专门期刊。试从2005年往前推十年，那就是上世纪90年代初。当时，正是以殷鸿福院士为首的团队在1994年发文论述“生物地质学”，决心引导地层学和古生物学“走学科交叉的道路”。他们一系列的研究工作导致2004年出版《生物地质学》专著。本书的出版标志着这一团队在创新的历程中又迈上了一个新台阶。从这些事实又可以看出，中国科学家在“地球生物学”的开拓过程中是整个国际团队的一部分，他们同是开拓者。

地层学和古生物学是地质学的基础分支学科，在中国地质学发展中一直是走在最前面的代表性学科，并赢得崇高的国际地位。中国地质大学的团队就是这方面一支生气勃勃的主力军。他们决心引导地层学和古生物学“走学科交叉的道路”是别有一种眼光的，我特别钦佩。地球生物学是地球科学与生命科学的融合，其使命是研究当代地球科学面临的，甚至可以说是长期以

来萦绕在地球科学家脑海中的重大科学问题——生命与地球环境的相互作用和协同演化。

地球生物学把地球视为一个系统，而生命是这个系统的组成部分。上世纪 80 年代中期提出地球系统科学概念，受到科学界广泛关注。人们自然关心地球系统科学是否应当被看作一门独立的学科？如是独立学科，在学科分类上的归属应当如何？它同地球科学的关系又是什么？地球系统科学概念的提出，对关于地球的科学的发展，其意义远远超过建立一门独立学科。我曾在多个场合表示过下述的看法，也可能认识不全面，地球系统科学作为整体观和方法论同地球科学各学科的互动是当代地球科学发展的特征，地球系统科学不是地球科学各分支学科的简单加积，也不会取代各学科的独立发展，但以各子系统为研究对象的各分支学科更加重视同其他子系统的相互作用，对各个分支学科已带来了深刻的影响，它的这种渗透作用已经并将继续推动各个分支学科向前发展；但同时也可预期在这积极的互动中推动交叉学科的产生，全球变化科学和地球生物学就是最好的例子。前者是地球系统科学最早提出的关键的科学问题，并特别强调人类活动的影响；后者把生物圈同地球其他圈层联系起来，研究不同空间尺度和时间尺度生物过程与地质过程的耦合。一旦具有自身的研究对象、方法和理论，就构成了一门新的学科。

2010 年 6 月在武汉召开了地球生物学国际研讨会。2011 年的“戈登研究会议”（Gordon Research Conferences）将在本月底在美国加州 Ventura 举行，会议将以地球生物学为主题展开交流和讨论，戈登会议旨在促进生物学、化学和物质科学研究前沿自由讨论和交换想法，在科学界有其独特的地位。我们也知道，2003 年创刊的《Geobiology》期刊的影响因子在 2009 年已达到 2.603。所有这些都从一些侧面反映了地球生物学迅速发展的景象。因此，我相信本书的出版必将进一步推动地球生物学的发展。

陈 松
2011 年 1 月 8 日

前 言

地球生物学 (Geobiology) 是地球系统科学的重要组成部分, 它不是简单的地球上的生物学。地球生物学是研究生命系统与地球环境系统相互作用和协同演化的科学, 是地球科学与生命科学结合形成的交叉学科, 这一新兴学科在国际上正在迅猛发展。地球生物学又是对古生物学的继承和发展。我们在上世纪末已经认识到地层学与古生物学学科不应局限于本学科传统的研究, 而应走学科交叉的道路。多年来, 我们一直在有意识地倡导地球生物学一些分支学科的发展, 如有计划地开展了生物地质学的研究, 相关成果获得了国家自然科学二等奖。近 5 年来, 我们在地球生物学某些新兴领域也已经取得了较突出的成果, 如在地球生物学的关键支撑点——分子地球生物学和地球微生物学等方面的研究成果已经在国际重要刊物 (如《Nature》、《Geology》、《Earth and Planetary Science Letters》等) 上发表; 提出了地球生物学初步的学科体系。我们受国家自然科学基金委员会的委托, 组织了两次“生物与地球环境协同演化”的双清论坛 (2005~2006)。本学科主攻地球生物学的学科团队入选“重大地质突变期生物与环境协同演化”的国家创新研究群体, 以及“生物地质与环境地质”高等学校学科创新引智基地 (111 计划)。近几年, 我们还与中国石油化工股份有限公司合作, 将地球生物学前沿研究与国家目标相结合, 开展了烃源岩形成的地球生物学过程的前期探索。

本书着重总结我们于 2004 年出版的《生物地质学》研究基础上的进一步深入工作, 并对相关领域的国内外研究情况进行初步的总结, 涉及地球生物学的学科体系、分子地球生物学、地球微生物学、典型生态系统 (礁生态系统、菌藻生态系统和热带雨林生态系统) 的地球生物学过程以及重大地质突变期 (前寒武纪、显生宙最大生物灭绝期和当代) 的地球生物学过程。本书是中国地质大学地层学与古生物学科多年来集体研究成果的总结。本书既有地球生物学方面的实际研究例子, 也有国际最新研究成果的系统总结。特别是, 由于地质微生物是地球科学领域的难点, 大部分地质微生物很难像动植物那样, 能够以硬体骨骼形式在地质环境中保存下来, 也难以从形态和结构上分门别类、开展属种水平的研究; 同时, 地质微生物不仅通过食物链向上作用于各类动植物, 而且又通过能量流和物质流直接对地质环境起关键的改造作用, 因此, 本书在强调系统性的基础上, 突出了地质微生物研究的重要性, 全书七章内容均涉及地质微生物的工作。全书各章节具体分工参见目录。全文由谢树成、殷鸿福统一修改和统稿。

地球生物学的工作受到国家自然科学基金委员会杰出青年科学基金项目 (40525008)、重点项目 (40730209, 40930210)、国家创新研究群体项目 (40621002,

40921062) 以及一系列面上项目的资助, 受到了科技部 973 项目 (2011CB808800) 和教育部创新研究团队、新世纪优秀人才计划和高等学校生物地质与环境地质学科创新引智基地 (111 计划, B08030) 等的资助。

在研究和撰写过程中, 得到了孙枢院士、安芷生院士、汪品先院士、戎嘉余院士、陈旭院士、张弥曼院士、王铁冠院士、金振民院士、马永生院士、焦念志教授、金之钧教授等的大力支持和指导。国际同行 Richard Evershed、Richard Pancost、Paul Wignall、Lee Kump、陈中强、石光荣等参与了部分合作研究。在此, 对他们表示衷心的感谢。

本书的完成虽经历了数年的修改, 但仍感粗糙, 只能作为地球生物学领域抛砖引玉的材料。不当之处, 敬请批评指正。

目 录

序

前言

第一章 地球生物学概述	殷鸿福 谢树成 (1)
第一节 形成背景和学科体系	(1)
一、形成背景	(1)
二、学科位置及其与地球科学其他分支学科的关系	(4)
三、地球生物学的分支学科体系	(5)
第二节 国内外研究现状和发展趋势	(6)
一、分子地球生物学	(6)
二、地球微生物学	(9)
三、地球生态学和地球生理学	(13)
四、生物地质学	(14)
五、应用地球生物学	(16)
第三节 研究内容和基本任务	(19)
一、研究内容	(19)
二、基本任务	(20)
三、面临的挑战和机遇	(21)
参考文献	(23)
第二章 地球生命系统与环境系统相互作用的分子记录	(32)
第一节 分子地球生物学概念、研究对象、方法和原理	(32)
一、研究对象和研究材料	赖旭龙 盛桂莲 (32)
二、古 DNA 研究的技术、方法和基本原理	赖旭龙 盛桂莲 (33)
三、地质类脂物研究的技术、方法和基本原理	黄咸雨 (44)
第二节 生命之树的古代生物分子证据	(50)
一、古 DNA 在构建生命之树中的应用	赖旭龙 盛桂莲 (50)
二、生命之树关键节点的地质类脂物证据	黄咸雨 杨 欢 (57)
第三节 生物圈与地球表层系统其他圈层相互作用的类脂物记录	谢树成 (71)
一、生物圈对大气圈的响应	(71)
二、生物圈对水圈的响应	(82)
三、生物圈对岩石圈的响应和作用	(87)
参考文献	(89)
第三章 若干重要的地球微生物学过程	(104)
第一节 地球微生物学的概念、研究内容和研究方法	王红梅 (104)

一、地球微生物学的概念	(104)
二、研究对象和研究内容	(105)
三、研究方法和原理	(106)
第二节 若干极端环境微生物的一般特征	(114)
一、深海	董海良 (114)
二、大陆地下深部	董海良 (116)
三、盐碱环境	董海良 (118)
四、酸性矿坑水	王红梅 (120)
五、洞穴	王红梅 曾翠平 (122)
第三节 极端环境碳、氮、硫元素的地球微生物学过程	董海良 (124)
一、与碳循环有关的代谢过程和地球微生物学过程	(124)
二、与硫循环有关的地球微生物学过程	(129)
三、与氮循环有关的地球微生物学过程	(130)
第四节 极端环境岩石矿物形成和分解的地球微生物学过程	(131)
一、洞穴滴水微生物沉淀碳酸钙的控制实验	王红梅 曾翠平 (132)
二、矿区环境硫化物的微生物氧化和含铁次生硫酸盐的形成	王红梅 (137)
三、洋底岩石的微生物风化作用	董海良 (140)
四、嗜热微生物对金属的还原作用	董海良 (141)
第五节 微生物与宏体生物的相互作用——以遗迹化石 <i>Zoophycos</i> 为例	龚一鸣 (142)
一、材料与研究方法	(143)
二、 <i>Zoophycos</i> 形态特征	(145)
三、 <i>Zoophycos</i> 中的微生物化石	(147)
四、微生物与造迹生物可能的共生关系	(149)
参考文献	(151)
第四章 地球生物学过程与典型生态系的形成和崩溃	(170)
第一节 礁生态系与微生物生态系	王永标 (170)
一、礁生态系和微生物生态系的基本特征	(171)
二、华南二叠纪长期生物礁的基本特点及礁生态系的消亡	(173)
三、二叠纪-三叠纪之交微生物生态系的基本特征及其兴起的原因	(177)
四、礁生态系消亡和微生物生态系兴起的关系	(182)
第二节 热带雨林生态系记录的古火灾事件	顾延生 (183)
参考文献	(186)
第五章 前寒武纪微生物地质作用与地球表层系统演化	史晓颖 蒋千清 (190)
第一节 早期地球表层系统各圈层的形成与演化	(190)
一、岩石圈的形成	(190)
二、水圈与原始海洋的形成	(192)
三、大气圈的形成与演化	(194)
四、地球生命起源与前寒武纪生物演化的主要阶段	(195)

第二节 早期大气成氧事件、海洋环境演化、古气候变化与微生物地质作用	(200)
一、大气成氧事件与微生物地质作用	(201)
二、古海洋环境演变与微生物地质作用	(205)
三、古气候变化事件与微生物地质作用	(208)
第三节 前寒武纪地质微生物记录及其意义	(214)
一、前寒武纪的微生物岩及其主要类型	(214)
二、微生物席及微生物成因沉积构造 (MISS)	(217)
三、微生物席的重要地质意义	(222)
参考文献	(224)
第六章 古生代与中生代之交全球幕式生物危机与异常环境系统	(236)
第一节 受环境驱动的海洋生物小型化	(236)
一、有孔虫	宋海军 童金南 (237)
二、牙形石	江海水 赖旭龙 (238)
三、腕足类	何卫红 (241)
第二节 海洋系统生物与环境的幕式变化	(245)
一、海洋食物链底层的变化	宋海军 童金南 谢树成 (246)
二、海洋食物链上层的变化	何卫红 江海水 赖旭龙 (259)
三、海洋透光带和底层水的幕式缺氧事件	谢树成 (261)
第三节 陆地系统生物与环境的幕式变化	(264)
一、植物的演化及灭绝模式	喻建新 (264)
二、两幕陆地风化作用的加强和有机碳同位素的负偏	谢树成 (275)
第四节 地球表层系统生物与环境的幕式变化	谢树成 (278)
一、全球碳循环两幕变化	(278)
二、两幕重复出现的生物与环境事件	(281)
三、两幕地球生物学事件的意义	(285)
参考文献	(288)
第七章 近代人类干预下的生命系统和环境系统	(298)
第一节 人类干预下地球系统的总体特征	(298)
一、人类干预下的生命系统特征	何卫红 (298)
二、人类干预下的地球环境系统特征	顾延生 (305)
第二节 长江中游人类活动背景下的古环境重建	(315)
一、考古遗址多环芳烃、植硅石和炭屑记录的古火灾事件	邹胜利 (316)
二、湖泊有壳变形虫记录的富营养化过程	秦养民 (321)
第三节 当代与重大地质转折期的地球生物学对比	谢树成 (328)
一、两大转折期对比的要素和标志	(329)
二、两大转折期变化的特点	(333)
三、启示和警示意义	(335)
参考文献	(336)

第一章 地球生物学概述

第一节 形成背景和学科体系

一、形成背景

地球科学是人类认识、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。在这些基础学科中，地球科学与化学、物理学两大基础学科已交叉形成比较独立和完善的学科体系，即地球化学（geochemistry）和地球物理学（geophysics），这两个学科为研究地球系统的物理过程和化学过程提供了强大的理论思想体系和技术方法手段。

与地球化学和地球物理学相对应，当前国际上出现了地球生物学（geobiology）这一新型学科，它应是生命科学与地球科学交叉而形成的独立学科体系。这一学科体系为研究地球系统的生命过程服务。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（Knoll and Hayes, 1997; Pennisi, 2002; 殷鸿福等, 2004）。因此，地球生物学与生命科学既有密切的联系，又有本质的区别，它不是简单的地球上的生物学。从学科分类上（表 1.1）就可以看出地球生物学与生命科学有着很大的差别。以地球生物学中的分子地球生物学为例，它与生命科学中的分子生物学对应。从研究对象上就可以看出分子地球生物学和分子生物学的差异。分子生物学主要研究现代生物体中的各类生物分子，特别是 DNA 等；而分子地球生物学则主要研究各类地质体中来源于生物体的有机分子，如地质类脂物（geolipids）、古 DNA 等。地质体中的这些有机分子有些是直接从活生物体中来的，基本没有发生变化，如卟啉；有些则发生了很大的变化，但基本保留了原始的碳骨架，例如，甾烯醇脱羟基形成甾烯；有些则是生物体中没有，后经成岩作用形成的，如噻吩等。

尽管目前地球生物学的发展程度远不如地球化学和地球物理学，但其思想的酝酿和萌芽阶段可以追溯到两个世纪以前 Hutton（1788）对地球表层的研究，那时人们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 Becking 开始使用“地球生物学”这个术语。随后，Lovelock（1986）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，即大家熟知的 Gaia 假说。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，并很快形成了一个全新的研究领域（Committee on Facilitating Interdisciplinary Research and Committee on Science, Engineering and Public Policy, 2004）。

表 1.1 地球生物学与其他学科的关系及其二级学科

一 级			二 级		与之相当的 生命科学学科
			二级学科名称	所包含的三级地质学科	
地 球 科 学	研究 对象 性质	地质科学（固体地球）	略	略	略
		海洋科学（液）			
		大气科学（气）			
		地理科学（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 molecular geobiology	分子古生物学、分子地层学、 分子生态学、分子考古学	分子生物学
		地球化学（化学运动）			
		地球生物学（生命运动）	地球微生物学 geomicrobiology		微生物学
			古生物学 paleobiology	古动物学、古植物学、演化 生物学等	生物学
			地球生态学 geoecology	古生态学、生态地质学、生 态动力学	生态学
			地球生理学 geophysiology		生理学
			生物地球化学 biogeochemistry	古生物化学、油气地球化学、 有机地球化学	生物化学
			生物地质学 biogeology	生物地层学、生态地层学、 生物成岩成矿学、生物矿物 学、古生物地理学	
			生物地球物理学 biogeophysics	生物磁学等	生物物理学
			应用地球生物学 applied geobiology	环境地球生物学、环境地球 微生物学、生物找矿学、矿 冶微生物学、石油微生物 学等	应用生物学

注：学科分类位置指在国家自然科学基金委员会的学科体系中的位置。

进入 21 世纪，国际地球生物学的发展经历了一系列重要事件，形成了良好的发展势头。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与地球微生物学分会；Elsevier 和 Blackwell 出版商则分别于 2002、2003 年推出了刊物《Virtual Journal of Geobiology》和《Geobiology》；2004 年，美国基金会地球科学部正式将地球生物学列为一个研究计划（program）予以稳定的支持；同时，南加州大学 Wrigley 环境研究所开办了地球生物学的国际培训班。目前，美国的哈佛大学、耶鲁大学、麻省理工学院、南加州大学，以及德国的哥廷根大学都成立了地球生物学研究团队。古生物学领域的著名学者 Andrew Knoll、Derek Briggs、Roger Summons、David

Bottjer 等都在开展这方面的研究工作。

在国内,地球生物学的研究基本与国际同步,处于初始阶段。1996 年,国家自然科学基金委员会首先在国内提到了地球生物学。2005 年,国家自然科学基金委员会地球科学部邀请美国耶鲁大学著名学者 Derek Briggs 做了有关地球生物学方面的讲座。2006 年中国地质大学(武汉)召开了多次地球生物学的学科建设研讨会,并于 2007 年举办了首届全国地球生物学培训班,会议情况在《地质通报》上进行了报道。2008 年国家自然科学基金委员会与美国自然科学基金委员会联合在中国地质大学(北京)举办了地球微生物学研讨会。中国地质大学(武汉)于 2008 年 10 月举办了地球生物学国际研讨会。

地球生物学的这种快速发展,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口-环境-资源问题的响应,它将为解决当今一些全球性问题提供强有力的科学支撑(谢树成等,2006)。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,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,导致灾害性天气和气候的出现,并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。

具体地说,得益于对地、对日等卫星观察技术的发展,人们不仅能够从外太空来观察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,研究由力学运动、物理运动、化学运动和生命运动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(陈宜瑜等,2002),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中研究四大物质运动的基础学科。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的反映。相反,它是学科整合的体现(Noffke, 2005),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(谢树成等,2006)。

同时,生命科学可能在 21 世纪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。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(谢树成等,2006)。

需要指出的是,在地球表层系统四大圈层(岩石圈表层、水圈、生物圈、大气圈)

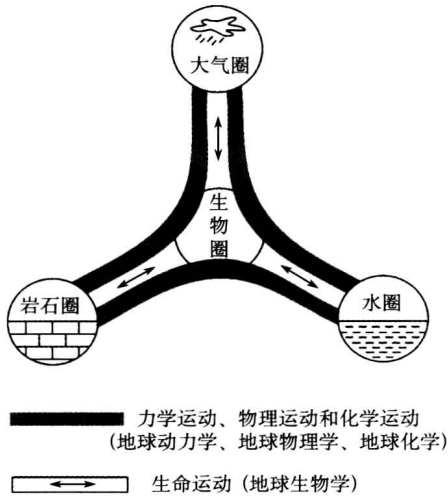


图 1.1 生物圈通过力学运动、物理运动、化学运动和生命运动四大基本过程与地表其他圈层相互作用 (谢树成等, 2006)

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 1.1); 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) (殷鸿福等, 2004)。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, 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学相比, 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运动、物理运动和化学运动。因此, 地球生物学也涉及力学运动、物理运动和化学运动这些基础运动形式, 应具有广泛的应用前景和发展空间。

二、学科位置及其与地球科学其他分支学科的关系

对地球科学学科体系的划分, 教育部和中华人民共和国国家标准的划分基本一致, 但它们与国家自然科学基金委员会的略有不同: 国家自然科学基金委员会地球科学的一级学科相当于教育部和中华人民共和国国家标准的二级学科 (表 1.2)。在国家自然科学基金委员会的学科分类体系中, 地球化学和地球物理学都是独立的一级学科, 而地球科学与生命科学交叉没有形成独立的一级学科。相反, 它们交叉形成的一些学科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, 分别作为二级学科放在地质学和地球化学学科中。在教育部和中华人民共和国国家标准的学科体系中也是同样的情况, 即地球化学和地球物理学都是独立的二级学科, 而地球科学与生命科学交叉没有形成独立的二级学科, 它们交叉形成的一些学科 (如古生物学、生物地球化学) 只是作为三级学科散布在其他二级学科中。

如前所述, 作为研究生命系统和地球系统相互作用的地球生物学, 应是生命科学与地球科学这两大基础学科交叉而形成的独立学科。我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。在学科分类上, 它等同于地球化学、地球物理学 (表 1.2), 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) 过程这些基础运动形式, 符合恩格斯按照物质运动类型进行学科分类的思想。因此我们认为, 在现行的学科体系中应加入地球生物学这一学科, 而且, 在国

国家自然科学基金委员会学科体系中，地球生物学应是一级学科；在教育部和中华人民共和国国家标准的学科体系中，地球生物学应是二级学科。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 1.2）。

表 1.2 我国不同部门对地球科学学科体系的划分

国家 标 准		教 育 部		国家自然科学基金委员会
二级学科代码	二级学科名称	二级学科代码	二级学科名称	一级学科名称
170. 10	地球科学史	170. 1	地球科学史	大气科学
170. 15	大气科学	170. 15	大气科学	
170. 20	固体地球物理学	170. 2	固体地球物理学	
170. 25	空间物理学	170. 25	空间物理学	
170. 30	地球化学	170. 3	地球化学	地球物理学
170. 35	大地测量学	170. 35	大地测量学	
170. 40	地图学	170. 4	地图学	
170. 45	地理学	170. 45	地理学	
170. 50	地质学	170. 5	地质学	地球化学
170. 55	水文学	170. 55	水文学	
170. 60	海洋科学	170. 6	海洋科学	
170. 99	地球科学其他学科	170. 99	地球科学其他学科	

理清了地球生物学的学科地位，那么对 geobiology 的译法就可以明确了。尽管对 geobiology 有不同的译法，例如地生物学、地质生物学等，但从学科分类位置上考虑，geobiology 应该与 geochemistry 和 geophysics 一样，其前缀“geo”应是“地球”之意，geobiology 应该译为地球生物学。

三、地球生物学的分支学科体系

作为地球科学的一级学科（指在国家自然科学基金委员会的学科体系中），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 1.1）。总体来说，表 1.1 中所列的这些二级学科可以归纳为如下四类：

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

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。因此，古生物学只是地球生物学的一部分，但同时，地球生物学是古生物学深入发展的结果。

(2) 地球生态学(包括古生态学、生态地质学)和地球生理学,主要强调生物与环境相互作用的机制和过程。

(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、生物矿物学、生态地层学、古生物地理学等),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、地质科学相互交叉结合的产物。

生物地质学主要是利用生物学的知识来服务于地质学(殷鸿福, 1994; 殷鸿福等, 2004), 是地球生物学的一部分。近年出现的 biogeosciences (生物地学) 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(Banfield and Marshall, 2000), 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, 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)。

生物地球化学分类位置一直放在地球化学学科中。2005年, Cutter (2005) 提出将生物地球化学作为地球生物学的一个重要组成部分。考虑到学科的发展历史和学科交叉性质, 生物地球化学既可以放在地球化学学科, 也可以放在地球生物学学科中。

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(Naylor, 2005), 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。

(4) 应用地球生物学是把地球生物学的基本原理、基本方法和技术应用到工业、农业、环境科学等领域, 例如环境地球生物学、环境地球微生物学、生物找矿学、地植物学等。尽管这些学科的研究内容也是当前生命科学、环境科学的研究内容, 但地球生物学更加关注与地球科学密切相关的应用方面。例如, 微生物对石油及其有机污染物、金属元素的降解和转化; 煤的微生物脱硫; 微生物通过分解有机质和营养元素对土壤肥力的影响; 微生物的选矿技术; 微生物采油和找油技术等。因此我们建议, 有必要区分环境地球生物学与环境生物学, 犹如环境地球化学与环境化学。

因此, 从学科分类和组成上可以看出, 古生物学是地球生物学的一部分。地球生物学与生命科学既有区别也有联系。

第二节 国内外研究现状和发展趋势

尽管地球生物学是一个新兴学科, 但它已在许多研究领域取得了重要进展。在此重点讨论在为地球系统科学服务中, 地球生物学的研究现状及其可能的发展趋势。

一、分子地球生物学

地球生物学过程在地质体中留下了丰富多彩的物质记录, 除了人们熟知的生物遗体(化石)外, 其中最为关键的记录是各种生物遗迹和生物衍生的以各种形式存在的有机化合物。这些不同形式的有机分子(核酸、蛋白质和氨基酸、类脂物、纤维素等)就是

分子地球生物学的研究对象，它对应于生命科学领域的分子生物学。第二章比较详细地介绍了分子地球生物学方面的内容。其主要的研究重点有下列三方面：

1. 生物与环境相互作用在富有机质地层中的分子地球生物学记录

与分子地球生物学相关的分子有机地球化学工作，其开展得最早和最广的是与油气系统有关的那些地层，特别是那些富有机质地层。油气系统的烃源岩是有机质的富集地层，是地球环境与生命系统协同演化过程的特殊产品，是生命系统与地球系统在一定条件下相互作用的产物。作为油气资源物质基础的烃源岩，其形成过程与有机质的形成和保存这两个最基本的地球生物学过程密切相关。而这两个基本过程都与不同功能的微生物（自养、异养）有关，需要从分子水平开展研究。

海洋有机质的形成是全球碳循环的重要环节，是一个最基本的地球生物学过程，它直接体现了光合生物（自养生物）与水圈和大气圈的相互作用。作为表层海洋生态系统的一个重要指标，海洋生产力研究一直受到地球科学界的关注，它决定了在单位面积的表层海水中，由光合作用所导致的无机碳向有机碳转变的量。海洋的初级生产力控制了温室气体 CO_2 在海洋和大气中的分配，进而影响着全球气候变迁。有关研究促进了我们对于海洋生态系统对全球变化的响应和反馈机制的理解。对海洋生产力的认识，也推动了海洋生物资源可持续利用对策的形成。海洋生产力研究最重要的里程碑之一是对微型生物环的认识，由相同粒级的微微型光合生物及异养细菌两条食物链路径构成的微型生物食物网（microbial loop），在海洋初级生产力及物质和能量循环中具有重要的贡献（Pomeroy, 1974；苏纪兰等，2001）。在诸如全球海洋通量（JGOFS）、海岸带陆海相互作用（LOICZ）和全球海洋生态系统动力学（GLOBEC）等大型国际合作研究计划中，海洋生产力都是关键的内容。但是，地质历史时期海洋古生产力及其组成的恢复则是一项复杂而艰巨的系统工程，需要分子地球生物学的支撑。

有机质的埋藏和保存是另一个最基本的地球生物学过程。它一方面与古生产力关系密切，另一方面又与水体以及水-沉积物界面的氧化还原条件（古氧相）密不可分，因而是生物与环境相互作用最集中的体现。水-沉积物界面及其以下的氧化作用带、硝酸盐还原作用带、硫酸盐还原作用带、甲烷形成带等精细刻画了不同功能（异养）的地球微生物学过程。这些不同的地球微生物学过程直接影响了有机质的保存和埋藏，并通过有机碳库的变化架起了生物圈与水圈和大气圈相互联系的桥梁。这方面工作开展最多的是全球一些缺氧事件层的研究。这些缺氧事件层与地球系统各圈层相互作用有关，记录了许多典型的地球生物学过程，分子地球生物学记录为之提供了重要乃至关键的证据。

2. 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。

（1）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，为生命起源研究提供可能的线索。通过沉积岩中地质类脂物分子化石及