

生命科学名著

生物地球化学 ——全球变化分析



Biogeochemistry—an Analysis of Global Change

[美] W. H. 施莱辛格 E. S. 伯恩哈特 编著

主译：俞 慎

参译：吝 涛 吴胜春 韦莉莉

审校：俞 慎 朱永官



原版引进



科学出版社

生物地球化学 ——全球变化分析

(原书第三版)

Biogeochemistry —an Analysis of Global Change

〔美〕 W. H. 施莱辛格 E. S. 伯恩哈特 编著

主译：俞 慎

参译：吝 涛 吴胜春 韦莉莉

审校：俞 慎 朱永官

中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室资助出版

科学出版社

北 京

图字：01-2014-1523 号

内 容 简 介

本书以地球生命起源到现代的时间尺度和从分子水平到全球水平的空间尺度为视角，系统阐述了地球地质过程的生物学过程与物质循环。全书分为两部分：第一部分包括大气、陆地、淡水水体和海洋等系统中的微生物和化学过程；第二部分包括一系列短章节，用于解释第一部分章节涉及的相关机理及大尺度生物地球化学循环过程。本书引用了超过 4500 篇文献，提供了丰富的图、表及章节间相互引用，有助于读者较全面地了解生物地球化学研究的历史进程与当今前沿。

本书为交叉学科著作，可供生物学、环境科学、生态学、地质学、农业科学等领域的学生和相关研究人员阅读参考。

书中参考文献请扫封底二维码获取。

Biogeochemistry—an Analysis of Global Change, Third Edition

Edited by William H. Schlesinger and Emily S. Bernhardt. ISBN: 978-0-12-385874-0. Copyright ©2013 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Elsevier (Singapore) Pte Ltd and China Science Publishing & Media Ltd.

Copyright ©2016 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Published in China by China Science Publishing & Media Ltd under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予科学出版社在中国大陆地区（不包括香港、澳门以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签，无标签者不得销售。

图书在版编目 (CIP) 数据

生物地球化学：全球变化分析：原书第三版/（美）威廉·H. 施莱辛格，
（美）埃米莉·S. 伯恩哈特编著；俞慎等译。—北京：科学出版社，2016.9

书名原文：Biogeochemistry—an Analysis of Global Change

ISBN 978-7-03-049918-9

I. ①生… II. ①威… ②埃… ③俞… III. ①生物地球化学 IV. ①P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 219283 号

责任编辑：王海光 刘 晶 / 责任校对：赵桂芬

责任印制：张 伟 / 封面设计：刘新新

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张：26 1/2

字数：601 000

定价：198.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

中文版序一

For more than a century, we've recognized that the movements and availability of many chemical elements at the surface of the Earth are affected by biology, defining an interdisciplinary scientific field known as biogeochemistry. With the Earth's burgeoning population and increasing resource demands, humans now have a huge impact on the movement of geological materials at the Earth's surface—in many cases more than doubling the natural movement of materials in the Earth's global biogeochemical cycles. Indeed, the impact of a single species, *Homo sapiens*, now dominates many aspects of the Earth's biogeochemistry, with deleterious effects on the environment both locally and globally.

Human impacts on the carbon cycle are well known, yielding anticipated global changes in the Earth's climate. Likewise, human impacts on the availability of nitrogen, largely to improve agricultural yield, leave their mark on greater levels of water pollution in rivers and coastal marine waters. Nitrogen that escapes from agricultural fields, largely as ammonia, affects air quality, especially fine particulate matter, in regions downwind of agriculture. Other gaseous losses of nitrogen yield acidic rain and depletion of stratospheric ozone.

Human extraction of a wide variety of chemical elements—boron, copper, lithium, mercury and vanadium—from the Earth's crust now vastly exceeds the natural release of these materials from rock weathering, yielding high inadvertent pollutant concentrations in runoff waters and potential resource depletion for future generations. Our extraction of phosphorus from the Earth's crust is likely to deplete the global supplies of mineable phosphorus within this century.

一个多世纪以来，我们认识到地球表面众多化学元素的迁移过程和有效性均受生物学影响，研究该问题的多学科交叉领域被命名为生物地球化学。随着地球人口的激增和资源需求的持续增长，人类对地球表面地质物质迁移造成了巨大影响，在很多情况下，超过了全球生物地球循环物质自然迁移量的两倍之多。事实上，人类的影响已主导了生物地球化学的多个方面，给区域和全球造成了不良影响。

人类对碳循环的影响已经众所周知，引起预期的全球气候变化。同样，人类对氮有效性的影响极大地提高了农业产出，但同时导致了河流和滨海水体高水平氮污染。农业土壤释放的氮，大多为氨气（尤其是细小颗粒物），影响了下风向地区的大气质量。其他含氮气体排放则会引起酸雨和平流层臭氧的损耗。

人类从地壳中提取各类化学元素，如硼、铜、锂、汞和钒等，提取量远远超过岩石风化的自然释放量，导致地表水污染物浓度升高，并减少了人类后代可利用的潜在资源。人们从地壳获取磷素可能会导致全球矿物磷供应在本世纪被消耗殆尽。

We wrote this textbook to satisfy the curiosity of a growing cadre of students who are fascinated by the role of biology in controlling geological processes on Earth—from the earliest dawn of life on Earth to modern times. Understanding the role of microbial processes should bring some humility to the human species; microbial processes have stabilized Earth's surface conditions for much of its history. The current impact of humans is upsetting earth system processes, with impacts on climate, stratospheric ozone, seawater chemistry and biodiversity. Nearly all environmental problems that face us have a chemical component, which must be understood from the molecular to global levels.

From the beginning of our work on a textbook for biogeochemistry, we wanted to have an edition in Chinese for students in China. China will play a huge role in the health of our environment in the coming years. Graciously, Dr. Shen Yu of the Institute of Urban Environment in the Chinese Academy of Sciences, offered to guide the translation effort with his colleagues and students. The result is a delightful volume, which we hope will aid a new generation of students in China to continue their work to stabilize human population growth and its impact on our planet. The alternatives are less certain and less desirable, both for us and our descendants.



24 May 2016

William H. Schlesinger, Lubec, Maine, USA
Emily S. Bernhardt, Durham, North Carolina, USA

我们撰写本书是为了满足不断壮大的对地球地质过程生物学（从地球生命起源到现代）感兴趣的研究群体的好奇心。微生物过程的作用不可小觑，在大部分地球历史进程中微生物过程稳定了地球表面性状。人类近期的冲击使地球系统过程变得不稳定，包括对气候、平流层臭氧、海水化学性质和生物多样性等影响。我们所面临的环境问题几乎都有化学因素，需要从分子水平到全球水平进行认知。

在撰写本书之初，我们就希望能有中文版供中国学生阅读。在未来数年内，中国将对我们全球环境健康扮演一个非常重要的角色。幸运的是，中国科学院城市环境研究所俞慎博士与他的同事和研究生一起承担了这一工作。希望本书中文版能够推动新一代中国学生在稳定人口增长和人类活动对地球影响方面的研究工作。换言之，这一努力或多或少都是为了我们自己和我们的后代。

威廉 H. 施莱辛格 于美国缅因州卢贝克
埃米莉 S. 伯恩哈特 于美国北卡罗来纳
州达勒姆

2016 年 5 月 24 日
(俞慎直译)

中文版序二

我和中国科学院城市环境研究所有很深的渊源，在 2008 年其建所之初便曾访问，其后又几次到访，并与其青年学者多有交流。2016 年 5 月，我再次到厦门，俞慎研究员请我为他领衔翻译的著作《生物地球化学——全球变化分析》作序，我欣然应允。该书是美国科学院院士 William H. Schlesinger 博士与其同事杜克大学教授 Emily S. Bernhardt 博士共同撰写的，在杜克大学和美国其他著名高校被用于本科生、研究生教材，且被学界认为是生物地球化学领域研究者的必备参考书。

Schlesinger 院士在生物地球化学研究领域取得了卓越的成就，该书是其重要代表成果之一，全书共 14 章，分为两大部分：过程和反应、全球变化。全书以生命相关的水和重要元素（碳、氮、磷、硅、硫等）为主线，将地球作为一个化学系统来认知其自然功能和正面临的人类活动的影响，并以陆地生态系统、陆地水体水生生态和海洋生态系统逐一分述。该书涉猎范围极广，从空间物理学到分子生物学的多学科融合，从地球起源到未来数十年的大时间跨度均有涉及。翻译这样一部力作，无疑是一个巨大的挑战。

俞慎研究员从浙江大学获得土壤学博士学位后，在美国游学 6 年，曾在氮素循环研究领域的著名科学家 Joan G. Ehrenfeld 教授实验室工作数年，于 2008 年受中国科学院“百人计划”项目资助加入城市环境研究所。俞慎博士基础知识扎实、治学严谨、学术经历丰富、知识体系涉猎也较广。即便如此，如其在“译者的话”中所说的那样，他仍是在忐忑中接下的这个任务。为了保证质量，在翻译完成之后，他又花费了长达半年的时间逐字逐句对照原文进行审校和通稿，为此放弃了大量休息时间。此外，他还颇费心思地在译稿中保留了图中的英文，并在图注中特意列出其对应中文，以方便读者学习相关专业词汇，其用心可见一斑。

我本人在全球变化与冰冻圈领域研究数十年，一直关注气候变化及其相关的生物地球化学过程等交叉学科的研究。在我看来，《生物地球化学——全球变化分析》是一部非常值得推荐的好书，也是生物地球化学和全球变化领域的研究者，尤其是青年学者不可多得的参考书。谨此为序，向译者表示敬意，同时期待更多青年人才的成长。



于北京

2016 年 5 月 25 日

译者的话

能够有幸成为《生物地球化学——全球变化分析》一书的译者缘于一次访问。2010年7月下旬，我陪同朱永官所长访问美国的卡里生态研究所（Cary Institute of Ecosystem Studies），本书的第一作者美国科学院院士 William H. Schlesinger 正是该所的所长。我因此有幸见到了 Schlesinger 院士，并听他谈起这本书，当时他就表达了希望能将该书译为中文的意愿，可由于没见到书的具体内容，我们没有贸然答应承接这一工作。

2012年，Schlesinger 院士获得了中国科学院爱因斯坦讲席教授项目的资助，于当年6月9-16日来我所访问、讲学，他再次向我提起此事，希望我能承担中文版的翻译工作。2013年年底，我收到了 Schlesinger 院士寄来的原版书，可翻看一番后却深感自己的知识体系不足以胜任这一工作。我是土壤学专业出身，而书中的内容涉及天文学、地理学、地质学、水文学、海洋学、生物学、生态学、化学计量学等一系列学科，正如原版书前言所写的“本教科书可以将从微生物学到全球变化生态学的孤立生物地球化学领域联系起来”。但在朱永官所长的鼓励下，我还是忐忑地接下了这个工作，其后，在和科学出版社接洽后，该书中文版于2014年正式列入出版计划。

这是一部巨作，我能作为译者是荣幸的。在翻译过程中，我的知识体系得到拓展的同时，也将已有的零散知识做了梳理。但我不得不承认，整个翻译工作是个不小的磨难。起初，我把书稿按章节分给了我的学生和研究伙伴，大家分头翻译，但在陆续收到反馈的译稿后，我发现由于每个人的语言习惯和理解角度不同，整个译稿的风格很不协调，读起来缺乏连贯性。思考良久，我还是希望中译本不仅能保持原书的科学性，还要尽可能保证其可读性。于是2015年年底，我下决心在已有译稿的基础上，一字一句对照原文进行审校和统稿。为此，我不仅放弃了2016年国家自然科学基金的申请工作，还在整整6个月期间，占用了所有周末和节假日，长期的伏案劳作让我的颈椎和腰椎常常疼痛难忍，但每每累到不行时，数数已完成的章节，总能体会到一种莫名的成就感，继而给自己打气：坚持就是胜利！终于，2016年5月15日我完成了全书的翻译工作。

我的多位同行、朋友和学生参与了本书的翻译工作，他们是本所吝涛博士团队（第5、11章）、浙江农林大学吴胜春博士、梁鹏博士、张进博士（第6、7、8章），以及我团队的韦莉莉博士（第9、10章）、历红波博士（第3、13章）、袁永强博士、高进波、丁品、洪兵、郗秀平、许敬华（第4、8、9章），非常感谢他们的付出，希望他们和我一样从中获益良多。必须说明的是，全部书稿是在我通读、审校后交给出版社的，如有任何错误或疏漏之处，都是我的责任，与他们无关。

由衷地感谢两位原版书的作者，William H. Schlesinger 院士和 Emily S. Bernhardt 教授（美国杜克大学），是他们让这部力作诞生。感谢 Schlesinger 院士的信任和朱永官所长的鼓励，是他们让参译的同仁和学生以及我成为这本书的译者。感谢科学出版社王

海光编辑及其同事，是他们的耐心、鼓励和出色的编校工作让本书成为精品。感谢中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室资助本书出版。感谢书中图表版权所有者授权使用绝大部分图表，尽可能保证了本书的完整性。需要说明的是，经过出版社多次努力，书中仍有个别图表未能联系上版权所有者，为了保持原书风貌，我们思虑再三，决定保留这些图表。如版权所有者看到本书，请与出版社联系，我们将积极配合补办手续及支付费用。

全球变化研究领域著名科学家秦大河院士为本书撰写了中文版序言，这是对我们翻译工作的莫大肯定，特此表示衷心的感谢！

本书涉及学科领域众多，翻译过程中虽已尽全力忠于原书，但限于能力和水平，疏漏之处在所难免，请使用本书的读者，无论是专家、教授，还是研究生、本科生，如有赐教，欢迎随时与我联系（syu@iue.ac.cn），以便在后续重印时修订。期待本书能对我国全球变化研究领域的莘莘学子和青年学者们有所帮助。

俞 慎

于厦门杏林湾畔

2016年5月23日下午3:30

前 言

这是一本关于地球表面化学的教科书。众多生命所依赖的地球表面现正面临着不断增加的人类活动影响。现有的众多环境问题——从全球变化到海洋酸化，都源于人类活动引起的地球表面化学的变化。我们希望学生们使用这本教科书后能把地球作为一个化学系统来认知其自然功能，并明确引起地球表面化学变化的历史事件，以及明白当前我们星球快速变化的原因。本书融合了从空间物理学到分子生物的多学科和从地球起源到未来数十年的大时间尺度。

和前两版一样，本书架构是源于早期 Schlesinger 教授和近期 Bernhardt 教授，以及两人在（美国）杜克大学（Duke University）多年教授的生物地球化学课程。根据课程教学大纲，我们将本书分为两部分：第一部分包括了在大气、陆地、淡水水体和海洋中的微生物和化学反应；第二部分包括了一系列的短章节，用于解释第一部分章节中相关机理及大尺度生物地球化学循环。

本书的各个章节都曾在 1997 年的上一版本中被修订，主要针对淡水和水生生态系统的拓展，包括了基于卫星和模型的地球化学特性全球地图，并提供了针对主要元素和汞生物地球化学循环的全球计量新成果。

综观全书，我们注重于那些对生命具有重要作用的元素的化学反应。全球尺度的元素耦合循环源于生物化学。在一些区域，我们表述了计算机模型是如何被用于了解和预测元素循环及生态系统功能的。多数这样的数学模型是源于生物化学及生物化学元素的内部相互作用。数学模型是将小尺度的观测扩展到全球尺度的有效方法。这些数学模型已被基于卫星的观测所证实，尤其是 NASA（美国国家航空航天局）的地球观测系统（earth observation system, EOS）的应用。我们希望这本教科书可以将从微生物学到全球变化生态学的孤立生物地球化学领域联系起来。

本书提供了生物地球化学的授课框架。附加的近期阅读文献使一些特别感兴趣的领域或最近研究进展得以进一步的深入。虽然不可能包罗万象，但本书包括了超过 4500 篇文献，有助于学生和其他希望了解相关领域的人得到较全面的了解。本书具有多学科交叉的特性，因此我们努力提供丰富的章节间相互引用和图表。

与本书的第一、第二版一样，我们希望本版能激发新一代学生学习全球变化相关科学的兴趣。放弃不是选择，我们的星球需要大家的共同呵护！

W. H. 施莱辛格

Cary Institute of Ecosystem Studies, Millbrook NY, USA

E. S. 伯恩哈特

Department of Biology, Duke University, Durham NC, USA

致 谢

很多人为本书第三版的出版提供了帮助,包括直接为我们提供数据、文献、审稿和图的科学家,以及间接对我们职业产生早期影响的科学家。对 William H. Schlesinger 来说,后者包括 Jim Eicher、Joe Chadbourne、John Baker、Russ Hansen、Bill Reiners、Noye Johnson、Bob Reynolds、Peter Marks。对 Emily S. Bernhardt 来说,包括 Gene Likens、Barbara Peckarsky、Lars Hedin、Alex Flecker、Margaret Palmer、Pat Mulholland、Bob Hall。

对本版早期草稿审阅提供巨大帮助的朋友包括 Ron Kiene、Susan Lozier、Elise Pendall、Emma Rosi-Marshall、Dan Richter、Lisa Dellwo Schlesinger、Jim Siedow、Dave Stevenson、Mike Tice 和 Paul Wennberg。其中一些朋友还对部分章节进行了课堂试教。Greg Okin 和 Daniel Giammar 帮助进行了课后问题的测试。

我们感谢以下朋友为本版提供文献、图和建议,无论帮助大小,都为提高本书质量做出了贡献。他们是: Geoff Abers、Andy Andreae、Alison Appling、Dennis Baldocchi、Mike Behrenfeld、Neil Bettez、Jim Brown、Amy Burgin、Oliver Chadwick、Terry Chapin、Ben Colman、Jim Clark、Jon Cole、Bruce Corliss、Randy Dahlgren、Paul Falkowski、Ian Faloona、Jack Fishman、Jacqueline Flückiger、Wendy Freeman、Jim Galloway、Nicholas Gruber、Jim Hansen、Kris Havstad、James Heffernan、Ashley Helton、Kristen Hofmockel、Ben Houlton、Dan Jacob、Steve Jasinski、Jason Kaye、Gabriel Katul、Ralph Keeling、Emily Klein、George Kling、Jean Knops、Arancha Lana、Steve Leavitt、Lance Lesack、Gene Likens、Gary Lovett、George Lutter、Brian Lutz、John Magnuson、Pat Megonigal、Patrick Mitchell、Scott Morford、Karl Niklas、Ram Oren、Steve Piper、Jim Randerson、Sasha Reed、Bill Reiners、Joan Riera、Phil Robertson、Jorge Sarmiento、Noelle Selin、Gus Shaver、Hank Shugart、John Simon、Emily Stanley、Phil Taylor、Eileen Thorsos、Kevin Trenberth、Remco van den Bos、Peter Vitousek、Mark Walbridge、Matt Wallenstein、Kathie Weathers 和 Charlie Yocum。另外, Deb Fargione 整理了 4500 多篇文献,使它们使用起来非常容易。

我们还要感谢杜克大学多年来选修生物地球化学课程的学生,帮助我们精炼了对生物地球化学的认知。

我们要再一次重申的是,所有的错误都是我们的过失,期待听到您宝贵的建议。您可以通过以下电子邮箱联系我们: schlesingerw@caryinstitute.org 或者 emily.bernhardt@duke.edu。

W. H. 施莱辛格
Cary Institute of Ecosystem Studies, Millbrook NY, USA
E. S. 伯恩哈特
Department of Biology, Duke University, Durham NC, USA

目 录

中文版序一	
中文版序二	
译者的话	
前言	
致谢	

第 1 篇 过程与反应

第 1 章 简介	3
1.1 什么是生物地球化学?	3
1.2 地球是一个化学系统	4
1.3 研究尺度	8
1.3.1 热动力学	8
1.3.2 计量学	9
1.3.3 大尺度试验	11
1.3.4 模型	11
1.4 Lovelock 的盖亚假设 (即地球是一个生物体)	11
第 2 章 起源	13
2.1 引言	13
2.2 元素起源	14
2.3 太阳系和固体地球起源	16
2.4 大气和海洋起源	19
2.5 生命起源	22
2.6 代谢途径进化	25
2.6.1 光合作用: 地球氧气起源	27
2.6.2 化学自养作用	30
2.6.3 厌氧呼吸作用	30
2.7 行星历史比较: 地球、火星和金星	34
2.8 小结	38
第 3 章 大气	40
3.1 引言	40
3.2 大气层结构与大气环流	41
3.3 大气组成	45
3.3.1 气体	45
3.3.2 气溶胶	48

3.4 对流层生物地球化学反应	52
3.4.1 主要组成——氮气和氧气	52
3.4.2 二氧化碳	53
3.4.3 痕量生物源气体	53
3.5 大气沉降	60
3.5.1 过程	60
3.5.2 区域特征与变化趋势	62
3.6 平流层生物地球化学反应	66
3.6.1 臭氧	66
3.6.2 平流层含硫化合物	70
3.7 大气和全球气候模型	71
3.8 小结	73
第4章 岩石圈	75
4.1 引言	75
4.2 岩石风化	76
4.2.1 化学风化	77
4.2.2 次生矿物	82
4.3 土壤化学反应	83
4.3.1 阳离子交换量	83
4.3.2 土壤缓冲能力	84
4.3.3 阴离子吸附量	86
4.3.4 含磷矿物	88
4.4 土壤发育	90
4.4.1 森林	90
4.4.2 草地	94
4.4.3 沙漠	95
4.4.4 土壤发育模型	96
4.5 风化速率	97
4.5.1 化学风化速率	97
4.5.2 机械风化	104
4.5.3 总剥蚀率	106
4.6 小结	107
第5章 生物圈：陆地生态系统碳循环	110
5.1 引言	110
5.2 光合作用	111
5.2.1 水分利用率	112
5.2.2 养分利用率	114
5.3 呼吸作用	115
5.4 净初级生产量	116

5.4.1 NPP 的测量和分配	116
5.5 净生态系统生产量和凋度相关研究	119
5.6 净初级生产量去向	121
5.7 初级生产量和生物量遥感监测	122
5.8 全球净初级生产量和生物量估算	124
5.9 净初级生产量和全球变化	127
5.10 凋落物(碎屑)	130
5.10.1 矿化作用过程	130
5.10.2 腐殖质形成和土壤有机质	132
5.10.3 周转过程	135
5.11 土壤有机质和全球变化	137
5.12 小结	139
第 6 章 生物圈: 陆地系统的生物地球化学循环	141
6.1 引言	141
6.2 陆地植物的生物地球化学循环	143
6.2.1 养分吸收	143
6.2.2 养分平衡	145
6.2.3 氮同化	146
6.2.4 固氮作用	147
6.2.5 菌根真菌	150
6.3 陆地植被中养分归趋与循环	152
6.3.1 系统内养分年循环	152
6.3.2 凋落物	154
6.3.3 系统内循环的养分质量平衡	156
6.3.4 养分利用率	158
6.4 土壤生物地球化学循环	159
6.4.1 土壤微生物生物量和降解过程	159
6.4.2 氮循环	164
6.4.3 土壤含氮气体释放	166
6.4.4 土壤磷循环	173
6.4.5 硫循环	174
6.4.6 林火转化作用	176
6.4.7 动物的作用	177
6.5 景观尺度物质平衡计算	179
6.6 陆地生物地球化学过程的人类活动影响	183
6.6.1 酸雨	183
6.6.2 氮饱和	184
6.6.3 CO ₂ 浓度升高与全球变暖	185
6.7 小结	185

第7章 湿地生态系统	192
7.1 引言	192
7.2 湿地类型	194
7.2.1 湿地水文学	195
7.2.2 湿地土壤	196
7.2.3 湿地植物	197
7.3 湿地生态系统的生产力	198
7.4 湿地有机质储存	201
7.5 水饱和和沉积物微生物代谢作用	204
7.5.1 自由能计算	206
7.5.2 环境氧化还原电位测定	209
7.6 厌氧代谢途径	213
7.6.1 酵解作用	213
7.6.2 硝酸根异化还原作用	213
7.6.3 铁和锰还原作用	215
7.6.4 硫的还原	216
7.6.5 产甲烷作用	217
7.6.6 甲烷好氧氧化作用	219
7.6.7 甲烷厌氧氧化作用	219
7.6.8 微生物群落	221
7.7 湿地和水质	222
7.8 湿地与全球变化	222
7.8.1 全球湿地损失	222
7.8.2 海平面上升与海水入侵	222
7.8.3 升温	223
7.8.4 CO ₂ 浓度上升	223
7.9 小结	224
第8章 陆地水体	226
8.1 引言	226
8.1.1 水的特性	227
8.1.2 水陆关系	228
8.1.3 水生食物网的特性	236
8.2 湖泊	237
8.2.1 湖泊水收支和混合作用	237
8.2.2 湖泊碳循环	240
8.2.3 湖泊养分循环	249
8.3 河流	253
8.3.1 河流水收支和混合作用	254

8.3.2 河流碳循环	257
8.3.3 河流养分涡旋	262
8.4 河口	267
8.4.1 河口水收支与混合	268
8.4.2 河口碳循环	269
8.4.3 河口养分循环	272
8.5 陆地水体的人类影响	274
8.5.1 水利设施	274
8.5.2 富营养化	277
8.5.3 全球气候变化	278
8.6 小结	280
第9章 海洋	283
9.1 引言	283
9.2 海洋环流	283
9.2.1 全球格局	284
9.2.2 厄尔尼诺 (El Niño) 现象	288
9.3 海水的组成	289
9.3.1 主要离子	289
9.4 净初级生产量 (NPP)	291
9.4.1 测量	291
9.4.2 全球格局和估算	293
9.4.3 水溶性有机质	293
9.4.4 海洋净初级生产量的归趋	294
9.5 沉积成岩作用	296
9.5.1 有机成岩作用	296
9.5.2 生源碳酸盐	301
9.6 生物泵: 海洋碳循环模型	303
9.7 海洋养分循环	306
9.7.1 内循环	307
9.7.2 大气-海洋氮交换	310
9.7.3 全球海洋氮收支	312
9.7.4 磷	313
9.7.5 海洋养分循环的人类干扰	316
9.7.6 硅、铁和微量元素	317
9.8 深海热液口生物群落的生物地球化学	322
9.9 海洋硫循环	324
9.10 生物地球化学的沉积记录	325
9.11 小结	327

第 2 篇 全球循环

第 10 章 全球水循环	331
10.1 引言	331
10.2 全球水循环	332
10.3 水循环模型	337
10.4 水循环历史	339
10.5 水循环与气候变化	340
10.5.1 海平面上升	340
10.5.2 海冰	342
10.5.3 陆地水平衡	343
10.6 小结	345
第 11 章 全球碳循环	347
11.1 引言	347
11.2 现代碳循环	348
11.3 碳循环时间演变	354
11.4 大气甲烷	358
11.5 一氧化碳	363
11.6 碳循环和氧循环的耦合	364
11.7 小结	367
第 12 章 全球氮和磷循环	368
12.1 引言	368
12.2 全球氮循环	370
12.2.1 陆地	370
12.2.2 海洋	376
12.3 全球氮循环的时间变化	377
12.4 氧化亚氮	379
12.5 全球磷循环	382
12.6 全球生物地球化学循环的耦合关系	384
12.7 小结	385
第 13 章 全球硫和汞循环	387
13.1 引言	387
13.2 全球硫循环	388
13.2.1 全球硫循环的时间演变	392
13.2.2 大气羰基硫化物收支	396
13.3 全球汞循环	398
13.4 小结	400
第 14 章 展望	402

第 1 篇 过程与反应