

周启星 黄国宏 著

# 环境生物地球化学 及全球环境变化

ENVIRONMENTAL BIOGEOCHEMISTRY AND  
GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGES



科学出版社

中国科学院污染生态化学“百人计划”项目  
国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011808)  
中国科学院陆地生态过程开放研究实验室资助项目

# 环境生物地球化学 及全球环境变化

周启星 黄国宏 著

科学出版社

## 内 容 简 介

本书主要论述生物-非生物复合系统中化学物质的生物地球化学循环的基本过程以及从全球各个水平上进行宏观和微观调控的理论与方法。主要内容包括:环境生物地球化学的学科与归属问题、原理与方法、生物地球化学循环的方式与特征;水、碳、氮、硫、磷、氢、硅、硒、汞、镉、铅、砷、放射性同位素、有机污染物的生物地球化学循环及调控;生物地球化学循环与全球环境变化的耦合关系、全球环境变化的生态效应及环境生物地球化学的应用;特别提出了“全球生态工程”的新概念和一些具体的设想。

本书可以作为环境科学与工程、生态学、化学、地学和农学等专业本科生进一步学习的参考材料或研究生教材,还可供这些专业科技人员参考。

## 环境生物地球化学及 全球环境变化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

周启星 黄国宏 著

责任编辑 史增启 孙桂荣

丹东印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2001年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2001年6月第一次印刷 印张:17

印数:0001-2000 字数:400千字

ISBN 7-03-000130-3/P·18

定价:31.00元

## 序

环境生物地球化学是一门新兴的、综合性的交叉学科，主要研究生物—非生物复合系统中化学物质的生物地球化学循环的基本过程与反应机制，以达到从全球各个层次水平上进行宏观与微观调控的目的。它在解决许多综合性的生态环境问题特别是较大时空尺度上的生态环境问题中已经发挥了重要的作用。可以预料，随着我国生态环境问题的演化和西部大开发战略的启动，环境生物地球化学必将起着越来越大的作用。

长期以来，在许多生态学和环境化学著作中，都含有“生物地球化学循环”这一重要概念。事实上，这一概念应该归属环境生物地球化学这一学科，是环境生物地球化学研究的中心内容。当今世界，许多全球性或区域性生态环境问题的发生和演化，归根到底，是人类活动干扰、打破正常的生物地球化学循环所致，因而都可以用生物地球化学循环的原理加以解释。在这种意义上，环境生物地球化学与全球环境变化又是紧密相连的。

《环境生物地球化学及全球环境变化》一书是中国科学院陆地生态过程开放研究实验室多年研究工作的理论升华，也反映了他们进一步研究的基本走向，涉及到包括宏量物质和痕量物质在内的各种化学物质的研究。因此，本书的出版，将有助于推动这一领域研究的深入进行。

中国科学院院士 徐晓白

2000年12月于北京

## 前 言

地球在不停地旋转，物质在不断地循环，我们的人类文明在逐渐地向“西”移动？……

20 世纪末的十年，世界风起云涌，全球环境变化巨大。从海湾战争、科索沃危机到土耳其、墨西哥和我国台湾地震，从苏联解体到美国的龙卷风，从一些国家的核泄漏到似乎普遍的夏季异常持续高温，既呈现了人为地球化学的强烈作用，又涉及了自然地球化学的剧烈运动，可谓惊心动魄！在这些人为或自然事件中，无一不涉及生物地球化学循环的普遍规律。

20 世纪末的十年，环境生物地球化学的研究在世界各地得到了较为广泛的开展，在许多方面的认识已达到了相当高的水平。特别对 C、N、S、P 和 Hg 等元素的生物地球化学循环，已积累了相当丰富的基础资料。为了正确使用这些资料，促进进一步的研究工作，本书用了十多年的时间，结合中国科学院陆地生态过程开放研究实验室的工作和中国科学院“污染生态化学”百人计划项目的研究，在大量国内外有关资料的基础上，首次从理论上对本学科有关的基本原理和方法进行系统的概述和总结。

本书还首次对人类活动如何打破正常的生物地球化学循环进而引起的全球生态环境变化和全球生态环境变化可能导致的不良生态效应进行了系统的论述，并从环境生物地球化学应用的角度，首次提出了“全球生态环境工程”的新概念和一些具体的设想，这或许是本书的最为成功之处。

随着环境生物地球化学研究的不断深入和发展，在最近几年内，从各个侧面促进了“污染生态化学”这一新学科的诞生和发展。因此，对环境生物地球化学从理论的高度进行系统的认识，有助于阐明污染生态化学的基本原理和基本过程。在这一意义上，本书的出版，是“污染生态过程”研究的一个重要起点，将大大促进污染生态化学的理论发展与具体的实践。

本书共分 20 章，除第 6 章由黄国宏研究员撰写外，其余 19 章由周启星研究员完成。

希望本书的出版，对环境科学与工程、生态学、化学、地学和农学等领域的研究工作者、管理工作者、工程技术人员、大学教师、研究生及高年级大学生的实际工作和学习有所裨益。同时，也衷心希望读者对本书提出批评意见和建议。

作 者

2001 年 3 月于中国沈阳

**Environmental Biogeochemistry  
& Global Environmental Changes**

Qixing Zhou

&

Guohong Huang

**Science Press**

# 目 录

## 上篇 环境生物地球化学原理

第一章 绪论	(3)
第一节 学科定义、任务与范畴	(3)
第二节 学科特点和研究意义	(8)
第三节 环境科学和现代生物地球化学的发展	(10)
第二章 环境生物地球化学原理与方法	(15)
第一节 基本概念	(15)
第二节 基本原理	(22)
第三节 研究的方法学	(25)
第三章 生物地球化学循环的方式与特征	(29)
第一节 生物地球化学循环的基本方式	(29)
第二节 生物地球化学循环的基本特征	(30)

## 中篇 环境生物地球化学循环各论

第四章 水的生物地球化学循环	(45)
第一节 循环的要素	(45)
第二节 库存、通量和停留时间	(49)
第三节 循环的人为效应	(51)
第四节 循环的模拟模型	(54)
第五章 碳的生物地球化学循环	(56)
第一节 循环的要素与基本模式	(56)
第二节 循环的关键反应	(57)
第三节 现代库存和通量	(59)
第四节 工业革命前的循环	(64)
第五节 与其它循环的关系	(65)
第六节 动态描述及其模型	(65)
第七节 温室气体的循环	(67)
第六章 氮的生物地球化学循环	(70)
第一节 循环的要素与基本模式	(70)
第二节 循环的关键反应	(72)
第三节 工业革命前的循环	(74)
第四节 现代库存和通量	(75)



第五节	循环的动态模型 .....	(77)
第六节	NO <sub>x</sub> 和 NH <sub>3</sub> 的亚循环 .....	(79)
<b>第七章</b>	<b>硫的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(82)</b>
第一节	循环的基本过程 .....	(82)
第二节	循环的关键反应 .....	(83)
第三节	工业革命前硫的循环 .....	(85)
第四节	循环的现代库存和通量 .....	(86)
第五节	硫的甲基化机制 .....	(89)
第六节	不同生态系统中硫的循环 .....	(90)
<b>第八章</b>	<b>磷的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(96)</b>
第一节	循环的要素与基本方式 .....	(96)
第二节	循环的关键反应 .....	(100)
第三节	库存、通量和停留时间 .....	(101)
第四节	人类对磷循环的干扰及其后果 .....	(102)
第五节	案例研究:Rhode 河流域磷的循环 .....	(104)
<b>第九章</b>	<b>氧的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(106)</b>
第一节	循环的要素与模式 .....	(106)
第二节	短时间尺度内的循环 .....	(106)
第三节	长时间尺度内的循环 .....	(108)
第四节	循环的数学模拟 .....	(109)
<b>第十章</b>	<b>硅的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(113)</b>
第一节	循环的基本环节与动力机制 .....	(113)
第二节	全球循环的基本模式 .....	(118)
第三节	地球各分室中硅的循环 .....	(120)
第四节	硅循环的生态效应 .....	(125)
<b>第十一章</b>	<b>硒的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(128)</b>
第一节	循环的基本模式和动力 .....	(128)
第二节	循环的重要环节和关键反应 .....	(129)
第三节	循环的通量与现代库存 .....	(131)
第四节	硒循环的生态效应 .....	(132)
<b>第十二章</b>	<b>汞的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(135)</b>
第一节	循环的基本要素与关键反应 .....	(135)
第二节	库存和通量 .....	(137)
第三节	停留时间和毒性 .....	(140)
第四节	在水和土壤分室中的循环 .....	(141)
第五节	汞循环的生态效应 .....	(142)
<b>第十三章</b>	<b>镉的生物地球化学循环 .....</b>	<b>(144)</b>
第一节	循环的基本过程 .....	(144)
第二节	库存与通量 .....	(145)
第三节	停留时间 .....	(148)



第四节	在海洋分室中的循环·····	(148)
第五节	镉循环的生态效应·····	(149)
第十四章	铅的生物地球化学循环·····	(152)
第一节	循环的一般模式·····	(152)
第二节	库存和通量·····	(154)
第三节	停留时间和污染生态效应·····	(157)
第十五章	砷的生物地球化学循环·····	(159)
第一节	循环的一般模式与基本过程·····	(159)
第二节	现代库存和通量·····	(161)
第三节	砷循环的生态效应·····	(162)
第十六章	放射性同位素的生物地球化学循环·····	(166)
第一节	天然放射性物质的存在·····	(166)
第二节	在大气分室中的迁移及其过程·····	(173)
第三节	在陆地和水分室中的迁移及其机制·····	(174)
第四节	在生物分室中的迁移及其机制·····	(176)
第五节	循环及其模型·····	(180)
第六节	生态效应与风险·····	(182)
第十七章	有机污染物的生物地球化学循环·····	(184)
第一节	多氯联苯(PCBs)的循环·····	(184)
第二节	石油及其烃类化合物·····	(187)
第三节	化学农药的循环·····	(193)
第四节	二恶英的循环和危害·····	(199)
第五节	有机染料的循环和危害·····	(200)

## 下篇 全球环境变化

第十八章	生物地球化学循环与全球环境变化·····	(209)
第一节	非生物组分的全球变化·····	(209)
第二节	生物组分的全球变化·····	(211)
第三节	全球气温变化·····	(213)
第四节	臭氧层的耗竭·····	(215)
第五节	酸雨·····	(216)
第六节	湖泊富营养化与海洋赤潮·····	(218)
第七节	烟雾:城市综合病症·····	(219)
第十九章	全球环境变化的生态效应·····	(221)
第一节	植物生态效应·····	(221)
第二节	动物生态效应·····	(225)
第三节	对水生生态系统的影响·····	(226)
第四节	对农业和林业的影响·····	(227)
第五节	人体健康效应·····	(229)

第二十章	环境生物地球化学应用与全球生态环境工程.....	(233)
第一节	生物地球化学循环与水资源开发利用.....	(233)
第二节	生物地球化学循环与工农业清洁生产.....	(236)
第三节	生物地球化学循环与废物资源化.....	(237)
第四节	全球生态环境工程.....	(244)
参考文献	.....	(250)

# Brief Contents

## Part I Principles of Environmental Biogeochemistry

<b>1 Introduction</b> .....	(3)
§ 1.1 Definition, mission and basic category of the subject .....	(3)
§ 1.2 Characteristics of the discipline and its practical significance .....	(8)
§ 1.3 Development of environmental sciences and modern biogeochemistry .....	(10)
<b>2 Principles and Methodology</b> .....	(15)
§ 2.1 Main concepts .....	(15)
§ 2.2 Basic principles .....	(22)
§ 2.3 Methods .....	(25)
<b>3 Modes and Features of Biogeochemical Cycles</b> .....	(29)
§ 3.1 Basic modes of biogeochemical cycles .....	(29)
§ 3.2 Intrinsic features of biogeochemical cycles .....	(30)

## Part II Biogeochemical Cycles in Abiotic—Biotic Complex Systems

<b>4 Biogeochemical Cycles of Water</b> .....	(45)
§ 4.1 Basic elements of water cycling .....	(45)
§ 4.2 Pools, fluxes and resident time .....	(49)
§ 4.3 Human effects of the cycle .....	(51)
§ 4.4 Simulation and models of water cycling .....	(54)
<b>5 Biogeochemical Cycles of Carbon</b> .....	(56)
§ 5.1 Basic elements and modes .....	(56)
§ 5.2 Pivotal reactions .....	(57)
§ 5.3 Modern Pools and fluxes .....	(59)
§ 5.4 Cycles before the industrial revolution .....	(64)
§ 5.5 Interrelationships with other cycles .....	(65)
§ 5.6 Dynamic description and relevant processes .....	(65)
§ 5.7 Subcycles of greenhouse gases .....	(67)
<b>6 Biogeochemical Cycles of Nitrogen</b> .....	(70)
§ 6.1 Basic elements and modes .....	(70)
§ 6.2 Pivotal reactions .....	(72)
§ 6.3 Cycles before the industrial revolution .....	(74)

§ 6.4	Modern pools and fluxes	(75)
§ 6.5	Dynamic models of the cycle	(77)
§ 6.6	Subcycles of $\text{NO}_x$ and $\text{NH}_3$	(79)
<b>7</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Sulfur</b>	<b>(82)</b>
§ 7.1	Basic processes	(82)
§ 7.2	Pivotal reactions	(83)
§ 7.3	Cycles before the industrial revolution	(85)
§ 7.4	Modern pools and fluxes of the cycle	(86)
§ 7.5	Methylation mechanisms of the cycle	(89)
§ 7.6	Sulfur cycling in various ecosystems	(90)
<b>8</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Phosphorus</b>	<b>(96)</b>
§ 8.1	Cycling elements and basic modes	(96)
§ 8.2	Pivotal reactions	(100)
§ 8.3	Pools, fluxes and resident time	(101)
§ 8.4	Human disturbance and its consequences	(102)
§ 8.5	A case study: phosphorus cycling in a valley	(104)
<b>9</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Oxygen</b>	<b>(106)</b>
§ 9.1	Cycling elements and basic modes	(106)
§ 9.2	Short time cycling	(106)
§ 9.3	Long-term cycling	(108)
§ 9.4	Mathematical models of the cycle	(109)
<b>10</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Silicon</b>	<b>(113)</b>
§ 10.1	Basic links and dynamic mechanisms	(113)
§ 10.2	Basic mode of global cycling	(118)
§ 10.3	Silicon cycling in various departments	(120)
§ 10.4	Ecological effects of silicon cycling	(125)
<b>11</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Selenium</b>	<b>(128)</b>
§ 11.1	Basic modes and dynamics	(128)
§ 11.2	Important links and pivotal reactions	(129)
§ 11.3	Fluxes and modern pools	(131)
§ 11.4	Ecological effects from selenium cycling	(132)
<b>12</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Mercury</b>	<b>(135)</b>
§ 12.1	Basic elements and pivotal reactions	(135)
§ 12.2	Pools and fluxes	(137)
§ 12.3	Resident time and toxicity	(140)
§ 12.4	Mercury cycling in water and soil departments	(141)
§ 12.5	Ecological effects from mercury cycling	(142)
<b>13</b>	<b>Biogeochemical Cycles of Cadmium</b>	<b>(144)</b>
§ 13.1	Basic cycling processes	(144)
§ 13.2	Pools and fluxes	(145)

§ 13.3 Resident time .....	(148)
§ 13.4 Cycling in marine departments .....	(148)
§ 13.5 Ecological effects from cadmium cycling .....	(149)
<b>14 Biogeochemical Cycles of Lead .....</b>	<b>(152)</b>
§ 14.1 General cycling modes .....	(152)
§ 14.2 Pools and fluxes .....	(154)
§ 14.3 Resident time and toxicological effects .....	(157)
<b>15 Biogeochemical Cycles of Arsenic .....</b>	<b>(159)</b>
§ 15.1 General cycling modes .....	(159)
§ 15.2 Modern pools and fluxes .....	(161)
§ 15.3 Ecological effects from arsenic cycling .....	(162)
<b>16 Biogeochemical Cycles of Radioactive Substances .....</b>	<b>(166)</b>
§ 16.1 Occurrence of naturally radioactive substances .....	(166)
§ 16.2 Transport and processes in the air department .....	(173)
§ 16.3 Transformation in the land and water department and its mechanisms .....	(174)
§ 16.4 Transformation in the life department and its mechanisms .....	(176)
§ 16.5 Cycling and its models .....	(180)
§ 16.6 Ecological effects and risk .....	(182)
<b>17 Biogeochemical Cycles of Organic Pollutants .....</b>	<b>(184)</b>
§ 17.1 Cycling of PCBs .....	(184)
§ 17.2 Cycling of oils and relevant hydrocarbons .....	(187)
§ 17.3 Cycling of chemical pesticides .....	(193)
§ 17.4 Cycling and harmfulness of PCDD .....	(199)
§ 17.5 Cycling and harmfulness of organic dyes .....	(200)

### Part III Global Environmental Changes

<b>18 Coupling of Biogeochemical Cycles and Global Environmental Changes .....</b>	<b>(209)</b>
§ 18.1 Global changes of abiotic components .....	(209)
§ 18.2 Global changes of biotic components .....	(211)
§ 18.3 Global greenhouse effects and climate changes .....	(213)
§ 18.4 Exhaustion of the ozone layer .....	(215)
§ 18.5 Acid rains .....	(216)
§ 18.6 Lake eutrophication and marine red tide .....	(218)
§ 18.7 Smog: comprehensive symptom of urban illness .....	(219)
<b>19 Ecological Effects from Global Environmental Changes .....</b>	<b>(221)</b>
§ 19.1 Ecological effects of plants .....	(221)
§ 19.2 Ecological effects of animals .....	(225)

§ 19. 3 Influences on aquatic ecosystems .....	(226)
§ 19. 4 Influences on agriculture and forest .....	(227)
§ 19. 5 Human health effects .....	(229)
<b>20 Application of Environmental Biogeochemistry .....</b>	<b>(233)</b>
§ 20. 1 Biogeochemical cycles and reasonable utilization of water resources .....	(233)
§ 20. 2 Biogeochemical cycles and cleaner production of industry and agriculture .....	(236)
§ 20. 3 Biogeochemical cycles and wastewater reclamation and reuse .....	(237)
§ 20. 4 Global ecological engineering .....	(244)
<b>References .....</b>	<b>(250)</b>

# 上篇 环境生物地球化学原理





# 第一章 绪 论

环境生物地球化学 (Environmental Biogeochemistry) 作为一门新兴的、综合性的交叉学科, 由于它在解决许多综合性的生态环境问题特别是较大时空尺度上的生态环境问题中起着非常重要的作用, 已成为当今国外环境科学学科的主要分支之一。然而, 由于历史的原因和当时我国环境科学技术发展水平所限, 我国 20 世纪 80 年代出版的《中国大百科全书·环境科学篇》并没有把它列入“环境科学”的分支学科之一而加以介绍。我国 90 年代以来出版的许多环境科学著作也很少涉及“环境生物地球化学”这一术语, 只是在许多生态学和一些环境化学著作中提及“生物地球化学循环”这一重要概念, 因此有相当一部分人甚至把这一概念与“生态学”相混淆、相等同。为此, 我们有必要对“环境生物地球化学”这一学科从理论的角度进行系统的论述, 这对于推动我国乃至世界环境科学技术的发展有着重要的现实意义和深远的历史意义。

## 第一节 学科定义、任务与范畴

### 一、学科定义

综观国内外生物地球化学在环境保护和生态建设方面的应用现状及发展趋势, 环境生物地球化学从学科上可以初步定义为: 它是一门研究生物—非生物复合系统中化学物质 (包括营养物质, 但主要是针对污染化学物质) 的生物地球化学循环的基本过程 (包括迁移支路、转化机制、库、通量和停留时间等) 与反应机制及其从全球各个水平上进行宏观和微观调控的学科。具体地说, 它有以下三方面的基本内涵:

#### 1. 特定的研究对象

生物—非生物复合系统是这一学科特定的研究对象, 它包括生物和非生物两大分室。其中, 非生物分室涉及到大气、水体和土壤等环境介质及其它化学物质, 生物分室则包括植物、动物、微生物和人类等生命介质。可见, 生物—非生物复合系统包容了广泛的物质组成和一定的时间尺度, 而化学物质则把该复合系统中各个组分串联或者并联在一起, 从而使这一研究对象更加具体化 (表 1.1)。在这种意义上, 严格地说, “生物—非生物复合系统”这一术语与生态学中的“生态系统”在概念上就有着本质的区别。不过, 它们在具体的内涵上, 其中所包括的各种组成成分, 基本上还是一致的。

#### 2. 明确的中心内容

至今, 环境生物地球化学学科的中心内容已经确立, 即它以生物—非生物复合系统中化学物质 (尤其是污染化学物质) 的生物地球化学循环及其过程为主题。从这一主题出发, 特别对全球污染发生的生物地球化学机制与过程进行探索, 并涉及到对人体健康影响的生物地球化学机制的研究。也就是说, 化学污染物质在生物—非生物复合系统中的迁移动力学以及生物地球化学过程与机制的研究, 是这一学科的实质性问题。