



全球变化与地球系统科学系列

Series in Global Change and Earth System Science

# 生物地球化学循环

——计算机交互式研究地球系统科学与全球变化

## Biogeochemical Cycles

A Computer-Interactive Study of Earth System Science and Global Change

[美] W. L. Chameides E. M. Perdue 著

张晶 译



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



全球变化与地球系统科学系列  
Series in Global Change and Earth System



# 生物地球化学循环

——计算机交互式研究地球系统科学与全球变化

## Biogeochemical Cycles

A Computer-Interactive Study of Earth System Science and Global Change

[美] W. L. Chameides E. M. Perdue 著  
张晶 译

SHENGWU DIQIU HUAXUE XUNHUAN

 高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字 : 01-2011-6999 号

Copyright © 1997 by Oxford University Press, Inc.

BIOGEOCHEMICAL CYCLES: A COMPUTER-INTERACTIVE STUDY OF EARTH SYSTEM SCIENCE AND GLOBAL CHANGE, FIRST EDITION was originally published in English in 1997. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

本书 BIOGEOCHEMICAL CYCLES: A COMPUTER-INTERACTIVE STUDY OF EARTH SYSTEM SCIENCE AND GLOBAL CHANGE, FIRST EDITION 英文原版于 1997 年出版。本书翻译版由牛津大学出版社授权出版。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

生物地球化学循环——计算机交互式研究地球系统科学与全球变化 / (美) 席明之 (Chameides, W.L.), (美) 珀杜 (Perdue, E.M.) 著; 张晶译. — 北京: 高等教育出版社, 2012.3

书名原文: Biogeochemical Cycles: A Computer-Interactive Study of Earth System Science and Global Change

ISBN 978-7-04-034340-3

I. ①生… II. ①席… ②珀… ③张… III. ①生物地球化学—地球化学循环—研究 IV. ①P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 008246 号

策划编辑 柳丽丽	责任编辑 马明敏 柳丽丽	封面设计 张楠	版式设计 马敬茹
插图绘制 郝林	责任校对 王雨	责任印制 张福涛	

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 北京七色印务有限公司  
开本 787mm×1092mm 1/16  
印张 13.75  
字数 260千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landracom.com>  
<http://www.landracom.com>  
版次 2012年3月第1版  
印次 2012年3月第1次印刷  
定价 39.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 34340-00

## 内容简介

本书不仅对地球系统的各个组分（固体地球、大气、海洋及生物圈）进行了介绍，还从化学基本原理出发，介绍了主要化学元素（碳、氮、磷、硫和氧）在这些组分间的全球生物地球化学循环，并利用模型对其进行了数值模拟。本书的第1章、第2章和第3章依次给出生物地球化学循环的介绍和基本原理的回顾（即基本的化学概念、地球系统的相关特点以及系统的关键物理、生物和化学过程）。第4章介绍了代表生物地球化学循环的数学形式，由一系列微分方程和解方程技巧表示。第5章、第6章、第7章和第8章分别讨论并模拟了全球磷、碳、硫和氮的循环。第9章综合了磷、碳、硫和氮的循环，并讨论了大气中氧气的稳定性。总的来说，这是一本较综合全面的生物地球化学循环参考书，其中的模型程序使学生可以与教师进行交互式工作，也可使个人和小组课题在教室外进行。

---

## Abstract

This book not only describes the individual components of the Earth system – the solid Earth, atmosphere, ocean and biosphere, but also gives consideration to the global biogeochemical cycles of major elements (Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur and Oxygen) among these components based on the fundamental chemical principles. Chapters 1, 2 and 3 provide an introduction and review of the fundamentals (i.e., basic chemical concepts, relevant features of the Earth system, the key physical, biological and chemical processes at work in this system). Chapter 4 presents a review of the mathematical formalism used to represent biogeochemical cycles in terms of a system of differential equations and the techniques used to solve these equations. Chapters 5, 6, 7, and 8 contain detailed discussions of the global cycles of P, C, S, and N, respectively. Chapter 9 integrates the cycles of P, C, S, and N in order to investigate the stability of atmospheric oxygen. Overall, this book presents an integrated and comprehensive text on the study of biogeochemical cycles. Moreover, the computer program used in this book allows students to work interactively with the professor, and also serves as the basis for individual and group projects executed outside of the classroom.

# 中文版序言

地球系统指的是地球大气圈、陆地、水圈、岩石圈、生物圈相互作用、相互影响的物理、化学、生物与人类活动的集合。地球系统科学研究是将全球大气圈、水圈、岩石圈、生物圈作为相互作用的大系统,研究圈层与圈层之间的物理、化学、生物过程,其时间尺度从数年、数十年、百年至数百年,并主张将社会、经济、政治等人类活动包括在内。地球系统科学是跨自然科学与社会科学的学科。

地球系统科学发轫于 20 世纪 80 年代,由于全球环境变化、国际经济和政治等问题,由于对地观测技术和计算机等科学技术的进步,全球变化与地球系统科学的研究工作在近 20 多年里以燎原之势迅速开展。近年来,与地球科学相关的行业部门、研究机构、高等学校、政府机关、国际组织和公众媒体等对具有全球视野和多学科交叉能力的全球变化和地球系统学科背景的综合人才均有迫切的需求。

长期以来,地球科学的发展延续着专门化的学科发展格局,难以培养和造就能够解决涉及地学、生命科学、社会科学等多学科交叉的全球变化与地球系统学科专门人才。尽管我国一些高等院校及科研单位相继成立了以“加强全球变化与地球系统科学学科建设、培养高水平研究人才”为目标的研究与教学机构,然而,在这样一门全新的交叉集成学科建设方面,我们还没有令人满意的全球变化与地球系统学科体系,包括人才培养体系、课程教育体系等。

全球变化与地球系统学科建设不可能一蹴而就,但又必须要解决问题。我认为有以下几个因素需要考虑:

第一是社会需求问题。学科建设,如果不考虑社会需求,学科将不可能持续发展。全球变化与地球系统学科培养的人才,他们的就业主要在两个方面:一部分从事科学研究工作,另外一部分可能分布在各个行业,利用自己在全球变化与地球系统学科领域的专业知识去服务于某些特定行业。对于研究型人才的培养,我认为应该让他们具备对地学各分支学科以及对数学、物理学、化学、生物学、计算机科学和经济学等相关学科提出问题的能力。比如,全球变化与地球系统学科对大气学科有什么要求、对地质学科有什么要求、对计算机学科有什么要求等。这是培养研究型人才的基本要求,人才培养当中要考虑这方面的训练。对于应用型人才的培养,则主要考虑培养具有相应行业延伸的能力。

第二是课程教育问题。基础课程设置,可以和地学每个相应的学科或者包括物理学、数学、计算机科学等基础学科的专家共同来研究并提炼出一些基础科学的授课内容,例如,大气学科支撑全球变化研究到底是哪个方面需要,大气科学对全球变化研究支撑的主要是哪门技术。我们现在不可能把所有的课都上好,都上完。但是我们可以从不同的学科当中筛选出有利于支撑全球变化与地球系统学科的一些基础课。专业课程设置,要考虑具体单位的优势和特色,以及当前教师的研究方向。专业课应当立足于不同方向的选修课,而不一定都成为必修课。我个人比较主张把基础打牢一些,基础课要上牢,专业课不一定上得那么多。总的来讲,课程教育的目的就是让学生具有开展科学研究的能力,举一反三的能力,而不是很多知识。

第三是教材建设问题。如果要对我国全球变化与地球系统学科有所贡献,就一定要出版几本好教材。我们需要组织高等院校、研究单位共同来编写一套教材,这是非常重要的工作。高质量的教材是学科建设的重要标志之一。

北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院张晶翻译的《生物地球化学循环——计算机交互式研究地球系统科学与全球变化》是一部适用于高等学校有关专业学生的参考书,同时它也是广大全球变化和地球系统学科相关领域科学工作者和中学地理教师的有益读物。我谨向读者推荐。

全球变化国家重大科学研究计划专家组组长,中国科学院院士  
2012年1月

# 前 言

全球生物地球化学循环处于地球系统科学学科的智力核心。构成这些循环的庞大而复杂的生物、地质和化学过程使得元素在地球各圈层之间发生转化和传输,从而保证地球化学系统发挥正常功能,并决定地球环境总体的化学和物理性质。因此,想要理解全球环境变化及其对地球上生命的意义,需要首先进行全球生物地球化学研究。

然而,要把全球生物地球化学循环这门课程搞清楚,也是该领域教师和学生所面临的巨大挑战。从各学科科学家的角度来讲,生物地球化学循环迫使我们跨越各学科的界限:物理学家需要研究化学和生物,而生物学家需要了解物理和化学,等等。作为地球科学的专家,生物地球化学循环要求我们从整体着眼;比如,大气科学家必须要关注海洋科学、地球物理学、生态学等。对于地球化学循环的研究甚至会使我们不时地面对超自然的和隐喻性的情况,例如,在考虑 James Lovelock 的盖娅假说(Gaia Hypothesis)<sup>①</sup>时,全球生物地球化学循环就被看做是与活的行星生物的新陈代谢一样。

数学与数值模拟给参与生物地球化学循环这门课程的学生和教师提出了另一个挑战。虽然揭开构成生物地球化学循环中生物和非生物过程的奇妙之谜可能是引人入胜的智力训练,但如果没有数学和数值模型,那只能是定性的推论。数学和数值模型的应用将这种定性推论转变为对生物地球化学循环动力学、促进全球变化的倾向、确定过去和未来地球行进方向中作用等方面的定量分析。

本书尝试将生物地球化学循环研究中所有这些重要元素整合在一起,成为一本全面综合的教科书。为了这一目标,第1章、第2章和第3章依次给出生物地球化学循环的介绍和基本原理的回顾(即基本的化学概念、地球系统的相关特点和系统的关键物理、生物和化学过程)。根据读者的科学背景和训练基础,这几章中的部分内容可略过。第4章回顾了代表生物地球化学循环的数学

---

<sup>①</sup> 盖娅假说(Gaia Hypothesis),在 James Lovelock 的《盖娅:地球生命的新视野》(*Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, 1979)一书中给出了清楚、确切的说明。该假说提出,地球可以被看成活的生物,可以为了地球生物的利益和生存而发生作用从而影响化学和物理环境。该假说与被更广泛接受的达尔文(Darwinian)说形成尖锐的对比——达尔文说认为,生命是相互竞争的并努力适应危险的环境和在很大程度上无生命的地球。

形式,由一系列微分方程和解方程技巧表示。这些基本概念可通过一个包括人类社会和虚构的“生物地球化学大学”的简单循环来表示。为了进一步帮助读者理解,我们开发了一个计算机程序 BOXES。本书第 4 章结尾处简要介绍了该程序;该程序方便使用的用户环境,使生物地球化学循环数值模型构建变得容易,而不会陷在类似模型繁琐的具体数值计算中。(对微分方程和数值技术掌握很少的学生也会发现自己可以使用 BOXES,而不必完全消化第 4 章的内容。)我们发现这个程序是极有价值的教学工具——使学生可以与教师进行交互式工作,也是个人和小组课题能够在教室外进行的基础。

第 5 章、第 6 章、第 7 章和第 8 章分别讨论全球磷(P)、碳(C)、硫(S)和氮(N)的循环。在每个循环中,BOXES 都用来演示循环的关键特征。第 9 章将 P、C、S 和 N 的循环综合在一起,并讨论了大气中氧气(O<sub>2</sub>)的稳定性(在太阳系内,氧气在地球上的存在是独一无二的)。每一章的后面都有习题,其中许多习题可以通过 BOXES 来求解。

本书是从我们在佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)“全球生物地球化学循环”的教学经验中总结而来的。期间有很多研究生见证了我们在完成这一具有挑战性主题所做的努力,并参与了我们的 BOXES 早期版本的开发;对于他们,我们表示感谢。我们尤其感谢耶鲁大学 A. C. Lasaga 博士,是他在讲座《地球化学循环的动力学处理》(Kinetic Treatment of Geochemical Cycles,发表于 1980 年的 *Geochimica et Cosmochimica Acta*)中为我们提供了 BOXES 数值程序编码的数学公式化表达方式。

W. L. Chameides

E. M. Perdue

佐治亚州亚特兰大



# 目 录

<b>第 1 章 生物地球化学循环及其在地球系统中的作用</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 开放循环与封闭循环 .....	2
1.3 我们为什么关心生物地球化学循环? .....	4
1.4 我们应该研究哪些元素? .....	5
建议阅读 .....	7
<b>第 2 章 化学热力学原理</b> .....	8
2.1 引言 .....	8
2.2 基本要点 .....	8
2.3 酸-碱平衡 .....	12
2.4 相变 .....	17
2.5 平衡在 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-Ca}$ 系统中的应用 .....	17
2.5.1 纯碳酸系统 .....	18
2.5.2 碳酸钙系统 .....	20
2.6 氧化还原性质 .....	24
2.6.1 价态 .....	24
2.6.2 氧化还原半反应 .....	26
2.6.3 氧化还原平衡 .....	28
2.7 $\text{pe-pH}$ 稳定性图 .....	29
2.7.1 水的 $\text{pe-pH}$ 稳定性图 .....	31
2.7.2 简单硫系统的 $\text{pe-pH}$ 稳定性图 .....	32
2.7.3 $\text{pe-pH}$ 稳定性图中的亚稳态边界 .....	35
2.8 结论 .....	36
建议阅读 .....	36
习题 .....	37
<b>第 3 章 地球系统</b> .....	38
3.1 引言 .....	38
3.2 水圈 .....	40
3.2.1 海洋底部 .....	40

3.2.2	海洋的物理性质 .....	41
3.2.3	海洋化学 .....	42
3.2.4	海洋年龄——一个悖论? .....	44
3.3	岩石圈 .....	46
3.3.1	地壳中的岩石和矿物质 .....	47
3.3.2	板块构造学说 .....	48
3.4	大气圈 .....	50
3.4.1	大气的组成 .....	51
3.4.2	大气的物理性质 .....	53
3.4.3	大气风与湍流混合 .....	55
3.5	生物圈 .....	57
3.5.1	新陈代谢过程 .....	57
3.5.2	生物圈的组成 .....	60
3.5.3	初级生产 .....	63
3.6	结论 .....	64
	建议阅读 .....	67
	习题 .....	67
<b>第4章</b>	<b>生物地球化学循环的数学模拟 .....</b>	<b>69</b>
4.1	引言 .....	69
4.2	线性箱式模型 .....	70
4.3	简单的例子:生物地球化学大学-世界循环 .....	70
4.3.1	$C_1$ , 世界的人数 .....	71
4.3.2	$C_2$ , 大学的人数 .....	72
4.3.3	$k_{2 \rightarrow 1}$ , 从大学到世界的转移系数 .....	72
4.3.4	$k_{1 \rightarrow 2}$ , 从世界到大学的转移系数 .....	72
4.4	运用微分方程模拟大学-世界循环 .....	73
4.4.1	第一组解 .....	75
4.4.2	第二组解 .....	75
4.4.3	完全一般解 .....	76
4.4.4	例1:稳态解 .....	76
4.4.5	例2:大学创立时期的初始状态 .....	77
4.4.6	例3:扰动试验 .....	77
4.4.7	小结 .....	78
4.5	生物地球化学循环中的特征值和特征向量解法 .....	80
4.5.1	含 $N$ 个储库的一般问题 .....	80
4.5.2	用向量矩阵形式设立问题 .....	80

4.5.3	特征值和特征向量问题一般解的获取	82
4.5.4	应用初始条件获得特定解	84
4.5.5	特征值和特征向量方法小结	84
4.6	运用 BOXES 模拟生物地球化学循环的方法	85
4.7	结论	86
	建议阅读	87
	习题	87
<b>第 5 章</b>	<b>全球磷循环</b>	<b>88</b>
5.1	引言	88
5.2	磷的氧化还原性质	90
5.3	磷循环的生物地球化学反应	91
5.3.1	磷循环与生物圈的耦合——光合与呼吸	91
5.3.2	磷循环与岩石圈的耦合——沉积与风化	92
5.4	磷的循环	93
5.4.1	$C_1$ : 沉积物储库	94
5.4.2	$C_2$ : 陆地土壤储库	94
5.4.3	$C_3$ : 陆地生物储库	94
5.4.4	$C_4$ : 海洋生物储库	94
5.4.5	$C_5$ : 表层海洋储库	95
5.4.6	$C_6$ : 深层海洋储库	95
5.4.7	$F_{2 \rightarrow 1}$ : 陆地土壤储库到沉积物储库流量	95
5.4.8	$F_{2 \rightarrow 3}$ : 陆地土壤储库到陆地生物储库流量	95
5.4.9	$F_{3 \rightarrow 2}$ : 陆地生物储库到陆地土壤储库流量	95
5.4.10	$F_{2 \rightarrow 5}$ : 陆地土壤储库到表层海洋储库流量	95
5.4.11	$F_{5 \rightarrow 4}$ : 表层海洋储库到海洋生物储库流量	96
5.4.12	$F_{4 \rightarrow 5}$ : 海洋生物储库到表层海洋储库流量	96
5.4.13	$F_{4 \rightarrow 6}$ : 海洋生物储库到深层海洋储库流量	96
5.4.14	$F_{5 \rightarrow 6}$ : 表层海洋储库到深层海洋储库流量	96
5.4.15	$F_{6 \rightarrow 5}$ : 深层海洋储库到表层海洋储库流量	96
5.4.16	$F_{6 \rightarrow 1}$ : 深层海洋储库到沉积物储库流量	97
5.4.17	$F_{1 \rightarrow 2}$ : 沉积物储库到陆地土壤储库流量	97
5.4.18	建立矩阵 $K$	97
5.5	运用 BOXES 研究磷循环	97
5.5.1	试验 1: 验证稳态模型	98
5.5.2	试验 2: 人为活动的影响	99
5.5.3	试验 3: 光合作用加倍	100

5.6	结论 .....	102
	建议阅读 .....	102
	习题 .....	103
<b>第 6 章</b>	<b>全球碳循环</b> .....	104
6.1	引言 .....	104
6.2	碳的氧化还原性质 .....	108
6.3	工业化前碳的全球生物地球化学循环 .....	110
6.4	人为排放的影响及其“留存大气比例” .....	112
6.4.1	运用 BOXES 模型进行简单模拟 .....	112
6.4.2	BOXES 模型的“准非线性”模拟 .....	114
6.5	人为干扰的持续性 .....	121
6.6	结论 .....	122
	建议阅读 .....	123
	习题 .....	123
<b>第 7 章</b>	<b>全球硫循环</b> .....	124
7.1	引言 .....	124
7.2	硫的氧化还原性质 .....	125
7.3	硫循环中的重要生物地球化学反应 .....	127
7.3.1	黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )的形成与风化 .....	129
7.3.2	石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )的形成与风化 .....	130
7.4	工业化前的全球硫循环 .....	131
7.5	数值试验 1:二叠纪时期石膏沉积物增加的模拟 .....	133
7.6	数值试验 2:人为干扰的影响和持续性 .....	136
7.7	结论 .....	138
	建议阅读 .....	139
	习题 .....	139
<b>第 8 章</b>	<b>全球氮循环</b> .....	141
8.1	引言 .....	141
8.2	氮的氧化还原性质 .....	143
8.3	氮循环的关键生物地球化学反应 .....	145
8.3.1	氮的固定——生物固氮与非生物固氮 .....	145
8.3.2	氮的同化或光合作用 .....	146
8.3.3	同化硝酸盐的还原 .....	147
8.3.4	氨化或矿化 .....	147
8.3.5	硝化 .....	147
8.3.6	氨的挥发 .....	148

8.3.7 大气化学 .....	148
8.3.8 反硝化 .....	153
8.4 工业革命以前的稳态氮循环 .....	153
8.5 数值试验:人类扰动的影响及持续时间 .....	157
8.6 结论 .....	160
建议阅读 .....	161
习题 .....	161
<b>第9章 综合循环:大气氧的稳定度 .....</b>	<b>163</b>
9.1 引言 .....	163
9.2 短时间尺度内的氧循环:生物圈的连接 .....	164
9.3 长时间尺度上的氧循环:岩石圈的连接 .....	167
9.4 构建氧循环的数学模型 .....	169
9.4.1 微分方程 .....	169
9.4.2 流量数学表达式的推导 .....	170
9.4.3 方程求解 .....	174
9.5 数值试验1:再论二叠纪时期石膏沉积的加强 .....	174
9.5.1 试验设置 .....	175
9.5.2 试验结果 .....	175
9.6 数值试验2:世界末日情景 .....	176
9.7 数值试验3:利用氧循环来寻找“失踪的碳” .....	178
9.7.1 试验设置 .....	178
9.7.2 试验结果 .....	179
9.8 结论 .....	181
建议阅读 .....	181
习题 .....	182
<b>附录 平衡常数(25 °C) .....</b>	<b>183</b>
<b>专业术语 .....</b>	<b>187</b>
<b>索引 .....</b>	<b>194</b>
<b>译后记 .....</b>	<b>202</b>

---

# 第 1 章

## 生物地球化学循环及其 在地球系统中的作用

“生物地球化学：一门研究地球上化学物质与  
植物和动物生命关系的科学。”

Webster's New Collegiate Dictionary

### 1.1 引 言

地球上几乎每个有生物参与的化学反应都在某种程度上与生物地球化学循环有关,并最终与物种产生一定联系。人类,作为地球生物群落的成员,参与这些循环并依赖它们生存。或许,最为人们所熟悉的生物地球化学循环是涉及碳(C)氧(O)循环的呼吸作用和光合作用(图 1.1)。比如,在我们的家中,室内植物通过光合作用消耗二氧化碳( $\text{CO}_2$ ),产生氧气( $\text{O}_2$ );而我们则通过呼吸作用消耗  $\text{O}_2$ ,产生  $\text{CO}_2$ 。当然,在更大的尺度上,光合作用和呼吸作用在支持生命的过程中起到了更加深远的作用。除了产生  $\text{O}_2$ ,光合作用还允许绿色植物利用来自太阳的辐射能,将水( $\text{H}_2\text{O}$ )与  $\text{CO}_2$  中的 C 原子化合成为有机分子,如碳水化合物,并以化学能的形式将能量储存起来。呼吸作用有机体吸收有机 C 以及由绿色植物产生的  $\text{O}_2$ ,导致合成放热反应即能量释放反应的发生,从而释放出化学能。在此过程中, $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  回到了环境中,有机体则获得了它们生存、生长所需要的能量。

上面的这个简单例子说明了生物地球化学循环的三个关键特点。第一,该循环描述了地球上元素的化学和物理转化,因此在“生物地球化学”中有“地球”

一词。第二,该循环几乎总是有至少一个生物所驱动或者生物的过程在起作用,所以在此有“生物”一词。第三,由于在其中一个过程中消耗的化学物质,最终在后来的过程中再次产生,因此我们将这些过程一起称为“循环”。从而,我们就有了“生物地球化学循环”。

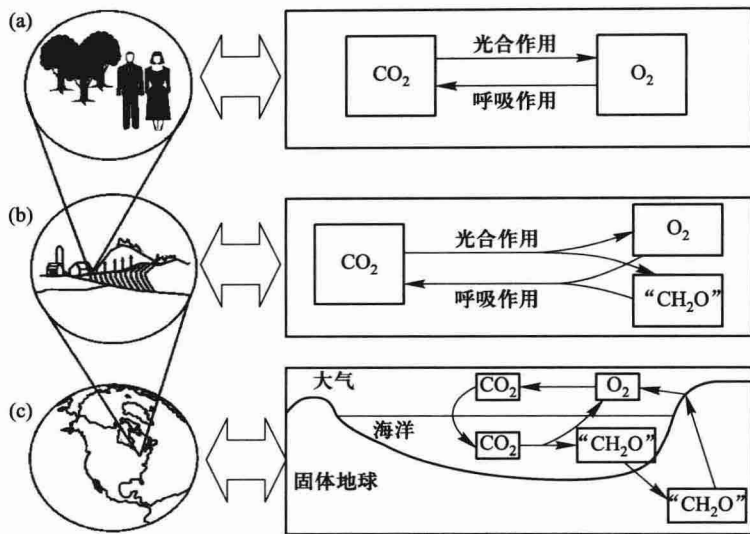


图 1.1 碳(C)的生物地球化学循环对地球上几乎每个活的生物的生存都是至关重要的。(a)在最简单水平上,可以认为该循环是由两个生物地球化学过程构成的:绿色植物的光合作用和动物的呼吸作用。光合作用会吸收二氧化碳( $\text{CO}_2$ ),同时释放氧气( $\text{O}_2$ )。呼吸作用会产生  $\text{CO}_2$ ,消耗  $\text{O}_2$ 。(b)除了产生  $\text{O}_2$ 外,光合作用还生成有机物(用“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”表示)。在呼吸作用中,“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”与  $\text{O}_2$ 化合后产生  $\text{CO}_2$ 以取代系统在光合作用中损失的  $\text{CO}_2$ 。在“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”和  $\text{O}_2$ 化合的过程中,释放的能量可提供给呼吸的生物进行新陈代谢过程并维持生命。(c)在全球尺度上,C的循环就复杂得多了,包括了下列过程:(1)大气中的  $\text{CO}_2$ 溶解到海洋中;(2)浮游植物进行光合作用,使溶解态  $\text{CO}_2$ 转化为  $\text{O}_2$ 和“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”; (3)  $\text{O}_2$ 向大气的传输;(4)光合作用产生的“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”中,一少部分下沉并沉积在海底;(5)被沉积的“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”经过几百万年的板块构造和上升运动,最终输送到地球表面;(6)“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”通过风化过程被氧化,由此去除了大气中的  $\text{O}_2$ 并归还了大气在循环开始时损失的  $\text{CO}_2$ 。

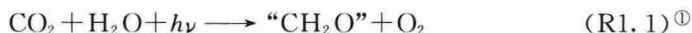
## 1.2 开放循环与封闭循环

生物地球化学循环可以是开放的,也可以是封闭的。在开放的循环中,物质可以流入或流出循环。例如,前面所描述房间内 C 和 O 的光合作用/呼吸作用的循环就是一个开放循环的例子。无疑,任何房间内的  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  中很大比

例都来自于户外,并被户外的有机体所消耗。而在封闭的循环中,物质不会流入或流出循环。在这种情况下,可以说循环内每种元素的总量是“守恒的”,这与物理学上的“热力学第一定律”关于能量守恒的描述是非常相似的。

我们可以将地球系统(即海洋、大气与固体地球)近似看作是一个封闭系统。在该系统中没有物质的流入和流出。(实际上确实有少量来自流星、宇宙尘埃等的物质使地球质量增加,也有氢(H)逃逸到太空而使地球质量有所减少,但是这些都只占地球质量非常少的比例。)因此,本书的核心——所谓“全球”生物地球化学循环,即描述全球尺度上元素的循环问题,实际上几乎在任何一种情况下,都可以当做一个封闭循环来对待。比如在图 1.1 所描述的 C 循环中,只有在图中(c)部分所示的全球循环才是封闭循环,其中在光合作用中从  $\text{CO}_2$  转化成有机 C 的每一个 C 原子都在后来某些时候以  $\text{CO}_2$  的形式返回到系统之中。

因为全球生物地球化学循环是封闭循环,根据定义,封闭循环不会产生净的化学变化。循环中在一个过程中消耗的每一种化学物质,都会经由另一个过程而产生,所以不会在完整的循环中有任何化合物的净生成或净消耗。例如,最简单的 C 和 O 的光合作用/呼吸作用循环即是如此。尽管每个过程实际都包含了许多单个的初级反应,我们仍然可以采用一个化学计量反应来代表这些反应的总和。光合作用从化学计量学方面表示为

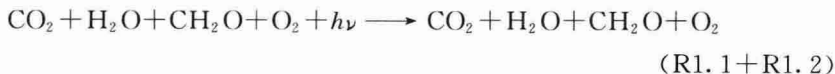


而呼吸作用则表示为



在这些反应中,我们采用  $h\nu$  表示来自太阳的辐射能量,用“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”表示有机物质。有机化合物中包含至少一个 C 原子,与至少一个 H 原子通过化学键结合。有机体中最常见的有机化合物是碳水化合物。碳水化合物中包含 C、H、O 原子,而且通常是以 1:2:1 的比例存在的。因此,在简单的化学计量反应如(R1.1)和(R1.2)中,“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”经常被用来表示碳水化合物。在后面的章节中所讨论的系统将更加复杂,也将采用更加完全的化学计量反应方程式来描述光合作用和有机化合物。

将反应(R1.1)和(R1.2)相加,可以得到光合作用和呼吸作用的净化学效应。可以看出,在整个式子左侧出现的每种化学物质,同时在式子右侧也出现,即



---

① 符号(R $x$ . $y$ )用来表示化学反应,其中 $x$ 代表该反应首次出现时所在的章节号码,而 $y$ 代表该反应在该章出现的次序。因此,(R1.1)和(R1.2)分别表示第1章的第一个和第二个反应。



因此,我们可以认为,光合作用和呼吸作用的加和并不产生“净的化学效应”。虽然本书中所讨论的循环要比这里考虑的简单光合作用/呼吸作用复杂得多,但是这些循环都应该具有相同的基本性质,即在循环中所有化学计量反应的加和不会产生净的化学变化,只有极少例外。

### 1.3 我们为什么关心生物地球化学循环?

既然生物地球化学循环并不产生净的化学变化,人们就可能问这样一个问题:“为什么我们还要费事研究这些?”答案是,尽管生物地球化学循环并不产生净的化学变化,但是这些循环实现了对维持地球上生命非常重要、关键的许多功能,因此我们要研究这些循环。比如,这些功能之一与地球所接收的太阳辐射能量的储存和利用有关系。通常,生物地球化学循环描述了生命有机体吸收太阳辐射能量并以化学能的形式储存起来的一个途径(即太阳辐射能量用来制造化合物,这些化合物通过与环境其他物质发生化学反应将太阳能转化为热能)。这种化学能或燃料可以由有机体储存起来以备将来使用,也可以从一处被转移到另一处,或者从一个有机体交换到另一个有机体(一般这种“交换”通过某种形式的放牧或狩猎来实现),直到最终在生物圈内通过新陈代谢而消耗并向环境释放出热能。

另一个重要的功能是物质的循环回收。由于地球是一个封闭系统,可被生物圈利用的物质的量是一定的。全球生物地球化学循环作为一个巨大的物质回收系统,使生物圈在其新陈代谢过程中一次又一次地反复利用这些元素。如果没有这些循环,生物圈最终会由于充满了自己的废物而慢慢停止下来。比如,在图 1.1(c)所演示的全球 C 循环。设想,如果我们突然间将埋藏在海底的有机 C 输送到地表的途径切断,那么最终现在大气和海洋中的所有的 C 都将被转化为“ $\text{CH}_2\text{O}$ ”并且被深埋在海底,再也没有多余的  $\text{CO}_2$  可以用来进行光合作用,我们也就会面临全面的食物危机了。

James Lovelock 博士建议,在理解地球上的生物及其所处物理化学环境的关系时,可以采用类比的方法——即将地球类比为生命有机体;而这个类比,就称为盖娅假说(Gaia Hypothesis)<sup>①</sup>。虽然该假说曾经被批评太过简单,但是它却为我们提出了有益的见解。如果我们采纳了该类比,那么全球生物地球

---

<sup>①</sup> 关于盖娅假说的最初讨论参见 Lovelock, J. E., *Gaia as seen through the atmosphere, Atmospheric Environment*, 6, 579-580, 1972. 以及 Margulis, L., and J. E. Lovelock, *Biological modulation of the earth's atmosphere, Icarus*, 21, 471-489, 1974. 这之后 James Lovelock 又有两本非常吸引人的,也很易读的书出版:*Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, 1979. 和 *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*, W. W. Norton and Co., London, 1988.