

# 生物地球化学概论

An Introduction to Biogeochemistry

韩兴国 李凌浩 黄建辉 主编



CHEP  
高等教育出版社



Springer  
施普林格出版社

# 生物地球化学概论

An Introduction to Biogeochemistry

韩兴国 李凌浩 黄建辉 主编



CHEP  
高等教育出版社



Springer  
施普林格出版社

(京) 112 号

**图书在版编目(CIP)数据**

生物地球化学概论/韩兴国等主编. —北京: 高等教育出版社;  
海德堡: 施普林格出版社, 1999. 8

ISBN 7-04-007757-4

I. 生… II. 韩… III. 生物化学: 地球化学 IV. P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 31809 号

生物地球化学概论

韩兴国 李凌浩 黄建辉 主编

---

出版发行 高等教育出版社 施普林格出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京民族印刷厂

开 本 787×1092 1/16

版 次 1999 年 8 月第 1 版

印 张 21

印 次 1999 年 8 月第 1 次印刷

字 数 520 000

定 价 35.00 元

---

©China Higher Education Press Beijing and Springer-Verlag Heidelberg 1999

**版权所有 侵权必究**

## 序 言

生物地球化学(biogeochemistry)是以研究地球表面化学过程为主,涉及地球科学与生命科学诸多分支学科,具有高度综合性的一门交叉学科。通过考察化学物质(元素)在大气、海洋与陆地之间以及它们内部各层次之间的生物地球化学循环过程,确定生命系统在漫长地质时期的进化过程中是如何影响地球化学环境,预测在未来广阔时空尺度上,生命系统,特别是人类将会对海洋与大气的组成成分、陆地生物圈的物质循环过程以及全球环境产生何种影响是生物地球化学研究的主线内容。由于生物地球化学涉足的领域与当今人类所引致和面临的重大生态、环境问题诸如全球变化、酸雨、臭氧层破坏和农药与工业污染物质泛滥等的联系是如此密切,使得这方面的研究成为当前国际上地学与生命科学研究中备受瞩目的核心内容之一。

在过去的几十年中,生物地球化学理论研究得到了迅速发展,出版了大量的专著和研究论文。但将生物地球化学作为一门学科,对此加以系统归纳和概括,对其范畴进行准确界定的专著并不多。进入90年代,在美国出版了两部相关专著使得这一状况得到改观。其一是《Global Biogeochemical Cycles》(Butcher *et al.*, 1992),其二是《Biogeochemistry: An Analysis of Global Change》(Schlesinger, 1997)。在我国,这样的专门论著很少,并且对于生态学背景的研究者和学生使用起来比较困难。有鉴于此,我们组织有关学者编写了《生物地球化学概论》。

本书以陆地生态系统为中心,共分12章,对生物地球化学的基本概念和原理进行了阐述,对一些重要元素在各个“库”中的分布及其全球生物地球化学循环过程进行了概述,介绍了模型手段在生物地球化学循环研究中的具体应用。此外,该领域在近期内的研究进展和较新成果在本书中也部分地有所体现。具体内容与分工是,第1章(导论)集体讨论由白永飞执笔,第2章(地球起源与生命演化)由白永飞编译,第3章(大气圈)由贺金生编写,第4章(土壤圈)由王其兵编写,第5章(陆地生物圈)由李凌浩、韩兴国编写,第6章(全球水循环)由牛海山编写,第7章(全球碳循环)由李凌浩编写,第8章(全球氮循环)由黄建辉、韩兴国编写,第9、10两章(磷循环、硫循环)由蒋高明编写,第11章(生物地球化学的动力学基础)由苏波编译,第12章(生物地球化学循环模型)由周广胜编写。全书由李凌浩统稿。

需要指出的是,本书在框架结构、内容取舍和具体内容方面从上述两部专著中吸收了许多有益成分,但对于陆地生态系统的相关内容进行了大量扩充,确立了本书有别于其他同类专著的基础。但无论如何,由于编写者在知识积累、文献储备和实际研究经验等方面的局限性,错误和疏漏肯定很多,敬请读者批评指正。

韩兴国

1999年5月

## 本专著得到以下单位和课题资助

中国生态系统研究网络(CERN)秘书处

中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站

中国科学院北京森林生态系统定位研究站

国家自然科学基金“九五”重点项目——“全球变化的中国东北森林草原样带研究”(39730110)

# 目 录

<b>第 1 章 导 论</b> .....	(1)
1.1 引 言 .....	(1)
1.2 生物地球化学系统模型 .....	(2)
1.3 生物地球化学循环 .....	(3)
1.4 热动力学 .....	(7)
1.5 大地女神假说 .....	(7)
<b>第 2 章 地球起源与生命演化</b> .....	(11)
2.1 引 言 .....	(11)
2.2 元素的起源 .....	(12)
2.3 地球和太阳系的起源 .....	(15)
2.4 大气圈和海洋的起源 .....	(16)
2.5 生命的起源 .....	(19)
2.6 新陈代谢的进化途径 .....	(20)
2.7 地球、火星和金星比较 .....	(24)
<b>第 3 章 大气圈</b> .....	(35)
3.1 大气的结构和环流 .....	(35)
3.2 大气的组成 .....	(38)
3.3 对流层的生物地球化学反应 .....	(40)
3.4 平流层的生物地球化学反应 .....	(43)
3.5 大气模型和全球气候 .....	(45)
3.6 大气沉降 .....	(46)
<b>第 4 章 土壤圈</b> .....	(51)
4.1 引 言 .....	(51)
4.2 岩石风化 .....	(52)
4.3 土壤化学反应 .....	(64)
4.4 土壤发育 .....	(70)
4.5 土壤与生物地球化学循环 .....	(75)
<b>第 5 章 陆地生物圈</b> .....	(85)
5.1 引 言 .....	(85)
5.2 生物量与生产力 .....	(86)
5.3 枯落物形成与分解 .....	(98)
5.4 土壤有机质 .....	(113)
5.5 陆地生物圈的生物地球化学循环 .....	(132)
<b>第 6 章 全球水循环</b> .....	(160)



6.1	引 言 .....	(160)
6.2	全球水循环 .....	(160)
6.3	全球水循环的历史与未来 .....	(162)
<b>第 7 章</b>	<b>全球碳循环</b> .....	(167)
7.1	碳循环的化学基础 .....	(167)
7.2	碳素的地质化学循环 .....	(168)
7.3	碳素的生物地球化学循环 .....	(170)
7.4	碳循环的现代特征 .....	(171)
7.5	主要的碳库 .....	(172)
7.6	全球碳循环 .....	(174)
7.7	海洋在全球碳循环中的作用 .....	(185)
7.8	碳循环模型 .....	(186)
7.9	全球碳循环的趋势 .....	(187)
<b>第 8 章</b>	<b>全球氮循环</b> .....	(197)
8.1	引 言 .....	(197)
8.2	氮的化学特征 .....	(198)
8.3	氮化合物的生物学转换 .....	(200)
8.4	氮化合物的非生物转换 .....	(218)
8.5	氮素的生物地球化学循环 .....	(221)
8.6	结 论 .....	(231)
<b>第 9 章</b>	<b>磷元素的生物地球化学循环</b> .....	(245)
9.1	磷的来源 .....	(245)
9.2	磷的亚地球化学循环 .....	(249)
9.3	磷的生物地球化学循环 .....	(253)
<b>第 10 章</b>	<b>硫元素的生物地球化学循环</b> .....	(262)
10.1	硫的化学特点 .....	(262)
10.2	硫的几种氧化态 .....	(263)
10.3	硫存在的几种库 .....	(264)
10.4	硫在大气中的循环 .....	(265)
10.5	硫在水圈中的循环 .....	(274)
<b>第 11 章</b>	<b>生物地球化学的动力学基础</b> .....	(280)
11.1	热力学 .....	(280)
11.2	氧化与还原 .....	(284)
11.3	化学动力学 .....	(287)
11.4	结 语 .....	(291)
<b>第 12 章</b>	<b>生物地球化学循环模型</b> .....	(293)
12.1	引 言 .....	(293)
12.2	模型及其在生态学和资源管理中的作用 .....	(294)
12.3	生物地球化学循环的有关概念 .....	(299)

---

12.4	生物地球化学循环的时间尺度与单个库系统的模拟·····	(304)
12.5	生物地球化学循环的耦合库及其模型·····	(306)
12.6	生态系统的生物地球化学循环模型·····	(313)



# 第1章 导论

- 1.1 引言
- 1.2 生物地球化学系统模型
- 1.3 生物地球化学循环
- 1.4 热动力学
- 1.5 大地女神假说

## 1.1 引言

人类活动正不断地对全球环境产生日益深刻的影响。由于栖息地不断地破碎和丧失,物种在以惊人的速度灭绝。当今,几乎所有的人都认识到由于受人类活动的影响,大气圈的组成及其组分间的相互作用都在不断地变化,如  $\text{CO}_2$  (0.4% /a)、 $\text{CH}_4$  (约 1% /a)、 $\text{N}_2\text{O}$  (约 0.3% /a),目前大气中的  $\text{CO}_2$  浓度已经达到  $360 \times 10^{-6}$ 。这些变化在地质记录中是几乎没有或根本没有先例的。再如,由于在许多工业产品中使用氟利昂(CFC),南极大气中臭氧层变薄并出现了空洞,与这种气体的排放有着直接的联系。此外,人类也改变了正常生物地球化学过程的其他方面。人类活动增加了土壤侵蚀,改变了沉积物由陆地向海洋的传输及其在海底的沉积速率。因此,当我们发现人类已经改变了全球环境时,我们会逐渐形成这样一种认识,即包括人类在内的生命有机体能够影响整个地球的状况。科学家们已经认识到生命有机体对地球的影响是普遍的,地球表面几乎所有的化学反应都要受生物的影响。生命系统对海洋和大气的组成以及地壳的风化速率具有控制和调节作用。

生物地球化学(Biogeochemistry)是一门介于各学科之间的科学,它包括大气层、海洋、地壳内各种矿物以及有机体所发生的各种化学反应(Schlesinger, 1997)。全球生物地球化学循环是生物地球化学的主要研究内容。生物地球化学循环(biogeochemical cycles)是指物质在自然环境中的传输和转化过程,即物质从环境-生物-环境的过程。它们与一些重要的区域和全球尺度的问题相联系:(1)陆地和海洋的食物生产及其对温度和其他气候因子的依赖性,养分的有效性,以及有毒物质的存在;(2)世界气候及其受自然和人类因素的影响范围;(3)酸沉降对自然生态系统的影响及其受人类的影响范围;(4)臭氧层对人类健康和福利的重要性及其对多种痕量气体存在的敏感性;(5)DDT 和其他化学合成物质的痕量级普遍性,以及它们在自然生态系统的散布和反应途径。

传统的实验方法和强硬的推论不能用于全球生物地球化学的研究。建立模型是生物地球化学家的一种基本工具。模型常常有助于将小尺度测量和田间实验的结果扩展到区域和全球尺度上。通常,我们可以采用卫星技术,在全球水平上通过观察来验证模型的正确性。许多情况下,有关地球的历史记录同样可以对试图描述地球过去和未来状况的模型进行检验。生物地球化学的最终目标是了解我们生活的化学环境及其控制过程。

## 1.2 生物地球化学系统模型

1981年, Garrels 和 Lerman 提出了地球表面大气圈、海洋圈、岩石圈和生物圈之间相互作用的一个简单生物地球化学模型(图 1.1)。该模型假定地质时期以来大气和海洋的组成没有发生大的变化。尽管我们知道真实的情况并非如此,但就最近的 6 000 万年而言,有地质证据表明这个假定是合理的(Holland 等,1986)。在这些约束下,该模型把大气和海洋中发生的化学反应同代表地壳主要矿物的 7 个分室结合在一起。这些矿物主要有石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )和碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )等。例如,石灰石风化后把 8 个单位的  $\text{Ca}^{2+}$  迁移到海洋,而海水中的 Ca 含量并没有发生变化,那么相同数量的 Ca 一定以沉积物的形式沉积在海底。

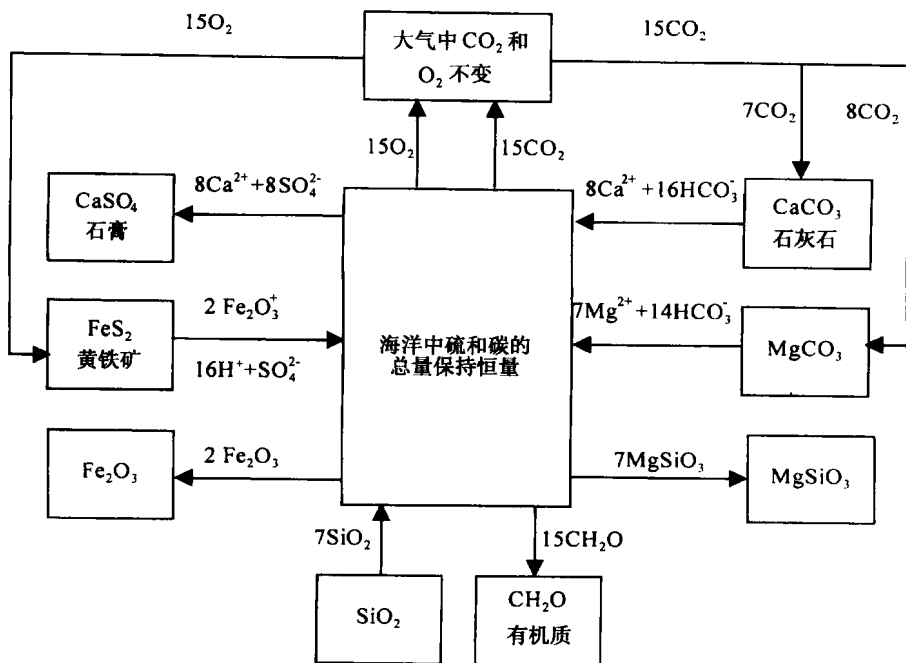
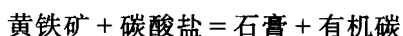


图 1.1 与生物圈质量增加 15mol 相联系的主要沉积库及其分室间的转化模型  
(仿 Garrels 和 Lerman, 1981)

组成生物圈活的和死的有机物,代表近似理想的活组织成分出现在模型中的  $\text{CH}_2\text{O}$  分室。生物圈质量在地质年代间的变化用该分室的物质净输入和净输出表示。石炭纪时期广大的陆地区域为湿地所覆盖,使有机物的总量增加。死的植被以泥炭的形式积累在

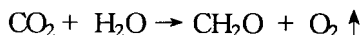
土壤中,后来形成了煤炭。同时,碳和碎石的积累使生物圈的质量增加。由于大气中的  $\text{CO}_2$  和以  $\text{HCO}_3^-$  形式溶解在海洋中的  $\text{CO}_2$  含量并没有增加,生物圈中增加的碳一定来自碳酸盐矿物的风化。碳酸盐矿物的风化使 Ca 和 Mg 迁移到海洋中,从而使海水的化学成分保持恒定。根据模型预测,通过海底沉积物发生的各种化学反应,Ca 一定以  $\text{CaSO}_4$  的形式,Mg 以硅酸盐矿物沉积在海底。 $\text{CaSO}_4$  的沉积并没有引起世界海洋中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量的变化,硫一定来自另外的源。黄铁矿的氧化为海洋提供了  $\text{SO}_4^{2-}$ ,同时消耗了部分植物光合作用添加到大气中的  $\text{O}_2$ ,剩余的  $\text{O}_2$  被  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的沉积所消耗。这些反应中消耗  $\text{O}_2$  的总量与植物光合作用固定的碳保持了摩尔化学平衡,使大气中  $\text{O}_2$  含量并没有发生变化。

该模型的特点是,它不以传统的生物学研究为核心,而是指出了各种矿物(如含 Mg 硅酸盐)是怎样同生物圈的行为相链接的。当然,我们可以对模型中关于地球上各种化学反应之间联系的合理性提出疑问。模型成立的关键在于,在地质年代中石膏的大量沉积是否与有机碳的净储备相联系,因为模型预测了这样一个共轭平衡(Schlesinger,1997):



Garrel 和 Lerman(1981)指出,石膏的大量沉积与石炭纪时期相联系,大量的有机碳储备在煤炭中,有机碳与石膏在地质年中保持着相当恒定的比率。

Garrel 和 Lerman 的模型提示我们,生物圈的大小随光合与呼吸的平衡结果而变化。地球上有生命以来,在光合速率高的时期导致了有机碳净积累和  $\text{O}_2$  释放,使生物圈质量增加。各种微生物的代谢活动和高等动物的非自养呼吸又把有机碳还原成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。火可以使这一过程在生物体以外很快地进行。当我们把地球上的状况同其他星球相比时,我们会发现有机碳的储备和自由  $\text{O}_2$  的释放,是地球上是否存在生命的基本标志。



近年来,我们正以燃烧煤炭和石油的方式使生物圈中的有机碳储备不断减少,其结果使大气层的  $\text{CO}_2$  积累不断增加(图 1.2)。特别是当化石燃料的燃烧超过了地球生物化学系统其他分室对碳的吸收速率时,使大气中  $\text{CO}_2$  不断增加。如图 1.2 所示,大气  $\text{CO}_2$  浓度在一年内不同月份间的波动,反映了北半球生物群落光合作用与呼吸作用的季节循环。而不同年度间大气  $\text{CO}_2$  浓度的增加,在很大程度上是由燃烧化石燃料引起的。

### 1.3 生物地球化学循环

作为太阳系中一行星,地球上一些自然现象是周而复始的。如地球的自转与公转、冰川的周期性变化等。现在认为冰川周期与地球轨道小的改变相关,因为这种改变使地球所接收的太阳辐射发生了变化(Berger,1978; Harrington,1987)。

地球上另一个长周期循环涉及到地壳与  $\text{CO}_2$  的相互作用。大气中的  $\text{CO}_2$  溶解在雨水中形成  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,它与暴露在地面上的矿物相互作用的过程称为岩石的风化。岩石风化的溶解物被河流带入海洋,进入海洋的  $\text{CaCO}_3$  被储存在海底沉积物中,进而又潜入较低的地壳中。在这里沉积物发生了变性,Ca 和 Si 被还原成最初的矿物—硅酸岩,火山喷发使碳又以  $\text{CO}_2$  的形式返回到大气中(图 1.3)。地球上整个洋壳正以这种方式进行着循环,循环时期约为 1~2 亿年(Li,1972; Howell 和 Murray,1986)。现在洋壳的循环速率并没有加快,但由于地面岩石的风化速率和海洋中碳酸盐的沉淀速率加快了,使通过各种途

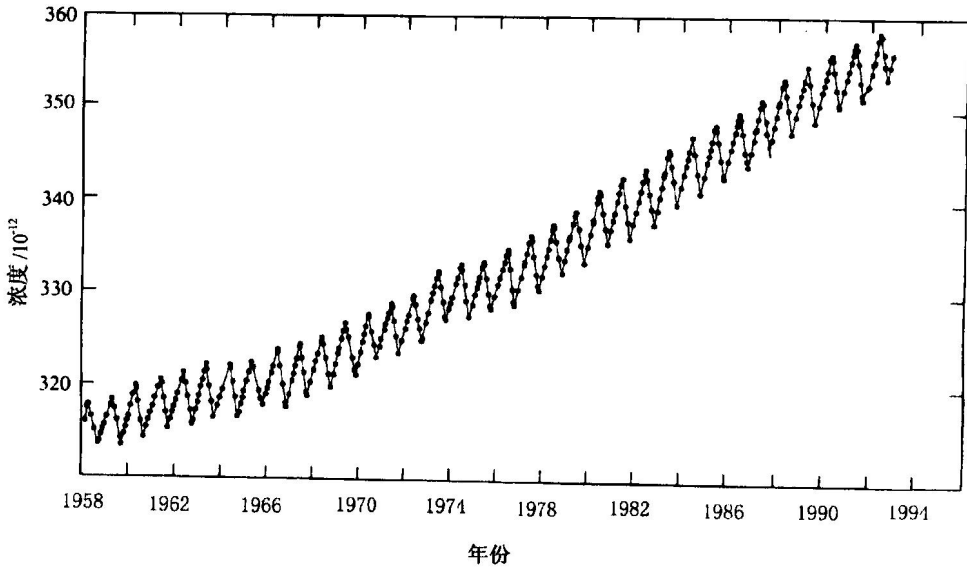


图 1.2 夏威夷 Mauna Loa 气象台测定的以月为间隔的大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化  
(仿 Keeling 和 Whorf, 1994)

径的物质移动量增加了。

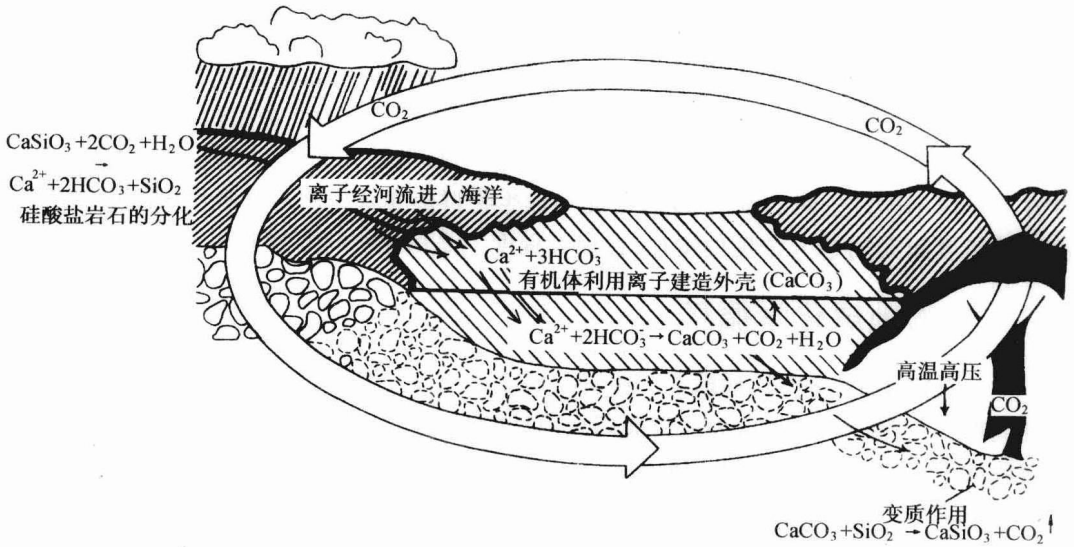


图 1.3 地球表面的碳酸盐和硅酸盐循环及其相互作用  
(仿 Kasting 等, 1988)

人们把诸如 Garrel 和 Lerman 的一类模型称为永久不变模型。从这种意义上讲, 这些模型所给出的沿各流程的物质转化是相等的, 各分室的质量没有时间上的变化。事实

上,这种模型潜在地提出一种系统的自我调节功能,因为任何一个  $\text{CO}_2$  喷发的高峰期都应导致岩石风化、大气中  $\text{CO}_2$  再移动以及系统恢复平衡速率的加快。生物地球化学家们经常用静态假设来简化生物地球化学循环,但许多情况下在短暂的快速变化期这种静态假设是不能成立的。例如,高的火山活动和构造运动速率,可能会导致暂时的大气  $\text{CO}_2$  浓度增加和一定时期的全球变暖(Owen 和 Rea,1985)。

生物圈总是不断地对地球化学循环作出响应。对于植物而言,白天光合作用超过呼吸作用占主导地位,而夜间则相反呼吸作用占主导地位。夏季,北半球的光合总生产量超过土壤呼吸,使碳暂时储存在植物组织中,大气中  $\text{CO}_2$  出现了季节性下降,到8月份大气中  $\text{CO}_2$  浓度降低到一年中的最低值(图 1.2)。冬季,许多植物叶片脱落或进入休眠期,但分解作用仍在继续,大气中的  $\text{CO}_2$  又回到较高的水平,完成了一年的循环。当然,用模型来描述生物圈的行为时,仅考虑夏季的情况是不正确的。在较长的时间尺度上,随着冰川期的循环,生物圈的大小也在发生相应的变化(Faure,1990),在石炭纪有机碳的储量有了很大的增加,大部分有开采价值的煤炭资源是从那一时期开始形成的。石炭纪所特有的环境条件使人难以理解,但它们肯定属于可再现的长期循环的一部分。

所有现在进行的有关全球变化方面的观察,一定要从地球系统的潜在循环和潜在非稳态方面进行评价。当今的大气  $\text{CO}_2$  变化,最好从过去 22 万年以来的周期变化方面来考察,历史的记录可以从极地冰层的气泡中找到。对南极 Vostok 附近不同冰层中采集的气体,进行  $\text{CO}_2$  及微量气体的分析结果表明,22 万年以来,大气中的  $\text{CO}_2$  浓度在变暖期的高浓度和冰川期的较低浓度之间摆动(图 1.4)。在距今约 2 万年至 5 万年的最近一个冰川期,大气中  $\text{CO}_2$  浓度变化在  $180 \times 10^{-6}$  至  $200 \times 10^{-6}$  之间,冰川期结束时(距今约 1 万年)大气中的  $\text{CO}_2$  浓度有显著的升高,到工业革命前  $\text{CO}_2$  浓度相对稳定在  $280 \times 10^{-6}$  左右。Sowers 和 Bender(1995)认为,冰川期结束时  $\text{CO}_2$  浓度的增加,可能是由于全球变暖使陆地上覆盖的冰溶化所引起的。

从上述循环的角度来看,近年来大气中的  $\text{CO}_2$  在以惊人的速率增加,目前大气中的  $\text{CO}_2$  浓度为  $360 \times 10^{-6}$ 。这个浓度范围是现代人类社会和经济系统进化过程中从未有过的。如果过去所发生的变化能够准确地预言未来的话,大气中较高的  $\text{CO}_2$  浓度将导致全球变暖。但是,由于许多可能的原因,对任何观测到的全球气候变化必须从长期循环的角度来评价(Hansen 等,1981;Schneider,1994; Stouffer 等,1994)。

因为大气混合得很好,其组分的变化可能是人类改变全球环境能力的最好证据。当我们看到大气组成在变化时,如  $\text{CO}_2$  (0.4% /a)、 $\text{CH}_4$  (约 1% /a)、 $\text{N}_2\text{O}$  (约 0.3% /a),而这些变化在地质记录中是几乎没有或根本没有先例的,就会认为全球变化是一个再大不过的问题了。然而,人类已经改变了正常生物地球化学过程的其他方面。例如,人类活动增加了土壤侵蚀,改变了沉积物由陆地向海洋的传输及其在海底的沉积速率。对于大气中的  $\text{CO}_2$ ,由人类活动引起侵蚀从而导致全球变化方面的证据,必须从气候和海平面变化所引起的地壳暴露、风化和沉积速率的长期振动方面来考虑(Worsley 和 Davies, 1979; Clemens 等,1993)。

对化石燃料和金属矿物的开采,加速了地壳的自然风化速率(Worsley 和 Davies, 1979)。例如,铅在工业中的使用,使世界范围内河流中铅的传输增加了 10 倍左右(Martin 和 Meybeck,1979)。近年来海岸沉积物中铅含量的变化,与人类对铅使用量的波

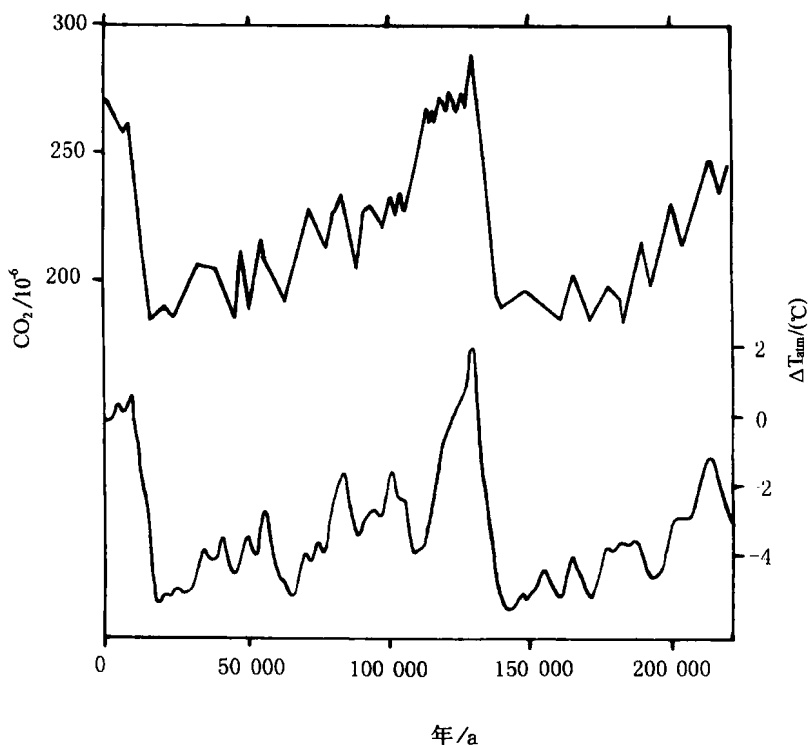


图 1.4 距今 22 万年以来南极地区大气中  $\text{CO}_2$  浓度和平均气温的变化趋势  
(仿 Jouzel 等, 1993; 大气中  $\text{CO}_2$  用冰心气泡中的  $\text{CO}_2$  表示, 平均气温由冰中同位素比值计算)

动,特别是含铅汽油有着直接的联系(Trefry 等, 1985)。近年来的估算表明,人类活动使许多金属的全球循环显著地增加了(表 1.1)。一些金属元素被排放在大气中,尔后在遥远的地方沉积下来(Boutron 等, 1994)。例如,格陵兰岛冰冠中 Hg 含量显著地高于 100 年前沉积冰层中的 Hg 含量(Weiss 等, 1971)。Vandal 等(1993)研究发现,南极冰盖中的 Hg 沉积在过去的 3.4 万年中有很大的变化。

表 1.1 几种金属元素通过大气的运动

(单位:  $10^8 \text{g/a}$ )

元素	源于自然的			源于人类的		源于人类与源于自然之比
	大陆尘埃	火山尘埃	火山气体	工业微粒	化石燃料	
Al	356 500	132 750	8.4	40 000	32 000	0.15
Fe	190 000	87 750	3.7	75 000	32 000	0.38
Cu	100	93	0.012	2 200	430	13.63
Zn	250	108	0.14	7 000	1 400	23.46
Pb	50	8.7	0.012	16 000	4 300	345.83

引自 Lantzy 和 Mackenzie(1979)。

## 1.4 热力学

物理化学中的两个热力学基本定律告诉我们,能量能够从一种形式转化成另一种形式,化学反应能够向着降低自由能的方向自发地进行。给定反应的最低自由能  $G$  代表着这个反应的平衡,它存在于由不同化学元素组成的混合物中,组成元素间表现出最大的结合力和最大的无序。按照这两个基本定律,生命系统及其地球表面环境处于一种非平衡状态。

即使一个最简单的细胞都是一个有序系统。在生物组织中大多数主要生物化学元素 C、N、O、P、S 之间的结合力被降低了或者是富含电子的结合。按照热力学定律,生命有机体中降低了结合力的分子只能以气态  $O_2$  的形式存在于强氧化剂中,而这些分子间的自发反应将产生结合力更强的  $CO_2$ 、 $H_2O$  和  $NO_3^-$ 。事实上,有机体死后所发生的正是上述反应。因此,活的生命有机体必须不断获取能量,以阻止系统向热力学基本定律所预言的无序方向发展。

植物的光合器官捕获太阳能,把  $CO_2$  中的碳和氧转化为弱结合力的生命有机物。异养生物则利用电子由弱结合力向强结合力的自然流动趋势,把有机碳还原为  $CO_2$ 。生命系统利用不同化合物间的转化进化出多种新陈代谢途径,但在所有情况下,代谢能的获得都是通过化合物间电子的流动来实现。新陈代谢之所以成为可能,是由于生命系统能够把高浓度的氧化物和还原物同它们的环境相隔离。活细胞内细胞器间如果没有膜系统的隔离,能量的转化过程(如呼吸作用)就不可能进行。

地球表面的自由  $O_2$  是在自养光合生物出现后才出现的,自由  $O_2$  是已知最强的氧化物之一,当电子从还原物中向  $O_2$  运动时,释放出大量的自由能。有氧代谢(包括真核细胞的有效代谢)能够释放大量的自由能。真核细胞不是立即出现的,化石记录表明,它是在最简单生命细胞出现后经过近 20 亿年的进化而产生的(Knoll, 1992)。只有环境中积累了维持有氧代谢所需的足够  $O_2$  后,才能使真核细胞的进化成为可能,而有氧代谢所产生的大量能量又使各种高等生物的精细结构和活动成为可能。

## 1.5 大地女神假说

尽管大地女神假说(Gaia Hypothesis)真正引起人们的兴趣,是在 1979 年牛津大学出版社出版了 Lovelock 的第一部书以后(Lovelock, 1979),但它的发展可以追溯到 60 年代初期(韩兴国, 1992)。当时,几乎所有的科学家都相信最有可能具有生命存在的星球是火星。大部分科学家认为,发现火星生命存在的最好方式是将自动生物学或化学实验室通过宇宙飞船栽入火星。Lovelock 则认为,测定火星是否有生命存在的最好办法应是比较有生命的地球和其邻近的火星或金星在大气气体组成上的不同(Lovelock, 1965)。根据当时的已有资料不难看出,有生命的地球同邻近的火星和金星在大气组成上有着显著的不同,火星和金星的  $CO_2$  占主导优势,而  $O_2$ 、 $CH_4$ 、及  $N_2$  的含量却很低。同时,金星和火星的气体处于平衡状态,表明其上不可能有生命存在,而地球上的大气组成则处于非平衡状态。

从地球上普遍出现了生命以后(大约 35 亿年前),太阳的辐射量增加了 30% 左右,然



而地球上的气候确变化很小,地球的表面温度一直在 15℃ 左右(全球平均温度)。大约 20 亿年前由于光合作用生物的大量出现,地球大气中的 O<sub>2</sub> 不断增加,但后来却一直稳定在 21% 左右,等等。Lovelock 认为,地球上的所有生命总体控制着地球的环境条件。1972 年 Lovelock 发表了第一篇关于大地女神假说的文章(Lovelock, 1972)。1974 年,他和 Margulis 又对该假说作了新的描述(Lovelock 和 Margulis, 1974),他们认为“生物圈作为能维持地球平衡状态的主动适应控制系统的概念叫大地女神假说”(韩兴国, 1992)。1988 年, Lovelock 关于大地女神假说的第二部书问世,书中对该假说作了进一步的补充和修正(Lovelock, 1988)。

大地女神假说认为地球表面的环境条件是由地球上生命总体控制的。具体地说,地表温度、酸碱度、氧化还原电位势和海水的盐分含量等受到自然条件的变化和干扰(如太阳辐射量的增加、地震、火山爆发、大陆漂移和冰川作用)或人为破坏(工业污染、森林砍伐)时,地球上所有生命的总体(动物、植物、微生物)就会通过生长和代谢对这些变化作出相应的反应。业已证明,在过去的 35 亿年中,太阳的辐射强度大约增加了 30% 左右,而地球表面温度一直保持在 15℃ 左右。再如,在白垩纪(Cretaceous)和第三纪(Tertiary)之间,地球可能受到过一次来自外星的灾难性破坏,海洋中 60% 的生物灭绝。再加连续性干旱、火山喷发、冰川作用等也经常发生,但研究结果表明,地球大气和地表性质却变化很少,这是地球上的生物总体对环境主动影响的结果。大地女神假说认为,生物圈各组成部分之间的最基本关系是互惠共生关系(mutualism),有些曾被人们认为是“负关系”的现象(如捕食)实际上也是互惠共生的关系。大地女神假说没有否定达尔文的进化论,但它却强调了生物对环境的主动和积极作用。它认为“生命的进化和岩石、海洋及大气的进化是一对紧密联接的过程,因为它们结合的那么紧密,我们可把它们看成只是一个过程,二者是不能分开的”(Lovelock, 1988)。

Lovelock 的论文和著作出版后,许多关于大地女神假说的文章相继问世。有的高度评价此假说,认为它是“创世纪之见解”,有的则认为该假说缺乏理论基础,同时也违背了达尔文物种进化的思想,也有的认为它纯属谬论,是典型的目的论(Teleology),还有的认为它只能算隐喻(Metaphor),算不上什么假说(Doolittle, 1981; Kirchner, 1989, 1990; Joseph, 1990; Schneider and Boston, 1991)。然而,大地女神假说提出了看待地球上生物之间及其生物与环境之间关系的新理论。它第一次提出了地球上所有生物的共同合作是地球表面环境稳定的基础。同时,它强调了物种进化和环境进化是一对紧密联系、不可分割的过程。它对于我们理解生态系统的发展和稳定性,认识生物间的相互关系、资源保护和揭示其他星球上的生命都具有重要的理论和实践意义(韩兴国, 1992)。

## 参考文献

- 韩兴国. 大地女神假说. 见: 刘建国主编. 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 3~15
- Berger, A. L., 1978. Longterm variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 9: 139~167.
- Boutron, C. F., J - P. Candelone, and S. Hong, 1994. Past and recent changes in the Large - scale tropospheric cycles of lead and other heavy metals as documented in the Antarctic and Greenland snow and ice: A review. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 3217~3225.

- Clemens, S.C., J.W. Farrell, and L.P. Gromet, 1993. Synchronous changes in seawater strontium isotope composition and global climate. *Nature*, 363:607~610.
- Doolittle, W.F., 1981. Is nature really motherly? *The Coevolution Quarterly*, 29:58~63.
- Faure, H., 1990. Changes in the global continental reservoir of carbon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, and Palaeoecology*, 82:47~52.
- Garrels, R.M. and A. Lerman, 1981. Nitrogen mineralization and denitrification in Lake Michigan sediments. *Limnology and Oceanography*, 32:1226~1238.
- Hansen, J., D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind, and G. Russel, 1981. Climatic impact of increasing atmospheric carbon dioxide. *Science*, 213:957~966.
- Harrington, G.B., 1987. Climate change: A review of causes. *Canadian Journal of Forest Research*, 11:1313~1339.
- Holland H.D., B. Lasar, and M. McCaffrey, 1986. Evolution of the atmosphere and Oceans. *Nature*, 320:27~33.
- Howell, D.G. and R.W. Murray, 1986. A budget for continental growth and denudation. *Science*, 233:446~449.
- Joseph, L.E., 1990. *Gaia: the growth of an idea*. St. Martin's Press, New York, U.S.A.
- Jouzel, J., N. I. Barkov, J. M. Barnola, J. Chappellaz, C. Genthon, V. M., Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, J. R. Petit, D. Raynaud, G. Raisbeck, C. Ritz, T. Sowers, M. Stievenard, F. Yiou, and P. Yiou, 1993. Extending the Vostok ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial period. *Nature*, 364:407~412.
- Kasting, J.F., O.B. Toon, and J.B. Pollack, 1988. How climate evolved on the terrestrial planets. *Scientific American*, 258(2):90~97.
- Keeling, C.D., J.F.S. Chin, T.P. Whorf, 1996. Increased interactivity of northern vegetation inferred from atmospheric CO<sub>2</sub> measurements. *Nature*, 382:146~149.
- Keeling, C.D. and T.P. Whorf. 1994. Atmospheric CO<sub>2</sub> from sites in the SIO air sampling network. pp. 16~26. In T. A. Boden, D. P. Kaiser, R. J. Sepanski, and F. W. Stoss (eds.), *Trends '93: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Kirchner, J.W., 1989. The Gaia hypothesis: can it be tested? *Review of Geophysics*, 27:223~236.
- Kirchner, J.W., 1990. Gaia metaphor unfalsifiable. *Nature*, 345:470.
- Knoll, A.H., 1992. The early evolution of eukaryotes: A geological perspective. *Science*, 256:622~627.
- Lantzy, R. J. and F. T. Mackenzie, 1979. Atmospheric trace metals: Global cycles and assessment of man's impact. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43:511~525.
- Laurmann, J.A., 1979. Market penetration characteristics for energy production and atmospheric carbon dioxide growth. *Science*, 205:896~898.
- Li, Y. - H., 1972. Geochemical mass balance among lithosphere, hydrosphere, and atmosphere. *American Journal of Science*, 272:119~137.
- Lovelock, J.E., 1990. Hands up for Gaia hypothesis. *Nature*, 344:100~102.
- Lovelock, J.E., and L. Margulis, 1974. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere. The Gaia hypothesis. *Tellus*, 26:1~10.
- Lovelock, J.E., 1965. A physical basis for life detection experiments. *Nature*, 207:568~569.
- Lovelock, J.E., 1972. Gaia as seen through atmosphere. *Atmosphere Environment*, 6:579~580.
- Lovelock, J.E., 1988. *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*. W.W. Norton, New York.