

## 现代生物地球化学研究进展

## ——《地球化学论文集》第8卷导读

罗绪强<sup>1,2</sup>, 张桂玲<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 贵阳学院化学与材料科学系, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 地球表面所有的地球化学作用都受到地球上存在的生命的影响, 地球生命自其诞生以来, 就一直受到地球环境的影响并影响着地球环境。由哈佛大学的 H. D. Holland 和耶鲁大学的 K. K. Turekian 主编的《地球化学论文集》第8卷《生物地球化学》从早期地球的演化过程和生命的诞生开始, 以元素和物质的生物地球化学过程为核心, 以生物与环境相互影响为对象, 以化学元素和物质在大气圈、海洋圈和陆地中以及在它们各圈层之间的生物地球化学循环过程为主线, 论述了地球生命对表生地球化学的影响, 特别关注和强调了当前人类对全球生物地球化学循环的影响, 并对 C、N、S、P 等一些重要生命元素在各个“库”中的分布特征及其全球生物地球化学循环过程进行了全面阐述, 介绍了生物地球化学模型在元素及物质生物地球化学循环研究中的作用和应用实例。

关键词: 生物地球化学; 元素循环; 地球化学论文集; 导读

中图分类号: P593 文献标识码: A 文章编号: 1673-6133(2009)01-0023-05

## Recent Progress in Biogeochemistry

## ——Guide to Treatise Collections on Geochemistry Volume 8

LUO Xu-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Gui-ling<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550002, China; 2. Graduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Chemistry and Material Science, Guiyang University, Guiyang Guizhou 550005, China)

Abstract: All the geochemical process on the earth surface is affected by the living things existing on the earth, and the earth environment always affects the earth life since its birth which in turn affects the earth environment. The Treatise Collections on Geochemistry has been published by Elsevier - Pergamon in 2003, which was edited by H. D. Holland from Harvard University and K. K. Turekian from Yale University. The treatise includes 10 volumes, 155 chapters, covering all the fields of geochemistry. The eighth volume was about biogeochemistry, which expound the influence of the earth life on the supergene geochemistry, particularly concern with and emphasize the influence of human being at present on the global biogeochemical cycle process, thoroughly explain distributed features of some important life elements C, N, S AND P in different "reservoirs" and their global biogeochemical cycle processes and introduce the function and application example of the biogeochemical model in the research on the elements and the material biogeochemical cycle beginning with the evolution process of the early earth and the birth of life, with the biogeochemical process of elements and material as the core, with the interaction of organism and its environment as subject, with the main clue of the biogeochemical cycle process of chemical elements and material not only in the atmosphere circle, marine circle and land but also among circles.

Key words: biogeochemistry; element cycle; treatise collections on geochemistry; guidance reading

收稿日期: 2008-09-18

作者简介: 罗绪强(1976-), 男, 中国科学院地球化学研究所, 讲师, 博士研究生, 研究方向为环境地球化学。

1999年在哈佛大学召开的 Goldschmidt会议上, Elsevier向《地球化学论文集》的执行编辑——哈佛大学的 H. D. Holland 和耶鲁大学的 K. K. Turekian 提议为地球化学这门学科做一个新的、合理全面的、综合的概述工作, 是该论文集得以面世的初衷。2001年6月, 美国地质协会和伦敦地质协会主办了地球科学进展会议, 其间在爱丁堡会议上该论文集的主要特征得以成形。由于某些特定部分存在大量艰难的工作, 使得该论文集直到2003年才得以首次出版发行。该论文集把地球化学分为陨石、彗星和行星; 地幔和地核地球化学; 地壳; 大气地球化学; 淡水地球化学、风化和土壤; 海洋和海底地球化学; 沉积物、成岩作用和沉积岩; 生物地球化学和环境地球化学等九个部分, 分别由 Andrew M. Davis; Richard Carlson; Roberta L. Rudnick; Ralph E. Keeling; James I. Drever; Harry Elderfield; Fred T. Mackenzie; William H. Schlesinger; Barbara Sherwood Lollar 等组织编写完成, 每一部分被指定为一卷来概述这一卷所涵盖的地球化学领域的特定部分。该论文集共分10卷, 155章, 其中, 第10卷是该论文集的综合索引, 第8卷为 William H. Schlesinger 组织编写的《生物地球化学》。为了使我国读者能快速了解该卷内容, 本文作者以导读的形式引领全书, 并对部分章节进行评述。

## 1 生命的早期历史

地球形成于距今大约46亿年前。地球形成后经过漫长的演化, 大约在距今38亿年前诞生了具有生命特征的物种。生物的存在, 是与其所处的环境息息相关的, 并时刻影响着周围的环境。自地球有生命诞生以来, 生物就一直影响着包括大气圈、水圈及外地壳在内的地表地球化学。本卷第一章主要从地球的早期演化过程和生命的早期历史出发, 通过沉积记录等指标体系论述了生物的进化过程和进化史, 重点论述了生物与地球环境的相互作用和影响。

## 2 代谢的进化

代谢是活细胞中全部化学反应的总称, 它包括物质代谢和能量代谢两个方面, 同化作用和异化作用两个过程。无论是代谢的两个方面或两个过程, 生物的代谢都与其自身的和周围的环境密切相关, 并相互影响和制约着。本卷第二章作者通过分子

生物学和稳定同位素等手段重建了生物的代谢进化过程, 全面系统地阐述了影响代谢的环境、能量和受代谢所影响的矿物的形成和分解以及它们的耦合作用对生物地球化学循环过程的影响等众多内容, 重点对氧化还原代谢和生物对氧化还原代谢能的利用进行了论述。

## 3 沉积有机物, 早期生命的生物标志物

生物标志物, 是一类起源于生物的自然产物, 由于它保存了有机体活动的地质历史记录, 使其具有与化石同等重要的地位。在环境学和地学研究中, 最有用的生物标志物是那些拥有高分辨特征和具有较好保存能力的沉积物中的有机分子, 同时, 用于环境分析的样品还应同时具有不受地球化学作用影响和容易分析等特点。生物标志物研究中的第一个重大发现是沉积有机质中毫无疑问地保留有生物信号的认识。随后在石油和天然气的起源问题上, 生物标志物起到了重要作用。最近, 生物标志物在宇宙生命进化过程、环境演变过程以及物质的生物地球化学循环过程等研究领域得到重视。本卷第三章作者对有关生物标志物的一些基本概念、原理做了简要的论述后, 通过检测生物标志物的分子组成, 包括沉积物记录中残留的基因物质, 解译了生物多样性、新陈代谢复杂化以及生物对地球表面化学的影响等地球生命活动的历史, 并举例说明了生物标志物在古环境、古气候、古生物重建以及年代学研究中的地位和作用。

## 4 生物矿化作用

生物矿化作用是生物形成矿物的作用, 是在生物体的特定部位, 在一定物理化学条件下, 在生物有机物质的控制或影响下, 将溶液中的离子转变为固相矿物的作用<sup>[1]</sup>。它经历了成核、生长和相变等过程, 受到热力学因素、动力学因素和生物学因素的控制<sup>[2]</sup>。漫长的地质时代, 有机体形成的矿物大大改变了生物圈的物理、化学特性, 影响着元素和物质的生物地球化学循环过程。生物矿化作用是一种很普遍的自然现象, 几乎每一种生物都有成矿本领<sup>[3]</sup>。本卷第四章作者对生物矿化作用的定义和概念进行了诠释, 对生物矿化作用的背景和影响因素进行了论述分析, 详细举例说明了碳酸盐、磷酸盐、草酸盐、硅石、铁、含硫矿物以及植物等的生物矿化作用。通过生物矿化作用, 认识到过去的生命活动不但影响到沉积岩的化学特征和矿物沉

积过程,也能影响到地球深部岩石的组成。作者对生物矿化作用与物质的生物地球化学循环和环境演变过程等问题进行了探讨和展望。

## 5 海洋初级生产力的生物地球化学

海洋中的生物通过同化作用生产有机物的能力,是海洋生态系统的基本功能之一。海洋初级生产力,也称海洋原始生产力,是指海洋浮游植物、底栖植物及自养细菌等通过光合作用制造有机物的能力,其大小首先受光照强度的制约,其次与海水中氮和磷的含量、使富含营养盐的深层水与表层水起混合作用的上升流的特征和季节有关。海洋初级生产力对深刻理解和研究海洋生态系统及其环境特征、海洋生物地球化学循环过程以及认识海洋在气候变化中的作用方面都有重要的意义,它是实现碳循环定量化的一个基本环节,也是海洋环境质量评价的重要科学基础<sup>[4]</sup>。本卷第五章作者在对地球上两个主要碳循环类型进行了简要介绍之后,重点论述了海洋初级生产力的进化及其生物地球化学特征以及与地球上其他生物地球化学循环之间的相互关系和影响。

## 6 陆地净初级生产力的生物地球化学

陆地净初级生产力是陆地上的绿色植物在单位时间和单位面积上所能生产的有机干物质总量,反映了植物对自然环境资源的利用能力,是生物地球化学碳循环的关键环节<sup>[5]</sup>,在全球碳平衡和全球气候变化中扮演着重要角色<sup>[6]</sup>。净初级生产力是众多生物地球化学反应、环境条件和有机体相互作用的产物,它不仅为所有生态系统成员提供生命活动的基础物质,而且又是生态系统过程不稳定性最佳概括。这种双重作用使净初级生产力成为生态系统中重要的综合过程,也因此成为我们理解全球环境下生态系统对各种变化产生响应的关键要素。由于净初级生产力是地球上所有生命赖以生存的基础,因此了解调控它的各种机制就显得至关重要。本卷第六章作者对控制净初级生产力的各种机制,包括环境对植物生长的限制、植物适应和改变这些限制的途径等多方面进行了全面深刻的论述。

## 7 分解和碎裂过程的生物地球化学

生态系统中的分解是复杂有机物矿化为简单无机物的过程,是众多生物与环境因子共同作用的

结果<sup>[7]</sup>,是碎裂、异化和淋溶三个过程的综合,这三个过程相互交叉、相互影响。分解过程的速率和特点,决定于资源的质量、分解者的种类和理化环境条件等三个方面。生态系统中的分解是系统内物质循环的主要过程,也是生态系统生物地球化学循环的重要环节,它不仅是营养物质的转运库,而且是土壤向大气排放  $\text{CO}_2$  的主要组分<sup>[8]</sup>。本卷第七章作者通过对碎裂资源和溶解有机质的组成、有机体的分解作用、一些量化分解速率的方法的评述,重点讨论了分解作用的机制、腐殖质作用以及这些过程的控制性因素,最后对当前生物地球化学模型是如何包含这些信息的问题进行了讨论分析。

## 8 厌氧代谢:痕量气体和好氧过程的纽带

新陈代谢是生命的基本特征。从有生命的单细胞到复杂的人体,都与周围环境不断地进行着物质交换和能量传递,深刻地影响着地表物质的循环及其他生物地球化学过程。厌氧代谢是不消耗分子态氧的代谢,是新陈代谢异化作用过程中的一种类型。一般来说,厌氧代谢生物体有乳酸菌和寄生在动物体内的寄生虫等少数动物,它们在缺氧的条件下,仍能够将体内的有机物氧化,从中获得维持自身生命活动所需要的能量。本卷第八章作者从自养生物对二氧化碳的同化作用出发,论述了地球上大部分还原能的来源问题,讨论了利用这一潜在能量的生物学过程,重点论述了厌氧代谢在地表物质循环及其他生物地球化学过程中的作用和影响。

## 9 地质历史时期的碳循环

全球碳循环是指碳在大气、海洋、陆地及化石燃料这四个库内和库间的迁移及转化。碳从一个库转移到另一个库可以在数秒内完成,也可能经历上千年的时间。从某种意义上说,全球碳循环决定了地球变暖的速度和程度。理解全球碳循环对控制全球气候变化有重大意义。地质历史时期的碳循环可以近似地看做为在沉积碳酸盐和沉积有机碳化学库之间的平衡,它的研究直接关系到地球古大气、古海洋、古气候和古环境演变的历史重建,关系到沉积矿产成因的正确认识和矿床时空分布的预测<sup>[9]</sup>。本卷第九章作者描述了整个地质历史时期碳循环的事件与过程,其中包括了地球表层碳库与岩石圈长期碳库之间的碳交换过程,评述了碳交换过程和碳循环的地质记录所反映的碳变化的控制机制,实例描述了过去碳循环的变化,论述了最

近的冰川钻探所得岩芯和海平面变化,记述了由前寒武纪地层岩石记录推断得到的间接变化情况。值得一提的是,本章描述的地质事件实例来源于大范围的地质记录,但实例的分布却不是按照地质时间的比例分配的。读者将会注意到,在细节上,本章对最近的和最短的地质时期——第四纪格外关注,如此强调的原因有两种,首先,碳循环变化的第四纪记录可得性远优于其他更早的地质时期;其次,第四纪时期地质记录能够精确地展现一系列大气圈、生物圈和水圈之间相互作用的具有启示意义的细节问题。为了更好的理解所有时期和时间尺度的碳循环,必须了解作为碳循环小环节的各大圈层。通过这些处理措施,突出了三个主题:其一是不同时间尺度的碳循环有不同的控制机制;其二是纵观整个地质历史,相对不连贯的碳变化在碳循环演化中扮演了重要角色;最后是碳的地质循环将贯穿大气圈和水圈的所有尺度,这是一个联系整个碳循环的共有的过程,即使是影响我们环境和生物圈的最遥远的组分也包括在内。

## 10 现代碳循环

无机形式的碳( $\text{CO}_2$ )形成有机碳被固定在陆地植被后,再转化为无机化学状态重新返回大气是现代碳循环的主要过程,而人类活动对碳循环的巨大影响形成了全球碳循环的现代特征<sup>[10]</sup>。和前面第九章所提及的地质历史时期内的碳循环不同,本卷第十章着重讨论的是碳在数年到数十年内的重要的碳交换过程,当然,也包括了发生在数月到数世纪的交换。作者在第十章首先描述了碳循环的基本过程,再讨论了人类活动对其循环产生的影响,并对下个世纪的碳变化量进行了展望,在这些章节中,碳循环与全球气候变化之间的关系问题一直都是关注的焦点。总之,这些章节的内容提供了一种观点与方法,即怎样运用我们掌握的现在碳循环的知识来处理当代问题和过去的地质记录。

## 11 全球氧循环

地球上下表层的生物、化学和物理的相互作用过程决定了 $\text{O}_2$ 浓度和 $\text{O}_2$ 的时空分布变化特征。地球现代的氧化性大气大约是四十多亿年历史的产物。早期的还原性大气圈随着氢气的缓慢逃逸而被逐渐氧化,有氧光合作用的演化加速了地球粉尘和大气的氧化过程,以至于到22亿年的时候,微小但意义重大的氧气浓度已与现代大气相接近。

在现在的地球系统中,释放 $\text{O}_2$ 进入大气的过程(光合作用)和消耗 $\text{O}_2$ 的过程(有氧呼吸作用,含硫矿物氧化作用,火山气体的氧化作用),使得与大气圈之间产生了巨大的 $\text{O}_2$ 流通量。即使 $\text{O}_2$ 释放和消耗过程的相对微小的变化也可能对某个较短的地质时期的大气 $\text{O}_2$ 浓度产生巨大的转变。然而,直至今日所有可得的证据却都支持一个结论:即地球大气圈在过去广阔的地质时期的一个显著特征是 $\text{O}_2$ 变化的静态平衡。尽管我们都知道稳定的 $\text{O}_2$ 浓度对生命极为重要,但是我们对为什么 $\text{O}_2$ 浓度在经过了漫长的地质时期却依然保持在一个常数的认识是非常的有限,这就是氧循环研究之所以重要的原因。本卷第十一章作者首先回顾了 $\text{O}_2$ 在地球表面各类氧库如大气、海水和其它自然水体中的分布情况,讨论了影响大气和表层水体中氧气浓度的关键因子,重点论述了作为产生游离 $\text{O}_2$ 的主要过程和各种消耗 $\text{O}_2$ 的生物与非生物过程。本章最后还展望了有关全球氧循环的模型化研究,模型将模拟地球45亿年历史中氧化性大气圈的演化过程,包括制约古代 $\text{O}_2$ 浓度的地球化学证据和大气演化的数字化模型。

## 12 全球氮循环

全球氮循环是指氮在大气圈、水圈、生物圈和土壤圈等各圈层之间以及各圈层内部的循环转化。在最近几十年中,人类活动已严重影响了氮的地球生物化学循环。过去很长一段时间内,认为人为固氮远少于细菌固氮。但是大规模的人为活动不断地将惰性 $\text{N}_2$ 转化为活性氮,使这种情况彻底改变。现在,燃烧和工业化肥固氮与自然生物固氮已经基本持平,人为作用对氮循环的影响从数量上看已处于主导地位。氮的有效性增加,可能在一定程度上加大 $\text{CO}_2$ 的吸收,并加强陆地和海洋的光合作用;另一方面,全球变暖和水文变化会加速土壤中储存有机氮的氧化,从而增加氮的流失。元素比例的失调如氮相对于磷的过剩,将导致本来氮缺乏系统的磷缺乏和流域中磷浓度下降,而产生酸性贫营养化,降低氮的吸收和导致较低的反硝化率。由于全球变暖而引起的有机碳的低分解率,将降低反硝化基底的有效性等以这样或那样的方式影响各个生态系统。本卷第十二章论述了活性氮的生物地球化学反应以及活性氮在地球上各个库间的分配与交换,分析讨论了自然或人为活动引起的活性氮的产生过程以及陆地、海洋和区域各库中氮的预算,

概括性地评述了活性氮在环境中的积累所产生的后果,最后对2050年活性氮产生的最小和最大速率进行了预测。

### 13 全球磷循环

磷是构成生物有机体的重要元素之一,也是水体富营养化的关键控制因子之一。对所有的生命形式来讲,磷都是一个很重要的营养元素,它在生物化学反应中发挥着重要作用,包括基因材料、能量传递、有机体的组织构建等。生物生产力中磷的利用是简单有机物形成陆地或水生生物的食物链基础。磷主要储存在矿床、土壤和沉积物中,但是,大部分并不能被有机物直接利用。在全球磷循环过程中的不同阶段,通过地球化学和生物化学反应把磷转化为可溶解的正磷酸盐而被吸收利用。磷是土壤和沉积物中微生物群落的营养来源,同时,土壤和沉积物中微生物的活性又强烈地影响着磷的浓度和化学形态。本卷第十三章作者首先对全球磷循环做了简要的总结,然后论述了陆地、海洋以及陆地与海洋之间的磷循环过程,并讨论了人类对全球磷循环的影响。最后,作者对当前在陆地生态系统和土壤中的磷循环、湖泊、江河和河口等陆地水系统中的磷循环、近代海洋中磷的生物地球化学和循环以及较长的、地质时间尺度的磷循环等磷生物地球化学和循环的各个方面的研究进行了重点回顾和论述。

### 14 全球硫循环

自然界的硫最初来自于黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )和黄铜矿( $\text{CuFeS}_2$ )等含硫的矿物。硫在自然界中的循环是影响全球生态平衡及气候变化的重要因素之一,一方面它为生物体的生长提供合成氨基酸和蛋白质所必需的硫元素,另一方面如化石燃料的燃烧所释放出的硫又导致了酸雨等自然环境的变化<sup>[11]</sup>。本卷第十四章(最后一章)作者对硫的来源、形态及早期演化历史等问题做了详细的概括和总结,论述了硫在各个库及各库之间的生物地球化学和循环过程,作者还讨论了人类活动对全球硫循环的影响及其由此产生的后果。

总之,自38亿年前有生命诞生以来,生物就一直影响着包括大气圈、水圈及外地壳在内的地表地球化学。有机体的光合作用为地表提供了氧气,反硝化作用保持了地球大气氮浓度的基本恒定,植物影响着化学风化的速率,生物的存在影响着生命元

素特别是C、N、P和S的全球生物地球化学循环等等。本卷共分十四章,从早期地球的演化过程和生命的诞生开始,以元素和物质的生物地球化学过程为核心,以生物与环境相互影响为对象,以化学元素和物质在大气圈、海洋圈和陆地中以及在它们各圈层之间的生物地球化学循环过程为主线,论述了地球生命对表生地球化学的影响,特别关注和强调了当前人类对全球生物地球化学循环的影响,对C、N、S、P等一些重要生命元素在各个“库”中的分布特征及其全球生物地球化学循环过程进行了全面重点的阐述,介绍了生物地球化学模型在元素及物质生物地球化学循环研究中的作用和应用实例。本书内容全面丰富,论述深刻,反映了本学科的最新进展和研究成果,是地球化学中较全面系统地介绍生物地球化学的一本专著,对从事生物地球化学、地质学、全球变化学和全球生态学、陆地生态系统生态学和环境生态学等相关领域学科研究的科研人员无疑是一本难得的参考书,该书也适合高等院校相关专业的高年级本科学生、研究生和教师参考。

#### 参考文献:

- [1] 戴永定,沈继英. 生物矿化作用机理[J]. 动物学杂志, 1995, 30(5): 55 - 58
- [2] 车遥,孙振亚,陈敬中. 现代沉积环境中铁的微生物矿化作用[J]. 高校地质学报, 2000, 6(2): 278 - 281.
- [3] 何基保,温树林. 生物矿化作用[J]. 自然杂志, 1997, 19(5): 272 - 276
- [4] 檀赛春,石广玉. 海洋初级生产力的卫星遥感[J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 863 - 870
- [5] 陶波,李克让,邵雪梅,曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟[J]. 地理学报, 2003, 58(3): 372 - 380
- [6] 崔林丽,史军,唐娉,高志强. 中国陆地净初级生产力的季节变化研究[J]. 地理科学进展, 2005, 24(3): 8 - 16.
- [7] 张瑜斌,林鹏,庄铁诚. 红树林生态系统微生物的分解过程及其在营养循环中的作用[J]. 海洋科学, 2003, 27(4): 9 - 12
- [8] 杜占池,樊江文,钟华平. 营养元素在红三叶叶片分解过程中的释放动态[J]. 草业科学, 2003, 20(7): 12 - 15.
- [9] 李任伟. 地质历史时期碳循环的研究[J]. 地球科学进展, 1996, 11(1): 35 - 39.
- [10] 韩兴国,李凌浩,黄建辉. 生物地球化学概论[M]. 北京:高等教育出版社, 1999: 167 - 196
- [11] 李刚. 生物质能源化利用与硫循环[J]. 可再生资源, 2004, (4): 39 - 40