

BIOGEOCHEMISTRY

Scientific Fundamentals and Modeling Approach

生物地球化学

科学基础与模型方法

李长生 著

Changsheng Li

清华大学出版社

内容简介

本书是作者多年从事生物地球化学研究的经验总结，也是作者多年从事生物地球化学研究的经验总结。本书共分四章，第一章为绪论，第二章为生物地球化学的基本概念，第三章为生物地球化学的模型方法，第四章为生物地球化学的应用。本书可作为生物地球化学专业及相关专业的教材，也可供从事生物地球化学研究的科研人员参考。

生物地球化学

科学基础与模型方法

BIOGEOCHEMISTRY

Scientific Fundamentals and Modeling Approach

李长生 著

Changsheng Li



清华大学图书馆
藏 书

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学图书馆

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

生物地球化学是一门以追踪化学元素的迁移转化为线索研究生命与环境相互关系的科学。地球上形形色色的生命活动受控于基本的动力学和热力学机制。本书基于量、群、流、场这四个概念重点讨论元素在地球系统中的丰度、形态、运动及各种驱动力场,探究自然环境如何影响生命的起源、进化和生存状况,分析生命改变自然环境的过程。书中还介绍了基于化学动力学和化学热力学机制所建立的一个生物地球化学模型 DNDC,及其详细的科学原理和应用。读者只要具备中学化学知识就可很好地理解书中的内容。

本书可作为本科生和研究生的教材,也可专业科研工作者提供参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

生物地球化学:科学基础与模型方法/李长生著.--北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-41265-6

I. ①生… II. ①李… III. ①生物地球化学 IV. ①P593

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 186379 号

责任编辑:柳 萍 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:34.5 插 页:16 字 数:797 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:89.00 元

产品编号:048418-01



在宇宙无垠的黑暗中，

元素点燃起生命的篝火……

序

PREFACE

生物地球化学,顾名思义是研究生命与地球环境之间交互作用的化学,是生物学、地学和化学三门学科相交叉的科学。它的研究对象是生物与地球环境间在各种作用力作用下化学元素的迁移转化过程。这门学问从 18 世纪后期荷兰科学家英根豪茨、英国科学家普里斯特利、法国科学家拉瓦锡、瑞士科学家索热尔等研究证明植物光合作用从空气中吸收二氧化碳排放氧气开始到现在已经有 200 多年的历史了。但是在 20 世纪 80 年代之前,有关这一学科的研究并不多。直到最近 30 多年来,气候变暖等全球环境变化问题日益突出,人们逐步认识到气候变暖的主因源于人类向大气中排放大量二氧化碳之后产生的温室气体作用。随着人类活动的日益增加,人类排放的二氧化碳量正逐年增高。我们不禁会问,人类排放的二氧化碳最终都到哪里去了呢?通过直接测量,我们已经基本上可以确定,约有 45% 人类二氧化碳排放滞留在大气当中,24% 被海洋吸收,而剩余的部分被陆地上的植物系统通过光合作用所吸收。但是由于陆地生态系统的复杂性,人们在寻找剩余约 30% 碳排放的归宿,即到底去了陆地的哪些地方,又被何种物质吸收?至今研究方法仍存在着很大的不确定性。为此,一门新的科学——碳科学,在过去 20 多年间迅速诞生,而支撑碳科学研究的重要工具恰恰是生物地球化学!

在全球变暖和碳循环受到世界科学界关注的同时,我国植物生态学家、大气物理学家和地球化学家也开始关注这一课题。起初,研究的着眼点放在较小空间范围的生态系统,如农业、草地生态系统,甚至岩溶卡斯特地区,大范围研究碳循环、特别是利用遥感等空间对地观测手段开展这一研究的人很少。于是,2000 年起我们在南京大学创办了国际地球系统科学研究所,开始培养能够通过地球观测和模型的手段定量确定陆地生态系统中碳的储量和在不同系统之间通量的人才。我们发现国内十分缺乏熟悉定量模拟生物地球化学循环的学者。这种状况,即便到 2008 年徐冠华院士带领国内一批学者发起加强全球变化与地球系统科学研究倡议的时候也并没有多大改观。

在徐冠华院士的推动下,北京师范大学和清华大学先后成立了以全球变化为对象,以地球系统科学为学科发展方向的研究机构。2009 年 3 月清华大学成立地球系统科学研究中心(简称地学中心),并于当

年4月在《Science》上向全球发布了招聘地球化学、结构地质学、行星科学、大气科学、地球系统科学和气候变化等方向高层次科研人才的广告。此后,又在人民日报海外版、美国地球物理学会、地理学会、生态学会等会员通讯上刊登了一系列广告,清华大学要发展地学的消息迅速在世界各地传开。2009年底,我收到李长生先生一封电子邮件,表示愿意将自己多年研究的 Denitrification Decomposition 模型(DNDC)成果通过清华地学中心传授给学生(后来才知道,他在日本工作的弟弟,李康生先生把我们在人民日报海外版上宣传清华设立地学的消息发送给了李长生先生,引起了他的重视)。20世纪90年代,我在加州大学开始接触生态系统模型时从文献里面看到了李长生先生1992年发表在美国《地球物理研究学报》上关于农业土壤中氮循环模式(DNDC)框架和应用的两篇论文。他的模式从土壤生态系统入手,经多年发展完善已经涵盖地下、地上主要陆地生态系统,是世界上著名的生物地球化学模式。由于长生先生模式开放,而且又乐于助人,经过近20年的发展,DNDC已经在世界上有很多使用者。他也已经组建了一个遍布于世界各地的用户群。他每年到欧洲、中国、大洋洲等地辅导研究人员和学生使用DNDC。当时计划调入清华的喻朝庆博士就在尝试使用DNDC,对李长生先生推崇有加。而另一方面,由于生物地球化学正是国内缺乏的地球系统科学最重要的支撑学科之一,清华正为找不到深谙这门学科的教师而犯愁。因此,收到长生先生的邮件令我兴奋不已。考虑到当时长生先生已年近古稀,我们决定按照地学中心最高荣誉——讲席教授,短期聘请长生先生。经过2010年下半年的沟通,我们签订了2011年秋季开始,连续三年,每年聘请先生在清华进行3~4个月的短期讲学的协议。2014年又开始了第二个聘期。清华地学初建,为了尽快办好这一新生学科,我们当时发起了一个“一门课,一本书”计划,特别请求长生先生考虑除了教学之外完成一本生物地球化学专著。他愉快地答应了。

2011年9月先生如期到清华为研究生授课。虽然这是他第一次讲授这门课,其效果却大大超出我们的预期!他的课深受学生喜爱,期末竟获得清华全校500多门秋季小班研究生课程中学生最满意的30门课之一——这是地学中心第一次获得这一殊荣。其后几年,每年如此!2014年,为了总结教学经验,地学中心召集部分上过他这门课的研究生座谈,学生们在上过这门课多年后,给予高度评价!有的研究生认为这门课是他们在清华研究生阶段学习的灵魂,对拓展知识面,改变思考方式大有帮助;有的则表示,这门课是其学习动力的源泉,不惜连续多年听这门课,以从中吸取精神力量,激励自己战胜现实压力。还有的同学通过学习这门课程形成了批判思维能力并拥有了自己的学术思想。大家把先生当成人生榜样,对他20余年坚持做好一个模型表示钦佩,赞叹在他身上学到了这个时代最缺乏的精神,激励他们克服急躁和急功近利,更加关注科学的根本。2012年上过这门课的李雪草同学这样描述:“量群流场,从宇宙到微生物的DNDC,带给我们一个奇妙的生物地球化学世界。听李老师的课感觉如沐春风,兴致盎然。怀念那段自由思辨的日子。”连续4年辅助他开设这门课的喻朝庆老师做了如下总结:“李长生教授的课堂教学内容宏大深厚,讲解深入浅出,深受学生欢迎。在这门课程中,数学、物理、化学、地质、生态、水文、农业、土壤、微生物这些学科边界消失了,学生真正感受到了学科交叉的力量。有的同学为生物地球化学发展进程中大师们的学术思想和命运感动得流泪,有的同学为地球元素

及地球环境的演化历史感到震撼,有的同学为学习模型的理念和技术废寝忘食。还有同学连续四年听这门课程,目的不再是满足于了解课程中的知识,而是希望在浮躁的大环境中感悟学术的精神。”我有幸聆听了几次先生的课堂讲授,对朝庆老师的总结深表赞同。

长生先生不仅把生物地球化学这门课上到了极致,2014年底他还完成了这部著作的800多页初稿。我有幸先睹,这是第一部生物地球化学的中文专著。同时,无论从系统性和思想性方面都是我2000年以来收集到的英文生物地球化学教材所不及的。先生在这部书中取得这样的成绩得益于一生的钻研和感悟。原来,先生大学三年级时,曾经听到一场学术讲座,了解到苏联地球化学界开始研究家畜疾病与土壤中化学元素的关系,这门学问被称为“生物地球化学”。这次讲座确定了先生一生的学术方向——通过理解土壤元素的迁移转化研究生命与环境的相互关系。他的科学研究从本科毕业设计在西北盐湖周围的植物里找寻锂和硼(这是20世纪70-80年代兴盛的Geobotany,即地植物学,也是生物地球化学的分支)开始;到在东北研究克山病因(由环境中缺硒造成的心肌坏死病);又到研究城市环境质量评价;再到酸雨和空气污染研究;最后到研究土壤及植被生态系统的碳氮循环,始终贯串于生命和环境中化学元素的迁移转化。上述提到的每一项研究都可圈可点。他不仅在20世纪60年代就创造性地利用地图叠加技术,与美国景观规划学家Ian McHarg等在城市设计中提出“地图叠加”(Map Overlay)这一美国科学界公认的地理信息系统的核心概念处于同一年代,从文献方面看,也可能是中国地理信息系统的最早践行者。他在研究过程中提出的流域汇流,离子通过率,的计算至今在地理信息分析中还没有得到充分应用,仍具先进性。而他带领完成的北京西郊环境评价,所使用的数学方法对大气、地表水、地下水、土壤、农作物等进行定量分析,则开创了我国定量开展环境质量评价的先河。20世纪80年代末至90年代初,他利用个人电脑建立生态模型,直至到清华给学生讲课还坚持自己编程改进模式,一生工作在科研第一线。他创建的DNDC模型,已经拥有超过千人的用户群,并有多用户网络,一是成立于2008年由新西兰主导的Global DNDC Network;另一个是成立于2013年由英国主导的GRAMP(Global Research Alliance Modeling Platform)。前者目前已有超过100多位注册学者,并举行过两届国际会议,每届都有多达30~50场学术报告,其中国学者群目前已有160位成员。而据英国Sarah Gihespy等2014年在Ecological Modelling发表的论文介绍设立GRAMP网络的目标是开源共享并联合发展DNDC模式。GRAMP注册用户当时已经超过了1500人。这些足见先生后期学术影响之一斑!喻朝庆老师对长生先生的学术思想有这样一段精辟总结:“长期的研究积累让他的学术思想集中体现在‘量’、‘群’、‘流’、‘场’这四个字中。这为他90年代初开启的生物地球化学模型——DNDC的发展奠定了理论基础。该模型的建模思想得益于长生教授在物理化学方面的深厚功底,避开生态系统中纷繁复杂、千姿百态的表象和细枝末节,从最基础的化学热力学和化学动力学出发,对元素在复杂地球环境中的迁移转化可以进行可靠的定量计算——这一思想,在20多年前的地学领域,毫无疑问是超前的。发展如今,已成为生物地球化学研究方法的主旋律。”

阅读长生先生《生物地球化学》这部书,从中国环境与健康实例研究,到宇宙爆

炸,地球形成,地壳形成,矿物形成,地球表面各圈层的形成,到生命形成与演化,再到生命元素的迁移转化。他从知识之根谈起,讲述生物地球化学,最后落脚于 DNDC 模型的设计理念和应用方法。这部著作有思想、有概念、有方法、有技术,可以说是一部难得的启迪科学思想、传授科学方法、教育全面系统思维的教科书。他对生物地球化学学科演化从各种相关理论的提出到理论的创立过程均有适当的介绍,在某种意义上讲,已经构成一部简明的科学思想史了。在这部著作中,我们可以系统地了解地理环境如何决定物种的演替,以及自然界演化如何决定物种兴衰。先生用元素丰度解释生命起源过程,带我们看到 H,O,C,N,K,P 等在人体中的比例,与构成细菌的前四位元素一致。这就是人类为什么常常受到细菌折磨的根源。植物体内的氮含量并不多,但是在土壤中增加氮却能使植物生长得更好,而且氮也是植物的必备元素。他告诉我们很多生命起源及随之的进化过程,就是一个能量损耗的过程。生命是元素和能量长时间相互作用的结果,许多看似无序的东西经过时间的作用变成了有序。迄今为止,按照我们的认识,除了人类之外,自然界其他生命均受制于地理环境的约束。阅读这部著作过程中,时常让我感叹:今天人类改造自然的逆天行为,使得我们的生态脚印日益扩大,既令人赞叹,又令人担忧!

诚然,要透彻理解长生先生《生物地球化学》这部著作不是一件易事。先生通晓中、英、俄三国文字,能够熟练地使用三种文字的文献。在今天这是十分难得的。由于他对大量一手文献做了高度综合,因此这部著作的原创性极高。然而阅读这部著作又是一件十分有趣的享受,因为先生使用了高超的科普写法,由浅入深,引人入胜!

今天,当我们手捧《生物地球化学》这部不朽的著作之时,却已经与长生先生阴阳相隔。迄今为止,生老病死尚无人幸免。在惋惜先生不能如愿地与我们“继续合作十年”的同时,我还是宁愿相信,随着科学技术的发展,终有一天人类会长生不老。当地球已经承载不下全人类,人们会如前人所梦想的那样,飘然如仙,择星而居。前人栽树,后人乘凉。我更相信,先生将其毕生所学汇聚而成的这部著作,做为一部实现人类可持续发展理想的宝典,必能帮助后人克服重重阻难,到达梦想的彼岸!

宫 鹏

2015 年 11 月 5 日于清华大学

前言

FOREWORD

我对生物地球化学产生兴趣,是在上大学时。1959年,我考入位于北京的中国科学技术大学,就读于地球化学系。之所以选择地球化学,与我在中学时期读过的一本书有关,这是苏联科学家费尔斯曼(A. E. Ферсман, 1883—1945)写的《趣味地球化学》。在此书中,作者表述了一个思想:地球上一切物质都是由一百多种化学元素组成的;知道了这些元素的性质,就可以解释万物的行为,甚至包括生命的起源。这是一个多么诱人的思想!但大学前三年的课程令人感到沉闷。虽然老师们说地球化学包含着认识地球演化的一般性方法论,但课堂上讲的全是矿物和岩石,没有人提及植物或动物,更不用说人类了。我问专业老师何铸文,为什么没有人用地球化学方法来研究生物呢?他反问我:“研究矿物岩石可以给国家寻找矿产资源,研究生物元素组成有什么用处呢?”我第一次意识到,进行科学研究不能只靠兴趣,还要为它找到实际的用途。1962年夏,事情发生了一些变化。

按照学校规定,在三年级结束时,所有学生都要确定专业方向,为毕业论文选题。为了让同学们了解地球化学的最新进展,系里请来了中国科学院地质研究所的研究员司幼东(稀有元素矿物地球化学家,1920—1968)做讲演。司幼东此前不久从苏联留学归来,曾在莫斯科地质勘探学院获得副博士学位,回国后从事稀有元素地球化学研究。在演讲中,他讲述了苏联地球化学的发展及分支学科,详细介绍了矿物地球化学、岩石地球化学、海洋地球化学、有机地球化学、同位素地球化学等前沿领域。最后,他提到一个新的地球化学分支,叫做“生物地球化学”;在苏联,生物地球化学家们研究远东地区家畜中的一些奇怪疾病,发现这些疾病与当地土壤中某些化学元素含量异常有关。司幼东的这番话使我忽然想起童年时的一段经历。

我的家乡在中国西北黄土高原南边的西安。20世纪40年代的西安十分落后,市区与农村仅一城墙之隔。在我上学的路旁有一所医院。清晨,医院门口总有一些病人在等待挂号,他们大多来自农村。我常常看到一些长着畸形腿脚或粗大脖子的病人,模样凄惨又骇人。我问父亲为什么他们会得这些怪病,父亲说,这是由于当地的“水土不好”;至于水土为什么会有好坏之分,我父亲也不知道。幼时的印象随着年龄增长逐渐淡去;但当我在中国科技大学的教室里听到司幼东研究员关

于苏联生物地球化学疾病的介绍时,童年的印象又突然闪现出来,于是我心中有了一个念头:“我幼时见到的是不是也是生物地球化学疾病呢?”

演讲一结束,我直奔学校图书馆。在那里,我查到了中国地方病的资料。当我看到克山病、大骨节病、甲状腺肿的地理分布图时,心跳砰砰,因为这些疾病都显示出明显的地带性分布。我联络了同学刘世庆去见系主任黎彤(岩石地球化学家),希望他能允许我们选择“生物地球化学”这一专业方向。但我们的申请未被批准,理由是“没有指导教师”。在失望之余,我转而选择了盐湖地球化学研究。根据资料,在中国西北的荒漠中有许多盐湖,由于当地特殊的气象和地质条件,这些湖泊中聚集了多种化学元素,其中包括锂(Li)和硼(B),它们都是发展火箭工业的重要原料,也是我们毕业论文研究的选题对象。我选择这项研究,是猜想在盐湖周围可能有一个特异的地球化学场,它既然能使元素在湖水富集,也可能会影响当地生物的种群和化学组成。

1963年和1964年,我在青海柴达木盆地的大柴旦盐湖区度过了两年时光。除了遵照导师张彭熹(盐湖地球化学家,1931—)的要求采集湖水、土壤和岩石样品外,我还擅自采集了许多湖边野生植物。对这些植物样品的化学分析显示出非常有趣的结果,即湖边一些植物对稀有元素有高度的富集作用。其中最令人感兴趣的是海韭菜和几种蓼科植物对元素锂的富集。当时中国在用化学方法从盐湖水提取锂,成本甚高。由于我的数据显示出湖滨植物体内锂含量是湖水的数千倍,我在论文中建议通过在盐湖地区人工种植富锂植物来提高工业炼锂的效率。可能是由于这篇毕业论文有些新颖内容吧,我于1964年从中国科学技术大学顺利毕业,同年考入中国科学院研究生院。

1964年夏末,我到中国科学院地质研究所与导师第一次见面。导师涂光炽(稀有元素地球化学家,1920—2007)20世纪50年代在美国明尼苏达大学地质系获博士学位回国,后又到苏联学习并获得副博士学位。他的专长是矿床地质,他希望我能研究硫化矿床氧化带的地球化学。在与涂先生的这次见面中,我表示更想用地球化学方法来研究与现代生物有关的问题。出乎我的意料,涂先生同意了我的要求,并将他从国外带回的几本有关生物地球化学的书籍送给我。但导师的好意并未使我的学业一帆风顺。1966年,“文化大革命”期间,研究生制度被废除,全国的研究生被取消了学籍。我被分配在新成立的中国科学院地球化学研究所作为一名初级研究人员。在“文化大革命”期间,科学研究几乎陷于停顿。我与遭遇同样命运的同学洪业汤(环境地球化学家),给当时负责中国科学技术工作的聂荣臻(时任国务院副总理兼科学技术委员会主任,1899—1992)写了一封信,阐述了生物地球化学的科学意义和地方病对广大贫下中农的严重危害,建议以地方病研究为任务来带动中国生物地球化学的学科发展。这个建议得到了支持,我们的信被批转到了中国科学院,这使我们得以组织起一支8人的“克山病战斗队”,并于1968年奔赴病区开始了有关的生物地球化学研究。克山病研究在1972年结束,此后,我转入城市污染研究,后来又在酸雨和温室气体领域工作了二十多年。

我虽长期在生物地球化学领域内工作,但一直侧重应用研究,并未对这门学科的理论认真思考过。1990年的一件事使我开始思考生物地球化学的学科范畴问题。当时我在为美国环境保护局总部的全球气候变化处(Division of Global Climate

Change, Office of Policy, Planning and Evaluation, US EPA)工作,领导一个农业温室气体模型发展小组。在业务上,我们与环保局设在佐治亚州爱森斯的大气环境研究所(EPA's National Exposure Research Laboratory in Athens, Georgia)有些联系。这年夏天,我应邀到该所作学术报告。当我走向报告厅的时候,看到走廊布告栏前有一群人在看我的演讲告示,其中一个人大声喊道:“I never know what biogeochemistry is. I'd like to see what a biogeochemist does today.”(我从来就不知道生物地球化学是个什么东西,今天倒要看看一个生物地球化学家究竟在干什么。)由于当天的报告内容局限在土壤温室气体问题上,我没有机会与这位仁兄探讨他非正式提出的关于生物地球化学定义的问题,但他的质疑确实使我反省。虽然我们经常把“生物地球化学”这个名词挂在嘴边,但对“生物地球化学究竟是个什么东西”的问题,似乎并没有一个清晰的答案。以后,我查阅了几本以生物地球化学为主题的教科书和专著(如 Schlesinger, 1997; Bashkin, 2002; Jacobson et al, 2003),也没有看到对生物地球化学的明确定义,这真令人诧异。

生态环境问题出现在当代人类生活的各个方面。从气候变化到水质污染,从农业可持续发展到城市规划,几乎所有生态环境问题都涉及生物学、地学和化学的综合作用。因此,研究者们使用“生物地球化学”这一名词泛指自己的研究工作是无可非议的。但从科学发展的角度来看,人们需要对一个学科的范畴进行比较严谨的定义,以厘清它和其他学科的关系,从而确定它对人类认识发展的特定贡献。在我看来,一个学科要能自立于科学之林,它需有自己特定的研究对象、基础理论及研究方法。那么,对于如此脍炙人口的“生物地球化学”,它的基础理论和方法论有什么独特之处呢?这些年来,我一直在思考这一问题。

2009年,清华大学成立了“地球系统科学研究中心”,致力于全球性的生态环境问题研究。2010年,该中心的主任宫鹏教授建议我来给他的研究生们开一门课,介绍生物地球化学这门学科,并为学生们编写一本相关的教材。“中国许多学生在学习生物地球化学,但我们还没有自己的教科书。”他说。宫鹏教授知道我自20世纪60年代以来一直在中国和美国从事与生物地球化学有关的研究,他希望这本教科书不仅能介绍生物地球化学的科学概念,也能展示这门学科在解决现代生态环境问题方面的应用价值。2011年9月,我应邀来到清华大学,与喻朝庆教授共同开始为这个中心的研究生们讲授生物地球化学。

我最初对讲授这门课程并不信心十足,因为这毕竟是一个涉及地学、生物学和化学的边缘领域;化学,特别是化学热力学,构成了生物地球化学的基础。我了解到,选课的学生们有着很不相同的专业背景,并不是每个学生都修过大学的化学课程。我不能确定我是否有能力将这些跨越多种学科,甚至带有一些自然哲学色彩的知识有条理地传授给学生。本着宁缺毋滥的精神,我在授课中尽量从最简单的科学道理讲起,再逐渐将这些原理与实际的环境问题结合起来。在第一学期结束的时候,我高兴地发现,学生们喜欢这门课,他们对授课内容的接受程度超过了我的预期。这给了我许多鼓励和启发,使我觉得应该用同样的指导思想来写这本教科书。当前有大量的学生和研究者在从事与生物地球化学有关的工作,他们迫切要求增进对这一学科的全面了解。如果一本生物地球化学教科书能从最基本的科学知识出发,既简

明扼要地阐述这个学科的原理和方法,又能结合一些人们关心的生态环境实际问题,就会提高这本书的可读性。在本书的写作过程中,我做了这样的努力。

另外,在讲课中我还发现,学生们对于能够通过亲自操作一个模型来理解生物地球化学原理感到满意。特别是当学生们应用模型为一些实际的生态环境问题找出答案时,他们对掌握这门学科的信心大大加强。为此,在本书中,我用了后半部的章节来介绍一个生物地球化学模型。试图通过对这个典型模型的剖析,使学生们了解如何把握生态系统的复杂性,并将分散在物理、化学和生物学中的基础知识汇总成一个相互关联的整体,使复杂的生态环境问题条理化。这个在本教科书中引用的模型叫做“DNDC”,这是一个目前在中国和世界范围内应用较多的生物地球化学计算机模拟模型。这个模型通过对碳、氮和水在生态系统中的耦合与循环,模拟植物生长、土壤固碳、微生物活动、温室气体排放、营养元素淋失等基本生物地球化学过程。这些过程都是关系到农业及地球资源环境可持续发展的核心问题。在过去的二十几年中,我一直有幸在全球范围内协调这一模型的发展和应用。通过这项模型研究,我认识到当代计算技术在开拓生物地球化学概念并将其付诸应用方面的巨大潜力。新的计算手段实现了生态学家们长期以来想做而做不到的事,即模拟生态系统中物理、化学和生物过程间的交互作用。这种来自计算技术的助力正在把生物地球化学研究推向一个新的前沿,即将错综复杂的生态环境问题转化成为一种可操作和可检验的虚拟数字系统。我相信这是生态环境研究的未来方向,也希望能够通过授课把这一火种传递到下一代研究者的手中。

在大量观测数据和计算机模拟技术支撑下,生物地球化学正在迅速拓展它的基础理论和方法论,以协助人类去应对日益复杂和严重的生态环境问题。人们期望能从生物地球化学中发展出一个统一的方法论,以应对形形色色的生态环境问题。达到这一目标也许需要几代人的努力,但我们现在已经启程。这本教科书也是向着这一目标探索的一部分。

在过去的三年中,无论是在新罕布什尔大学(University of New Hampshire)或清华大学,日常科研和教学仍是我的主业,写书的时间多放在业余。在晚上、周末或度假时写作,并不总是一件十分轻松愉快的事;我妻子吕瑞兰对这种持续三年的非正常情况表现的理解和支持,大大缓解了我的困境。本书还在初稿阶段,就得到我的学生和朋友们关心,吕瑞林、李敏生、邓佳、赵子健及清华大学的师生们认真阅读了初稿,并提出许多修改建议,使本书的内容和文字都大为改善。我的大学同学刘世庆和蒋志毕生从事地球化学和分析化学研究,他们对书稿中地球化学部分的校阅和修改,使有关论述更加准确。美国得克萨斯大学西南医学中心(University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas)的李小华和日本大分大学医学部的李康生多年从事分子生物学和微生物学研究和教学,他们对本书的生物化学部分进行了认真修改,并增加了一些新的内容。中国农业科学院的高懋芳提供了她所收集的自1992年以来世界各地发表的476篇有关DNDC模型的文章,其中包括许多我过去从未读过的中文文献,为我在本书中综述这个模型提供了极大帮助。俄罗斯科学家布拉高达茨基(Artem Blagodatsky)在莫斯科为我收集了俄罗斯和苏联时期的生物地球化学研究资料,使我得以评价在世界生物地球化学发展史中曾经占有重要地位的

俄罗斯科学家们的贡献。将这本书由粗糙的书稿转为精致的出版格式的过程是由清华大学地球系统研究中心办公室的丛娜完成的,她的细心校正和图件修改为这本书的面世做出了很大贡献。清华大学教育基金会为本书提供了资金。在此,我对来自各方面的支持深表感谢。

著 者
2015 年 8 月

王德滋等主编：《生物地球化学基础》

目录

CONTENTS

第一部分 生物地球化学基础

第 1 章 生物地球化学发展简史	3
1.1 原始数据的积累	4
1.2 地球化学思想向生物圈的延伸	7
1.3 生物地球化学的早期应用	9
1.4 环境科学的大潮	10
1.5 新的地平线	12
第 2 章 中国克山病的故事	17
2.1 一种奇怪的疾病	18
2.2 乌裕尔河流域的发现	21
2.3 黑龙江省环境质量模型的建立	24
2.4 病因元素的追寻	35
2.5 硒的生物地球化学	39
2.6 克山病研究的启示	41
第 3 章 自然选择与生物地球化学丰度	43
3.1 化学元素的起源	44
3.1.1 “大爆炸”理论	44
3.1.2 物质出现	45
3.1.3 质子和中子出现	46
3.1.4 氢原子出现	46
3.1.5 更多元素的形成	46
3.1.6 铁、超新星与重元素	47
3.1.7 宇宙的元素丰度	49
3.2 地球的形成	50
3.2.1 地壳的形成	51
3.2.2 岩石圈的形成	52
3.2.3 水圈的形成	54

3.2.4	大气圈的形成	56
3.3	生命的起源	61
3.3.1	有机物的形成	62
3.3.2	原始生命的出现	65
3.4	生命元素丰度	67
3.4.1	碳基生命	67
3.4.2	微生物的元素组成	71
3.4.3	植物的元素组成	75
3.4.4	人体的元素组成	80
3.4.5	生物元素丰度的比较	82
3.4.6	质量作用定律	86
3.5	自然选择的压力	89
3.5.1	热泉中的生命	90
3.5.2	谁在血液中传送氧	93
3.5.3	关于砷细菌的争论	97
第4章	生命能源与生物地球化学耦合	101
4.1	控制万物运动的无形之手	102
4.2	原子结构的缺陷	106
4.3	化学键	109
4.4	元素耦合和解耦	112
4.4.1	溶解-脱溶反应	112
4.4.2	化合-分解反应	114
4.4.3	络合-反络合反应	114
4.4.4	吸附-解吸反应	116
4.4.5	氧化还原反应	117
4.5	星球地质过程中的元素耦合	118
4.5.1	岩浆矿物结晶作用	118
4.5.2	岩石矿物风化作用	119
4.5.3	元素运动中的群组效应	120
4.6	生命能量的获取	121
4.7	生命获能效率的提高	124
4.7.1	光合作用	124
4.7.2	呼吸作用	128
4.7.3	酶和反应动力学	134
4.8	元素耦合和全球变化	136
4.8.1	用铁为地球降温	136
4.8.2	大氧化事件中的元素耦合	140
4.8.3	生态系统生产力与元素耦合	143

4.8.4 元素耦合与生态化学计量学	145
--------------------	-----

第5章 新陈代谢与生物地球化学循环	147
-------------------	-----

5.1 元素循环的星球地质动力	149
5.2 元素循环的生物学动力	152
5.2.1 元素的穿膜运动	152
5.2.2 新陈代谢的生物地球化学效应	154
5.2.3 微生物的地球化学营力	156
5.2.4 植物的地球化学营力	160
5.2.5 动物的地球化学营力	162
5.3 碳的生物地球化学循环	167
5.3.1 碳的地球化学特性	168
5.3.2 碳的生物化学特性	168
5.3.3 碳的全球循环	169
5.3.4 大气圈的碳库和碳通量	172
5.3.5 陆地生物圈的碳库和碳通量	172
5.3.6 海洋的碳库和碳通量	173
5.3.7 大气、陆地和海洋间的碳交换	176
5.3.8 碳循环与气候变化	178
5.4 氮的生物地球化学循环	179
5.4.1 氮的地球化学特性	179
5.4.2 氮的生物化学特性	182
5.4.3 氮的全球循环	186
5.4.4 人类活动对氮循环的影响	189
5.5 硫的生物地球化学循环	190
5.5.1 硫的地球化学特性	190
5.5.2 硫的生物化学特性	191
5.5.3 硫的全球循环	192
5.5.4 硫对陆海物质交换的指示作用	194
5.6 磷的生物地球化学循环	196
5.6.1 磷的地球化学特性	196
5.6.2 磷的生物化学特性	197
5.6.3 磷的全球循环	198
5.6.4 人类活动对磷循环的影响	200
5.7 水的生物地球化学循环	201
5.7.1 水的地球化学特性	201
5.7.2 水的生物化学特性	202
5.7.3 全球水循环	203
5.7.4 人类对水循环的影响	204

第 6 章 环境冲击与生物地球化学场	207
6.1 地球生物大灭绝	208
6.2 元素运动的原动力	215
6.3 环境营力	217
6.3.1 辐射	218
6.3.2 重力	220
6.3.3 温度	222
6.3.4 湿度	223
6.3.5 酸碱度	225
6.3.6 氧化还原电位	227
6.3.7 反应物浓度梯度	233
6.4 生物地球化学场	234
6.4.1 生物地球化学场的建立	236
6.4.2 生物地球化学场中的元素运动	241
第一部分小结	246
第二部分 生物地球化学模型	
第 7 章 生物地球化学模型的特征	251
7.1 早期生态系统模型	252
7.2 经验模型与过程模型	253
7.3 生物地球化学模型	255
7.4 一个生物地球化学模型的实例	260
第 8 章 DNDC 模块之一：输入界面	263
8.1 气候输入数据	265
8.2 土壤输入数据	267
8.3 农业管理输入数据	271
8.3.1 农作物种植	272
8.3.2 犁地	274
8.3.3 化肥施用	274
8.3.4 有机肥施用	276
8.3.5 灌溉	277
8.3.6 淹灌	278
8.3.7 塑膜覆盖	280
8.3.8 放牧	280
8.3.9 刈割	281