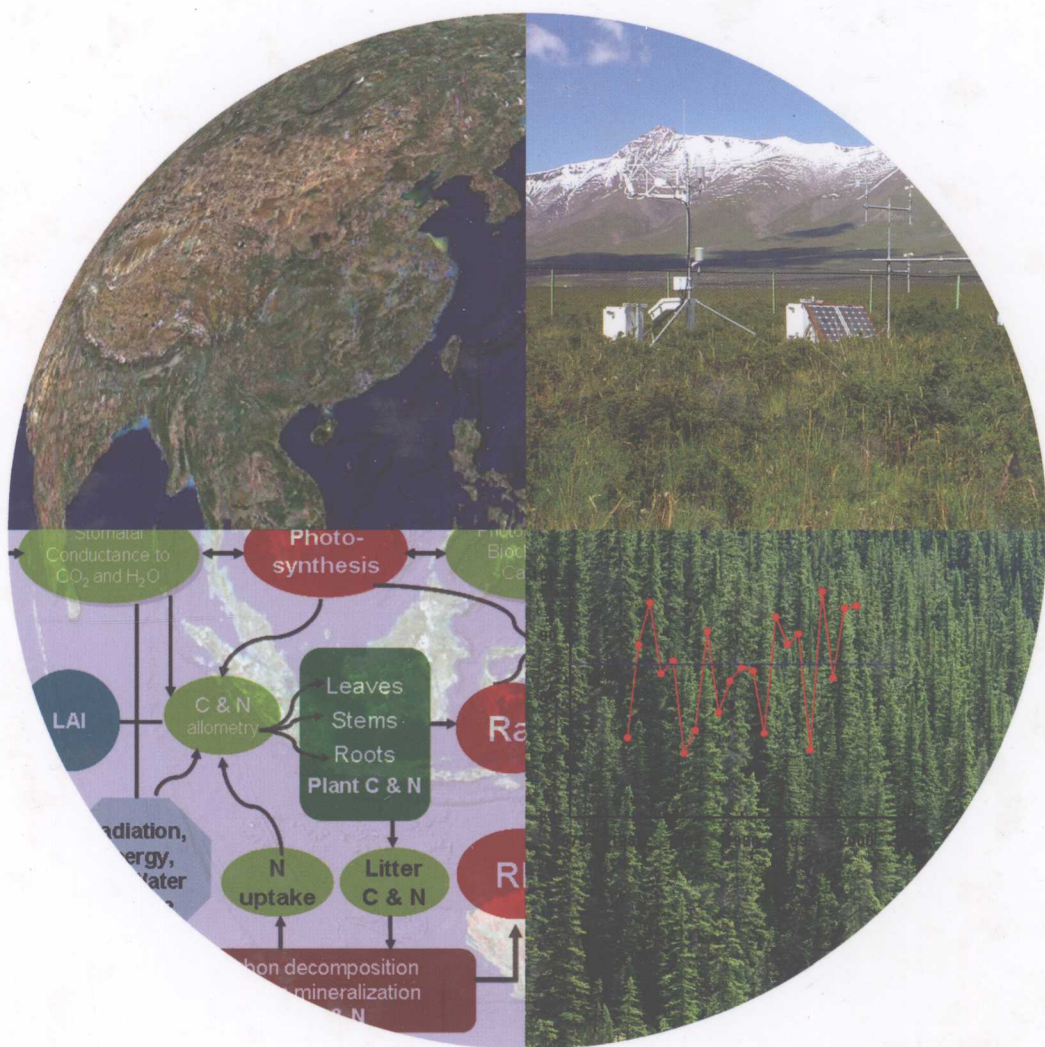


系列专著

黄耀 周广胜 等著
吴金水 延晓冬



中国科学院知识创新工程重大项目
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著

中国陆地生态系统碳收支模型

黄 耀 周广胜 吴金水 延晓冬 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”成果之一。书中系统介绍了中国陆地生态系统碳收支模型的研究成果,并对未来研究重点做了简要评述。主要包括:森林、草地、农田和自然湿地碳收支模型的基本原理和数学表达、模型的验证和灵敏度分析,中国陆地生态系统碳收支的模拟与预测等。

本书可供地球化学、地理学、土壤学、气象学、环境学、生态学、生物学、大气科学、应用遥感和全球变化等领域的科研、教学人员及本科生、研究生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国陆地生态系统碳收支模型/黄耀等著. —北京:科学出版社, 2008
(中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著)

ISBN 978-7-03-020115-7

I. 中… II. 黄… III. 陆地-生态系统-碳循环-研究-中国 IV. P9
X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177218 号

责任编辑:胡晓春 王国华/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年3月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:1—1 500 字数:314 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

中国科学院知识创新工程重大项目

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(KZCX1-SW-01)

资助

序

众所周知，在人类社会日益关注全球环境问题的今天，大气中二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化已成为世界经济可持续发展和国际社会所面临的最为严峻的挑战。为了应对这个挑战，国际社会采取了一系列重大行动。1992年在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会，签署了《联合国气候变化框架公约》，1997年12月在日本东京通过了著名的《京都议定书》等，试图通过人类社会的共同努力，将大气二氧化碳稳定在某一个水平上，规避其可能给人类社会带来的重大负面影响。

从科学的角度看，二氧化碳和甲烷等温室气体浓度升高诱发的全球气候变化尚存在诸多不确定性。全球碳循环是其中的重要方面，它控制着大气二氧化碳浓度的变化。为此，国际地圈生物圈计划（IGBP）、国际全球环境变化人文因素计划（IHDP）、世界气候研究计划（WCRP）以及国际生物多样性计划（DIVERSITAS）联合发起了以全球碳循环为主要研究内容的全球碳计划（GCP），该计划的实施极大地推动了全球碳循环与气候变化科学的发展。

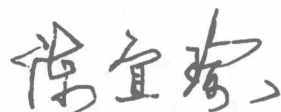
中国地域广阔，陆地和近海生态系统复杂多样，拥有自寒温带至热带的气候带和特殊的植物地理区域，为研究全球碳循环提供了良好的实验平台。同时，我国的社会经济正处在高速发展阶段，这为研究世界经济发展对全球碳循环和气候变化的影响提供了难得的社会经济背景。

我国的碳循环研究起步较晚，但起点较高、发展迅速。2001年中国科学院启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”，共有18个研究所（中心、植物园）和中国生态系统研究网络（CERN）的400余名科研人员参与了该项研究。通过为期5年的研究，该项目取得了一系列研究成果，主要包括：构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统；初步明确了驱动生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动的影响；初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应，并评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力等。这些研究成果是迄今为止对中国陆地和近海生态系统碳收支较为全面的认识，对我国制定碳管理策略和参与气候公约谈判具有重要的参考价值。本系列专著是对

上述研究成果的全面总结，是国内首部关于中国陆地和近海生态系统碳收支研究的系统性学术著作。本系列专著的出版不仅展示了中国学者在该领域的最新研究成果，而且对推动我国全球变化科学、生态学、气候学、土壤学、地理科学、海洋科学和遥感科学等学科的发展具有重要意义。

本系列专著的作者们是活跃在我国碳循环与全球变化研究领域的中青年学者。我十分欣慰地看到他们正在成长，也赞赏他们那种刻苦钻研、勇于探索的科学精神。一分耕耘，一分收获。希望他们继续努力，将我国生态系统碳循环与全球变化研究推向新的高度，取得更多、更大的进展。

国家自然科学基金委员会主任
中国科学院院士



2007年6月于北京

序 二

近百年来,以全球变暖为主要标志的气候变化对世界经济、社会和生态环境等产生了重大影响,严重威胁着各国经济的可持续发展和国家安全。地球系统碳循环是连接诸如温室气体、全球变暖和土地利用等重大全球变化问题的纽带,是在更高层次上推进学科交叉和综合集成的切入点。对全球和区域碳循环的深入研究不仅可为认识和控制全球气候变化提供理论基础,而且有助于制定生态系统管理策略以适应和减缓气候变化的影响。

为了在区域和国家尺度上回答与中国陆地和近海生态系统碳循环相关的科学问题,中国科学院于2001年启动了知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”,共有18个研究所(中心、植物园)(地理科学与资源研究所、大气物理研究所、海洋研究所、遥感应用研究所、沈阳应用生态研究所、植物研究所、南京土壤研究所、东北地理与农业生态研究所、南京地理与湖泊研究所、水生生物研究所、寒区旱区环境与工程研究所、亚热带农业生态研究所、生态环境研究中心、成都山地灾害与环境研究所、新疆生态与地理研究所、西北高原生物研究所、华南植物园、西双版纳热带植物园)和中国生态系统研究网络(CERN)的400余名科研人员(包括研究生和博士后)参与了该项研究。该项目的总体目标是以回答科学问题为中心,着眼于为我国社会经济的可持续发展和履行有关国际公约服务。试图通过对中国陆地和近海生态系统碳收支时空格局、碳循环过程和模型、生态系统碳收支对全球变化的响应以及碳增汇、减排技术的系统研究,阐明中国陆地和近海生态系统碳收支的系列科学问题,提高我国在国际全球变化研究领域中的学术地位,为全球变化背景下的中国社会经济的可持续发展以及生态系统的管理提供科学依据,为履行有关国际公约提供基础数据。

经过为期5年的研究工作,该项目在以下4个方面取得了重要进展:

- 1) 构建了ChinaFLUX研究平台、中国碳循环数据信息系统、中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统。ChinaFLUX的建成,有力地推动了我国生态系统碳通量观测和碳循环的研究,为我国深入开展陆地生态系统物质循环和区域气候响应等研究提供了平台。中国陆地和近海生态系统碳循环模型和模型集成系统实现了多个点尺度模型在同一平台上的模拟,为估算国家尺度的碳收支状况提供了基础。

2) 研究了驱动我国陆地和近海生态系统碳循环过程的关键气候因子、生物学因子和人类活动影响,其成果是迄今为止对不同生态系统碳循环过程较为全面的认识。通过对详尽的历史资料的收集、整理和分析,重新估算了过去 300 年间中国土地利用变化导致的陆地生态系统向大气释放的碳总量,对正确评价我国历史时期土地利用、土地覆被变化对陆地碳收支的影响具有积极意义。

3) 初步明确了中国陆地和近海生态系统碳源汇时空格局及其对气候变化的响应,并得到如下重要结果:过去 20 年中国陆地生态系统碳汇区主要分布在华北、华东、华中、东北及西南大部分地区,碳源区主要分布在西北大部分地区、内蒙古西部等地区,国家尺度上总体为碳汇;中国农田土壤具有明显的碳汇功能;林业工程实施将在未来 50 年内显著增加林木碳储量等。这些研究结果对客观认识我国生态系统的碳汇功能、制定碳管理策略和气候公约谈判策略具有重要价值。

4) 初步评价了不同技术措施下中国陆地生态系统碳增汇潜力,相关研究结果可为我国参与气候变化谈判提供参考依据。

本系列专著是研究项目组成员对上述研究成果的系统总结,包括了 8 本各自独立,但又相互呼应的学术著作。分别为:《中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征》(于贵瑞、孙晓敏)、《中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测》(王跃思、王迎红等)、《碳循环遥感基础与应用》(牛铮、王长耀等)、《过去三百年中国土地利用变化与陆地碳收支》(葛全胜、戴君虎、何凡能等)、《中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程》(韩士杰、董云社、蔡祖聪、宋长春等)、《中国近海与湖泊碳的生物地球化学》(宋金明、徐永福、胡维平、倪乐意等)、《中国陆地生态系统碳收支模型》(黄耀、周广胜、吴金水、延晓冬等)和《中国陆地生态系统碳收支与增汇对策》(陈泮勤、王效科、王礼茂等)。

出版本系列专著的主要目的是向读者系统地展示该项目所获得的最新研究成果,并对未来的发展方向和研究重点进行评述,为读者提供系统性的科学资料和理论知识,以推动我国地球系统碳循环及相关学科的发展。我们衷心感谢项目组全体成员在这 5 年中的良好协作和辛勤努力,并期望在未来的科研活动中能取得更大的突破。

“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”项目首席科技专家

黄 耀 于贵瑞

2007 年 6 月于北京

前 言

全球碳循环是气候变化和区域可持续发展研究的核心问题之一。为了客观评价和预测全球碳循环的过去、现在和未来格局及其对气候变化的响应和反馈,国际上关于陆地碳循环模型的研究方兴未艾。在中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(KZCX1-SW-01, 2001~2005 年)的资助下,我国科研人员对森林、草地、农田和自然湿地生态系统碳循环模型进行了系统的研究,本书详细地介绍了这些研究的成果。

全书共分 6 章:第一章阐述陆地生态系统碳循环模型研究的意义、国内外研究进展及各类生态系统碳循环模型的特色;第二章至第五章分别介绍森林、草地、农田和自然湿地生态系统碳循环模型,是“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”所属课题“森林生态系统碳循环模型研究”(课题负责人:延晓冬)、“草地生态系统碳循环模型研究”(课题负责人:周广胜)、“农田生态系统碳循环模型研究”(课题负责人:黄耀)和“湿地生态系统碳循环模型研究”(课题负责人:吴金水)的研究总结;第六章对未来研究进行展望。

本书是集体智慧的结晶。五年来,共有 30 余位科技人员和研究生参加了研究,著者深表感谢。各章主要作者为:第一章,黄耀、周广胜;第二章,延晓冬;第三章,周广胜、王玉辉、许振柱、袁文平、周莉;第四章,黄耀、张稳、于永强、孙文娟;第五章,吴金水、张文菊、童成立、肖和艾、刘守龙;第六章,黄耀、周广胜。其中第二章、第三章、第四章和第五章分别由延晓冬、周广胜、黄耀和吴金水统稿,全书由黄耀统稿。

尽管近年来陆地生态系统碳循环模型研究取得了一定的进展,但仍有许多未知的科学问题需要我们来回答。由于著者学术积累有限,本书错误和遗漏在所难免,恳请读者不吝指正。

黄 耀

2006 年 6 月于北京

目 录

序一

序二

前言

第一章 绪论	1
参考文献	5
第二章 森林生态系统碳收支模型	7
第一节 基于个体的森林生态系统碳收支模型 FORCCHN	8
一、基本过程和模拟策略	8
二、模型 FORCCHN 的主要方程	11
第二节 基于个体的森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 的验证	17
一、在样地水平的 NPP 观测和模拟比较	17
二、在样地水平的 NEP 观测和模拟比较	18
三、基于全国总量的模拟和对比	19
参考文献	21
第三章 草地生态系统碳收支模型	23
第一节 草地碳收支模型的构建	25
一、草地碳收支模型的基本原理与框架	25
二、草地碳收支模型的子模块	26
第二节 模型验证	33
一、数据来源	33
二、模型的输入与输出	34
三、模型验证结果	35
第三节 草地生态系统的固碳机理	39
一、水分胁迫与草地固碳	39
二、温度与草原固碳	45
三、CO ₂ 倍增与草原固碳	47
四、环境胁迫交互作用与草原固碳	49
第四节 水热因子对羊草草原固碳能力的影响机理研究	56
一、研究区域概况	57
二、研究方法	57
三、数据分析	57
四、降水量年际变化及其对羊草草地生产力的影响	59

五、温度年际变化特征及其对羊草群落固碳能力的影响	63
第五节 草地生态系统碳管理	69
一、模型简介	70
二、模型验证	71
三、不同人类活动和气候变化情景	72
四、不同放牧强度对羊草草原生态系统固碳能力的影响	73
五、羊草草原对气候变化的响应	75
参考文献	79
第四章 农田生态系统碳收支模型	87
第一节 模型的构建	87
一、基本原理与概念性模型	87
二、Agro-C 模型的数学表达	88
三、Agro-C 模型的参数与变量	96
第二节 模型的验证	96
一、Crop-C 模型的验证	96
二、Soil-C 模型的验证	104
第三节 模型的灵敏度分析	107
一、Crop-C 模型的灵敏度分析	107
二、Soil-C 模型的灵敏度分析	109
第四节 模型尺度转换	111
一、数据源	111
二、空间数据库建设	112
三、模型与 GIS 空间数据库接口	121
第五节 1980~2000 年中国农田碳收支	123
一、作物净初级生产力	124
二、农田土壤有机碳	127
第六节 2000~2050 年中国农田碳收支预测	148
一、2000~2050 年气候情景	148
二、作物净初级生产力	150
三、农田土壤有机碳	152
参考文献	154
第五章 自然湿地生态系统碳收支模型	164
第一节 自然湿地生态系统碳收支模型框架构建	165
一、基本原理与概念模型	167
二、模型结构	168
第二节 模型参数体系	172
一、植被生产力模型参数	173
二、湿地沉积物碳循环模型参数	174

第三节 模型验证	181
一、数据来源	182
二、模型验证结果	191
三、模型灵敏度分析	198
第四节 气候变化背景下湿地碳收支预测	199
参考文献	203
第六章 研究展望	209

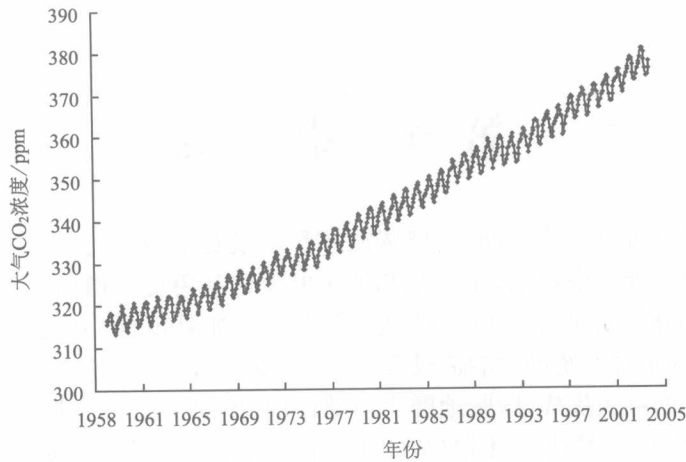
第一章 绪 论

在受人类活动强烈干扰之前,全球碳循环受气候变率和陆地-海洋-大气系统的内部动力学驱动。自工业革命以来,工业化和加速的土地利用变化增加了碳循环的复杂性。最近 20 年,人们开始认识到:CO₂ 和其他温室气体增加引起的气候变化不仅对人类的福利造成影响,也对地球系统的功能造成重大影响(Rodhe, 1990; IPCC, 2001)。面对全球变化给人类带来的巨大挑战,国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)和世界气候研究计划(WCRP)等组织提出了一个碳集成研究计划,并于 2001 年设立了全球碳计划(GCP)。碳集成研究计划的重点是要回答目前全球碳源与碳汇的时空格局如何、是何种因素导致的、决定未来碳循环动态的控制与反馈机制(人为的和自然的)是什么,以及未来全球碳循环的可能动态等科学问题。

CO₂ 是最主要的温室气体。夏威夷 Mauna Loa 的观测结果表明,大气 CO₂ 浓度已从 1959 年的 316ppm^① 增加到 2005 年的 379 ppm (图 1.1)。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指出,如果温室气体以目前排放速率持续下去,21 世纪末大气 CO₂ 浓度可能会增加到 540~970ppm (IPCC, 2001),全球平均地表温度可能升高 1.1~6.4℃ (IPCC, 2007)。全球气温升高将会导致海平面上升、降水分布变异、沙漠化加剧、自然灾害发生频繁等,会给人类的生存环境和国民经济的可持续发展带来极为不利的影响。除工业、交通和能源消耗等人类活动向大气排放 CO₂ 外,陆地生态系统对全球碳循环具有重要的影响(Schimel, 1995)。全球碳循环过程不仅与气候变化有关,而且与其他自然过程(水循环、养分循环、生物多样性等)及人类的生存与社会的发展(能源、工农业等)息息相关。因此全球碳循环是当前气候变化和区域可持续发展研究的核心问题之一。

从 20 世纪 80 年代中期开始研究全球变化至今,人们深刻地认识到生物地球化学循环是地球系统科学的核心。事实上,地球上的每一个生物化学反应都以某种形式与生物地球化学循环相联系,作为地球生物成员之一的人类参与并依赖于这些循环。数量庞大且复杂的生物过程、地质过程和化学过程改变和传输着生物地球化学元素,从而使得地球化学系统有序地工作着,决定着我们的生存环境的化学和物理特性。正因为如此,任何一个试图了解全球环境变化原因及其对人类生存环境影响的人都应该研究全球的生物地球化学过程。虽然对组成生物地球化学循环的生物和非生物过程的奇妙迷宫的解开是令人惊喜的,但如果没有数学与数值模式,则对于生物地球化学循环的理解只能局限于定性的理解。数学和数值模型的应用有助于将对生物地球化学循环的定性理解上升到对生物地球化学循环动态的定量理解水平;同时,这些模型还可与全球变化研究相联系,定量地理解

① 1 ppm=10⁻⁶。下同

图 1.1 大气 CO₂ 浓度变化(资料来源: <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/trends/co2/maunaloa.co2>)

生物地球化学循环在地球的过去和未来中的作用。“地球,无论是从全球还是局地尺度来看,都是一个动态且进化的化学系统……如果地球化学家试图描述地球的生物地球化学元素的分布性质,那么唯一合适的方法就是在一个总的……(数学)……框架下研究生物地球化学元素的分布性质”(Lasaga, 1988)。

通常用循环方法来研究地球上生物地球化学元素在库中的容量和其他外部因子对不同库之间的传输速率的影响。特定元素或组成成分循环的基本特征常常用该研究元素或组成成分在不同库(reservoir)中的含量和它在各个库之间的流动来描述。所谓库,又称盒(box)或分室(compartment),是指以某一物理、化学或生物特征定义的大量物质。譬如,对于海洋、大气与陆地之间的水分循环过程,海洋、大气中的水分和地下水等都是库。当定义了库的边界后,通常将库中具体元素的容量作为库的强度。而单位时间从一个库传输到另一个库的物质质量被称为通量(flux),如海洋表面的水分蒸发率、平流层的一氧化二氮(N₂O)的氧化率(从大气的 N₂O-氮库流进平流层 N_xO-氮库)、海洋沉积物中的磷沉积率。在更具体的传输过程研究中,通常将通量定义为单位时间单位面积传输的物质数量。为区分这两个概念,通常将后者定义为通量密度(flux density)。

碳素是地球上生命有机体的关键成分,它区别于其他生命必需元素的特点之一是碳原子具有形成长的共价链和环的能力,从而形成了有机化学与生物化学的基础。在漫长的地质时期,植物对碳素的固定是大气中产生氧气(O₂)的近乎唯一的来源,决定了整个地球环境的发展趋势。通过氧化还原反应,其他元素循环与碳循环和氧气紧密相连。因此,碳循环是生物圈健康发展的重要标志。不仅如此,准确地评估全球碳收支不仅是准确地估算未来大气二氧化碳(CO₂)浓度、预测气候变化的关键,而且也是基于气候情景预测评估气候变化对生态系统影响及探讨生态系统适应对策的基础(Berrien and Braswell, 1994),直接关系到一个国家履行《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》与《京都议定书》的情况,影响一个国家的生态、环境与社会经济的可持续发展,具有重要的理论与现实

意义,成为当前各国迫切需要解决的现实问题。正因为如此,碳循环与水循环、食物系统一起成为当今全球变化研究的3大热点。2001年三个国际全球环境变化计划——国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)及世界气候研究计划(WCRP)共同开始了一个新的国际协作研究计划,即全球碳计划(Global Carbon Project, GCP),标志着国际科学界对全球碳循环的联合研究。

全球碳循环是碳在大气、海洋及包括植物和土壤的陆地生态系统3个主要储存库之间的流动。其中,大气和海洋中的碳通量可由全球监测系统直接测定,但是对于组成陆地生态系统的植被碳库和土壤碳库的估算目前还不一致。而几个世纪以来的人类活动对生物圈的影响已从区域扩展到全球,特别是大气 CO_2 及其他温室气体浓度逐年增加,由此引起全球气候发生巨大变化,进而导致陆地生态系统的生产力及其碳储量发生变化,进一步加剧了全球碳循环估算的复杂性与不确定性。由于陆地生态系统对 CO_2 的吸收有助于减缓大气中 CO_2 气体的累积速度,从而减小气候变化的速率,因此,陆地生态系统对 CO_2 吸收的潜力成为陆地碳循环研究的关键(Walker and Steffen,1999)。

国际社会普遍认为增加陆地生态系统碳固定与储藏能有效地减缓大气 CO_2 浓度的增加,而定量评估陆地生态系统固碳能力及碳储藏潜力取决于人们对碳循环过程的认知及其相关研究的成果。陆地生态系统是一个极其复杂的系统,其碳循环过程不仅受到自然环境(如气候、土壤和地形地貌等)的影响,而且强烈地受到人类活动(如森林砍伐、土地利用、放牧和农业管理等)的制约(Izaurrealde *et al.*, 2000; Scholes and Noble, 2001; Melillo *et al.*, 2002)。由于陆地生态系统的复杂性,仅根据若干个点的测定结果尚不足以阐明区域乃至全球陆地生态系统碳收支的时空分布特征及其对大气 CO_2 浓度的贡献,况且目前我们还难以进行大范围的野外测定。因此,建立受气候、土壤、生物和人类活动综合影响的生态系统模型不仅有助于客观认识我国陆地生态系统碳收支的过去、现状和未来,而且可以通过碳循环模型与气候模式的双向耦合对未来气候变化做出更为客观的估计,以帮助人类制定适应气候变化的措施。

近20年来,陆地生态系统碳循环模型发展突飞猛进。这些模型从陆地生态系统的光合作用、呼吸作用及营养元素的循环等生理生态过程着手,研究各种环境、生物、气候因素对碳循环过程的综合影响,颇具代表性的模型包括TEM(Melillo *et al.*, 1993)、CENTURY (Parton *et al.*, 1993)、FBM (Kindermann *et al.*, 1993)、Biome-BGC (Running and Hunt, 1993)、CASA (Potter *et al.*, 1993)和BEAMS (Sasai *et al.*, 2005)。IPCC将这些模型分为两类:一类是陆地生物地球化学模型(terrestrial biogeochemical model, TBM),它可以模拟陆地生态系统的碳通量及水、氮的耦合(Dargaville *et al.*, 2002);另一类是动态全球植被模型(dynamic global vegetation model, DGVM),它更关注于生态系统内部结构和组成的相互作用(Prentice *et al.*, 1995)。这些模型对碳与其他营养元素相互作用关系的处理有极大的不同。例如,一些模型把氮的供应作为碳循环的主要限制因子,而另一些模型则不这样认为(Knorr and Heimann, 2001a, b)。目前公开发表的陆地生物地球化学模型大约有30个TBM和10个DGVM,被广泛用于评价和预测全球陆地生物圈初级生产力和碳循环的过去、现在和未来格局(Cao and Woodward, 1998; Schimel *et al.*, 2001)。陆地生物地球化学模型不仅为综合大量的观测数据、分析和

预测大尺度的生态系统过程提供了一个工具(White and Luo, 2005),而且还给实验研究以新的启示(Oreskes *et al.*, 1994; Heimann *et al.*, 1998)。

迄今为止,国际上大部分研究均将不同类型的陆地生态系统视为一个整体进行模拟、评价和预测。客观上,陆地生态系统按植被类型可分为森林、草地、农田和湿地。若不考虑人为干扰(如森林砍伐和放牧等),森林、草地和湿地为自然生态系统,农田生态系统则强烈地受到人类活动(如轮作、耕翻和肥水管理等)的影响。不同生态系统的结构和功能迥然相异,如森林主要以多年生植物为主,而农田则以一年生植物为主;大部分草地植物的地下部分生物量高于地上部分,而农作物的地上部分生物量远高于地下部分。这就决定了不同生态系统碳收支的特征及其关键驱动因子的不同。因而,试图用同一模型估计、评价和预测不同生态系统的碳收支是不客观的,尤其是在区域和国家尺度上。在中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(Huang *et al.*, 2005)的资助下,我们针对不同生态系统的特点,分别建立了森林、草地、农田和湿地生态系统碳循环模型。

森林生态系统碳循环模型(FORCCHN)的主要特色为:①碳、水和氮在土壤-植物-大气系统中的循环过程有机地结合;②森林生态系统的碳收支外部强迫和驱动因素主要基于个体生理生态过程机制,而不是由当前气候和生态系统的统计关系预先确定;③生态系统碳收支对林分生长的依赖性由个体生长来确定,从而使中国森林生态系统碳收支得到较可靠的估算;④模型可以同时用于预测气候变化所引起的森林生态系统碳收支的动态变化和未来平衡态。该模型与 Hybrid 模型的显著不同在于,前者不仅是模拟个体,而且考虑了每个个体的逐年生长(胸径和树高逐年变化)。

草地生态系统碳循环模型的主要特色为:①在模拟叶片光合作用时不仅考虑了生化限制因素(主要包括 Rubisco 限制、电子传递限制和磷酸丙糖利用限制),还包含了养分(主要是土壤碳、氮)对植物光合生理生态的影响,改进了国际通用的叶片光合生化模型。②模拟不同时空尺度的生物物理过程和生理生态过程及化学过程(主要是土壤碳、氮)对生物、物理过程的影响。③发展了基于资源(光照、水分和养分)竞争的植物光合产物分配模型,实现了光合产物在植物不同器官(根、茎和叶)分配的动态模拟,克服了 IBIS 将植物光合产物在根、茎和叶的分配以及根冠比作为常数,及采用潜在叶面积指数作为实际叶面积指数的不足。④综合考虑了温度、水分、Rubisco 酶活性和养分(土壤碳和氮)对叶片维持呼吸作用的影响,克服了 IBIS 仅考虑温度、水分和 Rubisco 酶活性对叶片维持呼吸作用的影响的不足。⑤模型采用双叶模式将植物叶片气孔导度尺度化至冠层尺度,反映了植物冠层内不同光分布对植物光合作用的影响。

农田生态系统碳循环模型(Agro-C)的主要特色为:①整体性——Agro-C 模型包括作物碳子模型(Crop-C)和土壤碳子模型(Soil-C),前者模拟作物净初级生产力,并将其中一部分(作物残茬、秸秆和根等)作为土壤碳子模型的输入,后者模拟这部分有机碳的分解、积累过程;②机理性——除考虑环境和生物因素外,强调氮素供需状态对作物光合作用和呼吸作用的影响;③可信性——模型参数来自我国的实验研究,并对不同区域进行了广泛的验证;④适应性——模型具有统一的数学表达,按不同作物主产区确定参数化方案;⑤易操作性——模型输入参数较少且易于获得。

湿地生态系统碳循环模型的主要特色为:模型参数来自我国的实验研究,且模型的有效性经过了验证。

上述模型已用于估计中国陆地生态系统碳源、碳汇格局的时空特征及预测对气候变化的响应。本书主要介绍森林、草地、农田和湿地生态系统碳循环模型的结构、基本数学表达、模型的检验和灵敏度分析以及在区域或国家尺度上的应用等。

参 考 文 献

- Cao M, Woodward F I. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393: 249~252
- Dargaville R J, Heimann M, McGuire A D *et al.* 2002. Evaluation of terrestrial carbon cycle models with atmospheric CO₂ measurements: Results from transient simulations considering increasing CO₂, climate, and land-use effects. *Global Biogeochemical Cycles*, doi:10.1029/2001GB001426
- Heimann M, Esser G, Haxeltine A, Kaduk J, Kicklighter D W, Knorr W, Kohlmaier G H, McGuire A D, Melillo J, Moore B, Otto R D, Prentice I C, Sauf W, Schloss A, Sitch S, Wittenberg U, Wurth G. 1998. Evaluation of terrestrial carbon cycle models through simulations of the seasonal cycle of atmospheric CO₂—First results of a model intercomparison study. *Global Biogeochemical Cycles*, 12: 1~24
- Huang Y, Yu G, Chen P. 2005. Carbon budgeting for the terrestrial and marginal sea ecosystems of China. *Global Change News Letter*, 62: 17~19
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001*. Cambridge, New York: Cambridge University Press. 12~14
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. <http://www.ipcc.cn>
- Izaurrealde R C, McGill W B, Rosenberg N J. 2000. Carbon cost of applying nitrogen fertilizer. *Science*, 288: 809
- Kindermann J, Lüdeke M K B, Badeck F W, Otto R D, Klaudius A, Häger Ch, Würth G, Lang T, Dönges S, Habermehl S, Kohlmaier G H. 1993. Structure of a global and seasonal carbon exchange model for the terrestrial biosphere—The Frankfurt Biosphere Model (FBM). *Water, Air, and Soil Pollution*, 70: 675~684. doi:10.1007/BF01105029
- Knorr W, Heimann M. 2001a. Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling, Part I: A comprehensive sensitivity analysis with a new photosynthesis and energy balance scheme. *Global Biogeochemical Cycles*, 15 (1): 207~225
- Knorr W, Heimann M. 2001b. Uncertainties in global terrestrial biosphere modeling, Part II: Global constraints for a process-based vegetation model. *Global Biogeochemical Cycles*, 15 (1): 227~246
- Lasaga A C. 1988. Dynamic treatment of geochemical cycles: Global kinetics. In: *Kinetics of Geochemical Processes. Reviews of Mineralogy*, 8: 69~109
- Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore III B, Vorosmarty C J, Schloss A L. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363: 234~240
- Melillo J M, Steudler P A, Aber J D *et al.* 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science*, 298: 2173~2176
- Oreskes N, Shrader-Frechette K, Belitz K. 1994. Verification, validation and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263: 641~646
- Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S *et al.* 1993. Observations and modelling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 785~809
- Potter C S, Randerson J T, Field C B *et al.* 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 811~841
- Prentice P, Sellers J, Townshend J R G, Tucker C J, Ustin S L, Vitousek P M. 1995. Mapping the land-surface for global atmosphere-biosphere models-toward continuous distributions of vegetations functional-properties. *Journal*