

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 与增汇对策

陈泮勤 王效科 王礼茂 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。书中系统阐述了近年来我国科学家在陆地生态系统碳收支与增汇技术研究中取得的最新成果和进展。全书共分三篇：上篇（第一至六章）主要介绍了自主发展的碳收支模型集成系统、中国陆地生态系统碳收支数据信息库、碳模式计算中的误差分析，以及中国陆地生态系统碳收支的现实格局和未来可能出现的变化趋势；中篇（第七至十三章）详细介绍了我国陆地和近海生态系统的固碳潜力与技术；下篇（第十四至十八章）探讨了后京都时代可能的碳减排方案和思路。

本书可供地球科学、环境科学、生态学、生物学和全球变化等专业的科研、教学人员及大学生、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与增汇对策/陈泮勤等著. —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 978-7-03-020111-9

I. 中… II. 陈… 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 172659 号

责任编辑：胡晓春 罗 吉/责任校对：桂伟利

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>

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：26 插页：4

印数：1—1 500 字数：590 000

定价：88.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈科印〉）

Carbon Budget and Its Sink Promotion of Terrestrial Ecosystem in China

Chen Panqin, Wang Xiaoke, Wang Limao *et al.*

Science Press
Beijing

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 一

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。

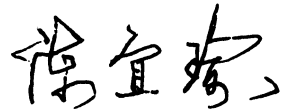
中国地域广阔，陆地和近海生态系统复杂多样，拥有自寒温带至热带的气候带和特殊的植物地理区域，为研究全球碳循环提供了良好的实验平台。同时，我国的社会经济正处在高速发展阶段，这为研究世界经济发展对全球碳循环和气候变化的影响提供了难得的社会经济背景。

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

自 20 世纪 70 年代国际上开展和系统地组织碳循环研究以来，碳问题的研究取得了长足的进展，特别是近 20 年来在全球变化研究计划的推动下，碳循环的研究方兴未艾。今天，碳循环的研究已成为国际地球系统科学伙伴计划的重要内容而备受瞩目。

碳循环研究涉及的问题多而复杂，其本身是一个大科学工程。本书是继系列书各卷之后，从整体上阐述中国陆地生态系统碳收支格局与增汇对策。因此，本书与前述各卷，如模型卷、通量观测卷等有着十分紧密的联系。

本书分上、中、下三篇，分别是中国陆地和近海生态系统碳收支项目的第 17、18 和 19 课题的总结，其上篇的重点在于研发生态系统碳循环模型集成系统，使得本项目模型组发展的碳循环模型能方便地在本系统运行；同时在收集数据的基础上，对多途径获取的点、面、线状数据进行严格的空问化处理，加工成供碳循环模型使用的基础数据库；然后利用集成系统对中国四类生态系统的碳循环进行模拟，分析其时空格局及其特点，探讨温室气体浓度增加通过其温室效应对我国生态系统的影响，以及植树造林对我国未来陆地生态系统碳的源汇格局的影响。

另一方面，我国的 CO₂ 排放量急剧增长，我国已成为世界第二排放大国。而我国目前正处于工业化进程中。《京都议定书》的实施将会给我国带来什么样的影响，在全球气候变化公约履约的所谓“后京都时代”，我国将取何种态度，不同减排方案对我国的社会经济将带来什么影响，有哪些行之有效的固碳增汇措施等，也是本书中篇和下篇关注的问题。

应该看到，上述问题的解决，在几年的时间内是不可能获得完满的答案的。本书仅仅是对上述问题的初步探讨，谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

本书采取文责自负的方式，由第 17 至 19 课题组成员共同完成。上篇由陈泮勤统稿，中篇由王效科统稿，下篇由王礼茂统稿，全书由陈泮勤负责统稿。为便于读者作者间的联系，现将本书各章的作者列表如下：

- 第一章 陈泮勤
- 第二章 张稳
- 第三章 张稳 史学正 王绍强
- 第四章 刘宇
- 第五章 陈泮勤
- 第六章 陈泮勤 黄耀 张稳
- 第七章 王效科
- 第八章 刘国华 胡会峰
- 第九章 韩冰 逯非 王效科

- 第十章 郭然 逯非 王效科
第十一章 段晓男 王效科
第十二章 王效科 逯非
第十三章 宋金明 李学刚 袁华茂 杨宇峰 邹定辉
第十四章 王中英 王礼茂
第十五章 许学工 彭慧芳 李海涛
第十六章 王礼茂 李海涛 闵庆文
第十七章 王礼茂 郎一环 彭慧芳
第十八章 王礼茂
附录 张稳

此外，参加本课题工作和本书撰写的还有三个课题的博士生、硕士生和相关人员，在此一并表示感谢！

陈泮勤

2006年6月于北京

目 录

序一
序二
前言

上篇 中国陆地生态系统碳源汇时空格局

第一章 绪言	3
第一节 问题的提出	3
第二节 科学问题	6
第三节 基本思路	9
主要参考文献	10
第二章 碳收支模型集成系统	15
第一节 碳收支模型集成系统的设计原则	15
第二节 碳循环模型集成系统的构成	16
一、硬件环境	17
二、通用软件系统	17
三、集成系统软件与系统的运行	19
第三节 集成系统的标准体系	20
一、运行环境和有关标准	20
二、数据格式、度量和空间参照系标准	21
三、模型集成软件开发与子模型接口标准	21
第四节 模型参数数据库集成	22
一、模型的参数数据	22
二、模型参数数据的多源性和复杂性	25
三、数据一致性和标准化	26
四、模型参数数据库建设	28
五、数据存储与组织结构	34
第五节 模型软件集成	39
一、集成软件的组成结构	39
二、软件开发平台	41
三、集成软件与各生态系统模型软件的集成	42
主要参考文献	43

第三章 碳模型所需的基础数据：中国陆地生态系统碳收支数据信息库	44
第一节 气象数据栅格化	44
一、不同气象要素空间化算法研究	44
二、地表太阳辐射估算	49
第二节 中国土壤数据库与碳模型模拟土壤参数	50
一、土壤类型名称规范与编码	50
二、土壤空间数据库	50
三、土壤属性数据库	58
四、土壤属性与空间数据的融合	60
五、碳模型模拟需要的土壤参数	61
第三节 碳通量观测数据的时空代表性	64
一、通量观测数据质量分析与评价	64
二、同化箱式法与涡度相关法的比较	69
三、通量观测数据的空间代表性	72
四、通量观测结果的尺度扩展	75
五、利用通量观测数据进行生态系统碳收支估算的初步探讨	80
主要参考文献	83
第四章 模式计算中的误差分析	88
第一节 误差及其来源	88
一、误差的定义	88
二、真值与平均值	88
三、误差的分类及来源	89
第二节 误差分析方法	90
一、直接测量中误差的表示方法	90
二、间接测量中误差的传递	92
三、误差合成	92
第三节 集成模式对输入误差的响应	93
主要参考文献	96
第五章 中国陆地生态系统碳收支时空分布格局	97
第一节 碳循环模型与输入参数	97
一、生态系统碳循环模型	97
二、模型的输入参数	104
第二节 计算结果	105
一、各类生态系统的面积与分布	105
二、生态系统重要变量的计算	105
第三节 碳收支时空分布特点	113
一、生态系统碳库的时间变化	113
二、生态系统碳库的空间格局	119

第四节 小结与讨论·····	121
一、小结·····	121
二、讨论·····	123
主要参考文献·····	124
第六章 全球变化背景下中国生态系统碳收支的未来演变趋势·····	126
第一节 温室气体排放情景·····	126
第二节 温室气体排放的影响·····	127
一、未来的气候情景·····	127
二、A1B 情景下中国陆地生态系统碳源汇的时空变化·····	130
三、B1 情景下中国陆地生态系统碳源汇的时空变化·····	132
第三节 土地利用变化的影响·····	134
一、植树造林计划·····	134
二、植树造林对陆地生态系统碳源汇格局的影响·····	135
主要参考文献·····	135
 中篇 中国陆地生态系统碳增汇技术措施与潜力 	
第七章 基于 IPCC 方法的中国陆地生态系统碳增汇潜力评估·····	139
第一节 中国森林生态系统的固碳潜力·····	139
一、IPCC 森林生态系统固碳潜力的估算方法·····	139
二、基于 IPCC 方法的中国森林生态系统固碳潜力·····	146
三、中国森林生态系统的固碳潜力·····	151
第二节 中国农田生态系统的固碳潜力·····	151
一、IPCC 估算农田生态系统碳库变化的方法·····	151
二、基于 IPCC 方法的中国农田生态系统的固碳潜力·····	154
三、中国农田生态系统的固碳潜力·····	158
第三节 中国草原生态系统的固碳潜力·····	158
一、IPCC 的草原生态系统碳库变化的估算方法·····	158
二、基于 IPCC 方法的中国草原生态系统的固碳潜力·····	161
第四节 小结·····	162
主要参考文献·····	163
第八章 中国森林生态系统碳增汇技术措施和潜力·····	164
第一节 人工造林的固碳潜力·····	165
一、人工林建设的固碳潜力·····	165
二、退耕还林的固碳潜力·····	169
第二节 森林管理的固碳潜力·····	172
一、减少森林采伐的固碳潜力·····	172
二、森林恢复的固碳潜力·····	173

三、森林防火的固碳潜力	174
四、森林病虫害防治的固碳潜力	176
第三节 小结	178
主要参考文献	178
第九章 中国农田生态系统的碳增汇技术措施和潜力	180
第一节 施用化肥的固碳能力与固碳潜力	181
一、研究方法	182
二、结果与分析	184
第二节 秸秆还田措施的固碳能力与固碳潜力	191
一、研究方法	191
二、结果与分析	194
第三节 施用有机肥的固碳能力与固碳潜力	201
一、研究方法	201
二、结果与分析	203
第四节 免耕措施的固碳能力与固碳潜力	210
一、研究方法	210
二、结果与分析	211
第五节 小结	214
主要参考文献	214
第十章 中国草原生态系统的固碳技术措施和潜力	220
第一节 草原生态系统的固碳速率	220
一、固碳速率的估算方法	220
二、草原生态系统的固碳速率	221
第二节 草原生态系统的固碳潜力	225
一、降低牧压的固碳速率	225
二、围封草场的固碳能力	226
三、人工种草的固碳能力	227
四、退化草地恢复的固碳潜力	227
第三节 小结	227
主要参考文献	228
第十一章 中国湿地生态系统碳增汇技术措施和潜力	230
第一节 湿地生态系统的固碳潜力	230
一、估算方法	230
二、我国湖泊湿地的分类和固碳潜力的估算	230
三、我国沼泽湿地的分类和固碳潜力估算	232
第二节 退田还湖的固碳潜力	233
第三节 小结	234
主要参考文献	234

第十二章 中国陆地生态系统固碳潜力	236
第一节 中国陆地生态系统固碳潜力.....	236
第二节 中国农田生态系统固碳措施的有效性评价.....	236
一、农田生态系统固碳措施的碳泄漏估算	237
二、农田生态系统固碳措施的有效性评价	242
主要参考文献.....	244
第十三章 中国近海生态系统的固碳潜力与技术措施	245
第一节 海洋固碳潜力与技术措施的研究现状.....	245
一、世界大洋的碳储库	245
二、近海生态系统碳储库	252
三、增加海洋固碳潜力的主要技术措施	257
四、我国海洋固碳潜力研究的主要进展	263
第二节 大型海藻栽培的碳吸收理论分析与环境作用.....	265
一、海藻栽培增加碳汇的理论分析	266
二、栽培大型海藻的环境作用	272
第三节 人为影响下浮游植物固碳能力的变化.....	275
一、营养物质的增加对浮游植物固碳量的影响	275
二、微量元素对浮游植物固碳量的影响	277
三、我国近海浮游植物生长的限制性因素	279
四、我国近海浮游植物固碳强度分析——以南黄海为例	281
第四节 中国近海生态系统碳增汇潜力与措施的分析.....	293
一、中国近海通过海气界面的表观碳汇强度	293
二、外源措施增加中国近海的碳汇强度	296
主要参考文献.....	299

下篇 主要碳减排方案与对策

第十四章 后京都时代的碳减排方案及其评述	313
第一节 有代表性的减排责任分担方案.....	313
一、基于人均排放量的方案	313
二、基于排放强度的方案	314
三、基于历史责任的方案	316
四、基于人均 GDP 的方案	317
五、其他方案	318
第二节 对主要方案的评述.....	318
一、主要分担方案的依据和基本原则	318
二、主要分担方案的优点和不足	320
三、不同方案对中国的影响分析.....	322

主要参考文献·····	323
第十五章 不同国家在碳减排中的博弈·····	324
第一节 主要国家或国家集团的减排立场及其主要依据·····	324
一、主要国家或国家集团的减排立场·····	324
二、主要国家碳减排立场的基本依据·····	327
第二节 不同国家在碳减排中的博弈·····	330
一、博弈论的基本内容及相关模型·····	330
二、《京都议定书》通过前各利益集团之间的博弈·····	332
三、后京都时代的博弈·····	333
四、中国的积极应对措施·····	337
主要参考文献·····	338
第十六章 后京都时代的碳减排分担方案思路·····	340
第一节 减排方案所依据的主要原则·····	340
第二节 发展中国家参与减排的门槛设定·····	341
一、单一门槛的设定·····	341
二、综合减排门槛的设定·····	346
三、中国参与减排门槛的选择·····	347
第三节 可能的减排方案思路·····	348
一、基于人均 GDP 的减排分担方案思路·····	348
二、基于生态足迹的减排分担方案思路·····	355
主要参考文献·····	359
第十七章 中国应对气候变化的谈判对策·····	362
第一节 中国能源利用和碳排放·····	362
一、中国能源消费与 CO ₂ 排放的特点·····	362
二、中国能源消费与 CO ₂ 排放面临挑战·····	364
三、促进能源合理利用削减 CO ₂ 排放·····	366
第二节 减少温室气体排放的途径比较与适宜方案选择·····	368
一、减少温室气体排放的途径比较·····	368
二、中国温室气体减排适宜方案的选择·····	374
第三节 中国应对气候变化谈判的主要对策·····	380
一、中国在气候谈判中面临的主要压力·····	380
二、中国应对气候变化的谈判策略·····	382
主要参考文献·····	384
第十八章 小结·····	387
第一节 中国在气候变化谈判中面临国内外的双重压力·····	387
一、国内面临经济发展、能源消费增加和 CO ₂ 减排的巨大压力·····	387
二、面临来自国际上的巨大压力·····	388
第二节 中国在气候变化谈判的主要立场和观点·····	388

第三节	中国参与减排门槛的选择.....	389
第四节	应对气候变化谈判的对策.....	390
附录 1	.....	392
附录 2	.....	393
附录 3	.....	395
附录 4	.....	396
附录 5	.....	397

上 篇

中国陆地生态系统碳源汇
时空格局

第一章 绪 言

第一节 问题的提出

碳是地球上最为重要的生命元素,是生命体的主要组成部分,它维系着地球上生命系统新陈代谢过程,在生命系统中占有极为重要的地位。碳也是地球上最为重要的环境地球化学元素,在地球演化和生命起源的历史长河中,扮演着十分重要的角色。

碳有多种存在形式,大气中的碳主要以气态形式存在,主要有 CO_2 、 CO 、 CH_4 以及人类排放的其他含碳气体,如哈龙等。由于自然原因赋存的碳是比较稳定的。

从 CO_2 对光谱吸收的物理特性出发,大气科学家很早就注意到大气中 CO_2 在吸收和反射太阳辐射中的作用(图 1.1)。即:它允许太阳辐射无阻碍地到达地面,限制红外辐射向外发射,从而引起地面净加热。正是由于大气 CO_2 犹如温室玻璃的作用,因此人们称这种作用叫“温室效应”。

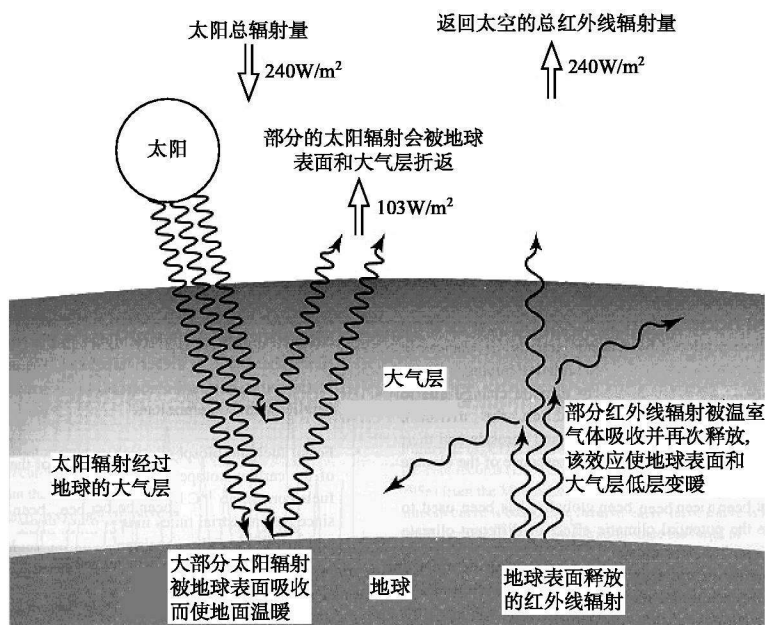


图 1.1 大气 CO_2 的温室效应

正是由于大气 CO_2 的温室效应,才使得地球平均温度保持在 16°C 左右,地球上的液态水才得以存在,从而创造了地球生命生存的环境。

地球系统中碳循环研究,始于 20 世纪 70 年代国际科学联合会环境问题科学委员会

(SCOPE)发动和组织的 C、N、S、P 研究计划。如果说,在此之前关于碳问题的研究,属于科学家个人在好奇心支使下追求科学奥秘的自由探索的话,那么,由 SCOPE 组织的碳循环研究则是国际科学界的群体行为,为今天的碳循环研究奠定了基础。然而,碳循环研究的浪潮还是缘于全球气候变暖,以及由此而引发的气候变化框架公约和为履约而达成的《京都议定书》(陈洋勤等,2004)。

众所周知,20 世纪 70 年代末至 80 年代初,世界范围内发生了一系列大范围持续性旱、涝气候事件,如印度和孟加拉国的暴雨、洪水,非洲撒哈拉地区年年干旱等,从而引发了人们对灾害性气候事件的关注。当气象学家在分析全球气象资料时发现,过去百年全球平均气温上升了 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 1.2),进而怀疑大范围持续性气候灾害似乎与全球增暖存在某种联系。与此同时,在探究全球变暖的原因时,科学家们又意外地发现了另一个不容争辩的事实,即位于夏威夷群岛的 Mauna Loa 观象台观测到自 1958 年以来大气 CO_2 的浓度持续升高(图 1.3)。联系到 CO_2 的浓度升高带来的增强温室效应,人们敏感地意识到,除了自然因素外,全球增暖必然与大气 CO_2 的浓度升高有关,进而与人类活动有关。

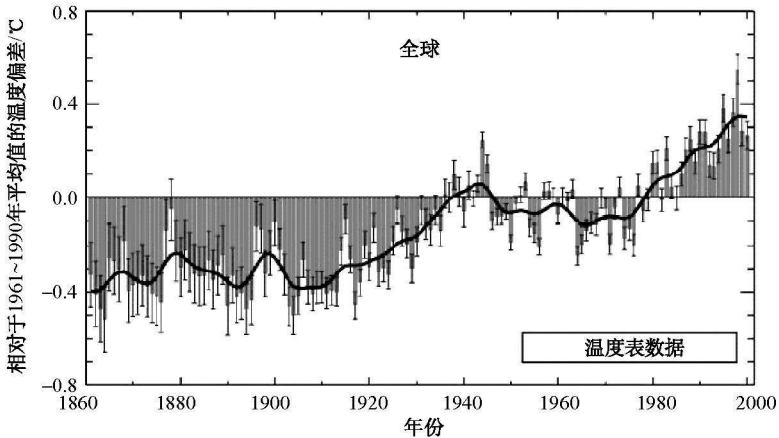


图 1.2 1860~1999 年全球温度变化(引自 IPCC,2001)

然而,在人们发现全球增暖、大气 CO_2 升高与人类活动(燃烧化石燃料)向大气排放碳时,却遇到了丢失的碳汇的新困惑。早年的资料认为(Sundquist,1993),人类通过燃烧化石燃料每年向大气排放了 5.4Gt C ,土地利用向大气释放了 1.6Gt C ,但只有 3.3Gt C 滞留在大气中,大约 2.0Gt C 被海洋吸收,其余的 1.7Gt C 不知去向,这就是所谓的“丢失的碳”问题。

近年来,IPCC 公布的模型计算和最新观测结果表明(IPCC,2001):每年人类向大气排放 8.0 Pg C ,其中,化石燃料的贡献约为 6.3Gt C ,土地利用变化的贡献约为 1.7Gt C ;通过大气 CO_2 浓度观测反演得到的 20 世纪 90 年代大气碳库的平均年增长率为 3.2Gt C ;同年代海洋平均每年吸收了大约 1.7Gt C ,而 20 世纪 80~90 年代陆地生态系统吸收了约 $1.9\sim 3.1\text{Gt C}$ 。且 Watson 和 Noble (2001)推测陆地生态系统吸收的约 3.1Gt C 中约有一半被欧亚大陆和北美吸收,另一半被热带生态系统吸收。似乎所谓的“丢失的碳”问题已经解决,但实际上,由于生态系统的碳汇功能存在很大的年际变率,加之观测站点少,

时间短等诸多不确定性,因此“丢失的碳”问题仍是科学家们关注的热点。

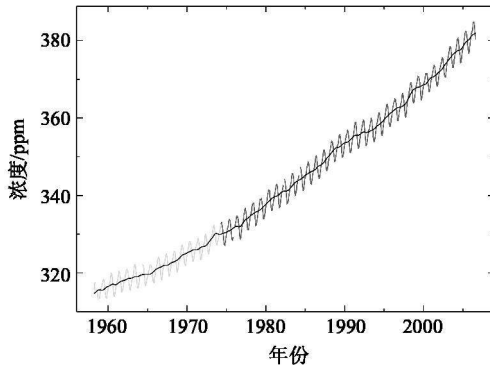


图 1.3 Mauna Loa 观测站观测到的大气 CO₂ 浓度的变化
(1958~2004 年)

1958~1974 年——Scripps 海洋研究所

1974~2006 年——美国国家海洋大气管理局地球系统研究实验室全球监测处

“丢失的碳”问题实际上是碳循环中的核心问题,涉及碳循环的方方面面。从调控的角度看,地球系统中碳的源汇格局(现实格局和未来的变化)、自调节能力(容量)是最为重要的两个内容。

全球增暖与大气 CO₂ 的浓度升高两个新的观测事实引发了关于碳循环及其相关研究的新浪潮,诞生了一系列重大国际科学研究计划,例如,国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、国际生物多样性计划(DIVERSITAS)和国际全球环境变化人文因素计划(IHDP),进一步推动了全球碳循环的研究。

另一方面,在给定的能源政策和排放情景下,全球气候模式的模拟结果显示:未来百年(1990~2100 年)全球平均气温将升高 1.4~5.8℃(IPCC, 2001);21 世纪全球平均水汽浓度和降雨要增加,21 世纪后半叶,北半球中高纬和南极地区的冬季降雨增加,而低纬度的陆区,既有区域范围的增加,亦有区域范围的减少;与 20 世纪后半叶观测到的事实相比,21 世纪极端事件发生的可能性有增加和扩大的趋势,如严重干旱和大暴雨事件,以及伴随厄尔尼诺发生危险程度增加;海洋温盐环流减弱,从而导致北半球热量向高纬度传输的减慢;北半球雪盖和海冰面积预计进一步减少,冰川和冰盖将继续退缩,南极冰盖可能会由于大的降水而得到补充,而格陵兰冰盖却因径流增加超过降雨的增加而亏损;预计 1990~2100 年间全球海平面将升高 0.09~0.88m。

尽管根据当前的知识对未来情景的估计存在诸多不确定性,但是,从人性的角度出发,达成了在气候变化框架公约下履行《京都议定书》的一致行动,并于 2005 年 2 月正式生效实施。

与此同时,20 世纪 90 年代末至 21 世纪初,地球系统碳循环已成为地球科学、生物学和社会科学共同关注的三大主题之一。以全球变化研究为核心的合作伙伴,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)共同认识到,地球系统碳循环是连接诸如温室

气体、全球增暖、土地利用等重大全球性环境问题的纽带,是在更高层次上推进学科交叉、进行综合集成的切入点。它们已将地球系统碳循环纳入其伙伴计划,成为共同关注的重大项目予以推进。这不仅可以从深入理解主导碳循环的物理、化学和生物学过程及其相互作用,还从一个侧面深刻认识地球系统是如何运行的。可以预计,在不远的未来,地球系统碳循环将取得长足的进展,从而极大地丰富我们的知识,在碳循环的认知世界里迈出坚实的一步。

第二节 科学问题

全球碳循环中涉及的科学问题很多,包括从观测资料的获取、碳循环现实格局的解读到未来的变化趋势预测等方面,这些问题在《地球系统碳循环》一书中已有较详细的阐述,本书将不再赘述,而是想从另一个角度提出问题,进行研究。

上一节提到,履行《京都议定书》最核心的目标是要减缓大气 CO_2 浓度增长的速度,并将其控制在不危及人类安全的水平上,保证人类社会的可持续发展。然而,减排目标的确定必然涉及地球系统容纳碳的自然能力和人类通过科学技术进步所达到的固碳能力。因此,无论是碳循环中所谓“丢失的碳”问题,还是《京都议定书》减排目标的确定所提出的地球系统容纳碳的能力问题都要求科学家准确回答地球系统的碳收支、碳源汇时空分布格局及未来的变化趋势。而对这一科学问题的求索又不可避免地涉及地球系统碳循环的方方面面。

为了进一步认识问题的实质,并抓住主要方面,我们收集了世界各国学者的研究成果。表 1.1 和表 1.2 分别给出了不同学者对全球陆地碳收支和中国的碳收支的估计结果。从表中不难得出以下共识:

- 1) 证实存在一个丢失的碳汇;
- 2) 多数学者认为,北半球中纬地区有一个碳汇;
- 3) 观测和估计结果一致认为,海洋是一个大小约为 2Pg C 的碳汇。

同样地,我们可以发现,不同学者的估计存在较大的差异。分析产生这些差异的原因不难发现:表 1.1 的结果是不同学者根据观测数据进行的估算,或者是根据模型进行的计算。

利用观测资料进行的估计主要来自三种观测数据。一是根据观测到的 CO_2 浓度或同位素示踪数据进行反演,如 Tans、Keeling 等工作均属此类。这种方法的主要不确定性来自测点的密度太小,且时空分辨率低,不能准确刻画陆地生态系统碳的源汇空间格局。另一种是利用卫星遥感观测的影像数据进行反演得到 NPP、NEP 等,如 Skole、Gong 等工作。该类方法的缺点是目前的反演模型只能粗略地区分大的生态系统类别,而不能准确分辨更细的生态系统类别,更不用说树种年龄等,这些都会影响到碳源、碳汇的估算结果。第三种方法是根据微气象法(涡度相关法和梯度廓线法)和箱法测量的数据进行估算,如 Philips 等工作。该方法可以直接获得大气与生态系统之间碳的净交换(碳通量)、土壤呼吸等碳循环中的重要变量,但微气象法在应用中受到均匀、定常条件的约束,实际生态系统既非平坦均一,又是处在不断变化的环境中。因此微气象法测量的结果的

表 1.1 地球陆地生态系统碳收支的估算结果

地区	碳通量/(Pg C/a)	方法	作者
西伯利亚	0.01~1.3		Schulze <i>et al.</i> , 2000
欧洲	0.2~0.4		Schulze <i>et al.</i> , 2000
美国	0.014~0.00		Houghton, 2002
美国	0.6		Pacala <i>et al.</i> , 2001
美国	1.4		Fan <i>et al.</i> , 1998
北美	-1.0~+1.0		Bousquet <i>et al.</i> , 2000
北美	0.05~1.7		Holland <i>et al.</i> , 1999
北半球中纬度	2.0~3.0	CO ₂ 观测数据反推	Tans <i>et al.</i> , 1990
北半球中纬度	2.5~3.5	CO ₂ 浓度和同位素观测	Ciais <i>et al.</i> , 1995
北半球中纬度	1.9~0.9	CO ₂ 观测数据反推	Keeling <i>et al.</i> , 1996
北半球中纬度	1.4±0.2	CO ₂ 数据和模型	Fan <i>et al.</i> , 1998
北半球中纬度	2.2±0.2	CO ₂ 数据和模型	Fan <i>et al.</i> , 1998
北半球中纬度	0.5~0.8	森林普查数据	Houghton, 1997
北半球中纬度	0.6~1.0	土地利用数据估计	Dixon <i>et al.</i> , 1994
北半球中纬度	1.0~1.2	氮沉降模型	Holland <i>et al.</i> , 1997
北半球中纬度	0.58	生物地球化学模型	Cao and Woodward, 1998
热带地区	1.6	土地利用数据估计	Houghton and Hacker, 1995
热带地区	1.7±1.6	CO ₂ 浓度和同位素观测	Ciais <i>et al.</i> , 1995
热带地区	1.65±0.4	森林和土地利用	Dixon <i>et al.</i> , 1994
热带地区	0.62±0.3	涡相关测量	Philips <i>et al.</i> , 1995
热带地区	0.2~0.7	气象和 TEM 模型	Tian <i>et al.</i> , 1998
热带地区	0.1	遥感数据	Skole and Tucker, 1993
热带地区	0.3	森林和土地利用	Fearside, 1997
全球	0.4~1.4		Yang <i>et al.</i> , 2000

注：“+”表示汇(吸收)；“-”表示源(排放)。

应用是有条件的,且此法昂贵,测点数量受到极大限制。箱法在测量中破坏了大气的自然状态,其动力和热力作用直接影响测量的准确性。因此,根据微气象法(涡度相关法和梯度廓线法)和箱法测量的数据进行估算由于测量引入了较大的误差和数据较少而严重影响了估算结果。

利用模型进行估计是当前最流行的方法,也是未来的发展方向。正如《地球系统碳循环》一书中指出的那样,近 30 年来已发展出多种模型来估算地球系统中各个碳库的储量、通量等。这些模型按性质可分为:

- 1) 生物地理模型,如 BIOME (Prentice)、MAPSS;
- 2) 生物物理模型,如 SIB (Simple Biosphere Model)、BITSLEAT (Land Ecosystem Atmospheric Feedback Model);
- 3) 生物地球化学模型,如 BIOME-BGC、CENTURY、TEM、DOLY 等;
- 4) 动力学模型,如生态系统与气候动态耦合模型、气候植被相互作用模式(Ji, 1995)、陆地生物地球化学模式与二维气候模式的耦合(Xiao *et al.*, 1997)、碳氮硫动力学

表 1.2 我国陆地生态系统碳收支的估算结果

时间	森林储量/(Pg C/a)	通量/(Pg C/a)	方法	作者
1990~2000		+0.024		刘纪远等, 2004
1994~1998	4.75	+0.021	材积法	Fang <i>et al.</i> , 2001
1989~1993	4.20	+0.0265	材积法	刘国华等, 2000
1981~1998		+0.07 (NEP)	模型	Cao <i>et al.</i> , 2003
1982~1998		-0.25~+0.15	遥感	Gong <i>et al.</i> , 2002
1989~1993	3.778		材积法	赵敏、周广胜, 2004
1984~1988	3.26~3.73		材积法	王效科等, 2002
	6.2		材积法	周玉荣等, 2000
1981~2000	3.06~3.61		材积法	陶波, 2003
	3.27			
1989~1993	5.41		材积法	赵士洞、汪业勛, 1999
1980~1990		-0.06±0.2	材积法	Houghton, 1999
1980~2000	-1.15~0.0575		材积法	Houghton, 1999
1950~1970		-0.2~-0.5		
1700~2000	-17~-33	-0.057~+0.11	材积法	Houghton, 2003
1994	+0.11		材积法	国家信息通报

注：“+”表示汇(吸收)；“-”表示源(排放)。

模式及相互作用(Van der Peijl and Verhoeven, 1999)、耦合物理与生物地球化学模式(Gregg, 2002)、二维能量平衡与碳循环耦合模式、陆地碳循环动力模式(Emanuel, 1993; Neilson and Running, 1996);

5) 其他模型,如大气反演模拟(Atmospheric inverse modelling)、陆地碳循环平衡模式(Foley, 1995)、碳循环系统模式(Goldewijk and Leemans, 1995)、凋落物分解通用模式(Moorhead and Reynolds, 1991)等。

按研究对象(或问题)可分为:

1) 海洋模式,如海洋三维模式(邢如楠, 1995;金星、石广玉, 2000;邢如楠, 2000;魏浩、赵亮, 2002)、二维全球海洋碳模式(董调玲, 1994;徐永福等, 1997;蒲一芬, 2000)、生物地球化学模式(宋金明, 2000)、海洋生态系统模式(Neumann, 2000; Fennel *et al.*, 2001)、海洋有机物分解模式(Middleburg, 1989);

2) 生物圈模式(SIB),如高分辨率生物圈模式(Esser *et al.*, 1994)、Frankfurt 生物圈模式(Ludeke *et al.*, 1994)、全球生物群区模式(Printice *et al.*, 1992)、简单生物圈模式 SIB (Sellers *et al.*, 1986)、区域初级生产量模式(Prince, 1991; Ruimy *et al.*, 1996)、全球陆地初级生产力与植物地理模式(Woodward *et al.*, 1995)、全球陆地生物生产力模式(Warnant *et al.*, 1994);

3) 土壤模式,如保护土壤有机物模式(Hassink and Whitmore, 1997)、土壤有机物动力学模式(Chertov and Komarov, 1997)、凋落物分解通用模式(Moorhead and Reynolds, 1991);

4) 生态系统模式,如简单生态系统模式(Cui *et al.*, 1997; Parson and Kessler, 1987)、森林生态系统过程通用模式(Running and Gower, 1991)、季节变化三维生态系统模式(Sarmiento *et al.*, 1993);

5) 通量模式,如耦合碳、水通量模式(Haxeltine *et al.*, 1996)、二维氮碳通量模式(Ianson and Allen, 2002)、碳通量经验模式(Zamolodchikov and Karelin, 2001);

6) 气候植被相互作用模式,如气候植被相互作用模式(Ji, 1995)、陆地生物地球化学模式与二维气候模式的耦合(Xiao *et al.*, 1997)、碳氮硫动力学模式及相互作用(Van der Peijl and Verhoeven, 1999)、耦合物理与生物地球化学模式(Gregg, 2002)、两维能量平衡与碳循环耦合模式。

总体上讲,各类模型均有其自身的优点。其共同存在的问题主要体现在以下四个方面:

1) 对主导碳循环的物理化学和生物学过程基本规律的认识和基本参数的获取。目前尽管开展了大量研究和科学实验,但对一些重要过程的认识仍然十分有限,如植物的光合过程,呼吸过程,光合产物分配过程,土壤的异养呼吸过程,分解过程,细根周转过程,干扰和死亡过程,碳在碳库中的运移转化过程,碳库间的平流输送、湍流交换过程等。

2) 基于上述认识的数学归纳法。如各种各样的参数化方案,而这些方案需要大量实验数据支持,而目前可靠的实验数据少之又少。

3) 几乎所有模型都需要有关环境要素(气象数据、水文和土壤等信息)作为模型的初始场。常规观测得到的环境要素,由于不能满足模型的时空分辨率的要求而需要对常规观测进行再加工。无论多好的资料处理方法都会偏离真值,从而引入新的误差,再加上模型本身的作用,误差将会进一步被放大或缩小,其结果更加偏离真值。

4) 模拟结果的检验。无论什么样的模型最终都要用观测数据进行验证。现在的问题是,一个观测站的数据本身代表什么样的时空尺度,模型的输出结果又代表什么样的时空尺度,如果这两个数据集不在同一个时空尺度上,比较的结果是无意义的。但这样的问题在实际中大量存在,从而影响了对碳循环、碳源汇格局的最终认识。

第三节 基本思路

为了在现有认知水平上对中国陆地生态系统碳源、碳汇现实格局做出较科学的估计,预测全球变化和土地利用变化背景下中国生态系统碳源汇未来变化趋势,我们有着以下一些基本思路和框架设想。

通过对碳循环综合模型与 GIS 和 RS 耦合技术的研究,建成具有自主知识产权的中国生态系统碳循环模型——GIS-RS 集成系统。该集成系统应具有模型兼容性,即,能够兼容多个生态类型模式,如森林、草地、农田、湿地等,并能方便地在普通计算机工作站环境下运行。集成系统要拥有格点化基础数据库,能方便地为模式提供运行所需的初始场数据和参数化数据,从而避免由于数据的不一致性带来的误差。

通过对中国陆地生态系统碳收支的研究,估计其碳源、碳汇强度及其现实空间分布格局,认识我国森林、草地、农田生态系统在固碳中的作用和相对贡献。

模拟中国生态系统碳循环对全球变化的响应和反馈,特别是在温室气体浓度增高和全球增暖的情景下对中国陆地生态系统的影响;模拟土地利用变化,特别是植树造林计划实施对中国生态系统固碳能力的影响,为我国参加后京都时代关于碳减排谈判提供科学数据。

这一研究最终将得到:

- 1) 中国生态系统碳循环模型——GIS-RS 系统;
- 2) 中国陆地生态系统碳源、汇空间分布格局;
- 3) 全球变化背景下中国生态系统碳收支未来变化趋势;
- 4) 植树造林计划对我国陆地生态系统固碳能力以及碳源、汇空间格局变化的影响。

为此,拟重点解决以下问题:

1) 模式估算误差与信度问题。所有进入集成系统的模型,必须对模式的整体误差进行估计,如有可能,分别说明其固有误差和参数化引入误差;尽量减小基础数据(气象数据空间化、土壤属性数据空间化、土地利用类型、植被分类、物候资料等)格点化引入的误差;探讨模型输出与实测值之间由于时空尺度不一致性造成的误差;探讨上述几种原因构成的累积误差,以增强对模型估计结果的信度。

2) 尺度转换问题。在已有方法如平均法(在属性均匀的区域内选择样点,用均值代表格点值)、权重法(在已有样点的地区,用卫片估计不同植被对区域的相对贡献)、模型法(构造模型,用模型将观测值插值到网格点上)、相似权重法等的基础上,探讨尺度放大(缩小)问题,即点(生态系统)与网格(小区域尺度)之间的转换方法。

3) 如何保证项目结果的先进性?从总体上讲,要采用较先进的模型,即代表当前认知水平,模型的设计要么具有自主知识产权,要么模型中过程的描述和参数化方案已经本土化;经过实测数据的验证,有一定信度(做过误差分析);有一套完整的、可用于碳计算的数据库(气象、土壤、植被和土地利用类型以及观测数据);再加上我们是用多个模型分别描述具有不同特征的生态系统,相比较而言,更全面、完整地对我国陆地生态系统的碳源、碳汇格局进行研究,其结果应该是先进的。

主要参考文献

- 董调玲,王明星,刘瑞芝.1994.二维的大气 CO_2 ——大西洋碳循环模式.大气科学,18:631~640
- 方精云,刘国华,徐嵩龄.1996.中国陆地生态系统碳库,见:王庚辰,温玉璞主编.温室气体浓度和排放监测及相关过程.北京:中国环境科学出版社.109~128
- 金心,石广玉.2000.海洋对人为 CO_2 吸收的三维模式研究.气象学报,58(1):40~48
- 刘国华,傅伯杰,方精云.2000.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献.生态学报,20(5):733~740
- 刘纪远,王绍强,陈镜明,刘明亮,庄大方.2004.1990~2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化.地理学报,59(4):483~496
- 浦一芬,王明星.2000.海洋碳循环模式(I)——一个包括海洋动力学环流、化学过程和生物过程的二维碳循环模式的建立.气候与环境研究,5(2):129~140
- 宋金明,罗延馨,李鹏程.2000.渤海沉积物——海水界面附近磷与硅的生物地球化学循环模式.海洋科学,24(12):30~32
- 王效科,白艳莹,欧阳志云,苗鸿.2002.全球碳循环中的失汇及其形成原因.生态学报,22(1):94~103
- 邢如南.1995.一个三维全球海洋碳循环模式.北京气象学院学报,(2):37~41

- 徐永福, 王明星, 金向泽. 1997. 二维海洋温盐环流碳循环模式. 大气科学, 21 (5): 573~580
- 赵敏, 周广胜. 2004. 中国森林生态系统的植物碳储量及其影响因子分析. 地理科学, 24 (1): 50~54
- 赵士洞, 汪业勤. 2001. 森林与碳循环. 科学对社会的影响, (3): 38~41
- 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 2000. 我国主要森林生态系统碳储量和碳平衡. 植物生态学报, 24 (5): 518~522
- Bacastow R E, Maier-Reimer. 1990. Ocean-circulation model of the carbon cycle. *Cli Dym*, 4: 95~125
- Bousquet P, Peylin P, Xiais P, Le Quere C, Friedlingstein P, Tans P P. 2000. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 290: 1342~1346
- Cao M, Woodward F I. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393: 249~252
- Cao M K, Prince Stephen D, Lit K, Tao B, Small Jennifer, Shao Xuemei. 2003. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 9: 536~546
- Chertov O G, Komarov A S. 1997. SOMM—a model of soil organic matter dynamics. *Ecological Modelling*, 94: 177~189
- Ciais P, Tans P, Trolier M *et al.* 1995. A large Northern Hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by ¹³C/¹²C of atmospheric CO₂. *Science*, 269: 1098
- Ciais P, Tans P P, White J W C *et al.* 1995. Partitioning of ocean and land up take of CO₂ as inferred by δ¹³C measurements from the NOAA Climate Monitoring and Diagnostics laboratory global air sampling network. *J Geophys Res*, 100: 5051~5070
- Cui M C, Wang R, Hu D X. 1997. Simple ecosystem model of the central part of the East China Sea in Spring. *Chin J Oceanol Liminol*, 15 (1): 80~87
- De Fries R S, Field C B, Fung I, Collatz G J, Bounoua L. 1999. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 13: 803~815
- Dixon R K, Brown S, Houghton R A *et al.* 1994. Carbon pools and flux of global forest eco systems. *Science*, 263: 185~190
- Emanuel W R. 1993. A dynamic model of terrestrial carbon cycling. *The Global Carbon Cycle*, 1: 239~260
- Esser G, Hoffstadt J, Mack F, Wittenberg U. 1994. High Resolution Biosphere Model: Documentation Model, Version 3.00.00. Institute für Pflanzenökologie, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Fan S, Gloor M, Mahlman J *et al.* 1998. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282: 442~446
- Fang J Y, Chen A P *et al.* 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320~2322
- Fearnside P M. 1997. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazon: net emitted emissions. *Climate Change*, 35: 321~360
- Fennel K, Losch M, Schröter J. 2001. Testing a marine ecosystem model: sensitivity analysis and parameter optimization. *Journal of Marine Systems*, 28: 45~63
- Foley J A. 1995. An equilibrium model of the terrestrial carbon budget. *Tellus*, 47B: 310~319
- Goldewijk K K, Leemans R. 1995. System models of terrestrial carbon cycling. In carbon sequestration in the biosphere. NATO ASI Series I, Vol 33. Heidelberg: Springer-Verlag. 129~151
- Gong P, Xu M, Chen J, Chen J M, Qi Y, Greg B, Liu J Y, Wang S Q. 2002. A preliminary study on the carbon dynamics of China's terrestrial ecosystems in the past 20 years. *Earth Science Frontiers*, 9 (1): 55~61
- Gregg W W. 2002. Tracking the Sea WiFs record with a coupled physical/ biogeochemical/radiation model of the global oceans. *Deep-Sea Res II*, 49: 81~105
- Hassink J, Whitmore A P. 1997. A model of the protection of organic matter in soil. *Soil Sci Soc Am J*, 61: 131~139
- Haxeltine A, Prentice I C, Creswell D I. 1996. A coupled carbon and water flux model to predict vegetation structure. *Journal of Vegetation Science*, 7: 651~666

- Holland E A *et al.* 1997. Variations in the predicted spatial distribution of atmospheric nitrogen deposition and their impact on carbon up take by terrestrial ecosystems. *J Geophys Res*, 102: 15849~15866
- Holland E A, Brown S, Potter C S *et al.* 1999. North American carbon sink. *Science*, 282: 1815
- Houghton R A. 1997. Historic role of forests in the global carbon cycle. In: Kohlmaier G H, Weber M, Houghton R A (eds). *Carbon Dioxide Mitigation in Forestry and Wood Industry*. New York: Springer-Verlag
- Houghton R A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990. *Tellus*, 51B: 298~313
- Houghton R A. 2002a. Magnitude, distribution and causes of terrestrial carbon sinks and some implications for policy. *Climate Policy*, 2: 71~88
- Houghton R A. 2002b. Terrestrial carbon sinks—uncertain explanations. *Biologist*, 49 (4): 155~160
- Houghton R A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850—2000. *Tellus B*, 55 (2): 378~390
- Houghton R A, Hackler J L. 1995. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850—1980. Rep. ORNL/ CD IAC-79, NDP-050, Oak Ridge N at Lat, Oak Ridge, Tenn
- Houghton R A, Hackler J L. 2000. Changes in terrestrial carbon storage in the United States I: The roles of agriculture and forestry. *Global Ecol Biogeogr*, 9: 125~144
- Houghton R A, Hackler J L. 2003. Sources and sinks of carbon from land-use change in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 17 (2): 1034
- Ianson D, Allen S E. 2002. A two-dimensional nitrogen and carbon flux model in a coastal upwelling region. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (1): 11~16
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson CA (eds). *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U K and New York, USA: Cambridge University Press
- Ji J J. 1995. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological process at the surface. *Journal of Biogeography*, 22: 445~451
- Keeling C D *et al.* 1996. Increased activity of northern Vegetation inferred from atmosphere CO₂ measurements. *Nature*, 382: 146~149
- Keeling R F *et al.* 1996. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381: 218~221
- Lal R. 2004. Offsetting China's CO₂ Emissions by Soil Carbon Sequestration. *Climatic Change*, 65: 263~275
- Lüdeke M K B, Badeck F-W, Otto R D. 1994. The Frankfurt Biosphere Model. A global process oriented model for the seasonal and long-term CO₂ exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. I. Model description and illustrative results for cold deciduous and boreal forests. *Climate Research*, 4: 143~166
- Maier-Reimer E. 1993. Geochemical cycles in an ocean general circulation model: Preindustrial tracer distributions. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 645~677
- Middleburg J J. 1989. A simple model for organic matter decomposition in marine sediments. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 53: 1577~1581
- Moorhead D L, Reynolds J F. 1991. A general model of litter decomposition in the northern Chihuahuan desert. *Ecological Modelling*, 56: 197~219
- Moulin S *et al.* 1998. Combining agriculture crop models and satellite observations: from field to regional scale. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1021~1036
- Neilson R P, Running S W. 1996. Global dynamic vegetation modeling: coupling biogeochemistry and biogeography models. In: Melillo J (ed). *Global Change and Terrestrial Ecosystem*. Cambridge University Press. 451~465
- Neumann T. 2000. Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems*, 25: 405~419

- Pacala S W, Hurt G C, Baker D, Peylin P, Houghton R A, Birdsey R A *et al.* 2001. Consistent land-and atmosphere-based US carbon sink estimates. *Science*, 292: 2316~2320
- Pan G X *et al.* 2004. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 10: 79~92
- Parsons T R, Kessler T A. 1987. An ecosystem model for the assessment of plankton production in relation to the survival of young fish. *J Plankt Res*, 9 (1): 125~137
- Philips O L, Malhi Y, Higuchi N *et al.* 1999. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 282: 5388~5389
- Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, Leemans R, Monserud R A, Solomon A M. 1992. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 19: 117~134
- Prince S D 1991. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6): 1313~1330
- Ruimy A, Dedieu G, Saugier B. 1996. TURC: a diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 10: 269~286
- Running S W, Gower E R. 1991. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiol*, 9: 147~160
- Sarmiento J L, Slater R D, Fasham M J R *et al.* 1993. A seasonal three-dimensional ecosystem model of nitrogen cycling in the North Atlantic euphotic zone. *Global Biogeochemical Cycle*, 7: 417~450
- Schimel D, Melillo J, Tian H Q *et al.* 2000. Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the US. *Science*, 287: 2004~2006
- Schulze E D, Wirth C, Heimann M. 2000. Managing Forests after Kyoto. *Science*, 289: 2058~2059
- Scott J G, Stephen D P, Samuel N G, Michelle M T, Jennifer S. 1999. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach. *Ecological Modelling*, 122: 239~255
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, Dalcher A. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 43: 505~531
- Skole D, Tucker C. 1993. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon; satellite data from 1987 to 1988. *Science*, 260: 1905~1910
- Sundquist E T. 1993. The global carbon budget. *Science*, 259: 934~941
- Tans P, Fung I P, Takahashi T. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247: 1431~1438
- Tian H, Mellilo J M, Kichlighter D W *et al.* 1998. Effects of inter-annual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 396: 664~667
- Van der Peijl M J, Verhoeven J T A. 1999. A model of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics and their interactions in river marginal wetlands. *Ecological Modelling*, 118: 95~130
- Warnant P, Francois L, Strivay D, Gérard J-C. 1994. CARAIB: a global model of terrestrial biological productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 8: 255~270
- Wang S, Tian H Q *et al.* 2003. Pattern and Change of Soil Organic Carbon Storage in China: 1960s—1980s. *Tellus*, 55B: 416~427
- Watson R T, Noble I R. 2001. Carbon and the Science-Policy Nexus: The Kyoto Challenge. In: Steffen W, Jager J, Carson D, Bredshaw C (eds). *Challenges of a Changing Earth. Proceedings of the Global Change Open Science Conference*. Berlin; Springer. 57~64
- Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. 1995. A global Land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 471~490
- Wu H B, Guo Z T, Peng C H. 2003. Land use induced changes of organic carbon storage in soils of China. *Global Change Biology*, 9: 305~315

-
- Xiao X, Kicklighter D W *et al.* 1997. Linking a global terrestrial biogeochemical model and a 2-dimensional climate model; implications for the global carbon. *Tellus*, 49B: 18~37
- Yang X, Wang M X, Huang Y. 2001. The climatic-induced net carbon sink by terrestrial biosphere over 1901—1995. *Adv Atmos Sci*, 18 (6): 1192~1206
- Zamolodchikov D, Dmitriv Karelin. 2001. An empirical model of carbon fluxes in Russian tundra. *Global Change Biology*, 7: 147~161