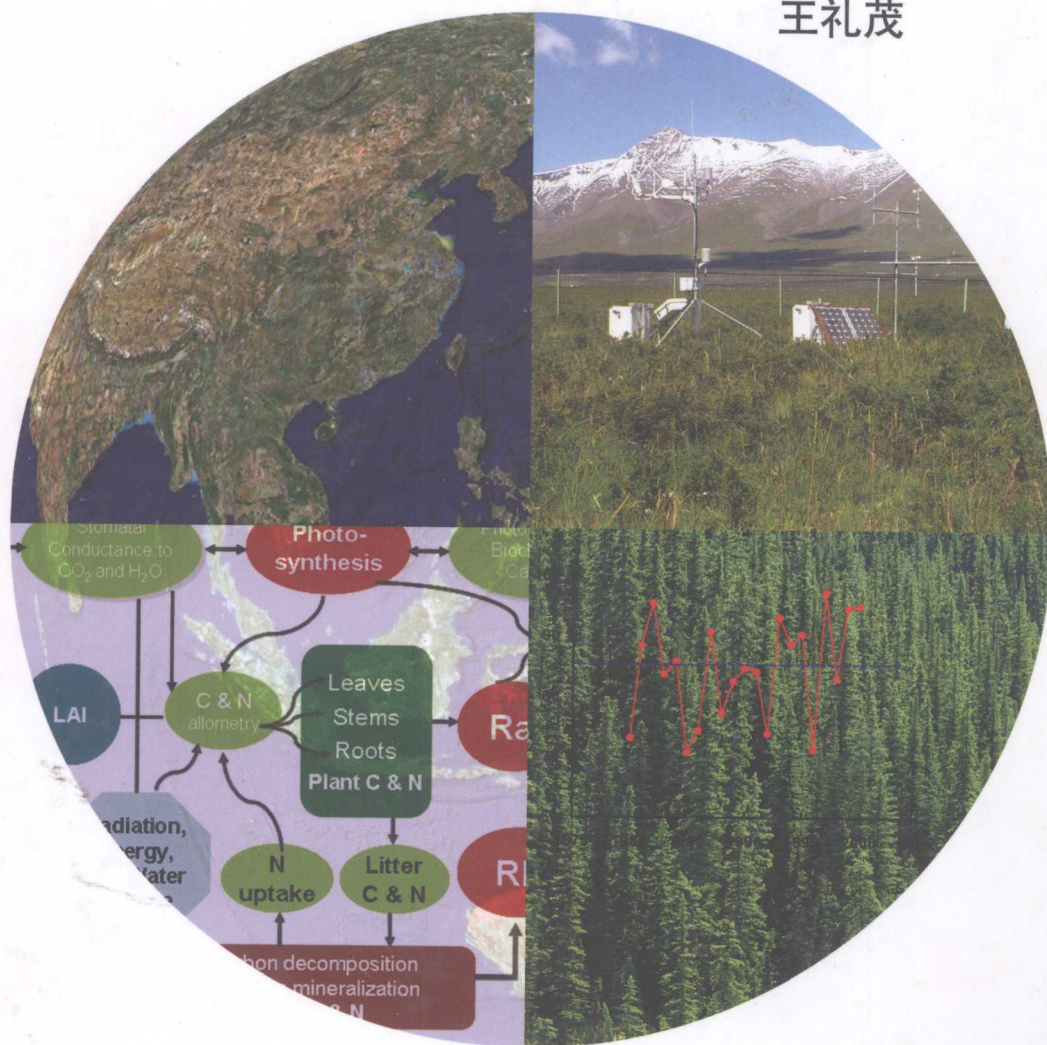


中国科学院知识创新工程重大项目
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著

中国陆地生态系统碳收支 与增汇对策

陈泮勤
王效科 等著
王礼茂



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

Carbon Budget and Its Sink Promotion of Terrestrial Ecosystem in China

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

Science Press
Beijing

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（第一至第六章）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>

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：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〉）

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

陈宜瑜

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 CO_2 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、硕士生和有关人员,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