



地球 系统 碳 循 环

主 编 / 陈泮勤
副主编 / 黄 耀
于贵瑞

 科学出版社
www.sciencep.com

地球系统碳循环

主 编 陈泮勤

副主编 黄 耀 于贵瑞

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

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述国内外近 20 年来在地球系统碳循环与全球变化领域的研究进展,并对未来研究的重点作了评述。主要内容包括:地球系统碳循环在全球变化中的作用;碳循环的历史记录;碳通量、碳储量的测定方法与技术;各主要生态系统的碳循环过程和生物地球化学模型;陆地生态系统固碳技术措施和主要发达国家的碳减排动态等。

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、海洋科学、应用遥感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

地球系统碳循环/陈泮勤主编. —北京:科学出版社,2004
ISBN 7-03-014486-4

I. 地… II. 陈… III. 碳循环-研究 IV. X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 107069 号

责任编辑:胡晓春/责任校对:钟 洋
责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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

*

2004 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2004 年 12 月第一次印刷 印张:37 3/4

印数:1—2 000 字数:895 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

《地球系统碳循环》编委会

主 编 陈泮勤

副主编 黄 耀 于贵瑞

编 委 (按姓氏笔画为序)

于贵瑞	王礼茂	王效科	王跃思	牛 铮	延晓冬
吴金水	宋长春	宋金明	陈泮勤	周广胜	胡维平
倪乐意	徐永福	徐柏青	黄 耀	葛全胜	董云社
韩士杰	蔡祖聪	戴万宏			

序 言

20多年前,美国科学家在夏威夷冒纳罗亚(Mauna Loa, HI)高山观测站观测到自1958年以来大气CO₂浓度逐年升高,联系到近百年来全球地表温度的上升,科学家们从两者的关系中醒悟到,人类在追求物质文明和社会进步的同时,也给自己酿下了苦果。人类活动使得排入大气的CO₂等温室气体浓度持续升高,其额外的温室效应导致全球变暖,进而带来诸如气候异常,灾害性天气、气候事件发生的频率增加,水资源分布的时空格局发生重大变化,气候带北移,海平面上升,从而将给工农业生产,人类的经济、社会带来不可估量的深远影响。

为了迎接温室气体及全球变暖等全球性环境问题的挑战,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》(UNFCCC)。1997年12月在日本东京召开的第三次缔约国大会上通过了著名的《京都议定书》。《京都议定书》规定附件1国家(主要是发达国家)在2008~2012年履约期间,将温室气体的排放量在1990年的基础上平均减少5.2个百分点,以达到减缓温室气体增长、保护地球环境之目的。

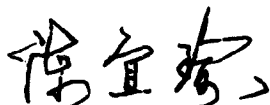
然而,无论是UNFCCC还是《京都议定书》的实施都需要科学上的支持,实质上涉及到对全球碳循环的认识。

碳作为一个重要的生命元素很早就引起了生物学家和农学家的注意。然而,碳作为一个重要的环境要素并对其进行系统研究则始于20世纪70年代末由国科联下属的国际环境问题科学委员会(SCOPE/ICSU)发动的碳、氮、硫、磷循环研究。今天,碳循环研究作为人类应对温室气体诱发的全球环境问题的挑战,而被国际科学界推向了一个新的高峰。地球系统科学的合作伙伴:国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球变化的人文因素计划(IHDP)及世界气候研究计划(WCRP)联合组织了一个新的全球碳项目(GCP)就是一个有力的佐证。GCP的主要目标是:发展一个关于碳循环研究的框架,包括构建碳循环的生物化学、生物物理和人文因素相互作用的研究框架,推进模型和数据的协调发展,开展有效观测和研究网络的设计等,为区域和国家的碳循环研究提供一个全球合作的平台,从而进一步改进观测网络的设计、数据标准和信息的传递,为决策者和广大公众提供快速服务。

我国的碳循环研究起步较晚,但发展迅速。2001年,中国科学院在知识

创新工程的支持下率先启动了中国陆地和近海生态系统碳收支项目,国家重点基础研究计划又立项予以呼应。该项目包括了从建立中国碳通量观测网,进行对地观测和海洋断面测量,主要生态系统重要碳过程实验研究,模型发展,到增汇技术对策和减排方案研究。

为了高起点的开展研究,该书的作者们通过大量调研,总结、评述了国内外碳循环研究中的主要科学问题,所取得的重要研究进展和存在问题。该书力图从碳通量、储量的地基和空基观测,冰芯记录到的大气 CO_2 浓度变化,近百年人类活动对碳循环的干扰,主导碳循环的物理、化学和生物学过程,碳模型与碳循环的数值模拟,增汇技术对策和履约中的科学问题,如减排成本、减排方案的比较研究等方面进行论述,全书形成整体,各部分又相对独立。可供从事碳循环研究的科研人员、有关决策者、研究生参考。



2004年5月于北京

前 言

自工业革命以来,人类活动对地球系统的影响已从区域扩展到全球。大气中 CO_2 、 CH_4 和其他温室气体浓度升高导致的全球变化是人类共同关注的问题,是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。除了工业、交通和能源消耗等人类活动外,地球系统碳循环过程对大气中温室气体浓度的增加起着极其重要的作用。

为了提供国际公认的和具有权威性的有关全球气候变化、气候变化对环境的可能影响、气候与社会之间相互作用的科学信息,国际上于 1988 年成立了政府间气候变化专门委员会(IPCC)。IPCC 于 1990 和 1992 年完成了第一次综合评估报告,1995 年完成了第二次综合评估报告,2001 年出版了第三次综合评估报告。除对工业、交通和能源消耗等人类活动产生的 CO_2 进行评估外,IPCC 还要求编制由农业活动所产生的 CH_4 和 N_2O 排放量的国家清单。1992 年在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上,包括中国在内的全球 166 个国家与地区签署了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)。其最终目标是为了防止人类对气候系统的有害干预,将大气中温室气体的浓度稳定在一个水平上,使生态系统自然地适应气候变化,保证粮食生产不受威胁,以及在可持续方式下促进经济发展。公约要求发达国家采取具体措施限制温室气体的排放,并向发展中国家提供资金和技术援助。而发展中国家负有提供温室气体的源和汇的国家清单的义务,不承担有法律约束力的限控义务。

自上世纪 80 年代初开始,国际科学界提出了一系列大型全球变化研究计划。其中包括世界气候研究计划(WCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球环境变化的人类因素计划(IHDP)和生物多样性计划(DIVERSITAS)。本世纪初三大国际组织(IGBP、IHDP、WCRP)提出了一个碳集成研究计划,其重点是要回答目前全球碳源、碳汇的时空格局如何?何种因素导致?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?未来全球碳循环的可能动态为何等科学问题。面对全球变化给人类带来的巨大挑战,一些国家先后启动了碳循环科学研究计划。美国于 2000 年启动了大型“碳循环科学计划”,重点研究大陆和区域尺度碳源、碳汇的时空变化。日本于 2002 年启动了“陆地生态系统碳收支国家战略性研究计划”,以亚洲的亚寒带、温带和热带陆地生态系统为对象开展碳收支综合研究。欧盟启动的“欧洲碳循环联合项目”目的是监测陆地生态系统碳储量、碳通量状况,为国家清单编写提供一致性的时空尺度方法论。

为了在区域和国家尺度上回答与中国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”,共有近 20 个研究所(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、植物研究所、生态环境研究中心、沈阳应用生态研究所、东北地理与农业生态研究所、南京土壤研究所、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、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、华南植物研究所、西双版纳热带植物园) 300 余名科研人员(包括研究生)参与了本研究。本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。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、碳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。

本书是“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(2001~2005 年)的主要科技骨干在调研了几千篇国内外文献后所编写,主要介绍国内外近 20 年来在地球系统碳循环与全球变化领域的研究进展,并对未来研究的重点作了评述。全书共分 5 篇 22 章,第一篇为概论,主要介绍地球系统碳循环在全球变化中的作用和碳循环的历史记录等;第二篇介绍地球系统碳通量、碳储量的测定方法与技术;第三篇和第四篇分别介绍各主要生态系统的碳循环过程和生物地球化学模型;第五篇介绍陆地生态系统固碳技术措施和主要发达国家的碳减排动态。随着社会经济的不断发展,人类对全球环境的影响仍将继续。在未来的若干年乃至一个世纪内,全球变化仍将是人类共同关注的主题。可以预计,作为全球变化研究的核心议题之一,地球系统碳循环及其对全球变化的响应和反馈的研究必将进一步深入。

编写本书的主要目的是向读者展示国内外最新的研究进展,并对未来的研究重点进行评述,以促进地球系统碳循环及其对全球变化影响的研究。由于编写者在知识积累、文献储备和科学研究等方面的局限性,本书的错误和遗漏在所难免,敬请读者不吝指正。

陈泮勤 黄 耀 于贵瑞

2004 年 5 月

目 录

序言
前言

第一篇 概 论

第一章 绪论	3
第一节 地球系统碳循环概述	3
一、地球系统	4
二、全球碳库	8
三、地球系统碳循环	13
第二节 地球系统碳循环与全球变化	24
一、全球变化	24
二、碳循环与全球变化	27
第三节 国际社会对遏制全球变化的努力	30
一、联合国组织对碳减排所做的努力	30
二、碳减排义务与国家主权	35
参考文献	37
第二章 地球系统碳循环历史的冰芯记录	43
引言	43
第一节 研究概况	43
第二节 冰川(冰盖)粒雪层中的空气	46
一、冰川(冰盖)中的空气气泡的形成	46
二、冰芯包裹气体记录的可靠性	48
三、粒雪孔隙中气体成分	50
第三节 冰芯揭示的大气温室气体的变化历史	54
一、千年来大气温室气体的含量变化特征	54
二、全新世大气温室气体含量变化	62
三、温室气体与气候突变	65
四、温室气体气候敏感性及其冰期-间冰期气候旋回	68
小结	71
参考文献	71
第三章 土地利用、土地覆被变化(LUCC)与陆地生态系统碳循环	76
引言	76

第一节 LUCC 与陆地生态系统碳循环的研究理论和方法	76
一、LUCC 与陆地生态系统碳循环	76
二、主要研究方法	81
第二节 LUCC 与陆地生态系统碳循环研究进展	84
一、国外研究进展	84
二、国内研究进展	87
第三节 相关科学问题及讨论	96
一、土地覆被的分类体系	96
二、LUCC 影响陆地碳循环的理论基础研究	97
三、LUCC 数据集建设和不同来源数据的整合	97
参考文献	97

第二篇 地球系统碳通量、碳储量的测定方法与技术

第四章 碳通量的微气象学测定	103
引言	103
第一节 CO ₂ 通量的微气象学原理与方法	104
一、微气象学测定法概述	104
二、涡度相关技术观测碳通量的原理	106
第二节 CO ₂ 通量观测中的误差与不确定性来源	112
一、误差类型、成因与特征	112
二、碳通量测定中不确定性的主要来源	115
第三节 FLUXNET 的发展、研究热点与技术问题	120
一、FLUXNET 的发展	120
二、FLUXNET 的研究热点问题	121
第四节 ChinaFLUX 的建设与发展	123
一、ChinaFLUX 的研究内容与科学目标	123
二、ChinaFLUX 的设计思路	124
三、ChinaFLUX 的发展方向	125
参考文献	126
第五章 碳交换的箱法测定	130
引言	130
第一节 碳交换箱法测定原理与方法	131
一、静态箱测定碳交换的原理与方法	131
二、动态箱测定碳交换的原理与方法	134
三、巨型箱测定碳交换的原理与方法	135
第二节 碳交换箱法测定国内研究进展	136
第三节 箱法测定陆地生态系统碳交换的不确定性	140

小结·····	141
参考文献·····	142
第六章 碳储量、碳通量的定量遥感研究 ·····	146
引言·····	146
第一节 陆地碳储量定量遥感研究的基本原理·····	147
一、碳储量与陆地生态系统参数·····	147
二、陆地生态系统参数遥感反演·····	147
三、碳储量与土地覆盖分类及植被遥感分类·····	156
第二节 陆地净初级生产力的定量遥感研究·····	162
一、传统陆地净初级生产力研究方法·····	162
二、基于遥感数据的陆地净初级生产力模型·····	162
三、国内外研究进展·····	163
第三节 陆地碳通量定量遥感研究·····	165
一、结合遥感的碳通量定位观测·····	166
二、碳通量定量遥感模型·····	167
三、陆地碳通量定量遥感研究的不确定性·····	168
小结·····	170
参考文献·····	171

第三篇 地球系统中的主要碳循环过程

第七章 陆地生态系统碳循环的基本过程 ·····	185
引言·····	185
第一节 光合作用与呼吸作用·····	186
一、光合作用·····	186
二、呼吸作用·····	187
第二节 影响植物光合作用和呼吸作用的主要因素·····	188
一、气候·····	188
二、大气 CO ₂ 浓度·····	190
三、土壤·····	191
四、植物生物学特性·····	191
五、人类活动·····	193
第三节 影响土壤呼吸的主要因素·····	193
一、土壤环境·····	194
二、植物生长·····	196
三、人类活动·····	196
小结·····	198
参考文献·····	199

第八章 森林生态系统碳循环过程研究	204
引言.....	204
第一节 森林与全球碳循环	204
第二节 森林碳蓄积及其变化.....	205
一、森林生物量和生产力	206
二、森林生态系统的发育阶段与碳储量	207
三、森林经营管理在森林生态系统碳循环研究中的作用	208
第三节 全球变化背景下森林生态系统碳储量变化趋势.....	209
一、大气 CO ₂ 浓度升高对森林生态系统碳储量变化的影响	210
二、气温与降水变化对森林生态系统碳储量变化的影响	214
第四节 森林生态系统土壤碳库及其估算的不确定性.....	215
一、输入与输出过程研究的不确定性	215
二、CO ₂ 浓度升高引起的“丢失的碳”问题	222
小结.....	222
参考文献.....	223
第九章 草地生态系统碳循环过程研究	231
引言.....	231
第一节 草地生态系统与全球碳循环.....	231
一、全球及我国草地生态系统概况	231
二、草地生态系统在全球碳循环中的作用	232
第二节 草地植被固碳与土壤碳库.....	234
一、全球草地生态系统净初级生产力(NPP)与生物量	235
二、我国草地地上及地下生物量研究	237
三、草地凋落物碳库.....	242
四、草地土壤碳库与土壤呼吸作用	243
第三节 人类活动与气候变化对草地生态系统碳循环的影响.....	249
一、放牧、割草、草地开垦	249
二、气候变化与 CO ₂ 浓度升高	250
小结.....	251
参考文献.....	251
第十章 农田土壤有机碳含量变化及主要影响因素	259
引言.....	259
第一节 农田土壤与全球碳循环.....	259
第二节 农田土壤有机碳周转.....	261
一、农田土壤有机碳投入量	261
二、农田土壤有机碳输出	263
第三节 农业管理对土壤有机碳含量的影响.....	266
一、耕作方式	266

二、灌溉方式	267
三、肥料管理	267
四、全球变化对农田土壤有机碳含量的影响	268
小结	268
参考文献	269
第十一章 湿地生态系统碳循环过程研究	272
引言	272
第一节 湿地与全球碳循环	273
一、湿地在全球碳循环中的作用	273
二、湿地碳的生物地球化学作用	274
第二节 湿地碳的积累与分解	276
一、湿地碳的积累	276
二、湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放及其影响因子	277
第三节 湿地生态水文过程和人类活动对碳的输入、输出的影响	283
一、湿地生态水文过程与碳的输入和输出	283
二、人类活动对湿地碳循环的影响	284
小结	286
参考文献	286
第十二章 内陆水体生态系统碳循环过程研究	293
引言	293
第一节 内陆水体与全球碳循环	293
一、全球及我国内陆水体生态系统概况	294
二、内陆水体在全球碳循环中的作用	296
第二节 内陆水体碳循环的关键过程	298
一、碳的赋存形态、来源和份额	298
二、有机碳的生产和分解过程	299
三、界面过程	300
第三节 影响内陆水体碳循环过程的关键因素	301
一、养分输入与水体初级生产力	301
二、不同类型水体与碳的动力学	303
第四节 主要研究方法	304
一、清单方法	304
二、过程研究	305
小结	310
参考文献	311
第十三章 海洋碳循环生物地球化学过程研究	313
引言	313
第一节 海洋与全球碳循环	313

一、全球及我国近海生态系统概况	313
二、海洋在全球碳循环中的作用	315
三、海洋碳源汇及其不确定性	319
第二节 海洋水体中的碳循环过程	324
一、海-气界面二氧化碳通量	324
二、海水中的颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)	326
三、河口碳的生物地球化学	328
四、海洋沉积物在海洋碳循环中的作用	329
五、生物泵在海洋碳循环中的作用	337
第三节 我国海洋碳循环生物地球化学过程研究的主要进展	338
一、大气与海洋间碳的交换	338
二、海水中碳及其生物地球化学循环	340
三、土壤和沉积物在海洋碳循环中的作用	344
小结	346
参考文献	347

第四篇 地球系统中的主要碳循环模型

第十四章 地球系统碳循环的基本模型	357
引言	357
第一节 陆面碳循环基本模型	359
一、陆面碳循环模型的结构	359
二、光合作用模型	361
三、呼吸作用模型	366
第二节 基于静态植被的生态系统碳循环模型	370
一、生物地理模型	371
二、基于静态植被的生物地球化学模型	372
三、陆面生物物理模型	373
第三节 基于动态植被的生态系统碳循环模型	375
一、动态植被模型	375
二、动态植被-生物地球化学耦合模型	377
三、集成生物圈模拟器:生长演替-生物物理耦合模型	378
第四节 各类模型的主要特征对比	379
小结	381
参考文献	382
第十五章 森林生态系统碳循环模型	387
引言	387
第一节 斑块尺度的生态系统碳循环模型	388

一、基于单木的生态系统碳循环模型·····	388
二、基于林分的生态系统碳循环模型·····	391
第二节 森林生态系统碳循环过程的若干子模型·····	392
一、凋落过程·····	392
二、同化产物分配过程·····	393
三、干扰和树木死亡·····	393
四、树木更新过程·····	393
第三节 森林生态系统碳循环模型研究展望·····	394
小结·····	395
参考文献·····	395
第十六章 草地生态系统碳循环模型·····	398
引言·····	398
第一节 草地生态系统碳循环模型·····	400
一、草地生态系统碳循环的基本理论与方法·····	400
二、草地生态系统碳循环模型的主要进展·····	401
第二节 中国草地碳循环模型的研究进展·····	414
第三节 草地生态系统碳循环模型研究展望·····	415
一、草地生产力模型的机理化·····	416
二、草地土壤呼吸作用模型的机理化·····	416
三、耦合大气环流模式的碳循环模型·····	417
小结·····	417
参考文献·····	418
第十七章 农田生态系统碳循环模型·····	423
引言·····	423
第一节 陆地生态系统碳循环模型·····	423
一、陆地生态系统碳循环模型概述·····	423
二、NPP 模型·····	426
三、土壤呼吸作用模型·····	427
第二节 农田生态系统碳循环模型·····	428
一、基于气候和土壤的农业植被生产力模型·····	428
二、基于过程的农业植被生产力模型·····	429
三、农田土壤碳周转模型·····	431
第三节 研究展望·····	432
一、氮素营养在碳循环中的作用·····	432
二、模型的有效性与输入变量·····	433
三、碳循环模型与其他模型的耦合·····	433
小结·····	434
参考文献·····	434

第十八章 湿地生态系统碳循环模型	442
引言.....	442
第一节 湿地生态系统碳循环模型的主要进展.....	443
第二节 湿地生态系统碳循环模型考虑因子.....	446
一、气象因子与水文状况	446
二、湿地基质性状	447
三、湿地有机碳动力学	449
四、模拟尺度	450
第三节 湿地生态系统碳循环模型研究展望.....	451
一、湿地生态系统碳循环过程机理的研究	451
二、湿地生态系统碳循环与全球气候变化	451
三、湿地生态系统碳循环模型研究与湿地管理	452
小结.....	452
参考文献.....	453
第十九章 内陆水体碳循环模型	457
引言.....	457
第一节 内陆水体碳循环模型的基本理论.....	458
一、水-气界面气体交换	458
二、水-沉积物界面输移	462
三、水体中碳循环规律	465
第二节 内陆水体碳循环模型的研究进展.....	467
一、水体碳循环模型.....	467
二、水-气界面	473
三、水-沉积物界面输移	476
第三节 内陆水体碳循环模型研究展望.....	479
一、Fick 第一定律的适用性	479
二、模型率定与验证.....	480
三、学科交叉	481
小结.....	481
参考文献.....	482
第二十章 近海生态系统碳循环模型	491
引言.....	491
第一节 海洋 CO ₂ 与全球海洋碳循环模型	492
一、海气交换	492
二、全球海洋碳循环模式	497
第二节 中国海洋碳循环模型.....	504
一、边缘海碳循环模型	504
二、中国近海碳循环模式	508

第三节 海洋碳循环模型研究展望	509
小结	511
参考文献	512

第五篇 地球系统的固碳技术与碳减排

第二十一章 陆地生态系统固碳技术措施	523
引言	523
第一节 陆地生态系统固碳机理及研究方法	524
一、陆地生态系统主要碳库和收支特点	524
二、固碳技术措施	527
第二节 陆地生态系统固碳潜力	529
一、固碳潜力的估算与评价	529
二、陆地生态系统固碳能力和潜力	534
第三节 陆地生态系统固碳技术措施研究展望	548
一、固碳机理	549
二、固碳潜力	550
小结	553
参考文献	553
第二十二章 主要发达国家的碳减排动态	565
引言	565
第一节 碳减排主题下的国际合作机制	566
一、建立国际合作机制的原理	567
二、合作机制异同比较	568
三、发展趋势分析	568
第二节 主要国际减排方案及其评述	569
一、美国在退出《京都议定书》后提出的减排新方案	569
二、挪威、荷兰学者提出的全球减排目标分担新方案	570
第三节 主要发达国家减排动态	573
一、欧盟国家的减排动态	573
二、其他发达国家的减排状况	577
小结	581
参考文献	582