

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,2004.12

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。

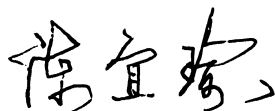
然而,无论是UNFCCC还是《京都议定书》的实施都需要科学上的支持,实质上涉及到对全球碳循环的认识。

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 and 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

第一篇

概 论

第一章 绪 论

陈泮勤

(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

第一节 地球系统碳循环概述

碳是地球上最为重要的生命元素。研究表明,碳是生命体的主要组成部分,约占生命体中生物质重量的 46%~48% (Elser *et al*, 2000),它维系着地球上生命系统的新陈代谢过程,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要素——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。众所周知,在四十几亿年前,地球形成的初期,地球大气是由一个含有丰富氢气的气层所包围,而后随着它的消散,包气层逐渐为以氮气和 CO₂ 为主的气体所取代,由于 CO₂ 的温室效应,使得地球保持较高的温度,非常类似于今天的金星和火星大气。直到大约 38 亿年前,由于大气与最原始的生命系统相互作用,才使得 CO₂ 占地球大气总含量的万分之三,氧气约占 21%,地球平均温度保持在 16°C 左右,地球上的液态水得以存在,从而创造了地球生命生存的环境。

碳循环研究始于 20 世纪 70 年代,是国际科学联合会环境问题科学委员会发动和组织的重要研究计划。80 年代,以全球变化研究为核心的国际地圈生物圈计划的诞生,进一步推动了全球碳循环的研究。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)、全球变化的人文因素计划 (IHDP)、世界气候研究计划 (WCRP) 以及生物多样性计划 (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;而且,紧紧抓住地球系统碳循环这一主题,不仅可以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,而且还可从一个侧面深刻认识地球系统是如何工作的。从而引发了关于全球碳循环的联合研究计划(陈泮勤,2000;陈宜瑜等,2001)。可以预计,在不远的未来,地球系统碳循环研究将会取得长足的进展,从而极大地丰富我们的知识,使人类在碳循环的认知世界里迈出坚实的一步。

本章第一节将从地球系统的基本概念和与碳循环有关的科学问题出发,概要论述地球系统的碳库,地球系统各子系统之间的碳循环及其控制过程。第二节将碳循环与全球变化相联系,简要论述人类活动对碳循环的干扰。第三节从人类只有一个地球的角度出发,简述国际社会为保护全球环境所采取的碳减排行动,以及围绕碳减排所进行的、包括维护国家主权在内的斗争,使大家对地球系统碳循环有个基本了解。

一、地球系统

(一) 地球系统概念的形成

地球系统系指由地球的大气圈、水圈、岩石圈、地核、地幔和生物圈(包括人类本身)组成的整体,它包括从地球的地核到外层大气的广阔范围。地球系统是一个非线性巨系统,在该系统中,存在着三大基本过程的相互作用,即物理、化学和生物过程的相互作用,存在着生命系统与无生命系统(即人与地球系统)之间的相互作用。地球系统的演化,地球系统中发生的重大事件、特别是具有全球意义的重大事件都受上述相互作用过程的制约(陈泮勤,1998)。

地球系统概念的提出是地球科学发展的必然结果。大家知道,地球科学的发展得益于两个传统的促动因素:为人类寻求实际利益和将地球作为行星来认识(陈泮勤,1989,1990)。

毫无疑问,为人类寻求实际利益,即利益驱动是科学发展的根本动力和普适规律,地球科学也不例外,这一点已为人们所普遍接受。但将地球作为行星来认识并非所有的人都意识到的。地球科学在其发展的历史长河中经历了从感知到认知、从定性到定量的漫长过程。也从来都是从微观和宏观两个角度认识世界的。今天,人们已经能够利用基础科学和高新技术的成果来进行地球科学研究。这一方面使得地球科学研究逐步从定性走向定量,同时也使得地球科学的学科分支越来越多、越来越细,从而使得人们能够更精细地观察微观世界和微观过程。另一方面,人们从宏观的角度认识地球有着悠久的历史 and 学科渊源。

回顾过去不难发现,在地球科学的发展史上,不乏一些世界级科学大师牢牢把握**将地球作为一个行星来认识**的方向,从而推动了地球科学的发展。例如:17世纪,牛顿建立了加速度与引力的方程式,即万有引力定律,阐明了包括地球转动、月潮和日潮在内的行星动力学;18世纪,赫顿建立了地质时间概念,并推断了地球内部热机的存在;19世纪初叶,莱伊尔为地质史建立了一个动力学研究方法,达尔文将莱伊尔的动力学研究方法与生物变化的原始观测相结合,创立了生物进化论。

将地球作为一个行星来认识体现了地球是一个整体的观点,但**地球系统**概念的诞生则是源于全球环境问题的挑战,是上述观点的进一步深化(陈泮勤、孙成权,1992,1994)。20世纪70年代,频繁出现的世界范围的干旱和洪涝灾害引发了人类对全球气候异常的关注。大气科学家们经过深入研究发现,气候问题不仅与大气本身的行为有关,而且与水圈(含冰雪圈)、岩石圈、生物圈等地球的组成部分有关,还与发生在圈层界面上的相互作用过程,如海气相互作用、陆气相互作用有关。因此,1978年,在世界气象组织(WMO)和国际科联(ICSU)的联合支持下诞生了第一个以全球气候问题为研究对象的世界气候研究计划,第一次提出了“气候系统”的概念(国家自然科学基金委员会,1998)。气候系统实际上已勾画了地球系统的轮廓,所不同的仅仅是探讨的实际问题集中在气候问题上而已。

除了气候问题外,人类还面临着一系列其他的全球环境问题。例如,越界空气污染、

温室效应、臭氧洞问题、水资源短缺、植被破坏、生物物种灭绝、土地沙漠化等。为了迎接上述全球环境问题的挑战,1984年,在ICSU召开的第20届大会上,组织了一次广泛的全球性环境问题的讨论,达成了以下共识:这些重大的全球性环境问题的研究和解决,已经远远超过了单一学科所涉猎的范围。例如,全球增暖问题已不仅仅是大气科学家们的“猎物”,也是海洋学家、地质学家、地理学家、土壤学家、生物学家、化学家以及生物地球化学家们共同的研究对象。与会者尖锐指出,就其科学实质而言,这些全球性环境问题,涉及地球的整体行为及各部分的相互作用,涉及到地球作为一颗行星的可居住性问题。从而将1978年世界气候研究计划中针对全球气候问题而提出的气候系统概念,拓展到针对全球环境问题的地球系统。因此,将地球作为一个整体系统来认识,发展一门新的综合集成学科——地球系统科学,从一个新的角度透视地球,便成了当务之急。会议一致赞同在全球范围内正式发动一个被称为全球变化研究的重要计划——国际地圈、生物圈计划(IGBP)。同时,ICSU责成特别计划小组(Ad Hcc Planning Group,成立于1983年)对ICSU及其他国际科学组织正在进行的有关科学活动做出评价,提出优先领域,在全球范围内开始进行全球变化的可行性研究(陈泮勤,1990)。

地球系统一词与**地球系统科学**相伴而生,它们最早非正式出现在1983年、出现在美国国家航空和宇航管理局(NASA)顾问委员会领导下的地球系统科学委员会(ESSC)的内部文件中。该委员会在制定NASA的地球科学计划时,提出要把地球的各组成部分作为相互作用的一个**系统**加以评述;将透视和理解**地球系统**随时间的演化作为**地球系统科学**的最终目标。此后,该委员会通过一系列活动,集240余名著名科学家之智慧,于1988年出版了专题报告《地球系统科学》一书(陈泮勤等译,1992),正式系统地阐述了**地球系统**和**地球系统科学**的观点。强调从整体出发,将地球的大气圈、水圈(含冰雪圈)、岩石圈和生物圈看作是一个有机联系的地球系统,发生在该系统中的各种时间尺度的全球变化是地球系统各分量(圈层)相互作用的结果、三大基本过程(物理、化学和生物学过程)相互作用的结果、以及人与环境(生命与非生命系统)相互作用的结果,首次提出将人类活动作为与太阳和地核并列的、能引发地球系统变化的驱动力——第三驱动因素。

由于**地球系统**一词与**地球系统科学**相伴而生,而地球系统科学又是在**地球系统**这一动力框架内进行全球环境问题研究的一门新兴学科,因此我们有必要对**地球系统科学**的诞生背景及科学内涵加以论述。

与地球系统一样,地球系统科学也是80年代为迎接全球环境挑战国际上诞生的一门新兴学科,它的产生和发展,除了上述促动因数外,主要是由于强烈的人类活动,传统学科的成熟,以及对地观测技术和计算机技术的进步的推动。

● **强烈的人类活动**。众所周知,地球自诞生以来就以其自身的规律造就并主宰着地球上的生灵。与此同时,地球上的高级智能动物——人类,为了自身的生存和发展,不断地影响并改造着地球环境,逐渐成为地球环境中不可缺少的组成部分。今天,人类对地球环境的影响已从秦汉时期的“局部影响”进入到“全球影响”的时代。在上面列举的全球性环境问题中,大多与强烈的人类活动有关。人类工业活动和日常生活对化石能源的消耗,不仅造成环境污染,而且导致CO₂等痕量气体排入大气,其温室效应可能导致全球增暖。人口爆炸,城市扩张,森林、草地被垦殖为农田,使土地利用格局发生了翻天覆地的变化,

直接造成植被破坏、生物物种灭绝、土地荒漠化,进而引发气候异常。且就人类诱发的全球性环境问题而言,其发生的频率和强度已接近、甚至超过自然因素引发的全球环境变化,从而可能对未来人类的生存环境产生不可逆转的后果,进而影响到我们的子孙后代。这就迫使人们必须首先认识地球系统本身的运转状况,从全球角度制定对策,控制和调整自身的行为,使整个地球环境朝着有利于人类的方向发展。

● **传统学科的成熟。**很多学科自身的成熟性促进了各学科之间基本关系和相互依赖的认识。为了取得实质性进展,某一学科的专家面临从其他学科吸取知识的需要。例如,物理海洋学的研究进展需要有关海气相互作用、陆海相互作用、极冰的范围、海洋生物群落分布和生产力方面的知识。对气候的深刻认识需要包括海洋学、大气科学、地质学和地球物理学在内的地球科学和生物学的知识。

● **对地观测技术。**对地观测技术的发展,特别是卫星遥感技术,提供了对整个地球系统行为进行长期、立体监测的能力;计算机技术的发展为收集、处理、分析地球系统变化的庞大信息、发展复杂的地球系统的数学模式提供了工具。

因此,地球系统科学是近代科学技术向深度和广度发展的必然结果,是全球环境变化研究的理论基础,是面对全球未来的一门科学。

地球系统科学的目标是:在地球系统这一动力框架下,描述和认识控制地球系统的关键的相互作用的物理、化学和生物学过程;描述和认识生命的支持系统——无生命的地球环境;描述和认识人类活动诱发的重大全球变化。上述目标的实现,从根本上回答了地球是怎样运行的,怎样演化的,它的未来如何等地球系统科学的基本问题。同时也有助于认识全球环境变化的发生、演化过程和控制机理,为人类合理利用资源服务。

地球系统科学用尺度分析的方法来确定研究对象。从谱分析的角度看,发生在地球系统中的各种变化具有很宽的时间和空间尺度谱。当代地球科学的研究进展表明,只有那些具有行星尺度的变化反映了地球系统各组成部分的相互作用和反馈。而任何时间尺度的变化都包含了各种时间尺度上发生的地球系统过程的相互作用。因此,在空间尺度上,地球系统科学将所关注的变化定位在那些具有行星尺度(相当于地球的半径)的变化上。在时间尺度上,将全球变化的主要时间尺度用五个时段来定义:几百万年至几十亿年,几千年至几万年,几十年至几百年,几天至几个季度,几秒至几小时。其中,前两个时段是传统的固体地球科学研究的对象,后两个时段是大气科学、生物科学和海洋科学涉猎的范围,而中间这个时段(几十年到几百年时间尺度)的全球变化问题正是当前人类面临的最大挑战,对于人类社会的利害关系和发展规划尤为重要,该时间尺度的研究直到20世纪90年代还基本处于空白状态。因此,地球系统科学要首先迎接这一挑战,要融合固体地球科学、大气科学、海洋科学以及生物科学的知识,从本质上去认识十至百年尺度的全球变化现象。

在研究方法上,地球系统科学的基本思路是对全球变化进行观测、理解、模拟和预测。它将全球变化用一些基本变量来描述,并进行全球范围长期、持续、同步的观测(卫星和地面观测),以建立全球变量信息库;地球系统科学尤其重视开展过程研究,以加深对全球变化的认识和理解;在上述基础上建立概念模型和数值模式,进行数值模拟;然后应用重建的过去环境记录检验模式,最后对地球系统状态变量的变化趋势、变化范围作统计性

预报。

(二) 地球系统中的主要科学问题

如前所述,地球系统科学把描述和认识行星尺度的变化(全球变化)作为自己的主要任务,特别强调从本质上认识数十年至数百年的全球变化。数十年至数百年的全球变化过程如图 1.1 所示。它将地球系统分为物理气候系统和生物地球化学循环两个系统,以过程研究为重点,研究其间的相互作用。

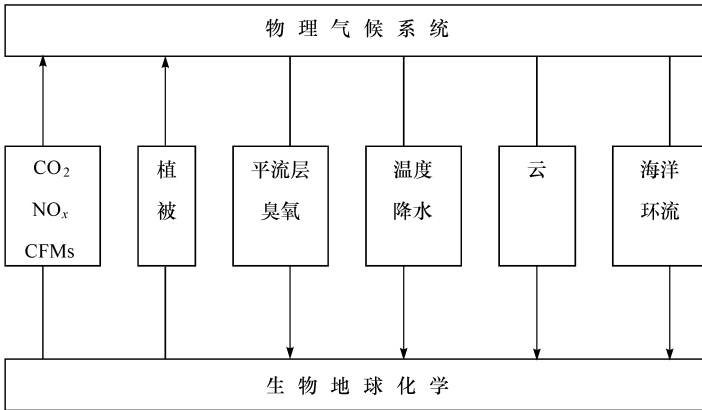


图 1.1 物理气候系统与生物地球化学循环间的联系示意图

物理气候系统包括控制地面温度和降水分布的大气和海洋过程,由于太阳加热不同而产生的运动以及冰雪覆盖的变化。

大气是物理气候系统的发动机。太阳辐射加热了地表和海洋。由于赤道地区日照较强,其平衡态下的温度大大高于极地。赤道-极地能量梯度加上地球自转产生的科氏力导致大气环流的形成,将热量从赤道带到极地,减小了温差,缓和了极地的酷冷。影响这一过程的主要因素有季节年循环产生的地面和海洋表层储热量的时间差异,总体上向极地输送的洋流,反射太阳辐射的云和冰雪等。上述因素决定了气候,特别是温度和降水过程,并通过大气物理和动力学过程、海洋动力学过程、陆面湿度和能量平衡,以及平流层-中间层大气动力学过程控制着物理气候系统。物理气候系统中的主要科学问题是:

气候(特别是温度、降水量、海面风力)对辐射重要的微量气体变化的敏感性如何?

海洋环流对大气的作用是如何响应的? 海洋环流变化是怎样影响地面温度分布的?

海洋的热容量对大气温室气体诱发的全球变暖出现时间的滞后影响如何?

要回答上述问题就必须认识云辐射的作用,认识海洋对热量储存、海洋环境和海冰的作用,陆地生态系统的作用以及平流层环流的作用。

生物地球化学循环是指诸如碳、氮、磷、硫等生源要素通过地球各子系统的物质流,及其对地球系统生物圈的影响。生物地球化学循环包括海洋生物地球化学、陆地生态系统、

对流层化学以及平流层、中间层大气化学等过程。

近年来,人们普遍认识到生物圈是由生物地球化学循环支撑和维持的。大气中的氧对生物活体和遗骸进行氧化,既产生 CO_2 ,又产生用于维持生物活动、生长和繁殖的能量。保持一定比例的氮、硫、磷及其他生源要素对生命系统是非常重要的。例如,氮控制着海洋中生命过程的速率,水的多少决定了沙漠中生命的范围。土壤、河湖和近海,氮、磷都是植物生长的限制因素。另一方面,植物初级生产量的形成和分解使上述生源要素得以再循环。生态系统除受生源要素控制外还受光照、温度和 CO_2 浓度等物理气候系统的影响。生物地球化学循环将物理、化学和生物学过程结合在一起,构成了生物地球化学循环的主要科学问题。当前需要回答的问题是:生物地球化学循环的现状如何?在人类扰动前的状态怎样?它们未来的状态和可能的后果是什么?

发生在物理气候系统和生物地球化学循环中的一些重要的相互作用过程将两大系统联系在一起。物理气候系统通过平流层臭氧的变化,云的变化,改变温度、降水和海洋环流的变化直接或间接影响生物地球化学循环。生物地球化学循环系统则通过 CO_2 、 NO_x 、 CFCs 等微量、痕量气体的“温室效应”直接或间接影响物理气候系统。生物地球化学循环系统还可以改变植被种群结构、类型,影响地面干燥度、地面反照率等,最终影响物理气候系统。

物理气候系统与生物地球化学循环的相互作用过程是非常复杂的,我们对此知之甚少。除了上面提到的科学问题外,当前更应重视对一些重要变量进行长期观测,对一些关键过程进行深入研究。

长期观测的重要内容包括:

- (1) 地球外部作用力的观测研究(太阳辐照度、紫外辐射通量、火山喷射指数);
- (2) 对流层和平流层痕量气体的观测(如 CO 、 CO_2 、 NO_x 、 CFCs 、 CH_4 、 O_3 、 H_2O 、 HNO_3 、 HCl 、气溶胶等);
- (3) 大气响应变量的观测研究;
- (4) 地面特征变量的观测;
- (5) 海洋变量的观测研究,特别是海洋叶绿素、 CO_2 、海洋生物地球化学通量观测。

上述观测内容已纳入全球陆地观测系统(GTOS),全球海洋观测系统(GOOS),全球气候观测系统(GCOS),全球通量观测网(FLUXNET)和地球观测系统(EOS)的框架。

在过程研究方面,地球系统界面之间的相互作用过程,如海-气相互作用、陆-气相互作用、陆-海相互作用、大气-植被-土壤相互作用、平流层-对流层相互作用等,地球系统各子系统内部的重要过程,如大气的氧化过程、陆地生态系统的级联效应、海洋物理泵和生物泵的机理等等,均已纳入以全球变化研究为核心的四大姊妹计划——IGBP、IHDP、WCRP、DIVERSITAS 的框架中,已经和正在成为地球系统科学、特别是地球系统碳循环的研究重点。

二、全球碳库

许多人对地球系统中的碳进行过估计,表 1.1 列出了一些有代表性的文献(IPCC, 1990;Schlesinger, 1991;Balino *et al*, 2001;Lal, 1999;Watson and Noble, 2001)的结果:

表 1.1 地球系统中的碳库 (Pg)

	IPCC (1990)	Schlesinger (1991)	Balino <i>et al</i> (2001)	Lal (1999)	Watson and Noble (2001)
大气圈	750	755	750	760	750
陆地生物圈	550	550	610	620	500
土壤	1500	1200	1500	2500	2000
海洋	39000	35500	38933	38000	38400
合计	41800	38005	41793	41880	41650

不考虑岩石圈的情况下,地球系统中碳的总量约为 38005~41880Pg ($1\text{Pg}=10^{15}\text{g}$)。

地球系统中碳的赋存方式千变万化。在大气中主要为含碳气体和气溶胶粒子;在海洋和淡水中主要为碳酸盐离子,如溶解无机碳(DIC),溶解有机碳(DOC),颗粒有机碳(POC)以及生物有机碳(BOC);在岩石圈中主要为碳酸盐岩石和油母岩;在陆地生物圈中主要以有机碳和无机碳的形式存在。地球系统中碳主要以上述方式存在于地球系统的各个子系统中。

习惯上,我们在讨论地球系统碳库时,将大气圈作为一个独立的碳库;将生物圈中陆地部分分离出来成为一个独立的陆地碳库,且为方便起见,又将陆地碳库分为陆地生物圈碳库和土壤碳库进行讨论;海洋包括了海洋生物部分。由于人类大量使用化石能源,因此将人类活动从岩石圈中独立出来,而不对岩石圈加以讨论。

(一) 大气碳库

大气中约有 750~760Pg C,约占大气质量的万分之三。不同作者有不同的估计,但差别不太大,通常小于 2%,是所有子系统中估计最为准确的。

表 1.2 (Brasseur and Schimel,1999; Urone,1976; 孙景群,1986; 王明星,1999)给出了大气的主要化学组成。显然,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 Halon 等。

表 1.2 大气的化学组成*

大气成分	体积混合比	寿命/a	来源与说明
N_2	78.088%	10^6	生物
O_2	20.949%	5000	生物
Ar	0.93%	10^7	惰性气体
Ne	18.18ppm	10^7	惰性气体
He	5.24ppm	10^7	惰性气体
Kr	1.1ppm	10^7	惰性气体
Xe	0.1ppm	10^7	惰性气体
H_2	0.55ppm	6~8	生物、人为
CO_2	360ppm	50~200	燃烧、海洋、生物
CH_4	1.7ppm	10	生物、人为

续表

大气成分	体积混合比	寿命/a	来源与说明
N ₂ O	0.31ppm	150	生物、人为
CO	50~200ppb	0.2~0.5	光化学、人为
Halocarbons	3.8ppb		人为
SO ₂	10ppt~1ppb	2天	光化学、火山、人为
O ₃ (对流层)	10~500ppb	2	光化学
O ₃ (对流层)	10~500ppb	2	光化学
OH	0.1ppt~10ppt		光化学
CH ₂ O	0.1ppb~1ppb		光化学

* 1ppm=10⁻⁶, 1ppb=10⁻⁹, 1ppt=10⁻¹²。下同

应该说大气中由于自然原因赋存的碳是比较稳定的。近百年来大气碳库有所增加主要是由于人类活动造成的。

(二) 人类活动

研究表明(Crutzen, 2001), 在工业革命以来的“人类世”中, 由于化石燃烧和森林砍伐, 大气温室气体温度快速增长, CO₂ 增加了 30%, CH₄ 和平流层 O₃ 增长幅度都超过 100%, 从而使地球表面获得的热量增加了 2.5W/m², 使过去百年大气温室气体升高了 0.6℃。烧煤和石油向大气排放的 SO₂ 约为 160Gt C/a, 比自然大气的 SO₂ 高 2 倍, 有的地区高出 10 倍以上, 从而导致酸雨, 损害健康, 使能见度变坏, 其阳伞效应导致气候变冷。

化石燃烧和生物质燃烧排放出比自然本身多的 NO, 在大范围造成光化学烟雾, 包括 O₃ 增高危害人类及植物。且此现象已从工业化国家蔓延到部分发展中国家的乡村。

人类还释放部分自然界没有的化合物, 如氟氯烃类: CFC₁₃, CF₂C₁₂, Halon, 造成南极春天 12~22km 的臭氧洞持续数周, 有时北极晚冬和春天也观测到较小的 O₃ 洞。

不少作者对人类活动造成的大气碳的增加进行了估算, 其结果虽有不同, 但差异不大。最新的研究(Watson and Noble, 2001)表明人类活动排放了大约 6.3Pg C。陆地生物圈和土壤圈向大气排放了大约 1.6Pg C, 共向大气注入了 7.9Pg C。现在的问题是, 根据实测的大气浓度反算, 实际大气碳库的增加仅有约 3.2Pg C。有人推测其余的碳被海洋和陆地生物圈吸收。现在研究表明: 海洋大约吸收了 2Pg C, 陆地生物圈大约吸收了 1~2Pg C, 还有大约 2Pg C 不知去向。这就是当今所谓的“丢失的碳汇”问题。

(三) 海洋碳库

海洋中溶解无机碳是大气的 50 倍, 是地球系统中除岩石圈外最大的碳库, 约 38400~39973Pg C。海洋中的碳有三种赋存形式: 溶解无机碳(DIC), 如 CO₂ 和带 CO₃²⁻、HCO₃⁻ 的碳酸盐; 溶解有机碳(DOC), 如溶解有机碳分子; 生物有机碳(BOC), 如海洋生物活体和残体。海洋碳库中绝大部分是 DIC, 约为 34000~38000Pg C; DOC 约为 1000Pg C; 只有

少量的 BOC, 约为 3Pg C。

海洋碳库大体分为表层海洋、中层和深层海洋进行研究。表层海洋包括了海洋生物的主要部分。表层海洋的储碳能力取决于海水表层的温度, 温度越低, 储碳能力越强。

(四) 陆地生物圈中的碳

陆地生物圈中的碳主要以 BOC 的方式赋存于生物体中。许多人对陆地生物圈中的碳库进行了研究, 所得结果不尽相同。陆地生物圈约有 500~620Pg C, 还有人估计在 550Pg C 至 924Pg C 之间。

目前对陆地植被碳库的估算的差异主要来自估算方法、植被分类方法的不一致、植被面积以及单位面积碳密度的确定等方面。

陆地生物圈碳库的估计有两种方法: 一是根据植被与气候和土壤之间的相互关系, 建立模型, 如 Hoidridge 生命带模型、BIOME 模型、MAPSS 模型等, 模拟陆地表面潜在或自然的植被分布, 然后根据各类植被的平均碳密度得到陆地生物圈碳库的估计。二是在分析土地利用类型的基础上, 根据实地调查和统计来估计不同陆地生态系统类型的分布及其碳密度。第一种方法的缺点是目前的模式还不能准确描述植被、大气、土壤间的相互作用机理, 其模拟的结果必然会引入误差, 且很难反映土地利用和土地覆盖变化, 往往高估了陆地生物圈碳库。第二种方法较第一种方法更接近现实, 但存在植被分类及面积估计带来的误差问题。而且两种方法都要用到碳密度, 而这一要素通常根据实测或调查数据进行, 必然受到样本不足和数据的限制, 带来较大误差。例如, Post 等(1982)曾比较全面地统计了全球各种生态系统类型的碳密度, 但这一结果是依据区域上有限的样本做出的。又如, Ajtay 等(1979)给出了全球陆地表面不同植被类型的年生产量和总生物量(碳库量)的估计结果(表 1.3), 但从中可见其对植被类型的划分仍很粗略。

表 1.3 陆地生态系统年生产量与总生物量(碳库)(Ajtay *et al.*, 1979)

生态系统类型	面 积 /10 ¹² m ²	年生产量 /(Pg C/a)	总生物量 /Pg C
森林	31.3	21.9	427.73
温带幼林	2.0	1.35	16.20
灌丛	2.5	0.90	7.88
稀疏草原	22.5	17.71	65.56
温带草地	12.5	4.39	9.11
极地冻原/高山	9.5	0.95	5.87
荒漠和半荒漠矮灌	21.0	1.35	7.42
荒漠	9.0	0.06	0.35
永久冰盖	15.5	0	0
湖泊和河流	2.0	0.36	0.02
沼泽	2.0	3.26	11.81
泥炭地	1.5	0.68	3.37
耕地	16.0	6.77	2.99
人类生活区	2.0	0.18	1.44
合计	149.30	59.86	559.75

(五) 土壤碳库

土壤碳库是大气碳库的 2 倍,是陆地生物圈碳库的 2~3 倍(表 1.1)。约在 1200Pg C~2500Pg C 之间。土壤碳库中碳的主要赋存方式为有机碳,也有少量的矿质碳。土壤有机碳来源于动植物、微生物遗体、排泄物、分泌物及分解产物和土壤腐殖质,是土壤碳库的主体。土壤矿质碳来源于土壤母岩风化形成的碳酸盐,在土壤碳库中的比例小于 25%,且比较稳定。

影响土壤碳库的因素可分为自然和人为因素两大类。自然因素包括:土壤的内部物理特性,如黏粒、酸度、质地等;植被类型及进入土壤的植物残体量;外部气候条件,如水、热、光照等。

土壤黏粒可以改善土壤内部的水肥条件,直接吸附腐殖质,阻碍微生物对腐殖质的分解,促进土壤腐殖质所需的植物残体的生长。黏粒对高活性物质有吸附优势。例如 Virakonphanich 等(1988)的研究表明,土壤黏粒可吸附有机碳,并将其封闭在土壤孔隙中,阻碍微生物的分解。酸性较强的土壤可抑制微生物活动,缓解有机物分解。不同的土壤质地,其透气性差异很大,直接影响土壤空气和水的运动,进而影响有机碳的分解速率。

进入土壤的植物残体量是土壤有机碳的主要来源,显然与地表植被类型密切相关。通常,热带地区凋落物量最大,并从高纬向低纬递减。

气候条件影响着进入土壤的植物残体的分解速率,其影响过程非常复杂。Smith 等(1951)对美国南部 Mayaguez 山区的研究表明,一些地点随海拔增高,降水增多,气温降低,土壤有机碳含量增高;而另一些地点,山上有机碳含量却低于山下。通常,温度比降水的作用更大些。

影响土壤碳库的人为因素主要表现在土地利用方式和耕作制度两个方面。毋庸置疑,森林砍伐、草场过牧、农田开垦(毁林毁草)均极大地减少了土壤有机碳储量,并改变了土壤有机碳的分布。大量研究表明,耕作制度的变化,也会影响土壤有机碳含量。免耕管理比传统的耕作更有利于保存土壤有机碳(Balesdent *et al*, 1990; Dalal, 1989; Havlin *et al*, 1990)。增加作物秸秆入土量可提高土壤有机碳密度。

目前,土壤碳库的估计有四种方法:植被类型法、土壤类型法、生命带法和模型法。使用最为普遍的是前两种,都是根据植被或土壤类型确定面积和与之相对应的土壤碳密度来估计土壤碳库总量。显然,土壤(或植被)类型(类型决定面积)和土壤碳密度是影响土壤碳库估计的关键因素。尽管许多人对植被分类进行了大量研究,但目前还没有一个普适的土壤(植被)类型分类体系。在土壤碳密度研究方面,许多人(Post *et al*, 1982; Zinke *et al*, 1986; Schlesinger, 1984, 1990)也进行了不懈努力。表 1.4 就是其中一例。但总的来说样本少,且分布不均。

表 1.4 按 FAO-UNESCO 土壤分类法计算得到的土壤各层平均碳密度 (kg/m^2) (Batjes, 1996)

土壤类型	平均碳密度 (0~30cm)	平均碳密度 (0~30cm)	平均碳密度 (0~30cm)	平均碳密度 (0~30cm)
强淋溶土	5.1	6.7	9.4	10.4
锥形土	5	6.9	9.6	15.7
黑钙土	6	8.6	12.5	19.6
灰化淋溶土	5.6	5.9	7.3	7.8
黑色石灰土	13.3			
铁铝土	5.7	17.6	10.7	16.9
潜育土	7.7	9.7	13.1	19.9
黑土	7.7	10.5	14.6	21.3
石质土	3.6			
冲积土	3.8	5.56	9.3	16.1
灰钙土	5.4	7.5	9.6	
淋溶土	3.1	4.3	6.5	9.9
灰色森林土	10.8	13.6	19.7	23.3
强风化弱黏淀土	4.1	5.6	8.4	11.3
有机土	28.3	46.4	77.6	218
灰壤	13.6	17.3	24.2	59.1
沙土	1.3	1.9	3.1	5.5
松岩性土	3.1	4	5	7
碱土	3.2	4.2	6.2	5.1
火山灰土	11.4	16.5	25.4	31
山地薄层土	15.9			
变性土	4.5	6.7	11.1	19.1
白浆土	39	5.2	7.7	16.9
干旱土	2	2.8	48	8.7
漠境土	1.3	1.8	3	6.6
盐土	1.8	2.6	4.2	5.7

三、地球系统碳循环

(一) 基本概念

不同作者对地球系统碳循环有着不同的理解 (Moor, 1994)。归根到底,地球系统碳循环是指碳在地球系统中的迁移运动。这种运动包括在物理、化学和生物过程及其相互作用驱动下,各种形态的碳在各个子系统内部的迁移转化过程,以及发生在子系统之间(即界面上,如陆气界面、海气界面等)的通量交换过程。

以下各小节将依次回顾碳循环的研究历史,简述发生在地球系统各子系统(大气、海洋、陆地生物圈)内部的重要碳过程,最后论述控制子系统之间的通量交换过程。

(二) 研 究 史

碳循环的研究始于 20 世纪 70 年代初。其主要工作集中在陆地生物量的估算方法 (Crow, 1978)、陆地生物群区在碳循环中的作用 (Bolin, 1977) 和全球生物地球化学循环研究方面 (Bolin, 1977; Bolin *et al*, 1979), 也有少量的工作针对陆地土壤和大气碳库变化的研究 (Schlesinger and Willian, 1977; Stuiver, 1978)。

80 年代, 在国际科联环境问题科学委员会 (SCOPE) 的推动下, 碳循环研究迅速开展。这一时期的研究主要集中在以下四个方面: ① 陆地生态系统生产量的估算 (Houghton *et al*, 1983; Brown and Lugo, 1984; Cooper, 1983; Delcourt and Harris, 1980), 包括估算方法的进一步研究 (Pastor *et al*, 1983/1984; Negi *et al*, 1988), 和土地利用变化对陆地碳的影响 (Houghton *et al*, 1987); ② 土壤碳库的研究 (Raich and Nadelhoffer, 1989; Post *et al*, 1982), 其中最重要的工作是 Houghton 对 1860~1980 年陆地生物群落和土壤碳库的研究 (Houghton *et al*, 1983); ③ 全球碳循环的模拟研究 (Kohlmaier *et al*, 1980; Emanuel *et al*, 1981; Detwiler and Hall, 1988; Houghton *et al*, 1988); ④ 也有部分工作涉及生物圈对大气 CO₂ 的影响和响应 (Kohlmaier *et al*, 1980; Reynolds and Acock, 1985; Dahlman, 1985)。

90 年代至今, 碳循环的研究工作进入高潮时期。这一时期由于世界环境与发展大会的召开, 《联合国气候变化框架公约》的签订和《京都议定书》的推进, 对陆地生态系统的储量的研究更全面更具体, 研究文章多, 内容涉猎广泛。在碳库的历史演化方面, Adams 等 (1990) 研究了末次冰盛期以来陆地碳库的变化。Houghton (1993) 研究了过去 135 年来陆地碳库的变化。在全球碳库的研究方面主要集中到对地球的主要植被带的研究上, 如北半球、热带、副热带、温带、亚洲季风区、东南亚、南亚以及北方森林对碳循环的贡献上。不少作者还从国家利益出发, 开始了本国森林生态系统在碳循环中的作用研究, 开展这些研究的国家有加拿大 (Apps and Kurz, 1990), 中国 (Fang *et al*, 1998), 芬兰 (Karjalainen *et al*, 1995), 欧洲 (Kauppi *et al*, 1992), 俄罗斯 (Rozhkov *et al*, 1996), 瑞典 (Sykes and Prentice, 1996), 原苏联 (Vinson and Kolchugina, 1993) 等。美国早在 80 年代就开始了研究, 近年又进行了更细致的研究。

碳循环模式发展和数值模拟的工作是 90 年代的又一特点, 这一时期模式的发展研究和模拟研究较以往更为活跃。先后诞生了陆地碳循环平衡模式 (Foley, 1995), 动力模式 (Emanuel, 1993; Neilson and Running, 1996), 系统模式 (Goldewijk and Leemans, 1995), 二维能量平衡与碳循环耦合模式, 陆地生物地球化学模式与二维气候模式的耦合 (Xiao *et al*, 1997), 全球陆地初级生产力与植物地理模式 (Woodward *et al*, 1995), 全球陆地生产力模式 (Warnant *et al*, 1994) 及凋落物分解通用模式 (Moorhead and Reynolds, 1991)。用模式进行碳循环和碳过程的研究广泛开展, 如 Hudson 等 (1994) 模拟了全球碳循环, Iverson 等 (1994) 估算了南亚和东南大陆的森林生产力, Luo 和 Mooney (1996) 模拟了大气 CO₂ 增加后对植物光合作用的影响等。

除了对陆地森林生态系统的碳储量研究外, 90 年代碳循环研究进一步加强了陆地生

态系统对大气 CO₂浓度增加响应(Amthor and Loomis, 1996; Koch and Mooney, 1996)研究,土地利用变化对陆地碳库的影响的研究(Houghton, 1996),开展了陆气间碳通量交换的观测研究(Esser, 1993),利用遥感方法进行生物量的估算(Running, 1990)和更加重视通量观测研究,一个覆盖全球的地面碳通量观测网正在形成。

90年代末21世纪初,IGBP、IHDP、WCRP等国际科学组织发动和组织了全球碳循环的新一轮研究(IGBP, IHDP, WCRP, 2001),涉及碳循环的方方面面。新一轮国际碳计划提出的主要科学问题是:

1. 格局与变率

- 碳源与碳汇格局随时间如何变化?
- 大陆和盆地尺度的碳源与碳汇空间分布格局如何?
- 人类活动(化石燃料的燃烧和土地利用)对碳源与碳汇格局的贡献是什么?
- 在碳循环中区域和次区域对全球碳收支的影响如何?

2. 过程、控制和相互作用

- 控制过去和工业革命前大气 CO₂浓度的机理是什么?
- 什么机理控制着当前陆地和海洋碳通量?
- 什么机理控制着人为碳通量和碳储库?
- 反馈机理是如何工作从而放大或减小了人为和非人为碳通量?

3. 未来全球碳循环动力学如何?

- 当前陆地碳汇特征在未来是否会消失?甚至会变成源?
- 下世纪(21世纪)海洋吸收碳的物理和生物驱动器将发生什么变化?如何影响海洋储库?
- 随着工业、商业、交通、居住系统以及土地利用变化碳通量将会怎样变化?
- 面对碳循环的挑战,人类将会怎样响应?

可以预料,全球碳计划的实施,必将对进一步认识全球碳循环的物理、化学和生物学过程及其调控机理产生深远影响。

(三) 碳过程与碳循环

1. 大气内部碳循环

大气内部的碳过程包括发生在大气内部的物理过程和那些与含碳气体有关的大气化学过程。前者决定着碳浓度及其时间变化和空间分布,但对大气碳库的储存能力没有本质影响(即不影响碳库大小),故本文不予论述。后者、特别是大气的氧化效率或自净能力决定着大气碳库的大小,因而予以重点讨论。

Crutzen (2001)认为,许多年前就有人提出 OH(羟基 Hydroxyl radicals)在清除由人类和自然排入大气的的所有气体中起着重要作用。OH的形成是由于太阳紫外辐射对 O₃