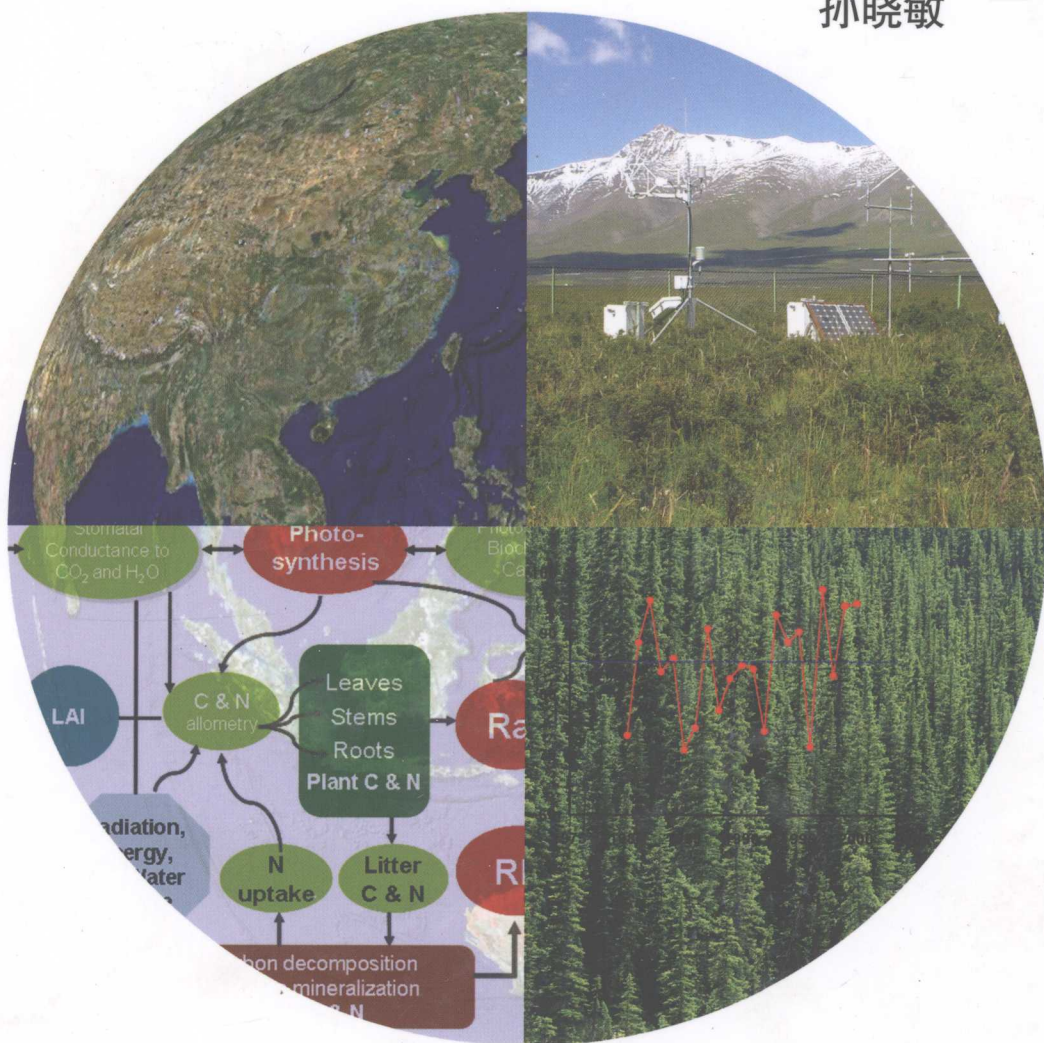


中国科学院知识创新工程重大项目
“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”系列专著

中国陆地生态系统碳通量观测 技术及时空变化特征

于贵瑞 主编
孙晓敏



科学出版社
www.sciencep.com

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通量观测 技术及时空变化特征

于贵瑞 孙晓敏 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以陆地生态系统 CO_2 、 H_2O 和能量通量的长期观测研究为核心，在系统阐述国际通量观测进展的基础上，重点论述和介绍了中国生态系统通量观测研究网络（ChinaFLUX）建立以来，在观测网络的运行机制，生态系统碳通量的观测理论、技术和方法，典型森林、草地和农田生态系统的碳通量特征及其环境控制机制，碳通量模型模拟、尺度扩展和数据-模型融合系统，以及中国区域陆地生态系统碳水通量的时空格局及其环境驱动机制等方面的综合研究成果。

本书可作为相关领域科研工作者的的重要参考书籍和观测数据源，也可作为相关领域的研究生教育的基础教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

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，孙晓敏主编. —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 978-7-03-020113-3

I. 中… II. ①于…②孙… 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 189706 号

责任编辑：胡晓春 吴三保 吴伶俐 / 责任校对：李奕萱

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：44

印数：1—1 500 字数：1 002 000

定价：150.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换〈科印〉）

本书由下列项目资助出版

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 (CBTSEC, KZCX1-SW-01)

科技部国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划):

中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究 (CCDMCTE, 2002CB412500)

国家自然科学基金委员会重大项目:

我国主要陆地生态系统对全球变化的响应与适应性样带研究 (30590380)

本书作者名单

主 编 于贵瑞 孙晓敏

副主编 王艳芬 刘琪璟 张一平 张宪洲 赵新全
欧阳竹 周国逸 韩士杰

作 者 (按姓氏笔画排序)

于 强	于贵瑞	王 靖	王绍强	王春林
王秋凤	王艳芬	方华军	石培礼	田 静
同小娟	朱治林	伏玉玲	任书杰	任传友
刘恩民	刘允芬	刘琪璟	闫俊华	关德新
米 娜	孙晓敏	李 俊	李 菊	李正泉
李庆唐	李英年	杨 振	杨凤亭	吴家兵
何永涛	何洪林	宋 霞	宋青海	沙丽清
沈文清	张 弥	张 黎	张一平	张东秋
张军辉	张法伟	张宪洲	张雷明	张德强
陈永瑞	欧阳竹	周国逸	郑 征	郑泽梅
赵 亮	赵双菊	赵晓松	赵新全	郝彦宾
胡中民	施婷婷	秦 钟	顾峰雪	徐世晓
徐玲玲	唐建维	黄 辉	黄祥忠	韩士杰
温学发				

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

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的基础,生态系统的结构和功能、格局和过程与大气圈和土壤圈的环境变化紧密相关。全球气候变化和强烈的人类活动已经对陆地生态系统的格局和结构、生态系统的供给服务(如提供食物和水)、调节服务(如控制洪水和疾病)、文化服务(如精神、娱乐和文化收益)以及支持服务(如维持地球生命生存环境的养分循环)等各个方面产生了全方位、多层次的综合影响。陆地生态系统作为全球碳平衡中的碳汇或碳源对全球气候变化起着负反馈(减缓)或正反馈(加速)作用。因此,评估陆地生态系统固定大气中 CO_2 等温室气体的能力,评价陆地生态系统碳汇、碳源的区域分布,预测未来气候变化的趋势已成为减缓和适应气候变化相关领域内多个国际科学计划共同关注的重大科学问题。

涡度相关技术(eddy covariance)是通过测定和计算物理量的脉动与垂直风速脉动的协方差求算湍流输送量(湍流通量)的方法,被认为是现今唯一直接测量生物圈与大气间的 CO_2 , H_2O 和能量通量的标准方法,同时也为生态系统光合和呼吸作用、蒸腾和蒸发作用的观测研究提供了一种革命性的新技术,已经得到全球变化和生态系统研究领域科学家的广泛公认和应用。欧洲及美国和日本率先启动了陆地生态系统 CO_2 , H_2O 和能量通量的长期观测研究计划,欧洲通量网(CarboEuroFlux)、美洲通量网(AmeriFlux)、加拿大通量网(Fluxnet-Canada)和日本通量网(AsiaFlux)相继建立,并于 1997 年共同组建了全球性的通量观测网络(FLUXNET)。全球以及不同区域的通量观测为解析不同生态系统的主要功能对环境变化的响应和适应机制,评估和预测生态系统的服务功能,陆地生态系统碳汇和碳源的空间格局与动态变化,以及全球变化情景下的生态系统动态模型的建立和验证提供了大量的观测数据,在生态系统与全球变化科学研究中发挥了不可替代的重要作用。

在过去 10 年的全球变化研究过程中,科学家们推动了跨地区、跨学科和跨知识领域的生态学与地球科学的综合科学(syntheses science)的发展。20 世纪 90 年代以后,在全球变化科学的引导下,逐步推进了地球科学、生物学、生态学、生物地球化学、系统科学、地球观测系统与信息科学等学科领域的高度融合。基于涡度相关技术的长期联网观测和研究,在地球系统科学联盟(ESSP)启动的全球可持续性三大研究计划——全球碳计划(GCP)、全球环境变化与食物系统(GECAFS)和全球水系统计划(GWSP)中发挥了重要作用,为全球变化科学研究提供了重要的野外研究平台和科学观测数据,为生态系统碳水循环的机理研究、过程认知、格局分析和模型预测提供了最为权威的资料。

中国陆地生态系统类型多种多样,地形、地貌条件十分复杂,并且位于东亚季风气候带,是开展生态系统碳循环和水循环综合研究得天独厚的实验研究区域。同时,中国的经济发展水平也正处在城市化和工业化的快速发展时期,土地利用与土地覆被正在发

生着剧烈的变化,这也为开展全球碳、水循环的综合研究提供了难得的社会经济背景。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”和科技部“973”计划项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”的支持下,中国陆地生态系统通量观测网络(ChinaFLUX)于2002年建立,并投入运行,在分布于不同区域的8个观测站点的10种生态系统类型上开展了连续的综合观测,填补了全球陆地生态系统通量观测网络的东亚区域空白,构筑了综合研究中国陆地生态系统碳水循环、陆地生态系统变化、全球变化和地球系统科学的实验研究和数据平台。

ChinaFLUX大多数观测站现已积累了4年以上的生态系统 CO_2 、 H_2O 和能量通量连续观测资料,并在中国主要生态系统的碳汇与碳源强度及其变异性、生态系统碳通量的环境控制机制、生态系统碳通量格局的生物地理学控制机制、生态系统碳水通量的耦合关系及模型开发等方面取得了一系列重要的研究成果,受到国内外同行的极大关注,推动和引领了中国区域通量观测研究事业的发展。为了系统地总结ChinaFLUX所取得的研究成果和进展,为国内的通量观测研究提供参考和借鉴,ChinaFLUX的研究骨干们对多年来的观测和研究工作进行了一次综合性的总结,共同完成了本书的撰写工作。本书的第一、第二章综述了ChinaFLUX的建设背景和总体设计;第三、第四章系统地介绍了ChinaFLUX的观测技术规范和数据质量控制体系;第五章至第七章重点介绍了ChinaFLUX在数据-模型融合技术、生态系统碳水通量时空变异特征、模型模拟与尺度转换方面的研究进展;第八章至第十五章分别论述了ChinaFLUX各个观测站点通量长期观测研究所取得的重要成果。

本书是ChinaFLUX所有成员齐心协力的结果。各章的执笔人分别为:

第一章 于贵瑞、伏玉玲、宋霞、胡中民、孙晓敏

第二章 于贵瑞、张雷明、胡中民、宋霞、孙晓敏

第三章 孙晓敏、温学发、张雷明、李正泉、伏玉玲、李庆康、方华军、郑泽梅、王绍强、宋霞、黄辉、任书杰、张黎、顾峰雪、胡中民、田静、于贵瑞

第四章 孙晓敏、温学发、朱治林、张雷明、伏玉玲、李正泉、任传友、宋霞、米娜、于贵瑞

第五章 何洪林、于贵瑞、郑泽梅、张黎

第六章 于贵瑞、张雷明、伏玉玲、李正泉、温学发、宋霞

第七章 于贵瑞、李正泉、任传友、王秋凤、顾峰雪、米娜、郑泽梅、王靖

第八章 吴家兵、韩士杰、施婷婷、张弥、赵晓松、张军辉、关德新

第九章 刘允芬、温学发、宋霞、沈文清、李菊、杨凤亭、陈永瑞

第十章 张德强、王春林、闫俊华、周国逸

第十一章 张一平、沙丽清、唐建维、郑征、赵双菊、宋清海、杨振

第十二章 于强、李俊、同小娟、秦钟、刘恩民、欧阳竹

第十三章 郝彦宾、王艳芬、黄祥忠

第十四章 李英年、赵亮、赵新全、徐世晓、张法伟

第十五章 石培礼、张宪洲、何永涛、徐玲玲、张东秋

借本书出版之际,谨对ChinaFLUX各成员单位合作者的精诚团结和努力工作表示

衷心感谢，也对参加 ChinaFLUX 的建设、观测和研究的全体博士和硕士研究生所做出的杰出贡献表示感谢，还衷心地感谢对 ChinaFLUX 的发展给予大力支持和关怀的所有领导、专家及学者。

需要说明的是，本书中的研究结果和结论还仅仅是基于 ChinaFLUX 现有的十分有限的观测资料所得到的，其中还存在较大的不确定性，甚至是错误和不妥之处，欢迎各位读者和使用者批评指正。

于贵瑞

2007 年春于北京

目 录

序一

序二

前言

第一章 绪论	1
第一节 国际通量观测事业的发展	1
一、通量观测的历史过程	1
二、FLUXNET 的构建与发展	2
第二节 通量观测的科学贡献	4
一、生态系统通量观测的技术进步	4
二、通量观测的主要科学贡献	5
第三节 中国通量观测事业的起步和发展	6
一、中国通量观测的前期研究工作	6
二、ChinaFLUX 的建设	7
三、中国通量观测事业的发展和壮大	8
第四节 国际通量观测研究的热点领域	9
一、通量观测技术研究	10
二、通量-遥感的联合观测技术与数据整合研究	11
三、通量的过程机理与动力学模型研究	11
四、数据-模型融合系统的开发研究	13
五、通量观测在一些新领域的拓展应用研究	14
六、区域碳平衡及其对全球变化的响应和适应性的综合研究	17
第五节 ChinaFLUX 的研究工作重点	17
一、复杂条件下通量观测技术与评价方法的研究	17
二、典型生态系统二氧化碳和水通量的环境响应机理研究	18
三、多尺度通量观测数据-模型融合系统的开发研究	18
四、大尺度生态系统二氧化碳源、汇格局及其变化规律研究	19
参考文献	19
第二章 中国通量观测研究网络的设计与运行机制	26
第一节 设计的目的和目标	26
一、背景与意义	26
二、研究目标与内容	28
第二节 研究网络的设计思路与空间布局	29
一、欧亚大陆的气候、植被格局与陆地样带	29

二、中国植被格局与陆地样带	31
三、ChinaFLUX 设计思路与原则	33
四、ChinaFLUX 观测站点的空间布局	35
第三节 通量观测系统的设计	37
一、主要仪器设备	37
二、各站的观测内容与方法	45
三、各台站的主要仪器配置	46
第四节 ChinaFLUX 的运行管理机制	47
一、运行管理机制	47
二、观测数据与成果共享机制	48
第五节 ChinaFLUX 的发展思路与战略布局	50
一、典型生态系统通量的联网观测与陆地样带研究相结合, 合理布局和增加观测站点的数量	50
二、有效组织多尺度、多过程、多途径、多学科的综合观测计划	51
三、重点开展生态系统的水、碳、氮循环过程机理及其耦合关系的集成性研究	52
四、加强数据管理和共享, 开展数据分析与模型对比实验	53
五、加强与国际通量观测研究网络的合作	53
参考文献	54
第三章 中国陆地生态系统通量观测研究网络的观测方法与技术规范	56
第一节 涡度相关通量与气象要素的观测与仪器标定	56
一、通量观测系统和微气象观测系统的安装与调试	56
二、涡度相关观测数据的采集与保存	61
三、观测系统的运行与日常保养	61
四、通量观测仪器的标定方法	63
五、微气象观测系统的野外质量控制简易方法	66
第二节 研究区域植被和土壤空间分布特征的调查与制图	67
一、植被空间分布调查	68
二、土壤有机碳储量和理化性质空间分布的调查	71
第三节 生态系统生理生态要素的动态观测	73
一、生态系统生理生态要素的动态观测概述	73
二、植物光合、蒸腾作用和气孔导度的测定	74
三、物候期、病虫害和自然灾害观测	77
四、生物量的测定	78
五、植物营养元素及土壤水分和养分含量的测定	80
六、叶面积指数的动态测定	82
七、凋落物的动态测定	87
第四节 生态系统呼吸组分的测定	87
一、生态系统呼吸组分的测定方法概述	88

二、土壤呼吸测定技术	89
三、土壤呼吸组分的拆分方法	94
四、植物叶片和树干呼吸的测定	97
第五节 生态系统的稳定同位素通量观测	98
一、稳定同位素通量观测技术及其应用	98
二、通量观测中稳定同位素测定的采样系统	99
三、稳定同位素的全自动测定系统	101
第六节 生态系统变化的卫星遥感地面信息观测	103
一、遥感观测在生态系统通量评价中的作用	103
二、卫星遥感的数据资源及其特征	107
三、地面通量与遥感联合观测系统	109
四、像元尺度遥感数据的地面验证	110
第七节 服务于生态系统碳和水循环研究的其他观测	115
一、大气粉尘和营养物质的干湿沉降观测	115
二、土壤生物和植物固氮量的观测	117
三、土壤有机碳形态及其周转速率的测定	119
四、植物根系生长和周转过程测定	122
五、土壤微生物区系和功能群的动态测定	123
六、生态系统养分库的生物化学计量学测定	125
七、生态系统水文参数的测定	126
参考文献	129
第四章 中国陆地生态系统通量的观测理论和方法研究	135
第一节 生态系统二氧化碳和水热通量的观测理论	136
一、通量观测有效性需要考虑的主要过程及误差类型	136
二、二氧化碳和水热通量数据的质量控制与评价体系	136
第二节 二氧化碳和水热通量观测系统的性能评价	139
一、开路和闭路涡度相关系统仪器高频响应特征	139
二、开路与闭路涡度相关系统的对比分析	140
三、开路涡度相关系统与常规气象系统的对比分析	141
四、频率响应衰减的校正	142
第三节 平均周期的选择和低频通量贡献的研究	143
一、确定平均周期的简易方法	143
二、确定平均周期参数范围的归一化比值方法	144
三、不同平均周期对通量计算的影响	144
第四节 倾斜校正途径的研究	148
一、倾斜校正的途径	148
二、不同倾斜校正方法的对比分析	149
三、三种旋转方法校正后的通量比较	153

第五节 WPL 校正和通量储存效应的研究	154
一、WPL 校正对通量计算的影响	154
二、植被冠层的通量储存效应	154
第六节 夜间通量数据处理方法研究	156
一、夜间湍流通量测定的低估现象	156
二、夜间数据处理的一般流程	157
三、 u^* 临界值的确定方法	158
四、夜间通量低估的可能原因	160
五、强风条件下净二氧化碳交换通量的上界摩擦风速修正及其影响	161
第七节 能量平衡闭合的评价	162
一、能量平衡闭合的评价途径	162
二、OLS, RMA 线性回归分析与能量平衡比率 EBR	163
三、能量平衡相对残差 δ 的频率分布	164
四、能量平衡闭合程度的日变化	165
五、能量平衡闭合程度的季节变化	166
六、能量不闭合的可能原因	167
第八节 生态系统二氧化碳和水热通量数据质量的控制体系	168
一、稳态与非稳态的大气湍流特征	168
二、大气湍流方差相似性关系	170
第九节 缺失数据的插补方法	172
一、通量观测站缺失数据插补策略	172
二、几种数据插补方法的比较	174
第十节 通量观测数据的空间代表性	176
一、影响通量贡献区的因素	177
二、通量贡献最大的点	180
三、源权重函数最小的点	182
四、通量贡献区的大小	182
五、观测数据的空间代表性	182
参考文献	183
第五章 中国通量观测研究网络的数据-模型融合技术体系	190
第一节 碳循环研究中模型-数据融合研究的国内外进展	190
一、模型-数据融合方法的进展	190
二、碳循环中的模型-数据融合系统的组成	192
三、模型-数据融合方法分类	194
四、陆地生态系统碳循环研究中的模型与数据	196
第二节 中国通量网的模型-数据融合系统构建与框架	199
一、生态系统尺度的模型-数据融合系统	199
二、区域尺度的模型-数据融合系统	202

第三节 ChinaFLUX 数据管理信息系统与数据规范	202
一、ChinaFLUX-DIS 数据管理信息系统的设计	202
二、ChinaFLUX-DIS 数据发布系统功能	206
三、ChinaFLUX 数据规范	207
第四节 ChinaFLUX 通量数据处理系统的开发	213
一、实时数据处理	214
二、非实时数据处理	214
参考文献	214
第六章 中国典型陆地生态系统碳通量的时空变异与环境控制机制	218
第一节 生态系统通量观测站气象环境变化特征	219
一、森林生态系统观测站	219
二、草地生态系统通量观测站	222
第二节 中国主要陆地生态系统碳通量的季节和年际变化	224
一、不同生态系统 NEE 的季节变化模式	224
二、不同生态系统 NEE 的差异	227
第三节 净生态系统碳交换的环境控制机理	228
一、光强对净生态系统碳交换的控制作用	229
二、温度对净生态系统碳交换的控制作用	234
三、水分对净生态系统碳交换的影响	237
第四节 温度和水分对生态系统呼吸的影响	241
一、生态系统呼吸对温度的响应	241
二、水分对生态系统呼吸的影响	245
三、脉冲式降雨对草地生态系统呼吸的影响	248
第五节 中国区域通量的时空格局的初步分析	251
一、中国主要陆地生态系统碳收支的初步评价	251
二、中国区域陆地生态系统碳通量的空间格局	253
三、中国区域陆地生态系统碳通量的环境控制机制	254
参考文献	255
第七章 中国典型生态系统的碳、水通量模拟模型及其尺度转换方法	261
第一节 生态系统碳、水通量模型概述	261
一、生态系统通量模型研究概述	261
二、ChinaFLUX 的通量模型研究的主要进展	262
第二节 冠层尺度的 SMPT-SB 模型的开发及其应用	263
一、SMPT-SB 模型的理论框架及其参数化方案	263
二、冠层尺度的 SMPT-SB 模型的开发	267
第三节 农田生态系统水热与二氧化碳通量的日变化模拟模型	272
一、光合-蒸散耦合模型的描述	272
二、模型模拟的验证与敏感性分析	281