



国家科学技术学术著作出版基金资助出版



陆地生态系统 通量观测的原理与方法 (第二版)

Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems (Second Edition)

于贵瑞 孙晓敏 等著



高等教育出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

陆地生态系统通量观测的原理与方法

(第二版)

Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems
(Second Edition)

于贵瑞 孙晓敏 等著

高等教育出版社·北京

内容简介

本书以近地边界层大气科学的基本理论为基础,系统地论述了陆地生态系统 CO_2 、 H_2O 、热量和动量通量的观测原理与方法,为从事全球变化、陆地生态系统碳循环和水循环以及地圈-生物圈-大气圈相互作用研究领域的科技人员提供了野外观测、数据质量控制与分析、生态学知识与数学模型的提炼等方面的基础理论和实践技术,可作为相关领域科研工作者的理论学习和实践活动的参考书。

全书共 17 章,第 1~6 章系统介绍了全球变化与陆地生态系统碳、氮和水循环,陆地生态系统的能量和物质交换通量,地球大气圈的垂直构造与大气成分,大气圈的辐射传输与地表辐射平衡,近地边界层特征与空气运动基本方程,近地边界层湍流运动特征与扩散通量等有关近地边界层大气科学的基础理论;第 7~10 章详细讨论了基于空气动力学和热平衡的通量观测、涡度相关技术原理及通量观测、涡度相关观测中的若干理论和技术问题、稳定同位素技术在通量观测中的应用;第 11~14 章综述了陆地生态系统不同界面的碳氮水交换通量观测方法、陆地生态系统碳循环与碳通量评价模型、陆地生态系统的水循环及水通量的评价模拟、陆地生态系统碳-氮-水耦合循环及模拟模型的研究进展;第 15、16 章分别介绍和评述了全球陆地生态系统的通量观测及其实例,全球陆地大气边界层观测实验/生态系统通量观测网络与相关研究计划;第 17 章讨论了中国通量观测研究网络的建设、研究进展及发展方向。

图书在版编目(CIP)数据

陆地生态系统通量观测的原理与方法/于贵瑞等著.

—2 版. —北京:高等教育出版社,2017.12

ISBN 978-7-04-046012-4

I. ①陆… II. ①于… III. ①陆地-生态系统-通量-观测 IV. ①P91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 217998 号

策划编辑 关 焱 李冰祥 责任编辑 关 焱 封面设计 杨立新 版式设计 于 婕
插图绘制 于 博 责任校对 张 薇 责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京中科印刷有限公司
开 本 889mm×1194mm 1/16
印 张 36.75
字 数 1090 千字
插 页 2
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>

版 次 2006 年 4 月第 1 版
2017 年 12 月第 2 版
印 次 2017 年 12 月第 1 次印刷
定 价 168.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46012-00

LUDI SHENGTAI XITONG TONGLIANG GUANCE DE YUANLI YU FANGFA

资 助 项 目

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)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目:中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究(2002CB412500)

国家自然科学基金委员会杰出青年科学基金项目:陆地生态系统水碳耦合循环机制及其模拟(30225012)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目:中国陆地生态系统碳-氮-水通量的相互关系及其环境影响机制(2010CB833500)

国家自然科学基金委员会 A3 前瞻计划项目(中日韩):CarbonEastAsia:基于通量观测网络的生态系统碳循环过程与模型综合研究(30721140307、31061140359)

中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)项目:生态系统碳氮水通量观测技术规范与数据集成(KFJ-SW-ST5-169)

国家重点研发计划(典型脆弱生态修复与保护研究):碳通量及碳同位素通量的连续观测技术和方法(2017YFC0503904)

本书作者名单
(按姓氏笔画排序)

于贵瑞 王绍强 王秋风 牛 栋 方华军
朱先进 朱治林 伏玉玲 任小丽 任传友
刘新安 米 娜 孙晓敏 李正泉 李庆康
何念鹏 何洪林 宋 霞 张雷明 张 黎
陈 智 赵风华 胡中民 高 扬 高鲁鹏
温学发 魏 杰

主要作者简介

于贵瑞 1959年生,辽宁省大连市新金县人,1982年毕业于沈阳农业大学,之后在沈阳农业大学获得农学硕士和博士学位,主要从事作物生理生态、耕作制度和土壤物理学等方面的研究,历任沈阳农业大学助教、讲师和副教授。1991年开始在日本千叶大学学习和工作,主要从事土壤-植物-大气系统的水分运动、农业气象和环境水利学的研究与教学工作,获千叶大学环境学博士学位,曾任千叶大学研究生院助理教授和园艺学部副教授等职。1999年入选中国科学院“百人计划”和“引进国外杰出人才计划”,2002年获得国家自然科学基金委员会“杰出青年基金”资助。曾任中国生态学会副理事长,AsiaFlux副主席等职。

现任中国科学院地理科学与资源研究所副所长、研究员、博士生导师,中国科学院大学岗位教授,中国科学院“特聘核心骨干”,国家科技部国家生态系统观测研究网络(CNERN)综合中心主任,中国科学院中国生态系统研究网络(CERN)综合研究中心主任,中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室主任,CERN科学委员会副主任,青藏高原研究会副理事长,中国生态学会长期生态专业委员会主任,中国通量观测研究联盟理事长。

近年来,主要从事生态系统生态学研究,着力于发展生态系统碳氮水通量及耦合循环与全球变化方向,推动生物学与地理学的交叉融合,开展生态系统过程机制与自然地理格局规律的整合研究,在生态系统碳氮水通量协同观测技术、碳通量动态变化和区域空间格局的生态学机制、碳氮水通量时空格局的耦合关系以及碳-氮-水耦合循环过程方面取得了系统性的研究成果。主持国家科技部和中国科学院的生态系统网络建设工程项目6项,主持中国科学院知识创新工程重大项目、战略性先导科技专项、国家973计划领域前沿项目、国家自然科学基金委员会重大项目和重点国际合作项目等科学研究任务8项。主持完成的2项成果获国家科学技术进步二等奖,参与完成的1项成果获国家科学技术进步一等奖、2项成果获省部级一等奖。授权发明专利7项,登记软件著作权8项,主编著作9部,发表论文460余篇,主要成果发表于*PNAS*、*Global Ecology and Biogeography*、*Global Change Biology*、*Agricultural and Forest Meteorology*、*Environmental Science & Technology*等国际期刊。





孙晓敏 1957年生,1983年毕业于北京邮电学院无线电技术专业。现任中国科学院地理科学与资源研究所研究员、博士生导师,中国科学院特聘研究员,中国科学院大学岗位教授,中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室常务副主任,中国科学院地理科学与资源研究所科技平台建设技术委员会副主任,中国通量观测研究联盟副理事长和技术顾问等。曾任中国生态系统研究网络(CERN)水分中心主任、综合研究中心副主任等。

主要从事生态系统地表通量观测、定量实验遥感技术和尺度转换研究,着力于发展生态系统碳水通量及其同位素通量综合观测技术,在新型观测仪器的研制和观测系统的建立方面做出了卓有成效的工作。在长期的观测研究工作过程中,开展了新型通风干湿表、换位式波文比观测仪、空气动力学阻抗观测仪等多项观测仪器的实际应用和观测研究,有效地解决了关键地表通量参数的定量观测方法和获取途径问题。

先后主持承担了国家科技部973计划、中国科学院重大项目、国家重点研发计划项目、中国科学院仪器研制项目等。荣获国家科学技术进步二等奖2项、中国科学院自然科学二等奖1项。在国内外学术期刊上发表论文240余篇,主要成果发表于 *Global Change Biology*、*Agricultural and Forest Meteorology* 等国际期刊。申请及授权国家发明专利20余项。

再版前言

陆地生态系统的水、碳和氮循环过程机理、变化趋势及其调控管理的综合研究,是人类调节地圈-生物圈-大气圈的相互作用关系,维持全球生态系统的物质循环与能量流动、自然资源再生与循环利用的科学基础,成为生态系统与全球变化科学研究的重要领域。开展生态系统水、碳和氮通量及其耦合过程机制的联网观测研究是认识生态系统过程和功能的动态变化与空间格局规律,揭示全球气候变化和人为活动对生态系统的影响,以及生态系统对环境变化适应性的重要技术途径。有效组织生态系统能量、水和温室气体(CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等)通量的联网观测,可以为认知和预测生态系统对全球气候变化的反馈作用、生态系统生产力和稳定性评价、生物多样性维持、生态系统碳固持、水源涵养、气候调节等功能提供理论依据和科学数据支撑。

中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX),自2002年以中国生态系统研究网络(CERN)为基础开始建立以来,取得了健康发展和系统性的科学研究进展,已成为中国学者研究陆地生态系统水、碳和氮循环的生态过程机理、动态变化和空间格局,以及生态系统与全球变化互馈关系等科学问题的综合性野外平台及多学科交叉研究基地。ChinaFLUX作为国际通量观测研究网络(FLUXNET)的核心成员之一,填补了亚洲大陆通量观测研究的区域空白,为全球尺度的通量观测体系发展和科学数据积累做出了重要贡献,开拓了中国通量观测研究事业,促进了陆地生态系统与全球变化学科领域的快速发展。

ChinaFLUX针对陆地碳收支评估等科学问题,系统解决了生态系统碳通量观测技术和碳收支评估的系列关键技术难题,创建了服务陆地碳收支评估的生态系统碳通量联网观测与模型模拟系统,集成性成果“中国陆地碳收支评估的生态系统碳通量联网观测与模型模拟系统”获得2010年度国家科学技术进步二等奖。ChinaFLUX学者陆续发表的系列研究成果得到了国内外同行广泛关注,为揭示欧亚大陆季风区的陆地生态系统水、碳、氮通量时空变异和过程机理、生态系统与气候系统间的相互作用关系,以及全球气候变化陆面过程模式开发和陆地生态系统综合管理等研究提供了有价值的科学认知和数据支持。

为了推动ChinaFLUX发展及观测技术规范化的发展,ChinaFLUX研究群体在2006年出版了该研究领域的第一部学术专著《陆地生态系统通量观测的原理与方法》,系统总结了陆地生态系统通量观测的理论、方法和技术方面的研究成果,成为该研究领域科技工作者学习边界层气象学、生物气象学、生态系统通量观测的相关理论和技术的参考书。图书出版之后供不应求,几年前就已售罄。近年来,众多科研院所和高校学者以及高等教育出版社强烈建议我们再版。为了回应学界的期待,并及时反映该研究领域的最新进展,我们欣然地接受了高等教育出版社的邀请,组织撰写了《陆地生态系统通量观测的原理与方法》(第二版)。在对初版进行校阅和补充的基础上,第二版进一步将内容扩展到陆地生态系统的辐射、能量、水热、碳、氮及其他温室气体的通量综合观测。期望本书的再版能够进一步推动中国陆地生态系统通量观测研究事业的发展,为新阶段的多要素与多途径协同、多方法与多技术集成、跨区域的多尺度立体化观测以及多源数据整合分析提供理论指导和技术参考。

《陆地生态系统通量观测的原理与方法》(第二版)在初版的基础上增加了相关领域的新进展,同时增加了第11章(陆地生态系统不同界面碳氮水交换通量观测方法)和第14章(陆地生态系统碳-氮-水耦合循环及模拟模型)。本书的第一部分(第1~6章)系统介绍了陆地生态系统的物质与热量通量、近地边界层特征与空气运动基本方程、近地边界层湍流运动特征与扩散通量等近地边界层大气科学的基础理论。第二部分(第7~10章)重点讨论了基于空气动力学和热平衡的通量观测、涡度相关技术原理及通量观测、通量观测的数据分析、稳定同位素在通量观测中的应用等。第三部分(第11~17章)介绍了陆地生态系统水、碳和氮循环及通量评价模型与数据整合分析研究进展。

ChinaFLUX 自建立以来,已历经 15 个春秋。在这 15 载的雨露风霜、阴晴圆缺历程中,ChinaFLUX 克服各种困难坚强前行,在阳光雨露的滋养和狂风暴雨的洗礼下茁壮成长,不仅为全球尺度的通量观测体系发展做出了中国的贡献,而且奠定了中国通量观测事业发展的基础,开拓了陆地生态系统碳-氮-水耦合循环综合研究的前沿领域。在本书再版之际,思绪万千,多少往事历历在目,多少情感涌上心头。衷心地感谢为本书初版作序的原中国科学院副院长孙鸿烈院士、原中国科学院副院长和原国家自然科学基金委员会主任陈宜瑜院士、北京大学陈家宜教授,感谢他们在 ChinaFLUX 创建初期所给予的关怀、指导与支持;衷心地感谢原中国科学院资源与环境技术局陈泮勤、刘健和冯仁国三位副局长,他们领导和支持了 ChinaFLUX 的建设、运行和设备升级工作。

ChinaFLUX 自创建以来,承担了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-01,2001.08—2005.12)、知识创新工程重要方向项目“中国陆地生态系统碳氮通量特征及其环境控制作用研究”(KZCX2-YW-432,2007.01—2009.12)、战略性先导科技专项“生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”(XDA05050000,2011.01—2015.12)的观测研究任务。多年来,同时承担了国家 973 计划“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”(2002CB412500,2002.12—2007.08)和“中国陆地生态系统碳-氮-水通量的相互关系及其环境影响机制”(2010CB833500,2010.01—2014.08),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”(30590380,2006.01—2010.12)和“森林生态系统碳-氮-水耦合循环过程的生物调控机制”(31290220,2013.01—2017.12),以及国家自然科学基金委员会 A3 前瞻计划项目“CarbonEastAsia:基于通量观测网络的生态系统碳循环过程与模型综合研究”(30721140307、31061140359,2007.09—2012.07)和国际合作重点基金项目“北半球陆地生态系统碳循环及关键地表过程对气候变化的响应和适应”(31420103917,2015.01—2019.12)的科学研究工作。正是这些科学研究项目支持了 ChinaFLUX 的健康发展和开拓前行。由衷地感谢国家自然科学基金委员会生命科学部、科技部基础研究司以及原中国科学院资源与环境技术局对 ChinaFLUX 给予的资助和支持。

更让我难以忘怀的是已故的美国 Bertrand D. Tanner 和澳大利亚 Ray Leuning 在 ChinaFLUX 观测系统设计、数据分析理论和技术研究、观测队伍技术培训等方面的合作与帮助,以及日本通量观测研究网络(JapanFlux)的 Susumu Yamamoto、Akira Miyata、Saigusa Nobuko、Takashi Hirano 等和韩国通量网(Ko-Flux)的 Joon Kim 等亚洲通量网(AsiaFlux)的同仁对 ChinaFLUX 的指导及在 A3 前瞻计划执行期间的真诚合作。

十分留恋以 ChinaFLUX 为工作平台执行中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“人类活动与生态系统变化”(CXTD-Z2005-1,2005.09—2008.08)与海外华人学者精诚合作的那段时光,怀念那个时期的年轻人所展现出的“胸怀天下、指点江山”的爱国激情,怀念那种“踌躇满志、数历史风流、谈今朝新星”的开放心态,怀念那种“勇于开拓、甘当大任、只争朝夕”的工作热情。令人欣慰的是,当年的这批海外华人学者(加拿大多伦多大学的陈镜明和魁北克大学的彭长辉,美国耶鲁大学的李旭辉、马里兰大学的梁顺林、俄克拉荷马大学的骆亦其和肖向明、密歇根州立大学的齐家国,以及英国伦敦大学的孙来祥)都已经成长为国际知名教授,也都以国家“千人计划”学者身份活跃在祖国的多所大学,持续地为中国科技发展做出新贡献。

本书的合作者孙晓敏研究员以及初版作者群体既是 ChinaFLUX 的建设者,也是中国陆地生态系统通量观测研究领域的开拓者。他们中的很多人伴随着 ChinaFLUX 的发展已经成长为陆地生态系统通量观测研究领域的专家。在第二版撰写过程中,我们又吸收了几位青年学者加盟,他们是近年来开始步入该研究领域的青年骨干,我相信他们必将成为继承和发展 ChinaFLUX 事业的有生力量。特此对本书初版和再版合作群体的精诚合作和智慧奉献表示衷心的感谢。

在本书完成之际,回忆并追记这些往事以为纪念。由于作者水平有限,书中难免会存在不足之处或者错误,敬请各位读者不吝指出。

于贵瑞

2017 年 5 月于北京大屯

初版序一

全球变化及其带来的生态环境问题是人类社会可持续发展所面临的重大挑战。生态系统作为生物圈的基本单元,为人类社会提供了食物、纤维、能量、自然资源以及生存环境等形式的服务,维持着社会经济系统的可持续发展。全球变化是来自各种尺度、不同类型生态系统变化的累计效应和交互影响的总体反应,所以生态系统的结构与功能、格局与过程研究是全球变化科学发展的基础。陆地生态系统的水和碳循环过程机理、变化趋势以及调控管理的综合研究,是探讨调控全球变暖进程、缓解淡水资源短缺、维持世界经济发展的需要,可是现今关于全球变化和人类活动影响下的生态系统水和碳循环变化特征、过程机理及其与全球气候变化的相互作用关系中的许多问题还没获得科学上共识的答案。

生态系统的联网观测研究是认识生态系统变化规律、揭示生态系统对全球气候变化的响应与适应性的重要途径。开展生态系统 CO_2 和水热通量的联网观测,对认知和预测全球气候变化趋势、评价生态系统的碳固定和水源涵养功能等都具有重要的科学意义。中国区域的陆地生态系统因其多样性和地理区位的特殊性,为开展全球尺度的生态系统 CO_2 和水热通量联网观测、生态系统水和碳循环机制研究提供了得天独厚的天然实验室。但长期以来,我国在国际通量观测研究网络 (FLUXNET) 中一直属于空白区域,使得我国独特的区位优势未能得到充分发挥。令我高兴的是,2002 年开始在中国生态系统研究网络 (CERN) 基础上所建立的中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 得到了健康发展,并取得了国内外关注的观测研究成就。ChinaFLUX 与 CERN 的有机结合,为我国开展陆地生态系统水和碳循环、生态系统与全球变化的综合研究提供了具有国际水平的野外研究平台和多学科交叉的合作基地。ChinaFLUX 的建立和发展,是对 CERN 的联网观测和综合研究能力的一次重大提升,使得 CERN 参与国际大型科学观测计划、开展陆地生态系统生物地球化学循环研究的综合能力得到了极大提高。同时,ChinaFLUX 作为 FLUXNET 的重要成员,它的研究工作也是我国科技界对国际通量观测研究领域学科发展的重要贡献。

ChinaFLUX 建立以来,获取了大量的系统性和连续性完好的原始科学数据,在生态系统通量观测的理论和方法、我国主要类型生态系统 CO_2 、 H_2O 和热量通量特征与过程机理研究等方面都取得了重要进展。这里出版的《陆地生态系统通量观测的原理与方法》是 ChinaFLUX 研究群体在生态系统通量观测的理论、方法和技术方面研究成果的集中总结,是我国在该研究领域的第一部学术专著。该专著比较全面地论述了近地边界层大气科学的基本理论,重点讨论了生态系统 CO_2 、 H_2O 和热量通量观测的原理及其应用技术。我相信该专著的出版,对推动我国陆地生态系统水和碳循环研究,以及生态系统与全球变化科学的发展将会做出重要的贡献。

中国科学院院士



2005 年 11 月

初版序二

全球气候变暖和淡水资源短缺是世界经济可持续发展所面临的两大重要环境问题。陆地生态系统的水循环和碳循环是陆地表层系统物质能量循环的核心,是地圈-生物圈-大气圈间相互作用关系的纽带。陆地生态系统的水循环和碳循环过程机理、变化趋势及其调控管理的综合研究,是人类调节地圈-生物圈-大气圈的相互作用关系,维持全球生态系统的物质与能量循环、自然资源再循环的科学基础,已经成为全球变化科学和生态系统生态研究的热点和核心科学问题。为此,有关国际组织提出了生态系统水循环和碳循环方面的一系列国际合作研究计划(IGBP、IHDP和WCRP等),欧洲、美国和日本也率先开展了陆地生态系统 CO_2 、水蒸气、热量通量的长期观测研究,成立了国际通量观测研究网络(FLUXNET)。

建立FLUXNET的主要目的是获取全球陆地生态系统水循环和碳循环的实际观测数据。这不仅是全球变化科学发展的迫切需要,也是各国社会经济发展和生态环境建设的需求,是服务于《联合国全球气候变化框架公约》和《京都议定书》的重要科学研究行动。中国在该领域的工作虽然起步较晚,但是起点高、发展迅速。2002年,中国科学院知识创新工程启动了重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”;2003年,国家科技部“973计划”又启动了“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”。在这两个项目的共同支持下,2002年开始创建的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX),取得了令人振奋的科学研究进展,带动了在中国区域内陆地生态系统通量观测事业的迅速发展。据不完全统计,现阶段国内已有50余个不同类型的观测站在开展陆地生态系统通量的观测与研究,为联合开展国家尺度的生态系统水循环、碳循环以及生态系统与全球变化的相互作用关系的集成性综合研究奠定了良好基础。

ChinaFLUX已经成为FLUXNET的重要成员,填补了FLUXNET在中国区域的空白,是开展全球通量观测研究的重要力量之一。ChinaFLUX系列研究成果的陆续发表,已经得到了国内外同行的广泛关注,为揭示欧亚大陆季风气候条件下的陆地生态系统水碳通量特征和机理、生态系统与气候系统间的相互作用关系、全球气候变化的陆面过程模式的开发,以及陆地生态系统水和碳过程的综合管理等研究工作提供了有价值的科学认知和数据支持。该书是国内首部关于陆地生态系统通量观测的原理与方法的系统性学术专著,也是ChinaFLUX在通量观测理论和方法研究方面所获得的重要成果之一。该书的出版对推动我国生态系统水循环和碳循环研究,以及生态系统与全球变化科学的发展具有重要意义。该书是作者基于3年来的理论研究和实践经验撰写而成的,是一部基础性的、理论与实践紧密结合的学术著作,对从事全球变化、陆地生态系统碳循环和水循环研究领域的科技人员具有理论和实践方面的指导作用,也是一部相关领域研究生教育的基础教材。

该书的作者是中国生态系统研究网络综合研究中心ChinaFLUX研究小组的青年学者群体,他们既是ChinaFLUX的建设者,也是中国陆地生态系统通量观测与研究领域的开拓者,我十分欣慰地看到了他们的成长过程,也十分欣赏他们那种刻苦努力、勇于探索的科学精神,希望他们能够百尺竿头,更进一步,积极推动中国陆地生态系统通量观测研究事业的发展。

国家自然科学基金委员会主任
中国科学院院士



2005年12月

初版序三

陆地生态系统的水循环与碳循环是陆地表层系统物质能量循环的核心,而陆地生态系统 CO_2 、水蒸气、热量通量是地圈-生物圈-大气圈的物质能量交换的主要形式。20 世纪 90 年代开始,欧洲、美国和日本已开展生态系统通量的长期观测研究,并联合成立了国际通量观测研究网络(FLUXNET),开始获取全球陆地生态系统 CO_2 、水蒸气、热量通量,以及陆地生态系统水循环和碳循环的实际观测数据。这一大型国际观测计划的实施为推动大气边界层科学、全球气候变化科学的发展做出了重要贡献。

2002 年开始创建的中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX),填补了 FLUXNET 在中国区域的空白,取得了一系列重要科学研究进展,已经成为 FLUXNET 的重要成员和重要研究力量。ChinaFLUX 的研究工作为揭示欧亚大陆季风气候区陆地生态系统水、碳通量特征和控制机理,近地边界层的物质和能量传输,全球气候变化陆面过程模式的参数化方案以及陆地生态系统碳汇和水源涵养功能的评价等研究工作提供了有价值的科学认知和数据支持。

该书是国内首部关于陆地生态系统通量观测的原理与方法的学术专著,除大气科学与陆地生态系统的基本原理和知识外,还讨论了陆地生态系统的物质与热量通量,对近地边界层特征与空气运动基本方程、近地边界层湍流运动特征与扩散通量等近地边界层大气科学的基础理论问题进行了系统论述,与此同时,重点阐述了基于空气动力学和热平衡的通量观测、涡度相关技术原理及通量观测、通量观测的数据分析、稳定同位素在通量观测中的应用等技术问题,还较全面地总结了陆地生态系统的碳循环和水循环及碳和水通量评价模型的研究进展。在该书的编写过程中,作者注意了理论与实践的结合,基础知识与专业技术问题的结合,做到了深入浅出。该书引用了 ChinaFLUX 大量的最新研究成果,是一部关于大气边界层科学、陆地表层通量观测原理与技术的优秀专著,可以作为从事全球变化、边界层大气科学、生态系统碳循环和水循环研究领域的科技人员的参考书,也可以作为相关领域研究生教育的基础教材。

该书的作者是 ChinaFLUX 研究群体的青年学者,他们刻苦努力、勇于开拓的科学精神,是 ChinaFLUX 健康运行和该书得以出版的基础。相信他们一定能够加倍努力,积极推动中国陆地生态系统通量观测与研究事业的发展,为相关领域的科学发展做出更大贡献。

北京大学教授

陈宗宜

2005 年 12 月

初版前言

人类活动所引起的超越自然变率的全球变化(global change)主要表现为全球大气温室气体浓度增加与全球气候变暖、臭氧层破坏和紫外辐射增加、大气污染与酸雨、内陆水体和海洋污染、污染物质和有害废弃物的越境迁移、生态系统退化和土地荒漠化、森林功能与资源量减少、野生物种的减少和生物多样性丧失等方面。全球变化导致了一系列全球规模的环境问题,是对全球社会经济可持续发展的严峻挑战。以全球变暖为主要特征的气候变化已经成为国际公认的事实,是全球变化科学领域的核心问题。20世纪后期,大气中二氧化碳(CO_2)、臭氧(O_3)、甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)和含氯氟烃(CFCs)等温室气体浓度的增加得到了科学观测的确认,科学界已经公认工业革命以来的化石燃料燃烧、水泥生产以及土地利用变化等人类活动的影响是导致全球变暖的直接原因。全球变暖所引起的一系列环境问题不仅会直接影响人类社会的食物生产和人类健康,同时还会改变地球系统的辐射平衡、水资源和水循环、大气环流和自然灾害系统,引起陆地生物圈的生物多样性、生物与生态系统格局、陆地表面过程等方面的一系列变化。

全球气候变暖和淡水资源短缺是世界经济可持续发展所面临的两大环境问题。陆地生态系统的水循环和碳循环是陆地表层系统物质能量循环的核心,是地圈-生物圈-大气圈的相互作用关系的纽带,也是两个耦合的基本生态学过程。陆地生态系统的水循环和碳循环过程机理、变化趋势以及调控管理的综合研究,不仅是探讨人类干预与调节全球变暖进程、缓解淡水资源短缺、维持世界经济可持续发展的战略需求,也是人类调节地圈-生物圈-大气圈的相互作用关系,维持全球生态系统的物质与能量循环、自然资源再循环的生态学途径。尽管科学界对陆地生态系统水循环和碳循环进行过长期的研究工作,取得了许多重要的科学进展。但是,关于全球变化背景下的陆地生态系统的水循环和碳循环的很多科学问题还未得到明晰的解答。为此,有关国际组织提出了生态系统水循环和碳循环方面的一系列国际合作研究计划(IGBP、IHDP和WCRP等),欧洲、美国和日本也率先开展了陆地生态系统 CO_2 、水蒸气、热量通量的长期观测研究,成立了国际通量观测研究网络(FLUXNET)。建立FLUXNET的主要目的是获取全球陆地生态系统水循环和碳循环的实际观测数据,这不仅是全球变化科学发展的迫切需要,也是各国社会经济发展和生态环境建设的重大需求。

中国陆地生态系统的多样性、地形的复杂性以及地理区位的特殊性为生态系统碳循环研究提供了得天独厚的天然实验室。可是长期以来,我国属于世界的 CO_2 和水热通量长期观测网络的空白区域。2000年以前,我国在生态系统碳循环通量和储量的观测研究方面做过一些工作,也开展了少数的应用微气象法对农田生态系统 CO_2 和水热通量的观测研究,而对草原和森林生态系统的研究却十分少见。尽管早期的研究工作十分零散,但是也有相当程度的知识积累,尤其是通过十多年的建设,中国生态系统研究网络(CERN)已经为中国的碳循环、碳储量和通量观测系统的建立奠定了良好的基础。2002年,中国科学院知识创新工程启动了重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”(Study on Carbon Budget in Terrestrial and Marginal Sea Ecosystems of China, CBTSEC, KZCX1-SW-01);2003年,国家科技部“973计划”又启动了“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”(Carbon Cycle and Driving Mechanisms in Chinese Terrestrial Ecosystem, CCDM-CTE, 2002CB412500)。这两个项目的启动全面推动了中国陆地生态系统的 CO_2 和水热通量的观测研究,并共同支持创建了中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)。它标志着中国陆地生态系统 CO_2 和水热通量的研究进入了国家尺度综合研究的新阶段,为中国陆地生态系统碳循环、全球变化与生态系统变化科学的综合研究提供了良好的实验研究平台和多学科合作基地。

自2002年ChinaFLUX建立以来,为了培养国内的通量观测与研究人才,ChinaFLUX办公室多次邀请国内外的专家,围绕近地边界层大气科学基础理论与陆地生态系统通量观测的原理与方法,以及通量观测研究

中的科学问题,举办了多次讲座和培训班。2003年12月,在北京组织召开了亚洲通量观测与研究国际研讨会(International Workshop on Flux Observation and Research in Asia)。目前,许多大学和研究机构也正在积极参与或制订通量观测研究计划,国内陆地生态系统通量观测研究事业得到了极大的发展,大量的硕士、博士研究生和一批青年学者投入了该研究领域之中,急需一部比较系统的参考教材,来指导和促进我国在该领域的学术发展和实践工作。为此,笔者们将近年来的学习和工作体会撰写成本书,其目的是为从事全球变化、陆地生态系统碳循环和水循环以及地圈-生物圈-大气圈的相互作用研究领域的科技人员提供野外观测、数据分析、水-碳过程的解析、数学模型构建等方面的基础知识,为相关领域的科研工作者提供实验观测的技术指导,为相关领域的研究生教育提供基础教材。

本书以近地边界层大气科学基本理论为基础,系统地论述了陆地生态系统通量观测的原理与方法,共由15章构成,为了方便读者的查阅,提供进一步的学习参考资料,在各章中提供了参考文献目录,最后还附录了SI单位换算表和重要术语检索表。

本书的第1章至第6章在论述全球变化与陆地生态系统水/碳循环的关系和国际科学研究动向的基础上,系统地介绍了陆地生态系统的物质与热量通量、地球大气圈的垂直构造与大气成分、大气圈的辐射传输与地表辐射平衡、近地边界层特征与空气运动基本方程、近地边界层湍流运动特征与扩散通量等近地边界层大气科学的基础理论。第7章至第10章重点阐述基于空气动力学和热平衡的通量观测,涡度相关技术原理及通量观测、涡度相关技术的若干理论问题、稳定同位素技术在通量观测中的应用,还简要地介绍了不同类型陆地生态系统通量观测的实例。第11章至第12章讨论了陆地生态系统的碳循环与碳通量评价模型,陆地生态系统水的特性与水热通量评价模型。第13章至第15章分别介绍和评述了全球陆地生态系统的通量观测及实例,全球陆地大气边界层观测实验/生态系统通量观测网络与相关计划,讨论了中国通量观测研究网络的建设与发展问题。

在本书撰写过程中,主要参考了日本大阪府立大学文字信贵教授所著的《森林における温室効果ガスフラックス測定手法に関する提言》和《植物と微気象》,AsiaFlux运营委员会主编的《陸域生態系における二酸化炭素等のフラックス観測の実態》、美国耶鲁大学李旭辉教授编著的 *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*,以及国内外一些关于边界层大气科学方面的著作,特向这些著作的作者表示谢意。在本书撰写过程中,还参考了北京大学陈家宜教授、中国科学院大气物理研究所胡非研究员、周乐义研究员,以及美国耶鲁大学李旭辉教授等在通量观测培训班上的部分授课内容,同时他们还对本书的撰写工作给予了热情的支持和指导,特此致谢。十分感谢中国科学院资源与环境技术局、中国科学院地理科学与资源研究所的各位领导对本书撰写工作的支持,感谢陈泮勤研究员、刘纪远研究员和黄耀研究员的帮助和指导。特别感谢原中国科学院副院长孙鸿烈院士,原中国科学院副院长、国家自然科学基金委员会主任陈宜瑜院士,以及北京大学陈家宜教授对本书出版的支持,并在百忙之中为本书作序。另外,也十分感谢美国 Campbell Scientific 公司及其在中国的代理天正通公司在 ChinaFLUX 建立与运行过程中的技术支持和良好的服务。

本书的作者群体主要由近年来中国生态系统研究网络综合研究中心ChinaFLUX研究小组的博士研究生或博士后构成,他们同时又是ChinaFLUX的建设者,在本书出版之际为他们的快速成长感到欣慰,也对他们为ChinaFLUX的建设、运行和发展所做出的贡献表示感谢。本书的合作者孙晓敏研究员是国内早期开展通量观测技术研究的学者之一,是ChinaFLUX的主要负责人,近4年来愉快的合作和友谊是ChinaFLUX成功运行的基础,谨在本书出版之际特向他多年来所付出的努力和奉献表示谢意。

本书涉及的学科面广、问题复杂,国内的观测研究工作才刚刚起步,本书的撰写工作又是首次尝试,加上作者的水平有限,经验不足,所以错误和缺点在所难免,欢迎读者不吝批评指正。

于贵瑞

2005年10月

目 录

第 1 章 全球变化与陆地生态系统碳、氮和水

循环	1
1.1 引言	2
1.2 全球气候变化与生态系统	2
1.2.1 全球变化及其成因	2
1.2.2 全球气候变暖的基本事实	3
1.2.3 全球变暖的成因	4
1.2.4 全球变化对生物圈结构和功能的影响	4
1.2.5 应对全球变化的适应性管理对策	4
1.3 全球变化与陆地生态系统碳、氮和水循环研究	6
1.3.1 陆地生态系统碳循环及其对全球变化的响应与反馈	6
1.3.2 陆地生态系统水循环及其对全球变化的响应与反馈	7
1.3.3 陆地生态系统氮循环及其对全球变化的响应与反馈	10
1.4 全球变化与陆地生态系统碳-氮-水耦合循环研究	12
1.4.1 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环研究的理论和实践意义	12
1.4.2 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环研究的基本科学问题	14
1.4.3 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环机制的逻辑框架	17
参考文献	20

第 2 章 陆地生态系统能量和物质的交换

通量	25
2.1 生态系统的能量传输与物质循环	26
2.1.1 陆地生态系统的概念与分布格局	26
2.1.2 陆地生态系统的能量传输和转化	28
2.1.3 陆地生态系统的物质循环	30
2.2 生态系统物质与能量通量的基本概念	38

2.2.1 动量通量	38
2.2.2 辐射通量	38
2.2.3 显热和潜热通量	38
2.2.4 物质通量	39
2.2.5 H_2O 通量	39
2.2.6 CO_2 通量	40
2.3 生态系统生产力与碳通量	40
2.3.1 总初级生产力(GPP)	41
2.3.2 净初级生产力(NPP)	41
2.3.3 净生态系统生产力(NEP)	42
2.3.4 净生物群系生产力(NBP)	42
2.3.5 净生态系统碳交换量(NEE)	42
2.4 生态系统碳通量的生态学测定方法	45
2.4.1 基于生物量变化的估算法	45
2.4.2 基于碳平衡方程的估算法	47
2.4.3 基于碳循环模型的估算法	48
2.4.4 同化箱测定法	49
2.5 生态系统水、碳与能量通量的微气象学测定法	50
2.5.1 H_2O 和 CO_2 通量微气象学方法概论	50
2.5.2 涡度相关法的特点及其应用	50
2.5.3 拓宽湍流累积法	51
参考文献	51

第 3 章 地球大气圈的垂直构造与大气成分

3.1 地球的气候系统	56
3.1.1 大气圈	56
3.1.2 生物圈	58
3.1.3 岩石圈与土壤圈	59
3.1.4 水圈与冰雪圈	60
3.2 大气圈的垂直构造	60
3.2.1 地球大气圈的垂直分层现象	60
3.2.2 对流层	61
3.2.3 平流层	63
3.2.4 中间层	64
3.2.5 热层	64
3.2.6 散逸层	64
3.3 地球大气成分及其进化	65

3.3.1 地球大气圈的成分	65	4.5.2 辐射吸收的温室效应	98
3.3.2 行星和第一次原始大气	65	4.5.3 辐射冷却效应	99
3.3.3 第二次原始大气的生成与进化	66	4.6 陆地表面的辐射平衡	101
3.3.4 地球大气中氧的生成与进化	68	4.6.1 地表的太阳辐射平衡	101
3.4 大气层臭氧的生成与分解	68	4.6.2 地表接受的光合有效辐射	106
3.4.1 大气的臭氧与臭氧层	68	4.6.3 地表的长波辐射平衡	107
3.4.2 大气中臭氧生成与分解的化学 过程	70	4.6.4 地表的辐射能量平衡	109
3.4.3 环境污染对大气臭氧层的影响	70	4.7 植物群落对地表辐射平衡的影响	111
3.5 大气中的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的浓度 变化	71	4.7.1 植物叶片的光反射率、透射率与 吸收率	111
3.5.1 二氧化碳	71	4.7.2 植物群落的光反射率、透射率与 吸收率	112
3.5.2 甲烷	74	4.7.3 植被指数、叶面积指数与植被光合 作用的关系	113
3.5.3 氧化亚氮	74	4.8 全球的能量平衡	116
3.6 大气圈的气象要素	75	4.8.1 地面的热量平衡	116
3.6.1 空气温度	75	4.8.2 全球的热量平衡模式	116
3.6.2 空气压力	75	参考文献	118
3.6.3 空气湿度	75		
3.6.4 风速与风向	76		
3.6.5 能见度、云与降水	76		
参考文献	77		
第4章 大气圈的辐射传输与地表辐射平衡	79	第5章 近地边界层特征与空气运动基本 方程	119
4.1 辐射的基本概念与定义	80	5.1 大气边界层的概念及其特征	120
4.1.1 辐射的物理特性	80	5.1.1 大气边界层的概念	120
4.1.2 辐射与辐射能	82	5.1.2 大气边界层的构造特征	121
4.1.3 物体对辐射能的吸收、反射和 透射	83	5.1.3 近地边界层的动力学特征	122
4.1.4 物体的辐射源函数	83	5.2 边界层空气的状态方程	123
4.1.5 物体辐射的基本定律	84	5.2.1 理想气体的状态方程	123
4.2 太阳辐射和地球辐射	86	5.2.2 干空气的状态方程	124
4.2.1 太阳辐射和地球辐射的特征	86	5.2.3 湿空气的状态方程	124
4.2.2 太阳辐射在大气上界的分布	87	5.3 边界层空气的运动方程	125
4.2.3 太阳辐射在大气中的衰减	90	5.3.1 连续方程(质量守恒方程)	126
4.3 大气圈的辐射平衡	92	5.3.2 动量守恒方程	128
4.3.1 大气圈的辐射平衡概述	92	5.3.3 能量守恒方程	130
4.3.2 辐射平衡与时间常数	93	5.4 标量、热量与水汽的守恒方程	132
4.4 大气中辐射传输的基本法则	93	5.4.1 标量守恒方程	132
4.4.1 比尔-布格-兰伯特法则	95	5.4.2 热量守恒方程	132
4.4.2 施瓦西方程和灰色大气的 辐射传输方程	95	5.4.3 水汽守恒方程	133
4.4.3 辐射平衡解	95	5.5 空气动力学方程的简化、近似和 尺度理论	133
4.5 辐射传输对气温度的影响	96	5.5.1 状态方程	133
4.5.1 大气层的辐射平衡温度与气温 分布	96	5.5.2 连续方程(质量守恒方程)	134
		5.5.3 平均运动方程——雷诺方程 (动量守恒, 牛顿第二定律)	134
		参考文献	135
		附录 矢量分析、张量简介	136

第6章 近地边界层湍流运动特征与扩散

通量	139
6.1 边界层的湍流现象及其作用	140
6.1.1 湍流现象	140
6.1.2 湍流的作用	141
6.1.3 湍流的发生、发展和维持	141
6.2 湍流物理量的定量描述	143
6.2.1 湍流描述的基本思想	143
6.2.2 湍流谱	144
6.2.3 湍流输送与涡度相关	146
6.3 边界层湍流研究的理论基础	147
6.3.1 π 定理与莫宁-奥布霍夫相似理论	148
6.3.2 湍流的半经验理论	150
6.3.3 基于 K 理论的扩散通量	152
6.4 湍流动能和稳定度	153
6.4.1 湍流动能收支方程	153
6.4.2 稳定度的概念	156
6.4.3 理查孙数	157
6.4.4 综合稳定度表	158
6.5 植被冠层对近地边界层湍流的影响	158
6.5.1 风速垂直分布的对数法则	158
6.5.2 空气动力学粗糙度	159
6.5.3 植被冠层对风速分布的影响	160
6.5.4 植被冠层内的风速分布	162
6.5.5 植被冠层对温度、湿度和 CO_2 浓度垂直分布的影响	163
参考文献	164

第7章 基于空气动力学和热平衡的通量

观测	165
7.1 湍流运动的物质和热量输送	167
7.1.1 物质和热量输送过程	167
7.1.2 物质和热量输送通量	168
7.2 梯度法的原理及其应用	169
7.2.1 梯度法的基本原理	169
7.2.2 莫宁-奥布霍夫相似理论在梯度法中的应用	172
7.2.3 梯度法的通量计算	174
7.2.4 梯度法的局限性及其改良	175
7.2.5 梯度法通量观测仪器的设置、检验及结果修正	177
7.3 整体法的原理及其应用	177
7.3.1 整体法测定原理	177
7.3.2 整体法测定通量的方法及注意事项	178

7.4 热量平衡法的原理及其应用	179
7.4.1 热量平衡方程	179
7.4.2 波文比法(BREB)	180
7.4.3 彭曼法	181
7.5 拓宽湍涡累积法的原理及其应用	182
7.5.1 拓宽湍涡累积法的原理	182
7.5.2 拓宽湍涡累积法测定通量的传感器和采样器	183
7.5.3 实验常数的确定	184
参考文献	186

第8章 涡度相关技术的原理及通量观测

8.1 涡度相关通量观测的基本原理	188
8.1.1 涡度相关技术的发展过程	188
8.1.2 生态系统 CO_2 通量的概念	190
8.1.3 通量观测的基本假设	192
8.1.4 物质守恒方程及影响 CO_2 通量的各种效应	192
8.2 通量观测系统及其仪器配置	197
8.2.1 观测系统及其基本要求	197
8.2.2 大气要素观测系统	197
8.2.3 土壤要素观测系统	201
8.2.4 植物要素观测系统	201
8.2.5 观测场的选择与器材设置	202
8.3 湍流变化与涡度通量的测定及其关键设备	204
8.3.1 风速脉动测定	204
8.3.2 CO_2 和水汽浓度与脉动测定	205
8.3.3 CH_4 浓度与脉动测定	208
8.3.4 其他痕量气体浓度与脉动测定	209
8.3.5 温度脉动测定	210
8.3.6 湿度脉动测定	211
8.3.7 通量测定的开路与闭路系统	211
8.4 通量数据的采集、计算与校正	214
8.4.1 数据采集装置与方法	214
8.4.2 数据处理、结果计算和校正的一般流程	215
8.4.3 通量计算要求的采样频率与平均长度	217
8.4.4 数据趋势去除运算	217
8.4.5 坐标轴旋转	219
8.4.6 WPL 校正	224
8.4.7 频率响应校正	224
8.5 通量数据质量的分析与评价	225
8.5.1 原始数据分析	225
8.5.2 大气湍流谱分析	226