

Process-Based Modeling on the Response and Adaptation of
Chinese Terrestrial Ecosystems to Global Change

中国陆地生态系统过程及 对全球变化响应与适应 的模拟研究

李克让 黄 玫 陶 波 等著



气象出版社
China Meteorological Press

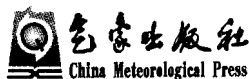
国家重点基础研究发展计划(973 计划项目)《中国陆地生态系统
碳循环及其驱动机制研究》(2002CB412500)

资助

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)

中国陆地生态系统过程及对 全球变化响应与适应的模拟研究

李克让 黄 玫 陶 波 等著



内容简介

本书共十三章:前五章为陆地生态系统模型与方法及其未来的可能发展,后八章是对中国陆地生态系统碳通量、碳贮量等的模拟结果。全书介绍了陆地生态系统的机理模型及其对全球变化响应和适应模拟的最新成果;从经验模型(森林生长收获模型)、遥感模型(光能利用率模型)到过程模型;从模型的改进、发展到模型的分析、应用;从观测数据、参数反演到模型验证;从自然生态系统到人工生态系统(农田和人工林),内容丰富,是作者多年研究积累的结晶。该书的大部分内容 and 结论都是作者的原创性成果,为我国未来在生态系统模拟和全球变化领域的研究打下了良好的基础。

本书可供从事全球环境和气候变化研究、生态环境保护以及从事林业和农业研究的科技工作者和有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究/李克让等著.

北京:气象出版社,2009.5

ISBN 978-7-5029-4434-6

I. 中… II. 李… III. 陆地—生态系统—研究—中国 IV. P942

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055192 号

Zhongguo Ludi Shengtai Xitong Guocheng ji dui Quanjie Bianhua Xiangying yu Shiying de Moni Yanjiu

中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究

李克让 黄 玫 陶 波 等著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

策划编辑:李太宇

责任编辑:王萃萃 隋珂珂

封面设计:王伟

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:576 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版

印 数:1~2500 册

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:纪乃晋

责任技编:吴庭芳

印 张:22.5

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

定 价:68.00 元

中国陆地生态系统过程及对 全球变化响应与适应的模拟研究

著作委员会

主 任	李克让		
副 主 任	黄 玫	陶 波	
学术指导	季劲钧	徐 明	刘纪远
委 员	(以汉语拼音为序)		
	高 荣	顾峰雪	季劲钧
	刘纪远	刘允芬	骆亦其
	王军邦	徐 明	徐新良
	闫慧敏	於 琬	于贵瑞
	张 黎		

序

陆地生态系统是地球生命系统的主要载体,它不仅是人类的家园,也是地球上大多数物种赖以生存的栖息地。陆地生态系统具有强大的服务功能,它保存着目前地球上绝大部分的生物量(约 99.8%),不仅为人类和其他生命提供食物和生存环境,同时也为维持地球大气成分的稳定(如氧气生产和有害气体的吸收)和水分及养分循环发挥重要作用。随着全球人口的增加,人类活动对地球生态系统尤其是陆地生态系统产生了巨大影响。特别是近几十年来,随着人类对化石能源需求的急剧增加,由于人类活动而释放到大气中的各种温室气体(如 CO_2 、 CH_4 和 N_2O)已经明显地改变了大气化学成分,使地球的气候系统、生态系统和其他圈层都发生了深刻变化。虽然这种影响和变化还不至于使地球生命系统崩溃,但已不可避免地对地球生态系统的各种服务功能产生了显著影响(甚至某些功能会因此而丧失)。从目前已有的研究结果看,这些影响以负面为主,从而危及人类的福祉和其他生物的繁衍生息。由于和人类活动的关系比较密切,这种变化在陆地生态系统中表现得更为明显。目前已经观察到的变化包括气候系统、大气成分和地表覆被的变化,也包括冰川融化和海平面上升等。这些变化都会影响到陆地生态系统的结构和功能(如植被带迁移、物种组成和物候期的改变以及水循环、养分循环和生产力的改变等)。同时,生态系统和气候系统也是相互紧密联系的,生态系统的变化反过来又会影响到(加强或减弱)气候变化,形成正(负)反馈,这些都使得相关的科学问题变得更为复杂和更具不确定性。

从另一个角度来看,生态系统和人类社会经济系统对气候和大气成分变化的响应并不完全是被动的,它们可以通过调节自身的结构和功能来削弱全球变化带来的负面影响,甚至还可以从全球变化所带来的正面影响中获益,这就是所谓的适应。生态系统对气候变化的响应和适应表现在不同的时间和空间尺度上,而且也随生态系统类型和生态过程而异,短至几秒(如气孔的开关)而长至几百甚至上万年(如植被带谱的移动和新物种的产生)。气候系统本身的非线性特征及其与生态系统和社会经济系统之间复杂的相互作用和反馈机制决定了气候变化研究的复杂性和艰巨性。随着全球人口和对化石燃料需求的继续增加,加上温室气体在大气中的滞留期较长,在未来几十年中,大气温室气体浓度将进一步升高,变暖趋势仍不可逆转。如何适应未来暖化的气候是人类社会经济系统和生态系统所面临的挑战。正因为如此,对气候变化的影响和适应性研究一直受到国际社会和科学界的广泛关注,我国从 20 世纪 80 年代就开展了相关研究,并已取得一些初步成果。

尽管国内外的研究已取得大量有价值的成果,但在各圈层相互作用机制、未来情景预测、综合系统评价、适应和对策研究等很多方面仍有很大的不确定性。如何在已有基础上,将气候变化影响研究提升到一个新的水平,减少相关研究中的不确定性,从而提出科学合理和切实可行的适应对策,最大限度地减少气候变化对人类可持续发展的不利影响,是当前各国科学家,也是我国科学家面临的一个巨大挑战。

全面认识全球变化背景下生态系统的响应与适应,必须从不同时空尺度去探寻二者之间的相互关系和反馈机制,尤其是区域和全球尺度的生态系统变化更是人们关心的焦点。限于目前的技术手段,实验观测尚难以满足人们对区域生态系统和气候变化关系研究的需要,遥感技术为区域气候变化研究提供了有力支撑,但难以揭示生态系统与气候变化的相互作用机理。因此,在进一步加强长期生态学观测网络建设的同时,模型模拟仍是研究区域和全球尺度生态系统结构与功能的主要手段之一。近年来,由于定量描述生态系统过程与全球变化之间相互作用的迫切需要,生态系统模型模拟已成为近 10 年来全球变化研究发展最快的领域之一,尤其对于区域生态系统研究来说,更具有其他方法难以比拟的优点。各种基于不同过程和机理的生态系统模型被建立起来,并被广泛应用于分析生态系统动态变化机制、定量描述生态系统结构和功能时空变化、评估生态系统对全球变化的响应。模型模拟已成为与控制试验和实际观测并重的生态系统研究方法。它在研究生态系统、环境变化和人类活动相互作用中起着不可替代的作用,并在过去 20 年取得了诸多重要成果。

随着各种试验数据的积累和地面观测网的迅速发展,生态系统模型正向耦合更多生理生态过程的方向发展。同时,许多国家和科学组织正致力于开发耦合气候系统、人类活动和生态系统过程的新一代机理模型。例如,目前大多数的生物地球化学循环模式并没有包括物理气候系统的反馈作用。气候变量被作为陆地生物圈模式的外强迫函数,它们并不受陆地生态系统变化的影响,从而增加了模拟结果的不确定性。同时,对大多数生态模型来说,尚没有和人类活动(如土地利用变化等)和社会经济活动有机地结合,其估算结果往往是在大量的假设和前提下做出的,在指导具体的社会实践和科学决策方面尚有一定困难。目前欧美等发达国家也正在规划未来全球变化领域的研究方向,大多数国家都把多因子试验和模型综合模拟作为未来的研究重点。近年来,我国在全球变化与生态系统过程模型模拟方面也做了很多工作,但由于起步较晚,目前大部分模型都是从国外引进和改进的,针对我国生态系统特点的成熟模型还不多见。因此,发展新一代的综合模型也应该成为我国未来全球变化领域的研究重点。

由李克让研究员作为著作委员会主任撰写的这部专著反映了目前我国在生态系统模拟和气候变化适应性领域的最新研究成果,是过去多年研究积累的结晶。该书内容丰富,从经验模型(森林生长收获模型)、遥感模型(光能利用率模型)到过程模型;从模型的改进、发展到模型的分析、应用;从观测数据、参数反演到模型验证;从自然生态系统到人工生态系统(农田和人工林)。该书的大部分内容和结论都是作者的原创性成果,为我国未来在生态系统模拟和全球变化领域的研究打下了良好的基础。

徐明 博士

中国科学院地理科学与资源研究所(“百人计划”研究员)
全球碳计划(Global Carbon Project)北京办公室主任

前 言

在刚刚完成两项国家攻关课题,寻求下一步的研究方向时,1998年7月的一天,我从《中国科学报》上见到一篇由曹明奎撰写的文章“陆地生态系统对气候变化的反馈控制”。该文的思路和学术观点非常超前,很有见地,十分可行,正是当代地球科学研究的前沿和热点问题。我读完文章后有一种急于见到作者的冲动。通过多种手段搜寻,不久终于了解到曹明奎正在美国 Virginia 大学从事陆地生态系统—气候变化相互作用的研究,我们很快取得联系并来往通信。1999年10月,我趁出访美国的机会专门拜访了曹明奎博士。在 Virginia 大学我参观了他们的实验室,进行了深入的学术交流,谈及可能的合作内容与途径,我们一见如故,相见恨晚。

回国后,恰逢中国科学院地理研究所与综合考察委员会两所整合组建为中国科学院地理科学与资源研究所,并决定启动中国科学院知识创新工程试点。在实施知识创新工程阶段提出加大吸引海内外优秀科学家的力度。同时,在知识创新全面推动阶段设立了研究所的主干研究计划“土地利用/土地覆被变化与陆地表层碳循环过程研究”。该计划内容恰好与曹明奎博士的研究方向和思路不谋而合。在刘纪远所长等所领导以及陆地表层研究室葛全胜主任的积极支持下,很快制定了与曹明奎的合作研究计划。2001年初,我再次赴美国访问了已调至 Maryland 大学地理系的曹明奎博士,并于同年8月和他正式签订了海外杰出人才客座研究员合作研究合同书;与此同时,又与中国科学院大气物理研究所的季劲钧研究员签订了杰出学者客座研究员合作研究合同书。他们的共同特点是分别拥有具有自主知识产权的陆地生态系统机理模型(CEVSA 和 AVIM),这两个模型都在全球尺度上经过应用和检验,并位居前列。

曹明奎和季劲钧两位研究员在中国科学院地理科学与资源研究所共同申请主持了研究所知识创新主干计划的前沿项目专题“中国陆地生态系统碳循环模式综合研究”。他们毫无保留地将各自的模式软件源程序提供给项目组,分别指导了陶波、黄玫的博士论文,手把手地指导他们学习并发展了两个模式。在担任所客座研究员的几年,他们为研究所培养青年科学家、完成知识创新工程研究项目、协助出版专著、发表高水平的学术论文做出了重大贡献。

曹明奎博士在陆地生态系统对全球变化响应的定量模拟方面做出了开拓性的突出贡献,是该领域国际公认的著名学者之一。他创建和发展的用于生态系统碳循环的机理模型,突破了过去的气候—生态系统平衡静态模拟方法,并与卫星遥感观测相结合,定量研究全球变化背景下的陆地生态系统生产力和碳循环动态变化,为认识生态系统与气候变化相互作用提供了新的方法和数据,取得了国内外同行公认的创新成果。1998年他和 Woodward 发表在《Nature》上的论文被认为是大尺度碳循环机理模型成熟应用的标志,改进了政府间气候变化专门委员会(IPCC)以往对全球碳循环变化情景的估计。截至2009年4月,该论文被引用的次数高达193次,他引次数177次,是全球碳循环研究引用次数最高的论文之一。他首次提出了气候驱动的陆地碳吸收或释放的定量估算方法,为分析气候变化综合作用提供了崭新的思

路,取得了公认的突破性进展。自1993年以来,他以第一作者署名发表SCI论文14篇,引用期刊种类在60种以上,他人引用次数超过313次。曹明奎博士先后以“综合应用模型模拟、通量观测和卫星遥感方法研究陆地生态系统碳循环的时空变化”及“生态系统对气候变化适应性机理分析和定量表达:新一代生态系统模型的建立和应用”为题成功获得中国科学院百人计划和国家杰出青年科学家科学基金的支持。2005年,他作为首席科学家,组建了中国科学院创新团队,实施了团队国际合作伙伴计划“人类活动变化与生态系统变化”。

在此期间,在生态网络研究中心领导于贵瑞、孙晓敏等的大力支持下,组建了由曹明奎博士领衔、季劲钧和李克让研究员为学术指导、以陶波和黄玫副研究员、博士后、博士生等十多位青年科学家为主体的研究团队。该研究组是一支老中青结合、结构合理、具有开拓创新精神、团结向上、朝气蓬勃的研究队伍,研究方向以生态系统过程模型研究为核心,涉及全球变化与陆地生态系统过程机理研究的诸多领域。短短的几年时间,这个团队将CEVSA和AVIM模型作了重大改进,将其应用到许多领域,完成了许多有分量的研究项目和课题,其中包括由刘纪远研究员主持的国家重点基础研究发展规划项目(973)“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”等,获得了一批创新成果。自该研究组成立以来,已在国内外著名刊物上发表了数十篇高水平的学术论文,2004年与北京大学生态学系方精云院士合作,“中国陆地生态系统生产力和碳循环的研究”项目获2004年国家自然科学二等奖(李克让和曹明奎分列二、三名),季劲钧研究员也于同年获国家自然科学二等奖。多年来,曹明奎博士废寝忘食、夜以继日,将全部时间和精力都投入到他所从事的生态学研究工作中。

不幸的是,正当这个团队团结奋战,蒸蒸日上的时候,曹明奎研究员的身体终于支撑不住了,他不得不住进了医院,但已是癌症晚期,不到20天就与我们永别了。曹明奎博士的不幸辞世,令研究组的同事万分悲痛!可以说,研究组从无到有、到发展壮大,都凝聚了曹明奎先生这些年的全部心血,是他用生命换来的宝贵遗产。明奎走了,但他的思想,多年来的科研成果将永远留存。令人欣慰的是,在明奎走后不久,我们又在院所领导的支持下,请来了在陆地生态系统生物地球化学循环研究和全球变化研究领域具有很高造诣的国际知名学者,来自美国Rutgers大学的徐明博士,他很快获得了中国科学院百人计划的支持,并被分配到该研究组。在明奎走后的两年多时间里,研究组的同事除了怀念,又在徐明博士和季劲钧研究员的指导下,一起继续精诚合作,团结奋斗,终于把明奎未尽的部分研究完成了。这本专著向世人展示的正是该研究组成员完成的部分原创性成果,我们将以此献给曹明奎先生!

特别值得提出的是,我们在承担和完成各项任务以及撰写和出版过程中,曾得到中国科学院各级领导:白春礼副院长,李家洋副院长,傅伯杰、刘健、冯仁国、陈泮勤等领导,国家自然科学基金委员会的领导陈宜瑜院士等,以及中国科学院地理科学与资源研究所的各级领导和专家:刘纪远、成升魁、欧阳华、李秀彬、赵士洞、于贵瑞、葛全胜、周成虎、邵雪梅、孙晓敏、李国胜等的大力支持、帮助和指导,同时还得到了孙鸿烈、陈述彭、李文华、方精云、石玉林、刘昌明、郑度、陆大道、孙九林等院士的学术指导。本书初稿完成后,我们又特别邀请刘允芬研究员对全书的内容、文字等进行了认真细致地把关和统稿。借此出版之际,谨对所有曾经给予我们支持和帮助的单位和个人表示衷心的感谢!

本书力图反映陆地生态系统的机理模型、模拟及其对全球变化响应和适应的最新成果,但鉴于这类问题极其复杂,影响因素多种多样,加之所需数据欠缺,特别是由于作者的学识、经验所限,加上时间仓促,书中可能会出现各种问题,包括交叉,甚至矛盾的结果,错误和不妥之处,

敬请读者批评、指正。

本书共包括十三章,前五章为模型与方法及其未来的可能发展,后八章为对中国陆地生态系统碳通量、碳贮量等的模拟结果。需要特别指出的是,这些结果主要是利用具有自主知识产权自主建立的模型模拟的原创性成果;此外,为了适应履行《联合国气候变化框架公约》和京都议定书,以及适应气候变化国家战略的需要,本专著较系统地分析研究了中国国家和区域尺度陆地生态系统碳贮量、净初级生产力、土壤呼吸、净生态系统生产力,特别是碳源汇、中国森林包括人工林碳贮量的时空特征,适应性碳管理对中国农田土壤碳吸收的影响以及陆地生态系统对气候变化的脆弱性。

各章标题和作者如下(特别需要指出的是,几乎每一章,曹明奎都参与了编写指导工作并凝聚了他的心血,在此未予一一注明):

- 第一章 CEVSA 模型及其改进和发展:顾峰雪、陶波、李克让。
- 第二章 AVIM 模型及其改进和发展:黄玫、季劲钧。
- 第三章 GLOPEM 与 CEVSA 耦合模型:发展、验证与应用:王军邦、刘纪远。
- 第四章 陆地生态系统碳循环模型数据融合研究:张黎、于贵瑞、骆亦其。
- 第五章 陆地生态系统模式与气候模式的耦合:季劲钧、高荣。
- 第六章 平均气候态下中国区域水、热通量的时空格局:黄玫、季劲钧。
- 第七章 中国陆地生态系统碳贮量空间分布格局:陶波、黄玫、李克让、季劲钧。
- 第八章 中国陆地生态系统碳通量的空间分布格局:陶波、黄玫、李克让、季劲钧。
- 第九章 中国陆地生态系统碳通量的动态变化及其对气候变化的响应:陶波、李克让。
- 第十章 未来气候变化对中国陆地生态系统碳循环影响:黄玫、顾峰雪、季劲钧、李克让。
- 第十一章 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评价研究:於刚、李克让。
- 第十二章 中国森林植被碳储量及造林的影响:徐新良。
- 第十三章 适应性碳管理对中国农田土壤碳吸收的影响:闫慧敏、李克让。

李克让

中国科学院地理科学与资源研究所研究员

2009 年 4 月 8 日

目 录

序 前 言

第一章 CEVSA 模型及其改进和发展 (1)

1.1	CEVSA 模型简介和主要构成	(1)
1.1.1	CEVSA 模型简介	(1)
1.1.2	CEVSA 模型的主要构成	(2)
1.1.3	CEVSA 模型的应用概述	(3)
1.2	生物物理子模型	(3)
1.2.1	蒸散和土壤水分动态的模拟	(3)
1.2.2	辐射的计算	(4)
1.3	植物生理生长子模型	(5)
1.3.1	植物的光合作用	(5)
1.3.2	CO ₂ 供应和气孔导度	(6)
1.3.3	植物的氮吸收和自养呼吸	(8)
1.3.4	净初级生产力(NPP)的计算过程	(9)
1.3.5	分配和凋落的模拟	(9)
1.4	土壤碳氮分解子模型	(9)
1.5	CEVSA 模型的发展——CEVSA2 的建立	(12)
1.5.1	物候的参数化和 LAI 动态的模拟	(12)
1.5.2	蒸散和土壤水分动态的模拟	(14)
1.5.3	净初级生产力的计算	(15)
1.5.4	分配和凋落的模拟	(15)
1.6	CEVSA2 的验证和评价	(19)
1.6.1	通量观测站点的基本情况和评价方法	(19)
1.6.2	CEVSA2 在通量观测站点的验证	(28)
1.6.3	CEVSA2 模型的综合评价	(34)
	参考文献	(42)

第二章 AVIM 模型及其改进和发展 (49)

2.1	大气—植被相互作用模型(AVIM2)简介	(49)
2.1.1	模型的总体结构	(49)

2.1.2 模型的输入与输出	(50)
2.2 陆面物理过程子模块	(51)
2.2.1 温度控制方程	(51)
2.2.2 水分控制方程	(51)
2.3 植物生理生长子模块	(51)
2.3.1 光合作用和呼吸作用	(52)
2.3.2 光合产物的分配方案	(53)
2.3.3 生物量的形成	(53)
2.3.4 物候的改进方案	(53)
2.4 土壤有机碳分解和转换子模块	(54)
2.4.1 模块的结构和组成	(54)
2.4.2 与陆面物理过程子模块和植物生理生长子模块的耦合	(55)
2.5 AVIM2 的检验和验证	(56)
2.5.1 荷兰 Loobos 森林水、热、碳通量的模拟与比较	(56)
2.5.2 千烟洲人工林碳贮量和储碳潜力的模拟	(59)
参考文献	(64)

第三章 GLOPEM 与 CEVSA 耦合模型:发展、验证与应用

3.1 GLOPEM-CEVSA 耦合模型	(66)
3.2 GLOPEM-CEVSA 模型对典型森林生态系统碳通量的模拟及其验证分析	(70)
3.2.1 研究地点	(70)
3.2.2 用于模型验证的数据	(71)
3.2.3 模型验证结果	(74)
3.2.4 结论与讨论	(84)
3.3 基于 GLOPEM-CEVSA 模型的中国净生态系统生产力的模拟	(87)
3.3.1 模型驱动数据	(87)
3.3.2 模型参数	(88)
3.3.3 模型初始化	(90)
3.3.4 模拟结果	(90)
3.3.5 结论与讨论	(98)
参考文献	(99)

第四章 陆地生态系统碳循环模型数据融合研究

4.1 模型数据融合的概念和组成	(107)
4.1.1 模型数据融合的概念	(107)
4.1.2 模型数据融合的组成	(108)
4.2 模型数据融合的主要方法	(112)
4.2.1 Levenberg-Marquardt 方法	(113)
4.2.2 基于贝叶斯估计的 MCMC 方法	(113)

4.2.3 卡尔曼滤波	(114)
4.2.4 遗传算法	(115)
4.3 模型数据融合在陆地生态系统碳循环研究中的应用	(115)
4.3.1 碳循环模型参数的反演	(116)
4.3.2 降低碳循环模型的不确定性	(117)
4.3.3 评估模型结构	(118)
4.3.4 区域及全球尺度的碳通量模拟研究	(118)
4.4 影响模型数据融合研究的重要因素	(119)
4.4.1 优化算法	(119)
4.4.2 数据误差	(120)
4.4.3 模型结构	(122)
4.4.4 数据信息	(124)
4.5 模型数据融合研究中存在的问题和展望	(124)
4.5.1 复杂陆地生态系统过程模型的参数估计方法	(125)
4.5.2 参数估计和模型模拟结果的不确定性分析	(125)
4.5.3 区域及全球尺度碳循环的模型数据融合方法研究	(125)
参考文献	(125)

第五章 陆地生态系统模式与气候模式的耦合

5.1 生态系统模式与气候系统模式耦合的原理和方法	(130)
5.1.1 生物圈是地球系统中的基本组成部分	(130)
5.1.2 生态系统模式与气候系统模式耦合的原理和方法	(130)
5.1.3 生态系统模式与气候模式耦合系统的功能	(132)
5.2 陆地生态系统与全球气候模式的耦合	(133)
5.2.1 耦合模式简介	(133)
5.2.2 全球平均气候态的模拟	(134)
5.2.3 全球生态系统特征量的模拟	(140)
5.3 陆地生态系统模式与区域气候模式的耦合	(144)
5.3.1 模式简介	(144)
5.3.2 区域(东亚)平均气候态的模拟	(144)
5.3.3 区域(东亚)陆地生态系统变量模拟	(152)
参考文献	(155)

第六章 平均气候态下中国区域水、热通量的时空格局

6.1 中国区域能量通量的模拟与源于实测资料计算结果的比较	(157)
6.1.1 净辐射通量空间分布格局	(157)
6.1.2 感热通量空间分布格局	(158)
6.1.3 潜热通量空间分布格局	(161)
6.2 土壤湿度的模拟与比较	(161)

6.2.1	中国区域年平均土壤湿度的空间分布	(161)
6.2.2	土壤湿度模拟的验证	(162)
6.3	中国区域能量、水分的区域差异和季节变化特征	(164)
6.3.1	自然地理区域水、热通量的年平均状况	(165)
6.3.2	自然地理区域能量通量的季节变化特征	(166)
6.4	青藏高原地表能量通量估算	(168)
6.4.1	青藏高原年平均地面能量通量	(168)
6.4.2	青藏高原地表能量通量的季节特征	(170)
6.4.3	结论与讨论	(171)
	参考文献	(172)
第七章	中国陆地生态系统碳储量空间分布格局	(174)
7.1	中国陆地生态系统土壤碳储量和碳密度的空间分布格局	(175)
7.1.1	应用 CEVSA 模型模拟中国陆地生态系统土壤碳储量和碳密度的空间分布	(175)
7.1.2	AVIM2 模拟的中国区域土壤碳密度空间格局	(180)
7.1.3	中国区域土壤碳密度模拟结果比较	(181)
7.2	中国陆地生态系统植被碳贮量、碳密度的空间分布	(182)
7.2.1	CEVSA 模拟的中国陆地生态系统植被碳贮量、碳密度空间分布	(182)
7.2.2	AVIM2 模拟的中国区域植被地上与地下部生物量	(186)
7.2.3	植被碳密度模拟值与其他研究结果的比较	(188)
	参考文献	(189)
第八章	中国陆地生态系统碳通量的空间分布格局	(192)
8.1	中国陆地生态系统净初级生产力(NPP)的空间分布格局	(193)
8.1.1	CEVSA 模拟的中国陆地生态系统 NPP 的空间分布	(193)
8.1.2	AVIM2 模拟的中国区域 NPP 空间分布	(198)
8.1.3	模型模拟的 NPP 与其他研究结果的比较	(198)
8.2	中国陆地生态系统土壤呼吸的空间分布格局	(200)
8.2.1	土壤呼吸的空间分布	(200)
8.2.2	与基于观测值估算的土壤呼吸数据的比较	(200)
8.3	中国陆地生态系统净生态系统生产力(NEP)的空间分布格局及其演变机制	(202)
8.3.1	NEP 空间格局变化	(203)
8.3.2	不同气候带 NEP 的空间分布	(204)
8.3.3	不同土地覆被类型的 NEP 分布	(207)
	参考文献	(208)
第九章	中国陆地生态系统碳通量的动态变化及其对气候变化的响应	(210)
9.1	净初级生产力(NPP)的时间变化及其对气候变化的响应	(210)

9.1.1 NPP 时间变化	(211)
9.1.2 NPP 变化与气候变化的关系	(212)
9.2 土壤异养呼吸(HR)的时间变化及其对气候变化的响应	(216)
9.2.1 土壤呼吸的时间变化	(216)
9.2.2 土壤呼吸变化与气候变化的关系	(218)
9.3 NEP 的时间变化及其与气候变化的关系	(219)
参考文献	(223)

第十章 未来气候变化对中国陆地生态系统碳循环影响

(226)

10.1 未来气候变化对典型陆地生态系统水碳交换的影响	(226)
10.1.1 气候变化对千烟洲亚热带常绿人工针叶林水碳通量的影响	(226)
10.1.2 气候变化对哈佛温带落叶阔叶林水碳通量的影响	(228)
10.1.3 气候变化对长白山温带针阔混交林水碳通量的影响	(233)
10.2 21 世纪中国陆地生态系统碳通量对气候变化和 CO ₂ 浓度变化的响应	(235)
10.2.1 B2 气候变化情景介绍	(235)
10.2.2 模拟方法	(236)
10.2.3 未来气候变化情景下中国区域 NEP、NPP、植被碳和土壤碳的变化 ...	(236)
10.2.4 未来气候变化情景下中国区域碳通量变化的空间分布格局	(239)
10.2.5 大气 CO ₂ 浓度增加对中国陆地生态系统碳循环影响	(241)
10.2.6 模型研究的不确定性讨论	(241)
10.3 21 世纪中国陆地生态系统碳源汇的可能变化	(242)
参考文献	(244)

第十一章 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评价研究

(247)

11.1 生态系统对气候变化的脆弱性评价研究概述	(247)
11.1.1 脆弱性研究的主要方法	(249)
11.1.2 生态系统脆弱性研究中存在的主要问题	(251)
11.2 CEVSA 模型在生态系统脆弱性评价研究中的应用	(252)
11.2.1 适用于脆弱性评价的 CEVSA 模型改进	(252)
11.2.2 CEVSA-Vul 模型模拟的中国潜在自然植被分布格局及其验证	(254)
11.2.3 基于 CEVSA-Vul 模型的脆弱性评价方法	(258)
11.3 中国自然生态系统对气候变化的脆弱性评价	(260)
11.3.1 植被分布格局对气候变化的脆弱性评价	(260)
11.3.2 中国自然生态系统功能对气候变化的脆弱性评价	(264)
11.3.3 中国自然生态系统气候脆弱性综合评价	(265)
11.3.4 中国自然生态系统脆弱性的区域差异分析	(267)
11.3.5 中国自然生态系统脆弱化机理分析	(268)
11.4 生态系统脆弱性评价的未来发展	(269)
参考文献	(270)

第十二章 中国森林植被碳储量及造林的影响 (274)

12.1 基于森林清查资料的森林碳储量估算方法 (274)

12.1.1 数据基础 (274)

12.1.2 基于森林清查资料的森林碳储量估算方法 (275)

12.1.3 中国森林生物量估算模型 (278)

12.1.4 中国人工林生物量估算模型 (280)

12.2 中国森林生态系统植被碳储量 (282)

12.2.1 中国森林资源现状及时空变化特征 (282)

12.2.2 中国森林植被碳储量的时间变化特征 (285)

12.2.3 中国森林植被碳储量的空间分异格局 (287)

12.3 造林对森林生态系统植被碳储量和碳平衡的影响 (289)

12.3.1 中国人工林概述 (289)

12.3.2 中国人工林植被碳储量和碳平衡 (292)

12.3.3 造林对森林生态系统植被碳储量和碳平衡的影响 (296)

12.4 林业重点工程对森林生态系统碳储量和碳平衡的影响 (298)

12.4.1 中国林业重点工程概述 (298)

12.4.2 林业重点工程植被碳储量估算方法 (302)

12.4.3 中国林业重点工程对森林生态系统植被碳储量和碳平衡的影响 ... (303)

参考文献 (312)

第十三章 适应性碳管理对中国农田土壤碳吸收的影响 (314)

13.1 适应性农业土壤碳管理的意义与途径 (314)

13.1.1 农业土壤碳吸收的重要性 (314)

13.1.2 人类活动对土壤碳库的影响 (315)

13.1.3 增加农业土壤碳吸收的途径 (316)

13.2 农业管理对土壤碳吸收影响的评估方法 (319)

13.2.1 几种常用的区域尺度土壤碳吸收潜力的估算方法 (319)

13.2.2 应用 CEVSA 和 GLOPEM 耦合模型估计适应性农业管理对土壤
碳吸收的影响 (320)

13.3 不同农业管理措施下的土壤碳变化特征 (322)

13.3.1 增强农田土壤碳吸收的管理方案与情景 (322)

13.3.2 不同农业管理措施情景下的土壤碳变化特征 (323)

13.4 中国土壤碳吸收潜力及空间格局 (324)

13.4.1 不同农业管理措施情景下土壤碳吸收潜力 (324)

13.4.2 土壤碳吸收潜力的空间格局及影响因素 (326)

13.4.3 不实施秸秆还田对土壤潜在碳库的影响 (328)

13.5 中国农田土壤固碳能力与世界其他区域研究结果的比较 (329)

参考文献 (330)

CONTENTS

Chapter 1 Improvement and Development of the CEVSA Model	(1)
1.1 Model introduction	(1)
1.1.1 Introduction	(1)
1.1.2 Main structure of the model	(2)
1.1.3 Model application	(3)
1.2 Biophysical module	(3)
1.2.1 Evapotranspiration and soil moisture	(3)
1.2.2 Solar radiation	(4)
1.3 Plant physiological and growth module	(5)
1.3.1 Photosynthesis	(5)
1.3.2 CO ₂ assimilation and stomatal conductance	(6)
1.3.3 Plant nitrogen absorption and autotrophic respiration	(8)
1.3.4 Net primary productivity (NPP)	(9)
1.3.5 Carbon allocation and litterfall	(9)
1.4 Soil carbon and nitrogen decomposition module	(9)
1.5 CEVSA2: An improved version of CEVSA	(12)
1.5.1 Phenology and LAI	(12)
1.5.2 Evapotranspiration and soil moisture	(14)
1.5.3 Net primary productivity (NPP)	(15)
1.5.4 Carbon allocation and litterfall	(15)
1.6 Model validation and evaluation	(19)
1.6.1 Flux-tower-based evaluation approach	(19)
1.6.2 Model validation	(28)
1.6.3 Model evaluation	(34)
References	(42)
Chapter 2 Improvement and Development of the Atmosphere-vegetation	
Interaction Model (AVIM)	(49)
2.1 Introduction	(49)
2.1.1 Model framework	(49)
2.1.2 Input and output	(50)

2.2	Physical process module	(51)
2.2.1	Temperature control equations	(51)
2.2.2	Moisture control equations	(51)
2.3	Plant growth module	(51)
2.3.1	Photosynthesis and respiration	(52)
2.3.2	Carbon allocation	(53)
2.3.3	Biomass formation	(53)
2.3.4	Improved phenology scheme	(53)
2.4	Soil carbon and nitrogen dynamics module	(54)
2.4.1	Module structure	(54)
2.4.2	Coupling with physical and plant growth modules	(55)
2.5	Model validation	(56)
2.5.1	Water, energy and carbon fluxes; Validation at Loobos site	(56)
2.5.2	Carbon fluxes; Validation in a forest plantation at Qianyanzhou	(59)
	References	(64)
Chapter 3	GLOPEM-CEVSA: Development, Validation and Application	(66)
3.1	Model Development: Coupling GLOPEM with CEVSA	(66)
3.2	Net Ecosystem Exchange (NEE): Modeling in typical forest ecosystems	(70)
3.2.1	Site description	(70)
3.2.2	Model validation	(71)
3.2.3	Results	(74)
3.2.4	Conclusion and discussion	(84)
3.3	Modeling Terrestrial Net Ecosystem Productivity (NEP) in China	(87)
3.3.1	Data sources	(87)
3.3.2	Model parameterization	(88)
3.3.3	Model initialization	(90)
3.3.4	Results	(90)
3.3.5	Discussion and conclusion	(98)
	References	(99)
Chapter 4	Model-Data Fusion in Terrestrial Carbon Cycle Modeling	(106)
4.1	Model data fusion	(107)
4.1.1	Conception	(107)
4.1.2	Components	(108)
4.2	Model-data fusion techniques	(112)
4.2.1	Levenberg-Marquardt	(113)
4.2.2	Markov Chain Monte Carlo	(113)
4.2.3	Kalman filter	(114)