



Technology for the Measurement
and Enhancement of Carbon Sinks
in Bamboo Forest Ecosystems

竹林生态系统 碳汇计测与增汇技术



周国模 姜培坤 杜华强 施拥军 等 编著

CO₂



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

竹林生态系统碳汇计测 与增汇技术

Technology for the Measurement and Enhancement of
Carbon Sinks in Bamboo Forest Ecosystems

周国模 姜培坤 杜华强 施拥军 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

竹子生长快速,更新特殊,一次成林,可长期利用,蕴藏着巨大的固碳潜力,竹林在应对全球气候变化中的作用也越来越受到国际社会的广泛关注。本书围绕竹林碳过程、碳监测、碳增汇三条主线,基于多角度、多维度、多尺度方式,采用多过程结合、多手段联合、多技术融合,用14章的篇幅全面系统地介绍了竹林碳生成、转化、分配、迁移等全过程特征,碳储量碳通量动态监测方法,以及竹林增汇减排技术等,旨在为竹林生态系统碳循环及其应对气候变化研究提供理论和技术指导。

本书关于竹林碳汇方面的研究,既包含了适合竹子生物学特征的独特方法,又包含了代表当今森林碳汇研究的主流方法和发展趋势,对其他森林类型的相关研究也具有很好的参考价值。本书可作为林学、森林碳汇、生态、环境、全球气候变化等相关专业领域的本科生、研究生教学用书,也可作为相关科研工作者和林业部门的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

竹林生态系统碳汇计测与增汇技术/周国模等编著. — 北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-051135-5

I. ①竹… II. ①周… III. ①竹林—森林生态系统—碳循环—研究 IV. ①S795

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第312606号

责任编辑:张会格 岳漫宇 高璐佳/责任校对:赵桂芬

责任印制:肖 兴/封面设计:铭轩堂

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

*

2017年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:470 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

自序

全球气候变化已受到国际社会的高度关注，国际社会先后发起了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）、国际生物多样性计划（DIVERSITAS）等以全球碳循环为主题的计划，重点研究全球碳循环及二氧化碳减排机制。世界气象组织（WMO）和联合国环境规划署（UNEP）也成立了联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC），专门对气候变化科学知识的现状，气候变化对社会、经济的潜在影响，以及如何适应和减缓气候变化的可能对策进行评估。

众所周知，森林植被能够固定大气中的二氧化碳，它占全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%，对全球碳平衡具有重要的作用。森林固碳是目前最安全、最经济的一种减排方式。1997 年第三次联合国气候变化大会通过的《京都议定书》指出，造林及森林经营所产生的碳汇可用于抵减发达国家承诺的部分温室气体减排指标。2007 年，印度尼西亚巴厘岛联合国气候变化大会（COP13）又开始启动 REDD+ 相关行动，把减少毁林和森林退化导致的排放，促进森林培育、森林可持续经营以增加碳储量也纳入林业减排内容，林业成为气候变化谈判的重要议题。我国政府也先后提出“森林减排方案”“森林两增目标”等森林减排增汇措施，并制定了《应对气候变化林业行动计划》。截至第八次森林资源清查，全国森林植被总碳储量已达 84 亿 t，是第四次森林资源清查的 2 倍，我国森林巨大的碳汇功能，对减缓全球气候变化作出了应有的贡献。

竹子属于禾本科竹亚科的植物，全球约有 150 属 1225 种，竹林面积超过 3100 万 hm^2 ，被称为“世界第二大森林”。我国地处世界竹子分布中心，竹子资源十分丰富，广泛分布于浙江、福建、江西、湖南、安徽、湖北、广西、广东等 15 个省（自治区、直辖市），现有竹类植物 34 属 534 种，约占世界竹种的 44%，竹林面积已达 601 万 hm^2 ，占世界竹林面积的 20% 左右，是名副其实的“竹子王国”。近年研究和技术推广表明，竹林具有高效的固碳能力和强大的碳汇潜力，从我国最近 20 多年森林资源 4 次连续清查的结果看，第八次全国森林资源



清查的竹林面积相对于第五次清查增长了 42.7%，竹林面积扩张速度惊人，在我国林业应对气候变化和林业生态建设方面的作用不断凸显，并随着 *The Climate Change: Challenge and Bamboo*、*Bamboo and Climate Change Mitigation*、*Bamboo Afforestation Methodology for Carbon Project in China* 等竹林应对气候变化技术报告在联合国气候变化大会上的连续展示，竹林碳汇功能在全世界范围内得到认可。

然而，竹子为禾本科植物，生物学特性异于其他林木，高径生长完成快速，具有自我扩繁更新能力，快速成林后可隔年择伐、持续利用，人为经营干扰频繁。因此，竹林生长、经营过程中的固碳机制和影响机制、竹林碳源汇变动特征、竹林碳的定量计量和监测方法，以及竹林生态系统增碳控排等经营管理技术应该有别于其他森林类型，或者在某些方面具有它的特殊性。为回答这些问题，我们于 2001 年提出了“竹林生态系统碳循环研究计划”，组建创新研究团队，紧紧围绕竹林碳过程、碳监测、碳增汇三条主线，基于多角度、多维度、多尺度方式，采用多过程结合、多手段联合、多技术融合，系统而深入地开展竹林碳生成、转化、分配、迁移等全过程特征，碳储量、碳通量动态监测方法，以及竹林增汇减排技术等创新研究。研究过程中，得到国家自然科学基金委员会、国家林业局、浙江省科技厅及浙江省自然科学基金委员会等部门的大力支持，先后获得各类科研项目 26 项，其中国家自然科学基金项目 15 项、国家林业局项目 2 项、浙江省重大科技计划项目 2 项和浙江省自然科学基金资助 7 项。

通过近 15 年的研究，我们建立了 12 个竹林长期定位试验点、2 座竹林碳水通量观测塔，营建了全国首个毛竹碳汇林基地，调查了 600 多个竹林样地、测定分析了 200 多株竹子全株样本数据，处理了近 30 年 Landsat 等陆地卫星遥感数据。在 40 多位研究人员的攻关和近 100 名研究生的参与下，我们在国内外期刊共发表或被录用学术论文 215 篇（其中 SCI 96 篇），获得国家发明专利 4 项，登记软件著作权 7 项。归纳起来，研究计划在以下 4 个方面取得了重要成果。

第一，系统阐明竹子生长全过程的碳生成、积累、分配和迁移规律，深入揭示竹林光合固碳、碳水耦合、碳微观形态结构、空间分配格局与碳源汇动态变化等的特征与影响机制，回答了竹林生态系统“如何固碳”这一科学问题，为合理调控竹林碳汇能力奠定了理论基础。

第二，突破了竹林碳储量测算中尺度与精度共融难题，研发构建立体、高精、普适的竹林碳储量、碳通量定量估测模型和动态监测方法，实现了任意尺度竹林碳储量的精准测算和区域尺度竹林碳储量及其空间分布的高精度遥感估算。解决了竹林生态系统“怎样测碳”的技术难题，为快速高效评测竹林固碳功能提供了科学方法。

第三，创新应用土壤呼吸测定系统、核磁共振波谱等先进技术，揭示了竹林土壤呼吸特征、土壤碳库动态和碳形态结构演变规律，阐明了人为经营干扰对竹



林土壤碳稳定性和温室气体排放的影响机制。集成土壤稳碳、养分调控、结构优化等竹林增汇减排经营技术体系，解决了竹林生态系统“如何增碳”的经营实践问题，为大幅提升竹林固碳能力，推进森林碳汇交易提供了坚实的技术支撑。

第四，首次开发出用于行业自愿减排和企业碳中和的《竹林项目碳汇计量监测方法学》，通过国家林业局审核批准，并在多哈（COP18）联合国气候变化大会上发布，自主开发出中国核证减排的《竹子造林碳汇项目方法学》《竹林经营碳汇项目方法学》，获得国家发展和改革委员会（以下简称国家发改委）审核备案；同时开发并提交了世界竹资源领域唯一的两项“国际核证碳减排标准”（VCS）竹林碳汇项目方法学，为竹林碳汇项目开发和进入国际、国内碳减排交易市场提供了重要的评价、计量与监测标准，解决了如何使竹林碳汇满足国家、企业履约减排需求，从而实现价值化、市场化的“如何售碳”这个关键技术问题。

相关研究成果从2007年起在浙江、安徽、福建、江西等竹子重点分布区推广应用，培训了大量的林技人员和林农人员，项目营建的毛竹碳汇林，其产生的碳信用额也通过华东林业产权交易所被阿里巴巴集团公司认购，给竹农带来了额外的碳汇收益，社会反响强烈；我们从2008年开始与国际竹藤组织合作，将竹林低碳经营与竹林碳汇技术进一步推向了国际舞台，“竹子碳汇造林方法学国外试点项目”也于2012年在非洲肯尼亚、埃塞俄比亚等国启动实施，产生了广泛的国际影响。

在长期的研究过程中，基于以上部分研究成果，我们先后出版《竹林生态系统中碳的固定与转化》《雷竹林土壤质量及其演变趋势》《竹林生物量碳储量遥感定量估算》《森林空间结构分析》等学术著作。为了更加全面、系统地介绍竹林碳汇研究的理论、方法、技术，以全新的视角向读者展示竹林生态系统碳循环及其在林业应对气候变化中的作用，我们通过三年多的努力，重新将上述成果整理并增加最新研究内容，编著成《竹林生态系统碳汇计测与增汇技术》一书，意在为我国乃至世界竹林碳汇研究和竹林资源可持续经营管理提供参考。同时我们也进行了竹材产品碳转移与碳储量研究，开发了竹子造林与竹林经营碳汇项目方法学，以推动竹林碳汇产业发展，这些内容将另著成书。

全书包括14章，其中第一章至第六章主要论述竹林固碳基本特征，第七章至第十章主要介绍竹林碳汇的估算与预测方法，第十一章至第十三章主要介绍竹林增汇减排技术，第十四章主要介绍竹林碳汇项目计量与监测方法技术。全书由周国模、姜培坤、杜华强、施拥军等共同编著完成，各章节的主要作者如下。

第一章：周国模、杜华强、姜培坤、施拥军、葛宏立、徐小军、毛方杰

第二章：周国模、徐涌、刘恩斌、施拥军、姜培坤、周宇峰

第三章：温国胜、张汝民、俞飞

第四章：江洪、余树全、陈健、宋新章、马元丹、王彬、姜小丽



第五章：周国模、吴家森、姜培坤

第六章：姜培坤、宋照亮、吴家森

第七章：刘恩斌、周国模、刘安兴、杜华强、施拥军、葛宏立

第八章：杜华强、周国模、徐小军、韩凝、施拥军、范渭亮、吕玉龙、周宇峰

第九章：江洪、陈健、周国模、宋新章、余树全

第十章：江洪、周国模、金佳鑫、陈健、余树全、宋新章

第十一章：刘娟、李永夫、吴家森、徐秋芳、姜培坤

第十二章：李永夫、姜培坤、郑蓉

第十三章：刘恩斌、周国模、汤孟平、施拥军

第十四章：施拥军、周国模、吕玉龙、沈振明、李金良、赖广辉

书稿是研究团队集体智慧的结晶，在此对项目全体成员表示衷心的感谢！我们的研究生（按姓氏笔画排序：牛晓栋、毛方杰、仇建习、方成圆、计露萍、邓英英、叶耿平、田海涛、朱弘、刘玉莉、孙成、孙恒、孙晓艳、李洪吉、李雪建、李蓓蕾、李翠琴、李翀、杨杰、杨爽、余朝林、谷成燕、沈利芬、沈楚楚、张利阳、张金梦、张艳、张敏霞、陆国富、陈云飞、陈晓峰、陈婷、陈嘉琦、范叶青、林琼影、林曦桥、郑泽睿、赵送来、赵赛赛、胡露云、俞淑红、娄明华、袁佳丽、徐林、黄浩、曹全、崔瑞蕊、商珍珍、董德进、曾莹莹、蔡先锋、蔺思杰、裴晶晶等）也为本书的最终成稿付出了艰辛的劳动，在此表示感谢！项目在研究和技术推广上还得到了中国绿色碳汇基金会，中国林业科学研究院亚热带林业研究所，福建省林业科学研究院，以及浙江、安徽、福建、江西、四川、云南等省的林业相关部门的大力支持，在此一并表示感谢！

本书得到国家科学技术学术著作出版基金资助，在研究过程中还得到国家自然科学基金重大专项课题（61190114）、973 重大项目课题（2011CB302705）、国家林业局 948 项目（2008-4-49）、国家自然科学基金（30700638、31070564、41471197、31500520、31570602、31270497、30972397、31570686、31470626、31170595、31270667、41271274）、浙江省自然科学基金（LR14C160001、LY14C160007、LY15C160004）和浙江省重点科技创新团队（2010R50030）等项目的资助，在此表示衷心的感谢！

本书是浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室平台获得的研究成果。

希望本书中的研究方法、技术手段和研究成果，能为林业和气候变化相关领域的科研工作者、决策管理人员提供有益的借鉴和参考，当然，限于编著者的学识水平，书中难免有疏漏与不足之处，敬请广大读者批评指正！

周国模 姜培坤 杜华强 施拥军

2016 年秋于杭州

目 录

第一章 竹林资源与生长利用	1
1.1 竹子及竹林资源分布	3
1.2 竹子的生物学特征	3
1.3 竹子利用及碳汇功能	4
主要参考文献	6
第二章 毛竹林笋期生长与碳积累特征	9
2.1 毛竹快速生长与碳储量动态	11
2.1.1 研究区概况	11
2.1.2 研究方法	12
2.1.3 结果与分析	12
2.2 毛竹快速生长期碳积累特征	17
2.2.1 研究方法	17
2.2.2 结果与分析	18
2.3 小结	20
主要参考文献	22
第三章 毛竹固碳的光合生理特征	23
3.1 毛竹光合作用时空特征	25
3.1.1 研究区概况	25
3.1.2 研究方法	26



3.1.3	光合作用环境因子的日变化特征	27
3.1.4	叶片气体交换的日变化	27
3.1.5	林冠不同层次叶片的光响应	29
3.1.6	毛竹光合作用时空特征小结	29
3.2	毛竹光响应模型构建	30
3.2.1	光响应曲线测定	30
3.2.2	光响应曲线拟合结果与分析	31
3.2.3	光响应曲线模拟小结	34
3.3	毛竹光合生理对气候变化的短期响应	35
3.3.1	研究方法	35
3.3.2	毛竹光合作用对 CO_2 浓度短期升高的响应模拟	37
3.3.3	毛竹光合作用对温度短期变化的响应模拟	38
3.3.4	讨论	42
	主要参考文献	43
第四章	毛竹固碳过程液流变化特征	45
4.1	毛竹液流变化“竹—鞭—笋”系统设计	47
4.2	系统的构建	48
4.3	液流测量仪器安装与数据采集	49
4.3.1	仪器介绍	49
4.3.2	仪器安装与数据采集	50
4.4	其他相关数据的采集	50
4.4.1	对照系统含水率和笋高测量	50
4.4.2	光合生理和环境参数的测量	51
4.4.3	数据处理与分析	51
4.5	结果与分析	51
4.5.1	毛竹“竹—鞭—笋”系统内液流的动态变化	51
4.5.2	竹鞭和竹笋含水率变化	56



4.5.3 “竹—鞭—笋”系统的边材液流与含水率动态	57
4.5.4 毛竹叶片生理参数及其对光响应的比较分析	60
4.6 小结	65
主要参考文献	65
第五章 毛竹林生态系统碳储量的分配特征	67
5.1 研究区概况	69
5.2 研究方法	69
5.2.1 野外调查与采样	69
5.2.2 室内分析	70
5.2.3 计算方法	70
5.3 结果与分析	70
5.3.1 毛竹不同器官碳密度分析	70
5.3.2 毛竹各器官碳储量	71
5.3.3 毛竹林生态系统中碳储量的空间分布	72
5.3.4 毛竹林碳素年固定量的推算	73
5.3.5 不同经营类型毛竹林生态系统中碳储量比较	73
5.4 小结	75
主要参考文献	75
第六章 竹林风化碳汇与植硅体固碳特征	77
6.1 毛竹对硅酸盐岩风化碳汇和植硅体碳汇的影响	80
6.1.1 研究区域	80
6.1.2 研究方法	80
6.1.3 结果与分析	80
6.2 不同生态型竹子的硅分布特征	85
6.2.1 研究方法	85
6.2.2 结果与分析	86
6.2.3 结论与讨论	88



6.3 我国重要丛生竹硅储量	90
6.3.1 研究区域	90
6.3.2 试验设计	91
6.3.3 数据处理	92
6.3.4 结果与分析	92
6.3.5 结论与讨论	95
主要参考文献	97
第七章 基于测树因子的毛竹林生物量碳储量估算	101
7.1 毛竹林测树因子概率分布模型构建及其理论基础	103
7.1.1 最大熵概率分布模型构建	104
7.1.2 多尺度概率分布模型构建	105
7.1.3 二元概率分布模型	106
7.2 毛竹单株生物量模型构建	111
7.3 耦合测树因子概率分布模型生物量多尺度估算	111
7.4 资料来源	112
7.4.1 测树因子概率分布资料	112
7.4.2 单株生物量模型构建资料	113
7.5 结果与分析	113
7.5.1 测树因子概率分布函数	113
7.5.2 单株生物量模型构建结果	124
7.5.3 区域尺度毛竹林生物量估算	126
7.6 结论与讨论	128
7.6.1 测树因子概率分布模型构建	128
7.6.2 多尺度生物量估算	128
主要参考文献	129
第八章 基于多源遥感的竹林碳储量估算及时空动态分析	131
8.1 竹林分布遥感信息提取	133



8.1.1 基于光谱特征的提取方法	133
8.1.2 基于 BP 神经网络毛竹林遥感信息提取	136
8.1.3 混合像元分解在竹林分布信息提取中的应用	141
8.2 竹林碳储量遥感估算模型构建	145
8.2.1 地面调查	146
8.2.2 遥感模型变量设置	146
8.2.3 变量筛选	148
8.2.4 基于 Erf-BP 神经网络的毛竹林地上部分碳蓄积估算模型	148
8.2.5 基于核函数的非线性偏最小二乘模型	151
8.3 Landsat 结合 MODIS 数据毛竹林 AGC 估算	156
8.3.1 研究方法	157
8.3.2 结果与分析	159
8.4 竹林碳储量时空演变遥感监测	166
8.4.1 毛竹林碳储量时空演变	166
8.4.2 雷竹林土地利用时空动态	171
8.5 小结	175
主要参考文献	175
第九章 基于涡度相关的竹林生态系统碳通量监测	177
9.1 涡度相关原理	179
9.2 竹林通量观测站	180
9.2.1 通量观测站概况	180
9.2.2 通量观测系统	181
9.2.3 二氧化碳廓线观测系统	182
9.2.4 常规气象观测系统	182
9.2.5 无线模块数据传输系统	183
9.2.6 其他辅助观测系统	183
9.3 数据处理方法	184



9.3.1	原始数据的倾斜校正	184
9.3.2	缺失数据的插补	185
9.4	毛竹林生态系统碳通量监测分析	186
9.4.1	CO ₂ 通量月平均日变化特征	186
9.4.2	CO ₂ 通量不同季节的日变化	188
9.4.3	毛竹林净生态系统交换量 (NEE) 月变化	189
9.4.4	冠层碳储量变化特征	189
9.4.5	毛竹林碳收支能力	191
9.4.6	毛竹林生态系统碳通量小结	192
9.5	雷竹林生态系统碳通量监测分析	193
9.5.1	雷竹林生态系统碳通量的日变化特征	193
9.5.2	雷竹林生态系统碳通量的季节变化特征	195
9.5.3	雷竹林碳收支能力	197
9.5.4	雷竹林生态系统碳通量小结	199
	主要参考文献	200
第十章	竹林分布格局及碳收支模型模拟与预测	201
10.1	我国竹林分布格局历史模拟及变化预测	205
10.1.1	技术流程	205
10.1.2	研究数据及处理	206
10.1.3	研究方法	207
10.1.4	研究结果及分析	210
10.2	我国竹林碳收支状况历史模拟及变化预测	229
10.2.1	IBIS 模型及其模块	229
10.2.2	IBIS 模型改进	236
10.2.3	竹类 NPP 和 NEP 模拟预测结果	238
	主要参考文献	240



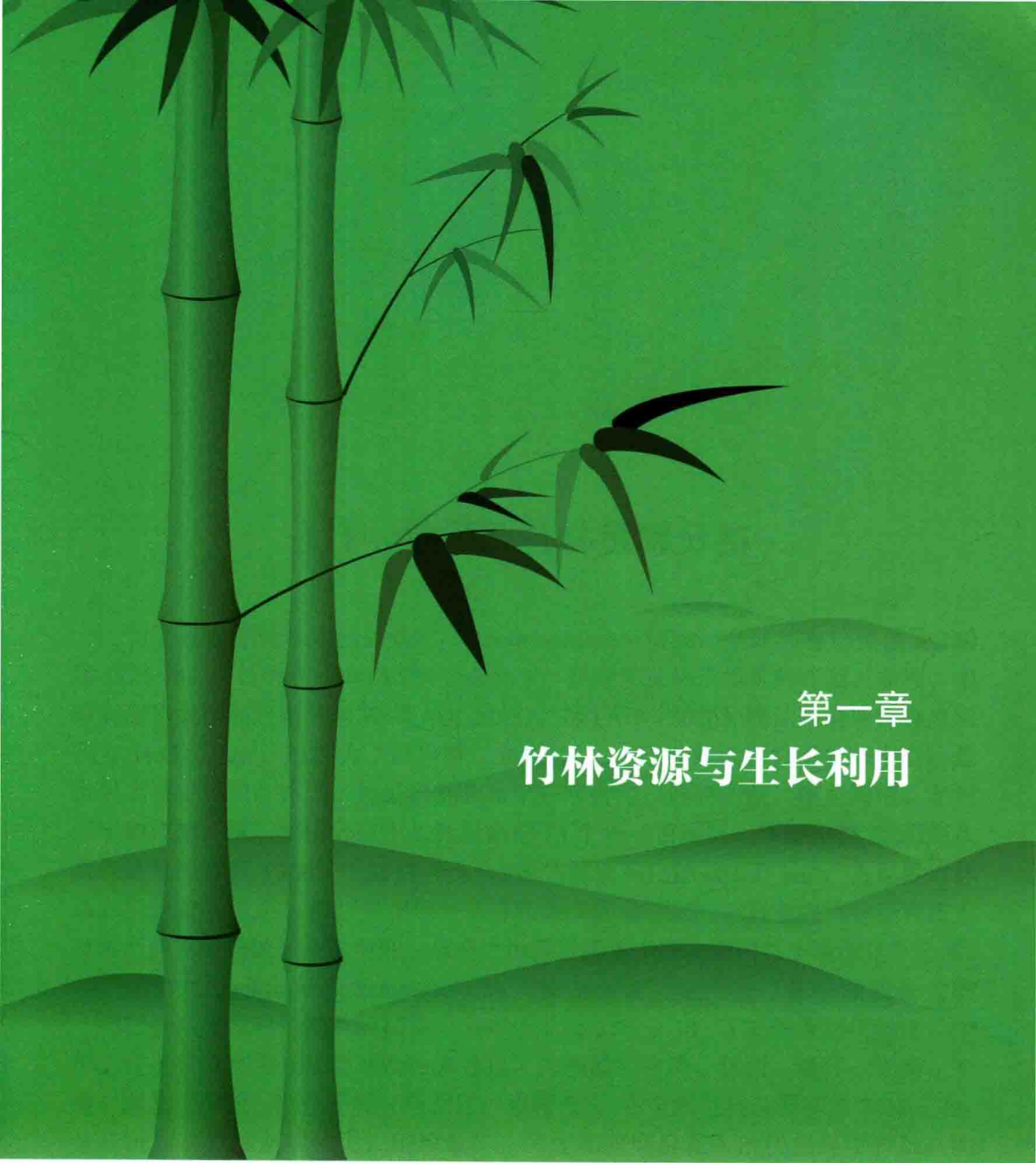
第十一章 经营对竹林生态系统碳平衡的影响	243
11.1 不同经营类型毛竹林碳积累动态	245
11.1.1 研究方法	245
11.1.2 结果与分析	246
11.1.3 小结	251
11.2 不同经营类型毛竹林土壤碳呼吸与碳排放动态	251
11.2.1 研究方法	251
11.2.2 研究结果	254
11.2.3 小结	258
11.3 集约经营雷竹林土壤呼吸与碳动态	259
11.3.1 研究方法	259
11.3.2 研究结果与分析	263
11.4 不同经营类型毛竹林土壤活性炭库的动态变化	281
11.4.1 研究方法	281
11.4.2 结果与分析	281
11.4.3 小结	285
11.5 集约经营历史对毛竹林土壤碳库稳定性的影响	286
11.5.1 研究方法	286
11.5.2 结果与分析	287
11.5.3 小结	288
主要参考文献	288
第十二章 养分调控对竹林土壤温室气体排放及固碳能力的影响	293
12.1 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响	296
12.1.1 研究方法	296
12.1.2 结果与分析	297
12.2 施肥对雷竹林土壤活性有机碳的影响	301
12.2.1 研究方法	301



12.2.2	结果与分析	302
12.2.3	小结	306
12.3	提高竹林固碳能力的配比施肥技术	306
12.3.1	研究方法	306
12.3.2	结果与分析	307
12.4	小结	310
	主要参考文献	310
第十三章	增强毛竹林碳汇功能的结构调控与优化技术	313
13.1	基于非空间结构的固碳潜力模型构建及其优化	316
13.1.1	毛竹固碳潜力模型构建	316
13.1.2	模型优化方法	319
13.1.3	数据来源	320
13.1.4	结果与分析	320
13.1.5	非空间结构部分结论与讨论	323
13.2	毛竹林空间结构与生物量碳储量的关系	324
13.2.1	研究区域	324
13.2.2	研究方法	324
13.2.3	结果与分析	327
13.2.4	空间结构部分结论与讨论	331
	主要参考文献	331
第十四章	毛竹碳汇林造林方法与计量技术	335
14.1	毛竹碳汇林造林方法	337
14.1.1	整地方式	337
14.1.2	植穴规格	338
14.1.3	造林密度	338
14.1.4	母竹规格	338
14.1.5	栽植技术	338



14.1.6 幼林抚育	339
14.1.7 成林管理与采伐措施	339
14.2 毛竹碳汇计量方法	341
14.2.1 碳库选择和温室气体排放源确定	341
14.2.2 碳汇计量公式	342
14.2.3 事前分层	342
14.2.4 基线碳储量变化	343
14.2.5 项目碳储量变化	345
14.2.6 项目边界内的温室气体排放	349
14.2.7 项目边界外的温室气体泄漏	350
14.2.8 项目产生的净碳汇量（一）	352
14.2.9 项目产生的净碳汇量（二）	353
主要参考文献	356



第一章 竹林资源与生长利用