

杜华强 周国模 徐小军 著



竹林生物量碳储量 Zhulin遥感定量估算



Shengwuliang Tanchuliang Yaogan Dingliang Gusuan



4031



科学出版社

S795

8

KD00904031

内 容 简 介

竹林生物量碳储量遥感定量估算

杜华强 周国模 徐小军 著

图 书 在 版 编 目 (CIP) 数 据



科学出版社

北方

湖南科技大学图书馆



KD00904031

内 容 简 介

本书主要以毛竹林、雷竹林为例,介绍竹林地上生物量碳储量遥感定量估算方法。全书分为8章,包括森林生物量碳储量遥感定量估算的原理、方法与过程,遥感数据几何校正、大气校正和地形校正及其对森林生物量碳储量估算的影响,竹林类遥感专题信息提取,竹林地上生物量碳储量遥感定量估算模型的变量设置、构建、分析与评价,竹林及其碳储量时空演变,毛竹林生物量空间变异特征,毛竹林叶面积指数和郁闭度定量反演以及竹林生物量碳储量遥感定量估算模型软件实现等。

本书既包括遥感数据处理的基本方法,又包括针对竹林及其碳储量遥感监测的大量实例,深入简出,实用较强,可作为遥感、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,也可作为科研工作者和林业相关部门的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

竹林生物量碳储量遥感定量估算/杜华强,周国模,徐小军著. —北京:科学出版社,2012.4

ISBN 978-7-03-033842-6

I. ①竹… II. ①杜… ②周… ③徐… III. ①竹林—生物量—森林遥感—定量分析 ②竹林—碳—储量—森林遥感—定量分析 IV. ①S795

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 044356 号

责任编辑:韩 芳 / 责任校对:刘珊珊

责任印制:刘 学 / 封面设计:殷 靓

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>

上海欧阳印刷厂有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年4月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012年4月第一次印刷 印张:11 1/2 插页2

字数:254 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

! 中国林业出版社 (北京) 2008 年 4 月第 1 版
五洲印刷厂承印 787mm×1092mm 1/16 32 印张 1.2 万字

前 言

在全球气候变化非同寻常的挑战面前,陆地生态系统特别是汇集着全球植被碳库 86% 以上碳的森林,在调节全球碳平衡和维护区域生态环境方面具有重大的贡献和作用,森林植被碳库及其作用成为国际社会研究的热点。其中,碳储量的精确估算是森林应对气候变化相关研究中最为基础性的工作,在众多的估算方法中,遥感对地观测技术以其独特的优势成为目前和未来森林碳储量定量估算的重要手段。

竹类植物是单子叶禾本科植物,具有速生丰产、快速收获的特点,是我国亚热带地区一类特殊的森林类型。研究表明,竹林资源特别是毛竹林具较强的固碳能力。随着 *Bamboo and Climate Change Mitigation* 一书在墨西哥坎昆全球气候变化大会上的亮相,竹林碳汇及其在全球气候变化中的作用得到了更加广泛的关注。

我国竹林资源遥感监测还处于初步阶段,基于遥感技术的竹林资源碳循环研究还在摸索之中,选择什么遥感数据、采用什么方法来提取竹林资源遥感信息,以及竹林地表参数定量反演、生物量碳储量遥感定量估算、碳储量时空演变格局等都需要探索。浙江农林大学率先在全国开展竹林碳汇相关研究,并在“竹林生态系统碳过程”、“竹林土壤碳特征”、“毛竹林碳储量遥感估测”、“碳汇林营造与计量监测”等方面取得一系列成果。本书是该系列的一部分,是作者在总结近几年研究成果的基础上成稿的,意在向相关领域的工作者介绍竹林资源碳汇遥感监测原理、技术、方法,以满足人们对竹林碳汇功能分析、评价的需要。

全书分为 8 章,主要包括:①遥感数据预处理,如几何校正、大气校正和地形校正等;②竹林地上生物量碳储量遥感定量估算模型构建的基本理论与过程;③竹林面积快速增长过程中碳储量的时空演变,以及土地利用覆盖变化对竹林碳储量的影响;④考虑到森林冠层在生态系统物质能量传输、太阳辐射传递等方面都有重要的功能,本书还以毛竹林为例,给出了竹林冠层叶面积指数和冠层郁闭度参数定量反演相关算法;⑤竹林碳储量遥感定量估算模型构建的软件实现。

在本书相关内容研究过程中,得到了浙江省安吉县林业局、临安市林业技术服务总站等单位的大力支持;浙江农林大学葛宏立教授、施拥军副教授、丁丽霞副教授、周宇峰、刘恩斌、徐文兵等参与了研究方案的设计和实施;美国印第安纳大学陆灯盛研究员指导了外业调查并在竹林碳储量遥感估算模型构建等方面提供宝贵的建议;研究生范渭亮、崔瑞蕊、董德进、李进、谢秉楼、商珍珍、陆国富、余朝林、谷成燕等在外业调查、数据处理、模型构建以及书稿文字、图表整理等方面做了大量的工作;东北林业大学范文义教授进行了全书的审稿。在此,一并表示感谢!

本书得到国家林业局 948 项目(2008-4-49)、国家自然科学基金青年基金(30700638)、国家自然科学基金(31070564)、浙江省自然科学基金(Y3100427)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!

由于水平有限,书中不足之处,恳请广大读者批评指正。

言 前

作 者

2011年9月

竹林是地球上最重要的生物圈之一,也是陆地生态系统中最重要的碳汇之一。竹林生物量碳储量是衡量竹林碳汇能力的重要指标,也是评估竹林生态服务功能的重要依据。然而,由于竹林生物量碳储量遥感定量估算的复杂性,目前尚缺乏一套成熟、可靠、实用的估算方法。本书在总结国内外相关研究成果的基础上,结合作者多年从事竹林生物量碳储量遥感定量估算的研究成果,系统阐述了竹林生物量碳储量遥感定量估算的原理、方法和应用。本书共分5章,第一章为绪论,第二章为竹林生物量碳储量遥感定量估算的原理,第三章为竹林生物量碳储量遥感定量估算的方法,第四章为竹林生物量碳储量遥感定量估算的应用,第五章为结论和展望。

本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。

本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。

本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。

本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。

本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。本书在编写过程中,得到了许多专家和学者的帮助和支持,特别是得到了浙江省林业厅、浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。同时,也得到了许多同行专家的指导和帮助,特别是得到了浙江省林业科学研究院、浙江省林业调查规划院、浙江省林业技术推广站等单位的支持和帮助。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 竹林资源	1
1.2 竹林资源的碳汇功能	2
1.3 竹林资源遥感监测现状	4
1.4 森林生物量碳储量研究背景和历史	4
1.4.1 历史背景	4
1.4.2 植被生物量碳储量研究的三个时期	6
1.5 森林生物量碳储量遥感估算概述	7
1.5.1 森林碳储量定量估算发展趋势	7
1.5.2 遥感定量估算模型的理论基础	8
1.5.3 森林生物量碳储量遥感估算的统计模型及分类	8
1.5.4 不同遥感数据生物量碳储量估算	11
本章参考文献	12
第 2 章 遥感数字图像预处理及评价	15
2.1 引言	15
2.2 几何精校正	15
2.2.1 几何精校正模型	15
2.2.2 几何精校正模型的求解与模型精度评价	16
2.2.3 几何精校正投影参数的设置	17
2.2.4 几何精校正实例	18
2.2 Landsat TM 遥感影像大气校正	19
2.2.1 绝对大气校正模型	19
2.2.2 相对大气校正及评价方法	26
2.3 遥感影像地形校正	29
2.3.1 地形校正概述	29
2.3.2 常用地形校正模型	29
2.3.3 地形校正实例	30
2.4 小结	34
本章参考文献	34
第 3 章 竹林类型遥感专题信息提取与评价	36
3.1 基于光谱特征的竹林信息提取	36
3.1.1 数据准备	36

3.1.2	分类特征设置	37
3.1.3	波段合成及目视解译	38
3.1.4	地物光谱特征曲线的提取与分析	39
3.1.5	光谱特征模型的构建	40
3.1.6	基于光谱特征的竹林信息提取结果	40
3.1.7	小结	41
3.2	基于 BP 神经网络毛竹林遥感信息提取	42
3.2.1	BP 神经网络简介	42
3.2.2	BP 神经网络算法简介	43
3.2.3	敏感性反向传播	44
3.2.4	数据准备	45
3.2.5	分类特征设置与选择	45
3.2.6	分类结果与精度评价	48
3.2.7	基于毛竹林遥感专题信息的安吉县毛竹林面积统计	52
3.2.8	小结	53
3.3	混合像元分解在竹林信息提取中应用	53
3.3.1	数据准备	53
3.3.2	算法原理与研究方法	53
3.3.3	分类结果与精度评价	57
3.3.4	小结	62
	本章参考文献	62
第 4 章	竹林样地调查及遥感变量的设置	64
4.1	竹林地面样地调查	64
4.1.1	安吉县概况	64
4.1.2	临安市概况	65
4.1.3	毛竹林样地调查及地上生物量估算	66
4.2.3	雷竹林样地调查及地上生物量估算	67
4.2	遥感变量设置	70
4.2.1	植被指数	70
4.1.2	纹理信息	71
4.1.3	缨帽变换	73
4.1.4	主成分变换	74
4.3	遥感变量值的提取	75
	本章参考文献	76
第 5 章	竹林生物量碳储量遥感估算模型构建与评价	78
5.1	引言	78
5.2	模型自变量	78
5.3	模型构建方案与评价方法	79

5.4	毛竹林生物量碳储量遥感信息模型	80
5.4.1	逐步回归筛选变量构建模型	80
5.4.2	Bootstrap 筛选变量构建模型	82
5.4.3	Erf-BP 神经网络构建模型	88
5.4.4	基于高斯核函数的 NLPLS 模型	92
5.5	毛竹林生物量碳储量光谱响应	99
5.5.1	波段间及其与生物量之间的关系	99
5.5.2	模型自变量对毛竹林生物量解释能力	99
5.5.3	植被指数解释毛竹林生物量的能力评价	102
5.6	小结	106
	本章参考文献	107
第 6 章	竹林及竹林碳储量时空演变	109
6.1	引言	109
6.2	LUCC 时空演变的评价方法	110
6.2.1	数量变化分析	110
6.2.2	LUCC 的时空变化	110
6.3	毛竹林时空演变	111
6.3.1	多时相遥感数据预处理	111
6.3.2	土地覆盖分布图与精度评价	111
6.3.3	毛竹林面积动态变化	111
6.3.4	土地利用类型转变对毛竹林面积动态的贡献	114
6.4	雷竹林土地利用时空动态	116
6.4.1	雷竹林区土地利用分布图	116
6.4.2	雷竹林时空变化	116
6.5	毛竹林碳储量时空演变	117
6.5.1	不同时相毛竹林地上碳储量遥感估算	117
6.5.2	乡镇单位上碳密度的时空变化	119
6.6	雷竹林碳储量时空演变	120
6.6.1	雷竹林碳储量遥感估算模型构建	120
6.6.2	雷竹碳储量时空分布	121
6.6.3	雷竹林区土地利用变化对碳储量的影响	121
6.7	竹林地上生物量空间变异研究	122
6.7.1	地统计及基本理论	122
6.7.2	普通克立格法	126
6.7.3	结果与分析	128
6.7.4	讨论	131
	本章参考文献	132
第 7 章	毛竹林郁闭度和 LAI 定量反演初步	134

7.1	概述	134
7.2	混合像元分解	136
7.2.1	带全约束的线性模型	136
7.2.2	几何光学模型	136
7.2.3	随机几何模型	137
7.2.4	概率模型	137
7.2.5	模糊模型	137
7.3	毛竹林真实场景模拟	138
7.3.1	毛竹冠型参数计算及简化模型	138
7.3.2	样地虚拟场景背景模型	139
7.3.3	毛竹林样地真实场景模拟	140
7.4	模拟端元获取算法	142
7.5	冠层郁闭度和 LAI 估算与评价	142
7.6	应用	142
7.6.1	样地选择与样地 LAI 计算	142
7.6.2	遥感数据处理	143
7.6.3	模拟场景评价及模拟端元获取	143
7.6.4	毛竹林冠层郁闭度估算与评价	144
7.6.5	毛竹林 LAI 定量反演	146
7.6.6	讨论	147
7.7	展望	149
	本章参考文献	149
第 8 章	竹林碳储量遥感定量估算模型软件实现	152
8.1	图形用户界面设计	152
8.1.1	主界面设计	152
8.1.2	竹林碳储量遥感估算模型界面设计	152
8.2	程序设计与实现	154
8.3	主要功能介绍	156
8.3.1	变量设置功能	156
8.3.2	变量值的读取功能	158
8.3.3	模型构建功能	159
8.4	模型构建	159
8.4.1	变量读取与筛选	159
8.4.2	一元模型	160
8.4.3	基于最小二乘的多元线性模型	161
8.4.4	基于偏最小二乘的多元线性模型	161
8.4.4	非线性偏最小二乘的模型	163
8.4.4	Erf-BP 神经网络模型	167
附表		169

第1章 绪 论

1.1 竹林资源

竹子是属于禾本科竹亚科(Bambusadea)的一类植物,全球约有150属、1225种,竹林面积达2000多万公顷,其中亚洲和大西洋竹区竹林面积占全世界的80%左右,美洲约有20属、300种木本竹类,非洲竹林面积相对最小。

我国地处世界竹子分布的中心,竹类植物资源十分丰富,主要竹类有40属、500余种。根据第六次(1999~2003年)森林资源清查结果显示,全国竹林面积484万公顷,占我国森林总面积的2.77%,与第五次资源清查相比,竹林面积增加63万公顷,截至第七次森林资源清查(2004~2008),我国竹林面积已增长到538万公顷。可见,近10年我国竹林面积以每年11.7万公顷的速度增长。我国竹林面积约占世界竹林面积的30%,居世界首位,我国成为名副其实的“世界竹子王国”。丰富的竹林资源为国家林业发展和生态环境建设做出了重大贡献,竹业产业及其竹产品深加工也极大地推动了地方的经济发展,竹林资源的生态、社会、经济效益越来越受到国家的重视。

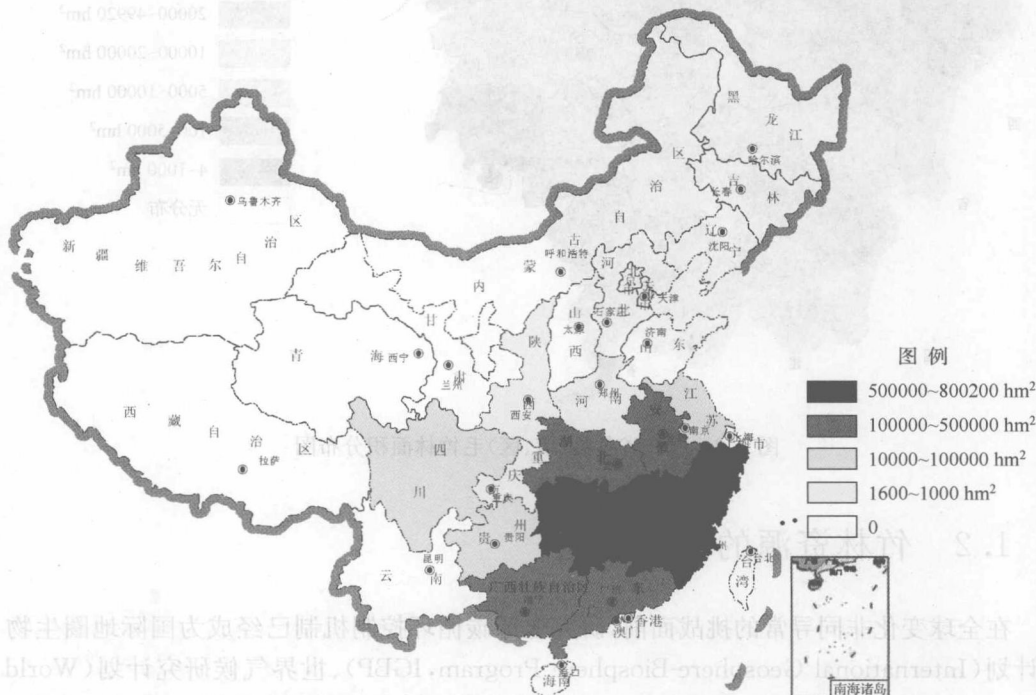


图1.1 中国各省(市)毛竹林面积分布示意图(按“九五”森林资源清查数据)

在我国所有竹类资源中,毛竹(*Phyllostachys heterocycla* var. *pubescens*)林面积具有绝对优势,约占竹林总面积的 70%,主要分布于福建、江西、浙江、湖南、安徽、湖北、广西、广东等省区(图 1.1),其中福建、江西、浙江、湖南四省的毛竹林面积均在 50 万公顷以上,并且随着竹林经济效益的凸显,这些地区的毛竹林经营水平不断提高,面积和产量也逐年增加。浙江省是竹林资源大省,在各县(市)中分布十分广泛(图 1.2),全省竹林面积为 83.34 万公顷,其中毛竹林面积为 70 万公顷(20.23 亿株),毛竹面积和株数均名列全国前茅。另据 2006 年《中国林业统计年鉴》,浙江毛竹林竹产品产值为 14.81 亿元,占同类产品总值的 38%。

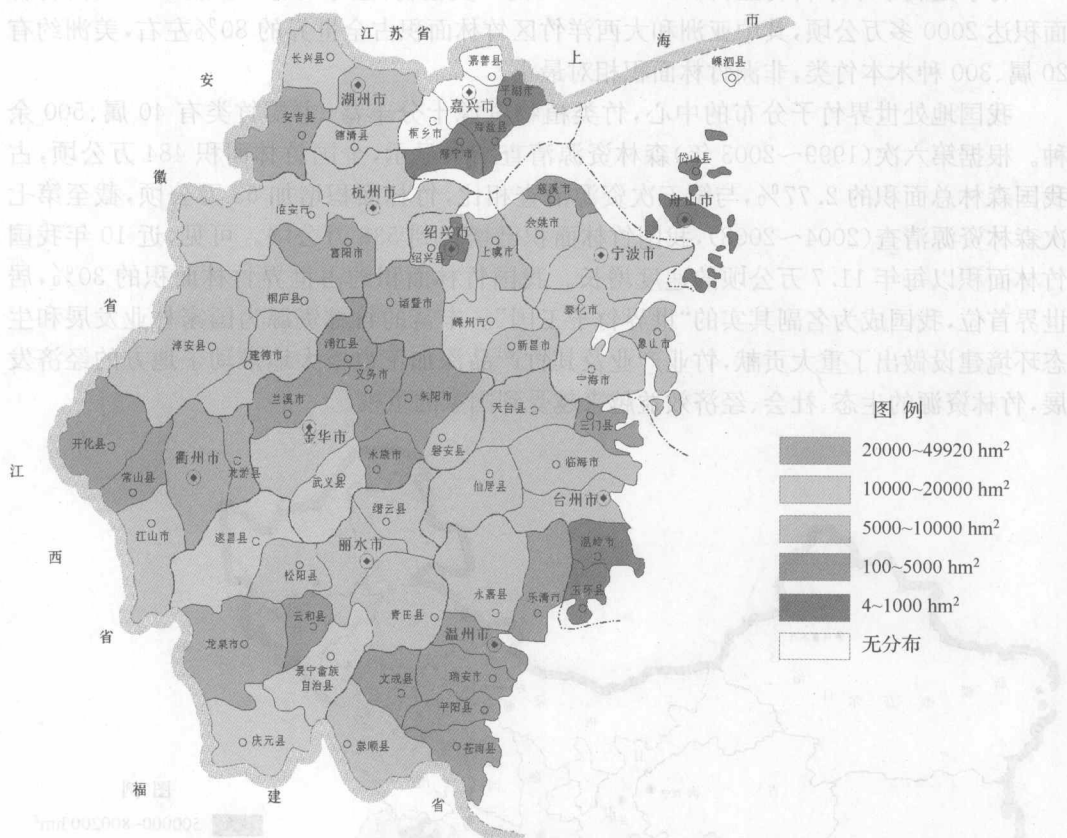


图 1.2 浙江省各县(市、区)毛竹林面积分布图

1.2 竹林资源的碳汇功能

在全球变化非同寻常的挑战面前,研究全球碳循环控制机制已经成为国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)、世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)、全球环境变化国际人文因素计划(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)和生物多样性计

划(International Programme of Biodiversity Science, DIVERSITAS)等科学计划的主题。同时,为了迎接这一挑战,最大限度地减少全球变化可能引起的不良后果,各国政府都投入了大量的人力、物力、财力进行研究。2009年12月《联合国气候变化框架公约》第15次缔约方大会即哥本哈根联合国气候变化大会将人类应对全球气候变化的研究推到一个新的阶段。

陆地生态系统特别是汇集着全球植被碳库86%以上碳的森林,在调节全球碳平衡和维护区域生态环境上具有重大的贡献,森林植被碳库及其作用成为国际社会研究的热点和焦点之一。研究表明,我国森林总碳库由1981年的4.3Pg C(1Pg=10¹⁵g)增加到2000年的5.9Pg C(方精云等,2007),2009年我国森林植被总碳储量达到7.8 Pg C。森林碳储量的增加说明我国森林是一个碳汇,对全球碳平衡具有重要的贡献。当然,第七次全国森林资源清查结果表明我国森林资源依然存在总量不足、质量不高等突出问题,针对这些问题,政府部门明确将“大力增加森林固碳总量,提高林业应对气候变化能力”作为改善我国森林资源保护和发展的对策之一,并指出大力培育碳汇林和生物质能源林,增强森林生态系统整体固碳能力,并尽快建立森林碳汇计量标准和监测体系,提高森林固碳监测能力。

为正确评估森林在全球碳平衡中的作用,在国家(或地区)尺度上对森林的碳动态进行更为细致的研究也日益成为人们关注的重点。刘国华等(2000)指出,高固碳能力森林类型碳的动态变化将直接关系我国森林的碳汇功能,因此,不同森林类型的碳储量在时间、空间尺度上的动态变化不仅对评估国家或地区尺度上森林在全球碳循环中的作用具有重要意义,而且对于森林的恢复重建以及保护和管理也有较大的指导意义。

竹类植物具有速生丰产、快速收获的特点,近年研究表明竹林资源特别是毛竹林具有高效固碳能力,其巨大的碳储量及对全球碳平衡的贡献开始受到广泛关注,并逐渐得到认可。

(1) 从碳储量总量上看,新中国成立60多年来,竹林碳储量从2.86亿吨提高到6.05亿吨,其碳汇总量占到全国森林植被总碳量的11%;60多年来,竹林碳储量翻了一番多,特别是近15年竹林碳储量增长最快;随着竹林面积的持续增长,竹林碳储量仍将继续增加(陈先刚等,2008;中国绿色时报,2009-10-14)。

(2) 从竹林生态系统看,我国竹林生态系统的碳储量约占整个森林生态系统碳储量的4.05%,表明竹林在森林生态系统二氧化碳减量方面具有重要作用(李正才等,2003)。

(3) 在局部区域上,竹林也具有较强的固碳能力和碳贡献。如安吉县每公顷毛竹生物量为44.228Mg/hm²(1Mg=10⁶g),碳密度为20.2965Mg C/hm²,据此推测浙江省毛竹地上总生物量碳储量约占全省林分总量的18%,接近20%(Du et al., 2010)。杭州市余杭区森林碳库的动态研究结果表明,1985年和1998年分别占全区森林面积46%和49%的竹林,却占该区当年森林碳储量总量的66%和65%(李惠敏等,2004)。

(4) 与同属亚热带其他主要森林类型相比,毛竹林乔木层年固碳量是亚热带山地雨林的1.4倍左右,是苏南27年生杉木林的2倍多。

(5) 竹林采伐周期短,竹炭、竹地板等竹产品利用周期长。毛竹5~8年就能采伐利用,如果以年均地上生物量(17~27Mg C/hm²)和五年内产生的碳储量(43~68 Mg C/hm²)

计算(Raya, 2007; Du et al., 2010),毛竹林的高效固碳能力及固碳优势将更明显。

随着中国绿色碳基金(中国石油)浙江临安毛竹林碳汇项目基地 2008 年在临安市藻溪镇严家村的启动、国际竹藤网络中心 2009 年“竹林生态和经营学术论坛—竹林经营与生物多样性和气候变化”的召开,以及 *Bamboo and Climate Change Mitigation* (Lou et al., 2010)一书 2010 年墨西哥坎昆全球气候变化大会上的亮相,竹林碳汇及其在全球变化中的作用得到广泛的关注和更大重视。

1.3 竹林资源遥感监测现状

我国森林资源监测、管理基本形成了以遥感、地理信息系统和全球定位系统相结合的监测框架,提高了监测效率与管理水平,并且随着遥感等空间信息技术的发展及全球变化研究中陆地植被的重要性,使得从不同遥感数据(从光学遥感到雷达遥感、从多光谱遥感到高光谱遥感、从低空间分辨率遥感到高空间分辨率遥感数据等)和不同尺度上(从区域到全球尺度等)全方位监测森林资源成为研究的热点。但针对我国亚热带特殊森林资源的竹林,其遥感监测还处于初步阶段,现有竹林资源的监测手段还比较传统,监测周期长、效率低、精度差,无法实时、快速、客观地完成大面积竹林资源清查和监测,因此,采用遥感等空间信息技术对竹林资源及生态系统进行长期定位观测、监测,实现竹林资源的数字化、信息化管理,是我国乃至世界竹林监测的必然趋势。

有关竹林遥感监测和竹林遥感信息的提取方法研究相对较少。就数据源而言,Landsat 系列卫星自发射以来,凭借其良好的性能价格比、丰富的光谱信息、快捷的图像更新周期优势,成为土地利用/覆盖调查、农业估产、区域规划、森林火灾监测等诸多方面应用最广泛的遥感数据源。以 Landsat TM 为数据源的相关研究表明,竹林遥感信息提取取得了比较满意的结果(杜华强等,2008;施拥军等,2008)。

1.4 森林生物量碳储量研究背景和历史

1.4.1 历史背景

生物量及碳储量研究之所以得到高度的关注,客观上主要是全球环境日益恶化,尤其是大量排放 CO_2 等温室气体所带来的严重后果直接影响到人类的生存发展。人们为了拯救地球,开始研究如何保护环境,减缓环境日益恶化的趋势。

森林生态系统通过光合作用吸收 CO_2 ,是一个强大的碳“汇”。而森林生物量是体现植物生长的关键因子,是生物生产力、净第一性生产力(net primary productivity, NPP)、碳循环和全球气候变化研究的基础。随着工业化的发展,木材需求量剧增,人们认识到如果任其发展下去,森林资源的供应将跟不上消耗,可采森林资源必将严重短缺。针对这一问题,人们开始思考如何合理的利用森林资源,如 1964 年芬兰和瑞典提出了全树利用观念(complete-tree concept),其目的在于充分利用森林生物量,将大量的加工剩余木质纤维,如树枝、树叶、树皮、木材片屑和剩余物,作为人造板、纸张、医药、食品、香料等工业的

原料;1974年美国人 Young 进一步提出了全林利用的概念,指出全林利用是集约经营森林内所有木本灌木和树种,从根尖至叶尖全部生物量在食物与饲料、固体或液体燃料、建筑材料和化学工业原料等方面得到全面利用(胥辉,1998)。Kimmins 指出,过去林业者只对树干感兴趣,而对生物量并不在意,但是随着全树利用的发展,人们开始对生物量的研究逐渐重视起来(曹福亮,2005)。

另一方面,研究气候及环境变化的政府和非政府组织或机构提出一些新观念和制定了一些计划或协议,推动科学界对生物量及碳储量估算的研究。如联合国科教文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)及其下属机构制定的国际生物学计划(International Biological Program, IBP)、人与生物圈计划(Man and Biosphere, MAB)、国际地圈-生物圈计划(IGBP),世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)和联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)于1988年联合成立的联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)以及《联合国气候变化框架》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)公约缔约方第三次会议于1997年通过的《京都议定书》(Kyoto Protocol)。这些组织促进了生物量及碳储量估算研究工作的开展。下面对其中几个典型的进行简要叙述。

(1) IBP IBP 由联合国科教文组织提出,1964年开始执行,包括陆地生产力、淡水生产力、海洋生产力和资源利用管理等7个领域,其中心是全球主要生态系统的结构、功能和生物生产力研究。这一计划以研究生物生产力为中心,实际上是在世界范围内对生物资源进行了一次摸底大普查(李文华,1978)。

(2) MAB MAB 是联合国教科文组织决定于1971年在 IBP 的基础上制定并开始实施的一项对生态环境进行综合性研究、监测及培训科研和管理人员的国际计划。其目的是为生物圈资源的合理利用和保护提供科学依据,预测由于人类活动而引起的生物圈状况的改变以及这种变化对人类的影响,其中生物生产量的调查和调控研究占有重要地位。在 IBP 和 MAB 实施的推动下,生物产量研究作为生态学的一个新分支——产量生态学迅速发展起来,并成为生态系统研究的重要分支领域。

(3) IGBP IGBP 是1986年9月在瑞士的伯尔尼(Bern)由联合国教科文下属机构国际科学联盟理事会(ICSU)决定实施的一项新跨学科研究计划。该计划使生物量的研究扩展到区域乃至全球尺度上,是生物量研究在空间尺度上的一次飞跃。其中,陆地生态系统碳循环研究是本计划的主题,并成为当时国际科学界广泛关心的前沿问题。全球碳循环研究的主要目标是完整表述全球碳循环,包括它的生物、物理和人文影响因子以及它们之间的作用与反馈过程。未来的研究主要集中在:当前碳源与碳汇的时间和空间模式、年际到千年尺度碳循环的动力控制与反馈以及未来全球碳循环的动态机制(Hibbard et al., 2002;刘清春等,2005)。

(4) IPCC IPCC 的主要任务是对气候变化的科学认识、气候变化的影响以及适应和减缓气候变化的可能对策进行评估。该机构在第三次评估报告中总结了20世纪全球气候变化的结果表明(孙成权等,2002):20世纪全球平均地表温度增加了 0.6°C 左右;地表8 km以上大气层气温在过去40年中有所升高;雪盖和冰川面积减少;全球平均海

平面升高而且海洋热容量增加。并且以新的证据证明过去 50 年观测到的全球性气候变暖主要由人类活动引起(孙颖等;2007)。陆地生态系统正成为储存日益增加的二氧化碳的汇。这主要与植物生产力的提高、生物量的增加将无机碳合成有机碳密切相关。

(5)《京都议定书》 《京都议定书》于 1997 年在日本京都通过,并且在 2005 年 2 月 16 日正式生效,这是人类试图阻止全球变暖的又一次重大行动。它的实质是减少全球温室气体 CO_2 的排放量,抑制大气中因 CO_2 含量升高而造成的气候变暖,保护人类生存环境和地球生态平衡。《京都议定书》在以下三方面促进了人们对生物量和碳储量估算的研究。①核心内容中的两项:灵活变通可跨国合作减量,可花钱从超额完成任务的国家购买额度;目标期限 2008~2012 年间总体计算。可购买和对碳排放总体计算预示着要比较准确地了解目前森林的碳储量动态变化。②允许缔约国通过保持及加强森林生态系统的碳储量来实现其减排承诺。③三大机制:排放贸易机制(emission trading,ET)、清洁发展机制(clean development mechanism,CDM)、联合履约机制(joint implementation,JI)。其中 CDM 造林再造林项目是利用森林的固碳作用来消减部分二氧化碳的排放量,并通过市场来实现森林生态效益价值的补偿,这意味着工业化国家可以通过在发展中国家实施林业碳汇项目来完成部分温室气体减排量。因此,基于碳平衡和碳交易的需求,森林生态系统生物量、碳储量估算以及森林植被碳库的动态变化成为目前急需解决的问题。

1.4.2 植被生物量碳储量研究的三个时期

国外森林生态系统生产力研究的中心集中在北美、欧洲和日本,研究对象主要为温带落叶林和针叶林、热带雨林。在该时期相应地涌现出了大量的论文和专著,其中有影响的著作包括 Newbould(1967)的《森林第一性生产量测定方法:第一性生产量水平上的陆地生态系统功能》(李文华,1978)、木村出版的《陆地植物群落的生产量测定方法》、佐腾大七郎等出版的《陆地植物群落的物质生产》和 Leith 等(1975)的《生物圈的第一性生产力》(胥辉,1998;Lieth et al.,1975)。

我国生物量的研究开始于 20 世纪 70 年代后期,最早是潘维待等(1979)对杉木人工林的研究,其后是冯宗炜等(1982)对马尾松人工林以及李文华等(1981)对长白山温带天然林的研究。刘世荣(1990)、陈灵芝等(1984)、党承林等(1991)也先后建立了主要森林树种生物量测定相对生长方程,估算了其生物量。

基于相关历史背景和研究,本书将生物量碳储量研究过程大致分为三个时期。

(1)起步时期 20 世纪 60 年代之前,人们开始关注生物量的研究,当然最早可以追溯到一百多年前的相关研究。1876 年,Ebermeyer 在德国进行了几种森林树枝落叶量和木材重量的测定。后来,Boysen Jensen 在研究森林自然稀疏问题时,研究了森林的初级生产力。1929~1953 年,Burger 研究了树叶生物量和木材生产力的关系。1944 年,Kittredge 利用叶重和胸径的拟合关系,成功拟合了预测白松等树种叶量的对数回归方程(安树杰等,2006)。

(2)高潮时期 20 世纪 60 年代到 80 年代末,生物量研究进入高潮。在这个时期,全球气候变化明显,人们开始关注温室气体的排放,主要是 CO_2 ,因此碳储量的研究受到关注。

(3) 由生物量到碳汇的转变 20 世纪 90 年代以后,进一步推动了生物量及碳储量研究的发展,并把重心转移到碳储量研究上。《京都议定书》的通过,预示着碳贸易市场即将问世,因此,碳储量的研究在市场的推动下变得更加活跃。

1.5 森林生物量碳储量遥感估算概述

1.5.1 森林碳储量定量估算发展趋势

目前国内外森林碳储量估算的方法包括森林固碳的随机模型法、相关生长的理论模型与森林植被生物量及各器官生物量分配法、生物量与林分材积平均比值法即平均转换因子法、转换因子连续函数法、生物量法、蓄积量法、以生物量与蓄积量为基础的生物量清单法及森林生态系统与大气 CO_2 碳交换量研究方法等。其中基于森林资源清查资料的碳储量估算方法比较常用,如方精云等(2001)利用 1949~1998 年间 7 次森林资源清查资料,估算中国森林植被碳储量在 50 年间变动于 4.38~5.06Pg C;刘国华等(2000)利用我国第一次(1973~1976)至第四次(1989~1993)森林资源清查资料,对我国近 20 年来的森林碳库进行了推算,结果表明我国四次森林资源清查(1973~1976、1977~1981、1984~1988 和 1989~1993)中森林的总碳储量分别是 3.75 Pg C、4.12Pg C、4.06 Pg C 和 4.20Pg C。

尽管各国科学家采用了大量的森林清查资料,对森林生态系统碳通量/储量和碳汇/源进行估计,但基于不同方法所计算的结果之间存在较大的差异,这主要是由复杂的陆地碳循环过程中大量的不确定性和数据缺乏造成的。另外,缺乏大尺度生态系统格局和过程的定量、动态观测也是限制碳循环研究进展的主要障碍(曹明奎等,2004),尤其没有形成完整的技术体系从不同尺度(单株-样地-区域-国家)对森林资源进行全方面、多过程以及长期、同步的监测和碳汇估测。因此,目前对森林碳汇、碳吸收量及地区分布、时间变化及其控制机制还缺乏明确的认识,需要对各种生态系统动态进行深入的研究,进一步发展对碳循环过程详细刻画的机制模型,并需要更先进的技术和更精确的基础观测数据。

遥感对地观测技术具有实时、动态、大面积同步监测和信息丰富的特点,它以电磁信息的形式快速记录环境条件(如气候、辐射和土壤水分)、植被分布格局与活动(如植被分布、组成、叶面积和有效辐射吸收)以及土地利用(森林砍伐、恢复、种植和农田弃耕)等动态变化,为生态系统模型运行提供高分辨率和实时变化数据(曹明奎等,2004)。可见,遥感对地观测技术在森林碳储量估算方面具有独特的优势。首先,遥感对植被光合有效辐射吸收的测定为估计植被生产力和碳固定变化提供了基础;其次,以遥感数据为基础,结合地面测量,以及相关模型将点上测量与陆地卫星 ETM+数据相联系,并借鉴生态系统过程模型如 Biome-BGC 和 IBIS 等描述水、碳循环的环境和生态控制因素,能够保证地面模型和遥感空间信息模型耦合精度。遥感在森林碳储量定量估算中的作用得到广泛的认可,是陆地和植被碳储量定量研究的重要进展,也是目前和未来森林碳估算及其动态变化规律研究的重要手段之一(Sandra Brown et al., 2002;秦小光等,2002)。

1.5.2 遥感定量估算模型的理论基础

植被遥感信息是其反射光谱特征的综合表征,而反射光谱在不同波段的特征主要由叶子色素、细胞构造以及细胞液、细胞膜所决定,如绿光波段的反射峰、红光区的吸收谷以及近红外区的强烈反射等。这些特征往往成为人们识别植被生长状况的依据,如实验和理论都证明,植被光谱曲线的“红边位置”、“绿峰反射高度”、“红谷的吸收深度”等会随着叶绿素含量、叶面积指数、生物量、年龄、植被的健康程度以及季节而变化。因此,植物的反射光谱特征能够反映其叶绿素含量和生长状况,进而可以解释叶生物量乃至群落的生物量(徐新良等,2006;杜华强等,2009)。因此,利用遥感数据来估算森林植被生物量,首先需要分析森林植被生物量估测的遥感模型机制,即需要从光合作用即森林植被生产力形成的生理生态过程出发,分析森林植被对太阳辐射的吸收、反射、透射及其辐射在植被冠层内及大气中的传输机制,然后结合植被生产力的生态影响因子,在卫星接收到的信息与实测生物量之间建立完整的数学模型及其解析式,并最终利用解析式估算森林生物量(张佳华等,1999;国庆喜等,2003;徐新良等,2006)。

地表参数遥感定量反演模型大致可以分为三类方法即统计模型、物理模型以及统计模型和物理模型相结合的混合方法。统计模型大多以波段及其派生波段(如植被指数)作为自变量进行遥感定量反演,模型较简单,但结构多样;物理模型主要指 BRDF (bidirectional reflectance distribution function)模型,包括辐射传输模型、几何光学模型、混合模型等,其最大的优势就是模型建立在电磁波辐射传输理论和植被生态学理论之上,不受植被类型等因素的影响,但模型比较复杂;混合模型指根据统计方法、物理模型的优点,将两者结合起来进行定量反演的一类模型。

1.5.3 森林生物量碳储量遥感估算的统计模型及分类

遥感信息模型与基于数学模型估算森林生物量是有重要区别的。数学模型是在抽象的数学空间内完成计算的,不一定与图像有关;而遥感信息模型是与图像有关的模型,是在数学模型的基础上按像元计算并能提供地学参数地理分布的可视化模型,因此,遥感信息模型还能对森林生物量的时空格局和动态进行分析和评价。建立遥感信息模型通常可分为选择遥感信息的独立变量、量纲分析、非线性多元回归分析和按像元计算并成图等步骤(马蔼乃,1997)。

目前,森林生物量碳储量遥感定量估算以统计模型为主。统计模型主要分为参数模型和非参数模型。参数模型是具有确定关系的数学解析式,如一元(非)线性、多元(非)线性模型等;非参数模型是非显式地包含可估参数,并对结果未知因素进行估算和预测,如人工神经网络等。以 TM 数据为例,对两种类型模型进行归类。

1.5.3.1 参数模型

1. 第一大类为线性回归模型(包括一元线性和多元线性回归模型)

这类模型的一般形式为

$$y = c + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots \quad (1.1)$$

其中, c 为常数项; a_i 为自变量系数; x_i 为自变量,可以是原始波段,可以是植被指数,也