




山西森林生态系统 碳储量研究

王 宁 著
富丰珍



中国农业科学技术出版社

S718.55
36

山西森林生态系统 碳储量研究

王 宁 著
富丰珍



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

山西森林生态系统碳储量研究 / 王宁, 富丰珍著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 5116 - 2100 - 9

I. ①山… II. ①王…②富… III. ①森林植被 - 碳 - 储量 - 研究 - 山西省
IV. ①S718. 55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 107925 号

责任编辑 张志花

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82106636 (编辑室) (010)82109702 (发行部)

(010)82109709 (读者服务部)

传 真 (010)82106631

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京教图印刷有限公司

开 本 710mm × 1 000mm 1/16

印 张 13. 75

字 数 230 千字

版 次 2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

定 价 38. 00 元

❖ 版权所有 · 翻印必究 ❖

本书由以下课题资助：

中国科学院战略先导专项专题：暖温带落叶阔叶混交林区域
山西中部森林固碳现状、速率和潜力研究（XDAO5050203 -
04 -01）

序

由于人类大量使用化石能源资源等原因，导致了全球气候逐渐变暖，极大地威胁着人类生存，气候变化已经成为全世界共同面对的严峻挑战。而森林被称为陆地最大的“碳储库”和最经济的“吸碳器”，对全球碳循环起着重要的调节和控制作用，因此，森林碳循环也成为全球气候变化研究的热点。区域森林生态系统碳储量也是森林生态系统碳循环研究的热点之一。

森林是人类的摇篮和陆地生态系统的主体，人类从诞生之日起就与森林结下了不解之缘。森林不仅为人类提供了木材和其他林产品，而且还具有涵养水源、保持水土、防风固沙、游憩保健、保护生物物种等多种作用，给人们提供了一个优美、安逸的生活环境，同时森林在调节全球碳平衡、减缓大气中温室气体浓度上升以及维护全球气候系统等方面具有不可替代的作用。然而，随着人口的迅速增长和工农业的不断发展，人类不惜代价地砍伐森林和侵占林地，森林以惊人的速度减少，已严重影响人类的生存环境，同时也制约了经济的发展。当今世界生态环境日益恶化，如温室效应增强、臭氧层被破坏、生物多样性锐减、水土流失严重、土地沙漠化扩大、土壤退化、干旱缺水和水患频繁、大气污染和酸沉降、水污染严重，包括现在比较严重的雾霾现象都与森林遭到破坏有着直接或间接的关系。人们越来越认识到保护森林就是保护地球、保护人类的绿色家园，保护和发展森林是改善生态环境，实现经济、社会和环境协调持续发展的根本性措施之一。

森林生物量作为森林生态系统最基本的特征数据，是研究森林生态系统结构和功能的基础，对于深入研究森林生态系统生物地球化学循环、水文学过程、碳循环和碳管理以及评估系统生产力与环境的相互关系等具有重要的科学价值。此外，森林生物量还是陆地生态系统碳计量与监测的核心问题，例如，国家温室气体清单、林业碳补偿项目等。依据《联合国气候变化框

架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 及《京都议定书》(Kyoto Protocol), 缔约方需定期提交土地利用变化和林业部门国家温室气体排放清单, 而且经过核准的碳汇量可用于抵消温室气体的排放量。因此, 森林生物量的研究一直受到重视, 从 20 世纪 60~70 年代的人与生物圈计划 (Man and the Biosphere Programme, MAB) 和国际生物学计划 (International Biological Programme, IBP) 到最近的全球森林碳平衡再评估, 有大量的研究报道。在 MAB 和 IBP 的推动下, 世界各国研究了陆地生态系统各植被类型的生物量 and 生产力及其地理分布规律, 以及植被生产力与气候因子、植物群落分布之间的关系。中国森林生态系统生物量 and 生产力的研究开始于 20 世纪 70 年代末, 这一时期的代表研究有杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.] 林、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr.) 林、红皮云杉 (*Picea koraiensis* Nakai) 林、雪岭云杉 (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey.) 林等。此后, 中国陆续开展了不同地带主要森林类型生物量 and 生产力的调查工作。经过 30 多年的发展, 积累了丰富的生物量数据, 遍布寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带等气候区, 为全面总结中国森林生物量研究的成果奠定了基础。

山西省地处黄河中游, 黄土高原东部, 森林地处暖温带区, 是我国北方森林的重要组成部分, 而其作为煤炭大省和全国重要的能源基地, 山西省的经济具有典型的高碳特征, 这使得其在全国乃至全球低碳经济的浪潮中形势不容乐观。因此, 本研究基于实地样点综合调查, 分析不同物种 (器官) 碳含量差异; 基于 4 个树种的解析木实测数据, 建立生物量分配格局及异速生长模型; 基于土壤剖面实测数据, 揭示不同植被类型土壤有机碳垂直分布格局; 基于对天然林和人工林碳库大小的调查, 比较不同林型的碳库大小, 揭示不同林型的固碳潜力; 基于实地样点综合调查, 得出山西省不同起源、不同龄组森林类型碳密度及其分配格局, 并结合山西省森林资源连续 4 期清查数据, 得出山西省森林生态系统碳储量及其动态变化, 综合探讨了山西省不同起源、不同龄组森林类型的有机碳含量、有机碳密度、碳储量及其分布规律与影响机制, 为山西省森林生态系统的合理经营、林业可持续发展及碳汇功能的评价提供科学依据, 对山西省在碳平衡交易中争取主动, 大力发展碳汇林业具有十分重要的意义。同时, 本研究取得的成果还可为我国区域性

森林生态系统碳库的估算提供数据支持和进一步评价森林生态系统在全球碳循环的贡献等提供素材。

本书共分七章，其中第一章、第二章、第六章和第七章由富丰珍执笔，第三章、第四章、第五章由王宁执笔。在本书出版之际，衷心地感谢北京林业大学水土保持学院的王百田教授的悉心指导与审阅，以及为本研究提供帮助的朋友们，同时也非常感谢张志花编辑为本书的出版所做的付出。由于作者水平有限，书中的不足之处在所难免，望读者批评指正。

王 宁 富丰珍

2015年4月

目 录

第一章 绪言	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 森林生态系统生物量和碳储量估算方法	2
1.2.2 森林生态系统生物量和碳储量研究进展	10
1.2.3 面临的问题	22
1.3 研究目的和意义	23
1.4 研究内容与技术路线	23
1.4.1 研究内容	23
1.4.2 技术路线图 (图)	24
第二章 研究区域与研究方法	25
2.1 研究区域概况	25
2.1.1 位置与范围	25
2.1.2 自然环境	25
2.1.3 社会经济	28
2.1.4 环保绿化	28
2.2 研究方法	28
2.2.1 资料收集	28
2.2.2 林分类型划分	29
2.2.3 标准地设置	30
2.2.4 调查取样	30
2.2.5 异速生长方程构建	32
2.2.6 碳含量和碳密度测定	32
2.2.7 基于森林清查数据估算碳储量	33
2.3 数据统计分析	33

第三章 单木生物量分配格局与异速生长模型构建	34
3.1 研究区概况	34
3.2 研究材料与方法	35
3.2.1 研究材料	35
3.2.2 研究方法	35
3.2.3 模型结构设计	36
3.3 结果与分析	37
3.3.1 单木生物量分配格局	37
3.3.2 单木生物量异速生长模型构建	43
3.3.3 单木生物量异速生长模型选择	57
3.4 小结	59
3.4.1 单木生物量分配格局	59
3.4.2 单木生物量异速生长模型	59
第四章 山西森林生态系统碳含量分析	61
4.1 乔木层碳含量	61
4.1.1 山杨乔木层碳含量	61
4.1.2 油松乔木层碳含量	62
4.1.3 侧柏乔木层碳含量	63
4.1.4 辽东栎乔木层碳含量	64
4.1.5 落叶松乔木层碳含量	65
4.1.6 刺槐乔木层碳含量	66
4.1.7 白桦乔木层碳含量	66
4.1.8 不同林种乔木层碳含量比较	67
4.1.9 阔叶林和针叶林乔木层碳含量	69
4.2 灌木层碳含量	71
4.2.1 山杨林灌木层碳含量	71
4.2.2 油松林灌木层碳含量	72
4.2.3 侧柏林灌木层碳含量	73
4.2.4 辽东栎林灌木层碳含量	74
4.2.5 落叶松林灌木层碳含量	75
4.2.6 刺槐林灌木层碳含量	76
4.2.7 白桦林灌木层碳含量	76
4.2.8 不同林种林下灌木层碳含量比较	77

4.2.9 阔叶林和针叶林灌木层碳含量	78
4.3 草本层碳含量	80
4.3.1 山杨林草本层碳含量	80
4.3.2 油松林草本层碳含量	80
4.3.3 侧柏林草本层碳含量	81
4.3.4 辽东栎林草本层碳含量	81
4.3.5 落叶松林草本层碳含量	82
4.3.6 刺槐林草本层碳含量	82
4.3.7 白桦林草本层碳含量	82
4.3.8 不同林种林下草本层碳含量比较	82
4.3.9 阔叶林和针叶林下草本层碳含量	83
4.4 枯落物层碳含量	85
4.5 土壤层容重与碳含量	87
4.5.1 山杨林土壤层容重与碳含量	87
4.5.2 油松林土壤层容重与碳含量	88
4.5.3 侧柏林土壤层容重与碳含量	90
4.5.4 辽东栎林土壤层容重与碳含量	91
4.5.5 落叶松林土壤层容重与碳含量	92
4.5.6 刺槐林土壤层容重与碳含量	93
4.5.7 白桦林土壤层容重与碳含量	94
4.5.8 不同林种土壤层容重与碳含量比较	94
4.6 小结	96
第五章 山西森林生态系统生物量与碳密度特征	98
5.1 乔木层生物量与碳密度	98
5.1.1 不同林分乔木层生物量与碳密度	98
5.1.2 不同起源乔木层生物量与碳密度	99
5.1.3 不同龄组乔木层生物量与碳密度	100
5.1.4 不同器官乔木层生物量与碳密度	104
5.2 灌木层生物量与碳密度	114
5.2.1 不同林分灌木层生物量与碳密度	115
5.2.2 不同起源灌木层生物量与碳密度	115
5.2.3 不同龄组灌木层生物量与碳密度	116
5.2.4 不同器官灌木层生物量与碳密度	118

5.3 草本层生物量与碳密度	127
5.3.1 不同林分下草本层生物量与碳密度	127
5.3.2 不同起源林分下草本层生物量与碳密度	128
5.3.3 不同龄组林分下草本层生物量与碳密度	129
5.3.4 不同器官草本层生物量与碳密度	130
5.4 枯落物层生物量与碳密度	138
5.4.1 不同林分枯落物层生物量与碳密度	138
5.4.2 不同起源林分枯落物层生物量与碳密度	139
5.4.3 不同龄组枯落物层生物量与碳密度	140
5.5 土壤层碳密度	141
5.5.1 不同林分土壤层碳密度特征	142
5.5.2 不同起源林分土壤层碳密度特征	143
5.5.3 不同龄组林分土壤层碳密度	145
5.6 山西森林生态系统生物量与碳密度	147
5.6.1 不同林分生态系统生物量与碳密度	147
5.6.2 不同起源林分生态系统生物量与碳密度	149
5.6.3 不同龄组生态系统生物量与碳密度	151
5.7 小结	155
第六章 山西森林生态系统碳储量动态特征	157
6.1 不同林分生态系统碳储量动态特征	157
6.2 不同起源林分生态系统碳储量动态特征	163
6.3 不同龄组生态系统碳储量动态特征	170
6.4 小结	177
第七章 结论与讨论	180
7.1 结论	180
7.2 讨论	182
7.3 研究的特色和创新点	187
主要参考文献	188
附录 I 山西连续 4 期森林清查统计表	189
附录 II 山西森林主要植物名录	194

第一章 绪 言

1.1 研究背景

由于人类大量使用化石能源资源等原因，大气中的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体浓度大幅度上升，自工业革命以来的 200 多年，它们分别增加了大约 30%、145% 和 15%（张志强和孙成权，1999），导致了全球气候逐渐变暖，由此引发了海平面上升、湖泊萎缩、物种灭绝，极端气候事件频发等问题，对全球的农业、牧业、水产、海洋、森林生态系统以及人体健康、社会经济产生严重影响，极大地威胁着人类生存（姜冬梅等，2007）。气候变化已经成为世界各国共同面对的严峻挑战。

减缓气候变暖，必须减少温室气体的排放，降低大气中温室气体的浓度。而森林可以通过光合作用，吸收 CO_2 ，释放 O_2 ，把大气中的 CO_2 以有机物的形式固定贮存下来，在一定时期内可以起到减少大气中温室气体浓度的作用。科学研究表明：森林每生长 1m^3 蓄积量，平均可吸收 1.83t CO_2 ，释放 1.62t O_2 。森林作为陆地生态系统的主体，贮存了 $1.0 \times 10^{12}\text{t}$ 有机碳，占整个陆地生态系统的 $2/3$ 以上（Brown，1996），因此，森林也被称为陆地最大的“碳储库”和最经济的“吸碳器”。近年来，林业在应对气候变化中的重要作用受到国际社会的普遍关注。《京都议定书》规定的 4 种温室气体的减排方式中，2 种与森林有直接的关系，以“净排放量”计算温室气体的排放量，即从本国实际排放量中扣除森林所固定的部分和通过采用绿色开发机制来减排，清洁发展机制（简称 CDM，Clean Development Mechanism）的造林、再造林项目和森林管理等活动允许发达国家可以通过在发展中国家实施林业碳汇项目来抵消其温室气体的排放量。《联合国气候变化框架公约》（United Nations Framework Convention on Climate Change，英文缩写 UNFCCC，简称《框架公约》）把植树造林、加强抚育、减少毁林、控制森林退化作为应对气候变化的主要措施，并列为巴厘岛路线图的重要内容；2009

年12月的《哥本哈根协议》(Copenhagen Accord)中明确指出,气候变化是我们当今面临的最重大挑战之一,各国均面临气候变化的负面影响,在应对全球气候变化中,各国家都应从科学角度出发大幅减少碳排放、减少滥伐森林,发达国家应向发展中国家提供资金以采取相应措施;2009年9月胡锦涛主席在出席联合国气候变化峰会上的讲话也指出“中国将进一步把应对气候变化纳入经济社会发展规划,继续加强节能减排、发展可再生能源、增加森林碳汇、发展绿色经济”。可见,气候变化已涉及全球各国的共同利益,森林在减缓全球气候变化中的重要作用已经成为世界各国的普遍共识。

所有这些工作必须建立在量化森林碳储量的工作基础之上,通过量化森林生态系统碳储量来评价不同森林生态系统类型的固碳能力,在理论和实践上都具有重要的意义(陶玉华,2012)。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 森林生态系统生物量和碳储量估算方法

1.2.1.1 森林植被生物量估算方法

森林植被生物量估算是进行陆地生态系统碳循环和碳动态分析的基础,已成为全球生态学研究的重要内容之一(蒋延玲等,2001;杨清培等,2003;邢艳秋等,2007)。早在20世纪50年代,日本、英国等国的科学家就研究表明,对于某一森林类型,森林的生产力和生物量与其自身的生物学(蓄积量、林龄等)有密切的关系(朱永杰,2012)。始于20世纪60年代中期的国际生物学计划(IBM)对不同类型生态系统生物生产力大规模调查和研究,这为各国乃至全球生态系统的碳储量和碳循环的研究奠定了坚实的基础(于贵瑞,2003)。森林植被生物量的研究已成为全球气候变化研究的热点之一(蒋延玲等,2001;杨清培等,2003;邢艳秋等,2007;黄从德,2008)。目前,估算森林植被生物量的方法常采用平均生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法、生物量模型法和遥感方法(于贵瑞,2003)。

(1) 平均生物量法,是基于某一单位面积森林类型样地生物量的实测数据,乘以该类型森林面积,进而估算出森林生物量(李文华等,1997;罗于祥等,1997;黄从德,2008)。其主要步骤是选择林地、林分,确定标准木,实测标准木平均生物量,推算林分生物量,从而对所研究林区的生物

量做出估计。平均生物量法除了利用实测样地生物量得到各类型森林单位面积生物量以外,还可以利用资源清查的样地数据,基于该森林类型的生物量相对方程计算样地生物量(李文华等,1997;罗于祥等,1997)。该方法在早期估算各尺度森林生态系统生物量及碳储量的研究中被广泛应用,也发挥了重要作用(Whittaker et al., 1975; Woodwell et al., 1978; Dixon et al., 1994)。但该方法的缺点是估算结果会有较大偏差,很难反映林分实际生长状况,在生物量的估算中是一种精度比较差的方法(于贵瑞,2003)。

(2) 生物量转换因子法,是利用某一森林类型的林分生物量与蓄积量的比值,乘以该森林类型的总蓄积量,得出该森林类型的总生物量(董恒宇等,2012)。Brown等(1982)采用由联合国粮农组织(Food and agriculture organization of the united nations, FAO)提供的主要森林蓄积量资料,估算了全球森林地上生物量,研究结果为热带森林的地上平均生物量为 $150\text{Mg}/\text{hm}^2$,Brown等(1989)指出,湿润、干旱和半干旱地区没有受干扰的原始森林的木材密度分别为1.74、1.95和1.57,并计算出全球森林总生物量与地上生物量之间的转换系数为1.6(Brown et al., 1989; 黄从德,2008)。但是,生物量和蓄积量还与森林类型、年龄、立地条件和林分密度等诸多因素有关。可见采用常数的生物量转换因子,不能准确估算森林生物量(吕勇等,1997;赵敏等,2004)。

(3) 生物量转换因子连续函数法,是为了克服生物量转换因子法中将生物量与蓄积量的比值作为常数的不足而提出的。研究表明,某一森林类型的林分生物量与蓄积量之间的比值是随林分立地、密度、林龄和林分生长状况等因素变化的(潘维待等,1981;吕勇等,1997;赵敏等,2004)。因此,Fang(2001)改进了这一不足,将生物量与蓄积量之间的比值改为分龄级进行换算,中国近50年应用的森林清查数据和实测数据,分析了全国森林植被碳储量的时空变化特征。但是,该方法还只是一种简单的线性回归方程,因此,在应用中还存在争议(王玉辉等,2001;Zhang et al., 2002;Zhou et al., 2002;黄从德,2008)。王玉辉等(2001)基于森林资源清查资料得到的落叶松林生物量估算模式则是双曲线关系,这样既克服了将生物量与蓄积量之比作为常数的不足,又避免将林分在任一个生长阶段的生物量随蓄积量的变化简单地处理为线性关系。目前,该模型仅对兴安落叶松进行了研究,是否适用于其他的森林类型,有待于进一步研究。

(4) 生物量模型法,是利用某一树种的生物量实测数据,通过数学统计的方法建立树种生物量与树高、胸径等参数间的统计回归模型,如异速生

长方程。对于某一株树木来讲,其生物量主要分为地上和地下两部分,地上部分主要包括叶、枝和干生物量,地下部分即根系的生物量,在生物量的测定中,除称量各部分生物量的干重外,有时还要计算它们的分配比(许善财,2010)。通常地下生物量占21%,而地上生物量高达79%左右(Ravindranath,2008;王宁等,2013a)。该方法主要优点是直观明确,操作简便、精度高并节约成本,缺点是费时费力。

(5) 遥感方法,是根据植物反射光谱特征结合遥感数据来估算森林生物量的方法(Spencer et al.,1997;Friedl et al.,1995;张佳华等,1999)。遥感技术为传统的估算、检测和验证生物量及生长率变化提供了一种新的选择,其具有效率高、破坏小、成本低、精度高的特点。目前,在区域森林资源调查及森林生物量估测中,应用了多种遥感技术如多光谱扫描仪、侧视雷达、合成孔径雷达(SAR)等(刘红辉等,2000)。尽管国内外的学者应用该方法在估测各尺度森林植被生物量方面已做了大量的研究(Boyd et al.,1999;Nicholas,1999;刘红辉等,2000;杨存建等,2004;汪少华等,2011),但是成功的案例并不多,对于复杂的森林生态系统,其估测效果还不甚理想,不过,随着遥感技术的不断发展与进步,且从效率和成本来讲,利用遥感方法估测森林生物量将成为主流(黄从德,2008)。

森林植被的生物量是由乔木层、灌木层和草本层组成,而上述几种生物量估算方法一般只是对乔木层生物量进行估算,往往忽略了林下灌木层、草本层的生物量,这样会导致森林生物量估算的结果偏小(黄从德,2008)。

1.2.1.2 森林植被碳储量估算方法

森林生态系统碳储量由乔木层、灌木层、草本层、枯落物层和土壤层碳储量组成(周玉荣等,2000)。森林植被碳储量的估算方法是精确估算森林植被碳储量的前提和基础(周玉荣等,2000;黄从德,2008)。

目前,森林生态系统乔木层碳储量的测定常用的有生物量法、蓄积量法、生物量清查法、涡度相关法、模型模拟法和遥感估算法等(方精云,2000;王效科等,2001;于贵瑞等,2004;王文杰等,2007;马泽清等,2007;Castellvi et al.,2008;程堂仁等,2008;曾伟生等,2011;陶玉华,2012),灌木层、草本层、枯落物层常用样方法测定(Brown et al.,2005)。生物量法、蓄积量法和生物量清查法是最基础的估算森林碳储量的方法,被国内外学者广泛应用;涡度相关法国外学者应用较多,且取得较多成果,而国内起步晚,应用较少;模型模拟法是应用统计学模型来估算森林碳储量的一种方法;遥感估算法在进行大尺度、连续和定量监测具有较大优势

(王光华, 2012)。样方法是目前灌木层、草本层、枯落物层实测的唯一较好的方法, 但其准确性易受主观和客观因素的影响, 且费时费力。各种方法所用的原理和技术手段不同, 在不同尺度上测算时各有优缺点, 获得的估算结果有一定差异。

(1) 生物量法, 是通过野外森林样地实地调查, 获得大量实测数据, 建立森林植被生物量数据库和相关碳含量等参数, 并基于样地数据获得森林的平均碳密度, 再乘以森林面积来估算森林植被的碳储量(吴金友, 2010)。该方法操作简单, 是目前应用最为广泛的方法, 主要是因为该方法操作技术简单、直接, 但其在大规模研究上, 还存在野外调查工作量大、成本高等问题。

(2) 蓄积量法, 是通过抽样调查来计算各主要树种的平均蓄积量, 再通过生物量与蓄积量间的转换系数来估算森林的碳储量(吴金友, 2010)。早期的生物量法是通过大量实地调查, 获得实测数据, 建立生物量数据库和相关参数, 基于样地数据获得树种的平均碳密度, 将其与树种面积相乘来估算森林植被的碳储量。目前, 生物量与蓄积量间的转换系数的方法有生物量扩展系数法、生物量转化和扩展系数法(Guo et al., 2010)。该方法在实际应用中虽有较强的实用性及操作性, 但因在转换系数上多采用的是缺省值, 从而造成较大的误差, 降低了森林碳储量的估算精度(王光华, 2012)。

(3) 生物量清查法, 是把野外调查资料与森林清查资料相结合的一种方法, 即获取单位面积森林的生物量、蓄积量和树种的干密度, 结合植被碳含量来估算森林植被单位面积的碳储量(吴金友, 2010)。

$$P_c = \frac{V \times D \times C_c}{R}$$

式中: P_c ——单位面积的森林乔木层碳储量;

V ——单位面积的森林蓄积量;

D ——树干的密度;

R ——树干的生物量占乔木层生物量比例;

C_c ——植物碳含量(通常采用0.5)。

该方法也存在野外调查工作量大、成本高的问题, 而且碳含量采用固定值, 也会降低碳计量的精度。

(4) 涡度相关法, 也称为微气象法, 是通过测量近地面层的湍流状况和被测气体(如 CO_2)的浓度变化来计算被测气体通量的方法, 该方法要求测量仪器灵敏度高、响应快、可连续操作, 可获得气体排放的长时间的变

化特征，在理论上极大地减少了测量的误差，被广泛应用于陆地碳平衡研究中（王文杰等，2007；Castellvi et al.，2008）。但自然环境的变化是人们难以控制的，而且这种方法本身对操作环境的要求又比较高，操作还有一点难度，使得估算的结果存在较大的误差（王光华，2012）。同时，该方法成本较高，操作难度较大，尽管现在已建立区域性和全球性的网络，但它仍然是一种小尺度观测方法，其结果只表示特定生态系统在特定环境中的碳循环特征，还难以用于大尺度研究（王效科等，2001；温学发等，2004；曹明奎等，2004）。因此，目前涡度相关通量法在国内没有得到较好的应用，而国外在这些方法上的研究较早，掌握的技术相对成熟，应用相对较多。总的来看，涡度相关通量法成本高、技术要求高、实际操作难度大，对于生态系统碳循环的长期变化，不是最经济有效的方法。

(5) 模型模拟法，是研究区域生态系统碳循环的一种途径，其是应用数学统计模型来估算森林植被生物量和碳储量的方法（吴金友，2010）。目前研究已有较多模型，例如，MIAMI 模型模型和 Thornthwaite Memorial 等统计模型（王维芳等，2009；高浩等，2009），BIOME 模型、CENTURY 模型、MAPSS 模型、BIOME-BGC 模型和 CASA 模型等参数模型（赵茂盛等，2002；Wang et al.，2009），Chikugo 模型和 Holdridge 模型等半统计半参数模型（Yue et al.，2001；高志强等，2006；于贵瑞，2006）。近几年来该方法在大尺度森林碳循环研究中得到广泛应用，开始由原来的静态统计模型向生态系统机制性模型转变。这些模型的研究有助于人们认识和了解生态过程中碳收支状况，但这些模型包含了许多假说，且应用常常受限于实测样点上，同时由于一些生态过程的特征参数不易获得或者很难把握，不确定因素较多。

(6) 遥感估算法，即应用遥感技术手段，主要是通过建立植被指数与生物量关系的模型来推算森林净初级生产力（net primary production, NPP）的方法（吴金友，2010）。在区域尺度研究中，遥感方法具有其他传统方法不可替代的作用，被广泛应用于研究全球碳平衡及其空间格局的工作中（曹明奎等，2004；王淑君等，2008；张茂震等，2009）。优点是用统一方法进行大面积碳储量变化的估算，并不需要直接测定生物量的贮存量，但该方法需要对模型进行校正，否则难以获得较准确的生物量估算值（吴金友，2010）。不过，随遥感技术的不断发展，遥感信息在空间、时间和光谱分辨率上逐步得到改善，可满足各种研究在时间和空间尺度上的要求，该方法在大尺度森林碳储量的研究中会发挥显著的作用。