

Study on Forest Biomass and Carbon Storage in Water Source of
Middle Line South to North Water Transfer Project

南水北调中线工程水源区 森林植被生物量和碳储量研究

■ 郭占胜 主编



黄河水利出版社

南水北调中线工程水源区 森林植被生物量和碳储量研究

主 编 郭占胜

参编人员 (以姓氏笔画为序)

马雪范	王一州	王国锋	王彦芳
石金先	刘学芝	刘 航	吕贤晓
吕鋈翔	宋海龙	张天聚	张延义
杨哨爽	姚晓锋	郭青波	郭 鹏
靖安猛	骞绍娟	魏亚平	魏耀远

黄 河 水 利 出 版 社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

应对气候变化已经引起了多国政府、世界组织和研究界的广泛关注。森林在应对气候变化中具有重要作用。本书主要内容包括:森林植被生物量、碳储量的研究现状、估算方法和影响因素;中国森林植被结构特征;以南阳市为例,对南水北调中线工程南阳水源区森林植被生物量和碳储量进行估算,提出了南阳水源区森林资源保护和发展对策等部分。

本书可供林业、农业、生态、环保等领域研究人员和相关部门管理人员参考,也可供关注生态的各界人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

南水北调中线工程水源区森林植被生物量和碳储量
研究/郭占胜主编. —郑州:黄河水利出版社,2016. 7

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1504 - 6

I. ①南… II. ①郭… III. ①南水北调 - 水利工程 - 供水水源 - 森林植被 - 生物量 - 研究 ②南水北调 - 水利工程 - 供水水源 - 森林植被 - 碳 - 储量 - 研究
IV. ①S718. 55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 175620 号

组稿编辑:王路平 电话:0371 - 66022212 E-mail:hhsllwlp@126. com

出版社:黄河水利出版社

网址:www. yrcp. com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126. com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:10. 5

字数:240 千字

印数:1—1 000

版次:2016 年 7 月第 1 版

印次:2016 年 7 月第 1 次印刷

定价:30. 00 元

前 言

近年来,随着 CO_2 等温室气体直接进入到大气中,形成的温室效应引起的气候变化,使得整个地球范围的气温上升,已经成为摆在世界各国面前的必须重视和解决的重大问题。世界各国非常重视气候变化带来的各种问题,正通过积极的态度和卓有成效的行动来控制温室气体的排放速度,以达到减慢气候迅速变化的目标。1992 年签署了《联合国气候变化框架公约》,1997 年签署了《京都议定书》,历年来召开的世界气候大会记录了世界各国在应对气候变化方面谈判的里程。

森林是陆地上最大的生态系统,存储着全球 86% 以上森林植被的碳和土壤碳库 73% 的碳,在缓解大气中 CO_2 浓度上升、调节全球碳平衡等方面具有不可替代的作用。森林生态系统不仅在调节区域气候上有着重要作用,同时通过碳循环,对全球的气候变化有着重要影响,还对地球其他生物的生存有着深远的影响。因此,估算森林碳储量对研究森林生态系统碳平衡、碳循环、碳汇有着积极的重要作用,同时为建设资源节约型、环境友好型社会提供了一定的理论基础。

南水北调中线工程是缓解我国北方水资源短缺、优化水资源配置的重大战略性基础设施。南阳市是南水北调中线工程的重要水源地和渠首所在地,是南水北调中线工程输水干渠线路最长、移民最多、工程量最大、环保任务最重的省辖市,在整个南水北调中线工程建设中占有非常重要的地位,进一步改善南水北调中线工程渠首水源地生态环境是保证该工程成功的关键。正确评估渠首水源地森林碳储量不仅对于促进该区域森林资源经营管理、生态环境改善和可持续发展提供重要的科学依据,而且对于进一步研究该区域碳循环和碳汇问题具有十分重要的意义。

本书广泛收集了历年来公开发表和出版的森林植被生物量和碳储量研究相关的资料,对森林植被生物量和碳储量相关研究进行了归纳总结,介绍和分析了中国森林资源结构特征,在此基础上以南阳市为例,分析了南水北调中线工程水源区森林资源结构特征,对水源区森林植被生物量和碳储量进行了估测,提出了水源区森林资源保护和发展对策。

本书共分 7 章,分别为绪论(第 1 章)、森林植被生物量(第 2 章)、森林植被碳储量(第 3 章)、中国森林资源结构特征(第 4 章)、南水北调中线工程水源区概况及森林资源结构特征(第 5 章)、南水北调中线工程水源区森林植被生物量和碳储量估算(第 6 章)、南水北调中线工程水源区森林资源保护和发展(第 7 章)。附件中列出了国家应对气候变化规划(2014~2020 年)、历届世界气候大会简介、中国应对气候变化的政策与行动(2014 年度报告)、林业应对气候变化“十三五”行动要点等内容,供读者了解。

本书的完成,归功于被引用文献的作者。他们开展了各类森林生物量和碳储量的研究,才获得了大量的数据资料和研究成果,值得编者深深感谢。在本书的编写过程中,也

得到中国林业科学研究院、河南省林业厅以及南阳市林业系统有关领导、专家的指导和帮助,在此一并表示感谢。

由于时间和作者水平限制,书中一些疏漏之处在所难免,敬请专家、读者批评指正!

作 者

2015 年 12 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 温室效应与全球温暖化	(1)
1.2 森林的固碳功能及其对全球气候变化的影响	(2)
1.3 森林植被生物量和碳储量研究意义	(4)
第2章 森林植被生物量	(5)
2.1 森林植被生物量研究现状	(5)
2.2 森林植被生物量估算方法	(8)
2.3 森林植被生物量分布格局	(16)
2.4 影响森林植被生物量的因素	(18)
第3章 森林植被碳储量	(20)
3.1 有关碳储量和碳汇的基本概念与内涵	(20)
3.2 森林植被碳储量和碳汇研究现状	(21)
3.3 森林植被碳储量估算方法	(23)
3.4 森林植被碳含量	(27)
3.5 影响森林植被碳储量的因素	(30)
第4章 中国森林资源结构特征	(34)
4.1 中国森林资源现状特征	(34)
4.2 中国森林资源变化特征	(42)
4.3 中国各省(自治区、直辖市)森林资源主要指标变化特征	(45)
第5章 南水北调中线工程水源区概况及森林资源结构特征	(55)
5.1 水源区概况	(55)
5.2 森林资源结构特征	(56)
第6章 南水北调中线工程水源区森林植被生物量和碳储量估算	(60)
6.1 森林植被类型划分	(60)
6.2 估算方法	(61)
6.3 生物量和碳储量估算结果	(64)
第7章 南水北调中线工程水源区森林资源保护和发展	(89)
7.1 林业生态建设取得的成就	(89)
7.2 水源区生态建设存在的问题	(90)
7.3 提高水源区森林植被生物量和碳储量的对策	(92)
附录1 国家应对气候变化规划(2014~2020年)	(94)
附录2 历届世界气候大会简介	(119)

附录 3 中国应对气候变化的政策与行动(2014 年度报告)	(122)
附录 4 林业应对气候变化“十三五”行动要点	(138)
参考文献	(143)

第1章 绪论

地球上几乎所有的环境问题都与人类自身的社会经济活动密切相关,全球变暖问题也不例外。最近两个世纪以来,特别是工业革命以来,人类对生物圈的活动已从区域扩展到全球(Vitousek, 1997),由于地球人口的急剧增长和工业的高速发展,人类对粮食、能源等资源的需求日益增加,煤碳、石油等化石燃料的大量应用,土地利用方式发生前所未有的变化,森林资源特别是热带雨林遭到严重破坏,人类正通过自身的行为扰动和改变各种自然过程,严重影响到地球生态系统的平衡。受人类活动的影响,全球碳循环受到显著改变,大气中二氧化碳等温室气体浓度在持续大幅度增加,导致温室效应增强、全球气候变暖、大气环流发生变化、区域性气候变化加剧等一系列的生态环境问题。

最近 30 多年来,全球气候变化及其对全球生态系统和人类生存环境的影响,不仅是举世瞩目的重大科学问题、经济贸易和环境保护问题,而且已经成为一个具有浓烈政治色彩的全球问题,受到国际社会的普遍关注,它对当今人类社会所产生的巨大影响可谓空前而深远。

1.1 温室效应与全球温暖化

1.1.1 温室效应的产生

二氧化碳等温室气体吸收长波辐射并将热量反射回地球,从而减少向外层空间的能量净排放,对大气层和地球表面起着保温的作用,这就是“自然”温室效应。早在 1824 年,法国科学家 Joseph Fourier (1768 ~ 1830 年)就对地球大气层的温室作用进行过描述,大气层能被太阳的短波辐射几乎无阻挡地穿透从而到达地面,同时阻挡和部分吸收地球向外发射的红外长波辐射,而使地球表面及低层大气增温,他把这种现象称为“玻璃效应”,即现代所称作的温室效应 (Greenhouse Effect) (Fankhauser, 1995)。进一步研究表明,大气中起温室作用的气体只有水汽 (H_2O)、二氧化碳 (CO_2)、氟利昂 (CFC_s)、甲烷 (CH_4)、一氧化二氮 (N_2O)、臭氧 (O_3) 等少数几种,且在大气中的含量甚微,除水汽外,其他几种温室气体在大气中的体积含量约为 0.3‰,但它们却在调节地球气候中起着十分重要的作用。假设地球大气中不存在温室气体,那么地球的平均温度大约是 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$,而不是现在的 $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$,比现在要冷得多 (Mitchell, 1989; Fankhauser, 1995),整个地球的生态系统将不会出现目前这种生机盎然的景象,因此大气中温室气体的存在在整个地球生命系统中起到了至关重要的作用。但是,温室气体在大气中的浓度变化通过辐射强迫会直接影响大气温室效用的强弱,特别是短时间内的快速变化,将会引起全球气候系统波动及异常变化,从而对人类社会甚至整个地球生物圈产生不可逆转的灾难性影响。

在直接受人类活动影响的主要温室气体中,二氧化碳起着重要的作用,对温室效应的

贡献率为 55%, 甚至有学者估计 CO_2 和 CH_4 的增温效应分别占 70% 和 23% (Houghton, 1990)。从长期气候数据比较来看, 气温和二氧化碳之间存在显著的正相关关系 (Bate, 1992)。

1.1.2 全球温暖化及其产生的影响

全球范围内的气温不断上升会诱发各种类型的极端异常气候, 如海水膨胀、冰川融化、地区性异常气象频繁发生等, 从而对自然生态系统、农林业生产及人类生存环境等都会产生极大的影响。全球变暖对人类生存与发展将会产生不同程度的影响。对于发展中国家而言, 由于同时面临着现有的各种公害及其他环境问题, 全球变暖引起的异常气象的频率增加, 无疑会对这些国家的生存基础和生产基础造成严重的打击。美国地质勘测局的调查结果表明, 全球增温在加速, 阿拉斯加州和加拿大的北极地区永冻层在消退, 环绕南极大陆和北极海域的海冰范围在缩小, 世界各地的冰川也在退缩, 并且导致了改变地球气候带、改变生物群落空间分布及其生物多样性、水资源短缺、水量分布不平衡、自然灾害加剧、海平面上升等一系列生态环境问题 (刘增兰, 2004; 张峥等, 2000)。这种大气中 CO_2 和 CH_4 浓度的升高和全球变暖无疑是人类活动影响的结果, 并引发了一系列严重的全球环境问题, 给人类自身的生存和可持续发展带来了巨大的威胁。从 1995 年起到现在, 连续召开的 20 届世界气候大会, 无疑都是国际社会对全球气候变化的响应。

1.2 森林的固碳功能及其对全球气候变化的影响

1.2.1 森林的固碳功能

绿色植物通过光合作用将大气中的 CO_2 转变为有机物储存起来, 所以光合作用是降低大气中 CO_2 浓度的根本途径。光合作用过程又称为初级生产过程 (Primary Production), 光合作用合成有机物的速率称为总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP)。陆地生态系统是受人类活动影响和干扰最大的部分, 陆地生物群落的碳储量为 $5.5 \times 10^{17} \sim 5.6 \times 10^{17} \text{ g}$ 。其中, 森林是陆地生物圈的主体, 森林总面积 40.33 亿 hm^2 , 占地球陆地面积的 31% (FAO, 2010), 其生物量约占整个陆地生态系统生物量的 90%, 生产量约占陆地生态系统的 70%。它不仅在维护区域生态环境上起到了重要作用, 而且在全球碳平衡中也做出了巨大的贡献。森林生态系统的固碳作用取决于 2 个对立过程, 即碳素输入过程和碳素输出过程, 碳素输入过程主要通过植物净光合作用实现, 而碳素输出过程主要指森林土壤和动物的异养呼吸过程以及凋落物的矿质化过程。

1.2.2 森林固碳功能对全球气候变化的影响

近年来, 随着温室效应和气候变暖的加剧, 森林碳汇问题越来越受到人们的重视, 森林与气候变化的关系也逐渐成为人类关注的焦点。森林作为陆地生态系统的主体, 既为人类提供了木材、食品、能源、药材等众多的物质产品, 又为人类提供了固碳释氧、涵养水源、保持水土、净化空气、防风固沙和保护生物多样性等丰富的生态产品, 还为人类提供了

休闲度假、生态旅游和文化遗产的重要场所,人类生存发展和繁荣进步永远也离不开森林的保障和支撑(国家林业局,2014)。森林除上述功能外,更重要的是它可以通过全球碳循环,对全球性的气候变化产生重要影响。森林植被是陆地生物圈的主体,森林生态系统是陆地生态系统中生产力的最高系统,生物量很高,生物量(干重)中含碳 43% ~ 58%,约有 90% 的陆地有机碳储存于森林生态系统中(Cost 等,1996;Whittaker 和 Likens,1975;Chen 等,2004)。由于它的固碳储碳的强大功能,森林在全球碳循环中起着举足轻重的作用。

人类活动对 CO_2 的影响有两方面:一方面是人类往往通过有意或无意地毁林,将森林生态系统(包括森林植被和土壤)中储存的 CO_2 释放大气中,使大气中 CO_2 的浓度增加,从而导致温室效应;另一方面,人们可通过造林和抚育森林,加速森林的生长(称作森林的再生长,Forest Regrowth),使森林面积扩大、森林蓄积量上升,从而吸收更多的 CO_2 ,使大气中的 CO_2 浓度减少,从而减缓全球气温升高。对全球温室效应而言,森林具有双重功能:当它遭到破坏时,加速全球温暖化进程;而当它得到保护和有效管理时,则可以起到减缓气温上升的作用。简而言之,毁林(Deforestation)、造林(Afforestation)和森林的再生长决定着森林在全球变化中作用的方向和程度。

森林生物量是研究森林生态系统碳循环的一个重要过程。因为,一方面,森林的生长可以从大气吸收和固定大量的碳,是大气中 CO_2 的一个重要碳汇;另一方面,森林的采伐利用使原先已经固定的碳释放,成为 CO_2 的一个重要碳源(吴仲民等,1998)。森林植被具有较强的生存持续性以及结构和功能的稳定性,在生物地球化学循环中起着重要作用(蒋有绪,1995)。森林生长吸收 CO_2 ,并具有长期保存能力,在调解陆地生态系统与大气碳库之间的碳交换中起到巨大的“生物泵”作用(肖冬梅,2004)。

温室气体引起的全球变暖,是全球科学家们普遍关注、研究的问题。在全球的碳循环中,令科学家困惑的问题依然是对全球陆地生态系统碳通量/储量和碳汇/源的估计以及区域分布的研究结果还存在着极大的不确定性(Tans 等,1990;Ciais 等,1995;IPCC,2002)。正因为碳储量研究结果缺乏必要的精度支持和可比性,难以确定某一国家对碳汇的贡献具体有多大,无法为 CO_2 减排以及维护全球气候平衡等方面提供有效支持。例如,森林凋落物和木质物残体是森林生态系统的重要组成部分。但传统上对森林凋落物的研究主要是在生态系统养分循环的背景下进行的,近十几年对凋落物研究才主要在全球气候变化的背景下进行。而目前地面凋落物积累已被看作是一个重要的碳汇(彭少麟等,2002;Borwn 等,1996)。同样,林下灌草对生态系统碳的循环速率等方面发挥的重要作用逐步得到重视(林开敏等,1999)。Martin 等(2001)总结回顾了温带森林碳汇研究的具体组分和估算方法中一些不确定的影响因素。可见,只有加强森林生态系统碳储量的取样方法和研究方法的研究,在特定研究范围内采用统一的研究方法,提高森林生态系统碳循环研究的精度,掌握森林碳储量大小、分布、碳汇/源功能,才能满足现实科学研究需要,对于制定相关碳汇政策、建设碳汇工程和推进国际碳汇项目发展,以改善生态环境和缓解全球气候变化具有重要意义。

1.3 森林植被生物量和碳储量研究意义

大气成分监测、CO₂ 通量测定以及模型模拟等方面的研究都表明,北半球是一个巨大的碳汇。但由于碳循环是一个极其复杂的生物学、化学和物理学过程,受到自然和人为活动的双重作用。所以,目前的科学技术及其数据的积累尚不能准确地回答碳汇到底有多大,以及其区域分布如何。也就是说,碳汇问题仍存在着相当大的不确定性。在美国,不同研究得出的结论之差异可达 5~6 倍(于贵瑞,2003)。因此,很难说某一国家对碳汇的具体贡献有多大。而森林生态系统具有比其他植被生态系统更高的碳存储密度。研究表明,森林生态系统中,植被和土壤的平均碳密度为 86 Mg/hm² 和 189 Mg/hm²;草原生态系统中,植被和土壤的平均碳密度为 21 Mg/hm² 和 116 Mg/hm²;农田生态系统中,植被和土壤的平均碳密度为 5 Mg/hm² 和 95 Mg/hm²。在过去的 150 年间,森林转化为农田或其他土地覆盖类型所造成的 CO₂ 排放量接近同期所有化石燃料利用所释放的 CO₂ 总量。森林的减少和破坏,是陆地生态系统碳源增加的一个重要原因。同时,森林寿命长、面积大,碳存储量多,在时间和空间上均占有较大的生态位,具有长期和大量影响大气碳库的能力。因此,森林碳储量及其动态的研究,将会极大地减少陆地生态系统碳循环研究中的不确定性。

由于森林生态系统碳储量的增减,会影响到大气中 CO₂ 浓度的变化,同时,森林碳储量的大小受光合作用、呼吸作用、死亡、收获等自然和人类活动因素的共同影响。由于土地利用与土地利用变化、毁林开荒、森林采伐等减少和破坏森林的人为活动,引起了陆地生态系统碳源的增加。森林碳储量和碳密度的变化反映了森林的演替、人类活动、自然干扰(如林火、病虫害等)、气候变化和人为污染等影响。因此,估算森林生态系统的碳储量与碳密度,掌握森林的碳储量和碳动态变化规律,准确了解森林生态系统碳储库的大小、位置,评估不同森林植被类型碳存储能力,判定碳汇,对于陆地生态系统碳循环和碳储量控制机制研究、制定合理碳汇政策与措施,对于改善生态环境和缓解全球气候变化具有重要意义。估算区域森林资源碳储量,宏观掌握森林碳储量及其分布,对于进一步制定公平合理的碳吸收补偿政策,增加陆地碳存储量也具有重要意义。

第2章 森林植被生物量

生物量(Biomass)是指任一时间区间内单位面积绿色植物净第一性生产量的累积量,即某一时刻的生物量,也就是在此时刻以前生态系统所累积下来的活有机质量的总和,一般以单位面积的烘干重(如 g/m^2 和 mg/hm^2)表示。森林生物量是研究森林生态系统物质循环以及森林固碳潜力的基础,可以反映群落利用自然潜力的能力,衡量群落生产力的高低,可为森林的可持续发展及林业产业和生态建设提供科学依据。

2.1 森林植被生物量研究现状

2.1.1 国外研究

20世纪50年代以前,国外关于森林生物量研究的报道较少,森林生物量的研究还未引起人们极大的关注。报道的研究内容主要是关于叶量、木材质量、初级生产量等指标的测定以及它们之间相互关系的确定(冯宗伟,1999)。到了20世纪50年代初期,人们开始关心森林生态系统的功能,逐渐关注森林生物量的研究。国外的一些科学家开始对各自国家的主要森林生态系统的生物量进行研究。英国科学家提出对森林生态系统定义的看法及其在森林研究中的应用,并对英国的一片森林的生物量现存量与净初级生产力进行了研究,这一研究为后来世界其他学者研究森林生态系统能量循环、森林生产力等提供了方法参考,对森林生态学的发展起到了重要的推动作用。同时,人们注意到森林凋落物在森林生态系统养分循环中具有重要的作用,有学者对世界主要森林类型凋落物量的分布格局进行了初步研究,这一研究为世界森林凋落物量的研究提供了宝贵的基础参考资料。随着一些发达国家经济的发展,森林的游憩功能被人们所重视,为了更好地对森林的游憩区进行管理,有林业研究者开始研究森林生物量与其抗干扰能力的关系(Liddle, 1975),为森林生物量的研究引入了新的内容。随着研究的开展和技术的进步,森林生物量动态规律方面的研究引起了一些国家研究人员的关注,CERES林分生长模型在森林生物量的动态研究中发挥了作用(Dixon等,1978),该模型可与土壤化学模型(SCHEM)、土壤-植物-大气水分模型等其他模型相结合,能区分活的植被、枯立木、凋落物,以及植物的叶、枝、根等各器官的生物量,由此可以建立这些部分生物量的一阶常微分方程。这一研究模型对于森林生物量模型及其他模型的发展具有借鉴意义。

到了20世纪80年代,关于栽培及抚育措施、采伐经营管理等与森林生物量、森林初级生产力、净生产力的关系的研究受到较大的关注(Conde等,1983; Mohren等,1984; Pehl等,1984; Stromgaard等,1985),树木生物量的测定主要是采用皆伐法、平均木或标准木法等收获法;为了满足研究发展的需要,有的研究者建立了与生物量有关的模型(Arp等,1987; Running等,1988)。生物量方程(Van等,1986; Das等,1987; Baldwin等,1989)用于

预测或测算单木和林分生物量,在这些模型或方程建立中使用的因变量主要有叶、干、枝、根等树木各器官的生物量,树冠生物量和单木地上、地下及总生物量等,使用的自变量有胸径、树高、边材断面面积、胸高到中央树冠的距离,以及这些因子的组合;这时已有人对森林生物量方程的估计误差进行了研究(Sala 等,1988),这对于引起研究者对森林生物量估计精度的关注有一定的推动作用。这一时期关于森林生物量方面的研究所采用的方法较为传统,建立的模型或方程的精度还不高,技术手段较为落后。不过,已有学者提出使用卫星遥感和计算机模拟技术来研究全球陆地植被初级生产力的想法(Running, 1986),对于解决大尺度森林生物量研究中存在的方法上的问题提供了较好的技术思路。

进入 20 世纪 90 年代,随着国际社会对全球气候变化问题和全球碳循环研究的持续关注,研究人员逐渐研究森林在碳汇方面的作用,同时重视以森林生物量为培育目标的能源林的研究,因此森林生物量的研究在原有基础上,区域及全球尺度的森林生物量研究得到了重视,人们更加关注一些与森林生物量相关的模型或方程的建立与使用。为了大力发展能源植物,以及提高一些以森林生物量为培育目标的森林生产力,不少国家研究了栽培措施(Nilsson 等,1993)、经营管理方法(Fern 等,1990; Messier 等,1994; Rytter 等,1995; Ingerslev,1999)等对森林生物量的影响以及根据生物量选择合适的树种的研究(Lugo 等,1990; Ranasinghe 等,1991; Duff 等,1994),这些研究在测定森林生物量时多采用平均木或标准木法;为了便于间接测算这些森林的生物量,有的拟合了树木生物量与基径断面面积、胸径、树高等因子的回归关系(Tietema,1993; Lodhiyal 等,1997; Senelwa 等,1997; Chiba,1998)。在全球气候变化背景下,虽然人们关注以森林生物量为培育目标的能源林的研究,但国际社会仍然更注重森林的碳汇/碳源的研究,因此在这一形势下,对森林生物量的研究不断深入。由于关于森林碳汇方面的森林生物量的研究范围大多涉及地区、国家、全球等大的尺度,因此有的研究根据林分生物量与蓄积量、木材密度的关系来测算森林生物量(Fearnside,1997),但更多的是根据各地区或国家的森林资源清查资料的林分蓄积数据和生物量转化和扩展系数(BCEF)或生物量扩展系数(BEF)与木材密度测算地区或国家的地上部分森林生物量(Brown 等,1997; Brown 等,1999),地下部分生物量则根据根茎比或地上部分生物量与地下部分生物量的回归关系(Brown 等,1999)来计算。随着遥感(Remote Sensing,RS)、地理信息系统(Geographic Information System,GIS)、全球定位系统(Global Positioning System,GPS)等信息技术的发展,以及 TM、MODIS 等遥感数据的商业化发展,国外研究者逐渐重视这些信息技术在大尺度森林生物量研究中的应用(Brown 等,1999; Fazakas 等,1999; Goetz 等,1999)。此外,合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radars,SARS)等信息技术也得到了应用(Bergen 等,1999)。

到了 21 世纪,随着全球环境的不断恶化,全球气候变化问题逐渐成为国际社会关注的主要问题之一,逐步达成全球共同应对气候变化问题的共识,由此森林生物量的研究得到空前发展,成为多学科交叉研究的重要领域,其研究的尺度不断扩展,从州、国家、洲到气候区,乃至全球,研究方法和手段不断改进,估计精度也不断得到提高。在研究中,一些新的模型和方法被用于森林生物量的估算,如 3-PG 模型(White 等,2000)、无损取样测定方法(Montes 等,2000)、Weibull 模型(Fleming,2001)、森林养分循环与生物量模型(For NBM)(Zhu 等,2003)、Chapman-Richards 模型(Tahvanainen 等,2008);采用传统取

样方法建立的单木生物量方程是大尺度研究的重要基础,因此仍需建立新的单木生物量方程(Cole等,2006;Albaugh等,2009;Basuki等,2009;Kenzo等,2010;Sampaio等,2010)以及一些材积方程(Vallet等,2006);遥感技术(Suganuma等,2006;Meng等,2007;Anaya等,2009;Soenen等,2010;Gasparri等,2010)以及生物量扩展系数(Lehtonen等,2004;Pajtik等,2008;Teobaldelli等,2009)或生物量转化和扩展系数(Sandstrom等,2007)仍然是主要的估算方法。

2.1.2 国内研究现状

我国森林生物量的研究开始于20世纪70年代后期。在国际“人与生物圈”研究计划推动下,早些时候,我国林业科学工作者利用收获法初步开展了栽培制度、经营措施等对油茶(冯宗炜等,1979)、油松(董世仁等,1980)、杉木(潘维涛等,1981)、马尾松(沈国华等,1981;田大伦,1989)、樟子松(焦树仁,1982)、落叶松(张世煜等,1984;刘世荣等,1990)、毛白杨(徐孝庆等,1987)、海南五针松(张家贤等,1987)等人工林生物量的影响的研究,也对沙地红皮云杉(陈炳浩等,1980)、山杨(朱兴武等,1988)等天然林生物量的分配格局进行了研究,这些研究较多使用皆伐法或平均木法来估测生物量;期间一些研究者按照传统的伐倒样木的办法建立了云杉属植物(张瑛山等,1980;穆天民,1982;江洪,1986)、杉木(叶镜中等,1983,1984)、红松(陈传国等,1986)、云南松(江洪等,1984,1985)、油松(盛瑞发等,1984)、湿地松(汪企明等,1990)等一些树种的枝、叶、干、果等各器官生物量或总生物量的经验公式,用于分析单木生物量和林分生物量的分配情况,对林分生产力和立地质量进行了评价,为人工林及天然林的经营管理提供了科学依据;随着人工林及天然林生物量研究的发展,前期建立的生物量经验公式存在精度低、适用范围小等问题,研究者尝试采用多种数学模型来建立生物量方程(曾天勋等,1990;秦建华等,1990;廖涵宗等,1991;刘志刚等,1994),但使用较为普遍的数学模型是相对生长方程($W = aD^b$, $W = a(D^2H)^b$, a 、 b 分别为参数, W 、 D 、 H 分别为各器官生物量、胸径、树高)(周世强等,1991;张祝平等,1991;高智慧等,1992;朱守谦等,1995;李志辉等,1996;石培礼等,1996),也有一些研究者采用灰色系统理论(廖宝文等,1991;毕君等,1993;王振亮等,1994)来建立生物量预测模型;另外,一些研究人员认识到用皆伐法、平均木法、相对生长法测定林木生物量的工作量大,在前期研究的基础上,提出了用林分蓄积量换算生物量的方法(温远光等,1989;周国模等,1996),即找出树木生物量与树干材积的关系,依此来推算林分生物量。上述一段时期,我国森林生物量研究在一定程度上主要是以服务我国林业生产为目的的,研究的技术手段较为传统,工作繁重,在大尺度研究中外业实施的难度大、成本高。

随着国际社会对全球气候变化的关注,森林生态系统在应对气候变化中的作用得以重视,中国应对全球气候变化的研究也逐渐起步,我国陆地生态系统的二氧化碳碳源/汇功能研究为其中一部分。此时,森林生物量的研究目的得以扩充,在重视传统研究目的的同时,也开始用森林生物量评价森林在应对全球气候变化中的作用;研究尺度,从个体、林分扩展到区域,乃至全国;研究方法除传统的方法外(王德艺等,1998;李意德等,1998;王金叶,2000),在大尺度上主要采用比值法(马钦彦等,1996;赵海珍等,2001)、材积源生物量法(Volume-derived Biomass)(即2006 IPCC中使用的BCEF法)(方精云等,1996;刘国

华等,2000;王玉辉等,2001)、蓄积与木材密度关系(李意德等,1998),目的是通过建立生物量和蓄积量的关系来求算生物量;研究的数据大多是将国家森林资源清查资料和各地森林生产力研究资料结合起来。期间,一些研究者为了提高估计精度或满足应用的需要等研究目的,建立了三维函数模型(方升佐等,1999)、与材积兼容的模型(唐守正等,1999;胥辉,1999)、相容性生物量模型(唐守正等,2000)等一些新的生物量模型。

虽然全球定位系统、地理信息系统、遥感等现代信息技术在国外应用较早,但我国进入 21 世纪后才较为关注遥感、地理信息系统等信息技术在森林生物量研究中的应用,除继续使用上述研究方法充实我国森林生物量研究内容和所需的基础资料外(姜萍等,2005;罗云建等,2006;程堂仁等,2007;周群英等,2010;刘彦春等,2010),国内也开始使用遥感手段结合地面调查来估测大尺度的森林生物量,主要是使用 TM(郭志华等,2002;仝慧杰等,2007;马泽清等,2008)、ETM(邢素丽等,2004)、MODIS(黄国胜等,2005)、IRS-P6 LISS3(徐天蜀等,2008)、CBERS02B-HR(李虎等,2008)等中高分辨率数据来估算,遥感手段使大尺度森林生物量的实时、动态监测成为可能,极大地促进了现代科学技术在林业中的应用。此外,在森林生物量时空格局分析中,GIS 技术也得到了应用(刘盛等,2007;徐志高等,2003;王维芳等,2010)。其他研究人员为了将其他新技术引入森林生物量研究中以及提高生物量模型估测的精度,利用三维激光扫描仪(冯仲科等,2007)对森林生物量进行了试探性研究。尽管新技术与传统方法在森林生物量研究中不断应用与发展,但国内还未形成一套统一的森林生物量计量和监测体系,因此在气候变化研究和陆地生态系统研究的推动下,有些学者参考 IPCC 的生物量测算方法,即采用生物量扩展系数(BEF)和根茎比(树根生物量与地上部分生物量的比值)(李建华等,2007)推算林分生物量。

2.2 森林植被生物量估算方法

森林生物量估算方法主要有平均生物量法、材积转换法、遥感估算法以及二氧化碳平衡法(气体交换法)、微气象场法(昼夜曲线法)等。

2.2.1 平均生物量法

平均生物量法以野外调查的数据(包括生物量测定数据)为基础,探讨生物量和其他相关变量的关系,并在空间层面上扩展某点或小面积单元上的碳估算值,可以进行大尺度森林生物量的估算,是传统的估测方法(马炜,2013;张俊,2008)。其中,平均生物量法的生物量测定是依据样地的测树资料,利用直接收获法进行。直接收获法切实可行,是目前最广泛应用于森林群落的传统研究方法,一般通过直接收获一定面积样地里的乔木、灌木、草本的地上部分和地下部分,取样测定含水率,再计算单位面积各层次和各器官组分的生物量(查同刚,2007;王光华,2012)。基于乔木生物量的测定,根据取样和收获的具体方法不同,平均生物量法又分为皆伐法、标准木法和相对生长法三种常规方法(冯宗炜等,1999;孟宪宇,2006)。

2.2.1.1 皆伐法

在林分内选择适当面积的林地,将该林地内的林层进行皆伐,测定树干、枝、叶和根系等器官的生物量。

$$W_{\text{样}} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2-1)$$

式中: $W_{\text{样}}$ 为样地生物量; w_i 为第 i 单株生物量; n 为样地内株数。

采用该法测定的数据准确可靠、精度高,但工作量大,而且具有破坏性,一般只用于对其他方法精度的检验。

2.2.1.2 标准木法

标准木法可细分为平均标准木法和分层标准木法两种。

(1) 平均标准木法: 在对标准地进行每木调查的基础上,选取能够代表群落平均特征的标准木,伐倒后测定标准木的器官生物量,然后乘以林分密度得到林分生物量。

(2) 分层标准木法: 按不同胸径级或树高将标准地树木分成数层,然后在各层内选取标准木,伐倒称重后再乘以各层的株数,最后合计得到林分生物量。

$$W_{\text{林}} = wn \quad (2-2)$$

$$W_{\text{林}} = \sum_{j=1}^k w_j n_j \quad (2-3)$$

式中: $W_{\text{林}}$ 为林分生物量; w 为标准木生物量; w_j 为第 j 径阶标准木生物量; k 为径阶数; n_j 为第 j 径阶株数。

标准木法比较适合于人工林,因为人工林的林木大小具有小的或中等离散度的正态频率分布。值得注意的是,根据不同的测树指标(胸径、树高、断面面积等)选取的标准木是不同的,进而推算的林分生物量值也存在一定的差异(Baskerville, 1965)。

2.2.1.3 相对生长法

现实林分中,林分大小不一,用平均木代表所有林木的生物量会造成一定误差,所以建立生物量估测模型逐渐成为研究生物量的有效手段。相对生长法是基于树木器官生长量间存在协调生长的相对关系(Huxley, 1932; Ketterings 等, 2001; Niklas, 1994),人们在研究区内选取多株标准木,伐倒后测定标准木的器官生物量,然后建立器官生物量与测树指标(如胸径、树高等)之间的关系,最后再以实测的测树指标推算林分生物量。此法广泛应用在森林生物量和生产力的估测中(Gower 等, 1999; Ogawa, 1977)。关于林木生物量模型的方程很多,主要有线性和非线性两种基本类型。一般有4种形式:一元线性模型、对数模型、相对生长模型和多项式模型。以非线性模型应用最为广泛,尤其是相对生长模型(Allometric Growth Equation)是所有模型中应用最为普遍的模式。

利用相对生长模型估计林木器官(树干、树枝、树叶、树根)生物量一般通过实测样本数据,根据林木的各器官生物量与某一测树学指标之间的相关关系,利用数理统计方法,进行回归拟合,建立各器官组分生物量和与之存在内在关系的、一个或几个易测树因子的回归方程,最后以实测的测树学指标估算林分生物量(刘志刚等, 1994; Brown 等, 1999; 胥辉, 1997, 2003)。唐建维等(1998)以林分平均胸径、林分平均高和年龄为自变量建立林分生物量模型,不仅研究了林分生物量与胸径、树高的关系,还分析了林分生物量随年龄

的变化。闵志强等(2010)以林分平均胸径、林分平均高和树冠指数为自变量,地上部分总生物量为变量,建立回归模型(估测精度达到 94.33%),还有其他许多应用林分调查因子建模的研究(张慧芳等,2007;周群英等,2010)。

一般采用胸径(D)作自变量,但一些研究表明用胸径作为自变量建立的模型仅适用于立地条件相同的生态系统,树高在一定程度上能反映立地条件的差异,因此用胸径的平方乘以树高(D^2H)作为自变量被认为更合适。

$$W = a(D^2H)^b \quad (2-4)$$

$$\lg W = \lg a + \lg D^2H \quad (2-5)$$

$$W = aD^b \quad (2-6)$$

式中: W 为各部位器官的质量(也可以是整个树木器官的总质量); D 为胸高直径; H 为树高; a 为系数; b 为常数项。

据此可以建立乔木树种、下木类和竹种各器官的生物量与测树因子的关系,灌木种模型按样方总质量与平均高、覆盖度、平均地径建立模型,草本按样方总质量与平均高、覆盖度建立物量模型。利用林木易测因子来推算难于测定的林木生物量,从而减少测定生物量的外业工作,以样方内乔灌木各层植物生物量结合面积比例推算定点监测样地的生物量,结合区域内森林植被类型面积数据推算大尺度区域总生物量。

2.2.2 材积转换法

材积转换法主要包括生物量转换因子法和生物量转换因子连续函数法。

2.2.2.1 生物量转换因子法

生物量转换因子法也称为材积源生物量法或林分材积平均比值法(Brown 和 Lugo, 1984)。该法是利用林分生物量与木材材积比值的平均值,乘以该森林类型的总蓄积量,得到该类型森林的总生物量的方法。

$$BEF = W/V \quad (2-7)$$

$$W = VD \quad (2-8)$$

式中: BEF 为生物量转换因子; W 为林分生物量; V 为蓄积量; D 为木材密度。

树干与总生物量和其他器官之间存在相关关系,所以由树干材积推算林分总生物量是可行的(李文华,1997)。研究表明,林分蓄积量与林分生物量之间存在良好的相关关系,因为林分蓄积量包含了森林类型、年龄、立地条件和林分密度等诸多因素,利用它与林分生物量之间的关系推算生物量就消除了这些因素的影响(薛立,2004)。生物量转换因子法的不足之处主要反映在生物量转换因子,例如木材密度和总生物量与地上生物量的转换系数均取作常数。

许多研究证明,对于某一特定的森林类型而言,生物量转换因子是立木的生物量和蓄积量的集中体现,与林木的年龄、种类组成、其他生物学特性和立地条件等密切相关(Isaev A, 1995)。Brown 等(1989)指出,湿润、干旱和半干旱地区没有受到干扰的原始森林的木材密度分别为 1.74、1.95 和 1.57,总生物量与地上生物量的转换系数为 1.6。方精云等(1996)也特别指出,林分生物量和蓄积量与森林类型、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。