

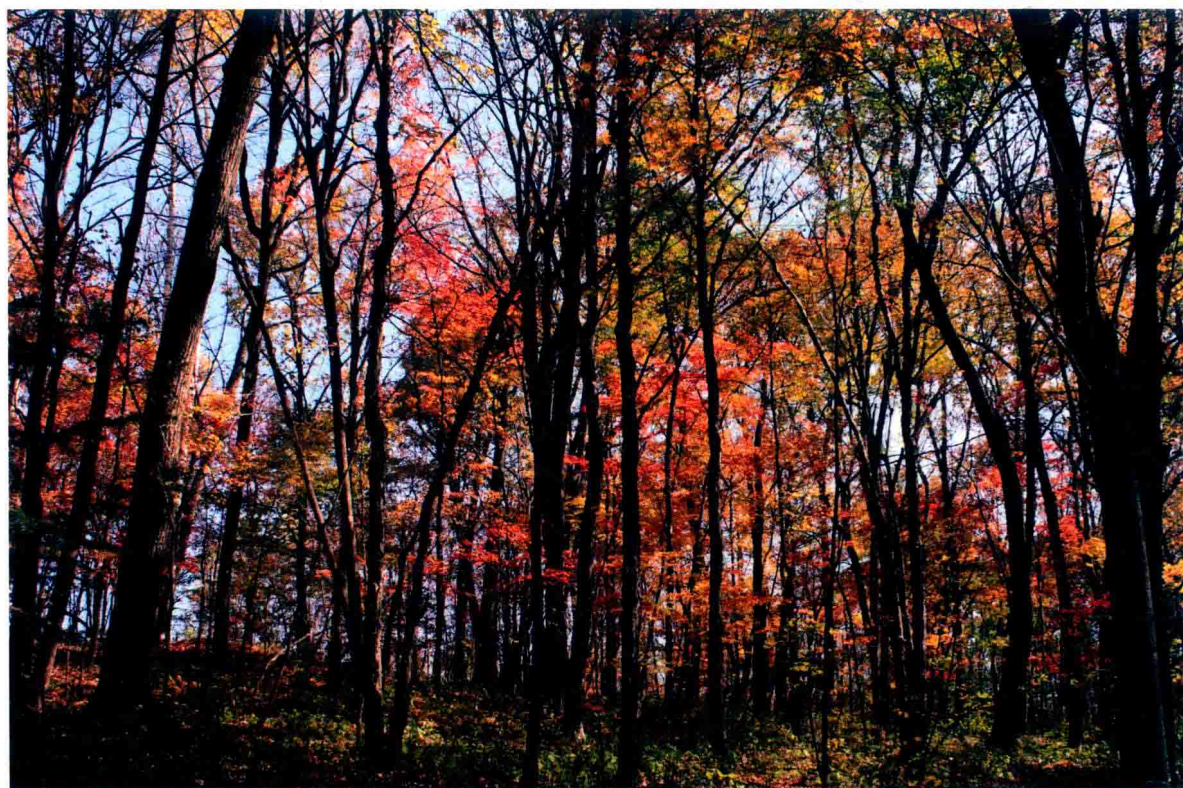
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国陆地生态系统碳收支研究丛书



中国森林生态系统碳储量 ——动态及机制

王万同 唐旭利 黄 玫 等 著



科学出版社



龍門書局



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FUND PROJECT

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国陆地生态系统碳收支研究丛书

中国森林生态系统碳储量 ——动态及机制

王万同 唐旭利 黄 玫 等 著

科学出版社

龙门书局

北京

内 容 简 介

本书是“中国陆地生态系统碳收支研究丛书”的一个分册,针对当前森林碳汇研究领域中的热点问题,基于全国 7800 个典型森林生态系统样地的调查资料,估算我国森林生态系统全组分(乔木、灌木、草本、凋落物及土壤)碳库现状,并对其机制进行初步探讨。在此基础上,采用遥感反演和模型模拟相结合的手段,估算我国森林生态系统的固碳速率及潜力。

本书可供从事生态、环境保护、林学、农学和地学等相关专业人员和高等院校师生阅读参考,也可供关注森林生态的各界人士参考。

审图号: GS (2018) 3054 号

图书在版编目(CIP)数据

中国森林生态系统碳储量: 动态及机制/王万同等著. —北京: 龙门书局, 2018.7

(中国陆地生态系统碳收支研究丛书)

国家出版基金项目 “十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5088-5393-2

I. ①中… II. ①王… III. ①森林生态系统—碳—储量—研究—中国
IV. ①S718.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 141735 号

责任编辑: 王 静 李 迪 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

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>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 7 月第一次印刷 印张: 8 1/2

字数: 200 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国陆地生态系统碳收支研究丛书

编委会

总主编 方精云 于贵瑞

丛书编委会 (以姓氏笔画为序)

于贵瑞 方精云 白永飞

吴炳方 周国逸 唐志尧

谢宗强

中国森林生态系统碳储量
——动态及机制

主要著者

王万同 唐旭利 黄 玫

周国逸 尹光彩 王金霞 温达志

前 言

全球气候变化对人类生存、社会发展造成了严重影响，它不仅通过改变生态系统的结构和功能来直接影响人类的生活质量，而且通过影响生态系统提供的生产资料和生态服务，从而改变生态系统生产力和碳、氮、磷循环及生物多样性等多个过程，来间接作用于人类社会。同时，《巴黎协定》(The Paris Agreement)使碳减排增汇成为与国家、政治、外交和生态安全等密切相关的重大问题，全球气候变化已引起各国政府、科学界与公众的强烈关注。应对气候变化与碳减排的国际谈判已经成为我国作为发展中大国面临的重大问题与难题，而我国正处于完成工业化和城镇化建设的关键阶段，需要不断提高我国人民生活水平，因此保持应对温室气体减排责任和可持续发展之间的最优平衡是一个迫切需要解决的重大发展问题。2011年，中国科学院多个研究所的科技人员和一部分从事经济和政策研究的专家，联合高校和有关部门专家，共同承担了科技先导专项——“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(简称“碳专项”)，针对我国的陆地碳收支定量认证、碳增汇潜力与速率、增汇技术与措施，以及未来全球增暖情景与大气温室气体浓度关系的不确定性等重大科学技术问题展开了深入研究。

应对气候变化、减少大气中温室气体浓度的一个重要途径是增强地球表层生态系统对大气中温室气体的吸收作用，即生态系统的碳汇功能。因此，明确我国主要生态系统(森林、灌丛、草地等)究竟有多大的碳吸收潜力，以及这些生态系统在过去、现在与未来吸收碳的速率究竟如何就变得尤为重要，而我国在这方面虽已做了很多工作，但缺乏全国尺度的精细调查和分析，缺乏基于统一技术体系的系统研究。在主要的陆地生态系统中，森林生态系统是陆地最大的碳库，在应对气候变化中具有独特的功能，在维持全球碳平衡中具有重要的作用。但是，和世界大部分国家一样，我国对森林资源的宏观监测以国家森林资源清查为主，虽然具有全国或区域尺度上的统一性，却存在较大的不确定性，精度不高，且常常因未包括林下植被、地表凋落物、根系及土壤等组分，而不能全面反映我国森林生态系统碳源汇的状况及其在减缓全球气候变化中发挥的巨大功能和贡献。基于此，“碳专项”专门设立了“中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”研究课题(简称“森林课题”)(XDA05050200)，处于生态固碳任务群项目5“中国生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”中第二个位置。

“森林课题”根据我国气候带和植被类型的空间分布特征，把我国的森林分为六大片区，按各片区的森林面积和森林类型及演替序列，共选择具有代表性的7800个样地，采取统一的标准和方法对我国森林生态系统全组分(乔木、灌木、草本、凋落物及土壤)碳库进行野外样地调查，基于调查资料准确估算了我国森林生态系统的碳汇现状。在此基础上，采用遥感反演和模型模拟相结合的手段，分别从区域和全国尺度上估算了我国森林生态系统的固碳速率及潜力。

从文献整理工作来看,近30年来我国有关森林碳动态的报道不少,以“碳储量”“生物量”“生产力”“森林”“土壤”为关键词检索到的论文数量在2000年以后逐年上升。总体来说,研究内容上以存量研究为主,对速率研究较少;研究方法上以森林资源清查资料为主研究区域尺度的碳储量,以样地调查为主研究样地尺度的碳库格局;研究对象以乔木层为主,鲜有涉及整个生态系统碳格局的工作,尤其在区域尺度上。

“森林课题”建立了一套符合国际规则和中国特色的森林碳汇评价技术体系,获取了反映我国森林生态系统碳储量、碳库格局的准确真实的数据资料。在此基础上,估算出我国森林碳汇大小、固碳速率及潜力,为定量评价我国森林生态系统在减缓全球气候变化中的巨大功能和贡献提供了科学依据,也为开展全国范围内森林生态系统碳汇功能及固碳潜力研究提供了资料,奠定了良好的基础。

本书是“森林课题”的重要研究成果之一,也是所有参与课题研究的专家及工作人员这几年来呕心沥血、辛勤工作的体现。为了强调科学性和系统性,全书共分为6章,按从背景、立项、研究思路、实施到研究结果、讨论及最后的结论的顺序展开阐述,遵循科学研究的结构和流程,便于读者阅读和参考。

第1章对课题研究的背景、意义进行重点介绍,对当前森林固碳研究中的理论、方法及国内外研究进展进行阐述,最后对存在的问题进行探讨。本章由王万同(河南师范大学)、尹光彩(广东工业大学)撰写。

第2章对研究思路和研究内容进行阐述。本章由唐旭利(中国科学院华南植物园)撰写。

第3章对调查数据的获取、管理、质量控制及森林固碳估算体系进行阐述。本章由温达志(中国科学院华南植物园)、王万同撰写。

第4章对森林固碳估算中的几个关键参数一一进行分析和估算。本章由王万同、尹光彩、王金霞(河南师范大学)撰写。

第5章从区域和国家尺度对我国森林生态系统全组分固碳现状进行估算,对我国森林生态系统固碳现状与格局进行论述。本章由唐旭利、王万同撰写。

第6章主要对我国森林生态系统固碳速率和潜力进行模拟和预测。本章由黄玫(中国科学院地理科学与资源研究所)、唐旭利撰写。

全书由周国逸研究员统稿。

最后,借此机会,向所有帮助、支持、关心我们的朋友及课题全体成员致以衷心的感谢。本书的出版得到了“森林课题”(XDA05050200)的资助。

由于著者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者多予指正。

著者

2017年于广州

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和研究意义	1
1.2 研究综述及存在问题	4
1.2.1 森林生态系统碳储量的研究方法	4
1.2.2 国内外对森林生态系统碳库的研究	9
1.2.3 存在问题	13
第2章 研究思路和研究内容	15
2.1 研究思路	15
2.1.1 总体思路	15
2.1.2 具体思路	16
2.2 研究内容	17
2.2.1 森林生态系统碳库现状及格局	17
2.2.2 森林生态系统固碳速率与潜力	17
2.2.3 森林生态系统固碳速率与潜力的自然格局	17
2.2.4 中国森林生态系统固碳现状、速率和潜力的整合分析	18
第3章 森林固碳调查规范和估算体系	19
3.1 森林固碳调查规范	19
3.1.1 调查样点布设	19
3.1.2 样地设置与调查	20
3.1.3 样地代表性	21
3.2 森林固碳估算体系	22
3.2.1 样地尺度的森林碳库储量估算方法	22
3.2.2 区域尺度的森林碳库储量估算方法	24
3.2.3 森林生态系统固碳速率的估算	26
3.2.4 森林生态系统固碳潜力的评估	26
第4章 中国森林固碳关键参数	28
4.1 生物量方程	28
4.1.1 生物量方程构建的基本思路	29

4.1.2	生物量方程构建的数据和方法	29
4.1.3	生物量方程的检验	31
4.1.4	讨论	33
4.2	中国森林主要树种碳含量	34
4.2.1	数据和方法	35
4.2.2	结果	36
4.2.3	讨论	39
4.2.4	结论	40
4.3	中国森林土壤砾石含量	41
4.3.1	数据和方法	41
4.3.2	结果	43
4.3.3	讨论与结论	43
4.4	中国森林土壤厚度	44
4.4.1	我国森林土壤厚度及格局	46
4.4.2	土壤碳储量估算中基于土壤厚度的面积加权	46
4.5	中国森林覆盖面积	47
4.5.1	国家森林资源清查	47
4.5.2	中国 1:100 万植被图	48
4.5.3	土地利用/覆盖数据集	49
第 5 章	中国森林生态系统固碳现状与格局	51
5.1	数据和方法	52
5.1.1	样地布设和调查	52
5.1.2	碳库估算方法	52
5.2	结果	54
5.2.1	我国森林生态系统各组分碳库及格局	54
5.2.2	我国各省(自治区、直辖市)森林碳库现状及分布特征	56
5.2.3	我国主要森林类型碳库现状及分布特征	63
5.2.4	我国不同地理区域森林碳库现状及分布特征	64
5.2.5	我国森林林龄与碳密度分布特征	64
5.3	讨论	66
5.3.1	森林碳库储量估算结果的差异性	66
5.3.2	气候因素对森林碳库格局的影响	67
5.3.3	人类活动对森林碳库格局的影响	69
5.4	结论	69

第 6 章 中国森林生态系统固碳速率与潜力	71
6.1 中国森林生态系统固碳速率	71
6.1.1 基于调查的森林固碳模型	71
6.1.2 模拟的土壤和植被碳密度	81
6.1.3 模拟的土壤和植被固碳速率	85
6.2 中国森林生态系统固碳潜力	87
参考文献	91
附录一 生物量方程	100
附录二 中国森林主要树种(组)分器官含碳量	104
附录三 中国森林土壤砾石含量	108
附录四 ChinaCover 土地覆盖及森林面积	113
附录五 我国森林生态系统全组分碳储量	115

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和研究意义

当前,以大气中 CO_2 浓度增加和气温升高为主要特征的全球气候变化正在加剧,并强烈地给人类生存、社会发展造成了严重影响。它不仅通过改变生态系统的结构和功能来直接影响人类的生活质量,而且通过影响生态系统提供的生产资料和生态服务,从而改变生态系统生产力和碳、氮、磷循环及生物多样性等多个过程,来间接作用于人类社会。《联合国气候变化框架公约》及《京都议定书》的制定将碳减排增汇提升为与国家政治、外交和生态安全等密切相关的重大问题,全球气候变化已引起各国政府、科学界与公众的强烈关注。2015 年 12 月《巴黎协定》的签署标志着缔约方就未来十几年的国际气候政策走向达成共识,气候变化作为全球环境问题之首将更加深刻地影响人类的生存和发展。

应对气候变化与碳减排的国际谈判已经成为我国作为发展中大国面临的重大问题与难题,作为负责任的发展中国家,我国一直在调整经济发展模式以适应经济发展和节能减排的共同需求。然而随着我国经济进一步发展和人民生活水平持续提升,能源消耗和温室气体排放量短期内继续增加的趋势仍难以改变,在未来的气候变化摊牌中势必面临国际社会要求我国减排温室气体的巨大压力(吕达仁和丁仲礼,2012;方精云等,2015)。2011 年,中国科学院多个研究所的科技人员与一部分从事经济和政策研究的专家,联合高校和有关部门专家,共同承担了科技先导专项——“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”。该专项共设立了 5 个任务群,即排放清单任务群、生态系统固碳任务群、气候敏感性任务群、影响与适应任务群和绿色发展任务群,针对我国的陆地碳收支定量认证、碳增汇潜力与速率、增汇技术与措施,以及未来全球增暖情景与大气温室气体浓度关系的不确定性等重大科学技术问题展开深入研究。

应对气候变化、减少大气中温室气体浓度的一个重要途径是增强地球表层生态系统对大气温室气体的吸收作用,即生态系统的碳汇功能(吕达仁和丁仲礼,2012)。增强陆地生态系统固碳能力被认为是最经济可行和环境友好的减缓大气中 CO_2 浓度升高的重要途径之一(IPCC,2007)。《京都议定书》第 3.4 款明确规定:世界各国可以通过增加陆地生态系统碳储量来抵消经济发展中的碳排放量。因此,如何提高陆地生态系统碳储量及其固碳能力,是近年来全球变化研究的热点领域。近年来的研究表明,我国的陆

地生态系统，尤其是森林生态系统具有非常强的固碳速率和潜力（贺金生，2012）。

森林生态系统是陆地最大的碳库，在应对气候变化中具有独特的功能，在维持全球碳平衡中具有重要的作用。这主要有两个原因（贺金生，2012）：一是森林生态系统的植被、凋落物、有机质残体及土壤有机质中储存有大量的碳，约占陆地生态系统有机碳地上部分的 80%，地下部分的 40%（FAO，2011）；二是森林生态系统如果遭到破坏或干扰，系统中储存的大部分碳会释放到大气中，成为大气中 CO_2 浓度升高的一个重要因素。因此，森林的碳循环与碳储量在全球陆地生态系统碳循环和气候变化研究中具有重要意义。

由于碳循环研究的复杂性，目前的科学技术及数据积累尚不能准确地回答碳汇到底有多大，其区域分布如何。也就是说，碳汇问题仍存在相当大的不确定性（Pan et al., 2011）。不同研究得出的结论的差异可达到 5 倍以上（于贵瑞等，2003）。因此，很难说某一国家对全球碳汇的贡献有多大。森林生态系统具有比其他植被生态系统更高的碳密度。研究表明，森林生态系统中，植被和土壤的平均碳密度分别为 86 Mg C/hm^2 和 189 Mg C/hm^2 （ $1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g}$ ）；草原生态系统中，植被和土壤的平均碳密度分别为 21 Mg C/hm^2 和 116 Mg C/hm^2 ；农田生态系统中，植被和土壤的平均碳密度分别为 5 Mg C/hm^2 和 95 Mg C/hm^2 。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 CO_2 排放量接近同期所有化石燃料利用所释放 CO_2 量的总和。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、碳储量多、具有长期和强烈影响大气碳库的能力。因此，对森林碳库及其动态的研究，将会极大地减少陆地生态系统碳循环研究的不确定性。

我国地域辽阔，自然气候条件复杂，森林类型多样且具有明显的地带性分布特征。进入 21 世纪以来，随着六大林业重点工程建设的相继启动和实施，林业生态和产业体系逐步建立和完善，人工造林和森林恢复性生长过程加速。第七次全国森林资源清查结果显示，全国森林面积为 1.955 亿 hm^2 ，森林蓄积量为 137.2 亿 m^3 ，森林植被总碳储量达 7.81 Pg C。美国、加拿大等发达国家在 21 世纪初就已经对国家森林资源碳储量进行了估算。但由于不同国家的森林资源清查体系、技术标准和调查方法不同，以及清查周期与清查时间不一致，调查结果在不同国家之间存在不具可比性和可靠性差的问题。目前，我国森林资源的变化正在对区域乃至全球生态环境变化产生积极影响，森林资源的生物量、碳储量和碳密度格局也日益被国际组织、各级政府及社会大众广泛关注。及时获取覆盖全国且长时间连续的森林资源生物量和碳储量，是准确评估我国固碳潜力、履行《联合国气候变化框架公约》，特别是依据《巴黎协定》进行碳汇贸易谈判的基础和有力保障。

我国和世界大部分国家一样，对森林资源的宏观监测以国家森林资源清查为主，

以数理统计抽样为基础,定期对同一地域上的森林资源进行重复性调查,采集样地和样木的调查数据,每5年产出一次累积性的统计成果。以国家森林资源清查统计数据为基础的碳库计量,与现行森林资源清查体系一样,产出数据为每5年的累积性统计数据,数据采集时间存在不一致性,分析成果缺乏现势性和时效性。国家森林资源清查资料虽然具有全国或区域尺度上的统一性,但精度往往不高,存在较大的不确定性,且常常因未包括林下植被、地表凋落物、根系及土壤等组分,而不能全面反映森林生态系统碳源汇的状况。在人为干扰和人类经营管理的影响下,森林生态系统各个组分的碳源汇状况在时空上的走向并不一致,仅仅以森林生物量动态为依据既可能低估又可能高估整个森林生态系统的碳源汇状况。因此,充分有效地利用连续的、系统的大面积森林资源清查资料估测森林碳储量和碳密度,不仅有助于估算区域尺度的森林生产力及其碳收支,也可为评价森林生态系统的结构与功能提供量化指标,同时对评估不同森林植被类型的碳汇潜力,制定合理的碳汇政策措施具有重要的意义。

我国学者基于样地调查对森林生物量及碳储量的研究始于20世纪70年代,主要集中于对部分区域或几十种森林树种的研究,如湖南会同地区马尾松林(冯宗炜等,1982)、北京西山人工油松林(陈灵芝等,1984)、海南尖峰岭热带雨林(李意德等,1992)、兴安落叶松林(刘志刚等,1994)、长白松人工林(邹春静等,1995)、云南哀牢山常绿阔叶林(谢寿昌等,1996)、鼎湖山南亚热带常绿阔叶林(唐旭利等,2003)、西双版纳热带山地雨林(郑征等,2006)、华北落叶松人工林(罗云建等,2007)等。样地尺度上的研究虽然全面涵盖了森林生态系统各个组分且相对准确,但往往局限于某些地理区域或森林类型而代表性不强,由于缺乏统一的方法,也不具有可比性,据此进行全国尺度上的推演将造成很大的不确定性。

到目前为止,我国在国家尺度森林生态系统固碳现状、速率和潜力的实际调查数据,碳收支计量和综合评估模型工具,以及区域碳汇强度的定量评估、科学认证和决策分析系统等方面的研究工作还十分匮乏。“森林课题”正是在此背景下,由“碳专项”专门设立,处于生态系统固碳任务群项目“中国生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”中第二的位置(图1.1)。“森林课题”的目标旨在建立符合中国特色的、科学有效的、能被国际同行公认的精准碳计量方法,全面建立国家尺度森林生态系统碳汇及其速率与潜力的评价体系,明晰中国森林生态系统碳库现状及时空分布格局,揭示驱动中国森林生态系统碳收支格局变化的生物和环境机制,不仅可以直接为中国应对气候变化的外交谈判提供科学依据,也可为制定国家尺度碳管理政策措施提供依据(方精云等,2011)。

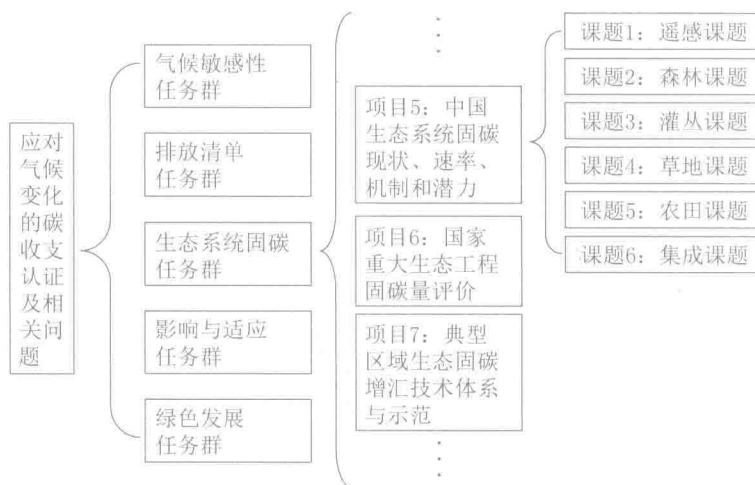


图 1.1 “森林课题”在“碳专项”中的位置

1.2 研究综述及存在问题

1.2.1 森林生态系统碳储量的研究方法

对森林碳储量估算的方法主要有生物量和土壤碳储量清单调查法、碳通量监测法、模型模拟法和稳定性同位素法（李世东等，2013）。由于每种研究方法均有其适宜的时间和空间尺度，各具有其明显的优势和劣势，因此采用各种方法对不同空间和时间尺度的森林生态系统碳储量估算时存在较大的差异（于贵瑞等，2011），下面对这些研究方法进行简要的综述。

1.2.1.1 清单调查法

在森林生物量的清单调查中，森林的碳储量大多数都是直接或间接以森林植被生物量的现存量乘以碳含量（即每克干物质的碳含量）推算而来的。因此，森林生态系统中各组分的生物量和碳含量是估算森林植被碳库的两个关键因子。土壤碳库的调查主要是土壤剖面调查，由土壤容重、有机质含量及土壤层厚度三个因子决定。

收割法是全球普遍采用的生物量研究方法，也是对陆地群落和森林进行调查最切实可行的方法。森林收割法大致分为三类：皆伐法、平均生物量法和相对生长法。

（1）皆伐法是对选定样地的林木进行全部砍伐，测定每株各部分（干、枝、叶和根等）的鲜重，并换算成干重，各部分累积后得到每株生物量，累加每株生物量即为林木的生物量。皆伐法的精度高，但费时费力，一般很少采用，仅在林下植被（灌木、草本）或者标准木的生物量测定中采用（李意德等，1992）。

(2) 平均生物量法是在样地每木调查基础上, 计算平均的生物量, 乘以该林分单位面积上的株数, 得到单位面积林分的林木生物量, 再利用获得的平均生物量乘以该类型森林面积得到该森林类型的生物量。这种方法适用于林木大小呈正态分布的林分, 如人工林(薛立和杨鹏, 2004)。但在进行生物量实测时, 由于往往选择林分生长较为良好的样地, 估算结果偏高(Fang et al., 1998)。

(3) 相对生长法是在每木调查的基础上, 根据林木径级分配, 按径级选择标准样木, 以皆伐法的样木调查方法, 测定各部分的生物量, 再根据各部分生物量与胸径、树高、材积等指标之间存在的相关关系, 利用数理统计拟合方程求出回归系数及相关系数, 然后估算林分生物量(Zhao and Zhou, 2004)。相对生长法应用最为普遍, 一般采用以胸径为自变量的一元方程或者以胸径、树高为自变量的二元方程来推算生物量(Zhang et al., 2007; Zheng et al., 2008)。存在的问题是林木各分量拟合方程都是独立进行计算的, 造成各分量间不相容, 换句话说, 就是干、枝、叶、根干重之和不等于总量。唐守正等(2000)以长白落叶松为例建立了相容性立木生物量方程, 解决了上述不相容问题(Verhoef and Bach, 2007)。

清单调查法计算森林碳库储量精度较高, 但缺点之一是因生态系统的空间异质性, 很难向大尺度推演, 只适合样地尺度的碳储量研究, 然而它为大尺度的森林碳循环模型构建提供了样本数据, 是区域、国家及全球尺度森林碳储量研究的基础; 缺点之二是无法反映森林碳储量的年内变化和季节性变化(Malhi et al., 1999)。

1.2.1.2 通量监测法

通量监测法主要包括箱式法和微气象学法, 而微气象学法中以涡度相关法最常用。箱式法根据箱内与外界有无气体交换分为静态箱和动态箱法。前者是在一定的时间内将箱体置于研究对象之上(如土壤和植物), 测定结束之后将箱体移开; 而后者是在测定之后, 箱体上部可以自动打开, 使箱内环境与外界保持一致, 不必移开箱体。静态箱移动方便、成本低, 但不能进行连续观测; 动态箱可以实现长期连续观测, 但成本较高。箱式观测技术已在中国的草地、农田和森林等不同类型生态系统中得到广泛的应用(周存宇等, 2004; Xiao et al., 2004)。

涡度相关法是通过测量一定高度上风速脉动和被测气体浓度脉动来计算界面的物质和能量交换通量的方法(宋霞等, 2003)。早期涡度相关技术多用于分析大气边界层湍流结构和热量与动量传输, 为生态系统植被-大气之间的 CO_2 交换研究奠定了理论和试验基础(Baldocchi, 2003)。自20世纪80年代以来, 通过直接测定风速、湿度及气体浓度等的脉动获得 CO_2 、显热、潜热等气体和能量通量的涡度相关法, 成为通量观测中最为有效的直接测定方法, 开始得到广泛应用(Baldocchi and Meyers, 1998)。一般

在植物冠层高度允许的范围内, 涡度相关法测定 CO_2 通量不受生态系统类型的限制, 特别适合测定大尺度内土壤 CO_2 排放通量, 同时对土壤系统几乎不造成干扰 (赵广东等, 2005), 但是目前测得的显热和潜热闭合程度只能达到 60%~80% (Chen and Falk, 2002)。涡度相关法对各方面条件的要求较高, 如观测样地的植被高度、下垫面地形、仪器的安装高度、仪器的响应速度等都会对通量观测结果的准确性产生影响 (Wilson et al., 2002), 并且在实际观测时, 还应根据具体情况采用虚温订正、坐标变换等方法进行校正 (张一平等, 2005)。

目前, 国际上已经建立的 CO_2 通量观测网络站点有 100 多个, 分别隶属于欧洲通量网 (EuroFLUX)、美洲通量网 (AmeriFLUX)、加拿大北方森林通量网 (BOREALS)、地中海通量网 (MedeFlux)、澳大利亚和新西兰通量观测塔 (OzFlux) 及亚洲通量观测网 (AsiaFLUX)。中国陆地生态系统通量观测研究网 (ChinaFLUX) 于 2002 年正式启动, 对中国的森林、农田和草地等 10 种不同类型的陆地生态系统开展了长期的、连续的通量观测与研究。涡度相关技术作为各观测站点的关键技术, 提供了一种直接测定植被与大气间 CO_2 、水、热通量的方法, 因此得到更广泛的应用 (于贵瑞等, 2004)。这些观测站点的建立为森林碳通量研究提供了重要途径, 由此产出一大批高质量的研究成果 (Zhou et al., 2008; Yan et al., 2006, 2013a, 2013b; Tang et al., 2011)。

通量观测法为典型生态系统碳收支的动态计量提供了大量可靠的数据, 有助于开展不同时间尺度上的碳通量变化及其对环境响应机制方面的研究, 已成为全球生态系统碳储量和碳收支研究的主要手段 (Baldocchi, 2003)。但是, 通量观测法仍是一种适宜小尺度研究的方法, 在观测结果的应用过程中, 仍有多源数据整合、复杂地形的通量观测技术及尺度转换等关键理论和技术问题尚待突破。

1.2.1.3 模型模拟法

模型模拟法是通过数学模型估算森林生态系统的碳储量, 适用于各个尺度的森林生态系统碳循环研究。按模型构建方式可分为经验模型、过程模型和遥感估算模型 (王军邦, 2004)。

经验模型以统计模型为主, 利用气候相关模型来估测净初级生产力。经验模型在一定范围内模拟较为准确, 但其应用条件和范围具有局限性。过程模型是在生态系统过程的基础上, 反映生物对环境响应机制的模型, 可对过去和未来气候变化条件下的生态系统碳循环过程进行推估和量化, 此类模型有森林生物地球化学循环模型 (forest biogeochemical cycle, forest-BGC) (Running and Coughlan, 1998)、陆地生态系统模型 (terrestrial ecosystem model, TEM) (Raich et al., 1991)、植被与大气交互模型 (atmosphere-vegetation interaction model, AVIM) (Ji and Yu, 1995; 黄玫等, 2006)、植被土壤与大

气碳交换模型 (carbon exchange between vegetation, soil, and atmosphere, CEVSA) (Cao et al., 2003; 顾峰雪等, 2006) 等。该类模型主要应用于小尺度的生态系统, 能够模拟生态系统碳循环的空间格局, 也便于与大气环流模式实现有效的对接 (于贵瑞等, 2004)。过程模型的缺点是机制复杂, 参数较多。

遥感估算模型是以遥感数据为驱动变量, 以空间化的环境数据库为支撑, 与生态学过程模型相耦合形成的森林碳储量估算模型, 如光能利用率模型 (carnegie ames stanford approach, CASA)、植被光合模型 (vegetation photosynthesis model, VPM) 和简单生物圈模型 (simple biosphere model version 2, SiB2) 等 (于贵瑞等, 2004; 江东和王礼茂, 2005)。按照耦合方式, 可分为“自上而下”和“自下而上”两种模式。前者是根据森林的光谱特征, 用遥感数据反演估算出固碳关键参数, 将其作为模型的输入参数, 计算出区域森林碳储量。后者是在地面实测碳通量数据或小尺度过程模型模拟结果的基础上, 分析实测碳通量与遥感光谱之间的对应关系, 建立由点及面的碳通量空间外推模型, 对区域森林碳储量进行估算 (江东和王礼茂, 2005)。

模型模拟法可以快速、无破坏地对森林碳储量进行估算, 并能实现宏观尺度上的动态实时监测, 且能对未来气候变化、人为干扰等情景进行预测, 这是传统方法所不可比拟的。利用模型估算区域、国家乃至全球尺度碳收支的变化是未来的发展趋势, 但是其缺陷在于受到模型本身的限制, 模型的有效性、尺度转换和输入参数等带来的不确定性, 最终导致模拟结果误差较大 (黄耀等, 2008)。遥感模型从理论研究阶段发展到实际的应用阶段还有很长的路要走。

1.2.1.4 稳定性同位素法

大气中 CO_2 的碳同位素含量变化量与其摩尔浓度倒数之间存在线性关系, 即所谓的 Keeling 曲线 (Keeling, 1958, 1961)。稳定性同位素法是以 Keeling 曲线为理论基础, 测定系统组分的碳同位素的比例, 精确量化不同生态过程对碳通量变化的贡献。在冠层尺度, Keeling 曲线的纵截距表示植被和土壤呼吸释放 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素组成。利用 Keeling 曲线求得的生态系统呼吸释放 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 能够将叶片尺度的同位素判别外推到生态系统尺度, 结合全球植被模型, 则能够确定不同植被类型在全球碳循环中的源汇关系 (Pataki et al., 2003)。但是为了降低外推截距的不确定性, 在实际测量中 CO_2 的变化范围应该足够大。稳定性同位素法与传统方法的结合将逐渐成为进一步揭示和解释生态学问题和现象的有效工具 (孙伟等, 2005), 尤其在全球变化背景下, 其与生态系统模型相结合, 能够进一步确定陆地生态系统在整个碳循环中的源汇关系 (Yakir and Wang, 1996)。

1.2.1.5 区域尺度森林碳储量估算方法

区域尺度森林碳储量的估算方法一直是人们关注的焦点。早期的研究主要是根据样