



CARBON BALANCE OF THE RUBBER
PLANTATION ECOSYSTEM IN HAINAN ISLAND

海南岛橡胶林 生态系统碳平衡研究

吴志祥 著

海南岛橡胶林生态系统碳平衡研究

吴志祥 著



气象出版社

China Meteorological Press

内 容 简 介

本书为评价橡胶林生态系统碳汇效益,采用生物量清查法和涡度相关法相结合的方法,对海南岛橡胶林生态系统碳储量和碳平衡特征及其环境调控机理进行研究。橡胶林生态系统作为人为生产系统,在人类提供大量经济效益的同时仍拥有巨大的碳汇生态功能,在热区科学合理地发展天然橡胶种植是值得提倡的。研究结果科学评价了橡胶林的碳汇效益,可为政府决策和碳汇贸易提供基础数据,为橡胶林经营管理提供理论依据;同时还可与其他热带人工林碳平衡研究提供范例,因而具有巨大的理论意义和实用价值。

本书可供人工林尤其是热带人工林生态系统碳平衡研究者借鉴,也可供高等院校热带作物栽培、生态、环境、气象、地理专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

海南岛橡胶林生态系统碳平衡研究/吴志祥著.

北京:气象出版社,2014.9

ISBN 978-7-5029-5998-2

I. ①海… II. ①吴… III. ①海南岛—橡胶树—森林生态系统—碳循环—研究 IV. ①S794.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 207591 号

Hainan Dao Xiangjiaolin Shengtai Xitong Tanpingheng Yanjiu

海南岛橡胶林生态系统碳平衡研究

吴志祥 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

策划编辑:崔晓军

责任编辑:黄海燕

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm, 1/16

字 数:275 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版

定 价:50.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:10.75

印 次:2014 年 9 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

CO₂ 浓度升高是引发气候变暖的重要原因,因此,减少 CO₂ 的排放量成了世界各国政府面临的重要任务。作为发展中大国的中国,减排压力越来越大。而人工林是我国碳贸易谈判的重要筹码,因此,研究我国各种人工林碳平衡状况十分重要。另外近 10 年来天然橡胶干胶价格上涨,而生产天然橡胶的巴西橡胶树(*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)是一种典型的热带作物,因地域分布的局限性,橡胶树种植面积在我国热带地区迅速扩大,引发众多争议,对热区种植橡胶树反感、抵触甚至反对的声音时有发生。为了正确评价橡胶林生态系统碳汇效益,本书采用生物量清查法和涡度相关法相结合的方法,对海南岛橡胶林生态系统碳储量和碳平衡特征及其环境调控机理进行研究。

经研究可知,海南岛的橡胶林生态系统是一个巨大的碳汇,其年均碳吸收量达 9.99~11.10 t·hm⁻²,其碳汇能力高于亚热带的杨树人工林和亚热带、热带的纸浆林,也高于位置比较接近的海南岛尖峰岭热带山地雨林和西双版纳的热带季节雨林。橡胶林生态系统碳平衡主要受橡胶林本身生长特性及外界环境驱动因子的影响。橡胶树本身林龄年轻,生命活动旺盛,光合、呼吸速率较高。外界环境驱动因子主要包括光合有效辐射、温度、水分等,对橡胶林生态系统净交换量影响最显著的驱动因子主要是光合有效辐射、饱和水汽压差以及土壤温度。相比较其他森林生态系统,橡胶林生态系统光合生产力很强,同时其生态系统总呼吸也很强,其净生态系统交换量(碳汇功能)也很大。

橡胶林生态系统作为人为生产系统,在为人类提供大量经济效益的同时仍拥有巨大的碳汇生态功能,因此,在热带地区科学合理地发展天然橡胶林是值得提倡的。

本书采用两种方法相结合并相互验证的方法,系统研究橡胶林生态系统碳平衡过程,获取橡胶林碳储量和净碳交换量的具体数值并分析其环境驱动因子和控制机制。研究结果可科学评价橡胶林的碳汇效益,为政府决策和碳汇贸易提供基础数据,为橡胶林经营管理提供理论依据;同时,还可为其他热带人工林碳平衡研究提供范例,因而具有巨大的理论意义和实用价值。

因本人水平有限,错误在所难免,望读者批评指正。

吴志祥
2014 年 4 月

目 录

前 言	
第 1 章 概论	1
1.1 研究背景	1
1.2 科学问题提出	2
1.3 研究目的与意义	3
1.4 研究内容与技术路线	4
第 2 章 国内外研究进展	6
2.1 森林生态系统碳平衡研究	6
2.2 涡度相关法及其应用	13
2.3 橡胶林生态系统碳平衡研究进展	22
2.4 研究述评	23
第 3 章 研究地区自然概况	27
3.1 地理位置	27
3.2 地形与土壤	27
3.3 土地利用与覆盖变化	27
3.4 气候	28
3.5 橡胶林植被	28
第 4 章 研究方法	30
4.1 试验设计	30
4.2 碳储量观测与检测	30
4.3 碳通量观测与数据处理	34
第 5 章 橡胶林生态系统碳储量研究	41
5.1 橡胶林生态系统植被碳储量研究	41
5.2 橡胶林生态系统土壤有机碳蓄积研究	46
5.3 橡胶林生态系统凋落物碳研究	50
5.4 橡胶林生态系统 NEP 及其驱动机制	51
5.5 橡胶林生态系统土壤呼吸研究	52
5.6 本章小结	57
第 6 章 橡胶林生态系统通量观测有效性评价	61
6.1 橡胶林生态系统湍流数据质量评价	61

6.2 橡胶林生态系统能量平衡闭合分析..... 71

6.3 橡胶林生态系统通量足迹与源区分析..... 79

6.4 本章小结..... 87

第7章 橡胶林生态系统碳通量研究 90

7.1 橡胶林生态系统环境因子..... 91

7.2 橡胶林净生态系统交换量研究..... 95

7.3 橡胶林生态系统呼吸研究 108

7.4 橡胶林生态系统生产力研究 118

7.5 橡胶林生态系统碳平衡及其环境响应机理 129

7.6 本章小结 132

第8章 讨论与结论..... 135

8.1 讨论 135

8.2 研究结论 137

8.3 特色与创新 142

8.4 展望 143

参考文献..... 144

附录 英文缩写词和符号含义..... 161

后 记..... 163

第1章

概论

1.1 研究背景

自工业革命以来,人类社会的发展十分迅速,加速改变着地球居住环境。过去的100年里,世界人口增长了4倍,能源消耗增加了6倍,工业产值增加了40倍。当今人类社会、经济活动已经足以对整个地球气候和生态环境产生显著影响(符涂斌等,2008)。相关研究表明,1861—2000年,全球地表平均增温 0.6°C (李怒云,2007),最近100年(1906—2005年)的地表温度线性增加趋势为 0.74°C (IPCC,2007)。全球地表增温的原因在于,地表反射的热辐射被地表温室气体吸收后,导致气温上升。这就是温室效应(greenhouse effect),是造成全球变暖的重要原因。

20世纪80年代以来,气温升高、气候变暖已成为全球性的环境问题,引起社会各界的广泛关注(李艳丽,2004;王顺兵等,2005;刘瑜等,2010)。全球气候变暖引起一系列环境变化,除了直接导致全球冰川融化、海平面上升、极端天气气候事件出现的频率上升等一系列变化外,还可能引发全球或区域性的干旱、洪涝、风暴潮、泥石流、滑坡、病虫害等气象、地质、生物灾害,进而给全球环境和人类社会、经济活动带来深远的负面影响(李艳丽,2004;欧阳丽等,2010)。

温室气体中 CO_2 是全球变暖最主要的因素,其贡献率为63.7%。自工业革命以来,由于人类大规模使用煤炭、石油和天然气等化石燃料,以及人类为开发或用材而加速砍伐森林等活动,全球每年由化石燃料燃烧释放的 CO_2 约为 $2.70\times 10^{10}\text{ t}$ (贾庆宇等,2011)。全球大气 CO_2 浓度从18世纪中叶的280 ppm*增加到现在的380 ppm以上,并以 $1.2\sim 1.8\text{ ppm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率递增(Dixon *et al.*, 1994; Schimel *et al.*, 2001; Laurent *et al.*, 2004)。人类在关注气候变化问题时,实际上更多地侧重于因人类活动所产生的温室气体及其所引起的全球变暖,多数研究认为空气中 CO_2 含量的上升是由人为经济活动引起的,主要是人类对煤炭、石油和天然气等化石能源的消费,其次是农业活动(水稻生产、畜牧业发展等)及大面积森林采伐等(刘金婷,2008)。

全球气候变化不仅会严重影响全球经济社会可持续发展,也将会日益影响人类自身的生存与发展。全球气候变化和全球变暖使人类社会把目光关注到地球大气 CO_2 浓度问题

* ppm(parts per million),即百万分率(10^{-6})。

上,因此,全球减排增汇、陆地生态系统碳源与碳汇问题成为当前生态科学研究的热点问题。气候变暖带来的全球环境问题就成了森林碳汇研究的重要背景。

1.2 科学问题提出

正因为人类活动导致全球 CO_2 浓度升高,进而引发全球气候变暖和环境恶化,因此减少 CO_2 的排放量就成了世界各国政府面临的重要任务。各国政府为实现减排任务过程中,主要进行了两方面工作:一方面采取技术措施改进工业技术、改革农业生产方式,或者使用洁净能源减少 CO_2 等温室气体的排放;另一方面就是寻找新的碳汇或者增大现有的碳汇以增加吸收固定大气中的 CO_2 来抵消 CO_2 的排放。

森林植被是陆地生物生态系统的主体,约有 85% 的陆地生物量集中于森林植被(Whittaker, 1973)。根据 FAO(2011)统计,全球森林面积约为 $4.0 \times 10^9 \text{ hm}^2$,森林蓄积量约为 $5.3 \times 10^{11} \text{ m}^3$,全球森林生物量碳储量达 282.7 Gt C,平均每公顷森林的生物量碳储量达到 71.5 t C。森林生态系统单位面积的碳储量(碳密度)是农田的 1.9~5 倍(Ciais *et al.*, 2000)。森林植被面积只占全球土地面积的 27.6%,其碳储量却占到全球植被碳储量的 77%;另外,森林土壤碳储量约占全球土壤碳储量的 39%。因此,森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量的增加或减少都将对大气中的 CO_2 储量产生巨大影响(张小全等, 2005)。森林生态系统也是陆地生态系统中碳吸收能力最强的碳库,因此,研究森林生态系统碳储量与碳通量特征及其环境调控机理就显得尤为重要,它已经成为全球气候变化研究的焦点问题(Twine *et al.*, 2000; Fang *et al.*, 2001; Ashton *et al.*, 2012)。

我国作为发展中大国,工农业生产技术仍有待提高,单位 GDP 能耗和 CO_2 排放量仍比较大。在国际谈判中,我们虽不承担减排指标,但我国已意识到节能减排的重要性并已经或将采取一些积极的措施减排增汇;同时,随着经济的发展,国际地位的提高,来自国际的压力不容忽视,我国将面临越来越大的减排压力。我国已将 CO_2 排放指标纳入国民经济和社会发展中长期规划,预计到 2020 年我国单位 GDP CO_2 排放指标比 2005 年下降 40%~45%。

我国天然林面积有限,但人工林面积逐年增加,人工林成为我国对外碳贸易谈判的重要筹码,因此,研究我国各种人工林碳平衡状况就显得尤为重要。但是,由于研究方法、技术手段、尺度转换及模型推算等方面的问题,人们对森林生态系统碳储量和碳平衡的估算与研究仍然有较大的不确定性,能让各国学者认可的确切数据还无法准确获得,同时,对其他陆地生态系统碳平衡过程及其机理研究也有待加强。

巴西橡胶树(*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.)人工林(本书简称为橡胶林)是我国热带地区最重要的森林生态系统,在我国海南、云南、广东等地的种植面积已超过 $1 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。我国橡胶林的碳汇效益将成为我国热带地区森林生态系统碳汇功能的一个重要增长点,但我国在人工林特别是热带橡胶林的碳汇效益方面的系统研究很少(向仰州, 2012),关于碳平衡规律及其机理方面的研究尚属空白。此领域即使在世界范围也刚起步(Thaler *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2010),还没有真正的研究结果。尤其是在橡胶林生态系统的研究方面,多关注于生物量生产、生物量增长模型、生物量测定及生物量与胶园生产率等方面(胡耀华等, 1982; 周再知等, 1995; 曹建华等, 2009; 唐建维等, 2009),蒋菊生等(2002)从橡胶林固定 CO_2 和释放 O_2 的服务功能及其价值估计方面进行了研究,而系统研究橡胶林生态系统

碳储量和碳平衡特征及其环境控制机理方面还很少进行。

另外,因近年来天然橡胶干胶价格大幅飙升,橡胶树种植面积扩大很快,尤其在云南西双版纳扩大更快,导致了一系列负面影响,引起了诸如生物多样性降低、原始次生林和水源林破坏、土壤碳储量减低等争议,生态学界对热带地区种植橡胶树产生反感、抵触甚至反对的声音(Guardiola *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2012; de Blécourt *et al.*, 2013; Yi *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。

橡胶林的生态问题到底怎样,实际情况到底如何,仍然有许多问题还没有研究透彻。从经济与社会发展角度看,天然橡胶的种植对我国意义重大。首先,天然橡胶仍是重要的战略物资,对我国国民经济建设、经济安全具有重要的战略意义;其次,天然橡胶产业是我国热带地区重要的支柱产业和优势产业,有近 200 万人专门从事天然橡胶种植业,因此,其稳定发展,对安排农场职工就业和促进热带地区农民脱贫致富具有举足轻重的社会意义;第三,天然橡胶园建成后,即是一个长期稳定的人工林生态系统,成为维持热带地区生态平衡的热带林的组成部分,对于热带地区农业可持续发展具有良好的生态意义;最后,我国作为世界上天然橡胶第一消费大国,保持较高的天然橡胶产量和自给率,对于在复杂多变的国际贸易环境中,平衡世界天然橡胶价格,避免受制于人,也具有重要的政治意义和经济意义(吴志祥等, 2009)。

因此,采用国际认可的技术方法,研究橡胶生态系统碳储量和碳平衡的特征及其环境控制机理,就显得十分必要与迫切。我们的关注点集中在 3 个方面:(1)橡胶林的碳储量和碳交换量的具体数值究竟是多少?(2)影响橡胶林碳储量和碳交换量的因素有哪些,如何影响?(3)估测橡胶林碳储量和碳交换量的最有效方法是什么?这些问题具有重要的学术价值和实践意义。

1.3 研究目的与意义

基于以上分析,本书采用生物量清查法和涡度相关法,研究海南岛橡胶林生态系统的碳储量和碳平衡过程及其环境响应机制。主要研究目的与意义如下:

(1) 橡胶林碳储量及年际变化驱动机制研究

采用经典的生物量清查法,结合已有模型估算橡胶人工林生态系统的碳储量,并结合气象、生态、水文数据,分析碳储量年际变化的驱动机制。研究结果将获取橡胶林生态系统的碳储量的具体数据,同时对人工林经营管理具有指导意义。

(2) 橡胶林碳通量及其环境响应机理研究

根据涡度相关系统数据,研究各环境因子如辐射、温度、湿度、CO₂ 浓度等因子对橡胶林生态系统碳固存的影响,并以此分析为基础,建立碳交换量与环境因子的相关模型。研究结果将利于弄清环境因子与碳交换的相关关系,并预期推广到热带人工林生态系统应用。

(3) 橡胶林的碳平衡与碳汇效益研究

利用涡度相关系统,结合梯度观测和廓线系统观测方法,全面研究橡胶林生态系统的净生态系统交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)、生态系统呼吸通量(Ecosystem Respiration, Re)和总生态系统生产力(Gross Ecosystem Productivity, GEP),具体回答橡胶林到底可固定多少 CO₂,并研究光合与呼吸等生理作用过程,综合评价橡胶林生态系统碳汇效益。

(4) 基于涡度相关系统的橡胶林生态系统通量观测有效性分析

研究基于涡度相关系统的橡胶林生态系统碳通量监测过程中的湍流平稳性和发展性检验、能量平衡闭合分析及通量源区分析等,分析研究橡胶林林分的能量闭合状况及对碳通量的可能影响。一方面可评价涡度相关系统测定碳通量数据的可信度,另一方面对完善热带人工林生态系统碳通量监测和碳交换量的模型建设具有重要的应用和理论价值。

(5) 比较分析生物量清查法与涡度相关法在森林碳平衡研究中的应用

生物量清查法是森林生态系统生物量研究中历史悠久的经典方法,根据连续年度的碳储量差额可计算森林净生态系统碳交换量,即 NEE;涡度相关法则可直接原位无损测定森林与大气间的 CO_2 净交换量。通过其应用比较,可揭示进行热带森林生态系统碳汇研究的有效方法。

总之,采用生物量清查法和涡度相关法,系统研究橡胶林生态系统碳平衡过程,获取橡胶林碳储量和净碳交换量的具体数值并分析其环境驱动因子和控制机制。研究结果可科学评价橡胶林的碳汇效益,为政府决策和碳汇贸易提供基础数据;同时,可以为橡胶林经营管理提供理论依据,因而具有十分巨大的理论意义和实用价值。

1.4 研究内容与技术路线

1.4.1 研究内容

本文研究内容包括 3 个部分:一是进行橡胶林生态系统碳储量研究,包括研究橡胶林生态系统的生物量碳库、土壤有机碳库和凋落物碳库以及土壤呼吸特征;二是对橡胶林生态系统碳通量监测有效性进行评价,包括对橡胶林湍流平稳性和发展性进行检验,评价湍流数据质量,对能量平衡闭合进行分析,对通量源区进行探讨,并评价它们对通量观测有效性的影响;三是进行橡胶林生态系统的碳通量研究,主要研究橡胶林生态系统的净碳交换(NEE)、呼吸通量(Re)和总生产力(GEP)动态及其影响机制,并研究橡胶林生态系统碳平衡过程,对橡胶林碳源或汇进行评估。

1.4.2 技术路线

本书研究技术路线见图 1.1。

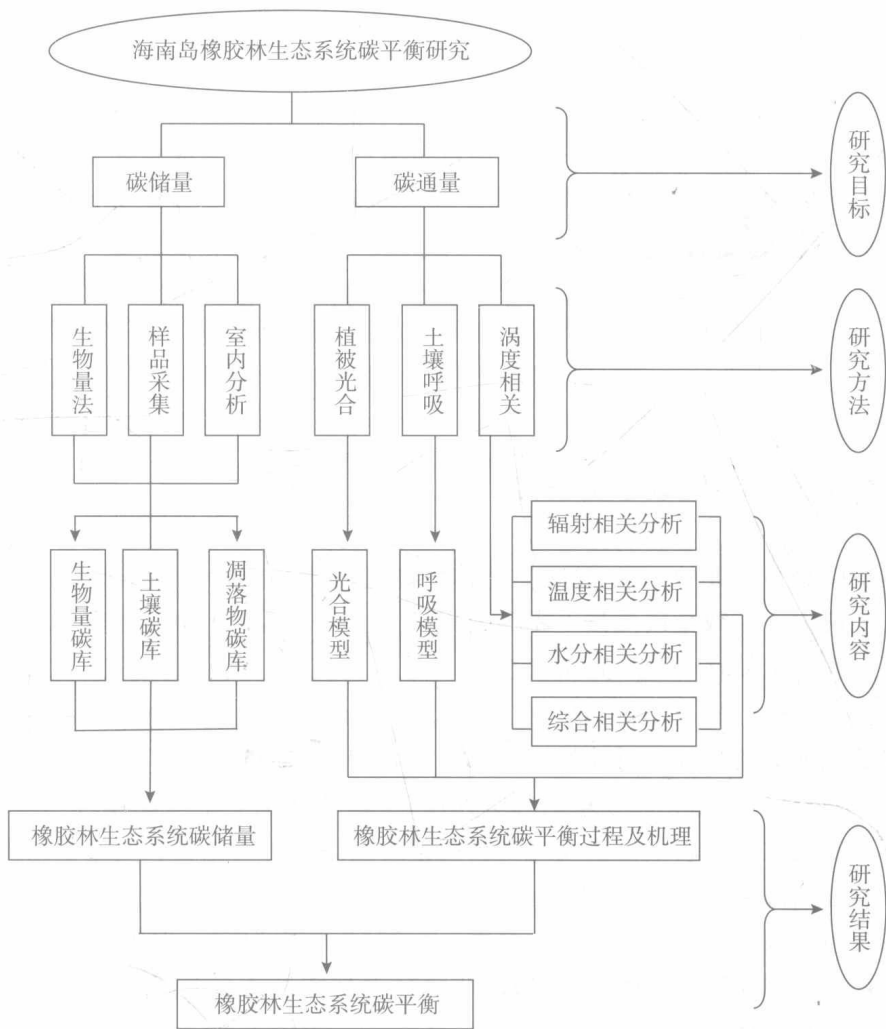


图 1.1 橡胶林生态系统碳平衡研究技术路线图

第2章

国内外研究进展

2.1 森林生态系统碳平衡研究

生物体中碳是最主要的元素,碳是生物体生命过程所必需的。碳平衡最初概念是指碳的排放和吸收两方面在数量或质量上相等或相抵;生态学中,碳平衡是指整个系统中碳素的储存和循环过程。碳储存(固存)是指气态的 CO_2 从大气中分离出来,通过生态学过程把碳固定下来,此生态学过程主要是指绿色植物把 CO_2 转化成碳水化合物。碳循环是指碳素在不同碳库间的交换流动过程。对陆地生态系统而言,碳循环指的是植被通过光合作用吸收大气中的 CO_2 ,而后经过植物及土壤的呼吸作用(生物地球化学循环过程)再返回到大气中的一个循环反复的过程。碳平衡研究主要指的是对生态系统碳储量和碳通量的研究。

森林是陆地生态系统的主体,森林生态系统是陆地生态系统中最大的碳库,森林在调节陆地生态系统与大气碳库间的碳交换中起着巨大的“生物泵”作用,但因森林具有生长发育周期长且对环境变化反应滞后的特点,因而在研究森林碳平衡与全球气候变化相关过程机制中存在许多不确定性。可以说,科学认识森林生态系统碳平衡过程是解决全球碳收支不确定性的关键。

2.1.1 森林生态系统碳平衡研究意义

(1)森林生态系统碳平衡过程影响和调控全球碳循环过程

在全球碳循环研究中,森林的意义十分重要,地位十分特殊。一方面,森林生长吸收大量的 CO_2 ,并且具有长期的保存能力。据估计,森林每积累 1 m^3 木材吸收约 850 kg 的 CO_2 。根据 Whittaker(1973)的资料,每年每平方米森林净光合固定的碳量,热带森林为 $450 \sim 1600 \text{ g}$,温带森林为 $270 \sim 1125 \text{ g}$,寒温带森林为 $180 \sim 900 \text{ g}$ 。陆地上森林植被分布面积广、生态类型多样、净生产力高、生物量积累大,全球森林类型从北到南主要包括寒温带和温带辽阔的针叶林及针阔混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林、热带雨林等。在地球陆地上,森林面积只占到全球非冰表面的 40% ,但其生物量却约占陆地生物量的 90% ,其土壤碳蓄积约占全球土壤碳蓄积的 73% (Wofsy *et al.*, 1993; Kirsebauma, 2003)。

另一方面,森林与其他植被系统相比,具有较高的碳存储密度。王效科等(2001)的研究表明,植被和土壤平均碳密度,在森林生态系统中分别为 86 和 $189 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,在草原中分别为 21 和 $116 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$,而在农田中则分别为 5 和 $95 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可见,森林生态

系统稍微受到破坏就会造成大量的 CO_2 气体外排,从而引起大气中 CO_2 浓度剧增,对区域乃至全球碳循环和碳平衡产生重要影响。据估算,全球平均每年因火灾而损失的森林面积大约占森林总面积的 1%(Crutzen *et al.*, 1979; Wong, 1979),并因此导致每年约 4 Pg C 排放到大气中,相当于全球每年化石燃料燃烧排放碳的 70%(Pickett *et al.*, 1985)。据测算,2010 年 6 月大兴安岭呼中区森林火灾总过火面积为 5 812.4 hm^2 ,消耗可燃物总量为 7.7 $\times 10^4$ t,释放 3×10^4 t C,单位面积排放达 5.94 t C(刘斌等, 2011),折算成 CO_2 达 21.79 t。全球森林砍伐和森林退化,是除煤炭之外 CO_2 排放的第二大单一来源。

森林是地圈生物圈过程最重要的参与者,森林控制着全球陆地碳循环的动态。因此,森林在全球陆地生态系统碳平衡研究中占有十分重要的地位(Lü *et al.*, 2006),寄托着人类降低大气 CO_2 浓度和减缓全球变暖趋势的希望。因此,森林生态系统碳平衡已经成为当前生态学的研究热点,并引起各国政府的高度重视(Hennigar *et al.*, 2008; van Kooten, 2009; Helm, 2010; Law *et al.*, 2012)。

(2) 研究森林生态系统碳平衡有助于弄清陆地生态系统碳循环过程

陆地生态系统是一个土壤-植物-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)相互作用的复杂系统,组成这个系统的森林、草地、农田、湿地等不同植被生态系统之间也存在着复杂的联系(Zhang *et al.*, 1997; Romano *et al.*, 2012)。陆地生态系统碳循环是指碳在包括整个陆地生态系统的植被(包含有森林、草地、农田和湿地等相应植被)-土壤-大气各个子碳库间的循环往复过程。对不同子系统碳循环的研究可为全面认识陆地生态系统的碳循环提供重要的理论支持(陈泮勤, 2004)。森林植被生命周期长,系统结构和功能稳定,在调控地球生物化学循环中发挥着重要的作用(Bahn *et al.*, 2012; Mueller *et al.*, 2012)。不同于草地、湿地、农田等植被系统类型,森林植被一般是多年生且单位面积上具有更大的生物量,在时间和空间上占据着较大的生态位(Kraft *et al.*, 2008; Loreau *et al.*, 2012),对平衡大气碳库具有重要作用。因此,深入研究生态系统碳蓄积和碳循环过程及其机理,可降低在陆地生态系统碳循环研究中的不确定性(尽管对森林本身的研究仍有较大的不确定性)。

(3) 研究森林生态系统碳平衡有助于全面认识森林生态系统的其他功能过程

森林生态系统有许多功能,影响着人类的生存环境,制约着人类社会的发展。森林生态系统除了吸收 CO_2 、制造 O_2 外,还可净化空气、改变低空气流、防止风沙、保持水土,有自然防疫、消除噪声等作用。从地球生物化学循环角度而言,与其他元素(如 N, S)相比,碳是构成生命有机体的基本元素,并且同 O, H, N 等不同元素存在一定的量比关系。包括碳循环在内的水循环和氮循环等循环过程相互耦合、相互作用,共同构成了森林生态系统物质循环和能量流动的重要基础(Butler *et al.*, 2012; Pinder *et al.*, 2013)。森林碳平衡过程具体包括森林生态系统的碳循环和碳蓄积过程,是森林生态系统最基本的功能特征,也是深入认识其他功能过程的基础,因此,研究森林的碳平衡过程对于全面认识森林生态系统的其他功能具有重要意义。

(4) 研究森林生态系统碳平衡可为森林经营及政府决策管理提供依据

森林经营管理者常常利用林地的经济产量、立地质量、系统结构与能量运转等指标来评价森林生态系统的健康、稳定与和谐。研究森林生态系统的碳平衡、碳蓄积和碳循环实际上是从不同侧面评价森林生态系统的经济产量、立地质量、系统结构与能量运转等指标(查同

刚,2007)。研究森林生态系统中碳、水等物质循环和能量流动规律,可为指导森林经营生产、提高森林生态系统管理水平提供重要理论参考,更可为政府及相关机构的决策管理提供科学依据。

2.1.2 森林生态系统碳平衡研究方法

森林生态系统碳平衡是指光合作用吸收 CO_2 和呼吸分解作用排放 CO_2 两个过程的平衡。森林生态系统光合作用产物通过一系列吸收转运过程被固定在植被生物、土壤有机物、林下调落物和动物中。森林是陆地上最大的植被生态系统,其生物量蕴含了大量的有机碳,国际上一般以 0.5 作为生物量和碳之间的转换系数,但转换系数在不同树种、树龄和器官之间存在差异。土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,主要是指由枯落物(花、果、叶等)、动植物代谢物和残骸等经分解后残留在土壤中的有机质中包含的碳(通常以 0.58 作为有机质中碳的转换系数),以及土壤微生物这部分碳库。枯落物碳库的碳蓄积与其分解速率有关,一般来说,高海拔、高纬度地区的枯落物分解较低海拔、低纬度地区凋落物分解慢,碳蓄积量也更大。森林动物碳库只占森林生态系统总蓄积碳量的很少一部分,一般不到 0.1%,因此,在估算森林生态系统碳蓄积时一般不包括动物碳库。研究森林生态系统碳平衡,就是研究碳在各子系统间的分布和交换,以及在植被-大气-土壤生态系统间的碳交换。研究生态系统碳平衡一般是从生物量和净初级生产力开始的,采用的方法总体上可分为三类:反映碳积累的基于生物量和土壤调查的生物量清查法(Fang *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2010; Guo *et al.*, 2010; Heath *et al.*, 2011);反映 CO_2 通量的以生理生态-微气象理论为基础的微气象方法(涡度相关法、能量平衡法和浓度梯度法)(Baldocchi *et al.*, 2000; Guan *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2008);反映大尺度范围的模型模拟法和遥感估测法(Dennis *et al.*, 2001; Schimel *et al.*, 2001; Asner 2009; Peckham *et al.*, 2013)。

(1)生物量清查法

生物量清查法是国内外通用的估算森林长期碳蓄积的普遍方法,具体包括生物量调查和土壤调查。生物量调查首先采用常规测树法,如皆伐法、平均木法、随机抽样法、径阶选择法、材积转换法、维量分析法等,根据每个树种树木的生长关系经验模型计算出森林群落的生物量,并结合室内分析测定不同部位的碳含量。然后根据生物量和碳含量计算获得碳蓄积的具体数值,但林木既有高碳组织又有低碳组织,且不同植被类型含碳量也有所不同,所以在估算时往往存在偏差。再次利用生物量和干物质中碳含量的乘积求得森林生态系统碳储量。当前,我国对森林碳储量的估算,在不同空间尺度(森林群落、生态系统、区域或国家尺度)上普遍采用的方法是通过直接或间接测定森林植被的生产量与现存量,并根据碳储量公式计算而得到。土壤碳含量调查一般先采集土壤样本(土壤剖面法或钻井法),然后室内采用干烧法或重铬酸钾氧化法测定土壤碳含量,进而获得不同尺度上土壤中有机碳的含量。

与其他测定方法相比,生物量清查法直接、明确、技术简单,可用于长时期、大面积的森林碳储量监测,但其劳动力消耗多,且只能间歇地记录碳储量,不能反映出季节和年变化的连续动态效应。同时,受估算方法、样地设置、时空尺度等因素影响,研究结果的可靠性和可比性较差,并且生物量清查法的数据资料最终还要依赖建立的各种模型进行估算,估测精度不高,因而还需要不断修正和完善。生物量清查法的另外一个不足是估测数据的不完整性。在森林生物量估算中,往往只估算了地上部分生物量,而地下部分的生物量因较难测定常被

忽略,或即使考虑地下部分生物量,估算值也存在很大的不确定性。

(2) 微气象学法

微气象学法主要通过近似平坦均一的下垫面条件下,根据近地层的湍流状况直接测定相关标量的通量。其测定假设条件是,测定相关气象参数必须在常通量层中进行,这样数据才能被认为是其气体交换量。根据不同测定原理,微气象学方法主要有涡度相关法(Eddy Covariance, EC)、空气动力学法、质量平衡法和能量平衡法等。其中,涡度相关法被认为是目前国际上测定森林生态系统 CO₂ 通量的标准方法(吴家兵等, 2003)。

涡度相关法是采用三维超声风速仪测定植被群落冠层与大气之间的湍流交换量的微气象学方法,是在植被冠层上方某一高度直接测定通过大气湍流向上或向下传递 CO₂ 的速率,从而计算出生态系统吸收或释放 CO₂ 通量的方法。区别于能量平衡法和浓度梯度法等其他微气象学方法,涡度相关技术依靠气流在垂直方向上的涡旋运动带动 CO₂ 等不同物质向上或向下通过某测定断面,传感探测器就通过测定两者(向上和向下)之差来计算生态系统固定或释放出的 CO₂ 量。其计算公式为

$$F_c = \overline{\rho'w'} \quad (2.1)$$

式中: F_c 为生态系统 CO₂ 交换量; ρ 为 CO₂ 浓度; w 为垂直方向上的风速; 字母上的小撇(')是指各自平均值在垂直方向上的波动即涡旋波动; 横线是指某一段时间(15~30 min)的平均值。利用涡度相关技术测定生态系统的碳通量主要有闭路和开路两套系统(Finnigan, et al., 2003)。典型的涡度相关系统主要由三维超声风速计、红外 CO₂/H₂O 分析探测计和数据采集仪组成。当然,为研究方便,一般在相应生态系统涡度相关测定中,还会测定一系列的森林生态环境方面的因子,如温度、湿度、辐射、风速、风向、降水、CO₂ 浓度等,另外还包括土壤的温湿度、土壤热量传递等方面的因子等。

对森林生态系统而言,结合测定森林植被的光合、呼吸和土壤的呼吸作用,可计算出森林生态系统的总初级生产力(Gross Ecosystem Production, GEP)和净生态系统交换量(NEE)。目前,涡度相关技术已实现对不同类型生态系统碳和水热通量的长期连续观测,其可靠性也得到了很好的验证,是生态定位观测技术上的重大突破。但是,由于试验地点、仪器设备、夜间通量以及气象条件等因素的复杂性,加上观测站点的分布不均和数量不足,在由点到面尺度外推过程中必然降低测定结果的精确度,涡度相关技术在净碳平衡估测上的精度有待进一步提高。

(3) 模型模拟法和遥感估测法

模型模拟法和遥感估测法是通过数学模型和遥感影像来估算森林生态系统的生产力和净碳收支。各种生态系统碳通量监测技术的应用,尤其是涡度相关技术,能让我们切实了解特定生态系统碳收支的动态及其影响因子。但因涡度技术设备的昂贵价格及其相对严格的安装适用条件,在一定程度上也限制了它的推广应用。因此,如何估算区域乃至全球尺度上的碳通量成为难题。

目前,主要模型模拟方法包括过程模型(process model)、大气反演模型(atmospheric inversion model)和光能利用效率模型(light use efficiency model)3种,可将生态系统水平上的研究推广到区域乃至全球尺度上。

过程模型也称机理模型,是在深入研究生物量形成的机理以及植物与环境间的交互作用的基础上,采取“自下而上”的方式,对影响碳通量结果的光合作用、呼吸作用和蒸腾作用

等生物学过程进行模拟,从而估算出系统的碳通量。相比于其他模型,过程模型能帮我们理解森林生态系统对气候与外界环境变化的响应过程,且外推结果也更为准确可靠(Liu *et al.*, 1997)。这类模型的主要缺点是计算过程比较复杂、观测指标多和输入变量参数大。因此,输出结果的最终表现受输入数据的质量影响很大。比较常用的过程模型有 BEPS(Liu *et al.*, 1997), BIOME-BGC(Hunt *et al.*, 1992; Kimball *et al.*, 1997), PIX GRO(Adiku *et al.*, 2006)等。

大气反演模型主要是通过安装在海洋大气边界层界面上不同站点不同时间测得的大气 CO_2 浓度和由气象数据推动的大气传输模型来计算陆地表面的碳通量(Denning *et al.*, 1996; Fan *et al.*, 1998; Gurney *et al.*, 2002; Rödenbeck *et al.*, 2003; Deng *et al.*, 2007),主要用作大尺度和长时间跨度的研究。大气反演模型的精确度主要受 CO_2 观测站点和安装位置的限制。另外,大气反演模型计算的全球生态系统与大气间的 CO_2 交换量,并不能确定不同生态系统对碳通量的贡献量,也不能揭示哪个过程会影响碳的源/汇(Janssens *et al.*, 2003)。

光能利用效率模型就是根据瞬时太阳辐射和植物冠层对光照的利用效率来计算碳通量,主要是指生产力。从某种程度上来看,光能利用效率模型可以看成过程模型的简化版,它抓住了生态系统碳循环最关键的步骤——光合作用。与过程模型相比,光能利用效率模型原理简单清楚,需要输入的变量更少,因此应用也最广。目前比较常见的光能利用效率模型有 GLO-PEM(Prince *et al.*, 1995), TURC(Ruimy *et al.*, 1996), CASA(Potter *et al.*, 1993), VPM(Xiao *et al.*, 2004)和 3-PG(Law *et al.*, 2000)等。

由于卫星遥感技术的发展,光能利用效率模型也成了生态系统碳通量估算模型研究的一个主要发展方向,而且遥感技术能有效地将涡度通量塔的测定扩展到区域乃至全球的尺度上。

总之,3种方法各有优缺点,适用的时空尺度也各不相同,其中,生物量清查法是研究生态系统较长时间尺度(3~5年)上碳交换和碳蓄积的经典方法;以涡度相关法为代表的微气象学法是目前研究时、日、月等短时间尺度内森林生态系统与大气间的碳交换量的标准方法;模型模拟法和遥感估测法适于估算理想条件下的区域或国家尺度上的碳蓄积和碳通量,一般同遥感技术相结合来估算土地利用变化对碳蓄积的影响。

2.1.3 森林生态系统碳储量的时空分布

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,不仅维系着大量的植被碳库(约占全球植被碳库的80%以上),而且也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的73%,是全球植被碳库的3倍和大气碳库的2倍),据统计,每年森林生态系统固定的碳约占整个陆地生态系统的2/3,相对于其他生态系统,森林具有更高的碳储存密度,且在时空上具有更广的生态位,由此可见,森林生态系统碳循环和碳蓄积过程在全球碳循环过程中起着不可替代的调节作用。

(1) 森林生态系统碳蓄积与碳循环时间分布

在森林的演替过程中,碳蓄积不断发生变化。Lieth(1974)首先分析了森林演替过程与固碳能力的关系,研究发现俄罗斯云杉林生物量在前20年演替过程中是一个慢速积累阶段,在演替20年时累积速率达到最大值 $486 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,70年后累积速率开始降低,在整

个93年的生命周期中生物量的平均累积速率为 $338 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (Major, 1974)。Kovel 等(2000)研究了荷兰流动沙地到阔叶混交林的整个演替过程,即从裸地到顶级群落形成的整个过程:在这个过程中,植被和土壤的碳蓄积不断增加,直到在121年后形成阔叶混交林时,植被和土壤的碳蓄积达到最大值。方精云等(2001)指出,20世纪70年代以前,我国森林碳储量减少,从70年代末期开始增加。刘国华(2000)指出,我国4次森林资源清查中森林植被总碳储量呈增加趋势。还有许多学者研究了不同地区森林植被碳储量的变化,刘其霞等(2005)指出浙江针阔混交林碳储量呈对数增长形式,张德全等(2002)研究了山东森林碳储量,从新中国成立到2000年均是增长的,年均递增4.38%。另外,在森林演替中,森林根系碳储量也会增加(杨丽韞等,2005)。宫超等(2011)研究了中亚热带马尾松林、马尾松阔叶树混交林和常绿阔叶林3种不同森林演替阶段类型的碳储量及时空分布特征,结果表明,马尾松林和马尾松阔叶树混交林碳储量相差不大,但到常绿阔叶林阶段,碳储量增加比较明显;其结果表明,乔木层碳储量会随森林进展演替增加,乔木层是生态系统碳储量的主要贡献者,且各林分均以树干占比例最大;土壤层碳储量会随演替进展而增加,但对整个系统碳储量的贡献率会降低;林下植被和凋落物层碳均会随演替进展而降低,占系统碳储量非常微弱。森林生态系统随着演替过程的进行,在整个系统中碳储量比重呈增加的趋势。

(2) 森林生态系统碳蓄积与碳循环的空间分布规律

由于气候、土壤等自然地理因子的地带性变化,森林碳循环和碳蓄积呈现出相应的空间变化规律:1)森林生态系统生物量碳密度随纬度升高有下降的趋势,而土壤碳密度有升高的趋势;2)森林土壤碳库是森林生态系统最大的碳库,其碳储量是森林生物量碳蓄积的2.2倍;3)高纬度地区森林生态系统是大气碳汇,而低纬度地区森林很有可能是大气碳源(Dixon *et al.*, 1994)。Raich 等(1992)发现土壤呼吸同净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、年平均温度和年降水量具有明显的正相关关系,这对理解土壤碳库和植被碳库的时空变化均具有重要意义。

对我国森林的研究,最重要的研究力量是基于ChinaFLUX网络对东部森林样带(从热带雨林、亚热带森林、暖温带森林到北方原始阔叶红松林和云杉林等)的碳储量和通量动态变化进行了大量研究,同时初步研究分析了人工林在全球碳循环中的作用和地位(于贵瑞等,2006a;张雷明,2006),但仍存在较多的不确定性。对我国森林植被碳储量的研究,赵敏和周广胜(2004)研究为3.778 Pg,低于方精云等(2001)的估算值4.63 Pg,比王效科(2001)的估算结果(3.724 Pg)略高,但周玉荣等(2000)的估算结果为植被碳储量为6.2 Pg。刘双娜等(2012)利用森林详查资料研究得出我国森林植被碳汇/源的空间分布规律:我国碳汇面积集中于亚热带和温带地区,高值区在海南岛、横断山脉、吉林长白山脉、大兴安岭南部和西北山地等;碳源面积则集中分布在东北至西南一带,高值区在云南南部、大兴安岭北部和四川盆地中部。我国的森林覆盖率已由1998年的13.92%上升到2009年的20.36%,预计到2050年增加到26%,因此,如何准确定量评估森林的碳源/汇功能,弄清影响森林CO₂吸收源的问题不仅可以有助于指导我们森林经营,提高森林碳汇功能,也是为完成我国既定的碳减排任务和履行国际义务的迫切需要。森林在全球碳循环中,尤其是在探求未知碳汇中有着重要的意义。