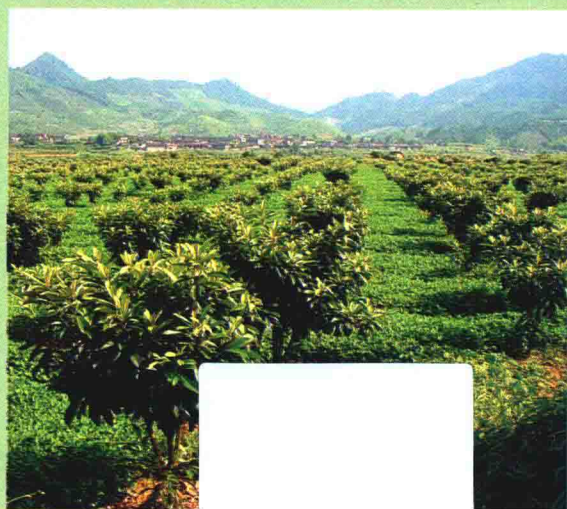


亚热带果园 生态系统碳吸存及其管理

Carbon Sequestration and Management
in Subtropical Orchard Ecosystem

王义祥 翁伯琦 邢世和 等著



科学出版社

亚热带果园生态系统 碳吸存及其管理

王义祥 翁伯琦 邢世和 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

在长期科学研究的基础上,总结亚热带果园生态系统碳素循环的特点及其主要影响因素,重点介绍经营年限、垦殖方式、施肥管理、生草覆盖等果园经营管理措施对果园生态系统碳吸存能力的影响,评估了不同经营管理措施下果园土壤的固碳潜力,并提出了提高亚热带果园生态系统碳汇功能的建议措施。

本书可供农业生态环境保护领域的研究人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

亚热带果园生态系统碳吸存及其管理/王义祥等著.

—北京:科学出版社,2014.4

ISBN 978-7-03-039977-9

I. ①亚… II. ①王… III. ①亚热带果树-果园-农业生态系统-碳循环-研究 IV. ①S667②S181

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 040958 号

责任编辑:许 健 韩 芳

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>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏凤凰数码印务有限公司印刷

科学出版社出版 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 242 000

定价: 89.00 元

前 言

由于人类活动的影响,大气 CO_2 浓度不断增加,其浓度从工业革命时期的 $280 \mu\text{mol/mol}$ 上升到目前的 $355 \mu\text{mol/mol}$,并继续以每年约 0.5% 的速度上升,预计 21 世纪末将达到 $650 \sim 700 \mu\text{mol/mol}$ 。我国作为世界上最大的发展中国家,对能源的需求量将继续增长,1992 年因化石燃料燃烧产生的 CO_2 排放量位居世界第二位,因此,如何适时采取措施控制碳排放,无论对全球环境质量的改善还是对国家安全都将起到重要作用。全球气候变化影响陆地生态系统,关系农林牧业生产、资源利用和人类的生存,而全球碳循环又直接影响全球气候变化。农业生态系统在全球碳循环中占有重要地位,既是碳源,又是碳汇。一方面,要发展农业就会增加农业源的碳排放量,促使全球变暖;另一方面,作物尤其是生长发育过程中会通过光合作用吸收并转化碳。但碳循环涉及地表系统各圈层物理、化学和生物过程,这些过程极其复杂,人类对它们的认识又十分有限,存在相当大的不确定性,尤其是在碳源和碳汇方面,未来由温室气体的增加所引起的气候变暖将继续长期地显现出来。

我国南方红壤丘陵区土地面积为 $113 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国土地总面积的 11.8% ,是世界上一个重要的生态类型区。该区域碳储量大,且土地利用和植被覆盖变化强烈,对全球碳循环以及大气 CO_2 的季节波动具有重要的影响。据估算,我国热带、亚热带地区 $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层中的有机碳储量约为 26.8 Gt ,分别占全球和全球热带、亚热带土壤碳储量的 1.9% 和 5.3% ;其平均有机碳密度(约为 125 t/hm^2)也高于世界上其他热带和亚热带地区。东南红壤丘陵区是我国热带、亚热带经济林果和茶叶的重要生产基地,盛产铁观音乌龙茶、武夷岩茶、白茶和芦柑、枇杷、锥栗、龙眼、荔枝等名特优和创汇农产品,具有巨大的特色生物产品贡献能力。就福建省而言,全省现有果茶园面积已逾 $71.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$,且绝大部分果茶园分布在丘陵、山地。其中,果园面积 $54.21 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年产水果 $495.40 \times 10^4 \text{ t}$,人均水果占有量位居全国前列,龙眼、柑橘产量居全国第一位;茶园面积 $16.93 \times 10^4 \text{ hm}^2$,居全国第二位,年产茶 $22.40 \times 10^4 \text{ t}$,居全国第一位。水果、茶叶已成为福建省广大农村促进经济发展、增加农民收入的一条主要途径。但由于长期以来对土地资源不合理的开发与利用,水土流失和土地退化较严重。据报道,我国东南丘陵区水土流失面积达 $800\,000 \text{ km}^2$ (其中严重侵蚀地占 $165\,000 \text{ km}^2$),热带、亚热带红壤地区的农业资

源每年向大气释放约 204 Tg CO₂。但是,该区农业资源固定大气 CO₂ 的潜力很大,如果利用得当,该区将成为大气 CO₂ 的汇。

果园作为重要的土地利用类型之一,在我国陆地生态系统碳汇评价中占有重要的地位。尽管我国碳平衡研究已经有了一些的积累,但主要是针对森林生态系统,有关亚热带果园生态系统的研究仍十分欠缺。加之果树作为一种农用型的植被类型,其碳循环及其过程受地理、气候条件,特别是周期性经营活动的影响而十分复杂。果园生态系统不仅仅有植被和土壤碳库,林果产品也是该系统中一个重要的流动性碳库。为了获得更高的产量,施肥、修剪、采摘和灌溉以及高密度栽培模式等经营行为增加了该系统碳循环研究的复杂性和不确定性,探索亚热带果园生态系统中碳素循环过程对经营管理的响应,完善碳素循环的动态平衡机制,寻求提高果园生态系统碳汇功能的技术措施,可为我国碳平衡研究补充基础数据,为我国生态系统碳增汇/减排对策的制定和果园生态系统管理提供科学依据。

本书是经过多年研究完成的,同时多名博士、硕士研究生为此付出了很大的努力。本书除署名的作者外,参与撰写的人员还有吴志丹(第二章)、王峰(第六章)、田娜(第七章)等。另外,本书涉及的研究工作还得到福建省农业科学院农业生态研究所的黄毅斌、王成己、罗旭辉、詹杰、徐国忠、郑仲登以及福建省农业科学院茶叶研究所的尤志明、江福英、李慧玲等的鼎力帮助。本书的相关研究也得到了福建省自然科学基金项目(D0510026)、福建省科技计划项目(2009R10036-4)、国家科技支撑计划课题(2008BAD95B08)、福建省农业科学院科技创新团队建设项目的资助。在此,向给予本书顺利出版提供资助和帮助的相关单位和人员致以衷心的感谢。

由于时间仓促,本书在编写的过程中可能出现一些疏漏和不足,恳请读者批评指正。

王义祥
2013 年 6 月

目 录

前言

第一章 果园生态系统及其碳吸存的研究现状	1
第一节 中国果园类型与分布	1
一、世界水果产量与分布	1
二、中国水果产量与分布	2
三、福建水果产量与分布	3
第二节 果园碳吸存研究进展	4
一、果园植被碳吸存	4
二、凋落物碳库	6
三、土壤有机碳库	8
四、土壤呼吸	10
第三节 果园碳吸存研究方法	12
一、植被生产力的测定方法	12
二、凋落物量的测定方法	12
三、土壤呼吸的测定方法	13
第四节 影响果园碳吸存的因素	14
一、自然因素	14
二、土地利用变化	15
三、果园管理	17
参考文献	21
第二章 亚热带果园生态系统的碳吸存	31
第一节 果园植被碳吸存	31
一、植被有机碳储量	31
二、果树植被碳吸存	33
第二节 果园土壤碳吸存	35
第三节 果园凋落物碳库	38
第四节 果园土壤呼吸	42
参考文献	49

第三章 经营年限对果园碳吸存的影响	53
第一节 果园土壤总有机碳的变化	53
第二节 果园土壤团聚体有机碳的变化	55
第三节 果园土壤活性有机碳的变化	60
第四节 果园土壤稳定性有机碳的变化	66
参考文献	71
第四章 垦殖方式对果园碳吸存的影响	75
第一节 油桃果园生态系统的有机碳储量	75
第二节 油桃园土壤有机碳的空间分布	78
一、果园土壤总有机碳的小生境分布	79
二、果园土壤有机碳的再分布	82
第三节 油桃园土壤有机碳的构成特征	88
第四节 土地利用方式变更对土壤有机碳的影响	91
参考文献	95
第五章 生草覆盖对果园碳吸存的影响	99
第一节 果园土壤总有机碳的变化	99
第二节 果园土壤团聚体内有机碳的变化	102
第三节 果园土壤有机碳组分的变化	108
第四节 果园土壤有机碳矿化特性的变化	113
参考文献	118
第六章 施肥管理对果园碳吸存的影响	122
第一节 化肥施用对果园土壤碳排放的影响	122
第二节 有机无机配施对果园土壤碳吸存的影响	129
一、果园土壤总有机碳的变化	129
二、果园土壤活性有机碳的变化	132
三、果园土壤有机碳稳定性的变化	137
四、果园土壤有机碳矿化特性的变化	143
第三节 绿肥还土对果园土壤碳吸存的影响	147
参考文献	155
第七章 亚热带果园生态系统的固碳潜力	159
第一节 清耕方式下果园土壤固碳潜力	160
第二节 生草栽培下果园土壤固碳潜力	163
第三节 县域尺度的果园土壤固碳潜力	165

一、土壤有机碳库的估算方法	166
二、永春县土地利用的特点	170
三、土壤有机碳空间分异特征	172
四、永春县果园土壤有机碳储量的估算	180
五、永春县果园土壤有机碳库的变化	183
六、现利用条件下固碳潜力评价	190
第四节 福建省土壤有机碳密度和碳储量的估算	193
参考文献	195
附录 1 试验代号及内容	201
附录 2 碳计量的相关单位	203
附录 3 专业术语与缩略词	204

第一章 果园生态系统及其碳吸存的研究现状

随着温室气体和温室效应等各种气候与环境问题的日益突出以及国际气候谈判中对碳源、碳汇评价的客观需要,碳平衡问题日益受到人们的普遍关注。森林作为陆地生物圈的主体,不仅在维护区域生态环境上起着重要作用,而且是大气 CO_2 的重要调节者之一。森林碳平衡的研究成为全球碳平衡研究中主要组成部分。国内外有关森林碳平衡已做了不少研究,但主要集中于热带雨林、温带和寒温带森林,经济林方面的研究还比较缺乏,尤其是国内,相关方面的研究极少。根据国家林业局森林资源管理司《全国森林资源统计》报告(2000),我国森林覆盖率为 16.55%,其中经济林覆盖率为 2.11%。就福建省而言,全省现有经济林面积 $103.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占有林地面积的 14.1%。然而经济林碳平衡研究与其面积并不成比例,主要是植被生物生产力和凋落物方面的零星报道,土壤呼吸和碳平衡研究国内几乎是空白。因此,开展经济林碳平衡的研究不仅为我国碳平衡研究补充基础数据,也为国际和国内的碳交易提供科学数据,对实现林业经营转型具有重要的作用。

果园是一种重要农用型的植被类型。我国作为“世界第一果园”,2007 年果园面积 $1.46 \times 10^7 \text{ hm}^2$,总产量 $1.05 \times 10^8 \text{ t}$,分别占世界果园面积的 20.48%,总产量的 18.46%,其在区域生态环境保护和农村经济发展中占有重要的地位。但与森林生态系统相比,果园生态系统受人为干扰的强度和频度更为强烈。因此,在全球气候变化的影响下,准确认识我国果园植被的碳汇功能,对中国陆地生态系统碳储量的正确评价具有重要的战略意义。

第一节 中国果园类型与分布

一、世界水果产量与分布

水果是世界大宗农产品之一。根据联合国粮农组织(FAO)的统计数据,近 10 年世界水果生产总体呈相对稳定增长趋势。1995 ~ 2005 年,世界水果收获面积平均年增长率为 1.21%,产量平均年增长率为 2.44%(乔宪生,2010)。根据水果生产地区的不同,可分为温带水果、亚热带水果和热带水果。2005 年世界水果种植

面积约 $4\,871.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 产量约 $5 \times 10^8 \text{ t}$, 单类水果产量占世界水果(不包含瓜类)总产的比例超过 1% 的水果有柑橘类、香蕉、葡萄、苹果等十类, 约占世界水果产量 80%, 其中热带水果有香蕉、芒果、菠萝、木瓜等四类。世界上能够进行热带作物种植的土地面积约 5 亿多公顷, 主要分布在亚洲、南美洲、非洲和大洋洲。

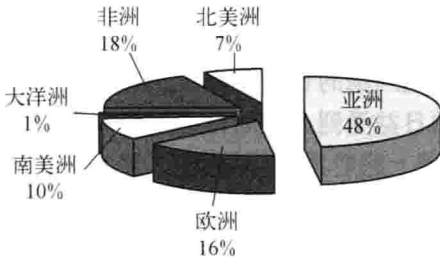


图 1-1 2005 年各大洲水果收获面积占世界总面积的比例

资料来源: 日本

亚洲是世界水果的主要生产区, 2005 年, 亚洲水果收获面积 $2\,492.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 产量 $23\,201.9 \times 10^4 \text{ t}$, 分别占世界水果总收获面积和产量的 48% 和 46% (图 1-1)。而且近 10 年来亚洲水果收获面积和产量均呈稳步发展趋势, 与 1995 年相比, 水果收获面积和产量增长率分别为 22.4% 和 43.1%。欧洲是世界水果的第二大产区, 1995 年至 2005 年, 欧洲水果的收获面积虽然减少了 10.8%, 但产量仍然增长了 9.2%, 2005 年,

欧洲水果产量为 $7\,609.8 \times 10^4 \text{ t}$, 占世界水果总产的比例由 1995 年的 17% 下降到 16%。就水果种植的国家而言, 全世界有近 200 个国家和地区种植水果, 但水果收获面积从 $5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 到 $1\,069.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 不等, 有 14 个国家和地区的水果收获面积超过 $100 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占世界水果总收获面积的 60.6%。产量超过 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 的国家有 13 个, 占世界水果总产的 62.1%, 分别是中国、印度、巴西、美国、意大利、墨西哥、西班牙、印度尼西亚、伊朗、菲律宾、土耳其、乌干达和法国(彭冬燕等, 2006)。

二、中国水果产量与分布

我国幅员辽阔, 地跨寒、温、热三带, 果树资源丰富、品种繁多, 是世界最大的果树起源地之一。中国水果总面积占世界果树总面积的 20.48%, 居世界第一位, 人均水果面积为 79.50 m^2 , 接近世界人均 82.96 m^2 的水平。2007 年全国水果总面积为 $1\,046.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 产量 $1.05 \times 10^8 \text{ t}$, 居世界第一位。其中, 苹果产量 $2\,787 \times 10^4 \text{ t}$, 占世界总产量的 38%, 居第一位; 柑橘产量 $2\,058 \times 10^4 \text{ t}$, 占世界总产量的 21%, 居第一位; 梨产量 $1\,305 \times 10^4 \text{ t}$, 占世界总产量的 61%, 居第一位; 桃产量 $803 \times 10^4 \text{ t}$, 占世界总产量的 45%, 居第一位; 人均水果占有量 79 kg, 达到世界平均水平。

就温带水果的分布而言, 苹果主要集中在邻近渤海湾的山东、辽宁、河北等省, 沿黄河故道的豫东、鲁西南、皖北和苏北等地, 秦岭北麓的豫西、关中等地, 西北黄土高原的渭北、陇中、青海、宁夏部分地区以及西南冷凉高地的阿坝藏族自治州、凉山彝族自治州。梨主要产区集中在河北、辽宁、山东三省, 山西、甘肃、新疆、安徽、

江苏、四川栽培也较多。葡萄主要在新疆、山东、河北、河南、辽宁、山西、安徽、江苏等省(自治区)有较多的栽培。枣的集中产区在山东、河北、河南、山西、陕西等省。柿主产于陕西、山西、河北、河南、山东等省。

我国的热带、亚热带地区(简称热区)主要分布在海南、广东、广西、云南、福建、湖南等省(区)南部及四川、贵州两省南端的河谷地区的 267 个县(市)和台湾省,主要有香蕉、芒果、木瓜、荔枝、龙眼、杨桃、枇杷、菠萝等。

三、福建水果产量与分布

福建属暖热湿润的亚热带海洋性季风气候,加上地形复杂,气候的垂直变化比较显著,形成多样化的地方性气候。这样的生态环境造就了生物资源的多样性,使福建成为我国生物多样性最丰富的省份之一。据不完全统计,福建省热带、亚热带和温带果树有 44 科、79 属、157 种,共有 3 000 多个品种,其中,较大宗商品水果 23 种以上,形成了多种类共同发展的格局,基本实现了鲜果周年供应。龙眼、枇杷、柚、锥栗、橄榄、余甘子、枳椇等资源在福建省种类最多,分布最广。

2007 年,全省果树种植面积和产量分别为 $53.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 和 $517.29 \times 10^4 \text{ t}$, 分别占全国的 5.12% 和 4.92%, 列第六位和第七位, 人均水果占有量全国第一。

就区域布局而言,依据地形、自然条件、生态适宜性等情况,以博平岭、戴云山、鹫峰山为界,大体形成闽东南沿海冬暖区(平均最低气温 $\geq -3^\circ\text{C}$)的柑橘类、龙眼、荔枝、枇杷、橄榄、香蕉等亚热带常绿果树栽培区,闽西北中亚热带的宽皮橘、甜橙、桃、李、木柰、梅、梨等常绿与落叶果类混栽区,并大致呈现“五带一区”的果类品种布局(表 1-1)。

表 1-1 福建省主要水果产地分布

品名	主产区分布
柑橘类	福州市辖区、闽侯、福清、仙游、三明市辖区、永安市、大田、尤溪、沙县、将乐、南安、永春、龙海、漳浦、长太、南靖、平和、延平、建瓯、建阳、顺昌、新罗、漳平、连城
荔枝	厦门市辖区、莆田市辖区、莆田县、仙游县、南安、漳州市辖区、龙海、云霄、漳浦、诏安、长太、平和、华安、宁德市
龙眼	福州市辖区、福清、仙游、厦门市辖区、同安、莆田、仙游、泉州市辖区、晋江、南安、惠安、漳州市辖区、龙海、漳浦、云霄、诏安、南靖、平和、宁德、福安
香蕉	闽侯、闽清、厦门市辖区、同安、莆田、仙游、晋江、南安、安溪、永春、漳州市辖区、龙海、云霄、漳浦、诏安、长太、南靖、平和、华安、漳平
菠萝	同安、南安、龙海、云霄、漳浦、诏安、长太、南靖、平和
枇杷	福清、连江、莆田、仙游、云霄、福安、霞浦

续表

品名	主产区分布
橄榄	闽侯、闽清、莆田、漳浦、福安、华安、诏安
柿子	永泰、大田、尤溪、沙县、安溪、德化、诏安、平和、福安、永定、武平
葡萄	福州市辖区、福清、长乐、连江、建瓯、武夷山、光泽、福安
柚	厦门市辖区、同安、仙游、永春、漳州辖区、龙海、云霄、漳浦、长泰、南靖、平和、华安
梨	闽侯、永安、明溪、宁化、尤溪、沙县、将乐、泰宁、建宁、光泽、新罗、长汀
桃	长乐、闽侯、永安、清流、宁化、大田、尤溪、南安、漳浦、邵武、建阳、连城、福安、古田、长汀、武平
李	闽清、永泰、宁化、大田、尤溪、南安、德化、漳州辖区、云霄、漳浦、诏安、长泰、南靖、华安、福安、霞浦、新罗、武平
杨梅	漳浦、宁德、福鼎、霞浦、南安、龙海、建瓯、建阳
油奈	闽侯、闽清、宁化、大田、尤溪、沙县、将乐、邵武、建瓯、建阳、顺昌、浦城、宁德、古田、屏南、长汀、武平、连城
青梅	永泰、永春、漳浦、诏安、上杭

第二节 果园碳吸存研究进展

一、果园植被碳吸存

植被碳库主要来源于绿色植物吸收固定大气 CO_2 形成的有机碳。全球陆地生态系统中植被碳库为 560 PgC, 占陆地总碳库的 19% (Lal, 1999)。其中, 森林、草原和农田生态系统平均植物碳密度分别为 189 t/hm^2 、 21 t/hm^2 和 5 t/hm^2 (Dixon et al., 1994)。据报道, 我国陆地植被总生物量的估计值为 $13.09 \times 10^9 \text{ t}$, 其中森林植被占我国陆地生态系统总生物量的 69.5% (方精云, 1996), 这说明森林在我国陆地植被的碳库中起主导作用。目前, 我国红壤山区植被碳库研究已经有了一些点上的分散资料的积累, 但基于区域尺度上植被碳库的研究较少, 多数研究停留在斑块或点的水平上, 而且主要是针对森林生态系统, 有关经济林(果园)、农田和牧草植被的研究还很缺乏。我国有关植被生物量和生产力的研究早在 20 世纪 60 年代就开始了, 亚热带红壤区也积累了较为丰富的数据, 这些为陆地植被固碳能力的评估奠定了重要的基础。

植被生产力称第一性生产力或初级生产力, 有两种表达方式: ① 总第一性生产力 (P_g), 指绿色植物在单位时间、单位面积内通过光合作用所固定的总能量, 或者说生产的总有机物数量; ② 绿色植物在生活过程中本身还要通过呼吸作用消耗掉一部分有机物, 因此总第一性生产力除去呼吸消耗就是净第一性生产力 (P_n), 即 $P_g = P_n + R$ 。从本质上看, 植物生产力的形成涉及碳的固定与消耗, P_g 指光合

作用碳被固定的总量,而 R 是植物在呼吸作用中损耗的碳, P_n 则为植物所固定的净碳量。因此, CO_2 的变化可用陆地植被生产力在区域或全球性尺度上的变化来评估。另外, NPP 反映了植物群落在自然条件下的生产能力,是估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标,而且植被对气候变化的调节与反馈作用是人类调节气候、减缓大气 CO_2 浓度增加的主要手段。故国际地圈-生物圈计划(IGBP)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)和最近出台的京都议定书(Kyoto Protocol)把植被的 NPP 研究确定为核心内容之一(Steffan et al., 1998)。

CO_2 浓度的升高与植被生产力之间关系十分密切。随着 CO_2 浓度的不断升高,陆地生态系统将是人类活动引起的碳排放的一个潜在碳汇,但不同类型植被对 CO_2 升高的响应机制各不相同:对 C_3 植物来说,随着 CO_2 浓度升高,光合作用和发育也加快;而对 C_4 植物来说,其光合速率在目前浓度条件下已趋于饱和(黄萍等, 2000)。Kimball 等(1983)的研究表明, CO_2 升高 1 倍时, C_3 植物产量平均提高 33%, C_4 植物提高 14%, 木本植物提高 26%。另外,大多数生态系统水平 CO_2 增浓实验结果表明,陆地生态系统的初级生产力在 CO_2 浓度增加条件下比正常 CO_2 浓度下高得多(Koch and Mooney, 1996)。一般情况下,陆地生态系统生产力在 CO_2 浓度加倍条件下平均提高 25% 左右,但不同生态系统之间的差异极为显著(从增高 80% 到降低 30% 左右)。这种差异反映了陆地生态系统之间种类组成的差异、不同组分之间相互作用的差异以及其他因子(如水分有效性、养分有效性、温度等)的差异。

国内在 NPP 对全球变化的响应方面,利用植被-气候关系进行了不少研究(周广胜, 1993),尝试的模型有迈阿密(Miami)模型、桑特威特(Thorntwaite)模型和筑后(Chikugo)模型等。倪健根据 Holdridge 的生命地带分类系统指标,利用筑后模型预测了大气 CO_2 浓度倍增后,温度增加 2°C 和 4°C 及降水增加 20% 的情况下,亚热带常绿阔叶林潜在净第一性生产力的变化情况,结果表明,气温增加、降水增加 20% 的条件下,东部地区的北部亚地带在气温增加 2°C 时 NPP 增加 $1.75 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 增加 4°C 时 NPP 增加 $2.22 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 中北部亚地带在气温增加 2°C 和 4°C 时, NPP 分别增加 $2.33 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $2.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 中南部亚地带在气温增加 2°C 和 4°C 时, NPP 分别增加 $2.37 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $2.83 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 南部亚地带在气温增加 2°C 时, NPP 增加 $2.49 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 在气温增加 4°C 时, NPP 增加 $2.88 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 西部地区的中西部亚地带在气温增加 2°C 时, NPP 增加 $1.79 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 在气温增加 4°C 时, NPP 增加 $2.32 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 西南部亚地带在气温 2°C 和 4°C 时, NPP 分别增加 $2.08 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $2.58 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。但总的看来,国内还很少利用自然净第一性生产力的实测资料来验证各种模型的合理性。现有的资料又因测定对象、方法等缺乏统一标准,数据可用性也较差,这些方面还有待进一步探索。

果园作为一种特殊的植被类型,其碳循环及其过程受地理、气候条件,特别是周期性经营活动的影响而十分复杂。与森林生态系统相比,经济林(果园)生态系统不仅有植被和土壤碳库,林果产品也是该系统中一个变化很大的因子,加之周期性的修剪、施肥等经营干扰行为,这些都增加了该系统碳循环研究的复杂性和不确定性。在果园经营过程中,为了获得更高的产量和尽早收回起初的投入,高密度的栽培模式被广泛地采用(Mao, 2002)。尽管目前对不同农业经营模式对 CO_2 排放影响的理解还不是很全面,但已有研究认为,与那些一年生草本作物相比,果园生态系统 CO_2 固定量也许更高(Grossman and DeJong, 1998; Robertson et al., 2000; Janssens et al., 2003)。目前,国外在经济林(果园)碳循环方面也做了一些研究,如 Proctor、Wibbe 等对苹果树的碳储量进行了预算,并探讨了果实收获对碳预算的影响;Eberth 等对苹果树根系呼吸的年变化及对碳平衡的贡献进行了研究;Blanke (1997)、Sekikawa (2002, 2003) 等也对果园生态系统中土壤呼吸的变化及对碳平衡的贡献做了不少研究;Adriano 等(2005)就橄榄和桃树果园生态系统的净 CO_2 通量进行了估算。此外,Lakso (1999, 2001)、Seem (2001) 等也对苹果树碳平衡进行了测定和模拟。由于受温室效应的影响,尽管近年来经果园生态系统的碳循环研究取得了一定进展,但多数研究集中于植物生理生态学方面,缺少对农业实践引起环境影响的考虑(Besset et al., 2001; Girona et al., 2002),尤其是在系统水平上碳素循环过程的研究还十分缺乏,而国内该方面的研究更是缺乏。

二、凋落物碳库

凋落物碳库是联系植被碳库和土壤碳库的重要中间环节。在过去的二十年里,我国对于森林生态系统凋落物碳库进行了大量细致的研究,如官丽莉等(2004)在 20 年定位研究的基础上,对亚热带常绿阔叶林凋落物动态变化格局和组成特征进行了分析总结;郑文教等(1993)也对亚热带雨林凋落物及其动态做过报道。总体来讲,我国亚热带不同森林类型凋落物量分布如下:亚热带常绿阔叶林 $4.63 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (何宗明等,2003),中亚热带青冈常绿阔叶林 $5.55 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (于明坚等,1996),北亚热带栓皮栎林 $7.36 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (俞元春等,1994),表明森林凋落物随纬度变化的规律不明显。但是,有关草地、农田和经济林(果园)生态系统凋落物的研究相对较少(李发林等,2002;叶川等,1998),而且大量的研究主要集中在凋落物量的季节变化动态和分解动态、气候及其他环境因子对凋落物形成与分解的影响以及凋落物层的生态效应等方面。凋落物量是森林生态系统生物量的组成部分,生物量反映森林生态系统的初级生产力水平,是森林生态系统功能的体现。我国亚热带森林年凋落量大约在 $3 \sim 11 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,其中亚热带森林年

凋落物量平均为 $5.497 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 中亚热带森林为 $5.333 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 北亚热带森林为 $4.514 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。凋落物因不同树种、不同林龄而表现出不同的凋落量、凋落物组成和季节变化规律。李发林等(2002)对 11 年生龙眼成年树与 4 年生龙眼幼年树的凋落物和凋落叶养分含量的动态变化及养分储量进行了研究, 结果表明: 成年树和幼年树的年凋落量分别为 $42.996 \text{ kg}/\text{株}$ 和 $3.683 \text{ kg}/\text{株}$ 。成年树在 8 月有单一凋落高峰, 而幼年树有 3 个凋落高峰, 且分别出现在每年的 3 月、6 月和 8 月。福建侵蚀坡地果园龙眼果树年凋落量为 $48.513 \text{ kg}/\text{株}$, 叶、枝、花和果分别占 32.41%、13.15%、1.97% 和 52.47%; 龙眼果树月凋落量季节变化规律是单峰型的, 8 月凋落量为 29.115 kg , 与其他月份之间有显著差异, 占全年的 60.01% (李发林等, 2005)。宿以明等(2005)以四川西部高山林区黑水县寡古 1966 年更新的川西云杉人工林为研究对象, 开展了凋落物的收集和分析测定, 结果表明: 云杉人工林年凋落量为 $2760.11 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 其中凋落针叶、树枝、树皮-杂物各占林分年凋落量的 80.81%、17.40% 和 1.79%。凋落量各月间变化大, 全年出现两个峰值(第一个峰出现在 4~5 月, 第二个峰出现在 10~11 月)。杨玉盛等(2004)对福建柏和杉木人工林凋落物数量、组成、季节动态、养分和能量归还及物质化学组成进行了 3 年的研究, 结果表明: 福建柏、杉木林的年均凋落物量分别为 $731.83 \text{ g}/\text{m}^2$ 、 $546.85 \text{ g}/\text{m}^2$, 前者是后者的 1.34 倍, 其中落叶分别占总凋落量的 65.29% 和 58.29%, 而福建柏林落枝、落果和其他组分占总凋落量的比例则比杉木林的低。福建柏林凋落物总量在 5 月(2000 年为 2 月)和 11~12 月出现两次峰值, 且第二次峰值远比第一次高; 杉木林总凋落物量 1 年出现 3 次峰值(4 或 5 月、8 月和 11 月), 且峰值较为接近。说明福建柏林凋落量比杉木大, 落叶质量亦比杉木的高。方代有等(1997)研讨了小良热带人工混交林 10 年的凋落量及其季节和年际动态, 并对其现存凋落量进行了初步研究, 结果表明: 小凋落物总量年均均为 $5.539 \text{ t}/\text{hm}^2$; 凋落量的季节变化明显, 一般以湿季的 7 月为凋落高峰; 随着人工林的发育, 其凋落物量的年际变化逐渐稳定。周东雄等(2005)分析 10 年生杉木乳源木莲(3:1)混交林和杉木纯林凋落物的数量、组成以及凋落规律、分解速率和养分归还量, 结果表明, 混交林平均年凋落物量为 $4004 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (8~10 年), 是杉木纯林凋落物量的 3.15 倍。海南麻竹林凋落物全年总量为 $6862.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (吕春艳等, 2003)。

凋落物分解和养分释放通常是沟通生物地球化学循环的纽带。林木每年将凋落物输入林地, 在土壤动物和微生物的活动以及各种生态因子的影响下, 被分解并转化, 使其中一部分养分重新归还土壤, 并再次被林木吸收利用, 在林木与土壤之间进行不断地循环, 使林地土壤中的有机质和营养元素不断积累和丰富, 因而它的分解过程和速率对森林土壤肥力有重要影响 (Easterling et al., 1997)。 CO_2 浓度升高对凋落物分解的影响是较为明显的。凋落物分解失重可分为两个主要阶段。

前期的快速失重阶段主要是非生物作用过程,为可溶成分的淋溶;后期的裂解阶段主要是生物作用过程,为生物分解者的活动。Melillo 等建立的两相分解模型中,凋落物分解失重到 80% 之前为第一期,之后为第二期。经长期的研究积累,人们认识到凋落物的分解受内在因素和外在因素的制约。凋落物分解快慢受内、外因子的共同影响,内因主要指凋落物自身的化学物理性质,如凋落物含氮量、C/N、木质素含量等;外因指影响凋落物分解的各种环境因子,包括生物因子和非生物因子。凋落物分解中,凋落物质量是本质因素,生物过程是主导过程,物理和化学过程也有重要地位。C/N 和木质素是最重要的凋落物质量指标。在凋落物分解的前期,物理和化学的分解作用强,对应于凋落物的快速淋溶失重,高温潮湿有利于该过程。分解后期主要为生物作用,其过程有赖于生物分解者的活动,即微生物和土壤动物的种类、数量、活性。但两个过程并非截然分开,微生物和土壤动物的活动能促进淋溶,物理和化学作用形成的碎裂也有利于微生物和土壤动物的分解活动。有关 CO₂ 增浓对凋落物分解的影响目前还缺乏令人信服的实验数据。Cotrufo 等 (1999) 研究发现在 CO₂ 升高环境下凋落物的分解会推迟。也有人认为 CO₂ 升高会使凋落物的氮浓度升高,但只对分解的某一阶段有影响 (Korner, 1999)。Kratz 等 (1996) 研究发现 CO₂ 升高会使凋落物的钾、镁、铁、锰等元素浓度降低,会降低凋落物的分解速度。然而 Norby 等 (1998) 的研究表明 CO₂ 浓度增加条件下形成的凋落物并非分解速度慢。绝大部分的温室实验都发现植物叶中 C/N 随 CO₂ 浓度的增加而提高。然而高浓度条件下形成的凋落物在大多数情况下具有和正常浓度下形成的凋落物相类似的 C/N (Norby and Cotrufo, 1996)。这是因为叶片衰老过程中蛋白质等水解然后转移到别的组织中,因而不能用绿叶中的 C/N 的变化来推论落叶及其他凋落物的 C/N 以及它们的分解速率会因 CO₂ 增浓而发生改变。

三、土壤有机碳库

土壤有机碳库是土壤生物地球化学碳循环研究的主要内容,在组成上包括植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质。据估计,全球土壤有机碳库为 1 395 ~ 2 200 PgC (Batjes, 1996),是陆地植被碳库 (500 ~ 600 PgC) 的 2 ~ 3 倍,是全球大气碳库 (750 PgC) 的 2 倍多 (苏永中等, 2002),因此土壤有机碳库较小幅度的变动,都可通过向大气排放温室气体直接导致大气层 CO₂ 浓度升高,从而以温室效应影响全球气候变化。我国土壤的有机碳储量 (100 cm) 为 84.4 PgC,主要储存于热带、亚热带红黄壤和东北森林土壤中 (Pan and Guo, 1999);其中红壤的有机碳储量为 539.47×10^{10} t, 占总有机碳储量的 6.39% (解宪丽等, 2004)。

早期对土壤有机碳库的估计是根据少数几个剖面资料进行推算的(汪业勋等,1999)。20世纪80年代以来,为了研究全球碳循环与气候、植被及人类活动等因素之间的相互关系,世界各国一般按植被类型、土壤类型、生命带或模型法来统计土壤的有机碳储量。具有代表性的是Post等(1982)按生命带方法的研究,该研究计算出全球土壤有机碳库(1 m)为 1.395×10^{12} t,并建立了土壤碳密度与气候及植被分布之间的关系图。陆地土壤碳库研究的新进展是利用地理信息系统技术,从区域尺度上描述土壤碳库不同层次的属性特征及其空间分布。以地理信息系统为支撑而建立的土壤空间数据库包含丰富的土壤属性数据和空间数据信息,为土壤碳库的估计和计算提供了可能,也是未来在区域尺度上研究土壤碳库的重要手段。

国内关于土壤有机碳储量的研究起步相对较晚,但近些年来有关这方面的研究逐渐增多,并取得了显著的成绩。Zhao等(1997)对我国热带、亚热带地区土壤碳储量做了初步研究,得到了按不同植被类型土壤等分类方式下的有机碳储量,并分析了SOC在不同粒级土壤中的分布与转化。甘海华等(2003)利用广东省第二次土壤普查资料,采用GIS技术估算了广东省土壤有机碳储量,并探讨其空间分布规律。彭新华等(2001)对我国中亚热带山地土壤有机质的某些性质的垂直变化规律进行了研究。陈庆强等(2002)根据土壤有机质 ^{14}C 放射性水平,运用模型对华南亚热带山地土壤有机质更新速率进行研究,结果表明上部0~10 cm土层有机质更新速率最高,向下更新速率锐减,剖面下部极低。吴金水等(2004)在经过长期田间定位试验结果检验的基础上,利用SCNC模型研究我国亚热带地区耕作土壤有机碳状况及其对全球气候变化的响应。

果园生态系统指以果树为主要生产者的陆地生态系统。由于是人工建立的生态系统,人的作用非常突出。由于大部分生产力随收获而被移出系统,养分循环主要靠系统外投入而保持平衡。在果园经营过程中,为了获得更高的产量和尽早收回起初的投入,高密度的栽培模式被广泛采用。目前关于不同农业经营模式对 CO_2 排放影响的理解还不是很全面,有研究认为,与那些一年生草本作物相比,果园生态系统 CO_2 固定量也许更高。果园生态系统管理的主要目的是为了提高果实部分而不是营养成分。由于较低的土壤肥力、加之修剪以及较高的收获指数,导致果园系统较少的碳量返回土壤,果园土壤损失大量有机碳(Anwar et al., 2009)。现在的许多园艺作物主要起源于中东、地中海、亚洲或中美洲地区,如高加索的苹果、墨西哥高原鳄梨、地中海橄榄和猕猴桃以及中国柑橘。这些地区土壤有机碳含量通常较低(Jones et al., 2005)。另外,随着果园面积的迅速扩展,人们对这些土壤有机碳含量较低的果园有了更多的关注。Rahman等(2010)对新西兰卡蒂卡蒂、陶