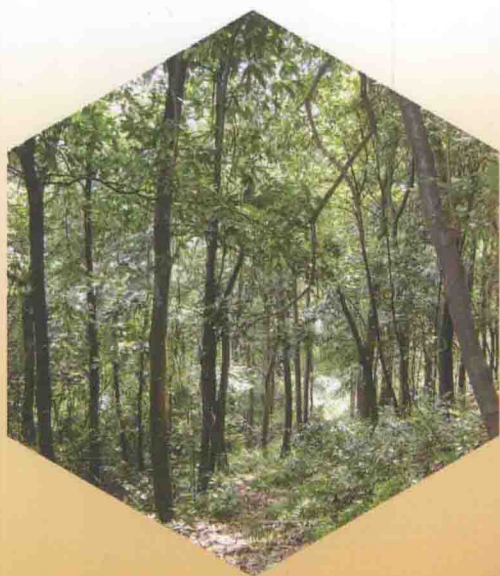


北亚热带土地利用变化 对土壤有机碳的影响

Effects of Land Use Change on Soil Organic
Carbon in North-subtropical Areas

李正才 王斌 格日乐图 杨校生 雷海清 等 著

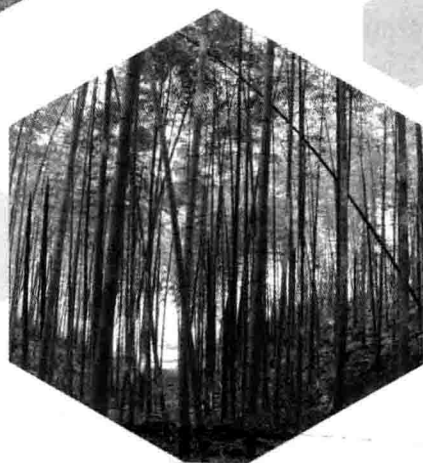


山
版
社

北亚热带土地利用变化 对土壤有机碳的影响

Effects of Land Use Change on Soil Organic
Carbon in North-subtropical Areas

李正才 王斌 格日乐图 杨校生 雷海清 等 © 著



中国林业出版社

内容简介

本书内容共分6章：第1章介绍了土壤有机碳的储量、组分和分布，影响土壤有机碳的自然因素，土地利用变化对土壤有机碳的影响；第2章介绍了研究区域的自然概况和土地利用变化情况；第3章研究了不同土地利用方式植被碳的固定、凋落物有机碳的分解和碳素归还特征；第4章研究了不同土地利用方式对土壤有机碳含量、储量和活性有机碳组分的影响，次生林植被恢复以及农田营造竹林对土壤有机碳的影响；第5章研究了毛竹林土壤呼吸特征，分析了毛竹林土壤呼吸与自然环境因子的相关关系；第6章综合分析了不同土地利用方式对生态系统碳汇功能的影响，初步提出了生态系统增汇技术措施。

本书主要适合从事森林生态系统碳循环研究方面的科研和教学人员、研究生和相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

北亚热带土地利用变化对土壤有机碳的影响/李正才等著. —北京：中国林业出版社，2013.5
ISBN 978-7-5038-7000-2

I. ①北… II. ①李… III. ①亚热带—土地利用—影响—土壤有机质—有机碳—研究 IV. ①S153.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第056168号

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同7号)

<http://lycb.forestry.gov.cn>

E-mai: lmbj@163.com 电话:010-83280498

发行 中国林业出版社

印刷 三河祥达印装厂

版次 2013年6月第1版

印次 2013年6月第1次

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 9.75

字数 240千字

印数 1~500册

定价 48.00元

编辑委员会

主 编：李正才

副主编：王 斌 格日乐图 杨校生 雷海清

编著者：（按姓氏拼音排序）

程彩芳 格日乐图 雷海清 李正才

刘荣杰 马少杰 倪建英 孙娇娇

孙雪忠 王 斌 吴亚丛 奚金荣

杨校生 赵志霞 周君刚

前言 FOREWORDS

全球气候变化及其影响是当前人类面临的最为严重的环境问题之一，碳循环格局的改变及其原因是这个问题的关键。碳是生物体中最主要元素之一，大气中，碳又是影响气候及气候变化的重要因素。土壤碳库是陆地生态系统中贮量最大的碳库，在调节气候及影响气候变化方面具有重要的作用。引起气候变化的根本原因是由于人类活动对陆地生态系统碳库和化石燃料碳库的改变，土地利用变化是影响地球环境系统最主要的人类活动，这些活动对土壤碳库的影响是导致气候变化的最重要原因之一。因此，科学地阐明土地利用变化对土壤碳库的影响规律是认识 and 解决气候变化问题的一个关键。

在陆地生态系统中，碳汇的功能体现在碳库的储量和积累速率，而碳源则体现在碳的排放强度。陆地生态系统基本碳库包括植被活体碳库、残体碳库和土壤碳库三个部分，基本积累过程包括植被光合作用和土壤碳的吸收，基本排放过程包括植被和土壤的呼吸过程。据估计，全球土壤按 1m 土层计，有机碳的贮量约 $1550 \times 10^9 \text{ t}$ ，占陆地生态系统碳贮量 ($2100 \times 10^9 \text{ t}$ 碳) 的 3/4，是植被碳库的近 3 倍、大气碳库 ($750 \times 10^9 \text{ t}$ 碳) 的 2 倍；土壤有机碳库由不同周转率的组分组成，其周转期从几周到近万年；土壤平均每年排放到大气中的 CO_2 以碳计为 $68 \times 10^9 \sim 100 \times 10^9 \text{ t}$ ；约为化石燃料碳排放量的 11 倍，大气 CO_2 贮量的 10%。全球植被碳贮量约为 $550 \times 10^9 \text{ t}$ ，这些碳主要由热带森林、温带森林、北方森林、热带灌丛、温带草原、荒漠和半荒漠、湿地与农田生物区的植被碳组成；植被碳库通过光合作用吸收积累；通过呼吸作用排放到大气；通过植物死亡及分解作用变成土壤碳；植被每年通过光合作用吸收的碳 (GPP) 约在 $120 \times 10^9 \text{ t}$ ，每年呼吸作用排放出碳约在 $60 \times 10^9 \text{ t}$ ，每年净光合作用吸收碳约为 $60 \times 10^9 \text{ t}$ 。另外，一部分植被碳又通过植物的死亡和残体的分解而变成土壤碳，陆地生态系统通过这些过程，调节着大气中 CO_2 的浓度。

在过去几十年的时间里，对陆地生态系统的碳循环已有大量的研究，总体上

掌握了其源/汇变化的一些规律。据估计,在20世纪80年代,陆地生态系统碳汇平均每年约 1.9×10^9 t 碳,90年代陆地生态系统和大气间碳交换通量每年约 $(1.4 \pm 0.7) \times 10^9$ t 碳。然而,到目前为止,陆地生态系统碳汇方面还存在许多不确定性,尤其对陆地生态系统碳汇时空分布和变化机制还很不清楚。究其原因,主要是对人为和自然因素影响陆地生态系统碳汇/源的机制还很不清楚,其中一个重要方面就是对土地利用变化影响陆地生态系统碳汇的机制不十分清楚。陆地生态系统碳库与土地利用及土地利用变化的联系,主要体现在植被和土壤碳在土地利用变化中,既可能成为碳汇,也可能成为碳源。在土地利用变化过程中,使植被和土壤碳库贮量积累的过程是碳汇,而使植被和土壤碳贮量减少的过程是碳源。在土地利用变化过程中,使植被和土壤碳库贮量增加或减少的过程较多,如土地上覆盖的植被本身生长特性等自然过程,人为收获生物量及对残体的遗留等。这些过程有些直接使植被和土壤碳贮量增加或减少,有些间接使植被和土壤碳贮量增加或减少。准确认识和评价陆地生态系统的碳源/汇功能,需要准确认识土地利用变化过程对植被和土壤碳贮量的影响是增加还是减少,是直接影响还是间接影响。

本书在北亚热带地区浙江省富阳市设立研究样地,采用相邻样地比较的方法,即通过土地利用变化巨大林区,选择邻近相同海拔、坡向和土壤类型的天然次生林、人工林(杉木林、马尾松林、毛竹林和早竹林)和农耕地为研究对象,采用野外固定样地调查、野外定位研究和室内分析相结合的方法,通过对不同土地利用方式下土壤有机碳的输入、输出、储量、组分和动态的比较分析,对天然次生林转变成人工林、灌木林、竹林、茶园和农耕地,以及农田更新造林后的土壤有机碳变化的效应和机理进行综合的研究,并对不同土地利用方式下碳源、碳汇功能进行正确的评价,初步提出增加北亚热带地区土壤碳汇的措施,为深入阐明我国北亚热带地区土地利用变化对土壤有机碳的影响规律,进一步阐明土地利用变化对土壤有机碳的影响提供理论依据。

本书由中国林业科学研究院亚热带林业研究所森林碳循环研究团队完成,是团队近10年从事森林生态系统碳循环研究工作的系统总结,在此过程中得到了中国林业科学研究院亚热带林业研究所领导和有关部门的关心和支持。研究内容先后受到以下项目的资助:中国林业科学研究院亚热带林业研究所基本科研业务费资助重点项目“中国亚热带地区森林碳循环与固碳潜力研究”(RISF6152);浙江省自然科学基金项目“毛竹林土壤呼吸组分的分离与量化研究”(LY12C03012);浙江省科技厅林业碳汇与计量科技创新团队项目“毛竹林土壤碳储量提升关键技术研究”(2010R50030);浙江省竹产业创新团队项目“毛竹高碳汇林培育技术集成与示范(2009R50030);浙江省自然科学基金项目“基于物理分组的竹林土壤有机碳调控技术研究”(Y507684);中国林业科学研究院亚热带林业研究所基本科研业务费资

助项目“中国亚热带地区林业生态建设与科技发展战略研究”(RISF6903);浙江省科技厅重点农业项目“竹林自然灾害防控及快速恢复重建技术集成研究与应用示范”(2008C12067-1);GEF 国际合作项目“与气候变化有关的目标研究”(CPR/00/G33/A/1G/99);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金一般项目“我国南方集体林权改革运行模式、成效与对策”(RISF6904);2012 年度浙江省科协育才工程资助项目。

参加本书编写的人员有:中国林业科学研究院亚热带林业研究所格日乐图助理研究员,李正才副研究员,王斌副研究员,杨校生副研究员,硕士研究生程彩芳、刘荣杰、马少杰、吴亚丛、赵志霞;浙江省亚热带作物研究所雷海清副研究员;富阳市林业局孙雪忠高级工程师、倪建英工程师、奚金荣工程师、孙娇娇工程师、周君刚工程师。试验研究过程得到了顾小平研究员、虞木奎研究员、张建锋研究员、周本智研究员、吴明副研究员的关心和大力支持,在此一并表示感谢。

国内外对土壤碳及土地利用变化对土壤有机碳的影响研究日新月异,本书力求内容全面,但是限于编者水平,书中疏漏和不足之处在所难免,诚恳地希望读者批评和指正,以便于进一步修改,在此表示万分感谢。

编著者
2013 年 4 月

目 录 CONTENTS

前言

第 1 章 土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展	1
1.1 森林生态系统与全球气候变化	1
1.1.1 全球碳循环与气候变化	1
1.1.1.1 气候变化与温室效应	1
1.1.1.2 气候变化对全球植被的影响	2
1.1.1.3 气候变化对土壤碳的影响	3
1.1.2 森林生态系统与全球碳循环	4
1.1.2.1 森林生态系统的碳循环	4
1.1.2.2 森林生态系统在碳循环中的作用	5
1.1.2.3 森林碳库的动态变化	6
1.2 土壤有机碳库储量、组分及其影响因素	8
1.2.1 土壤碳研究现状	8
1.2.1.1 全球土壤碳库的组成和分布	8
1.2.1.2 土壤碳库的组成和分布	9
1.2.1.3 土壤有机碳库组成及驻留时间确定	10
1.2.2 土壤有机碳影响因素研究进展	11
1.2.2.1 自然因素的影响	11
1.2.2.2 土壤理化特性的影响	12
1.2.2.3 气候变化的影响	12
1.2.3 土壤活性有机碳组分的研究	13
1.2.3.1 土壤活性有机碳库组分的分类	14
1.2.3.2 土壤活性有机碳组分影响主要因素	17

1.2.4	我国土壤有机碳研究现状	20
1.3	土地利用变化对土壤有机碳的影响	20
1.3.1	森林转变为农田	20
1.3.2	森林采伐	21
1.3.3	草地转换成农田	22
1.3.4	农田中造林	22
1.3.5	草地变成农田	22
1.3.6	农田变成草地	23
1.4	土地管理措施对土壤有机碳的影响	23
1.4.1	施肥与土壤碳库	23
1.4.2	土地开垦与土壤碳库	24
1.4.3	栽培方式与土壤有机碳	24
1.4.4	草地管理	25
1.4.5	森林采伐和收获	25
1.4.6	火烧	27
1.5	土地利用变化对土壤有机碳影响特点和类型	27
1.6	土地利用变化对土壤有机碳影响研究：问题和展望	29
第2章	试验研究地区概况	31
2.1	研究区域概况	31
2.1.1	研究地区气候、地貌	31
2.1.2	研究地区森林资源和植被现状	31
2.2	研究区土地利用变化情况	33
2.2.1	研究地区浙江省土地利用变化情况	33
2.2.2	浙江省富阳市土地利用变化情况	34
2.3	主要研究方法	35
2.3.1	植被活体生物量碳库的研究	35
2.3.2	植被残体生物量碳库的研究	36
2.3.3	植被残体碳库分解的研究	37
2.3.4	植被残体有机碳归还特征的研究	37
2.3.5	不同土地利用类型土壤有机碳库研究	37
2.3.6	毛竹林土壤活性有机碳库研究	38
2.3.7	天然次生林和杉木人工林土壤活性有机碳库的研究	38
2.3.8	农田营造早竹林后对土壤有机碳的影响	39

2.3.9	不同演替类型对土壤有机碳的影响	40
2.3.10	竹林培育对生态系统碳储量的影响	40
2.3.11	毛竹林土壤呼吸特征研究	41
2.3.12	不同海拔高度毛竹林土壤呼吸特征	41
2.3.12.1	试验样地设置	42
2.3.12.2	土壤呼吸速率测定	42
2.3.12.3	土壤温度测定	42
2.3.12.4	土壤含水率测定	42
2.3.12.5	Q_{10} 值计算	42
2.3.12.6	统计分析	42
第3章	北亚热带不同土地利用方式对土壤有机碳输入的影响	43
3.1	植被活体生物量碳储量及分配	43
3.1.1	植被活体不同部分有机碳含量	43
3.1.2	植被活体地上部分生物量有机碳储量和分配	44
3.1.3	植被活体地下部分不同土壤层次生物量有机碳储量和分配	46
3.1.4	植被活体地下部分不同根系大小生物量有机碳分配	47
3.1.5	植被活体总有机碳储量和分配	51
3.2	植被残体有机碳储量、分配及形成	53
3.2.1	植被地上部分细残体生物量有机碳储量和分配	54
3.2.2	植物地上部分粗残体生物量有机碳储量和分配	55
3.2.3	植物地下部分细残体生物量有机碳储量和分配	55
3.2.4	植物地下部分粗残体生物量有机碳储量和分配	56
3.2.5	植物总残体生物量有机碳储量	57
3.3	植被残体碳库的分解	58
3.3.1	凋落物分解过程中有机碳浓度的动态变化	58
3.3.2	凋落物分解过程中有机碳释放速率的动态变化	59
3.3.3	凋落物分解过程中有机碳剩余率随时间变化的指数模型	61
3.3.4	气象因子对凋落物分解速率的影响	61
3.4	植被残体有机碳归还特征	62
3.4.1	不同土地利用类型凋落物有机碳输入数量的月动态分析	62
3.4.2	不同土地利用类型凋落物有机碳输入数量的年动态分析	63
3.4.3	不同土地利用类型凋落物有机碳组分的变化分析	64

第4章 不同土地利用方式对土壤有机碳储量和组分的影响	65
4.1 土地利用变化对土壤有机碳垂直分布特征及储量的影响	65
4.1.1 不同土地利用方式土壤有机碳含量的垂直分布特征及比较	65
4.1.2 不同土地利用方式土壤有机碳储量的垂直分布特征	67
4.1.3 不同土地利用类型土壤有机碳储量比较	68
4.2 不同经营类型对毛竹林土壤活性有机碳组分的影响	69
4.2.1 不同经营类型对毛竹林土壤有机碳的影响	69
4.2.2 不同经营类型对毛竹林土壤有机碳剖面特征的影响	71
4.2.3 不同经营类型对毛竹林土壤碳素有效率及碳库活度的差异	74
4.2.4 土壤有机碳组分与土壤养分间的相关分析	77
4.3 不同经营类型毛竹林土壤有机碳及活性组分动态变化与比较	77
4.3.1 不同经营类型毛竹林土壤总有机碳季节动态比较	77
4.3.2 不同经营类型毛竹林土壤水溶性有机碳季节动态比较	79
4.3.3 不同经营类型毛竹林土壤易氧化碳季节动态比较	80
4.3.4 不同经营类型毛竹林土壤活性炭碳素有效率及活度季节动态比较	81
4.4 天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较	85
4.4.1 不同林分土壤活性有机碳含量比较	86
4.4.2 土壤活性有机碳占总有机碳的比率	88
4.4.3 土壤活性有机碳与总有机碳的相关性	89
4.4.4 土壤有机碳与土壤养分的关系	90
4.5 农田营造早竹林后对土壤有机碳的影响	90
4.5.1 农田营造早竹林后土壤有机碳含量的变化	91
4.5.2 农田营造早竹林后土壤有机碳密度的变化	92
4.5.3 农田营造早竹林后土壤有机碳储量的变化	93
4.6 天然次生林植被恢复对土壤有机碳的影响	94
4.6.1 不同演替年限土壤有机碳含量垂直分布的差异	94
4.6.2 不同演替年限土壤有机碳储量的垂直分布特征及比较	96
4.6.3 土壤有机碳含量与其他土壤养分元素的相关分析	98
4.7 不同经营方式对竹林碳储量的影响	98
4.7.1 不同培育措施对竹林植被碳储量的影响	99
4.7.2 不同培育措施对竹林土壤碳储量的影响	100
4.7.3 不同培育措施对竹林生态系统碳储量的影响	101

第 5 章 北亚热带不同土地利用方式土壤有机碳输出	103
5.1 北亚热带毛竹林土壤呼吸特征	103
5.1.1 土壤呼吸的日变化规律	104
5.1.2 土壤呼吸的季节变化规律	105
5.1.3 土壤呼吸与土壤温度的关系	106
5.1.4 土壤呼吸与土壤湿度的关系	106
5.2 不同海拔高度毛竹林土壤呼吸特征	109
5.2.1 不同海拔梯度土壤呼吸的季节变化	110
5.2.2 不同海拔梯度土壤温度的季节变化	111
5.2.3 不同海拔梯度土壤含水率的季节变化	113
5.2.4 土壤呼吸对土壤温度和水分含量关系	114
第 6 章 北亚热带不同土地利用方式碳源/汇评价和增汇技术	116
6.1 土地利用变化对土壤有机碳影响的综合评价	116
6.1.1 陆地生态系统碳源与碳汇	117
6.1.2 土地利用方式与大气碳源、汇	118
6.2 生态系统增汇的主要措施	119
6.2.1 合理区划和选择土地利用方式	120
6.2.2 合理的森林生态系统管理和退化生态系统恢复	120
6.2.3 草地生态系统合理管理和草地保护	121
6.2.4 农田生态系统合理管理和耕作	121
参考文献	123

第 1 章

土地利用变化对土壤有机碳的影响研究进展

全球气候变暖及其影响是当前人类所面临的最为严重的环境问题之一。追源和解决这些问题,准确确定陆地生态系统碳循环及其影响因素是一个关键问题。土地利用变化是影响陆地生态系统碳循环的主要因素之一,也是仅次于化石燃料燃烧而使大气 CO_2 浓度急剧增加的主要人为活动。在陆地生态系统中,森林是最大的有机碳贮库,占整个陆地生态系统碳库的 56%,是陆地生态系统中重要的碳汇和碳源(Dixon *et al.*, 1994)。土地利用变化发生后,由于影响土壤有机碳的动态过程和相关性质发生了变化,使土壤有机碳的储量、分布等也发生了变化,这些变化又将进一步影响土壤向大气释放 CO_2 的强度与过程(Jackson *et al.*, 2000)。

1.1 森林生态系统与全球气候变化

1.1.1 全球碳循环与气候变化

1.1.1.1 气候变化与温室效应

碳是地球生物体中最主要的组成元素之一,也是自然界中一切有机物中最基本的组成元素之一,它在自然界中以两种稳定同位素(^{12}C 和 ^{13}C)和一种放射性同位素(^{14}C)的形态存在。大气中的 CO_2 是生物体碳元素的主要来源,植物通过光合作用将大气 CO_2 合成有机物质,固定在植物体内,作为食物时,被人和动、植物吸收,在生物间传递,因此,大气 CO_2 是地球生物存在的基础(Atjay *et al.*, 1979; Cruzen *et al.*, 1979; Detwiler, 1986; Harkness *et al.*, 1986; Davidson & Lefebvre, 1993; Dixon *et al.*, 1994; Malhi *et al.*, 1999)。

碳通过生物过程、溶解过程在地球系统中的大气圈、生物圈、水圈、岩石圈之间交换,直接和间接对气候变化起影响作用。由于大气中 CO_2 的含量较多,是目前最主要的温室气体。工业革命以后,随着人类化石燃料燃烧和滥伐森林等行为的加剧,大量有机碳作为人类活动的废弃物,从岩石、有机体和土壤中以 CO_2 形式不断地进入大气中,加剧了温室效应,引起气候和生态的变化(徐德应和刘世荣, 1992; Sedjo, 1993; 徐德应, 1994; Raich & Potter, 1995; 聂道平等, 1997; Lan *et al.*, 1997; Lai, 1999; 陶波等, 2001)。

美国海洋研究中心所属的各监测站(包括夏威夷冒纳罗亚监测站和南极站)的实测记录数据和许多间接的证据表明,在过去 100 多年的时间里,大气 CO_2 浓度已经增加了近 25% (Houghton *et al.*, 1983),即从 $280\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $353\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而且大气 CO_2 浓度增加

的速率是上升的,这意味着到 2050 年 CO_2 浓度值将达到 $550 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Keeling & Bacastow, 1979), 即比 100 年前的浓度增加近 1 倍。

大气 CO_2 浓度升高的直接影响是增加地球大气吸收来自太阳的长波辐射,引起全球性的气温上升,导致气候变化和激烈波动(旱、涝灾增加)。Manabe 等(1979)预计,大气 CO_2 浓度上升 1 倍可能导致全球增温 $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 尤以极地增加较多。如果此估计成为现实,则由于极地永冻冰层的部分融化,将导致海平面在 100~200 年的时间里上升 5 m,从而极大地减少人类赖以生存的陆地面积。

许多研究表明,由于大气 CO_2 含量增加所造成的温室效应,将带来大气气温、海水表面温度的升高,使海水盐度发生变化,从而影响降水、空气和土壤湿度。碳循环对气候变化的间接影响是通过生物圈对气候的调节作用。大气中 CO_2 的含量对生物体能量转换和碳素循环过程都有较大的影响作用,大气中 CO_2 含量的增加将会加速大多数植被的生长,由于各种植物类受其影响的程度不相同,就会导致植被种类和陆地生态系统发生较大变化,农业生产格局、森林分布、陆地植被以及海洋、极冰圈、冻土带等也将随之发生改变,从而影响气候变化(杨政川, 2000)。

然而,目前的研究结果尚不足以说明未来气候一定会有大幅度增温。气候变化非常复杂,并不仅仅局限于地球本身,太阳变化和宇宙变化均可能产生影响。即使是地球本身,也还存在着复杂的正、负反馈作用机制的调节作用,如温度增加可使地球表面蒸发作用增强、云量增多,而云量的增加则会阻挡太阳辐射,起到降温作用;火山爆发一方面会使大气增加大量温室气体,而同时排出的大量气溶胶也会阻挡太阳辐射而使大气降温。政府间气候变化委员会(Watson & Bolin, 1992)根据全球气候模型预测,到本世纪中叶, CO_2 浓度倍增后,全球可能增温 $1.5\sim 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最近由于加深了对云的反馈作用和气溶胶作用的了解,普遍认为预测偏大,将变成 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或更低。然而,美国华盛顿战略研究所则认为, CO_2 上升导致气候变化的问题可能是根本不存在的,近几十年的全球变暖可能是 19 世纪小冰期后的变暖。更有数千名科学家(其中包括 70 位诺贝尔奖获得者)签发了“赫得乐呼吁书”,要求废除巴西里约热内卢的《全球气候变化框架公约》(1992),认为政府间气候变化小组在几份重要报告中低调处置大气 CO_2 浓度升高所导致气候变化预测结果的不确定性,有违科学原则,并提醒人们不要被所谓的全球性气候灾难所迷惑。近来,又有 100 多位气候学家签署了“莱比锡宣言”,联名否认温室气体对全球气温变化的影响的说法。除了在 CO_2 浓度变化与气候变化的关系问题上存在很多争论外,在大气 CO_2 浓度上升的原因上也存在很多不同意见。经过几十年的研究,现在比较一致的看法是,化石燃料和森林的破坏(尤其是热带森林的破坏)以及森林破坏后土壤利用方式的改变,是大气 CO_2 浓度升高的两个主要原因(徐德应, 1994)。

根据生态学原理,一个系统中的自然过程总是有利于系统的结构稳定和功能最大化,而非自然过程总是降低或破坏生态系统的稳定性,增加系统的不确定性。显然,大量开采化石燃料以及过度砍伐森林等活动都是非自然过程,这些活动导致了大气 CO_2 浓度的不断上升。虽然目前我们尚不能准确地预测其生态后果,但最终的结果必将危害人类自身。

1.1.1.2 气候变化对全球植被的影响

自然土壤一般都在植被覆盖之下,那么植被对气候变化的反应将影响土壤的变化。由于 CO_2 浓度、温度和降水的变化,全球各生态系统的生物生产能力都将会受到影响。一般

地讲, CO_2 浓度升高, 气温变暖, 降水增加均会有利于植物生长, 初级生产力将提高。但由于温度和降水变化的全球不均衡性, 生物生产力的变化也是不等的, 有的地方生产力可能会提高, 有的地方则可能减少 (Anderson, 1992; William & Turner, 1994)。但就全球而言, 目前研究的结果是总的生物量可能增加。由于 CO_2 浓度加倍, 地球表面温度升高, 北半球及其以北地区的温度和土壤湿度区域界线将大幅度北移。研究表明, 如果平均温度升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 永冻带的南界将北移 $205\sim 300\text{ km}$ 。如果温度升高 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加拿大永冻土面积将减少 25% (Sims & Nielsen, 1986)。这样必然导致地球植被区域发生变化, 这种变化主要表现为森林面积减少, 森林类型发生变化, 草原面积增加, 全球植被总的生物生产力下降。森林生长模型预测结果表明, 北美洲的南部和中部地区因气候变化森林将大面积死亡, 主要原因是温度升高, 水分可利用性降低。

Emanuel 等用 Holdridge 生命带分类原理预测了全球温度和降雨量的变化及其对植被带的影响 (Emanuel *et al.*, 1985)。结果表明在低纬度地区生命带变化较小, 但中纬度和高纬度地区变化明显。北方森林和冻原的面积将分别减少 37% 和 32% , 北方森林的北界将北移, 其 40% 以上侵占冻原地带, 北方森林的南部将大面积地被温性森林所取代, 而温性森林则有不少被草原所替代, 整个地球植被将发生较大的地带性变化, 但是这种变化要滞后于气候的变化, 可能有数十年的滞后期。

1.1.1.3 气候变化对土壤碳的影响

(1) 气候变化对土壤 CO_2 释放的影响 土壤向大气释放的 CO_2 主要是土壤碳库中有机物质矿化作用产生的, 即土壤呼吸作用产生的。土壤呼吸量的大小与生态系统中枯枝落叶的生产量直接相关, 沿纬度形成明显的梯度。当然释放的 CO_2 一部分来源于植物根系的呼吸作用, 不同生态系统根系呼吸量所占 CO_2 释放总量的比例不同, 森林土壤中根系呼吸量可达 50% , 而草地一般占 $20\%\sim 30\%$ (Raich & Nadelhoffer, 1989), 土壤呼吸和根系呼吸都与温度和水分有密切的相关关系。

温度对土壤微生物呼吸的影响一般用 Q_{10} 函数关系表示, 即温度每增加 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 微生物呼吸作用增加的倍数, 通常 $Q_{10}=2$, 但在不同的生态系统中 Q_{10} 值不同, 在温暖的地区 Q_{10} 值较低, 而在寒冷地区 Q_{10} 值则较高, 比如在暖温带落叶阔叶林中土壤呼吸 $Q_{10}=2$, 但在冻原生态系统中 $Q_{10}=3.7$ 。尽管 Q_{10} 不同, 但温度和土壤呼吸的相关关系是明显的。Moore (1984) 研究认为北方森林和冻原有机质的分解主要是低温限制; 在沼泽、积水冻原、湿地等生态系统中, 土壤呼吸与温度的关系是非线性的 (Moore, 1984), 但在广大的温带地区的森林和草地, 土壤呼吸很少受到土壤水分的限制 (Coleman & Sasson, 1980)。在干旱地带的草地和荒漠, 增加水分则明显加快土壤呼吸 (Hunt, 1977)。因此, 全球气候变暖、平均降水量增加, 会使土壤微生物和土壤动物活动加剧, 土壤呼吸加快, 这就必然导致全球土壤碳库释放 CO_2 速度的加快, 尽管各种生态系统加速的幅度不同, 但趋势是一致的。这样将影响碳素的流动, 会出现土壤中碳的输入和输出失衡, 即输出量大于输入量, 逐渐引起土壤有机质缺乏, 导致土壤贫瘠, 土壤质量下降, 其长远效应可能是严重的。

(2) 气候变化对枯枝落叶分解的影响 土壤枯枝落叶层的分解速度决定于温度和水分等气候条件对微生物的影响, 当然也受土壤表面微气候、微地形、积雪和植被覆盖程度等的影响。分解速率与枯枝落叶的成分密切相关。一般地讲, 温度和水分条件适当, 枯枝落叶含氮和营养成分较高, 适于微生物利用, 则分解速率较高。如果枯枝落叶含木质素、树

脂较高,而含氮较少,分解速率就较慢(Swift *et al.*, 1979),这方面已做了大量研究工作。在草本植物群落中,不少学者用含氮量或 C/N 比作为枯枝落叶分解速率的预测指标(Seastedt, 1989; Taylor *et al.*, 1989);在木质素较高的枯枝叶中,一般用木质素/N 比作为预测指标。但在极端的环境中,这些预测指标也有例外,不一定起作用。

气候变化对枯枝落叶分解的作用是十分明显的。有人用¹⁴C 标定黑麦草进行枯草分解实验,实验在不同的气候条件下类似的土壤中进行。结果表明其分解曲线的形状是一致的,但同样的分解量(物质损失量)在尼日利亚(年均温 26.1 °C)分解速度是在英国(年均温 8.9 °C)的 4 倍(Dyer, 1990),在南澳也是英国的 2 倍。类似的实验也在欧洲松(*Pinus sylvestris*)林中做过,3 年实验结果表明松针分解速率与年均温呈非常显著的正相关,与年蒸发量关系也十分密切。Dyer 等在北方森林、温带森林做的研究,也证明年蒸发量与分解速率有着密切联系。通常可认为蒸发量是温度和水分可利用性的综合反映。

在气候变暖,全球平均降水量增加的情况下,全球枯枝落叶的分解速率会加快。因 CO₂ 浓度升高,光合速率提高,生产力增加,输入到土壤中的枯枝落叶量会增加,但因温度效应,留存于土壤中的枯枝叶总量相对减少,在海拔较高的山地和高纬度地区,土壤中总枯枝落叶留存量减少更明显,但这方面的实验模拟研究尚不多见。

气候与土壤的关系是十分复杂的,因此,气候变化对土壤的影响和土壤对气候变化的反馈作用也是十分复杂的(Anderson, 1992)。目前对全球气候变化的实验和预测研究主要集中在温室气体的产生过程与机理、大气中温室气体的变化史及其浓度变化预测;温室气体升高对气候影响的程度和区域差异、全球气候变化对海洋的影响、全球气候变化对冰川的影响、气候变化对农业生产的影响、气候变化对地球生命及生命带的影响等方面。对土壤和气候变化的关系研究相对较少,因为土壤系统是十分复杂的,许多因素难以模拟。对于土壤与气候因子之间关系的研究做的工作较多,尤其是对森林土壤研究的较多,这些研究主要集中在土壤系统的生物物理和生物化学过程与机理及其气候因子对其的影响上,这些是理解气候变化对土壤影响的基础(Dyer, 1990)。由于土壤系统对外界的干扰和影响的巨大缓冲作用,土壤对气候变化的反应有相对较长的滞后期,因此,气候变化对土壤影响的研究尚未引起高度重视。但土壤系统是林业、农业、畜牧业等的基础,它的变化直接影响着地球生命和人类自己,对它的模拟和预测研究有着非常重要的意义。

1.1.2 森林生态系统与全球碳循环

在全球三个大的贮库中即海洋、大气和陆地生态系统,对海洋-大气系统间的碳循环研究的较少,而对陆地-气候系统之间的碳循环进行了大量的研究(方精云等, 1996; 康惠宁和马钦彦, 1996; 方精云, 2000; 耿元波等, 2000; 刘国华和方精云, 2000; 贺庆棠, 2001; 蒋延玲和周广胜, 2001),这主要是由于陆地生态系统不仅是人类生存的空间,而且它也比较复杂,变化较大,在全球碳循环中要考虑的因子很多。在陆地生态系统中,森林是最大的有机碳的贮库,贮有 1146×10^9 t 碳,占整个陆地碳库的 56%(Robert, 1995)。因此,了解森林生态系统在碳循环中的作用,对于研究陆地-气候系统的碳循环乃至全球碳循环都是一个基础,具有重要的意义。

1.1.2.1 森林生态系统的碳循环

森林生态系统是陆地中重要的碳汇和碳源,在这个系统中,森林的生物量、植物碎屑和森林土壤固定了碳素而成为碳汇,森林以及森林中微生物、动物、土壤等的呼吸、分解

则释放碳素到大气中成为碳源。如果森林固定的碳大于释放的碳就成为碳汇,反之成为碳源。在全球碳循环的过程中,森林是一个大的碳汇,但随着森林破坏、退化的加剧以及一些干扰因素(如火灾)的影响,森林生态系统就可能成为碳源,这将更加剧全球的温室效应,导致生态环境的进一步恶化。通过国内外的一些研究表明,温带和北部寒带森林是碳汇,如北方森林每年净吸收碳量为 $0.4 \times 10^9 \sim 0.6 \times 10^9$ t 碳 (Apps & Kurz, 1991)。俄罗斯森林每年固碳 $0.36 \times 10^9 \sim 0.45 \times 10^9$ t 碳 (朱云辉译, 1995)。在温带,森林每年净吸收碳量 $0.17 \times 10^9 \sim 0.35 \times 10^9$ t 碳,美国东南部的森林生态系统每年固碳 0.07×10^9 t 碳 (Hazel, 1980)。而热带森林地区由于过度砍伐森林以及土地利用方式的改变已成为碳源。

在森林生态系统中,植物首先通过光合作用吸收 CO_2 生成有机质,贮藏在体内(G_p),这是森林吸收碳素过程。而后,通过植物自身的呼吸作用要释放出—部分碳素(R_a)。另外,植物还会以枯枝落叶、根屑等形式的碳贮藏在土壤中。而土壤中的碳有一部分会被微生物和其他的异养生物通过分解和呼吸释放到大气中(R_h),森林生态系统和大气之间的碳通量是森林生长过程中固定的碳和干扰过程中释放碳之间的差值。森林生态系统的净生产量 NEP 可用下面的公式表示: $\text{NEP} = G_p - R_a - R_h$ 。如果在自然生长状态下,按上面这个公式计算,一般森林生态系统的 NEP 为正,是个碳汇,然而,由于人类活动的干扰和破坏,尤其是对热带森林的乱伐或把其变农业用地等行为就会使森林生态系统的 NEP 为负,而成为碳源,这需要引起人类的关注。采取有效措施,防止森林变成碳源,从而缓和或扭转全球气温变暖的趋势。我国森林生态系统在陆气系统碳循环中表现为碳汇,其 NEP 值为 0.48×10^9 t 碳 (刘国华和方精云, 2000; 周玉荣等, 2000)。目前,人类对森林生态系统的作用呈现多样性,有毁林耕地也有退耕还林,有只伐不育也有植树造林,就使森林生态系统的碳循环也变得复杂。

1.1.2.2 森林生态系统在碳循环中的作用

从人类认识到温室气体,尤其是 CO_2 浓度的上升会使全球气温变暖,从而带来一系列严重生态环境问题时,就展开了对碳素循环的研究。而森林生态系统是吸收 CO_2 释放 O_2 的一个大碳汇,在碳循环中起着非常重要的作用。全球陆地生态系统地上部的碳为 562×10^9 t,森林生态系统地上部的含碳量为 483×10^9 t,占了 86%。全球陆地生态系统地下部的含碳量为 1272×10^9 t,而森林地下部含碳约 927×10^9 t,占整个世界土壤含碳量的 73%。森林生态系统在碳循环中的作用主要取决于以下几个方面:

(1) 生物量 森林生态系统的生物量贮存着大量的碳素,如按照植物生物量的含碳量为 40%~45% 计,那么整个森林生态系统的生物量将近一半是碳素含量。森林的生物量与其成长阶段的关系最为密切,一般森林据其年龄可分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林/过熟林,其中碳的累积速度在中龄林生态系统中最大,而成熟林/过熟林由于其生物量基本停止增长,其碳素的吸收与释放基本平衡。从森林的年龄结构来估算吸收碳素的潜力是决定森林生态系统碳汇功能的一个主要方面。目前,我国森林的结构以幼龄林、中龄林居多,因此我国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力很大。据估算(王效科和冯宗炜, 2000; 王效科和冯宗炜, 2001),我国森林生态系统潜在的植物总碳贮量为 8.41×10^9 t,现有的实际碳贮存总量只是潜在的植物总碳贮量的 44.3%,因此,如果我国的森林生态系统得到切实有效地保护,那么它将是—中国—个重要的碳汇(图 1-1 引自秦建华和姜志林, 1997)。