

森林 生态系统固碳

◆ ◆
Carbon Sequestration
in Forest Ecosystems

[美] 克劳斯·洛伦茨 [美] 拉藤·拉尔 著
罗 勇 刘飞鹏 等 译



科学出版社

森林生态系统固碳

Carbon Sequestration in Forest Ecosystems

[美]克劳斯·洛伦茨 [美]拉藤·拉尔 著
罗 勇 刘飞鹏 等 译

科学出版社

北 京

内 容 简 介

森林是陆地生态系统的主体,森林生态系统固碳在当今关于气候议题的国际谈判和生态问题研究中占有重要地位。本书首次系统论述了森林生态系统自然的碳动态过程和世界主要森林生物群落的碳动态及碳库特征,探讨了干扰、演替和经营管理对森林碳交换的影响,以及营养元素、水分等供应的影响机理;讨论了森林在未来生物质能源发展及减缓气候突变中的作用;同时提出了很多森林可持续开发利用的新观点和前沿问题,有助于人们进一步深入研究。

本书适合从事林业碳汇研究、项目设计与实施、政策制定或林业相关专业的技术人员等阅读使用。

Translation from English languages edition:

Carbon Sequestration in Forest Ecosystems

By Klaus Lorenz and Rattan Lal

Copyright © Springer Science+ Business Media B. V. 2010 All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

森林生态系统固碳/(美)洛伦茨(Lorenz, K.), (美)拉尔(Lal, R.)著;罗勇等译. —北京:科学出版社, 2014. 10

书名原文:Carbon Sequestration in Forest Ecosystems

ISBN 978-7-03-041785-5

I. ①森… II. ①洛… ②拉… ③罗… III. ①森林生态系统-碳-储量-研究 IV. ①S718.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 198512 号

责任编辑:万群霞 李娟 / 责任校对:胡小洁

责任印制:肖 兴 / 封面设计:华路天然工作室

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:330 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书译者名单

罗 勇	刘飞鹏	肖智慧
陈富强	黄妃本	林丽平
卢雅莉	杨海燕	王 旭

中译本序

森林具有提供物质产品、改善生态环境、承载历史文化等多种功能。长期以来,林业调查规划部门主要的任务是开展森林资源面积和蓄积量的调查,编制森林经营方案和林业规划,在国家宏观林业政策制定提供基础数据的同时,也为林业生产单位提供技术服务。自20世纪80年代以来,人们对森林认识发生了根本性地改变,应对全球气候变化和生物多样性保护受到了广泛的关注。其中,森林生态系统的固碳功能是地球的福祉,更是人类社会的福祉。如何利用我国成熟的森林资源清查体系优势,把调查、评价和预测森林生态系统固碳功能纳入森林资源清查体系,是今后森林资源调查发展的趋势。因此,林业科研及技术人员需要对森林生态系统固碳过程及调控机制有一个基本的认识 and 了解。

克劳斯·洛伦茨和拉滕·拉尔编写的《森林生态系统固碳》一书首次从全球生态学的宏观视角和植物生理学的微观视角来探讨森林生态系统的固碳规律。本书集森林生态系统中的相关进程、生产者、碳周转和固碳的技术,以及经济潜力为一体,填补了全球环境政策的需求与当地森林管理之间的空白。尽管阅读原著能原汁原味地欣赏作者思想和风格,但为了节省时间和对内容的理解更全面,更多的读者愿意用母语阅读专业著作,翻译原著已在知识积累、学科发展和人才培养等方面发挥了重要作用。

翻译专著除具备扎实的专业知识和较好的英文功底外,还需要投入大量的时间。本书第一译者是我培养的第一届硕士研究生罗勇,其在硕士期间主要开展亚热带树种光合特征及其对环境响应的研究,但一直对森林生态系统生产力和固碳功能研究方面有浓厚的兴趣;从中山大学博士毕业后,在广东省林业调查规划院从事森林生态监测工作。他在美国 Georgia 大学访问学习期间,翻译了《森林生态系统固碳》一书。希望该书能帮助相关专业的研究人员、大学生、研究生和广大林业工作者认识、理解森林生态系统的固碳过程,以及森林生态系统固碳的已知和未知领域,为林业碳汇的计量和研究工作提供参考和借鉴。

源文化

中南林业科技大学 生命科学与技术学院院长

2014年5月

译者序

初读本书原著始于2011年3月,缘于中国经济低碳发展的要求,那时中国的科普领域和公开媒体上“森林固碳”一词曝光率极高,盛况空前之下渐显出一些浮躁的暗流。这种浮躁如同人们热衷于金鱼的美丽,却不愿去了解水的静养。作为一名知识分子,如何从学术严谨的角度来全面了解和认识森林生态系统固碳的机理过程和动态变化,成了我内心的一种期盼,直到这书本的出现。

作者克劳斯·洛伦茨2001年博士毕业于德国霍恩海姆大学,长期从事土壤有机碳的生物地球化学研究和相关管理工作,为美国、德国土壤学会专业委员会会员和美国地质联合会会员,现为美国俄亥俄州立大学碳管理与固碳中心副主任、首席科学家,他的研究侧重于森林地下部分的固碳。

本书从生物地球化学角度探讨了森林生态系统基本碳动态过程及影响碳固存的因素和原因,并首次描述了气候突变对森林和环境碳元素交换过程的影响。本书在现有大量文献综述的基础上,集中探讨了大气 CO_2 浓度升高、温度升高,降水格局变化、干扰和经营,以及水分和养分对森林生态系统固碳的影响。本书的可贵之处在于明确指出了与森林固碳有关领域的研究不足及缺陷,为未来林业科研人员和碳汇研究人员提供了新的命题与思路。

本书在翻译过程中,得到了北京化工大学苏贵福博士、美国乔治亚大学尤浩博士的帮助,也得到了国家外国专家局出国留学人员审批类项目、广东省林业科技创新专项项目、广东省低碳发展专项项目的支持,藉此深表感谢!

囿于知识和水平有限,书中难免有疏失错漏之处,敬请读者指正。

译者

2014年7月15日于广州火炉山

序 一

在关于气候突变的政治谈判和森林生态系统研究中,森林生态系统固碳已成为一个重要的议题。该书首次集森林生态系统中的相关进程、生产者、碳周转诱因及碳固存的技术和经济潜力为一体,填补了全球环境政策的制定和当地森林管理之间的空白。该书讨论了缓解气候突变和未来气候状态下的森林发展趋势,也综述了可持续森林经营、适应性森林经营等一些有价值的知识点。

对大气碳循环来说,土壤有机质(SOM)碳库因储存时间长、容量大而引人注目。但当环境条件发生变化时,土壤也会成为碳源。森林土壤的“源-汇”功能均与生物过程相联系,因为凋落物的产生和分解、腐殖质的合成均受生态系统中大量自养和异养生物相互作用的影响。此外,土壤有机质的数量和质量与其他元素的生物地球化学循环密切相关,尤其是土壤氮在土壤有机质动态变化中起关键作用。土壤的自然形成和人类活动(例如大气氮沉降或种植固氮植物)均会影响土壤氮,这就要求森林经营者必须打破传统的可持续发展林业的观念,因为当前的经营策略主要是筛选品种和调整林分结构,来提高林木和林分的生长量。基于固碳,必须要考虑“地下森林”的问题,如根系的分布和周转、腐殖质的构成、微生物的活性等。为配合这一具有挑战性的工作,森林经营者必须把土壤学和森林生态学等现代基本知识纳入到森林经营管理中去。保存完好的中欧森林历史记录表明,收集枯枝落叶、薪材的矮化等不当的管理方式已经导致 SOM 减少及养分严重枯竭。但许多地区的森林均采用了这种不计后果的经营管理方式,其 SOM 的基础服务功能(作为水和元素循环的缓冲器和过滤器)至今尚未得到恢复。除此之外,该书的选题和架构等许多方面均值得高度称赞!

该书将丰富大学的课堂教学内容,并有助于促进政策制定者、科学家和土地管理者等不同群体之间的交流对话!

菲 戈

德国德累斯顿工业大学森林土壤和营养学教授

2009 年 4 月 26 日

序 二

克劳斯·洛伦茨和拉藤·拉尔两位科学家在碳汇上所做的大量工作,将会在大学教室、演讲厅和世界各地的会议里引起一个重要的生物学话题,即森林生态系统如何减缓气候变化。

虽然事关气候变化和文明活动的辩论将持续一段时间,但该书坚定地告诉我们:假如不慎重对待这些生态系统的话,森林将不能完全发挥其固碳潜能。

在人类进化前,良好的森林生态系统显然在全球生态环境平衡中发挥了重要的作用。今天,我们依赖于森林自然资源和生态系统服务功能,受益于森林及数万年森林形成的化石燃料;全球森林覆盖率在近代已大大减少,但人类社会赖以生存的、持续的环境服务和福利仍然由现存的森林所提供。森林在维护地球宜居方面的重要性从未引起公众过多的关注,而我们以前也从来没有这么依赖化石燃料的使用。因此,尽管新的森林面积不断增加,但我们不能低估现存森林在维持全球碳循环中的重要作用。

该书集当代知识与森林生态系统固碳于一体,将有利于提高对现存森林资源的管理能力和对森林资源继续服务于全球碳循环的维护能力,也将使固定在森林里为数不多的碳能在日复一日、年复一年的基础上不断积累,以确保森林的碳能维持人类的生存。

该书对学生、科学家和决策者的知识积累有重要的贡献,它将指导人们如何管理全世界现存的森林及未来的新森林。该书提出的一系列问题和发现的知识缺口将促使人们继续质疑和论证,取得政策制定和管理者认同,进而理解和全面领会森林生态系统在固碳方面的潜力。填补这些知识缺口的问题和论断为我们提供了一个非常有用的基准,即有关森林生态系统固碳所取得的科学进展是可以衡量的。未来的科学家和人类历史观察员迟早会对这些科学进展做出客观的评价,因此该书将对社会大有益处。同时,仔细思考森林对全球碳循环中的复杂性、连通性及落实措施以确保现存森林生态系统的繁荣昌盛是我们共同的义务和责任。

彼得·克林顿
新西兰森林研究所

2009年4月

前 言

森林生态系统覆盖了大部分的陆地地表,是陆地碳循环的主要组成部分。重要的是,森林生态系统通过固碳过程,将积累的含碳有机化合物长时间储存在植被、凋落物,特别是土壤中。树木作为森林的主要组成部分,通过光合作用吸收了大量的 CO_2 ,但通过自养或异养呼吸又将大致等量的 CO_2 返回到大气中。因此,森林中仅有少量的碳在现存的植物、凋落物和土壤中不断积累。故当前未受干扰的森林生态系统是全球重要的碳汇。

森林生态系统的固碳服务功能是地球的福祉,也是人类社会的福祉。然而,气候突变(ACC)威胁森林固碳,由于化石燃料燃烧和土地利用变化导致了大气中 CO_2 浓度明显增加,大气温度越来越高,降水格局发生变化,这些都可能影响森林生态系统的固碳过程。与用于农业生产的人类毁林活动相比,当前的气候突变对森林固碳已有限制作用。可是,未来因化石燃料排放增加引起的气候突变可能把森林变成碳源,这将进一步加剧气候突变对森林的破坏性影响。因此,气候突变的最终解决方案是全球经济的脱碳行动。

在有效的解决方案实施之前,森林生态系统的固碳有助于延缓气候突变。同时,可持续与适宜的森林经营也能使森林更好地应对未来的气候突变。因气候突变不断干扰森林对碳的吸收,必须实施可持续和适宜的森林经营措施来确保未来森林能吸收更多的碳。关于气候变化的国际协议也一致认同森林生态系统对气候突变的减缓作用。未来的国际气候变化协议将更强调减少毁林和森林退化(REDD)造成碳排放的重要性。提高森林生态系统固碳能力的重要方法是减少热带地区的毁林活动,保护储存有大量碳汇的泥炭地 and 老熟林。

对研究生和本科生来说,市场上正缺乏一本这样的参考书或教科书:它能介绍森林生态系统中碳动态的基本过程,哪些基本因素和原因决定了固碳的技术和经济潜力;有结合世界各地的案例描述;各章有促进思考、推动学术对话的系列复习题设置。本书为我们提供了森林生态系统中影响固碳进程的因素和诱因,且每章都对当前的知识进行总结,并为今后的研究确定了方向,还附有与主题相关的参考文献。

本书首次描述了气候突变对森林与环境中的碳元素交换过程的影响。大气中的碳与周围生态系统的碳交换是通过光合作用和呼吸作用,以及一氧化碳(CO)通量、甲烷(CH_4)、植物挥发性气体(BVOC)、可溶性无机碳(DIC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒碳(PC)等形式发生的。本书在综述现有大量文献的基础上,就气候

突变对森林生态系统固碳过程的影响进行了讨论。这些文献主要集中在大气 CO₂ 浓度升高、升温及降水格局变化对生态系统过程的影响等方面。

固碳是指长时间储存在植被、凋落物和土壤中的含碳有机化合物不断增加的过程。本书还讲述了森林生态系统中主要养分和水分对固碳的限制作用。最后,探讨了森林在未来生物质能源中的角色及减缓气候突变的作用。本书的重点是现存森林的固碳,而不是指那些已确定下来的造林、再造林或林产品行业中的固碳。因此,本书对本科生、研究生、科学家、森林管理人员和政策制定者来说,具有重要的参考和使用价值。

克劳斯·洛伦茨 拉藤·拉尔

美国俄亥俄州立大学环境和自然资源学院碳管理与碳汇中心

2009年5月1日

目 录

中译本序

译者序

序一

序二

前言

第1章 绪言	1
1.1 森林生态系统	1
1.2 森林生态系统发展史	3
1.3 全球碳循环与气候变化	4
1.4 固碳	9
1.5 复习题	14
参考文献	15
第2章 森林生态系统的自然固碳动态	20
2.1 森林生态系统的碳输入	20
2.1.1 碳同化	22
2.1.2 气态碳吸收	31
2.1.3 溶解态和颗粒态碳的沉降	32
2.2 森林生态系统的碳动态	33
2.2.1 树木碳动态	33
2.2.2 林外碳动态	43
2.3 森林生态系统的碳输出	60
2.3.1 植物气态碳释放	60
2.3.2 有机质碳流失	65
2.3.3 土壤碳酸盐的碳流失	69
2.4 结论	70
2.5 复习题	70
参考文献	71
第3章 干扰、演替和经营管理对固碳的影响	92
3.1 自然干扰对森林生态系统固碳的影响	93
3.1.1 主要干扰(如林分取代)	94

3.1.2 轻微干扰	101
3.2 林分的自然演替周期和固碳	103
3.2.1 林分初始期	104
3.2.2 林分排除期	105
3.2.3 林下再现期	106
3.2.4 老熟期	106
3.3 森林经营管理和固碳	108
3.3.1 天然林的经营管理活动	110
3.3.2 人工林的经营管理活动	118
3.4 泥炭地、矿业和城镇土地利用对森林固碳的影响	120
3.4.1 森林泥炭地	120
3.4.2 森林采矿活动	124
3.4.3 城市化和森林生态系统	126
3.5 结论	128
3.6 复习题	129
参考文献	130
第4章 世界主要森林生物群落碳库和碳动态	143
4.1 寒带森林(北方森林)	144
4.1.1 碳动态与碳库	146
4.1.2 气候变化的影响	151
4.2 温带森林	155
4.2.1 碳库和碳动态	157
4.2.2 气候变化的影响	160
4.3 热带森林	163
4.3.1 碳动态和碳库	165
4.3.2 气候变化的影响	169
4.4 结论	173
4.5 复习题	174
参考文献	174
第5章 营养元素及水分对森林固碳的影响	187
5.1 氮	188
5.1.1 森林生态系统氮动态	188
5.1.2 氮对生物质固碳的影响	191
5.1.3 氮对土壤有机碳汇的影响	194
5.1.4 结论	196

5.2 磷	197
5.2.1 森林生态系统磷动态	198
5.2.2 森林生态系统磷对固碳的影响	199
5.2.3 结论	200
5.3 水	201
5.3.1 森林生态系统水循环	202
5.3.2 水和森林生态系统固碳	204
5.3.3 结论	206
5.4 复习题	207
参考文献	207
第6章 森林生态系统固碳的重要性	218
6.1 人工林的生物质能	219
6.1.1 林业生物能源和生物燃料	220
6.1.2 运用生物技术对生物质林木进行基因改良	222
6.2 《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》和“后京都协议”下的 森林固碳	225
6.2.1 当前承担的森林固碳义务	225
6.2.2 未来基于森林系统的固碳	227
6.3 森林固碳的主要限制因子:热带森林砍伐、泥炭地和老熟林扰动 ...	232
6.3.1 热带森林砍伐	232
6.3.2 泥炭地扰动	233
6.3.3 老熟林扰动	234
6.4 结论	235
6.5 复习题	235
参考文献	236
缩写及缩略词	245

第 1 章 绪 言

在所有陆地生态系统中,森林生态系统的面积最大。林木作为森林生态系统的主要成分,蓄积量或者森林活生物绝对数量最大。全球森林总生物量约为 6770 亿 t,林木生物量占 80%(Kindermann et al.,2008)。森林生态系统通过光合作用从大气中吸收大量 CO_2 ,所固定的碳大部分又通过自养和异养呼吸返回大气,小部分储存在地上和地下的生物质、凋落物和土壤中。约有一半的陆地碳汇储存在森林中(Canadell et al.,2007)。根据世界联合国粮食及农业组织(简称世界粮农组织)的统计数据,森林地上部分储存的碳约为 2340 亿 t,地下部分约为 620 亿 t,枯死木约为 410 亿 t,凋落物约为 230 亿 t,森林土壤约为 3980 亿 t(Kindermann et al.,2008)。但森林碳汇的数据极不精确,因为森林植物生物量中储存的碳可能达到 6910 亿 t,森林 1m 深土壤中储存的碳可能达到 9680 亿 t。大气层中储存的碳约为 8170 亿 t,与此相比,森林储存的碳可能更多,尤其是原始森林、未受干扰的森林和老熟林,均积累了大量的碳。因此,森林是陆地碳循环的重要组成部分。从历史上看,森林碳库的主要威胁是人为将森林植被转换为其他用途的土地(如农业化和城市化)及森林退化。然而,由于森林砍伐、全球人口增长等人为因素导致的 CO_2 排放空前增加对森林碳储量造成的直接或间接压力与日俱增。具体来说,全球气候变化会削弱森林生态系统的碳吸收能力,并使其变为碳源。虽然森林生态系统碳汇无法阻止因化石燃料燃烧引起的大气中 CO_2 增加,但它能对森林碳库进行持久的增强与巩固,可以抵消部分人为 CO_2 的排放,尽可能降低气候突变带来的风险。因此,通过森林生态系统对大气中 CO_2 进行固定、运输,发挥其永久碳库的作用,可以为全球经济的低碳技术、无碳化发展赢得更多的时间。

绪言解释了森林生态系统固碳的相关专业术语,并对欧洲和北美森林生态系统的长远发展进行了简要概述。另外,还讨论了全球碳循环、气候突变和森林生态系统固碳的重要性。

1.1 森林生态系统

20 世纪 30 年代初,Chapman 最早提出了“生态系统”术语,之后 Tansley 首次在出版物中使用了这个术语(Tansley,1935;Willis,1997)。虽然没有确切的定义,但生态系统的基本概念早就有人提出。早在公元前 371~公元前 287 年,希腊哲学家塞奥弗拉斯托斯(Theophrastus)已经意识到了气候对植物分布的重要性,以

及植物生命周期与季节之间的“共生关系”。因此,“生态系统”被定义为一定地域或空间内所有生物与物理环境之间通过物质循环、能量流动及信息传递而构成的相互依存、相互作用的统一体(Odum,1967)。对陆地生态系统而言,生态系统的边界是指集水区(即该地区所有降水能汇成一条溪流的特定地形区域)或林分(即在植被、土壤、地形、气候和干扰历史等方面有高度同质性的区域)(Aber and Melillo,2001)。在生态系统中,能量或碳从生产者(如植物)逐渐向消费者(如动物)和分解者(如微生物)转移(Lindeman,1942),能量流动与养分循环、水分流动之间相互影响、相互作用(Ovington,1962)。

“森林”的定义可以归类为行政单元或法律单元,也可归类为土地覆盖或土地使用(Lund,1999)。在2005年全球森林资源评估(FAO,2006)中“森林”权威的定义指树高>5m,冠层郁闭度>10%,面积大于0.5ha^①的土地,或是能达到这些条件的树林。主要包括由竹子(*Bambuseae* Kunth ex Dumorth)、棕榈(*Arecaceae* Schultz Schultzenstein)等植物组成且高度、冠层和郁闭度均符合条件的区域;也包括林区道路、防火带、其他小型开放区、国家森林公园、自然保护区,还包括具有具体的科学、历史、文化或精神利益的其他保护区、防风林、防护林、面积>0.5ha或宽度>20m的廊道,以及主要用于林业或保护目的的人工林等。

森林是由树木组成的(Lund,1999)。“树”可以定义为在一个特定地区,形体较大、寿命较长(即多年生)、成熟期高度达到6m以上的木本植物,而且由单一主干抽生出树枝、嫩枝和树叶,最终形成树冠(Seth,2004)。通俗地讲,“树”是有单一主干的多年生木本植物;也可指在萌芽更新的情况下,有多个主干,但有明显树冠的木本植物(FAO,2001)。这个定义也包括竹子、棕榈科和其他符合上述标准的木本植物。树由根、茎、枝和叶组成(Kozlowski et al.,1991)。茎主要包括支撑和输导组织(木质部和韧皮部),由木质部细胞、韧皮部组成的树皮和维管形成层组织构成。树有几种分类方法,例如,常绿树指终年具有绿叶,所有叶子不会同时脱落的乔木(Seth,2004);相反地,落叶树指在生长季节结束时,老叶全部脱落的乔木。锥形树被称为针叶树或球果植物,所有非锥形、会开花的树木通常被称为有花树木或阔叶树。针叶树一般具有针形的叶子,而阔叶树则有扁平、宽阔的叶子。种子无果皮包被、裸露在外的植物称为裸子植物,种子被封闭在子房/果实壁内的称为被子植物。被子植物又可分为双子叶植物和单子叶植物。植物种子内有两片子叶的,叫双子叶植物;植物种子内有一片子叶的,叫单子叶植物(Seth,2004)。

总之,森林生态系统包括林内所有生物、垂直向上延伸到空中的林冠层,向下延伸到受根系和生物过程影响的最低土壤层(Waring and Running,2007)。它是一个开放系统,并与其他相邻的森林、水生生态系统和大气圈发生碳交换、能量交

① 1ha=10⁴m²。

换和物质交换。因此,森林生态系统一直处于非平衡状态。

1.2 森林生态系统发展史

森林生态系统经过成千上万年长期的变化,会发生植物迁移、物种形成和物种进化的现象(Barnes et al., 1998)。天然林往往分布在那些能够维持树木生长、海拔达到林界线的区域,不会分布在那些自然火灾频发或其他干扰太大或环境已被人类活动改变的地区。

第四纪气候变化直接或间接地影响了当前森林生态系统的分布格局(Schulze et al., 2005)。在第四纪的寒冷期,南北半球大量聚集巨大的内陆冰块,森林消失,仅有少部分树木幸存。但在约 10000 年前的冰河末期,气候开始变暖,冰块融化消退。在当前全新世期间,许多树种开始回迁。根据物种的立地条件、迁移速度及避难位置等因素的不同,森林群落也随之发生变化。例如,美国东部许多针阔混交林或纯阔叶林取代寒带森林,而在东南部则形成松树林(Perry et al., 2008)。由于最近的冰川消退,美国西北部森林群落的组成主要是西部铁杉[*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.]、红杉(*Thuja plicata* Donn ex D. Don)和花旗松[*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)]等。同样,间冰期的循环决定了亚马逊热带雨林群落的组成(Mayle et al., 2000)。

人类干扰改变了当前间冰期森林群落的自然演替。在过去的 8000 多年里,全球近一半的森林被转换为农田、牧场或其他用途的土地(Bryant et al., 1997)。数万年前,狩猎者用火来取暖或驱赶野生动物(Bowman et al., 2009),在欧洲中南部,新石器农业时代开始大规模的火烧森林。在随后的几千年中,森林砍伐蔓延至北欧(Schulze et al., 2005)。除了森林砍伐,大面积的天然林被放牧、践踏、采伐及其他人类活动所破坏。中世纪欧洲中部的前工业革命时期,森林最为广泛的经营方式是森林采伐。工业革命开始后(约 1800 年),采伐后的林地种植了针叶林种,阔叶林退出历史舞台。在 18 世纪,森林经营在欧洲发展成为一门学科(Bravo et al., 2008),在森林更新、密度配置、森林利用和保护等方面,开始应用生物学、生态学和经济学原理(Helms, 1998);到 19~20 世纪,森林经理学从欧洲国家兴起(Bravo et al., 2008)。森林经理的目的是尽可能快速、频繁、可持续地进行商业化木材生产,然而,自 20 世纪 70 年代中期以来,工业化产生的强酸及长途运输产生的 SO_2 ,使土壤表层日益酸化,对针叶林造成大面积的重大伤害。此外在欧洲许多地区,森林经理施用大量氮肥,改变了森林的立地条件和植被组成(Schulze et al., 2005)。

与欧洲的发展情况类似,在过去的二三百年来,全球范围内发生了大面积的森林砍伐(Martin, 2008)。例如,美国东部的森林先被砍伐,然后因定居者西迁而被

遗弃(Clawson, 1979)。北美森林砍伐的主要原因是为粮食和棉花生产让路;拉丁美洲、加勒比地区、非洲和亚洲森林砍伐的主要原因是进行牲畜养殖及甘蔗、茶叶、咖啡、橡胶和油棕榈等的种植(Martin, 2008)。因此,在过去的 300 年中,由于农业扩张和木材砍伐,多达 1.1 亿 ha 的森林被摧毁(Foley et al., 2005)。经过森林间伐、其他人类干扰等森林改造,目前人工林面积已超过原始森林面积,现有人工林面积约为 25 亿 ha(FAO, 2006)。

以木材生产为目标的森林经营很明显是以消耗森林生物为代价的。例如,原始热带森林通常牺牲 30%~70% 的碳储量用于木材生产,每公顷(ha)欧洲森林有 100~120t 的碳用于木材生产,而国家公园每公顷原始林的碳储量为 140~300t (Mollicone et al., 2007)。目前保存完好的原始森林约有 15 亿 ha,主要分布在巴西、俄罗斯、加拿大和美国(FAO, 2006)。但仅有五分之一的原始森林未受干扰(Bryant et al., 1997)。当今,因为市场准入困难、土地贫瘠、陡崖、干旱缺水或经济效益低等原因,那些不能进行农业种植的区域还保留着原始森林(Martin, 2008)。

多种土地利用方式除了引起森林面积减少外,同时也会造成森林生态系统生产力下降、生物量锐减、林分结构和物种多样性的退化(Foley et al., 2005)。病虫害入侵、可燃物增加、火源模式和频率改变、当地气象条件变化等因素均会使森林生态系统发生退化。但是,这种全球变化志在引起人们对森林生态系统产品和服务功能的关注,例如,在气候变化背景下,地中海地区一些代表性树种的分布可能会减少(Schröter et al., 2005)。尽管气候变暖会造成碳损失,但植树造林使欧洲森林土壤的净碳汇增加。此外,气候变化可能让北欧的森林生长加速。据预测,与气候变化相比,森林经理对欧洲的木材产量影响更大。气候专家预测:全球范围内北半球寒带、温带森林生态系统向极地迁移,而热带森林植被会明显退化(Alo and Wang, 2008);同时,全球大多数的森林净初级生产力(NPP)和叶面积指数(LAI)将会增加。

1.3 全球碳循环与气候变化

碳是组成地球生活的核心元素(Roston, 2008)。尽管地质运动在地质时间表上占主导地位,但生物体对大气碳浓度的调节作用不可忽视。最重要的是,从地质时间跨度看,地球温度和大气碳浓度密切相关。全球碳循环主要包括碳在大气圈、生物圈、水圈、土壤圈和岩石圈的生物地球化学循环,这个过程可历时数小时至百万年,而且短期碳循环和长期碳循环之间也有差别(Berner, 2003)。长期碳循环反映碳在岩石、海洋、大气、生物圈和土壤圈之间的交换途径。当地质时间跨度大于 10 万年时,长期碳循环便决定了大气 CO_2 浓度,该循环可用以下化学方程式来表示(Berner, 2003):