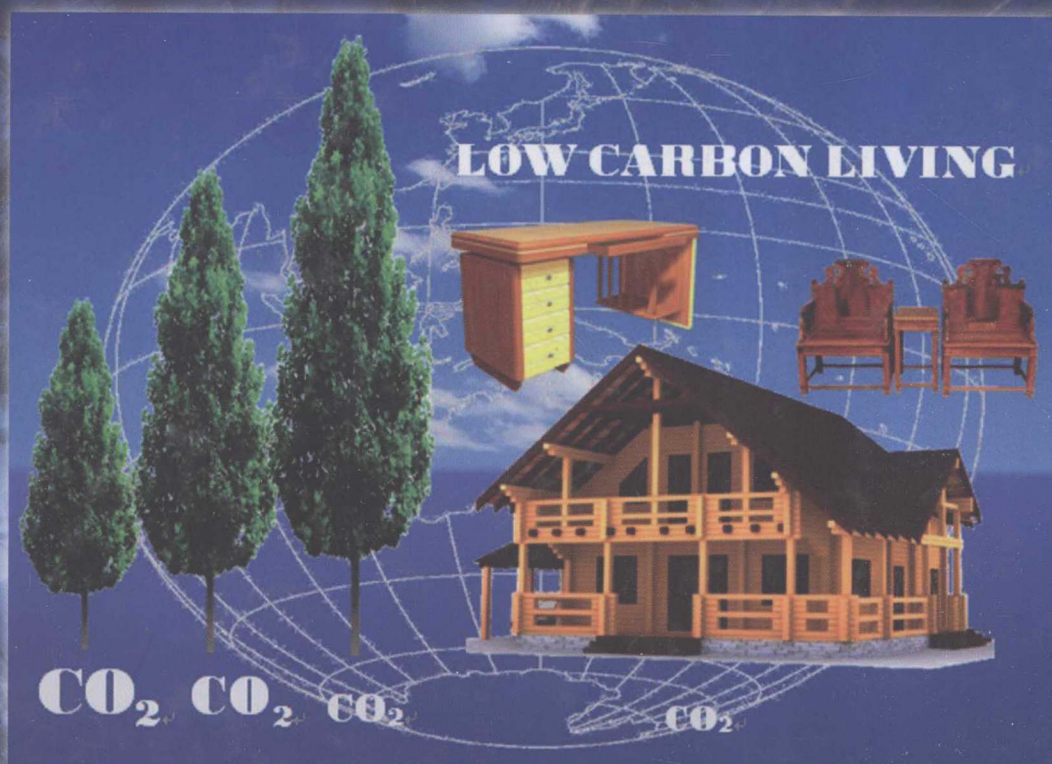


郭明辉 李 坚 关 鑫 编著



木材碳学



科学出版社

木材碳学

郭明辉 李 坚 关 鑫 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要阐述了木材碳学的生态环境学意义、木材碳储量的计量方法、木材碳储量与木材性质的潜在相关性、木材碳储能的原理及应用,并以人工林碳储量和优质木材培育技术为基础,系统解析高固碳量优质人工林木材培育技术,且从木材保护、木质复合材料、木结构建筑、木材加工等角度探讨木材固碳的延伸,旨在补充和拓展木材的生态环境学特性,缓解全球气候变化产生的负面效应。

本书可作为木材科学与技术、生物质复合材料、生物质能源、森林培育、建筑环境设计等领域科研院所研究人员的参考用书,亦可作为生产企业工程技术人员和管理人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

木材碳学/郭明辉,李坚,关鑫编著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034428-1

I. ①木… II. ①郭…②李…③关… III. ①碳-材料科学 IV. ①TB322

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第104606号

责任编辑:张会格 莫结胜/责任校对:林青梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:364 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自工业革命以来，由于人类对化石燃料的过量使用和对森林的破坏性砍伐，使二氧化碳等温室气体在地球大气中积累，引发国际社会公认的全球性环境问题，而固碳减排是缓解或解决这一问题的唯一途径。森林是陆地生态系统中最大的碳库，根据联合国粮农组织发布的“世界森林状况报告”可知，全球森林累积面积在人为、自然灾害等破坏下持续减少，预示着森林正在发挥着碳源的作用，这主要是受到木材需求压力的胁迫。木材在物质循环过程中发挥着碳库和碳源的双重作用，经历着碳吸存-碳排放-碳储存-碳排放的过程。以往，人工林培育和林木生产力的提高缓解了森林的加速退化，以材积作为评价林木经营的标准，忽视林木固碳效应的最优化，而在后续的木材砍伐、运输、保管、加工、废弃等过程中也都忽视了木材的碳学特性及其带来的生态效应、社会效应和经济效应。

本书主要分析了木材碳储存的基本特性，探讨碳储量与木材宏/微观构造特征、物理化学特征和力学特征的相关关系，介绍木材碳储能原理及应用，解析高固碳量优质木材培育技术，探索木材固碳的延伸方法。结构上首先阐述木材碳学基本特性，其次与木材培育相结合拓展到应用，再次从多角度分析木材固碳减排的发展方向。内容上注重方法介绍和结果分析，学科交叉融合性强，与生产实际相结合，并引入国内外较新的研究成果和科学论点。本书可为建筑设计、木材加工工艺设计、木材加工设备配置、木材循环利用、木材保管、木材功能性改良等提供科学参考。全书共分为5个部分。第1章：绪论；第2章：木材碳素储存；第3章：木材碳储能与木质能源；第4章：人工林固碳增汇与优质木材培育技术；第5章：木材固碳的延伸。

本书由东北林业大学郭明辉、李坚和关鑫共同编写而成，分工如下：第4章和第5章由郭明辉编写，第3章由李坚编写，第1章和第2章由关鑫编写。在本书的相关研究过程中，得到了“十二五”国家科技支撑计划课题“大兴安岭森林资源高效利用关键技术研究”（课题编号：2011BAD08B03）、黑龙江省重点科技攻关项目“森林经营剩余物高效利用技术研究”（课题编号：GA09B201-07）、黑龙江省自然科学基金项目“木材的碳素储存与环境效应的研究”（课题编号：ZD200808-01）和教育部博士点基金项目“红松人工林及其木制品生物固碳与延展机制的研

究”（课题编号：20110062110001）的资助，在此对其大力支持表示衷心的感谢，同时对引用的期刊论文和著作的作者也表示由衷的谢意。此外，在本书编写过程中还得到宋魁彦、于海鹏、袁媛、秦磊、付纪磊、胡建鹏、李志勇、刘芳延等同志的大力帮助，在此谨向他们表示由衷的感谢！

鉴于作者水平有限，且第一次把木材碳学的相关内容编写成书，书中欠妥和疏漏之处难免，恳请得到各方面的批评指正和宝贵意见。

作 者

2011 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 木材碳学的研究对象和内容	1
1.1.1 木材碳学的研究对象	2
1.1.2 木材碳学的研究内容	2
1.1.3 木材碳学的研究现状和发展趋势	3
1.2 木材碳学的研究意义	6
1.2.1 全球气候问题概况	6
1.2.2 全球气候变化问题的解决方针	10
1.2.3 森林生态系统的源汇功能及潜力	11
1.2.4 木材的“多 R”特性与环境响应	14
参考文献	19
第 2 章 木材碳素储存	21
2.1 木材碳素储量的计量方法	21
2.1.1 燃烧法	21
2.1.2 树干解析法	23
2.1.3 树芯法	25
2.1.4 生长轮分析法	25
2.1.5 其他方法	26
2.2 木材碳储量与木材性质的相关性研究	26
2.2.1 木材碳储量	26
2.2.2 木材构造特征与碳储量	30
2.2.3 木材物理特征与碳储量	76
2.2.4 木材缺陷与碳储量	93
2.3 木材碳储量与木材性质相关性研究的意义	97
参考文献	98
第 3 章 木材碳储能与木质能源	99
3.1 木材碳储能	99
3.1.1 木材能量的形成	99
3.1.2 木材能量的利用	100

3.1.3 木材碳储量与木材能量	100
3.1.4 木材发热量的影响因素	102
3.2 木质能源	104
3.2.1 木质能源的特征	104
3.2.2 木质能源转化技术	105
参考文献	129
第4章 人工林固碳增汇与优质木材培育技术	130
4.1 中国主要人工林树种木材固碳量	130
4.1.1 人工林针叶材	130
4.1.2 人工林阔叶材	132
4.1.3 人工林针叶树材与阔叶树材固碳量差异分析	134
4.2 气象因子与木材固碳量的关系	135
4.2.1 日照时数	138
4.2.2 平均气温	141
4.2.3 平均地温	143
4.2.4 相对湿度	146
4.2.5 降水量	148
4.2.6 气候因子交互作用	151
4.3 立地条件与木材固碳量的关系	161
4.3.1 地理位置	162
4.3.2 地形因子	164
4.3.3 土壤条件	169
4.3.4 林分类型	173
4.4 培育措施与木材固碳量的关系	175
4.4.1 初植密度	176
4.4.2 抚育间伐	179
4.4.3 修枝	182
4.5 木材材质与木材固碳量的关系	185
4.5.1 木材解剖特征	185
4.5.2 木材物理特征	215
4.5.3 木材力学特征	235
4.6 高固碳量的优质木材培育技术	245
参考文献	246

第 5 章 木材固碳的延伸	249
5.1 木材保护处理	249
5.1.1 木材着色处理	250
5.1.2 木材防腐处理	256
5.1.3 木材防虫处理	258
5.1.4 木材阻燃处理	259
5.1.5 木材耐候处理	261
5.1.6 木材尺寸稳定化处理	262
5.1.7 木材强化处理	263
5.2 木质复合材料	267
5.2.1 混合复合方式	267
5.2.2 渗透（生成）复合方式	270
5.3 木结构建筑	273
5.3.1 木结构建筑的低碳性	273
5.3.2 木结构建筑的结构体系	275
5.3.3 木结构建筑的拓展应用	277
5.4 木材加工技术	277
5.4.1 制材	277
5.4.2 木材干燥	280
5.4.3 成板	284
5.4.4 表面装饰	286
5.5 木质资源循环利用	286
参考文献.....	288

第 1 章 绪 论

伴随世界经济的高速增长, 气候变暖严重影响了生态安全、人类健康和经济社会的可持续发展。为应对挑战, 国际社会积极建立物理、化学、生物的“高固碳”发展模式和低能耗、低污染、低排放的“低排碳”发展模式, 提倡发展低碳经济, 推进节能减排, 构建资源节约型、环境友好型社会。

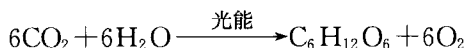
森林是陆地系统最大的碳素储存库, 森林的培育和利用构成木质资源循环型社会, 木质资源包括木材、竹材、藤本、灌木、作物秸秆等, 而木材以其巨大的资源量及良好的性能占据木质资源之首, 并在固碳减排战略中发挥重要作用。在物质循环过程中, 木材经历着碳吸存-碳排放-碳储存-碳排放的过程, 有效地增加碳吸存量、减少碳排放量、延长碳储存时间对保障生态安全、实现木材低碳加工和发展低碳经济具有重大意义^[1~3]。

木材碳学是研究木材与碳汇关系的一门科学, 是森林培育学、森林生态学、木材科学及木材保护学之间相互融合的交叉科学。其目的一是探明木材构造特征、物化特征和力学特征与木材碳素储存的规律, 为木材固碳减排研究奠定科学基础; 二是揭示木材的生物潜能, 将木质材料转化为洁净的高品位燃料, 以替代化石燃料用于电力、交通运输、城乡生活燃料等方面, 不仅可减轻人类对有限化石燃料资源的过分依赖, 而且能大幅度降低大气污染物及温室气体的排放, 利于能源安全, 保护生态环境; 三是研究气候因子、立地条件、培育措施和木材材质与木材碳素储存之间的关系, 确立速生、丰产、优质、高效的高固碳人工林的培育措施和栽培技术; 四是提出延展木材固碳的方式方法, 涉及木材加工、木质材料、木建筑、木质资源循环利用、生物质能等综合领域, 达到木材的高效、合理利用, 以生态安全、人类健康为前提, 构建最佳的木质资源循环型社会。

1.1 木材碳学的研究对象和内容

森林是与人和谐、保护地球生态系统的最重要的自然资源, 树木在生态效益中发挥着固定二氧化碳、氧气供给、水土保持等多种重要功能。树木的主体是木材(木质部), 也是树木全部生物量中碳素储存最多的寄存体, 其固碳机理主要是通过光合作用, 将大气二氧化碳转化为糖类、氧气和有机物, 再通过物质能量转换生成纤维素、半纤维素和木质素等高分子化合物, 从而为人类提供可再生的生物质和生物质能。

树木的光合作用公式如下：



可见，构成木材的主要元素有 C、O、H 三种，其中，C：50%，O：42.6%，H：6.4%，碳素含量相当可观，这既是木材被认可为陆地生态系统最大碳库的原因，也决定了木材碳学在全球碳汇研究中的重要地位。

研究对象和研究内容是构建木材碳学的基础，决定木材碳学的主体构架。因此，阐明研究对象和研究内容对木材碳学的建立和发展具有积极作用。

1.1.1 木材碳学的研究对象

木材碳学围绕木材开展一体化研究，具体研究对象如下：

- (1) 木材碳素储存量与构造特征、物化特征和力学特征的相关关系；
- (2) 木材碳素储存量与木材储能的响应关系；
- (3) 人工林木材固碳增汇与优质木材培育技术；
- (4) 木材资源循环利用的技术方法。

木材碳学的研究涵盖基础理论研究和应用技术研究，依托基础理论研发应用技术，完善碳汇知识体系的同时实现巨大的生态效益、社会效益和经济效益。

1.1.2 木材碳学的研究内容

木材碳学的研究内容主要包括 4 个方面。

第一，木材碳素储存量。选择人工林红松（针叶材）和人工林杨木（阔叶材）为试材，首先研究木材宏/微观构造特征（边材和心材、生长轮、早材和晚材、管胞/导管、木射线、树脂道/树胶道和轴向薄壁组织）与木材碳素储存量的相关关系；其次研究木材物化特征（密度、热学性质、电学性质、声学性质、光学性质、纤维素、半纤维素、木质素和抽提物）与木材碳素储存量的相关关系；再次研究木材力学特征（压缩强度、拉伸强度、抗弯强度、抗剪强度、扭曲强度、冲击强度、硬度和抗劈力）与木材碳素储存量的相关关系；最后研究木材缺陷与木材碳素储存量的相关关系。此研究内容为碳汇树种的优选提供科学依据，为生物能源开发技术奠定理论基础，同时优化高固碳量人工林木材培育模式。

第二，木材碳素储存量与木材储能。木材储能的化学能可转化为热能和机械能。选择木炭、木质压缩燃料和木煤气为对象，研究木材化学能与热能的转化率及其对木材碳素储存量的响应；选择生物乙醇和生物柴油为对象，研究木材化学能与机械能的转化率及其对木材碳素储存量的响应。此研究内容揭示木材作为生物质能源材料的巨大潜力，从而推动生物质能源材料替代化石燃料的进程。

第三，人工林木材固碳增汇与优质木材培育技术。试材为人工林针叶材（落

叶松、红松和樟子松)和人工林阔叶材(大青杨、桉树、泡桐和大叶相思),首先研究气象因子(光照、温度、湿度和降水量)与木材碳素储存量的变异规律;其次研究立地条件(地理位置、地形因子、土壤条件和林分类型)与木材碳素储存量的变异规律;再次研究培育措施(初植密度、抚育间伐、修枝、施肥和灌溉)与木材碳素储存量的变异规律;最后研究木材材质(解剖特征、生长速率、生长轮宽度、生长轮密度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度、顺纹抗拉强度、顺纹抗剪强度、横纹抗压强度、抗劈力和冲击韧性)与木材碳素储存量的变异规律。此研究内容得出高固碳量优质人工林木材的培育模式。

第四,木材固碳的延展。主要从木材保护处理(防变色、防腐、防虫、阻燃、耐候、尺寸稳定性和强化)、木质基材料(实体木材、木质重组材料和木质基复合材料)、木建筑、生物质转化技术(生物燃料)、低碳加工设备(设备制造、动力来源、能源损耗、原料损耗、生产效率和加工精度)、木制品低碳加工技术(家具、人造板、装饰材料和纸类)和木材资源循环利用(能源材料、简易结构材料、包装材料、制浆造纸、艺术装饰和木质基复合材料)几方面来减少大气二氧化碳排放量、延长碳素储存期。此研究内容从应用的角度提出碳素减排策略,将木材碳学的研究从基础科学引向生产实际,实现木材碳学研究的真正价值。

1.1.3 木材碳学的研究现状和发展趋势

木材碳学是涵盖碳计量方法、林木培育固碳、木材低碳加工、木制品储碳、延长碳循环周期的一体化研究,具有科学研究和实际应用的双重价值,对减缓温室效应和发展低碳经济具有积极作用。

第七次全国森林资源清查数据显示,我国森林面积 1.95 亿 hm^2 ,蓄积量 137.21 亿 m^3 ;人工林面积 0.62 亿 hm^2 ,蓄积量 19.61 亿 m^3 ,反映出我国森林资源保护和发展依然面临森林资源不足、森林资源质量不高、碳素储备总量不足等突出问题。人工林是解决天然林和天然次生林日益减少的有效战略,同时扮演着固碳林和原材料林的双重角色,依托人工林研究木材碳学是备受全球瞩目的新的研究方向。

关于人工林木材碳储量计量方法的研究,国内外采用的碳储量计量方法主要有生物量法、蓄积量法、生物量清单法、涡度相关法、弛豫涡旋积累法、箱式法、干烧法、湿烧法、树木解析法、树芯法、IPCC 缺省法、储量变化法、生产法和大气流动法,估测对象为人工林、木材和木制品。人工林碳储量计量方法相对成熟,但还存在急需解决的问题:一是森林生态系统的复杂性,实测数据不够全面和完善,各种方法中使用的参数不一致,导致对估算结果不能做出正确的评价;二是受资料和数据限制,大多数采用静态平衡分析法,以及对某一点的静态

估计, 缺乏动态预测和评价。木材和木制品的碳储量计量方法存在的问题较多, 如对某一工业区或木制品加工厂碳排放量的估算, 启动节能减排措施后缺省值的选取, 不同节能减排措施的碳汇效应对比, 加工设备更新换代造成的碳排放量估算, 兴建、维护厂房等产生的碳排放量估算等^[4~6]。

关于人工林储碳量影响因素的研究, 人工林储碳量的影响因素有三种: 人类活动、自然条件和林分状况。人类活动包括人口密度、土地利用变化和植被变化、人工林经营和管理 (林分组成、人工林结构、抚育间伐、整地、施肥、修枝等); 自然条件包括气象因素 (光照、温度、湿度、降水量、冰雹、降雪量等) 和地形因素 (海拔、坡度、土壤等); 林分状况包括森林类型、土壤类型和深度、林分密度和林龄、林下植被和枯枝落叶等。国内外学者的研究结果表明, 人工林经营管理能有效提高人工林质量, 增加碳素储存量; 自然条件中气候和雨量起着主导作用, 决定了树种的组成、林木的生长发育、木材的蓄积量等; 不同类型的人工林生态系统中, 乔木层、土壤层, 包括林下植被和枯枝落叶的碳储量均存在着一定差异。人工林是一个动态的复杂体系, 人类活动、自然条件和林分状况之间交互作用, 人工林碳储量与之存在动态的时空关系, 现阶段研究方法中存在大量的假设, 对科学问题缺乏全面考虑^[7~11]。

关于人工林木材和木制品碳储量的研究, 树木从采伐时起终止对大气二氧化碳的固定, 并成为碳排放源, 碳排放不单指树木自身分解释放的碳, 也包括因而发生的碳排放 (化石燃料燃烧)。树木在采伐过程中产生的木屑、落叶、枝杈等在细菌、真菌等微生物的作用下腐烂分解, 一部分碳沉降到土壤中, 一部分碳以二氧化碳的形式排放到大气中, 此部分碳排放量相对较少, 通常在研究中忽略不计。依据木材材质的差别, 采伐得到的木材进入不同的物质循环过程, 主要有薪炭材、建筑材料、家具材料、家装材料、饰面材料、工程材料、纸质材料等, 在产品加工、使用、消耗过程中产生的碳排放均记为树木的碳排放量, 这主要有运输、机器制造、机器运转、木废料燃烧、产品损毁、产品废弃、产品消耗等。为了便于估算和横向对比, 通常采用 IPCC 缺省法进行估算。树木转化为木制品时进入碳封存期, 认为碳零排放, 此阶段时间越长越好, 但任何木制品都存在使用寿命, 寿命终止便进入碳排放阶段。目前对木制品的使用寿命还没有一个统一的标准, 通常认为薪炭材为 1a, 纸和纸板类为 20a, 实体木材为 40a, 但这只是一个平均值, 以纸张为例, 清洁纸卷的使用寿命为 14~15d, 报纸在日光和空气中只能保存几个星期, 牛皮纸的使用寿命不超过两年, 而无酸纸的使用寿命通常在 200a 左右^[5]。木制品的使用寿命与碳封存期密切相关, 较长的使用寿命也是对固碳减排的一种贡献。使用寿命对固碳减排的贡献在木材学界再次掀起木材保护研究热潮, 主要研究内容有木材防腐、木材阻燃、木材防潮等, 在技术方面已经形成较成熟的理论体系, 但同样存在使用寿命评定标准的问题。

关于延展人工林木材及木制品碳储量的研究,提高碳储量的途径主要有以下几个方面:人工林合理经营、人工林合理采伐、木材保护处理、创生生物质复合材料、木建筑及建筑木构件、生物质转化技术、木制品低碳加工技术和木质资源循环利用。木材的腐朽过程即为木材释放碳素的过程,通过木材防腐、木材耐候、木材强化等技术进行处理可有效延长木材的储碳期,目前关于木材保护技术的研究比较成熟,但是关于保护技术与木材储碳期相关性的研究还未涉及。生物质复合材料是扩展木材应用范围的有效手段,木材的使用量与二氧化碳排放量成负相关关系。木建筑和木构件的固碳减排效果超出其他建筑材料,平均一栋面积为 136m^2 住宅中储存的碳,木结构住宅固碳量 6t ,钢筋混凝土住宅固碳量 1.6t ,钢筋预制板住宅固碳量 1.5t 。生物质转化技术使木材转化为能源材料,替代部分化石能源,从而有效降低二氧化碳的排放量。木制品的需求量逐年增加,为减缓其加工过程排放的二氧化碳量,主要从动力来源、能量损耗、原料损耗、生产效率、加工精度等几方面考虑。木质资源循环利用,除了将其用于加工能源物质、纸张、板材外,还可作为包装材料及装饰材料使用。人工林木材固碳减排的强化措施已部分应用于生产生活中,但其与木材碳储量相关关系的定性和定量研究还未深入开展,木材的无限使用和任意开发并不能保护生态安全,只有平衡资源开发与资源利用间的关系才能合理有效地保护生态和人类的安全。

木材碳学已经成为国际前沿热点科学问题之一,人工林木材固碳减排效益日趋显著,但还需要对以下几方面进行深入研究。

(1) 木材碳储量计量方法研究。从人工林木材构造特征入手,借助计算机视觉分析系统,细化人工林木材碳储量动态变化研究间隔,同时提高计量效率和准确度;

(2) 木材碳储量的基本规律研究。人工林木材宏微观构造特征、物化特征和力学特征与其碳储量的相关回归分析,为木材碳储量变异性的研究奠定基础,进而指导人工林经营管理与木材加工利用;

(3) 人工林木材碳储量与生物质能的潜在关系研究。探索不同生物质能转化技术的排碳量和能量转换率,为指导人工林木质资源循环利用提供重要的基础理论依据;

(4) 优质高固碳量人工林木材培育技术的研究。考虑综合因素对人工林木材储碳量和材质的影响,根据用材的需要,建立合理的经营培育模式,指导人工林的生产;

(5) 人工林木材固碳减排强化措施的有效性研究。定性分析和定量研究人工林合理经营、木材保护处理、创生生物质复合材料、木建筑及建筑木构件、生物质转化技术和木质资源循环利用对人工林木材固碳减排的作用,从而实现木材碳学研究的现实意义。

1.2 木材碳学的研究意义

1.2.1 全球气候问题概况

从喜马拉雅冰川的悄然融化到南极冰架的轰然崩塌,从中国南方的雨雪冰冻灾害到中国北方的严重干旱,从澳大利亚森林大火到日本里氏 9.0 级地震,一场场灾难引发全球对气候问题的空前关注,气候问题成为 21 世纪最热门的话题之一。

南极 Law Dome 冰芯资料显示 CO_2 等温室气体的浓度与全球气候变化具有同步性,说明温室气体是引发气候变化的原因。温室气体的排放主要是受自然因素和人为因素所致,自工业革命以来,人类活动(化石燃料燃烧和森林砍伐)向大气中排放的温室气体是扩大温室效应的主导因素,其中以 CO_2 和 CH_4 的排放为主,此外,1860~2000 年间气候演变模拟数据也表明此期间的气候变化主要由人类活动引起^[12-13]。

气候问题的产生破坏了生态系统的平衡,增加极端天气的发生频次,威胁经济社会健康发展和国际安全,因此引发国际社会对气候问题的高度关注。为减缓或消除气候变化对人类社会健康发展的制约,1992 年 6 月 11 日,在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会上签署了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC),于 1994 年 3 月 21 日正式生效,此后每年召开一次缔约方大会。1997 年,149 个国家和地区的代表在日本东京召开缔约方第三次会议,会议通过了旨在限制发达国家温室气体排放的《京都议定书》,规定到 2010 年所有发达国家排放的 6 种温室气体的数量要比 1990 年减少 5.2%,其中污染大国美国减少 7%,欧盟和日本分别减少 8%和 6%,发展中国家没有减排义务。2001 年达成了《波恩政治协定》和《马拉喀什协定》,同意将造林和再造林碳汇项目作为第一承诺期的合格 CDM 项目类型。2005 年《京都议定书》正式生效。2007 年中国对外发布《中国应对气候变化国家方案》,2008 年八国集团峰会就温室气体长期减排目标达成一致。由于温室气体的减排战略牵动国家发展动脉,决定国际竞争优势地位,因此固碳减排成为各国政治、经济、科技和外交的综合较量。

1.2.1.1 全球气候变化趋势

工业革命后,随着人类活动的加剧,特别是化石燃料(煤炭、石油等)的消耗量不断增长和森林植被的大量破坏,二氧化碳等温室气体的人为排放量不断增长。政府间气候变化小组 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第三次报告指出,最近 12 年(1995~2006 年)中,有 11 年位列最暖的 12 个年

份之中。最近 100 年（1906～2005 年）的温度线性趋势为 0.74°C [$0.56\sim 0.92^{\circ}\text{C}$]^①，这一趋势大于《第三次评估报告》给出的 0.6°C [$0.4\sim 0.8^{\circ}\text{C}$] 的相应趋势（1901～2000 年）。全球温度普遍升高，在北半球高纬度地区温度升幅较大。陆地区域的变暖速率比海洋快。自 1961 年以来，全球平均海平面上升的平均速率为每年 1.8mm [$1.3\sim 2.3\text{mm}$]，而从 1993 年以来平均速率为每年 3.1mm [$2.4\sim 3.8\text{mm}$]，海平面上升的主要原因是热膨胀及其冰川、冰帽和极地冰盖的融化。已观测到的积雪和海冰面积减少也与变暖相一致。从 1978 年以来的卫星资料显示，北极年平均海冰面积已经以每十年 2.7% [$2.1\%\sim 3.3\%$] 的速率退缩，夏季的海冰退缩率较大，为每十年 7.4% [$5.0\%\sim 9.8\%$]。南北半球的山地冰川和积雪平均面积已呈现退缩趋势。1900～2005 年，在北美和南美的东部地区、北欧和亚洲北部及中亚地区降水显著增加，但在萨赫勒、地中海、非洲南部地区和南亚部分地区降水减少。在 20 世纪下半叶，北半球平均温度很可能高于过去 500 年中任何一个 50 年期，并可能至少是过去 1300 年中平均温度最高的 50 年^[14]。

全球气候变暖后，不仅气候平均值会发生变化，自然系统也受到影响，积雪、冰和冻土变化使冰川湖泊的数量和面积增加，使山区和其他多年冻土区的土层不稳定性增加；由冰川和积雪供水的河流中径流量增加，春季最大流量提前；春季事件的发生时间提前，植物生长和动物活动范围朝着两极和高海拔地区推移；藻类、浮游生物和鱼类大量繁殖。

1.2.1.2 气候变化的影响

气候变化的影响具有全球性、长远性、不确定性和潜在性。气候变化威胁人类的生存发展、转变人类价值观、影响国际合作关系，因此应对气候变化问题已转变为国际社会的政治和经济问题，其对世界政治、经济秩序的调整和能源发展产生巨大影响。

1. 气候变化威胁人类生存发展

人类生存发展依托于健康的生态系统，气候变化扰乱生态系统的平衡，进而引发粮食、水资源、自然灾害、人类健康等一系列变化。

粮食安全受到挑战。气候变化引发温度、降水量、自然灾害、土壤、病虫害等多种因素的异常波动，进而制约农业生产。温度和降水的反常变化、干旱和洪

① 方括号内的数字表示某个最佳估值的可能性为 90% 的不确定区间，即：该值可能大于方括号内给出范围的可能性估计为 5%，而该值低于这一范围的可能性为 5%。不确定性区间并不一定是对应于某个最佳估值的前后对称值。

涝等自然灾害发生频次和强度的增大、土壤肥力的下降和病虫害的流行等导致粮食生产的不稳定性加剧,产量波动很大。据中国农业和气候科学家的最新研究,气候变化可能导致中国三大主要粮食作物(水稻、小麦和玉米)产量持续下降。此外,粮食生产的不稳定性、产量下降和格局调整还会影响世界粮食的贸易和价格,加重粮食供应问题,引发潜在的政治和安全危机。

水资源危机。气候变暖加速冰川、冻土和积雪的消融和缩减,提高河川径流量和水位,虽然短期能够增加水资源供应,但长期将使水资源逐渐枯竭。气候变化带来水环境和水生态安全问题,温度升高易引发蓝藻和富营养化等问题;降水量减少和径流减少会降低水的自净能力,诱发疾病;海平面上升则威胁沿海地区和低洼浸水地区的地下水蓄水层。这些问题为水资源管理带来巨大的挑战,需加强节约用水、污水处理、防洪工程体系和防护堤坝的建设和投入。

自然灾害频发。气候变暖引发的自然灾害主要有水旱灾害、气象灾害、海洋灾害、生物灾害和森林草原火灾等。20 世纪的观测数据显示,气候变化引起的自然灾害(厄尔尼诺、干旱、洪涝、雷暴、冰雹、风暴、高温天气和沙尘暴等)出现频率和强度明显上升,直接危及国民经济发展。此外,由于气候变暖导致冰帽融化,释放出地壳中被抑制的压力,引发地震、海啸和火山喷发。英国地质学家也指出全球气候变暖已经影响着地震、火山喷发和灾难性海底滑坡的发生频率。

人类健康和居住环境受到威胁。气候变暖产生的系列变化给生态系统、渔业资源、旅游资源、基础设施、民居和公用建筑带来巨大威胁,制约国家和地区的可持续发展。预计未来,伴随海平面的上升和侵蚀,沿海和低洼地区将大面积被淹没。此外,疾病发生和传播的机会增大,直接危害人类健康。

2. 气候变化促进人类价值观的转变

汲取了现代工业文明带来的教训,人类有必要重新思考现有的生产生活和消费方式,近年来对环境伦理的探讨,对生态赤字的关注,对绿色 GDP 的推动和低碳经济发展模式的提出等集中反映出人们对生产生活方式的深刻反思和价值观的深层次变化,这为人类从工业文明转向生态文明奠定了重要的思想基础。

气候变化引发人类的归因认识。大量事实表明人为温室气体浓度增加引发气候问题,因此减缓气候变化的关键和难点是如何解决全球温室气体排放。温室气体排放是各国的独立行为,但后果要全球共同承担。控制全球温室气体排放除了依靠科技进步和创新外,还要确立真正的有约束力的国际气候合作协议,实现对大气温室气体排放的全球性管理。而受各国利益的驱使,要达成真正有约束力的国际协议具有很大的难度。

气候变化重塑人类对合作、公平、伦理的认识。解决气候变化的关键是实现全球合作,这涉及人与人之间的伦理关系问题和国际国内间的公平问题。世界各

国通过《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 对合作、公平和伦理问题达成了共识, 即人类必须以文明的生产生活方式实现人与地球生物圈的和谐共生以及不损害后代人的可持续发展环境。在公平的国际气候合作应对机制下, 发达国家和发展中国家对全球环境承担共同但有区别的责任, 在合作的基础上谋求集体理性的气候问题解决之路。

气候变化影响国家政治和社会管理。全球气候合作应对机制为各国制定了国内气候治理的目标或行动义务, 这既需要各国调整对国内经济活动的干预力度和手段; 反过来国内各经济部门和利益集团为了各自目的, 在此问题上以强大经济实力和社会影响力为后盾, 影响政府的决策过程。

3. 气候变化影响国际合作关系

解决全球气候变化问题离不开世界各国的合作, 而国际气候制度的创建和运行必将带来国家利益的重新调整和分配。全球气候变化问题促进了发达国家与发展中国家的合作与对话, 同时彰显出发达国家和发展中国家在环境伦理、平等权利、气候责任、减排义务和损害补偿方面的分歧和对立。

气候变化促成国际公约。气候变化的全球性导致世界各国协作的必然性, 《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 和《京都议定书》就是主要成果之一, 《联合国气候变化框架公约》确立了国际气候合作的最终目标, 并为缔约方共同实现该目标确立了包括共同但有区别的责任原则、充分考虑发展中国家的具体需要和特殊情况原则、环境风险防范原则、促进可持续发展原则等基本原则和规范, 指导缔约方开展国际气候合作的纲领性文件。《京都议定书》相当于在减缓气候变化方面对《联合国气候变化框架公约》的具体实施和补充, 为发达国家缔约方控制温室气体排放规定了更加细化并具有强制力的承诺义务。

气候变化影响国际外交。气候变化合作制度的建立和实施包含着非气候问题的主观因素, 如国家利益、国际形象、国内外政治压力、文化因素和其他战略考虑, 因此必须通过政治和外交手段来协同各国之间的关系和利益取向。世界各国围绕气候变化问题的复杂互动深刻影响着当今世界的国际关系和国际政治格局。

气候变化影响国际贸易。国际气候制度促进国际碳排放权交易, 碳排放权贸易是发达国家之间的双边或多变交易, 是灵活的减排机制, 可有效促进发达国家内部及与发展中国家之间的碳减排合作, 增强碳减排的成本有效性, 同时对国际技术和资金流向产生重大影响。