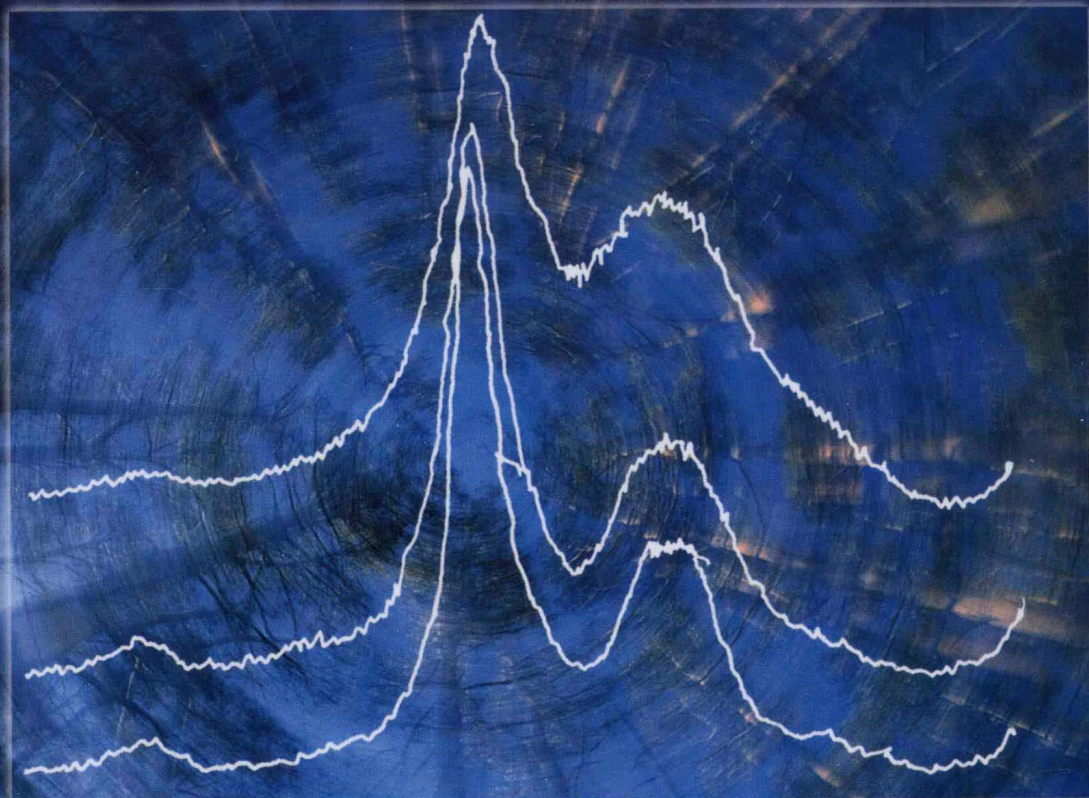


李坚 邱坚等著



# 气凝胶型木材的形成与分析



科学出版社  
www.sciencepress.com

# 气凝胶型木材的形成与分析

李 坚 邱 坚 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书针对气凝胶的某些制约其商业应用的缺点,以气凝胶型木材形成机理的科学问题为核心,基于树木天然生物结构,阐述制备具有多种功能的气凝胶型木材的方法:采用现代测试分析方法全面分析木材的天然生物结构和物理特性,并与气凝胶进行比较,筛选具有气凝胶基本结构属性的木材,运用超临界流体技术等先进手段,对选定木材进行结构参数调控,将其制成兼备气凝胶材料和天然木材双重优良特性的气凝胶型木材。并通过对气凝胶型木材重要基础理论和关键技术原理的多视角研究和分析,获得了针对科学问题的规律性认识,所提出的气凝胶型木材新理论、新方法体现了“师法自然”的科学思想。

本书可供木材科学与技术、木材功能性改良等领域的研究人员、工程技术人员和高等院校有关师生学习和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气凝胶型木材的形成与分析 / 李坚 邱坚等著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-029188-2

I. ①气… II. ①李… ②邱… III. ①气凝胶-木材-形成 ②气凝胶-木材-分析 IV. ①S781

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 197091 号

责任编辑: 周巧龙 刘 冉 / 责任校对: 邹慧卿

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2010 年 10 月第一次印刷 印张: 22

印数: 1—1 500 字数: 428 000

定价: 78.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

气凝胶是迄今所知的世界上密度最小的凝聚态固体材料，具有纳米结构独特、介电常数低、声阻率高和隔热功能异常强大等许多特殊的性质，可以应用于许多特殊的场合。由于气凝胶自身存在着高度的松脆性、易碎性和吸湿性等缺点，其应用受到限制。一些轻质木材的某些性质与气凝胶比较接近，因此，可“师法自然”地以木材为基质，采取先进的加工方法，制备形成一种新型木质基复合材料——气凝胶型木材。这种材料兼有木材和气凝胶的双重优良特性：①保留有木材优雅的天然生物结构；②具有木材色、香、质、纹等优良的生态学属性和环境学特性；③克服了原本气凝胶松脆、易碎的缺点，从而扩大了气凝胶的应用范围，可在某些场合代替人工合成的气凝胶材料。

木材是一种天然的有机高分子聚合物，其细胞壁中含有纳米结构单元，与加入的无机/有机微纳米元素形成的复合物将赋予木材新的功能，从而可以根据需要制备多种木材纳米复合材料，以顺应 21 世纪“纳米科技”的发展态势。

鉴于学术创新的理念，积多年来耕读之实践，编撰此书，期盼与全国同仁共勉。

全书共 10 章，由李坚、邱坚等合著。具体分工如下：第 1 章，李坚、邱坚；第 2 章，高景然、邱坚；第 3 章，高景然；第 4 章，王成毓、高景然；第 5 章，高景然；第 6 章，高景然、王成毓；第 7 章，邱坚、李坚；第 8 章，李君；第 9 章，赵晓虹；第 10 章，李秀荣。

本研究及本书的出版得到国家自然科学基金重点项目（30630052）的资助，诚致谢忱。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2010 年 10 月

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 木质材料的研究及其在低碳经济中的作用</b> .....	1
1.1 木质材料的研究和发展趋势 .....	1
1.2 木质材料在低碳经济中的作用 .....	3
1.3 林木生物量的固碳与低碳加工的必然性 .....	10
1.4 木质材料和制品的科学保护与利用 .....	18
1.5 木材保护研究的问题与思考 .....	29
参考文献 .....	31
<b>第 2 章 气凝胶的性质与气凝胶型木材的制备构想</b> .....	33
2.1 气凝胶的性质及应用 .....	33
2.2 木材细胞壁的结构与气凝胶型木材 .....	37
2.3 木质材料的新生长点和有待深入研究开拓的问题 .....	41
2.4 气凝胶型木材的国内外研究现状和应用前景 .....	43
2.5 气凝胶 A 型木材的制备构想 .....	44
2.6 木材/无机气凝胶复合材料的工艺学原理 .....	46
2.7 木材/有机气凝胶的制备构想 .....	58
参考文献 .....	59
<b>第 3 章 轻质木材的相关特性</b> .....	62
3.1 基材的基本解剖构造 .....	62
3.2 基材的基本物理性质 .....	71
3.3 气凝胶的性质和构造及其与轻质木材对比分析 .....	73
参考文献 .....	76
<b>第 4 章 木材细胞壁的润胀及气凝胶 A 型木材的制备</b> .....	78
4.1 木材细胞壁的润胀 .....	78

4.2 气凝胶 A 型木材的制备	92
参考文献	100
<b>第 5 章 气凝胶型木材的超临界干燥</b>	<b>101</b>
5.1 超临界流体技术的原理	101
5.2 超临界流体技术的应用	102
5.3 超临界流体技术在木材工业中的应用	104
5.4 木材干燥的常用方法	107
5.5 超临界流体干燥特性与干燥原理	111
5.6 山黄麻素材的超临界干燥实验	113
5.7 轻木处理材的超临界干燥实验	120
参考文献	123
<b>第 6 章 气凝胶 A 型木材</b>	<b>125</b>
6.1 气凝胶 A 型木材的微观构造	125
6.2 气凝胶 A 型木材的形成机理	127
6.3 气凝胶 A 型木材的力学性能	128
6.4 热学性能检测	133
6.5 声学性能检测	134
6.6 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析	137
6.7 X 射线衍射分析	138
6.8 结论	138
<b>第 7 章 木材/无机气凝胶复合材</b>	<b>141</b>
7.1 木材/SiO <sub>2</sub> 气凝胶复合材的制备工艺	141
7.2 木材/SiO <sub>2</sub> 气凝胶复合材的微观构造	164
7.3 木材/SiO <sub>2</sub> 气凝胶复合材的性能评价	182
7.4 木材/SiO <sub>2</sub> 气凝胶复合材的复合机理研究	197
7.5 总结与展望	216
参考文献	220
<b>第 8 章 木材/有机气凝胶复合材</b>	<b>223</b>
8.1 有机气凝胶和木材/有机气凝胶复合材概述	223
8.2 间苯二酚-甲醛气凝胶/木材复合材的制备及其性能	228

---

8.3 轻木/三聚氰胺-甲醛气凝胶复合材的制备和性能测定与分析 .....	236
8.4 超临界 CO <sub>2</sub> 处理对轻木和木棉浸注性的影响 .....	241
参考文献 .....	245
<b>第9章 基于木材化学结构制备纤维素气凝胶 .....</b>	<b>248</b>
9.1 纤维素的超分子结构与性质 .....	248
9.2 纤维素的解结晶化 .....	255
9.3 纤维素化学研究的新焦点 .....	260
9.4 纤维素气凝胶的基础理论与制备方法 .....	268
参考文献 .....	287
<b>第10章 气凝胶型木材环境学特性分析 .....</b>	<b>291</b>
10.1 气凝胶型木材环境学特性的研究内容及指导思想 .....	291
10.2 气凝胶型木材表面的视觉环境学特性 .....	294
10.3 气凝胶型木材的触觉环境学特性 .....	308
10.4 气凝胶型木材地板的步行感特性 .....	318
10.5 气凝胶型木材的空间声学特性 .....	325
10.6 气凝胶型木材表面超疏水性 TiO <sub>2</sub> 涂层的制备与分析 .....	332
参考文献 .....	340

## 第1章 木质材料的研究及其在低碳经济中的作用

亘古以来，人类的生活就与木材息息相关。现代建筑的室内装饰，都表明人与木材的紧密联系。随着生活质量的逐步提高和对回归自然的不断追求，人们越来越希望在生活空间中更多地使用木材和木质复合材料。这是因为木材具有其他材料无法比拟的生态学属性和环境学特性。木材具有天然的生物结构和良好的视觉特性、触觉特性、听觉特性及调节特性，由木材构成的空间可以调节室内小气候，可进行生物生存和心理感觉的调节，给人以舒适感。

木材制品和木质材料构成的人类生活环境，除了给人们一种自然感觉和美的享受外，还有益于人们的健康及更好的休憩和娱乐。住宅是修养和“充电”的场所；工作单位是劳动和“放电”的场所。居室内导入何物会对人们的身心健康有利呢？可以肯定地说，首选物件就是木材，木材有益于健康。木材依树种不同，具有不同的香气与色调。例如，花柏的香味很浓，用花柏建造的居室，因其散发出来的松烯类化合物，可在几年内不见蚊子靠近；松木有消炎、镇静、止咳等作用；杉木会刺激大脑而使脑力活动更活跃；银杏对治疗高血压有益；白桦具有抗流行性感胃之功效；冷杉和杜鹃能杀灭黄色葡萄球菌等。总之，木材的视觉和嗅觉特性使人感到舒服，木材中含有的挥发成分或抽提物质具有抗菌和杀菌作用，有利于人体健康。因此，在木材和木质材料构成的居室中生活，可得到“人+木=休”的效果。

### 1.1 木质材料的研究和发展趋势

天然生物质资源在蓄积量和生产量上是一切物质资源中最巨大、最恒久的，千万年来一直是维持人类生存和发展的主要物质基础之一。木材、农业剩余物（秸秆）、竹材是我国分布广、蓄积量大的天然资源。我国的木材蓄积量约130亿 $\text{m}^3$ ，天然的大径级木材资源已比较紧张，而低质木材及加工剩余物的利用率却不足20%；农作物秸秆的产量达到7亿 $\text{t/a}$ ，工业利用率仅为1%左右，大量的秸秆在农田里焚烧，火光和浓烟严重污染了空气环境，甚至对民用航空安全造成影响；我国是世界上主要的产竹国，每年可砍伐毛竹约5亿根，各类杂竹300多万吨（相当于1000万 $\text{m}^3$ 以上的木材资源量）。可见，农业剩余物和竹材是我国极为丰富的重要天然生物质资源，亟待进行科学经营和高效利用。



天然生物质资源符合资源利用的“3R 特性”，即可再生（regeneration）、可再利用（reuse）、可循环利用（recycle），是可持续发展的绿色资源，这一点是石油、煤炭等终将枯竭的资源无法与之相比的。天然生物质资源的另一突出优点就是它独有的生物体亲和性与环境友好性，符合人类日益增长的健康和环境文明的需求。对天然生物质资源的生物学与环境学特性的追求已成为后工业化时代的一个显著标志。

目前，天然优质林木资源已被过度开发，剩余资源用于保护水土流失和维持生态平衡的意义远重于利用，今后加工利用的重点是对低质木材、人工速生丰产林和加工剩余物的深度开发；竹材、农作物秸秆产量巨大，可作为木材的替代原料，但还无法直接应用到人们的生活环境中，需要研究其有效利用的途径。可以预见，间伐材、速生材等劣质材和竹材、农作物秸秆将是今后相当时期内生物质资源供应的主要来源，这决定了以它们为基础的新型材料的出现依然是复合与功能性改良，而原料的形态与特性又决定了复合是主要的利用方法。因此，采用生物质资源与非生物质资源的复合，创造出新的、能满足人们需求的高性能生物质复合材料是一个主要研究发展方向。

开发新的生物质复合材料将注重追求以下特征：①材料来源具有天然生产性和可持续性；②复合后能够提高产品的附加值，有高性能、多功能的特点，适应低碳产业的要求；③具有木质材料优良的生态学属性和环境学特性；④复合后的材料应用前景好，对天然的、不可再生的资源（如化石类材料）具有补充、替代作用。从生物质复合材料的应用性来看，由于其同时具备可再生、可持续利用，多功能化、高附加值，生物体亲和、环境友好的特点，完全满足 21 世纪对材料的功能性、环保性及可持续利用的要求，必将获得广泛应用，产生深远的社会影响和巨大的经济效益。

21 世纪，全球木材供给量仍少于需求量，因此更有必要创生一些高性能、多功能、高附加值的新型材料，来满足人类生活和社会发展的需要。其中，木质复合材料既可弥补各自的缺点，又可实现木质资源的高效利用，将备受青睐。按木质材料自身复合或其他材料复合的形态，一般分为三种类型：层积复合、混合复合和渗透复合。有关复合方法、产品性能及应用价值等内容详见科学出版社 2008 年出版的《生物质复合材料学》一书。

经过各类复合形式制得的各种木质复合材料比原本木材具有更多的优良性能，并可按照人们的意愿和它的用途，改良天然木材固有的缺点或赋予木材新的功能，提高木材的使用价值，实现低质材的优化利用。因此在人类面临资源和环境挑战的 21 世纪，研制开发多种新型的木质复合材料，对实现木质资源的低碳加工和高效利用、保护生态环境和促进社会持续发展均有重要意义。木质复合材料的开发无疑是 21 世纪人类普遍关注的、不断创新和发展的主题之一。

## 1.2 木质材料在低碳经济中的作用

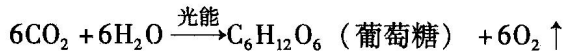
森林是与人和谐、保护地球生态系统的最重要的自然资源。树木在生态效益中发挥着固定 CO<sub>2</sub>、供给氧气、保持水土、益于健康等多种重要功能。构成木材的元素主要有 50% 的 C，43% 的 O 和 6% 的 H，可见木材是一个巨大的碳素储存库，是一种无公害、节能源、可再生、可循环利用的生态型材料。

木材取于自然，用于人类。作为家具、纸张、住宅之用，与人类活动、居住环境息息相关。木材基复合材料越来越受到关注，以这种方式加工、利用木材也是固定和储存碳素、提高生态效益的有效途径。

### 1.2.1 碳素的形成

树木是一种生命体，在生长过程中形成木质部（木材），这是生物质的主体。二氧化碳由光合作用转化成糖类，而糖类聚合成高分子化合物——纤维素和半纤维素，即形成木材的主要高分子物质，为人类提供了可再生的永续利用的生物物质原料和生物质能。

树木的光合作用反应式如下：



正是光合作用使树木吸收的 CO<sub>2</sub> 以有机物的形式储存起来，固定在树木的各个部分，木材是树木全部生物量中碳素储存最多的寄存体（碳汇）。据文献 [1] 记载，通过光合作用，树木每生产 1t 生物质（纤维素等）就要吸收 1.6t CO<sub>2</sub>，释放出 1.1t O<sub>2</sub>，可固定约 0.5t C，见示意图 1-1。

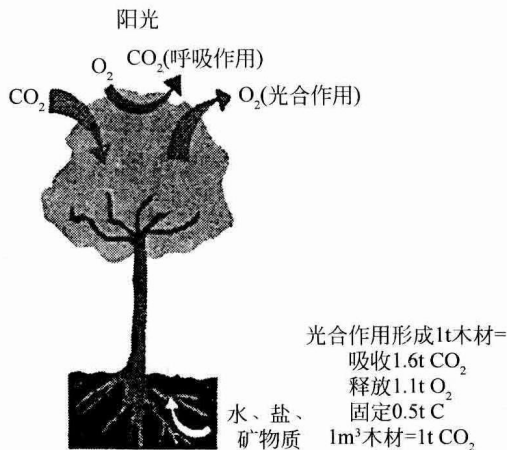


图 1-1 树木碳吸收示意图

### 1.2.2 木材利用及其生态意义

相对于疆土而言,我国的森林资源比较贫乏,森林覆盖率仅相当于世界平均水平的61.52%,居世界第130位。由此林木的碳素储备总量不足,从维护生态平衡角度出发,须特别注意碳素的“储存库”——木材的科学保护与科学利用,以减少温室效应,维护生态安全。温室效应是由温室气体产生的,而二氧化碳是所有温室气体中数量最大、影响最直接的因素。树木生长中吸收的 $\text{CO}_2$ 以木材的形式予以固定和储存,木材是林木生物量中储存碳素量最大的生物质。保护和利用木材,减少 $\text{CO}_2$ 排放具有十分重要的生态意义。

#### 1. 木质材料与制品的防护

由于木材具有独特的自然美感和环境学特性,所以常常用来制作室内家具和日常生活用品,装饰人居空间和建筑房屋;以木材为原料的各种加工形式制得的人造板、纸张广泛地应用于人类生活的各个部门。木材制品及各种林产品则是将林木生长吸存的碳继续固定和储存,对这些产品须予以科学管护,以延长木材及林产品的使用年限并使其循环利用,减少或避免因这些材料所储存的碳以各种形式回归大气而导致的 $\text{CO}_2$ 浓度增加和温室效应。

当木材、木质材料和制品燃烧或腐朽时,原本被封存在其中的以有机物形式储存的 $\text{CO}_2$ 又会被释放出来,所以木材的阻燃处理和防腐处理是十分必要的。世界上科技发达的国家非常重视木材防护技术的研究与开发。美国每年的木材防腐处理量为1800万~2000万 $\text{m}^3$ ,相当于每年减伐林木4000多万 $\text{m}^3$ ;新西兰每年处理量约为270万 $\text{m}^3$ ;英国约为230万 $\text{m}^3$ ;美国、英国和新西兰年处理量分别占木材消耗量的15.6%、20%和43%。我国年防腐处理木材约为60万 $\text{m}^3$ ,约占木材消耗量的0.3%,说明木材防护能力很低。并且每年约有60%的商品木材未被立即加工利用,要经过夏季储存,其中又有40%的木材遭受真菌的腐蚀和虫蛀,严重影响木材品质和使用寿命。木材的阻燃处理量与木材消耗量相比更是微乎其微。木材燃烧不仅消耗资源,危害安全,更重要的是木材燃烧时,将储存的碳素又以 $\text{CO}_2$ 等气体的形式排放到大气中,加剧破坏自然界的生态平衡。因此必须提高木材防护意识,加强木材阻燃和防腐处理能力,优化木材防腐、阻燃等防护处理技术。

此外,我国每年的废旧家具、木制品、包装物、房屋更新、城市园林和经济林木修枝等废旧木材不低于3000万t,利用潜力很大,要采取科学方法,有效地循环利用,以减少对环境的污染。

## 2. 发展生物质复合材料

除木材外,我国每年收获的农作物秸秆约在7亿t左右,也是陆地植物体中储存碳素最多的物质之一。因此,应将木材的科学防护与利用扩展到农作物废弃物等全部生物质。以前对这类生物质的工业利用率很低,绝大部分弃掉或焚烧,燃烧时所释放的烟雾严重危害环境,甚至妨碍航空安全;燃烧过程是将生长时储存的碳素又转换成 $\text{CO}_2$ 气体排放的过程。这样导致本来是碳汇的生物质转变为碳源,使我国的碳汇能力越发不足。

对废旧的木材、加工剩余物和农作物秸秆等生物质的利用,国内外开展了大量的研究工作,重点着眼于新型生物质能和生物质复合材料。

生物质能是由植物的光合作用固定于地球上的太阳能,最有可能成为21世纪主要的新能源之一。据统计,植物每年储存的能量约相当于世界主要燃料消耗的10倍,而作为能源的利用量还不到总量的1%。这些未加工利用的生物质,一部分可以通过生物能转换技术发展成为新的能源,以代替石油、天然气和煤炭等传统燃料,一部分可以与相应的材料复合研制新型生物质复合材料等。

有关以木材为主体基质研制创生的复合材料已在国内外取得诸多进展,如木材与芦苇(野生植物)复合、木材与聚合物复合、木材与金属复合、木材与无机物复合,以不同形态、不同组合方式和加工工艺制成具有不同功能的木质复合材料。如木材/塑料复合材可提高原本木材的尺寸稳定性,木材/金属复合材可赋予木材电磁屏蔽功能,木材/无机物复合材可提高木材的阻燃性和抗生物危害性等。木材或生物质复合材不但可以使低质木材、小径材、废旧木材及农业剩余物得以高效利用,而且具有鲜为人知的生态效应。木材、木质材料和生物质资源经复合加工后,能使碳素进行再次固定和封存,并且在整个加工过程中减少 $\text{CO}_2$ 的排放,从而减轻“温室效应”,这是对人类生存环境的贡献。

## 3. 木结构住宅与人居环境

木材是公认的人类永续利用的生态材料,同时在加工时也比其他某些建筑材料所需能源小,碳素排放量少。例如,人工干燥制材(密度 $0.50\text{g}/\text{cm}^3$ )、钢材和混凝土制造时,其能源消耗分别为 $3210\text{MJ}/\text{m}^3$ 、 $266\ 000\text{MJ}/\text{m}^3$ 和 $4800\text{MJ}/\text{m}^3$ ,制造时碳素排放量顺次为 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $5320\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $120\text{kg}/\text{m}^3$ 。

根据资料记载,比较木结构(木造)、钢筋混凝土结构(RC造)和铁骨预铸结构(S造)住宅,楼板面积均为 $136\text{m}^2$ ,通过计算得出,不同结构材料建成

的住宅在制造时碳素排放量为：木造住宅 5140.0kg，RC 造住宅 21 814.7kg，S 造住宅 14 743.0kg，详见表 1-1（参见王松永编著的《木质环境科学》一书）。对比分析表明，无论何种结构的住宅，木材和木质材料（人造板）的碳素排放量最低，在三种结构形式的住宅建筑中，木结构住宅在各种建筑材料中综合碳素排放量最低，说明木结构住宅与环境友好，更适宜居住、学习和工作。世界上一些发达国家和木材资源丰厚的地区，很注重采用木结构形式建造住宅、别墅和公共、公益性场所，增加人居空间的木材拥有量。木材和木质材料具有独特的环境学属性，除长久固定碳素、净化空气外，还具有对室内建筑物理环境的调节功能：调节室内温度和湿度。实验结果表明，夏季木质板墙体住宅的最高室温比对照住宅要低 2.4℃左右，冬季室温日变化比隔热墙住宅缓和，且高出 3~4℃，夜间室温较高。木材具有吸湿与解吸特性，具有对室内微环境的湿度调节作用，因而有利于营造舒适的居住环境。室内环境湿度是影响住宅舒适性的主要因素所在。

表 1-1 不同结构建筑的住宅主要用材在制造时的碳素排放量（地板面积 136m<sup>2</sup>）  
（单位：kg）

材料		木造	RC 造	S 造
木材 制品	制材品	1 282.0 (24.9)	234.6 (1.1)	293.6 (2.0)
	胶合板	260.3 (5.1)	425.3 (2.0)	199.6 (1.4)
	合计	1 542.3 (30.0)	659.9 (3.1)	493.2 (3.4)
钢材		792.6 (15.4)	7 067.8 (32.4)	8 817.1 (59.8)
混凝土		2 805.1 (54.6)	14 087.0 (64.6)	5 432.7 (36.8)
总计		5 140.0 [1.00]	21 814.7 [4.24]	14 743 [2.87]

注：（）内为各种构造、各种材料的碳素排放量对全碳素排放量的比例（%）；

[ ] 内为以木造（传统轴组结构法）的碳素排放量为 1，各种构造碳素排放量与其之比。

木结构建筑及用木质材料装饰的人居环境与其他建筑结构相比，由于建筑材料所产生的氡元素辐射明显减少，有利于人体健康。氡对人体的危害表现在：氡裂变时放射出  $\alpha$  射线，对生物体组织有电离作用，可使人的支气管上皮组织染色体突变而引起肺癌。因此应该降低和控制微环境中氡的浓度。据文献报道，不同材料结构的住宅，氡浓度大小顺序为：砖混结构 > 钢混结构 > 砖木结构 > 木结构，如表 1-2 所示。可见砖混结构和钢混结构住宅中，氡元素辐射浓度平均值最高，而木结构的最低，其值为  $(6.8 \pm 3.2) \text{ Bq/m}^3$ 。

表 1-2 不同结构形式的住宅中氡的辐射浓度

住宅结构	样品数	范围/(Bq/m <sup>3</sup> )	平均值/(Bq/m <sup>3</sup> )
木结构	4	3.7 ~ 20.1	6.8 ± 3.2
砖木结构	16	5.5 ~ 21.2	12.7 ± 4.2
砖混结构	20	11.9 ~ 48.5	18.3 ± 9.4
钢混结构	20	7.3 ~ 41.2	16.0 ± 7.8
地下室	16	22.4 ~ 167.2	74.3 ± 29.5

在砖混结构和钢混结构的住宅内，为减少氡元素辐射对人体的损害，在房屋装修时，要多用木材薄板、人造板等木质材料进行贴面处理。在墙壁、屋顶和地面的装饰设计时，要尽量采用一定厚度的木质材料。

### 1.2.3 提升和发挥碳汇功能的途径

树木生长的主要产物是木材，碳素储存有相应的生命周期。从林地上植树造林开始到树木砍伐（轮伐期因树种和用途不同而异）是树木的生长阶段。树木在生长期内，将吸收的 CO<sub>2</sub> 借其生命力在体内以碳素加以固定，随着树龄的增加，其储存量增加，树木生长到一定年限后要进行采伐、制材、加工和利用。假定制材后的锯材被用来制作木结构住宅用材，此时，树木中所储存的碳素会保持在该状态下继续储存于住宅用材之中，使用数十年后，这些住宅解体，废旧木材和木质材料可加工成碎料，由这些碎料再加工制成碎料板，这些板材又可作为家具材制作成家具而使用。此间，碳素又被家具材料储存起来。家具使用若干年后，废旧解体而被弃掉。期间，树木在生长过程中所储存的碳素又全部回归自然。在木材加工和使用过程中，会产生碳素损失，特别是采伐和加工剩余物，未再利用的部分（废弃物）会将储存的碳素释放。

综上所述，在木材生产和加工利用过程中，碳素储存在发生着变化，碳汇在不同阶段有相应的生命周期。详见王松永报道的研究结果，如图 1-2 所示。

该研究设定，柳杉造林后 50 年采伐，作为木材，加工成建材用于建筑住宅（制材利用率 60%），供住宅使用 33 年后，住宅被废弃，其中 60% 的废旧木材被再次加工成人造板（利用率 80%），而被用来制造家具再次使用，家具使用 17 年后废弃。只有了解和掌握碳素储存在各个阶段的生命周期及其从植树造林到木材使用完结全过程的变化，才能有力、有节、有效地保证碳素储存数量，提升和发挥树木的碳汇功能。其影响环境复杂，制约因素交错，综合起来，应通过合理经营、合理采伐和合理利用等途径来增加树木的碳汇容量。

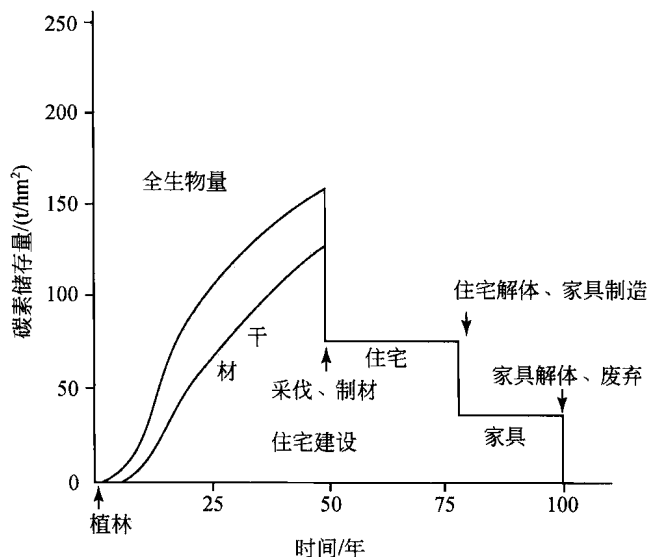


图 1-2 1hm<sup>2</sup> 柳杉树木生长期间和加工利用过程中碳素储存变化示意图

现有森林资源的经营管理目标应该是高产、优质、高效和可持续发展。森林作为陆地最大的生态系统，在陆地生物量的碳素储存库中占有重要地位。处于良好经营状态下的森林能够良好地提高林木的碳吸收速度和固碳能力。因此要根据树木生长规律，采用先进的科技手段，实行集约经营，高质量地增加森林蓄积量，这就等于增加森林碳汇容量，使林木更有效地吸收 CO<sub>2</sub>，从而降低大气中 CO<sub>2</sub> 浓度。

天然林是我国森林资源的主体，是森林生态系统的主要组成部分。全国天然林面积 1.16 亿 hm<sup>2</sup>，蓄积量为 105.93 亿 m<sup>3</sup>，占森林蓄积的 87.56%，要科学地实施保护，防止森林火灾和人为毁坏，以保护好现有天然林的碳素储量。

我国人工林面积为 0.53 亿 hm<sup>2</sup>，居世界首位。应在人工林生长到可采伐树龄期间，加速其生长，实现高产优质，增加其碳素储存能力。我国每年造林面积均在 600 万 hm<sup>2</sup> 左右，实行科学经营，将有力地增加碳汇容量的潜力。

树木从幼龄到成熟，要历经十几年、数十年的时间，因树种、生长条件和培育措施而异，其生命周期也是树木吸收 CO<sub>2</sub>、将其转换成有机碳并固定在生命体内的过程。通常将这一过程称为碳沉降。

据资料记载<sup>[1]</sup>，从造林起，当树木生长达到最旺盛时期，单位时间内森林形成的碳沉降增量达到最大。当树木生长达到成熟期，立木蓄积量达到最大，而碳沉降已减至最低点，此时碳素储存量却达到最高值；进入成熟期时，碳沉降的增

量为零，而此时森林碳汇作用在一段时间内保持最大，但随着时间的推移，林木健康状况可能慢慢变坏，碳汇作用将会逐渐消失，碳源（释放  $\text{CO}_2$ ）作用将会逐渐表现出来。据此，要准确、科学地按树木生长过程中碳沉降规律来确定轮伐期，这样以保证最大限度地增加碳汇容量。依据上述观点，最合理的轮伐期应该是，树木达到成熟期即可采伐，到了过熟期不采伐反而不利于碳素储存。在采伐作业中严禁过度采伐，注意采育结合和最大限度地发挥森林生态效益和综合效应。

树木采伐后，木材要以各种形式被加工和利用，用得最多的场合是作为建筑材、家具材和用于制造各种复合材料，从而由树木生长时所吸收、固定的碳素转换成在材料和制品中积蓄储存的碳素。但是碳素的储存是有一定生命周期的，因用途而有差别。一般说来，建筑用材储存碳素的周期为 30 ~ 50 年，或者更长；家具用材为十几年或更长时间，人造板等木质复合材料为 10 ~ 25 年，木材纤维和造纸用的材料储碳时间最短，数月或数年。国外研究者认为，木材产品的储碳周期总体上可认为是 10 ~ 30 年。因此在木材利用时，要根据储碳时间的长短，科学地进行加工，并注意循环利用，将其废旧材料作为能源进行加工利用，这样可以替代石油化工原料生产热量和电力，以此带来的  $\text{CO}_2$  减排效果是“一石三鸟”。当然切记，在生物质能源的开发利用上重点要着眼于我国储量十分丰富而工业利用率极低的那些生物质，即农作物秸秆和野生植物。需要说明的是，农作物和草本植物也有固碳作用，但固碳的生命周期很短，约 1 年左右。可见农作物等固定的碳素基本上处于自我循环状态。

据联合国政府间气候变化问题研究小组（IPCC）的气候报告指出：“即使采取措施减少  $\text{CO}_2$  的排放量，仍不能阻止气温继续上升的步伐，未来的气候前景非常暗淡。”科学家们首次将全球变暖由人类活动造成的可能性从 66% 提升到 90%。足以说明，保护生物质资源，将其科学地加工和利用，减排  $\text{CO}_2$ ，是对世界和人类的贡献。

综上所述，木材作为碳素固定和储存的载体，对减排  $\text{CO}_2$  和减弱“温室效应”，保障使用环境的气体净化和生态文明具有十分重要的意义，其潜力巨大，须引起木材科学与技术工作者的瞩目。在进行木材加工和利用的过程中，须进行科学设计和规划，实施科学防护和综合循环利用，体现木材应有的生态价值和多种效益；在现有森林的营护中，要保障树木在其生长最旺盛时期达到最大的碳汇容量，精心注意扩大和培育好人工林木，提升木材质量，以持续增加碳汇能力，让大自然赋予人类的宝贵财富——木材及林产品——发挥多功能、高性能，保障人们高质量的生活、学习和工作环境。



### 1.3 林木生物量的固碳与低碳加工的必然性

全球气候的极端变化与温室气体的排放有直接关联。森林作为地球上的四大碳源之一，加强其经营管护，提升林木生物量的固碳容量，对抑制“温室效应”具有至关重要的作用。木材是森林生物量的主要产品，是林木碳素储存的延伸，是保障人类生存环境和人体健康的绿色材料。它的后续加工、利用必须以“低碳经济”的视角，审视以往的加工行为，走固碳减排、节能降耗的低碳加工和高效利用之路。本节将就加强森林经营、重在生态建设、实施木材和木质材料的科学防护及采用各种利于碳素封存的低碳加工方法进行论述，旨在使人们更新传统观念，推动木材工业的低碳化进程，为我国低碳经济的发展做出新的贡献。

#### 1.3.1 二氧化碳排放与低碳经济

随着人类经济社会的飞跃发展，现代工业生产和生活方式造成了二氧化碳的大量排放，超量的二氧化碳是温室气体的主要成分，由此引发“温室效应”，导致全球气候变暖。统计资料记载，在 20 世纪的 100 年中，人类共消耗 2650 亿 t 煤炭、1420 亿 t 石油，同时排放出大量的温室气体，使大气中二氧化碳浓度由 20 世纪初的不到  $0.3\text{g}/\text{m}^3$ ，上升到目前的接近  $0.4\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[2]</sup>。

若不采取有效的应对措施，如此发展下去，预计在未来 20 年中，气温约将以 10 年  $0.2\text{℃}$  的速度升高。气温的不断升高，严重破坏自然生态系统，威胁地球上赖以生存的人类和生物体的安全。由此，在人类生产、生活及所从事的一切生命活动中，必须采取有效措施，坚持不懈地减少向大气碳库中排放二氧化碳等温室气体。今天，我国正处于工业化高速发展时期，能源消费处于“高碳消耗”状态。在人们重新审视以往的生产 and 生活方式的时候，当人们经历着气候的极端变化的时候，越来越多的企业和国民开始接受“低碳经济”的理念——转变经济发展方式的“低碳产业”的变革以及减少自然灾害，保障环境友好、人体健康的“低碳生活”。

所谓低碳经济，就是以低消耗、低排放、低污染为基础的绿色经济，以应对碳基能源对于气候变暖影响为基本要求，以实现经济社会的可持续发展为基本目的。低碳经济的实质在于提升和应用能效技术、节能技术、可再生能源技术、温室气体减排和储存技术，以促进产品的低碳开发和维持全球的生态平衡。这是从高碳能源时代向低碳能源时代演化的一种经济发展模式<sup>[3]</sup>。我国政府十分重视中国经济社会发展方式由高碳经济向低碳经济的转变。2007 年 9 月 8 日，胡锦涛总书记在 APEC 会议上，向与会各国提出“发展低碳经济，努力建设资源节约型、