

FUJIAN ZHONGYAREDAI

RENGONG KUOYELIN CAIZHI BIANYI GUILU JI YUCE YANJIU

福建中亚热带 人工阔叶林材质变异规律 及预测研究

林金国 著



化学工业出版社

FUJIAN ZHONGYAREDAI
RENGONG KUOYELIN CAIZHI BIANYI GUILU JI YUCE YANJIU

福建中亚热带 人工阔叶林材质变异规律 及预测研究

林金国 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以福建中亚热带人工阔叶乡土树种荷木、山枣、拟赤杨为对象比较系统地阐述了林龄、立地条件、伴生树种对其材性及其径向变异的影响规律；应用快速有序聚类分析进行幼龄材和成熟材的界定；应用统计回归方法对福建中亚热带人工阔叶林木材的基本密度、纤维长度、宽度、长宽比和微纤丝角进行预测，为福建中亚热带人工阔叶林材质定向培育和合理利用提供了科学依据，同时丰富了人工林材性变异规律的研究成果。

本书对于木材科学与技术、森林培育等相关学科的教学及科研工作者、大学生、研究生都具有重要的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

福建中亚热带人工阔叶林材质变异规律及预测研究/林金国著.
北京: 化学工业出版社, 2008. 5
ISBN 978-7-122-02666-8

I. 福… II. 林… III. 亚热带-人工林: 阔叶林-变异-研究-
福建省 IV. S718.54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 056908 号

责任编辑: 王 斌
责任校对: 陶燕华

文字编辑: 张林爽
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 8½ 字数 249 千字 2008 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

木材作为生态环境材料,具有其他材料所无法替代的优点。随着人们生活水平的提高,对室内外环境质量越来越重视,而由于木材对人居环境的极其友好性,对于木材的需求量越来越大。然而,由于世界性天然林资源的锐减,大力发展人工林已成为解决 21 世纪木材需求的根本措施。为了得到符合用途的优质木材,必须对未来人工林的培育进行集约栽培、定向培育。而要解决这个问题,只有在弄清人工林材性与培育和加工利用的关系的前提下,才能以材性为纽带,走营林和加工利用一体化道路,因此应着重研究人工林培育措施对木材品质的影响、木材生长过程中材质变异规律。人工林材质及其变异规律和预测的研究已成为森林资源结构转变之后木材科学的主要研究内容之一。

荷木、山枣、拟赤杨是福建中亚热带具代表性的优良速生乡土树种,也是很有发展前途的优良阔叶树种,其材质变异规律和预测的研究必将推动福建中亚热带人工林阔叶林材质定向培育技术的发展和木材合理高效利用的进程,具有十分重要的应用价值。本书以福建中亚热带人工阔叶乡土树种荷木、山枣、拟赤杨为对象阐述了林龄、立地条件、伴生树种对其材性及其径向变异的影响规律。第一,系统分析了林龄对福建中亚热带人工阔叶林木材密度、干缩性、导热性、力学性质、化学组分的影响;第二,系统分析了立地条件对福建中亚热带人工阔叶林木材密度、干缩性、力学性质、化学组分、组织比量、纤维形态、微纤丝角的影响;第三,系统分析了伴生树种对福建中亚热带人工阔叶林木材密度、干缩性、力学性质、化学组分、组织比量、纤维形态、微纤丝角的影响;第四,研究福建中亚热带人工阔叶林材性与生长间的相关关系;第五,根据福建中亚热带人工阔叶林木材基本密度、纤维长度、长宽比和微纤丝角的径向变异规律,应用快速有序聚类分析进行幼龄材和成熟材的界定;第六,以生长轮为自变量,用统计回归方法对福建中亚热带人工阔叶林木材的基本密度、纤维长度、宽度、长宽比和微纤丝角进行预测。

此研究项目得到福建省生物质材料工程技术研究中心建设项目、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划以及福建省自然科学基金、福建省教育厅科研基金的资助,在此深表感谢。书中研究成果是作者在徐永吉教授、陆继圣教授的深切关怀和悉心指导下进行博士论文研究过程中完成的。他们对本书的选题、实验研究及撰著工作各个环节给予了全面、具体的指导,倾注了大量的心血。研究过程还得到了福建农林大学杨庆贤教授、肖正福教授、林思祖教授等的热忱帮助与指导。在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请有关专家和广大读者不吝赐教。

作者

2008 年 4 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 人工林材质变异和影响因子国外研究现状	1
1.1.1 人工林材质株内径向变异的研究	1
1.1.2 遗传结构对人工林材质影响的研究	1
1.1.3 自然条件和培育措施对人工林材质影响的研究	2
1.1.4 人工林材质预测研究	3
1.1.5 人工林生长与材性性状间的相关研究	3
1.2 人工林材质变异和影响因子国内研究现状	4
1.2.1 人工林材质株内径向变异的研究	4
1.2.2 遗传因子对人工林材质影响的研究	5
1.2.3 自然条件对人工林材质影响的研究	6
1.2.4 培育措施对人工林材质影响的研究	7
1.2.5 人工林材质预测的研究	9
1.2.6 人工林生长与材性性状的相关研究	9
1.3 研究背景	10
1.3.1 福建省中亚热带的自然概况	10
1.3.2 福建中亚热带人工阔叶林发展概况	11
1.3.3 研究用阔叶乡土树种概况	11
1.4 主要研究内容	12
1.4.1 林龄对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	12
1.4.2 立地条件对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	12
1.4.3 伴生树种对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	12
1.4.4 福建中亚热带人工阔叶林材性与生长间的相关研究	12
1.4.5 福建中亚热带人工阔叶林材质预测的研究	12
1.4.6 福建中亚热带人工阔叶材显微及超微构造的 ESEM 观察与分析	13
1.5 本书研究的意义、特色和创新	13
1.5.1 适应森林资源结构转变木材科学的研究热点	13
1.5.2 为人工林材质定向培育提供依据	13
1.5.3 丰富人工林材质变异规律的研究	13
1.5.4 本书的特色和创新	13
第2章 木材材质因子测试与分析方法	14
2.1 试材采集	14
2.2 试样制备与测试分析方法	14
2.2.1 木材物理力学性质测定	14
2.2.2 木材化学组分测定	14
2.2.3 木材纤维形态测定	14
2.2.4 木材组织比量测定	15
2.2.5 木材径向基本密度的测定	15

2.2.6	微纤丝角的测定	15
2.2.7	木材热导率的测定	15
2.2.8	应用类比法推导木材热导率	16
2.2.9	木材显微及超微构造研究	17
2.2.10	数据分析	17
第3章	林龄对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	18
3.1	材料和方法	18
3.1.1	试验地概况	18
3.1.2	试验地调查测定取材	18
3.1.3	试验方法	19
3.2	结果与分析	19
3.2.1	林龄对荷木人工林材质的影响	19
3.2.2	林龄对山枣人工林材质的影响	23
3.2.3	林龄对拟赤杨人工林材质的影响	25
3.2.4	林龄对3种阔叶树种人工林木材导热性的影响	28
3.3	小结	33
第4章	立地条件对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	34
4.1	材料和方法	34
4.1.1	试验地概况	34
4.1.2	试验地调查测定取材	34
4.1.3	试验方法	35
4.2	结果与分析	35
4.2.1	立地条件对荷木人工林材质的影响	35
4.2.2	立地条件对山枣人工林材质的影响	44
4.2.3	立地条件对拟赤杨人工林材质的影响	52
4.3	小结	60
第5章	伴生树种对福建中亚热带人工阔叶林材质的影响	62
5.1	材料和方法	62
5.1.1	试验地概况	62
5.1.2	试验地调查测定取材	62
5.1.3	试验方法	63
5.2	结果与分析	63
5.2.1	伴生树种对荷木人工林材质的影响	63
5.2.2	伴生树种对山枣人工林材质的影响	72
5.2.3	伴生树种对拟赤杨人工林材质的影响	80
5.3	小结	88
第6章	福建中亚热带人工阔叶林材性指标间及其与生长性状间的关系	90
6.1	福建中亚热带人工阔叶林材性与生长性状的关系	90
6.1.1	荷木人工林材性与生长性状的关系	90
6.1.2	山枣人工林材性与生长性状的相关研究	91
6.1.3	拟赤杨人工林材性与生长性状的相关研究	92
6.2	福建中亚热带人工阔叶林材性指标之间的相关研究	93
6.2.1	荷木人工林材性指标之间的相关研究	94

6.2.2 山枣人工林材性指标之间的相关研究	98
6.2.3 拟赤杨人工林材性指标之间的相关研究	101
6.3 小结	105
6.3.1 福建中亚热带人工阔叶林材性与生长性状的关系	105
6.3.2 福建中亚热带人工阔叶林材性指标之间的相关研究	105
第7章 福建中亚热带人工阔叶林幼龄期界定和材质预测的研究	107
7.1 福建中亚热带人工阔叶林幼龄材与成熟材的界定	107
7.1.1 荷木人工林幼龄材与成熟材的界定	108
7.1.2 山枣人工林幼龄材与成熟材的界定	109
7.1.3 拟赤杨人工林幼龄材与成熟材的界定	109
7.2 福建中亚热带人工阔叶林生长轮材质预测	110
7.2.1 荷木人工林生长轮材质预测	111
7.2.2 山枣人工林生长轮材质预测	111
7.2.3 拟赤杨人工林生长轮材质预测	113
7.3 小结	114
7.3.1 福建中亚热带人工阔叶林幼龄材与成熟材的界定	114
7.3.2 福建中亚热带人工阔叶林生长轮材质预测	115
第8章 中亚热带人工阔叶林木材显微和超微构造的研究	116
8.1 扫描电子显微镜的材料处理	116
8.2 扫描电子显微镜观察	116
8.2.1 荷木人工林幼龄材与成熟材显微和超微构造差异	116
8.2.2 山枣人工林幼龄材与成熟材显微和超微构造差异	116
8.2.3 拟赤杨人工林幼龄材与成熟材显微和超微构造差异	116
8.3 小结	122
参考文献	123

第1章 绪 论

木材作为一种生物材料,具有其他材料所无法比拟的优点。随着人们环境意识、健康意识的增强,社会对于木材的需求量越来越大。但是,全球天然林资源日益减少,而人工林生长速度快、采伐周期短,逐渐成为工业用材林的最终取向(王恺,1999)。大力发展人工林是世界各国面对天然林和天然次生林日益减少所采取的共同战略,许多工业化国家和发展中国家都把大力发展人工林作为解决21世纪木材需求的根本措施,并制定了长期的人工林发展规划,以此来解决生态环境和木材供需之间的矛盾。人工林材性及其随林学因子的变异规律研究已成为森林资源结构转变之后木材科学的主要研究内容之一。许多国家投入大量的人力物力来进行人工林材性与培育和利用关系的研究,已取得了大量的研究成果。

1.1 人工林材质变异和影响因子国外研究现状

1.1.1 人工林材质株内径向变异的研究

尽管不同的试验结果显示一定程度的差别,但研究表明,木材密度株内径向变异有明显的规律性。Hernandez 等对安第斯桤木(*Alnus cremastogyneburk*)研究认为,木材的密度从髓心到树皮有直线增加的趋势,但不同地区在增加的数量上有所区别(Hernandez 等,1995)。例如,不同无性系的美国白杨纤维长度沿半径稳定增长;美国白杨(*Populus tremuloides Michx*)无性系间整个半径的木材密度有两种最明显的变化模式,即一是木材密度在近髓心处最高然后降低,最后稳定,二是木材密度沿半径稳定增长(Yanchuk 等,1990)。Muneri 研究了生长在津巴布韦的两个造林点的14年和25年生展叶松的管胞的树内变异,结果表明:25年生的树木比14年生的具有更长的管胞;两地点的管胞长度表现较大的差异;管胞长度随年轮增长而增长,管胞长度的径向增加约25%(Muneri 等,1998)。

据 Matti P. Saren 等的研究,挪威云杉(*Picea abies*)横切面的细胞腔形状从髓心到树皮从圆形变到长方形,管胞的长度也是随着与髓心的距离增加而加大;圆形指数随着年轮的增加而降低,圆形指数与距髓心的距离成函数关系;根据圆形指数,细胞内腔在近髓心处最接近圆形,随年轮数的增加变成长方形(Matti P. Saren 等,2001)。

Matti P. Saren 等用X射线衍射和光学显微镜研究了芬兰的4种挪威云杉[*Picea abies* (L.) Karst.]茎的早材细胞的大小和形状及细胞壁微纤丝角,从髓心起平均微纤丝角度减小而细胞的直径迅速增大至5~10年水平,随后保持在同样的水平。微纤丝角从靠近髓心的大于20°降至10年后的8°(Matti P. Saren 等,2001)。Lichtenegger 等研究了两种针叶树挪威云杉(*Picea abies*)、欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)和2种阔叶树英国栎(*Quercus robur*)、欧洲水青冈(*Fagus sylvatica*)的微纤丝角,4个树种的微纤丝角从髓心至树皮逐步变小,针叶树的微纤丝角一般大于阔叶树,挪威云杉晚材的微纤丝角大于早材;欧洲赤松则相反,早材的微纤丝角大于晚材(Lichtenegger 等,1999)。

1.1.2 遗传结构对人工林材质影响的研究

Byram 和 Tauer 等分别研究了美国阿肯色州和西海岸地区两地不同种源火炬松木材密度变异。种源间木材密度的变异因不同树种、不同试验而表现不同,在有些试验中表现出显著差异,而有些试验种源间差异却不显著(Byram,1988;Tauer,1990)。Miranda 等对葡萄牙蓝桉(*Eucalyptus globulus*)3个地点37个种源9年生的种源试验林研究的结果表明,来自澳大利亚的种源木材密度

显著受种源的影响,而不受地点的影响 (Miranda 等, 2001a)。但在 Wright 等对卵果松 (*Pinus oocarpa*) 和展叶松亚种 (*Pinus patulasub* sp. *tecunumanii*) 的种源试验 (Wright 等, 1989) 以及 Mugasha 等对卡西亚松 (*Pinus kesiya*) 和卵果松 (*Pinus oocarpa*) 的种源试验 (Mugasha 等, 1996) 研究中发现, 种源间木材密度没有显著差异。

Indira 等研究了生长在 India 两个地点的种子园的 18 个 14 年生的柚木 (*Tectona grandis*) 无性系木材密度的影响。无性系对木材密度的影响达到显著水平 (5% 水平), 没有发现地点和无性系之间的相互作用 (Indira 等, 1998)。Wright 对选自哥伦比亚 16 个地点 4 年生巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 无性系研究表明, 木材密度在无性系间差异显著 (Wright, 1993)。Donaldson 等对辐射松 (*Pinus radiata*) 16 年生的 11 个无性系 (插条来自 5 年生的树木) 的研究表明, 木材密度无性系间、无性系内单株间、年轮间有显著的差异。无性系和年轮的效应占优势。无性系间从髓心至树皮的变化趋势也有显著的差异。然而, 所有的无性系比同年龄的实生材密度低, 说明这些无性系的生理年龄效应来自 5 年生的树 (Donaldson 等, 1996)。Lima 对巴西 7 个巨桉 (*Eucalyptus grandis*) 无性系的研究中发现, 无性系间的变异在所有年龄中都相当大 (从 0.5 年的 7.5% 到 7.5 年的 4.2%)。无性系间、年龄间以及无性系与年龄的相互作用间的变异都显著 ($p=0.01$), 但无性系内的树木间的基本密度的变异不显著 (Lima, 2001)。Indira 等研究了生长在印度两个地点的种子园的 18 个 14 年生的柚木无性系木材密度的影响。无性系对木材密度的影响达到显著水平 (5% 水平), 没有发现地点和无性系之间的相互作用 (Indira 等, 1998)。Beaudoin 等对 10 个 9 年生杨树杂交种 [*Populus* × *euramericana* (*P. canadensis*)] 的研究表明, 无性系、单株间对木材密度有显著的效应 (Beaudoin 等, 1992)。Belonger 等报道, 在 49 个火炬松 (*Pinus taeda*) 自由授粉家系的遗传测定中, 家系间木材密度存在显著的差异 (Belonger 等, 1996)。Vargas Hernandez 等对在 1988 年夏天取自种在希腊的 60 个花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 15 年生的自由授粉家系的研究表明, 木材密度组成在家系间差异显著 (Vargas Hernandez 等, 1991)。

1.1.3 自然条件和培育措施对人工林材质影响的研究

Zobel 等合著的 “Wood Variation-Its Cause and Control” (Zobel, 1989 年) 中集中论述了木材变异的原因及其控制方法, 以及木材变异与自然条件和培育措施的关系。Todd F. Shupe 等研究了培育措施 (施肥、林分密度和修枝) 对湿地松人工林木材化学成分的影响以及心边材的差异, 结果表明: 抽出物含量随着林分密度的增大而增大, 木素、半纤维素和纤维素含量与林分密度没有明显的关系, 施肥使苯醇抽出物含量, 半纤维素和乙醚抽出物含量明显下降。修枝使苯醇抽出物和热水抽出物含量高, 边材的 Klason 木素、半纤维素和 α -纤维素含量提高 (Todd F. Shupe 等, 1996)。Isabel Miranda 等研究了立地条件对 7 年生蓝桉木材密度的影响 (Isabel Miranda 等, 2001), 结果表明立地条件对桉树木材密度影响极显著。Roger E. Hernández 等研究了 11 个不同地区、不同纬度桉木木材的差异, 结果表明, 桉木木材密度明显随着地理位置的变化而变化 (Roger E. Hernández 等, 1995)。Håkan lindström 等研究了形成层年龄和生长条件对挪威云杉木材纤维角的影响, 结果表明挪威云杉木材纤维角与形成层年龄明显负相关并受生长条件的影响 (Håkan lindström 等, 1998)。Edward 等研究了间伐后火炬松人工林木材密度特征 (Edward 等, 1989), 认为间伐可提高木材的密度。Paul R. Blankenhorn 等研究认为经营策略和立地对杨树无性系木材密度的影响明显 (Paul R. Blankenhorn 等, 1992)。各国学者愈来愈重视人工林材性变异与生长培育的关系, 在充分研究人工林木材材性及其变异规律的基础上, 深入探讨林学因子对材性的影响规律, 试图通过培育措施来来提高材质。

一些研究认为, 种植地点对木材密度有显著影响。Belonger 等研究了 10 年生不同来源的 49 个自由授粉火炬松 (*P. taeda* L.) 家系的遗传测定林, 结果发现地点效应非常重要, 占木材密度变异的 56% (Belonger 等, 1996)。Indira 等对两个地点种子园的不同地方起源的 18 个 14 年生的柚木无性系木材密度变异也得到了地点对木材密度的影响极显著 (1% 水平) 的结果 (Indira 等, 1998)。Wilkins 等研究不同栽培措施 (对照、中耕+间伐、杀虫剂+中耕+间伐、除草+中耕+间

伐、施肥+中耕+间伐、施肥+除草+杀虫剂+中耕+间伐)对澳大利亚9.5年生巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林的木材密度的影响。结果表明,不同的营林措施对生长和木材密度有影响,可提高木材密度的11%和材积的270%(Wilkins等,1991)。Wilkins的另一个研究也有不同的营林措施对生长和木材密度有影响的结果(Wilkins,1990)。关于种植密度对木材密度的影响不同的研究结果不尽相同,有些研究影响显著,而有些研究却未发现种植密度对木材密度有显著影响。Carvalho等在巴西对16年生圭亚那乳桑(*Bagassa guianensis*)进行了4种不同的种植密度(3m×2m、3m×3m、3m×4m和4m×4m)的比较试验,结果表明,种植密度显著影响木材密度(Carvalho等,2001)。Sauter等对加拿大43~45年生的西部落叶松(*Larix occidentalis*)密度在270~4300株/hm²不同的立木蓄积水平的618样株的研究表明,间距最大的树木长得最快。但尽管胸径生长差异很大,不同种植密度间的木材密度却没有显著的差异(Sauter等,1999)。Beets等的研究发现,新西兰辐射松的木材平均密度、早材密度和晚材率与树木氮元素的状态有显著的相关(Beets等,2001)。以上研究表明,自然条件和营林措施显著影响木材密度。

1.1.4 人工林材质预测研究

人工林材质早期预测的研究受到广泛重视,目前,人工林材质的早期预测主要是应用材质性状与年龄的相关分析。通过相关分析,确定早期预测的可行性、早期预测的最佳年龄。Lima等用时间作为预测因子对巨桉(*Eucalyptus grandis*)木材密度的回归分析,无性系内的不同年龄之间的木材密度的相关性表明,除了0.5年的木材以外,其他相关性在统计上都很显著,用一个年龄的木材密度预测另一个年龄的木材密度是可能的(Lima等,2001)。Koga的研究表明,香脂冷杉(*Abies fraseri*)木材密度在幼年材与成熟材的相关是显著的。认为对于这个树种,幼年材的早材密度似乎是预测成熟材木材密度的最好参数(Koga等,2002)。在Miranda等进行的蓝桉(*Eucalyptus globulus*)37个种源3个地点的种源试验的研究中发现,全部种源木材密度的次序在采用7年和9年时的估计中相当一致。因而认为,在育种项目中木材密度的早期预测是可行的(Miranda等,2001b)。Vargas Hernandez等研究了60个花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)自由授粉家系15年生树木年龄与年龄的相关和木材密度及其组成的遗传控制的年龄变化,总密度及其组成成分在15年与它们各自的年幼时的性状有强烈的遗传相关,年龄和年龄的遗传相关比表型相关大(Vargas Hernandez等,1992)。

1.1.5 人工林生长与材性性状间的相关研究

Isabel Miranda等在3个地点9年生的蓝桉(*Eucalyptus globules* Labill)37个种源试验中发现,生长和密度之间没有相关关系(Isabel Miranda等,2001)。Miranda等在蓝桉(*Eucalyptus globulus*)3个地点37个种源的9年生树木的胸高断面圆盘的分析中发现,生长和木材密度间也没有相关,对7年生胸高木芯的分析也发现木芯生长与木材密度之间没有相关性(Miranda等,2001b)。Wright等在4年生的巨桉无性系上取样研究,木材密度与树高和每公顷材积的次序相关系数不显著,说明生长率(高和每公顷材积)与木材密度间无相关(Wright等,1993)。Hernandez等选择了99株安第斯桉木的树木样本来测定不同地区、同一地区不同海拔、不同树木的木材材性变化类型,结果表明,树高和胸径与木材性质之间没有相关性(Hernandez等,1995)。Sheriff等对扦插繁殖的辐射松5年生无性系的研究发现木材密度与地上部分生长或光合作用没有相关性(Sheriff等,1990)。LeiHua等的研究表明:红桉木(*Alnus rubra*)生长速度对于密度、纤维直径、生长轮中纤维或导管的比例等没有影响,而纤维长度、导管直径和射线比例与生长速度之间存在正相关,纤维壁的厚度、轴向的薄壁组织比例随生长速度的增加而稍微下降,提高红桉木的生长速度对于木材和纤维的品质不会产生太多的消极影响(Lei Hua等,1997)。

在另一些研究中生长与材性性状之间存在正相关。Williams等报道,火炬松自由授粉子代的木材密度与树高间表现微弱的正相关(Williams等,1994)。还有不少的研究结果表明,生长和木材密度之间表现负相关。巨桉(*Eucalyptus grandis*)7个无性系的试验中生长与木材密度性状呈负相

关 (Lima 等, 2001)。美国异叶铁杉 (*Tsuga heterophylla*) 的木材密度与径向的生长率呈负相关。当平均年轮宽度从 2mm 增加至 8mm 时, 平均木材密度从 $0.47\text{g}/\text{cm}^3$ 下降到 $0.37\text{g}/\text{cm}^3$ 。在高生长率下木材密度降低是因为早材宽度增加而晚材宽度保持不变, 导致晚材率降低 (DeBell 等, 1994)。Hylen 报道, 在欧洲云杉 (*Picea abies*) 28 年生的子代林 47 个自由授粉家系子代测定的试验中, 总密度和其组成都与高生长呈负相关 ($r_g = -0.51 \sim -0.68$) (Hylen, 1997)。

1.2 人工林材质变异和影响因子国内研究现状

研究所涉及的树种除大量针叶树种外, 阔叶树种主要有: 桉树、杨树、刺楸、樟树、白桦、水曲柳、紫椴、木麻黄、橡胶树和铜钱树等。研究所涉及的评价指标有: 木材物理性质 (包括生长轮宽度、密度、干缩性等)、木材力学性质 (包括顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、硬度、抗劈力、冲击韧性和握钉力等)、木材化学组成 (包括热水抽出物、苯醇抽出物、1%NaOH 抽出物、木素、戊聚糖和纤维素等)、木材解剖性质 (包括纤维长度、宽度、壁厚、腔径、组织比量、微纤丝角等)。

1.2.1 人工林材质株内径向变异的研究

1.2.1.1 木材密度的株内径向变异的研究

在径向变异上, 马尾松木材基本密度髓心附近较大, 由髓心向外递减至最小值后再缓慢增加, 并趋于稳定 (徐有明等, 1997a)。橡胶树 PR107 无性系株内木材基本密度径向上为“递增、稳定”的模式, 过熟期内木材密度降低 (徐有明等, 2002d)。火炬松木材基本密度存在着极显著的部位间差异, 各高度的径向变异总的规律是各部位木材基本密度随距髓心年轮数的增加而增大, 到一定年轮数后增加趋缓 (姜景民等, 1999a)。火炬松木材基本密度从髓心向外, 南北方向随年轮数的增加而减少, (方文彬等, 1995)。油松基本密度从髓心向外逐渐减到最小值后又递增; 最大值出现在髓心附近, 最小值位于第 10 生长轮附近 (徐有明, 1991)。长白落叶松木材由髓心至形成层, 基本密度迅速增大, 至第 20 轮后增幅变小 (段喜华等, 1997)。银杏木材年轮密度近髓心部位略大一些, 随着年龄的增加, 略有下降趋势, 之后呈平缓的生长状态 (费本华等, 2000a)。

樟树人工林木材基本密度髓心处稍大, 由髓心向外先稍递减而后递增, 再趋于稳定 (徐有明等, 2001a)。刺楸木材基本密度的径向变异自髓心向外以曲线形式缓慢减低, 用幂函数回归, 相关系数均在 0.8 以上 (刘盛全等, 1996a)。兰考泡桐基本密度从里向外呈抛物线或近抛物线变化, 属 Panshin III 型 (段新芳等, 1995a)。在木麻黄株内不同高度径向上, 木材密度自外到内均逐渐减小, 变化趋势大致相同 (林金国等, 1999a)。板栗木材年轮密度从髓心向外一直呈逐渐下降趋势 (费本华, 2000b)。铜钱树自髓心向外, 基部密度生长初期为递增状态, 约 14 年后变化趋于相对平稳, 后期略有下降趋势 (费本华, 1993)。

1.2.1.2 木材解剖特征株内径向变异的研究

纤维形态特征径向变异表现明显的规律性。纤维长度、纤维宽度、纤维长宽比由髓心向外迅速增加, 然后趋于稳定的变异模式。欧美杨 (姜笑梅, 1997a)、马尾松 (徐有明等, 1997a)、赤松 (金春德等, 2000)、池杉 (江泽慧等, 1994a)、水杉 (江泽慧等, 1994b)、长白落叶松 (邱肇荣等, 1996a) 等都表现相似的模式, 但不同的树种、不同的性状、不同的试验表现稳定的年龄不同。而赤松管胞长度、管胞长宽比 18 年后变化缓慢, 45 年后保持相对稳定; 管胞宽度 7 年后增加缓慢, 22 年后保持相对稳定 (金春德等, 2000)。杉木管胞长度、宽度和长宽比的径向变异模式在不同高度和圆周方位上大致相似 (长宽比在不同方位上除外)。不同年龄间管胞长度、宽度、长宽比差异均显著。管胞形态与年龄呈显著正相关 (姜笑梅等, 1997b)。人工林红皮云杉木材管胞长度达到稳定年龄为 17 年左右, 天然林约为 27 年 (徐魁梧等, 1997)。油松株内幼龄材与成熟材材性差异显著, 幼龄材浸提物含量高, 管胞长度短, 纤丝角度大, 管胞直径小, 基本密度稍大, 幼龄材的力学强度远小于成熟材 (徐有明, 1992)。15 个欧美杨无性系木材纤维长度的株内径向变异模式大

致相似,从第1年至第7年都迅速上升,但各无性系间径向变异模式仍有差异(姜笑梅等,1997a)。长白落叶松由髓心至形成层,管胞长度迅速增大,至第20轮后增幅变小(段喜华等,1997)。樟树人工林株内纤维长度径向变异由髓心向外递增,而后趋于稳定(徐有明等,2001b)。刺楸应拉木三区(应拉区,对应区和侧区)纤维长度的径向变异为“先递增,后保持平稳”模式,微纤丝角度的径向变异模式为“先递减,后保持平稳”模式,但三区由递增或递减向平稳过渡的年限不同(刘盛全等,1999a)。在径向,铜钱树木材纤维长度、宽度、长宽比都不同程度地随轮龄逐渐增加,约在14年后变缓(费本华,1994)。意杨木材纤维长度、长宽比径向表现为递增,8~10年后纤维长度趋于稳定,8年后长宽比趋于稳定(徐有明等,1994)。河北毛白杨纤维长度变异与树龄、树干高度及栽培环境等有关,幼龄期纤维长度随树龄增加迅速,12~14年生以后纤维长度达最大值后渐趋稳定,纤维长度(y)随树龄(x)变化可用 $y=1.0490+0.0377x-0.0006x^2$ 的回归方程表示(曾其蕴等,1990)。台湾杉的纤维长度由髓心至树皮有逐渐增加趋势(张丰吉等,1993)。

组织比量研究方面,在径向变异上,由髓心向外,三角枫纤维组织比量迅速减少,上下波动至13年生后,稳定减少,近树皮处又略有上升;导管比量的径向变异正好与之相反;木射线组织比量在径向保持恒定不变。根据组织比量径向变异,划分三角枫木材幼年期为13年左右,过渡期为13~17年(任海青等,1997)。刺楸木材组织比量变异因构造分子而异,木纤维比量自髓心向外逐渐减小,而导管比量变异模式基本上与木纤维比量变异完全相反,木射线组织比量变异较前两者要小得多(刘盛全等,1996)。

微纤丝角径向变异表现自髓心向外递减趋势。如水杉(江泽慧等1994b)、铜钱树(*Paliurus hemsleyanus* Rehd)(费本华,1995)、欧美杨(李火根等,1997)、银杏(费本华等,2000)和火炬松(徐有明等,1996)的研究。但不同树种不同研究的变异有差别,油松木材管胞次生壁 S_2 层的纤丝角径向变化由髓心向外,开始递减很快,13年后纤丝角度大小相对稳定(徐有明,1989)。长白落叶松木材管胞微纤丝角由髓心向外呈减小趋势,微纤丝角(y)与树龄(x)之间的关系为 $y=542.3742/x^{0.01}-503.332$ ($R^2=0.9045$, R 表示相关系数)。微纤丝角在不同高度变异模式为:在1.3m处,前40年迅速减小,而后趋于平缓;在3.3m和5.3m处,始终保持减小趋势(邱肇荣等,1996b)。三角枫微纤丝角由髓心向外迅速减小,至13年生后相对平缓,近树皮处又略有回升(任海青,1997)。刺楸木材微纤丝角自髓心向外逐渐减少,17年左右达最小值,以后又增加,纤维长度与微纤丝角度之间联系密切程度要比针叶材低得多,相关系数 $R=-0.5206$ (刘盛全,1996)。刺楸应拉木三区(应拉区,对应区和侧区)微纤丝角度的径向变异模式为“先递减,后保持平稳”模式,但三区由递增或递减向平稳过渡的年限不同(刘盛全等,1999a)。

1.2.1.3 木材化学组分株内径向的变异

马尾松纤维素含量由髓心附近递增到22轮处;木素、多缩戊糖和苯醇抽出物含量分别由髓心附近递减到树皮附近(徐有明,1997a)。湿地松纤维素含量由髓心向外呈递增的趋势,10年后趋于稳定;木质素、戊聚糖含量由髓心向外呈递减趋势,10~12年后变化缓慢。苯醇抽出物含量由髓心向外递减,至12年达最小值,而后呈递增的趋势(徐有明等,1993b)。樟树人工林株内其浸提物含量幼龄材与成熟材之间差异不显著(徐有明等,2001b)。

1.2.2 遗传因子对人工林材质影响的研究

许多学者的研究表明,木材密度在相同树种的不同种源间、家系间、无性系间和个体间存在不同程度的差异。

1.2.2.1 种群和种源对人工林材质影响的研究

湿地松种源间木材基本密度存在着显著差异(徐有明等,2001a)。湿地松种源间木材气干密度差异极显著,管胞长度、管胞宽度差异显著(姜笑梅等,2002)。耐寒火炬松种源间木材管胞长度、宽度、长宽比等7个性状特征的差异多不显著(徐有明等,2002a)。火炬松种源间木材径向、弦向全干干缩率和差异干缩3个性状差异显著,种源间纵向全干干缩率差异不显著(徐有明等,1998)。

火炬松 21 个种源间木材基本密度存在着显著的差异 (徐有明等, 1999a)。火炬松种源间纤维素、木质素含量无显著性差异, 戊聚糖、苯醇抽出物含量则差异显著 (徐有明等, 1997b)。火炬松和湿地松的基本密度和管胞长度在种源间表现出显著差异 (管宁等, 1993)。火炬松木材基本密度、管胞长度种源间差异显著, 基本密度随原产地由东向西呈增大的趋势, 美国分布区西南部分布着最大管胞长度的火炬松种源 (宋云民等, 1995a)。叶志宏、施季森等报道 8 年生 81 个种源间的杉木木材密度差异达到 1% 的显著水平 (叶志宏等, 1990)。李晓储等对杉木全分布区种源试验的木材密度进行了分析, 不同种源间木材基本密度有极显著的差异 (李晓储等, 1999)。杉木不同种源间年轮平均密度的径向变异曲线都存在一定的变异 (骆秀琴等, 1999)。杉木不同种源间的木材密度有明显的地理变异趋势, 呈现东西变异的趋势, 自西向东相对密度增加 (施季森等, 1993)。杉木地理种源间木材物理力学性质和纤维特征有较明显的变异, 木材化学组分的变异相对较小 (孙成志等, 1993)。马尾松幼龄材密度和管胞长度的变异主要来源于种源内, 幼龄材木材密度和管胞长度与产地纬度相关性不大, 无一定的地理变异规律 (周志春等, 1990)。马尾松木材相对密度和管胞长度在种源间、试验点间有显著或极显著差异, 相对密度具有从西南往东北增大的地理变异趋势, 与纬度和经度呈弱至中等强度的正相关 (徐立安等, 1997)。各种源白栎木材生长轮密度径向变异趋势基本相同, 种源间生长轮密度的平均值差异显著 (郭明辉等, 1999)。细叶桉和赤桉的基本密度及纤维长度在种源间均表现出显著差异, 纤维宽度差异较小, 变异从大到小的排序为: 木材纤维长度、基本密度、纤维宽度 (陆剑华等, 2000)。桉木木材基本密度和纤维长度种源间差异极显著 (王军辉等, 2001)。

1.2.2.2 无性系、家系对人工林材质影响的研究

美洲黑杨无性系的木材基本密度、纤维长度在无性系间的变异达极显著水平 (姜笑梅等, 1994)。意杨纸浆材无性系间木材化学成分含量差异显著 (徐有明等, 1993a)。橡胶树木材基本密度无性系间差异不显著 (徐有明等, 2002d)。群众杨纤维长、纤维宽、长宽比、纤维壁厚在无性系间存在显著或极显著的差异 (王克胜, 1995)。巨桉 8 个无性系间的材性差异达到极显著水平 (1%) (吴义强等, 2000)。桉木木材基本密度和纤维长度家系间差异不显著 (王军辉等, 2001)。品系对滩地杨树木材材性有较大的影响, 微纤丝角和主要物理力学性质差异均达显著和极显著 (刘盛全等, 2001)。6 年生美洲黑杨无性系的 S_2 层微纤丝角在不同无性系间存在显著差异 (李火根等, 1997), 油松优树子代林的微纤丝角在家系之间存在显著差异 (赵荣军等, 2000), 但 5 个杨树品系的微纤丝角无显著差异 (江泽慧等, 1992)。巴西橡胶树抗风品系和弱抗风品系间微纤丝角有明显差异, 抗风品系微纤丝角度较小, 弱抗风品系的微纤丝角较大 (郑兴峰等, 2002)。马尾松木材化学组分和基本密度在家系间的差异都达到了极显著水平 (周志春等, 2000)。毛白杨无性系间木材密度、纤维长度、宽度和长宽比差异极显著 (顾万春等, 1998)。刑新婷研究三倍体毛白杨无性系木材的热学性质表明, 热学性质在无性系间存在显著差异 (刑新婷等, 2000)。泡桐无性系间木材基本密度存在显著差异 (茹广欣等, 2001)。施季森等报道, 38 个杉木半同胞家系子代木材的平均气干密度表现出极显著的差异 (施季森等, 1987)。在李晓储等的研究中, 50 个杉木自由授粉家系间 12 年生的木材基本密度差异显著 (李晓储等, 1998)。

1.2.3 自然条件对人工林材质影响的研究

木材材性与其生长的气候条件关系密切, 红松木材管胞长度随温度增加而增长, 相关程度达显著水平; 管胞径向直径与降雨量、相对湿度、日照呈显著正相关, 与温度呈显著负相关; 管胞径与弦向壁厚和温度与相对湿度呈显著正相关; 胞壁率与温度呈正相关; 纤丝角与日照呈正相关, 与温度呈负相关 (郭明辉等, 2000)。

地理位置影响材性方面, 郭明辉分析不同地理位置的人工红松林木材质表明: 红松人工林木材质的优劣顺序为凉水、老山、方正 (郭明辉, 2001a)。不同产地杉木的微纤丝角变动在 $10.44^{\circ} \sim 16.73^{\circ}$ 之间 (肖绍琼等, 1992)。杉木人工林木木材基本密度和力学性质的产区间效应大于产区内效应, 产区间木材力学性质差异极显著, 产区内木材基本密度、端面硬度和径面硬度外的其他力学

强度指标差异不显著。杉木人工林木材基本密度从大到小的顺序为：边缘产区、一般产区、中心产区。纤维长度和长宽比的顺序为：一般产区、边缘产区、中心产区。纤维宽度的顺序为：中心产区、一般产区、边缘产区。一般产区杉木人工林木材各项力学强度较中心产区和边缘产区的稍高，中心产区和边缘产区的杉木人工林木材各项力学强度相近（林金国等，1999b；林金国等，1999c）。火炬松种源管胞形态特征存在着一定的地理变异模式，高纬度区种源引种到我国福建省区栽培，火炬松木材管胞长度、宽度、直径、长宽比、腔径比有增大的趋势，壁厚、壁腔比有减小的趋势（徐有明等，2000）。

立地条件影响材性方面，不同立地条件下红皮云杉人工林木材的基本密度和干缩性随立地指数增高而上升；3种立地指数下的顺压强度、抗弯强度和弯曲弹性模量均有极显著差异；立地条件对弯曲弹性模量影响最大，抗弯强度次之，对顺压强度影响最小（徐魁梧等，1998）。立地指数大，短周期工业材纤维宽度大，但纤维长度、纤维长宽比、木材基本密度减小（方文彬，1997）。滩地类型对72杨、63杨、69杨木材材性都有或大或小的差异，对63杨木材微纤丝角、基本密度、抗弯强度和干缩率差异显著（刘盛全等，2001）。栽植立地对融水种源幼龄材基本密度没有明显影响（李晓储等，1999）。

小地形影响材性方面，郭明辉等研究3种不同海拔高度白桦木材解剖特征表明：海拔高度对复管孔平均壁厚、胞壁率、壁腔比有显著影响（郭明辉等，2000）。不同坡向（阳坡和半阳坡）的长白落叶松木材的大多数纤维形态指标和物理、化学特征指标存在显著的差异（郭明辉等，2002）。同一地区阳坡比阴坡的杉木纤维角小（肖绍琼等，1992）。影响杉木人工林和湿地松人工林木材密度的坡相因子的重要程度依次为：坡形>坡位>坡度>坡向。坡形对杉木人工林和湿地松人工林木材密度的影响极显著，是最重要的坡相因子，坡位的影响显著；而坡向和坡度的影响不显著（林金国等，1998）。

淹水影响材性方面，与未淹水相比，长江滩地季节性淹水对69杨纤维形态特征影响不显著；对木材微纤丝角、木材密度、木材干缩率和力学性质影响均显著（刘盛全，1999）。汪佑宏等研究不同淹水程度对滩地枫杨组织比量等解剖特征影响表明：在径向上，淹水1个月和2个月的两组间，除导管比量变化趋势基本相反外，纤维比量、轴向薄壁组织比量和木射线比量变化趋势相似（汪佑宏等，2000）。

1.2.4 培育措施对人工林材质影响的研究

培育措施影响人工林材质方面，李坚等编著了《生物木材学》（李坚等，1993），鲍甫成、江泽慧等著有《中国主要人工林树种木材性质》（鲍甫成等，1998）。徐永吉等研究了间伐强度对北京杨年轮密度、基本密度、纤维形态和pH值影响。方文彬等研究了栽培措施对短期工业林（日本落叶松、湿地松、马尾松、杉木）材性的影响规律。刘盛全等发表了“人工林的发展和人工林材性与培育及利用关系学”（刘盛全等，1998）等系列文章。郭明辉、徐有明等均发表了人工林材质变异的系列文章。朱林峰等进行了初植密度对尾叶桉材性影响的研究（朱林峰，1995）。郭晓敏等针对森林资源结构变化引起的材性变异、材质下降等问题，提出应使“生态木材学”形成完整的理论体系并应用于实践，应深入研究各材质因子生长速度、培育措施、生长环境之间的关系，用生态措施和造林营林手段来控制木材生长速度和材质，走“按需培养”、“定向培育”的道路，培育出优质良材（郭晓敏等，1992）。本书作者对杉木、湿地松、木麻黄等树种人工林材性随培育措施的变异规律也做过一些研究，是本课题的工作基础。总的来看，国内研究涉及的培育措施有：树龄、初植密度和林分密度、施肥处理、间伐强度、林分结构等。

在初植密度和林分密度对人工林材质影响的研究方面，徐有明等的研究表明，初植密度对湿地松对其人工林木材管胞解剖特征、化学成分含量的影响没有达到显著水平（徐有明等，2002）。初植密度对红松人工林木材微纤丝角影响不显著，但对管胞长度、管胞直径、生长轮密度木材密度的影响显著（郭明辉，2001b）。栽植密度对72杨、63杨、69杨木材材性的影响因材性指标的不同而不同。对72杨、63杨、69杨来讲，栽植密度越大，微纤丝角、导管比量增大，纤维长度、木纤维

比量、木射线比量都减小,基本密度、抗弯弹性模量和抗弯强度也越小。72 杨和 69 杨受栽植密度影响较大,63 杨受栽植密度影响较小(刘盛全等,2001)。种植密度对湿地松和火炬松的各密度特征值径向变异模式的影响主要表现在变异曲线平均水平高低的变动,而对变异曲线形状的影响并不显著(文小明等,1996)。林分密度对南方型杨树各无性系木材的纤维素含量、纤维宽度、长宽比和抗压强度影响不明显;随林分密度增大,纤维长度有所增长,相对结晶度增大,气干密度、抗弯强度和弹性模量增大,而冲击韧性降低, S_2 层微纤丝角减少;林分密度对 S_2 层微纤丝角有显著影响(曹福亮,1994)。不同造林密度 I-63 杨木材密度存在极显著差异(李大纲等,1994)。林分初植密度对杨树人工林木材多数解剖性质无显著影响;不同品系杨树在不同栽植密度下主要解剖特征的径向变异趋势基本相同;栽植密度越大,基本密度、抗弯弹性模量和抗弯强度越小,干缩率越大(刘盛全,2000)。5~6 年生尾叶桉人工林种群密度对木材纤维宽度的影响达显著水平;对木材气干密度和木材纤维长度影响不显著(黄宝灵等,2000a)。不同造林密度对 6 年生尾叶桉木材纤维宽度、导管分子长度的影响达显著水平;对木材气干密度、木纤维长度影响不显著(黄宝灵等,2000b)。聂少凡等研究认为:影响人工杉木林木材纤维形态、化学成分各因素的重要程度从大到小依次为林龄、地位指数和林分密度(聂少凡等,1998a)。影响人工杉木林木材力学性质的主导因子是林龄,其次是立地条件,林分密度影响最小(林金国等,1997)。林龄与栽植密度是引起杉木木材基本密度变异的重要因素(李晓储等,1999)。红皮云杉人工林材性指标与林龄密切相关,而受林分密度和立地条件的影响较小,材性值随林龄增大而增加(罗旭等,2000)。

在施肥处理对杨树人工林材质影响的研究方面,方长华的研究认为,施肥处理增大纤维宽度、微纤丝角,但降低了纤维长度、长宽比(方长华等,2002)。施肥能增大短周期工业材(日本落叶松、湿地松、马尾松、杉木)的纤维直径,但导致纤维长宽比、木材密度降低(方文彬,1997)。

在间伐对人工林材质影响的研究方面,徐有明研究认为,间伐对湿地松人工林木材管胞壁腔比、腔径比、 S_2 层微纤丝角、主要化学成分没有显著的影响,对木材管胞长度、长宽比值有显著负面影响(徐有明,2002c)。间伐使北京杨纤维长度增加,北京杨木材基本密度随着间伐强度增加有减少的趋势(徐永吉等,1995),适度间伐不降低北京杨木材的物理力学性质(李大纲等,1995)。间伐对红松木材材质有很大的影响,间伐林的管胞长度、管胞直径、纤丝角、生长速率、生长轮宽度、顺纹抗压和抗拉强度、抗劈力和冲击韧性大于未间伐林;间伐林木材生长轮密度、壁厚、壁腔比、抗弯强度和局部抗压强度小于未间伐林。其中管胞直径、生长轮宽度、壁厚、壁腔比、抗弯强度、顺纹抗压和抗拉强度、横纹局部抗压强度的差异达到显著水平,表明间伐能显著提高木材力学性能。综合性能和纸浆材性能未间伐林好于间伐林,建筑材性能间伐林好于未间伐林(郭明辉,2002)。抚育间伐对紫椴木材纤维长度、胞壁率的影响不显著,对生长轮宽度和生长轮密度、木材硬度和小拉伸强度有显著影响,轻度间伐的林分材质最优(郭明辉,2001g)。间伐强度对水曲柳木材的纤维长度和胞壁率无显著影响,对生长轮宽度、晚材率、生长轮密度、木材硬度有显著影响,重度间伐的水曲柳林分木材材质最优,轻度间伐林分材质次之,未间伐林分材质相对较差(郭明辉,2001f)。

另外,林型、立地类型、栽培区和经营类型的改变对柏木材质影响显著。柏木与阔叶树混交将明显地增大木材密度、管胞长度和年轮宽度,提高木材抗压、抗弯强度;立地的贫瘠化导致木材抗压、抗弯强度增大。可以通过栽培区和经营类型的改变,调节木材数量生长来影响材质材性(唐君畏等,1993)。桉树木材基本密度和纤维长度则随连栽代次增加而逐代递增(余雪标,1999)。不同林分结构(纯林、混交林和三株一丛)对红松木材的管胞长度、微纤丝角、生长轮密度影响显著(郭明辉,2001)。赤松纯林和赤松与沙松混交林中赤松木材的基本密度、管胞宽度存在显著差异,赤松纯林中赤松木材的基本密度比赤松与沙松混交林中的高,赤松与沙松混交林中赤松木材的管胞宽度比赤松纯林中的大,而赤松纯林和赤松与沙松混交林中赤松木材的管胞长度和管胞长宽比差异不显著(金春德,2001)。

1.2.5 人工林材质预测的研究

对木材密度和纤维长度等材性性状早期预测主要是通过性状的幼-成相关来研究,许多研究者的研究表明材性性状的早期预测是可行的(姜笑梅等,1997b;徐有明等,1999a;骆秀琴等,1997;李斌等,2002)。但不同的树种不同的试验早期预测的最佳年龄不同。可用马尾松5年生时木材密度值预估30年生的密度值,5年时管胞长度值估测25年生的管胞长度值(李火根等,1994)。用湿地松5年生木材密度能可靠地预测12年生木材密度(徐有明等,2001a),樟树人工林木材纤维长度和基本密度性状与生长轮年龄关系模型可用来预测其性状值(徐有明等,2001b)。3个橡胶树无性系生长轮宽度、木材基本密度与树龄的关系模型为5~6次多项式方程,相关系数 $R=0.8362\sim 0.9787$ (徐有明等,2002d)。杉木木材相对密度和管胞长度两性状随年龄变化的曲线都在距髓心13~18年轮区域内出现明显的转折,所以,该区域是速生杉木幼龄材和成熟材的过渡阶段。杉木幼龄材和成熟材的性状是密切相关的,说明利用幼龄材相对密度值预测成熟材的相对密度值是可行的(施季森1993;叶志宏,1987)。

李坚等根据木材的管胞长度、微纤丝角、气干密度、生长轮宽度、晚材率5项特性指标的测试结果,采用最优分割法分析得出,人工林杉木的幼龄材与成熟材的界限为第14年。根据材性特征参数变异规律的数学模型,建立了预测方程,实现了材质早期预测(李坚等,1999)。鲍甫成等建立了长江滩地速生杨树纤维长度(FL)、微纤丝角(FA)和木材密度(WD)随生长轮年龄(CA)的模型(鲍甫成等,1999)。王金满等以现代统计预测理论为基础,结合人工林长白落叶松木材生长轮材性变异规律,提出了木材幼龄期与成熟期划分研究的理论与方法。根据幼龄材与成龄材材性的特点采用有序聚类最优分割模型划分出人工林长白落叶松的幼龄期为15年(王金满等,1996)。王金满等采用多种形式的回归分析,优选出反映材性指标生长过程变异规律的模式;仅采用幼龄期测试数据,以优选模式重新回归建模,并以该模型的曲线外延实现材性指标的早期预测(王金满等,1997)。王金满等还建立了木材生长轮材性变异规律时间序列数学模型(王金满等,1998)。刘一星等得出了火炬松木材管胞长度、管胞直径、管胞长宽比、微纤丝角、晚材率、胞壁率和生长轮密度等材性指标变异规律的数学模型(刘一星等,1999)。林金国等采用多元线性回归方法,建立了用林龄、林分密度、地位指数3因子预测杉木短轮伐期工业林木木材物理力学性质指标的一系列回归方程,并经回归显著检验,这些方程的复相关关系均显著(林金国等,1999d)。

1.2.6 人工林生长与材性性状的相关研究

木材基本密度、纤维长度等材性性状与生长性状的相关性研究是通过生长预测材性的基础。有的学者研究认为,林木生长性状与材性相关不显著,生长速度对樟树木材纤维长度、基本密度、浸提物含量等性状影响不显著(徐有明等,2001b)。马尾松木材相对密度与树高、胸径间不存在显著相关关系(范云,1999a)。湿地松种源(姜笑梅等,2002)、毛白杨优良无性系(新品种)(顾万春等,1998)、群众杨改良无性系(王克胜等,1995)、桉木种源/家系(王军辉等,2001)、泡桐无性系(茹广欣等,2001)的研究中材性性状与生长性状都没有显著的相关。对8年生81个杉木种源的研究表明,树高等7个生长性状与木材相对密度间的相关性均不显著(叶志宏等,1990)。火炬松和湿地松的生长速度对木材材性总的来说没有显著影响(管宁等,1993)。另一些学者研究认为,林木生长性状与材性呈正相关。金春德等研究表明,多数材性指标均与生长轮有明显相关性(金春德等,2000)。还有一些学者研究则认为,生长性状与材性呈负相关,如马尾松种源(徐立安等,1997)、火炬松种源(徐有明等,2002a)的木材密度与树高、胸径、材积等性状呈显著负相关。杉木人工林胸径与木材密度存在极显著的负相关(骆秀琴等,1994)。杉木种源、控制授粉子代和自由授粉子代的木材密度与材积生长之间呈微弱的负遗传相关(-0.199)(施季森等,1987)。

火炬松木材微纤丝角与管胞长度呈线性负相关(徐有明等,1996)。长白落叶松微纤丝角度与管胞长度、管胞宽度、长宽比等因子呈密切的线性负相关,与木材密度也呈负相关(邱肇荣等,1996b)。火炬松木材密度与顺纹抗压强度高度相关;顺纹抗压强度值与胸径负相关(徐有明等,

1995)。火炬松木材基本密度与生长速率呈显著正相关,与晚材率、管胞长度呈正相关,马尾松管胞长度与胸径生长呈显著相关,与高生长相关不显著(周志春等,1990)。

1.3 研究背景

随着木材资源从主要来自天然林向以利用人工林为主的结构转变,人工林资源向社会提供木材的份额越来越大,工业人工林材质定向培育无疑成为工业原料林基地建设适应市场需要的重要途径。我国是人工林发展较早且面积较多的国家,20世纪60年代以来,我国已营造大面积工业用材林。根据国家林业局2005年1月18日发布的第6次森林资源清查结果,我国目前森林覆盖率为18.21%,人工林保存面积达5300万公顷,蓄积量达15.05亿立方米,居世界各国之首,约占全世界人工林面积的1/5;阔叶林和针阔混交林面积比例比第5次森林资源清查结果增加了3个百分点。大力营造利用速生人工林是弥补我国天然林木材资源严重缺乏的长期国策。为了得到符合用途的优质木材,必须对未来人工林的培育要进行集约栽培、定向培育。而要解决这个问题,只有在弄清人工林材性与培育和加工利用的关系的前提下,才能以材性为纽带,走营林和加工利用一体化道路(刘盛全,1998)。人工林材质变异和影响因子的研究已成为当今世界木材科学研究的热点课题之一。

自然条件和培育措施是影响木材性质的重要因素,为实现林木定向培育,达到高产优质,必须首先要研究和了解各种自然条件和培育措施对各个树种和各种性质的影响规律。李坚等编著的《生物木材学》阐述了林木材质与立地条件、气象因素、疏伐整枝、施肥、灌溉等的关系(李坚等,1993)。鲍甫成、江泽慧等著的《中国主要人工林树种木材性质》就不同培育措施(如立地条件、种植密度、间伐强度、施肥处理、土壤类型和栽培方法等)对我国主要人工林木材性质的影响进行了论述(鲍甫成等,1998)。国内外学者研究表明,来源于生物体的木材,其性质受到初植密度、立地条件、间伐强度和施肥等栽培条件的影响,存在变异性。这种变异性给木材品质管理及其利用带来了许多困难。因此,如能掌握木材性质的变异规律及其影响因子,对于指导木材生产,在提高林业生产的集约化经营水平和在加速速生树木生长量的同时改善木材品质,提高木材的综合利用率和拓展其用途,具有重要的现实意义。

长期以来,人们对林学因子中初植密度、立地条件、间伐强度和施肥等对林木材质影响的研究较多,对伴生树种等其他培育措施与木材材质的关系研究极少。国内在这方面研究主要针对针叶树种(如杉木、马尾松、湿地松、火炬松及东北针叶树种等)和速生阔叶树种杨、桉树、泡桐等。地处我国东南沿海的福建省在全国气候区划上,分属于中亚热带和南亚热带。由于特殊的自然地理条件,区域蕴藏着丰富的森林植物资源,阔叶树种非常丰富。福建省从20世纪50年代以来,全省各地开展100多种阔叶林的造林试验,在引种外来树种的同时积极发掘乡土树种,从中筛选出数十种优良速生乡土阔叶树种在全省推广造林,取得了可喜成绩。为此,本文以福建中亚热带人工阔叶乡土树种荷木、山枣、拟赤杨为对象,系统研究了林龄、立地条件、伴生树种这些林学因子对其材性及其径向变异的影响规律。

1.3.1 福建省中亚热带的自然概况

福建省位于东经 $115^{\circ}50'$ ~ $120^{\circ}43'$ 、北纬 $23^{\circ}33'$ ~ $28^{\circ}19'$ 之间,地处我国东南部。东及东南面临台湾海峡,北邻浙江省,西及西北以武夷山脉与江西省分界,南及西南与广东省接壤。境内山地广阔,海拔200m以上的山地、丘陵占全省土地总面积的87.3%,主要山脉有西北部的武夷山和斜贯于闽中的戴云山山脉。这两大山脉大致平行地呈东北-西南走向;山脉两侧地势均逐级下降而成阶梯状地形的中低山地、丘陵,大小山间盆地错落其间。东南部濒海地带多属低丘、台地与冲积、海积平原。因而构成全省西北高、东南低的地势,有利于截流海洋的暖湿气流,形成境内的湿热性气候和亚热带植被,主要土壤类型有红壤、黄壤、砖红壤性红壤等,土层深厚。福建省林地中立地肥沃和较肥沃的占28.35%,立地中等的占58.8%,适宜林木生长。西北部有山岭屏障,既可阻挡或减