

国内杨树培育、木材性质及其加工利用研究进展

席 佳,赵荣军,费本华,吕建雄

(中国林业科学研究院 木材工业研究所,北京 100091)

[摘 要] 概述了国内杨树培育,木材解剖、化学和物理力学性质及加工利用等方面的主要研究成果,分析了杨树杂交育种、定向培育、木材性质与加工利用的研究现状与不足,并对杨树木材研究及加工利用进行了展望,以期杨树木材资源的合理利用提供借鉴。

[关键词] 杨树;林木培育;木材性质;加工利用

[中图分类号] S792.11

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)05-0124-09

Overview of research on tree breeding, wood property & utilization of poplar in China

XI Jia, ZHAO Rong-jun, FEI Ben-hua, LV Jian-xiong

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Some important civil researches on poplar breeding, timber dissection, mechanical properties, processing and utilization were summarized in this paper. Current situation and existing problems of research on poplar tree breeding, wood property, processing and utilization were widely analyzed. Finally some suggestions were made on the research of poplar timber. It is expected that it will be useful to guide the effective and reasonable utilization of plantation poplar, and thus improve the value of poplar timber.

Key words: poplar; tree breeding; wood property; wood processing and utilization

木材是国民经济建设中的重要原料,随着世界性天然林资源的枯竭和国家天然林保护工程的实施,木材资源正经历着从主要来自天然林到人工林的巨大转变,人工林木材的大量利用已成为解决木材供需矛盾的重要途径。

杨树是我国主要的人工林树种之一,生长速度快、分布面积广、木材蓄积量大。自 20 世纪 60 年代以来,林业工作者选育出许多速生丰产优良品种和无性系,营林面积达 700 多万 hm^2 , 超过世界其他国家杨树人工林面积的总和^[1]。为了合理利用这些杨树人工林资源,笔者将杨树培育、木材性质及加工利用研究现状进行了归纳总结,以期杨树木的综合高

效利用提供借鉴。

1 杨树的培育

我国杨树育种工作始于 20 世纪 40 年代。杨树改良目标由通用性向专用性育种过渡,由单一的产量指标向优质高抗多性状综合改良转变,力求育种与环境、林种和材种需求紧密统一。近 20 年已选育出许多与 20 世纪五六十年代明显不同的新品种,新品种平均材积生长量提高 10%~20%,木材密度提高 3% 以上,纤维含量增加 2% 以上^[1]。为了更有效、更有针对性地发展人工林杨树,越来越多的学者开始研究杨树的定向培育。

* [收稿日期] 2008-12-02

[基金项目] 国家林业局“948”引进项目“人工林木材材性快速预测技术引进”(2006-4-96);国家林业局“948”创新项目“林木基因工程技术引进与创新”(2006-4-C01)

[作者简介] 席 佳(1985—),女,安徽合肥人,在读硕士,主要从事木材性质与利用研究。E-mail:leonaxj@163.com

[通信作者] 赵荣军(1966—),女,陕西大荔人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事木材科学与技术研究。

E-mail:rongjun@caf.ac.cn

1.1 杂交育种

在我国 50 余年的杨树培育史中,派内种间杂交以白杨派、黑杨派成就最为显著,派间杂交以青杨派与黑杨派杂交成果最为突出。选育的杨树良种已在生产中产生了巨大的经济效益、生态效益和社会效益^[2]。

自叶培忠先生于 1946 年在甘肃省天水首次进行白杨派内种间杂交研究以来^[3],杨树的新品种层出不穷,而南北方新品种明显不同。

北方杨树的优良新品种主要有:北京林业大学对白杨派种及杂种间杂交的难易程度、杂交方式进行研究,选育出了 6 个三倍体毛白杨优良无性系^[4];中国林业科学研究院林业研究所张绮纹^[5]研究员承担的国家“七五”科技攻关“欧美杨胶合板材及纸浆材新品种选育”课题,从 17 个国家引进的 331 个无性系中选出欧美杨 107、108 号等,该品种的成功研究,解决了长期以来我国北方林业尤其是工业用材林和生态防护林发展缺乏优良树种的难题,具有重要的经济和生态意义;西北林学院开展了全国河北杨良种选育工作,从河×毛、河×新、银×(河×山)杂交组合中选育出河北杨×毛白杨 1 号,其 10 年生材积超河北杨 141%^[6];山东农业大学选育出的窄冠型白杨和黑杨,具有冠幅窄、根系深、生长快、材质好等特点,是农田林网及农林间作的优良无性系^[7]。

南方杨树的优良新品种研究主要有:南京林业大学自 20 世纪 70 年代初从意大利引进美洲黑杨、欧美杨(如 I-69 杨、I-72 杨和 I-63 杨等)获得成功以来,相继承担了国家“七五”、“八五”、“九五”和“十五”等杨树科技攻关项目,先后选育了 19 个针对不同工业用材要求的优质高产杨树新品种^[8],这些品种在黄淮、江淮和长江中下游广大地区工业用材造林中发挥了重要作用,也为我国杨树的定向培育奠定了基础。

1.2 定向培育

木材定向培育是人工林培育过程中分化出来的一种特殊的林业生产经营方式,是按最终用途来确定木材原料,采用集约经营等科学管理措施,生产出种类、质量、规格都大致相同,价格具竞争力的大批木材原料。杨树具有生长快、成材早、产量高和易于更新的特点,为短轮伐期工业用材林经营树种之一^[9]。杨树定向培育短轮伐期经营分 3 种模式:一是超短轮伐期,伐期 1~3 年,以生产纸浆材、纤维板材为主;二是中短轮伐期,伐期 4~10 年,以生产高级纤维为主;三是短轮伐期,伐期 10~15 年,主要生

产胶合板等工业用材。

短轮伐期定向培育由于具有产量高、收益早、效益明显的特点,得到了世界各国的重视。我国在这些方面的研究起步较晚,最早的是 1979 年中国林业科学研究院进行的 I-214 杨、沙兰杨、山海关杨和北京杨等 4 个品种短轮伐期生物量的对比试验^[10]。我国的研究主要是以密度、无性系配置试验为主,全面系统地研究正逐步展开^[10]。郑勇平等^[10]、梁鸿恩等^[11]、许业洲等^[12]、姜岳忠等^[13]分别在浙江、辽宁、湖北、山东等地对适宜当地品系的杨树进行了纸浆材定向培育的研究;方升佐等^[9]、秦光华等^[14]研究了大径胶合板用材的定向培育,确定了各品系杨树的适宜营林密度和采伐年限。这些研究为合理利用杨树木材资源提供了重要的基础数据。

通过以上分析可以看出,虽然研究人员认识到杨树培育的重要性,但国内尚少开展关于杨树新品种木材材性的快速检测早期预测研究。因此,应加强杨树新品种这些方面的研究。

2 杨树的木材性质

2.1 解剖性质

木材解剖构造决定木材性质,木材性质影响木材的最终用途,所以木材解剖性质是木材性质评价的重要指标之一。国内学者对杨木解剖性质的研究,主要集中在各品种杨树木材纤维形态特点和变异规律^[15-18]、微纤丝角的测定和比较^[19-20]以及环境因素对其影响^[21-22]等方面。

杨树是阔叶散孔材,主要由导管、木纤维和木射线组成,几乎没有轴向薄壁组织细胞。杨树木材的纤维长度大多为 0.9~1.2 μm ,属中等长度纤维;单壁厚为 1.54~3.07 μm ;纤维宽为 17.09~26.26 μm ;导管分子长度为 495~530 μm ;木纤维比量大于 50%,最高可达 75%,可见杨木杂细胞含量较少,属于较优的纤维原料^[15-17]。王嘉楠等^[23]、刘亚梅等^[24]选取了人工林木材 69 杨及其应拉木作为研究对象,总结了 69 杨及其应拉木的主要纤维形态特征,发现应拉木比非应拉木的纤维长度长,长宽比大,但纤维宽度、腔径、双壁厚、壁腔比均小于非应拉木。

纤维形态特征不仅直接决定着木材的物理、力学性质,而且还影响着木材的加工利用,尤其是在制浆造纸方面,纤维形态特征大小关系着制浆造纸质量的好坏^[25]。导管的大小及分布既对制浆过程中药液的扩散、木材的加工及单板的制作等有重要影

响,而且会影响纸页的表面性质。而纤维形态、导管特征的大小在不同树种间存在着明显的差异,即使同一树种的不同树株,或同株不同部位亦有差别^[26]。此外,在不同的培育环境下,纤维形态特征亦有不同,所以对纤维形态变异规律的全面研究非常必要。姜笑梅等^[18]于 2003 年对北京地区的 I-214 杨解剖性质进行了深入研究,并提出解剖特性的株内预测模型。任海青等^[21]、刘盛全等^[22]研究了不同林分密度下、不同品系杨树解剖性状的变异规律,认为杨树木材解剖性状径向变异规律大致相同,木材纤维长度、宽度,纤维壁厚,长宽比,导管分子长、弦径等的变异均是自髓心向外迅速递增,并且随着树木树龄的增大,各种纤维形态指标逐渐趋于稳定,不同栽植密度对木材解剖特征的影响程度不同,单从解剖特性而言,栽植密度为 4 m×5 m 的林分较好,其纤维长度、长宽比、双壁厚、纤维比量、导管比量、胞壁率均最大。

微纤丝角(Micro fibril angle, MFA)为细胞次生壁 S2 层微纤丝排列方向与细胞主轴所形成的夹角^[27],国内学者主要采用 X 射线法对其进行研究。如江泽慧等^[19]、杨文忠等^[20]利用 X 射线法对几种杨树的微纤丝角进行了测定,总结了杨树无性系微纤丝角的径向及株内纵向变异规律,在幼龄阶段(1~3 年)微纤丝角逐渐增大,此后又逐渐减小;同一年轮内微纤丝角变化呈“马鞍型”;微纤丝角在树木基部最大,随着树高的增加而逐渐减小,微纤丝角越小木材抗拉强度越大。

除传统方法外,国内学者们也应用了一些新的手段来描述杨树的解剖性质和变异规律。如马丽娜等^[28]采用微密度的测定方法,对人工林杨树木材密度径向和纵向变异规律进行了研究;殷亚方等^[29]应用定量解剖学和显微图像分析技术得出在整个形成层活动期,随着时间的变化,形成层纺锤形细胞与木纤维的解剖特征之间相关性较好。赵荣军等^[30]引入分形理论,描述了杨树木材横切面细胞(二维)孔径分布的分形表征,认为杨树木材的二维腔径分布分形维数为 1.24~1.31,且随着树木高度的增加,腔径分布的分形维数值逐渐减小。

2.2 化学性质

木材是复杂的天然聚物质,主要成分为纤维素、木质素和半纤维素,不均匀地分布于木材细胞和胞间层中;木材的次要成分有抽出物和无机物等^[31]。木材化学成分影响其物理力学性质与纸浆的打浆性能。国内对杨树的化学成分组成,及不同

种杨树化学成分的对比较研究较多^[16,32-33]。王桂岩等^[16]、姚春丽等^[32]和蒲俊文等^[33]研究了 5 种杨树(中林 46、23、28、45、14 杨)和三倍体毛白杨的化学组成认为,这 5 种杨树木材的化学组成接近,其棕纤维素含量较高,酸不溶木素含量较低,非纤维杂质及低聚合度半纤维素含量也较低,适宜于制浆造纸。秦特夫^[34]对从 214 杨树心、边材提取的磨木木质素进行了元素分析和红外光谱、质子和碳-13 核磁共振波谱等特征研究,总结了 214 杨木质素的径向变异规律和化学特性。

2.3 物理力学性质

我国学者对杨树的物理力学性质有很多研究,研究方向主要集中在木材的各项物理性能及木材解剖性质^[17,35-39]、环境因素等对物理性能的影响^[40-45]方面。木材密度是物理性质的重要指标之一。由国内黑杨、白杨的主要品种木材物理力学性质的试验结果可知,杨树的平均基本密度为 0.286~0.379 g/cm³,气干密度为 0.346~0.473 g/cm³,由生材干燥至含水率为 12% 所产生的干缩率为 8.66%~11.96%,弦、径向干缩差异为 1.70~3.35,顺纹抗拉强度为 88.6~91.6 MPa,顺纹抗压强度为 25.6~38.5 MPa,抗弯强度为 48.7~73.0 MPa,抗弯弹性模量为 6 988~10 395 MPa,冲击韧性为 43~74 kJ/m²,端面硬度为 2 334~3 423 N。由此可知,杨树气干密度属低类或很低类,综合强度属低类,硬度属软类或甚软类,冲击韧性中等;品种间木材物理力学性质差异较大^[17,35-38]。任海青等^[39]测量了 I-214 杨树木材的物理力学性质,总结了其株内变异规律,并证明木材密度与力学性质有很好的线性相关关系,用木材密度可以很好地预测力学强度。

环境因素与栽培措施对木材的物理力学性质有一定影响。刘盛全等^[40]、曹福亮^[41]、费本华等^[42]、查朝生等^[43]、柴修武等^[44]和黄振英等^[45]分别研究了栽植密度、灌溉和施肥条件等生长培育环境,对 72、63、69 等品种杨木木材物理力学性质的影响认为,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,而木材的冲击韧性降低;灌溉施肥使得材积量增长加快,而木材密度、木材干缩率、木材强度都有较大下降。以上有关杨树木材材性研究,为杨木合理高效利用提供了重要的科学依据。

综上所述,国内学者主要对不同品系杨树木材的基本性质及其变异规律研究较多,对杨树培育、木材材性和加工利用一条龙的系统研究较少。究其原

因主要是因为以往从事杨树培育研究的工作者比较重视树木的生长性状,而从事木材科学研究的工作者又很少涉及培育领域,对杨树培育的了解不够深入。因此,尚少见到有关杨树培育、材性和加工利用等方面的系统性研究。

3 杨树木材的加工利用

3.1 纸浆用纤维

20世纪90年代,我国的造纸厂主要是以草料为造纸原料。随着杨树人工林的发展,越来越多的造纸厂选择了应用杨树木浆作为造纸原料^[46]。国内对杨树木浆造纸的研究,主要集中于杨木纤维及化学性质的研究,以确定适宜制浆的杨树树种和采伐年限^[47-48]。

姜岳忠等^[47]分析了各品种杨树木材纤维形态、化学成分及林分、林分生长量后认为,BT17杨、三倍体毛白杨等均为优良的造纸用材。翁文源^[48]根据意杨纸浆材材性工艺指标,总结出中龄林(4~7年生)木材适合生产纤维长度为0.6~1.0 mm的吸墨纸等纸样,成熟林(8年生及以上)木材适合生产纤维长度为0.8~1.1 mm的打字纸。

近几十年来,以杨木为原料生产高得率浆的技术发展很快,80年代兴起了化学热磨机械浆(CTMP),90年代又出现了新浆种——碱性过氧化物机械浆(APMP)^[46]。杨木经过化学预处理后,机械浆的强度性质得到显著的改进,已能用100%的杨木高得浆制造新闻纸以及配抄高档的纸张^[46]。

总之,杨木因其具有纤维长宽比大于35~45、壁腔比为0.4~0.5、综纤维素含量较高(约为80%),木素含量较低(20%~25%)、材色白净、易漂白、得浆率高等特点^[15],是一种比较好的造纸原料。

3.2 人造板

3.2.1 胶合板、刨花板、纤维板 国内对杨木人造板的研究比较全面,其中对其旋切^[49]、干燥^[50-52]、热压工艺^[53]、胶粘剂等均有较多的探讨。如王金林等^[49]对7种杨木旋切及单板质量与木材性质的关系进行了深入研究,指出杨木旋切及单板质量除与木材密度和硬度有关外,还与木材的抗弯性能密切相关。周永东等^[50]、董会军等^[51]、李晓玲等^[52]分别对杨木单板进行了常规干燥、高温高湿干燥和高频真空干燥,认为在常规干燥过程中杨木无内裂等严重干燥缺陷发生,但收缩及变形较大,容易发生翘弯等缺陷;高温高湿干燥法能耗小;而高频真空干燥法缺陷少、速度快。顾炼百等^[53]开发并推广了杨木单

板连续式热压干燥工艺,相比一般的蒸汽加热对流干燥机,其将生产率提高了5~6倍。张洋等^[54]以无醛豆胶为胶黏剂,针对速生杨木润湿性差的特点,提出了速生杨木无醛胶合板制造技术。华毓坤等^[55]对南方型杨木人造板产品及其产业化生产进行了研究。

杨树因其生材含水率高,材质较软,一般不需蒸煮可直接旋切,制板工艺及设备较为简单^[56],全国已有数千家胶合板生产企业利用人工林杨树木材资源,生产单板、胶合板、实木拼板和细木工板。这些板材质量轻、加工方便,可广泛用于家具制造和室内装修,在市场上竞争力较强。杨树木材的密度较低、材色浅、加工容易,是生产中密度纤维板和刨花板,尤其是中密度纤维板的优质材料,且原料的来源广泛,杨树的枝桠、梢头和加工剩余物均可利用。

3.2.2 人造薄木 人造装饰薄木是以普通树种木材,特别是以杨树等人工林木材为原料,采用仿真技术加工制成的仿名贵树种木材材色、花纹及各种装饰图案的新型薄木装饰材料。人造装饰薄木制造技术,是高效利用人工林杨树的高新技术^[57]。由于产品的品种和规格可以自由设计和加工,且能保证薄木质量的一致性,有利于大规模产业化生产,产品附加值高,工业化生产可获得显著的经济效益,广泛应用于室内装修和家具生产^[57]。

3.2.3 重组木 重组木是将小径材、间伐材和枝桠材等经碾压加工成横向交叉相连的大束木材,经干燥、铺装、施胶和热压(最好是模压)制成的产品^[58]。与天然木材相比,重组木几乎不弯曲、不开裂、不扭曲,其密度可人为控制,因为成型时的尺寸是按使用要求设计的规格材,故浪费较少,可使木材综合利用率达85%以上^[58]。重组木作为一种新型建筑材料,有很大的发展潜力,可以促进速生杨与其间伐材的合理利用。目前,我国速生杨重组木尚处于研究、试验阶段^[58]。

3.2.4 集成材 杨木集成材是以直径8 cm以上的杨木为原料,经制材、干燥、指接和胶拼而成的一种结构板材,被广泛用作地板、楼梯、门框框架等。集成材生产工艺的特点在于提高了小径杨木的利用率,得到了性能稳定的产品^[59]。

3.2.5 细木工板 杨木也是细木工板制造的主要原料,主要用于芯板的制造,利用小径木、旋切木芯等进行加工^[60]。向仕龙等^[61]以意杨为芯条制作细木工板,结果发现,意杨细木工板质量超过国际标准GB5850—86的要求。

3.3 杨木改性

3.3.1 单板染色 杨木染色通过染料分子在木材组织中的渗透吸着,突出和强调木材所具有的天然纹理的自然美,掩饰木材的固有缺陷,修饰木材的表面性状,提高了木材自身的表现价值,从而拓宽了杨木木材的利用途径^[62]。我国木材染色工业发展较晚,染料的上染率一般在 30% 以下,远低于纺织印染行业(上染率为 80%),染色废水中有 70%~80% 的染料未被利用。李春生等^[63]针对目前杨木染色上染率较低的现状,开展了染色废水循环利用技术研究,为节能、环保的木材染色工艺提供了依据。张伟等^[64]采用真空浸渍渗透的方法,使染料渗透到木材中,通过染液和木材两者之间共同作用使木材着色,较好地解决了染料易被摩擦掉落的问题。常佳等^[65]先应用微波技术处理杨木厚板,之后进行染色,结果表明,木材的上染率随微波处理时间的延长及微波强度的增加而增大,但微波处理时间超过 45 s,木材会发生变形。

3.3.2 表面密实化 应用低分子量酚醛树脂或异氰酸酯树脂等对杨木木材进行浸渍处理后,再用热压机压缩、加热、定型,得到表面压密的木材,可以扩大软质木材的使用范围,增加产品的科技含量,提高经济效益^[66]。表面密实化后可以显著增强杨木的物理力学性质^[66],固定变形^[67],而处理材细胞只是被挤压,细胞腔变小,细胞壁并未受到破坏^[68]。

3.3.3 木材炭化处理 木材炭化处理也称木材的热处理,是指在保护性气体环境中,在 160~250 ℃ 条件下进行短期热解处理的一种物理改性和保护技术,可以改善木材尺寸的稳定性、耐久性和颜色,并能提升木材的附加值^[69]。朱一辛等^[69]研究了杨木单板炭化工艺后指出,杨木单板经过炭化处理后,单板颜色变深,呈褐色;力学性能衰减较大,抗拉强度下降了 52.3%;尺寸稳定性有所提高,24 h 吸水厚度膨胀率平均仅为 0.56%;胶合性能随炭化温度的升高及炭化时间的延长而降低。

4 讨论与展望

作为我国主要的工业用材树种,杨树最大的优点是生长速度极快,5~7 年生杨树的单株材积可达 0.4~0.5 m³,平均年树高生长量为 3~4 m。除了纤维长度较短外,杨树木材制得率、强度与白度都表现良好,是一种适宜的制浆造纸原料。因杨树木材密度低、纹理通直、材质松软、易于旋切等特性,所以也是较好的胶合板用原材料。但人工林杨树含水率

高且分布不均,加之含应拉木、湿心材等,影响木材的加工利用^[49]。为了提高杨树的综合利用水平,一方面要按最终用途对杨树木材性质的要求来定向培育林木;另一方面要根据现有速生杨木材性质的特点,从加工利用方面来克服其不利因素。

综合以上分析,笔者认为,今后关于杨木研究与利用应着重于以下几个方面:继续重视杨树基因改良和定向培育研究,根据林业行业市场需求,培育出木材质量优、生长速度快的杨树人工林新品种;应将人工林杨树培育和木材材性紧密结合起来,开展杨树木材材性快速评价及其加工利用等方面的系统研究,为充分、合理、高效利用杨木提供科学依据;依据人工林杨树木材的基本特性,改进现有加工技术,如板材的干燥、防腐、改性、胶拼等加工技术,提高杨木利用率以及使用价值;针对我国新兴的木结构建筑市场要求,积极研发装饰与建筑用杨木新产品。

[参考文献]

- [1] 苏晓华,黄秦军,张冰玉,等. 中国杨树良种选育成就及发展对策 [J]. 世界林业研究,2004,17(1):46-49.
Su X H, Huang Q J, Zhang B Y, et al. The achievement and developing strategy on variety selection and breeding of poplar in China [J]. World Forestry Research, 2004, 17(1): 46-49. (in Chinese)
- [2] 李善文,张志毅,何承忠,等. 中国杨树杂交育种研究进展 [J]. 世界林业研究,2004,17(2):37-41.
Li S W, Zhang Z Y, He C Z, et al. Progress on hybridization breeding of poplar in China [J]. World Forestry Research, 2004, 17(2): 37-41. (in Chinese)
- [3] 叶培忠. 白杨繁殖育种法 [J]. 林业科学:创刊号,1955,1(1):37-46.
Ye P Z. Methods of white poplar breeding [J]. Scientia Silvae Sinicae: Inaugural Issue, 1955, 1(1): 37-46. (in Chinese)
- [4] 朱之梯,林惠斌,康向阳. 毛白杨异源三倍体 B301 等无性系选育的研究 [J]. 林业科学,1995,31(6):499-505.
Zhu Z T, Lin H B, Kang X Y. Studies on allotriploid breeding of populus tomentosa B301 clones [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(6): 499-505. (in Chinese)
- [5] 张绮纹. 杨树优良纸浆材和生态防护林新品种欧美杨 107 号 [J]. 林业科学研究,1999,12(3):332-332.
Zhang Q W. New species of poplar pulp timbers and zoology protection forest, poplar 107 [J]. Forest Research, 1999, 12(3): 332-332. (in Chinese)
- [6] 邱明光,翁俊华. 河北杨良种选育研究. 阔叶树遗传改良 [M]. 北京:科学技术文献出版社,1991:103-115.
Qiu M G, Weng J H. Variety selection of Hebei aspen genetic improvement of broadleaf [M]. Beijing: Science and Technology Literature Publishing House, 1991: 103-115. (in Chinese)
- [7] 庞金宣,郑世锴,刘国兴,等. 窄冠型杨树新品种的选育 [J]. 林

- 业科技通讯,2001(4):8-9.
- Pang J X,Zhen S K,Liu G X,et al. Selective breeding of new cultivars for poplar with narrow crown [J]. Forest Science And Technology,2001(4):8-9. (in Chinese)
- [8] 潘惠新. 杨树新品种选育研究 [J]. 林业科技开发,2002(3):3-4.
- Pan H X. Research on selective breeding of new cultivars for poplar [J]. Forest Research,2002(3):3-4. (in Chinese)
- [9] 方升佐,吕士行,徐锡增,等. 南方地区杨树胶合板材定向培育技术的研究 [J]. 林业科学,1999,35(6):120-124.
- Fang S Z,Lv S X,Xu X Z,et al. Studies on directive silviculture of poplar veneer glued wood in the southern region of China [J]. Scientia Silvae Sinicae,1999,35(6):120-124. (in Chinese)
- [10] 郑勇平,童再康,罗士元,等. 杨树纸浆林定向培育研究初报 [M]//吕士行. 杨树定向培育技术. 北京:中国林业出版社,1997:46-57.
- Zhen Y P,Tong Z K,Luo S Y. A preliminary study on directive silviculture for poplar pulp timbers[M]//Lv S X. Research and practice on poplar industrial plantations. Beijing: China Forestry Publishing House,1997:46-57. (in Chinese)
- [11] 梁鸿恩,杨志岩,王胜东,等. 杨树造纸林栽培密度及轮伐期的研究 [J]. 辽宁林业科技,1999(1):20-24.
- Liang H E,Yang Z Y,Wang S D,et al. Study on density and final cutting age of poplar plantation for paper-making [J]. Journal of Liaoning Forestry Science & Technology,1999(1):20-24. (in Chinese)
- [12] 许业洲,宋丛文,唐万鹏,等. 南方型黑杨品系短周期纤维材定向培育研究初报 [J]. 湖北林业科技,2004(增刊):28-32.
- Xu Y Z,Song C W,Tang W P,et al. Preliminary report for study on directional cultivation of short-cycle fibre timber for strains from southern type of black poplar [J]. Hubei Forestry Science and Technology,2004 (Supplement):28-32. (in Chinese)
- [13] 姜岳忠,秦光华,乔玉玲,等. 杨树纸浆用材林优良品种和短轮伐期定向培育 [J]. 山东林业科技,2003(3):29-31.
- Jiang Y Z,Qin G H,Qiao Y L,et al. Study on fine varieties of poplar plantation for paper-making and directive cultivation of short-rotational [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology,2003(3):29-31. (in Chinese)
- [14] 秦光华,姜岳忠,朱瑞强,等. 杨树大径级工业用材林合理采伐年龄的研究 [J]. 甘肃农业大学学报,2006,41(3):81-85.
- Qin G H,Jiang Y Z,Zhu R Q,et al. Determination of rotation age of poplar plantation for large-grade timber production [J]. Journal of Gansu Agricultural University,2006,41(3):81-85. (in Chinese)
- [15] 赵志才,安培钧,赵荣军,等. 毛白杨4个栽培种的木材构造及物理力学性质 [J]. 西北林学院学报,1995,10(1):27-33.
- Zhao Z C,An P J,Zhao R J,et al. Wood structure and physical properties of four types of populus tomentosa carr [J]. Journal of Northwest Forestry College,1995,10(1):27-33. (in Chinese)
- [16] 王桂岩,吕雷昌,袁素萍,等. 5 品种杨树木材纤维形态和化学成分 [J]. 山东林业科技,1992(2):69-72.
- Wang G Y,Lv L C,Yuan S P,et al. Fiber morphology and chemical constituent of 5 species of poplar timber [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology,1992(2):69-72. (in Chinese)
- [17] 乔玉玲,王桂岩,秦光华,等. 美洲黑杨 PE-19-66、S. 307-26 材性测试报告 [J]. 山东林业科技,2004(5):4-5.
- Qiao Y L,Wang G Y,Qin G H,et al. Report on wood properties of populus deltoides marsh PE-19-66、S. 307-26 [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology,2004(5):4-5. (in Chinese)
- [18] 姜笑梅,殷亚方,浦上弘幸. 北京地区 I-214 杨树木材解剖特性与基本密度的株内变异及其预测模型 [J]. 林业科学,2003,39(6):115-121.
- Jiang X M,Yin Y F,Urakami H. Variation within tree of wood anatomical properties and basic density of I-214 poplar in beijing area and their relationship modelling equations [J]. Scientia Silvae Sinicae,2003,39(6):115-121. (in Chinese)
- [19] 江泽慧,费本华. 长江滩地不同品系杨树木材纤维形态、微纤丝角和结晶度变异研究 [J]. 安徽农学院学报,1992,19(4):255-262.
- Jiang Z H,Fei B H. The variation of fiber form, microfibril and crystallinity of different strains of poplar wood in the flood land along the lower yangtze river,China [J]. Journal of Anhui Agricultural College,1992,19(4):255-262. (in Chinese)
- [20] 杨文忠,方升佐. 杨树无性系微纤丝角的时空变异模式 [J]. 东北林业大学学报,2004,32(1):25-28.
- Yang W Z,Fang S Z. Temporal and spatial variation patterns of microfibril angle for poplar clones [J]. Journal of Northeast Forestry University,2004,32(1):25-28. (in Chinese)
- [21] 任海青,刘杏娥,江泽慧,等. 栽植密度对小黑杨人工林木解剖特性的影响 [J]. 林业科学研究,2006,19(3):364-369.
- Ren H Q,Liu X E,Jiang Z H,et al. Effects of planting density on wood anatomical properties of populus× xiaohei [J]. Forest Research,2006,19(3):364-369. (in Chinese)
- [22] 刘盛全,储茵. 不同生长培育条件下人工林杨树木材性质的综合评价 [J]. 安徽农业大学学报,2006,33(2):141-148.
- Liu S Q,Chu Y. Evaluation on the wood properties of plantation poplar grown in different conditions [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2006,33(2):141-148. (in Chinese)
- [23] 王嘉楠,查朝生,刘盛全. 人工林杨树木材纤维形态特征及其变异的研究 [J]. 安徽农业大学学报,2006,33(2):149-154.
- Wang J N,Zha C S,Liu S Q. Fiber morphological features and variation of plantation poplar [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2006,33(2):149-154. (in Chinese)
- [24] 刘亚梅,王传文,方长华,等. I-69 杨应拉木生长应力及纤维形态特征的研究 [J]. 安徽农业大学学报,2007,34(4):534-539.
- Liu Y M,Wang C W,Fang C H,et al. Growth stress and fiber morphology of tension wood in poplar I-69 [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2007,34(4):534-539. (in Chinese)
- [25] 成俊卿. 中国木材学 [M]. 北京:中国林业出版社,1985.

- Chen J Q. Chinese wood science [M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1985. (in Chinese)
- [26] Panshin A J, Carl de Zeeuw. Textbook of wood technology [M]. 4th Ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980.
- [27] Walke J C F, Bunerfield B G. The importance of microfibril angle for the processing industries [J]. New Zealand Forestry, 1995, 40(4): 34-40.
- [28] 马丽娜, 付孝德, 张 明, 等. 人工林杨树木材密度变异规律的研究 [J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(4): 410-413.
- Ma L N, Fu X D, Zhang M, et al. Variation patterns of wood density in plantation poplar [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2003, 30(4): 410-413. (in Chinese)
- [29] 殷亚方, 姜笑梅, 刘晓丽. 毛白杨枝条木质部细胞分化的动态变化及其与形成层活动的相互关系 [J]. 林业科学, 2004, 40(2): 119-125.
- Yin Y F, Jiang X M, Liu X L. Dynamic changes in cambial anatomy and xylem cell differentiation of shoots in populus tomentosa [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 119-125. (in Chinese)
- [30] 赵荣军, 费本华, 张 波. 杨树木材细胞腔径分布的分形表征 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 133-135.
- Zhao R J, Fei B H, Zhang B. Fractal property of poplar wood cell lumen distribution [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(1): 133-135. (in Chinese)
- [31] 黄洛华, 秦特夫. 人工林日本落叶松幼龄材与成熟材化学组成的研究 [J]. 世界林业研究, 1995, 8(增刊): 100-103.
- Huang L H, Qin T F. Chemical constituents of juvenile and mature wood of artificial wood lanrix kaempferi [J]. World Forestry Research, 1995, 8(Suppl): 100-103. (in Chinese)
- [32] 姚春丽, 蒲俊文. 三倍体毛白杨化学组成纤维形态及制浆性能的研究 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(5): 18-21.
- Yao C L, Pu J W. Timber characteristics and pulp properties of the triploid of populus tomentosa [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(5): 18-21. (in Chinese)
- [33] 蒲俊文, 宋君龙, 谢益民, 等. 三倍体毛白杨木质素结构特性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 211-215.
- Pu J W, Song J L, Xie Y M, et al. Characteristics of lignin structure of triploid clones of Populus tomentosa carr [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 211-215. (in Chinese)
- [34] 秦特夫. “I-214 杨”心材、边材木质素的红外光谱、质子和碳-13 核磁共振波谱特征研究 [J]. 林业科学研究, 2001, 14(4): 375-382.
- Qin T F. Study on FTIR, ^1H and ^{13}C NMR characterization of poplar I 214 heartwood and sapwood lignins [J]. Forest Research, 2001, 14(4): 375-382. (in Chinese)
- [35] 柴修武, 安学惠. 6 个杨树无性系木材性质的研究 [J]. 林业科学研究, 1993, 6(5): 569-572.
- Chai X W, An X H. Wood properties of 6 poplar clones intensive cultivation [J]. Forest Research, 1993, 6(5): 569-572. (in Chinese)
- [36] 王桂岩, 王 彦, 李善文, 等. 13 种杨树木材物理力学性质的研究 [J]. 山东林业科技, 2001(2): 1-11.
- Wang G Y, Wang Y, Li S W, et al. A study on wood physical and mechanical properties of thirteen poplar varieties [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2001(2): 1-11. (in Chinese)
- [37] 李大纲. 速生人工林杨树的木材材性 [J]. 中国木材, 2002(2): 37-39.
- Li D G. Wood properties of fast-growing poplar plantation [J]. China Wood, 2002(2): 37-39. (in Chinese)
- [38] 鹿振友, 孙立涛. 速生毛白杨杂交新品种力学性质研究 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 68-71.
- Lu Z Y, Sun L E. Studies on the mechanical properties of poplar hybrid new breeds [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1995, 17(1): 68-71. (in Chinese)
- [39] 任海青, 中井孝. 人工林杉木和杨树木材物理力学性质的株内变异研究 [J]. 林业科学, 2006, 42(3): 13-20.
- Ren H Q, Takashi N. Intratree variability of wood density and main wood mechanical properties in chinese fir and poplar plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(3): 13-20. (in Chinese)
- [40] 刘盛全, 江泽慧, 鲍甫成. 人工林杨树木材性质与生长培育关系的研究 [J]. 林业科学, 2001, 37(2): 90-95.
- Liu S Q, Jiang Z H, Bao F C. The relationships between wood properties and forest cultures in plantation poplar [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(2): 90-95. (in Chinese)
- [41] 曹福亮. 林分密度对南方型杨树木材性质的影响 [J]. 南京林业大学学报, 1994, 18(2): 41-46.
- Cao F L. Effects of planting density on wood properties [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1994, 18(2): 41-46. (in Chinese)
- [42] 费本华, 王小青, 刘杏娥, 等. 栽植密度对小黑杨人工林幼龄材和成熟材生长量的影响 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 44-48.
- Fei B H, Wang X Q, Liu X E. Effects of planting density on growth increment of juvenile and mature wood in populus $\times$ xiaohei [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2007, 31(5): 44-48. (in Chinese)
- [43] 查朝生, 王嘉楠, 方 宇, 等. 不同生态条件对人工林杨树木材物理力学性质的影响 [J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2012-2018.
- Zha C S, Wang J N, Fang Y, et al. Physicomechanical properties of plantation poplar wood under different eco-environments [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2012-2018. (in Chinese)
- [44] 柴修武, 李铨铭, 陈道东. 不同肥料效应对 I-69 杨木材性质的影响研究 [J]. 林业科学, 1993, 29(2): 145-151.
- Chai X Z, Li Y Q, Chen D D. Study on the fertilization effect upon the wood properties of populus deltoides cv. “LUX” ex I-69/55 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1993, 29(2): 145-151. (in Chinese)
- [45] 黄振英, 刘盛全, 朱林海, 等. 施肥处理对 I-69 杨木材材性的

- 影响[J]. 安徽农业大学学报, 2003, 30(1): 86-91.
- Huang Z Y, Liu S Q, Zhu L H, et al. Effect of fertilization on the wood properties of poplar 69 [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2003, 30(1): 86-91. (in Chinese)
- [46] 吴定新, 姚春丽. 杨木制浆造纸技术的发展 [J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(1): 63-70.
- Wu D X, Yao C L. The development of poplar wood pulping and papermaking [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997, 19(1): 63-70. (in Chinese)
- [47] 姜岳忠, 王桂岩, 吕雷昌, 等. 杨树纸浆林品种选择研究 [J]. 山东林业科技, 2001(2): 12-16.
- Jiang Y Z, Wang G Y, Lv L C, et al. Study on the varieties selection of paper-making poplar wood [J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2001(2): 12-16. (in Chinese)
- [48] 翁文源. 杨树木材纤维长度变异及其在造纸中的应用 [J]. 湖北林业科技, 2007(2): 31-33.
- Weng W Y. Application of timber fiber length variation and its papermaking for populus [J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2007(2): 31-33. (in Chinese)
- [49] 王金林, 李春生. 杨木旋切及单板质量与木材性质关系的研究 [J]. 木材工业, 1995, 9(5): 1-6.
- Wang J L, Li C S. Study on relationship among poplar log peeling veneer quality and wood properties [J]. China Wood Industry, 1995, 9(5): 1-6. (in Chinese)
- [50] 周永东, 李晓玲. 人工林杨木和杉木的干燥特性与干燥工艺 [J]. 木材工业, 2004, 18(3): 4-6.
- Zhou Y D, Li X L. Drying characteristics and drying schedule for plantation grown poplar and chinese fir lumber [J]. China Wood Industry, 2004, 18(3): 4-6. (in Chinese)
- [51] 董会军, 顾炼百. 杨木单板高温高湿干燥工艺研究 [J]. 人造板通讯, 2005, 12(7): 10-13.
- Dong H J, Gu L B. Studies on high temperature and humidity drying technology of cottonwood veneer [J]. Wood-Based Panels, 2005, 12(7): 10-13. (in Chinese)
- [52] 李晓玲, 高瑞清, 黑田尚宏, 等. 人工林杨木的高频真空干燥工艺 [J]. 木材工业, 2004, 18(4): 12-15.
- Li X L, Gao R Q, Kuroda N, et al. Radio frequency vacuum drying technology for plantation grown poplar [J]. China Wood Industry, 2004, 18(4): 12-15. (in Chinese)
- [53] 顾炼百, 李大纲, 承国义, 等. 杨木单板连续式热压干燥的研究 [J]. 林业科学, 2000, 36(5): 78-84.
- Gu L B, Li D G, Cheng G Y, et al. Research on continuous hot-pressing drying of poplar veneers [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(5): 78-84. (in Chinese)
- [54] 张洋, 周定国, 杨波, 等. 豆胶制造速生杨木Ⅱ类胶合板的工艺研究 [J]. 中国人造板, 2007, 14(5): 7-9.
- Zhang Y, Zhou D G, Yang B, et al. Study on manufacturing process of type Ⅱ poplar plywood with soybean adhesive [J]. China Wood-Based Panels, 2007, 14(5): 7-9. (in Chinese)
- [55] 华毓坤, 金菊婉. 江苏南方型杨树的加工利用现状及发展 [J]. 木材工业, 2006, 20(2): 72-75.
- Hua Y K, Jin J W. Status and development of the southern type poplar processing industry in jiangsu province [J]. China Wood Industry, 2006, 20(2): 72-75. (in Chinese)
- [56] 刘盛全, 鲍甫成. 我国杨树人工林材性与加工利用研究现状及发展趋势 [J]. 木材工业, 1999, 13(3): 14-16.
- Liu S Q, Bao F S. Current situation and development trends of research on wood properties, processing & utilization of poplar plantation in China [J]. China Wood Industry, 1999, 13(3): 14-16. (in Chinese)
- [57] 叶克林, 王金林. 人工林杨树木材的加工利用 [J]. 木材工业, 2003, 17(1): 5-10.
- Ye K L, Wang J L. Processing and utilization of poplar wood from plantations [J]. China Wood Industry, 2003, 17(1): 5-10. (in Chinese)
- [58] 徐咏兰, 金菊婉. 速生杨小径材的优化开发利用 [J]. 林业科技开发, 1998(1): 4-7.
- Xu Y L, Jin J W. Optimum exploitation and utilization of small diameter log of fast-growing poplar [J]. China Forestry Science And Technology, 1998(1): 4-7. (in Chinese)
- [59] 朱典想, 陈有福, 余明宣. 意杨集成材制造的关键技术探讨 [J]. 木材加工机械, 2004(5): 20-22.
- Zhu D X, Chen Y F, Yu M X. The key manufacturing technology of Italian poplar finger joint lumber [J]. Wood Processing Machinery, 2004(5): 20-22. (in Chinese)
- [60] 张勤丽. 我国意杨加工利用概况 [J]. 林产工业, 2000, 27(5): 3-6.
- Zhang Q L. The utilization of southern type poplar [J]. China Forest Products Industry, 2000, 27(5): 3-6. (in Chinese)
- [61] 向仕龙, 郭运勇. 南方十种树种木材作芯条的细木工板性能研究 [J]. 木材工业, 1997, 11(1): 7-9, 17.
- Xiang S L, Guo Y Y. Effect of 10 wood species from southern china on properties of block board with cores from these species [J]. China Wood Industry, 1997, 11(1): 7-9, 17. (in Chinese)
- [62] 张洋, 安霞, 周兆宾, 等. 速生杨木染色效果的色差分析 [J]. 林业科技开发, 2007, 21(1): 25-27.
- Zhang Y, An X, Zhou Z B, et al. The chromatist analysis of the dyeing effectiveness for poplar veneer [J]. China Forestry Science and Technology, 2007, 21(1): 25-27. (in Chinese)
- [63] 李春生, 王金林, 王志同, 等. 杨木单板染色染料上染率研究 [J]. 中国人造板, 2006, 13(11): 9-13.
- Li C S, Wang J L, Wang Z T, et al. Research on dye uptake of poplar veneer dyeing [J]. China Wood-Based Panels, 2006, 13(11): 9-13. (in Chinese)
- [64] 张伟, 许俊, 岳孔, 等. 速生杨木板材的染色工艺试验 [J]. 林业科技开发, 2008, 22(5): 84-86.
- Zhang W, Xu J, Yue K, et al. Study on dyeing processing of fast-growing poplar board [J]. China Forestry Science and Technology, 2008, 22(5): 84-86. (in Chinese)
- [65] 常佳, 王金林, 王清文, 等. 微波处理对木材染色性能的影响 [J]. 林业科学, 2008, 44(6): 109-112.
- Chang J, Wang J L, Wang Q W, et al. Effects of wood dyeing

with microwave processing [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6):109-112. (in Chinese)

[66] 刘君良,江泽慧,孙家杰. 酚醛树脂处理杨树木材物理力学性能测试 [J]. *林业科学*, 2002, 38(4):176-180.

Liu J L, Jiang Z H, Sun J J. Measurement the physical-mechanical properties of poplar lumber by PF resin treatment [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4):176-180. (in Chinese)

[67] 杨 霞. 异氰酸酯树脂固定人工林杨木压缩变形的研究 [J]. *吉林省林业科技*, 2006, 35(3):39-40.

Yang X. Fixing compression deformation by isocyanate to poplar timber cut from artificial stand [J]. *Jilin Forestry Science and Technology*, 2006, 35(3):39-40. (in Chinese)

[68] 陈瑞英,胡国楠. 速生杨木密实化研究 [J]. *福建农业大学学报*, 2005, 34(3):324-329.

Chen R Y, Hu G N. Study on the compression of fast-growth poplar [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 2005, 34(3):324-329. (in Chinese)

[69] 朱一辛,关明杰,李 晖. 杨木单板炭化处理工艺试验 [J]. *林业科技开发*, 2008, 22(4):79-82.

Zhu Y X, Guan M J, Li H. Experiment on the heat treatment of poplar veneer [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2008, 22(4):79-82. (in Chinese)

(上接第 123 页)

[10] 吴小芹,何月秋,刘忠华. 葡萄座腔菌所致树木溃疡病发生与研究 [J]. *南京林业大学学报*, 2001, 25(1):61-66.

Wu X Q, He Y Q, Liu Z H. Occurrence and progress on tree cankers caused by *Botryosphaeria spp* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(1):61-66. (in Chinese)

[11] 张星耀,赵仕光,吕 权,等. 树木溃疡病病原真菌类群分子遗传多样性研究 II. *Botryosphaeria* 属 28S-DNA-PCR-RFLP 和 RAPD 的解析 [J]. *林业科学*, 2000, 36(2):75-81.

Zhang XY, Zhao S G, Lv Q, et al. Molecular genetic diversity of pathogenic fungal group causing tree canker II. 28S rDNA PCR-RFLP and RAPD analysis of *Botryosphaeria spp* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2):75-81. (in Chinese)

[12] Smith C O. Inoculating showing the wide host range of *Botryosphaeria ribis* [J]. *Jour Agric Res*, 1934(49):467-476.

[13] Ainsworth G C. Ainsworth & Bisby's Dictionary of the Fungi [M]. 5th Edition. Kew, England: Commonwealth Mycological Institute, 1961:1-547.

[14] 王金利,秦国夫,贺 伟,等. 葡萄座腔菌属及相关真菌的系统学研究进展 [J]. *中国森林病虫*, 2003, 25(3):32-36.

Wang J L, Qin G F, He W, et al. Research progress on taxonomy and phylogeny of *Botryosphaeria* and related fungi [J]. *Forest Pest and Disease*, 2003, 25(3):32-36. (in Chinese)

[15] 向玉英. 杨树溃疡病 [M]/中国森林病害. 北京:中国林业出版社, 1984:79-80.

Xiang Y Y. Poplar canker disease[M]/Chinese Forest Disease. Beijing:Chinese Forestry Publishing House, 1983:78-80. (in Chinese)

[16] 杨 旺. 森林病理学 [M]. 北京:中国林业出版社, 1996:48-50.

Yang W. Forest pathology[M]. Beijing: Chinese Publishing House, 1996:48-50. (in Chinese)