

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.04.002

# 造林密度对欧美杨 3 品种在东北地区 生长及材性的影响

刘 宁, 丁昌俊, 李 波, 丁 密, 苏晓华, 黄秦军\*

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:** [目的] 为了探讨我国欧美杨速生丰产林良种选育及栽培环节存在的关键共性技术问题, 在我国东北地区大凌河流域平原开展栽植密度对欧美杨品种的影响试验, 为欧美杨纸浆材人工林优良品种的早期选育及推广栽培提供一定的理论依据。[方法] 试验材料为京 2 杨、渤海 1 号杨和渤海 3 号杨 3 个欧美杨品种, 设计 2 m×3 m、2 m×4 m、2 m×5 m 和 2 m×6 m 四种造林密度。测量第 2 至 8 年的胸径, 统计第 1 至 8 年的保存率, 测定第 1 至 8 年的木材物理性质、第 2、4、6、8 年的木材解剖性质, 测定总体的木材化学成分; 整理并绘制保存率连年变化图, 利用双因素方差分析逐年评价品种、造林密度以及品种与造林密度的交互作用对欧美杨胸径的效应, 并对各性状进行多重比较。[结果] 品种和造林密度对胸径生长均有极显著的影响 ( $p < 0.01$ ); 造林密度与品种的互作效应在第 1 至 6 年均是显著的 ( $p < 0.05$ ), 第 7、8 年则没有出现显著性 ( $p > 0.05$ ) 的互作效应。各造林密度中京 2 杨的保存率呈逐年较大幅度下降的形式, 在第 8 年其各密度胸径和保存率最差, 保存率最高的是 2 m×6 m 造林密度中的渤海 1 号杨; 胸径最大的是 2 m×6 m 造林密度中的渤海 3 号杨。较大造林密度 (2 m×3 m 和 2 m×4 m) 会在生长初期使欧美杨的保存率较大幅度下降, 而较小的造林密度 (2 m×5 m 和 2 m×6 m) 保存率下降平缓。对木材性质进行的多重比较结果表明: 造林密度对木材性质影响不显著 ( $p > 0.05$ ) 的影响。木材的纤维长宽比、总木素含量随造林密度的增加而增大; 而较小的造林密度会增加木材的微纤丝角、纤维素含量、综纤维素含量。[结论] 3 个欧美杨品种适应性存在差异, 渤海 1 号杨和渤海 3 号杨优于京 2 杨。较大的造林密度对 3 品种的保存率、胸径、木材性质均有抑制作用, 而较小的造林密度欧美杨的保存率高。随林龄的增长, 欧美杨的木材基本密度、纤维长、纤维长宽比显著性 ( $p < 0.05$ ) 增大, 而木材的微纤丝角、木纤维组织比量显著 ( $p < 0.05$ ) 减小, 纤维宽的变异较小。造林密度与品种的互作效应对胸径的影响随林龄的增长而减弱。在营造纸浆材欧美杨人工林时, 初植密度最少不能小于 2 m×6 m, 且应当做到适地适树以优化生产。试验中欧美杨的木材性质均适宜营造纸浆林, 高保存率的渤海 1 号杨适合纸浆材人工林的营造, 而渤海 3 号杨有发展大径材人工林的潜力。

**关键词:** 造林密度; 欧美杨品种; 保存率; 胸径; 木材性质

**中图分类号:** S781.42

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2020)04-0009-10

杨树 (*Populus* spp.) 为杨柳科杨属 (*Populus*) 植物的总称, 属于速生阔叶树种, 其用途广泛, 既是北半球重要的速生工业、民用材原料树种, 又是进

行水土保持、防风固沙和生态绿化的主要速生树种<sup>[1]</sup>。杨树速生、高产、易繁殖、木材易加工、适应性和用途广泛, 是温带地区种植的首选树种, 根

收稿日期: 2019-09-27 修回日期: 2020-05-25

基金项目: 国家重点研发计划课题“欧美杨工业资源材高效培育技术研究”(2016YFD0600401); 国家“十二五”科技支撑计划课题“阔叶树速生丰产林定向培育技术研究”(2015BAD09B02)

\* 通讯作者: 黄秦军. Email: huangqj@caf.ac.cn

据第九次森林资源结果,在我国其人工林面积已达 757.07 万  $\text{hm}^2$ , 占全国人工林总面积的 13.25%, 木材产量占全国木材总产量近 30%, 对国家林业建设和地域经济发展的贡献巨大, 并取得了显著的社会效益和生态效益<sup>[2-6]</sup>。黑杨派 (*Section aigeiros*) 是杨树中的高生产潜力树种, 具有极高的育种价值和经济价值, 目前, 大部分人工栽培的杨树都源于黑杨派<sup>[7-8]</sup>。大量实践表明, 黑杨派中美洲黑杨 (*Populus deltoides* Marsh.) 及其与欧洲黑杨 (*P. nigra* L.) 的杂种后代欧美杨 (*P. × euramericana*) 已成为我国杨树规模和商业化栽培的主体<sup>[9]</sup>, 对于人工用材林发展具有不可替代的作用。

由于生长周期长, 林木的产出、适应性、木材性质等因素在育种时必须综合考虑, 其中, 对能够影响产量和木材性质的因素尤为重视<sup>[10]</sup>。密度是人工林合理结构的数量基础, 对林木生长和木材质量具有重要影响, 人工林中个体间的空间竞争随林龄的增长而变大, 合理的密度能提供适当的环境条件使林木达到最佳生长, 过大的林分密度对林木的生长产生抑制作用<sup>[11-12]</sup>。研究表明, 密度不仅影响林冠特征、林下植被和林木生长, 而且还影响木材质量<sup>[13-14]</sup>。西南桦 (*Betula alnoides* Hamilt) 生长受到密度影响, 其中, 密度与胸径生长呈显著负相关, 与林分蓄积呈正相关, 与单株材积呈负相关, 且随林龄增长, 不同密度林分间蓄积差异逐渐缩小<sup>[15]</sup>。造林密度对 6 年生尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla* Blake) 胸径、立木单株材积、冠幅及枝下高的影响达到极显著水平, 对蓄积量、木材纤维宽度和导管分子长度的影响达到显著水平, 对树高、木材气干密度和木纤维长度有一定的影响<sup>[16]</sup>。

鉴于国家木材资源将长期紧缺现状<sup>[14]</sup>, 选育和栽培适宜的速生高产优质欧美杨品种, 以提高我国尤其是北方地区杨树人工林的生产力和木材质量非常重要。本文以 2 个国家审定欧美杨良种渤丰 1 号杨 (*P. × euramericana* ‘Bofeng 1’; 良种编号: 国 S-SC-PE-002-2011)、渤丰 3 号杨 (*P. × euramericana* ‘Bofeng 3 hao’; 良种编号: 国 S-SV-PE-003-2017) 和欧美杨新品种京 2 杨 (*P. × euramericana* (Dode) Guiner c1. ‘J2’; 品种权号: 20050033) 为试材<sup>[17-18]</sup>, 通过分析比较不同密度对不同林龄生长和木材性质的影响, 确定合理造林密度, 为欧美杨新品种的选育、北方杨树用材林特别是纸浆材林产量提高和木材品质优化提供有价值参考。

## 1 材料与方法

试验开展于辽宁省锦州凌海市原种场 (41°17' N, 121°36' E), 年降水量 400~600 mm, 海拔 17 m。2007 年春季埋根造林, 造林所用根为 1 年生苗木的根。试验采用 4 个密度处理 (2 m×3 m、2 m×4 m、2 m×5 m 和 2 m×6 m), 3 个重复, 林地四周栽植 2 行隔离行。实验材料为 3 个欧美杨品种: 渤丰 1 号杨、渤丰 3 号杨和京 2 杨。

2007 至 2012 年和 2014 年每年秋季使用测树围尺测量胸径, 其中, 使用 2014 年春季调查的胸径代替 2013 年秋的胸径数据; 统计不同年份的保存率; 木材性质的测定由东北林业大学在 2017 年完成。

使用 Excel、SPSS25 以及 R3.6.0 等统计软件对试验数据进行分析。对保存率进行整理并绘制连年变化图; 对胸径进行方差分析; 对 3 品种的胸径进行多重比较; 对于木材解剖性质和木材化学成分, 取 3 个品种的均值作为欧美杨人工林整体的木材性质进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 造林密度对生长的影响

2.1.1 保存率的连年变化 3 个品种的保存率变化模式具有明显的差异 (图 1)。总体上看, 京 2 杨的 4 个栽植密度均呈逐年下降的趋势, 第 4 年开始逐年较大幅度下降, 各造林密度间差异不明显; 渤丰 1 号杨 2 m×6 m 造林密度的保存率始终高于 87%, 而 2 m×5 m 造林密度的保存率从第 4 年开始逐年小幅下降, 较大造林密度 (2 m×3 m 和 2 m×4 m) 的保存率是从造林开始逐年小幅下降至第 3 年, 第 3 至 6 年保存率稳定在 70% 左右, 在第 7 年有小幅下降, 第 7、8 年的保存率维持在 55% 左右; 渤丰 3 号杨较小造林密度 (2 m×5 m 和 2 m×6 m) 的保存率变化较稳定, 至第 8 年两密度保存率在 75% 左右, 2 m×4 m 造林密度的保存率大幅下降至第 2 年, 后维持在 54%~63%, 而 2 m×3 m 造林密度的保存率, 在第 1 至 3 年大幅下降, 在第 6 至 8 年均小幅下降, 最终保存率为 41%。

2.1.2 胸径的方差分析及多重比较结果 对连续测量的胸径数据进行双因素方差分析 (表 1), 结果表明: 造林密度和品种对胸径生长均有极显著的影响 ( $p<0.01$ ); 造林密度与品种的互作效应在第

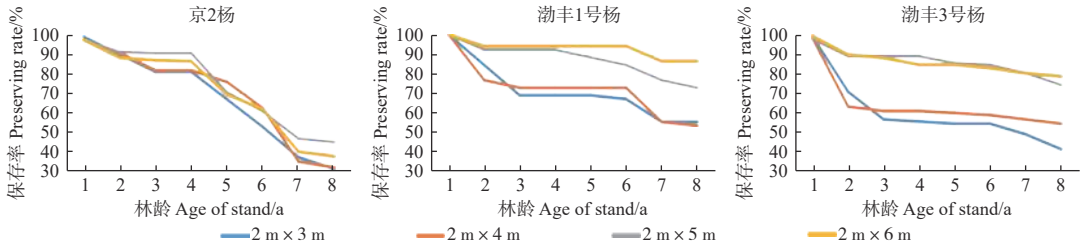


图1 保存率变化

Fig. 1 Changes in preserving rates

2至6年均达显著水平 ( $p < 0.05$ ), 其中, 第3、4年达极显著 ( $p < 0.01$ ) 水平。

表1 欧美杨胸径的双因素方差分析

Table 1 Two-Way ANOVA of DBH of *Populus×euramericana*

林龄 Age of stand/a	变异来源 Variation source		
	品种 Cultivars	造林密度 Planting density	品种×造林密度 Cultivars×Planting density
2	47.93**	90.59**	3.32*
3	44.02**	110.00**	14.05**
4	126.11**	49.21**	17.11**
5	609.30**	46.00**	20.70*
6	1 037.10**	60.50*	29.90*
7	757.90**	71.50*	20.80
8	693.60**	90.90**	14.80
自由度 Degree of freedom	2	3	6

注：“\*”表示0.05的显著性水平，“\*\*”代表0.01的显著性水平。  
Notes: “\*” represents a 0.05 level of significance, and “\*\*” represents a 0.01 level of significance.

对不同年份不同造林密度下各品种的胸径进行多重比较 (表2), 结果表明: 不同年份间, 各造林密度下, 品种胸径的表现存在明显差异。2 m×3 m 造林密度下, 除第2年外, 渤丰3号杨胸径最大且除第3年外显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其他品种, 第2年京2杨的胸径最大且显著高于其他品种; 2 m×4 m 造林密度下渤丰3号杨的胸径在第2至8年最大且除第2、第7年外显著高于其他品种; 2 m×5 m 造林密度下, 京2杨在第2、3年胸径最大且显著高于其他品种, 第4年各品种无显著差异, 第5至8年渤丰3号杨胸径最大且显著高于京2杨; 2 m×6 m 造林密度下, 第2年京2杨胸径最大且显著优于其他品种, 第3年渤丰1号杨胸径最小且显著劣于其他品种, 第4至8年渤丰3号杨

胸径最大且显著高于其他品种。第8年试验结束时, 2 m×6 m 造林密度下渤丰3号杨的胸径最大, 达 25.01 cm; 渤丰1号杨次之, 达 22.96 cm; 京2杨最差, 仅 21.34 cm。

## 2.2 造林密度对总体木材性质的影响

2.2.1 对木材物理性质的影响 由表3可以看出: 除第3年外, 欧美杨在同一林龄不同栽植密度下木材基本密度差异不显著; 第3年 2 m×4 m 造林密度的欧美杨木材基本密度显著大于 2 m×3 m 造林密度, 其余造林密度差异不显著。整体上看, 欧美杨木材基本密度每年的总均值在第4、5年下降, 除此之外呈逐年增长的趋势; 各栽植密度中, 随林龄的增长, 欧美杨的木材基本密度存在增长的趋势, 各造林密度下欧美杨第7、8年的木材基本密度均高于第1、2年。2 m×3 m、2 m×4 m、2 m×5 m 和 2 m×6 m 造林密度下欧美杨木材基本密度首先出现显著性差异的年份分别为第4年、第3年、第7年和第7年。较小造林密度下, 欧美杨的木材基本密度呈增长趋势, 较大造林密度下欧美杨的木材基本密度, 整体上是逐年增长的趋势, 但其在第4至6年存在木材基本密度下降的现象; 至第8年, 各造林密度下欧美杨的基本密度为 0.33~0.34 g·cm<sup>-3</sup>。

随着林龄的增大, 欧美杨的微纤丝角均呈先增加后减小的趋势, 至第8年, 各造林密度下欧美杨的微纤丝角为 15.00~15.65; 只有第3年和第5年各造林密度间微纤丝角存在差异, 在第3年, 2 m×4 m 和 2 m×6 m 造林密度的欧美杨微纤丝角显著大于 2 m×3 m 造林密度; 在第5年, 2 m×5 m 和 2 m×6 m 的欧美杨微纤丝角显著大于 2 m×3 m 造林密度。只有 2 m×4 m 和 2 m×6 m 造林密度下欧美杨微纤丝角的逐年变化存在差异, 2 m×3 m 和 2 m×6 m 密度处理的欧美杨微纤丝角随林龄的增长差异不显著, 2 m×3 m、2 m×4 m、2 m×5 m 和 2 m×6 m

表 2 3 品种不同林龄的胸径及多重比较

Table 2 Multiple comparisons of 3 cultivars' DBH at different forest ages

cm

林龄 Age of stand/a	品种 Cultivars	造林密度 Planting density			
		2 m×3 m	2 m×4 m	2 m×5 m	2 m×6 m
2	渤海1号杨	4.93±1.36 bc	5.23±0.99 b	4.20±0.70 d	4.09±1.05 d
	渤海3号杨	4.98±1.63 bc	6.06±1.21 a	4.69±0.99 c	4.04±1.25 d
	京2杨	5.71±0.98 a	5.99±0.88 a	5.28±0.87 b	4.72±1.25 c
3	渤海1号杨	8.15±2.08 cde	8.89±2.35 bc	7.74±2.12 ef	7.12±2.10 f
	渤海3号杨	9.36±2.28 b	10.26±2.13 a	8.06±2.34 de	8.17±2.22 cde
	京2杨	8.69±1.40 bcd	9.37±1.43 b	8.86±1.60 bc	8.02±2.08 de
4	渤海1号杨	10.72±2.62 def	11.58±2.79 bcd	10.66±2.66 def	10.87±2.62 cdef
	渤海3号杨	11.78±3.13 bc	13.11±2.48 a	11.07±2.77 bcdef	11.93±2.57 b
	京2杨	10.17±1.78 f	11.20±1.68 bcde	10.96±1.97 cdef	10.42±2.35 ef
5	渤海1号杨	13.18±3.21 ef	14.22±3.61 cde	14.21±2.86 cde	14.49±3.18 cd
	渤海3号杨	15.32±3.66 bc	16.79±3.17 a	14.90±3.04 bc	15.93±3.33 ab
	京2杨	12.19±2.21 f	13.09±2.45 ef	13.39±2.36 de	13.22±2.74 ef
6	渤海1号杨	15.73±4.12 def	16.50±4.60 cde	16.96±3.42 cd	17.48±3.92 bc
	渤海3号杨	18.55±4.54 b	20.24±3.88 a	18.30±3.70 b	19.90±3.61 a
	京2杨	14.81±2.64 f	15.52±3.01 ef	16.20±2.77 cdef	15.90±3.28 def
7	渤海1号杨	19.87±3.88 cd	21.34±3.33 abc	19.89±3.66 cd	20.87±4.08 bc
	渤海3号杨	21.67±4.09 ab	22.84±4.05 a	21.03±4.11 bc	22.88±3.64 a
	京2杨	17.54±3.26 e	18.73±2.92 de	19.04±3.11 de	19.06±3.68 de
8	渤海1号杨	21.00±4.20 ef	22.28±3.92 bcde	21.83±3.59 cde	22.96±4.19 bcd
	渤海3号杨	23.78±3.64 ab	25.01±3.78 a	23.08±4.16 bc	25.01±3.70 a
	京2杨	19.66±3.56 f	21.23±3.61 def	20.96±3.36 ef	21.34±4.49 cdef

注:不同小写字母表示林龄相同时不同造林密度间胸径差异显著( $P<0.05$ );表中的数据为“均值±标准差”,下同。

Note: The lowercase letters indicated the significant difference of DBH among different planting densities at the same age, with a significant level of 0.05. The unit of measurement for DBH is centimeters. The format in the table is "mean ± standard deviation", the same as below.

造林密度下欧美杨微纤丝角开始明显下降年份分别为第3年、第4年、第6年和第6年(表3)。

欧美杨木材纤维的长、宽及长宽比在同一林龄时,各造林密度之间均差异不显著(表4)。至第8年,欧美杨木材的长宽比为49.65~52.83。随着林龄的增长,各造林密度下的欧美杨长宽比和纤维长均有显著增加,而纤维宽则没有显著的变化。长宽比总均值的排序为:2 m×3 m>2 m×4 m>2 m×5 m>2 m×6 m;纤维长总均值的排序为:2 m×6 m>2 m×3 m>2 m×5 m>2 m×4 m;纤维宽总均值的排序为:2 m×6 m>2 m×5 m>2 m×3 m>2 m×4 m。

2.2.2 对木材解剖性质的影响 欧美杨木材的壁腔比差异不显著,第6年时,2 m×3 m、2 m×4 m和2 m×5 m密度的欧美杨壁腔比较低,2 m×6 m密度壁腔比相对稳定,其余年份壁腔比大部分在0.3以

上(表5)。欧美杨木材的木纤维组织比量在同一林龄不同栽植密度间均差异不显著,除2 m×3 m造林密度外,其余造林密度第8年欧美杨的木纤维组织比量均显著小于造林初期;欧美杨木纤维组织比量较高,均在50%以上,木纤维组织比量木纤维组织比量总体上随林龄的增长呈减小的趋势(表5)。

2.2.3 对木材化学成分的影响 欧美杨木材的各化学成分在不同栽植密度下均差异不显著(表6)。欧美杨木材的纤维素含量为40.54%~42.76%,综纤维素含量均大于76%,欧美杨的酸溶木素含量均高于3.25%,总木素的含量在22%左右;2 m×3 m造林密度的酸不溶木素和总木素含量最高,2 m×5 m造林密度的水分和综纤维素含量最高,2 m×6 m造林密度的纤维素和酸溶木素含量最高。

表3 不同造林密度下的基本密度和微纤丝角

Table 3 Basic density and microfibrillar angle of different planting densities

指标 Index	林龄 Age of stand/a	造林密度 Planting density				总均值 Mean value	P值 P value
		2 m×3 m	2 m×4 m	2 m×5 m	2 m×6 m		
基本密度 Basic density/(g·cm <sup>-3</sup> )	1	0.28±0.02 aA	0.29±0.05 aA	0.30±0.02 aAB	0.29±0.02 aA	0.29±0.03	0.50
	2	0.29±0.03 aAB	0.30±0.02 aA	0.31±0.02 aAB	0.31±0.03 aAB	0.30±0.03	0.29
	3	0.29±0.03 aAB	0.34±0.03 bB	0.31±0.03 abAB	0.31±0.03 abAB	0.31±0.03	0.05
	4	0.31±0.05 aABC	0.32±0.04 aAB	0.30±0.02 aA	0.29±0.03 aA	0.30±0.03	0.36
	5	0.31±0.03 aABC	0.32±0.03 aAB	0.30±0.02 aA	0.29±0.02 aA	0.30±0.03	0.11
	6	0.32±0.03 aBC	0.31±0.03 aAB	0.31±0.02 aAB	0.29±0.03 aA	0.31±0.03	0.14
	7	0.34±0.04 aC	0.35±0.03 aB	0.32±0.04 aBC	0.34±0.03 aB	0.34±0.04	0.70
	8	0.33±0.04 aC	0.34±0.03 aB	0.34±0.01 aC	0.34±0.03 aB	0.34±0.03	0.99
	总均值 Mean value	0.31±0.04	0.32±0.04	0.31±0.03	0.31±0.04	-	-
	P值 P value	0.00	0.01	0.00	0.00	-	-
微纤丝角 Micro microfibrillar angle/(°)	1	16.76±2.18 aA	18.15±1.68 aBC	17.89±2.80 aA	16.16±1.40 aAB	17.18±2.08	0.16
	2	17.03±3.04 aA	18.96±1.24 aBC	17.60±2.74 aA	17.84±1.86 aBC	17.86±2.34	0.37
	3	16.11±3.01 aA	19.76±2.82 bC	17.80±1.64 abA	19.50±1.75 bC	18.29±2.72	0.01
	4	16.42±2.82 aA	18.80±2.78 aBC	17.84±3.03 aA	18.92±1.95 aC	18.00±2.75	0.19
	5	15.69±2.37 aA	17.84±2.56 abABC	18.32±2.98 bA	19.63±1.79 bC	17.87±2.76	0.02
	6	15.89±3.52 aA	16.32±3.00 aAB	17.56±3.27 aA	19.18±2.93 aC	17.24±3.31	0.14
	7	16.77±4.81 aA	16.18±4.45 aAB	16.86±3.52 aA	18.48±1.79 aC	17.07±3.76	0.62
	8	15.59±3.86 aA	15.03±3.62 aA	15.00±2.81 aA	15.65±1.50 aA	15.32±2.97	0.95
	总均值 Mean value	16.28±3.17	17.63±3.17	17.34±2.92	18.17±2.32	-	-
	P值 P value	0.97	0.01	0.35	0.00	-	-

注:不同小写字母表示同一林龄欧美杨在不同密度下差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一密度下欧美杨无性系在不同林龄间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

Notes: The lowercase letters indicate the significant difference in the planting density of *Populus×euramericana* at the same age of stand. The capital letters indicate the significant difference in the planting density of *Populus×euramericana* at different age of stand. The significance levels were all 0.05, the same as tab.4, 5 and 6.

### 3 讨论

造林密度和欧美杨的品种特性与保存率的变化关系密切,研究其变化规律对欧美杨品种选择及生产的科学规划具有实际意义。不同造林密度下,3品种每年的保存率变化趋势差异显著,京2杨保存率在第1至8年保持中等幅度的持续下降,其第8年保存率最低;渤丰1号杨与渤丰3号杨保存率变化相似,均为较小造林密度的保存率优于较大造林密度,较大造林密度在第3年和第6年附近出现下降。整体看,2 m×6 m造林密度下渤丰1号杨的保存率最高,始终高于87%。保存率出现差异可能是因为渤丰3号杨和渤丰1号杨均是来自荷兰的欧洲黑杨145号(*P. nigra*)与河南的美洲黑杨

65号杨(*P. deltoides* cl. '55/65' × *P. deltoides* cl. '2KEN8')的杂交种,而京2杨属聚合型杂种欧美杨,但其遗传成分中欧洲黑杨仅占1/8,而美洲黑杨占7/8<sup>[17-18]</sup>。由遗传结构差异而带来的杂种优势<sup>[17, 19-20]</sup>,在本研究中极为明显:渤丰3号杨和渤丰1号杨既有欧洲黑杨的抗逆性,也获得了美洲黑杨的速生性,能适应当地冬季寒冷等环境条件而且有较好的生长表现;而京2杨主要成分是美洲黑杨,继承欧洲黑杨抗寒能力较弱,加之其大冠幅的特点,使京2杨生长处于逆境状态,这可能是其保存率低的重要原因。据报道<sup>[13-14, 21]</sup>,造林密度会影响杨树冠层特性、生物量、树体和叶片形态以及光合作用。本研究结果表明,欧美杨品种随着林龄的

表4 不同造林密度下欧美杨的纤维结构

Table 4 The fiber structure of *Populus×euramericana* with different planting densities

纤维结构 Fiber structure	林龄 Age of stand/a	造林密度 Planting density				总均值 Mean value	P值 P value
		2 m×3 m	2 m×4 m	2 m×5 m	2 m×6 m		
纤维长宽比 Fiber aspect ratio	1	33.05±4.60 aA	31.09±2.14 aA	34.33±6.24 aA	30.79±7.87 aA	32.13±5.48	0.58
	2	37.92±6.49 aAB	36.67±4.13 aA	39.47±6.03 aAB	36.68±5.17 aA	37.69±5.41	0.67
	3	41.13±8.19 aBC	46.43±5.93 aBC	42.97±2.84 aB	43.54±8.26 aB	43.52±6.67	0.42
	4	47.62±6.77 aCD	45.17±6.49 aB	42.08±3.86 aB	43.89±5.01 aB	44.69±5.78	0.23
	5	46.58±6.07 aCD	47.47±7.25 aBC	42.69±5.91 aB	44.22±3.07 aB	45.24±5.85	0.30
	6	49.96±6.98 aD	46.05±5.07 aBC	44.75±10.06 aB	43.86±7.93 aB	46.16±7.75	0.37
	7	51.84±7.60 aD	49.83±7.37 aBC	45.24±5.64 aB	49.33±5.95 aB	49.06±6.85	0.22
	8	49.65±9.14 aD	52.17±7.95 aC	52.83±8.41 aC	49.96±7.68 aB	51.15±8.07	0.81
	总均值 Mean value	44.72±9.20	44.36±8.76	43.42±7.75	42.78±8.65	-	-
P值 P value	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	
纤维长 Fiber length/ $\mu$ m	1	739.50±158.93 aA	708.00±57.96 aA	806.91±211.39 aA	700.68±107.43 aA	732.58±136.12	0.48
	2	890.69±190.82 aB	814.17±57.5 aB	866.74±164.89 aAB	881.28±141.84 aB	863.22±144.19	0.70
	3	929.58±130.26 aB	1002.38±83.64 aC	961.99±126.48 aBC	991.58±159.26 aBC	971.38±125.52	0.63
	4	1096.20±91.71 aC	996.46±98.81 aC	984.62±93.73 aBC	1059.66±117.59 aC	1034.24±107.13	0.08
	5	1088.82±104.64 aC	1090.87±117.53 aCD	1078.71±99.30 aC	1102.24±85.28 aCD	1090.16±98.23	0.97
	6	1127.88±136.85 aC	1069.63±87.67 aCD	1088.26±124.85 aCD	1098.46±119.67 aCD	1096.06±115.46	0.77
	7	1180.89±75.69 aC	1129.35±113.75 aDE	1100.76±119.36 aCD	1209.80±75.08 aDE	1155.20±103.35	0.10
	8	1170.99±133.29 aC	1185.78±114.25 aE	1222.26±142.97 aD	1219.55±117.84 aE	1199.65±124.03	0.79
	总均值 Mean value	1028.07±194.54	999.58±177.02	1022.78±177.61	1032.91±198.41	-	-
P值 P value	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	
纤维宽 Fiber width/ $\mu$ m	1	22.30±2.82 aA	22.87±2.46 aA	23.34±2.65 aA	23.39±3.61 aA	22.94±2.84	0.86
	2	23.57±3.25 aA	22.39±2.46 aA	21.94±2.31 aA	24.13±2.89 aA	23.01±2.78	0.32
	3	22.96±2.85 aA	21.84±2.89 aA	22.59±4.10 aA	23.20±3.72 aA	22.65±3.32	0.85
	4	23.38±3.38 aA	22.32±2.80 aA	23.65±3.78 aA	24.26±2.33 aA	23.40±3.07	0.62
	5	23.67±3.31 aA	23.16±1.81 aA	25.5±2.64 aA	24.99±2.14 aA	24.33±2.62	0.19
	6	22.79±2.98 aA	23.34±1.78 aA	24.91±3.47 aA	25.47±3.14 aA	24.13±3.00	0.19
	7	23.13±3.10 aA	22.86±2.02 aA	24.47±2.48 aA	24.82±3.27 aA	23.82±2.78	0.36
	8	23.99±3.15 aA	22.96±2.33 aA	23.37±2.49 aA	24.69±2.65 aA	23.75±2.64	0.55
	总均值 Mean value	23.22±3.00	22.72±2.28	23.74±3.13	24.37±2.96	-	-
P值 P value	0.96	0.90	0.25	0.75	-	-	

增长, 其对生存空间的需求增加, 当初始造林密度满足不了其生存需求时, 空间上的竞争使保存率下降以增加其生存空间。人工林的造林密度与林分后期密度关系紧密, 林木的生长受此影响, 过高的造林密度会使林分中可利用的空间减少, 从而加剧林木间的竞争, 林木的死亡率上升、生长受到抑制,

必需适当调整林分密度, 才能促进林木生长发育, 达到速生丰产的效果<sup>[11-12, 15, 22]</sup>。

造林密度和品种对欧美杨人工林生产力具有显著的影响。研究表明, 密度主要与胸径生长相关显著<sup>[15-16]</sup>。本研究中, 品种和造林密度对黑杨派品种胸径生长均有极显著 ( $p<0.01$ ) 的效应; 品种与造

表5 不同造林密度下的纤维形态  
Table 5 The fiber morphology of different planting densities

纤维形态 Fiber morphology	林龄 Age of stand/a	造林密度 Planting density				总均值 Mean value	P值 P value
		2 m×3 m	2 m×4 m	2 m×5 m	2 m×6 m		
壁腔比 Ratio of wall to cavity	2	0.31±0.06 aA	0.31±0.05 aA	0.33±0.03 aA	0.31±0.06 aA	0.31±0.05	0.82
	4	0.29±0.04 aA	0.33±0.06 aA	0.32±0.03 aA	0.31±0.05 aA	0.31±0.05	0.20
	6	0.29±0.03 aA	0.29±0.06 aA	0.27±0.07 aA	0.31±0.05 aA	0.29±0.05	0.49
	8	0.33±0.05 aA	0.29±0.05 aA	0.31±0.04 aA	0.33±0.05 aA	0.31±0.05	0.21
	总均值 Mean value	0.30±0.05	0.31±0.06	0.31±0.05	0.31±0.05	-	-
	P值 P value	0.19	0.33	0.05	0.80	-	-
木纤维组织比量 Wood fiber ratio/%	2	64.45±7.80 aA	68.26±5.39 aB	64.69±4.97 aB	61.09±5.29 aB	64.62±6.26 c	0.11
	4	58.58±7.74 aA	58.94±4.73 aA	62.43±7.09 aB	64.12±5.35 aB	61.02±6.51 b	0.20
	6	60.12±4.83 aA	60.88±7.81 aA	62.84±6.75 aB	60.78±3.99 aB	61.15±5.86 b	0.80
	8	56.50±6.16 aA	59.26±9.26 aA	55.58±7.08 aA	54.97±6.07 aA	56.58±7.13 a	0.61
	总均值 Mean value	59.91±7.09	61.83±7.74	61.39±7.16	60.24±6.02	-	-
	P值 P Value	0.10	0.03	0.03	0.01	-	-

表6 不同密度处理下欧美杨的化学成分  
Table 6 Chemical composition of *Populus×euramericana* with different planting densities

化学成分 Chemical composition	造林密度 Planting density				总均值 Mean value	P值 P value
	2 m×3 m	2 m×4 m	2 m×5 m	2 m×6 m		
水分 Water content/%	7.52±1.51 a	6.97±0.29 a	7.72±1.04 a	7.09±0.55 a	7.33±0.89 a	0.75
综纤维素 Holo cellulose/%	76.29±1.14 a	77.19±1.82 a	78.44±2.22 a	76.86±1.93 a	77.19±1.76 a	0.55
纤维素 Cellulose/%	40.54±1.08 a	41.21±0.56 a	41.75±1.47 a	42.76±1.61 a	41.56±1.36 a	0.24
酸不溶木素 Acid accumulator insoluble lignin/%	19.32±2.35 a	18.45±2.80 a	19.26±1.70 a	18.56±1.35 a	18.9±1.86 a	0.93
酸溶木素 Acid accumulator soluble lignin/%	3.79±0.73 a	3.47±0.59 a	3.75±1.01 a	3.99±0.31 a	3.75±0.63 a	0.84
总木素 Total lignin/%	23.11±2.24 a	21.91±2.78 a	23.01±0.92 a	22.55±1.65 a	22.65±1.79 a	0.88

林密度的互作在第2至6年均具有显著效应,而在第7和第8年互作效应不显著。说明品种对不同造林密度的响应不一,根据胸径表现筛选品种、造林密度有利于人工林的营造栽培。据悉,渤丰1号杨和渤丰3号杨是针对东北环渤海湾地区设计杂交的欧美杨造林品种,其综合表现优于108杨<sup>[18]</sup>。随林龄增长,首先郁闭的是造林密度较大的人工林,杨树胸径的生长会较早受到竞争而被抑制<sup>[23]</sup>;而品种与造林密度的互作效应可以看做基因型与环境的互作效应,试验结果表明互作效应随林龄的增长会消失,这与相关的研究结果一致<sup>[24-25]</sup>。第8年试验结束时2 m×4 m和2 m×6 m造林密度下欧美杨各品种的胸径表现最好,但2 m×4 m造林密度下各品

种的保存率较低。综合各品种保存率和胸径的表现,应当选择2 m×6 m造林密度来营造人工林。

造林密度对欧美杨品种木材物理和化学性质的效应不明显,第8年试验结束时,4种造林密度下欧美杨木材的解剖性质和化学成分均差异不显著,这可能是由于保存率的连年变化导致了生存空间的增加。鲍甫成等<sup>[26]</sup>认为,阔叶树木材密度会因林分中郁闭度的增加而减少。基本密度是木材在用作纤维原料时的重要性质,密度为0.4~0.6 g·cm<sup>-3</sup>的木材坚硬适中且易于制浆;木纤维长度不仅与木材的利用关系紧密,而且也是评价木浆的一项重要因素。纤维长度的增加会提高纸张的耐撕度、抗拉强度、耐破度和耐折度等性质;壁腔比对纸张的性能

产生影响,壁腔比越小,纸张强度越大;上等造纸用材的标准是壁腔比小于1。高木纤维组织比量也是选择造纸材树种时的考虑因素<sup>[27]</sup>。纸浆材的木材纤维应细且长,长宽比大于30,且愈大愈好<sup>[28]</sup>。在试验的第8年,欧美杨平均木材基本密度为 $0.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,平均微纤丝角为15.32,平均长宽比达51.15,平均纤维长达 $1\,199.65\ \mu\text{m}$ ,平均纤维宽达 $23.75\ \mu\text{m}$ ,平均壁腔比为0.31,平均木纤维组织比量达56.58%。是易于制浆,并可以用于生产优质性能纸张的上等造纸用材。

适宜造林密度的确定应充分考虑培育材种和品种特性。本研究中,欧美杨品种人工林的培育主要是纸浆用材,因此,木材的化学成分倍受关注。结果表明,造林密度愈小,欧美杨木材纤维素含量愈高,这一趋势与姜岳忠等<sup>[28]</sup>、柴修武等<sup>[29]</sup>、曹福亮<sup>[30]</sup>对不同造林密度杨树的木材化学性质的研究结果相同。本研究中,不同密度下欧美杨的综纤维素含量间差异不显著,均大于76%;4种密度处理下的综纤维素含量排序为:  $2\text{ m}\times 3\text{ m}<2\text{ m}\times 6\text{ m}<2\text{ m}\times 4\text{ m}<2\text{ m}\times 5\text{ m}$ 。总体上看,造林密度愈小,综纤维素的含量愈高。欧美杨的酸溶木素含量均高于3.25%,可以使用酸法制纸浆,总木素的含量在22%左右。酸不溶木素的含量均低于19.97%,这一结果与雷金选等<sup>[31]</sup>研究的8种杨树的材性结果略有差异。欧美杨木材的各化学成分在不同密度下均差异不显著(表7), $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ 和 $2\text{ m}\times 6\text{ m}$ 密度欧美杨的总木素含量和水分含量较低, $2\text{ m}\times 5\text{ m}$ 和 $2\text{ m}\times 6\text{ m}$ 密度的纤维素含量较高, $2\text{ m}\times 4\text{ m}$ 和 $2\text{ m}\times 5\text{ m}$ 密度的综纤维素较高。相比之下,造林密度较小的欧美杨木材化学成分更适宜纸浆的生产。

## 4 结论

(1) 较大的造林密度对欧美杨3个品种的保存率和胸径产生了抑制作用;较小造林密度下欧美杨的保存率更高。3个欧美杨派品种的适应性存在差异,渤丰1号杨和渤丰3号杨优于京2杨。  
(2) 品种、造林密度、品种与造林密度的互作对欧美杨胸径的生长均有显著效应,品种与造林密度的互作效应对胸径的影响随时间增长而变弱。  
(3) 造林密度对欧美杨的木材性质的影响不显著。随林龄的增大,木材基本密度、纤维长、纤维长宽比显著增大,而欧美杨木材的微纤丝角、木纤

维组织比量显著减小,纤维宽的变异较小,其木材性质均符合纸浆材要求。(4) 在大凌河流域平原及类似环境下,渤丰1号杨和渤丰3号杨更适合生产,且造林密度最少不能小于 $2\text{ m}\times 6\text{ m}$ 。本试验中,渤丰3号杨有发展大径材的潜力,而高保存率的渤丰1号杨适合纸浆材人工林的营造。

## 参考文献:

- [1] 吕爱霞,杨吉华.3种阔叶树气体交换特性及水分利用效率影响因子的研究[J].水土保持学报,2015,19(3):188-200.
- [2] 苏晓华,丁昌俊,马常耕.我国杨树育种的研究进展及对策[J].林业科学研究,2010,23(1):31-37.
- [3] Kang M, Zhang Z, Noormets A, et al. Energy partitioning and surface resistance of a poplar plantation in northern China[J]. Biogeosciences, 2015, 12(14): 4245-4259.
- [4] Lutter R, Tullus A, Kanal A, et al. Above-ground growth and temporal plant-soil relations in midterm hybrid aspen (*Populus tremula* L. $\times$ *P. tremuloides* Michx.) plantations on former arable lands in hemiboreal Estonia[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2017, 32(8): 688-699.
- [5] Jansson G, Hansen J K, Haapanen M, et al. The genetic and economic gains from forest tree breeding programmes in Scandinavia and Finland[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2017, 32(4): 273-286.
- [6] Karp A, Shield I. Bioenergy from plants and the sustainable yield challenge[J]. New Phytologist, 2008, 179(1): 15-32.
- [7] 黄国伟,苏晓华,黄秦军.美洲黑杨不同生长势无性系生长和生理特征的差异[J].林业科学,2012,48(4):27-34.
- [8] 丁昌俊,黄秦军,张冰玉,等.北方型美洲黑杨不同无性系重要性状评价[J].林业科学研究,2016,29(3):331-339.
- [9] 丁昌俊,张伟溪,高 暎,等.不同生长势美洲黑杨转录组差异分析[J].林业科学,2016,52(3):47-57.
- [10] 任建中,刘长青,汪清锐,等.杨树纸浆材优良无性系选择方法的研究[J].北京林业大学学报,2003,25(4):25-29.
- [11] 贾亚运,何宗明,周丽丽,等.造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响[J].生态学杂志,2016,35(5):1177-1181.
- [12] Ning K, Ding C J, Huang Q J, et al. Transcriptome profiling revealed diverse gene expression patterns in poplar (*Populus\texttimes}euramericana*) under different planting densities[J]. PLoS ONE, 2019, 14(5): e0217066.
- [13] Benomar L, DesRochers A, Larocque G R. The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada[J]. Trees, 2012, 26(3): 939-949.
- [14] Tun T N, Guo J, Fang S Z, Tian Y. Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2018, 33(5): 464-



- 474.
- [15] 郑海水,黎明,汪炳根,等.西南桦造林密度与林木生长的关系[J].林业科学研究,2003,16(1):81-86.
- [16] 黄宝灵,吕成群,蒙钰钗,等.不同造林密度对尾叶桉生长、产量及材性影响的研究[J].林业科学,2000,31(1):81-90.
- [17] 张蕾,苏晓华,张冰玉,等.京2杨组培条件的优化及再生体系建立[J].林业科学研究,2007,20(6):787-793.
- [18] 黄秦军,苏晓华,王胜东,等.杨树新品种‘渤丰1号’杨和‘渤丰2号’杨的综合评价[J].林业科学,2014,50(5):75-81.
- [19] Birchler J A, Auger D L, Riddle N C. In search of the molecular basis of heterosis[J]. *The Plant Cell*, 2003, 15(10): 2236-2239.
- [20] 陈晓阳,沈熙环.林木育种学[M].北京:高等教育出版社,2005.
- [21] 王宁宁,黄娟,丁昌俊,等.不同栽植密度下欧美杨叶片耐荫性与生物累积量的关系[J].林业科学研究,2015,28(5):691-700.
- [22] 王春胜,赵志刚,曾冀,等.广西凭祥西南桦中幼林林木生长过程与造林密度的关系[J].林业科学研究,2013,26(2):257-262.
- [23] 方升佐,徐锡增,吕士行.杨树定向培育[M].合肥:安徽科学技术出版社,2004.
- [24] Bian L, Shi J, Zheng R, *et al.* Genetic parameters and genotype-environment interactions of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in Fujian Province[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(6): 582-592.
- [25] Vazquez R D, Zas R, Merlo E, *et al.* Stability across sites of Douglas-fir provenances in Northern Spain[J]. *Forest Genetics*, 2003, 10(1): 71-82.
- [26] 鲍甫成,江泽慧.中国主要人工林树种木材性质[M].北京:中国林业出版社,1998.
- [27] 成俊卿.木材学[M].北京:中国林业出版社,1985.
- [28] 姜岳忠,王桂岩,吕雷昌,等.杨树纸浆林定向培育技术研究[J].林业科学,2004,40(1):123-127.
- [29] 柴修武,刘家平,魏德津.短轮伐期I-69杨林分密度与材性的关系[J].林业科技通讯,1991(5):2-5.
- [30] 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:自然科学版,1994(2):41-46.
- [31] 雷金选,张桂兰,张桂珍.造纸植物纤维原料和纸浆中酸溶木素与总木素的测定(续)[J].中国造纸,1987(3):22-27.

# Effect of Planting Density on Growth and Wood Property of Three *Populus×euramericana* Cultivars

LIU Ning, DING Chang-jun, LI Bo, DING Mi, SU Xiao-hua, HUANG Qin-jun

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

**Abstract:** [Objective] To study the impact of planting density on *Populus×euramericana* cultivars so as to benefit the selection and cultivation of fast-growing and high-yielding poplar plantation. [Method] The test was conducted in Dalinghe Plain, northeast China, taking three *Populus×euramericana* cultivars (“J2”, “Bofeng 1” and “Bofeng 3”) as trial materials. Four planting densities of 2 m×3 m, 2 m×4 m, 2 m×5 m and 2 m×6 m were designed. The DBH of the 2nd to the 8th year, the preservation rate of the 1st to 8th year, the physical properties of the 1st to the 8th year, the anatomical properties of the 2nd, 4th, 6th and 8th year, and the chemical composition of the *Populus×euramericana* wood were measured and calculated. The effects of cultivars, planting density and cultivars×planting density on DBH of *Populus×euramericana* were evaluated by two-factor variance analysis year by year, and multiple comparisons were made for each trait. [Result] Cultivars and planting density had significant effects on DBH growth ( $p < 0.01$ ). Planting density×cultivars had significant effects on DBH growth from the 1st to the 6th years ( $p < 0.05$ ), but there was no significant interaction effect from the 7th to the 8th years ( $p > 0.05$ ). Among various planting densities, the preservation rate of “J2” decreased significantly year by year, and the DBH and preservation rate of each density were the worst in the 8th year. The preservation rate of “Bofeng 1” was the highest with the planting density of 2 m×6 m. The DBH of “Bofeng 3” was the largest with the planting density of 2 m×6 m. Higher planting densities (2 m×3 m and 2 m×4 m) would significantly lower the preservation rate of *Populus×euramericana* in the early growth stage, while lower planting densities (2 m×5 m and 2 m×6m) would decrease more slowly. Multiple comparisons of wood properties showed that planting density had little significant effect on wood properties. The ratio of fiber length to width and total lignin content of wood increased with the increase of planting density. The smaller planting density increased the fibril angle, the content of cellulose and the content of holocellulose. [Conclusion] The adaptability of the three *Populus×euramericana* cultivars is different. The performance of “Bofeng 1” and “Bofeng 3” are better than “J2”. Larger afforestation density will inhibit the preservation rate, breast diameter, and wood properties of the three cultivars; with the lower afforestation density, *Populus×euramericana* will have a higher preservation rate. With the increase of forest age, the wood basic density, fiber length, fiber length to width ratio of *Populus×euramericana* will increase significantly, the wood microfibril angle, wood fiber tissue ratio will decrease significantly, and the fiber width variation is small. The effect of the interaction of afforestation density and variety on DBH decreases with the age of the plantation. When establishing *Populus×euramericana* plantation for pulpwood, the initial planting density should not be less than 2 m×6 m, and match the tree species with the site in order to maximize the output. In the experiment, the wood properties of *Populus×euramericana* are suitable for paper and pulp production. The high preservation rate of “Bofeng 1” is suitable for the establishment of pulpwood plantation, and “Bofeng 3” has the potential to develop large-diameter industrial plantation.

**Keywords:** planting density; *Populus×euramericana* cultivars; preservation rate; DBH; wood property