

# 栽植密度对小黑杨树木生长因子和木材物理力学性质的影响\*

刘杏娥<sup>1</sup>,汪佑宏<sup>2</sup>,徐斌<sup>2</sup>,张群<sup>3</sup>

(1. 国际竹藤网络中心,北京 100102; 2. 安徽农业大学林学与园林学院,合肥 230036;

3. 中国林业科学研究院林业研究所,北京 100091)

**摘要:**以山西朔州小黑杨 (*Populus xiaohei* T. S. Hvang et Liang)人工林为试验材料,研究了3种栽植密度(1000、500、250株·hm<sup>-2</sup>)对小黑杨树木生长、木材生长量和主要物理力学性质的影响。结果表明,栽植密度对树木冠幅、冠长、胸径、湿心材面积、边材面积和木材基本密度、顺纹抗压强度和MOE的影响达到极显著水平;对湿心材比例、边材比例和MOR的影响达到显著水平;对基本密度的径向变异有一定程度的影响,但不改变其变异的一般趋势,即从髓心向外,先下降后呈上升的变化趋势。

**关键词:**栽植密度;小黑杨;树木生长因子;物理力学性质

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2007)02-0226-06

## Effects on growth factors and wood physical and mechanical properties of *Populus xiaohei* in different planting densities

LU Xing-e<sup>1</sup>, WANG You-hong<sup>2</sup>, XU Bin<sup>2</sup>, ZHANG Qun<sup>3</sup>

(1. International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102;

2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036;

3. The Institute of Forestry, CAF Beijing 100091)

**Abstract:** The effects of different planting densities (1 000, 500, 250 trees · hm<sup>-2</sup>) on growth factors and wood physical and mechanical properties of *Populus xiaohei* T. S. Hvang et Liang were studied in Shuozhou county, Shanxi Province. The results indicated that the effects of planting density on crown width, crown length, DBH, wetwood areas, sapwood areas, wood basic density, compression strength parallel to grain and MOE were highly significant, and those effects on wetwood proportional, sapwood proportional and MOR were significant. The planting densities had certain effects on the radial variation of wood basic density, but the trends of the radial variation were not changed. The results showed an initially descend and then gentle increase from pith to outward.

**Key words:** planting density; *Populus xiaohei* T. S. Hvang et Liang; growth factors; wood physical and mechanical properties

林分密度是仅次于环境质量对林木生长有着重要作用的因素,它既制约林木的生长,又影响林木的质量,是培育森林的重要控制因素,单株树木及整个林分的生长都与林分密度紧密相关<sup>[1,2]</sup>,所以林分密度影响着林木的生长和木材形成过程。小黑杨

属强阳性树种,在生长过程中对顶光和侧光遮荫都非常敏感,其水平根系又十分发达,要求一定的营养面积供其对水分和矿物质的吸收。这就需要在营林的时候考虑合理的栽植密度,满足单株和林分的生长。几十年来,林学家们<sup>[1-4]</sup>一直致力于进行林分密

\* 收稿日期: 2006-10-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(30230420)资助。

作者简介:刘杏娥(1971-)女,博士。

度造林试验研究,就林分密度对树木生长和木材性质的影响得出一些重要结论,为我国主要用材树种营林培育提供了重要的理论依据。而对西北地区的小黑杨树种研究很少,只在造林的前几年进行了一般生长量统计,没有进行系统分析。为此,作者分析了3种栽植密度对小黑杨树冠冠幅、冠长、胸径、胸径分布、湿心材面积及木材物理力学性质等方面影响的特点,旨在为小黑杨树种的推广、营林培育和高效利用提供合理的依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

试验地点位于山西省朔州市薛家庄国营林场。试验地概况和材料见文献[5]所述。

### 1.2 标准地调查、试材采集制作

2004年5月在3种栽植密度的标准地中,进行每木检尺,调查林下植被和土壤,测定不同栽植密度林分中小黑杨的胸径,树高,东西、南北向冠幅和枝下高。

试材采集方法按照国家标准《木材物理力学性质试验方法》<sup>[6]</sup>中有关规定进行。采用砍伐样木方法进行采集。根据每木检尺结果,按径阶大小及频率分布选取样木株数。在每个径阶选取1株标准木为解析木,以2m为一个区分段截取厚为2~5cm的圆盘,进行树干解析的内业测定。

在伐倒的36株试材的1.3m处截取10cm厚的圆盘和长为2m(1.3m~3.3m)的木段,标出南北向,将圆盘、木段运回、气干。野外记录情况见文献[5]。

试样制作:在10cm厚的圆盘上截取一厚为2cm的圆盘,用于测定湿心材面积、边材面积等木材生长量指标。将木段按照国家标准的要求取样和试件加工。从圆盘上截取一厚为2.5cm、宽2cm的木条,每隔2个年轮截取作为基本密度试样。

### 1.3 木材生长量及物理力学性质测定

生长量的测定:根据小黑杨湿心材的特点,用图像分析软件测算出边材面积和湿心材面积。具体操作如下:用数码相机垂直拍摄圆盘的照片,在圆盘上放置一个1cm×1cm的小纸片。将所获得的圆盘图像用Photoshop图像处理软件进行增强、滤色处理,然后用SigmaScan图像分析软件对处理后的图像进行分类计算,采用图像自动灰度值识别技术和人工手描划线,计算机自动计算相结合的手段进行边材面积,湿心材面积及胸高断面面积的测量。

主要力学性质的测定:按照木材国家标准,在4t、5t的万能力学试验机上进行测试。

基本密度采用排水法进行测定。

### 1.4 数据处理与分析

采用多变量统计、方差和线性回归进行分析,所有的数据处理皆在Excel和SAS软件中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 栽植密度对小黑杨树木生长因子的影响

2.1.1 栽植密度对树冠生长的影响 树冠是树木进行光合作用、制造干物质的场所。树冠的大小和形状对树木的生长、木材的形成和木材性质有重要影响。

表1 3种栽植密度的小黑杨树木生长量统计及方差分析

Table 1 Analysis of variance and statistics of tree growths of *Populus xiaohei* at three planting densities

| 栽植密度<br>Planting<br>density | 胸径/cm<br>Diameter | 树高/m<br>Height    | 胸高形率<br>Artificial<br>form quotient | 冠长/m<br>Crown<br>length | 冠幅/m<br>Crown width | 湿心材<br>面积/cm <sup>2</sup><br>Wetwood areas | 边材面积/cm <sup>2</sup><br>Sapwood<br>areas | 湿心材<br>比例/%<br>Wetwood<br>proportion | 边材比例/%<br>Sapwood<br>proportion |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------|--|--|--------------------------------------|---------------------------------|
| 2×5 m (A)                   | 18.4 <sup>a</sup> | 17.6 <sup>a</sup> | 0.73 <sup>a</sup>                   | 6.3 <sup>a</sup>        | 2.50 <sup>a</sup>   | 140.79 <sup>a</sup>                        | 90.98 <sup>b</sup>                       | 59.98 <sup>a</sup>                   | 40.02 <sup>a</sup>              |
| 4×5 m (B)                   | 22.8 <sup>b</sup> | 17.8 <sup>a</sup> | 0.72 <sup>a</sup>                   | 7.0 <sup>b</sup>        | 3.64 <sup>b</sup>   | 198.50 <sup>b</sup>                        | 131.63 <sup>a</sup>                      | 60.69 <sup>ab</sup>                  | 37.89 <sup>ab</sup>             |
| 4×10 m (C)                  | 27.3 <sup>c</sup> | 17.9 <sup>a</sup> | 0.75 <sup>a</sup>                   | 8.4 <sup>c</sup>        | 5.15 <sup>c</sup>   | 303.45 <sup>c</sup>                        | 140.80 <sup>a</sup>                      | 68.13 <sup>b</sup>                   | 31.87 <sup>b</sup>              |

注:小写字母相同的表示用SNK法检验在0.05水平上差异不显著。下同。

Note: Means with the same small letter are not significantly different by SNK's tests at 0.05 level. The same as follows.

3种栽植密度的小黑杨人工林树冠冠幅和冠长调查结果如表1所示。由表1可知,栽植密度对小黑杨单株立木的冠幅影响明显,从栽植密度为A的2.5m、B的3.64m到C的5.15m,分别增加了

45.6%和106%。体现了栽植密度较大的林分,冠幅较窄;栽植密度较小的林分,冠幅较伸展的特点。方差分析表明:在3种栽植密度下,冠幅在0.001水平上差异显著,并且两两栽植密度间差异显著。3

种栽植密度间冠幅大小的差异与曹福亮等<sup>[1]</sup>对黑杨派南方型杨树栽植密度效应的研究结果相一致。

不同栽植密度间树冠冠长的变化没有冠幅大,但经 SNK法检验,表明冠长间的差异显著,其变化趋势与冠幅的变化相一致,即  $C > B > A$ 。

**2.1.2 栽植密度对树高生长的影响** 在 A、B、C 3种栽植密度下,小黑杨人工林单株立木平均树高生长基本相似,分别为 17.6 m、17.8 m 和 17.9 m。经方差分析表明,栽植密度对小黑杨的树高生长影响不显著。

**2.1.3 栽植密度对胸径的影响** 胸径是研究林分密度最重要的因子。在立地条件相同的情况下,胸径的大小,直接受林分密度影响。在 3种栽植密度下,小黑杨单株立木胸径间存在着显著差异。表现趋势为:随着栽植密度的增加,胸径均值明显降低。即栽植密度为 A 的林分平均胸径为 18.4 cm, C 为 27.3 cm,比 A 大 47.94%,比 B 大 19.31%,大小依次为  $A < B < C$ 。用 SNK法检验表明,这种差异表现

在两两栽植密度间显著,这也说明宽大的栽植空间因减少资源的竞争而促进树木胸径的生长。

直径分布是林分结构的基本规律之一,从经营利用的角度来看,林分直径直接关系到林分的蓄积量、材种规格及其经济价值。因此,正确预测林分的直径分布,是正确预测林分产量、论证营林措施合理性的前提。从图 1 可以看出,对于栽植密度为  $2 \times 5$  m 的林分,胸径分布最多的是 18 cm 径阶,占整体林木的 29.8%,胸径分布的偏度系数为 0.32,峰度系数为 -0.35;对 B 密度的林分,胸径分布最多的是 24 cm 径阶,占总株数的 30%,偏度系数为 -0.296,峰度系数为 -0.31;栽植密度为 C 的林分,胸径分布宽度最小,分布相对集中,最小、最大径阶分布都较少,分别为 7.5% 和 5%。28 cm 径阶分布最多,占 55%,其分布的偏度系数为 0.509,峰度系数为 1.77。因此,在 3种栽植密度下,小黑杨林木胸径分布不是呈严格的正态分布。

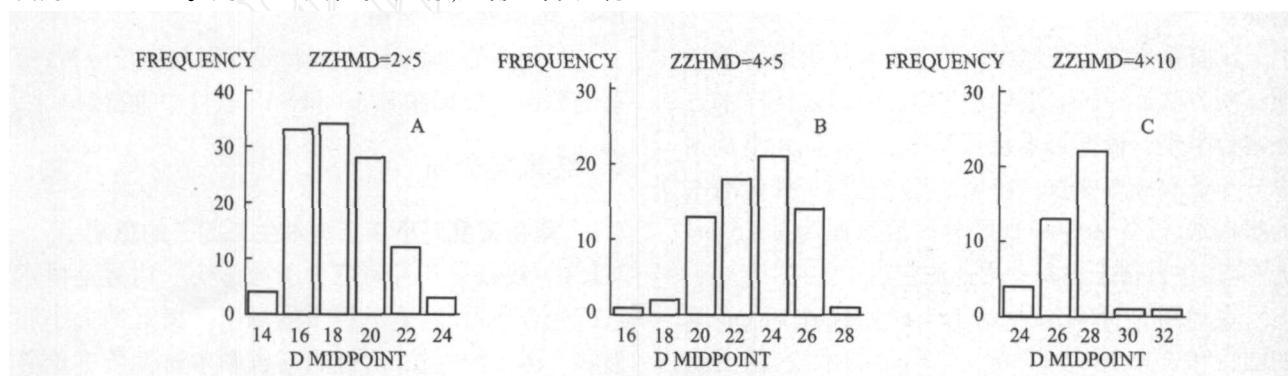


图 1 2 m × 5 m (A)、4 m × 5 m (B) 和 4 m × 10 m (C) 的小黑杨胸径径阶分布

Figure 1 The distribution of DBH at 2 m × 5 m (A), 4 m × 5 m (B) and 4 m × 10 m (C) planting densities of *Populus xiaohai*

**2.1.4 栽植密度对胸高形率的影响** 树木干形的好坏,直接影响木材本身的质量和经济效益。胸高形率是衡量树干圆满度的标志。在 3种密度的林分中,小黑杨胸高形率的范围为 0.72 ~ 0.75。变化趋势为:随着栽植密度的增加,呈“V”形变化,栽植密度较大、较小的林分,胸高形率较大,且密度最小的林分其值最大。方差分析表明,这种差异没有达到显著水平。

**2.1.5 栽植密度对边材面积的影响** 边材是“在生活树干内包含有活细胞和储藏物质的那部分木材”<sup>[7]</sup>。树木的根部从土壤中吸收的水分和矿物质通过木质部的边材输送到树冠,供叶片进行光合作用,所以边材对于树木的生长发育来说有很重要的意义。

3种栽植密度的单株立木木材边材面积、面积

比例的统计值和方差分析见表 1 所示。由表 1 可以看出,3种栽植密度的边材面积均值分别为: 90.98 cm<sup>2</sup>, 131.63 cm<sup>2</sup> 和 140.8 cm<sup>2</sup>。即随着栽植密度的减小,边材面积增大,栽植密度为 C 的林分中的边材面积均值比 A 密度大 54.76%。随着栽植密度的增加,边材面积比例增加。因为随着营养空间的加大,树木生长加快,树干直径增粗,虽然边材面积也增加,但与整个胸高断面积增加量相比较,只是一部分,特别是对于接近成熟或过熟林的树木,其活力下降,树木需要的水分和矿物质的量减少,较小栽植密度的林分因充足的营养物质和空间而产生较多的光合物质,所以相对于栽植密度较大的林分而言,其储藏物质积累多,形成心材的比例也高。经 SNK法检验表明,3种栽植密度间边材面积差异显著,且 A 与 B、C 间差异显著; B、C 的差异不显著。边材面积比

例也表现出相似的规律。边材面积随栽植密度的减小而增大的趋势与 Yang and Hazenberg<sup>[4]</sup>的研究结果相一致,他在研究黑云杉和白云杉时认为,较大的栽植空间产生更多的边材面积。

由此可以初步认为,对于有明显边材的树种,其边材面积与栽植密度间有关系,且一般呈正相关性,这种正相关性归因于稀疏的林分一般树冠体积较大<sup>[8]</sup>。

**2.1.6 栽植密度对湿心材面积的影响** 杨树湿心材的形成常伴随着高含水率和颜色加深,木材呈现深褐色或红色,故常称为“湿心材”或“变材”。3种栽植密度的小黑杨湿心材比例和湿心材面积见表1所示。由表可知,小黑杨湿心材率高于其它杨树树种<sup>[9]</sup>,分别为59.98%,60.69%,68.38%。小黑杨的湿心材比例高于其它杨树无性系的原因可能是树种不同,湿心材比例主要受遗传控制<sup>[10]</sup>。方差分析表明,3种栽植密度的湿心材比例差异显著,随着栽植密度的加大,湿心材比例降低。经SNK法检验,2m×5m与4m×10m间的湿心材比例差异明显,而2m×5m与4m×5m间的差异不显著;同样,4m×5m与4m×10m间的差异也不显著。

在栽植密度为A、B、C的林分中,湿心材面积均值依次为140.79 cm<sup>2</sup>,198.5 cm<sup>2</sup>和303.45 cm<sup>2</sup>。表现为:随着栽植密度的增加,湿心材面积随之减少的趋势。经SNK法分析揭示,在两两栽植密度间湿心材面积差异显著。小黑杨湿心材面积随栽植密度的变化特点与 Yang and Hazenberg<sup>[4]</sup>对黑云杉和白云杉研究结果相一致。

由上述分析可以看出,用不同的指标(湿心材面积/湿心材比例)来表示3种栽植密度间小黑杨湿心材大小这一特征时,其结果是不一样的。随着栽植密度的增大,湿心材比例增加,而湿心材面积却下降。正如Climent<sup>[11]</sup>在研究立地质量和环境因子对木材心材大小的影响时所阐述,用不同的心材参数描述(直径,面积,体积和心材比例)心材大小,其

结果是不一样的。

**2.2 栽植密度对小黑杨木材物理力学性质的影响**

**2.2.1 对木材基本密度的影响** 栽植密度对小黑杨木材基本密度均值的影响结果见表2所示。由表2可以看出:随着栽植密度的减小,基本密度呈上升的趋势,但最大值出现在栽植密度为4m×5m的林分,栽植密度为2m×5m的林分最小。经方差分析表明,栽植密度为4m×5m与2m×5m、4m×10m间的差异达到了0.01水平上显著,而2m×5m与4m×10m间差异不显著。

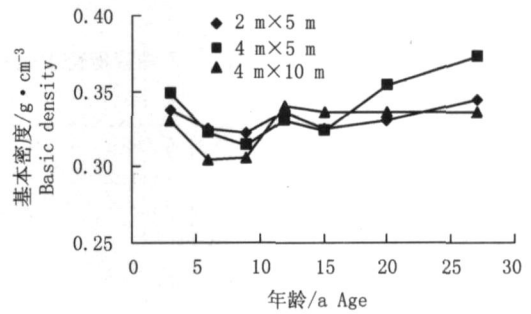


图2 3种栽植密度的小黑杨木材基本密度径向变异  
Figure 2 The curves of radial variation of basic density of *Populus xiaohei* at three planting densities

栽植密度对小黑杨木材基本密度的径向变化的影响见图2所示。由图2可发现,3种栽植密度的小黑杨木材基本密度的径向变化趋势相似,皆为从髓心向外,先下降后呈上升直到树皮,符合Panshin II式<sup>[12]</sup>。

关于栽植密度对木材基本密度的影响大小及有无影响,涉及的因子比较多,不能一概而论<sup>[13]</sup>。从营林角度来看,关键可能在于如何使林分维持在一个合理的生长环境下。本研究认为,栽植密度对小黑杨木材基本密度有影响,中间密度与最大、最小密度间差异显著。

表2 3种栽植密度的小黑杨木材物理力学性质的统计分析

Table 2 Statistics analysis of *Populus xiaohei* mechanical and physical properties at three planting densities

| 栽植密度<br>Planting density | 顺纹抗压强度 /MPa<br>Compression strength parallel to grain |      |      | 抗弯弹性模量 /GPa<br>Modulus of elasticity bending |      |      | 抗弯强度 /MPa<br>Modulus of rupture |      |      | 基本密度 /g·cm <sup>-3</sup><br>Basic density |       |       |
|--------------------------|---|------|------|--|------|------|---------------------------------|------|------|---|-------|-------|
|                          | Mean  | SD   | CV%  | Mean   | SD   | CV%  | Mean                            | SD   | CV%  | Mean                                      | SD    | CV%   |
|                          | 2 m × 5 m (A)   | 40.2 | 1.50 | 3.73   | 10.9 | 0.87 | 7.94                            | 71.9 | 3.15 | 4.38                                      | 0.33  | 0.011 |
| 4 m × 5 m (B)            | 39.9  | 1.24 | 3.12 | 10.5   | 0.72 | 6.88 | 74.1                            | 3.79 | 5.11 | 0.34                                      | 0.013 | 3.95  |
| 4 m × 10 m (C)           | 36.7  | 1.15 | 3.13 | 9.7  | 0.45 | 4.63 | 70.2                            | 1.98 | 2.82 | 0.33                                      | 0.009 | 2.59  |

2.2.2 栽植密度对小黑杨木材主要力学性质的影响 小黑杨木材不同单株及不同栽植密度间的 MOR/MOE和顺纹抗压强度的差异,分别见表 2、表 3及图 3、图 4所示。由表中可以看出,MOE在单株间存在显著差异。栽植密度为 A 的林分,MOE均值为 10.0~13.2GPa,变异系数为 7.94%;B 林分的均值为 9.7~11.9GPa,变异系数为 6.88%;C 林分为 9.3~10.4GPa,变异系数为 4.63%,且 MOE均值 A 林分分别比 B、C 高 11.2%和 3.8%。

经方差分析表明,3种栽植密度间小黑杨木材 MOE的均值有差异,大小依次为 A>B>C,体现为

栽植密度越小,MOE值越小,变异幅度也小。且栽植密度为 A、B 间,差异不显著,栽植密度为 A、B 与 C 间达到 0.01 水平上差异显著。这与刘盛全<sup>[14]</sup>对滩地 F63 杨的研究结果相一致。

在单株间,MOR 值存在显著差异,变异幅度介于 2.82%~5.11%之间。栽植密度为 A 的林分,木材的 MOR 均值为 67.9~80.0MPa;C 林分,MOR 在 65.8~72.2MPa 间变动。方差分析表明,栽植密度对木材 MOR 的影响达到 0.05 水平上差异显著,且 4 m×5 m 与 4 m×10 m 间差异显著;2 m×5 m 与 4 m×5 m,4 m×10 m 与 2 m×5 m 间差异不显著。

表 3 3种栽植密度的小黑杨木材物理力学性质的方差分析

Table 3 Analysis of variance of *Populus xiaohei* poplar mechanical and physical properties at three planting densities

| 栽植密度<br>Planting densities | 顺纹抗压强度 /MPa<br>Compression strength<br>parallel to grain | 抗弯弹性模量 /GPa<br>Modulus of<br>elasticity bending | 抗弯强度 /MPa<br>Modulus of rupture | 基本密度 /g·cm <sup>-3</sup><br>Basic density |
|----------------------------|--|---|---------------------------------|---|
| 2 m×5 m (A)                | 40.2 <sup>a</sup>  | 10.9 <sup>a</sup>                               | 71.9 <sup>ab</sup>              | 0.327 <sup>c</sup>                        |
| 4 m×5 m (B)                | 39.9 <sup>a</sup>  | 10.5 <sup>a</sup>                               | 74.4 <sup>a</sup>               | 0.336 <sup>b</sup>                        |
| 4 m×10 m (C)               | 36.7 <sup>b</sup>  | 9.7 <sup>b</sup>                                | 70.2 <sup>b</sup>               | 0.329 <sup>b</sup>                        |
| <i>P</i>                   | 0.0001   | 0.0022  | 0.0217                          | 0.0045                                    |

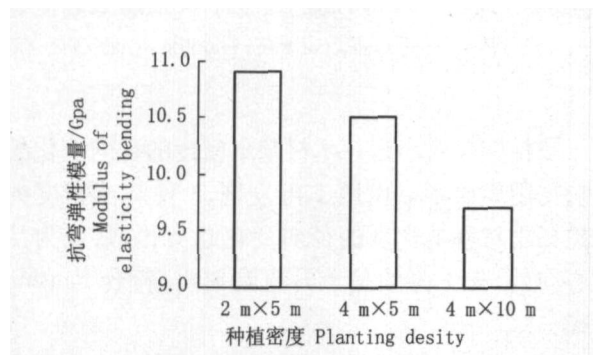


图 3 不同栽植密度的 MOE 比较

Figure 3 Comparison of modulus of elasticity bending in different planting densities

单株间木材顺纹抗压强度的差异达到显著水平。在 A、B、C 栽植密度的林分中,单株林木的顺纹抗压强度的均值分别在 37.9~43.6MPa、37.3~41.7MPa 和 34.6~38.1MPa 间变动,变异系数约 3%。在 3 种栽植密度间,顺纹抗压强度的均值也有差异,表现为 A 最大,B 次之,C 最小,且 C 与 A、B 间的差异达到 0.001 水平上显著,A、B 间差异不显著。这说明并非栽植密度越大,力学性质指标越好;栽植密度越小,力学性质越差。所以在“三北”地区,小黑杨人工林的经营可以适当增加栽植密度,并不降低木材质量而可以充分利用林地资源获得较多的木材蓄积量。

根据木材分级标准<sup>[15]</sup>,3种栽植密度的小黑杨木材 MOE 属于 到 级,MOR 和顺纹抗压强度均属于 级。这比北京顺义地区<sup>[16]</sup>小黑杨的 MOR、MOE 和顺纹抗压强度平均值高,产生这种原因可能是山西朔州地区年降雨量比北京地区的年降雨量少;而杨树是需水量较大的树木。Eidman<sup>[16]</sup>就水分对杨树的生长进行了研究,他把杨树和其它树种做比较,以下数字说明从 5 月到 9 月,每 g 干叶重 24 h 吸收的平均水分 (cm<sup>3</sup>):冷杉属 5.1,欧洲栎属 0.6,落叶松属 22.6,桦属为 45.1,杨树为 50.1;而生长的干物质与吸收的水分数量的关系数字为:欧洲山杨在生长活跃期叶干重每增加 1 g,每天要平均吸收

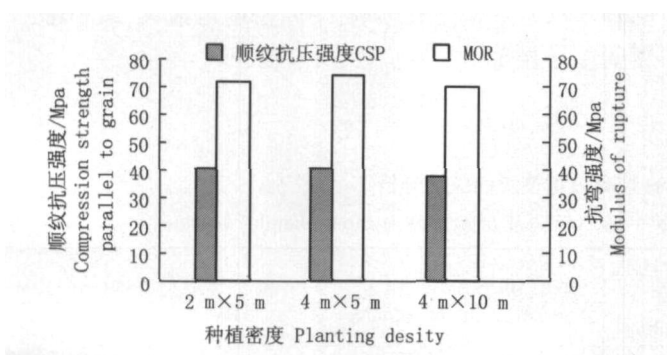


图 4 不同栽植密度顺纹抗压强度和 MOR 的比较

Figure 4 Comparison of compression strength parallel to grain and modulus of rupture in different planting densities

5.79 cm<sup>3</sup>的水,桦属为6.59,冷杉属2.64,而栽培杨树,估计为6~7 cm<sup>3</sup>,生长活跃季节则为1 m<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>。水分的缺乏导致树木对土壤水分的竞争激烈,抑制了小黑杨树木生长,导致产生较慢的生长量,而获得较高质量的木材。

### 3 结论

通过对3种栽植密度的小黑杨人工林树木生长因子和木材生长量、主要物理力学性质的研究分析得知:栽植密度对冠幅、冠长、胸径、湿心材面积、边材面积的影响达到极显著水平;对湿心材比例、边材比例的影响达到显著水平;对树高和胸高形率的影响不显著。随着栽植密度的增加,冠幅、冠长、胸径、湿心材面积、边材面积随之减小;湿心材、边材比例增加。边材面积在2 m×5 m与4 m×5 m、4 m×10 m间差异显著,但4 m×5 m与4 m×10 m间差异不显著。湿心材比例、边材比例在2 m×5 m和4 m×10 m间差异显著,其余两两栽植密度间差异不显著。

在3种栽植密度下,小黑杨林木胸径分布差异显著。栽植密度越小,较大径阶林木的比例越高;栽植密度越大,较小径阶的林木越多。

栽植密度对木材基本密度、顺纹抗压强度和MOE的影响达到极显著水平;对MOR的影响达显著水平。随着栽植密度的增加,MOE、顺纹抗压强度也随之增大。栽植密度对木材基本密度的径向变异有一定程度的影响,但不改变其变异的一般趋势,即从髓心向外,先下降后呈上升的变化趋势。

### 参考文献:

- [1] 曹福亮,徐赐增,吕士行,等.黑杨派南方型杨树密度效应规律的研究[J].南京林业大学学报,1991,15(3):12-19.
- [2] 徐宏远,陈章水.不同密度1-69杨树生长规律的研究[J].林业科学研究,1994,7(1):61-66.
- [3] 寇文正.林分直径分布的研究[J].南京林产工业学院学报,1982(1):51-65.
- [4] Yang K C, Hazenberg G. Impact of spacing on sapwood and heart wood thickness in *Picea mariana* and *P. glauca* [J]. Wood Fiber Sci, 1992, 24(3): 330-336.
- [5] 任海青,刘杏娥,江泽慧,等.栽植密度对小黑杨人工林木材解剖特性的影响[J].林业科学研究,2006,19(3):364-369.
- [6] 国家技术监督局发布.中华人民共和国国家标准 GB1927-43-91,木材物理力学性质试验方法[S].北京:中国标准出版社,1991.
- [7] International association of wood anatomists( IAWA). Multilingual glossary of terms used in wood anatomy[M]. Verlagsanstalt Buchdruckerei Konkordia, Winterthur, Switzerland, 1964: 186.
- [8] Gougeon F. Recognizing the forest from the trees: Individual tree crown delineation, classification, and regrouping for inventory purposes[C]//Third international airborne remote sensing conference and exhibition Copenhagen, Denmark. ER M International, Ann Arbor, MI 1997: 807-814.
- [9] 汪桂岩,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,2001,133(2):1-11.
- [10] 张冬梅.纸浆材毛白杨无性系材质性状的遗传分析[D].北京:中国林业科学研究,2003.
- [11] Climent J, Gil L, Pardos J. Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis* Chr Sm ex DC[J]. Forest Ecology and Management, 1993, 59: 165-174.
- [12] Panshin A J, De Zeeuw C. Textbook of wood technology [M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1980.
- [13] 熊平波.初植密度和间伐强度对杉木木材性质的影响[J].林业科学,1987,23(1):39-42.
- [14] 刘盛全.长江滩地杨树人工林木材性质与培育及利用的关系研究[D].北京:中国林科院,1997.
- [15] 江泽慧,彭镇华.世界主要树种木材科学特性[M].北京:科学出版社,2001.
- [16] 赵天赐,陈章水.中国杨树集约栽培[M].北京:中国科学技术出版社,1994.