

## 4种无性系速生材杉木的材性比较研究

沈浩, 吴玉乐, 杨冉, 关莹, 刘盛全, 高慧\*

(安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

**摘要:** 以开3、开13、F24x那1-1和大坝8共4种速生材杉木为研究对象, 测定其化学组成、密度、力学性质及主要解剖特性, 比较不同无性系速生材杉木材性。结果显示: 开13的综纤维素、 $\alpha$ -纤维素含量最高, 木质素含量最低, 基本密度、气干密度和绝干密度最大且力学性质优于另3个无性系; 随着树龄的增加, 4种杉木苯醇抽提物含量从髓心向外逐渐减少, 综纤维素与 $\alpha$ -纤维素从髓心向外逐渐增加, 木质素从髓心向外前10年逐渐增加, 后10年逐渐减少; 基本密度、气干密度和绝干密度及力学性质从髓心向外逐渐增加; 微纤丝角从髓心向外波状逐渐减少, 管胞长度从髓心向外逐渐增加。通过对杉木的化学组成、密度、力学性质及解剖特性的结果综合评价得出, 4种无性系中开13的材性为最佳。

**关键词:** 杉木; 无性系; 径向变异; 化学组成; 密度; 力学性质; 解剖特性

中图分类号: S781

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2020)05-0713-09

### Comparative study on wood properties of four clones of fast-growing *Cunninghamia lanceolata*

SHEN Hao, WU Yule, YANG Ran, GUAN Ying, LIU Shengquan, GAO Hui

(School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In this study, we took four clones of planted fast-growing *Cunninghamia lanceolata*, Kai 3, Kai 13, F24x1-1 and Daba8 as raw materials to measure and analyze the chemical components, density, mechanical properties and anatomy properties of the woods and compare the wood properties of the fast-growing *Cunninghamia lanceolata* among the four clones. The results showed that the basic density, air dry density, absolute dry density and the mechanical properties of Kai 13 was the highest, and its mechanical properties were better than the other three clones. Kai 13 had the highest contents of holocellulose and  $\alpha$ -cellulose while with the lowest lignin content. With the increase of tree-age, the contents of benzene alcohol extracts from the four clones of *Cunninghamia lanceolata* were decreased gradually from the pith to the bark, while the contents of holocellulose and  $\alpha$ -cellulose were increased gradually from the pith to the bark; the lignin contents were increased gradually in the first decade and decreased in the later decade. The basic density, air dry density, absolute-dry density and mechanical properties were gradually increased from the pith to the bark; the microfibril angles of the four woods were decreased gradually from the pith to the bark, and the tracheid length was increased gradually from the pith to the bark. Through the comprehensive evaluation of the chemical composition, density, mechanical properties and anatomical characteristics of *Cunninghamia lanceolata*, Kai 13 has the best material properties among the four clones.

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata*; clone; radial variation; chemical composition; density; mechanical properties; anatomical characteristics

我国木材供给严重不足, 近年来持续增长的木材进口量使我国成为世界第一大木材进口国<sup>[1]</sup>。同时我国木材的利用率低, 速生材经营管理未成熟<sup>[2-3]</sup>。木材的生长特点决定其径向材性复杂且多变, 木材的材

性性质在径向上的变化与轴向、弦向相比更为明显和重要<sup>[4-5]</sup>。

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) 是我国特有的重要造林和用材树种, 其具有生长快、

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2017YFD0600201)资助。

作者简介: 沈浩, 硕士研究生。E-mail: 472707536@qq.com

\* 通信作者: 高慧, 教授。E-mail: huigaozh@163.com

材质优、用途广、经济价值高等优点,是主要的商用建筑材料之一<sup>[6]</sup>。材性变异是木材的一大特征,众多学者对天然林杉木材性做了大量研究,如秦特夫等<sup>[7]</sup>研究了杉木在不同树高处心边材化学成分变化规律,发现杉木边材的综纤维素和 $\alpha$ -纤维素含量高于心材,杉木边材的木质素在各个树高部位均高于心材;骆秀琴等<sup>[8]</sup>研究表明杉木密度径向变异在不同高度和不同方向均为有一定波动的直线;朱栗琼<sup>[9]</sup>研究表明管胞长度从髓心向外逐渐增加、微纤丝角逐渐降低;任海青和中井孝<sup>[10]</sup>对杉木人工林木材的抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度进行研究,结果表明杉木的抗弯强度、顺纹抗压强度由胸高直径处向上呈波浪性增加,抗弯弹性模量则稳定降低,不同高度间杉木物理力学树皮处大于髓心处,但对人工林速生材杉木的材性径向变异研究不够全面和深入。鉴于此,作者选取了4种不同无性系人工林速生材杉木作为研究对象,通过测定它们

的化学组成、密度、力学性质及主要解剖特性,研究其材性径向变异规律,分析不同无性系和生长轮杉木材性的差异性,以期为人工林速生材杉木合理培育及加工利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试样采集于浙江省开化县林场,林场属亚热带季风气候,年平均气温 16.4 °C,年平均降雨量 1 814 mm,年平均日照时数 1 712.5 h,无霜期 252 d。

### 1.2 原材料及试材的制备

4种杉木无性系开3、开13、F24x那1-1和大坝8均采集于浙江省开化县林场(1998年造林),每种无性系各5株,在树干高1.3 m处截取若干圆盘用于实验。4种无性系杉木树龄、平均胸径和树高均值见表1。

表1 4种无性系杉木的树龄、胸径和树高

Table 1 The tree age, diameter at breast height, and tree height of four clones of *cunninghamia lanceolata*

无性系 Clone	编号 Number	树龄/a Tree age	胸径/cm DBH	树高/m Tree height
开3 Kai 3	CL-3	20	17.8	18.0
开13 Kai 13	CL-13	20	17.0	17.1
F24x那1-1 F24 x1-1	CL-24	20	19.9	22.3
大坝8 Daba 8	CL-8	20	17.5	19.0

**1.2.1 化学组成试样准备** 原木风干处理后划分年轮,将第1至第4年(心材),第5至第6年、第7至第8年、第9至第10年、第11至第13年、第14至第16年以及第17至第20年各计1份。各生长轮取出后切成火柴棒大小,原料粉碎后,取40~60目试样,平衡水分后进行化学组成测定。

**1.2.2 密度试样准备** 原木气干后,截取厚度为100 mm的圆盘,端面刨光后,在心材、心边材过渡区和边材分别标注,然后将3个不同区域制取成试样,精加工成20 mm×20 mm×20 mm标准试样,精确到0.01 mm。

**1.2.3 解剖特性试样准备** 从基部向上截取7 cm厚度圆盘,沿髓心向外解锯成宽1.5 cm的小木条,然后根据不同年轮将木条切成10 mm(R)×10 mm(T)×15 mm(L)的小木块,用于解剖特性的测量研究。

**1.2.4 力学性能试样准备** 将截取厚度为5 cm圆盘调整木材含水率至12%左右,根据国家标准GB/T 1929-2009《木材物理力学试件锯解及试样截取方法》制取试件。由于制样的局限性,木材抗弯强度、抗弯弹性模量取心材、边材;顺纹抗压强度取心材、

心边材和边材;硬度测量是沿着径向方向制样。

### 1.3 测量方法

**1.3.1 化学组成的测定方法** 水分含量的测定参考GB/T 36055-2018,苯醇抽提物含量的测定参考GB/T 35816-2018,木质素及综纤维素含量的测定参考GB/T 35818-2018, $\alpha$ -纤维素含量的测定参考GB/T 744-2004,半纤维素含量是由综纤维素与 $\alpha$ -纤维素含量相减计算所得。化学组成含量均以绝干材为基准,数值均为组内5株样本的平均值,每组3~5个平行样品。

**1.3.2 密度的测定方法** 密度测定参考GB 1933-2009,数值均为组内5株样本的平均值,每组3~5个平行样品。

**1.3.3 解剖性能的测定方法** 参照GB/T 10336-2002,按1:1的比例混合冰乙酸和双氧水后将试样离析,在显微镜下测定管胞长度。微纤丝角采用XRD-3型X射线衍射仪对样品进行测定,实验条件:Cu靶; $\alpha$ 射线; $\lambda=0.154$  nm;36 kV;20 mA; $h=15$  min。每个切片测30根纤维,数值均为5株样本的平均值,每组3~5个平行样品。

**1.3.4 木材力学性质的测定方法** 木材抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗压强度等分别参照 GB/T 1936.1-2009《木材抗弯强度试验方法》、GB/T 1937-2009《木材抗弯弹性模量测定方法》和 GB/T 1935-2009《木材顺纹抗压强度试验方法》进行测定。各试件在欧姆斯诺 (Amsler) 4 t 万能力学试验机上测定。每个指标测定的有效样本数不少于 30 个, 数值均为 5 株样本的平均值, 每组 3~5 个平行样品。

## 2 结果与分析

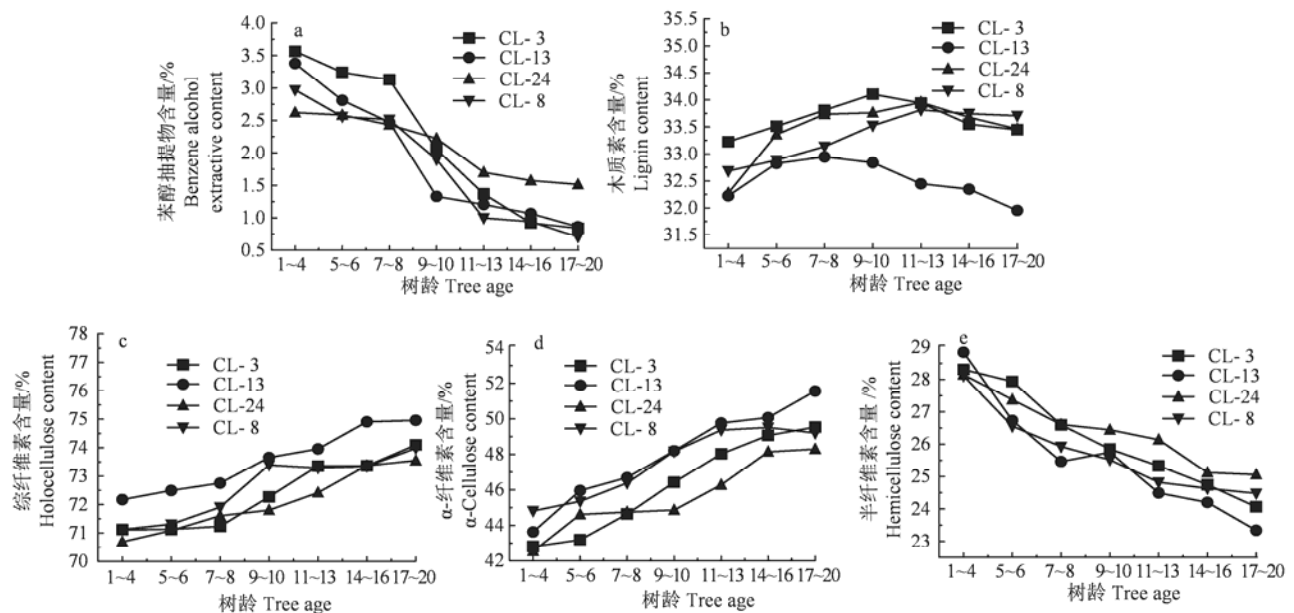
### 2.1 4 种无性系杉木化学组成及其径向变异分析

木材的化学组成是影响木材性质和加工利用的重要因素, 它赋予木材一定的强度和物理力学性

质<sup>[11-12]</sup>。表 2 为 4 种无性系杉木化学组成含量, 图 1 为 4 种无性系杉木化学组成径向变异。从图 1 和表 2 可以得出, 4 种无性系杉木中, 开 13 的木质素 (32.72%) 含量最低、综纤维素 (73.41%) 和  $\alpha$ -纤维素 (47.66%) 的含量最高。根据图 1 中径向变异比较可知, 随着树龄的增加, 苯醇抽提物从髓心向外逐渐降低, 木质素从髓心向外前 10 年先增加后 10 年逐渐降低; 综纤维素从髓心向外逐渐增加,  $\alpha$ -纤维素从髓心向外逐渐增加, 半纤维素从髓心向外逐渐降低。上述径向变异与艾卿等<sup>[13]</sup>研究水杉化学组成中的苯醇抽提物、木质素和纤维素径向变异规律一致。

表 2 4 种无性系杉木的化学组成

无性系 Clone	苯醇抽提物 Benzene alcohol extractive	木质素 Lignin	综纤维素 Holocellulose	$\alpha$ -纤维素 $\alpha$ -Cellulose	半纤维素 Hemicellulose
CL-3	2.18±0.23	33.76±0.27	72.36±0.39	46.24±0.43	26.12±0.29
CL-13	1.92±0.19	32.72±0.23	73.41±0.32	47.66±0.49	25.75±0.35
CL-24	2.00±0.14	33.46±0.22	72.08±0.31	45.64±0.40	26.44±0.26
CL-8	1.80±0.16	33.08±0.23	72.88±0.29	47.40±0.43	25.48±0.39



a. 苯醇抽提物; b. 木质素; c. 综纤维素; d.  $\alpha$ -纤维素; e. 半纤维素。

a. benzene alcohol extractive; b. lignin; c. holocellulose; d.  $\alpha$ -cellulose; e. hemicellulose.

图 1 4 种无性系杉木主要化学组成径向变异

Figure 1 Radial variations of main chemical compositions of four clones *Cunninghamia lanceolata*

### 2.2 4 种无性系杉木化学组成的相关性分析

表 3 为 4 种无性系杉木的化学组成方差分析。由表 3 的方差分析结果可以看出, 不同无性系对苯醇抽提物含量、木质素含量、 $\alpha$ -纤维素含量、

综纤维素含量的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 而对半纤维素含量影响不显著 ( $P > 0.05$ ); 生长轮对各化学组成含量影响均呈显著。由  $F$  值结果可以发现, 生长轮对苯醇抽提物含量和综纤维素的影响较大,

对  $\alpha$ -纤维素含量的变化, 无性系与生长轮这两种因素的影响差别不大, 对木质素变化影响较大的是无性系。

2.3 4种无性系杉木密度及其径向变异分析

密度是判断木材各项力学性质的重要指标, 因此掌握杉木密度变异规律十分重要。密度变异与杉木生长速度有关, 一般生长快的树木, 木材密度有下降趋势<sup>[14-15]</sup>。图2为4种无性系杉木密度径向变异, 表4为4种无性系杉木密度。从图2

和表4可以得出, 4种无性系杉木中的密度, 开13的基本密度(0.31 g·cm<sup>-3</sup>)、气干密度(0.36 g·cm<sup>-3</sup>)和绝干密度(0.35 g·cm<sup>-3</sup>)均为最大。基本密度、气干密度和绝干密度的径向变异为: 从髓心向外逐渐增加。此结果与骆秀琴等<sup>[8]</sup>指出的杉木密度的径向变异模式在不同高度和不同方向均为一定波动的直线变化规律一致, 与李晓储等<sup>[16]</sup>研究发现杉木由髓心向外至18~20年, 木材密度随树龄增加而增大变化规律的结果也相同。

表3 4种无性系杉木的化学组成方差分析

Table 3 Analysis of variances of chemical compositions of four clones of *cunninghamia lanceolata*

化学组成 Chemical composition	影响因素 Impact factor	离差平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance
苯醇抽提物 Benzene-alcohol extractive	因素 A	17.599	3	3.520	3.593	0.004
	因素 B	93.994	6	15.666	26.511	0.000
木质素 Lignin	因素 A	80.526	3	16.105	8.095	0.000
	因素 B	26.807	6	4.468	1.962	0.033
$\alpha$ -纤维素 $\alpha$ -Cellulose	因素 A	73.870	3	14.774	3.747	0.003
	因素 B	83.759	6	13.960	3.568	0.002
综纤维素 Holocellulose	因素 A	141.936	3	28.387	4.325	0.001
	因素 B	547.419	6	91.236	20.246	0.000
半纤维素 Hemicellulose	因素 A	19.309	3	3.962	1.065	0.381
	因素 B	224.657	6	37.443	14.476	0.000

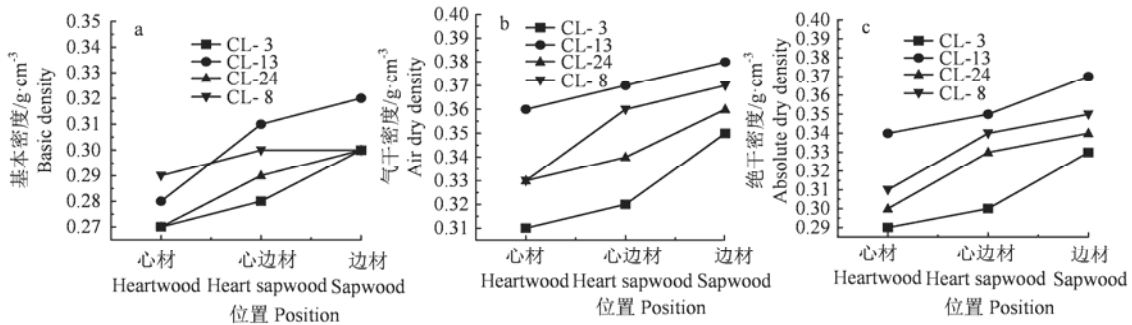
注: 因素 A—无性系差异, 因素 B—生长轮差异。

Note: factor A – clonal difference, factor B – difference in growth ring.

表4 4种无性系杉木的密度

Table 4 The densities of four clones of *cunninghamia lanceolata*

无性系 Clone	基本密度 Basic density	气干密度 Air dry density	绝干密度 Absolute dry density
CL-3	0.28±0.17	0.33±0.24	0.31±0.04
CL-13	0.31±0.22	0.36±0.11	0.35±0.07
CL-24	0.29±0.20	0.34±0.20	0.32±0.02
CL-8	0.30±0.07	0.35±0.13	0.33±0.19



a. 基本密度; b. 气干密度; c. 绝干密度。

a. basic density; b. air dry density; c. absolute dry density.

图2 4种无性系杉木密度径向变异

Figure 2 The radial variation of densities from four clones of *cunninghamia lanceolata*

表 5 4 种无性系杉木的密度方差分析  
Table 5 The density variance analysis of four clones of *cunninghamia lanceolata*

密度 Density	影响因素 Impact factor	离差平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance
基本密度 Basic density	因素 A	0.606	3	0.121	27.659	0.000
	因素 B	0.023	2	0.012	2.650	0.041
气干密度 Air dry density	因素 A	0.101	3	0.034	5.424	0.001
	因素 B	0.088	2	0.044	7.089	0.001
绝干密度 Absolute dry density	因素 A	0.822	3	0.164	184.117	0.000
	因素 B	0.060	2	0.030	33.739	0.000

注: 因素 A—无性系差异, 因素 B—位置差异。

Note: factor A – clonal difference, factor B – difference in position.

## 2.4 4 种无性系杉木密度的相关性分析

4 种无性系杉木密度的方差分析结果(表 5)显示, 不同无性系对基本密度、气干密度、绝干密度影响呈极显著差异 ( $P < 0.01$ ); 位置(心材、心边材过渡区和边材)对基本密度、气干密度、绝干密度影响显著 ( $P < 0.05$ )。通过对  $F$  值大小的分析可知, 对基本密度、绝干密度的影响较大的因素是无性系的差异, 无性系与位置对气干密度的变化均有影响。

## 2.5 4 种无性系杉木的解剖特性及径向变异分析

### 2.5.1 微纤丝角与管胞长度及其径向变异分析

微纤丝角一般指的是纤维细胞次生壁的 S2 层, 是

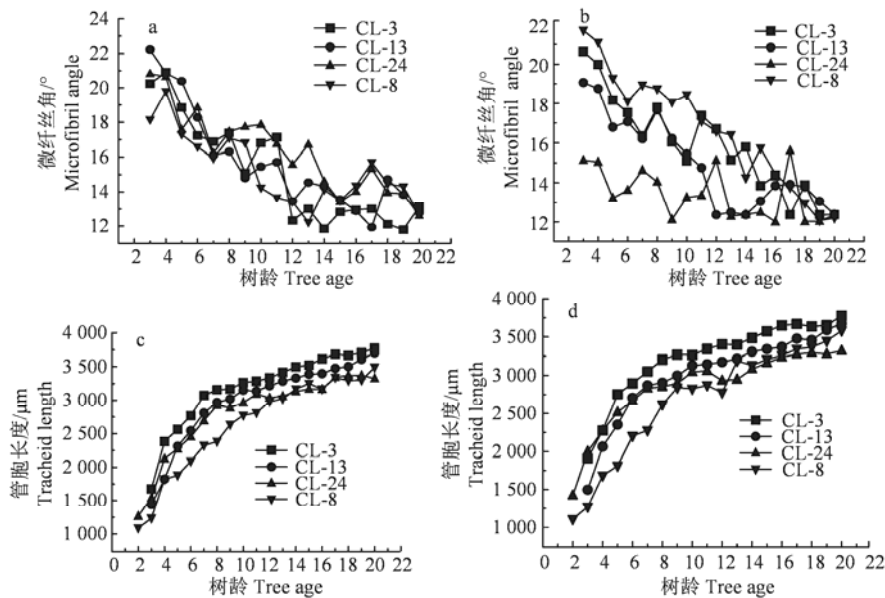
影响木材材性的主要因子, 其影响木材的解剖性质、尺寸稳定性、弹性模量及加工性能等<sup>[17-19]</sup>。纤维强度一般随微纤丝角的增加而降低<sup>[20]</sup>。图 3 为 4 种无性系杉木的主要解剖特性径向变异, 表 6 为 4 种无性系杉木的主要解剖特性数值。由图 3 和表 6 所知, 杉木早材的微纤丝角范围为 13.76~15.67°, 晚材范围为 13.04~23.54°, 其中早、晚材微纤丝角相差较大的是 F24x 那 1-1, 其他 3 个无性系相差较小。F24x 那 1-1 早、晚材微纤丝角均最大, 开 3 的最小。在微纤丝角径向变异分析中, 随着树龄的增加, 早、晚材的微纤丝角均呈现出波状下降趋势, 这一结果与李火根<sup>[21]</sup>和费本华等<sup>[22]</sup>研究结果一致。杉木早材

表 6 4 种无性系杉木的解剖特性  
Table 6 The anatomical characteristics of four clones of *cunninghamia lanceolata*

无性系 Clone	部位 Part	微纤丝角/° Microfibril angle	变异幅度 Amplitude of variation	管胞长度/ $\mu\text{m}$ Tracheid length	变异幅度 Amplitude of variation
CL-3	早材 Early wood	13.76	9.76~37.96	3 237	1 018~4 787
	晚材 Late wood	13.04	8.98~44.48	3 264	1 380~4 744
CL-13	早材 Early wood	14.62	9.50~26.03	3 043	782~5 016
	晚材 Late wood	14.13	8.68~24.95	3 051	842~4 765
CL-24	早材 Early wood	15.67	9.65~39.65	2 865	681~4 703
	晚材 Late wood	23.54	9.25~29.29	2 906	656~4 842
CL-8	早材 Early wood	15.30	10.85~30.27	2 664	450~4 899
	晚材 Late wood	15.43	10.84~36.89	2 709	545~5 083

腔径比 Ratio of Lumen diameter to wall thickness	变异幅度 Amplitude of variation	壁腔比 Wall thickness to lumen ratio	变异幅度 Amplitude of variation
0.82	0.27~0.96	0.23	0.05~0.90
0.57	0.12~0.88	0.89	0.15~4.92
0.80	0.35~0.97	0.26	0.03~1.82
0.58	0.19~0.93	0.83	0.08~3.98
0.81	0.38~0.95	0.24	0.05~1.62
0.54	0.12~0.89	0.97	0.13~4.96
0.80	0.36~0.95	0.25	0.05~1.80
0.60	0.20~0.89	0.74	0.12~3.86



a. 早材微纤丝角; b. 晚材微纤丝角; c. 早材管胞长度; d. 晚材管胞长度。

a. microfibril angle of early wood; b. microfibril angle of late wood; c. tracheid length of early wood; d. tracheid length of late wood.

图 3 微纤丝角与管胞长度径向变异

Figure 3 Radial variations of microfibril angle and tracheid length

表 7 4 种无性系杉木解剖特性方差分析

Table 7 The variance analysis anatomical characteristics of four clones of *cunninghamia lanceolata*

解剖特性 Anatomical characteristics	影响因素 Impact factor	离差平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance
微纤丝角 Microfibril angle	因素 A	1 385.469	3	277.094	16.900	0.000
	因素 B	4 328.446	18	240.469	14.667	0.000
	因素 C	216.771	1	216.771	13.221	0.000
管胞长度 Tracheid length	因素 A	212 372.980	3	4 247.796	2 827.711	0.000
	因素 B	145 252.380	19	7 644.283	5 181.312	0.000
	因素 C	180 459.617	1	1 804.617	122.307	0.000

注: 因素 A—无性系差异, 因素 B—生长轮差异, 因素 C—早晚材差异。

Note: factor A – clonal difference, factor B – difference in growth ring, factor C – difference in early and later wood.

的管胞长度为 2 664~3 237  $\mu\text{m}$ , 晚材为 2 709~3 264  $\mu\text{m}$ , 其中, 开 3 早、晚材管胞长度最长分别为 3 237  $\mu\text{m}$  和 3 264  $\mu\text{m}$ , 大坝 8 管胞长度为最小分别为 2 664  $\mu\text{m}$  和 2 709  $\mu\text{m}$ 。随着树龄的增加, 早、晚材管胞长度均呈现出逐渐增加趋势。

**2.5.2 腔径比与壁腔比分析** 由 4 种无性系杉木的解剖特性 (表 6) 可知, 杉木早材的腔径比范围 0.80~0.82, 晚材范围 0.54~0.60, 大坝 8 早、晚材的腔径比最大, F24x 那 1-1 的最小。壁腔比早材范围 0.23~0.26, 晚材的范围 0.74~0.97, 其中 F24x 那 1-1 早晚材壁腔比最大, 大坝 8 最小。

## 2.6 4 种无性系杉木解剖特性相关性分析

4 种无性系杉木解剖特性方差分析结果 (表 7) 显示, 不同无性系、生长轮和早晚材对微纤丝角、

管胞长度的影响均极显著 ( $P < 0.01$ ); 但对  $F$  值大小的比较发现, 对管胞长度的影响较大的因素是生长轮的差异, 对微纤丝角的变化, 三因素的影响相差不多。

## 2.7 4 种无性系杉木的力学性质分析

不同无性系力学性质径向变异见图 4, 测定统计结果见表 8。由表 8 可知, 4 个无性系中的开 13 顺纹抗压强度 (31.70 MPa)、抗弯强度 (59.03 MPa)、抗弯弹性模量 (10.95 GPa) 和平均硬度 (1.68 N) 均优于其他 3 个无性系。从图 8 可以看出, 随着杉木树龄的增加, 顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量均呈增大趋势, 这与孙恒等<sup>[23]</sup>研究的人工林刺槐主要力学性质变化的规律相同。顺纹抗压强度从心材到心边材逐渐增加, 之后增幅变缓。是由于

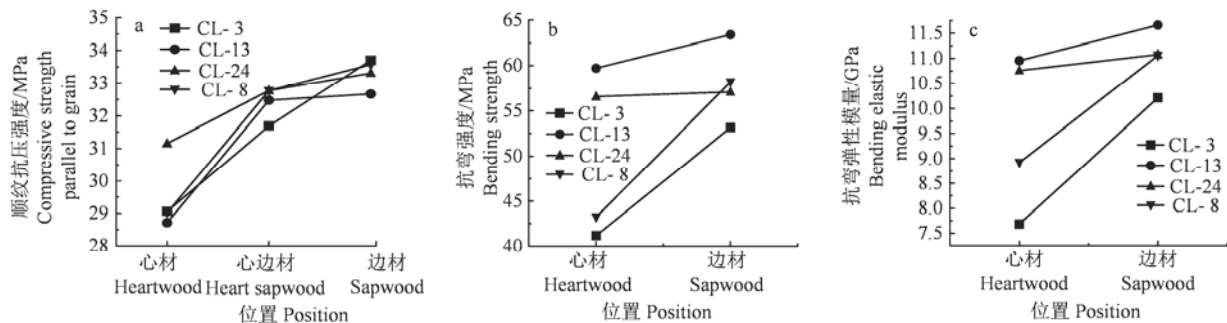
这阶段树木处于快速生长期, 同阶段对应的综纤维素、 $\alpha$ -纤维素、管胞长度增长速度也较快, 心材附近的树木处于幼龄期, 形成层原始细胞尚未成熟, 形成层原始分裂较快, 年生长量也较大到达到成熟期后, 形成层原始细胞分裂变化相对稳定, 此后由于形成层原始细胞分裂减慢, 树木生长速度明显降低, 这导致其顺纹抗压强度也随着降低。在抗弯强

度与抗弯弹性模量上, 二者的变化趋势相同, 均随着树龄的增加而增加, 开 3 和大坝 8 心、边材增长幅度较大, 而开 13 与 F24x 那 1-1 变化幅度较小, 结合化学组成、解剖特性以及密度的径向变异, 开 3 和大坝 8 整材性径向变化幅度大, 但是整体材性并不是最佳。

表 8 4 种无性系杉木力学性质

Table 8 Mechanical properties of four clones of *cunninghamia lanceolata*

无性系 Clone	顺纹抗压强度/MPa Compressive strength parallel to grain	抗弯强度/MPa Bending strength	抗弯弹性模量/GPa Bending elastic modulus	硬度/N Hardness
CL-3	31.16±4.60	51.86±11.26	10.05±1.80	1.61±0.20
CL-13	31.70±3.05	59.03±7.60	10.95±1.31	1.68±0.18
CL-24	31.51±3.05	57.60±7.17	10.09±1.20	1.61±0.21
CL-8	31.55±3.05	55.36±8.42	10.80±1.55	1.58±0.14



a. 顺纹抗压强度; b. 抗弯强度; c. 抗弯弹性模量。

a. compressive strength parallel to grain; b. bending strength; c. bending elastic modulus.

图 4 4 种无性系杉木力学性质径向变异

Figure 4 The radial variation of mechanical properties of four clones of *cunninghamia lanceolata*

表 9 4 种无性系杉木的力学性质方差分析

Table 9 The variance analysis of mechanical properties of four clones of *cunninghamia lanceolata*

力学性质 Mechanical properties	影响因素 Impact factor	离差平方和 SS	自由度 DF	均方 MS	F 值 F value	显著性 Significance
顺纹抗压强度 Compressive strength parallel to grain	因素 A	178.427	3	59.479	4.747	0.003
	因素 B	383.188	2	54.741	4.499	0.000
抗弯强度 Bending strength	因素 A	5 748.816	3	1 149.764	22.359	0.000
	因素 B	8 382.102	2	51.424	12.108	0.000
抗弯弹性模量 Bending elastic modulus	因素 A	104.089	3	20.818	13.037	0.000
	因素 B	260.276	2	1.597	3.739	0.000
硬度 Hardness	因素 A	0.206	3	0.082	2.304	0.019
	因素 B	0.830	2	0.042	1.120	0.015

注: 因素 A—无性系差异, 因素 B—位置差异。

Note: factor A – clonal difference, factor B – difference in position.

## 2.8 4 种无性系杉木力学性质相关性分析

4 种无性系杉木力学性质方差分析 (表 9) 结果表明, 不同无性系及不同位置 (心材、心边材过

渡区和边材) 对顺纹抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量均差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 对硬度达到了影响差异显著 ( $P < 0.05$ )。通过对达到极显著的 3 个

力学性质指标  $F$  值比较, 两因素的影响相差不大。

### 2.9 4种无性系杉木的材性性状整体变异分析

4种无性系杉木材性性状整体变异分析结果(表10)显示, 整体的材性性状变异系数(性状平均值与性状标准差的比值)比较低, 在各自的95%置

信区间内, 变异系数低于10%的材性性状有苯醇抽提物、木质素、综纤维素、 $\alpha$ -纤维素和半纤维素。这些化学组成性状表现十分稳定, 在培育及加工利用中, 主要考虑解剖特性、密度和力学性质。

表10 杉木材性性状整体变异分析

Table 10 The variation analysis of the whole properties of *cunninghamia lanceolata*

指标 Parameter	平均值 Mean	变异系数 /% Coefficient of variation	95%置信区间 Confidence interval at 95%	
			上限 Upper	下限 Lower
苯醇抽提物/% Benzene-alcohol extractive	1.90±0.02	1.05	1.76	2.05
木质素/% Lignin	32.90±1.53	4.65	32.69	33.12
综纤维素/% Holocellulose	72.80±2.05	2.81	72.51	73.08
$\alpha$ -纤维素/% $\alpha$ -Cellulose	46.89±2.67	5.69	46.52	47.26
半纤维素/% Hemicellulose	25.91±1.91	7.37	25.65	26.18
基本密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Basic density	0.29±0.03	10.34	0.29	0.30
气干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Air dry density	0.35±0.04	11.43	0.34	0.35
绝干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Absolute dry density	0.33±0.04	12.12	0.32	0.33
微纤丝角/ $^{\circ}$ Microfibril angle	14.46±4.73	32.71	14.17	14.96
管胞长度/ $\mu\text{m}$ Tracheid length	2 515.93±655.27	26.04	2 507.66	2 524.19
顺纹抗压强度/MPa Compressive strength parallel to grain	32.03±3.43	10.71	32.36	33.14
抗弯强度/MPa Bending strength	55.96±8.60	15.55	55.34	56.16
抗弯弹性模量/GPa Bending elastic modulus	10.72±1.46	13.72	10.26	11.27
硬度/N Hardness	1.68±0.18	10.87	1.62	1.74

注:  $\mu\pm s$  表示平均值±标准差。

Note:  $\mu\pm s$  means average±standard deviation.

### 3 结论

以开3、开13、F24x那1-1和大坝8共4种无性系速生材杉木为研究对象, 对其化学组成、密度、力学性质及主要解剖特性进行测定, 比较其材性及其径向变异。4种无性系杉木径向变异: 随着树龄的增加, 苯醇抽提物从髓心向外逐渐降低; 木质素从髓心向外前10年先增加, 后10年逐渐降低; 综纤维素和 $\alpha$ -纤维素从髓心向外逐渐增加。基本密度、气干密度和绝干密度以及力学性质从髓心向外逐渐增加; 微纤丝角从髓心向外波状下降; 而管胞长度从髓心向外逐渐增加。通过各材性性状比较: 开13的综纤维素和 $\alpha$ -纤维素含量最高; 木质素含量最低; 基本密度、气干密度和绝干密度最大, 且力学性质优于另3个无性系, 结果表明了开13在4个无性系中材性最佳。

从相关性分析可得, 生长轮和无性系对各材性的差异影响, 除无性系对半纤维素含量差异差异不显著外, 其他所测指标都达到显著差异; 化学组成变异系数均低于10%, 表明化学组成性状表现比较

稳定, 在培育及利用中主要考虑解剖特性、密度和力学性质。

### 参考文献:

- [1] 田明华, 史莹赫, 黄雨, 等. 中国经济发展、林产品贸易对木材消耗影响的实证分析[J]. 林业科学, 2016, 52(9): 113-123.
- [2] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1-10.
- [3] KE S F, QIAO D, ZHANG X X, et al. Changes of China's forestry and forest products industry over the past 40 years and challenges lying ahead[J]. For Policy Econ, 2019, 106: 1-12.
- [4] PERRE P, TURNER I. A heterogeneous wood drying computational model that accounts for material property variation across growth rings[J]. Chem Eng J, 2002, 86(1): 117-131.
- [5] 周国模, 郭仁鉴, 韦新良, 等. 浙江省杉木速生材生长模型及主伐年龄的确定[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(3): 219-222.



- [6] 何福基, 许元科. 杉木不同优树材性的比较研究[J]. 浙江林学院学报, 1995, 12(1): 24-30.
- [7] 秦特夫, 黄洛华, 周勤. 杉木、I-72 杨主要化学组成的株内纵向变异研究[J]. 林业科学研究, 2004, 17(1): 47-53.
- [8] 骆秀琴, 管宁, 张寿槐, 等. 杉木材性株内变异的研究 I. 木材力学性质和木材密度[J]. 林业科学, 1997, 33(4): 349-355.
- [9] 朱栗琼. 杉木无性系材性变异研究[D]. 南宁: 广西大学, 2003.
- [10] 任海青, 中井孝. 人工林杉木和杨木木材物理力学性质的株内变异研究[J]. 林业科学, 2006, 42(3): 14-20.
- [11] 李坚. 木材科学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2014: 241.
- [12] JIANG J, BACHTIAR E V, LU J, et al. Moisture-dependent orthotropic elasticity and strength properties of Chinese fir wood[J]. Eur J wood wood Prod, 2017, 75(6): 927-938.
- [13] 艾卿, 梁建萍, 江萍, 等. 水杉木材化学成份变异模式及其纸浆林的采伐年龄[J]. 华东森林经理, 2004, 18(4): 8-12.
- [14] 骆秀琴, 黄东森. 木材材性株内径向变异模式初探[J]. 林业科学, 1997, 33(1): 75-82.
- [15] 江泽慧, 姜笑梅. 木材结构与其品质特性的相关性[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 228-230.
- [16] 李晓储, 黄利斌, 王伟, 等. 杉木木材基本密度变异的研究[J]. 林业科学研究, 1999, 12(2): 179-184.
- [17] 黄寿先, 施季森, 李力, 等. 杉木无性系微纤丝角遗传变异的研究[J]. 南京林业大学学报, 2005, 29(1): 11-14.
- [18] 李坚, 刘一星, 崔永志, 等. 人工林杉木幼龄材与成熟材的界定及材质早期预测[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(4): 24-28.
- [19] 崔永志, 徐子才, 李坚, 等. 速生材杉木材性变异规律[J]. 东北林业大学学报, 1999, 27(5): 35-39.
- [20] 陈岳武, 施季森. 杉木遗传改良中的若干基本问题(续)[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1984, 8(1): 1-15.
- [21] 李火根, 黄敏仁, 阮锡根. 美洲黑杨新无性系木材细胞次生壁 S2 层微纤丝角株内变异的初步研究[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(1): 61-65.
- [22] 费本华. X 射线衍射法测定铜钱树木材微纤丝角及其变异的研究[J]. 安徽农业大学学报, 1995, 22(3): 262-265.
- [23] 孙恒, 冀晓东, 赵红华, 等. 人工林刺槐木材物理力学性质研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 104-112.