

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021020

# 杉木无性系管胞形态及其拉伸性能的研究

任素红, 冯启明, 吕建雄, 蒋佳荔, 王玉荣, 赵荣军

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



**摘要:** 为了给人工林杉木选育和合理利用提供依据, 以3个杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 无性系为研究对象, 测试分析管胞长度、宽度和长宽比以及单根管胞拉伸强度、拉伸弹性模量的变异规律。结果表明, 管胞长度、长宽比、拉伸强度、拉伸弹性模量, 在株内径向由髓心向外逐渐增大, 在株内纵向1.3~5.5 m段自下向上逐渐增大。管胞的拉伸强度、拉伸弹性模量, 与管胞长度、长宽比均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ )。杉木无性系管胞形态和单根管胞拉伸性能在幼龄与成熟时期材性呈现显著差异。

**关键词:** 杉木; 无性系; 单根管胞; 管胞形态; 拉伸性能

中图分类号: S781.29; S791.27

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 05-0012-06

## Study on Morphology and Tensile Properties of Wood Tracheid of Chinese Fir Clones

REN Su-hong, FENG Qi-ming, LYU Jian-xiong, JIANG Jia-li, WANG Yu-rong, ZHAO Rong-jun

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

**Abstract:** In order to provide scientific support for the breeding selection and reasonable utilization of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), three Chinese fir clones were selected to investigate the variation of tracheid length, tracheid width, tracheid length-width ratio, tensile strength, and tensile modulus of elasticity (MOE) of single tracheid. The results showed that tracheid length, length-width ratio, tensile strength, and tensile MOE increased gradually from pith to the bark, and increased gradually from the breast height 1.3 m to 5.5 m in longitudinal variation. Single tracheid tensile strength and tensile MOE showed significantly positively correlation to their tracheid length and length-width ratio ( $P < 0.01$ ). Tracheid morphology and tensile properties had significant differences in juvenile and mature wood.

**Key words:** Chinese fir; clones; single tracheid; tracheid morphology; tensile properties

杉木是我国南方重要的速生人工林树种, 种植面积广, 资源丰富。杉木管胞作为木质部的主要组成部分, 其基本形态和力学性能是评价其材性的重要参考指标。管胞的木材结构与力学性能

研究, 对人工林培育与木材资源合理利用具有重要意义, 也是建立木材宏观-微观结构与物理力学性质关系的纽带。

国内学者已开展了马尾松、杉木、辐射松等人工林树种的管胞形态变异规律及宏观物理力学性质等方面的研究<sup>[1-5]</sup>。在微观力学方面, 单根管胞力学性能的研究最早可追溯至1925年<sup>[6]</sup>, 经过学者们不断探索与改进, 测试方法和技术日趋成熟<sup>[7-9]</sup>。我国学者对单根纤维力学的研究始于20世

收稿日期: 2021-03-01; 修改日期: 2021-06-24

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题“木材细胞壁结构调控对性能的影响机制”(2017YFD0600202)。

作者简介: 任素红 (1995—), 女, 博士研究生。Email: rensuhong@caf.ac.cn

通讯作者: 赵荣军, 女, 研究员。Email: rongjun@caf.ac.cn

纪初。余雁、王戈<sup>[6]</sup>课题组自主研发了单根纤维拉伸测试仪，并开展了相关研究<sup>[10-13]</sup>，提高了单根纤维拉伸性能测试的精度和效率，为木材资源科学利用提供了可靠的参考数据。但目前关于管胞形态参数，如管胞长度、宽度及长宽比等与微观拉伸性能相关性研究鲜有报道。鉴于此，本研究以20年生杉木无性系为研究对象，比较研究杉木无性系的管胞形态及单根管胞拉伸性能，为优质人工林杉木选育和木材合理加工利用提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)：选取力学性质较好的3个无性系试材，具体信息见表1。取样地位于浙江开化（北纬 28°54′30″至 29°29′59″、东经 118°01′15″至 118°37′50″）。样本采伐及试样制备参照 GB/T 1927—2009《木材物理力学性质试验方法》进行。

表1 杉木样本基本信息

| Tab.1 Chinese fir specimen information |      |       |      |
|----------------------------------------|------|-------|------|
| 无性系                                    | 树龄/a | 胸径/cm | 树高/m |
| 大坝8号(8号)                               | 20   | 16.8  | 17.0 |
| 开化13号(13号)                             | 20   | 15.8  | 15.1 |
| 开林24号(24号)                             | 20   | 17.6  | 17.4 |

取大坝8号1株，分别在1.3、3.5、5.5、7.5 m高度截取40 mm厚圆盘，沿南北向过髓心锯取宽20 mm的中心条，将毛坯中心条锯切成宽度为10 mm，高度为30 mm。根据前期对所选杉木无性系的研究数据，及幼龄材与成熟材界定的研究理论，认为所选杉木在14 a成熟<sup>[14-15]</sup>。因此，为区分成熟材和幼龄材，在北向中心条自髓心向树皮第3、9、15生长轮处取样，切成1 mm×1 mm×3 mm（径×弦×纵）的小木条备用（图1）。其余2种各1株，试样取自1.3 m处，加工及制样方法同上。

### 1.2 实验仪器

电热鼓风干燥箱，超景深显微镜，激光共聚焦显微镜，高精度植物短纤维力学性能测试仪，恒温水浴锅等。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 试样制备

将小木条装入试管，倒入配制好的离析液

( $V_{\text{过氧化氢}}:V_{\text{冰醋酸}}=1:1$ )，在60℃水浴锅中放置20 h左右，待小木条变成白色后取出，用蒸馏水反复洗涤，去除小木条中残留的离析液；然后用玻璃棒将试管中的小木条充分打散于水中，形成白色的悬浮液。用滴管吸取少量悬浮液滴于载玻片上，使杉木管胞细胞充分分散，将载玻片放入60℃烘箱中烘干备用。在体视显微镜下用超精细镊子选取两端尖削的完整管胞，横放在开有凹槽的有机玻璃模板上，在管胞两端滴AB胶固定12 h后备用。试验流程如图1所示。

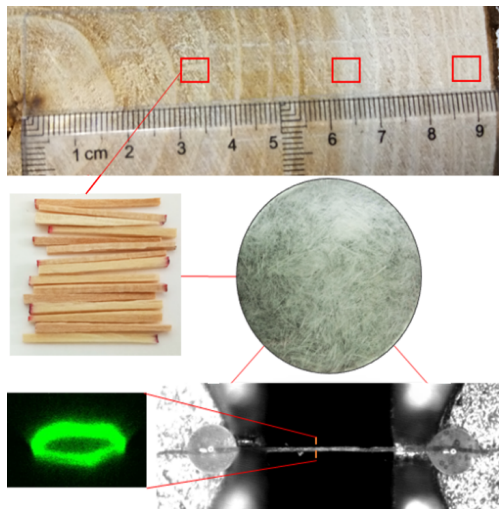


图1 试验流程图

Fig.1 Diagram of experiment process

#### 1.3.2 管胞形态测量

在光学显微镜下对干燥后的单根管胞进行拍照、测量，管胞长度、宽度分别在100、300倍物镜下测量，并计算管胞长宽比。每个生长轮随机选取30根完整的管胞，结果取平均值。

#### 1.3.3 单根管胞拉伸性能测量

采用高精度植物短纤维力学性能测试仪，测量单根管胞的拉伸强度和拉伸弹性模量。传感器量程为980.7 mN，拉伸载荷精度为0.01 μN，拉伸速率为0.05 mm/min。

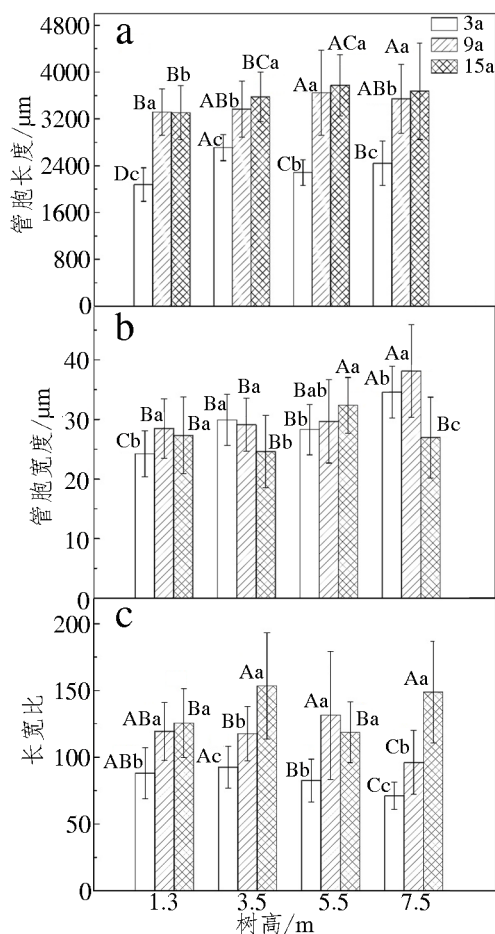
为计算拉伸强度值，还需要测试单根管胞横截面积。将拉伸断裂后的管胞置于吖啶橙 (Acridine Orange) 溶液中染色1 min。染色后采用激光共聚焦显微镜，通过仪器自带软件测量单根管胞横截面积，激光光源参数为488 nm（图1）。每个生长轮测量有效数据15个，结果取平均值。

## 2 结果分析

### 2.1 杉木管胞形态

#### 2.1.1 杉木管胞形态株内变异

以大坝8号无性系为研究对象,探究杉木管胞形态的径向及纵向变异规律,结果如图2所示。3a、9a、15a分别表示从髓心向外第3、9、15生长轮的试样。



不同大写字母表示同一生长轮纵向差异显著( $P < 0.05$ );  
不同小写字母表示同一树高位置径向差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图2 杉木管胞形态株内变异及显著性分析

Fig.2 Significance analysis and within-tree variation of tracheid morphology of Chinese fir

图2显示,大坝8号管胞长度范围为1 483.13~5 173.84  $\mu\text{m}$ ,均值为3 159.48  $\mu\text{m}$ 。根据IAWA对于针叶树材管胞长度分等<sup>[16]</sup>要求,大坝8号管胞长度属于中等长度(3 000~5 000  $\mu\text{m}$ )。管胞长度最小值出现在幼龄3a,最大值出现在成熟15a,变异系数为24.23%。由图2a可知,在径向,管胞长度

由髓心至边材均呈现逐渐增大的趋势,与马尾松、杉木管胞形态的变异规律一致<sup>[1-2]</sup>。第3、9生长轮、第3、15生长轮之间的管胞长度差异显著( $P < 0.05$ ),第9、15生长轮管胞长度在不同高度上差异显著性不同;管胞宽度自髓心至边材略有减小趋势,显著性差异主要体现在第3、9生长轮、第3、15生长轮之间;长宽比的径向变异规律与管胞长度类似。

管胞长度在3a时较短,是由于髓心附近的木质部属于幼龄材,形成层细胞尚未成熟,细胞长度较短;随着形成层细胞的分化和成熟,生长至9a和15a时,管胞长度逐渐趋于稳定,二者的长度差异显著性降低。以上研究结果表明,幼龄材与成熟材管胞形态变异较大,且存在显著差异。

在纵向,管胞长度呈先增后减的趋势,在1.3~5.5 m区间内随树高逐渐增加,且均值较大,在5.5~7.5 m之间降低;管胞宽度随树高逐渐增加;长宽比与管胞长度变化趋势一致(图2b)。本研究文献中马尾松的管胞形态纵向变异结果一致<sup>[17]</sup>。图2b的显著性分析表明,在各树高间生长轮3a处管胞形态差异更为显著,管胞长度、宽度均表现出显著差异( $P < 0.05$ );9a、15a之间的管胞长、宽差异在纵向上相邻高度间表现不显著( $P > 0.05$ ),间隔两个高度位置的管胞形态差异显著(即取样高度差 $> 4$  m),管胞形态参数表现出显著差异。这种差异可能是幼龄材、成熟材形成层细胞成熟程度不同造成的。

#### 2.1.2 杉木不同无性系管胞形态变异

针叶树材管胞形态参数是评价其作为纤维材料等级的重要依据。纤维长度越长,长宽比越大,制成的纸张物理性能越强。纤维长宽比越大,越有利于纤维的结合,纤维长宽比 $< 45$ 的原料,纸浆造纸价值很低,长宽比均值 $> 90$ 可作为优良的造纸原料<sup>[1-2]</sup>。3个杉木无性系管胞形态的测试结果,列于表2。

由表2可知,无性系8号、13号和24号管胞长度均值分别为2 900.27、3 277.17和3 376.72  $\mu\text{m}$ ;无性系8号管胞长度变幅最大,表明无性系8号管胞长度性状最不稳定;无性系13号和24号管胞长度均值 $> 3 000$   $\mu\text{m}$ ,长宽比的均值分别为119.74、

134.09, 是优良的纤维原料<sup>[1-2, 17]</sup>; 后两个无性系变异系数较小, 表明管胞性状较无性系8号稳定。

表2 杉木无性系管胞形态参数

Tab.2 Tracheid morphology parameters of Chinese fir clones

| 无性系   | 管胞长度               |       | 管胞宽度               |       | 长宽比          |       |
|-------|--------------------|-------|--------------------|-------|--------------|-------|
|       | 测量值/ $\mu\text{m}$ | CV    | 测量值/ $\mu\text{m}$ | CV    | 数值           | CV    |
| 大坝8号  | 1 483.13~4 451.42  | 24.11 | 17.72~40.01        | 20.48 | 60.16~202.33 | 26.93 |
| 开化13号 | 2 338.76~4 236.41  | 15.16 | 16.85~46.08        | 21.78 | 63.81~195.69 | 29.95 |
| 开林24号 | 2 382.35~4 395.16  | 14.17 | 12.37~36.95        | 19.54 | 83.35~306.57 | 25.95 |

注: CV为变异系数, %。

3个杉木无性系的管胞长度、宽度和长宽比的方差分析结果, 见图3。

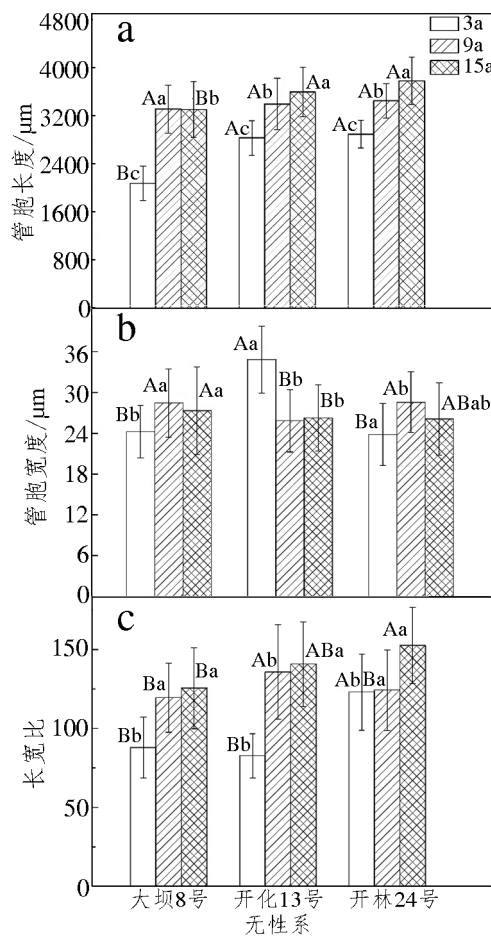


图3 杉木无性系管胞形态及显著性分析

Fig.3 Significance analysis of tracheid morphology among the Chinese fir clones

由图3可知, 幼龄材3a、成熟材15a处, 无性系8号与13号、24号差异显著 ( $P < 0.05$ ), 无性

系13号和24号管胞长度差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 9a、15a管胞宽度和长宽比在3个无性系间的差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (图3b、c)。管胞形态参数在不同生长轮间的差异显著性不同, 这与幼龄材、成熟材之间的细胞差异有关, 管胞越趋于成熟, 性质越稳定。因此, 无性系13号和24号管胞形态显著优于无性系8号; 无性系24号比13号略优, 但二者差异不显著。

林木生长周期长, 选育优化耗时较长, 为缩短育种时间, 早期优良性状筛选十分必要。对马尾松无性系管胞形态的研究表明, 马尾松管胞形态与幼龄-成熟期紧密相关, 主要受遗传因素控制<sup>[1]</sup>。本研究的结果显示, 杉木不同无性系间管胞形态存在显著差异, 相比于成熟材, 杉木管胞形态在幼龄时差异性更显著, 因此, 杉木无性系在早期进行管胞形态优选是可行的。

## 2.2 杉木单根管胞拉伸性能

### 2.2.1 杉木单根管胞拉伸性能株内变异

图4为8号杉木单根管胞拉伸性能的径向及纵向变异示意图。

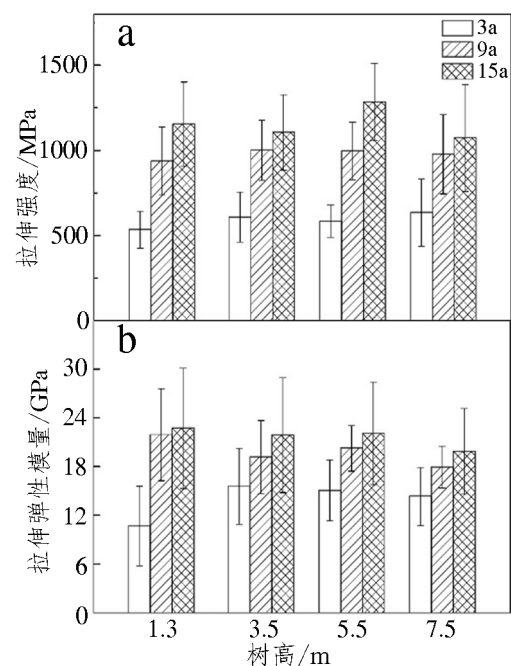


图4 杉木单根管胞的拉伸性能

Fig.4 Tensile properties of Chinese fir single tracheid

图4显示, 在径向, 杉木无性系8号管胞拉伸强度和拉伸弹性模量均表现为从髓心向外逐渐增大, 即  $3a < 9a < 15a$ ; 生长轮间拉伸性能差异显著,

幼龄 3a 管胞拉伸性能显著低于 9a 和 15a。这主要与细胞壁  $S_2$  层的微纤丝角对单根管胞拉伸性能有显著影响, 且呈负相关有关, 即随微纤丝角减小, 管胞力学性能提高, 微纤丝角自髓心向外一般呈减小趋势<sup>[18-20]</sup>。根据 Wang<sup>[15]</sup>的研究结果, 杉木微纤丝角在髓心处显著大于边材, 因此推测本研究中管胞拉伸性能的径向变异可能与微纤丝角径向变化有关。

8 号无性系杉木的拉伸性能测试结果, 如表 3 所示。

表 3 杉木纵向单根管胞的拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of Chinese fir single tracheid in the longitudinal direction

| 树高位置/m | 拉伸强度/MPa        | 拉伸弹性模量/GPa    |
|--------|-----------------|---------------|
| 1.3    | 873.32±325.15 A | 18.01±8.08 AB |
| 3.5    | 921.48±276.48 A | 18.85±6.10 A  |
| 5.5    | 923.64±376.10 A | 18.94±5.65 A  |
| 7.5    | 883.48±312.14 A | 16.01±4.94 B  |

不同字母表示纵向位置的管胞拉伸性能差异显著 ( $P<0.05$ )。下表同。

表 3 显示, 随树高从 1.3 m 增至 5.5 m, 试样的拉伸性能逐渐增大, 再向上至 7.5 m 时有所下降。方差分析结果表明, 纵向单根管胞拉伸强度差异性均不显著, 拉伸弹性模量仅在树高 3.5 m 和 7.5 m、5.5 m 和 7.5 m 之间存在显著差异 ( $P<0.05$ ); 任海青<sup>[21]</sup>等研究结果显示, 人工林杉木不同高度间的宏观物理力学性能波动变化, 但无显著差异, 说明木材微观力学和宏观力学性能的变异规律具有一致性, 微观力学性能可以在一定程度上反映宏观力学性能, 深入研究可建立微观-宏观力学性能的关系模型, 为木材资源的精准加工利用提供参考依据。

## 2.2.2 杉木无性系单根管胞的拉伸性能

3 个杉木无性系单根管胞的拉伸性能测试结果, 见表 4 和图 5。

表 4 杉木无性系单根管胞的拉伸性能

Tab.4 Tensile properties of single tracheid of Chinese fir clones

| 无性系     | 拉伸强度/MPa       | 拉伸弹性模量/GPa  |
|---------|----------------|-------------|
| 大坝 8 号  | 873.32±325.15A | 18.01±8.08A |
| 开化 13 号 | 880.21±363.31A | 18.43±7.86A |
| 开林 24 号 | 968.63±293.84A | 20.90±7.21A |

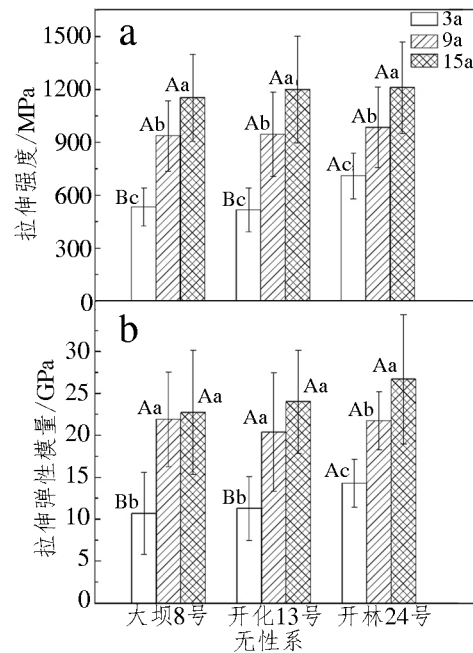


图 5 杉木无性系单根管胞的拉伸性能

Fig.5 Tensile properties of single tracheid of Chinese fir clones

杉木单根管胞拉伸强度和拉伸弹性模量均值为 910.08 MPa、18.80 GPa, 变化范围为 336~2 005 MPa、6~41 GPa, 变异系数为 38.15%。研究结果表明 (表 4、图 5), 无性系 24 号管胞拉伸性能优于其他两个无性系, 但 3 个无性系间差异并不显著 ( $P>0.05$ )。在同一生长轮位置, 无性系 8 号和 13 号、8 号和 24 号间在幼龄 3a 处拉伸性能差异显著; 9a、15a 的拉伸性能在无性系间差异不显著 ( $P>0.05$ )。无性系不同生长轮间管胞拉伸性能差异主要体现在幼龄时期, 可能是由于幼龄材微纤丝角大且变异系数较大的缘故<sup>[19-20, 22]</sup>。相对于成熟材, 单根管胞拉伸性能在幼龄材的变幅大, 变异系数高, 说明杉木管胞拉伸性能在早期有筛选价值。

## 2.3 杉木管胞形态与拉伸性能的相关性

将管胞的拉伸强度和拉伸弹性模量分别与其长度、宽度和长宽比进行相关性分析, 结果见表 5。

由表 5 可知, 3 个杉木无性系的管胞拉伸强度、拉伸弹性模量, 与管胞长度、长宽比均呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ); 管胞拉伸强度、拉伸弹性模量与管胞宽度相关性不显著。因此, 认为管胞长度和长宽比对拉伸性能影响显著, 宽度值影响较小可能与管胞宽度在径向的波动变化有关<sup>[2]</sup>。

表5 杉木管胞形态参数与拉伸性能的关系

Tab.5 Relationship between tracheid morphological parameters and tensile properties

| 指标     | 大坝8号    |       |         | 开化13号   |          |         | 开林24号   |        |         |
|--------|---------|-------|---------|---------|----------|---------|---------|--------|---------|
|        | 管胞长度    | 管胞宽度  | 长宽比     | 管胞长度    | 管胞宽度     | 长宽比     | 管胞长度    | 管胞宽度   | 长宽比     |
| 拉伸强度   | 0.561** | 0.273 | 0.450** | 0.587** | −0.422** | 0.525** | 0.634** | −0.044 | 0.386** |
| 拉伸弹性模量 | 0.549** | 0.284 | 0.404** | 0.549** | −0.388** | 0.512** | 0.643** | −0.022 | 0.391** |

注：\*\*为极显著相关( $P<0.01$ )。

3 结论

1) 在径向, 3个无性系杉木的管胞长度、长宽比自髓心向外逐渐增大。管胞形态在生长轮间差异显著, 幼龄3a与9a、15a之间管胞形态差异最为显著。在纵向, 随树高向上, 管胞长度、长宽比先增大后减小, 管胞宽度持续增大。幼龄3a管胞形态在纵向差异显著 ( $P<0.05$ )。

2) 在径向, 3个无性系杉木单根管胞的拉伸强度、拉伸弹性模量自髓心向外逐渐增大; 拉伸性能差异显著性主要体现在幼龄3a, 随着管胞的成熟, 拉伸性能差异显著性降低。在纵向, 管胞拉伸强度和拉伸弹性模量在5.5 m处最大, 1.3 m处最小, 拉伸性能在树高方向差异不显著; 同一生长轮的拉伸性能在幼龄3a处差异显著 ( $P<0.05$ )。

3) 3种杉木无性系中, 开化13号、开林24号的管胞形态参数显著优于大坝8号; 3个无性系间拉伸性能在幼龄3a处差异显著, 开林24号的管胞形态和单根管胞拉伸性能最优。

4) 管胞形态与拉伸性能相关性分析表明, 管胞长度、长宽比等参数与拉伸强度和拉伸弹性模量有极显著正相关性 ( $P<0.01$ ), 管胞宽度对拉伸强度和拉伸弹性模量的影响不显著。其中, 无性系开林24号管胞长度与管胞拉伸强度、拉伸弹性模量相关系数最大。

参考文献:

[1] 尹焕焕, 刘青华, 周志春, 等. 马尾松无性系木材基本密度和纤维形态的变异及选择[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(6): 1186-1192.  
YIN H H, LIU Q H, ZHOU Z C, et al. Genetic variation of wood basic density and fiber morphology and selection of *Pinus massoniana*[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(6): 1186-1192.

[2] 李超, 王哲, 郭宇, 等. 人工林杉木管胞形态与基本密度径向变异规律研究[J]. 林产工业, 2019, 56(12): 30-33.  
LI C, WANG Z, GUO Y, et al. Radial variation of tracheid morphology and basic density of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. China Forest Products Industry, 2019, 56(12): 30-33.

[3] 孙海燕. 杉木无性系木材力学性质及其与微观结构相关性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.

[4] 周永东, 高鑫, 周凡, 等. 40 mm厚杉木锯材高温干燥工艺研究[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(2): 54-58.  
ZHOU Y D, GAO X, ZHOU F, et al. High-temperature drying technology for 40 mm-thickness chinese fir lumber[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(2): 54-58.

[5] 吴艳华, 孙海燕, 任海青, 等. 进口辐射松木材物理与力学性能评价[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 48-50.  
WU Y H, SUN H Y, REN H Q, et al. Physical and mechanical properties of imported pinus radiata wood[J]. China Wood Industry, 2019, 33(2): 48-50.

[6] 余雁, 江泽慧, 任海青, 等. 管胞细胞壁力学研究进展评述[J]. 林业科学, 2003, 39(5): 133-139.  
YU Y, JIANG Z H, REN H Q, et al. A review: current international research into cell wall mechanics of tracheids[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(5): 133-139.

[7] Mott L, Groom L, Shaler S. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I. Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility[J]. Wood and Fiber Science, 2002, 34(1): 14-27.

[8] Ingo B, Notburga G, Tanja Z. Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Part I: Structural and chemical characterisation[J]. Holzforschung, 2005(59): 240-246.

[9] Ingo B, Michaela E, Klaus F, et al. Properties of chemically and mechanically isolated fibres of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). Part 3: Mechanical characterisation[J]. Holzforschung, 2005(59): 354-357.

[10] 王戈, 余雁, 曹双平, 等. 微拉伸技术测试植物单根纤维纵向拉伸性能[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 151-155.  
WANG G, YU Y, CAO S P, et al. Longitudinal tensile properties determination of vegetable single fibers by the micro-tensile technology[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(7): 151-155.

[11] 邢新婷, 邵亚丽, 安珍, 等. 长白落叶松木材单根管胞力学性能分析[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(4): 597-602.  
XING X T, SHAO Y L, AN Z, et al. Mechanical properties of single tracheids of *Larix olgensis* wood[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2013, 40(4): 597-602.

[12] YU Y, WANG H K, LU F, et al. Bamboo fibers for composite applications: a mechanical and morphological investigation[J]. Journal of Wood Science, 2014, 49: 2559-2566.

[13] CHEN H, YU Y, ZHONG T H, et al. Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of individual bamboo fibers [J]. Cellulose, 2017, 24(1): 333-347.

[14] 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.  
LI J, LIU Y X, CUI Y Z, et al. Demarcation of juvenile wood and mature wood of planted chinese fir and its wood quality prediction[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1999, 27(4): 24-28.