

不同林龄杉木实生林物理力学性质变异研究

赵林峰, 邱向英*

(湖南环境生物职业技术学院, 衡阳 421005)

摘要: 以湖南省金洞林场同一立地条件、不同林龄的杉木实生林木材为研究对象, 按照国家标准测定其物理力学性质的气干密度、基本密度、横纹弦向全部抗压、横纹径向全部抗压等 10 个性状指标。方差分析发现, 杉木实生林木材的 10 个性状指标均随林龄的增大而增加, 且各指标差异显著。对其进行相关性分析, 发现木材物理与力学性质间表现为正相关, 其中与横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯模量、顺纹抗拉强度表现出极显著相关性, 相关系数为 0.207 ~ 0.680。变异系数计算结果表明, 各性状的变异系数变化范围为 3.57% ~ 11.40%, 30 年生时, 气干密度、基本密度、横纹弦向全部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗压强度、顺纹抗拉强度的变异系数小于其他 2 个林龄。全部性状的变异系数均处于 10% 左右, 说明实生林各性状总体稳定。综上可知, 实生林的物理力学性质具有密切的相关性, 随着林龄的增加, 表现出受环境因素影响越来越小, 受遗传因素影响越来越大。

关键词: 杉木; 实生林; 木材物理性质; 木材力学性质

中图分类号: S781.29; S791.27

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)05-0726-07

Study on the variation of physical and mechanical properties of Chinese fir seedling forest in different stand ages

ZHAO Linfeng, QIU Xiangying

(Hunan Polytechnic of Environment and Biology, Hengyang 421005)

Abstract: Taken Chinese fir seedlings from different stand stages in the same site condition of Jindong forest farm in Hunan Province as the research objects, 10 characters of the physical and mechanical properties of Chinese fir were determined, such as air-dry density, basic density, compression resistance of all stripes (flat) and compression resistance of all stripes (radial) according to the national standard. The analysis of variance showed that the 10 characters of Chinese fir seedlings increased with the increase of the stand age, and the difference in each index was significant. The correlation analysis showed that the physical and mechanical properties of wood were positively correlated with the compression resistance of all stripes (flat), the compression resistance of local (radial), the modulus of elasticity to grain, and the tensile strength parallel to grain with the correlation coefficient of 0.207 - 0.680. The results showed that the variation coefficients of each character varied from 3.57% - 11.40%. At 30 years of age, the variation coefficients of air-dried density, basic density, compression resistance of all stripes (flat), compression resistance of local (radial), bending strength to grain, compressive strength parallel to grain, and tensile strength parallel to grain were lower than those of the other two stand ages. However, the variation coefficients of all the characters were about 10%, which indicated that all the characters of the seedling forests were stable on the whole. In conclusion, the physical and mechanical properties of Chinese fir seedling forests are closely related, and which are less affected by environmental factors, more affected by genetic factors with the increase of stand age.

Key words: *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook; seedling forest; physical properties of wood; mechanical properties of wood

收稿日期: 2020-10-14

基金项目: 湖南省普通高校青年骨干教师项目(湘教通(2020)43 号), 湖南省林业科技创新杰出青年项目(XLK201981)和湖南环境生物职业技术学院 2019 年度科技创新服务团队项目共同资助。

作者简介: 赵林峰, 副教授。E-mail: 270679030@qq.com

* 通信作者: 邱向英, 副研究员。E-mail: 409757441@qq.com

木材是一种非均质、各向异性的天然高分子材料,其材性特点复杂且多变^[1],而木材的物理力学性质对合理利用木材和工程设计都起到重要作用。杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)广泛分布于中国,具有生长快速、材质优良且无明显病虫害等特点,是主要商品用材树种之一^[2]。

近年来,国内学者对不同林龄实生林木材的物理力学性质进行了大量的研究和评价。高瑞龙等^[3]研究发现香椿人工林木材物理力学性质在各树龄之间差异显著,且随着树龄的增大而增大。孙庆丰等^[4]比较了不同树龄思茅松人工林,发现密度和力学性质随着树龄的增加呈增大趋势,达到成熟林后基本稳定,变异显著。黄广华等^[5]比较了巨尾桉在4年生、6年生和8年生的各种木材材性,认为木材物理力学性质在树龄为6年生时已经基本稳定在较高水平,并随树龄增加明显提高。姬宁等^[6]研究了贵州45年生的天然林木材,得出人工林马尾松木材基本密度、全干缩率、顺纹抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量在幼龄材与成熟材之间存在显著差异。金春德等^[7]研究发现人工林赤松幼龄材和成熟材力学性质差异达显著性水平,其中抗弯强度、抗弯弹性模量等指标成熟材要高于幼龄材,而径向横纹抗压强度等项指标高幼龄材要好于成熟材。刘迎涛等^[8]研究发现人工林红松的所有力学性质的差异达显著和极显著水平,表现为成熟材性质高于幼龄材。孙恒等^[9]分析10年生、15年生、20年生和25年生刺槐木材,结果表明木材的气干密度、全干密度、基本密度、顺纹抗压强度、横纹全部抗压强度(径向/弦向)、抗弯强度和抗弯弹性模量均随树龄的增大而增加。孙恒等^[9]分析不同树龄西南桦木材物理和主要力学性质,结果表明7年生与11年生、15年生、19年生均差异显著,而11年生、15年生、19年生三者之间有的指标差异显著,有的指标则差异不显著,在利用西南桦木材时应对树龄加以特别考虑。王军锋等^[10]研究发现,15年生香樟人工林与26年生香樟人工林的木材物理力学性能差异不显著,得出15年生香樟人工林木材材性已相对稳定。目前,针对不同林龄杉木实生林木材物理力学性质且专注于特定林龄的杉木实生林评价的研究不多。施季森等^[11]就15年生杉木实生林的生长性状与材性的相关性进行了研究;边黎明等^[12]测定了16年生杉木实生林的弹性模量;龚迎春等^[13]测定24年生杉木实生林木材的抗弯强度;韦如萍等^[14]认为杉木实生林的木材密度随年龄增长而增大,56年后则反之。

为系统研究人工林杉木木材的物理力学性质,选取不同树龄的杉木实生林,测定和分析了主要物理力学性质。通过对比不同林龄木材密度与力学性质的相关性,初步探索木材物理力学性质产生差异的机理,以期为实生林木材高效、精细化利用提供有效途径,为人工林科学经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试材采自湖南省永州市金洞林场(110°53'43"~112°13'37" E、26°2'10"~26°21'37" N),海拔85~120 m,属中亚热带东南季风湿润性气候,年均气温18℃,年均降雨1 000~1 800 mm,土壤属森林黄红, pH 4.5,通气性好,土壤厚度30~60 cm,土壤肥力一般。

1.2 试验材料

试材采集按GB/T1927—2009《木材物理力学试验采集方法》选取生长良好、无病虫害、树干通直且代表性强的杉木实生林作为试验样木。17年生、22年生和30年生3类林分选取样树3株(表1),砍伐后运回实验室,按GB/T 1929—2009《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》,立即对其进行锯解,制作待测试件。

表1 样木采集基本情况

Table 1 Basic parameters of the collected samples

树龄/a	样木/个	胸径/cm	树高/m	蓄积/m ³
17	3	16.50	9.75	0.117 3
22	3	16.90	10.10	0.128 2
30	3	18.10	11.98	0.165 7

1.3 测试方法

测试的物理性质和力学性质包括木材气干密度、基本密度、横纹弦向全部抗压、横纹径向全部抗压、横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗弯模量、顺纹抗压强度和顺纹抗拉强度,性状测试分别按照GB/T1933—2009《木材密度测定方法》^[15]、GB/T1938—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》^[16]、GB/T1935—2009《木材顺纹抗压强度试验方法》^[17]、GB/T1936.1—2009《木材抗弯强度试验方法》^[18]、GB/T1936.2—2009《木材抗弯弹性模量测定方法》^[19]、GB/T1939—2009《木材横纹抗压试验方法》^[20]等木材物理力学性质试验方法的有关规定,将试样加工成供测试物理力学性能用的无暇小试样进行测试。各项力学强度指标在全数字电子万能力学试验机(型号:UTM5504,

三思纵横科技股份有限公司)和摆锤式冲击试验机(型号:JB-M100,时代集团济南时代试金仪器有限公司)上测定,测定有效样本数为24个。

1.4 数据统计分析

采用Excel2016、SPSS25.0、Origin2017等软件进行试验数据统计分析。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和Duncan法进行方差分析和多重比较($\alpha = 0.05$)^[21];用皮尔逊相关系数^[12](pearson

correlation coefficient)度量两个变量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 木材物理力学性质的方差分析

由表2可知,杉木实生林物理力学性质的方差分析结果除顺纹抗弯强度外,其他性状均达显著和极显著差异,表明参试杉木实生林在不同林龄阶段物理力学性质均具有明显的分化。

表2 杉木实生林物理力学性质的方差分析

Table 2 Variance analysis of physical and mechanical properties of Chinese fir forests

性状	平方和	自由度	均方	F值	显著性
气干密度/(g·cm ⁻³)	0.011	2	0.005	26.435	0.000
基本密度/(g·cm ⁻³)	0.007	2	0.003	30.840	0.000
横纹弦向全部抗压/Mpa	2.920	2	1.460	6.243	0.005
横纹径向全部抗压/Mpa	3.384	2	1.682	7.550	0.002
横纹弦向局部抗压/Mpa	16.549	2	8.274	12.714	0.000
横纹径向局部抗压/Mpa	23.558	2	11.779	23.559	0.000
顺纹抗弯强度/Mpa	51.437	2	25.719	2.167	0.131
顺纹抗弯模量/Gpa	10.794	2	5.397	38.916	0.000
顺纹抗压强度/Mpa	261.700	2	130.850	11.972	0.000
顺纹抗拉强度/Mpa	4 523.558	2	2 261.779	78.247	0.000

表3 不同林龄木材气干密度和基本密度差异及多重比较

Table 3 Difference and multiple comparison of air dry density and basic density of wood in different stand ages

性状	林龄/a	变幅	平均值	变异系数/%
气干密度/(g·cm ⁻³)	17	0.326~0.366	0.350 ± 0.016 ^c	4.29
	22	0.347~0.402	0.377 ± 0.019 ^b	5.03
	30	0.376~0.422	0.392 ± 0.014 ^a	3.57
基本密度/(g·cm ⁻³)	17	0.268~0.296	0.284 ± 0.012 ^c	4.23
	22	0.287~0.326	0.307 ± 0.014 ^b	4.56
	30	0.296~0.342	0.317 ± 0.012 ^a	3.79

注:同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 木材密度的差异

密度分为基本密度和气干密度。基本密度是衡量木材密度程度的重要指标,气干密度是影响木材最终产品质量的重要指标^[22]。由表3可知,不同林龄的气干密度和基本密度的方差分析结果呈现显著差异;不同林龄的气干密度均值依次为0.350、0.377和0.392 g·cm⁻³之间,22年生和30年生分别增长了7.7%和3.9%,而基本密度均值在0.284、0.307和0.317 g·cm⁻³,22年生和30年生分别增长了8.1%和3.3%,说明17~22年树龄时,基本密度的增量比较大,22~30年树龄时,气干密度的增量比较大。不同林龄的气干密度变异系数依次为4.29%、5.03%和3.57%;基本密度变异系数依次为4.23%、4.56%和3.79%。变异系数的峰值出现在22年生时,随后

开始下降。变异系数都小于10%,表明气干密度和基本密度虽受一定程度环境的影响,但更明显受遗传控制。

2.3 木材的力学性质的差异

木材力学性质是指木材抵抗外部机械力作用的能力,它是木材合理开发利用的重要依据^[23]。由表4可知,随着树龄的增加,除了横纹弦向局部抗压、顺纹抗弯强度外木材各项力学性质均呈显著差异且表现为增大趋势,在横纹弦向全部抗压和横纹径向全部抗压上,强度增长最多的为22~30年树龄段,30年生比22年生分别增加11.4%和11.8%;在横纹弦向局部抗压上,强度增长最多的为17~22年树龄段,22年生比17年生增加15.3%;在横纹径向局部抗压上,强度增长最多的为22~30年树龄段,30年

生比 22 年生增加 14.8%; 在顺纹抗弯强度上, 强度增长最多的为 17~22 年树龄段, 22 年生比 17 年生增加 2.7%; 在顺纹抗弯模量上, 强度增长最多的为 22~30 年树龄段, 30 年生比 22 年生增加 11.1%; 在

顺纹抗压强度和顺纹抗拉强度上, 强度增长最多的为 22~30 年树龄段, 30 年生比 22 年生分别增加 8.7% 和 19.8%。

表 4 不同林龄木材力学性质的差异及多重比较

Table 4 Difference and multiple comparison of mechanical property of wood in different stand ages

性状	林龄/a	变幅	平均值	变异系数
横纹弦向全部抗压/Mpa	17	4.580~5.920	5.265±0.401 ^b	7.62
	22	4.300~6.240	5.271±0.601 ^b	11.40
	30	5.140~6.560	5.873±0.424 ^a	7.22
横纹径向全部抗压/Mpa	17	4.220~5.400	4.780±0.397 ^b	8.31
	22	4.020~5.780	4.908±0.469 ^b	9.56
	30	4.670~6.420	5.485±0.543 ^a	9.89
横纹弦向局部抗压/Mpa	17	6.620~9.500	8.335±0.779 ^b	9.35
	22	8.300~10.920	9.608±0.734 ^a	7.63
	30	8.340~11.940	9.895±0.897 ^a	9.07
横纹径向局部抗压/Mpa	17	5.880~8.780	7.183±0.760 ^c	10.58
	22	7.160~9.100	7.970±0.659 ^b	8.27
	30	8.120~10.140	9.151±0.697 ^a	7.62
顺纹抗弯强度/Mpa	17	54.380~65.750	61.010±3.391 ^a	5.55
	22	54.380~67.360	62.667±3.671 ^a	5.86
	30	57.980~69.530	63.930±3.260 ^a	5.09
顺纹抗弯模量/Gpa	17	5.804~6.640	6.173±0.292 ^c	4.73
	22	5.890~7.221	6.761±0.431 ^b	6.37
	30	6.846~7.988	7.511±0.381 ^a	5.07
顺纹抗压强度/Mpa	17	34.810~45.460	39.625±3.028 ^c	7.64
	22	36.810~49.000	42.501±4.056 ^b	9.54
	30	41.520~50.730	46.211±2.677 ^a	5.79
顺纹抗拉强度/Mpa	17	66.400~78.600	71.041±3.567 ^c	5.02
	22	70.200~87.200	77.612±4.917 ^b	6.34
	30	89.360~108.900	97.415±7.058 ^a	7.25

表 5 杉木实生林木材密度与力学性质相关性分析

Table 5 Correlation analysis between wood density and mechanical properties of Chinese fir forests

性状指标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
气干密度	1									
基本密度	0.988**	1								
横纹弦向全部抗压	0.284	0.325	1							
横纹径向全部抗压	0.221	0.258	0.637**	1						
横纹弦向局部抗压	0.450**	0.438**	0.121	0.332*	1					
横纹径向局部抗压	0.611**	0.601**	0.214	0.329	0.618**	1				
顺纹抗弯强度	0.207	0.157	-0.104	0.194	0.447**	0.261	1			
顺纹抗弯模量	0.680**	0.659**	0.345*	0.286	0.494**	0.577**	0.401*	1		
顺纹抗压强度	0.298	0.338*	0.396*	0.495**	0.435**	0.482**	0.230	0.574**	1	
顺纹抗拉强度	0.562**	0.560**	0.464**	0.609**	0.563**	0.727**	0.398*	0.769**	0.633**	1

注: **表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

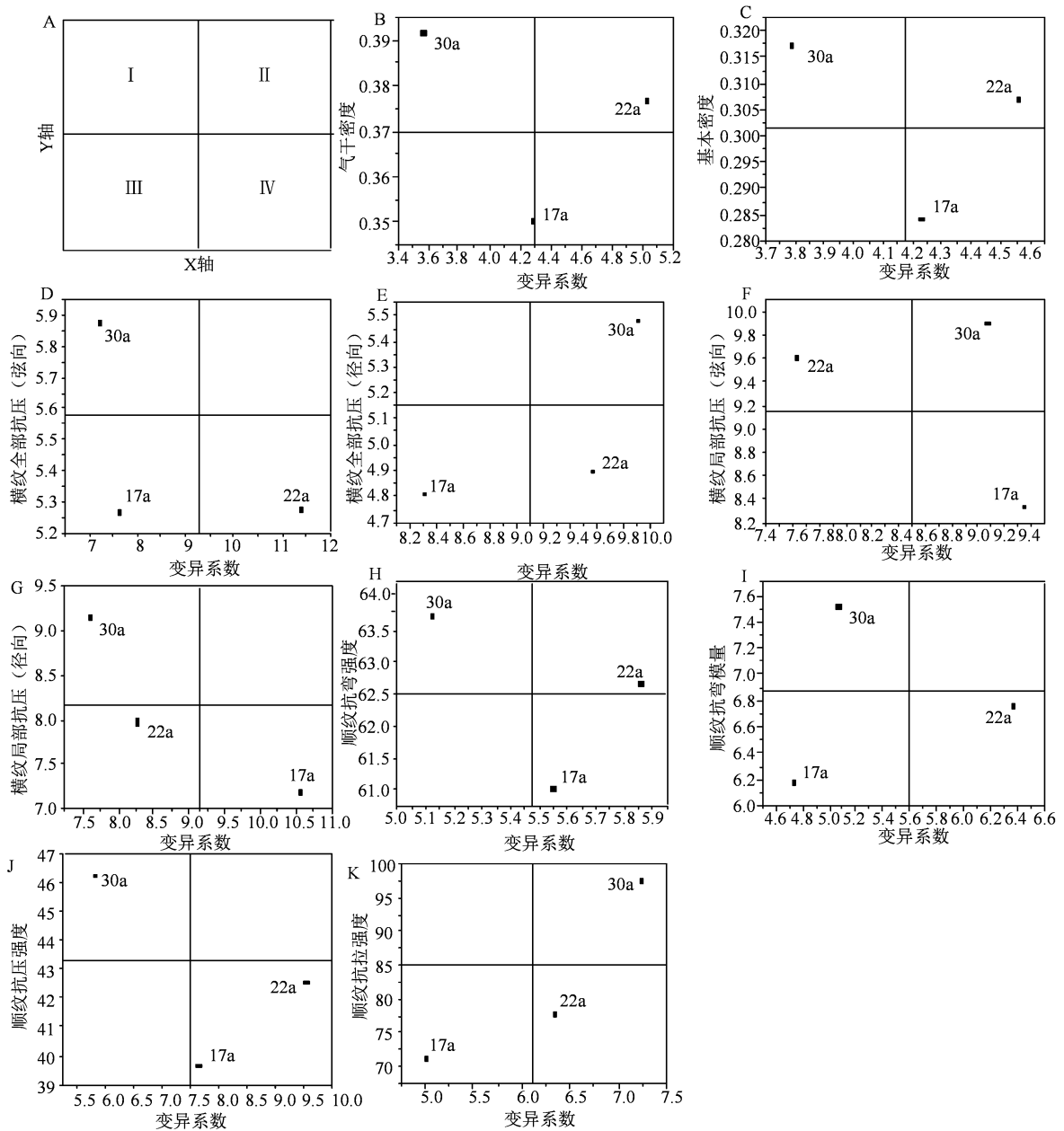
2.4 不同林龄木材密度与力学性质相关性的稳定性分析

变异系数是度量品种稳定性的重要参数。分别以 3 个林龄的杉木实生林木材气干密度、基本密度、

横纹弦向全部抗压强度、横纹径向全部抗压、横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗弯模量、顺纹抗压强度和顺纹抗拉强度的平均值为纵坐标, 以相应性状的表型变异系数为横坐

标, 绘制散点分布图(图 1)。从图 1 可以看出: 分布于第 I 象限的具有性状平均值高、变异系数大的特点; 分布于第 II 象限的无性系具有性状平均值高、变异系数小的特点; 分布于第 III 象限的无性系具有性状平均值低、变异系数小的特点; 分布于第 IV 象限的无性系具有性状均值低且变异系数大的特点。就木材密度而言, 17 年生均值小, 变异系数也小, 22 年生均值增大, 变异系数也增大, 30 年生时, 均

值更大, 而变异系数逐渐变小 (图 1B、C); 就木材力学性质而言, 横纹弦向全部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗压强度也呈现出与木材密度的变化规律 (图 1D、G、H 和 J); 横纹径向全部抗压、顺纹抗拉强度的均值和变异系数都随着年龄的增长而增大 (图 1E 和 K); 横纹弦局部抗压、顺纹抗强度强度的变异系数都随着年龄的增长而先减小再增大 (图 1F 和 I)。



A. 杉木实生林稳定性模式图; B. 气干密度散点分布图; C. 基本密度散点分布图; D. 横纹弦向全部抗压散点分布图; E. 横纹径向全部抗压散点分布图; F. 横纹弦向局部抗压散点分布图; G. 横纹径向局部抗压散点分布图; H. 顺纹抗弯强度散点分布图; I. 顺纹抗弯模量散点分布图; J. 顺纹抗压强度散点分布图; K. 顺纹抗拉强度散点分布图; 图 A 中 I、II、III、IV 表示由 x 轴均值和 y 轴均值分割而成的 4 个象限; 图 B、C、D、E 和 F 中十字线表示 x 轴均值和 y 轴均值。

图 1 不同林龄木材密度以及力学性质散点分布图

Figure 1 Scatter diagram of wood density and mechanical properties of different stand ages

2.5 木材密度与力学性质的相关性

木材密度是判断木材物理力学性质和工艺性质的重要指标, 密度与木材的众多性能都有着密切关系, 又是影响木材力学性质的重要参数^[24], 所以对密度和主要力学性质进行了相关性分析。由表 5 可知, 气干密度和基本密度之间相关性很强, 达到 0.988, 表现为显著相关性水平。气干密度和基本密度与力学性质中的横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯模量、顺纹抗拉强度呈极显著的正相关。在 8 个木材力学指标中, 横纹弦向全部抗压与横纹径向全部抗压表现出显著的正相关; 横纹弦向局部抗压和横纹径向局部抗压也表现出显著的正相关; 而顺纹抗压强度和顺纹抗拉强度与横纹弦向全部抗压、横纹径向全部抗压、横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗弯模量都表现出显著的正相关。

3 讨论与结论

木材密度是木材的一项重要指标, 反映了木材的致密程度, 与其自身生长特性以及外界生长环境存在密切相关性^[25], 是衡量木材物理力学性质的最佳指标, 其大小及变异程度是木材定向培育和性状改良的主要依据与理论基础^[26]。本研究发现不同林龄木材气干密度、基本密度差异显著, 随着树龄的增长而增大, 变幅分别为 0.350 ~ 0.392、0.284 ~ 0.317, 分别增长了 12.0%和 11.6%, 与梁宏温^[27]、韦如萍^[14] 等研究结果一致。

木材抗弯强度、抗弯弹性模量、顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度等力学性质可度量木材抵抗外力的能力, 是结构用材的主要指标, 也是木材合理利用的重要依据^[23]。本研究中, 不同林龄木材 8 个力学性质横纹弦向全部抗压、横纹径向全部抗压、横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯强度、顺纹抗弯模量、顺纹抗压强度和顺纹抗拉强度差异显著, 变幅分别为 5.265~5.873、4.780~5.485、8.335~9.895、7.183~9.151、61.010~63.930、6.173~7.511、39.625~46.211 和 71.041~97.415, 分别增加 11.5%、14.7%、18.7%、27.4%、4.8%、21.7%、16.6%和 37.1%, 说明树龄对实生林的力学性质影响显著。这与梁宏温^[27]、高建亮^[28] 等的研究结果一致, 其中对顺纹抗拉强度及横纹径向局部抗压影响最大。

相关系数反映的是群体水平参数, 而不是特指某一个个体, 即使两个性状之间总体上为负相关, 但涉及到某个具体的基因型, 也可能存在两个性状的遗传值均为正相关的特例^[29]。根据现有的研究结

果, 杉木在气干密度和基本密度达到极显著正相关, 同时, 气干密度、基本密度与 8 个木材力学性质的相关性为正向, 且与横纹弦向局部抗压、横纹径向局部抗压、顺纹抗弯模量、顺纹抗拉强度表现极显著差异, 说明杉木的物理力学性质具有紧密的相关性。开展遗传改良时, 可以以木材物理和力学性质的相关性为综合指标, 同步开展两个有利性状的遗传改良。

变异系数是衡量相关生长性状遗传变异潜力的有效指标, 变异系数的大小反映群体的变异程度^[30]。本研究中, 木材的气干密度、基本密度表现一致, 而木材的力学性质各不相同, 出现随着树龄的增长而逐渐变小、随树龄的增长而逐渐上升以及随着树龄的增长而先升后降 3 种趋势。30a 生时, 各变异系数的排序: 气干密度(3.57) < 基本密度(3.79) < 顺纹抗弯模量(5.07) < 顺纹抗弯强度(5.09) < 横纹弦向全部抗压(7.22) < 顺纹抗拉强度(7.25) < 横纹径向局部抗压(7.62) < 横纹径向全部抗压(9.89) < 横纹弦向局部抗压(9.07), 所有性状的变异系数小于 10%, 说明随着树龄的增加, 受遗传因素控制越来越大, 受环境因素影响越来越小。

本研究中, 不同林龄的杉木实生林的物理差异显著, 力学性质除了顺纹抗弯强度, 其他性状间也差异显著; 随着林龄的增长, 10 个性状逐渐增大; 从变异系数来看, 物理力学性质在不同的林龄的变异程度各不相同, 30 年生时, 10 个性状的变异系数都不大于 10%; 相关关系分析得出物理力学各性状两两间存在着复杂的相关性, 可作为材种需求分指标进行定向材性评价。木材性质关系到木材的加工和利用, 目前, 杉木作为成为南方地区主要的用材林, 在以后的定向培育中, 可根据不同的目标选择不同林龄的杉木进行砍伐, 也可在以后的杉木定向培育中, 根据不同木材用途调整营林措施。

参考文献:

- [1] 李坚. 木材科学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009:183.
- [2] 赵林峰, 高建亮, 李有清. 聚类分析与杉木优良无性系选择[J]. 分子植物育种, 2017, 15(9): 3616-3622.
- [3] 高瑞龙, 吴光华, 李大岔. 不同树龄香椿人工林木材材质的比较[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(S1):124-127.
- [4] 孙庆丰, 陈太安, 王昌命. 不同树龄思茅松人工林密度和力学性质变异研究[J]. 木材加工机械, 2007, 18(3): 19-23.
- [5] 黄广华, 陈瑞英. 人工林巨尾桉木材性能与树龄的关系[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(2): 183-186.
- [6] 姬宁, 潘彪, 徐永吉. 贵州马尾松人工林木材物理力学性质研究[J]. 贵州林业科技, 2003, 31(1): 41-44.

- [7] 金春德, 张美淑, 文桂峰, 等. 人工林赤松幼龄材与成熟材力学性质的比较[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(5): 477-481.
- [8] 刘迎涛, 李坚, 刘一星. 人工林红松幼龄材与成熟材力学性质的差异[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(4): 1-2.
- [9] 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.
- [10] 王军锋, 谭桂菲, 宋恋环, 等. 15年生香樟人工林木材物理力学性质研究[J]. 广西林业科学, 2020, 49(1): 26-29.
- [11] 施季森, 叶志宏, 翁玉榛, 等. 杉木生长与材性联合遗传改良研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1993, 17(1): 1-8.
- [12] 边黎明, 叶代全, 陈松, 等. 杉木嫁接植株胸径和木材弹性模量变异分析[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(1): 102-106.
- [13] 龚迎春, 武国芳, 王朝辉, 等. 杉木目测等级规格材足尺抗弯强度的设计值研究[J]. 西部林业科学, 2017, 46(3): 23-27.
- [14] 韦如萍, 胡德活, 郑会全, 等. 杉木优树生长性状和材质性状的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(2): 28-33.
- [15] 中国林业科学研究院木材工业研究所等. GB/T1933—2009 木材密度测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材顺纹抗拉强度试验方法: GB/T 1938—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材顺纹抗压强度试验方法: GB/T 1935—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材抗弯强度试验方法: GB/T 1936.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材抗弯弹性模量测定方法: GB/T 1936.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 木材横纹抗压试验方法: GB/T 1939—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 欧建德, 康永武. 造林密度对乳源木莲人工林生长形质及林分分化的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(4): 40-45.
- [22] 张沛健, 尚秀华, 吴志华. 5种桉树木材物理力学性质的差异比较[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 184-190.
- [23] 黄慧, 黄小春, 王小东, 等. 6种江西常见速生阔叶材纤维形态及材性比较[J]. 南方林业科学, 2016, 44(2): 52-55.
- [24] 李清芸, 林金国, 卞丽萍, 等. 马尾松人工林木材主要材性家系间的变异[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 209-213.
- [25] 魏鹏, 贾晨, 周永丽, 等. 鹅掌楸天然林木材物理力学及垂直变异特性研究[J]. 四川林业科技, 2018, 39(1): 27-31.
- [26] 尚秀华, 张沛健, 罗建中, 等. 赤桉幼龄材物理力学性质研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 32-41.
- [27] 梁宏温, 黄恒川, 黄承标, 等. 不同树龄秃杉与杉木人工林木材物理力学性质的比较[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(2): 137-142.
- [28] 高建亮, 赵林峰. 30a 杉木萌生林和实生林木材的材性比较[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(4): 93-97, 119.
- [29] 胡德活, 林绪平, 阮梓材, 等. 杉木无性系早-晚龄生长性状的相关性及早期选择的研究[J]. 林业科学研究, 2001, 14(2): 168-175.
- [30] 潘艳艳, 梁德洋, 郭婧, 等. 日本落叶松不同种源及家系生长性状变异分析[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 19-27.