

网络出版时间:2021-07-07 10:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.01.006
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210706.1719.005.html

杉木无性系不同林龄生长变异与选择效应

赵林峰,高建亮

(湖南环境生物职业技术学院 园林学院,湖南 衡阳 421005)

【摘要】【目的】研究杉木不同林龄无性系生长性状(胸径、树高、材积)的遗传变异规律,探讨早期选择的适宜年龄,为杉木无性系良种再选育提供依据。【方法】从 131 个杉木无性系每木调查数据中随机选择 56 个无性系样本,以其 5,10,15,20 和 30 年生时测算的胸径、树高、材积数据为依据,进行各性状的变异分析、方差分析、重复力估算,分析各无性系在不同林龄的遗传变异规律;采用早晚相关性分析和聚类分析确定早期选择的适宜林龄;利用聚类分析和布雷金多性状综合评定法选择出杉木速生无性系,并通过计算遗传增益和现实增益对选择效果进行评价。【结果】杉木无性系的胸径、树高、材积性状具有丰富的变异,变异幅度分别为 11.82%~24.41%,10.56%~21.28% 和 30.83%~66.73%,表现为材积>胸径>树高;方差分析结果显示,杉木胸径、树高、材积在无性系间差异极显著,且重复力达 0.919~0.947。相关分析认为,杉木无性系生长性状早晚相关性呈极显著正相关,表型相关系数为 0.432~0.999;各生长性状间的相关性与林龄间隔期有关,间隔期越短其相关性就越紧密。聚类分析结果表明,与 30 年生时入选的速生无性系比较,在林龄 15 年生时进行选择的正选率达 85.71%,而错选率为 14.29%,漏选率为 0%。30 年生时 6 个速生无性系胸径、树高、材积的总体遗传增益分别为 21.86%,18.32% 和 61.19%,现实增益分别为 29.86%,24.93% 和 92.92%。布雷金多性状综合评价以无性系 79172(1.705)最大,然后依次是 7911(1.698)、8213(1.688)、8237(1.672)、79173(1.666)、8219(1.664)。【结论】杉木无性系间的生长性状存在丰富的遗传变异,且受到较高的遗传控制,有较好的遗传改良潜力。15 年生是杉木速生无性系进行适宜选择的最早年龄,此时进行优良无性系选择更有利于提高杉木遗传改良的效率。30 年生按照<5% 的入选率,无性系 79172 和 7911 被选择出来,适宜在湖南永州林区进行推广种植。

【关键词】 杉木;无性系;林木遗传育种;遗传变异;早期选择

【中图分类号】 S791.270.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2022)01-0043-09

Growth variation and selection effect of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages

ZHAO Linfeng, GAO Jianliang

(Landscape Architecture College, Hunan Polytechnic of Environment and Biology, Hengyang, Hunan 421005, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the genetic variation of growth traits (DBH, height and volume) of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages and explored suitable age for early selection to provide basis for rebreeding of fine varieties. 【Method】 A total of 56 samples from 131 *C. lanceolata* clones were randomly selected from the survey data of individual trees. Based on the data of DBH, height and volume measured at ages of 5, 10, 15, 20 and 30 years, the variation analysis, variance analysis and reduplication estimation of traits were carried out to analyze the genetic variation rule of each clone at different stand ages. Early and late correlation analysis and cluster analysis were also used to determine

【收稿日期】 2021-02-24

【基金项目】 湖南省自然科学基金项目(2019JJ6028);湖南省林业科技创新杰出青年项目(XLK201981)

【作者简介】 赵林峰(1981—),男,湖南祁阳人,副教授,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:270679030@qq.com

【通信作者】 高建亮(1981—),男,安徽合肥人,教授,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:6015941@qq.com

suitable stand age for early selection. Clustering analysis and Bregkin multi-trait evaluation method were used to select fast growing clones and the selection effect was evaluated by calculating genetic gain and realistic gain. 【Result】 There were rich variations in DBH, height and volume of *C. lanceolata* clones, with ranges of 11.82%—24.41%, 10.56%—21.28% and 30.83%—66.73%, respectively. They were in the order of volume > DBH > height. The results of variance analysis showed that DBH, height and volume of *C. lanceolata* were significantly different among clones with repetitions of 0.919—0.947. Correlation analysis showed that morning and evening correlations of growth traits were extremely significant and positive with correlation coefficients of 0.432—0.999. The correlation between each growth character was related to stand age interval, and shorter interval led to closer correlation. The results of cluster analysis showed that the positive selection rate was 85.71%, the wrong selection rate was 14.29%, and the omission rate was 0%, compared with the fast growing clones selected at the age of 30 years. At the age of 30 years, the overall genetic gain of DBH, height and volume of 6 fast growing clones were 21.86%, 18.32% and 61.19%, while those of actual gain were 29.86%, 24.93% and 92.92%, respectively. Based on comprehensive evaluation using Bregin's multiple traits, 79172 (1.705) was the best, followed by 7911 (1.698), 8213 (1.688), 8237 (1.672), 79173 (1.666) and 8219 (1.664). 【Conclusion】 The growth traits of *C. lanceolata* clones had rich genetic variation and were controlled by high genetic control, showing good potential for genetic improvement. The age of 15 years was the earliest suitable age for selection of fast growing clones of *C. lanceolata* to improve efficiency of genetic improvement. The 30-year-old clones of 79172 and 7911 were selected according to the selection rate of less than 5% for popularization in Yongzhou forest area, Hunan.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; clone; forest tree genetics and breeding; genetic variation; early selection

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国特有的用材树种,广泛分布于我国的 16 个省份,有大约 8 000 年的采伐及 2 000 多年的栽培历史^[1]。其栽培面积大、生长速度快、干形通直圆满、木材纹理美观、材质轻、不翘不裂、加工性能好,是重要的用材树种之一。

无性育种具有选择层次高、选择强度大、能保持亲本的遗传特性、可缩短林木育种周期等特性,是提高人工林生产力的有效途径。因此,无性系林业一直受到林木育种界的普遍重视^[2]。我国的林业研究人员对欧洲云杉(*Picea abies*)^[3]、日本落叶松(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr)^[4]、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)^[5]、马尾松(*Pinus massoniana*)^[6]等树种的无性系均开展了大规模的良种选育试验,已取得一系列研究成果。

对杉木无性系的研究始于 20 世纪 70 年代,主要焦点集中在最早选育年龄的讨论上:有学者认为,幼树阶段杉木无性系间就存在显著差异,因此在幼树阶段选择是有效果的^[7-9];也有学者认为,中龄期杉木无性系间的生长性状呈极显著差异水平,且有较高的重复力和丰富的遗传变异,因此在中龄阶段选择更具有较高的遗传增益^[10-13];还有学者认为,成熟龄期无性系的生长性状间存在的差异极显著,既

具有中等以上重复力,也具有更高的生长稳定性和生长潜力,因此在成熟龄期对无性系进行选择更为精准可靠^[14-17];另有学者对不同林龄无性系研究发现,杉木无性系间的生长性状始终存在显著差异,具有较大的广义遗传力,林龄越大正选率越高,遗传增益越大^[18-22]。可见,有关杉木优良无性系早期选择的适宜年龄尚无定论。

本研究对湖南省永州市金洞林场杉木无性系田间试验林早期的每木调查数据进行生长性状分析,探讨杉木速生无性系适宜选择的最早年龄,为杉木优良无性系再选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湖南省永州市金洞林场李子魁(E110°53'43", N26°21'37"),该地属中亚热带东南季风湿润性气候,年均气温 18℃,年均降雨量 1 000~1 800 mm,年均蒸发量 1 225 mm,年均有效日照时数为 1 617 h,相对湿度 75%~82%。土壤属森林黄壤,厚 30~60 cm, pH 4.5~5.5。

1.2 试验材料

杉木无性系田间试验林是 1987 年 2 月营造的,

苗木来自湖南省永州市林业科学研究所。试验按随机区组设计,5 株小区,6 次重复。30 年生时,131 个参试无性系的保存率大于 80% 的有 112 个,按 2:1 的比例从 112 个无性系中选择 56 个无性系作为样本进行分析。按杉木速生丰产林(湖南)标准(DB/4300B64012-1986)进行施工和管理。

1.3 杉木无性系生长性状测定方法

造林后前 5 年每年进行每木调查,随后是每隔 2 或 3 年进行 1 次每木调查,20 年后每隔 5 年进行 1 次每木调查。林分前 5 年每木实测树高和胸径;5 年后实测胸径,且每个试验小区选择 1 株有代表性的样木实测树高后估算其他株的树高。按下式估算材积^[23]:

单株材积计算公式:

$$V=0.000\ 058\ 777\ 042 \times D^{1.969\ 983\ 1} \times H^{0.896\ 461\ 57}。$$

式中: V 、 D 、 H 分别表示单株材积、胸径和树高。

1.4 杉木无性系生长性状变异分析

采用变异系数(CV)分析各无性系胸径、树高和材积 3 个生长性状的离散程度,其计算公式^[24]如下:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}。$$

式中:CV 为变异系数, S 为性状的标准差, \bar{X} 为整体性状平均值。

1.5 杉木无性系生长性状的方差分析

以各无性系生长性状平均值为统计单位,采用线性模型进行方差分析,在方差分析的基础上估算生长性状的重复力。

方差分析采用的线性模型:

$$Y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + e_{ijk}。$$

式中: Y_{ijk} 为实际观测值, μ 为总体平均值, a_i 为无性系效应, b_j 为区组效应, e_{ijk} 为机误。

重复力计算公式^[25]: $R = 1 - \frac{1}{F}$ 。

式中: R 为重复力, F 为方差分析中的 F 值。

1.6 杉木无性系生长性状的早晚相关性

利用皮尔逊相关系数度量 2 个性状之间的相关性,相关系数采用下式计算:

$$r_p = \sigma_{pxpy} / \sqrt{\sigma_{px}^2 \sigma_{py}^2}。$$

式中: r_p 为表型相关系数, σ_{pxpy} 为性状 x 与性状 y 的表型协方差, σ_{px}^2 为性状 x 的表型方差, σ_{py}^2 为性状 y 的表型方差。

1.7 杉木无性系基于生长性状的聚类分析

采用 SPSS 25.0 的类平均法,以欧式距离为划分标准,对 56 个无性系进行变量聚类。将无性系在

5,10,15,20 和 30 年生的胸径、树高、材积性状均值作为变量分 3 类进行聚类,I 类生长最好,定位为速生型;II 类表示生长中等,定位为中庸型;III 类生长最差,定位为缓慢型。与 30 年生入选的杉木速生无性系比较,早期和后期均入选的称为正选,早期入选而后期被淘汰的称为错选,早期淘汰而后期入选的则为漏选,并据此计算正选率、错选率和漏选率。

1.8 入选杉木无性系的多性状综合评价

利用生长性状标准化处理后的数据,采用布雷金多性状综合评定法^[26]对杉木无性系进行综合评定,综合评价值(Q_i)计算公式为:

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n a_j}, a_j = \frac{X_{ij}}{X_{j\max}}。$$

式中: Q_i 为综合评价值, i 表示某个无性系, n 表示无性系数量, j 表示某个性状, X_{ij} 表示 i 无性系 j 性状的平均值, $X_{j\max}$ 表示 j 性状最大值。

1.9 入选杉木无性系选择效果评价

以 30 年生时的入选结果为标准,估算现实增益(G)和遗传增益(ΔG),计算公式^[27-28]如下:

$$G = (\bar{x} - \bar{X}) / \bar{X}。$$

$$\Delta G = (\bar{x} - \bar{X}) \cdot R / \bar{X}。$$

式中: G 为现实增益, ΔG 为遗传增益, \bar{x} 为某无性系性状平均值, \bar{X} 为整体性状平均值, R 为重复力。

2 结果与分析

2.1 杉木无性系生长性状的变异情况

由表 1 可以看出,56 个杉木无性系胸径的变异系数表现为 5 年生(24.41%)>10 年生(15.37%)>30 年生(12.97%)>20 年生(12.22%)>15 年生(11.82%),树高的变异系数表现为 5 年生(21.28%)>10 年生(13.76%)>30 年生(11.09%)>15 年生(10.58%)>20 年生(10.56%),材积的变异系数表现为 5 年生(66.73%)>10 年生(42.39%)>30 年生(33.15%)>20 年生(31.94%)>15 年生(30.83%)。各生长性状的变异系数在 5 年生时均处于最大值,胸径和材积的变异系数最小值在 15 年生,树高的变异系数最小值在 20 年生,且胸径和材积的变异系数变化趋势一致。研究还发现,各性状的变异系数随着林龄的增大而呈现逐渐减小的趋势;不同林龄杉木无性系各生长性状的变异系数表现为材积>胸径>树高,说明在生长过程中材积更能通过表型的表现使其差异更加明显。分析结果还表明,5 年生时由于各生长性状的变异值处于最大,因此此时选择优良无性

系的效果不理想;胸径和材积的变异系数最小值在 15~20 年生时选择效果更好。
15 年生,树高变异系数最小值在 20 年生,因此在

表 1 杉木无性系不同林龄生长性状的变异情况

Table 1 Variation of growth traits of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages

林龄/a Age	胸径 DBH					
	均值/cm Mean	标准差/cm SD	最小值/cm Min	最大值/cm Max	极差/cm Range	变异系数/% CV
5	4.38	1.069 9	2.70	7.60	4.90	24.41
10	8.61	1.323 6	5.80	12.90	7.10	15.37
15	13.24	1.564 5	7.80	17.80	10.00	11.82
20	17.16	2.097 4	13.00	23.50	10.50	12.22
30	20.30	2.632 9	14.60	27.30	12.70	12.97
林龄/a Age	树高 Height					
	均值/m Mean	标准差/m SD	最小值/m Min	最大值/m Max	极差/m Range	变异系数/% CV
5	3.78	0.803 4	2.50	6.20	3.70	21.28
10	6.89	0.948 6	5.10	9.90	4.80	13.76
15	10.15	1.074 4	6.30	13.20	6.90	10.58
20	12.79	1.350 9	10.00	16.80	6.80	10.56
30	14.78	1.638 9	11.10	19.00	7.90	11.09
林龄/a Age	材积 Volume					
	均值/m ³ Mean	标准差/m ³ SD	最小值/m ³ Min	最大值/m ³ Max	极差/m ³ Range	变异系数/% CV
5	0.004 8	0.003 2	0.001 3	0.017 2	0.015 9	66.73
10	0.024 8	0.010 5	0.009 8	0.066 6	0.056 8	42.39
15	0.073 1	0.022 5	0.018 4	0.151 2	0.132 8	30.83
20	0.141 8	0.045 3	0.068 0	0.304 4	0.236 4	31.94
30	0.217 3	0.072 1	0.091 4	0.442 3	0.350 9	33.15

2.2 杉木无性系生长性状的方差分析

由表 2 可知,参试无性系在 5,10,15,20 和 30 年生时各生长性状的差异性均达到了极显著水平 ($P<0.01$),说明不同无性系间的生长性状表现有很大差异,即使在相同林龄下其差异也很明显。在

重复力方面,5,10,15,20 和 30 年生时的胸径、树高和材积的重复力均在 0.919 以上,且随着林龄的增长各性状的重复力均表现稳定。从重复力角度来看,在 5 年生时对速生无性系进行选择也是可行的,但其增产效果会有不确定性。

表 2 杉木无性系不同林龄生长性状的方差分析及重复力

Table 2 Variance analysis of growth traits and repeat of *Cunninghamia lanceolata* clones at different ages

性状 Traits	林龄/a Age	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F 值 F value	重复力 Repeat
胸径 DBH	5	174.282	55	3.169	14.919**	0.933
	10	265.992	55	4.836	14.589**	0.931
	15	369.026	55	6.710	13.790**	0.928
	20	666.953	55	12.126	14.419**	0.931
	30	1 033.675	55	18.794	12.701**	0.921
树高 Height	5	97.719	55	1.777	14.266**	0.929
	10	136.329	55	2.479	14.346**	0.930
	15	174.502	55	3.173	14.085**	0.929
	20	274.886	55	4.998	13.706**	0.927
	30	399.327	55	7.260	12.438**	0.919
材积 Volume	5	0.002	55	0.000	16.649**	0.939
	10	0.017	55	0.000	18.991**	0.947
	15	0.079	55	0.001	17.205**	0.942
	20	0.315	55	0.005	16.062**	0.938
	30	0.784	55	0.014	14.015**	0.929

注: ** 表示在 $P<0.01$ 水平上差异极显著。表 3 同。

Note: ** represents extremely significant differences at $P<0.01$. The same for Table 3.

2.3 杉木无性系生长性状的早晚相关性

由表 3 可知,胸径、树高、材积在不同林龄间的表型相关系数分别在 0.438~0.956,0.437~0.955,0.450~0.967,即同一性状不同林龄之间均呈极显著正相关($P<0.01$),但 5 年生与 30 年生前相关系数最小,林龄越相近其表型相关系数会相应

增加。不同性状间早晚相关性随林龄的增长而增大,30 年生时,胸径与树高、材积的相关系数分别达到 0.999 和 0.993。上述结果说明,5 年生时选择速生无性系,早晚相关性低,增产效果不确定性高;越接近林分成熟时期选择,早晚相关性越高,其选择效果会越好。

表 3 杉木无性系不同林龄生长性状的表型相关系数

Table 3 Early-late correlation analysis of growth traits of *Cunninghamia lanceolata* clones at different ages

性状 Trait	林龄/a Age	胸径 DBH					树高 Height					材积 Volume				
		5	10	15	20	30	5	10	15	20	30	5	10	15	20	30
	5	1														
胸径 DBH	10	0.787**	1													
	15	0.506**	0.771**	1												
	20	0.477**	0.762**	0.956**	1											
	30	0.438**	0.720**	0.887**	0.938**	1										
	5	0.997**	0.788**	0.508**	0.473**	0.435**	1									
树高 Height	10	0.787**	0.993**	0.770**	0.768**	0.732**	0.784**	1								
	15	0.502**	0.763**	0.995**	0.954**	0.890**	0.502**	0.769**	1							
	20	0.476**	0.759**	0.953**	0.995**	0.939**	0.475**	0.764**	0.955**	1						
	30	0.439**	0.722**	0.886**	0.937**	0.999**	0.437**	0.733**	0.889**	0.936**	1					
	5	0.982**	0.808**	0.530**	0.503**	0.451**	0.980**	0.806**	0.525**	0.502**	0.450**	1				
材积 Volume	10	0.801**	0.986**	0.752**	0.742**	0.690**	0.800**	0.983**	0.747**	0.739**	0.690**	0.836**	1			
	15	0.504**	0.771**	0.991**	0.959**	0.887**	0.505**	0.771**	0.988**	0.955**	0.884**	0.538**	0.763**	1		
	20	0.472**	0.755**	0.951**	0.993**	0.928**	0.469**	0.760**	0.949**	0.989**	0.924**	0.505**	0.745**	0.967**	1	
	30	0.432**	0.716**	0.889**	0.938**	0.993**	0.430**	0.725**	0.891**	0.936**	0.991**	0.450**	0.693**	0.900**	0.938**	1
	5															

2.4 杉木无性系聚类分析结果

4。

杉木无性系不同林龄生长性状的聚类结果见表

表 4 杉木无性系不同林龄生长性状的聚类结果

Table 4 Cluster results of growth traits of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages

林龄/a Age	速生型 Fast-growing type	中庸型 Middle-growing type	缓慢型 Slow-growing type
5	7910、7911、7927、7967、8008、8213、8237	7903、7945、7948、7962、7973、79159、79160、79161、79172、79173、79186、8002、8012、8029、8104、8204	7901、7907、7912、7913、7914、7915、7916、7919、7922、7924、7926、7929、7976、79114、79118、79126、79163、79165、79166、79167、79168、79171、79174、79177、79179、79182、8007、8009、8027、8206、8208、8219、8231
10	7911、7927、8213	7910、7967、79172、79173、8008、8104、8219、8237	7901、7903、7907、7912、7913、7914、7915、7916、7919、7922、7924、7926、7929、7945、7948、7962、7973、7976、79114、79118、79126、79159、79160、79161、79163、79165、79166、79167、79168、79171、79174、79177、79179、79182、79186、8002、8007、8009、8012、8027、8029、8204、8206、8208、8231
15	7911、7927、79172、79173、8213、8219、8237	7910、7922、7948、7962、7967、7973、79160、79165、79167、79174、79177、79179、79182、8008、8104	7901、7903、7907、7912、7913、7914、7915、7916、7919、7924、7926、7929、7945、7976、79114、79118、79126、79159、79161、79163、79166、79168、79171、79186、8002、8007、8009、8012、8027、8029、8204、8206、8208、8231
20	7911、7927、79172、79173、8213、8219、8237	7910、7922、7948、7962、7967、7973、79160、79165、79167、79174、79177、79179、79182、8008、8104	7901、7903、7907、7912、7913、7914、7915、7916、7919、7924、7926、7929、7945、7976、79114、79118、79126、79159、79161、79163、79166、79168、79171、79186、8002、8007、8009、8012、8027、8029、8204、8206、8208、8231
30	7911、79172、79173、8213、8219、8237	7910、7922、7927、7948、7962、7967、7973、79160、79165、79167、79174、79177、79179、79182、8008、8104	7901、7903、7907、7912、7913、7914、7915、7916、7919、7924、7926、7929、7945、7976、79114、79118、79126、79159、79161、79163、79166、79169、79171、79186、8002、8007、8009、8012、8027、8029、8204、8206、8208、8231

如表 4 所示,各林龄生长最好的种源只是绝小的一部分,仅占 12%左右。5 年生时入选 7 个,10 年生时入选 3 个,15 年生时入选 7 个,20 年生时入选 7 个,30 年生时入选 6 个,在不同林龄阶段入选

的无性系数量是不一致的,错选、漏选现象均有发生,但随着林龄的增加,错选、漏选会减少。对杉木速生无性系早期选择的正选率、错选率和漏选率进行分析,结果(表 5)表明,与 30 年生选中的速生无

性系进行比较,5年生时的正选率为 42.86%,错选率 57.14%,漏选率 50.00%;10年生时的正选率为 66.67%,错选率是 33.33%,漏选率是 66.67%;15和 20年生时正选率均为 85.71%,而错选率均为

14.29%,漏选率均为 0%。另外还发现,30年生时入选的无性系 7911 和 8213,在 5,10,15 和 20 年生时均入选,这也说明了幼龄期选择的可行性,但中期选择结果更为可靠。

表 5 杉木无性系不同林龄的选择风险

Table 5 Selection risk of *Cunninghamia lanceolata* clones at different stand ages

林龄/a Age	入选数 Number of selection	正选数 Number of correct selection	正选率/% Correct selection rate	错选数 Number of wrong selection	错选率/% Wrong selection rate	漏选数 Number of missed selection	漏选率/% Missed selection rate
5	7	3	42.86	4	57.14	3	50.00
10	3	2	66.67	1	33.33	4	66.67
15	7	6	85.71	1	14.29	0	0
20	7	6	85.71	1	14.29	0	0
30	6	6	100.00	0	0	0	0

2.5 入选无性系的多性状综合评价结果

由表 6 可知,入选的 6 个无性系按布雷金多性状综合值的排序依次为 79172 (1.705) > 7911 (1.698) > 8213 (1.688) > 8237 (1.672) > 79173 (1.666) > 8219 (1.664)。

2.6 入选无性系的选择效果评价

由表 7 可知,30 年生时 6 个杉木速生无性系胸径、树高、材积的平均遗传增益分别为 21.86%, 18.32% 和 61.19%, 现实增益分别为 29.86%, 24.93% 和 92.92%。入选无性系生长性状的遗传

增益和现实增益的排序与综合评价值的排序一致。

表 6 参试杉木无性系生长性状综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of growth traits of *Cunninghamia lanceolata* clones

无性系 Clone	综合评价价值 Evaluating value	排序 Ranking
8219	1.664	6
79173	1.666	5
8237	1.672	4
8213	1.688	3
7911	1.698	2
79172	1.705	1

表 7 6 个入选杉木无性系选择效果评价

Table 7 Evaluation on selection effect of 6 *Cunninghamia lanceolata* clones

无性系 Clone	胸径 DBH			树高 Height			材积 Volume		
	均值/cm Mean	遗传增益/% Genetic gain	现实增益/% Realized gain	均值/m Mean	遗传增益/% Genetic gain	现实增益/% Realized gain	均值/m ³ Mean	遗传增益/% Genetic gain	现实增益/% Realized gain
8219	24.0	16.78	24.14	17.07	14.24	20.32	0.321 3	44.46	71.88
79173	24.8	20.42	28.10	17.53	17.09	23.55	0.347 1	55.49	85.69
8237	24.8	20.42	28.45	17.57	17.34	23.80	0.350 3	56.86	87.43
8213	25.2	22.23	30.17	17.76	18.53	25.19	0.362 2	61.95	93.79
7911	25.2	22.23	30.17	17.77	18.59	25.20	0.362 9	62.25	94.64
79172	26.7	29.09	38.10	18.66	24.13	31.51	0.418 8	86.15	124.08
均值 Mean	25.1	21.86	29.86	17.73	18.32	24.93	0.360 4	61.19	92.92

3 讨论

变异系数能反映出性状在遗传变异中的幅度,及遗传因素导致性状相对变异的程度^[3]。本研究中胸径的遗传变异系数为 11.82%~24.41%,树高的为 10.56%~21.28%,材积的为 30.83%~66.73%,且有随着林龄的增长而减小的趋势,这与李荣丽等^[10]和孙云等^[7]的研究结果一致,表明杉木无性系间存在丰富的表型变异,具有较高的选择潜力。

遗传变异分析是林木育种研究的主要内容^[30]。在本研究中,56 个杉木无性系在不同林龄期各生长性状的差异均达到极显著水平($P < 0.01$),该结果与伍汉斌等^[1]、李魁鹏等^[18]、许忠坤^[19]的研究结果一致。本试验发现,不同林龄杉木胸径的重复力是 0.921~0.933,树高的重复力是 0.919~0.930,材积的重复力是 0.929~0.947,这与蓝肖等^[31]、胡德活等^[8]和郑会全等^[17]的研究结果相似,与 Pang 等^[32]的研究结果一致,表明杉木无性系的遗传一致性高,性状受遗传控制的程度较高,因此对速生无性系进行早期选择是可行的。

方差分析是评价变异程度的一个重要方法^[29]。

相关性分析可以反映各变量之间的关系^[33]。本研究中杉木胸径、树高、材积在不同林龄间的表型相关系数分别在 0.438~0.956, 0.437~0.955, 0.450~0.967, 相关性较高,这与曾志光等^[13]和焦云德等^[34]的研究结果一致。本研究还发现,随着林龄增大各性状间的相关性递增,这与李魁鹏等^[18]的研究结果一致,说明延迟选育年限,选择效果更好。

利用聚类分析可将 56 个杉木无性系分为 3 大类群,同一类群中无性系的生长量基本相近,同一无性系在 5~10 年生时可能会处在不同的类群中,但到 15 年后就基本稳定在既定的类群中。因此如果在 5~10 年生时选择速生无性系,就会出现错选、漏选,这种结果与马常耕等^[35]和陈代喜等^[36]的研究结果一致。利用布雷金多性状综合评定法能准确计算各品种的综合评价值,对最终入选的杉木无性系进行排序,发现排序位置与各入选无性系的遗传增益和现实增益排序结果一致,证明布雷金多性状综合评定法也是一种良种选择方法。

4 结 论

本研究结果表明,56 个杉木无性系间在生长性状上存在极显著差异,受到高强度的遗传控制,且不同林龄表现出丰富的变异,具有较好的遗传改良潜力。分析早晚年份生长性状相关性,得出杉木速生无性系选择的最早适宜年龄在 15 年生以后,其错选率、漏选率最低,正选率达 85.71%。30 年生时,采用聚类分析和布雷金多性状综合评定法选择出无性系 79172 和 79111,其遗传增益和现实增益增幅较大,可考虑作为生长优良的杉木无性系在当地推广种植。

[参考文献]

[1] 伍汉斌,段爱国,张建国. 杉木地理种源不同林龄生长变异及选择 [J]. 林业科学, 2019, 55(10): 181-192.
Wu H B, Duan A G, Zhang J G. Growth variation and selection effect of *Cunninghamia lanceolata* provenances at different stand ages [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(10): 181-192.

[2] 马常耕. 世界松类无性系林业发展策略和现状 [J]. 世界林业研究, 1994, 2(2): 11-18.
Ma C G. Development strategy and present status of pine clonal forestry in the world [J]. World Forestry Research, 1994, 2(2): 11-18.

[3] 安三平, 欧阳芳群, 马建伟, 等. 欧洲云杉无性系遗传变异及早期选择 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 61-65.
An S P, Ouyang F Q, Ma J W, et al. Genetic variation and early evaluation of *Picea abies* clone [J]. Journal of Northwest

Forsetry University, 2018, 33(6): 61-65.

[4] 杜超群, 许业洲, 孙晓梅, 等. 鄂西亚高山区日本落叶松无性系生长性状变异分析与早期选择 [J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 19-23.
Du C Q, Xu Y Z, Sun X M, et al. Variation of growth traits and early selection of *Larix kaempferi* clone in sub-alpine area of western Hubei Province [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(3): 19-23.

[5] 李嘉琪, 韩喜东, 马盈慧, 等. 樟子松无性系生长性状与结实量变异研究 [J]. 植物研究, 2020, 40(2): 217-223.
Li J Q, Han X D, Ma Y H, et al. Variation analysis of growth traits and coning quantity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* clones [J]. Bulletin of Botanical Research, 2020, 40(2): 217-223.

[6] 王胤, 姚瑞玲. 马尾松无性系幼林生长性状变异分析 [J]. 西南林业大学学报, 2020, 40(1): 11-16.
Wang Y, Yao R L. Variation analysis of growth characters in young clones forest of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2020, 40(1): 11-16.

[7] 孙云, 李鑫, 李勇, 等. 幼树阶段杉木不同无性系生长与形态性状分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 34-39.
Sun Y, Li X, Li Y, et al. Analysis of growth traits and morphological characters among different clones of *Cunninghamia lanceolata* in young tree stage [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(3): 34-39.

[8] 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.
Hu D H, Lin X P, Ruan Z C, et al. Study on the growth character correlation of Chinese fir clone and early selection [J]. Forest Research, 2001, 14(2): 168-175.

[9] 游水林, 代仕高, 马光良, 等. 杉木无性系的遗传变异及优良无性系选择 [J]. 四川林业科技, 2001, 22(2): 60-64.
You S L, Dai S G, Ma G L, et al. Genetic variation and selection of excellent clones of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2001, 22(2): 60-64.

[10] 李荣丽, 黄寿先, 梁机, 等. 杉木无性系生长和木材品质性状遗传变异研究 [J]. 南方农业学报, 2014, 45(9): 1626-1631.
Li R L, Huang S X, Liang J, et al. Genetic variation of growth traits and wood properties in Chinese fir clones [J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(9): 1626-1631.

[11] 何贵平, 林阳峰, 程亚平, 等. 杉木无性系主要经济性状遗传变异和无性系选择 [J]. 浙江林业科技, 2015, 35(1): 65-67.
He G P, Lin Y F, Cheng Y P, et al. Genetic variation and selection for main economic traits of *Cunninghamia lanceolata* clone [J]. Journal of Zhejiang Forest Science and Technology, 2015, 35(1): 65-67.

[12] 段红静, 曹森, 郑会全, 等. 杉木不同无性系主要经济性状变异分析 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 78-83.
Duan H J, Cao S, Zheng H Q, et al. Variation analysis on the main economic characters of Chinese fir clone [J]. Journal of

- Southwest Forestry University, 2016, 36(2): 78-83.
- [13] 曾志光, 肖复明, 沈彩周, 等. 江西省优质速生杉木无性系选育研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 561-566.
Zeng Z G, Xiao F M, Shen C Z, et al. Clone selection of Chinese fir with fast growth and superior timber property [J]. Forest Research, 2006, 19(5): 561-566.
- [14] 韦颖文, 覃静, 吴幼媚, 等. 杉木实生及无性系人工林生长规律的研究 [J]. 江苏林业科技, 2016, 43(3): 1-4, 24.
Wei Y W, Qin J, Wu Y M, et al. Growth comparison of seedling and clonal trees of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology, 2016, 43(3): 1-4, 24.
- [15] 段爱国, 张雄清, 张建国, 等. 21 年生杉木无性系生长与遗传评价 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 672-676.
Duan A G, Zhang X Q, Zhang J G, et al. Growth and genetic evaluation of 21-year-old Chinese fir clonal plantation [J]. Forest Research, 2014, 27(5): 672-676.
- [16] 王润辉, 胡德活, 郑会全, 等. 杉木无性系生长和材性变异及多性状指数选择 [J]. 林业科学, 2012, 48(3): 45-50.
Wang R H, Hu D H, Zhen H Q, et al. Clonal variation in growth and wood quality and the multi-trait index selection of Chinese fir [J]. Scientia Silvae Sincae, 2012, 48(3): 45-50.
- [17] 郑会全, 胡德活, 韦如萍, 等. 杉木速生无性系选择与材质分析 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 27-31.
Zheng H Q, Hu D H, Wei R P, et al. Fast-growing clone selection and wood quality analysis in Chinese fir [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(10): 27-31.
- [18] 李魁鹏, 陈代喜, 黄开勇, 等. 21 年生杉木无性系生长差异与决选 [J]. 广西林业科学, 2017, 46(1): 42-46.
Li K P, Chen D X, Huang K Y, et al. Growth difference and final selection Guangxi 21-year-old Chinese fir clone [J]. Guangxi Forestry Science, 2017, 46(1): 42-46.
- [19] 许忠坤. 杉木无性系选择与生长潜力分析 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 598-603.
Xu Z K. Selection and growth potential analysis of Chinese fir clones [J]. Forest Research, 2014, 27(5): 598-603.
- [20] 范福金. 杉木不同无性系间生长性状差异研究 [J]. 安徽农学通报, 2012, 18(6): 21-25.
Fan F J. Study on growth traits difference among clones of Chinese fir [J]. Anhui Agriculture Science Bulletin, 2012, 18(6): 21-25.
- [21] 赵承开. 杉木优良无性系早期选择年龄和增益 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 53-60.
Zhao C K. A study on optimum age and gain for early selection of superior clone in *Cunninghamia lanceolata* Hook [J]. Scientia Silvae Sincae, 2002, 38(4): 53-60.
- [22] 蓝肖, 韦华, 陈琴, 等. 杉木无性系对比试验研究 [J]. 广西林业科学, 2012, 41(4): 331-335.
Lan X, Wei H, Chen Q, et al. Comparative test study on *Cunninghamia lanceolata* clones [J]. Guangxi Forestry Science, 2012, 41(4): 331-335.
- [23] 李龙英, 伍伯良, 胡德活, 等. 杉木优良无性系区域化试验初报 [J]. 广东林业科技, 2004, 20(3): 5-9.
Li L Y, Wu B L, Hu D H, et al. Preliminary report on regionalization test of super Chinese fir clone [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2004, 20(3): 5-9.
- [24] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 等. 柚木无性系生长性状的遗传变异与选择效应 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1): 101-106.
Huang G H, Liang K N, Zhou Z Z, et al. Genetic variation and selective effect of growth traits of teak clones [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1): 101-166.
- [25] 凌娟娟, 肖遥, 杨桂娟, 等. 灰楸无性系生长和性质性状变异与选择 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(5): 149-156.
Ling J J, Xiao Y, Yang G J, et al. Variation and selection of growth and trunk shape traits of *Catalpa fargesii* clones [J]. Forest Research, 2019, 32(5): 149-156.
- [26] 赵曦阳, 马开峰, 沈应柏, 等. 白杨派杂种无性系植株早期性状变异与选择研究 [J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 45-51.
Zhao X Y, Ma K F, Shen Y B, et al. Characteristic variation and selection of forepart hybrid clone of *Sect. Populus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 45-51.
- [27] 赵林峰, 高建亮, 刘得花, 等. 25a 杉木优良无性系生长评价和遗传潜力估算 [J]. 分子植物育种, 2017, 15(7): 2755-2761.
Zhao L F, Gao J L, Liu D H, et al. Growth evaluation and genetic potential estimation of superior clones of 25a Chinese fir [J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(7): 2755-2761.
- [28] 王家妍, 莫雅芳, 申礼凤, 等. 桂南地区 23 个桉树无性系遗传变异分析和选择 [J]. 西南农业学报, 2019, 32(9): 2174-2179.
Wang J Y, Mo Y F, Shen L F, et al. Genetic variation analysis and selection of 23 *Eucalyptus clones* in southern Guangxi [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(9): 2174-2179.
- [29] Safavi S A, Pourdad S A, Taeb M, et al. Assessment of genetic variation among safflower (*Carthamus tinctorius* L.) accessions using agro-morphological traits and molecular markers [J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2010, 8: 616-625.
- [30] Mwase W F, Savill P S, Hemery G E. Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in a breeding seedling orchard at little wittenham in England [J]. New Forests, 2008, 36(3): 45-51.
- [31] 蓝肖, 唐文, 黄开勇, 等. 杉木无性系对比试验研究 [J]. 热带农业科学, 2012, 33(5): 46-50.
Lan X, Tang W, Huang K Y, et al. Evaluation and selection of *Cunninghamia lanceolata* Full-sib filial generation [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2012, 33(5): 46-50.
- [32] Pang F H, Yang J W, Pang Z L, et al. The correlation analysis between *Populus simonii* ecophysiological indexes and environmental factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3188-3197.
- [33] 何贵平, 陈益泰, 张国武. 杉木主要生长、材质性状遗传差异及家系选择 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 559-563.
He G P, Chen Y T, Zhang G W. Genetic analysis and family selection for main traits of growth and wood quality of Chi-

- nese fir [J]. Forest Research, 2002, 15(5): 559-563.
- [34] 焦云德, 赵燕, 赵鲲, 等. 楸树无性系生长和生理特性研究 [J]. 湖北农业科学, 2016, 55(22): 5858-5863.
Jiao Y D, Zhao Y, Zhao K, et al. Study on growth and physiological characteristics of *Catajpt bungei* clones [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(22): 5858-5863.
- [35] 马常耕, 周天相, 徐金良. 杉木无性系生长的遗传控制和早期选择初探 [J]. 林业科学, 2000, 36(1): 62-69.
Ma C G, Zhou T X, Xu J L. A preliminary study on genetic control of growth traits and early selection of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* Hook) clones [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 62-69.
- [36] 陈代喜, 李魁鹏, 黄开勇, 等. 广西 20 年生杉木无性系测定与早期选择研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(11): 9-13.
Chen D X, Li K P, Huang K Y, et al. Study on early selection and experiment of Guangxi 20-year-old Chinese fir clone [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(11): 9-13.
-
- (上接第 42 页)
- [32] 闫茂仓, 单乐州, 邵鑫斌, 等. 温度及体重对鳊鱼幼鱼耗氧率和排氮率的影响 [J]. 热带海洋学报, 2007, 26(1): 44-49.
Yan M C, Shan L Z, Shao X B, et al. Influence of temperature and weight on respiration and excretion of juvenile *Miichthys miju* [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(1): 44-49.
- [33] 廖志洪, 林小涛, 王春, 等. 黄颡鱼仔、稚、幼鱼耗氧率及氨氮排泄率的初步研究 [J]. 生态科学, 2004, 23(3): 223-226.
Liao Z H, Lin X T, Wang C, et al. Primary study on oxygen consumption and NH₃-N excretion rate of larvae, juvenile and young *Pelteobogrus fulvidraco* [J]. Ecologic Science, 2004, 23(3): 223-226.
- [34] Dalvi R S, Pal A K, Tiwari L R, et al. Thermal tolerance and oxygen consumption rates of the catfish *Horabagrus brachysoma* (Günther) acclimated to different temperatures [J]. Aquaculture, 2009, 295(1): 116-119.
- [35] 刘伟成, 冀德伟, 张赛乐, 等. 温度、盐度和体重对美国红鱼幼鱼呼吸和排泄的影响 [J]. 浙江农业学报, 2014, 26(6): 1478-1483.
Liu W C, Ji D W, Zhang S L, et al. Effects of different temperature, salinity and body weight on respiration and excretion of juvenile *Sciaenops ocellatus* [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensi, 2014, 26(6): 1478-1483.
- [36] 陈王柯, 包杰, 倪锡远, 等. 温度及其突然变化对泥鳅耗氧率、排氮率和窒息点的影响 [J]. 沈阳农业大学学报, 2014, 45(6): 741-745.
Chen W K, Bao J, Ni X Y, et al. Effects of temperature and sudden change on oxygen consumption rate, ammonia excretion rate and asphyxiation point of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2014, 45(6): 741-745.
- [37] 邓超准, 黄永春, 陈辉辉, 等. 体质量和温度对星洲红鱼耗氧率、排氮率和窒息点的影响 [J]. 淡水渔业, 2015(5): 90-95.
Deng C Z, Huang Y C, Chen H H, et al. Effects of body weight and temperature on oxygen consumption rate, ammonia excretion rate and asphyxiation point of Red tilapia [J]. Freshwater Fisheries, 2015(5): 90-95.
- [38] 孙宝柱, 黄浩, 曹文宣, 等. 厚颌鲂和圆口铜鱼耗氧率与窒息点的测定 [J]. 水生生物学报, 2010, 34(1): 19-24.
Sun B Z, Huang H, Cao W X, et al. Studies on the oxygen consumption rate and asphyxiation point of *Megalobrama pellegrini* and *Coreius guichenoti* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(1): 19-24.