

红锥家系遗传变异与优良家系选择

朱积余^{1,2,3}, 申文辉^{1,2,3*}, 蒋焱^{1,2,3}, 卢立华⁴, 谭一波^{1,2,3}, 刘秀^{1,2,3}

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002; 2. 国家林业局中南速生材繁育重点实验室, 南宁 530002; 3. 广西优良用材林资源培育重点实验室, 南宁 530002; 4. 中国林科院热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

摘要: 为选择红锥(*Castanopsis hystrix*)优良家系,对2-11年生红锥家系的生长性状和遗传参数进行了研究分析。结果表明,家系间在树高、胸径和单株材积上的差异达显著或极显著水平,家系的树高、胸径和单株材积受中等或中等以上遗传控制,具有很强的家系和家系内单株选择潜力;家系的单株材积变异幅度较大,胸径居中,树高的较小,显示出红锥家系间存在着丰富的变异;家系和单株遗传力随林龄的增大逐渐变小,到7-9年生时逐渐稳定。年度生长性状的相关分析表明,树高、胸径和单株材积的遗传相关系数随林龄逐渐增大,到7年生时最大,分别达到0.9602、0.9340和0.9849,之后趋于稳定,因此,7年生可作为早期选择的适合年龄。结合早期选择及形质指标,11年生时最终选择出优良家系10个,其平均树高、胸径和单株材积分别为13.95 m、14.34 cm和0.1229 m³,平均遗传增益分别为12.24%、18.69%和51.59%,其通直度、圆满度、分枝角度、最大分枝、冠幅、枝下高等形质指标也提高7.71%~12.94%。

关键词: 红锥; 家系; 遗传变异; 选择

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.03.009

Genetic Variation and Superior Family Selection of *Castanopsis hystrix* Families

ZHU Ji-yu^{1,2,3}, SHEN Wen-hui^{1,2,3*}, JIANG Yi^{1,2,3}, LU Li-hua⁴, TAN Yi-bo^{1,2,3}, LIU Xiu^{1,2,3}

(1. Guangxi Academy of Forestry, Nanning 530002, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530002, China; 3. Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation, Nanning 530002, China; 4. Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pinxiang 532600, China)

Abstract: In order to select superior families of *Castanopsis hystrix* in southern China, the growth traits and genetic parameters of *C. hystrix* families at ages from 2 to 11 years were studied. The results showed that the average height, diameter at breast height (DBH) and wood volume among families had significant differences. The average height, diameter and wood volume growth of families were genetic controlled at medium level or above, which indicated high selection potential among or within families. Wood volume had large variation among families, followed by DBH and height. Family heritability and individual heritability gradually decreased with age increasing, and stabilized at 7- to 9-year-old. The genetic correlation coefficient of growth traits gradually increased with age increasing, and reached maximum at 7 years old and then tended to stable. The genetic correlation coefficients of plant height, DBH and wood volume were 0.9602, 0.9340 and 0.9849, respectively, so that 7-year-old was suitable age for early selection of families. Combined with early selection and character indexes, ten superior families of 11-year-old were selected, their average height, DBH and wood volume were 13.95 m, 14.34 cm and 0.1229 m³, respectively, and their genetic gains were 12.24%, 18.69% and 51.59%.

收稿日期: 2013-10-30

接受日期: 2014-01-23

基金项目: 广西科学研究与计划开发课题(桂科攻 10100012-3);“十一五”广西林业科技项目(桂林科字[2009]2-1号)资助

作者简介: 朱积余(1956~),男,教授级高级工程师,博士,博士生导师,主要从事森林培育研究。E-mail: zhujy1028@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenwenhui2003@163.com

respectively. Compared with contrast of the superior provenance, the 10 selected superior families showed certain advantage on tree form qualities, such as stem straightness, fullness, branching angle, the biggest branch and crown breadth, which increased from 7.71% to 12.94%.

Key words: *Castanopsis hystrix*; Family; Genetic variation; Selection

红锥(*Castanopsis hystrix*)为壳斗科(Fagaceae)栲属常绿乔木,是华南地区重要的乡土珍贵阔叶用材树种和高效多用途树种,主要分布于广西、广东、海南、云南等地区,中心分布区在广西南部。因其具有生长快、材质优、适应性强、用途广等优良特性,近20多年来,红锥人工林发展迅速,市场前景广阔^[1]。目前广西、广东的红锥纯林及针锥混交林的面积已达5000 hm²以上,仍有进一步扩大的趋势。开展良种选育,提高遗传增益,加快红锥生产的良种化进程,提高红锥林的单位面积产量,对华南地区发展珍贵用材树种具有重大意义^[1]。种源及家系选择是树木遗传改良的重要手段之一^[2]。大量研究均证明通过种源家系选择能取得良好的改良效果^[3]。红锥的遗传改良工作先后开展了优树选择^[4]、种源试验^[5-6]、家系子代测定^[7-8]、遗传多样性^[9-13]、生理特性^[14]、木材材性^[15-17]等系列研究。有关家系和种源的研究仅探讨了红锥幼林阶段(1~3年)生长性状与遗传参数的变异情况,尚缺乏对长期数据的研究。鉴于此,本文利用11年生红锥自由授粉家系子代测定林幼、中2个生长阶段的逐年观测数据,对红锥自由授粉家系的树高、胸径和单株材积等生长性状进行方差分析、方差分量分解、遗传参数估计及生长性状年度相关分析,并探讨红锥家系早期选择的适合年龄。同时,根据各性状生

长水平、形质指标及遗传增益等指标,按不同入选率对优良家系进行选择,为红锥的遗传改良工作提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

红锥(*Castanopsis hystrix*)家系试验林位于广西凭祥市东部的中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场伏波站林区,地理位置为22°02' N, 106°51' E。地貌为低山,海拔高度550 m,属北热带季风气候,年均温为19.5℃,年降雨量为1400 mm,相对湿度为83%。土壤为花岗岩发育的山地红壤,风化层厚达5 m以上,土层厚1 m以上。试验林为马尾松(*Pinus massoniana*)林采伐迹地,马尾松立地指数为18^[1]。

1.2 材料与田间设计

试验材料为2000年11-12月从广西全分布区红锥天然次生林和人工林中评选出的32株优树,通过采种育苗所获得的苗木^[4,7],来自广西浦北、凭祥和博白等5个种源区32个家系(表1),红锥天然次生林中优树选择的标准为:树高超过优势木平均树高的9%或超过林分平均木树高的17%,胸径超

表1 家系基本情况

Table 1 Basic information of families

家系 Family	产地 Locality	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	年均温 Annual average temperature (°C)	年降雨量 Annual rainfall (mm)	数量 Number
P1,P2,P3,P4,P5,P6, P7,P11,P12,P13	广西浦北 Pubei, Guangxi	21° 52'	109° 13'	21.4	1787.3	10
B1,B2,B4,B5	广西博白 Bobai, Guangxi	21° 38'	109° 32'	21.9	1743.2	4
R1,R2,R3,R7,R8,R9, R10,R12,R13	广西容县 Rongxian, Guangxi	22° 28'	110° 15'	21.3	1660.2	9
X1,X2,X4	广西凭祥市 Pingxiang, Guangxi	21° 51'	106° 41'	21.3	1376.5	3
D2,D3,D4,D5,D6,D7	广西东兰 Donglan, Guangxi	24° 30'	107° 05'	20.1	1577.1	6

过优势木平均胸径的 16% 或超过林分平均木胸径的 44%, 材积超过优势木平均材积的 52% 或超过林分平均木材积的 143%。红锥人工林优树选择的最低标准为: 树高超过优势木平均树高的 10% 或超过林分平均木树高的 21%, 胸径超过优势木平均胸径的 21% 或超过林分平均木胸径的 43%, 材积超过优势木材积的 55% 或超过林分平均木材积的 140%。试验林于 2003 年 5 月, 采用 2 年生容器苗造林, 采用完全随机区组设计, 10 株小区, 4 次重复。穴状整地 50 cm × 50 cm × 27 cm, 初植密度为 2500 ind. hm⁻², 面积约 2 hm²。试验林抚育及管理按照常规方式进行, 3 年保存率在 85% 以上, 在造林后第 11 年(2012 年)进行了疏伐。

1.3 数据调查

试验林营建后, 除 2009 年未测定外, 每年末对树高、胸径等生长性状进行每木测量。单株材积的计算公式为: $V = 1/3HD^2 \times 10^{-4}$, 式中: V 、 D 、 H 分别表示单株材积、胸径和树高。

1.4 试验统计模型及分析方法

利用小区平均值进行家系方差分析, 方差分析模型采用: $Y_{ijk} = \mu + B_i + F_j + e_{ijk}$, 式中, Y_{ijk} 为第 i 个区组第 j 个家系的第 k 个观测值, μ 为总体平均值, B_i 为区组效应, F_j 为家系效应, e_{ijk} 为随机误差。遗传力估算、遗传变异分析和性状早晚相关分

析参考任华东等^[3]计算方法。遗传增益采用黄少伟等^[18]的计算公式: $\Delta G (\%) = (\bar{x} - \bar{X})h^2/\bar{X} \times 100$; 式中, ΔG 表示遗传增益, \bar{x} 为入选家系性状平均值, h^2 为性状遗传力, \bar{X} 表示性状的总平均值。优良家系选择采用综合指数选择法^[19]计算: $I = \sum_{i=1}^n b_i x_i$, 式中 b_i 为性状 x_i 的权重。本文试验数据的处理与统计分析采用 Excel 2003、SPSS 19.0 和 DPS 13.5^[20] 统计软件。

2 结果和分析

2.1 种源/家系生长性状方差分析

从表 2 可以看出, 2–7 年生红锥的树高、胸径和材积 3 个性状在种源间的差异均达到显著水平, 而家系间除了第 7 年的树高差异为显著外, 其余均达到极显著水平。9–11 年生时 3 个性状在种源间的差异不显著, 在家系间 9 年生的 3 个性状差异显著, 11 年生的差异不显著。从种源和家系变异所占的比重上看, 差异在家系间更大, 表明这 3 个性状在家系水平上具有更大的遗传选择潜力, 从试验林中选育优良家系完全是可行的。

2.2 生长性状的遗传参数估算

不同家系生长性状方差分量和遗传力反映了性状变异受遗传制约的程度, 其大小直接影响选择效果。从表 3 可见, 各生长性状的家系遗传力

表 2 种源、家系生长性状的方差分析

Table 2 Variance analysis of growth traits of provenance and families

树龄 Age (a)	来源 Source	均方 Mean square				F		变异比重 Proportion of variation	
		种源 Provenance	家系 Family	区组 Block	机误 Error	种源 Provenance	家系 Family	种源 Provenance	家系 Family
2	H	0.67	0.22	0.03	0.09	7.69**	2.54**	0.25	0.42
	DBH	0.65	0.14	0.11	0.04	16.79**	3.54**	0.42	0.51
	V	1.89×10 ⁻⁸	4.77×10 ⁻⁸	6.10×10 ⁻¹⁰	1.15×10 ⁻⁹	16.42*	41.53**	0.41	0.92
3	H	0.88	0.27	0.27	0.08	11.11**	3.37**	0.32	0.49
	DBH	1.26	0.39	0.64	0.13	9.08**	2.81**	0.28	0.45
	V	3.74×10 ⁻⁷	0.93×10 ⁻⁷	1.20×10 ⁻⁷	3.01×10 ⁻⁸	12.40**	3.10**	0.35	0.47
4	H	1.07	0.24	0.74	1.00	10.76**	2.40**	0.32	0.41
	DBH	2.29	0.62	2.66	0.30	7.56**	2.05**	0.25	0.37
	V	4.73×10 ⁻⁶	9.52×10 ⁻⁷	2.00×10 ⁻⁶	2.77×10 ⁻⁷	17.10**	3.44**	0.42	0.50
5	H	1.51	0.48	4.47	0.19	7.99**	2.51**	0.26	0.42
	DBH	3.88	1.09	9.48	0.50	7.83**	2.21**	0.25	0.39
	V	3.62×10 ⁻⁵	7.75×10 ⁻⁶	6.90×10 ⁻⁵	3.60×10 ⁻⁶	10.05**	2.15**	0.30	0.38

续表(Continued)

树龄 Age (a)	来源 Source	均方 Mean square				F		变异比重 Proportion of variation	
		种源 Provenance	家系 Family	区组 Block	机误 Error	种源 Provenance	家系 Family	种源 Provenance	家系 Family
6	H	2.22	0.98	14.93	0.40	5.59*	2.47**	0.19	0.42
	DBH	4.51	1.83	14.64	0.74	6.09*	2.47**	0.21	0.42
	V	1.29×10 ⁻⁴	4.18×10 ⁻⁵	4.86×10 ⁻⁴	1.79×10 ⁻⁵	7.20**	2.33**	0.24	0.40
7	H	3.38	0.80	20.53	0.50	6.79*	1.62*	0.22	0.32
	DBH	6.57	1.78	21.88	0.83	7.87**	2.13**	0.25	0.38
	V	3.00×10 ⁻⁴	6.37×10 ⁻⁵	1.16×10 ⁻³	3.28×10 ⁻⁵	8.15**	1.73**	0.26	0.33
9	H	2.74	1.00	32.48	0.72	3.82	1.40*	0.14	0.29
	DBH	7.14	2.06	57.26	1.47	4.87	1.41*	0.17	0.29
	V	1.01×10 ⁻³	1.52×10 ⁻⁴	5.27×10 ⁻⁴	1.30×10 ⁻⁵	4.74	1.14*	0.17	0.25
11	H	3.44	1.42	99.02	1.40	2.46	1.01	0.10	0.23
	DBH	11.41	3.24	125.41	2.18	5.24	1.48	0.18	0.30
	V	1.81×10 ⁻³	5.08×10 ⁻⁴	2.83×10 ⁻²	4.70×10 ⁻⁴	3.84	1.08	0.14	0.24

H: 树高; DBH: 胸径; V: 单株材积。**: $P < 1\%$; *: $P < 5\%$.

H: Tree height; DBH: Diameter at breast height; V: Wood volume of individual. **: $P < 1\%$; *: $P < 5\%$.

表3 家系生长性状方差分量和遗传参数估算

Table 3 Variance components and estimates of genetic parameters of family growth traits

树龄 Age (a)	性状 Traits	平均值 Mean	方差 Variance			遗传力 Heritability		CV _g (%)	CV _p (%)
			家系 Family	环境 Environment	表型 Phenotype	家系 Family	单株 Individual		
2	H	1.76	0.04	0.22	0.27	0.84	0.65	11.82	29.39
	DBH	0.76	0.034	0.19	0.23	0.83	0.65	25.72	63.70
	V	6.00×10 ⁻⁵	2.57×10 ⁻¹¹	1.58×10 ⁻¹⁰	1.84×10 ⁻¹⁰	0.80	0.56	10.76	28.71
3	H	2.90	0.08	0.44	0.52	0.79	0.62	9.77	24.90
	DBH	2.08	0.11	0.69	0.80	0.77	0.55	15.91	42.91
	V	5.60×10 ⁻⁴	2.05×10 ⁻⁸	1.15×10 ⁻⁷	1.35×10 ⁻⁷	0.80	0.61	32.35	83.09
4	H	4.01	0.07	0.57	0.64	0.76	0.43	6.51	19.93
	DBH	4.03	0.18	1.29	1.47	0.79	0.49	10.53	30.15
	V	2.58×10 ⁻³	2.90×10 ⁻⁷	1.84×10 ⁻⁶	2.13×10 ⁻⁶	0.81	0.54	26.59	72.10
5	H	6.04	0.12	1.04	1.16	0.75	0.40	5.66	17.83
	DBH	6.30	0.30	2.27	2.57	0.78	0.46	8.65	25.42
	V	9.05×10 ⁻³	2.50×10 ⁻⁶	1.75×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁵	0.79	0.50	22.26	62.85
6	H	8.16	0.29	1.69	1.98	0.76	0.58	6.58	17.22
	DBH	7.77	0.48	2.81	3.29	0.63	0.58	8.88	23.33
	V	2.159×10 ⁻²	1.19×10 ⁻⁵	8.90×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴	0.78	0.47	20.33	59.21
7	H	8.94	0.26	1.95	2.21	0.72	0.47	5.71	16.62
	DBH	9.27	0.53	3.81	4.34	0.73	0.49	7.84	22.46
	V	2.84×10 ⁻²	2.14×10 ⁻⁵	1.51×10 ⁻⁴	1.73×10 ⁻⁴	0.73	0.49	20.75	59.02
9	H	10.27	0.37	3.29	3.66	0.67	0.40	5.90	18.62
	DBH	10.99	0.69	6.92	7.61	0.73	0.36	7.55	25.10
	V	4.78×10 ⁻²	5.62×10 ⁻⁵	5.45×10 ⁻⁴	6.01×10 ⁻⁴	0.74	0.37	19.97	65.31
11	H	12.69	0.22	5.79	6.01	0.35	0.15	3.71	19.32
	DBH	13.28	0.51	9.41	9.92	0.52	0.21	5.37	23.71
	V	8.73×10 ⁻²	5.23×10 ⁻⁵	1.93×10 ⁻³	1.99×10 ⁻³	0.35	0.11	10.52	64.87

H: 树高; DBH: 胸径; V: 单株材积。

H: Tree height; DBH: Diameter at breast height; V: Wood volume of individual.

为 0.3491 ~ 0.8365, 单株遗传力为 0.1053 ~ 0.6518, 遗传水平较高, 说明红锥各生长性状受中等或中等以上遗传控制, 具有很强的家系和家系内单株选择潜力。树高、胸径和单株材积 3 个性状中, 变异幅度最大的为单株材积, 遗传变异系数(CV_g)和表型变异系数(CV_p)分别为 3.71% ~ 32.35% 和 16.62% ~ 72.10%; 树高的变异幅度最小, CV_g 和 CV_p 分别为 3.71% ~ 11.82% 和 16.62% ~ 29.39%; 胸径的居中, CV_g 和 CV_p 分别为 5.37% ~ 25.72% 和 22.46% ~ 60.37%。这些表明, 红锥的家系间存在着丰富的变异。

观察表 3 遗传力的变化趋势可以看出, 家系

和单株遗传力随林龄的增大逐渐变小, 到 7 - 9 年生时逐渐稳定。11 年生时遗传力变小, 这可能与 2012 年进行了间伐有关。

2.3 生长性状年度相关与早期选择

表 4 为 11 年生红锥林树高、胸径和单株材积与各年度生长的相关系数。可以看出, 各年度 3 个性状的遗传相关系数逐渐增大, 到 7 年生时 3 个性状的遗传相关系数最大, 分别为 0.9602, 0.9340 和 0.9849, 且均达到极显著水平, 相关程度非常紧密, 表明 7 年生可作为早期选择年龄。

表 4 2012 年(11 年生)树高、胸径和单株材积与各年度生长的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of tree height, DBH and volume growth between 2012 and each year

树龄 Age (a)	H_{11}			D_{11}			V_{11}		
	r_p	r_g	r_e	r_p	r_g	r_e	r_p	r_g	r_e
2	0.2108	0.2437	0.2517	0.5777	0.7676	0.3245	0.0939	0.1178	0.2209
3	0.3968	0.7144	0.3228	0.4856	0.5739	0.3819	0.5357	0.7930	0.3955
4	0.4874	0.8774	0.3789	0.5741	0.6852	0.4436	0.5792	0.8873	0.3805
5	0.6027	0.9594	0.5463	0.7196	0.8506	0.5650	0.6976	0.9037	0.5109
6	0.7188	0.9758	0.7048	0.7311	0.8298	0.6212	0.7429	0.9367	0.6651
7	0.7664	0.9602	0.7828	0.8390	0.9340	0.7372	0.8412	0.9849	0.7616
9	0.7721	0.8917	0.7701	0.8713	0.9482	0.7362	0.8277	0.9735	0.7563

H_{11} : 11 年生的树高; D_{11} : 11 年生的胸径; V_{11} : 11 年生的单株材积; r_p : 表型相关; r_g : 遗传相关; r_e : 环境相关。

H_{11} : Tree height at 11 years old; D_{11} : DBH at 11 years old; V_{11} : Individual volume at 11 years old; r_p : Relation of phenotype; r_g : Relation of genetic; r_e : Relation of environment.

2.4 优良家系选择

各家系的年度遗传增益见表 5, 以各家系单株材积为主要评价指标(整体遗传增益 > 20%), 同时树高、胸径生长量不低于家系平均值为标准进行评价和选择。以同年种植在试验林旁的优良种源生产造林作为对照, 因此, 所有林分均以对照的平均值作为选择基准计算遗传增益。在早期选择年龄(7 年生)时, 入选率为 30% 时已经满足选择标准要求, 此时入选的 10 个家系为 X1、X4、P13、D3、P7、X2、R7、B2、B1 和 P3, 树高、胸径和单株材积 3 个性状的遗传增益分别为 6.77%、10.91% 和 28.11%, 其均值比对照分别提高 0.84 m (8.62%)、1.37 cm (13.07%) 和 0.0083 m³ (27.85%)。入选率为 20% 时, 入选的 7 个家系为 X1、X4、P13、D3、P7、X2 和 R7, 遗传增益分别为 7.29%、11.65% 和 30.31%, 3 个性状均值比对照分别提高 0.91 m

(9.22%)、1.47 cm (13.75%) 和 0.0102 m³ (32.59%)。入选率为 10% 时, 入选的 4 个家系为 X1、X4、P13 和 D3, 遗传增益分别为 8.34%、12.90% 和 34.65%, 3 个性状均值比对照分别提高 1.05 m (10.42%)、1.66 cm (15.10%) 和 0.0108 m³ (32.24%)。

由于 2012 年 3 月对林分进行了间伐, 因此在 2012 年(11 年生)遗传增益的计算中, 各性状的平均值采用间伐前 2011 年的对照平均值计算。11 年生时, 在 30% 入选率下, 入选的 10 个家系为 X1、P13、X2、D3、X4、B1、P3、P2、P7 和 R1, 树高、胸径和单株材积 3 个性状的遗传增益分别为 12.23%、19.95% 和 53.11%, 其均值分别比对照提高 3.48 m (25.20%)、3.98 cm (27.37%) 和 0.0511 m³ (60.05%)。入选率为 20% 时, 入选的 7 个家系为 X1、P13、X2、D3、X4、B1 和 P3, 遗传增益分别为 12.43%、20.10% 和 53.31%, 3 个性状均值比

对照分别提高 3.69 m (26.26%)、4.09 cm (27.77%) 和 0.0528 m³ (60.14%)。入选率为 10% 时,入选的 4 个家系为 X1、P13、X2 和 D3,遗传增益分别为 12.56%、20.02% 和 54.59%, 3 个性状均值比对照分别提高了 3.75 m (26.46%), 4.14 cm (27.69 %)和 0.0553 m³ (60.70%)。

比较 7 年生和 11 年生的入选家系情况(表 5)可以看出,在 30% 入选率下,两者有 X1、X4、P13、D3、P7、X2、B1 和 P3 共 8 个家系相同,选对率为 80%,错漏选率占 20%;在 20% 入选率下,两者有 X1、P13、X2、D3 和 X4 共 5 个家系相同,选对率为 71%,错漏选率占 29%;在 10% 入选率下,两者有 X1、P13 和 D3 共 3 个家系相同,选对率为 75%,错漏选率占 25%。7 年生时在 30% 入选率下选对率最高(80%),这表明 7 年生作为早期选择的

年龄是适合的。结合 7 年生早期选择和 30% 入选率, 11 年生的入选红锥家系有 10 个,分别是 X1、P13、X2、D3、X4、B1、P3、P2、P7 和 R1,其平均树高、胸径和单株材积分别为 13.75 m、14.54 cm 和 0.1253 m³,与对照(优良种源)相比,他们的遗传增益分别为 8.84%~13.54% (平均 11.76%)、17.80%~25.26% (平均 19.70%)、45.57%~67.33% (平均 53.11%),可作为优良家系。

林木品种优良品系的评选主要以生长性状为主,但也与干形、分枝、冠幅等形质指标相关。因此,进一步用单株材积、胸径、树高、通直度、圆满度、分枝角度、最大分枝、枝下高、冠幅等 9 个因子分别计算每个家系的综合选择指数,9 个因子的经济权重为 0.4 : 0.2 : 0.1 : 0.08 : 0.06 : 0.05 : 0.05 : 0.03 : 0.03。根据综合选择指数排名,再结合单株材积、胸

表 5 入选家系树高、胸径和单株材积的预期遗传增益

Table 5 Expected genetic gain in tree height, DBH and volume of selected families

入选率 Selection rate	家系 Families	均值 Mean	预期遗传增益 Expected genetic gain (%)
10%	R7,X4,X1,R3	2.29	26.44
	X1,X4,P13,D3	1.14	62.34
	R7,X1,X4,D3	1.25×10 ⁻⁴	102.31
	X4,X1,P13,B1	3.41	16.91
	X1,X4,P13,R7	2.9	27.31
	X4,X1,P13,B1	1.05×10 ⁻³	84.66
	X4,X1,B1,P13	4.56	12.23
	X1,X4,R7,P7	4.93	20.34
	X4,X1,R7,B1	3.77×10 ⁻³	66.05
	X1,X4,D3,P13	6.83	11.23
	X4,X1,R7,P7	7.55	17.40
	X4,X1,P13,R7	1.34×10 ⁻²	44.96
	X1,P13,X4,D3	9.13	10.68
	X1,X4,P7,P13	9.81	12.18
	X1,X4,P13,P7	3.04×10 ⁻²	40.10
	X1,X4,D3,R9	10.08	8.34
	X1,X4,P7,P13	10.99	12.90
	X1,X4,P13,D3	4.26×10 ⁻²	34.65
	X1,D3,X4,P1	11.39	6.36
	X1,X4,D3,P1	12.41	11.17
X1,X4,D3,P2	6.35×10 ⁻²	29.55	
X1,B1,P13,D3	14.17	12.56	
X1,P13,X2,P7	14.95	20.02	
X1,P13,X2,D3	0.12	54.59	
20%	R7,X4,X1,R3,B1,D3,P13	2.18	23.62
	X1,X4,P13,D3,B1,R7,D7	1.03	54.69

续表(Continued)

入选率 Selection rate	家系 Families	均值 Mean	预期遗传增益 Expected genetic gain (%)
	R7,X1,X4,D3,B1,P13,B2	1.08×10^{-4}	94.35
	X4,X1,P13,B1,D3,D4,P7	3.30	15.15
	X1,X4,P13,R7,D3,B1,R3	2.74	23.44
	X4,X1,P13,B1,D3,R7,D2	9.17×10^{-4}	71.03
	X4,X1,B1,P13,P7,R9,P5	4.40	9.78
	X1,X4,R7,P7,B1,P13,R3	4.70	16.93
	X4,X1,R7,B1,P7,P13,R9	3.31×10^{-3}	53.11
	X1,X4,D3,P13,R9,P2,P7	6.62	9.29
	X4,X1,R7,P7,P13,P2,D3	7.27	15.07
	X4,X1,P13,R7,D3,P7,P2	1.25×10^{-2}	40.25
	X1,P13,X4,D3,R9,P2,D6	8.92	9.42
	X1,X4,P7,P13,D3,R7,B2	9.51	10.86
	X1,X4,P13,P7,D3,R7,B1	2.83×10^{-2}	35.28
	X1,X4,D3,R9,P13,D2,X2	9.87	7.29
	X1,X4,P7,P13,D3,R7,B2	10.69	11.65
	X1,X4,P13,D3,P7,X2,R7	3.98×10^{-2}	30.31
	X1,D3,X4,P1,B1,P2,R9	11.20	5.63
	X1,X4,D3,P1,P13,P7,X2	12.13	10.20
	X1,X4,D3,P2,X2,P13,R8	6.05×10^{-2}	27.72
	X1,B1,P13,D3,X2,X4,P3	14.05	12.43
	X1,P13,X2,P7,X4,D3,P2	14.73	20.10
	X1,P13,X2,D3,X4,B1,P3	0.12	53.31
30%	R7,X4,X1,R3,B1,D3,P13,D4,P7,X2	2.11	16.62
	X1,X4,P13,D3,B1,R7,D7,D4,B2,P7	0.97	23.24
	R7,X1,X4,D3,B1,P13,B2,D2,B5,D7	9.70×10^{-5}	93.70
	X4,X1,P13,B1,D3,D4,P7,R7,P5,R9	3.21	13.92
	X1,X4,P13,R7,D3,B1,R3,D2,P7,P5	2.62	20.91
	X4,X1,P13,B1,D3,R7,D2,P7,R3,D4	8.31×10^{-4}	62.95
	X4,X1,B1,P13,P7,R9,P5,R7,D4,R2	4.32	8.87
	X1,X4,R7,P7,B1,P13,R3,R9,B2,D6	4.54	14.88
	X4,X1,R7,B1,P7,P13,R9,R3,D6,P5	3.07×10^{-3}	48.25
	X1,X4,D3,P13,R9,P2,P7,R2,D6,P5	6.49	8.20
	X4,X1,R7,P7,P13,P2,D3,B1,B2,R3	7.07	13.57
	X4,X1,P13,R7,D3,P7,P2,B1,X2,R9	1.77×10^{-2}	36.49
	X1,P13,X4,D3,R9,P2,D6,B5,P7,B1	8.77	8.73
	X1,X4,P7,P13,D3,R7,B2,B1,R9,D6	9.31	10.20
	X1,X4,P13,P7,D3,R7,B1,R9,D6,B2	2.70×10^{-2}	33.07
	X1,X4,D3,R9,P13,D2,X2,P7,P3,B5	9.74	6.77
	X1,X4,P7,P13,D3,R7,B2,P2,B1,X2	10.48	10.91
	X1,X4,P13,D3,P7,X2,R7,B2,B1,P3	3.79×10^{-4}	28.11
	X1,D3,X4,P1,B1,P2,R9,D2,X2,D6	11.08	5.27
	X1,X4,D3,P1,P13,P7,X2,R1,B2,D6	11.91	9.54
	X1,X4,D3,P2,X2,P13,R8,P7,D6,R1	5.79×10^{-2}	25.76
	X1,B1,P13,D3,X2,X4,P3,P2,P7,R1	13.75	11.76
	X1,P13,X2,P7,X4,D3,P2,B1,P3,R1	14.54	19.95
	X1,P13,X2,D3,X4,B1,P3,P2,P7,R1	0.13	53.11

径、树高遗传增益,最终选择出 10 个优良家系:X1、P13、X2、X4、D3、B1、P3、R3、D5 和 D6 (表 6),这 10 个优良家系的平均树高、胸径和单株材积分别为 13.95 m、14.34 cm 和 0.1229 m³,与对照(优良种源)相比,分别提高了 8.41%、11.03% 和 50.44%,遗传增益分别为 11.21% ~ 13.54% (平均 12.24%)、14.10% ~ 25.26% (平均 18.69%)、38.40% ~ 67.33% (平均 51.59%);32 个家系整体的平均树高、胸径和单株材积分别为 13.21 m、13.35 cm 和 0.1088 m³,与对照(优良种源)相比,分别提高了 8.83%、9.73% 和 33.17%,其总体遗传增益分别为 9.73%、13.84% 和 36.97%;最优家系 X1 的平均树高、胸径和单株

材积分别为 14.34 m、15.66 cm 和 0.1258 m³,分别比对照(优良种源)提高了 18.12%、28.68% 和 53.94%,其遗传增益分别为 13.54%、25.26% 和 67.33%。

从形质指标上看,这 10 个优良家系的通直度、圆满度、分枝角度、最大分枝、冠幅、枝下高的平均分值与对照(优良种源)的差异达显著水平,分别提高了 10.93%、12.94%、8.35%、9.27%、7.71% 和 11.75%;32 个家系各指标的总体平均分值与对照(优良种源)的差异也达显著水平,分别提高了 9.32%、12.78%、7.54%、6.16%、6.98% 和 10.36%,而最优家系 X1 各指标的平均分值与对照(优良

表 6 选择的优良家系

Table 6 Selection of superior families

家系 Family	单株材积 Volume (m ³)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	遗传增益 Genetic gain (%)		
				单株材积 Volume of individual	胸径 DBH	树高 Height
X1	0.1258	15.66	14.34	67.33	25.26	13.54
P13	0.1179	14.85	14.12	60.86	21.25	12.80
X2	0.1109	14.70	13.96	55.17	20.49	12.26
X4	0.1081	14.54	13.83	52.91	19.70	11.83
D3	0.1395	14.39	14.00	54.20	18.96	12.39
B1	0.1356	14.15	14.25	51.61	17.79	13.24
P7	0.1274	14.61	13.17	46.36	20.03	9.61
P3	0.1324	14.20	13.80	49.55	18.03	11.71
P2	0.1290	14.39	12.95	47.41	18.95	8.84
B2	0.1225	14.38	12.72	43.27	18.89	8.08
R3	0.1196	13.90	13.65	41.41	16.55	11.21
R1	0.1261	13.93	13.09	45.57	16.68	9.32
D5	0.1245	13.54	13.88	44.49	14.77	11.98
D6	0.1149	13.41	13.73	38.40	14.10	11.47
R13	0.1152	13.32	13.57	38.58	13.68	10.93
P5	0.1126	13.03	13.22	36.86	12.25	9.77
B5	0.1027	12.90	13.33	30.56	11.57	10.13
P1	0.1061	12.90	13.17	32.72	11.58	9.59
P4	0.0953	12.84	13.02	25.74	11.31	9.08
B4	0.1057	12.74	13.11	32.48	10.82	9.40
R9	0.0948	12.62	13.21	25.47	10.20	9.73
P11	0.0982	13.05	12.27	27.62	12.34	6.56
D2	0.0979	12.65	13.05	27.39	10.34	9.20
R7	0.1045	13.12	12.05	31.73	12.66	5.81
P12	0.0956	12.60	12.96	25.95	10.09	8.89
D4	0.0916	12.81	12.50	23.41	11.16	7.33
R2	0.0932	12.59	13.03	24.38	10.03	9.12
R8	0.0904	12.36	12.67	22.71	8.90	7.92
D7	0.0942	12.37	12.39	25.03	8.94	6.95

续表(Continued)

家系 Family	单株材积 Volume (m ³)	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	遗传增益 Genetic gain (%)			
				单株材积 Volume of individual	胸径 DBH	树高 Height	
P6	0.0861	11.87	13.48	19.86	6.51	10.66	
R10	0.0914	12.03	12.49	23.33	7.29	7.28	
R12	0.0720	10.90	11.76	10.83	1.71	4.83	
总体平均 Mean in total	0.1088	13.35	13.21	36.97	13.84	9.73	
对照平均 Mean of control	0.0817	12.17	12.14	30.33	11.63	8.59	
优良家系平均 Mean of superior family	0.1229	14.34	13.95	51.59	18.69	12.24	
家系 Family	通直度 Straightness	圆满度 Roundness	分枝角度 Branch angle	最大分枝 Biggest branch	冠幅 Crown	枝下高 Height under branch	综合指数 Complex index
X1	2.1297	2.3134	0.4741	0.2110	2.3474	2.2630	5.1011
P13	2.1086	2.2188	0.4760	0.2102	2.3244	2.2476	4.9024
X2	2.0921	2.3177	0.4661	0.2202	2.3182	2.2848	4.8592
X4	2.0891	2.2916	0.4464	0.2073	2.3471	2.2942	4.8108
D3	2.1908	2.2544	0.4531	0.2046	2.2109	2.3087	4.8128
B1	2.1308	2.2461	0.3748	0.2117	2.3155	2.3072	4.7825
P7	2.0114	2.2339	0.5564	0.2062	2.4326	2.2520	4.7636
P3	2.0099	2.1764	0.4822	0.2054	2.2530	2.1987	4.7323
P2	2.1042	2.3054	0.4361	0.1829	2.2929	2.2114	4.6973
B2	2.0607	2.1921	0.5107	0.2144	2.3620	2.0976	4.6634
R3	2.0207	2.1493	0.4822	0.1996	2.2025	2.2511	4.6512
R1	2.0718	2.2999	0.3935	0.2224	2.3076	2.3336	4.6192
D5	2.0785	2.1745	0.4850	0.2022	2.1628	2.2958	4.6107
D6	2.0769	2.2825	0.3860	0.2115	2.2151	2.4188	4.5730
R13	2.0833	2.3552	0.4696	0.2033	2.2734	2.4166	4.5494
P5	2.1045	2.2792	0.4706	0.2152	2.2907	2.3774	4.4525
B5	1.9612	2.1511	0.4571	0.1931	2.1931	2.3887	4.4100
P1	1.9867	2.2520	0.4786	0.1789	2.2059	2.2321	4.3995
P4	2.1134	2.2305	0.4562	0.1986	2.2423	2.3370	4.3811
B4	2.0380	2.2393	0.4555	0.1923	2.2144	2.2622	4.3653
R9	2.0723	2.2512	0.4288	0.1976	2.2218	2.3694	4.3528
P11	1.9649	2.2519	0.5171	0.2060	2.3509	2.2119	4.3416
D2	2.0367	2.2688	0.3892	0.1898	2.2424	2.2479	4.3369
R7	1.9940	2.1459	0.4176	0.1938	2.2083	2.2501	4.3234
P12	2.1153	2.2255	0.4285	0.2015	2.2798	2.1706	4.3220
D4	2.0883	2.2835	0.4117	0.1987	2.2150	2.2100	4.3160
R2	2.0313	2.1995	0.4194	0.2069	2.1786	2.2155	4.3159
R8	2.1757	2.2344	0.4273	0.2098	2.3329	2.2371	4.2522
D7	2.0972	2.2481	0.4221	0.1948	2.1435	2.2671	4.2165
P6	2.0361	2.1698	0.4496	0.1866	2.0548	2.2132	4.2093
R10	1.9290	2.2402	0.4195	0.2188	2.2616	2.1597	4.1448
R12	1.9920	2.1742	0.4336	0.1815	2.1367	2.1602	3.8343
总体平均 Mean in total	2.0623	2.2393	0.4492	0.2024	2.2543	2.2654	4.4877
对照平均 Mean of control	1.8865	1.9856	0.4177	0.1907	2.1073	2.0555	4.3605
优良家系平均 Mean of superior family	2.0927	2.2425	0.4526	0.2084	2.2697	2.2870	4.7676

种源)的差异均达显著水平,分别提高了12.89%、16.51%、13.50%、10.65%、11.39%和14.96%。

3 结论和讨论

本研究结果表明,2-7年生红锥的树高、胸径和单株材积3个性状在种源间的差异均达显著水平,而在家系间均达极显著水平。9-11年生的3个性状在种源间的差异不显著,在家系间第9年生的3个性状差异显著,第11年生的差异不显著。从种源和家系变异所占的比重上看,差异在家系间更大,表明这3个性状在家系水平上具有更大的遗传选择潜力。不同家系的生长性状遗传力反映了性状变异受遗传制约的程度,其大小直接影响选择效果。红锥家系生长性状遗传力较高,说明其受中等或中等以上遗传控制,具有很强的家系和家系内单株选择潜力。红锥家系生长性状变异幅度最大的是单株材积,其次为胸径和树高,表明红锥家系间存在着丰富的变异。红锥家系和单株遗传力随林龄的增大而逐渐减小,到7-9年生时趋于稳定;红锥生长性状的遗传相关系数随林龄的增大而逐渐增大,到7年生时最大,相关程度非常高,且均达到极显著水平,表明7年生可作为早期选择的年龄。

研究表明,7年生作为早期选择年龄是适合的,与11年生入选的优良家系比较,在10%~30%入选率下,选对率最高为80%,最低为71%,漏选率最高为29%,最低为20%。根据生长性状与形质指标综合评选,结合早期选择和入选率,最终选择出10个红锥优良家系,其平均树高、胸径和单株材积分别为13.95 m、14.34 cm和0.1229 m³,比对照(优良种源)分别提高8.41%、11.03%、50.44%,遗传增益分别为12.24%、18.69%、51.59%;32个家系整体的平均树高、胸径和单株材积比对照分别提高8.83%、9.73%、33.17%,其总体遗传增益分别为9.73%、13.84%、36.97%;最优家系X1的平均树高、胸径和单株材积分别为14.34 m、15.66 cm和0.1258 m³,比对照(优良种源)分别提高18.12%、28.68%、53.94%,遗传增益分别为13.54%、25.26%、67.33%。10个优良家系的通直度、圆满度、分枝角度、最大分枝、冠幅、枝下高等形质指标比对照(优良种源)有较大程度提高(7.71%~12.94%),32个家系的形质指标比对照也有较大程度提高(6.16%~

12.78%),而最优家系的形质指标比对照有更大的提高(10.65%~16.51%)。

红锥优良家系的选育,不仅能选择出速生优质的良种,提高种子园的遗传增益,加快红锥生产的良种化进程,提高红锥林的单位面积产量,还对下一步的红锥高世代改良、杂交育种等遗传改良及其良种推广都具有深远影响,同时对华南地区发展珍贵用材树种有重大意义。

参考文献

- [1] Zhu J Y, Jiang Y, Liang R L, et al. A primary study on provenances & families experiment of *Castanopsis hystrix* in Guangxi [J]. West For Sci, 2005, 34(4): 5-9.
朱积余, 蒋焱, 梁瑞龙, 等. 广西红锥种源/家系造林试验研究初报 [J]. 西部林业科学, 2005, 34(4): 5-9.
- [2] Zhu L K. Developmental strategies for forest and tree breeding in China towards to the new century [J]. J Nanjing For Univ, 2001, 25(1): 3-8.
祝列克. 新世纪中国林木遗传育种发展战略 [J]. 南京林业大学学报, 2001, 25(1): 3-8.
- [3] Ren H D, Yao Y H, Kang W L, et al. Genetic variation and early selection of provenances and families of *Acacia mearnsii* [J]. Sci Silv Sin, 2010, 46(3): 153-160.
任华东, 姚小华, 康文玲, 等. 黑荆树种源和家系的遗传变异与早期选择 [J]. 林业科学, 2010, 46(3): 153-160.
- [4] Zhu J Y, Jiang Y, Pan W. A study on selection standard of plus trees of *Castanopsis hystrix* [J]. Guangxi For Sci, 2002, 31(3): 109-113.
朱积余, 蒋焱, 潘文. 广西红锥优树选择标准研究 [J]. 广西林业科学, 2002, 31(3): 109-113.
- [5] Zhu J Y, Jiang Y, Qiu X J. Primary study of geographical provenances of *Castanopsis hystrix* in Guangxi [J]. Guangxi For Sci, 1997, 26(2): 66-68.
朱积余, 蒋焱, 丘小军. 广西红锥地理种源试验初报 [J]. 广西林业科学, 1997, 26(2): 66-68.
- [6] Xia W J, Jiang Y. Provenance trial and primary selection of superior provenance of *Castanopsis hystrix* in Paiyangshan Forest Farm, Guangxi [J]. Guangxi For Sci, 2006, 35(3): 140-142.
夏文阶, 蒋焱. 广西派阳山林场红锥种源试验及优良种源初步选择 [J]. 广西林业科学, 2006, 35(3): 140-142.
- [7] Jiang Y, Zhu J Y. Seedling variability and correlation research for progenies of plus trees of *Castanopsis hystrix* in Guangxi [J]. Guangxi For Sci, 2003, 32(4): 169-174, 196.
蒋焱, 朱积余. 广西红锥初选优树子代苗期变异性和相关性研究 [J]. 广西林业科学, 2003, 32(4): 169-174, 196.
- [8] Zhang F Q, Liang D C, Chen Z X, et al. The variation regularity on seedling growth of *Castanopsis hystrix* in different population

- and families [J]. *Guangdong For Sci Techn*, 2006, 22(4): 7–12.
张方秋, 梁东成, 陈祖旭, 等. 福建红锥不同种群及家系早期生长变异研究 [J]. *广东林业科技*, 2006, 22(4): 7–12.
- [9] Xu B, Zhang F Q, Pan W, et al. The optimization of rapid reaction system for *Castanopsis hystrix* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2008, 16(1): 89–94.
徐斌, 张方秋, 潘文, 等. 红锥基因组RAPD反应体系的建立和优化 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2008, 16(1): 89–94.
- [10] Wang L, Ye Z Y, Jiang Y, et al. Genetic diversity of *Castanopsis hystrix* by ISSR analysis [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2006, 45(Suppl.): 91–94.
王蕾, 叶志云, 蒋焱, 等. 利用ISSR技术对优质红锥种质资源遗传多样性的分析 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(增刊): 91–94.
- [11] Wang M G, Zhao H, Chen X Q, et al. Genetic diversity of *Castanopsis hystrix* germplasm resources by ISSR and cluster analysis [J]. *J Gansu Agri Univ*, 2009, 44(2): 110–115.
王鸣刚, 赵宏, 陈晓前, 等. 优良红锥种质资源遗传多样性的ISSR分析与聚类 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2009, 44(2): 110–115.
- [12] Wang M G, Tu Z J, Qiu X J, et al. Genetic diversity of *Castanopsis hystrix* provenance by RAPD analysis [J]. *J Xiamen Univ (Nat Sci)*, 2006, 45(4): 570–574.
王鸣刚, 涂智杰, 丘小军, 等. 优质红锥种源遗传多样性的RAPD分析 [J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2006, 45(4): 570–574.
- [13] Yang F, Li Z H, Jiang Y, et al. Genetic diversity of *Castanopsis hystrix* superior genealogy by ISSR marker [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(6): 123–127.
杨峰, 李志辉, 蒋焱, 等. 红锥优良家系ISSR遗传多样性分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(6): 123–127.
- [14] Jiang Y, Li Z H, Zhu J Y, et al. Diurnal variations of photosynthetic characteristics of different provenances *Castanopsis hystrix* young plantations [J]. *J CS Univ For Techn*, 2013, 33(6): 43–47.
蒋焱, 李志辉, 朱积余, 等. 不同红锥种源幼林光合特性日变化测定与分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(6): 43–47.
- [15] Lü J X, Luo X Q, Jiang J L, et al. Mechanical properties of *Castanopsis hystrix* and *Betula alnoides* plantation wood [J]. *Beijing For Univ*, 2006, 28(2): 118–122.
吕建雄, 骆秀琴, 蒋佳荔, 等. 红锥和西南桦人工林木材力学性质的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 118–122.
- [16] Jiang Y, Li Z H, Zhu J Y, et al. Analysis on genetic and variability of wood density and other physical properties of *Castanopsis hystrix* family [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(11): 9–13, 20.
蒋焱, 李志辉, 朱积余, 等. 红锥家系木材密度等物理性状的遗传及变异性分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(11): 9–13, 20.
- [17] Chen G D, Tang X M, Qin Y L, et al. Study on tree bark rate and bark fiber morphological size of *Castanopsis hystrix* plantation [J]. *J CS Univ For Techn*, 2012, 32(6): 163–167.
陈桂丹, 唐贤明, 覃引鸾, 等. 人工林红锥树皮率及树皮纤维尺寸的研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(6): 163–167.
- [18] Huang S W, Zhong W H, Huang K, et al. Progeny test for the open-pollinated families of loblolly pine with multiple site [J]. *For Res*, 2001, 14(5): 509–514.
黄少伟, 钟伟华, 黄凯, 等. 火炬松自由授粉子代多地点试验 [J]. *林业科学研究*, 2001, 14(5): 509–514.
- [19] Shen X H. *Forest Tree Breeding* [M]. Beijing: Science Press, 1990: 1–207.
沈熙环. *林木育种学* [M]. 北京: 中国林业出版社, 1990: 1–207.
- [20] Tang Q Y, Feng M G. *DPS Data Processing System: Experimental Design, Statistic Analysis and Data Mining* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1–1124.
唐启义, 冯明光. *DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘* [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1–1124.