

南方低山丘陵区泡桐无性系主要性状的综合选择

冯延芝^{1,2*}, 乔杰^{1,2*}, 王保平^{1,2}, 赵阳^{1,2}, 周海江^{1,2}, 段伟^{1,2}, 李芳东^{1,2**}

(1. 国家林业局泡桐研究开发中心, 河南 郑州 450003; 2. 中国林业科学研究院经济林研究开发中心, 河南 郑州 450003)

摘要: [目的] 为了选育出适宜南方低山丘陵区栽植的白花泡桐优良无性系。[方法] 以湖北省赤壁市5年生的18个泡桐无性系为研究对象, 对其4个生长性状(胸径、主干高、总材积、接干高)和2个干形性状(主干削度、形数)进行变异分析、遗传参数估算、性状间的相关性分析以及多性状综合评价。[结果] 结果表明: 各性状在无性系间的差异均达到极显著水平。胸径、主干高、总材积、接干高和形数的重复力较大, 均在0.7858以上, 主干削度的重复力较小(0.5163)。胸径、主干高、总材积和接干高之间均呈极显著的表型和遗传正相关关系; 除与主干高、接干高分别呈不显著和显著的表型负相关外, 主干削度与其它性状间的表型和遗传负相关关系均达极显著水平; 除与主干高呈不显著的表型正相关外, 形数与其它性状间的表型和遗传相关关系均达极显著水平; 通过多性状选择指数方程选择出的3个优良无性系与CK相比, 其胸径、主干高、总材积、接干高、主干削度和形数的遗传增益分别为13.33%、6.59%、28.68%、40.08%、12.99%和8.89%, 实际增益分别为13.82%、7.55%、32.04%、43.31%、25.16%和11.31%。[结论] 依据建立的多性状指数方程, 选择出适宜在南方低山丘陵区栽植的白花泡桐优良无性系3个, 分别为01-23、01-22和1-58, 入选率17%。

关键词: 泡桐; 无性系; 表型变异; 遗传变异; 多性状选择指数

中图分类号: S792.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)06-0969-08

Comprehensive Selection of Main Phenotypic Characters of Paulownia Clones in the Hilly Area of Southern China

FENG Yan-zhi^{1,2}, QIAO Jie^{1,2}, WANG Bao-ping^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2}, ZHOU Hai-jiang^{1,2},
DUAN Wei^{1,2}, LI Fang-dong^{1,2}

(1. Paulownia Research and Development Center of State Forestry Administration, Zhengzhou 450003, He'nan, China;

2. Non-timber Forestry Research and Development Centre, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou 450003, He'nan, China)

Abstract: [Objective] To screen the superior clones of *Paulownia fortunei* suitable for planting in the hilly area of Southern China. [Method] Eighteen 5-year-old *P. fortunei* clones in Chibi City, Hubei Province were used to conduct the variation analysis, genetic parameter evaluation, correlation analysis and comprehensive assessment on four growth traits [diameter ($D_{1.3}$), height of trunk (H), total volume (V) and height of extended trunk (H_2)] and two stem form traits [taper of trunk (β) and form factor (f)]. [Result] Extremely significant differences ($P < 0.01$) were observed in each of the six traits among these 18 clones. The repeatability of $D_{1.3}$, H , V , H_2 and f was higher than 0.7858, the repeatability of β was 0.5163. Extremely significant positive phenotypic and genetic correlations

收稿日期: 2017-04-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD01B0602)。

* : 为共同第一作者。

作者简介: 冯延芝(1986—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: fyz617912@126.com;

乔杰(1966—), 男, 学士, 副研究员, 主要从事森林培育研究, E-mail: qiaoj3715@163.com。

** 通讯作者: 李芳东(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事经济林培育和林木遗传育种研究, E-mail: lifangdong66@163.com。

were shown among $D_{1.3}$, H , V and H_2 ; The β showed no significant negative phenotypic correlation with H but significant negative phenotypic correlation with H_2 . In addition, the β showed significantly negative phenotypic and genetic correlation with the other traits; The f showed no significant positive phenotypic correlation with H but extremely significant phenotypic and genetic correlation with the other traits. Comparing with the CK, the genetic gains of the three clones selected by comprehensive selection index equation on $D_{1.3}$, H , V , H_2 , β and f were 13.33%, 6.59%, 28.68%, 40.08%, 12.99% and 8.89%, and the actual gains were 13.82%, 7.55%, 32.04%, 43.31%, 25.16% and 11.31%, respectively. [**Conclusion**] With the selection rate of 17%, three clones were selected and evaluated as the superior clones from 18 *P. fortunei* clones by the method of comprehensive selection index.

Keywords: *Paulownia*; clones; Phenotypic variation; genetic variation; comprehensive selection index

泡桐 (*Paulownia*) 是我国栽培历史最悠久的优质速生用材树种,在我国 25 个省(市、自治区)均有分布,具有优质、速生、分布和用途广泛以及适用于农林复合经营等众多优良特性。20 世纪 70 年代以来,泡桐产业得到迅猛发展,学者们分别从泡桐的种类、形态特征、生态特性、分布状态以及性状稳定性等开展了多方面的综合研究^[1-2],将泡桐分为 11 个种、2 个变种、6 个变型,并针对泡桐的传统栽培区(黄淮海平原)先后选育出优良无性系 30 余个。

近年来随着林权制度的改革,泡桐因其较高的经济和生态收益日益受到重视,加之南方低山丘陵区丰富的土地资源、优越的水热和气候等条件,泡桐种植业得到迅速发展。泡桐在优良无性系选育以及高效栽培技术等方面虽取得一定的成效,但前期研究主要集中在北方,针对适宜南方低山丘陵区栽植的泡桐优良无性系缺乏系统研究,导致南方栽植的泡桐用材林存在诸多问题,比如盲目引种、品系混杂、主干低矮不通直等,严重阻碍了泡桐产业的健康发展;而且前期的泡桐无性系选择多采用单性状直接选择法(速生、干形、抗丛枝病等)或者单性状排列选择法(逐步实现多个性状的遗传改良),对其进行多性状综合改良研究较少^[2-7],大大降低了聚合多性状育种的选择效果^[8-9];白花泡桐 (*Paulownia fortunei* (Seem.) Hemsl.) 是我国南方泡桐种类的代表树种,分布范围较广,遍布长江流域以南各地,除了一部分人工栽培外,多为天然分布;其树形多为长卵形或塔形、生长速度较快、树干通直高大、自然接干能力较强;木材的亮度和白度较高、材质均匀、色泽淡雅、材性较优^[4, 10-11]。本研究针对 18 个白花泡桐无性系的 6 个主要性状指标进行观测和统计(选择目前栽培范围较广、市场前景广阔的主栽品种 9501 为对照),并对各性状的表型变异、遗传变异、表型相关和遗传相关等进行综合比较分析,采用多性状选择指数法对各无性系进行综合评

价,以期选择出适宜南方低山丘陵区域栽植的泡桐优良无性系,为当地泡桐种植业的健康发展提供科学指导。

1 试验地概况

参试试验地位于湖北省赤壁市中伙铺镇董家岭村(112°52'21" E, 31°12'49" N),海拔 200 m,坡度 10°~15°,为典型的华中低山丘陵地区,土壤类型为黄红壤(pH:4.50~5.95)。年平均气温 16.8℃,年均降雨量 1 690 mm,年均日照时间 1 880 h,无霜期 247~261 d。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

2012 年 2 月对试验地进行整地挖穴(规格为 60 cm × 60 cm × 60 cm),18 个参试无性系均按照完全随机区组设计,6 株小区,4 次重复,株行距为 4 m × 5 m,1 年生苗木造林(平均苗干高度为 2.92 m,平均胸径为 6.55 cm),底肥为 3 kg 有机肥。其中 9501 为对照(CK),四周均设有保护行,试验林采用一致的抚育管理措施。试验材料的来源详见表 1。

2.2 试验方法

2012 年 3 月试验林营建后,调查各无性系初始的苗干高度和胸径。于每年落叶后(11 月份左右),分别对 18 个参试无性系的生长情况进行观察和测定,其中包括胸径($D_{1.3}$)、2.6 m 直径($D_{2.6}$)、苗干高度(H_1)、接干高度(H_2)、接干 0.5 m 处直径($D_{0.5}$)和接干 1.5 m 处直径($D_{1.5}$),根据公式(1)~(8)分别计算其主干高(H)、苗干削度(β_1)、接干削度(β_2)、主干削度(β)、苗干材积(V_1)、接干材积(V_2)、总材积(V)和形数(f)^[12]。以已达到早期选择年龄^[13]的 5 年生泡桐的调查数据为基础进行统计分析。为了减少初始苗干高度和胸径对试验结果的影响,分别采用协方差分析方法对高、径生长指标进行调整^[14]。

表1 参试泡桐无性系的来源

Table 1 The origin of *Paulownia* clones used in this study

| 无性系 Clone | 种源 Provenance | 种类 Specie | 来源 Origin |
|-----------|---------------|-------------------------|------------------------|
| 01-1 | 江西抚州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-4 | 湖南郴州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-11 | 重庆涪陵 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-18 | 湖北宜昌 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-20 | 浙江衢州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-22 | 湖南郴州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 01-23 | 湖南郴州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 1-3 | 湖南张家界 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-38 | 贵州凯里 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-39 | 广西柳州 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-43 | 广西河池 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-45 | 广西河池 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-48 | 湖南衡阳 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| 1-58 | 广西河池 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 优树 plus tree |
| -1 | 江西宜春 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| -4 | 湖南邵阳 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| -9 | 广西桂林 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |
| 9501 | 湖南长沙 | 白花泡桐 <i>P. fortunei</i> | 实生选种 seeding selection |

$$(1) H = H_1 + H_2$$

$$(2) \beta_1 = (D_{1.3} - D_{2.6}) / (2.6 - 1.3)$$

$$(3) \beta_2 = (D_{0.5} - D_{1.5}) / (1.5 - 0.5)$$

$$(4) \beta = (\beta_1 + \beta_2) / 2$$

$$(5) V_1 = \{ 2.6 \times D_{1.3}^2 + [D_{2.6} - \beta_1 \times (H_1 - 2.6) / 2]^2 \times (\pi / 40000)$$

$$(6) V_2 = \{ [D_{0.5} - \beta_2 \times (H_2 / 2 - 0.5)]^2 \} \times \pi \times H_2 / 40000$$

$$(7) V = V_1 + V_2$$

$$(8) f = V_1 / [(\pi / 40000) \times D_{1.3}^2 \times H_1]$$

2.3 统计分析方法

方差分析和重复力计算具体参照续九如^[15]的林木数量遗传学,用方差分析线性模型 $x_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ijk} + e_{ijk}$ 对参试的18个泡桐无性系进行方差分析,均以单株测定数据为统计单元(式中 μ : 总体均值; α_i : 无性系效应; β_j : 区组效应; $\alpha\beta_{ijk}$: 无性系和区组的交互效应; e_{ijk} : 随机误差)。无性系重复力计算公式为 $H^2 = 1 - 1/F$ (式中 F : 无性系方差分析的 F 值)。

表型变异系数 $CV = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\%$ (式中 S : 某性状的表型标准差; \bar{x} : 某性状的群体平均值); 遗传变异系数 $GCV = \frac{\sqrt{\sigma_a^2}}{\bar{x}} \times 100\%$ (式中 σ_a^2 : 无性系方差分量; \bar{x} : 某性状的群体平均值)^[16]; 表型相关系数

$r_{p12} = \frac{Cov_{p12}}{\sqrt{\sigma_{p1}^2 \sigma_{p2}^2}}$ (式中 Cov_{p12} : 2个性状的表型协方差; σ_{p1}^2 、 σ_{p2}^2 : 2个性状的表型方差); 遗传相关系数 $r_{g12} = \frac{Cov_{g12}}{\sqrt{\sigma_{g1}^2 \sigma_{g2}^2}}$ (式中 Cov_{g12} : 2个性状的遗传协方差; σ_{g1}^2 、 σ_{g2}^2 : 2个性状的遗传方差)。

利用 Smith-Hazel 指数选择法进行多性状的综合选择^[17], 采用等权重法估算无性系各性状的经济权重 w , 具体计算公式为 $w_i = \frac{1}{\sigma_i}$ (式中 σ_i : 各性状的表型标准差), 指数选择的计算公式为 $I = b'X$ (式中 b' : 各性状的指数系数; X : 对应性状的平均值), 指数系数计算公式为 $b' = P^{-1}Gw$ (式中 P : 选择性状的表型方差协方差矩阵; G : 选择性状的遗传方差协方差矩阵)^[6, 18-19]。

参照赵承开等^[20]方法进行遗传增益 (ΔG) 和实际增益 (G) 的计算, 但又做了适当的调整, 具体计算公式如下: $\Delta G = (H^2 M / \bar{x}) \times 100\%$ 、 $G = (M / \bar{x}) \times 100\%$, 式中 M 为入选无性系群体某一性状的平均值与 CK 平均值之差。

3 结果与分析

3.1 泡桐无性系各性状差异性分析

对参试无性系的各性状分别进行方差分析和遗传参数估算, 结果表明: 胸径、主干高、总材积、接干

高、主干削度和形数等 6 个性状指标在 18 个无性系间的差异均达到极显著水平(表 2)。其胸径、主干高、总材积、接干高、主干削度和形数的平均值分别为 18.282 1、7.452 1、0.139 2、4.611 9、1.258 3 和

0.964 6, 其最高值分别是最低值的 2.41、2.88、5.50、9.63、103.47 和 1.76 倍,在立地环境一致条件下不同无性系间表型的差异客观反映了它们基因型存在差异,表明开展无性系选择是必要的。

表 2 方差分析及遗传参数估算

Table 2 Analysis of variance and genetic parameter estimation

| 性状 Traits | 胸径 $D_{1.3}/\text{cm}$ | 主干高 H/m | 总材积 V/m^3 | 接干高 H_2/m | 主干削度 β | 形数 f |
|--|------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|------------|
| 平均值 Means | 18.282 1 | 7.452 1 | 0.139 2 | 4.611 9 | 1.258 3 | 0.964 6 |
| 无性系间 F 值 F values of clones | 12.399 2 ** | 3.444 5 ** | 11.672 7 ** | 8.664 4 ** | 2.824 4 ** | 7.196 9 ** |
| 无性系间方差分量 Variance | 37.042 8 | 3.302 4 | 0.012 7 | 8.091 3 | 0.888 9 | 0.019 5 |
| 交互方差分量 Interaction variance component | 1.313 8 | 0.420 3 | 0.001 3 | 0.603 0 | 0.429 9 | 0.004 2 |
| 误差 Error | 2.987 6 | 0.958 8 | 0.001 1 | 0.933 9 | 0.314 7 | 0.002 7 |
| 无性系重复力 Repeatability of clones | 0.964 6 | 0.872 7 | 0.895 0 | 0.925 5 | 0.516 3 | 0.785 8 |
| 表型变异系数 PCV/% | 12.840 3 | 13.869 8 | 32.780 1 | 25.113 6 | 48.093 1 | 6.495 9 |
| 遗传变异系数 GCV/% | 33.290 9 | 24.385 8 | 80.938 9 | 61.678 4 | 74.926 2 | 14.486 8 |

18 个参试无性系各性状的 Duncan's 多重比较结果如表 3 所示,结果表明胸径、主干高、总材积均显著高于 CK 的有 01-22、01-23 和 1-58,接干高

显著高于 CK 的有 01-22、01-23、1-38、1-45 和 1-58,主干削度显著低于 CK 的有 01-22、01-23 和 1-58,形数显著高于 CK 的是 01-23 和 -9。

表 3 泡桐无性系各性状的 Duncan's 多重比较结果

Table 3 Duncan's test of the *Paulownia* clones performance

| 无性系 Clones | 胸径 $D_{1.3}/\text{cm}$ | 主干高 H/m | 总材积 V/m^3 | 接干高 H_2/m | 主干削度 β | 形数 f |
|------------|------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|
| 9501 (CK) | 18.386 7 cdef | 7.403 5 abc | 0.143 0 cde | 3.642 1 fg | 1.292 3 abcd | 0.891 9 i |
| 01-1 | 17.333 5 fgh | 6.534 2 d | 0.124 4 defg | 3.653 6 fg | 1.694 6 a | 0.948 9 defgh |
| 01-4 | 16.887 5 gh | 7.317 4 bed | 0.124 4 defg | 4.220 9 efg | 1.488 0 abc | 0.940 9 fgh |
| 01-11 | 18.969 2 cd | 7.578 9 ab | 0.157 8 bc | 4.782 0 bcde | 1.044 3 cd | 0.998 7 bc |
| 01-18 | 17.907 5 cdefg | 7.576 0 ab | 0.139 1 cdef | 4.538 2 cde | 1.261 8 abcd | 0.956 7 cdefg |
| 01-20 | 17.501 3 efg | 6.605 8 cd | 0.117 7 efg | 3.541 1 g | 1.489 3 abc | 0.909 0 hi |
| 01-22 | 20.420 4 b | 8.206 7 a | 0.199 6 a | 5.406 7 b | 0.970 6 d | 0.964 5 bcdefg |
| 01-23 | 21.916 3 a | 7.855 4 ab | 0.187 2 a | 6.505 4 a | 0.971 6 d | 1.044 2 a |
| 1-3 | 18.100 0 cdefg | 7.163 6 bed | 0.128 9 defg | 4.296 9 defg | 1.450 8 abcd | 0.989 8 bed |
| 1-38 | 16.852 5 gh | 7.783 6 ab | 0.124 4 defg | 5.056 2 bed | 1.655 4 ab | 0.950 1 defgh |
| 1-39 | 17.664 4 defg | 7.675 0 ab | 0.129 7 defg | 4.804 3 bcde | 1.037 2 cd | 0.985 0 bcde |
| 1-43 | 17.484 2 efg | 7.210 7 bed | 0.118 0 ef | 4.452 7 cde | 1.258 0 abcd | 0.984 2 bcdef |
| 1-45 | 18.896 7 cde | 7.681 1 abc | 0.139 0 cdef | 5.138 9 bc | 1.116 5 cd | 0.944 3 efg |
| 1-48 | 16.863 5 gh | 7.715 9 ab | 0.114 7 fg | 4.738 9 bcde | 1.160 5 cd | 0.951 0 defg |
| 1-58 | 20.403 8 b | 7.837 2 ab | 0.176 0 ab | 5.006 4 bcde | 0.985 1 d | 0.994 4 bc |
| -1 | 16.078 3 h | 7.406 5 abc | 0.109 1 g | 4.331 7 cdef | 1.406 0 abcd | 0.934 4 gh |
| -4 | 18.227 5 cdefg | 7.283 3 bed | 0.118 7 efg | 4.366 8 cdef | 1.139 9 cd | 0.949 4 defgh |
| -9 | 19.270 8 bc | 7.298 2 bed | 0.146 7 cd | 4.498 9 cde | 1.189 6 bcd | 1.004 0 b |

3.2 泡桐无性系各性状遗传变异分析

表现型是遗传效应和环境效应共同决定的。重复力是指基因型方差和一般环境方差之和在表型方差中所占的比例。本研究 18 个泡桐无性系各性状的重复力如表 2 所示,其中胸径的重复力最大(0.964 6),主干高、总材积和接干高的重复力也均达到了 0.872 7 以上,表明泡桐无性系各性状受遗传因素的影响较大,受外界环境的制约较小,对其进

行表型选择获得优良无性系的概率较大^[21]。形数的重复力次之(0.785 8),重复力最小的是主干削度(0.516 3)。

较大的变异可以提供更大的选择空间^[22],在 18 个参试无性系的 6 个选择性状中,总材积和主干削度的遗传变异系数最大,接干高和胸径的遗传变异系数次之,主干高和形数的遗传变异系数较小,遗传变异系数的变化范围为 14.486 8%~80.938 9%;

表型变异系数最大的为主干削度和总材积,其次是接干高、主干高和胸径,最小的是形数,表型变异系数的变化范围为 6.495 9%~48.093 1%;该结果表明参试的 18 个无性系之间存在着比较丰富的遗传变异和表型变异,变幅最大的性状是主干削度,其次是接干高。

3.3 泡桐无性系各性状相关性分析

泡桐无性系各性状间相关系数如表 4 所示,胸径、主干高、总材积和接干高 4 个生长性状之间均呈现出极显著的表型和遗传正相关关系;除与主干高、接干高分别呈不显著和显著的表型负相关关系外,主干削度与其它性状间的表型和遗传负相关关系均

达到极显著水平;形数与主干高表型正相关关系不显著外,与其它性状间的表型和遗传相关关系均呈极显著水平;遗传相关对于育种来说更为重要,它是指表型性状中可以稳定遗传部分的相关,表 4 结果显示:18 个参试无性系的 4 个生长性状指标中遗传相关系数最高的可达到 0.949 3(胸径与总材积间的相关系数),其两两之间的遗传相关系数均大于 0.583 3,变化范围为 0.583 3~0.949 3。主干削度与 4 个生长性状间的遗传相关系数的绝对值均接近于 1,形数与其它 5 个性状间的遗传相关系数的变化范围为 -0.561 6~0.784 2。

表 4 泡桐无性系各性状间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between traits of *Paulownia* clones

| 性状 Traits | 胸径 $D_{1.3}$ /cm | 主干高 H /m | 总材积 V/m^3 | 接干高 H_2 /m | 主干削度 β | 形数 f |
|--------------|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 胸径 $D_{1.3}$ | | 0.259 8 ** | 0.816 5 ** | 0.411 3 ** | -0.165 5 ** | 0.248 3 ** |
| 主干高 H | 0.583 3 ** | | 0.521 2 ** | 0.869 8 ** | -0.098 9 | 0.023 2 |
| 总材积 V | 0.949 3 ** | 0.717 6 ** | | 0.527 7 ** | -0.243 7 ** | 0.152 3 ** |
| 接干高 H_2 | 0.760 0 ** | 0.825 1 ** | 0.756 6 ** | | -0.146 0 * | 0.286 9 ** |
| 主干削度 β | -0.972 5 ** | -1.150 6 ** | -0.827 0 ** | -1.044 1 ** | | -0.504 3 ** |
| 形数 f | 0.649 4 ** | 0.371 3 ** | 0.486 7 ** | 0.784 2 ** | -0.561 6 ** | |

注:左下角为遗传相关系数,右上角为表型相关系数。*表示相关关系达到显著水平($P < 0.05$),**表示相关关系达到极显著水平($P < 0.01$)。

Notes: Phenotypic correlation coefficients in the upper triangle, and genetic correlation coefficients in the below triangle. * and ** represent correlation is significant at 5% level and 1% level, respectively.

3.4 泡桐无性系多性状综合选择

为了从多性状角度来评价泡桐无性系,本研究利用 18 个参试无性系的胸径、主干高、总材积、接干高、主干削度和形数等 6 个性状指标对其进行综合评价。首先按照等权重法确定 6 个性状指标的经济权重(表 5),后分别用等权重法、强调生长改良和强调干形改良三种方法建立多性状综合指数方程进行整理分析。根据各性状间的相关关系,选择不同的

性状组合,分别构建等权重的指数方程($I_1 - I_3$)、强调生长的指数方程($I_4 - I_6$)和强调干形的指数方程($I_7 - I_9$),并分别对 9 个指数方程的综合选择进展(表 6)和各性状的遗传进展进行统计分析(表 7)。表 6 和表 7 的结果表明:在等权重的各指数方程中,以胸径、主干高、总材积、接干高、主干削度和形数这 6 个性状组合的指数方程 I_1 的综合选择进展最大(13.272 4),此时胸径和接干高的遗传进展也最大;

表 5 各性状经济权重及估算方法

Table 5 Estimation method and results of 6 traits economic weight

| 方法 Method | 指数方程 Selection indices | 经济权重 Economic weight | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------|---------|----------|-----------|--------------|----------|
| | | 胸径 $D_{1.3}$ | 主干高 H | 总材积 V | 接干高 H_2 | 主干削度 β | 形数 f |
| 等权重 Equal weight | I_1 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | -1.652 5 | 15.960 0 |
| | I_2 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | -1.652 5 | |
| | I_3 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | | 15.960 0 |
| 强调生长 Strengthening growth | I_4 | 1.278 0 | 2.902 5 | 65.745 5 | 2.590 2 | -1.652 5 | 15.960 0 |
| | I_5 | 1.278 0 | 2.902 5 | 65.745 5 | 2.590 2 | -1.652 5 | |
| | I_6 | 1.278 0 | 2.902 5 | 65.745 5 | 2.590 2 | | 15.960 0 |
| 强调干形 Strengthening stem form | I_7 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | -4.957 4 | 47.880 1 |
| | I_8 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | -4.957 4 | |
| | I_9 | 0.426 0 | 0.967 5 | 21.915 2 | 0.863 4 | | 47.880 1 |

强调生长改良的3个指数方程中,虽然 I_5 的主干高和总材积的遗传进展最大,但 I_4 的综合选择进展、胸径和接干高的遗传进展均最大;强调干形改良的

3个指数方程中, I_7 的综合选择进展、胸径和接干高的遗传进展均最大。

表6 生长和干形性状组合的指数方程和综合选择进展

Table 6 Combined selection progress and selection indices equation with growth and stem form

| 序号 No. | 性状配合及指数方程式 Selection indices equation with various traits | 综合选择进展 ΔI |
|--------|---|-------------------|
| I_1 | $I = +1.6469 \times 1 + 3.5513 \times 2 - 41.9650 \times 3 + 0.4055 \times 4 - 5.9856 \times 5 + 13.3898 \times 6$ | 13.2724 |
| I_2 | $I = +1.5381 \times 1 + 3.8137 \times 2 - 39.6184 \times 3 - 0.0462 \times 4 - 6.3373 \times 5$ | 11.6629 |
| I_3 | $I = +1.0961 \times 1 + 2.7979 \times 2 - 8.1286 \times 3 + 0.2214 \times 4 + 32.8729 \times 5$ | 10.9808 |
| I_4 | $I = +3.9592 \times 1 + 9.0791 \times 2 - 86.5176 \times 3 + 0.6225 \times 4 - 16.3600 \times 5 + 22.2677 \times 6$ | 33.3417 |
| I_5 | $I = +3.8628 \times 1 + 8.7743 \times 2 - 85.0869 \times 3 + 0.5902 \times 4 - 17.3120 \times 5$ | 31.7451 |
| I_6 | $I = +3.0574 \times 1 + 9.6782 \times 2 - 18.8227 \times 3 - 0.7984 \times 4 + 83.5020 \times 5$ | 29.3868 |
| I_7 | $I = +2.6284 \times 1 + 5.1262 \times 2 - 81.3425 \times 3 + 0.9994 \times 4 - 7.5825 \times 5 + 31.2916 \times 6$ | 19.9523 |
| I_8 | $I = +2.2894 \times 1 + 6.4804 \times 2 - 73.3866 \times 3 - 0.7751 \times 4 - 8.0373 \times 5$ | 15.0034 |
| I_9 | $I = +1.3268 \times 1 + 1.5133 \times 2 - 13.6918 \times 3 + 1.6840 \times 4 + 47.9897 \times 5$ | 14.8257 |

表7 指数方程中各性状的遗传进展

Table 7 Genetic progress on the traits of all selection indices

| 序号 No. | 胸径 $D_{1.3}$ | 主干高 H | 总材积 V | 接干高 H_2 | 主干削度 β | 形数 f |
|--------|--------------|---------|---------|-----------|--------------|--------|
| I_1 | 6.7456 | 1.8876 | 0.1140 | 3.2402 | -0.9675 | 0.1051 |
| I_2 | 6.6832 | 1.9857 | 0.1152 | 3.1651 | -0.9908 | |
| I_3 | 6.3166 | 1.5400 | 0.1087 | 3.0008 | | 0.1144 |
| I_4 | 6.7705 | 1.9237 | 0.1154 | 3.2143 | -0.9658 | 0.1000 |
| I_5 | 6.7411 | 1.9616 | 0.1157 | 3.1753 | -0.9711 | |
| I_6 | 6.3076 | 1.5995 | 0.1107 | 2.9662 | | 0.1080 |
| I_7 | 6.6349 | 1.8081 | 0.1105 | 3.2502 | -0.9605 | 0.1125 |
| I_8 | 6.5176 | 2.0237 | 0.1134 | 3.1231 | -1.0262 | |
| I_9 | 6.2114 | 1.3921 | 0.1028 | 3.0109 | | 0.1249 |

综上所述,等权重的指数方程 I_1 、强调生长改良的指数方程 I_4 和强调干形改良的指数方程 I_7 比较理想。按照20%的选择强度依据指数方程 I_1 从参试无性系中选择出排在前三位的无性系依次是01-23、01-22、1-58和1-45,指数方程 I_4 排在前三位的无性系依次是01-23、01-22、1-58和1-45,指数方程 I_7 排在前三位的无性系依次是01-23、1-58、01-22和01-11。3个理想指数方程分别选出的4个无性系都包含01-23、01-22和1-58,可作为入选的生长、干形兼优的优良无性系,入选率为

17%。表8是入选的3个无性系和CK各性状的平均值,其中,01-23、01-22和1-58这3个人选无性系的胸径、主干高、总材积、接干高和形数与CK相比均不同程度的得到了提高,幅度分别为10.97%~19.20%、5.86%~10.85%、23.08%~39.58%、37.46%~78.62%和8.14%~17.08%;其主干削度与CK相比降低的幅度为23.77%~24.89%;3个人选无性系的6项指标均得到不同程度的改良。

表8 泡桐3个入选无性系和CK各性状的均值

Table 8 Means of 3 traits of *Paulownia* clones and its value of index formula

| 无性系 Clone | 胸径 $D_{1.3}$ | 主干高 H | 总材积 V | 接干高 H_2 | 主干削度 β | 形数 f |
|-----------|--------------|---------|---------|-----------|--------------|--------|
| 01-23 | 21.9163 | 7.8554 | 0.1872 | 6.5054 | 0.9716 | 1.0442 |
| 01-22 | 20.4204 | 8.2067 | 0.1996 | 5.4067 | 0.9706 | 0.9645 |
| 1-58 | 20.4038 | 7.8372 | 0.1760 | 5.0064 | 0.9851 | 0.9944 |
| 9501 (CK) | 18.3867 | 7.4035 | 0.1430 | 3.6421 | 1.2923 | 0.8919 |

3个人选群体各性状的遗传增益和实际增益如图1所示。在所有性状中,接干高的实际增益最高,

达到43.31%,其次是总材积(32.04%),二者的遗传增益也较高,分别达到40.08%和28.68%,表明

入选群体接干高和总材积在获得较大实际增益的基础上,也显著提高了其遗传增益;其次是主干削度和胸径,其实际增益分别达 25.16% 和 13.82%,但由于主干削度的重复力较小(0.516 3),导致其遗传增益与实际增益相差稍大^[23];入选群体形数和主干高的遗传增益和实际增益稍小。

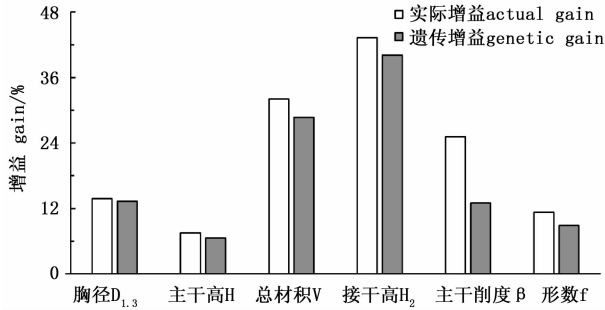


图1 17% 入选率下各性状的遗传增益和实际增益

Fig. 1 Genetic and actual gains of the traits in 17% selective ratio

4 小结与讨论

在无遗传变异发生的前提下,同一无性系内各单株的遗传物质应是相同的,各单株间的形态特征应该是一致的^[24-25]。但受遗传和外界环境等多因素的共同作用可能导致同一无性系内或不同无性系间发生变异,该变异是无性系选择育种的基础,变异系数的大小直接反映了该群体的变异程度,且决定了选择的空间大小^[22, 25]。参试的 18 个泡桐无性系各表型差异显著,变异丰富,各性状指标的表型变异系数变化范围为 6.495 9%~48.093 1%,遗传变异系数变化范围为 14.486 8%~80.938 9%,其中胸径、总材积的遗传变异系数分别为 33.290 9%、80.938 9%,与施士争等^[26]研究的 11 个 4 年生泡桐无性系(12.64%、33.08%)和杨途熙等^[27]研究的 12 个 10 年生泡桐无性系(7.46%、20.85%)的结果相比稍大,这与参试无性系的选择有关,也与试验过程中存在的位置效应、数量、试验重复次数以及区组间环境的变化等多种非遗传因素相关。重复力并非是一个恒定的数值,它会随着选择的群体、群体的发育年龄、外界环境以及选择的研究时间等因素的变化而变化^[28],它的大小直接决定无性系选择的效果^[29],它能够衡量依据表型进行选择的可靠程度。本研究中胸径(0.964 6)、接干高(0.925 5)、总材积(0.895 0)和主干高(0.872 7)的重复力较高,表明这 4 个性状受较强的遗传因素制约,根据表型进行选择的可靠性较大;其次是形数(0.785 8);重复力

最小的是主干削度(0.516 3)。

林木各性状间的相互关系比较复杂,在开展无性系选择时,应根据具体的选育目标统筹考虑,以达到最优的育种目的^[30]。无性系各性状间相关系数的高低直接反映了它们的相关程度,可为林木的定向遗传改良提供理论参考^[31-32]。本研究中各无性系 6 个性状间的表型和遗传相关系数差异较大,胸径,主干高、总材积和接干高等生长性状之间存在着极显著的表型和遗传正相关关系,这与何贵平等^[31]对杉木主要生长、材质性状遗传分析的结果一致;主干削度与胸径、主干高、总材积、接干高和形数这 5 个性状之间呈表型和遗传负相关关系,除了与主干高、接干高呈不显著和显著的表型负相关外,其它均呈极显著水平;形数与主干高呈不显著的表型正相关关系外,与其它生长性状间的表型和遗传正相关关系均呈极显著水平。主干削度与主干高、接干高之间的遗传相关系数绝对值出现了大于 1 的情况,前期也有过类似的报道^[33],但导致出现这一现象的原因到底是抽样误差还是理论基础造成的,有待于进一步深入探究。

性状的选择(数量,类型)直接影响着选择育种的精度。性状多,代表的特征信息全面但不一定能选择出理想的品系;性状少,容易选择但代表的信息不全面。因此应根据具体的育种目标而制定不同的选择性状指标组合。白花泡桐材色较好、材质均匀、材性较优^[10],本研究基于此选择白花泡桐 18 个无性系的 6 个指标(胸径、主干高、总材积、接干高、主干削度和形数)进行方差分析、遗传变异以及相关分析,并分别用等权重法、强调生长改良和强调干形改良三种方法建立多性状综合指数方程进行综合选择,最终以 17% 的入选率选择出 3 个生长、干形兼优的白花泡桐优良无性系(01-23、01-22 和 1-58),与对照 9501 相比,其各个性状指标均得到不同程度的改良。

参考文献:

- [1] 李芳东, 乔杰, 王保平, 等. 中国泡桐属种质资源图谱[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013: 1-1.
- [2] 魏安智, 杨途熙, 杨焕叶, 等. 泡桐优良无性系相关选择的研究[J]. 西北植物学报, 1998, 18(1): 39-43.
- [3] 叶金山, 胡伟华, 谢青, 等. 白花泡桐×兰考泡桐和毛泡桐×白花泡桐 F1 无性系自然接干性状遗传变异的比较研究[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(10): 1-4.
- [4] 邱乾栋, 莫文娟, 王楠, 等. 白花泡桐材色优良单株的选择[J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 277-283.

- [5] 杨俊秀, 张刚龙, 王培新, 等. 抗丛枝病泡桐表型单株选择及其育种技术[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 90-96.
- [6] Cotterill P P, Jackson, N. On index selection. I. Methods of determining economic weight[J]. *Silvae Genetica*, 1985a, 34(2/3): 56-63.
- [7] Cotterill P P. On index selection. II. Simple indices which require no genetic parameters or special expertise to construct[J]. *Silvae Genetica*, 1985b, 34(2/3): 64-69.
- [8] 邓继峰, 张含国, 张 磊, 等. 杂种落叶松 F2 代自由授粉家系纸浆材遗传变异及多性状联合改良[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 31-39.
- [9] 何贵平, 陈益泰, 张国武. 杉木主要生长、材质性状遗传分析及家系选择[J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 559-563.
- [10] 常德龙, 黄文豪, 张云岭, 等. 4 种泡桐木材材色的差异性[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 102-104.
- [11] 常德龙, 张云岭, 胡伟华, 等. 不同种类泡桐的基本材性[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(8): 79-81.
- [12] Wu L C, Wang B P, Qiao J, *et al.* Effects of trunk-extension pruning at different intensities on the growth and trunk form of *Paulownia fortunei*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 128-135.
- [13] 魏安智, 杨途熙. 泡桐优良无性系早期选择的研究[J]. 林业科学研究, 1993, 6(2): 136-140.
- [14] 汪东华. 多元统计分析与 SPSS 应用[M] 第 1 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2010: 49-55.
- [15] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 26-28.
- [16] Lai M, Sun X M, Chen D, *et al.* Age-related trends in genetic parameters for *Larix kaempferi* and their implications for early selection[J]. *BMC genetics*, 2014, 15(Suppl): S10.
- [17] Cotterill P P, Dean C A. Successful tree breeding with index selection[M]. CSIRO: Division of Forestry and Forest Products, 1990.
- [18] 马 妮, 仲崇禄, 张 勇, 等. 7 年生短枝木麻黄优良无性系选择的研究[J], 林业科学研究, 2014, 27(5): 662-666.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 李善文, 姜岳忠, 王桂岩, 等. 黑杨派无性系多性状遗传分析及综合评选研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(3): 36-40.
- [22] 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.
- [23] 方乐金, 施季森, 张运斌, 等. 杉木优良家系及单株综合选择研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(1): 20-24.
- [24] 王明麻. 林木遗传育种学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 200-223.
- [25] 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.
- [26] 施士争, 倪善庆, 朱 超, 等. 泡桐胶合板材栽培性状的综合选择[J]. 南京林业大学学报, 1996, 20(3): 27-31.
- [27] 杨途熙, 魏安智, 杨焕叶, 等. 泡桐无性系数量性状的遗传分析和指数选择研究[J]. 西北植物学报, 1997, 17(3): 374-381.
- [28] 李火根, 黄敏仁, 潘惠新, 等. 美洲黑杨新无性系生长动态遗传分析及早期选择[J]. 南京林业大学学报, 1996, 20(4): 2-7.
- [29] 朱积余, 申文辉, 蒋 燧, 等. 红锥家系遗传变异与优良家系选择[J]. 热带亚热带植物学报, 2014, 22(3): 270-280.
- [30] 孙晓梅, 张守攻, 李时元, 等. 日本落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 48-54.
- [31] 何贵平, 陈益泰, 张国武. 杉木主要生长、材质性状遗传分析及家系选择[J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 559-563.
- [32] 周志春, 金国庆, 周世水. 马尾松自由授粉家系生长和材质的遗传分析及联合选择[J]. 林业科学研究, 1994, 7(3): 263-268.
- [33] 符建明, 沈熙环, 朱少彬. 14 年生油松测定林树高生长分析[J]. 林业科学, 1990, 26(5): 457-460.

(责任编辑: 张 研)