

黄心梓木优良无性系评价与初选

薛惠芬^{1,2},于晓池^{1,2},付鹏跃^{1,2},肖 遥²,刘冰洋²,杨桂娟²,
王军辉²,赵曦阳¹,麻文俊^{2*}

(1. 林木遗传育种国家重点实验室,东北林业大学林学院,黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 中国林业科学研究院 林业研究所,林木遗传育种国家重点实验室,国家林业和草原局林木培育重点实验室,
楸树国家创新联盟,北京 100091)

摘要:为揭示黄心梓木重要性状的变异水平,初选的无性系为速生优良无性系的选择提供物质基础。以种植在河南省南阳市 252 个黄心梓木无性系为材料,对其 2 年生树高、胸径、叶长、叶宽、叶长宽比、叶片质量、比叶质量与皮孔数量等 8 个性状进行测定分析。方差分析结果表明,除比叶质量在不同无性系间差异不显著外,其余性状均达极显著差异水平($P < 0.01$)。无性系间各性状表型变异系数变化范围为 7.104%~40.818%;重复力变化范围为 0.101~0.859。相关性分析表明:树高与胸径、叶长与叶宽、叶长和叶宽与叶片质量均达到极显著正相关水平;比叶质量与叶长宽比、叶片质量之间达(极)显著正相关水平,但与叶宽之间呈显著负相关关系;生长性状和叶片性状相关性较弱。通过多性状综合评价法、隶属函数法和指数选择法分别对不同无性系进行评价选择,以 15% 的入选率分别筛选出 37 个优良无性系,其中,不同方法共同筛选出 7 个优良无性系,其树高、胸径的现实增益为 10.44% 和 12.96%。利用综合评价法、隶属函数法和指数选择法联合选择出 39、46、64、92、159、177 和 242 共 7 个无性系,可以作为楸树遗传改良的首选材料。

关键词:黄心梓木;生长性状;叶片性状;多性状综合评价法;隶属函数法;指数选择法

中图分类号:S722.33

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)02-0108-07

Evaluation and Primary Selection of Excellent Clones of *Catalpa fargesii* f. *duclouxii*

XUE Hui-fen^{1,2}, YU Xiao-chi^{1,2}, FU Peng-yue^{1,2}, XIAO Yao², LIU Bing-yang², YANG Gui-juan²,
WANG Jun-hui², ZHAO Xi-yang¹, MA Wen-jun^{2*}

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding/Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grass Land Administration, China Forest Genetic Resource, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The genetic variation of important traits of *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* had been revealed, and the excellent clones selected provided material basis for the selection of fast-growing elites. Taking 252 clones (2-year-old) of *C. fargesii* f. *duclouxii* cultivated in Nanyang City, Henan Province as materials, eight parameters were measured and analyzed, including tree height (H), the diameter at breast height (DBH), leaf length (LL), leaf width (LW), ratio of leaf length and width (LWR), leaf mass (LM), leaf mass per unit area (LMA) and number of lenticels (LN). Analysis of variance showed that almost all the traits among clones reached extremely significant difference ($P < 0.01$), except for LMA. The coefficients of phenotypic variation of all the traits ranged from 7.104%—40.818%. Repeatability ranged from 0.101

收稿日期:2021-03-16 修回日期:2021-05-05

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020SZ003)。

第一作者:薛惠芬。研究方向:楸树遗传改良。E-mail:xuehuifen98@163.com

*通信作者:麻文俊,博士,副研究员。研究方向:楸树等珍贵树种遗传改良和高效培育技术。E-mail:mwjlx@sina.com

-0.859. Correlation analysis showed that there was significant positive correlation between H and DBH. LL was significantly and positively correlated with LW. What's more, LL and LW were significantly and positively correlated with LM. LMA was negatively correlated with LW, while significant and positive correlation was found between LWR and LM. It was obvious that there was little correlation between growth traits and leaf traits. With the selection rate of 15%, the 37 fine clones were selected according to multi-trait comprehensive evaluation method, membership function analysis method, and index selection method, respectively, among them, 7 superior clones were screened out, the realized genetic gain of H and DBH were 10.44% and 12.96%, respectively. Seven superior clones that selected included No. 39, 46, 64, 92, 159, 177 and 242, which could be used as the preferred materials for genetic improvement of *C. bungei*.

Key words: *Catalpa fargesii* f. *duclouxii*; growth trait; leaf trait; multi-trait comprehensive evaluation method; membership function analysis method; index selection method

滇楸(*Catalpa fargesii* f. *duclouxii*)属紫葳科(Bignoniaceae)梓属(*Catalpa*)落叶大乔木,喜光,适宜温暖湿润气候^[1],广泛分布于我国西南地区,是重要的乡土珍责用材和园林观赏树种^[2]。黄心梓木是滇楸的特殊类型,分布范围极小,仅在贵州省黔南州和黔东南州部分区域,常与滇楸混生,由于其生长速度略慢于滇楸,而木材呈黄色,因此更受青睐,在当地常用来制作高档家具和装饰用材。近年来,由于对黄心梓木资源的过度利用,导致资源存量骤减,基因资源严重流失,2018年的立木数量仅为2013年的1/2。由于重视程度不够、相关研究起步晚,所以针对黄心梓木这一地方特有珍责用材树种的培育却无较大的进展。

植物表型性状具有观察直观、调查简便的优点,被广泛应用于资源评价和良种选育^[3]。叶片是植物的重要器官,与光合作用、养分合成和水分利用等过程密切相关^[4],同时,叶片大小、形态、结构与植物生长量和生理生态因子也密切相关^[5-6]。常用的叶片观察性状有叶长、叶宽、叶面积、叶片质量和比叶质量等,由于其相对稳定且易于测定,对辅助品种评价和优良无性系选择有较高的指导意义。

目前,对梓属树种的研究主要集中在无性系表型特征、生长特性、光合生理和组培技术等方面^[7-11]。由于原来对黄心梓木的认识不足,与滇楸合并对待,因此并未系统性开展黄心梓木的资源评价与优良无性系选择。鉴于此,本研究对营建于河南南阳的2年生黄心梓木无性系对比试验林进行表型性状测定与分析,旨在为选择速生优良无性系提供物质基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省南阳市卧龙区香铺村,地处亚热带向温暖带过渡地带,属季风大陆半湿润气候。

土壤为灰潮土或黄棕壤,自然肥力中等。年平均气温14.4~15.8℃,极端最高气温42.6℃,极端最低气温-13.2℃,年平均日照时数2121 h,年平均无霜期225~240 d,年降水量800 mm。

1.2 试验材料与设计

参试无性系共计252个,收集于贵州省黔南州和黔东南州,2019年3月20日在南阳市宛城区造林。采用完全随机区组设计,2株小区,4次重复,株行距3 m×3 m。苗木为1年生嫁接苗,苗高2.0~3.0 m,地径1.5~3.0 cm。苗木定植5 d后平茬,以提高成活率。

1.3 试验方法

2020年8月进行叶部性状调查,10月进行生长性状调查。调查性状包括:树高(tree height, H)、胸径(diameter at breast height, DBH)、叶长(leaf length, LL)、叶宽(leaf width, LW)、叶长宽比(ratio of leaf length and width, LWR)、叶片质量(leaf mass, LM)、皮孔数量(number of lenticels, LN)和比叶质量(leaf mass per unit area, LMA)。其中,采用塔尺和游标卡尺测量其树高和胸径。每个无性系随机选取生长正常、无严重缺陷、无明显病虫害的3株单株测定其叶片性状。叶片性状测定:试验林共4次重复,选择第1~第3重复,每个重复中每个无性系随机选择1株用于叶片性状测定,每株选取苗干中部3个生长正常的功能叶片。用直尺测量叶长和叶宽,并将叶片进行拍照,然后进行装袋,于105℃杀青20 min,70℃烘干至恒重,称量叶片质量,利用image J软件矢量化处理照片并计算叶面积,叶片干重与叶面积的比值为比叶质量^[12]。在苗干1.3 m处南向,用2 cm×2 cm的方框卡在苗干上,统计区域内的皮孔数量。

1.4 数据处理

采用单因素方差分析设计无性系间方差分析,线性模型为^[13]

$$x_{ij} = \mu + C_i + e_{ij} \quad (1)$$

式中: μ 为总体平均值; C_i 为无性系效应; e_{ij} 为环境误差。

重复力(R)的估算根据公式^[14]

$$R = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_e^2 + \sigma_e^2/N} \quad (2)$$

式中: σ_e^2 为无性系的方差分量; σ_e^2 为随机误差的方差分量; N 为无性系的单株数。

表型变异系数采用公式^[15]

$$P_{cv} = \frac{\sqrt{\sigma_p^2}}{\bar{X}} \quad (3)$$

式中: σ_p^2 为性状的表型方差分量; \bar{X} 为性状的平均值。

表型相关系数(r)采用公式^[16]

$$r = \frac{C_{ovp12}}{\sqrt{\sigma_{p1}^2 \cdot \sigma_{p2}^2}} \quad (4)$$

式中: C_{ovp12} 为 2 个性状的表型协方差; σ_{p1}^2 和 σ_{p2}^2 分别为 2 个性状的表型方差。

采用布雷金多性状综合评定法^[17]对无性系进行综合评定,具体公式为

$$Q_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n ai}, ai = X_{ij}/X_{jmax} \quad (5)$$

式中: Q_i 为综合评价值; X_{ij} 为某一性状的平均值; X_{jmax} 为某一性状的最优值; ai 为平均值与最优值之比; n 为评价性状的个数。

采用隶属函数法综合各项性状进行评价^[18],隶属函数值计算公式为

$$T_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (6)$$

反隶属函数值计算公式为

$$T_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (7)$$

式中: i 表示某个无性系; j 表示某项性状; T_{ij} 表示 i 无性系 j 性状的隶属函数值; X_{ij} 表示 i 无性系 j 性状的测定值; X_{jmin} 表示所有无性系 j 性状的最小值; X_{jmax} 表示所有无性系性状的最大值。假如某项性状与材积呈负相关,则 1 减去正相关的隶属函数值就是它的隶属函数值。某一个体某一性状的隶属函数值或反隶属函数值越大,表明该性状越靠近最大值。

采用选择指数法对无性系进行综合评价^[19]

$$I = \sum_{i=1}^n C_i X_i, C = \frac{WR}{\bar{X}} \quad (8)$$

式中: I 为选择指数; n 为性状个数; R 为重复力; X 为性状个体观测值; \bar{X} 为性状平均值; W 为性状加权系数; C 为选择指数各组成的系数。

现实增益(ΔG)估算^[17]

$$\Delta G = RW/\bar{X} \quad (9)$$

式中: W 为选择差; R 为性状的重复力; \bar{X} 为某一性状的平均值。

2 结果与分析

2.1 黄心梓木无性系各性状方差分析和遗传参数估算

对 252 个无性系的树高、胸径等 8 个性状进行方差分析(表 1)。结果表明,不同无性系的树高、胸径、叶长等 7 个性状差异极显著,而比叶质量差异不显著,说明无性系间存在较大的变异,具有较大的遗传改良潜力。

对 8 个性状进一步计算平均值、标准差、表型变异系数和重复力。由表 2 可知,无性系树高的平均值为 4.513 m,最大值(5.500 m)是最小值(3.158 m)的 1.74 倍;胸径的平均值是 5.409 cm,最大值(6.953 cm)是最小值(3.289 cm)的 2.10 倍;叶长的平均值是 20.481 cm,变幅为 13.933~27.211 cm;叶宽的平均值为 15.217 cm,变幅为 9.622~25.944 cm;叶长宽比的平均值为 1.378,变幅为 1.110~1.782;叶片质量的平均值为 4.117 g,变幅为 1.993~7.043 g;皮孔数量的平均值为 11.505,变幅为 4.667~28.000,最大值为最小值的 6.00 倍;比叶质量的平均值为 0.008,变幅为 0.004~0.030,最大值为最小值的 7.50 倍,表明不同无性系间变化较大。各性状表型变异系数的变化范围为 7.104%~40.818%,皮孔数量的表型变异系数最大,达 40.818%,说明无性系各性状间存在丰富的遗传变异,在无性系水平上有较好的遗传改良潜力。树高、胸径和皮孔数量受较强的遗传控制,重复力分别为 0.859、0.828 和 0.791;叶长宽比具有中偏上的重复力,达 0.578;除比叶质量之外,其余性状的重复力均>0.3。

表 1 252 个 2 年生黄心梓木无性系各性状方差分析

Table 1 Variance analysis of each traits of 252 2-year-old

Catalpa fargesii f. *duclouxii* clones

| 性状 | 平方和 SS | df | 均方 MS | F |
|------|-----------|-----|-----------|---------|
| 树高 | 206.42 | 251 | 0.82 | 7.10 ** |
| 胸径 | 53 607.84 | 251 | 213.58 | 5.83 ** |
| 叶长 | 3 711.99 | 251 | 14.79 | 1.44 ** |
| 叶宽 | 4 009.06 | 251 | 15.97 | 1.66 ** |
| 叶长宽比 | 8.86 | 251 | 0.04 | 2.37 ** |
| 叶片质量 | 520.29 | 251 | 2.07 | 1.51 ** |
| 皮孔数量 | 16 606.98 | 251 | 66.16 | 4.79 ** |
| 比叶质量 | 0.00 | 251 | 1.086E-05 | 1.11 |

注: ** 代表 $P < 0.01$ 差异极显著; * 代表 $P < 0.05$ 差异显著。

表2 252个2年生黄心梓木无性系各性状的遗传参数

Table 2 Variation parameters of different traits in 252 2-year-old
C. fargesii f. *duclouxii* clones

| 性状 | 平均值 | 变幅 | 表型变异系数/% | 重复力 |
|----------------------------|--------|---------------|----------|-------|
| 树高/m | 4.513 | 3.158~5.500 | 7.104 | 0.859 |
| 胸径/cm | 5.409 | 3.289~6.953 | 9.553 | 0.828 |
| 叶长/cm | 20.481 | 13.933~27.211 | 10.840 | 0.307 |
| 叶宽/cm | 15.217 | 9.622~25.944 | 15.172 | 0.396 |
| 叶长宽比/1 | 1.378 | 1.110~1.782 | 7.660 | 0.578 |
| 叶片质量/g | 4.117 | 1.993~7.043 | 20.190 | 0.336 |
| 皮孔数量/个 | 11.505 | 4.667~28.000 | 40.818 | 0.791 |
| 比叶质量/(g·cm ⁻²) | 0.008 | 0.004~0.030 | 25.371 | 0.101 |

表3 252个2年生黄心梓木无性系各性状相关系数

Table 3 Correlation coefficients among different traits in 252 2-year-old *C. fargesii* f. *duclouxii* clones

| 性状 | 树高 | 胸径 | 叶长 | 叶宽 | 叶长宽比 | 叶片质量 | 皮孔数量 |
|------|----------|---------|----------|----------|----------|---------|--------|
| 胸径 | 0.815** | | | | | | |
| 叶长 | 0.110 | 0.189** | | | | | |
| 叶宽 | 0.047 | 0.095 | 0.810** | | | | |
| 叶长宽比 | 0.084 | 0.093 | -0.200** | -0.659** | | | |
| 叶片质量 | 0.012 | 0.035 | 0.790** | 0.688** | -0.282** | | |
| 皮孔数量 | -0.189** | -0.113 | -0.021 | 0.031 | -0.022 | -0.062 | |
| 比叶质量 | -0.016 | -0.122 | -0.099 | -0.156* | 0.149* | 0.178** | -0.003 |

注: ** 表示 $P < 0.01$ 相关达极显著水平; * 表示 $P < 0.05$ 相关达显著水平。

2.3 黄心梓木优良无性系的综合评价与选择

2.3.1 黄心梓木无性系多性状综合评价 采用多性状综合评定法,利用树高、胸径、叶长、叶宽、叶长宽比、叶片质量和皮孔数量7个性状,对黄心梓木无性系进行综合评价(表4),以15%的入选率对无性系进行选择,无性系44、46、108、167、212、208、9、87、39、97、19、177、60、156、64、159、92、176、204、155、127、189、69、99、239、98、248、146、199、72、259、160、30、242、63、3和25共37个无性系入选。

2.3.2 黄心梓木无性系隶属函数法评价 采用隶属函数法对无性系进行综合评价,将树高、胸径、叶长、叶宽、叶长宽比、叶片质量和皮孔数量等7个性状作为评价性状,平均隶属函数值见表5。无性系46的7个性状平均隶属函数值最高,为0.70;其次是无性系19和无性系167。以15%的入选率,无性系46、19、167、212、72、177、189、208、108、159、88、98、69、89、60、246、34、190、97、92、2、79、1、44、39、155、204、145、225、9、146、64、156、242、30、213和15等37个无性系的平均隶属函数值较高,因此初选为优良无性系。

2.3.3 黄心梓木无性系指数选择法评价 楸树为珍贵用材树种,材积速生是其选择的主要目的,将树高、胸径、叶长、叶宽、叶长宽比、叶片质量、和皮孔数量对立木材积进行多元回归分析之后, F 检验结果

2.2 黄心梓木无性系各性状相关性分析

对所有无性系各性状进行相关性分析(表3),结果表明,不同无性系生长性状(树高和胸径)间达极显著正相关水平。对于叶片性状,叶长与叶宽之间呈极显著正相关水平;叶长、叶宽均与叶片质量呈极显著正相关关系,但叶长宽比则与叶片质量呈极显著负相关关系;比叶质量与叶宽之间呈(极)显著负相关关系,但与叶长宽比、叶片质量之间达(极)显著正相关水平。对于生长性状与叶片性状之间的相关性,树高与皮孔质量之间呈极显著正相关水平,胸径与叶长之间达(极)显著正相关关系,其余性状之间相关性均不显著。

表明,叶长、叶宽、叶长宽比、叶片质量和皮孔数量对材积的偏回归平方和不显著,因此只选取对材积有决定意义的树高和胸径2个性状作为评价性状^[19]。

表4 不同黄心梓木无性系的 Q_i

Table 4 Q_i values of different *C. fargesii* f. *duclouxii* clones

| 无性系 | Q_i | 无性系 | Q_i |
|-----|-------|-----|-------|
| 44 | 2.22 | 155 | 2.06 |
| 46 | 2.21 | 127 | 2.06 |
| 108 | 2.13 | 189 | 2.05 |
| 167 | 2.13 | 69 | 2.05 |
| 212 | 2.12 | 99 | 2.05 |
| 208 | 2.09 | 239 | 2.05 |
| 9 | 2.08 | 98 | 2.05 |
| 87 | 2.08 | 248 | 2.05 |
| 39 | 2.08 | 146 | 2.04 |
| 97 | 2.08 | 199 | 2.04 |
| 19 | 2.08 | 72 | 2.04 |
| 177 | 2.07 | 259 | 2.04 |
| 60 | 2.07 | 160 | 2.03 |
| 156 | 2.07 | 30 | 2.03 |
| 64 | 2.07 | 242 | 2.03 |
| 159 | 2.07 | 63 | 2.03 |
| 92 | 2.07 | 3 | 2.03 |
| 176 | 2.06 | 25 | 2.03 |
| 204 | 2.06 | | |

权重的计算方法很多,这里将树高和胸径2个性状数据标准化,以材积为因变量,建立多元标准化

回归式,将标准回归系数作为权重^[20],根据式(8)得出黄心梓木无性系指数选择的最优方程式:

$$I = 4.9871X_1 + 11.6876X_2 \quad (10)$$

将黄心梓木各无性系树高和胸径测定值代入式(10)中,求出相应的值,并将值按顺序排列(表6)。252个无性系的平均选择指数值为0.857,大于平均选择指数值的有133个无性系。通过指数选择法,以15%的入选率,无性系177、236、239、242、94、149、256、99、178、46、112、15、64、243、119、6、172、104、166、145、110、92、41、201、220、130、233、174、173、246、63、223、170、159、39、101和65等37个优良无性系入选。

表5 黄心梓木无性系隶属函数值

Table 5 Membership function values of *C. fargesii* f. *duclouxii* clones

| 无性系 | 平均隶属函数值 | 无性系 | 平均隶属函数值 |
|-----|---------|-----|---------|
| 46 | 0.70 | 92 | 0.55 |
| 19 | 0.64 | 2 | 0.54 |
| 167 | 0.62 | 79 | 0.54 |
| 212 | 0.62 | 1 | 0.54 |
| 72 | 0.61 | 44 | 0.54 |
| 177 | 0.59 | 39 | 0.54 |
| 189 | 0.59 | 155 | 0.54 |
| 208 | 0.58 | 204 | 0.54 |
| 108 | 0.57 | 145 | 0.54 |
| 159 | 0.56 | 225 | 0.54 |
| 88 | 0.56 | 9 | 0.54 |
| 98 | 0.56 | 146 | 0.54 |
| 69 | 0.56 | 64 | 0.53 |
| 89 | 0.55 | 156 | 0.53 |
| 60 | 0.55 | 242 | 0.53 |
| 246 | 0.55 | 30 | 0.53 |
| 34 | 0.55 | 213 | 0.53 |
| 190 | 0.55 | 15 | 0.53 |
| 97 | 0.55 | | |

2.4 黄心梓木优良无性系遗传增益

利用多性状综合评价法、隶属函数法和指数选择法分别对黄心梓木进行评价选择(表7),无性系39、46、64、92、159、177和242在不同的评价方法中均被筛选出来。树高的遗传增益为10.44%;胸径的现实增益为12.96%;叶长、叶宽、叶片质量和比叶质量的现实增益分别为4.71%、7.41%、8.46%和1.42%。

3 结论与讨论

黄心梓木是滇楸的特殊类型,具有较高的研究和遗传改良价值。本研究对其性状进行分析,结果显示不同无性系各性状均存在较高的遗传变异,且

生长性状受到较强的遗传控制,同时也发现其生长性状与叶片性状相关性较弱。利用多性状综合评价法、隶属函数法和指数选择法对不同无性系进行评价选择,共同筛选出7个优良无性系,初选的无性系可以为选择速生优良无性系提供物质基础。

表6 黄心梓木无性系选择指数值比较

Table 6 Comparison of selection index values of *C. fargesii* f. *duclouxii* clones

| 无性系 | 指数值 I | 无性系 | 指数值 I |
|-------|-------|-----|-------|
| 177 | 1.059 | 110 | 0.957 |
| 236 | 1.027 | 166 | 0.963 |
| 239 | 1.017 | 92 | 0.954 |
| 242 | 1.004 | 41 | 0.951 |
| 94 | 0.998 | 201 | 0.950 |
| 149 | 0.994 | 220 | 0.944 |
| 256 | 0.989 | 130 | 0.943 |
| 99 | 0.987 | 233 | 0.941 |
| 178 | 0.982 | 174 | 0.936 |
| 46 | 0.982 | 173 | 0.933 |
| 112 | 0.977 | 246 | 0.932 |
| 15 | 0.975 | 63 | 0.931 |
| 64 | 0.973 | 223 | 0.930 |
| 243 | 0.969 | 170 | 0.929 |
| 119 | 0.969 | 159 | 0.929 |
| 6 | 0.966 | 39 | 0.928 |
| 172 | 0.966 | 101 | 0.926 |
| 104 | 0.965 | 65 | 0.926 |
| 145 | 0.963 | | |
| 平均指数值 | 0.857 | | |

表7 基于不同评价方法筛选优良无性系的现实增益

Table 7 The realistic gain of good clones was screened based on different evaluation methods

| 性状 | 现实增益/% |
|------|--------|
| 树高 | 10.44 |
| 胸径 | 12.96 |
| 叶长 | 4.71 |
| 叶宽 | 7.41 |
| 叶片质量 | 8.46 |
| 比叶质量 | 1.42 |

遗传和变异是林木育种研究的主要内容,是林木遗传改良的基础^[21]。本研究中,252个黄心梓木无性系间树高、胸径、叶长、叶宽、叶长宽比、叶面积、叶片质量、皮孔数量均达极显著差异,表明不同无性系间存在明显差异,可从中进行无性系初选,这与对灰楸^[22]、滇楸^[23]的研究结果一致,均具有较好的遗传改良基础,为选择优良种质提供可行性。

不同无性系间差异主要由遗传和环境因素引起,重复力大小可以在一定程度上解释无性系间存在的变异是由遗传与固定环境因素引起,还是由随

机环境因素引起。某一性状重复力越大,说明该性状受遗传与固定环境因素控制较强,受随机环境影响较弱^[24]。高变异、高重复力更有利于无性系的选择^[25]。本试验中,树高、胸径、叶长宽比和皮孔数量等性状重复力均大于0.5,说明性状受遗传控制较强,能稳定遗传,有利于优良无性系选择。叶长宽比的表型变异系数为7.660%,重复力为0.578,说明该性状比较稳定,受遗传控制较强,这与凌娟娟等^[22]的研究结果类似。负慧玲等^[26]研究发现皮孔性状的变异系数超过20%,重复力高达0.7,本试验中皮孔数量的重复力为0.791,表型变异系数为40.818%,与前人研究结果一致,表明皮孔数量的变异系数和重复力均较大,受遗传因素影响较大,对初步选择优良无性系有一定的帮助。

相关性分析可以表现出各性状间的相关程度。相关分析结果表明,叶长与叶宽之间呈极显著正相关水平,这与欧建德^[27]对南方红豆杉研究结果一致,说明在叶片生长过程中,叶片长度与宽度增长速度相对一致,形状相对稳定。叶长、叶宽与叶片质量呈极显著正相关关系,这与金方伦等^[28]对桑树的研究结果一致,表明叶长和叶宽越大,叶片内部吸收的营养成分也越多,叶片质量也越大。尽管相关性分析结果显示叶片性状与生长性状相关程度较弱,但也表现出一些规律:如皮孔数量与生长性状呈显著负相关,说明皮孔数量越多,越不利于其生长,类似的结果也出现在滇楸^[23]、楸树^[26]、小黑杨^[25]中。郭从俭等^[29]研究表明,叶片大小与树高、胸径存在一定相关性,叶片越大,胸径越大,生长越快。本试验中叶长与胸径达到显著正相关,与前人研究结果一致,说明叶片越大,光合作用面积大,净光合速率高,生长越快,以叶片性状作为辅助选择指标,对于优良无性系初选具有重要意义。

从多性状综合评价法、隶属函数法和指数选择法3种选择方法的初选结果来看,3种方法各有利弊。多性状综合评价法将各无性系的性状等权处理,可以直观简便地选出各性状最优的无性系,但若无性系仅个别性状较优良则可能无法被筛选出^[30]。隶属函数法对多个性状进行相对评价,并综合这些评价值从而得出各无性系的整体评价值^[31]。指数选择法将各性状赋予权重,是评价各性状兼优的无性系的一种较为理想的方法,更加客观综合^[32]。任建中等^[32]在选择杨树优良无性系时,同时应用选择指数法和多性状综合评价法,选择出生长性状和木材性质均优良的无性系。陆钊华等^[30]在进行尾叶桉优良无性系选择时认为选择指数法从理论上讲是更加科学的。本研究基于3种不同的选择方法,共

同筛选出的优良无性系,更具有代表性,可以作为楸树遗传改良的首选材料。

参考文献:

- [1] 张新叶,李振芳,张亚东,等.湖北引种滇楸优良无性系早期选择[J].中国农学通报,2016,32(10):24-29.
ZHANG X Y,LI Z F,ZHANG Y D,*et al.* Early stage selection of fine clones of *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* in Hubei Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(10):24-29. (in Chinese)
- [2] 姚淑均,张守攻,王军辉,等.滇楸花部性状的表型多样性研究[J].中南林业科技大学学报,2013,33(10):19-24.
YAO S J,ZHANG S G,WANG J H,*et al.* Study on phenotypic diversity of flower characters in *Catalpa fargesii* f. *duclouxii*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2013,33(10):19-24. (in Chinese)
- [3] 贾春红,张利,魏晓,等.川西地区毛叶木姜子的表型多样性研究[J].林业科学研究,2015,28(6):844-850.
JIA C H,ZHANG L,WEI X,*et al.* Phenotypic polymorphism of *Litsea mollis* Hemsl in West Sichuan Province[J]. Forest Research,2015,28(6):844-850. (in Chinese)
- [4] 黄雅茹,马迎宾,苏智,等.乌兰布和沙漠绿洲北抗杨家系6个无性系叶片性状研究[J].西北林学院学报,2019,34(3):86-90,103.
HUANG Y R,MA Y B,SU Z,*et al.* Leaf traits of six clones of *Populus deltoides* cl. Beikang family in Ulanbu desert oasis [J]. Journal of Northeast Forestry University,2019,34(3):86-90,103. (in Chinese)
- [5] CHECHOWITZ N,CHAPPELL D M,GUTTMAN S I,*et al.* Morphological,electrophoretic, and ecological analysis *Quercus macrocarpa* populations in the Black Hills of South Dakota and Wyoming[J]. Canadian Journal of Botany,1990,68(10):2185-2194.
- [6] WRIGHT I J,WESTOBY M. Understanding seedling growth relationships through specific leaf area and leaf nitrogen concentration:generalisations across growth forms and growth irradiance[J]. Oecologia,2001,127(1):21-29.
- [7] 张宋智,王军辉,负慧玲,等.幼龄楸树生长、生理和形态性状的遗传变异[J].东北林业大学学报,2011,39(10):4-8.
ZHANG S Z,WANG J H,YUN H L,*et al.* Genetic variation in growth, physiological and morphological traits of *Catalpa bungei*[J]. Journal of Northeast Forestry University,2011,39(10):4-8. (in Chinese)
- [8] 韩东花,杨桂娟,肖遥,等.楸树无性系早期生长变异和优选[J].林业科学研究,2019,32(4):96-104.
HAN D H,YANG G J,XIAO Y,*et al.* Study on early growth variation of *Catalpa bungei* clones and optimization[J]. Forest Research,2019,32(4):96-104. (in Chinese)
- [9] 赵曦阳,王军辉,张金凤,等.楸树无性系叶绿素荧光及生长特性变异研究[J].北京林业大学学报,2012,34(3):41-47.
ZHAO X Y,WANG J H,ZHANG J F,*et al.* Variation analysis on chlorophyll fluorescence and growth traits of *Catalpa bungei* clones[J]. Journal of Beijing Forestry University,2012 34(3):41-47. (in Chinese)

- [10] 负慧玲,王军辉,马建伟,等.楸树叶片营养生物学及基因型间的遗传变异[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(4):51-56.
- YUN H L,WANG J H,MA J W,*et al.* Genetic variation and leaf nutritional biology of *Catalpa bungei*[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2012, 36(4):51-56. (in Chinese)
- [11] 于永明,王军辉,马建伟,等.楸树无性系离体培养特性差异研究[J].西北植物学报,2012,32(1):199-204.
- YU Y M,WANG J H,MA J W,*et al.* Study on characteristic differences of *Catalpa bungei* clones *in vitro* culture[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(1):199-204. (in Chinese)
- [12] 李世娟,诸叶平,张红英,等.整株干物质量分配指数模型模拟冬小麦各器官形态参数[J].农业工程学报,2019,35(9):155-164.
- LI S J,ZHU Y P,ZHANG H Y,*et al.* Simulating winter wheat geometrical parameters of each organ using whole plant dry matter weight distribution index model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9):155-164. (in Chinese)
- [13] DAVID K K,LI Y X,ZHANG D W,*et al.* Clonal variations in cone, seed and nut traits in a *Pinus koraiensis* seed orchard in northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 32(1):171-179.
- [14] WANG F,ZHANG Q, TIAN Y,*et al.* Comprehensive assessment of growth traits and wood properties in half-sib *Pinus koraiensis* families[J]. Euphytica, 2018, 214(11):15.
- [15] ZHANG H,ZHOU X Y,GU W,*et al.* Genetic stability of *Larix olgensis* provenances planted in different sites in Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 485:118988.
- [16] PAN Y Y,JIANG L P,XU G Y,*et al.* Evaluation and selection analyses of 60 *Larix kaempferi* clones in four provenances based on growth traits and wood properties[J]. Tree Genetics & Genomes, 2020, 16(2):27.
- [17] PAN Y Y,LI S C,WANG C L,*et al.* Early evaluation of growth traits of *Larix kaempferi* clones[J]. Journal of Forestry Research, 2018, 29(4):1031-1039.
- [18] 李斌,刘立强,罗淑萍,等.扁桃花芽的抗寒性测定与综合评价[J].经济林研究,2012,30(3):16-21.
- LI B,LIU L Q,LUO S P,*et al.* Determination and comprehensive evaluation on cold resistance of flower bud in almond[J]. Non-wood Forest Research, 2012, 30(3):16-21. (in Chinese)
- [19] 章世恭.优树选择的指数法[J].林业科技通讯,1980(4):1-3.
- [20] 焦云德,熊贵来,赵鲲.楸树优良家系苗期选择研究[J].河南林业科技,1997,17(2):20-23.
- [21] WESTON F M,PETER S S,GABRIEL H. Genetic parameter estimates for growth and form traits in common ash (*Fraxinus excelsior* L.) in a breeding seedling orchard at Little Wittonham in England[J]. New Forests, 2008, 36(3):225-238.
- [22] 凌娟娟,肖遥,杨桂娟,等.灰楸无性系生长和形质性状变异与选择[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. (in Chinese)
- [23] 肖遥,麻文俊,易飞,等.滇楸种质生长性状遗传变异及表型性状遗传多样性分析[J].植物研究,2018,38(6):843-851.
- XIAO Y,MA W J,YI F,*et al.* Genetic variation of growth traits and genetic diversity of phenotypic traits in *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* germplasm[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(6):843-851. (in Chinese)
- [24] 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.
- LI S W,JIANG Y Z,WANG G Y,*et al.* Genetic analysis and comprehensive evaluation for multi-trait in Section *Aigeiros* clones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(3):36-40. (in Chinese)
- [25] 刘殿昆,刘梦然,李志新,等.转 *TaLEA* 基因小黑杨无性系生长性状变异研究[J].植物研究,2015,35(4):540-546.
- LIU D K,LIU M R,LI Z X,*et al.* Variation analysis of growth traits of transgenic *Populus simonii* × *P. nigra* clones carrying *TaLEA* gene[J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(4):540-546. (in Chinese)
- [26] 负慧玲,王军辉,张宋智,等.楸树无性系表型识别特征与遗传变异[J].东北林业大学学报,2012,40(2):34-38,46.
- YUN H L,WANG J H,ZHANG S Z,*et al.* Genetic variation and identification of phenotypic characteristics of clones of *Catalpa bungei*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(2):34-38,46. (in Chinese)
- [27] 欧建德.南方红豆杉叶片性状的遗传变异及相关性研究[J].安徽农学通报,2012,18(9):30-31,86.
- OU J D. Correlation between genetic variations of leaves characters in *Taxus chinensis* var. *mairei*[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2012, 18(9):30-31,86. (in Chinese)
- [28] 金方伦,王贤玉,韩世玉,等.桑树叶片大小与质量的相关性[J].湖北农业科学,2020,59(1):74-77.
- JIN F L,WANG X Y,HAN S Y,*et al.* Regression analysis of *Morus alba* leaf size and its mass[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(1):74-77. (in Chinese)
- [29] 郭从俭,张新胜,张万钦,等.楸树叶面积与生长相关研究[J].河南林业科技,1994(3):6-10.
- [30] 陆钊华,徐建民,卢国桓,等.尾叶桉无性系多性状综合选择方法的研究[J].林业科技开发,2009,23(4):24-29.
- LU Z H,XU J M,LU G H,*et al.* Comparision of multi-characters selection methods in *Eucalyptus urophylla* clonal testing[J]. Journal of Forestry Engineering, 2009, 23(4):24-29. (in Chinese)
- [31] 刘滨,彭励,郑丽萍,等.宁夏10种观赏灌木叶片解剖结构及其抗旱性综合评价[J].西北植物学报,2013,33(9):1808-1816.
- LIU B,PENG L,ZHENG L P,*et al.* Drought resistance study of 10 major ornamental shrub in Ningxia[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(9):1808-1816. (in Chinese)
- [32] 任建中,刘长青,汪清锐,等.杨树纸浆材优良无性系选择方法的研究[J].北京林业大学学报,2003,25(4):25-29.
- REN J Z,LIU C Q,WANG Q R,*et al.* Methods to select superior clones of poplar pulpwood[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(4):25-29. (in Chinese)