

灰楸无性系生长和形质性状变异与选择

凌娟娟¹, 肖 遥¹, 杨桂娟¹, 马建伟²,
赵秋玲², 贞慧玲², 王军辉¹, 麻文俊^{1*}

(1. 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, 国家林木种质资源平台, 北京 100091; 2. 甘肃省小陇山林业实验局林业科学研究所, 甘肃 天水 741022)

摘要: [目的] 本研究考察了灰楸无性系生长(树高、胸径、单株材积)和形质(分枝度、分枝角、冠幅、树皮厚度、尖削度)性状, 为灰楸优质用材良种选育和定向培育提供理论依据。 [方法] 以5年生灰楸试验林33个无性系为材料进行多个性状的遗传变异分析、方差分析、重复力估算。利用主成分分析和隶属函数法综合选择优良无性系。 [结果] 灰楸树高、胸径、单株材积在无性系间差异显著或极显著, 其重复力为0.456~0.592。灰楸形质性状中, 平均尖削度 P_1 和 P_3 在无性系间存在显著或极显著差异, 且具有中等大小的重复力(0.479和0.415)。遗传相关分析中, 单株材积与冠幅、树皮厚度、平均尖削度 P_1 等存在显著或极显著较弱的正相关, 相关系数为0.178~0.263。针对不同育种目标, 利用主成分评价和隶属函数法最终选择出特定的优良无性系。 [结论] 5年生灰楸无性系间各性状存在丰富的遗传变异, 且生长性状受到中等的遗传控制, 有较好的遗传改良潜力。灰楸无性系生长性状与形质性状具有独立性, 可进行单独定向选择。灰楸无性系H3-1-9、H3-1-18、H3-1-10、H3-1-3、H3-2-16和H3-1-17可作为速生丰产良种; 无性系H3-1-16、H3-1-19、H3-2-12和H3-2-9可作为优质用材的无性系; 无性系H3-1-17、H3-1-10、H3-1-18和H3-2-16可考虑作为生长和形质综合改良的灰楸无性系在当地推广。

关键词: 灰楸; 无性系; 变异; 形质性状; 综合评价

中图分类号: S718.46

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)05-0149-08

楸树, 泛指梓属(*Catalpa* Scop.) 乔木, 包括楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey.)、灰楸(*C. fargesii* Bur.)、滇楸(*C. fargesii* Bur. f. *duclouxii* (Dode) Gilmour)及其变种和类型。楸树自然分布于中国华北、西北和西南等地^[1]。其材质优良, 坚韧致密, 具有不翘不裂、耐腐、耐湿、耐磨和不易虫蛀等优点, 属我国重要的珍贵用材树种^[2]。楸树良种评价和选择工作已开展了20余年, 早期的以速生为目的的楸树遗传改良取得了一定的成效^[3-4]。如今, 为促进楸树新品种和良种选育, 其多育种目标改良工作已经开展, 如高光效^[5-6]和高密度材楸树良种选育^[7]。形质改良是材性改良的重要组成部分, 在珍贵用材中的地位不亚于生长指标^[8]。前人研究表明, 尖削度、树皮厚度、分枝角、冠幅等形质性状与木材的出材率密切相关^[9-13]。赵阳等^[14]采用5年生24个泡

桐无性系的4个生长性状(胸径、主干高、总材积、接干高/苗干高)和2个干形性状(主干削度、形数)建立的多性状指数方程选择出了适宜在南方丘陵区栽培的4个优良无性系。孙晓梅等^[15]以12年生落叶松自由授粉家系子代测定林为对象, 对生长和形质性状的遗传变异、性状间的相关关系进行研究, 并利用选择指数方法对形质性状进行了综合评价, 选择出了形质性状优良的家系。由此可见, 以形质为目标的林木形质性状改良受到育种研究人员的重视; 然而, 以形质为主的楸树遗传改良并未开展。

近几十年, 随着人民生活水平和文化素质的提高, 社会对珍贵用材的需求越来越旺盛, 对木材品质要求越来越高。形质改良是提高木材品质的一个重要环节, 研究表明, 树木的形质性状受中度至较强的遗传控制^[16], 这意味着形质的遗传改良具有较高的

收稿日期: 2019-03-04 修回日期: 2019-07-09

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“楸树优质高抗良种选育技术研究”(CAF-YBB2017ZA001-8)

* 通讯作者: 麻文俊, 博士, 助理研究员, 从事楸树等珍贵树种遗传改良和高效培育技术研究. E-mail: mwjlx@sina.com

可行性。然而,不同于生长性状,形质性状的调查更复杂,这方面的育种工作仍处于薄弱阶段。鉴于此,本研究测定了5年生灰楸试验林33个无性系的生长和形质性状,分析了各性状的遗传变异、表型相关和遗传相关,针对不同育种目的利用主成分分析和隶属函数法对灰楸无性系进行综合评定,为灰楸定向培育提供选择策略。

1 试验地概况

参试的灰楸无性系均种植于甘肃省小陇山林业科学研究所苗圃(105°54' E, 34°28' N),气候类型属半干旱半湿润气候过渡带,年降水量600~800 mm,年平均气温10.7℃,≥10℃积温3359℃,极端高温39℃,极端低温-19.2℃,无霜期约190 d。

该苗圃地处西秦岭北坡,渭河支流川台区,属典型的黄土高原地貌特征,海拔1160 m;土壤为黄绵土,其主要性质为:pH值9.07,有机质8.9 g·kg⁻¹,全N 0.93 g·kg⁻¹,速效钾86.77 mg·kg⁻¹,速效磷5.99 mg·kg⁻¹,有效铁1.683 mg·kg⁻¹,有效锌32.665 mg·kg⁻¹,有效锰0.808 mg·kg⁻¹。

2 试验材料和研究方法

2.1 试验材料

灰楸试验林为2008年3月初营造,以来自2个优良家系的33个无性系为参试材料,以2个当地推广的楸树良种为对照(表1),造林苗木为1年生嫁接苗,由小陇山林业科学研究所提供。本试验林营建采用完全随机区组设计,4次重复,每小区4株,株行距2 m×2 m。

表1 试验材料

Table 1 Experiment material

来源 Source	编号 Number
家系 H3-1 Family H3-1	H3-1-2、H3-1-3、H3-1-5、H3-1-7、H3-1-8、 H3-1-9、H3-1-10、H3-1-15、H3-1-16、H3-1- 17、H3-1-18、H3-1-19、H3-1-20、H3-1-21
参试无性系 Test clone	H3-2-2、H3-2-3、H3-2-4、H3-2-6、H3-2-8、 H3-2-9、H3-2-10、H3-2-11、H3-2-12、H3-2- 13、H3-2-15、H3-2-16、H3-2-17、H3-2-19、 H3-2-20、H3-2-21、H3-2-22、H3-2-23、H3- 2-24
对照无性系 Control clone	灰楸 H3、楸树 9-1

2.2 性状调查方法

于2012年年末,进行无性系性状调查。测定各

小区中每个单株东西和南北方向的冠幅(单株冠幅以2个方向的平均值代表),伐倒后测定树高(H)、胸径(DBH)。利用国标GB4814-84的方法计算单株材积。分枝度按照等级标准赋值,具体参见文献[17]。测定植株最粗侧枝的分枝角度作为单株分枝角。从基部开始,每1 m测定直径,并用生长锥从每个测定直径的部位南向取树皮,用游标卡尺测定树皮厚度。依据李善文等^[18]的方法计算平均尖削度。

$$P1 = \frac{D_0 - D_2}{2}; P2 = \frac{D_0 - D_4}{4}; P3 = \frac{D_0 - D_{\text{小头}}}{H}$$

式中:P1、P2、P3分别代表平均尖削度1、2、3;D₀、D₂、D₄分别代表0、2、4 m树高的直径;D_{小头}代表的是最高处测得的直径H代表树高。

2.3 数据统计分析方法

使用Excel2007进行数据分析处理和图表制作。以各性状小区均值为基础,采用SPSS 22.0对33个参试无性系的树高、胸径、单株材积等10个性状进行方差分析,以检验其是否具有显著差异;其中,遗传参数估算,包括遗传相关、表型相关均使用R语言中的ASReml程序包完成;同时,用R语言中的psych程序包对33个参试无性系进行主成分分析。详细代码及分析步骤见参考文献[19]。为满足方差分析的独立、正态、方差齐性等条件,对分枝度性状的直径平方根转换后再进行统计分析。

方差分析线性模型为: $y_{ij} = \mu + C_i + B_j + e_{ij}$

式中: y_{ij} 为第j个区组第i个无性系的观测值, μ 为群体平均效应, C_i 为第i个无性系效应, B_j 为第j个区组效应, e_{ij} 为环境误差。

文中具体的参数计算公式如下^[20]:

无性系重复力采用公式: $R = 1 - 1/F$

式中:F为方差分析的F值;

变异系数: $CV = S/\bar{X} \times 100\%$

式中:CV为变异系数;S为各性状的标准差; \bar{X} 各性状均值。

表型相关分析采用以下公式:

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

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。

遗传相关分析采用以下公式:

$$r_g = \frac{\sigma_{gxgy}}{\sqrt{\sigma_{gx}^2 \sigma_{gy}^2}}$$

式中: r_g 为遗传相关系数; σ_{gxgy} 为性状 x 与性状 y 的遗传协方差; σ_{gx}^2 为性状 x 的遗传方差; σ_{gy}^2 为性状 y 的遗传方差。

用隶属函数法综合各项指标进行评价^[21], 隶属函数值计算公式为:

$$T_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}}$$

反隶属函数值计算公式为:

$$T_{ij} = 1 - \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}}$$

式中: i 表示某个无性系; j 表示某项指标; T_{ij} 表示 i 无性系 j 指标的隶属函数值; X_{ij} 表示 i 无性系 j 指标的测定值; X_{jmin} 表示所有无性系 j 指标的最小值; X_{jmax} 表示所有无性系 j 指标的最大值。假如某项指标与材积呈负相关,则 1 减去正相关的隶属函数值就是它的隶属函数值。某一个体某一指标的隶属函数值或反隶属函数值越大,表明该指标越靠近最大值。

3 结果与分析

3.1 灰楸无性系生长性状和形质性状的变异分析

参试的 33 个无性系树高、胸径、单株材积等 10 个性状调查情况(表 2)表明:树高平均 6.69 m;胸径平均 7.59 cm,最小值仅为 4.13 cm,最大值为 9.44 cm;单株材积的表型变异系数最大,达 34.60%,平均单株材积为 0.06 m³。形质性状的表型变异系数均大于 15%,其中,平均尖削度 $P1$ 的变异系数为

32.67%。说明 5 年生灰楸无性系各性状间存在丰富的遗传变异,在无性系水平上具有一定的遗传改良潜力。

表 2 参试无性系各性状测定值

Table 2 Measured value of test clone traits

性状 Traits	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	表型变异系数/% Phenotype variable coefficient	变幅 Range of Variation
树高 H/m	6.69	0.90	13.45	3.8 ~ 8.71
胸径 DBH/cm	7.59	1.10	14.47	4.13 ~ 9.44
单株材积 V/m^3	0.06	0.02	34.60	0.01 ~ 0.11
冠幅 C/m	2.23	0.42	18.83	1.18 ~ 4.78
分枝度 BD	1.80	0.43	23.75	1.41 ~ 5.75
分枝角 $BA/(^\circ)$	41.51	10.31	24.84	20 ~ 65
树皮厚度 BT/cm	4.25	0.67	15.76	2.57 ~ 7.83
平均尖削度 $P1$	1.69	0.55	32.67	0.63 ~ 3.57
平均尖削度 $P2$	1.40	0.34	24.27	0.24 ~ 2.37
平均尖削度 $P3$	1.50	0.27	18.08	0.23 ~ 2.33

3.2 灰楸无性系各性状方差分析及重复力

表 3 表明:灰楸树高和单株材积在无性系间差异极显著,胸径在无性系间差异显著。树高和单株材积具有中偏上的重复力,达 0.592,而胸径具有中等重复力,达 0.456。这表明灰楸无性系生长性状遗传变异显著,但遗传控制程度适中。形质性状中,仅平均尖削度 $P1$ 和 $P3$ 在无性系间呈显著或极显著差异,其均具有中等大小的重复力,分别为 0.479 和 0.415。冠幅、分枝角、分枝度及树皮厚度在无性系间差异均不显著,且无性系重复力都较小。这意味着灰楸无性系形质性状变异较小,且其遗传控制程度适中,环境因素对灰楸形质性状影响大于生长性状。

表 3 灰楸无性系各性状方差分析及重复力估算

Table 3 Analysis of variance and estimation of repeatability of *Catalpa fargesii* clone traits

变异来源 Variation of source	无性系 Clone				V 区组 Block			误差 Error	
	自由度 df	均方 MS	F 值 F value	重复力 Repeatability	自由度 df	均方 MS	F 值 F value	自由度 df	均方 MS
H	32	1.441	2.451 **	0.592	3	0.832	1.416	85	0.588
DBH	32	1.790	1.837 *	0.456	3	2.085	2.140	85	0.974
V	32	0.001	2.452 **	0.592	3	0.000	1.337	85	0.000
C	32	0.184	1.031	0.030	3	0.038	0.213	89	0.178
BD	32	0.182	1.025	0.024	3	0.274	1.538	65	0.178
BA	32	132.826	1.531	0.347	3	363.068	4.185 **	75	86.761
BT	32	0.494	1.147	0.128	3	0.226	0.524	79	0.431
$P1$	32	0.460	1.919 **	0.479	3	0.555	2.318	85	0.240
$P2$	32	0.128	1.148	0.129	3	0.043	0.381	84	0.112
$P3$	32	0.103	1.708 *	0.415	3	0.080	1.326	85	0.060

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

Notes: ** represents $P < 0.01$, the difference is extremely significant, and * represents $P < 0.05$, the difference is significant. The same below.

3.3 灰楸无性系各性状的相关分析

相关分析结果(表4)表明:灰楸树高、胸径和单株材积的表型相关和遗传相关两两之间均呈极显著正相关。分枝角与其他性状间的遗传和表型相关不

显著,说明分枝角性状可能独立于其它性状进行遗传。平均尖削度 $P1$ 与树高、胸径、单株材积的表型和遗传相关均呈极显著正相关。平均尖削度 $P3$ 与胸径的表型和遗传相关均呈显著正相关。

表4 灰楸无性系各性状表型相关系数和遗传相关系数

Table 4 Correlation coefficients and the genetic correlation coefficients of *Catalpa fargesii* clone traits

	<i>H</i>	<i>DBH</i>	<i>V</i>	<i>C</i>	<i>BD</i>	<i>BA</i>	<i>BT</i>	$P1$	$P2$	$P3$
<i>H</i>	1	0.786**	0.944**	0.111	0.097	0.087	0.321**	0.203*	-0.259**	-0.128
<i>DBH</i>	0.901**	1	0.917**	0.165*	0.037	-0.035	0.220**	0.309**	0.052	0.212*
<i>V</i>	0.988**	0.943**	1	0.178*	0.046	0.002	0.263**	0.259**	-0.125	0.025
<i>C</i>	-0.039	-0.123	0.245	1	-0.032	0.291	-0.025	-0.008	0.001	0.129
<i>BD</i>	-0.129	-0.255	-0.235	-0.698	1	0.394	0.216*	0.128	0.076	0.062
<i>BA</i>	-0.002	0.003	-0.014	0.137	0.064	1	-0.395	-0.071	-0.360	0.200
<i>BT</i>	0.863*	0.847	0.793	0.615	0.825	0.075	1	-0.087	-0.200*	-0.126
$P1$	0.778**	0.777**	0.709**	-0.711	0.630	-0.085	0.809	1	0.580**	0.579**
$P2$	-0.053	0.772	0.035	-0.823	0.662	-0.054	0.713	0.863	1	0.700**
$P3$	0.118	0.611*	0.277	0.241	0.844	-0.015	0.993	0.771**	0.940**	1

注:右上角代表遗传相关系数,左下角代表表型相关系数。

Notes: The upper right corner represents the genetic correlation coefficient, and the lower left corner represents the phenotypic correlation coefficient.

3.4 灰楸无性系各性状主成分分析

本研究通过对楸树各无性系生长性状和形质性状的成分分析,将原来的10个性状降维成相互独立的少数几个能充分反映总体信息的因子,以累积贡献率达80%为阈值选择出前4个主成分 $Y1$ 、 $Y2$ 、 $Y3$ 、 $Y4$ (表5)。

表5表明: $Y1$ 主成分具有最大的贡献率35.38%,该主成分中,树高、胸径、单株材积均为负值,但绝对值占比最大,因此,当 $Y1$ 较小时,树高、胸径等生长量指标大。第2主成分 $Y2$ 贡献率为22.90%,其中,平均尖削度 $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 较大,表明第2主成分 $Y2$ 代表树木的尖削度, $Y2$ 越小,尖削度越小。第3主成分 $Y3$ 贡献率为13.67%,冠幅、分枝角这2个指标均为负值,但绝对值最大,表明 $Y3$ 越大,冠幅、分枝角越小。第4主成分 $Y4$ 贡献率为11.91%,分枝度值最大,表明 $Y4$ 越大,分枝度值越大,树干分叉越少。

3.5 灰楸优良无性系选择方法

3.5.1 主成分分析法评价结果 主成分分析结果表明: $Y1$ 主要体现的是生长性状, $Y2$ 、 $Y3$ 、 $Y4$ 主要体现的是形质指标。根据主成分所代表的生物学意义,同时在实际木材生产中, $Y2$ 与出材率具有一定的负相关^[22],在此构建参数 Y_z ($Y_z = Y3 + Y4 - Y2$)作为形质成分,再结合 $Y1$ (生长主成分)进行优良无性系的选择。分别选出 $Y1$ 和 Y_z 主成分值排名前40%的无性系。图1中类群A代表在生长方面占优势的无性系;类群B代表形质较优良的无性系;类

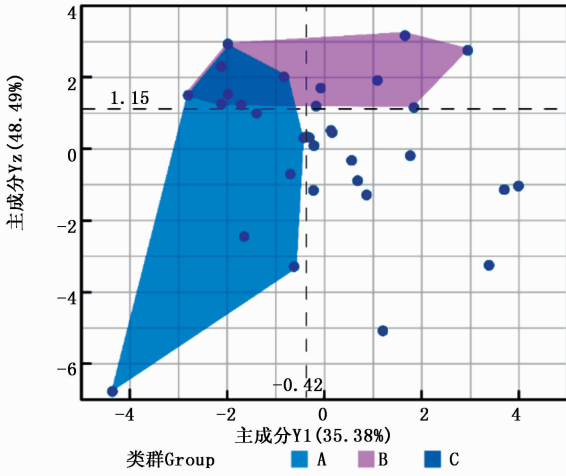
表5 灰楸无性系性状主成分分析

Table 5 Main component analysis of growth traits of *Catalpa fargesii* clones

主成分 Main component	$Y1$	$Y2$	$Y3$	$Y4$
<i>H</i>	-0.453	-0.295	0.124	
<i>DBH</i>	-0.492			-0.177
<i>V</i>	-0.480	-0.228		-0.152
<i>C</i>			-0.740	-0.166
<i>BD</i>	-0.144	0.161	0.236	0.745
<i>BA</i>	-0.109		-0.554	0.477
<i>BT</i>	-0.290	-0.217		0.324
$P1$	-0.369	0.373	0.143	
$P2$	-0.113	0.598		-0.138
$P3$	-0.226	0.527	-0.215	
特征根 Characteristic root	1.881	1.514	1.169	1.091
贡献率 Proportion of Variance/%	35.38	22.90	13.67	11.91
累计贡献率 Cumulative Proportion/%	35.38	58.27	71.94	83.87

群C所代表综合性状良好的无性系,不仅生长量大,而且形质较优良。

3.5.2 隶属函数法评价结果 应用隶属函数法对无性系进行综合评价,结果(表6)表明:33个灰楸无性系中,无性系H3-2-16的10个性状平均隶属函数值(0.667)最高,无性系H3-2-15的平均隶属函数值(0.342)最小。无性系H3-1-18生长(树高、胸径、单株材积)性状的平均隶属函数值最高,为0.945;其次是无性系H3-2-16和H3-1-10,无性系H3-2-15性状的平均隶属函数值(0.041)最小。无性系H3-1-19形质性状的平均隶属函数值最高(0.679),而生



注:虚线代表各成分40%的临界值
Notes: The dotted line represents the critical value of 40% of each component.

图1 灰楸无性系主成分散点图
Fig.1 Scatter plot of main component of *Catalpa fargesii* clones

长性状平均隶属函数值很低(0.119),综合性状平均隶属函数值排名中等(0.511)。无性系 H3-1-9 的形质性状平均隶属函数值最低(0.132),而生长性状平均隶属函数值排名第4(0.870),综合性状平均隶属函数值排名倒数第2(0.353)。

3.6 灰楸优良无性系选择

为选育生长量大的无性系,结合主成分分析和隶属函数法筛选出共有无性系 H3-1-9、H3-1-18、H3-1-10、H3-1-3、H3-2-16 和 H3-1-17。从表7可以看出:与对照灰楸 H3 相比,筛选出的无性系生长性状都有不同程度的提高,其中,单株材积的增益最大为80%,树高的增益为25.91%,胸径的增益为12.73%。与楸树9-1相比,改良程度较低,单株材积增益为28.57%,树高增益为17.16%。

为选育树干分叉少,分支角小,冠幅小,尖削度小的品种,以2种方法筛选出的共有无性系为 H3-1-16、H3-1-19、H3-2-12 和 H3-2-9。表8显示:与对照

表6 灰楸无性系不同性状隶属函数值及排序

Table 6 Membership function values of different trait of *Catalpa fargesii* clones

综合性状 Comprehensive trait			生长性状 Growth trait			形质性状 Trunk shape		
无性系 Clones	平均隶属函数值 Average membership function value	排序 Order	无性系 Clones	平均隶属函数值 Average membership function value	排序 Order	无性系 Clones	平均隶属函数值 Average membership function value	排序 Order
H3-2-16	0.667	1	H3-1-18	0.945	1	H3-1-19	0.679	1
H3-1-18	0.663	2	H3-2-16	0.905	2	H3-2-8	0.661	2
H3-1-17	0.637	3	H3-1-10	0.904	3	H3-2-9	0.635	3
H3-1-10	0.619	4	H3-1-9	0.870	4	H3-2-3	0.623	4
H3-1-7	0.609	5	H3-1-17	0.853	5	H3-1-16	0.616	5
H3-2-4	0.605	6	H3-1-3	0.729	6	H3-2-12	0.599	6
H3-1-20	0.592	7	H3-1-7	0.688	7	H3-2-4	0.576	7
H3-2-23	0.583	8	H3-2-24	0.675	8	H3-1-7	0.576	8
H3-2-9	0.573	9	H3-2-4	0.672	9	H3-1-20	0.573	9
H3-1-15	0.554	10	H3-2-21	0.636	10	H3-2-16	0.565	10
H3-1-16	0.541	11	H3-1-20	0.635	11	H3-2-23	0.561	11
H3-2-20	0.533	12	H3-2-23	0.635	12	H3-1-15	0.554	12
H3-2-21	0.532	13	H3-2-22	0.623	13	H3-1-17	0.545	13
H3-2-22	0.528	14	H3-1-2	0.563	14	H3-1-18	0.542	14
H3-1-2	0.522	15	H3-1-15	0.554	15	H3-2-20	0.538	15
H3-2-6	0.520	16	H3-2-10	0.549	16	H3-2-6	0.508	16
H3-2-12	0.520	17	H3-1-8	0.548	17	H3-1-2	0.505	17
H3-1-19	0.511	18	H3-2-6	0.547	18	H3-2-13	0.501	18
H3-1-3	0.502	19	H3-2-20	0.521	19	H3-1-10	0.497	19
H3-2-10	0.495	20	H3-2-17	0.473	20	H3-1-21	0.495	20
H3-2-13	0.486	21	H3-1-21	0.459	21	H3-2-19	0.493	21
H3-1-21	0.484	22	H3-2-13	0.451	22	H3-2-21	0.488	22
H3-2-24	0.481	23	H3-2-2	0.444	23	H3-2-22	0.488	23
H3-1-8	0.480	24	H3-2-9	0.430	24	H3-2-17	0.483	24
H3-2-17	0.480	25	H3-1-5	0.386	25	H3-2-10	0.472	25
H3-2-8	0.476	26	H3-1-16	0.369	26	H3-2-15	0.471	26
H3-2-3	0.474	27	H3-2-12	0.335	27	H3-1-5	0.459	27
H3-1-5	0.437	28	H3-2-11	0.300	28	H3-1-8	0.451	28
H3-2-19	0.415	29	H3-2-19	0.232	29	H3-2-11	0.429	29
H3-2-11	0.390	30	H3-2-3	0.125	30	H3-1-3	0.404	30
H3-2-2	0.355	31	H3-1-19	0.119	31	H3-2-24	0.398	31
H3-1-9	0.353	32	H3-2-8	0.046	32	H3-2-2	0.317	32
H3-2-15	0.342	33	H3-2-15	0.041	33	H3-1-9	0.132	33

无性系相比,筛选出的无性系形质性状都有不同程度的改良,其中,尖削度性状改良效果最佳。

为选育兼具高生长和优良形质的无性系,以2种方法选出的共有无性系为 H3-1-17、H3-1-10、H3-1-18 和 H3-2-16(表9)。与对照灰楸 H3 相比,单株材积增益最大 77.74%,其次是尖削度都有不同程度的改良。与对照楸树 9-1 相比,尖削度改良得最佳,其次是单株材积(26.96%)。

4 讨论

遗传变异是选择的基础,充分了解林木的变异才能准确地评估改良的可靠性。本研究通过对5年

表7 生长改良的优良无性系特征描述

Table 7 Growth-improved optimal clone characteristics

无性系 Clone	H/m	DBH/cm	V/m ³
H3-1-9	7.22 ± 0.46	8.82 ± 0.31	0.09 ± 0.01
H3-1-18	7.64 ± 0.26	8.75 ± 0.66	0.09 ± 0.01
优选无性系 Optimal clone	H3-1-10 H3-1-3 H3-2-16 H3-1-17 均值 Mean	7.71 ± 0.41 7.36 ± 0.47 8.01 ± 1.19 7.54 ± 0.62 7.58	8.46 ± 0.47 7.97 ± 0.25 8.06 ± 1.18 8.39 ± 0.22 8.41 0.09
对照无性系 Control clone	灰楸 H3 增益 Gain/% 楸树 9-1 增益 Gain/%	6.02 ± 0.32 25.91 6.47 ± 0.43 17.16	7.46 ± 1.37 12.73 8.37 ± 0.22 0.48 0.05 ± 0.02 80.00 0.07 ± 0.01 28.57

表8 形质改良的优良无性系特征描述

Table 8 Shape-modified optimal clone characteristics

性状 Traits	优良无性系 Optimal clone					对照无性系 Control clone			
	H3-1-16	H3-1-19	H3-2-12	H3-2-9	均值 Mean	灰楸 H3	增益 Gain/%	楸树 9-1	增益 Gain/%
C/m	2.02 ± 0.24	1.83 ± 0.30	2.12 ± 0.34	2.25 ± 0.35	2.06	2.31 ± 0.26	-11.04	2.13 ± 0.49	-3.52
BD	1.91 ± 0.15	2.00 ± 0.00	1.65 ± 0.16	1.82 ± 0.15	1.85	1.73 ± 0.00	6.65	1.73 ± 0.00	6.65
BA/(°)	34.25 ± 5.68	40.67 ± 16.77	40.00 ± 14.72	49.33 ± 1.15	41.06	43.75 ± 7.50	-6.14	39.50 ± 9.33	3.96
BT/cm	4.36 ± 0.30	3.83 ± 0.25	4.08 ± 0.44	4.17 ± 0.32	4.11	4.00 ± 0.48	2.75	4.38 ± 0.35	-6.16
P1	1.57 ± 0.42	1.60 ± 0.54	1.49 ± 0.48	1.03 ± 0.39	1.42	2.76 ± 1.83	-48.46	2.35 ± 0.48	-39.47
P2	1.29 ± 0.24	1.20 ± 0.20	1.29 ± 0.13	0.98 ± 0.07	1.19	1.82 ± 0.31	-34.62	2.02 ± 0.30	-41.09
P3	1.50 ± 0.22	1.40 ± 0.15	1.31 ± 0.11	1.23 ± 0.20	1.36	1.58 ± 0.21	-13.92	1.87 ± 0.14	-27.27

表9 综合选育的优良无性系特征描述

Table 9 Comprehensive selection of optimal clone characteristics

性状 Traits	优良无性系 Optimal clone					对照无性系 Control clone			
	H3-1-17	H3-1-10	H3-1-18	H3-2-16	均值 Mean	灰楸 H3	增益 Gain/%	楸树 9-1	增益 Gain/%
H/m	7.54 ± 0.62	7.71 ± 0.41	7.64 ± 0.26	8.01 ± 1.19	7.73	6.02 ± 0.32	28.33	6.47 ± 0.43	19.41
DBH/cm	8.39 ± 0.22	8.46 ± 0.47	8.75 ± 0.66	8.06 ± 1.18	8.42	7.46 ± 1.37	12.82	8.37 ± 0.22	0.55
V/m ³	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.03	0.09	0.05 ± 0.02	77.74	0.07 ± 0.01	26.96
C/m	2.10 ± 0.36	2.51 ± 0.41	2.28 ± 0.14	2.28 ± 0.15	2.29	2.31 ± 0.26	-0.80	2.13 ± 0.49	7.59
BD	1.63 ± 0.18	1.80 ± 0.13	1.73 ± 0.00	1.80 ± 0.13	1.74	1.73 ± 0.00	0.52	1.73 ± 0.00	0.52
BA/(°)	35.75 ± 6.50	47.75 ± 15.71	28.75 ± 6.50	40.50 ± 8.23	38.19	43.75 ± 7.50	-12.71	39.50 ± 9.33	-3.32
BT/cm	4.45 ± 0.68	4.80 ± 0.58	4.62 ± 1.03	3.82 ± 0.89	4.42	4.00 ± 0.48	10.56	4.38 ± 0.35	0.97
P1	1.63 ± 0.72	1.29 ± 0.32	2.15 ± 0.97	2.03 ± 1.03	1.77	2.76 ± 1.83	-35.73	2.35 ± 0.48	-24.52
P2	1.41 ± 0.41	1.09 ± 0.31	1.25 ± 0.26	1.23 ± 0.24	1.25	1.82 ± 0.31	-31.54	2.02 ± 0.30	-38.32
P3	1.46 ± 0.30	1.40 ± 0.13	1.45 ± 0.14	1.34 ± 0.11	1.41	1.58 ± 0.21	-10.62	1.87 ± 0.14	-24.48

生33个灰楸无性系生长进行统计分析发现,树高和单株材积在无性系间差异极显著,胸径在无性系间差异显著,说明在无性系水平具有较大的遗传改良潜力。生长性状重复力估算结果表明,树高、胸径、单株材积受中等的遗传控制(0.456~0.592)。早期研究表明,5年生林木无性系间的生长性状存在显著差异^[23],且受到中偏上的遗传控制(0.53~0.78)^[24-25],证明了5年生无性系生长遗传改良具有可行性。

形质性状遗传改良是获得优良形质的主要途

径,而形质改良是林木改良的重要部分,优良的形质不仅可以保证林木的良好生长,而且还可以提高木材的材质和出材率^[12]。本研究的灰楸形质性状中,平均尖削度P1和P3无性系间存在显著或极显著的差异,且具有中等大小的重复力(0.479和0.415),同样具有一定的改良基础。遗传相关分析结果显示,单株材积与冠幅、树皮厚度均存在显著或极显著较弱的正相关,相关系数分别为0.178、0.263,说明生长性状与形质性状具有独立性,可进行单独定向选择^[26-27]。

生长性状和形质性状的平均隶属函数值排名结果表明,无性系在这两方面各有侧重,形质性状平均隶属函数值高的无性系,生长性状平均隶属函数值不一定高,如无性系 H3-1-19,因此,可以根据育种目的选择出不同的育种群体。相关分析和评价结果说明,若对灰楸的形质性状进行选择改良,对生长性状的影响极小。然而,这与前人研究结果不一致,如日本落叶松的冠幅、皮厚与生长性状之间存在着中等程度的正相关^[15];泡桐的削度与胸径、主干高、接干高/苗干高的遗传正相关关系均达极显著,如果过分强调泡桐生长性状的改良,则有导致干形性状下降的趋势^[14]。

在林木育种过程中,没有任何一个良种能适用于一切用途。林木生长性状的优良与否是保证木材产量的关键因素。另外,对原木加工来说,更需要林木干形通直、圆满、大径级及无节疤等形质性状优良^[28]。鉴于此,本研究良种选育了以生长性状为主,形质为辅;以形质为主,生长为辅及生长和形质兼具的多个育种方向的不同类型无性系。

5 结论

5年生灰楸无性系间各个性状存在丰富的遗传变异,且生长性状受到中等的遗传控制,有较好的遗传改良潜力。灰楸无性系生长性状与形质性状具有独立性,可进行单独定向选择。灰楸无性系 H3-1-9、H3-1-18、H3-1-10、H3-1-3、H3-2-16 和 H3-1-17 可作为速生丰产良种;H3-1-16、H3-1-19、H3-2-12 和 H3-2-9 可作为优质用材的无性系;无性系 H3-1-17、H3-1-10、H3-1-18 和 H3-2-16 可考虑作为生长和形质综合改良的灰楸无性系在当地推广。

参考文献:

- [1] 潘庆凯,康平生,郭明. 楸树[M]. 北京:中国林业出版社,1991:1-4.
- [2] 赵秋玲,马建伟,王军辉,等. 灰楸不同流域种质变异与多样性研究[J]. 植物遗传资源学报,2012,13(5):803-809.
- [3] 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.
- [4] 翟文继,麻文俊,王秋霞,等. 楸树苗期优良家系及单株的配合选择[J]. 西北林学院学报,2012,27(3):68-71.
- [5] 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.
- [6] 张帅,谯四红,荣新军,等. 15个楸树无性系间表型性状和光合性状分析[J]. 安徽林业科技,2015(4):15-18.
- [7] 马建伟,王军辉,宋璐,等. 楸树杂种无性系幼龄期材性遗传变异[J]. 东北林业大学学报,2014,42(10):11-15.
- [8] Zobel B J, Kellison R C. The rate of growth syndrome[J]. *Silvae Genetica*, 1978, 27(3/4):123-124.
- [9] 陈森霖,尹伟伦,刘晓东,等. 修枝对欧美107杨木材生长量的短期影响[J]. 林业科学,2008,44(7):130-135.
- [10] 何贵平,陈益泰,关志山,等. 杉木无性系生长及分枝习性的遗传变异[J]. 林业科学研究,1997,10(5):556-559.
- [11] 郑海水,陈玉培,曾杰,等. 不同种源西南桦在云南景东的生长差异[J]. 林业科学研究,2005,18(6):657-661.
- [12] 管兰华,潘惠新,黄敏仁,等. 美洲黑杨×欧美杨F1无性系遗传变异[J]. 浙江农林大学学报,2004,21(4):376-381.
- [13] Guidi W, Piccioni E, Ginanni M, et al. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy[J]. *Biomass & Bioenergy*, 2008, 32(6):518-524.
- [14] 赵阳,乔杰,王保平,等. 南方低山丘陵区泡桐无性系生长和干形综合选择[J]. 北京林业大学学报,2017,39(9):32-40.
- [15] 孙晓梅,张守攻,王卫东,等. 日本落叶松自由授粉家系形质性状遗传变异的研究[J]. 北京林业大学学报,2004,26(3):41-45.
- [16] 解懿妮,莫晓勇,彭仕尧,等. 粤西21个桉树无性系早期性状遗传变异分析和无性系综合选择[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(3):77-84.
- [17] 黄德龙. 柳桉家系适应性试验与遗传变异分析[J]. 山地农业生物学报,2008,27(3):207-212.
- [18] 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.
- [19] 林元震,张卫华,郭海. R与ASReml-R统计学[M]. 北京:中国林业出版社,2017.
- [20] 续九如. 林木数量遗传学[M]. 北京:中国林业出版社,2006.
- [21] 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.
- [22] 孙锋,周永东,贺志强,等. 无卡轴旋切桉木单板出材率的研究[J]. 木材加工机械,2012,23(4):36-39.
- [23] 张勇,仲崇禄,陈羽,等. 海南5年生木麻黄优良无性系的选择与评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(5):25-30.
- [24] 陈建华,纪程灵,吴际友,等. 台湾桉木无性系的生长性状比较[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(4):7-9.
- [25] 冯延芝,乔杰,王保平,等. 南方低山丘陵区泡桐无性系主要性状的综合选择[J]. 林业科学研究,2017,30(6):969-976.
- [26] 肖遥,张蕊,楚秀丽,等. 24个产地南方红豆杉在两试验点的生长差异及其选择[J]. 林业科学研究,2017,30(2):342-348.
- [27] 张冬梅,鲍甫成,张志毅,等. 毛白杨无性系湿心材比例的遗传分析[J]. 林业科学,2005,41(4):140-144.
- [28] 徐宏远. 杨树工业用材林的定向培育[J]. 世界林业研究,1994,7(2):33-39.

Variation and Selection of Growth and Trunk Shape Traits of *Catalpa fargesii* Clones

LING Juan-juan¹, XIAO Yao¹, YANG Gui-juan¹, MA Jian-wei²,
ZHAO Qiu-ling², YUN Hui-ling², WANG Jun-hui¹, MA Wen-jun¹

- (1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Forestry, Chinese Academy Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;
2. Xiaolongshan Research Institute of Forest Science and Technology, Tianshui 741022, Gansu, China)

Abstract: [**Objective**] To study the breeding and directional cultivation of high-quality *Catalpa fargesii* clones by investigating the growth (tree height, DBH, individual volume) and trunk shape traits (branch degree, branch angle, crown, bark thickness, sharpness) of *C. fargesii* clones. [**Method**] The analysis of genetic variation, variance and repeatability of several traits were carried out using 33 five-year-old *C. fargesii* clones. The optimal clones were selected by principal component analysis and membership function method. [**Result**] The height, diameter, and individual volume of *C. fargesii* were significantly or extremely significantly different among the clones, and the repeatability was between 0.456 and 0.592. There were significant or extremely significant differences among clones with average sharpness P1 and P3 which had moderate repeatability (0.479 and 0.415). In the genetic correlation analysis, there was a significant or extremely significant positive weak correlation between individual volume and crown, bark thickness and average sharpness P1, the correlation was 0.178-0.263. According to different breeding objectives, the selection of clone was carried out by principal component evaluation and membership function method. The optimal clones selected by the two methods were combined. [**Conclusion**] There was abundant genetic variation among the traits of the 5-year-old *C. fargesii* clones, and the growth traits are controlled by the genetic control in the middle and have good genetic improvement potential. The growth traits of *C. fargesii* clones are independent of the trunk shape traits and can be individually oriented. 6 *C. fargesii* clones are selected as fast-growing and high-yield varieties; 4 clones are selected as high-quality timber clones; and 4 can be considered as the clones improved both in growth and trunk shape traits and is suitable to be extended locally.

Keywords: *Catalpa fargesii*; clone; variation; trunk shape trait; comprehensive evaluation

(责任编辑:徐玉秀)