

9年生枫香的遗传变异和优良家系单株选择

胡文杰¹, 庞宏东¹, 胡兴宜^{1*}, 王晓荣¹, 郑勇奇²

(1. 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要: 为选育枫香(*Liquidambar formosana*)优良家系, 对其 24 个种源 310 个家系的遗传变异进行分析, 采用多目标决策法选育用材林优良家系及单株。结果表明, 9 年生枫香胸径、树高、材积、第一枝下高、冠幅和树干通直度等性状在种源和家系间存在显著差异($P < 0.01$), 以云南富宁、广西凭祥和江西湖城 3 个种源的材积生长表现最佳。各性状的家系遗传力属于中等遗传控制, 为 0.24~0.44, 单株遗传力为 0.20~0.50。共选出优良家系 26 个和单株 41 株, 优良家系的平均胸径、树高、材积、冠幅、树干通直度分别大于总体均值的 19.63%、18.56%、52.16%、5.11% 和 4.03%; 遗传增益分别为 6.67%、8.24%、20.28%、1.82% 和 1.75%, 优良单株平均材积大于总体均值的 150.25%。这为枫香育种策略制定和生产应用等提供理论依据。

关键词: 枫香; 家系; 种源; 遗传

doi: 10.11926/jtsb.3855

Genetic Variation, Excellent Family and Individual Selection of 9-year-old *Liquidambar formosana*

HU Wen-jie¹, PANG Hong-dong¹, HU Xing-yi^{1*}, WANG Xiao-rong¹, ZHENG Yong-qi²

(1. Hubei Academy of Forest, Wuhan 430075, China; 2. Research Institute of forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to select excellent family of *Liquidambar formosana*, the genetic variations among 24 provenances and 310 families at 9 years old were analyzed, and excellent families and individuals were selected by multi-objective decision method. The results showed that there were significant differences in diameter at breast height (DBH), height, volume, height under branch, crown width and straight index among provenances and families ($P < 0.01$), and the volume growth was better in provenances from Funing of Yunnan, Pingxiang of Guangxi and Hucheng of Jiangxi. The family heritability of all traits was moderate genetic control, ranged from 0.24 to 0.44, and the individual heritability was from 0.20 to 0.50. There were 26 excellent families and 41 excellent individuals were selected. The average DBH, tree height, volume, crown width and straight index of excellent families were larger than ensemble average for 19.63%, 18.56%, 52.16%, 5.11% and 4.03%, respectively, and their genetic gain was similar for 6.67%, 8.24%, 20.28%, 1.82% and 1.75%. The average volume of excellent individuals was larger than ensemble average for 150.25%. So, these would provide a theoretical basis for the breeding strategy making and application in production of *L. formosana*.

Key words: *Liquidambar formosana*; Family; Provenance; Heredity

长期以来我国大力发展人工林, 但大多以幼林 材资源培育, 提高单位面积林地产量显得尤为迫切
为主, 优质木材资源总量仍然不足^[1], 加强优良木 和重要。当前, 已开展白皮松(*Pinus bungeana*)^[2]、

收稿日期: 2017-11-29

接受日期: 2018-03-05

基金项目: “十二五”国家科技计划课题(2013BAD01B06); 湖北省林业科技支撑重点项目([2017]LYKJ01-3)资助

This work was supported by the National Twelfth Five-Year Science and Technology Plan (Grant No. 2013BAD01B06), and the Key Project for Hubei Forestry Science and Technology (Grant No. [2017]LYKJ01-3).

作者简介: 胡文杰, 男, 硕士, 研究实习员。E-mail: wenjiehu1725@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huxingyi027@126.com

西南桦(*Betula alnoides*)^[3]、马尾松(*P. massoniana*)^[4]、白桦(*B. platyphylla*)^[5]、木荷(*Schima superba*)^[11]、火炬松(*P. taeda*)^[6]等优良家系的定向选择, 并取得了一定的成果。枫香(*Liquidambar formosana*)作为南方重要的阔叶乔木乡土树种, 广泛分布于南方各省, 其干形通直, 生长较快, 且对环境适应性强, 枯落物易分解, 是荒山造林、混交造林的优良树种, 同时也是工业木材加工和城市绿化的重要树种, 开展枫香用材等优良家系选择具有重要意义。

下胚轴离体培养^[7]和嫩枝扦插技术^[8]为枫香表现突出家系或单株优良性状的保存提供了保障。施季森等研究了枫香性状的遗传变异^[9]并进行了优良家系或单株选择^[10-14], 枫香不同性状家系间存在着丰富的遗传变异, 进行优良家系选择具有巨大潜力。本研究以 15 个省(市)分布的 9 年生枫香 24 个种源 310 个家系为材料, 分析胸径、树高和材积等生长性状以及第一枝下高、冠幅和树干通直度等形质性状及保存率的遗传变异规律, 并进行优良家系和单株选择, 为枫香育种策略制定和生产应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

试验地点位于湖北省荆门市虎爪山林场, 于 2007 年播种育苗, 第二年早春选择长势一致、无病虫害的健壮苗造林, 4 株小区, 重复 3 次, 完全随机区组设计, 株行距 2 m × 3 m。从 346 个家系中剔除严重缺区的家系后, 保留 310 个家系。这些家系来自 15 个省(市)的 24 个种源^[15]。

1.2 数据收集

2017 年早春对林分进行调查, 测量胸径(cm)、树高(m)、第一枝下高(m, 以下统称枝下高)、冠幅(m), 通直度(SI)和保存率(RR)。用 Vertex IV 测量树高(精度 0.1 m), 测量东-西向和南-北向冠幅, 取平均值; 通直度分 5 个等级: 通直, 记为 5; 较通直, 记为 4; 一般, 记为 3; 较弯曲, 记为 2; 弯曲, 记为 1。

1.3 数据统计和分析

枫香单株材积(m^3)^[14]计算: $V=0.00008721 DBH^{1.7853886} H^{0.93139237}$, 保存率取小区平均值。方差分析模型^[16]为 $Y_{ij}=\mu+B_i+F_j+BF_{ij}+\varepsilon_{ij}$, 其中 Y_{ij} 为第 i 个家系第 j 个重复的观测值, μ 为总体均值, B_i 为

第 i 个家系的效应值, F_j 为第 j 个重复的效应值, BF_{ij} 为第 i 个家系第 j 个重复的交互作用效应值, ε_{ij} 为第 i 个家系第 j 个重复观测值的机误。家系遗传力及单株遗传力参照胡文杰等^[15]方法进行计算, 表型变异系数(phenotypic variation coefficient, PVC)^[17]:

$$PVC = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{ij}^2 + \sigma_e^2} / \mu, \text{ 遗传变异系数(genetic}$$

variation coefficient, GVC)^[17]: $GVC = \sqrt{\sigma_i^2 / \mu}$, 其中

μ 为总体均值, σ_i^2 为家系方差分量, σ_{ij}^2 为家系重复方差分量, σ_e^2 为误差项分量。遗传增益为选择响应与性状总体均值的比值, 具体参照覃敏等^[18]的方法计算。

采用多目标决策法^[19-20]进行优良家系选择, 将各性状值进行标准化处理, 即 $U=1-0.9 \times (\lambda_{i\max} - \lambda_{ij}) / (\lambda_{i\max} - \lambda_{i\min})$, 其中, λ_{ij} 为第 i 个性状第 j 个家系的性状值, $\lambda_{i\max}$ 和 $\lambda_{i\min}$ 分别为第 i 个性状的最大值和最小值。得到的效用值乘以对应性状的权重即为性状评价值, 最后累加得到综合评价值。

2 结果和分析

2.1 不同种源的性状差异分析

从表 1 可见, 9 年生枫香的平均胸径、树高、材积、枝下高、冠幅、通直度和保存率分别为 7.71 cm、6.84 m、0.0228 m^3 、1.49 m、3.63 m、4.27 和 88.36%。方差分析结果表明, 除保存率外, 其他性状在种源间都存在极显著差异($P < 0.01$), 说明长期的地理隔离使生长性状和形质性状在种源间已产生明显分化, 为进一步进行优良家系选择奠定了基础。保存率在种源间的差异不显著($P > 0.05$), 以江苏溧阳(92.42%)的最高。

从表 2 可以看出, 不同种源的胸径为 6.21~8.38 cm, 树高为 5.84~7.74 m。材积为 0.015 1~0.027 7 m^3 , 以云南富宁、广西凭祥和江西湖城最高。从形质性状看, 第一枝下高为 1.18~1.85 m, 以云南富宁和重庆丰都的较高; 冠幅最大的种源为湖北大悟(4.51 m^2), 各种源树干总体都较通直。

2.2 家系间性状的方差分析和遗传参数估计

胸径、树高、材积、枝下高、冠幅和通直度在家系间表现出极显著差异($P < 0.01$)(表 3), 除通直度外, 其余性状在区组间也表现出极显著差异($P <$

表 1 9 年生枫香种源间生长性状的方差分析

Table 1 Variance analysis of growth traits among provenances of 9-year-old *Liquidambar formosana*

| | 变源 Source | 自由度 Degree of freedom | 均方值 Mean square | F | 平均 Mean | 标准差 Standard error |
|-----------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------|---------|------------|-----------------------|
| 胸径 Diameter at breast height (cm) | 种源 Provenance | 23 | 31.43 | 6.78** | 7.71 | 2.20 |
| 树高 Height (m) | 种源 Provenance | 23 | 47.56 | 22.90** | 6.84 | 1.55 |
| 单株材积 Volume (m ³) | 种源 Provenance | 23 | 0.001 9 | 10.97** | 0.022 8 | 0.013 6 |
| 枝下高 Height under branch (m) | 种源 Provenance | 23 | 3.36 | 11.75** | 1.49 | 0.56 |
| 冠幅 Crown width (m) | 种源 Provenance | 23 | 9.63 | 14.04** | 3.63 | 0.87 |
| 通直度 Straight index | 种源 Provenance | 23 | 9.33 | 13.91** | 4.27 | 0.86 |
| 保存率 Survival | 种源 Provenance | 23 | 0.02 | 0.66 | 0.88 | 0.17 |

** : $P < 0.01$

表 2 9 年生枫香种源的生长性状

Table 2 Growth traits of 9-year-old *Liquidambar formosana* provenances

| 种源 Provenance | 胸径 Diameter at breast height (cm) | 树高 Height (m) | 材积 Volume (m ³) | 枝下高 Height under branch (m) | 冠幅 Crown width (m) | 通直度 Straight index |
|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| AHO | 7.43abcd | 6.41efgh | 0.019 6fghi | 1.32fgh | 4.02bcd | 4.14defg |
| CF | 8.04abc | 7.74a | 0.026 4abcd | 1.75ab | 3.42ghi | 4.63ab |
| FJ | 8.12ab | 7.20abc | 0.025 5abcde | 1.59bcd | 4.19b | 4.14defg |
| GC | 8.17ab | 7.22abc | 0.026 8abc | 1.31gh | 3.77cdefg | 3.75h |
| GK | 7.82abc | 7.05bcd | 0.023 6abcdefg | 1.40defgh | 3.16i | 4.62ab |
| GP | 7.85abc | 7.15abc | 0.027 5a | 1.66abc | 3.94bcde | 4.00efgh |
| GW | 8.17ab | 7.42ab | 0.027 1abc | 1.59bcd | 3.49ghi | 4.13defg |
| HB | 7.23bcd | 5.89h | 0.018 5ghi | 1.38defgh | 3.62efgh | 3.96fgh |
| HD | 8.07ab | 5.92h | 0.020 8defgh | 1.18h | 4.51a | 3.18i |
| HN | 7.99abc | 7.23abc | 0.024 6abcdef | 1.39defgh | 3.66efgh | 4.45abcd |
| HNS | 7.91abc | 7.03bcd | 0.024 3abcdef | 1.36defgh | 3.42ghi | 4.21cdef |
| HS | 8.11ab | 7.73a | 0.027 3ab | 1.57bcde | 3.63efgh | 4.30bcdef |
| HSZ | 6.90de | 6.35efgh | 0.017 1hi | 1.37defgh | 3.40hi | 4.72a |
| HX | 6.21e | 6.17gh | 0.015 1i | 1.35efgh | 3.19i | 4.44abcd |
| JH | 8.38a | 7.67a | 0.027 6a | 1.59bcd | 4.09bc | 4.39abcd |
| JL | 7.90abc | 6.52defg | 0.022 1abcdefgh | 1.40defgh | 4.03bcd | 3.78h |
| JN | 7.55abcd | 6.26fgh | 0.020 0efghi | 1.33fgh | 3.93bcdef | 3.86gh |
| JT | 7.67abcd | 6.88bcde | 0.022 3abcdefgh | 1.63bc | 3.77cdefg | 4.25cdef |
| JW | 7.73abcd | 6.81bcdef | 0.022 4abcdefgh | 1.37defgh | 3.71defgh | 4.36bcd |
| SG | 7.11cd | 6.30efgh | 0.018 2ghi | 1.35efgh | 3.45ghi | 4.52abc |
| YF | 8.31a | 7.23abc | 0.027 7a | 1.85a | 3.71defgh | 4.33bcde |
| ZK | 7.64abcd | 6.40efgh | 0.021 7bcdefgh | 1.55bcdef | 3.58fgh | 4.30bcdef |
| ZZ | 7.33bcd | 5.84h | 0.018 1ghi | 1.28gh | 3.65efgh | 4.22cdef |

HB: 海南霸王岭; SG: 四川广元; HD: 湖北大悟; HX: 湖北兴山; YF: 云南富宁; GK: 甘肃康县; JH: 江西湖城; FJ: 福建建瓯; ZK: 浙江开化; JL: 江苏溧阳; GP: 广西凭祥; HS: 湖北松滋; JT: 江西铜鼓; JW: 江西婺源; GW: 广东翁源; ZZ: 浙江舟山; GC: 广西岑溪; CF: 重庆丰都; AH: 安徽黄山; HNS: 河南商城; JN: 江苏南京; HN: 河南南阳; HSZ: 湖南桑植; AHO: 安徽霍山。同列数据后不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

HB: Bawangling, Hainan; SG: Guangyaun, Sichuan; HD: Dawu, Hubei; HX: Xingshan, Hubei; YF: Funing, Yunnan; GK: Kangxian, Gansu; JH: Hucheng, Jiangxi; FJ: Jianou, Fujian; ZK: Kaihua, Zhejiang; JL: Liyang, Jiangsu; GP: Pingxiang, Guangxi; HS: Songzi, Hubei; JT: Tonggu, Jiangxi; JW: Wuyuan, Jiangxi; GW: Wengyuan, Guangdong; ZZ: Zhoushan, Zhejiang; GC: Cenxi, Guangxi; CF: Fengdu, Chongqing; AH: Huangshan, Anhui; HNS: Shangcheng, Henan; JN: Nanjing, Jiangsu; HN: Nanyang, Henan; HSZ: Sangzhi, Hunan; AHO: Huoshan, Anhui. Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level.

0.01), 说明环境的差异对性状产生了显著影响。性状的表型变异系数为 19.79%~54.33%, 以材积 > 枝下高 > 胸径 > 冠幅 > 树高 > 通直度; 遗传变异系数为 5.28%~15.67%, 以材积 > 枝下高 > 树高 > 胸径 > 冠

幅 > 通直度, 表明枫香各性状在家系间存在丰富的遗传变异, 且遗传因素和环境因素的共同作用是造成家系间差异的主要因素。从家系遗传力看, 各性状都属于中度遗传控制, 其中, 树高的家系遗传力最大, 为

0.44, 枝下高的最小, 为 0.24; 胸径、材积和冠幅的家系遗传力差异不大, 为 0.34~0.39, 表明胸径、树高、材积、枝下高、冠幅和通直度等性状分别有 34%、44%、39%、24%、35% 和 43% 可稳定遗传到后代。

单株遗传力也是树高最大, 和家系遗传力一致, 由大到小的顺序为树高(0.50)、材积(0.33)、通直度(0.29)、冠幅(0.25)、胸径(0.24)和枝下高(0.20)。保存率在家系间未表现出显著差异($F=0.91, P>0.05$)。

表 3 9 年生枫香家系间性状的方差分析

Table 3 Variance analysis of traits among families of 9-year-old *Liquidambar formosana*

| | 变源 Source | 自由度 Degree of freedom | 均方值 Mean square | F | PCV /% | GCV /% | 家系遗传力 Family heritability | 单株遗传力 Individual heritability |
|------------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|----------|-----------|-----------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 胸径 Diameter at breast height | 区组 Block (A) | 2 | 866.94 | 267.36** | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 8.98 | 2.77** | 26.5 | 6.53 | 0.34 | 0.24 |
| | A×B | 618 | 5.94 | 1.83** | | | | |
| 树高 Height | 区组 Block (A) | 2 | 474.14 | 469.74** | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 6.71 | 6.65** | 20.4 | 7.22 | 0.44 | 0.50 |
| | A×B | 618 | 3.79 | 3.75** | | | | |
| 材积 Volume | 区组 Block (A) | 2 | 0.04 | 375.77** | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 0.0004 | 3.69** | 54.33 | 15.67 | 0.39 | 0.33 |
| | A×B | 618 | 0.0002 | 2.26** | | | | |
| 枝下高 Height under branch | 区组 Block (A) | 2 | 54.64 | 348.37** | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 0.63 | 3.99** | 33.6 | 7.47 | 0.24 | 0.20 |
| | A×B | 618 | 0.48 | 3.04** | | | | |
| 冠幅 Crown width | 区组 Block (A) | 2 | 21.88 | 39.60** | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 1.55 | 2.81** | 23.27 | 5.86 | 0.35 | 0.25 |
| | A×B | 618 | 1.01 | 1.83** | | | | |
| 通直度 Straight index | 区组 Block (A) | 2 | 1.59 | 2.59 | | | | |
| | 家系 Family (B) | 309 | 1.42 | 2.32** | 19.79 | 5.28 | 0.43 | 0.29 |
| | A×B | 618 | 0.81 | 1.32** | | | | |

**：P<0.01。PCV: 表型变异系数; GCV: 遗传变异系数。

**：P<0.01。PCV: Phenotypic variation coefficient; GCV: Genetic variation coefficient.

2.3 相关性分析

从表 4 可以看出, 除冠幅和通直度间未表现出显著相关性外, 其余性状间均表现出极显著相关性 ($P<0.01$)。其中, 胸径和材积的相关性最高, 相关系数达到 0.945, 其次为树高 0.857。在形质性状中, 冠幅与材积的相关性最大, 相关系数为 0.484, 这可能是由于冠幅的大小影响到了单株叶片光合作用的面积, 冠幅越大, 单株叶片进行光合作用的有效面积越多, 从而促进植株生长。总体来说, 性状

间存在着相互影响、相互促进的关系, 因此, 形质性状生长得越好, 其材积越大。

2.4 优良家系选择

采用多目标决策法进行优良家系选择, 主要考虑生长性状, 同时兼顾形质性状和保存率, 即选取胸径、树高、材积生长较好, 同时冠幅较小, 树干较通直, 且保存率较高的为优良家系, 其对应权重分别为 0.2、0.2、0.4、-0.1、0.1 和 0.2, 以综合评

表 4 9 年生枫香生长性状间相关性分析

Table 4 Correlation among growth traits of 9-year-old *Liquidambar formosana*

| | 胸径 Diameter at breast height | 树高 Height | 材积 Volume | 枝下高 Height under branch | 冠幅 Crown width | 通直度 Straight index |
|------------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|----------------------------|-------------------|-----------------------|
| 胸径 Diameter at breast height | 1 | | | | | |
| 树高 Height | 0.797** | 1 | | | | |
| 单株材积 Volume | 0.945** | 0.857** | 1 | | | |
| 枝下高 Height under branch | 0.349** | 0.454** | 0.379** | 1 | | |
| 冠幅 Crown width | 0.597** | 0.376** | 0.484** | 0.072** | 1 | |
| 通直度 Straight index | 0.174** | 0.292** | 0.182** | 0.234** | -0.026 | 1 |

**：P<0.01

价值 ≥ 0.80 为标准, 共选出优良家系 26 个, 入选率 8.39%。从表 5 可见, 入选的 26 个优良家系的平均胸径为 9.22 cm, 大于总体均值 19.63%, 平均遗传增益为 6.67%; 平均树高为 8.11 m, 大于总体均值 18.56%, 平均遗传增益为 8.24%; 平均材积为 0.034 m^3 , 大于总体均值 52.16%, 平均遗传增益为 20.28%; 平均冠幅为 3.81 m, 大于总体均值 5.11%, 平均遗传增益为 1.82%; 平均树干通直度为 4.44, 大于总体均值 4.03%, 平均遗传增益为 1.75%; 平均保存率为 91.99%, 大于总体均值 4.11%。入选的优良家系分别来自 11 个种源, 其中甘肃康县、江西铜鼓、江西湖城、浙江开化和河南南阳种源各 1 个家系, 福建建瓯、广西岑溪种源各 2 个家系, 云南富宁种源 3 个家系, 湖北松滋种源 4 个家系, 广

东翁源、重庆丰都种源各 5 个家系。可见, 优良家系在地域上分布广泛。由于优良家系选择主要考虑的是生长性状, 且冠幅对应的权重为-0.1, 因此, 少部分优良家系的冠幅和通直度的遗传增益为负。冠幅较小是为了在保证生长量的同时提高单位面积的种植密度, 以获得更大的效益。而对于通直度为负遗传增益的优良家系, 应通过杂交等途径逐渐对其进行改良, 或直接适当用于园林造景。

2.5 优良单株选择

在开展优良家系选择的基础上, 进行优良单株选择, 首先选出材积大于总体均值 100% 的单株, 结合这些单株所属家系, 从材积遗传增益 $\geq 20\%$ 的优良家系中进一步筛选单株, 再剔除树干通直度 ≤ 3

表 5 9 年生枫香优良家系的选择

Table 5 Excellent family selection of 9-year-old *Liquidambar formosana*

| 家系 Family | 胸径 Diameter at breast height (cm) | 评价价值 Evaluate value | 遗传增益 Genetic gain /% | 树高 Height (m) | 评价价值 Evaluate value | 遗传增益 Genetic gain /% | 材积 Volume (m^3) | 评价价值 Evaluate value | 遗传增益 Genetic gain /% |
|-----------------------------|---|---------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| GW27 | 9.14 | 0.17 | 6.32 | 8.71 | 0.20 | 12.10 | 0.037 3 | 0.37 | 24.81 |
| CF19 | 9.61 | 0.19 | 8.41 | 8.64 | 0.20 | 11.65 | 0.039 0 | 0.39 | 27.70 |
| GW19 | 10.00 | 0.20 | 10.13 | 8.34 | 0.18 | 9.72 | 0.039 8 | 0.40 | 29.16 |
| GW21 | 9.47 | 0.18 | 7.80 | 8.35 | 0.18 | 9.81 | 0.035 2 | 0.35 | 21.16 |
| GW9 | 9.58 | 0.18 | 8.27 | 8.57 | 0.19 | 11.2 | 0.039 5 | 0.40 | 28.61 |
| ZK12 | 9.53 | 0.18 | 8.05 | 8.09 | 0.17 | 8.11 | 0.035 5 | 0.35 | 21.80 |
| JH16 | 9.76 | 0.19 | 9.07 | 8.23 | 0.18 | 9.01 | 0.037 7 | 0.38 | 25.50 |
| HS8 | 9.29 | 0.17 | 6.99 | 8.43 | 0.19 | 10.3 | 0.036 3 | 0.36 | 23.16 |
| FJ9 | 9.00 | 0.16 | 5.71 | 8.25 | 0.18 | 9.17 | 0.032 0 | 0.31 | 15.83 |
| HS28 | 8.98 | 0.16 | 5.64 | 8.25 | 0.18 | 9.14 | 0.034 2 | 0.34 | 19.44 |
| HS5 | 9.14 | 0.17 | 6.32 | 8.37 | 0.19 | 9.93 | 0.034 4 | 0.34 | 19.91 |
| GC15 | 9.77 | 0.19 | 9.11 | 7.44 | 0.15 | 3.92 | 0.037 2 | 0.37 | 24.72 |
| JT4 | 9.01 | 0.16 | 5.75 | 7.79 | 0.16 | 6.18 | 0.034 7 | 0.34 | 20.35 |
| YF21 | 8.88 | 0.16 | 5.20 | 7.87 | 0.16 | 6.67 | 0.030 2 | 0.29 | 12.64 |
| HS23 | 9.24 | 0.17 | 6.76 | 7.81 | 0.16 | 6.30 | 0.034 2 | 0.34 | 19.50 |
| YF18 | 9.25 | 0.17 | 6.82 | 8.35 | 0.18 | 9.78 | 0.035 8 | 0.35 | 22.30 |
| CF6 | 8.85 | 0.16 | 5.05 | 8.04 | 0.17 | 7.79 | 0.031 4 | 0.30 | 14.76 |
| CF1 | 9.43 | 0.18 | 7.61 | 8.26 | 0.18 | 9.19 | 0.036 1 | 0.36 | 22.74 |
| GW6 | 9.42 | 0.18 | 7.58 | 7.73 | 0.16 | 5.81 | 0.032 9 | 0.32 | 17.26 |
| GC16 | 9.32 | 0.18 | 7.13 | 8.26 | 0.18 | 9.21 | 0.037 6 | 0.37 | 25.31 |
| YF13 | 9.08 | 0.17 | 6.08 | 7.75 | 0.16 | 5.95 | 0.035 1 | 0.35 | 21.10 |
| CF11 | 8.44 | 0.14 | 3.24 | 8.16 | 0.18 | 8.56 | 0.030 1 | 0.29 | 12.53 |
| FJ12 | 9.53 | 0.18 | 8.05 | 7.87 | 0.16 | 6.69 | 0.035 0 | 0.34 | 20.84 |
| HN29 | 9.01 | 0.16 | 5.76 | 7.75 | 0.16 | 5.92 | 0.032 1 | 0.31 | 15.88 |
| CF3 | 8.58 | 0.15 | 3.86 | 8.05 | 0.17 | 7.85 | 0.029 6 | 0.28 | 11.68 |
| GK1 | 8.33 | 0.14 | 2.77 | 7.50 | 0.15 | 4.31 | 0.027 8 | 0.26 | 8.57 |
| 家系均值 Mean of family | 9.22 | | 6.67 | 8.11 | | 8.24 | 0.034 6 | | 20.28 |
| 总体均值 Ensemble average | 7.71 | | -4.38×10^{-14} | 6.84 | | -1.15×10^{-14} | 0.022 8 | | -1.62×10^{-14} |

续表(Continued)

| 家系 Family | 冠幅 Crown width (m) | 评价值 Evaluate value | 遗传增益 Genetic gain /% | 通直度 Straight index | 评价值 Evaluate value | 遗传增益 Genetic gain /% | 保存率 Survial /% | 评价值 Evaluate value | 综合评价 Comprehensive evaluation |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| GW27 | 3.09 | -0.04 | -5.18 | 4.82 | 0.10 | 5.55 | 100.00 | 0.20 | 0.99 |
| CF19 | 3.77 | -0.07 | 1.42 | 4.70 | 0.09 | 4.36 | 91.67 | 0.16 | 0.96 |
| GW19 | 4.01 | -0.08 | 3.74 | 4.60 | 0.09 | 3.35 | 91.67 | 0.16 | 0.96 |
| GW21 | 3.44 | -0.05 | -1.76 | 4.45 | 0.08 | 1.89 | 100.00 | 0.20 | 0.94 |
| GW9 | 3.67 | -0.06 | 0.46 | 3.80 | 0.05 | -4.71 | 91.67 | 0.16 | 0.92 |
| ZK12 | 3.97 | -0.07 | 3.31 | 4.90 | 0.10 | 6.38 | 91.67 | 0.16 | 0.90 |
| JH16 | 4.37 | -0.09 | 7.22 | 4.30 | 0.07 | 0.33 | 91.67 | 0.16 | 0.89 |
| HS8 | 3.72 | -0.06 | 0.89 | 4.20 | 0.07 | -0.68 | 91.67 | 0.16 | 0.89 |
| FJ9 | 3.95 | -0.07 | 3.21 | 4.73 | 0.09 | 4.64 | 100.00 | 0.20 | 0.87 |
| HS28 | 4.15 | -0.08 | 5.05 | 4.17 | 0.07 | -1.01 | 100.00 | 0.20 | 0.86 |
| HS5 | 4.05 | -0.08 | 4.13 | 4.55 | 0.08 | 2.80 | 91.67 | 0.16 | 0.86 |
| GC15 | 4.01 | -0.08 | 3.69 | 3.70 | 0.04 | -5.72 | 91.67 | 0.16 | 0.84 |
| JT4 | 3.86 | -0.07 | 2.33 | 4.36 | 0.07 | 0.97 | 91.67 | 0.16 | 0.83 |
| YF21 | 3.91 | -0.07 | 2.76 | 4.75 | 0.09 | 4.87 | 100.00 | 0.20 | 0.83 |
| HS23 | 4.01 | -0.08 | 3.78 | 4.36 | 0.07 | 0.97 | 91.67 | 0.16 | 0.83 |
| YF18 | 3.73 | -0.07 | 0.99 | 4.75 | 0.09 | 4.87 | 75.00 | 0.09 | 0.83 |
| CF6 | 3.39 | -0.05 | -2.30 | 4.60 | 0.09 | 3.35 | 91.67 | 0.16 | 0.83 |
| CF1 | 3.73 | -0.07 | 1.02 | 4.57 | 0.08 | 3.07 | 75.00 | 0.09 | 0.83 |
| GW6 | 3.83 | -0.07 | 2.04 | 4.33 | 0.07 | 0.67 | 91.67 | 0.16 | 0.83 |
| GC16 | 4.32 | -0.09 | 6.69 | 3.90 | 0.05 | -3.70 | 83.33 | 0.13 | 0.82 |
| YF13 | 4.09 | -0.08 | 4.52 | 4.18 | 0.07 | -0.86 | 91.67 | 0.16 | 0.82 |
| CF11 | 3.24 | -0.05 | -3.70 | 4.70 | 0.09 | 4.36 | 91.67 | 0.16 | 0.82 |
| FJ12 | 4.57 | -0.10 | 9.10 | 4.00 | 0.06 | -2.69 | 91.67 | 0.16 | 0.82 |
| HN29 | 3.76 | -0.07 | 1.33 | 4.50 | 0.08 | 2.35 | 91.67 | 0.16 | 0.81 |
| CF3 | 3.33 | -0.05 | -2.88 | 4.70 | 0.09 | 4.36 | 91.67 | 0.16 | 0.81 |
| GK1 | 3.16 | -0.04 | -4.49 | 4.83 | 0.10 | 5.70 | 100.00 | 0.20 | 0.80 |
| 家系均值 Mean of family | 3.81 | | 1.82 | 4.44 | | 1.75 | 91.99 | | 0.86 |
| 总体均值 Ensemble average | 3.63 | | 3.56×10^{-14} | 4.27 | | -2.23×10^{-14} | 88.36 | | 0.57 |

的单株,最后共选出优良单株41株(表6)。优良单株分别来自YF13、JH16、ZK12、HS8等16个家系,平均胸径、树高、材积、枝下高、冠幅和通直度分别为11.66 cm、9.47 m、0.0570 m³、1.83 m、4.10 m和4.59,分别大于总体均值的51.28%、38.37%、150.25%、22.95%、13.14%和7.41%,选出的优良单株对枫香种子园营建、优良无性系繁殖利用等具有重要意义。

3 讨论

遗传变异研究是开展林木育种工作的基础^[21-22],长时间地理隔离有可能造成物种的生殖隔离,进而产生丰富的遗传变异,这些变异就体现在种源间的差异上^[23]。何贵平等^[24]报道不同地理种源枫香性状间存在显著差异。本研究结果与其相同,说明枫香种源间已产生明显分化,存在丰富变异。材积生长

表现突出的种源有云南富宁、广西凭祥和江西湖城,总体来看,来自低纬度地区的种源材积生长较好^[25],但来自纬度更低地区的海南霸王岭种源的材积表现却一般,这与刘明宣等^[26]的试验结果相似。枫香生长性状和形质性状的家系遗传力属于中度遗传控制,生长性状家系遗传力为0.34~0.44,与方乐金等^[10]和王俊青等^[27]的研究结果相似,但明显小于叶代全^[12]和张汉永等^[28]的研究结果,这可能是由于试验地点、参试家系和林龄不同等原因造成的。朱积余等^[29]对红锥(*Castanopsis hystrix*)家系的研究表明,家系遗传力会随林分年龄的增大而减小,并在7~9 a时稳定。方乐金等^[30]对3年生和9年生的枫香家系研究结果相同,其胸径、树高和材积的家系遗传力为0.27~0.39,都属于中度遗传控制,这表明环境因素对林木后期生长起到了非常重要的作用^[31]。

枫香家系间丰富的表型变异和遗传变异表明

表 6 9 年生枫香优良单株选择表

Table 6 Excellent individual selection of 9-year-old *Liquidambar formosana*

| 序号 No. | 株号 Individual No. | 胸径 Diameter at breast height (cm) | 树高 Height (m) | 材积 Volume (m ³) | 枝下高 Height under branch (m) | 冠幅 (m) Crown width | 通直度 Straight index |
|-----------|----------------------|---|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 | YF13-1 | 12.6 | 10.2 | 0.069 9 | 3.6 | 4.00 | 5 |
| 2 | YF13-2 | 12.0 | 9.5 | 0.060 0 | 2.6 | 4.50 | 4 |
| 5 | YF18-1 | 12.2 | 9.8 | 0.063 6 | 2.7 | 4.50 | 5 |
| 6 | YF18-2 | 11.5 | 10.8 | 0.062 6 | 2.1 | 3.40 | 4 |
| 7 | JH16-1 | 11.7 | 9.4 | 0.056 8 | 1.5 | 5.90 | 4 |
| 8 | JH16-2 | 10.9 | 9.6 | 0.051 0 | 1.3 | 3.40 | 5 |
| 9 | JH16-3 | 10.9 | 9.3 | 0.049 5 | 1.7 | 4.00 | 4 |
| 10 | JH16-4 | 10.2 | 9.8 | 0.046 2 | 1.5 | 4.00 | 4 |
| 11 | FJ12-1 | 11.6 | 9.9 | 0.058 7 | 1.6 | 4.50 | 5 |
| 15 | FJ12-2 | 11.8 | 9.5 | 0.058 2 | 2.0 | 4.35 | 5 |
| 16 | FJ13-1 | 11.2 | 9.1 | 0.050 9 | 2.0 | 5.00 | 5 |
| 17 | ZK12-1 | 11.5 | 9.5 | 0.055 6 | 4.4 | 4.00 | 5 |
| 18 | ZK12-2 | 11.6 | 8.3 | 0.049 8 | 1.2 | 3.60 | 5 |
| 19 | ZK12-3 | 10.8 | 8.7 | 0.045 8 | 1.4 | 3.55 | 5 |
| 21 | HS8-1 | 12.0 | 8.5 | 0.054 1 | 1.9 | 3.50 | 5 |
| 22 | HS8-2 | 11.0 | 9.5 | 0.051 3 | 1.8 | 4.75 | 4 |
| 23 | JT4-1 | 14.0 | 9.2 | 0.076 7 | 1.5 | 3.25 | 4 |
| 24 | JT4-2 | 12.7 | 10.8 | 0.074 8 | 1.8 | 5.90 | 4 |
| 25 | JT4-3 | 10.6 | 9.8 | 0.049 5 | 2.5 | 3.75 | 5 |
| 26 | GW19-1 | 12.2 | 10.6 | 0.068 4 | 1.6 | 4.50 | 5 |
| 27 | GW19-2 | 12.2 | 8.4 | 0.055 1 | 1.6 | 4.00 | 4 |
| 28 | GW19-3 | 11.8 | 8.1 | 0.050 2 | 1.3 | 5.00 | 4 |
| 29 | GW19-4 | 10.9 | 9.4 | 0.050 0 | 1.8 | 4.25 | 4 |
| 30 | GW27-1 | 13.3 | 10.0 | 0.075 6 | 2.2 | 3.75 | 4 |
| 31 | GW27-2 | 12.3 | 10.0 | 0.065 7 | 1.6 | 3.00 | 5 |
| 32 | GW27-3 | 10.5 | 9.5 | 0.047 3 | 1.6 | 3.90 | 5 |
| 33 | GW27-4 | 10.5 | 9.4 | 0.046 8 | 1.5 | 3.00 | 5 |
| 34 | GW6-1 | 12.0 | 7.5 | 0.048 1 | 2.0 | 5.00 | 5 |
| 38 | GW6-2 | 11.0 | 8.4 | 0.045 8 | 0.7 | 3.35 | 4 |
| 39 | GW8-1 | 10.5 | 10.0 | 0.049 6 | 1.8 | 3.30 | 5 |
| 40 | GW9-1 | 12.0 | 9.4 | 0.059 4 | 1.7 | 4.25 | 5 |
| 41 | GW9-2 | 11.1 | 10.3 | 0.056 3 | 1.8 | 4.00 | 5 |

其具有巨大的选优潜力, 家系遗传力的大小直接影响到选优效果^[29]。本次家系选择以培育用材林为主要目的, 重点考量材积等生长性状, 同时要求干形通直, 且冠幅较小, 主要是为了在实际生产中能根据冠幅大小合理密植, 使单位面积产量更大。本次选出的优良家系共有 21 个, 平均材积大于总体均值的 52.36%, 平均遗传增益达到 20.36%, 家系选优效果较好。胡文杰等^[15]曾对 6 年生枫香也以材积为主要考量性状进行了优良家系选择, 并选出 49 个优良家系。本次选优结果表明, 9 年生时入选的家系比 6 年生时减少了 23 个, 且有 GK1、GC15、CF3 和 CF6 等 4 个新家系入选, 表明本次淘汰的家系在后期生长上表现不够强劲, 而新入选的家系逐渐表现出遗传优势, 生长迅速, 这说明林分年龄会对选择结果产生影响, 同时也表明家系持续选择的重要性。优良家系连续选择可以避免等到林分成熟

或接近成熟再进行选择, 从而有序进行“边选边育”, 避免耽误潜在优良家系的宝贵育种时间。本次选出的优良家系对于优良采穗圃、种子园营建、造林等具有重要现实意义。

参考文献

- [1] XIN N N, ZHANG R, FAN H H, et al. Family variation and selection of growth and quality characteristics of 5-year-old *Schima superba* seedlings [J]. *For Res*, 2014, 27(3): 316–322. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.03.004.
辛娜娜, 张蕊, 范辉华, 等. 5 年生木荷生长和形质性状的家系变异和选择 [J]. *林业科学研究*, 2014, 27(3): 316–322. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.03.004.
- [2] ZHU L, SHANG X Y, ZHU X M, et al. Selection of elite provenances and families of *Pinus bungeana* in Beijing [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2016, 44(9): 121–127. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.09.016.

- 祝良, 尚旭阳, 朱晓梅, 等. 北京地区白皮松优良种源与家系的选择 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 121-127. doi: 10.13207/j.cnki.jnwf.2016.09.016.
- [3] GUO W F, ZENG J, LI M. Provenance and family trials for *Betula alnoides* in Pingxiang, Guangxi: I. Early variation of growth traits [J]. For Res, 2008, 21(5): 652-656. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2008.05.011.
- 郭文福, 曾杰, 黎明. 广西凭祥西南桦种源家系选择试验, I. 幼林生长性状的变异 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(5): 652-656. doi: 10.3321/j.issn:1001-1498.2008.05.011.
- [4] YANG Z W, ZHENG R H, FU Z H, et al. Study on selection of excellent families for industrial wood of *Pinus massoniana* [J]. Sci Silv Sin, 2003, 39(S1): 74-80. doi: 10.11707/j.1001-7488.2003S114.
- 杨宗武, 郑仁华, 傅忠华, 等. 马尾松工业用材优良家系选择的研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(S1): 74-80. doi: 10.11707/j.1001-7488.2003S114.
- [5] ZHU Z B, LIU G F, JIANG J, et al. Preliminary selection of *Betula platyphylla* superior family for pulpwood production [J]. J NE For Univ, 2009, 37(11): 1-3, 10. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2009.11.001.
- 祝泽兵, 刘桂丰, 姜静, 等. 小兴安岭地区白桦纸浆材优良家系选择 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(11): 1-3, 10. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2009.11.001.
- [6] LEPOITTEVIN C, ROUSSEAU J P, GUILLEMIN A, et al. Genetic parameters of growth, straightness and wood chemistry traits in *Pinus pinaster* [J]. Ann For Sci, 2011, 68(4): 873-884. doi: 10.1007/s13595-011-0084-0.
- [7] WANG H Y, ZHUGE Q, HE Z X, et al. *In vitro* Culture and plantlet regeneration of hypocotyl of *Liquidambar formosana* [J]. Plant Physiol Commun, 2001, 37(2): 136-137.
- 王洪云, 诸葛强, 何祯祥, 等. 枫香下胚轴的离体培养和植株再生 [J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(2): 136-137.
- [8] CHENG T L, SHI J S. Soft cutting propagation technique of *Liquidambar formosana* [J]. China For Sci Technol, 2003, 17(1): 36-37. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2003.01.013.
- 成铁龙, 施季森. 中国枫香嫩枝扦插繁殖技术 [J]. 林业科技开发, 2003, 17(1): 36-37. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2003.01.013.
- [9] SHI J S, ZHU S L, MA R X, et al. Study on multi-objective breeding of *Liquidambar formosana* in China: I. Selection of excellent trees [J]. For Sci Technol, 1997(10): 15-16.
- 施季森, 朱胜利, 马如兴, 等. 中国枫香多目标育种的研究, I 中国枫香优树选择 [J]. 林业科技通讯, 1997(10): 15-16.
- [10] FANG L J, SHI J S, LI L, et al. Analysis of genetic variation of progeny traits in *Liquidambar formosana* [J]. Sci Silv Sin, 2003, 39(3): 148-152. doi: 10.11707/j.1001-7488.20030324.
- 方乐金, 施季森, 李力, 等. 枫香子代性状的遗传变异分析 [J]. 林业科学, 2003, 39(3): 148-152. doi: 10.11707/j.1001-7488.20030324.
- [11] CHENG T L, SHI J S. Genetic variation of the half-sib progeny of *Liquidambar formosana* Hance [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci), 2005, 29(1): 29-32. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.01.007.
- 成铁龙, 施季森. 枫香半同胞子代遗传变异研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(1): 29-32. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2005.01.007.
- [12] YE D Q. Open pollination progeny test and excellent family selection of *Liquidambar formosana* [J]. J CS Univ For Technol, 2011, 31(8): 79-82. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2011.08.014.
- 叶代全. 枫香优树自由授粉子代测定与速生优良家系选择 [J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(8): 79-82. doi: 10.3969/j.issn.1673-923X.2011.08.014.
- [13] JIA C, GU Y J, XIA C, et al. The half-sib family progeny test and excellent family selection of *Liquidambar formosana* [J]. J W China For Sci, 2014, 43(5): 122-128. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2014.05.026.
- 贾晨, 辜云杰, 夏川, 等. 枫香半同胞家系子代测定及优良家系选择 [J]. 西部林业科学, 2014, 43(5): 122-128. doi: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2014.05.026.
- [14] CHEN X C. Genetic variation and selection of 14-year-old *Liquidambar formosana* progeny [J]. For Res, 2015, 28(2): 183-187. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2015.02.007.
- 陈孝丑. 枫香优树 14 年生子代遗传变异及选择 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 183-187. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2015.02.007.
- [15] HU W J, WANG X R, HU X Y, et al. Early selection of fine families and individuals of *Liquidambar formosana* [J]. J NE For Univ, 2017, 45(6): 5-11. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2017.06.002.
- 胡文杰, 王晓荣, 胡兴宣, 等. 枫香优良种源及家系早期选择 [J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 5-11. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2017.06.002.
- [16] JI K S, FAN M L, XU L A. Variation analysis and plus family selection on half-sib progenies from clonal seed orchard of *Pinus massoniana* [J]. Sci Silv Sin, 2005, 41(6): 43-49. doi: 10.11707/j.1001-7488.20050607.
- 季孔庶, 樊民亮, 徐立安. 马尾松无性系种子园半同胞子代变异分析和家系选择 [J]. 林业科学, 2005, 41(6): 43-49. doi: 10.11707/j.1001-7488.20050607.
- [17] WANG J Z, XIONG T, ZHANG L, et al. Genetic variation and selection on growth and stem form quality traits of 25-year-old *Eucalyptus cloeziana* provenance [J]. For Res, 2016, 29(5): 705-713. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2016.05.012.

- 王建忠, 熊涛, 张磊, 等. 25 年生大花序桉种源生长与形质性状的遗传变异及选择 [J]. 林业科学研究, 2016, 29(5): 705-713. doi: 10.3969/j.issn.1001-1498.2016.05.012.
- [18] QIN M, YIN G T, YANG J C, et al. Growth traits variation and early selection of *Mytilaria laosensis* provenances and families [J]. Bull Bot Res, 2017, 37(1): 139-146. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2017.01.018.
覃敏, 尹光天, 杨锦昌, 等. 米老排种源家系生长性状变异分析及早期选择 [J]. 植物研究, 2017, 37(1): 139-146. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2017.01.018.
- [19] OU J D, WU Z Z. Excellent families and plus trees of *Taxus wallichiana* var. *mairei* for landscaping [J]. J Zhejiang Agric For Univ, 2016, 33(1): 102-108. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2016.01.014.
欧建德, 吴志庄. 景观型南方红豆杉家系和单株选择 [J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(1): 102-108. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2016.01.014.
- [20] LIU Y, XU H W, TENG W H, et al. Full-sib progeny test and early selection in superior families of *Betula platyphylla* [J]. J Beijing For Univ, 2017, 39(2): 1-8. doi: 10.13332/j.1000-1522.20160138.
刘宇, 徐焕文, 滕文华, 等. 白桦全同胞子代测定及优良家系早期选择 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(2): 1-8. doi: 10.13332/j.1000-1522.20160138.
- [21] DENG B, FANG S Z, YANG W X, et al. Provenance variation in growth and wood properties of juvenile *Cyclocarya paliurus* [J]. New For, 2014, 45(5): 625-639. doi: 10.1007/s11056-014-9424-x.
- [22] SEYED M S. Estimation of genetic parameters related to morphological traits in poplar clones [J]. Amer J Sci Res, 2011, 27: 105-110.
- [23] ZHENG J, HU Z H, ZHENG Y Q, et al. Analysis on geographic variation of phenotypic traits of *Sorbus pohuashanensis* among different provenances [J]. J Plant Resour Environ, 2012, 21(3): 50-56. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2012.03.008.
郑健, 胡增辉, 郑勇奇, 等. 花楸树种源间表型性状的地理变异分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(3): 50-56. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2012.03.008.
- [24] YE X X, XU Z Y, WANG B S, et al. Genetic variations of growth traits in different *Liquidambar formosana* provenances and selection [J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2013, 33(2): 71-74. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2013.02.017.
叶晓霞, 徐肇友, 王帮顺, 等. 不同枫香种源造林实验及优良种源选择 [J]. 浙江林业科技, 2013, 33(2): 71-74. doi: 10.3969/j.issn.1001-3776.2013.02.017.
- [25] HE G P, CHEN Y T, TANG X Y, et al. A study on variations of young forest growing traits in *Liquidambar formosana* geographic provenances [J]. Acta Agric Univ Jiangxi, 2005, 27(4): 585-589. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2005.04.024.
何贵平, 陈益泰, 唐雪元, 等. 枫香地理种源幼林生长性状变异研究 [J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(4): 585-589. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2005.04.024.
- [26] LIU M X, GU Y J, XIA C, et al. A study of variations and selections of *Liquidambar formosana* geographic provenance [J]. J Sichuan For Sci Technol, 2014, 35(5): 13-16. doi: 10.3969/j.issn.1003-5508.2014.05.004.
刘明宣, 辜云杰, 夏川, 等. 枫香地理种源变异与选择 [J]. 四川林业科技, 2014, 35(5): 13-16. doi: 10.3969/j.issn.1003-5508.2014.05.004.
- [27] WANG J Q, ZHAO T Y, GU F P, et al. Study on the genetic variations of half-sib progeny testing and excellent family selection of *Liquidambar formosana* [J]. J SW For Univ, 2015, 35(4): 33-38. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2015.04.006.
王俊青, 赵天宇, 谷凤平, 等. 枫香半同胞家系子代遗传变异与优良家系选择研究 [J]. 西南林业大学学报, 2015, 35(4): 33-38. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2015.04.006.
- [28] ZHANG H Y, LI Z L, DING W E, et al. Plus-trees progeny testing and family selection of *Liquidambar formosana* [J]. Guangdong For Sci Technol, 2015, 31(3): 20-23. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2015.03.005.
张汉永, 李志良, 丁文恩, 等. 枫香优树子代测定及家系选择 [J]. 广东林业科技, 2015, 31(3): 20-23. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2015.03.005.
- [29] ZHU J Y, SHEN W H, JIANG Y, et al. Genetic variation and superior family selection of *Castanopsis hystrix* families [J]. J Trop Subtrop Bot, 2014, 22(3): 270-280. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.03.009.
朱积余, 申文辉, 蒋焱, 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. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2014.03.009.
- [30] FANG L J, SHI J S. Genetic variation of *Liquidambar formosana* progeny testing at year 3 and 9 and family selection [J]. China For Sci Technol, 2010, 24(1): 50-52. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2010.01.013.
方乐金, 施季森. 不同林龄枫香子代性状变异与家系选择 [J]. 林业科技开发, 2010, 24(1): 50-52. doi: 10.3969/j.issn.1000-8101.2010.01.013.
- [31] ZOBEL B J, van BUIJTENEN J P. Wood Variation: Its Causes and Control [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1989: 7-421. doi: 10.1007/978-3-642-74069-5.