

白杨派优良无性系选育研究

许兴华¹,李善文^{2*},潘 瞳¹,黄启伦³,孟宪伟³,许兴成⁴,安新民⁵,张志毅⁵

(1. 宁阳县林业保护发展中心, 山东 宁阳 271400; 2. 山东省林业科学研究院 山东省林木遗传改良重点实验室, 山东 济南 250014;
3. 宁阳县国有高桥林场, 山东 宁阳 271400; 4. 宁阳县磁窑镇农技站, 山东 宁阳 271400; 5. 北京林业大学, 北京 100083)

摘 要:选择白杨派的毛新杨、银白杨、银腺杨(84K)、银毛杨、截叶毛白杨、鲁毛 50 等为亲本,开展杂交育种,获得遗传变异丰富的杂种无性系,选育白杨派新品种。对白杨派的 21 个杂种无性系及对照鲁毛 50 进行无性系测定,对苗木、1~6 a 的胸径、树高及 7 a 的胸径、树高、材积等性状进行遗传变异分析、相关分析、主成分分析和多重比较,综合选择优良无性系。结果表明,苗木胸径、苗高、1~7 a 胸径、树高、单株材积等性状的方差分析,除分枝粗度差异不显著外,无性系其他性状差异显著或极显著。遗传变异分析表明,各性状遗传变异系数的变化范围为 2.94%~68.88%,材积的遗传变异系数最大,达 68.88%;苗木胸径、苗高、1~7 a 树高和胸径、7 a 材积、冠幅、分枝度、分枝角度、枝下高和冠表面积的广义遗传力在 0.725 7~0.966 8,22 个性状属于高遗传力,受强遗传控制;胸径和树高对材积的相关系数呈极显著相关;冠幅、枝下高和树冠表面积对树高、胸径和材积呈极显著相关或显著相关。对 7 年生无性系的 10 个性状进行主成分分析,前 3 个主成分累计贡献率达到 85.692%;运用主成分第 1 主成分值和 7 a 材积多重比较,选出 YX-50、峰雄和 13-16 无性系,材积分别超过对照 62.0%、50.9%和 28.1%,杂交育种效果显著。选育的峰雄(毅杨 1 号)、YX-50(毅杨 2 号)和 13-16(毅杨 3 号)已被授予植物新品种权和国审良种。峰雄(毅杨 1 号)和 YX-50(毅杨 2 号)具有速生、干直等优良特性,适于培育大径材和纸浆材;13-16(毅杨 3 号)为雄株,具有干直、窄冠等特性,适于城乡绿化和行道树栽植。

关键词:白杨派;无性系;遗传变异分析;综合选择

中图分类号:S792.11

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0087-07

A Study on Breeding of Fine Clones in *Leuce*

XU Xing-hua¹, LI Shan-wen^{2*}, PAN Tong¹, HUANG Qi-lun³, MENG Xian-wei³,

XU Xing-cheng⁴, AN Xin-min⁵, ZHANG Zhi-yi⁵

(1. Forestry Protection and Development Center of Ningyang County, Ningyang 271400, Shandong, China;

2. Shandong Academy of Forestry, Key Laboratory for Genetic Improvement in Forest Trees of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China; 3. State-Owned Gaoqiao Forest Farm of Ningyang County, Ningyang 271400, Shandong, China;

4. Agricultural Technology Station of Ciyao Town of Ningyang County, Ningyang 271400, Shandong, China;

5. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to obtain hybrid clones with rich genetic variation and breed new varieties of Section *Leuce*, *P. tomentosa* × *P. bolleana*, *P. alba*, *P. alba* × *P. glandulosa* '84K', *P. alba* × *P. tomentosa*, *P. tomentosa* 'Truncata', *P. tomentosa* 'LM50', etc., were selected as parents. Field experiments were carried out on *Leuce* clones. Genetic analysis, correlation analysis, principal component analysis and multiple compari-

收稿日期:2022-02-21 修回日期:2022-06-29

基金项目:山东省重点研发计划项目(2021SFRC0205);“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2201200);“十一五”国家科技支撑计划课题(2006BAD01A1502)。

第一作者:许兴华,高级农艺师。研究方向:杨树遗传育种和林果栽培。E-mail:tnxxh@126.com

* 通信作者:李善文,博士,研究员。研究方向:杨树遗传育种。E-mail:lishanwen66@163.com

son were adopted on measured data of seedlings and 1 a to 6 a trees, and superior clones were selected comprehensively. The variance analysis of DBH and height of seedling, 1 a to 7 a DBH, tree height and volume per plant of 21 hybrid clones and the control Lumao 50 in Sect. *Leuce* showed that the differences in other traits of the clones were significant or extremely significant except for branch diameter. Genetic variation analysis showed that the genetic variation coefficient of each character ranged from 2.94% to 68.88%, and the genetic variation coefficient of volume was the largest (68.88%). The broad-sense heritability of ground diameter, seedling height, tree height and 1 a to 7 a DBH, 7 a volume, crown width, branch degree, branch angle, branch height and crown surface area ranged from 0.725 7 to 0.966 8. Twenty two traits showed high heritability and were strongly controlled by heredity. The correlation coefficients of DBH and tree height to volume were extremely and significantly correlated. Crown width, underbranch height and crown surface area were significantly correlated with height, DBH and volume. Principal component analysis of 10 characters of 7 a clones showed that the first three principal components contributed 85.692%. By multiple comparison and principal component analysis, YX-50, Fengxiong and 13-16 clones were selected, and the volume of YX-50, Fengxiong and 13-16 clones were 62.0%, 50.9% and 28.1% higher than the control, respectively. Fengxiong (Yiyang No. 1), YX-50 (Yiyang No. 2) and 13-16 (Yiyang No. 3) have been granted the new plant variety right and the state approved improved varieties.

Key words: Section *Leuce*; clone; genetic variation analysis; comprehensive selection

白杨派(Sect. *Leuce*)树种在中国有 18 种、14 变种、16 变型^[1], 如银白杨(*Populus alba*)、毛白杨(*P. tomentosa*)、河北杨(*P. hopeiensis*)、新疆杨(*P. bolleana*)等, 是我国北方重要的工业用材林和生态防护林树种, 在大陆半干旱带和大陆湿润带等生境范围内栽培可发挥较大的生产作用^[2]。白杨派内种间杂交可配性高, 配合力较好^[2-3], 很多专家学者在白杨派种内、种间做了大量的杂交育种研究工作, 培育出许多优良品种, 在生产中发挥了巨大的经济、生态和社会效益, 选育了银毛杨(银白杨×毛白杨)、毛新杨(毛白杨×新疆杨), 朱之悌等^[4]利用毛新杨×毛白杨选育出 6 个三倍体毛白杨, 陈柳晔等^[5]从 I-101(意大利银白杨)×84K(银腺杨 *P. alba*×*P. glandulosa*)杂交组合中选育出秦白杨 1、2、3 号优良品种。白杨派树种遗传变异丰富, 诸多性状存在较大差异, 适宜多性状综合评价和选择^[2, 6]。选择白杨派优良种质资源为亲本, 开展种间杂交或回交, 获得遗传变异丰富的杂种群体^[7], 选育新的优良无性系, 是杨树育种的持久目标。

本研究以白杨派内 8 个杂交组合的 21 个杂种无性系和对照鲁毛 50 为试验材料, 对无性系的多个性状进行遗传变异分析和相关分析, 运用主成分分析和多重比较^[8-9], 选育出综合性状表现优良的无性系, 丰富白杨派良种资源, 为林业生产提供优良品种。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地在山东省宁阳县国有高桥林场, 位于大

汶河南岸河阶地(116°50'E、35°53'N), 土壤为沙质河潮土, 土壤较瘠薄。海拔 78.9 m, 属大陆性暖温带季风气候。年平均气温 13.4℃, 极端最高气温 40.7℃, 极端最低气温 -19.0℃, 年均降水量 689.6 mm, 年蒸发量 1 169.8 mm, 无霜期 206 d。地下水位 5~8 m, pH 值 6.5。

1.2 试验材料和试验设计

试验材料来源于北京林业大学毛白杨协作组, 参试白杨派杂交无性系 21 个, 对照(CK)鲁毛 50 为山东省主栽品种, 共 22 个无性系, 无性系编号及杂交组合见表 1。参试杂交无性系苗木由冠县苗圃提供; 2006 年 3 月造林, 完全随机区组设计, 4 株小区, 单行排列, 4 次重复, 造林苗木为 1 年生苗, 株行距 3 m×4 m, 周边设 2 行保护行, 采用 1 m×1 m×1 m 大穴整地, 每亩施磷酸二铵 25 kg 作底肥, 苗木清水浸泡 1 d 后栽植, 定植后大水漫灌, 第 1、2 年间作小麦、花生等作物, 结合农作物管理施肥, 及时防治病虫害。

1.3 调查和统计方法

1.3.1 调查方法 栽植后测量苗木的苗高和胸径(苗径); 在每年生长季结束后, 测量试验林所有树木的树高(*H*)、胸径(DBH); 在第 7 年(2012 年)测量每株的冠幅、枝下高、通直度、分枝度、第一层分枝角度、分枝粗度、雌雄性等性状。冠幅取东西与南北方向冠幅的平均值; 枝下高是最下第一层分枝的树干高度, 通直度、分枝度和分枝粗度的测定方法见表 2。计算每小区的平均值, 单株材积采用公式计算:

$$V=0.193\ 283\ 21D^2H+0.007\ 734\ 35\times DH+0.821\ 419\ 15D^2 \quad (1)$$

式中: V 为材积, D 为胸径, H 为树高^[2]。

1.3.2 统计方法 以小区平均值进行方差分析,估算各种遗传参数^[9-10]。广义遗传力根据无性系平均值计算:

$$\delta_e^2=M_2,\delta_g^2=(M_1-M_2)/r,\delta_p^2=\delta_g^2+\delta_e^2/r \quad (2)$$

式中: σ_g^2 为遗传方差, σ_p^2 为表型方差, δ_e^2 为环境方差, M_1 为无性系均方, M_2 为误差均方, r 为重复数。

$$\text{广义遗传力 } h^2=\delta_g^2/\delta_p^2\times 100 \quad (3)$$
$$\text{遗传变异系数: } G_{CV}=(\sqrt{\delta_g^2}/\bar{X})\times 100 \quad (4)$$

式中: \bar{X} 为某一个性状的平均值。

$$\text{表型变异系数 } P_{CV}=(\sqrt{\delta_p^2}/\bar{X})\times 100 \quad (5)$$

式中: \bar{X} 为某一性状的平均值。

$$\text{表型相关系数: } r_{pij}=C_{ov\,pij}/\sqrt{\delta_{pi}^2}\times\sqrt{\delta_{pj}^2} \quad (6)$$

式中: $C_{ov\,pij}$ 为 2 个性状的表型协方差, σ_{pi}^2 、 σ_{pj}^2 分别为 i 、 j 性状的表型方差。

$$\text{遗传相关系数 } r_{gij}=C_{ov\,gij}/\sqrt{\delta_{gi}^2}\times\sqrt{\delta_{gj}^2} \quad (7)$$

式中: $C_{ov\,gij}$ 为 2 个性状的遗传协方差, σ_{gi}^2 、 σ_{gj}^2 分别为 i 、 j 性状的遗传方差。无性系选择采用主成分分析和多重比较(LSD 法),利用 DPS 软件分析^[11]。

表 1 无性系编号及杂交组合

Table 1 Clone numbers and cross combinations

无性系编号	杂交组合	母本来源	父本来源
22、23、26、28、30 号	<i>(P. alba</i> × <i>P. glandulosa)</i> × <i>P. bolleana</i>	山东冠县苗圃	中科院植物所
42、46、49、50 号	<i>(P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana)</i> × <i>(P. alba</i> × <i>P. glandulosa</i> ‘84 K’)	中国农业大学	陕西杨凌
64、67、69、76 号	<i>(P. alba</i> × <i>P. tomentosa)</i> × <i>P. bolleana</i>	河北易县	中科院植物所
78、83 号	<i>(P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana)</i> × <i>P. tomentosa</i> ‘LM50’	中国农业大学	山东冠县苗圃
99、101 号	<i>P. alba</i> × <i>P. bolleana</i>	北京植物园	中科院植物所
103 号	<i>(P. alba</i> × <i>P. bolleana)</i> × <i>P. bolleana</i>	吉林白城	中科院植物所
13-16 号	<i>(P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana)</i> × <i>P. tomentosa</i> ‘LM50’	中国农业大学	山东冠县苗圃
峰雄、YX-50 号	<i>(P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana)</i> × <i>P. tomentosa</i> ‘Truncata’	中国农业大学	山东冠县苗圃
鲁毛 50(CK)	<i>P. tomentosa</i> ‘LM50’	山东冠县苗圃	

表 2 通直度、分枝度和分枝粗度评判标准及分值

Table 2 Evaluation standard and score of straightness, branching degree and branching thickness

性状	分值				
	1	2	3	4	5
通直度	完全通直	树干有 1 段稍弯曲	树干有 1~2 段稍弯曲	树干有 2 段以上稍微弯曲或 1 段明显弯曲	树干有 2 段以上明显弯曲
分枝度	主干高度 1/4 以下有 1 个大分枝或几个大分枝	主干高度 1/4~1/2 处有 1 个或几个大分枝	主干高度 1/2~3/4 处有 1 个或几个大分枝	主干高度 3/4 以上有 1 个大分枝	没有明显大分枝
分枝粗度	分枝细小,轮生枝不明显	分枝粗度中等	轮生枝较粗,明显影响主干生长	2 个主梢	2 个主梢以上

2 结果与分析

2.1 白杨派无性系各性状变异分析及方差分析

由表 3、表 4 可以看出,无性系间的生长性状均存在不同程度的变异。7 a 胸径的平均值是 11.5 cm,最大值(18.7 cm)是最小值(6.8 cm)的 2.75 倍;7 a 的树高平均值为 8.9 m,最大值(12.7 m)是最小值(6.1 m)的 2.08 倍;7 a 材积的平均值是 0.048 2 m³,最大值(0.133 2 m³)是最小值(0.012 7 m³)的 10.49 倍;7 年生冠幅平均值为 2.7 m,变幅在 1.3~5.1 m,极差 3.8 m。

对参试无性系的 24 个性状进行方差分析,由 F 值可知:除分枝粗度差异不显著外,树高、胸径、材积、冠幅、通直度、枝下高、树冠表面积等性状的差异达显著或极显著水平。不同林龄方差分析结果不

同,树高和胸径的差异呈逐年增高的趋势。无性系生长性状存在着明显差异,为选育优良无性系提供了丰富的变异。

2.2 无性系的遗传分析

表 5 列出无性系各性状的广义遗传力、遗传变异系数、表型变异系数。由表 5 可知,各性状遗传变异系数的变幅范围为 2.94%~68.88%,材积的遗传变异系数最大,达 68.88%;其中各个年度胸径的遗传变异系数在 13.24%~29.27%,树高的遗传变异系数在 10.86%~20.93%,7 a 材积、冠幅、分枝角度、枝下高、冠表面积的遗传变异系数分别为 68.88%、36.58%、16.05%、16.64%、56.69%,变异系数均在 15%以上,遗传变异较大;树高和胸径遗传变异系数随着树龄的增大而增加,表明随着树龄的增长,白杨派杂种无性系变异增大,这种变异主要

由遗传因素控制,无性系间存在丰富的遗传变异,表明无性系有较好的遗传改良潜力。

遗传力是指亲代传递其遗传特性的相对能力,遗传力大的性状可比较稳定地遗传给后代。白杨派无性系的苗高、苗径、1~7 a 树高和胸径、7 a 材积、冠幅、分枝度、分枝角度、枝下高和冠表面积的广义遗传力在 0.725 7~0.966 8,22 个性状属于高遗传

力,受强遗传控制;通直度的遗传力是 0.491 0,属于中等遗传力;分枝粗度的遗传力是 0.189 9,属于低遗传力。树高、胸径遗传力随林龄增大呈增大趋势,第 7 年树高、胸径、材积 3 性状遗传力达 0.95 以上,达到极高的遗传力水平。表明白杨派无性系生长受到极强的遗传控制,仅分枝粗度受环境影响较大,因此,在第 7 年多性状综合选择优良无性系较为准确。

表 3 各无性系胸径、树高均值和方差分析的 F 值

Table 3 The mean values of DBH, tree height and F-value of variance analysis

无性系	苗径 /cm	1 a 胸径 /cm	2 a 胸径 /cm	3 a 胸径 /cm	4 a 胸径 /cm	5 a 胸径 /cm	6 a 胸径 /cm	苗高 /m	1 a 树高 /m	2 a 树高 /m	3 a 树高 /m	4 a 树高 /m	5 a 树高 /m	6 a 树高 /m
平均值	2.3	3.1	5.2	6.7	8.4	9.5	10.5	3.9	4.4	5.2	5.8	6.9	7.9	8.3
标准差	0.4	0.48	1.05	1.50	1.97	2.43	2.86	0.57	0.56	0.65	0.88	1.28	1.65	1.72
变幅	1.4~3	2.1~4	2.9~7.0	3.4~9.0	4.2~11.5	5.3~14	6.4~16.3	2.4~4.7	3.1~5.3	3.9~6.5	4.2~7.6	4.6~9.4	5.4~11.2	5.8~11.8
极差	1.6	1.9	4.1	5.6	7.3	8.7	9.9	2.3	2.2	2.6	3.4	4.8	5.8	6
F 值	4.109**	4.09**	15.393**	25.559**	26.764**	28.79**	29.977**	3.645**	4.059**	10.392**	14.67**	20.12**	20.525**	20.674**

注: * 表示在 0.05 水平上差异达到显著, ** 表示在 0.01 水平上差异达到极显著。下同。

表 4 7 年生各无性系的性状均值和方差分析的 F 值

Table 4 Mean values of characters of all clones at 7 years old and F-value of variance analysis

无性系	7 a 胸径 /cm	7 a 树高 /m	材积 /m ³	冠幅 /m	通直度	分枝度	分枝 粗度	分枝 角度/(°)	枝下高 /m	树冠 表面积/m ²
平均值	11.5	8.9	0.0482	2.7	1.1	1.7	1.7	52.9	3.4	32.2
标准差	3.43	1.91	0.0344	1.02	0.14	0.18	0.11	9.96	0.62	18.84
变幅	6.8~18.7	6.1~12.7	0.012 7~0.133 2	1.3~5.1	1~1.6	1.4~2	1.5~1.9	37~71.3	2.4~4.7	12.9~87.9
极差	11.9	6.6	0.1205	3.8	0.6	0.6	0.4	34.3	3.3	75
F	30.141**	20.177**	27.872**	16.946**	1.966*	3.947**	1.237	3.655**	7.873**	16.313**

表 5 无性系性状的遗传参数估算

Table 5 Estimation of genetic parameters for clonal characters

性状	遗传力	遗传变异 系数(%)	表型变异 系数(%)	性状	遗传力	遗传变异 系数(%)	表型变异 系数(%)
苗径	0.756 6	15.35	17.64	4 a 树高	0.950 3	18.04	18.50
1 a 胸径	0.755 5	13.24	15.24	5 a 树高	0.951 3	20.31	20.82
2 a 胸径	0.935 0	19.44	20.10	6 a 树高	0.951 6	20.23	20.73
3 a 胸径	0.960 9	21.86	22.31	7 a 树高 X ₂	0.950 4	20.93	21.47
4 a 胸径	0.962 6	22.88	23.32	7 a 材积 X ₃	0.957 4	68.88	71.78
5 a 胸径	0.965 4	25.06	25.50	7 a 冠幅 X ₄	0.941 0	36.58	37.71
6 a 胸径	0.966 6	26.74	27.20	7 a 通直度 X ₅	0.491 0	9.23	13.15
7 a 胸径 X ₁	0.966 8	29.27	29.76	7 a 分枝度 X ₆	0.746 3	9.17	10.61
苗高	0.725 7	12.55	14.73	7 a 分枝粗度 X ₇	0.189 9	2.94	6.68
1 a 树高	0.753 6	10.86	12.51	7 a 分枝角度 X ₈	0.726 4	16.05	18.84
2 a 树高	0.903 8	11.94	12.56	7 a 枝下高 X ₉	0.873 0	16.64	17.81
3 a 树高	0.931 8	14.61	15.14	7 a 冠表面积 X ₁₀	0.938 7	56.69	58.51

2.3 无性系性状相关性分析

遗传相关是表型中能够稳定遗传的那一部分相关,对于育种来说,遗传相关则显现得更为重要,尤其对无性系进行多性状综合评价提供重要参考价值^[12]。由表 6 看出,胸径、树高、材积和冠幅两两性状间的遗传相关均达极显著或显著水平,这 4 个性

状分别与分枝粗度、分枝角度、枝下高、冠表面积的遗传相关也均达极显著或显著水平,说明相关性强,某一性状的改变可以给另一性状带来正向或负向改良;分枝粗度、分枝角度、枝下高、冠表面积两两性状间的遗传相关均达极显著,通直度与冠幅和分枝度呈显著相关。树高与胸径遗传相关系数(0.87)比表

型相关系数(0.85)高 2.4%,树高与冠幅遗传相关系数(0.457)比表型相关系数(0.437)高 4.6%,遗传相关高于表型相关。通直度与分枝度的遗传相关系数(0.669)比表型相关系数(0.432)高 54.9%,差异较大。

由以上分析可知,生长性状、干形性状、冠型性状间存在不同程度的遗传相关关系,对 1 个性状的选择会影响到其他性状。因此,有必要进行多个性状的综合选择。

2.4 主成分分析

对白杨派杂种无性系 7 a 试验林 10 个性状(胸径 X_1 、树高 X_2 、材积 X_3 、冠幅 X_4 、通直度 X_5 、分枝度 X_6 、分枝粗度 X_7 、分枝角度 X_8 、枝下高 X_9 和冠表面积 X_{10})进行主成分分析,首先计算这 10 个性

状的相关矩阵,用 Jacobi 方法求出特征值、各特征值的贡献率及特征向量^[10](表 7)。根据累积贡献率大于 85%的原则,提取前 3 个主成分代表 85.692%的信息。由表 7 可知,主成分 I 中胸径(0.402 3)、树高(0.365)、材积(0.398 9)、枝下高(0.376 4)和冠表面积(0.384)5 个性状的特征向量值较高,均是正值,属“生长性状和冠形性状”的综合因子,5 个因子大,则 I 值大。因此当 I 较大时,树高、胸径、材积、枝下高和冠表面积等生长量指标大;主成分 II 中冠幅(0.381 7)、通直度(0.593 6)和分枝度(0.553 7)3 个性状的特征向量值较高,均是正值,是“干形和冠形”的综合因子,对主成分 II 是正增长;主成分 III 中分枝粗度(0.821 3)和分枝角度(0.334 3)2 个性状的特征向量值较高,均是正值,是“分枝”的综合因子。

表 6 无性系 7 a 性状表型和遗传相关分析

Table 6 Trait phenotypic and genetic correlation analysis of clone at 7 years old

性状	胸径	树高	材积	冠幅	通直度	分枝度	分枝粗度	分枝角度	枝下高	冠表面积
胸径	1	0.870**	0.978**	0.776**	-0.144	0.277	1.192**	-0.673**	0.950**	0.893**
树高	0.850**	1	0.898**	0.457*	-0.437*	0.109	1.326**	-0.709**	0.988**	0.687**
材积	0.974**	0.883**	1	0.711**	-0.287	0.229	1.337**	-0.648**	0.955**	0.873**
冠幅	0.757**	0.437*	0.689**	1	0.438*	0.758**	0.640**	-0.499*	0.645**	0.949**
通直度	-0.079	-0.272	-0.184	0.311	1	0.669**	-0.527*	-0.182	-0.382	0.171
分枝度	0.244	0.070	0.191	0.664**	0.432*	1	0.040	-0.176	0.367	0.626**
分枝粗度	0.503*	0.557**	0.559**	0.307	0.000	0.107	1	-0.816**	1.121**	0.994**
分枝角度	-0.570**	-0.593**	-0.552**	-0.387	-0.011	-0.092	-0.250	1	-0.664**	-0.586**
枝下高	0.884**	0.914**	0.888**	0.571**	-0.271	0.277	0.405	-0.519*	1	0.834**
冠表面积	0.872**	0.670**	0.852**	0.945**	0.139	0.542**	0.446*	-0.468*	0.731**	1

注:右上角为遗传相关系数,左下角为表型相关系数;* * 代表 0.01 水平极显著相关,* 代表 0.05 水平显著相关。

表 7 无性系主成分分析

Table 7 Main component analysis of clones

主成分	I	II	III
特征值	5.804 4	1.884 7	0.880 1
累计贡献率(%)	58.044 0	76.891	85.692 0
胸径 X_1	0.402 3	-0.067 1	0.015 8
树高 X_2	0.365 0	-0.271 6	0.023 8
材积 X_3	0.398 9	-0.133 8	0.030 3
冠幅 X_4	0.333 1	0.381 7	-0.055 7
通直度 X_5	-0.010 3	0.593 6	0.374 4
分枝度 X_6	0.173 9	0.553 7	-0.207 0
分枝粗度 X_7	0.222 1	-0.155 5	0.821 3
分枝角度 X_8	-0.257 0	0.090 9	0.334 3
枝下高 X_9	0.376 4	-0.156 4	-0.160 5
冠表面积 X_{10}	0.384 0	0.205 5	-0.012 7

第 1 主成分的贡献率为 58.044%,反映了总体 58.044%的主成分信息,计算各个无性系的第 1 主成分值(表 8)。由表 8 可知,各无性系的第 1 主成分值变化范围为-2.894 6~6.013 4,变化幅度较大,超过对照鲁毛 50 的有 3 个无性系:YX-50、峰雄和 13-16。

2.5 无性系的多重比较和选择

对 7 年生材积进行多重比较,以检验第 1 主成分值排在前三位的无性系与对照的差异是否达到显著水平(表 9)。单株材积超过对照(鲁毛 50)前三名的是 YX-50、峰雄和 13-16,与主成分分析排名结果一致,YX-50、峰雄和 13-16 无性系的单株材积与对照差异均达到显著水平。入选 3 个无性系的材积分别超过对照 62.0%、50.9%和 28.1%,选择效果显著。

3 结论与讨论

林木育种的主要目的是获得经济性状较高的新品种^[12]。运用多重比较和主成分分析,选出的 YX-50、峰雄和 13-16 优良无性系,材积分别超过对照鲁毛 50 杨 62.0%、50.9%和 28.1%。峰雄(毅杨 1 号)、YX-50(毅杨 2 号)和 13-16(毅杨 3 号)已经被授予植物新品种权和国审良种。峰雄(毅杨 1 号)和 YX-50(毅杨 2 号)的母本是毛新杨(*P. tomentosa* × *P. bolleana*)、父本是截叶毛白杨(*P. tomentosa* ‘Truncnata’),具有速生、干直等优良特性,适于培

表 8 各个无性系的第 1 主成分值

Table 8 First main component values of each clones

无性系	第 1 主成分值	排名	无性系	第 1 主成分值	排名	无性系	第 1 主成分值	排名
YX-50	6.013 4	1	50	0.781 4	9	28	-2.096 1	17
峰雄	4.485 2	2	26	0.468 3	10	30	-2.328 5	18
13-16	2.828 5	3	42	0.333 3	11	103	-2.551 7	19
CK	2.633 4	4	22	-0.718 9	12	101	-2.692 1	20
49	1.569 5	5	23	-0.940 2	13	67	-2.708 3	21
83	1.250 2	6	64	-1.439 9	14	99	-2.894 6	22
78	0.932 4	7	69	-1.677 6	15			
46	0.841	8	76	-2.088 7	16			

表 9 7 年生树材积多重比较

Table 9 Multiple comparisons of volume at 7 years old

无性系	材积均值 /m ³	5% 显著水平	1% 极显著水平	材积超鲁毛 50 杨(%)
YX-50	0.133 2	a	A	62.0
峰雄	0.124 0	a	AB	50.9
13-16	0.105 3	b	BC	28.1
鲁毛 50(CK)	0.082 2	c	CD	0

注:大小写字母分别表示在 0.01、0.05 水平上差异显著性。

育大径材和纸浆材;13-16(毅杨 3 号)母本为毛新杨(*P. tomentosa* × *P. bolleana*)、父本为鲁毛 50(*P. tomentosa* ‘LM50’),雄株,干直,树冠为窄冠型,遗传了母本毛新杨的窄冠特性,适于城乡绿化和行道树栽植。

遗传和变异是林木育种研究的主要内容^[12],是林木遗传改良的基础^[13]。白杨派无性系的苗高、苗径、1~7 a 生的树高、胸径、材积等性状的方差分析表明,除分枝粗度差异不显著外,其他性状差异显著或极显著。遗传变异分析表明,各性状遗传变异系数的变化范围 2.94%~68.88%,材积的遗传变异系数最大,达 68.88%。苗径、苗高、1~7 a 树高和胸径、7 a 材积、冠幅、分枝度、分枝角度、枝下高和冠表面积的广义遗传力在 0.725 7~0.966 8,22 个性状属于高遗传力,受强遗传控制;遗传力随树龄增大呈增大趋势;第 7 年树高、胸径、材积三性状遗传力达 0.95 以上,达到极高的遗传力水平,与许兴华等^[8]、黄逢龙等^[14]、贾素苹等^[15]等研究结果相一致。

相关性分析可以反映各性状之间存在的联系,对了解不同性状之间的关系具有重要作用^[16]。本研究遗传相关分析表明,白杨派无性系各性状的相关性差异性较大。胸径、树高、材积和冠幅两两性状间的遗传相关均达极显著或显著相关,这 4 个性状分别与分枝粗度、分枝角度、枝下高、冠表面积的遗传相关也均达极显著或显著相关,胸径和树高对材积的相关系数呈极显著相关性,与赵曦阳等^[2]、李善文等^[6]、许兴华等^[8]的研究结果相似。冠幅、枝下高和树冠表面积对树高、胸径和材积呈极显著相关或

显著相关,与黄逢龙等^[14]、陈存等^[17]对杨树树冠性状的相关性研究结果相似;各性状间的相关系数呈正或负相关水平,表明任一性状的改良都会给另一性状带来正向改良或负向作用,通过遗传相关分析,可以为遗传改良提供理论基础。

运用主成分分析,对白杨派杂交无性系 7 a 试验林的 10 个性状进行分析,提取前 3 个主成分,代表 10 个性状的 85.692% 的信息,综合代表了的生长、干形和冠形因子,与李善文等^[18]对黑杨派(*Aigeiros*)、马娇等^[19]对侧柏(*Platycladus orientalis*)的主成分研究结果相似。

杨树作为林木遗传育种中的模式树种^[20],有丰富的遗传资源。本研究利用白杨派的毛新杨、银白杨、银腺杨(84K)、银毛杨、截叶毛白杨、鲁毛 50 等为亲本,开展种间和回交,杂种无性系间各性状遗传变异丰富,选择潜力大,杂交育种效果显著。

参考文献:

- [1] 赵天锡,陈章水.中国杨树集约栽培[M].北京:中国科学技术出版社,1994.
- [2] 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. ZHAO X Y, MA K F, SHEN Y B, et al. Characteristic variation and selection of forepart hybrid clones of Sect. *Populus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 45-51. (in Chinese)
- [3] 李天权,朱之梯.白杨派内杂交难易程度及杂交方式的研究[J].北京林业大学学报,1989,11(3):54-59. LI T Q, ZHU Z T. Studies on the limits possibilites and modes of artificial hybridization in section leuce[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1989, 11(3): 54-59. (in Chinese)
- [4] 朱之梯,林惠斌,康向阳.毛白杨异源三倍体 B301 等无性系选育的研究[J].林业科学,1995,31(6):499-505. ZHU Z T, LIN H B, KANG X Y. Studies on allotriploid breeding of *Populus tomentosa* B301 clones[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(6): 499-505. (in Chinese)
- [5] 陈柳晔,史小娟,樊军锋,秦白杨系列品种木材材性及纤维形态的研究[J].西北林学院学报,2017,32(1):253-258. CHEN L Y, SHI X J, FAN J F. Study on properties and fiber

- morphology of Qinbaiyang series varieties woods[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 253-258. (in Chinese)
- [6] 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-traits in Section *Aigeiros* clones[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(3): 36-40. (in Chinese)
- [7] 苏晓华,丁明明,黄秦军. 外来杨树遗传资源及其存在的问题[J]. 林业科学研究, 2005, 18(6): 743-748.
- [8] 许兴华,李霞,孟宪伟,等. 毛白杨优良无性系的选育研究[J]. 山东林业科技, 2006(2): 30-32.
- [9] 解荷锋,于中奎,潘礼晶,等. 毛白杨无性系数量性状的遗传距离分析[J]. 山东林业科技, 1997, (4): 11-15.
- [10] 潘礼晶,解荷锋,赵西珍,等. 28个黑杨无性系的造林试验及其遗传分析[J]. 山东林业科技, 1999(Supp. 1): 8-12.
- [11] 唐启义著. DPS数据处理系统:实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2010.
- [12] 赵曦阳,李颖,赵丽,等. 不同地点白杨杂种无性系生长与适应性表现分析与评价[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(6): 6-14.
ZHAO X Y, LI Y, ZHAO L, *et al.* Analysis and evaluation of growth and adaptive performance of white poplar hybrid clones in different sites[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(6): 7-14. (in Chinese)
- [13] 薛惠芬,于晓池,付鹏跃,等. 黄心梓木优良无性系评价与初选[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 108-114.
XUE H F, YU X C, FU P Y, *et al.* Evaluation and primary selection of excellent clones of *Catalpa fargesii* f. *duclouxii* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 108-114. (in Chinese)
- [14] 黄逢龙,焦一杰,梁军,等. 杨树无性系树冠性状间的相关性与遗传差异[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 61-65.
HUANG F L, JIAO Y J, LIANG J, *et al.* Correlation and genetic difference of crown traits of poplar clones[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 61-65. (in Chinese)
- nese)
- [15] 贾素苹,李金花. 不同立地黑杨派无性系生长和多性状综合评选[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3): 124-130.
JIA S P, LI J H. Growth and comprehensive evaluation of multi-traits for the selection of 7 poplar clones belonging to Section *Aigeiros* in different sites[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 124-130. (in Chinese)
- [16] 芦贤博,徐连峰,庞忠义,等. 胡桃楸种源家系幼龄期生长变异及选择研究[J]. 林业科学研究, 2022, 35(1): 20-30.
LU X B, XU L F, PANG Z Y, *et al.* Variation and selection of seedling growth traits among *Juglans mandshurica* provenances and families[J]. Forest Research, 2022, 35(1): 20-30. (in Chinese)
- [17] 陈存,丁昌俊,黄秦军. 等. 美洲黑杨表型和生理性状多样性及群体结构分析[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 1-12.
CHEN C, DING C J, HUANG Q J, *et al.* Phenotypic and physiological trait diversity and population structure of *Populus deltoides* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 1-12. (in Chinese)
- [18] 李善文,姜岳忠,王桂岩,等. 黑杨派无性系生长与材性联合选择[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 53-58.
LI S W, JIANG Y Z, WANG G Y, *et al.* Joint selection for growth and wood properties in *Aigeiros* clones[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 53-58. (in Chinese)
- [19] 马娇,王清麒,卿仕琦,等. 侧柏古树后备资源健康评价体系的建立与应用[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 90-97.
MA J, WANG Q Q, QING S Q, *et al.* Establishment and application of health evaluation system for reserve resources [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 90-97 (in Chinese)
- [20] 王如月,王雪菱,李际红,等. 美洲黑杨杂交良种‘鲁林9号杨’离体再生体系的建立[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 83-89.
WANG R Y, WANG X L, LI J H, *et al.* Establishment of in vitro regeneration system of *Populus deltoides* × ‘Lulin No. 9’ [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 83-89. (in Chinese)