北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

美洲黑杨种质资源创制和综合评价

许兴华 黄启伦 李善文 孟宪伟 李宗泰 乔艳辉 董玉峰 张志毅

Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources

Xu Xinghua, Huang Qilun, Li Shanwen, Meng Xianwei, Li Zongtai, Qiao Yanhui, Dong Yufeng, Zhang Zhiyi

引用本文:
许兴华, 黄启伦, 李善文, 孟宪伟, 李宗泰, 乔艳辉, 董玉峰, 张志毅. 美洲黑杨种质资源创制和综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(8):79–86. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220101
Xu Xinghua, Huang Qilun, Li Shanwen, Meng Xianwei, Li Zongtai, Qiao Yanhui, Dong Yufeng, Zhang Zhiyi. Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8):79–86. doi: 10.12171/j.1000–1522.20220101

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220101

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

美洲黑杨表型和生理性状多样性及群体结构分析

Phenotypic and physiological trait diversity and population structure of *Populus deltoides*

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 1–12. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200231

毛白杨耐寒种质资源遗传鉴定及评价

Genetic identification and evaluation of cold–resistant germplasm resources in *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 59–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220363

美洲黑杨与欧洲黑杨及其杂交子代材性径向变异规律

Radial variation law of wood properties for *Populus deltoides*, *Populus nigra* and their hybrid progenies

北京林业大学学报, 2020, 42(5): 50–58. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190352

镉胁迫下美洲黑杨无性系‘中菏1号’转录组分析

Transcriptome analysis of clone *Populus deltoides* ‘Zhonghe 1’ under cadmium stress

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 12–21. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210037

秋水仙碱处理诱导银灰杨2n花粉与杂种三倍体创制

Pollen chromosome doubling induced by colchicine treatment and creation of hybrid triploids in *Populus canescens*

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 119–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190363

毛白杨多态SSR引物库和种质资源指纹图谱库构建

Construction of polymorphic SSR primer library and germplasm resource fingerprint database of *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2019, 41(7): 10–18. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190040

DOI:10.12171/j.1000−1522.20220101

美洲黑杨种质资源创制和综合评价

许兴华[1]　黄启伦[2]　李善文[3]　孟宪伟[2]　李宗泰[3]　乔艳辉[3]　董玉峰[3]　张志毅[4]
（1. 宁阳县林业保护发展中心，山东 宁阳 271400；2. 宁阳县国有高桥林场，山东 宁阳 271400；3. 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；4. 北京林业大学生物科学与技术学院，北京 100083）

摘要:【目的】通过美洲黑杨种内杂交育种，创制综合性状优良的新种质，进一步丰富美洲黑杨育种资源。**【方法】**以美洲黑杨无性系Ⅰ-69 为母本，D324 为父本杂交，获得 22 个美洲黑杨杂种无性系。以母本Ⅰ-69 杨为对照开展苗期试验和造林试验，进行无性系测定，对苗高、苗木胸径、第 1 年～第 8 年的树高和胸径、干形、冠型等性状进行遗传变异分析、主成分分析等，综合选择美洲黑杨优异种质。**【结果】**苗高、苗木胸径、第 1 年～第 8 年的树高和胸径以及第 8 年的材积、冠幅、分枝度、通直度和冠高比在无性系间差异显著，分枝角度、枝下高和分枝粗度在无性系间差异不显著；各性状遗传变异系数变化范围为 3.49%～23.98%；苗高、胸径、树高、材积、冠幅和分枝度的重复力在 0.679 8～0.940 5 之间，属于高重复力，受到较强遗传控制。美洲黑杨无性系的生长、干形、冠形性状间存在不同程度的相关性，第 8 年胸径、树高、材积、冠幅和冠高比两两间的遗传相关系数较高，均呈极显著正相关。主成分分析表明：前 3 个主成分的累计贡献率达 86.85%；其中第 1 主成分的贡献率为 57.04%，胸径、树高、材积、冠幅和冠高比对第 1 主成分的贡献最大，可作为无性系的评价指标；第 1 主成分值超过对照Ⅰ-69 的有 616、607、609、623 和 624 共 5 个无性系。**【结论】**美洲黑杨种内杂种无性系存在丰富遗传变异，创制的这 5 个无性系具有生长快、树干通直、冠幅大、冠高比高等优良特性，综合性状优于对照Ⅰ-69 杨，为优异种质。

关键词：杂交；育种；美洲黑杨；种质资源；创制；综合评价
中图分类号：S792.11　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)08−0079−08
引文格式：许兴华，黄启伦，李善文，等. 美洲黑杨种质资源创制和综合评价［J］. 北京林业大学学报，2024，46(8)：79−86.
Xu Xinghua, Huang Qilun, Li Shanwen, et al. Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(8): 79−86.

Creation and comprehensive evaluation of *Populus deltoides* germplasm resources

Xu Xinghua[1]　Huang Qilun[2]　Li Shanwen[3]　Meng Xianwei[2]　Li Zongtai[3]
Qiao Yanhui[3]　Dong Yufeng[3]　Zhang Zhiyi[4]
(1. Forestry Protection and Development Center of Ningyang County, Ningyang 271400, Shandong, China;
2. State-Owned Gaoqiao Forest Farm of Ningyang County, Ningyang 271400, Shandong, China;
3. Shandong Academy of Forestry, Key Laboratory for Genetic Improvement in Forest Trees of Shandong Province, Jinan 250014, Shandong, China;
4. School of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: ［**Objective**］ In order to further enrich the breeding resources of *Populus deltoides*, new germplasms with excellent comprehensive characters were created through intraspecific hybridization breeding of *P. deltoides*. ［**Method**］ A total of 22 hybrid clones of *P. deltoides* were obtained by crossbreeding between *P. deltoides* ‘Ⅰ-69/55’ as the female parent and *P. deltoides* ‘D324’ as the male

收稿日期: 2022−03−18　**修回日期:** 2022−04−29
基金项目: 山东省重点研发计划项目（2021SFGC0205），国家重点研发计划（2021YFD2201200），国家科技支撑计划课题（2006BAD01A15-02）。
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。Email：tnxxh@126.com　地址：271400 山东省宁阳县欣街路 629 号宁阳县林业保护发展中心。
责任作者: 李善文，博士，研究员。研究方向：杨树遗传育种。Email：lishanwen66@163.com　地址：250014 山东省济南市历下区文化东路 42 号山东省林业科学研究院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

parent. The nursery stage and afforestation experiments were carried out with the female *P. deltoides* ‘Ⅰ-69/55’ as control. These clones were tested, and genetic variation analysis and principal component analysis were performed for seedling height and DBH, tree height and DBH from 1st to 8th year, 8th year stem shape, crown type and other characters, so as to comprehensively select excellent *P. deltoides* germplasms. [**Result**] There were significant differences in seedling height and DBH, tree height and DBH from 1st year to 8th year, 8th year volume, crown width, branch degree, straightness and crown-height ratio among clones, but no significant differences in branch angle, subbranch height and branch thickness among clones. Moreover, the coefficient of genetic variation of each character ranged from 3.49% to 23.98%. In addition, the repeatability of seedling height, DBH, tree height, volume, crown width and branch degree were 0.679 8−0.940 5, which belonged to high repeatability and was under strong genetic control. Furthermore, there were different degrees of correlation between growth, stem, and crown traits of *P. deltoides* clones. The genetic correlation coefficients between DBH, tree height, volume, crown width and crown-height ratio in the 8th year were relatively high, showing a highly significant positive correlation. Additionally, principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the top three principal components was 86.85%, of which the contribution rate of the first principal component was 57.04%, and the DBH, tree height, volume, crown width and crown-height ratio contributed the most to the first principal component, which could be used as the evaluation index of clones. There were five clones, i.e. 616, 607, 609, 623, and 624, whose first principal component value exceeded the control *P. deltoides* ‘Ⅰ-69/55’. [**Conclusion**] There are abundant genetic variations in the intraspecific hybrid clones of *P. deltoides*. The created five clones have excellent characteristics such as fast growth, straight trunk, large crown width and high crown-height ratio, and the comprehensive traits are better than those of control *P. deltoides* ‘Ⅰ-69/55’. So they are excellent germplasms.

Key words: hybridization; breeding; *Populus deltoides*; germplasm resources; creation; comprehensive evaluation

黑杨派(Sect. *Aigeiros*)杨树具有早期速生、材质优良、适应性强的特点，是营造速生用材林的优良树种[1−2]，是世界中纬度平原地区栽培面积最大的速生用材树种之一。我国缺乏黑杨派的美洲黑杨(*Populus deltoides*)种质资源[3]，利用从国外引进的美洲黑杨资源开展杂交育种，获得高产优质杂种群体[4]，是杨树育种的重要内容。

我国自 1972 年从意大利引进美洲黑杨南方型无性系Ⅰ-69/55(*P. deltoides* ‘Ⅰ-69/55’，以下简称Ⅰ-69)、Ⅰ-63(*P. deltoides* ‘Ⅰ-63/51’)和欧美杨无性系Ⅰ-72(*P.* × *euramericana* ‘Ⅰ-72/58’)后，育种工作者利用这些无性系作亲本进行了杂交育种研究[5]。符毓秦等[6]以Ⅰ-69 杨为母本，用Ⅰ-63 杨、密苏里杨(*P. deltoides* var. *missouriensis*)和卡罗林杨(*P. deltoides* ‘Carolin’)的混合花粉授粉，选育出陕林 3 号杨(*P. deltoides* ‘Shanlin No. 3’)优良无性系。黄东森等[7]以Ⅰ-69 杨为母本，欧亚黑杨(*P. nigra*)混合花粉为父本，选育出中林 46(*P.* × *euramericana* ‘Zhonglin-46’)、中林 23(*P.* × *euramericana* ‘Zhonglin-23’)等优良无性系。韩一凡等[8]以Ⅰ-69 杨为母本，Ⅰ-63 杨为父本，选育出南抗 1 号(*P. deltoides* ‘Nankang-1’)和南抗 2 号(*P. deltoides* ‘Nankang-2’)优良品种。王福森等[9]从美洲黑杨 × 小叶杨(*P. simonii*)杂交组合中选育出龙丰 1 号杨(*P. deltoides* × *P. simonii* ‘LongFeng-1’)和龙丰 2 号杨(*P. deltoides* × *P. simonii* ‘LongFeng-2’)，这 2 个品种杂种优势显著，具有速生、优质、抗寒、耐旱、抗病虫等优良特性。吴中能等[10]通过美洲黑杨种内杂交选育出江淮 1 号杨(*P. deltoides* ‘Jianghuai No. 1’)和江淮 2 号杨(*P. deltoides* ‘Jianghuai No. 2’)，这 2 个品种具有速生、干形通直圆满、出材率高、材质佳、抗病虫、抗风折、耐水湿、适应性强等优点。通过杂交育种选育出的杨树优良品种，加快了我国杨树良种的更新换代，丰富了杨树良种资源。杨树高产性状的选择和改良一直是育种研究的目标，育种工作者通过分析无性系生长性状的遗传变异，从而筛选出高产的优良无性系[11]。但目前生产中普遍存在美洲黑杨优异种质资源不足，新品种的遗传基础较窄，人工林的稳定性较差，经常发生病虫害等问题，困扰着杨树栽培和产业发展[12]。

鉴于此，本研究以美洲黑杨无性系Ⅰ-69 为母本，美洲黑杨无性系 D324 为父本，人工控制授粉杂

交获得无性系，测定各个无性系的生长、干形、冠型等性状，对杂种无性系多个性状进行遗传变异分析，选育出综合性状优良的新种质，进一步丰富美洲黑杨育种资源。

1　研究区概况及研究方法

1.1　研究区概况

研究区山东省宁阳县国有高桥林场（116°50′E，35°53′N）位于大汶河南岸河阶地，土壤为沙质河潮土，土壤较瘠薄。海拔高度 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 ℃，年均降雨量 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　研究材料和研究方法

以美洲黑杨无性系Ⅰ-69 杨为母本，美洲黑杨无性系 D324 为父本，人工控制授粉获得杂交子代，通过苗期试验初选出 22 个美洲黑杨杂种无性系参与造林试验，对照（CK）为母本Ⅰ-69 杨，共 23 个无性系参加试验。造林苗木由山东省冠县苗圃提供，为 2 年根 1 年干苗木。2006 年 3 月造林，采用完全随机区组设计，6 株小区，单行排列，4 次重复，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，以 375 kg/hm^2 磷酸二铵作底肥；苗木用清水浸泡 1 d 后栽植，定植后大水漫灌，第一、二年间作小麦（*Triticum aestivum*）、花生（*Arachis hypogaea*）等作物，结合农作物管理施肥，及时防治病虫害。

造林后测量苗木的苗高和胸径；在每年生长季结束后，测量每木树高、胸径；第 8 年增加测量冠幅、通直度、分枝度、枝下高、第一层分枝角度、第一层分枝粗度等性状，并观察每个无性系的雌雄性。单株材积采用胸高形数法计算[13]。

$$V = g_{1.3} f_{1.3} H$$

式中：V 为单株材积；$g_{1.3}$ 为胸高断面积；H 为树高；$f_{1.3}$ 为胸高形数，取值 0.467 5。

通直度、分枝度、分枝角度和分枝粗度的测定按照树干弯曲程度和分枝状况，赋值 1 ~ 4 分，标准见表 1。

1.3　数据分析方法

以小区平均值进行方差分析，估算各个遗传参数[14−15]。参数包括无性系重复力（R）、遗传方差（σ_g^2）、环境方差（σ_e^2）、表型方差（σ_p^2）、遗传变异系数（GCV）、表型变异系数（PCV）、表型相关系数（r_{pij}）、遗传相关系数（r_{gij}）。

$$R = 1 - 1/F$$

式中：F 为方差分析中 F 值。

$$\sigma_g^2 = (M_1 - M_2)/r$$

$$\sigma_e^2 = M_2$$

$$\sigma_p^2 = \sigma_g^2 + \sigma_e^2/r$$

式中：M_1 为无性系均方，M_2 为误差均方，r 为重复数。

$$\mathrm{GCV} = \left(\sqrt{\sigma_g^2}/\overline{X}\right) \times 100\%$$

$$\mathrm{PCV} = \left(\sqrt{\sigma_p^2}/\overline{X}\right) \times 100\%$$

式中：$\overline{X}$ 为某一个性状的平均值。

$$r_{pij} = \mathrm{cov}(p_{ij}) \Big/ \left(\sqrt{\sigma_{pi}^2} \times \sqrt{\sigma_{pj}^2}\right)$$

式中：$\mathrm{cov}(p_{ij})$ 为 i 性状和 j 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。

$$r_{gij} = \mathrm{cov}(g_{ij}) \Big/ \left(\sqrt{\sigma_{gi}^2} \times \sqrt{\sigma_{gj}^2}\right)$$

表 1　通直度、分枝度、分枝角度和分枝粗度调查评判标准及分值

Tab. 1　Evaluation criteria and score of straightness, branching degree, branching angle and branching thickness

性状 Trait	分值 Score			
	1	2	3	4
通直度 Straightness	完全通直 Completely straight	树干有1段稍弯曲 Trunk with one slightly curved section	树干有2段稍弯曲 Trunk with two slightly curved segments	树干有2段以上明显弯曲 Trunk with two or more distinctly curved segments
分枝度 Branching degree	主干高度1/4以下有1个或几个较大分枝 One or several larger branches below 1/4 of trunk height	主干高度1/4 ~ 1/2处有1个或几个较大分枝 One or several larger branches at 1/4 to 1/2 of trunk height	主干高度1/2 ~ 3/4处有1个或几个较大分枝 One or several larger branches at 1/2 to 3/4 of trunk height	主干高度3/4以上有1个或几个较大分枝 One or several larger branches over 3/4 of trunk height
分枝角度 Branching angle/(°)	< 30	[30, 45)	[45, 60)	⩾60
分枝粗度 Branching thickness	分枝细小，轮生枝不明显 Branches are small and the verticillate branches are not obvious	分枝粗度中等 Medium branching thickness	轮生枝较粗，明显影响主干生长 Verticillate branches are thicker, significantly affecting the growth of main stem	两个主梢 Two main tips

式中：cov(g_{ij}) 为 i 性状和 j 性状的遗传协方差，σ^2_{gi}、σ^2_{gj} 分别为 i、j 性状的遗传方差。

种质评价和选择采用主成分分析法[15−16]，利用 DPS 软件进行统计分析[17]。

2 结果与分析

2.1 无性系的各性状变异分析和方差分析

表 2 和表 3 显示：各无性系的苗木胸径、苗高和第 1～8 年的胸径、树高在无性系间存在较大差异：苗木胸径的变幅为 1.3～3.0 cm，生长最快无性系的胸径比最慢无性系高 1.7 cm；苗高的变幅为 2.8～4.7 m，生长最快无性系的苗高比最慢无性系高 1.9 m；第 1～7 年的胸径和树高在无性系间均存在较大变异幅度；第 8 年胸径最大值（13.7 cm）比最小值（9.8 cm）高 39.8%，第 8 年树高的最大值（12.6 m）比最小值（8.6 m）高 46.5%；第 8 年材积的平均值为 0.058 8 m^3，最大值（0.085 2 m^3）比最小值（0.032 1 m^3）高 165.4%，极差为 0.053 1 m^3。对美洲黑杨无性系的苗木胸径、苗高、第 1～8 年的树高和胸径、第 8 年的材积、冠幅、分枝角度、分枝度、通直度、枝下高、冠高比、分枝粗度等 26 个性状逐一进行方差分析，除分枝角度、枝下高和分枝粗度差异不显著外，其他 23 个性状在无性系间的差异均达显著水平（$P<0.05$）或极显著水平（$P<0.01$）。这表明大多性状在不同无性系间存在较大变异，这为优良无性系选择提供了变异基础。

2.2 无性系各性状的遗传分析

依据方差分析的方差分量，计算无性系各性状的重复力、遗传方差、环境方差、表型方差、遗传变异系数和表型变异系数。表 4 显示：从重复力来看，胸径、树高、材积、冠幅和分枝度的重复力在 0.679 8～0.940 5 之间，属于高重复力；冠高比的重复力为 0.531 2，属于中等重复力；通直度、分枝角度、枝下高和分枝粗度 4 个性状的重复力在 0.107 1～0.385 7 之间，属于低重复力，受环境影响较大。胸径、树高、材积、冠幅和分枝度均达到高重复力，表明无性系生长性状受到较强的遗传控制，可比较稳定地遗传给后代。

各性状表型变异系数变化范围为 5.98%～29.42%，其中材积最高，为 29.42%；各性状遗传变异系数变化范围为 3.49%～23.98%，其中分枝角度的遗传变异系数为 3.49%，为最低；第 8 年材积的遗传变异系数最大，为 23.98%。这表明以材积为主要指标进行选择，效果好于树高和胸径。

2.3 无性系性状相关性分析

表 5 显示：胸径、树高和材积间在表型和遗传方

表 2 无性系的胸径、树高及其方差分析

Tab. 2 DBH, tree height and their variance analysis of clones

项目 Item	胸径 DBH/cm								高度 Height/m							
	苗 Seedling	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a	苗 Seedling	1a	2a	3a	4a	5a	6a	7a
均值 Mean	2.3	3.8	6.5	8.0	9.1	9.8	10.4	11.4	4.0	4.8	6.2	7.6	8.4	9.0	9.5	10.0
SD	0.39	0.42	0.63	0.84	0.94	1.01	1.15	1.21	0.56	0.50	0.47	0.64	0.78	0.92	0.96	1.07
变幅 Amplitude	1.3～3.0	2.6～4.4	4.9～7.8	5.5～9.1	6.9～10.4	7.7～11.3	8.4～11.9	9.1～13.1	2.8～4.7	3.8～5.8	5.1～7.1	6.5～9.0	7.0～9.8	7.3～10.8	7.7～11.2	8.1～11.7
极差 Range	2.7	1.8	2.9	3.6	3.5	3.4	3.5	4.0	1.9	2.0	2.0	2.5	2.8	3.5	3.5	3.6
F	11.755**	4.42**	3.188**	4.115**	4.283**	4.964**	5.208**	5.421**	16.795**	7.306**	3.169**	3.524**	4.211**	4.53**	4.556**	5.257**

注：1a～7a代表第1年到第7年。*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。Notes: 1a−7a represent the 1st to 7th year. * means significant difference at the level of 0.05, ** means extremely significant difference at the level of 0.01. The same below.

表 3 无性系第 8 年各生长性状及其方差分析

Tab. 3 Growth traits and their variance analysis of clones in the 8th year

项目 Item	胸径 DBH/cm	树高 Tree height/m	材积 Volume/m^3	冠幅 Crown width/m	分枝角度 Branching angle	分枝度 Branching degree	通直度 Straightness	枝下高 Under branch height/m	冠高比 Crown-height ratio	分枝粗度 Branching thickness
均值 Mean	12.1	10.6	0.058 8	3.1	2.4	2.7	1.4	3.0	0.709	1.9
SD	1.18	1.21	0.016 5	0.26	0.22	0.56	0.18	0.30	0.042 2	0.22
变幅 Amplitude	9.8～13.7	8.6～12.6	0.032 1～0.085 2	2.6～3.5	2.1～3.0	2.0～4.0	1.2～2.1	2.6～3.8	0.590～0.795	1.3～2.2
极差 Range	3.9	4.0	0.053 1	1.9	1.2	2.0	0.9	1.2	0.205	0.9
F	5.506**	7.089**	6.599**	3.847**	1.165	3.123**	1.628*	1.411	2.133*	1.120

表 4　无性系各性状的遗传参数

Tab. 4　Genetic parameters for each trait of clones

性状 Trait	重复力 Repeatability	环境方差 Environmental variance	遗传方差 Genetic variance	表型方差 Phenotypic variance	遗传变异系数 GCV/%	表型变异系数 PCV/%
苗木胸径 Seedling DBH	0.914 9	0.053 8	0.144 8	0.158 2	16.54	17.29
1a DBH	0.773 8	0.159 3	0.136 3	0.176 1	9.72	11.04
2a DBH	0.686 3	0.501 2	0.274 2	0.399 5	8.06	9.72
3a DBH	0.757 0	0.682 8	0.531 7	0.702 4	9.12	10.48
4a DBH	0.766 5	0.822 4	0.675 0	0.880 6	9.03	10.31
5a DBH	0.798 5	0.946 8	0.960 4	1.197 1	10.00	11.16
6a DBH	0.808 0	1.015 8	1.068 6	1.322 5	9.94	11.06
7a DBH	0.815 5	1.085 0	1.199 2	1.470 4	9.61	10.64
8a DBH	0.818 4	1.019 7	1.148 5	1.403 4	8.86	9.79
苗高 Seedling height	0.940 5	0.074 9	0.295 8	0.314 5	13.60	14.02
1a树高 1a tree height	0.863 1	0.126 3	0.199 1	0.230 6	9.30	10.00
2a树高 2a tree height	0.684 4	0.278 2	0.150 9	0.220 4	6.27	7.57
3a树高 3a tree height	0.716 2	0.463 7	0.292 6	0.408 5	7.12	8.41
4a树高 4a tree height	0.762 5	0.572 7	0.459 8	0.602 9	8.07	9.24
5a树高 5a tree height	0.779 2	0.754 0	0.665 4	0.853 9	9.06	10.27
6a树高 6a tree height	0.780 5	0.807 4	0.717 9	0.919 7	8.92	10.09
7a树高 7a tree height	0.809 8	0.872 9	0.928 9	1.147 1	9.64	10.71
8a树高 8a tree height	0.858 9	0.821 1	1.249 9	1.455 2	10.55	11.38
材积 Volume	0.847 5	0.000 2	0.000 2	0.000 3	23.98	29.42
冠幅 Crown width	0.740 1	0.072 3	0.051 5	0.069 6	7.32	8.51
分枝角度 Branching angle	0.141 6	0.168 7	0.007 0	0.049 2	3.49	9.24
分枝度 Branching degree	0.679 8	0.394 4	0.209 3	0.307 9	16.94	20.55
通直度 Straightness	0.385 7	0.080 5	0.012 6	0.032 8	8.01	12.94
枝下高 Under branch height	0.291 3	0.225 7	0.023 2	0.079 6	5.08	9.40
冠高比 Crown-height ratio	0.531 2	0.003 3	0.001 0	0.001 8	4.46	5.98
分枝粗度 Branching thickness	0.107 1	0.173 8	0.005 2	0.048 7	3.79	11.62

面均呈显著正相关；胸径与材积在遗传相关方面呈极显著正相关，树高与材积在遗传相关方面呈极显著正相关，说明胸径和树高越大，材积越大；胸径、树高、材积、冠幅和冠高比两两间的遗传相关系数均较高（相关系数 > 0.6），均呈极显著正相关；分枝角度和通直度与胸径、树高和材积等性状呈弱相关，在表型和遗传相关方面相关性均不显著；树高与胸径的遗传相关系数比表型相关系数高 5.2%，冠幅与材积的遗传相关系数比表型相关系数高 26.4%。

由上述分析可知：美洲黑杨无性系的生长、干形、冠型等性状间存在不同程度的遗传相关关系。对一个性状的选择会影响到其他性状的表现，遗传相关和表型相关分析对指导无性系的相关选择，尤其对无性系的多性状综合评价，具有重要的参考价值。

2.4　主成分分析

选取表 3 中第 8 年无性系之间存在显著差异的 7 个性状进行主成分分析，首先计算这 7 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[10−11]，结果见表 6。根据累积贡献率大于 80% 的原则，选取前 3 个主成分。依据各性状对应的向量值的大小，可以了解 3 个主成分的生物学意义，3 个主成分代表 7 个性状的 86.85% 的信息。表 6 显示：第 1 主成分中胸径（0.472 5）、树高（0.453 8）、材积（0.480 0）、冠幅（0.379 4）和冠高比（0.405 9）5 个性状的特征向量值较高，是正值，通直度（−0.122 1）为负值，因此第 1 主成分是表示生长性状、冠形性状和干形性状的综合因子，第 1 主成分值越大，胸径、树高、材积、冠幅和冠高比这 5 个性状值也越大，而树干通直度值越小，表示树干较直立；第 2 主成分中分枝度和通直度的特征向量绝对值较大，分别为 0.639 7、0.644 9，主要表示分枝和干形因子，分枝度的特征向量值是负值，通直度是正值，第 2 主成分值越大，分枝度值就越小，树干就越弯曲；

表 5 第 8 年各性状表型相关和遗传相关分析

Tab. 5 Phenotypic and genetic correlation analysis of various traits in the 8th year

性状 Trait	胸径 DBH	树高 Tree height	材积 Volume	冠幅 Crown width	分枝角度 Branching angle	分枝度 Branching degree	通直度 Straightness	枝下高 Under branch height	冠高比 Crown-height ratio	分枝粗度 Branching thickness
胸径 DBH	1	**0.886****	**0.968****	**0.999****	**0.405**	**0.140**	**−0.128**	**0.213**	**0.867****	**0.264**
树高 Tree height	0.842**	1	**0.976****	**0.678****	**0.316**	**0.184**	**−0.076**	**0.330**	**0.850****	**0.503***
材积 Volume	0.966**	0.947**	1	**0.852****	**0.348**	**0.120**	**−0.081**	**0.262**	**0.896****	**0.355**
冠幅 Crown width	0.779**	0.527**	0.674**	1	**1****	**0.136**	**−0.267**	**0.079**	**0.840****	**−0.164**
分枝角度 Branching angle	0.174	0.183	0.178	0.279	1	**0.271**	**0.997****	**−0.293**	**0.525****	**−0.145**
分枝度 Branching degree	0.114	0.126	0.104	0.095	0.078	1	**−0.578****	**−0.940****	**0.694****	**−0.518***
通直度 Straightness	−0.074	−0.021	−0.042	−0.139	0.213	−0.239	1	**1****	**−1****	**0.025**
枝下高 Under branch height	0.156	0.141	0.159	0.094	−0.124	−0.394	0.504*	1	**−0.189**	**0.172**
冠高比 Crown-height ratio	0.624**	0.722**	0.682**	0.479*	0.247	0.376	−0.375	−0.559**	1	**0.433***
分枝粗度 Branching thickness	0.100	0.160	0.140	0.020	−0.020	−0.190	0.160	0.080	0.050	1

注：加粗的为遗传相关系数，加下划线为表型相关系数，*表示在0.05 水平上显著相关，**表示在 0.01 水平上极显著相关。Notes: the bold is genetic correlation coefficient, and the underline is phenotypic correlation coefficient. * means significant correlation at 0.05 level , ** means extremely significant correlation at 0.01 level.

表 6 第 8 年 7 个性状的主成分分析

Tab. 6 Principal component analysis of 7 traits in the 8th year

项目 Item	主成分1 Component 1	主成分2 Component 2	主成分3 Component 3
特征值 Eigenvalue	3.993 1	1.317 3	0.769 0
贡献率 Contribution rate/%	57.04	18.82	10.99
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	57.04	75.86	86.85
胸径 DBH	0.472 5	0.172 7	−0.047 6
树高 Tree height	0.453 8	0.143 0	0.168 7
材积 Volume	0.480 0	0.182 5	0.044 1
冠幅 Crown width	0.379 4	0.110 2	−0.290 8
分枝度 Branching degree	0.129 7	−0.639 7	0.638 0
通直度 Straightness	−0.122 1	0.644 9	0.684 0
冠高比 Crown-height ratio	0.405 9	−0.281 4	0.088 4

第 3 主成分中分枝度和通直度的特征向量较大，分别为 0.638 0、0.684 0，主要表示分枝和干形因子，第 3 主成分值越大，分枝度值就越大，树干就越弯曲。

由表 6 中各性状的特征向量值可以得到主成分的线性方程，用 X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7 分别表示第 8 年胸径、第 8 年树高、第 8 年材积、冠幅、分枝度、通直度、冠高比，用 Y_1 代表综合得分，Y_1 的线性方程表达式为 $Y_1 = 0.472\ 5X_1 + 0.453\ 8X_2 + 0.480\ 0X_3 + 0.379\ 4X_4 + 0.129\ 7X_5 - 0.122\ 1X_6 + 0.405\ 9X_7$。

依据综合得分的线性方程，计算各个无性系的综合得分，并根据综合得分的大小，对 23 个无性系进行排名，结果见表 7。综合得分超过对照Ⅰ-69 的有 616、607、609、623 和 624 共 5 个无性系，表明这 5 个无性系具有生长量大、树干通直、冠幅大、冠高比高等优良特性，综合性状优于对照Ⅰ-69，为优异种质。

3 结论与讨论

美洲黑杨天然分布在北美洲北纬 30° ~ 50°，主要生长在密西西比河的冲积平地上；其树干高大，树冠扩展，林分生产力高，经济价值高[18]。美洲黑杨及其杂种欧美杨是北美洲、欧洲、亚洲等地的重要造林树种。中国于 1972 年从意大利引进美洲黑杨南方型无性系Ⅰ-69 和Ⅰ-63，它们在我国亚热带地区表现出较强适应性和较高生产力，成为改变我国杨树栽培区格局和培育南温带及北亚热带新品种的关键性种质资源[19]，其中Ⅰ-69 杨在杨树育种中表现更为突

表 7　各无性系综合得分排序

Tab. 7　Ranking of comprehensive scores for each clone

排名 Ranking	无性系 Clone	综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking	无性系 Clone	综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking	无性系 Clone	综合得分 Comprehensive score
1	616	2.717 1	9	630	1.158 4	17	620	−1.321 7
2	607	2.524 2	10	621	0.515 4	18	611	−1.509 7
3	609	2.264 2	11	629	0.354 3	19	613	−1.859 7
4	623	2.244 9	12	614	−0.033 2	20	610	−1.950 3
5	624	2.205 2	13	628	−0.051 3	21	627	−2.800 1
6	Ⅰ-69	2.139 0	14	633	−0.324 7	22	612	−3.370 1
7	622	1.649 0	15	608	−0.707 5	23	631	−4.457 7
8	632	1.506 1	16	626	−0.892 0			

出，一些学者利用这个无性系作母本进行了杂交育种研究。符毓秦等[6]以Ⅰ-69 杨为母本，青杨（*P. cathayana*）为父本进行杂交育种，选育出陕林 4 号杨（*P. deltoides* × *P. cathayana* ‘Shaanlin 4’）优良无性系。王明麻等[20]以Ⅰ-69 杨为母本、小叶杨（*P. simonii*）为父本开展杂交育种，选育出 NL-105、NL-106、NL-121 等优良无性系。陈鸿雕等[21]从Ⅰ-69 × 山海关杨（*P. deltoides* ‘Shanhaiguan’）杂交组合中选出美洲黑杨优良品种辽宁杨（*P.* × *Liaoningensis*），它具有抗溃疡病和灰斑病等特点，并且速生，胸径生长量超沙兰杨（*P.* × *euramericana* ‘Sacrau-79’）20% 以上。潘惠新等[22]从Ⅰ-69 × Ⅰ-45 杂交组合中选出欧美杨优良品种南林 95 杨（*P.* × *euramericana* ‘Nanlin95’）和南林 895 杨（*P.* × *euramericana* ‘Nanlin895’）。因此，Ⅰ-69 杨不但是引种成功的优良无性系，而且还是重要的育种资源。

本研究以美洲黑杨无性系Ⅰ-69 杨为母本，以美洲黑杨无性系 D324 为父本杂交获得的 22 个杂种无性系为试验材料，以母本Ⅰ-69 为对照，经过 8 年较长时间的造林试验观测，对方差分析差异显著的 7 个性状（胸径、树高、材积、冠幅、分枝度、通直度和冠高比）进行主成分分析，计算各个无性系的第 1 主成分值。第 1 主成分值超过对照Ⅰ-69 的有 616、607、609、623 和 624 共 5 个无性系，这 5 个无性系具有生长量大、树干通直、冠幅大、冠高比高等优良特性，综合性状优于对照Ⅰ-69 杨，为优异种质资源。赵曦阳等[14]利用河南省许昌市的相同无性系的 3 年生试验数据进行多性状分析和选择，选出 5 个优良无性系（616、609、623、624 和 629），其中 4 个无性系与本试验的结果相同。本试验选出的 5 个种质，616、607 和 623 为雄株，609 和 624 为雌株，这 5 个美洲黑杨优异种质为杨树遗传改良提供了新的育种材料，可以通过杂交育种进一步选育新的美洲黑杨和欧美杨新品种。

参　考　文　献

[1] 张绮纹, 苏晓华. 杨树定向遗传改良及高新技术育种 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
Zhang Q W, Su X H. Directional genetic improvement and high-tech breeding of poplar[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999.

[2] 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.

[3] 张绮纹, 苏晓华. 国外黑杨派内杨树遗传改良及国外杨树引种的研究 [M]// 林业部科技司. 阔叶树遗传改良. 北京: 科学技术文献出版社, 1991: 34−58.
Zhang Q W, Su X H. Study on genetic improvement in *Aigeiros* and its introduction[M]// Science and Technology Department, Forestry Department. Genetic improvement on broadleaf trees. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991: 34−58.

[4] 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.
Su X H, Ding M M, Huang Q J. The genetic resources of introduced *Populus* and the problems existed in China[J]. Forest Research, 2005, 18(6): 743−748.

[5] 李善文, 张志毅, 何承忠, 等. 中国杨树杂交育种研究进展 [J]. 世界林业研究, 2004, 17(2): 37−41.
Li S W, Zhang Z Y, He C Z, et al. Progress on hybridization breeding of poplar in China[J]. World Forestry Research, 2004, 17(2): 37−41.

[6] 符毓秦, 刘玉媛, 李均安, 等. 美洲黑杨杂种无性系——陕林 3、4 号杨的选育 [J]. 陕西林业科技, 1990(3): 1−9, 13.
Fu Y Q, Liu Y Y, Li J A, et al. Cottonwood hybrid clones: selection of Shanlin No. 3 and No. 4[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 1990(3): 1−9, 13.

[7] 黄东森, 朱湘渝, 王瑞玲, 等. 中林 46 等 12 个杨树新品种杂交育种 [M]// 林业部科技司. 阔叶树遗传改良. 北京: 科学技术文献出版社, 1991: 1−19.
Huang D S, Zhu X Y, Wang R L, et al. Hybrid breeding of 12 new poplar varieties including Zhonglin-46 [M]// Science and Technology Department, Forestry Department. Genetic improvement on broadleaf trees. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991: 1−19.

[8] 韩一凡, 杨自湘, 王建园, 等. 杨树抗性育种进展 [M]// 林业部科技司. 阔叶树遗传改良. 北京: 科学技术文献出版社, 1991: 20−33.
Han Y F, Yang Z X, Wang J Y, et al. Progress in resistance breeding of poplar trees[M]// Science and Technology Department, Forestry Department. Genetic improvement on broadleaf trees. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991: 20−33.

[9] 王福森, 李树森, 赵玉恒, 等. 龙丰 1 号、2 号杨选育研究 [J]. 防护林科技, 2020(9): 24−28.
Wang F S, Li S S, Zhao Y H, et al. Selection of *Populus deltoides* × *Populus simonii* 'LongFeng-1' and *Populus deltoides* × *Populus simonii* 'LongFeng-2'[J]. Protection Forest Science and Technology, 2020(9): 24−28.

[10] 吴中能, 于一苏, 苏晓华, 等. 杨树优良无性系'江淮 1 号杨'和'江淮 2 号杨'选育研究 [J]. 安徽林业科技, 2021, 47(5): 16−20.
Wu Z N, Yu Y S, Su X H, et al. Study on developing fine poplar clones Jianghuai poplar No. 1 and Jianghuai poplar No. 2[J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2021, 47(5): 16−20.

[11] 张晓艳, 季新月, 王雷, 等. 不同地点黑杨派无性系生长性状变异及其与叶片性状相关分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(3): 65−73.
Zhang X Y, Ji X Y, Wang L, et al. Genetic variation in growth traits at different sites and correlationship among growth traits and leaf traits of Section *Aigeiros* clones[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(3): 65−73.

[12] 许兴华, 李霞, 孟宪伟, 等. 黑杨派无性系选择研究 [J]. 山东林业科技, 2006(1): 21−23.
Xu X H, Li X, Meng X W, et al. Study on clone selection of *Aigeiros*[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 2006(1): 21−23.

[13] 李凤日. 测树学 [M]. 第 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2019.
Li F R. Forest mensuration[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.

[14] 赵曦阳, 宋跃明, 马开峰, 等. 美洲黑杨种内杂种无性系树皮厚度与湿心材变异分析 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(5): 67−73.
Zhao X Y, Song Y M, Ma K F, et al. Genetic variation of bark thickness and wet heart wood of intraspecific hybrid clones in *Populus deltoides*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(5): 67−73.

[15] 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. *Leuce*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2): 45−51.

[16] 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.
Xie H F, Yu Z K, Pan L J, et al. Genetic distance analysis of quantitative traits of *Populus tomentosa* clones[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology, 1997(4): 11−15.

[17] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2010.
Tang Q Y. DPS© data processing system: experimental design, statistical analysis and data mining[M]. 2th ed. Beijing: Science Press, 2010.

[18] 姜岳忠, 王彦. 山东杨树育种与栽培 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
Jiang Y Z, Wang Y. Breeding and cultivation of poplar in Shandong[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2021.

[19] 马常耕. 我国杨树育种中的若干问题商榷 [M]// 苏晓华, 黄秦军, 张冰玉. 杨树遗传育种. 北京: 中国林业出版社, 2007: 50−59.
Ma C G. Discuss on some questions of poplar breeding in China[M]// Su X H, Huang Q J, Zhang B Y. Poplar genetic breeding. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 50−59.

[20] 王明庶, 黄敏仁, 邬荣领, 等. 美洲黑杨×小叶杨杂交育种研究 [M]// 林业部科技司. 阔叶树遗传改良. 北京: 科学技术文献出版社, 1991: 83−92.
Wang M X, Huang M R, Wu R L, et al. Study on cross breeding of *Populus deltoides* × *P. simonii*[M]// Science and Technology Department, Forestry Department. Genetic improvement of broadleaf trees. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1991: 83−92.

[21] 陈鸿雕, 潘成良, 刘志成, 等. 新杂交种辽宁杨、辽河杨、盖杨的选育 [J]. 林业科技通讯, 1995(11): 16−18.
Chen H D, Pan C L, Liu Z C, et al. Breeding of new hybrid *Populus deltoides* 'Liaoningyang', *P. deltoides* 'Liaoheyang' and *P.* × *euramericana* 'Gaixianyang'[J]. Forest Science and Technology, 1995(11): 16−18.

[22] 潘惠新. 杨树新品种选育研究 [J]. 林业科技开发, 2002(3): 3−4.
Pan H X. Study on breeding of new poplar varieties[J]. Forestry Science and Technology Development, 2002(3): 3−4.

(责任编辑 吴 娟 赵田芸
责任编委 康向阳)