

DOI:10.13332/j.1000-1522.20190106

三倍体毛白杨新无性系多性状与环境 互作及稳定性分析

张平冬¹ 张锋² 孙静² 宋连君³ 康向阳¹

(1. 北京林业大学林木育种国家工程实验室, 北京 100083; 2. 国有冠县苗圃, 山东 冠县 252500; 3. 河北威县苗圃, 河北 威县 054700)

摘要:【目的】为揭示与阐明三倍体毛白杨纸浆材新无性系在多点试验条件下的主要生长和材性指标遗传变异、无性系与栽培环境互作和稳定性信息, 服务于各栽培地区的主栽品种选择。【方法】本文对设置在晋、鲁、豫 5 个试验点的三倍体毛白杨新无性系区域化对比试验林 7 年生无性系植株进行了木材基本密度和主干生长指标的调查分析, 估算了无性系间遗传变异与稳定性参数。【结果】结果表明: 栽培地点、无性系效应对三倍体毛白杨生长性状、木材基本密度以及主干生物量均有极显著影响; 地点与无性系间的交互作用对生长性状和主干生物量具显著影响, 对木材基本密度的影响不显著。三倍体毛白杨新无性系的木材基本密度重复力为 0.92, 略大于胸径(0.90)、树高(0.84)、单株材积(0.86)以及主干生物量(0.80)的重复力。通过生长性状、木材基本密度以及主干生物量的稳定性分析, 筛选出高产且相对稳定的三倍体毛白杨无性系 B303, 两个木材基本密度大且稳定性好的无性系 B331、B302。三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度稳定性评价结果不一致, 可能与两者间存在弱的负相关性有关。建议主干生物量可作为纸浆材新品种评价的重要指标。【结论】论文成果深化了对毛白杨材性变异与影响因子的认识, 为优良纸浆材品种选择提供了技术参考, 对促进优良品种的推广有积极指导意义。

关键词: 三倍体毛白杨; 生长性状; 木材基本密度; 遗传变异; 稳定性

中图分类号: S718.46; S792.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2019)07-0031-08

引文格式: 张平冬, 张锋, 孙静, 等. 三倍体毛白杨新无性系多性状与环境互作及稳定性分析 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(7):31-38. Zhang Pingdong, Zhang Feng, Sun Jing, et al. Interactions between environment and traits and analysis of stability in new triploid clones of *Populus tomentosa* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(7): 31-38.

Interactions between environment and traits and analysis of stability in new triploid clones of *Populus tomentosa*

Zhang Pingdong¹ Zhang Feng² Sun Jing² Song Lianjun³ Kang Xiangyang¹

(1. National Engineering Laboratory for Tree Breeding, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. National Nursery of Guanxian County, Guanxian 252500, Shandong, China;

3. Nursery of Weixian County, Weixian 054700, Hebei, China)

Abstract: [Objective] Better understand genetic variations, clone × interaction and stability for growth traits and wood properties of pulpwood in new triploid clones of *Populus tomentosa* can provide specific information for developing new varieties in planting area. [Method] Growth traits and wood basic density of 7-year-old pulpwood of new triploid clones of *P. tomentosa* at five clonal trials located at Shanxi Province, Shandong Province and Henan Province were investigated. Then, genetic variations and stability parameters were also estimated. [Result] The results indicated that the site and clonal effects were highly significant for the growth traits, wood basic density and trunk dry mass. Site × clone interactions were also highly significant for growth traits and trunk dry mass. However, it did not have significant effect on wood

收稿日期: 2019-02-28 修回日期: 2019-05-12

基金项目: 国家重点研发项目“白杨工业资源材高效培育技术研究”(2016YFD0600403)。

第一作者: 张平冬, 副教授, 博士生导师。主要研究方向: 林木遗传改良。Email: zhangpd@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区学院路清华东路 35 号。

责任作者: 康向阳, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 林木细胞遗传与细胞工程育种。Email: kangxy@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

basic density. Clonal repeatability of wood basic density in triploid clones of *P. tomentosa* was 0.92, slightly higher than DBH (0.90), tree height (0.84), individual volume (0.86) and trunk dry mass (0.80). Triploid clone B303 with high yield and higher stability and two triploid clones B331, B302 with higher wood basic density and stability were developed. The results of stability evaluation in growth traits were not consistent with the results in wood basic density owing to the negative correlations between the growth traits and wood basic density. It is suggested that trunk dry mass is considered as a reasonable index to develop new pulpwood varieties. [Conclusion] Our findings strengthen recognition of wood properties and its factors, and provide technique reference for developing new pulpwood varieties. It also plays an important role in guiding the popularization of new varieties.

Key words: triploid clones of *Populus tomentosa*; growth trait; wood basic density; genetic variation; stability

林木品种的遗传型与环境互作效应表现为品种性状在不同生境下的相对表现程度不同或相对位次的变化,是影响品种推广的主要因素。栽培地区的气象与立地条件是影响品种性状表现的主要环境因子,而决定品种特定性状表现的遗传型对环境信号的响应则是互作效应的内因。三倍体毛白杨(*Populus tomentosa*)纸浆材新无性系具有木纤维长、木纤维素含量高、纸浆率高、白度高和生长快等优良特点,是我国北方纸浆工业的主要原材料。在多种拟推广的栽培条件下不同品种与环境的互作效应对其生长与纸浆得率主要指标(木材密度等)影响状况,性状遗传变异与稳定性,不同品种最适的环境条件等需要通过试验分析来阐明。2003—2004年,为了确定三倍体毛白杨新品种的适宜栽培区域,北京林业大学毛白杨课题组在国家林业局产业化专项经费的支持下,选定北京平谷、山东兖州、山东高唐、河北威县、河南郑州、河南长葛、山西襄汾、山西太原以及安徽宿州等地作为试验点,分两批次营建了区域化试验林,开展三倍体毛白杨区域化试验研究。Zhang等^[1-3]和Wu等^[4-5]以部分5年生三倍体毛白

杨区域化试验林为研究对象,就不同栽培地点的三倍体白杨杂种无性系生长性状、纤维性状、木材基本密度以及化学成分的遗传变异进行了研究,并计算出了该研究性状的重复力和遗传相关系数等参数。

晋、鲁、豫是毛白杨的天然分布区,也是三倍体毛白杨纸浆材品种的重点推广区域,3地的主导气象因子及栽培立地条件均有不同程度的差异。在以上省份典型栽培立地条件下开展三倍体毛白杨纸浆材新无性系的对比试验,分析其生长和纸浆材主要指标的遗传变异,及其与栽培环境的互作效应,为揭示与阐明三倍体毛白杨纸浆材新无性系与栽培条件的互作效应、各栽培地区的主栽品种的选择等具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

区域化试验林营建所用材料为三倍体白杨杂种无性系 B301、B302、B303、B304、B305、B306、B312、B330、B331 以及二倍体毛白杨无性系 1319 的 2 年生嫁接苗。其杂交亲本、倍性水平以及性别等信息见表 1。

表 1 三倍体白杨杂种无性系的来源与性别

Tab. 1 Origin and gender of the triploid hybrids of *Populus tomentosa*

序号 No.	无性系 Clone	杂交亲本 Parent	倍性水平 Level of ploidy	性别 Gender
1	B301	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
2	B302	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♂
3	B303	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
4	B304	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
5	B305	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
6	B306	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
7	B312	(<i>P. tomentosa</i> × <i>P. bolleana</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♂
8	B330	(<i>P. alba</i> × <i>P. glandulosa</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
9	B331	(<i>P. alba</i> × <i>P. glandulosa</i>) × <i>P. tomentosa</i>	三倍体 Triploid	♀
10	1319	<i>P. tomentosa</i>	二倍体 Diploid	♂

1.2 区域化试验林设置

选择地势平缓,土壤深度大于 50 cm 的毛白杨主栽区的代表性区域山东兖州、山东高唐、山西襄汾、山西太原以及河南郑州为区域化试验建设区域,以 B301 等 9 个三倍体毛白杨无性系以及对照毛白

杨无性系 1319 的 2 年生嫁接苗为材料,以 2 m × 3 m 为造林密度,按照完全随机区组设计进行试验林定植。试验重复 3 次。各造林地点的具体位置、环境因子见表 2。

表 2 5 个试验地点的位置与气候因子信息

Tab. 2 Information of location and climatic factors at five experimental sites

地点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均温度 Mean annual temperature/°C	降雨量/(mm·a ⁻¹) Rainfall/(mm·year ⁻¹)	土壤类型 Type of soil
兖州 Yanzhou	33°10'N	116°49'E	13.6	660	砂姜黑土 Shajiang black soil
高唐 Gaotang	36°51'N	116°04'E	13.1	556	潮土 Moisture soil
襄汾 Xiangfen	35°50'N	111°21'E	11.5	550	潮土 Moisture soil
太原 Taiyuan	34°27'N	112°33'E	10.5	431	潮土 Moisture soil
郑州 Zhengzhou	37°52'N	113°47'E	14.2	641	潮土 Moisture soil

1.3 区域化试验林生长量调查和木材基本密度测定

区域化试验林生长 5 年后,分别造林地点和无性系对区域化试验林胸径和树高生长量进行全林调查。根据陈章水^[6]拟合的毛白杨材积计算公式,计算出每株样木的单株材积。

从每试验地点的各小区内选取 2 株平均木,伐倒后在胸高位置截取 10 cm 厚的圆盘用于木材基本密度测定。在圆盘半径中部取 20 mm × 20 mm 样木,利用饱和水分法测定木材基本密度^[7]。主干材质量为单株材积与木材基本密度的乘积。

1.4 三倍体毛白杨生长性状与木材基本密度的稳定性评价方法

分别以 5 个地点三倍体毛白杨无性系胸径、树高、单株材积以及木材基本密度的平均值为纵坐标,以相应性状的表型变异系数为横坐标,画出 9 个参试三倍体毛白杨无性系的散点分布图。根据张天真^[8]描述的方法进行三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度的稳定性分析。

1.5 数据分析

由于本文主要研究不同造林地点三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度的变异和稳定性,因此数据分析时,未将对照毛白杨无性系 1319 的数据纳入分析范围。不同造林地点间三倍体毛白杨无性系的胸径、树高、单株材积以及木材基本密度的联合差异显著性分析采用如下线性模型进行:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + R_{j(i)} + C_k + SC_{jk} + e_{ijkl}$$

式中: Y_{ijkl} 为第 i 个地点、第 j 次重复、第 k 个无性系、第 l 个单株的性状观测值; μ 代表群体平均值; S_i 表示地点效应值(固定); $R_{j(i)}$ 为地点内重复效应值(固定); C_k 为三倍体毛白杨无性系效应值(随机); SC_{jk} 为无性系与地点的交互效应值; e_{ijkl} 为剩余项(小区内效应值)。

利用上述线性模型对胸径、树高、单株材积以及木材基本密度的进行差异显著性分析时,均采用 SPSS 统计分析软件(18.0 版)进行。无性重复力采用公式 $R = 1 - 1/F$ 进行计算,式中 F 表示方差中无性系效应 F 值。

2 结果与分析

2.1 不同试验地点间三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度的变异

5 个试验地点三倍体毛白杨胸径、树高、单株材积、木材基本密度以及主干材质量的平均值、变异范围以及表型变异系数的统计结果见表 3。从表 3 可以看出,郑州试验点三倍体毛白杨的木材基本密度最小,平均木材基本密度为 (319.6 ± 14.5) kg/m³;高唐试验点的木材基本密度最大,平均木材基本密度达 (346.7 ± 24.8) kg/m³,比郑州试验点三倍体毛白杨木材基本密度大 8.5%。兖州试验点三倍体毛白杨的主干材质量最小,平均主干材质量仅为 (13.39 ± 1.76) kg;郑州试验点的主干材质量最大,平均主干材质量达 (30.60 ± 5.78) kg,比兖州试验点三倍体毛白杨主干材质量大 128.5%。

从表 3 还可以看出,兖州试验点三倍体毛白杨胸径生长量最小,平均胸径为 (10.7 ± 1.0) cm;郑州试验点的胸径生长量最大,平均胸径达 (14.5 ± 1.5) cm;兖州试验点三倍体毛白杨树高生长量亦最小,平均树高为 (12.5 ± 1.2) m;高唐、太原以及郑州试验点的树高生长量最大,平均树高达 13.6 m。在所有试验点中,兖州试验点三倍体毛白杨的单株材积生长量最小,平均单株材积为 $(0.048 2 \pm 0.011 0)$ m³;郑州试验点的单株材积生长量最大,平均单株材积达 $(0.095 4 \pm 0.023 6)$ m³,但其表型变异系数均大于 22.0%,显著高于胸径、树高、木材基本密度以及主干

表3 不同造林地点三倍体毛白杨无性系生长性状和木材基本密度的变异

Tab. 3 Phenotypic variances of growth traits and wood basic density in triploid clones of *P. tomentosa* at different sites

地点 Site	性状 Trait	平均值 Mean \pm SE	变化范围 Range	变异系数 CV/%
兖州 Yanzhou	胸径 DBH/cm	10.7 \pm 1.0	8.5 ~ 13.3	9.4
	树高 Tree height/m	12.5 \pm 1.2	10.6 ~ 15.4	9.7
	单株材积 Individual volume/m ³	0.048 2 \pm 0.011 0	0.026 2 ~ 0.070 4	22.9
	木材基本密度 Wood basic density/(kg·m ⁻³)	327.3 \pm 25.8	287.0 ~ 385.4	7.9
	主干材质量 Trunk dry mass/kg	13.39 \pm 1.76	8.33 ~ 19.93	13.1
高唐 Gaotang	胸径 DBH/cm	11.6 \pm 1.5	7.8 ~ 14.9	12.8
	树高 Tree height/m	13.6 \pm 1.2	9.4 ~ 16.0	8.9
	单株材积 Individual volume/m ³	0.061 8 \pm 0.018 4	0.023 6 ~ 0.113 9	29.8
	木材基本密度 Wood basic density/(kg·m ⁻³)	346.7 \pm 24.8	308.8 ~ 401.8	7.2
	主干材质量 Trunk dry mass/kg	16.03 \pm 2.68	9.48 ~ 21.53	16.7
襄汾 Xiangfen	胸径 DBH/cm	11.7 \pm 1.2	9.0 ~ 14.6	10.3
	树高 Tree height/m	13.2 \pm 1.1	11.4 ~ 15.8	8.4
	单株材积 Individual volume/m ³	0.060 8 \pm 0.015 6	0.031 5 ~ 0.107 1	25.7
	木材基本密度 Wood basic density/(kg·m ⁻³)	326.3 \pm 15.7	294.8 ~ 360.0	4.8
	主干材质量 Trunk dry mass/kg	19.12 \pm 2.17	15.10 ~ 25.87	11.3
太原 Taiyuan	胸径 DBH/cm	13.5 \pm 2.1	6.8 ~ 16.4	15.3
	树高 Tree height/m	13.6 \pm 1.6	9.8 ~ 16.0	11.6
	单株材积 Individual volume/m ³	0.085 2 \pm 0.028 5	0.016 0 ~ 0.133 0	33.4
	木材基本密度 Wood basic density/(kg·m ⁻³)	334.9 \pm 23.4	284.1 ~ 405.5	7.0
	主干材质量 Trunk dry mass/kg	28.42 \pm 8.06	14.25 ~ 39.10	28.4
郑州 Zhengzhou	胸径 DBH/cm	14.5 \pm 1.5	9.8 ~ 17.3	10.1
	树高 Tree height/m	13.6 \pm 1.5	9.6 ~ 16.6	11.1
	单株材积 Individual volume/m ³	0.095 4 \pm 0.023 6	0.033 5 ~ 0.124 6	24.7
	木材基本密度 Wood basic density/(kg·m ⁻³)	319.6 \pm 14.5	294.7 ~ 345.0	4.5
	主干材质量 Trunk dry mass/kg	30.60 \pm 5.78	16.52 ~ 35.51	18.9

材质量的地点内变异系数。三倍体毛白杨木材基本密度的表型变异系数介于 4.5 ~ 7.9 之间, 小于胸径、树高、干纤维质量以及单株材积的表型变异系数, 说明木材基本密度较胸径、树高、干纤维质量等生长性状稳定。进一步对 5 个试验点三倍体毛白杨的生长性状和木材基本密度进行联合方差分析, 结果表明试验地点对胸径、树高单株材积、木材基本密度以及主干材质量等性状均具有极显著的影响(表 4)。

2.2 三倍体毛白杨的无性系重复力与主栽品种选择

5 个试验点三倍体毛白杨无性系胸径、树高、单株材积、主干材质量以及木材基本密度的进行联合方差分析结果见表 4。从表 4 可以看出, 无性系对三倍体毛白杨胸径、树高、单株材积、木材基本以及主干材质量的影响均达到了显著水平。三倍体毛白杨木材基本密度的无性系重复力均为 0.92, 大于生长性状胸径(0.90)、树高(0.84)、单株材积(0.86)以及

干纤维质量(0.80)的无性系重复力。

2.3 三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度的稳定性分析

品种与栽培环境间的交互作用是描述品种稳定性的参数之一。品种与环境的交互效应越显著, 说明该品种的稳定性相对较差。反之, 品种与环境的交互效应不显著, 说明品种受环境影响小, 品种的稳定性好。从表 4 可以看出, 无性系与试验地点间的交互作用对三倍体毛白杨的胸径、树高、单株材积以及干纤维质量等生长性状具有极显著的影响, 而对木材基本密度的影响则不显著。木材基本密度的地点与无性系交互效应方差分量百分比为 0.9%, 显著小于干纤维质量(13.0%)、树高(11.1%)、单株材积(5.3%)以及胸径(3.4%)的方差分量百分比, 说明三倍体毛白杨木材基本密度较生长性状稳定, 受试验点的土壤立地条件和气候环境因素影响小。

表 4 不同试验地点三倍体毛白杨无性系生长性状和木材基本密度的联合方差分析

Tab. 4 Joint analysis of variance for growth traits and wood basic density in triploid cones of *P. tomentosa*

性状 Trait	F值 F value			无性系重复力 Clonal repeatability	方差分量 Variance percentage/%
	地点 Site	无性系 Clone	地点 × 无性系 Site × clone interactions		
胸径 DBH	170.08**	14.17**	3.29**	0.90	3.4
树高 Tree height	43.07**	10.64**	3.78**	0.84	11.1
单株材积 Individual volume	156.20**	13.50**	4.30**	0.86	5.3
木材基本密度 Wood basic density	14.67**	12.36**	1.08	0.92	0.9
主干材质量 Trunk dry mass	115.15**	3.16*	3.73**	0.80	13.0

注: *表示差异显著($P < 0.05$); **表示差异极显著($P < 0.01$)。Notes: * showing significant difference at $P < 0.05$ level; ** showing extremely significant difference at $P < 0.01$ level.

表型变异系数也是度量品种稳定性的另一重要参数。分别以 5 个地点三倍体毛白杨无性系胸径、树高、单株材积、木材基本密度以及干纤维质量的平均值为纵坐标,以相应性状的表型变异系数为横坐标,画出 9 个参试三倍体毛白杨无性系生长性状、木材基本密度和干纤维质量的散点分布图(图 1)。从图 1 可以看出,分布于第 I 象限的无性系具有性状平均值高,变异系数大的特点,属于高均值、不稳定品种;分布于第 II 象限的无性系具有性状平均值高,变异系数小的特点,属于高均值、稳定品种;分布于第 III 象限的无性系具有性状平均值低,变异系数小的特点,属于低均值、稳定品种;分布于第 IV 象限的无性系具有性状平均值低且变异系数大的特点,属于低均值、不稳定品种(图 1A)。就三倍体毛白杨生长性状而言,无性系 B312、B303、B302 的胸径生长量大,变异系数小(图 1B);无性系 B303、B302 的树高生长量大,变异系数小(图 1C);无性系 B312、B303 的单株材积生长量大,变异系数小(图 1D)。因此,如果仅从产量的角度考虑,三倍体毛白杨无性系 B303 是一个既高产又稳定的品种。而从木材基本密度来看,三倍体毛白杨无性系 B331、B302 的木材基本密度平均值高且变异系数小(图 1E),属于均值高、稳定性好的品种。从综合生长和材性的角度来看,则三倍体毛白杨无性系 B312、B303、B302 的主干材质量平均值高且变异系数小(图 1F),属于干物质产量高且稳定性好的品种。

3 讨 论

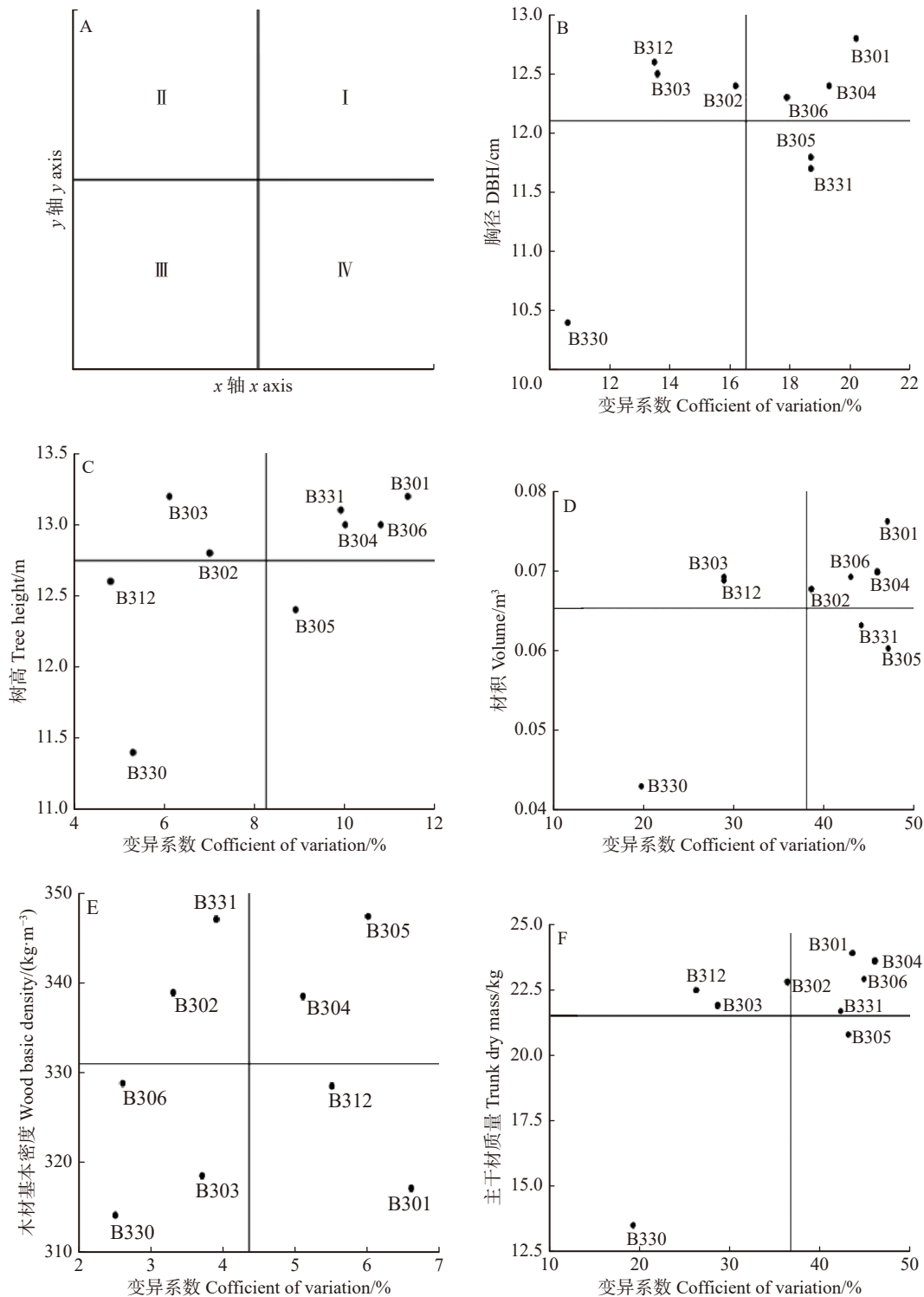
3.1 地点效应对杨树生长与材性性状的影响

地点效应是试验区域内气候因子和土壤条件综合效应的反映。尽管本研究中未设计试验,将土壤立地类型与气候因子对三倍体生长性状的影响从地点效应中剖析出来,但可以肯定兖州地点三倍体毛白杨的单株材积生长相对缓慢(表 3)不仅与砂姜黑

土的黏度大、透气性差有关,还与地理纬度、年均气温以及年均降雨量等密切相关(图 2)。由于不同栽培区域的土壤立地类型不同,气候因子也各异,因此地点效应往往对林木生长性状和材性性状均具有显著或极显著的影响。据 Pliura 等^[9]报道,试验地点对美洲黑杨(*P. deltoides*)、欧美杨(*P. deltoides* × *P. nigra*)杂种、香脂杨(*P. balsamifera*)与欧洲黑杨(*P. nigra*)杂种、毛果杨(*P. trichocarpa*)与美洲黑杨杂种的木材密度和生长性状均具有显著影响。Zhang 等^[1]对不同栽培地点的三倍体毛白杨生长性状、木材基本密度、纤维长度以及干纤维质量等性状的遗传变异进行了分析,发现试验地点对 5 年生三倍体毛白杨的生长性状、木材基本密度、纤维长度以及干纤维质量均具有显著影响。本研究取得了与前人一致的研究结果,发现地点效应对 5 年生三倍体毛白杨的胸径、树高、单株材积、木材基本密度以及干纤维质量均具有极显著影响,说明开展更大规模的区域化试验是很有必要的。

3.2 杨树无性系效应与重复力

Yanchuk 等^[10]、Yu 等^[11]、Zhang 等^[12]、李善文等^[13]以及 Seyed 等^[14]均报道了无性系(基因型)对杨树及其杂种的生长性状和木材密度具有显著影响。Zhang 等^[1]对 5 年生三倍体毛白杨的生长性状、木材基本密度等材性性状的遗传变异进行了研究,发现无性系对树高、干纤维质量、纤维长度以及木材基本密度具有显著影响。宋婉等^[15]和邢新婷等^[16]分别就毛白杨和三倍体毛白杨木材密度的遗传变异进行了研究,发现无性系对木材密度的影响达到了显著水平。本研究中,作者对兖州、高唐、襄汾、太原以及郑州 5 个地点 9 个三倍体毛白杨无性系的生长性状和木材基本密度进行了遗传变异分析,联合方差分析结果表明,无性系对三倍体毛白杨胸径、树高、单株材积、木材基本密度以及干纤维质量均具有极显著的影响。在同一试验点内,除兖州试验点的生长



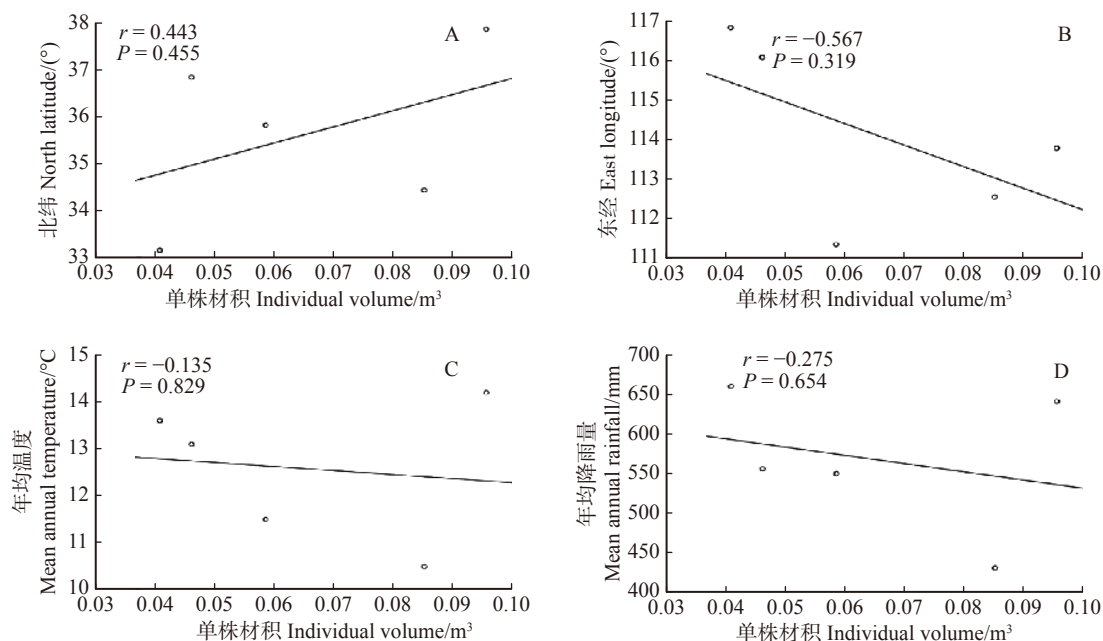
A. 三倍体毛白杨无性系稳定性模式图; B. 三倍体毛白杨无性系胸径散点分布图; C. 三倍体毛白杨无性系树高散点分布图; D. 三倍体毛白杨无性系单株材积散点分布图; E. 三倍体毛白杨无性系木材基本密度散点分布图; F. 三倍体毛白杨无性系主干材质量散点分布图。图 A 中 I、II、III、IV 表示由 x 轴均值和 y 轴均值分割而成的 4 个象限; 图 B、C、D、E、F 中十字线表示 x 轴均值和 y 轴均值。A, model diagram of stability in triploid clones of *P. tomentosa*; B, scatter diagram of DBH in triploid clones of *P. tomentosa*; C, scatter diagram of tree height in triploid clones of *P. tomentosa*; D, scatter diagram of individual tree volume in triploid clones of *P. tomentosa*; E, scatter diagram of wood basic density in triploid clones of *P. tomentosa*; F, scatter diagram of trunk dry mass in triploid clones of *P. tomentosa*. I, II, III and IV showed four quadrants divided by mean value of x axis and mean value of y axis in figure A. Reticles in figure B, C, D, E and F are mean values of x axis and mean values of y axis.

图 1 三倍体毛白杨无性系生长性状以及木材基本密度散点分布图

Fig. 1 Scatter diagram of growth traits and wood basic density in triploid clones of *P. tomentosa*

性状以及高唐试验点的树高和木材基本密度外,无性系对生长性状和木材基本密度均具有显著影响。

这种联合方差分析与单试验点方差结果的不完全一致,说明在区域化试验中增加区试地点可以有效地



A.三倍体毛白杨单株材积与地理纬度的相关性; B.三倍体毛白杨单株材积与经度的相关性; C.三倍体毛白杨单株材积与年均温度的相关性; D.三倍体毛白杨单株材积与年均降雨量的相关性。A, correlation between individual volume and latitude in triploid clones of *P. tomentosa*; B, correlation between individual volume and longitude in triploid clones of *P. tomentosa*; C, correlation between individual volume and mean annual temperature in triploid clones of *P. tomentosa*; D, correlation between individual volume and mean annual rainfall in triploid clones of *P. tomentosa*.

图 2 三倍体毛白杨无性系单株材积与环境因子的相关性

Fig. 2 Correlations between individual volume and environmental factors in triploid clones of *P. tomentosa*

提高试验精度。

Zhang 等^[1]通过研究兖州、高唐以及襄汾的 5 年生三倍体毛白杨生长性状和材性性状遗传变异,分别估算出胸径、树高、材积以及木材基本密度的重复力分别为 0.61、0.62、0.55、0.71。张平冬等^[17]对河南郑州中牟县的 13 个三倍体白杨杂种无性系的木材基本和化学成分变异进行了研究,估算出木材基本密度的无性系重复力为 0.90。本研究中,通过对 5 个试验点三倍体毛白杨的胸径、树高、单株材积以及木材基本密度进行联合方差分析,估算出胸径、树高、单株材积、木材基本密度以及干纤维质量的无性系重复力分别为 0.90、0.84、0.86、0.92、0.80,且木材基本密度的表型变异系数小于胸径、树高、单株材积以及干纤维质量的变异系数。

3.3 杨树生长与材性性状的稳定性评价

稳定性参数的估算广泛应用于农作物的区域化试验研究中,分析作物品种产量性状的适应性和稳定性。描述稳定性的常用参数包括表型变异系数、地点与品种(无性系)的交互效应、以品种平均值为参照数的稳定性参数^[18]以及以环境指数为参照数的稳定性参数^[19]等。Pliura 等^[9]利用环境指数为参照的稳定性参数估算法,对美洲黑杨、欧美杨杂种、香脂杨与欧洲黑杨杂种、毛果杨与美洲黑杨杂种的干纤维质量性状进行了稳定性分析,发现美洲黑杨、欧美杨杂种的稳定性显著偏低。本研究采用多试验点

性状平均值与表型变异系数相结合的方法,对三倍体毛白杨的生长性状和木材基本密度进行稳定性评价,从产量的角度筛选出一个既高产又稳定的三倍体毛白杨无性系 B303。而就木材基本密度而言,则无性系 B331、B302 的木材基本密度平均值高且变异系数小,属于均值高且稳定性好的品种。从产量和木材基本密度两个方面单独进行稳定性评价的结果不一致,可能是由于三倍体毛白杨生长性状与木材基本密度之间存在微弱的负相关性所致^[1]。本研究为获得生长量大、木材品质好的纸浆材新品种,采用综合生长和材性的干纤维质量指标进行新品种评价,筛选出生长快、木材基本密度高的三倍体毛白杨纸浆材无性系 B312、B303 以及 B302。

4 结 论

本研究通过对设置在晋、鲁、豫 5 个试验点的三倍体毛白杨新无性系区域化对比试验林 7 年生无性系植株进行木材基本密度和主干生长指标调查分析的基础上,估算了无性系间遗传变异与稳定性参数。结果表明,栽培地点、无性系效应对三倍体毛白杨生长性状、木材基本密度以及主干生物量均有极显著影响;地点与无性系间的交互作用对生长性状和主干生物量具显著影响,对木材基本密度的影响不显著。三倍体毛白杨新无性系的木材基本密度重复力为 0.92,略大于胸径(0.90)、树高(0.84)、单株材

积(0.86)以及主干生物量(0.80)的重复力。通过生长性状、木材基本密度以及主干生物量的稳定性分析,筛选出高产且相对稳定的三倍体毛白杨无性系B303,两个木材基本密度大且稳定性好的无性系B331、B302。发现三倍体毛白杨生长性状和木材基本密度稳定性评价结果不一致,并提出了以主干生物量作为纸浆材新品种评价指标的建议。

致谢 感谢山东太阳纸业股份有限公司、高唐泉林纸业股份有限公司、山西省襄汾县林业局、太原市林业科学研究所以及河南省种苗站等单位在区域化试验林营建、管护和数据收集等方面给予的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] Zhang P D, Wu F, Kang X Y. Genotypic variation in wood properties and growth traits of triploid hybrid clones of *Populus tomentosa* at three clonal trials[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2012, 8(5): 1041–1050.
- [2] Zhang P D, Wu F, Kang X Y. Genetic control of fiber properties and growth in triploid hybrid clones of *Populus tomentosa*[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2013, 28(7): 621–630.
- [3] Zhang P D, Wu F, Kang X Y. Chemical properties of wood are under stronger genetic control than growth traits in *Populus tomentosa* Carr.[J]. *Annals of Forest Science*, 2015, 72: 89–97.
- [4] Wu F, Zhang P D, Pei J C, et al. Genotypic parameters of wood density and fiber traits in triploid hybrid clones of *Populus tomentosa* at five clonal trials[J]. *Annals of Forest Science*, 2013, 70: 751–759.
- [5] Wu F, Zhang P D, Pei J C, et al. Within-stem variation in wood properties of triploid hybrids of *Populus tomentosa* at three clonal trials[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2014, 29(1): 71–76.
- [6] 陈章水. 杨树二元立木材积表的编制 [J]. 林业科学研究, 1989, 2(1): 78–83.
Chen Z S. The establishment of binomial stock volume tables of poplar[J]. *Forest Research*, 1989, 2(1): 78–83.
- [7] Smith D M. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples: rept. No. 2014[R]. Wisconsin: Forest Products Laboratory, Forest Service, US Department of Agriculture, 1954.
- [8] 张天真. 作物育种学总论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
Zhang T Z. General discussion on crop breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.
- [9] Pliura A, Zhang S Y, Mackay J, et al. Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trails[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 238: 92–106.
- [10] Yanchuk A D, Dancik B P, Micko M M. Intraclonal variation in wood density of trembling aspen in Alberta[J]. *Wood Fiber Science*, 1983, 15: 387–394.
- [11] Yu Q, Pulkinen P, Rautio M, et al. Genetic control of wood physiochemical properties, growth and phenology in hybrid aspen clones[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31: 1348–1356.
- [12] Zhang S Y, Yu Q, Chauret G, et al. Selection for both growth and wood properties in hybrid poplar clones[J]. *Forest Science*, 2003, 49: 901–908.
- [13] 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.
- [14] Seyed M S, Mohsen F, Kahrizi D, et al. Genetic variability of some morphological traits in poplar clones[J]. *American Journal of Science Research*, 2011, 13: 113–117.
- [15] 宋婉, 张志毅, 续九如. 毛白杨无性系木材基本密度遗传变异研究 [J]. 林业科学, 2000, 36(专刊 1): 125–130.
Song W, Zhang Z Y, Xu J R. Study on inheritance and variation of wood basic density of *Populus tomentosa* Carr. clones[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(Spec. 1): 125–130.
- [16] 邢新婷, 张志毅. 三倍体毛白杨无性系木材密度变异研究 [J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(6): 16–20.
Xing X T, Zhang Z Y. Genetic variation in wood density of triploid clones of *Populus tomentosa*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2000, 22(6): 16–20.
- [17] 张平冬, 吴峰, 康向阳. 三倍体白杨杂种无性系木材的基本密度与化学成分变异 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(4): 26–31.
Zhang P D, Wu F, Kang X Y. Genetic variations in wood basic density and chemical components of triploid hybrid clones of white poplar[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42(4): 26–31.
- [18] Francis T R, Kanneberg L W. Yield stability studies in short season maize. (1): a descriptive method for grouping genotypes [J/OL]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1978, 58: 1029–1034 [2019-02-13]. <http://pubs.aic.ca/doi/abs/10.4141/cjps78-157>.
- [19] Finlay K W, Wilkinson G N. The analysis of adaptation in a plant breeding program[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1963, 14: 742–754.

(责任编辑 范娟
责任编委 康向阳)