

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.004

10年生黑杨派无性系材性径向遗传变异分析与综合评价

严涵薇[#], 程雅静[#], 余彤彤, 余娜, 周亮, 刘盛全^{*}

(安徽农业大学林学与园林学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: [目的] 研究黑杨派无性系材性性状遗传变异, 并进行综合评价, 为其工业用材林定向培育和木材利用提供理论依据。[方法] 对河南省焦作 8 个黑杨派无性系试验林选取 10 年生样木 (每个无性系 5 株) 进行材性性状 (解剖特性、物理性能、化学组成) 测定, 对 18 个材性性状进行遗传变异分析和遗传参数估算, 并采用主成分分析法对无性系进行综合评价。[结果] 除半纤维素外, 其他 17 个材性性状在不同无性系间均差异极显著。18 个材性性状的无性系重复力为 0.49~0.93, 其中, 全干密度、基本密度、综纤维素、径向-细胞直径和径向-细胞腔径的重复力达 0.8 以上。无性系材性性状表型变异系数均大于遗传变异系数, 经主成分分析评选出中林 46 杨为主成分综合分值最高的无性系。[结论] 8 个黑杨派无性系在 18 个材性性状上差异显著, 并受较强的遗传控制, 具备遗传改良的条件。无性系重复力存在径向差异, 随着年轮的增大, 物理性能变化幅度最小, 全干密度和基本密度相对稳定。

关键词: 黑杨派无性系; 材性; 径向; 遗传变异;

中图分类号: S792.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)06-0028-10

杨树是主要用材林树种之一, 在纸浆材、板材等工业原料领域用途广泛, 并且在生态环境建设和绿色环保发展中发挥着重要的作用。杨树加工利用的方向主要由木材性质决定^[1], 木材性质是木材整体特性的体现, 主要包括木材解剖结构、木材物理性质、木材化学组成、木材力学性质等内容^[2]。国内外许多研究表明, 杨树种间和种内无性系间材性性状上存在丰富遗传差异^[3-5], 蕴藏着遗传改良的极大潜力^[6], 因此, 在杨树种质资源的收集和评价的基础上, 开展杨树无性系木材材性遗传变异规律研究, 阐明材性相关性状的遗传特性, 从而综合评价筛选出材性性状优良的无性系, 对于提高我国杨树用材林产量和质量, 实现杨树工业用材林产业的提质增效具有重要意义。

目前, 有关材性性状遗传变异的研究报道主要

集中在以不同种源、家系和无性系为材料, 测定多个材性性状特性, 结合方差分析、遗传参数估算等指标鉴定差异显著、遗传稳定性强的材性性状, 并采用主成分分析法、综合指数法、聚类分析等统计学方法综合评价无性系, 实现选育优良无性系的目的^[7-10]。黑杨派是杨属中较大的一派, 具有栽植面积广、经济效益高等优势, 对黑杨派遗传变异规律的研究为其发挥生产应用价值提供了理论依据。通过对 10 个 9 年生黑杨派无性系的 23 个性状进行遗传变异分析, 发现材积、心材宽、边材宽、心边材比等 12 个性状受较强的遗传控制; 并选出卡帕茨杨、50 杨、中林 46 杨 3 个优良无性系^[11]。丹红杨具有速生、干形通直等木材性质, 结合其优良的生长和抗性性状, 2003 年通过了国家良种认定 (R-SC-PD-003-2003) 并在淮河及长江流域栽种^[12]。张

收稿日期: 2020-12-02 修回日期: 2021-09-18

基金项目: 国家重点研发专项计划 (2017YFD0600201); 国家自然科学基金 (31770595、31800557)

#共第一作者: 严涵薇, 程雅静。

*通讯作者: 刘盛全, e-mail: liusq@ahau.edu.cn

晓艳等^[13]对不同地点13个黑杨派无性系5~6年生林木生长性状开展遗传变异分析显示:无性系间、不同地点间生长性状差异显著或极显著,阐明了108杨生长性状受环境效应的程度大于50号杨和36号杨。材质变异是木材的一大特性,对杨树材性性状的变异规律研究有利于木材的科学加工和合理利用。以50杨、108杨和N179杨为试验材料,通过研究木材物理、力学性能发现,50号杨的气干密度、抗弯强度、抗弯弹性模量和顺纹抗压强度值均最高,物理、力学性质最优,108杨抗弯强度值最低,N179杨气干密度、抗弯弹性模量和顺纹抗压强度均最低。因此,依据气干密度和力学性质总结得到50杨材性最优^[14]。

已有研究表明,不同无性系间、不同年轮间、不同性状间遗传变异规律均存在一定程度的差异,然而,目前对杨树无性系的多个材性性状在径向上的遗传变异规律研究较少。本研究利用河南省焦作林场(中国林业科学研究院实验基地)试验林中美洲黑杨(*Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall)、欧洲黑杨(*Populus nigra* Linn.)和欧

美杨(*Populus × euramericana* (Dode) Guinier)共计8个黑杨派(Section *Aigeiros*)无性系为材料,测定无性系不同年轮木材解剖结构、物理特性、化学组成,共计18个材性性状,开展不同无性系和年轮材性性状遗传变异的分析和遗传参数的估算,揭示材性性状径向遗传变异规律,并对8个无性系进行材性性状的综合评价,为杨树工业用材林定向培育和木材利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选自河南省焦作林场(中国林业科学研究院实验基地)试验林,于2007年春季造林,株行距3 m × 5 m,完全随机区组设计,4个区组,6株小区。8个黑杨派无性系分别为50号杨、36号杨、丹红杨、南杨、N179杨、中林46、108杨和桑巨杨,其中,50号杨和36号杨为美洲黑杨,丹红杨和南杨是50号杨与36号杨的杂交子代,N179杨为欧洲黑杨,中林46杨、108杨和桑巨杨是为欧美杨(表1)。

表1 8个杨树无性系基本信息

Table 1 Basic information of 8 poplar clones

无性系 Clones	遗传背景资料 Genetic Background Information	拉丁名 Scientific Name	起源 Origin
50号杨	美洲黑杨	<i>P. deltoides</i> cl. '55/65'	意大利
36号杨	美洲黑杨	<i>P. deltoides</i> cl. '2KEN8'	意大利
丹红杨	美洲黑杨(50号和36号杂交子代)	<i>P. deltoides</i> cv. 'Danhong'	中国
南杨	美洲黑杨(50号和36号杂交子代)	<i>P. deltoides</i> cl. 'Nanyang'	中国
N179杨	欧洲黑杨	<i>P. nigra</i> cl. 'N179'	中国
中林46	美洲黑杨 × 欧洲黑杨	<i>P. euramericana</i> cv. 'Zhonglin46'	中国
108杨	美洲黑杨 × 欧洲黑杨	<i>P. euramericana</i> cv. 'Guariento'	意大利
桑巨杨	美洲黑杨 × 欧洲黑杨	<i>P. euramericana</i> cl. 'Sangju'	中国

1.2 试验地概况

河南省焦作市(35°10'~35°21' N, 113°40'~113°26' E)属温带季风气候,具有冬长寒冷雨雪少,春短干旱风沙多,夏日炎热雨丰沛,秋季晴和日照足四季分明的特点。年平均气温12.8℃~14.8℃,是华北地区的富水区,年均降水量600~700 mm,无霜期200 d^[5],土壤类型为潮土。

1.3 性状测定

每个无性系选取5株样株,分别来自每个小区的平均木,共计40株,伐倒后制备试样,用于

10个年轮18个材性性状测定,分为解剖特性、物理性能、化学组成3类,解剖特性主要包括微纤丝角、弦向与径向的双壁厚、细胞腔径、细胞直径、导管长度、木射线组织比量、木射线高度与宽度、纤维长度;物理性能主要涉及全干密度和基本密度^[15];化学性质涉及半纤维素、α-纤维素、木质素和综纤维素^[16]。按照国家标准《木材物理力学试材采集方法》(GB 1927—97)进行试材采集,将采集好的原木从基部向上截取7 cm圆盘,根据不同年轮将木条切成10 mm × 10 mm × 15 mm的木块用

于解剖特性的测量研究。在 1.1、1.92、2.62 m 处取 100 mm 物理圆盘, 根据年轮位置的不同, 选择第 1~4 年轮为心材区域, 5~7 年轮为心边材区域, 8~10 年轮为边材区域, 制成不同木材位置的试块用于全干密度和基础密度研究。从基部向上 1.3 m 处截取圆盘进行风干处理, 根据年轮不同将试材经粉碎机粉碎并筛取 40~60 目试样, 平衡水分后用于化学组成的测定。材性性状的具体测定方法参见文献 [2]。

1.4 数据统计与分析

利用 Excel 软件进行数据的录入和校对, 使用 DPS 软件和 SPSS 软件进行方差分析、遗传参数的估算^[17-18]和主成分分析 (PCA)。方差分析的线性模型为:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + R_j + C_i \times R_j + e_{ijk}$$

式中: Y_{ijk} 为第 i 无性系的第 j 个年轮的观测值; μ 为总体平均值; C_i 表示无性系第 i 个效应

值; R_j 表示年轮 (或木材位置) 第 j 个效应值; $C_i \times R_j$ 为无性系与年轮 (或木材位置) 交互效应; e_{ijk} 表示误差。

2 结果与分析

2.1 黑杨派无性系材性性状的变异

由 8 个黑杨派无性系木材性状方差分析结果 (表 2) 可知: 木质素在不同年轮间差异不显著 ($P > 0.05$); 全干密度在不同木材位置上差异不显著 ($P > 0.05$); 半纤维素在不同无性系间差异不显著 ($P > 0.05$)。除此之外, 其余 15 个材性性状在杨树无性系间、不同年轮间或不同木材位置间均差异极显著 ($P < 0.01$), 表明无性系材性性状变异比较丰富。无性系与年轮之间交互效应的结果显示: 微纤丝角、径向-细胞腔径、半纤维素、 α -纤维素、综纤维素、全干密度、基本密度的交互效应显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$)。

表 2 黑杨派无性系木材性状方差分析结果

Table 2 Variance analysis of traits on the clones of Section Aigeiros Clones

性状 Traits	变异来源 Source of variation	自由度 DOF	均方 Mean square	F	P
微纤丝角 Microfibril Angle	无性系间	7	113.743	8.983**	1.31E-09
	年轮间	6	556.719	43.969**	6.47E-34
	无性系 × 年轮	41	26.029	2.056**	0.001
	误差 Error	198	12.662		
弦向-双壁厚 Tangential Cell Wall Thickness	无性系间	7	5.696	14.083**	6.609E-15
	年轮间	8	1.517	3.75**	4.011E-4
	无性系 × 年轮	54	0.317	0.784	0.854
	误差 Error	207	0.404		
弦向-细胞腔径 Tangential Lumen Diameter	无性系间	7	91.169	27.044**	3.957E-28
	年轮间	8	28.979	8.596**	1.855E-10
	无性系 × 年轮	54	2.620	0.777	0.867
	误差 Error	275	3.371		
弦向-细胞直径 Tangential Cell Diameter	无性系间	7	83.946	22.178**	1.040E-23
	年轮间	8	36.511	9.646**	8.738E-12
	无性系 × 年轮	54	2.929	0.774	0.872
	误差 Error	275	3.785		
木射线组织比量 Wood Ray Tissue Proportion	无性系间	7	0.0107	17.2597**	6.788E-19
	年轮间	8	0.0044	7.1613**	1.299E-8
	无性系 × 年轮	54	0.0005	0.7336	0.915
	误差 Error	274	0.0006		
导管长度 Pipe Length	无性系间	7	0.026	12.088**	1.187E-13
	年轮间	9	0.306	142.590**	1.260E-104
	无性系 × 年轮	61	0.002	0.798	0.856
	误差 Error	310	0.002		
径向-双壁厚 Radial Cell Wall Thickness	无性系间	7	4.213	18.780**	1.920E-20
	年轮间	8	1.468	6.542**	8.144E-8
	无性系 × 年轮	54	0.205	0.914	0.646
	误差 Error	276	0.224		

续表 2

性状 Traits	变异来源 Source of variation	自由度 DOF	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
径向-细胞腔径 Radial Lumen Diameter	无性系间	7	109.140	45.762**	1.003E-42
	年轮间	8	14.443	6.056**	3.501E-7
	无性系 × 年轮	54	3.795	1.591**	0.009
	误差 Error	276	2.385		
径向-细胞直径 Radial Cell Diameter	无性系间	7	100.409	41.549**	9.824E-40
	年轮间	8	20.376	8.431**	2.982E-10
	无性系 × 年轮	54	3.337	1.381	0.051
	误差 Error	276	2.417		
木射线高度 Wood Ray Height	无性系间	7	7 667.040	12.128**	2.130E-13
	年轮间	8	16 278.413	25.750**	3.883E-29
	无性系 × 年轮	54	651.048	1.030	0.426
	误差 Error	260	632.178		
木射线宽度 Wood Ray Width	无性系间	7	4.636	21.316**	1.282E-22
	年轮间	8	0.865	3.978**	1.826E-4
	无性系 × 年轮	54	0.256	1.177	0.204
	误差 Error	259	0.217		
纤维长度 Fiber Length	无性系间	7	0.188	14.579**	2.032E-16
	年轮间	9	1.940	150.272**	1.181E-107
	无性系 × 年轮	61	0.008	0.593	0.993
	误差 Error	311	0.013		
半纤维素 Hemicellulose	无性系间	7	3.799	1.630	0.129
	年轮间	5	22.457	9.635**	3.553E-8
	无性系 × 年轮	35	6.240	2.677**	3.553E-8
	误差 Error	182	2.331		
a-纤维素 a - cellulose	无性系间	7	44.898	18.372**	2.145E-18
	年轮间	5	27.108	11.093**	2.435E-9
	无性系 × 年轮	35	4.106	1.680*	0.016
	误差 Error	182	2.444		
木质素 Lignin	无性系间	7	53.112	16.959**	3.634E-17
	年轮间	5	4.709	1.504	0.191
	无性系 × 年轮	35	3.139	1.002	0.473
	误差 Error	182	3.132		
综纤维素 Total Cellulose	无性系间	7	53.232	30.902**	6.163E-28
	年轮间	5	17.586	10.209**	1.227E-8
	无性系 × 年轮	35	3.080	1.788**	0.008
	误差 Error	182	1.723		
全干密度 Absolutely Dried Density	无性系间	7	0.0200	42.8315**	2.020E-26
	木材位置	2	0.0004	0.8323	0.438
	无性系 × 木材位置	14	0.0009	1.9356*	0.032
	误差 Error	93	0.0005		
基本密度 Basic Density	无性系间	7	0.008	30.359**	1.530E-21
	木材位置	2	1.703	6 415.699**	3.156E-101
	无性系 × 木材位置	14	0.002	8.038**	5.725E-11
	误差 Error	94	0.0003		

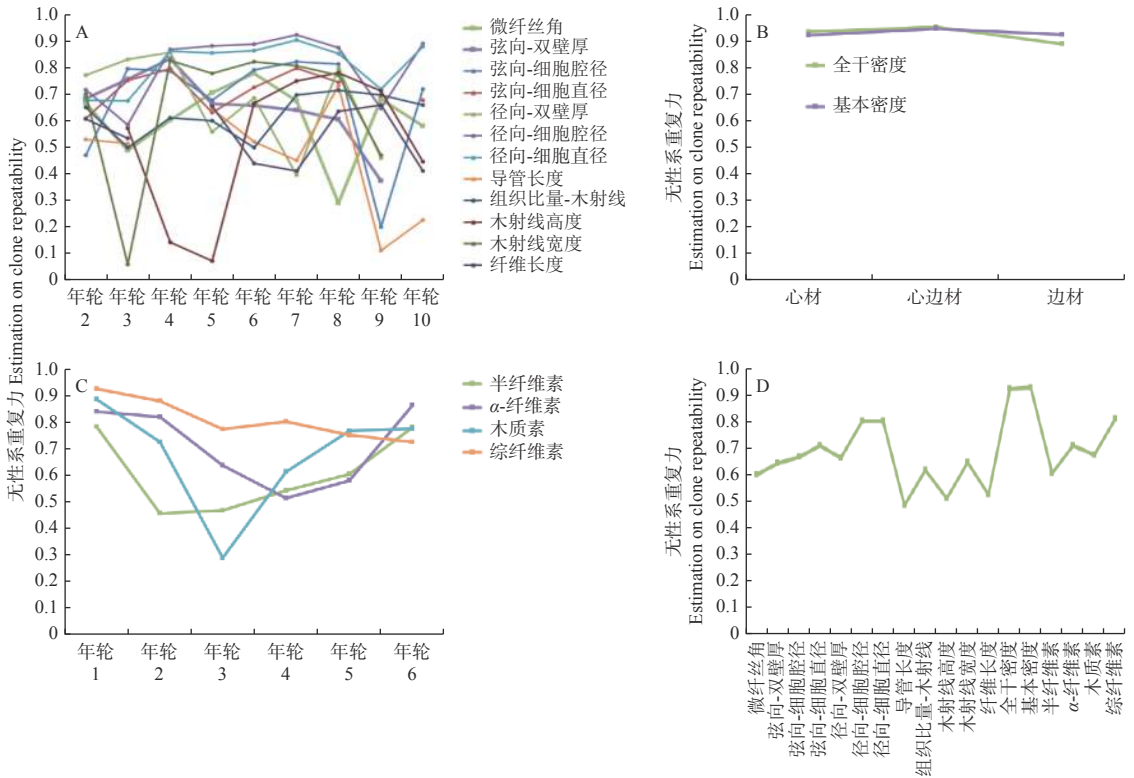
注: **表示差异极显著 ($P < 0.01$)、*表示差异显著 ($P < 0.05$)

Notes: ** shows extremely significant difference ($P < 0.01$), * shows significant difference ($P < 0.05$).

2.2 黑杨派无性系材性性状的遗传参数

由 8 个黑杨派无性系材性性状的无性系重复力的估算结果 (图 1) 可知: 18 个材性性状无性系重

复力参数的差别明显。对于木材解剖特性, 径向-细胞腔径与径向-细胞直径的无性系重复力随着年轮增大的变化趋势相似, 其中, 无性系重复力在



注: A 解剖特性; B 物理性能; C 化学组成; D 平均无性系重复力

Notes: A: Anatomical Characteristics; B: Physical Properties; C: Chemical Composition; D: Average Clone Repeatability

图 1 黑杨派主要材性性状的无性系重复力

Fig. 1 Estimation on clone repeatability of main wood properties in Section Aigeiros.

第 2、3 和 9 年轮偏小,但在第 7 年轮达到最大值。木射线高度与木射线宽度无性系重复力范围幅度最大,分别为 0.07~0.78、0.06~0.82。解剖特性相关性状的无性系重复力在第 2~3 年轮、第 8~10 年轮间的变化趋势无明显规律性;径向的细胞腔径与细胞直径、弦向双壁厚等性状的无性系重复力在第 4~8 年轮间的变化趋势稳定(图 1A)。通过比较不同木材位置的物理性状无性系重复力后发现,全干密度和基本密度的无性系重复力变化范围为 0.89~0.95,且均在心边材处达到最大值(图 1B)。对于化学组成的材性性状研究发现,半纤维素、 α -纤维素和木质素的无性系重复力变化有一定相关性,在第 1 和第 6 年轮时数值较大,整体随着年轮表现为先减小后增大,与之不同的是综纤维素的无性系重复力则呈下降趋势(图 1C)。由图 1D 可见,在不考虑无性系重复力径向变异的情况下,各材性性状的无性系重复力均较高(0.49~0.93),其中,全干密度、基本密度、综纤维素、径向-细胞直径、径向-细胞腔径的无性系重复力在 0.8 以上,表明这些木材材性性状均受较强的遗传

控制,具有遗传改良的潜力。

性状变异系数反映了性状间的变异类型状况,系数值越大,表明性状间存在较丰富的变异类型,有较大的性状改良潜力^[19]。本研究中 8 个黑杨派无性系材性性状变异系数的估计结果(表 3)显示:表型变异系数均大于遗传变异系数。不同年轮下无性系遗传变异系数的变化规律在一定程度上与无性系重复力相似。木射线高度与木射线宽度遗传变异系数变化趋势相似,变化范围分别为 1.3%~7.2%、0.9%~6.6%。木射线组织比量遗传变异系数变化不大,且处于较高水平。弦向的细胞直径和腔径遗传变异系数变化趋势吻合度较高,在第 3 年轮达到最大值。弦向和径向的双壁厚遗传变异系数在第 7 年轮时均达到最低值,且在第 4 年轮处于最高或次高值。径向的细胞腔径与径向的细胞直径遗传变异系数变化趋势大致相同,经比较第 2、3 和 9 年轮时遗传变异系数偏小,且最大值都在第 7 年轮。微纤丝角遗传变异系数的幅度最大(5.0%~20.5%)。全干密度和基本密度遗传变异系数均在边材处(8~10 年轮)达到最大值,分别为 10.2%、9.6%。而

表3 黑杨派无性系材性性状变异系数

Table 3 Coefficient of variation on wood properties of Section Aigeiros clones

%

性状 Traits	变异项目 Variation of project	变异系数 Coefficient of variation										
		心材区域 Heartwood				心边材区域 Heartwood and Sapwood			边材区域 Sapwood			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
全干密度 Oven-Dry Density	GCV		6.3				9.9			10.2		
	PCV		7.9				11.0			11.8		
基本密度 Basic Density	GCV		6.2				9.1			9.6		
	PCV		7.3				10.2			11.3		
微纤丝角 Microfibril Angle	GCV		20.5	9.5	11.6	9.5	12.2	10.4	5.0	8.6	6.4	
	PCV		29.4	23.3	24.1	16.7	18.9	19.1	17.9	15.6	13.7	
弦向-双壁厚 Tangential Cell Wall Thickness	GCV		10.4	12.2	14.3	10.9	11.1	7.0	8.6	7.4		
	PCV		18.0	19.7	20.2	20.5	21.0	13.6	17.8	22.5		
弦向-细胞腔径 Tangential Lumen Diameter	GCV		6.6	14.6	11.1	9.2	12.1	11.9	11.6	3.1	9.5	
	PCV		16.2	22.1	17.0	17.0	18.4	17.2	17.0	14.4	16.3	
弦向-细胞直径 Tangential Cell Diameter	GCV		6.3	11.3	9.4	6.7	8.3	9.0	7.6		6.9	
	PCV		12.3	18.4	14.2	13.4	14.1	13.5	12.6		12.8	
组织比量-木射线 Wood Ray Tissue Proportion	GCV		12.1	9.2	11.5	11.1	10.8	13.7	11.8	12.6	11.2	
	PCV		22.1	22.6	23.4	23.2	26.3	25.6	21.3	22.8	20.9	
导管长度 Pipe Length	GCV	7.6	5.8	5.2		6.4	4.4	3.8	6.1	1.8	2.2	
	PCV	13.1	13.3	12.4		12.4	10.4	9.9	10.3	11.0	9.5	
径向-双壁厚 Radial Cell Wall Thickness	GCV		9.0	10.5	11.4	6.9	9.3	5.0	12.1	6.8		
	PCV		13.8	15.0	15.5	15.4	16.8	14.7	18.2	17.8		
径向-细胞腔径 Radial Lumen Diameter	GCV		11.3	6.4	11.4	14.5	12.6	15.2	12.1	6.3	13.1	
	PCV		18.8	13.7	15.2	18.9	16.1	18.1	15.9	12.3	16.7	
径向-细胞直径 Radial Cell Diameter	GCV		8.3	6.5	9.3	11.2	9.0	11.4	8.3	5.2	9.8	
	PCV		14.7	12.0	12.4	15.2	12.1	14.2	11.3	9.0	12.7	
木射线高度 Wood Ray Height	GCV			4.3	2.1	1.3	5.6	6.5	7.2	5.3	2.6	
	PCV			9.2	11.2	10.4	10.4	10.5	11.1	9.1	6.9	
木射线宽度 Wood Ray Width	GCV		3.6	0.9	6.6	5.6	5.5	5.3	5.3	3.2		
	PCV		5.9	7.3	9.3	8.5	8.0	7.7	8.3	7.9		
纤维长度 Fiber Length	GCV	5.3	6.6	6.6	0.0	5.9	4.4	3.9	5.4	4.4	2.6	
	PCV	14.1	13.5	15.3	0.0	11.2	10.4	11.2	10.6	8.3	7.5	
半纤维素 Hemicellulose	GCV		3.7	1.7	1.7	2.1		3.8				
	PCV		5.6	4.2	4.3	4.5		5.8				
a-纤维素 a - cellulose	GCV		3.4	3.4	2.4	1.3	2.1	4.0				
	PCV		4.7	4.8	4.5	3.0	4.3	5.3				
木质素 Lignin	GCV		7.7	5.3	2.9	5.4	5.6	5.8				
	PCV		9.8	8.7	10.1	10.7	8.6	8.8				
综纤维素 Herald Cellulose	GCV		2.8	1.6	1.4	1.5	1.4	1.3				
	PCV		3.3	2.0	2.2	2.2	2.2	2.1				

注: GCV: 遗传变异系数; PCV: 表型变异系数

Notes: GCV: Genotypy Coefficient of Variable; PCV: Phenotypy Coefficient of Variable

半纤维素、a-纤维素和木质素的遗传变异系数变化也有相似之处, 在第1和第6年轮时数值较大, 综纤维素遗传变异系数在第1年轮时最大(2.8%), 但随着年轮增加而减小。

黑杨派无性系各材性性状表型变异系数表现出明显规律性, 弦向的细胞腔径和弦向的细胞直径在第3年轮时都存在最大值且与其他数据差异显著, 其他年轮下表型变异系数变化范围分别保持在

14.4%~18.4%、12.3%~14.2%。弦向和径向双壁厚表型变异系数的变化趋势相似, 都先缓慢上升然后在第7年轮突降到最低或次低水平再急剧上升到较高水平。径向细胞腔径和径向细胞直径表型变异系数的变化趋势相似, 在第5年轮达最大值, 分别为18.9%、15.2%。木射线高度与木射线宽度表型变异系数均处于较低水平, 都在第4年轮取得最大值, 变化范围分别为6.9%~11.2%、5.9%~9.3%;

而微纤丝角、导管长度、纤维长度的表型变异系数随着年轮增加整体呈下降趋势。木射线组织比量的表型变异系数较大,在第6年轮达最大值26.3%。全干密度、基本密度2个物理性状的遗传变异系数和表型变异系数均表现为在心材处值最小,随着年轮增加呈现上升趋势,在边材处达到最大值。化学组成4个性状的表型变异系数较小,木质素的表型变异系数相对最高;半纤维素与 α -纤维素表型变异系数在第6年轮达最大值,分别为5.8%、5.3%,而综纤维素的表型变异系数在第1年轮时最大。总体看,除微纤丝角外,其余性状表型变异系数波动幅度不大。

2.3 8个10年生黑杨派无性系材性性状综合评价

2.3.1 主成分分析 8个无性系18个性状主成分分析结果(表4)显示:前4个主成分累积贡献率分别为38.21%、64.48%、76.16%、84.62%。根据累积贡献率大于85%的原则,前4个主成分已能代表18个性状的大部分信息。由表4可知:对第1主成分分值(Y_1)影响最大的性状是弦向和径向的细胞腔径和细胞直径、全干密度和基本密度,其中弦向和径向的细胞腔径和细胞直径的向量值为正值,说明 Y_1 分值越大,细胞腔径和细胞直径越大;全干密度和基本密度的向量值为负值,说明 Y_1 分值越大,全干密度和基本密度越小。对第2主成分分值(Y_2)影响最大的性状是木射线组织比量、导管长度、木射线高度和宽度、 α -纤维素、木质素;对第3主成分分值(Y_3)影响最大的性状是弦向和径向的双壁厚、纤维长度;对第4主成分分值(Y_4)影响最大的性状是木射线高度、纤维长度、半纤维素、综纤维素。

2.3.2 主成分值权重法 统计8个无性系的前4个主成分分值,以每个主成分对应的特征值占所提取

表4 黑杨派无性系材性性状主成分分析

Table 4 Principal component analysis of wood properties in Section Aigeiros Clones

项目 Item	第1主成分 Y_1	第2主成分 Y_2	第3主成分 Y_3	第4主成分 Y_4
累积贡献率/%	38.21	64.48	76.16	84.62
微纤丝角	0.27	-0.04	0.05	0.05
弦向-双壁厚	-0.14	-0.03	0.59	0.01
弦向-细胞腔径	0.35	0.13	0.11	-0.03
弦向-细胞直径	0.33	0.13	0.28	-0.03
木射线组织比量	-0.19	-0.37	0.02	0.14
导管长度	0.25	0.32	-0.07	-0.18
径向-双壁厚	-0.19	-0.05	0.57	-0.10
径向-细胞腔径	0.33	-0.21	0.05	0.08
径向-细胞直径	0.30	-0.23	0.16	0.07
木射线高度	0.05	0.36	0.18	0.35
木射线宽度	0.06	0.31	0.03	0.12
纤维长度	-0.06	0.19	0.36	-0.36
半纤维素	-0.15	0.15	0.07	0.64
α -纤维素	-0.21	0.30	-0.11	-0.22
木质素	-0.19	-0.35	0.11	0.18
综纤维素	0.08	0.24	0.01	0.39
全干密度	-0.34	0.16	-0.02	-0.05
基本密度	-0.32	0.22	-0.04	0.01

主成分总特征值的比例为权重加权求和^[20],利用8个无性系的主成分综合值进行计算并排序评价无性系,结果(表5)显示:第1主成分值较大的是中林46;第2主成分值较大的是50号杨和中林46;第3主成分值较大的是108杨和中林46;第4主成分值较大的是N179杨。按综合得分排序分别是中林46杨、50号杨、N179杨、108杨、桑巨

表5 主成分因子得分与排序

Table 5 Scores and sorting of principal component factors

无性系	第1主成分 Y_1	第2主成分 Y_2	第3主成分 Y_3	第4主成分 Y_4	综合排序
中林46	4.12/1	2.10/2	1.10/2	-0.25/6	2.23/1
50号杨	-0.93/6	3.85/1	-0.84/6	0.92/2	0.64/2
N179杨	1.74/2	-1.93/7	0.51/4	1.85/1	0.37/3
108杨	0.84/4	-0.87/5	1.69/1	-1.08/7	0.20/4
桑巨杨	1.36/3	-1.72/6	-2.73/8	0.32/3	-0.22/5
丹红杨	-0.30/5	-0.26/4	-1.10/7	-2.23/8	-0.50/6
南杨	-4.21/8	1.11/3	0.44/5	0.19/5	-1.25/7
36号杨	-2.62/7	-2.28/8	0.91/3	0.28/4	-1.47/8

杨、丹红杨、南杨、36号杨。

3 讨论

本研究从木材解剖特性、物理性能、化学组成3个维度及不同年轮下的径向变化对黑杨派无性系进行比较分析,覆盖了8个无性系,40个单株,10个年轮,18个性状,138 798个测试数据。因此,通过大量的数据采集可较全面地展示黑杨派无性系的材性遗传变异规律。本研究方差分析结果显示:除半纤维素外,微纤丝角、弦向导管直径、弦向双壁厚、弦向细胞腔径、弦向细胞直径等17个材性性状在不同的黑杨派无性系及不同年轮间均差异极显著。上述结果表明,黑杨派无性系间及不同年轮间材性性状存在丰富的遗传变异,为选育出优质的黑杨派纸浆材和板材无性系提供了理论依据。通过测定7个黑杨派无性系的基本密度、纤维长度、壁腔比和1%NaOH抽提物,发现4个材性性状在7个无性系间存在极显著或显著差异,其中,47号杨的综合表现最佳,可作为优良的造纸原材料^[21]。利用23个生长、干形和冠形性状对10个黑杨派无性系材料进行表型变异规律分析,同样得出黑杨派无性系多个性状存在广泛变异^[11]。

各性状无性系间存在差异的原因可由遗传参数加以证明,性状的重复力大,说明该性状受遗传控制较强,受外界环境影响较小^[22]。本研究中,材性性状无性系重复力变化范围为0.49~0.93,变化幅度较大,其中,全干密度、基本密度、综纤维素、径向-细胞直径、径向-细胞腔径的重复力在0.8以上,性状很大程度受遗传控制,说明以上性状在无性系间的选择潜力更大。导管长度的无性系重复力最小(0.49),说明与其他性状相比较容易受外部环境的影响^[23]。研究发现,纤维长度在第4、8、9年轮时重复力偏高,即黑杨派作为纸浆材时选择该年轮在一定程度上可以得到遗传增益^[24]。

在无性系性状主成分分析中,木材解剖和物理特征对第1主成分的贡献率最大;在对第1主成分值排序后发现中林46分值最大,表明其弦向和径向的细胞直径和细胞腔径较大,而全干密度和基本密度较小。密度低的木材原料在造纸过程中易于制浆和打浆,因此,在同等条件下中林46是较好的纸浆用材。第2主成分中木射线相关特征值、 α -纤维素、木质素等性状的贡献率最大, α -纤维素的向量值为正值,木质素的向量值为负值,这说明当

第2主成分分值越大时, α -纤维素性状值越大,相反地木质素越小。杨树作为重要的纸浆用材,应满足生物量高的同时木材纤维素含量较高、木质素含量较低的要求。因此,从第2主成分角度分析,50号杨和中林46是较好的纸浆用材。利用主成分分值可对黑杨派无性系进行初步评价,无性系综合排名从第1至第8名分别是中林46杨、50号杨、N179杨、108杨、桑巨杨、丹红杨、南杨、36号杨,该评价为筛选优良无性系提供重要依据。据遗传资料显示,桑巨杨、中林46、108杨为欧美杨,N179为欧洲黑杨,50号杨和36号杨为美洲黑杨,丹红杨和南杨同为50号杨和36号杨的杂交子代,因此,从主成分因子评价角度发现杂交后代丹红杨和南杨表现出比亲本36号杨更高的综合评价,但未超过母本50号杨的主成分值,以本研究的18个材性性状角度分析杂交子代未体现出明显的杂交优势。从材性变异规律角度上分析,进一步发现丹红杨的材性性状与父本36号杨相近,南杨的材性性状与母本50号杨相近。

本研究发现,黑杨派无性系在1~10年轮间存在丰富变异,因此,应准确把握杨树在生长发育的节律和生长期长短方面的规律,通过材性分析筛选目的性强、生产周期短的无性系树种,选育优良速生优质人工林杨树^[25-27]。但需要注意的是在生态环境建设和绿色环保发展中,生态是第一步,无性系会对生物多样性产生影响,生态系统难免造成不稳定的情况,所以,合理利用无性系,保护遗传基础宽广性,显得尤为重要^[28]。

4 结论

除半纤维素外,微纤丝角,弦向与径向的双壁厚、弦向与径向的细胞腔径、弦向与径向的细胞直径、导管长度、木射线组织比量、木射线高度与宽度、纤维长度、全干密度、基本密度、 α -纤维素、木质素和综纤维素等材性性状在不同无性系间差异极显著。全干密度、基本密度、综纤维素、径向-细胞直径和径向-细胞腔径的重复力达0.8以上,受较强的遗传控制,具有遗传改良的潜力。

参考文献:

- [1] Guerra F P, Richards J H, Fiehn O, *et al.* Analysis of the genetic variation in growth, ecophysiology, and chemical and metabolomic composition of wood of *Populus trichocarpa* provenances[J]. *Tree Genet-*

- ics & Genomes, 2016, 12(1): 6.
- [2] 周 亮. 人工林杨树正常木和应拉木材性与制浆造纸性能关系及其模型研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008.
- [3] 刘玉鑫, 颜开义, 何 伟, 等. 美洲黑杨无性系木材纤维性状遗传变异[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44 (2): 67-74.
- [4] 栾鹏慧, 苏晓华, 张冰玉, 杨属(*Populus L.*)种质资源遗传学评价研究进展[J]. 植物学报, 2011, 46 (5): 586-595.
- [5] 石传喜, 于英良, 朱莹琦, 等. 6个杨树无性系木材密度及干缩性能差异[J]. 林业工程学报, 2020, 5 (5): 57-62.
- [6] 金胶胶. 大青杨无性系材性遗传变异分析及优良无性系选择[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2019.
- [7] Zhao X, Hou W, Zheng H, *et al.* Analyses of genotypic variation in white poplar clones at four sites in china[J]. *Silvae Genetica*, 2013, 62(4-5): 187-195.
- [8] 韩东花, 杨桂娟, 肖 遥, 等. 楸树无性系早期生长变异和优选[J]. 林业科学研究, 2019, 32 (4): 96-104.
- [9] Liu M, Yin S, Si D, *et al.* Variation and genetic stability analyses of transgenic TaLEA poplar clones from four different sites in China[J]. *Euphytica*, 2015, 206(2): 331-342.
- [10] Zhao X, Li Y, Zheng M, *et al.* Comparative analysis of growth and photosynthetic characteristics of (*Populus simonii* × *P. nigra*) × (*P. nigra* × *P. simonii*) hybrid clones of different ploidides[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(4): e0119259.
- [11] 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.
- [12] 张兴虎, 叶中亚, 黄天勇, 等. 丹红杨定向培育技术研究[J]. 湖北林业科技, 2016, 45 (3): 8-10.
- [13] 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.
- [14] Jia R, Wang Y, Wang R, *et al.* Physical and mechanical properties of poplar clones and rapid prediction of the properties by near infrared spectroscopy[J]. *Forests*, 2021, 12(2): 206.
- [15] Arthur G, Francesco C. The effect of the interaction of tree slenderness and relative height with ring width on wood density in *Abies balsamea* and *Picea glauca*[J]. *Wood Science and Technology*, 2017, 51(1): 175-194.
- [16] 巩其亮. 银杏无性系材性遗传变异及良种选择[D]. 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [17] 梁一池. 树木育种原理与方法 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1997: 274-276
- [18] 马育华. 植物育种的数量遗传学基础 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982: 334-346.
- [19] 解懿妮, 莫晓勇, 彭仕尧, 等. 粤西21个桉树无性系早期性状遗传变异分析和无性系综合选择[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42 (3): 73-80.
- [20] 张 振. 红松无性系种子形态及营养成分变异研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [21] 李金花, 宋红竹, 牛正田, 等. 辽西地区黑杨派纸浆材无性系生长与材性综合评价[J]. 林业科学研究, 2008, 21 (2): 206-211.
- [22] 江锡兵, 宋跃朋, 马开峰, 等. 杨树杂种无性系生长与光合生理遗传变异研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31 (9): 1779-1785.
- [23] 黄桂华, 梁坤南, 周再知, 等. 柚木无性系生长性状的遗传变异与选择效应[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (1): 101-106.
- [24] 童再康, 郑勇平, 罗士元, 等. 黑杨派南方型新无性系纸浆材材性变异与遗传[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18 (1): 21-25.
- [25] Wang T, Aitken S N, Rozenberg P, *et al.* Selection for height growth and Pilodyn pin penetration in lodgepole pine: effects on growth traits, wood properties, and their relationships[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(4): 434-445.
- [26] Fujimoto T, Kita K, Uchiyama K, *et al.* Age trends in the genetic parameters of wood density and the relationship with growth rates in hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) F1[J]. *Journal of Forest Research*, 2006, 11(3): 157-163.
- [27] 孙晓梅, 张守攻, 周德义, 等. 落叶松种间及种内和种间杂种家系间的物候变异与早期选择[J]. 林业科学, 2008, 44 (1): 77-84.
- [28] 安三平, 欧阳芳群, 马建伟, 等. 欧洲云杉无性系遗传变异及早期选择[J]. 西北林学院学报, 2018, 33 (6): 61-65.

Radial Genetic Variation Analysis and Comprehensive Evaluation of Wood Properties in Ten-year-old Section Aigeiros Clones

YAN Han-wei[#], CHENG Ya-jing[#], YU Tong-tong, YU Na, ZHOU Liang, LIU Sheng-quan

(School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: [Objective] The purpose of this research is to study the differences and genetic characteristics of various timber traits among Section Aigeiros clones, and to evaluate the excellent degree of wood properties of the clones, so as to provide theoretical basis for breeding clones with excellent comprehensive characters in experimental areas, and promote the directional cultivation of industrial timber. [Method] The wood properties (anatomical features, physical properties, and chemical composition) of ten-year-old sample trees (5 plants per clone) were measured from 8 experimental Section Aigeiros clones in Jiaozuo, He'nan Province. The genetic variation and genetic parameters of 18 wood traits were analyzed, and principal component analysis was used to evaluate the clones. [Result] Except the hemicellulose, the other 17 wood properties of poplar clones showed significant differences among clones. The variation range of clone repeatability was 0.49-0.93, in which the absolutely dried density, basic density, total cellulose, radial cell diameter and radial lumen diameter were more than 0.8. The phenotypic variation of clones was greater than the genetic variation. *Populus × euramericana* 'Zhonglin 46' was selected as the superior clones based on the highest core of principal component factors. [Conclusion] The eight poplar clones showed genetic differences in 18 wood properties, which were under strong genetic control and possessed the conditions of genetic improvement. There were radial differences in clone repeatability. With the increase of annual rings, the variation range of physical properties was the smallest, and the absolutely dried density and basic density were relatively stable.

Keywords: Section Aigeiros clones; poplar; wood properties; radial; genetic variation

(责任编辑: 张 研)