

泡桐优良无性系“TF33”干材表型性状 杂种优势研究

王楠¹, 李芳东¹, 马跃², 叶金山^{1*}

(1. 国家林业局泡桐研究开发中心, 河南 郑州 450003; 2. 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西 凭祥 532600)

摘要:以“毛泡桐×白花泡桐”的优良无性系 TF33 和两个标准对照品种(白花泡桐 C001 与兰考泡桐 C125)为试验材料,研究了泡桐优良无性系干材表型性状的杂种优势。结果表明:(1)TF33、C001、C125 无性系间各性状存在广泛和显著的变异;(2)3 个生长性状(接干高、接干材积和主干材积)与 3 个干形性状(通直度、接干形数和主干平均削度)为高度变异性状($CV \geq 30\%$), CV 变幅为 33.10%~53.19%;(3)接干因子是影响和决定性状杂种优势最终状况和总体表现的最重要因素;(4)通直度性状的遗传改良是毛泡桐×白花泡桐杂种无性系干形遗传改良的关键和瓶颈;(5)多数性状间存在极显著或显著的相关性,且不同的性状间相关性变化较大;(6)TF33 较 C001 有显著的材积生长杂种优势,较 C125 没有显著杂种优势。

关键词:泡桐;优良无性系;TF33;杂种优势

中图分类号:S792.43

文献标识码:A

Heterosis of Phenotypic Characters of *Paulownia* Elite Clone Stem Timber

WANG Nan¹, LI Fang-dong¹, MA Yue², YE Jin-shan¹

(1. Paulownia Research and Development Center of State Forestry Administration, Zhengzhou 450003, He'nan, China;

2. The Experimental Centre of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, Guangxi, China)

Abstract: The heterosis of phenotypic characters of *Paulownia* elite clone stem timber were studied with elite clone of *P. tomentosa* × *P. fortunei* (TF33) and two standard trail varieties, *P. fortunei* (C001) and *P. elongate* (C125), as experimental materials. The results are as follows. (1) There were extensive and significant variation among characters at clone level among TF33, C001 and C125. (2) Three growth characters (height of stem-join, volume of stem-join and volume of main stem) and three trunk form characters (straightness of stem, stem-join form-factor and average taper of main stem) had high variation. The coefficient of variation (CV) ranged from 33.10% to 53.19%. (3) The height of stem-join factor played a vital role in influencing and determining general expression and total status of traits heterosis. (4) Straightness of stem was the key and bottleneck to the genetic improvement of *P. tomentosa* × *P. fortunei* on the stem form characters. (5) Most of the characters correlated very significantly or significantly and the correlations between different characters changed greatly. (6) TF33 had very prominent volume growth heterosis over C001. There was no remarkable heterosis compared with C125.

Key words: *Paulownia*; elite clone; TF33; heterosis

收稿日期:2014-09-22

基金项目:国家林业局植物新品种测试指南及已知品种数据库(20050012)。

作者简介:王楠,女,硕士研究生,主要研究方向为泡桐杂种优势研究。E-mail:wwangan@163.com

* 通讯作者:研究员,主要研究方向为林木遗传育种。E-mail:yejinshan371@163.com

泡桐 (*Paulownia*) 是原产我国的重要速生用材树种之一, 目前已在纸浆用材、人造板用材和大径级装饰用材等产业上开展了高干材定向培育。为获得生长迅速、树干通直圆满的优良品种, 我国学者自 20 世纪 70 年代就开展了泡桐种内和种间的杂交组合研究, 并成功培育出一批优良杂种无性系应用于生产实践。多年的试验表明, 毛泡桐 × 白花泡桐 (*P. tomentosa* (Thunb.) Steud. × *P. fortunei* (Seem.) Hemsl.)、兰考泡桐 × 白花泡桐 (*P. elongata* S. Y. Hu × *P. fortunei* (Seem.) Hemsl.)、毛泡桐 × 南方泡桐 (*P. tomentosa* (Thunb.) Steud. × *Paulownia australis* Gong Tongsp. nov.)、毛泡桐 × 兰考泡桐 (*P. tomentosa* (Thunb.) Steud. × *P. elongata* S. Y. Hu) 杂种苗明显优于亲本^[1]。

杂交育种是利用遗传基础不同的树种、类型或者个体相互交配, 通过综合不同亲本的优良特性, 丰富杂种后代的遗传变异以及利用杂种优势等途径选育树木良种^[2]。目前, 国内外学者对泡桐杂交领域的研究主要集中在杂交策略、区域栽培试验、子代表型变异和遗传多样性, 在木材理化性质等方面也有一些探讨^[3-10]。随着泡桐杂交工作的不断深入开展, 逐渐拓展了泡桐种间杂交组合, 并在提高速生性的同时也兼顾了干形和抗病性的改良, 也开展了泡桐种间杂交后代杂种优势形成的逆境生理学研究^[11-13]。但是, 目前并未见在田间试验条件下成年大树干材表型性状杂种优势表现的研究报道。

“毛白 33” (以下简称 TF33) 是以“毛泡桐 × 白花泡桐”杂交获得的优良无性系, 其苗高和地径分别比母本大 21.3%~72.7% 和 14.3%~69.0%, 比父本分别大 4.9%~49.1% 和 0~41.3%^[14]; C001 是于 1985 年 1 月通过林业部鉴定的白花泡桐 (*P. fortunei* (Seem.) Hemsl.) 优良单株无性系, 其树高、胸径、材积分别比对照白花泡桐大 7%、38%、43%~45%^[15-16]; C125 是华北平原广泛发展的兰考泡桐 (*P. elongata* S. Y. Hu) 优良无性系, 在树高、胸径和材积生长量等方面与杂种起源的“桐杂一号”处于同一水平, 抗寒性表现优于 TF33^[17]。以上品系均具有生长迅速、干形通直、材质优良和抗逆性强等特点。本研究以泡桐属中具有重要杂交意义的毛白杂种 F_1 优良无性系 TF33 和两个具代表性的标准对照品种 (C001、C125) 为试验材料, 研究 TF33 的表型性

状遗传变异规律及性状杂种优势率, 为进一步开展泡桐杂交工作奠定基础, 为泡桐优良杂种的创制提供基本技术支撑。

1 材料与方法

试验在 TF33、C001 和 C125 的无性系区域试验林 (12 年生) 中进行。该试验林位于豫东平原黄泛区腹地 (114°28'E, 34°20'N); 海拔约 60 m, 年均气温为 14.4℃, 年均降水量达 678.5 mm; 试验地土壤类型为黄河冲积土中的沙壤土, pH 值约为 7.0, 中等肥力, 地下水位约 3.5 m。试验采用完全随机区组设计, 6 株小区, 4 次重复, 林分株行距为 5 m × 10 m。

每木检尺和计算 12 个生长性状 (树高、主干高、接干高、全干高、胸径、主干 1/2 径、接干 1/2 径、主干端径、主干基径、主干材积、接干材积和全干材积) 与 8 个干形性状 (主干形率、主干形数、接干形率、接干形数、主干材积/全干材积、接干材积/全干材积、主干平均削度和通直度)。按中央直径法计算主干材积和接干材积; 以胸径为比较直径计算主干形率和接干形率; 以胸高断面面积和全干高为标准计算主干形数和接干形数; 用长度除两端直径之差法计算各段树干的平均削度; 采用 4 级分类标准区分通直度^[18]。基于标准对照品种 (以下简称 St) 计算 TF33 的杂种优势率 (RH), 其计算公式如下:

$$RH (\%) = (F1 - St) / St \times 100^{[19]}$$

采用 SAS 9.0 版软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 干材表型性状的变异特征与方差分析

由表 1 可知, 3 个无性系的 20 个表型性状总变异系数最大可达 53.19% (接干高), 其中生长性状中接干材积的变异幅度仅次于接干高, 其变异系数为 42.57%, 这表明接干高和接干材积是泡桐生长性状最主要的变异来源。树干通直度 ($CV = 41.24\%$) 和接干形数 ($CV = 39.96\%$) 是干形性状中变异幅度最大的性状, 这表明树干通直度和接干形数在 3 个无性系中具有较大的可选择空间。因此, 3 个无性系丰富的表型性状变异空间为优良新种质选择提供了较好的变异基础。通过对 TF33、C001 和 C125 表型性状的变异系数的均值比较可知, TF33 表型性状的稳定性最高, C125 次之, C001 稳定性最

差,分别为 17.56%、23.75% 和 21.87%。由此,TF33 是速生高稳定型优良无性系。

按照变异系数 CV 的大小,将 20 项性状的遗传变异性分为以下 3 种变异类型:

(1)高度变异类型($CV \geq 30\%$):接干高、接干材积、主干材积等 3 个生长性状以及通直度、接干形数、主干平均削度等 3 个干形性状高度变异,其 CV 变幅为 33.10%~53.19%。

(2)中度变异类型($15\% \leq CV < 30\%$):主干高、全干高、全干材积、接干 1/2 径、主干基径等 5 个生长性状和接干形率 1 个干形性状属于中度变异,其 CV 变幅为 15.07%~27.64%。

(3)低度变异类型($CV < 15\%$):树高、胸径、主干端径、主干 1/2 径等 4 个生长性状和主干形数、接干材积/全干材积、主干形率、主干材积/全干材积等 4 个干形性状表现为低度变异,其 CV 变幅为 1.52%~8.92%。

单因素方差分析表明,3 个无性系性状中,除全干高、通直度、接干材积/全干材积、主干材积/全干材积差异性不显著外($p > 0.05$),其它 11 项生长性状和 5 项干形性状均存在显著性或极显著性差异。

为了分析 TF33 与 C001、C125 的各性状的差异,在方差显著的基础上进行了 Duncan's 多重比较。结果表明,TF33 和 C001 的大部分性状存在显著差异或极显著差异(表 1)。其中,生长性状方面,TF33 的树高平均值是 C001 的 113.77%,主干高是 C001 的 164.48%,胸径是 C001 的 108.87%,主干 1/2 径是 C001 的 105.87%,接干 1/2 径是 C001 的 157.95%,主干基径是 C001 的 111.33%,主干材积是 C001 的 190.64%,全干材积是 C001 的 165.99%;在干形性状上,TF33 同样表现突出,其接干形率和接干形数分别是 C001 的 146.36% 和 216.20%。表明 TF33 有显著的杂种优势,利用其在华北平原营造速生丰产林可以获得显著的增产效益。

TF33 与 C125 相比,除在主干平均削度、树高、主干基径性状表现差异显著外,其他 17 个性状上均没有显著差异。可见,TF33 较 C125 并没有显著的杂种优势。与 C125 相比,TF33 仅在主干高、接干 1/2

径、接干形率、接干形数、主干材积/全干材积、通直度等性状上优于非杂交种兰考泡桐优良无性系 C125。

另外,TF33 的通直度性状并没有在无性系水平上比对照品种表现出显著差异性,证明了通直度性状的遗传改良是毛泡桐 × 白花泡桐杂种无性系干形遗传改良的关键和瓶颈。

2.2 干材表型性状相关分析

相关分析发现(表 2),多数性状间存在显著或极显著的相关性,而不同性状间的相关性变化很大:(1)接干形率与接干形数、主干形率与主干形数呈极显著相关($r \geq 0.99$),胸径与主干 1/2 径、主干端径、主干基径、主干材积、全干材积也呈极显著相关($0.62 \leq r \leq 0.95$);(2)有些性状如通直度与主干形数、主干形率,接干材积与全干高、胸径、主干 1/2 径、主干端径等相关性较低($0.36 \leq r < 0.53$);(3)还有一些性状如接干高与接干形率、接干形数、主干材积/全干材积呈极显著负相关($r \leq -0.66$)。由此表明,在做泡桐杂种的定向选择和遗传改良时,应综合考虑相关性状的杂种优势表现,以胸径、接干高和通直度为指标对泡桐的生长表现进行分析,有望选出速生、通直的泡桐优良品种或者类型。

2.3 TF33 干材表型性状杂种优势表现

由表 3 可知,与 C001 比较,TF33 大部分的生长性状表现为正向杂种优势,极个别表现为负向杂种优势。此外,杂种优势并不是某个性状的表现突出,而是多个性状的综合表现较好,这些性状之间又是相关的。TF33 与 C001 相比具有材积杂种优势,在树高、胸径、接干 1/2 径、接干形率、接干形数和通直度等性状上也同样具有杂种优势。TF33 的主干平均削度较 C001 没有突出表现,这是由于白花泡桐是泡桐属中干形表现最为优良的树种,其干形普遍通直,而 C001 又是从白花泡桐中选育出来的优良无性系,其干形自然特别通直。

与 C125 相比,TF33 的干形性状表现更加优良,但是在材积性状方面并不突出。而 C125 能在速生性状上优于 TF33 的事实也说明,除种间人工杂交育种途径外,在泡桐属中物种水平上的选择育种也是一种很有效的泡桐遗传改良途径。

表 1 3个无性系干材表型性状变异及方差分析

项目	TF33					C001					C125					F 值	
	平均值±标准差	变异系数/%	最大值	最小值	平均值±标准差	变异系数/%	最大值	最小值	平均值±标准差	变异系数/%	最大值	最小值	平均值±标准差	变异系数/%	最大值		最小值
	树高/m	15.11±1.10b	7.25	17.20	13.20	13.28±1.41c	10.62	14.60	11.50	16.61±0.80a	4.79	18.00	15.50	15.54±1.39	8.92		22.12**
主干高/m	4.22±0.73a	17.35	5.50	3.00	2.57±0.79b	30.94	4.00	2.00	3.86±0.88a	22.89	5.50	2.60	3.66±1.01	27.64	10.38**		
接干高/m	2.63±1.30b	49.35	5.50	1.20	5.93±2.14a	36.00	7.50	3.50	4.60±1.97ab	42.88	7.40	1.80	3.85±2.05	53.19	5.66*		
全干高/m	5.37±1.87a	34.79	11.00	3.60	5.53±3.31a	59.74	9.50	2.00	6.49±2.51a	38.62	10.20	3.00	7.51±2.02	26.90	1.07		
胸径/cm	32.48±2.22a	6.84	36.20	28.00	29.83±2.38b	7.97	32.30	26.50	34.04±1.87a	5.50	37.20	31.60	32.30±2.50	7.72	8.26**		
主干1/2 径/cm	31.5±1.94a	6.17	35.50	28.00	29.75±2.52b	8.48	32.30	26.00	33.09±1.74a	5.27	35.20	30.50	31.47±2.21	7.02	6.53**		
接干1/2 径/cm	25.43±3.77a	14.81	30.00	17.20	16.1±3.97b	24.63	20.50	12.80	23.15±3.04a	13.12	28.50	19.00	23.23±4.61	19.84	8.09**		
主干直径/cm	30.35±2.11ab	6.95	34.50	27.20	29.28±3.32b	11.32	32.30	23.50	32.00±2.07a	6.46	34.50	28.70	30.46±2.33	7.64	3.69*		
主干基径/cm	36.46±2.52b	6.91	41.80	31.50	32.75±3.17c	9.69	36.30	28.00	40.23±2.44a	6.07	45.80	37.50	33.81±5.10	15.07	19.42**		
主干材积/m³	0.33±0.07a	21.49	0.44	0.20	0.17±0.04b	21.79	0.22	0.12	0.33±0.09a	25.93	0.53	0.23	0.29±0.10	33.10	11.98**		
接干材积/m³	0.13±0.03ab	21.08	0.16	0.07	0.11±0.02b	18.37	0.13	0.09	0.19±0.08a	44.03	0.31	0.09	0.148±0.063	42.57	3.96*		
全干材积/m³	0.39±0.08a	21.87	0.57	0.27	0.23±0.07b	30.16	0.34	0.24	0.47±0.13a	27.27	0.65	0.36	0.44±0.12	27.13	9.55**		
通直度	1.35±0.57a	42.50	3.00	1.00	2.00±1.1a	54.77	3.00	1.00	1.50±0.76a	50.64	3.00	1.00	1.95±0.81	41.24	1.96		
主干平均削度	1.45±0.27a	18.73	2.14	1.00	1.26±0.58a	46.39	1.93	0.25	2.19±0.57b	26.03	3.17	1.43	1.71±0.61	35.89	15.54**		
主干形率	0.97±0.02b	2.53	1.00	0.92	1.00±0.01a	0.82	1.00	0.98	0.97±0.02b	2.25	1.00	0.94	0.98±0.03	2.77	3.27*		
主干形数	0.94±0.05b	4.92	1.00	0.85	0.99±0.02a	1.64	1.00	0.96	0.95±0.04b	4.54	1.00	0.88	0.95±0.05	5.36	3.57*		
接干形率	0.81±0.13a	16.65	0.95	0.53	0.55±0.12b	21.82	0.67	0.43	0.69±0.12ab	17.86	0.88	0.54	0.72±0.15	21.02	5.14*		
接干形数	0.66±0.2a	29.86	0.90	0.28	0.31±0.13b	42.43	0.44	0.18	0.48±0.17ab	35.95	0.77	0.29	0.54±0.22	39.96	5.16*		
接干材积/全干材积	0.30±0.04a	14.83	0.38	0.23	0.42±0.09a	21.78	0.52	0.35	0.37±0.13a	36.30	0.56	0.18	0.34±0.01	2.92	0.97		
主干材积/全干材积	0.70±0.04a	6.32	0.77	0.62	0.58±0.09a	15.56	0.65	0.48	0.63±0.13a	21.09	0.82	0.44	0.66±0.01	1.52	1.15		
均值	15.11±1.10b	17.56			13.28±1.41c	23.75				21.87							

注:同行不同字母(a、b、c)表示在p<0.05水平差异显著,*表示在p<0.01水平上差异显著,**表示在p<0.01水平上差异显著。

表 2 3 个无性系各干材表型性状间的相关系数

性状	树高	主干高	接干高	全干高	胸径	主干 1/2 径	接干 1/2 径	主干基径	主干材积	接干材积	全干材积	通直度	主干尖削度	主干形率	主干形数	接干形率	接干形数	接干材积/全干材积
主干高	0.42**																	
接干高	-0.02	-0.27																
全干高	0.28	0.10	0.88**															
胸径	0.35*	0.34*	0.14	0.09														
主干 1/2 径	0.26	0.12	0.19	0.02	0.95**													
接干 1/2 径	0.28	0.06	-0.73**	-0.71**	0.09	0.08												
主干端径	0.16	-0.07	0.28	-0.01	0.84**	0.94**	0.02											
主干基径	0.47**	0.33*	0.04	0.04	0.92**	0.86**	0.15	0.75**										
主干材积	0.45**	0.88**	-0.13	0.10	0.72**	0.57**	0.04	0.38*	0.66**									
接干材积	0.43	-0.13	0.58**	0.53*	0.45*	0.50*	0.06	0.52*	0.42	0.07								
全干材积	0.59**	0.58**	0.21	0.71**	0.62**	0.49**	0.07	0.32	0.61**	0.69**	0.59							
通直度	-0.16	-0.44**	0.42	0.54**	-0.22	-0.12	-0.35	0.02	-0.25	-0.40**	0.15	0.10						
主干尖削度	0.41**	-0.03	-0.07	0.02	0.40**	0.35*	0.26	0.21	0.66**	0.10	0.31*	0.27	-0.15					
主干形率	-0.35*	-0.70**	0.08	-0.25	-0.43**	-0.13	-0.05	0.05	-0.42**	-0.62**	-0.01	-0.50	0.36*	-0.27				
主干形数	-0.36*	-0.73**	0.10	-0.23	-0.44**	-0.13	-0.07	0.05	-0.43**	-0.65**	-0.01	-0.50	0.39*	-0.25	0.99**			
接干形率	0.11	-0.08	-0.78**	-0.83**	-0.27	-0.25	0.93**	-0.29	-0.18	-0.20	-0.11	-0.22	-0.30	0.10	0.13	0.10		
接干形数	0.06	-0.10	-0.77**	-0.84**	-0.30	-0.28	0.92**	-0.30	-0.22	-0.23	-0.14	-0.26	-0.28	0.06	0.15	0.13 1**		
接干材积/全干材积	-0.08	-0.70**	0.66**	0.32	-0.16	-0.02	-0.13	0.10	-0.17	-0.59**	0.72**	-0.10	0.42	0.10	0.37	0.39	-0.10	-0.11
主干材积/全干材积	0.08	0.70**	-0.66**	-0.32	0.16	0.02	0.13	-0.10	0.17	0.59**	-0.72**	0.10	-0.42	-0.10	-0.37	-0.39	0.10	0.11

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著性差异, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著性差异。

表3 TF33 干材表型性状的杂种优势表现

性状类型	性状	RH _{C001} /%	RH _{C125} /%
材积性状	树高	13.774	-9.036
	胸径	8.866	-4.596
	接干1/2径	57.950	9.849
	主干材积	90.635	-0.514
	接干材积	10.294	-34.211
	全干材积	65.992	-17.004
干形性状	主干平均削度	-15.488	33.622
	通直度	32.609	10.145
	接干形率	46.364	17.518
	接干形数	116.196	37.766

3 结论与讨论

TF33、C001 和 C125 无性系间各性状存在广泛和显著的变异性。其中,接干高和接干材积是泡桐生长性状最主要的变异来源,树干通直度和接干形数则在干形性状中具有较大的可选择空间。从高度变异类型及变异系数不难看出,接干因子基本决定了泡桐优良无性系的总体表现,而其他性状都依附于接干性状存在和发展。这一结论与泡桐通过着生于接干高上枝叶的光合作用而对其它性状产生直接和间接影响的结论吻合^[12,20]。由此,泡桐的接干能力对泡桐的生长有重要影响,接干性能的强弱直接决定了泡桐干形的好坏,同时也决定了材积的大小。

TF33 与 C001 相比具有显著的材积杂种优势,与 C125 比较没有显著杂种优势。有学者认为,兰考泡桐可能是白花泡桐和毛泡桐的天然杂交种^[1],莫文娟等在 DNA 水平上证明了毛泡桐是兰考泡桐的亲本之一^[21]。本研究中 C125 的性状突出表现为这一观点提供了一定的支撑。

杂种优势现象实际上是内基因表达调控的外在表现方式,近年来分子生物技术为泡桐杂交育种注入了新的活力。一些难以从形态上区别的杂种或无性系通过分子标记的方法可以较容易分开,一些经济性状也可通过分子标记辅助育种进行数量性状位点的定位^[22]。目前,虽然已在泡桐逆境分子生物学、亲缘关系的鉴定、杂交种起源和表观遗传等方面取得了一定的研究成果,但就目前水平来看,目标性状由哪些基因控制还不清楚,加上林木杂种优势分子机理的研究水平较为落后,人类还不能对目的基因进行随意操作和组合,杂交育种仍将是泡桐改良的主要途径^[13,21,23-24]。随着科学技术的进步,泡桐杂种优势遗传机理的研究有望从单基因研究发展到高通量多基因研究,逐步实现从形态学、生理生化和

分子水平到基于基因组学、蛋白质组学和代谢组学水平揭示杂种优势机理的本质^[25]。

优良毛白杂种 TF33 作为未来泡桐遗传改良和新品种选育的重要育种材料,蕴含着极其重要的遗传改良和杂交育种意义。因此,必须高度重视 TF33 的价值,并进行更加全面和深入的研究,期望为培育出更加速生优质高产的泡桐新品种奠定基础。

参考文献:

- [1] 中国林学会泡桐文集编委会. 泡桐文集[C]. 北京:中国林业出版社, 1982.
- [2] 蒋建平. 泡桐栽培学[M]. 北京:中国林业出版社, 1990: 189-197.
- [3] 河南省豫林一号泡桐选育协作组. 豫林一号泡桐的杂种优势[J]. 林业科学, 1989, 25(5): 467-471.
- [4] 熊耀国, 赵丹宁. 泡桐遗传改良[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1995:1-350.
- [5] 中国林业科学研究院泡桐组, 河南省商丘地区林业局. 泡桐研究[M]. 北京:中国林业出版社, 1982.
- [6] 茹广欣, 袁金玲, 明军, 等. 泡桐杂种花的形态变异分析[J]. 林业科学研究, 2005, 18(01): 41-46.
- [7] Prakash P K, Dimps R C, Rajaseger G, et al. Seed surface architecture and random amplified polymorphic DNA profiles of *Paulownia fortunei*, *P. tomentosa* and their hybrid[J]. Annals of Botany, 1999, 83(2): 103-107.
- [8] Armando J D S, Dmitry V E, António P M S, et al. Lignans from a hybrid *Paulownia* wood[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2005, 33(12): 1298-1302.
- [9] Goncalves V M, Evtuguin D V, Domingues M R. Structural characterization of the acetylated heteroxylan from the natural hybrid *Paulownia elongata*/*Paulownia fortunei*[J]. Carbohydr Res, 2008, 343(2): 256-66.
- [10] 邱乾栋, 莫文娟, 王楠, 等. 白花泡桐材色优良单株的选择[J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 277-283.
- [11] 侯元凯, 翟明普. 泡桐干形培育研究进展[J]. 林业科学, 1999, 35(3): 76-83.
- [12] 叶金山, 马志刚, 刘楠, 等. 毛泡桐×白花泡桐正反交 F₁ 杂种优势形成的逆境生理学基础[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 8-17.
- [13] 叶金山, 胡伟华, 谢青, 等. 白兰杂种 F₁ 种间杂种优势形成的水分胁迫抗性生理基础[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(1): 70-74.
- [14] 河南省泡桐杂种优势利用协作组. 泡桐杂种优势利用[J]. 中国林业科学, 1977(3): 24-28.
- [15] 莫秋. 白花泡桐优良无性系 C001 通过鉴定[J]. 广西林业, 1986(4): 32.
- [16] 梁作. 泡桐优良无性系的推广[J]. 江西林业科技, 1996, (1): 32-33.
- [17] 张维栋, 徐刚, 王方泉, 等. 兰考泡桐优良无性系 C125 的选育[J]. 山东林业科技, 1990(1): 32-37.

- [18] 叶金山, 崔永兰, 杨文萍. 泡桐自然接干性状的遗传变异[J]. 林业科学, 2008, 44(3): 87-93.
- [19] 蔡 旭. 植物遗传育种学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [20] 叶金山, 胡伟华, 谢 青, 等. 毛泡桐×白花泡桐杂种 F₁ 无性系自然接干性状的遗传变异[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(6): 1-4.
- [21] 莫文娟, 傅建敏, 乔 杰, 等. 泡桐属植物亲缘关系的 ISSR 分析[J]. 林业科学, 2013, 49(1): 61-67.
- [22] 王 念, 何 威, 王文君, 等. AFLP 分子标记在泡桐遗传育种中的应用与前景[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(1): 151-153.
- [23] Wang W Y, Pai R C, Lai C C, *et al.* Molecular evidence for the hybrid origin of *Paulownia raiwaniana* based on RAPD markers and RFLP of chloroplast DNA[J]. Theor Appl Genet, 1994, 89(2-3): 271-275.
- [24] 黎 明, 翟晓巧, 范国强, 等. 土霉素对豫杂一号泡桐丛枝病幼苗形态和 DNA 甲基化水平的影响[J]. 林业科学, 2008, 44(9): 152-156.
- [25] 杨成超, 黄秦军, 苏晓华. 林木杂种优势遗传机理研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(5): 25-29.