

秦黑杨杂交新品种木材纤维形态及物理力学性质

冯德君,赵泾峰\*,陈卫华

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**对产于渭河试验站的秦黑卜杨、秦黑青杨 1 号和秦黑青杨 2 号 3 种秦黑杨杂交新品种对照陕林 4 号杨木进行木材纤维形态和物理力学性质研究。秦黑卜杨、秦黑青杨 1 号、秦黑青杨 2 号和陕林 4 号杨木的纤维长度分别为 987.5、1 064、1 087、935  $\mu\text{m}$ ;木纤维长宽比分别为 42.75、41.3、42.35、44.9;气干密度分别为 0.44、0.42、0.42、0.49  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;体积干缩系数分别为 0.40%、0.33%、0.28%、0.26%;顺纹抗压强度分别为 36.46、34.79、36.21、46.29 MPa;抗弯强度分别为 63.18、60.52、61.89、81.34 MPa;抗弯弹性模量分别为 6 896.67、6 339.21、6 627.16、8 082.40 MPa;综合强度分别为 99.64、95.31、98.10、127.63 MPa。结果表明,3 种秦黑杨新品种的木纤维长度均大于陕林 4 号,木纤维长宽比略小于陕林 4 号;3 种秦黑杨新品种的物理力学性质指标均小于陕林 4 号,但干缩系数大于陕林 4 号。综合分析纤维形态和物理力学性质指标,作为纤维工业用材,3 种秦黑杨新品种优于陕林 4 号,3 种秦黑杨新品种是较为理想的造纸和纤维工业用材;作为结构用木材,陕林 4 号优于 3 种秦黑杨杂交新品种。

**关键词:**秦黑杨;物理力学性质;纤维形态

**中图分类号:**S781.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)02-0198-04

Properties and Fiber Morphology of “Qinhei Yang” Woods

FENG De-jun,ZHAO Jing-feng\*,CHEN Wei-hua

(College of Forestry,Northwest A&F University,Yangling 712100,Shaanxi,China)

**Abstract:** Three “Qinhei Yang” cultivars of *Populus* hybrids were collected from “Weihe River Experimental Station of Northwest A&F University” to study the physical and mechanical properties and fiber morphology of the woods,including “Qinhei Bu Yang (QHB)” (*Populus deltoides*  $\times$  *P. purdomii*), “Qinhei Qing Yang No. 1 (QHQ-1)” (*P. deltoides*  $\times$  *P. cathayana*), and “Qinhei Qing Yang No. 2 (QHQ-2)” (*P. deltoides*  $\times$  *P. cathayana*). A main local cultivar “Shaanlin No. 4 (SL-4)” (*P. deltoides*  $\times$  *P. cathayana*) was used as the control. The fiber lengths of the three cultivars, i. e., “QHB”, “QHQ-1”, “QHQ-2”, and the control were 987.5, 1064, 1087 and 935  $\mu\text{m}$ , respectively. The ratios of length to width of the wood fibers of the three and the control were 42.75, 41.3, 42.35 and 44.9, respectively. The air dry densities were 0.44, 0.42, 0.42 and 0.49  $\text{g}/\text{cm}^3$ , respectively. The volume shrinkage coefficients were 0.40%, 0.33%, 0.28% and 0.26%, respectively. The longitudinal compressive strengths were 36.46, 34.79, 36.21 and 46.29 MPa, respectively. The bending strengths were 63.18, 60.52, 61.89 and 81.34, respectively. The flexural moduli were 6 896.67, 6 339.21, 6 627.16, and 8 082.40 mpa, respectively. The comprehensive strengths were 99.64, 95.31, 98.10, and 127.63 MPa, respectively. The results showed that the fiber lengths of three “Qinhei Yang” cultivars of *Populus* hybrids were longer than the control, the ratios of length to width were lower than the control. The values of the physico-mechanical property indices of the

收稿日期:2020-04-30    修回日期:2020-06-17

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

作者简介:冯德君,副教授。研究方向:木材及木材功能性改良。E-mail:mcyjs\_fdj@163.com

\* 通信作者:赵泾峰,副教授。研究方向:木材科学与技术。E-mail:zhaojf928@nwsuaf.edu.cn

three were lower than the control. The shrinkage coefficients were greater than the control. The comprehensive analysis of the physico-mechanical analysis indicated that as structural wood,the control cultivar “SL-4” was better than the three “Qinhei Yang” cultivars,while the three were ideal materials for paper-making and fiber industry.

**Key words:** “Qinhei Yang”; wood property; fiber morphology

美洲黑杨(*Populus deltoides*)是我国上世纪引进的速生杨树树种,具有适应性强、生长迅速、材质优良和高产等特点,可作制浆造纸及人造板制造的原料,是速生用材及绿化造林的主要树种,具有良好的经济和生态效益,在我国杨树产业中占有重要的地位<sup>[1-2]</sup>。

秦黑卜杨(*P. deltoides* × *P. purdomii*)、秦黑青杨 1 号(*P. deltoides* × *P. cathayana*)和秦黑青杨 2 号(*P. deltoides* × *P. cathayana*)是由西北农林科技大学林学院杨树育种课题组按照严格育种程序,历时 12 a,从美洲黑杨×卜氏杨、美洲黑杨×青杨杂交组合中选育出的 3 个杨树派间杂交新品种<sup>[3]</sup>。

秦黑卜杨、秦黑青杨 1 号、秦黑青杨 2 号 3 个杂交新品种的主要特点是干型通直圆满,生长迅速(5 年生树木材积生长量分别比当地同类生产主栽品种陕林 4 号(*P. deltoides* × *P. cathayana*)大 139.01%、28.97%、47.42%)。现有区域栽培试验表明,上述 3 个秦黑杨杂交新品种在陕西延安以南、青海西宁及周边较高海拔相似气候区均生长良好。同时,秦黑青杨 1 号和 2 号枝叶繁茂,树皮光滑、翠绿,高抗溃疡病,观赏价值大,也可用作很好的风景园林树种<sup>[4]</sup>。

为了更好地体现速生秦黑杨杂交新品种成材后的利用优势,对秦黑杨杂交新品种木材的材性和纤维形态进行系统研究,并与当地同类主栽杨树品种陕林 4 号对比分析,为秦黑杨杂交新品种的推广种植、加工利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料采集于西北农林科技大学周至渭河试验站 6~7 年生的对比试验林,其中秦黑卜杨、秦黑青杨 1 号、秦黑青杨 2 号及对照样陕林 4 号各 2 株,共 8 株(表 1)。

### 1.2 测定方法

在试材 1.3 m 处截取 5 cm 厚圆盘,沿南北向截取 3 cm 中心木条,分年轮劈成火柴棍大小的试样,南北向混合,采用硝酸-氯酸钾法分离木纤维,制成简易切片,在光学显微镜下随机测定 50 根木纤维

的长度、宽度,并对数据进行计算及分析。

将试材按照国家标准 GB/T1929-2009《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》进行初步加工,加工后的试材毛坯在实验室阴凉通风处进行堆垛气干放置,直到试样达到气干,再按照国家标准 GB/T1930—1941-2009《木材物理力学性质试验方法》加工试样,主要测定的物理力学性能指标有气干密度、全干干缩率及干缩系数(弦向、径向、体积)、顺纹抗压强度、横纹(全部)抗压强度、抗弯强度和抗弯弹性模量。其中试样数量按照国家标准 GB/T1929—2009《木材物理力学试材锯解及试样截取方法》中所需要试样数为准,密度试样各 20 个、干缩试样各 120 个、顺纹抗压强度试样各 30 个、横纹(全部)抗压强度各 65 个、抗弯强度及抗弯弹性模量试样各 65 个。以上各项力学性质在万能力学试验机上测定,试验结果均换算成含水率为 12%时的数据。

表 1 样木基本情况

Table 1 Basic situations of the sample trees

树种	胸径/cm	树高/m	树龄/a
秦黑卜杨( <i>P. deltoides</i> × <i>P. purdomii</i> )	15.9	15.1	7
秦黑青杨 1 号( <i>P. deltoides</i> × <i>P. cathayana</i> )	12.8	15.8	6
秦黑青杨 2 号( <i>P. deltoides</i> × <i>P. cathayana</i> )	14.3	15.7	6
陕林 4 号( <i>P. deltoides</i> × <i>P. cathayana</i> )	11.6	13.0	7

## 2 结果与分析

### 2.1 秦黑杨杂交新品种木材纤维形态

纤维形态是木材作为造纸和纤维工业必须要考虑的性能指标,纤维越长、长宽比越大的制品强度越好。3 种秦黑杨及陕林 4 号木材纤维测定结果见表 2。

木材纤维是起着支撑树体和给木材提供强度的作用,木材纤维长度的变化规律是树木年轮材质分析的主要参数之一,同时也是反映木材及其利用价值的重要指标。在造纸工业中,纤维长度对纸张的拉伸强度和撕裂度都有着极强的相关性,并且细长的纤维能提高纤维柔韧性使纸张形成良好的粘结性。由表 2 可知,3 种秦黑杨新品种的木纤维长度为 987.5~1 087 μm,均大于陕林 4 号的 935 μm;秦

黑青杨 1 号和秦黑青杨 2 号明显大于秦黑卜杨。仅从木纤维长度来讲,作为造纸和纤维工业 3 种秦黑杨新品种要优于陕林 4 号,秦黑青杨 1 号和秦黑青杨 2 号要优于秦黑卜杨。依据木材解剖分子分级规定<sup>[5]</sup>,4 种杨木的木纤维长度均在 900~1 600 μm,属于中等长度木纤维。

表 2 木材纤维测定结果  
Table 2 Wood fiber morphologies

试验项目	树龄	秦黑卜杨	秦黑青杨 1 号	秦黑青杨 2 号	陕林 4 号
纤维长度/ $\mu\text{m}$	第 1 年	785	775	796	698
	第 2 年	891	951	922	772
	第 3 年	1 004	1 074	1 046	876
	第 4 年	1 053	1 103	1 132	996
	第 5 年	1 075	1 170	1 289	1 077
	第 6 年	1 117	1 313	1 338	1 189
	第 7 年	1 233			1 239
	平均	987.5/1 023	1 064	1 087	935/978
木纤维宽度/ $\mu\text{m}$	第 1 年	21.1	21.5	21.4	17.4
	第 2 年	21.5	25.6	23.1	18.9
	第 3 年	22.6	25.2	25.8	20.1
	第 4 年	23.7	25.9	27.6	21.5
	第 5 年	23.2	27.6	26.9	21.5
	第 6 年	26.1	27.9	28.1	24.5
	第 7 年	24.3			24.6
	平均	23.21	25.62	25.48	21.21
长宽比	第 1 年	37.2	36.0	37.2	40.1
	第 2 年	41.4	37.1	39.9	40.8
	第 3 年	44.4	42.6	40.5	43.6
	第 4 年	44.4	42.6	41.0	46.3
	第 5 年	46.3	42.4	47.9	50.1
	第 6 年	42.8	47.1	47.6	48.5
	第 7 年	50.7			50.4
	平均	42.75/43.89	41.3	42.35	44.9/45.69

由表 2 可知,随着树龄的增加,4 种杨木纤维长宽比变异规律基本一致,整体呈上升趋势,变化幅度较小,曲线较为平缓。木纤维长宽比大的,制品的强度较高;3 种秦黑杨木纤维长宽比为 41.3~42.75,略小于陕林 4 号的 44.9;仅从木纤维长宽比考虑,陕林 4 号略优于 3 种秦黑杨。按照造纸原料标准,

表 4 木材主要力学性能测定结果  
Table 4 Mechanical properties of the woods

试验项目	秦黑卜杨	秦黑青杨 1 号	秦黑青杨 2 号	陕林 4 号
顺纹抗压强度	36.46	34.79	36.21	46.29
横纹(全部)抗压强度	径向	1.82	1.98	2.16
	弦向	1.08	1.23	1.54
抗弯强度	63.18	60.52	61.89	81.34
抗弯弹性模量	6 896.67	6 339.31	6 627.16	8 082.40
顺纹抗压强度+抗弯强度	99.64	95.31	98.10	127.63

2.2.3 顺纹抗压强度 从表 4 可知,3 种秦黑杨新

木纤维长宽比>33,纸张交织较好,强度较高,说明 4 种杨木均为优良的造纸原料。

武恒等<sup>[6]</sup>研究人工林杨树 12 个无性系木材纤维形态;潘存娥<sup>[7]</sup>研究新疆几种杨树品种纤维形态,长度均为中等长度(900~1 600 μm),长宽比均在 36.0~50.7,具有相同的研究结果。

## 2.2 秦黑杨杂交新品种木材物理力学性质

根据试验结果,3 种秦黑杨及陕林 4 号木材各项物理性质指标见表 3。

2.2.1 密度 由表 3 可知,3 种新培育的秦黑杨木材的气干密度为 0.42~0.44 g/cm<sup>3</sup>,小于陕林 4 号的 0.49 g/cm<sup>3</sup>,这样的气干密度在杨树品种中已经算中等,密度越大,木材的强度越大;依据木材材性分级规定<sup>[5]</sup>,4 种杨木气干密度均在 0.36~0.55 g/cm<sup>3</sup>,属于小密度范围。

表 3 秦黑杨等 4 种木材气干密度与干缩系数

树种	气干密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	干缩系数/%		
		弦向	径向	体积
秦黑卜杨	0.44	0.22	0.18	0.40
秦黑青杨 1	0.42	0.20	0.11	0.33
秦黑青杨 2	0.42	0.18	0.10	0.28
号陕林 4 号	0.49	0.17	0.09	0.26

2.2.2 木材干缩性能 由表 3 可知,4 种杨木弦向、径向、体积干缩系数大小依次为秦黑卜杨>秦黑青杨 1 号>秦黑青杨 2 号>陕林 4 号,从木材利用来讲木材干缩越小越好,3 种新培育的秦黑杨的弦向、径向、体积干缩系数均大于陕林 4 号,仅从木材干缩来讲,秦黑青杨 2 号是 3 种秦黑杨新品种中最小的,也是最接近陕林 4 号的干缩性能的;从 4 种杨木的弦向、径向、体积干缩系数来看,都是相对较小的。依据木材材性分级规定<sup>[5]</sup>,4 种杨木体积干缩系数均<0.45%,属于小干缩系数范围。

木材力学性能是木材抵抗使其改变大小和形状的外力的能力,即木材适应外力作用的能力<sup>[8]</sup>。3 种秦黑杨与陕林 4 号木材主要力学性能结果见表 4。

品种的顺纹抗压强度为 34.79~36.21 MPa,均小于

陕林 4 号的 46.29 MPa,3 种秦黑杨的顺纹抗压强度只有陕林 4 号的 75%~78%;依据木材物理力学性质分级表<sup>[9]</sup>,4 种杨木顺纹抗压强度均在 33.9~50.7 MPa,属于低强度范围。作为结构用木材,陕林 4 号杨木的顺纹抗压强度就比较小,3 种秦黑杨新品种顺纹抗压强度更小,说明不适合。

2.2.4 横纹(全部)抗压强度 由表 4 可知,4 种杨木的径向横纹(全部)抗压强度都是大于弦向横纹(全部)抗压强度,杨木是散孔材,早晚材缓变,早晚材差距很小,径向横纹(全部)抗压强度大于弦向,主要是木射线的作用;4 种杨木径向和弦向的横纹(全部)抗压强度从大到小的顺序为陕林 4 号>秦黑青杨 2 号>秦黑卜杨>秦黑青杨 1 号。

2.2.5 抗弯强度 由表 4 可知,3 种秦黑杨新品种的抗弯强度为 60.52~63.18 MPa,均小于陕林 4 号的 81.34 MPa,3 种秦黑杨的抗弯强度只有陕林 4 号的 74.4%~77.7%;依据木材物理力学性质分级表<sup>[9]</sup>,4 种杨木的抗弯强度均在 60.5~98.8 MPa 的范围内,属于低强度的范围。作为结构用木材,这个抗弯强度值太低。

2.2.6 抗弯弹性模量 由表 4 可知,3 种秦黑杨新品种的抗弯弹性模量为 6 339.31~6 896.67 MPa,均小于陕林 4 号的 8 082.40 MPa,3 种秦黑杨新品种的抗弯弹性模量只有陕林 4 号的 78.4%~85.3%;我国阔叶树材大多数树种的抗弯弹性模量在 8.0~14 GPa<sup>[10]</sup>,4 种杨木只有陕林 4 号在此区间,3 种秦黑杨新品种均<8.0 GPa。

2.2.7 木材综合强度 木材作为承重构件时,必须考虑其顺纹抗压强度和抗弯强度,所以通常用顺纹抗压强度和抗弯强度之和来表示木材的综合强度,以表明木材强度品质等级<sup>[11]</sup>。由表 4 可知,3 种秦黑杨新品种的木材综合强度为 95.31~99.64 MPa,均小于陕林 4 号的 127.63 MPa,3 种秦黑杨新品种的木材综合强度只有陕林 4 号的 74.7%~78.1%;依据木材材性分级标准<sup>[12]</sup>,3 种秦黑杨新品种木材的综合强度均<108 MPa,属于强度低的范围;陕林 4 号木材的综合强度在 108~167 MPa,属于中等强度范围。作为结构用木材来讲,3 种秦黑杨新品种木材的综合强度与陕林 4 号有很大差距。

### 3 结论

木材的利用主要是 2 个方面:一是作为纤维工业用材,二是作为结构用木材。从结构用木材考虑,密度大、干缩小、强度大者为好<sup>[13]</sup>。木材密度的大小对木材物理力学性质以及木材加工工艺性质有直接影响<sup>[14]</sup>,同时木材密度与力学性质之间存在正相

关系<sup>[15]</sup>。

从纤维工业和造纸用材的要求考虑,木纤维越长,长宽比越大的制品强度越高<sup>[16]</sup>。3 种秦黑杨的木纤维长度略大于陕林 4 号的,而 3 种秦黑杨的木纤维长宽比又略小于陕林 4 号,综合木纤维长度和木纤维长宽比来考虑,4 种杨木都是很好的纤维工业和造纸用材。

4 种杨树中,陕林 4 号的气干密度、顺纹抗压强度、横纹(全部)径向与弦向抗压强度、抗弯强度、抗弯弹性模量、木材综合强度均大于 3 种秦黑杨新品种,陕林 4 号干缩同时小于 3 种秦黑杨新品种;从木材主要物理力学性能来看,作为结构用木材,陕林 4 号明显要优于 3 种秦黑杨新品种;3 种秦黑杨新品种相互比较,秦黑卜杨性能略优于秦黑青杨 1 号和秦黑青杨 2 号。

### 参考文献:

[1] 徐有明,翁文源,张友华.美洲黑杨小同径级木材纤维、导管形态及其基本密度的差异[J].安徽林业科技,2011,37(1):2-9.

[2] 刘忠华,胡俊,代先钊.美洲黑杨优良无性系 NL-80351 推广初报[J].湖北林业科技,2006(6):29-31.

[3] 巫明会,樊军锋,高建设等.秦黑杨 1 号等美洲黑杨指纹图谱构建及遗传关系分析[J].西北林学院学报,2019,34(4):91-95.

WU M H, FAN J F, GAO J S, *et al.* Construction of fingerprints and analysis of genetic relationship among *Populus deltoides* hybrids Qinheiyang No. 1[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 91-95. (in Chinese)

[4] 李晓东,樊军锋,邱兴,等.美洲黑杨×青杨派杂种无性系苗期抗寒性的鉴定与筛选[J].西北林学院学报,2015,30(2):100-104.

LI X D, FAN J F, QIU X, *et al.* Identification and selection on the cold tolerance in the hybrids of *Populus deltoids* × *Section tacamahaca* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 100-104. (in Chinese)

[5] 成俊卿,杨家驹,刘鹏.中国木材志[M].北京:中国林业出版社,1992:758-761.

[6] 武恒,查朝生,王传贵,等.人工林杨树 12 个无性系木材纤维形态特征及变异[J].东北林业大学学报,2011,39(2):8-10,27.

WU H, CHA C S, WANG C G, *et al.* Morphological features of wood fiber and its variation for twelve clones of poplar plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(2): 8-10, 27. (in Chinese)

[7] 潘存娥.新疆几种杨树品种纤维形态分析[J].甘肃林业科技,2016,41(2):22-26.

[8] 黄腾华,符韵林,李宁.擎天树木材物理力学性质研究[J].西北林学院学报,2013,28(5):160-163.

HUANG T H, FU Y L, LI N. Physical and mechanical properties of *Shorea chinensis* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5): 160-163. (in Chinese)

[9] 中国林业科学研究院木材工业研究所.中国主要树种的木材物理力学性质[M].北京:中国林业出版社,1982:106.



甲苯胺蓝可以抑制木质素的自发荧光,避免木质素的自发荧光的干扰,直接观察到木栓脂的荧光。

硫酸氢黄连素-苯胺蓝染色后,木栓脂的荧光在木栓细胞壁外侧呈灰绿色,木质素的荧光在木栓细胞壁的内侧呈黄绿色。

盐酸-间苯三酚染色后,木栓细胞壁内侧的木质素呈现为红棕色,且环氧树脂包埋会降低盐酸-间苯三酚的染色效果。

参考文献:

[1] ANGYALOSSY V, PACE M R, EVERT R F, *et al.* IAWA List of Microscopic Bark Features[J]. IAWA Journal, 2016, 37(4): 517-615.

[2] 韩雪源, 茅林春. 木栓脂组成成分、组织化学特性及其生物合成研究进展[J]. 植物学报, 2017, 52(3): 358-374.

HAN X Y, MAO L C. Research progress on composition, histochemical characteristics and biosynthesis of suberin[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2017, 52(3): 358-374. (in Chinese)

[3] MIRANDA I, GOMINHO J, PEREIRA H. Cellular structure and chemical composition of cork from the Chinese cork oak (*Quercus variabilis*) [J]. Journal of Wood Science, 2013, 59(1): 1-9.

[4] 张丽丛, 雷亚芳, 常宇婷. 栓皮栎软木主要化学成分的分析[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(4): 163-165.

ZHANG L C, LEI Y F, CHANG Y T. Contents of the main chemical components of cork from *Quercus variabilis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(04): 163-165. (in Chinese)

[5] 上官蔚蔚, 雷亚芳, 赵经峰, 等. 栓皮栎软木性质及应用研究进展[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 282-287.

SHANGGUAN W W, LEI Y F, ZHAO J F, *et al.* Advances in the researches of basic properties and the application of cork from *Quercus suber* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 282-287. (in Chinese)

[6] 赵戈, 段新芳, 官恬, 等. 世界软木加工利用现状和我国软木工业发展对策[J]. 世界林业研究, 2004, 17(5): 25-28.

ZHAO G, DUAN X F, GUAN Y, *et al.* Situation of cork utili-

zation in the world and the development countermeasure of the China's cork industry[J]. World Forestry Research, 2004, 17(5): 25-28. (in Chinese)

[7] KOBAYASHI K, URA Y, KIMURA S, *et al.* Outstanding toughness of cherry bark achieved by helical spring structure of rigid cellulose fiber combined with flexible layers of lipid polymers[J]. Advanced Materials, 2018, 30(6): 1705315.

[8] VIKTOR ŽÁRSKÝ, FATIMA CVRČKOVÁ. Plant cell morphogenesis: methods and protocols[M]. New York: Humana Press, 2014: 28-29.

[9] 李兵, 李登弟, 张杰, 等. 植物树脂半薄切片染色方法的改进[J]. 植物生理学报, 2011, 47(12): 85-90.

LI B, LI D D, ZHANG J, *et al.* Modification of resin semithin section staining method in plant tissues[J]. Plant Physiology Journal, 2011, 47(12): 85-90. (in Chinese)

[10] 张霞, 胡露洁, 周存宇, 等. 植物细胞壁组织化学定位染色方法和技术的比较研究[J]. 植物研究, 2017, 37(1): 149-156.

ZHANG X, HU L J, ZHOU C Y, *et al.* Comparative study on staining methods and techniques of cell wall histochemistry [J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(1): 149-156. (in Chinese)

[11] SIEGEL S M. On the biosynthesis of lignin[J]. Physio Plant, 1953(6): 134-139.

[12] ZOË A. POPPER. The plant cell wall: methods and protocols [M]. New York: Humana Press, 2011.

[13] 胡正海. 植物解剖学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 106-115.

[14] 黄南平. 氮酮在植物染色中的应用[J]. 宜春学院学报, 1994(5): 62-64.

[15] BIGGS A R. Detection of impervious tissue in tree bark with selective histochemistry and fluorescence microscopy[J]. Bio-technic & Histochemistry, 1985, 60(5): 299-304.

[16] 薛雨源. 木质素的荧光行为及其荧光共振能量转移体系的构建[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[17] 徐建华, 陶冶, 黄艳, 等. 植物根内皮层凯氏带染色的小檗碱-苯胺蓝对染法[J]. 植物生理学报, 2004, 40(4): 479-482.

XU J H, TAO Y, HUANG Y, *et al.* A berberin-aniline blue counterstaining method for dyeing caspary band in root endodermis [J]. Plant Physiology Journal, 2004, 4(40): 479-482. (in Chinese)

(上接第 201 页)

[10] 徐有明. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019: 185.

[11] 尹思慈主编. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 227-228.

[12] 刘鹏, 姜笑梅, 张立非. 非洲热带木材[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

[13] 周海宾, 吕建雄, 徐伟涛. 我国结构用木材标准体系构建[J]. 木材工业, 2012, 26(3): 44-47.

ZHOU H B, LV J X, XU W T. Establishing a standard system for structural wood products in China[J]. China Wood Industry, 2012, 26(3): 44-47. (in Chinese)

[14] 吴敏, 吴立勋, 汤玉喜, 等. 南方型黑杨无性系木材材性的研究[J]. 湖南林业科技, 2005, 32(4): 21-31.

[15] 潘彪, 王丰, 连彩萍, 等. 美洲黑杨新无性系主要物理力学性能研究[J]. 安徽农业学报, 2014, 41(6): 928-933.

PAN B, WANG F, LIAN C P, *et al.* Physical and mechanical properties of new *Populus deltoides* clones [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2014, 41(6): 928-933. (in Chinese)

[16] 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 H, 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)