

7个南方适生杨树无性系生长和木材纤维性状分析与评价

杨 艳, 唐 洁, 李永进, 汤玉喜, 黎 蕾

(湖南省林业科学院, 湖南长沙 410004)

摘要: 【目的】分析杨树 *Populus* 无性系间纤维性状差异及与生长性状的相关性, 为杨树无性系优质材定向培育与选择利用提供基础信息和指导。【方法】选择树干通直, 生长量大的 7 个杨树无性系 XL-80、XL-86、XL-83、XL-58、XL-75、ZH-17、I-69(对照) 为材料, 对纤维长、纤维宽、纤维长宽比及纤维素质量分数、单株纤维素等性状进行了研究, 利用主成分综合得分法评价了各无性系纤维性状指标。【结果】7 个杨树无性系木材纤维长为 0.95~1.12 mm, 均达到了国际木材解剖学会规定的中级纤维长 (0.91~1.60 mm) 的标准; 纤维长宽比为 49.09~54.62, 超出造纸所需纤维长宽比 (30) 的 63.67%~82.00%; 纤维素质量分数为 53.06%~59.66%, 均超出造纸纤维素质量分数的基本要求 (40%)。纤维宽与树高、胸径及生物量呈正相关但不显著 ($P>0.05$), 纤维长、纤维长宽比及纤维素质量分数分别与胸径、树高及生物量均呈负相关, 且均不显著 ($P>0.05$)。通过主成分综合得分法评选出 5 个杨树优良无性系, 分别为 XL-80、XL-58、XL-86、ZH-17、XL-83。【结论】筛选的 5 个优良无性系综合了各性状的优良特性, 能够最大程度地实现物尽其用, 达到杨树无性系资源利用的最大化, 同时也为杨树多目标育种提供了丰富的遗传资源。表 6 参 24

关键词: 南方; 杨树; 木材纤维; 无性系; 综合评价

中图分类号: S758.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)04-0807-07

Analysis and evaluation of growth and wood fiber characters of seven poplar clones in southern China

YANG Yan, TANG Jie, LI Yongjin, TANG Yuxi, LI Lei

(Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: [Objective] With an investigation of differences among wood fiber related traits and their correlation with growth traits among tested poplar (*Populus*) clones, this paper provides basic information and guidance for the targeted cultivation and selection as well as the utilization of high-quality poplar clones. [Method] Seven poplar clones, including XL-80, XL-86, XL-83, XL-58, XL-75, ZH-17 and I-69 (ck) with straight trunk and large growth were chosen before the principal component comprehensive score method was employed to evaluate the fiber traits of each clone with indexes including fiber length, fiber width, fiber length-width ratio, cellulose mass fraction and cellulose content per plant. [Result] The wood fiber length range of the seven poplar clones was 0.95–1.12 mm, all meeting the standard of intermediate fiber length 0.91–1.60 mm stipulated by the International Society of Wood Anatomy. The length to width ratio of fiber varied from 49.09 to 54.62, which is 63.67%–82.00% of the length to width ratio (30) required for paper making. The cellulose mass fraction varied from 53.06% to 59.66%, exceeding the basic requirement (40%) of paper making cellulose content. Fiber width was positively correlated with height, diameter at breast height (DBH) and biomass but not

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2022-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2201202)

作者简介: 杨艳 (ORCID: 0000-0003-1790-8720), 从事植物育种栽培及应用研究。E-mail: yangyanzupei@126.com。

通信作者: 汤玉喜 (ORCID: 0000-0002-5162-5647), 研究员, 博士, 从事林木育种栽培及生态修复等相关研究。E-mail: 1726027015@qq.com

significantly ($P>0.05$). Fiber length, fiber length-width ratio and cellulose mass fraction were negatively correlated with DBH, tree height and growth, respectively, but not significantly ($P>0.05$). Five clones with good traits were selected by principal component comprehensive score method, namely XL-80, XL-58, XL-86, ZH-17, and XL-83. [Conclusion] The five selected fiber clones have integrated the excellent characteristics of each character, which could maximize the utilization of poplar clones and provide more abundant genetic resources for poplar multi-objective breeding. [Ch, 6 tab. 24 ref.]

Key words: southern China; poplar; wood fiber; clone; comprehensive evaluation

杨树 *Populus* 作为速生用材树种, 具有广泛的用途, 尤其是在制浆造纸、人造纤维和纤维板制造业中占有重要地位。木材纤维是杨树木材的主要组成部分, 也是制浆及纤维制造业的主要原料, 纤维性状的优劣直接决定着杨树纤维材的开发利用与发展^[1]。然而, 纤维形态特征及纤维含量对不同品种或无性系而言均存在着差异, 即使同一树种的不同个体或同株不同部位亦有明显差异^[2]。Jr FARMER 等^[3]利用美洲黑杨 *Populus deltoids* 无性系幼林作为试验材料, 开展了木材纤维长度性状变异研究, 证明了纤维性状在无性系间也呈较大差异。王明床等^[4]对杂种无性系的材性变异研究表明: 纤维相关性状呈株内变异特点, 且各性状间的变异具有独立性。查朝生等^[5]对杨树无性系人工林的木材纤维形态特征进行了研究, 表明纤维长、纤维宽以及纤维长宽比随着生长轮的增加, 呈增大趋势。MANSFIELD 等^[6]对不同产地 15 个山杨 *Populus davidiana* 无性系的木材纤维性状进行研究发现: 纤维性状在不同品种及林分间均呈显著变异。刘玉鑫等^[7]研究表明: 美洲黑杨无性系纤维性状存在遗传变异, 且变异受遗传的影响大于受环境的影响。综上可知, 杨树无论是品种间、林分间、无性系间或是单株的不同部位都存在变异的可能, 因此, 分析与评价杨树不同无性系间纤维性状差异性, 不仅能够为选育适用于木材工业化生产及大规模加工利用高附加值的杨树优良新品种提供参考, 而且对促进杨树人工林及杨树相关产业的可持续发展具有重要意义。鉴于此, 本研究选择树干通直圆满, 生长量大, 且在长江流域及洞庭湖区分布广、适生性较强的 7 个杨树无性系为材料, 对纤维素形态特征及含量差异进行了研究, 综合评价了各无性系纤维性状指标, 旨在为杨树无性系选择纤维材优良品系提供科学依据。

1 研究区概况

研究区在湖南省岳阳市君山区 (39°46'01"N, 116°25'53"E)。该区光照充足, 年平均气温为 16.8 ℃, 年平均降水量为 1 135.3~1 237.9 mm, 无霜期为 260 d, 雨热同期, 为典型的亚热带湿润季风气候^[8-10]。林地海拔为 28~35 m, 土壤多为江湖冲积而成的潮土, 土壤肥沃^[11]。

2 材料与方法

2.1 材料

试验林于 2009 年造林, 林分株行距为 4 m×6 m。林内共 18 个杨树无性系, 各无性系按完全随机区组试验排列, 每个无性系 10 株, 3 次重复。试验林造林后 3~4 a, 每年浅耕 1~2 次, 林下间种南瓜 *Cucurbita moschato*; 造林后 2~6 a, 于每年的 4 月下旬至 5 月上旬采用环状沟施肥法施尿素或复合肥 (250~500 g·株⁻¹) 1 次; 造林后第 3 年、第 5 年以及第 7 年, 每年 12 月修枝 1 次, 3 次修枝强度 (修枝高度与树高比) 分别为 35%、40% 和 40%; 其他管理措施为常规管理。

选取试验林中树干圆满且通直, 生长较快的杨树 XL-80、XL-86、XL-83、XL-58、XL-75、ZH-17、I-69(对照) 等 7 个无性系作为材料, 每个无性系选取 3 株标准木测定树高及胸径, 伐倒后作为生物量测定和纤维性状取样对象。在伐倒样株胸径处取一个厚 5 cm 的圆盘作为木材纤维形态测定试样。

2.2 方法

各无性系样木伐倒后, 将地上部分分成干、枝、叶, 树干每 2 m 分为一段, 分别称各部位的鲜质量, 然后各部位在 105 ℃ 下烘干并称量, 最后根据样品干质量和湿质量的比例, 换算单株生物量干质量^[12]。单株纤维素质量的估算: 单株纤维素质量=单株生物量干质量×纤维素质量分数。采集的样品经处

理后，纤维素质量分数测定采用硝酸-乙醇法，木材纤维长和纤维宽采用刘超逸等^[13]的测定方法。

2.3 数据处理

运用 Excel、SPSS 等软件进行不同无性系间的数据统计和方差分析。各无性系间生长性状及纤维形态及含量综合评价采用加权综合得分法。

3 结果与分析

3.1 杨树无性系的性状变异分析

由表 1 可以看出：树体性状和木材纤维性状变异幅度较大，为 2.66%~21.76%，其中生物量 (21.76%) 和单株纤维素 (21.35%) 的变异系数较大，均超过 21%，树高和纤维宽的变异系数较小，为 2.0%~3.2%，表明杨树各性状间变异的差异较大，可选择利用的空间广阔。

表 1 杨树无性系性状变异
Table 1 Character variation of poplar clones

性状	胸径/cm	树高/m	生物量/(kg·株 ⁻¹)	纤维长/mm	纤维宽/mm	纤维长宽比	纤维素质量分数/%	单株纤维素/(kg·株 ⁻¹)
平均值	31.28	25.22	301.81	1.04	0.02	52.03	57.78	175.46
标准差	3.08	0.81	65.68	0.05	0.00	1.82	2.31	37.47
变异系数/%	9.84	3.19	21.76	4.99	2.66	3.50	3.99	21.35

3.2 木材纤维形态差异

从表 2 可知：7 个杨树无性系的纤维长为 0.95~1.12 mm，纤维宽为 0.019~0.021 mm，纤维长宽比为 49.1~54.6。其中，无性系 XL-83 的纤维长最小，为 0.95 mm，与其他无性系纤维长呈极显著差异 ($P<0.01$)；除无性系 XL-83 外，其他无性系的纤维长差异均不显著 ($P>0.05$)，且无性系 XL-58、XL-86 以及 XL-80 纤维长均达 1.05 mm 以上。无性系之间纤维宽差异均不显著 ($P>0.05$)。无性系的纤维长宽比从大到小依次为 I-69、XL-58、XL-86、XL-75、ZH-17、XL-80、XL-83。各无性系间的纤维长宽比存在一定差异，其中无性系 XL-83 与 I-69、XL-58、XL-86 均呈显著差异 ($P<0.05$)。

3.3 生物量及木材纤维素差异

从表 3 可以看出：无性系生物量间差异显著 ($P<0.05$)，生物量为 194.27~401.73 kg·株⁻¹，其中生物量最大的无性系为 XL-80 (401.73 kg·株⁻¹)，最小的无性系为对照 I-69 (194.27 kg·株⁻¹)。各无性系间纤维素质量分数存在一定差异，除无性系 XL-83 与其他无性系的纤维素质量分数呈显著差异 ($P<0.05$) 外，其他无性系间纤维素质量分数差异不显著 ($P>0.05$)。无性系纤维素质量分数为 53.06%~59.66%，均高出造纸所需纤维素质量分数的基本要求 (40%)。无性系单株纤维素为 114.04~233.81 kg·株⁻¹，其中最高的无性系为 XL-80 (233.81 kg·株⁻¹)，对照 I-69 单株纤维素仍为最小，仅 114.04 kg·株⁻¹。无性系单株纤维素呈不同程度的差异，其中无性系 XL-80 与 XL-86 单株纤维素呈显著差异 ($P<0.05$)，与其他无性系均呈极显著差异 ($P<0.01$)；无性系 I-69 与供试的其他无性系均呈极显著差异 ($P<0.01$)，无性系 XL-75 与 ZH-17 差异不显著 ($P>0.05$)。

3.4 生长性状及木材纤维性状相关性分析

木材纤维性状与生长性状间的相关分析结果 (表 4) 表明：生长性状树高、胸径、生物量以及单株纤维素之间呈极显著正相关 ($P<0.01$)。纤维长与纤维宽、纤维长宽比以及纤维素质量分数呈显著正相关 ($P<0.05$)，纤维长宽比与纤维素质量分数呈显著正相关 ($P<0.05$)。木材纤维性状与生长性状之间相关性

表 2 杨树无性系纤维特征

Table 2 Fiber characteristics of poplar clones			
无性系	纤维长/mm	纤维宽/mm	纤维长宽比
XL-80	1.06±0.05 Ab	0.021±0.001 a	50.93±0.91 ac
XL-86	1.07±0.05 Ab	0.021±0.001 a	52.52±2.50 a
XL-83	0.95±0.03 Bc	0.019±0.001 a	49.09±9.19 bc
XL-58	1.12±0.10 Aa	0.021±0.000 a	53.84±3.81 a
XL-75	1.02±0.03 Ab	0.020±0.001 a	51.91±2.00 ac
ZH-17	1.04±0.07 Ab	0.020±0.001 a	51.81±1.80 ac
I-69	1.08±0.05 Ab	0.020±0.001 a	54.62±4.70 a

说明：数值为平均值±标准差；同列不同大写字母表示同一指标在不同无性系之间差异极显著 ($P<0.01$)；同列不同小写字母表示同一指标在不同无性系之间差异显著 ($P<0.05$)

各异,纤维宽与树高、胸径、生物量呈正相关但不显著 ($P>0.05$),纤维长、纤维长宽比及纤维素质量分数分别与胸径、树高及生物量均呈负相关,且均不显著 ($P>0.05$),表现出独立遗传特性。

3.5 不同无性系木材纤维综合评价

纤维材培育的最终目标是尽可能多地提供优质的纤维。因林木的生长量与木材产量呈正相关,木材的纤维形态又直接关系到林木纤维的产量和质量,因此,纤维材的产量以及纤维形态和含量是评价和选择该材种优劣的重要依据。本研究通过主成分分析(表5)得出:决定第1主成分的主要是生物量、纤维素质量分数和单株纤维素;决定第2主成分的主要是纤维长和纤维宽,前2个主成分已经能够解释原有各性状的大部分信息,故可以选择前2个主成分进行综合评分。根据所选主成分的贡献

率对主成分得分进行加权平均,求得主成分综合得分(表6)。由表6可以看出:供试7个无性系综合得分由大到小依次为XL-80、XL-58、XL-86、ZH-17、XL-83、XL-75、I-69,该综合得分排序与各无性系的生物量、纤维长、纤维宽、纤维长宽比及纤维素质量分数排序具有一定的一致性。通过综合评比,入选的前5个杨树无性系综合了各性状的优良水平,也突出了联合选择在纤维材良种选育中的重要性。

表4 无性系生长性状与木材纤维性状的相关性

Table 4 Correlation between clonal growth traits and wood fiber traits

项目	胸径	树高	生物量	纤维长	纤维宽	纤维长宽比	纤维素质量分数	单株纤维素
胸径	1							
树高	0.926**	1						
生物量	0.995**	0.903**	1					
纤维长	-0.146	-0.178	-0.111	1				
纤维宽	0.520	0.366	0.556	0.734*	1			
纤维长宽比	-0.598	-0.534	-0.572	0.863*	0.293	1		
纤维素质量分数	-0.258	-0.210	-0.237	0.716*	0.467	0.682*	1	
单株纤维素	0.972**	0.887*	0.981**	0.032	0.667*	-0.448	-0.043	1

说明: *表示相关显著($P<0.05$); **表示相关极显著($P<0.01$)

表5 主要性状的特征向量

Table 5 Feature vectors of main characters

性状	主成分	
	1	2
生物量	0.875	-0.028
纤维长	-0.018	0.435
纤维宽	-0.201	0.365
纤维素质量分数	0.236	0.099
单株纤维素	0.935	0.035

表3 杨树无性系生物量及木材纤维素差异

Table 3 Differences in biomass and wood cellulose content of poplar clones

无性系	生物量/ (kg·株 ⁻¹)	纤维素质量 分数/%	单株纤维素/ (kg·株 ⁻¹)
XL-80	401.73±12.09 Aa	58.22±0.40 a	233.81±5.43 Aa
XL-86	335.98±10.90 Bb	59.66±0.23 a	200.58±7.18 Ab
XL-83	329.23±9.34 Cc	53.06±0.41 b	174.82±3.64 Bb
XL-58	320.14±1.62 Dd	58.55±0.50 a	187.60±2.55 Bc
XL-75	268.67±1.96 Ef	59.17±0.94 a	159.05±3.58 BCe
ZH-17	270.31±0.96 Ee	59.66±0.53 a	161.38±0.78 BCe
I-69	194.27±3.76 Fg	58.66±0.10 a	114.04±2.01 Df

说明: 数值为平均值±标准差; 同列不同大写字母表示同一指标在不同无性系之间差异极显著($P<0.01$); 同列不同小写字母表示同一指标在不同无性系之间差异显著($P<0.05$)

表6 各无性系综合评价得分

Table 6 Comprehensive evaluation score of each clone

无性系	第1主成分得分	第2主成分得分	综合得分	排序
XL-80	2.489	2.547	2.510	1
XL-86	0.952	0.982	0.963	3
XL-83	-0.944	-0.907	-0.931	5
XL-58	1.252	1.110	1.202	2
XL-75	-1.204	-1.117	-1.173	6
ZH-17	-0.522	-0.438	-0.493	4
I-69	-2.024	-2.177	-2.078	7

4 讨论与结论

4.1 讨论

木材纤维占阔叶树木材总体积的50%以上,木材纤维的形态指标直接影响着木材的硬度、强度以及

制浆造纸性能,与木材物理力学性能以木材的开发利用息息相关^[14-15]。曾广植^[16]研究得出:纤维长与纸张强度呈线性正相关;张平冬等^[17]认为:纤维长宽比越大,越能增加纤维之间交织次数,提升结合能力,从而增强纸张的强固性和割裂性^[7];汪殿蓓等^[18]研究表明:纤维长宽比大于56是优良的造纸原料。本研究杨树无性系的纤维长以及纤维长宽比最小分别为0.95 mm和49.09,均达到或超出国际木材解剖学中所规定的中级长度纤维(0.91~1.60 mm)以及长宽比不低于35~45的标准^[4],其中纤维长与刘玉鑫等^[7]、查朝生等^[5]的测定结果相当,但纤维长宽比均高于以上测定结果,且主成分综合得分排名中,前5个无性系的纤维长宽比均在58.2以上。进一步表明本研究杨树无性系的纤维性状均较优,其中主成分分析评价得分较高的前5个无性系更适合用于纸浆或纤维用材。

性状间遗传变异差异较大,要开展多性状选择就需要探明各性状间相互关系。而杨树作为速生树种,其生长性状在进行良种选择时是必须考虑的指标,材性性状无论是作为结构材还是纤维用材都是综合评价的关键因子,因此,生长性状、材性性状以及生长性状与材性性状间的相关性是杨树遗传改良的重要依据。黄家华^[19]以鹅掌楸 *Liriodendron chinense* 等14个种源作为研究材料,发现生长性状与纤维宽及纤维长宽比均呈负相关;覃敏^[20]评价了6年生米老排 *Mytilaria laosensis* 子代测定林,发现除纤维宽外,生长性状与木材性状的改良具有相对独立性;黄寿先^[21]选取12个杉木 *Cunninghamia lanceolata* 无性系对制浆造纸性能的变异及其与生长、材性的相关性进行了研究,得出胸径、树高与管胞长度、宽度、管胞长宽比等呈不显著到显著的遗传负相关;李开隆等^[22]通过对山杨材性与生长性状的相关性分析得出:纤维长、纤维宽及纤维长宽比均与树高、胸径等生长性状相关不显著。以上研究表明:纤维性状与生长性状呈一定的相关性,但相关性均不显著,说明纤维性状与生长性状间具有一定的独立性,在进行林木选育时可实现生长与材性同步选择。本研究分析了供试杨树无性系的生长性状与纤维性状间的相关性,发现纤维宽与树高、胸径及生物量呈正相关,但不显著,纤维长、纤维长宽比及纤维素质量分数分别与胸径、树高及生物量呈负相关性,且均不显著。该结论与以上研究结论^[19-22]具有一定的相似性。杨树生长性状与纤维性状间存在着负相关或相关性不显著,说明这2个性状在遗传机制中是相互独立的,可开展杨树生长性状与纤维性状的联合改良。

多性状综合评价选择法能够在相关性复杂的多性状之间权衡取舍,使目标性状得到进一步改良,同时又能够保留其他优良性状。本研究利用主成分分析加权综合得分法对杨树无性系进行综合评价,初步筛选出XL-80、XL-58、XL-86、ZH-17、XL-83等5个优良无性系,无性系XL-58的纤维长度最长,高出群体均值7.25%;无性系XL-80的生物量最大,高出群体均值33.11%;无性系XL-86和ZH-17的纤维素含量最高,高出群体均值3.32%;无性系XL-83各性状虽没有最突出的,但各性状在供试无性系评比中排序都是靠前的,也均达到了优良纤维材的整体水平^[23-24]。综上所述,评价筛选的5个优良纤维材无性系综合了各性状的优良特性,既考虑到了生长性状又兼顾了纤维性状对林木选优的影响,能够最大程度地实现物尽其用,达到杨树无性系资源利用的最大化,同时也为杨树多目标育种提供了更丰富的遗传资源与选育途径。

4.2 结论

本研究表明:7个杨树无性系生物量、木材纤维长及单株纤维素差异显著,纤维素质量分数存在一定的差异,各性状变异幅度较大,这些为杨树资源的良种选育及性状改良提供了遗传基础与参考依据;主成分分析表明:生物量、纤维素质量分数和单株纤维素代表了杨树无性系各性状的综合水平,是杨树纤维材评选的主导因子。综合评价选出木材纤维性状综合表现较优的5个无性系(XL-80、XL-58、XL-86、ZH-17、XL-83),这些无性系除生长性状表现优良外,木材纤维各项指标均达到了造纸所需原料的中优水平。

5 参考文献

- [1] 翁文源. 杨树木材纤维长度变异及其在造纸中的应用[J]. 湖北林业科技, 2007, 36(2): 31-33.
WENG Wenyuan. Application of timber fiber length variation and its papermaking for *Populus* [J]. Hubei For Sci Technol, 2007, 36(2): 31-33.
- [2] PANSIN A J, de ZEEUW C. *Textbook of Wood Technology* [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980.

- [3] Jr FARMER R E, WILCOX J R. Preliminary testing of eastern cottonwood clones [J]. *Theor Appl Genet*, 1968, **38**(5): 197 – 201.
- [4] 王明庥, 黄敏仁, 阮锡根, 等. 黑杨派新无性系木材性状的遗传改良[J]. 南京林业大学学报, 1989, **13**(3): 9 – 16.
WANG Mingxiu, HUANG Minren, RUAN Xigen, *et al.* Genetic improvement of wood characters of new clones in the Aigeiros section [J]. *J Nanjing For Univ*, 1989, **13**(3): 9 – 16.
- [5] 查朝生, 方宇, 刘盛全, 等. 杨树无性系木材纤维形态特征及其径向变异的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2005, **32**(2): 192 – 197.
ZHA Chaosheng, FANG Yu, LIU Shengquan, *et al.* Radial variation of fiber morphology of different poplar clones [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2005, **32**(2): 192 – 197.
- [6] MANSFIELD S D, WEINEISEN H. Wood fiber quality and kraft pulping efficiencies of trembling aspen (*Populus tremuloides* Michx) clones [J]. *J Wood Chem Technol*, 2007, **27**(3/4): 135 – 151.
- [7] 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.
LIU Yuxin, YAN Kaiyi, HE Wei, *et al.* Genetic variation of fiber traits in *Populus deltoides* clones [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2020, **44**(2): 67 – 74.
- [8] 王玲. 东洞庭湖湿地土壤营养元素空间分异特征研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2011.
WANG Ling. *Spatial Difference Characteristics of Nutrient Elements in East Dongting Lake Wetland Soil* [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2011.
- [9] 王宏. 东洞庭湖湿地土壤重金属的分布特征及风险评价[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2012.
WANG Hong. *Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Eastern Dongting Lake Wetland* [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2012.
- [10] 杨艳, 李永进, 唐洁, 等. 高密度初植杨树无性系间生物量及热值差异性[J]. 东北林业大学学报, 2019, **47**(8): 30 – 34, 46.
YANG Yan, LI Yongjin, TANG Jie, *et al.* Biomass and calorific value differences among high-density poplar clones with initial planting [J]. *J Northeast For Univ*, 2019, **47**(8): 30 – 34, 46.
- [11] 赵丹丹. 东洞庭湖湿地土壤养分状况及其评价[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016.
ZHAO Dandan. *The Nutrient Status and Evaluations of Eastern Dongting Lake Wetland Soil* [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016.
- [12] 王妍, 刘杏娥, 彭镇华, 等. I-72 杨树冠特性与生物量相关性研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, **35**(2): 164 – 168.
WANG Yan, LIU Xin'e, PENG Zhenhua, *et al.* Correlations between crown characteristics and biomass of popular I-72 [J]. *J Anhui Agric Univ*, 2008, **35**(2): 164 – 168.
- [13] 刘超逸, 刘桂丰, 方功桂, 等. 四倍体白桦木材纤维性状比较及优良母树选择[J]. 北京林业大学学报, 2017, **39**(2): 9 – 15.
LIU Chaoyi, LIU Guifeng, FANG Gonggui, *et al.* Comparison of tetraploid *Betula platyphylla* wood fiber traits and selection of superior seed trees [J]. *J Beijing For Univ*, 2017, **39**(2): 9 – 15.
- [14] 王莹, 郭明辉, 李明君. 适度间伐对人工林大青杨解剖特征和物理特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(6): 15 – 16, 19.
WANG Ying, GUO Minghui, LI Mingjun. Effects of moderate thinning on anatomical characteristics and physical characteristics of ussuri poplar [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(6): 15 – 16, 19.
- [15] 黄日明, 陈承德. 42 种阔叶树木材纤维长度和宽度的研究[J]. 闽西职业技术学院学报, 2014, **16**(4): 97 – 102.
HUANG Riming, CHEN Chengde. The research on wood fiber length and width of 42 kinds of hardwood [J]. *J Minxi Vocat Tech Coll*, 2014, **16**(4): 97 – 102.
- [16] 曾广植. 对用纸浆纤维筛分组分评价纸张综合强度影响关系的探讨[J]. 纸和造纸, 2006, **25**(5): 74 – 76.
ZENG Guangzhi. Study on the influence of paper composite strength on the classification of pulp fiber screen [J]. *Pap Pap Making*, 2006, **25**(5): 74 – 76.
- [17] 张平冬, 吴峰, 康向阳, 等. 三倍体白杨杂种无性系的纤维性状遗传变异研究[J]. 西北林学院学报, 2014, **29**(1): 78 – 83.

- ZHANG Pingdong, WU Feng, KANG Xiangyang, *et al.* Genetic variation of fiber properties of triploid hybrid clones of white poplar [J]. *J Northwest For Univ*, 2014, **29**(1): 78 – 83.
- [18] 汪殿蓓, 李建华, 田春元, 等. 湖北省野生青檀纤维形态特征及差异[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2018, **42**(1): 169 – 174.
- WANG Dianbei, LI Jianhua, TIAN Chunyuan, *et al.* Variation in fiber morphology among wild *Pteroceltis tatarinowii* populations in Hubei Province [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2018, **42**(1): 169 – 174.
- [19] 黄家华. 马褂木种源生长性状与材性变异研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- HUANG Jiahua. *Study on Variations of Growth Traits and Wood Properties in Liriodendron chinense Provenances* [D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [20] 覃敏. 米老排优良种源/家系选择与遗传变异研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- QIN Min. *Study on Selection and Genetic Variation of Provenances/Families of Mytilaria laosensis* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [21] 黄寿先. 杉木纸浆材优良无性系选育研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- HUANG Shouxian. *Selection on Superior Clones of Chinese Fir for Pulpwood* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2004.
- [22] 李开隆, 杨传平, 刘桂丰. 黑龙江省杨树遗传育种研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2003, **31**(4): 45 – 48.
- LI Kailong, YANG Chuanping, LIU Guifeng. Research progresses of genetics and breeding of *Populus* in Heilongjiang Province [J]. *J Northeast For Univ*, 2003, **31**(4): 45 – 48.
- [23] 高慧, 徐斌, 邵卓平. 青檀树皮的化学组成与细胞壁结构[J]. 经济林研究, 2007, **25**(4): 28 – 33.
- GAO Hui, XU Bin, SHAO Zhuoping. Chemical compositions and structure of cell wall in *Pteroceltis tatarinowii* Bark [J]. *Non-wood For Res*, 2007, **25**(4): 28 – 33.
- [24] 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.
- ZHOU Liang. *Study on Relationships and Models Between Wood Properties and Quality of Pulp&paper of Normal Wood and Tension Wood in Poplar Plantation* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2008.