

日本落叶松无性系管胞力学性质的遗传变异

邢新婷¹, 邵亚丽^{1,2}, 安 珍², 上官蔚蔚¹, 赵荣军¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 内蒙古农业大学材艺院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:对4个12年生的日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞进行了拉伸实验。结果表明:日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率的均值分别为11.44 GPa、616.59 MPa和6.54%,相应的变异系数为26.97%、26.26%和23.17%。方差分析表明日本落叶松幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量和管胞断裂伸长率在无性系间差异极显著(0.01水平),拉伸强度在无性系间差异不显著;株内早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和管胞断裂伸长率在年轮间差异显著。对日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸力学性能进行遗传参数估计,单根管胞弹性模量和断裂伸长率的重复力分别是0.79和0.57,属于中度到强度遗传控制,无性系早期选择及材性遗传改良潜力较大。

关键词:日本落叶松;无性系;幼龄材;管胞力学;重复力

中图分类号:S791.223

文献标识码:A

A Study on the Genetic Variation in the Mechanical Properties of Single Tracheids of Japanese Larix

XING Xin-ting¹, SHAO Ya-li^{1,2}, AN Zhen², SHANGGUAN Wei-wei¹, ZHAO Rong-jun¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Material Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The mechanical properties of single tracheids sampled from the juvenile wood of four 12-year-old Japanese Larix clones were examined by using tensile testing. The results revealed that the modulus of elasticity, tensile strength and breaking elongation of single tracheids of different clones were 11.44 GPa, 616.59 MPa and 6.54%, respectively, with the corresponding variation coefficient being 26.97%, 26.26% and 23.17%. The modulus of elasticity and breaking elongation of single tracheids were significantly different (at 0.01 level) among different clones of Japanese Larix, whereas the tensile strength showed insignificant difference. The modulus of elasticity, tensile strength and breaking elongation of single tracheids showed significant differences among different growth rings within a single tree. The repeatability of modulus of elasticity and breaking elongation of Japanese Larix clone were 0.79 and 0.57, respectively, indicating these two mechanical property indexes of tracheids being under moderate to strong genetic control. These results indicate that there are great potentials for early clone selection and genetic improvement in wood properties of Japanese Larix clones.

Key words: Japanese Larix; clone; juvenile wood; mechanical property of single tracheids; repeatability

收稿日期:2011-10-16

基金项目:中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金(CAFINT2009C07)和国家自然科学基金重点项目(30730076),中国林业科学研究院基本科研业务费专项资金(CAFYBB2008008)

作者简介:邢新婷(1971—),女,河北藁城人,副研究员,博士,主要研究方向:材质评价与预测,E-mail:xingxinting@caf.ac.cn

日本落叶松(*Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) 原产日本,1909年前后引入我国,具有初期生长较快、抗病性较强、成林快、易于栽培等特点,是我国北方及南方亚高山地区的主要造林树种,是制浆造纸的重要树种。木材纤维是纤维板和纸张的重要原材料,针叶材木材管胞的拉伸力学性能可以有效评价纤维板和纸张强度。Page等^[1]最早在《Nature》发表了针叶材单根管胞力学特性及其测定方法,引起了制浆造纸行业对于单根管胞拉伸技术的兴趣,而对于单根管胞力学的研究始于20世纪20年代,一段时间以来研究主要集中于测试方法的改进和探索^[2-4]。随后,不同学者将相对成熟的测试技术应用于不同树种单根管胞力学性质株内变异的研究。Groom等^[5]测得化学离析的火炬松(*Pinus taeda* Linn.)管胞弹性模量和最大抗拉强度的均值,分别是19.7GPa和1040MPa,并对成熟材和幼龄材管胞强度做出评价。Nasko T等^[6]研究了挪威云杉(*Picea abies* (L.) Karst.)管胞交错对纸张力学强度的影响,研究表明无交错纤维纸张的撕裂度高于普通纸张。国内学者对于毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)、洋麻(*Hibiscus cannabinus* Linn.)等植物纤维力学进行了研究^[7-8]。人们对于工业用纤维的大量需求,快速获得较高强度工业纤维成为学者和企业面临的重要课题。日本落叶松作为重要的纸浆材树种,培育出了较多的无性系,无性系选育成为育种的主导方向。许多学者从无性系利用的角度对其管胞形态指标的遗传变异进行了分析^[9-10],但从细胞壁力学层次,涉及纸张强度最直接性能的单根管胞力学性能在无性系间的变异还未

见报道。本研究选择4个12年生日本落叶松无性系作为实验材料,研究不同无性系幼龄材早材管胞力学性质在径向的变异模式,探讨单根管胞力学性能在不同无性系间的变异水平,为开展日本落叶松纸浆材的无性系选择、材性遗传改良提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

选取河南省嵩县五马寺林场4个日本落叶松无性系,每无性系3株样木为实验材料,试验林采用完全随机区组设计,4区组4株小区。五马寺林场海拔为1400~1600m,年平均气温8.4℃,无霜期178天,年降水量800~1200mm,相对湿度80%,土壤为棕壤,pH值为6.0。所选无性系为1996年6月从日本落叶松一代采穗圃分单株采条,剪成长12cm的接穗,采用全光自动喷雾装置在扦插盘内进行扦插育苗。1997年4月将扦插苗移入苗圃培育,1998年分系号造林。

在样木(表1)胸径处钻取12mm的生长锥,将生长锥北向4、7、10年轮早材的样品劈成火柴棍大小(试材为幼龄材,试样为生长锥,晚材率低,无法精确获得晚材管胞,故选择年轮较宽的早材作为实验样品),装入试管,倒入提前配制好的离析液(氧化氢与冰醋酸1:1),在60℃烘箱中放置18~20h,待样品发白后将样品取出洗净置于载玻片上气干24h。实体显微镜下用超精细镊子挑取完整管胞横放在开有宽度为2mm狭缝的有机玻璃板上,在管胞两端滴冷固化胶放置12h,每个年轮测定单根管胞25根。

表1 不同无性系日本落叶松样木生长情况

无性系	编号	胸径/cm	树高/m	无性系	编号	胸径/cm	树高/m
CK5	1	8.3	8.9	劳16-21	1	8.3	8.6
	2	7.3	9.0		2	10.9	9.8
	3	7.3	8.9		3	13.0	11.7
中3-10	1	6.0	7.5	F0-19	1	15.2	13.8
	2	7.6	7.5		2	10.5	11.3
	3	7.6	7.5		3	12.5	11.4

1.2 实验方法

实验拉伸仪器为Instron5848微型力学试验机,试验机配备量程为5N的传感器,可以对1.5mm以上各种植物纤维的纵向力学性能进行测量,拉伸载荷精度为0.01μN,拉伸速率为0.048mm·min⁻¹。将拉断管胞置于吡啶橙(0.001g Acridine Orange,配

成0.001g·100mL⁻¹的Acridine Orange溶液)溶液中染色。染色后管胞采用ZEISS公司生产的LSM510META共聚焦激光显微镜进行管胞横截面面积的测量,实验采用的激光光源为488nm激光光谱^[11]。

2 结果与分析

2.1 日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞应力应变曲线

表2、3是4个日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞横截面面积和管胞拉伸长度在不同年轮间的统计值,其中管胞拉伸长度测量的是两个胶滴之间的长度如图1所示。从表2、3中可以看出日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞横截面面积随着年轮的增加而增加,均值在 $188.6 \sim 408.5 \mu\text{m}^2$ 之间;单根管胞拉伸长度均值是 $0.63 \sim 0.94 \text{ mm}$ 之间。通过测量单根管胞的横截面面积和长度可以得到单根管胞拉伸的力学强度。

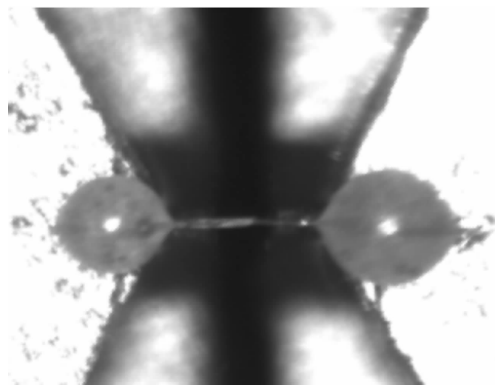


图1 管胞拉伸长度测量图

表2 日本落叶松无性系幼龄材各年轮早材单根管胞横截面面积均值

无性系	单根管胞横截面面积/ μm^2			变异系数/%		
	4	7	10	4	7	10
CK5	242.3	225.2	346.0	28.5	29.5	27.2
F0-19	201.1	408.5	361.1	24.0	12.6	24.7
劳 16-21	188.6	252.0	259.2	21.6	26.1	28.9
中 3-10	229.1	184.9	256.9	25.0	28.2	26.2
平均值	215.3	267.6	305.8	24.8	24.1	26.8

表3 日本落叶松无性系各年轮早材单根管胞拉伸长度均值

无性系	拉伸长度/mm			变异系数/%		
	4	7	10	4	7	10
CK5	0.76	0.80	0.94	17.67	15.42	9.43
F0-19	0.77	0.86	0.64	17.78	14.51	12.63
劳 16-21	0.63	0.86	0.88	13.60	11.67	14.75
中 3-10	0.75	0.69	0.77	26.45	18.01	16.13
平均值	0.70	0.80	0.80	18.90	14.90	12.30

图2是日本落叶松不同无性系幼龄材早材不同年轮管胞拉伸的应力应变曲线。应力应变曲线中出现明显滑移的直线产生的数据视为无效数据在分析中已剔除。应力应变曲线出现的滑移现象很早就有学者进行了解释,Kersavage^[12]认为滑移现象的出现源于夹具对管胞的夹持。从图中可以看出,应力应变曲线在不同的年轮间和不同无性系间均存在不同程度的差异。随着年轮的增加应力应变曲线的倾斜度出现轻微的增加,以无性系劳 16-21 最为显著,曲线的长度也出现明显的增加,出现这种原因的影响因素很多,可能与气候和外界应力有关,使得10年轮的管胞的形态特征(壁腔比、宽度等)发生变化。从图2中可以看出,每个年轮每根管胞间的应力应变曲线的斜率差异很大,这是由于木材管胞在树木生长发育的幼龄

阶段,管胞的形态变化非常活跃,其微纤角可能差异较大,不仅仅是不同年轮间的形态差异较大,同一年轮内管胞的形态特征也是各异的。从材性育种的角度来考虑,材性差异越大对于选择育种越有利。在一个年轮内其管胞间应力应变曲线差异大,因为在幼龄期其木材性质还没有完全稳定,从材性育种和工业利用的角度此年龄还不适宜选择利用,但幼龄材总体获得的信息可以对后期的选择育种提供指导。

2.2 日本落叶松无性系幼龄材单根管胞拉伸力学性能

由表4可以看出,日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率值在株内径向随着年轮的增加而增加。日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断

裂伸长率的均值分别为 11.44 GPa、616.59 MPa 和 6.54%，相应的变异系数均值为26.97%、26.26% 和 23.17%。日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量的值介于 6.70 GPa 与 15.96 GPa 之间，拉伸强度介于 328 MPa 与 895.41 MPa 之间，单根管胞断裂伸长率介于 4.06% 与 8.46% 之间。断裂伸长率

是衡量单根管胞韧性的指标，具有较大的断裂伸长率表征管胞在抗冲击时有一定的单性伸长，不会立即脆断。因此，在造纸行业如果纤维的断裂伸长率大则表明纸张的韧性相对较好。日本落叶松幼龄材早材的管胞拉伸力学性能大于火炬松^[13]，说明日本落叶松的单根管胞力学性能要高于火炬松。

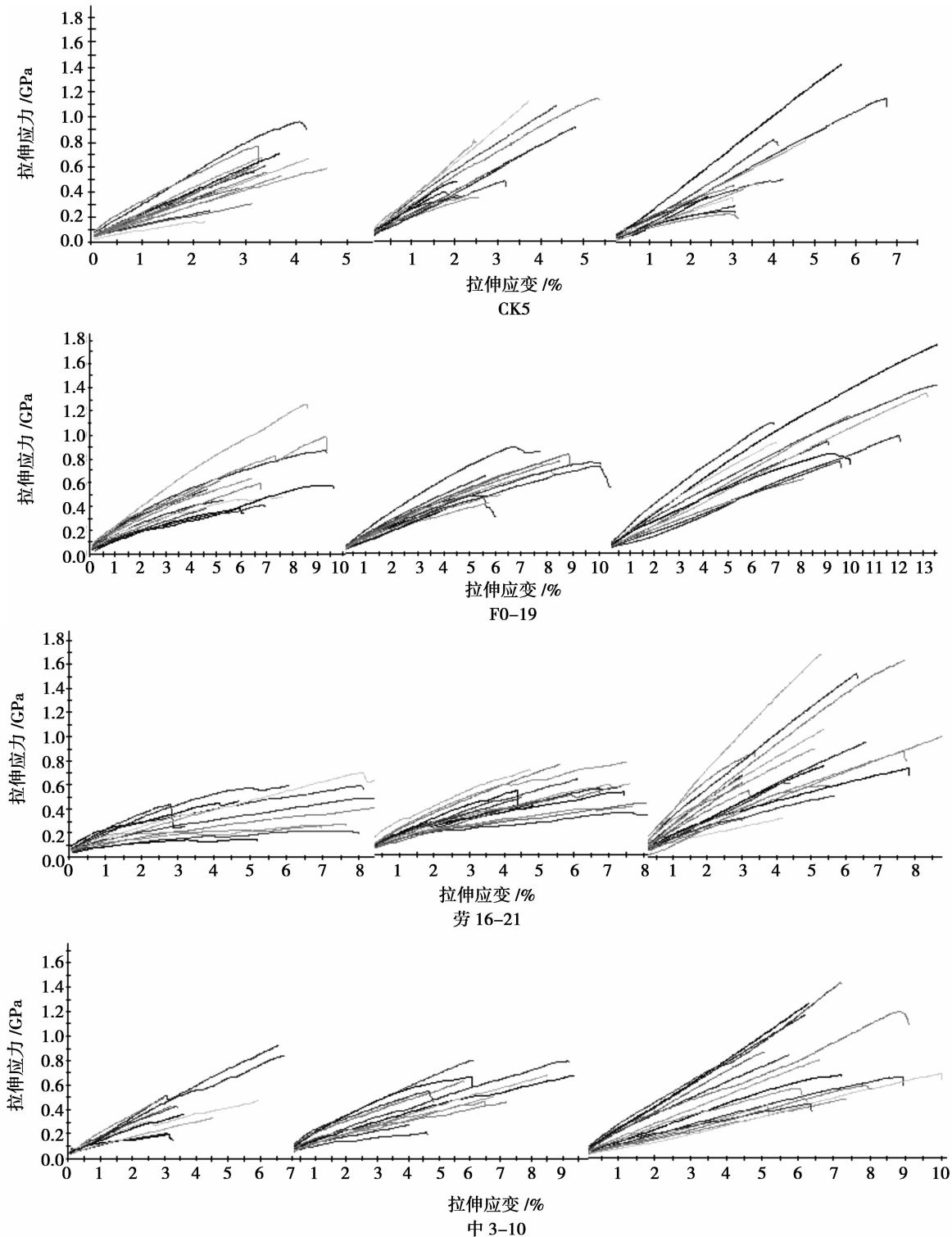


图2 日本落叶松无性系不同年轮早材应力应变曲线

表4 日本落叶松不同无性系幼龄材早材不同年轮间的单根管胞拉伸力学强度值

无性系	弹性模量/GPa			变异系数/%		
	4	7	10	4	7	10
CK5	14.15	14.58	15.96	28.85	30.47	28.77
F0-19	9.82	10.73	11.93	25.3	27.36	21.38
劳 16-21	6.70	8.92	10.55	27.74	25.29	25.83
中 3-10	10.73	10.25	13.29	27.10	27.16	28.57
平均值	10.30	11.10	12.93	27.20	27.60	26.10
无性系	拉伸强度/MPa			变异系数/%		
	4	7	10	4	7	10
CK5	572.94	579.00	895.41	28.80	28.57	25.12
F0-19	534.00	628.13	837.60	23.86	27.01	24.57
劳 16-21	435.56	540.63	529.70	27.24	23.18	24.87
中 3-10	503.33	637.86	705.02	26.69	26.39	28.57
平均值	511.46	596.40	741.93	26.65	26.28	25.84
无性系	断裂伸长率/%			变异系数/%		
	4	7	10	4	7	10
CK5	4.06	4.20	6.23	17.52	21.07	27.59
F0-19	7.31	7.21	7.77	22.75	24.90	14.17
劳 16-21	7.88	7.31	6.37	22.22	26.88	27.01
中 3-10	5.35	6.52	8.46	26.86	24.79	22.45
平均值	6.10	6.30	7.21	22.30	24.40	22.80

方差分析表明(表5),日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量在无性系间差异极显著(0.01水平),CK5的单根管胞拉伸弹性模量显著大于其他3个无性系,劳16-21的单根管胞拉伸弹性模量最小;早材单根管胞拉伸强度在无性系间差异不显著,CK5的单根管胞拉伸强度大于其他3个无性系,劳16-21的单根管胞拉伸强度最小;早材单根管胞断裂伸长率无性系间差异极显著(0.01水平),F0-19单根管胞断裂伸长率大于其他3个无性系,CK5单根管胞拉伸断裂伸长率显著小于其他3个无性系。综上所述,无性系CK5早材的单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度显著大于其他3个无性系,表现出优良的性状,而劳16-21早材单根管胞拉伸弹性模量和拉伸强度则最差。微纤丝角是细胞壁S₂层微纤丝与管胞主轴方向的夹角,微纤丝角越大则力学性能越小。马顺兴、王军辉等^[14]对日本落叶松无性系幼龄材的微纤丝角的研究表明,微纤丝角度在无性系间的基因型差异显著,这也是造成单根

管胞拉伸力学性质在无性系间存在差异性的原因。单根管胞参数对管胞力学的影响很大,马顺兴、王军辉等^[9]通过对日本落叶松无性系幼龄材早材管胞长度、宽度、长宽比、壁厚的研究表明,无性系幼龄材早材管胞参数在无性系间存在着显著的差异,而管胞的这些性质直接影响着管胞的力学性能。

方差分析表明,日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量和拉伸强度在年轮间差异均呈现极显著(0.01水平);日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞断裂伸长率在年轮间差异显著(0.05水平)。3种管胞力学指标均呈现10年轮显著大于4、7年,4年与7年间差异不显著的现象,可以初步判断10年轮可能为材性的一个转折点,这有待进一步深入研究。单根管胞力学在径向的变异性与微纤丝角关系密切,EL-Hosseiny^[15]很早就证明细胞壁S₂层的纤丝角度对于单根管胞力学性质有显著影响,随着年轮的增加微纤丝角度减少,单根管胞力学性能增加。

表5 日本落叶松不同无性系幼龄材早材单根管胞力学性能方差分析

指标	来源	自由度	平方和	均方和	F值	P值
弹性模量	无性系间	3	199.56	66.52	34.38**	<0.0001
	年轮间	2	51.94	25.97	13.42**	<0.0001
拉伸强度	无性系间	3	1.80E ⁵	5.99E ⁴	2.11	0.12
	年轮间	2	3.26E ⁵	1.63E ⁵	5.75**	0.0077
断裂伸长率	无性系间	3	37.72	12.57	12.9**	<0.0001
	年轮间	2	7.81	3.91	4.01*	0.0287

2.3 日本落叶松不同无性系幼龄材单根管胞拉伸力学性质遗传参数估计

表6是日本落叶松不同无性系幼龄材早材弹性模量和断裂伸长率的遗传参数估计,由于拉伸强度在无性系间的差异性不显著,说明从遗传的角度该指标受遗传因素影响较小,所以没有对其进行遗传参数重复力的估算。马顺兴、王军辉等^[9]研究表明日本落叶松无性系早材管胞长度、宽度和长宽比等

表6 日本落叶松无性系早材管胞力学性质的遗传参数估计

管胞力学指标	F 值	P 值	遗传方差	环境方差	表型方差	重复力
弹性模量	34.38	<0.000 1	7.18	1.93	9.11	0.79
断裂伸长率	12.9	<0.000 1	1.29	0.97	1.13	0.57

3 结论

(1)日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞面积随着年轮的增加而增加,单根管胞横截面面积的均值188.6~408.5 μm^2 之间;早材管胞有效拉伸长度均值在0.63~0.94 mm之间;早材单根管胞拉伸应力应变曲线随着年轮的增加倾斜度出现轻微的增加,以劳16-21最为显著,曲线的长度也出现明显的增加。

(2)日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞拉伸弹性模量、拉伸强度和断裂伸长率的均值分别为11.44 GPa、616.59 MPa和6.54%,相应的变异系数均值为26.97%、26.26%和23.17%。方差分析表明早材单根管胞拉伸弹性模量和单根管胞断裂伸长率在无性系间差异极显著(0.01水平),单根管胞拉伸强度无性系间差异不显著。CK5早材的单根管胞拉伸的弹性模量和拉伸强度表现出优良的性状,而劳16-21则最差。早材单根管胞拉伸弹性模量和拉伸强度在年轮间差异极显著(0.01水平),单根管胞断裂伸长率在年轮间差异显著(0.05水平)。10年轮的各项性能显著大于4、7年轮,10年可能为材性的一个转折点。

(3)日本落叶松无性系幼龄材早材单根管胞弹性模量和断裂伸长率的重复力均在0.5以上,达到了中等以上水平,说明日本落叶松无性系单根管胞拉伸力学性质受到中度至强度遗传控制,可以开展日本落叶松无性系选择和材性遗传改良从而获得较高的遗传增益。

参考文献:

[1] Page D H, El-Hosseiny F, Winkler K. Behavior of single wood fibers under axial tensile strain[J]. *Nature*, 1971, 229(5282): 252-253

[2] Klautz W, Marschall A, Ginzl W. Technology verholzter pflanzenlicher Zellwände[J]. *Holzforschung*, 1947, 1(4): 98-103

性状的重复力均达到了中等和中等以上水平。通过表6可以得出,单根管胞弹性模量和断裂伸长率的重复力分别是0.79和0.57,均在0.5以上达到了中等以上水平,说明日本落叶松无性系幼龄材单根管胞拉伸力学性质受到中度以上的遗传控制,为开展日本落叶松无性系选择及材性遗传改良提供理论依据。

[3] McIntosh D C, Unrig L O. Effect of refining on load 2 elongation characteristics of Loblolly pine holocellulose and unbleached kraft fibers[J]. *Tappi*, 1968, 51(6): 265-273

[4] Kersavage P C. A system for automatically recording the load 2 elongation characteristics of single wood fibers under controlled relative humidity conditions[R]. USDA, U.S. Government Printing Office, 1973

[5] Groom L H, Mott L, Shaler S M. Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I: Determination and variability of stress-strain curves with respect to tree height and juvenility[J]. *Wood and Fiber Science*, 2002, 34(1): 14-27

[6] Terziev N, Daniel G, Marklund A. Effect of dislocations in Norway spruce fibers on the mechanical properties of paper[M]. ESWN-Stockholm, 2003

[7] 曹双平, 王戈, 余雁. 几种植物单根纤维力学性能对比[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2010, 34(5): 87-90

[8] Yan Y, Jiang Z H, Fei B H. An improved microtensile technique for mechanical characterization of short plant fibers: a case study on bamboo fibers[J]. *J Mater Sci*, 2011, 46: 739-746

[9] 马顺兴, 王军辉, 张守攻, 等. 日本落叶松无性系木材性质的遗传变异[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(1): 69-73

[10] 马顺兴, 王军辉, 张守攻, 等. 日本落叶松无性系木材组织比量的遗传变异[J]. *南京林业大学学报*, 2006, 30(5): 55-59

[11] Jang H F, Robertson A G, Seth R S. Optical sectioning of pulpo fibers with confocal scanning laser microscopy[C]. *International Paper Physics Conference*, 1991: 277-280

[12] Kersavage P C. A system for automatically recording the load elongation characteristics of single wood fibers under controlled relative humidity conditions[R]. USDA. U.S. Government printing Office, 1973: 1-46

[13] Mott L, Groom L H, Shaler S M. Mechanical properties of individual southern pine fibers[J]. Part II: Comparison of earlywood and latewood fibers tree respect to tree height and juvenility[J], *Wood and Fiber Science*, 2002, 34(1): 221-227

[14] 马顺兴, 王军辉, 张守攻, 等. 日本落叶松无性系微纤丝角遗传变异的研究[J]. *林业科学研究*, 2006, 19(2): 188-191

[15] EL-Hosseiny F E, Page D H. The mechanical properties of single wood pulp fibers 2. Theories of strength. [J]. *Fiber Sci Technol*, 1975, 8: 21