

长白落叶松木芯基本密度与材性指标相关及 建筑材优良家系选择研究

李艳霞^{1,2} 张含国¹ 邓继峰³ 张磊¹

(1 东北林业大学林木遗传育种国家重点实验室 2 黑龙江省林业科学研究所
3 北京林业大学水土保持学院,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

摘要:对 24 年生长白落叶松优树子代测定林 14 个处理(13 个家系和 1 个对照)的生长性状、木芯基本密度进行遗传变异分析和方差分析,结果表明,家系间生长性状和木芯基本密度均存在较大变异,家系间生长性状差异极显著,木芯基本密度差异显著,树高、胸径、材积和木芯基本密度家系遗传力分别为 0.73、0.72、0.80 和 0.60,进行家系水平的改良具有很大的潜力。生长性状、木芯基本密度与物理力学指标相关分析结果表明:生长性状与木芯基本密度、解析木基本密度、气干密度呈正相关不显著,与大多数力学指标间相关不显著;木芯基本密度与解析木基本密度、气干密度、径面抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度和径面硬度呈极显著正相关,且回归分析模型比较理想,可以利用胸径木芯基本密度值预测物理力学指标值,间接选择和评价长白落叶松建筑材优良家系。通过生长性状和木芯基本密度综合分析选出 166、169 为优良家系,根据解析木物理力学性状选出的优良家系与其结果一致;树高、胸径、材积和木芯基本密度的遗传增益分别为 14.27%、19.96%、48.12% 和 14.06%;优良家系树高、胸径、材积和木芯基本密度分别比对照高 7.20%、13.31%、38.46% 和 4.76%。

关键词:长白落叶松;自由授粉家系;建筑材;基本密度

中图分类号:S722.3⁺3; S718.46 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2012)05-0006-09

LI Yan-xia^{1,2}; ZHANG Han-guo¹; DENG Ji-feng³; ZHANG Lei¹. **Correlations among wood density, wood physical mechanics index and growth trait, and selection of elite families for production of building products in *Larix olgensis*.** *Journal of Beijing Forestry University* (2012) **34**(5) 6-14 [Ch, 38 ref.]

1 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Northeast Forestry University, Harbin, 150040, P. R. China;

2 Forestry Research Institute of Heilongjiang Province, Harbin, 150081, P. R. China;

3 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

The growth traits and wood density of 14 families of 24-year-old *Larix olgensis* progeny testing forests composed of 13 open-pollinated families and one control were selected as the research object of this tractate, which went through genetic variation analysis and deviation analysis. The results showed that there were larger variations in both the growth traits among families and wood basic density, the differences of growth traits among families were extremely significant, the differences of wood basic density values were significant, and that the heritability values of height, diameter at breast height, timber volume and wood basic density were 0.73, 0.72, 0.80 and 0.60 respectively, which indicated that there was rather large potential for improving the family levels. The results of the correlation analysis of growth traits, wood basic density and physical mechanics indices showed positive but insignificant correlation between the growth traits and wood basic density, analytic timber basic density and drying

收稿日期:2011-12-08

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD01B01)、黑龙江省科技攻关计划项目(GA08B201-01)。

第一作者:李艳霞,博士生,助理研究员。主要研究方向:落叶松、云杉遗传育种。电话:0451-86603545 Email: liyanxia2006@163.com
地址:150081 黑龙江省哈尔滨市哈平路 134 号黑龙江省林业科学研究所。

责任作者:张含国,教授,博士生导师。主要研究方向:落叶松、云杉遗传育种。电话:0451-82190607 Email: hanguozhang1@yahoo.com.cn
地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

density respectively and insignificant correlation between the growth traits and most physical mechanics indices; the wood basic density positively and extremely significantly correlated with analytic timber basic density, drying density, diametric cleavage strength, modulus of elasticity, bending strength, crushing strength parallel to grain and the hardness of the diametric plane, and the regression analysis model was ideal to predict the physical mechanics index values and indirectly select and assess the superior families of *L. olgensis* construction timber by use of diameter at breast height. Afterwards, the 166 and 169 were selected as the superior families after the synthesized analysis of the growth traits and wood basic density, which was the same as the superior families selected according to the physical mechanics traits of analytic timber; the heritability gains of height, diameter at breast height, timber volume and wood basic density were 14.27%, 19.96%, 48.12% and 14.06% respectively; the values of height, diameter at breast height, timber volume and wood basic density of superior families were higher than those of control by 7.20%, 13.31%, 38.46% and 4.76% respectively.

Key words *Larix olgensis*; open-pollinated family; construction timber; basic density

木材的力学性质可衡量木材抵抗外力的能力,是木材实际应用时最主要的参数^[1-2]。木材基本密度、抗弯强度、抗剪强度、抗压强度及弹性模量等物理力学指标在优良建筑材选择与评价中是比较重要的材性指标^[3-5],进行这些指标的研究破坏性强,需要耗费大量人力、物力以及试验材料;因此,探索出简便的间接选择方法,进行优良建筑材的选择非常必要。

木材密度是木材材性的一项重要指标,与木材力学性质有着密切的关系。对一些树种的研究显示,胸高木芯和树干取样测定的指标间存在一定相关。例如:徐有明等^[6]对火炬松(*Pinus taeda*)种源试验林材性分析研究认为,基本密度、气干密度和绝干密度与顺纹抗压强度高度相关,生长锥法木芯取样测定基本密度可以很好地预估顺纹抗压强度值;叶志宏等^[7]通过对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的研究认为,胸高值与树干均值在木材基本密度和管胞长度两性状上都存在着很强的相关性,利用胸高截面的性状值可以估测树干的性状均值,也可以直接用于株间的相对比较;周志春等^[8]对马尾松(*Pinus massoniana*)的研究结果表明,马尾松胸高处任一方位半径的木材样品估算树干材性均值,可达到胸径木芯取样的目的。由此可见,有望通过测定木芯样本间接预测木材力学强度指标,加快建筑材良种选育进程,缩短育种周期。

长白落叶松(*Larix olgensis*)是我国北方的主要造林树种之一,它具有生长快、分布广、适应性强、易于栽培的特点,其木材材质细密坚韧、纹理直、强度高、耐腐蚀性强、耐久用,是房屋结构和建筑上的重要用材。以往开展了很多长白落叶松人工林材质早期预测、人工林与天然林材性比较以及不同种源木材基本密度、管胞长度等材性性状遗传变异规律方面的研究和选育工作^[9-12],而用木芯与解析木来研究

长白落叶松建筑材材性指标方面尚缺乏相关研究;因此,本文以24年生长白落叶松优树子代测定林为对象,从家系水平上,通过胸径木芯基本密度与解析木的材性指标间的相关关系,探索基于木芯基本密度间接测定长白落叶松建筑材重要材性指标并应用于优良家系选择的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

种子园和子代测定林设在黑龙江省林业科学院江山娇实验林场。林场位于黑龙江省东南部宁安县境内,43°44'54"~43°54'12"N,128°53'16"~129°12'42"E,地处张广才岭南端,山脉为东西走向,整个地势东高西低、北高南低,属低山丘陵地区。该区属温带大陆性季风气候,年平均气温3.5℃左右,≥10℃年积温2200℃左右。年降水量在450~550mm之间,大多集中在6—8月份,占全年降水量的50%左右。10月中旬至翌年的4月初为降雪期,积雪时间150d,厚度达30~50cm。全年无霜期为116~125d。

1.2 试验材料

试验材料来源于1986年黑龙江省林业科学院江山娇实验林场建立的长白落叶松优树子代测定林(24年生)。1983年采集长白落叶松优树种子,1984年播种育苗,1986年按完全随机区组设计定植9个组,每个定植组包括16个自由授粉家系和1个对照(当地一般生产用长白落叶松苗木)20株单行小区,重复4次,株行距为2m×2m,1994年进行过疏伐(隔1株伐1株),伐后行距约为2m×4m,保存率为48.33%。

1.3 取样方法及木材物理力学性状测试

取样分为生长锥胸径木芯取样与伐倒木取样2种方法。

2007年树木停止生长后调查长白落叶松优树子代测定林3个试验组的每木树高、胸径。同时进行生长锥胸径木芯取样,在胸高1.3 m处自东向西用直径5 mm的生长锥取得由树皮至髓心的完整无疵木芯。每个处理在每个重复中各选取5株平均木作为样木4次重复,每个处理测定20个单株。采用最大饱和含水率法测定落叶松木芯基本密度^[13]。

为更全面地了解家系材质性状,将家系按生长性状分成好、中、差,随机选择生长好的家系4个、生长中等的家系5个、生长差的家系4个,共13个自由授粉家系和1个对照,每个处理在每个重复中选择1株平均木作为样木伐倒,14个处理4个重复共伐56株样木。每株试材分别从胸高处向下截取5 cm厚的圆盘和向上截取2 m长的原木一段,试材运回后气干备用。测试的主要指标包括:木材密度(GB 1933—1991)、晚材率(GB 1930—1991)、干缩率(GB 1932—1991)、抗劈力(GB 1942—1991)、抗弯弹性模量(GB 1936.2—1991)、抗弯强度(GB 1936.1—1991)、顺纹抗剪强度(GB 1937—1991)、顺纹抗压强度(GB 1935—1991)、硬度(GB 1941—1991)等指标,按照国家标准规定进行取样和测试^[14]。纤维角测量用碘化钾溶液染色法,每试样测量45个数据。材性测试在东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室完成。

1.4 统计分析方法

家系生长性状与木芯基本密度采用小区平均数进行方差分析,解析木物理力学性状采用单株进行方差分析。

线性模型计算公式:

$$Y_{ij} = \mu + F_i + B_j + e_{ij}$$

式中: Y_{ij} 为第 i 个区组第 j 个家系的观测值; μ 为总体平均值; B_j 为区组; F_i 为家系; e_{ij} 为误差。

家系遗传力计算公式:

$$h^2 = \sigma_f^2 / (\sigma_e^2 / b + \sigma_f^2)$$

式中: h^2 为家系遗传力; σ_f^2 为家系方差; σ_e^2 为环境方差; b 为重复次数。

遗传增益:

$$\Delta G = R/\bar{X} = h i \sigma_A / \bar{X}, R = i \sigma_p h^2 = h i \sigma_A$$

式中: ΔG 为遗传增益; \bar{X} 为家系的平均值; R 为选择响应; h 为家系遗传力的平方根; i 为选择强度; σ_p 为亲本群体的标准差; σ_A 为选择性状的标准差。

相关分析、回归分析以单株进行分析,遗传相关系数:

$$r_{g(xy)} = \text{Cov}_{g(xy)} / \sqrt{\sigma_{g(x)}^2 \sigma_{g(y)}^2}$$

式中: $\text{Cov}_{g(xy)}$ 为 x 与 y 性状的遗传协方差; $\sigma_{g(x)}^2$ 为 x 性状的遗传方差; $\sigma_{g(y)}^2$ 为 y 性状的遗传方差。

采用 DPS 专业统计 V11.50 进行方差分析、相关分析和综合选择指数构建^[15]。

2 结果与分析

2.1 生长性状、木材密度与木材物理力学性状间的相关分析

建筑材物理力学性状的取样破坏性强、成本高,而且测定过程复杂,如果已知性状间的相关关系,就可以利用容易测定的生长和胸径木芯取样性状对物理力学性状进行预测和间接选择,极大地降低建筑材材性改良的成本。表1列出了生长性状与木材物理力学性状之间的相关分析结果,可以看出:树高与弦向干缩率、体积干缩率、抗弯弹性模量、抗弯强度和顺纹抗压强度呈极显著或显著正相关;材积与抗弯弹性模量呈显著正相关,与晚材率、弦面抗劈力、顺纹抗剪强度(弦面、径面)、端面硬度呈微弱负相关;生长性状与解析木基本密度、气干密度呈正相关但不显著;解析木基本密度、气干密度与晚材率、径向干缩率、弦面抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、径面顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度、硬度(端面、径面)呈极显著或显著正相关,说明解析木基本密度、气干密度与木材物理力学性状关系极为密切;纤维角与抗弯弹性模量呈显著负相关,与其他力学性状大多呈微弱负相关,说明纤维角越小,抗弯弹性模量越大;晚材率与抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度呈极显著正相关,与端面硬度呈显著正相关,说明晚材率越高,木材物理力学强度越好;干缩率(弦向、体积)与硬度呈极显著或显著负相关;径面抗劈力与弦面抗劈力、抗弯强度、顺纹抗压强度和硬度(端面、径面)呈极显著正相关;弦面抗劈力与抗弯强度、径面顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度和硬度(端面、径面)呈极显著正相关;抗弯弹性模量与抗弯强度、顺纹抗压强度呈极显著正相关,与弦面顺纹抗剪强度呈极显著负相关;抗弯强度与顺纹抗压强度呈极显著正相关;力学性状间多数呈极显著、显著正相关,这说明对个性状的改良同时有利于力学性状的综合改良。

木芯基本密度与解析木基本密度、气干密度、晚材率、径向干缩率、抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度、硬度(端面、径面)呈极显著正相关,与径面顺纹抗剪强度呈显著正相关,与生长性状正相关不显著。这些性状间的相关关系,为长白落叶松木芯取样测定基本密度预测活立木木材基本密度乃至评价建筑材指标提供了理论依据。

2.2 木材密度与物理力学性状的回归模型

木材基本密度与木材力学性质有着密切的关

表 1 性状间相关分析

Tab. 1 Correlation analysis among wood traits

性状	树高	胸径	材积	木芯基本密度	解剖木基本密度	气干密度	纤维角	晚材率	径向干缩率	弦向干缩率	体积干缩率	径面抗劈力	径面抗劈力	弦面抗劈力	抗弯弹性模量	抗弯强度	弦面顺纹抗剪强度	径面顺纹抗剪强度	顺纹抗压强度	端面硬度	弦面硬度	径面硬度
树高		0.77**	0.86**	0.33	0.18	0.44	0.01	0.26	0.40	0.50*	0.49**	0.10	-0.04	0.67**	0.62**	-0.43	-0.11	0.55*	-0.26	-0.03	-0.08	
胸径	0.92		0.98**	0.38	0.12	0.29	-0.11	-0.09	0.00	0.17	0.01	0.11	-0.18	0.54	0.49	-0.49	-0.13	0.27	-0.11	0.19	0.11	
材积	0.95	0.99		0.41	0.33	0.31	0.18	-0.06	0.09	0.24	0.12	0.06	-0.21	0.57*	0.48	-0.19	-0.17	0.30	-0.18	0.13	0.05	
木芯基本密度	0.76	0.75	0.74		0.92**	0.91**	-0.33	0.65**	0.66**	0.19	0.22	0.46**	0.43**	0.76**	0.60**	-0.10	0.41*	0.78**	0.45**	0.33	0.55**	
解剖木基本密度	0.81	0.68	0.65	1.19		0.98**	-0.13	0.62**	0.61**	0.33	0.31	0.38	0.52**	0.66**	0.54**	-0.03	0.52*	0.75**	0.38**	0.35	0.48**	
气干密度	0.91	0.74	0.72	1.25	1.02		-0.15	0.65**	0.42*	0.37	0.33	0.39	0.53**	0.68**	0.53**	-0.02	0.45*	0.77**	0.41**	0.37	0.51**	
纤维角	-0.01	-0.18	0.11	-0.31	-0.17	-0.25		-0.06	0.07	0.25	0.48	-0.14	-0.26	-0.56*	-0.26	0.17	0.18	-0.14	-0.13	-0.14	-0.37	
晚材率	0.40	0.03	0.05	-0.12	0.79	0.93	-0.12		0.43	0.45	0.48	0.44**	0.48**	0.56**	0.68**	0.08	0.15	0.85**	0.42*	-0.01	0.29	
径向干缩率	0.89	0.37	0.44	1.55	1.35	1.54	0.26	1.51		0.33	0.57**	-0.10	0.07	0.39	0.10	-0.04	0.12	0.56*	0.00	0.00	-0.01	
弦向干缩率	0.88	0.43	0.49	0.69	0.72	0.97	0.53	0.87	0.86**		0.86**	0.09	0.18	0.39	0.44	-0.24	0.14	0.50	-0.40**	-0.39**	-0.33**	
体积干缩率	0.74	0.12	0.22	0.58	0.64	0.83	0.77	0.96	1.18	1.12		-0.12	0.06	0.19	0.25	-0.19	0.03	0.42	-0.49*	-0.42*	-0.43*	
径面抗劈力	0.40	0.37	0.27	0.65	0.50	0.52	-0.83	0.51	0.13	0.34	0.01		0.74**	0.45	0.64**	0.31	0.32	0.60**	0.67**	0.35	0.70**	
弦面抗劈力	0.13	0.01	-0.03	0.50	0.53	0.58	-0.34	0.52	0.47	0.33	0.28	0.95		0.37	0.50**	0.31	0.50**	0.55**	0.70**	0.53	0.57**	
抗弯弹性模量	0.99	0.93	0.94	1.16	0.91	1.06	-0.84	0.62	1.09	0.86	0.50	0.85	0.44		0.79**	-0.42**	-0.06	0.75**	0.34	0.39	0.38	
抗弯强度	1.28	1.29	1.21	0.85	0.67	0.65	-0.55	0.80	0.23	1.44	0.91	1.21	0.58	0.98		-0.22	0.05	0.79**	0.23	0.22	0.34	
弦面顺纹抗剪强度	-0.72	-0.91	-0.93	-0.41	-0.16	-0.26	0.23	0.41	-0.44	-0.14	-0.24	0.39	0.46	-0.42	-0.44		0.53**	0.11	0.22	-0.19	0.21	
径面顺纹抗剪强度	0.06	0.01	-0.06	0.23	0.71	0.68	0.23	0.17	0.16	0.47	0.15	0.51	0.63	-0.11	-0.22	0.71		0.29	0.22	-0.03	0.26	
顺纹抗压强度	1.07	0.79	0.77	1.20	0.84	0.95	-0.28	1.16	1.49	1.38	1.09	0.91	0.66	1.00	0.93	0.32	0.36		0.30	0.11	0.42	
端面硬度	-0.59	-0.41	-0.47	0.75	-0.07	-0.15	-0.89	0.08	-0.70	-0.60	-0.82	0.31	0.62	0.05	-0.57	0.20	-0.13	-0.36		0.80**	0.90**	
弦面硬度	-0.30	-0.08	-0.12	0.01	-0.01	-0.05	-0.69	-0.09	-0.65	-0.59	-0.67	-0.03	0.45	0.21	-0.27	-0.39	-0.40	-0.53	0.92		0.63**	
径面硬度	0.00	0.55	0.32	0.97	0.83	0.99	-0.65	0.21	-0.31	-0.16	-0.78	1.24	1.31	0.80	0.00	0.42	-0.23	0.35	1.18	0.59		

注: 对角线以上为表型相关系数, 以下为遗传相关系数; * 为 5% 水平显著, ** 为 1% 水平显著, 表 3 同此。

系,很多学者报道了基本密度与力学性质关系的经验公式和方程^[16-19]。木材力学性质与密度的关系除指数曲线 $S = a\rho^b$ 外,多数表现为直线关系,可近似用直线方程 $S = a\rho$ 或 $S = a\rho + b$ 表示^[20-21]。表1

相关分析说明木芯基本密度与木材物理力学性状相关极为密切,基于这种相关性建立木芯基本密度与解析木物理力学性状的线性回归和幂函数回归2种回归模型(表2)。

表2 木芯基本密度与物理力学性状的回归模型

Tab.2 Regression analysis model of wood basic density and physical mechanics traits

处 理	回归方程	R^2
木芯基本密度(x)与解析木基本密度(y)	$y = 0.037 + 1.168x$	0.84
	$y = 1.192x^{0.940}$	0.84
木芯基本密度(x)与气干密度(y)	$y = 0.076 + 1.149x$	0.84
	$y = 1.192x^{0.874}$	0.83
气干密度(x)与解析木基本密度(y)	$y = -0.037 + 1.011x$	0.99
	$y = 0.983x^{1.068}$	0.99
木芯基本密度(x)与径面抗劈力(y)	$y = 4.822 + 19.219x$	0.49
	$y = 22.957x^{0.667}$	0.52
木芯基本密度(x)与弦面抗劈力(y)	$y = -1.281 + 26.488x$	0.46
	$y = 24.946x^{1.079}$	0.44
木芯基本密度(x)与抗弯弹性模量(y)	$y = 2840 + 13455x$	0.76
	$y = 15380x^{0.685}$	0.76
木芯基本密度(x)与抗弯强度(y)	$y = 21.248 + 156.200x$	0.70
	$y = 169.530x^{0.771}$	0.69
木芯基本密度(x)与径面顺纹抗剪强度(y)	$y = 2.393 + 22.730x$	0.45
	$y = 23.763x^{0.797}$	0.44
木芯基本密度(x)与顺纹抗压强度(y)	$y = 7.687 + 109.600x$	0.75
	$y = 113.420x^{0.862}$	0.76
木芯基本密度(x)与端面硬度(y)	$y = 2522 + 3417x$	0.35
	$y = 5486x^{0.337}$	0.34
木芯基本密度(x)与径面硬度(y)	$y = 592 + 2708x$	0.58
	$y = 3040.430x^{0.651}$	0.54

由建立的回归模型可知,长白落叶松的木芯基本密度与解析木基本密度、气干密度三者间存在极显著的正相关关系, R^2 分别为0.84、0.84和0.99,说明它们之间相互预测精度高,可以用其中的一项指标值推算另一项指标值。

木芯基本密度与力学强度指标之间的回归分析显示,木芯基本密度与径面抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度和径面硬度的 R^2 较大,回归分析模型较为理想。木芯基本密度与抗弯强度、径面硬度的相关关系以线性方程描述较好,与径面抗劈力、顺纹抗压强度的相关关系以幂函数方程描述效果好。

这些结果说明,木芯取样不仅测定方便,而且其基本密度值可以很好地预估解析木基本密度、气干密度乃至径面抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度、径面硬度,这对基于胸径木芯取样预测和评价长白落叶松建筑材指标具有重要意义。

2.3 长白落叶松家系间木材物理力学性状的方差分析及遗传参数估算

家系间木芯取样生长性状和木芯基本密度的遗传变异及方差分析(表3)显示:生长性状、木芯基本密度存在丰富的变异,其中材积的变异系数最大,为

40.45%;家系间生长性状差异极显著,木芯基本密度差异显著,树高、胸径、材积和木芯基本密度的家系遗传力分别为0.73、0.72、0.79和0.59,属于中等偏上强度遗传,说明进行家系水平的改良具有很大的潜力。

对14个处理解析木物理力学性状进行统计分析,结果(表3)显示:家系间纤维角、弦面抗劈力、端面硬度和弦面硬度差异极显著,家系遗传力比较高,在0.62~0.78之间;家系间解析木基本密度、气干密度、晚材率、体积干缩率、径面抗劈力、抗弯弹性模量和径面顺纹抗剪强度差异显著,家系遗传力在0.52~0.60之间,说明这些性状受中等及以上强度的遗传控制;家系间径向干缩率、弦向干缩率、抗弯强度、弦面顺纹抗剪强度、顺纹抗压强度和径面硬度差异不显著,遗传力在0.5以下,说明这些性状受较弱的遗传控制,受环境影响较大。

2.4 生长性状与木芯基本密度的联合选择

用家系木芯基本密度构建选择指数方程(表4),进行生长和木芯基本密度的联合选择。经济权重采用等权法估算,即以各性状表型标准差的倒数作为该性状的权重^[11,22]。树高 x_1 、胸径 x_2 、材积 x_3 、木芯基本密度 x_4 ,经济权重向量 $W = (0.625,$

表 3 生长和木材物理力学性状的方差分析及遗传参数估算

Tab.3 Deviation analysis and gauging of the genetic parameters of growth and physical mechanics traits

性状	均值	标准差	变异系数/%	家系间		区组间		机误		家系 F 值	P 值	h ²
				df = 13	df = 3	df = 39	df = 39	df = 39				
树高/m	12.74	1.60	12.56	9.384	12.279	2.491	3.77**	0.002	0.73			
胸径/cm	18.32	3.24	17.69	33.474	0.450	9.329	3.59**	0.003	0.72			
材积/m ³	0.18	0.07	40.45	0.019	0.003	0.004	4.75**	0.000	0.79			
木芯基本密度/(g·cm ⁻³)	0.43	0.06	13.65	0.002	0.000	0.001	2.44*	0.022	0.59			
解析木基本密度/(g·cm ⁻³)	0.54	0.05		0.005	0.002	0.002	2.36*	0.020	0.58			
气干密度/(g·cm ⁻³)	0.57	0.05		0.005	0.001	0.002	2.09*	0.038	0.52			
纤维角/(°)	16.67	1.06		2.810	0.417	0.618	4.55**	0.000	0.78			
晚材率/%	34.06	5.55		52.528	32.262	23.403	2.24*	0.026	0.55			
径向干缩率/%	2.90	0.84		0.922	0.297	0.675	1.37	0.220	0.27			
弦向干缩率/%	5.82	0.94		1.343	1.277	0.698	1.92	0.050	0.48			
体积干缩率/%	9.02	1.77		5.506	4.257	2.234	2.46*	0.015	0.59			
径面抗劈力/(N·mm ⁻¹)	13.69	2.83		13.506	5.833	6.320	2.14*	0.034	0.53			
弦面抗劈力/(N·mm ⁻¹)	10.56	2.66		17.272	2.735	3.998	4.32**	0.000	0.77			
抗弯弹性模量/MPa	8 625	1 373		3 447 615	242 181	1 492 354	2.31*	0.022	0.57			
抗弯强度/MPa	89.12	10.70		164.521	9.235	105.846	1.55	0.142	0.36			
弦面顺纹抗剪强度/MPa	11.85	2.55		9.483	2.571	5.776	1.64	0.115	0.39			
径面顺纹抗剪强度/MPa	12.57	3.05		16.684	11.505	6.643	2.51*	0.013	0.60			
顺纹抗压强度/MPa	54.27	6.21		62.048	12.045	32.704	1.90	0.062	0.47			
端面硬度/N	3 973	834		1 365 805	165 833	512 519	2.66**	0.009	0.62			
弦面硬度/N	1 720	543		677 836	30 245	188 103	3.60**	0.001	0.72			
径面硬度/N	1 783	430		221 527	20 494	185 105	1.20	0.318	0.16			

注: 性状中的单位符号针对均值和标准差。

表 4 家系性状均值和选择指数值

Tab.4 Family trait averages and selection index values

家系	性状均值				选择指数 I
	树高/m	胸径/cm	材积/m ³	木芯基本密度/(g·cm ⁻³)	
166	14.03	20.31	0.235	0.44	23.73
169	13.95	20.55	0.233	0.44	23.63
225	13.66	19.34	0.203	0.43	22.95
317	13.31	17.25	0.157	0.45	22.20
55	12.92	20.01	0.210	0.42	22.00
386	12.99	18.67	0.189	0.42	21.88
对照	13.05	18.03	0.169	0.42	21.81
389	12.52	17.33	0.145	0.44	21.03
491	12.71	15.85	0.129	0.42	20.99
104	12.71	16.01	0.132	0.41	20.96
96	12.49	17.34	0.156	0.42	20.95
481	12.40	17.59	0.161	0.43	20.92
29	12.09	14.35	0.105	0.42	19.93
495	11.11	15.99	0.118	0.42	18.81

0.309, 13.888, 17.241)。

生长性状和木芯基本密度的综合指数方程为 $I = 1.333x_1 + 0.074x_2 + 5.152x_3 + 5.262x_4$, 综合育种值选择进展为 2.85, 指数估计的准确度为 0.92, 指数遗传力为 0.80, 树高、胸径、材积和木芯基本密度等性状的遗传进展分别为 1.234、2.416、0.054 和 0.034。根据选择指数方程计算各家系指数值, 并进行排序, 指数值由高到低的家系依次为 166、169、

225、317、55、386、对照、389、491、104、96、481、29 和 495。

综合分析选出排在前 2 位的 166 和 169 为优良家系, 树高、胸径、材积和木芯基本密度的遗传增益分别为 14.27%、19.96%、48.12% 和 14.06%。优良家系树高 (13.99 m) 比对照 (13.05 m) 高 7.20%, 胸径 (20.43 cm) 比对照 (18.03 cm) 高 13.31%, 材积 (0.234 m³) 比对照 (0.169 m³) 高 38.46%, 木芯基本密度 (0.44 g/cm³) 比对照 (0.42 g/cm³) 高 4.76%。

2.5 生长性状与解析木材性的联合选择

为了更直观地了解不同性状间差异, 以及对解析木与木芯取样选择优良家系的效果进行对比, 利用选择指数进行家系生长与解析木材性指标的多性状联合选择。根据方差分析结果, 对达到差异显著水平的 14 个性状构建选择指数方程, 树高 x_1 、胸径 x_2 、材积 x_3 、纤维角 x_4 、晚材率 x_5 、气干密度 x_6 、解析木基本密度 x_7 、体积干缩率 x_8 、径面抗劈力 x_9 、弦面抗劈力 x_{10} 、抗弯弹性模量 x_{11} 、径面顺纹抗剪强度 x_{12} 、端面硬度 x_{13} 和弦面硬度 x_{14} , 各性状经济权重向量 $W = (0.656, 0.350, 16.667, -0.943, 0.180, 18.868, 17.825, -0.566, 0.353, 0.376, 0.001, 0.328, 0.001, 0.002)$ 。为了消减指数方程中性状的

负向影响,采用 Kempthorne 等^[23]约束指数法,将纤维角、体积干缩率的遗传进展约束为零,以使其他性状获得最大增益。

约束和无约束选择指数方程及性状育种值选择进展(表5)显示:方程 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_{10} 、 I_{11} 、 I_{13} 综合育种值选择进展虽然较高,但指数遗传力为负值;方程 I_5 综合育种值选择进展虽然较高,但是指数遗传力较低,仅为0.22,且抗弯弹性模量、径面顺纹抗剪强度和弦面硬度偏回归系数为负值,根据方程 I_5 计算的家系指数值进行优良家系的选择是不合理的;方程 I_6 、 I_7 、 I_8 、 I_9 、 I_{14} 、 I_{15} 综合育种值选择进展虽然较高,综合育种值估计准确度和指数遗传力也比较高,但是生长性状、晚材率、基本密度或者力学强度等性状的偏回归系数为负值,纤维角或体积干缩率等性

状的偏回归系数为正值,因此方程不理想。由材积、解析木基本密度、体积干缩率、径面抗劈力、抗弯弹性模量、径面顺纹抗剪强度和弦面硬度等7个指标构建的约束选择指数方程 I_{16} 综合育种值选择进展为2.54,生长性状、基本密度、力学强度等性状的偏回归系数为正值,体积干缩率偏回归系数为负值,方程的综合育种值估计准确度为0.84,指数遗传力为0.77,且各性状的遗传进展均为正向,因此方程最理想,进行建筑材优良家系选择的效果最佳。根据指数方程 I_{16} 计算各家系指数值,并进行排序(表6),各家系指数值由高到低依次为166、169、225、317、386、55、389、对照、96、104、491、481、29、495。前2名家系与木芯选择的结果一致。

表5 性状配合的约束和无约束选择指数方程及性状育种值选择进展

Tab. 5 Restricted and unrestricted selection index equations and the selection progress of trait breeding values involving traits

处理	性状配合及选择指数方程	综合育种值 选择进展	综合育种值 估计准确度	指数 遗传力
无约束	$I_1 = -13.415 2x_1 + 6.839 6x_2 - 42.167 1x_3 - 0.198 5x_4 - 3.657 9x_5 - 479.265 2x_6 + 1 153.028 3x_7 - 6.558 2x_8 - 3.144 2x_9 + 16.770 9x_{10} - 0.000 3x_{11} - 12.418 1x_{12} - 0.001 3x_{13} - 0.075 0x_{14}$	10.31	1.55	-10.51
	$I_2 = -33.936 9x_3 + 0.401 2x_4 - 1.593 0x_5 - 28.151 5x_6 + 329.888 4x_7 - 5.462 7x_8 + 0.228 8x_9 + 6.224 9x_{10} + 0.000 3x_{11} - 4.425 2x_{12} - 0.008 4x_{13} - 0.020 3x_{14}$	6.06	1.06	-4.10
	$I_3 = -16.347 4x_3 + 0.521 0x_4 - 1.398 7x_5 + 221.692 8x_7 - 2.743 6x_8 + 3.821 3x_{10} + 0.000 2x_{11} - 3.233 0x_{12} - 0.018 4x_{14}$	4.21	1.05	-3.97
	$I_4 = -48.466 3x_3 + 1.111 9x_4 - 0.900 9x_5 + 191.394 1x_7 - 1.271 4x_8 + 1.352 9x_9 - 1.757 3x_{12} - 0.007 5x_{14}$	2.65	0.81	-3.75
	$I_5 = 50.291 0x_3 + 53.884 7x_7 - 1.269 0x_8 + 1.857 3x_{10} - 0.001 8x_{11} - 0.873 0x_{12} - 0.005 3x_{14}$	3.15	1.02	0.22
	$I_6 = 36.790 3x_3 + 0.020 1x_5 + 7.684 7x_7 + 0.303 5x_8 + 0.809 5x_{10} - 0.000 4x_{11} + 0.126 1x_{12}$	3.08	0.98	0.98
	$I_7 = 22.931 0x_3 + 20.226 8x_7 - 0.411 9x_8 + 0.377 4x_9 + 0.000 3x_{11} + 0.080 4x_{12} - 0.000 8x_{14}$	2.61	0.86	0.91
	$I_8 = 29.807 8x_3 + 1.651 9x_7 + 0.076 5x_8 + 0.408 8x_9 + 0.000 2x_{11} + 0.332 8x_{12}$	2.69	0.94	0.91
	$I_9 = 38.141 3x_3 + 2.546 3x_7 + 0.067 9x_8 + 0.734 5x_{10} - 0.000 4x_{11} + 0.190 7x_{12}$	2.74	0.98	0.96
约束	$I_{10} = -16.125 0x_1 + 10.571 0x_2 - 64.286 5x_3 - 0.127 1x_4 - 3.125 5x_5 - 920.491 9x_6 + 1 358.050 1x_7 - 0.162 5x_8 - 5.668 2x_9 + 15.218 7x_{10} + 0.000 1x_{11} - 11.030 9x_{12} + 0.022 6x_{13} - 0.081 5x_{14}$	9.06	1.36	-12.13
	$I_{11} = -42.598 7x_3 + 1.516 1x_4 - 1.079 2x_5 - 294.702 4x_6 + 388.520 0x_7 + 0.152 7x_8 + 0.289 0x_9 + 1.753 9x_{10} + 0.000 9x_{11} - 1.705 3x_{12} + 0.001 6x_{13} - 0.006 8x_{14}$	3.14	0.55	-1.85
	$I_{12} = -39.422 8x_3 + 1.405 2x_4 - 0.739 7x_5 + 51.921 2x_7 + 0.212 1x_8 + 0.338 0x_{10} + 0.001 5x_{11} - 0.243 8x_{12} + 0.000 6x_{14}$	1.02	0.25	-2.66
	$I_{13} = 225.467 7x_3 - 9.935 2x_4 + 2.812 5x_5 - 461.051 4x_7 + 5.902 6x_8 - 1.583 9x_9 + 5.461 5x_{12} + 0.017 3x_{14}$	4.65	1.42	-11.25
	$I_{14} = 39.015 1x_3 + 11.285 6x_7 - 0.735 2x_8 + 0.991 6x_{10} - 0.000 9x_{11} - 0.132 8x_{12} - 0.000 2x_{14}$	2.77	0.89	0.68
	$I_{15} = 24.034 9x_3 - 0.219 4x_5 + 13.272 8x_7 - 0.208 3x_8 + 0.727 9x_{10} - 0.000 1x_{11} + 0.072 9x_{12}$	2.56	0.82	0.86
	$I_{16} = 24.523 3x_3 + 7.885 1x_7 - 0.443 0x_8 + 0.356 7x_9 + 0.000 2x_{11} + 0.179 0x_{12} + 0.000 3x_{14}$	2.54	0.84	0.77
	$I_{17} = 30.500 6x_3 - 2.300 6x_7 - 0.340 7x_8 + 0.436 8x_9 + 0.000 1x_{11} + 0.321 8x_{12}$	2.54	0.88	0.80
	$I_{18} = 37.544 8x_3 - 1.892 8x_7 - 0.507 9x_8 + 0.674 4x_{10} - 0.000 5x_{11} + 0.207 8x_{12}$	2.46	0.88	0.80

表6 家系生长、力学性状均值和选择指数值

Tab. 6 Family growth traits, physical mechanical averages and selection index values

家系	材积/ m ³	基本密度/ (g·cm ⁻³)	体积干 缩率/%	径面抗劈力/ (N·mm ⁻¹)	抗弯弹性 模量/MPa	径面顺纹抗剪 强度/MPa	弦面硬 度/N	选择指数 I
166	0.215	0.61	8.60	14.47	9 177	12.97	2 273	16.27
169	0.282	0.56	9.26	12.55	10 099	10.78	1 753	16.18
225	0.199	0.50	7.87	16.57	8 318	11.94	1 599	15.53
317	0.159	0.59	9.38	14.55	10 191	14.55	2 323	14.93
386	0.190	0.55	9.26	14.43	8 692	15.14	1 083	14.81
55	0.217	0.53	9.10	13.06	8 781	10.75	1 668	14.31
389	0.134	0.58	9.47	14.42	9 599	12.53	1 491	13.42
对照	0.163	0.57	10.30	13.18	9 016	13.96	1 386	13.35
96	0.145	0.52	8.55	13.03	8 539	11.40	1 879	12.83
104	0.121	0.55	8.33	13.13	7 104	14.25	1 614	12.75
491	0.129	0.49	7.69	11.40	7 819	11.45	1 821	11.85
481	0.168	0.53	12.18	12.27	7 949	11.76	1 564	11.44
29	0.100	0.48	8.48	13.46	7 632	9.56	1 504	10.97
495	0.090	0.49	7.76	11.30	7 828	11.88	1 886	10.92

排在前2位的家系材积平均值(0.249 m³)比对照(0.163 m³)高52.76%,基本密度(0.59 g/cm³)比对照(0.57 g/cm³)高3.51%,体积干缩率(8.93%)比对照(10.30%)小13.30%。径面抗劈力(13.51 N/mm)比对照(13.18 N/mm)高2.50%。抗弯弹性模量(9 638 MPa)比对照(9 016 MPa)高6.90%。弦面硬度(2 013 N)比对照(1 386 N)高45.24%。

3 结论与讨论

本研究相关分析结果表明,生长性状与木芯基本密度、解析木基本密度、气干密度间呈正相关不显著,木材密度与生长性状可以进行独立选择。孙晓梅等^[24]和邓继峰等^[25]分别对日本落叶松(*Larix kaempferi*)、杂种落叶松研究表明,木材基本密度与生长性状存在微弱负相关。生长性状与大多数力学性状指标相关不显著。

基本密度与多数物理力学性状呈显著正相关。国内外学者对西伯利亚落叶松(*L. sibirica*)、日本落叶松、欧洲落叶松(*L. decidua*)、杉木、红橡(*Quercus rubra*)和白橡(*Q. alba*)等主要用材树种的材性指标间的相互关系进行了大量研究^[26-30]。木材密度与力学性状具有密切的关系,通过测定其密度来实现木材力学性质的早期预测和改良具有重要意义^[31-34]。夏炎等^[20]对I-69杨(*Populus deltoides* cv. I-69)分析研究认为,木材弹性模量、静曲强度、抗压强度与其密度存在着显著的正相关关系,并得出其相关性的模型。段喜华等^[35]对长白落叶松种源试验林和54年生人工林研究得出,胸高样品值与树干平均值在基本密度和管胞长度两性状上都存在很强的相关性,利用胸高样品值可以较好地估测树干平均值,直接用于株间的相对比较。本文对24年生长白落叶松优树子代测定林研究认为:木芯基本密

度不仅与解析木基本密度、气干密度呈极显著正相关关系,与多数物理力学性状也呈极显著或显著正相关;而且木芯基本密度与解析木基本密度、气干密度、径面抗劈力、抗弯弹性模量、抗弯强度、顺纹抗压强度和径面硬度建立的预测模型较为理想,可以通过胸径木芯基本密度值预测解析木基本密度、气干密度以及力学强度值,间接选择建筑材优良家系。

育种选择往往是多性状的,选择指数是生长、形质和材质多性状优良家系联合选择较为简便的理想方法。国内外学者都借助选择指数筛选出一批生长和材质兼优的种源、家系和个体^[10 24-25 36-37]。本研究分析认为,利用选择指数进行生长和材质多性状联合选择时,构建选择指数方程所考虑的性状不应过多,这与周志春等^[38]观点一致。以建筑材为选育目标,根据落叶松的特点,综合考虑性状的家系遗传力和性状间相关关系,选择具有代表性的生长和物理力学主要性状指标构建综合指数方程来提高选择效率,通过约束指数方程来提高选择的准确性。由材积、解析木基本密度、体积干缩率、径面抗劈力、抗弯弹性模量、径面顺纹抗剪强度和弦面硬度等7个主要性状构建的约束选择指数方程 I_{16} 最理想。选出材积生长量大、基本密度高、体积干缩率小和力学强度高的建筑材优良家系是166和169。由于只有差异显著的性状才能纳入综合指数方程,一些重要性状可能会被忽略,再加上权重的赋予与遗传力有关,而与性状的重要性无关,这也影响了方程的准确性,因此,开发更理想的分析方法非常重要。

基于木芯基本密度与生长性状联合选出的建筑材优良家系是166和169,根据解析木物理力学性状选出的优良家系与其结果一致。树高、胸径、材积和木芯基本密度的遗传增益分别为14.27%、19.96%、48.12%和14.06%,优良家系树高、胸径、材积和木芯基本密度分别比对照高7.20%、

13.31%、38.46%和4.76%。对24年生白落叶松自由授粉子代测定林生长性状与建筑材材质指标进行评价,为初级无性系种子园疏伐与升级改造提供理论依据,为杂交育种亲本选择以及高世代种子园优树选择打下了良好基础。

参 考 文 献

- [1] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [2] 童再康, 俞友明, 郑勇平. 黑杨派新无性系木材物理力学性质研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(4): 450-456.
- [3] 刘昭息, 徐有明, 孙海菁, 等. 火炬松建筑材优良种源综合评定的研究[J]. 林业科学研究, 1998, 11(4): 417-423.
- [4] 孙成志, 谢国恩, 李萍. 杉木地理种源材性变异及建筑材优良种源评估[J]. 林业科学, 1993, 29(5): 429-437.
- [5] 赵荣军, 杨培华, 谢斌, 等. 油松半同胞子代及亲本木材构造与物理力学性质的研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(2): 24-28.
- [6] 徐有明, 刘清平, 刘昭息, 等. 火炬松种源顺纹抗压强度的变异与木材密度的关系[J]. 华中农业大学学报, 1995, 14(3): 285-290.
- [7] 叶志宏, 张敬源. 杉木木材材性的遗传和变异研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1987, 3(1): 1-11.
- [8] 周志春, 王章荣, 陈天华, 等. 马尾松木材性状株内变异与木材取样方法的探讨[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1988, 4(4): 52-60.
- [9] 成俊卿, 李源哲, 孙成志. 人工林及天然林白落叶松木材材性比较试验研究[J]. 林业科学, 1962, 7(1): 18-27.
- [10] 张含国, 张殿福, 李希才, 等. 长白落叶松自由授粉家系生长和材性遗传变异及性状相关的研究[J]. 林业科技, 1995, 20(6): 1-5.
- [11] 张含国, 周显昌, 田松岩, 等. 长白落叶松生长和材质性状地理变异的研究[J]. 林业科技, 1996, 21(5): 5-8.
- [12] 刘一星, 杨书文, 杨传平, 等. 长白落叶松木材性质的地理变异与优良种源选择的研究[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(增刊2): 54-61.
- [13] SMITH D M. A comparison of two methods for determining the specific gravity of small wood samples of second-growth Douglas-fir [R]. Madison: U. S. Dept of Agriculture, Forest Service, 1955.
- [14] 中国标准化出版社第一编辑室. 中国林业标准汇编: 木材与木制品卷[G]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [15] 唐启义, 冯明光. DPS数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [16] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [17] 肖绍琼, 叶喜, 唐开军, 等. 云南杉木物理力学性质的研究[J]. 西南林学院学报, 1987, 7(1): 74-87.
- [18] 杨家驹, 卢鸿俊. 木材密度力学性质及其换算关系[J]. 木材工业, 1997, 11(1): 35-37.
- [19] 虞华强, 费本华, 任海青, 等. 毛竹顺纹抗拉性质的变异及与气干密度的关系[J]. 林业科学, 2006, 42(3): 72-76.
- [20] 夏炎, 岳孔, 张伟, 等. 1-69速生杨木密度变异特性及其与力学强度的关系[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(10): 5-6.
- [21] 刘一星. 木材资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003.
- [22] 沈熙环. 种子园技术[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992.
- [23] KEMPTHORNE O, NORDSKOG A W. Restricted selection indices [J]. *Biometrics*, 1959, 15(1): 10-19.
- [24] 孙晓梅, 张守攻, 李时元, 等. 日本落叶松纸浆材优良家系多性状联合选择[J]. 林业科学, 2005, 41(4): 48-54.
- [25] 邓继峰, 张含国, 张磊, 等. 杂种落叶松 F₂ 代自由授粉家系纸浆材遗传变异及多性状联合选择[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 31-39.
- [26] KOIZUMI A, TAKATA K, YAMASHITA K, et al. Anatomical characteristics and mechanical properties of *Larix sibirica* grown in south-central Siberia [J]. *IAWA Journal* 2003, 24(4): 355-370.
- [27] KOIZUMI A, KITAGAWA M, HIRAI T. Effects of growth ring parameters on mechanical properties of Japanese larch (*Larix kaempferi*) from various provenances [J]. *Eurasian Journal of Forest Research* 2005, 8(2): 85-90.
- [28] MULLER U, SRETENOVIC A, GINDL W A, et al. Longitudinal shear properties of European larch wood related to cell-wall structure [J]. *Wood and Fibre Science* 2004, 36(2): 143-151.
- [29] 骆秀琴, 管宁, 张寿槐, 等. 杉木材性株内变异的研究[J]. 林业科学, 1997, 33(4): 349-355.
- [30] 吴燕, 周定国, 王思群, 等. 木材微纤丝角和密度与弹性模量的关系[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, 33(4): 113-116.
- [31] 刘晓丽, 王喜明, 姜笑梅, 等. 沙棘材解剖及物理力学性质的研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(2): 84-89.
- [32] 赵荣军, 冯德君, 雷亚芳. 油松半同胞子代及亲本木材生长轮宽度与密度的研究[J]. 西北林学院学报, 2000, 15(3): 16-19.
- [33] 吕建雄, 骆秀琴, 蒋佳荔, 等. 红锥和西南桦人工林木材力学性质的研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 118-122.
- [34] 骆秀琴, 姜笑梅, 殷亚方, 等. 人工林马尾松木材性质的变异[J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 28-33.
- [35] 段喜华, 张含国, 潘本立, 等. 长白落叶松木材材性株内变异[J]. 东北林业大学学报, 1997, 25(2): 33-36.
- [36] CHRISTOPHE C, BIROT Y. Genetic structures and expected genetic gains from multitrait selection in wild population of Douglas fir (II): Practical application of index selection on several population [J]. *Silvae Genetica*, 1983, 32(5-6): 173-181.
- [37] IVEBGEN R J, LOWE W J. The efficiency of early and indirect selection in three sycamore genetic traits [J]. *Silvae Genetica*, 1985, 34(2-3): 72-75.
- [38] 周志春, 金国庆, 周世水. 马尾松自由授粉家系生长和材质的遗传分析及联合选择[J]. 林业科学研究, 1994, 7(3): 264-268.

(责任编辑 董晓燕)