

# 湿地松活立木弹性模量无损评估技术研究

张帅楠<sup>1</sup>, 姜景民<sup>1</sup>, 徐永勤<sup>2</sup>, 栾启福<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江省林木育种技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311400;

2. 浙江省杭州市余杭区长乐林场, 浙江 杭州 311123)

**摘要:** [目的] 开发操作简便、破坏性小且结果可靠的弹性模量无损评估技术, 为实现以大群体试验材料为基础的遗传选择和评估, 培育速生优质林木良种奠定基础。[方法] 以 22 年生湿地松自由授粉家系测定林为研究对象, 采用力学阻力仪 (Pilodyn) 和应力波速 (V) 记录仪 (AV) 等活立木无损评估仪器和方法以及木材物理力学常规检测方法, 建立活立木弹性模量评估技术体系。[结果] Pilodyn 测定值  $Pr$  与实测基本密度 ( $\rho$ ) 间呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ); 弹性模量测定值  $MOE_B$  与弹性模量 (计算值)  $MOE$  ( $MOE = \rho V^2$ ) 之间呈极显著线性相关关系, 其线性回归模型为  $MOE_B = 2.0133 + 0.8286 MOE$ , 决定系数  $R^2 = 0.8541$ ; 利用  $\rho$  和  $V$  计算的弹性模量值  $MOE$  与利用  $Pr$  和  $V$  计算的弹性模量相对值  $MOE_p$  ( $MOE_p = PrV^2$ ) 间呈极显著正相关关系 ( $P < 0.001$ ), 回归模型为  $MOE = 0.4007 + 0.2311 MOE_p$ , 决定系数  $R^2 = 0.7340$ ; 弹性模量  $MOE$  与  $V$  值相关极显著 ( $P < 0.001$ ),  $V$  与  $MOE$  的回归方程为  $MOE = -5.1218 + 3.2394 V$ , 决定系数  $R^2 = 0.9219$ 。[结论] 在遗传选择时弹性模量 (计算值) 完全可以代表弹性模量测定值进行评估与选育; 可直接利用  $MOE_p$  作为各样木的弹性模量值参与遗传分析; 同时建立了  $MOE$  与  $V$  值之间的回归方程, 在比较同一测定群体弹性模量值相对大小时也可直接比较  $V$  值, 大大减少了工作量。建立的模型对其它树种测定具有参考意义, 但尚需检验。

**关键词:** 湿地松; 活立木; 弹性模量; 无损评估

中图分类号: S791.246

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)01-0075-06

## Study on the Modulus of Elasticity Non-destructive Evaluation Technique of Slash Pine Standing Tree

ZHANG Shuai-nan<sup>1</sup>, JIANG Jing-min<sup>1</sup>, XU Yong-qin<sup>2</sup>, LUAN Qi-fu<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. Changle Forestry Farm of Yuhang District, Hangzhou, Hangzhou 311123, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] To develop the non-destructive evaluation technique of modulus of elasticity (MOE) for realizing the genetic selection and evaluation of forest tree with the traits of fast growing and high quality based on a large population of test materials. [Method] The evaluation systems of MOE of standing tree were established by non-destructive evaluation technique, Pilodyn and acoustic velocity (AV), and conventional testing methods based on the open pollinated family of 22-year-old slash pine (*Pinus elliottii*). [Result] The Pilodyn value ( $Pr$ ) and the basic density ( $\rho$ ) showed a significant negative correlation ( $P < 0.01$ ). The measurement value of MOE ( $MOE_B$ ), determined by conventional methods, had a very significant linear correlation with the MOE value calculated by the formula  $MOE = \rho V^2$ . The regression model was  $MOE_B = 2.0133 + 0.8286 MOE$  (Coefficient of determination  $R^2 = 0.8541$ ). A significant positive correlation ( $P < 0.001$ ) was observed between MOE and  $MOE_p$ , the relative value

收稿日期: 2016-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570668); “十二·五”国家林业科技支撑计划专题(2012BAD01B0203); 国家林业局“948”引进项目(2012-4-46)

作者简介: 张帅楠(1993—), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事林木遗传育种研究。

\* 通讯作者: 栾启福, 副研究员, 博士, 从事林木遗传育种研究. E-mail: qifu.luan@caf.ac.cn

of  $MOE$ , ( $MOE_p = PrV^2$ ) ( $V$  means the value of  $AV$ ), and the linear regression model was  $MOE = 0.4007 + 0.2311 MOE_p$  (coefficient of determination  $R^2 = 0.7340$ ). The positive correlation between  $MOE$  and  $V$  was extremely significant ( $P < 0.001$ ) and the linear regression model between  $MOE$  and  $V$  was  $MOE = -5.1218 + 3.2394 V$  (coefficient of determination  $R^2 = 0.9219$ ). [ **Conclusion** ] The modulus of elasticity calculated by  $MOE = \rho V^2$  can represent the determination values of  $MOE$ . The  $MOE_p$  can be used directly as the  $MOE$  value for each sample tree to participate in genetic analysis. It is feasible to compare only the  $V$  when evaluating the relative value of  $MOE$  of the sample trees in the same population. Therefore, these linear models are also useful for other tree species.

**Keywords:** slash pine; standing tree; modulus of elasticity; non-destructive evaluation

为培育速生优质林木良种,需要大规模对遗传测定群体活立木材性等重要品质性状开展无损评估。其中,弹性模量( $MOE$ )是林木建筑用材最重要的力学性质,能够反映木材的韧性和抵抗变形的能力,木材的弹性模量越大,在承受荷载时其变形越小<sup>[1-2]</sup>。目前,已成功应用于活立木弹性模量无损评估的是基于应力波速法的  $AV$  技术,它通过测量应力波在开始探头和结束探头之间的传播时间来测得  $AV$  值(波速  $V$ ),该数值与立木强度具有显著的相关性,可以作为活立木强度的检测工具<sup>[3-5]</sup>。Ross 等<sup>[6]</sup>采用应力波检测方法得出木材的弹性模量( $MOE$ )、木材密度( $\rho$ )和应力波速度的关系式: $MOE = \rho V^2$ ,这为应力波速技术在木材弹性模量无损检测提供了研究基础<sup>[7-9]</sup>。活立木木材基本密度( $\rho$ )测定的常规方法是用生长锥在其胸径处取木芯,然后利用饱和含水量法进行测定<sup>[10]</sup>,虽然该方法获得的数据直观、可靠,但是成本高、耗时长、具破坏性。Pilodyn 是应用最为普遍的一种基于阻力的活立木密度无损快速检测仪器<sup>[11-12]</sup>,有效地克服了传统检测方法的缺点,在活立木木材密度评估中已有一定的进展<sup>[13-17]</sup>。在实现了应力波速( $V$ )和基本密度( $\rho$ )无损评估的基础上,Chen 等<sup>[5, 18]</sup>综合利用了 Pilodyn 和  $AV$  技术,以 Pilodyn 探测值估测的木材外部密度作为木材基本密度,对挪威云杉(*Picea abies* (L.) H. Karst.)大群体  $MOE$  和基本密度( $\rho$ )进行了估测,首次实现了数千株大群体活立木材性性状的遗传变异分析。

湿地松(*Pinus elliottii* Engelman var. *elliottii*)原产于美国东南部,现已成为我国南方重要的用材树种<sup>[19-21]</sup>。经过数十年的育种工作,湿地松生长性状获得较大的改良<sup>[22-24]</sup>,以弹性模量为代表的力学性状由于受测定技术影响改良进程缓慢<sup>[25-28]</sup>。因此,开发操作简单方便、破坏性小且结果可靠的弹性

模量无损评估技术,实现以大群体试验材料为基础的遗传选择和评估,对提高遗传测定的精度与效率、促进遗传改良进程具有重大现实意义。本研究采用力学阻力仪(Pilodyn)和应力波速记录仪( $AV$ )等活立木无损评估仪器和方法以及木材物理力学常规检测方法,初步建立湿地松活立木弹性模量评估技术体系,为湿地松弹性模量等材性性状遗传改良奠定基础,同时对其它树种材性测定具有参考意义。

## 1 试验林概况

试验地位于浙江省杭州市余杭区长乐林场( $30^{\circ}27' N, 119^{\circ}48' E$ ),亚热带湿润季风性气候,年均降水量 1 399 mm,年均气温  $16.1^{\circ}C$ ,属低山缓坡,土壤以红壤为主。

试验林为湿地松子代测定林,营建于 1994 年春季,含 33 个半同胞家系,采取单行 6 株小区、6 个重复的随机完全区组设计。

## 2 研究方法

### 2.1 材性性状指标测定方法

2.1.1 Pilodyn 测定 2015 年 12 月对上述 33 个湿地松半同胞家系进行取样测定,随机选取 6 个重复中的 3 个重复,其中,每个小区选取 1 株平均木作为样木,总计 99 个单株,进行 Pilodyn (6J, PROCEQ, Switzerland)单株测定<sup>[5, 29]</sup>。在样木胸高南、北向分别测定 2 次(若 2 次探测值差值大于 2 mm,则进行第 3 次探测,选择 3 次探测差异最小的 2 个值作为有效探测值),取 2 次测定的平均值作为南向的 Pilodyn 值( $P_s$ )和北向的 Pilodyn 值( $P_n$ ),并取南、北向的平均值作为 Pilodyn 测定值( $P_r$ )。

2.1.2 基本密度生长锥测定 Pilodyn 测定后,用内径为 5 mm 的生长锥在样木胸高处南北向钻取木芯(木芯穿透样木)。基本密度( $\rho$ )采用饱和含水量

法测定<sup>[10]</sup>,其计算公式如下:

$$\rho = \frac{1}{\frac{G_{mw}}{G_h} - 0.3464} \quad (1)$$

式(1)中: $\rho$ 为基本密度( $g \cdot cm^{-3}$ ); $G_{mw}$ 为饱和含水率时试样的质量( $g$ ); $G_h$ 为绝干时试样的质量( $g$ )。

2.1.3 应力波速  $V$  测定 利用活立木 AV 值测量专用工具 Hitman ST300 (Fibre-gen, Christchurch, New Zealand) 对选择的样木进行测量, 获得 AV 值 ( $V$ )<sup>[30]</sup>。分别将传输探头 (Transmit Probe, Tx) 和接收探头 (Rx) 以  $45^\circ$  角敲进样木树干 (探头敲进树干深度一般大于 10 mm, 以确保探头能够达到样木边材且保持探头稳定, 同时要求传输装置和接受装置位于树干同一垂直方向且保持水平), 其中, Tx 和 Rx 之间间隔 100 cm 左右。每有效敲击 Tx 8 次, 数据记录器 (PDA) 就会自动得出本轮 8 次敲击的平均波速  $V_1$ , 为提高测定精度, 需敲击 2~3 轮, PDA 则会自动计算并保存该 2~3 轮敲击所得波速 ( $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ ) 的平均值  $V$ , 即为该样木的 AV 值。

#### 2.1.4 弹性模量评估

2.1.4.1 无损评估 根据生长锥法和 AV 技术得出的测定值  $\rho$  和  $V$ , 应用公式  $MOE = \rho V^2$  计算出各样木的弹性模量 (即弹性模量计算值, 本文中以  $MOE$  表示); 根据 Pilodyn 法和 AV 技术得出的测定值  $Pr$  和  $V$ , 以  $Pr$  代替  $\rho$ , 应用上述公式计算出各样木的弹性模量相对值  $MOE_p$  ( $MOE_p = PrV^2$ )。

2.1.4.2 常规测定 在 99 株样木中随机选取 30 株样木依据国家标准《GB/T 1929-2009 木材物理力学试材锯解及试样截取方法》进行破坏性取样, 并委托浙江省林科院质检站按照国家标准《GB/T 1936.

2-2009 木材抗弯弹性模量测定方法》测定其抗弯弹性模量 (即弹性模量测定值, 本文中以  $MOE_B$  表示)。

### 2.2 统计分析方法

数据分析在 R 软件 (v 3.1.3, CRAN, <http://cran.r-project.org>) 上进行。

(1) 各指标间的相关性分析利用 R 软件中的 `corr.test()` 函数计算 Pearson 相关系数  $r$  并进行显著性检验。

(2)  $MOE_B$  和  $MOE$ 、 $MOE$  和  $MOE_p$  以及  $MOE$  和  $V$  之间的回归分析均基于普通最小二乘法 (OLS), 利用 R 软件中的 `lm()` 函数拟合其简单线性回归模型:

$$MOE_B = b_1 + k_1 MOE \quad (2)$$

$$MOE = b_2 + k_2 MOE_p \quad (3)$$

$$MOE = b_3 + k_3 V \quad (4)$$

式(2)~(4)中: $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  代表回归常数, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  代表回归系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 各测定指标的基本情况

99 个湿地松单株材性性状各测定指标的基本情况见表 1。湿地松木材基本密度和弹性模量分别为  $0.5020 g \cdot cm^{-3}$ 、 $4.4956 GPa$ , 其中,  $MOE_p$  极差与方差均较大, 说明弹性模量值变异丰富, 这可能是由于  $MOE_p$  计算时因子  $Pr$  与  $V^2$  的乘积引起的  $MOE_p$  值波动较大, 可能会有较好的遗传选择成效。基本密度性状测定指标 ( $\rho$ 、 $Pr$ ) 变异系数较小 ( $CV < 10\%$ ), 弹性模量性状测定指标 ( $MOE$ 、 $MOE_p$ ) 变异系数较大 ( $CV > 20\%$ ), 也说明湿地松弹性模量性状相对于基本密度性状具有更丰富的遗传变异性。

表 1 湿地松基本密度和弹性模量性状各测定指标的基本情况

Table 1 Basic information of determination of wood density and MOE of slash pine

项目 Item	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	标准误 SE	方差 Variance	变异系数 CV/%
基本密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	0.502 0	0.390 0	0.629 4	0.239 4	0.003 9	0.001 4	7.576 6
Pilodyn 测定值 $Pr/cm$	1.987 0	1.625 0	2.380 0	0.755 0	0.017 7	0.029 9	8.708 6
波速 $V/(km \cdot s^{-1})$	2.968 9	2.275 0	4.171 0	1.896 0	0.037 5	0.135 3	12.387 8
弹性模量 $MOE/GPa$	4.495 6	2.337 0	8.349 4	6.012 4	0.127 3	1.554 7	27.735 9
弹性模量相对值 $MOE_p$	17.687 5	10.549 8	33.054 8	22.505 0	0.505 6	21.985 0	26.905 3

### 3.2 各测定指标间相关性分析

对湿地松木材基本密度性状测定指标 ( $\rho$ 、 $Pr$ ) 和弹性模量性状测定指标 ( $V$ 、 $MOE$ 、 $MOE_p$ ) 进行相关分析, 结果见表 2。从表 2 中可以看出:  $\rho$  与  $Pr$  呈显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ), 而这二者基本密度性状

测定指标与 3 个弹性模量性状测定指标之间相关关系不显著或显著性低 ( $P < 0.1$ );  $V$  与  $MOE$  及  $MOE_p$  达到极显著的高度正相关 ( $r > 0.90$ ,  $P < 0.001$ )。这说明波速是影响湿地松弹性模量估测的关键因子, 木材密度对弹性模量影响相对较小, 而  $MOE$  与

$MOE_p$  之间也呈极显著高度正相关( $r = 0.85, P < 0.001$ ), 因此, 可以认为  $MOE_p$  也可以对  $MOE$  进行预测和评估。

表2 湿地松基本密度和弹性模量性状各测定指标间相关关系

Table 2 The correlations of determination of wood density and  $MOE$  indexes of slash pine

项目 Item	基本密度 度 $\rho$	Pilodyn 测定 值 $Pr$	波速 $V$	弹性模量 $MOE$	弹性模量相 对值 $MOE_p$
基本密度 $\rho$		-0.35** (0.01)	0.20 (0.25)	0.25* (0.08)	-0.04 (0.73)
Pilodyn 测定 值 $Pr$			-0.11 (0.62)	-0.16 (0.30)	0.19 (0.28)
波速 $V$				0.96*** (0.00)	0.93*** (0.00)
弹性模量 $MOE$					0.85*** (0.00)
弹性模量相对 值 $MOE_p$					

注: 括号中为该相关系数显著性水平; \* 代表显著性水平为 0.1, \*\* 代表显著性水平为 0.01, \*\*\* 代表显著性水平为 0.001。

Note: Significance probability of the correlations were given in parenthesis; \*, \*\*, \*\*\* represent  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$ , respectively.

### 3.3 弹性模量测定值和弹性模量(计算值)的回归方程

湿地松弹性模量测定值与弹性模量(计算值)的线性回归模型为  $MOE_B = 2.0133 + 0.8286MOE$ , 其决定系数  $R^2 = 0.8541$ (图1)。模型中, 回归常数和回归系数都达极显著水平( $P < 0.001$ ), 即  $MOE_B$  与  $MOE$  呈极显著线性相关关系。因此, 利用关系式  $MOE = \rho V^2$  得出的湿地松弹性模量计算值  $MOE$  虽然不能作为其标准值, 却完全可以代表弹性模量测定值进行评估与选育。

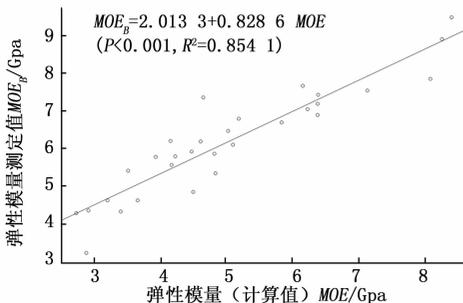


图1 湿地松弹性模量测定值与弹性模量(计算值)的简单线性回归模型

Fig. 1 Simple linear regression model between  $MOE_B$  and  $MOE$

### 3.4 弹性模量(计算值)和弹性模量相对值的回归方程

湿地松弹性模量与弹性模量相对值的线性回归

模型为  $MOE = 0.4007 + 0.2311MOE_p$ , 其决定系数  $R^2$  为 0.7340(图2)。模型中, 回归常数( $P < 0.05$ )和回归系数( $P < 0.001$ )都达显著水平, 这说明该线性模型适合于  $MOE$  与  $MOE_p$  之间的回归分析, 也就是说利用 Pilodyn 法和 AV 技术得出的测定值  $Pr$  和  $V$ , 计算出  $MOE_p$  并应用以上模型即能快速评估弹性模量。

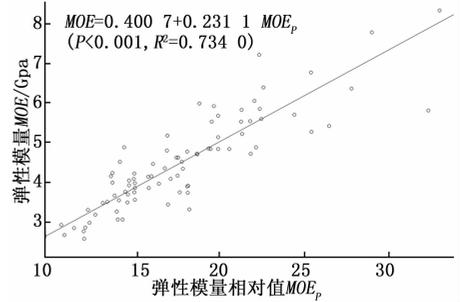


图2 湿地松弹性模量值与弹性模量相对值的简单线性回归模型

Fig. 2 Simple linear regression model between  $MOE$  and  $MOE_p$

### 3.5 弹性模量(计算值)和波速的回归方程

湿地松弹性模量与波速的线性回归模型为  $MOE = -5.1218 + 3.2394V$ , 其决定系数  $R^2$  为 0.9219(图3)。模型中, 回归常数和回归系数也都达极显著水平( $P < 0.001$ ), 该模型的方差解释率为 91.19%, 这说明该线性模型能很好地拟合  $MOE$  与  $V$  之间的线性回归关系, 即仅利用 AV 技术也能实现弹性模量评估。

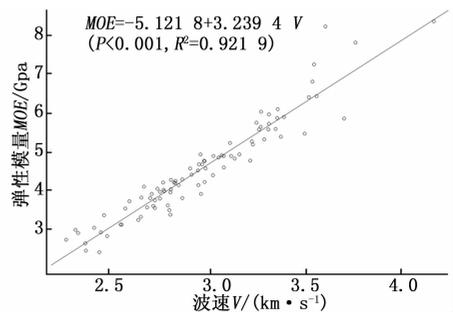


图3 湿地松弹性模量值与波速  $V$  的简单线性回归模型

Fig. 3 Simple linear regression model between  $MOE$  and  $V$

## 4 讨论

弹性模量与树木本身抵抗倒伏能力密切相关<sup>[31]</sup>。湿地松作为当前我国南方最重要的用材、采脂及荒山绿化优良树种, 种植面积超过 200 万  $hm^2$ , 然而, 由于前期研究工作对其抗风雪等力学性质的选择力度不够, 部分地区湿地松遇到异常天气情况出现雪压、风倒等灾害, 成为制约该树种发展的一个

重要方面<sup>[32]</sup>,因此,从树种健康角度考虑,需要继续加强其弹性模量等物理力学性质的评估与选育研究。随着无损评估技术的发展,全林选择测定湿地松弹性模量成为可能。本研究以力学阻力仪(Pilodyn)和应力波速记录仪(AV)等活立木无损评估仪器和方法,初步建立湿地松活立木弹性模量评估技术体系,为湿地松弹性模量等材性性状遗传改良奠定基础,同时对其它树种测定具有参考意义。

自 Ross 等<sup>[6]</sup>研究得出关系式  $MOE = \rho V^2$  以来,基于应力波速法的 AV 技术在雪松(*Cedrus deodara* (Roxb.) G. Don.)<sup>[7]</sup>、欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.)<sup>[8]</sup>、火炬松(*Pinus taeda* L.)<sup>[33]</sup>、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)<sup>[9]</sup>等树种活立木 MOE 评估中的研究应用逐渐成熟,为湿地松大群体活立木弹性模量的快速评估奠定了基础。本研究结果也显示出湿地松弹性模量测定值与弹性模量(计算值)之间存在着极显著的线性相关关系,其线性回归模型为  $MOE_b = 2.0133 + 0.8286MOE$ , 决定系数  $R^2 = 0.8541$ 。可以看出,在湿地松弹性模量评估中,关系式  $MOE = \rho V^2$  不能得出其标准弹性模量值,但这并不能否定该关系式的应用价值,在湿地松无损、快速评估及其遗传改良研究进程中,其仍具有相当大的优势,完全可以代表弹性模量测定值进行评估与选育。

湿地松木材基本密度性状测定指标和弹性模量性状测定指标相关分析结果显示:基本密度  $\rho$  与 Pilodyn 测定值  $Pr$  呈显著负相关关系。直接以  $Pr$  值代替  $\rho$  计算的弹性模量相对值  $MOE_p$  与弹性模量  $MOE$  之间呈极显著的高度正相关关系,回归模型  $MOE = 0.4007 + 0.2311MOE_p$ , 因此,在不要求精确获取各样木弹性模量绝对值时,可直接利用  $MOE_p$  作为各样木的弹性模量值参与遗传分析。以  $Pr$  值代替  $\rho$  计算的弹性模量相对值  $MOE_p$  较之先前弹性模量无损评估研究而言,节省了测定相应木材基本密度的工作量<sup>[8-9]</sup>,具有一定的便利优势,可在现实工作中应用。同时,相关性研究中还发现,基本密度性状测定指标( $\rho$ 、 $Pr$ )与弹性模量性状测定指标( $MOE$ 、 $MOE_p$ )之间相关关系不显著或显著性较低,波速  $V$  与弹性模量  $MOE$  以及弹性模量相对值  $MOE_p$  则均达到极显著高度正相关,说明波速  $V$  是弹性模量间接估测中的关键因子,而木材密度对其影响相对较小。弹性模量  $MOE$  与波速  $V$  之间的线性回归模型  $MOE = -5.1218 + 3.2394V$ , 该模型很好地拟合了

本研究中  $MOE$  与  $V$  之间的线性关系。可能受试验材料影响, Wu 等<sup>[34]</sup>以 22 个 4 年生桉树(*Eucalyptus* spp.)无性系为研究对象,结果认为 Pilodyn 与弹性模量呈显著负相关,而本研究中结果显示,尽管二者之间存在负相关关系,但相关是不显著的,与 Chen 等<sup>[5]</sup>对 5 618 株挪威云杉材性无损测定的结果相同。因此,木材基本密度与弹性模量之间的相关性受试验对象或环境条件影响较大,不同研究对象评估时需要建立对应的评估模型。

一般认为弹性模量由物体基本密度( $\rho$ )和应力波速( $V$ )共同决定,由经验方程  $MOE = \rho V^2$  可以看出  $V$  的影响应该更大,本研究中仅应用  $V$  就能很好地预测弹性模量,可以将公式中  $\rho$  看作是一个常数,这和 Kennedy 等<sup>[9]</sup>的观点一致,为活立木弹性模量的简单快速预测奠定了基础,同时研究中直接用 Pilodyn 测定值  $Pr$  代替  $\rho$  计算的弹性模量估计值  $MOE_p$  也可以作为活立木弹性模量的参考值。

## 5 结论

(1) 湿地松弹性模量测定值  $MOE_b$  与弹性模量(计算值)  $MOE$  之间存在极显著线性相关关系,在遗传选择时  $MOE$  完全可以代表弹性模量测定值进行评估与选育。

(2) 弹性模量相对值  $MOE_p$  与弹性模量  $MOE$  之间呈极显著高度正相关关系,回归模型  $MOE = 0.4007 + 0.2311MOE_p$ , 可直接利用  $MOE_p$  作为各样木的弹性模量值参与遗传分析。

(3) 弹性模量  $MOE$  与波速  $V$  之间的线性回归模型  $MOE = -5.1218 + 3.2394V$ , 在比较同一测定群体弹性模量值相对大小时也可直接比较  $V$  值,大大减少了工作量。

以上建立的模型对其它树种测定具有参考意义,但尚需检验。

## 参考文献:

- [1] Raymond C A, Kube P D, Pinkard L, et al. Evaluation of non-destructive methods of measuring growth stress in *Eucalyptus globulus*: relationships between strain, wood properties and stress[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 190(2): 187-200.
- [2] Lasserre J P, Mason E G, Watt M S. Assessing corewood acoustic velocity and modulus of elasticity with two impact based instruments in 11-year-old trees from a clonal-spacing experiment of *Pinus radiata* D. Don. [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 239(1): 217-221.
- [3] Grabianowski M, Manley B, Walker J C F. Acoustic measurements

- on standing trees, logs and green lumber[J]. *Wood Sci Technol*, 2006, 40(3): 205–216.
- [4] Wessels C B, Malan F S, Rypstra T. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber[J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, 130(6): 881–893.
- [5] Chen Z Q, Karlsson B, Lundqvist S O, *et al.* Estimating solid wood properties using Pilodyn and acoustic velocity on standing trees of Norway spruce[J]. *Annals of Forest Science*, 2015, 72(4): 499–508.
- [6] Ross R J, Pellerin R F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress wave[J]. *Forest Products Journal*, 1988, 38(5): 39–45.
- [7] Nanami N, Nakamura N, Arima T, *et al.* Measuring the properties of standing trees with stress waves, 3; Evaluating the properties of standing trees for some forest stands[J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 1993, 39(8): 903–909.
- [8] Auty D, Achim A. The relationship between standing tree acoustic assessment and timber quality in Scots pine and the practical implications for assessing timber quality from naturally regenerated stands[J]. *Forestry*, 2008, 81(4): 475–487.
- [9] Kennedy S G, Cameron A D, Lee S J. Genetic relationships between wood quality traits and diameter growth of juvenile core wood in Sitka spruce[J]. *Can J For Res*, 2013, 43(1): 1–6.
- [10] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985: 282–464.
- [11] Yanchuk A D, and Kiss G K. Genetic variation in growth and wood specific gravity and its utility in the improvement of interior spruce in British Columbia[J]. *Silvae Genet*, 1993, 42(2–3): 141–148.
- [12] Koch L, Fins L. Genetic variation in wood specific gravity from progeny tests of ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Laws.) in northern Idaho and Western Montana[J]. *Silvae Genet*, 2000, 49(4–5): 174–181.
- [13] Cown D J. Comparison of the Pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees[J]. *N Z J For Sci*, 1978, 8(3): 384–391.
- [14] Taylor F W. Rapid determination of southern pine specific gravity with a Pilodyn tester[J]. *For Sci*, 1981, 27(1): 59–61.
- [15] 朱景乐, 王军辉, 张守攻, 等. 毛白杨材性指标预测及选择[J]. *林业科学*, 2008, 44(7): 23–28.
- [16] 栾启福, 卢萍, 井振华, 等. Pilodyn 评估杂交松活立木的基本密度及其性状相关分析[J]. *江西农业大学学报*, 2011, 33(3): 548–552.
- [17] 易敏, 赖猛, 孙晓梅, 等. 无损检测在日本落叶松材性育种中的应用前景探讨[J]. *林业科学*, 2014, 50(11): 96–103.
- [18] Chen Z Q, Gil M R G, Karlsson B, *et al.* Inheritance of growth and solid wood quality traits in a large Norway spruce population tested at two locations in southern Sweden[J]. *Tree Genetics & Genomes*, 2014, 10(5): 1291–1303.
- [19] 曲桂林, 吴志民. 国外林业技术考察报告选编[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 63–72.
- [20] Wen X, Kuang Y, Shi M, *et al.* Biology of *Hylobitelus xiaoi* (Coleoptera: Curculionidae), a new pest of slash pine, *Pinus elliottii* [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2004, 97(6): 1958–1964.
- [21] Barnett J P, Sheffield R M. Slash pine: characteristics, history, status and trends[C]// Dickens E D, Barnett J P, Hubbard W G, *et al.* Slash pine: still growing and growing! Proceedings of the slash pine symposium, Jekyll Island, Georgia, USA, 23–25 April 2002. Gen. Tech. Rep. SRS–76. Asheville, NC: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 2005: 1–6.
- [22] 潘志刚, 郑勇奇. 湿地松种源试验研究[J]. *林业科学研究*, 1990, 3(4): 314–322.
- [23] White T L, Hodge G R, Powell G L. An advanced-generation tree improvement plan for slash pine in the southeastern United States [J]. *Silvae Genetica*, 1993(42): 359–359.
- [24] 姜景民, 孙海菁, 刘昭息. 湿地松自由授粉家系的早期评定[J]. *林业科学研究*, 1995, 8(5): 574–581.
- [25] Zobel, B J. Inheritance of wood properties in conifers[J]. *Silvae Genet*, 1961, 10(3): 65–96.
- [26] Wei X, Borralho N M G. Genetic control of basic density and bark thickness and their relationships with growth traits of *Eucalyptus urophylla* in south east China[J]. *Silvae Genetica*, 1997, 46(4): 245–250.
- [27] Hansen C P. Application of the Pilodyn in forest tree improvement. DFSC Series of Technical Notes. TN55 [R]// Humlebaek, Denmark: DANIDA Forest Seed Centre, 2000.
- [28] 姜笑梅, 骆秀琴, 殷亚方, 等. 不同湿地松种源木材材性遗传变异的研究[J]. *林业科学*, 2002, 38(3): 130–135.
- [29] 朱景乐, 王军辉, 张守攻, 等. Pilodyn 在林木遗传改良应用中的研究进展[J]. *浙江林学院学报*, 2008, 25(5): 661–665.
- [30] Carter P, Briggs D, Ross R J, *et al.* Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs[R] // Harrington C A, Schoenholtz S H. Productivity of western forests: a forest products focus. General technical report PNW–GTR–642. Portland: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research, 2005: 121–129.
- [31] 许秀玉, 王明怀, 仲崇禄, 等. 不同树种木材性质及其抗台风性能[J]. *浙江农林大学学报*, 2014, 31(5): 751–757.
- [32] 栾启福, 卢萍, 肖复明, 等. 雨雪冰冻重灾区湿地松受害情况调查及其原因初步分析[J]. *林业科学*, 2008, 44(11): 50–54.
- [33] Mora C R, Schimleck L R, Isik F, *et al.* Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(8): 1421–1429.
- [34] Wu S, Xu J, Li G, *et al.* Use of the Pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones[J]. *Journal of Forestry Research*, 2010, 21(1): 68–72.

(责任编辑:金立新)