

刨花楠木材主要解剖性状与材性快速评估指标间的关系

冷春晖, 易敏, 张露, 李响, 程子珊, 谌梦云, 刘思羽, 赖猛*

(江西农业大学, 江西特色林木资源培育与利用 2011 协同创新中心, 江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045)

摘要:为开发准确、快速、低损的木材解剖性状测定方法以简化育种程序, 提高育种效率, 以 17 年生刨花楠人工林为研究对象, 综合利用 Pilodyn、微秒计等材性快速评估仪器以及 SilviScan、L&W Fiber Tester 等木材性质快速测定仪, 研究材性快速评估指标和木材解剖性状之间的相关关系及其内在的影响途径, 初步建立刨花楠木材解剖性状快速评估模型。结果表明: 在 6 个解剖性状中, Pilodyn 测定值(P_r)与纤维壁腔比(R_{CC})($R=-0.803$), 纤维粗度(F_C)($R=-0.453$)和纤维宽度(F_W)($R=0.676$)呈极显著相关关系; 除 F_C 外, 应力波速(v)与其余 5 个解剖性状均呈显著至极显著的相关关系。 R_{CC} 和 F_W 成为对 P_r 影响较大的两个因子, 两者对 P_r 的贡献率达 73.0%, 其中, 以 R_{CC} 的贡献率为主, 达 44.6%; 对 v 影响最大的因子为微纤丝角(M_{FA}), 其贡献率为 27.4%。 P_r 与 R_{CC} 和 F_W 、 v 与 M_{FA} 之间的线性回归方程分别为 $R_{CC}=0.277-0.008 P_r$ ($F=127.816^{**}$, $R^2=0.641$)、 $F_W=18.934+0.590 P_r$ ($F=63.118^{**}$, $R^2=0.467$)、 $M_{FA}=36.544-6.371 v$ ($F=24.286^{**}$, $R^2=0.247$), 3 个模型的预估精度分别为 98.59%, 99.16%, 97.26%, 说明 P_r 能对 R_{CC} 和 F_W 进行较好的预测, v 能对 M_{FA} 进行较好的预测。因此, 采用 Pilodyn 和微秒计等木材材性快速评估仪器可对 R_{CC} 、 F_W 和 M_{FA} 进行快速评估; 建立的模型可为刨花楠人工林木材解剖性状的早期预测提供理论依据, 同时为其他树种材性早期选育提供参考。

关键词:刨花楠; 木材解剖性状; 材性快速评估; 木材性质快速测定

中图分类号: S781

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2096-1359(2019)05-0046-08



Study on the relationship between main wood anatomical traits and wood properties rapid assessment indexes of *Machilus pauhiol*

LENG Chunhui, YI Min, ZHANG Lu, LI Xiang, CHENG Zishan, CHEN Mengyun, LIU Siyu, LAI Meng*

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, 2011 Collaborative Innovation Center of Jiangxi Typical Trees Cultivation and Utilization, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: This research is to systematically analyze the relationship between the rapid assessment indexes of wood properties and wood anatomical traits and its internal influence pathways using a 17-year-old *Machilus pauhiol* plantation tree. Based on Pilodyn, Microsecond timer and the wood property rapid determination apparatus like SilviScan and L&W Fiber Tester, a rapid assessment model for wood anatomical traits of *M. pauhiol* was established. This research could be an important support for developing an accurate, rapid and low-loss method for the determination of wood anatomical traits to simplify the breeding procedures and improve the breeding efficiency. The results showed that among the six wood anatomical traits, the measured values of Pilodyn (P_r) were significantly correlated with the fiber wall cavity ratio (R_{CC}) ($R=-0.803$), the fiber coarseness (F_C) ($R=-0.453$) and the fibre length (F_W) ($R=0.676$). In addition to F_C , the wave velocity (v) was significantly correlated with the other five wood anatomical traits. R_{CC} and F_W were two factors that had a great influence on P_r , and their contribution rate to P_r was 73.0%. Among them, the contribution rate of R_{CC} was 44.6%. The most influential factor on v was the microfibrillar angle (M_{FA}), and whose contribution rate was 27.4%. The linear regression equation between R_{CC} and P_r was $R_{CC}=0.277-$

收稿日期: 2019-01-17

修回日期: 2019-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(31860220); 国家重点研发计划(2017YFD0600502-5); 江西林业科技创新专项(201811); 江西省青年科学基金(20181BAB214015)。

作者简介: 冷春晖, 女, 研究方向为林木遗传育种。通信作者: 赖猛, 男, 讲师。E-mail: laimeng21@163.com

0.008 P_r ($F = 127.816^{**}$, $R^2 = 0.641$), and the equation between F_w and P_r was $F_w = 18.934 + 0.590 P_r$ ($F = 63.118^{**}$, $R^2 = 0.467$). The estimated accuracy of the two models was 98.59% or 99.16%, respectively, which indicated that P_r could be used to predict R_{CC} and F_w . The linear regression equation between M_{FA} and v was $M_{FA} = 36.544 - 6.371v$ ($F = 24.286^{**}$, $R^2 = 0.247$), and the estimated accuracy of the model was 97.26%, indicating that v could be used to predict M_{FA} . Therefore, the wood properties of R_{CC} , F_w and M_{FA} could be rapidly determined using the rapid assessment instruments such as the Pilodyn and Microsecond timer. The model established in this article provided a theoretical basis for the early prediction of wood anatomical traits of *M. pauhiol* plantation tree and also a reference for the early selection and breeding of wood properties of other tree species.

Keywords: *Machilus pauhiol*; wood anatomical traits; wood properties rapid assessment; wood properties rapid determination

刨花楠 (*Machilus pauhiol*) 樟科润楠属, 是我国南方珍贵的用材树种和观赏树种, 主要分布于江西、福建、浙江、广东和广西等地, 为亚热带常绿阔叶乔木^[1-2]。刨花楠生长迅速, 适应性强, 干形圆满通直, 材质优良具胶质, 可加工成熏香原料、造纸原料、家具、胶合板、细木工用材等^[3-4]。近年来, 刨花楠在生长规律、材质改良、物理和力学性状的早期选择及预测等方面已有初步研究, 但对于其木材解剖性状的早期预测研究尚未涉及^[5-6]。开发准确、快速、低损的木材解剖性状测定方法, 对加快刨花楠木材解剖性状选育效率, 简化育种程序具有重要意义。

木材解剖性状在阔叶树材质与速生丰产兼优的育种目标中有着重要的地位, 其中, 微纤丝角、纤维壁腔比、纤维粗度等解剖性状对纸张强度、纤维复合材料性能及纺织品强度均有很大的影响, 并在一定程度上决定着木材密度和弹性模量等物理力学性状^[5,7]。测试木材解剖性状常用的方法主要有: 显微技术法、X射线法及近红外光谱预测法, 这3种方法代表性强、应用广泛、数据精准度高^[8]。但无法在活立木上进行直接测定, 室内实验操作复杂、耗时较长且价格昂贵。目前, 已成功应用于活立木材性检测的快速评估仪器有 Pilodyn 和微秒计, Pilodyn 可间接预测活立木的木材密度, 在桉树 (*Eucalyptus*)、白榆 (*Ulmus pumila*) 和杂交松等树种上已有广泛应用^[9-11]。微秒计可用于检测应力波在树木中的传播速度, 已成功应用于杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、挪威云杉 (*Picea asperata*) 和湿地松 (*Pinus elliottii*) 等树种弹性模量的快速评估^[12-14]。但影响 Pilodyn 测定值和应力波速的不仅是木材密度和弹性模量, 微纤丝角、纤维壁腔比等木材解剖性状与其也存在紧密联系^[15-16]。有研究表明, Pilodyn 测定值与日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 的早材壁腔比、生长轮壁腔比存在极显著的负相关关系^[16]。微纤丝角是影响弹性模量的

重要因素, 随着微纤丝角的增加, 纵向弹性模量将减小, 而应力波速与弹性模量间存在关系式: $MOE = \rho V^2$, 因此, 应用应力波速亦可对木材微纤丝角进行快速评估^[15,17-18]。

笔者基于 Pilodyn、微秒计等材性快速评估仪器以及 SilviScan、L&W Fiber Tester 等木材性质快速测定仪分别获得刨花楠材性快速评估指标和主要解剖性状。研究材性快速评估指标与木材解剖性状间的相关性及其内在的影响途径, 构建相关解剖性状与材性快速评估指标的线性回归方程, 为实现刨花楠人工林解剖性状的早期预测、材质性状的早期选育和木材资源合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验林概况及试验设计

试验地位于江西省安福县谷源山林场 17 年生刨花楠人工林 (27°17'19.5"N, 114°29'51.3"E), 造林采用带状整地, 株行距为 2 m×2 m, 营建于 1999 年春。气候温和、降雨充沛, 为亚热带季风气候。年均气温 17.9 °C, 年均降雨量 1 570 mm, 土壤为红壤, pH 为 5.6。整体坡向属阴坡, 局部小地形坡向分别属阳坡, 试验地处于中下坡位。

2016 年 8 月, 在刨花楠人工林中典型地段选设 6 个 20 m×30 m 的代表性样地, 各样地间距 ≥ 50 m。对每个样地中胸径 ≥ 9 cm 的刨花楠进行每木检尺, 标号、挂牌, 记录其胸径、树高。采用上限排外法进行径阶的划分, 按径阶将各样木进行分组, 根据样木胸径的大小, 以 2 cm 为一径阶 (如胸径 ≥ 9.0~10.9 cm 为 10 径阶, ≥ 11.0~12.9 cm 为 12 径阶, 依次类推)。每径阶各选取 3~4 株接近径阶平均木的样本, 做好标记, 以便后续连续采样分析, 每块样地取 20 株样木, 共 120 株样木。

1.2 材性快速评估指标的测定

对 120 株样木分别进行 Pilodyn 和微秒计检测。Pilodyn 的测定方法是在胸高处分正南和正北

两个方向进行测定,并取南、北向的平均值作为 Pilodyn 测定值(P_r)。具体操作:在活立木胸高处,应用 Pilodyn 进行探测。如果2次探测值的误差在2 mm 以内,则取2次探测值的平均值作为计算数据;如果2次探测值的误差大于2 mm,则需要进行第3次探测,然后在3个数据中选择2个误差在2 mm 以内,且数据最接近的2个探测值的平均数作为计算数据。

采用两通道 Fakopp(FRS-06/00,匈牙利)进行应力波速测定,对每株样木测量5次,取其平均值作为样木的 v 值。具体操作:将微秒计的两个传感器探针沿活立木纵向1 m 的距离分别以45°角钉入样木1.5 m 和0.5 m 处,深度约为10 mm,以确保探头能够达到样木边材且保持稳定,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。随后用专用锤敲击其中一个传感器,记录传播波速,敲击1次即为1次的检测值。

1.3 解剖性状的测定

待材性快速评估指标测定完成后,在活立木胸高1.3 m 处用内径为12 mm 的生长锥,由南面从韧皮部直至髓心取一无疵木芯,在室内利用木材性质快速测定仪(SilviScan)进行解剖性状的测定。测定的指标包括微纤角(M_{FA})、纤维壁腔比(R_{CC})和纤维粗度(F_C)。其中, M_{FA} 的扫描步长为0.1 mm, R_{CC} 和 F_C 的扫描步长为0.025 mm^[19]。

完成 SilviScan 扫描测定后,将木芯样品沿纵向切成火柴梗大小,水煮排气后,用30%的双氧水和冰醋酸按1:1体积比配成的混合溶液在60℃水浴条件下处理24 h,直至试样变白,纤维完全解离。然后用 L&W Fiber Tester 测定样品的纤维长度(F_L)、宽度(F_W)并计算纤维长宽比(F_L/F_W)。其中, F_L 的单位为mm, F_W 的单位为 μm 。该仪器能在短时间内完成数以万计根纤维的测定,本试验设定每个样品测定5万根纤维,共完成120个木芯样品解剖性状的测定。

1.4 数据处理和分析

1) 利用 SPSS 22.0 软件进行各指标的描述性统计分析和各指标间的 Pearson 相关分析,得出相关系数并进行显著性检验。

2) 采用通径分析方法,解释刨花楠各解剖性状对 P_r 和 v 等快速评估指标的内在控制途径。通径分析基于相关系数,应用最小二乘法在 Matlab 软件中进行^[20]。根据通径分析结果得出各解剖性状对材性快速评估指标的贡献率。

设有变量 x_1, x_2, \dots, x_n 与 y ,它们之间存在着线

性关系,其回归方程为:

$$\hat{y}_1 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

应用最小二乘法求方程组,求得性状 x_1, x_2, \dots, x_n 对性状 y 的直接通径系数 p :

$$[p] = [B]^{-1}[A] \quad (2)$$

式中:[A]为各控制性状 x_1, x_2, \dots, x_n 与性状 y 的相关系数向量; [B]为各控制性状间的相关系数矩阵。

$$q_{ij} = r_{ij} \cdot p_j \quad (3)$$

式中: q_{ij} 为 x_i 通过 x_j 对性状 y 的间接通径系数; r_{ij} 为 x_i 与 x_j 的相关系数; p_j 为 x_j 直接通径系数。

3) 采用回归分析方法建立 P_r, v 与相关解剖性状的回归方程。材性快速评估指标与相应解剖性状的回归分析均在 Origin 10.4 中实现,先构建自变量与因变量间的散点图,再进行回归分析拟合线性模型。

4) 对解剖性状与材性快速评估指标建立的模型进行预估精度检验^[21-22]。在每个样地随机选取8组数据,6个典型样地共48组数据作为检验样本,其余72组数据作为拟合样本。模型预估精度检验公式如下:

$$p = \left(1 - \frac{t_\alpha \sqrt{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\hat{y} \sqrt{n(n-T)}} \right) \quad (4)$$

式中: y_i 为实测值; \hat{y}_i 为预估值; n 为样本数; t_α 为置信水平为0.05时 t 的分布值; T 为回归模型中的参数个数; \hat{y} 为预估值的均值。

2 结果与分析

2.1 木材解剖性状和材性快速评估指标及其相关性分析

120个刨花楠单株木材解剖性状($M_{FA}, R_{CC}, F_C, F_L, F_W$ 和 F_L/F_W)及材性快速评估指标(P_r, v)的基本情况见表1。材性快速评估指标 P_r 和 v 的均值分别为14.31 mm 和3.07 km/s,其变异系数分别为11.45%和8.02%。 P_r 的变异系数略高于 v ,说明 P_r 具有更大的选择潜力。整体来看,各材性性状中, $M_{FA}, F_L, F_L/F_W$ 的变异系数均超过15%,说明刨花楠 M_{FA}, F_L 和 F_L/F_W 相对于材性快速评估指标及其他木材解剖性状(R_{CC}, F_C 和 F_W)具有更丰富的变异性。

对刨花楠木材解剖性状及材性快速评估指标进行相关性分析,结果见表2。从表2可以看出,刨花楠木材解剖性状与材性快速评估指标之间呈

不同程度的相关性。 P_r 与 R_{CC} 、 F_C 和 F_W 之间均具有极显著的相关关系,相关系数分别为-0.803, -0.453和0.676。其中,以 P_r 与 R_{CC} 的相关系数为最大,绝对值达0.800以上。研究表明,日本落叶松的 P_r 均与 R_{CC} 和 F_W 呈极显著相关关系,白榆的 P_r 与 F_W 呈极显著相关关系,与本研究结果类似^[10,16,23];而华山松(*P. armandii*)的 P_r 仅与晚材 F_L 呈极显著相关关系,与本研究结果不一致^[24]。 v 与 M_{FA} 、 R_{CC} 、 F_L 、 F_W 和 F_L/F_W 之间呈显著至极显著的相关关系,其中,与 M_{FA} 相关系数绝对值达

0.542。就木材解剖性状而言, M_{FA} 、 F_L 和 F_L/F_W 三者之间均呈极显著相关关系,且 F_L 与 F_L/F_W 之间的相关系数达0.900以上,但 F_W 与 F_L/F_W 之间的相关系数仅为-0.184,木材纤维主要为木材中纵行、细长两端呈钝圆形或尖削形的厚壁细胞, F_L 远远大于 F_W ,这说明 F_L/F_W 可能由 F_L 起主导作用^[25]。 R_{CC} 与 F_C 和 F_W 之间呈极显著相关关系,相关系数为0.548和-0.714。 R_{CC} 为纤维双倍胞壁厚度与胞腔直径之比,通常胞壁愈薄,胞腔愈大,其比值愈小,因此 R_{CC} 与 F_C 呈极显著相关关系^[25]。

表 1 刨花楠木材解剖性状与材性快速评估指标的描述统计

Table 1 Statistical calculation results of wood anatomical traits and wood properties rapid assessment indexes of *Machilus pauhiol*

性状	均值	最小值	最大值	标准差	标准误	方差	变异系数/%
P_r /mm	14.31	10.10	17.60	1.64	0.15	2.69	11.45
v /($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.07	2.48	3.76	0.25	0.02	0.06	8.02
M_{FA}	16.93	7.85	27.96	3.03	0.28	9.17	17.89
R_{CC}	0.16	0.12	0.20	0.02	0.00	0.00	11.89
F_C /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$)	210.55	180.82	241.85	14.63	1.34	214.03	6.95
F_L /μm	983.33	669.00	1 438.00	180.15	16.45	32 453.82	18.32
F_W /μm	27.26	23.70	30.80	1.53	0.14	2.33	5.60
F_L/F_W	36.15	24.87	55.85	6.73	0.61	45.35	18.63

注: P_r 、 v 、 M_{FA} 、 R_{CC} 、 F_C 、 F_L 、 F_W 、 F_L/F_W 分别表示 Pilodyn 测定值、应力波速、微纤丝角、纤维壁腔比、纤维粗度、纤维长度、纤维宽度和纤维长宽比。下同。

表 2 刨花楠木材解剖性状与材性快速评估指标间的相关关系

Table 2 The correlations among wood anatomical traits and wood properties rapid assessment indexes of *Machilus pauhiol*

性状	P_r	v	M_{FA}	R_{CC}	F_C	F_L	F_W	F_L/F_W
P_r			0.036 (0.697)	-0.803 ** (0.000)	-0.453 ** (0.000)	0.112 (0.225)	0.676 ** (0.000)	-0.103 (0.263)
v			-0.542 ** (0.000)	0.345 ** (0.000)	0.063 (0.492)	0.218 * (0.017)	-0.361 ** (0.000)	0.334 ** (0.000)
M_{FA}				-0.011 (0.909)	0.127 (0.166)	-0.270 ** (0.003)	0.092 (0.319)	-0.311 ** (0.001)
R_{CC}					0.548 ** (0.000)	-0.084 (0.361)	-0.714 ** (0.000)	0.146 (0.111)
F_C						-0.130 (0.157)	-0.131 (0.153)	-0.092 (0.320)
F_L							0.135 (0.141)	0.947 ** (0.000)
F_W								-0.184 * (0.045)
F_L/F_W								

注:括号中为相关系数标准误差;显著性水平 ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $0.01 < P < 0.05$ 。

2.2 木材解剖性状与材性快速评估指标的通径分析

与相关分析相比,通径分析能把性状间的相关性分解成直接和间接作用,能更深入评价因变量对自变量具体的控制程度和控制途径,同时利用各性状的决定系数总贡献将影响程度表现出来,因此通

径分析在林木选育过程中具有十分重要的作用^[15,26-27]。通过观察可知,6个解剖性状对 P_r 的直接作用和间接作用表现各不相同(表3,图1),其中, R_{CC} 的直接负作用表现得最为强烈,且 R_{CC} 通过影响 F_C 、 F_L 及 F_W 等其他解剖性状对 P_r 产生了间接负效应(间接通径系数为-0.25),故两者相关系

数高达-0.80。 F_w 的直接正作用和间接正作用均比较强烈,直接通径系数和间接通径系数分别为0.42和0.26,所以两者之间表现出极显著的相关关系,相关系数为0.68。 F_c 的直接作用(直接通径系数为-0.11)和间接作用(间接通径系数为-0.34)均为负效应,因此两者之间呈负相关关系。 F_L/F_w 和 F_L 对 P_r 均具有较为强烈的直接作用(F_L/F_w 的直接通径系数为0.51, F_L 的直接通径系数为-0.48),但 F_L/F_w 和 F_L 的直接作用绝大部分被反向间接作用(F_L/F_w 的间接通径系数为-0.61, F_L 的间接通径系数为0.59)所抵消,因此,两者与 P_r 之间均呈现不显著的相关关系。 M_{FA} 对 P_r 的直接效

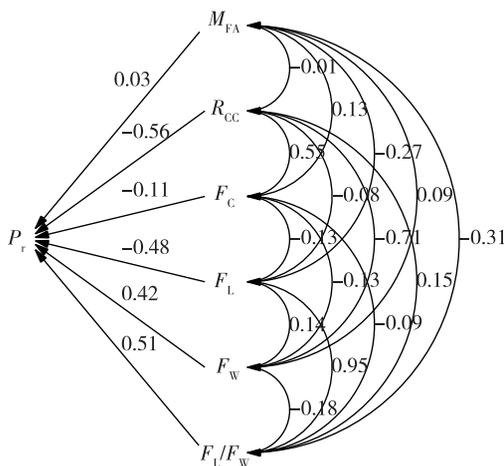
应较小仅0.03,间接作用几乎为零,因此两者之间的相关性不显著。6个解剖性状对 P_r 的决定系数贡献之和为0.676,表明其可解释 P_r 影响作用的67.6%,同时说明还有其他因素影响 P_r 的大小。但在这6个性状中决定系数贡献之和主要由 R_{CC} 和 F_w 决定,两者之和达73.0%,说明 R_{CC} 和 F_w 通过直接作用和间接作用成为影响 P_r 的主导因素,也为 P_r 对 R_{CC} 和 F_w 进行快速评估提供理论依据。 R_{CC} 和 F_w 是木材的重要组成物质或数量指标, R_{CC} 又称为柔性系数,它影响纸张的强度和纤维之间的结合能力,是衡量木材物理及力学性能优劣的重要指标^[28]。

表3 刨花楠木材解剖性状与 Pilodyn 测定值间的通径分析

Table 3 The path analysis between wood anatomical traits and the value of Pilodyn of *Machilus pauhiol*

性状	M_{FA}	R_{CC}	F_c	F_L	F_w	F_L/F_w	总和	对 R^2 的总贡献
M_{FA}	0.034 7	0.006 1	-0.014 4	0.129 4	0.038 6	-0.158 4	0.036 0	0.001 2
R_{CC}	-0.000 4	<u>-0.555 1</u>	-0.062 3	0.040 2	-0.299 9	0.074 4	-0.803 0	0.445 7
F_c	0.004 4	-0.304 2	<u>-0.113 6</u>	0.062 3	-0.055 0	-0.046 9	-0.453 0	0.051 5
F_L	-0.009 4	0.046 6	0.014 8	<u>-0.479 1</u>	0.056 7	0.482 4	0.112 0	-0.053 7
F_w	0.003 2	0.396 3	0.014 9	-0.064 7	<u>0.420 0</u>	-0.093 7	0.676 0	0.283 9
F_L/F_w	-0.010 8	-0.081 0	0.010 5	-0.453 7	-0.077 3	<u>0.509 4</u>	-0.103 0	-0.052 5

注:带下划线数据为直接通径系数,其余为间接通径系数。下同。



注:直线箭头表示直接效果,曲线表示间接路径的相关系数。下同。

图1 木材解剖性状对 Pilodyn 测定值的通径图

Fig. 1 Path map of P_r versus wood anatomical traits

通过观察表4和图2可知,6个纤维性状对 v

的直接作用和间接作用表现各不相同, M_{FA} 的直接和间接通径系数分别为-0.51和-0.04, R_{CC} 的直接和间接通径系数分别为0.26和0.09,说明 M_{FA} 和 R_{CC} 主要通过直接作用对 v 产生影响。 F_w 的直接作用(F_w 的直接通径系数为-0.50)中有一部分被反向抵消,因此其对 v 仍表现为显著的负相关关系,相关系数为-0.36。 F_L 和 F_L/F_w 均表现出强烈的直接作用(F_L 的直接通径系数为1.20, F_L/F_w 的直接通径系数为-1.09),但两者的直接作用绝大部分被反向效应(F_L 的间接通径系数为-0.99, F_L/F_w 的间接通径系数为1.43)所抵消,因此两者与 P_r 的相关系数都较低。 F_c 的直接效应和间接效应均不强烈,且有部分相互抵消,因此 F_c 与 v 的相关系数仅为0.06。6个解剖性状对 v 的决定系数贡献之和为0.438,表明其可解释 v 影响作用的43.8%,同时说明还有其他因素影响 v 的大小。其中对 R^2

表4 刨花楠木材解剖性状与应力波速间的通径分析

Table 4 The path analysis between wood anatomical traits and the wave velocity of *Machilus pauhiol*

性状	M_{FA}	R_{CC}	F_c	F_L	F_w	F_L/F_w	总和	对 R^2 的总贡献
M_{FA}	<u>-0.505 8</u>	-0.002 8	-0.003 0	-0.324 8	-0.045 7	0.340 2	-0.541 9	0.274 1
R_{CC}	0.005 6	<u>0.258 7</u>	-0.013 0	-0.101 1	0.354 5	-0.159 7	0.344 9	0.089 3
F_c	-0.064 2	0.141 8	<u>-0.023 8</u>	-0.156 4	0.065 0	0.100 6	0.063 0	-0.001 5
F_L	0.136 6	-0.021 7	0.003 1	<u>1.203 1</u>	-0.067 0	-1.036 0	0.218 0	0.262 3
F_w	-0.046 5	-0.184 7	0.003 1	0.162 4	<u>-0.496 5</u>	0.201 3	-0.360 9	0.179 2
F_L/F_w	0.157 3	0.037 8	0.002 2	1.139 3	0.091 4	<u>-1.094 0</u>	0.334 0	-0.365 4

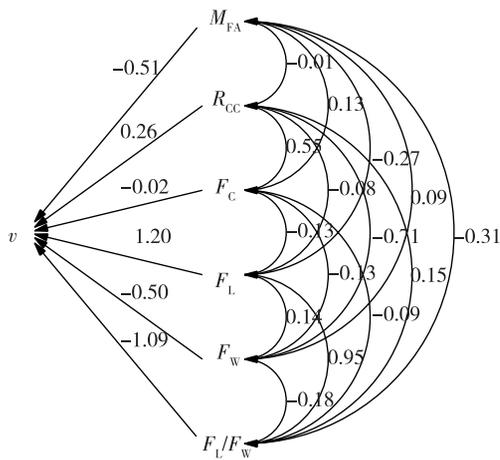


图 2 木材解剖性状对应力波速的通径图

Fig. 2 Path map of v versus wood anatomical traits

的总贡献排名前三的是 F_L/F_W (36.5%)、 M_{FA} (27.4%) 和 F_L (26.2%), 说明这个 3 个性状通过直接作用和间接作用成为影响 v 的主导因素, 但综合三者与 v 相关系数的大小 ($R_{F_L/F_W} = 0.334$, $R_{M_{FA}} = -0.542$, $R_{F_L} = 0.218$), M_{FA} 的影响在三者中可能更为突出, 这一结果为 v 对 M_{FA} 进行快速评估提供有利依据。 M_{FA} 是决定木材机械性能的因子之一, 影响木材弹性模量和异向收缩性, 而 v 是影响弹性模量的重要因素, 这一现象间接证明了 M_{FA} 对 v 的影响作用^[29]。

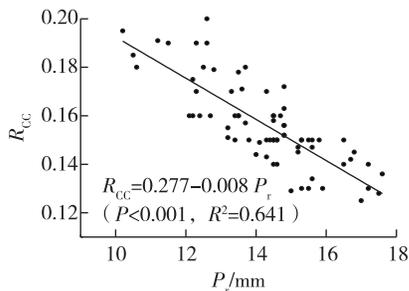


图 3 纤维壁腔比与 Pilodyn 测定值的线性回归模型

Fig. 3 The linear regression model between R_{CC} and P_r

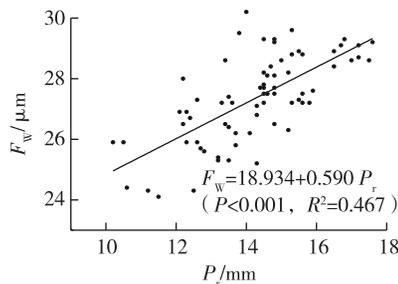


图 4 纤维宽度与 Pilodyn 测定值的线性回归模型

Fig. 4 The linear regression model between F_W and P_r

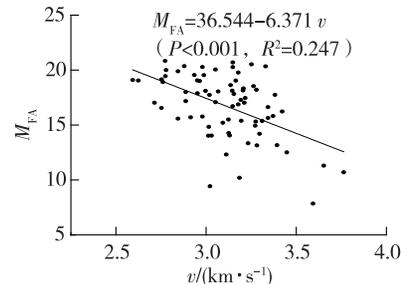


图 5 微纤丝角与应力波速的线性回归模型

Fig. 5 The linear regression model between M_{FA} and v

2.3 木材解剖性状与材性快速评估指标间的线性回归分析及精度检验

综合木材解剖性状与材性快速评估指标间的相关分析和通径分析结果可知, R_{CC} 和 F_W 对 P_r 的相关系数和贡献率都比其他的纤维性状大, M_{FA} 与 v 之间的相关系数和贡献率也优于其他性状, 因此应用 P_r 来预测 R_{CC} 和 F_W 、 v 来预测 M_{FA} 是可行的。在每个样地随机选取 8 组数据, 6 个典型样地共 48 组数据作为检验样本, 其余 72 组数据作为拟合样本, 分别建立 P_r 与 R_{CC} 、 P_r 与 F_W 和 v 与 M_{FA} 之间的回归模型并对模型进行预估精度检验(图 3、图 4、图 5)。由图 3 和图 4 可知, P_r 与 R_{CC} 的回归方程为: $R_{CC} = 0.277 - 0.008 P_r$ ($F = 127.816^{**}$, $R^2 = 0.641$); P_r 与 F_W 的回归方程为: $F_W = 18.934 + 0.590 P_r$ ($F = 63.118^{**}$, $R^2 = 0.467$); v 与 M_{FA} 的回归方程为: $M_{FA} = 36.544 - 6.371 v$ ($F = 24.286^{**}$, $R^2 = 0.247$)。3 个模型的回归常数和回归系数均达到极显著水平, 对拟合的 3 个方程进行预估精度计算, 预估精度分别为 P_r 对 R_{CC} : 98.59%, P_r 对 F_W : 99.16%, v 对 M_{FA} : 97.26%, 均超过 95%, 因此应用 P_r 和 v 等材性快速检测指标来预测 R_{CC} 、 F_W 和 M_{FA} 是可行和可靠的。

3 结论

木材解剖性状是林木材性遗传改良的重要研究方向, 然而, 受制于常规检测方法耗时多、价格昂贵的弊端, 无法大规模开展解剖性状数据的测定和分析, 一定程度上制约着木材解剖性状遗传改良的进展。本研究综合利用材性快速评估仪器和木材性质快速测定仪, 通过相关、通径及多元回归分析建立刨花楠木材解剖特性与快速评估指标的线性回归模型, 揭示刨花楠材性快速评估指标与主要解

剖性状间的相关关系及其内在的影响途径, 为刨花楠人工林木材解剖性状的早期预测提供理论依据, 同时为其他树种材性早期选育提供参考。

1) 通过比较变异系数可知, 刨花楠的材性快速评估指标 Pilodyn 测定值相比于应力波速在不同单株间更具有选择效应。在 6 个解剖性状中, Pilodyn 测定值与纤维壁腔比, 纤维粗度和纤维宽度呈极显著相关关系; 除纤维粗度外, 应力波速与其余 5 个性状均呈显著至极显著的相关关系。这为 Pilodyn 测定值和应力波速对木材解剖性状进行

评估提供了理论依据。

2) 本研究6个解剖性状可解释 Pilodyn 测定值影响作用的 67.6%, 应力波速影响作用的 43.8%, 说明还有其他因素影响 Pilodyn 测定值和应力波速的大小。其中, 纤维壁腔比和纤维宽度成为对 Pilodyn 测定值影响最大的两个因子, 对应应力波速影响最大的因子为微纤丝角。纤维壁腔比与 Pilodyn 测定值的预测模型要优于纤维宽度, 这可能跟细胞本身的结构有关, 纤维壁腔比越接近于 1, 纤维壁薄腔越大, 细胞越易于压溃, 则 Pilodyn 探测时受到的阻力就越小, 测定值就会越小。

3) 通过材性快速评估指标与木材解剖性状间建立的线性回归模型和模型预估精度(预估精度分别为 P_r 对 R_{CC} : 98.59%, P_r 对 F_w : 99.16%, v 对 M_{FA} : 97.26%) 可知, 应用 Pilodyn 测定值可对纤维壁腔比和纤维宽度进行预测, 应力波速可对微纤丝角进行预测。说明将材性快速评估仪器(Pilodyn 和微秒计)应用于刨花楠个别木材解剖性状的快速评估也是可行的, 然而, Pilodyn 测定值和应力波速只是木材性状的间接估测值, 不能精确估算每株树木木材性状的具体数值。因此, 如何有效结合这两种无损检测方法预测材性性状还需进一步分析。

参考文献(References):

- [1] 张蕾蕾, 钟全林, 程栋梁, 等. 刨花楠叶片碳氮磷化学计量比与个体大小的关系[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1928-1934. DOI:10.13287/j.1001-9332.20150506.015.
ZHANG L L, ZHONG Q L, CHENG D L, et al. Characteristics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in relation to plant size of *Machilus pauhoi*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 1928-1934.
- [2] 余华, 钟全林, 黄云波, 等. 不同种源刨花楠林下幼苗叶功能性状与地理环境的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 449-458. DOI:10.13287/j.1001-9332.201802.008.
YU H, ZHONG Q L, HUANG Y B, et al. Relationships between leaf functional traits of *Machilus pauhoi* understory seedlings from different provenances and geographical environmental factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 449-458.
- [3] 陈国彪. 刨花楠的利用与培育技术[J]. 广西林业科学, 2004, 33(4): 212-213. DOI:10.19692/j.cnki.gfs.2004.04.014.
CHEN G B. Application and Breeding Techniques of *Machilus Pauhoi*[J]. Guangxi Forestry Science, 2004, 33(4): 212-213.
- [4] 胡波, 钟全林, 程栋梁, 等. 刨花楠树高与胸径异速生长的关系[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2012, 24(3): 9-14. DOI:10.3969/j.issn.1008-9225.2012.03.004.
HU B, ZHONG Q L, CHENG D L, et al. Relationship between *Machilus*' height and allometric growth of diameter at breast[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2012, 24(3): 9-14.
- [5] 易敏, 赖猛, 张露, 等. 人工林刨花楠木材主要特性的径向变异及其对气象因子的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3677-3684. DOI:10.13287/j.1001-9332.201811.014.
YI M, LAI M, ZHANG L, et al. Radical variation of main wood properties and its relationship to climatic factors of *Machilus pauhoi* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3677-3684.
- [6] 冷春晖, 易敏, 张露, 等. 材性快速评估技术在刨花楠活立木木材密度和弹性模量预测中的应用[J]. 林业工程学报, 2018, 3(6): 56-61. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.2018.06.009.
LENG C H, YI M, ZHANG L, et al. Application of wood properties rapid assessment technology in prediction of wood density and modulus of elastic of standing tree of *Machilus pauhoi*[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(6): 56-61.
- [7] 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. DOI:10.3321/j.issn:1001-7488.2008.07.005.
ZHU J L, WANG J H, ZHANG S G, et al. Wood property estimation and selection of *Populus tomentosa*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(7): 23-28.
- [8] 黄艳辉, 赵荣军, 费本华, 等. 木材微纤丝角的测定方法及其进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 184-188. DOI:10.3969/j.issn.1001-7461.2006.04.049.
HUANG Y H, ZHAO R J, FEI B H, et al. Measurement methods and development of wood microfibril angle[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(4): 184-188.
- [9] WU S J, XU J M, LI G Y, 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. DOI:10.1007/s11676-010-0011-5.
- [10] 沈亚洲, 王军辉, 张守攻, 等. 基于 Pilodyn 无损检测技术的白榆活立木材性评估[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(3): 89-92, 160. DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2011.03.026.
SHEN Y Z, WANG J H, ZHANG S G, et al. Assessment on wood properties of *Ulmus pumila* based on Pilodyn[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(3): 89-92, 160.
- [11] 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. DOI:10.13836/j.jjau.2011098.
LUAN Q F, LU P, JING Z H, et al. Assessment of wood basic density for standing trees of hybrid pines by Pilodyn and the correlation analysis of several traits[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2011, 33(3): 548-552.
- [12] 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]. Canadian Journal of Forest Research, 2013, 43(1): 1-6. DOI:10.1139/cjfr-2012-0308.
- [13] 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. DOI:10.1007/s13595-015-0458-9.
- [14] 张帅楠, 姜景民, 徐永勤, 等. 湿地松活立木弹性模量无损评估技术研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(1): 75-80. DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2017.01.011.
ZHANG S N, JIANG J M, XU Y Q, et al. Study on the modulus of elasticity non-destructive evaluation technique of slash pine standing tree[J]. Forest Research, 2017, 30(1): 75-80.
- [15] IVKOVIĆ M, GAPARE W J, ABARQUEZ A, et al. Prediction

- of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of *Radiata* pine[J]. *Wood Science and Technology*, 2009, 43(3/4): 237-257. DOI:10.1007/s00226-008-0232-3.
- [16] 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. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20141113.
YI M, LAI M, SUN X M, et al. Application prospect on applying nondestructive testing technology in wood property breeding of *Larix kaempferi* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(11): 96-103.
- [17] ROSS R J, PELLERIN R F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves[J]. *Forest Products Journal*, 1988, 38(5): 39-45. DOI:10.1515/hfsg.1988.42.3.203.
- [18] TZE W T Y, WANG S, RIALS T G, et al. Nanoindentation of wood cell walls: continuous stiffness and hardness measurements [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(3): 945-953. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.06.018.
- [19] EVANS R, ILIC J, MATHESON C, et al. Rapid estimation of solid wood stiffness using SilviScan [C] // Proceedings of 26th forest products research conference: Research developments and industrial applications and wood waste forum. Clayton, Victoria, Australia, 19-21 June, 2000.
- [20] 崔党群, 林德光. 通径分析的矩阵算法[J]. *生物数学学报*, 1994, 9(1): 71-76.
CUI D Q, LIN D G. The matrix solutions on path analysis [J]. *Journal of Biomathematics*, 1994, 9(1): 71-76.
- [21] 朱景乐, 赵宁, 刘增喜, 等. Pilodyn 在毛白杨材性指标的预测及选择中的应用[J]. *河南农业大学学报*, 2009, 43(4): 376-381. DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.2009.04.021.
ZHU J L, ZHAO N, LIU Z X, et al. Research on the application Pilodyn in assessing wood traits and selection of *Populus tomentosa* [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2009, 43(4): 376-381.
- [22] 张瑛春, 王军辉, 张守攻, 等. Pilodyn 和日本落叶松材性指标的关系[J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 114-119. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20100717.
ZHANG Y C, WANG J H, ZHANG S G, et al. Relationship between the Pilodyn penetration and wood property of *Larix kaempferi* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(7): 114-119.
- [23] 朱景乐, 王军辉, 张守攻, 等. Pilodyn 在日本落叶松活立木材性指标预测中的应用[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(1): 75-79. DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2009.01.016.
ZHU J L, WANG J H, ZHANG S G, et al. Using the Pilodyn to assess wood traits of standing trees *Larix kaempferi* [J]. *Forest Research*, 2009, 22(1): 75-79.
- [24] 梁保松, 朱景乐, 王军辉, 等. Pilodyn 在华山松活立木木材材性估测中的应用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(6): 97-101. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.2008.06.022.
LIANG B S, ZHU J L, WANG J H, et al. The application of the Pilodyn to assess wood traits of living trees in *Pinus armandii* [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(6): 97-101.
- [25] 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. DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2011.02.019.
WU H, ZHA 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.
- [26] 卢妮妮, 王新杰, 张鹏, 等. 不同林龄杉木胸径树高与冠幅的通径分析[J]. *东北林业大学学报*, 2015, 43(4): 12-16. DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.20150116.022.
LU N N, WANG X J, ZHANG P, et al. Pathanalysis between diameter at breast height, height and crown width of *Cunninghamia lanceolata* in different age [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2015, 43(4): 12-16.
- [27] 陈存, 丁昌俊, 苏晓华, 等. 欧美杨纤维含量构成因素的相关和通径分析[J]. *林业科学*, 2016, 52(11): 124-133. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20161115.
CHEN C, DING C J, SU X H, et al. Correlation and path analysis of the components of fiber content for *Populus × euramericana* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(11): 124-133.
- [28] 杨中宁, 项东云, 陈健波, 等. 大花序桉种源木材纤维特性变异研究[J]. *广西林业科学*, 2011, 40(1): 8-11, 16. DOI: 10.19692/j.cnki.gfs.2011.01.003.
YANG Z N, XIANG D Y, CHEN J B, et al. Study on variation of fiber characteristics of *Eucalyptus cloeziana* provenances [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2011, 40(1): 8-11, 16.
- [29] 洪香香, 杨文忠, 方升佐. 木材微纤丝角研究的现状和发展趋势[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(6): 83-87. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2002.06.021.
FU X X, YANG W Z, FANG S Z. Current situations and prospects on the microfibril angle research of wood [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, 26(6): 83-87.

(责任编辑 田亚玲)