

“定向培育松树木材性质评价”专栏 (6) DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025116

应力波法快速预测 3 个家系落叶松木材弹性模量

贾昌东, 贺嘉琪, 陈丽颖, 龚迎春, 周永东, 王玉荣

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 为实现杂种落叶松木材弹性模量 (modulus of elasticity, MOE) 的快速预测, 以日 3×兴 2 (*Larix kaempferi* 3×*L. gmelinii* 2)、日 12×兴 9 (*Larix kaempferi* 12×*L. gmelinii* 9)、日 3×兴 9 (*Larix kaempferi* 3×*L. gmelinii* 9) 3 个家系落叶松木材为研究对象, 运用应力波无损检测技术获取木材波速, 结合气干密度计算动态 MOE, 探究原木与无疵小试样两种形态木材在应力波波速、动态 MOE 上的差异, 并与无疵小试样的静态 MOE 进行比较分析。结果表明, 无疵小试样的波速、动态 MOE 分别较原木平均高 6.1%、8.4%, 无疵小试样的静态 MOE 比原木动态 MOE、无疵小试样动态 MOE 分别高 30.2%、20.1%。基于原木波速、原木动态 MOE 分别构建无疵小试样静态 MOE 的全样本一元线性回归模型, 其决定系数 (R^2) 分别为 0.57、0.66; 基于原木波速、气干密度构建无疵小试样静态 MOE 的全样本多元线性回归模型, 其 R^2 为 0.67, 经五折交叉验证, 该多元模型显示较强的泛化能力。3 类模型 R^2 均达中度拟合水平, 在 MOE 预测中展现良好应用潜力, 其中“日 3×兴 2”模型 R^2 均最高。研究为杂种落叶松木材 MOE 快速评估提供理论依据和技术支撑。

关键词: 杂种落叶松; 应力波波速; 弹性模量预测; 无损检测

中图分类号: S781.7; S791.22 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 01-0019-08

Rapid Prediction of Modulus of Elasticity in Larch Wood from Three Families Using Stress Wave Method

JIA Changdong, HE Jiaqi, CHEN Liying, GONG Yingchun, ZHOU Yongdong, WANG Yurong

(Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To enable rapid prediction of the modulus of elasticity (MOE) in hybrid larch wood, three hybrid larch families (*Larix kaempferi* 3×*Larix gmelinii* 2, *L. kaempferi* 12×*L. gmelinii* 9, and *L. kaempferi* 3×*L. gmelinii* 9) were selected. Stress-wave nondestructive testing technology was employed to measure stress-wave velocity in logs and small clear specimens. The dynamic modulus of elasticity was calculated based on stress-wave velocity in combination with oven-dry density. The differences in stress-wave velocity and dynamic MOE between two forms of wood, namely logs and small clear specimens, were investigated, and the differences between the dynamic MOE and static MOE of small clear specimens were also compared. The results showed that, compared with logs, the stress-wave velocity and dynamic MOE of small clear specimens increased by 6.1% and 8.4%, respectively. The static MOE was 30.2% and 20.1% higher than the dynamic MOE of logs and small clear specimens,

收稿日期: 2025-10-23; 修改日期: 2025-12-22

基金项目: 农业生物育种国家科技重大专项课题“纸浆材与结构材用松树木材性质与质量评价”(2023ZD0405905)。

作者简介: 贾昌东 (2000—), 男, 硕士研究生。Email: xbrdjd@163.com

通讯作者: 王玉荣, 女, 研究员。Email: yurwang@caf.ac.cn

respectively. The full-sample regression models developed using log wave velocity and log dynamic MOE to predict the static MOE of small clear specimens yielded coefficients of determination (R^2) of 0.57 and 0.66, respectively. A full-sample multiple regression model of small clear specimens incorporating both log wave velocity and air-dry density yielded R^2 of 0.67, and five-fold cross-validation indicated that the model exhibited good stability. All models demonstrated moderate fitting level and promising predictive potential. Across different families, the *Larix kaempferi* 3 × *L. gmelinii* 2 family showed all the best fit. This study provides a theoretical basis and technical support for rapid evaluation of MOE in hybrid larch wood.

Key words: hybrid larch; stress wave velocity; MOE prediction; non-destructive testing

落叶松 (*Larix* spp.) 作为北半球温带及寒温带针叶林的重要组成树种, 其木材因优异的物理力学性能, 在结构材、家具制造及制浆造纸等领域应用广泛^[1]。研究表明落叶松属不同种 (如日本落叶松 (*L. kaempferi*)、兴安落叶松 (*L. gmelinii*) 等) 及同一种不同地理种源、家系或无性系间的木材密度与弹性模量 (modulus of elasticity, MOE) 存在天然变异^[2-4]。自 20 世纪 80 年代以来, 我国东北地区落叶松育种聚焦杂种优势利用与多性状协同改良, 通过日本落叶松与兴安落叶松间杂交培育速生、优质的杂种家系, 其杂交后代在木材生长性状上较亲本表现出明显提升^[5-7]。目前, 针对杂种落叶松开展的研究多聚焦于前期生长性状筛选或部分基础材性差异分析^[8], 缺乏材性系统研究, 特别是结构用材的力学性质快速评估问题亟需解决。因此, 开展杂种落叶松木材关键力学性能研究并实现快速预测, 对杂种落叶松适材适用具有重要意义。

弹性模量 (MOE) 是评价木材品质的核心指标^[9-13], 主要表征材料抵抗弹性变形的能力, 是判断木材是否适用于承重结构材或工程木产品的关键力学参数^[14]。传统 MOE 测定方法操作复杂且成本高, 难以满足大规模木材性能筛选需求。相比之下, 应力波无损检测技术操作简便, 已被广泛用于木材 MOE 快速检测^[15-16], 检测对象涵盖活立木、原木、锯材及木构件等^[17-25]。该技术在落叶松 MOE 预测研究中也得到应用^[26-28]。然而, 已有研究多通过对比动态 MOE 大小评估材质优劣, 但应力波波速能否直接用于林木材质评估, 以及波速、动态 MOE 与静态 MOE 之间的关联关系仍需进一步研究。

木材动态 MOE 计算模型基于单一形态试样密度和应力波波速构建, 缺乏不同形态试样检测指标之间的关系分析, 导致跨形态试样 MOE 预测精度受限^[29]。此外, 通过原木无损检测参数直接获取木材 MOE 指标值的可行性目前还需更广泛验证。在预测木材 MOE 时, 已有研究将动态 MOE 模型中的波速与密度进行拆分, 赋予不同权重, 能提高模型预测精度和稳定性^[30-32]。因此, 构建不再局限于 ρV^2 形式的多元预测模型, 是进一步提高跨形态试样 MOE 预测精度的有效途径。

鉴于此, 本研究以 3 个家系杂种落叶松为研究对象, 分别测定原木的应力波波速、动态 MOE, 无疵小试样的应力波波速、气干密度、动态 MOE 及静态 MOE, 分析各家系气干密度差异, 原木与无疵小试样在应力波波速、动态 MOE 上的差异, 以及原木动态 MOE 与无疵小试样在动、静态 MOE 上的差异和关联。在此基础上, 以各家系样本和全样本, 分别构建基于原木波速、原木动态 MOE 的静态 MOE 一元线性回归模型, 以及基于原木波速和气干密度的静态 MOE 多元线性回归模型, 为落叶松木材 MOE 快速评估提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

材料采自黑龙江省牡丹江市林口县青山林场 (45° 27' N, 130° 34' E) 的杂种落叶松人工林。1993 年 4 月造林, 面积 0.33 hm², 株行距 1.5 m × 2.0 m。选取树龄均为 32 年的日 3 × 兴 2 (*Larix kaempferi* 3 × *L. gmelinii* 2)、日 12 × 兴 9 (*Larix kaempferi* 12 × *L. gmelinii* 9)、日 3 × 兴 9 (*Larix*

kaempferi 3 × *L. gmelinii* 9) 3个家系, 每个家系选取3株生长状况健康、树干通直的样木, 共计9株, 样木信息列于表1。

表1 3个家系落叶松木材基本信息

Tab.1 Basic information of wood samples from three larch families

家系	编号	平均树高/m	平均胸径/cm
日3×兴2	A	22.30	21.03
日12×兴9	B	21.50	17.70
日3×兴9	C	20.30	19.97

1.2 仪器设备

微秒计、恒温恒湿箱 (HPG-280HX)、万能力学试验机 (Instron 5582) 等。

1.3 试验方法

1.3.1 应力波波速测定 如图1所示, 在落叶松距地面1.5 m处截取一段1 m长原木段。气干4个月后, 采用微秒计进行应力波测定。沿原木端面东、南、西、北四个方向, 从近髓心至近树皮以1 cm为单位建立坐标系, 每1 cm设置一个检测点, 每株实际有效检测点在60~80个之间。分别在原木两个端面以90°垂直钉入传感器探头。通过敲击法激发应力波, 每个检测点重复测量3次, 剔除异常值 (值间差异<3 μs), 记录平均传播时间。

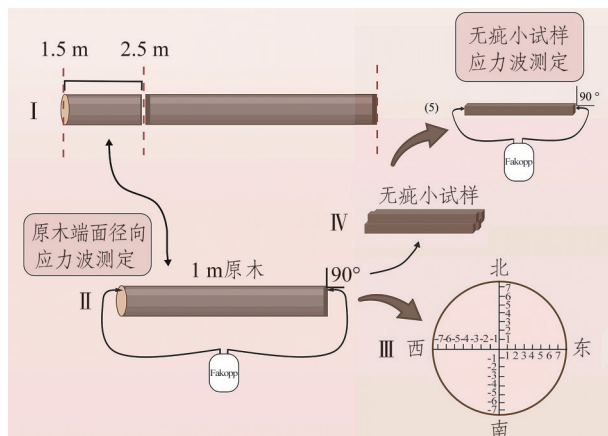


图1 落叶松木材波速测定示意

Fig.1 Schematic diagram for measuring wave velocity of larch wood

按照 GB/T 1927.2—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第2部分: 取样方法和一般要求》, 在原木端面东、南、西、北四个径向方向上近髓心和近树皮部位及剩余4个扇形部位各获取1根尺寸为380 mm×20 mm×20 mm (L×R×T) 的无

疵小试样, 平均每株取12根无疵小试样, 共108根。在温度20 °C、湿度65%的条件下, 将无疵小试样的含水率平衡至约12%, 随后进行应力波测定。分别在试样两个端面以90°垂直钉入传感器, 钉入深度20 mm, 获得应力波传播时间, 按公式(1)计算波速。

$$V = \frac{L}{t} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: V 为应力波波速, m/s; L 为检测距离, m; t 为传播时间, μs。

1.3.2 密度测试 无疵小试样的两端各截去20 mm后, 在末端截取1个尺寸为20 mm×20 mm×20 mm (L×R×T) 的小木块, 共108个。试样经过含水率平衡处理后, 依据国家标准 GB/T 1927.5—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分: 密度测定》测定3个家系落叶松木材的气干密度。

1.3.3 动态MOE计算 木材动态MOE计算模型见公式(2)。

$$MOE_d = \rho V^2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: MOE_d 为动态弹性模量, GPa; ρ 为气干密度, g/cm³; V 为应力波波速, m/s。

1.3.4 静态MOE测定 将测试完应力波的试样锯解为300 mm×20 mm×20 mm (L×R×T) 的无疵小试样, 将其含水率平衡至约12%后, 按照 GB/T 1927.10—2021 《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第10部分: 抗弯弹性模量测定》, 采用万能力学试验机测定其静态MOE。

1.3.5 数据处理与关系模型建立 采用 Pearson 相关性分析方法, 分析原木与无疵小试样在波速、动态MOE上的差异, 以及原木和无疵小试样的动态MOE与无疵小试样静态MOE之间的相关性; 构建基于原木波速、原木动态MOE的无疵小试样静态MOE一元线性回归模型, 以及基于原木波速、气干密度的无疵小试样静态MOE多元线性回归模型。通过比较各模型的决定系数(R^2)和平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE), 评价模型的解释力和预测精度, MAPE依据公式(3)计算。最后采用五折交叉验证法评价多元线性回归模型的泛化能力。

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (3)$$

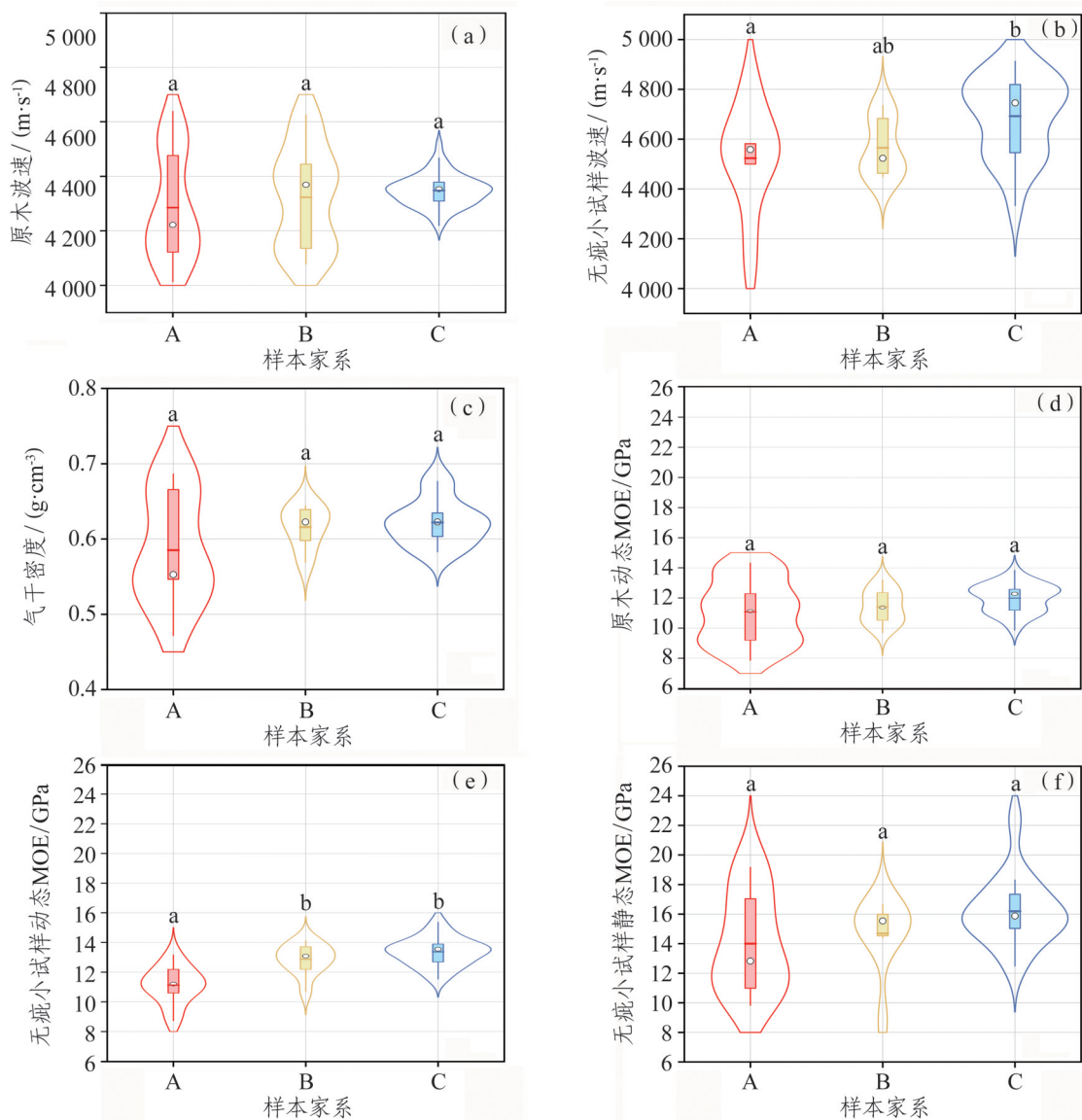
式中： n 为测试集样本数量； \hat{y}_i 为第*i*个样本静态MOE的预测值，GPa； y_i 为第*i*个样本静态MOE的实测值，GPa。

2 结果与分析

2.1 波速、气干密度以及动、静态MOE

3个家系落叶松原木试样的波速与动态MOE，无疵小试样的波速、气干密度以及动、静态MOE，如图2所示。由于动态MOE的计算直接依赖波速，

首先分析3个家系落叶松原木与无疵小试样波速的变化规律，如图2a和图2b所示。原木波速在4 013~4 669 m/s之间，平均值为4 328 m/s，3个家系间的波速差异未达显著水平；无疵小试样波速范围在4 083~4 913 m/s之间，平均值为4 593 m/s，A家系与C家系的波速存在显著差异，而A家系与B家系、B家系与C家系的波速无显著差异。对比发现，3个家系无疵小试样波速较原木平均高约6.1%。木材含水率影响应力波传播速度，含水率较高时波速通常较低，不同部位含水率分布不均，其应力波波速呈现一定的变异性^[19,33]。原木在通风



注：字母a、b分别表示试样各指标显著性检验($\alpha=0.05$)的分组结果，相同字母表示差异不显著，不同字母表示差异显著。

图2 3个家系落叶松木材的波速、密度、弹性模量

Fig.2 Wave velocity, density and MOE of larch wood from three families

条件下气干约4月后，其含水率与无疵小试样差异不大。因此，原木波速较低的原因可能是原木中的节子等缺陷导致应力波传播路径弯折，造成波速衰减^[21-23]；而无疵小试样无节子存在，波速相对较高。

3个家系落叶松气干密度检测结果如图2c所示，其变化范围在0.472~0.694 g/cm³之间。其中，C家系的平均气干密度最高，B家系次之，A家系最低，3个家系间气干密度差异未达显著水平。结合波速检测结果，发现家系间原木与无疵小试样波速的大小与其密度变化趋势基本一致，有一定的对应关系，这为依据应力波波速的大小判别杂种落叶松的密度大小提供了依据。

3个家系落叶松原木和无疵小试样的动态MOE计算结果如图2d、2e所示。原木动态MOE在7.86~14.32 GPa之间，平均值为11.49 GPa。无疵小试样的动态MOE在8.72~15.36 GPa之间，平均值为12.46 GPa。与原木相比，无疵小试样的动态MOE平均高约8.4%。原木家系间动态MOE差异未达到显著水平，无疵小试样B家系与C家系无显著差异，但二者均显著高于A家系。3个家系间原木与无疵小试样动态MOE均值依然表现为C家系最大，B家系次之，A家系最小。

3个家系落叶松无疵小试样的静态MOE如图2f所示。其静态MOE范围为8.76~22.40 GPa，平均值为14.96 GPa。其中C家系最大，B家系次之，A家系最小，其变化趋势与动态MOE的基本一致。

进一步对比原木动态MOE与无疵小试样的动态MOE、静态MOE（表2），发现无疵小试样的静态MOE整体高于原木和无疵小试样的动态MOE，其数值分别高30.2%和20.1%，2种形态试样动态MOE与静态MOE之间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、黑松木（*Pinus thunbergii*）等针叶树种的研究^[19, 34]亦表明，基于应力波法获得的动态MOE，与静态MOE在数值上存在一定差异。虽然这种差异在不同树种中表现并不一致，但动态MOE与静态MOE之间的差异具有普遍性，且二者具有较好相关性^[19, 34]，为利用动态MOE预测静态MOE提供理论依据。

表2 落叶松原木和无疵小试样动、静态弹性模量

Tab.2 Dynamic and static MOE of logs and small clear specimens of larch

指标	平均值/ GPa	标准差/ GPa	变异系数/ %	多重比较
原木动态MOE	11.49	0.998	8.760	a
无疵小试样动态MOE	12.46	1.019	8.360	b
无疵小试样静态MOE	14.96	1.458	9.740	c

2.2 动态MOE与静态MOE的回归分析

为评估落叶松不同形态木材动态MOE与静态MOE的相关性，构建原木动态MOE、无疵小试样动态MOE与无疵小试样静态MOE之间的一元线性回归模型，如图3和表3所示。原木动态MOE与无疵小试样静态MOE的回归分析显示，全样本模型 R^2 为0.66，A家系模型的 R^2 最高，B家系和C家系的 R^2 相对较低，表明不同家系间模型的拟合优

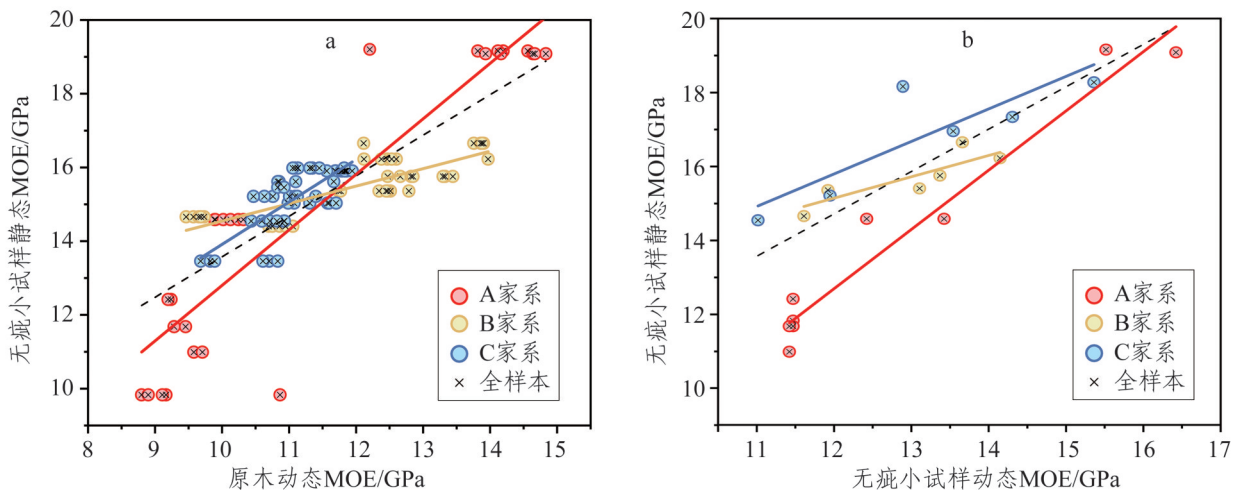


图3 无疵小试样静态MOE与原木、无疵小试样动态MOE的关系

Fig.3 Relationship between static MOE of small clear specimens and dynamic MOE of log and small clear specimens

表 3 无疵小试样静态 MOE 基于原木及无疵小试样动态 MOE 的回归模型构建与验证

Tab.3 Regression model construction and validation of static MOE of small clear specimens based on dynamic MOE of logs and small clear specimens

因变量(y)	自变量(x)	样本	回归模型	R ²	MAPE
无疵小试样静态MOE/ GPa	原木 动态MOE/ GPa	A家系	$y=-2.26+1.51x$	0.83	9.19%
		B家系	$y=9.81+0.47x$	0.70	2.33%
		C家系	$y=2.39+1.15x$	0.54	2.93%
		全样本	$y=2.59+1.10x$	0.66	6.09%
无疵小试样静态MOE/ GPa	无疵小试样 动态MOE/ GPa	A家系	$y=-6.53+1.60x$	0.97	3.09%
		B家系	$y=8.23+0.58x$	0.73	1.85%
		C家系	$y=5.25+0.88x$	0.66	3.92%
		全样本	$y=0.97+1.15x$	0.64	6.59%

度存在一定差异。无疵小试样动态 MOE 与无疵小试样静态 MOE 的回归分析表明，全样本模型 R² 为 0.64，A 家系模型 R² 最高，B 家系和 C 家系模型 R² 相对较低。总体来看，3 个家系的原木动态 MOE、无疵小试样动态 MOE 与无疵小试样静态 MOE 呈现中度或高度拟合水平，和以往湿地松 (*Pinus elliottii*) 应力波检测研究结果一致^[35]。全样本和各家系模型的 MAPE 均 <10%，表明模型的预测误差较小。

2.3 原木波速与静态 MOE 的一元线性回归分析

原木波速与无疵小试样波速之间的关系如图 4 所示，全样本的原木波速与无疵小试样波速的回归模型（表 4）的 R² 仅为 0.34，解释力相对较低，但不同家系表现不同，A 家系模型的 R² 最高，B 家系模型次之，C 家系模型最低，且各家系模型的 R² 均高于全样本。模型 MAPE 均 <2%，说明预测误差较小。

依据原木波速进一步建立原木波速与无疵小试样静态 MOE 的一元线性回归模型（图 5、表 4），全样本模型 R² 为 0.57，各家系模型 R² 大于全样本，A 家系的 R² 最高，B 家系次之，C 家系最低，整体呈现中度拟合水平。全样本和各家系模型的 MAPE 均 <10%，模型误差较小，原木波速可以有效预测静态 MOE，与已有研究原木应力波波速可用于预测木材 MOE 的结论一致^[27,30]。家系之间的差异与各家系样本在波速与静态 MOE 的变异系数及数据分布范围有关。因此，在构建 MOE 预测模型时，可以考虑分家系建模，以提高模型精度。



图 4 原木波速与无疵小试样波速的关系

Fig. 4 Relationship between wave velocity of logs and small clear specimens

表 4 基于原木波速的无疵小试样波速与静态 MOE 的回归模型构建与验证

Tab.4 Regression model construction and validation of wave velocity and static MOE of small clear specimens based on wave velocity of logs

因变量(y)	样本	回归模型	R ²	MAPE
无疵小试样波速/(m·s ⁻¹)	A家系	$y=2\ 290.51+0.55x$	0.66	1.53%
	B家系	$y=3\ 309.31+0.30x$	0.51	1.19%
	C家系	$y=-242.31+1.15x$	0.42	1.67%
	全样本	$y=2\ 685.78+0.46x$	0.34	1.81%
无疵小试样静态MOE/ GPa	A家系	$y=-53.40+0.016x$	0.79	8.72%
	B家系	$y=-2.87+0.004x$	0.66	2.20%
	C家系	$y=-18.30+0.008x$	0.58	3.13%
	全样本	$y=-30.12+0.011x$	0.57	6.90%

注：自变量x为原木波速，m/s。

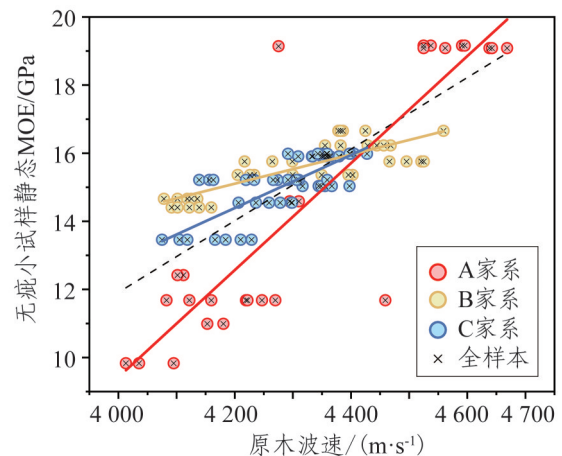


图 5 原木波速与无疵小试样静态弹性模量的关系

Fig.5 Relationship between wave velocity of logs and static MOE of small clear specimens

2.4 基于原木波速和气干密度的静态 MOE 多元回归分析

鉴于密度是影响木材力学性质的关键因子, 引入气干密度结合原木波速构建无疵小试样静态 MOE 多元线性回归模型, 实现基于原木检测指标的木材 MOE 精准预测与等级评估。3 个家系以及全样本的预测模型以及其评价指标列于表 5。

表 5 基于原木波速和气干密度的无疵小试样静态 MOE 多元线性回归模型

Tab.5 Multivariate regression models of static MOE of small clear specimens based on wave velocity of logs and air-dry density

样本	模型	R^2	MAPE
A 家系	$MOE = -40.26 + 0.0089V + 26.74\rho$	0.95	5.87%
B 家系	$MOE = -2.22 + 0.0046V - 3.10\rho$	0.69	2.35%
C 家系	$MOE = -15.89 + 0.0078V - 4.00\rho$	0.61	3.02%
全样本	$MOE = -29.60 + 0.0093V + 7.54\rho$	0.67	6.04%

静态 MOE 的多元回归模型 R^2 趋势与一元线性回归模型以及动态 MOE 模型趋势基本一致, A 家系模型的 R^2 最高, 全样本、B 家系、C 家系模型的 R^2 相对较低。全样本多元线性回归模型的拟合效果优于基于原木波速的一元线性回归模型, 这与已有研究波速与密度赋予不同权重可提高模型拟合度的结论一致^[30-32]。A 家系和 C 家系的多元线性回归模型拟合效果, 均优于基于原木动态 MOE 的一元线性回归模型。经五折交叉验证, 全样本多元线性回归模型平均 MAPE 为 6.37%, 且波动较小, 表明其具备较好的泛化能力。

3 结论

1) 3 个家系落叶松原木与无疵小试样的波速和动态 MOE, 以及无疵小试样静态 MOE, 在整体水平上均呈现家系差异规律。无疵小试样的应力波波速较原木平均高 6.1%, 动态 MOE 较原木平均高 8.4%; 无疵小试样的静态 MOE 较原木动态 MOE 平均高 30.2%, 较其动态 MOE 平均高 20.1%。

2) 3 个家系以及全样本的原木波速与无疵小试样静态 MOE 的线性回归模型, 原木动态 MOE 和无疵小试样静态 MOE 的线性回归模型, 其 R^2 在 0.54~0.83 之间, 拟合度处于中度或较高水平, 表明原木波速可用于木材 MOE 预测。比较各家系模

型差异可知, 样本数据分布范围和变异性大的 A 家系, 其模型 R^2 相对较高。

3) 以原木波速、气干密度构建无疵小试样静态 MOE 多元线性回归模型, 其 $R^2=0.67$, MAPE=6.04%, 较基于原木波速的一元线性回归模型, 拟合度和预测精度更优。经五折交叉验证, 该多元模型泛化能力较强, 具备快速预测落叶松木材 MOE 的应用潜力。

参考文献:

- [1] PÂQUES L E, FOFFOVÁ E, HEINZE B, et al. Forest tree breeding in Europe: Current state-of-the-art and perspectives[M]. 2013.
- [2] ROZENBERG P, CAHALAN C H. Spruce and wood quality: genetic aspects (a review)[J]. *Silvae Genetica*, 1997, 46(5): 270-279.
- [3] FUJIMOTO T, AKUTSU H, NEI M, et al. Genetic variation in wood stiffness and strength properties of hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*)[J]. *Journal of Forest Research*, 2006, 11(5): 343-349.
- [4] POUPON V, GEZAN S A, SCHUELER S, et al. Genotype × environment interaction and climate sensitivity in growth and wood density of European larch[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 545: 121259.
- [5] 邓继峰, 张含国, 张磊, 等. 17 年生杂种落叶松遗传变异及优良家系选栽[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(1): 8-11.
DENG J F, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Genetic variation of 17 year old hybrid larch and its superior family selection[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(1): 8-11.
- [6] 李祺, 贾庆彬, 杨伟财, 等. 杂种落叶松家系生长性状变异分析与优良家系选择[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2018, 38(2): 37-42.
LI Q, JIA Q B, YANG W C, et al. Variation analysis of growth traits and superior families selection of hybrid *Larix gmelini* families[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2018, 38(2): 37-42.
- [7] 贾庆彬, 张含国, 张磊, 等. 杂种落叶松优良家系选择与生长节律分析[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 52-60.
JIA Q B, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Selection of superior hybrid larch families and growth rhythm analysis[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, 38(2): 52-60.
- [8] 贾庆彬, 张含国, 张磊, 等. 杂种落叶松家系变异分析与优良家系选择[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(4): 1-7.
JIA Q B, ZHANG H G, ZHANG L, et al. Variation analysis of hybrid larch families and superior families selection[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(4): 1-7.
- [9] GREEN D W, WINANDY J E, KRETSCHMANN D E. Mechanical properties of wood[M]//Wood handbook: wood as an engineering material. Forest Products Laboratory, 1999.
- [10] ZOBEL B J, JETT J B. Genetics of wood production[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [11] 徐曼琼, 金观昌, 鹿振友. 数字散斑面内相关法测量木材抗压弹性模量[J]. *林业科学*, 2003, 29(2): 174-176.
XU M Q, JIN G C, LU Z Y. Digital spackle correlation method (dscm) for measurement of wood compression elastic modulus[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 29(2): 174-176.
- [12] 常德龙, 张云岭, 胡伟华, 等. 不同种类泡桐的基本材性[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(8): 79-81.
CHANG D L, ZHANG Y L, HU W H, et al. Wood properties of

- different *Paulownia* species[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(8): 79-81.
- [13] 王正, 周宇昊, 沈肇雨, 等. Timoshenko 自由梁迭代法计算木材弹性模量和剪切模量的适用性[J]. 林业科学, 2022, 58(8): 173-181.
WANG Z, ZHOU Y H, SHEN Z Y, et al. Applicability of Timoshenko beam iterative method to calculate wood elastic modulus and shear modulus[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(8): 173-181.
- [14] BODIG J, JAYNE B A. Mechanics of wood and wood composites[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- [15] ROSS R J, BRASHAW B K, PELLERIN R F. Nondestructive evaluation of wood[J]. Forest Products Journal, 1998, 48(1): 14-24.
- [16] 孙丽萍, 许述正, 魏喜雯, 等. 应力波木材无损检测技术应用及研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(6): 39-43.
SUN L P, XU S Z, WEI X W, et al. Application of stress wave wood nondestructive testing technology and its research progress[J]. World Forestry Research, 2020, 33(6): 39-43.
- [17] PELLERIN R F, DEGROOT R C, ESENTHER G R. Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units[C]//Proceedings of the 5th nondestructive testing of wood symposium, 1985: 319-352.
- [18] GRABIANOWSKI M, MANLEY B, WALKER J C F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber[J]. Wood Science and Technology, 2006, 40(3): 205-216.
- [19] YIN Y F, NAGAO H, LIU X L, et al. Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods[J]. Journal of Wood Science, 2010, 56(1): 33-40.
- [20] RAIS A, PRETZSCH H, VAN DE KUILEN J G. Roundwood pregrading with longitudinal acoustic waves for production of structural boards[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2014, 72(1): 87-98.
- [21] 魏喜雯, 孙丽萍, 许述正, 等. 基于应力波传播速度模型的原木缺陷定量检测[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 143-154.
WEI X W, SUN L P, XU S Z, et al. Quantitative detection of log defects based on stress wave propagation velocity model[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(5): 143-154.
- [22] 刘丰禄, 张厚江, 王喜平, 等. 应力波在落叶松活立木中传播影响因素数值模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 203-212.
LIU F L, ZHANG H J, WANG X P, et al. Numerical simulation of influence factors on stress wave propagation in larch standing trees[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 203-212.
- [23] 袁霄, 陈勇平, 郭文静, 等. 古建筑木构件隐蔽式残损适宜性检测技术[J]. 木材科学与技术, 2021, 35(6): 9-15.
YUAN X, CHEN Y P, GUO W J, et al. Suitability testing technology of invisible damage in wooden components of ancient timber structures[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2021, 35(6): 9-15.
- [24] BRASHAW B K, BUCUR V, DIVOS F, et al. Nondestructive testing and evaluation of wood: A worldwide research update[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(3): 7-14.
- [25] 常丽红, 钱威, 常浩, 等. 应力波对木构件内部空洞的检测[J]. 木材科学与技术, 2022, 36(4): 70-76.
CHANG L H, QIAN W, CHANG H, et al. Detection of internal voids in wooden components by stress waves[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2022, 36(4): 70-76.
- [26] LUO J Y, YANG X C. Study on the correlation between mechanical characteristics and non-destructive testing of stress wave in larch logs [J]. Advanced Materials Research, 2012, 433-440: 2135-2141.
- [27] TUMENJARGAL B, ISHIGURI F, TAKAHASHI Y, et al. Predicting the bending properties of *Larix sibirica* lumber using nondestructive-testing methods[J]. International Wood Products Journal, 2020, 11(3): 115-121.
- [28] CHENG L T, WANG W, YANG Z G, et al. Establishing a dynamic elastic modulus prediction model of larch based on nondestructive testing data[J]. BioResources, 2020, 15(3): 4835-4850.
- [29] ISIK F, MORA C R, SCHIMLECK L R. Genetic variation in *Pinus taeda* wood properties predicted using non-destructive techniques[J]. Annals of Forest Science, 2011, 68(2): 283-293.
- [30] TODOROKI C L, LOWELL E C. Validation of models predicting modulus of elasticity in Douglas-fir trees, boles, and logs[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2016, 46(1): 11.
- [31] HAN G P, WU Q L, WANG X P. Stress-wave velocity of wood-based panels: effect of moisture, product type, and material direction[J]. Forest Products Journal, 2006, 56: 28-33.
- [32] PAPANDREA S F, CATALDO M F, BERNARDI B, et al. The predictive accuracy of modulus of elasticity (MOE) in the wood of standing trees and logs[J]. Forests, 2022, 13(8): 1273.
- [33] 高珊, 王立海, 王洋. 东北林区十个树种冻结活立木中应力波传播速度试验研究[J]. 森林工程, 2013, 29(4): 47-52.
GAO S, WANG L H, WANG Y. Experimental study on stress wave propagation velocity in frozen standing trees of 10 species in Northeast China[J]. Forest Engineering, 2013, 29(4): 47-52.
- [34] MVOLO C S, STEWART J D, KOUBAA A. Comparison between static modulus of elasticity, non-destructive testing moduli of elasticity and stress-wave speed in white spruce and lodgepole pine wood[J]. Wood Material Science & Engineering, 2022, 17(5): 345-355.
- [35] 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.
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.

(责任编辑 周海滨 / 编校 曹惠敏、向琴)