

基于 Pilodyn 的楠木木材密度预测模型的建立

彭建¹, 鲁鑫钊², 余小晏³, 刘闵豪¹, 肖兴翠¹, 杨汉波², 辜云杰^{1*}

(1. 四川省林业科学研究院, 森林和湿地生态恢复与保育四川重点实验室, 四川 成都 610081;

2. 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 华西雨屏区人工林生态系统研究长期科研基地, 四川农业大学, 生态林业研究所, 四川 成都 611130;

3. 四川省林业工作总站, 四川 成都 614801)

摘要:木材密度是决定用材树种木材质量的重要性状。以 12~96 年生楠木为对象, 采用 Pilodyn 方法对活立木胸径处南北向木材进行探测, 结合实测值构建楠木木材材性指标预测模型, 以实现楠木活立木材性的快速、可靠评价。结果表明, 楠木木材纤维长度、纤维宽度和纤维长宽比分别在 629.90~1 238.76、13.78~23.95 μm 和 29.83~80.35。纤维长度和长宽比随树龄增加而增加, 纤维宽度随树龄增加而降低, 而气干密度与树龄无相关性。木材外侧、内侧和整株木材气干密度分别在 0.40~0.698、0.13~0.66 和 0.40~0.57。采用不同回归方程模型构建木材气干密度预测模型, 结果显示, Pilodyn 测定值与气干密度的指数函数方程的拟合效果最佳, Pilodyn 测定值与各木材气干密度间均呈极显著负相关关系 ($P < 0.0001$), 决定系数 $R(-0.3002 \sim -0.5184)$ 。虽然 pilodyn 测定值与纤维长度与宽度呈现出显著的负相关关系, 但决定系数均较低 ($R < 0.15$), 无法保证预测模型结果的准确性。最后, 分别构建楠木木材外侧 ($y = 2.4782x^{-0.539}$) 和整株气干密度预测模型 ($y = 0.9538x^{-0.24}$), 该预测模型的建立为今后快速无损评估楠木活立木木材密度提供新的思路和方法。

关键词:楠木; Pilodyn; 气干密度; 纤维长宽; 相关性

中图分类号: S781.31

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2023)06-0269-07

Establishment of Wood Density Prediction Model of *Phoebe zhennan* Based on Pilodyn Data

PENG Jian¹, LU Xin-yue², YU Xiao-yan³, LIU Min-hao¹, XIAO Xing-cui¹,
YANG Han-bo², GU Yun-jie^{1*}

(1. Sichuan Academy of Forestry, Ecological Restoration and Conservation on Forest and Wetland Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering on the Upper Reaches of the Yangtze River & National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River & Rainy Area of West China Plantation Ecosystem Permanent Scientific Research Base, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China; 3. Forestry Station of Sichuan Province, Chengdu 614801, Sichuan, China)

Abstract: Wood density is an important character to determine the wood quality of timber tree species. Trees of *Phoebe zhennan* (12—96 years old) were selected as the research objects. The detections were conducted from south and north directions of *P. zhennan* tree by Pilodyn method to establish the prediction model of wood properties to implement the quick and reliable evaluation of wood properties in *P. zhennan* living tree. The results showed that the length, width, and length/width ratio of fiber of *P. zhennan* tree

收稿日期: 2022-08-29 修回日期: 2022-11-11

基金项目: 四川省科技计划项目(2021YFYZ0032); 四川省自然科学基金(2022NSFSC1062); 世行贷款长江上游森林生态系统恢复项目(2019-510000-02-01-400761)。

第一作者: 彭建, 高级工程师。研究方向: 林业。E-mail: 512783496@qq.com

* 通信作者: 辜云杰, 研究员。研究方向: 森林培育。E-mail: 15398954@qq.com

were 629.90—1 238.76 μm , 13.78—23.95 μm , and 29.83—80.35, respectively. The fiber length and aspect ratio increased with tree age, fiber width shortened with tree age, and there was no correlation between air-dried density and tree age. The air-dried density of *P. zhennan* at the outside, inside, and the total tree were 0.40—0.69, 0.13—0.66, and 0.4—0.57 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. The results of prediction model of Pilodyn value and air-dried density with different regression equations showed that the fitting effect of Pilodyn value and exponential function equation of air dry density was the best. Pilodyn value was negatively correlated with the air-dried density of wood ($P < 0.000 1$), with the determination coefficient R : -0.300 2 to -0.518 4, and the fitting equation of air-dried density from outside was the best. There were very low R value ($R < 0.15$) in all prediction models of Pilodyn value and the fiber length, width, although there were significant negative correlation between Pilodyn value and the fiber length, and width. Therefore, we could not ensure the accuracy. Finally, we established the prediction models of air-dried density of the outside ($y = 2.478 2x^{-0.539}$) and the whole *P. zhennan* wood ($y = 0.953 8x^{-0.24}$), respectively. The establishment of the prediction model provides an idea and method for rapid nondestructive measurement of *P. zhennan* living wood in the future.

Key words: *Phoebe zhennan*; Pilodyn; air-dried density; fiber length and width; correlation

楠木(*Phoebe zhennan*)是楠属(*Phoebe*)的高大乔木,是我国特有的珍贵用材树种,国家二级重点保护树种;其木质坚实,纹理致密,花纹美观,木味香浓,耐腐蚀性强,是高档家具、雕刻艺术、建筑等的绝佳材料,素有“木中金子”之美称,还是一个城乡和庭园常用的绿化树种^[1-5]。该树种主要分布在海拔 1 100 m 以下的平原和山地,在排水良好、土层深厚的中性或微酸性冲积土上生长是最好的,在重庆、四川、贵州西部和湖北西部均有分布^[6-8]。由于楠木木材珍贵,历代均有砍伐利用,特别是明清两代的“木政”活动大量采伐楠木,使大径材楠木短缺,导致楠木资源稀缺^[6]。同时,由于社会经济的快速发展,经济建设开始侧重于用珍贵木材作为建材^[9],使得全国珍贵木材特别是楠木的供求矛盾变得越来越深。因此,加强对珍贵树种的保护及培育尤为重要。对现有资源进行快速、系统评价是开展楠木良种选育和遗传改良的基础。因而在楠木现存资源匮乏和作为重点保护树种的双重影响下,寻求一种快速、准确、无损测量楠木活立木木材材性的方法对现有楠木资源进行系统评选具有重要意义。

木材密度是木材重要的物理性质指标,与木材力学性质以及加工利用有着密切的关系,直接影响木材的加工质量和木材的用途^[10-13]。活立木密度测定的一般是在木材的胸高 1.3 m 处用生长锥取木芯或伐倒木法,然后用排水法来测定木材的基本密度。这种方法程序繁杂,耗时较长,而且在一定程度上损坏树木^[9]。并且树木被破坏后可能染病或者生长发育减缓降低其使用价值,造成了大量的浪费,另外高额的试验花费和大量试验数据的获取,也增加了育种试验的成本负担。Pilodyn 是一种无损检测

的仪器,其原理是预先将弹簧压缩,利用其能量,将钢针打入木材中,钉子射入的深度与木材密度密切相关,木材密度越大,则射入深度越浅^[14]。用所得到的 Pilodyn 探测数据与木材材性性状指标建立合适的回归方程,用于无损评价活立木材性性状差异^[15]。Pilodyn 小巧轻便,操作简单,结果可靠,可以在活立木上快速无损地大规模快取样,可实现快速、低价进行大量基因型材性测定,是材质育种中的关键技术^[16]。国内外已经尝试将 Pilodyn 运用在多个树种上,认为 Pilodyn 可以无损且快速检测活立木的木材密度,因此可以在传统取木芯后再进行测定的方法上作为补充方法,在一定条件下可代替传统木芯测定方法^[17-19]。目前已经在刨花楠(*Machilus pauhoi*)^[20-21]、白榆(*Ulmus pumila*)^[22]、大花序桉(*Eucalyptus cloeziana*)^[23]、华山松(*Pinus armandii*)^[24]、青海云杉(*Picea crassifolia*)^[25]等主要造林用材树种上取得成果,可以运用于木材密度无损检测,不仅提高了选择的效率,同时也加速了材性选择的进程。鉴于此,本研究以楠木为研究对象,通过 Pilodyn 方法,建立一种无损快速测量楠木木材材性指标的方法,为加速楠木材性育种开拓一种评价大量材料的可靠途径。

1 材料与方法

1.1 取样地概况与取样数量

本研究所用材料来自四川省楠木主要分布区,每个区域选择株数 2—15 株,共计 58 株活立木,树龄在 12~96 a。

1.2 试验方法

1.2.1 Pilodyn 使用方法 本次使用的仪器型号是

Pilodyn 6J。在取样林分中,在 1.3 m 胸高处确定南北方向,需要剥去该活立木表层树皮,用 Pilodyn 在南北向剥口处分别测定 2 次,取平均值,得南北向 Pilodyn 数据(P_s 和 P_n),再计算出南北向的平均值(P_a)。如果南北向分别 2 次测定的探测误差 >2 mm,则进行第 3 次测定,直至 2 次测定的误差值 <2 mm。

表 1 采样点基本情况
Table 1 Basic information of sampling points

地点	编号	经度	纬度	海拔/m	数量	树龄/a
泸州市纳溪区上马镇斑竹林	NX	105°20′5″	28°31′40″	280	10	42~74
宜宾市江安县底蓬镇	JA	105°6′10″	28°32′32″	277	2	19
宜宾市江安县仁河寨六明村	JA	105°8′4″	28°31′31″	480	2	74、78
宜宾市江安县仁河乡国有林场仁和管护站	JA	105°8′31″	28°30′12″	515	3	44~63
宜宾市江安县夕佳山镇夕佳山民居	JA	105°6′37″	28°36′6″	330	3	23~58
宜宾市长宁县飞泉寺	CN	105°0′42″	28°40′43″	256	10	34~80
宜宾市筠连县国有林场苗圃工区	JL	104°35′58″	28°12′31″	989	10	37~58
资阳市乐至县现代林业园区	LZ	105°3′54″	30°12′6″	634	15	12~33
成都市龙泉驿区龙泉山	LQ	104°17′28″	30°29′58″	1342	3	55~96

1.2.2 木芯取样 采用内径为 5 mm 的生长锥在 Pilodyn 仪器所测定位置,沿着树干的南北方向穿过髓心钻取整个胸径上的生长锥髓心,测定楠木材性指标。将取回的髓心首先用砂纸磨光滑数出总年轮,然后找到髓心位置从中间截断标记为南向和北向 2 段,除去两头的树皮部分,再将每段在距外侧 30 mm 位置处截成 2 部分,最后将剩余部分从髓心开始每 10 个年轮截 1 次。分别装袋,并写上编号、采集部位(南向外侧 so、北向外侧 no、南向髓心处 s1、北向髓心处 n1,依次编号)。

1.2.3 材性指标测定 采用饱和含水量法(GB/T 1929—2009)测定木材气干密度,分为南向外侧木材气干密度(D_{so})、北向外侧木材气干密度(D_{no})、南向木材气干密度(D_{s1} 、 D_{s2} 等)、北向木材气干密度(D_{n1} 、 D_{n2} 等)。采用硝酸离析法测定纤维长度和宽度。

1.3 数据分析

分别统计分析楠木不同材性指标,计算与树龄的 P ,要求 $P<0.05$ 才可以建立柱状图,采用回归分析探讨材性指标与树龄的相互关系。采用回归分析方法建立 Pilodyn 探测值与楠木材性性状的回归方程。选用 4 种不同的回归方程模型,即:线性回归方程模型: $y=b+ax$ 、指数回归方程模型: $y=be^{-ax}$ 、对数回归方程模型: $y=a\ln(x)+b$ 、幂函数回归方程模型: $y=bxa$ 构建回归方程,并要求 $P<0.05$ 再比较不同回归方程模型之间的决定系数值,选择最适模型构建楠木材性性状的回归方程预测模型。

2 结果与分析

2.1 纤维长度、宽度和气干密度与树龄之间的关系

楠木木材纤维长度、宽度和长宽比与树龄具有显著的相关性(图 1)。其中纤维长度($R=0.885\ 4$,

$P<0.000\ 1$)和纤维长宽比($R=0.809\ 5$, $P<0.000\ 1$)随着树龄的增加呈增加的趋势,而纤维宽度随着树龄的增加表现出减少的趋势($R=-0.486\ 4$, $P<0.000\ 1$)。楠木气干密度与树龄没有相关关系($R=-0.218\ 4$, $P<0.000\ 1$)。

2.2 楠木 Pilodyn 值、木材密度特性

楠木南向、北向 Pilodyn 测定值分别在 13.75~25.00 mm 和 13.00~24.25 mm,变异系数分别为 12.17%和 12.23%(表 1)。楠木南北向外侧木材气干密度在 0.4~0.69 和 0.42~0.68,变异系数分别为 11.69%和 9.89%。南北向内部木材气干密度分别在 0.13~0.66 和 0.28~0.57,变异系数分别为 24.36%和 19.58%。整株木材气干密度在 0.4~0.57,平均值为 0.49,变异系数为 9.63%。表层(0~30 mm)木材气干密度在 0.31~0.64,平均值为 0.54,变异系数为 11.8%。

2.3 楠木 Pilodyn 测定值与气干密度回归方程选择及其相关性

设木材气干密度为因变量 x ,Pilodyn 测定值为自变量 y ,用 4 个函数模型建立回归线方程,从中选择最优的预测模型。楠木的 Pilodyn 测定值与整株木材气干密度和外部木材气干密度均呈现出极显著的负相关关系($P<0.000\ 1$)(图 2)。由表 3 可以看出,外部木材气干密度的决定系数(R)比整株木材气干密度的决定系数(R)大,表明 Pilodyn 测定值预测树干外部木材气干密度的准确度略高于整株气干密度。根据指数函数构建的预测模型决定系数明显高于其他 3 个预测模型,可作为 Pilodyn 预测楠木木材材性的最佳预测模型,这也适用于其他部位的木材气干密度预测模型。进一步地使用指数函数构建的外部木材气干密度预测模型的决定系数高于整株模型($-0.4776>-0.3002$),表明利用 Pilodyn

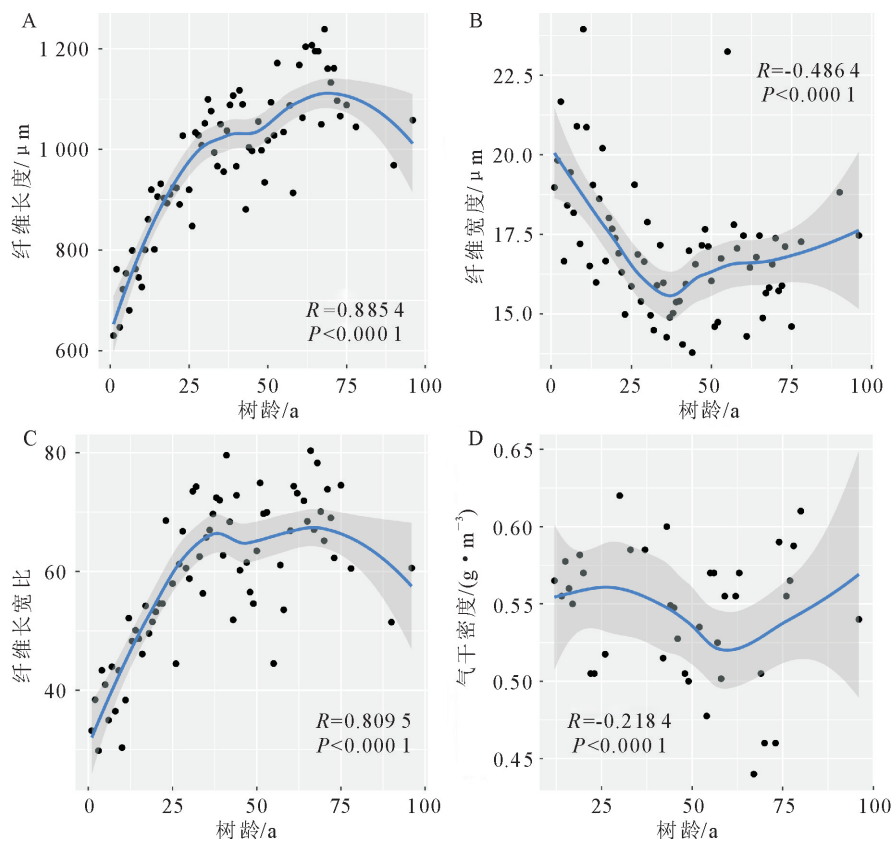


图1 纤维长度宽度、长宽比随树龄变化趋势

Fig. 1 Variation trends of fiber length,width and aspect ratio with tree age

表2 楠木 Pilodyn 值和木材材性指标

Table 2 Pilodyn value and wood property index of *Phoebe zhennan* wood

项目	测定值	平均值	最大值	最小值	变异系数(%)
Pilodyn 测定值/mm	南向	17.59	25.00	13.75	12.17
	北向	17.81	24.25	13.00	12.23
木材密度/(g·cm ⁻³)	南向外侧	0.56	0.69	0.40	11.69
	北向外侧	0.56	0.68	0.42	9.89
	南向内部	0.42	0.66	0.13	24.36
	北向内部	0.41	0.57	0.28	19.58
	整株	0.49	0.57	0.40	9.63
	表层 0~30 mm	0.54	0.64	0.31	11.80

测定值构建的预测模型预测木材外部气干密度的准确性高于整株预测值。

由表 3 可以看出,楠木 Pilodyn 测定值与木材气干密度呈现出极显著的负相关关系($P<0.0001$),外侧木材气干密度预测模型决定系数($R=-0.5184$ 、 -0.4988)高于内部模型($R=-0.3504$ 、 -0.3124)。表明利用 Pilodyn 测定值构建的预测模型预测木材外侧气干密度的准确性高于内部。

2.4 Pilodyn 测定值与楠木内外侧纤维长度宽度的相关性

同样用 4 个函数模型建立回归线方程,分别比较楠木 Pilodyn 测定值与木材纤维长度宽度预测模

型决定系数,选择决定系数 R 最大的作为其预测模型。由表 4、图 3 可以看出,楠木 Pilodyn 测定值与木材纤维长度宽度呈现出显著的负相关关系($P<0.05$),但决定系数都 <0.15 ,因此无法保证预测模型结果的准确性,不能用于楠木木材纤维长度和宽度的预测。

3 结论与讨论

3.1 讨论

楠木树龄与纤维长度、宽度有极显著的相关关系($P<0.0001$),纤维长度随树龄增加而增长,纤维宽度随树龄增加而缩短。与杨进等^[26]对楠木不

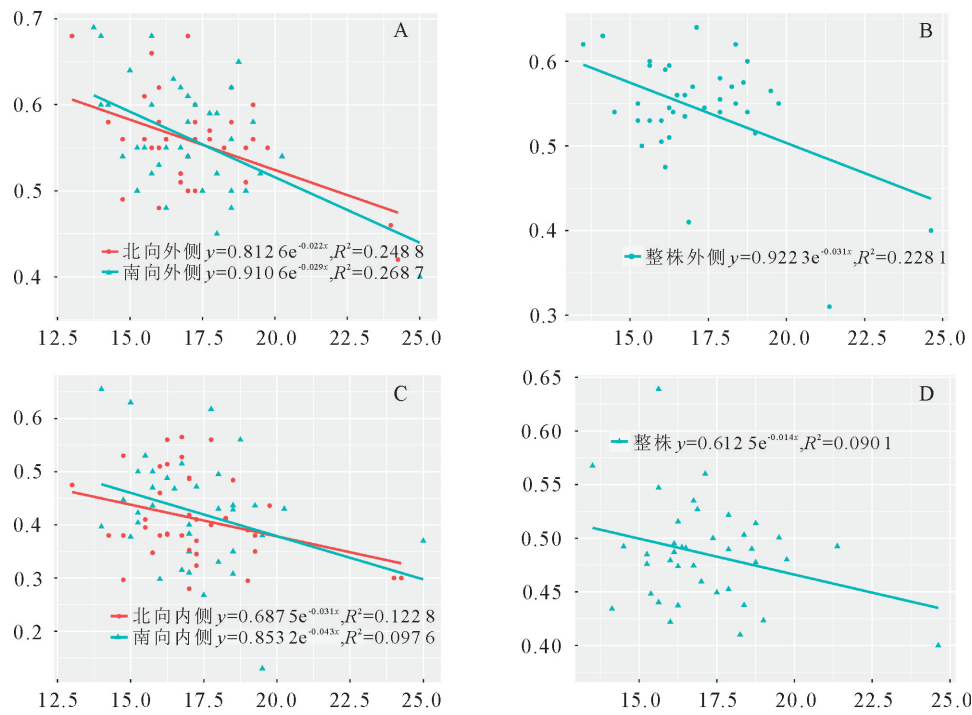


图 2 Pilodyn 测定值与楠木气干密度回归分析

Fig. 2 Regression analysis between measured value of Pilodyn and air dry density of *P. zhenan* wood

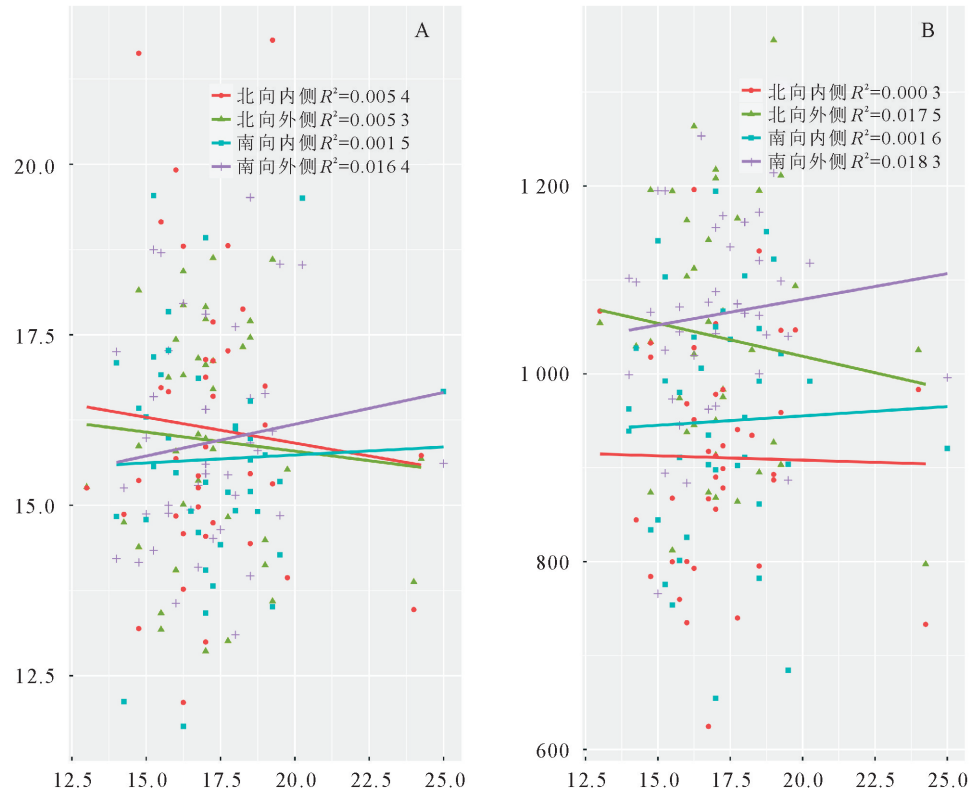


图 3 Pilodyn 测定值与楠木纤维长度和宽度回归分析

Fig. 3 Regression analysis between measured value of Pilodyn and fiber length and width of *P. zhenan* wood

同年轮部位纤维长度和宽度的变化规律研究结果有所差异,这可能与研究对象和取材部位的差异有关,本研究取材为不同植株,且这些植株来自不同地区,纤维长度和宽度性状可能受环境影响较大。刘敏等^[27]研究分析了庐山和新津 2 地楠木纤维径向长

度宽度随树龄的变化。研究结果显示,处于 2 个不同地区的楠木长度宽度随树龄的变化有很大不同:庐山的为楠木纤维长度随树龄增加而缩短,纤维宽度随树龄增加变化不大;新津的为楠木纤维长度和纤维宽度都随树龄增加而增加。这表明地理位置会

表 3 Pilodyn 测定值与木材气干密度回归关系

Table 3 Regression relationship between measured value of Pilodyn and air dry density of wood

项目	回归方程	R^2	R	P
整株树木材气干密度	$y = 0.6125e^{-0.014x}$	0.090 1	-0.300 2	<0.000 1
	$y = -0.0067x + 0.6002$	0.085 8	-0.292 9	<0.000 1
	$y = -0.117\ln(x) + 0.8177$	0.080 6	-0.283 9	<0.000 1
	$y = 0.9538x^{-0.24}$	0.083 2	-0.288 4	<0.000 1
外部木材气干密度	$y = 0.9223e^{-0.031x}$	0.228 1	-0.477 6	<0.000 1
	$y = -0.0144x + 0.7891$	0.210 3	-0.458 6	<0.000 1
	$y = -0.248\ln(x) + 1.2442$	0.191 5	-0.437 6	<0.000 1
	$y = 2.4782x^{-0.539}$	0.206 1	-0.454 0	<0.000 1
南向外侧	$y = 0.9106e^{-0.029x}$	0.268 7	-0.518 4	<0.000 1
北向外侧	$y = 0.8126e^{-0.022x}$	0.248 8	-0.498 8	<0.000 1
南向内部	$y = 0.6875e^{-0.031x}$	0.122 8	-0.350 4	<0.000 1
北向内部	$y = 0.8532e^{-0.043x}$	0.097 6	-0.312 4	<0.000 1

表 4 Pilodyn 测定值与木材纤维长度宽度回归关系

Table 4 Regression relationship between Pilodyn measured value and wood fiber length and width

项目	回归方程	R^2	R	P
南向外侧纤维长度	$y = 749.55x^{0.1216}$	0.018 3	0.135 3	<0.000 1
北向外侧纤维长度	$y = 117.9e^{-0.008x}$	0.017 5	-0.132 3	<0.000 1
南向外侧纤维宽度	$y = 11.645x^{0.1086}$	0.016 4	0.128 1	0.006 1
北向外侧纤维宽度	$y = 16.874e^{-0.004}$	0.005 3	-0.072 8	0.006 3
南向内部纤维长度	$y = 43.123\ln(x) + 827.26$	0.001 6	0.04	<0.000 1
北向内部纤维长度	$y = -16.99\ln(x) + 958.91$	0.000 3	-0.017 3	<0.000 1
南向内部纤维宽度	$y = 15.042e^{0.002x}$	0.001 5	0.038 7	0.001 3
北向内部纤维宽度	$y = -0.0757x + 17.424$	0.005 8	-0.076 2	0.033 2

影响楠木纤维长度和宽度随树龄的变化趋势。

用生长锥取样测定楠木木材气干密度,结果显示楠木外侧木材气干密度大于内部木材气干密度,导致这一现象原因有 2 个:一是由于树木的生长,树体承受的压力增加,需要增加躯干的强度和硬度来抵抗压力,因此分泌更多的物质使得木材气干密度增大;二是因为树木生长受到的压力越来越大,压力使树木的细胞的空隙被挤压填补,细胞之间变得更紧实,使木材气干密度增大^[28]。生长锥法等传统方法测定木材材性性状结果直接、准确,但其费时、费力,对立木损伤较大^[29],不同于生长锥,Pilodyn 通过测定阻力值间接预测木材材性,有着无损、便捷、快速的优点,已成为用材树种材性改良应用最广的测量工具^[30]。

楠木 Pilodyn 测定值与木材气干密度的 4 个预测模型中,指数方程的拟合程度是最好的,因此采用指数方程来建立预测楠木的木材气干密度的预测方程是可行的。楠木 Pilodyn 测定值与不同部位的木材气干密度都呈现极显著的负相关关系 ($P < 0.0001$),外侧拟合度比内部拟合度高,南部外侧拟合度大于北向外侧,南向内部拟合度大于北向内部。这与日本落叶松 (*Larix kaempferi*)^[16]、大花序桉 (*Eucalyptus cloeziana*)^[23] 和华山松 (*Pinus ar-*

mandii)^[24] 结果一致。说明可以用 Pilodyn 预测楠木木材气干密度,且外侧好于内部,南向好于北向。

楠木 Pilodyn 测定值与木材南北向纤维长度呈现极显著的相关关系 ($P < 0.0001$),与木材纤维宽度呈现显著的相关关系 ($P < 0.05$),南向为正相关关系,北向为负相关关系。Pilodyn 测定值与木材纤维长度和宽度拟合系数很小,拟合度低,说明用 Pilodyn 来预测楠木纤维长度宽度可行性不高。

3.2 结论

通过 Pilodyn 无损检测方法,以楠木活立木木材气干密度、纤维长度、纤维宽度和纤维长宽比实测值为基础,构建楠木木材材性检测无损预测模型。纤维长度和纤维宽度受到树龄的影响较大,而气干密度与树龄无明显相关性。不同预测模型中,指数方程的拟合效果最佳,可用于楠木木材材性指标与模型的构建。基于 Pilodyn 值构建的纤维长度和纤维宽度预测模型拟合度较低,难以用于楠木活立木的无损监测。而 Pilodyn 值与木材外侧和整株气干密度拟合度高,可用于楠木活立木气干密度的无损监测。

参考文献:

- [1] 方文培. 四川植物志[M]. 成都:四川人民出版社,1981.
- [2] 马羽,许亚洲,袁慧,等. 湖北省杉木人工林胸径差分方程及多形地位指数表研究[J]. 森林工程,2023,39(2):72-81.

- [3] 龙汉利,张炜,宋鹏,等. 四川桢楠生长初步分析[J]. 四川林业科技,2011,32(4):89-91.
- [4] 周祖洪,陈孝,纪程灵,等. 桢楠径向生长量变化规律研究[J]. 湖南林业科技,2014,41(6):66-69.
- [5] 辜云杰,李晓清,杨汉波. 基于 MaxEnt 生态位模型预测桢楠在中国的潜在适宜栽培区[J]. 西北林学院学报,2021,36(2):136-141.
GU Y J, LI X Q, YANG H B. MaxEnt model-based prediction of suitable cultivation area of *Phoebe zhennan* in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 136-141. (in Chinese)
- [6] 张炜,江波,蒋晔,等. 四川省桢楠天然群体种子表型多样性的初步研究[J]. 四川林业科技,2009,30(6):75-78.
- [7] 赵翼. 楠木古今浅谈[J]. 四川林业科技,1980,3:87-88.
- [8] 刘闯豪,谭斌,杨勇智,等. 桢楠容器育苗技术研究[J]. 西北林学院学报,2022,37(3):120-125.
LIU M H, TAN B, YANG Y Z, et al. Technologies of nursing container seedlings of *Phoebe zhennan* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3): 120-125. (in Chinese)
- [9] 李晓清,唐森强,隆世良,等. 桢楠木材的物理力学性质[J]. 东北林业大学学报,2013,41(2):77-79.
LI X Q, TANG S Q, LONG S L, et al. Timber physical and mechanical properties of *Phoebe zhennan* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(2): 77-79. (in Chinese)
- [10] 成俊卿. 木材学[M]. 北京:中国林业出版社,1985.
- [11] 杨露露,董喜斌,徐华东. 电阻法和应力波法在活立木内部腐朽缺陷检测中的对比[J]. 森林工程,2022,38(4):82-88.
- [12] 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):7-75.
- [13] 姜新波,宋靖,夏鹏. 桦木波动干燥过程中温度和水分扩散数值模拟[J]. 森林工程,2022,38(1):34-41,51.
- [14] TAYLOR F W. Rapid determination of southern pine specific gravity with a Pilodyn tester[J]. Forest Science, 1981, 27: 59-61.
- [15] 丁显印,陶学雨,刁姝,等. Pilodyn 和 Resistograph 对湿地松活立木基本密度的评估[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(3):142-148.
DING X Y, TAO X Y, DIAO S, et al. Estimation of wood basic density in a *Pinus elliottii* stand using Pilodyn and Resistograph measurements[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2020, 44(3): 142-148. (in Chinese)
- [16] 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.
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. (in Chinese)
- [17] COWN D J. Comparison of the Pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1978, (8): 384-391.
- [18] GOUGH G, BARNES R D. A comparison of three methods of wood density assessment in a *Pinus elliottii* progeny test[J]. South African Forestry, 1984, 128: 2-22.
- [19] WANG T L, AITKEN S N. Selection for improved growth and wood density in lodgepole pine: effects on radial patterns of wood variation[J]. Wood Fiber Sci, 2000, 32(4): 43-391.
- [20] 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.
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. (in Chinese)
- [21] 冷春晖,易敏,张露,等. 刨花楠木材主要解剖性状与材性快速评估指标间的关系[J]. 林业工程学报,2019,4(5):46-53.
LENG C H, YI M, ZHANG L, et al. Study on the relationship between main wood anatomical traits and wood properties rapid assessment indexes of *Machilus pauhoi* [J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(5): 46-53. (in Chinese)
- [22] 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.
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. (in Chinese)
- [23] 李昌荣,周维,陈健波,等. Pilodyn 评估大花序桉活立木木材基本密度[J]. 桉树科技,2013,30(3):35-41.
- [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.
LIANG B S, ZHU J L, WANG J H, et al. The application of the Pilodyn to assess wood traits of living trees [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(6): 97-101. (in Chinese)
- [25] 菇广欣,李林,朱秀红. Pilodyn 在青海云杉活立木基本密度预测中的应用[J]. 河南农业大学学报,2009,43(5):506-510.
RU G X, LI L, ZHU X H. Application of the Pilodyn to assessment of wood basic density of standing trees in *Picea crassifolia* Kom. [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2009, 43(5): 506-510. (in Chinese)
- [26] 杨进,宁莉萍,刘敏,等. 桢楠木材构造特征及其径向变异研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(2):7-14.
YANG J, NING L P, LIU M, et al. Wood characteristics and radial variations of *Phoebe zhennan* [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2018, 46(2): 7-14. (in Chinese)
- [27] 刘敏. 四川两产地桢楠木材构造及其性能研究[D]. 成都:四川农业大学,2016.
- [28] 徐明锋,柯炳氢,张毅,等. 粤东6种阔叶树木材密度及其影响因子研究[J]. 华南农业大学学报,2016,37(3):100-106.
XU M F, KE X D, ZHANG Y, et al. Wood densities of six hardwood tree species in Eastern Guangdong and influencing factors [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(3): 100-106. (in Chinese)
- [29] FUNDAOVA I, FUNDA T, WU H X. Non-destructive wood density assessment of scots pine (*Pinus sylvestris*) using resistograph and pilodyn [J]. Plos one, 2018, 13(9): e0204518.
- [30] 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.