

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.023

# 基于圆柱面模型的仿形喷雾植物冠层密度超声量化测试

南玉龙 张慧春 郑加强 焦祥 徐幼林 王国苏

(南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

**摘要:** 基于低成本超声波传感器搭建了一套植物冠层超声回波信号检测系统,建立了基于圆柱面叶片分布模型的量化测试台。在正交中心复合设计试验基础上,建立了超声回波信号均值与冠层密度、探测距离的定量关系,即植物冠层密度量化模型。对已建立的植物冠层密度量化模型进行方差分析,结果表明,植物冠层密度量化模型具有显著性,且失拟性不显著。植物冠层密度量化模型决定系数  $R^2$  和预测模型决定系数  $R^2$  分别为 0.988 5 和 0.911 4,表明试验值和预测值具有良好的一致性。为了验证已建立的植物冠层密度量化模型的可靠性,于室内测试台进行了 4 种植物在 3 种不同测试距离下的冠层密度验证测试,试验结果表明,实测值与模型测量值的相对误差最小为 1.230%,最大为 13.650%,平均相对误差为 6.120%,植物冠层密度量化模型对室内测试台的冠层密度测量有较好适用性。室外选择 3 棵不同的桂树,每棵树选择 9 个测试点进行验证测试,试验结果表明,实测密度与模型测量密度的最小相对误差为 3.959%,最大相对误差为 20.600%;3 棵桂树的实测密度与模型测量密度的平均相对误差分别为 11.244%、12.246% 和 9.628%,植物冠层密度量化模型对户外桂树密度测量有较好的适用性。

**关键词:** 仿形喷雾; 植物冠层; 超声波传感器; 圆柱面模型; 密度量化模型

**中图分类号:** S491; S122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0209-08

## Ultrasonic Quantification Test of Plant Canopy Density Based on Cylindrical Surface Model

NAN Yulong ZHANG Huichun ZHENG Jiaqiang JIAO Xiang XU Youlin WANG Guosu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** A set of ultrasonic echo signal detection system was constructed based on low-cost ultrasonic sensors, and a quantification test bench was established based on the cylindrical surface leaf blade distribution model. Based on the orthogonal center composite design experiment, a quantitative relationship among the mean value of ultrasonic echo signals, canopy density and detection distance was established, namely the plant canopy density quantitative model. The variance analysis of the established plant canopy density quantification model showed that the plant canopy density quantitative model was very significant, and the loss of quasi-simulation was not significant. The  $R^2$  and predicted  $R^2$  by the plant canopy density quantification model were 0.988 5 and 0.911 4, respectively, indicating good agreement between the experimental values and the predicted values. In order to verify the reliability of the established plant canopy density quantitative model, four canopy densities were used in indoor to perform verification tests at three different distances. The experiment results showed that the minimum relative error between the measured value and the model measured value was 1.230%, the maximum relative error was 13.650%, and the average relative error was 6.120%. The plant canopy density quantitative model had a good applicability to the canopy density measurement of the indoor test bench. Three *Osmanthus* trees were selected to verify the model in the outdoor and nine test points were selected for each tree. The experiment results showed that the minimum relative error of the measured density and the model density was 3.959% and the maximum relative error was 20.600%, and the average relative

收稿日期: 2018-07-05 修回日期: 2018-08-09

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31371963)、江苏省六大人才高峰项目(NY-058)、江苏省青蓝工程项目(苏教201812)、江苏省333工程项目(苏人20186)、国家留学基金项目(201808320043)和江苏高校优势学科建设工程项目

**作者简介:** 南玉龙(1991—),男,博士生,主要从事智能植保机械和农药精确使用技术研究,E-mail: nanyulong2012@163.com

**通信作者:** 张慧春(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事智能植保机械和农药精确使用技术研究,E-mail: njzhanghc@hotmail.com

error between the measured density and the model measured density of three Osmanthus trees was 11.244%, 12.246% and 9.628%, respectively. Therefore, the plant canopy density quantitative model established was suitable for outdoor density measurement of Osmanthus trees.

**Key words:** profiling spray; plant canopy; ultrasonic sensor; cylindrical surface model; density quantitative model

## 0 引言

近年来,环境问题与食品安全受到人们的广泛关注,农药的过量使用对环境、食品和人类健康构成了潜在风险<sup>[1]</sup>。传统农林病虫害防治中,采用连续均匀喷施农药,易导致农药飘移和过量施药,造成环境污染,以及农林产品与土壤中农药残留超标<sup>[2]</sup>。

仿形变量喷雾是提高农药利用率,降低农林产品农药残留的主要途径之一<sup>[3-4]</sup>。仿形变量喷雾是根据农林植物冠层特征,调整喷头组到达理想喷雾距离,并实时改变喷雾参数(喷雾量和气流量等),以获得理想喷雾效果。植物冠层特征信息包括植物冠层的直径、体积、密度、叶面积指数和叶面积密度等。超声波技术、激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)、立体视觉、数字摄影技术、光传感器和高分辨率雷达图像是探测植物冠层特征信息的主要技术<sup>[5-10]</sup>。由多个超声波传感器和GPS(全球定位系统)组成的超声波探测系统能够实时探测植物冠层的高度、宽度、体积和叶面积指数等冠层特征信息,经过微控制器计算处理后,微控制器发出控制信号,实时改变施药系统的喷雾参数<sup>[11-17]</sup>。多层感知神经网络算法能够根据超声波传感器测得冠层高度和宽度信息,可靠地估计冠层体积<sup>[18]</sup>。环境温度、喷嘴相对于超声波传感器的物理位置、长期的寒冷条件等因素会影响超声波传感器测量冠层尺寸的精度,对变量施药产生不利影响<sup>[19-20]</sup>。

LiDAR 传感器能够采集果树冠层的三维点云数据,经计算机处理后重建果树三维模型,获得果树的宽度、高度、体积、叶面积指数和叶面积密度等冠层特征信息<sup>[21-24]</sup>,应用于变量施药决策。研究人员在LiDAR 传感器采集植物冠层三维点云数据的基础上,采用凸包法、 $\alpha$ 形重建算法<sup>[25]</sup>、分段凸包法、基于柱面的建模法和三维占用网格法<sup>[26]</sup>等提高树冠体积的计算精度。LiDAR 到植物中心的距离误差和LiDAR 定位角度是LiDAR 估计树冠体积的主要误差来源,需要其他设备或程序估计和纠正这些误差源<sup>[27]</sup>。

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是表征植株生长活力的一个重要指标<sup>[28]</sup>。超声波传感器测量的作物体积和叶面积指数之间具有良好的相关

性<sup>[12]</sup>。LiDAR 测量冠层体积与 LAI 测量值之间具有很好的相关性( $R^2 = 0.81$ )。数字摄影技术也可以用于估计 LAI<sup>[29]</sup>。基于不同果树冠层特征信息,采用不同喷雾体积沉积模型在苹果园进行施药试验,试验结果表明,植物面积密度是作为估计农药剂量的最佳单株果树冠层特征信息<sup>[30]</sup>。

PALLEJA 等<sup>[31-32]</sup>利用超声波回波包络信号的强度估计冠层密度,结果表明,回波信号强度可以表征冠层密度。LI 等<sup>[33]</sup>基于多层平面阵列式叶片分布模型建立了超声波波强能量与冠层密度之间的定量关系,未充分考虑实际植物叶片的分布特性,可能会影响到冠层密度模型估计的准确率,且未涉及户外植物冠层密度测试验证。

本文基于圆柱面叶片分布模型的超声波回波信号均值与植物冠层密度的定量关系,建立植物冠层密度量化模型,并进行室外植物冠层密度测试,验证冠层密度量化模型的适用性。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 超声波回波信号检测系统

为获取超声波回波包络信号,搭建了一套超声波回波信号检测系统,如图1所示,该系统主要由超声波传感器、单片机控制板、电源转接板、CH340 模块、计算机、数据采集卡等组成。

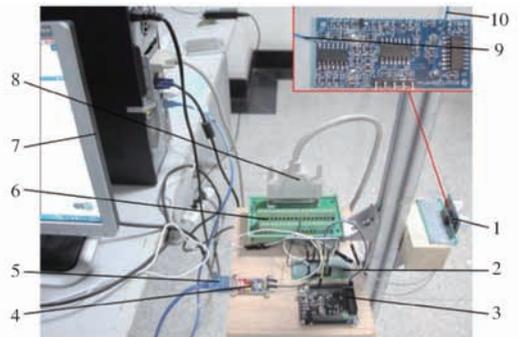


图1 超声波回波信号检测系统

Fig. 1 Ultrasonic echo signal detection system

1. 超声波传感器 2. 电源转接板 3. 单片机控制板 4. CH340 模块 5. USB 延长线 6. 数据采集卡端子板 7. 计算机 8. 数据采集卡数据线 9. B 引线 10. A 引线

从超声波传感器(HY-SRF05 型,深圳北科商贸有限公司)的电路板引出 A 和 B 两条测量线,A 引线接在 ST202 芯片第 7 引脚,采集超声波发射信号;B 引线接在 LM324 芯片的第 7 引脚,采集超声

波回波电压信号。单片机控制板(STM32F103RCT6 核心板, 广州星翼电子科技有限公司)为 HY-SRF05 型超声波传感器提供触发信号。USB 延长线连接计算机和 CH340 模块(深圳市北科商贸有限公司), 为电源转接板、HY-SRF05 型超声波传感器和 STM32F103RCT6 核心板提供 5 V 电压。数据采集卡(凌华 PCI9111DG/HR 采集卡, 凌华科技有限公司)模拟输入口通过数据线与数据采集卡端子板(北京华创至诚科技有限公司)分别接入 A 和 B 两条引线, 将采集的电压信号传输到计算机, 并用 Matlab 软件对采集的信号进行分段、Hibert 变换, 以获得超声回波电压信号。

## 1.2 密度计算方法

利用超声波回波信号检测系统采集超声波回波电压信号, 超声波回波信号如图 2 所示。图中标记 A 范围的信号为回波误信号, 标记 B 范围的信号为有效回波信号。由于 HY-SRF05 型超声波传感器是收发分体式, 收发探头之间距离很近, 发射探头发射的超声波首先到达接收探头, 该信号是回波误信号, 这也是收发分体式超声波传感器产生测距盲区的原因。

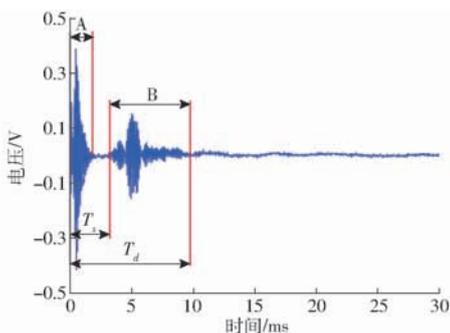


图 2 超声波回波信号

Fig. 2 Ultrasonic echo signal

超声波发射后, 遇到植物冠层前端边缘后反射回波, 被接收探头检测到, 所需的时间为  $T_s$ ; 遇到冠层后端边缘后反射回波, 被接收探头检测到, 所需时间为  $T_d$ , 计算公式为

$$T_s = 2x_2/v \quad (1)$$

$$T_d = 2(x_2 + D_c)/v + t_0 \quad (2)$$

式中  $x_2$ ——超声波传感器到冠层前端边缘的距离, m

$D_c$ ——超声波穿透冠层的距离, m

$t_0$ ——超声发射探头发射超声波的持续时间, s

$v$ ——超声波在空气中的速度, m/s

本次试验中  $t_0$  为 1.8 ms, 超声波速度  $v$  为 340 m/s。

采集的超声波回波信号为数字信号, 因此需要根据  $T_s$  和  $T_d$  确定有效回波数字信号的开始序列号  $N_s$  与结束序列号  $N_d$ 。

$$N_s = \lfloor T_s f \rfloor \quad (3)$$

$$N_d = \lfloor T_d f \rfloor \quad (4)$$

式中  $f$ ——采样频率

$\lfloor \cdot \rfloor$ ——向上取整运算

本次试验中, 采样频率  $f$  为 50 kHz。

回波信号电压受到测量距离、冠层密度和冠层空间维度等因素的影响, 回波信号均值为

$$\bar{X} = \frac{1}{T_d - T_s} \int_{T_s}^{T_d} x(t) dt \quad (5)$$

$$\bar{X}' = \frac{1}{N_d - N_s} \sum_{k=N_s}^{N_d} x(k) \quad (6)$$

式中  $\bar{X}$ ——模拟信号均值, mV

$\bar{X}'$ ——数字信号均值, mV

$x(t)$ ——模拟信号

$x(k)$ ——数字信号

$t$ ——时间, s

## 1.3 密度检测系统

密度检测系统由测试台、可调节支架和超声波回波信号检测系统组成, 提供一个密度和距离参数可调的测试环境, 其中测试台由三合板 A、三合板 B、中间方木条、底角方木条、鱼线、树叶和带孔自攻螺丝组成, 超声波传感器安装在可调节支架上, 如图 3 所示。

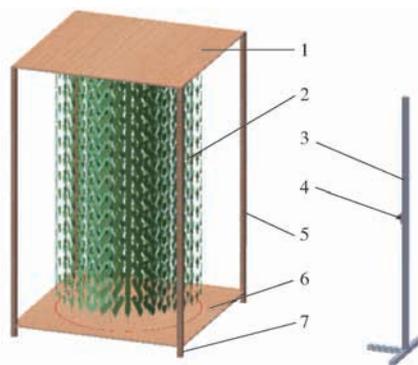


图 3 密度测试台与可调节支架

Fig. 3 Density test bench and adjustable bracket

1. 三合板 A 2. 树叶 3. 可调节支架 4. 超声波传感器 5. 中间方木条 6. 三合板 B 7. 底角方木条

三合板 A 与三合板 B 的尺寸(长 × 宽 × 厚)为 100 cm × 100 cm × 1 cm, 在三合板 A 的下表面安装带孔螺栓, 带孔螺栓以三合板 A 的中心为圆心, 呈圆形分布, 共有 4 圈, 每圈均布 36 个带孔螺栓; 三合板 B 上表面与三合板 A 上的带孔螺栓分布相同。在三合板 A 与三合板 B 对应的带孔螺栓上连接直径 0.203 mm 鱼线, 鱼线对超声回波几乎没有影响。每一圈带孔螺栓上连接的 36 根鱼线组成一层圆柱面, 为了使相邻圆柱面之间包含的体积相等, 则 4 层圆柱面底面半径符合关系

$$\pi (r_4 - r_3)^2 = \pi (r_3 - r_2)^2 = \pi (r_2 - r_1)^2 = \pi r_1^2 \quad (7)$$

式中  $r_1, r_2, r_3, r_4$ ——4层圆柱面底面半径, cm

本次试验中,  $r_4$  为 40 cm, 经计算  $r_1, r_2, r_3$  分别为 20、28.3、34.6 cm。底面半径的设置便于每层圆柱面上等密度分配树叶; 常见植物冠层外形主要有圆头形、圆柱形、纺锤形、分层形、十字形和自然开心形等, 测试台内树叶分布与植物圆柱形冠层特性近似。

试验中选用桂树叶片, 每片叶子质量为 0.5 ~ 1.5 g, 每根鱼线上最多能放置树叶质量为 8 g, 因此每层圆柱面上叶子的最大质量为 288 g, 相邻圆柱面间体积均为 0.188 5 m<sup>3</sup>, 则每层圆柱面叶子最大密度为 1 527.85 g/m<sup>3</sup>, 最小密度设置为最大密度的 10%, 即 152.78 g/m<sup>3</sup>。

#### 1.4 超声波传感器波束宽度测量试验

波束宽度是决定超声波传感器检测范围的重要参数。图 4 为超声波传感器波束宽度测量示意图, 图中  $xy$  面与地面平行, 试验中左、右挡板与传感器的距离  $S$  始终保持相同,  $S$  将由正交中心复合试验计算获得。 $D_r$  是测量中心线与右挡板的距离,  $D_l$  是测量中心线与左挡板的距离。

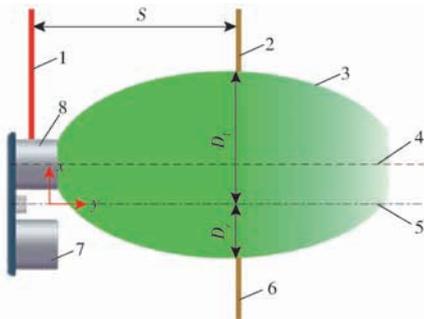


图4 超声波传感器波束宽度测量示意图

Fig.4 Schematic for measuring beam width of ultrasonic sensor

1. 发射起点 2. 左挡板 3. 超声波波束 4. 发射探头中心线  
5. 测量中心线 6. 右挡板 7. 超声波传感器接收探头 8. 超声波传感器发射探头

试验中, 将超声波传感器置于一个接收不到回波的空旷空间, 采用 Matlab 软件控制数据采集卡实时采集显示回波信号波形, 左、右挡板分别向测量中心线移动, 直到传感器接收到回波信号, 测量并记录左、右挡板到测量中心线的距离  $D_l$  和  $D_r$ , 在不同  $S$  下,  $D_l$  与  $D_r$  均测量 3 次并求均值, 波束宽度为  $D_l$  与  $D_r$  之和。

#### 1.5 正交中心复合试验设计

中心复合设计是最常用的响应面设计试验<sup>[33]</sup>。利用正交中心复合设计试验的数据, 建立因素与响应值之间的回归方程。响应值是回波信号的均值,

因素是植物冠层密度与距离, 通过正交中心复合设计试验获得冠层密度数学模型。本次试验中, 因素编码如表 1 所示。

表1 因素编码

Tab.1 Coding of factors

| 编码     | 因素  |                     |
|--------|---|---------------------|
|        | 冠层密度 $x_1 / (\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ | 距离 $x_2 / \text{m}$ |
| -1.147 | 152.78                                      | 0.50                |
| -1     | 241.13                                      | 0.55                |
| 0      | 840.31                                      | 0.90                |
| 1      | 1 439.50                                    | 1.25                |
| 1.147  | 1 527.85                                    | 1.30                |

在正交中心复合试验中, 测试点安排需要考虑超声波传感器的波束宽度(波束宽度测量结果在 2.1 节中说明),  $D_l$  和  $D_r$  最大值均小于 30 cm, 测试点离三合板与中间方木条距离均在 40 cm 以内, 测试点置于测试台正面的垂直中心线上, 测试点间距为 35 cm, 如图 5 所示, 其他 3 个侧面测试点采用相同安排方式, 编号依次标注。

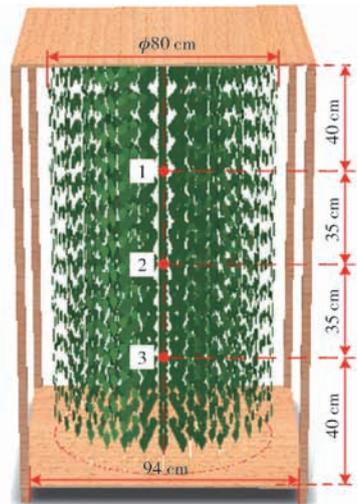


图5 测试台正面测试点分布图

Fig.5 Test point distribution diagram in front of test bench

每组试验中, 将 12 个测试点测得的回波信号均方值去掉最大值和最小值, 对剩余 10 个回波信号均方值求平均, 得到该组试验的响应值。通过 11 组试验数据, 利用 Design-Expert 软件计算出不同阶次的二元多项式回归方程, 比较回归方程的显著性与失拟性, 选出最适合阶次的二元多项式回归方程。

在叶片呈圆柱面分布特征的测试台上, 通过正交中心复合试验, 建立冠层密度模型。图 6 为室内试验现场图, 室温 15 ~ 20℃, 相对湿度 45% ~ 56%。每个测试点重复测 3 次, 对测量结果求均值, 作为该测试点的测量值。

#### 1.6 冠层密度量化模型的验证

为了验证植物冠层量化模型的适用性, 选用 4 种



图 6 冠层密度量化测试现场图

Fig. 6 Scene diagrams of quantitative test of canopy density

冠层密度 425.72、716.18、1 068.94、1 297.98 g/m<sup>3</sup>, 分别在距离超声波传感器 0.8、1.0、1.2 m 处测得超声回波信号的均值, 并与植物冠层量化模型的计算结果作比较。

桂树, 为常绿阔叶乔木, 不仅是我国重要的绿化树种, 也具有很强的药用价值, 从形态特性来看其冠层近似于圆柱形, 室内测试台选用桂树叶片, 室外试验选定树种为桂树。室外选择南京林业大学校园内(北纬 32°4'52", 东经 118°48'37") 密度不同的 3 棵桂树, 分别标记为桂树 A、桂树 B、桂树 C, 每棵桂树测试 9 个点, 测试点分布如图 7 所示, 室外温度 15 ~ 19℃, 相对湿度 50% ~ 60%。以每个测试点为中心、半径为  $r$  的圆为超声密度测试有效范围, 以桂树 A 的第 9 个测试点为例, 用浅蓝色圈标记, 则该范围的人工测量密度计算公式为

$$\rho = \frac{\bar{m}\varphi}{V} \quad (8)$$

其中  $V = \pi r^2 D_c$  (9)

式中  $V$ ——有效范围内冠层体积, m<sup>3</sup>  
 $r$ ——有效范围的半径, m  
 $\rho$ ——人工测量密度, g/m<sup>3</sup>  
 $\bar{m}$ ——该棵桂树平均叶片质量, g  
 $\varphi$ ——有效范围内的叶片数

从桂树 A、B、C 上随机摘取 100 片叶子, 用 Sartorius BS110S 型天平(赛多利斯科学仪器北京有限公司)称量, 求得叶片平均质量  $\bar{m}$  分别为 0.75、0.70、0.78 g。

桂树 A、B、C 的最大冠层直径分别为 2.7、2.4、3.1 m, 由于户外桂树冠层直径较大, HY-SRF05 型超声传感器能检测到明显回波的有效距离小于 3.5 m, 因此仅测量树冠的一半。利用冠层密度真实值和模型值的相对误差分析冠层模型的适用性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超声波传感器波束宽度测量

表 2 是超声波波束宽度测量结果, 结果表明: 在相同测量距离条件下,  $D_r$  的平均值比  $D_l$  平均值大, 这是由于 HY-SRF05 型超声波传感器为收发分体式, 超声发射探头与接收探头之间间隔一定的距离(图 4)。随着测量距离的增加,  $D_r$  的平均值与  $D_l$  平均值也均增加, 但是两者差值波动较小。若超声波回波检测到三合板 A、三合板 B 和中间方木条会造成超声波回波均值增大, 为了避免出现这种测量误差, 测试点与三合板 A、三合板 B、中间方木条距离应大于 30 cm。

### 2.2 植物冠层密度量化模型及拟合方程

植物冠层密度量化试验结果见表 3 ( $z_1$ 、 $z_2$  为因素编码值,  $z'_1$ 、 $z'_2$  分别是  $z_1$ 、 $z_2$  中心化后的值)。利用 Design-Expert 软件分析植物冠层密度量化试验结

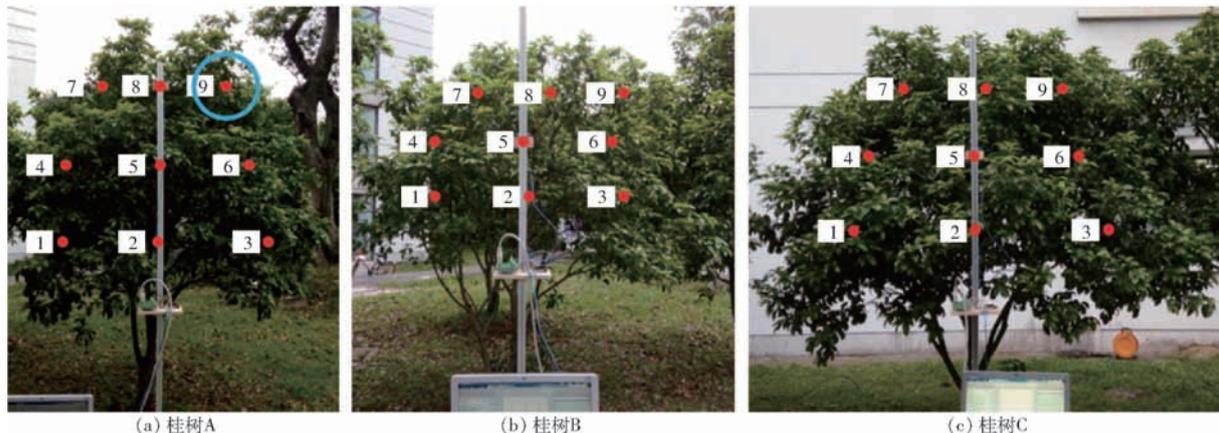


图 7 室外测试的桂树 A、桂树 B、桂树 C 及测试点分布

Fig. 7 Outdoor tests of Osmanthus trees A, B and C and test points distribution

果,计算出不同阶次二元多项式回归方程,比较不同阶次回归方程的显著性与失拟性,得出二元二次回归方程是最佳冠层密度量化模型。表4为冠层密度量化模型的方差分析。变量 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_1x_2$ 、 $x_1^2$ 、 $x_2^2$ 的 $p$ 均小于0.05,表明冠层密度量化模型的这些变量是显著的,而变量 $x_1^2$ 的 $p$ 大于0.1,表明该变量不显著。冠层密度量化模型的 $F$ 为86, $p$ 小于0.0001,表明冠层密度量化模型总体显著。失拟检验的 $F$ 为5.91, $p$ 大于0.1,表明冠层密度量化模型失拟不显著。冠层密度量化模型的 $R^2$ 和预测模型 $R^2$ 分别为0.9885和0.9114,表明试验值和预测值具有良好的一致性。

表2 超声波波束宽度测量结果

**Tab.2 Measurement results of ultrasonic beam width**

| cm   |       |       |           |           |
|------|-------|-------|-----------|-----------|
| 距离/m | $D_l$ | $D_r$ | $D_l$ 平均值 | $D_r$ 平均值 |
|      | 17.4  | 19.5  |           |           |
| 0.50 | 15.8  | 19.9  | 16.30     | 19.90     |
|      | 15.7  | 20.3  |           |           |
|      | 16.0  | 20.5  |           |           |
| 0.55 | 17.5  | 21.3  | 16.67     | 21.13     |
|      | 16.5  | 21.6  |           |           |
|      | 21.5  | 25.3  |           |           |
| 0.90 | 20.1  | 26.0  | 20.70     | 25.63     |
|      | 20.5  | 25.6  |           |           |
|      | 24.0  | 28.3  |           |           |
| 1.25 | 22.5  | 26.3  | 23.33     | 27.60     |
|      | 23.5  | 28.2  |           |           |
|      | 24.5  | 28.3  |           |           |
| 1.30 | 23.3  | 29.3  | 23.93     | 28.37     |
|      | 24.0  | 27.5  |           |           |

表3 植物冠层密度量化试验结果

**Tab.3 Quantitative test results of tree canopy density**

| $z_1$  | $z_2$  | $z_1z_2$ | $z'_1$ | $z'_2$ | $y/mV$ |
|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 1.147  | 0      | 0        | 0.713  | -0.603 | 14.678 |
| 1      | 1      | 1        | 0.397  | 0.397  | 9.429  |
| 0      | 0      | 0        | -0.603 | -0.603 | 11.340 |
| 0      | -1.147 | 0        | -0.603 | 0.713  | 21.494 |
| 0      | 1.147  | 0        | -0.603 | 0.713  | 8.113  |
| 1      | -1     | -1       | 0.397  | 0.397  | 24.750 |
| -1.147 | 0      | 0        | 0.713  | -0.603 | 7.540  |
| -1     | 1      | -1       | 0.397  | 0.397  | 5.985  |
| 0      | 0      | 0        | -0.603 | -0.603 | 11.695 |
| 0      | 0      | 0        | -0.603 | -0.603 | 10.814 |
| -1     | -1     | 1        | 0.397  | 0.397  | 11.405 |

植物冠层密度量化模型为

$$y = 25.14023 + 0.019568x_1 - 38.93135x_2 - 0.01185x_1x_2 - 1.55764 \times 10^{-6}x_1^2 + 18.48872x_2^2 \quad (10)$$

式中  $y$ ——回波信号均值, mV

2.3 植物冠层密度量化模型的验证结果

室内植物冠层密度量化模型适用性测试结果见表5。密度真实值与模型值的相对误差最小为1.230%,最大为13.650%,平均相对误差为6.120%,因此可以看出密度实测值与模型值相差较小,冠层密度量化模型对室内测试台冠层密度测量有较好适用性。密度实测值与模型值的相对误差最大为13.650%,造成较大相对误差的原因是测试台叶片分布形态差异和叶片分布不均匀。

表4 植物冠层密度量化模型的方差分析

Tab.4 Variance analysis of tree canopy density

quantitative model

| 变量       | 平方和    | 自由度 | 均方     | $F$    | $p$     |
|----------|--------|-----|--------|--------|---------|
| 模型       | 333.57 | 5   | 66.71  | 86     | <0.0001 |
| $x_1$    | 94.07  | 1   | 94.07  | 121.25 | 0.0001  |
| $x_2$    | 196.41 | 1   | 196.41 | 253.18 | <0.0001 |
| $x_1x_2$ | 24.51  | 1   | 24.51  | 31.59  | 0.0025  |
| $x_1^2$  | 1.08   | 1   | 1.08   | 1.40   | 0.2903  |
| $x_2^2$  | 17.50  | 1   | 17.50  | 22.56  | 0.0051  |
| 残差       | 3.88   | 5   | 0.78   |        |         |
| 失拟       | 3.49   | 3   | 1.16   | 5.91   | 0.148   |
| 纯误差      | 0.39   | 2   | 0.20   |        |         |
| 总和       | 337.45 | 10  |        |        |         |

注: $p < 0.001$ ,极显著; $p < 0.05$ ,显著; $p > 0.1$ ,不显著。

表5 室内冠层密度模型适用性测试结果

Tab.5 Test results of indoor canopy density

model applicability

| $x_1/(g \cdot m^{-3})$ | $x_2/m$ | 真实值/mV | 模型值/mV | 相对误差/% |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|
|                        | 0.8     | 10.370 | 9.840  | 5.111  |
| 425.72                 | 1.0     | 8.172  | 7.701  | 5.764  |
|                        | 1.2     | 7.302  | 7.041  | 3.574  |
|                        | 0.8     | 13.304 | 12.254 | 7.892  |
| 716.18                 | 1.0     | 10.916 | 9.426  | 13.650 |
|                        | 1.2     | 8.475  | 8.078  | 4.684  |
|                        | 0.8     | 13.846 | 14.832 | 7.121  |
| 1068.94                | 1.0     | 11.973 | 11.168 | 6.723  |
|                        | 1.2     | 9.492  | 8.983  | 5.362  |
|                        | 0.8     | 16.501 | 16.298 | 1.230  |
| 1297.98                | 1.0     | 12.554 | 12.091 | 3.688  |
|                        | 1.2     | 10.248 | 9.364  | 8.626  |

室外桂树 A、B、C 的冠层密度测试结果如表6所示。桂树 A 测试点处的实测密度与模型密度相对误差最小为5.918%,最大为18.021%,平均相对误差为11.244%;桂树 B 测试点处的实测密度与模型密度相对误差最小为6.323%,最大为20.600%,平均相对误差为12.246%;桂树 C 测试点处的实测密度与模型密度相对误差最小为3.959%,最大为

表 6 室外桂树 A、B、C 的冠层密度测试结果

Tab. 6 Test results of canopy density of outdoor Osmanthus trees A, B and C

| 测试点<br>序号 | 桂树 A                                      |   |            | 桂树 B                                      |   |            | 桂树 C                                      |   |            |
|-----------|---|---|------------|---|---|------------|---|---|------------|
|           | 实测密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 模型密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 相对误差/<br>% | 实测密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 模型密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 相对误差/<br>% | 实测密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 模型密度/<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 相对误差/<br>% |
| 1         | 462.226                                   | 521.627                                   | 12.851     | 161.447                                   | 194.705                                   | 20.600     | 601.699                                   | 651.176                                   | 8.223      |
| 2         | 351.751                                   | 403.983                                   | 14.849     | 219.699                                   | 256.106                                   | 16.571     | 656.405                                   | 715.967                                   | 9.074      |
| 3         | 1098.819                                  | 1179.769                                  | 7.367      | 371.550                                   | 411.716                                   | 10.810     | 654.534                                   | 575.933                                   | 12.009     |
| 4         | 1068.809                                  | 1184.337                                  | 10.809     | 631.096                                   | 687.533                                   | 8.943      | 999.764                                   | 1088.028                                  | 8.828      |
| 5         | 621.461                                   | 697.794                                   | 12.283     | 340.024                                   | 382.527                                   | 12.500     | 574.859                                   | 552.098                                   | 3.959      |
| 6         | 1104.999                                  | 1039.603                                  | 5.918      | 421.090                                   | 488.552                                   | 16.021     | 1259.417                                  | 1358.804                                  | 7.892      |
| 7         | 383.345                                   | 406.610                                   | 6.069      | 434.065                                   | 485.725                                   | 11.902     | 1062.511                                  | 1185.929                                  | 11.616     |
| 8         | 834.395                                   | 943.137                                   | 13.032     | 483.605                                   | 514.184                                   | 6.323      | 387.956                                   | 460.040                                   | 18.580     |
| 9         | 495.400                                   | 584.676                                   | 18.021     | 1102.265                                  | 1030.094                                  | 6.547      | 1255.839                                  | 1337.086                                  | 6.470      |

18.580%, 平均相对误差为 9.628%。由此可见, 室外 3 棵桂树的实测值与模型值相对误差较小, 因此建立的冠层密度量化模型对户外桂树密度测量有较好的适用性。当桂树冠层密度较大时, 实测密度与模型密度相对误差较小, 这是由于树枝等因素产生的超声回波占植物冠层产生的超声回波的比例较小; 反之亦然。室外桂树的冠层密度测量相对误差要明显高于室内, 尤其是在冠层密度较低的测试点, 这主要是由于树枝对超声回波产生了不利影响。超声波回波测量冠层密度还受空气湿度、风速和地面平整性等因素影响。

### 3 结论

(1) 对建立的冠层密度量化模型进行方差分析, 结果表明, 冠层密度量化模型总体显著, 且失拟性不显著。冠层密度量化模型的  $R^2$  和预测模型的  $R^2$  分别为 0.988 5 和 0.911 4, 即试验值和预测值具

有良好的一致性。

(2) 室内试验结果表明: 实测值与模型值的相对误差最小为 1.230%, 最大为 13.650%, 平均相对误差为 6.120%, 植物冠层密度量化模型对室内测试台冠层密度测量有较好适用性。室外试验结果表明, 实测密度与模型密度的最小相对误差为 3.959%, 最大相对误差为 20.600%; 3 棵桂树的实测密度与模型密度的平均相对误差分别为 11.244%、12.246% 和 9.628%, 因此建立的冠层密度量化模型对户外桂树密度测量也有较好的适用性。

(3) 室外桂树的冠层密度测量相对误差要明显高于室内, 尤其是在冠层密度较低的测试点, 这说明树枝对超声回波产生了不利影响。当桂树树枝光秃或受病虫害侵染后叶片大面积枯死甚至脱落, 则植物冠层密度量化模型不适用。超声波回波测量植物冠层密度还受空气湿度、风速和地面平整性等因素的影响。

### 参 考 文 献

- [1] LAMICHHANE J R. Pesticide use and risk reduction in European farming systems with IPM: an introduction to the special issue [J]. *Crop Protection*, 2017, 97: 1-6.
- [2] 张慧春, 郑加强, 周宏平, 等. 农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 114-122. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170812&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170812&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.012.  
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition distribution and off-target drift during pesticide spraying operation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 114-122. (in Chinese)
- [3] 曲峰. 果树病害检测与精准喷施方法及关键技术装备研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
QU Feng. Study on disease detection and precision spray method of fruit trees and key technical equipment[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [4] 南玉龙, 张慧春, 徐幼林, 等. 农林仿形对靶喷雾及其控制技术的研究进展[J]. *世界林业研究*, 2018, 31(4): 54-58.  
NAN Yulong, ZHANG Huichun, XU Youlin, et al. Research progress of profiling target spray and its control technology in agriculture and forestry[J]. *World Forestry Research*, 2018, 31(4): 54-58. (in Chinese)
- [5] ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2012, 81(4): 124-141.
- [6] LEE W S, ALCHANATIS V, YANG C, et al. Sensing technologies for precision specialty crop production[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 2-33.
- [7] SONG Y, SUN H, LI M, et al. Technology application of smart spray in agriculture: a review[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2015, 21(3): 319-333.

- [8] GIL E, ARNÓ J, LLORENS CALVERAS J, et al. Advanced technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish Viticulture: an overview[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 691–708.
- [9] 张美娜, 吕晓兰, 邱威, 等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(11): 172–178. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171121&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171121&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.021.
- ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, QIU Wei, et al. Calculation method of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 172–178. (in Chinese)
- [10] 李秋洁, 郑加强, 周宏平, 等. 基于车载二维激光扫描的树冠体积在线测量[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 309–314. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161238&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161238&flag=1&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.038.
- LI Qiujie, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Online measurement of tree canopy volume using vehicle-borne 2-D laser scanning[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 309–314. (in Chinese)
- [11] ZAMAN Q, SCHUMANN A W. Performance of an ultrasonic tree volume measurement system in commercial citrus groves[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 6(5): 467–480.
- [12] JORDI L, EMILIO G, JORDI L, et al. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: advances to improve pesticide application methods[J]. *Sensors*, 2011, 11(2): 2177–2194.
- [13] SCHUMANN A W, ZAMAN Q U. Software development for real-time ultrasonic mapping of tree canopy size[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 47(1): 25–40.
- [14] STAJNKO D, BERK P, LESNIK M, et al. Programmable ultrasonic sensing system for targeted spraying in orchards[J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 15500–15519.
- [15] GIL E, ESCOLÀ A, ROSELL J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors[J]. *Crop Protection*, 2007, 26(8): 1287–1297.
- [16] LLORENS J, GIL E, LLOP J, et al. Variable rate dosing in precision viticulture: use of electronic devices to improve application efficiency[J]. *Crop Protection*, 2010, 29(3): 239–248.
- [17] JEON H Y, ZHU H, DERKSEN R C, et al. Performance evaluation of a newly developed variable-rate sprayer for nursery liner applications[J]. *Transactions of the ASABE*, 2011, 54(6): 1997–2007.
- [18] MAGHSOUDI H, MINAEI S, GHOBADIAN B, et al. Ultrasonic sensing of pistachio canopy for low-volume precision spraying [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112(Supp. 1): 149–160.
- [19] JEON H Y, ZHU H, DERKSEN R, et al. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(1): 213–221.
- [20] ESCOLA A, PLANAS S, ROSELL J R, et al. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies[J]. *Sensors*, 2011, 11(3): 2459–2477.
- [21] ROSELL J R, LLORENS J, SANZ R, et al. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1505–1515.
- [22] ARNÓ J, ESCOLÀ A, VALLÈS J M, et al. Use of a ground-based LIDAR scanner to measure leaf area and canopy structure variability of grapevines[C]//*Precision Agriculture'09*, 2009: 177–184.
- [23] CAI J, WANG X, SONG J, et al. Development of real-time laser-scanning system to detect tree canopy characteristics for variable-rate pesticide application[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(6): 155–163.
- [24] ESCOLÀ A, MARTÍNEZ-CASASNOVAS J A, RUFAT J, et al. Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds[J]. *Precision Agriculture*, 2017, 18(1): 111–132.
- [25] COLAÇO A, TREVISAN R, MOLIN J, et al. A method to obtain orange crop geometry information using a mobile terrestrial laser scanner and 3D modeling[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 763.
- [26] AUAT CHEEIN F A, GUIVANT J, SANZ R, et al. Real-time approaches for characterization of fully and partially scanned canopies in groves[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 118(Supp. C): 361–371.
- [27] PALLEJA T, TRESANCHEZ M, TEIXIDO M, et al. Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1420–1427.
- [28] DEL-MORAL-MARTÍNEZ I, ROSELL-POLO J, COMPANY J, et al. Mapping vineyard leaf area using mobile terrestrial laser scanners: should rows be scanned on-the-go or discontinuously sampled? [J]. *Sensors*, 2016, 16(1): 119.
- [29] LIU C, KANG S, LI F, et al. Canopy leaf area index for apple tree using hemispherical photography in arid region[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164: 610–615.
- [30] WALKLATE P J, CROSS J V, RICHARDSON G M, et al. IT-information technology and the human interface: comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards[J]. *Biosystems Engineering*, 2002, 82(3): 253–267.
- [31] PALLEJA T, LANDERS A J. Real time canopy density validation using ultrasonic envelope signals and point quadrat analysis [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 134(Supp. C): 43–50.
- [32] PALLEJA T, LANDERS A J. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 115(Supp. C): 108–117.
- [33] LI H, ZHAI C, WECKLER P, et al. A canopy density model for planar orchard target detection based on ultrasonic sensors [J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 31.