doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.011

密植矮化茶园地面低容量仿形喷雾液滴沉积性能研究

刘冬梅[1,2]　杨杭旭[2]　周宏平[1]　茹　煜[1]　郑加强[1]　南玉龙[1]
(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321017)

摘要: 为探究地面低容量仿形喷雾技术在茶园植保作业中的适应性,以自主设计的茶园低容量仿形喷雾轨道式测试系统为喷雾载体,通过正交试验方法对茶园地面低容量喷雾的雾滴沉积性能进行了试验研究。阐述分析了喷雾测试系统的结构及控制电路,依据解析法确定了喷头安装参数;以雾滴沉积密度、沉积均匀性为主要喷雾指标,探究了喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型和冠层梯度对茶树低容量喷雾时液滴沉积的影响。田间试验结果表明:茶树冠层梯度对雾滴沉积密度有显著性影响,其雾滴数量在冠层上、中、下部依次减少,冠层上部雾滴个数明显多于中、下部,中、下部雾滴数量没有显著性差异;喷雾高度与雾滴沉积数量呈负相关,且喷雾高度 30 cm 时的雾滴个数明显多于 50 cm 时的雾滴数量,而 40 cm 高度与 30、50 cm 时的雾滴数量无显著性差异。喷施方向、冠层梯度对雾滴分布均匀性有显著性影响,喷施方向 45°时,其变异系数均值为 0.610,显著大于 0°、15°、30°时的变异系数,雾滴分布均匀性最差,而 0°、15°、30°时变异系数无显著性差异;不同冠层梯度上的雾滴分布均匀性差异显著,其中冠层上部雾滴分布最均匀,而冠层中部雾滴分布均匀性最差。与常规喷雾相比,低容量喷雾的雾滴沉积量整体偏小;冠层梯度对雾滴沉积量有显著性影响,其中冠层上部沉积量均值为 0.608 μL/cm^2,显著大于中、下部沉积量,而中、下部雾滴沉积量差异不显著;喷施方向 0°时,其雾滴沉积量均值最大,显著大于沉积量最小的 45°方向。茶树低容量喷雾时,雾滴平均沉积密度均大于 26 个/cm^2,冠层顶部变异系数均不大于标准中规定的 0.5,满足国家标准中农药喷雾机喷洒质量要求。

关键词: 茶树; 低容量喷雾; 沉积密度; 沉积均匀性; 仿形喷雾; 正交试验
中图分类号: S49　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0096-10

Droplet Deposition Performance of Low-capacity Profiling Spray in Densely Planted Dwarf Tea Plantation

LIU Dongmei[1,2]　YANG Hangxu[2]　ZHOU Hongping[1]　RU Yu[1]　ZHENG Jiaqiang[1]　NAN Yulong[1]
(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Jinhua Polytechnic*, *Jinhua* 321017, *China*)

Abstract: In order to explore the adaptability of ground low-capacity profiling spray technology in tea plantation operation, a tea garden low-capacity contour spray orbit test system was designed, which was used as a spray carrier. The experimental study on the droplet deposition performance of low-volume spray on tea garden ground was carried out by orthogonal test method. The structure and control circuit of the spray test system were analyzed. The nozzle installation parameters were determined according to the analytical method. The droplet deposition density and deposition uniformity were taken as the main spray indicators, and the effects of spray height, spray direction, fan speed, nozzle type and canopy gradient on droplet deposition during low-volume spray of tea tree were investigated. The field experiment results showed that the tea tree canopy gradient had a significant effect on the droplet deposition density, and the number of droplets was decreased from the upper, middle and lower layers of the canopy. The number of droplets in the upper part of the canopy was significantly higher than that in the middle and lower parts, while there was no significant difference in the number of droplets in the middle and lower parts. The spray height was negatively correlated with the number of droplets deposited, and the number of droplets

收稿日期: 2019-08-12　修回日期: 2019-08-27
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0600202)
作者简介: 刘冬梅(1983—),女,博士生,金华职业技术学院讲师,主要从事植保机械及技术研究,E-mail: ldm123ldm@126.com
通信作者: 周宏平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械装备与技术研究,E-mail: hpzhou@njfu.edu.cn

at 30 cm was significantly greater than that at 50 cm, while there was no significant difference in the number of droplets at 40 cm and 30 cm and 50 cm. The spray direction and the canopy gradient had a significant effect on the uniformity of droplet distribution. When the spraying direction was 45°, the coefficient of variation was 0.610, which was significantly greater than the coefficient of variation of 0°, 15°, and 30°, and the uniformity of droplet distribution was the worst. The variation coefficients of 0°, 15° and 30° were not significant. The uniformity of droplet distribution on different canopy gradients was significant. The distribution of droplets in the upper part of the canopy was the most uniform, and the distribution of droplets in the middle of the canopy was the worst. The amount of droplet deposition of the low volume spray was generally small compared with that of conventional sprays. The canopy gradient had a significant effect on the amount of droplet deposition. The average sedimentation volume in the upper canopy was 0.608 μL/cm^2, which was significantly larger than that in the middle and lower parts, while the difference in droplet deposition between the middle and lower parts was not significant. When the spraying direction was 0°, the mean value of the droplet deposition was the largest, which was significantly larger than that of the 45° direction with the smallest deposition amount. When the tea tree was sprayed at low volume, the average deposition density of each layer of droplets was greater than 26 droplets/cm^2, and the coefficient of variation at the top of the canopy was not more than 0.5, which met the requirements of the spraying quality of pesticide sprayers in national standards. The research result provided new methods and new ideas for the reduction of pesticide application in tea tree pest control.

Key words: tea tree; low-capacity spray; deposition density; deposition uniformity; profiling spray; orthogonal test

0　引言

农药防治是茶树病虫害综合防治的重要组成部分,其在病虫害突发或爆发时具有快速、高效的优势。农药过量喷施及低利用率将影响茶园生态环境和茶叶品质安全[1-2]。目前,茶园地面施药多采用常规喷雾,施药液量多在 600 ~ 1 050 L/hm^2[3-4],不仅造成药液流失、环境污染和水资源浪费,而且降低了药剂作用效果和农药器械作业效率。研究发现,农药使用的最佳效率是将适量农药剂量输送到靶标上,以获得预期的生物效果[5]。在农药喷雾中,每个农药雾滴都有其“杀伤半径”,且其半径值远大于单个雾滴本身的雾滴粒径[6-7],喷雾施药时只需一定的雾滴覆盖密度即可达到良好的防治效果,并不需要采用大容量淋洗式喷雾方式[8]。研究人员通过室内及田间试验发现,在喷施相对少量的农药雾滴时,对害虫的防治效果就能达到 80% 以上,而增加雾滴数量的防治效果提高不明显,更多的是导致药液的流失和浪费[8-10]。

喷雾施药时,雾滴密度不宜过大或过小,过大容易造成流失,过小由于漂移及不易沉积等问题而不能收到理想的防治效果[8]。近年来,喷雾技术及装备的发展使低容量喷雾逐渐成为农药喷雾的主流。低容量喷雾通过增加单位面积的雾滴个数提高对作物的覆盖率,根据中国农业科学院植物保护研究所喷雾方式的划分,低容量喷雾的喷雾量为 49.5 ~ 199.5 L/hm^2,为达到对生物靶标的有效覆盖,低容量喷雾的雾滴粒径一般为 150 ~ 250 μm[11-12]。随着国内外对茶叶农残限量标准的逐步严格,低容量喷雾已成为茶园农药防治时实现减量施药的重要手段。目前,部分学者利用植保无人机或静电喷雾器进行茶园低容量喷雾作业[13-14]。试验发现,无人机可实现低容量及超低容量喷雾,但雾滴沉积均匀性较差,喷雾压力不稳定,难以实现精准施药[15];而静电喷雾器多为人工背负,无法保证喷雾时行走速度的均匀一致性,易造成少喷及过喷。研究发现,农药喷施效果不仅与施药液量相关,还受到喷施方向、喷雾高度、风速等多种因素的影响[16-23],对茶树喷雾施药时,根据茶树冠层形貌信息,调节喷头组达到理想的喷雾距离和角度,实现仿形喷雾,将有助于提高农药利用率和病虫害防治效果[24-28]。

受茶园地面工况复杂、栽培管理未实现标准化等方面的限制,目前针对密植矮化茶园自走式低容量喷雾沉积性能的研究尚未见报道。为验证茶园自走式低容量喷雾沉积性能是否满足国家植保作业标准要求,本文以设计的密植矮化茶园低容量仿形喷雾轨道式测试系统为喷雾载体,进行茶园低容量喷雾田间试验,以期为茶树病虫害防治和减量施药提供新方法。

1　材料与方法

1.1　试验装置

1.1.1　低容量仿形喷雾轨道式测试系统

为测试茶园地面低容量喷雾的雾滴沉积性能,设计了一套茶园低容量仿形喷雾轨道式测试系统,以其作为茶园喷雾试验的机械载体,如图 1 所示。

该系统主要是由雾化系统、调节系统和导轨滑台移动系统组成。雾化系统主要包括水泵、压力表、稳压罐、降压模块、水箱、水管、风扇、喷头及喷雾与风量控制系统。调节系统主要包括高度调节杆、角度旋转支架及仿形臂组件。喷雾测试系统结构左右对称,可实现双侧喷雾作业,每组仿形臂包括 2 个水平调节杆、旋转臂、喷头、无刷电机和风扇(1045MR 无人机螺旋桨),其中无刷电机和喷头安装时要保持轴线共线,以保证风送方向与喷雾方向一致。每组仿形臂可水平左右调节以匹配茶行位置,旋转臂可 0°~180°旋转,以使 2 个喷头弧线与茶树冠层轮廓匹配。导轨滑台移动系统主要包括导轨、滑台、带轮、同步带、喷雾机架、伺服电机、地面支撑架及移动速度控制系统。

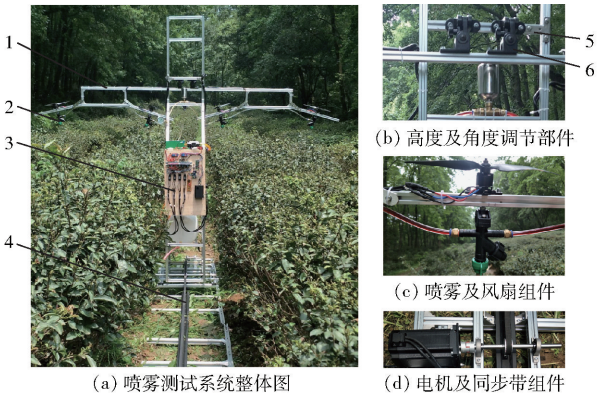

图 1 低容量仿形喷雾测试系统

Fig. 1 Low-capacity profiling spray test systems

1. 调节系统 2. 雾化系统 3. 喷雾与风量控制系统 4. 导轨滑台移动系统 5. 高度调节杆 6. 角度旋转支架

1.1.2 控制系统硬件电路

低容量喷雾轨道式测试系统的控制部分包括喷雾与风量控制系统和导轨滑台移动速度控制系统。喷雾与风量控制系统硬件电路如图 2 所示,主要包括水泵、降压模块、STM32 核心板、电源转接板、红外信号接收头、无刷电机转速指示灯、5 V 及 12 V 电源、继电器、TD-2030 接线端子排及无刷电子调速器。

红外遥控器发射红外控制信号,STM32 核心板 STM32F103RCT6(广州星翼电子科技有限公司)通过红外信号接收头 IRM-3638T(亿光电子工业股份有限公司)接收信号指令来控制喷雾与风量电路系统。STM32 核心板通过控制继电器 1 实现喷雾开启和关闭,降压模块 XL4016E1(深圳市北科商贸有限公司)通过调节 12V 电源供给水泵的电压实现喷雾压力调节。STM32 核心板控制继电器 2 实现无刷电子调速器开启和关闭,同时通过控制向无刷电子调速器 XRotor-20A-亚太版(深圳市好盈科技有限公司)发出 PWM 信号的频率来实现对 4 个无刷电机 X2212-13 KV980(中山市朗宇模型有限公司)转速的调节。无刷电机转速设置为 2 000、4 000、6 000 r/min 共 3 挡,并通过无刷电机转速指示灯指示当前无刷电机转速挡位。12 V 电源通过 TD-2030 接线端子排(温州金柯电气科技有限公司)实现对无刷电子调速器与水泵的供电,5 V 电源通过电源转接板向 STM32 核心板、继电器 1 和继电器 2 供电。

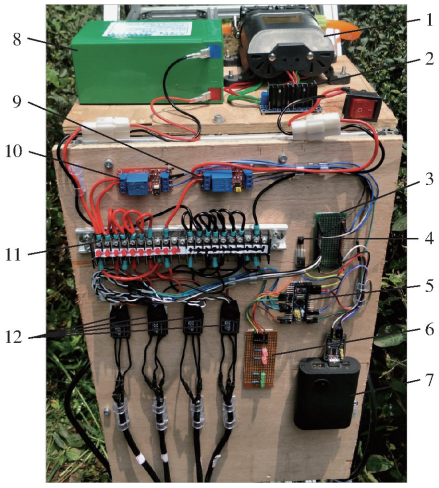

图 2 喷雾与风量控制系统硬件电路

Fig. 2 Spray and air volume control system hardware circuit

1. 水泵 2. 降压模块 3. 电源转接板 4. 红外信号接收头 5. STM32 核心板 6. 无刷电机转速指示灯 7. 5 V 电源 8. 12 V 电源 9. 继电器 1 10. 继电器 2 11. TD-2030 接线端子排 12. 无刷电子调速器

导轨滑台移动速度控制系统硬件电路如图 3 所示,主要包括 STM32 核心板、控制按键与状态指示灯、电源转接板、电平转换模块、5 V 电源、86 伺服步进电机、电机驱动器和 48 V 电源。STM32 核心板通过控制向电机驱动器发送脉冲的频率来控制步进电机转速,使导轨上滑台以 1.6 m/s 速度带动喷雾机架移动。通过按键实现导轨滑台启停、正反向移动,并由状态指示灯指示导轨滑台当前的运行状态。电平转换模块(4 路,深圳市科比微电子有限公司)将 STM32 核心板发出的脉冲信号电平从 3.3 V 转换成 5 V。48 V 电源向步进电机驱动器供电,5 V 电源向 STM32 核心板、电源转接板和电平转换模块供电。

1.1.3 喷头安装参数

国内常用植保喷头的喷雾角多为 80°和 110°,考虑喷头选择通用性,低容量喷雾时,为匹配茶树冠层修剪轮廓,每个茶垄设计安装 2 个喷头。现以茶树冠层顶面为水平基准面,垄宽的中心对称面为竖直基准面,建立直角坐标系 xOy,如图 4 所示。

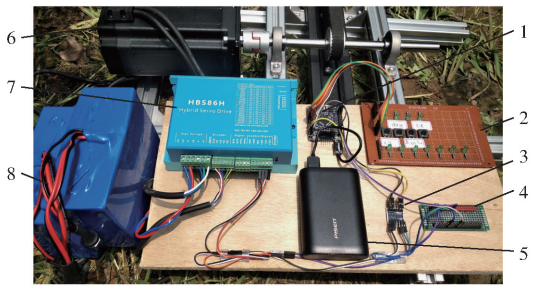

图 3　导轨滑台移动速度控制系统硬件电路

Fig. 3　Rail slide table moving speed control system hardware circuit

1. STM32 核心板　2. 控制按键与状态指示灯　3. 电平转换模块　4. 电源转接板　5. 5 V 电源　6. 86 伺服步进电机　7. 伺服步进电机驱动器　8. 48 V 电源

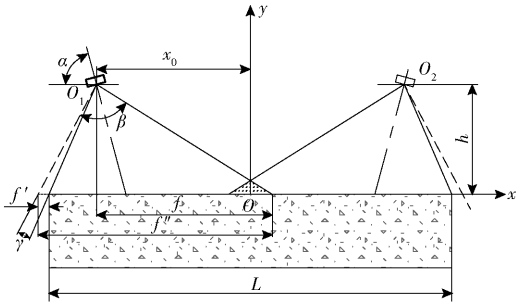

图 4　喷头布置示意图

Fig. 4　Spray head layout

茶树喷雾施药时为实现全面覆盖和均匀喷雾，喷头安装需满足约束条件

$$\begin{cases} k_1 f'' \leqslant 2(f - x_0) \leqslant k_2 f'' \\ 0 < f'' - f - \left(\dfrac{L}{2} - x_0\right) \leqslant f' \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$f = h\cot\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \tag{2}$$

$$f' = h\left(\tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - 90°\right) - \tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - \gamma - 90°\right)\right) \tag{3}$$

$$f'' = h\left(\tan\left(\frac{\beta}{2} + \alpha - 90°\right) + \cot\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right)\right) \tag{4}$$

式中　k_1——最小重叠系数

k_2——最大重叠系数

x_0——喷头到垄宽中心的水平距离，m

L——茶树垄宽，m

f——喷头安装竖直面右侧幅宽，m

f'——舍弃喷幅，m

f''——单喷头喷幅，m

h——喷头到冠层顶面距离，m

α——喷头与水平面夹角，(°)

β——喷头标定喷雾角，(°)

γ——舍弃的局部喷雾角，(°)

将式(2)～(4)代入式(1)得 x_0、α 的求解公式

$$\begin{cases} x_0 \leqslant \dfrac{(2-k_1)h\cot\left(\alpha - \dfrac{\beta}{2}\right) - k_1 h\tan\left(\dfrac{\beta}{2} + \alpha - 90°\right)}{2} \\ x_0 \geqslant \dfrac{(2-k_2)h\cot\left(\alpha - \dfrac{\beta}{2}\right) - k_2 h\tan\left(\dfrac{\beta}{2} + \alpha - 90°\right)}{2} \\ x_0 \leqslant \dfrac{L}{2} - h\tan\left(\dfrac{\beta}{2} + \alpha - \gamma - 90°\right) \\ x_0 \geqslant \dfrac{L}{2} - h\tan\left(\dfrac{\beta}{2} + \alpha - 90°\right) \end{cases} \tag{5}$$

其中，喷头位置 O_1 坐标为 $(-x_0, h)$，另一喷头位置 O_2 坐标为 (x_0, h)。根据喷头公司建议，茶树低容量喷雾时，建议 k_1 取 10%，k_2 取 20%，γ 取 5°～10°。考虑低容量喷雾时雾滴均为细雾，为减少雾滴飘移，建议喷雾高度取 30～50 cm，调研发现 L 一般在 1～1.5 m，其中以 1.1 m 左右为主[14,29]。以 L = 1.1 m，h = 30 cm，γ = 5°，XR8001 喷头为例，其标定喷雾角为 86°，当喷头与水平面倾角 α = 75°时，通过式(5)得 41.613 cm ≤ x_0 ≤ 42.265 cm，取 x_0 = 42 cm，即两喷头间距为 84 cm。

1.2　试验方法

试验测试场地为南京市中山陵茶园，茶树株高约 1 m，垄宽 1.1 m，垄间距 0.5 m，品种为“龙井 43”。试验时间为 2019 年 7 月 14—16 日，温度 26～30℃，环境风速为 0～1.6 m/s，相对湿度 76%～80%。喷雾样本为诱惑红示踪剂(上海染料研究所有限公司南通分公司)，试验时配置成质量浓度为 1 g/L的水溶液。

喷头选用 TeeJet 公司的标准扇形喷头 TP8001、双扇面扇形喷头 TJ60－8001、延长范围扇形喷头 XR8001 和 XR11001 共 4 种常用扇形喷头。喷雾行走速度为 1.6 m/s，喷雾压力为 0.3 MPa，在 0.3 MPa 压力下，4 种喷头的雾滴均为细雾[11]，且流量均为 0.39 L/min，施药量为 50.85 L/hm^2。研究发现，茶树病虫害绝大部分发生在叶部，而茶树一般有 80%～90%的叶量集中分布在树冠 0～20 cm 的表层[30]，为探究茶树低容量喷雾，本文仅以茶树表层 0～20 cm 梯度内叶部为研究对象，以表层顶面为上部，表层向下 10、20 cm 为冠层中、下部，研究不同喷施参数下低容量喷雾时雾滴沉积分布情况。为验证茶树低容量喷雾的雾滴沉积密度和雾滴分布均匀性是否符合 NY/T 650—2013《喷雾机(器)作业质量》的标准要求，同时探明喷头类型、喷雾高度、喷施方向(喷头与竖直面夹角)、风扇转速对茶树冠层内雾滴沉积密度、沉积均匀性和雾滴沉积量的影响，本文采用正交试验设计方法进行试验研究，其正交试验因

素水平如表 1 所示。由于试验场地内茶树非机械化修剪,为考虑误差对结果影响,正交试验方案设计时加入误差列,利用 SPSS 软件设计的混合正交试验方案如表 2 所示(x_1、x_2、x_3、x_4、x_5、x_6分别为 A、B、C、D、E 和误差列的水平值)。

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors and levels

水平	因素				
	喷雾高度 A/cm	喷施方向角 B/(°)	风扇转速 C/(r·min^{-1})	喷头类型 D	冠层梯度 E
1	30	0	0	XR8001	上
2	40	15	2 000	TJ60 - 8001	中
3	50	30	4 000	TP8001	下
4		45	6 000	XR11001	

表 2 正交试验方案

Tab. 2 Orthogonal test schemes

试验序号	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	3	3	3	4	2	1
2	1	2	3	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	2	1	3	3	3	4
5	1	4	4	3	2	1
6	1	1	1	1	2	2
7	3	4	1	1	1	4
8	2	1	1	2	1	1
9	2	2	2	1	3	1
10	2	2	1	4	2	2
11	2	1	4	4	1	3
12	2	1	1	3	2	1
13	2	4	2	1	2	3
14	3	1	2	2	2	1
15	1	1	3	1	2	3
16	1	1	2	4	1	4
17	2	4	3	2	1	2
18	3	2	1	3	1	3
19	2	3	4	1	1	1
20	1	4	1	4	3	1
21	1	2	4	2	2	4
22	1	3	1	2	3	3
23	3	1	4	1	3	2
24	2	3	1	1	2	4
25	1	3	2	3	1	2

试验时,选取冠层参数基本一致的茶行,每个处理在茶树冠层横截面上采用 5 点取样法,即左右两侧各布置 2 点,中间布置 1 点,如图 5 所示。其中水敏纸左右两侧布置线距茶行边缘 8% ~15%,中间点布置在外侧 4 点的对角线交点处,要求 5 个布点在同一高度。在每个测点布置 1 张水敏纸(3 cm × 8 cm,重庆六六山下植保科技有限公司),喷雾试验后,待各测点水敏纸干燥后将其装入相应标记的自封袋内,实验室内用扫描仪进行灰度扫描,生成分辨率 600 像素 ×600 像素的 PNG 格式,用水敏纸自带软件(六六山下雾滴分析软件)读取雾滴沉积密度、沉积量数据。本研究以雾滴沉积密度和雾滴分布均匀性作为喷雾效果的主要评价指标,其中,雾滴沉积密度指低量喷雾沉积在作物单位面积上的雾滴数,通过读取各测点水敏试纸显示的雾滴个数获得;雾滴分布均匀性指喷洒的雾滴在作业区内表面分布的均匀程度,用变异系数表示[31-32]。

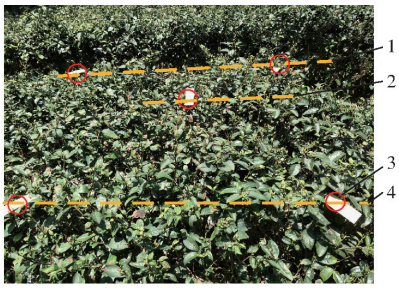

图 5 茶树冠层 5 点取样分布

Fig. 5 5-point sampling distribution of tea tree canopy

1. 水敏纸布置左侧线 2. 茶行中心线 3. 水敏纸测点 4. 水敏纸布置右侧线

2 结果与分析

2.1 喷施参数对雾滴沉积密度的影响

不同喷施参数下各测点的雾滴沉积密度如表 3 所示,从表中可看出,不同处理下雾滴平均沉积密度均大于 26 个/cm^2,高于 JB/T 9782—2014《植保机械通用试验方法》对风送喷雾中喷幅界定的 20 个/cm^{2}要求[33]。利用 SPSS 软件的二维组间方差分析检验不同喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型和冠层梯度对雾滴沉积密度的影响,检验结果如表 4 所示。在主效应检验中,整体模型 F 为 4.296,P 为 0.021,小于 0.05,表明在 5% 显著性水平下方差分析模型整体显著。冠层梯度 P < 0.001,而喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型 P > 0.05,表明冠层梯度对雾滴沉积密度有显著性影响,喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型对雾滴沉积密度无显著性影响。根据效应量的度量值偏 E_{ta}平方值判断,冠层梯度偏 E_{ta}平方值最大且通过了显著性检验,喷雾高度、喷施方向、喷头类型、风扇转速偏 E_{ta}平方值依次减小且均未通过显著性检验。因偏 E_{ta}平方值越大,该因素对雾滴沉积密度的影响越大,因此,试验中各喷施参数对雾滴沉积密度的影响程度从大到小依次为冠层梯度、喷雾高度、喷施方向、喷头类型、风扇转速。

表 3　雾滴沉积密度正交试验结果

Tab. 3　Orthogonal test results of droplet deposition density

试验序号	不同测点雾滴沉积密度/(个·cm^{-2})					雾滴平均沉积密度/(个·cm^{-2})	变异系数
	左 1	左 2	右 1	右 2	中间		
1	102. 68	116. 91	40. 68	16. 46	73. 70	70. 09	0. 597 2
2	163. 94	189. 20	195. 56	170. 77	56. 87	155. 27	0. 363 9
3	148. 27	129. 48	160. 90	156. 64	59. 54	130. 97	0. 318 5
4	58. 12	43. 05	63. 06	59. 43	52. 45	55. 22	0. 141 3
5	112. 27	117. 09	26. 97	34. 34	26. 38	63. 41	0. 740 2
6	111. 32	180. 29	56. 15	59. 19	44. 47	90. 28	0. 625 9
7	102. 13	161. 40	109. 23	98. 34	89. 56	112. 13	0. 253 6
8	197. 55	219. 25	148. 60	185. 38	63. 47	162. 85	0. 375 7
9	68. 95	108. 60	30. 29	44. 97	61. 10	62. 78	0. 472 0
10	10. 45	70. 54	76. 63	68. 05	65. 47	58. 23	0. 464 2
11	97. 99	132. 33	248. 73	118. 75	125. 06	144. 57	0. 412 4
12	16. 61	76. 14	69. 08	46. 00	69. 57	55. 48	0. 442 5
13	19. 20	75. 69	9. 67	37. 92	23. 99	33. 29	0. 774 9
14	47. 05	56. 69	11. 09	18. 88	20. 01	30. 74	0. 646 7
15	69. 76	62. 44	15. 91	12. 32	59. 72	44. 03	0. 626 5
16	176. 70	179. 64	131. 56	114. 64	116. 65	143. 84	0. 222 7
17	64. 69	131. 47	70. 06	51. 84	162. 72	96. 16	0. 501 8
18	94. 04	104. 62	42. 71	90. 27	114. 27	89. 18	0. 309 7
19	175. 42	160. 44	155. 03	138. 64	77. 66	141. 44	0. 268 7
20	17. 24	18. 94	26. 82	87. 69	46. 71	39. 48	0. 744 2
21	176. 06	79. 81	19. 29	52. 14	227. 93	111. 05	0. 789 6
22	40. 16	115. 17	145. 10	122. 30	48. 80	94. 31	0. 497 4
23	34. 58	25. 64	16. 50	8. 17	45. 41	26. 06	0. 562 2
24	48. 29	39. 28	67. 05	23. 54	40. 98	43. 83	0. 360 7
25	87. 89	118. 21	165. 36	104. 16	67. 68	108. 66	0. 339 3

表 4　雾滴沉积密度主体间效应的检验

Tab. 4　Inspection of inter-subject effect of droplet density

来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	P	偏 E_{ta} 平方值
校正模型	39 121. 505	16	2 445. 094	4. 296	0. 021	0. 896
截距	91 817. 890	1	91 817. 890	161. 322	<0. 001	0. 953
喷雾高度	3 540. 670	2	1 770. 335	3. 110	0. 100	0. 437
喷施方向	2 106. 893	3	702. 298	1. 234	0. 359	0. 316
喷头类型	1 691. 767	3	563. 922	0. 991	0. 445	0. 271
风扇转速	1 190. 956	3	396. 985	0. 697	0. 579	0. 207
冠层梯度	29 428. 905	2	14 714. 452	25. 853	<0. 001	0. 866
空白列	1 162. 313	3	387. 438	0. 681	0. 588	0. 203
误差	4 553. 266	8	569. 158			
总计	230 878. 100	25				
校正总计	43 674. 771	24				

冠层梯度、喷雾高度因素中不同水平对雾滴沉积密度的影响程度如表 5 所示。在最小显著性差异法(Least significant difference,LSD)多重比较中,由冠层梯度平均值差值发现冠层上、中、下部雾滴数量依次减少,且上部雾滴数量显著高于中、下部(P < 0. 05),而中、下部雾滴个数没有显著性差异(P = 0. 741 > 0. 05),这是由于茶树冠层内叶片上下交叠和障蔽现象严重,绝大多数雾滴因叶片遮挡而沉积在冠层上部,使上部与中下部的雾滴沉积密度出现显著性差异。穿透到冠层中部的雾滴只有一部分沉积到中部叶片,其余通过叶片间隙继续穿透到冠层下部,雾滴经过上、中部叶片的逐层拦截,使沉积到下层的雾滴数量最少。因到达冠层中、下部的雾滴数量有限,与沉积密度最大的表层相比,冠层中、下

部的雾滴沉积密度差异性相对较小,无显著性。由喷雾高度平均值差值发现,喷雾越高,雾滴沉积个数越少,且高度 30 cm 时的雾滴数量显著多于 50 cm 时的雾滴个数($P=0.038<0.05$),而 40 cm 时雾滴个数与 30、50 cm 时雾滴数量差异不显著($P>0.05$)。主要是由于喷雾高度变大,雾滴沉积幅宽也同时变大,使单位面积内雾滴个数变少。计算得知喷雾高度 30、40、50 cm 时,雾滴沉积幅宽分别为 $60\tan\frac{\beta}{2}$、$80\tan\frac{\beta}{2}$、$100\tan\frac{\beta}{2}$,可看出喷雾高度 30、50 cm 之间的幅宽差是其余各挡高度之间幅宽差的 2 倍,使喷雾高度 30、50 cm 间雾滴数量具有显著性差异,且其差异性大于其余各挡间的数量差异。

表 5 冠层梯度和喷雾高度对雾滴沉积密度 LSD 多重比较

Tab. 5 LSD multiple comparisons of canopy gradient and spray height on droplet deposition density

	列 1	列 2	平均值差值(列 1 - 2)	标准误差	P	下限(95% 置信)	上限(95% 置信)
冠层梯度	上	中	68.464 0	10.669 19	<0.001	43.860 8	93.067 2
	上	下	72.937 0	13.067 04	0.001	42.804 4	103.069 6
	中	下	4.473 0	13.067 04	0.741	-25.659 6	34.605 6
喷雾高度	30 cm	40 cm	12.745 0	10.669 19	0.266	-11.858 2	37.348 2
	30 cm	50 cm	32.490 0	13.067 04	0.038	2.357 4	62.622 6
	40 cm	50 cm	19.745 0	13.067 04	0.169	-10.387 6	49.877 6

2.2 雾滴沉积分布均匀性分析

雾滴分布均匀性以雾滴沉积密度变异系数来表征。从表 3 可看出,茶树低容量喷雾时冠层顶部变异系数均不大于 0.501 8,满足 NY/T 650—2013《喷雾机(器)作业质量》行业标准中对机动喷雾机在低容量喷雾时变异系数的要求[32]。雾滴分布均匀性受多种因素影响,其中喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型和冠层梯度对雾滴沉积均匀性的影响如表 6 所示。从表 6 可看出,冠层梯度 $P<0.001$,喷施方向 $P=0.023$,均小于 0.05,对雾滴分布均匀性有显著性影响;喷雾高度、喷头类型和风扇转速的 $P>0.05$,对雾滴分布均匀性无显著性影响。冠层梯度的偏 E_{ta} 平方值最大,为 0.869,喷施方向的偏 E_{ta} 平方值次之,为 0.677,喷头类型、喷雾高度和风扇转速的偏 E_{ta} 平方值依次递减,分别为 0.569、0.502、0.475,根据偏 E_{ta} 平方值越大,该因素对雾滴分布均匀性影响越大的原则,可得各喷施参数对雾滴分布均匀性的影响程度从大到小依次为冠层梯度、喷施方向、喷头类型、喷雾高度和风扇转速。

表 6 雾滴分布均匀性主体间效应的检验

Tab. 6 Inspection of inter-subject effect of droplet distribution uniformity

来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	P	偏 E_{ta} 平方值
校正模型	0.753	16	0.047	6.827	0.005	0.932
截距	3.767	1	3.767	546.647	<0.001	0.986
喷雾高度	0.056	2	0.028	4.030	0.062	0.502
喷施方向	0.115	3	0.038	5.586	0.023	0.677
喷头类型	0.073	3	0.024	3.518	0.069	0.569
风扇转速	0.050	3	0.017	2.415	0.142	0.475
冠层梯度	0.366	2	0.183	26.527	<0.001	0.869
空白列	0.093	3	0.031	4.518	0.039	0.629
误差	0.055	8	0.007			
总计	6.426	25				
校正总计	0.808	24				

喷施方向、冠层梯度作为雾滴分布均匀性的显著影响因素,其不同水平对雾滴分布均匀性的影响如表 7 所示。在多重比较中由平均值差值发现喷施方向 45°时,雾滴分布均匀性最差,其变异系数均值为 0.610,显著大于 0°、15°、30°时的变异系数均值 0.445、0.487、0.420($P<0.05$),这主要是由于喷施方向越大,雾滴竖直方向上有效初始速度越小,雾滴更易发生飘移。喷施方向 0°、15°、30°时的变异系数差异不显著($P>0.05$),因此,在喷雾作业时应尽量使喷头处于或接近竖直平面以保证雾滴分布均匀性。由冠层梯度多重比较可看出,冠层上、中、下部雾滴分布均匀性差异显著($P<0.05$),其中冠层上部雾滴分布最均匀,冠层中部雾滴分布均匀性最差,这主要是由于冠层上部无叶片遮挡,避免了叶片着生分布如叶片稠密稀疏、倾斜角度、叶片大小对雾滴分布的影响。冠层中部因同时受到叶片着生分布和风送辅助的双重影响,其雾滴分布最不均匀。而冠层下部整体叶量比中部少,同时其受风送的影响程度要弱于冠层中部,其雾滴分布均匀性介于冠层上、中部之间。

2.3 喷施参数对雾滴沉积量的影响

雾滴撞击到茶树叶片上经过反复铺展和回缩,最终持留在茶树叶片上的雾滴才是有效雾滴。传统观念认为沉积量越大越好,而实际上由于雾滴具有一定杀伤半径,施药时只需一定的雾滴沉积量即能达到病虫害防治效果,过量喷施容易引起农药浪费、

表 7　喷施方向和冠层梯度对雾滴分布均匀性 LSD 多重比较

Tab. 7　LSD multiple comparisons of spray direction and canopy gradient on droplet distribution uniformity

	列 1	列 2	平均值差值(列 1 - 2)	标准误差	*P*	下限(95% 置信)	上限(95% 置信)
喷施方向	0°	15°	-0. 042 440	0. 045 468 5	0. 378	-0. 147 291	0. 062 411
	0°	30°	0. 024 780	0. 045 468 5	0. 601	-0. 080 071	0. 129 631
	0°	45°	-0. 165 500	0. 045 468 5	0. 007	-0. 270 351	-0. 060 649
	15°	30°	0. 067 220	0. 052 502 6	0. 236	-0. 053 851	0. 188 291
	15°	45°	-0. 123 060	0. 052 502 6	0. 047	-0. 244 131	-0. 001 989
	30°	45°	-0. 190 280	0. 052 502 6	0. 007	-0. 311 351	-0. 069 209
冠层梯度	上	中	-0. 270 210	0. 037 124 9	<0. 001	-0. 355 820	-0. 184 600
	上	下	-0. 146 790	0. 045 468 5	0. 012	-0. 251 641	-0. 041 939
	中	下	0. 123 420	0. 045 468 5	0. 026	0. 018 569	0. 228 271

环境污染和茶叶农残。不同喷施参数下各测点的雾滴沉积量如表 8 所示，从表中可看出与常规喷雾相比，低容量喷雾的雾滴沉积量整体偏小。各喷施参数对雾滴沉积量的影响如表 9 所示，在主效应检验中，冠层梯度对沉积量有显著性影响，其 *P* 值小于 0. 001。喷雾高度、喷施方向、风扇转速、喷头类型的 *P* 值分别为 0. 248、0. 134、0. 231、0. 344，均大于 0. 05，则这些因素对沉积量无显著性影响。冠层梯度的偏 E_{ta} 平方值最大，为 0. 970，喷施方向、风扇转速、喷头类型、喷雾高度的偏 E_{ta} 平方值依次递减，分

表 8　雾滴沉积量正交试验结果

Tab. 8　Orthogonal test results of droplet deposition

试验序号	不同测点雾滴沉积量/(μL·cm⁻²)					雾滴平均沉积量/(μL·cm⁻²)	变异系数
	左 1	左 2	右 1	右 2	中间		
1	0. 20	0. 16	0. 17	0. 03	0. 17	0. 146	0. 455 9
2	0. 87	0. 62	0. 58	0. 85	0. 58	0. 700	0. 210 2
3	0. 87	0. 72	0. 74	0. 03	0. 68	0. 608	0. 544 2
4	0. 08	0. 05	0. 10	0. 13	0. 11	0. 094	0. 324 4
5	0. 14	0. 15	0. 04	0. 05	0. 02	0. 080	0. 755 2
6	0. 10	0. 55	0. 15	0. 05	0. 17	0. 204	0. 975 2
7	0. 47	0. 64	0. 42	0. 68	0. 76	0. 594	0. 242 1
8	1. 03	0. 61	0. 92	0. 88	0. 31	0. 750	0. 387 2
9	0. 12	0. 25	0. 11	0. 14	0. 12	0. 148	0. 392 2
10	0. 01	0. 06	0. 18	0. 24	0. 18	0. 134	0. 711 1
11	0. 88	0. 74	1. 00	0. 89	0. 62	0. 826	0. 178 7
12	0. 03	0. 35	0. 34	0. 17	0. 17	0. 212	0. 633 2
13	0. 02	0. 17	0. 01	0. 05	0. 03	0. 056	1. 168 2
14	0. 09	0. 14	0. 02	0. 06	0. 08	0. 078	0. 561 8
15	0. 22	0. 14	0. 02	0. 01	0. 16	0. 110	0. 833 2
16	0. 79	0. 81	0. 37	0. 48	0. 80	0. 650	0. 321 8
17	0. 17	0. 66	0. 24	0. 33	0. 95	0. 470	0. 696 8
18	0. 80	0. 54	0. 49	0. 65	0. 44	0. 584	0. 245 9
19	0. 91	0. 95	0. 64	0. 79	0. 56	0. 770	0. 218 7
20	0. 03	0. 03	0. 06	0. 10	0. 05	0. 054	0. 533 5
21	0. 21	0. 11	0. 03	0. 10	0. 39	0. 168	0. 831 6
22	0. 06	0. 19	0. 28	0. 17	0. 33	0. 206	0. 507 5
23	0. 10	0. 02	0. 12	0. 06	0. 23	0. 106	0. 747 6
24	0. 08	0. 03	0. 19	0. 05	0. 23	0. 116	0. 765 3
25	0. 51	0. 38	0. 71	0. 42	0. 47	0. 498	0. 257 7

表 9　雾滴沉积量主体间效应的检验

Tab. 9　Inspection of inter-subject effect of droplet deposition

来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	*F*	*P*	偏 E_{ta} 平方值
校正模型	1. 679	16	0. 105	17. 726	<0. 001	0. 973
截距	1. 131	1	1. 131	190. 923	<0. 001	0. 960
喷雾高度	0. 020	2	0. 010	1. 669	0. 248	0. 294
喷施方向	0. 044	3	0. 015	2. 496	0. 134	0. 484
风扇转速	0. 031	3	0. 010	1. 767	0. 231	0. 399
喷头类型	0. 023	3	0. 008	1. 285	0. 344	0. 325
冠层梯度	1. 543	2	0. 772	130. 324	<0. 001	0. 970
空白列	0. 018	3	0. 006	0. 996	0. 443	0. 272
误差	0. 047	8	0. 006			
总计	4. 455	25				
校正总计	1. 727	24				

别为 0. 484、0. 399、0. 325、0. 294，根据偏 E_{ta} 平方值，可看出上述各因素对雾滴沉积量的影响程度大小为冠层梯度、喷施方向、风扇转速、喷头类型、喷雾高度。

冠层梯度、喷施方向各水平对雾滴沉积量的影响程度如表 10 所示。冠层上、中、下部沉积量均值分别为 0. 608、0. 104、0. 095 μL/cm²，由 *P* 值可看出，冠层上部沉积量显著大于中、下部沉积量（*P* < 0. 05），而中、下部雾滴沉积量差异不显著（*P* = 0. 840 > 0. 05）。这主要是由于冠层上部无叶片遮挡，其沉积量最大，而中、下部叶片密集簇生，到达中、下部的雾滴个数显著减少，其沉积量也相应显著变少。喷施方向 0°时，其雾滴沉积量均值最大，为 0. 311 μL/cm²，且显著大于沉积量均值最小的 45°方向（*P* = 0. 028 < 0. 05）。喷施方向 15°、30°、45°的沉积量均值为 0. 273、0. 294、0. 198 μL/cm²，彼此间雾滴沉积量差异不显著（*P* > 0. 05）。这主要是由于 0°时，雾滴竖直方向上有效初始速度最大，雾滴有足够能量到达叶片表面，而 45°时竖直方向上雾滴有效初始速度最小，雾滴飘移风险大，15°、30°时的雾滴竖直方向上有效初始速度介于 0°与 45°之间。

表 10 冠层梯度和喷施方向对沉积量 LSD 多重比较

Tab. 10 LSD multiple comparisons of canopy gradient and spray direction on sediment amount

	列 1	列 2	平均值差值(列 1 - 2)	标准误差	P	下限(95% 置信)	上限(95% 置信)
冠层梯度	上	中	0.504 200	0.034 412 9	<0.001	0.424 844	0.583 556
	上	下	0.513 000	0.042 147 1	<0.001	0.415 809	0.610 191
	中	下	0.008 800	0.042 147 1	0.840	-0.088 391	0.105 991
喷施方向	0°	15°	0.037 800	0.042 147 1	0.396	-0.059 391	0.134 991
	0°	30°	0.016 600	0.042 147 1	0.704	-0.080 591	0.113 791
	0°	45°	0.113 000	0.042 147 1	0.028	0.015 809	0.210 191
	15°	30°	-0.021 200	0.048 667 2	0.675	-0.133 427	0.091 027
	15°	45°	0.075 200	0.048 667 2	0.161	-0.037 027	0.187 427
	30°	45°	0.096 400	0.048 667 2	0.083	-0.015 827	0.208 627

3 结论

(1)茶树低容量喷雾时,雾滴平均沉积密度均大于 26 个/cm^2,满足 JB/T 9782—2014《植保机械通用试验方法》中对风送喷雾的雾滴沉积密度要求。冠层梯度对雾滴沉积密度有显著性影响,且冠层上、中、下部雾滴数量依次减少,其中冠层上部雾滴数量明显高于中、下部,而中、下部雾滴个数无显著性差异。喷雾高度与雾滴沉积密度呈负相关,且高度30 cm 时雾滴数量明显多于 50 cm 时的雾滴数量,而 40 cm 与 30、50 cm 时雾滴数量差异不显著。冠层梯度、喷雾高度、喷施方向、喷头类型、风扇转速对雾滴沉积密度的影响程度依次递减。

(2)茶树冠层顶部变异系数均满足 NY/T 650—2013《喷雾机(器)作业质量》行业标准中对机动喷雾机低容量喷雾时变异系数的要求,不大于 0.5。喷施方向、冠层梯度对雾滴沉积均匀性有显著性影响。喷施方向 45°时,雾滴分布均匀性最差,其变异系数均值为 0.610,显著大于 0°、15°、30°时的变异系数,而 0°、15°、30°时变异系数无显著性差异。茶树冠层上、中、下部雾滴分布均匀性差异显著,其中冠层上部雾滴分布最均匀,冠层中部雾滴分布均匀性最差。

(3)与常规喷雾相比,低容量喷雾的雾滴沉积量整体偏小;冠层梯度对雾滴沉积量有显著性影响,冠层上部沉积量均值为 0.608 μL/cm^2,显著大于中、下部沉积量,而中、下部雾滴沉积量无显著性差异;喷施方向 0°时,其雾滴沉积量最大,显著大于沉积量最小的 45°方向,而 15°、30°、45°时的沉积量差异不显著。

(4)考虑雾滴沉积量及雾滴分布均匀性,在实际喷雾施药时应使喷头处于竖直状态,即喷施方向为 0°。

参 考 文 献

[1] 徐志武. 茶树病虫害绿色防控现状及对策[J]. 现代农业科技,2014(6):157 - 158.

[2] 郭勤, 高楠, 汪勇,等. 我国茶树农药应用现状及问题分析[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(8):58 - 61.

[3] 许姗姗, 郭萧, 彭萍, 等. 几种喷雾器在茶园中的使用性能与效果对比研究[J]. 西南农业学报, 2012,25(6):2311 - 2315.
XU Shanshan, GUO Xiao, PENG Ping, et al. Comparison on performances of several knapsack sprayers in tea garden[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012,25(6):2311 - 2315. (in Chinese)

[4] 罗宗秀, 边磊, 蔡晓明, 等. 新型茶园管理机的农药雾滴沉积特性及田间药效评价[J]. 茶叶科学,2016,31(1):52 - 58.
LUO Zongxiu, BIAN Lei, CAI Xiaoming, et al. Pesticide deposit characteristics and its field efficacy evaluation of a new type of tea management machine[J]. Journal of Tea Science,2016,31(1):52 - 58. (in Chinese)

[5] EBERT T A, DOWNER R A. A different look at experiments on pesticide distribution[J]. Crop Protection, 2006, 25(4):299 - 309.

[6] FORD M G, SALT D W. Behaviour of insecticide deposits and their transfer from plant to insect surfaces[M]//COTTREL H J. Pesticides on plant surfaces, Chichester UK: Johnwiley,1987.

[7] HEWITT A J, MEGANASA T. Droplet distribution densities of a pyrethroid insecticide within grass and maize canopies for the control of Spodopteraexempta larvae[J]. Crop Protection, 1993, 12(1):59 - 62.

[8] 袁会珠, 王国宾. 雾滴大小和覆盖密度与农药防治效果的关系[J]. 植物保护, 2015,41(6):9 - 16.
YUAN Huizhu, WANG Guobin. Effects of droplet size and deposition density on field efficacy of pesticides[J]. Plant Protection,2015,41(6):9 - 16. (in Chinese)

[9] 庾琴, 范仁俊, 刘中芳,等. 雾滴密度、药液量和器械对苹果全爪螨防效的影响[J]. 果树学报,2016,33(1):81 - 87.
YU Qin,FAN Renjun,LIU Zhongfang, et al. Effects of droplet density,spraying volume and spraying equipment on efficacy of abamectin microemulsion against *Panonychusulmi* in apple tree [J]. Journal of Fruit Science, 2016,33(1):81 - 87. (in Chinese)

[10] 董玉轩, 顾中言,徐德进,等. 雾滴密度与喷雾方式对毒死蜱防治褐飞虱效果的影响[J]. 植物保护学报, 2012, 39(1):75 - 80.
DONG Yuxuan, GU Zhongyan, XU Dejin, et al. Influence of droplet densities and spray methods on the efficiency of chlorpyrifos against brown planthopper[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2012, 39(1):75 - 80. (in Chinese)

[11] 陈福良. 超低容量油剂的研发与无人机喷雾用药问题探讨[EB/OL]. (2019-06-20)[2019-07-29]. https://www.docin.com/p-2221451726.html.
[12] 孙炳林, 李世华. 低容量喷雾技术的理论依据及其在植保上的应用[J]. 安徽农学通报, 1997, 3(3):34-36.
[13] 陈丹, 任广伟, 王秀芳,等. 4 种喷雾器在茶树上喷雾效果比较[J]. 植物保护, 2011, 37(5):110-114.
CHEN Dan, REN Guangwei, WANG Xiufang, et al. Spray performance of four sprayers in the tea garden [J]. Plant Protection, 2011, 37(5):110-114. (in Chinese)
[14] 王明, 王希, 何玲, 等. 植保无人机低空低容量喷雾在茶园的雾滴沉积分布及对茶小绿叶蝉的防治效果[J]. 植物保护, 2019, 45(1):62-68,87.
WANG Ming, WANG Xi, HE Ling, et al. Deposition distribution of pesticide droplets over the tea canopy and control efficiency against *Empoasca flavescens* sprayed by unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. Plant Protection, 2019, 45(1):62-68,87. (in Chinese)
[15] 何雄奎. 我国植保无人机喷雾系统与施药技术[J]. 农业工程技术, 2018,38(9): 33-38.
[16] FERGUSON J C, CHECHETTO R G, HEWITT A J, et al. Assessing the deposition and canopy penetration of nozzles with different spray qualities in an oat (*Avena sativa* L.) canopy[J]. Crop Protection, 2016,81(4):14-19.
[17] 王娟,兰玉彬,姚伟祥,等. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J/OL]. 农业机械学报,2019, 50(7):109-119.
WANG Juan,LAN Yubin,YAO Weixiang,et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca tree[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019, 50(7):109-119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.011. (in Chinese)
[18] FOQUÉ D, PIETERS J G, NUYTTENS D. Spray deposition and distribution in a bay laurel crop as affected by nozzle type, air assistance and spray direction when using vertical spray booms[J]. Crop Protection, 2012,41(6):77-87.
[19] SHARPE S M, BOYD N S, DITTMAR P J, et al. Spray penetration into a strawberry canopy as affected by canopy structure, nozzle type, and application volume[J]. Weed Technology, 2018,32(1):1-5.
[20] 刘冬梅,周宏平,茹煜,等. 扇形喷头结构和压力对微生物农药雾滴分布及活性的影响[J]. 农业工程学报,2018, 34(21):57-64.
LIU Dongmei,ZHOU Hongping,RU Yu,et al. Effect of fan nozzle structure and pressure on distribution and activity of microbial pesticide droplets[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(21):57-64. (in Chinese)
[21] 陈盛德,兰玉彬,BRADLEY K F,等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(8):105-113.
CHEN Shengde,LAN Yubin,BRADLEY K F,et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):105-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)
[22] CREECH C F, HENRY R S, HEWITT A J, et al. Herbicide spray penetration into corn and soybean canopies using air-induction nozzles and a drift control adjuvant[J]. Weed Technology, 2018,32(1):1-8.
[23] 刘冬梅,周宏平,郑加强,等. 茶树叶片表面喷雾液滴斜撞击行为研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):96-103,195.
LIU Dongmei,ZHOU Hongping,ZHENG Jiaqiang,et al. Oblique impact behavior of spray droplets on tea tree leaves surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):96-103,195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190511&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.011. (in Chinese)
[24] 南玉龙, 张慧春, 徐幼林, 等. 农林仿形对靶喷雾及其控制技术研究进展[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)
[25] MIRANDA-FUENFUENTES A, RODRIGUEZ-LIZANA A, CUENCA A, et al. Improving plant protection product applications in traditional and intensive olive orchards through the development of new prototype air-assisted sprayers[J]. Crop Protection, 2017,94:44-58.
[26] HOCEVAR M, SIROK B, EJCIC V, et al. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards[J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2010, 117(2):71-79.
[27] OSTERMAN A, GODESA T, HOCEVAR M, et al. Real-time positioning algorithm for variable-geometry air-assisted orchard sprayer[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2013,98(7):175-182.
[28] 房开拓. 智能型果树仿形施药系统研究[D]. 无锡:江南大学, 2012.
FANG Kaituo. Research on intelligent profiling pesticide spraying for fruit trees[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012. (in Chinese)
[29] 王秀铿, 黄仲先, 朱树林. 机采茶树修剪形状的研究[J]. 茶叶通讯, 1985(1):9-12,13.
[30] 王立. 成龄茶树叶片的冠层结构[J]. 中国茶叶, 1986(3):3-4.
[31] 马驰, 李光林, 李晓东,等. 丘陵山地柑橘果园多方位自动喷药装置研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3):31-41.
MA Chi, LI Guanglin, LI Xiaodong, et al. Development of multi-orientation automatic spraying device for citrus orchards in hilly and mountainous areas [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 31-41. (in Chinese)
[32] 全国农业机械标准化技术委员会. 喷雾机(器)作业质量:NY/T 650—2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2013.
[33] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese)