

不同送风方式果园喷雾机施药效果比较

李昕昊,王鹏飞*,李建平,杨欣,边永亮

(河北农业大学机电工程学院,河北保定 071000)

摘要:【目的】探究不同送风方式果园喷雾机施药的雾滴分布效果,为果园风送喷雾机风送系统的设计、果农的选型和使用提供技术参考。【方法】选取涡轮风送喷雾机、塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机作为研究对象,通过田间试验,对其雾滴沉积特性和冠层分布特性进行对比研究,分析雾滴沉积密度和雾滴在冠层中和叶片正反面的分布情况。【结果】1)在相同作业情况下,涡轮风送喷雾机较塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机分别节省约36%和33.3%的药液量;2)三种机型中下层雾滴分布集中,差异在17.28%~29.51%,而涡轮风送喷雾机的上层明显少于另外两种机型,较另外两种机型差异在66.65%~69.03%;3)涡轮风送喷雾机的叶面叶背雾滴密度差异是9.60%,另外两种机型差异分别为39.48%和42.70%;4)涡轮风送喷雾机、塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机在南北向雾滴沉积密度集中在95~119滴·cm⁻²。【结论】涡轮风送喷雾机药液消耗量少,漂移量低,对果品质量影响更小,更适合现代果园喷雾机的整体要求。

关键词:果园;风送式喷雾机;对比试验;雾滴密度;冠层分布

中图分类号:S66 文献标志码:A 文章编号:1009-9980(2020)07-1065-08

A comparative study on the spraying effect of orchard wind sprayers under different air supply modes

LI Xinhao, WANG Pengfei*, LI Jianping, YANG Yin, BIAN Yongliang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: 【Objective】 Pest control is one of the important aspects in orchard management, and mainly depends on spraying pesticides. With the change in climate across the seasons, pesticides are sprayed 8-15 times in orchards in a year, and the workload accounts for about 30% of the total management work. Therefore, machinery for plant protection in orchards is very important. The performance of spraying machinery directly determines pest control result and thus the economic profit of the orchard. Evaluating the spraying effect of orchard sprayers under different air supply modes based on liquid consumption, droplet distribution in the crown, attachment of droplets to the lower surface of the leaves and the penetration performance of the droplets provides technical reference for the design of the wind conveying system of air blast sprayers used in orchards. 【Methods】 The 450 type turbofan sprayer from Vicar, Italy, and fx17b-18 / 440 tower type and FXD / 340 circular fan type sprayers from China's Taizhou Xinyi Agricultural Machinery Co., Ltd. were selected as the research objects. We will use water sensitive paper, hot wire anemometer (QY-AM-4204, Handan Qingsheng Electronic Technology), Taihong tractor (TH804-3), rotational speed tester, thermometer and hygrometer (AS847), box ruler (3m), tape measure (30m), stopwatch and other instruments to test. The test was carried out at an ambient temperature of 15-20 °C, a humidity of 40%, and a northwest wind speed of 3 m·s⁻¹. The operation speed was

收稿日期:2019-12-30 接受日期:2020-04-16

基金项目:河北农业大学社科基金和理工基金(ZD201701、LG201703);河北省农业科技成果转化资金专项(19827201D);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-27)

作者简介:李昕昊,男,在读硕士研究生,研究方向为机械装备与自动控制。Tel:13520662076,E-mail:2399453883@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: wpf5769@126.com

$1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Two rows of trees were selected as the experimental block in the orchard. Six fruit trees (three trees in each row) with well-developed canopy were selected for the test, which was carried out in accordance with the national standard of air supply sprayer. Through this field experiment, the characteristics of droplet deposition and canopy distribution were compared and analyzed. 【Results】 1) Under the same operation condition, the tower type and circular type sprayers saved about 36% and 33.3% liquid consumption, respectively. 2) The distribution of droplets was concentrated in the middle and lower layers of the canopy in all the three models and the difference was between 17.28% and 29.51%, while droplet distribution in the upper layer created by the turbine type sprayer was significantly less than the other two models and the difference was between 66.65% and 69.03%. Under the droplets national standard of $20 \text{ drops} \cdot \text{cm}^{-2}$ for orchard spray, the upper layer in the treatment of air assisted sprayer had less drift and thus a higher liquid utilization rate; 3) Droplet density difference between the upper and the lower leaf surface in the treatment with the turbo air assisted sprayer was 9.60%, and the difference in the groups with the other two types was 39.48%–42.70%. The results showed that the turbo air assisted sprayer was more uniform than the other two types and the adhesion effect on the lower leaf surface was better; 4) According to the analysis of variance, the penetration performance of the three models was similar. 【Conclusion】 The turbine air sprayer has less liquid consumption, less drift, and less impact on the quality of fruits, and is thus more suitable for orchard spraying.

Key words: Orchard; Wind-driven; Contrast test; Droplet density; Canopy distribution

病虫害防治工作是整个果树管理作业中极其重要的环节,该环节主要依靠喷施农药,随着季节变更,气候变化,每年喷施农药 8~15 次,其工作量约占果树管理工作总量的 30%^[1-3],因此果园植保机械就显得及其重要。喷雾机械作为植保机械的一种,其性能直接决定着果实品质和果园的经济效益。目前果园常见的地面施药机械主要有手工喷雾器、机动喷雾器以及风送式喷雾机等^[4-5],风送喷雾与常规喷枪喷施相比,雾滴粒径较小,雾滴穿透性强,通过风力辅助输送雾滴到靶标内部,对枝叶搅动大,有别于圆形施药的冲淋式施药,不仅大大减少喷药量,而且还提高了药液在靶标上的覆盖密度和均匀度,其药液的利用率达到 30%~40%,同时操作人员的劳动强度和工作条件还大为改善^[6-7]。

现在常用的果园风送喷雾机主要是圆形风送喷雾机、塔型风送喷雾机以及涡轮风送喷雾机。涡轮风送喷雾机是采用涡轮风机以及 4 风管输送,每个风管配有 3 个双向喷头,通过调整出风口实现喷雾,可根据冠层形状进行调整,以达到最优效果;塔型风送喷雾机是采用轴流风机,通过内部挡流板向后输送至出风口,使药液在高速气流的吹送下与空气撞击而雾化,从而输送至果树冠层;圆形风送喷

雾机采用轴流风机,风机轴向进风,径向出风呈辐射状,气流使雾滴雾化并送至叶片上^[8-11]。在喷雾机的各项性能测试中,雾滴在冠层中的沉积和分布特性是衡量施药质量最重要的指标之一。雾滴均匀覆盖,不仅能消除对作物的条纹状漏喷,而且能防止农药对作物的伤害;雾滴在冠层上中下均匀分布,可以使药液充分利用,提高农药利用率。

丁素明等^[12]研制的一种自走式果园风送喷雾机在喷雾压力 1.0 MPa、风机转速 $1\ 450 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、行驶速度 $1.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的作业条件下进行喷雾,树冠内部枝叶正、反面平均有 61.22%、20.9% 的药液附着率,树冠外层枝叶正、反面平均有 77.22%、37.17% 的药液附着率;曹龙龙等^[13]通过性能试验对比塔式风送喷雾机和传统风送喷雾机,得出塔式果园风送喷雾机果树冠层整体药液沉积量为 $1.932 \mu\text{L} \cdot \text{cm}^{-2}$,明显高于圆形风送喷雾机;张晓辉等^[14]通过对履带自走式定向风送喷雾机进行试验分析,得出有风送时雾滴沉积量比无风送时提高了 42.9%,变异系数降低了 18.5%;定向喷雾比普通喷雾雾滴个数提高了 30.9%,变异系数降低了 55.3%。

上述对不同喷雾机的各项研究均未进行田间试验,因此通过田间试验对意大利 Vicar 公司涡轮

风送 450 型喷雾机和我国台州信溢农业机械有限公司的 FXL7B-18/440 型号塔型风送喷雾机和 FXD/340 型号圆形风送喷雾机施药效果进行对比,分析 3 种喷雾机作业性能,为下一步果园风送喷雾机送风系统设计、果农的选型和使用提供技术参考^[15-16]。

1 试验用果园喷雾机

1.1 Vicar 涡轮风送 450 型号喷雾机(TAFS)

意大利 Vicar 涡轮风送 450 型号喷雾机主要结构如图 1 所示,主要包括铝合金外壳、不锈钢涡轮、可调节喷头、2-速齿轮以及机架、药箱和内部隔膜泵等工作部件。

喷雾作业时,拖拉机后置动力输出轴输出的动力经联轴器传递至喷雾机的隔膜泵,再经过隔膜泵与风机变速箱间的联轴器传递至风机变速箱,驱动隔膜泵和风机作业。药箱中药液经隔膜泵加压后,除一部分药液回流到药箱起搅拌作用外,其余药液经液管输送至喷头雾化喷出;风机变速箱将动力传递至风机,风机高速旋转形成的高压高速气流将喷



图1 Vicar 450 涡轮风送喷雾机模型

Fig. 1 Vicar 450 model of turbine wind-driven sprayer

头喷出的雾滴二次雾化,并将雾滴风送至果树叶片和枝干上;同时,高压高速气流还能翻动果树枝叶,使雾滴均匀覆盖于果树叶片的叶面与叶背^[17]。Vicar 450 涡轮风送喷雾机为提高雾滴穿透性采用 4 风管分置输送,其特点是风机出口风速大、雾滴在冠层中的穿透性好等,可根据果树冠形调整喷头方向,以此达到最佳喷雾效果。Vicar 450 涡轮风送喷雾机主要参数见表 1。

表1 三种机型主要参数

Table 1 Main parameters of the three models of sprayers

参数 Parameter	TAFS	TTWS	TPS
配套功率 Supporting power/kW	25.7~36.8	25.7~36.8	25.7~36.8
喷头数量 Number of nozzles	12	14	10
喷头型号 Sprinkler type	F2002A (1.2/1.5)	F2002A (1.2/1.5)	F2002A (1.2/1.5)
工作压力 Working pressure/(MPa)	1.0~4.0	1.0~4.0	1.0~4.0
单喷头流量 Single nozzle flow/(L·min ⁻¹)	0.60	0.60	0.60
施药量 Dosage of pesticide/(L·hm ⁻²)	542	846	812
风机形式 Fan form	涡轮式 Turbo	轴流式 Axial flow	轴流式 Axial flow
风机尺寸 Fan size/mm	500	800	800
风机风量 Fan air volume/(m ³ ·h ⁻¹)	13 000	16 200	16 200

1.2 法美特塔式风送喷雾机(TTWS)

塔型风送喷雾机结构组成如图 2 所示,主要机构有风机、立板、导流装置、喷头、药箱、药泵及机架和隔膜泵等工作部件。

喷雾作业时,拖拉机后置动力输出轴输出的动力经联轴器传递至喷雾机的隔膜泵,再经过隔膜泵与风机变速箱间的联轴器传递至风机变速箱,驱动隔膜泵和风机作业。药箱中药液经隔膜泵加压后,除一部分药液回流到药箱起搅拌作用外,其余药液经液管输送至喷头雾化喷出;风机变速箱将动力传递至风机,风机高速旋转形成的高压高速气流将喷

头喷出的雾滴二次雾化,并将雾滴风送至果树叶片和枝干上;同时,高压高速气流还能翻动果树枝叶,使雾滴均匀覆盖于果树叶片的叶面与叶背^[18]。TTWS 是为提高雾滴在冠层中分布均匀性采用两边及顶部均匀开口的塔式输送,特点是风机出口风速小、风速与雾滴在冠层中分布均匀等。FXL7B-18/440 型号塔型风送喷雾机主要参数见表 1。

1.3 法美特圆形风送喷雾机(TPS)

圆形风送喷雾机如图 3 所示,主要机构有风机、喷头、药箱、机架及隔膜泵等工作部件。

喷雾作业时,拖拉机后置动力输出轴输出的动



图2 塔式风送喷雾机三维模型

Fig. 2 The three-dimensional model diagram of the tower type wind-driven sprayer



图3 圆形风送喷雾机

Fig. 3 Traditional pneumatic sprayer

力经联轴器传递至喷雾机的隔膜泵,再经过隔膜泵与风机变速箱间的联轴器传递至风机变速箱,驱动隔膜泵和风机作业^[19]。药箱中药液经隔膜泵加压后,除一部分药液回流到药箱起搅拌作用外,其余药液经液管输送至喷头雾化喷出;风机变速箱将动力传递至风机,风机轴向进风,径向出风呈辐射状,将雾滴送至叶片^[8, 20-22]。TPS为传统的风送喷雾机,其特点是风机出口风速不匀等特点。FXD/340型

号圆形风送喷雾机主要参数见表1。

2 试验方法

试验于2019年11月10日在河北农业大学曲阳县果树试验站标准果树示范基地进行,为5a生苹果树,品种为‘国光’。该果园采用矮砧密植的栽培模式,果树的冠层形状为纺锤形,其离地平均高度在0.73 m和2.93 m的冠层直径为0.87 m和2.16 m,株距1 m,行距3.5 m,树高3.5 m;试验条件:环境温度15~20 ℃,湿度40%,风速3 m·s⁻¹,西北风,作业速度1.25 m·s⁻¹。试验时叶片少数凋落。试验时调整表1中的工作参数,依据戴奋奋^[23]“置换原则”,控制风机转速,使得风机单位时间内输入风量一定,确保试验结果由“输风方式”这一单一因素改变。

在果园内选取两行果树作为试验区,在试验区内选取6株(行间左右各3株)枝叶繁茂、冠层直径大的典型树体作为试验对象,试验按照风送喷雾机国家标准方法进行^[8, 24-25]。试验过程中采取单行喷雾(可以减少双行喷雾对试验结果分析的影响),使3种喷雾机在同一位置的试验数据更精准。

根据选取的果树的冠层形状和冠层直径,将果树冠层分为上、中、下3个截面,截面冠层高度及冠层直径数据如表2所示。上中下3个截面平均离地高度分别为2.93、1.82、0.73 m,上层截面与中层截面平均间隔为1.12 m,中层截面和下层截面平均间隔为1.1 m;3个截面的平均冠层直径为0.87、1.62、2.16 m。在每一个截面的东南西北四个方向布置水敏纸,由于果树的冠层形状为纺锤形,下层截面直径大,在布置水敏纸的过程中,下层每一个方向分外中内进行布置,中层分外内进行布置,上层在冠层内部进行布置,布置点如图4所示,同时叶背叶面也要布置,因此1株树上中下布置水敏纸的数量分别为8、16、24,总计48张。

两种机型依次进行试验,第一种机型试验后,

表2 截面冠层高度及直径

Table 2 Height and diameter of canopy

cm

冠层 Canopy	树一 Tree one		树二 Tree two		树三 Tree three		树四 Tree four		树五 Tree five		树六 Tree six	
	高度 H	直径 D	高度 H	直径 D	高度 H	直径 D	高度 H	直径 D	高度 H	直径 D	高度 H	直径 D
上层 Upper	300	120	260	100	330	100	320	40	280	60	270	100
中层 Middle	180	140	140	220	210	130	210	100	170	180	180	200
下层 Lower	70	190	50	160	80	210	80	198	75	300	80	240

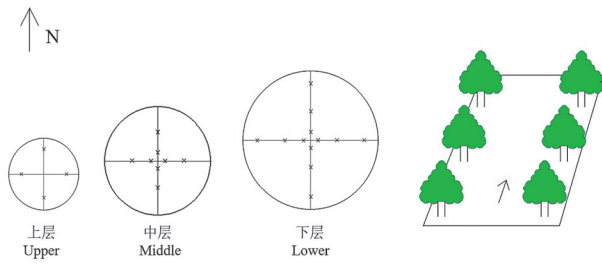


图4 采样点示意图

Fig. 4 Sketch map of sample arrangement

采集水敏纸,贴在事先准备好的数据收集表格中,待叶面雾滴蒸发后,进行第二种机型试验,重复上一机型的步骤,在布置水敏纸时尽可能在与上一机型同样的位置,以减小数据对比的误差,提高数据真实性。

3 数据处理

将采集好的水敏纸用扫描仪(EPSON PERFECTION 1670)进行扫描,扫描参数设置:彩色,分辨率600 dpi, PNG 格式,扫描水敏纸如图5所示,将扫描好的水敏纸用重庆六六山下植保科技有限公司开发的雾滴处理软件进行分析处理。

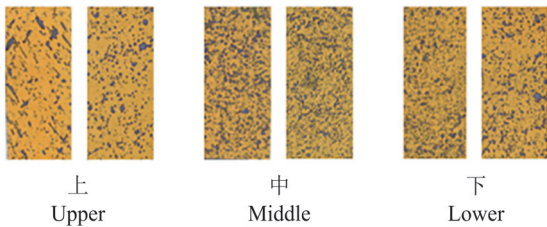


图5 扫描件

Fig. 5 Scanned copy

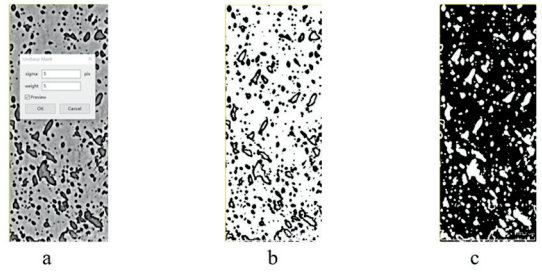
软件处理过程:在软件中导入扫描件后,将扫描件上的水敏纸框选提取,第一步,调节雾滴分析区域前景背景像素,参数如图6-a所示;第二步,雾滴分析的区域前景背景剥离,将前背景的阈值调节到80,效果如图6-b所示;第三步,雾滴分析区域的雾滴反选,如图6-c所示;第四步,雾滴分析的区域筛选,过滤噪声,筛选去除小雾滴等干扰因子;第五步,统计结果,如图6-d所示。

4 结果与分析

4.1 药液消耗量

根据上述实验方法,对3种喷雾机进行50 m 喷雾试验,测得涡轮风送喷雾机、塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机的药液消耗量分别为8.0、12.5

和12 L(图7)。与其他两种机型相比,涡轮风送喷雾机节省施药量约36%和33.3%。



	DV1	VMD	DV9	NMD	Spectrum	Total	Deposits/cm2	Coverage	Area cm2	ul/cm2
1	93.26	198.84	390.16	142.96	1.39	428	124.06	21.2817%	3.45	0.7059

d

图6 数据处理过程

Fig. 6 Data processing

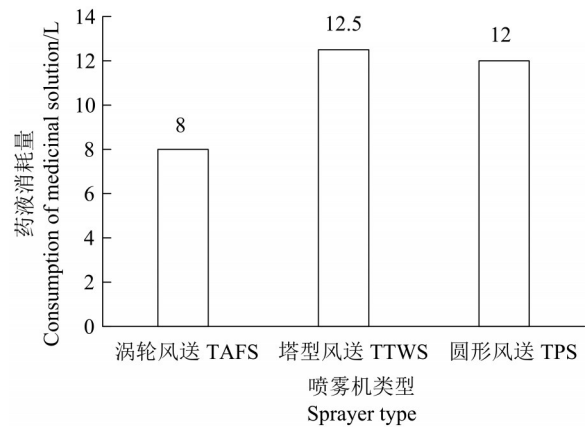


图7 药液消耗量

Fig. 7 Liquid consumption

4.2 树冠上中下雾滴分布情况

为探究3种机型风送雾滴在树冠不同高度上的分布情况,把收集到离地平均高度为2.93、1.82、0.73 m的上、中、下3个截面的数据进行处理分析,3种机型的上、中、下的雾滴分布图如图8所示。

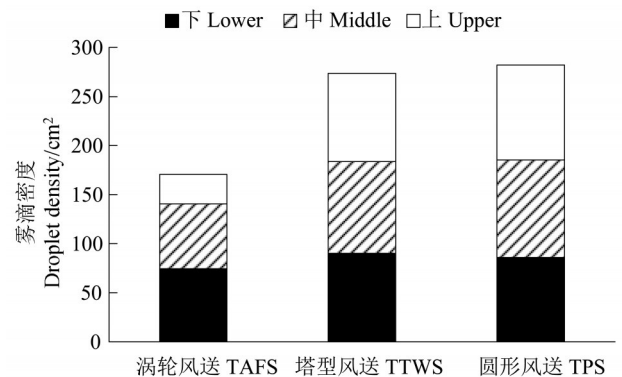


图8 三种机型雾滴冠层分布

Fig. 8 Droplet distribution in canopy created by three types of sprayers

由图 8 得知,涡轮风送喷雾机上层雾滴密度分布较低,分布范围在 20~58 滴·cm²,而中下层雾滴密度分布范围在 30~105 滴·cm²;塔型风送喷雾机上、中、下雾滴密度具体范围在 40~158 滴·cm²;圆形风送喷雾机上中下雾滴密度具体范围在 62~130 滴·cm²。3 种机型中下层雾滴分布集中,差异在 17.28%~29.51%,而涡轮风送喷雾机的上层明显少于另外两种机型,较另外两种机型差异在 66.65%~69.03%。为探究 3 种机型在冠层高度上的差异性进行两因素无重复方差分析(公式(1),公式(2),公式(3))。

$$S_T^2 = S_e^2 + S_A^2 + S_B^2; \tag{1}$$

$$F_A = \frac{S_A^2 / f_A}{S_e^2 / f_e}; \tag{2}$$

$$F_B = \frac{S_B^2 / f_B}{S_e^2 / f_e}。 \tag{3}$$

式中 S_T^2 为总离差平方和, S_A^2 为机型的离差平方和, S_B^2 为冠层高度的离差平方和, S_e^2 为误差的离差平方和, F_A 和 F_B 为两因素水平的统计量, f 为其相应的自由度。

算出 $F_A=0.72$, $F_B=5.75$, 在显著性水平 $\alpha=0.10$ 时, 由 F 分布表查出 $F_{\alpha}=4.32$, 因此 $F_A < F_{\alpha}$, 机型对雾滴密度的影响不显著; $F_B > F_{\alpha}$, 冠层高度对雾滴密度影响显著。

分析其原因: 涡轮风送喷雾机最高的喷头高度为 1.4 m, 塔型风送喷雾机最高喷头高度为 2.1 m, 导致涡轮风送喷雾机上层出风口的风速到树冠上层时降低, 雾滴送至上层树冠较少, 而圆形风送喷雾机轴向进气, 轴向排气, 雾滴呈放射状, 因此在上中下分布较均匀。但综合比较 3 种机型, 在同时满足果园喷雾国家标准 20 滴·cm² 的情况下, 涡轮风送喷雾机树冠上层飘移更少, 药液利用率更高。

4.3 叶面叶背雾滴附着对比分析

在果树施药过程中, 叶面叶背均匀着药能够使施药效果更佳, 下面就 3 种机型叶面叶背雾滴附着情况进行对比分析。通过图 8 可知, 树冠下层的雾滴沉积密度更集中, 因此选取树冠下层叶面叶背雾滴密度数据进行分析, 得出如图 9 所示结果。

涡轮风送喷雾机的叶面、叶背雾滴分布较为均匀, 差异仅为 9.60%; 塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机的叶面雾滴沉积密度明显高于叶背, 叶面叶背雾滴密度不均匀, 差异分别为 39.48% 和 42.70%。

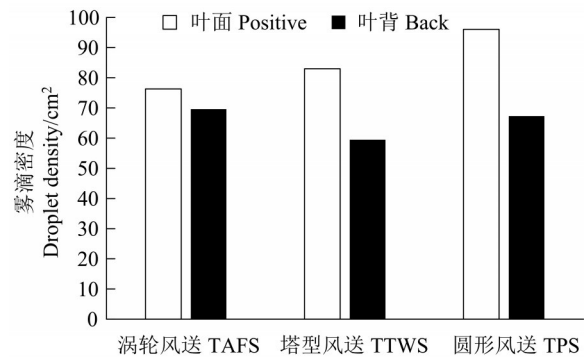


Fig. 9 Droplet density on the upper and surface of leaves sprayed by the three models of sprayers

其原因是涡轮风送喷雾机采用涡轮离心风机, 速度高, 排量小, 能够有效搅动叶片, 使叶面叶背药液附着更均匀; 而塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机采用轴流风机, 速度低, 排量大, 对叶片的搅动效果不足, 导致叶背雾滴附着密度低。

4.4 雾滴穿透性能分析

同 4.3 中所述, 选取下层作为分析数据, 为探究 3 种机型穿透冠层的性能, 再选取与喷头相同距离的南北向数据, 选点如图 10 所示。将 3 种机型选点数据进行统计分析, 得出图 11 所示的分布数据。

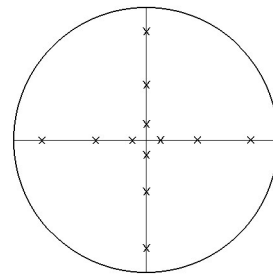


图 10 选点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of point selection

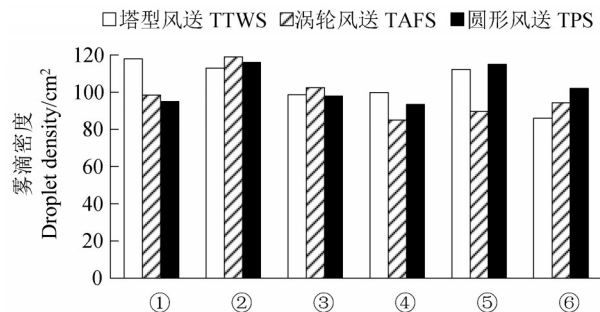


图 11 三种机型雾滴密度

Fig. 11 Droplet density created by the three models of sprayers

为探究 3 种机型的雾滴穿透性能的差异性, 对试验数据进行单因素方差分析见公式(4)。

$$F_A = \frac{S_A^2 f_A}{S_e^2 f_e} \quad (4)$$

式中 F_A 为机型统计量, S_A^2 和 S_e^2 分别为机型和误差的离差平方和, f_A 和 f_e 分别为机型和误差的自由度。

结果为 $F_A=0.30$, 在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, 由 F 分布表查出 $F_\alpha=3.68$, 由此可见, $F_A < F_\alpha$, 3 种机型对雾滴密度的影响在 $\alpha=0.05$ 水平下不显著。

涡轮风送喷雾机、塔型风送喷雾机和圆形风送喷雾机在南北向雾滴沉积密度集中在 95~119 滴·cm⁻², 根据方差分析结果, 3 种机型的雾滴穿透性能一致。

5 讨 论

雾滴在冠层不同高度上的均匀分布是衡量喷雾机的重要指标, 该试验与李龙龙等^[7]所做的果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验在同样的果园类型进行, 但对于冠层上层雾滴沉积的结果却有差异, 这可能是受试验时风速的影响, 导致圆形风送喷雾机的上层雾滴沉积较多。

此外, 作者仅研究了 3 种机型在冠层不同高度、叶面叶背以及穿透性能等方面的雾滴沉积分布情况, 还未涉及外界环境(包括温度、湿度和风速等)因素对于雾滴沉积分布情况的影响。在今后的研究中, 需要综合考虑生物防治以及气象环境等不同因素才能对实际生产提供参考。

6 结 论

综合考虑 3 种机型雾滴沉积特性和冠层分布特性, 涡轮风送喷雾机药液消耗量少, 漂移量低, 更适应现代果园喷雾机的整体要求; 塔型风送机喷雾后的树冠上下部雾滴分布更为均匀; 文中采取单行试验是为消除多余因素影响, 而实际作业中从一个方向喷雾作业导致树冠横向方位的雾滴沉积差异可以通过从树冠两侧喷雾而消除。

参考文献 References:

- [1] 李瀚哲, 翟长远, 张波, 杨硕. 果园喷雾靶标探测技术现状分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(2): 1-5.
LI Hanzhe, ZHAI Changyuan, ZHANG Bo, YANG Shuo. Status analysis of orchard spray target detection technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 1-5.
- [2] 杨莉, 施英俊, 冯宏祖, 王兰, 王喆, 吴雪海, 师建银, 董宁, 黄

群. B-7451 型直升机喷雾参数对枣树冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 果树学报, 2019, 36(3): 338-346.

YANG Li, SHI Yingjun, FENG Hongzu, WANG Lan, WANG Zhe, WU Xuehai, SHI Jianyin, DONG Ning, HUANG Qun. Effect of flight parameters of B-7451 helicopter on distribution pattern of droplet deposition in jujube canopy[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(3): 338-346.

- [3] 张鹏九, 高越, 史高川, 刘中芳, 封云涛, 范仁俊. 不同药械对高效氟氯菊酯水乳剂防治苹果园桃小食心虫的影响[J]. 果树学报, 2016, 33(7): 850-856.

ZHANG Pengjiu, GAO Yue, SHI Gaochuan, LIU Zhongfang, FENG Yuntao, FAN Renjun. Effect of different pesticide sprayers on beta-cyfluthrin EW for controlling the peach fruit moth (*Carpocapsa niponensis* Walsingham) in orchard[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(7): 850-856.

- [4] 邢敬轩. 果园风送喷雾机喷雾特性的试验研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.

XING Jingxuan. Orchard air-assisted sprayer spray characteristics experimental study[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012.

- [5] 傅锡敏, 吕晓兰, 丁为民. 我国果园植保机械现状与技术需求[J]. 新疆农机化, 2010(1): 49-50.

FU Ximin, LÜ Xiaolan, DING Weimin. Current situation and technical demand of orchard plant protection machinery in China[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2010(1): 49-50.

- [6] 顾家冰. 风送式变量喷雾机气液两相流及雾化的试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.

GU Jiabing. Atomization and air-droplet flow fields of an air-assisted variable-rate rate sprayer for tree crop applications[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.

- [7] 李龙龙, 何雄奎, 宋坚利, 刘杨, 王志翀, 李进耀, 贾晓铭, 刘志雄. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 56-63.

LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, LIU Yang, WANG Zhichong, LI Jinyao, JIA Xiaoming, LIU Zhixiong. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(16): 56-63.

- [8] 王利源, 李鑫, 赵鹏, 李建平, 王鹏飞, 杨欣. 3 WFQ-1600 型牵引式风送喷雾机喷雾性能试验研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 167-171.

WANG Liyuan, LI Xin, ZHAO Peng, LI Jianping, WANG Pengfei, YANG Xin. Experimental study on spray performance of 3WFQ-1600 traction air-jet sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9): 167-171.

- [9] FAO. Minimum requirements for agricultural pesticide application equipment[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

- [10] GIL E, ARNO J, LLORENS J, SANZ R, LLOP J, ROSELL-POLO J R, GALLART M, ESCOLA A, LLORENS J. Advanced

- technologies for the improvement of spray application techniques in Spanish viticulture: An overview[J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 691-708.
- [11] 牛萌萌,段洁利,方会敏,杨洲,朱正波. 果园施药技术研究进展[J]. *果树学报*, 2019, 36(1): 103-110.
NIU Mengmeng, DAUN Jieli, FANG Huimin, YANG Zhou, ZHU Zhengbo. Research progress in orchard chemical spraying technology[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(1):103-110.
- [12] 丁素明,薛新宇,张玲,刘卫华,周良富,蔡晨,秦维彩. 自走式果园风送喷雾机的研制[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(4): 54-58.
DING Suming, XUE Xinyu, ZHANG Ling, LIU Weihua, ZHOU Liangfu, CAI Chen, QIN Weicai. Design on self-propelled blowing orchard sprayer [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(4): 54-58.
- [13] 曹龙龙. 三种典型果园风送式喷雾机雾滴沉积特性与风送系统的优化试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
CAO Longlong. Droplet deposition of three typical orchard air-assisted sprayer and air-assisted parametric optimization and experiment[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.
- [14] 张晓辉,姜宗月,范国强,曹龙龙. 履带自走式果园定向风送喷雾机[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 117-122.
ZHANG Xiaohui, JIANG Zongyue, FAN Guoqiang, CAO Longlong. Self-propelled crawler directional air-blowing orchard sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 117-122.
- [15] 董祥,杨学军,严荷荣. 果园喷雾机喷雾量垂直分布测试系统[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 59-63.
DONG Xiang, YANG Xuejun, YAN Herong. Test system of vertical spray distribution on orchard sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 59-63.
- [16] 邱威. 自走式果园风送涡轮喷雾机的研制与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
QIU Wei. Development and experimental research of self-propelled air assisted orchard sprayer[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [17] 王士林,宋坚利,何雄奎,李艳杰,凌云. 电动背负式风送喷雾器设计与作业性能试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 67-73.
WANG Shilin, SONG Jianli, HE Xiongkui, LI Yanjie, LING Yun. Design of air-assisted electric knapsack sprayer and experiment of its operation performance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(21): 67-73.
- [18] 郭峰. 3WF-8 型风送式果园喷雾机的试验研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2010.
GUO Feng. Experiments and research of 3WF-8 air-assistant orchard sprayer[D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2010.
- [19] 蒋超峰. 气助式静电喷雾雾化及沉积特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
JIANG Chaofeng. Atomization and deposition characteristic research on air-assisted electrostatic spraying[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [20] ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124-141.
- [21] SHALAL N, LOW T, MCCARTHY C, HANCOCK N. Orchard mapping and mobile robot localisation using on-board camera and laser scanner data fusion - Part B: Mapping and localisation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 119: 267-278.
- [22] SOLANELLES F, ESCOLA A, PLANAS S, ROSELL J R, CAMP F, GRACIA F. An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(4): 473-481.
- [23] 戴奋奋. 风送喷雾机风量的选择与计算[J]. *植物保护*, 2008(6): 124-127.
DAI Fenfen. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers[J]. *Plant Protection*, 2008(6): 124-127.
- [24] 张亮,刘俊峰,李建平,侯天宇. 3WFQ-1600 型牵引式风送喷雾机研制与试验[J]. *农机化研究*, 2017, 39(4): 62-67.
ZHANG Liang, LIU Junfeng, LI Jianping, HOU Tianyu. Design and experiment of 3WFQ-1600 traction type air-assisted in orchard[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(4): 62-67.
- [25] 何雄奎. 植保精准施药技术装备[J]. *农业工程技术*, 2017, 37(30): 22-26.
HE Xiongkui. Plant protection precise application equipment[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2017, 37(30): 22-26.