

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.06.026

基于多指标的静电喷雾效果 影响因素最优组合研究^①

谢守勇, 王靖, 何丙辉

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

摘要: 为了提高喷雾效果, 对静电喷雾效果的影响因素进行了研究. 选取静电电压、喷雾压力、喷头形式和喷孔直径作为影响因子, 以雾滴直径、雾滴均匀性和雾滴附着率为衡量喷雾效果的多指标并进行研究. 搭建了静电喷雾效果多指标测试平台, 按照正交试验表 $L_9(3^4)$ 进行试验测试, 采用电子显微镜采集雾滴图像信息, 利用 Matlab 语言进行图像处理和数据统计, 以测试出雾滴直径、均匀度和附着率, 通过正交试验分析方法得出影响喷雾效果的最优参数组合.

关键词: 多指标; 静电喷雾; 雾化效果; 影响因素; 最优组合

中图分类号: S491

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)06-0163-06

静电喷雾应用越来越广泛, 常规喷雾器因所产生的雾滴直径较大、分布不均、不能有效吸附至靶标物上等原因, 使得防治病虫害效果较差, 造成农药浪费. 为了降低农药消耗, 减少环境污染, 采用静电喷雾是较好方法之一. 国内外对农药喷洒效果开展了相关研究, 如美国、英国和加拿大等发达国家相继开展农药喷洒试验研究^[1], 结果表明压力波动对喷施流量影响很大^[2-3]. 国内植保机械和农药使用技术相对发达国家而言还很落后^[4-5], 虽然在农药喷雾效果方面开展了一些相关研究, 如采用静电喷雾, 旨在使药液喷出后借助静电场力和重力等使雾滴定向运动至靶标物的各个部位, 从而有效提高药液的利用率, 降低因飘散或滴落导致药物流失^[6], 但由于多种因素影响, 其应用推广受限^[7]. 目前, 药液分布量或分布特性的检测方法以水敏纸图像分析、激光或超声波对雾滴的运动分析和荧光检测示踪剂等方法为主, 由于传感器精度、信号采集和控制系统的缺陷, 操作十分繁琐, 且获得数据易产生漂移, 不能准确、实时地获得雾量分布信息^[8]. 随着电子技术的发展, 喷雾检测技术也在不断提高, 静电雾化理论也趋于成熟, 开发精准、环境友好的喷雾系统非常必要, 但是有关喷雾质量衡量指标和影响喷雾质量的因素之间的定量关系研究还很缺乏, 严重制约喷雾技术提升. 本文拟通过对影响静电喷雾效果的因素进行正交试验研究, 建立静电喷雾效果影响因素最优组合, 为喷雾技术提升提供模型基础.

1 静电喷雾试验平台

为了测试静电喷雾器喷雾效果指标, 按照图 1 所示平台结构示意图, 搭建了一个测试平台如图 2 所示. 该平台主要由喷雾单元和检测单元组成.

^① 收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家科技支撑计划项目专题(2011BAD31B03); 重庆市科学技术委员会攻关项目(cstc2013yykfA80009).

作者简介: 谢守勇(1969-), 博士, 教授, 主要从事智能化农业机械方面的研究.

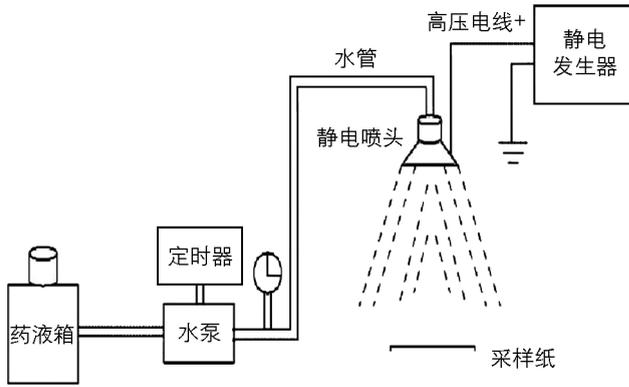


图 1 试验平台结构示意图

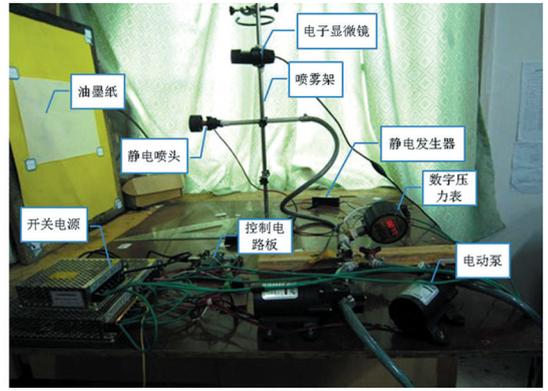


图 2 试验平台实物图

1.1 喷雾单元

1.1.1 单元组成

喷雾单元主要由喷头、定时器、静电发生器、液压泵、压力表、开关电源等元件构成,完成静电喷雾功能.为了检测方便和保证安全,本试验采用自来水中加入黑色墨水代替农药,分别采用不同结构形式和喷孔直径的喷头,利用 OMRON PLC 作为定时控制核心,结合显控触摸屏控制液压泵,实现定时喷雾以及喷雾压力的调节,通过压力表显示压力,有效提高了该试验的准确性.本文采用的静电发生器所产生的电压通过安装在喷头上的环形电极,使喷雾液滴带电(即感应充电),该种充电方式有效避免了电极与药液的直接接触^[6],大大提高喷雾安全性,整个控制系统采用开关电源供电.

1.1.2 静电喷雾原理

静电喷雾的优点就是加入了二次雾化过程^[6]即:静电喷雾则通过某种充电方式使常规喷雾形成的初始雾滴带电后在静电力作用下进一步雾化成更小的雾滴,从而有效提高雾化效果.静电作用的雾化机理至今没有公认模型,一般认为由于液体充电后其表面分子定向排列导致张力下降,同时,由于同性电荷的相互排斥作用使雾滴产生内外压力差,使雾滴进一步细化,大大减少雾滴群的形成,从而有效地减小雾滴的直径及改善其分布状况,提高了雾滴在靶标物上的沉积、吸附等^[9].

1.2 检测单元

1.2.1 单元构成

检测单元主要包含油纸、电子显微镜和计算机等.为检测喷雾的雾化效果,因油纸不利于雾滴扩散和飞溅,故本试验以油纸为喷雾对象,通过高分辨率电子显微镜采集雾滴图像信息保存于计算机中,并结合 MATLAB 强大的数字图形处理技术对雾滴的参数进行测量.

1.2.2 图像处理

喷雾完成后,通过电子显微镜自动采集雾滴图像(其中图 3 所示为某一次所采集的图像),将图 3 通过二值化和反向处理得到图 4,再通过 imfill 填充处理后得到图 5,为统计准确,将图 5 中边缘上的残缺雾滴清除^[10],得到图 6.在图 6 中,利用 Matlab 语言通过计算得到相应的检测指标.

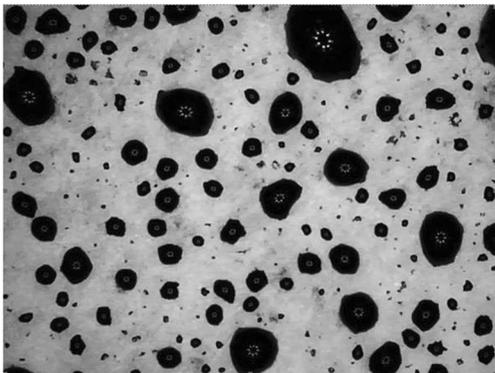


图 3 图像采集

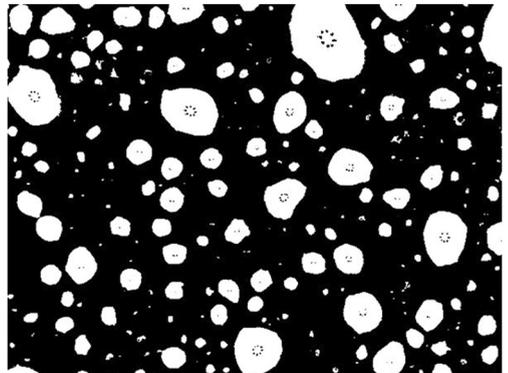


图 4 二值化处理

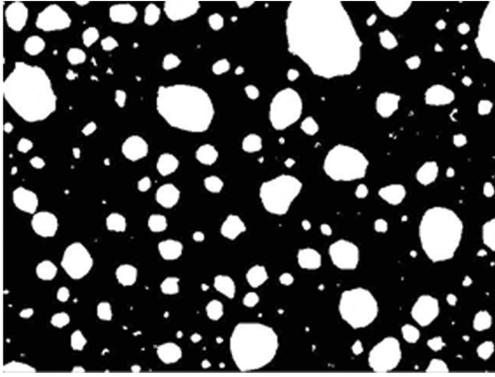


图 5 中心填充

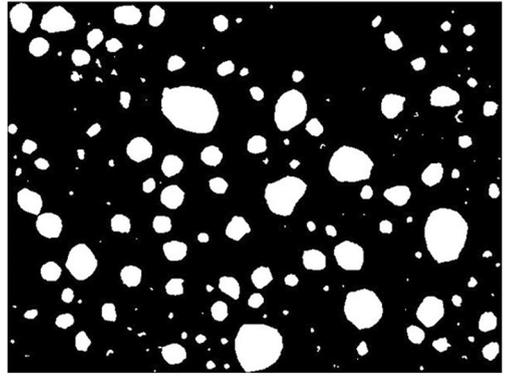


图 6 去除边缘

2 试验指标

2.1 雾滴直径

雾滴直径是衡量喷雾效果的一个重要指标. 雾滴直径较小, 表明覆盖效果好, 利于药物功能的发挥. 雾滴直径一般用平均直径描述, 根据平均的方法不同, 可分为算术平均直径、体积中径、数量中径和面积平均直径等^[9], 它们之间可以通过某种方式相互转化. 由于雾滴在油纸上将产生扩散, 根据《中华人民共和国机械行业标准》规定: 液体雾滴在纸上的测量直径与实际直径之间的修正系数为 0.42, 即雾滴实际直径 = 雾滴测量直径 \times 0.42^[6]. 本文选用体积中径(V_{MD})来描述雾滴直径, 作为评价雾化效果的指标之一.

2.2 雾滴均匀性

雾滴直径的均匀性表征了雾滴群体大小的分散程度, 是评价雾化效果的一个重要指标, 一般用 D_R 来表示^[11], 即

$$D_R = \frac{N_{MD}}{V_{MD}}$$

式中 N_{MD} 为数量中径; V_{MD} 为体积中径.

当 D_R 值越接近 1, 表示雾滴的直径越均匀, 但是很难达到, 实践表明当 $D_R \geq 0.67$ 时, 喷洒质量良好.

2.3 雾滴附着率

雾滴的附着率表征了雾滴的吸附效果, 是评价雾化效果的又一重要指标, 可以用雾滴附着面积占图像总面积的比值表示, 即

$$K = \frac{S_w}{S_z}$$

式中: K 为雾滴附着率; S_w 为雾滴附着面积; S_z 为图像总面积.

3 试验方法及结果分析

3.1 试验方法

本文采用正交试验方法, 以静电电压、喷雾压力、喷头形式和喷孔直径作为影响因子, 雾滴直径、均匀度和附着率作为评价指标, 构成四因子三水平正交试验, 选用 $L_9(3^4)$ 试验表, 如表 1 所示. 在所搭建的实验平台上, 按照正交试验表(表 1)选择喷头形式及其孔径, 设定静电电压和调节喷雾压力后, 打开喷雾开关, 在设定时间(1 s)内进行喷雾, 喷雾完成后, 通过电子显微镜自动采集油纸上的雾滴图像, 并将采集后

的图像进行编号保存,按照正交试验表(表 1)顺序依次进行下一组试验,以此类推。

当所有试验结束后,利用 Matlab 语言对所采集的图像进行处理,得到相应的评价指标值,如表 1 所示。将表 1 中数据通过正交试验分析,得到试验结果,如表 2 所示。

在表 2 中,通过水平平均值得到单指标优水平,根据极差分析得到单指标因子主次,由单指标因子主次得到综合平衡主次,最后通过综合平衡法对各项试验指标逐项按单指标分析后,根据因子主次、水平优劣和各项指标的重要性进行综合平衡,选出最优组合^[12]。

表 1 试验数据表

试验号	喷雾压力(A)/	静电电压(B)/	喷头类型(C)	喷孔径(D)/	数量中径/	均匀度	附着率/
	MPa	kV		mm	μm		%
1	0.1	10	普通直喷	0.7	93	0.698	61
2	0.1	15	普通弯喷	0.9	86	0.725	68
3	0.1	20	特制喷头	1.0	87	0.739	73
4	0.2	10	普通弯喷	1.0	89	0.729	76
5	0.2	15	特制喷头	0.7	72	0.746	64
6	0.2	20	普通直喷	0.9	78	0.751	66
7	0.3	10	特制喷头	0.9	82	0.701	70
8	0.3	15	普通直喷	1.0	64	0.743	78
9	0.3	20	普通弯喷	0.7	68	0.770	68

表 2 试验结果表

水平均值	数量中径/ μm				均匀度				附着率/%			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	88.67	88.00	78.33	77.67	0.721	0.709	0.731	0.738	67.33	69.00	68.33	64.33
k_2	79.67	74.00	81.00	82.00	0.742	0.738	0.741	0.726	68.67	70.00	70.67	68.00
k_3	71.33	77.67	80.33	80.00	0.738	0.753	0.729	0.737	72.00	69.00	69.00	75.67
R_j (极差)	17.33	14.00	2.67	4.33	0.021	0.044	0.013	0.012	4.67	1.00	2.33	11.33
单指标优水平	A3	B2	C1	D1	A2	B3	C2	D1	A3	B2	C2	D3
单指标因子主次	ABDC				BACD				DACB			
综合平衡主次					BACD							
综合平衡优水平					B2A3C2D1							

3.2 结果分析

表 2 所示试验结果表明:

1) 由极差分析可知,影响数量中径最大的因子为 A(即喷雾压力),其次为 B(即静电电压),而 C 和 D(即喷头形式和喷孔直径)对其影响相对较小,表明在静电电压作用下喷雾压力更能决定雾滴的直径;各因子对雾滴均匀度的影响较小,影响相对较大的是静电电压,极差仅为 0.44,说明在该试验静电力的作用下,雾滴群体大小的分散程度稳定;影响附着效果最大的因子是喷孔直径,极差为 11.33,且较静电电压和喷雾压力对其的影响程度大,主要由于喷孔直径大,喷射的药液量大,同时在静电力的作用下导致附着量大。

2) 数量中径、均匀度和附着率的因子主次依次为 ABDC, BACD 和 DACB;综合平衡主次依次为喷雾压力,静电电压,喷头形式和喷孔直径;当选择 0.3MPa 的喷雾压力,15kV 的静电电压,普通弯喷和 0.7 mm 的喷孔直径的试验条件时雾化效果最好,主要是涡流室结构形式的影响。

3) 喷雾压力对数量中径的影响较其他因子大, 静电电压次之, 主要是由于喷雾压力决定了药液的雾化程度, 当产生的雾滴直径较小时, 对静电电压的敏感程度越高, 二次雾化效果越好, 产生的直径更小、均匀度更好, 同时更有利于雾滴的附着, 但由于静电电压过高导致周围空气电离, 将雾滴的部分电荷中和了, 导致部分雾滴群聚集, 对雾化效果造成负面影响。

3.3 结论验证试验

为了验证试验设计所得到的组合具有普遍性, 为此按照表2所示组合 B2A3C2D1 进行试验, 试验结果为: 均匀度 $D_R=0.819$ (常规喷雾 $D_R=0.621$); 附着率 $K=79\%$ (常规喷雾 $K=62\%$); 雾滴直径对比如图4所示, 常规喷雾雾滴直径在 $100\ \mu\text{m}$, 通过优化组合得到喷雾雾滴直径在 $70\ \mu\text{m}$ 左右, 大于 $90\ \mu\text{m}$ 较少。通过验证试验可以得出本文所得到的优化组合具有普遍性, 对改善喷雾效果具有较大作用。

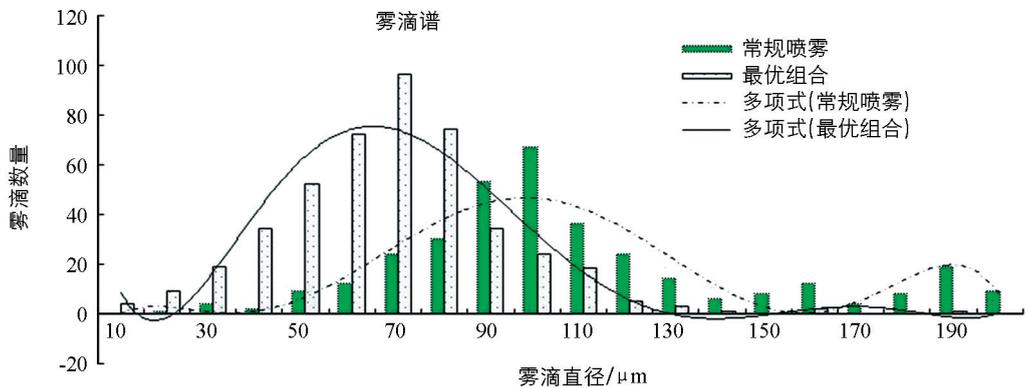


图4 雾滴直径对比图

4 结束语

影响静电喷雾系统的因子有很多, 试验指标也不尽相同。本试验选其中较为重要的4个因子并设计较少的水平数进行正交试验研究, 探索各因子对静电雾化效果的影响程度和规律, 得出最优组合。通过最优组合参数和常规喷雾对比试验发现, 最优组合试验所得到的喷雾效果好于常规喷雾, 其结果是可信的, 具有普遍性。因此本文所得到的最优组合具有实用性, 将为后续研究精准喷雾器, 进一步提高喷雾效果打下模型基础。

参考文献:

- [1] 沈从举, 贾首星, 汤智辉, 等. 农药静电喷雾研究现状与应用前景 [J]. 农机化研究, 2010(4): 10-13.
- [2] HAN Shu-feng, HENDRICKSON L L, Ni Bing-cheng, et al. Modification and Testing of a Commercial Sprayer with PWM Solenoids for Precision Spraying [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2001, 17(5): 591-594.
- [3] 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87-92.
- [4] 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13-15.
- [5] 刘伟, 汪小岳, 丁为民, 等. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 16-20.
- [6] 张丽丽. 静电喷雾的理论分析与应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011.
- [7] 郑文钟, 应霞芳. 我国植保机械和施药技术的现状、问题及对策 [J]. 农机化研究, 2008(5): 219-221.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 袁江涛, 杨立, 王小川, 等. 基于机器视觉的细水雾液滴尺寸测量与分析 [J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2842-2847.

- [11] 杜智平. 影响超低量喷雾机液体雾化效果的因素分析 [J]. 农村牧区机械化, 2012(6): 46—48.
- [12] 马成良, 张海军, 李素平. 现代试验设计优化方法及应用 [M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007: 127—132.

Study on the Optimal Combination of the Influencing Factors of Electrostatic Spray Based on Multiple Indexes of Spraying Performance

XIE Shou-yong, WANG Jing, HE Bing-hui

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: In order to improve the spraying performance, many influencing factors of electrostatic spray should be researched. In the present study, voltage, spray pressure, nozzle type and nozzle diameter of the electrostatic atomizer were chosen as the influencing factors of electrostatic spray, and diameter, uniformity and adhered rate of atomized droplets as multiple indexes for spraying performance. A test platform was constructed, and many experiments were done according to a given orthogonal test table [$L_9(3^4)$]. In the process of experiment, for the sake of safety, water instead of pesticide was used as the spraying liquid and black ink was added in the water for the convenience of image-gathering. All spraying experiments were done at the same time and controlled by PLC, and the mixed water was sprayed on the oil paper that simulated the plant foliage. Information of water droplets adhering to the oil paper was recorded as image by an electron microscope in the test platform. The indexes were measured by image processing and data statistic treatment with Matlab, and these measured data of the diameter, uniformity and adherence rate of droplets on the oil paper were recorded in the orthogonal test table. The optimal combination of electrostatic spray influencing factors was obtained by calculating the range of the orthogonal test. Then, the form of the electrostatic atomizer would be revised based on the optimal combination.

Key words: multiple index; electrostatic spray; atomization effect; influencing factor; optimal combination

责任编辑 汤振金

