

陈志刚,于成程,杜彦生,等. 风速、喷雾压力和静电电压对雾滴沉积性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(23):97-101.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.024

# 风速、喷雾压力和静电电压对雾滴沉积性的影响

陈志刚<sup>1</sup>, 于成程<sup>2</sup>, 杜彦生<sup>1</sup>, 魏新华<sup>3</sup>, 张奇<sup>2</sup>

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏镇江 212013;

3. 江苏大学农业装备工程学院, 江苏镇江 212013)

**摘要:**为提高农药喷洒过程中雾滴的沉积效果,在试验基础上研究不同风速、喷雾压力和静电电压下雾化靶标荷电效果和沉积效果的综合影响,优化选配影响因素的参数。试验结果表明,荷质比在 4 kV 之后趋于稳定,当风速为 0 m/s,喷雾压力为 0.3 MPa,静电电压达到 6 kV 时,雾滴粒径达到最小值 137.79  $\mu\text{m}$ ,荷质比达到最大值 0.128 mC/kg,靶标背部在荷电电压大于 4 kV 以后出现雾滴沉积,在 0.3 MPa 以后沉积率增大幅度趋于平缓。正交试验得出,风速、喷雾压力和静电电压均对雾滴沉积率有显著影响,影响主次顺序分别是静电电压、喷雾压力、风速。本系统喷雾的最佳组合是风速为 0 m/s 喷雾压力为 0.4 MPa 和静电电压为 6 kV,总沉积率达到最大值 48.01%。研究结果为进一步研究喷雾技术参数优化选配和提高喷雾沉积效果提供了依据。

**关键词:**静电喷雾;风速;喷雾压力;静电电压;沉积性

**中图分类号:** S491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0097-05

众所周知,我国农药生产技术处于国际先进水平,而我国的农药使用技术却严重落后,落后于发达的欧美国家 30~50 年,采用现有植保机具和施药技术,农药的有效利用效率最好

的也不足 30%,施药过程中飘移、流失的农药是一种污染源,会造成环境污染和人畜中毒,已严重影响了农作物病虫害的防治<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2017-08-15

基金项目:江苏省农业科技支撑计划(编号:BE2014415);江苏省镇江市农业科技支撑计划(编号:NY2014030)。

作者简介:陈志刚(1963—),男,江苏镇江人,博士,教授,博士生导师,主要从事现代施药技术及农业环境保护研究。E-mail:chenzg01@126.com。

通信作者:于成程,硕士,主要从事静电喷雾及农业智能化装备研究。E-mail:907889984@qq.com。

在国内外研究人员不断探索下,静电喷雾施药技术是近年来发展起来的一种较为公认的高效施药技术,具有雾滴目标指向型运动好、雾滴沉积均匀性高、飘移损失小等优点,不仅节约了水和农药,还减少了环境污染<sup>[2-4]</sup>。外部环境风速、喷雾压力和静电电压对静电喷雾的效果都有很大影响。周宏平等认为,当静电电压升高时,雾滴粒径随电压增加而减小,雾滴沉降分布状态得到显著改善<sup>[5-7]</sup>;贾卫东等研究得出,静电作用下随着喷雾压力的增大,雾滴的沉积分布均匀性反而

研究[J]. 蛛形学报,2004,13(4):95-102.

[4] 马志卿. 不同类杀虫药剂的致毒症状与作用机理关系研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2002.

[5] Shoop W L, Mroziak H, Fisher M H. Structure and activity of avermectins and milbemycins in animal health [J]. *Veterinary Parasitology*, 1995, 59(2):139-156.

[6] 陈文博,孙磊,杨涛,等. 土耳其斯坦叶螨对阿维菌素和哒螨灵抗药性机理及抗性适合度研究[J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(2):229-235.

[7] 刘怡聪,王玲,张友军,等. 二斑叶螨田间种群对阿维菌素的抗性及相关基因表达与分析[J]. *昆虫学报*, 2016, 59(11):1199-1205.

[8] 宋丽雯,李妙雯,沈慧敏. 截形叶螨对哒螨灵、阿维菌素和阿维·哒螨灵的抗性选育和抗性稳定性研究[J]. *应用昆虫学报*, 2016, 53(1):89-94.

[9] 何林,谭仕祿,曹小芳,等. 朱砂叶螨的抗药性选育及其解毒酶活性研究[J]. *农药学报*, 2003, 5(4):23-29.

[10] Claudianos C, Ranson H, Johnson R M, et al. A deficit of detoxification enzymes: pesticide sensitivity and environmental response in the honeybee [J]. *Insect Molecular Biology*, 2010, 15

(5):615-636.

[11] 沈一凡,沈慧敏,岳秀利,等. 二斑叶螨抗阿维菌素品系选育及其解毒酶系活力变化[J]. *植物保护*, 2014, 40(5):44-48.

[12] 汝阳,陈耀年,尚素琴,等. 阿维菌素亚致死剂量对二斑叶螨解毒酶系的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(1):87-91.

[13] 黎萍,刘连军,李恒锐,等. 1.8%阿维菌素杀螨剂对木薯朱砂叶螨的室内抗性选育[J]. *中国热带农业*, 2016(5):46-48.

[14] van Asperen K. A study of housefly esterases by means of a sensitive colorimetric method [J]. *Journal Insect Physiology*, 1962, 8(2):401-416.

[15] Clark A G, Dick G L, Smith J N. Kinetic studies on a glutathione S-transferase from the larvae of *Costelytra zealandica* [J]. *Biochemical Journal*, 1984, 217(1):51-58.

[16] 张雪燕,何婕. 小菜蛾对阿维菌素 B<sub>1</sub> 抗药性选育及交互抗性[J]. *植物保护学报*, 2011, 28(2):163-168.

[17] 高新菊,张志刚,段辛乐,等. 二斑叶螨抗四螨嗪品系筛选及其解毒酶活力变化[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(7):1433-1438.

[18] 刘金香,韩巨才,刘慧平,等. 山楂叶螨抗药性机制的初步研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2006, 43(6):1364-1368.

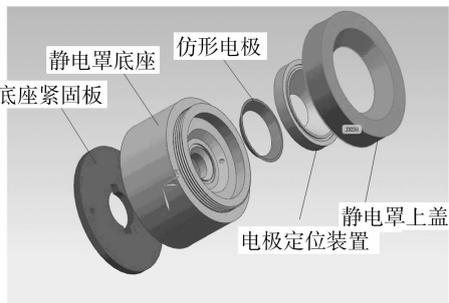
会降低<sup>[8-9]</sup>；何雄奎等通过试验表明，随着恒风风速和静电电压的增加，雾滴的飘移中心距离和飘失率增大<sup>[10-12]</sup>。综合分析前人的研究成果，大多数都只是研究单一或某几个因素对沉积效果的影响，而关于风速、喷雾压力以及荷电电压对雾滴的沉积效果的综合影响没有进行全面的试验研究。

本研究针对上述情况，搭建了1套用于研究静电喷雾沉积效果的试验装置，开展不同风速、喷雾压力和静电电压多因素影响条件下的沉积性能研究，以期对喷雾技术参数优化选配和提高雾滴沉积效果提供依据。

## 1 试验装置

本试验在江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室进行，测试时环境温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为70%。搭建的静电喷雾系统用于荷电雾滴沉积性试验(图1)。

该系统主要由水箱、微型隔膜泵、调压阀、压力表、静电喷头、风机、直流高压测量仪、高压静电发生器组成。高压静电发生器输出端正极为荷电装置供电，直流高压测量仪与高压静电发生器输出端相连，测量其输出的高压，高压静电发生器输出端负极接地。微型直流隔膜泵选择普兰迪 PLD-1205(量程为0~0.6 MPa)；调压阀选择亚德客 AR-2000(调节范



a. 静电罩爆炸安装



b. 实物

图2 静电罩结构与实物

## 2 试验方法

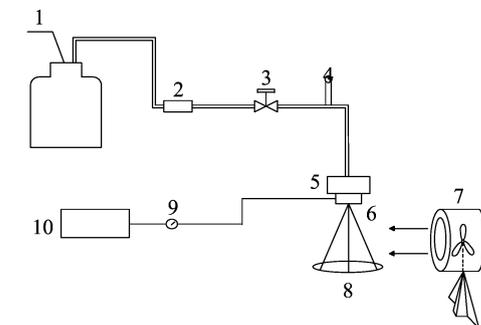
### 2.1 试验设计

雾滴在沉积过程中主要受自身质量、曳力和电场力的影响<sup>[12-13]</sup>，其中电场力的大小主要取决于雾滴的荷电量。静电喷头产生的雾滴荷电效果的重要参数是荷质比<sup>[14-15]</sup>(电荷量与雾滴质量 $m$ 之间的比值)，单位为 $\text{mC}/\text{kg}$ 。而静电喷雾中静电电压的大小又是影响雾滴荷电量的主要因素，所以本研究还进行了不同静电电压下雾滴荷质比和粒径体积中径的测定。

为研究不同风速、喷雾压力和静电电压对雾滴沉积效果的影响，设计了7个静电电压水平(0.1、2、3、4、5、6 kV)、4种风速(0.1、2、3 m/s)和5种喷雾压力(0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 MPa)，分别进行单因素试验，找到各因素与雾滴沉积效果的关系。

### 2.2 试验步骤

2.2.1 荷质比和雾滴粒径测量试验 荷质比测量试验如图3-a所示，该系统结合网状目标法和法拉第筒法。将喷头固定在三角架上与法拉第筒保持0.5 m距离，使喷雾轴线垂直于截流网中心，连接喷雾管路，调节 Keithley 皮安表，并设置 Excel Links 软件；打开并调节高压静电发生器，观察直流高压



1—水箱；2—微型直流隔膜泵；3—调压阀；4—压力表；5—喷头；6—静电罩；7—风机；8—靶标；9—直流高压测量仪；10—高压静电发生器

图1 静电喷雾系统原理

围为0~1 MPa)；压力表选择上海江云仪表厂生产的压力表(量程为0~0.6 MPa)；喷头选择 Lechler TR80-02 型标准圆锥雾喷头(雾锥角为 $80^\circ$ )；风机选择 SF-4 型轴流风机(调节范围为0.1~3 m/s)；直流高压测量仪量程为0~40 kV；高压静电发生器选择 GF-2A 型(调节范围为0~40 kV)；静电罩电极用黄铜制成仿形，绝缘层厚度为2.5 mm，电极宽度和中心到喷口的轴向距离分别是6 mm和8 mm(图2)。

测量仪是否到达指定电压；点击 Excel Links 软件开始按钮，采集雾滴放电电流值，保持20 s后关闭软件和喷雾系统；用精密天平对该时间段收集的液体进行称质量，依据放电电流值与液体质量算得雾滴的荷质比；每组重复试验3次取平均值后改变工况，继续试验。

如图3-b所示，本试验采用 Winner 318 喷雾激光粒度分析仪(济南维纳颗粒仪器股份有限公司，粒径测量范围为1~711  $\mu\text{m}$ )对静电喷头进行雾滴粒径测定，并计算雾滴粒径体积中径 $D_{0.5}$ (volume median diameter, 简称 $\text{VMD}_{0.5}$ )<sup>[8]</sup>。喷头位置为激光粒度分析仪发射与接收端中间位置的正上方50 cm处。测定选取喷雾压力0.3 MPa，静电电压0.1、2、3、4、5、6 kV，每组重复3次。

2.2.2 荷电雾滴沉积性试验 将静电喷雾系统(图1)的喷头固定在试验架上，靶标由水敏卡代替植物叶片，喷头下方0.5 m处悬空固定好一把钢尺作为导体，将水敏卡贴在钢尺正反两面来接收荷电雾滴，按试验设计环节的工况每组重复试验3次，取平均值。喷雾结束以后，取下水敏卡，用扫描仪扫描水敏卡上沉积的雾滴，再利用软件对扫描仪扫出的图像进行分析计算，如图4所示，可以得出雾滴在水敏卡正反面的沉积率。

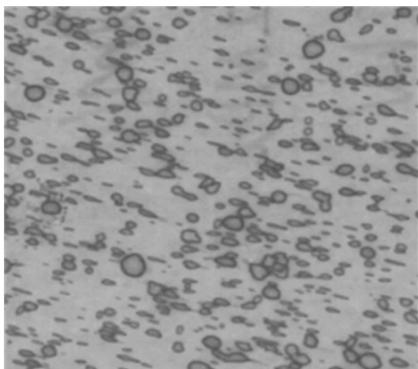


a. 荷质比测量现场

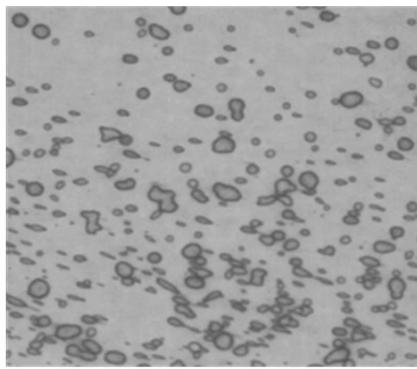


b. 雾滴粒径测量现场

图3 荷质比和雾滴粒径测量系统



a. 雾滴沉积率为 33.38%



b. 雾滴沉积率为 21.58%

图4 纸卡上雾滴覆盖率图像处理结果

收集每组工况下3次试验的水敏纸卡,对其作变异系数(CV)分析,来观察雾滴沉积的均匀性,变异系数计算公式为

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{其中 } S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中: $S$ 表示同组试验采集样本标准差; $X_i$ 表示各采集点沉积率; $\bar{X}$ 表示各组试验采集点沉积率的平均值; $n$ 表示各组试验采集点数量。

### 3 结果与分析

#### 3.1 静电电压对雾滴荷质比及沉积性的影响

试验设定风速为0 m/s、喷雾压力为0.3 MPa,由表1可知,荷质比随着静电电压的增加而逐渐增大,在3~4 kV处增幅最大,之后趋于平缓,到6 kV时达到最大值0.128 mC/kg;雾滴粒径随静电电压增大而变小,在6 kV时达到最小值137.79  $\mu\text{m}$ 。随着电压升高雾滴沉积的变异系数在逐渐减小,从16.58%下降到7.40%。试验表明,电压升高使静电喷雾的均匀性有明显提高。

雾滴在水敏卡正面的沉积率随静电电压的升高而增大,在3 kV之后,水敏卡背面开始有雾滴沉积。说明此时荷电雾滴产生电场对钢尺产生静电感应现象。在充电电压为6 kV时,正反面的沉积率分别达到最大值37.86%和7.15%。总沉积率相对于0 kV时的28.13%提高了16.88个百分点。这是因为静电电压会使雾滴携带电荷,且电荷呈现与电极相反的电性,在荷电雾滴下落过程中雾滴周围会产生电场。植物叶

表1 静电电压对雾滴荷质比和沉积性影响

静电电压 $U$ (kV)	体积中径 $D_{0.5}$ ( $\mu\text{m}$ )	荷质比 (mC/kg)	雾滴沉积率(%)			变异系数 (%)
			正面	背面	总和	
0	173.28	$2.58 \times 10^{-3}$	28.13	0	28.13	16.58
1	164.38	$1.58 \times 10^{-2}$	29.35	0	29.35	13.16
2	158.64	$2.18 \times 10^{-2}$	29.92	0	29.92	11.94
3	151.87	$4.20 \times 10^{-2}$	31.08	0	31.08	9.83
4	146.51	$9.16 \times 10^{-2}$	33.38	4.82	38.20	8.56
5	141.06	0.120	36.65	6.07	42.72	7.89
6	137.79	0.128	37.86	7.15	45.01	7.40

片含水量较多,相当于导体,当雾滴下落到叶片周围时,雾滴周围的电场就会对植物叶片产生静电感应现象,使叶表感应出与雾滴极性相反的电荷,从而在雾滴和植物之间产生相互吸引电场力,提高雾滴在叶片上的沉积能力<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 喷雾压力对雾滴沉积性的影响

在风速为0 m/s的工况下,选取0、2、4、6 kV 4种不同静电电压做对照试验,来获取不同喷雾压力对雾滴沉积率的影响规律。如图5-a所示,雾滴在水敏卡正面的沉积率随喷雾压力的增大而增大,在喷雾压力为0.4 MPa、静电电压为6 kV时到达最大值40.17%。

图5-b反映在4、6 kV静电电压、0 m/s的环境风速下水敏卡背面沉积情况。雾滴的沉积率随喷雾压力增大而增大,在0.3 MPa以后增大幅度趋于平缓。主要是因为随喷雾压力增大,喷出的雾滴流量增大,粒径减小,而背面的雾滴沉积主要与雾滴所带电荷数量有关。当充电电压不变,单位时间内喷头喷出的雾滴数量增多时,由于单个雾滴粒径变小,每个雾

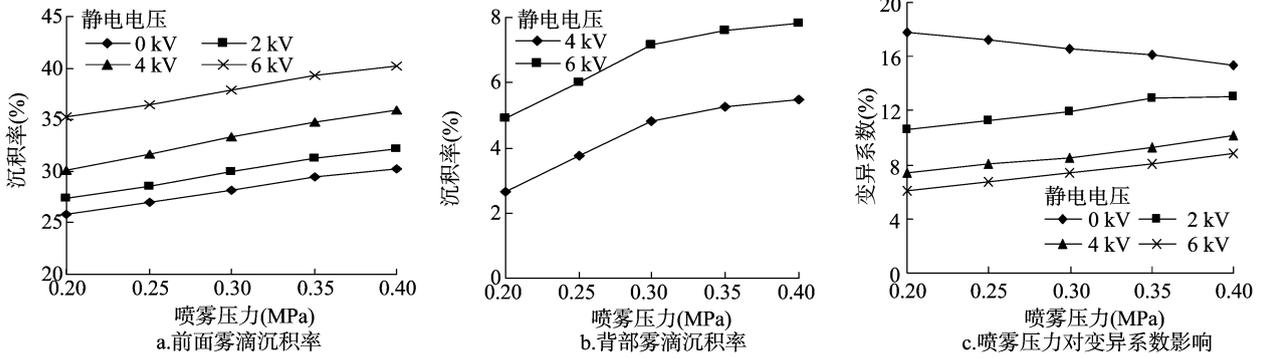


图5 喷雾压力对沉积性影响

滴所带的电量也就减少,因此背面的沉积率并没有明显增大。

图5-c反映在风速为0 m/s的条件下,不同喷雾压力对雾滴沉积均匀性的影响。0 kV时,随喷雾压力变大,变异系数逐渐变小,雾滴沉积得更均匀;而当电压为2、4、6 kV时,变异系数逐渐变大,雾滴沉积的越来越不均匀,原因在于雾滴荷质比与喷雾压力呈负相关关系,喷雾压力增大,荷质比降低,雾滴定向运动至靶标的能力降低。

### 3.3 环境风速对雾滴沉积性的影响

在喷雾压力为0.3 MPa的工况下,选取0、2、4、6 kV静电电压做对照试验,得到不同风速下沉积率的变化规律。由图

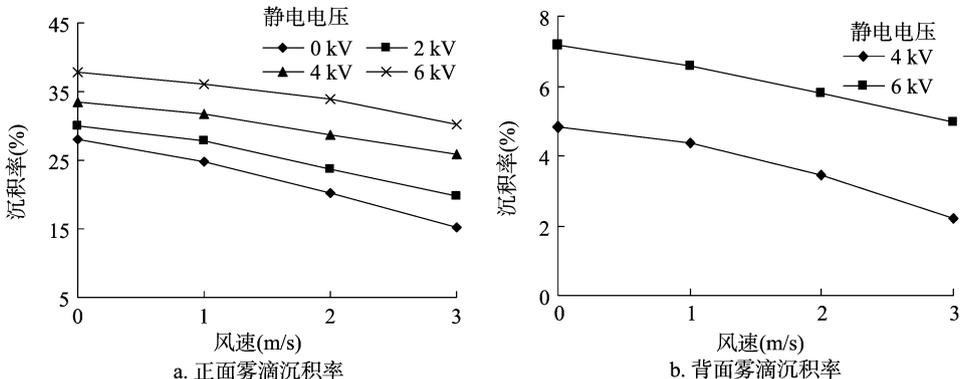


图6 风速对沉积率的影响

由表2可知,在喷雾压力为0.3 MPa、静电电压为6 kV时,雾滴在水敏卡上沉积率的变异系数随着风速的增加而变大,从7.40%增长到17.98%,表明风速对雾滴沉积的均匀性有显著影响。

表2 不同风速下雾滴沉积变异系数

风速 $v$ (m/s)	每组试验沉积率(%)			平均值 (%)	变异系数 (%)
	1	2	3		
0	39.59	40.08	33.91	37.86	7.40
1	39.57	37.73	30.85	36.05	10.41
2	27.18	36.63	37.65	33.82	13.94
3	22.65	35.21	32.71	30.19	17.98

### 3.4 正交试验

完成风速、喷雾压力和静电电压对雾滴沉积的单因素影响试验后,安排多因素试验,优化参数选配,寻求最优水平组合。常见的试验方法是正交试验,它是在试验因素所有水平中挑选具有代表性的水平进行试验,通过分析试验结果,找到最优的水平组合。本研究采用3因素3水平正交试验对风

速、喷雾压力和静电电压进行雾滴沉积率试验分析,选取 $L_9(3^4)$ 正交试验表,试验因素如表3所示。

表3 正交试验因素水平

试验水平	因素		
	$U$ (kV)	$P$ (MPa)	$v$ (m/s)
1	2	0.2	0
2	4	0.3	1
3	6	0.4	2

根据正交试验表安排了9次试验,试验结果见表4。对试验结果进行极差分析,可以找到各因素对沉积率影响的主次顺序和各因素的最佳组合。如表5所示, $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 分别表示各水平的平均值;极差 $R$ 是同一列中最大值与最小值的差值,它衡量各个因素的水平改变对试验结果影响的大小。各因素对雾滴沉积率影响由大到小的顺序依次是静电电压、喷雾压力、风速,同时可以得出喷雾的最好方案是静电电压为6 kV、喷雾压力为0.4 MPa、风速为0 m/s。

表4 正交试验结果

试验号	因素			沉积率 (%)
	<i>U</i>	<i>P</i>	<i>v</i>	
1	1	1	1	27.36
2	1	2	2	27.87
3	1	3	3	28.17
4	2	1	2	30.71
5	2	2	3	32.82
6	2	3	1	41.40
7	3	1	3	34.88
8	3	2	1	45.01
9	3	3	2	45.96

表5 极差分析计算

类别	雾滴沉积率 (%)		
	<i>U</i>	<i>P</i>	<i>v</i>
$k_1$	27.80	30.98	37.92
$k_2$	34.98	35.23	34.84
$k_3$	41.95	38.51	31.96
极差 <i>R</i>	14.15	7.53	5.96
最优组合	$U_3$	$P_3$	$V_1$
因数排序	$U > P > v$		

通过方差分析检验各因素下不同水平对试验结果影响是否显著,如表6所示。结果表明,静电电压 *U* 因素的 *P* 值小于0.01,喷雾压力 *P* 值和风速 *v* 的 *P* 值小于0.05,说明3个因素对雾滴沉积率的影响均显著,与极差分析结果一致,说明误差没有影响试验正确性。通过对得出的最佳水平组合进行多次试验,得出该因素水平组合下雾滴沉积率平均值为48.01%。

表6 方差分析

试验因数	偏差平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
<i>U</i>	300.359	2	150.180	300.059	<0.01
<i>P</i>	85.454	2	42.727	85.369	<0.05
<i>v</i>	53.424	2	26.712	53.371	<0.05
误差	1.001	2	0.501		

注: $F_{0.1}(2,2) = 9.0, F_{0.05}(2,2) = 19.0, F_{0.01}(2,2) = 99.0$ 。

## 4 结论

(1) 荷质比随静电电压的升高而增大,4 kV 以后逐渐趋于平缓,在6 kV 时荷质比达到最大值0.128 mC/kg,雾滴粒径达到最小值137.79  $\mu\text{m}$ 。雾滴的沉积率随电压增大而增大,变异系数随电压增大而减小。(2) 雾滴沉积率随喷雾压力的增大而增大,静电电压达到4 kV 时,靶标背面开始有雾滴沉积;喷雾压力变大,靶标正面的沉积率越高,靶标背面的沉积率先增大后趋于稳定;当静电电压为0 kV 时,变异系数随喷雾压力增大而减小,有静电作用下变异系数随喷雾压力增大而增大,雾滴沉积均匀性变差。(3) 环境风速越大,雾滴

的沉积率越小,变异系数越大,雾滴沉积的均匀性越差。喷雾压力0.3 MPa 不变,当风速为3 m/s、静电电压为0 kV 时,雾滴沉积率达到最小值15.26%;当静电电压为6 kV、喷雾压力为0.3 MPa 不变,风速达到3 m/s 时雾滴沉积的变异系数达到最大值17.98%。(4) 正交试验得出,风速、喷雾压力和静电电压均对雾滴沉积率有显著影响,影响的主次顺序为静电电压、喷雾压力、风速。本系统喷雾的最佳水平组合是静电电压为6 kV、喷雾压力为0.4 MPa、风速为0 m/s,此时沉积率为48.01%。

## 参考文献:

- [1] 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,2004,20(1):13-15.
- [2] Law S E. Agricultural electrostatic spray application; a review of significant research and development during the 20th century[J]. Journal of Electrostatics,2001,51(1):25-42.
- [3] 黄 贵,王顺喜,王继承. 静电喷雾技术研究与进展[J]. 中国植保导刊,2008,28(1):19-21.
- [4] 宋 琦,李 林,吴 妹,等. 感应式高压静电喷头雾滴荷电效果影响因素分析[J]. 农机化研究,2017,39(10):156-162.
- [5] 周宏平,茹 煜,舒朝然,等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验[J]. 农业工程学报,2012,28(12):7-12.
- [6] 王军锋,张娟娟,王贞涛,等. 风幕式气力辅助静电喷雾沉积特性[J]. 农业机械学报,2012(2):61-65.
- [7] Maski D, Durairaj D. Effects of electrode voltage, liquid flow rate, and liquid properties on spray chargeability of an air-assisted electrostatic-induction spray-charging system[J]. Journal of Electrostatics,2010,68(2):152-158.
- [8] 贾卫东,胡化超,陈 龙,等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(7):53-59.
- [9] 廉 琦,张 伟. 静电喷头电极对雾滴沉积效果的影响[J]. 农机化研究,2016,38(6):188-193.
- [10] 何雄奎,曾爱军,何 娟. 果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):75-77.
- [11] 吕晓兰,傅锡敏,吴 萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):70-75.
- [12] 杨 洲,牛萌萌,李 君,等. 不同侧风和静电电压对静电喷雾飘移的影响[J]. 农业工程学报,2015(24):39-45.
- [13] 龚 艳,于林惠,张 晓,等. 1种便于水稻病虫害统防统治的自走式喷杆喷雾机应用研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(1):383-385.
- [14] 贾卫东,邱白晶,施爱平,等. 农用高压静电喷雾场的试验[J]. 农业机械学报,2007,38(12):66-69.
- [15] 贾卫东,李萍萍,邱白晶,等. 农用静电喷雾雾滴粒径与速度分布的试验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):17-21.
- [16] 杨学昌,刘寒松. 高效带电农药喷雾技术的研究[J]. 高压电技术,1995,21(3):19-22.