# 基于高压静电场的棉尖极化-静电喷雾系统设计及参数优化

吴芯茗<sup>1,2</sup>, 孙 胜<sup>1,2</sup>, 胡 斌<sup>1,2,3</sup>, 罗 昕<sup>1,2,3\*</sup>, 刘晗郡<sup>1</sup>, 韩长杰<sup>4</sup>, 马 振<sup>5</sup>

(1. 石河子大学机械电气工程学院,石河子 832000; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832000;

3. 现代农业机械兵团重点实验室,石河子 832000;4. 新疆农业大学机电工程学院,乌鲁木齐 830000;

5. 江苏大学农业工程学院,镇江 212000)

摘 要:针对棉花生产中化学打顶农药利用率低、单一静电喷雾效力不足的问题,该研究从提高棉尖对雾滴的静电吸附力 出发,提出了基于高压静电场的棉尖极化-静电喷雾方法,通过高压静电场预先极化棉尖,使叶片表面积聚异性电荷,协同 荷电雾滴增强静电吸附。通过 COMSOL 软件仿真分析验证了电荷迁移可行性,高速摄像捕捉试验表明极化棉叶使雾滴 运动轨迹更趋于直线,沉积特性显著提升。优化参数组合(棉尖极化电压 15.4 kV,雾滴充电电压 20.3 kV)下,雾滴附 着率较单一静电喷雾提升 51.40%,粒径减小了 2.36%。此研究不仅丰富了高效环保静电喷雾理论,也为棉花等经济作物 绿色生产转型提供借鉴。

关键词:高压静电场;棉尖极化;静电喷雾;电荷衰减;雾滴附着特性 doi:10.11975/j.issn.1002-6819.202410053 中图分类号:S224;S19 文献标志码:A 文章编号:1002-6819(2025)-11-0052-10

吴芯茗,孙胜,胡斌,等.基于高压静电场的棉尖极化-静电喷雾系统设计及参数优化[J].农业工程学报,2025,41(11): 52-61. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410053 http://www.tcsae.org

WU Xinming, SUN Sheng, HU Bin, et al. Design and parameter optimization of cotton tip polarization-electrostatic spraying system based on high voltage electrostatic field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(11): 52-61. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202410053 http://www.tcsae.org

# 0 引 言

棉花在全球农业经济中占据重要地位,作为纺织业 的主要原料,其产量与品质直接影响着市场供需与国际 贸易<sup>[1]</sup>。为提高棉花产量和品质,化学施药打顶被广泛 应用于棉花生产中<sup>[2-3]</sup>。然而,这一做法在带来显著经济 效益的同时,也引发了土壤、水源及整个生态系统的化 学污染问题,对生态环境构成了不容忽视的潜在威胁<sup>[4-5]</sup>。

在此背景下,静电喷雾技术以其独特的优势脱颖而 出,其利用高压静电场感应使雾滴荷电,在静电力、气 流曳力及重力等作用下,可增强药液雾滴对作物茎叶的 附着性和覆盖均匀度<sup>[6-8]</sup>。李建平等<sup>[9]</sup>在风送式喷雾系统 领域的研究,强调了静电在促进雾滴沉降、增强沉积密 度方面的关键作用,为精准高效的喷雾作业提供了坚实 的理论基础; SALCEDO 等<sup>[10]</sup>的研究则聚焦于不同静电 喷雾机在苹果树农药喷洒中的表现,指出喷雾器类型对 覆盖率和沉积量的影响更为显著,说明定制果园喷雾器 设计的重要性,以更有效地实现农药减量目标; GUO 等<sup>[11]</sup> 采用 Box-Behnken 法优化番茄叶片的静电喷雾条件,发 现喷雾距离是关键因素,并确认了最佳操作参数(电压 为10 kV、距离为2.75 m、模式为下降喷雾); 汪明等<sup>[12]</sup>则在果园植保领域,通过仿真与试验结合,确定了气助 式静电喷雾技术的最优电极环参数:外径30 mm、内径 4 mm、厚度1 mm,进一步研究显示,3 kV 荷电电压下, 荷质比最优达3.41 mC/kg。进一步验证了静电技术在提 升叶片背面沉积中的有效性。但这些研究仅对雾滴荷电, 喷雾施药过程中棉叶表面雾滴附着所受静电力的放大效 应有限<sup>[13-14]</sup>,并不能解决目前生产中普遍存在叶面附着 的雾滴粒径大,附着率差等技术瓶颈问题。数据显示, 国内农药的有效利用率较低,意味着超过50%的农药资 源被浪费,同时加剧了环境负担<sup>[15]</sup>。

根据前期试验,已经验证高压静电场在电压为 2~28 kV的范围内、电极到棉叶距离在 4~16 cm 范围 内、电场作用时间在 10~70 s 范围内的作用下对棉花植 株的生长无副作用<sup>[16]</sup>。鉴于此,本文依据高压静电异性 电荷吸附理论,提出了棉尖极化-静电喷雾法。拟通过测 量棉叶表面电位验证荷电可行性,分析电参数对雾滴附 着性能的影响,观测雾滴沉积行为,利用正交试验优化 系统参数,旨在为静电喷雾技术的发展探索路径,并为 液态雾滴静电吸附碰撞破碎特性以及棉花等经济作物的 绿色生产提供参考。

# 1 棉尖极化-静电喷雾系统结构及原理

# 1.1 系统结构组成

棉尖极化-静电喷雾系统主要由静电喷雾装置和棉尖 极化装置组成,如图1所示。其中棉尖极化装置包括高

收稿日期: 2024-10-09 修订日期: 2025-05-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2002401);兵团研究生科研 创新项目(BTYJXM-2024-S07)。

作者简介:吴芯茗,研究方向为机械工程。Email: 760969529@qq.com ※通信作者:罗昕,教授,硕士生导师,研究方向为计算机虚拟仿真设计。 Email: lx\_mac@shzu.edu.cn

压静电发生器 b 和电压输出电极, 主要用来极化棉尖, 即增强棉尖叶面的表面电场; 静电喷雾装置由喷雾部分 和盆栽移动部分组成, 喷雾部分由高压静电发生器 a、 静电喷头、蓄水箱和喷头支架组成, 用来喷出带电的雾 滴; 盆栽移动部分由电机、滚线盘、移动载物小车组成, 用来模拟实际工作中棉株与喷雾器之间的相对运动并统 一有效喷雾时间。



1.高压静电发生器 a 2.水箱 3.静电喷头 4.水敏纸 5.高压静电发生器 b 6.移动 载物小车 7.滚线盘

High-voltage electrostatic generator a 2. Water tank 3. Electrostatic nozzle
 Water-sensitive paper 5. High-voltage electrostatic generator b 6. Mobile cargo cart 7. Rolling coil

图1 棉尖极化-静电喷雾试验系统

Fig.1 Cotton tip polarization - electrostatic spray test system

# 1.2 工作原理

本研究基于异性电荷静电吸附原理优化化学打顶施 药技术。如图2所示,在高压静电场作用下,棉尖上下表 面分别诱导产生异性电荷并快速积聚,这一极化过程(棉 尖区域的场强增强效应)显著提升了棉尖电场强度分布。



1.雾滴 2.靶标棉叶 3.上极板 4.负电荷 5.正电荷

1. Droplets 2. Target cotton leaf 3. Pole plate 4. Negative charge 5. Positive charge

图 2 靶标棉叶-雾滴正负电荷相吸原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the principle of positive and negative charge attraction between the target cotton leaf and the droplet

同时,高压静电场使施药雾滴携带与叶面相反的极 性电荷。基于静电平衡原理,叶片与雾滴之间产生的强 静电引力协同重力作用,实现雾滴向棉株顶端的靶向沉 积,提升施药精准性与雾滴附着特性。

#### 1.3 电荷迁移规律

为验证棉尖荷电的可行性,本研究利用仿真软件 COMSOL Multiphysics 6.1 对棉尖极化过程中的电荷迁移 规律进行仿真。在仿真试验中,添加流体流动颗粒跟踪 和静电物理场接口,选择瞬态研究;将叶片截面视为长 度 50 mm 和宽度 10 mm 的规则长方体,其材料设置为 "PMMA [solid]",相对介电常数设置为 4.75;在叶片 极化过程中,极化电压由高压静电发生器产生,其电极 线芯为直径 1 mm 的柱型。为便于仿真,将截面电极视 为一点,以点电势代替,点电势位置设置如图 3 所示 (距离叶片表面 0.02 mm);在叶片极化过程中,其内 部粒子被随机极化携带正负电荷,在外加电场的作用下 向叶片上下表面迁移积聚。



Fig.3 Charge transfer diagram

为便于仿真和观察粒子迁移规律,在叶片截面下底 边均布 24 个点作为粒子释放点,粒子值数为 20,第一 个粒子释放时间(t)为 0.5 s,最后一个粒子释放时间 (t)为 10 s。为便于观察外加电场作用下叶片内极化粒 子的迁移积聚过程,仿真过程中叶片内极化粒子需进入 外加电场环境中。因此,为极化粒子设置初速度为 5×10<sup>-4</sup> m/s,粒径设置为 0.2 mm,使其进入外加电场中。 设置粒子在电压产生电场作用下受到粒子与粒子间的相 互作用力;叶片内部的正负电粒子分别积聚在两端面。 由于正负电粒子分布的对称性,为便于仿真,将电粒子 迁移分布过程简化,仅考虑负电粒子的分布状态;试验 环境设置为 air,相对介电常数为 1。如图 3 所示,在极 化电压产生电场的作用下,叶片截面内部的正电粒子从 下向上迁移并积聚,因此通过感应的方式使叶面电荷积 聚以此来增强电场,以进一步提高叶面对雾滴的静电吸 附力的方法,从原理上来说可行。

# 2 棉尖极化-静电喷雾系统关键部件设计

#### 2.1 极化装置关键部件设计

棉尖极化所用电极和棉叶本身材料特性是两个影响 棉尖叶片荷电的关键因素,两者性能的好坏直接影响到 棉叶荷电性能的优劣。

#### 2.1.1 电极结构设计

基于棉花的生长特性及当前电极应用的实际情况,本研究对三种典型形状的电极(板状电极、针状电极和 柱状电极)进行电场分布的仿真试验,其中下极为大地, 视作板状处理。基于 SOLIDWORKS 2021 构建三维模型, 定义板状电极尺寸 50 mm×50 mm×2 mm、针状电极总长 10 mm(含 5 mm 锥形尖端)、柱状电极长 50 mm 且截 面半径 0.5 mm、下极板尺寸 100 mm×100 mm×2 mm,并 设置上下极板间距 50 mm;将模型导入 COMSOL Multiphysics 6.1 后,设定上极材料为"UNS C10500"、下极材料为"1045 [Solid]",施加上极 15 kV 电压且下 极板接地处理。电极布局如图 4 所示。

三种电极结构的仿真试验结果如图 5 所示。从图 5a 中可以看出,板状电极作用下的电势线分布范围相对广 泛,表明其电场作用范围较大。然而,对于仅希望棉花 顶尖带电的需求而言,这种广泛的作用范围并不理想。 此外,与柱状电极相比(图 5c),板状电极在靠近其表 面的区域电势分布较为稀疏,而柱状电极周围电势线更 为密集,显示出更高的电场强度。因此,在特定距离下, 柱状电极的极化效果优于板状电极。图 5b 则呈现了针状 电极的仿真结果。尽管该电极周围的电势分布较为密集, 但其作用范围过于局限,无法满足实际应用的需求。综 合以上分析,本次研究采用柱状电极对棉尖进行极化处 理,线芯为紫铜、直径 1 mm、电极护套材质为 PVC、 内径为 1 mm、外径为 11 mm<sup>[17]</sup>。









在实际应用场景中,棉尖极化系统是将以上确定的 电极结构安置于棉尖叶片的正上方。随后,系统启动电 极进行匀速移动,以横扫的方式覆盖整个棉尖叶片的表 面区域。在电极匀速横扫的过程中,电场能够有效地作 用于棉尖叶片,使其表面荷电。

# 2.1.2 极化叶片材料选择

直接对棉叶上雾滴的附着率和雾滴粒径进行精确测量不仅技术难度高,且实际操作中极易因误触或其他细 微扰动导致雾滴滑落,从而严重影响测量结果的准确性和可靠性。为提升雾滴附着观测效率,本研究采用介电特性测量系统(E4991B,Keysight Technologies,美国加州),同步测定棉尖叶片与水敏纸的相对介电常数。其

中水敏纸作为雾滴附着率-粒径可视化替代材料,其介电 参数为材料替代性评估提供关键依据。测试结果显示: 棉尖叶片相对介电常数为4.75,水敏纸为4.28。鉴于水 敏纸在介电常数上与棉尖叶片相近,且其具备更好的可 操作性和可重复性,本次研究使用水敏纸作为棉尖叶片 的替代物,在喷雾试验中用于观测雾滴的附着效果。

#### 2.2 静电喷雾装置关键部件设计

# 2.2.1 喷雾作业距离设计

本次研究设计并实施单因素预试验,喷雾作业距离 设置为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m,固定输入电压为 15 kV、水压设置为 0.7 MPa<sup>[18-20]</sup>,并确保喷雾时间统一 为盆栽移动装置完全穿越喷雾区域所需的时间,从而探 究喷头至靶标叶片间距离这一单一变量对喷雾效果的影 响。在本预试验中,选用雾滴附着率和雾滴体积中值直 径作为关键评估指标。雾滴附着率和雾滴粒径同等重要, 为追求"高附着率且低体积中值直径"的最优组合<sup>[21-22]</sup>, 构建综合评价指标体系 *I*(0~1)。雾滴附着率和雾滴粒 径标准化后分别为

$$C_s = \frac{C}{100} \tag{1}$$

$$D_{S} = 1 - \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}}$$
(2)

式中 C 为雾滴附着率(%); C<sub>s</sub>为标准化后的附着率

(范围:  $0 \sim 1$ ); *D*为雾滴粒径 ( $\mu$ m); *D*<sub>min</sub>和 *D*<sub>max</sub>分 别为试验数据中雾滴粒径的最小值和最大值, *D*<sub>s</sub>为标准 化后的粒径 (范围:  $0 \sim 1$ )。采用加权求和的方法,两 者权重各取 0.5,则综合评价指标 *I* 为

$$I = 0.5C_s + 0.5D_s \tag{3}$$

静电喷雾在不同距离下的雾滴附着率和体积中值直 径如图 6 所示。经计算,当喷雾距离为 0.8 m 时,综合 评价指标达到最高值 0.59,因此最终确定最佳喷雾距离 为 0.8 m。



2.2.2 喷雾有效时间设计

静电喷雾装置中,盆栽移动部分的关键在于控制棉 尖与喷头的相对移动速度,以控制喷雾对棉尖的有效作 用时间。基于主流大型静电喷雾机 0.32 m/s 的作业速度<sup>[23]</sup>, 本研究选用 5GU-5-K 型电机(普菲德,0~100 r/min 可 调),设定转速为 20 r/min,并配套设计直径 285 mm 的 定制滚线盘(图1部件7)。滚线盘与电机精密联动, 其绕线轨道与移动小车绑线点精确对位,确保电机驱动 时滚线盘边缘产生 0.32 m/s 的精准线速度。装置采用 3 m 牵引线(初始绷直状态),喷头居中布置,启动后移动 小车可带动载水敏纸以恒定速度通过喷雾区,确保喷雾 作用时间一致,实现与田间作业一致的动态喷雾模拟。

# 2.3 高压静电参数设计

依据库仑定律可知,两带电体之间的静电作用力与 带电体自身荷电量呈正相关。喷头喷出雾滴后,其荷电 量会不断衰减。为提升静电雾滴在棉尖上的附着性能,本 研究借鉴了静电技术的相关原理,对棉尖进行了预极化 处理。这一处理的目的是通过增加棉尖表面电场来优化 静电吸附机制,进而增强棉叶与雾滴之间的静电吸附力。 虽然直接针对棉尖荷电的研究较少,但本研究参考了静 电吸附式软体机械手的设计原理<sup>[24]</sup>、电极参数对射流喷 雾荷电量影响的试验结果<sup>[25]</sup>以及电介质材料的静电吸附 效果<sup>[26]</sup>可知,荷电雾滴会倾向于向带有异性电荷的表面 飘移,并能实现紧密的附着。根据 1.3 节电荷迁移规律 仿真分析,棉尖可以荷电。定量推导棉尖与雾滴自身的 荷电量,进而构建棉叶与雾滴之间的静电吸附力,为棉 尖极化-静电喷雾系统的结构工作参数优化提供理论基础。

将电极-电极护套-空气-水膜视为平行板电容系统, 假定电极保护层的厚度为*m*(mm);空气层的厚度为*n*, (mm);则极芯与水膜之间的间距为 *d=m+n* (mm)。 假定该电容系统的电容值为 *C* (F),依据高斯定理可得:

$$C = \frac{\varepsilon_e \cdot A_0}{d} \tag{4}$$

式中  $\varepsilon_e$  为等效相对介电常数;  $A_0$  为极板正对面积, mm<sup>2</sup>。 等效相对介电常数  $\varepsilon_e$  由体积加权平均计算:

$$\varepsilon_e = \frac{V_m \varepsilon_m + V_0 \varepsilon_0}{V_t} \tag{5}$$

式中  $V_m$  为电极护套的等效体积, mm<sup>3</sup>;  $V_0$  为空气层的体积, mm<sup>3</sup>;  $\varepsilon_m$  为电极护套相对介电常数;  $\varepsilon_0$  为空气层的相对介电常数;  $V_{=}V_m+V_0$ 。则:

$$C = \frac{(V_m \varepsilon_m + V_0 \varepsilon_0) \cdot A_0}{(V_m + V_0)(m+n)}$$
(6)

水膜极板的初始荷电量为 q<sub>0</sub>=CU<sub>d</sub>, C; 则有

$$q_0 = \frac{(V_m \varepsilon_m + V_0 \varepsilon_0) \cdot A_0}{(V_m + V_0)(m+n)} \cdot U_d \tag{7}$$

式中 $U_d$ 为静电喷雾雾滴输入电压, kV。

雾滴经过喷嘴射出时被感应充电获得初始荷电量, 到达棉叶表面之前荷电量逐渐衰减,雾滴随时间变化的 电荷量为 q(t):

$$q(t) = q_0 \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{8}$$

式中  $q_0$  为初始荷电量, C; q(t) 为雾滴任一时刻的荷电量, C; t 为雾滴电荷的衰减时间, s;  $\tau$  为时间常数。

设 *L* 为喷口与棉叶的水平间距, mm; 雾滴落到叶片 表面时其水平速度为 0, 因此在雾滴落到叶片表面期间 雾滴水平方向的运动可以视为匀减速运动 (*V*),则有

$$L = V \cdot t \tag{9}$$

式中 t 为雾滴离开喷口落到叶片表面的时间(即雾滴电荷的衰减时间), s。

将式(6)、(8)代入式(7),则有

$$q(t) = \frac{(V_m \varepsilon_m + V_0 \varepsilon_0) \cdot A_0}{(V_m + V_0)(m+n)} \cdot U_d \cdot e^{-\frac{L}{V\tau}}$$
(10)

棉株叶片为非导电体,将其视为电介质材料。Q(t) 为任一时刻叶片内的极化电荷量。则有:

$$Q(t) = Q_0 \cdot \mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{\tau_d}} \tag{11}$$

式中 $Q_0$ 为棉叶初始荷电量,C; $\tau_d$ 为棉株叶片自身的介电弛豫时间,s; $t_y$ 为除去电场的时间,s。

将棉叶视为一个电容系统, $C_y$ (F)为该系统的电容。则有

$$C_{y} = \frac{\varepsilon_{y} \cdot S_{y}}{d_{y}} \tag{12}$$

式中 $\varepsilon_y$ 为棉叶的相对介电常数;  $S_y$ 为棉叶的表面积, mm<sup>2</sup>;  $d_y$ 为棉叶厚度, mm。

若棉叶表面极化电压为 *U<sub>y</sub>*, kV,则棉叶表面的初始 荷电量 *Q*<sub>0</sub> 为

$$Q_0 = C_y \cdot U_y \tag{13}$$

外加电场去除后,任意时刻棉叶表面的极化荷电量为 $Q_v(t)$ (C)。

$$Q(t) = \frac{\varepsilon_{yS_yU_y}}{d_y} \cdot e^{-\frac{t_y}{\tau_d}}$$
(14)

*F*<sub>0</sub>(N)为雾滴与棉株叶片接触时刻两者之间的静电吸附力。根据库仑定律:

$$F_{0} = K_{0} \frac{\frac{(V_{m}\varepsilon_{m} + V_{0}\varepsilon_{0}) \cdot A_{0}}{(V_{m} + V_{0})(m + n)} \cdot U_{d} \cdot e^{-\frac{L}{V_{\tau}}} \cdot \frac{\varepsilon_{y}S_{y}U_{y}}{d_{y}} \cdot e^{-\frac{s_{y}}{\tau_{d}}}}{(Vt)^{2}}$$
(15)

式中 $K_0$ 为静电力常量,其约为9.0×10<sup>9</sup>N·m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>。

根据式(15),雾滴与棉叶极化时刻的静电吸附力 主要受电极护套体积、极间空气介电常数、电极有效作 用面积、雾滴充电电压、电荷弛豫时间、喷施靶距、雾 滴运动速度、介质介电常数及棉叶厚度等参数影响。在 实际工况中,电极护套体积、极间介质特性、电极几何 参数、靶距及雾滴动力学参数等均为系统固有属性,故 棉尖极化-静电喷雾系统的参数优化应聚焦于棉尖极化电 压与雾滴充电电压这两个可控电气参数,通过调控静电 场强度与电荷匹配来实现吸附力的精准控制。

# 3 试验方法与装置

# 3.1 棉叶电荷衰减量试验

棉叶的静电耗散能力可通过电荷衰减速率表征<sup>[27-28]</sup>。 本试验通过感应法使棉叶带电,测定其电荷衰减曲线, 以此评估叶片荷电性能,为棉尖极化电压及雾滴充电电 压设计提供参数依据。

3.1.1 试验设备与材料

高压静电发生器 (DW-N603-12ACA1, 东文高压电源(天津)股份有限公司)、电荷测量仪 (EFM022, Kleinwachter,德国)、支架、高速摄像机 (FASTCAM NOVA S12, 上海均富电子科技有限公司)、棉株叶片。3.1.2 试验方法

试验场地为石河子大学机械电气工程学院重点实验 室。如图 7 所示,选择叶片附近没有遮蔽的试验棉叶, 进行清洗和干燥处理。



1.高压静电发生器 2.靶标棉叶 3.支架 4.电荷测量仪 5.高速摄像机 1. High-voltage electrostatic generator 2. Target cotton leaf 3. Bracket 4. Charge measuring instrument 5. High-speed camera

# 图 7 棉叶电荷衰减测量试验示意图 Fig.7 Schematic diagram of cotton leaf charge decay measurement test

连接好高压静电发生器、电荷测量仪、高速摄像机 和其他辅助设备。使用高压静电发生器给叶片施加一定 的初始电荷量(根据前期预试验,本次给叶片施加的电 压为15 kV,感应电极到棉叶的距离为10 cm,极化时间 为 40 s<sup>[16]</sup>),并记录施加电荷后的初始感应电位值。在 施加初始电荷后,立即开始使用电荷测量仪测量叶片表 面的感应电位值,并使用高速摄像机进行记录,按照预 定的时间间隔(2 s/次)记录测量电位值,直至其衰减到 稳定状态<sup>[29]</sup>。随后,利用数据分析软件 Origin 2022,将 这些离散的数据点转化为直观的散点图,并进一步通过 非线性回归分析方法拟合出电场变化的趋势曲线。

# 3.2 水敏纸统计雾滴附着特性试验

#### 3.2.1 试验设备与材料

该试验由棉尖极化-静电喷雾系统进行,如图1所示, 该系统主要由静电喷雾装置和棉尖极化装置组成。其中 棉尖极化装置包括高压静电发生器b和电压输出电极 (DW-N603-12ACA1,东文高压电源(天津)股份有限 公司);静电喷雾装置由喷雾部分和盆栽移动部分组成, 喷雾部分由高压静电发生器a(JC-120k,深圳川奇机械 企业店)、静电喷头(新疆农垦科学院自制静电喷头, 感应式充电)、蓄水箱和喷头支架组成;盆栽移动部分 由电机、滚线盘、移动载物小车组成。

# 3.2.2 试验设计与方法

根据 2.3 节中所得结论,选定棉尖极化电压和雾滴 充电电压作为关键试验因素。另外,在深入探讨喷雾技 术效率时,高附着率确保了农药的有效利用率,减少了 非目标区域的流失与环境污染;而较小的雾滴粒径则促 进了喷雾覆盖的均匀性,增强了雾滴对复杂表面的穿透 能力,从而提升防治效果<sup>[21-22]</sup>。因此,本研究选取雾滴 的附着率与体积中值直径作为核心评价指标。增设单一 静电喷雾试验组作为基准对照。喷头到靶标叶片的距离 为 0.8 m。喷口附近压力保持恒定(0.7 MPa)。

负向高压静电发生器 b 的输出电极诱导棉株叶片表 面感应出正电荷;另一台负向高压静电发生器 a 连接静 电喷头,确保喷出的雾滴携带负电荷。试验前,确保喷 雾机满载清水,将水敏纸用回形针固定在盆栽模型上, 启动喷雾机,同时操作盆栽移动装置,模拟实际喷雾过 程中盆栽与喷头的相对运动,其相对移动速度为 0.32 m/s。当盆栽模型完全通过喷雾有效区域后停止喷雾, 确保各组试验喷雾量一致。移除水敏纸,晾干后使用分 析软件进行数据收集与统计。综合评价指标计算方法与 2.2.1 节中所述相同。

本次试验设置3组工况:对照组采用不同电压 (5~30 kV,以5 kV 为间隔)进行单一静电喷雾;试验 组1在喷雾前对棉尖进行40 s极化,极化距离10 cm, 叶片极化电压同样设为5~30 kV(以5 kV 为间隔), 雾滴输入电压固定为20 kV;试验组2极化条件与试验 组1相同,但叶片极化电压固定为15 kV,雾滴输入电 压则设为5~30 kV(以5 kV 为间隔)。

# 3.3 高速摄像捕捉雾滴附着特性试验

#### 3.3.1 试验设备与材料

如图 8 所示,包括棉尖极化-静电喷雾系统和高速摄像捕捉系统。棉尖极化-静电喷雾系统组成同 1.1 节中所述。高速摄像捕捉系统包括:高速摄像机(FASTCAM NOVA S12,上海均富电子科技有限公司)、放大镜头

(M24042501,上海鸣策电子科技有限公司)、计算机 与图像处理软件、光源、棉花叶片标定平台。



1.高压静电发生器 a 2.水箱 3.静电喷头 4.光源 5.棉花叶片标定平台 6.靶标叶 片 7.高速摄像机 8.高压静电发生器 b 9.计算机

1. High-voltage electrostatic generator a 2. Water tank 3. Electrostatic nozzle 4. Light 5. Cotton leaf calibration platform 6. Target cotton leaf 7. High-speed cameras 8. High-voltage electrostatic generator b 9. Computer

图 8 雾滴沉积特性试验现场图 Fig.8 Field view of droplet deposition characteristics test

#### 3.3.2 试验方法

在深入研究叶片表面雾滴沉积行为的试验中,采 用高速摄像技术以捕捉靠近棉尖叶片的雾滴在不同状态 下的精细变化。具体而言,本次试验选取了两个关键视 角——叶片的侧面与正面(侧视图与主视图),进行雾 滴的图像记录与分析。

首先确保高压静电发生器、高速摄像机、棉尖极化-静电喷雾系统、光源等设备处于正常工作状态,并进行必要的校准。将靶标叶片固定在标定平台上,调整其与喷嘴的相对位置,确保拍摄区域合适。调整光源,确保拍摄区域光线均匀。棉尖极化-静电喷雾系统接通高压电源,对靶标叶片进行极化,开启喷嘴,产生带电雾滴。通过高速摄像仪观察雾滴的沉积过程,记录雾滴运动和沉积情况的关键帧图像(高速摄像拍摄速度为6000 fps,帧数为21821 帧,记录时间为3.64 s)。利用 CAXA CAD 软件标记侧视图中雾滴的位置及偏移角度;选取主视图中尺寸一致、清晰且无叶脉的区域标记为统计有效区,采用雾滴分析软件统计附着特性。

本次试验分2组:1)无极化组(棉尖无极化,进行 单一静电喷雾,雾滴荷电电压为20kV);2)极化组 (先进行棉尖极化,极化电压为15kV,后进行静电喷 雾,雾滴电压为20kV)

#### 3.4 参数优化

试验方法及评价指标测量方法与 3.2 中所述方法保持一致。以极化电压和雾滴充电电压为试验因素,以雾滴在水敏纸上的综合评价指标(*I*)为主要性能指标进行二因素五水平 Central Composite 设计试验,根据其设计要求,共分为 13 组。依据前期单因素试验,确定各因素的取值范围为:极化电压区间为 10~20 kV,雾滴电压区间为 15~25 kV,系统自动生成试验因素编码。每组试验重复 3 次,取其平均值作为该组试验结果。采用Design Expert 13 软件对数据进行处理,建立各试验因素与响应指标间的拟合回归方程,确定较优的极化电压和

雾滴的输入电压参数组合。试验因素编码如表1所示。

衣 1 试验因素编码表					
Table 1         Coding table of test factors					
编码值 Code value	极化电压 Polarization voltage U <sub>y</sub> / kV	雾滴电压 Droplet voltage $U_d/\mathrm{kV}$			
-1.41421	7.928 93	12.928 9			
-1	10	15			
0	15	20			
1	20	25			
1.414 21	22.071 1	27.071 1			

#### 4 结果与分析

#### 4.1 叶片电荷衰减量试验

电场变化的趋势曲线如图 9 所示,电荷衰减过程呈 现出典型的两阶段特征:初始阶段,电荷衰减极为迅速, 这反映了叶片表面电荷的快速重新分布与耗散,这提示 在实际应用中需考虑在短时间内最大化电荷积累效率; 随后,随着电荷量的减少,衰减速度逐渐放缓,直至最 终达到相对稳定的状态。根据后期观察与记录,这一稳 定状态能在无外界干扰的情况下维持超过 30 min,为静 电喷雾系统的设计提供了时间窗口,即在这段时间内实 施喷雾作业,可以最有效地利用叶片上的电荷来吸附并 固定雾滴,为静电喷雾技术的实际应用提供支持。这一 发现增强了技术可行性,也为后续研究指明了方向,比 如,通过优化棉尖极化电参数进一步提升静电喷雾的效 果与效率。



Fig.9 Charge decay curve diagram

# 4.2 水敏纸统计雾滴附着特性试验

水敏纸统计雾滴附着特性试验结果如表 2 所示。雾 滴附着率随荷电电压变化呈单峰分布,在 20 kV 时达到 峰值(综合评价指标也达峰值,*I*=0.58)。这一现象可 归因于:在较低电压时,雾滴荷电量不足导致静电吸附 力较弱;而在较高电压时,过量的表面电荷引发雾滴间 排斥效应,反而降低附着性能。雾滴体积中值直径随电 压升高呈单调递减趋势,表明增强雾滴荷电可有效促进 雾滴二次破碎。基于综合评价结果,选定 20 kV 作为后 续试验的基准雾滴充电电压。

当固定雾滴充电电压为 20 kV 时,棉叶极化电压对 雾滴沉积特性表现出显著调控作用。15 kV 棉叶极化电 压可使雾滴附着率提升至最优值。雾滴粒径随棉叶电压 变化呈现弱"V"型分布,在 15 kV 附近达到最小值,但整 体波动范围不大,这一现象可能与极化电场对雾滴破碎和聚合的平衡作用有关。当极化电压为 15 kV,雾滴电压为 20 kV 时综合评价指标达到峰值(*I*=0.70),后续试验将棉叶极化电压固定为 15 kV。

Table 2 Test results of droplet adhesion characteristics statistics				
试验组 Experimental group	极化电压 Polarization voltage/kV	雾滴电压 Droplet voltage/kV	附着率 Coverage/ %	体积中值直径 VMD/µm
对照组 Control group	/	5 10 15 20 25 30	14.89 15.79 22.63 28.45 21.11 15.29	159.72 149.08 142.64 130.52 128.48 126.36
试验组 1 Experimental group 1	5 10 15 20 25 30	20	22.38 29.76 40.55 32.13 24.78 17.38	132.16 129.92 128.90 130.16 130.21 130.56
试验组 2 Experimental group 2	15	5 10 15 20 25 30	22.38 24.24 32.13 35.76 20.78 15.98	154.16 142.26 135.16 125.92 122.50 120.26

表 2 雾滴附着特性试验结果

试验组 2 结果显示,在最优参数组合(15 kV 极化 电压+20 kV 雾滴电压)下,附着率较对照组增加 25.69%, 同时 雾 滴粒 径 减小 3.52%。然而 在 高压 区 间(25~ 30 kV),其附着优势减弱,表明棉叶极化对雾滴沉积的 增强效应存在明确的电压作用窗口,其优化机制可能与 棉叶表面电荷饱和效应及雾滴运动轨迹改变密切相关。

# 4.3 高速摄像捕捉雾滴附着特性试验

极化组和无极化组的侧面雾滴动态捕捉如图 10 所示。 对比两侧视图发现,在相同的时间跨度内,极化组的雾 滴偏移角度较无极化组的雾滴偏移角度小,说明极化叶 片上的雾滴在相同的观测时间内沿电场方向的位移更大, 即雾滴更趋向于直线运动而非受其他因素影响的偏转。 这一现象表明,极化叶片使得雾滴能够更直接、更有效 地朝向叶片表面移动,证明了极化处理有效增强了叶片对 带电雾滴的吸引力,促进了雾滴向叶片表面的快速聚集。

极化组的雾滴附着率高达 89.54%,雾滴的体积中径 为 201.36 μm,而无极化组的附着率则仅为 70.95%,雾 滴的体积中值直径为 219.72 μm。两组数据对比证明了棉 尖极化-静电喷雾法,在提升雾滴附着特性方面具有一定 优势。



注: A<sub>0</sub>、B<sub>0</sub>、C<sub>0</sub>、D<sub>0</sub>、E<sub>0</sub>、F<sub>0</sub>分别代表6个不同雾滴的起始位置,而A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>、D<sub>1</sub>、E<sub>1</sub>、F<sub>1</sub>则分别表示这些雾滴运动结束后的位置;图中角度为雾滴的 偏移角度。偏移角度越小,说明雾滴在相同的观测时间内沿电场方向的位移更大。

Note:  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$ ,  $E_0$ , and  $F_0$  respectively represent the starting positions of the six different droplets, while  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$ ,  $E_1$ , and  $F_1$  respectively represent the positions at the end of the movement of these droplets. The angle in the figure represents the offset angle of the fog droplet. The smaller the offset angle is, the greater the displacement of the fog droplets along the direction of the electric field within the same observation time.

#### 图 10 高速摄像捕捉雾滴图

Fig.10 High-speed cameras capture images of fog droplets

此外,对比高速摄像捕捉试验与水敏纸统计雾滴附 着特性试验发现,高速摄像捕捉试验中的附着率和雾滴 粒径与水敏纸记录之下的结果相差较大。这可能是因为 棉叶表面疏水性增强雾滴反弹,且高速摄像所记录的雾 滴为未被完全固定的雾滴,而水敏纸吸湿性强,保留完 全润湿并固定的雾滴,且扩散后斑点变小,导致两组试 验的附着率和粒径统计相差较大。

# 4.4 参数优化结果与分析

正交试验方案与结果如表 3 所示,方差分析如表 4 所示,采用 Design Expert 13 软件对数据进行处理,建立棉

尖极化电压 U<sub>y</sub>和雾滴充电电压 U<sub>d</sub> 与综合评价指标(I) 之间的拟合回归方程,剔除回归模型中不显著项,可得:

$$I = -0.9330 - 0.0013U_yU_d - 0.0017U_y^2 - 0.0017U_d^2 \quad (16)$$

表 3 正交试验方案与结果

Table 3 Orthogonal test scheme and results						
序号	极化电压	雾滴电压	综合评价指标			
Serial	Polarization voltage	Droplet voltage	comprehensive evaluation			
number	$U_y$ / kV	$U_d / \mathrm{kV}$	index I			
1	20	25	0.49			
2	7.928 93	20	0.47			
3	15	20	0.58			
4	15	20	0.60			
5	15	12.928 9	0.48			
6	15	20	0.61			
7	10	25	0.55			
8	15	20	0.57			
9	10	15	0.47			
10	22.0711	20	0.51			
11	20	15	0.54			
12	15	27.0711	0.50			
13	15	20	0.59			

表 4 正交试验结果方差分析

Table 4	Analysis of variance	of orthogona	ai experime	ent results	
来源	平方和	自由度	Г	D	
Source	Sum of Squares	Sum of Squares df F		P	
模型	0.0282	5	15.46	0.001 2	
$U_y$	0.000 6	1	1.67	0.237 1	
$U_d$	0.000 5	1	1.38	0.2787	
$U_y U_d$	0.004 0	1	10.98	0.012 9	
$U_y^2$	0.012 8	1	35.09	0.0006	
$U_d^2$	0.013 3	1	36.45	0.000 5	
残差 Residual	0.002 6	7			
失拟 Lack of fit	t 0.001 2	3	1.27	0.398 8	
误差 Pure error	0.001 3	4			
总和 Total	0.0307	12			

对回归模型进行显著性分析,由方差分析表可知, 雾滴附着率模型极显著(P<0.01),失拟项均不显著 (P>0.05),回归方程不失拟。此时回归模型拟合决定 系数 R<sup>2</sup>为 0.917,表明回归模型预测值与实际值有较高 相关性。失拟项 P 值大于 0.05,表明回归方程拟合度高, 可用此方程来优化基于棉尖极化的静电喷雾系统的结构 参数。

为了获得影响雾滴附着率的最佳工作参数组合,以 综合评价指标 I 最大为目标函数,结合各试验因素的边 界条件,对雾滴附着率的回归模型进行多目标优化设计, 优化目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} 10 \text{ kV} \leqslant U_y \leqslant 20 \text{ kV} \\ 15 \text{ kV} \leqslant U_d \leqslant 25 \text{ kV} \\ \max I(U_y, U_d) \end{cases}$$
(17)

将目标函数和约束条件代入 Design-Expert 13 中可得 试验因素的最佳参数组合:棉尖极化电压为 15.392 kV、 雾滴输入电压为 20.311 kV,此时雾滴附着综合评价指标 为 0.609 6。 为验证其可靠性,开展基于棉尖极化的静电喷雾性 能试验,为便于调节,将工作参数就近圆整,试验中取 极化电压为 15.4 kV、喷雾输入电压为 20.3 kV,试验重 复多次,取其平均值作为试验结果,可得雾滴附着综合 评价指标为 0.60,与优化计算结果高度接近。此时雾滴 附着率为 43.08%,相较于单一静电喷雾提升 51.40%; 雾滴粒径为 127.44 µm,相较于单一静电喷雾减小 2.36%。

# 5 结 论

1) 对叶片预先实施极化处理,能够大幅加速雾滴向 叶片表面的移动速度,并显著提升叶片对带电雾滴的吸 附能力,进而提升雾滴附着特性,优化喷雾效果。

2)叶片电荷衰减呈现两阶段特征,初始阶段衰减迅速后逐渐放缓至稳定状态,且该状态可持续超 30 min, 为静电喷雾系统设计提供了有效时间窗口,利于电荷高效利用;单因素试验中,未极化棉尖下雾滴充电电压 20 kV时附着综合性能最佳;有棉尖极化时,棉尖极化 电压 15 kV 结合 20 kV 雾滴充电电压时叶片附着综合性 能最优;高速摄像验证表明,极化棉叶使雾滴更趋直线 运动、沿电场方向位移增大,增强棉叶对带电雾滴的吸 引力,沉积特性显著提升,附着率达 89.54%、雾滴体积 中值直径 219.72 μm,优于单一静电喷雾。

3)通过系统的单因素试验与参数优化研究,确定最 佳参数为:极化电压 15.4 kV,喷雾输入电压 20.3 kV。 在此最优配置下,雾滴的附着率达 43.08%,相较于单一 静电喷雾提升 51.40%;雾滴粒径为 127.44 μm,相较于 单一静电喷雾减小 2.36%。

#### [参考文献]

- 张友平,王巧连,程海亮,等.2001—2020年中国棉花成本要素和生产效率分析[J].中国棉花,2024,51(11):1-10. ZHENG Youping, WANG Qiaolian, CHENG Hailiang, et al. Analysis of China cotton production efficiency from 2001 to 2020[J]. China Cotton, 2024, 51(11):1-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴纯新,蒋朝常.化控技术让棉花生产提质增效[N].科技日 报,2024-11-05(005).
- [3] 吴博,王文涛,戴翠荣,等.新疆阿拉尔垦区不同剂量甲 哌(年翁)对新陆中60号农艺性状、产量和纤维品质的 影响[J].中国棉花,2023,50(12):23-27.
  WU Bo, WANG Wentao, DAI Cuirong, et al. Effects of different dosages of mepiquat chloride on agronomic traits, yield, and fiber quality of Xinluzhong 60 in Aral Reclamation Area of Xinjiang[J]. China Cotton, 2023, 50(12): 23-27. (in Chinese with English abstract)
- [4] JAIN, H, DHIMAN, S, ANSARI, N. Recent trends in techniques, process and sustainability of slow-release formulation for pesticides[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 216: 118764.
- [5] WANG, Q, LI, Q, WANG, L, et al. Optimizing the size of mesoporous silica nano-delivery system enhances the absorption, transport, and retention of pesticides in tea

plants[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 227: 120789.

- [6] APPAH S, WANG P, OU M, et al. Review of electrostatic system parameters, charged droplets characteristics and substrate impact behavior from pesticides spraying[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(2): 1-9.
- [7] 郑加强,徐幼林.环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J].农业机械学报,2021,52(3):1-16.
  ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):1-16. (in Chinese with English abstract)
- [8] WANG J, ZHANG Y, ZHANG W, et al. Research progress of electrostatic spray technology over the last two decades[J]. Journal of Energy Engineering, 2021, 147(4): 03121003.
- [9] 李建平,茹煜,倪佳胜,等.梯形果园风送静电喷雾机仿 真分析及试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2023, 44(1):45-51.

LI Jianping, RU Yu, NI Jiasheng, et al. Simulation analysis and experiment of trapezoidal orchard air delivery electrostatic spray machine[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 45-51. (in Chinese with English abstract)

- [10] SALCEDO R, SÁNCHEZ E, ZHU H, et al. Evaluation of an electrostatic spray charge system implemented in three conventional orchard sprayers used on a commercial apple trees plantation[J]. Crop Protection, 2023, 167: 106212.
- [11] GUO J, DONG X, QIU B. Analysis of the factors affecting the deposition coverage of air-assisted electrostatic spray on tomato leaves[J]. Agronomy, 2024, 14(6): 1108.
- [12] 汪明,戴世群,刘世超,等. 气助式静电喷头感应电场及 荷质比研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 192-196.
  WANG Ming, DAI Shiqun, LIU Shichao, et al. Study on the Effect of Air-assisted Spraying Auxiliary Airflow on Droplet Size[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(10): 192-196. (in Chinese with English abstract)
- [13] LIU C, HU J, LI Y, et al. Numerical simulation of the trajectory of UAVs electrostatic droplets based on VOF-UDF electro-hydraulic coupling and high-speed camera technology[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 512.
- [14] LIU C, HOU H. Numerical simulation of water droplet impact on composite insulator under DC electric field[C]//2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). Chengdu, 2022: 518-522.
- [15] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社, 2023.
- [16] WU X, SUN S, HU B, et al. A study on the macro and micro mechanisms of cotton seedling growth regulation by highvoltage electrostatic field and optimization of system parameters. Scientific Reports, 2024, 14(1): 30000.
- [17] 孙胜,胡斌,马金虎,等.蔬菜育苗高压静电吸附播种机 理及系统参数优化[J].农业工程学报,2024,40(9):26-38. SUN Sheng, HU Bin, MA Jinhu, et al. Mechanism of highvoltage electrostatic adsorption seeding for vegetable seedlings and optimization of system parameters[J]. Transactions of the

Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(9): 26-38. (in Chinese with English abstract)

- [18] 彭强吉,康建明,宋裕民,等. 3MDZ-4型自走式棉花打顶 喷药联合作业机设计[J].农业工程学报,2019,35(14):30-38. PENG Qiangji, KANG Jianming, SONG Yumin, et al. Design of 3MDZ-4 self-propelled cotton topping and spraying combined machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 30-38. (in Chinese with English abstract)
- [19] 白海超.水田喷杆喷雾机喷雾装置优化设计与试验[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
  BAI Haichao. Optimal Design and Experiment of Spray Device for Paddy Field Boom Sprayer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王金武,白海超,孙小博,等.水田喷雾机喷雾装置设计与动态分析[J].农业机械学报,2019,50(3): 69-79.
  WANG Jinwu, BAI Haichao, SUN Xiaobo, et al. Design and dynamic analysis of spray device for paddy field sprayer[J].
  Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 69-79. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱金文, 吴慧明, 程敬丽, 等. 雾滴体积中径与施药量对毒 死蜱在棉花叶片沉积的影响[J]. 棉花学报, 2004(2): 123-125.
  ZHU Jinwen, WU Huiming, CHENG Jingli, et al. Influence of droplet sizes and spray volume on deposition of chlorpyrifos on cotton leaves[J]. Cotton Science, 2004(2): 123-125. (in Chinese with English abstract)
- [22] PATEL B, SINGH M, MISHRA P, et al. Efficacy of the prototype electrostatic nozzle for cotton crops[J]. African Entomology, 2021, 29(2): 471-478.
- [23] 刘建凤,吉春明,朱锦磊,等.植保机械对稻纵卷叶螟防 效和工效的影响[J].浙江农业科学,2016,57(12):2002-2004.

LIU Jianfeng, JI Chunming, ZHU Jinlei, et al. Effects of plant protection machinery on control efficacy and work efficiency against Cnaphalocrocis medinalis[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2016, 57(12): 2002-2004. (in Chinese with English abstract)

[24] 宋瑞洲. 静电吸附式软体机械手的设计与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

SONG Ruizhou. Design and Experimental Study of an Electrostatic-Adhesive Soft Robotic Gripper[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese with English abstract)

- [25] 崔海蓉,杨超珍,余盛兵,等.电极参数影响射流喷雾荷电量的试验研究[J].高电压技术,2015,41(12):4042-4047.
  CUI Hairong, YANG Chaozhen, YU Shengbing, et al. Experimental study of electrode parameters effect on jet spray charge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4042-4047. (in Chinese with English abstract)
- [26] SUN S, HU B, MA J, et al. Research on seedling sowing method based on high voltage electrostatic characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108850.
- [27] ANDERSSON B, STRANNEBY D. Long-term charge retention on PWBs[J]. Journal of Electrostatics, 2005, 63(6/7/8/9/10): 597-602.

- [28] LONGWORTH L, POST S, JERMY M, et al. Evaluating capacitive wetness sensors for measuring deposition in electrostatically charged spraying operations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105829.
- [29] 王瑞雪,海彬,田思理,等.绝缘材料表面电荷测量优化 及等离子体处理对其表面电特性的影响[J].高电压技术,

2017, 43(6): 1808-1815.

WANG Ruixue, HAI Bin, TIAN Sili, et al. Optimization of Dielectric Material Surface Charge Measurement and Impact of Plasma Treatment on Their Surface Electrical Characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1808-1815. (in Chinese with English abstract)

# Design and parameter optimization of cotton tip polarization-electrostatic spraying system based on high voltage electrostatic field

WU Xinming<sup>1,2</sup>, SUN Sheng<sup>1,2</sup>, HU Bin<sup>1,2,3</sup>, LUO Xin<sup>1,2,3</sup>, LIU Hanjun<sup>1</sup>, HAN Changjie<sup>4</sup>, MA Zhen<sup>5</sup>

 College of Mechanical and Electronic Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;
 Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China;
 Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi 832003, China;
 College of Electrical and Mechanical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China;
 College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China;

Abstract: Cotton is one of the main raw materials in the global textile industry. Its output and quality have a significant impact on the market supply and demand, as well as international trade. Among them, the chemical defoliation and topping techniques have been widely applied to increase the cotton production. But there is the increasingly prominent pollution of the soil, water source and ecosystem. Electrostatic spraying can be expected to enhance the adhesion of the liquid droplets for the uniform coverage of the crops. However, the existing technologies have been confined to the large droplet size and low adhesion rate, resulting in only 40.6% effective utilization of the pesticides for the serious waste of resources. In this study, a cotton tip polarization-electrostatic spraying was proposed to optimize the chemical topping and defoliation spraying, according to the high-voltage electrostatic hetero-charge adsorption. The utilization rate of the pesticides was then improved to reduce the environmental pollution. Firstly, a systematic simulation was performed on the charge migration during polarization of cotton tips using COMSOL Multiphysics software. The feasibility of cotton tip charging was also verified after simulation. Subsequently, a cotton tip polarization-electrostatic spraying system was designed and then built. Two devices consisted of an electrostatic spraying and a cotton tip polarization. The opposite charges were induced on the cotton tip surface and the droplets in a high-voltage electrostatic field, in order to enhance the electrostatic adsorption force. The water-sensitive experiment was used to replace the cotton leaves for the measurement of droplet adhesion rate and particle size. The deposition behavior of the droplets on the leaf surface was also observed using high-speed camera. Design-Expert 13 software was also utilized to optimize the parameters, including the optimal combination of the polarization voltage and droplet charging voltage. The experimental results show that the polarization treatment of the cotton tips was significantly improved the deposition of droplets. The leaf charge decay was divided into the rapid and slow stages. The stable state lasted for more than 30 min, providing for an effective time window during electrostatic spraying. Under the optimal combination of the parameters (polarization voltage 15.4 kV, and droplet charging voltage 20.3 kV), the droplet adhesion rate reached 43.08%, which was 51.40% higher than that of the single electrostatic spraying. At the same time, the median diameter of the droplet volume decreased by 2.36%. High-speed camera analysis further confirmed that the polarization of the cotton leaves made the droplet movement more linear, thus enhancing the leaf's adsorption capacity for droplets. An adhesion rate was as high as 89.54%, significantly better than the 70.95% of the traditional. This finding can provide the new ideas to optimize the cotton tip polarization with the electrostatic spraying. The utilization rate of pesticides can be effectively improved to reduce the environmental pollution. Technical references can offer for the green production of different cash crops.

Keywords: high-voltage electrostatic field; cotton tip polarization; electrostatic spraying; charge decay; droplet adhesion characteristics