

◆ 专论与综述 ◆

# 静电喷雾技术理论与应用研究进展

任立瑞, 陈福良\*, 尹明明\*

(中国农业科学院 植物保护研究所, 农业部作物有害生物综合治理重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 静电喷雾技术为新型农药使用技术, 对农药利用率、环境保护以及药液在靶标上的分布等具有重要作用。对静电喷雾的原理与特点, 荷电方式, 静电雾化, 雾滴荷电效果及运行、沉积过程进行了深入阐述, 论述了静电喷雾技术、药械的研究进展, 提出当前静电喷雾技术理论与应用过程中存在的问题和解决方法, 对未来可能的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 静电喷雾; 荷电方式; 液滴雾化; 荷电效果; 研究进展

中图分类号: S 499 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-5284.2019.01.001

## Progress in Theory and Application on Electrostatic Spraying Technology

Ren Li-rui, Chen Fu-liang\*, Yin Ming-ming\*

(Key Laboratory of Integrated Pest Management in Crop, Ministry of Agriculture, PRC, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Electrostatic spraying is a new kind of pesticide applying technology, which have significant improvement in pesticide utilization, environmental protection, and distribution on targets. The principle and characteristics of electrostatic spraying technology, charging methods, charged atomization, charged effect, droplets motion, deposition process and so on were analyzed. At the same time, the research progress of electrostatic spraying technology and equipment were reviewed in the current work. The existing problems and solutions on the current theory and application of electrostatic spraying technology were put forward. And the prospect of electrostatic spraying technology was given.

**Key words:** electrostatic spraying technology; charging method; drop atomization; charge effect; research progress

长期以来, 我国植保施药技术和机械比较落后, 农药有效利用率只有20%~30%, 而真正到达靶标的药量仅占施药量的1%~3%, 由此引发农药浪费、环境污染等一系列问题<sup>[1]</sup>。静电喷雾技术是在控制雾滴技术及超低容量喷雾理论和实践的基础上发展起来的新型施药技术。与常规喷雾技术相比, 静电喷雾能够实现定向喷洒, 减少农药飘移, 降低环境污染, 提高农药利用率, 节约施药成本。因此, 静电喷雾技术理论研究, 相应的机械设备及其适配静电超低容量油剂的发展均受到广泛关注。

## 1 静电喷雾的原理与特点

### 1.1 静电喷雾的原理

静电喷雾技术是在喷头上施加高压静电, 在喷头与靶标之间建立静电场, 药液经喷头雾化后带上电荷, 形成群体荷电雾滴, 然后在静电场和其他外力的共同作用下定向运动而被吸附到靶标的各个部位。在此过程中, 带电雾滴主要受电场力和自身重力的作用, 由于带电雾滴粒径较小, 所受电场力通常很强, 约为重力的40倍, 因此, 在雾滴运行过程中

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200301)

作者简介: 任立瑞, 女, 硕士。E-mail: lrui@126.com

通讯作者: 陈福良, 男, 博士, 研究员, 主要从事农药制剂学研究。E-mail: flchen@ippcaas.cn

尹明明, 女, 博士, 副研究员, 主要从事农药制剂与分析工作。E-mail: mmyin@ippcaas.cn

电场力起主导作用。由于电场力具有穿透性,可以穿透靶标内部,因此,带电雾滴能够定向吸附于植株

叶片正反面,减少农药飘移<sup>[2]</sup>。目前雾滴荷电方式分为3种,即接触充电、电晕充电和感应充电,见图1。

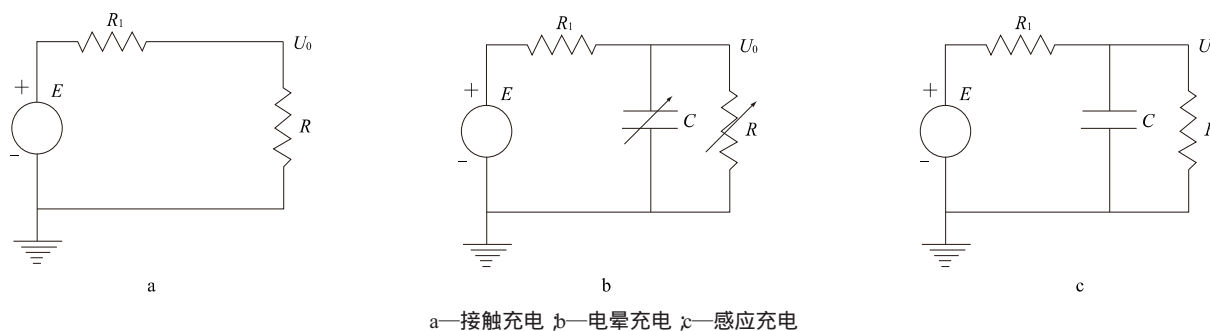


图1 静电喷雾器充电原理图

接触充电方式的高压电源一端直接与药液或喷头相连,另一端接地,液体与地面之间产生电场,形成回路,其等效电路如图1a所示。药液经喷头雾化形成雾滴并带上电荷。由于充电液体与地面距离较远,因此,接触充电方式要求充电电压比感应充电电压高很多,其雾滴充电效果最佳。

电晕充电方式采用高压电极尖端放电,使周围空气电离成带电粒子,药液经喷头雾化后与电极周围的极化粒子碰撞而带电。电极与水膜间的气体电阻随电离的加强而减小,可以用可变电阻来代替,其等效电路如图1b所示。这种充电方式绝缘性好,可直接用于普通喷头。

感应充电方式在喷头和电极间设有高压电源,由静电感应原理可知,喷头与电极带极性相反的电荷。药液经喷头雾化后带走喷头表面电荷,因此,雾滴形成区与电极的距离决定充电效果。喷头与电极之间的空气层被认为是由1个电容器和1个较大阻值的电阻并联,其等效电路如图1c所示。

以上3种充电方式,接触充电形成的雾滴荷电效果最好,电晕充电方式效果次之,感应充电方式效果较差。从安全角度考虑,感应充电方式最安全,充电电压较小,只有几千伏,绝缘容易实现;其次是电晕充电方式,其高压绝缘性好,但所需电极电压较高,接触充电方式电极电压高,绝缘比较困难,因而逐渐被其他充电方式取代。目前较常用的充电方式是感应充电<sup>[2]</sup>。

## 1.2 静电喷雾的特点

静电喷雾具有包抄效应、穿透效应、尖端效应,且覆盖均匀,沉积量高。带电雾滴由于粒径小且分布均匀,在强电场力的作用下能迅速吸附于作物上,不仅能在叶片正面实现均匀覆盖,而且在叶片背面及植株隐蔽部位也有分布。试验表明,静电喷

雾药液沉积量较常规喷雾药液沉积量提高36%以上,静电喷雾能显著提高药液在靶标作物下部和背部的沉积效果<sup>[3]</sup>。

静电喷雾可提高防效,降低用药量和成本。静电喷雾雾滴体积中径一般在45 μm左右,粒径分布均匀,粒径谱窄,符合生物最佳粒径理论,易于被靶标吸附。当静电电压为20 kV时,雾滴粒径减小约10%,粒径谱均匀性提高约5%。这些特点增加了雾滴与病虫害接触的机会。与常规喷雾相比,静电喷雾的防治效果提高2倍以上,节省农药用量30%~50%,防治成本降低50%左右<sup>[4-6]</sup>。

静电喷雾喷液量少,对环境污染小。带电雾滴雾化程度高,吸附力强,在外加电场力作用下,雾滴可快速吸附于靶标,而且其穿透力强,无需反复喷洒,农药飘移量减少20%~30%,避免了农药流失。因此,其对大气、土壤和水体的污染极小。另外,静电喷雾油剂一般直接用于喷雾,适合干旱地区使用。

静电喷雾持效期长。由于雾化程度高,雾滴在靶标上沉降均匀,且静电喷雾液剂多为油基制剂,渗透性强,粘附牢,耐雨水冲刷。另外,高沸点溶剂可延长农药有效成分的降解时间,持效期长。

静电喷雾工效高。针对不同作物,静电超低量喷雾器工效较常规喷雾工效提高近20倍,东方红-18型背负式静电喷雾机每小时可喷雾1.33~2 hm<sup>2</sup>。

## 2 静电作用下的液滴雾化研究

液体表面张力和黏滞阻力是2种主要的雾化阻力,两者能够维持液滴形态并防止其变形<sup>[7]</sup>。液体从喷嘴喷出后,由液柱变成液膜,随着压力增大,液体克服表面张力和黏滞阻力由液膜变成液丝最后形成液滴。这些液滴因具有较高速度,在空气中受到气流剪切作用进而破裂成更小的雾滴喷向靶标。

Laryea等<sup>[8]</sup>建立了荷电雾滴带电量与雾滴破裂相关的数学模型,表明雾滴所带电荷量超过极限值,雾滴会因受力不平衡而发生破裂。Shrimpton<sup>[9]</sup>研究了Rayleigh极限条件下雾滴的破裂,在喷雾流动中雾滴持有的电荷达到Rayleigh极限的50%,雾滴将发生破裂。在液力式雾化过程中,液体压力和静电电压均能改善雾化效果,但超过一定值时,雾化效果不明显。在气助式雾化过程中,随喷雾距离的增加,雾滴整体均匀性提高,但雾滴沉降速度降低。

静电喷雾目前应用于农药喷洒、材料制备、工业喷涂、燃油燃烧、工业除尘、脱硫、颗粒聚并及分离等多方面。但高压静电雾化受空间非均匀电场与流场耦合等因素影响,液滴雾化研究尚处于通过喷雾器械改装及雾化参数优化的水平。

### 3 雾滴荷电效果的研究

荷质比是指雾滴所带的电荷量与其质量的比值,是衡量雾滴荷电效果的重要指标<sup>[10]</sup>。试验证明,在分散流雾中,雾滴的荷电量与比表面积成正比,雾滴粒径是影响荷质比的重要因素。雾滴粒径在100  $\mu\text{m}$ 以下时,带电雾滴沉积效果好,这表明荷质比越大,雾滴的荷电性能越好,充电效果越理想<sup>[11]</sup>。

由于单个雾滴荷电量小,雾滴运行过程中荷电量呈逐渐衰减趋势,此外,还受蒸发导致荷电量减小以及液滴之间存在相互作用等诸多因素影响,所以只能通过研究荷电雾滴群的平均荷电量来考察充电效果。带电雾滴平均荷电量测定方法有法拉第桶法、模拟目标法和网状目标法。3种方法均通过将雾滴收集器接地,测定收集雾滴质量,并采用电流表测定电流,从而计算出荷质比。法拉第桶法对桶内荷电雾滴测量精度较高,雾滴电荷损失少,但只能测定直接喷入内筒的狭窄雾流的荷质比,对喷头和喷出的雾形要求较严格。模拟目标法的优点是模型对真实靶标生长状态拟合度高,但局限性在于需要根据实际情况制作不同的实物模型,存在制作过程较复杂等问题,从而不利于建立数学模型进行研究。网状目标法弥补了法拉第桶法的不足,但也存在远距离收集雾滴,不易测量金属网上液滴附着量的问题<sup>[12]</sup>。因此,试验时要根据具体情况选择适当的荷质比测定方法。在静电喷雾过程中,荷质比是变化的,其影响因素较多,如喷头类型、充电电压、液体理化性质以及喷雾压力等。就如何提高荷质比,Maski等<sup>[3]</sup>研究了液体流量和电极电压对荷质比的影响。结果表明:在电压一定的情况下,荷质比随流

量的增大而减小;在流量不变的条件下,荷质比随电压的增大而增大,电压超过某一值,荷质比逐渐减小。Gan-Mor等<sup>[13]</sup>研究了常规压力喷嘴下气流速度对荷电量的影响,发现增加气流速度能有效增加雾滴荷电量;Ahmed等<sup>[14]</sup>研究了电导率、电压对荷质比的影响。结果表明,高电导率液体和较高的静电电压能有效提高雾滴荷质比。在雾滴中添加离子型表面活性剂能更好地促进雾滴荷电<sup>[15]</sup>。江苏大学也对感应荷电过程中喷雾荷电特性进行了研究。结果表明,带电雾滴的荷质比与静电电压及喷雾压力有关;对于同一静电喷雾装置,存在荷电效果最佳的静电电压和喷雾电压,同时荷质比随电极环直径的增大而减小,随电极间距的增大而增大<sup>[16]</sup>。于辉等<sup>[17]</sup>研究显示,当电导率超出一定范围后,荷质比随电导率的增加而减小,同时随液体介电常数的增大而增大,但液体表面张力的增加对荷质比无明显影响。代亚猛等<sup>[18]</sup>研究了喷嘴孔径对荷电性能的影响,喷嘴孔径越小,雾滴体积中径越小,荷电效果越好。针对圆环形和方形2种电极进行的研究结果表明,电极宽度、电极中心到喷口的轴向距离与雾滴荷质比成正相关<sup>[19]</sup>。由于荷电效果影响因素诸多,目前研究侧重于具体作业条件下静电喷头的研制。

## 4 雾滴运行及沉降过程的研究

### 4.1 带电雾滴的运行过程

带电雾滴在向靶标运行的过程中,受重力、电场力、惯性和空气浮力等作用。由于雾滴粒径很小,在整个运行过程中,电场力起主导作用。雾滴受到的电场力主要包括:带电雾滴群体与靶标之间的电场力 $F_1$ 、带电雾滴相互作用力 $F_2$ 。由于带电雾滴与靶标之间的电场强度远大于雾滴之间的电场强度,故 $F_1$ 远大于 $F_2$ ,所以通常认为起主导作用的是 $F_1$ , $F_2$ 可忽略不计。目前喷雾流场的测量包括速度场测量和粒径谱测量,多采用粒子图像测速技术(PIV)和相位多普勒测速技术(PDPA)。其中,PIV能够对流场运动的物理形态进行显示,同时提供流场的瞬时定量信息;PDPA是研究喷雾流场中测试雾滴速度及粒径的重要手段。雾滴在运行过程中,因蒸发作用其质量逐渐减小,同时雾滴间相互排斥,小雾滴易发生飘移,且荷电雾滴存在放电现象。电导率高的雾滴,放电率可达60%,如果附近有尖端导电物存在,放电率更高<sup>[20]</sup>。带电雾滴运行的影响因素众多,外界环境复杂,其影响因素较难确定,并且雾滴在气液两相流场中的运动具有随机性,因此,其运动轨迹



和规律很难用确切的数学模型来表示,尚需进一步研究。

#### 4.2 带电雾滴的沉积过程

雾滴在靶标上的沉积分布是影响喷雾效果的重要因素。衡量沉积性能的指标有沉积量、沉积区域面积和沉积密度。药液在靶标单位面积上的沉积称为沉积量。雾滴运行沉积所覆盖的区域为沉积区域面积,由于沉积密度不同,雾滴密度大且分布均匀的中心区域称为有效沉积区域,雾滴密度很小的区域称为无效区域。沉积密度是指单位面积上雾滴沉积的数量,代表沉积分布的均匀性。目前对沉积过程的研究主要采用理论与试验2种方式。在理论方面,对湍流的研究尚处于湍流模型的建立与应用阶段,Reynolds建立了时均方程,之后Lagrange和Eider分别建立了颗粒群轨道模型和颗粒拟流体模型<sup>[21]</sup>。在试验方面,通过改变各种作业参数来提高沉积效果。测试雾滴沉积的方法有显微图像技术、空间解析方法、模拟作物法和纸卡法等。影响沉积的影响因素较多,如喷头类型、雾化和荷电效果、药液流量及靶标状态等,目前这些影响因素主要通过试验检测方式判定。

对果园静电喷雾沉积特性进行的研究表明,脉冲感应式静电喷雾的覆盖率是常规喷雾的4.3倍<sup>[22]</sup>。Maher等<sup>[23]</sup>研究了液滴冲击和表面沉淀物形成的耦合动力学,通过形成亲水性表面来增加液滴沉积,从而在冲击过程中阻止液滴弹跳,减少农药流失。Foque等<sup>[24]</sup>从喷头类型、气力辅助和喷雾方向等方面对带电雾滴的沉积进行了研究,Devanand等<sup>[25]</sup>研究了喷雾电压、喷雾机前进速度、喷雾高度和方向对沉积量的影响,得出具体的作业参数。谢守勇等<sup>[26]</sup>选取静电电压、喷雾压力、喷头形式和喷口直径作为影响因素,采用正交试验法获得最佳喷雾效果的参数组合。荷质比、喷雾角度与叶片表面性质对沉积效果也有较大影响<sup>[27]</sup>。集高压静电喷雾技术、轴流风送技术于一体的高沉积静电喷雾装置、接触式荷电的静电喷雾装置和风幕式气力辅助静电喷雾装置的沉积性能较好,喷雾效果理想<sup>[28-29]</sup>。南京农业大学对3WBJ-16DZ型多功能静电喷雾器的带电雾滴运行沉积进行研究,并建立了风送静电喷雾覆盖率响应面模型<sup>[30-31]</sup>。南京林业大学也对此进行研究,结果表明静电可以减小雾滴与叶片之间的接触角<sup>[32]</sup>。对于静电喷雾飘移问题,华南农业大学研究了不同侧风和静电电压对飘移的影响。中国农业大学率先设计了果园自动对靶静电喷雾机。

## 5 静电喷雾技术的研究发展

国外对于静电喷雾设备的研究较早,由于静电喷雾技术在很大程度上弥补了传统喷雾技术的不足,因此,其在20世纪90年代得到迅速发展,静电喷雾器械在欧美一些国家农业生产中使用较为普遍,温室及大田使用尤为广泛。针对静电喷雾器械,英国帝国化学工业公司研制出手持式静电喷雾器,随后对手动喷雾机和拖拉机悬挂式喷雾机进行改进。英国Bertelfi Randell公司生产的ON-TARGET静电喷头可用于喷杆喷雾机和背负式机动喷雾机,能产生40 kV高压,比普通喷头减少65%的药液损失,从而大幅度减少环境污染<sup>[33]</sup>。日本对感应充电及其电极、果园静电喷雾技术进行研究,成功研制出电抗线圈喷枪、微型锥孔旋转喷头、弥雾喷头和双流体静电喷头。手持式转盘喷雾器、背负式喷雾机、喷烟机的药液覆盖率显著提高。霍恩海姆大学1987年研制出气流剪切式静电喷头,可用于背负式喷雾机<sup>[34]</sup>。Laryea等<sup>[35]</sup>设计了静电压力旋涡喷嘴,并对其雾化效果、荷质比及沉积效果等进行测试。结果显示,静电喷雾沉积量较常规喷雾增加1.3~2.3倍。Mamidi等<sup>[36]</sup>设计了静电喷枪并进行静电喷雾效果试验。

随着静电喷雾喷头的不断发展,静电喷雾系统也有了很大进步。美国乔治亚大学20世纪80年代研制出静电喷雾系统(ESS)和气助式静电喷雾系统(AA-ESS),后由美国ESS公司改进后投入商品化生产。其广泛应用于农业防治、公共场所及家禽消毒、水果保鲜、工业喷涂等领域,并带来良好的经济效益。在嵌入电极静电感应喷头的基础上研制的气助式嵌入电极静电感应喷头Max-charge现已应用于大田作物、温室、葡萄园等植保作业中。Patel等<sup>[37]</sup>针对印度小规模农作设计开发了一种新型空气辅助静电喷雾系统,可充电电池根据压力的改变自动调节开关,从而降低功耗。该系统采用空气辅助静电喷嘴,质量轻,便于携带。

航空静电喷雾技术是农用飞机和静电喷雾装置结合的产物,提高了飞机作业抗飘移性。在飞行高度较高时,静电喷雾可以减少蒸发和飘移损失,增加细雾的沉降速率等。Carlton<sup>[38]</sup>开展航空静电喷雾技术研究并申请专利。随后该专利被美国SES公司获得并进行商品化生产,至此航空静电喷雾技术在美国及世界其他地区推广。Martin等<sup>[39]</sup>将USDA-ARS空中静电喷雾系统与固定翼飞机组合,研究了气流速度和喷嘴孔尺寸对喷雾雾化效果的影响。结

果表明,在一定范围内,雾滴粒径随气流速度及喷嘴孔径的增大而增大。该研究为航空静电喷雾作业参数的优化提供了参考。

我国静电喷雾技术研究始于20世纪70年代末,经过几十年的研究探索,取得了丰硕成果。在静电喷雾喷头的研究上,张京等<sup>[40]</sup>研制了气液两相感应式静电喷头,网式圆锥状感应环充电静电喷头的成功研发有效解决了雾滴挂附等问题。江苏理工大学相继研制出手持转盘式静电喷雾器、车载式静电喷雾机和拖拉机牵引式风送静电喷雾机,应用于大田且取得了良好效果。中国在航空静电喷雾技术方面也取得很大进步,对雾滴粒径、充电效果、静电喷头以及沉积性能均进行了较为深入的研究。南京林业大学采用不同类型的农用航空飞机,设计搭建了与其相适应的多种静电喷雾系统,研制出挂载于固定翼飞机的双喷嘴航空静电喷头及挂载于旋翼飞机的电极内嵌式单喷嘴航空静电喷头。蔡彦伦等<sup>[41]</sup>研究了无人机低空静电喷雾时雾滴沉积量随喷雾高度和飞行速度的变化。在低空喷雾时,高度较低的区域,雾滴沉积量较大,喷雾均匀性与飞机速度关系不明显。另外,针对果园及温室也进行了相应静电喷雾机的研究。周良富等<sup>[42]</sup>采用双气流辅助系统与静电喷雾系统相结合的方法,研制了牵引式双气流辅助静电果园喷雾机,从而提高了果树叶片正反面雾滴覆盖密度。杨洲等<sup>[43]</sup>设计了果园在线混药型静电喷雾机,该喷雾机的风送静电喷雾系统可提高雾滴附着与穿透能力。

## 6 静电喷雾技术存在的问题及解决方法

液体雾化机理及荷电效果比较复杂。由于空间电场不稳定及影响雾滴运行沉积的因素很多,雾滴运行轨迹和规律很难找到明确的数学模型和测试方法。因此,通过试验加快建立精确的数学模型,研究各项作业参数对喷雾效果的影响,具有现实意义。

目前国内研制的喷头存在喷雾射程短,雾化锥角小,喷头漏电,雾滴粒谱不均匀,喷幅不易控制,对绝缘材料要求高等问题,且接触充电方式要求静电电压达20 kV,耗电大。因此,我国应在自主研发基础上引进国外先进技术,解决关键技术难点。

由于静电喷雾技术涉及多学科基础理论,试验仪器和方法有待进一步提高,建议应用LDV、PIV等技术进行理论研究,改善电场的模拟方法,以提高测量精度。

在静电喷雾药械产品设计及应用方面我国还

存在诸多不足,建议在研究静电喷雾理论的基础上,进行参数优化设计以及产品标准化、系列化和商品化生产。

采用静电喷雾技术与飞防应用结合,弥补常规飞防缺点,研制航空专用静电液剂,增强雾滴对预定靶标的吸附,有效减少雾滴飘移损失。

## 7 小结

由于静电喷雾技术解决了多个常规喷雾作业的难题,其已经在发达国家得到广泛应用,我国对适合大田和果园作业的大中型静电喷雾机械的研究与开发尚处于起步阶段,应加强静电喷雾荷电方式及雾化理论的研究,分析雾滴荷电及沉积的影响因素,研制先进静电喷雾设备,以提高农药利用率,减少环境污染。

致谢:本文承蒙导师尹明明、陈福良悉心指导,谨此致谢!

### 参考文献

- [1] 韩树明. 静电喷雾技术在植保领域的应用 [J]. 农机化研究, 2011, 33 (12): 249-252.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘勇良. 10%氨基吡啶酸静电喷雾液剂的研制及助剂对沉积量的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [5] 徐清华, 王正艳. 静电喷雾器的技术特点及使用注意事项 [J]. 农业装备技术, 2012, 38 (5): 38.
- [6] 果红忠. 静电喷雾变量控制系统雾化效果的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [7] 田仲福, 王述洋, 曹有为. 基于马尔文激光粒度分析仪的生物物质燃油的雾化特性研究 [J]. 安徽农业科学, 2013, 41 (32): 12700-12702; 12721.
- [8] Laryea G N, No S Y. Development of Electrostatic Pressure-Swirl Nozzle for Agricultural Applications [J]. Journal of Electrostatics, 2003, 57 (2): 129-142.
- [9] Shrimpton J S. Dielectric Charged Drop Break-up at Sub-Rayleigh Limit Conditions [J]. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12 (3): 573-578.
- [10] 郑加强, 冼福生, 高良润. 静电喷雾雾滴荷质比测定研究综述 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 1992, 13 (1): 1-6.
- [11] 刘玉洲, 高雄, 王安亭, 等. 农药静电喷雾及雾滴沉降分布研究方

- 法和评析 [J]. 农机化研究, 2011, 33 (4): 28-32.
- [12] 廉琦. 多旋翼无人机静电喷雾系统的试验研究 [D]. 黑龙江大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [13] Gan-Mor S, Ronen B, Ohaliav K. The Effect of Air Velocity and Proximity on the Charging of Sprays from Conventional Hydraulic Nozzles [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 121 (5): 200-208.
- [14] Ahmed A, Soban T, Ohyama R. Experimental Studies on Influence of Different Conductivities on Water Mist Charging with Electrostatic Induction [C]// IEEF. 2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2014, 558-561.
- [15] Polat M, Polat H, Chander S, et al. Characterization of Airborne Particles and Droplets: Ration to Amount of Airborne Dust and Dust Collection Efficiency [J]. *Particle & Particle System Characterization*. 2002, 19 (1): 38-46.
- [16] 王军锋, 张仕超, 左子文. 感应荷电过程中喷雾荷电特性影响规律实验研究 [J]. *高电压技术*, 2017, 43 (2): 514-519.
- [17] 于辉, 何雄奎, 仲崇山, 等. 在静电喷雾中喷液物化特性对荷质比的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2007, 35 (15): 4706-4707.
- [18] 代亚猛, 周艳, 贾首星, 等. 3种孔径的静电喷头喷雾性能比较 [J]. *江苏农业科学*, 2013, 41 (9): 358-360.
- [19] 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.
- [20] 王保华. 组合充电液力式静电喷雾装置设计与试验研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2005.
- [21] 齐永胜. 风送式静电农药喷洒技术研究 [D]. 河北保定: 河北农业大学, 2008.
- [22] 袁晴春. 高压水静电喷雾装置的设计与试验研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [23] Maher D, Reza M S, Nasim H M, et al. Enhancing Droplet Deposition Through In-situ Precipitation [J]. *Nature Communications*, 2016 (7): 12560.
- [24] Foque D, Pieters G, Nuytens D. Comparing Spray Gun and Spray Boom Applications in Two Lvy Crops with Different Grop Densities [J]. *Hortscience A Piblication of the American Society for Horticultural Science*, 2012, 47 (1): 51-57.
- [25] Devanand M, Divaker D. Effects of Charging Voltage, Application Speed, Target Height, Andorientation upon Charged Spray Deposition on Leaf Abaxial and Adaxial Surfaces [J]. *Crop Protect*, 2010, 29 (2): 134-141.
- [26] 谢守勇, 王靖, 何丙辉. 基于多指标的静电喷雾效果影响因素最优组合研究 [J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2015, 37 (6): 163-168.
- [27] 陈志刚, 冷超, 杜彦生, 等. 影响雾滴靶标沉积效果的三种因素实验分析 [J]. *中国农机化学报*, 2015, 36 (3): 127-131.
- [28] 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, 43 (2): 61-65.
- [29] 顾万玉. 接触式荷电的静电喷雾流场特性及沉积性能试验研究 [D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2016.
- [30] 李芳丽. 多功能静电喷雾器的沉积特性研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [31] 周良富, 张玲, 丁为民, 等. 风送静电喷雾覆盖率响应面模型与影响因素分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (增刊2): 52-59.
- [32] 茹煜, 金兰, 周宏平, 等. 雾滴荷电特性对其沉积分布及黏附靶标的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2014, 38 (3): 129-133.
- [33] Jones A R, Thong K C. The Production of Charged Monodisperse Full Droplets by Electrical Dispersion [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 1971, 48 (4): 1159-1166.
- [34] Moser E. Electrostatic Spraying with Knapsack Sprayer [J]. *AMA*, 1987, 16 (3): 27-45.
- [35] Laryea G N, No S Y. Development of Electrostatic Pressure-Swirl Nozzle for Agricultural Applications [J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57 (2): 129-142.
- [36] Mamidi V R, Ghanshyam C, Kumar P M, et al. Electrostatic Hand Pressure Knapsack Spray System with Enhanced Performance for Small Scale Farms [J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71 (4): 785-790.
- [37] Patel M K, Praveenb, Sahoo H K, et al. An Advance Air-Induced Air-Assisted Electrostatic Nozzle with Enhanced Performance [J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2017, 135 (C): 280-288.
- [38] Carlton J B. Technique to Reduce Chemical Usage and Concomitant Drift from Aerial Sprays: US, 5975425 [P]. 1999-11-02.
- [39] Martin D E, Carlton J B. Airspeed and Orifice Size Affect Spray Droplet Spectrum from an Aerial Electrostatic Nozzle for Fixed-Wing Applications [J]. *Atomization & Sprays*, 2013, 22 (12): 997-1010.
- [40] 张京, 官帅, 宋坚利, 等. 气液两相感应式静电喷头性能试验 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42 (12): 107-110; 120.
- [41] 蔡彦伦, 邱白晶, 沈伟. 无人机低空静电喷雾效果研究 [J]. *农机化研究*, 2018, 40 (8): 188-192.
- [42] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 3WQ-400型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (16): 45-53.
- [43] 杨洲, 牛萌萌, 李君, 等. 果园在线混药型静电喷雾机的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31 (21): 60-67.

(责任编辑: 顾林玲)

## 扫一扫下方二维码



微信号: M-pesticide-E

公众号: 现代农药

QQ: 906491600

电话: 025-86581148

传真: 025-86581147

网址: www.agroinfo.com.cn