

助剂对静电喷雾液剂电导率及沉积量的影响

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:【目的】优化静电喷雾液剂配方, 研究助剂对静电喷雾液剂电导率及沉积量的影响, 探寻二者之间的关系, 为降低农药使用量, 实现农业可持续发展提供科学依据。【方法】采用新型环保溶剂 HDBE 和 NCC, 以二甲亚砜、N-甲基吡咯烷酮和异佛尔酮作为助溶剂, 设定助溶剂用量分别为 0、3%、5%、7%和 10%, 以传统溶剂 S200# 作为对照。根据静电喷雾液剂质量技术指标对不同配方进行筛选。分析助剂种类及用量的变化对阿维菌素和吡虫啉两种静电喷雾液剂电导率的影响。同时, 在施药前测定靶标叶面积, 施药后用丙酮反复冲洗、过滤、旋蒸、定容, 最后采用高效液相色谱 (HPLC) 测定靶标叶片上农药有效成分的沉积量, 探究助剂种类和用量对黄瓜和番茄叶片正、背面沉积量的影响, 分析制剂电导率与沉积量之间的关系, 评价静电喷雾包抄效应。【结果】筛选出 6 个符合质量技术指标要求的环保型静电喷雾液剂配方; 制剂电导率并非各组分电导率的加权平均数, 而是各组分相互作用的结果; 对于极性不同的农药有效成分配制的静电喷雾液剂, 助剂种类和用量的改变对电导率和沉积量的影响趋势相同。当有效成分为非极性农药阿维菌素时, 其对制剂整体电导率几乎无影响, 而当采用极性较大的农药吡虫啉时, 制剂整体的电导率得到显著提高, 在相同助剂条件下, 高出阿维菌素制剂近百倍。当溶剂为 HDBE 时, 电导率较小, 电导率和沉积量随助溶剂质量分数的提高增幅较大, 差异显著。当溶剂为 NCC 时, 由于其本身电导率较大, 二者随助溶剂用量的提高增幅较小, 不同配方之间的电导率差异减小。当助溶剂同为二甲亚砜时, 由 HDBE、NCC 作为溶剂制备的静电喷雾液剂电导率及沉积量较传统溶剂 S200# 均显著增加, 其中电导率高出 5 倍以上, 沉积量高出 1.5 倍以上; 静电喷雾液剂在黄瓜叶片正、背面的沉积量均大于番茄; 不同配方在靶标正、背面沉积量之比在 1.17—2.11。【结论】环境友好的 HDBE、NCC 可代替 S200# 成为静电喷雾的优良溶剂; 助剂的种类和用量的改变对静电喷雾液剂电导率及沉积量有重要影响, 通过提高制剂的电导率可以显著改善沉积量, 从而提高农药有效利用率; 所配制的静电喷雾液剂具有良好的静电包抄效应。

关键词: 静电喷雾液剂; 助剂; 电导率; 沉积量; 阿维菌素; 吡虫啉

Effect of Adjuvant on Conductivity and Deposition of Electrochargeable Liquid

REN LiRui, CHEN FuLiang, YIN MingMing

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

Abstract: 【Objective】The objective of this study is to optimize formula and research the effects of different adjuvants on conductivity and deposition of the electrochargeable liquid and the internal relationship, and to provide scientific guidance for reducing the use of pesticides and achieving sustainable agricultural development. 【Method】New environment-friendly solvents HDBE and NCC were used with dimethyl sulfoxide, N-methyl pyrrolidone and isophorone as cosolvents. The contents of cosolvents were set as 0, 3%, 5%, 7%, and 10% respectively, and the traditional solvent S200# was used as control. Qualified formulas were

收稿日期: 2018-06-13; 接受日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200301)

联系方式: 任立瑞, E-mail: lrui@126.com. 通信作者尹明明, E-mail: mmyin@ippcaas.cn. 通信作者陈福良, E-mail: flchen@ippcaas.cn

screened according to the technical index of electrochargeable liquid. The effect of the different contents of adjuvants on conductivity of abamectin and dinotefuran electrochargeable liquid was analyzed. At the same time, in order to study the effect of the different contents of adjuvants on the deposition on the front and back of cucumber and tomato leaves, explore the relationship of preparation conductivity and deposition and analyze electrostatic outflank effect. The area of target leaves was measured before pesticide application, and washed repeatedly with acetone after the treatment. The active ingredient on target leaves was determined by high performance liquid chromatography (HPLC) after process of filtration, rotary steaming and dilution to graduation with solvent.

【Result】Six environment-friendly electrochargeable liquid formulas that meet the requirements of quality and technical specifications were screened. The conductivity of the formula was not a weighted mean of the individual component, but rather the final result of the interaction of the components. For the electrochargeable liquid prepared by the active components of pesticides with different polarity, the change of the species and contents of the adjuvant had the same effect trend on the conductivity and deposition. It had almost no effect on the overall conductivity of the preparation when the active ingredient was the non-polar pesticide abamectin, whereas it was significantly increased when the polar pesticide dinotefuran replaced abamectin. The conductivity of preparation was nearly 100 times higher than that of abamectin with the same adjuvant. When the solvent was HDBE, the conductivity was small, the conductivity and deposition of the preparation increased rapidly as the content of cosolvents increasing, and the difference was significant. When the solvent was NCC, because of its high conductivity, the conductivity and deposition of the preparation increased steadily as the content of cosolvent increasing, and the difference of conductivity among different formulas was reduced. When the dimethyl sulfoxide was cosolvent, the conductivity and deposition of electrochargeable liquid prepared with HDBE, NCC as solvent were significantly higher than that of the traditional solvent S200#, in which the conductivity was more than 5 times and the deposition amount was more than 1.5 times higher than that of the traditional solvent S200#. The deposition of electrochargeable liquid on the front and back of cucumber leaves was higher than that of tomato. It was found that the ratio of deposition on the front and back of the leaves was between 1.17 and 2.11. 【Conclusion】The environment-friendly HDBE and NCC can replace S200# as excellent solvents for electrostatic spray. The species and content of adjuvants had a significant effect on the conductivity and deposition of electrochargeable liquid and the deposition can be significantly improved by increasing the conductivity of the preparation. The prepared electrostatic spray had an excellent electrostatic outflank effect.

Key words: electrochargeable liquid; adjuvant; conductivity; deposition; abamectin; dinotefuran

0 引言

【研究意义】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为施药量的 1%—3%^[1],由此带来农药浪费、环境污染等一系列问题。静电喷雾技术是通过利用不同的充电方式使雾滴荷电,并在喷头和靶标之间形成静电场,从而具有“细雾穿透效应、附着增强效应、静电环绕效应”的优点^[2]。与常规喷雾相比,可节省农药 30%—50%^[3-4],防治效果可提高两倍以上^[5],在农药使用上得到广泛应用^[6-7]。当前静电喷雾在国内外已得到较为深入的研究,在静电喷雾作业参数如静电电压、喷雾距离等以及药械研制和静电无人机喷雾等诸多方面取得一定的研究成果^[2,8-12]。影响静电喷雾的主要因素有药液雾化程度、雾滴荷电效果以及雾滴运行、沉积过程等^[13-16],其中影响雾滴荷电效果的因素众多,如电极电压、喷液理化性能、气流速度以及喷头种类等^[8,15,17-18]。其中以充电电压和药

液的理化性能影响最大^[18]。因此对静电喷雾液剂理化性能进行研究,可为静电喷雾技术发展提供科学指导,具有重要的现实意义。【前人研究进展】喷液的理化性能包括黏度、表面张力、电导率以及介电常数等。研究表明,液体表面张力和黏度是影响雾化的主要阻力^[19],通过影响雾滴粒径进而影响荷电量;介电常数是影响电荷弛豫时间的主要因素,对于感应荷电方式而言,药液的介电常数需限制在一定范围内,否则感应荷电将会受到限制^[20]。王军锋等通过研究电导率、黏度、表面张力等介质物性,发现介质的黏度对液滴的荷电能力有明显的抑制作用,而表面张力与液滴荷质比呈正比关系。电导率越大,荷质比随荷电电压的增大增幅越大,但当介质的电导率较小时,荷电电压对液滴荷质比起主导作用^[21]。电导率能够影响雾滴粒径和带电量,对雾滴荷电效果有重要影响^[22];洗福生等^[23]在对雾滴荷电效果研究中发现,随电导率的增大,雾滴荷电逐渐增多,与此同时雾滴粒径逐渐减小,从而荷电效果显著增大,因此雾滴所带的表面电荷更

大; MASKI 等^[24]研究表明, 由于地下水电导率高于地表水, 因此地下水的荷电效果更好; AHMED 等^[25]研究同样表明高电导率液体能有效提高雾滴荷电量。

【本研究切入点】前人研究表明喷液的电导率对雾滴荷电效果有重要影响, 但关于如何提高静电喷雾液剂电导率, 以及电导率与沉积量之间的相关性研究较少。目前, 静电喷雾液剂选取对环境污染较大的重芳烃或二线油等作为溶剂, 农乳 500#为导电剂, 直链中级醇为助溶剂, 药液所产生的带电电荷有限^[26-28], 雾滴带电荷偏小成为制约静电喷雾发展的瓶颈。因此筛选绿色环保助剂, 提高静电喷雾液剂的电导率和沉积量意义重大。【拟解决的关键问题】通过对溶剂和助溶剂的筛选, 获得显著提高静电喷雾液剂电导率的环保型溶剂与助溶剂。在此基础上, 改变助溶剂的质量分数, 研究配方各组分对电导率的影响, 探究电导率与沉积量之间的关系, 改善雾滴荷电效果, 提高静电喷雾沉积量, 为提高农药利用率, 降低生产成本提供科学依据。

1 材料与方法

试验于 2017 年在中国农业科学院植物保护研究所完成。

1.1 药剂、植物材料与仪器

95%阿维菌素原药 (abamectin, 山东潍坊润丰化工股份有限公司); 98%呋虫胺原药 (dinotefuran, 河北兴柏农业科技有限公司)。溶剂: 多元醇混合酯 (HDBE, 乙二醇二醋酸酯: 乙二醇单醋酸酯为 8:2, 广州印田新材料有限公司); 改性氨基乙醇酯 (NCC, 广州印田新材料有限公司); S200# (苏州华伦化工有限公司)。助溶剂: N-甲基吡咯烷酮 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 二甲亚砜 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 异佛尔酮 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。其他溶剂: 丙酮 (分析纯, 北京化工厂); 甲醇 (色谱纯, Fisher scientific); 乙腈 (色谱纯, Fisher scientific)。作物: 黄瓜 (品种中农 37 号, 中蔬种业科技有限公司); 番茄 (品种中杂 9 号, 中国农业科学院蔬菜花卉研究所)。

奥利龙 Star pH 电导率仪 (配 2-Electrode conductivity cell 013016MD 不锈钢电极, Thermo Electron Corporation); DJ-1 型旋转式黏度计 (配 0 号转子, 上海天平仪器厂); 恒温干燥箱 (北京西城区医疗器械二厂); Yaxin-1242 叶面积仪 (北京雅欣理仪科技有限公司); ESS BP2.5 静电喷雾器 (美国

ESS 公司); N-1001 旋转蒸发仪 (EYELA 东京理化公司); Agilent 1200 Infinity 高效液相色谱仪 (安捷伦科技有限公司); AA-200 型万分之一电子天平 (赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司); 隔水式培养箱 (上海一恒科学仪器有限公司); DHJF-4002 型低温搅拌反应浴 (郑州长城科工贸有限公司); 全自动闭口闪点测定仪 (山东傅山同业分析仪器厂); ZB-0 1/8 型空气压缩机 (上海丽涛精细化工有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 静电喷雾液剂的配制 分别配制一系列不同助溶剂质量分数的静电喷雾液剂, 其中农药有效成分质量分数分别为阿维菌素 0.5%, 呋虫胺 3.5%, 助溶剂质量分数为 0、3%、5%、7%、10% 5 个梯度, 最后由溶剂补齐。

1.2.2 静电喷雾液剂的理化性能测定 根据静电喷雾液剂质量技术指标标准, 分别测定各个试样冷热贮稳定性、黏度、挥发率和闪点等技术指标。

1.2.3 电导率的测定 采用奥利龙 Star pH 电导率仪对稳定性合格试样进行电导率测定, 每个试样平行测定 3 次, 取其算术平均值为该试样的电导率。

1.2.4 静电喷雾方法 采用 ESS BP 2.5 静电喷雾器进行喷施, 喷头距靶标的水平距离为 1 m 左右, 垂直距离为 50 cm 左右, 同时将空气压缩机压力调到 60—70 psi, 为静电喷雾器提供稳定气压, 将喷头对准供试植株叶片喷雾 10 s, 每个处理 3 个重复。

1.2.5 叶面积的测定 用 Yaxin-1242 叶面积仪测定作为喷雾靶标的黄瓜和番茄叶片的叶面积, 每个待测叶片叶面积重复测定 3 次取其平均值。

1.2.6 沉积量的测定 分别选取温室内种植 50 d 及 70 d 的黄瓜和番茄叶片作为供试靶标。选取位置相对的两叶片, 测定叶面积。用胶条分别贴在一片叶的正面和另一片叶的背面, 测定药液在靶标正面和背面的沉积量。

待喷雾结束后, 立即摘取叶片, 撕下贴在叶片上的胶条, 并剪碎至 100 mL 烧杯中, 用 30、20 mL 丙酮, 依次浸泡超声提取 15 min, 用脱脂棉过滤提取液至三角瓶中, 并且使用丙酮反复冲洗滤渣 5 次, 将提取液用旋转蒸发仪浓缩至干, 流动相定容, 过 0.45 μm 有机滤膜, 使用高效液相色谱仪测定阿维菌素和呋虫胺的质量分数。

1.2.7 高效液相色谱分析条件 阿维菌素: Waters sunfire-C18 色谱柱 (4.6 mm \times 150 mm, 5 μm), 流动相 V (甲醇) : V (乙腈) : V (水) = 42.5 : 42.5 :

15, 流速 1 mL·min⁻¹, 紫外检测波长 245 nm, 进样体积 5 μL, 柱温 30℃, 保留时间 11 min; 呋虫胺: Waters sunfire-C 18 色谱柱 (4.6 mm×150 mm, 5 μm), 流动相 $V(\text{甲醇}):V(\text{水})=20:80$, 流速 1 mL·min⁻¹, 紫外检测波长 270 nm, 进样体积 5 μL, 柱温 30℃, 保留时间 6 min。

2 结果

2.1 静电喷雾液剂的筛选

配方组成见表 1。试验结果表明以上 6 个配方低温稳定性良好, 热贮分解率均<5% (质量技术指标要求<5%), 闭口闪点在 85℃以上 (质量技术指标要求>40℃), 黏度在 2 mPa·s 以下 (质量技术指标要求≤10 mPa·s), 挥发性<10% (质量技术指标要求<30%)。以上各项均符合静电喷雾液剂质量技术指标要求。

2.2 静电喷雾液剂电导率的测定

2.2.1 有效成分对静电喷雾液剂电导率的影响 由表 2 可以看出, HDBE、NCC 电导率分别为 0.10、0.45 μs·cm⁻¹, 表 3 配方 1—3 中助溶剂添加量为 0 时电导率分别为 0.10、0.11、0.44 μs·cm⁻¹, 说明阿维菌素对制剂整体电导率几乎无影响, 阿维菌素为非极性农药, 非极性组分无法电离出离子, 其理论电导

率为 0; 由表 3 中配方 4—6 可知, 当有效成分为呋虫胺, 溶剂为 HDBE、NCC, 在不加助溶剂条件下, 制剂整体电导率为 10.42、10.41、51.23 μs·cm⁻¹, 其测定值显著高于溶剂的电导率, 呋虫胺为极性农药, 在溶液中可电离出大量离子 (其理论电导率在不同溶剂中分别为 10.32 和 50.78 μs·cm⁻¹), 呋虫胺的加入显著提高了制剂整体的电导率。表 3 中呋虫胺静电喷雾液剂的电导率都明显高于阿维菌素。呋虫胺在制剂中的质量分数比阿维菌素高 7 倍, 但电导率高出近百倍。

2.2.2 助溶剂和溶剂对静电喷雾液剂电导率的影响 由表 2 可知, 除有效成分对制剂电导率影响之外, 由于 3 种助溶剂均有一定的电导率, 因此各配方电导率均随助溶剂含量的增加而增大, 差异显著。对比表 3 中配方 1 与 2、配方 4 与 5, 当以 HDBE 为溶剂时, 随着助溶剂的增加, 药液的电导率均能得到较为显著的增加。因此在实际生产应用中, 当溶剂电导率较小时, 可增加助溶剂用量来提高制剂电导率。

对比表 3 中配方 1 与 3、配方 4 与 6 可知, 以助溶剂二甲亚砜配制的静电喷雾液剂, 当溶剂为 HDBE 时, 5 个浓度梯度的电导率差异显著, 当溶剂为 NCC 时, 电导率测定结果之间的差异减小。

表 1 静电喷雾液剂配方组成成分

Table 1 The formulation of electrochargeable liquid

配方 Formula	有效成分 Active ingredient	助溶剂 Cosolvent	溶剂 Solvent
1	阿维菌素 Abamectin	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	多元醇混合酯 HDBE
2	阿维菌素 Abamectin	异佛尔酮 Isophorone	多元醇混合酯 HDBE
3	阿维菌素 Abamectin	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	改性氨基乙醇酯 NCC
4	呋虫胺 Dinotefuran	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	多元醇混合酯 HDBE
5	呋虫胺 Dinotefuran	N-甲基吡咯烷酮 N-Methyl pyrrolidone	多元醇混合酯 HDBE
6	呋虫胺 Dinotefuran	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	改性氨基乙醇酯 NCC
CK1	阿维菌素 Abamectin	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	S200#
CK2	呋虫胺 Dinotefuran	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	S200#

所配静电喷雾液剂中有效成分质量分数分别为阿维菌素 0.5%、呋虫胺 3.5%

The mass fraction of active ingredient in the electrochargeable liquid is 0.5% (W/W) abamectin and 3.5% (W/W) dinotefuran, respectively

表 2 溶剂、助溶剂电导率测定

Table 2 The conductivity parameters of solvents and cosolvents

电导率 Conductivity (μs·cm ⁻¹)					
HDBE	NCC	S200#	二甲亚砜 Dimethyl sulfoxide	N-甲基吡咯烷酮 N-Methyl pyrrolidone	异佛尔酮 Isophorone
0.10±0.002	0.45±0.005	0	1.23±0.012	1.22±0.07	0.25±0.004

表 3 静电喷雾液剂电导率测定

Table 3 The conductivity parameters of electrochargeable liquid

助溶剂质量分数 Mass fraction of cosolvent (%)	电导率 Conductivity ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)							
	阿维菌素 Abamectin				呋虫胺 Dinotefuran			
	配方 1	配方 2	配方 3	CK1	配方 4	配方 5	配方 6	CK2
	Formula 1	Formula 2	Formula 3		Formula 4	Formula 5	Formula 6	
0	0.10±0.003e	0.11±0.002e	0.44±0.006c	0b	10.42±0.011e	10.41±0.014e	51.23±0.311b	—
3	0.23±0.011d	0.12±0.003d	0.50±0.008b	0b	14.23±0.062d	12.66±0.261d	59.03±0.732a	—
5	0.36 ±0.018c	0.13±0.004c	0.48±0.011b	0b	16.69±0.232c	14.58±0.224c	52.20±0.948ab	—
7	0.48±0.004b	0.15±0.005b	0.51±0.015b	0b	20.37±0.017b	19.80±0.013b	55.80±0.154ab	—
10	0.66±0.011a	0.16±0.002a	0.55±0.017a	0.10±0.010a	22.33±0.118a	20.27±0.219a	54.30±0.068ab	4.20±0.122

表中同列不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。“—”表示有效成分不溶于所配溶液
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan’s new multiple range test. The same as below. “—” represents that the active ingredient is insoluble in the solution

对比表 3 中配方 1、3 与 CK1；配方 4、6 与 CK2，当助溶剂二甲亚砷含量为 10%时，以 HDBE 为溶剂配制的两种静电喷雾液剂电导率分别高出 S200# 6.60、5.50 倍；以 NCC 为溶剂高出 S200# 5.32、12.93 倍。
2.2.3 制剂各组分之间相互作用对电导率的影响
由表 2、表 3 可知，按理论计算阿维菌素在 HDBE、NCC 中电导率为 0，呋虫胺在 HDBE 和 NCC 中电导率分别为 10.32、50.78 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，由此计算各个配方加

权平均的理论电导率，见表 4。对比表 3、表 4 可知，各配方加权平均数理论电导率与实测电导率有较大差距，说明制剂整体电导率并非各个组分电导率的加权平均数，而是由各组分相互作用的结果。配方 1、2 的理论值远低于实测值，配方 3 加权平均的理论电导率与实测值接近。对于呋虫胺静电喷雾液剂分析发现，配方 4、5 理论值与实测值差距较大，而配方 6 几乎无差异。

表 4 加权平均的理论电导率

Table 4 Weighted mean of theoretical conductivity

助溶剂质量分数 Mass fraction of cosolvent (%)	理论电导率 Theoretical conductivity ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)					
	阿维菌素 Abamectin			呋虫胺 Dinotefuran		
	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4	配方 5	配方 6
	Formula 1	Formula 2	Formula 3	Formula 4	Formula 5	Formula 6
0	0.10	0.10	0.45	10.42	10.42	51.21
3	0.13	0.11	0.47	10.45	10.45	51.24
5	0.16	0.12	0.49	10.47	10.47	51.25
7	0.18	0.12	0.50	10.50	10.49	51.27
10	0.21	0.12	0.53	10.53	10.52	51.29

2.3 静电喷雾液剂沉积量的测定及静电包抄效应的评价

2.3.1 溶剂和助溶剂对静电喷雾液剂在蔬菜叶片正面沉积量的影响
对比表 5 中配方 1 与 3、配方 4 与 6，以二甲亚砷为助溶剂时，当溶剂为 HDBE 时，黄瓜和番茄叶片正面的沉积量与助溶剂质量分数呈显著正相关，且沉积量增幅较大；当溶剂为 NCC 时，沉积量随助溶剂质量分数的提高也表现出递增趋势，但增幅较小。另外，分别对比配方 1 与 2、配方 4 与 5 可知，

以溶剂 HDBE 配制的静电喷雾液剂，沉积量随助溶剂质量分数的提高增幅较大，助溶剂质量分数对沉积量影响差异显著。

表中配方 3 比配方 1、2；配方 6 比配方 4、5 的沉积量高，这表明采用高电导率的 NCC 作为溶剂能够明显提高静电喷雾液剂在靶标上的沉积量。

分别对比配方 1、3 与 CK1，加入 0、10%二甲亚砷条件下，当溶剂为 HDBE 时，所配制的阿维菌素静电喷雾液剂在黄瓜叶片正面沉积量均高出

S200# 1.80 倍。当溶剂为 NCC 时, 高出 S200# 5.76、1.53 倍; 加入 10%二甲亚砜配制的呋虫胺静电喷雾液剂, 当溶剂分别为 HDBE、NCC 时配制的呋虫胺静电喷雾液剂高出 S200# 1.53、1.91 倍。此外, 不同配方在黄瓜叶片正、背面的沉积量均高于番茄匀(表 5)。

表 5 靶标正面沉积量
Table 5 The deposition on the front of the target

靶标 Target	助溶剂质量分数 Mass fraction of cosolvent (%)	沉积量 Deposition ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)							
		阿维菌素 Abamectin				呋虫胺 Dinotefuran			
		配方 1 Formula 1	配方 2 Formula 2	配方 3 Formula 3	CK1	配方 4 Formula 4	配方 5 Formula 5	配方 6 Formula 6	CK2
黄瓜 Cucumber	0	2.12±0.11c	2.12±0.23c	6.80±0.10b	1.18±0.13	13.40±1.22c	13.40±1.24c	32.90±2.44ab	—
	3	2.83±0.32c	2.74±0.11bc	7.26±0.52ab	—	20.48±0.41bc	17.01±0.83bc	30.10±0.36b	—
	5	5.04±0.20bc	3.18±0.09bc	7.52±0.21ab	—	23.40±2.16b	20.86±4.52abc	39.15±3.56a	—
	7	7.51±0.41ab	3.46±0.40b	7.93±0.60a	—	26.41±1.03b	26.21±1.24ab	33.00±1.10ab	—
	10	8.76±0.33a	4.97±0.36a	7.43±0.30ab	4.86±0.31	31.58±0.67a	30.54±3.15a	39.35±1.66a	20.64±0.97
番茄 Tomato	0	1.77±0.31b	1.13±0.26c	6.30±0.34c	—	8.33±0.43c	8.33±0.43b	30.01±0.31c	—
	3	2.65±0.22b	1.71±0.32c	6.76±0.65b	—	15.28±1.64bc	11.01±1.38b	31.46±0.69b	—
	5	3.03±0.05b	2.78±0.48b	6.97±0.21a	—	16.12±0.60b	12.05±2.01b	33.54±0.47a	—
	7	5.27±0.03a	3.88±0.22a	6.81±0.55a	—	20.25±1.28ab	22.45±1.40a	34.43±0.77a	—
	10	5.86±0.11a	4.16±0.60a	6.46±0.30bc	—	24.77±1.09a	23.79±1.60a	34.45±1.21a	—

2.3.2 静电包抄效应的评价 通过计算静电喷雾液剂在靶标正、背面叶片上沉积量的比值来评价静电包抄效应, 结果见表 6。静电喷雾液剂在靶标正、背面上沉积量比值在 1.17—2.11, 表明药液能在黄瓜和番茄叶片背面达到有效的沉积, 具有较强的静电包抄效应, 从而可以显著提高在叶背面取食的害虫的

防治效果。对于所配制的阿维菌素和呋虫胺静电喷雾液剂, 静电包抄效应随助溶剂用量的增加增长趋势不明显, 差异不显著。

2.4 静电喷雾液剂电导率与沉积量相关性

2.4.1 两种有效成分的静电喷雾液剂电导率与在黄瓜叶片正面沉积量关系 制剂电导率和沉积量均随助

表 6 靶标正面和背面沉积量之比
Table 6 The ratio of deposition on the front and back of the target

靶标 Target	助溶剂质量分数 Mass fraction of cosolvent (%)	配方 1 Formula 1	配方 2 Formula 2	配方 3 Formula 3	配方 4 Formula 4	配方 5 Formula 5	配方 6 Formula 6
黄瓜 Cucumber	0	1.17b	1.27b	2.11a	1.48a	1.48a	1.81a
	3	1.35a	1.36a	1.56b	1.50a	1.28b	1.62b
	5	1.29a	1.33a	1.49b	1.41a	1.42a	1.65b
	7	1.30a	1.22b	1.70b	1.30a	1.39a	1.69b
	10	1.21a	1.21b	1.67b	1.46a	1.40a	1.63b
番茄 Tomato	0	1.69a	1.49ab	1.63ab	1.88ab	1.88a	1.67a
	3	1.64ab	1.51ab	1.65ab	2.01a	1.85a	1.66a
	5	1.63ab	1.54a	1.79a	1.76ab	1.67ab	1.64a
	7	1.56b	1.42ab	1.67ab	1.84ab	1.61ab	1.59a
	10	1.54b	1.39b	1.56b	1.65b	1.52b	1.41a

溶剂用量的增加而增加,且表现出相同的变化趋势,即溶剂和助溶剂对制剂电导率与沉积量的影响趋势一致。当溶剂为 HDBE 时(图 1-A、1-B、1-D、1-E),随着助溶剂用量的增加,制剂电导率和沉积量增幅明显,差异显著。当溶剂为 NCC 时(图 1-C、1-F),制剂电导率增幅减小,沉积量测定结果之间的差异减小。

对比图 1 中 A—C 与 D—F 可知,呋虫胺静电喷

雾液剂与阿维菌素电导率与沉积量在不同配方中的变化趋势一致。由此说明助剂种类和用量的改变对于极性不同的农药有效成分配制的静电喷雾液剂影响结果相同。

2.4.2 两种有效成分的静电喷雾液剂电导率与在番茄叶片正面沉积量关系 由图 2 分析可知,不同配方的电导率和沉积量在番茄叶片上的变化规律与黄瓜完全一致。

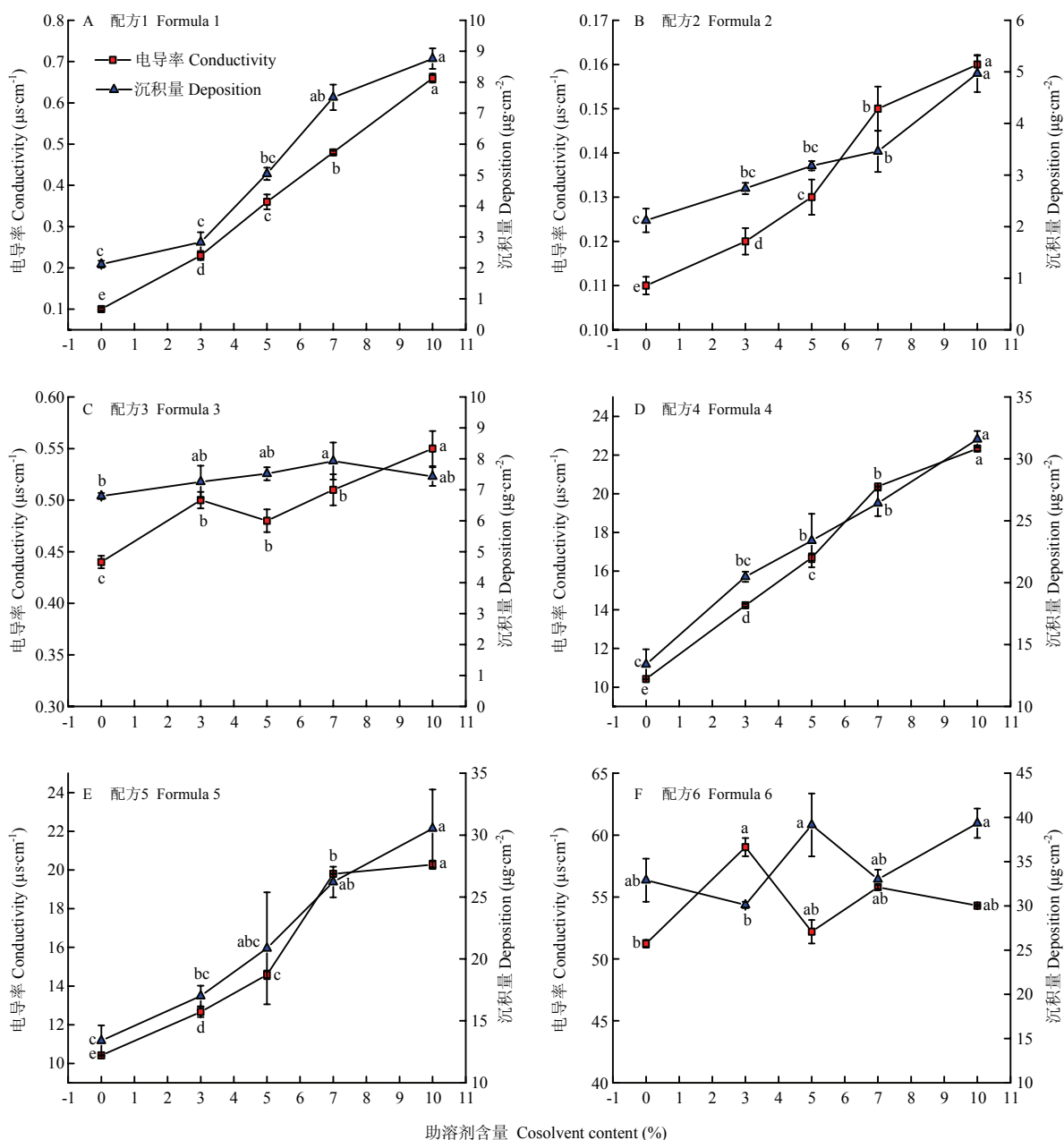


图 1 制剂电导率与在黄瓜叶片正面沉积量的关系

Fig. 1 The relationship between conductivity of preparation and deposition on the front of cucumber leaves

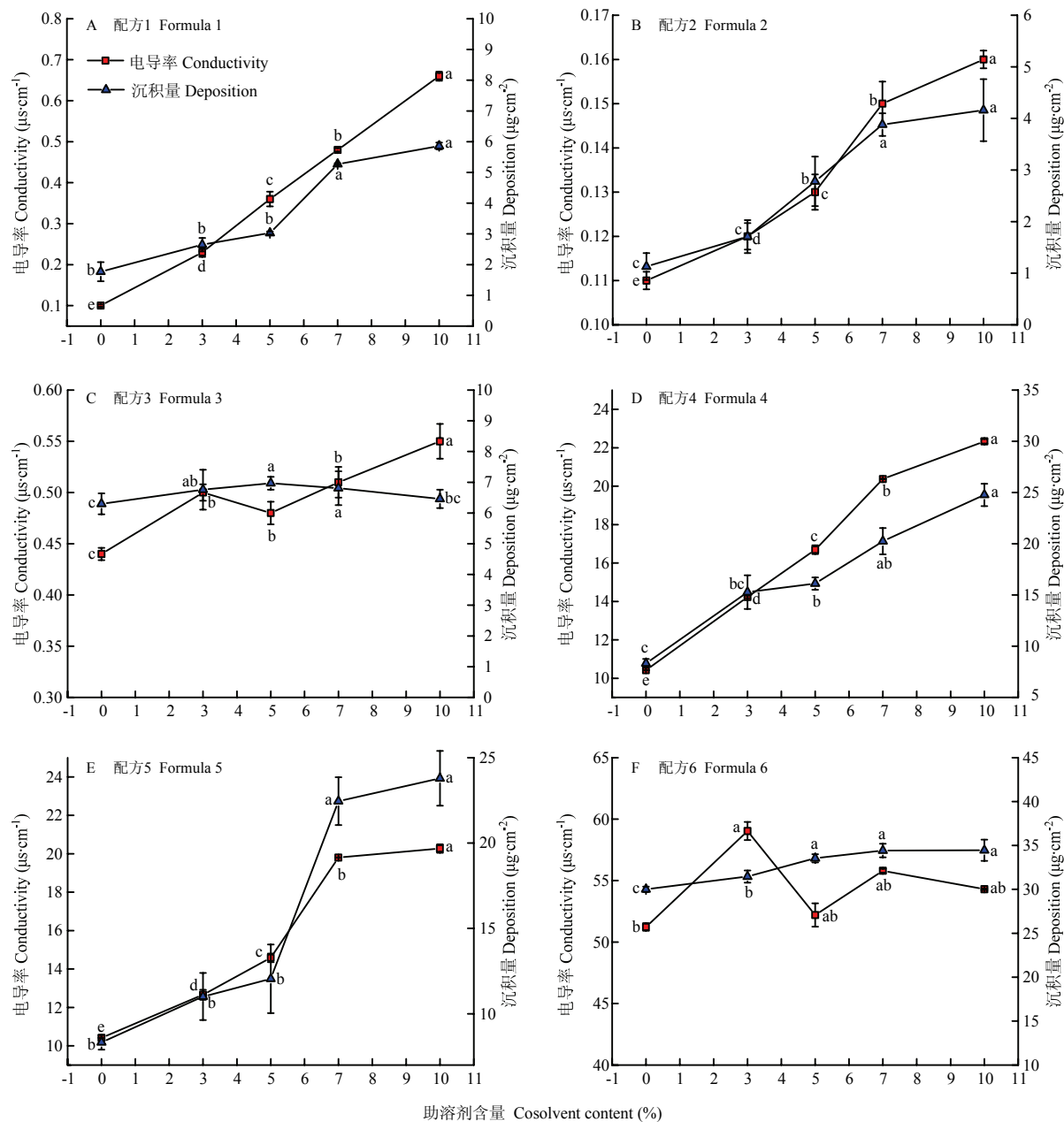


图2 制剂电导率与在番茄叶片正面沉积量的关系

Fig. 2 The relationship between conductivity of preparation and deposition on the front of tomato leaves

3 讨论

以极性大的呋虫胺为农药有效成分时，制剂电导率要远高于非极性农药阿维菌素，分析原因可知，电导率是指物质的导电能力，是衡量溶液携带电流能力的度量值，该能力与粒子类型和浓度有关^[29]。呋虫胺在制剂中能够解离出大量离子，在测定电导率时，传输电流能力较强，而阿维菌素在制剂中解离出的离子

有限，传输电流较弱，因此呋虫胺静电喷雾液剂电导率远高于阿维菌素。根据电导率实际测定结果与其加权平均电导率相比可知，阿维菌素本身不导电，助溶剂的加入起到了溶剂化作用从而表现出制剂电导率随助溶剂含量增加而增大，这与兰媛等^[30]研究表明DMSO对离子液体产生溶剂化作用导致溶液电导率增大的结论相同。而溶剂NCC本身电离程度大，远高于助溶剂的溶剂化作用，对制剂电导率起主要作用。

呋虫胺在不同溶剂中电离程度不同,在极性较弱的 HDBE 中电离程度较小,但随着极性助溶剂的增加,增强了呋虫胺在溶液中的电离程度,其程度远高于助溶剂的溶剂化作用,对制剂电导率起主要作用。而在极性较强的 NCC 中呋虫胺电离程度大幅增加,对制剂电导率起主要作用。POLAT 等^[31]研究证明,在雾滴中添加离子型表面活性剂能更好地促进雾滴荷电,周璐等^[20]提出通过加入表面活性剂来增加载电荷的个数,或者加入 5%—10% 的水使喷雾形成连续的导体通路以此提高油基溶剂的导电率,增加雾滴荷电量,这与本试验结果一致。

通过对溶剂的筛选,发现采用高电导率的 NCC 能够明显提高静电喷雾液剂的沉积量。根据感应充电原理,喷雾的电导率是影响雾滴荷电的主要原因^[20],而雾滴荷电效果又是影响沉积量的重要因素^[32]。因此制剂电导率对沉积量具有重要影响。在静电喷雾液剂制备过程中,尽量选择电导率较高的有机溶剂,在保证制剂理化性能合格的条件下,不加或者少加极性助溶剂即可获得较高的沉积量。而当所使用的溶剂电导率较小时,需要考虑提高极性助溶剂用量以期获得较高的沉积量。刘勇良^[5]研究表明,喷雾电导率对沉积量的影响不显著。这是因为喷雾性质不同,刘勇良采用的是非极性溶剂 S200#,本试验采用电导率较高的有机溶剂,电导率变化范围差异大。同时试验荷电方式不同,刘勇良采用的是接触式,而本研究采用感应式,不同荷电方式对沉积效果的影响不同^[33]。

以 HDBE 和 NCC 作为溶剂配制的静电喷雾液剂电导率及沉积量均高出 S200# 数倍,表明采用环保、极性较强的溶剂代替非极性的 S200#,不仅能减少环境污染,而且能够显著提高静电喷雾对靶沉积量。

本研究表明,静电喷雾液剂在黄瓜叶片正、背面的沉积量均高于番茄,这可能与叶片表面结构有关。有研究表明黄瓜叶片呈椭圆形,表面分布稀疏绒毛,表皮细胞大小不等,排列紧密,呈无规则形。番茄叶片呈卵形或长圆形,绒毛密度高,表皮细胞呈椭圆形,垛叠整齐^[18]。两种植物叶片形状和表面结构特征可能是造成沉积量差异的重要原因,有待进一步的试验探究。通过对比靶标正、背叶片沉积量的比值发现,所配制的静电喷雾液剂都具有较好的静电包抄效应。但其随助溶剂质量分数的增加增幅较小,差异不显著。原因可能是在感应荷电条件下,试验所制备的静电喷雾液剂电导率变化范围较小,对静电包抄效应影响不

显著,因此对于影响静电包抄效应的制剂电导率变化范围的研究有待深入。

4 结论

通过对助剂的筛选获得 6 个理化性能合格的静电喷雾液剂配方。助剂种类和用量对静电喷雾液剂的电导率和沉积量影响较大,在实践生产中可以通过对电导率的测定,预测对靶标上沉积量的影响,对研制更加经济有效的静电喷雾液剂具有一定的指导意义。采用绿色环保的高沸点溶剂代替重芳烃或二线油等对环境污染较大的溶剂,有利于实现可持续发展。

References

- [1] 韩树明. 静电喷雾技术在植保领域的应用. 农机化研究, 2011, 33(12): 249-252.
HAN S M. Application of electrostatic spray technology in the field of plant protection. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(12): 249-252. (in Chinese)
- [2] MASKI D, DURAIRAJ D. Effects of charging voltage, application speed, target height, and orientation upon charged spray deposition on leaf abaxial and adaxial surfaces. *Crop Protection*, 2010, 29: 134-141.
- [3] 徐清华, 王正艳. 静电喷雾器的技术特点及使用注意事项. 农业装备技术, 2012, 38(5): 38.
XU Q H, WANG Z Y. The technical characteristics and precautions of electrostatic sprayer. *Agricultural Equipment and Technology*, 2012, 38(5): 38. (in Chinese)
- [4] 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.
GUO H Z. Research on atomization effect of electrostatic spray variable control system[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)
- [5] 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.
LIU Y L. The development of picloram 100ED and the effect of adjuvant on deposition in target[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)
- [6] KACPRZYK R, ZYLKA P. Electrification of aerosol particles in supersonic atomizers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(5): 1353-1360.
- [7] PATEL M K, GHANSHYAM C, KAPUR P. Characterization of electrode material for electrostatic spray charging: Theoretical and engineering practices. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(1): 55-60.

- [8] 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. *高电压技术*, 2017, 43(2): 514-519.
- WANG J F, ZHANG S C, ZUO Z W. Experimental study of influence rules on spray charged characteristics in the induction charging process. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(2): 514-519. (in Chinese)
- [9] 徐晓军, 吴春笃, 杨超珍. 荷质比对荷电雾滴沉积分布影响的初步研究. *农机化研究*, 2011, 33(11): 138-142.
- XU X J, WU C D, YANG C Z. Effect of charge-to-mass ratio of droplets on deposition distribution of droplets. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(11): 138-142. (in Chinese)
- [10] 陈志刚, 冷超, 杜彦生, 贾卫东, 吴春笃. 影响雾滴靶标沉积效果的三种因素实验分析. *中国农机化学报*, 2015, 36(3): 127-131.
- CHEN Z G, LENG C, DU Y S, JIA W D, WU C D. Experimental analysis of three factors influencing the effect of droplet target deposition. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2015, 36(3): 127-131. (in Chinese)
- [11] PATEL M K, PRAVEENB, SAHOO H K, PATEL B, KUMAR A, SINGH M, NAYAK M K, RAZAN P. An advance air-induced air-assisted electrostatic nozzle with enhanced performance. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 135(C): 280-288.
- [12] 蔡彦伦, 邱白晶, 沈伟. 无人机低空静电喷雾效果研究. *农机化研究*, 2018, 40(8): 188-192.
- CAI Y L, QIU B J, SHEN W. Research on low altitude electrostatic spray of UAV. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(8): 188-192. (in Chinese)
- [13] LARYEA G N, NO S Y. Development of electrostatic pressure-swirl nozzle for agricultural applications. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57: 129-142.
- [14] 刘玉洲, 高雄, 王安亭, 张兴华. 农药静电喷雾及雾滴沉降分布研究方法和评析. *农机化研究*, 2011, 33(4): 28-32.
- LIU Y Z, GAO X, WANG A T, ZHANG X H. Research method and assessment based on electrostatic pesticide spraying and distribution of droplet deposition. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011, 33(4): 28-32. (in Chinese)
- [15] GAN-MOR S, RONEN B, OHALIAV K. The effect of air velocity and proximity on the charging of sprays from conventional hydraulic nozzles. *Biosystems Engineering*, 2014, 121(5): 200-208.
- [16] 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]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- GU W Y. Research on flow characteristic and deposition performance based on contacted charge[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [17] 代亚猛, 周艳, 贾首星, 沈从举. 3 种孔径的静电喷头喷雾性能比较. *江苏农业科学*, 2013, 41(9): 358-360.
- DAI Y M, ZHOU Y, JIA S X, SHEN C J. Comparison of spray performance of three apertures of electrostatic sprays. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(9): 358-360. (in Chinese)
- [18] 朱和平, 洗福生, 高良润. 静电喷雾技术的理论与应用研究综述. *农业机械学报*, 1989(2): 53-59.
- ZHU H P, XIAN F S, GAO L R. Summary of research on electrostatic spraying technology and its application. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1989(2): 53-59. (in Chinese)
- [19] 王晓英. 荷电液体雾化的研究与应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- WANG X Y. The research and application of charged atomization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- [20] 周璐, 周继中, 杜凤沛. 喷液的性质对静电喷雾的影响//植保机械与施药技术国际研讨会, 2008: 115-118.
- ZHOU L, ZHOU J Z, DU F P. The effect of spray properties on electrostatic spray//*International Conference on Plant Protection Machinery and Application Technology*, 2008: 115-118. (in Chinese)
- [21] 王军锋, 王泽, 霍元平, 毛文龙, 张娟娟. 荷电压、介质物性对静电雾化特征的影响. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 469-472.
- WANG J F, WANG Z, HUO Y P, MAO W L, ZHANG J J. Effects of liquid properties on electrostatic spray characteristics. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 469-472. (in Chinese)
- [22] 高良润, 洗福生. 静电喷雾理论及其测试技术的研究. *江苏大学学报 (自然科学版)*, 1986, 7(2): 1-13.
- GAO L R, XIAN F S. Electrostatic spraying theory and testing technique. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 1986, 7(2): 1-13. (in Chinese)
- [23] 洗福生, 吴春笃. 雾化过程中的静电作用及喷液物理特性影响的研究. *农业机械学报*, 1987(1): 60-68.
- XIAN F S, WU C D. The effects of static electricity and physical properties of liquid on spray atomization. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1987(1): 60-68. (in Chinese)
- [24] 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. *Journal of Electrostatics*, 2010, 68(2): 152-158.
- [25] AHMED A, SOBAN T, OHYAMA R I. Experimental studies on influence of different conductivities on water mist charging with electrostatic induction//*IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2014: 558-561.
- [26] 陈福良, 李卫国, 尹明明, 李耀秀, 卢镇. 啮虫脒静电油剂及其制

- 备方法: CN 101578993A[P]. (2009-11-18) [2018-06-13].
- CHEN F L, LI W G, YIN M M, LI Y X, LU Z. Acetamidrid electrochargeable liquid and preparation method: CN 101578993A[P]. (2009-11-18) [2018-06-13]. (in Chinese)
- [27] 陈福良, 李卫国, 尹明明, 李耀秀. 阿维菌素与毒死蜱二元组合物静电油剂及其制备方法: CN 101578979A[P]. (2009-11-18) [2018-06-13].
- CHEN F L, LI W G, YIN M M, LI Y X. Abamectin and chlorpyrifos composition electrochargeable liquid and preparation method: CN 101578979A[P]. (2009-11-18) [2018-06-13]. (in Chinese)
- [28] 陈福良, 李耀秀, 尹明明, 卢镇, 陈利标. 戊唑醇静电油剂及其制备方法: CN 101897331A[P]. (2010-12-01) [2018-06-13].
- CHEN F L, LI Y X, YIN M M, LU Z, CHEN L B. Tebuconazole electrochargeable liquid and preparation method: CN 101897331A[P]. (2010-12-01) [2018-06-13]. (in Chinese)
- [29] 周光益, 田大伦, 邱治军, 王旭, 杨松, 刘敏. 广州市流溪河降水离子浓度与电导率关系. 生态科学, 2009, 28(5): 465-470.
- ZHOU G Y, TIAN D L, QIU Z J, WANG X, YANG S, LIU M. Relationships between electrical conductivity and main ions' concentration in rainwater at Liuxihe, Guangzhou. *Ecological Science*, 2009, 28(5): 465-470. (in Chinese)
- [30] 兰媛, 李欣达, 张玥, 何小云, 唐静文, 滕翠青, 余木火. DMSO 对纤维素在咪唑型离子液体中溶解性能的影响. 材料科学与工程学报, 2015, 33(1): 93-97.
- LAN Y, LI X D, ZHANG Y, HE X Y, TANG J W, TENG C Q, YU M H. Effect of DMSO addition on dissolution of cellulose in ionic liquid. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2015, 33(1): 93-97. (in Chinese)
- [31] POLAT M, POLAT H, CHANDER S, HOGG R. Characterization of airborne particles and droplets: Relation to amount of airborne dust and dust collection efficiency. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2015, 19(1): 38-46.
- [32] SHENG W, MA S, LI W, LIU Z, GUO X, JIA X. A facile route to fabricate a biodegradable hydrogel for controlled pesticide release. *RSC Advances*, 2015, 5(18): 13867-13870.
- [33] 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.
- ZHANG L L. Theoretical analysis and applied research on electrostatic spraying technology[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2011. (in Chinese)

(责任编辑 岳梅)