

基于 PWM 变量喷雾的单喷头动态雾量分布均匀性实验

蒋焕煜 张利君 刘光远 施玮因

(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为研究 PWM 变量喷雾系统的动态雾量分布均匀性特点,以胭脂红溶液为喷雾试剂,在输送带上放置矩阵式集雾穴盘收集雾滴,采用浓度-吸光度法测量雾量沉积浓度,对单个喷头分别测试了不同 PWM 频率、PWM 占空比和喷雾压力对总体区域、喷雾前进方向和喷杆方向上雾量分布均匀性的影响。研究发现,相较于喷杆方向,PWM 频率对单喷头在喷雾前进方向上的雾量分布均匀性影响更大,某一速度条件下 PWM 频率的最小值应至少保证喷雾的连续性,且无需过大,从而保证电磁阀的使用寿命;当 PWM 占空比增大到一定值使喷雾流量基本稳定时,PWM 占空比的继续增大可同时提高单喷头在喷雾前进方向和喷杆方向上的雾量分布均匀性,而在 PWM 占空比增大到该定值之前,仅对喷雾前进方向上的雾量分布有明显影响;在雾化效果较好的前提下,喷雾压力对单喷头在喷雾前进方向和喷杆方向上的雾量分布均匀性均有较大影响,且影响效果相反,主要因为随着喷雾压力的增大,雾量更多地向喷杆方向上的两侧和喷雾前进方向上的中间聚集。

关键词: 植保机械; 变量喷雾; 脉宽调制; 雾量分布均匀性

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)04-0041-06

Experiment on Dynamic Spray Deposition Uniformity for PWM Variable Spray of Single Nozzle

JIANG Huanyu ZHANG Lijun LIU Guangyuan SHI Weinan

(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The spray deposition uniformity is an important measure index to evaluate spray quality. Through improving the spray deposition uniformity, the pesticides can be saved under the premise of high pesticide effect. Aiming at studying the uniformity characteristics of dynamic spray deposition for PWM variable spray system, the carmine solution was used as spray reagent and matrix tray with holes was put on the conveyor to collect droplets, and then the spray deposition concentrations of each hole were calculated by the method of concentration - absorbance measurement. The impacts of spray pressure, frequency and duty cycle of PWM signal on spray deposition uniformity for single nozzle were tested from three aspects of whole area, forward moving and spray bar direction. The research results suggested that for single nozzle, the frequency of PWM signal had bigger impact on spray deposition uniformity in forward moving direction than that in spray bar direction and there was no need to set too large value of frequency unless it was required to guarantee the continuity of spray. Moreover, before the duty cycle of PWM signal reached a certain value that the flow rate of spray became stable, the duty cycle only influenced the spray deposition uniformity in forward moving direction significantly for single nozzle, and when the duty cycle was bigger than the value, it can influence the spray deposition uniformity in both the forward moving and spray bar directions for single nozzle. The results also indicated that the spray pressure had opposite effect on spray deposition uniformity in forward moving and spray bar directions for single nozzle. These results could provide references for setting operating parameters of spray work and studying the uniformity characteristics of dynamic spray deposition for multi nozzles.

Key words: plant protection machinery; variable spray; pulse width modulation; spray deposition uniformity

收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-09-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA10A504)、农业部引进国际先进农业科学技术项目(2011-G32)和浙江省“新世纪151人才工程”项目

作者简介: 蒋焕煜(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事农业自动化装备研究,E-mail: hyjiang@zju.edu.cn

引言

雾量分布均匀性是衡量植保喷雾质量的重要指标,在喷雾过程中,病虫害的具体分布无法被准确预测,所以最保险的方式就是均匀喷雾,使药液尽可能全面覆盖^[1-3]。同时,只有提高了喷雾的分布均匀性,才能在保证药效的前提下,节省药量,提高农药有效利用率^[4-5]。脉宽调制式(PWM)控制技术是当前变量喷施领域的发展方向以及研究热点^[6-7],其调节流量的原理为:通过控制电磁阀的开闭,调节喷头在一个周期内开合的时间比来调节流量。相对于常见的变压式变量喷雾技术而言,PWM变量喷雾技术有着更好的流量调节特性和动态响应特性^[8],但由于PWM变量喷雾系统间歇式的喷雾特点,其雾量分布均匀性难以控制。目前国内外学者在静态喷雾条件下,对各种喷雾机的喷雾分布特性已经进行了大量的研究^[4,9-12]。但这些静态喷雾实验均是在喷头与靶标无相对运动的条件下,对恒量喷雾进行测量,且实际上研究的是垂直于喷雾前进方向上的喷雾分布均匀性,所得结论片面。在真正农田作业过程中,喷头相对作物是运动的且需要根据病虫害情况做到变量喷施。当前,针对PWM变量喷施系统,尤其是在动态喷雾条件下喷雾特性的研究报道较少。TIAN等^[13]以PWM变量喷头为研究对象,在不同控制信号条件下,建立了模拟动态喷雾雾量分布的模型,但是未对建立的模型进行有效验证。LEBEAU^[14]建立了动态喷雾沉积特性试验台,分析了PWM变量喷头的水平运动对雾量分布的影响。LARDOUX等^[15-16]在动态条件下研究了喷杆高度、喷杆速度和喷头类型等喷杆参数对喷雾分布特性的影响。魏新华等^[17]采用矩阵式雾量收集装置对PWM变量喷头的静态雾量分布进行了测试。蒋焕煜等^[18]进行了基于水敏试纸的动态喷雾分布均匀性实验,分析了不同控制信号对动态喷雾分布均匀性的影响,但使用水敏试纸只能表征雾滴的分布面积等雾滴的二维特征,而不能评价实际喷洒出的单位面积上的雾滴质量,即雾量沉积浓度。而邱白晶等^[19]以胭脂红溶液为药液,针对大田环境下无人直升机的喷雾沉积分布特性,采用沉积浓度的概念对雾滴沉积浓度的分布均匀性进行了评价。

为在动态条件下针对变量喷雾的雾量分布均匀性进行充分研究,需从总体区域、喷雾前进方向和喷杆方向上分别进行讨论。本文借鉴邱白晶等^[19]和魏新华等^[17]的研究方法,采用矩阵式集雾穴盘收集雾滴,使用胭脂红溶液浓度-吸光度法测量收集的雾

量浓度,在搭建的一套动态PWM变量喷雾实验平台上,研究PWM频率、PWM占空比和喷雾压力等作业参数对单喷头动态雾量分布均匀性的影响,以为实际作业中选择PWM变量喷雾作业参数和多喷头喷雾特性深入研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 动态PWM变量喷雾实验平台

动态PWM变量喷雾实验平台示意图如图1所示。实验平台主要由计算机、喷雾控制器、电磁阀(Q22XD-1.2L型,余姚博普阀业有限公司)、扇形喷头(H1/4VV-80015型,美国喷雾系统公司)、供压稳压部分和调速输送带组成。其中计算机产生脉宽调制信号并控制信号脉宽及频率,经以单片机STM32F407为中央处理器的喷雾控制器传输信号驱动电磁阀的关闭;供压稳压部分由安全阀、球阀、压力罐、单向阀、压力表、气泵和直流电动机组成,喷雾试剂通过球阀注入压力罐内,直流电动机驱动气泵为压力罐供给一定喷雾压力,压力可通过压力表读出;调速输送机由输送带、伺服电动机和变频器组成,通过变频器控制伺服电动机驱动输送带实现变速操作。

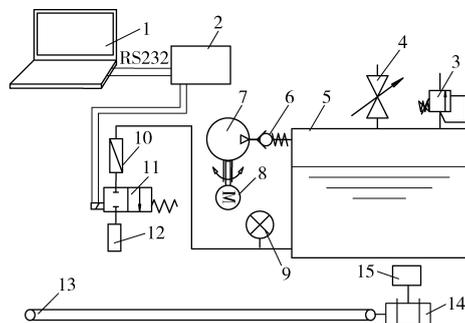


图1 动态PWM变量喷雾实验平台

Fig. 1 Dynamic experiment platform of PWM variable spray

1. 计算机 2. 喷雾控制器 3. 安全阀 4. 球阀 5. 压力罐 6. 单向阀 7. 气泵 8. 直流电动机 9. 压力表 10. 过滤器 11. 电磁阀 12. 扇形喷头 13. 输送带 14. 伺服电动机 15. 变频器

1.2 雾滴收集装置

雾滴收集装置采用矩阵式集雾穴盘,尺寸为15 mm×320 mm×480 mm,集雾穴盘上有384(16×24)个紧密均匀排列的穴孔,每个孔的容积为3 mL,直径为2 cm。实验时,将集雾穴盘放置在输送带上,随着输送带的前进,喷头在一段时间内喷出的雾滴落入穴孔中,如图2所示。

1.3 胭脂红溶液浓度-吸光度法

喷雾试剂采用胭脂红水溶液,胭脂红为易溶于水的人工合成色素。测量集雾穴盘中收集的雾量质量浓度的方法为胭脂红溶液浓度-吸光度法。

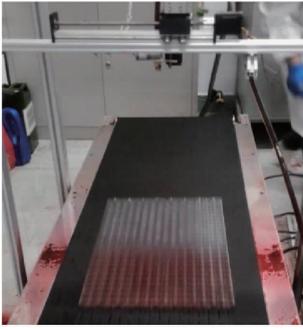


图 2 集雾穴盘工作过程

Fig. 2 Working process of droplets collection tray

1.3.1 胭脂红溶液的配制

根据朗伯-比尔定律^[20],吸光度与样品浓度成正比,样品浓度过低或过高,都会使测得的吸光度超出合适的范围。实验所采用的吸光度测量设备为多功能酶标仪(SpectraMax M5 型,美国分子仪器有限公司),其吸光度的有效测读范围为 0 ~ 4.00D,为使实验中测得的吸光度数值控制在测读范围之内,试剂的配置质量浓度设为 10 g/L。

1.3.2 胭脂红溶液浓度-吸光度的标定

为确定胭脂红溶液浓度与吸光度的输入与输出关系,需要先对其进行标定。

配置 0.04、0.06、0.08 g/L 3 种质量浓度的胭脂红溶液,利用多功能酶标仪获得 3 种浓度下的胭脂红吸收曲线,如图 3 所示。根据朗伯-比尔定律^[16],在最大吸收波长处测得的吸光度所换算成的浓度误差最小,由图 3 可知,在 200 ~ 300 nm 时 3 种浓度的吸光度差异极小,因此选择 300 ~ 800 nm 之间的波峰 506 nm 作为胭脂红溶液吸光度的检测波长。

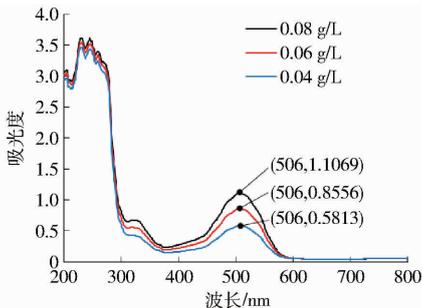


图 3 胭脂红吸收曲线

Fig. 3 Carmine absorption curves

选取质量浓度为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 g/L 的胭脂红溶液进行标定。每种质量浓度的溶液各配置 3 份,在 506 nm 的波长下对每份溶液分别测 2 次吸光度,即每种质量浓度的溶液各测 6 次吸光度,取平均值,获得的胭脂红标准浓度曲线如图 4 所示。经过线性拟合,胭脂红质量浓度与吸光度的关系为

$$C = 0.0733A - 0.0009 \quad (1)$$

式中 C ——胭脂红质量浓度, g/L

A ——胭脂红吸光度

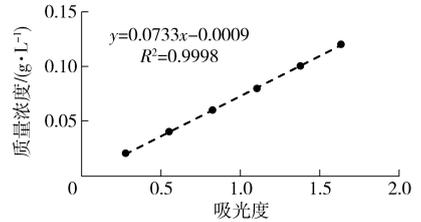


图 4 胭脂红标准浓度曲线

Fig. 4 Carmine standard concentration curve

经过回归分析,该关系式的决定系数 $R^2 = 0.9998$,表明拟合程度较高。

1.4 动态雾量分布均匀性评价方法

1.4.1 雾量沉积浓度

实验时,用集雾穴盘收集雾滴,之后在暗室环境中晾干集雾穴盘;待水分蒸发干净后,在每个穴孔中注入 3 mL 清水,穴孔中留下的胭脂红成分会迅速溶解;再从每个穴孔中吸取 200 μ L 溶液注入酶标板(96 孔,美国康宁公司)中,将酶标板放在多功能酶标仪中测量吸光度,根据式(1)计算胭脂红质量浓度,进而得出每个穴孔的雾量沉积浓度。雾量沉积浓度指单位面积上所沉积雾滴的质量,计算公式为

$$L = \frac{CV}{C_0} \frac{\rho}{\pi r^2} \times 10^3 \quad (2)$$

式中 L ——雾量沉积浓度, mg/cm^2

V ——集雾穴盘单孔容积, L

C_0 ——喷雾试剂质量浓度, g/L

ρ ——喷雾试剂密度, g/L

r ——集雾穴盘单孔半径, cm

在该实验中,集雾穴盘单孔容积为 3 mL,单孔半径为 1 cm,喷雾试剂密度为 $10^3 \text{ g}/\text{L}$,代入式(2)中可得

$$L = \frac{300C}{\pi} \quad (3)$$

1.4.2 雾量分布变异系数

动态雾量分布均匀性的衡量指标为雾量分布变异系数 C_V , C_V 越小表示雾量分布越均匀。从农艺角度来讲, C_V 应不超过 15%。 C_V 计算公式为

$$C_V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5)$$

其中

式中 S ——数据集的标准差

\bar{x} ——数据集的平均值, mg/cm^2

n ——数据集中的数据个数

x_i ——数据集中单个数据的值, mg/cm^2

雾量分布变异系数可从总体区域、喷雾前进方向和喷杆方向3方面进行计算。公式(4)、(5)中的数据相应地分为3类:总体区域上的数据集指一次实验中每个穴孔的雾量沉积浓度的集合,数据量为穴孔数;喷雾前进方向上的数据集指一次实验中每行(喷杆方向)穴孔的雾量沉积浓度求取平均值后的集合,数据量为集雾穴盘行数;喷杆方向上的数据集指一次实验中每列(喷雾前进方向)穴孔的雾量沉积浓度求取平均值后的集合,数据量为集雾穴盘行数。

1.4.3 喷雾区域可视化研究

使用 Matlab 软件对单盘集雾穴盘中每个穴孔的沉积浓度进行插值拟合可获得某一实验条件下的雾量沉积浓度分布图。在 PWM 占空比为 60%, PWM 频率为 7 Hz, 喷雾速度为 0.5 m/s, 喷雾压力为 0.2 MPa 的条件下, 获得的雾量沉积浓度分布图如图 5 所示, 从图中可以直观地评价雾量沉积浓度的分布情况。

2 动态雾量分布均匀性实验设计

打开压力罐上的球阀, 注入质量浓度为 10 g/L 的胭脂红溶液作为喷雾试剂; 固定喷头位置, 使喷头与输送带之间的高度为 300 mm, 喷头与地面垂直并位于输送带中央, 且扇形喷雾截面长轴应与输送带运动方向垂直; 使用变频器控制输送带速度为 0.5 m/s;

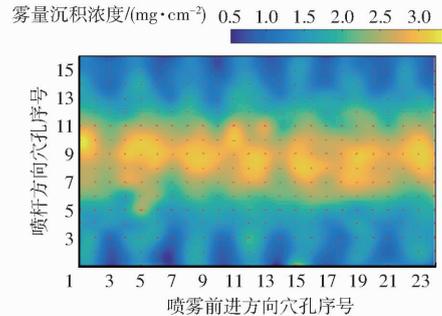


图5 雾量沉积浓度分布图

Fig.5 Concentration distribution diagram of spray deposition

设置所需的 PWM 频率(3、5、7、9 Hz)、PWM 占空比(20%、40%、60%和80%)和喷雾压力(0.1、0.2、0.3、0.4 MPa)进行单因素实验; 等待喷头及传输带稳定工作 1 min 后, 将集雾穴盘放置在输送带中间位置进行雾滴收集, 进而按照第 1.4 节提供的方法从总体区域、喷雾前进方向和喷杆方向对单喷头动态雾量分布均匀性进行评价, 每次实验重复 3 次。

3 结果与讨论

3.1 PWM 频率对单喷头动态雾量分布均匀性的影响

将喷雾压力设置为 0.2 MPa, PWM 占空比设置为 60%, 将 PWM 频率分别设置为 3、5、7、9 Hz, 其他实验条件和实验过程同第 2 节。不同 PWM 频率下的实验结果如图 6 和表 1 所示。

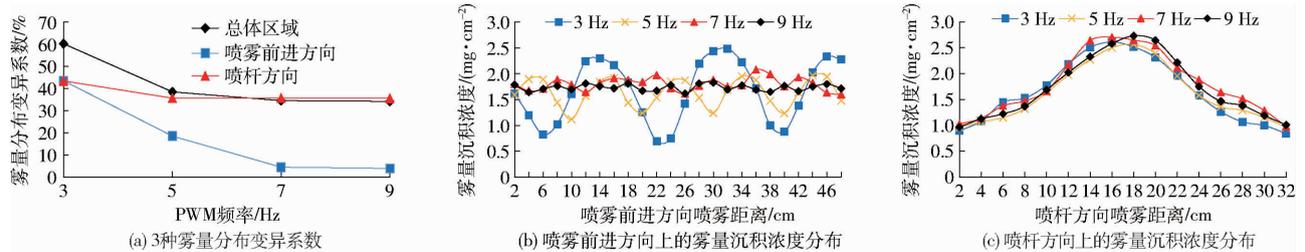


图6 不同 PWM 频率下的实验结果

Fig.6 Experimental results under different PWM frequencies

表1 不同 PWM 频率下的 3 种雾量分布变异系数

Tab.1 Variation coefficient of three kinds of spray deposition under different PWM frequencies %

PWM 频率/Hz	总体区域	喷雾前进方向	喷杆方向
3	60.20	43.50	43.46
5	38.46	18.52	35.63
7	34.51	4.45	35.73
9	34.18	3.96	35.60

由图 6b 可知, 在喷雾前进方向上, 在输送带速度为 0.5 m/s 的条件下, PWM 频率为 3 Hz 和 5 Hz 时, 雾量分布的间歇性特点明显, 不适合实际作业; 而在 7 Hz 和 9 Hz 时, 雾量分布的间歇性特点变弱, 从图 6a 中也可观察到, 在 PWM 频率为 7 Hz 和 9 Hz

时, 变异系数略有降低但变化不大。在喷杆方向上, 由图 6c 和图 6a 可知, PWM 频率对喷杆方向上的变异系数影响较弱。从数学统计角度上讲, 总体区域上的变异系数大小及变化规律受到喷杆方向和喷雾前进方向上的共同影响, 且与变异系数较大的一方更接近, 该规律从图 6a、图 7a 和图 8a 中也可得出。主要结论为, 某一速度条件下 PWM 频率的最小值应至少保证喷雾的连续性, 且无需过大, 从而保证电磁阀的使用寿命。

3.2 PWM 占空比对单喷头动态雾量分布均匀性的影响

将喷雾压力设置为 0.2 MPa, PWM 频率设置为 7 Hz, 将 PWM 占空比分别设置为 20%、40%、60%

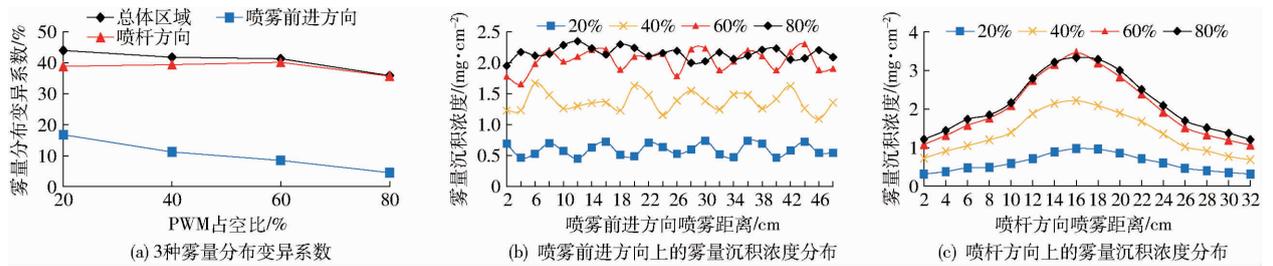


图 7 不同 PWM 占空比下的实验结果

Fig. 7 Experimental results under different PWM duty cycles

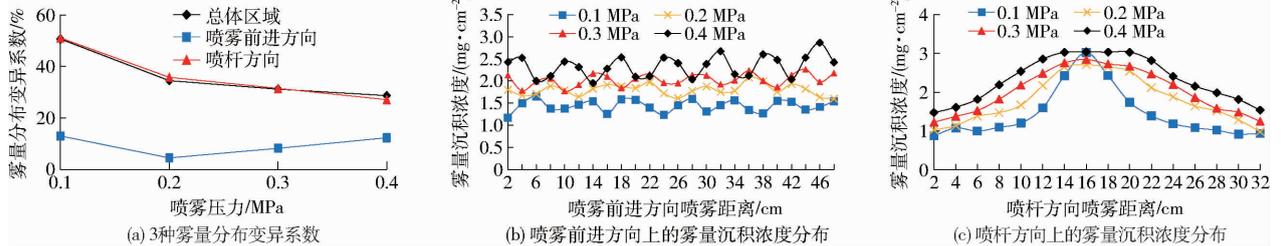


图 8 不同喷雾压力下的实验结果

Fig. 8 Experimental results under different spray pressures

和 80% ,其他实验条件和实验过程同第 2 节。不同 PWM 占空比下的实验结果如图 7 和表 2 所示。

表 2 不同 PWM 占空比下的 3 种雾量分布变异系数

Tab.2 Variation coefficient of three kinds of spray deposition under different PWM duty cycles %

PWM 占空比/%	总体区域	喷雾前进方向	喷杆方向
20	43.94	16.79	38.87
40	41.75	11.18	39.36
60	41.29	8.48	40.15
80	35.85	4.56	35.68

由图 7a 可知,在喷雾前进方向上,PWM 占空比越大,变异系数越小,且变化显著。在喷杆方向上,从图 7b 和图 7c 可观察到,当 PWM 占空比从 20% 增加到 60% 时,喷雾流量变化明显,但变异系数变化较小,而当 PWM 占空比从 60% 变化到 80% 时,喷雾流量基本不变,但变异系数有明显降低。主要结论为,当 PWM 占空比增大到一定值使喷雾流量基本稳定时,PWM 占空比的继续增大可同时提高喷雾前进方向和喷杆方向上的雾量分布均匀性,而在 PWM 占空比增大到该定值之前,仅对喷雾前进方向上的雾量分布有明显影响。

3.3 喷雾压力对单喷头动态雾量分布均匀性的影响

将喷雾频率设置为 7 Hz, PWM 占空比设置为 60%,将喷雾压力分别设置为 0.1、0.2、0.3、0.4 MPa,其他实验条件和实验过程同第 2 节。不同喷雾压力下的实验结果如图 8 和表 3 所示。由图 8a 可知,在喷雾压力为 0.1 MPa 时,由于压力过低,雾化效果差,导致 3 种雾量分布变异系数均较大。在喷雾压力达到 0.2 MPa 后,喷雾压力越大,喷

表 3 不同喷雾压力下的 3 种雾量分布变异系数

Tab.3 Variation coefficient of three kinds of spray deposition under different spray pressures %

喷雾压力/MPa	总体区域	喷雾前进方向	喷杆方向
0.1	50.71	12.97	51.10
0.2	34.51	4.45	35.73
0.3	31.16	8.15	31.50
0.4	28.65	12.22	27.03

雾前进方向上的变异系数越大,而喷杆方向上变异系数反而越小。从图 8c 可观察到,在喷杆方向上,喷雾压力变大时,增加的流量更多地喷向两侧而非在中间聚集,使得雾形更加饱满;而根据图 8b 中的数据计算得出,0.2、0.3、0.4 MPa 所对应的曲线中相邻波峰与波谷差值的平均值分别为 0.23、0.30、0.51 mg/cm²,可见在喷雾前进方向上,喷雾压力变大时,增加的流量更多的喷向中间而非两侧。主要结论为,在雾化效果较好的前提下,随着喷雾压力的增大,雾量更多地向喷杆方向上的两侧和喷雾前进方向上的中间聚集。

4 结论

(1) 采用矩阵式集雾穴盘收集雾滴,使用胭脂红溶液浓度-吸光度法测量雾量浓度,可在动态条件下对变量喷雾的雾量分布均匀性进行可视化研究。

(2) 相较于喷杆方向,PWM 频率对单喷头在喷雾前进方向上的雾量分布均匀性影响较大。某一速度条件下 PWM 频率的最小值应至少保证喷雾的连续性,且无需过大,从而保证电磁阀的使用寿命。

(3) 当 PWM 占空比增大到一定值使喷雾流量基本稳定时,PWM 占空比继续增大可同时提高单喷

头在喷雾前进方向和喷杆方向上的雾量分布均匀性,而在 PWM 占空比增大到该定值之前,仅对喷雾前进方向上的雾量分布有明显影响。

(4)在雾化效果较好的前提下,喷雾压力对单喷头在喷雾前进方向和喷杆方向上的雾量分布均匀

性均有较大影响,且影响效果相反,主要因为随着喷雾压力的增大,雾量更多地向喷杆方向上的两侧和喷雾前进方向上的中间聚集。

(5)单喷头在总体区域上雾量分布均匀性与喷杆方向和喷雾前进方向上的雾量分布均相关。

参 考 文 献

- 袁会珠,杨代斌,闫晓静,等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护,2011,37(5): 14-20.
YUAN Huizhu, YANG Daibin, YAN Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese)
- 邓巍,丁为民,何雄奎. 变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J]. 中国农业大学学报,2009,14(3): 94-102.
DENG Wei, DING Weimin, HE Xiongkui. Technologies and evaluation methodology of variable spray[J]. Journal of China Agricultural University, 2009,14(3): 94-102. (in Chinese)
- 祁力钧,傅泽田. 不同条件下喷雾分布试验研究[J]. 农业工程学报,1999,15(2): 107-111.
QI Lijun, FU Zetian. Experimental study on spray deposition uniformity[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2): 107-111. (in Chinese)
- 王璐,陈永成,苏迪,等. 喷杆式喷雾分布均匀性试验研究[J]. 农机化研究,2015,37(10): 193-196.
WANG Lu, CHEN Yongcheng, SU Di, et al. Experimental study on spray distribution uniformity of the spray rod[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(10): 193-196. (in Chinese)
- SUN W, LI Q, FAN Y, et al. Effect factor analysis of spraying quality for agricultural chemicals[J]. International Journal of u- and e-Service, Science and Technology, 2015, 8(11): 221-230.
- 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 基于高频电磁阀的脉宽调制变量喷头喷雾特性[J]. 农业工程学报,2016,32(1): 97-103.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Spray characteristics on pulse-width modulation variable application based on high frequency electromagnetic valve[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 97-103. (in Chinese)
- 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3): 59-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 59-72. (in Chinese)
- GILES D K, COMINO J A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47: 249-267.
- AGUILAR G, MAJARON B, VERKRUISSE W, et al. Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(17): 3201-3211.
- 吴春笃,杜彦生,张伟,等. 脉宽调制型变量喷雾系统雾量沉积分布[J]. 农业机械学报,2007,38(12): 70-73.
WU Chundu, DU Yansheng, ZHANG Wei, et al. Study on the deposit distribution of the modulated variable rate spray system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12): 70-73. (in Chinese)
- DENG W, HE X K, DING W M. Droplet size and spray pattern characteristics of PWM-based continuously variable spray[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2009, 2(1): 8-18.
- 时玲,张霞,吴红生,等. 扇形喷头雾量分布均匀性的试验研究[J]. 云南农业大学学报:自然科学版,2011,26(3): 389-394.
SHI Ling, ZHANG Xia, WU Hongsheng, et al. Experimental research on spray distribution uniformity of fan nozzle[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science Edition, 2011, 26(3): 389-394. (in Chinese)
- TIAN L, ZHENG J. Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(1): 5-11.
- LEBEAU F. Modelling the dynamic distribution of spray deposits[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 255-265.
- LARDOUX Y, SINFORT C, ENFALT P, et al. Test method for boom suspension influence on spray distribution, Part I: experimental study of pesticide application under a moving boom[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(1): 29-39.
- LARDOUX Y, SINFORT C, ENFALT P, et al. Test method for boom suspension influence on spray distribution, part II: validation and use of a spray distribution model[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2): 161-168.
- 魏新华,于达志,白敬,等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统的静态雾量分布特性[J]. 农业工程学报,2013,29(5): 19-24.
WEI Xinhua, YU Dazhi, BAI Jing, et al. Static spray deposition distribution characteristics of PWM-based intermittently spraying system[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(5): 19-24. (in Chinese)
- 蒋焕煜,周鸣川,李华融,等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3): 73-77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150310&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.010.
- JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Research of dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 73-77. (in Chinese)
- 邱白晶,王立伟,蔡东林,等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(24): 25-32.
QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 25-32. (in Chinese)
- 霍瑞岗. 朗伯-比尔定律在化学分析中的应用及局限性[J]. 学周刊,2013(33): 14-15.