

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.010

PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验^{*}

蒋焕煜 周鸣川 李华融 蒋卓华
(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 由于 PWM 变量喷雾作业过程中喷头不连续作业, 喷雾的均匀性特别是喷雾机运动方向上的均匀性较难控制, 为此通过高速电磁阀、不锈钢压力罐、压力传感器、气泵、调速输送带等构建了一套动态 PWM 变量喷雾实验平台, 并对该平台动态喷雾雾滴分布特性进行实验研究。采用水敏试纸作为获取动态雾滴分布状态手段, 通过图像处理技术以区域内雾滴覆盖率的变异系数作为动态雾滴分布均匀性判定指标, 评估了在不同 PWM 控制信号频率、不同 PWM 控制信号占空比及不同喷雾压力下的单个喷头动态雾滴分布均匀程度。经实验表明, 变异系数随控制信号占空比的增大而减小, 控制信号频率对动态喷雾雾滴分布均匀性有较大影响, 变异系数随控制信号频率增大而减小, 喷雾压力对变异系数影响较小, 喷雾压力越大变异系数越大。

关键词: 变量喷雾 脉宽调制 水敏试纸 变异系数

中图分类号: S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0073-05

Experiment on Dynamic Droplet Distribution Uniformity for PWM Variable Spray System

Jiang Huanyu Zhou Mingchuan Li Huarong Jiang Zhuohua
(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: A dynamic PWM variable spray experiment platform was built up to solve the problems of discontinuous operation of nozzles in spray progress, and improve the homogeneity of droplets, especially homogeneity along the travel direction. This platform included high-speed solenoid valve, a stainless steel pressure tank, a pressure sensor, an air pump, a conveyor and so on. The distribution features of droplets in dynamic spray based on this platform was studied. Water-sensitive paper was used to collect droplets under different frequencies and different duty cycles of PWM controlling signals, also different pressures of spray. Image-processing technology was used to get the coefficient of variation (CV) value of percent area droplets coverage to evaluate the uniformity of droplets. The homogeneity of single nozzle dynamic spraying was evaluated under different experiment conditions. The research suggested that CV value decreased as the duty cycle of controlling signals increased, the frequency of controlling signals had influence on homogeneity, which was CV value decreased as the frequency increased. And what is more, when pressure became high, CV value became larger and the influence was weaker compared to the other factors.

Key words: Variable spray Pulse width modulation Water-sensitive paper Coefficient of variation

引言

变量喷雾施药是减少植保作业中药液使用量的

重要技术手段^[1]。变量喷雾施药可以通过变喷雾时间、变喷雾压力及变药液浓度 3 种途径实现。PWM 技术调节电磁阀实现流量控制是一种变喷雾

收稿日期: 2014-05-29 修回日期: 2014-06-20

^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA10A504)、农业部引进国际先进农业科学技术资助项目(2011-G32)和浙江省“新世纪 151 人才工程”资助项目

作者简介: 蒋焕煜, 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

时间方法,相对于其他变量喷雾技术其实现简便,对喷雾粒径影响较小^[2-3],故应用较为广泛。由于植保作业过程中靶标的分布较难获得甚至无法获得,因此喷雾机械的喷雾均匀性指标对防治效果影响很大。PWM 变量喷雾是在一个控制周期内调节电磁阀开闭的时间来完成流量调节,致使喷雾机运动方向上的雾滴均匀性较难控制。对于 PWM 变量喷雾的流量控制模型,国内外学者进行了大量的研究^[4-9],但对于 PWM 变量喷雾雾滴分布均匀性特别是动态均匀性研究较少。Tian 等^[10]对 2 种 PWM 变量喷施喷头在喷雾压力 206.7 kPa、PWM 控制信号频率 10 Hz 及占空比 75% 工况下的二维空间静态雾量分布进行了测试,并以此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。魏新华等^[11]通过矩阵式雾量收集装置对 PWM 喷头的静态雾量分布进行了测试,通过实验建立了圆锥喷头的静态雾量分布模型并分析了喷雾雾量与喷雾压力、PWM 控制信号频率及 PWM 控制信号占空比之间的关系。矩阵式雾量收集装置能够方便地获取静态喷雾雾量分布,但在进行动态雾滴分布均匀性测试时,由于单位面积上雾量较少,不便于通过称测方法获得雾滴质量。目前有较多技术手段应用于测量动态雾滴分布均匀性,邱白晶等^[12]以胭脂红溶液作为药液,通过内径为 90 mm 玻璃采样皿收集雾滴并运用分光光度计测量胭脂红含量从而间接测量雾滴分布量,这种方法一般适用于田间大面积喷雾均匀性测试。Salyani 等^[13]通过水敏试纸评估了在不同作业参数下喷雾机的雾滴分布特性,通过图像采集系统获得水敏试纸的描述喷雾分布特性的参数包括:雾滴覆盖率、雾点平均直径、雾滴平均粒径及雾点密度,发现其中最好的表征参数为雾滴覆盖率。

在借鉴以上研究成果基础上,考虑到 PWM 喷雾作业时喷头作业不连续性,本文采用水敏试纸作为获取动态雾滴分布状态手段。通过搭建的一套动态 PWM 变量喷雾实验平台,在实验室环境下研究各作业参数包括 PWM 控制信号频率、PWM 控制信号占空比和喷雾压力对动态雾滴分布均匀性的影响。从而为植保作业过程中,合理选择 PWM 变量喷雾作业参数提供参考。

1 动态 PWM 变量喷雾平台

设计的动态 PWM 变量喷雾平台总体结构如图 1 所示。

实验平台由供压稳压部分、人机控制部分、PWM 变量部分构成。其中供压稳压部分主要由储液箱、安全阀、球阀、不锈钢压力罐、压力传感器

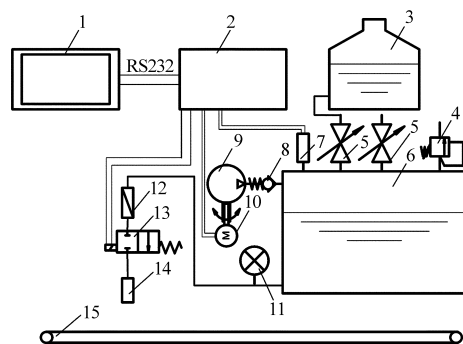


图 1 动态 PWM 变量喷雾实验平台

Fig. 1 Dynamic experiment platform of PWM variable spray

1. 人机界面 2. STM32 控制器 3. 储液箱 4. 安全阀 5. 球阀
6. 不锈钢压力罐 7. 压力传感器 8. 单向阀 9. 气泵 10. 直流电动机 11. 压力表 12. 过滤器 13. 高速电磁阀 14. 喷头
15. 调速输送带

(WMB2012-HS 型,杭州烨立工控有限公司)、单向阀、气泵、直流电动机及压力表构成;人机控制部分由人机界面(Eivew ET070 型,深圳市步科有限公司)及 STM32 控制器构成;PWM 变量部分主要由高速电磁阀(ZCB 型,重庆柯思阀门有限公司)、扇形喷头(H-VV9515 型,美国喷雾公司)及调速输送带(杭州三迪数控设备有限公司)构成。供压稳压部分通过电动机带动气泵为压力罐提供一定气压,并通过压力传感器与 STM32 控制器形成闭合控制来维持气压罐压力。人机界面可输入喷雾压力、PWM 控制信号频率及占空比,通过 RS232 接口及 MODBUS 通讯协议与 STM32 控制器通讯,STM32 控制器核心芯片为 STM32F407。调速输送带通过变频器控制伺服电动机实现变速,调速范围为 0 ~ 1 m/s。

2 基于水敏试纸的动态雾滴分布均匀性实验

在进行 PWM 变量喷雾作业时,PWM 控制信号频率、PWM 控制信号占空比、喷雾压力和喷雾作业速度都可能对雾滴分布均匀性产生一定的影响。由于喷雾作业速度的调整往往取决于施药量水平及植保机械底盘动力性能,同时考虑到调速输送带的调速极限及实验操作安全性,因此本研究将输送带速度设置为定值。

2.1 PWM 信号频率对动态喷雾雾滴分布的影响

打开压力罐上安装的球阀,使储液箱中的清水流入到压力罐中,调整喷头与调速输送带的高度为 500 mm,调整并固定喷头位置使扇形喷雾截面长轴与调速输送带运动方向垂直。每次实验时将长度为 L 的水敏试纸(美国喷雾公司)放置在调速输送带的最左端中点位置,为防止水敏试纸与调速输送带上已有的喷雾水滴发生作用,用一块塑料薄板作为基

座,将水敏试纸背面黏贴在薄板上。由于 PWM 变量喷雾过程中 PWM 控制信号的周期性使得雾滴的分布也呈周期性,为了使水敏试纸上的雾滴分布至少为一个周期,因此要保证水敏试纸的长度大于输送带在 PWM 控制信号一个周期内的运动距离。即

$$L \geq 1\,000v/f \tag{1}$$

式中 L ——水敏试纸长度,mm
 v ——调速输送机速度,m/s
 f ——PWM 信号频率,Hz

通过人机界面将喷雾压力设为 0.2 MPa,PWM 控制信号占空比设为 50%,输送带速度调到 0.7 m/s,PWM 控制信号频率分别设置为 3、6、9 Hz。获得各条件下处理后的水敏试纸,待晾干后用扫描仪(MF4720w 型,佳能有限公司)获取水敏试纸图像,扫描仪获取图像分辨率设置为 600 dpi。考虑到实验结果的可对比性,将各个实验条件下水敏试纸长度设为一致,以最低 PWM 信号频率作为基准代入公式(1),求得最短水敏试纸长度 L 为 230 mm。

2.2 PWM 信号占空比对动态喷雾雾滴分布的影响

通过人机界面设置喷雾压力为 0.2 MPa,PWM 控制信号频率为 6 Hz,PWM 控制信号占空比分别为 20%、50% 和 80%,其他实验条件及实验过程同 2.1 节,从而获得不同占空比对应处理的水敏试纸图像。

2.3 喷雾压力对动态喷雾雾滴分布的影响

保持 PWM 控制信号频率及 PWM 控制信号占空比为 6 Hz 和 50% 不变,通过人机界面设置喷雾压力分别为 0.2、0.3、0.4 MPa,其他实验条件及实验过程同 2.1 节,从而获得不同喷雾压力下对应处理的水敏试纸图像。

为了方便比照,喷雾均匀性结果设置对照组。用大小为 76 mm × 52 mm 的水敏试纸,设置喷雾压力为 0.2 MPa,PWM 控制信号占空比为 100%,即电磁阀处于完全开启状态,其他条件与操作过程与上述一致后,获得处理后水敏试纸图像如图 2a 所示。

3 水敏试纸图像处理

水敏试纸遇水部分会由原来的绿色转变为蓝色,因此可以采用蓝色增强方法进行灰度化,灰度化方法为

$$G = b - r - g \tag{2}$$

灰度化后的水敏试纸图像的灰度直方图如图 2b,呈明显的双峰分布,因此采用 Ostu 自动阈值分割完成雾滴区域提取^[14],如图 2c 所示。

本研究采用单位面积内水敏试纸的雾滴覆盖率的变异系数^[15]描述 PWM 喷雾系统动态雾滴分布的均匀性,变异系数计算公式为

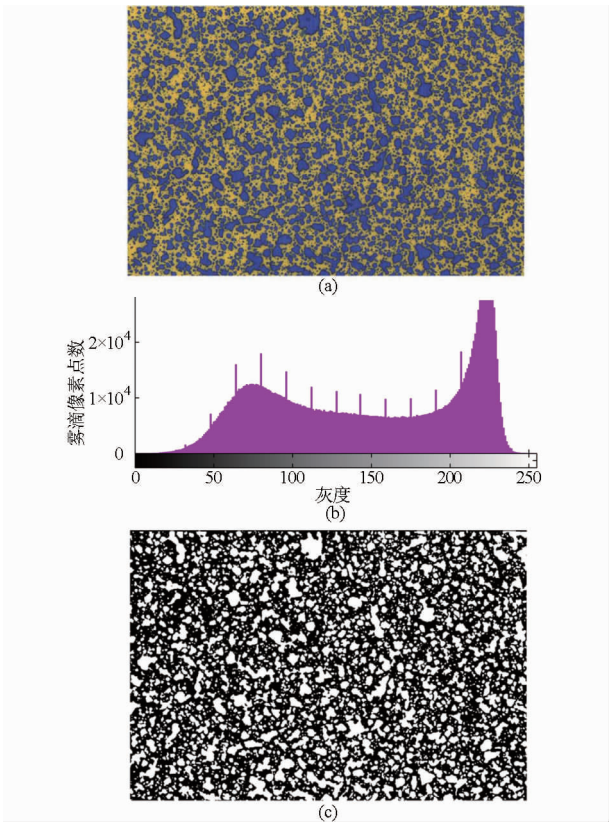


图 2 水敏试纸图像分割结果
Fig. 2 Image segmentation for water-sensitive paper
(a) 原始图 (b) 灰度化后直方图 (c) 二值化图像

$$C = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \tag{3}$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n - 1)} \tag{4}$$

式中 S ——同一张水敏试纸上获得单位面积雾滴覆盖率数据集的标准差
 X_i ——水敏试纸上获得的单位面积雾滴覆盖率,%
 $\bar{X}$ ——同一张水敏试纸上获得的单位面积雾滴覆盖率数据集的平均值,%
 n ——同一张水敏试纸上获得的单位面积雾滴覆盖率数据集的数据个数

获得同一张水敏试纸单位面积上雾滴覆盖率数据集过程如下:取一个矩形区域大小为 52 mm × 5 mm,从水敏试纸最左端开始,沿水敏试纸长度方向从左向右依次移动距离为一个像素,统计当前矩形区域内白色像素个数即雾滴像素个数,直至矩形移动到最右端停止运算,如图 3 所示。

4 各控制参数对动态雾滴分布均匀性的影响

4.1 PWM 控制信号频率

将喷雾压力为 0.2 MPa、PWM 控制信号占空比为 50%、不同 PWM 控制信号频率下的水敏试纸图

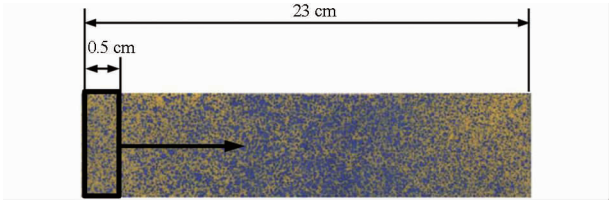


图3 单位面积雾滴覆盖率数据集生成示意图

Fig.3 Generation of data set for droplets coverage in unit area

像经过上述图像处理方法进行处理,获得的3组雾滴覆盖率与矩形区域平移距离的关系如图4所示。

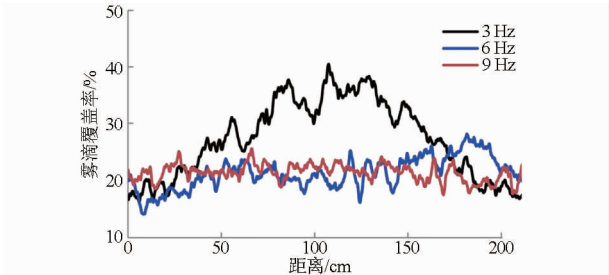


图4 不同 PWM 控制信号频率下雾滴覆盖率

Fig.4 Droplets coverage under different frequencies of PWM control signal

通过公式(3)、(4)计算的不同 PWM 控制信号频率下,雾滴覆盖率如表1所示。

表1 不同 PWM 控制信号频率下雾滴覆盖率均匀性变异系数

Tab.1 C value of droplets coverage under different frequencies of PWM control signals

频率/Hz	3	6	9
C/%	25.44	13.36	7.27

从图4和表1中可以看出,PWM控制信号频率对动态雾滴分布的均匀性有较显著的影响,在较低的频率下,雾滴动态分布波动性较大。由于在3 Hz的PWM控制信号频率下雾滴覆盖率有一个周期的变化,因此在理论上6 Hz的PWM控制信号频率下雾滴覆盖率应该有两个周期变化,但实际上图中数据周期性并不明显,这可能是由于在喷雾过程中同一时间喷雾雾滴飞行时间的不一致所引起的。9 Hz的PWM控制信号频率所获得的C最小,已经接近对照组的5.15%,同时表中可以看出越高的PWM信号控制频率会产生越好的喷雾雾滴分布均匀性,然而高频率动作又会减少电磁阀使用寿命,通过上述方法及分析可以为植保作业中PWM控制信号频率的选择作参考。

4.2 PWM控制信号占空比

对喷雾压力为0.2 MPa、PWM控制信号频率为6 Hz、不同PWM控制信号占空比下的水敏试纸应用上述图像处理方法处理,获得的3组雾滴覆盖率与

矩形区域平移距离的关系如图5所示。

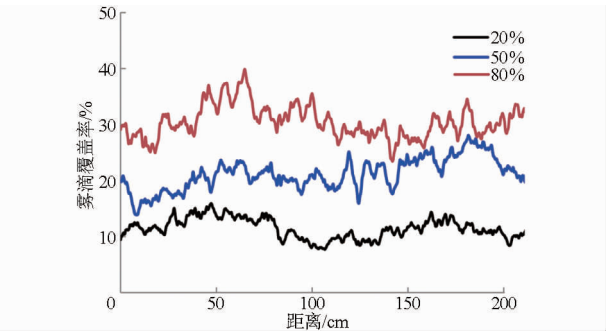


图5 不同 PWM 控制信号占空比下雾滴覆盖率

Fig.5 Droplets coverage under different duty cycles of PWM control signals

计算的不同 PWM 控制信号占空比下雾滴覆盖率均匀性变异系数如表2所示。

表2 不同 PWM 控制信号占空比下雾滴覆盖率均匀性变异系数

Tab.2 C value of droplets coverage under different duty cycles of PWM control signals

占空比/%	20	50	80
C/%	15.76	13.36	9.52

从图5和表2中可以看出,PWM控制信号占空比对动态雾滴分布均匀性也有影响,但是影响不如PWM控制信号频率大,PWM控制信号占空比越小雾滴覆盖率均匀性变异系数C越大。PWM控制信号占空比越大获得的雾滴覆盖率越大,即单位区域内雾滴越密集。变量喷雾系统在进行变量作业时,一般是通过PWM控制信号占空比来调节流量^[10],应用PWM控制信号占空比较小即低流量作业时喷雾作业的均匀性会降低,此时可考虑提高PWM控制信号频率来保证植保喷雾作业质量^[11]。

4.3 喷雾压力

对PWM控制信号频率为6 Hz、PWM控制信号占空比为50%、不同喷雾压力条件下的水敏试纸应用上述图像处理方法处理,获得的3组雾滴覆盖率与矩形区域平移距离的关系如图6所示。

计算的不同喷雾压力下雾滴覆盖率均匀性变异系数如表3所示。

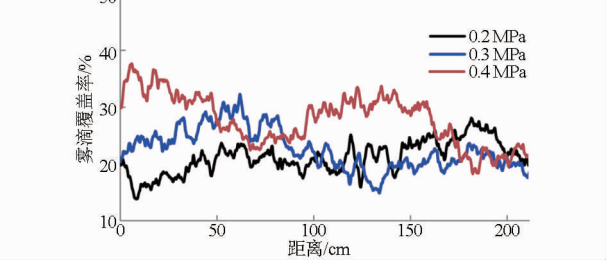


图6 不同喷雾压力下雾滴覆盖率

Fig.6 Droplets coverage under different spray pressures

表 3 不同喷雾压力下雾滴覆盖率均匀性变异系数

Tab. 3 C value of droplets coverage under different spray pressures			
压力/MPa	0. 2	0. 3	0. 4
C/%	13. 36	15. 67	16. 39

从表 3 中可以看出,喷雾压力从 0. 2 MPa 变化到 0. 4 MPa 过程中,雾滴覆盖率均匀性变异系数 C 随之增大,但是变化幅度不大。从图 6 中可以分析出,变化的主要原因是压力增大喷雾量增大,雾滴覆盖率最大值的增加较最小值增加多,从而导致雾滴覆盖率均匀性变异系数 C 增大。

5 结论

构建了一套动态 PWM 变量喷雾实验平台,运

用水敏试纸作为动态雾滴收集方式,以雾滴覆盖率均匀性变异系数作为动态雾滴分布均匀性描述手段,通过图像处理技术研究了各控制参数对 PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性的影响。得到如下结论:

- (1) PWM 控制信号频率、PWM 控制信号占空比及喷雾压力参数变化对雾滴分布均匀性实验都有影响,影响程度依次减弱。
- (2) PWM 控制信号频率越大雾滴分布均匀性越好;PWM 控制信号占空比越大雾滴分布均匀性越好;喷雾压力越大雾滴分布均匀性越差。
- (3) 设计的动态 PWM 变量喷雾实验平台能够进行动态雾滴分布均匀性评估,从而为植保作业过程中,合理选择 PWM 变量喷雾作业参数提供参考。

参 考 文 献

1 Loghavi M, Behzadi Mackvandi B. Development of a target oriented weed control system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 112 – 118.

2 Unavut J K, Schueller J K, Mason P A C. Continuous control of a sprayer pinch valve[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(4): 829 – 837.

3 Guzman J L, Rodriguez F, Sanchez-Hermosilla J, et al. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(2): 715 – 727.

4 邓巍,丁为民. 基于 PWM 技术的连续式变量喷雾装置设计与特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 77 – 80. Deng Wei, Ding Weimin. Variable-rate continuous spray equipment based on PWM technology and its spray characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 77 – 80. (in Chinese)

5 Escolà A, Rosell-Polo J R, Planas S, et al. Variable rate sprayer. Part 1—orchard prototype: design, implementation and validation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 95: 122 – 135.

6 Lebeau F, El Bahir L, Destain M F, et al. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(2): 149 – 161.

7 刘大印,王秀,毛益进,等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 99 – 103.

8 翟长远,王秀,密雅荣,等. PWM 变量喷雾喷头流量模型[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 40 – 44. Zhai Changyuan, Wang Xiu, Mi Yarong, et al. Nozzle flow model of PWM variable-rate spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 40 – 44. (in Chinese)

9 魏新华,蒋杉,张进敏,等. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 87 – 92,86. Wei Xinhua, Jiang Shan, Zhang Jinmin, et al. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 87 – 92,86. (in Chinese)

10 Tian L, Zheng J. Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying[J]. Transactions of ASAE, 2000,43(1): 5 – 11.

11 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)

12 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)

13 Salyani M, Fox R D. Evaluation of spray quality by oil-and water-sensitive papers[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(1): 37 – 43.

14 胡炼,罗锡文,曾山,等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12 – 18. Hu Lian, Luo Xiwen, Zeng Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12 – 18. (in Chinese)

15 邱白晶,沙俊炎,汤伯敏,等. 密闭空间雾滴沉积状态参数的显微图像解析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 55 – 58. Qiu Baijing, Sha Junyan, Tang Bomin, et al. Analysis of droplets disposition parameters based on micrograph in airtight space [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 55 – 58. (in Chinese)