

混药器混合均匀性分析方法与在线混合变工况试验

代祥¹ 徐幼林¹ 宋海潮^{1,2} 陈骏阳¹ 况良杰¹ 马鲁强¹

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京工业职业技术学院机械工程学院, 南京 210023)

摘要: 直接注入式变量喷雾系统中药水混合均匀性是衡量系统性能的重要指标。为了评价混药器在线混合农药的能力,提出了混药器混合均匀性分析方法,并进行了旋动射流混合装置混合脂溶性农药的变工况(不同载流流量 Q 以及不同药水混合比 P)在线混合试验。以基于像素的变异系数 α 和均匀性指数 γ 作为均匀性评价指标,对混药器的药水混合图像进行处理,定量分析混合均匀性。采用人工预混的方法,通过和无混药器混合图像及静置图像进行对比,验证了评价指标的准确性。变工况试验结果表明:旋动射流混药器混合脂溶性农药时,在混合比 P 一定的条件下,载流流量 Q 越大,则混合均匀性越高;不同 P 条件下,均在 $Q=2\,400\text{ mL/min}$ (试验条件下最大载流流量)时混合均匀性达最高, Q 过小,会造成混合均匀性明显下降; Q 一定时, P 越大,则混合均匀性越高, P 较低时,需要有较高的 Q 才能取得良好的混合均匀性。综合分析知: $2\,000\text{ mL/min}\leq Q\leq 2\,400\text{ mL/min}$ 时,可以完成不同混合比 P 下的药水均匀混合; $800\text{ mL/min}<Q<2\,000\text{ mL/min}$ 时,可完成较高混合比 P 下的在线均匀混合; $Q\leq 800\text{ mL/min}$ 时,基本无法完成各种混合比 P 下的在线均匀混合。

关键词: 旋动射流混药器; 像素变异系数; 面积加权均匀性指数; 变工况; 混合均匀性

中图分类号: TP391.41; S482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0172-08

Mixing Uniformity Analysis Methods and In-line Mixing Experiments of Mixer under Variable Working Conditions

DAI Xiang¹ XU Youlin¹ SONG Haichao^{1,2} CHEN Junyang¹ KUANG Liangjie¹ MA Luqiang¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract: The high mixing uniformity for pesticides and carrier water was an important requirement in direct nozzle injection system (DNIS) used to alleviate the waste of pesticides and protect environment from being contaminated by pesticides residues. To evaluate the mixing effects of pesticides mixers, new analysis methods for mixing uniformity were presented and the swirling jet mixer was used to carry out the experiments of in-line mixing for the water and non-water soluble pesticides under variable working conditions. Quantitative descriptions for mixing uniformity of mixture inside the mixer were achieved based on calculating the coefficient of variation (α) and area-weighted uniformity index (γ) for the regions of interest (ROI) in the mixture images of the mixer. The accuracy of the analysis methods was verified by comparing the images of artificial premixed mixture and the images of unmixed mixture, as well as the images of mixture in standing state, and it proved that the indexes could be taken as criteria to judge whether the mixers could meet the requirements for in-line mixing or not. The experiments result under variable working conditions revealed that the mixing uniformity was increased with higher carrier flow rate and the flow rate of $2\,400\text{ mL/min}$ gave rise to the best uniformity while the uniformity was declined heavily with lower flow rate under the conditions of settled mixing ratios. When the carrier flow rate was remained unchanged, higher mixing ratios would contribute to higher uniformity. Therefore, it was necessary to provide high flow rate to ensure good mixing uniformity when it came to lower mixing

收稿日期: 2018-04-18 修回日期: 2018-05-23

基金项目: 江苏省基础研究计划青年基金项目(BK20170930)、国家林业局948项目(2015-4-56)、江苏高校“青蓝工程”项目和江苏省“333”高层次人才培养工程项目

作者简介: 代祥(1993—),男,博士生,主要从事农林机械化与自动化技术研究,E-mail: 18852089528@139.com

通信作者: 徐幼林(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事植保机械、现代机械设计理论与方法研究,E-mail: youlinxu@njfu.edu.cn

ratios. Normally, The criteria of $\alpha = 0.2239$ and $\gamma = 80.39\%$ were set to be the thresholds for uniform mixtures and non-uniform mixtures as there were no non-scatted pesticides remaining in the mixer when the indexes were better than them. Moreover, the filtering results showed that the flow rate which was higher than 2 000 mL/min could meet the uniformity requirements at different mixing ratios while the flow rate of 800 mL/min could not meet the uniformity requirements at any mixing ratios, and the mixing uniformity at part of these ratios could be satisfied when the flow rates were between 800 mL/min and 2 000 mL/min.

Key words: swirling jet mixer; variation coefficient of pixel; area-weighted uniformity index; variable working conditions; mixing uniformity

0 引言

精准变量喷雾具有减少农药浪费、提高农药利用率的优点^[1-2]。农药与水的混合方式分为预混式及在线混合式,前者需预先进行药水混合,存在剩余药水处理以及人工预混时接触农药的问题^[3],后者能根据需要实时配比出所需混合比的药水,有效地避免了农药浪费,保护了环境及操作人员健康,因此成为目前植保机械的研究方向^[4]。而在线注入式变量喷雾主要存在变量响应延时、药水难以精确配比,以及药水混合均匀性存在差异等问题^[5-6]。采用喷嘴直接注入式系统可有效降低变量响应延时,即农药直接从喷嘴前方注入载流中^[7-8],使得农药传输距离最短,缩短了农药输运时间,但是该系统存在农药与载流混合不充分的缺陷。

在对流体混合均匀性效果的分析评价方面,LUCK 等^[9]在基于吸光性测定均匀性的试验中评估了红色罗丹明颜料作为示踪剂的应用;VONDRICKA 等^[10]基于碘脱色反应,测定混合液的透光性,获得了在线混合每一时刻的混合均匀性,这与通过测定时间序列上农药浓度^[11-12]或者比较喷雾扇面内样本间农药量^[5,8]从而评估均匀性的做法有所不同。采用图像处理方法进行均匀性评估是另一种可行的方法,REALPE 等^[13]通过比对灰度值区分悬浮剂药水浓度,与分光光度仪所取得的检测结果进行对比,发现两者误差很小;BERTHIAUX 等^[14]采用主成分分析(PCA)方法研究了两种不同颜色粉末的混合均匀性;MUERZA 等^[15]使用自相关函数对两种不同颜色粉末颗粒的静态混合效果进行了动态研究;郭敬坤等^[16]使用图像增强方法获得了流体混合图像中示

踪粒子的分布;XU 等^[17]利用流体图像处理技术研究了泵转速与系统压力对混合均匀性的影响。但目前对农药与水掺混后的均匀性分析研究仍缺乏科学的、一致认可的精确定量分析评价方法。

液态脂溶性农药与水混合后难以实现准确的边界分割,因此本文以脂溶性农药为试验对象。从研究能够描述图像中药水混合均匀性的定量分析方法着手,借助脂溶性农药与水混合后在流场中分布存在差异的特性,利用图像处理技术对混药器内的混合均匀性进行定量分析,提出均匀性评价指标,并通过均匀性分析方法验证试验对比分析所提出的评价指标正确性;然后对旋动射流混药器进行变工况(不同混合比 P 、不同载流流量 Q)条件下脂溶性农药与水的在线混合试验,依据所提出的评价指标探寻混药器混合均匀性随 P 及 Q 变化的关系。为农药混合效果的科学评价提供有效方案,并为利用该混药器进行精确的处方施药提供有力的技术支持。

1 材料与方法

1.1 混药器、直接注入式在线混合试验系统及试验用农药

经过结构优化的脂溶性农药混药器^[18]如图 1 所示,农药与水在入射点后的混合管内实现第 1 步掺混,混合管内液体流速高,雷诺数较大,湍流扩散作用较强。混合管后接扩散管,药水经过混合管流出后速度降低,为了继续增强湍流作用,扩散管外壁的导叶使液体产生切向加速度。混药器内径为 13 mm,混合管直径为 4 mm,混合管长度为 20 mm,扩散管角度为 9°。检测管为圆管,内径与混药器内径一致,管较薄,可有效减轻光线的折射现象以及图

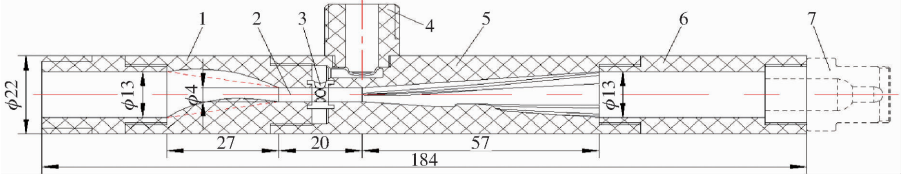


图 1 旋动射流混药器结构图

Fig. 1 Structure diagram of swirling jet mixer

1. 收缩管 2. 混合管 3. 分流器 4. 进药管 5. 扩散管 6. 检测管 7. 喷头

像采集失真。

试验系统包括注水、供药以及图像采集 3 部分,如图 2 所示。注水系统中水泵为 PLD1206 型隔膜泵,由 DC12V 直流电机驱动,最高压力 1.0 MPa,最大流量 4.0 L/min;LWGY-DN15 型流量传感器由 DC24V 直流电源供电,流量检测范围 0.04 ~ 0.2 m³/h;压力变送器(CYT101 型,精度等级 ±0.2% F·S)压力检测范围 0 ~ 10 kPa;采用流量控制阀手动对载流流量 Q 进行调节。供药系统中药泵为 KDS-FB-24 型蠕动泵,由 DC24V 直流电源驱动,注药流量控制器经 485 总线控制药泵精准调解注药量,流量范围 0.005 ~ 0.55 L/min。图像采集系统包括 IO Industries 生产的 4M180-CL 型高速相机;OR-X4C0-XPF00 型图像采集卡;视频记录软件为 IO Industries Streams 7,紫光灯选用美国 Spectroline 系列 B-260 型双灯管手持式紫外线灯。

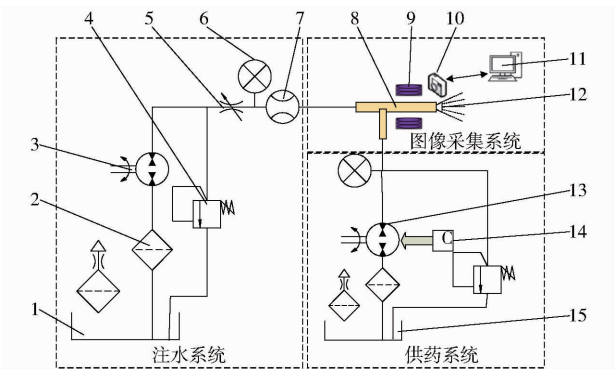


图 2 直接注入式在线混合试验系统示意图

Fig. 2 Experimental system sketch of in-line injection and mixing

1. 水箱 2. 过滤装置 3. 水泵 4. 安全阀 5. 流量控制阀
6. 压力变送器 7. 涡轮流量计 8. 混药器及检测管 9. 紫光灯
10. 高速相机 11. 图像采集装置 12. 喷头 13. 药泵 14. 注药流量控制器 15. 药箱

为了对混合均匀性进行分析,以脂溶性农药为在线混合对象进行试验研究。脂溶性农药指的是难溶于水的油剂类农药。油剂是常用农药剂型之一,包括油剂类化学农药及油剂类生物农药,一般情况下脂溶性农药比水溶性农药的在线掺混均匀性差,但是由于其优良的作用效果,应用较为广泛^[18]。为了试验操作安全,采用加入了 LUYOR-6100 油性荧

光剂的菜籽油(粘度 40 mPa·s,密度 915 kg/m³)模拟脂溶性农药进行试验,荧光剂与植物油按 1:1 000 预混,在紫光照射下亮度较高,高速相机能够捕捉到混合液中荧光剂的分布。试验在暗室进行,设置相机帧率为 180 f/s,曝光度为 4 000,图像灰度级为 1 024。试验过程中紫光灯分别架设于混药器上方和下方,高速相机垂直于混药器安放并保持与混药器在同一水平,相机和混药器相对位置固定,水平距离为 30 cm。混药器检测管处于成像的中央,避免出现异常光点而影响图像处理计算精度。

1.2 基于像素的混合均匀性分析方法

试验中对检测管进行图像采集,并从中截取检测区域(Region of interest, ROI)进行分析,因为要验证的是混药效果,故 ROI 选择在靠近混药器出口的检测管部分。ROI 应尽可能涵盖混合区域,并反映混合区域的细节,因此不宜选择较小的 ROI,避免由于图像失真及信息丢失导致计算不够准确。试验中根据当前相机参数及相机安装(距混药器检测管 30 cm)条件下所采集的图像,沿管壁附近设定 ROI 边界。

图 3a 白色方框内为 ROI,图 3b 为截取的 ROI,该图像的像素波动情况可从图 3c 看出。为了获得该图像的混合均匀性定量分析数据,分别使用基于像素的变异系数(Coefficient of variation)和面积加权均匀性指数(Area-weighted uniformity index)综合分析农药与水的混合均匀性。

1.2.1 基于像素的变异系数

变异系数 α 一般用于衡量分布的相对偏差。将混合图像的每个像素值视作离散值,则 α 能够衡量像素波动的相对大小,可以描述区域内亮度值分布相对于亮度平均值的离散程度。

在混合过程中, α 大说明像素亮度值相对离散程度大,即 ROI 中有未混合开的药团以及含药量低的区域存在,则混合均匀性较差; α 小说明像素离散程度较小,亮度值分布在均值附近,即 ROI 内亮度差异极化不明显,则均匀性较好。 α 计算公式为

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

(1)

式中 x_i ——ROI 内各像素点像素值

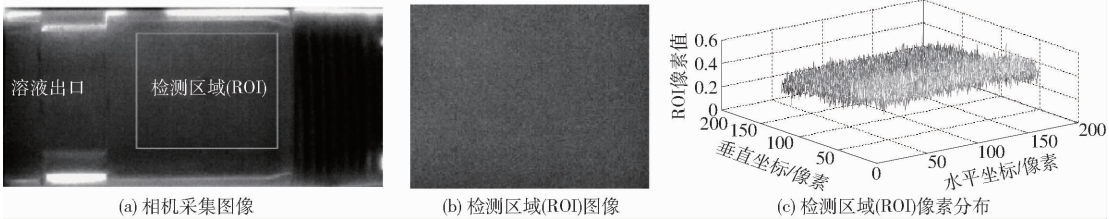


图 3 混药器在线混合图像采集及其像素分析

Fig. 3 Schematics for ROI acquisition and pixels analysis of ROI

$\bar{x}$ ——ROI 内像素值均值
 n ——ROI 内像素个数

对时间轴上连续 1 s(180 幅)图像处理,取均值为计算结果。

1.2.2 基于像素的面积加权均匀性指数

α 值代表了 ROI 内植物油浓度的波动范围,但是 α 值不能描述特定浓度的混合液在整个 ROI 内的分布均匀性,因此使用面积加权均匀性指数 γ 来描述这一特征。面积加权法可用于流体流动均匀性的度量,面积加权平均速度能衡量区域内流体速度分布的均匀性^[19]。 γ 计算公式为

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (|\phi_i - \mu|) A_i}{2 |\mu| \sum_{i=1}^N A_i} \tag{2}$$

式中 ϕ_i ——网格内平均浓度药液分布占比

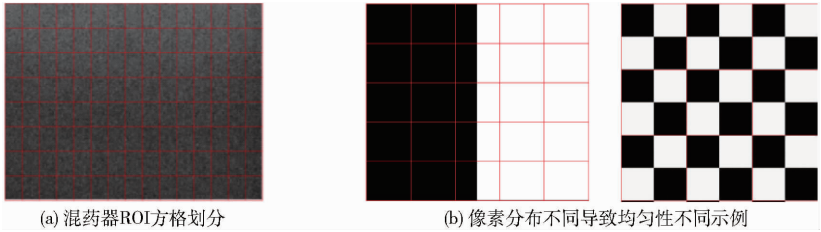


图 4 网格划分及 γ 计算原理示意图

Fig.4 Schematics of grid partition and calculation principle of γ

根据文献[13],均值反映了图像所代表的混合液的平均浓度大小,因此以混合液的亮度均值 μ 作为混合液中平均浓度混合液的特征值,试验条件下样本将选择 $\mu \pm 0.02$ (0.02 的确定与本试验条件下预混合液图像的计算相关,使得预混合图像计算 γ 值接近 100%) 计算该特征值对应像素在 ROI 内分布的 γ 值。从而获得平均浓度混合液在 ROI 内的分布均匀性。对时间轴上连续 1 s(180 幅)图像处理,取均值为计算结果。

1.3 均匀性分析方法验证试验设计

试验前需对采集到的管内混合图像进行标定,用不同混合比 P 条件下均匀的混合液作为参照,与不均匀的混合液以及极不均匀的静置分层现象作对比,检验 α 和 γ 两种均匀性分析方法的准确性并标定混合均匀性范围。均匀性分析方法验证试验中检测管安装方式如图 5 所示,不安装混药器,检测管与三通直接相连。

(1)均匀混合液图像采集:人工将药液与载流(清水)分别以 1:100、3:100、5:100、7:100、9:100 的比例置于水箱中进行预混合,由水泵将混合液泵送至检测管,泵送过程中保持强力搅拌确保混合液均匀,进行图像采集。

μ ——ROI 内平均浓度药液分布占比
 A_i ——网格面积
 N ——划分网格数

它能够在不规则区域内借助网格划分的方法,描述其中一相物质在整体区域内的分布均匀性。混药器 ROI 方格划分如图 4a 所示,即所有小网格中农药的量相差较小,则混合较为均匀;图 4b 两幅图像中黑白像素所占比例相同,但由于黑色像素分布不同,导致后者更为均匀,说明需要引入面积加权的均匀性计算方法。

借助 Matlab 图像处理工具,对 ROI 以 5 像素 $\times$ 5 像素进行等面积网格划分,等网格面积条件下 γ 计算公式为

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (|\phi_i - \mu|)}{2N |\mu|} \tag{3}$$

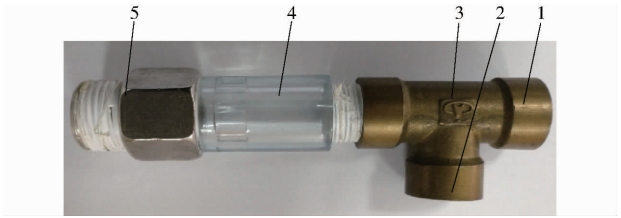


图 5 验证试验检测管安装方式

Fig.5 Detection tube installation in verification experiments

1. 进水口 2. 进药口 3. 三通管 4. 检测管 5. 溶液出口

(2)不均匀混合图像采集:进行不安装混药器条件下的在线混合,农药从三通管的下部进药口注入载流之中。控制 $Q = 2\,400\text{ mL/min}$, P 同上,采集混合图像。

(3)极不均匀混合图像采集:采取注药后静置的方式,待药水分层后采集极不均匀的混合图像。

1.4 变工况试验设计及试验参数设置

安装旋动射流混药器进行变工况试验,混药器及检测管安装方式如图 6 所示。

变工况试验参数包括不同的混合比 P ,以及不同的载流流量 Q ,调整这两个参数即可以满足在线喷雾需要。在草甘膦用于大豆病虫害防治中,常见的药水混合比 P 范围一般为 1:10 到 1:107 之间^[11],试验中混合比指的是体积流量比。载流流量

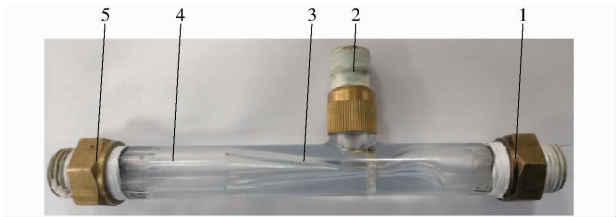


图 6 变工况试验混药器及检测管安装方式

Fig. 6 Swirling jet mixer and detection tube installation under variable working conditions experiments

1. 进水口 2. 进药口 3. 混药器 4. 检测管 5. 溶液出口

Q 参考实际喷雾作业中单喷头流量选取^[20],并结合试验系统水泵特性,流量范围限定在 2 400 mL/min 以内,设定较小的载流流量 Q 以适应未来精量喷雾的发展趋势。本试验仅研究混合均匀性,在安装 MDC01/4BSPT 型喷头的条件下喷雾压力在 0.3 MPa 以内,低于常见喷雾系统的实际工作压力。变工况试验安排如表 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 均匀性分析方法验证

人工预混均匀混合液图像计算结果如图 7a ~ 7e 所示。不同混合比 P 下各 ROI 图像均显示出极高的混合质量,图像几乎无亮度差异。预混液的 α 值计算结果均小于 0.1,说明 ROI 内不存在大浓度差异性,药团被分散。而以 $\mu \pm 0.02$ 计算所得的 γ 值基本在 99% ~ 100% 之间,各混合比 P 下的图像各小网格内所含有浓度均值附近农药的量几乎没有差异。预混合溶液混合均匀极佳。

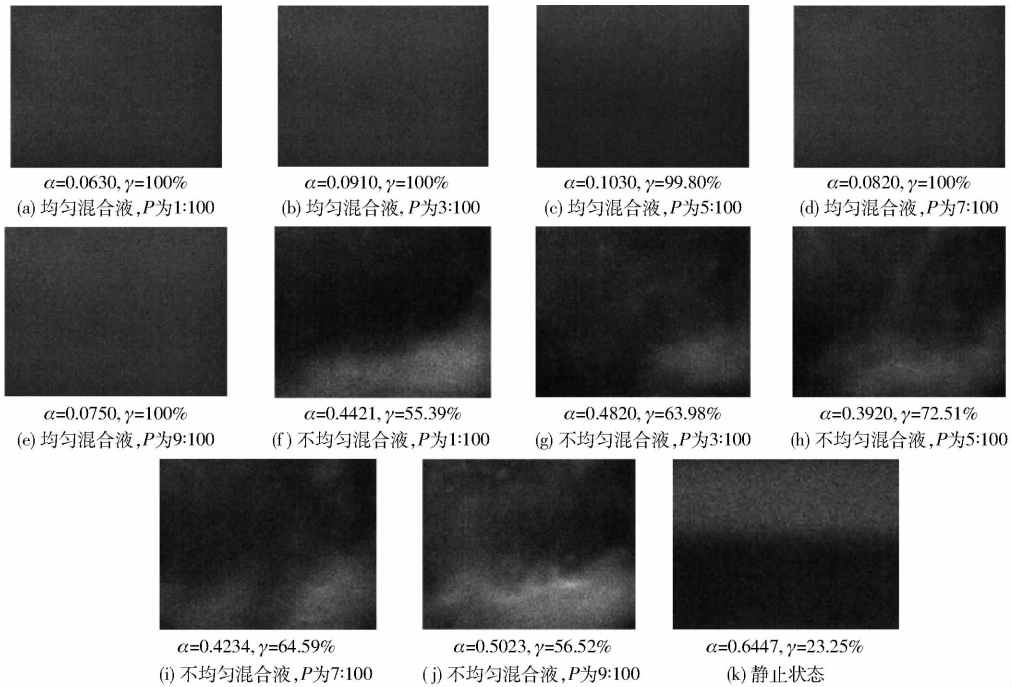


图 7 均匀性分析方法验证试验结果 (ROI 图像)

Fig. 7 Comparative results of verification experiments by uniformity analysis methods

表 1 变工况试验安排

Tab. 1 Parameters arrangements under variable working conditions experiments

药流量/(mL·min ⁻¹)					
$Q =$	$Q =$	$Q =$	$Q =$	$Q =$	混合
2 400	2 000	1 600	1 200	800	比 P
mL/min	mL/min	mL/min	mL/min	mL/min	
240	200	160	120	80	10:100
216	180	144	108	72	9:100
192	160	128	96	64	8:100
168	140	112	84	56	7:100
144	120	96	72	48	6:100
120	100	80	60	40	5:100
96	80	64	48	32	4:100
72	60	48	36	24	3:100
48	40	32	24	16	2:100
24	20	16	12	8	1:100

不均匀混合液图像对比结果如图 7f ~ 7j 所示。图中可见大部分农药仍集中在检测管内的一部分区域,且连续图像显示农药呈团状不连续分布。根据图像计算所得的 α 在 0.39 ~ 0.51 之间,表明 ROI 内有较亮的药团以及含药量较低的水存在。 γ 集中在 50% ~ 75% 之间,明显小于预混合试验结果。农药没有分布在整个 ROI 内,药水混合效果很差。

静置分层试验检测管内图像如图 7k 所示。农药受浮力作用与水分层并集中在检测管上部。计算所得 α 为 0.644 7,远大于预混合及无混药器注入试验结果。 γ 为 23.25%,远小于极均匀混合图像及不均匀混合图像计算结果,静置分层导致混合极不均匀。

综上所述,所提出的基于 α 以及 γ 的图像均匀性分析方法能够准确识别均匀程度明显不同的混合溶液,越均匀的混合液则 γ 越大, α 越小。依据该分析方法可以对混合均匀性进行判别,较均匀的混合液计算所得 α 及 γ 应在所标定的均匀混合液及不

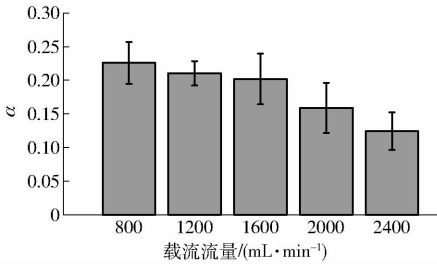
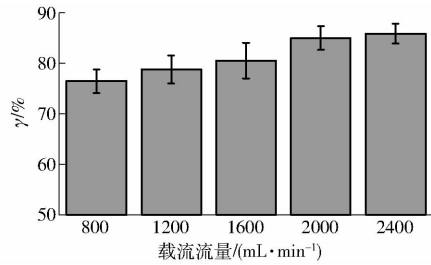


图 8 载流流量对混合均匀性的影响

Fig. 8 Impact of carrier flow rates on mixing uniformity

随着 Q 的增加,不同混合比 P 对应的平均 α 从 800 mL/min 时对应的 0.226 0 逐渐减小到 2 400 mL/min 时的 0.125 0,混合均匀性指数 γ 逐渐从 76.50% 增大到 85.80%。 Q 为 2 400 mL/min 时对应的混合均匀性最高,ROI 内图像像素值波动范围较小,亮度值分布趋于集中,平均浓度的混合液在 ROI 内的分布均匀性较高。其混合均匀性接近预混合时的均匀性,表明增加 Q 可以减小 ROI 内浓度值的波动范围,并提高药水混合均匀性,分析知这是因为流量增大导致水的紊流效

均匀混合液计算平均值之间。
2.2 不同载流流量混合均匀性分析
载流流量 Q 不同意味着实际喷雾中单喷头水流量不同。不同载流流量 Q 条件下的试验结果如图 8 所示。



应增强,从而使得脂溶性药团更加容易被击碎分散。
 Q 在 800 ~ 1 600 mL/min 之间时, α 仅减小 0.023 0, γ 仅增加约 4%,变化不明显。 Q 从 1 600 mL/min 提高到 2 000 mL/min 时, α 从 0.202 0 下降至 0.159 0, γ 从 80.40% 增加至 85%,均匀性存在相对明显的提升。 P 为 10:100 时不同载流流量 Q 对应的 ROI 图像如图 9 所示, Q 为 800 ~ 1 600 mL/min 时均存在未散开的药团,在 Q 提升至 2 000 mL/min 时,药团消失,混合变得较为均匀。

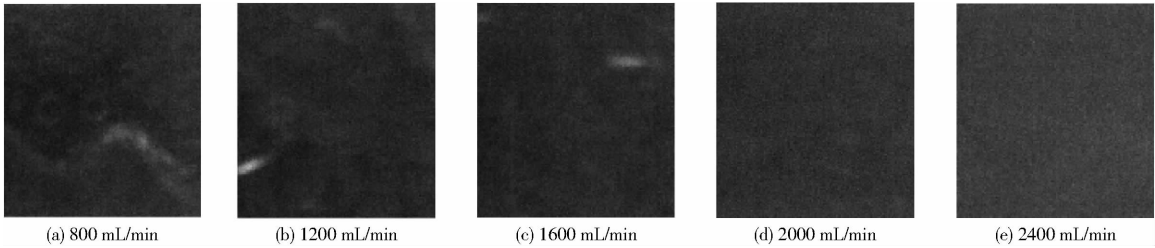


图 9 P 为 10:100 时不同载流流量对应的 ROI 图像

Fig. 9 Mixing images in ROI under conditions of different flow rates with a settled mixing ratio of 10:100

2.3 不同混合比混合均匀性分析

混合比 P 不同意味着实际混合的药水浓度不同。不同混合比 P 条件下的试验结果如图 10 所示。
随着混合比 P 的减小,不同载流流量 Q 对应的平均 α 均逐渐增大,平均 γ 均逐渐减小。这表明较

高混合比 P 有助于减小因药液难以分散所带来的浓度值的差异性,并增加了混合管内药液在各检测区域各部分分布的均匀性。 P 为 10:100 时,不同载流流量 Q 的平均 α 可降至 0.15 以下,平均 γ 可提升至 85%,各载流流量 Q 下混合均匀性均达到

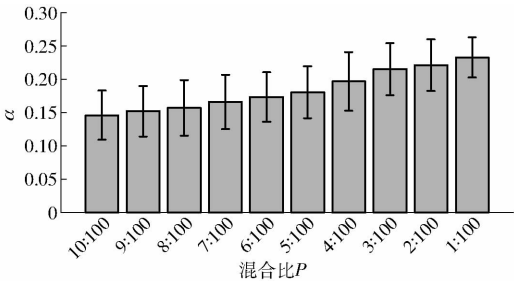
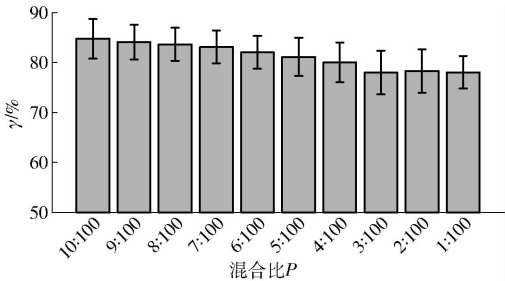


图 10 混合比对混合均匀性的影响

Fig. 10 Impact of mixing ratios on mixing uniformity



最高。

载流流量 Q 为 2 000 mL/min 时不同混合比 P 对应混合图像如图 11 所示。在较高的混合比 P 下,

检测区域整体亮度较高,且无明显的药团出现,接近均匀混合液标定结果。而当混合比 P 较低时,如 P 为 1:100 时,虽仍会偶尔出现未散开的药团,但是整

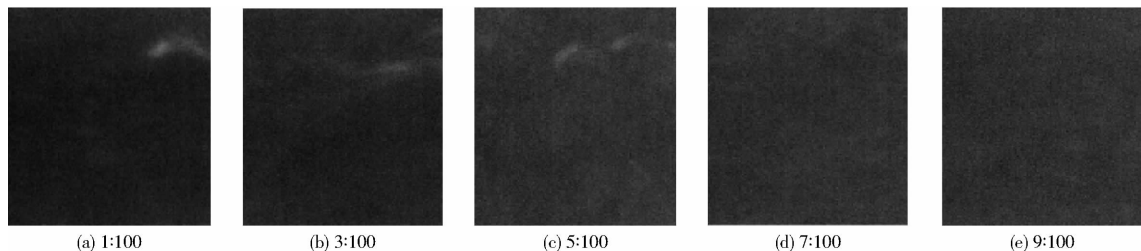


图 11 $Q = 2\,000$ mL/min 时不同混合比对应的 ROI 图像

Fig. 11 Mixing images in ROI under conditions of different mixing ratios with a settled carrier flow rate of 2 000 mL/min

体混合图像仍较为均匀,均匀性基本达标。

2.4 工况条件优选

不同载流流量 Q 、混合比 P 条件下, α 以及 γ 如图 12 所示。对 α 与 γ 所求得的相关系数 $R =$

-0.938 8,说明对于 ROI 所求的 α 与 γ 之间存在高度的负线性相关性,即较大的 α 值往往对应着较低的 γ 值,当 ROI 内浓度波动减小时,农药在整个区域内的分布也更为平均,这与实际混合规律一致。

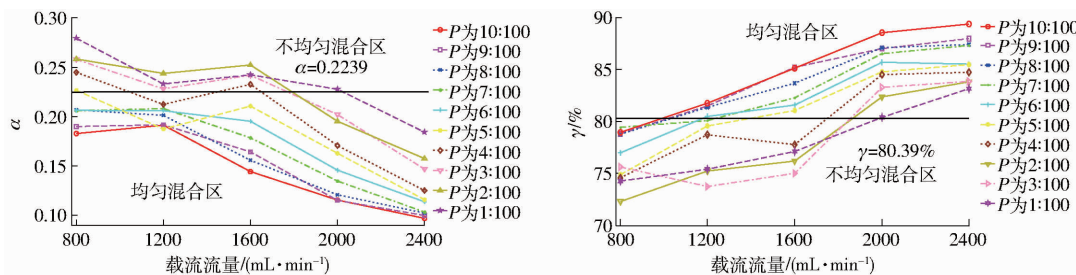


图 12 工况条件优选

Fig. 12 Working conditions preferences

根据图 12 分析,当 Q 从 1 600 mL/min 提升至 2 000 mL/min 时,不同混合比 P 下 α 平均值有较明显下降, γ 平均值有较明显上升,均匀性有较明显提高。当 $Q = 2\,000$ mL/min, P 为 1:100 时,实际混合图像(图 11a)有较少几率会出现较浓的药团。该工况下计算所得 γ 为 80.39%, α 为 0.223 9,说明虽然 ROI 内仍会出现少许未散开的药团,但是混合液在整个 ROI 内仍具有相当的分布均匀性,与实际混合效果相符。这种偶尔出现较浓药团的情形在实际应用中,可以进一步采取往脂溶性药剂中加入助剂促进药水亲和等措施,再辅以喷头的雾化混合效果,解决农药有效成分在喷雾区域上的分布差异性问题。因此,选择 $Q = 2\,000$ mL/min, P 为 1:100 的均匀性计算结果作为判断混合液是否均匀的阈值,如图 12 中横线所示。按照 α 及 γ 分别筛选的结果在低载流流量 Q 时稍有不同,需要结合实际混合图像再行判断。

结合实际混合图像,在应用旋动射流式混药器混合脂溶性农药时,当 $Q \geq 2\,000$ mL/min 时,低混合比下会偶尔出现难以分散的药团,因此可基本满足 P 大于等于 1:100 的在线均匀混合; $Q = 800$ mL/min 时,未分散药团时刻存在,因此 $Q \leq 800$ mL/min 时

基本无法均匀混合脂溶性农药; Q 在 800 ~ 2 000 mL/min 时,较高混合比 P 条件下药团出现几率较少,能够完成药水的均匀混合。因此在实际应用该混药器进行脂溶性农药在线混合喷施时应尽量避免较低的载流流量 Q ,防止药水混合不均匀,尤其在混合比 P 较低的情况下。实际应用该混药器进行喷雾时需保证载流流量 $Q \geq 2\,000$ mL/min。

3 结论

(1)根据均匀性分析方法验证试验,所提出的基于像素 α (变异系数)以及 γ (面积加权均匀性指数)的均匀性分析方法能够有效描述农药的在线混合均匀性。 α 越小, γ 越大,则混合越均匀。

(2)添加混药器能够有效提高脂溶性农药与水的在线掺混。旋动射流混药器的混合效果随载流流量 Q 的增大及混合比 P 的增大而提高, $Q = 2\,400$ mL/min 时,较高混合比 P 条件下的混合效果接近预混合效果;载流流量 $Q \geq 2\,000$ mL/min 时,不同混合比 P 工况下,仍具有较高的 γ 及较低的 α , P 为 1:100 时较少出现未散开的药团,基本满足均匀性要求。

(3)以 $Q = 2\,000$ mL/min、 $P = 1:100$ 条件下计算

的均匀性值对全部工况进行筛选,结果表明: $Q \leq 800 \text{ mL/min}$ 时,旋动射流混药器基本无法完成脂溶性农药与水的均匀掺混; $800 \text{ mL/min} < Q < 2000 \text{ mL/min}$ 能完成较高混合比 P 的在线混合;由于当前应用的直接注入式喷雾机多是以改变混合比

P 进行变量喷雾工作的,因此从混合均匀性角度考虑,应用该混药器混合脂溶性农药,推荐载流流量 Q 在 2000 mL/min 以上,以满足较低混合比 P 混合时的均匀性要求。而当混合水溶性农药时,由于水溶性农药与水较容易混合,工况条件可适当放宽。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 薛新宇,兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):194-201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034.
- 3 XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):194-201. (in Chinese)
- 4 郑加强,周宏平,徐幼林,等. 农药精确对靶施用及其系统设计[J]. 农业工程学报,2005,21(11):67-72.
- 5 ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, XU Youlin, et al. Toward-target precision pesticide application and its system design[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11):67-72. (in Chinese)
- 6 袁琦堡,胡炼,罗锡文,等. 在线实时混药喷雾系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):176-181. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.027.
- 7 YUAN Qibao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of online mixing spraying system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):176-181. (in Chinese)
- 8 ZHU H, OZKAN H E, BRAZEE R D, et al. A system to determine lag time and mixture uniformity for inline injection sprayers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1998, 14(2):103-110.
- 9 LUCK J D, SHEARER S, LUCK B D, et al. Recalibration methodology to compensate for changing fluid properties in an individual nozzle direct injection system[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(3):847-859.
- 10 VONDRICKA J, HLOBEN P, LAMMERS P S. Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application[C]//ASABE Annual International Meeting, Technical Papers. Minneapolis, 2007.
- 11 ZHU H, OZKAN H E, FOX R D, et al. Mixture uniformity in supply lines and spray patterns of a laboratory injection sprayer[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 14(3):223-230.
- 12 LUCK J D, SHEARER S, LUCK B D. Evaluation of a Rhodamine-WT dye/glycerine mixture as a tracer for testing direct injection systems on agricultural sprayers[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 19(28):643-646.
- 13 VONDRICKA J, LAMMERS P S. Measurement of mixture homogeneity in direct injection systems[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(1):61-66.
- 14 VONDRICKA J, LAMMERS P S. Evaluation of a carrier control valve for a direct nozzle injection system[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1):43-48.
- 15 HLOBEN P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides[D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 16 REALPE A, VELAZQUEZ C. Image processing and analysis for determination of concentrations of powder mixtures[J]. Powder Technology, 2003, 134(3):193-200.
- 17 BERTHIAUX H, MOSOROV V, TOMCZAK L, et al. Principal component analysis for characterising homogeneity in powder mixing using image processing techniques[J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2006, 45(5):397-403.
- 18 MUERZA S, BERTHIAUX H, MASSOL-CHAUDÉUR S, et al. A dynamic study of static mixing using on-line image analysis[J]. Powder Technology, 2002, 128(2-3):195-204.
- 19 郭敬坤,徐幼林,汪希伟. 混药器流体图像采集与分割方法[J]. 农业机械学报,2009,40(1):83-86.
- 20 GUO Jingkun, XU Youlin, WANG Xiwei. Investigation of liquid image processing methods for pesticide mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):83-86. (in Chinese)
- 21 XU Youlin, WANG Xiwei, ZHENG Jiaqiang, et al. Simulation and experiment on agricultural chemical mixing process for direct injection system based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5):152.
- 22 宋海潮,徐幼林,郑加强,等. 脂溶性农药旋动射流混合机理与混药器流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160912&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.012.
- 23 SONG Haichao, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Swirling jet mixture mechanism of fat-soluble pesticides and numerical simulation of mixer field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):79-84. (in Chinese)
- 24 TAO H G, CHEN H X, XIE J L, et al. An alternative approach to quantifying fluid flow uniformity based on area-weighted average velocity and mass-weighted average velocity[J]. Energy & Buildings, 2011, 45(2):116-123.
- 25 吴春笃,张波,王军锋,等. 高效喷雾技术研究及应用[M]. 镇江:江苏大学出版社,2016.