

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010

温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化^{*}

袁雪¹ 祁力钧¹ 王虎¹ 黄世凯¹ 冀荣华² 张建华¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

【摘要】 设计了具有喷头变速摇摆功能和自动进、排药功能的温室摇摆式变量弥雾机。为验证和优化喷雾机的施药效果,以喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆动速度为自变量,雾滴分布变异系数为响应值,根据 Box-Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平响应面分析方法,并利用 Design-Expert 软件建立数学模型,对各因素及其交互作用进行分析。结果表明:4 个因素的影响显著性由大到小依次为:喷头摆动速度、喷雾机行走速度、喷雾距离、喷雾流量;喷雾机的最佳喷雾参数为:喷雾流量 185 mL/min、喷雾距离 2 m、喷雾机行走速度 8 cm/s 和喷头摆动速度 5(°)/s,此时雾滴分布变异系数为 1.632%。

关键词: 温室 弥雾机 喷雾参数 响应面法

中图分类号: S491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)04-0045-06

Spraying Parameters Optimization of Swing, Automatic Variables and Greenhouse Mist Sprayer with Response Surface Method

Yuan Xue¹ Qi Lijun¹ Wang Hu¹ Huang Shikai¹ Ji Ronghua² Zhang Jianhua¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

A swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer equipped with the sprinkler swing function and automatic dosing and discharge liquid system was presented. In order to verify and optimize pesticide application efficiency of mist sprayer, parameters such as spraying flow rate, spraying distance, sprinkler swing speed and sprayer forward velocity were selected as independent variables, which would influence distribution of droplets deposition. Subsequently, the Box-Behnken experimental design with four factors and three levels was performed, and the mathematical model was established by using Design-Expert software, then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The results showed that effects order of four parameters on distribution of droplets deposition were as follows: sprinkler swing speed, sprayer forward velocity, spraying distance, and spraying flow rate. The optimal spraying parameters were spraying flow rate of 185 mL/min, spraying distance of 2 m, sprayer forward velocity of 8 cm/s and sprinkler swing speed of 5(°)/s, then the coefficient of variation of droplets distribution of 1.632% was obtained.

Key words Greenhouse, Mist sprayer, Spraying parameter, Response surface method

引言

随着日光温室推广普及,以及人们对安全施药

和保护生态环境的要求,开发温室专用的高效施药技术和装备已迫在眉睫。温室无人自动施药技术是近年来设施农业植保机械领域研究的新技术。

收稿日期: 2011-06-20 修回日期: 2011-07-23

^{*} 农业部农业科技专项资助项目(201203025)和中国农业大学研究生科技创新专项资助项目(KYCX2011072)

作者简介: 袁雪,博士生,主要从事植保机械研究,E-mail: yuan12062001@yahoo.com.cn

通讯作者: 祁力钧,教授,博士生导师,主要从事植保机械和图像处理研究,E-mail: qilijun@cau.edu.cn

Dramm Autofog 喷雾系统采用自动烟雾生成器和循环风扇,在需要手动喷雾的场所进行自动喷雾,避免了操作者与农药过度接触带来的危害^[1]; Rowe 等将喷头安装在温室内部的固定支架上,利用继电器自动控制施药时间,实现无人自动施药^[2]。我国在此领域与发达国家有很大差距。目前,我国仍广泛使用手动背负式喷雾器对温室进行病虫害防治喷雾,防治效果差,农药使用量大,有效利用率仅为 20%~30%。温室施药人员通过暴露于环境中的皮肤和呼吸系统直接接触农药,从而引发农药中毒^[3-6]。为了解决上述问题,本文研究一种用于温室的摇摆式变量弥雾机,以喷雾参数作为自变量,通过试验测得不同因素水平组合条件下雾滴分布变异系数,采用响应面分析法确定各因素及其交互作用对施药指标的影响和获取最优控制变量组合,以达到最佳喷雾性能。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

温室摇摆式变量弥雾机是一台自动变速变量智能喷雾装置。整个系统集成喷雾机构、摆动机构、行走机构和自动加药装置,其主要结构如图 1 所示。其中,喷雾机构选用旋切风雾化喷头,内置起涡器将风机产生的气流转换成高速旋切气流,高速旋切气流将液体雾化,雾化后的雾滴形成弥雾,经风机驱动通过喷头体飘向温室内的作物。喷雾机构上的 U 型支架组成摆动机构,以摆动机构上的接近开关作为中间定位点,实现喷雾机构左、右摆动角度及方向的控制。当摆动机构摆动到极限位置时,接近开关发出信号给电控箱,进而调节摆动机构反方向转动,如此循环摆动,以达到最佳的施药效果。喷雾机行走机构设置在机架上端,包括步进电动机和 2 个驱动轮,行走机构具有前进、后退和自动返回 3 种工作模式。自动加药装置通过控制装置上的按键完成加药和排药过程,达到一键式操作,使用方便、快捷,且避免了操作人员与农药的直接接触。

1.2 试验方法

由于喷头类型、喷雾流量、喷雾压力和风速等因素的制约,喷洒的雾滴有很大一部分到不了预定的目标,而到了目标的雾滴又因为分布不均而使药效不高^[7]。精确变量喷雾的重要研究内容即是使喷雾雾滴在目标上均匀分布,均匀分布的程度一般用变异系数表示。变异系数小于 10% 的喷雾分布模型是非常一致的,变异系数在 10%~15% 之间的喷雾分布模型可以接受或能够使用,变异系数大于 15% 的分布模型则无法使用^[8]。因此,试验内容以

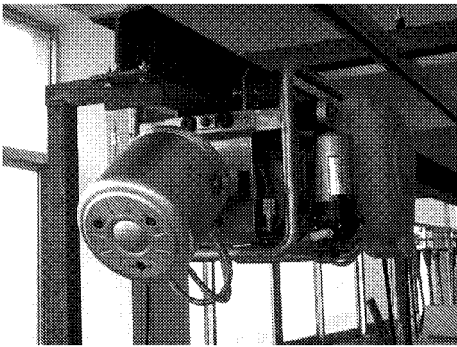


图 1 温室摇摆式变量弥雾机

Fig.1 Swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer

验证喷雾机喷雾模型均匀性和优选适于精确农业变量作业的最佳条件为目的,通过设计不同因素水平组合的试验方案,测量各试验条件下的雾滴沉积分布变异系数,以方差分析为手段建立数学回归模型,应用响应面法分析并优化喷雾参数。

2 试验设计与流程

2.1 试验布置

在中国农业大学植保机械实验室 3 m×3 m 的区域内,布置分布在 3 个不同喷雾距离的 18 个采样点,沉积载体选用直径 9 cm 的滤纸,试验布置如图 2 所示。

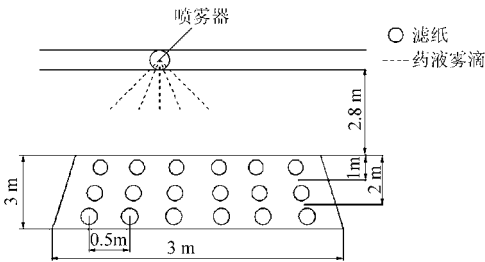


图 2 采样点布置

Fig.2 Sampling scheme

2.2 试验仪器

选用 KANOMAX Climomaster A531 型环境测试仪测量环境温度和湿度;AVM-05 型风速仪测量风机风速;722N 型可见分光光度计测定滤纸上喷雾药液的浓度。

2.3 试验设计

试验设计运用 Design-Expert 7.0 软件对试验数据进行回归分析,Box-Behnken 设计模型能用较少的试验次数进行全面的分析研究。根据相关文献和单因素试验,选取喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摇摆速度为试验因素,雾滴分布变异系数为响应值进行响应面分析试验。因素水平和编码如表 1 所示。

表 1 响应面分析法的因素与水平

Tab.1 Factors and levels of response surface method				
水平	因素			
	喷雾流量	喷雾距离	喷雾机行走	喷头摆动速度
	$x_1/\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	x_2/m	速度 $x_3/\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	$x_4/(\text{^\circ})\cdot\text{s}^{-1}$
1	300	3.0	12	10
0	190	2.0	8	6
-1	80	1.0	4	2

2.4 试验流程

试验在中国农业大学植保机械实验室进行,每个试验重复 3 次,取 3 次的平均值计入结果。试验步骤如下:

(1) 配制溶液

试验测试的示踪物选用亚甲基蓝粉末,以自来水作为溶剂进行配制,配制后溶液的质量浓度为 0.5 g/L。

(2) 确定试验条件

每次开始试验时喷雾机处于悬挂导轨左起始点,喷头初始竖直向下,垂直且平行喷雾机喷头的喷雾区域为喷雾距离 0 m,单位时间内喷头摆动与竖直方向的夹角为喷头摆动速度。根据试验设计要求,分别调节喷雾流量、喷雾距离、喷头摇摆速度和喷雾机行走速度等工作参数至预定值。

(3) 测定试验环境参数

实验室内密闭无自然风,温度 26.8℃、相对湿度 24%、喷雾机喷头风机风速 10.3 m/s、大气压力 101.3 kPa。

(4) 采集样品

喷雾机和药箱通过驱动行走机构在导轨上作往复运动,喷头单面向左摆动,导轨长 3 m,采样时间为喷雾机在导轨上往返运动 2 次的时长。喷雾后 10~30 min 滤纸变干,将滤纸收集到干燥的采样瓶中,在瓶中加 100 mL 的蒸馏水(含酒精体积分数 5%),静置 2 h,把滤纸上沉积的亚甲基蓝洗脱下来。用分光光度计测定液体中的亚甲基蓝浓度,然后计算各采样区域每片滤纸上的雾滴沉积量。

(5) 雾滴分布变异系数

雾滴分布变异系数计算公式为

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%$$

(1)

式中 c_v ——雾滴沉积分布变异系数,%
 s ——滤纸雾滴沉积量标准差
 $\bar{x}$ ——滤纸雾滴沉积量平均值,μg

3 结果与分析

3.1 试验设计方案及结果

试验结果如表 2 所示。应用 Design-Expert 软件

对数据进行分析,得到编码值表示的雾滴分布变异系数 Y 的二次回归模型为

$$Y = 1.59 - 0.031X_1 - 0.043X_2 + 0.2X_3 + 0.21X_4 - 0.047X_1X_2 + 0.013X_1X_3 - 0.31X_1X_4 + 0.067X_2X_3 - 0.08X_2X_4 + 0.18X_3X_4 + 0.62X_1^2 + 0.24X_2^2 + 1.11X_3^2 + 0.34X_4^2$$

(2)

表 2 响应面分析结果

Tab.2 Results of response surface analysis					
试验号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y/\%$
1	1	-1	0	0	2.67
2	0	0	1	-1	2.71
3	0	-1	-1	0	2.78
4	0	-1	0	-1	1.95
5	-1	1	0	0	2.35
6	1	0	0	-1	2.55
7	1	0	0	1	2.27
8	0	1	0	-1	2.09
9	-1	0	1	0	3.54
10	-1	-1	0	0	2.48
11	1	0	1	0	3.54
12	0	0	1	1	3.71
13	0	1	1	0	3.21
14	0	1	-1	0	2.63
15	0	0	-1	1	3.03
16	1	1	0	0	2.35
17	-1	0	-1	0	3.11
18	0	-1	0	1	2.39
19	0	0	-1	-1	2.74
20	-1	0	0	-1	2.19
21	1	0	-1	0	3.06
22	0	1	0	1	2.21
23	-1	0	0	1	3.14
24	0	-1	1	0	3.09
25	0	0	0	0	1.47
26	0	0	0	0	1.78
27	0	0	0	0	1.76
28	0	0	0	0	1.32
29	0	0	0	0	1.63

对模型(式 2)进行方差分析和回归系数显著性检验,结果见表 3。由表 3 方差分析可知,模型的 $P < 0.0001$,表明模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,失拟不显著,回归模型与实际拟合良好, R^2 为 0.9401,拟合度高,说明模型所拟合的二次回归方程合适,能正确反映雾滴分布变异系数 Y 与 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 之间的关系,模型可以较好地对体系内各种试验结果

进行预测。

表 3 方差分析
Tab.3 Variance analysis

项目	平方和	自由度	均方	F	P
X_1	0.011	1	0.011	0.48	0.501 9
X_2	0.023	1	0.023	0.94	0.349 1
X_3	0.50	1	0.50	20.84	0.000 4
X_4	0.53	1	0.53	22.04	0.000 3
X_1X_2	9.025×10^{-3}	1	9.025×10^{-3}	0.38	0.549 6
X_1X_3	6.250×10^{-4}	1	6.250×10^{-4}	0.026	0.874 1
X_1X_4	0.38	1	0.38	15.75	0.001 4
X_2X_3	0.018	1	0.018	0.76	0.398 3
X_2X_4	0.026	1	0.026	1.07	0.319 3
X_3X_4	0.13	1	0.13	5.25	0.038 0
X_1^2	2.49	1	2.49	103.52	<0.000 1
X_2^2	0.37	1	0.37	15.27	0.001 6
X_3^2	7.94	1	7.94	330.80	<0.000 1
X_4^2	0.73	1	0.73	30.37	<0.000 1
模型	10.73	14	0.77	31.93	<0.000 1
失拟项	0.18	10	0.018	0.47	0.845 9
残差	0.34	14	0.024		
净误差	0.15	4	0.038		
总离差	11.07	28			

由表 3 也可知,模型的一次项 X_3 (喷雾机行走速度)和 X_4 (喷头摇摆速度)影响极显著,而 X_1 (喷雾流量)和 X_2 (喷雾距离)影响不显著;二次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 和 X_4^2 都影响极显著;交互项 X_1X_4 和 X_3X_4 影响显著,其余各项均不显著。根据模型各因素的回归系数的大小,可得到各因素的影响主次顺序为: X_4 、 X_3 、 X_2 、 X_1 ,即喷头摆动速度、喷雾机行走速度、喷雾距离、喷雾流量^[9]。

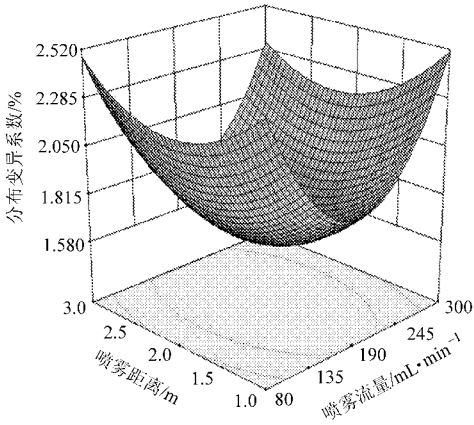


图 3 喷雾距离和喷雾流量对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig.3 Surface and contour plots of mutual-influence of spraying distance and spraying flow rate on distribution of droplets deposition

3.2 模型交互项的解析

根据回归方程(式 2)作出响应面图和等高线图。等高线的形状可反映出交互作用的强弱,椭圆形表示两因素交互作用显著,而圆形则相反^[10]。

由图 3 可知,获得较好雾滴分布均匀性的条件是喷雾流量 190 mL/min,喷雾距离 2 m。随着喷雾流量的增加,雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势。主要原因是单位时间喷雾流量过大,会使喷雾区域内沉积的雾滴相互重叠,单位时间内喷雾流量过小,会降低雾滴在区域内的覆盖率。

由图 4 可知,获得较好雾滴分布均匀性的条件是喷雾流量 190 mL/min,喷雾机行走速度 8 cm/s。随着喷雾机行走速度的增加,雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势。主要原因是喷雾机行走速度影响到喷雾机行走的稳定性,速度过快或过慢将影响喷雾机在导轨上行走的平衡能力。

由图 5 可知,获得较好雾滴分布均匀性的条件是喷雾流量 190 mL/min,喷头摆动速度 4(°)/s。两因素交互作用的等高线图表明,喷雾流量和喷头摆动速度的交互作用对雾滴分布变异系数影响显著,与方差分析结果相吻合。

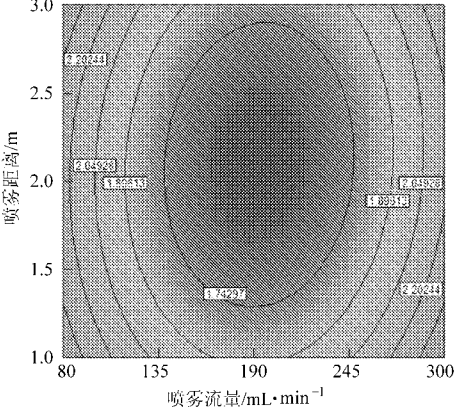
由图 6 可知,喷雾距离对雾滴分布变异系数影响不明显,与方差分析结果一致。

由图 7 可知,随着喷头摆动速度的增加,雾滴分布变异系数呈现先减小后增加的趋势。主要原因是喷头摆动速度决定单位时间内施药面积,如果施药面积过大,会出现漏喷的现象,施药面积过小,会造成同一区域内多次喷洒。

由图 8 可知,两因素交互作用的等高线图表明喷雾机行走速度和喷头摆动速度的交互作用对雾滴分布变异系数影响显著,与方差分析结果相同。

3.3 喷雾机最优参数确定及模型验证

通过对回归方程模型进行优化求解,得到温室分布变异系数/%



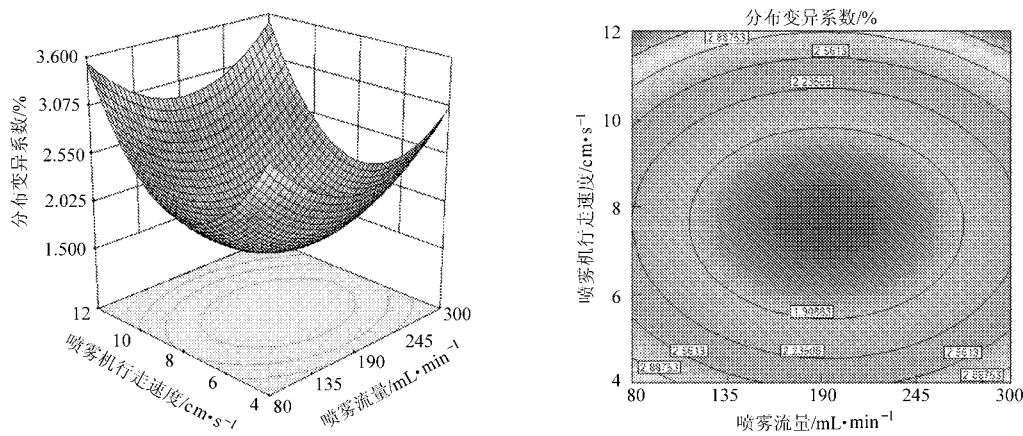


图 4 喷雾机行走速度和喷雾流量对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig. 4 Surface and contour plots of mutual-influence of mist-sprayer forward velocity and spraying flow rate on distribution of droplets deposition

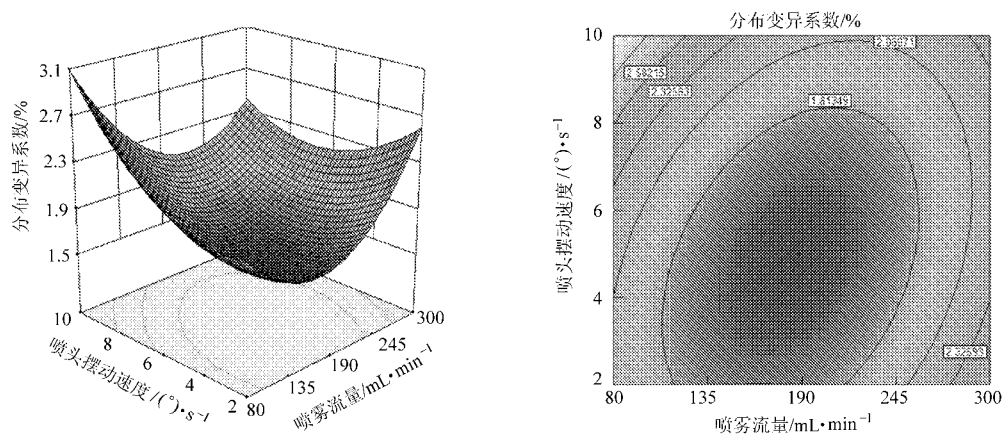


图 5 喷头摆动速度和喷雾流量对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig. 5 Surface and contour plots of mutual-influence of nozzle swing speed and spraying flow rate on distribution of droplets deposition

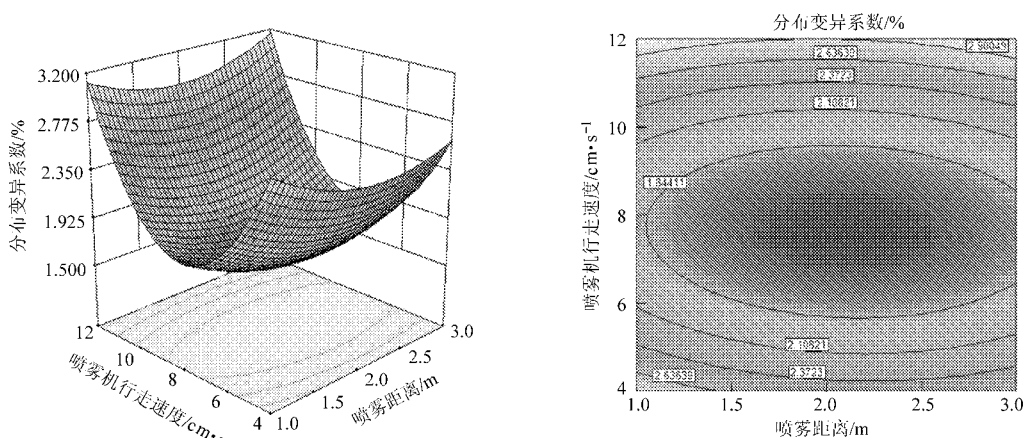


图 6 喷雾机行走速度和喷雾距离对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig. 6 Surface and contour plots of mutual-influence of mist-sprayer forward velocity and spraying distance on distribution of droplets deposition

摇摆式变量弥雾机最优喷雾参数为：喷雾流量 184.5 mL/min、喷雾距离 2.04 m、喷雾机行走速度 7.73 cm/s 和喷头摆动速度 4.75(°)/s,此条件下雾滴分布变异系数为 1.552%。

为验证模型的可靠性,采用上述最优喷雾参数进行 3 次试验,3 次试验的雾滴分布变异系数均值为 1.632%,相对误差 5.1%,和理论预测值基本吻合。

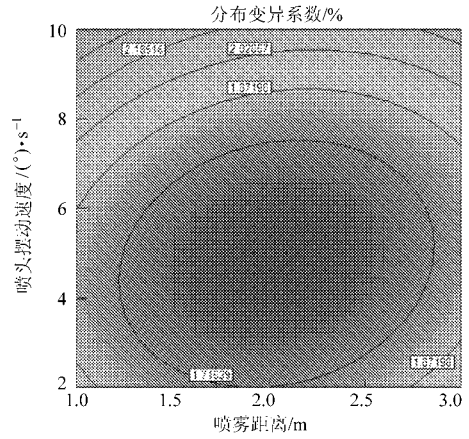
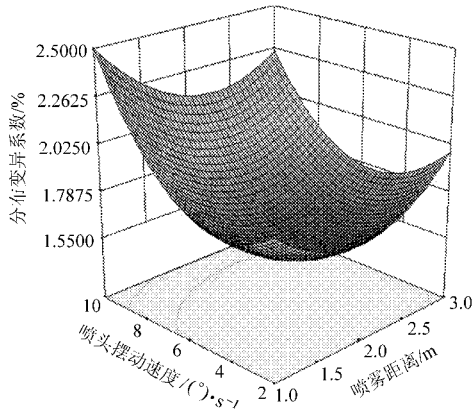


图 7 喷头摆动速度和喷雾距离对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig.7 Surface and contour plots of mutual-influence of nozzle swing speed and spraying distance on distribution of droplets deposition

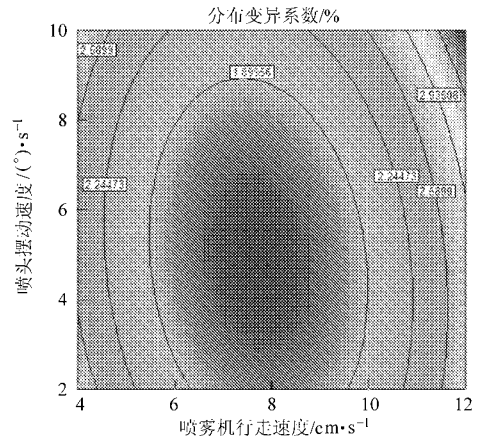
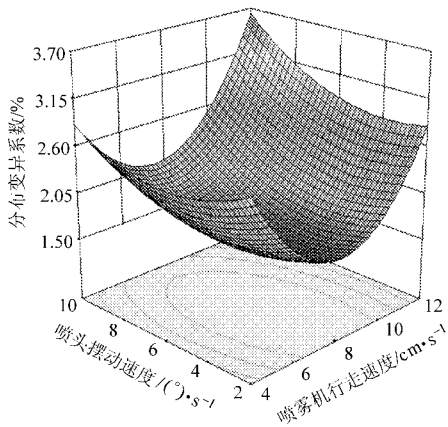


图 8 喷头摆动速度和喷雾机行走速度对雾滴分布变异系数交互影响的三维曲面图和等高线图
Fig.8 Surface and contour plots of mutual-influence of nozzle swing speed and mist-sprayer forward velocity on distribution of droplets deposition

4 结论

(1)根据响应面分析法进行喷雾机参数优化的试验结果得出:影响喷雾雾滴分布变异系数的因素由大到小依次为喷头摆动速度、喷雾机行走速度、喷雾距离、喷雾流量。

(2)建立了雾滴分布变异系数与喷雾流量、喷雾距离、喷雾机行走速度和喷头摆动速度的二次多

项式回归模型,得到最佳操作参数。经试验验证,当喷雾流量为 185 mL/min、喷雾距离为 2 m、喷雾机行走速度为 8 cm/s、喷头摆动速度为 5 (°)/s 时,得到雾滴分布变异系数为 1.632%,相对误差为 5.1%。试验值与理论值基本吻合,证明了该模型的可靠性。

(3)响应面曲面分析结果表明,喷雾流量和喷头摇摆速度、喷雾机行走速度和喷头摇摆速度的交互作用影响显著,而其他交互作用影响不显著。

参 考 文 献

- 1 Nuytens D, Windey S, Sonck B. Optimisation of a vertical spray boom for green house spray applications[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(4): 417 ~ 423.
- 2 Rowe D E, Malone S, Yate Q L. Automated green house spray system for increased safety and flexibility[J]. Crop Science, 2000, 40(4): 1176 ~ 1179.
- 3 Liu Qian, Lan Zhou, Zheng Na, et al. Poisoning deaths in China: type and prevalence detected at the tongji forensic medical center in Hubei[J]. Forensic Science International, 2009, 193(1 ~ 3): 88 ~ 94.
- 4 张霞. 温室蔬菜病虫害危害的特点及综合防治技术[J]. 内蒙古农业科技, 2006(7): 27 ~ 28, 31.
- 5 何雄奎. 改变我国植保机械和施药技术严重落后的现状[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 13 ~ 15.
- He Xiongkui. Improving severe dragging actuality of plant protection machinery and its application techniques [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(1): 13 ~ 15. (in Chinese)

室气吹作用和有平衡气孔气室气吹作用3种状态下,排种器的合格指数分别为66.8%、78.4%和82.0%,漏播指数分别为14.4%、4.4%和2.4%。

在有平衡气孔气室气吹作用下,播种最均匀,单位长度内播种数量变化范围在10%内。在有平衡气孔气室气吹作用下,排种器性能得到明显改善。

参 考 文 献

1 张秀花,夏玲,马洪亮.精密播种机的可靠性研究[J].农业机械学报,2004,35(2):62~65.
Zhang Xiuhua, Xia Ling, Ma Hongliang. Design and experiment of the vegetable seed metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 62~65. (in Chinese)

2 张泽平,马成林,左春桢.精播排种器及排种理论研究进展[J].吉林工业大学学报,1995,25(4):112~117.
Zhang Zeping, Ma Chenglin, Zuo Chuncheng. The development of the seed-metering device for precision planter and its theoretical study[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1995, 25(4): 112~117. (in Chinese)

3 Ahmadi E, Ghassemzadeh H R, Moghaddam M, et al. Development of a precision seed drill for oilseed rape[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2008, 32(5): 451~458.

4 袁文胜,吴崇友,金诚谦.异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(5):72~75.
Yuan Wensheng, Wu Chongyou, Jin Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):72~75. (in Chinese)

5 李善军,廖庆喜,张衍林,等.油菜播种机斜窝眼偏心轮式排种器结构设计[J].农机化研究,2008(8):72~74.
Li Shanjun, Liao Qingxi, Zhang Yanlin, et al. The design of central parts about inclined-hole and partial-wheel seeding device of the rape sower[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(8): 72~74. (in Chinese)

6 张宇文.机械式多功能精密排种器的设计[J].农业机械学报,2005,36(5):50~53.
Zhang Yuwen. Research and design for making a new type of mechanized and multiple functions of precision seed-drilled appliance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5):50~53. (in Chinese)

7 张宇文,张文超,李冬肖.中心传动强推式精密排种器设计[J].农业机械学报,2010,41(2):78~81.
Zhang Yuwen, Zhang Wenchao, Li Dongxiao. Design for precision metering device with center transmission[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 78~81. (in Chinese)

8 廖庆喜,黄吉星,刘光,等.油菜播种机槽孔轮式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(2):63~66.
Liao Qingxi, Huang Jixing, Liu Guang, et al. Design and experiment of precision metering device for slot wheeled seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 63~66. (in Chinese)

9 Overview of ANSYS CFX. ANSYS CFX, Release 11.0. ANSYS user's manual[M]. Nasdaq: ANSYS, Inc. 2006.

10 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

(上接第50页)

6 耿爱军,李法德,李陆星.国内外植保机械及植保技术研究现状[J].农机化研究,2007(4):181~191.
Geng Aijun, Li Fade, Li Luxing. The plant protection machinery and technology at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(4):181~191. (in Chinese)

7 Pimentel D, Levitan L. Pesticide: amounts applied and amounts reaching pests[J]. Bioscience, 1986, 36(2): 86~91.

8 Prairie Agricultural Machinery Institute. Hexi-coil mode 1562 field sprayer evaluation report 527 [R]. Saskatoon, Saskatchewan, Canada: Prairie Agricultural Machinery Institute, 1987.

9 张军伟,傅大放,彭奇均,等.响应面法优化酸水解稻秆制木糖的工艺参数[J].农业工程学报,2009,25(11):253~257.
Zhang Junwei, Fu Dafang, Peng Qijun, et al. Optimized conditions for production of xylose by acid-hydrolysis of rice straw based on response surface methodology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):253~257. (in Chinese)

10 易军鹏,朱文学,马海乐,等.牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J].农业机械学报,2009,40(6):103~110.
Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *paeonia suffruticosa andr.* seeds with response surface analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):103~110. (in Chinese)