

刘道奇,余永昌,张开飞,等.多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验[J].江苏农业科学,2018,46(24):104-108.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.027

# 多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验

刘道奇<sup>1</sup>,余永昌<sup>2</sup>,张开飞<sup>2</sup>,董慧锋<sup>2</sup>,赵彬彬<sup>2</sup>,秦超彬<sup>2</sup>,邢金龙<sup>1</sup>,李 赫<sup>2</sup>

(1.河南省农业科学院长垣分院,河南长垣 453400; 2.河南农业大学,河南郑州 450002)

**摘要:**为精确测试多旋翼植保无人机在不同高度、相对作业速度下的喷雾作业均匀性参数,针对河南农业大学研制的 3W16-10 型 8 轴 16 旋翼植保无人机,采用相对运动的方法模拟其田间作业场景,为了探究该多旋翼植保无人机喷雾作业效果,制订相应的试验方案并采用多次试验取平均值的方法安排试验,计算出在不同作业高度、相对飞行速度、喷雾压力条件下植保无人机在喷雾作业过程中线性方向各点的沉积量、均匀性,并绘制拟合曲线,建立了飞行速度、飞行高度、喷雾压力的喷雾均匀性关系模型。通过单因素试验和响应曲面法优化 3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验得到的最佳作业参数为:飞行高度 1.39 m,飞行速度 2.38 m/s,喷雾压力 0.5 MPa,此时沉积均匀性变异系数为 0.172,相对误差为 8%。

**关键词:**多旋翼植保无人机;作业高度;喷雾;飞行速度;沉积量;均匀性;单因素试验;响应曲面法

**中图分类号:**S252+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)24-0104-05

近年来,我国农用植保无人机发展迅速,据农业部相关部门统计,截至 2016 年 5 月,全国在用的农用无人机共有 178 种,全国农业航空技术 95% 以上用于航空植保作业<sup>[1]</sup>。其中,多旋翼植保无人机受到越来越广泛的关注,主要是由于其制造原材料成本的降低,作业极为高效,并且对人体造成的污染较少,采用低量或超低量喷雾可以降低农药使用量,提高农药利用率,同时还能减少作业过程对环境的污染<sup>[2-9]</sup>。多旋翼植保无人机在农业植保的应用方面愈加频繁,目前国内已经有许多中小型企业进行多旋翼植保无人机的研发与生产。

多旋翼植保无人机在我国发展年限较短,多数由企业拼装而成,整机及零部件缺乏相应的行业制造规范,作业可靠性不高,飞行控制系统依然具有一定的缺陷,在作业过程中易发生各种事故,并且缺乏熟练的飞手进行植保作业,这些问题都造成了多旋翼植保无人机的作业效果一直无法得到广大农民的认可,其作业参数对作业效果的影响一直缺乏相应的理论和数据支持。本研究在现有条件下,对 3W16-10 型 8 轴 16 旋翼植保无人机进行进一步试验测试,主要探究飞行高度、飞行速度、喷雾压力对喷雾均匀性的影响,以期多旋翼植保无人机喷雾作业参数的确定和作业环境的选择提供理论依据,减少多旋翼植保无人机施药过程中的农药损失,提高农药利用率。

收稿日期:2017-08-04

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-04-PS23)。

作者简介:刘道奇(1992—),男,河南信阳人,硕士,主要从事农业机械化研究。E-mail:15704485800@163.com。

通信作者:李 赫,博士,副教授,主要从事农业机械化研究。E-mail:chungbuk@163.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

试验采用的材料与设备由 3W16-10 型多旋翼植保无人机及其配套喷雾系统、雾滴收集装置、环境参数检测装置、数

[3]秦锡祥,高瑞桐.花绒坚甲生物学特性及应用研究[J].昆虫知识,1988,25(2):109-112.

[4]杨忠岐.利用天敌昆虫控制我国重大林木害虫研究进展[J].中国生物防治,2004,20(4):221-227.

[5]张彦龙,杨忠岐,张翌楠,等.利用花绒寄甲防治越冬后松褐天牛试验[J].林业科学,2014,50(3):92-98.

[6]骆有庆,蒋 平.松树虫害木存放及剖板处理防止松墨天牛传播[J].中国森林病虫,2000,19(4):4-7.

[7]蒋 平,何志华,赵锦年,等.松材线虫罹病木的烘压处理试验[J].中国森林病虫,2000,19(6):30-31.

[8]李永成,赵翔翔,周茂建,等.加强疫木管理遏制松材线虫病扩散蔓延[J].中国森林病虫,2005,24(1):36-39.

[9]闫 闯,宋崇康,罗致迪,等.松材线虫病疫木除害技术综述[J].安徽农业科学,2017,45(19):152-154.

[10]来燕学.林内就地火烧病死木防治松材线虫病试验[J].江苏林业科技,2000,27(6):28-32.

[11]杨忠岐,王小艺,张翌楠,等.释放花绒寄甲和设置诱木防治松褐天牛对松材线虫病的控制作用研究[J].中国生物防治学报,2012,28(4):490-495.

[12]罗致迪,陈元生,于海萍,等.赣南花绒寄甲松树林间自然寄生率调查研究[J].环境昆虫学报,2015,37(5):1070-1074.

[13]沈彩周,何龙喜.江西省松材线虫病的防控思路 and 措施[J].林业科技开发,2014,28(6):6-9.

[14]郑礼平.松材线虫病疫木林间就地除害技术[J].现代农业科技,2017(2):106-107.

[15]张冬生,黄水生,廖三腊,等.用铁纱网罩处理松材线虫病疫木的方法介绍与应用[J].生物灾害科学,2016,39(1):59-61.

[16]来燕学,王亚红,王小艺,等.松褐天牛疫木隔离结合人工释放管氏肿腿蜂防治松材线虫病[J].中国生物防治学报,2012,28(4):460-465.

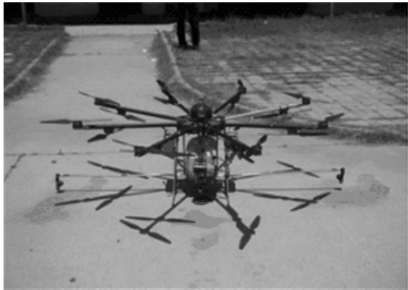
[17]杨远亮,杨忠岐,王小艺,等.应用花绒寄甲防治松褐天牛[J].林业科学,2013,49(3):103-109.

据采集及配套分析系统组成(表 1)。多旋翼植保无人机及其配套喷雾系统作业机械为 3W16-10 型多旋翼植保无人机(图 1-a),采用 8 轴 16 旋翼设计结构,机身及螺旋桨材料以碳纤维为主,飞行控制采用大疆创新科技有限公司生产的 A2 飞行控制系统,支持失控保护和低电压保护,具有智能控制及自稳功能等;喷雾系统包括气泵、控制器、输液管及喷头等装置。雾滴收集装置(图 1-b)尺寸为 510 cm×510 cm×

210 cm,装置主体由不锈钢方钢(郑州海绵电动门商行)搭建而成。在其 2 个侧面(每个面 18 个点)和 1 个底面(27 个点)用铁丝共分割出 63 个点,用于固定雾滴收集装置,雾滴收集装置选用定性滤纸(辽宁省抚顺市民政滤纸厂)和培养皿(江苏省扬州市光华医疗器械有限公司)。将滤纸用燕尾夹固定在各个点上,设置 3 组重复,用以消除单次试验可能引起的误差。

表 1 3W16-10 型多旋翼植保无人机主要技术参数

机型	机身长度 (mm)	旋翼直径 (mm)	喷杆宽度 (mm)	机身高度 (mm)	整机质量 (kg)	喷头数量 (个)	喷头间距 (mm)	喷头类型
3W16-10	1 920	460	2 050	500	12	3	1 060	110 02 VP



a. 3W16-10 型多旋翼植保无人机



b. 雾滴收集装置

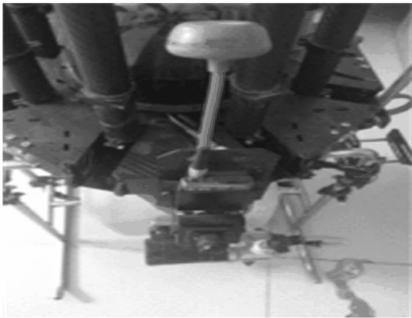
图1 多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验照片

为保证试验结果的可靠性,在试验过程中对环境及试验参数等进行监测,所用仪器如图 2 所示,通过温湿度仪(广东省深圳市华盛昌机械科技实业股份有限公司)、风速仪(浙江省杭州绿博仪器有限公司)监测环境温度、风速、湿度等。通过无人机自带的图传设备实时记录无人机的飞行速度、高度。数据采

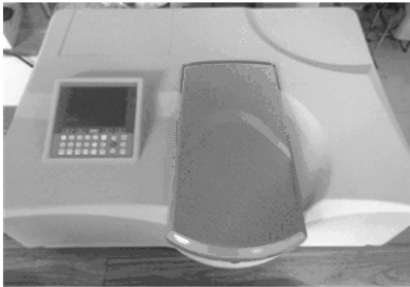
集及配套分析装置包括数据采集卡、密封袋、移液枪、紫外可见分光光度计(图 2-c)等,配制质量浓度为 2 g/L 的胭脂红溶液(天津市科密欧化学试剂有限公司)作为喷雾液。测试后将雾滴收集器的胭脂红溶液用去离子水洗脱后,经 EXPEC 分光分析仪[聚光科技(杭州)股份有限公司]检测其吸光度。



a. 温湿度仪



b. 无人机图传系统



c. 紫外可见分光光度计



d. 风速仪

图2 多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验仪器

1.2 试验方法

2017 年 4—5 月在河南农业大学第三生活区实验楼前空白场地进行试验,测试按照无人植保机械施药空间质量平衡

测试方法实施<sup>[1]</sup>。试验桩装置如图 1-b 所示,定性滤纸用夹子固定在收集装置 2 个侧面的 36 个点上,分为 3 组;在底面上用夹子将定性滤纸固定在 27 个点上,分 3 组。同时用培养

皿在地面上设置 3 组, 27 个点作为参照。本试验采用响应面分析的试验方法设计试验, 选取高度、速度、喷雾压力 3 个自变量设置试验范围中低值和中高值为 1.2 ~ 2.0 m、1.2 ~ 4.0 m/s、0.3 ~ 0.5 MPa, 试验分析目标为沉积浓度变异系数。对环境温度、风速进行监测, 达到试验所需水平时进行试验, 用 2 g/L 胭脂红溶液代替药液喷雾, 启动植保无人机使其进入正常飞行运行状态, 每组试验重复 3 次。每组试验结束后待雾滴采集卡自然晾干, 编号并装入收集盒。

### 1.3 数据处理

**1.3.1 沉积浓度吸光度标定** 先使用分析天平称取 0.5 g 分析纯级胭脂红粉末, 放入烧杯中用玻璃棒搅拌, 待粉末状物质完全消失, 加入到 500 mL 的容量瓶中, 配制 2 g/L 胭脂红原液, 用移液枪分别抽取 100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000  $\mu\text{L}$  的胭脂红原液加入 10 mL 的容量瓶中, 配制 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mg/L 10 组胭脂红溶液, 选取超纯水作为参照组, 在其最大波长  $\lambda = 508 \text{ nm}$  处测得其最大吸光度, 每份重复测试 3 次并取其平均值, 得到胭脂红溶液浓度吸光度曲线(图 3)。通过线性回归拟合, 其决定系数  $r^2 = 0.992$ 。由于沉积量的测量须要测试稀释液浓度, 胭脂红溶液浓度与吸光度的关系式:

$$C = 0.036 1D - 0.160 4。$$

式中:  $D$  为吸光度;  $C$  为胭脂红溶液浓度, mg/L。

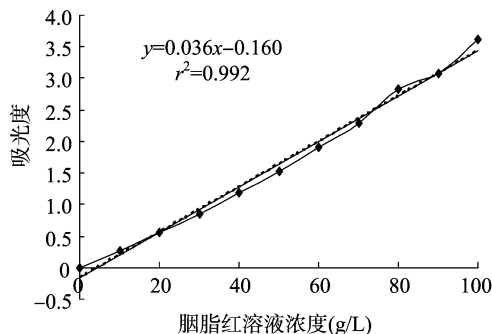


图3 胭脂红溶液标准浓度曲线

### 1.3.2 雾滴沉积浓度的测定及统计方法

**1.3.2.1 胭脂红回收率的检测** 用移液枪分别吸取 10 种浓度的胭脂红溶液 200  $\mu\text{L}$  滴至培养皿中, 待其自然风干后吸取 200  $\mu\text{L}$  超纯水反复洗涤培养皿, 并再次测量洗涤液吸光度, 经试验检测, 胭脂红溶液回收率可达 93.5%, 且不受浓度高低影响。

**1.3.2.2 单点雾滴收集皿沉积浓度的测量** 单点雾滴收集皿沉积浓度的测量方法: 喷雾试验结束后, 待其自然风干, 加盖, 带回实验室用 200  $\mu\text{L}$  超纯水反复洗涤, 选取超纯水作为参照组测量其吸光度。沉积浓度公式为

$$\beta_{\text{dep}} = \frac{(\beta_{\text{smp}} - \beta_{\text{blk}}) \cdot F_{\text{cal}} \cdot V_{\text{dil}}}{\beta_{\text{spray}} \cdot A_{\text{col}}}。$$

式中:  $\beta_{\text{dep}}$  是雾滴采集卡上单位面积雾滴沉积量,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $\beta_{\text{smp}}$  是可见紫外分光光度计示数;  $\beta_{\text{blk}}$  为空白采集卡读数;  $F_{\text{cal}}$  为可见紫外分光光度计示数与示踪剂浓度的关系系数,  $\mu\text{g}/\text{L}$ ;  $V_{\text{dil}}$  为加入洗涤液的体积, mL;  $\beta_{\text{spray}}$  为药液中示踪剂浓度;  $A_{\text{col}}$  为收集卡面积。

采用变异系数  $CV$  作为衡量其喷雾均匀性的标准, 其公式为

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}, s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}。$$

式中:  $s$  为标准差;  $x_i$  为雾滴收集皿单位面积雾滴沉积浓度;  $\bar{x}$  为雾滴收集皿单位面积平均沉积浓度;  $n$  为每组雾滴收集皿的个数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

**2.1.1 植保无人机高度对雾滴沉积均匀性的影响** 从图 4 可以看出, 当高度  $\leq 1.5 \text{ m}$  时, 随着高度的增大, 植保无人机喷雾沉积浓度的变异系数减小; 当高度  $> 1.5 \text{ m}$  时, 多旋翼植保无人机喷雾沉积浓度的变异系数随着高度的增大而增大。可见, 在喷雾作业过程中, 在一定范围内飞行高度与喷雾均匀性成正比, 但是超过一定高度后喷雾高度对喷雾沉积均匀性又会产生负面影响, 因此沉积均匀性最好的试验高度为 1.5 m。

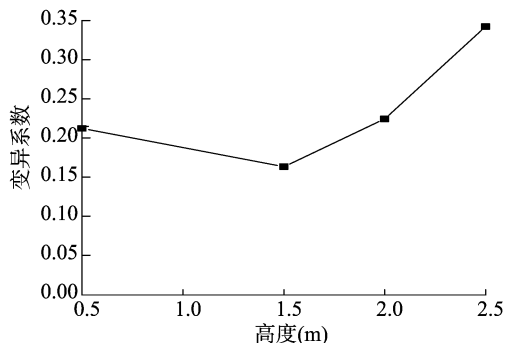


图4 高度对沉积浓度变异系数影响

**2.1.2 植保无人机相对速度对雾滴沉积均匀性的影响** 从图 5 可以看出, 3W16-10 型多旋翼植保无人机雾滴沉积均匀性变异系数随速度变化并无明显改变, 说明飞行速度对其雾滴沉积均匀性影响不明显。

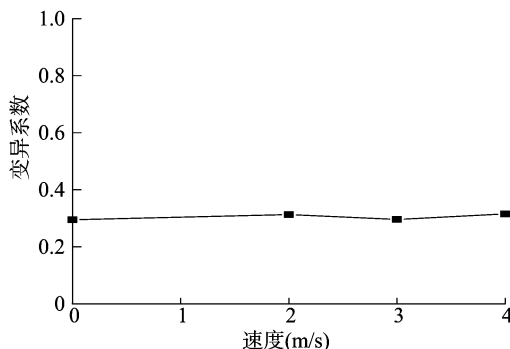


图5 速度对沉积浓度变异系数的影响

**2.1.3 植保无人机喷雾压力对雾滴沉积均匀性的影响** 从图 6 可以看出, 3W16-10 型多旋翼植保无人机雾滴沉积浓度变异系数随喷雾压力的增加小范围减少, 雾滴均匀性变好。

**2.1.4 响应面试验结果及方差分析** 根据单因素试验结果, 选取处理高度(A)、速度(B)、压力(C)3 个重要因素, 并用 Design Expert 7.0 软件设计 3 因素 3 水平试验。以沉积浓度变异系数为目标函数, 响应面试验结果见表 2。

### 2.2 试验分析

从表 3 可知, 试验数据所得的  $F$  值为 9.230,  $P$  值为

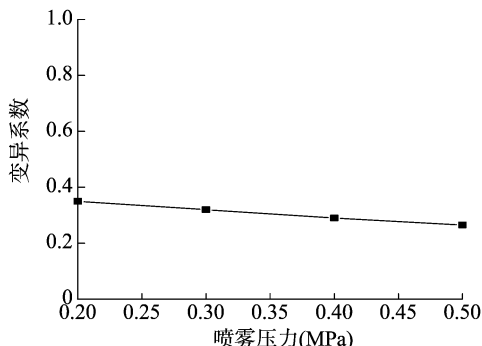


图6 喷雾压力对沉积浓度变异系数的影响

表 2 响应面试验及响应值

组别	高度 (m)	速度 (m/s)	压力 (MPa)	变异系数
1	1.60	2.60	0.40	0.187 6
2	1.60	2.60	0.40	0.189 0
3	1.60	2.60	0.30	0.221 3
4	1.60	2.60	0.40	0.262 5
5	1.20	1.20	0.50	0.223 7
6	1.20	4.00	0.50	0.257 1
7	1.60	2.60	0.40	0.241 3
8	1.20	4.00	0.30	0.291 2
9	1.20	1.20	0.30	0.366 3
10	1.20	2.60	0.40	0.278 5
11	2.00	4.00	0.50	0.355 8
12	1.60	2.60	0.40	0.219 8
13	1.60	4.00	0.40	0.322 5
14	1.60	2.60	0.50	0.174 4
15	2.00	4.00	0.30	0.452 1
16	2.00	1.20	0.50	0.394 3
17	2.00	2.60	0.40	0.523 1
18	1.60	2.60	0.40	0.189 6
19	1.60	1.20	0.40	0.256 6
20	2.00	1.20	0.30	0.433 4

0.000 9,表明该模型显著。基于回归模型的因素显著性分析,在显著水平 0.01 条件下,模型中的一次项 A、二次项  $A^2$  表现显著,其余项表现为不显著。在显著水平 0.05 条件下,模型中的一次项 A、C,二次项  $A^2$ 、 $B^2$  显著,其余项表现为不显著。整个模型的失拟项  $P=0.127\ 9>0.05$ ,表明失拟项不显著,即该模型是稳定的,能较好地预测高度、速度、压力 3 个因素对植保无人机喷雾均匀性的影响,因此可采用此模型对高度的变化量进行分析和预测。由模型中一次项的回归系数

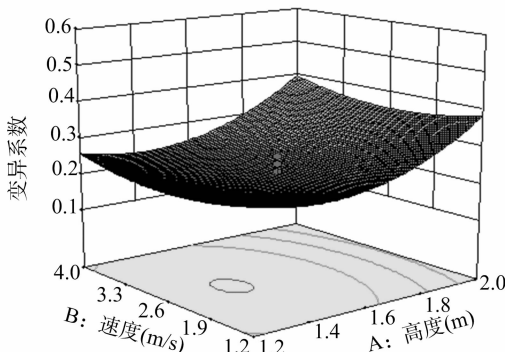
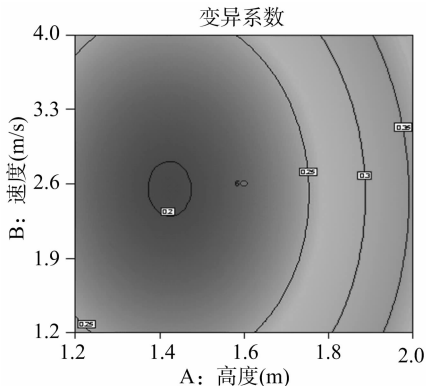


图7 高度和速度对沉积浓度变异系数的影响

绝对值可得对沉积浓度变异系数高低影响的顺序为:飞行高度>飞行速度。以飞行高度、飞行速度的编码值为自变量,以沉积浓度变异系数为 y 值的二元二次回归方程为

$$y=0.21+0.067A+3.612\times10^{-3}\times B-0.029C+2.738\times10^{-3}\times AB+5.163\times10^{-3}\times AC+6.413\times10^{-3}\times BC+0.075A^2+0.036B^2+3.603\times10^{-3}\times C^2。$$

由此可得最佳的预作业条件为:飞行高度 1.39 m,飞行速度 2.38 m/s,喷雾压力 0.5 MPa,此条件下的沉积浓度变异系数为 0.172。

### 2.3 试验因素交互影响分析

为了得到两两因素之间同时作用对沉积均匀性变异系数的影响,用 Design Expert 8.0 软件作出相应的响应曲面 3D 图

表 3 响应曲面方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.17	9	0.019	9.230	0.000 9**
A	0.06	1	0.060	30.110	0.000 3**
B	$1.78\times10^{-4}$	1	$1.78\times10^{-4}$	0.089	0.771 9
C	0.011	1	0.011	5.570	0.039 9*
AB	$6.00\times10^{-5}$	1	$6.00\times10^{-5}$	0.030	0.866 3
AC	$2.13\times10^{-4}$	1	$2.13\times10^{-4}$	0.110	0.751 2
BC	$3.29\times10^{-4}$	1	$3.29\times10^{-4}$	0.160	0.694 2
$A^2$	0.082	1	0.082	40.760	<0.000 1**
$B^2$	0.019	1	0.019	9.310	0.012 2*
$C^2$	$1.87\times10^{-4}$	1	$1.87\times10^{-4}$	0.093	0.766 4
残差	0.02	10	$2.01\times10^{-3}$	—	—
失拟项	0.015	5	$3.01\times10^{-3}$	2.980	0.127 9
纯误差	$5.04\times10^{-3}$	5	$1.01\times10^{-3}$	—	—
总和	0.19	19	—	—	—

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05、0.01 水平差异显著。

和相应的等高线图(图 7、图 8、图 9),并对两两因素间的交互作用进行分析。

图 7 是喷雾压力为 0.4 MPa 时,3W16-10 型多旋翼植保无人机飞行速度和飞行高度对雾滴沉积均匀性变异系数的影响曲面图。当飞行速度一定时,随着飞行高度的增加,雾滴沉积均匀性变异系数先小范围减小后快速增加,这是由于在飞行高度过低时,雾滴来不及雾化就直接喷洒到采集卡上,当高度过高时,漂移量增加,雾滴受下旋风涡流影响会出现局部集中的情况;当飞行高度一定时,雾滴沉积均匀性变异系数随速度变化不太明显,这是由于速度对雾滴沉积均匀性影响效果不显著;整体来看,飞行速度和飞行高度互作对 3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾沉积的均匀性影响不显著。

图 8 是飞行速度为 2.6 m/s 时,3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾压力和飞行高度对雾滴沉积均匀性变异系数的影响曲面图。当喷雾压力一定时,随着飞行高度的增加,雾滴沉积均匀性变异系数先小范围降低后快速增加,对雾滴沉积均匀性变异系数影响极显著;当飞行高度一定时,雾滴沉积均匀性

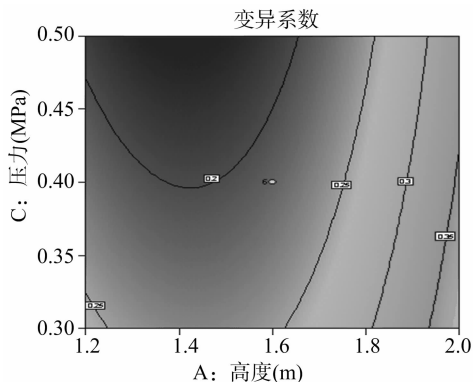


图8 高度和压力对沉积浓度变异系数的影响

图 9 为飞行高度为 1.6 m 时,3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾压力和飞行速度对雾滴沉积均匀性变异系数的影响曲面图。当飞行速度一定时,随着喷雾压力的增加,雾滴沉积均匀性变异系数小幅增加,对雾滴沉积均匀性变异系数影响

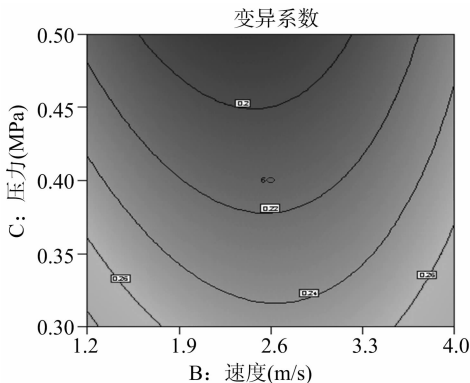


图9 速度和压力对沉积均匀性变异系数的影响

### 3 结论

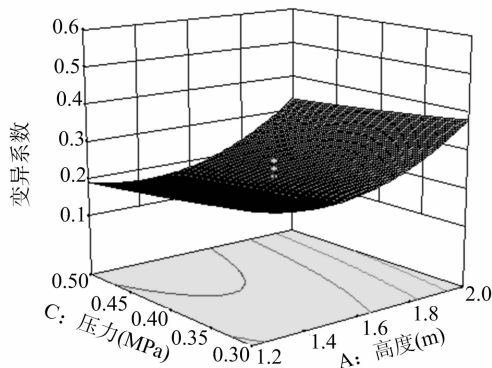
根据以上分析,通过 Design Expert 8.0 软件模拟所得 3W16-10 型多旋翼植保无人机最佳作业参数为:飞行高度 1.39 m,飞行速度 2.38 m/s,喷雾压力 0.5 MPa。通过修正,将飞行高度设置为 1.4 m,飞行速度设置为 2.5 m/s,喷雾压力设置为 0.5 MP,在此条件下进行 3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾均匀性测定试验。在修正条件下所得雾滴沉积均匀性变异系数为 0.184,与预测值间相对误差为 8%。结果表明,运用响应曲面法优化 3W16-10 型多旋翼植保无人机作业参数是可行的。

通过单因素试验和响应曲面法优化 3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾均匀性试验得到的最佳作业参数为:飞行高度 1.39 m,飞行速度 2.38 m/s,喷雾压力 0.5 MPa,此时沉积均匀性变异系数为 0.172,相对误差为 8%。

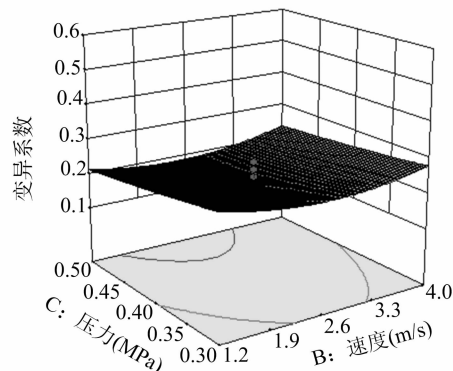
### 参考文献:

[1] 王昌陵,何雄奎,王潇楠,等. 基于空间质量平衡法的植保无人机

变异系数随喷雾压力增加小幅度减少,这是由于当喷雾压力增加时,雾化效果较好,有利于雾滴更加均匀地到达靶标采集卡上;整体来看,喷雾压力和飞行高度互作对 3W16-10 型多旋翼植保无人机喷雾沉积的均匀性影响不显著,在高度为 1.39 m、喷雾压力为 0.5 MPa 时,沉积浓度变异系数最低,均匀性最好。



显著;当喷雾压力一定时,雾滴沉积均匀性变异系数随飞行速度增加变化较小,响应面起伏较小,颜色波动小,说明喷雾压力和飞行速度互作对雾滴沉积均匀性的交互作用不明显。



施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报,2016,32(24): 89-97.

[2] 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.

[3] 邵振润,郭永旺. 我国施药机械与施药技术现状及对策[J]. 植物保护,2006,32(2):5-8.

[4] 邓敏,邢子辉,李卫. 我国施药技术和施药机械的现状 & 问题[J]. 农机化研究,2014,36(5):235-238.

[5] 马小艳,王志国,姜伟丽,等. 无人机飞防技术现状及在我国棉田应用前景分析[J]. 中国棉花,2016,43(6):7-11.

[6] Huang Y, Hoffmann W C, Lan Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform [J]. Applied Engineering in Agriculture,2008,25(6):803-809.

[7] 张国庆. 农业航空技术综述评与新型农业航空技术研究[J]. 江西林业科技,2011(1):25-31.

[8] 张国庆. 我国农用航空发展瓶颈与对策[J]. 中国民用航空,2011(4):31-33.

[9] 杜智平. 影响超低量喷雾机液体雾化效果的因素分析[J]. 农村牧区机械化,2012(6):46-48.