

锥形风场式防飘移装置雾滴沉积特性研究

胡军^{1,2} 刘昶希¹ 初鑫¹ 李宇飞^{1,2} 孙舒仪¹ 张伟^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 黑龙江省保护性耕作工程技术研究中心, 大庆 163319)

摘要: 喷雾机械在进行植保作业时雾滴飘移和沉降是影响作业效果的重要因素。为减少雾滴飘移和非靶标区域内的无效沉降,设计了一种锥形风场式防飘移装置,以锥风风速、侧风风速、喷雾压力为因素,通过三因素三水平室内雾滴飘移沉积试验,明晰锥形风场对雾滴沉积效果的影响规律。结果表明:3种因素对雾滴的沉积特性都有较为显著的影响,其影响由大到小依次为:锥风风速、侧风风速、喷雾压力。当侧风风速为2 m/s时,有锥风作用的雾滴体积中径较无锥风平均降低了11.7%,雾滴覆盖率、沉积密度、沉积量分别提高了21.9%、26.7%、22.6%。响应曲面模型优化结果显示,当侧风风速2 m/s、喷雾压力为0.34 MPa、锥风风速为16.53 m/s时,雾滴沉积量最优值为3.14 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。当侧风风速大于2 m/s时,应该降低喷雾压力、增大锥风风速,从而保证较优的雾滴沉积量。试验验证结果与模型预测基本吻合。

关键词: 植保喷雾机; 防飘移装置; 锥形风场; 雾滴沉积; 响应曲面

中图分类号: S491

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)12-0142-08

OSID:



Droplet Deposition Characteristics of Conical Wind Field Anti-drift Device

HU Jun^{1,2} LIU Changxi¹ CHU Xin¹ LI Yufei^{1,2} SUN Shuyi¹ ZHANG Wei^{1,2}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. Heilongjiang Province Conservation Tillage Engineering Technology Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: Drifting and settling of droplets are important factors affecting the effect of spray machinery. In order to reduce the drift of droplets and the ineffective settlement in non-target areas, a conical wind field anti-drift device was designed. The effect of conical wind field on droplet deposition was clarified by three factors and three horizontal indoor droplet drift deposition tests. The experimental results showed that these three factors had significant influence on the deposition characteristics of droplets, and the degree of influence was as follows: conical wind speed, natural wind speed, and spray pressure. As an example of natural wind speed of 2 m/s, the mean diameter of droplet volume was decreased by 11.7%, and the coverage, deposition density and deposition volume was increased by 21.9%, 26.7% and 22.6%, respectively. The optimization results of response surface model showed that when the spray pressure was 0.34 MPa, the conical wind speed was 16.53 m/s, the optimal droplet deposition can be 3.14 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ when the natural wind speed was 2 m/s. If the natural wind speed was more than 2 m/s, the spray pressure should be reduced and the conical wind speed should be increased, so as to ensure the better droplet deposition. The test verification results were basically consistent with the model prediction. The research result can provide a reference for further promoting the application of airflow assisted technology in plant protection field.

Key words: plant protection sprayer; anti-drift device; conical wind field; droplet deposition; response surface

收稿日期: 2020-05-10 修回日期: 2020-09-29

基金项目: 国家大豆产业技术体系岗位专家项目(CARS-04-01A)、国家重点研发计划项目(2017YFC1601905-04)、黑龙江省农垦总局重点研发项目(HNK135-03-08)、黑龙江八一农垦大学三横三纵支持项目(TDJH201808)、黑龙江八一农垦大学校级重点项目(XA2015-01)和黑龙江八一农垦大学学成引进项目(XDB2013-08)

作者简介: 胡军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事植保机械设计研究,E-mail: gcxykj@126.com

0 引言

雾滴飘移和沉降是影响植保机械作业效果的重要因素^[1-2]。减少雾滴飘移和非靶标区域内的无效沉降一直是植保领域研究的热点。雾滴飘移是在施药过程中,从喷头喷射出的雾滴粒子群因受空间内气流场的影响而脱离靶标区域、改变沉降位置的一种物理运动过程^[3-4]。雾滴飘移受多种因素影响,主要包括雾滴自身因素,如粒径、理化性质等^[5-6],喷雾工况,如喷雾压力、高度、角度等^[7-8],空间气流场分布,如流场大小、方向等^[9],以及载具移动速度和采样方式^[10-12]等。减少雾滴飘移的方法有很多,例如静电喷雾、气流辅助式喷雾等。气流辅助喷雾技术不仅能减少雾滴飘移,还能引导雾滴向靶标部位运动,使作物冠层的孔隙率变大,增加了雾滴穿透性^[13-15]。因此,辅助气流的利用形式和工作参数的选择也成为影响雾滴飘移和沉降的重要因素。

TSAY 等^[16]利用 Fluent 软件模拟分析了在没有作物情况下气流辅助喷雾系统各参数变化对喷雾效果的影响,评估了气流辅助作用下的雾滴飘移特性。DERKSEN 等^[17]研究得出,在不同外界风速情况下,气流辅助喷雾的方式能够有效减少飘移的发生。QUANQUIN^[18]以气流辅助喷雾机为研究载体,探究了风扇转速、喷雾压力和喷雾排放方式对冠层内雾滴沉积的影响,并通过田间试验确定了行进过程中最佳的喷雾作业高度。文献^[19-22]先后从雾滴沉积特性以及药液飘失成因等方面对气流辅助喷雾技术进行了研究,以期通过改变喷雾压力和喷嘴类型以及利用辅助气流等方式达到减少药液飘移、提高雾滴沉积均匀性的目的。贾卫东等^[23]在对风幕式喷杆喷雾施药技术进行大量研究的基础上,设计了一种双平板感应式荷电装置,并对风幕和静电共同作用下的喷雾特性进行了一系列试验研究。

在常用标准扇形喷头上,本文设计一种可以减少雾滴飘移的锥形风场式防飘移装置,通过室内雾滴飘移沉积试验明晰锥形风场影响雾滴沉积的规律,以期为该防飘移装置在不同侧风影响下最佳作业参数的选择提供依据。

1 结构与原理

1.1 结构设计

设计的锥形风场式防飘移装置结构如图 1 所示。该装置主要由喷头安装座和双层锥形气流罩两部分构成,其实物图如图 2 所示。喷头安装座采用旋转卡扣结构,尺寸参照本研究选用的哈滴扇形雾喷头进行设计。双层锥形气流罩根据周良富等^[24]

的双气流道风送原理采用仿形结构设计,最主要的尺寸参数为锥形风道的开口角和锥形风道长度,根据目前常用的扇形喷头雾锥角将锥形风道开口角设为 110° 。

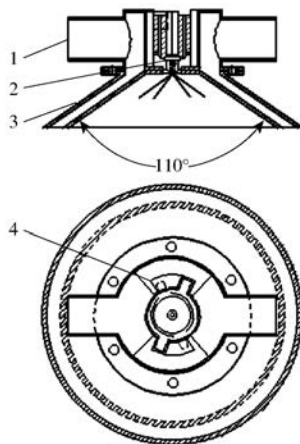


图 1 锥形风场式防飘移装置结构图

Fig. 1 Structure drawing of conical air flow anti-drift device

1. 进风口 2. 扇形喷头 3. 锥形气流罩 4. 旋转卡扣结构



图 2 锥形风场式防飘移装置实物图

Fig. 2 Physical drawing of conical air flow anti-drift device

1. 双层锥形气流罩 2. 喷头安装座

由于过短的锥形风道产生的辅助气流会对液体雾化过程形成的空心液膜造成不利影响,而过长的锥形风道会对相邻的喷头雾化过程造成干扰,且会增加能量的损失。锥形风道长度计算式为

$$l = \frac{h}{\cos(0.5\alpha)} \quad (1)$$

式中 l ——锥形风道长度

h ——液膜高度

α ——喷头雾锥角

根据空心液膜位于 10 cm 处的形成位置并结合式(1)将锥形风道长度设为 17.5 cm。在保证风量的前提下,通过缩小小夹层间隙(即出风口面积)来提高气流速度,本研究设计夹层间隙宽度为 1 cm。供风装置采用 KOMAX 型风机,风管与进风口直径设为 2 cm。

1.2 防飘原理

在喷雾作业过程中,自然风风向的变化不规则。

根据宋坚利等^[25]研究的扇形喷头扇面末端及两侧雾滴更易发生飘移的理论,本文设计的仿雾形风场可以与自然风形成合力,引导扇面边界的细小雾滴向靶标处沉降。当自然风方向自左向右时,自然风会与风场 A 形成一个合风场,合风场的方向指向作物,如图 3 所示。大部分雾滴在风场 A 的作用下会加速向作物表面沉积,少数雾滴仍会向右飘移,这时风场 B 会进一步阻挡雾滴的飘移,从而提高沉积效果。

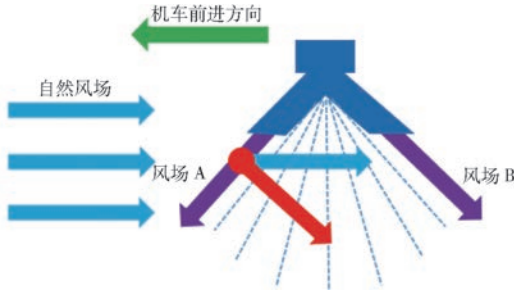


图 3 锥形辅助风场防飘原理图

Fig. 3 Anti-drift schematic of conical wind field

2 试验材料与方法

2.1 试验仪器

试验采用气流辅助喷雾沉积量检测系统。该系统主要构成有:可移动式气流辅助喷雾试验台(图 4)、SFG 型可调速轴流风机(模拟到达靶标作物侧风风速范围 0 ~ 4 m/s、风量 1 900 m³/h、转速 1 400 r/min)、精密型热线风速仪(VT-100 型)、KOMAX 小型风机(提供锥形风风速范围 0 ~ 20 m/s)、Winner 318 型激光粒度仪、Deposit Scan 软件、丹麦 HARDI F-03-110 型扇形喷头等。

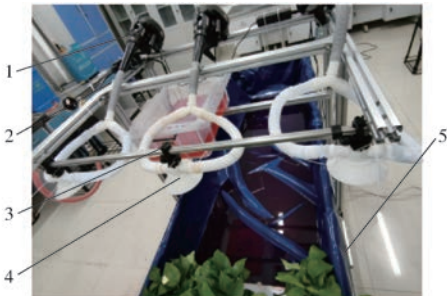


图 4 可移动式气流辅助喷雾试验台

Fig. 4 Mobile air-assisted spray test bed

- 1. 风机 2. 水泵 3. 水箱 4. 锥形风场式防飘移装置 5. 可移动滑道

2.2 试验设计

2.2.1 防飘移验证试验

为了更直观地表述防飘原理,以纯净水为喷雾介质,利用植保综合试验台分别在只有风场 A 作用或风场 A、B 同时作用这 2 种条件下对装置进行防飘移验证试验(图 5)。试验条件均为:侧风风速

2 m/s、锥风风速 15 m/s、喷雾压力 0.3 MPa、喷雾高度 500 mm、HARDI F-03-110 型扇形喷头、喷雾时间 60 s,每组试验进行 3 次取平均值。

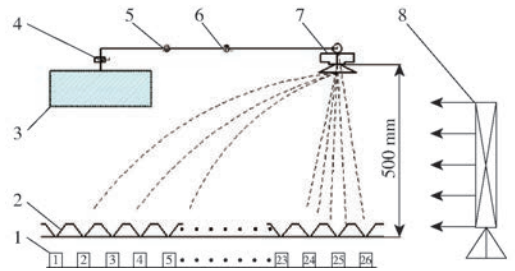


图 5 防飘移原理验证试验装置示意图

Fig. 5 Proof test drawing of drift proof principle of device

- 1. 量筒(编号 1~26) 2. 集雾槽 3. 水箱 4. 控制阀 5. 流量表 6. 压力表 7. 锥形风场式防飘移装置 8. 风机

2.2.2 雾滴沉积均匀性试验

为探究锥形风场对相邻喷头喷雾作业产生的影响,本文在沉积特性综合试验开展前,利用植保综合试验台对安装锥形风场式防飘移装置前、后的雾滴沉积均匀性进行试验(图 6)。试验条件:锥风风速 0 m/s 或 15 m/s、喷雾压力 0.3 MPa、喷雾高度 500 mm、HARDI F-03-110 型扇形喷头、喷雾时间 60 s,每组试验进行 3 次取平均值。

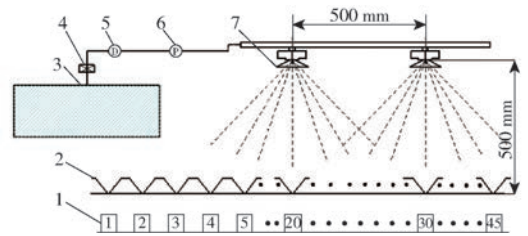


图 6 雾滴沉积均匀性试验

Fig. 6 Proof test drawing of deposition proof principle of device

- 1. 量筒(编号 1~45) 2. 集雾槽 3. 水箱 4. 控制阀 5. 流量表 6. 压力表 7. 锥形风场式防飘移装置

2.2.3 雾滴沉积特性综合试验

试验调节喷头到植株顶端的高度为 500 mm,并选用 16 盆绿萝植株构成的矩形区域作为雾滴沉积数据采集区,采用五点取样法将 3 次试验的平均值作为试验数据,利用爱普生 V19 型扫描仪对收集的水敏纸进行分类扫描(将此试验中同一取样点位置的水敏纸归为一类)。并通过 Deposit Scan 软件对水敏纸进行区域提取、比重设置、阈值调整以及碎片化等处理,将处理结果导入 Origin 进行整理分析。

此外,考虑到施药机械移动作业引起的雾滴随风飘失,本次雾滴沉积特性综合试验所需的侧风风速由可移动喷雾试验台移动速度与轴流风机风速(模拟自然风)共同提供。

为了分析侧风风速、锥风风速以及喷雾压力等因素对雾滴沉积分布情况的影响,首先进行锥风风速单因素试验,控制移动喷雾台以速度 2 m/s 穿过喷雾区域(即此时轴流风机风速 0 m/s,侧风风速 2 m/s),在喷雾压力为 0.3 MPa,锥风风速分别为 0.5、10、15、20 m/s 的情况下分析雾滴沉积密度、覆盖率、沉积量以及体积中径的变化。其次进行喷雾压力单因素试验,将锥风风速设定为 5 m/s,调节喷雾压力为 0.2 ~ 0.4 MPa,每组试验较前一组增加 0.02 MPa,共计 11 组试验用于分析喷雾压力对雾滴沉积量的影响。

通过对锥风风速和喷雾压力单因素试验结果进行分析,确定了多因素试验的取值范围。为探究不同侧风风速、锥风风速以及喷雾压力共同作用下的雾滴沉积效果,分析了这 3 个因素的影响主次程度并建立响应曲面模型。对所得模型进行优化与试验验证,从而得出最佳作业参数。

3 试验结果与影响因素分析

3.1 防飘移验证试验

通过改变施加在 HARDI F-03-110 型扇形喷头上的风场条件,得到雾滴飘移分布如图 7 所示。



图 7 施加 2 种不同风场时雾滴飘移分布

Fig. 7 Droplet drift distribution when applying two different wind fields

由图 7 可以看出,当仅有风场 A 作用时,单侧锥风对于雾滴飘移的抵抗效果较差,侧风对喷头均匀性的不利影响较为严重。

雾滴飘移率计算公式为

$$\beta = \frac{M_z - \sum_{i=1}^N M_i}{M_z} \times 100\% \quad (2)$$

式中 β ——飘移率, %

i ——U 型槽对应量筒编号, $i = 1, 2, \dots, 26$

N ——量筒总数

M_i ——第 i 个量筒中收集的液体质量, kg

M_z ——实际喷雾总质量, kg

将试验数据整理后,代入式(2)得,施加两侧锥风比仅施加一侧锥风的雾滴飘移率降低了 31.2%。由此可得,在 A、B 两侧锥风的双重作用下,雾滴的飘移潜力更小、沉积效果更好,从而验证了 1.2 节提

出的本装置防飘移原理。

3.2 雾滴沉积均匀性试验

对相邻喷头施加锥形风场前后,得到的雾滴沉积均匀性分布如图 8 所示。

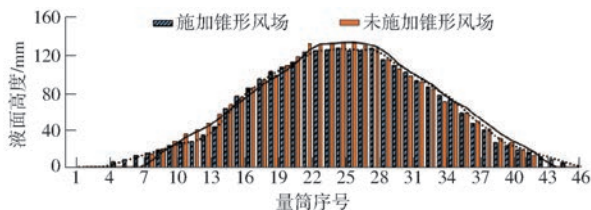


图 8 施加锥形风场前后雾滴沉积均匀性分布

Fig. 8 Uniform distribution of droplet deposition before and after applying conical wind field

从图 8 可以看出,当施加锥形风场时,喷头的有效喷幅变大,雾滴沉积均匀性有所提高。沉积均匀性试验结果表明,雾液量分布变异系数降低了 2.7%。

3.3 单因素试验

3.3.1 锥风风速

在侧风风速为 2 m/s,喷雾压力为 0.3 MPa,锥风风速为 0 ~ 20 m/s,体积中径、雾滴沉积密度、沉积量以及雾滴覆盖率的变化趋势如图 9、10 所示。

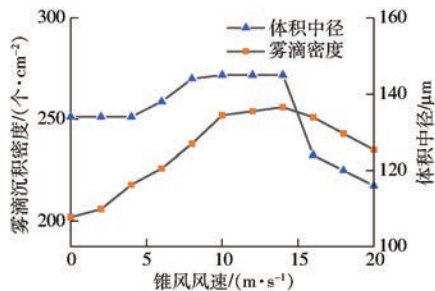


图 9 不同锥风风速下雾滴沉积密度和体积中径变化曲线

Fig. 9 Trends in droplet coverage density and mid-volume diameter at different cone wind speeds

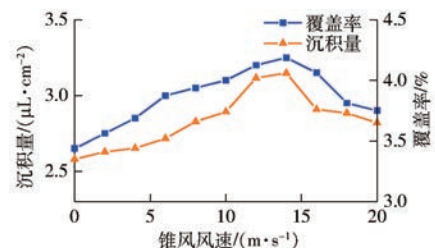


图 10 不同锥风风速下雾滴沉积量和覆盖率变化曲线

Fig. 10 Trends in droplet deposition and coverage at different cone wind speeds

由图 9、10 可以看出,锥形风场加快了雾滴的沉降速度,从而使沉积均匀性得到提高。当锥风风速在 0 ~ 10 m/s 区间内时,雾滴覆盖率、雾滴沉积密度、沉积量都与锥风风速呈明显正相关,雾滴体积中径略微变大。当锥风风速开始增大时,锥风风力小

于雾滴自身的表面张力,不能使雾滴发生分裂。但是由于整个雾滴群的雾滴体积中径都不相同,因此雾滴获得动能也不同,导致雾滴之间有碰撞合并现象。随着风速的继续增大,锥风风力大于雾滴表面张力,雾滴会发生破裂,即雾滴粒径变小。当锥风风速在 10 ~ 15 m/s 内时,雾滴覆盖率、雾滴沉积密度、沉积量呈缓慢增长趋势,雾滴体积中径基本保持不变。当锥风风速在 15 ~ 20 m/s 时,各指标略微有所下降,趋于平稳,雾滴的体积中径下降的趋势较为明显。原因为当锥风风力过大时,雾滴克服其表面张力并发生破裂的速度加快,形成细小的雾滴,自身存在的飘移潜力增大,导致雾滴沉积量等指标有所下降。

在相同试验条件与采集面积下,有锥风作用时的雾滴体积中径较无锥风时平均降低了 11.7%,雾滴覆盖率、沉积密度、沉积量分别提高了 21.9%、26.7%、22.6%。

3.3.2 喷雾压力

为确保试验的准确性,在喷雾压力单因素试验结束后,取 3 次试验的平均值作为最终的试验结果。喷雾压力与雾滴沉积量的关系曲线如图 11 所示。

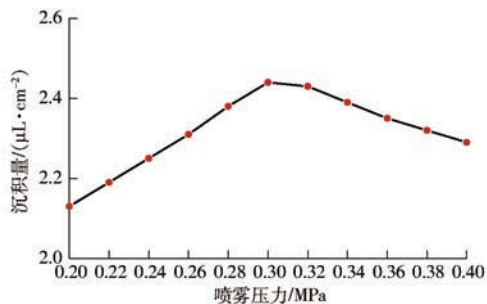


图 11 雾滴沉积量随喷雾压力的变化曲线

Fig. 11 Curve of droplet deposition versus spray pressure

从图 11 可以看出,当其他因素不变时,随着喷雾压力的增大,雾滴沉积量先增大后减小,但是总体变化幅度不大。当喷雾压力为 0.2 MPa 时,沉积量最低,为 2.13 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,当喷雾压力为 0.3 MPa 时,沉积量最高,为 2.44 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。增大喷雾压力会减小雾滴粒径。当喷雾压力开始增大时,雾滴体积中径变化较小,并且压力增大后动能增加,雾化效果较好,因此沉积量有所增加。但是当喷雾压力继续增大时,液体经过喷嘴分裂成的雾滴体积中径越来越小,使其自身飘移潜力增大,因此雾滴沉积量有所下降。

3.4 多因素试验

3.4.1 试验方案与结果分析

根据 Box - Behnken 正交试验方案设计三因素三水平响应面分析试验,试验因素编码如表 1 所示,试验方案与结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Test factors codes

编码	因素		
	侧风风速	喷雾压力	锥风风速
	$x_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	x_2/MPa	$x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	2.0	0.2	10
0	3.5	0.3	15
1	5.0	0.4	20

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Test scheme and response value

序号	因素			沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
	X_1	X_2	X_3	
1	0	-1	1	2.80
2	0	0	0	2.50
3	-1	1	0	3.06
4	0	0	0	2.66
5	1	-1	0	2.41
6	0	1	1	2.97
7	-1	0	1	2.74
8	-1	0	-1	2.14
9	0	1	-1	2.15
10	0	0	0	2.55
11	1	0	1	2.36
12	0	-1	-1	1.78
13	1	1	0	2.59
14	0	0	0	2.50
15	-1	-1	0	2.82
16	0	0	0	2.61
17	1	0	-1	1.35

3.4.2 回归模型建立

运用 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 中的试验数据进行多元回归拟合,建立侧风风速、喷雾压力、锥风风速和雾滴沉积量的回归方程为

$$Y = 2.56 - 0.26X_1 + 0.12X_2 + 0.43X_3 - 0.015X_1X_2 + 0.1X_1X_3 - 0.05X_2X_3 - 0.061X_1^2 + 0.22X_2^2 - 0.36X_3^2 \quad (3)$$

通过 F 检验得到 P 值以确定各个因素对响应值的影响显著性,如表 3 所示。

由表 3 可得出,响应模型中 $P < 0.01$,表明文中所建立的响应模型极显著; R^2 大于 0.98,显示模型拟合度高。根据表 3 中各因素的显著性水平,选择 $P < 0.05$ 的因素进行模型优化,得出优化后的回归方程为

$$Y = 2.56 - 0.26X_1 + 0.12X_2 + 0.43X_3 + 0.1X_1X_3 + 0.22X_2^2 - 0.36X_3^2 \quad (4)$$

由图 12、13 可以看出,雾滴沉积量的标准化残差分布图基本呈正态分布,雾滴沉积量的预测值和试验值的相关性较高。

表 3 方差分析结果

Tab.3 Variance analysis results

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.90	9	0.32	58.36	<0.000 1**
X_1	0.53	1	0.53	95.15	<0.000 1**
X_2	0.12	1	0.12	20.87	0.002 6**
X_3	1.49	1	1.49	269.50	<0.000 1**
X_1X_2	9.000×10^{-4}	1	9.000×10^{-4}	0.16	0.698 4
X_1X_3	0.042	1	0.042	7.61	0.028 1*
X_2X_3	1.000×10^{-2}	1	1.000×10^{-2}	1.81	0.220 3
X_1^2	0.016	1	0.016	2.81	0.137 3
X_2^2	0.20	1	0.20	35.83	0.000 5**
X_3^2	0.53	1	0.53	96.52	<0.000 1**
残差	0.039	7	5.521×10^{-3}		
失拟项	0.019	3	6.308×10^{-3}	1.28	0.395 0
误差	0.020	4	4.930×10^{-3}		
总和	2.94	16			

注: **表示影响极显著($P < 0.01$); *表示影响显著($P < 0.05$)。

通过以上对模型拟合方差分析的结果表明,雾滴沉积量与各因素间的回归模型较好。

3.4.3 各因素交互作用

在上述回归方程分析的基础上,运用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制响应曲面,分析侧风风速 x_1 、

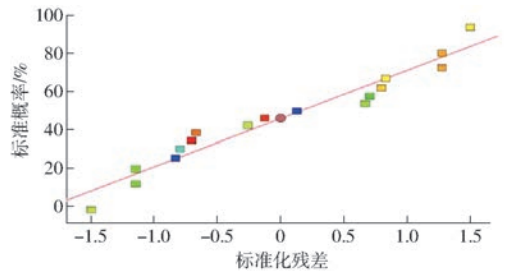


图 12 雾滴沉积量标准化残差分布

Fig.12 Standardized residual distribution of droplet deposition

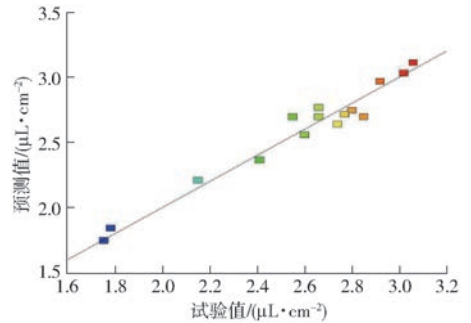


图 13 雾滴沉积量预测值与试验值相关性曲线

Fig.13 Correlation between predicted and experimental values of droplet deposition

喷雾压力 x_2 、锥风风速 x_3 对响应值(沉积量)的影响。各因素交互作用对雾滴沉积量的影响如图 14 所示。

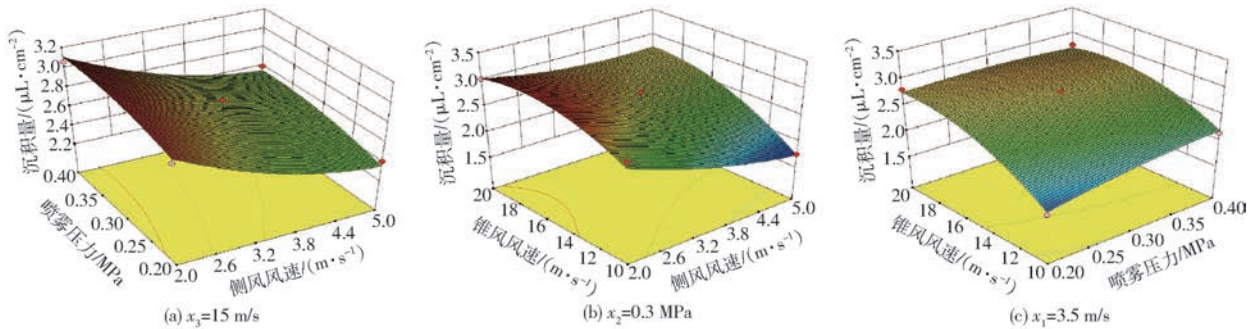


图 14 各因素对雾滴沉积量影响的响应曲面

Fig.14 Effect of various factors on amount of droplet deposition

由图 14a 可知,当锥风风速为 15 m/s,侧风风速恒定不变时,随着喷雾压力的增大,雾滴沉积量呈上升趋势;当喷雾压力达到峰值后,雾滴体积中径过小,自身飘移潜力变大,导致雾滴沉积量呈下降趋势。当喷雾压力恒定不变时,随着侧风风速的增加,飘移越来越严重,因此雾滴的沉积量逐渐减少。

由图 14b 可知,当喷雾压力为 0.3 MPa,侧风风速恒定不变时,随着锥风风速的增加,其抵挡侧风的能力增强,并加速了雾滴的沉降,使雾滴沉积量呈上升趋势;当锥风风速达到峰值后,雾滴破碎加快,飘移潜力增大,导致沉积量呈下降趋势。当锥风风速恒定不变时,随着侧风风速不断增大,雾滴飘移越来越严重,因此雾滴的沉积量逐渐减少。

由图 14c 可知,当侧风风速为 3.5 m/s,喷雾压力恒定不变时,随着锥风风速的增加,雾滴沉积量呈先上升后下降的趋势。当锥风风速恒定不变时,随着喷雾压力的逐渐增大,雾滴沉积量同样呈先上升后下降的趋势。

因此,适当增加喷雾压力和锥风风速有助于提高雾滴沉积量,3 种因素对雾滴沉积量的影响由大到小为锥风风速、侧风风速、喷雾压力。

3.4.4 模型优化与试验验证

为了满足施药要求,提高农药利用率,本文进一步确定最佳组合参数,以实现在该气流辅助装置的作用下,雾滴沉积量能够达到最优。结合本试验影响因素的边界条件,定义约束条件为

$$\begin{cases} \max Y(x_1, x_2, x_3) \\ 2 \text{ m/s} \leq x_1 \leq 5 \text{ m/s} \\ 0.2 \text{ MPa} \leq x_2 \leq 0.4 \text{ MPa} \\ 10 \text{ m/s} \leq x_3 \leq 20 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

利用 Design-Expert 8.0.6 设计软件得到各参数

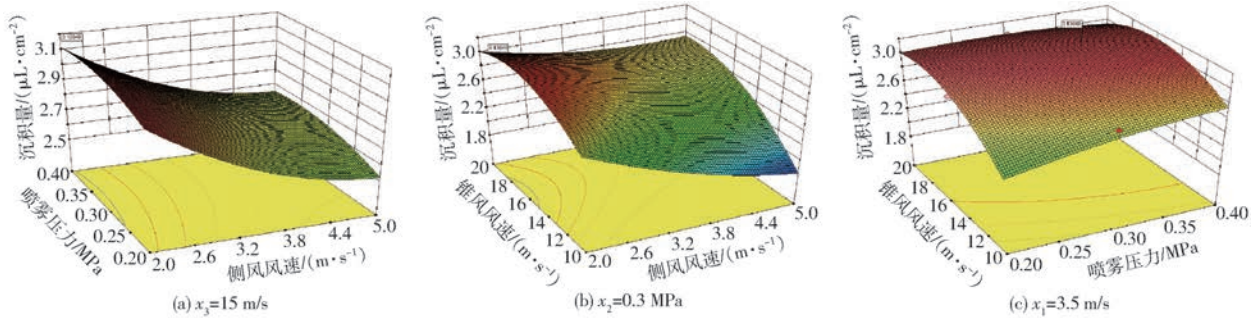


图 15 模型优化后各因素对雾滴沉积量影响的响应曲面

Fig. 15 Effect of various factors on amount of droplet deposition after model optimization

为了验证该优化方案的准确性,根据 Design-Expert 8.0.6 优化得出的因素取值:当侧风风速 2 m/s 时,将喷雾压力设成 0.34 MPa、锥风风速为 16.53 m/s 进行 5 次试验并取其平均值,5 次重复试验结果为 3.12、3.16、3.11、3.14、3.12 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,平均值为 3.13 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$,与响应曲面优化的结果基本吻合。

4 结论

(1)设计的锥形风场式防飘移装置可以起到细化雾滴粒径、提高雾滴沉积效果的作用。当侧风风速 2 m/s 时,在锥形风场辅助作用下,雾滴体积中径较无锥形风场平均降低了 11.7%,在相同采集面积

优化求解后的影响曲面如图 15 所示。当侧风风速 2 m/s、喷雾压力为 0.34 MPa、锥风风速设为 16.53 m/s 时,可得雾滴沉积量最优值为 3.14 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。当侧风风速大于 2 m/s 时,应该降低喷雾压力,增加锥风风速,从而保证较优的雾滴沉积量。

下,雾滴覆盖率、沉积密度、沉积量分别提高了 21.9%、26.7%、22.6%。

(2)进行了室内多因素雾滴飘移沉积试验,以侧风风速、锥风风速、喷雾压力为因素建立了二次回归模型,并绘制了响应曲面。结果表明,3 种因素对雾滴的沉积特性均有较为显著的影响,影响由大到小依次为锥风风速、侧风风速、喷雾压力。

(3)当侧风风速 2 m/s、喷雾压力为 0.34 MPa、锥风风速设为 16.53 m/s 时,可得雾滴沉积量最优值为 3.14 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 。当侧风风速大于 2 m/s 时,应该降低喷雾压力、增大锥风风速,从而保证较优的雾滴沉积量。试验验证所得结果与模型预测结果基本吻合。

参 考 文 献

- [1] 陈盛德,兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105-113.
CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105-113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170811&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)
- [2] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53-59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53-59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141009&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)
- [3] 周瑞琼,张慧春,周宏平,等. 喷雾参数间交互效应对农药雾滴飘移的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 612-617, 638.
ZHOU Ruiqiong, ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, et al. Interaction effects of spray parameters on pesticide spray droplet drift [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(7): 612-617, 638. (in Chinese)
- [4] 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,等. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 59-63.
LÜ Xiaolan, FU Ximin, SONG Jianli, et al. Influence of spray operating parameters on spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 59-63. (in Chinese)
- [5] 王志翀,何雄奎,李天,等. 基于激光成像技术的农药雾滴飘移评价方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 73-79.
WANG Zhichong, HE Xiongkui, LI Tian, et al. Evaluation method of pesticide droplet drift based on laser imaging [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 73-79. (in Chinese)

- [6] 张慧春, GARY Dorr, 郑加强, 等. 扇形喷头雾滴粒径分布风洞试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 53-57, 52. ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment of influence on droplet size distribution of flat fan nozzles[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 53-57, 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120610&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)
- [7] 张慧春, GARY Dorr, 郑加强, 等. 喷雾飘移的风洞试验和回归模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 94-100. ZHANG Huichun, GARY Dorr, ZHENG Jiaqiang, et al. Wind tunnel experiment and regression model for spray drift[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 94-100. (in Chinese)
- [8] 孙国祥, 汪小岳, 丁为民, 等. 基于CFD离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 13-19. SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition base on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 13-19. (in Chinese)
- [9] 茹煜, 朱传银, 包瑞. 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 66-72. RU Yu, ZHU Chuanyin, BAO Rui. Spray drift model of droplets and analysis of influencing factors based on wind tunnel[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141011&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.011. (in Chinese)
- [10] 张慧春, 朱正阳, 郑加强, 等. 面向林业病虫害防治的生物农药喷施系统[J]. 林业科学, 2018, 54(10): 116-124. ZHANG Huichun, ZHU Zhengyang, ZHENG Jiaqiang, et al. Research on biopesticide application system oriented to forest disease and pest control[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10): 116-124. (in Chinese)
- [11] 李继宇, 兰玉彬, 施叶茵. 旋翼无人机气流特征及大田施药作业研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 104-118. LI Jiyu, LAN Yubin, SHI Yeyin. Research progress on airflow characteristics and field pesticide application system of rotary-wing UAV[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 104-118. (in Chinese)
- [12] 文晟, 韩杰, 兰玉彬, 等. 单旋翼植保无人机翼尖涡流对雾滴飘移的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 127-137, 160. WEN Sheng, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Influence of wing tip vortex on drift of single rotor plant protection unmanned aerial vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 127-137, 160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180815&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.015. (in Chinese)
- [13] GARY J D, ANDREW J H, STEVE W A, et al. A comparison of initialspray characteristics produced by agricultural nozzles[J]. Crop Protection, 2013, 53(11): 109-117.
- [14] 刘雪美, 苑进, 张晓辉, 等. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 67-72. LIU Xuemei, YUAN Jin, ZHANG Xiaohui, et al. Effect of air-assisted spraying condition parameters on boom spray drift characteristics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 67-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s14&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.014. (in Chinese)
- [15] 张铁, 杨学军, 严荷荣, 等. 超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 77-86. ZHANG Tie, YANG Xuejun, YAN Herong, et al. Anti-drift technology of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 77-86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20121215&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.015. (in Chinese)
- [16] TSAY J, FOX R D, OZKAN H E. Evaluation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation[J]. Transactions of ASAE, 2002, 45(1): 47-54.
- [17] DERKSEN R C, GRAY R L. Deposition and air speed patterns of air-carrier apple orchard sprayers[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 5-11.
- [18] QUANQUIN B J. Air-assist applied to field sprayers[C]//Proc. National Conference on Pesticide Application Technology, 1995: 124-126.
- [19] 李继宇, 郭爽, 姚伟祥, 等. 气流作业下雾滴粒径稻株间分布特性与风洞模拟试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 148-156. LI Jiyu, GUO Shuang, YAO Weixiang, et al. Distribution characteristics of droplet size in rice field and wind tunnel simulation test under airflow operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 148-156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190817&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.017. (in Chinese)
- [20] 唐青, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 高速气流条件下标准扇形喷头和空气诱导喷头雾化特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 121-128. TANG Qing, CHEN Liping, ZHANG Ruirui, et al. Atomization characteristics of normal flat fan nozzle and air induction nozzle under high speed airflow conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 121-128. (in Chinese)

- YUAN Yanwei, FANG Xianfa, RONG Yao, et al. Online diagnosis system of threshing cylinder welding quality of combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(4): 11-16. (in Chinese)
- [16] 张亚伟, 王冬, 陈度, 等. 大型收获机械发动机孔组位置度误差在线检测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 71-78.
ZHANG Yawei, WANG Dong, CHEN Du, et al. Online method for large-scale harvester engine punch combination position accuracy measurement[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 71-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.012. (in Chinese)
- [17] 全国农业机械标准化技术委员会. GB 16151.12—2008 农业机械运行安全技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 全国农业机械标准化技术委员会. GB/T 14248—2008 收获机械制动性能测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [19] 全国拖拉机标准化技术委员会. GB/T 20949—2007 农林轮式拖拉机照明和灯光信号装置的安装规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [20] 生态环境部. GB 36886—2018 非道路移动柴油机械排气烟度限值及测量方法[S]. 北京: 环境科学出版社, 2018.
- [21] 全国农业机械标准化技术委员会. JB/T 6268—2015 自走式收获机械噪声测定方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [22] 全国农业机械标准化技术委员会. JB/T 7316—2015 谷物联合收割机液压系统试验方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [23] QUARTERMAN L. How to balance a manufacturing work cell[C]//Institute of Industrial Engineers-IE Solutions Conference. Cleveland Ohio, 2000.
- [24] 张泽群, 唐敦兵, 金永乔, 等. 信息物联驱动下的离散车间自组织生产调度技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 34-44.
ZHANG Zequn, TANG Dunbing, JIN Yongqiao, et al. Self-organizing production technology for discrete workshop scheduling driven by internet of things[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 34-44. (in Chinese)
- [25] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1432-1443.
ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1432-1443. (in Chinese)
- [26] 路亚峰, 陈义军, 温新歧, 等. 虚拟仪器技术研究现状与展望[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(11): 35-37.
LU Yafeng, CHEN Yijun, WEN Xinqi, et al. Research status and prospect of virtual instrumental technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(11): 35-37. (in Chinese)
- [27] 祝青园, 王书茂, 康峰, 等. 虚拟仪器技术在农业装备测控中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(6): 1333-1338.
ZHU Qingyuan, WANG Shumao, KANG Feng, et al. Application of virtual instrument technology in agricultural equipment measurement and control system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(6): 1333-1338. (in Chinese)
- [28] 夏明忠, 夏以轩, 李兵元. 软件模块化设计和模块化设计[J]. 中国信息界, 2012(11): 56-59.
XIA Mingzhong, XIA Yixuan, LI Bingyuan. Software modular design and modular management[J]. China Information Times, 2012(11): 56-59. (in Chinese)

(上接第 149 页)

- [21] 王景旭, 祁力钧, 夏前锦. 靶标周围流场对风送喷雾雾滴沉积影响的 CFD 模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 46-53.
WANG Jingxu, QI Lijun, XIA Qianjin. CFD simulation and validation of trajectory and deposition behavior of droplets around target affected by air flow field in greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 46-53. (in Chinese)
- [22] 周良富, 张玲, 丁为民, 等. 风送静电喷雾覆盖率响应面模型与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 52-59.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, DING Weimin, et al. Droplet coverage response surface models and influencing factors of air-assisted electrostatic spray[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 2): 52-59. (in Chinese)
- [23] 贾卫东, 胡化超, 陈龙, 等. 风幕式静电喷杆喷雾喷头雾化与雾滴沉积性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 53-59.
JIA Weidong, HU Huachao, CHEN Long, et al. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of wind-curtain electrostatic boom spray[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 53-59. (in Chinese)
- [24] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 双气流道辅助静电喷头设计与试验[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 192-196.
ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Design and test of auxiliary electrostatic nozzle with dual air flow channels[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(24): 192-196. (in Chinese)
- [25] 宋坚利, 刘亚佳, 张京, 等. 扇形雾喷头雾滴飘失机理[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 63-69.
SONG Jianli, LIU Yajia, ZHANG Jing, et al. Drift mechanism of flat fan nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 63-69. (in Chinese)