

喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究

丁素明¹ 薛新宇¹ 董祥² 顾伟¹ 周晴晴¹

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了研究扇形喷嘴不同喷雾方式下的空间沉积情况, 利用自行设计的 NJS-1 型植保风洞, 搭建雾滴粒径测试装置与雾滴沉积分布测试装置。选用 LURMARK-04F80 型标准扇形喷嘴开展雾滴粒径分布与沉积特性试验, 分析了喷雾压力与风速对雾滴粒径的影响, 同时研究了不同风速、喷雾压力、雾流角及喷头倾角下雾滴沉积特性, 并采用 3 种不同的计算方法对比了雾滴飘移减少百分比的影响因素。雾滴粒径分布试验结果表明, 相同风速下, 增大喷雾压力会导致 $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 和 $D_{v0.9}$ 都变小, 同时 $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 变大, 雾滴谱宽 S 变化不大; 相同压力下, 增大风速导致 $D_{v0.1}$ 和 $D_{v0.5}$ 变大, $D_{v0.9}$ 变化较小, 同时 $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 变小, 雾滴谱宽 S 减小。雾滴沉积分布试验结果表明, 压力从 0.2 MPa 增加至 0.4 MPa 时, 水平喷雾平面上, 距离喷头 2~3 m 处雾滴沉积量基本呈增加趋势, 竖直喷雾平面上, 距离地面 0.1~0.2 m 处雾滴沉积量呈增加趋势; 风速从 1 m/s 增加至 5 m/s 时, 在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上, 雾滴沉积量整体呈增加趋势; 雾流角从 -15° 变化到 15° 时, 在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上, 雾滴沉积量明显加大; 喷头倾角从 0° 变化到 30° 时, 在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上, 总体趋势是喷头倾角越大, 沉积量越低, 但差异不大; 同时与参考喷雾相比较, 采用 3 种计算方法得到的雾滴飘移减少百分比 (DPRP) 表明, 喷雾压力、风速以及雾流角对雾滴飘移减少百分比影响较大, 特别是侧风风速影响尤为显著。该研究可为田间喷雾作业参数的选择提供试验数据指导。

关键词: 喷头; 雾滴沉积分布; 喷雾参数; 雾滴粒径; 风洞

中图分类号: S499; V211.74 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S2-0308-08

Effects of Spraying Parameters on Droplet Deposition Performance

DING Suming¹ XUE Xinyu¹ DONG Xiang² GU Wei¹ ZHOU Qingqing¹

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to research on the effect of different spraying modes of fan nozzle on spatial deposition of droplet, droplet size measurement test device and deposition distribution test device were established by using NJS-1 wind tunnel for plant protection. The droplet size measurement test device was mainly composed of spray system, laser particle size analyzer and so on. The nozzle was mounted on the vertical reciprocating guide rail with the moving speed of 6.7 cm/s and the horizontal distance between the nozzle and the laser beam was 30 cm. During the tests, the spray pressure was firstly stabilized, and then the laser particle size analyzer was turned on. In order to sample the entire spray stoke area, the spraying nozzle was controlled by a single-chip microcomputer to move at a certain speed. Droplet deposition distribution test device was mainly composed of spray system, wind tunnel system, acquisition system and so on. During the tests, the flow rate of the spray nozzle was controlled by an electronic timer to open/close the solenoid valve to ensure that the spray time of each test was fixed at 10 s. The fluorescent tracer BSF was selected as the spray medium and was mixed with water at the ratio of 0.30 g/L. After each spray test, the collection line was placed in the plastic bag with 30 mL deionized water for full oscillation washing, the amount of fluorescent agent content was determined by the calibrated fluorescence analyzer for each test eluent. The LURMARK-04F80 standard fan nozzle was used in the drop-size distribution and deposition performance tests. The effects of spray pressure and wind speed on droplet size and the

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700905)

作者简介: 丁素明(1977—), 男, 研究员, 主要从事施药技术与植保机械研究, E-mail: dsmchina@sina.com

通信作者: 薛新宇(1969—), 女, 研究员, 主要从事施药技术与植保机械研究, E-mail: 735178312@qq.com

influence of wind speed, spray pressure, spray orientation and nozzle direction on droplet deposition were investigated. Three calculation models were employed to compare different influence factors of droplet drift reduction percentage. The results of droplet size distribution experiments showed that at the same wind speed, the increase of spray pressure would cause the decrease of $D_{V0.1}$, $D_{V0.5}$ and $D_{V0.9}$ and the increase of $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$, but minor changes of droplet spectrum width S ; under the same spray pressure, the increase of wind speed would cause the increase of $D_{V0.1}$ and $D_{V0.5}$ but minor change of $D_{V0.9}$, the decrease of $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ and droplet spectrum width S was from 1.44 to 1.17. The results of droplet deposition distribution tests showed that when spray pressure was increased from 0.2 MPa to 0.4 MPa, in the plane parallel to spray direction, the droplet deposition was increased at 2 ~ 3 m from the spray nozzle, droplet deposition was decreased when spray pressure was increased far away from the nozzle, in the plane vertical to spray direction, the droplet deposition was increased at 0.1 ~ 0.2 m from the ground and increased when spray pressure was increased, in the middle position, the droplet deposition was decreased when spray pressure was increased, the droplet deposition was close to zero at the height nearest to the nozzle. When wind speed was increased from 1 m/s to 5 m/s, the droplet deposition was increased on both planes parallel and vertical to spray direction; when the nozzle direction was changed from -15° to 15° , the droplet deposition was increased on both planes parallel and vertical to spray direction; when the nozzle direction was changed from 0° to 30° , the droplet deposition was decreased with the increase of nozzle direction on both planes parallel and vertical to spray direction with minor difference. Compared with the reference spray, the values of DPRP obtained from three calculation models showed that spray pressure, wind speed and spray orientation greatly influenced the droplet drift reduction percentage, especially the cross-wind speed. This study can provide experimental data guidance for the selection of spray parameters for spray operation in the field.

Key words: nozzle; droplet deposition distribution; spray parameter; droplet size; wind tunnel

0 引言

植保施药作业过程中,理想情况下,雾滴应全部有效沉积在靶标区域内。然而实际作业过程中由于外界气流的扰动,始终有一定比例的农药雾滴被气流携带飘移到非靶标区^[1-3],不能充分发挥防治病虫害的作用,造成环境污染、农药流失和农药利用率低等现象^[4-7],是影响喷雾施药效果的主要因素。因此,世界各国十分重视雾滴沉积飘失问题,把控制雾滴飘移作为施药领域的主要研究方向。

影响雾滴飘移的因素主要有喷雾参数(如喷头类型、喷雾压力、雾流角、雾滴粒径等)及喷雾环境(风速、风向、温度、速度)^[8-11]。近年来,研究农药雾滴沉积飘失的主要手段有田间试验及风洞试验。由于田间试验过程中,环境风速、风向等因素的不可控性导致试验可重复性较差^[12],风洞试验可以准确控制喷雾参数及环境参数,使得试验重复性较好^[13-14]。围绕喷雾参数、喷雾环境等影响因素与雾滴飘移之间的关系,国内外学者已经开展了大量试验研究。文献[15]通过试验提出了飘移潜在指数(Drift potential index, DIX)来评价喷嘴的潜在飘移特性;文献[16-17]在大量田间试验的基础上提出了农药预测模型(Agricultural dispersion, AGDISP)和农药飘移模型(Agricultural drift, AGDRIFT),预测喷雾作业中可能产生的雾滴飘移;文献[18]研究了不

同喷雾压力、喷头类型及喷雾速度等影响因素下的飘移预测方程;文献[19]在室内恒定风速下,采用分光光度法测定并结合数学模型方法研究了不同喷雾量及喷雾浓度下的地面沉积状况;文献[20]在定量分析的基础上研究了不同喷头与风速对雾滴飘移影响的主次关系;文献[21-22]建立了不同药剂类型、喷头类型及风速的雾滴飘移回归模型。

扇形喷头是当前施药喷雾使用的主要喷头类型之一,目前尚缺乏不同喷雾条件下扇形喷头雾流角、喷头倾角、侧风风速及喷雾压力对雾滴飘失影响的研究,本文通过风洞生成恒速风场模拟自然风的侧风条件,搭建喷雾系统,研究不同工况下扇形喷头雾滴粒径分布以及在水平与垂直方向上雾滴沉积状况,以期施药技术的研究提供参考。

1 材料与方法

试验在农业农村部农业机械重点开放实验室进行。

1.1 试验装置

本文试验分雾滴粒径测试试验和雾滴沉积分布试验 2 部分,选用 LURMARK-04F80 型标准扇形喷嘴。

1.1.1 雾滴粒径测试装置

试验装置由农业农村部南京农业机械化研究所自行研制的 NJS-1 型植保风洞^[23]、DP-02 型

激光粒度仪(测试范围 $1 \sim 1\,500\ \mu\text{m}$; 温度 $5 \sim 35\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度小于 85%)与喷雾系统等部分组成。风洞通过变频器控制风洞内部轴流风机的转速,从而获得不同的稳定风速,该风洞试验段尺寸为 $10\ \text{m} \times 1.2\ \text{m} \times 1.8\ \text{m}$ (长 \times 宽 \times 高),风速为 $0.5 \sim 10\ \text{m/s}$ 。DP-02型激光粒度仪发射端与接收端分别安装在风洞两侧,并在发射端与接收端所对应的风洞侧面开有直径 $2.0\ \text{cm}$ 的圆孔,以便激光束正常发射,保证测试精度。喷雾系统上的喷头安装在可竖直往复运动的导轨上,运动速度为 $6.7\ \text{cm/s}$,喷头与激光束之间的距离为 $30\ \text{cm}$ ^[24]。雾滴粒径测试装置如图1所示。

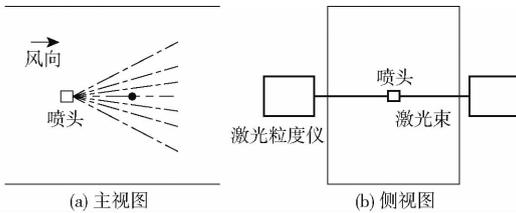


图1 雾滴粒径测试示意图

Fig.1 Schematic of droplet diameter test

1.1.2 雾滴沉积分布试验装置

雾滴沉积分布测量系统由喷雾系统、风洞系统、采集系统3部分组成,试验装置原理如图2所示。其中,喷雾系统由电机、液泵、水箱、压力表、调压阀、喷头、电磁阀、定时继电器等部分组成;采集系统主要包括不同高度、不同距离的采集架。喷头被固定在距离风洞地面 $0.6\ \text{m}$ 的中心位置,雾滴沉积由直径为 $2\ \text{mm}$ 的聚乙烯线收集。在顺风方向,距离喷头 $2\ \text{m}$ 的位置,由风洞地面向上 $0.1 \sim 0.5\ \text{m}$ 放置5根间隔为 $0.1\ \text{m}$ 的收集线,并且地面铺设人工草坪,以免雾滴在地面飞溅污染采集线,这些采集线用来收集穿过垂直平面空气的雾滴,分别命名为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 和 V_5 ;此外,沿水平方向在距离地面 $0.1\ \text{m}$ 高的位置间隔 $1\ \text{m}$ 分别放置6根收集线,来检测喷雾在 $2 \sim 7\ \text{m}$ 范围内的水平飘失,分别命名为 H_1 、

H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 和 H_6 (其中 V_1 和 H_1 合并为同一收集线)。

1.2 试验设计

试验采用的 LURMARK-04F80 型标准扇形喷嘴在一定的喷雾压力条件下形成稳定的喷雾,为了探索喷雾压力与风速对雾滴粒径的影响,以及喷雾压力、风速与喷头安装方式对雾滴沉积分布的影响,每组试验重复3次,取其平均值作为最终数据。

1.2.1 雾滴粒径分布试验

雾滴粒径是影响农药飘移、沉降的关键因素之一。相同喷雾量的条件下,雾滴粒径越细,雾滴数量就会越多,在靶标上分布越均匀且覆盖面积大。但小雾滴由于本身特性(动量小、粒径细、蒸发易)导致其受环境因素(温度、湿度、风速)影响较大,使得部分雾滴未能有效到达靶标^[25]。分析评价喷头雾化性能参数主要有 $D_{V0.1}$ 、 $D_{V0.5}$ 、 $D_{V0.9}$ 、 $\Phi_{V0.1 < 100\ \mu\text{m}}$ 以及雾滴谱宽 S ^[26], $D_{V0.1}$ 、 $D_{V0.5}$ 、 $D_{V0.9}$ 分别表示在喷雾过程中,将所有雾滴的体积从小到大顺序积累,其累积值分别等于取样雾滴体积总和 10% 、 50% 、 90% 的雾滴粒径,其中 $D_{V0.5}$ 也称为体积中径 (Volume median diameter, VMD); $\Phi_{V0.1 < 100\ \mu\text{m}}$ 表示粒径小于 $100\ \mu\text{m}$ 雾滴占全部雾滴的百分比; S 表示雾滴粒径分布对称性的参数,计算式为 $S = (D_{V0.9} - D_{V0.1}) / D_{V0.5}$ 。

为考量不同雾滴粒径对飘移性能的影响,设置不同喷雾压力,调整风洞风速;测试时,开启动力装置待喷雾压力稳定后,打开激光粒度仪,单片机控制喷头以一定的速度运动,使得整个喷雾行程区域都被抽样。同时在相同工作条件下,测定喷头在不同工作压力下喷雾流量,每个工作压力下喷雾时间为 $60\ \text{s}$,将收集的雾滴在天平上进行称量。

1.2.2 雾滴沉积分布试验

为了研究不同喷雾参数对雾滴粒径分布的影响,本文设计了风速、雾流角、喷头倾角、喷雾压力条件下雾滴沉积分布试验。本试验规定喷头垂直向下且雾流长轴与风向垂直而雾流短轴与风向平行时,

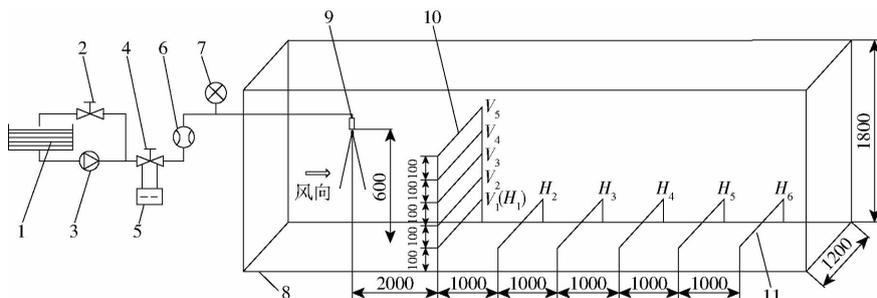


图2 雾滴沉积分布测量系统

Fig.2 Measurement system of droplet deposition distribution

1. 水箱 2. 回水调压阀 3. 液泵 4. 喷雾调压阀 5. 定时继电器 6. 流量计 7. 压力表
8. 风洞 9. 喷头 10. 垂直采集架 11. 水平采集架

其雾流角 α 与喷头倾角 β 均为 0° , 当向前喷雾即喷头绕雾流长轴旋转且偏向风向时雾流角 α 为正, 向后喷雾时雾流角 α 为负; 当喷头绕垂直于地面的轴线旋转时与起始位置所形成的角度为喷头倾角 β , 如图 3 所示。

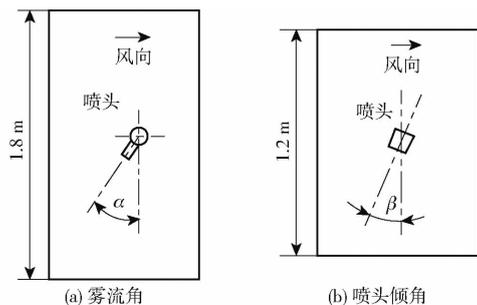


图 3 雾流角与喷头倾角示意图

Fig. 3 Schematics of spray orientation and nozzle direction

试验按照 ISO/FDIS 22856:2008 Equipment for crop protection—Methods for the laboratory measurement of spray drift—Wind tunnels 进行。试验时, 喷头的流量由电子计时器控制电磁阀的开闭, 确保每个测试的喷雾时间都固定地维持在 10 s, 喷雾介质选择荧光示踪剂 BSF 与清水按照 0.30 g/L 的浓度配比, 喷雾测试后, 把收集线放置在塑料袋中, 加入 30 mL 的去离子水充分振荡洗涤, 每次测试的洗脱液由校准过的荧光分析仪测定荧光剂含量。同时为保证试验的一致性, 每一组试验开始与结束时, 都在喷雾压力 0.3 MPa、风速 3 m/s、雾流角 0° 、喷头倾角 0° 条件下进行校准, 如果两组试验的结果都在 90% 置信区间内, 那么就认为本次试验结果可以接受, 否则重新校准试验参数。试验方案如表 1 所示。

表 1 雾滴沉积分布试验设计

Tab. 1 Experiment design of droplet distribution

试验 序号	因素				试验 次数
	喷雾压力/ MPa	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	雾流角/ ($^\circ$)	喷头倾角/ ($^\circ$)	
1	0.2	3	0	0	3
2	0.3	3	0	0	11
3	0.4	3	0	0	3
4	0.3	1	0	0	3
5	0.3	5	0	0	3
6	0.3	3	-15	0	3
7	0.3	3	15	0	3
8	0.3	3	0	15	3
9	0.3	3	0	30	3

2 结果分析

2.1 不同喷雾条件下雾滴粒径分布

2.1.1 试验结果

不同压力与风速下雾滴特性试验结果如表 2 所

示, 通过试验结果可以为采集线雾滴沉积分布提供依据。

表 2 不同喷雾条件下喷雾流量与粒径分布

Tab. 2 Spray flow rate and droplet size distribution under different spray pressures

压力/ MPa	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流量/ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	$D_{v0.1}$ / μm	$D_{v0.5}$ / μm	$D_{v0.9}$ / μm	$\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$ / %	S
0.2	3	1.281	122.74	291.56	486.68	6.21	1.25
	1		94.02	221.51	415.07	12.05	1.44
0.3	3	1.606	99.62	239.25	419.72	10.10	1.33
	5		108.17	254.92	407.25	8.15	1.17
0.4	3	1.860	88.14	204.02	355.79	13.86	1.31

2.1.2 结果分析

(1) 压力对雾滴粒径分布的影响

由表 2 可知, 在风速 3 m/s 下, 随着压力的增加, $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 和 $D_{v0.9}$ 都会变小, 同时 $\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$ 随之变大, 而雾滴谱宽 S 变化不大; 当喷雾压力增加 100% 时 (0.2 MPa 增加至 0.4 MPa), $D_{v0.5}$ 平均减小 30%, $\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$ 平均增大 123%。试验结果表明, 在低风速下, 决定雾滴粒径的主要因素仍是压力。

(2) 风速对雾滴粒径分布的影响

由表 2 可知, 在压力 0.3 MPa 下, 随着风速的增加, $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 随之变大, $\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$ 随之变小, 同时雾滴谱宽 S 从 1.44 减小到 1.17, $D_{v0.9}$ 变化较小; 当风速增加 67% 时 (3 m/s 增加至 5 m/s), $D_{v0.5}$ 平均增大 6.5%, $\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$ 平均减小 19%。试验结果表明在低压喷雾条件下, 风速的变大会使得细小的雾滴能够在风力的作用下, 合并聚集效应更加明显, 从而使得 $D_{v0.1}$ 、 $D_{v0.5}$ 变大, 雾滴谱宽也相应变小。

2.2 不同喷雾条件下雾滴沉积分布

2.2.1 计算方法

测定雾滴在空间与地面上的飘移沉积, 计算不同喷雾状况下的潜在飘移特性 (Drift potential, DP)。为了更好地说明喷头在不同喷雾条件下的飘移特性, 本文中潜在飘移特性表示飘移沉积量与喷头喷雾量进行比较的相对值, 并采用 3 种不同的计算方法研究潜在飘移特性, 分别为 D_{pV1} 、 D_{pV2} 和 D_{pH} 。

(1) 利用数值累加的方法, 计算在距离喷头下风向 2 m 处的垂直面上 D_{pV1} , 此方法由 MILLER 等^[27] 提出, HERBST 等^[28] 也采用了此方法进行统计分析, 计算式为

$$D_{pV1} = \sum_{i=1}^5 P_{Vi} h_i \quad (1)$$

$$\text{其中 } P_{Vi} = 6 \times 10^6 \frac{10^{-3} A_{Vi} W}{KQ} \quad (2)$$

式中 D_{pV1} ——距离喷头 2 m 处的所在平面累计潜

在飘移性能, $\mu\text{L}/\text{mL}$

P_{Vi} ——喷头每喷洒出 1 L 溶液第 i 根水平采集线上的相对飘移沉积量, $\mu\text{L}/\text{L}$

h_i ——距离风洞底面高度, 分别取 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 m

A_{Vi} ——第 i 根水平采集线上的飘移沉积量, mg/L

W ——洗脱水体积, 取 30 mL

K ——示踪剂质量浓度, 300 mg/L

Q ——喷头流量, L/min

(2) 利用数值积分的方法, 计算在距离喷头下风向 2 m 处的竖直面上 D_{PV2} , 计算式为

$$D_{PV2} = \sum_{i=1}^5 P_{Vi} \Delta h_i \quad (3)$$

式中 D_{PV2} ——距离喷头 2 m 处所在平面基于数值积分的空间潜在飘移性能, $\mu\text{L}/\text{mL}$

Δh_i ——各采集线对应的高度间隔, 分别取 0.05、0.1、0.1、0.1、0.05 m

(3) 利用数值积分的方法, 计算在水平沉降面上的 D_{PH} , NILARS^[29] 采用此方法进行统计分析, 计算式为

$$D_{PH} = \sum_{i=1}^6 P_{Hi} \Delta x_i \quad (4)$$

其中 $P_{Hi} = 6 \times 10^6 \frac{10^{-3} A_{Hi} W}{KQ}$ (5)

式中 D_{PH} ——基于数值积分的地面潜在飘移性能, $\mu\text{L}/\text{mL}$

P_{Hi} ——喷头每喷洒出 1 L 溶液第 i 根竖直采集线上的相对飘移沉积量, $\mu\text{L}/\text{L}$

A_{Hi} ——第 i 根竖直采集线上的飘移沉积量, mg/L

Δx_i ——各水平采集线对应的距离间隔, 分别取 0.5、1、1、1、0.5 m

(4) 在上述潜在飘移参数计算的基础上, 设定喷雾压力 0.3 MPa、风速 3 m/s、雾流角 0° 、喷头倾角 0° 时为参考喷雾参数, 其他所有喷雾情况均与其进行比较, 从而计算雾滴潜在飘移减少百分比 (Drift potential reduction percentages, DPRP), 计算式为

$$D_{PRP} = \frac{D_p^s - D_p^{os}}{D_p^s} \times 100\% \quad (6)$$

式中 D_{PRP} ——雾滴潜在飘移减少百分比, %

D_p^s ——参考喷雾下的飘移性能, $\mu\text{L}/\text{mL}$

D_p^{os} ——其他喷雾情况下的飘移性能, $\mu\text{L}/\text{mL}$

2.2.2 雾滴沉积量

2.2.2.1 试验结果

图 4、5 为各采集线上雾滴沉积量的变化趋势,

水平面与竖直面雾滴沉积量与标准差见表 3, 这些数据显示了所有喷雾条件下喷头每喷洒出 1 L 液体各采集线上收集到的雾滴。

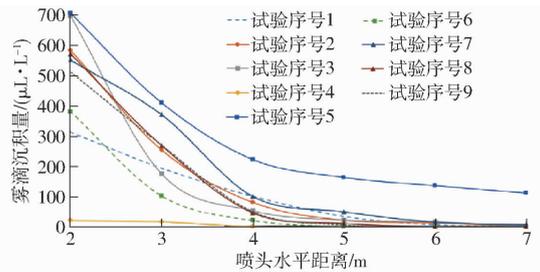


图 4 不同喷雾条件下水平方向雾滴沉积量分布
Fig. 4 Droplet deposition distribution under different spray conditions along horizontal directions

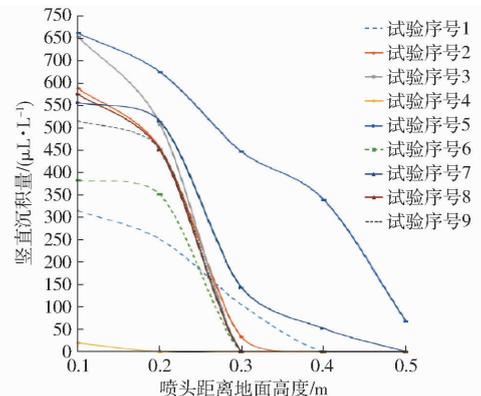


图 5 不同喷雾条件下竖直方向雾滴沉积量分布
Fig. 5 Droplet deposition distribution under different spray conditions along vertical directions

2.2.2.2 结果分析

从图 4、5 可以看出, 总体趋势是在水平方向上距离喷头最近的位置处飘移量最高, 在竖直方向上飘移量随着距离喷头位置的升高而增加。

(1) 喷雾压力对雾滴沉积量的影响

在水平喷雾方向上, 距离喷头 2、3 m 处, 压力变大雾滴沉积量基本呈增加的趋势, 距离喷头较远处, 压力变大雾滴沉积量基本呈减少的趋势; 在竖直喷雾方向上, 雾滴沉积量在距离地面较近处沉积量最大, 且与压力大小成正比, 在中间位置随着压力增大而变小, 在喷头最近的高度处, 雾滴基本没有沉积。其主要原因是压力加大, 喷头的流量与小雾滴 ($\Phi_{Vol < 100 \mu\text{m}}$) 的数量明显增加, 雾滴在喷头出口初始速度也加快, 侧风对高速小雾滴影响降低, 高速雾滴较低速雾滴能够快速的沉降, 从而高速小雾滴在水平方向上大多沉积在喷头较近的位置, 在竖直方向上大多沉积在距离风洞底壁较近的位置, 低速雾滴在侧风的影响下能够飘移到较远的位置才开始沉积。

(2) 风速对雾滴沉积量的影响

在水平喷雾方向以及竖直喷雾方向上, 随风速

的加大雾滴沉积量整体呈增加的趋势。其主要原因是风速的加大,虽然让部分小雾滴产生聚合并效应,但大量的小雾滴在喷头出口处就被风力胁迫带走,使得竖直方向上距离喷头高度较近的位置有大量小雾滴沉积,同时高风速在一定程度上会带走一部分相对较大的雾滴,使得在水平方向上距离喷头较近的位置有大量小雾滴和部分相对较大的雾滴沉积,距离喷头较远的位置有大量小雾滴沉积。

(3) 雾流角对雾滴沉积量的影响

在水平喷雾方向以及竖直喷雾方向上,随着雾流角从 -15° 变化到 15° ,雾滴沉积量明显加大。其主要原因是雾流角为负时,雾滴的初始速度会分解

为一向下的速度与一向后(与风速方向相反)的速度,使得风力胁迫雾滴运动时需要克服此方向上的动能,从而降低雾滴的沉积量;而雾流角为正时,雾滴的初始速度会分解为一向下的速度与一向前(与风速方向一致)的速度,加大风力对雾滴的胁迫能力,从而提高雾滴的沉积量。

(4) 喷头倾角对雾滴沉积量的影响

在水平喷雾方向以及竖直喷雾方向上,总体趋势是喷头倾角越大,沉积量越低,但差异不大。造成这一现象的原因是喷头倾角变大,增加了雾滴碰撞的机率,使得部分小雾滴变大,从而降低了雾滴的沉积量,但喷头倾角为 0° 时,其喷幅最大。

表 3 不同喷雾条件下水平与竖直方向上雾滴沉积量

Tab.3 Droplet deposition distribution under different spray conditions along vertical and horizontal directions

试验序号	采集线编号									
	V_5	V_4	V_3	V_2	$V_1(H_1)$	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6
1	0 ± 0	0 ± 0	105.3 ± 16.9	251.4 ± 10.0	315.8 ± 13.4	194.6 ± 15.2	100.4 ± 11.4	33.1 ± 7.0	4.9 ± 3.0	0 ± 0
2*	0 ± 0	0 ± 0	33.4 ± 6.0	454.6 ± 12.4	589.0 ± 10.8	255.4 ± 6.9	80.1 ± 16.4	20.6 ± 9.2	12.1 ± 5.9	0 ± 0
3	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	509.0 ± 11.6	705.0 ± 15.9	176.3 ± 14.6	52.6 ± 6.2	21.4 ± 9.0	15.9 ± 7.1	0.6 ± 0.3
4	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	19.9 ± 2.8	15.6 ± 3.8	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
5	68.2 ± 4.2	340.1 ± 12.7	447.7 ± 9.1	625.5 ± 11.2	713.0 ± 12.3	413.2 ± 15.0	223.6 ± 16.2	163.7 ± 14.9	136.6 ± 18.8	111.7 ± 15.9
6	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	351.7 ± 8.2	383.6 ± 14.1	101.8 ± 12.1	19.9 ± 6.8	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0
7	0 ± 0	52.0 ± 4.5	143.8 ± 4.5	515.0 ± 9.8	556.3 ± 8.7	374.2 ± 13.1	100.7 ± 8.2	49.2 ± 12.5	14.7 ± 2.7	5.9 ± 0
8	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	450.2 ± 8.9	576.0 ± 8.4	270.0 ± 12.1	45.3 ± 9.2	9.9 ± 7.5	0 ± 0	0 ± 0
9	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	453.3 ± 11.6	516.8 ± 16.8	271.5 ± 17.3	49.0 ± 10.0	4.4 ± 2.0	0 ± 0	0 ± 0

注: * 参考喷雾。

2.2.3 水平面与竖直面雾滴飘移减少百分比

(1) 试验结果

根据 3 种计算方法得到的雾滴飘移减少百分比 (D_{PRPV1} 、 D_{PRPV2} 和 D_{PRPH}) 如图 6 所示,结果表明喷雾方式对雾滴飘移减少百分比影响较大。

(2) 结果分析

从图 6 可以看出,喷雾压力、侧风风速以及雾流角对雾滴飘移减少百分比影响较大,特别是侧风风

速影响尤为显著,喷雾倾角的变化对雾滴飘移减少百分比影响较小。

同时,采用不同的方法评价雾滴飘移减少百分比略有差异。与参考喷雾比较,喷雾压力 0.2 MPa 下的 D_{PRPV1} 、 D_{PRPV2} 较 D_{PRPH} 大,表明其在空气中雾滴比在地面沉积的少,随着喷雾压力加大,空气中雾滴比在地面沉积的多;在不同侧风风速下,风速 1 m/s 下 D_{PRPV1} 、 D_{PRPV2} 和 D_{PRPH} 基本一致,风速 5 m/s 下

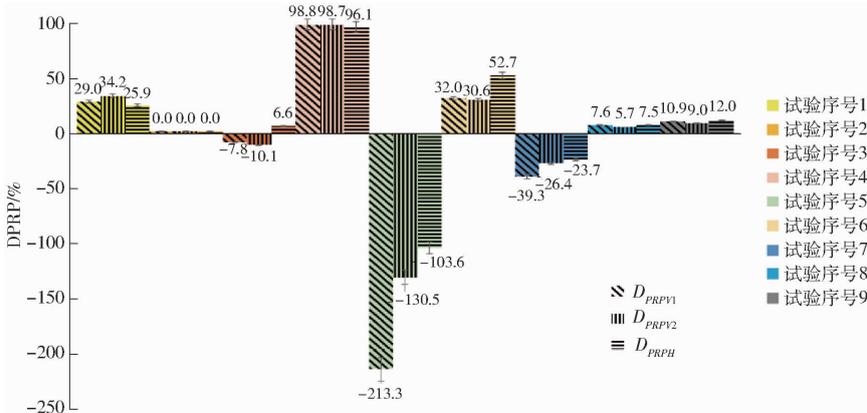


图 6 不同喷雾条件下雾滴飘移减少百分比

Fig.6 Drift potential reduction percentages under different spray conditions

D_{PRPH} 最高,其次是 D_{PRPV2} 和 D_{PRPV1} ,表明空气中雾滴比在地面沉积的多;在雾流角 -15° 与 15° 下,两者趋势一致,均为 D_{PRPH} 最高,其次是 D_{PRPV2} 和 D_{PRPV1} ;在喷头倾角 15° 、 30° 时, D_{PRPV1} 、 D_{PRPV2} 和 D_{PRPH} 与参考喷雾基本一致,表明雾滴飘移基本没有减少。

3 结论

(1) 针对 LURMARK-04F80 型喷头在不同喷雾条件下进行了雾滴粒径分布及沉积分布试验,分析了不同喷雾压力与风速对雾滴粒径的影响,同时,研究了不同风速、喷雾压力、雾流角及喷头倾角下雾滴沉积特性。

(2) 相同风速下,增大喷雾压力导致 $D_{V0.1}$ 、 $D_{V0.5}$ 和 $D_{V0.9}$ 都会变小,同时 $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 变大,雾滴谱宽 S 变化不大;当喷雾压力从 0.2 MPa 增加至 0.4 MPa, $D_{V0.5}$ 平均减小 30%, $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 平均增大 123%。相同压力下,增大风速导致 $D_{V0.1}$ 和 $D_{V0.5}$ 变大, $D_{V0.9}$ 变化较小,同时 $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 变小,雾滴谱宽 S 从 1.44 减小到 1.17,当风速从 3 m/s 增加至 5 m/s, $D_{V0.5}$ 平均增大 6.5%, $\Phi_{Vol < 100 \mu m}$ 平均减小 19%。

(3) 压力从 0.2 MPa 增加至 0.4 MPa 时,水平喷雾平面上,距离喷头 2~3 m 处雾滴沉积量基本呈增加的趋势;竖直喷雾平面上,距离地面 0.1~0.2 m 处雾滴沉积量呈增加的趋势。风速从 1 m/s 增加至 5 m/s 时,在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上,雾滴沉积量整体增加的趋势。雾流角从 -15° 变化到 15° 时,在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上,雾滴沉积量明显加大,且当风速达到 5 m/s 时,距离喷头 7 m 处仍有大量雾滴沉积。喷头倾角从 0° 变化到 30° 时,在水平喷雾平面以及竖直喷雾平面上,总体趋势是喷头倾角越大,沉积量越低,但差异不大。

(4) 喷雾压力、风速以及雾流角对雾滴飘移减少百分比影响较大,特别是侧风风速影响尤为显著,喷雾倾角的变化对雾滴飘移减少百分比影响较小。同时 3 种计算方法得到的飘移减少百分比表明,喷雾压力、风速以及雾流角的增大,使得大量雾滴飘移在空气中,不能有效沉积在地面。

(5) 当外界风速较大时,为减少雾滴在空气中的飘移,应选择低压大雾滴进行喷雾作业,并适当调整雾流角。

参 考 文 献

- [1] 屠豫钦. 农药剂型和制剂与农药的剂量转移[J]. 农药学报,1999,1(1):1-6.
TU Yuqin. Pesticide formulation and dose transfer[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 1999, 1(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 刘秀娟,周宏平,郑加强. 农药雾滴飘移控制技术进展[J]. 农业工程学报,2005,21(1):186-190.
LIU Xiujuan, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 186-190. (in Chinese)
- [3] 王潇楠,何雄奎,王昌陵,等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报,2017,33(1):117-123.
WANG Xiaonan, HE Xiongkui, WANG Changling, et al. Spray drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 117-123. (in Chinese)
- [4] HEWITT A J. Droplet size spectra classification categories in aerial application scenarios[J]. Crop Protection, 2008, 27(9): 1284-1288.
- [5] FRITZ B K. Role of atmospheric stability in drift and deposition of aerially applied sprays-preliminary results [C]. ASAE Paper 041031, 2004.
- [6] HUANG Y B, THOMSON S J, HOFFMANN W C, et al. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2013, 6(3): 1-10.
- [7] EMILIA H, ARNOLDUS W P V. Spray drift review: the extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction [J]. Crop Protection, 2013, 44: 75-83.
- [8] 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?file_no=2012s14&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.014. (in Chinese)
- [9] HORWARD K D, MULROONEY J E, GAULTNEY L D. Penetration and deposition of air-assisted sprayers[C]. ASAE Paper 941024, 1994.
- [10] 曾爱军,何雄奎,陈青云,等. 典型液力喷头在风洞环境中的飘移特性试验与评价[J]. 农业工程学报,2005,21(10): 78-81.
ZENG Aijun, HE Xiongkui, CHEN Qingyun, et al. Spray drift potential evaluation of typical nozzles under wind tunnel conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 78-81. (in Chinese)
- [11] 王潇楠,何雄奎,宋坚利,等. 助剂类型及浓度对不同喷头雾滴飘移的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(22):49-55.
WANG Xiaonan, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Effect of adjuvant types and concentration on spray drift potential of different nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 49-55. (in Chinese)
- [12] FRITZ B K, HOFFMANN W C, MARTIN D E, et al. Aerial application methods for increasing spray deposition on wheat heads[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(6): 709-715.
- [13] NUYTENS D, TAYLOR W A, SCHAMPHELEIRE M D, et al. Influence of nozzle type and size on drift potential by means

- of different wind tunnel evaluation methods[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(3): 271–280.
- [14] HERBST A. A method to determine spray drift potential from nozzles and its link to buffer zone restrictions[C]. ASAE Paper 011047, 2001.
- [15] GENG B, KAZUHIRO N, TOMOMICHI M K, et al. Characteristics and classification of Japanese nozzles based on relative spray drift potential[J]. *Crop Protection*, 2013, 46:88–93.
- [16] TESKE M E, BOWERS J F, RAFFERTY J E, et al. FSCBG: an aerial spray dispersion model for predicting the fate of released material behind aircraft[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(3): 453–464.
- [17] TESKE M E, THISTLE H W. Aerial application model extension into the far field[J]. *Biosystems Engineering*, 2004,89(1): 29–36.
- [18] NUYTTENS D, DE S M, BAETENS K, et al. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers[J]. *Trans. ASABE*, 2007,50(4): 1129–1140.
- [19] 李秉华,王贵启,李香菊,等. 农药飘移状况的室内模拟测定[J]. *河北农业科学*,2006,10(2): 43–46.
LI Binghua, WANG Guiqi, LI Xiangju, et al. Determination of indoor simulation of pesticide drift[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2006, 10(2): 43–46. (in Chinese)
- [20] 祁力钧,胡锦蓉,史岩,等. 喷雾参数与飘移相关性分析[J]. *农业工程学报*,2004,20(5):122–125.
QI Lijun, HU Jinrong, SHI Yan, et al. Correlative analysis of drift and spray parameters[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 122–125. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120610&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)
- [23] 丁素明,薛新宇,兰玉彬,等. NJS-1型植保直流闭口式风洞设计与试验[J]. *农业工程学报*,2015,31(4):76–84.
DING Suming, XUE Xinyu, LAN Yubin, et al. Design and experiment of NJS-1 type open-circuit closed wind tunnel for plant protection[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4):76–84. (in Chinese)
- [24] FRITZ B K, HOFFMANN W C, KRUGER G R, et al. Comparison of drop size data from ground and aerial application nozzles at three testing laboratories[J]. *Atomization and Sprays*, 2014, 24(2): 181–192.
- [25] 屠豫钦,李秉礼. *农药应用工艺学导论*[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [26] ASAE Standards. S572: Spray nozzle classification by droplet spectra[S]. St. Joseph, Mich.: ASAE,2004.
- [27] MILLER P C H, MAWER C J, MERRITT C R. Wind tunnel studies of the spray drift from two types of agricultural spray nozzle[J]. *Aspects of Applied Biology*, 1989,21: 237–238.
- [28] HERBST A, GANZELMEIER H. Classification of sprayers according to drift risk—a German approach[J]. *Aspects of Applied Biology*, 2000, 57: 35–40.
- [29] NILARS M S. Some nozzle performance considerations when using wide booms at higher spraying speeds[J]. *Aspects of Applied Biology*, 2002, 66: 95–105.

(上接第 267 页)

- [18] TSAY J, OZKAN H E, FOX R D, et al. CFD simulation of mechanical spray shields[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(5): 1271–1280.
- [19] BAETENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 56(2): 161–173.
- [20] 王俊,祁力钧,孙小华. 基于 CFD 的罩盖防飘移机理模拟及防飘移效果量化研究[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(4):95–100.
WANG Jun, QI Lijun, SUN Xiaohua. Simulation and quantification on drift-reduction of double-foil shield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2007, 12(4): 95–100. (in Chinese)
- [21] 傅泽田, 王俊, 祁力钧, 等. 果园风送式喷雾机气流速度场模拟及试验验证[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 69–74.
FU Zetian, WANG Jun, QI Lijun, et al. CFD simulation and experimental verification of air-velocity distribution of air-assisted orchard sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 69–74. (in Chinese)
- [22] 吕晓兰, 张美娜, 常有宏, 等. 果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15):81–87.
LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, CHANG Youhong, et al. Influence of deflector angles for orchard air-assisted sprayer on 3D airflow distribution[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(15): 81–87. (in Chinese)
- [23] OLIVET J J, VAL L, USERA G. Distribution and effectiveness of pesticide application with a cold fogger on pepper plants cultured in a greenhouse[J]. *Crop Protection*, 2011, 30(8):977–985.
- [24] 李慧, 祁力钧, 王沛. 悬挂式常温烟雾机气流场与雾滴沉积三维模拟与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 103–109.
LI Hui, QI Lijun, WANG Pei. 3-D simulation for airflow field and droplets deposition of hanging cold sprayer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4): 103–109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.016. (in Chinese)