

冠层推拨装置对喷杆喷雾机雾滴飘失与沉积特性的影响

王士林^{1,2}, 李雪^{1,2}, 雷晓晖¹, 顾炆¹, HERBST Andreas³,
BONDS Jane⁴, 吕晓兰^{1,2*}

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014; 3. Institute for Chemical Application Technology of JKI, Braunschweig D-38104, Germany; 4. Bonds Consulting Group LLC, Panama City Florida 32408, USA)

摘要 喷杆喷雾机具有作业效率高、雾滴覆盖率高、沉积分布均匀、防治效果好等优点,是目前大田作物最主要的施药机具。但受作物冠层遮挡和侧风等气象条件的影响,导致喷杆喷雾机作业时雾滴难以穿透到植株中下部并伴随飘失。为改善喷杆喷雾机喷雾雾滴在作物冠层的穿透性并降低飘移量,本文优化设计了一种适用于大田作物的喷杆喷雾机冠层推拨装置。并分别使用两种喷头(标准扇形雾喷头 ST110-02、射流喷头 IDK120-02)对该装置的减飘特性和在小麦上的沉积特性进行了对比试验。结果表明:该冠层推拨装置对标准扇形雾喷头 ST110-02 的减飘效果强于射流喷头 IDK120-02,其减飘效果分别为 59.0%和 9.5%;冠层推拨装置可以提高药液的沉积率,对于 ST110-02 喷头可增加 18.0%,IDK120-02 喷头增加了 8.6%;同时该推拨装置对小麦植株的推拨作用增加了雾滴向冠层中下部的穿透效果,有利于药液在植株上的均匀沉积。

关键词 喷杆喷雾机; 推拨装置; 飘失; 雾滴; 沉积

中图分类号: S 491 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019541

Influences of canopy-pushing plate on droplet drift and deposition characteristics of boom sprayer

WANG Shilin^{1,2}, LI Xue^{1,2}, LEI Xiaohui¹, GU Yang¹, HERBST Andreas³, BONDS Jane⁴, LÜ Xiaolan^{1,2,*}

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Engineering in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. Institute for Chemical Application Technology of JKI, Braunschweig D-38104, Germany; 4. Bonds Consulting Group LLC, Panama City Florida 32408, USA)

Abstract Boom sprayer is one of the most important sprayers for field crops due to its advantages of high working efficiency, droplet coverage, uniform droplet distribution and good biological control effect. However, due to the density of plant canopy and meteorological conditions such as crosswind, the droplets are very difficult to penetrate into the middle and lower parts of the plant and tend to drift into non-target areas. In order to improve the penetrability of droplets in crop canopy and reduce the potential spray drift of boom sprayer, a canopy-pushing plate of boom sprayer was designed and optimized. Two kinds of nozzles (standard flat fan nozzle ST110-02 and air injection nozzle IDK120-02) were used to compare the characteristics of drift reduction and droplet deposition on wheat between conventional boom sprayer and canopy-pushing plate boom sprayer. The results showed that the pushing plate could effectively reduce drift, and the effect on the standard flat fan nozzle ST110-02 was stronger than on the air injection nozzle IDK120-02. The drift reduction rates in ST110-02 and IDK120-02 nozzle were 59.0% and 9.5%, respectively. The canopy-pushing plate could increase the deposition rate of spray liquid by 18.0% for the ST110-02 nozzle and 8.6% for the IDK120-02 nozzle. What's more, the canopy-pushing plate could also improve the penetration effect of droplets into the lower parts of canopy, which is favorable for the uniform deposition of the spray liquid on the plant.

Key words boom sprayer; canopy-pushing plate; drift; droplet; deposition

收稿日期: 2019-10-09

修订日期: 2019-12-27

基金项目: 江苏省农业自主创新资金[CX(16)1001, CX(19)3070]; 2019年江苏省农业科学院海外引智项目

* 通信作者 E-mail: lxlanny@126.com

喷杆喷雾机的作业效率高,药液喷洒均匀、防治效果好,因此被广泛用于小麦、水稻、玉米等大田作物的病虫害防治^[1-2]。随着我国农业种植规模的不断扩大,喷杆喷雾技术发挥了越来越重要的作用并成为了国内应用最为广泛的植保机具,目前国内约有 52.25% 的农户选择自走式喷杆喷雾机进行田间施药^[3-4]。

然而,喷杆喷雾机在进行施药作业时,其喷雾扇面内的细小雾滴极易在周围气流的胁迫之下运动至远离靶标区域的范围,造成农药的飘失与浪费、降低病虫害的防治效果,甚至会引起非靶标区域作物药害以及环境污染等问题^[5-7]。此外,由于稻、麦等防治作物种植密度较大,叶片交错重叠,导致喷杆喷雾机喷洒出的农药雾滴难以穿透作物冠层而沉积到植株中下部位^[8],这在一定程度上降低了作物冠层中下部位病虫害的防治效果。

为有效降低喷杆喷雾机作业过程中农药雾滴的飘移并提高雾滴在作物冠层内的穿透效果,科研人员先后对喷杆喷雾机的喷杆结构^[9]、减震装置^[10]和智能控制系统^[11]等进行了深入研究,但这些研究仅是改善了农药雾滴的沉积分布均匀性,并没有解决农药的飘失与穿透效果差的问题。在随后的研究中发现通过改变喷头周围气流的速度和方向,使气流运动利于雾滴的沉降,可以增加雾滴在作物冠层的沉积并

减少雾滴向非靶标区域飘失,由此风幕装置^[12]和罩盖推拨装置^[13-14]开始被用于喷杆喷雾机上。

风幕装置是在喷杆喷雾机的喷杆部分上加装风机或风筒等,以在喷杆喷雾机喷雾方向上产生辅助气流带动喷雾雾滴向靶标移动,从而增加农药雾滴的穿透效果并降低飘失^[15]。罩盖推拨装置是通过在喷杆上增加导流板来引导和改变喷头周围气流运动的路径,同时对防治作物产生推拨作用而促进雾滴向冠层中下部位的沉积。相比而言,罩盖推拨装置结构简单、投入成本更低、更有利于大规模的推广应用^[14]。因此本文优化设计了一种冠层推拨装置,并对安装该装置的喷杆喷雾机的雾滴飘移及田间沉积效果进行了对比试验,以期降低喷杆喷雾机施药时的农药飘移并提高雾滴的沉积效果。

1 材料与方 法

1.1 推拨装置结构参数

推拨装置的作用原理如图 1 所示:作业前喷杆喷雾机通过液压驱动喷杆的升降,使得推拨装置深入到作物冠层内部,当喷杆喷雾机行驶作业时推拨装置在喷杆的带动下将作物冠层拨开,使得喷头喷出的农药雾滴喷射到冠层内部^[16],同时推拨装置对外界自然风形成了阻挡作用降低了农药雾滴的飘失风险。

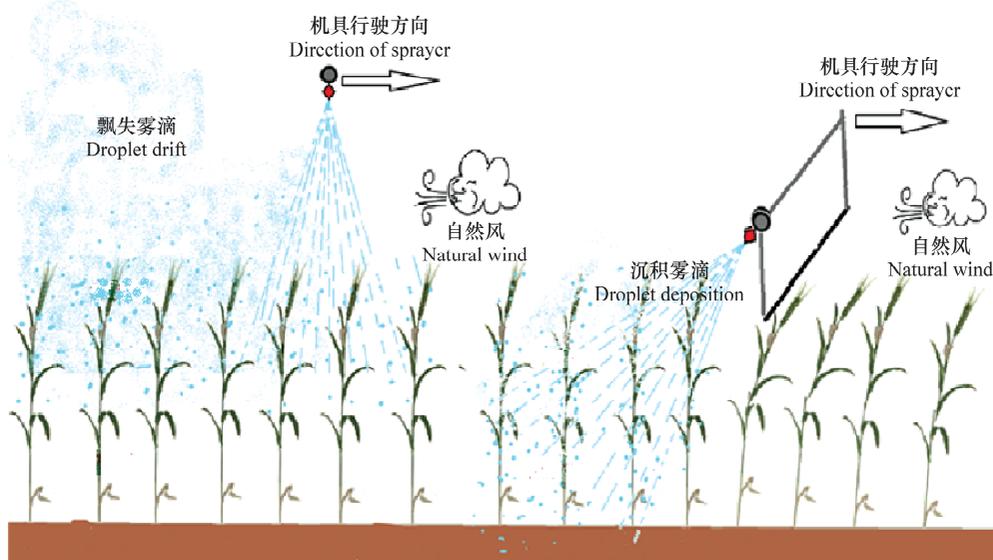


图 1 推拨装置对雾滴的减飘与沉积作用原理图

Fig. 1 Functional principles of shield on droplet deposition and drift reduction

为有效提升推拨装置的防飘与促沉降效果并提升其结构刚度,参照张京等^[17]在风洞和田间对不同结构参数的推拨装置的对比试验结果,利用有限元理论找出推拨装置固定支架的应力集中部位,并在

其原有结构基础上进行拓扑优化设计,以增强其结构强度和机械抗震性。最终确定推拨装置的结构如图 2 所示:固定支架为平行四边形结构,相邻两边长分别为 250、350 mm(其中 250 mm 为竖直方向的边

长), 夹角为 50°, 支架宽为 30 mm, 板厚为 4 mm。在平行四边形固定支架的右上角内部(相邻两边长度的三分之一处)增加一条加强筋, 厚度为 4 mm。推拨板宽为 350 mm, 固定在支架下方, 与水平方向的夹角为 40°。喷头位于固定支架右上角, 方向与推拨板平行, 喷头安装间距为 50 cm。

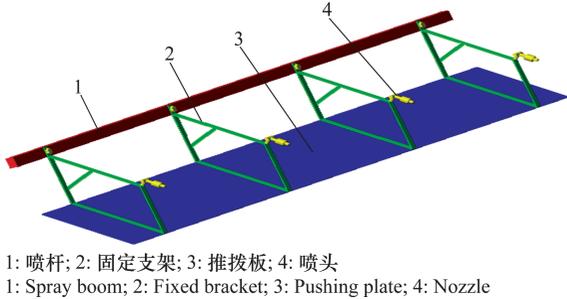


图 2 冠层推拨装置结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of canopy shield

1.2 试验方法

为研究所设计冠层推拨装置对喷杆喷雾机施药雾滴的飘移与沉积特性的影响, 将该冠层推拨装置安装于 3WZP-600 型自走式水旱两用喷杆喷雾机(山东绿田农业机械有限公司)与未安装推拨装置的该喷杆喷雾机进行对比试验。喷杆喷雾机的喷幅宽度为 12 m, 喷头间距为 0.5 m, 试验分别选用标准扇形雾喷头 ST110-02 与射流喷头 IDK120-02 进行, 两种喷头的喷雾压力均为 0.3 MPa。试验期间安装冠层推拨装置与未安装推拨装置条件下的喷杆喷雾机行进速度分别为 1.18 m/s 和 1.21 m/s, 喷雾压力为 0.3 MPa, 单喷头的流量均为 0.80 L/min。为对雾滴的飘移与沉积进行定量, 向喷雾液中加入质量分数为 2.5% 的诱惑红作为示踪剂, 试验结束后对所收集的样品进行洗脱并测定洗脱溶液的吸光值。

1.2.1 雾滴飘失测试

根据 ISO22369-3 农药飘移潜力测试平台试验标准^[18]对喷杆喷雾机的飘移特性进行测定, 该平台(见图 3)是在比利时由 Advanced Agricultural Measurement System 公司(A. A. M. S.)生产, 它由垂直杆、雾滴沉积和飘移收集装置和控制单元组成。控制单元由电控系统、气泵和电池组成, 电控系统的开关通过电信号与气动联动开启或闭合雾滴飘移收集装置上方的滑盖。

当待测喷杆喷雾机以平行于平台的雾滴沉积和飘移收集装置方向前进时, 喷出的粒径较大的雾滴会直接沉积到喷杆正下方区域, 而粒径较小的潜在飘移雾滴会在空中悬浮并增加沉降时间, 当喷杆喷

雾机行驶至垂直杆处喷杆会触碰垂直杆, 此时控制单元接收信号后由气动阀打开雾滴飘移收集装置上方的滑盖进而收集潜在飘移雾滴。同时雾滴飘移测试系统的前端有两个暴露的凹槽可放置培养皿用于收集喷雾扇面内沉积雾滴与空中飘移雾滴沉降后沉积量的总和。雾滴飘移收集装置长度为 11 m, 每隔 0.5 m 处有一个凹槽(共计 22 个)用于摆放培养皿作为飘移雾滴的收集单元, 每个凹槽上面均有滑盖, 控制系统可同时打开或关闭所有滑盖。

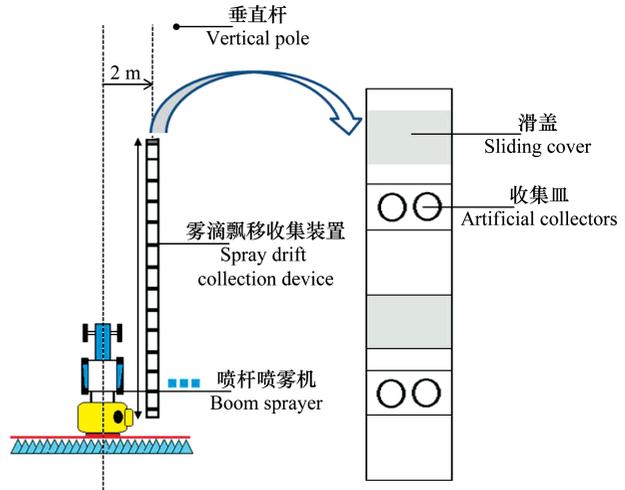


图 3 喷杆喷雾机雾滴飘移潜力测试平台

Fig. 3 Droplet drift test bench of boom sprayer

待测喷杆喷雾机的飘移特性表示为飘移潜力 (d_{PV}), 其计算公式如下:

$$d_{PV} = \sum D_i / d_{RS} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_i 是单位面积飘移量, 单位: $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; d_{RS} 是单位面积总的沉积量, 单位: $\mu\text{L}/\text{cm}^2$; d_{PV} 是飘移潜力值, 单位: %。

1.2.2 雾滴田间沉积效果

试验在灌浆期的麦田进行, 小麦株高约 60 cm, 株密度为 667 株/ m^2 , 试验期间田间温度为 21.6 ~ 22.9°C, 相对湿度 48.5% ~ 56.7%。根据 ISO24253-1 田间喷雾沉积试验测试标准^[19]对喷杆喷雾机的沉积效果进行测定, 分别对比安装标准扇形雾喷头 ST110-02 与射流喷头 IDK120-02 时冠层推拨装置对雾滴沉积效果的影响, 喷雾完成后在各处理作业区内随机选取 5 个采样点, 每个采样点收集不少于 10 株小麦。采样后将各采样点小麦植株剪切为等高的三段, 由上到下分别为上层、中层和下层, 对各层植株进行称重后洗脱并测定洗脱液吸光值, 根据式(2)计算各层植株上的沉积量 V_s , 并基于各层植

株高度计算单位高度上的药液沉积量 d (式 3)。

$$V_s = \frac{V_w \times FL_s}{N \times FL_a} \times 10^3 \quad (2)$$

$$d = \frac{V_s}{l} \quad (3)$$

式中 V_s 为靶标沉积量, μL ; V_w 为洗脱液体积, mL ; FL_s 为洗脱液吸光值; FL_a 为喷雾液稀释液的吸光值; N 为喷雾液的稀释倍数; d 为单位高度沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}$; l 为植株各层的高度, cm 。



图 4 喷杆喷雾机田间施药作业效果

Fig. 4 Pesticide application of boom sprayers in the field

2 结果与分析

2.1 雾滴飘移测试结果

图 5 显示使用标准扇形雾喷头 ST110-02 时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机在不同距离下的雾滴飘移量。ST110 型喷头作为目前喷杆喷雾机使用最为广泛的标准扇形雾喷头之一, 使用该类型喷头的雾滴飘移量能够极大程度上反应喷杆喷雾机作业时喷雾雾滴的飘移情况, 由图 5 可知雾滴的飘移量随着距离的增加均呈减少趋势且在各距离下常规喷杆喷雾机的雾滴飘移量均大于推拨喷杆喷雾机, 结果表明在喷杆喷雾机上加装的该推拨装置可有效减少雾滴的飘移, 从而改善雾滴沉积的靶向性。

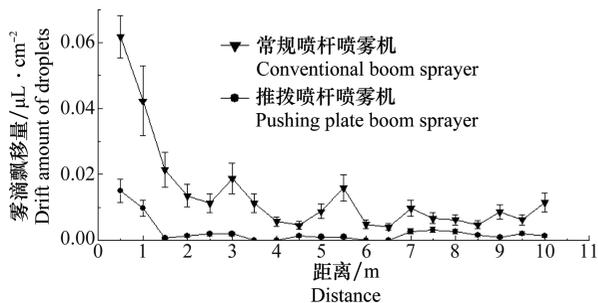


图 5 使用 ST110-02 喷头时的雾滴飘移结果

Fig. 5 Droplet drift results of ST110-02 nozzle

图 6 显示使用射流喷头 IDK120-02 时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机在不同距离下的雾滴飘移量。IDK 型喷头又名空气诱导型扇形喷头, 与常规标准扇形雾喷头相比, IDK 型喷头内部包含由喷射器与进气口形成的文丘里结构^[20], 因而提前了 IDK120-02 喷头喷雾液膜的雾化过程并增大了其雾滴粒径。在 0.3 MPa 喷雾压力下 IDK120-02 的雾滴粒体积中值中径约为 $350 \mu\text{m}$, 远大于标准扇形雾喷头 ST110-02 约为 $170 \mu\text{m}$ 的粒径^[21], 因此 IDK 型喷头具有较好的防飘移效果常被用于喷杆喷雾机喷施除草剂与植物生长调节剂。由于 IDK120 型喷头具有防飘移作用, 因此图 6 所显示的使用该喷头的常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机在不同距离下的雾滴飘移量并没有明显的差异。

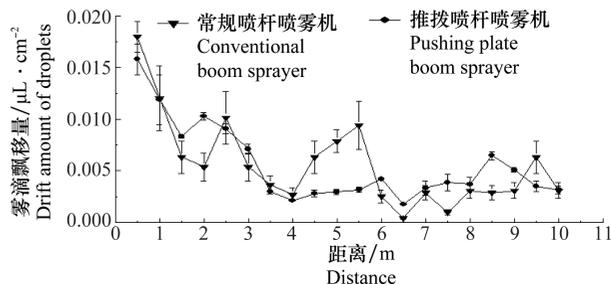


图 6 使用 IDK120-02 喷头时的雾滴飘移结果

Fig. 6 Droplet drift results of IDK120-02 nozzle

为更为直观地对该推拨装置的防飘效果进行定量, 分别计算使用两种喷头时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机的飘移潜力, 并以常规喷杆喷雾机的飘移潜力为基准计算使用两种喷头时推拨喷杆喷雾机的减飘率。表 1 显示使用两种喷头时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机的雾滴飘移潜力与减飘率, 结果显示使用标准扇形雾喷头 ST110-02 时常规喷杆喷雾机的飘移潜力为 39.7%, 增加推拨装置的喷杆喷雾机的飘移潜力为 16.3%; 使用射流喷头 IDK120-02 时常规喷杆喷雾机的飘移潜力为 14.3%, 增加推拨装置的喷杆喷雾机的飘移潜力为 12.9%。减飘率的结果显示当使用标准扇形 ST110-02 喷头时推拨装置的减飘率可达 59.0%, 使用射流喷头 IDK120-02 时推拨装置的减飘率为 9.5%。以上结果表明: 在喷杆喷雾机上加装该推拨装置可以有效减少传统标准扇形雾喷头作业时雾滴的飘移; 而该装置对防飘喷头的减飘效果有所下降, 但该装置在一定程度上能够进一步降低防飘喷头的雾滴飘移。

表 1 雾滴飘移潜力与减飘率

Table 1 Potential drift and drift reduction of droplets

| 喷雾方式 Spraying method | ST110-02 喷头 ST110-02 nozzle | | IDK120-02 喷头 IDK120-02 nozzle | |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| | 飘移潜 力/% | 减飘 率/% | 飘移潜 力/% | 减飘 率/% |
| | Potential drift | Drift reduction | Potential drift | Drift reduction |
| 常规喷杆喷雾机 Conventional boom sprayer | 39.7 | — | 14.3 | — |
| 推拨喷杆喷雾机 Pushing plate boom sprayer | 16.3 | 59.0 | 12.9 | 9.5 |

2.2 雾滴田间沉积结果

图 7 为使用标准扇形喷头 ST110-02 时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机施药在小麦上的沉积结果。常规喷杆喷雾机在小麦植株上、中、下层的沉积量分别为 7.94、2.93 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 和 3.44 $\mu\text{L}/\text{cm}$ ；而增加推拨装置的喷杆喷雾机在小麦植株上、中、下层的沉积量分别为 9.03、3.53 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 和 4.33 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 。与常规喷杆喷雾机相比，加装推拨装置后雾滴在小麦植株上、中、下三层的沉积量分别增加了 13.7%、20.5%和 25.8%，药液在小麦植株上的总沉积量增加了 18.0%。这一结果表明该推拨装置可以有效提高农药雾滴的有效利用率，而增加的这部分雾滴的有效利用率主要来源于推拨装置的防飘作用。

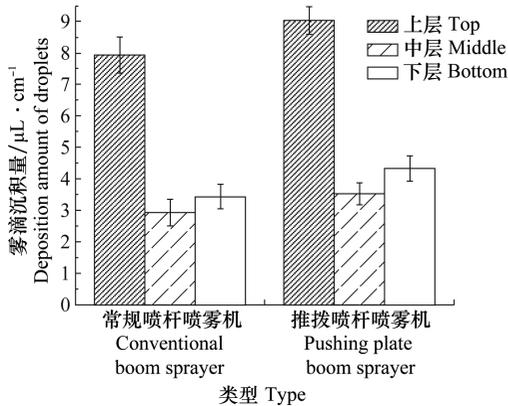


图 7 使用 ST110-02 喷头时雾滴的沉积结果

Fig. 7 Droplet deposition results of ST110-02 nozzle

图 8 为使用射流喷头 IDK120-02 时常规喷杆喷雾机与推拨喷杆喷雾机施药在小麦上的沉积结果。常规喷杆喷雾机在小麦植株上、中、下层的沉积量分别为 7.14、4.33 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 和 3.08 $\mu\text{L}/\text{cm}$ ；而增加推拨装置的喷杆喷雾机在小麦植株上、中、下层的沉积量分别为 7.39、4.99 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 和 3.42 $\mu\text{L}/\text{cm}$ 。与常规喷杆喷雾机相比，加装推拨装置后雾滴在小麦植株上、中、下三层的沉积量分别增加了 3.5%、15.2%和

11.0%，药液在小麦植株上的总沉积量增加了 8.6%。与使用标准扇形喷头 ST110-02 的沉积结果相对比发现，射流喷头 IDK120-02 对提高农药雾滴有效利用率的作用效果有所下降，这是由于 IDK120-02 喷头具备防飘作用弱化了该推拨装置的作用效果，这一结果与雾滴的飘移测试结果相一致，这也进一步说明了该推拨装置可以改变喷头周围的气流运动而起到减飘的作用。

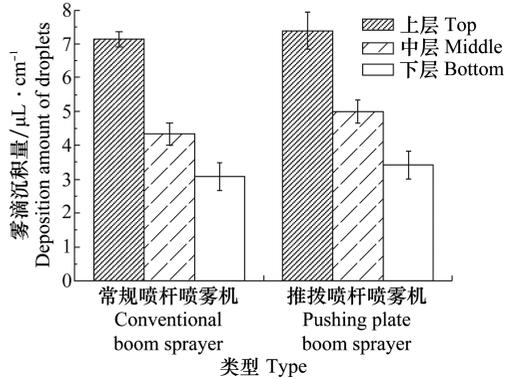


图 8 使用 IDK120-02 喷头时雾滴的沉积结果

Fig. 8 Droplet deposition results of IDK120-02 nozzle

农药雾滴的有效沉积率是病虫害有效防治的前提，而防治效果的好坏与药液在植株上的沉积分布均匀效果有直接的关系。为验证该推拨装置对雾滴在小麦植株冠层中下部位的沉积效果，引入变异系数作为雾滴在植株冠层各层沉积分布均匀性的评价指标，变异系数越小说明雾滴在各层的沉积均匀性越好。表 2 为使用两种喷头时常规喷杆喷雾机和推拨喷杆喷雾机在小麦植株冠层上沉积量的变异系数结果，结果显示加装推拨装置可使标准扇形喷头 ST110-02 沉积量的变异系数由 57.8%降低到 52.4%，IDK120-02 沉积量的变异系数由 43.8%降低到 38.7%，由此可知推拨装置促进了雾滴向小麦植株中下层部分的沉积，提高了雾滴在植株上、中、下层沉积分布的均匀性，更有利于植株中下部位病虫害的防治效果。

表 2 雾滴在小麦植株上的沉积量的变异系数

Table 2 Variation coefficients of droplet deposition on wheat plants

| 喷雾方式 Spraying method | 变异系数/% Variation coefficient | |
|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | ST110-02 喷头 ST110-02 nozzle | IDK120-02 喷头 IDK120-02 nozzle |
| 常规喷杆喷雾机 Conventional boom sprayer | 57.8 | 43.8 |
| 推拨喷杆喷雾机 Pushing plate boom sprayer | 52.4 | 38.7 |

3 结论与讨论

喷杆喷雾机是目前我国大田粮食作物病虫害防治最为有效的施药机具,但其喷雾雾滴的飘移和在作物冠层中下部穿透效果在一定程度上降低了农药的有效利用率和沉积分布效果。为改善喷杆喷雾机喷雾雾滴在作物冠层的穿透性并降低农药的飘移量,优化设计了该喷杆喷雾机冠层推拨装置。

分别使用两种喷头(标准扇形雾喷头 ST110-02、射流喷头 IDK120-02)对该冠层推拨装置的减飘性和在小麦上的沉积特性进行了对比试验。试验结果表明该冠层推拨装置可降低喷杆喷雾机施药作业时农药雾滴的飘移量,且该冠层推拨装置对标准扇形雾喷头 ST110-02 的减飘效果强于具有防飘效果的射流喷头 IDK120-02,其减飘效果分别为 59.0% 和 9.5%;同时该冠层推拨装置还可以提高农药雾滴的有效沉积率和雾滴在小麦植株上沉积的均匀性,当喷杆喷雾机使用标准扇形雾喷头 ST110-02 时可提高 18.0% 的药液沉积率,使用射流喷头 IDK120-02 时可增加 8.6% 的药液利用率。

农药利用率是衡量施药水平的重要指标,也是评价农药减量增效的重要指标。施药器械是影响农药综合利用率的主要影响因素,为提高农药的有效利用率国内外先后研发了多种先进的施药机具,如对靶喷雾机、仿形喷雾机、变量喷雾机和静电喷雾机等,但这些新型的施药机具往往成本较高,极大地限制了其应用推广。本文中所优化设计的冠层推拨装置成本较低,易于在目前广泛使用的喷杆喷雾机上进行改装,同时具有减少飘失、提高农药利用率和雾滴穿透性等多重效果,为促进我国农药使用零增长具有较好的推广价值。

参考文献

[1] 乔白羽,丁素明,薛新宇,等. 喷雾机喷杆结构的研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 246-250.

[2] 贾卫东,张磊江,燕明德,等. 喷杆喷雾机研究现状及发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(4): 19-22.

[3] 常志强. 安徽机械化植保现状与对策[J]. 农机科技推广, 2018(4): 9-11.

[4] 冯耀宁,裴亮,李晔,等. 自走式喷杆喷雾机行业现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 56-59.

[5] 袁会珠,杨代斌,闫晓静,等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.

[6] 王潇楠,何雄奎,HERBST A,等. 喷杆式喷雾机雾滴飘移测试系统研制及性能试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 55-62.

[7] ZHAO Huiyu, XIE Chen, LIU Fengmao, et al. Effects of sprayers and nozzles on spray drift and terminal residues of imidacloprid on wheat [J]. Crop Protection, 2014, 60: 78-82.

[8] 顾扬. 小麦冠层推拨防飘喷雾装置设计优化及试验[D]. 南京: 南京林业大学, 2019.

[9] 庄腾飞,杨学军,董祥,等. 大型自走式喷雾机喷杆研究现状及发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 189-198.

[10] 薛涛. 大型高地隙喷雾机喷杆悬架设计与控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.

[11] HERBST A, OSTEROTH H J, STENDEL H. A novel method for testing automatic systems for controlling the spray boom height [J]. Biosystems Engineering, 2018, 174: 115-125.

[12] 何雄奎,曾爱军,刘亚佳,等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 76-79.

[13] 刘丰乐,张晓辉,马伟伟,等. 国外大型植保机械及施药技术发展现状[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 246-248.

[14] HISLOP E C, WESTERN N M, COOKE B K, et al. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions [J]. Crop Protection, 1993, 12(3): 193-200.

[15] FURNESS G O. A comparison of a simple bluff plate and axial fans for air-assisted, high-speed, low-volume spray application to wheat and sunflower plants [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 48: 57-75.

[16] 雷晓晖,吕晓兰,李雪,等. 喷杆喷雾机拨禾板固定支架优化设计[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 243-247.

[17] 张京,何雄奎,宋坚利,等. 挡板导流式罩盖喷雾机结构优化与性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 101-104.

[18] Crop protection equipment-drift classification of spraying equipment-part 3: Potential spray drift measurement for field crop sprayers by the use of a test bench [S]. ISO22369-3-2010.

[19] Crop protection equipment-spray deposition tests of field crop sprayers-part1: Field deposit measurement [S]. ISO24253-1: 2015.

[20] WANG Shuangshuang, DORR G J, KHASHEHCHI M, et al. Performance of selected agricultural spray nozzles using particle image velocimetry [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(3): 601-613.

[21] 王双双. 雾化过程与棉花冠层结构对雾滴沉积的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.