

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.012

# 风幕式喷杆喷雾机玉米田间施药试验\*

王 俊<sup>1</sup> 董 祥<sup>1</sup> 严荷荣<sup>1</sup> 王锦江<sup>1</sup> 张 铁<sup>2</sup> 曾亚辉<sup>2</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对常规喷雾方式农药利用率低、流失严重的问题, 开展风幕式气流辅助喷雾技术研究。通过 3WQ-3000 型牵引式风幕喷杆喷雾机在玉米小喇叭口期进行的田间试验, 确定施药作业中常用的 4 种型号(ST110-02、ST110-04、ST110-05、ST110-06) 扇形雾喷头在 0.4 MPa 喷雾压力下, 进行风幕对农药利用率、雾滴覆盖率和流失率的影响试验。试验结果表明, 雾滴在玉米冠层上部的沉积量较大、下部较小; 风幕能够增强雾滴的穿透性, 增加喷雾药液的沉积量, 使雾滴在植株各冠层的沉积分布更加均匀; 风幕辅助气流对体积小径小雾滴影响明显, ST110-02 喷头在使用风幕时比没有使用风幕农药利用率提高了 83%; ST110-06 号喷头在有风幕时农药利用率为 41.93%, 为各试验工况最高; 使用风幕时农药在地面流失率比无风幕有所增加, ST110-02 号喷头在未使用风幕时药液在地面的流失率为 13.05%, 是各试验工况最小值; 与三轮车载式喷杆喷雾机相比, 风幕式喷雾机施药雾滴覆盖率和穿透性明显升高, 农药利用率平均提高了 144.17%, 雾滴在地面的流失率平均降低了 14.46%。

**关键词:** 喷杆喷雾机 风幕 农药利用率 玉米 田间试验

**中图分类号:** S49 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0079-06

## Experiment on Spraying Performance of Air-assisted Boom Sprayer in Corn Field

Wang Jun<sup>1</sup> Dong Xiang<sup>1</sup> Yan Herong<sup>1</sup> Wang Jinjiang<sup>1</sup> Zhang Tie<sup>2</sup> Zeng Yahui<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** Air-assisted spraying technique research was carried out to increase pesticide efficiency and decrease pesticide loss. The spraying performance was experimentally studied on model 3WQ-3000 trailed air-assisted boom sprayer in small bell stage of corn fields. The effects of four sizes of flat fan nozzles(ST110-02, ST110-04, ST110-05, ST110-06) with air curtain on pesticide efficacy, coverage rate and loss rate were carried out. The experiment results showed that the deposition amount was large at upper part of corn canopy and small at lower part. Air curtain enhanced penetrability, deposited property of droplets and improved the uniformity of distribution at corn canopies. Air-assisted sprayer had significant influence on small size droplets VMD that the pesticide efficacy of ST110-02 flat fan nozzle with air curtain was 83% more than that without air curtain. The optimum pesticide efficacy of ST110-06 flat fan nozzle with air curtain was 41.93%. Air curtain could increase pesticide loss rate on the ground. The best loss rate of ST110-02 flat fan nozzle without air curtain was 13.05%. Compared with the conventional sprayer, the new air-assisted sprayer had better droplet coverage rate and higher penetrability, the average pesticide efficacy was improved by 144.17%, and pesticide loss rate on the ground was reduced by 14.46%.

**Key words:** Boom sprayer Air curtain Pesticide efficacy Corn Field test

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2014-12-02

\* 国家自然科学基金资助项目(51405496)、公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203025)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B04)、土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室开放课题资助项目(2014-SKL-04)、江苏省高校自然科学研究重大资助项目(13KJA210001)和镇江市科技计划资助项目(NY2012030)

作者简介: 王俊, 高级工程师, 主要从事施药技术及施药设备研究, E-mail: wangjuncau\_678@163.com

## 引言

我国是世界上农药生产量和使用量最大的国家之一,2011年全国农药使用量达到178.7万t<sup>[1]</sup>。但是我国农药有效利用率低,在大田作物上只有30%左右,远低于发达国家50%的平均水平<sup>[2]</sup>。常规喷雾方式,喷洒的农药主要沉积在冠层上部,很难向下穿透,冠层中下部病虫害防治效果较差。大部分农药流失到空气、土壤、水系等周围环境中,造成生态环境恶化,农产品品质下降,浪费了宝贵的农药资源。减少农药用量,提高农药利用率,确保农产品质量安全,是施药技术和装备研究发展的根本目标<sup>[3-7]</sup>。

施药作业的农药利用率受到气象因素(风力、气温、湿度)、作物因素(作物品种、表面特性、生长期、叶面积指数)和喷雾作业参数(喷雾量、雾滴直径、作业速度)等很多因素的影响<sup>[8-13]</sup>。增强雾流穿透能力,提高雾滴在作物上的沉积率,减少雾滴飘移,是提高农药利用率的关键。风幕式气流辅助喷雾技术,是实现上述目标的有效方法<sup>[14-16]</sup>。其相关技术理论,需要田间试验加以验证。

为优化植保机械设计,对风幕式气流辅助喷雾田间作业参数对施药效果的影响进行试验研究。本文以中国农业机械化科学研究院研制的装备了风幕式气流辅助系统及变量喷雾控制系统的3WQ-3000型牵引式风幕喷杆喷雾机作为研究对象,通过对我国种植面积最大的粮食作物——玉米进行田间喷雾试验,研究风幕式气流辅助喷雾系统对雾滴沉积、覆盖规律和流失率的影响,为提高农药使用效率、发展精少量施药技术和装备、减少农业污染提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验样机

3WQ-3000型牵引式风幕喷杆喷雾机,主要由隔膜泵、药液箱、机架、喷杆、喷头、风机及风幕系统、喷雾控制系统等部件组成。喷雾机的结构示意图见图1,由拖拉机通过传动轴驱动隔膜泵,抽取药液箱中农药通过喷头进行喷雾作业,施药量由变量喷雾控制系统控制,辅助气流由风机及风幕系统提供。药液箱容积3000L,喷幅25m,安装51个喷头,常用喷雾压力0.3~0.5MPa,采用东方红904型拖拉机牵引作业(图2),作业地隙为0.5m;为与现有施药方式作业效率比较,使用陕西省常用的三轮车载式喷杆喷雾机进行喷药性能对照试验,该喷药机喷药液泵为苏州农业药械有限公司生产的B-36D型

三缸活塞泵,喷幅5.5m,安装空心圆锥喷头13个,常用喷雾压力2.0MPa(图3)。

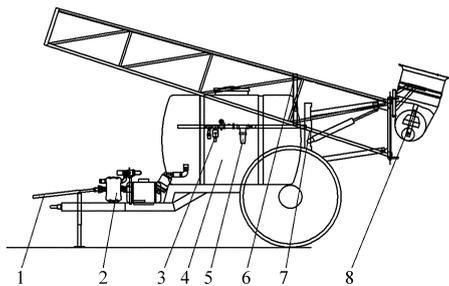


图1 3WQ-3000型牵引式喷杆喷雾机结构示意图

Fig.1 Structure schematic of model 3WQ-3000 trailed air-assisted boom sprayer

1. 传动轴 2. 隔膜泵 3. 变量喷雾控制系统 4. 药液箱 5. 过滤器 6. 喷杆 7. 喷头 8. 风机及风幕系统



图2 3WQ-3000型牵引式风幕喷杆喷雾机

Fig.2 Model 3WQ-3000 trailed air-assisted boom sprayer



图3 三轮车载式喷杆喷雾机

Fig.3 Tricycle sprayer

### 1.2 主要材料与仪器

使用荧光检测计(美国 Turner Biosystems 公司, 型号 Modulus<sup>TM</sup>)测量荧光剂在喷雾靶标上的沉积量;喷雾靶标(尼龙网,50 mm×50 mm);水敏纸(Syngenta,76 mm×26 mm);雾滴覆盖率分析软件(Depositscan)<sup>[3]</sup>;激光叶面积仪(美国 CID 公司,型号 CI-202);植物冠层图像分析仪(美国 CID 公司,型号 CI-110);雾滴粒径分析仪(英国马尔文公司,型号 Spraytec);喷雾药液为0.1%罗丹明 B(Alfa Aesar)荧光剂水溶液。

### 1.3 试验设计

试验时间为2014年7月,试验田位于陕西省扶风县的陕西省农牧良种场,玉米品种为陕单609,平均行距70cm,株距20cm,生长期为小喇叭口期,测定玉米冠层叶面积指数(Leaf area index, LAI)为

1.78, 喷雾时天气晴朗, 风速 2~2.5 m/s, 温度 30~35℃。

试验喷雾机风幕系统风机转速为 3 000 r/min, 风幕出口平均风速 13.5 m/s, 出风量 18 750 m<sup>3</sup>/h。选用德国 LECHLER 公司的 ST110-02、ST110-04、ST110-05、ST110-06 型标准扇形雾喷头, 喷雾压力为 0.4 MPa, 喷头距作物顶部高度为 0.5 m, 机具作业速度为 6.7 km/h。对照试验喷雾机喷雾压力

2.0 MPa(此为当地用户习惯使用压力值), 作业速度约 2.0 km/h。喷雾管路有沿程压力损失, 施药作业中表压与实际喷头喷雾压力有偏差<sup>[7]</sup>。试验前对 4 种喷头及对照喷雾机的喷雾量进行测定, 并测定在相同喷雾流量下各喷头的体积中径, 结果见表 1。试验使用 4 种喷头分别在有风幕和无风幕条件下进行喷雾作业测试, 每组喷头进行 3 次重复试验。

表 1 施药量测定结果

Tab. 1 Results of pesticide application rates

参数	ST110-02	ST110-04	ST110-05	ST110-06	对照喷雾机
单喷头施药量/(L·min <sup>-1</sup> )	0.91	1.53	1.98	2.07	3.75
单位面积施药量/(L·hm <sup>-2</sup> )	163	274	355	372	886
雾滴体积中径 $D_{v50}$ /μm	234.2	289.6	337.7	369.8	122.5

喷雾区域为 7 500 m<sup>2</sup> (300 m × 25 m), 在区域中部选取 4 个测试点, 每个测试点选取 3 株玉米, 喷雾前在每株玉米的上、中、下部叶面及附近地面分别布置水敏纸和尼龙网, 喷雾后用自封袋迅速收集并避光保存(图 4)。



图 4 玉米冠层水敏试纸布置

Fig. 4 Water sensitive paper located in corn canopy

采集到的靶标尼龙网在中国农业机械化科学研究院土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室进行分析处理, 使用 200 mL 去离子水清洗尼龙网靶标 10 min, 将靶标上的罗丹明 B 洗脱, 使用荧光分析仪测量浓度并记录, 然后计算出冠层上、中、下部单位面积靶标上的喷雾药液的沉积量及地面药液的流失量(计算方法与文献[16]相同)。使用 Depositscan 软件对采集到的水敏纸分析, 得到施药雾滴在植株冠层上的覆盖率(图 5)。

DV 1 (μm)	DV 5 (μm)	DV 9 (μm)	% Coverage	Image Area...
1642.97	1642.97	1642.97	59.12	3.21
Object	Image Spot Area (μm <sup>2</sup> )	Actual Diameter (μm)		
1	1792.11	32.04		
2	1792.11	32.04		
3	1792.11	32.04		
4	1792.11	32.04		
5	1792.11	32.04		
6	1792.11	32.04		
7	1792.11	32.04		
8	1792.11	32.04		
9	1792.11	32.04		

465 Total Drops Counted

图 5 Depositscan 软件分析雾滴覆盖率结果

Fig. 5 Droplet coverage rate analyzed by Depositscan software

## 2 结果与分析

### 2.1 雾滴沉积量

表 2 为喷雾药液在玉米冠层上、中、下 3 部分沉积量试验结果, 通过对试验中 4 种喷头及对照喷雾机喷药沉积量数据对比可见, 药液沉积量在冠层的上部较大, 下部较小。通过与表 1 施药量数据对比发现, 单位面积施药量大的喷药工况, 其沉积量也相应较大。分析各喷头喷药量沉积分布的变异系数, 对照喷雾机喷药变异系数最大为 0.85, 雾滴的穿透性和分布沉积均匀性很差。试验喷雾机在有风幕情况下的变异系数小于无风幕的情况, 使用 ST110-05 喷头在有风幕的情况下, 上中下各层沉积量的变异系数最小(0.28)。表明风幕辅助气流能够有效

表 2 雾滴在玉米植株冠层沉积量

Tab. 2 Droplet deposited property on corn canopy

参数	ST110-02		ST110-04		ST110-05		ST110-06		对照喷雾机
	有风幕	无风幕	有风幕	无风幕	有风幕	无风幕	有风幕	无风幕	
上部沉积量/(μL·cm <sup>-2</sup> )	0.52	0.36	0.73	0.66	0.99	0.98	1.34	1.46	1.67
中部沉积量/(μL·cm <sup>-2</sup> )	0.31	0.16	0.62	0.40	0.81	0.60	0.83	0.46	0.54
下部沉积量/(μL·cm <sup>-2</sup> )	0.15	0.02	0.33	0.15	0.48	0.13	0.46	0.15	0.11
变异系数	0.47	0.79	0.30	0.52	0.28	0.61	0.41	0.81	0.85

增强喷雾的穿透性,使雾滴在植株各冠层中的分布更加均匀。

4种喷头在有风幕时及对照喷雾机在单位面积植株上药液平均沉积量如图6所示。在相同喷雾压力下,单位面积植株上,ST110-06喷头沉积量最大,在有风幕时为155.89 L/hm<sup>2</sup>。对照喷雾机在植株冠层的沉积量为137.81 L/hm<sup>2</sup>。ST110-02喷头无风幕时沉积量最小,为31.80 L/hm<sup>2</sup>。由表1数据可知,对照喷雾机的单位面积施药量远大于试验喷雾机,所以试验喷雾机无风幕施药作业4种喷头的药液沉积量均小于对照喷雾机,增加施药量可以提高沉积量。试验喷雾机有风幕施药作业的药液沉积量大于无风幕时情况,表明风幕辅助气流能够有效减少雾滴的飘移。对比表1雾滴体积中径值,施药时雾滴体积中径越小,辅助气流对雾滴沉积量提高的效果越好。其中ST110-02喷头在有风幕时沉积量为58.03 L/hm<sup>2</sup>,相比没有风幕的情况沉积量提高了83%,风幕辅助气流起到了显著的作用。

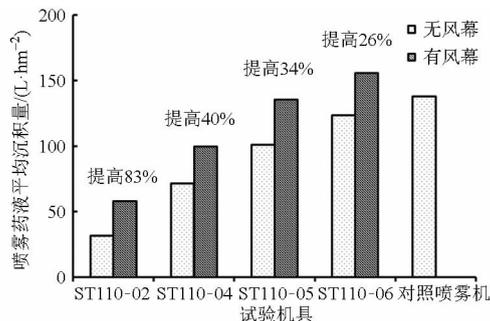


图6 喷雾药液在单位面积玉米植株冠层的沉积量试验结果

Fig.6 Unit area pesticides deposited property results on unit area corn canopy

## 2.2 农药利用率

试验中,将沉积在植物冠层上的药液视为有效利用的农药。在单位面积农田中,喷洒后沉积在作物上的农药量相对于施药总量的比值作为农药利用率<sup>[2]</sup>。根据各喷头试验时单位时间的喷雾量,结合冠层药液沉积量,获得了喷雾药液在玉米植株冠层上农药利用率对比(图7)。可以看到,对照喷雾机农药利用率为15.56%,为各测试工况最低。在相同的自然风速下,雾滴体积中径较大的喷头作业后的农药利用率较高。同样,在有风幕的情况下,由于辅助气流的作用,农药利用率大于无风幕的情况。其中使用ST110-02号喷头雾滴较小,在有风幕的情况下农药利用率为35.51%,比没有使用风幕有较大提高。ST110-06号喷头在有风幕的情况下农药利用率为41.93%,为试验各工况最高。使用风幕时各试验工况平均农药利用率37.98%,较未使

用风幕平均值26.76%提高了41.93%,相比对照用三轮车载喷雾机提高了144.17%。

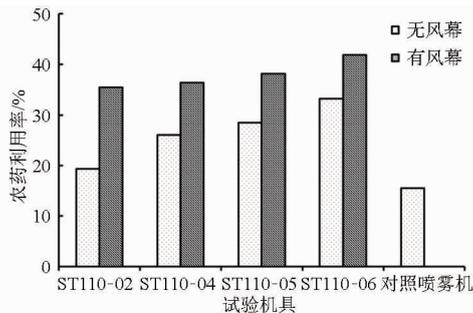


图7 喷雾药液在玉米植株冠层的利用率试验结果

Fig.7 Pesticide efficacy results on corn canopy

## 2.3 雾滴覆盖率

使用水敏试纸采集的玉米植株叶面上喷雾雾滴覆盖率如图8、9所示,将叶面向上且雾滴较易沉积的一面作为叶子正面,另一面作为叶子背面。图中显示雾滴在玉米冠层的上层覆盖率较大,下层较小。4种试验喷头相比较,ST110-06号喷头的覆盖率最好,ST110-02号喷头较差,主要原因是ST110-06号喷头的喷量较大。对照喷雾机因为施药量大,其在叶子正面覆盖率比较高。玉米植株叶面正面雾滴覆盖率结果显示(图7),风幕辅助气流能够有效提高雾滴的覆盖率,其中ST110-06号喷头的覆盖率在冠层中平均提高了32%。从图9玉米植株叶面背面雾滴覆盖率结果可以明显看出,无风幕时叶子背面基本没有雾滴覆盖。在喷雾过程中,由于辅助气流的吹送,玉米植株各冠层叶面产生翻动,使雾滴沉积在叶子背面的几率有较大提高。在各种喷头中,风幕辅助气流对ST110-06号喷头在冠层叶子背面的覆盖率提高效果最为明显。

## 2.4 地面流失量

4种喷头及对照喷雾机施药后药液在玉米植株冠层地面流失量的对比如图10所示,可以看到对照喷雾机的单位面积施药量过大,使大量的药液流失到地面,对土壤环境及地下水造成极大的污染。风幕式喷杆喷雾机施药后地面流失量小于对照喷雾机,减少了农药对环境的污染。比较各喷头的施药量,获得喷雾药液在玉米植株冠层地面流失率对比(图11)。有风幕时地面流失率比无风幕时有所增加,这是风幕辅助气流胁迫更多的液滴向地面运动的结果。其中喷雾量较小的ST110-02号喷头,在无风幕时药液在地面的流失率为13.05%,有风幕时的流失率为15.98%,增加量相对较小;ST110-06号喷头雾量较大,在无风幕时药液在地面的流失率为24.85%,有风幕时流失率为28.28%,在4种喷头中流失率最大。ST110-05号喷头有风幕比无

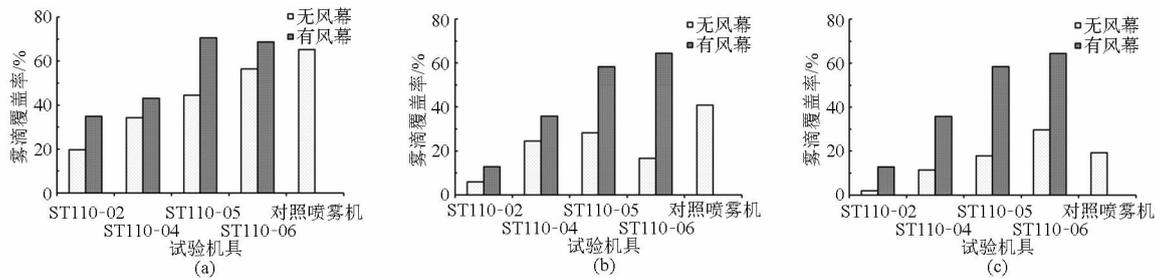


图 8 玉米植株叶面正面雾滴覆盖率试验结果

Fig. 8 Droplet coverage rate results on the front of corn leaf

(a) 冠层上部 (b) 冠层中部 (c) 冠层下部

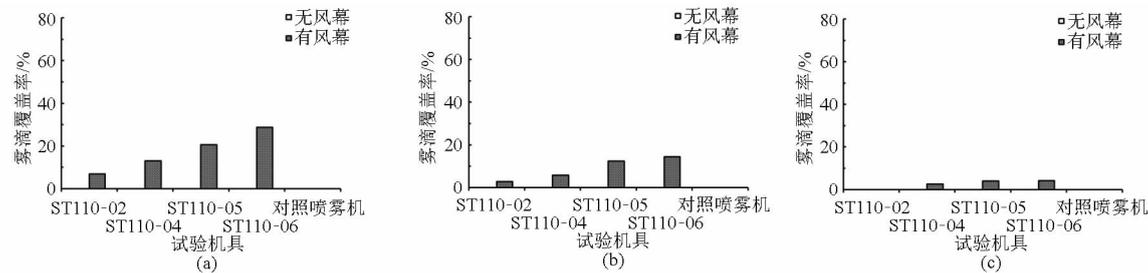


图 9 玉米植株叶面背面雾滴覆盖率试验结果

Fig. 9 Droplet coverage rate results on the back of corn leaf

(a) 冠层上部 (b) 冠层中部 (c) 冠层下部

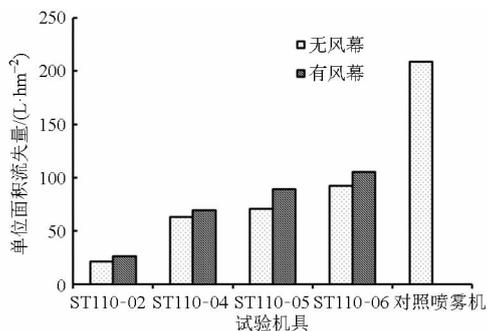


图 10 喷雾药液在玉米植株冠层地面流失量试验结果

Fig. 10 Pesticides loss results on the ground of corn canopy

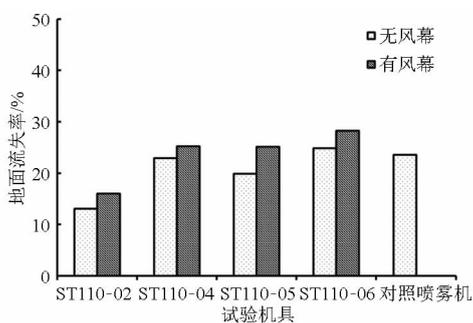


图 11 喷雾药液在玉米植株冠层地面流失率试验结果

Fig. 11 Pesticides loss rate results on the ground of corn canopy

风幕的地面流失率升高了 5%，升高量最大。对照喷雾机使用空心圆锥雾喷头，喷雾压力过高，雾滴细小，喷施的药液雾滴很大部分产生空中飘移，地面流失量所占比重不大，地面流失率为 23.58%，这一点可以从图 3 中对照喷雾机施药作业的情景得到证实。对比其在玉米植株冠层的沉积率，可以认为对照喷雾机没有能够进行有效施药，并造成了环境污染。

### 3 结论

(1) 药液在冠层上部的沉积量最大，在下部最小。风幕辅助气流增强了喷雾药液的穿透性，使雾滴在植株各冠层的分布更加均匀，ST110-05 喷头在有风幕时的变异系数为 0.34，优于其他工况。

(2) 风幕辅助气流能够有效减少雾滴的飘移，有风幕时的药液沉积量大于无风幕时的情况，且雾

滴体积中径越小，沉积量提高的效果越好。其中在使用 ST110-02 喷头时，相比没有风幕的情况，沉积量提高了 83%。

(3) 较大的雾滴可以获得较高的农药利用率；在风幕作用下，农药利用率大于无风幕的情况。使用风幕时各试验工况平均农药利用率 37.98%，比未使用风幕提高了 41.93%；ST110-06 号喷头在有风幕时利用率为 41.93%，在各工况中最高。

(4) 有风幕时地面流失率比无风幕时有所增加，ST110-02 号喷头在未使用风幕时药液在地面的流失率较小，ST110-06 号在使用风幕时药液在地面的流失率最大，ST110-05 号喷头使用风幕比未使用风幕的地面流失率增加了 5%。

(5) 对照喷雾机喷雾压力过高，体积中径过小，是造成雾滴飘移现象严重、农药利用率过低的主要

原因。与对照喷雾机具相比,3WQ-3000型牵引式提升,喷雾药液在地面的流失率降低,有效地提高了风幕喷杆喷雾机在农药沉积率、覆盖率方面有很大农药利用率,并减少了环境的污染。

### 参 考 文 献

- 1 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2012[M]. 北京:中国农业出版社,2013.
- 2 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.  
Yuan Huizhu, Yang Daibin, Yan Xiaojing, et al. Pesticide efficiency and the way to optimize the spray application[J]. Plant Protection, 2011, 37(5): 14-20. (in Chinese)
- 3 Zhu H, Derksen R C, Ozkan H E, et al. Development of a canopy opener to improve spray deposition and coverage inside soybean canopies: Part 2. Opener design with field experiments [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(6):1913-1921.
- 4 Nuyttens D, Baetens K, de Schampheleirec M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 333-345.
- 5 de Schampheleire M, Nuyttens D, Dekeyser D, et al. Deposition of spray drift behind border structures [J]. Crop Protection, 2009, 28(12): 1061-1075.
- 6 Geng Baia, Kazuhiro Nakanoa, Tomomichi Mizukamib, et al. Characteristics and classification of Japanese nozzles based on relative spray drift potential[J]. Crop Protection, 2013, 46: 88-93.
- 7 王俊,祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 42-45.  
Wang Jun, Qi Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 42-45. (in Chinese)
- 8 王潇楠,何雄奎,Andreas Herbst,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.  
Wang Xiaonan, He Xiongkui, Andreas Herbst, et al. Development and performance test of spray drift test system for sprayer with bar [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(18): 55-62. (in Chinese)
- 9 Emilio Gil, Paolo Balsari, Montserrat Gallart, et al. Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench [J]. Crop Protection, 2014, 56: 58-68.
- 10 祁力钧,胡锦涛,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.  
Qin 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)
- 11 Andrade R, Skurtys O, Osorio F. Drop impact behavior on food using spray coating: fundamentals and applications [J]. Food Research International, 2013, 54(1):397-405.
- 12 Nuyttens D, Baetens K, de Schampheleire M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 333-345.
- 13 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.
- 14 张铁,杨学军,董祥,等. 超高地隙风幕式喷杆喷雾机施药性能试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 66-71.  
Zhang Tie, Yang Xuejun, Dong Xiang, et al. Experiment on spraying performance of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 66-71. (in Chinese)
- 15 燕明德,毛罕平,贾卫东,等. 风幕式喷杆喷雾气液两相流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2013,44(10): 68-74.  
Yan Mingde, Mao Hanping, Jia Weidong, et al. Numerical simulation on gas-liquid two phase flow of air assist boom spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 68-74. (in Chinese)
- 16 燕明德,毛罕平,贾卫东,等. 风幕式喷杆喷雾雾滴粒径与速度分布试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 104-109.  
Yan Mingde, Mao Hanping, Jia Weidong, et al. Experimental investigation of droplet diameter and velocity distributions in air-assist boom sprays[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 104-109. (in Chinese)