

轻便型高地隙喷杆喷雾机大豆田间施药试验

张 铁<sup>1</sup> 董 祥<sup>2</sup> 尹素珍<sup>2</sup> 杨学军<sup>2</sup> 严荷荣<sup>1</sup> 巩 琼<sup>3</sup>  
(1. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;  
3. 北京华夏山川生态环境科技有限公司, 北京 100053)

**摘要:** 针对大豆作物生长中后期施药难、施药效果差的问题,设计了一种轮距 1 600 ~ 1 750 mm 可调、地隙800 mm、轴距 2 000 mm、喷幅 8 000 mm、具有风幕辅助喷雾系统的轻便型高地隙喷杆喷雾机,并进行了田间施药试验。试验结果表明:在作业速度 4 km/h 时,通过提高喷雾压力可使大豆冠层叶片正面的雾滴覆盖率在上层提高 19.0 个百分点,中层提高 17.0 个百分点,下层增加不到 5 个百分点;叶片背面的雾滴覆盖率在上层提高 5.5 个百分点,中层提高 2.3 个百分点,下层增加不足 1.0 个百分点。通过更换喷嘴而提高雾滴的喷施量可以使大豆冠层叶片正面的雾滴覆盖率在上层提高 21.0 个百分点、中层提高 26.0 个百分点,下层提高 10.0 个百分点;叶片背面的雾滴覆盖率在上层提高 5.0 个百分点,中层提高 1.0 个百分点,下层无显著影响。当风幕出口风速为 11.5 m/s 时,风幕系统能够使大豆冠层中部叶片正面雾滴覆盖率提高 26.8 个百分点,下部提高 22.0 个百分点,对大豆冠层上部叶片背面雾滴覆盖率提高 23.1 个百分点,中部提高 18.1 个百分点,下部提高 8.4 个百分点;风幕式施药技术能够有效提高雾滴在大豆冠层中的穿透性和分布均匀性,增加雾滴在植株各冠层叶片背面的附着率,但雾滴的地面流失率相对不使用风幕有所增加。

**关键词:** 喷杆喷雾机; 高地隙; 大豆; 田间试验

**中图分类号:** S49      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0182-07

Spraying Performance of Lightweight High Clearance Boom  
Sprayer in Soybean Field

Zhang Tie<sup>1</sup> Dong Xiang<sup>2</sup> Yin Suzhen<sup>2</sup> Yang Xuejun<sup>2</sup> Yan Herong<sup>1</sup> Gong Qiong<sup>3</sup>  
(1. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China  
2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China  
3. Beijing Huaxia Shanchuan Ecological Environment Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** Lightweight high clearance boom sprayer with air-assisted system was designed to develop efficient pesticide application technologies for soybean at middle and later growing stages. The sprayer wheel tread can be adjusted from 1 600 mm to 1 750 mm, ground clearance was 800 mm, wheel base was 2 000 mm, spray span was 8 000 mm. Various soybean field experiments were conducted to measure the performance of air-assisted spraying system on lightweight high clearance boom sprayer. The experiment results showed that when the operating speed was 4 km/h, droplet coverage rate of the positive soybean leaves surface was increased by 19.0 percentage points in upper canopy and 17.0 percentage points in middle canopy, while that in lower canopy was increased by less than 5.0 percentage points through improving the spray pressure. Droplet coverage rate of back soybean leaves surface was increased by 5.5 percentage points in upper canopy and 2.3 percentage points in middle canopy, and that in lower canopy was increased by less than 1.0 percentage points. Droplet coverage rate by using ST110-05 nozzle was

收稿日期: 2016-07-20    修回日期: 2016-08-14  
**基金项目:** 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303011)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD08B00)、国家自然科学基金项目(51405496)和土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室开放课题项目(2010-SKL-04)  
**作者简介:** 张铁(1979—),男,高级工程师,主要从事植保机械与施药技术研究,E-mail: zhangtie1979@126.com

improved by 21.0 percentage points, 26.0 percentage points and 10.0 percentage points compared with that by using ST110 - 03 nozzle on the positive soybean leaves surface in upper, middle and lower canopies, respectively. Droplet coverage rate by using ST110 - 05 nozzle was increased by 5.0 percentage points and 1.0 percentage points in comparison with that by using ST110 - 03 nozzle on the back soybean leaves surface in upper and middle canopies, respectively, and no significant influence on lower canopy. When the air speed of curtain was 11.5 m/s, the air-assisted system could make the droplet coverage rate of positive soybean leaves surface increase by 26.8 percentage points and 22.0 percentage points in middle and lower canopies, respectively. The droplet coverage rate of back soybean leaves surface was increased by 23.1 percentage points, 18.1 percentage points and 8.4 percentage points in upper, middle and lower canopies, respectively. The assisted air flow had strong penetrability which was shown in the droplet coverage rate on positive and back leaves surfaces, and improved the distribution uniformity in soybean canopies. However, the droplet loss rate on the ground was increased.

**Key words:** boom sprayer; high clearance; soybean; field test

引言

大豆是我国的重要农作物,是蛋白质和食用油的主要来源。黄淮海地区是我国第二大豆主产区,种植面积占全国大豆种植面积的30%~60%。由于重迎茬比较严重,再加上夏大豆生长季节在每年的6—9月份,此时正是黄淮海区域高温多雨的季节,易发生各种病虫害,导致每年因各种病虫害造成的大豆产量损失约占总产量的7%以上,并且严重降低了其品质<sup>[1-2]</sup>。

由于黄淮海地区大豆种植面积大、区域化规模不同,加之目前适用性强的高地隙自走式喷药机具比较匮乏,目前该地区的病虫害防治工作主要以人工背负喷药机械为主,作业环境恶劣、作业效率低。而且,大豆生长中后期作物高度一般在800 mm左右,普通的拖拉机配套喷杆喷雾机由于地隙较低(400~450 mm),无法进入目标地进行施药作业,不能满足大豆中后期的病虫草害防治。此外,大豆生长到中后期的地块是一个郁闭度比较高的生态环境,上下植株冠层之间的障蔽作用很突出。由于浓密的株冠层对雾滴有“过滤”作用,采用手动喷雾器、背负式喷雾喷粉机等机具从植株上部向下喷洒,药液进入株冠时首先被上层叶片截获,雾滴主要沉积在上部叶片,而很难沉积到中下层叶片上,植株中下层的病虫害防治效果较差。大豆中后期的病虫害防治,成为影响我国大豆生产的“瓶颈”。

本文设计一种配备风幕式气流辅助施药系统的轻便型高地隙自走式大豆喷杆喷雾机。以轻便型高地隙自走式大豆喷杆喷雾机为研究对象,通过对大豆田间施药作业试验,考察喷雾压力、喷嘴型号以及风幕系统对雾滴沉积特性、穿透特性和地面流失率的影响,为提高农药使用率,减少农药污染,保证粮

食生产安全提供理论基础。

1 轻便型高地隙喷杆喷雾机结构

轻便型高地隙喷杆喷雾机总体上由轻型自走式高地隙底盘、喷雾系统和风幕系统3部分组成<sup>[3-4]</sup>,如图1所示。

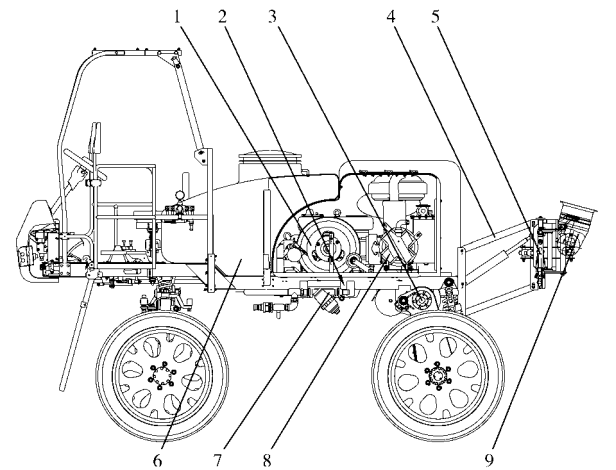


图1 轻便型高地隙喷杆喷雾机结构示意图  
Fig.1 Structure schematic of lightweight high-clearance boom sprayer  
1. 发动机 2. 机架 3. 后传动系统 4. 喷杆升降系统 5. 喷杆桁架 6. 药液箱 7. 喷药管路 8. 液泵 9. 风机及风幕系统

轻型自走式高地隙底盘是喷雾机的核心,主要由发动机、机架、传动系统、制动系统、行走转向系统、液压系统和电气系统等组成。通过对黄淮海地区大豆种植模式的调研,确定自走式底盘的轮距可调整范围为1 600~1 750 mm,通过轮距调整,可以满足黄淮海大部分地区的大豆种植行距要求,还可以兼顾玉米、棉花、小麦、蔬菜等作物。为了提高喷雾机在大豆等高秆作物生长中后期的通过性能,最终驱动部件采用链条传动,喷雾机的离地间隙达到800 mm。同时,为了保证高地隙喷雾机底盘的行驶

稳定性,通过整机部件合理化布置、重心位置分配等研究,并参考文献[5],确定机具轴距为2 000 mm。

喷雾系统主要由药液箱、液泵、喷雾装置、管路系统、喷杆展开/拆叠机构、升降机构、自动平衡机构等组成,喷杆后置,向前折叠。喷杆长度8 000 mm,喷头16个,喷杆可调节高度范围500~1 500 mm。

风幕系统主要由风机、液压泵、驱动液压马达和风幕组成。风机及风幕安装在喷杆上,风幕底部有圆形出风口,在施药作业过程中提供辅助气流,以增加雾滴穿透能力,减少雾滴飘移<sup>[6-9]</sup>。

轻便型高地隙喷杆喷雾机如图2所示。



图2 轻便型高地隙喷杆喷雾机

Fig.2 Lightweight high-clearance boom sprayer

喷雾机具体参数详见表1。

表1 喷雾机参数  
Tab.1 Parameters of sprayer

| 参数                           | 数值                |
|------------------------------|-------------------|
| 发动机功率/kW                     | 20                |
| 发动机转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 2 200             |
| 驱动方式                         | 后轮驱动/前轮转向         |
| 轮距/mm                        | 1 600~1 750       |
| 底盘间隙/mm                      | 800               |
| 轴距/mm                        | 2 000             |
| 喷杆长度/mm                      | 8 000             |
| 喷头离地间隙/mm                    | 500~1 500         |
| 药箱容积/L                       | 650               |
| 喷头个数                         | 16                |
| 喷雾压力/MPa                     | 0.3~0.5           |
| 作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )   | 3~10              |
| 外形尺寸/(mm×mm×mm)              | 3 900×2 300×2 800 |

2 喷雾机田间施药试验

2.1 试验目的

试验研究喷雾机喷嘴型号、施药压力及风幕式气流辅助系统对雾滴在大豆作物冠层中的穿透性能和沉降效果的影响<sup>[10-16]</sup>。

2.2 主要仪器与设备

水敏纸(Syngenta,76 mm×26 mm);雾滴覆盖率

分析软件(Deposit scan);CI-202型激光叶面积仪(美国CID公司);CI-110型植物冠层图像分析仪(美国CID公司)。

2.3 试验设计

试验时间为2015年9月,试验田位于山东省济宁市大张庄,大豆品种为荷豆12号,行距300 mm,株距150 mm,植株高度800 mm,如图3所示。测定大豆冠层叶面积指数(Leaf area index,LAI)为4.46,如图4所示。



图3 喷雾机大豆田间施药试验

Fig.3 Spraying experiment in soybean field



图4 叶面积指数测定

Fig.4 Determination of leaf area index

试验工况设置如表2所示,选用德国LECHLER公司的ST110-03型和ST110-05型标准扇形喷嘴,喷雾作业时喷头距离作物顶部高度为500 mm,机具作业速度4 km/h。风幕系统风机转速3 000 r/min,风幕出口平均风速11.5 m/s。

表2 喷雾机田间试验工况

Tab.2 Field test conditions of sprayer

| 喷嘴型号     | 风幕 | 喷雾压力/MPa |
|----------|----|----------|
| ST110-03 | 无  | 0.3      |
| ST110-05 | 有  | 0.4      |
|          |    | 0.5      |

选取一块尺寸(长×宽)为100 m×15 m的区域作为喷雾区域,在喷雾区域中间位置,间隔1 m选取6个测试点,每个测试点选取3株大豆,每个工况测试3次,取平均值。作业前在测试大豆植株的上、

中、下冠层和地面布置水敏试纸,其中上、中、下冠层每个测试点由背靠背放置的2片水敏试纸组成,视为大豆冠层的一片叶片,朝上的水敏试纸视为大豆冠层叶片正面、朝下的水敏试纸视为大豆冠层叶片的背面。喷雾后用自封袋将水敏试纸收集保存,如图5所示。使用Deposit scan 软件对采集到的水敏试纸分析,得到雾滴在植株冠层上的覆盖率。



图5 水敏纸布置及数据采集

Fig. 5 Layout of water sensitive paper and data collection in soybean canopy

3 结果与分析

3.1 喷雾压力对雾滴覆盖率的影响

图6和图7分别为喷雾压力对雾滴在植株冠层上、中、下部冠层叶片正面和背面覆盖率的影响。从图中可以看出:在植株叶片正面,改变喷雾压力能够提高植株上部和中部冠层的雾滴覆盖率,最多可增加19.0个百分点和17.0个百分点,而在植株冠层下部,喷雾压力的变化对叶片雾滴覆盖率影响较小,增加不超过5.0个百分点;在植株叶片背面,改变喷雾压力对雾滴在叶片上的覆盖率影响较小,在冠层上部,0.5 MPa 压力下最高仅比 0.3 MPa 增加5.5%;在冠层中部,增加2.3个百分点;在冠层下部,增加不足1.0个百分点。

3.2 喷嘴型号对雾滴覆盖率的影响

图8和图9分别为喷嘴型号对雾滴在植株冠层上、中、下部叶片正面和背面覆盖率的影响。从图中可以看出,在相同的喷雾压力下,采用ST110-05型喷嘴在植株冠层的上、中部叶片正面的雾滴覆盖率比ST110-03型喷嘴有明显提高,上部雾滴覆盖率最高增加21.0个百分点左右,中部最高增加26.0个百分点左右,下部最高增加仅10.0个百分点左

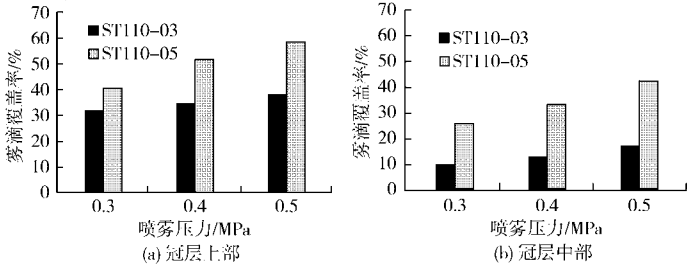
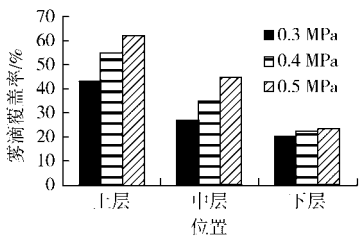
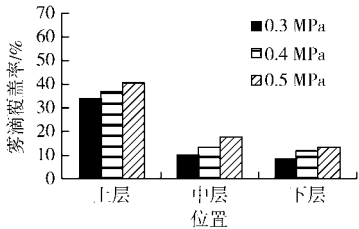


图8 喷嘴型号对植株叶片正面雾滴覆盖率的影响

Fig. 8 Effect of nozzle type on droplet coverage rate of positive soybean leaves surface



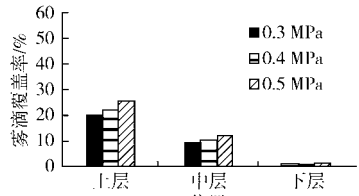
(a) ST110-05型喷嘴



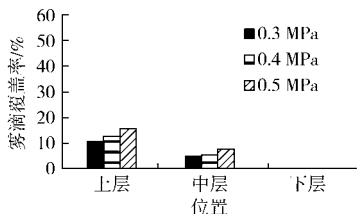
(b) ST110-03型喷嘴

图6 喷雾压力对植株叶片正面雾滴覆盖率的影响

Fig. 6 Effect of spraying pressure on droplet coverage rate of positive soybean leaves surface



(a) ST110-05型喷嘴



(b) ST110-03型喷嘴

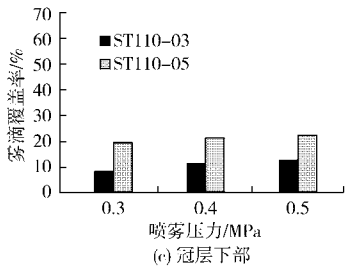
图7 喷雾压力对植株叶片背面雾滴覆盖率的影响

Fig. 7 Effect of spraying pressure on droplet coverage rate of back soybean leaves surface

右;而在叶片背面,只有在冠层上部,采用ST110-05型喷嘴比ST110-03型喷嘴雾滴覆盖率增加10.0个百分点,在冠层中部和下部,仅可增加5.0个百分点和1.0个百分点左右。

3.3 风幕系统对雾滴覆盖率的影响

图10为采用不同型号的喷嘴,风幕系统对雾滴在植株冠层上、中、下部叶片正面覆盖率的影响。从



(c) 冠层下部

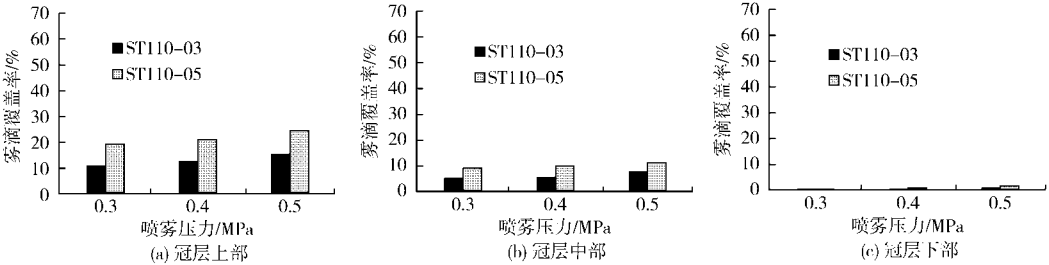


图 9 喷嘴型号对植株叶片背面雾滴覆盖率的影响

Fig. 9 Effect of nozzle type on droplet coverage rate of back soybean leaves surface

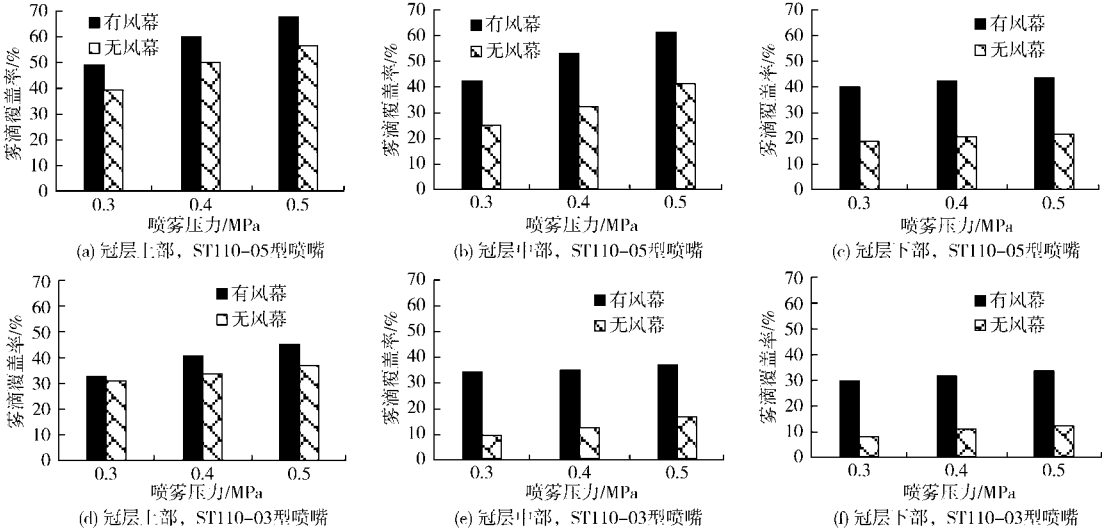


图 10 风幕系统对植株叶片正面面雾滴覆盖率的影响

Fig. 10 Effect of air-assisted system on droplet coverage rate of positive soybean leaves surface

图中可以看出,对于 ST110-05 型和 ST110-03 型喷嘴,风幕系统都能够提高雾滴在植株叶片正面的覆盖率,尤其是在植株管层中部,雾滴覆盖率最高可以增加 26.8 个百分点,在植株冠层下部,雾滴覆盖率也可以增加 22.0 个百分点左右。采用风幕系统有效地增加了雾滴的穿透性能。

图 11 为采用不同型号的喷嘴,风幕系统对雾滴在植株冠层上、中、下部叶片背面覆盖率的影响。从图中可以看出,采用风幕系统能够有效提高雾滴在

植株冠层背面的雾滴覆盖率,在冠层上、中和下部,植株叶片背面的雾滴覆盖率最高分别增加 23.1、18.1 和 8.4 个百分点。采用风幕系统,由于辅助气流的吹送,大豆植株各冠层叶面产生翻动,提高了雾滴沉积在叶片背面的附着几率。

3.4 风幕系统对雾滴分布均匀性的影响

表 3 和表 4 分别为采用 ST110-05 型和 ST110-03 型喷嘴工况下,喷雾雾滴在大豆冠层上、中、下部叶片正面的覆盖率。分析各喷雾工况,从有、无风幕

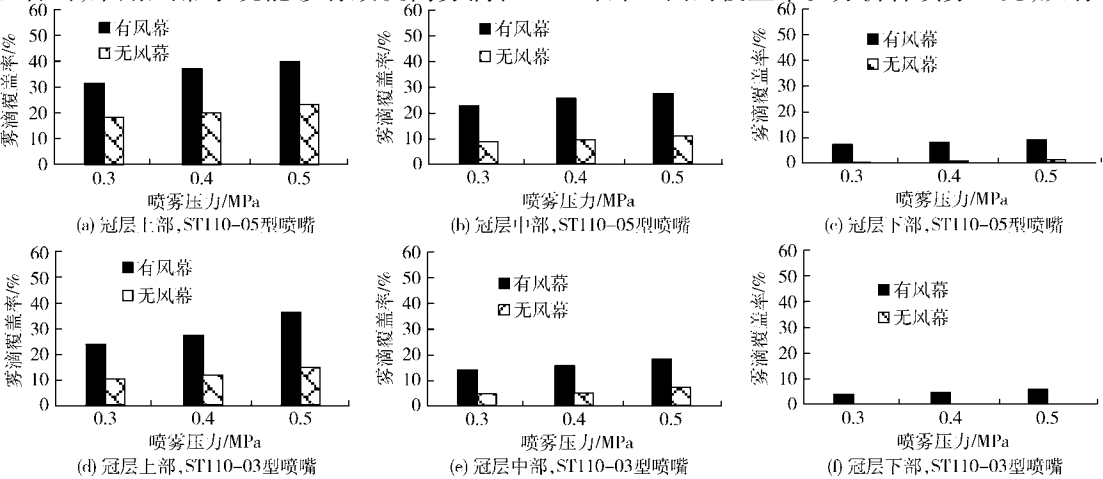


图 11 风幕系统对植株叶片背面雾滴覆盖率的影响

Fig. 11 Effect of air-assisted system on droplet coverage rate of back soybean leaves surface

情况下雾滴覆盖率变异系数的对比情况可以看出：有风幕情况下的雾滴覆盖率变异系数明显小于没有风幕的情况，表明风幕式施药技术能够有效地提高雾滴在大豆植株冠层中穿透性，使雾滴在植株各冠层中的分布更加均匀。

表 3 不同工况下大豆各冠层雾滴覆盖率  
(ST110-05 型喷嘴)

| Tab.3 Droplet coverage rate of soybean canopies under different conditions with ST110-05 nozzle % |          |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 位置                                                                                                | 喷雾压力/MPa |       |       |       |       |       |
|                                                                                                   | 0.3      |       | 0.4   |       | 0.5   |       |
|                                                                                                   | 有风幕      | 无风幕   | 有风幕   | 无风幕   | 有风幕   | 无风幕   |
| 上层                                                                                                | 53.73    | 42.89 | 65.68 | 54.64 | 73.98 | 61.92 |
| 中层                                                                                                | 45.63    | 26.87 | 57.35 | 34.68 | 66.36 | 44.43 |
| 下层                                                                                                | 43.08    | 20.12 | 45.62 | 22.05 | 46.97 | 23.16 |
| 变异系数                                                                                              | 0.12     | 0.39  | 0.18  | 0.44  | 0.22  | 0.45  |

表 4 不同工况下大豆各冠层雾滴覆盖率  
(ST110-03 型喷嘴)

| Tab.4 Droplet coverage rate of soybean canopies under different conditions with ST110-03 nozzle % |          |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 位置                                                                                                | 喷雾压力/MPa |       |       |       |       |       |
|                                                                                                   | 0.3      |       | 0.4   |       | 0.5   |       |
|                                                                                                   | 有风幕      | 无风幕   | 有风幕   | 无风幕   | 有风幕   | 无风幕   |
| 上层                                                                                                | 35.61    | 33.76 | 44.37 | 36.61 | 49.20 | 40.24 |
| 中层                                                                                                | 36.65    | 9.87  | 37.34 | 13.10 | 39.66 | 17.50 |
| 下层                                                                                                | 32.29    | 8.35  | 34.14 | 11.56 | 36.26 | 13.02 |
| 变异系数                                                                                              | 0.07     | 0.82  | 0.14  | 0.69  | 0.16  | 0.62  |

使用 ST110-03 型喷嘴在喷雾压力 0.3 MPa、有风幕的情况下，雾滴覆盖率的变异系数最小(0.07)，上、中、下各冠层雾滴分布最均匀。

3.5 风幕系统对雾滴地面流失率的影响

图 12 为风幕系统对雾滴在大豆作物地面流失率的对比。从图中可以看出，采用风幕系统，ST110-03 型喷嘴的地面流失率最多由 10.9% 升高至 15.9%，增加 5.0 个百分点；ST110-05 型喷嘴的地面流失率最多由 8.8% 升高至 15.5%，增加 6.7 个百分点。有风幕系统时地面流失率比无风幕时有所增加，这是由于风幕辅助气流胁迫更多的雾滴向地面运动的结果。

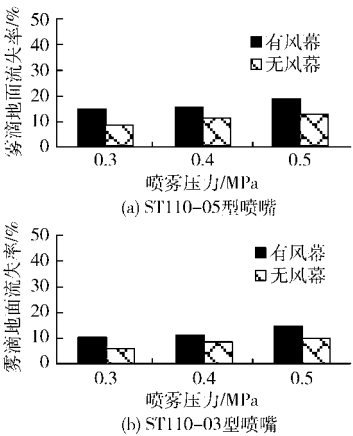


图 12 风幕系统对雾滴地面流失率的影响

Fig. 12 Effect of air-assisted system on droplet loss rate on ground

4 结论

- (1) 通过提高喷雾压力可以使大豆冠层叶片正面的雾滴覆盖率在上层提高 19.0 个百分点，中层提高 17.0 个百分点，下层增加不到 5 个百分点；叶片背面的雾滴覆盖率在上层提高 5.5 个百分点，中、下层提高不显著。
- (2) 与 ST110-03 型喷嘴相比较，采用 ST110-05 型喷嘴能够使大豆冠层叶片正面的雾滴覆盖率在上层提高 21.0 个百分点，中层提高 26.0 个百分点，下层提高 10 个百分点；叶片背面的雾滴覆盖率在上层提高 5.0 个百分点，中、下层提高不显著。
- (3) 当风幕出口风速为 11.5 m/s 时，风幕系统能够使大豆冠层中部叶片正面雾滴覆盖率提高 26.8 个百分点，下部提高 22.0 个百分点，对大豆冠层上部叶片背面雾滴覆盖率提高 23.1 个百分点，中部提高 18.1 个百分点，下部提高 8.4 个百分点。
- (4) 采用风幕系统能够有效提高雾滴在大豆冠层中的穿透性能和分布均匀性，提高雾滴在大豆各冠层叶片正面和背面的附着几率。
- (5) 采用风幕系统会增加雾滴的地面流失率，使用 ST110-05 型喷嘴最多增加了 6.7 个百分点。
- (6) 轻便型高地隙喷杆喷雾机配备风幕式施药系统，能够解决大豆生长中后期施药作业难、施药作业质量差的问题。

参 考 文 献

1 张兵,李丹,张宁. 黄淮海地区大豆主要种植模式及效益分析[J]. 大豆科学,2011,30(6):987-992.  
ZHANG Bing, LI Dan, ZHANG Ning. Soybean patterns and benefit analysis of Huang-Huai-Hai region[J]. Soybean Science, 2011,30(6):987-992. (in Chinese)

2 成雪峰,张凤云. 黄淮海夏大豆生产现状及发展对策[J]. 大豆科学,2010,29(1):157-160.  
CHENG Xuefeng, ZHANG Fengyun. Present conditions and countermeasures of soybean production in Huang-Huai-Hai regions [J]. Soybean Science, 2010,29(1):157-160. (in Chinese)

3 周海燕,刘树民,杨学军,等. 大田蔬菜高地隙自走式喷杆喷雾机的研制[J]. 农机化研究,2011(6):70-72.

- ZHOU Haiyan, LIU Shumin, YANG Xuejun, et al. Development on field vegetables high clearance self-propelled boom sprayer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(6):70-72. (in Chinese)
- 4 韩红阳,陈树人,邵景世,等. 机动式喷杆喷雾机机架的轻量化设计[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3):47-53.  
HAN Hongyang, CHEN Shuren, SHAO Jingshi, et al. Lightweight design of classis frame for motor boom sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3):47-53. (in Chinese)
- 5 GB 10395.1—2009 农林机械 安全 第1部分:总则[S]. 2009.
- 6 WASTON D G, WOLFF R L. Air carrier technique for row crop spraying application[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(5):1445-1448.
- 7 WOMAC A R, MULROONEY J E, SCOTT W P. Characteristics of air-assisted and drop-nozzle sprays in cotton[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(5):1369-1376.
- 8 HOWARD K D, MULROONEY J E. Penetration and deposition of air-assisted sprayers[C]. ASAE Paper 941024, 1994.
- 9 COOKE B K, HISLOP E C, HERRINGTON P J, et al. Air-assisted spraying of arable crops in relation to deposition, drift and pesticide performance[J]. Crop Protection, 1990, 9(4):303-311.
- 10 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.
- 11 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)
- 12 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)
- 13 贾卫东,陈龙,薛新宇,等. 风幕式喷杆喷雾雾滴特性试验[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3):91-97.  
JIA Weidong, CHEN Long, XUE Xinyu, et al. Experimental investigation of droplet characteristics of air-assist boom sprayer [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3):91-97. (in Chinese)
- 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 王俊,董祥,严荷荣,等. 风幕式喷杆喷雾机玉米田间施药试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7):79-84.  
WANG Jun, DONG Xiang, YAN Herong, et al. Experiment on spraying performance of air-assisted boom sprayer in corn field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):79-84. (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)

(上接第162页)

- 21 张德胜,施卫东,王川,等. 斜流泵叶轮和导叶叶片数对压力脉动的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2):167-170.  
ZHANG Desheng, SHI Weidong, WANG Chuan, et al. Influence of impeller and guide vane blade number on pressure fluctuation in mixed-flow pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2):167-170. (in Chinese)
- 22 黎义斌,李仁年,王秀勇,等. 低比转数混流泵压力脉动特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3):205-209.  
LI Yibin, LI Rennian, WANG Xiuyong, et al. Numerical analysis of pressure fluctuation in low specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(3):205-209. (in Chinese)
- 23 施卫东,邹萍萍,张德胜,等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4):147-152.  
SHI Weidong, ZOU Pingping, ZHANG Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high specific speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4):147-152. (in Chinese)
- 24 刘建瑞,郑俊峰,付登鹏,等. 混流泵径向间隙对内部非定常流场影响的分析[J]. 流体机械, 2014(3):19-23.  
LIU Jianrui, ZHENG Junfeng, FU Dengpeng, et al. Effect of volute tongue-impeller gaps on the unsteady flow in mixed-flow pump[J]. Fluid Machinery, 2014(3):19-23. (in Chinese)
- 25 李新华,刘川梅,吴波,等. 基于CFX单圆弧空间导叶斜流泵的数值模拟[J]. 水电能源科学, 2014(4):175-179.  
LI Xinhua, LIU Chuanmei, WU Bo, et al. Numerical simulation of oblique flow pump with single arc space vane based on CFX [J]. Water Resources and Power, 2014(4):175-179. (in Chinese)
- 26 杨从新,高强,黎义斌,等. 不同湍流模型在混流泵数值模拟中的应用与评价[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(5):51-55.  
YANG Congxin, GAO Qiang, LI Yibin, et al. Application of different turbulence models in numerical simulation of mixed-flow pump and its evaluation[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(5):51-55. (in Chinese)
- 27 王春林,郑海霞,张浩,等. 可调叶片高比转速混流泵内部流场数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2009, 27(1):30-34.  
WANG Chunlin, ZHENG Haixia, ZHANG Hao, et al. Numerical simulation for adjustable high specific speed mixed-flow pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2009, 27(1):30-34. (in Chinese)