

气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对沉积性能影响解耦研究

刘雪美^{1,2} 宋来其¹ 崔慧媛¹ 刘一冲¹ 刘兴华^{1,3} 武民庆¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 气流辅助喷雾中气流导致的冠层孔隙变化和对雾滴胁迫作用的影响是耦合的, 两者最终影响雾滴沉积性能, 明晰两者的耦合比例对沉积性能的影响, 可为风送参数优化和喷雾模式改进提供指导。本文以盛花期棉花为研究对象, 通过设计解耦试验方案, 分析气流辅助施药过程中气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对雾滴沉积行为的不同影响。首先, 借助高速相机标定棉花枝叶风载下的变形量, 得到气流速度、叶面积、变形量三者间的拟合关系, 通过仿真叶片风载变形试验得出, 仿真叶片与真实叶片的风载变形相对误差在 17% 之内, 从而确定了仿真枝叶模型应用于风送喷雾试验的可行性; 然后, 基于棉花生长发育的枝叶构型 3/8 规律, 搭建冠层孔隙可风载变形的方案 1 棉花模型, 测量方案 1 棉花冠层内气流场数据, 计算风载后枝叶变形量, 并使用物理手段固定枝叶变形量, 形成风载变形后冠层孔隙固定的方案 2 棉花模型, 将自然状态下棉花枝叶固定, 保持风载下冠层孔隙不变作为方案 3 棉花模型; 最后, 针对 3 种试验方案的棉花模型, 通过改变辅助气流风速进行了风送沉积试验。结果表明: 相较于冠层孔隙变化, 气流对雾滴的胁迫作用更有利于雾滴在冠层内的沉积行为, 两者对于雾滴沉积量的提升比例分别为 39.81% 和 10.52%; 相比于气流对雾滴的胁迫作用, 冠层孔隙增大形成的雾滴运移通道更有利于雾滴在冠层内的均匀分布, 两者对沉积均匀性的提升比例分别为 42.71% 和 1.10%。本研究可为基于不同作物冠层孔隙变化特性的新型喷雾模式设计提供参考。

关键词: 气流辅助喷雾; 气流雾滴胁迫; 冠层孔隙变化; 解耦合; 雾滴沉积

中图分类号: S499 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)08-0117-10

OSID: 

Decoupling on Influence of Air Droplets Stress and Canopy Porosity
Change on Deposition Performance in Air-assisted Spray

LIU Xuemei^{1,2} SONG Laiqi¹ CUI Huiyuan¹ LIU Yichong¹ LIU Xinghua^{1,3} WU Mingqing¹

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Agricultural Equipment Intelligent Engineering Laboratory, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: In the air-assisted spray, the change in the porosity of the canopy caused by the wind speed of the auxiliary airflow and the effect on the droplet migration were coupled, and the two ultimately affected the droplet deposition performance. Studying the effect of the coupling ratio of the two on the deposition performance can provide guidance for the optimization of air-assisted spray parameters and the improvement of spray patterns. Taking cotton in the full blooming period as the research object, and the different effects of the decoupling of the two on the droplet deposition behavior were analyzed by designing a decoupling test plan. Firstly, the deformation of cotton branches and leaves under wind load was calibrated with the help of a high-speed camera, and the fitting relationship among air velocity, leaf area and deformation was obtained. Through carrying out the wind load deformation test of the fake blade, it was verified that the wind load deformation error of the fake blade and the real blade was basically less than 17%. The plan of using the simulated cotton model to be applied to the air-assisted spray test was

收稿日期: 2020-09-24 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075308, 51475278)、山东省农业机械装备研发创新项目(2018YF002)和山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ003)

作者简介: 刘雪美(1973—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事植保机械与精准施药技术研究, E-mail: lxmywj@126.com

通信作者: 刘兴华(1988—), 男, 讲师, 主要从事植保机械与精准施药技术研究, E-mail: lxh9357@163.com

determined. Then, according to the 3/8 rule of the branch and leaf configuration of cotton growth and development, a cotton model of Scheme 1 in which the canopy porosity can be changed by wind load was built. The data of the airflow field in the cotton canopy was measured, and the deformation of branches and leaves under different wind speeds was calculated. Physical means were used to fix the deformation of branches and leaves, and a Scheme 2 cotton model was formed with fixed canopy porosity after wind load deformation. The cotton branches and leaves was fixed in the natural state and the canopy porosity was kept unchanged under wind load as the cotton model of Scheme 3. Finally, for the cotton models of the three test schemes, the auxiliary air flow velocity was changed to carry out air-assisted droplet deposition experiments. The test results showed that the migration effect of airflow on droplets was more favorable to the deposition behavior of droplets in the canopy than changes in canopy porosity. The effect of air flow on the movement of droplets increased the droplet deposition rate by 39.81%, and the change in canopy porosity increased the droplet deposition rate by 10.52%. The droplet transport channel formed by the increase of canopy pores was more conducive to the uniform distribution of droplets in the canopy than the transport effect of airflow on the droplets. The increase in the porosity of the canopy increased the deposition uniformity by 42.71%, and the transport effect of the air flow on the droplets increased the deposition uniformity by 1.10%. This decoupling method can provide a reference for the design of spray patterns for different crop canopy porosity changes.

Key words: air-assisted spraying; airflow droplets stress; canopy porosity change; decoupling; droplets deposition

0 引言

在气流辅助喷雾过程中,由辅助气流导致的冠层孔隙变化和对雾滴胁迫作用的影响是耦合的^[1]。面对不同施药对象,在最佳工况下胁迫雾滴需要的辅助气流风速和扰动冠层孔隙需要的风速是不同的^[2-3],两者对辅助气流风速需求的不一致导致施药效果下降和额外风量浪费。此外,辅助气流导致的冠层孔隙变化和对雾滴胁迫作用影响间的耦合强度可以改变,进而冠层内雾滴沉积性能也存在差异。通过改变辅助气流的作用形式可减弱两者间的耦合强度,或者通过增加机械拨杆、改变冠层孔隙可减弱气流对冠层的作用^[4-5]。目前,辅助气流作用下两者间耦合比例对沉积性能的影响机理尚未明确,明晰两者的耦合比例对沉积性能的影响可为风送参数优化和喷雾模式改进提供指导。

高郁闭度作物施药时,辅助气流对气流雾滴胁迫和冠层孔隙改变的差异性导致施药效果不佳。一方面,辅助气流对冠层孔隙空间改变有限,为达到较好的施药效果,需要提高施药机具的风速和风量,导致动力消耗成本相应增加^[6];另一方面,辅助气流风速增大会胁迫雾滴造成地面流失,从而引起环境污染。因此,辅助气流导致的雾滴气流胁迫和冠层孔隙改变对提升高郁闭度作物的施药效果有限,辅助气流风速不足以改变高郁闭度冠层内枝叶间的遮蔽,冠层外层稠密叶幕阻碍了雾滴在冠层内的运移^[7-8]。国内外研究人员针对气流辅助喷雾过程中辅助气流、冠层特性和沉积性能等进行了大量的试验研究^[9-14]。

上述研究均表明,风速对冠层内部的均匀沉积贡献较大。目前,关于辅助气流导致的冠层孔隙变化和对雾滴胁迫作用的分析以及两者对沉积性能的影响尚未见报道。深入研究气流辅助喷雾工况下气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对雾滴沉积性能的影响,对于优化气流输送形式、提高农药利用率、减少农药施用量具有重要意义。基于此,本文在前人研究基础上,以高郁闭度盛花期棉花为研究对象,通过设计解耦试验方案,解析气流辅助施药过程中气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对棉花冠层整体沉积行为的不同影响。

1 气流辅助喷雾沉积过程与解耦试验方案

1.1 风送喷雾冠层内雾滴沉积过程分析

冠层内部沉积阶段是关系到雾滴沉积是否均匀的关键过程。由于强制气流不是导致冠层孔隙变化的唯一原因,例如机械式扰动,因此本文将冠层孔隙变化视为一种影响雾滴沉积性能的独立因素加以考虑。在风送喷雾中,冠层孔隙变化和气流雾滴胁迫共同作用于雾滴冠层穿透、雾滴分配、雾滴沉积分布,气流雾滴胁迫强弱由气流风速决定并影响冠层孔隙变化,而冠层孔隙变化影响冠层内气流分布,进而影响气流雾滴胁迫作用。因此,两者对雾滴沉积性能的影响是耦合的。

在风送喷雾中的冠层内部沉积阶段,由于不同强制气流风速和不同冠层特性作物影响冠层孔隙变化,进而导致雾滴沉积行为存在差异。冠层孔隙的改变主要表现为气流对茎叶的扰动变形:若枝叶刚度较大或叶面积较小,受风载扰动后冠层孔隙变化

较小,气流雾滴胁迫是雾滴沉积行为的主要因素;若茎叶刚度较小或叶面积较大,受风后冠层孔隙变形较大,冠层孔隙增大形成雾滴运移通道,冠层孔隙变化成为雾滴冠层中下层沉积行为的主要因素。同时,气流对雾滴的胁迫作用还受雾滴粒径谱的影响:对于到达冠层雾滴群中粒径较大的雾滴,由于动能较大,在气流胁迫下会向下加速移动,因此大雾滴向冠层中下部运移主要依靠冠层孔隙改变形成的雾滴运输通道;对于粒径较小的雾滴,由于其动能不大,容易受层流或紊流胁迫,绕过茎叶进入冠层中下部或沉积在叶片背面,因此在冠层内部的沉积行为中,气流雾滴胁迫影响较大^[15-18]。

然而在实际喷雾作业过程中,提高喷雾效率主要依靠改变喷嘴流量、压力、气流速度等方式,未充分考虑到作物冠层特性对雾滴沉积行为的影响存在差异。若针对不同冠层特性作物,量化气流辅助喷雾中气流雾滴胁迫与冠层孔隙改变对雾滴沉积性能的影响,则可根据实际情况选择增大辅助气流或者额外通过机械手段增大作物冠层孔隙空间,提高雾滴沉积质量的同时又可以减少风机动力消耗。将能实现以较低的成本、较快的速度促进气流辅助喷雾施药质量的提升,可为针对不同作物冠层孔隙变化特性的新型喷雾模式设计提供借鉴。

综上所述,气流辅助喷雾在冠层内沉积行为主要受冠层内气流雾滴胁迫与冠层孔隙变化的影响,气流雾滴胁迫强弱由气流风速决定并影响冠层孔隙变化,而冠层孔隙变化影响冠层内气流分布,进而影响气流雾滴胁迫作用,两者在气流辅助喷雾过程中耦合发生,在不同冠层特性作物内沉积行为也存在差异。因此,研究行之有效的解耦方案对不同冠层特性作物内沉积行为改善尤为重要。

1.2 气流辅助喷雾解耦试验方案

一般而言,在作物群体的生长周期中存在冠层孔隙分布的差异;冠层孔隙也可以通过气流或物理方式加以改变。对于郁闭度较高作物,用于改变孔隙的辅助气流风速较大,功率消耗较多。只有当作物冠层孔隙率小于某个阈值,即郁闭度足够大时,才需要改变冠层孔隙,使之增强雾滴冠层内部运输能力,反之当孔隙率大于该阈值时,即郁闭度不大时,则不需要改变冠层孔隙。因此,本文讨论的解耦研究,其喷雾应用范围仅限于作物或作物群体达到一定的郁闭度。

采用物理解耦方式将气流影响雾滴沉积性能的二者作用形式剥离,设计 2 组解耦试验和 1 组对照试验。其中,方案 1 为对照组,方案 2、3 作为解耦试验组,方案 1 分别与方案 2、3 相互对照,两组对照之间试验变量不同。方案 1 试验对象是冠层孔隙可风

载变形的棉花模型;方案 2 试验对象是风载变形后冠层孔隙固定的棉花模型,用于开展有风载孔隙变形的无风沉积试验,剥离气流雾滴胁迫对冠层沉积行为的影响;方案 3 试验对象是自然状态下风载冠层孔隙不变的棉花模型,用于开展气流辅助喷雾下冠层孔隙不变的沉积试验,剥离风速对冠层孔隙改变的影响。忽略 3 组试验方案中冠层动态孔隙变化和静态孔隙保持不变的差异。如图 1 所示,方案 1 与方案 2 比较试验变量为是否存在气流雾滴胁迫影响,方案 1 与方案 3 比较试验变量为是否存在冠层孔隙变形影响。因此,分别分析方案 1 相对于方案 2、3 的沉积表现,可定量分析气流雾滴胁迫和冠层孔隙变化对冠层沉积性能的影响。

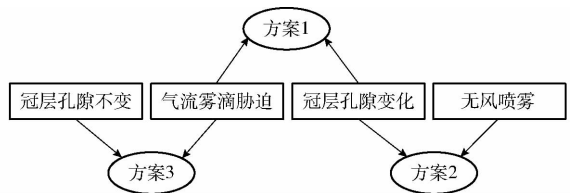


图 1 气流辅助喷雾过程解耦试验方案

Fig. 1 Air-assisted spray process decoupling test scheme

2 风载作用下棉花单枝叶变形测量

气流辅助喷雾中,棉花孔隙变化主要指叶枝弯曲变形与叶片扰动变形。由于叶枝在风载荷作用下变形量相对叶片扰动变形较小,将叶枝受风载变形过程简化,采样实测不同风速下叶枝变形量进行统计,作为棉花模型叶枝变形参数^[19-20]。叶片扰动变形采用试验方法得到不同风速作用下回归关系,用以对比仿真叶片与真实棉花叶片风载特性差异。

2.1 棉花叶片风载变形试验

2.1.1 试验材料

试验取样棉花为盛花期表面无明显损伤、茎叶茂盛植株,样本取自山东农业大学南校区棉花试验田。取样叶片分布于棉花冠层不同部位,最终选取 10 组样本并进行编号,其叶面积分别为: 14.2、29.6、37.4、47.1、61.4、77.8、81.6、91.4、102.8、113.96 cm²。取样过程中直接带根移栽样本棉花,提供充足水分。叶片带柄取下后立即进行风载试验,保证叶片风载特性不受影响。测量设备包括 CR1000x3 型高速相机(德国 Optronis)、离心风机、无级变频调速器、热线风速仪、导流风筒、标尺、三脚架、补光灯等。

2.1.2 试验方案

(1)导流风筒下方固定标尺,将离心风机作为风源,调节变频器改变风机转速,使用热线风速仪测量出风口风速(V)与下方叶片位置处风速(U),得

到变频器频率与出风口风速 (V) 对应关系。

(2)导流风筒下方 30 cm 处固定棉花叶片,调整三脚架高度和位置,使高速相机拍摄位置正对叶片区域,调整补光灯位置、亮度,调整相机焦距和拍摄角度确保叶片轮廓清楚,刻度清晰。同时拍摄叶片静止状态位置图像,记录静态叶片位置。

(3)通过改变变频器频率,将出风口风速 (V) 分别调节为 5、7、9、13、17、19、21 m/s,拍摄风载下叶片高速变形过程,通过高速相机软件 TimeBench 获取叶片动态变形过程。试验过程和装置如图 2 所示。

(4)分析静态叶片与风载下高速变形叶片,以静态叶片位置为参考,获取叶片位置处风速 (U) 下叶片最大变形时位移。

2.2 棉花叶片变形量标定与统计

棉花叶片在气流作用下变形表现为振动变形,

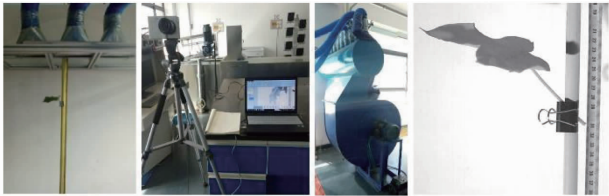


图 2 风载变形试验过程和装置

Fig. 2 Wind load deformation test process and device

其振动模式和振幅受气流速度影响。由于本次试验出风口风速 (V) 为 5 ~ 21 m/s,叶片振动变形难以评估,叶片振幅可以表征叶片变形受风速的影响。所以将叶片最大变形振幅作为变形量进行统计,通过对高速相机中的连续帧分析,抓取叶片最大变形量位置进行标定,获取其最大变形量。图 3 为部分叶片不同风速下变形量标定。将不同叶片变形量进行统计,结果如表 1 所示。

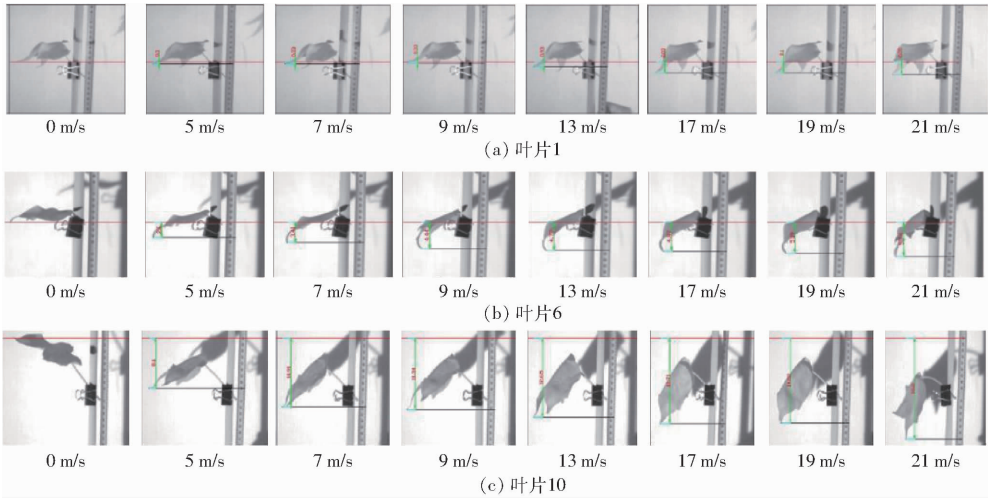


图 3 部分叶片风载变形量标定示意图

Fig. 3 Schematics of calibration of partial blade wind load deformation

表 1 叶片最大变形量统计结果

Tab. 1 Statistics of blade maximum deformation

出口风速 V / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	叶片位置处风速 $U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	叶片最大变形量/mm									
		叶 1	叶 2	叶 3	叶 4	叶 5	叶 6	叶 7	叶 8	叶 9	叶 10
5	3.9	3.0	7.0	21.0	26.6	26.0	32.0	42.5	51.5	73.9	81.5
7	5.4	3.3	8.8	23.0	30.0	34.1	42.3	45.1	58.0	90.0	93.0
9	7.0	3.4	13.0	29.1	35.8	44.4	43.1	48.9	68.8	93.8	101.5
13	10.1	9.3	15.9	34.0	36.0	47.9	51.2	56.9	79.8	99.0	106.4
17	13.2	20.3	23.0	38.8	39.2	48.7	64.3	69.0	84.2	103.7	112.2
19	14.8	21.0	24.4	38.9	40.9	51.9	70.5	75.5	92.5	109.5	116.4
21	16.4	23.8	29.0	39.1	41.1	57.4	77.8	86.0	105.0	113.0	121.3

根据表 1 数据,棉花叶片变形量受辅助气流风速与叶面积影响。随着辅助气流的增大与叶面积的增加,采样叶片的最大变形量也随之增大。为得到风载作用下叶片位置处风速 (U)、叶面积 (A) 与叶片最大变形量 (D) 三者间的关系,对获取的叶片变形量与风速、叶面积进行非线性拟合,得到图 4 的拟

合曲面,拟合后决定系数 $R^2 = 0.969$,具有较高的可靠性,其拟合关系为

$$D = -5.054 + 0.358A + 1.807U + 0.005A^2 - 0.032U^2 + 0.019AU$$

(1)

2.3 仿真叶片风载变形试验

封伟建等^[21]通过对比多种材料发现,一些人造

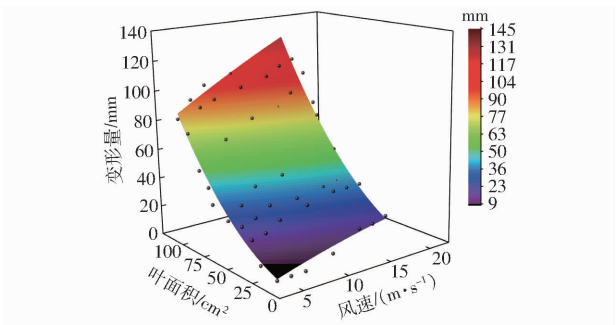


图 4 叶片变形量与风速、叶面积的拟合曲面

Fig.4 Fitting image of blade deformation, wind speed and leaf area

树叶能很好地反映真实树叶的气动特性,田间叶片受风动态变形的过程可以在室内模拟。利用人造树模拟气流辅助喷雾过程中冠层内沉积分布使喷雾试验不再受限于田间试验。为接近棉花叶片风载下真实变形,选择相近尺寸、叶形呈三掌裂状塑料叶片作为仿真棉花叶片。开展仿真叶片风载变形试验,对比仿真叶片与真实叶片风载变形量差异。重复上述真实叶片风载变形试验步骤,对仿真叶片变形量与真实叶片受风拟合得到的数据进行对比。

根据表 2 中数据,仿真叶片在风载下变形量与拟合变形量相对误差大部分在 15% 之内,少数叶片变形量误差在 17% 之内。由于本文只是使用人造树近似表示棉花高郁闭度状态,该误差一定程度上反映了真实叶片风送喷雾下变形状态。所以,确定仿真枝叶应用于风送喷雾试验的可行性并作为棉花模型叶片材料开展沉积试验。

2.4 棉花单果枝风载变形量测量

按照上述棉花叶片风载变形量测量步骤,对采样的新鲜带叶果枝进行风载变形试验。由于果枝变形量相对于叶片变形量较小,为简化冠层孔隙变化模型,对采样棉花植株果枝变形量进行统计,以上、中、下 3 层采样均值分别作为棉花模型果枝变形量,通过高速相机提取采样果枝变形连续帧,标定果枝风载变形量。棉花果枝风载变形量如表 3 所示。

3 解耦试验方案的棉花植株模型搭建

真实植株移入室内试验会破坏植株原有枝叶特性,冠层叶片会因脱水而自然下垂,试验成本较高且试验效果不理想。因此,结合 DEKEYSER 等^[22]采用人造仿真树木代替真实树木进行室内试验的方式。将盛花期棉花植株作为试验对象,搭建 3 种方案棉花模型开展喷雾沉积试验。

3.1 棉花表型数据及枝叶构型规律

棉花作为大株作物,具有根深、叶茂、分枝多的表型特征,器官种类多且结构复杂,但器官生长和发

表 2 仿真叶片风载变形量与拟合值对比

Tab.2 Comparison of wind load deformation of false blade and fitted value

叶面积/ cm ²	出风口风速 V/(m·s ⁻¹)	拟合值/ mm	测量值/ mm	相对误差/ %
15.6	5	9.46	8.4	12.67
	7	12.17	11.2	8.69
	9	14.90	13.5	10.40
	13	19.73	18.2	8.39
	17	23.94	21.6	10.82
	19	25.87	23.6	9.61
	21	27.64	26.5	4.29
36.5	5	23.94	22.1	8.32
	7	27.24	26.2	3.98
	9	30.61	29.6	3.41
	13	36.66	33.2	10.44
	17	42.11	40.5	3.96
	19	44.67	41.1	8.69
	21	47.08	43.5	8.22
61.3	5	46.78	44.5	5.13
	7	50.79	47.4	7.16
	9	54.91	50.2	9.39
	13	62.43	56.2	11.08
	17	69.33	60.6	14.41
	19	72.65	66.8	8.76
	21	75.81	65.6	15.56
80.3	5	68.44	58.6	16.80
	7	73.00	66.5	9.77
	9	77.69	71.7	8.36
	13	86.33	77.8	10.96
	17	94.35	87.5	7.83
	19	98.25	90.5	8.56
	21	101.98	88.5	15.24
98.4	5	92.44	79.4	16.42
	7	97.51	86.5	12.72
	9	102.75	89.6	14.68
	13	112.46	101.4	10.90
	17	121.54	112.6	7.94
	19	125.99	108.5	16.12
	21	130.28	115.2	13.09

表 3 棉花枝叶风载变形量采样统计结果

Tab.3 Sampling statistical results of cotton branches and leaves under wind load

出风口风速 V/(m·s ⁻¹)	果枝平均变形量/mm		
	上层果枝	中层果枝	下层果枝
5	4.3	1.6	0.7
7	4.8	1.9	1.0
9	5.2	2.7	1.3
13	6.8	3.5	2.1
17	8.1	4.6	2.4
19	9.4	5.1	3.2
21	11.6	8.3	4.7

育存在同伸关系并具有较为明显的规律性。本文搭建的植株模型为盛花期棉花植株,只考虑棉花冠层内枝叶部分,忽略花蕾等其他器官的影响。棉花表型生长参数通过查阅文献以及实际测量的方式确定。被测棉花品种为鲁研棉 21 号,位于山东农业大学南校区试验田。根据棉花农艺要求,营养枝在田间管理时大多被去除,因此棉花叶片主要考虑主茎叶和果枝叶。统计发现,盛花期棉花植株在打顶栽培条件下平均株高为 1 ~ 1.2 m,具有直立生长的主茎和螺旋有序生长的叶片,其主茎上节位间可以分化出叶枝和果枝。将棉花模型主茎节位按照 20 层搭建,每层节位上分布有主茎叶。由于棉花主茎下部无节生果枝,将 5 ~ 20 层设置为果枝位置。具体果枝表型参数如表 4 所示,盛花期主茎叶表型参数如表 5 所示。

表 4 盛花期棉花果枝表型参数

Tab.4 Phenotypic parameters of cotton fruit branches during flowering period

cm				
节位	叶宽	叶长	节长	叶柄长
5	11.2	10.4	13.5	8.1
6	11.5	10.9	14.2	8.5
7	13.1	11.2	14.8	8.9
8	12.9	11.5	14.8	8.9
9	13.8	11.6	14.4	8.6
10	14.1	11.7	13.6	8.2
11	14.3	11.6	12.6	7.5
12	13.2	11.5	11.1	6.7
13	13.6	11.2	9.3	6.3
14	12.1	10.9	8.5	5.6
15	11.8	10.4	7.9	5.1
16	10.9	9.8	7.3	4.7
17	10.5	9.1	6.7	4.4
18	10.1	8.4	5.4	4.0
19	9.2	7.6	4.2	3.5
20	7.8	6.7	3.0	2.9

根据倪万潮等^[23]的研究,陆地棉主茎生长的主茎叶和果枝螺旋有序分布,符合“3/8”分布规律。如图 5 所示,第 1 至第 8 台果枝(主茎叶)旋绕主茎 3 周,第 9 台果枝(主茎叶)位于第 1 台果枝(主茎叶)正上方,果枝上真叶交互排列成两行。对取样试验田内棉花冠层果枝与主茎叶排列进行测量,其生长排列基本符合“3/8”枝叶构型规律,因此,选择“3/8”枝叶构型规律作为搭建棉花模型的枝叶排列依据。

3.2 棉花植株模型搭建与叶片位置坐标建模

3.2.1 棉花植株模型搭建

根据上述盛花期棉花表型数据并结合“3/8”枝叶构型规律对棉花模型进行搭建。主茎秆材料选择 PVC 塑料管并在主茎各节位置打孔预留安装位置,

表 5 盛花期棉花主茎叶表型参数

Tab.5 Phenotype parameters of cotton leaves during flowering period

cm				
节位	叶宽	叶长	节长	叶柄长
1	9.6	8.5	2.44	7.5
2	10.7	9.45	2.44	11.8
3	11.7	10.3	2.44	14.4
4	12.5	11	2.44	15.3
5	13.2	11.6	2.44	14.4
6	13.7	12.1	2.78	11.8
7	14.2	12.5	2.78	9.2
8	14.5	12.74	2.78	11.2
9	14.6	12.9	2.78	12.8
10	14.8	13	2.78	14.2
11	14.6	12.9	3.48	15.2
12	14.5	12.7	3.48	15.9
13	14.2	12.5	3.48	16.3
14	13.7	12.1	3.48	16.4
15	13.2	11.6	3.48	16.2
16	12.5	11	3.13	15.7
17	11.6	10.3	3.13	14.9
18	10.7	9.45	3.13	13.8
19	9.6	8.5	3.13	12.3
20	8.4	7.4	3.13	10.6

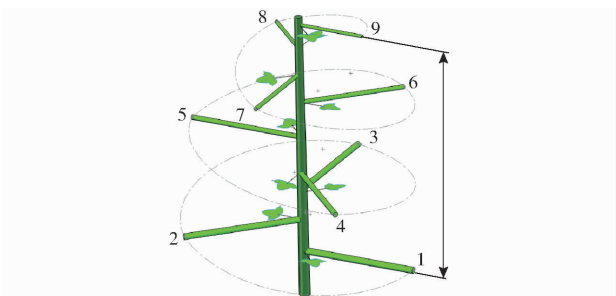


图 5 棉花生长 3/8 枝叶构型规律

Fig.5 Schematic of 3/8 rule of cotton growth

选择刚度合适的铁丝作为果枝材料。为方便棉花模型搭建,不考虑果枝的“之”字型结构,简化为单轴形式。将果枝叶与果枝间的夹角统一设置为 45°,相邻果枝螺旋角为 135°,果枝与同节主茎叶水平夹角为 45°。为便于分析棉花冠层内沉积分布规律,对冠层分层:1 ~ 7 层为下层,果枝倾角为 65°;8 ~ 14 层为中层,果枝倾角为 60°;15 ~ 20 层为上层,果枝倾角为 55°。

按照气流辅助喷雾中棉花模型解耦方案,分别搭建方案 1 与方案 3 棉花模型:方案 1 棉花冠层孔隙可风载变形;方案 3 棉花冠层为保持自然状态下风载孔隙不变。图 6 为搭建完成的部分棉花模型。

3.2.2 棉花叶片位置笛卡尔坐标系

根据上述棉花生长发育的表型参数与枝叶构型规律,结合简化棉花模型方法,构建描述棉花叶片空间分布的笛卡尔坐标系。以地面主茎中心为坐标原点,第一主茎叶朝向为 x 轴方向,与其垂直的方向为



图 6 搭建完成的棉花模型

Fig. 6 Built complete model of cotton

y 轴,垂直于地面的棉花主茎设置为 z 坐标轴。以棉花叶片长度方向中点作为叶片中心位置,根据几何关系得出所有叶片位置坐标分布,如图 7 所示。

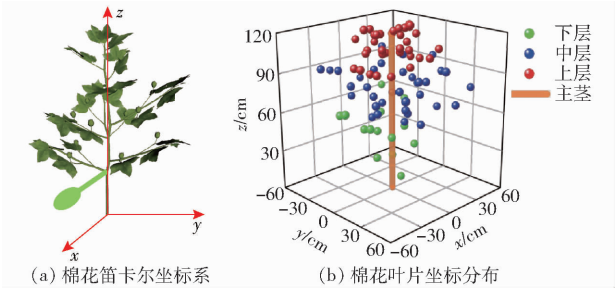


图 7 棉花模型坐标系与叶片位置分布

Fig. 7 Cotton model coordinate system and leaf position distribution

3.3 棉花冠层内流场分布测量与叶片变形量计算

辅助气流作用下棉花冠层内风速分布可为冠层枝叶变形提供数据支撑。由于田间测量棉花冠层内辅助气流风速分布较为困难且易受自然风影响,所以本文方案 1 搭建的可风载变形的仿真棉花植株为测量对象,借助热线风速仪 (Testo 405i 型) 测量不同风速下方案 1 冠层内气流分布,图 8 为棉花冠层内流场分布测量过程与装置。测量过程中,每次测量同时使用 3 个热线风速仪分别对上、中、下 3 层不同部位测量,每个位置连续取样 30 次,通过蓝牙将数据传输至智能手机上的应用程序,将数据导出至 Excel 取平均值作为该位置速度测量值,每层内多次测量不同位置进行统计,并根据插值方法得到所有叶片位置风速。根据公式(1)得到该风速下所有叶片变形量。

4 气流辅助喷雾棉花模型沉积解耦试验

以上述 3 组棉花模型为试验对象,改变辅助气流风速分别开展风送沉积试验,对 3 组棉花模型的沉积数据进行解耦分析。

4.1 试验设置与步骤

4.1.1 试验设置

依据实际喷雾工况,每次试验选取 4 株仿真棉花所围成的立方体区域为数据采集区,将棉花的

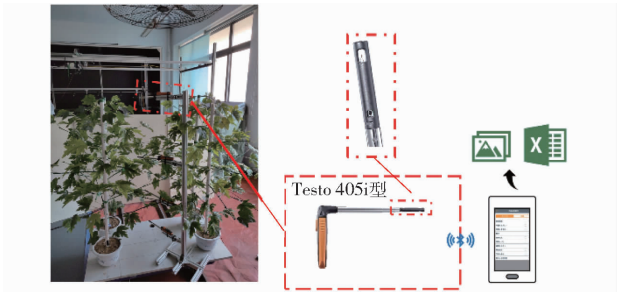


图 8 棉花冠层内气流场测量装置

Fig. 8 Device for measuring airflow field in cotton canopy

行、株距设置为 80 cm × 30 cm。棉花放置于移动小车上,以 0.65 m/s 的速度通过试验台喷雾区并施加辅助气流。本文试验环境为室内,忽略自然风的影响。图 9 为试验过程中的棉花模型采样区域与试验图像。

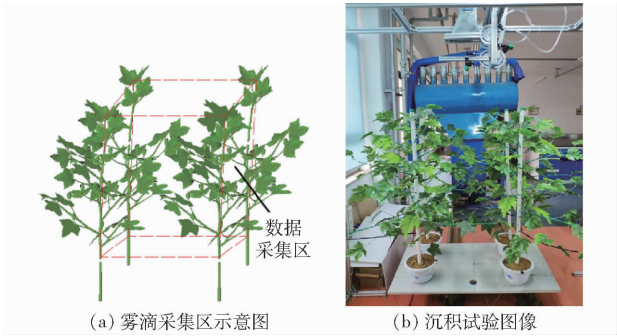


图 9 棉花冠层雾滴采样与沉积试验图像

Fig. 9 Photographs of cotton canopy droplet sampling and deposition test

4.1.2 试验步骤

- (1)调整棉花模型行株距,在数据采集区内布置水敏纸,上、中、下 3 层随机选取 8 处叶片布置水敏纸,并保证每次试验布置水敏纸位置叶片不变。
- (2)试验用喷嘴选择单个 TP11001 不锈钢高压扇形喷嘴 (TeeJet), 调整喷嘴距离冠层高度为 30 cm,出风孔距离喷嘴高度为 20 cm,调整喷嘴压力为 0.26 MPa。方案 1、3 试验组调整出风口风速分别为 9、13、17 m/s 依次进行试验,方案 2 试验组依次进行风速 9、13、17 m/s 下冠层孔隙改变的无风沉积试验,每次试验重复 3 次。
- (3)待水敏纸晾干后进行图像扫描,使用水敏纸雾滴分析软件 DepositScan 对雾滴分布进行统计分析。计算各层单位面积沉积量的平均值 $\bar{q}$ 和棉花 3 层间沉积量分布变异系数 C_v

$$\bar{q} = \frac{q_1 + q_2 + \cdots + q_i + \cdots + q_n}{n} \quad (2)$$

$$C_v = \frac{S_D}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

其中

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (4)$$

式中 q_i ——每层各采样点雾滴沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$
 n ——棉花冠层内每层采样点数
 S_d —— X_i 的标准差, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$
 $\bar{X}$ ——棉花冠层内采样点平均雾滴沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$
 X_i ——第 i 层采样点平均雾滴沉积量, $\mu\text{L}/\text{cm}^2$

4.2 试验结果与分析

评价田间喷雾效果的指标主要有单位面积沉积量、沉积均匀性和雾滴飘移。一般而言,沉积量很大程度反映了喷雾效果。另外,对于高郁闭度作物,沉积均匀性是衡量喷雾效果的重要指标。所以本文将从沉积量与沉积均匀性两方面对试验结果进行分析。

4.2.1 试验结果

按照上述试验方法,3 个方案在风速为 0 m/s 的静态沉积试验条件相同,所以只需进行 1 组沉积试验,并且将静态沉积试验数据单独与其他数据进行对比。将 3 种方案下所有试验重复 3 次取其平均值作为统计量,记录不同试验方案在各层单位面积沉积数据和各层间的沉积量变异系数,如表 6 ~ 8 所示。表 6 显示:方案 1 棉花冠层内雾滴分布具有明显的雾滴沉积衰减特征,随着辅助气流速度的增加,中下层沉积量得到改善,雾滴沉积均匀性有较小幅度改善。表 7 显示:方案 2 试验组随着辅助气流速度的增大,更换孔隙增大的植株模型,导致上层雾滴承接面减少和冠层内部空间增大,表现出上层雾滴相比其它组沉积量较少,中、下层雾滴沉积量有所增加,变异系数下降明显。表 8 显示:随着辅助气流速度的增加,冠层内孔隙固定不变,上层由于承接面不变,辅助气流作用下喷嘴扇形雾面向靶标集中导致上层雾滴沉积增加明显,中、下层沉积量的增加主要靠冠层内的涡流带动细小雾滴的靶标撞击。

表 6 方案 1 各层沉积量与变异系数

Tab.6 Scheme 1 droplets deposition volume and variation coefficient of each layer						
分层	9 m/s		13 m/s		17 m/s	
	沉积量/标准差/		沉积量/标准差/		沉积量/标准差/	
	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
上层	0.296	0.018	0.315	0.081	0.346	0.073
中层	0.157	0.049	0.183	0.070	0.244	0.049
下层	0.131	0.052	0.122	0.055	0.165	0.029
变异系数/%	45.51		47.87		36.20	
平均沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.194		0.207		0.252	

4.2.2 沉积性能对比

如图 10、11 所示,棉花冠层在无风喷雾时的静

表 7 方案 2 各层沉积量与变异系数

Tab.7 Scheme 2 droplets deposition volume and variation coefficient of each layer						
分层	9 m/s		13 m/s		17 m/s	
	沉积量/标准差/		沉积量/标准差/		沉积量/标准差/	
	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
上层	0.253	0.094	0.248	0.102	0.198	0.112
中层	0.120	0.054	0.139	0.058	0.163	0.065
下层	0.080	0.049	0.089	0.018	0.109	0.046
变异系数/%	60.10		51.06		28.45	
平均沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.151		0.159		0.157	

表 8 方案 3 各层沉积量与变异系数

Tab.8 Scheme 3 droplets deposition volume and variation coefficient of each layer						
分层	9 m/s		13 m/s		17 m/s	
	沉积量/标准差/		沉积量/标准差/		沉积量/标准差/	
	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)
上层	0.321	0.077	0.363	0.078	0.410	0.129
中层	0.143	0.080	0.160	0.067	0.140	0.085
下层	0.069	0.029	0.100	0.066	0.092	0.076
变异系数/%	72.84		74.56		80.11	
平均沉积量/ ($\mu\text{L}\cdot\text{cm}^{-2}$)	0.178		0.198		0.214	

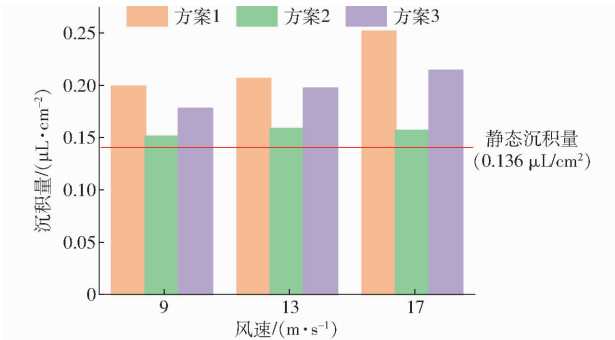


图 10 不同方案雾滴沉积量

Fig. 10 Amount of droplet deposition in different schemes

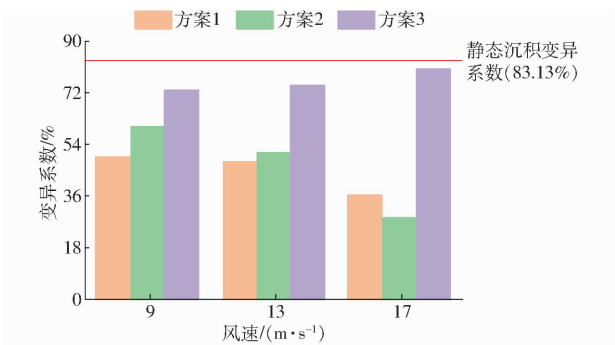


图 11 不同方案沉积分布变异系数

Fig. 11 Coefficient of variation of deposition distribution of different schemes

态沉积量为 $0.136 \mu\text{L}/\text{cm}^2$, 整体各层间分布的变异系数为 83.13%。其中方案 1 在辅助气流为 9、13、17 m/s 时雾滴沉积量提升比例分别为 43.2%、52.2%、85.3%, 雾滴分布变异系数降低比例分别为 45.2%、42.4%、56.5%; 方案 2 在辅助气流风速为 9、13、17 m/s 时雾滴沉积量提升比例分别为 11.4%、16.9%、15.3%, 雾滴分布变异系数分别降低 27.7%、38.6%、65.8%; 方案 3 在辅助气流为 9、13、17 m/s 时雾滴沉积量提升比例分别为 30.9%、45.5%、57.7%, 雾滴分布变异系数降低比例分别为 12.4%、10.3%、3.6%。综上所述, 3 个试验方案的沉积量相较于静态沉积量提升比例在 11.4% ~ 85.3% 之间, 雾滴沉积量变异系数降低比例在 3.6% ~ 65.8% 之间, 表明气流辅助喷雾过程中的气流雾滴胁迫与冠层空隙变化都能提高雾滴在棉花冠层内的沉积量和上下均匀性。

4.2.3 辅助气流对沉积性能影响的解耦分析

按照上述棉花模型沉积解耦方案, 方案 1 为对照组, 方案 2、3 为解耦试验组。方案 1 与方案 2 比较试验变量为是否存在气流雾滴胁迫影响, 方案 1 与方案 3 比较试验变量为是否存在冠层孔隙变形影响。因此, 忽略其它无关变量的影响, 将不同变量组之间相互对照, 得出气流辅助喷雾中二者对沉积性能的影响。方案 1 相对于方案 2 在辅助气流为 9、13、17 m/s 时, 雾滴沉积量提升比例分别为 28.6%、30.18%、60.66%, 雾滴分布变异系数降低比例分别为 24.28%、6.25%、-27.24%; 方案 1 相对于方案 3 在辅助气流为 9、13、17 m/s 时, 雾滴沉积量提升比例分别为 9.45%、4.60%、17.52%, 雾滴分布变异系数降低比例分别为 37.52%、35.80%、54.81%。其中, 辅助气流在风速 17 m/s 时, 方案 1 相较于方案 2 雾滴分布变异系数存在明显差异, 辅助气流对雾滴胁迫的影响作用反而导致雾滴分布均匀性有所下降, 可能是由于方案 2 较大辅助气流引起上、中层雾滴承接叶片变形较大导致沉积量较少, 形成方案 2 沉积变异系数相较于方案 1 低, 方案 1 雾滴沉积量高于方案 2。综合以上数据, 在 9、13、17 m/s 辅助气流作用下, 方案 1 比方案 2 的沉积量平均提升比例为 39.81%, 雾滴分布变异系数下降比例为 1.10%。方案 1 比方案 3 的沉积量平均提升比例为 10.52%, 雾滴分布变异系数下降比例为 42.71%。试验结果表明: 在 9、13、17 m/s 辅助气流作用下, 气流的雾滴胁迫作用相较于冠层内的孔隙变化影响更有利于雾滴在冠层内的沉积行为, 两者对于雾滴沉积量的提升比例分别为 39.81% 和 10.52%; 冠层孔隙增大形成的雾滴运移通道相较于气流对雾滴的胁

迫作用更有利于雾滴在冠层内的均匀分布, 两者对沉积均匀性的提升比例分别为 42.71% 和 1.10%。

4.3 讨论

依据上述解耦分析结论, 可以看出气流雾滴胁迫能力和气流对冠层孔隙改变, 均能影响雾滴沉积但其贡献存在差异。在此基础上, 分析并设计新施药模式具有现实意义。高郁闭度作物是均匀沉积的难点, 改变冠层孔隙增大药液在靶标上沉积均匀性更有利于病虫害化学防治。结合本文研究对象, 就高郁闭度作物施药模式展开讨论。目前高郁闭度作物施药可采用 3 种施药方式: ①采用强制气流改变冠层孔隙, 打开雾滴输送通道, 增加雾滴在冠层内的穿透性, 若冠层枝叶刚度较大, 需要气流风速相对较大, 但存在进入冠层内部风速的末速度过大, 导致药液流失到地面、风机功率消耗过大的问题。该方式的典型施药方式为大负载的植保无人机。②自然状态下田间植株群体的冠层孔隙分布有其内在差异的特点, 依据此差异进行针对性雾滴输送有利于冠层内部沉积^[24]。采用喷杆喷雾与吊杆喷雾组合施药方式, 吊杆式冠层上方采用由上而下的雾滴喷施, 冠层中下部使用吊杆在行间冠层中下部孔隙处喷施细小雾滴, 其典型施药方式为吊杆式喷雾^[25]或分行冠内冠上组合气流喷雾^[5]。③采用机械方式^[26]打开上层冠层空间, 使药液雾滴进入冠层中下部提高施药效果, 代表施药方式为罩盖式施药^[27]和柔性罩盖式气流辅助施药方式^[28], 根据作物冠层特性, 在不产生机械损伤的情况下打开植株冠层内部药液运移通道, 辅助气流同时胁迫雾滴加速进入冠层内部, 减少过大辅助气流风速的功率消耗, 也有效减少相对风速和自然风速对雾滴产生的飘移影响。此种喷雾模式为新型施药模式设计提供了思路借鉴。

5 结论

(1) 3 组不同风速下风送试验方案的沉积量相较于静态沉积量提升比例在 11.4% ~ 85.3% 之间, 雾滴分布变异系数降低比例在 3.6% ~ 65.8% 之间, 表明气流辅助喷雾过程中的气流雾滴胁迫与冠层孔隙变化均可提高雾滴在棉花冠层内的沉积量和上下均匀性。

(2) 试验表明: 方案 2 在辅助气流风速为 9、13、17 m/s 时雾滴沉积量提升比例分别为 11.4%、16.9%、15.3%, 雾滴分布变异系数降低比例分别为 27.7%、38.6%、65.8%, 在实际工作过程中机械式改变冠层孔隙可较好地提升中、下层雾滴的沉积分布。

(3) 解耦分析表明: 气流辅助喷雾可以显著提

高雾滴在冠层内的沉积量和均匀性,相较于冠层孔隙变化气流对雾滴的胁迫作用更有利于雾滴在冠层内的沉积行为,3种风速下两者对于雾滴沉积量的平均提升比例分别为39.81%和10.52%;相比于气

流对雾滴的胁迫作用冠层孔隙增大形成的雾滴运移通道更有利于雾滴在冠层内的均匀分布,两者对沉积均匀性的平均提升比例分别为42.71%和1.10%。

参 考 文 献

- [1] 杨风波,张玲,薛新宇,等. 果园风送喷雾机气助式喷头风力性能数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 38-47.
YANG Fengbo, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Numerical simulation and test of wind performance of gas spray nozzle for orchard air-assisted sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 38-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180605&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.005. (in Chinese)
- [2] 翟长远,赵春江,WANG Ning,等. 果园风送喷雾精准控制方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 1-15.
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Ning, et al. Research progress on precision control methods of air-assisted spraying in orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 1-15. (in Chinese)
- [3] 刘雪美,张晓辉,侯存良. 喷杆喷雾机风助风筒流场分析与结构优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 70-75.
LIU Xuemei, ZHANG Xiaohui, HOU Cunliang. Air flow simulation and flow field optimization for airduct of air-assisted boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 70-75. (in Chinese)
- [4] 崔龙飞,薛新宇,秦维彩. 基于EBF神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 62-69.
CUI Longfei, XUE Xinyu, QIN Weicai. Parameter optimization on crop divider of cotton defoliation sprayer based on EBFNN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 62-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160509&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.009. (in Chinese)
- [5] 魏新华,邵菁,解禄观,等. 棉花分行冠内冠上组合风送式喷杆喷雾机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 101-107, 90.
WEI Xinhua, SHAO Jing, XIE Luguan, et al. Design and experiment of air-assisted cotton boom sprayer with separating row and spraying in inside and upper canopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 101-107, 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160114&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.014. (in Chinese)
- [6] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,等. 基于变量喷雾的果园自动仿形喷雾机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 70-76.
LI Longlong, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 70-76. (in Chinese)
- [7] SINHA R, RANJAN R, KHOT L R, et al. Comparison of within canopy deposition for a solid set canopy delivery system (SSCDS) and an axial-fan airblast sprayer in a vineyard[J]. Crop Protection, 2020, 132: 105124.
- [8] 孙诚达,柳长鼎. 风送喷雾雾滴冠层穿透模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 25-32.
SUN Chengda, LIU Changding. Construction and application of droplet canopy penetration model for air-assisted spraying pattern[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 25-32. (in Chinese)
- [9] DUGA A T, RUYSEN K, DEKEYSER D, et al. Spray deposition profiles in pome fruit trees: effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics[J]. Crop Protection, 2015, 67: 200-213.
- [10] DUGA A T, DEKEYSER D, RUYSEN K, et al. Numerical analysis of the effects of wind and sprayer type on spray distribution in different orchard training systems[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157(3): 517-535.
- [11] MUSIU E M, QI Lijun, WU Yalei. Spray deposition and distribution on the targets and losses to the ground as affected by application volume rate, airflow rate and target position[J]. Crop Protection, 2019, 116: 170-180.
- [12] 刘冬梅,杨杭旭,周宏平,等. 密植矮化茶园地面低容量仿形喷雾液滴沉积性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 96-105.
LIU Dongmei, YANG Hangxu, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition performance of low-capacity profiling spray in densely planted dwarf tea plantation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 96-105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191011&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.011. (in Chinese)
- [13] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.012. (in Chinese)
- [14] 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 70-75.
LÜ Xiaolan, FU Ximin, WU Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 70-75. (in Chinese)