

农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究

张慧春¹ 郑加强¹ 周宏平¹ DORR G J²

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 昆士兰大学理学院, 布里斯班 4343)

摘要: 对农药通过空气运输并沉积到靶标植物表面(叶片或其它部位)、地面(土壤表层)以及大气(随风飘移)等不同部分的沉积进行研究。以苦苣菜、棉花和稗草作为靶标植物,取其不同生长阶段(总叶面积分别为15、135、300 cm²)作为研究对象。在开路式风洞喷施加有荧光示踪剂喷雾介质,通过清洗并分析植物叶片、地面上放置的聚酯薄膜卡和风洞中悬挂的聚乙烯线测定荧光剂含量,分析不同体积中径、喷雾角、雾滴速度、流量、喷头高度、风速、植物类型、生长阶段等因素时的农药雾化后的分配过程,定量测试不同参数对农药在植物、地面和大气中的沉积比例分配的影响。建立了基于跨帧技术的粒子图像测速系统来增加测速范围,包括激光成像系统、脉冲发生器和分析软件。结果表明,喷雾角、雾滴速度、流量、植物类型等参数对植物、地面和大气等不同部分农药分配比例的影响不大,而雾滴粒径、喷头高度、风速、植物生长阶段对植物、地面和大气等不同部分农药分配比例的影响显著。当雾滴粒径由445 μm减小到181 μm时,地面上的沉积比例由82.7%减少到57.7%,空气中飘移部分的比例由30%减少到0.8%。当喷雾高度为40~60 cm、风速2~4 m/s时,农药在植物上的沉积比例都达到13.4%以上。因此,喷施农药时,应尽量使喷雾高度为40~60 cm,风速小于4 m/s,并根据防治目标、附近环境确定雾滴粒径。当喷施土壤活性除草剂等农药时,应选择产生较大的雾滴粒径,以增加在地面(土壤)上的沉积比例;而对于防治飞行类害虫,农药在空气中飘移部分的比例可以提高防治效果,所以较小的雾滴更加有效。靶标植物本身的特性也会影响农药的有效沉积效率,植物的生长阶段越靠后,叶面积越大,农药在植物上的沉积比例越高,在地面上沉积部分的比例越低,喷施除草剂时,尽量减少药剂在单子叶作物叶片上的沉积,增加在双子叶靶标杂草上的沉积量。选择不同的参数,将导致植物上的药剂有效沉积明显不同,也会引起农药流失部分的明显不同。

关键词: 农药沉积; 跨帧技术; 靶标植物; 生长阶段; 随风飘移

中图分类号: S499; V211.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0114-09

Droplet Deposition Distribution and Off-target Drift during Pesticide Spraying Operation

ZHANG Huichun¹ ZHENG Jiaqiang¹ ZHOU Hongping¹ DORR G J²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Faculty of Science, The University of Queensland, Brisbane 4343, Australia)

Abstract: Due to great human awareness of environmental conservation and public health, pesticides must be applied in economically viable and environmentally sensitive ways, and it requires deep understanding on the distributions of pesticide application. The distribution is the process occurring immediately after application. When applied, the pesticide can distribute in the following way: loss by wind drift, deposition on leaves or other parts of the target plant and deposition on ground (soil). The sum of these three components (plant, soil and drift) should equal to the amount of spray emitted. However, there are concerns over the intended effect (deposition on plant) and unintended effect (deposition on ground and wind drift) of pesticide application on the effectiveness and risks associated with the use of pesticides. Oriented to distribution of pesticide application, droplet deposition on different parts was measured in the research. Spray deposition was tested by recovery of a fluorescent tracer (pyranine) in the 1.75 m wide, 1.75 m high and 10 m long working section of the wind tunnel. A single

收稿日期: 2016-12-08 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371963)、江苏省自然科学基金项目(BK20130965)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B04)、江苏省杰出青年教师培育项目(2012256)、江苏省青蓝工程项目和江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 张慧春(1978—),女,教授,博士,主要从事智能植保机械和农药精确使用技术研究, E-mail: njzhanghc@hotmail.com

nozzle was positioned in the centre of the wind tunnel at a height of 0.6 m above the wind tunnel floor and then sprayed moving along the length of the tunnel at a speed of 1 m/s. The nozzle moved over the top of the plant so that application amount was the same to a typical spray in agriculture and the pesticide distribution was measured. Mylar cards (plastic) were used to collect the deposition on ground, diameter polythene lines were horizontally mounted to provide an estimate of the wind drift of spray, and the sow thistle plant was put under the nozzle to test the deposition on the target. To evaluate the influence of different factors on spray distribution, the trial was carried out for three plant types (sow thistle, cotton and barnyard grass) at three growth stages (leaf area were 15 cm², 135 cm² and 300 cm², respectively). After spraying, fluorescent dyes were easily washed off the three different samples so good recoveries can be got. The amount of spray on the plant, ground and wind drift was calculated and expressed as a percent (or fraction) of the amount of spray that came out of the nozzle. Based on the frame straddling technique, velocity of droplet was investigated by particle image velocimetry (PIV), and the test system included laser imaging system, pulse generator and analysis software. The influences of droplet size (VMD), droplet velocity, spray angle, flow rate, height of nozzle, wind speed and growth stage of plant on deposition at various parts were investigated. Correlation between different factors and spray distribution (fraction of spray deposited on ground, plant and drift) was calculated to judge the impact. The results indicated that the distribution of the spray was influenced by droplet size, release height wind speed and growth stage. Meanwhile, spray angle, sheet velocity flow rate and plant type had no significant effect on the spray distribution. The ground deposition was the lowest with the fine sprays. It was found that ground deposition from application of pesticides was 57.7% for finer droplet (VMD was 181 μm) which was increased to 82.7% for coarser droplet (VMD was 445 μm). Deposition on plant surfaces was also found to be more than 13.4% with release height at 40 cm to 60 cm and wind speed less than 4 m/s. For soil-active herbicide, a proportion of deposit on the ground was increased by bigger VMD, and this is a desirable result. For controlling flying pest, airborne deposit can increase chemical's spread on its body, so smaller VMD was more effective. It was also shown that the proportion of spray depositing on plant surfaces was increased as the plants got larger and the amount depositing on the ground was decreased. The result can be used to effectively aid spray decisions to maximize the effectiveness of pesticides and minimize risks to the environment from chemical spraying activities. Chemical application must be as precise as possible, so populations of unwanted organisms (insects or diseases) can be reduced and less environmental impacts created in the agricultural production. An understanding of the pesticide application process can be utilized to improve the estimate of the distribution on pesticide from a spray operation.

Key words: pesticide deposition; frame straddling technique; target plant; growth stage; wind drift

引言

喷施农药能迅速有效地控制农林病虫害的爆发和蔓延^[1], 目标是以对非靶标生物风险最小的方法把少量高效的农药有效成分分散、传递到生物靶标上实现病虫害防治^[2]。而农药施用是农药的输送过程, 目的在于把农药从喷头输送到靶标植物上, 然后发生农药的剂量转移, 直接或间接地转移到有害生物体上, 既减少有害生物数量 (如杂草、害虫和真菌), 又尽量减轻由此导致的对环境的毒性影响^[3]。施药时, 不仅要考虑对病虫害的致死效果, 还要预测环境风险, 评估农药施用对周围不同对象的影响^[4]。

国内很多学者开展了农药沉积与飘移的研究。王玲等^[5]设计了微型无人机脉宽调制型变量喷药系统, 并利用风洞的可控多风速环境, 通过荧光粉测试方法对悬停无人机变量喷药的雾滴沉积规律进行

了试验研究。李慧等^[6]基于 CFD 三维模拟技术, 建立了常温烟雾机在密闭温室内作业的气流速度场模型及雾滴沉积分布模型, 并进行了试验验证。邱白晶等^[7]采用二因素三水平试验方法进行了小型无人直升机喷洒农药试验, 研究了飞行高度与飞行速度对农药沉积浓度、沉积均匀性的影响, 并建立了回归模型。宋坚利等^[8]针对农药雾滴难以在水稻叶片上沉积持留的问题, 采用扫描电镜法观察研究了两种水稻品种在分蘖期、孕穗期叶片正、反面的显微结构, 研究了农药药液在水稻叶片的主要沉积部位。

国外的专家学者不仅开展了大量的农药喷雾沉积与飘移研究, 也研究了农药使用技术评价模型。BIRKVED 等^[9]建立了一个基于农药寿命周期评价的模块化模型, 推导出了不同施用时间和类型、植物品种、生长阶段、喷施区域时空条件等因子下的数学模型, 称为 PestLCI 1.0 模型。DIJMAN 等^[10]在此基础上进行深入研究, 增加了农药使用对水体环

境的污染风险评估,包括农药对地表水(通过径流、灌溉等)和对地下水(通过降雨、淋溶等)的污染,并发展建立了 PestLCI 2.0 模型。

国内外运用水敏纸、采集卡等模拟植物叶片,进行了大量不同施药器械、不同施药技术等因素对农药在植物靶标上的沉积研究,但器械和操作因素对大气和土壤等环境的影响没有进行过定量分析,尚无人开展农药喷施分配过程中在地面、大气和植物等不同部分的沉积比例研究。本文从农药喷施分配过程的角度出发,对防治效果和环境安全进行综合考虑,研究雾滴粒径、喷雾角等喷头结构参数,雾滴速度、流量、喷头高度、风速等喷施操作参数,植物类型、生长阶段等靶标参数对农药喷施分配的影响,定量分析不同参数时,农药在地面、大气和植物等部分的沉积比例,不仅重视其在靶标植物上发挥药效的有效沉积部分,也关注其在地面(土壤)和大气飘移的无效流失部分,以提高雾滴在植株靶标上的沉积分布、减少脱靶飘移、预测农药对环境的污染。

1 农药喷施的分配过程分析

农药药液从喷雾机喷头喷射出去后,不可能完全按照操作者的意愿全部沉积到靶标植物上^[11],而是雾滴通过空气输运分别沉积到靶标植物表面(叶片或其它部位)、地面(土壤表层)以及大气(随风飘移),过程如图 1 所示。这 3 部分(植物、地面和空气)的农药总和等于喷头雾化喷射出的量。

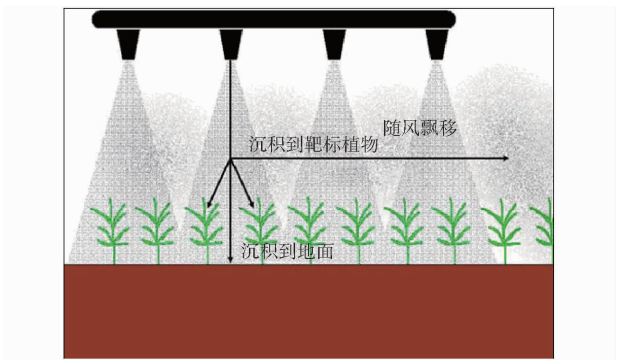


图 1 农药雾化后的分配过程示意图

Fig. 1 Pesticide distribution between deposition on plants, ground and that moved off field in wind drift

沉积到靶标植物表面(叶片或其它部位)的药剂被叶片吸收(如除草剂、杀菌剂)及在昆虫体内消化(如杀虫剂),从而发挥药效;沉积到地面(土壤表层)的药剂通过降解消失部分药性,通过地表径流、排水系统等用药性影响着地表水,通过大孔隙流、渗透、淋溶等用药性影响着地下水,通过吸附滞留在土壤中;在大气中(随风飘移)的药剂随着蒸发影响着空气,其对环境的综合影响如图 2 所示。因此,在施

药过程中,农药离开靶标,造成药剂损失和环境污染,不仅容易导致邻近作物等药害事故,还会严重污染空气和水源,是农药使用中的重要问题。农药的脱靶流失进入土壤和空气,在生态系统中扩散,扩大了污染范围,甚至在南极人迹稀少地带的企鹅体内也积蓄了农药中的有害成分,可见,农药直接影响整个生物圈^[12]。已有大量动物在地球上灭绝,由大自然演变造成的只有 1/4 左右,3/4 是人为造成的,其中重要原因是农药的大量无效使用。已经证实不少鸟类的灭绝与有机氯农药的使用有关,一些鱼类和野生动物的绝迹也与农药有关^[13]。农药对环境的污染已成为人们非常关切的社会公害问题,因此,施药过程中,防治效果和环境安全要进行综合考虑。

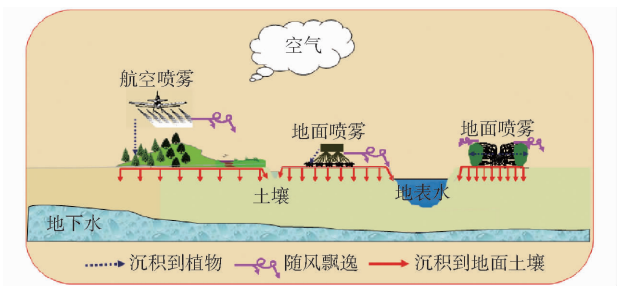


图 2 农药雾化后对环境的综合影响示意图

Fig. 2 Total environmental impact after applying pesticide

实际应用过程中,喷头性能、喷雾流量、气象条件、植物生长阶段、植株冠层结构、叶片表面特性对农药的分配有决定性的影响^[14],防治植物病虫害,总希望有更多的药剂沉积到生物靶标上,流失到大气中的药剂则越少越好,而农药在植物叶片上的最终沉积分布是喷头的雾滴粒径、雾滴运行速度、喷雾角、操作参数、气象环境、药液的物化特性、叶片表面结构、冠层结构等多方面因子决定的^[15-17]。在作业过程中,不可避免地会出现农药雾滴的飘移、蒸发、流失等农药损耗,因此,大部分的农药雾滴难以到达预定的靶标叶片上,从而限制了药效的发挥;与此同时,农药雾滴飘移会给附近农作物、水源等敏感区域造成危害,进入空气的农药又会污染环境。若要提高农药的利用率、减少农药负效应,则必须掌握农药的分配规律,减少农药的不必要流失,明确农药在靶标上的沉积^[18-19]。

2 试验材料与方法

2.1 试验装置与试验设计

采用 AI 110015 型气吸扇形喷头、TT 11002 型广角扇形喷头、XR 8002 型和 XR 11002 型延长范围扇形喷头作为供试喷头。试验在澳大利亚昆士兰大学农药应用与安全研究中心(The Center for Pesticide Application and Safety, CPAS)的风洞实验

室进行,该风洞由 75 kW 变速电动机驱动的离心风机、流量校正部分、开路式风洞、工作区和排气滤净系统组成^[20],长、宽、高分别为 10、1.75、1.75 m 的工作区能进行雾滴在空气中的运动研究^[21-23]。风洞内风速、喷雾流量可调,喷头被固定在距离风洞地面 0.6 m 高的中心位置,确定喷头方向垂直向下,所依据的原则是:喷雾羽流的长轴和风向是相互垂直的。喷头的流量由电子计时器控制,喷头沿着滑轨在风洞的上方匀速移动以模拟户外田间作业时横杆式喷雾机的作业情况^[24],其匀速移动的速度为 1 m/s。雾滴的随风飘移部分由直径为 2 mm 的聚乙烯线收集。沿水平方向在距离地面 0.1 m 高的位置以 1 m 的间隔距离分别放置 6 根收集线,来检测喷雾从 2 m 到 7 m 范围内的水平飘移,分别命名为 H1、H2、H3、H4、H5 和 H6。喷头正下方地面上摆放植物来收集在靶标植物上沉积的雾滴。地面上放置 10 cm × 10 cm 的聚酯薄膜卡来收集在地面上沉积的雾滴。利用三维数字化仪(Freepoint XL2, GTCO 数控绘图机,墨西哥)进行靶标植物形态数字化,数据经 Floradig 3.0 软件处理后得到植物叶面积大小^[25-26],本文所选靶标植物为苦苣菜、棉花和稗草,选取其在不同生长阶段(总叶面积分别为 15、135、300 cm²)作为喷施植物对象,栽培在直径为 15 cm

的容器中^[27],栽培用土壤为美国加州大学盆栽混合类型 C 土。为了减少液体飞溅、卷扬的影响和雾滴接触地面后的反弹,风洞地面铺有人造草皮作为虚拟地面。试验系统原理如图 3 所示。选择 Pyranine (D & C, 绿色, 8 号) 荧光示踪剂与清水按照 0.3 g/L 的浓度配比后作为喷雾介质。喷雾完成后,把聚乙烯线、目标植物和聚酯薄膜卡分别放置在不同的自封袋中,测试时加入 60 mL 的去离子水充分振荡洗涤,洗脱液由校准过的荧光分析仪(Turner-Sequia, 型号 450, 美国)测定荧光剂含量。

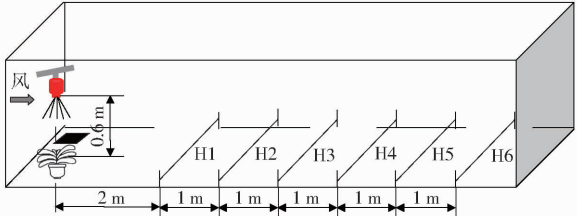


图 3 测试农药雾化后分配过程的风洞试验系统原理图
Fig. 3 Schematic diagram of wind tunnel measuring layout chart of distribution of pesticide

在体积中径、喷雾角、雾滴速度、流量、喷头高度、风速、植物类型、生长阶段(用叶面积表示)等不同参数下,定量测试农药雾化后的分配过程,试验参数设置见表 1。测试过程中室温恒定,每组试验重复 3 次,取其平均值作为最终数据。

表 1 农药喷施过程中农药沉积试验的 8 因素 3 水平试验设计

Tab. 1 Eight-factor and three-level experiment design to measure pesticide deposition for distribution of pesticide								
水平	因素							
	体积中径/ μm	喷雾角/ (°)	雾滴速度/ (m·s ⁻¹)	流量/ (L·min ⁻¹)	喷头高度/ cm	风速/ (m·s ⁻¹)	植物类型	叶面积/cm ²
1	181	80	8	0.48	40	2	苦苣菜	15
2	293	110	14	0.84	60	4	棉花	135
3	445	130	20	1.20	80	6	稗草	300

2.2 测试系统及技术

喷头雾化产生的雾滴粒径由安装 R7 镜头的 Sympatec HELOS VARIO Helios 激光粒度仪(Sympatec GmbH, 德国)进行测试(0.5 ~ 3 500 μm 的动态尺寸范围)^[28]。喷雾角由牛津激光成像系统(Oxford, 英国)和图像分析系统(Image Pro Plus, 英国)进行测试^[29]。

粒子图像测速(Particle image velocimetry, PIV)技术所获得的粒子图像信号是二维的,从粒子图像中获取速度信息研究的是 2 个离散的图像信号的相似程度,因此图像的匹配问题即二维相关函数的形式非常重要。相关测量作为图像处理中的主要手段,包括自相关与互相关。在 PIV 技术的图像处理方法中,互相关法优于自相关法,它既可以精确地重

建粒子图像的位移场,也可以自动识别位移方向^[30]。利用互相关法显著提高 PIV 精度的有效途径是跨帧(Frame straddling)技术。

本文的雾滴速度在 PIV 系统上采用跨帧技术进行测试。跨帧技术显著提高了 PIV 精度,解决了记录两幅时间间隔很小(微秒量级)图像的问题,它通过控制激光脉冲与电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)摄像机的同步和延时,使第 1 个光脉冲在时序上位于第 1 帧即将结束的位置,而第 2 个光脉冲位于第 2 帧刚刚开始的位置,使 2 个光脉冲的时间间隔缩小到 10 μs 量级,明显改善 PIV 互相关技术的测速上限,目前可实现 100 m/s 左右的速度测量。因此,跨帧技术在粒子图像测速系统上的应用大大缩短了两帧之间的时间间隔,增加了测速

范围^[31]。跨帧技术采用二维 PIV 测试系统实现,该系统由高速数字摄像机 (Oxford, Photron Fastcam Ultima 512, 英国)、铜氙脉冲激光仪 (Oxford, LS20-50, 英国)、脉冲发生器 (BNC model 500, Berkely Nucleonisc Corp) 和数据分析软件 (VidPIV 4.0) 组成。摄像机对图像采集速度设置为 2 000 f/s 来实现图像的最大分辨率 (512 像素 × 512 像素)。脉冲发生器实现激光脉冲和摄像机工作时序的完全同步。数据分析软件为粒子图像测速软件,通过它实时控制系统的数据采集、处理和图像显示并完成相关分析。

图 4 所示为本文测试雾滴速度采用跨帧技术的系统原理图。常规技术只能拍摄雾滴的流场分布,由于采集连续图像之间的运动太大以致于无法测量雾滴速度,因此不能取得雾滴速度的具体值。使用脉冲发生器使双脉冲激光分别工作在 CCD 摄像机第 1 帧脉冲的最后以及第 2 帧脉冲的开始,即镜头帧的图像只有当激光脉冲器打开时才可见,当镜头帧结束时激光发出一束短脉冲光线,而下一帧开始时发出另一束短脉冲光线,所以图像之间的时间就是激光脉冲之间而不是摄像机图像之间的时间。从图 4 可见,摄像机原本的图像采集速度为 2 000 f/s,即连续图像之间的时间间隔为 500 μs,使用跨帧技术后,实现了图像采集速度 25 000 f/s,即帧 1 和帧 2 连续图像对之间时间间隔为 40 μs。可见,跨帧技术的使用显著提高了图像采集速度。

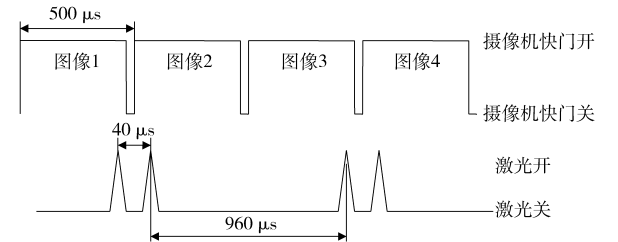


图 4 测试雾滴速度采用的跨帧技术原理图
Fig.4 Schematic diagram of frame straddling technique used to measure droplet velocity

2.3 计算方法

喷雾过程中,雾滴的随风飘移部分质量用 S_d 表示,算法为用飘移的示踪剂测试量除以喷头输出量 (喷施的示踪剂的总量)^[32]。

喷雾过程中,沉积到靶标植物的农药部分质量用 B_d 表示,即沉积到靶标植物的示踪剂测试量占喷头输出量 (喷施的示踪剂的总量) 的百分比。

$$B_d = \frac{IV}{A_R CS} \times 100\%$$

(1)

式中 I ——由荧光分析仪得到的质量浓度,μg/L
 V ——洗脱液体积,L

A_R ——理论施用量,L/m²
 C ——示踪剂质量浓度,μg/L
 S ——目标植物表面积,cm²

喷雾过程中,沉积到地面的农药部分质量用 T_d 表示。

显然从农药施用的分配过程分析可知

$$S_d + B_d + T_d = 100\%$$

(2)

3 结果与分析

农药喷施分配过程中,通过对比测试雾滴粒径、喷雾角、雾滴速度等喷头性能参数,流量、喷头高度等操作参数,风速等气象参数和植物类型、生长阶段等靶标参数与农药在地面、植物、大气 (飘移) 等部分的沉积比例的关系,得到结果如图 5 所示。

由图 5a 可知,雾滴粒径与不同部分农药分配比例显著相关,当雾滴粒径分别为 181、293、445 μm 时,根据美国农业工程师协会制订的雾谱标准,分别为细、中等和粗雾滴,对应农药在植物上的沉积比例分别为 12.3%、15.2% 和 16.9%,变化不大,而地面上和大气中随风飘移部分的比例变化剧烈,地面的沉积比例分别为 57.7%、79.0% 和 82.3%,大气的农药比例分别为 30.0%、5.8% 和 0.8%。因此,雾滴粒径大,会有更多的雾滴沉积到地面 (土壤) 中,造成农药的浪费和环境的潜在污染;雾滴粒径小,本身质量轻,在空气中悬浮、顺风飘失的可能性更高。

由图 5b 可知,喷雾角对于不同部分农药分配比例的影响不大,当喷雾角分别为 80°、110° 和 130° 时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 16.5%、13.8% 和 15.2%,地面的沉积比例分别为 78.7%、80.8% 和 79.0%,大气中随风飘移的农药比例分别为 4.8%、5.4% 和 5.8%。喷雾角度的确定更多是为了保证雾滴的分布和覆盖范围,对环境的影响不显著。

由图 5c 可知,雾滴速度与不同部分农药分配比例的关联不大,当雾滴速度分别为 8、14、20 m/s 时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 16.1%、15.0% 和 15.2%,地面的沉积比例分别为 75.0%、77.7% 和 79.0%,大气中随风飘移的农药比例分别为 8.9%、7.3% 和 5.8%。雾滴一旦从喷头释放,就会在空气中下降,由于阻力和周围气流的作用,它的速度逐渐减小。速度快的雾滴很快失去初始速度而达到最终速度,速度慢的雾滴在达到最终速度之前会运动更远距离,所以速度快的农药雾滴在大气中随风飘移的比例要低于速度慢的雾滴。

由图 5d 可知,流量对于不同部分农药分配比例的影响不大,当流量分别为 0.48、0.84、1.20 L/min

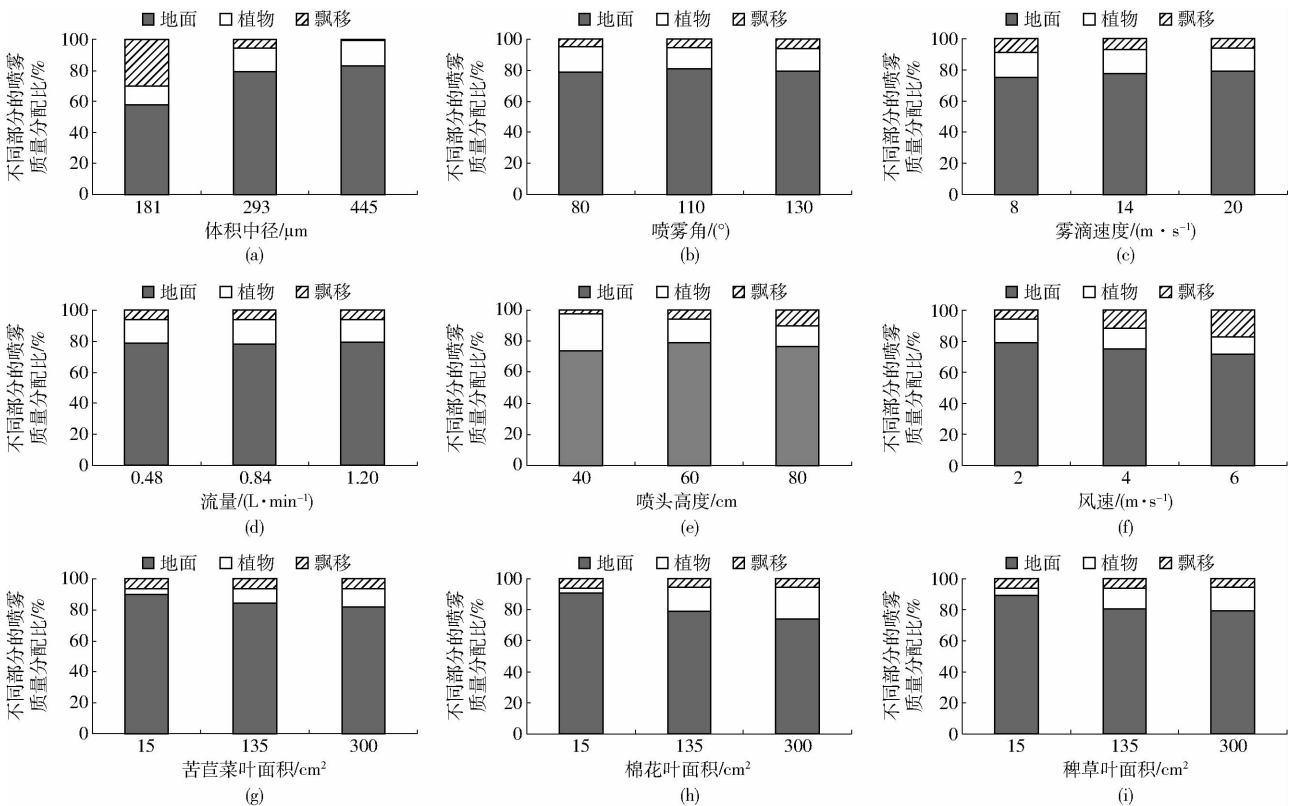


图 5 不同因素对地面、植物和飘移等部分农药分配比例的影响

Fig. 5 Influence of various factors on spray distributions (fractions of spray deposited on ground, plant and drift)

时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 15.1%、15.5% 和 15.2%,地面的沉积比例分别为 78.9%、78.3% 和 79.0%,大气中随风飘移的农药比例分别为 5.9%、6.0% 和 5.8%。流量主要影响喷雾持续作业时间,对环境的影响不显著。

由图 5e 可知,喷头高度对于不同部分农药分配比例的影响显著,当喷头高度分别为 40、60、80 cm 时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 23.5%、15.2% 和 13.3%,地面的沉积比例分别为 74.1%、79.0% 和 76.5%,大气中随风飘移的农药比例分别为 2.4%、5.8% 和 10.2%。当喷头高度越大,喷头与喷雾区域间的距离越大时,空气中的农药悬浮沉积(飘移)越多,对环境的污染越严重。因此,不要在高于喷头制造商建议的高度进行喷雾,一般推荐喷头离靶标植物的高度为小于 60 cm。

由图 5f 可知,风速对于不同部分农药分配比例的影响也是显著的,当风速分别为 2、4、6 m/s 时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 15.2%、13.4% 和 11.1%,地面的沉积比例分别为 79.0%、75.1% 和 71.5%,大气中随风飘移的农药比例分别为 5.8%、11.5% 和 17.4%。在影响农药飘移的气象条件中,风速是主要因素。随着风速的增加,空气中的农药悬浮沉积(飘移)的趋势越明显。由此产生的环境污染越严重,而在植物靶标上的有效沉积越

少。通常风速在一天中经常会发生变化,因此,在清晨和傍晚风速比较小的时候进行喷雾作业能取得更好的防治效果,付出更少的环境代价。

由图 5g 可知,植物生长阶段对于不同部分农药分配比例的影响是显著的,当苦苣菜叶面积分别为 15、135、300 cm^2 时,对应农药在植物上的沉积比例分别为 3.5%、9.7% 和 12.1%,在地面的沉积比例分别为 89.9%、84.0% 和 81.7%;当棉花叶面积分别为 15、135、300 cm^2 时(图 5h),对应农药在植物上的沉积比例分别为 2.7%、15.2% 和 20.7%,在地面的沉积比例分别为 90.8%、79.0% 和 73.8%;当稗草叶面积分别为 15、135、300 cm^2 时(图 5i),对应农药在植物上的沉积比例分别为 4.4%、13.5% 和 14.8%,在地面的沉积比例分别为 89.2%、80.4% 和 79.3%。当植物生长阶段越靠后,叶面积越大,沉积在植物上的农药比例越高,而在地面的沉积比例越低,空气中的农药悬浮沉积(飘移)变化不明显。3 种植物中,棉花随着植物生长阶段的变化,农药在植物上的沉积增加幅度最大。

喷头性能和操作、气象参数与农药在地面、植物、大气(飘移)等部分的沉积比例的相关分析见表 2。从表 2 中可以看出,雾滴粒径与农药在地面上的沉积比例呈极显著正相关关系(相关系数为 0.45, $p < 0.01$),雾滴粒径与植物的沉积比例呈显著

正相关关系(相关系数为 0.19, $p < 0.05$), 雾滴粒径与农药在空气中的飘移比例呈极显著负相关关系(相关系数为 -0.57, $p < 0.01$), 农药药液在离开喷头向靶标运动的过程中, 当雾滴粒径增大时, 农药在地面上的沉积明显增多, 在植物上的沉积也增多, 但是大雾滴不易受气流影响, 减少了飘移。喷头高度对农药在地面上的沉积比例影响不大($p > 0.05$), 喷头高度与农药在植物的沉积比例呈极显著负相关关系(相关系数为 -0.29, $p < 0.01$), 喷头高度与农药在空气中的飘移比例呈极显著正相关关系(相关系数为 0.35, $p < 0.01$), 喷头到靶标距离增大, 农药在植物上的沉积减少, 更容易随风飘移, 即飘移增多。风速与农药在地面和植物上的沉积均呈显著负相关关系(相关系数分别为 -0.12 和 -0.18, $p < 0.05$), 风速与农药在空气中的飘移比例呈极显著正相关关系(相关系数为 0.41, $p < 0.01$), 过高的风速会造成严重的雾滴飘移, 降低在植物上的靶标沉积量。植物生长阶段与农药在地面上的沉积呈极显著负相关关系(相关系数为 -0.84, $p < 0.01$), 与农药在植物上的沉积比例呈极显著正相关关系(相关系数为 0.81, $p < 0.01$), 与农药在空气中的飘移呈显著负相关关系(相关系数为 -0.74, $p < 0.05$)。苦苣菜和棉花为阔叶作物(属于双子叶), 稗草为禾本科杂草(属于单子叶), 对于这 3 种植物, 植物类型对于农药在不同部分的沉积比例影响并不显著, 但是叶面积不同, 即植物生长阶段不同, 对于农药的沉积比例有显著影响。喷施除草剂时, 通过调整喷雾高度、选择产生合适雾滴粒径的喷头、确定适宜的风速, 减少药剂在单子叶作物叶片上的沉积, 增加在双子叶靶标杂草上的沉积量, 提高除草剂的利用效率。在本文所选取设置的参数范围内, 喷雾角、雾滴速度、流量和植物类型对于农药各部分的沉积比例

影响不大。

4 结论

本文将农药喷施后输运去向分为 3 方面: 植物(靶标)、地面(土壤)和大气(飘移), 并进行了喷头性能(雾滴粒径、喷雾角、雾滴速度)、操作条件(流量和喷头高度)、气象环境(风速)、靶标植物(植物类型、生长阶段)等不同参数下农药在植物、地面和大气等不同部分的沉积比例试验, 得到如下结论:

(1) 喷雾角、雾滴速度、流量等参数对于植物、地面和大气等不同部分农药分配比例的影响不大。雾滴粒径、喷头高度、风速对于植物、地面和大气等不同部分农药分配比例的影响显著, 选择不同的参数, 将导致农药在植物上的有效沉积明显不同, 也会引起农药在地面和大气等的无效沉积明显不同, 这对于提高农药防治病虫害效果、减少环境污染至关重要, 如附近存在鱼塘、敏感作物、水源等, 应使用可产生粗雾滴的喷头、适当降低喷头高度或选择风速小的时段来减少农药在空气中飘移部分的比例。

(2) 当喷雾高度由 40 cm 提高到 80 cm 时, 农药在植物上的沉积减少了 43%, 而在空气中飘移部分的比例则上升了 3.21 倍。因此, 应尽量使喷雾高度为 40 ~ 60 cm, 以确保农药在植物上的沉积, 避免其在大气中的飘移。当风速由 2 m/s 提高到 6 m/s 时, 农药在植物上的沉积减少了 27%, 而在空气中飘移部分的比例则上升了 2 倍。因此, 在风速为 1 ~ 2 m/s 时, 适合喷施农药; 风速为 2 ~ 4 m/s 时, 适合喷施杀菌剂和杀虫剂, 不适合喷施除草剂, 此时容易引起飘移、危害周围敏感作物; 当风速大于 4 m/s 时, 避免施药。

(3) 当雾滴粒径越大, 在地面和植物上沉积部分的比例越大, 在空气中飘移部分的比例越小, 当雾滴粒径由 181 μm 增大到 445 μm 时, 农药在植物上的沉积增加了 34.1%, 地面上的沉积比例增加了 43.3%, 空气中飘移部分的比例降低为原来的 1/37.5。当喷施土壤活性除草剂等农药时, 应选择产生较大的雾滴粒径, 以增加在其地面(土壤)上的沉积比例。根据“生物最佳粒径原理”, 悬浮在空气中的雾滴有助于在昆虫振翅时农药沿虫体各方向的附着, 当防治蝗虫这样大面积的虫害时, 增加农药在空气中飘移部分的比例可以提高防治效果, 所以, 较小的雾滴对于飞行类害虫的防治更加有效。

(4) 靶标植物的生长阶段越靠后, 叶面积越大, 农药在植物上的沉积比例越高, 在地面上沉积部分的比例越低, 而在空气中飘移部分的比例变化不明显。当叶面积由 15 cm^2 变化到 300 cm^2 时, 农药在苦

表 2 不同参数与农药在地面、植物、大气等部分沉积比例的相关分析
Tab.2 Correlations between different factors and spray distribution

项目	影响因子	相关系数		
		地面	植物	飘移
喷头性能	雾滴粒径	0.45 **	0.19 *	-0.57 **
	喷雾角	0.05	0.08	0.06
	雾滴速度	0.11	0.14	0.18
操作条件和气象环境	流量	0.07	0.11	0.13
	喷头高度	0.17	-0.29 **	0.35 **
	风速	-0.12 *	-0.18 *	0.41 **
靶标植物	植物类型	-0.16	0.17	-0.23
	生长阶段	-0.84 **	0.81 **	-0.74 *

注: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ 。

苣荬菜、棉花和稗草上的沉积比例分别增大了 2.5 倍、6.7 倍和 2.4 倍,其中,棉花随植物生长阶段的变化在植物上农药的沉积增加幅度最大。喷施除草剂时,应尽量减少药剂在单子叶作物叶片上的沉积,增加在双子叶靶标杂草上的沉积量。同时,从植物学

角度而言,植物处于不同的生长阶段对药剂的抵抗能力也不同,一般在生长阶段初期对外界不良环境的抵御力都不是很强,容易发生药害,此时期应尽可能少施药。

参 考 文 献

1 FOCKS A, HORST M T, BERG E V D, et al. Integrating chemical fate and population-level effect models for pesticides at landscape scale: New options for risk assessment[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 280(14):102 – 116.

2 COUPE R H, CAPEL P D. Trends in pesticide use on soybean, corn and cotton since the introduction of major genetically modified crops in the United States [J]. *Pest Management Science*, 2016, 72(5):1013 – 1022.

3 郑加强,徐幼林. 可持续发展的精确林业思想研究[J]. *南京林业大学学报:人文社会科学版*,2004, 4(3):26 – 30.

ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Study on precision forestry from sustainable developments perspective[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Humanities and Social Sciences Edition*, 2004, 4(3):26 – 30. (in Chinese)

4 袁会珠,郑加强,何雄奎. 农药使用技术指南[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

5 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W Clint,等. 微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(1):15 – 22. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160103&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.003.

WANG Ling, LAN Yubin, HOFFMANN W Clint, et al. Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):15 – 22. (in Chinese)

6 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140416&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.016.

LI Hui, QI Lijun, WANG Pei. 3-D simulation for airflow field and droplets deposition of hanging coldsprayer[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4):103 – 109. (in Chinese)

7 邱白晶,王立伟,蔡东林,等. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响[J]. *农业工程学报*,2013,29(24):25 – 32.

QIU Baijing, WANG Liwei, CAI Donglin, et al. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(24):25 – 32. (in Chinese)

8 宋坚利,王波,曾爱军,等. 雾滴在水稻叶片上的沉积部位分析与显微试验[J/OL]. *农业机械学报*,2013, 44(4):54 – 58,76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130410&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.010.

SONG Jianli, WANG Bo, ZENG Aijun, et al. Deposition part analysis and microscopic test of spray droplets on rice leaves[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(4):54 – 58,76. (in Chinese)

9 BIRKVED M, HAUSCHILD M Z. PestLCI—A model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198(3 – 4):433 – 451.

10 DIJKMAN T J, BIRKVED M, HAUSCHILD M Z. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(8):973 – 986.

11 戴奋奋,袁会珠. 植保机械与施药技术规范[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2002.

12 SANCHEZBAYO F, GOKA K. Pesticide residues and bees—a risk assessment[J]. *Plos One*, 2014, 9(4):482 – 497.

13 LARI S Z, KHAN N A, GANDHI K N, et al. Comparison of pesticide residues in surface water and ground water of agriculture intensive areas[J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2014, 12(1):173 – 183.

14 DORR G J, WANG S, MAYO L C, et al. Impaction of spray droplets on leaves: influence of formulation and leaf character on shatter, bounce and adhesion[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56:Article 143.

15 张靖. 喷雾助剂提高农药对靶沉积性能与增效作用研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.

ZHANG Jing. Research on mechanism of enhancing deposition and synergistic effect of the spray adjuvants on pesticide[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015. (in Chinese)

16 徐德进,徐广春,许小龙,等. 施液量、雾滴大小、叶片倾角及助剂对农药在稻叶上沉积的影响[J]. *西南农业学报*,2015, 28(5):2056 – 2062.

XU Dejin, XU Guangchun, XU Xiaolong, et al. Effect of application volume, droplet size, rice leaf incline angle and spray adjuvant on pesticide deposition [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(5):2056 – 2062. (in Chinese)

17 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)
- 18 王昌陵,何雄奎,王潇楠,等. 无人植保机施药雾滴空间质量平衡测试方法[J]. 农业工程学报,2016, 32(11):54–61.
WANG Changling, HE Xiongkui, WANG Xiaonan, et al. Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 54–61. (in Chinese)
- 19 杨洲,牛萌萌,李君,等. 不同侧风和静电电压对静电喷雾飘移的影响[J]. 农业工程学报,2015, 31(24):39–45.
YANG Zhou, NIU Mengmeng, LI Jun, et al. Influence of lateral wind and electrostatic voltage on spray drift of electrostatic sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(24): 39–45. (in Chinese)
- 20 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120610&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010.
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. (in Chinese)
- 21 WANG S, DORR G J, KHASHEHCHI M, et al. Performance of selected agricultural spray nozzles using particle image velocimetry[J]. Journal of Agricultural Science & Technology, 2015, 17(3):601–613.
- 22 DORR G J, KEMPTHORNE D M, MYAO L C, et al. Towards a model of spray-canopy interactions: interception, shatter, bounce and retention of droplets on horizontal leaves[J]. Ecological Modelling, 2014, 290:94–101.
- 23 DORR G J, FORSTER W A, MAYO L C, et al. Spray retention on whole plants: modelling, simulations and experiments[J]. Crop Protection, 2016, 88:118–130.
- 24 SALYANI M, KOO Y M, SWEEB R D. Spray application variables affect air velocity and deposition characteristics of a tower sprayer[J]. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, 2015, 35(1):416–425.
- 25 HANAN J, ROOM P. Floradig user manual, CPAI[M]. Brisbane, QLD: The University of Queensland, 2002.
- 26 HANAN J S, WANG Y. Floradig: a configurable program for capturing plant architecture [J]. International Workshop on Functional, 2011,4:407–411.
- 27 TONY C, BILL D, REBECCA M. A new glyphosate resistant weed species confirmed for northern New South Wales and the world: common sowthistle (*Sonchus oleraceus*)[C]//Nineteenth Australasian Weeds Conference, 2014:206–209.
- 28 王双双,何雄奎,宋坚利,等. 农用喷头雾化粒径测试方法比较及分布函数拟合[J]. 农业工程学报,2014, 30(20):34–42.
WANG Shuangshuang, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Measurement comparison and fitted distribution equation of droplet size for agricultural nozzles[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20):34–42. (in Chinese)
- 29 LESNIK M, STAJNKO D, VAJS S. Interactions between spray drift and sprayer travel speed in two different apple orchard training systems[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(9):3017–3028.
- 30 张慧春,周宏平,郑加强,等. 喷头雾化性能及雾滴沉积可视化模型研究[J]. 林业工程学报,2016, 1(3):91–96.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. A study of spray nozzle atomization performance and droplet deposition visual model[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(3):91–96. (in Chinese)
- 31 RAFFEL M, WILLERT C E, KOMPENHANS J. Particle image velocimetry: a practical guide [M]. Berlin, Heiderbery: Springer, 2013.
- 32 张慧春,DORR G J,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, DORR G J, 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)