

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.004

3WGZ-500型喷雾机对靶喷雾系统设计与试验

金鑫¹ 董祥² 杨学军² 严荷荣²

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了提高果园喷雾的农药利用率,减少因农药地面流失而造成的环境污染,针对果园传统连续喷雾作业时存在过量喷洒和树间无效喷雾的特点,基于3WGZ-500型风送自走式喷雾机设计了自动对靶喷雾系统。该系统采用超声波传感器测距方式探测果树(传感器量程为0.35~2 m,发射角为60°,喷雾机两侧分别以15°均布5个)。根据传感器信号,控制与相应位置喷头对应的上、中、下3组管路电磁阀的开合,实现自动对靶喷雾。以5 a树龄的苹果园为试验对象,在喷雾压力0.5 MPa时,开展不同作业速度(1.3、1.7、4.5、7.2 km/h)下果树冠层的有、无对靶喷雾试验,并与传统喷雾机喷药对照,结果表明:作业速度对3WGZ-500型喷雾机有、无对靶喷雾时的农药利用率影响不大,自动对靶喷雾系统开启时的农药利用率为35.8%,比关闭时的27.6%提高了29.7%,较传统喷雾机18.7%的农药利用率提高了91.4%,可大幅减少农药用量;3WGZ-500型喷雾机在不同作业速度的农药地面流失率十分接近,有对靶时地面流失率平均13.3%,相对无对靶时的18.86%降低了42%,说明对靶喷雾系统有效降低了对生态环境的污染。

关键词: 果园; 喷雾机; 对靶喷雾; 超声波探测; 试验

中图分类号: S493 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0021-07

Design and Experiment of Target Spraying System of 3WGZ-500 Sprayer

Jin Xin¹ Dong Xiang² Yang Xuejun² Yan Herong²

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

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

Abstract: In order to improve the pesticide application efficiency and reduce the agricultural chemicals lost in orchard spraying, an automatic target spraying system based on the 3WGZ-500 self-propelled sprayer was designed in view of excess spraying and ineffective spray at fruit trees clearances during traditional spray operation. Ten ultrasonic sensors were fixed on the two sides of the orchard sprayer at 15° intervals, which were used to measure the distance between the nozzles and sprayer targets. The sensor measure range was 0.35~2 m and emission angle was 60°. Based on the sensor signals, three channel solenoid valves by side were used to control the switch of nozzles at the corresponding position. The experiment was worked at the five years old apple orchard, test spray pressure was 0.5 MPa and operating speed was 1.3 km/h, 1.7 km/h, 4.5 km/h and 7.2 km/h respectively. The result showed that the operating speed had little effect on pesticide application efficiency at the condition of with target spraying system and without target spraying system. This target spraying system can reduce unnecessary spraying chemical pesticides. The pesticide application efficiency was 35.8% with target spraying system, which increased 29.7% compared to without target spraying system's 27.6% and increased 91.4% compared with traditional spray's 18.7%. The system can effectively reduce the pollution to the

收稿日期: 2015-12-29 修回日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405496)、河南省开放合作项目(152106000036)、国家国际合作专项(2013DFA71130)和土壤植物机器系统技术国家重点实验室开放课题项目(2014-SKL-04)

作者简介: 金鑫(1986—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备技术研究,E-mail: jx.771@sina.com

通信作者: 董祥(1982—),男,高级工程师,博士,主要从事智能化植保装备技术研究,E-mail: dx314@hotmail.com

environment. Ground loss rate at different operating speeds was proximity. The ground loss rate was 13.3% with target spraying system, which reduced by 42% compared to without target spraying system's 18.86%.

Key words: orchard; sprayer; target spray; ultrasonic sensor measurement; experiment

引言

自动对靶果树喷雾是实现高效低污染施药的一种重要方法,所谓对靶喷雾就是只对目标喷雾,对于非目标不喷雾或者尽可能少喷雾。对靶喷雾机械中,目标探测器是关键部分。美国于1987年将超声波传感器用于自动对靶喷药^[1],GIL等2007年研制的超声波自动对靶喷药系统能够节省58%的药液^[2]。STAJNKO等的超声波自动对靶喷药机能够省药48%^[3]。GIULIANI等使用光电传感器对靶标进行识别处理^[4]。一些学者把图像处理技术与喷雾技术相结合,根据作物形态的图像特征来优化喷洒控制,进一步提高了喷洒效率^[5-7]。西班牙学者将激光传感器应用于葡萄园的自动对靶^[8-9]。国内,江苏大学于2000年就开始了自动对靶喷雾的试验研究^[10],2002年中国农业大学针对树冠内风速的变化对靶标上农药沉积量的影响进行了试验研究^[11],并与2003年研制了红外探测果园自动对靶静电喷雾机,节省药液50%~75%^[12]。2010年胡天翔等对双目视觉技术在智能对靶喷雾中的应用进行了相关的试验研究,进一步提高了喷雾的精准度和效率^[13]。2012年翟长远等基于红外传感器研制了幼树靶标探测器^[14]。2014年,许林云等研制了激光对靶喷雾控制系统,对枣树喷药能够节省药液27.3%~81%^[15]。

对靶喷雾技术是目标物探测技术、喷雾技术和自动控制技术的结合。文献[16-17]报道,可用于植株目标探测的探测器有光电传感器、超声传感器、微波传感器和图像传感器等。其中图像传感器获取的信息量最大,能清晰识别作物形态和作物部位,为精确定位和精确控制提供控制信息。但目前图像处理技术的实际应用仅限于固定空间场合的作物病虫害监测,由于其价格昂贵、环境适应性差、信息处理速度慢等原因,尚未实际应用于移动式施药机械,所以图像处理和识别技术用于对靶喷雾,目前还未在实际中得到广泛的推广应用。微波探测技术由于受到通信等条件限制,加上控制技术复杂,使用经济性较差,尚不宜用于农业生产。超声探测技术的复杂性要低于其它探测技术,且可以简化控制电路,成本低,近年来超声波传感器的精度与信号反馈速度明显提高,故有商品化应用前景。超声波对靶喷雾农

药利用率提高技术及与传统喷雾方式的效用对比,在国内还未见详尽报道。本文以3WG-500型风送自走式果树喷雾机为平台,设计一套集成目标超声波探测、作业速度自动采集和喷头电磁阀调节的果树自动对靶喷雾系统,通过不同作业工况下的有、无对靶喷雾试验及与传统喷雾机施药情况对比,得出果树喷雾质量各指标的参数影响关系,对比分析对靶喷雾系统的施药效果与降污情况。

1 对靶喷雾系统组成与工作原理

1.1 自走式果树喷雾机

3WGZ-500型喷雾机是现代农装科技股份有限公司生产的一种风送自走式喷雾机,外形尺寸(长×宽×高)为3200 mm×1400 mm×1200 mm,整机净质量1200 kg(图1)。采用四轮驱动,四轮转向/两轮转向系统,行走底盘发动机11 kW。配套轴流风机额定转速2800 r/min,风量27000 m³/h,驱动发动机功率29.5 kW。药液箱容量500 L,喷雾泵采用JN-100A型柱塞泵,额定转速750 r/min,采用额定喷雾压力0.5~1.0 MPa的可旋转式空心圆锥雾喷头(意大利ARAG公司,型号F20011.900),单个喷头喷雾量1.6~2.8 L/min可调,喷雾机喷雾范围可达6 m。



图1 3WGZ-500型喷雾机

Fig.1 3WGZ-500 sprayer

1.2 自动对靶喷雾系统

为实现自动对靶喷雾功能,将喷雾机左右两侧的喷头分为上、中、下3组,安装对应的电磁阀分别进行控制。作业时,根据果树树冠形状,调整两侧探测器的安装角度,使之与树冠的上、中、下层相对应,使用高速电磁阀开关控制及嵌入式系统实时控制各组喷头的喷雾工况。当喷雾机正常工作时,车速约5 km/h,考虑到传感器及电磁阀的响应速度,设定电磁阀控制速率约10 Hz,即0.18 m为一个工作区间,在这个区间内有果树则打开电磁阀进行喷药。其控

制系统原理如图 2 所示,通过采集果树冠层信息,结合喷雾机行进速度,对靶喷雾系统对各喷头电磁阀发出指令,通过调节多路喷嘴的开闭,对果树进行喷雾作业。



图 2 控制系统原理图

Fig. 2 Diagram of control system principle

采用国产 NU40F30TR-3MVA 型超声波传感器采集植株靶标信息,相比于激光和红外测距,超声波具有不受阳光、灰尘、潮湿环境影响的特点,适合在阳光变化大及环境恶劣的田间进行作业。该型号超声波传感器量程为 0.35~2.50 m,发射角度约为 60°,输出 0~5 V 电压信号。喷雾机与果树最近距离约 1 m,最远约 2.5 m,距离在超声波传感器的工作范围内,同时果树的高度最高可达 2.5~3 m,因此在喷雾机的两侧分别以 15°角间隔均布 5 个传感器覆盖整个可能出现果树的高度范围,实际作业时考虑树形是纺锤形,传感器位置角度在此基础上略有调整。

超声波传感器对果树分上、中、下 3 段探测控制,通过对不同果树形态进行探测,得出准确的判断,提供给喷雾控制系统。喷雾控制系统接收到对靶系统的信号后,迅速作出判断,决定是上、中、下 3 段的喷头同时喷射,还是上或下、中各自喷射。通过调整喷头和探测器的工作参数和位姿,使喷雾有效面积更大,非有效喷雾面积尽可能地小。探测器及喷头安装位置与覆盖面如图 3、4 所示。



图 3 超声波传感器阵列

Fig. 3 Ultrasonic sensor array

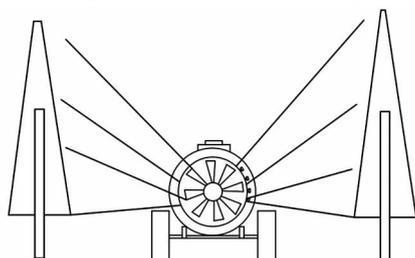


图 4 喷雾覆盖面示意图

Fig. 4 Spray surface of fruit tree

2 试验条件与方法

2.1 材料与仪器

材料:喷雾药液为质量分数 0.1% 的罗丹明 B (Alfa Aesar) 荧光剂水溶液;喷雾靶标为尼龙网 (50 mm × 50 mm, 2 500 目);水敏试纸 (Syngenta, 76 mm × 26 mm)。

仪器:荧光检测计 (美国 Turner Biosystems 公司,型号 Modulus™),用于测量荧光剂在喷雾靶标上的沉积量;雾滴覆盖率分析软件 (USDA ARS 自研软件,Depositscan);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)。

2.2 试验设计

于 2014 年 7 月中旬,在杨凌汇承果业公司的苹果园进行农药有效利用率测定 (图 5)。试验苹果品种为树龄 5 a 的嘎啦 (早熟品种),树形属于纺锤形,枝叶稀疏,行距 4 m,株距 1.5 cm,平均树高 3.22 m,作业行区间长度 110 m。试验期间天晴,风速为 1~1.5 m/s,温度为 30~32℃。

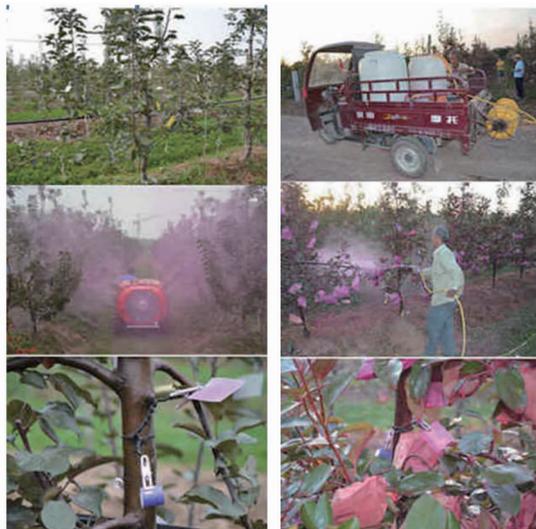


图 5 果树喷雾机试验现场图片

Fig. 5 Test site pictures of fruit tree sprayer

试验喷雾机 (3WGZ-500 型) 风送系统的风机转速为 2 800 r/min,风幕出口平均风速 25 m/s。喷雾使用出口直径 1.2 mm 空心圆锥雾喷头,喷雾压力为 0.5 MPa,喷头与树冠水平距离约 0.3 m,机具作业速度为 1.3、1.7、4.5、7.2 km/h。对当地常用的高压三缸柱塞泵配合手持式可调喷枪喷雾方式进行测试,与试验机型进行对比,喷雾压力 4.0 MPa (此为当地用户习惯使用压力值),为人工手工作业。试验前对喷头及对照喷雾机的喷雾量进行测定,结果如表 1。喷头分别在有对靶和无对靶条件

表1 喷雾作业工况

Tab.1 Conditions of spraying operation

喷雾机类型	作业速度/ (km·h ⁻¹)	喷雾压力/ MPa	施药量/(L·hm ⁻² ·m ⁻¹)	
			无对靶	有对靶
试验喷雾机	1.3	0.5	761	543
	1.7	0.5	621	450
	4.5	0.5	248	186
	7.2	0.5	140	112
对照喷雾机		4	1 417	

下进行喷雾作业测试,每组工况进行3次重复试验。

根据果园作业行长度和果树实际情况,确定作业行区间中段长度50 m(33棵)的区域为喷雾试验段,两侧各选取中间段3棵果树,每棵果树布置7个采样点,上层和下层各1个,中层5个(前、后、左、右和中部各1个),固定水敏试纸及雾滴采集网。如图6,将点1视为观测上部,点2、3、4、5、6视为观测中部,点7视为观测下部;将点3视为冠层前部,点1、2、4、6、7视为冠层中部,点5视为冠层后部。在作业行间及左右两侧相邻的各两行(共5行)地面上也布置水敏试纸及雾滴采集网,喷雾后用自封袋迅速收集并避光保存(图5)。

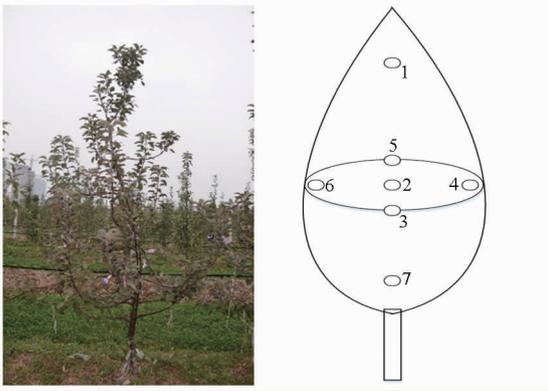


图6 布点取样位置图

Fig.6 Arrangement plan of sampling points

采集到的靶标尼龙网在中国农业机械化科学研究院的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其浓度并记录,然后计算出冠层上、中、下部单位面积靶标上的喷雾药液沉积量及地面药液的流失量。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。

2.3 施药质量计算方法

(1) 试验介质配制:根据喷雾机药箱容积大小,取定量的罗丹明B荧光示踪剂,用清洁水稀释成质量分数为0.1%的荧光剂水溶液,并适量留取于深色容器,以便在实验室内测定所配制的试验液荧光度与对应沉积量之间的函数关系。

(2) 在试验果园作业区域随机选取5~10棵苹果树,测量其高度,取平均值作为被试果园果树的高度。根据果树高度、种植行距、株距及树冠枝叶疏密情况,按每米果树高度200~600 L/(hm²·m)确定果园的施药量。

(3) 测量上述选取的各株果树树冠在前后方向长度(喷雾机前进方向)和左右方向宽度(垂直于前进方向)的最大尺寸作为椭圆的长短轴,计算椭圆面积作为各株果树在地面上的投影面积。用植物冠层分析仪在果树下方的前、后、左、右4个位置测定各果树的叶面积指数,取平均值作为该株果树的叶面积指数(LAI)。

(4) 在喷雾机作业行的左右对称位置随机选择6棵果树(左、右各3棵),在各株果树的上、中、下3层布置水敏试纸及雾滴采集网(水敏试纸用于测定雾滴的覆盖率,雾滴采集网用于收集沉积在网上的试验液,测定农药利用率)。在作业行间及左右两侧相邻的各两行的地面上也布置(铺放)水敏试纸及雾滴采集网,用于测定沉积到地面的药液量。

(5) 收集布置在果树上、中、下层及行间地面上的雾滴采集网,分别保存在不透光的密闭容器中,并标记。

(6) 在实验室内使用搅拌器和定量的去离子水将各雾滴采集网清洗0.5 h,直至荧光剂从滤布(纸)带上完全洗脱,然后利用荧光分析仪测定洗出液的荧光度,确定其沉积量,并计算出各雾滴采集网上沉积的荧光剂的量。上、中、下层滤布(纸)带上的荧光剂的量按单位面积计算后取平均值。根据每棵果树的叶子面积,计算出该棵果树上沉积的荧光剂量和单位面积上的沉积量。6棵果树单位面积上的沉积量的平均值作为试验区域果树单位面积上的沉积量;根据所喷的果树数量,计算出沉积在果树上的沉积量总量。

(7) 根据雾滴采集网面积、试验区域作物的总叶面积和地块面积,计算出沉积到作物叶面上和降落到地面的荧光剂的量。

(8) 计算公式为:农药利用率

$$\eta = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_1 ——试验区域内沉积在果树叶面上的有效物质量,g

m ——试验区域内喷洒出的有效物质总量,g
农药流失率

$$d_s = \frac{m_2}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中 m_2 ——试验区域内降落到地面(土壤)的有效物质量, g

农药飘移率

$$d_a = \frac{m_3}{m} \times 100\% \quad (3)$$

其中

$$m_3 = m - m_1 - m_2$$

式中 m_3 ——试验区域内飘失到空气中的有效物质量, g

3 试验结果与分析

3.1 雾滴沉积量

试验喷雾机在有无自动对靶时及对照喷雾机在单位面积果树上药液沉积平均量如图7所示。对于试验喷雾机,在相同喷雾压力下,无自动对靶作业速度1.3 km/h时,单位面积的雾滴沉积量最大,为107.44 L/(hm²·m);开启自动对靶作业速度为7.2 km/h时,每米树高沉积量18.23 L/(hm²·m)为各工况最小;由于喷雾压力一定,喷雾总量随着速度的增加而减少,图中试验喷雾机药液单位面积沉积量随着作业速度的增加而减小。对照喷雾机在植株冠层的沉积量为每米树高130.85 L/(hm²·m),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,且为人工作业,在果树上过量施药,沉积量大于试验喷雾机沉积量。试验喷雾机在开启自动对靶系统时作业的药液沉积量与无自动对靶时的沉积量比值小于3%,自动对靶系统对喷雾药液在果树上的沉积量没有明显影响。

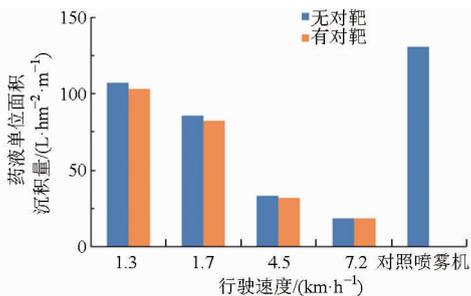


图7 喷雾药液在单位面积果树冠层的沉积量试验结果

Fig. 7 Test results of spray deposition on unit area of fruit trees

3.2 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。利用公式(1),根据各试验工况的喷雾量并结合果树冠层药液沉积量,获得了喷雾药液在果树冠层上农药利用率对比(图8)。试验喷雾机开启自动对靶时的农药利用率在各工况均大于没有开启自动对靶时;开启自动对靶作业速度为1.3 km/h时,农药利用率最高为38.44%,比没有开启自动对靶的28.53%提高了35%,自动对靶系统

对提高农药利用率起的作用最显著;自动对靶系统的使用,减少了果树空隙间的喷雾量,提高了农药利用率。自动对靶系统打开时农药利用率35.8%,比自动对靶系统关闭时的27.6%提高了29.7%。对照喷雾机采用高压三缸柱塞泵配用手持式可调喷枪,喷雾压力高,喷雾量大,且移动速度慢,有重复喷雾现象,因此单位果树上的施液量过大,药液从枝叶上流淌到地上,农药利用率只有18.7%。3WGZ-500型自走式果园喷雾机自动对靶系统关闭时的农药利用率比对照喷雾机提高了47.6%,3WGZ-500型喷雾机自动对靶系统打开时的农药利用率比对照喷雾机提高了91.4%。表明3WGZ-500型风送自走式果园喷雾机由于采用了自动对靶喷雾技术,有效地提高了农药利用率,可以大幅度减少农药使用量,减轻对农业生态环境的污染。

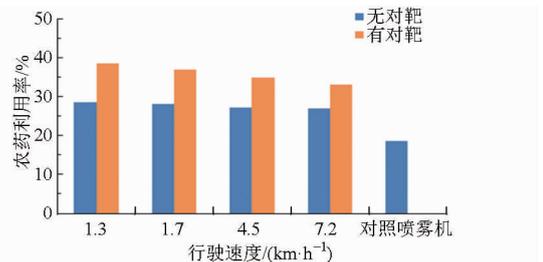


图8 喷雾药液在果树冠层的利用率试验结果

Fig. 8 Test results of spray utilization rate on unit area of fruit trees

通过搭载超声波传感器采集植株标靶信息与多路喷嘴电磁阀控制相结合的对靶喷雾系统,进行了3WGZ-500型喷雾机的对靶喷雾效果的对比试验(如上述试验),在表1的4种工况下,采用超声波对靶喷雾比无对靶连续喷雾分别节省药量28.6%、27.5%、25.0%和20.0%,与传统高压手持式对照喷雾方式相比平均节省药量77.2%。因此将超声波对靶喷雾系统应用于现有喷雾机能够有效提高农药利用率和降低用药量。

3.3 雾滴覆盖率

采用水敏试纸采集的果树上、中、下冠层喷雾雾滴覆盖率对比如图9所示,将叶面面向喷雾机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。图中显示雾滴在果树冠层的中层覆盖率较大,在上、下层较小;雾滴在果树冠层叶子正面的覆盖率大于叶子背面。

图10为果树前、中、后冠层喷雾雾滴覆盖率试验结果。图中显示雾滴在果树冠层的前层覆盖率较大,在中、后层较小;雾滴在果树冠层叶子正面的覆盖率大于叶子背面。

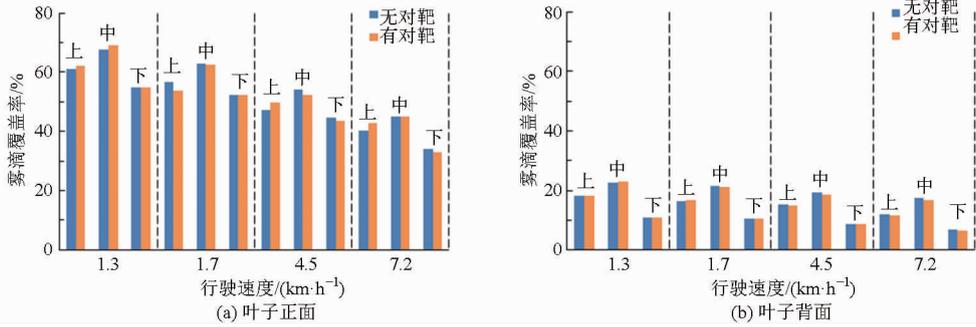


图9 果树上、中、下冠层喷药雾滴覆盖率试验结果

Fig. 9 Test results of spray coverage for the upper, middle and lower canopy of fruit trees

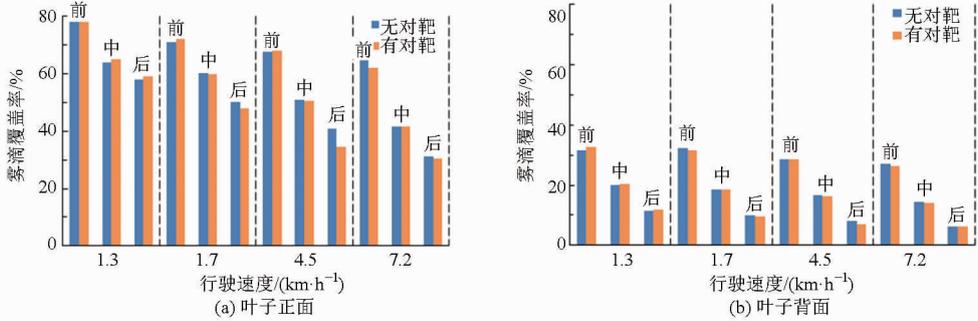


图10 果树前、中、后冠层喷药雾滴覆盖率试验结果

Fig. 10 Test results of spray coverage for the front, middle and rear canopy of fruit trees

分别对叶子正面与背面的4种试验工况进行比较发现,在1.3 km/h的作业速度下喷药雾滴覆盖率最好,作业速度7.2 km/h时的覆盖率较差,主要原因是作业速度1.3 km/h时单位面积喷量较大。相同作业速度时,叶子正面与背面有对靶的雾滴覆盖率与无对靶的雾滴覆盖率相差分别小于4%和3%,说明自动对靶系统对雾滴覆盖率无明显影响。

3.4 农药飘移率

试验喷雾机的4种工况作业及对照喷雾机常规作业下的农药飘移率对比试验结果如图11所示。在相同条件下,试验喷雾机在不同作业速度下的农药飘移率十分接近,有对靶时飘移率平均为50.91%,低于无对靶时的53.52%,降低了5%。开启自动对靶系统能够有效减少喷雾液滴的飘移。对照喷雾机飘移率为42.46%,小于试验喷雾机,这是由于对照喷雾机为人工施药,喷头贴近靶标叶面直

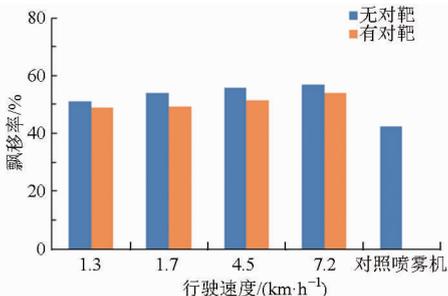


图11 喷雾农药飘移率试验结果

Fig. 11 Test results of drift rate for pesticide spraying

接喷雾,雾滴不容易飘移。

3.5 地面流失率

对果树冠层喷雾,试验喷雾机的4种工况作业及对照喷雾机的常规喷药,地面流失率的对比如图12所示。试验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。在相同条件下,试验喷雾机在不同作业速度的流失率十分接近,有对靶时地面流失率平均13.30%,低于无对靶时的18.86%,降低了42%。开启自动对靶系统时喷雾机在两树冠层间隙间停止喷雾,能够减少雾滴的流失量。对照喷雾机喷施的药液量过大,很大部分药液在喷到叶面后流到地面,地面流失率为38.89%。对比其在果树冠层的沉积率,可以认为对照喷雾机没有能够进行有效施药,对土壤环境及地下水会造成极大的污染。

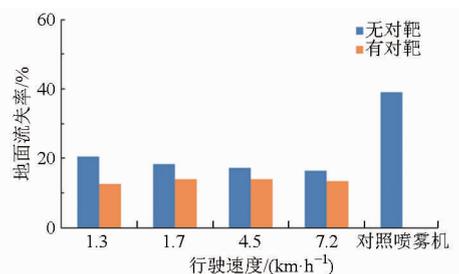


图12 喷雾药液在果树冠层地面流失率试验结果

Fig. 12 Test results of ground drain rate for spraying under canopy of fruit trees

4 结论

(1) 设计了一套以 3WGZ-500 型风送自走式果园喷雾机为载体, 由 NU40F30TR-3MVA 型超声波传感器、多路喷嘴及对应的电磁阀和嵌入式控制系统为主要组成部分的对靶喷雾系统。系统利用超声波传感器采集果树冠层信息, 结合喷雾机行进速度, 采用嵌入式控制系统实时调节各喷嘴电磁阀的开关, 实现了果树的对靶喷雾。

(2) 以苹果园 5 a 树龄的果树为作业对象, 开展了 4 种工况下的有、无对靶喷雾和对照喷雾试验, 结果表明: 在试验范围内, 随着试验喷雾机行进速度的增加, 单位面积每米树高的药液雾滴沉积量减小, 对

靶喷雾系统开启与否对其影响不大; 3WGZ-500 型喷雾机自动对靶系统开启时农药利用率为 35.8%, 比其关闭时的 27.6% 提高了 29.7%, 自动对靶系统打开时的农药利用率比传统喷雾(对照喷雾机)提高了 91.4%, 可有效减少农药用量和降低生态污染; 相同工况下果树冠层的中层叶面雾滴覆盖率较上、下层大, 叶子正面覆盖率较背面大, 有无对靶喷雾雾滴覆盖率之差小于 4%, 随着试验喷雾机作业速度的增加, 果树冠层叶面雾滴覆盖率减小; 试验喷雾机有对靶时地面流失率平均为 13.3%, 低于无对靶时的 18.86%, 降低了 42%, 对照喷雾机喷施的药液量过大, 地面流失率为 38.89%; 试验喷雾机在不同作业速度下的农药飘移率十分接近, 平均为 50% 左右。

参 考 文 献

- GILES D K, DELWICKE M J, DODD R B. Control of orchard spraying based on electronic sensing of target characteristics[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(6): 1624-1630.
- GIL E, ESCOA A, ROSELL J R, et al. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors[J]. *Crop Protection*, 2007, 26(8): 1287-1297.
- STAJNKO D, BERK P, LESNIK M, et al. Programmable ultrasonic sensing system for targeted spraying in orchards[J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 15500-15519.
- GIULIANI R, MAGNSNINI E, FRAGASSA C, et al. Ground monitoring the light shadow windows of a tree canopy to yield canopy light interception and morphological traits[J]. *Plant Cell and Environment*, 2000, 23(8): 783-796.
- LEBLANC S, CHEN J, FERNANDES R, et al. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(3): 187-207.
- ROVIRA-MÁS F, ZHANG Q, REID J. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoisimages[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(3): 251-259.
- ANDERSEN H, RENG L, KIRK K. Geometric plant properties by relaxed stereo vision using simulated annealing[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 49(2): 219-232.
- JOAN Ramon Rosell Polo, RICARDO Sanz, JORDI Llorens, et al. A tractor-mounted scanning LiDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: a comparison with conventional destructive measurements[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 102(2): 128-134.
- JOAN R Rosell, JORDI Llorens, RICARDO Sanz, et al. Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1505-1515.
- 袁湘月, 吴春笃, 储金宇, 等. 果园自动对靶喷雾机的研制-对靶喷雾技术的研究[J]. *安徽技术师范学院学报*, 2004, 18(1): 49-52.
- 何雄奎, 曾爱军, 何娟. 果园喷雾机风速对雾滴的沉积分布影响研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 75-77.
- 何雄奎, 严荷荣, 储金宇, 等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 78-80.
- 胡天翔, 郑加强, 周宏平. 基于双目视觉的树木图像测距方法[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(11): 158-162.
HU Tianxiang, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping. Measurement method of depth information of tree images based on binocular vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(11): 158-162. (in Chinese)
- 翟长远, 赵春江, 王秀, 等. 幼树靶标探测器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 18-22.
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Xiu, et al. Design and experiment of young tree target detector[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 18-22. (in Chinese)
- 许林云, 张昊天, 张海锋, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 1-9.
XU Linyun, ZHANG Haotian, ZHANG Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(22): 1-9. (in Chinese)
- 陈志刚, 王玉光, 杜彦生, 等. 精确对靶喷雾施药的靶标微波探测试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 28(4): 364-368.
CHEN Zhigang, WANG Yuguang, DU Yansheng, et al. Microwave target detecting experiment for precise pesticide spraying[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(4): 364-368. (in Chinese)
- 宋淑然, 陈建泽, 洪添胜, 等. 果园柔性对靶喷雾装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 57-63.
SONG Shuran, CHEN Jianze, HONG Tiansheng, et al. Design and experiment of orchard flexible targeted spray device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(10): 57-63. (in Chinese)
- 刘雪美, 李扬, 李明, 等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 1-10.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 1-10. (in Chinese)