

果园施药技术研究进展

牛萌萌¹, 段洁利^{2*}, 方会敏¹, 杨洲^{3,4}, 朱正波¹

(¹山东省农业机械科学研究院, 济南 250100; ²华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510642;

³华南农业大学工程学院, 广州 510642; ⁴华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 水果产业一直是中国的传统优势产业, 实现水果生产机械化对促进水果产业持续健康发展具有重要意义。果园施药作为水果生产中的一个重要环节, 随着农药施用量的不断增加及人们对生态环境和食品安全问题的日益关注, 已成为需要注意的主要问题之一。文中讨论介绍了国内外先进的施药技术与理论, 分析了国内外果园施药机械与技术的研究进展, 指出了果园施药机械发展中存在的问题。为促进果园施药机械的创新发展, 笔者建议, 进一步做好农机农艺的结合, 多学科协同互助, 从新品种选育、种植模式到修剪管理全面统筹考虑, 才能更好地加快推进果园施药技术发展进程, 在实现机械化和自动化的前提下, 进一步提高智能化及信息化水平。

关键词: 果园; 施药技术; 施药机械; 农机农艺

中图分类号: S66

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2019)01-0103-08

Research progress in orchard chemical spraying technology

NIU Mengmeng¹, DUAN Jieli^{2*}, FANG Huimin¹, YANG Zhou^{3,4}, ZHU Zhengbo¹

(¹Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, Shandong, China; ²Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; ³College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China; ⁴Key Laboratory of Key Technology for South Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: The fruit industry has always been a competitive traditional industry in China. Currently, the China's fruit yield and planting area have both ranked the first place in the world so that it is of great significance to realize the mechanization of fruit production to promote sustainable and sound development of the fruit industry. China's pesticide yields and application amounts have been number one in the world since 2007. With the continuous increase of pesticide application and the growing public concern for the ecological environment and food safety, the orchard pesticide application, as an important section of fruit production, has become one of major problems that require public attention. In this paper, the advanced pesticide application technologies and theories at home and abroad, such as the automatic target spraying technology, recycle spraying technology, anti-drift spraying technology, air-assisted spraying technology, electrostatic spraying technology, constant-pressure spraying technology and on-line pesticide mixing technology, are introduced and discussed from the perspectives of orchard pesticide application characteristics. The research progress in orchard pesticide application machines and technologies both here and abroad are also analyzed. Many developed countries have stepped toward low-capacity, super-low-capacity, variable-capacity and intelligent spraying to reduce pesticide pollution and optimize the spraying effect. Some advanced technologies have been widely applied to the orchard pesticide application field, and America and Europe are in the leading positions of researches on the pesticide application technologies. As the equipment and technologies stands for the highest level in the current world and their products are sold across the world, they have become the most important

收稿日期: 2018-04-18

接受日期: 2018-10-08

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系创新团队(2017LM2153)

作者简介: 牛萌萌, 男, 工程师, 硕士, 主要从事施药装备与机械化研究。Tel: 13356695272, E-mail: 979379855@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 020-85286120, E-mail: duanjieli@scau.edu.cn

countries/regions of plant protection machine production and manufacturing in the world. However, China has introduced and promoted much fewer High-Tech technologies, consequently causing China's technical level of plant protection machines to fall behind. Therefore, application and promotion of High-Tech technologies should be enhanced along with orchard pesticide application machines R&D. Besides, an attention also should be paid to the research on basic theories of spraying technologies as well as key components (e.g., nozzles, liquid pumps, small-flow high-precision control valves and flow pumps) of spraying systems. Moreover, new technologies and materials, disease and pest databases, field disease and pest information monitoring and collecting systems should also be focused on. Additionally, overall performance and major working components of plant protection machines should also be studied; and advanced test sites and technologies should be constructed and introduced in order to better meet the requirements for plant protection machine development. China's orchards planting modes vary with different regions, but traditional modes are still universally used. The traditional trimming and management modes lead to severe overlapping of fruit tree canopies in mature orchards. Moreover, limited by China's orchard operating environment, field operating machines can hardly enter the orchards, which severely affected their operating effects and impeded orchard machines research and promotion. In the present paper, the problems in research and promotion of orchard pesticide application machines in China are pointed out from the aspects of pesticide application technologies and orchard agronomy. To promote the innovative development of China's orchard pesticide application machines, the following suggestions are proposed based on orchard geographical conditions in different regions, to introduce advanced orchard planting and management modes from Europe, America, Australia, etc., to investigate and gradually promote novel orchard planting modes, to integrate agricultural machines with agronomy in depth, to make use of multidisciplinary integration. Meanwhile, the comprehensive consideration is given to new products breeding, planting modes and trimming management, strengthening research of orchard pesticide application machines, speeding up improvement of pesticide application equipment, and further improving the intelligence and informatization level by introducing and integrating foreign advanced pesticide application technologies and achieving mechanization and automatization of orchard pesticide application, so as to accelerate the development progress in orchard pesticide application technologies in China.

Key words: Orchard; Spraying technology; Spraying machinery; Agricultural machinery and agronomy

自 1993 年开始,中国已成为世界上第一大水果生产国。随着我国农业产业结构的优化调整,各地区果园种植面积逐年增大,林果业已成为农村经济的重要支柱和农民增收致富的一种重要方式。目前,我国水果产量和种植面积均居世界第一,2013 年水果总产量为 1.58 亿 t,果园种植面积 1 237.14 万 hm^2 ^[1]。但除新疆地区外,我国果园种植业主要集中在各地区丘陵山区,果园机械化作业的实现和推广有较大难度。

自 2007 年开始,我国农药生产量与使用量已居世界第一^[2]。随着农药使用量在农业生产中的不断增加,带来的农药施药次数多、农药用量大、农药残留超标、农药利用率低、浪费严重、环境污染等负面

问题也日趋突出。

1 施药关键技术与理论

植物保护是现代农业生产的必要环节之一。目前农业生产中病、虫、草害的防治方法主要有物理、生物、化学和综合防治等。其中,化学防治具有快速、高效、防治及时的特点,特别是对突发性和大面积爆发性的病虫害,能做到快速应对和有效控制。因此,化学防治仍将是农业生产过程中对作物进行病虫害防治的主要方法。目前,国内外较为先进的施药技术主要有以下几种。

1.1 自动对靶技术

20 世纪 70 年代前苏联和美国就已经开始对自

动对靶喷雾进行研究和试验。自动对靶喷雾技术就是将目标探测技术和自动控制技术运用到施药技术中。目前施药技术中研究运用较多的目标探测技术有微波传感技术、超声波传感技术、光电传感技术和图像采集处理技术等。其中超声波和光电传感技术,在生产成本和复杂性上低于其他探测技术,在农业机械中有较好的应用前景。微波传感技术由于使用经济性差、实现控制技术复杂,加上受到通讯等限制,目前尚不宜用于农业机械。图像采集处理技术能达到识别作物种类、作物部位和作物形态的能力,能为精确控制和精确定位提供信息,但目前图像处理速度还不能满足田间移动式实时检测施药机械,其在实际应用中还仅限于对固定空间的作物病虫害进行检测。

1.2 循环喷雾技术

循环喷雾技术最早出现于20世纪70年代,由于果园矮化种植模式的出现使得冠层能够被完全横跨覆盖喷雾,利用药液回收装置拦截并收集飘移和滑落的药液,将其再利用^[1]。循环喷雾种类繁多,主要可概括为“Π”型罩盖型、收集器型、反射型和气流循环型4种技术类型。随着循环喷雾技术的研究发展,多种技术相互融合,各种类型之间的区别已经不再明显。如现在许多收集器型、“Π”型罩盖型与气流循环型相结合,进一步优化提高了循环喷雾机的药液回收工作性能。

1.3 防飘喷雾技术

保护性罩盖技术最早在1953年被提出用于减少喷雾雾滴飘失^[2]。目前主要有机械式罩盖喷雾和气力式罩盖喷雾2种形式,机械式罩盖技术是采用挡板导流式约束雾流的运动轨迹,包括半封闭型机械式罩盖和封闭型机械式罩盖。气力式罩盖有气囊、风帘和风幕等形式,它是通过加设风机产生的气流来约束雾流的运动轨迹,达到增加标靶雾滴沉积量减少飘失的效果。目前较为理想的是气力式罩盖,通过气流约束雾流向标靶运动,迫使雾滴更多的沉积在标靶上。随着喷雾技术研究的不断融合,使得防飘喷雾技术与循环喷雾技术也已经存在很多的交集。

1.4 气力辅助喷雾技术

辅助气流喷雾于20世纪末在欧洲兴起,利用气流的动能把药液雾滴吹送到标靶上,以提高雾滴穿透性和沉积均匀性。现在用于商业的气力辅助喷雾

系统根据气流进入雾流的方式分为两类:一类为风送式喷雾系统,雾流和气流在喷头外部混流在一起,雾流被气流携带进入冠层内部;另一类为气力式喷头喷雾系统,雾流和气流在喷头的内部混流在一起,气流速度的设定对雾流雾滴粒径的影响较大。风送式喷雾技术是目前推广使用最好的喷雾技术。

1.5 静电喷雾技术

20世纪40年代,法国首次将高压静电技术应用用于施药喷雾作业^[3]。静电喷雾技术运用高压静电原理使喷雾区域产生高压电场,流经高压静电场的雾流雾滴会带上电荷,带电雾滴具有吸附特性,从而使雾流趋向标靶运动,最后吸附在标靶上。雾滴沉积率会明显提高,尤其可以提高标靶叶片背面的雾滴沉积量。目前,主要的充电方法为感应充电法、电晕充电法和接触充电法。其中感应充电相比电晕充电和接触充电,具有相对低压作业的特点,在作业安全和高压绝缘性方面优势明显^[3]。由于静电喷雾在环境适应性、使用安全性和设备维护保养等方面存在短板,使得静电喷雾技术一直没有得到较好的推广和使用。

1.6 恒压喷雾技术

恒压喷雾技术主要是针对固定管道喷雾系统,在喷雾作业时,同时作业的外接喷头或喷枪的个数随机变化,使整个喷雾系统的压力不稳定,会发生较大的压力波动而提出。压力的变化会影响喷雾效果的稳定性,及喷雾管道的安全性。目前研究表明,比例-积分-微分(PID)控制、模糊控制、参数自整定控制、反馈线性化控制^[4]、自适应控制^[5]、鲁棒控制^[6]及多种控制相结合^[7-8]等方法对于恒压供液系统有相对较好的稳压控制效果。

1.7 在线混药技术

在线混药技术可实现药、水独立存放,消除预混药中预混药液过剩而造成的浪费问题,同时,在线混药技术是实现变量施药的前提。在线混药技术中农药小流量控制是实现在线混药的关键所在,目前研究主要采用流量调节阀^[9]、电控喷嘴^[10]、比例泵、射流混药装置^[11-12]及微流量泵等技术方法实现在线实时混药。

2 施药技术研究与发展现状

2.1 国外研究现状

为了减少施药污染、优化喷雾效果、提高农产品

品质,许多国家的研究已经向低容量、超低容量、变量和智能喷雾方向发展。一些先进技术被广泛应用于果园施药领域,如静电喷雾技术、药液回收循环喷雾技术、气流辅助喷雾技术和利用超声波和光电等自动识别系统进行选择性喷雾技术。其中美国与欧洲位于施药技术研究的前列,是目前国际上生产制造植保机械最主要的国家和地区,装备与技术都代表着当今世界的最高水平,其产品遍布全球。

1999年 Carlton^[13] 申请获得航空静电喷雾系统专利,后来专利权被美国 SES 公司(Spectrum electrostatic sprayers, Inc.) 购买,并生产推广形成商业化产品。美国研究制造的 ON-TARGET 高压静电喷头,电源输入采用 12 V 直流电,输出 40 kV 的工作高压,可用于背负式喷雾喷粉机和机动式喷杆喷雾机,该静电喷头比普通喷头大约能减少药液损失 65%,降低了因农药使用率过低而带来的环境污染^[14]。

Zande 等^[15]采用激光探测树冠结构,通过试验分析给出了叶面积指数(leaf area index, LAI)的转换计算公式。Palacin 等^[16]使用激光扫描器(Laser scanner)对树的树干及树叶进行表面积估算,分析得出,尽管树干在测量中极易引起瞬时相关误差,但树木叶片总面积与树木外轮廓可用线性关系建模,平均误差一般控制在 6% 以下。Zaman 等^[17]基于野生杂草的高度特点,设计了可用于变量喷雾的超声波杂草探测系统。Llorens 等^[18]采用超声波探测器进行了葡萄树树冠体积的测定,并结合葡萄园变量施药给出了超声波探测器在喷雾机上的安装布置方案。

Needham 等^[19]提出运用喷头与比例电磁阀相耦合的控制方法,实现雾滴尺寸与喷雾量的分别可控。Gonzalez 等^[20]试验探究了一种基于压力调节的非线性变量喷雾系统,试验分析得出开环控制系统可运用一阶系统描述,并给出了系统传递函数的具体对应公式,体现了运用参变的方法处理非线性的思路。Funseth 等^[21]设计了一种变量喷头,喷头体内加设了一个转盘式流量控制阀,工作动力由步进电动机提供,从流体通道来看,流量控制阀处于流体入口和喷嘴之间。

俄罗斯研制推广的 ПЮ-2 型果园喷雾机采用超声波探测技术,实现对果树冠层的识别,可只针对果树树冠喷雾,而在株间冠层空挡处自动停止喷雾,大幅降低喷施药液的脱靶流失,机具可节省药液 50%

左右^[22]。Zhu 等^[23]设计了一种五指式分散喷雾装置,可使作物的上中下部都达到很好的喷雾沉积,提高雾滴在垂直空间上的沉积均匀性。Celen 等^[24]基于广泛推广使用的风送式喷雾机对葡萄园进行药液喷洒试验,探究了雾滴在树冠内的沉积分布模式。康乃尔大学的 Landers^[25]研制了一种果园喷雾机,通过调节出风口的风栅可实现送风方向的改变,以达到更理想的雾滴沉积效果,此外还分析了影响雾滴沉积和风场分布的各种因素,通过改变各种喷雾技术参数研究雾滴飘移和喷雾沉积情况。

2.2 国内研究现状

与发达国家相比,我国果园施药技术和施药机械还较为落后,目前我国果园施药机械中占主导地位的单架式喷枪喷雾机和背负式动力喷雾机喷洒效果差,作业效率较低,药液沉积分布不均匀度高达 45%,且对操作者的健康危害较大,已经越来越不适应规模化果园病虫害防治的要求^[26]。近几年来,国内果园施药机械和技术也有了初步的发展,经过测绘仿制、改进创新到自行研制的发展进程,也已经设计研制了许多新产品。

南京农业机械化研究所通过引进创新、优化改进先后开发研制了 3WP-50 型炮塔式离心雾化风送式远程射雾机、3WP-800 多功能低量喷雾机,水平射程大于 35 m,雾滴平均粒径 80 μm 左右^[27]。丁素明等^[28]研制了一种适应于低矮果园的自走式风送喷雾机,并通过室内性能试验和样机田间试验分别测试了风机性能特性和树冠冠层中叶片上的雾滴覆盖率及沉积密度。李超等^[29]结合葡萄园的农艺特点,研制了一种采用悬挂式以小四轮拖拉机为动力源,适用于葡萄园施药的立管风送式喷雾机。杨洲等^[30]设计了一种果园在线混药型静电喷雾机,喷雾机采用了风辅与静电喷雾相结合的设计,设计的可调喷杆架结构具有定向风送特点,根据不同果树形状和果树行间距来调节喷杆架,可达到雾滴沉积分布均匀的效果。周良富等^[31]研制了一种 3WQ-400 型双气流辅助静电果园喷雾机,喷雾机设计采用双气流辅助系统与静电喷雾系统相结合的方法,提高药液雾滴在果树冠层上的沉积量。王志强等^[32]研制了一种由拖拉机牵引适用于葡萄园作业的气力雾化风送式果园静电弥雾机,喷雾机采用了分段、独立式喷雾结构的设计,以适应不同的葡萄树体。

李秉华等^[33]采用室内模拟恒定风速,结合分光

光度法试验测定和数学模型拟合的方法,研究了不同药液喷雾量及不同药液浓度在接近地面处的飘移情况。吕晓兰等^[34]试验得出喷雾压力和风速增大及喷头型号小变都显著增加了雾滴飘移量随喷雾高度变化的敏感程度。刘雪美等^[35]运用软件仿真结合三维流场的多相流计算流体力学模型,得出增大辅助气流速度可显著降低雾滴飘移率,且当喷头流量较小时,雾滴飘失率变小的趋势更为明显。茹煜等^[36]在风洞试验条件下研究得出,不同喷头型号而引起的雾滴粒径减小和干扰气流侧风速度增大,都会带来雾滴飘移距离的明显增大。杨洲等^[37]采用室内模拟侧风探究了不同侧风和静电电压对静电喷雾飘移的影响,得出随着静电电压的增大,雾滴的飘移中心距离和飘失率增大。

邱白晶等^[38]设计了以电动流量调节阀为调节元件的变量喷雾系统,研究表明,基于电动调节阀的连续变量喷雾系统响应速度与现有调压变量喷雾系统相当,系统上升时间、峰值时间和超调量都有幅值相关性,因此系统为非线性,此类流量调节变量喷雾系统的控制系统设计必须考虑非线性问题。刘伟等^[39]研制了一种针对背负式喷雾机的PWM变量喷雾控制系统,并在占空比分别为40%、60%、80%和100%的工作情况下对喷雾量、雾滴粒径、雾流速度及喷雾角度等特性进行了分析。蔡祥等^[40]设计了一种基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统,并采用Compact Rio 9014型控制器,借助快速响应阀和流量计,实现PWM用于农药注入量的闭环控制。李晋阳等^[41]设计了利用调节阀和流量计分别对水和农药进行计量的在线混药装置,并结合调节阀标定方法,建立了调节阀的流量关系表达式,基于DSP56F805芯片设计了各模块的控制系统。蒋焕煜等^[42]采用卡尔曼滤波算法处理压力数据得到喷雾流量,将得到的喷雾流量与PWM信号占空比相关联,建立了PWM喷雾流量模型。李君等^[43]设计了一种采用蠕动泵进行农药供给精量控制的实时混药系统,并运用STM32单片机采用STM32F103ZET6芯片设计了相应的控制系统,并设计了多种静态混合器,进行了混药均匀性对比试验。

3 存在的问题与对策

3.1 施药技术方面

我国不同地区果园种植的果品种类不同,各个

地区的种植制度也不尽相同。因此,要结合不同果园种植模式及时调整施药机具参数,开发满足各地区的专业化施药机械,以满足各地区不同果园种植模式的需求。

在研制植保机械过程中,我国引进和推广的高新技术还相对较少,从而导致我国植保机械技术水平较为落后。目前我国试验研究的在线混药系统中的药液配比装置主要采用传统的流量控制阀或射流混药方式,前者混药系统管道结构相对复杂且缺少小流量高精度控制阀技术的支撑,后者药水混合比例精度和准确性不易控制,受喷雾压力影响较大。当前对喷雾飘移的研究主要在风洞实验室、室内风场环境及软件建模仿真探究了传统喷雾形式下不同喷雾高度、喷雾压力、喷头型号及不同风速侧风等参数对雾滴飘移的影响,针对静电喷雾和气力辅助喷雾等先进喷雾技术的雾滴飘移和飘失的研究较少。目前研究施药雾滴飘移的主要试验手段有室内风场、田间试验和风洞试验等。风洞中进行雾滴飘移试验,试验条件要求严格、操作较为复杂且设备造价昂贵^[44-45]。田间试验由于周围环境的不稳定性和不可控性,使得试验很难实现重复,难以探究确定某一因素对试验结果的影响作用。而室内风场对试验环境的可控条件和可控精度较低。

因此,在对果园施药机械进行研制及开发的过程中,要加强高新技术的应用和推广,如防飘移技术、静电技术、自动对靶技术、变量混药技术等。同时,要注重研究喷雾技术基础理论及喷雾系统关键部件(如喷头、液泵、小流量高精度控制阀、流量泵等),注重新技术、新材料的使用,注重研究构建病虫害数据库,注重构建田间病虫害信息监测采集系统。此外,还要对植保机械的整机性能、主要工作部件进行研究,并构建先进的试验场所,引进先进的试验技术,以更好地满足植保机械的发展要求。

要加大果园施药机械研究力度,加快改良施药装备,推动我国果园施药机械向专业化、智能化、信息化的方向发展。目前,我国虽然已经有了一定数量的机动喷雾机,但是在农业领域特别是果园施药中仍多采用小型背负式喷雾机。面对这种情况,国家应该加大对农业植保机械的投入力度,鼓励构建相关的专家团队,研究智能、高效、节水的施药机具。

3.2 果园农艺方面

我国各地区果园的种植模式存在一定的差异,

且基本依旧沿用传统的种植模式,传统的修剪和管理方式,使得成熟期果园果树冠层交叠现象严重,作业机械难以进入果园,并且严重影响机械作业效果,使果园机械的研究与推广难度增大。

《全国现代农作物种业发展规划(2012—2020年)》明确提出:到2020年,要培育一批高产、优质、多抗、广适和适应机械化作业、设施化栽培的新品种。研究探讨新型种植模式,培育适应机械化作业的新品种,将机械适用性作为品种选育和栽培管理的重要指标,充分表明国务院对农机农艺融合的高度重视。汪懋华^[46]提出精准农业并不是要过分地强调高产,主要强调综合的经济和社会效益。加强多学科联合攻关,针对果园机械化作业中出现的问题,在保证相应产量和市场产品接受度的前提下,从农机农艺相融合的角度,结合我国各地区果园的地理条件,引进探讨欧美、澳大利亚等先进的果园种植管理模式,研究适合我国不同地区的新型果园种植模式,并逐步实现新型果园种植模式推广,以方便果园机械化作业。

4 结 论

受我国果园作业环境的限制,果园施药装备的研究和推广相比于大田作物较为滞后,大中型施药机具难以推广使用,轻型机动式喷雾机仍将是主流,对于规模化果园可研究推广航空施药技术和固定管道式施药系统。结合先进的检测、控制和喷雾技术开展果园高效施药装备研发,采用防飘喷雾、风送喷雾、静电喷雾、变量喷雾和自动对靶喷雾等先进技术来增加农药使用率、减少脱靶率和漂移率、提高喷雾质量。研制推广作业效率高,适合我国果园病、虫、草害防治的施药机具,以提高农药利用率、减少农药用量,改善果园生态环境,缩小与国外先进水平之间的差距,促进我国果园种植业的持续、健康发展。

《中国制造2025》明确指出“以信息化与工业化深度融合为主线,重点发展农业装备等十大领域。”农业生产信息化是提高劳动生产率、资源利用率和土地产出率的重要途径,也是提高农业生产经济效益和农机装备作业质量的重要举措。当前大型农业机械正在从机械化向智能化、信息化方向转变,从而整体提升农业机械化水平,进一步节约成本、提高效益,有利于精细化管理,提高作业精度。因此,果园施药设备在实现机械化和自动化的前提下,提高智

能化及信息化水平也必将成为趋势,同时,进一步做好农机农艺的结合,优化种植模式,才能更好地推进果园植保机械发展进程。

参考文献 References:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
Editorial Board of China Agriculture Yearbook. China Agriculture Yearbook 2014[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014.
- [2] 何雄奎. 高效施药技术与机具[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
HE Xiongkui. Efficient pesticide application technology and equipment [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2012.
- [3] 贾卫东, 胡化超, 陈龙, 陈志刚, 魏新华. 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, CHEN Zhigang, WEI Xinhua. Performance experiment on spray atomization and droplets deposition of wind- curtain electrostatic boom spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(7): 53-59.
- [4] MINTSA H A, VENUGOPAL R, KENNE J P, BELLEAU C. Feedback linearization-based position control of an electrohydraulic servo system with supply pressure uncertainty[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 1092-1099.
- [5] GUO K, WEI J H. Adaptive robust control of variable displacement pumps[C]//Proceedings of American Control Conference, 2013: 1112-1117.
- [6] DE PERSIS C, KALLESOE C S. Pressure regulation in nonlinear hydraulic networks by positive and quantized controls[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1371-1383.
- [7] 许绩彤, 李君, 牛萌萌, 薛坤鹏, 陈佳森, 周佳鑫. 管网式喷雾系统建模与压力控制[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 389-391.
XU Jitong, LI Jun, NIU Mengmeng, XUE Kunpeng, CHEN Jiasen, ZHOU Jiabin. Modeling and pressure control of pipe network spray system [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(1): 389-391.
- [8] 宋淑然, 阮耀灿, 洪添胜, 代秋芳, 张丞. 果园管道喷雾系统药液压力的自整定模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 157-161.
SONG Shuran, RUAN Yaocan, HONG Tiansheng, DAI Qiufang, ZHANG Cheng. Self-adjustable fuzzy PID control for solution pressure of pipeline spray system in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6): 157-161.
- [9] 赵晓廷, 刘俊峰, 冯晓静, 李建平. 果园喷雾机变量混药装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 112-115.
ZHAO Xiaoting, LIU Junfeng, FENG Xiaojing, LI Jianping. Or-

- chard sprayer variable mix medicine device and test [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36 (6): 112-115.
- [10] 张文昭,刘志壮. 3WY-A3型喷雾机变量喷雾实时混药控制试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 130-133.
ZHANG Wenzhao, LIU Zhizhuang. Experiment on variable rate spray with real-time mixing pesticide of 3WY-A3 sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(11): 130-133.
- [11] 陈志刚,朱树礼,邱白晶. 在线射流混药浓度控制系统[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 463-468.
CHEN Zhigang, ZHU Shuli, QIU Baijing. Online jet mixing control system of pesticide concentration [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30 (4): 463-468.
- [12] 邱白晶,马靖,邓斌,欧鸣雄,董晓娅. 在线混药喷雾系统混药性能试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(17): 78-85.
QIU Baijing, MA Jing, DENG Bin, OU Mingxiong, DONG Xiaoya. Experiment on mixing performance of online mixing spray system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(17): 78-85.
- [13] CARLTON J B. Technique to reduce chemical usage and concomitant drift from aerial sprays: US5975425[P]. 1999-08-15.
- [14] 张玲,戴奋奋. 我国植保机械及施药技术现状与发展趋势[J]. *中国农机化*, 2002(6): 34-35.
ZHANG Ling, DAI Fenfen. Actuality and development trend about equipment for crop protection and the spray technique of agricultural chemicals in China [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2002(6): 34-35.
- [15] ZANDE D V D, HOET W, JONCKHEERE I, JVAN A, COPPIN P. Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2): 147-160.
- [16] PALACIN J, PALLEJA T, TRESANCHEZ M, SANZ R, LLORENS J, RIBES-DASI M, MASIP J, ARNO J. Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56 (4): 1377-1383.
- [17] ZAMAN Q U, ESAU T J, SCHUMANN A W, PERCIVAL D C, CHANG Y K. Development of prototype automated variable rate sprayer for real-time spot-application of agrochemicals in wild blueberry fields[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 76(2): 175-182.
- [18] LLORENS J, GIL E, LLOP J. Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: advances to improve pesticide application methods[J]. *Sensors*, 2011, 11 (2): 2177-2194.
- [19] NEEDHAM D L, HOLTZ A J, GILE D K. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size [J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(2): 379-386.
- [20] GONZALEZ R, PAWLOWSKI A, RODRIGUEZ C, GUZMAN J L. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2012, 10(4): 939-949.
- [21] FUNSETH T G, MERCER D S, HUMPAL R A. Sprayer pulsing nozzle flow control using rotational steppositions: US201301-61413[P]. 2013-06-27.
- [22] 刘青. 9WZCD-25型风送式喷雾机喷雾性能优化试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2003.
LIU Qing. Optimizing experimental study on spraying functions on 9WZCD-25 air-assisted sprayer[D]. Urumchi: Xinjing Agricultural University, 2003.
- [23] ZHU H P, BRAZEE R D, DERKSEN R C. A specially designed air-assisted sprayer to improve spray penetration and air jet velocity distribution inside dense nursery crops[J]. *Transactions of the ASABE*, 2006, 49(5): 1285-1294.
- [24] CELEN I H, ARIN S, DURGUT M R. The effect of the air blast sprayer speed on the chemical distribution in vineyard[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, 11(11): 1472-1476.
- [25] LANDERS A J. Developments towards an automatic precision sprayer for fruit crop canopies[C]/2010 ASABE Annual International Meeting, Precision, Pennsylvania, 2010.
- [26] 汪懋华,李民赞. 现代精细农业理论与实践[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2012: 512-540.
WANG Maohua, LI Minzan. Study and practice on modern precision agriculture[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2012: 512-540.
- [27] 邵晓玲. 南京农机化所科研成果和在研项目简介[J]. *农机科技推广*, 2005(8): 34-35.
SHAO Xiaoling. Introduction of research achievements and research projects of Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization Ministry of Agriculture [J]. *Agriculture Machinery Technology Extension*, 2005(8): 34-35.
- [28] 丁素明,傅锡敏,薛新宇,周良富,吕晓兰. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 18-25.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, ZHOU Liangfu, LÜ Xiaolan. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 18-25.
- [29] 李超,张晓辉,姜建辉,胡洋洋. 葡萄园立管风送式喷雾机的研制与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 71-78.
LI Chao, ZHANG Xiaohui, JIANG Jianhui, HU Yangyang. Development and experiment of riser air-blowing sprayer in vineyard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4): 71-78.
- [30] 杨洲,牛萌萌,李君,徐兴,许绩彤,陈兆春. 果园在线混药型静电喷雾机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 60-67.
YANG Zhou, NIU Mengmeng, LI Jun, XU Xing, XU Jitong, CHEN Zhaochun. Design and experiment of an electrostatic sprayer with on-line mixing system for orchard[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (21): 60-67.
- [31] 周良富,张玲,薛新宇,丁为民,孙竹,周晴晴,崔飞龙. 3WQ-400型双气流辅助静电果园喷雾机设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 45-53.

- ZHOU Liangfu, ZHANG Ling, XUE Xinyu, DING Weimin, SUN Zhu, ZHOU Qingqing, CUI Longfei. Design and experiment of 3WQ-400 double air-assisted electrostatic orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 45-53.
- [32] 王志强,郝志强,刘凤之,王孝娣,张敬国,王海波. 气力雾化风送式果园静电弥雾机的研究与试验[J]. 果树学报, 2017, 34(9): 1161-1169.
- WANG Zhiqiang, HAO Zhiqiang, LIU Fengzhi, WANG Xiaodi, ZHANG Jingguo, WANG Haibo. Design and experiment of an air-atomized, air-assisted and electrostatic orchard sprayer [J]. Journal of Fruit Science, 2017, 34(9): 1161-1169.
- [33] 李秉华,王贵启,李香菊,苏立军,樊翠芹. 农药飘移状况的室内模拟测定[J]. 河北农业科学, 2006, 10(2): 43-46.
- LI Binghua, WANG Guiqi, LI Xiangju, SU Lijun, FAN Cuiqin. Simulating and measurement of pesticide drift in indoor condition [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2006, 10(2): 43-46.
- [34] 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,何雄奎. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 59-63.
- LÜ Xiaolan, FU Ximin, SONG Jianli, HE Xiongkui. Influence of spray operating Parameters on spray drift[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 59-63.
- [35] 刘雪美,苑进,张晓辉,左文龙. 气流辅助式喷雾工况参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 67-72.
- LIU Xuemei, YUAN Jin, ZHANG Xiaohui, ZUO Wenlong. Effect of air-assisted spraying condition parameters on boom spray drift characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Suppl.): 67-72.
- [36] 茹煜,金兰,周宏平,舒朝然. 基于圆锥管状电极的高压静电场对雾滴荷电的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2721-2727.
- RU Yu, JING Lan, ZHOU Hongping, SHU Chaoran. Effect of high-voltage electrostatic field on droplet charging based on cone-shaped electrode[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2721-2727.
- [37] 杨洲,牛萌萌,李君,徐兴,孙志全,薛坤鹏. 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, XU Xing, SUN Zhiquan, XUE Kunpeng. Influence of lateral wind and electrostatic voltage on spray drift of electrostatic sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 39-45.
- [38] 邱白晶,李坤,沈成杰,徐溪超,毛罕平. 连续可变量喷雾系统响应特性试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 32-35.
- QIU Baijing, LI Kun, SHEN Chengjie, XU Xichao, MAO Hanping. Experiment on response characteristics of variable-rate continuous spraying system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 32-35.
- [39] 刘伟,汪小岳,丁为民,邱威. 背负式喷雾器变量喷雾控制系统设计与特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 16-21.
- LIU Wei, WANG Xiaochan, DING Weimin, QIU Wei. Design and characteristics analysis of variable spraying control system for knapsack sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 16-21.
- [40] 蔡祥, MARTIN W, MALTE D, PETER S L, 孙宇瑞. 基于电磁阀的喷嘴直接注入式农药喷洒系统[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 69-72.
- CAI Xiang, MARTIN W, MALTE D, PETER S L, SUN Yurui. Direct nozzle injection sprayer based on electromagnetic-force valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 69-72.
- [41] 李晋阳,贾卫东,魏新华. 基于流量调节阀和神经网络的植保机械在线混药装置[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 98-103.
- LI Jinyang, JIA Weidong, WEI Xinhua. On-line mixing pesticide device based on flow control valve and neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 98-103.
- [42] 蒋焕煜,周鸣川,童俊华,刘岩. 基于卡尔曼滤波的 PWM 变量喷雾控制研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 60-65.
- JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, TONG Junhua, LIU Yan. PWM variable spray control based on Kalman Filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 60-65.
- [43] 李君,许绩彤,杨洲,牛萌萌,薛坤鹏,莫谋斌. 风送式喷雾机实时混药系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 62-69.
- LI Jun, XU Jitong, YANG Zhou, NIU Mengmeng, XUE Kunpeng, MO Moubin. Design and experiment on real-time mixing system for air-assisted sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(11): 62-69.
- [44] 茹煜,朱传银,包瑞. 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 66-72.
- RU Yu, ZHU Chuanyin, BAO Rui. Spray drift model of droplets and analysis of influencing factors based on wind tunnel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 66-72.
- [45] 王潇楠,何雄奎, HERBSTA, LANGENAKENS J, 郑建秋, 李云龙. 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, HERBST A, LANGENAKENS J, ZHENG Jianqiu, LI Yunlong. Development and performance test of spray drift test system for sprayer with bar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 55-62.
- [46] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-8.
- WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(1): 1-8.