doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.001

环境友好型农药喷施机械研究进展与展望

郑加强　徐幼林
（南京林业大学机械电子工程学院，南京 210037）

摘要： 在农林病虫害防治中，化学方法仍占主导地位，化学农药施用不当会引起农药浪费、环境污染和农药残留等问题。为此，本文阐述了国内外对农药雾化、在线混药、可变量控制、仿形喷雾、雾滴飘移控制、静电喷雾、智能对靶喷雾集成等关键技术的研究概况；综述了防飘移喷雾机、仿形喷雾机、喷杆喷雾机、杂草防除机械、果园喷雾机、智能喷雾机等6类典型地面植保机械的发展概况，以及包括植保无人机及其关键部件在内的典型航空植保机械的研究发展水平；提出了环境友好型农药喷施机械“绿色环保、精确高效”的研究理念，以及开展植保机器人与专用植保机械（植保机器人及其阵列、专用植保机械）研发、航空施药机具与植保无人机研究、智能物联农药喷雾系统（病虫草害靶标智能监测识别与防治预警系统、无线物联智能植保信息传输系统、立体智能协同农药喷雾系统）研究和植保机械关键技术（新型喷头及在线混药、智能化载运平台）研究等总体发展建议。

关键词： 环境友好；植物保护；农药喷雾机

中图分类号： S49　**文献标识码：** A　**文章编号：** 1000-1298(2021)03-0001-16　**OSID：**

Development and Prospect in Environment-friendly Pesticide Sprayers

ZHENG Jiaqiang　XU Youlin
(*College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: The pesticide application plays a leading role in the control of agricultural and forestry pests and diseases, but the improper application of chemical pesticides causes a series of problems. Therefore, the research progress of the key technologies for the pesticide atomizing and nozzles, the inline pesticide mixing, the variable-rate control, the profiling spray, the droplet drift control, the electrostatic spraying, and the intelligent targeting spraying were analyzed. The development of six kinds of typical plant protection machinery was reviewed, that was, anti-droplet-drift sprayers, profiling sprayers, high clearance self-propelled sprayers, weeds control machines, orchard sprayers, and intelligent targeting sprayers. And the development of the aviation plant protection equipment, including the plant protection UAV and its key components was also reviewed. Then, the research concept and general ideas of environment-friendly pesticide spraying machinery, which were the “green and environment-friendly, precision and high efficiency”, were put forward. It was proposed to develop plant protection robots and special-purpose plant protection machinery, such as plant protection robot and its array design, plant protection machinery for specific applications, aviation pesticide application equipment and plant protection UAV. The intelligent IoT-driven pesticide spraying system was introduced, including the intelligent identification of pests targets and the precautionary prevention system, the intelligent plant protection information transmission system through wireless Internet of Things, the three-dimensional intelligent collaborative capability for the pesticide spray system. The key technology of plant protection machinery, including new nozzles and inline pesticide mixing, intelligent and flexible transport platform was put forward. It was suggested that more attention should be paid to help researchers better carry out disruptive innovative research on advanced plant protection machinery.

Key words: environment-friendly; plant protection; pesticide sprayer

收稿日期：2020-12-11　修回日期：2020-12-28

基金项目： 国家自然科学基金项目(31901239)、江苏省基础研究计划项目(BK20170930)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)和南京林业大学“一流学科”建设经费项目(PNFD)

作者简介： 郑加强(1962—)，男，教授，主要从事植保机械研究，E-mail: jqzheng@njfu.edu.cn

通信作者： 徐幼林(1961—)，女，教授，博士生导师，主要从事植保机械、现代机械设计理论与方法研究，E-mail: youlinxu@njfu.edu.cn

0　引言

植物在复杂多变的生长过程中经常会受多种生物胁迫(病虫草鼠害等)及非生物胁迫(干旱、盐碱、洪涝等)因素的影响,因此农业发展史就是与病虫草鼠害斗争的历史。而全球气候变暖使害虫繁殖代数增加,国际间交流密切也使外来生物入侵频率增加,跨区机收促使病虫害传播,秸秆还田和免耕种植改善害虫栖息和越冬场所,连茬种植加重土传病害,因此中国农林病虫草鼠害发生面积总体居高不下。PAUL 发现 DDT 杀虫剂活性后,植物保护从天然药物、无机合成农药进入人工合成有机农药时代,对病虫草鼠害防治起到重大作用。BORLAUG 预言“我们要优先考虑的是吃并保持健康,为此必须要有农药。没有农药,全世界将挨饿!”化学农药防治已占有 80% 的主导地位,但是过分依赖农药导致了“3R”(农药残留(Residue)、害物再猖獗(Resurgence)和害物抗药性(Resistance))现象,影响整个农林生态系统,研究机构开展农药减量及精确施用技术研究[1]。中国推出了《农药使用量零增长行动方案》,探索农药减量控害且产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的农业发展道路,需要研究更多切实有效的病虫草害防治方法和植保装备实现减量控害,以保证人类生存和环保的需求。因此本文拟综述国内外农药施用机械及其关键技术的发展,分析环境友好型农药喷施机械研究理念与总体思路,并提出相关研究建议。

1　农药喷雾关键技术发展

近百年来,国内外开展了大量的农药喷雾机械及其关键技术研究。随着科技发展,农药喷雾技术不断创新,新装备不断涌现,本文对近年来普遍受关注的关键技术进行分析。

1.1　农药雾化技术及喷头

雾化理论:农药雾化按喷雾量分为常量、低容量(LV)、超低容量(ULV);按雾化动力分为毛细管雾化、液力雾化(扇型雾喷头、涡流式喷头等)[2-4]、转盘(转笼、转杯)离心雾化[5-8]、气动力雾化[9]、超声波雾化[10]、静电雾化[7]等及其组合雾化方式[11]。雾化需要克服气动阻力、粘滞力、液体表面张力、惯性力等及其各种力的相互作用,需要研究农药及助剂物理化学性质、液体雾化的动力、液体雾化所消耗的能量等[9]以及控滴技术原理[12]。

喷头雾化性能:喷雾性能研究包括雾滴尺寸及其均匀性、雾流锥角形状及沉积特性等,也包括喷雾参数对雾化性能的影响、雾化模型及喷雾模拟仿真以及喷头磨损规律的研究,还需要研究雾化试验标准、测试技术及可重复性保障等[3,5,13-20]。

特殊功能喷头:为了实现特定喷雾性能需要研究特殊需求的喷头,研究设计特定结构及其流体运动动力特性。如低飘移掺气(AI)喷头[21]、可变量喷头[22]、增加流动范围的旁路喷头[23]、可控滴转盘喷头[8]、采用脉冲调制的间歇流量控制喷头[24]等。可采用模块化等设计方法开发满足特定需求的系列化喷头产品。

1.2　农药直接注入技术与在线混药器

喷雾农药在线混合采用水箱和药箱分设,在农药施用过程中按需在线混合,如可通过恒定的用水量和变化的用药量来实现设定的农药使用量,达到药、水、人分离,达到安全、可靠、高效地使用农药,解决传统农药与水预先混合后直接喷施所造成的剩余药液的处理,或配比过程中过量使用农药的问题,以减少和消除残留农药对环境的污染[25-28]。

(1)不同农药注入方式

为实现农药在线与水或油混合,可采取计量泵控制、射流(旋动射流)、阀控喷嘴直接注入、带缓冲罐预混式在线注入系统等不同注入混合方式[29-36];为提高农药混合均匀性和混药响应时间,将高压注入混药系统与自动可变量喷头相结合[36]。为避免药液在混药系统管路中的残留,保证系统可重复利用并增强药水混合均匀性,发现在喷头前加入螺旋状在线混合装置提高可清洁性,同时试验表明采用脉冲水-空气流冲洗比连续冲洗方法更节水[37]。

(2)不同剂型农药的混合

农药有水溶性和脂溶性之分,水溶性农药可以与水充分溶解混合,而脂溶性农药和助剂加水稀释搅拌后,以极小的油珠均匀分散在水中形成相对稳定的乳浊液,或以平均粒径 2～3 μm 分散颗粒与水混合形成有明显分层现象的悬浮剂[38]。国内外开展了大量的水溶性农药在线混合研究[39-41];鉴于脂溶性农药的特殊性,设计旋动射流混药器,发挥旋动射流的卷吸能力和掺混作用来提高脂溶性农药的混合均匀性[42]。

(3)混合性能测试

混合均匀性及稳定性检测是在线混药的关键指标,可采用荧光分析和高速摄影技术检测混合浓度均匀性和动态浓度一致性等以及进行影响因素分析[43-47]。

1.3　可变量控制技术

由于农田中各小田块的含水率、有机物含量等各不相同,需要适时依据其变量信息,对每一小田块进行可变量精确施肥施药等,也就是要采用可变量

技术(VRT),其核心是实现对喷雾目标按需施药的可变量喷雾控制系统[48-49]。

可变量控制系统：计算机控制器接收来自地理信息系统、田间定位系统、实时传感器等信息,控制可变量施用设备调节施用量,通过流量控制系统控制总流量,流量传感器检测实际流量并将此信息传送给计算机控制喷雾系统实现微调[48-50]。

施药量调节模型：根据特定需求,可通过施药量调节模型检验合理施药量与沉积量关系等[51-54];为提高喷雾机施药量的精准性,建立回归方程预测和控制脉宽调制(PWM)电磁阀占空比和工作喷头总流量,研究变量控制系统响应特性和建模仿真等[54-60]。

1.4　仿形喷雾技术与仿形机构

仿形对靶喷雾技术是根据传感器探测获得的果树、行道树和园林景观树以及篱架型植物等靶标冠层形貌信息[61],自动调节喷雾机相关机构到达理想喷雾距离进行仿形对靶喷雾作业,以提高雾滴在靶标冠层分布的均匀性和农药施用效率[62-65]。

仿形机构及仿形喷雾模型：仿形喷雾机构主要有倒 U 型、双摇臂和变喷杆等,为更好地分析仿形喷雾作业,通过仿形喷雾模拟试验、虚拟仿真及喷雾模型等研究,确定仿形变量喷雾关键参数与雾化特性及仿形对靶的关系等[62-63]。

仿形喷雾系统及关键参数：根据靶标形貌特征,建立仿形控制喷雾系统,优化研究冠层梯度、喷头安装控制、喷雾方向与辅助风速、喷雾压力与流量调节等关键参数[62-65]。

1.5　雾滴飘移控制技术与雾滴沉降沉积行为分析

雾滴飘移是农药使用过程中通过空气向非预定目标运动的现象,包括飞行飘移和蒸发飘移,飘移会造成环境污染、农药流失、农药有效利用率降低[66-68],飞行飘移包括非靶标(non-target)飘移和田块外(off-field)飘移,非靶标飘移会污染田块、水源和空气等,田块外飘移甚至会危及人类居住地、蜜蜂养殖等,因此需要研究飘移控制与沉积行为。

雾滴运动行为研究：雾滴运动行为直接影响雾滴飘移性能及沉积分布,要减少雾滴脱靶的可能性[62,65-73],通常可采用 CFD 模拟进行飘移控制研究[73-75]。AGDISP 是基于拉格朗日的雾滴跟踪算法的喷雾模型,可输入喷雾机信息、喷杆喷嘴位置、雾滴尺寸分布、喷雾液体特性、喷雾高度和气象学等参数,更新版包括雾滴蒸发模型、雾滴沉降时间步长算法、光学冠层模型、顺风 20km 远场高斯模型、跟踪挥发性活性喷雾液体的欧拉模型等[76]。

雾滴与靶标：喷雾助剂、雾滴大小、靶标植物叶片物理特性是影响药液沉积性能的重要变量,需要关注农药雾滴在靶标植物叶面的撞击(正向撞击、斜撞击)、弹跳、浸润、持留、蒸发等行为及调控技术[77-93]。

飘移控制方法与测试：喷头类型、气流、喷雾方向等喷雾参数以及气象条件等对雾滴飘移影响显著[94-95],常采用风洞和相关测试平台对雾滴飘移进行测量和评价[96-98],也有采用稳态和瞬时测量技术测量二维目标区域的雾滴覆盖[99],或采用白色塑料板、尼龙网、不锈钢网作为喷雾沉积采集器通过高速成像系统判断雾滴穿透率和回收率等[100]。

1.6　静电喷雾技术与雾滴充电方法

农药静电喷雾技术研究荷电雾滴向植物靶标运行过程及其电场梯度、空间电荷分布、雾滴尺寸和运行速度、喷雾机动力学、气候条件、植物物理特性等对雾滴充电效果及静电喷雾沉降性能的影响[7,101-103]。

雾滴充电技术：充电技术是实现静电喷雾性能的重要环节,包括电晕充电、感应充电和接触充电及其各种组合充电方式,需要结合不同的喷头类型和喷雾形态,实现必要的雾滴荷电量和形成良好的诱导电场[101-105];也可尝试其他充电技术,如等离子体脉冲荷电喷雾技术,即窄脉冲电晕放电产生的高能电子能使气体电离成正、负离子,当药液雾化形成的雾滴通过电离区与离子碰撞时,电荷便传给雾滴使其荷电[106]。

静电喷雾性能测试：静电喷雾性能包括雾滴尺寸分布、流场状态、荷质比等,需建立模型和试验设施研究流场状态、电荷衰减规律等[107-109];荷质比决定荷电雾滴沉积,采用模拟目标、网状目标、法拉第筒法测试,瑞利极限可以反映雾滴最大荷电量信息[109]。

1.7　智能对靶喷雾集成技术与多功能底盘系统

智能对靶喷雾是通过传感(超声波、红外、机器视觉等)和卫星定位技术获取靶标的分布范围、危害程度和确切位置等特征信息,实时测知工作对象所需工作的质、量和时机等数据,形成处方图控制可变量喷头(包括电磁阀和喷头等)以优化的农药剂量,精确喷洒于靶标,减少甚至杜绝非靶标农药流失与飘移[110-111]。

智能对靶喷雾集成技术：围绕智能对靶喷雾技术建设农药自动精确施用系统试验台,分析影响植物生长的环境存在的时空差异性、病虫草害种群数量随时间和空间的演变过程以及病虫草害种群与自然环境因子之间的相互作用,集成知识库(病虫草害历史情况和植保专家研究与生产实践知识等)、

数据库(植保机械专题数据库及其实时使用数据、GIS时空数据、农药使用属性数据等)、农药使用技术专家系统ES、决策支持系统DSS和各类处理算法等,结合喷雾靶标特征和病虫害防治目标阈值,采用知识规则对事实数据进行推理,集成建立对靶喷雾智能决策支持系统IDSS,分析智能喷雾系统施药过程中的雾滴运动模拟、靶标图像采集、图像分割、施药决策、数据交换等,分析控制策略,设计控制系统,控制可变量喷头实现特定区域的农药精确对靶施用[55,110-113]。

多功能柔性底盘系统:为满足农林作物不同生长环境地形的复杂性,以及适应不同作物不同生长阶段植保作业时作物状态的多变性,要求智能对靶喷雾机的底盘具备良好的越野通过性、操纵性、乘坐舒适性和行驶平顺性,对底盘高度调节,轮距调整,不同规格的药箱、泵、喷杆的安装要求等都会对底盘的柔性提出更高的要求,因此要开展多功能智能化柔性底盘系统研究,包括底盘动力系统、柔性底盘控制、导航系统、定位与轨迹优化等[114-116]。

2 典型地面植保机械研究进展

2.1 防飘移喷雾机

防飘移喷雾机包括风幕式防飘喷雾机、罩盖式防飘喷雾机、隧道式喷雾机、循环喷雾机、静电喷雾机、固定式农药冠层输运系统等典型机具,也有研究专用防飘移喷头[21]。

风幕式防飘喷雾机:风幕式防飘喷雾机通常是在喷杆喷雾机喷杆上增加风机和风筒,喷雾作业时在喷头上方沿喷雾方向强制送风形成风幕,增大雾滴穿透力,减小飘移[117-118]。

罩盖式防飘喷雾机:罩盖式防飘喷雾机可以通过圆弧结构罩盖的导流作用改变雾流周围的空气流场,使雾滴在短时间内沉积在靶标而达到防飘目的[119]。

隧道式喷雾机:隧道式喷雾机采用两组相对的风机形成隧道式喷雾模式来提高靶标上的雾滴沉积[120-121]。

循环喷雾机:循环喷雾机设药液雾滴回收装置,喷雾时雾流横向穿过靶标冠层,未被冠层附着的雾滴进入回收装置,过滤后返回药液箱,提高农药有效利用和减小飘移[121]。

静电喷雾机:静电喷雾机通过高压静电发生器使从喷头喷出的雾滴带电,荷电雾滴在电场力和其他外力作用下向靶标运行,促进雾滴在靶标(特别是靶标背面)沉积[101-122]。

固定式冠层农药输运系统:固定式冠层农药输运系统(SSCDS)由一系列微喷头组成并固定分布于整个高密度果园,图1显示微喷头在果园的不同安装位置(冠顶、树间、树间斜下喷、树间斜上喷)[123]。图2为工作框图[124],混合药液从药箱1在公共泵站2产生的小于240 kPa压力作用下,经过阀3而充满整个输运管路4,多余药液经管路5通过回流阀7与管路6返回药箱10;当关闭回流阀7时,泵压增至415 kPa,微喷头8间隔10 s进行喷洒;打开回流阀7,在气泵9作用下,输运管路剩余药液由管路5经过管路6回到药箱10,从而实现自动化而快速精确施用农药,最大限度减少农药飘移,避免操作人员接触农药以及解决作业机械造成果树损坏和土壤压实等问题。

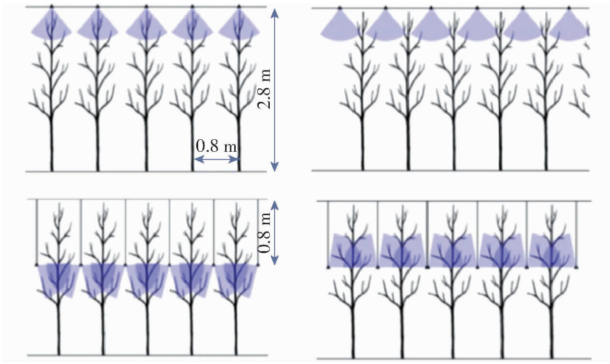

图1 喷头在果园的不同安装位置

Fig. 1 Configurations to install different emitters within tree canopy

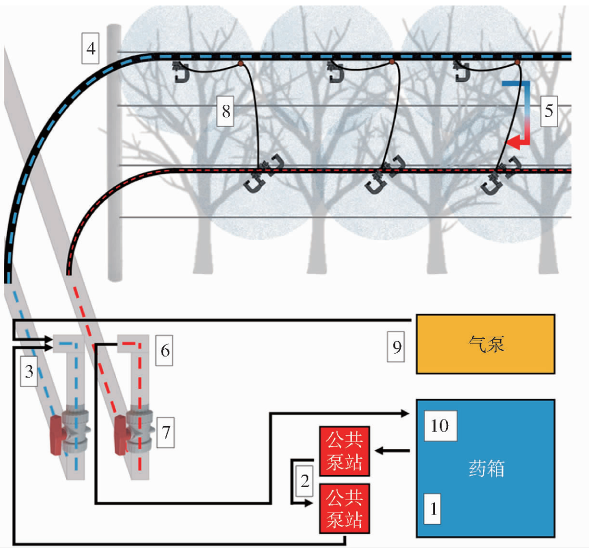

图2 SSCDS工作框图

Fig. 2 Schematic of solid set canopy delivery system

2.2 仿形喷雾机

仿形喷雾机通过红外线、超声波、图像和LiDar等仿形目标探测方法与技术获取靶标植物冠层特征信息,自动调节仿形机构到达实时处理得到的喷雾距离时,对靶标冠层按需变量喷施农药,提高雾滴在靶标植物冠层分布的均匀性和农药施用效率,国内

主要开展了果园和茶园等仿形喷雾机的设计和试验研究[62,125]。

2.3　喷杆喷雾机

喷杆喷雾机包括牵引式、自走式和悬挂式，其中自走式喷杆喷雾机是一种将喷头装在横向喷杆或竖立喷杆上，自身可以提供驱动动力与行走动力，不需要其它动力提供就能完成自身工作的一种植保机械，如中小型自走式喷杆喷雾机、大型自走式喷杆喷雾机及遥控自走式喷杆喷雾机等，以及滑板揽索式水田宽幅喷杆喷雾机、可调地隙与轮距的高地隙自走式喷杆喷雾机等，需要研究减振控制、辅助驾驶系统、转向系统等关键技术[126－128]。

2.4　杂草防除机械

除了杂草在种子萌发及萌芽期采用土壤处理剂及土表施药外，杂草营养生长后期主要采用叶面喷施除草剂。化学除草剂选择性强，要求除去杂草而不伤害作物。为了提高杂草防除效率和减小环境污染，通过杂草靶标识别信息和其他信息，采用杂草定点防除机械，分别对各单个喷头的喷量通过喷雾阀进行控制[129]。精确侧向喷雾系统应用机器视觉系统和快速响应间歇喷雾系统，在离喷雾机外侧一定位置，通过图像采集处理和位移触发控制，控制喷杆上每一喷头喷出雾滴的运行，向有杂草危害区域喷雾[130]。有研究采用切割杂草涂抹技术[131]。

2.5　果园喷雾机

对于较大面积果园，通常采用风送喷雾机，高速气流有助于雾滴翻动叶片并穿透果树冠层而输送至果树各部位。果园喷雾机通常有悬挂式、牵引式和自走式。当前开展了大量自走式定向精确对靶果园喷雾机研究以及关键技术参数试验研究等[132－133]。

2.6　智能喷雾机及喷雾机器人

智能喷雾机通过传感器识别靶标特征，制定喷雾决策，进行对靶施药、变量或按需施药，避免无效喷雾，实现减少农药用量、最佳病虫草害防治效果和降低环境污染的目的，如基于视觉传感器对靶标植物实施精量喷雾系统等[134－139]，和基于喷雾距离和叶面积密度的果园智能农药精确喷雾模型，调整最佳喷雾距离和剂量提高施药效率[137－139]。为了使智能喷雾机能通过软/硬件模块的重构，来实现适应不同作业环境与对象的精准变量施药作业，形成适于智能喷雾机可重构模块化设计的 P－BfP 设计方法[140]。随着传感器、机器人和人工智能等技术的发展，喷雾机器人应运而生[131,141－142]，根据车辆速度和施药量要求计算压力设定值，获取植物生长状态，实现压力鲁棒控制，反馈调节控制喷雾压力[142]。

3　典型航空植保机械研究进展

农业航空施药应对突发性病虫害能力强、作业效率高、单位面积施药量少、不留车辙印、作业成本低，1911 年德国研究用飞机喷洒农药控制森林虫害，1949 年美国研制农用固定翼飞机，1987 年日本研制农用无人直升机。中国于 20 世纪中叶开展航空喷雾研究，开展了直升机、航空静电喷雾技术等研究，至 21 世纪开发植保无人机，截至到 2018 年底，中国 300 多家植保无人机生产企业，已生产 253 种 3.15 万架各类植保无人机。同时研究精确和安全施药的航空喷头及飘移控制、可变量控制、优化喷雾模型以及配合各种应用技术[143－145]，本文重点综述植保无人机的发展状况。

3.1　植保无人机分类及特点

无人机 UAV 是利用无线遥控设备和程序控制装置的不载人飞机。按照结构不同，无人机可以分为固定翼无人机、无人直升机和多旋翼无人机等。目前植保无人机发展了包括油动单旋翼和电动单旋翼、四旋翼、六旋翼、八旋翼植保无人机等。

植保无人机在一定程度上具有较多的优点[146－169]，总体归纳包括：①机动灵活性好，平台构建容易，速度调节快速方便，无需专用起降机场，可远程操控，安全便捷，机动性好，如常规固定翼无人机系统为稳定系统，同时具有完整的驱动系统，飞行速度快。②复杂地形适应性好，不受泥泞田地等限制，适应性强，如常规无人直升机具有完整的驱动系统，可原地垂直起升、悬停。③作业效率高，低空低量喷雾的旋翼植保无人机作业效率高，场地要求低，飞行高度低，如单旋翼无人机的风场稳定，无翼间气流干扰且雾滴下压效果好，同时翻叶可部分提高雾滴冠层穿透性。④对非防治目标损伤小，可避免对非防治目标的物理损伤和减少农田土壤破坏，可空中悬停，一定程度上可实现定点喷洒，作业质量高。⑤应变能力好，体积小，质量轻，应付突发灾害能力强，如多旋翼无人机的动力学模型和结构相对简单，对起降场地要求不高，转场防治容易，操纵简单。

但不可忽视的是植保无人机及其性能仍存在不足和不确定性[146－169]，需要进一步完善，如：①综合喷雾性能不足，对大型或枝繁叶茂植物的冠层，雾滴穿透性差、施药雾滴分布不均匀等，飞行高度较大时采用低容量细小雾滴喷雾，对靶性不足，飘移风险极高，农药飘移产生次生灾害，过量使用致环境污染、施药纠纷频发。②续航时间短，多旋翼控制系统难设计，气动效率低，飞行时间短，电池续航时间短。③有效载重量小，携药量较低。④需要专业操作人

员,虽然单旋翼无人机操纵简单易学习,但结构复杂维护不方便,而多旋翼无人机的操作系统需要较高的操作技巧,喷雾准确性不高,还有飞行安全事故隐患。⑤飞行稳定性不足,低空低速飞行时作业不够稳定,无法适应田间高温、频繁起降要求,不容易稳定操控而影响防治效果。⑥产业链不够完善,航空作业法律法规和技术标准的完善性、雾化部件性能低等自身产品质量、农药有效利用率、飞行安全监管等方面仍存在诸多问题,无人机制造、租赁、培训等配套尚处起步阶段,制约着植保无人机的推广。

3.2 植保无人机关键技术

旋翼植保无人机喷雾关键技术研究包括:旋翼及下洗风场、喷头类型及喷雾参数、电池及续航能力、控制系统及航线规划、避障和配套部件及其对雾滴沉积分布、防治效果等的影响。如,研究无人机旋翼数、旋翼分布及其产生的下洗风场与飞行方式、飞行高度、侧风等对雾滴运动动力特性的影响[149-152];研究植保无人机专用雾化装置及其喷雾参数以及植保无人机静电喷雾系统[152-154];利用激光位移传感器等识别障碍物特征,开展避障技术组合、实时性主动避障技术、建立辅助避障系统和制定避障流程标准等研究[155-156]。

3.3 植保无人机性能和防治效果测试

植保无人机喷雾参数是影响雾滴飘移和沉积效果的重要指标,主要包括最佳作业高度和作业速度范围。为克服田间试验的随机性、不可重复性、片面性,可建立喷雾综合实验台,测试无人机在不同旋翼转速、飞行高度、喷头参数情况下的雾滴粒径及沉积分布等[157-158],利用风洞试验设施分析悬停无人机变量喷药的雾滴沉积规律[159],采用手持式三维激光扫描仪和 CFD 模拟研究确定最佳作业参数以减少雾滴飘移[160],以及进行实际田间飘移测试[161]等;国内外开展了大量的靶标形状[162]、飞行参数(飞行高度、飞行速度)[163-164]与喷雾参数[165-166]、旋翼机下洗流场对雾滴飘移与冠层沉积分布的影响[154,167]测试研究。融合 CHARM 和 AGDISP 的算法研究跟踪旋翼无人机喷雾飘移和沉积预测[168];研究植保无人机施药雾滴空间质量平衡测试方法,采用雾滴质量平衡收集装置、北斗卫星定位系统和多通道微气象测量系统联用,对国内典型植保无人机沉积和飘移特性进行评估[169]。

4 创新研究思路与展望

4.1 环境友好型植保机械研究理念与总体思路

本文结合国内外植保机械发展状况及问题分析,提出未来植保机械应创新融合人、药、械、技,秉承“绿色环保、精确高效”的研究思路。

绿色环保理念:植保作业的绿色环保包括环境最友好、操作最安全、产品最优质等植物保护系统发展思想。①持续开展融合物理防治、农艺措施、低毒无毒及生物农药、飘移控制、农药残留检测与降解、农药全寿命周期管理等环境最友好植保技术研究,监测评估有害生物及潜在危害,将 IPM(Integrated pest management)各种策略组合成最适合特定需求的行动计划。②进一步研究在线混药、遥控自动、植保无人车平台、无线物联智能植保系统等操作最安全的植保技术,在农药施用前、中、后期用最少人工介入准确操控农药施用全过程。③采用现代设计方法以及智能制造技术等研发产品最优质的植保机械。

精确高效理念:精确高效理念包括防治理性化、使用精确化、浪费最小化、效率最大化等。①防治理性化要考虑生态平衡的主动干预和防治阈期的被动防治,根据生物链逐步开发不同的生物调节剂来影响、调节和改变有害生物体的生长,提高利于植物生长发育的机能,如提高对病害免疫能力等的农作物自主灭虫法。②使用精确化的核心是综合运用传感、大数据、人工智能等技术,真正做到按需处方对靶施药喷雾作业;进一步改进如静电喷雾、对靶喷雾、涂抹、注射、药包定向投射等有助于农药高效使用的技术;研究对生物或非生物胁迫敏感的智能纳米生物材料对靶标进行修饰,然后根据生物信息变化精确控制靶标施药的技术。③浪费最小化包括设计农药闭环使用系统和开发雾滴回收系统等。④效率最大化的主要措施有航空施药、大型专用植保机械和多功能集成技术等。

4.2 环境友好型农药喷雾机械发展建议

4.2.1 植保机器人与专用植保机械研发

探索开发能替代人类不愿干、不能干、干不好的植保机器人和专用植保机械。

(1)植保机器人及其阵列研究

集成传感器和高速物联网、云存储等,开发地面无人驾驶喷雾机器人,使之成为互联网的终端和结点,实现对外部相关信息(如靶标信息、环境信息等)的实时反馈;配备类似人眼、耳、鼻、触觉的靶标及环境因子传感设备,研究手脚并控型多足多臂专用植保机器人;采用 AI 帮助基于语言理解的植保机器人处理非规则、非连续性信息,使会学习、可交互的植保机器人能处理复杂繁琐的植保作业;研究面向植保机械多机协同作业的植保机器人阵列,即由一系列小规模网络化机器人阵列组成更大的田间植物保护系统,分别检测、控制田块中各类病虫草害。

（2）专用植保机械研究

研制符合国情的专用植保机械，如高性能防飘移喷雾机械及辅助装备、智能化自走式喷杆喷雾机、密闭空间烟雾机、远程遥控或在驾驶室可控制所有作业操作程序的全自动无人介入植保系统等；融合植物表型进行植物定制，实现半自主（需人工干预）智能植保机械、全自主（无人干预）智能植保机械。

4.2.2　航空施药机具与植保无人机研究

基于农林航空喷雾在高效和应对爆发性农林病虫害的必要性，发展适合中国国情的航空喷雾装备，同时针对植保无人机在农林应用的优势以及存在的问题，在推广应用精准导航、主动避障、定量施药基础上，进一步开展专用无人机及机群系统、关键施药装备及专用药剂等研究。

（1）无人机作业环境与靶标研究

针对无人机在高度、对靶、飘移、反应时间存在的问题，研究包括光学吊舱、遥感平台、遥感影像处理、病虫害识别模型的内置靶标识别装置；分析施药时细雾滴运动规律与作物冠层内外气象因子的相关性，研究雾滴飘移模型及高效防飘喷雾技术；研究包含超声波、双目立体视觉系统、TOF 技术、三维地形图导航等及其组合的智能避障系统，实现无人机自主飞行与避障仿形精确喷雾。

（2）植保无人机关键部件研究

通过多传感器靶标感知与定位融合冠层相对高度测量、路径规划导航、综合作业处方图、飞行控制、多参量（相对高度、飞行速度、姿态信息）驱动，研究旋翼下洗风场下雾滴运动规律，实施航空精准施药处方变量喷雾控制、有效沉积控制等；研究植保无人机靶标侦测、姿态控制、随速变量和喷头定向等，实现超低空稳定仿形飞行以缩小喷头与靶标的距离，开展高速植保作业试验，研究航空静电施药技术，减小雾滴飘移。

（3）专用植保无人机及其相关技术研究

研究适于不同地区和满足不同植物病虫草害防治要求的无人机航空植保专用制剂、无人机专用喷头、低空低量航空施药装备、各种专用轻型飞行器系列与其相结合的高效航空施药系统。

（4）自主植保无人机群系统设计

研究实施具备自主靶标识别、跟踪定位与对靶喷雾作业、断点续喷、自动返航能力的无人机，集成设备、飞行数据、植保等信息，设计零人工干预和长续航时间的植保无人机系统，并研究无人机多机协同自主作业集群系统。

4.2.3　智能物联农药喷雾系统研究

依托物联网、大数据、人工智能等技术，通过传感网络系统[61]实现靶标传感、植保机械及其环境信息形成智能驱动物联无人植保系统，准确预测植物冠层大小、形状和密度、胁迫因子及病虫草害发生迁移情况等，确定精确的喷雾时机以控制病虫草害。图 3 所示为智能物联农药喷雾系统框图。

（1）病虫草害靶标智能监测识别与防治预警系统

通过卫星遥感、无人机、地面生物与非生物传感器等立体化感知获取各类信息，融合监测数据和气候条件、植物品种特性、植物生长过程信息、土壤信息及病虫害防治历史数据等，大数据分析确定精确植保作业处方图；架构物联网系统建设病虫草害预警网络直报系统平台，预测与预警入侵生物、迁飞害虫，增强病虫草害检测预警时效性及早期监测预警能力；通过即时分析计算，超出天敌防治范围或危害

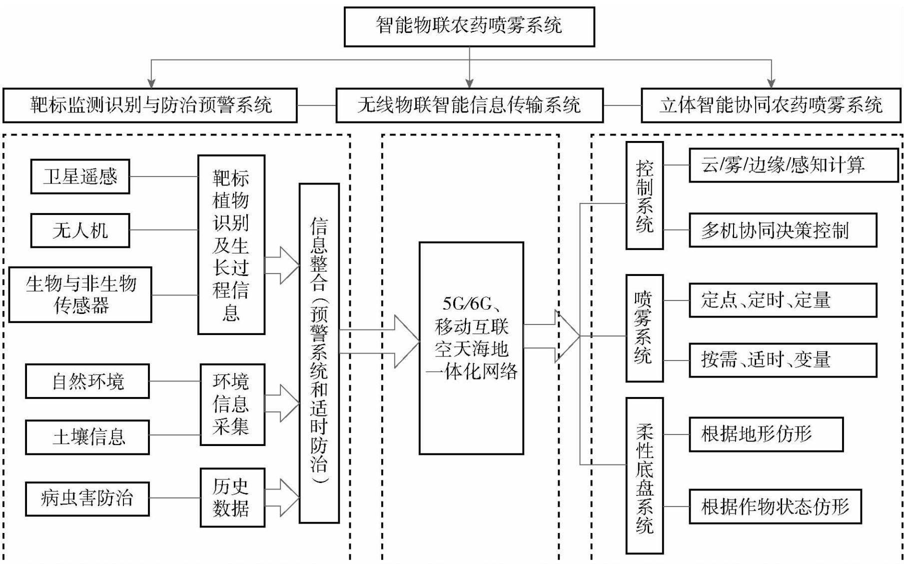

图 3　智能物联农药喷雾系统框图

Fig. 3　System diagram of intelligent IoT-driven pesticide spraying system

阈值,开启病虫草害适时防治作业,落实应急反应,联防联控。

(2)无线物联智能植保信息传输系统

值5G商用、6G(峰值速率、时延、连接数密度、移动性、定位能力等远优于5G)研发之机,研制无线物联智能移动终端,实现智能植保机械海量数据传输和互联网共享控制;为实现植物病虫草害智能诊断、预警以及智能化无人植保作业等功能,运用5G/6G技术,通过传感网络形成防治区域、自然环境、靶标生长、病虫害防治等大数据群,将各种植保机械组成作业机具网以及中国北斗卫星“天网”(也可结合“星链计划”),引入空天海地一体化网络技术,通过天网与地网融合形成智能植保信息传输系统,无死角地实现智能植保信息采集传输。

(3)立体智能协同农药喷雾系统

集成大数据智能、移动互联、云计算等技术充实智能植保机械的智慧大脑,研究基于云/雾/边缘计算和感知计算、群体智能、边缘智能和人机混合智能的地面与航空植保装备多机协同决策控制,研制适应复杂地形和不同植物冠层特征的柔性底盘系统,完成作业路径分时或跟随施药,实现对靶标冠层中下部与中上部施药互补,利用专家群体智能接受事故教训的负学习能力,解决作业精度要求高、作业环境复杂、安全风险防控难的问题,形成立体智能协同农药喷雾系统,更进一步可与综合防治系统深度融合形成泛系智能植保机械系统。

4.2.4 植保机械关键技术研究

综上,为满足越来越高的环保要求,分析农药喷施机械的技术特性、适用性和推广应用程度,提出农药喷雾关键技术的研究方向为微量、精准、精确、智能,见表1。其中,喷头及农药输运系统和喷雾机载运平台是决定农药喷雾系统性能的关键部件。

表1 农药喷雾关键技术研究及其发展

Tab.1 Research and development of key technologies for pesticide spraying

研究方向	研究热点	优势与局限分析	发展建议
微量	雾化方式及其效果 飘移、沉降	雾化效果好,可有效降低农药使用量,但会使飘移量增加	结合仿形喷雾进行小区域喷施系统研究,可实现微量喷雾并最大限度减少飘移
精准	仿形喷雾技术 静电喷雾技术	能根据作物大小、形态实现雾滴定向移动,但仿形准确性和静电实施可靠性需进一步研究	进行静电雾化和仿形机构及其智能控制一体化系统研究,开发系列化、标准化、智能化的模块和系统
精确	在线混合技术 可变量控制技术	有效减少农药的污染环节,可基本实现农药按需变量施用,但精确程度还需不断提高	研究适于不同类型的“农药”在线施药技术,并开发相应的处方施药可变量控制系统(软硬件)
智能	智能对靶喷雾技术	可实现按靶标形态及其危害程度,按需对靶适时可变量精确施药,但对靶标植物的适应性、控制的精确性、操作的智能化程度还需进行广泛深入研究	结合病虫草害大数据、靶标植物形态大数据、地形地貌大数据,建立相应的数据库,研究基于大数据的施药智能控制系统及其控制技术(软硬件)

(1)新型喷头及在线混药研究

按照生物最佳粒径理论的不同生物靶标对雾滴粒径的选择捕获能力,研究可控滴技术提高雾滴的对靶沉积能力;根据植物病虫草害类型,开展基于PWM等技术的可变量控制,开展包括低飘移喷头的新型专业化喷头及其雾化理论研究;按照不同农药剂型开展液液、液固在线混药技术及其混药器研究。

(2)智能化载运平台研究

植保机械作业效率很大程度上取决于其载运工具能力及智能化水平。①智能化柔性底盘:采用全液压系统的液压驱动转向、制动、行走及药泵等,使整机结构简化和传动系统可靠,研制适应复杂地形及地况的多功能智能化柔性动力底盘。②植保无人车平台:无人化植保作业需要自动导航驾驶系统,具备全方位感知探测和侦测避障能力、远程监测及操控功能等,研究具备自主爬坡自动巡视的强大地形及其土壤条件的适应能力、足够动力配备及收集运动过程中可能转化的能量自给(如各类可燃物投入外燃机转化能量、风能及各类振动能量等)、自动运输能力(如长续航时间与智能往返能力)、灵活的操控方式(航线模式、往返模式、跟随模式、遥控模式)等的植保作业无人车平台;开展陆空联合载重型植保无人机(无人飞行车)研制,除收起轮子进行空中喷洒农药外,还可兼顾地面运输及作业。③外骨骼植保机器人平台:外骨骼植保机器人平台属于仿生学领域的可穿戴机器人,分析不同动物脚部和骨骼的生理结构,可将人体机能与外部机械动力装置的机械能结合,如按照人的智能或检测到运动意图控制指令,采用碳纤维和航空级铝合金材料,通过足式或轮式行走机构以及手控或脚控骨骼及其关节,通过液压、气动或电机驱动,发挥外骨骼强劲的承载能力,给人提供额外的动力或能力,然后根据不同作业需求安装相应植保执行机构,即实现小型植保机械从“人背机械”向“机械背人”转化。

在农药仍为解决全球饥荒问题重要保障的时代,精确使用农药成为必然选择,这就要求开发出具

有先进理念和创新性思维的环境友好型农药喷雾系统及其机械产品，因此需要培养具备颠覆式创新能力的科技人才，以绿色防控、融合创新、智能互联为重点，开展多学科深度合作，进行植保作业信息挖掘及其大数据平台建设，构建智能化植保信息传输系统，突破和掌握靶标识别与植物生长模型建设、喷头设计制造、在线混药器设计、植保机器人设计、无人机控制系统研究、智能植保机械柔性底盘研发、植保作业无人化技术研究等，促进中国农药喷施机械标准化、专业化、系列化、高质量发展的格局。

参 考 文 献

[1] 郑加强，周宏平，徐幼林. 农药精确使用技术[M]. 北京：科学出版社，2006.

[2] GILES D K, BEN-SALEM E. Spray droplet velocity and energy in intermittent flow from hydraulic nozzles[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1992, 51(2): 101 – 112.

[3] 张慧春，DORR Gary，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, 52.
ZHANG Huichun, DORR Gary, 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, 52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120610&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.010. (in Chinese)

[4] XIAO Liping, ZHU Heping, WALLHEAD M, et al. Characterization of biological pesticide deliveries through hydraulic nozzles [J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(3): 897 – 908.

[5] DERKSEN R C, BODE L E. Droplet size comparisons from rotary atomizers[J]. Transactions of the ASAE, 1986, 29(5): 1204 – 1207.

[6] 周良富，张晓辛，吕晓兰，等. 圆盘雾化器风力性能数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 72 – 75, 81.
ZHOU Liangfu, ZHANG Xiaoxin, LÜ Xiaolan, et al. Numerical simulation and experimental study on the wind performance of the disc atomizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 72 – 75, 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20121013&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.013. (in Chinese)

[7] 郑加强，冼福生. 风动转笼式静电喷雾技术的研究[J]. 农业机械学报, 1990, 21(1): 55 – 61.
ZHENG Jiaqiang, XIAN Fusheng. Research on wind-driven rotary-cage electrostatic spraying technique[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(1): 55 – 61. (in Chinese)

[8] PANNETON B. Geometry and performance of a rotary cup atomizer[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(4): 435 – 441.

[9] LAKHIAR I A, GAO Jianmin, XU Xiuquan, et al. Effects of various aeroponic atomizers (droplet sizes) on growth, polyphenol content, and antioxidant activity of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(6): 1475 – 1487.

[10] 高良润. 关于植保机械的若干雾化理论问题[J]. 农业机械学报, 1980, 21(3): 78 – 88.

[11] ZHAI E Y, ZHENG J Q, RU Y, et al. Atomization mechanism and numerical simulation of external mixing two-fluid fan nozzle[J]. EKOLOJI, 2019, 28(107): 4277 – 4288.

[12] HIMEL C M. The optimum size for insecticide spray droplets[J]. J. Econ. Entomol., 1969, 62(4): 919 – 926.

[13] 祁力钧，赵亚青，王俊，等. 基于 CFD 的果园风送式喷雾机雾滴分布特性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 62 – 67.
QI Lijun, ZHAO Yaqing, WANG Jun, et al. CFD simulation and experimental verification of droplet dispersion of air-assisted orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 62 – 67. (in Chinese)

[14] KUMAR S R, REGUPATHY A. Spray pattern and droplet spectrum of certain high volume spray nozzles[J]. Pesticide Research Journal, 2000, 12(1): 14 – 20.

[15] BRUNO C V, GUILHERME S A, FERNANDO K C, et al. Influence of airspeed and adjuvants on droplet size distribution in aerial applications of glyphosate[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(3): 507 – 513.

[16] SHARPE S M, BOYD N S, DITTMAR P J, et al. Spray penetration into a strawberry canopy as affected by canopy structure, nozzle type, and application volume[J]. Weed Technology, 2018, 32(1): 80 – 84.

[17] 刘春景，郑加强，王科元. 静电喷头雾化特性预测模型[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 63 – 68.
LIU Chunjing, ZHENG Jiaqiang, WANG Keyuan. Prediction model for atomization performance of electrostatic spraying nozzle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 63 – 68. (in Chinese)

[18] SCOTT L P, ANDREW J H. Flat-fan spray atomization model[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4): 1249 – 1256.

[19] REICHARD D L, OZKAN H E, FOX R D. Nozzle wear rates and test procedure[J]. Transaction of the ASAE, 1991, 34(6): 2309 – 2316.

[20] 翟恩昱，郑加强. 扇形喷头球头结构建模与磨损试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 65 – 69.
ZHAI Enyu, ZHENG Jiaqiang. Spherical top structure mathematical model and wear experiments of flat fan nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 65 – 69. (in Chinese)

[21] SCOTT L P. Drift of droplets from air-induction nozzles[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(6): 1683 – 1687.

[22] WOMAC A R, BUI Q D. Design and tests of a variable-flow fan nozzle[J]. Transactions of ASAE, 2002, 45(2): 287 – 295.

[23] BODE L E, LANGLEY T E, BUTLER B J. Performance characteristics of bypass spray nozzles[J]. Transactions of ASAE, 1979, 22(5):1016-1022.
[24] GILES D K, COMINO J A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles[J]. J. Agric. Eng. Research, 1990, 47: 249-267.
[25] WOMAC A, VALCORE D, MAYNARD R. Variable-concentration direct injection from fixed-ratio diluent-driven pumps[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(6):1721-1728.
[26] GILLIS K P, GILES D K, SLAUGHTER D C, et al. Injection mixing system for boomless, target-activated herbicide spraying [J]. Transactions of the ASAE, 2003, 46(4):997-1008.
[27] VONDRICKA J, LAMMERS P S. Real-time controlled direct injection system for precision farming[J]. Precision Agriculture, 2009, 10(5):421-430.
[28] XU Youlin, WANG Xiwei, ZHENG Jiaqiang, et al. Simulation and experiment on agricultural chemical mixing process for direct injection system based on CFD[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5):148-152.
[29] 刘志壮,徐汉虹,洪添胜,等. 在线混药式变量喷雾系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2009, 40(12):93-96.
LIU Zhizhuang, XU Hanhong, HONG Tiansheng, et al. Design and experiment of variable-rate spraying system of online mixing pesticide[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):93-96. (in Chinese)
[30] 邱白晶,徐溪超,杨宁,等. 射流混药装置结构参数对混药性能影响的模拟分析[J]. 农业机械学报,2011, 42(6):76-79,69.
QIU Baijing, XU Xichao, YANG Ning, et al. Simulation analysis of structure parameters of jet-mixing apparatus on jet-mixing performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):76-79,69. (in Chinese)
[31] 周良富,傅锡敏,薛新宇,等. 基于 CFD 的射流式在线混药装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 107-112.
ZHOU Liangfu,FU Ximin,XUE Xinyu,et al. Design and experiment of jet mixing apparatus based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp. 1):107-112. (in Chinese)
[32] SHEN Y, ZHU H. Embedded computer controlled premixing inline injection system for air-assisted variable-rate sprayers[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(1):39-46.
[33] 蔡祥, MARTIN M, WALGENBACH M,等. 喷嘴直接注入式农药喷洒系统控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):100-105.
CAI Xiang, MARTIN M, WALGENBACH M, et al. Control methods of direct nozzle injection system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):100-105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161113&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.013. (in Chinese)
[34] 宋海潮,徐幼林,郑加强,等. 基于减小有效长度的旋动射流混药器结构参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 62-69.
SONG Haichao, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Structural parameters optimization of swirling jet mixer based on reducing effective length[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):62-69. (in Chinese)
[35] ZHANG Zhihong, ZHU Heping, HU Chengsong. Hardware and software design for premixing in-line injection system attached to variable-rate orchard sprayer[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 823-846.
[36] LUCK J D, SHEARER S A, SAMA M P. Development and preliminary evaluation of an integrated individual nozzle direct injection and carrier flow rate control system for pesticide applications[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 505-514.
[37] DÖRPMUND M, CAI X, WALGENBACH M, et al. The challenge of cleaning direct-injection systems for pesticide application [J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(5): 1643-1650.
[38] 宋海潮,徐幼林,郑加强,等. 脂溶性农药旋动射流混合机理与混药器流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(9):79-84.
SONG Haichao, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Development of swirling jet mixer to apply fat-soluble pesticides through in-line injection spray technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160912&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.012. (in Chinese)
[39] CHI K, BIGSBY R. Chemical flow rate control in injection-type sprayers[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1980, 30(1):19-26.
[40] 代祥,徐幼林,郑加强,等. 基于 3D 图像重构的水分散粒剂在线混合分析方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(5): 98-107.
DAI Xiang,XU Youlin,ZHENG Jiaqiang,et al. Analysis method and experiments of inline mixing water dispersible granules pesticides based on 3D image reconstruction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):98-107. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200510&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.010. (in Chinese)
[41] ZHU H, OZKAN H E, FOX R D, et al. Mixture uniformity in supply lines and spray patterns of a laboratory injection sprayer [J]. Transactions of the ASAE, 1998, 14(3):223-230.
[42] 宋海潮,徐幼林,郑加强,等. 脂溶性农药旋动射流混药器结构分析与混合均匀性试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32

(23):86 - 92.
SONG Haichao, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Structural analysis and mixing uniformity experiments of swirling jet mixer for applying fat-soluble pesticides[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(23):86 - 92.(in Chinese)

[43] DARQUEA D, SWAISGOOD H E, FOEGEDING P M. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying[J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(1):73 - 82.

[44] 徐幼林,郭敬坤,郑加强. 农药在线混合均匀度高速摄影分析[J]. 农业机械学报,2011,42(8):75 - 79.
XU Youlin, GUO Jingkun, ZHENG Jiaqiang. Mixing uniformity of chemical and water in direct injection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):75 - 79. (in Chinese)

[45] LUCK J, SHEARER S, LUCK B. Evaluation of a Rhodamine-WT dye/glycerine mixture as a tracer for testing direct injection systems on agricultural sprayers [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2012, 19(28):643 - 646.

[46] 欧鸣雄,贾卫东,邱白晶,等. 射流混药装置变工况流场特性试验与数值分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 107 - 111.
OU Mingxiong, JIA Weidong, QIU Baijing, et al. Experiment and numerical analysis of flow field in jet mixing device under variable working conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):107 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150915&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.015. (in Chinese)

[47] DAI Xiang, XU Youlin, CHEN Junyang, et al. Evaluation of mixing uniformity for inline mixers by image processing [J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(2):429 - 443.

[48] ROCKWELL A D, AGERS P D. Variable rate sprayer development and evaluation [J]. Applied Engineering in Agricultrue, 1994, 10(3): 307 - 333.

[49] 陈勇,郑加强,周宏平,等. 精确农业管理系统可变量技术研究现状与发展[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6):156 - 159.
CHEN Yong, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. R&D of variable rate technology in precision agriculture management system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(6):156 - 159. (in Chinese)

[50] 邱白晶,闫润,马靖,等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):59 - 72.
QIU Baijing, YAN Run, MA Jing, et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(3):59 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150309&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009. (in Chinese)

[51] LLORENS J, GIL E, LLOP J, et al. Variable rate dosing in precision viticulture: use of electronic devices to improve application efficiency[J]. Crop Protection, 2010,29(3): 239 - 248.

[52] JEON H Y, ZHU H, DERKSEN R, et al. Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011,75(1): 213 - 221.

[53] ZHOU J, HE X, LANDERS A J. Dosage adjustment for pesticide application in vineyards[J]. Transactions of ASABE, 2012, 55(6): 2043 - 2049.

[54] ZHAI Changyuan, WANG Xiu, LIU Dayin. Nozzle flow model of high pressure variable-rate spraying based on PWM technology[J]. Advanced Materials Research, 2011,422: 208 - 217.

[55] GOPALAPILLAI S, TIAN L, ZHENG Jiaqiang. Evaluation of a spray control system for variable rate herbicide applications [J]. Transactions of ASAE, 1999,42(4): 863 - 870.

[56] TIAN Lei, ZHENG Jiaqiang. Dynamic deposition pattern simulation of modulated spraying[J]. Transactions of ASAE, 2000, 43(1):5 - 11.

[57] 邓巍,丁为民,何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009,40(1): 74 - 78.
DENG Wei, DING Weimin, HE Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(1):74 - 78. (in Chinese)

[58] 胡开群,周舟,祁力钧,等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. 农业机械学报. 2010,41(6):70 - 74.
HU Kaiqun, ZHOU Zhou, QI Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable-rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(6):70 - 74. (in Chinese)

[59] GU J, ZHU H, DING W, et al. Droplet size distributions of adjuvant-amended sprays from an air-assisted five-port PWM nozzle[J]. Atomization and Sprays, 2011,21(3): 263 - 274.

[60] 蒋焕煜, 周鸣川, 童俊华, 等. 基于卡尔曼滤波的 PWM 变量喷雾控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(10): 60 - 65.
JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, TONG Junhua, et al. PWM variable spray control based on Kalman filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):60 - 65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141010&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.010. (in Chinese)

[61] 郑加强,徐幼林. 精确林业传感技术和无线传感器网络研究进展[J]. 林业工程学报, 2016, 1(2):9 - 16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Review and prospect of sensing technologies and wireless sensor networks for precision forestry [J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(2):9 - 16. (in Chinese)

[62] 南玉龙. 基于树冠密度检测的智能仿形变量喷雾机及机构自适应控制研究[D]. 南京:南京林业大学,2020.
NAN Yulong. Research on intelligent variable profiling sprayer and mechanism adaptive control based on canopy density detection[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020. (in Chinese)

[63] 洪添胜，王贵恩，陈羽白，等. 果树施药仿形喷雾关键参数的模拟试验研究[J]. 农业工程学报，2004，20(7):104－107.
HONG Tiansheng, WANG Guien, CHEN Yubai, et al. Profile modeling of spray parameters of chemical solution application to fruit tree[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(7): 104－107. (in Chinese)

[64] DUGA A T, RUYSEN K, DEKEYSE R 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.

[65] 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? flag = 1&file_no = 20191011&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.011. (in Chinese)

[66] 刘秀娟，周宏平，郑加强. 农药雾滴飘移控制技术研究进展[J]. 农业工程学报，2005，21(1): 186－190.
LIU Xiujuan, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang. Research advances of the technologies for spray drift control of pesticide application[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 186－190. (in Chinese)

[67] NUYTTENS D, SCHAMPHELEIRE M D, BAETENS K, et al. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a 5 year study[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(2): 403－408.

[68] 袁雪，祁力钧，冀荣华，等. 温室风送式弥雾机气流速度场与雾滴沉积特性分析[J]. 农业机械学报，2012，43(8):71－77.
YUAN Xue, QI Lijun, JI Ronghua, et al. Analysis on features of air-velocity distribution and droplets deposition pattern for greenhouse air-assisted mist sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 71－77. (in Chinese)

[69] MAYO L C, MCCUE S W, MORONEY T J, et al. Simulating droplet motion on virtual leaf surfaces[J]. Royal Society Open Science, 2015, 2(5): 140528.

[70] 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.

[71] 张慧春，郑加强，周宏平，等. 农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(8):114－122.
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Droplet deposition distribution and off-target drift during pesticide spraying operation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 114－122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170812&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.012. (in Chinese)

[72] COCK N D, MASSINON M, SALAH S O T, et al. Investigation on optimal spray properties for ground based agricultural applications using deposition and retention models[J]. Biosystems Engineering, 2017, 162: 99－111.

[73] DELELE M A, JAEKEN P, DEBAER C, et al. CFD prototyping of an air-assisted orchard sprayer aimed at drift reduction [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 55(1): 16－27.

[74] BAETENS K, NUYTTENS D, VERBOVEN P, et al. Predicting drift from field spraying by means of 3D computational fluid dynamics model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 161－173.

[75] 孙国祥，汪小旵，丁为民，等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. 农业工程学报，2012，28(6): 13－19.
SUN Guoxiang, WANG Xiaochan, DING Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition base on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6): 13－19. (in Chinese)

[76] TESKE M E, THISTLE H W, FRITZ B K. Modeling aerially applied sprays: an update to AGDISP model development[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 343－354.

[77] 杨希娃，代美灵，宋坚利，等. 雾滴大小、叶片表面特性与倾角对农药沉积量的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(3):70－73.
YANG Xiwa, DAI Meiling, SONG Jianli, et al. Effect of droplet size, leaf characteristics and angle on pesticide deposition [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 70－73. (in Chinese)

[78] 贾卫东，朱和平，董祥，等. 喷雾液滴撞击大豆叶片表面研究[J/OL]. 农业机械学报，2013，44(12): 87－93，113.
JIA Weidong, ZHU Heping, DONG Xiang, et al. Impact of spray droplet on soybean leaf surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 87－93, 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131215&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.015. (in Chinese)

[79] ZWERTVAEGHER I K, VERHAEGHE M, BRUSSELMAN E, et al. The impact and retention of spray droplets on a horizontal hydrophobic surface[J]. Biosystems Engineering, 2014, 126(39): 82－91.

[80] DONG Xiang, ZHU Heping, YANG Xuejun. Characterization of droplet impact and deposit formation on leaf surfaces[J]. Pest Management Science, 2015, 71(2): 302－308.

[81] MASSINON M, COCK N D, FORSTER W A, et al. Spray droplet impaction outcomes for different plant species and spray formulations[J]. Crop Protection, 2017, 99: 65－75.

[82] ZHU L, GE J R, QI Y Y, et al. Droplet impingement behavior analysis on the leaf surface of Shu-ChaZao under different pesticide formulations[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2018, 144: 16－25.

[83] 刘冬梅，周宏平，郑加强，等. 茶树叶片表面喷雾液滴斜撞击行为研究[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(5): 96－103，195.
LIU Dongmei, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang, et al. Oblique impact behavior of spray droplets on tea tree leaves surface

[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 96 - 103, 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190511&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.011. (in Chinese)
[84] 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(7): 1 - 17.
[85] LIN H, ZHOU H, XU L, et al. Effect of surfactant concentration on the spreading properties of pesticide droplets on Eucalyptus leaves[J]. Biosystems Engineering, 2016, 143: 42 - 49.
[86] HOLLOWAY P J. Surface factors affecting the wetting of leaves[J]. Pest Management Science, 2010, 1(4): 156 - 163.
[87] ELLIS M C B, WEBB D A, WESTERN N W. The effect of different spray liquids on the foliar retention of agricultural sprays by wheat plants in a canopy[J]. Pest Management Science, 2004, 60(8): 786 - 794.
[88] NAIRN J J, FORSTER W A, LEEUWEN R M V. "Universal" spray droplet adhesion model-accounting for hairy leaves[J]. Weed Research, 2013, 53(6): 407 - 417.
[89] BOUKHALFA H H, MASSINON M, BELHAMRA M, et al. Contribution of spray droplet pinning fragmentation to canopy retention[J]. Crop Protection, 2014, 56(2): 91 - 97.
[90] TESKE M E, THISTLE H W, RILEY C M, et al. Laboratory measurements of evaporation rate of droplets at low relative wind speed[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(3): 919 - 923.
[91] XU Linyun, ZHU Heping, OZKAN H E, et al. Droplet evaporation and spread on waxy and hairy leaves associated with type and concentration of adjuvants[J]. Pest Management Science, 2011, 67(7): 842 - 851.
[92] NAIRN J J, FORSTER W A. Methods for evaluating leaf surface free energy and polarity having accounted for surface roughness[J]. Pest Management Science, 2017, 73(9): 1854 - 1865.
[93] DAMATO T C, CARRASCO L D M, CARMONA-RIBEIRO A M, et al. The interactions between surfactants and the epicuticular wax on soybean or weed leaves: Maximal crop protection with minimal wax solubilization[J]. Crop Protection, 2017, 91: 57 - 65.
[94] FOQUÉ D, PIETERS J G, NUYTTENS D. Spray deposition and distribution in a bay laurel crop as affected by nozzle type, air assistance and spray direction when using vertical spray booms[J]. Crop Protection, 2012, 41(6): 77 - 87.
[95] 梁昭，范国强，王光明，等. 基于双峰分布的风胁迫雾滴沉积分布模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 28 - 37.
LIANG Zhao, FAN Guoqiang, WANG Guangming, et al. Distribution model of wind-stressed droplet deposition based on bimodal distribution[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 28 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200403&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.003. (in Chinese)
[96] 张慧春, DORR Gary, 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 Gary, 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)
[97] GIL E, BALSARI P, GALLART M, et al. Determination of drift potential of different flat fan nozzles on a boom sprayer using a test bench[J]. Crop Protection, 2014, 56(2): 58 - 68.
[98] SCHRAMM M W, HANNA M H, DARR M J, et al. Measuring sub-second wind velocity changes for agricultural drift one meter above the ground[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(5): 697 - 704.
[99] SAMA M P, WEISS A M, BENEDICT E K. Validating spray coverage rate using liquid mass on a spray card[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(3): 887 - 895.
[100] YOU K, ZHU Heping, ABBOTT J P. Assessment of fluorescent dye brilliant sulfaflavine deposition on stainless steel screens as spray droplet collectors[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 495 - 503.
[101] DANTE E T, GUPTA C P. Deposition studies of an electrostatic spinning disc sprayer[J]. Transactions of the ASABE, 1991, 34(5): 1927 - 1934.
[102] 茹煜，郑加强，周宏平，等. 感应充电喷头环状电极诱导电场的分布研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 119 - 122.
RU Yu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Electric field distribution produced by circular electrode of induce charging nozzle[J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(5): 119 - 122. (in Chinese)
[103] HE X K, ZENG A J, LIU Y J, et al. Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques[J]. Int. J. Agric. & Bio. Eng., 2011, 4(1): 35 - 40.
[104] 甘云华，郑晓红，江政纬，等. 环形电极结构对喷雾形态与荷电效果的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 387 - 393.
GAN Yunhua, ZHENG Xiaohong, JIANG Zhengwei, et al. Effect of ring electrode structure on spray morphology and droplet charging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 387 - 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190945&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.045. (in Chinese)
[105] APPAH S, JIA Weidong, OU Mingxiong, et al. Investigation of optimum applied voltage, liquid flow pressure, and spraying height for pesticide application by induction charging[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(5): 795 - 804.
[106] 储金宇，吴春笃，杨超珍，等. 等离子体脉冲荷电喷雾装置[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 98 - 101.
[107] 郑加强，冼福生，高良润. 静电喷雾雾滴荷质比测定研究综述[J]. 江苏理工大学学报, 1992, 13(1): 1 - 6.
[108] 郑加强，冼福生，高良润，等. 荷电雾滴电荷衰减规律研究[J]. 农业机械学报, 1993, 24(4): 33 - 36.

ZHENG Jiaqiang, XIAN Fusheng, GAO Liangrun, et al. Charge attenuation pattern of charged droplets[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1993, 24(4):33-36. (in Chinese)

[109] SCOTT L P, RORY L R. A review of the effects of droplet size and flow rate on the chargeability of spray droplets in electrostatic agricultural sprays[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4): 1243-1248.

[110] 郑加强. 农药精确使用原理与实施原则研究[J]. 科学技术与工程, 2004, 4(7):566-570.

[111] YAN Tingting, ZHU Heping, SUN Li, et al. Investigation of an experimental laser sensor-guided spray control system for greenhouse variable-rate applications[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(4): 899-911.

[112] BAHLOL H Y, CHANDEL A K, HOHEISEL G A, et al. Smart spray analytical system for orchard sprayer calibration: a-proof-of-concept and preliminary results[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(1): 29-35.

[113] 张慧春,郑加强,周宏平,等. 农药精确施用系统信息流集成关键技术研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 130-136.
ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Key technologies for integration of information flow for precision pesticide application system[J]. Transaction of the CSAE, 2007, 23(5):130-136. (in Chinese)

[114] AL-GAADI K A, PAUL D A. Integrating GIS and GPS into a spatially variable rate herbicide application system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1999, 15(4): 255-262.

[115] 刘路,潘艳娟,陈志健,等. 高遮挡环境下玉米植保机器人作物行间导航研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(10):11-17.
LIU Lu, PAN Yanjuan, CHEN Zhijian, et al. Inter-rows navigation method for corn crop protection vehicles under high occlusion environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):11-17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201002&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.002. (in Chinese)

[116] 张华,郑加强,徐幼林. 概念喷雾机底盘双侧液压马达自抗扰同步控制研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(6): 135-143.

[117] TSAY J, FOX R D, OZKAN H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shield spraying system by CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 47-54.

[118] 张铁,杨学军,严荷荣,等. 超高地隙喷杆喷雾机风幕式防飘移技术研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 77-86.
ZHANG Tie, YANG Xuejun, YAN Herong, et al. Anti-drift technology of super-high clearance boom sprayer with air-assisted system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):77-86. (in Chinese)

[119] OZKAN H E, MIRALLES A, SINFORT C, et al. Shields to reduce spray drift [J]. J. Agric. Eng. Res., 1997, 67(4): 311-322.

[120] PETERSON D L, HOGMIRE H W. Evaluation of tunnel sprayer systems for dwarf fruit trees[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11(6): 817-821. (in Chinese)

[121] 牛萌萌,方会敏,乔璐,等. 高地隙隧道式循环喷雾机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11):41-48.

[122] 高良润,冼福生,朱和平,等. 静电喷雾治虫实验[J]. 农业机械学报, 1994, 25(2):30-38.
GAO Liangrun, XIAN Fusheng, ZHU Heping, et al. Experiments on electrostatic spraying for pest control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 1994, 25(2): 30-38. (in Chinese)

[123] SHARDA A, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Effect of emitter type and mounting configuration on spray coverage for solid set canopy delivery system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112:184-192.

[124] OWEN-SMITH P, WISE J, GRIESHOP M J. Season long pest management efficacy and spray characteristics of a solid set canopy delivery system in high density apples[J]. Insects, 2019, 193(10): 1-22.

[125] 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)

[126] 武秀恒,秦嘉浩,杜岳峰,等. 高地隙喷雾机主动空气悬架减振控制与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6):60-67.
WU Xiuheng, QIN Jiahao, DU Yuefeng, et al. Experiments of vibration control for active pneumatic suspension system in high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.007. (in Chinese)

[127] 陈黎卿,许鸣,柏仁贵,等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9):25-32.
CHEN Liqing, XU Ming, BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):25-32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)

[128] 扈凯,张文毅. 高地隙自走式喷雾机多模式液压转向系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 366-373.
HU Kai, ZHANG Wenyi. Design and experiment of multi-mode hydraulic steering system of high clearance self-propelled sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9):366-373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200942&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.042. (in Chinese)

[129] TIAN Lei. Development of a sensor-based precision herbicide application system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 36:133 – 149.

[130] SLAUGHTER D C, GILES D K, TAUZER C. Precision offset spray system for roadway shoulder weed control[J]. Journal of Transportation Engineering,1999, 125(4): 364 – 371.

[131] 陈勇,田磊,郑加强. 基于直接施药方法的除草机器人[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 90 – 93,129.
CHEN Yong,TIAN Lei,ZHENG Jiaqiang. Development of weeding robot based on direct herbicide application method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 90 – 93,129. (in Chinese)

[132] 邱威,丁为民,汪小旵,等.3WZ – 700 型自走式果园风送定向喷雾机[J].农业机械学报,2012,43(4):26 – 30,44.
QIU Wei, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. 3WZ – 700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4):26 – 30,44. (in Chinese)

[133] 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等.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, et al. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(15):18 – 25. (in Chinese)

[134] ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, XU Youlin, et al. Toward-target precision pesticide application and its system design [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11):67 – 72.

[135] JEON H Y, ZHU H. Development of a variable-rate sprayer for nursery liner applications[J]. Transactions of the ASABE, 2012,55(1): 303 – 312.

[136] 焦祥,张慧春,郑加强,等.基于农林植物表型的智能喷雾机械研究进展[J].世界林业研究,2020, 33(5):42 – 46.
JIAO Xiang, ZHANG Huichun, ZHENG Jiaqiang, et al. Research progress of intelligent spray machinery based on the phenotype of agricultural and forestry plants[J]. World Forestry Research,2020, 33(5):42 – 46. (in Chinese)

[137] HOČEVAR M, ŠIROK B, JEJČIČ V, et al. Design and testing of an automated system for targeted spraying in orchards[J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2010,117(2): 71 – 79.

[138] LI L L, HE X K, SONG J L, et al. Design and experiment of variable rate orchard sprayer based on laser scanning sensor [J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2018, 11(1): 101 – 108.

[139] GAO Guandong, XIAO Ke, LI Jianping. Precision spraying model based on Kinect sensor for orchard applications[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(2): 291 – 298.

[140] MA Luqiang, XU Youlin, ZHENG Jiaqiang, et al. Ecodesign method of intelligent boom sprayer based on preferable Brownfield process[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,268:122206.

[141] GUZMÁN J L, RODRÍGUEZ F, SÁNCHEZ-HERMOSILLA J, et al. Robust pressure control in a mobile robot for spraying tasks[J]. Transactions of the ASABE, 2008,51(2): 715 – 727.

[142] 耿长兴,张俊雄,曹峥勇,等. 温室黄瓜病害对靶施药机器人设计[J]. 农业机械学报,2011,42(1):177 – 180.
GENG Changxing, ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, et al. Cucumber disease toward-target agrochemical application robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):177 – 180. (in Chinese)

[143] 茹煜,郑加强,周宏平,等.航空双喷嘴静电喷头的设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12):58 – 61,57.
RU Yu, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Design and experiment of double-nozzle of aerial electrostatic sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):58 – 61,57. (in Chinese)

[144] 张东彦,兰玉彬,陈立平,等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J/OL].农业机械学报, 2014, 45(10): 53 – 59.
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10):53 – 59. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141009&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.009. (in Chinese)

[145] LAN Yubin, CHEN Shende, FRITZ B K, et al. Current status and future trends of precision agricultural aviation technologies [J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2017, 10(3): 1 – 17.

[146] HE X K, BONDS J, HERBST A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2017, 10(3): 18 – 30.

[147] RICHARDSON B, ROLANDO C A, KIMBERLEY M O, et al. Spray application efficiency from a multi-rotor unmanned aerial vehicle configured for aerial pesticide application[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(6): 1447 – 1453.

[148] 薛新宇,顾伟,徐阳,等.农用无人飞机法规与标准制定现状分析[J/OL].农业机械学报,2020,51(10):1 – 10.
XUE Xinyu, GU Wei, XU Yang, et al. Review on current state of agricultural UAS regulations and standards[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(10):1 – 10. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201001&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.001. (in Chinese)

[149] TANG Chaoying, WEI Xianghui, WANG Biao, et al. A cross-border detection algorithm for agricultural spraying UAV[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(2): 163 – 174.

[150] 刘洋洋,茹煜,陈青,等.无人机变量施药实时监控系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(7):91 – 99.
LIU Yangyang, RU Yu, CHEN Qing, et al. Design and test of real-time monitoring system for UAV variable spray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):91 – 99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200711&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.

011. (in Chinese)

[151] 曹光乔,李亦白,南风,等.植保无人机飞控系统与航线规划研究进展分析[J/OL].农业机械学报, 2020,51(8): 1-16.
CAO Guangqiao, LI Yibai, NAN Feng, et al. Development and analysis of plant protection UAV flight control system and route planning research[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.001. (in Chinese)

[152] LIAN Q, TAN F, FU X, et al. Design of precision variable-rate spray system for unmanned aerial vehicle using automatic control method[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(2):29-35.

[153] HUANG Yanbo, HOFFMANN W C, LAN Yubin, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 25(6): 803-809.

[154] 杨知伦,葛鲁振,祁力钧,等.植保无人机旋翼下洗气流对喷幅的影响研究[J/OL].农业机械学报, 2018,49(1): 116-122.
YANG Zhilun, GE Luzhen, QI Lijun, et al. Influence of UAV rotor down-wash air flow on spray width[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):116-122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.014. (in Chinese)

[155] 李海林,吴开华,王文杰,等.基于激光位移传感器的障碍物检测与模式识别[J].传感器与微系统,2018,37(1):120-123.

[156] 兰玉彬,王林琳,张亚莉.农用无人机避障技术的应用现状及展望[J].农业工程学报, 2018,34(9):104-113.
LAN Yubin, WANG Linlin, ZHANG Yali. Application and prospect on obstacle avoidance technology for agricultural UAV [J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(9):104-113. (in Chinese)

[157] 贾志成.小型无人直升机航空喷雾试验系统及喷雾流场研究[D].南京:南京林业大学, 2018.
JIA Zhicheng. Research on aerial spray testing system and spraying flow field for small unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)

[158] 王昌陵,何雄奎,曾爱军,等. 基于仿真果园试验台的植保无人机施药雾滴飘移测试方法与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(13):56-66.
WANG Changling, HE Xiongkui, ZENG Aijun, et al. Measuring method and experiment on spray drift of chemicals applied by UAV sprayer based on an artificial orchard test bench[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13):56-66. (in Chinese)

[159] 王玲.多旋翼植保无人机低空雾滴沉积规律及变量喷施测控技术[D].北京:中国农业大学,2017.
WANG Ling. Research on low-attitude droplets deposition and technology of variable spraying measurement and control system based on multi-rotor crop protection UAV[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[160] SHI Qiang, MAO Hanping, GUAN Xianping. Numerical simulation and experimental verification of the deposition concentration of an unmanned aerial vehicle[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(3): 367-376.

[161] BROWN C R, GILES D K. Measurement of pesticide drift from unmanned aerial vehicle application to a vineyard[J]. Transactions of the ASABE, 2018,61(5): 1539-1546.

[162] TANG Y, HOU C J, LUO S M, et al. Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148: 1-7.

[163] 王娟,兰玉彬,姚伟祥,等. 单旋翼无人机作业高度对槟榔雾滴沉积分布与飘移影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019,50(7): 109-119.
WANG Juan, LAN Yubin, YAO Weixiang, et al. Effects of working height of single-rotor unmanned aerial vehicle on drift and droplets deposition distribution of areca canopies[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):109-119. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190711&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.011. (in Chinese)

[164] LV Meiqiao, XIAO Shupei, TANG Yu, et al. Influence of UAV flight speed on droplet deposition characteristics with the application of infrared thermal imaging[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019,12(3):10-17.

[165] 张京,何雄奎,宋坚利,等. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J].农业机械学报, 2012, 43(12): 94-96.
ZHANG Jing, HE Xiongkui, SONG Jianli, et al. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(12):94-96. (in Chinese)

[166] RICHARDSON B, ROLANDO C A, KIMBERLEY M O. Quantifying spray deposition from a UAV configured for spot spray applications to individual plants[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(4): 1049-1058.

[167] LIU Yang, LI Longlong, LIU Yajia, et al. Assessment of spray deposition and losses in an apple orchard with an unmanned agricultural aircraft system in China[J]. Transactions of the ASABE, 2020, 63(3): 619-627.

[168] TESKE M E, WACHSPRESS D A, THISTLE H W. Prediction of aerial spray release from UAVs[J]. Transactions of the ASABE, 2018,61(3): 909-918.

[169] WANG C L, HE X K, WANG X N, et al. Testing method and distribution characteristics of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2018, 11(2): 18-26.