

药剂友好型施药机械的研究进展与未来展望

张毅杰^{1,2} 张志涛¹ 赵永梅¹ 宋泽祺¹ 任雯¹ 莫玉兰¹
杨振杰¹ 邹欢^{1*}

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明 650201; 2. 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201)

摘要: 农药过量施用引发的环境污染与食品安全问题日益凸显, 发展适应多样化农药制剂特性的药剂友好型施药机械, 是突破当前施药技术瓶颈的重要途径。该文运用文献计量法对施药技术领域研究趋势与热点演化进行定量解析, 发现全球施药技术研究呈持续增长态势, 2010—2024年Web of Science数据库中的年发文量由14篇增长至60篇, 增幅达328%; 且研究焦点由早期对单一雾滴沉积过程的关注, 逐步向药械协同的系统性协同适配拓展。同时, 该文总结了实现药剂友好型施药机械的三重关键技术路径, 即基于药剂特性的施药机械适应性设计、面向药剂友好的施药机械作业参数优化以及针对机械作业瓶颈的药剂辅助协同; 并展望了药剂友好型施药机械的未来研究方向, 指出应强化药械协同的原生设计理念, 提升复杂作业场景下的智能感知与精准施药能力, 推动数据驱动的协同优化与决策支持体系构建, 以促进植保喷雾机械向智能化、绿色化与精准化方向演进, 为现代农业可持续发展提供技术思路与理论参考。

关键词: 施药机械; 药剂友好; 施药技术; 药械协同; 文献计量分析

Research progress and future prospects of pesticide-friendly application machinery

Zhang Yijie^{1,2} Zhang Zhitao¹ Zhao Yongmei¹ Song Zeqi¹ Ren Wen¹ Mo Yulan¹
Yang Zhenjie¹ Zou Huan^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan Province, China; 2. Key Laboratory for Crop Production and Smart Agriculture of Yunnan Province, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan Province, China)

Abstract: Environmental pollution and food safety risks caused by excessive pesticide application have become increasingly prominent. Developing pesticide-friendly application machinery capable of accommodating diverse pesticide formulation properties is therefore considered an important approach to overcoming current technical bottlenecks in pesticide application. In this review, bibliometric analysis was employed to quantitatively examine research trends and the evolution of research hotspots in the field of pesticide application technology. The results indicate a sustained global growth in this research area, with the annual number of publications indexed in the Web of Science increasing from 14 in 2010 to 60 in 2024, representing a growth rate of 328%. Meanwhile, research focus has gradually shifted from an early emphasis on individual droplet deposition processes toward system-level synergistic adaptation between pesticide formulations and application machinery. On this basis, three key technical pathways

基金项目: 国家自然科学基金项目(32260438), 云南省重大科技专项(202102AE090042-06-04), 云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-107, 202101BD070001-032), 云南省作物生产与智慧农业重点实验室开放基金(2024ZHNY06), 云南省教育厅科学研究基金项目(2026Y0541)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: yn_zbagg2025@126.com

收稿日期: 2025-11-15

for achieving pesticide-friendly application machinery are summarized, including adaptive machinery design based on formulation properties, optimization of operating parameters oriented toward formulation compatibility, and formulation-assisted collaboration to address mechanical operation bottlenecks. Finally, future research directions for pesticide-friendly application machinery are discussed, suggesting that greater attention should be paid to strengthening native formulation-machinery integrated design concepts, enhancing intelligent perception and precision application capabilities under complex operating conditions, and promoting the development of data-driven collaborative optimization and decision-support systems. These efforts are expected to facilitate the advancement of plant protection spraying machinery toward intelligence, environmentally sustainability, and precision-oriented development, thereby providing technical insights and theoretical support for sustainable agriculture.

Key words: pesticide application machinery; pesticide friendliness; pesticide application technology; pesticide-equipment synergy; bibliometric analysis

全球农业正面临着粮食安全与生态可持续的双重挑战,施药技术的绿色发展势在必行。长期以来,传统化学农药的粗放与过度施用已导致农残累积超标、环境污染加剧等问题。据统计,全球64%的农业用地(约2 450万 km^2)面临着一种以上农药成分的污染,以及靶标生物抗性加剧等生态与环境问题(Tang et al., 2021)。此外,随着全球农村劳动力的逐步短缺,对植保作业的效率 and 自动化提出了更高要求(FAO, 2022; 张冰冰和仇童伟, 2025)。在此背景下,构建以农药减量增效为目标的高效、环境友好植保技术体系,已成为保障国家粮食安全与环境可持续发展的当务之急。

在应对上述挑战的进程中,施药机械作为施药过程的核心载体,是实现药剂减量增效与生态环境保护的关键。近年来,施药机械领域的发展已从传统粗放型转向智能化、精准化方向,涵盖了静电喷雾(周良富等, 2018)、机器视觉辅助精准对靶(Xue et al., 2023; 杨森等, 2025)、雾滴粒径优化(刘雪美等, 2025)等前沿技术,有效促进了药剂沉积效率和施药作业精细化。同时,新型植保装备的智能控制和参数优化也为提升作业质量与降低劳动强度提供了坚实支撑。

随着新型药剂配方的快速迭代,对药剂友好型喷雾机械的设计需求愈加突出。在田间实际应用中,喷雾机械常常面临药械失配这一技术瓶颈,具体表现为3个层面:一是机械施药时产生的物理作用可能影响部分药剂的活性与有效性(Fife et al., 2005);二是制剂流变性与机械结构的矛盾,高黏度、高载量的悬浮剂流变特性常与精密喷嘴的孔径参数不匹配,引发堵塞(牛明旭等, 2024);三是配方化学性质与工程设计的脱节,脂溶性或难分散的制剂配

方与常规混合系统不兼容,导致药液混合不均、分层絮凝(徐幼林, 2009)。这些问题主要源于机械研发阶段未充分考虑药剂的理化特性,导致适配性施药技术的创新滞后,进而成为精准植保效能进一步提升的关键障碍。

目前,构建药剂友好型施药机械、强化药械协同创新,已成为推动农业绿色转型及精准植保技术体系成熟的关键路径。本文从施药机械的角度出发,系统综述了其在适应多样化药剂特性方面的前沿创新与工程突破,重点分析了基于药剂友好性设计的施药机械结构优化、活性药剂友好的施药机械作业参数优化、以及施药机械优化瓶颈的药剂辅助方案等方面的最新进展,并结合未来绿色植保的发展趋势,展望了药剂友好型施药机械的研究方向,以期为相关领域的研究提供理论参考与技术思路,推动施药机械体系的绿色升级与多学科融合。

1 施药作业流程中的关键环节与技术关联

农药施用的最终成效取决于农药制剂、施药机械以及施药技术之间的有效协同。药械协同过程从药液制备阶段开始,例如施药机械提供了混药所需的物理环境,而农药制剂的分散性、溶解度等理化特性决定了混合均匀程度与稳定性;在施药技术的精确调控之下,例如压力、流量等的调控使得机械喷洒出高效雾化雾滴,当雾滴抵达靶标作物表面时表现出一系列关键界面行为,诸如反弹附着、液膜扩展、收缩沉积以及渗透吸收等,最终雾滴有效成分被靶标作物吸收并完成内吸转运(图1)。以上过程中,雾滴的界面行为主要由农药制剂的物化性质如表面

张力、黏弹性等决定;而施药技术作为农药制剂与机械喷施的“枢纽”,动态协同优化作业参数,以保证从

药液混合到靶标作物吸收的各个环节达到最佳适配,从而提高农药利用率,实现减量增效的目标。

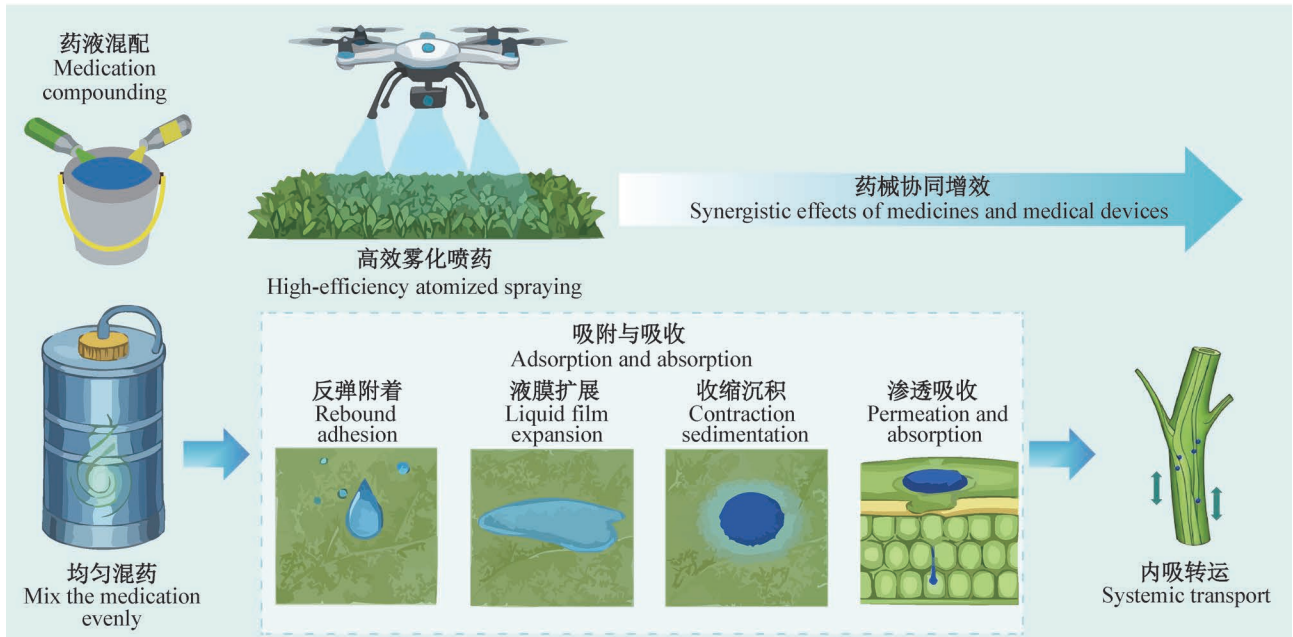


图1 基于药械协同的雾滴吸附与吸收原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the synergistic formulation-machinery mechanism for droplet adsorption and absorption

2 基于文献计量法的药械协同施药技术分析

施药技术是实现药剂与施药机械适配性的核心枢纽。为定量分析二者协同关系的研究脉络与演化特征,本文运用文献计量法,以施药技术为切入点,揭示药械协同的演化规律和关联效能,以期为药剂友好型施药机械的创新梳理研究脉络。

2.1 施药技术的文献发表趋势计量分析

本文基于中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)与Web of Science(WOS)开展文献检索与计量分析,时间跨度为2010—2025年。在CNKI数据库中,以“施药技术”为主题词进行检索,限定文献来源为EI(Engineering Index)、中文社会科学引文索引(Chinese Social Sciences Citation Index, CSSCI)、《中文核心期刊要目总览》及中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, CSCD)收录期刊,共获得文献1352篇,经CiteSpace软件去重与筛选后,最终纳入1336篇文献进行计量分析;在WOS数据库中,以“pesticide application technology AND spray pesticide”为主题词进行检索,共获得相关文献406篇,均用于后续计量分析。

从文献发表趋势来看,近16年来国内外施药技

术研究呈现出显著的增长态势(图2)。在WOS数据库中,相关研究的年发文量由2010年的14篇增长至2024年的60篇,增幅达328%;2025年(截至5月)的发文量已达到30篇,显示出持续上升的研究热度。CNKI数据库中施药技术相关研究同样保持活跃,年发文量在2021年达到峰值(144篇),随后有所回落,但在2024年和2025年仍维持较高水平(分别为63篇和23篇)。上述趋势表明,施药技术作为精准农业与绿色植保的重要支撑技术,其研究关注度在国内外均持续提升。

从文献贡献国家的分布格局来看,在WOS数据库收录的相关文献中,中国以141篇发文量位居首位,美国(97篇)和巴西(88篇)紧随其后,三国发文总量占全球相关研究总发文量的54%,共同构成施药技术领域的第一研究阵营,凸显了其在该领域的引领作用。与此同时,西班牙、意大利和德国等欧洲国家保持了稳定的研究产出,体现出区域性协同推进施药技术发展的特点;印度、澳大利亚等国家近年来发文量逐步增长,显示出新兴研究力量的崛起,预示着施药技术研究重心正逐步由传统发达国家向亚太地区扩展。总体而言,全球施药技术研究不仅在规模上持续扩大,其地域分布格局也正在发生结构性变化,进一步印证了该领域在现代农业技术体

3 药械协同的关键载体与核心媒介的归类与分析

为直观呈现支撑药剂友好型施药机械技术创新的关键载体(即施药装备与核心部件)及其高效兼容的核心媒介(即多样的药剂剂型),本文将近年来主

流高效施药机械、典型喷头及喷药辅助系统进行系统梳理与归纳(表1和图4)。针对典型农药剂型,结合其理化性质及实际施用条件,系统归纳了各类剂型所适用的施药机械及各自的主要特点(表2),以期为推动农药友好型施药机械的高质高效发展提供理论基础与应用参考。

表1 高效施药机械、喷头和喷药辅助系统

Table 1 Efficient pesticide application machinery, nozzles and spray assist systems

类型 Type	名称 Name	功能 Function	参考文献 Reference
高效施药机械 High-efficiency pesticide application machinery	自走式喷杆喷雾机 Self-propelled boom sprayer	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、行走动力,不需要其他动力提供就能完成自身工作的植保机械 A plant protection machine in which spray nozzle are mounted on horizontal or vertical booms, providing its own driving and locomotion power to operate independently without external power sources	胡继红和于庆旭, 2024 Hu & Yu, 2024
	植保无人机 Plant protection UAV	植保无人机以电动多旋翼机型为主,通过超低空(1~4 m)飞行与超低量施药技术提高施药覆盖效率,并依托RTK厘米级导航与自主避障系统,实现对复杂地形的稳定飞行与精准作业,从而在水稻田、丘陵等人工或地面机械难以作业的场景中有效突破地形限制 Plant protection UAVs are predominantly based on electric multi-rotor platforms. By combining ultra-low-altitude (1-4 m) flight with ultra-low-volume pesticide application, they enhance spray coverage efficiency. Moreover, supported by RTK centimeter-level navigation and autonomous obstacle-avoidance systems, these UAVs achieve stable flight and precise operations in complex terrains such as paddy fields and hilly areas where manual or ground-based machinery is difficult to deploy	陈盛德等, 2023 Chen et al., 2023
	果园风送喷雾机 Orchard air sprayer	果园风送喷雾机不是仅靠液泵压力使药液雾化,还依靠风机产生强大的气流将雾滴吹送至果树各个部位 Instead of relying solely on liquid pump pressure for atomization, orchard air sprayers use fans to generate a powerful airflow that conveys droplets to all parts of the fruit trees	徐陶等, 2023 Xu et al., 2023
	智能喷药机器人 Intelligent spraying robot	基于激光雷达LiDAR与机器视觉的完全自主导航系统,实现仿形变量喷雾与精准对靶(按植株密度动态调节喷量),在设施农业与果园场景中逐步替代人力,避免人机接触中毒风险 A fully autonomous navigation system based on LiDAR and machine vision enables contouring-following variable-rate spraying and precise target application by dynamically adjusting spray volume according to plant density, gradually replacing manual labor in facility agriculture and orchard scenarios while reducing operator exposure risk	何雄奎, 2022 He et al., 2022
喷头 Nozzle	扇形雾喷头 Fan spray nozzle	高压液体通过狭缝式喷孔将高压液体挤出形成扁平液膜,液膜在空气剪切作用下破碎为均匀雾滴,实现广角覆盖,喷幅宽度大,分布均匀 High-pressure liquid is extruded through a slit orifice to form a flat liquid film, which breaks into uniform droplets under air shear to achieve wide-angle coverage, large spray width and uniform distribution	孙胜等, 2019 Su et al., 2019
	锥形雾喷头 Conical spray nozzle	高压液体通过旋流腔形成高速旋转液膜,在离心力作用下破碎成环状分布的雾滴 High-pressure liquid forms a high-speed rotating liquid film in a swirl chamber, which disintegrates into annular droplets under centrifugal force	Zhang et al., 2017
	双流体喷头 Dual fluid nozzle	将两种流体分别通过不同通道引入喷头,在喷头内部或外部混合,利用流体的相对速度和压力差等使液体雾化成细小液滴 Two fluids are introduced into the nozzle through different channels, mixed internally or externally; atomization is achieved through relative velocity and pressure differences between the fluids	Combella & Miller, 1999
	离心雾化喷头 Centrifugal atomizer	通过高速旋转的雾化盘产生离心力撕裂药液,形成液膜后在边缘断裂成雾滴,并通过外盘二次撞击进一步细化,转速越高雾滴越细 Centrifugal atomizers generate centrifugal force through a high-speed rotating atomization disc, tearing the liquid into a film that breaks into droplets at the edge, with secondary impact further refining droplets; higher rotational speed produces finer droplets	郭依剑等, 2023 Guo et al., 2023

续表 1 Continued

类型 Type	名称 Name	功能 Function	参考文献 Reference
	静电辅助喷头 Electrostatic auxiliary nozzle	一种通过感应电极施加高压静电场,使雾滴荷电并在电场力作用下定向沉积至靶标作物的专用喷头 A specialized nozzle that applies a high-voltage electrostatic field via induction electrodes to charge droplets, promoting directional deposition onto target crops under electrostatic forces	周良富等,2018 Zhou et al., 2018
喷药辅助系统 Spray assist system	在线混药系统 Online mixing system	实时混合农药母液与水,提升混合均匀度,减少配药残留和作业人员健康危害 Pesticide stock solutions and water are mixed in real time to improve mixing uniformity and reduce formulation residues and operator health risks	陈雨等,2025 Chen et al., 2025
	风送辅助系统 Air supply auxiliary system	利用风送助力机构补充普通喷雾机械在喷雾效果、喷洒范围及射程等方面的不足,实际作业中可依据用途不同进行定向改造,如设置不同角度的风栅叶片、不同的风机结构等 Air-assisted mechanisms are used to compensate for deficiencies of conventional spraying machinery in spray effectiveness, coverage, and range; systems can be directionally modified according to application requirements, such as by adjusting airflow angles or fan structures	崔雷,2025 Cui et al., 2025
	风幕防飘系统 Air curtain anti-floating system	喷杆上方形成风幕屏障,减少雾滴飘移量 An air curtain barrier formed above the boom reduces droplet drift during spraying operations	杨立武等,2025 Yang et al., 2025
	变量喷药控制系统 Variable rate spray control system	利用GIS、GPS、机器视觉、LiDAR/超声波、微波等获取喷药对象信息,根据具体环境参数判断是否喷雾和选择参数,并利用探测到的作物形态自动调整喷头位置和角度,减少无效喷雾区域 GIS, GPS, machine vision, LiDAR/ultrasonic, and microwave technologies are used to acquire target information, determine spray necessity and parameters based on environmental conditions, and automatically adjust nozzle position and angle according to crop morphology, thereby reducing ineffective spraying areas	翟长远等,2024 Zhai et al., 2024



A: 自走式喷雾机(张校康,2021);B:T60植保无人机;C:自动对靶静电喷雾机(余忠义等,2025);D:果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人(刘理民等,2022);E:扇形雾喷头;F:锥形雾喷头;G:静电辅助喷头(马旭等,2020)。A: Self-propelled sprayer (Zhang, 2021); B: T60 plant protection UAV; C: automatic target-oriented electrostatic sprayer (Yu et al., 2025); D: autonomous navigation and target-oriented spraying robot for orchards (Liu et al., 2022); E: fan spray nozzle; F: conical spray nozzle; G: electrostatic-assisted spray nozzle (Ma et al., 2020).

图4 典型施药机械与喷头

Fig. 4 Typical pesticide application machinery and nozzles

基于以上分类整理与分析可知,当前植保药械失配的根源并非简单的功能缺陷,而是源于系统性割裂的研发路径,即制剂的化学及生物学逻辑与机械的物理及工程学逻辑总体上是并行发展的,缺乏

深度协同与融合。例如脉冲宽度调制流量控制系统和各类精密喷头(如小孔径的扇形雾喷头),其设计前提是药液具有稳定且理想的流变特性(如低黏度),而现代农药制剂常追求高载量、高悬浮率和长

持效性等特性,当这类制剂未经充分适配就进入精密施药系统时,其高剪切黏度、触变性等复杂的流变行为极易引发喷头堵塞、流量波动,导致脉冲宽度调制系统精度失准,雾化效果急剧下降,这是制剂物化性质与机械作业特性在物理层面上的直接冲突(冯耀宁等,2021);另外,扇形雾喷头可通过高压雾化方式实现药液的充分分散。这种高压环境能够有效提升雾化效率,对于传统的化学农药而言基本不会造成明显影响。然而,对于具有特定空间结构和生物

活性的微生物药剂来说,高压喷射带来的剧烈物理应力却可能产生破坏性影响(吴晓青等,2019)。具体而言,药液在经过高压扇形喷头的过程中,微生物的细胞壁可能被冲击撕裂,导致药剂抵达靶标前就已大量失活,大幅削弱其效果。这正是由于未充分考虑制剂的生物学特性与喷头机械作业原理的匹配而导致的药械失配问题。同样,静电辅助喷头要求药液具有适宜的电导率以实现高效荷电,而这在相关制剂配方开发时却往往被忽略(刘勇良,2011)。

表2 典型农药剂型及其施用适配

Table 2 Typical pesticide formulations and their application compatibility

剂型 Formulation	适用施药机械 Applicable machinery	特点 Characteristics	参考文献 Reference
粉剂 Dustable powder	手摇喷粉器、机动喷粉机、飞机喷粉等 Hand-cranked dusters, motorized dusters, aerial dusting aircraft	粉剂是最早开发与应用的农药剂型,有效成分含量偏低(为1%~10%),通过喷粉施用。其95%以上的颗粒粒径小于45 μm,施用时严重飘失且靶标黏附性差,药效损失大,对环境也不利 One of the earliest developed pesticide formulations, characterized by a relatively low active ingredient content (typically 1%–10%) and applied by dusting. Over 95% of its particles are smaller than 45 μm, leading to significant drift during application and poor adhesion to targets, resulting in substantial efficacy loss and adverse environmental risks	吴萍,2007 Wu, 2007
可湿性粉剂 Wettable powder	加水稀释后利用常用喷雾施药器械均可喷施 Common sprayers after dilution with water	可湿性粉剂是由农药原药、载体或填料、表面活性剂等经混合、粉碎而制成的固体农药制剂,具有较好的生物活性 A solid pesticide formulation prepared by mixing and pulverizing pesticide technical material with carriers or fillers, surfactants and other components, and it exhibits good biological activity	吴萍,2007; 华乃震,2008 Wu, 2007; Hua, 2008
可分散粒剂 Water-dispersible granule	加水稀释后利用常用喷雾施药器械均可喷施 Common sprayers after dilution with water	可分散粒剂由有效成分、分散剂、润湿剂、黏结剂等多种助剂及填料组成,其在水中能迅速崩解并形成均匀的悬浮液。使用时无粉尘飞扬,安全性高 Composed of active ingredients, dispersants, wetting agents, binders and fillers. The granules rapidly disintegrate in water to form a homogeneous suspension, enabling dust-free application and improved safety	华乃震,2008 Hua, 2008
水基化制剂 Water-based formulation	加水稀释后利用常用喷雾施药器械均可喷施 Common sprayers after dilution with water	水基化制剂是以水作为主要载体的制剂,替代了传统的有机溶剂,包括水乳剂、可溶性液剂、悬浮剂、微乳剂和悬乳剂等多种剂型 Use water as the primary carrier instead of traditional organic solvents, and includes formulations such as emulsions in water, soluble liquids, suspensions, microemulsions, and suspoemulsions	韩菲菲,2021 Han, 2021
超低容量喷雾(油)剂 Ultra-low volume (oil) spray	需要专用喷雾设备进行雾化处理,如地面超低容量喷雾、无人机超低容量喷雾、静电喷雾 Dedicated spraying equipment for atomization, such as ground-based ULV sprayers, UAV-based ULV sprayers, electrostatic sprayers	超低容量喷雾(油)剂是以高沸点的油质溶剂为农药有效成分分散介质,添加适当助剂配制而成的一种特殊油剂。施用时不用水或者少量用水 A special oil-based formulation prepared using high-boiling-point oily solvents as the dispersion medium for active ingredients, supplemented with appropriate adjuvants. It requires no water or only a small amount of water	吴萍,2007; 刘琴等,2020 Wu, 2007; Liu et al., 2020

综上所述,实现精准植保的关键在于突破药剂与机械协同不足的瓶颈。立足于药剂友好型施药机械,破解这一难题的重要路径就在于强化机械端的主动适配能力,其核心策略是推动施药机械从被动

执行向智能适配演进,即通过机械结构的创新设计与作业参数的精准调控,主动响应并适应多样化农药制剂的物理化学特性,从而主导实现精准、高效与绿色的植保作业目标。

4 突破药械协同下施药技术瓶颈的关键途径

为构建药剂友好型施药机械技术体系,突破现有施药技术瓶颈,本文提出以下三重路径进行解决:基于药剂特性的施药机械结构创新设计、面向特殊药剂的施药机械作业参数优化以及针对机械作业瓶颈的药剂辅助方案。

4.1 基于药剂特性的施药机械适应性设计

基于药剂特定属性的施药机械设计是实现农药制剂与施药机械深度协同的必然。其核心内涵是精准规避机械作业对敏感药剂活性的损伤(李新松等, 2024),解决传统施药过程中存在的雾化不均(肖丽萍等, 2018)和混药困难(徐幼林, 2009)等技术障碍,从而驱动施药技术向高效率、高精度和可持续方向转型。以下将通过典型案例展示近年来针对特定药剂特性所开发的关键施药机械创新设计。

4.1.1 面向微生物活性保护的损伤雾化喷嘴技术研究

微生物农药在现代植保中具有低毒、低残留和延缓抗性形成等显著优势(Idris et al., 2020; 张慧等, 2023),但其工程化施用长期受限于高压雾化过程产生的强剪切作用对微生物活性的破坏。如何在满足雾化粒径与沉积要求的同时有效降低雾化过程对微生物活性的损伤(刘冬梅等, 2018),已成为微生物农药施药装备设计中的关键技术瓶颈。围绕这一矛盾,当前研究的重点逐步转向通过改变雾化机理,构建低剪切、低压力条件下的雾化方式来实现药剂活性保护与喷雾性能之间的协同优化。

离心雾化法不同于依赖高液压破碎液膜的传统雾化方案,而是采用电机驱动喷头高速旋转,进而利用离心力将药液雾化并喷施至目标区域。由于该过程不再依赖高系统压力完成雾化,在实现雾化均匀性的同时,也在一定程度上降低了高压剪切对微生物细胞结构的破坏风险(高雪晴, 2022)。Zhang et al.(2013)研究结果表明,转笼式离心喷头在合理转速范围内可较好地保持微生物制剂的活性。但需要指出的是,离心雾化并非完全无损伤方案,当转速过高时产生的局部剪切应力仍可能导致微生物失活。针对该问题,相关研究通过定量分析泵压、剪切强度与菌剂存活率之间的关系,明确了微生物农药适宜的操作参数区间,实现了喷头调控由经验依赖向参数化控制的转变(董祥等, 2018; 朱正阳等, 2018)。且进一步研究发现,风送系统的引入有助于提升雾滴穿透性和作业效率,但风速、转速与流量之间的耦

合作用对微生物活性具有显著影响,其中风速的负面效应尤为突出,需要通过参数协同优化实现有效平衡(董祥等, 2018; 朱正阳等, 2018)。

在此基础上,双流体外混式雾化技术通过改变能量输入方式,在降低雾化损伤的同时兼顾了雾化质量。该技术利用低压药液与高压气流在喷头外部的瞬时碰撞实现雾化,显著降低了药液在喷头内部承受的压力与剪切负荷(马雷鸣等, 2024)。李新松等(2024)设计的双流体外混式扇形雾喷头,通过优化水药压力比($\lambda=0.7:0.2$),在保持良好雾滴均匀性和沉积性能的同时,使微生物存活率提升至89.6%。该研究还发现,通过喷头结构与雾化机理的重构,可在工程层面实现微生物农药高效雾化与低损施用的协同目标,缓解传统高压喷雾条件下雾化效率与药效保持难以兼顾的问题。

总体而言,离心雾化与双流体雾化技术均在一定条件下实现了微生物的活性保护与喷雾性能的协同优化,经合理调控参数后,微生物存活率普遍可稳定在80%以上(翟恩昱等, 2018),具备实际应用潜力。然而,现有研究仍主要集中于少数菌种和相对理想的作业条件,对复杂田间环境下的适应性、长期运行稳定性及多类型制剂的通用性研究仍显不足。此外,微生物农药制剂成本较高,对施药精准性要求更为严苛(卓富彦等, 2023),亟需进一步融合靶标探测、施药量精确控制与风量协同调节等精准施药技术,避免“大水漫灌”式喷施,实现药效与成本的最优平衡(周宏平等, 2022)。未来,提升低损伤雾化喷嘴的通用性与环境适应能力将是微生物农药友好型施药装备持续发展的重要方向。

4.1.2 面向高黏度药剂稳定喷施的喷头关键技术研究

在现代植保作业中,为保障作业效率与防治效果,喷雾设备通常在较高行进速度下配合使用高浓度药液。然而,高浓度药液在实际应用中易出现混合不均、黏度偏高等问题,加之水源水质差异的影响,喷头堵塞风险显著增加,进而引发喷洒量不足、喷雾间断及雾化不均等现象,严重影响喷雾质量和作物防护效果(张瑜, 2022)。因此,如何在复杂药液物性条件下保障喷头稳定运行已成为施药机械药剂适应性提升中的重要问题。

针对喷头堵塞风险,传统防控方式主要依赖筛网和过滤器的清洗维护,但在植保作业高强度、长时间运行条件下,人工检查易出现疏漏,且过滤装置自身的可靠性亦可能随使用时间的延长而下降。在此背景下,喷头运行状态的自动化检测技术逐渐成为

研究重点。近年来,研究人员尝试采用加速度计和压电薄膜等振动传感器(Giles, 2006)、流量计(Arenson et al., 2013)以及辅助照明系统(<https://www.landtechnikmagazin.de/duengung-pflanzenschutz/agritechnica-neuheiten-2009-dammann-praesentiert-innovative-spritzkegeldirektbeleuchtung-hd-nightlux-1362?i=10922>)开展喷头异常监测,在一定程度上提升了检测效率,但在检测精度、环境适应性及经济性方面仍存在局限。Siebald et al.(2020)从实际应用需求出发,提出基于声学信号的喷嘴监测方法,通过分析喷头工作过程中的声学信号特征,实现喷嘴功能状态与系统压力变化的识别。声学监测方法不易受外界环境干扰,维护成本较低,在喷头故障检测领域展现出较好的应用潜力。

除运行状态监测外,高黏度药液条件下的雾化能力同样是影响施药效果的关键因素。针对高黏度药剂雾化困难的问题,内混式双流体喷雾技术表现出明显优势。该技术通过在喷嘴内部实现气液两相混合,使液体在气压作用下被充分破碎成细小、均匀的液滴,从而显著提升雾化效果,适用于不同黏度范围的药液(李楚桥, 2019; 石宝宝等, 2019)。蒋宗谨(2020)在果园内应用混式空气雾化喷头进行液体授粉作业,使猕猴桃坐果率提升至86.7%,明显高于普通电动喷雾器授粉作业的坐果率(69.5%)。需要指出的是,液体授粉液剂虽不属于农药制剂,但其为提高昆虫吸引力而添加的高浓度糖分显著提高了溶液黏度(牛明旭等, 2024),在此类极端高黏度条件下仍能实现稳定雾化,进一步验证了内混式双流体雾化技术在复杂物性药液中的适应能力。

综上所述,针对高浓度、高黏度药液引发的喷头堵塞与雾化不均问题,自动化喷头故障检测技术与内混式双流体雾化技术分别从运行状态监测与雾化机理优化两个层面提升了施药机械对不同药剂的适应性,有效保障了喷雾作业连续性与均匀性,降低了药液浪费和作业中断风险,对推动施药机械药剂友好化具有积极意义。然而,现有研究仍面临不同药液物性条件下检测灵敏性不足、雾化调控范围有限以及系统长期运行稳定性与智能集成水平有待提升等问题。未来研究仍需进一步增强自动化检测系统的鲁棒性与智能化水平,拓展雾化设备对极端物性药液的适应能力,并加强多技术协同与全流程智能管控,以实现高效、精准、环境友好的植保施药装备体系。

4.1.3 面向制剂特性适配的混药关键技术研究

在农药施用实践中,药剂混配是保障施药效果的重要前置环节,其核心任务是将助剂、水与不同类型有效成分按比例混合均匀。然而,由于农药制剂在物化性质和活性保持要求方面差异明显,传统混药方式在实际应用中难以兼顾混合均匀性与活性保护。以授粉液剂和微生物农药为例,其活性成分易随时间衰减(Šunjka & Mechora, 2022; 韩虎等, 2024),若混配与施用过程间隔过长,往往导致防效降低,因此催生了即配即用型混药装备的发展需求。此外,混药过程中的加药顺序、搅拌方式及流体剪切强度等因素(Fife et al., 2007)均可能对制剂活性造成不利影响。由此可见,混药系统的优化已不再是单纯的工艺问题,而是制剂特性与施药机械协同设计中的关键技术环节。

在水基化制剂中,乳浊液型和悬浮剂型农药因分散性差、易团聚沉降等缺点,成为制剂特性适配型混药技术亟需解决的重点对象。徐幼林(2009)在在线植保混药器研究中发现,此类制剂在高浓度条件下易以团状形式悬浮于水中,常规混药结构难以实现充分破碎与均匀分散。针对这一问题,宋海潮等(2016)设计了脂溶性农药旋动射流混药器,通过继旋器诱导液流起旋、在扩散管内布设导叶并结合切向径流与螺旋收缩结构,有效强化了混合过程,显著提升了混合均匀性,突破了脂溶性农药与水难以均匀混合的技术瓶颈。

在混药结构优化的基础上,实现混药质量的实时感知与控制同样是保障施药安全与药效稳定的关键。通过对混合过程的在线监测,不仅可实时掌握药剂混合的状态,而且可在喷施前形成质量控制关口,降低因混配不当引发的药害风险。现有研究基于混合溶液电导率变化及其外观特征发展了多种检测方法,包括基于高速摄像的图像处理法(代祥等, 2020)以及电导探针法(余淋等, 2024)。综合检测效率与工程可实施性,电导探针法在田间施药装备中更具应用优势。如Zhang et al.(2025)通过分析草甘膦和氟噻嗪稀释后电导率的变化规律,构建了基于电导率反馈的在线混合控制系统,有效避免了过量施药引发的药液飘移问题;于鹏澎等(2024)进一步将电导率传感与射流器-静态混药器结构相结合,实现混药比例的在线监测与压力扰动补偿,提出了压力-混药比联合控制策略,为混药过程的精确控制提供了新的技术路径。

总体而言,围绕不同制剂特性,发展即时混合装

置、强化混合结构以及基于电导率的在线监测技术,构成了当前混药系统优化的主要技术方向。这些关键技术在提升混药均匀性、降低活性损耗和减少药害风险方面展现出良好的应用潜力。然而,现有研究多集中于特定制剂或实验室条件,对易衰变生物制剂和难分散悬浮剂等复杂制剂的系统适配性研

究仍显不足。基于上述分析,本文针对制剂特性导向的智能混药技术概念进行了概括(图5)。未来需进一步推动制剂特性导向的智能混药技术发展(郭长皓等,2022),加强多传感信息融合与全流程协同控制,以实现施药机械对复杂制剂的高效适应与精准施用。

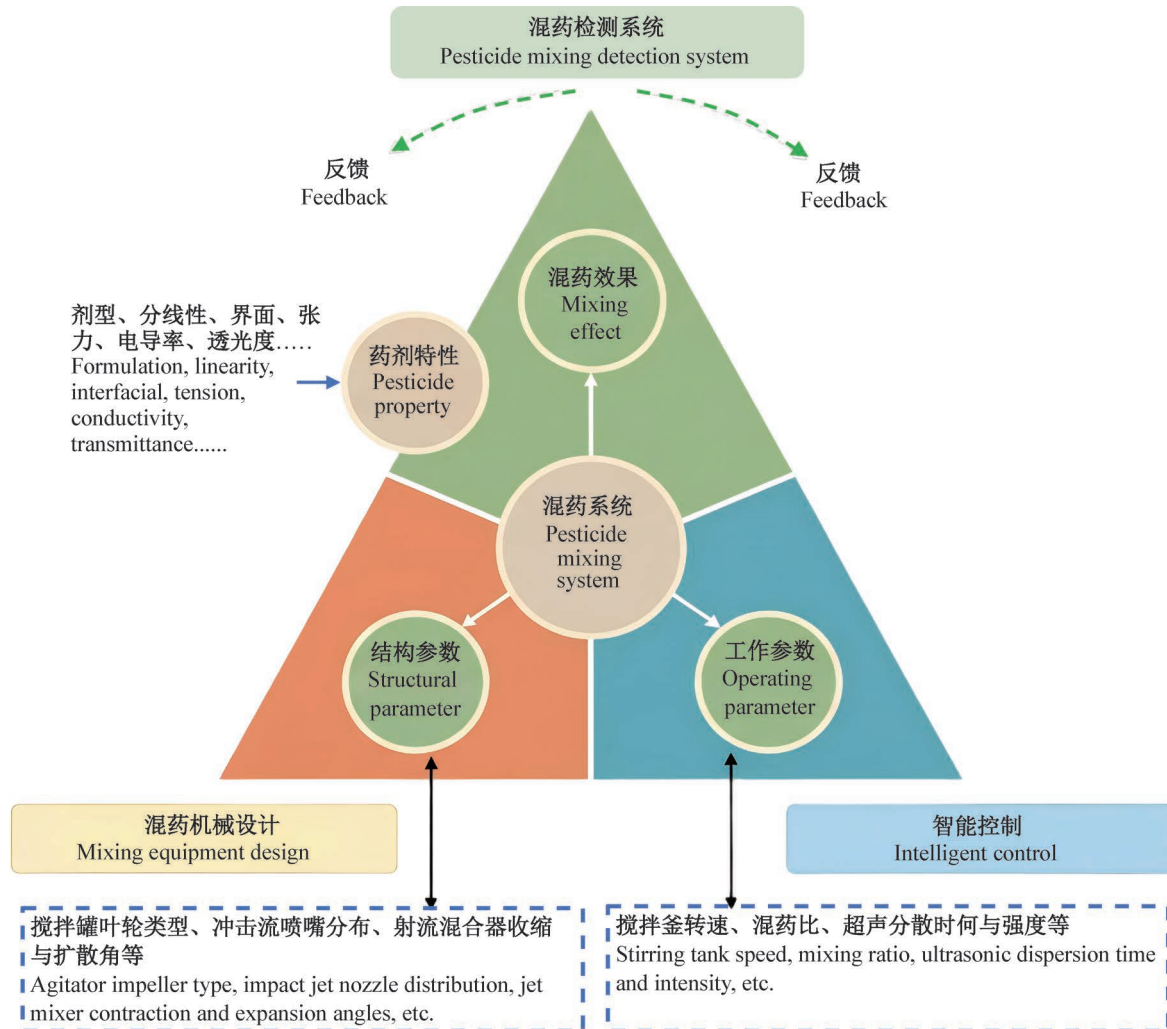


图5 制剂特性导向的智能混药技术概念图

Fig. 5 Conceptual diagram of formulation property-oriented intelligent mixing technology

4.2 面向活性敏感药剂保护的施药机械作业参数研究

在传统施药领域,以化学农药为主要作业对象时,喷雾压力、喷头类型和雾滴粒径等机械参数已形成较为成熟的规范体系。然而,随着微生物农药和液体授粉等活性敏感介质逐步进入田间应用,施药机械在参数调控层面面临着新的挑战。此类药剂在施药过程中对温度、压力、流道结构及雾滴形成过程高度敏感,传统施药以雾化效率和覆盖效果为导向的参数设定方式难以兼顾活性保持需求,导致施用效果不稳定。因此,如何在满足雾滴沉积与覆盖要

求的同时,通过作业参数调控最大限度降低活性损失,已成为施药机械参数优化中的核心任务。

在这一背景下,无论是微生物农药还是液体授粉技术,其施用效果均高度依赖于施药过程中关键参数的精细控制,包括温度管理(周宏平等,2013;周洋洋,2017)、压力调控(刘邮洲等,2008)以及喷头类型选择(肖丽萍等,2018)等。不恰当的高压喷雾、强剪切流动或喷头磨损均可能造成菌体或花粉结构被破坏,进而降低其生物活性。此外,泵送循环引起的药液温度升高以及混合液长时间停留,同样会加剧

菌体或花粉活性的衰减,成为影响施用效果的重要隐性因素。由此可见,施药参数优化不再是单一参数的经验调节,而是围绕活性保护目标的系统性参数协同控制问题。

值得指出的是,尽管液体授粉技术并不属于传统农药施用范畴,但其在机械作业过程中同样面临雾滴沉积效果与活性保持难以兼顾的共性问题。因此,本文将液体授粉技术的参数优化研究纳入讨论

范围,作为活性敏感介质施药参数优化的重要补充与验证案例。大量田间试验结果表明,通过选用低剪切喷头、合理降低施药压力、控制药液温度并对机械运行状态进行实时监控,可有效提升微生物和花粉的存活率,增强施药和授粉作业的稳定性与效率。基于此,本文系统梳理了微生物农药与液体授粉在实际应用中的主要影响参数及对应优化措施(表3),以期工程实践提供参考。

表3 喷雾设备参数对活性喷雾介质的影响及使用建议

Table 3 Effects of spray equipment parameters on active spray media and application recommendations

施药参数 Working parameter	试验对象 Object	关键结论及使用建议 Key conclusions and usage recommendations	参考文献 Reference
磨损的扇形喷头 Worn fan nozzle	微生物农药 Microbial pesticide	扇形喷头磨损率越高,酵母菌活性越低;喷施化学农药的喷头失效标准不适用于微生物农药,微生物农药的喷头失效评估应当制定新标准 Increased wear of fan nozzles reduces yeast activity. Failure criteria developed for chemical pesticide spraying are not applicable to microbial pesticides; new standards should be established for evaluating nozzle wear when applying microbial pesticides	翟恩昱等, 2018 Zhai et al., 2018
扇形喷头内部结构 Internal structure of fan-shaped nozzle	微生物农药 Microbial pesticide	各喷头内部流道结构越复杂,微生物农药活性越差;同时外部气流干扰也会加剧微生物农药活性的降低,但相比其他参数而言喷头内部结构对微生物活性影响较小,可优先考虑雾滴分布均匀性和药液覆盖密度 Greater complexity of internal flow channels leads to reduced microbial activity. External airflow disturbance further decreases activity; however, compared with other parameters, the internal nozzle structure has a relatively smaller effect. Priority should be given to droplet distribution uniformity and spray coverage density	刘冬梅等, 2018 Liu et al., 2018
药罐温度升高 Temperature rise of spray tank	微生物农药 Microbial pesticide	高温会显著影响微生物活性,而增加药罐的容积能一定程度抑制药液温度升高。药罐容量越小,药剂混合过程中的温度升高越快,微生物农药活性越差 Elevated temperature significantly reduces microbial activity, increasing tank volume can partially suppress temperature rise during mixing. Smaller tank volumes result in faster temperature rise and lower microbial activity	Fife et al., 2007
混合药液放置时间 Holding time of mixed solution	花粉溶液 Pollen solution	花粉液配好 15 min 后花粉活性显著下降,建议授粉现场现配现用 Pollen viability decreased significantly after 15 min following preparation; therefore, on-site preparation and immediate use are recommended during pollination	韩虎等, 2024 Han et al., 2024
喷雾压力(柱塞泵) Spray pressure (plunger pump)	花粉溶液 Pollen solution	在 0.3~2.5 MPa 的最优区间内,压力增大对花粉活性无显著影响;建议优先选用隔膜泵保持雾滴的稳定性;过高的喷雾压力可能导致花粉颗粒破裂,影响花粉活性 Within the optimal range of 0.3–2.5 MPa, increasing pressure has no significant effect on pollen viability. Diaphragm pumps are recommended to maintain droplet stability. Excessively high spray pressure may cause pollen grain rupture and reduce viability	Williams et al., 2021; Hao et al., 2023
离心喷头转速 Rotational speed of centrifugal nozzle	花粉溶液 Pollen solution	转速大于 12 000 r/min 时花粉活性大幅下降,转速小于 8 000 r/min 时雾滴均匀性较差,最佳的离心喷头转速区间建议在 8 000~12 000 r/min 之间 Pollen viability decreases markedly at rotational speeds above 12 000 r/min, while droplet uniformity is poor below 8 000 r/min. The recommended optimal rotational speed range is 8 000–12 000 r/min	韩虎等, 2024; Han et al., 2024
风送静电 Wind assistance and electrostatic charging	花粉溶液 Pollen solution	静电会减小雾滴粒径,导致花粉过多暴露在空气中;风送同时加剧了花粉在空气中的破裂风险 Electrostatic charging reduces droplet size, increasing pollen exposure to air; wind assistance further elevates the risk of pollen rupture during airborne transport	刘紫嫣等, 2024 Liu et al., 2024

综上所述,施药机械作业参数的精准优化,是实现其药剂友好目标的最终执行环节。针对微生物农药、花粉等活性介质的成功实践表明,将药剂特性深度融入机械的控制逻辑,是实现高效、低损伤作业的必由之路。未来的发展方向是构建内嵌药剂知识的

智能决策系统,使施药机械能自动适应不同介质,最终实现从人适应药械到机械主动适应药剂的根本性转变。

4.3 机械作业瓶颈的药剂辅助方案

施药机械效率的提升根本上依赖于其自身结构

与技术的持续创新,但在实际应用过程中,机械设备的性能始终受到操作环境与其固有技术边界的限制。对于植保无人机、静电喷雾等超低容量喷雾机械而言,仅靠机械本体难以突破某些关键瓶颈,这些卡脖子问题限制了精准农业的推广。例如,植保无人机常因雾滴粒径和药液成分导致喷头堵塞和雾滴飘移(伏安良,2020),静电喷雾的雾滴荷电效果也受限于药液配方特性(洗福生和吴春笃,1987;许晏铭等,2019;Lin et al.,2023),通常药液的电导率越大,雾滴的荷电能力越强,荷质比越大。因此,在硬件提升遇到瓶颈时,需通过药剂制剂与助剂优化协同,以实现机械作业能力的必要补充和突破。

为突破上述机械作业瓶颈,药剂制剂与功能性助剂的外部赋能成为高效而灵活的技术补充。纳米农药通过粒径优化和分散性改善,可有效降低无人机喷头堵塞风险(胡红岩等,2022a),并在飞防助剂的协同下提升雾滴抗飘移和靶标沉积能力(胡红岩等,2022b;2023;祁之秋等,2025),实现同等防治效果下的农药减量增效。在静电喷雾技术领域,通过筛选高电导率药剂或科学添加助剂,不仅增强了喷雾雾滴的荷电力,也有效提升了复杂环境下雾滴的沉积效率。例如,吡虫啉的电导率远高于阿维菌素,这使其在相同作业条件下表现出更优的沉积性能(任立瑞等,2018)。此外,通过助剂优化还可进一步提升药液的带电能力,从而激发静电喷雾装备在多样环境中的作业潜力。各类药剂性状与不同机械参数之间往往存在复杂却可调控的协同关系,制剂和助剂的针对性调整已成为挖掘施药设备潜能的关键手段。

综上,本文围绕施药机械作业中的关键瓶颈,系统阐释了药剂与助剂优化在提升设备作业性能方面的作用。实践表明,药剂辅助不仅能够有效弥补机械本体难以克服的技术不足,还为精准、高效及绿色施药提供了更广阔的应用空间。当前药剂与机械协同机制仍有待完善,未来研究应聚焦于协同参数优化与标准建设,推动药剂与机械在友好型施药机械技术体系中的深度融合,从而实现智能、高效的药剂友好型施药技术体系。这一策略对于促进现代农业可持续发展和技术创新具有重要的现实意义。

5 结论与展望

文献计量分析表明,全球相关研究焦点正从单纯的雾滴沉积模式向药械协同系统性适配拓展,研究文献规模在过去15年间增长了328%。文献研究

证实,通过机械结构创新、作业参数精细调控以及药剂助剂辅助的三重路径,有望解决物理应力损伤与流变性不匹配等药械失配矛盾,使微生物农药存活率普遍提升至80%以上。施药机械正从被动执行向智能主动适配的方向发展,这已成为突破行业瓶颈的必然选择,将为农药减量增效与农业可持续发展提供核心原动力。

5.1 从双向被动适应到药械一体化的模式创新

植保技术未来将从药械被动双向适应的传统模式,向药械一体化耦合设计的模式转变。该模式要求系统考量农药制剂的流变学、界面张力等多尺度物理行为,以主动匹配特定的植保施药技术装备。与此同时,施药装备需针对高黏度、生物制剂等特殊剂型,定制化开发低剪切雾化、防堵塞输送及结合多物理场辅助沉积等核心技术模块。二者源于基础科学的深度协同耦合,有望将制剂与装备从被动的末端适配,转变为主动的系统性共创。

5.2 面向复杂地形的装备系统重构与精准作业策略

面对山地、丘陵、梯田等复杂农田地貌,农药施药面临通行性差、药剂分布不均、装备损耗高等突出问题。未来发展应着力突破环境自适应的智能施药系统的开发,这要求装备从机械适应性向感知-决策-执行一体化的自主协同演进,研发基于多传感器融合(如激光雷达、视觉)的高通过性自主导航平台,实现对非结构化环境的实时三维建模与精准路径规划;构建可重构的智能喷洒执行系统,该系统能根据实时感知的作物冠层形态与地形坡度,动态调整喷头姿态、流量与雾化参数,甚至主动补偿风场扰动,以生成并精准执行变量施药处方图。这一重构与精准作业策略将推动复杂地形下的植保作业模式从经验驱动的均匀喷洒向数据驱动的靶向精准施药转变,在显著提升药剂利用率的同时,确保作业人员与生态环境的安全。

5.3 协同优化与专家系统集成

未来智慧植保不应仅仅等同于传感器和智能检测,而更应以药械双方特性的大数据采集、知识建模、专家经验集成为核心。通过构建真实作业条件下的药剂物化参数与机械运行参数双向数据库,不断积累大量实践案例,建立药械协同的专家系统。利用优化算法和决策引擎,让用户能够根据作物类型、病虫害对象、环境条件等输入,智能推荐出最优药械组合、工况和操作流程。特别是在药剂友好型施药机械的研究框架下,实现制剂参数与机械作业环节的知识驱动与协同优化,精准匹配药剂特性与

机械工况,全面提升植保作业效率与用药安全。

5.4 政策驱动下的绿色技术推广与农民技能赋能

新型环保、高效药剂与智能施药机械的推广应用,往往面临成本高、技术门槛高等因素的制约。建议政府加大绿色装备的财政补贴力度和金融优惠支持,以有效减轻农户采购负担。此外,需完善绿色农药和智能农机的应用标准及监管规范;进一步加强对一线技术人员和农户的技能培训,同时完善配套服务体系,例如设立田间示范培训基地,推动新型器械技术从“可获得”到“高效应用”的实际转化。这将有力促进绿色施药技术在农业生产中的广泛推广和可持续落地。

综上,未来药剂友好型施药机械将是一个深度集成药剂知识、具备环境自主决策能力并以用户为中心设计的智能系统,其技术演进必将引领植保作业走向更精准、更绿色、更可持续的未来。

参 考 文 献 (References)

- Arenson MA, Davenport J, Stone SG. 2013. Spraying apparatus with spray nozzle flow sensing and monitoring system: 20130037625. (2013-02-14) [2025-08-01]
- Chen SD, Liao LJ, Xu XJ, Chen WR, Li ZH, Zhou ZY, Lan YB. 2023. Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 54(4): 502–512 (in Chinese) [陈盛德, 廖玲君, 徐小杰, 陈威任, 黎志宏, 周志艳, 兰玉彬. 2023. 中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势. *沈阳农业大学学报*, 54(4): 502–512]
- Chen Y, Chen YX, Guo PJ, Zhang S, Jin HL, Chen J. 2025. Design and experiment of static mixer for direct injection inline mixing system. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 56(3): 301–311 (in Chinese) [陈雨, 陈宇翔, 郭佩杰, 张硕, 靳红玲, 陈军. 2025. 直接注入式在线混药系统静态混药器设计与试验. *农业机械学报*, 56(3): 301–311]
- Combella JH, Miller P. 1999. The development of twin-fluid nozzle for precision agriculture//Marshall G. 1999 Brighton Conference: weeds, vols 1/2/3. Brighton: Brighton Crop Protections Council, pp. 473–478
- Cui L. 2025. Design and testing of a composite spray boom with flexible opener and air-assisted spraying in a density canopy: a case study of soybean. Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [崔雷. 2025. 郁闭冠层柔性推拨与风送喷雾复合式喷杆设计及试验: 以大豆为例. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Dai X, Xu YL, Zheng JQ, Ma LQ, Ding FJ, Guo CH. 2020. Analysis method and experiments of inline mixing water dispersible granules pesticides based on 3D image reconstruction. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 51(5): 98–107 (in Chinese) [代祥, 徐幼林, 郑加强, 马鲁强, 丁凤娟, 郭长皓. 2020. 基于3D图像重构的水分散粒剂在线混合分析方法研究. *农业机械学报*, 51(5): 98–107]
- Dong X, Zhang T, Yan MD, Yang XJ, Yan HR, Sun X. 2018. Design and experiment of 3WPZ-4 type air-assisted grape sprayer. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 49(Suppl.1): 205–213 (in Chinese) [董祥, 张铁, 燕明德, 杨学军, 严荷荣, 孙星. 2018. 3WPZ-4型风送式葡萄喷雾机设计与试验. *农业机械学报*, 49(增刊1): 205–213]
- FAO. 2022. The state of food and agriculture 2022: leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome: FAO
- Feng YN, Pei L, Chen X, Chen XB, Liu Y, Chen B. 2021. Summary of the key technology of variable rate application. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 42(12): 65–71 (in Chinese) [冯耀宁, 裴亮, 陈晓, 陈小兵, 刘燕, 陈彬. 2021. 变量施药关键技术综述. *中国农机化学报*, 42(12): 65–71]
- Fife JP, Ozkan HE, Derksen RC, Grewal PS. 2007. Effects of pumping on entomopathogenic nematodes and temperature increase within a spray system. *Applied Engineering in Agriculture*, 23(4): 405–412
- Fife JP, Ozkan HE, Derksen RC, Grewal PS, Krause CR. 2005. Viability of a biological pest control agent through hydraulic nozzles. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 48(1): 45–54
- Fu AL. 2020. Advantages, existing problems and countermeasures of pesticide application of plant protection UAVs. *Qinghai Agro-Technology Extension*, (4): 57–58 (in Chinese) [伏安良. 2020. 植保无人机的施药优势、存在问题及对策建议. *青海农技推广*, (4): 57–58]
- Gao XQ. 2022. Structure optimization and deposition improvement method of centrifugal nozzle for aviation spray in tea garden. Master thesis. Jinan: Shandong University (in Chinese) [高雪晴. 2022. 面向茶园航空喷洒的离心雾化喷头结构优化及沉积增效方法研究. 硕士学位论文. 济南: 山东大学]
- Giles DK. 2006. Monitoring spray nozzle operation by sensing vibration of atomisation. *Aspects of Applied Biology*, 77(1): 189–196
- Guo CH, Ya MS, Xu YL, Zheng JQ. 2022. Solid-liquid two-phase mixing method and its uniformity detection technology. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 41(7): 3413–3430 (in Chinese) [郭长皓, 鸦明胜, 徐幼林, 郑加强. 2022. 固液两相混合方法及其均匀性检测技术. *化工进展*, 41(7): 3413–3430]
- Guo YJ, Zhu XY, Tong LD, Wei Q, Wang XJ. 2023. Analyzing static spray characteristics of variable spray system of centrifugal nozzle. *Journal of Irrigation and Drainage*, 42(1): 100–105, 111 (in Chinese) [郭依剑, 朱兴业, 童林丹, 魏巧, 王鑫建. 2023. 离心喷头变量喷施系统静态喷雾特性分析. *灌溉排水学报*, 42(1): 100–105, 111]
- Han FF. 2021. Overview of the development of pesticide formulations. *South China Agriculture*, 15(2): 233–235 (in Chinese) [韩菲菲. 2021. 农药剂型发展概况. *南方农业*, 15(2): 233–235]
- Han H, Liu ZY, Liu LM, Liu YJ. 2024. Exploration of the factors influencing pollen activity in liquid spray pollination of pears. *South*

- China Fruits, 53(3): 210–216 (in Chinese) [韩虎, 刘紫嫣, 刘理民, 刘亚佳. 2024. 梨液体授粉花粉活性影响因素探究. 中国南方果树, 53(3): 210–216]
- Hao W, Ding XT, He Z, Li K, Gong WX, Li ZX, Yang Z, Cui YJ. 2023. Development and evaluation of precision liquid pollinator for kiwifruit. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213: 108193
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 389–397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. 植物保护学报, 49(1): 389–397]
- Hu HY, Chen YN, Song XP, Ma YJ, Liu QM, Wang D, Shan YP, Ma Y. 2022a. Influence of the spray volumes and adjuvants on operational efficacy of plant protection unmanned aerial vehicle at the seedling stage of cotton. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 24(4): 825–833 (in Chinese) [胡红岩, 陈宇楠, 宋贤鹏, 马亚杰, 刘青梅, 王丹, 单永潘, 马艳. 2022a. 喷雾量及助剂对棉花苗期植保无人机作业效果的影响. 农药学报, 24(4): 825–833]
- Hu HY, Chen YN, Song XP, Ren XL, Ma XY, Ma YJ, Wang D, Ma Y. 2022b. Control effect on cotton aphids of nanopesticide sprayed with plant protection unmanned aerial vehicles in cotton field. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 37(1): 54–60 (in Chinese) [胡红岩, 陈宇楠, 宋贤鹏, 任相亮, 马小艳, 马亚杰, 王丹, 马艳. 2022b. 植保无人机喷施纳米农药对棉花蚜虫的防治效果研究. 云南农业大学学报(自然科学), 37(1): 54–60]
- Hu HY, Ma YJ, Shan YP, Song XP, Wang D, Ren XL, Li J, Niu YB, Wu CC, Ma XY, et al. 2023. Effects of adjuvants on physicochemical properties of nanopesticide applied by plant protection unmanned aerial vehicles and control of aphids in cotton field. *Cotton Science*, 35(3): 239–250 (in Chinese) [胡红岩, 马亚杰, 单永潘, 宋贤鹏, 王丹, 任相亮, 李洁, 牛一搏, 吴长才, 马小艳, 等. 2023. 助剂对植保无人机喷施纳米农药理化性质和防治棉田蚜虫效果的影响. 棉花学报, 35(3): 239–250]
- Hu JH, Yu QX. 2024. Current status and prospects of self-propelled spray bar sprayers based on 3C certification. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(1): 68–75 (in Chinese) [胡继红, 于庆旭. 2024. 基于3C认证的自走式喷杆喷雾机产品现状与展望. 中国农机化学报, 45(1): 68–75]
- Hua NZ. 2008. Advance and trend of pesticide formulation development: II. *Agrochemicals*, 47(4): 235–239, 247 (in Chinese) [华乃震. 2008. 农药剂型的进展和动向: 下. 农药, 47(4): 235–239, 247]
- Idris AL, Fan X, Muhammad MH, Guo YC, Guan X, Huang TP. 2020. Ecologically controlling insect and mite pests of tea plants with microbial pesticides: a review. *Archives of Microbiology*, 202(6): 1275–1284
- Jiang ZJ. 2020. Optimization of air-liquid spray parameter and development of pollinator for kiwifruit flower. Master thesis. Yangling: Northwest A&F University (in Chinese) [蒋宗谨. 2020. 双流式喷雾参数优化与猕猴桃授粉装置研制. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学]
- Li CQ. 2019. Experimental study on spray steadiness of internal-mixing twin-fluid atomizer. Master thesis. Xi'an: Chang'an University (in Chinese) [李楚桥. 2019. 内混式空气雾化喷嘴喷雾稳定性试验研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学]
- Li XS, Zhai EY, Chen ZT, Zheng JQ, Li JH. 2024. Microbial activity and spray characteristics of dual fluid nozzles. *Journal of Forestry Engineering*, 9(3): 138–148 (in Chinese) [李新松, 翟恩昱, 陈曾涛, 郑加强, 李建华. 2024. 一种双流体喷头的微生物活性及喷雾特性. 林业工程学报, 9(3): 138–148]
- Lin Z, Liang SK, Xie JY, Tian S. 2023. Effect of physical properties of electrostatic spray additives on deposition rate of precision spray// 2023 7th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan, China: IEEE, pp. 75–80
- Liu DM, Zhou HP, Ru Y, Qu RJ. 2018. Effect of fan nozzle structure and pressure on distribution and activity of microbial pesticide droplets. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(21): 57–64 (in Chinese) [刘冬梅, 周宏平, 茹煜, 曲荣佳. 2018. 扇形喷头结构和压力对微生物农药雾滴分布及活性的影响. 农业工程学报, 34(21): 57–64]
- Liu LM, He XK, Liu WH, Liu ZY, Han H, Li YF. 2022. Autonomous navigation and automatic target spraying robot for orchards. *Smart Agriculture*, 4(3): 63–74 (in Chinese) [刘理民, 何雄奎, 刘伟洪, 刘紫嫣, 韩虎, 李扬帆. 2022. 果园自主导航兼自动对靶喷雾机器人. 智慧农业, 4(3): 63–74]
- Liu Q, Wang XY, Wei K, Li XZ, Luo H. 2020. Preparation and application of dimethomorph-thiram ultra-low volume spray. *Chemical Reagents*, 42(12): 1409–1414 (in Chinese) [刘琴, 王晓宇, 韦昆, 李兴忠, 罗会. 2020. 烯酰吗啉·福美双超低容量喷雾剂的制备与应用. 化学试剂, 42(12): 1409–1414]
- Liu XM, Ma MR, Hou XW, Chen YF, Yu SH, Yuan J. 2025. Research progress and trend analysis of gas-liquid twin-fluid nozzle. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 56(6): 296–318 (in Chinese) [刘雪美, 马旻睿, 侯献伟, 陈月锋, 于世辉, 苑进. 2025. 气液两相流喷头研究现状与展望. 农业机械学报, 56(6): 296–318]
- Liu YL. 2011. The development of picloram 100 ED and the effect of adjuvant on deposition in target. Master thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [刘勇良. 2011. 10% 氨基吡啶酸静电喷雾液剂的研制及助剂对沉积量的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Liu YZ, Chen ZY, Fu XM, Wu P, Luo CP, Gong Y, Liu YF, Nie YF. 2008. Influence of different operating pressures and spray volumes and wind velocities on biocontrol strains colonization on crops. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 24(5): 640–644 (in Chinese) [刘邈洲, 陈志谊, 傅锡敏, 吴萍, 罗楚平, 龚艳, 刘永峰, 聂亚峰. 2008. 喷雾压力、药液流量和工作风速对生防微生物在不同作物上定殖的影响. 江苏农业学报, 24(5): 640–644]
- Liu ZY, Liu LM, Han H, He XK, Liu YJ. 2024. Effect of three modes of backpack wind-fed electrostatic sprayer on pear liquid pollination. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(11): 54–59 (in Chinese) [刘紫嫣, 刘理民, 韩虎, 何雄奎, 刘亚佳. 2024. 风送静电喷雾器三种喷雾模式对梨液体授粉的影响. 中国农机化学报, 45(11): 54–59]

- Ma LM, Gan SK, Lü XF. 2024. Study on atomization characteristics based on a dual fluid spray device. *Journal of Jilin Institute of Chemical Technology*, 41(9): 81–86 (in Chinese) [马雷鸣, 甘树坤, 吕雪飞. 2024. 基于一种双流体喷雾装置的雾化特性试验研究. *吉林化工学院学报*, 41(9): 81–86]
- Ma X, Guo LJ, Wen ZC, Wei YH, Xiao RH, Zeng H. 2020. Atomization characteristics of multi-nozzle electrostatic spray and field experiment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(7): 73–82 (in Chinese) [马旭, 郭林杰, 温志成, 魏宇豪, 肖荣浩, 曾红. 2020. 静电喷雾的多喷头雾化特性及田间试验. *农业工程学报*, 36(7): 73–82]
- Niu MX, Lou JJ, Li M, Zhao YN, Tao ST. 2024. Screening of high efficiency of pollen dispersant for liquid pollination of pear. *South China Fruits*, 53(6): 175–180 (in Chinese) [牛明旭, 娄婧婧, 李敏, 赵亚楠, 陶书田. 2024. 用于梨树液体授粉的花粉分散剂筛选. *中国南方果树*, 53(6): 175–180]
- Qi ZQ, Gao LQ, Li Y, Wei SH. 2025. Effect of aviation spray adjuvants on physicochemical properties and efficacy of 2.5% jinggangmycin-*Bacillus cereus* AS in controlling rice sheath blight using a UAV sprayer. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 56(1): 18–28 (in Chinese) [祁之秋, 高连奇, 李祎, 魏松红. 2025. 飞防助剂对2.5%井冈·蜡芽菌水剂理化性状及无人机喷雾防治水稻纹枯病效果的影响. *沈阳农业大学学报*, 56(1): 18–28]
- Ren LR, Chen FL, Yin MM. 2018. Effect of adjuvant on conductivity and deposition of electrochargeable liquid. *Scientia Agricultura Sinica*, 51(23): 4459–4469 (in Chinese) [任立瑞, 陈福良, 尹明明. 2018. 助剂对静电喷雾液剂电导率及沉积量的影响. *中国农业科学*, 51(23): 4459–4469]
- Siebold H, Hensel O, Kaufmann HH, Kirchner S. 2020. Spray nozzle function control using acoustics for agricultural applications. *Biosystems Engineering*, 197: 149–155
- Shi BB, Shi FX, Chen J, Jiang ZJ, Liu SH. 2019. Study on atomization control characteristics of twin-fluid nozzle. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 41(1): 174–179 (in Chinese) [石宝宝, 石复习, 陈军, 蒋宗谨, 刘世浩. 2019. 双流体喷嘴雾化控制特性研究. *农机化研究*, 41(1): 174–179]
- Song HC, Xu YL, Zheng JQ, Wang XW, Zhang M. 2016. Structural analysis and mixing uniformity experiments of swirling jet mixer for applying fat-soluble pesticides. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(23): 86–92 (in Chinese) [宋海潮, 徐幼林, 郑加强, 汪希伟, 张敏. 2016. 脂溶性农药旋动射流混药器结构分析与混合均匀性试验. *农业工程学报*, 32(23): 86–92]
- Sun S, Tang Y, Miao AM, Hou CJ, Zhuang JJ, Lin JT, Luo SM. 2019. Study on atomization performance of fan and hollow cone nozzle of unmanned aerial vehicle for plant protection. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 47(11): 246–250 (in Chinese) [孙胜, 唐宇, 苗爱敏, 侯超钧, 庄家俊, 林进添, 骆少明. 2019. 植保无人机扇形和空心锥喷头雾化性能研究. *江苏农业科学*, 47(11): 246–250]
- Šunjka D, Mechora Š. 2022. An alternative source of biopesticides and improvement in their formulation: recent advances. *Plants*, 11(22): 3172
- Tang FHM, Lenzen M, McBratney A, Maggi F. 2021. Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience*, 14(4): 206–210
- Williams H, Bell J, Nejati M, Hussein S, Penhall N, Lim J, Jones MH, Ahn HS, Bradley S, Schaare P, et al. 2021. Evaluating the quality of kiwifruit pollinated with an autonomous robot. *Field Robotics*, 1: 1–22
- Xian FS, Wu CD. 1987. The effects of static electricity and physical properties of liquid on spray atomization. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 18(1): 60–68 (in Chinese) [洗福生, 吴春笃. 1987. 雾化过程中的静电作用及喷液物理特性影响的研究. *农业机械学报*, 18(1): 60–68]
- Wu P. 2007. Development of pesticide formulation and its employment technique in China. *Modern Agrochemicals*, 6(6): 52–54, 56 (in Chinese) [吴萍. 2007. 简述我国农药剂型与农药施用技术发展. *现代农药*, 6(6): 52–54, 56]
- Wu XQ, Zhao XY, Xu YZ, Wang JN, Zhou FY, Zhou HZ, Zhang GZ, Xie XY, Yan K, Zhang XJ. 2019. Research progress on precision application technology of biological control. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(3): 13–21 (in Chinese) [吴晓青, 赵晓燕, 徐元章, 王加宁, 周方园, 周红姿, 张广志, 谢雪迎, 颜坤, 张新建. 2019. 植物生物防治精准化施药技术的研究进展. *中国农业科技导报*, 21(3): 13–21]
- Xiao LP, Liu MH, Zhu HP, Cai JP, Lin JL, Ou MX. 2018. Spray droplet size characteristics of different biological pesticides with different hydraulic nozzles. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 49(2): 100–106 (in Chinese) [肖丽萍, 刘木华, 朱HP, 蔡金平, 林金龙, 欧鸣雄. 2018. 喷嘴喷施不同生物农药雾滴特性研究. *农业机械学报*, 49(2): 100–106]
- Xu T, Lü XL, Qi YN, Zeng J, Lei XH, Yuan QC. 2023. Research status on equipment and technology of orchard air-assisted sprayer in China. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 44(7): 69–77 (in Chinese) [徐陶, 吕晓兰, 祁雁楠, 曾锦, 雷晓晖, 袁全春. 2023. 我国果园风送式喷雾装备与技术研究进展. *中国农机化学报*, 44(7): 69–77]
- Xu YL. 2009. Study on pesticide mixers for plant protection machinery and their in-line pesticide mixing performance. PhD thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese) [徐幼林. 2009. 植保机械混药器及其农药在线混合性能研究. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学]
- Xu YM, Liu JH, Li XG. 2019. Study of liquid properties on electrostatic spray atomizing performance. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 37(9): 793–798 (in Chinese) [许晏铭, 刘建河, 李星光. 2019. 液体物性对静电喷雾雾化性能的试验研究. *排灌机械工程学报*, 37(9): 793–798]
- Xue ZY, Xu RJ, Bai D, Lin HF. 2023. YOLO-tea: a tea disease detection model improved by YOLOv5. *Forests*, 14(2): 415
- Yang LW, Sun YQ, Zhang JQ. 2025. Design and simulation of an anti-drift spraying device for soybean-corn strip planting systems. *Instrumentation Technology*, (5): 72–76 (in Chinese) [杨立武, 孙友强, 张俊卿. 2025. 大豆玉米带状种植专用防飘喷雾装置的设计与仿真. *仪表技术*, (5): 72–76]
- Yang S, Zhang PC, Wang L, Tang LB, Wang SS, He X. 2025. Identify-

- ing tomato leaf diseases and pests using lightweight improved YOLOv8n and channel pruning. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 41(2): 206–214 (in Chinese) [杨森, 张鹏超, 王磊, 唐梁彬, 王树声, 贺兴. 2025. 集成改进YOLOv8n与通道剪枝的轻量化番茄叶片病虫害识别方法. *农业工程学报*, 41(2): 206–214]
- Yu L, Hao ZX, Zhang JP, Xu DH, Liu DY, Liu HB, Shu WZ, Wang XL. 2024. Construction of conductivity prediction model for mixed fertilizer solution. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 39(2): 6–11 (in Chinese) [余淋, 郝祝霞, 张京萍, 许德华, 刘敦一, 刘洪滨, 束维正, 王辛龙. 2024. 混合肥液电导率预测模型构建研究. *磷肥与复肥*, 39(2): 6–11]
- Yu PP, Zhang WY, Han ZJ, Dong X, Cheng JH, Jia WD. 2024. Design and test of online mixing pesticide system of sprayer based on conductivity characteristics of pesticide. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(10): 82–85, 93 (in Chinese) [于鹏澎, 张文雅, 韩志杰, 董祥, 程军辉, 贾卫东. 2024. 基于药液电导率特性的植保机械在线混药系统设计与试验. *中国农机化学报*, 45(10): 82–85, 93]
- Yu ZY, He XK, Su LY, Zeng WD, Wang GF, Li YF, Song JL, Wang CL, Liu YJ, Zeng AJ. 2025. Research progress on key technologies and equipment for air-assisted to target variable pesticide application in domestic orchards. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 27(5): 799–812 (in Chinese) [余忠义, 何雄奎, 苏立阳, 曾文定, 王光夫, 李扬帆, 宋坚利, 王昌陵, 刘亚佳, 曾爱军. 2025. 果园风送对靶变量施药关键技术及装备研究进展. *农药学报*, 27(5): 799–812]
- Zhai CY, Zhang YL, Zou W, Song J, Han CJ, Dou HJ. 2024. Design and test of precision variable-rate spray monitoring and control system based on pesticide spraying traceability. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 55(2): 160–169 (in Chinese) [翟长远, 张焱龙, 邹伟, 宋健, 韩长杰, 窦汉杰. 2024. 基于农药喷施溯源的精准变量喷药监控系统设计与试验. *农业机械学报*, 55(2): 160–169]
- Zhai EY, Zheng JQ, Zhou HP, Ru Y, Li JH. 2018. Effects of flat-fan nozzle wear on application of microbial pesticides. *China Forestry Science and Technology*, 3(1): 109–116 (in Chinese) [翟恩昱, 郑加强, 周宏平, 茹煜, 李建华. 2018. 扇形雾喷头磨损对微生物农药施药性能的影响. *林业工程学报*, 3(1): 109–116]
- Zhang BB, Qiu TW. 2025. The influence of rural population aging on farmland abandonment and its mechanism analysis. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 44(3): 212–222 (in Chinese) [张冰冰, 仇童伟. 2025. 农村人口老龄化对耕地撂荒的影响及其机制分析. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 44(3): 212–222]
- Zhang H, Xu N, Cao LR, Wang R, Zhang K. 2023. Review on research and utilization of microbial pesticides in China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 25(4): 769–778 (in Chinese) [张慧, 许宁, 曹丽茹, 王蕊, 张凯. 2023. 我国微生物农药的研发与应用研究进展. *农药学报*, 25(4): 769–778]
- Zhang HC, Zheng JQ, Zhou HP, Song WF, Ge YF. 2013. Performance experiments of rotary cage atomizer for biological pesticide application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29: 63–70
- Zhang W, Hou YR, Liu X, Lian Q, Fu XM, Zhang B, Wang HY, Wang YQ. 2017. Wind tunnel experimental study on droplet drift reduction by a conical electrostatic nozzle for pesticide spraying. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 10(3): 87–94
- Zhang XK. 2021. Design and research of spraying rod suspension device for sprayer. Master thesis. Shihezi: Shihezi University (in Chinese) [张校康. 2021. 喷杆式喷雾机喷杆悬挂架装置设计与研究. 硕士学位论文. 石河子: 石河子大学]
- Zhang Y. 2022. Experimental study on detection method of clogging of spray nozzle based on acoustic signal. Master thesis. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese) [张瑜. 2022. 基于声信号的农用喷嘴堵塞检测方法及其试验研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学]
- Zhang ZY, Guo PJ, Ma HY, Chen YX, Chen Y. 2025. Experimental investigation of dual-path inline mixing system for sprayers in corn-soybean strip intercropping mode. *Agriculture*, 15(3): 247
- Zhou HP, Xu LY, Zheng JQ, Gao SY. 2013. Tail-tube structure effect on temperature and speed of hot gas inner tail-tube of steady combustion fogger. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 35(12): 125–128 (in Chinese) [周宏平, 许林云, 郑加强, 高绍岩. 2013. 稳态烟雾机喷管结构对管内气流特性影响研究. *农机化研究*, 35(12): 125–128]
- Zhou HP, Zhang C, Xu LY, Ru Y, Zheng JQ, Li QJ. 2022. Research and progress of precision spraying technology and equipment for trees. *Journal of Forestry Engineering*, 7(5): 12–22 (in Chinese) [周宏平, 张超, 许林云, 茹煜, 郑加强, 李秋洁. 2022. 树木精准施药技术研究进展. *林业工程学报*, 7(5): 12–22]
- Zhou LF, Zhang L, Xue XY, Chen C. 2018. Research progress and application status of electrostatic pesticide spray technology. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(18): 1–11 (in Chinese) [周良富, 张玲, 薛新宇, 陈晨. 2018. 农药静电喷雾技术研究进展及应用现状分析. *农业工程学报*, 34(18): 1–11]
- Zhou YY. 2017. Effects of thermal fogging application on the activity of biopesticides and stability of chemical pesticides. Master thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [周洋洋. 2017. 热雾施药对生物农药活性和化学药剂稳定性的影响. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院]
- Zhu ZY, Zhang HC, Zheng JQ, Zhou HP. 2018. Performance of an air-assisted spinning disc nozzle for biological pesticide. *Journal of Zhejiang A&F University*, 35(2): 361–366 (in Chinese) [朱正阳, 张慧春, 郑加强, 周宏平. 2018. 风送转盘式生物农药离心雾化喷头的性能. *浙江农林大学学报*, 35(2): 361–366]
- Zhuo FY, Zhang HJ, Liu WC, Zhang J. 2023. Review and prospects on microbiological pesticides used on grain crops in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(4): 747–751 (in Chinese) [卓富彦, 张宏军, 刘万才, 张杰. 2023. 我国微生物农药在粮食作物上应用回顾及发展建议. *中国生物防治学报*, 39(4): 747–751]