

植物生物防治精准化施药技术的研究进展

吴晓青¹, 赵晓燕¹, 徐元章², 王加宁¹, 周方园¹, 周红姿¹,
张广志¹, 谢雪迎¹, 颜 坤³, 张新建^{1*}

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)生态研究所, 山东省应用微生物重点实验室, 济南 250103;
2. 福建省福州市农业科学研究所, 福州 350018; 3. 中国科学院烟台海岸带研究所,
中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 为了减少化学农药滥用造成的危害, 精准施药技术及相关植保机械发展迅速, 实现了化学农药的减施增效, 并提高了化学农药的利用率。但在生物防治领域, 尤其是利用活体生物防治措施中, 精准化施药技术研发相对滞后, 增加了生物农药向市场推广应用的难度。为了更好地了解针对生物防治的精准化施药技术研究现状, 分别从植保机械精准施药技术现状、植物病虫害和杂草生物防治的精准施药技术等方面展开综述, 并对生物防治精准化施用技术进行了研究展望, 旨在为生物防治更加精准高效地推广应用提供发展思路。

关键词: 生物防治; 植保机械; 精准化施药技术

doi: 10.13304/j.nykjdb.2018.0292

中图分类号: S476 S49

文献标识码: A

文章编号: 1008-0864(2019)03-0013-09

Research Progress on Precision Application Technology of Biological Control

WU Xiaqing¹, ZHAO Xiaoyan¹, XU Yuanzhang², WANG Jianing¹, ZHOU Fangyuan¹,
ZHOU Hongzi¹, ZHANG Guangzhi¹, XIE Xueying¹, YAN Kun³, ZHANG Xinjian^{1*}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology, Ecology Institute, Qilu University of Technology
(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103; 2. Fuzhou Institute of Agricultural Sciences, Fuzhou 350018;
3. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal
Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Shandong Yantai 264003, China)

Abstract: In order to reduce the harm caused by chemical pesticide abuse, precision application technology and related plant protection machinery have developed rapidly, realized the reduction and increase efficiency of chemical pesticides, and improved the utilization rate of chemical pesticides. However, in the field of biological control, especially in disease prevention measures using living creature, studies on R & D of precise pesticide application technology are relatively lagging behind, which has increased the difficulties in extension and application of biological pesticides to the market. In order to better understand the current research status on precise pesticide application technology for biological control, this paper discussed the following aspects, including the present situation of precise pesticide application technology in plant protection machinery, precise application technology of plant pest biological control, plant disease biological control and weed biological control. The paper also prospected the future of precise pesticide application technology in biological control, aiming at providing thought for more precise and high effective application technology in biological control.

Key words: biological control; plant protection machinery; precision application technology

收稿日期: 2018-05-09; 接受日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200604); 山东省重点研发计划项目(2017GSF21120); 中国科学院沈阳分院-山东省科学院青年科学家合作伙伴项目(第三批)资助。

作者简介: 吴晓青, 助理研究员, 博士, 主要从事微生物农药、微生物肥料等应用微生物研究。E-mail: wuxq@sdas.org。* 通信作者: 张新建, 副研究员, 博士, 主要从事微生物农药、微生物肥料等应用微生物研究。E-mail: zhangxj@sdas.org

植物病、虫、草害防治从以化学农药防治为主发展到结合生物防治、化学防治和农业防治的综合防治时代,理论和技术的成果和突破。化学防治目前仍是重要的防治手段,其优缺点都比较突出,优点是防效范围广、防效高、施用技术简易和区域限制小,缺点是易导致抗性、破坏生态平衡、引起环境污染和导致人畜中毒^[1]。为了减少化学农药滥用造成的危害,实现农药的减施增效,精准施药技术及相关装备研发日趋成熟,将遥感技术、传感器探测技术、机电一体化技术、导航技术、信号采集及数据处理等多种现代化技术与方法应用于精准施药装备,有效提高了农药利用率^[2]。

除了利用精准化的施药技术控制化学农药用量,生物防治理论和技术的快速发展和积累^[3-4],用于部分替代甚至全部代替化学农药。生物防治是利用一些有益的生物或代谢物来防治病、虫、草害,包括以虫治虫/除草和以菌治菌/治虫/除草两大类,已成为防治有害生物的重要技术措施^[1-3]。与化学防治不同,大部分生物类农药使用中具有以下几个显著特点:①防效与生物体存活率(或定殖率)有关^[5];②施药部位需精准才能达到预期防效^[6];③施药器械设备和参数配置对施药效果具有重要影响^[6]。国内外研究者不断发现新的生物农药种类^[7-8],生物防治理论和技术研究越来越深入^[9]。生物农药有效成分登记的数量也逐年递增,据统计,我国生物农药产品约占我国登记农药总数的 11%~13%,年产量为 12 万 t,生物农药的防治面积约 2 670 万 hm^2 ,约占农药市场份额的 5%^[10]。从统计数据看,生物农药的发展渐入佳境,但市场份额比重依然处于低位,防治效果往往不及预期。近年来,我国从法律到政策方面对生物农药产业的推动和扶持力度持续加大,新产品不断涌现,但仍然“叫好不叫座”,短板之一就在于应用环节的技术力量相对于化学农药非常薄弱。针对生物农药的施用技术和施药机械不配套,使得本来没有价格优势的生物农药在使用技术上又产生了障碍,加深了推广应用的难度。由于生物防治机械化的研究属于生物学和机械工程学的交叉领域,长期被研究者忽视,不过随着对生物农药需求的加大,其精准化机械化施药技术研究成果也逐渐丰富起来。这些针对生物农药的施药技术大多建立在比较成熟的化

学农药施用技术和植保机械基础上,如喷施技术及设备,根据不同的生物特性进行参数调整或设备改良。本文综述了植保机械及精准施药技术的最新研究进展和生物类农药的精准化施用研究现状,以期为生物防治的推广应用提供研究思路和发展方向。

1 植保机械精准施药技术的现状

1.1 植保机械的发展现状

植保机械研究及行业正向着自动化、智能化和精准化方向发展^[11]。传统的植保机械以小型和人工农业机为主,常见的机型包括背负式手动喷雾器、背负式电动喷雾机、背负式动力喷雾机、背负式机动喷雾喷粉机、框架(或手推)式喷雾机、风送式喷雾机等^[12],结构较简单,难以根据不同作物特点精确调整喷施量,效率低下,对操作者毒害较大。牵引式和悬挂式喷雾机与拖拉机配套完成喷洒作业^[12],相对于传统人力植保机械有了很大提升,是我国目前主要的设备类型。相对而言,欧美发达国家已普及了大中型喷雾机,主要有自走型、牵引式和悬挂式三种配套形式,集现代微电子技术、仪器与控制技术、信息技术、光机电一体化技术和 GPS 定位技术为一体,特点是喷量少、喷洒精度高^[13]。在我国虽未普及,但一系列符合我国国情的植保精准施药技术装备已被研发出来^[14],典型的包括果园自动对靶静电喷雾机^[15]、履带自走式果园送喷雾机^[16]、基于 LiDAR 探测的果园自动仿形变量喷雾机^[17]、自走式精准变量喷杆喷雾机^[18]等,这些先进的植保机械将遥感技术、传感器探测技术、机电一体化技术、导航技术、信息采集及数据处理等技术与方法应用于精准施药装备。除了地面植保机械,精准农业航空技术是另一块核心发展领域,搭载了遥感技术和 GPS 导航系统的农用植保无人机近年来的发展十分迅速^[19-20]。植保无人机的突出优势是效率提升、喷洒精准化提高、人工成本和中毒风险降低。目前植保无人机主要以燃油发动机和电动机为动力装置,分为固定翼植保无人机、单旋翼植保无人机和多旋翼植保无人机^[21]。无人机防治技术研发的热点领域主要有低空低量喷雾技术^[22]、基于 GPS/GIS 的无人机航线规划技术^[23]、基于无人机采集大数据的农药喷洒定量分析技术^[24]

等,与此同时,适配无人机的农药剂型也正在研发中。总的来看,无论地面还是空中的植保机械,都是朝着精准化、低量化、智能化和大数据的方向发展。

1.2 植保机械中的喷雾技术

喷雾技术是植保机械的核心技术,从喷头设计到喷药系统研发一直是研究热点^[25]。其中,喷头设计主要关注雾化效果、雾滴沉降性和雾滴分布均匀性等指标,针对不同的植物类型、种植模式调整雾滴粒径、沉降性、粘附性和分布范围;喷药系统的设计则越来越多地针对地面机械或航空无人机特点,结合机器视觉技术、GIS/GPS 定位技术、实时传感器和喷杆位姿自动调节技术等,确保农药雾滴准确、高效地作用于病害发生部位。表 1 列出了几款新型的喷头和喷药辅助系统。

喷头作为药液雾化装置,直接影响了植保机械的喷施效率和质量。目前传统的扇形压力喷头和离心喷头仍是市场主流,而在此基础上借助辅助系统,发展高效能、智能化、长寿命的喷施技术是行业方向。故而,当今的喷药技术已不单是机

械领域的研究方向,更多地融合了基础物理、计算机技术、航空技术、生物学技术等多领域的先进成果。

2 生物防治中的精准施药技术

相对于化学农药较为成熟的喷施技术而言,由于生物农药进入农业生产的起步时间较晚,往往借用现有的(多数为简单的)喷施技术,并未发展出完善的技术体系。生物农药尤其以微生物活体为有效成分的微生物制剂,虽然没有证据表明过量施用具有如化学农药一般对环境的危害效应,但生物农药对喷施位置的要求更严格,粗放的喷施技术不仅造成浪费,更发挥不出防治效果。无效喷施造成的浪费增加了投入成本,使得市场对生物农药的认可度更低。

2.1 植物虫害生物防治的精准施药技术

利用白僵菌 (*Beauveria* spp.)、绿僵菌 (*Metarhizium* spp.)、线虫 (*Steinernema* spp.) 等通

表 1 新型喷头和喷药系统

Table 1 New types of nozzle and spraying supporting system.

| 类型 Type | 名称 Name | 功能 Function | 文献 Reference |
|--------------|---|--|-----------------|
| | 气泡雾化喷头 Effervescent atomization spraying nozzle | 气体与液体内混式,在较低的气、液压力下可获得较好的雾化效果 The mixture of gas and liquid can achieve better atomization effect at lower gas and hydraulic pressure | [26] |
| | 静电雾化喷头 Electrostatic effervescent nozzle | 使液滴在电场力作用下荷电,改善雾化性能、提高雾滴分布均匀、提高沉积质量、降低漂移损失 The droplet is charged under the electric field force to improve atomization performance, droplet distribution uniformity and deposition quality, reduce drift loss | [27] |
| | 双气流辅助静电喷头 Double gas channel assisted electrostatic effervescent nozzle | 解决荷电雾滴易吸附、易衰减等问题 Solving the problems of adsorption and attenuation of charge droplets | [28] |
| 喷头 Nozzle | 航空静电喷头 Aviation electrostatic sprayer | 结合静电喷雾技术和航空喷雾技术,增强了雾滴对靶标的吸附性、雾滴向下运动的速度和雾滴在作物间的穿透性 Combining with electrostatic spray technology and air spray technology, the adsorption of droplets on targets, the velocity of droplet downward movement and the penetration of droplets between crops are enhanced | [29, 30] |
| | 离心雾化喷头 Centrifugal atomization nozzle | 分为转笼式离心雾化和转盘式离心雾化,具有结构简单和雾化质量好等优点。其中转盘式离心雾化喷嘴由于雾滴谱窄,易于控制雾的大小且喷孔不易堵塞,在航空低量施药领域具应用前景 It can be divided into rotary cage centrifugal atomization and rotary disk centrifugal atomization, which have the advantages of simple structure and good atomization quality. The rotating disk centrifugal atomizer is easy to control the size of fog and the nozzle hole is not easy to be blocked because of its narrow droplet spectrum, so it has application future in the field of aeronautical low-dose pesticide | [31, 32] |

续表Continued

| 类型 Type | 名称 Name | 功能 Function | 文献 Reference |
|--------------------------------------|--|--|-----------------|
| | 喷杆位姿自动调平系统 Automatic control system of boom posture | 田间喷洒作业时实现对喷杆位姿的自动实时调节 Automatic real-time adjustment the spray rod position during field spraying operation | [33] |
| 喷药辅助系统 Spraying supporting system | 变量喷药控制系统 Variable spraying system | 利用 GIS、GPS、机器视觉、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 Using GIS, GPS, machine vision, ultrasonic wave, microwave etc., to get information of spraying target and judge whether spraying, selecting parameters according to specific environmental parameters | [34] |
| | 植保无人机变量喷药系统 Variable spraying system for plant protection unmanned aerial vehicle | 针对植保无人机特点设计, 基于机器视觉, 判断病害程度等级 According to the characteristics of plant protection unmanned aerial vehicle, the classification of disease level is judged based on machine vision | [35] |
| | 风送辅助系统 Air-assisted spraying 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。 The air-assisted mechanism is used to supplement the shortcomings of common spraying machine in spraying effect, spraying area and range. It is used to carry out directional transformation in different operation, such as setting different angle blades of wind grille and different fan structure | [36] |

过寄生、释放共生菌感染并杀死害虫等机制, 将菌、虫活体作为菌剂活性成分, 已作为有效虫害生物防治措施被广泛研究, 并应用于农田、森林害虫的防治。一些研究者根据菌、虫的生防特性, 分析并总结了更精准化的喷施技术。

为了有效防治害虫, 需使药剂与目标虫的接触最大化, 与化学农药通过几种物质混合成均相体系不同, 真菌制剂是将微生物活体(包括细胞、孢子、分生孢子等)悬浮于低密度液体中。后者在喷施中, 悬浮的微生物活体成分由于比液相动能更高, 喷施时雾滴看似抵达目标植物部位, 但一部分微生物已散落到空气中, 这个缺陷在低容量喷施设备中更加突出。为了解决这个问题, Gouli 等^[37]对主要活性成分为球孢白僵菌 (*B. bassiana*) 的真菌杀虫剂 BotaniGard[®] 22WP (助剂为石油馏分等) 防治菊花虫害西花蓟马 (*Frankliniella occidentalis*) 时的喷施参数进行了分析, 研究评价了不同喷头、喷施角度和喷施压力对白僵菌分生孢子在植物有效部位沉降效果的影响, 同时考虑了喷施时间和距离因素。该研究结果表明喷头、角度和距离均对施药后菌剂的有效沉降具有显著影响。西花蓟马、粉虱、蚜虫、螨虫等温室典型害虫常栖息在叶下表面, 但菌剂更易沉积在叶上表面, 研究发现减少喷雾时长可提高

下表面的分生孢子沉积量, 达到前人研究设定的防治西花蓟马的有效孢子浓度^[38]。Gouli 等^[37]通过研究比较建议采用 HC-22 和 FAN-1 两种喷头, 因为相较之下两者可有效覆盖包括叶下表面的植物所有部位。另有研究分析了包括喷施间隔、施液量、容量和程序时间对白僵菌菌剂喷施效果的影响, 结果表明增加喷施频率和喷施体积可以显著提高白僵菌分生孢子在西花蓟马体表的沉积量, 但西花蓟马会躲避集中高浓度的喷射^[39]。该研究还表明, 在 3~4 个喷雾的最高施液量和最高容量条件下每隔 7 d 喷施一次时, 西花蓟马数量会出现显著下降, 但在同样的喷施条件下, 对开花前的凤仙花幼苗的防效不如老龄植株稳定。Goble 等^[40]对森林和果园果树害虫生物防治喷施技术进行了研究, 具体分析了棕色绿僵菌 (*M. brunneum* Petch) F52 喷施效果的影响因素。在尝试了车前草、黄原胶及两者混合物作为增粘剂, 并利用铺料 (hydromulch) 作为介质后, 结果表明增粘剂的种类对菌剂的防治效果影响不显著, 而自然条件雨水、温度和户外曝露的时间对菌剂喷施后分生孢子的附着数量影响较大。不过, 对于利用线虫进行的蔬菜虫害防治, 不同的助剂对防治虫体沉降具有明显的影响。两种昆虫致病线虫叶蛾斯氏线虫 (*S. feltiae*) 和小卷蛾斯氏线虫 (*S.*

carpocapsae) 分别广泛用于防治蛾类和眼蕈蚊等害虫, 喷施时对助剂和喷头的选择非常重要。Beck 等^[41] 分析了一些助剂和三种不同喷头对线虫制剂在叶面喷施效果的影响, 证明黄原胶比其他助剂(聚氧乙烯醚类和烷基多糖类) 对减少线虫制剂悬浊液的虫体沉降具有显著作用。通过比较三种规格的扁平扇形喷头, 结果表明, ISO04 标准喷头在对花椰菜叶面喷施时具有更好的沉积效果, 不过添加不同助剂对喷施后沉积效果无显著改善作用。

除了喷头和助剂, 害虫生态位也是线虫生防效果的主要影响因素, 例如蛾幼虫在卷心菜等植物中的生态位主要分布在叶片背面或植物基部, 晚龄幼虫更深入植物内部甚至隐藏在叶间^[42], 这种生态位的天然障碍使得药剂难以被有效送达虫害关键部位^[43]。一些研究者设计了不同的喷施装置, 用于改善喷施的精准性。Brusselman 等^[44] 采用的喷施装置为水力搅拌系统^[45] 连接一个五嘴喷杆, 将五嘴喷杆安装在全自动跟踪喷雾系统^[46] 上, 其中一个喷嘴在距卷心菜和花椰菜上方 50 cm 处。Brusselman 等^[44] 共尝试了三种喷头类型: ①增程式(extend-range), 标准型(standard), 扇形喷嘴(flat-fan) XR 110 08; ②空气供给型(air induction) 喷头 AI 110 08; ③双流体(twin fluid) 喷头 TJ 60 110 08(Teejet, Springfield, 1L), 采用空气支撑系统模拟 Hardi Twin 空气支撑系统。在此基础上, 构建了行喷施系统, 在将该系统安置在与蔬菜播种行平行上方的喷杆上。喷施系统呈 90° 的两侧臂分别安装喷嘴, 中间用截流阀堵住。通过调节喷杆的高度, 使喷嘴和植物间的距离为 15 cm, 喷杆的喷射速度为 1.6 m/s。结果表明 AI 110 08 喷射产生的液滴大小不一, TJ 60 110 08 的液滴最小喷速最慢, XR 110 08 喷速最快。夜蛾斯氏线虫在靶标植物中的有效沉积量受到不同喷头类型的影响, 其中 AI 110 08 型喷嘴的沉淀量相比其他两种喷头显著增大, 空气支撑系统和行喷施系统的配合提高了该线虫在叶片中的沉积量。而对于小卷蛾斯氏线虫, 三种喷头喷施在叶片的沉积量并无显著不同, 但结合空气支撑系统均提高了沉积量。在该实验条件下, 约有 40% 的线虫未到达卷心菜下部, 但采用空气支撑系统或行喷施系统可提高线虫在甘蓝基部的沉积量, 但在花椰菜下部叶片沉积量仍较小, 喷嘴类型仅影响了

线虫在液滴中的分布和数量。Brusselman 等^[44] 的研究表明, 喷头类型对线虫制剂在叶背面、叶间等部位的沉积量无显著影响, 但是针对不同的喷施作物调整适合的喷施系统对于可到达目标部位的病害防治具有提高作用。

Beck 等^[6] 研究了影响喷施效果和难以到达有效部位的另一个重要因素, 即由于叶片表面的疏水特性引起了雾滴的反弹和径流^[47]。一般认为添加合适的分散剂可改善叶面喷施效率^[48-49], 对于线虫制剂来说, 可以通过添加表面活性剂或高分子聚合物等扩大喷施有效范围^[50]。Beck 等^[6] 针对线虫防治甘蓝夜蛾(*Mamestra brassicae*) 喷施技术, 从多个方面分别进行优化: ①选择能到达花椰菜特殊部位的喷施设备(图 1), 尤其可到达花椰菜的中心部位和叶下部; ②分析向线虫制剂中添加啤酒酵母提取物作为诱导剂^[51] 是否可诱导甘蓝夜蛾进食或接触更多的线虫制剂, 增加害虫的死亡率; ③在田间验证喷施设备、诱导剂和助剂对防治甘蓝夜蛾的实际效果。结果表明, 五种不同喷施设备对叶正面的边缘和中间的喷洒覆盖效果没有显著差异, 而利用纵向杆和调整喷射角度的喷头装置 C3 和 C4 相比 C1、C2 和 C5 增加了菌剂在叶背面边缘部位的覆盖面积, 减少了蔬菜虫害防治死角面积。另外研究者使用酵母提取物作为诱导剂与线虫制剂混合, 一定程度上提高了甘蓝夜蛾的死亡率。Beck 等^[6] 继而将上述技术结合并应用于田间(选择 C3 作为喷施设备, 并添加诱导剂), 同时添加分散助剂, 田间结果表明几种技术结合有效减少了甘蓝叶球的虫害发病率。

综上, 目前利用生物农药对植物虫害进行的精准施药技术重点在于解决菌剂沉积率、定殖率和精准送药至植物不易到达部位——害虫主要聚集的叶背面、叶缝隙和植物基部等, 生物农药类型主要是细菌、真菌等微生物和线虫, 对于病毒类和昆虫类杀虫剂的研究较为罕见。

2.2 植物病害生物防治的精准施药技术

利用生防真菌、细菌菌剂可防治多种植物病害, 不过对精准喷施技术的研究相对较少, 主要关注于如何提高活菌定殖率和如何向病害发生部位精准送药。

小球壳孢菌(*Microsphaeropsis ochracea*) 是

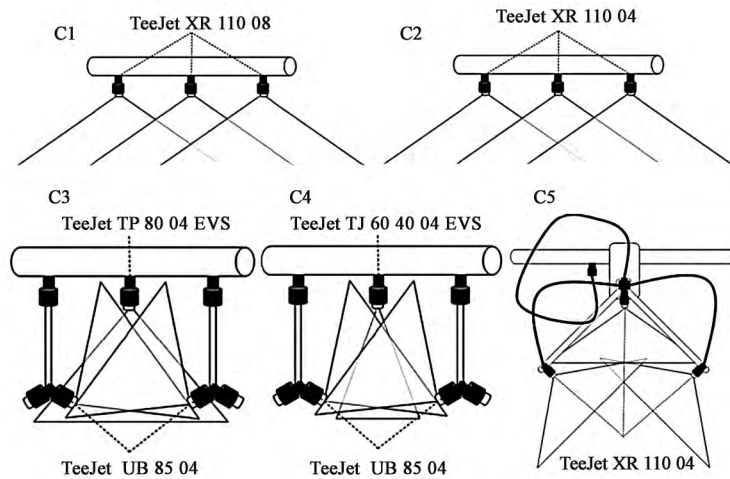


图 1 不同结构类型的喷杆^[6]

Fig.1 Scheme of different spray boom configurations^[6].

注: C1 表示 TeeJet XR 110 08 喷嘴安装在 50 cm 喷嘴间距的标准喷杆上; C2 表示 TeeJet XR 110 04 喷嘴安装在 50 cm 喷嘴间距的标准喷杆上; C3 表示 TeeJet TP 80 04 EVS 喷嘴安装在喷杆上, TeeJet UB 85 04 喷嘴安装在 38 cm 长的纵向延伸杆上, 延伸杆喷嘴间距为 35 cm; C4 表示 TeeJet TJ 60 40 04 EVS 喷嘴安装在喷杆上, TeeJet UB 85 04 喷嘴安装在 38 cm 长的纵向延伸杆上, 延伸杆喷嘴间距为 35 cm; C5 表示 TeeJet XR 110 04 喷嘴安装在行喷施套件上, 每个套件间距为 70 cm。

Note: C1 indicates TeeJet XR 110 08 nozzles are mounted on a standard spray boom with 50 cm nozzle spacing; C2 indicates TeeJet XR 110 04 nozzles are mounted on a standard spray boom with 50 cm nozzle spacing; C3 indicates TeeJet TP 80 04 EVS are mounted on a spray boom and TeeJet UB 85 04 nozzles are mounted 38 cm long vertical extension, nozzles and extensions are spaced 35 cm apart; C4 indicates TeeJet TJ 60 40 04 EVS are mounted on a spray boom and TeeJet UB 85 04 nozzles are mounted on 38 cm long vertical extensions, nozzles and extension are spaced 35 cm apart; C5 indicates TeeJet XR 110 04 nozzles are mounted on a row application kit, the row application kits are spaced 70 cm apart.

一种内生真菌,对苹果黑星病具有防治效果。Bailey 等^[52]利用商业化的喷雾设备,在离体叶片上筛选了孢子浓度 $10^9 \sim 10^{12}$ spores/h·hm²、喷水量 250~1 500 L/hm²和 20 种助剂影响下小球壳孢菌在苹果叶片上定殖效果的最佳条件。结果表明,孢子浓度与定殖水平呈正比,而喷水量并未对定殖产生显著影响;20 种助剂中,某些试验条件下,甘油可提高孢子萌发率,K-90、Agrimer、Ekol 和 Tween 80 可促进菌丝的生长,在苹果树上应用时,助剂在大部分试验中显著提高了真菌的定殖水平。链核盘菌(*Monilinia vaccinii-corymbosi*)可通过柱头-子房途径引起浆果病害,实验室条件下该病害可通过向柱头部位施用含有枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)的生物杀真菌剂加以防治。然而在田间应用中,生防菌剂如何在花的柱头表面进行适量和靶向投放是关键技术问题。Schemm 等^[53]利用气助式静电喷雾法研究了两种生物杀真菌剂的定殖对喷施参数的敏感性,结果

显示在不同的荷电电压(0~1.2 kV)和雾化压力(138~276 kPa)参数下进行静电喷雾对制剂中细菌的存活无影响,在暴露于强电场和近音速雾化过程中均可有效存活。采用静电法,枯草芽孢杆菌在离体蓝莓花序柱头的沉积量比传统液压喷雾方法极显著增加($P < 0.0001$),荧光假单胞菌沉积量比传统方法有所增加但未达显著水平($P = 0.1487$),该研究较为看好静电喷雾法在防治浆果病害的应用前景。

防治病害的生物农药尤其在设施农业中具有巨大的应用潜能,但其精准施药措施研究基础相对薄弱,需要加强在设施农业条件下针对不同作物的低量、精准化施用技术和专型设备的研发。

2.3 杂草生物防治的精准施药技术

除了防治植物病、虫害,一些真菌等微生物还被应用于防治杂草危害。为了保护粮食生产,在美国,化学除草剂的用量几乎占化学农药的 1/3,为了减少化学品用量,合理利用植物病原真菌作为生物除草剂成为趋势。目前生物除草剂的推广

主要受到一些生物和环境因素的限制而无法精准化,通过适当添加助剂和采用合理的药液分配系统可解决部分问题^[54]。

喷雾保留值(spray retention)是传统的农药喷洒技术中常用来判断最佳用药参数的指标,而在杂草生防领域,一些研究也借用了这一概念,Byer等^[55]的研究对比了三种真菌除草剂谷瘟病菌(*Pyricularia setariae*)、平头炭疽菌(*Colletotrichum truncatum*)和炭疽病菌(*C. gloeosporioides* f. sp. *Malvae*)分别针对青狗尾草(green foxtail)、淡甘菊(scentless chamomile)和圆叶锦葵(round-leaved mallow)的喷施技术中接种液保留值和分生孢子保留值。结果表明植物类型对两种保留值影响很小,具有显著正效应的是喷施体积,但不同的植物形态学特征对两种保留值间相关性影响较大,例如对于青狗尾草两种保留值几乎等价,而对于另外两种植物,接种液保留值则高于分生孢子保留值。Peng等^[56]对谷瘟病菌防治青狗尾草的喷施技术进行了详细研究,其中喷雾保留值可通过荧光分光光度计法分析被施药植物上残留荧光物的方法检测。结果表明,雾滴粒度一致时,在径流发生前宽幅喷雾(broadcast spraying)在1 000~2 000 L/hm²喷施量的保留值与喷枪喷雾(airbrush spraying)相当,在温室条件下采用宽幅喷雾和喷枪喷雾的杂草防治效果相当。当宽幅喷雾容量从2 000 L/hm²减少至250 L/hm²时,提高*P. setariae*分生孢子浓度至与总量一致,对杂草防效无显著减弱作用。另外,VMD(volume median diameter)207 μm型号的喷头比粗VMD 325 μm型号喷头喷施后的保留值更高,对杂草防效更好,但持续喷施一段时间后防效优势减弱。

相对于病虫害防治,对杂草的生物防治受防治对象的影响因素相对较小,故需侧重于如何实现减量增效,并针对不同的植物形态,结合菌剂自身生物特性调整喷头和喷施参数。

3 展望

植保机械能提高工作效率、增加农药的有效利用率、减少对人体危害,在欧美等发达国家规模化的农林业生产和园林管理中已普及了大型植保机等先进的植保机械类型,目前我国市场中常见的植保机械以中小型为主,但自主研发或合作

引进的自走式喷雾机和植保无人机也逐渐成熟并投入使用。针对生物防治设计的植保机械虽不多见,但可喜的是,近期出现了针对专门喷施生物农药的器械研究,如朱正阳等^[57]为防治小菜蛾(*Plutella xylostella*)的生物农药设计制造了风送离心式雾化装置,并优化了结构、操作等参数。目前,已有企业研发出生物粉剂施粉装置、天敌虫投放无人机、生物农药喷洒无人机等相对先进的绿色生防设备,是生防植保机械市场化的信号。不过,生物农药精准化喷施技术的研究仍然缺乏且不系统,相对于生物农药品种研发和投放速度的不断加快,施药措施的滞后不利于生物农药在生产中的推广应用。生物农药是植物病害绿色防控的重要组成,亟需相应的植保机械、精准化喷施技术研发工作的推进。基于现状,对生物农药精准喷施技术的进一步发展提出以下建议:①从植保机械设备研发角度,提高设备对微生物、线虫或昆虫活体等不同剂型的适应性,或采用一定的助剂,确保喷施时有一定的存活率;对于不同生物农药类型的防治机制,应细化相应的喷药参数包括喷射压力、角度、喷施量、喷施次数、时长等,提高定殖率和防效;生物农药施用的精准化也依赖于与智能化、自动化的植保机械对接,研发更多可适配不同生物农药类型的低量喷头、喷雾系统,并可搭载在植保无人机等先进植保机械中。②从生物农药研发角度,在对菌(虫)剂剂型设计时也需考虑与植保机械结构、喷施参数有效搭配,减少喷施过程中有效成分散失、提高沉降率和定殖率。③在研究和应用成果不断积累的基础上,将生物农药研发、喷施技术与植保机械设备研发有机整合,形成系统的针对生物农药的精准施药体系。

参 考 文 献

- [1] 汪建沃.绿色植保技术手册[M].湖南:中南大学出版社,2014.
- [2] 何雄奎.植保精准施药技术装备[J].农业工程技术,2017,37(30):22-26.
- [3] Rodriguez-Saona C. Biological control: Ecology and applications [J]. Am. Entomol., 2018, 64(1): E2.
- [4] Brodeur J, Abram P K, Heimpel G E, et al.. Trends in biological control: Public interest, international networking and research direction [J]. BioControl, 2018, 63(1): 11-26.
- [5] Akbaba M, Ozaktan H. Biocontrol of angular leaf spot disease and colonization of cucumber (*Cucumis sativus* L.) by endophytic bacteria [J]. Egyptian J. Biol. Pest Control, 2018, 28(1): 14.

- [6] Beck B, Brusselman E, Nuyttens D, *et al.*. Improving the biocontrol potential of entomopathogenic nematodes against *Mamestra brassicae*: Effect of spray application technique, adjuvants and an attractant [J]. *Pest Manage. Sci.*, 2014, 70(1): 103-112.
- [7] Chauhan A, Ranjan A, Jindal T. Biological control agents for sustainable agriculture, safe water and soil health [A]. In: Jindal T. *Paradigms in Pollution Prevention* [M]. Springer International Publishing AG 2018.
- [8] Van Lenteren J C, Bolckmans K, Köhl J, *et al.*. Biological control using invertebrates and microorganisms: Plenty of new opportunities [J]. *BioControl*, 2018, 63(1): 39-59.
- [9] Barratt B I P, Moran V C, Bigler F, *et al.*. The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future [J]. *Biocontrol*, 2018, 63(1): 155-167.
- [10] 余露.我国生物农药产品登记占农药登记总数超十成[J]. *农药市场信息*, 2017(2): 37-38.
- [11] 张波, 翟长远, 李瀚哲, 等. 精准施药技术与装备发展现状分析[J]. *农机化研究*, 2016(4): 1-5, 28.
Zhang B, Zhai C Y, Li H Z, *et al.*. Development status analysis of precision pesticide application techniques and equipments [J]. *J. Agric. Mechan. Res.*, 2016(4): 1-5, 28.
- [12] 全国农业技术推广服务中心. 植保机械与施药技术应用指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [13] Urso L M, Wegener J K, Hörsten D V, *et al.*. Crop production of the future—Possible with a new approach [J]? *Adv. Anim. Biosci.*, 2017, 8(2): 734-737.
- [14] 邱峰, 杜永年, 秦海生. 我国植保机械化发展研究[J]. *现代农机*, 2018(4): 26-29.
- [15] 何雄奎, 严苛荣, 储金宇, 等. 果园自动对靶静电喷雾机设计与试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 78-80.
He X K, Yan K R, Chu J Y, *et al.*. Design and testing of the automatic target detecting, electrostatic, air assisted, orchard sprayer [J]. *Trans. CSAE*, 2003, 19(6): 78-80.
- [16] 池淑筠, 宁堂原, 李汝莘. 履带自走式果园风送喷雾机[P]. 中国, CN 202504082U.
- [17] 李龙龙, 何雄奎, 宋胜利, 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 L L, He X K, Song J L, *et al.*. Design and experiment of automatic profiling orchard sprayer based on variable air volume and flow rate [J]. *Trans. CSAE*, 2017, 33(1): 70-76.
- [18] 周海燕, 杨学军, 严荷荣, 等. 高地隙精准变量植物保护机械研究开发[J]. *农业机械*, 2006(9): 35-36.
- [19] 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. Engin.*, 2017, 10(3): 18-30.
- [20] Yang S, Yang X, Mo J. The application of unmanned aircraft systems to plant protection in China [J]. *Precision Agric.*, 2018, 19(2): 278-292.
- [21] 何勇. 农用无人机技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [22] 吴笛, 李君兴, 袁洪印. 植保无人机低空低量喷雾技术研究现状[J]. *农业与技术*, 2018(1): 45-47.
- [23] West J S, Kimber R B E. Innovations in air sampling to detect plant pathogens [J]. *Ann. Appl. Biol.*, 2015, 166(1): 4-17.
- [24] Yang Z, Zheng L, Li M, *et al.*. Matching algorithm for plant protecting unmanned aerial vehicles and plant protecting jobs based on R-tree spatial index [J]. *Trans. CSAE*, 2017, 33: 92-98.
- [25] Liu D, Gong Y, Wang G, *et al.*. Development of centrifugal atomization technique in the field of plant protection machinery [J]. *Plant Diseases Pests*, 2017, 8(3): 39-42.
- [26] Kourmatzis A, Lowe A, Masri A R. Conditioned analysis of effervescent atomization [J]. *J. Energy Engin.*, 2017, 143(5): 04017019.
- [27] Laryea G N. Spray characteristics of conventional and electrostatic pressure-swirl nozzle [J]. *J. Appl. Sci. Technol.*, 2009, 14(1-2): 44329.
- [28] 周良富, 张玲, 薛新宇, 等. 双气流道辅助静电喷头设计与试验[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(24): 192-196.
- [29] 张亚莉, 兰玉彬, Bradley K F, 等. 美国航空静电喷雾系统的发展历史与中国应用现状[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 1-7.
Zhang Y L, Lan Y B, Bradley K F, *et al.*. Development of aerial electrostatic spraying systems in the United States and applications in China [J]. *Trans. CSAE*, 2016, 32(10): 1-7.
- [30] 刘武兰, 周志艳, 陈盛德, 等. 航空静电喷雾技术现状及其在植保无人机中应用的思考[J]. *农机化研究*, 2018, 40(5): 1-9.
Liu W L, Zhou Z Y, Chen S D, *et al.*. Status of aerial electrostatic spraying technology and its application in plant protection UAV [J]. *J. Agric. Mechan. Res.*, 2018, 40(5): 1-9.
- [31] 周晴晴, 薛新宇, 杨风波, 等. 离心喷嘴雾滴运动轨迹与沉积分布特性[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1): 18-23.
Zhou Q Q, Xue X Y, Yang F B, *et al.*. Trajectory and deposition distribution features of centrifugal atomization nozzle droplet [J]. *J. Jiangsu Univ. (Nat. Sci.)*, 2017, 38(1): 18-23.
- [32] 茹煜, 周宏平, 贾志成. 背负式高速电动离心雾化喷雾器的设计[J]. *中华卫生杀虫药械*, 2012, 18(3): 185-188.
Ru Y, Zhou H P, Jia Z C. The design of knapsack high-speed electric centrifugal atomizing sprayer [J]. *Chin. J. Hygienic Insecticides Equipments*, 2012, 18(3): 185-188.
- [33] 王佳文, 杨自栋. 自动调平喷杆式喷雾机设计与试验研究[J]. *农机化研究*, 2016, 38(7): 162-166.
Wang J W, Yang Z D. Design and experimental research on automatic levelling boom sprayer [J]. *J. Agric. Mechan. Res.*, 2016, 38(7): 162-166.
- [34] 李锐, 郑晓培. 喷雾机变量施药控制系统的研究[J]. *农机使用与维修*, 2017(12): 5-6.
- [35] 王金星, 刘双喜, 张菡, 等. 无人机变量施药自动控制系统及方法[P]. 中国, CN105173085B.
- [36] 王成达. 直立风送式对靶喷雾机设计研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院 硕士学位论文, 2016.
Wang C D. Design and study of vertical air target spraying machine [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, Master Dissertation, 2016.
- [37] Gouli V, Kassa A, Skinner M, *et al.*. Fungal conidia distribution on chrysanthemum: Varying spray parameters [J]. *Archives Phytopathol. Plant Prot.*, 2011, 44(6): 567-574.

- [38] Ugine T A , Wraight S P , Sanderson J P. Acquisition of lethal doses of *Beauveria bassiana* conidia by western flower thrips , *Frankliniella occidentalis* , exposed to foliar spray residues of formulated and unformulated conidia [J]. J. Invertebrate Pathol. , 2005 , 90(1) : 10-23.
- [39] Ugine T A , Wraight S P , Sanderson J P. Effects of manipulating spray - application parameters on efficacy of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* against western flower thrips , *Frankliniella occidentalis* , infesting greenhouse impatiens crops [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2007 , 17(2) : 193-219.
- [40] Goble T A , Gardescu S , Jackson M A , et al.. Evaluating *Metarhizium brunneum* F52 microsclerotia in hydromulch formulations using different tackifiers under forest and orchard conditions [J]. Biocontrol , 2017 , 62(6) : 769-778.
- [41] Beck B , Brusselman E , Nuyttens D , et al.. Improving foliar applications of entomopathogenic nematodes by selecting adjuvants and spray nozzles [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2013 , 23(5) : 507-520.
- [42] Johansen N S. Mortality of eggs , larvae and pupae and larval dispersal of the cabbage moth , *Mamestra brassicae* , in white cabbage in south-eastern Norway [J]. Entomol. Exp. Appl. , 1997 , 83(3) : 347-360.
- [43] Foqué D , Nuyttens D. Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants [J]. Pest Manage. Sci. , 2011 , 67(2) : 199-208.
- [44] Brusselman E , Beck B , Pollet S , et al.. Effect of the spray application technique on the deposition of entomopathogenic nematodes in vegetables [J]. Pest Manage. Sci. , 2012 , 68(3) : 444-453.
- [45] Brusselman E , Moens M , Steurbaut W , et al.. Evaluation of hydraulic , pneumatic and mechanical agitation for the spray application of *Steinernema carpocapsae* (Rhabditida: Steinernematidae) [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2010 , 20(4) : 339-351.
- [46] Dieter F , David N. Effects of nozzle type and spray angle on spray deposition in ivy pot plants [J]. Pest Manage. Sci. , 2011 , 67(2) : 199-208.
- [47] Crease G J , Hall F R , Thacker J R M. Reflection of agricultural sprays from leaf surfaces [J]. J. Environ. Sci. Health Part B , 1991 , 26(4) : 383-407.
- [48] Butler Ellis M C , Webb D A , Western N M. The effect of different spray liquids on the foliar retention of agricultural sprays by wheat plants in a canopy [J]. Pest Manage. Sci. , 2004 , 60(8) : 786-794.
- [49] Massinon M , Lebeau F. Experimental method for the assessment of agricultural spray retention based on high-speed imaging of drop impact on a synthetic superhydrophobic surface [J]. Biosyst. Engin. , 2012 , 112(1) : 56-64.
- [50] Schroer S , Ziermann D , Ehlers R U. Mode of action of a surfactant - polymer formulation to support performance of the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* for control of diamondback moth larvae (*Plutella xylostella*) [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2005 , 15(6) : 601-613.
- [51] Navon A , Keren S , Salame L , et al.. An edible-to-insects calcium alginate gel as a carrier for entomopathogenic nematodes [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 1998 , 8(3) : 429-437.
- [52] Bailey K L , Carisse O , Leggett M , et al.. Effect of spraying adjuvants with the biocontrol fungus *Microsphaeropsis ochracea* at different water volumes on the colonization of apple leaves [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2007 , 17(10) : 1021-1036.
- [53] Scherm H , Savelle A T , Law S E. Effect of electrostatic spray parameters on the viability of two bacterial biocontrol agents and their deposition on blueberry flower stigmas [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2007 , 17(3) : 285-293.
- [54] Boyette C D , Quimby P , Caesar A J , et al.. Adjuvants , formulations , and spraying systems for improvement of mycoherbicides [J]. Weed Technol. , 1996 , 10(3) : 637-644.
- [55] Byer K N , Peng G , Wolf T M , et al.. Spray retention for liquid and mycoherbicide inoculum in three weed-biocontrol systems [J]. Biocontrol Sci. Technol. , 2006 , 16(8) : 815-823.
- [56] Peng G , Wolf T M , Byer K N , et al.. Spray retention on green foxtail (*Setaria viridis*) and its effect on weed control efficacy by *Pyricularia setariae* [J]. Weed Technol. , 2005 , 19(1) : 86-93.
- [57] 朱正阳 张慧春 郑加强 等.风送转盘式生物农药离心雾化喷头的性能 [J].浙江农林大学学报, 2018 , 35(2) : 361-366.
- Zhu Z Y , Zhang H C , Zheng J Q , et al.. Performance of an air-assisted spinning disc nozzle for biological pesticide [J]. J. Zhejiang Agric. Forestry Univ. , 2018 , 35(2) : 361-366.

(责任编辑: 陈凌云)