

新疆棉花病虫害防治药剂剂型研发策略

郑丽¹, 黄启良¹, 陆宴辉^{1, 2*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193;

2. 中国农业科学院西部农业研究中心, 昌吉 831100)

摘要 棉花是我国重要的经济作物,也是受病虫害危害最严重的农作物之一。目前化学防治仍是棉田病虫害防治的重要技术。新疆棉区是我国最大的棉花主产区,气候类型属于典型的温带大陆性气候,具有光照充足、夏季高温干旱、多风、昼夜温差大等特殊气候特点,农药药液喷施过程中容易发生蒸发、飘移、降解等损失,严重影响药剂的防治效果。本文综述了温湿度、风、光照等环境因子对药剂防治效果的影响,以及国内外对提升药剂防治效果采取的调控措施,并结合新疆棉田的特殊气候条件提出了剂型研发的新策略。在提升产品理化稳定性的前提下,还需综合考虑有效成分的理化性质、棉花叶片的结构及润湿特性、施药器械等多种因素。结合农药学、植物保护学、界面化学、有机化学等多学科交叉理论知识指导,利用先进的技术和载体材料研发环境响应型、靶向高效的农药剂型,结合配套使用技术及措施,探索农药高效利用及减量调控途径,为实现农药减量增效、引领棉花产业绿色发展提供科技支撑。

关键词 新疆; 棉花; 气候条件; 病虫害; 化学防治; 剂型研发

中图分类号: S 435.622 **文献标识码**: A **DOI**: 10.16688/j.zwbh.2023099

Research and development strategy for pesticide formulations targeting cotton diseases and insect pests in Xinjiang

ZHENG Li¹, HUANG Qiliang¹, LU Yanhui^{1, 2*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China)

Abstract Cotton is an important economic crop in China and is one of the crops most severely damaged by diseases and insect pests. At present, chemical control remains the most important pest control technology in cotton field. Xinjiang cotton region, for its typical temperate continental climate, is the largest cotton-producing area in China. It exhibits unique climate characteristics, including sufficient sunlight, high temperatures, drought, windy weather, and significant day-night temperature variations in the summer. Pesticide droplets is prone to evaporation, drift, degradation and other problems in the process of spraying, which seriously affect the effectiveness of pesticide applications. This paper summarized the effects of environmental factors such as temperature, humidity, wind, and light on pesticide application effectiveness. It also discussed domestic and international control measures for improving pesticide application efficiency. Moreover, it puts forward a new strategy for the research and development of pesticide formulations according to the specific climatic conditions in cotton fields in Xinjiang. In addition to improving the physical and chemical stability of the product, it is also necessary to comprehensively consider the physical and chemical properties of the active ingredients, the structure and wetting characteristics of cotton leaves, and the pesticide application equipment. Under the guidance of the interdisciplinary theoretical knowledge, encompassing pesticide science, plant protection science, interface

收稿日期: 2023-03-01

修订日期: 2023-04-20

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1400300); 国家现代农业产业技术体系(CARS-15-20)

* 通信作者 E-mail: luyanhui@caas.cn

chemistry, and organic chemistry, environmentally intelligent, targeted, and highly efficient pesticide formulations were developed by using advanced technology and carrier materials. Combined with supporting technologies and measures, it aims to explore efficient pesticide utilization and reduction strategies, providing scientific and technological support to achieve pesticide reduction and highly efficient utilization, thereby leading the green development of the cotton industry.

Key words Xinjiang; cotton; climatic conditions; diseases and insect pests; chemical control; pesticide formulation

棉花是我国最主要的经济作物之一,病虫害的发生严重制约棉花产业的发展^[1-3],而化学防治是最重要的棉花病虫害防治技术之一^[4-8]。新疆是目前我国最大的优质棉种植区。据统计,2022年我国棉花种植总面积为295.21万hm²,总产量为613.8万t,新疆棉花面积达246.03万hm²,产量563.4万t^[9]。新疆属典型的温带大陆性干旱气候,夏季炎热干燥,降水稀少,南北疆水汽来源不同,南疆主要源于太平洋,北疆主要源于大西洋和北冰洋,因此从西北向东南降水逐渐减少,绝大多数地区年降水量不足200mm,降水分布呈“山地多于盆地、北疆多于南疆、西部多于东部”的趋势^[10-11]。新疆棉区光热资源丰富,光合作用充分,全疆大部分植棉区全年 $\geq 20^{\circ}\text{C}$ 活动积温为1859~3985 $^{\circ}\text{C}$,日照时间为1326~2120h,平均每天光照时数均在10h以上,最长日照时数在15h以上。新疆棉区昼夜温差较大,一般

在13~16 $^{\circ}\text{C}$,多年年均温分布呈“南疆高、北疆低;盆地高,山区低”的趋势^[12-13]。

在新疆棉区特殊气候条件下,农药药液在喷施过程中因受环境影响易造成雾滴蒸发、飘移、光解等损失现象,进而影响农药药效的发挥。本文综述了环境因子对药剂防治效果的影响,以及国内外提出的主要调控措施,并结合新疆的特殊气候环境以及棉花叶片润湿特性等提出了防治药剂剂型研发的新策略,以期设计精准、控释、环保的高效剂型,实现农药减施增效、提升棉花病虫害绿色防控提供参考。

1 环境因子对药剂防治效果的影响

农药经器械喷施后雾滴完全暴露在环境中,温湿度、风向、风速、光照等环境因子通过改变雾滴所受电力的大小、蒸发速率等,使农药雾滴在空间运行过程中发生蒸发、飘移等损失现象(图1)^[14-15]。

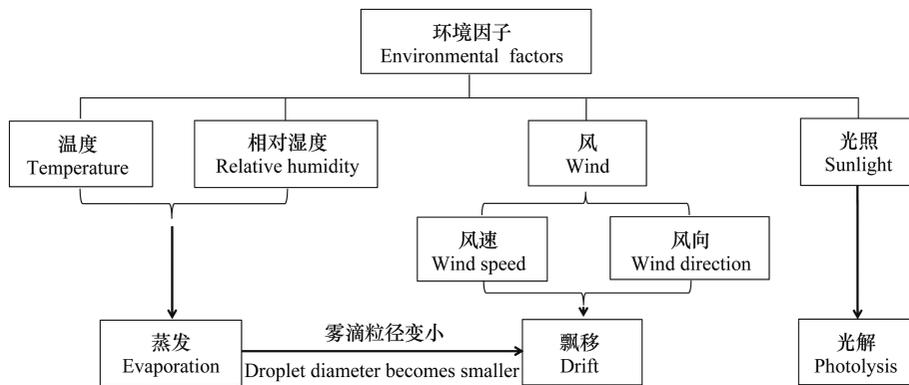


图1 环境因子对农药药液喷施效果的影响

Fig. 1 Influence of environmental factors on spraying effects of pesticide solution

1.1 温湿度

环境温度和相对湿度主要影响农药雾滴在空间运行及界面沉积过程中的蒸发飘移。雾滴飘移包括蒸发飘移(vapor drift)和颗粒飘移(particle drift)。蒸发飘移是指农药雾滴受温湿度等外界环境的影响,农药活性成分或分散体系中的溶剂蒸发或挥发扩散到周围环境中,导致雾滴偏离靶标沉积区

域^[16-18]。农药雾滴在空间运行过程中,雾滴不断与环境空气发生质量和热量交换的蒸发行为,该行为以气相扩散过程为主要控制步骤。温度与农药雾滴的蒸发速率呈强相关性,当环境温度升高时,空气中水蒸气的质量扩散系数增加,同时传递速率加快,雾滴单位面积上的蒸发速率也就越大。随着不断蒸发,雾滴自身质量下降而出现水平飘移,雾滴水平飘

移量明显受环境风带来的曳力作用影响,飘移距离也随环境温度的升高而增加^[19-22]。相对湿度与温度类似,也是通过影响蒸发过程改变雾滴蒸发保留率及飘移距离。当相对湿度降低时,雾滴表面的水蒸气与空气中水蒸气的浓度差增加,推动力增强,促进水分子从雾滴表面蒸发到环境中,进而加剧雾滴粒径的衰减^[23-25]。Xue 等^[26]选取了常温常湿(30℃, RH 60%)和高温低湿(40℃, RH 30%) 2 种典型施药气候,雾滴初始粒径在 50~300 μm 之间,发现在高温低湿环境中雾滴的蒸发速率会增加,导致粒径变小,尤其是 100 μm 以下雾滴的蒸发损失会更加严重,甚至会出现完全蒸发的现象,以气相形式扩散到大气环境中。

农药雾滴在空中运行过程中因水分蒸发导致粒径变小进而发生飘移,药液质量损失。因此,相比较大雾滴而言,细小雾滴更容易受到环境温度和相对湿度的影响,相对蒸发量极大,50 μm 以下的雾滴在到达靶标叶面之前基本完全蒸发^[27-30]。在常温常湿环境下,100 μm 以下(恒飘区)的雾滴为受蒸发损失影响较为严重的部分,100~150 μm 雾滴(敏感区)的粒径衰减比例在 4%~14%之间,剂量损失比例在 12%~35%之间;而在高温低湿等极端环境条件下,100~150 μm 雾滴粒径衰减比例增加到 12%~38%,剂量损失比例高达 31%~76%。除此之外,该区间雾滴在极端条件下的蒸发损失容易使得自身粒径减少到 100 μm 左右,如初始粒径为 125 μm 的雾滴在高温低湿环境下运行 2.47 s 时自身粒径缩减为 93 μm 左右,逐渐濒临恒飘区雾滴的尺寸范围,即原本可能沉降下来的雾滴因受环境气候的影响逐渐逃出靶标区域,在极端条件下蒸发损失较为严重的雾滴粒径为 150 μm 左右^[31-33]。

不同温度、湿度除了影响农药雾滴在空中的传递行为之外,还会影响雾滴在叶片表面的蒸发时间和蒸发速率^[34-35]。雾滴在叶面的蒸发行为是吸热过程,因此雾滴内部的温度高于气-液界面的温度。外界环境可以使雾滴界面温度产生表面张力梯度,进而引起马拉戈尼流。雾滴蒸发过程中,液滴和叶片基底的相对导热系数决定了马拉戈尼流的流动方向。当叶片与液滴的导热系数比值小于 1.45 时,液滴边缘温度最低,热马拉戈尼流朝雾滴内部运动,当毛细管流小于向内的马拉戈尼流时,农药有效成分汇集到液滴的中间。研究表明,当叶片温度为室温

或更高温度时,毛细管流作用力增强,液滴最终呈现咖啡环状沉积状态^[36-38]。药效的发挥受温度直接影响,在一定温度范围内,气温较高时会增强药剂的渗透性,利于提高药效;当气温超过一定范围后,高温会加快药物分解,导致药效的持久性降低。农药药液一般都具有易挥发、易分解的特点,温度的高低同空气中分子活动的活跃度呈正相关关系,温度较高时空气中分子更为活跃,此时药液容易挥发和蒸腾,导致药效时间变短^[39]。

1.2 风

环境风速是造成雾滴飘移的主要影响因素,甚至决定雾滴在近距离区域内的飘移损失比例。颗粒飘移是指细小雾滴因受环境气流胁迫作用从而脱离靶标区域的过程^[40]。当雾滴蒸发时表面空气的对流强度会受风速的影响,进而影响空气与雾滴之间的传质和传热过程。环境风速较大时,气液传质速率随空气对流强度的增大而加快,雾滴蒸发后造成剂量损失增加。同时,雾滴在强风速条件下所受的曳力是自身重力的数百至数千倍,因此在环境风的卷携作用下一直在空间运行,更容易导致有效成分经蒸发扩散飘失到环境中^[19]。大量风洞试验研究表明,雾滴的飘移比例与风速呈线性关系^[41-42]。薛士东^[17]研究了不同尺寸雾滴在不同环境风速下的剂量传递规律,结果表明在环境风速为 1 m/s 时,各尺寸雾滴基本均可以沉积在下风 2 m 范围内。环境风速对 100~150 μm 之间雾滴的剂量传递影响更为显著,表明该粒径范围内的雾滴对环境气候改变的响应程度更为敏感。当环境风速增加时,雾滴的飘移损失逐渐增加,导致空间剂量传递降低。当环境风速超过 3 m/s 时,雾滴的传递效率将随下落高度发生大幅度降低,呈现严重的飘移损失趋势。当环境风速从 1 m/s 增加到 2、3、4 m/s 时,雾滴下落 0.5 m 时的剂量损失分别为 2.54%、2.94%、10.76%和 24.29%。当雾滴继续下落时环境风速对剂量损失的影响更为明显,下落 1.0 m 时 4 种环境风速下的剂量损失分别为 8.37%、47.12%、85.50%和 96.01%。

除环境风速之外,风向也影响雾滴的空间扩散行为。赵峻逸等^[24]的研究发现当横向风速由 1 m/s 增加至 7 m/s 后,飘移距离从 0.92 m 迅速升高至 6.75 m。横向风速对雾滴与空气的相对速度产生影响后会改变雷诺数 Re 、舍伍德数 Sh ,进而改变雾滴

的蒸发速率。因此,雾滴横向受力与横向风速呈正相关,风速增大时蒸发作用增强,雾滴飘移距离越远。雾滴在竖直方向运行时,受到曳力与浮力的合力远大于自身重力,从而阻力增加动能衰减,与空气的相对速度逐渐减小。

1.3 光照

日光是降解农药的重要因素,药效与光的强弱相关,药剂在强烈的光照条件下会加快挥发与降解,导致药效降低。研究发现真正使农药发生降解的是日光中的紫外部分(290~400 nm),可导致有机物大部分共价键断裂,生成 CO_2 、 H_2O 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、卤素等离子,但光照强度因地域、时间而异,因此农药发生降解的程度也不同^[43]。拟除虫菊酯类农药有效成分容易受光照的影响引起大分子有机物发生光化学降解。拟除虫菊酯类药剂经器械喷施后存在于植物表面、大气、土壤以及水体等不同环境中,均可以在太阳光的辐射下发生降解反应^[44]。骆爱兰等^[45]通过紫外光对高效氯氰菊酯进行照射处理,发现紫外光照射 10 min 后高效氯氰菊酯的降解率提高 10%。当波长在 380 nm 以下时拟除虫菊酯类药剂分子中的化学键会发生断裂,其中 C=O 键与 C-H 键分别在 164 nm 和 280 nm 下断裂。

2 提升药剂防治效果的主要措施

为了减少农药药液在喷施过程中受环境因素的影响,国内外学者提出了一系列的调控策略,包括添加喷雾助剂、剂型设计与改进、配套施药器械与技术等^[46-48]。随着纳米技术在农业领域的迅速发展,通过无机、有机聚合物等载体材料构建缓控释载药体系,可以有效延长农药的持效期,保证环境敏感型有效成分的化学稳定性^[49]。环境响应性载体材料具有良好的智能响应性和生物相容性,可以响应光、温度、热等环境刺激的变化,实现有效成分的靶向控制释放,在农药控释方面具有明显的优势^[50]。

2.1 添加喷雾助剂

基于雾滴在高温干旱条件下的空间运行及界面蒸发损失规律,喷施农药时应添加喷雾助剂调控雾滴谱的初始分布,尽可能地减少细小雾滴的比例;或通过界面修饰等技术将雾滴“包裹”在保护膜内来抑制有效成分的蒸发^[51]。药液的表面张力和黏度是影响雾滴飘移最为重要的理化性质参数。研究表明,通过改变药液的理化性质可以调控液膜波动破

裂和液丝拉伸破碎的过程,抑制界面处的扰动和震荡,进而改善雾滴谱的分布特征。增加药液的黏度能够提高雾滴的粒径大小,降低表面张力能够显著改善雾滴粒径的分布跨度,提高雾滴谱的均匀性,在一定程度上可以降低雾滴的飘移潜在性能^[52]。近年来,喷雾助剂对雾滴谱分布及飘移沉积规律的影响得到了国内外众多学者的广泛关注,通过添加油基、乳化的喷雾助剂达到减少雾滴飘移、抗蒸发的效果^[53-54]。林金元等^[55]研究对比了添加不同喷雾助剂及浓度对植保无人机喷施效果的影响。结果发现添加浓度主要影响雾滴群的体积中径和细雾滴($\leq 70 \mu\text{m}$)的体积百分比,最终决定雾滴的飘移潜在指数。利用液力式喷头喷施,添加喷雾助剂可以减少雾滴飘移 24.1%~66.4%,其中效果最好的为改性植物油助剂。当风速为 3.5 m/s 时,添加植物油类喷雾助剂与清水相比飘移率降低 66.4%。Wang 等^[56]发现,在稀聚合物溶液中加入缔合表面活性剂(SDS)时能显著地提高雾滴谱的均匀性及抗飘移能力,同时减飘效果与浓度呈正相关;当加入非缔合表面活性剂(Tween-20)时反而降低了雾滴粒径,增加了雾滴的飘移损失。

目前我国喷雾助剂种类较多,主要包括矿物油、植物油、有机硅、非离子表面活性剂、无机盐和高分子聚合物等,但添加不同类型助剂及不同浓度助剂对农药雾滴抗蒸发效果的影响程度也存在较大差异^[57]。Wang 等^[58]通过硅油培养皿收集不同高度处的雾滴研究添加不同种类助剂后雾滴的动态蒸发过程。结果表明,添加植物油助剂和非离子表面活性剂的雾滴动态蒸发规律随温度的降低和相对湿度的增大而减小,而添加有机硅助剂的雾滴在高温高湿时动态蒸发较少,主要是由于有机硅助剂的饱和蒸汽压与温度呈负相关,表明农药活性成分或溶剂的物化参数与环境条件共同决定雾滴的蒸发损失。Zhou 等^[59]发现,当助剂浓度增加时,表面活性剂分子在固-液界面形成吸附能垒,分子间相互作用形成致密的自组装保护层,水分子束缚在液滴内部无法逸出从而抑制了雾滴的蒸发,延长了蒸发时间。Liu 等^[60]构建了一种水性凝聚层和动态共价三聚体表面活性剂,协同控制农药在棉花叶片上的沉积、持留和释放。通过扫描电镜显示凝聚体独特的致密纳米级网络与叶片表面微结构产生强大的钉扎力,从而有利于农药沉积。

2.2 优化改进剂型

目前,农药剂型的研究主要分为 2 个方面:一是传统剂型的改进,二是新剂型的研发。水基化、粒性化、缓释化等农药剂型已发展成为主流方向^[61]。悬浮剂、水分散粒剂和可溶粒剂克服了传统粉剂易飘浮容易造成粉尘污染的缺点。缓释剂可有效降低环境中光、空气、水和微生物对原药的分解,减少挥发流失的可能性,并可以改变释放性能,使持效期延长。具有壳核结构的农药微囊化制剂,可以避免环境敏感型农药有效成分的光解,延长持效期。Jia 等^[62]通过聚多巴胺(PDA)修饰微胶囊包裹阿维菌素,最大限度地减少了阿维菌素的挥发,改善了其在棉花叶片表面的黏附性,延长了农药药液的滞留时间。阿维菌素释放动力学研究表明,Av@PDA 微胶囊具有缓释和控释性能。此外,PDA 壳能有效屏蔽紫外线辐射,保护阿维菌素不受光降解,更适用于叶面喷施。Guo 等^[63]利用环氧氯丙烷与羧甲基纤维素交联,制备了一种新型的酶反应型苯甲酸-阿维菌素微囊,发现微囊对苯甲酸-阿维菌素具有良好的负载能力,能有效地保护阿维菌素抗光降解和热降解。

随着纳米科技的迅猛发展,利用一些无机、有机聚合物等纳米材料与技术研究纳米农药新剂型成为应用领域研究的热点之一。Sabry 等^[64]以壳聚糖作为载体制备了 200~400 nm 的茚虫威和吡虫啉纳米粒,结果表明,茚虫威和吡虫啉纳米粒对二代棉铃虫的防治效果是常规剂型的 12 倍和 4 倍。Su 等^[65]通过纳米级星状阳离子聚合物与甲基硫菌灵自组装制备了纳米制剂,纳米载体主动递送药剂分子到达植物体内,能够有效抑制大丽轮枝菌 *Verticillium dahliae* 生长,保护棉花免受黄萎病侵害。

温度响应型载体材料在外界温度刺激下其物理结构和化学性质会发生变化,主要分为热胀型温敏载体(温度正响应型)和热缩型温敏载体(温度负响应型)。温度响应型材料主要包括 N 取代的聚酰胺类、羟丙基甲基纤维素、聚乙烯基甲基醚和聚乙烯醇类等聚合物^[66]。以聚乙二醇 6000 作为载体制备阿维菌素缓释固体分散体时,阿维菌素的释放具有温度敏感性,释放量随着温度的升高而上升,且具有良好的防紫外光降解的作用^[67-68]。Wang 等^[69]通过简单的物理吸附过程将高效氯氟氰菊酯(LC)负载在聚 N-异丙基丙烯酰胺改性氧化石墨烯 PNIPAM-GO 纳米复合载体上,LC@PNIPAM-GO 为温度响

应型控释剂,使 LC 在指定温度下释放并延长其持续释放时间。此外,LC@PNIPAM-GO 具有抗紫外线性能。

同时,利用光响应型载体材料制备高效剂型也得到了快速的发展。光响应型载体材料利用光敏性高分子的感光现象使分子间或分子内产生物理变化或化学反应^[70-72]。Zhang 等^[73]利用聚多巴胺修饰后的 CuS 为光热剂,以金属有机骨架 ZIF-8 负载吡虫啉构建了光热响应型控释制剂,CuS 吸收大量红外光后使凝胶颗粒逐步软化溶解,促进了吡虫啉有效成分的释放。Xu 等^[74]利用偶氮苯分子与吡虫啉结合制备了光响应型控释剂,在紫外光照射下,偶氮苯分子发生顺反异构化,可以使两端的吡虫啉分子与受体接触发挥药效。在无光条件下,偶氮苯分子为顺式结构,吡虫啉分子只有一端接触受体,杀虫活性相对较低。Xu 等^[75]将螺虫乙酯烯醇与香豆素共价交联,制得光响应型控释剂。结果发现,螺虫乙酯烯醇可以在 420 nm 蓝光或太阳光下触发释放,具有良好的光刺激响应性能。生测结果表明,其在黑暗条件下对蚜虫无明显杀虫活性,而在光照条件下显示出良好的杀虫活性。Aleksiev 等^[76]利用苜蓿和向日葵作为基质制备了阿维菌素颗粒剂,在紫外光下照射 3 h 后阿维菌素没有损失,而薄膜中的阿维菌素在同样的照射条件下快速降解,仅剩初始量的 0.2%。

2.3 配套施药技术

施药方式和技术的革新是提高化学农药防治效果的重要途径。目前国内外主要应用低容量与超低容量喷雾、防飘喷雾、精准喷雾等减量施药技术与器械^[77]。气流辅助式防飘移喷雾技术将雾滴通过风机产生的气流输送至靶标,可增加雾滴在叶片正反面的覆盖密度和沉积率,显著减少雾滴的飘移^[78-79]。静电喷雾技术是指在喷头与靶标作物之间利用高压静电建立静电场,药液雾化后带电荷的雾滴定向运动吸附到靶标作物上,能够提高药液在作物冠层中下部及叶片背面的附着能力^[80]。通过静电喷雾器、电动喷雾器、植保无人机等新型器械施药,配合专用剂型及喷雾助剂,可不断提高化学防治的施用效果。

农药药液雾化过程中,雾滴的初始大小与速度是关键参数。喷头是植保机械作业时的重要部件,因结构和雾化原理不同,不同类型的喷头具有特定的雾滴谱^[81]。何勇等^[82]从喷嘴压力与流量、喷嘴喷

雾角、防堵塞性、最佳作业粒径 4 个方面分析了喷嘴类型对植保无人机喷施均匀性及减少雾滴飘移效果的影响。范小博等^[83]的研究发现,通过辅助式喷雾、静电喷雾、变量喷雾、低量低压喷雾、抗飘移喷头等方法可以减少雾滴飘移。低飘移喷头、抗飘移助剂等喷雾减飘技术可提高防治效果,同时可以减少处理区 10 m 范围外的雾滴飘移^[84]。

3 适宜新疆棉花病虫害防治的药剂剂型研发重点

新疆棉区具有光照充足、高温干旱、多风、昼夜温差大等特殊气候特点,农药药液经喷施器械雾化后在空间运行及界面沉积过程中容易发生蒸发、飘移、降解等损失问题,严重影响药剂的防治效果。随着植保技术的发展以及对农药靶剂量传输规律的深入研究,农药制剂的研发除了在提升产品理化稳定性的前提下,还需要综合考虑农药有效成分理化性质、病虫害的发生规律、靶标叶面结构特性、环境因子、施药器械和技术等多种因素,最大限度地提高农药有效成分到靶标的剂量传递以及对非靶标生物的安全性^[85]。

3.1 基于新疆气候特点,设计环境响应释放型制剂

在新疆棉区光照充足、高温干旱、昼夜温差大等特殊气候条件下喷施农药,易造成有效成分在靶标或周围环境中快速光降解或热降解,导致农药的持效期降低。因此,针对一些易光解、挥发等环境敏感型农药有效成分,应借助刺激响应聚合物载体和小分子物质等材料,结合材料学、界面化学以及农药学等交叉学科理论知识,通过物理吸附、包裹或自组装构建温度和光等环境因子响应型精准释放载药体系,根据不同施药场景及病虫害发生规律,利用可逆/非可逆光响应型聚合物、温度正响应/负响应聚合物的特性,通过外界环境刺激改变其结构及理化性质,精准靶向地调节控制农药有效成分释放,保护环境敏感型农药,抑制环境因素造成的农药降解和流失,提高稳定性和持效期,降低其在非靶标区域和环境中的残留污染。例如 Xu 等^[72]利用聚多巴胺(PDA)微球为光热剂,包覆温敏型材料聚 *N*-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM),并通过 PDA@PNIPAM 纳米复合材料负载吡虫啉,发现该控释剂具有较高的负载率和良好的温度响应释放性能。当温度低于最低临界相变温度(32℃)时,有效成分残留在 PNIPAM

壳内不利于释放(25℃,5 h 释放 20.5%);当温度高于最低临界相变温度时,有效成分容易通过聚合物包膜层扩散到周围介质中(40℃,5 h 释放 64.3%),因此有利于提高吡虫啉对有害生物的防治效果。在近红外光照射下,0.5 h 吡虫啉累积药物率为 15.7%,而无光下为 5.2%,其缓释性能有利于维持吡虫啉对靶标生物的长期毒性。

3.2 依据棉花叶片润湿特性,设计高黏附沉积型制剂

植物作为农药喷施的直接靶标,其所处生态环境、冠层结构、叶面特性等影响并决定了农药在其表面的沉积与分布,进而影响了农药对有害生物的防治效果^[85]。棉花叶片具有亲水性的绒毛,表现为亲水性表面。叶片表面的润湿性受绒毛分布密度、形态和类型的影响,棉花叶面绒毛的形态和密度受温度、光照、降水及空气成分的改变等环境条件的影响较大^[86]。

棉花叶片的临界表面张力比较大,约为 63.30~71.81 mN/m,水滴在棉花叶面上接触角约为 0^[87]。只有当药液的表面张力值小于叶片的临界表面张力值时,液滴才能在叶片表面很好地润湿铺展^[88]。实际应用中大多数药液的表面张力小于棉花叶片的临界表面张力,农药喷施到亲水性作物棉花叶片上均能润湿铺展,但随着药液表面张力的减小,其叶面持液量也随之减少,容易造成药液流失,影响防治效果且污染环境。此外,高密度种植的棉花封行后,雾滴冠层穿透性较差,主要沉积在棉花上、中部冠层^[89-90]。因此,基于对棉花叶片表面结构特征及润湿特性的认识,可通过天然生物大分子(壳聚糖、透明质酸、海藻酸盐、明胶)等功能载体材料制备高效剂型。儿茶酚基团对各种表面具有强劲且持久的黏附力,利用含有儿茶酚基团的改性剂(多巴胺、3,4-二羟基苯甲醛等)对载体材料进行亲和性修饰,有利于促进农药药液对棉花叶片正反面的黏附性与渗透性。针对不同生长期的棉花应在实际应用时选择合适的喷雾助剂及推荐浓度,减少液滴在叶片表面的蒸发、滚落流失。

3.3 结合新疆棉田主推施药器械,设计配套专用型制剂

剂型的设计和开发还与施药器械有密切关系,农药的有效利用率以及对病虫害的防治效果受施药器械作业质量的直接影响。目前,植保无人机因具

有作业效率高、适应性广等优点得到快速发展,但常规传统剂型不适合植保无人机飞防作业,药剂兑水稀释后容易出现沉淀、絮凝等情况,造成喷头堵塞或产生药害^[91]。尤其在新疆高温干旱、多风的气候条件下,植保无人机喷施的雾滴粒径较细小,由于重量轻,下降过程中受空气阻力影响速度衰减较为严重,到达靶标所需时间较长,受风力影响具有更高的飘移风险^[92-93]。

为了提高植保无人机飞防技术在新疆棉花种植区的应用质量,需开发具有抗蒸发、抗飘移、强沉降等特点的高效专用制剂。首先应对有效成分、助剂进行筛选,一般有效成分中的酯类、芳香烃、醚类容易挥发,因此,在选择农药时需了解有效成分的挥发性,最大限度地减少飘移药害。同时,选择吡虫啉、氟啶虫酰胺等内吸传导或跨层传导能力极强的药剂(尤其是杀菌剂),施药后 1~2 h 植物即可吸收农药有效成分,且在叶片中均匀分布,并能够迅速地转移到作物的蜡质层或跨层移动到植物叶片背部,从而达到防治有害生物的效果;其次以水基化剂型如悬浮剂、水乳剂、微乳剂等为主,飞防专用剂型-超低容量液剂(ULV)因具有雾滴细、浓度高、挥发性低、渗透性强、药液覆盖率高等优点使用相对普遍;此外,可制备与农药雾滴同等粒径、表面可乳化的颗粒剂减少空间运行过程中的蒸发飘移损失,同时优化喷施技术,颗粒到达叶面可立即乳化分散增加黏附,利用粒性化技术替代传统雾滴,突破技术瓶颈,完善植保无人机飞防药剂的质量控制标准。结合新疆昼夜温差大的气候特点,在使用无人机时应考虑天气情况,一般选择在清晨或傍晚气温相对较低时进行,此时风力较小,田间湿度较大,有利于雾滴沉积附着。

4 结语

新疆棉区具有高温干旱、光照充足、多风、昼夜温差大等气候特点,农药药液在空间运行及界面沉积过程中容易发生蒸发、飘移、降解等损失,严重影响农药对有害生物的防治效果。因此,基于新疆棉区特殊的气候特点,农药制剂的研发以产品稳定为前提,稀释药液添加蒸发抑制剂、沉降剂等专用助剂,减少雾滴在喷施过程中的蒸发、飘移等问题,增强药液在棉花叶面的沉积性和渗透性。此外,还需综合考虑有效成分的理化性质、棉花叶片的结构及润湿特性、施药器械等多种因素,结合农药学、植物

保护学、界面化学、有机化学等多学科交叉理论知识指导,利用先进的技术和载体材料研发环境响应释放型、靶向高效的农药剂型,结合配套使用技术及措施,利用粒性化技术替代传统雾滴,突破技术瓶颈,探索农药高效利用及减量调控途径,为实现农药减量增效、引领棉田绿色发展提供科技支撑。

参考文献

- [1] 喻树迅. 我国棉花生产现状与发展趋势[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 9-13.
- [2] 闫庆华, 刘维忠, 秦子. 世界棉花格局变化及对中国棉花发展的启示[J]. 农业经济, 2017(11): 119-121.
- [3] 陆宴辉, 吴孔明. 棉花盲椿象及其防治[M]. 北京: 金盾出版社, 2008.
- [4] 江海澜, 乔金玲, 邓小霞, 等. 棉花病虫害全程绿色防控技术应用与推广[J]. 中国棉花, 2018, 45(6): 31-33.
- [5] 陆宴辉, 梁革梅, 张永军, 等. 二十一世纪以来棉花害虫治理成就与展望[J]. 应用昆虫学报, 2020, 57(3): 477-490.
- [6] 热依汗古丽·阿布都热合曼, 伊力亚尔·达吾提江, 艾合买提江·努力买买提, 等. 2021 年新疆棉花重大病虫害发生趋势[J]. 中国棉花, 2021, 48(3): 41-44.
- [7] 高希武. 我国害虫化学防治现状与发展策略[J]. 植物保护, 2015, 36(4): 19-22.
- [8] 陆宴辉, 赵紫华, 蔡晓明, 等. 我国农业害虫综合防治研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2017, 54(3): 349-363.
- [9] 国家统计局. 国家统计局关于 2022 年棉花产量的公告[DB/OL]. (2022-12-26) [2023-03-01]. <https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203-1901689.html>.
- [10] 汤三玲. 近 40 年新疆气温和降水的时空变化特征[D]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- [11] 康丽娟, 巴特儿·巴克, 罗那那, 等. 1961—2013 年新疆气温和降水的时空变化特征分析[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(1): 123-133.
- [12] 吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017 年新疆区域气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(4): 27-34.
- [13] 李迎春, 郭燕云, 王雪姣, 等. 2021 年新疆棉花生长气象条件分析[J]. 中国棉花, 2022, 49(2): 1-3.
- [14] 袁会珠, 杨代斌, 闫晓静, 等. 农药有效利用率与喷雾技术优化[J]. 植物保护, 2011, 37(5): 14-20.
- [15] OERKE E C. Crop losses to pests [J]. Journal of Agricultural Science, 2006, 144(1): 31-43.
- [16] 王潇楠. 农药雾滴飘移及减飘方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [17] 薛士东. 常量喷雾农药雾滴的空间飘移行为与剂量损失调控[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [18] GEOGHEGAN T, HAGEMAN K, HEWITT A. Testing flow-through air samplers for use in near-field vapour drift studies by measuring pyrimethanil in air after spraying [J].

- Environmental Science-Processes & Impacts, 2014, 16(3): 422-432.
- [19] 宋小沫. 雾滴蒸发特性及农药助剂的抗蒸发性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [20] ZHANG Ruirui, CHEN Liping, WEN Yao, et al. Key technologies for testing and analyzing aerial spray deposition and drift: A comprehensive review [J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 13-27.
- [21] 宋小沫, 奚溪, 薛士东, 等. 喷雾助剂对农药雾滴蒸发特性影响研究[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(5): 1143-1150.
- [22] NUYTTENS D, BAETENS K, DE SCHAMPHELEIRE M, et al. Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 333-345.
- [23] NUYTTENS D, DE SCHAMPHELEIRE M, BAETENS K, et al. The influence of operator-controlled variables on spray drift from field crop sprayers [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(4): 1129-1140.
- [24] 赵峻逸, 薛士东, 宋小沫, 等. 农药药液物理性质对雾滴空间运行规律的影响模拟研究[J]. 农药学学报, 2020, 22(2): 306-314.
- [25] GIBBS J, PETERS T, HECK L. Comparison of droplet size, coverage, and drift potential from UAV application methods and ground application methods on row crops [J]. Transactions of the ASABE, 2021, 64(3): 819-828.
- [26] XUE Shidong, XI Xi, LAN Zhong, et al. Longitudinal drift behaviors and spatial transport efficiency for spraying pesticide droplets [J/OL]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 177: 121516. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121516.
- [27] LI Shougen, CHEN Chongchong, WANG Yaxiong, et al. Study on the atomization characteristics of flat fan nozzles for pesticide application at low pressures [J/OL]. Agriculture, 2021, 11(4): 309. DOI:10.3390/agriculture11040309.
- [28] ZHANG Xiaoguang, XIONG Lixia. Effect of adjuvants on the spray droplet size of pesticide dilute emulsion [J/OL]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 619: 126557. DOI:10.1016/j.colsurfa.2021.126557.
- [29] SONG Yuying, ZHU Feng, CAO Chong, et al. Reducing pesticide spraying drift by folate/Zn²⁺ supramolecular hydrogels [J]. Pest Management Science, 2021, 77(11): 5278-5285.
- [30] HOUBRAKEN M, VAN DEN BERG F, BUTLER ELLIS C M, et al. Volatilisation of pesticides under field conditions: inverse modelling and pesticide fate models [J]. Pest Management Science, 2016, 72(7): 1309-1321.
- [31] DEKEYSER D, DUGA A, VERBOVEN P, et al. Assessment of orchard sprayers using laboratory experiments and computational fluid dynamics modelling [J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(2): 157-169.
- [32] AL HEIDARY M, DOUZALS J, SINFORT C, et al. Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review [J]. Crop Protection, 2014, 63: 120-130.
- [33] NUYTTENS D, ZWERTVAEGHER I K A, DEKEYSER D. Spray drift assessment of different application techniques using a drift test bench and comparison with other assessment methods [J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 14-24.
- [34] MCHALE G, AQIL S, SHIRTCLIFFE N, et al. Analysis of droplet evaporation on a superhydrophobic surface [J]. Langmuir, 2005, 21(24): 11053-11060.
- [35] XU Wei, LEELADHA R, KANG Y T, et al. Evaporation kinetics of sessile water droplets on micropillared superhydrophobic surfaces [J]. Langmuir, 2013, 29(20): 6032-6041.
- [36] 周召路. 农药助剂调控雾滴在典型作物上的蒸发、沉积及弹跳行为研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [37] 周召路, 曹冲, 曹立冬, 等. 不同类型界面液滴蒸发特性与农药利用效果研究进展[J]. 农药学学报, 2017, 19(1): 9-17.
- [38] 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.
- [39] 王昱莎, 梁立成, 覃荣乐, 等. 影响杀螺胺乙醇胺盐药效的因素及使用技术[J]. 农药, 2014, 53(5): 369-371.
- [40] 刘秀娟, 周宏平, 郑加强. 农药液滴飘移控制技术进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 186-190.
- [41] WOLF R E. Drift-reducing strategies and practices for ground applications [J]. Technology & Health Care, 2013, 19(1): 1-20.
- [42] 茹煜, 朱传银, 包瑞. 风洞条件下雾滴飘移模型与其影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 66-72.
- [43] 陈小军, 徐汉虹, 胡珊, 等. 农药光催化降解研究进展[J]. 农药, 2006(6): 381-384.
- [44] 李亚平, 胡艳芳, 杨凡昌, 等. 拟除虫菊酯类农药光降解的研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(1): 14-19.
- [45] 骆爱兰, 余向阳, 张存政, 等. 拟除虫菊酯类农药多残留酶免疫分析方法的建立[J]. 中国农业科学, 2005(2): 308-312.
- [46] ZHAO Kefei, HU Jun, MA Yue, et al. Topology-regulated pesticide retention on plant leaves through concave Janus carriers [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(15): 13148-13156.
- [47] ZHENG Li, CAO Chong, CAO Lidong, et al. Bounce behavior and regulation of pesticide solution droplets on rice leaf surfaces [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2018, 66(44): 11560-11568.
- [48] HE Lifei, DING Lei, LI Beixing, et al. Optimization strategy to inhibit droplets rebound on pathogen-modified hydrophobic surfaces [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(32): 38018-38028.
- [49] 孙长娇, 崔海信, 王琰, 等. 纳米材料与技术农业上的应用研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(1): 18-25.

- [50] 郭明程, 陈立萍, 张佳, 等. 环境响应性载体材料在农药控释中的应用研究进展[J]. 农药学学报, 2018, 20(3): 270-278.
- [51] ARVIDSSON T, BERGSTROM L, KREUGER J. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors [J]. Pest Management Science, 2011, 67(5): 586-598.
- [52] PREFTAKES C, SCHLEIER J, KRUGER G, et al. Effect of insecticide formulation and adjuvant combination on agricultural spray drift [J/OL]. PeerJ, 2019, 7: e7136. DOI:10.7717/peerj.7136.
- [53] BALSARI P, GIL E, MARUCCO P, et al. Field-crop-sprayer potential drift measured using test bench: Effects of boom height and nozzle type [J]. Biosystems Engineering, 2017, 154: 3-13.
- [54] QIN Weicai, XUE Xinyu, CUI Longfei, et al. Optimization and test for spraying parameters of cotton defoliant sprayer [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 63-72.
- [55] 林金元, 王国宾, 况慧云, 等. 喷雾助剂对雾滴粒径、抗蒸发及植保无人机喷施雾滴飘移的影响[J]. 上海农业学报, 2022, 38(2): 81-87.
- [56] WANG Guobin, HAN Yuxing, LI Xuan, et al. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer [J/OL]. Science of the Total Environment, 2020, 737: 139793. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.139793.
- [57] 高赛超. 植保无人机喷雾助剂评价方法研究与应用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [58] WANG Zhichong, LAN Luchen, HE Xiongkui, et al. Dynamic evaporation of droplet with adjuvants under different environment conditions [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 1-6.
- [59] ZHOU Zhaolu, CAO Chong, CAO Lidong, et al. Evaporation kinetics of surfactant solution droplets on rice (*Oryza sativa*) leaves [J/OL]. PLoS ONE, 2017, 12(5): e0176870. DOI: 10.1371/journal.pone.0176870.
- [60] LIU Bin, FAN Yaxun, LI Haoifei, et al. Control the entire journey of pesticide application on superhydrophobic plant surface by dynamic covalent trimeric surfactant coacervation [J/OL]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(5): 2006606. DOI:10.1002/adfm.202006606.
- [61] 郑丽, 黄桂珍, 曹立冬, 等. 农药制剂创新研究方向[J]. 世界农药, 2022, 44(12): 1-5.
- [62] JIA Xin, SHENG Wenbo, LI Wei, et al. Adhesive polydopamine coated avermectin microcapsules for prolonging foliar pesticide retention [J]. ACS Applied Materials & Interface, 2014, 6(22): 19552-19558.
- [63] GUO Mingcheng, ZHANG Wenbing, DING Guanglong, et al. Preparation and characterization of enzyme-responsive emamectin benzoate microcapsules based on a copolymer matrix of silica-epichlorohydrin-carboxymethylcellulose [J]. RSC Advances, 2015, 5: 93170-93179.
- [64] SABRY A H, SALEM H A N, METWALLY H M. Development of imidacloprid and indoxacarb formulations to nanofomulations and their efficacy against *Spodoptera littoralis* (Boisd) [J/OL]. Bulletin of the National Research Centre, 2021, 45: 16. DOI: 10.1186/s42269-020-00477-8.
- [65] SU Xiaofeng, YAN Shuo, ZHAO Weisong, et al. Self-assembled thiophanate-methyl/star polycation complex prevents plant cell-wall penetration and fungal carbon utilization during cotton infection by *Verticillium dahliae* [J/OL]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124354. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124354.
- [66] SHEN Yue, AN Changcheng, JIANG Jiajun, et al. Temperature-dependent nanogel for pesticide smart delivery with improved foliar dispersion and bioactivity for efficient control of multiple pests [J]. ACS Nano, 2022, 16(12): 20622-20632.
- [67] 陈慧萍, 曹立冬, 赵鹏跃, 等. 阿维菌素缓释控释载药体系的构建及应用研究进展[J]. 农药学学报, 2021, 23(1): 42-59.
- [68] 姜官鑫, 沈国清, 朱鸿林, 等. 阿维菌素缓释固体分散体的制备及其性能研究[J]. 科技通报, 2012, 28(5): 125-129.
- [69] WANG Yuli; SONG Saijie; CHU Xiaohong, et al. A new temperature-responsive controlled-release pesticide formulation-poly(*N*-isopropylacrylamide) modified graphene oxide as the nanocarrier for lambda-cyhalothrin delivery and their application in pesticide transportation [J/OL]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 612: 125987. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.125987.
- [70] ZHOU Jie, LIU Guangyang, GUO Zhaojiang, et al. Stimuli-responsive pesticide carriers based on porous nanomaterials: A review [J/OL]. Chemical Engineering Journal, 2023, 455, 140167. DOI:10.1016/j.cej.2022.140167.
- [71] XIAO Douxin, WU Haixia, ZHANG Yanling, et al. Advances in stimuli-responsive systems for pesticides delivery: Recent efforts and future outlook [J]. Journal of Controlled Release, 2022, 352: 288-312.
- [72] XU Xiaohui, BAI Bo, WANG Honglun, et al. A near-infrared and temperature-responsive pesticide release platform through core-shell polydopamine@PNIPAm nanocomposites [J]. ACS Applied Materials & Interface, 2017, 9(7): 6424-6432.
- [73] ZHANG Lihong, REN Siyi, CHEN Chaowen, et al. Near infrared light-driven release of pesticide with magnetic collectability using gel-based nanocomposite [J/OL]. Chemical Engineering Journal, 411: 127881. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127881.
- [74] XU Zhiping, SHI Lina, JIANG Danping, et al. Azobenzene modified imidacloprid derivatives as photoswitchable insecticides: Steering molecular activity in a controllable manner [J/OL]. Scientific Reports, 2015, 5: 13962. DOI: 10.1038/srep13962.
- [75] XU Zhiping, GAO Zhenhong, SHAO Xusheng. Light-triggered release of insecticidally active spirotetramat-enol [J]. Chinese Chemical Letters, 2018, 29(11): 1648-1650.

- [J/OL]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(14): 7328. DOI: 10.3390/ijms22147328.
- [168] CHEN Chen, LU Lili, MA Shuya, et al. Analysis of PAT1 subfamily members in the GRAS family of upland cotton and functional characterization of *GhSCL13-2A* in *Verticillium dahliae* resistance [J]. Plant Cell Reports, 2023, 42(3): 487–504.
- [169] XIONG Xianpeng, SUN Shichao, ZHU Qianhao, et al. Transcriptome analysis and RNA interference reveal *GhG-DH2* regulating cotton resistance to *Verticillium* wilt by JA and SA signaling pathways [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 654676. DOI: 10.3389/fpls.2021.654676.
- [170] ZHANG Xue, LIU Jianfeng, WU Lizhu, et al. *GbWRKY1*, a member of the WRKY transcription factor family identified from *Gossypium barbadense*, is involved in resistance to *Verticillium* wilt [J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2019, 33(1): 1354–1364.
- [171] LI Xiancai, LIU Nana, SUN Yun, et al. The cotton *GhWIN2* gene activates the cuticle biosynthesis pathway and influences the salicylic and jasmonic acid biosynthesis pathways [J/OL]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 379. DOI: 10.1186/s12870-019-1888-6.
- [172] ZHAO Yunlei, JING Huijuan, ZHAO Pei, et al. *GhTBL34* is associated with *Verticillium* wilt resistance in cotton [J/OL]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(17): 9115. DOI: 10.3390/ijms22179115.
- [173] ZHANG Baolong, YANG Yuwen, CHEN Tianzi, et al. Island cotton *Gbv1* gene encoding a receptor-like protein confers resistance to both defoliating and non-defoliating isolates of *Verticillium dahliae* [J/OL]. PLoS ONE, 2012, 7(12): e51091. DOI: 10.1371/journal.pone.0051091.
- [174] CHEN Tianzi, KAN Jialian, YANG Yuwen, et al. A *Ve* homologous gene from *Gossypium barbadense*, *Gbvdr3*, enhances the defense response against *Verticillium dahliae* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 98: 101–111.
- [175] YANG Yuwen, CHEN Tianzi, LING Xitie, et al. *Gbvdr6*, a gene encoding a receptor-like protein of cotton (*Gossypium barbadense*), confers resistance to *Verticillium* wilt in *Arabidopsis* and upland cotton [J/OL]. Frontiers in Plant Science, 2018, 8: 2272. DOI: 10.3389/fpls.2017.02272.
- [176] YANG Chunlin, LIANG Shan, WANG Haiyun, et al. Cotton major latex protein 28 functions as a positive regulator of the ethylene responsive factor 6 in defense against *Verticillium dahliae* [J]. Molecular Plant, 2015, 8(3): 399–411.
- (责任编辑: 杨明丽)
-
- (上接 9 页)
- [76] ALEKSEEV A, TYURIN M, KHAIROV K, et al. Characterization and biological action of avermectin granules on the Moroccan locust, *Dociostaurus maroccanus* (Orthoptera: Acrididae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2019, 112(6): 2663–2669.
- [77] 袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 等. 植保无人机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 152–158.
- [78] MAY M. Early studies on spray drift, deposit manipulation and weed control in sugar beet with two air-assisted boom sprayers [J]. BCPC Monograph, 1994, 46: 89–96.
- [79] NORDBO E, TAYLOR W. The effect of air assistance and spray quality (drop size) on the availability, uniformity and deposition of spray on contrasting targets [J]. BCPC Monograph, 1994, 46: 113–124.
- [80] 娄尚易, 薛新宇, 顾伟, 等. 农用植保无人机的研究现状及趋势[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 1–6.
- [81] 刘晓慧, 袁亮亮, 石鑫, 等. 植保施药机械喷雾雾滴飘移研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(2): 232–247.
- [82] 何勇, 肖舒裴, 方慧, 等. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 113–124.
- [83] 范小博, 邓巍, 吴桂芳. 飘移控制喷雾施药技术研究进展[J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 1–9.
- [84] FORNASIERO D, MORI N, TIRELLO P, et al. Effect of spray drift reduction techniques on pests and predatory mites in orchards and vineyards [J]. Crop Protection, 2017, 98: 283–292.
- [85] 郑丽. 农药乳状液液滴在水稻叶面沉积规律与调控机制的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [86] 石辉, 王会霞, 李秧秧. 植物叶表面的润湿性及其生态学意义[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4287–4298.
- [87] 顾中言. 植物的亲水疏水特性与农药药液行为的分析[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(2): 276–281.
- [88] 顾中言, 许小龙, 韩丽娟. 作物叶片持液量与溶液表面张力的关系[J]. 江苏农业学报, 2003(2): 92–95.
- [89] 胡红岩, 任相亮, 姜伟丽, 等. 植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5): 59–64.
- [90] 王国宾, 王十周, 陈鹏超, 等. 植保无人机喷洒不同雾滴粒径药剂对其在棉花冠层沉积, 穿透及脱叶催熟效果的影响[J]. 植物保护学报, 2021, 48(3): 493–500.
- [91] 张俊, 杨志刚, 廉勇, 等. 植保无人机对农药及其剂型的选择[J]. 现代农业, 2020(5): 14–17.
- [92] 田志伟, 薛新宇, 崔龙飞, 等. 植保无人机昼夜作业的雾滴沉积特性及棉蚜防治对比[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 69–77.
- [93] 胡红岩, 任相亮, 姜伟丽, 等. 植保无人机飞行高度与方向对棉田雾滴沉积分布的影响[J]. 中国棉花, 2017, 44(12): 16–19.
- (责任编辑: 杨明丽)