

◆ 专论:农药加工与剂型(特约稿) ◆

# 农药剂型的过去、现在与发展趋势

程雪健<sup>1</sup>, 丁程瀛<sup>1</sup>, 冉刚超<sup>2</sup>, 徐博<sup>2\*</sup>, 黄啟良<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193 2. 河南好年景生物发展有限公司, 郑州 450000)

**摘要:** 农药剂型作为农药剂量传递的重要载体对于农药应用效果具有重要影响。经过70余年的演化、发展,我国农药剂型结构、加工与应用技术等发生了翻天覆地的变化。文章综述了我国农药剂型的过去、现在与发展趋势,总结了未来农药制剂研发的5个重点突破方向,分别为通过纳米化提高分散度、基于靶标界面特性设计靶向亲和型农药制剂、应用场景导向的制剂研发、开发适配植保无人机喷雾的农药制剂、发展省力化制剂,以期为我国农药制剂研发、登记和应用提供借鉴,为我国农药减施增效策略提供理论和技术支撑。

**关键词:** 农药剂型; 制剂研发; 剂量传递; 农药利用率; 发展趋势

中图分类号: TQ 450 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2024.05.001

## The past, present and development trends of pesticide formulation

CHENG Xuejian<sup>1</sup>, DING Chengying<sup>1</sup>, RAN Gangchao<sup>2</sup>, XU Bo<sup>2\*</sup>, HUANG Qiliang<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Henan Haonianjing Biological Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** As important carriers of pesticide dose transfer, pesticide formulation has an important impact on the effect of pesticide application. After more than 70 years of evolution and development, China's pesticide formulation structure, preparation and application technology has undergone radical changes. The past, present and development trends of pesticide formulation in China was reviewed in this paper. And the five key breakthrough directions for future pesticide formulation research and development were summarized, namely, improving dispersion through nanosizing, designing target affinity pesticide formulation based on the target interface characteristics, application scenario oriented formulation research and development, developing pesticide formulation suitable for spraying by plant protection drones, and developing labor-saving formulations. This review could serve as a reference for the research and development, registration and application of pesticide formulations, and provide theoretical support for strategy of efficiency improvement with less application.

**Key words:** pesticide formulation; formulation development; dose transfer; pesticide utilization rate; development trend

20世纪以来全球人口呈指数增长,粮食需求迅速增加,但每年因植物病虫害导致的全球作物产量损失约为20%~40%<sup>[1-2]</sup>。在可预见的未来,农药仍将会是保障全球粮食生产和安全的重要手段。通常,1 hm<sup>2</sup>田地所需的农药有效成分在几十克到几千克不等,而大多数农药原药为有机化合物,在水中的

溶解度极低。为实现农药有效成分在靶标区域的均匀覆盖,通常需要将农药有效成分加工成制剂施用<sup>[3-4]</sup>。农药剂型加工是指基于农药理化性质(熔点、闪点、在水和有机溶剂中的溶解度等)和使用方式,通过加入适当的助剂并结合科学的制剂加工技术将农药原药加工成具有一定分散度、便于贮存和使用的

收稿日期:2024-07-09

作者简介:程雪健(1998—),男,在读博士,研究方向为农药剂型加工及其对靶剂量传输规律。E-mail: xuejian\_cheng@163.com

通信作者:黄啟良(1968—),男,博士,研究员,博士研究生导师,主要从事农药剂型加工与使用技术原理、农药高效对靶沉积技术及质量控制研究。E-mail: qihuang@ippcaas.cn

共同通信作者:徐博(1967—),男,河南永城人,高级工程师,主要从事缓控释药肥技术研究与产业化。E-mail: haonianjing01@163.com

制剂的过程,其实质是农药的分散过程。通过农药剂型加工可以达到以下几个目的:(1)将农药有效成分加工成易于使用的形态;(2)提高农药有效成分的分散度;(3)改善有效成分的生物活性;(4)高毒农药低毒化<sup>[5-6]</sup>。

对于选定的农药有效成分,其理化性质很大程度上决定了其适合加工的剂型。通常,水溶性强的农药有效成分可以加工成可溶液剂和可溶粒剂,水溶性差但油溶性强的农药有效成分可以加工成乳油、水乳剂和微乳剂,而在水中和有机溶剂中溶解度均较差的农药有效成分则可以加工成可湿性粉剂、水分散粒剂和悬浮剂等。农药有效成分的熔点也会对加工的剂型起到一定的决定作用,熔点低于 60℃ 的原药通常很难加工成悬浮剂。此外,还应考虑农药制剂的使用方式、防治对象的生物特性等。

中国农药工业经过 70 余年的发展,农药剂型结构、加工技术以及应用技术发生了翻天覆地的变化。本文综述了我国农药剂型的过去、现在与发展趋势,总结了未来农药制剂研发的 5 个重点突破方向,以期为我国农药制剂研发、登记和应用提供借鉴,为我国农药减施增效策略提供理论和技术支撑。

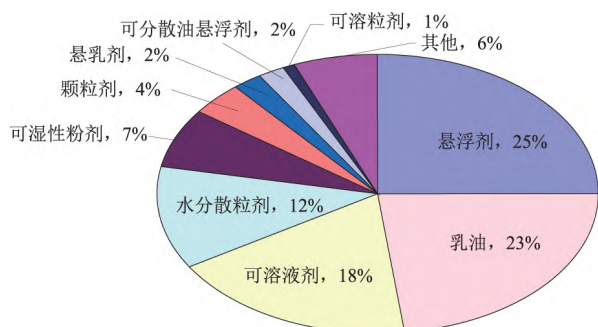
### 1 我国农药剂型的过去与现在

农药制剂加工最重要的目的是最大限度发挥农药有效成分的生物活性和最大限度降低其风险,因此,农药制剂的发展历程与农药有效成分的创制过程和加工技术的发展息息相关。20 世纪 50 年代,随着六六六、滴滴涕等有机氯农药的问世和大规模应用,以粉剂、可湿性粉剂和乳油为主的第一代农药制剂被开发<sup>[7-8]</sup>。第一代制剂主要以提高农药原药的分散性和方便使用为主要目标,由于制剂加工技术发展水平所限,并未解决农药制剂使用中对人畜及环境产生的负面影响。

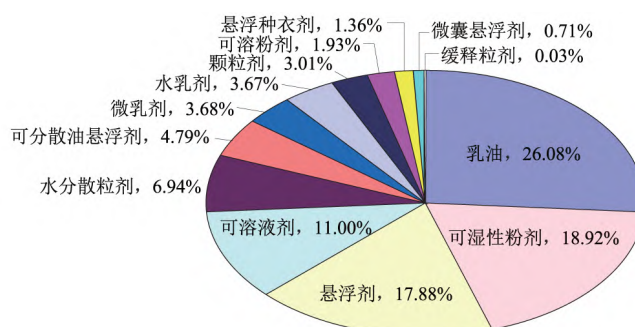
20 世纪 80 年代,粉剂、可湿性粉剂在生产和使用

用过程中的粉尘污染问题,乳油中含有的甲苯、二甲苯等挥发性有机溶剂导致的药害、易燃易爆等问题日益凸显,第一代农药制剂大面积使用导致的环境问题开始得到人们重视。国际上提出了农药制剂应朝着水基化、颗粒化、缓释、环境友好的方向发展,以水乳剂、微乳剂和悬浮剂为代表的水基化剂型,以水分散粒剂为代表的颗粒化剂型和以微囊悬浮剂为代表的缓释剂型相继被开发并推向市场。在此阶段,我国农药制剂工业迅速发展,乳油、可湿性粉剂等传统剂型产品质量明显提升。发展至 20 世纪 90 年代,我国乳油产量及产品数量下降至制剂产量和农药产品总数的 50%,而同期英国销售的悬浮剂比例已达 26%,超过乳油(24%)和可湿性粉剂(17%)。与发达国家相比,我国仍然存在乳油和可湿性粉剂等传统剂型产量占比高,悬浮剂和水分散粒剂等新剂型稳定性及技术指标相对较差等问题<sup>[8-10]</sup>。2001—2010 年,我国环境友好型农药新制剂进入快速发展阶段。主要表现在乳油占比由 1998 年的 46.7% 下降到 2003 年的 40%,而水乳剂、微乳剂、悬浮剂、悬乳剂和悬浮种衣剂的产品登记数量分别由 1998 年的 13、5、95、17、5 个上升至 2007 年的 124、226、321、66 和 226 个,2008 年,悬浮剂产品登记数量占全部登记制剂产品数量的 7.18%<sup>[7,11]</sup>。

2010 年以后,农药制剂发展进入新的阶段,主要表现在农药制剂研究不再局限于农药剂型的形成和稳定,而开始关注农药剂量传递技术<sup>[4]</sup>。农药制剂研发在兼顾成本的同时开始重视环保和安全。环境友好型农药制剂的比例持续上升,至 2016 年,环境友好型制剂产品占比上升到 26.7%,乳油占比下降到 31%,可湿性粉剂占比约在 22%<sup>[12]</sup>。发展至今,我国农药剂型结构趋于合理,水基化制剂(悬浮剂、水乳剂、微乳剂)占比 25.23%,颗粒化制剂(水分散粒剂、颗粒剂)占比 9.95%,缓释制剂(微囊悬浮剂、缓释粒剂)占比 0.74%,基本达到国际平均水平(图 1)。



a 国外农药剂型分布(至 2020 年,来源于 Agrow)



b 国内剂型分布(至 2024 年 6 月,来源于中国农药信息网)

图 1 国内和国外农药剂型登记占比分布图

综上,我国农药制剂整体朝着有机溶剂用量更低、分散度更高的方向发展,具体表现在有机溶剂用量更低的水乳剂和微乳剂正逐步替代乳油,分散度更高的悬浮剂和水分散粒剂正逐步替代可湿性粉剂。经过70余年的发展,我国水基化、颗粒化、缓释制剂登记占比不断提升,农药剂型结构趋于合理,并逐渐与国际接轨。

## 2 我国农药剂型的发展趋势

### 2.1 通过纳米化提高分散度

纵观农药制剂的历史可以发现,提高低水溶性农药有效成分的分散度贯穿了整个农药制剂的发展历程,究其根本原因在于农药有效成分的分散度会通过影响靶标覆盖面积、附着性、表面能以及稳定性等影响农药生物活性的发挥。农药的覆盖面积和表面能与分散度呈正相关。对于保护性杀菌剂、触杀型除草剂和触杀型杀虫剂而言,有效成分的分散度越高则表明其与病原菌、杂草和昆虫接触并发挥活性的概率越大,进而可能表现出更高的生物活性。例如,可湿性粉剂和悬浮剂兑水稀释后形成的药液分散体系均为悬浮液,但悬浮剂的粒径更小,分散度更高,因此,对于同一种农药而言,悬浮剂的施用剂量通常低于可湿性粉剂<sup>[13]</sup>。

过去受制剂加工设备、助剂以及成本等因素的限制,低水溶性农药有效成分通常只能被分散至微米尺度。近年来,随着纳米技术对农药制剂的不断赋能,低水溶性农药有效成分的分散度得以提升至纳米尺度,纳米农药应运而生。纳米农药是指通过纳米技术制备,使农药有效成分在制剂或/和使用分散体系中的平均粒径以纳米分散状态稳定存在的农药。纳米农药与传统农药剂型(乳油、可湿性粉剂、悬浮剂等)的本质区别在于农药有效成分在兑水稀释药液中的分散度不同。纳米农药特有的小尺寸、大比表面积赋予其许多优异的性能,如显著提高农药有效成分在靶标区域的覆盖面积,尺寸效应和表面电荷效应增强了对靶标的黏附性能,改善了对植物、昆虫和病原菌的渗透性,促进了农药在植物体内的吸收和传输与分布等。根据加工方式可以将纳米农药分为将农药有效成分直接加工成纳米尺度的纳米农药(Ⅰ类纳米农药)和以纳米材料为载体,通过吸附、偶联、包裹、镶嵌等方式负载构建纳米载药系统的纳米农药(Ⅱ类纳米农药)。Ⅰ类纳米农药包括微乳剂、纳米乳剂、纳米分散体等;Ⅱ类纳米农药包括纳米胶囊、纳米微球、纳米胶束、纳米

凝胶和纳米纤维等。目前学界对Ⅰ类纳米农药的研究更为广泛,主要原因包括:(1)通过对载体进行化学修饰可以赋予其环境响应、生物刺激响应等性能,进而实现精准调控释放;(2)纳米材料或载体可以改变农药有效成分的界面特性,进而改善农药在植物体内的吸收、传导和时空分布;(3)可以改善核酸农药的稳定性,并通过提高渗透性显著改善递送效率。但Ⅱ类纳米农药制备工艺复杂、成本高昂、放大困难,目前的研究尚停留在实验室阶段。

与Ⅰ类纳米农药相比,Ⅱ类纳米农药因具有制备工艺简单、表面活性剂用量低、成本低廉、易于放大等优势而更易于产业化,其中较典型的为纳米乳剂和纳米分散体。纳米乳剂是指在表面活性剂等功能助剂作用下,将难溶于水的农药以纳米尺度增溶于水中形成的乳状液体制剂。与乳油相比,纳米乳剂可以降低有机溶剂用量,在改善生物活性的同时降低对非靶标生物的毒性<sup>[14]</sup>。纳米分散体是指通过湿法砂磨、熔融乳化、微沉淀、溶剂挥发等方法将难溶于水的农药以纳米尺度的微粒、微晶形态均匀分散在水中形成的固体纳米剂型<sup>[15]</sup>。纳米分散体本质上与传统农药剂型可湿性粉剂和悬浮剂一样,兑水形成的分散体系都是悬浮液,但纳米分散体分散度更高。经湿法砂磨制备的纳米分散体平均粒径在200 nm,经熔融乳化法制备的纳米分散体平均粒径可低至60 nm<sup>[16-17]</sup>。纳米分散体与传统悬浮剂相比,表现出改善的生物活性,可减少农药用量20%以上。

### 2.2 基于靶标界面特性设计靶向亲和型农药制剂

植物叶片是农药对有害生物发挥生物活性的重要媒介,农药在叶片上的滞留是农药施用过程中的关键环节,受作物叶片表面基团、微纳米结构、电位、表面能以及农药颗粒的粒径、刚性、表面官能团等多种因素影响。传统农药在作物叶片上的黏附性不强,往往易通过雨水冲刷、挥发等途径进入环境<sup>[18]</sup>。因此,基于靶标界面特性设计靶向亲和型农药制剂对于提高农药在靶标界面的滞留具有重要意义。在设计靶向亲和型农药制剂时需充分考虑作物叶片表面的电性、基团及结构,通过对载药颗粒进行修饰,在农药载体上引入黏附基团等提高农药在植物叶片上的有效滞留。

邻苯二酚基团可以与叶片表面的羧基或羟基形成氢键,使用富含邻苯二酚基团的材料制备纳米载体或对纳米载体进行改性可以提高农药在作物叶片上的黏附性能,延长其在作物叶片上的滞留时

间。Wu等<sup>[19]</sup>以富含邻苯二酚基团的聚多巴胺为壁材制备了高效氯氟氰菊酯微囊悬浮剂,该微囊悬浮剂可显著提高农药在甘蓝叶片上的滞留量,并可有效减少雨水冲刷带来的损失。Liang等<sup>[20]</sup>以苯乙烯和甲基丙烯酸为载体,通过乳液-溶剂蒸发法和化学改性制备了对作物叶片具有强黏附力的阿维菌素纳米颗粒[P(St-MAA)-Av-Cat]。P(St-MAA)-Av-Cat表面富含邻苯二酚基团,可与叶片表面的羧基或羟基形成氢键。此外,由于邻苯二酚易与多种金属离子形成配位键,P(St-MAA)-Av-Cat与作物叶片之间也可能存在配位键。与传统剂型乳油和水分散剂剂相比,P(St-MAA)-Av-Cat对蚜虫的室内毒力显著增强。

根据作物叶片表面粗糙形貌,设计与叶片微纳米结构互补的农药载体是提高农药在作物叶片上的滞留量,降低农药损失的另一种有效途径。Zhao等<sup>[21]</sup>通过乳液界面聚合合法合成了负载农药的帽型载体。农药喷洒后,在拓扑效应的作用下,负载农药的帽型载体可以嵌入植物叶片上的微乳头和纳米刺,从而增加农药在靶标作物上的滞留量。Cai等<sup>[22]</sup>通过向毒死蜱乳液中添加基于草灰的生物炭和生物硅开发了一种可以减少农药损失的制剂。生物硅具有多孔微纳米结构,可以吸附大量农药分子形成农药-生物硅复合物。由于生物硅的高吸附能力和叶片表面的粗糙结构,毒死蜱在叶片表面的滞留量显著提高。此外,通过高能电子束对凹凸棒土<sup>[23-24]</sup>、硅藻土<sup>[25]</sup>进行改性,可提高纳米粘土的分散度并使其表面形成纳米多孔网络状结构,将其添加至毒死蜱乳液中。由于花生叶片表面有大量的微纳米结构,毒死蜱-纳米粘土复合物更容易滞留在粗糙的花生叶片表面,有利于增加毒死蜱在花生叶面的滞留量。

植物叶片表面通常带负电,利用农药液滴与植物表面之间的静电相互作用可以改善农药液滴在植物表面的滞留。Zhang等<sup>[26]</sup>通过在农药液滴中添加带正电荷的纤维素纳米纤维(CNFs),显著提高了农药液滴在植物叶片表面的黏附力。Chen等<sup>[27]</sup>将端基乙二胺聚亚胺引入玉米醇溶蛋白中合成了多胺改性的玉米醇溶蛋白,并以其为载体制备了负载阿维菌素的纳米粒子。该载药颗粒表面的氨基可通过静电吸附及氢键作用增强农药液滴与植物叶面之间的相互作用。

通过调控载药颗粒的黏性和柔性状态,可以显著提高农药液滴与作物叶面的亲和性,从而提高农药在作物叶面的滞留。Pan等<sup>[28]</sup>发现,在微囊壳中加

入不同相对分子质量的聚乙二醇(PEG)会改变微囊的柔软度。采用高相对分子质量的聚乙二醇制备的微囊壁更柔软,与叶片的接触面积更大,可以更多地滞留在花生叶片上,从而提供更好的耐雨水冲刷性能。Luo等<sup>[29]</sup>通过调控载体材料的软端结构,实现了载药凝胶由球状到饼状的形态控制,扁平化状态可以提高农药与有害生物的接触效率。将纳米凝胶负载的高效氯氟氰菊酯用于叶面喷雾后,发现其比乳油杀虫活性更高,抵抗逆境能力更强,且持效期更长。

### 2.3 应用场景导向的制剂研发

除分散度和载药颗粒本身的特性外,农药制剂兑水稀释后形成药液的物理化学性质也会影响剂量传递行为,进而影响最终的生物活性。农药剂量传递包含药液分散、空间传递、界面传递和释放传导4个过程。目前对界面传递过程中的弹跳行为、润湿行为、蒸发行为的研究较为深入,但对药液分散、空间传递过程中的规律研究相对欠缺。传统的农药制剂研发通常只关注制剂的形成与稳定,以保障制剂的物理稳定性为导向筛选助剂体系,而很少关注助剂体系对农药剂量传递行为的影响。应用场景导向的制剂研发不仅需要关注制剂的形成与稳定,更应重视助剂体系对制剂兑水稀释后形成的药液和雾化分散体系的影响,并针对应用场景的客观条件(环境条件、靶标界面特性、病虫害发生规律等)对助剂体系进行专门的设计,优化制剂在剂量传递过程中的性能,从而提升剂量传递效率<sup>[30-31]</sup>。

在高温低湿的干旱地区,农药雾滴蒸发速率快,空间运行过程中更易飘移,因此应通过优化助剂体系增强其抗蒸发性能。除环境条件外,靶标作物界面特性同样值得关注。水稻和小麦叶片的临界表面张力分别为36.7 mN/m和36.9 mN/m,而只有当药液的表面张力低于植物叶片的临界表面张力时才能润湿叶片<sup>[32]</sup>。通过合理选择助剂的种类和用量,使药液润湿状态由Cassie-Baxter状态转变为Wenzel状态是实现有效润湿黏附的关键<sup>[33]</sup>。此外,病原菌和昆虫侵染可能会导致植物叶片变得更加疏水,尤其是喷洒治疗性杀菌剂时,应该对药液体系的表面张力进行调整以使药液性质更好地匹配被病原菌改性的作物叶片<sup>[34-35]</sup>。总之,我国幅员辽阔,各地气候条件不同,种植作物种类丰富,施药场景繁多,应用场景导向的制剂研发应着眼于满足各种应用场景下的农药施用需求,研发适应性强、用途广的农药制剂。将应用场景导向的农药制剂作为减施增效的

重要载体,持续推动我国农药利用率提升。

## 2.4 开发适配植保无人机喷雾的农药制剂

植保无人机在我国的大面积应用对农药制剂的发展提出了新的要求<sup>[36]</sup>。与常规容量喷雾相比,植保无人机喷雾具有飞行速度快、飞行高度高、喷液量低、药液浓度高等特点。大多数植保无人机配备的是口径较小的离心式雾化喷头,要求药液分散体系中农药颗粒具有更小的粒径。雾化方式不同可能导致产生与常规施药机械喷雾不同的雾滴粒径谱,在进行剂型设计时可通过助剂体系改变药液理化性质,进而调控离心雾化后产生的雾滴粒径谱,降低小雾滴比例,减少飘移。植保无人机作业时距作物冠层的高度通常为2~5 m,雾滴离开喷头后到达作物冠层过程中的空间运行距离更长,更容易蒸发飘移,因此,在开发适配植保无人机喷雾的农药制剂时应更注重其抗蒸发性能。除超低容量液剂外,目前我国登记的大部分兑水喷雾施用的农药制剂均为常规容量喷雾设计。这些制剂用于植保无人机低容量喷雾时,低稀释倍数下形成药液的表面张力过低,可能会导致药液在亲水性叶片上滚落流失。因此,有必要对常规剂型的助剂体系进行合理优化以满足植保无人机低容量喷雾的要求。此外,在采用植保无人机进行施药时,多药混配和药肥混打现象越来越普遍,因此,更应关注多种制剂混配后的稀释稳定性,避免多元混配时出现破乳、絮凝等不稳定现象。

## 2.5 发展省力化制剂

随着我国农村劳动人口减少以及人工成本上升,基于农药应用场景,将制剂研发与应用技术相结合,积极开发水面漂浮粒剂、泡腾片剂、展膜油剂、烟剂、微粉剂等省力化剂型符合当前农药制剂的发展趋势。目前,开发较多的是应用在水田的漂浮粒剂和展膜油剂。漂浮粒剂可以直接撒施,由于其具有比水更低的密度,因此施用后能够漂浮在水面上。我国第1个漂浮粒剂产品16.5%丙草胺·吡嘧磺隆漂浮粒剂(丙草胺15%+吡嘧磺隆1.5%)于2016年上市,主要用于移栽水稻田防除稗草等一年生杂草和多年生杂草<sup>[37]</sup>。此外,漂浮粒剂也可以用于水稻田递送杀虫剂<sup>[38]</sup>。展膜油剂由农药活性成分、至少1种植物油和极性惰性溶剂加工而成,施用于水田后会在水面形成一层油膜,油膜在表面张力的驱动下可以在水田表面迅速扩散铺展,进而降低施药者的劳动强度<sup>[39]</sup>。除水稻田施药场景外,设施温室也是典型的省力化剂型应用场景。设施温室为相对封闭的

施药场景,环境温差大,湿度高,常规喷雾不仅劳动强度大,而且还会提高温室内湿度,进一步加剧病害发生。针对设施温室特殊的施药场景开发微粉剂、烟剂等无水或少水的农药制剂,不仅可以降低劳动强度,还可以提高防治效果,降低农药残留<sup>[40]</sup>。

## 3 总结与展望

农药剂型是具有一定组分和规格的农药原药(母药)的加工形态。农药剂型的发展经历了从赋形到赋能的历史过程,体现了发展过程中的时代背景,具有典型的时代特征;农药剂型随着有效成分、助剂、加工技术等的发展而发展,技术越来越先进。农药剂型加工是一种分散技术,由过去简单的物理粉碎,发展到现在基于作物叶面拓扑结构和有害生物危害特性的“定向尺度”与“生物最佳粒径”的精准制备与分散,分散越来越精准。农药剂型加工是一种制备技术,由过去简单物理混合,发展到现在基于作物组分与电荷、对靶沉积滞留与剂量传输的“精准组装”与“界面修饰”,制备越来越精细。同时,农药剂型加工也是一种控制释放技术,由过去开放和半开放的自由释放,发展到现在基于有害生物防控剂量需求的“环境因子调控释放”与“酶触释放”等,释放越来越可控。

当前我国农村劳动人口减少,人工成本不断上升,植保无人机发展迅速,国家持续推进农药减施增效,农药绿色发展理念得到普遍认可。在此背景下,利用纳米技术提高难溶性农药有效成分的分散度,基于靶标界面特性和农药应用场景设计具有高效剂量传递性能的农药制剂,开发省力化和适用于植保无人机飞防的农药功能制剂与助剂,不仅符合我国当下的战略需求,还可以提高经济效益并降低农药应用带来的环境风险。

### 参考文献

- [1] PIRZADA T, FARIAS B V, MATHEW R, et al., Recent advances in biodegradable matrices for active ingredient release in crop protection: towards attaining sustainability in agriculture[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2020, 48: 121-136.
- [2] LAMBERTH C, JEANMART S, LUKSCH T, et al. Current challenges and trends in the discovery of agrochemicals[J]. *Science*, 2013, 341: 742-746.
- [3] 钱虹,冷阳,张一宾. 农药制剂发展的若干动向[J]. *世界农药*, 2017, 39(4): 16-18; 42.
- [4] 马悦,张晨辉,杜凤沛. 农药制剂发展趋势及前沿技术概况[J]. *现代农药*, 2022, 21(1): 1-8.
- [5] 屠豫钦,王以燕. 农药的剂型问题与我国农药工业的发展[J]. *农*

- 药, 2005, 44(3): 97-102.
- [6] 冯建国, 吴学民. 国内农药剂型加工行业的现状及展望[J]. 农药科学与管理, 2016, 37(1): 26-31.
- [7] 凌世海, 温家钧. 中国农药剂型加工工业60年发展之回顾与展望[J]. 安徽化工, 2009, 35(4): 1-8.
- [8] 冷阳. 我国农药制剂的动态及发展趋势[J]. 世界农药, 2010, 32(增刊): 19-21.
- [9] 凌世海. 我国农药加工工业现状和发展建议[J]. 农药, 1999, 38(10): 19-24.
- [10] 华乃震. 农药悬浮剂的进展、前景和加工技术[J]. 现代农药, 2007, 6(1): 1-7.
- [11] 华乃震, 华纯. 农药悬浮剂发展优势和应用前景 ( ) [J]. 世界农药, 2013, 35(1): 29-33.
- [12] 冷阳. 中国农药制剂技术发展方向试析[J]. 世界农药, 2017, 39(1): 1-8.
- [13] 华乃震. 农药剂型的进展和动向 (中) [J]. 农药, 2008, 47(3): 157-160; 163.
- [14] 张航航, 陈慧萍, 曹冲, 等. 农药纳米乳剂研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(6): 1340-1357.
- [15] 王春鑫, 崔博, 曾章华, 等. 农药固体纳米分散体及其制备方法的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(3): 108-114.
- [16] WANG C, CUI B, ZHAO X, et al. Preparation and characterization of efficient and safe *lambda*-cyhalothrin nanoparticles with tunable particle size[J]. Pest Manag Sci, 2021, 77: 2078-2086.
- [17] CUI B, LV Y, GAO F, et al. Improving abamectin bioavailability via nanosuspension constructed by wet milling technique[J]. Pest Manag Sci, 2019, 75: 2756-2764.
- [18] SINGH A, DHIMAN N, KAR A K, et al. Advances in controlled release pesticide formulations: prospects to safer integrated pest management and sustainable agriculture[J]. J Hazard Mater, 2020, 385: 121525.
- [19] WU T, FANG X, YANG Y, et al. Eco-friendly water-based *lambda*-cyhalothrin polydopamine microcapsule suspension with high adhesion on leaf for reducing pesticides loss[J]. J Agric Food Chem, 2020, 68: 12549-12557.
- [20] LIANG J, YU M, GUO L, et al. Bioinspired development of P (St-MAA)-avermectin nanoparticles with high affinity for foliage to enhance folia retention[J]. J Agric Food Chem, 2018, 66: 6578-6584.
- [21] ZHAO K F, HU J, MA Y, et al. Topology-regulated pesticide retention on plant leaves through concave janus carriers[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7: 13148-13156.
- [22] CAI D Q, WANG L, ZHANG G, et al. Controlling pesticide loss by natural porous micro/nano composites: straw ash-based biochar and biosilica[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2013, 5: 9212-9216.
- [23] SUN X, LIU Z, ZHANG G, et al. Reducing the pollution risk of pesticide using nano networks induced by irradiation and hydrothermal treatment[J]. J Environ Sci Health B, 2015, 50: 901-907.
- [24] XIANG Y, WANG M, SUN X, et al. Controlling pesticide loss through nanonetworks[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2014, 2: 918-924.
- [25] XIANG Y, WANG N, SONG J, et al. Micro-nanopores fabricated by high-energy electron beam irradiation: suitable structure for controlling pesticide loss[J]. J Agric Food Chem, 2013, 61: 5215-5219.
- [26] ZHANG C Y, YANG X P, YANG S, et al. Eco-friendly and multifunctional lignocellulosic nanofibre additives for enhancing pesticide deposition and retention[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430: 133011.
- [27] CHEN L, LIN Y, ZHOU H, et al. A stable polyamine-modified zein-based nanoformulation with high foliar affinity and lowered toxicity for sustained avermectin release[J]. Pest Manag Sci, 2021, 77: 3300-3312.
- [28] PAN S H, CAO H C, LI B X, et al. Improving the efficacy against crop foliage disease by regulating fungicide adhesion on leaves with soft microcapsules[J]. Pest Manag Sci, 2021, 77(10): 4418-4424.
- [29] LUO J, GAO Y, LIU Y, HUANG X, et al. Self-assembled degradable nanogels provide foliar affinity and pinning for pesticide delivery by flexibility and adhesiveness adjustment[J]. ACS Nano, 2021, 15: 14598-14609.
- [30] 曹冲, 黄啟良, 曹立冬, 等. 减施增效农药剂型设计与制剂研发策略[J]. 世界农药, 2021, 43(2): 1-5.
- [31] 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; 31.
- [32] 顾中言, 许小龙, 韩丽娟. 一些药液难在水稻、小麦和甘蓝表面润湿展布的原因分析[J]. 农药学报, 2002, 4(2): 75-80.
- [33] 张晨辉, 马悦, 杜凤沛. 表面活性剂调控农药药液对靶润湿沉积研究进展[J]. 农药学报, 2019, 21(5): 883-894.
- [34] LU Z, GAO Y, ZHANG C, et al. Surface properties of *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and the effect of their infestation on the surface properties of kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) hosts[J]. Pest Manag Sci, 2021, 77: 5120-5128.
- [35] HE L, DING L, WATERHOUSE G I N, et al. Performance matching between the surface structure of cucumber powdery mildew in different growth stages and the properties of surfactant solution[J]. Pest Management Science, 2021, 77: 3538-3546.
- [36] 张宏军, 武鹏, 吴进龙, 等. 农用飞防专用制剂的现状与发展[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(5): 13-17.
- [37] 林雨佳, 华乃震. 省时、省工的农药新剂型——漂浮颗粒[J]. 世界农药, 2016, 38(6): 17-24.
- [38] YANG L, WANG S, WANG R, et al. Floating chitosan-alginate microspheres loaded with chlorantraniliprole effectively control *Chilo suppressalis* (Walker) and *Sesamia inferens* (Walker) in rice fields[J]. Sci Total Environ, 2021, 783: 147088.
- [39] 华乃震. 农药剂型的进展和动向 (下) [J]. 农药, 2008, 47(4): 235-239; 247.
- [40] GAO H, SHI S, LUAN F, et al. Fungicide smoke generated by electrical heating effectively controls gray mold of Chinese chives and reduces residue risk through adequate environmental sterilization[J]. Pest Management Science, 2022, 79: 1399-1409.

(编辑: 顾林玲)