

**主编按:**近年来,纳米农药已成为植物化学保护的研究热点。为充分发挥青年科学家的创新优势,加速产学研用协同发展,2024年10月11—13日,中国农业科学院植物保护研究所和中国植物保护学会青年工作委员会在苏州联合主办了“2024年纳米农药青年科学家研讨会”。会议围绕纳米农药制备、有效性与安全性、精准施用、产业化等进行实践性、前沿性报告。本期特约了其中5篇重要报告编辑出版,以飨读者。

◆ 专论:纳米农药青年论坛(特约稿) ◆

## 农药纳米悬浮剂的制备、发展现状与展望

刘泓怡,上官文杰,程雪健,余曼丽,曹立冬\*

(中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

**摘要:**纳米制备技术可显著提升农药制剂体系的稳定性,优化其界面特性,从而改善制剂在靶标生物表面的润湿和沉积性能,增强活性成分的靶向传输,最终实现农药生物活性的显著提升。纳米悬浮剂作为一种水基型的纳米制剂,具有低毒、高效、环保的优势,在构建绿色植保体系、实现农业可持续发展中发挥越来越重要的作用。本文系统综述了纳米悬浮剂的组成成分、制备方法、表征手段及其发展现状,并进一步展望了纳米悬浮剂未来发展的重点方向与潜在挑战,以期为该领域的深入研究和技术创新提供理论依据和实践指导。

**关键词:**纳米悬浮剂;助剂;制备方法;纳米农药;环境友好

**中图分类号:**TQ 450 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-5284.2025.03.001

### Preparation, development and future challenges of pesticide nanosuspension concentrate

LIU Hongyi, SHANGGUAN Wenjie, CHENG Xuejian, YU Manli, CAO Lidong\*

(Institute of Plant Protection, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Based on nanotechnology for preparation, the physicochemical stability of pesticide formulations can be significantly enhanced. This technology optimizes interface characteristics, thereby improving the wetting and deposition performance of the formulation on target surfaces. It also enhances the targeted delivery of active ingredients, ultimately leading to a substantial increase in the biological efficacy of pesticides. As a water-based nanotechnology formulation, nanosuspension concentrates offer advantages such as low toxicity, high efficiency, and environmental sustainability. They play an increasingly vital role in the development of green plant protection systems and the achievement of sustainable agricultural practices. This paper systematically reviewed the composition, preparation methods, characterization methods and current status of nanosuspension concentrate. Additionally, it explored key directions and potential challenges for the future development of these agents, aiming to provide a theoretical foundation and practical guidance for further research and technological innovation in this field.

**Key words:** nanosuspension concentrate; auxiliary; preparation method; nanopesticide; environmental friendliness

传统农药的低效性和过度施用不仅对非靶标生物及环境产生了显著的负面效应,同时也会诱导

靶标生物产生抗药性,进而降低农药的防治效果<sup>[1-2]</sup>。在此背景下,纳米农药应运而生。通过纳米制备技

收稿日期:2025-05-08

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD1700500);国家自然科学基金(32472618)

作者简介:刘泓怡(2001—),女,河北廊坊人,硕士研究生,主要从事农药剂型加工与质量控制技术研究。E-mail: lhy20011211@163.com

通信作者:曹立冬(1980—),男,河南南阳人,博士,研究员,主要从事农药剂型加工与质量控制技术研究。E-mail: caolidong@caas.cn

术,使农药有效成分在制剂或/和分散体系中的平均粒径以纳米尺度分散,且状态稳定的农药即为纳米农药。借助纳米技术,能够显著提高农药的分散性、稳定性、黏附性,进而带来对靶沉积和吸收传输性能的提升<sup>[3]</sup>。

纳米农药可分为载体型和非载体型两大类。载体型纳米农药以有机聚合物、二氧化硅等无机纳米颗粒为载体,通过吸附、偶联或包裹等方式负载农药,形成纳米微球、纳米微囊等剂型;非载体型纳米农药则通过机械破碎等手段将农药有效成分直接加工至纳米尺度,包括纳米乳剂、纳米悬浮剂等<sup>[4-5]</sup>。目前,研究较为充分的纳米农药主要基于这2种制备方法,前者利用纳米载体构建载药体系,后者通过物理加工实现农药的纳米化分散。其中,纳米悬浮剂作为一种水基型的环保剂型,因其独特的优势和制备工艺简单受到广泛关注。纳米悬浮剂将纳米级农药颗粒均匀分散于水相中提高了农药的溶解性,以水为介质从而减少了对环境的污染。随着纳米技术的不断发展,纳米悬浮剂有望成为未来农药制剂的重要发展方向,为实现农业绿色可持续发展提供有力支撑。本文综述了纳米悬浮剂的组成成分、制备方法、表征手段以及其在农药领域中的应用,并对该领域的发展前景进行展望,以期为纳米悬浮剂在农药中的应用提供一定的参考和理论指导。

## 1 纳米悬浮剂的定义及组成

我国农药剂型名称及代码标准(GB/T 19378—2017)中将悬浮剂(suspension concentrate, SC)定义为有效成分以固体微粒分散在水中成稳定的悬浮液体制剂,一般用水稀释使用。悬浮剂不使用有机溶剂且无粉尘污染,能够降低对人类和环境的危害,绿色安全,同时使用方便,防治效果稳定<sup>[6-7]</sup>。由中国农业科学院植物保护研究所和农业农村部农药检定所等单位牵头制定的我国农业行业标准《纳米农药产品质量标准编写规范》(NY/T 4451—2023),将纳米悬浮剂定义为利用纳米制备技术使农药有效成分及固体配方组分以平均粒径为纳米尺度(1~300 nm)的固体微粒或微囊分散在水中形成的悬浮液体制剂。纳米悬浮剂主要由有效成分、分散剂、润湿剂、防冻剂、增稠剂、消泡剂、水和其他助剂组成。添加这些助剂能够保证制剂的稳定性,提高实际应用时的防治效果。

### 1.1 有效成分

大多数农药有效成分可以被加工成悬浮剂使

用,但需要满足以下要求:(1)为保证农药有效成分在加工过程中不被熔化,其熔点应大于60°C;(2)在水中的溶解度低,室温下应低于100 mg/L;(3)在水中具有较好的化学稳定性<sup>[8]</sup>。

### 1.2 分散剂

分散剂是纳米悬浮剂的重要组成部分,它能防止悬浮体系的絮凝、膏化、析水。良好的分散剂应当能够吸附在颗粒表面,通过静电斥力和空间位阻增加体系稳定性,降低体系自由能,防止体系中的粒子聚集,抑制奥氏熟化,控制颗粒长大<sup>[9]</sup>。其本质是吸附力与脱附力的相互竞争<sup>[10]</sup>。

分散剂主要分为五大类:阴离子分散剂,如木质素磺酸盐类、烷基萘甲醛缩合物磺酸盐类;阳离子分散剂,其较少用于农药纳米悬浮剂配方中;非离子分散剂,如聚氧乙烯聚丙烯醚(EO-PO)嵌段共聚物;两性离子分散剂,其同时带有正、负电荷,引入电极化和长链聚合物分散2种因素;高分子分散剂,如聚羧酸盐类。理想的分散剂应满足以下基本条件:(1)分子结构中需同时具备亲水基团和亲油基团;(2)其亲油基团应能够有效吸附农药分子,并显著增强农药悬浮体系的分散稳定性;(3)对农药有效成分的生物活性无负面影响;(4)具有良好的环境相容性<sup>[11]</sup>。这些特性是确保分散剂在实际应用中发挥最佳性能的关键因素。

由4位科学家Derjaguin、Landau、Verwey和Overbeek提出的DLVO理论表明,带有相同电荷的微粒相互靠近时,由于静电斥力大于范德华力,彼此之间不易聚集沉降,可以保持悬浮体系的稳定性<sup>[12]</sup>。阴离子分散剂能够吸附于原药颗粒表面,使其带有负电荷,并在周围扩散形成双电层,主要通过静电斥力阻止颗粒间的聚集。阴离子分散剂中的典型代表是阿克苏诺贝尔公司生产的Morwet D-425,它是一种烷基萘磺酸甲醛缩聚物钠盐类分散剂,适应性良好,适用于多种原药,具有优异的分散性和悬浮性,且高温稳定性好,低泡,广泛应用于纳米悬浮剂的制备。非离子分散剂主要的作用方式是空间位阻,亲油基团吸附于颗粒表面,亲水基团伸入水中,在微粒表面形成具有一定厚度的吸附层,从而造成空间阻碍<sup>[10]</sup>。包裹了非离子分散剂的微粒彼此接近时,由于空间位阻会滑动错开,从而为悬浮体系提供良好的分散稳定性<sup>[13]</sup>。Pluronic PE10500分散剂为EO-PO嵌段聚合物非离子型低泡表面活性剂,在悬浮剂中使用此分散剂能够抑制粒径增长,提高冷、热储稳定性,不易受强电解质及酸碱的影响。相对

分子质量较大、分子链较长、由多个亲水亲油基团交替组成的聚合物分散剂,能够同时发挥静电斥力和空间位阻作用<sup>[10]</sup>。与聚合物相比,相同链长下的非离子分散剂通常具有更强的吸附能力<sup>[14]</sup>。

流点法是筛选纳米悬浮剂分散剂的常用方法之一。取一定质量( $m_0$ )已粉碎的原药于烧杯中,用滴管逐滴加入5%分散剂水溶液,边滴边搅拌,直至糊状物能够从玻璃棒上自由滴下,记录此时滴加入的分散剂水溶液质量( $m$ ), $m_0/m$ 即为该分散剂对此原药的流点。重复测定5次,取平均值<sup>[15]</sup>。一般认为,流点越小,该分散剂越适用于此原药。通常使用流点法对分散剂进行初步筛选,但其结果还要结合实际应用情况和纳米悬浮剂的配方组成进行调整。

### 1.3 润湿剂

润湿剂是一种能够降低固体表面张力,增强液体在固体表面润湿性、铺展性和渗透性的表面活性剂,其核心作用是促进固体被液体快速润湿。在农药悬浮剂中,润湿剂通过破坏固体颗粒表面的气膜或疏水层,使液体更好地渗透颗粒,从而加速颗粒的润湿与崩解,确保制剂在制备和使用过程中的稳定性与均匀性<sup>[16]</sup>。优良的润湿剂不仅能提升农药的田间喷洒效果,还能增强药液的覆盖性和滞留性,显著提高农药的有效利用率。只有当液体的表面张力低于叶片表面的临界表面张力时,液体才能在叶片表面实现良好的润湿与铺展;同时,只有当药液中表面活性剂的浓度超过其临界胶束浓度(CMC)时,雾滴才能被叶片迅速滞留并有效附着,从而减少药液流失,真正做到减施增效<sup>[17]</sup>。

### 1.4 防冻剂

纳米悬浮剂作为一种以水为分散介质的液体制剂,在低温环境中易出现结晶结块等现象,影响产品的稳定性,从而影响制剂的使用效果。因此,需要加入适量的防冻剂以提高纳米悬浮剂在低温储存、运输等过程中的稳定性。在纳米悬浮剂制备过程中使用的防冻剂应具备良好的防冻性能、低挥发性以及低成本等特性。常用的防冻剂有丙二醇、乙二醇、尿素等,添加量一般控制在5%~10%<sup>[18]</sup>。

### 1.5 增稠剂

增稠剂在悬浮剂中起着至关重要的作用,适度提升药液黏度不仅能够有效降低颗粒沉降速率,还能显著增强体系稳定性,防止析水分层现象的发生,从而确保产品在贮存和运输过程中的理化稳定性以及使用过程中具有良好的稀释性和流动性。理想的增稠剂需具备优异的悬浮能力,并与农药活性

成分具有良好的相容性和长期稳定性<sup>[7]</sup>。常用的增稠剂包括黄原胶、硅酸镁铝、羟乙基纤维素、膨润土、二氧化硅等。有研究表明,低浓度的黄原胶在水相中分散较少,易于吸附于颗粒表面形成网状薄膜层;较高浓度则会在水相中形成交联的螺旋网络结构,提高药液黏度<sup>[19]</sup>。

### 1.6 消泡剂

由于表面活性剂的添加,纳米悬浮剂在制剂加工及产品稀释时不可避免地产生泡沫。这些泡沫可能会降低悬浮剂生产效率,影响其田间使用和药效。因此,添加消泡剂成为纳米悬浮剂配方中不可或缺的一环<sup>[7]</sup>。

### 1.7 其他

纳米悬浮剂在制备过程中,除上述提到的主要助剂外,还需添加多种功能性助剂以优化制剂性能。例如,防腐剂可防止微生物滋生,延长制剂的储存期限;pH调节剂用于维持体系的酸碱稳定性,确保农药活性成分的化学稳定性;稳定剂则能够抑制纳米颗粒的团聚,提高制剂的物理稳定性,并且起到阻止或减缓有效成分分解的目的<sup>[16]</sup>。这些助剂的协同作用不仅能够提升纳米悬浮剂的整体性能,还能增强其在实际应用中的效果。

## 2 农药纳米悬浮剂的制备方法

助剂体系的选择与优化是纳米悬浮剂配方设计的关键环节,其组成及配比直接决定了纳米悬浮剂的分散性和稳定性。其中,表面活性剂的种类、用量以及分子结构等参数都会显著影响纳米悬浮剂的性能。与此同时,制备工艺也是决定其质量的重要因素,不同的制备方法会导致纳米悬浮剂在粒径分布、表面特性及稳定性等方面产生显著差异。

目前,常用的纳米悬浮剂制备工艺主要有自上而下法和自下而上法2种。自上而下(top-down)法是一种通过机械力作用将农药原药颗粒破碎至纳米尺度的加工工艺,主要包括介质研磨法、高压均质法等。这种方法通过施加高强度机械力,使大颗粒农药逐步细化,最终获得粒径分布均匀的纳米级农药颗粒。自下而上(bottom-up)法是一种通过分子或原子组装构建纳米颗粒的制备技术。该方法首先将农药有效成分溶解于适当溶剂中,随后将其添加到非溶剂中诱导纳米颗粒形成。其主要包括超临界流体法、沉淀法、热熔凝聚法等<sup>[20-23]</sup>。

### 2.1 介质研磨法

介质研磨法是一种高效制备纳米悬浮剂的方

法,将原药、分散介质、分散剂、润湿剂、防冻剂、增稠剂、消泡剂等物料按照配方混合均匀后,转移至研磨设备中,加入一定量的研磨介质(如锆珠),通过调整研磨设备的转速和时间,制备出一定尺寸范围( $<300\text{ nm}$ )的纳米悬浮液。待研磨完成后,通过筛分分离研磨介质与悬浮液。根据原药性质及配方组成,可以适当添加氢氧化钠、柠檬酸等pH调节剂以优化纳米悬浮剂的稳定性。

介质研磨法根据工艺条件可分为干法研磨和湿法研磨2种形式。两者的主要区别在于湿法研磨需要在研磨罐中添加水作为分散介质,而干法研磨则无需添加液体介质,通常湿法研磨具有更优的研磨效果。此外,研磨时间是影响纳米悬浮剂粒径及其分布的关键因素,研磨时间过短或过长均不利于纳米悬浮剂的制备。具体而言,过短的研磨时间无法提供足够的机械能以实现大颗粒的有效破碎,从而导致粒径分布不均匀;而过度研磨则会因机械能过量输入产生大量热量,引发颗粒间的热聚集现象,进而影响纳米悬浮剂的稳定性<sup>[24]</sup>。因此,优化研磨时间对于获得粒径均一、稳定性良好的纳米悬浮剂具有重要意义。

## 2.2 高压均质法

高压均质法是通过高压流体力学原理实现农药纳米化的技术,利用柱塞泵加压使物料高速通过均质阀狭缝,在剪切、撞击和空化效应的协同作用下将原药颗粒粉碎至纳米级。这种制备方法具有操作简便、粒度分布窄等优势,适用于多种难溶性药物,但设备易于磨损,且对高浓度、高黏度物料的处理能力有限<sup>[22,25]</sup>。

## 2.3 超临界流体法

超临界流体法因其较好的环保性,已被用于纳米农药的研发中。超临界流体法主要分为两类:第一类为超临界反溶剂法,将原药溶解于有机溶剂后注入超临界流体(如 $\text{CO}_2$ ),原药不溶于超临界流体,通过超临界流体对溶剂的快速萃取,使溶质沉淀析出形成纳米悬浮剂。第二类为超临界溶液快速膨胀法,原药溶于超临界流体中,将溶液通过细小喷嘴快速膨胀,压力减小使溶液过饱和,析出形成纳米悬浮剂<sup>[20]</sup>。

## 2.4 控制沉淀法

控制沉淀法通过将农药溶液滴加至反溶剂(如水)中,利用药物过饱和析出结晶,通过调控成核与生长速率(如优化温度)形成纳米粒子<sup>[26]</sup>。快速混合可促使药物瞬间过饱和,生成超细结晶或无定形固

体,且高成核速率与低生长速率的平衡是制备稳定纳米悬浮剂的关键<sup>[27]</sup>。

## 2.5 热熔凝聚法

热熔凝聚法,又称为熔融凝聚法、熔融分散法。定义为当熔融状态下的原药和助剂的混合物遇到高速搅拌下的较冷液体(水)时,便会形成晶体微粒分散于该液体中,冷却至室温后,补加其他物料,就能够得到悬浮剂。热熔凝聚法具有工艺简单、耗能低、贮存性能稳定等优点,但其所需助剂用量高,因此原料成本较高<sup>[23]</sup>。此方法适用于水溶性低的农药,可以使粒径从 $5\text{ }\mu\text{m}$ 减小至 $1\text{ }\mu\text{m}$ <sup>[28]</sup>。

# 3 农药纳米悬浮剂的表征

## 3.1 粒径及粒度分布

粒径和粒度分布是评估水基配方稳定性的关键指标。多分散指数(polydispersity index, PDI)是衡量粒度分布均匀性的重要参数。PDI值低于0.3,表明体系具有较窄的粒度分布,且PDI值越小,体系的均匀性越高<sup>[24]</sup>。动态光散射(dynamic light scattering, DLS),也称光子相关光谱(photon correlation spectroscopy, PCS)、准弹性光散射(quasi-elastic scattering, QELS),是最常用的粒径及粒度分布的检测方法。其是通过检测颗粒布朗运动引起的散射光强波动,并基于斯托克斯-爱因斯坦方程计算粒度分布的测试技术,得到的结果为颗粒的流体力学等效直径。该方法具有测试快速、操作简便、重复性高等优势。此外,透射电子显微镜(transmission electron microscopy, TEM)和扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)能直观呈现颗粒形貌、实际尺寸及团聚状态,也是表征纳米悬浮剂粒径的关键技术。

## 3.2 形貌及结晶状态

纳米悬浮剂的颗粒形貌(如球形、棒状或不规则形状)直接影响其靶向沉积和吸收转运性能,是制剂研发的关键参数。SEM作为最常用的表征手段,可直观呈现颗粒的表面形貌特征,而TEM则能提供更高分辨率的内部结构信息<sup>[29]</sup>。值得注意的是,在纳米悬浮剂制备过程中常会形成无定形药物颗粒,这可能会影响制剂的稳定性和药效。X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析可以准确测定药物颗粒的结晶状态变化,为优化纳米悬浮剂的制备工艺和性能评价提供了重要依据<sup>[21]</sup>。

## 3.3 表面电荷

表面电荷是评估纳米农药长期稳定性的基本

参数。zeta电位绝对值大于30 mV表明系统稳定<sup>[30-31]</sup>。在低zeta电位体系中,颗粒间的静电斥力显著降低。当颗粒间距缩小至一定范围内时,范德华力占主导地位,从而诱发颗粒发生团聚,最终导致体系出现沉淀或上浮等不稳定行为。

#### 4 农药纳米悬浮剂的发展现状与应用

传统制剂常使用有机溶剂,易挥发,不仅对环境造成污染,还对人体健康构成潜在危害。因此,推动低毒、低污染的水基化制剂的发展成为行业的重要趋势。以悬浮剂为代表的水基化剂型因其环保性和高效性,逐渐受到广泛关注并走向市场<sup>[32]</sup>。数据显示,2003年在我国登记的各类剂型制剂中,悬浮剂产品占比为4.89%<sup>[33]</sup>;而到2024年,悬浮剂产品的登记数量显著上升,占比达到17.88%<sup>[34]</sup>。这一增长趋势表明,悬浮剂作为一种环保型剂型,在农药制剂领域中的应用正逐步扩大。

##### 4.1 杀虫剂

传统杀虫剂在实际应用中普遍存在持效期短、残留量高,以及对非靶标生物安全性较低等问题<sup>[35]</sup>。研究表明,若不使用杀虫剂,谷物、蔬菜和水果的产量将分别下降32%、54%和78%,这充分说明了杀虫剂在保障农作物产量方面的重要性<sup>[36]</sup>。纳米悬浮剂的应用为解决上述问题提供了新途径,其以水为分散介质可降低环境污染风险,同时纳米级尺寸特性能够增强对靶标生物的渗透性,从而有效减少施药

剂量。

李杰等<sup>[37]</sup>通过系统筛选不同助剂的种类及用量,基于研磨效率和储存稳定性进行优化,成功开发了20%氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂。其配方组成:氯虫苯甲酰胺原药(20%)、分散剂SY-131421Y-60(12%)、硅酸镁铝(2%)、白炭黑(0.5%)、黄原胶(0.1%)、丙三醇(4%)、消泡剂SXP-880(0.1%)、卡松(0.2%),水补足至100%。该配方各项性能指标均符合纳米悬浮剂的检测标准。生物活性测试显示,与常规20%氯虫苯甲酰胺悬浮剂相比,该纳米制剂对小菜蛾的防治效果显著提升,药后14 d的防效提高了25%,展现出优异的生物活性。Ding等<sup>[24]</sup>通过优化制备工艺,在表面活性剂与农药质量比为1:2的条件下,经过2 h的研磨,成功制备了平均粒径为56 nm的氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂(图1)。该纳米悬浮剂表现出优异的物理稳定性,并显著提高了在水稻叶片上的沉积性能。由于其较小的纳米级尺寸,氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂能够更有效地嵌入水稻叶片的微纳结构中,其叶片持留率较常规悬浮剂提高了55.9%。在田间药效试验中,有效成分用量为18 g/hm<sup>2</sup>的纳米悬浮剂与30 g/hm<sup>2</sup>的常规悬浮剂对稻纵卷叶螟的防治效果无显著差异,表明纳米悬浮剂在降低用药剂量的同时仍能保持较高的防治效果。此外,与常规悬浮剂处理相比,纳米悬浮剂处理的水稻中钙、镁、铁、锌和钾等营养元素的含量均有所提升,并且对斑马鱼具有较高的安全性。

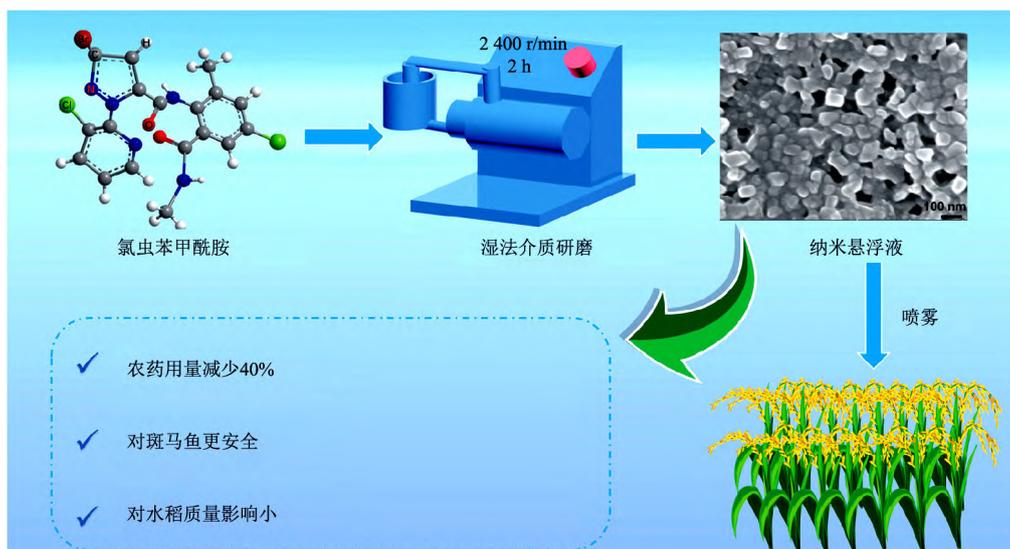


图1 氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂的制备及实际应用效果示意图<sup>[24]</sup>

此外,采用多级湿法研磨工艺可有效降低悬浮剂粒度分布,使粒度分布更加均匀。张小兵等<sup>[38]</sup>通过优化两级湿法研磨工艺,成功制备了100 g/L螺虫乙

酯纳米悬浮剂。试验结果表明,该纳米制剂表现出优异的物理稳定性,在常温(25±2)℃、低温(0±2)℃和高温(54±2)℃储存条件下,有效成分均无

明显分解,悬浮率始终维持在98.5%以上,且 $D_{90}$ 稳定控制在200 nm以下。田间施药14 d后,该纳米悬浮剂对烟粉虱若虫的防治效果在77.8%以上,其中有效成分用量 $135 \text{ g/hm}^2$ 处理组的防效高达90.9%,显著高于同剂量常规悬浮剂。

近年来,植物源生物农药因其环境友好特性备受关注。Iqbal等<sup>[39]</sup>以辣木提取物为活性成分,聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为稳定剂,成功制备了平均粒径为241.9 nm的纳米生物农药。该纳米悬浮剂

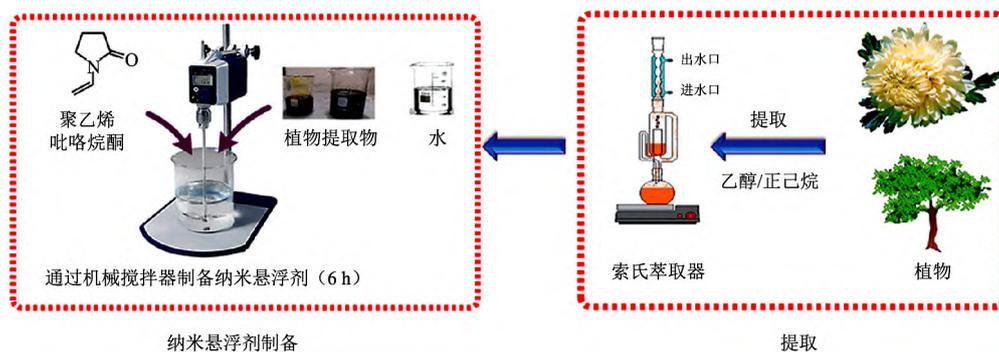


图2 植物源纳米悬浮剂的制备示意图<sup>[40]</sup>

## 4.2 杀菌剂

传统杀菌剂由于存在剂量传递效率低下的问题,导致活性成分在植物体内的利用率显著降低,这不仅降低了防治效果,更可能诱发病原菌抗药性的产生<sup>[41]</sup>。传统农药制剂普遍面临稳定性不足、水分散性差等技术瓶颈,使得有效成分利用率偏低,客观上加速了抗药性发展进程<sup>[42]</sup>。通过纳米制备工艺可有效提升农药活性成分的溶解性能,同时显著改善其在水相介质中的稳定性和分散性,提高农药利用效率,延缓抗药性发展<sup>[43-44]</sup>。

Xu等<sup>[45]</sup>采用金属配位自组装策略成功研制了丙硫菌唑铜盐配合物,通过工艺优化制备了表面活性剂调控的金属配合物纳米悬浮剂。试验结果表明,添加0.5%~1%的阴离子表面活性剂可有效调控纳米复合物的粒径,使其稳定在100 nm以内。该纳米悬浮剂对多种植物病原真菌表现出显著的抑菌活性,同时显著降低了对非靶标生物斑马鱼的急性毒性,体现出良好的环境相容性。此外,由于其较小的粒径,该纳米悬浮剂显著促进了丙硫菌唑在小麦植株中的吸收与转运,为纳米农药的高效制备及规模化应用提供了新的技术路径。

Jahan等<sup>[46]</sup>采用溶剂/反溶剂沉淀法,在胡椒薄荷提取物用量1%、稳定剂十二烷基硫酸钠用量0.2%的条件下,成功制备了平均粒径为259 nm的胡椒薄荷纳米生物农药。与粗提物相比,该纳米悬浮液凭借

对仓储害虫赤拟谷盗(*Tribolium castaneum*)和谷蠹(*Rhyzopertha dominica*)表现出较高的杀虫活性,72 h死亡率分别达到83.00%和92.48%,展现出替代传统化学农药的应用潜力。同样以PVP作为稳定剂,通过反溶剂沉淀法成功制备了2种植物源纳米生物农药制剂——茼蒿(*Chrysanthemum coronarium*)和印楝(*Azadirachta indica*)纳米悬浮剂(图2)。在100 mg/L质量浓度下,2种纳米悬浮剂对谷蠹和赤拟谷盗均表现出100%的致死率<sup>[40]</sup>。

其尺寸优势(减小粒径、增大比表面积),显著提升了与靶标生物的接触效率,从而表现出更强的抗(真)菌及杀虫活性。其中,该纳米制剂对丁香假单胞菌(*Pseudomonas syringae*)的抑菌效果显著优于粗提物,抑菌圈直径从13.90 mm提升至16.18 mm,增幅达16.4%,进一步验证了纳米化策略在增强生物农药效能方面的潜力。

采用多活性组分复配的纳米悬浮体系可协同增强其生物活性,显著提升农药的利用效率<sup>[42]</sup>。解维星等<sup>[47]</sup>采用湿法介质研磨技术成功制备了40%联苯吡菌胺·啞菌酯纳米悬浮剂。该制剂的优化配方组成为:联苯吡菌胺(15%)、啞菌酯(25%)、分散剂FS3000(12%)、分散剂4913(4%)、润湿剂3475(1%)、防冻剂乙二醇(4%)、增稠剂黄原胶(0.1%)、增稠剂硅酸镁铝(0.6%)、消泡剂0050(0.5%)、防腐剂AQ(0.3%),余量为去离子水。田间药效试验结果表明,该纳米制剂对丝瓜白粉病的防治效果显著,施药后14 d的防治效果达到92.3%,较常规非纳米悬浮剂(62.8%)的防效提升了29.5%。

Zhu等<sup>[48]</sup>通过瞬时纳米沉淀法(flash nanoprecipitation, FNP)成功制备了粒径为84 nm的纳米悬浮剂(图3),并系统评估了其在樱桃种子、樱桃及番茄保鲜试验中的抗真菌效果,同时采用PDA培养基对瓜亡革菌(*Thanatephorus cucumeris*)进行了离体抑菌试验。研究表明,相较于传统滴加搅拌法(粒

径 $>200$  nm,  $ED_{50}$ 为688 mg/L)和市售悬浮剂(粒径173 nm,  $ED_{50}$ 为560 mg/L), FNP法制备的纳米悬浮剂( $ED_{50}$ 为354 mg/L)展现出显著的抗真菌优势, 其半数有效剂量分别降低了48.5%和36.8%。这一现象归因于纳米农药的尺寸效应, 较小的粒径、较好的润湿能力, 能够显著提升生物利用度和抗真菌活性。

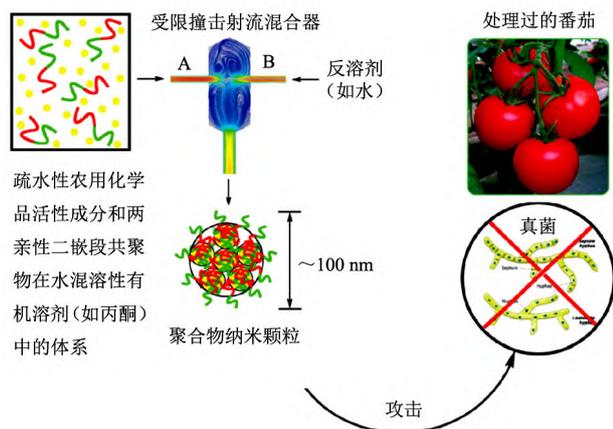


图3 瞬时纳米沉淀法制备纳米悬浮剂示意图<sup>[48]</sup>

### 4.3 除草剂

当前除草剂在杂草防控应用中面临环境风险和非靶标植物毒性等关键问题<sup>[49]</sup>; 而纳米制剂能够有效改善农药的界面润湿性、叶面沉积特性及环境行为。文献调研发现, 纳米制剂的典型代表——纳米悬浮剂的研究主要集中于杀虫剂和杀菌剂的性能评价与生物活性测定, 而针对除草剂纳米悬浮剂的研究相对匮乏, 这一研究缺口在一定程度上制约了绿色农业的可持续发展。通过以下典型事例说明将除草剂制备成纳米悬浮剂的应用前景与优势, 以期推动该领域的深入研究, 弥补现有技术空白, 以充分挖掘纳米悬浮剂的应用潜力。

Cheng等<sup>[50]</sup>采用湿法介质研磨技术成功制备了二氯喹啉酸纳米悬浮剂(图4), 并对其配方进行了优化。优化后的配方组成为: 二氯喹啉酸原药(5.15%)、分散剂GY1200(脂肪链-聚醚嵌段共聚物, 3%)、润湿剂Emulan LVS(脂肪醇聚醚类非离子表面活性剂, 1.5%)、防冻剂丙二醇(5%)、增稠剂黄原胶(0.2%)、消泡剂SAG 1572(有机硅类, 0.1%), 余量用水补足。试验结果表明, 该纳米悬浮剂具有优异的稳定性、润湿性和沉积性能。值得注意的是, 在仅使用常规剂量一半的条件下, 其除草活性显著优于传统制剂, 且未降低对水稻的安全性, 展现了良好的应用潜力。



图4 二氯喹啉酸纳米悬浮剂的制备示意图<sup>[50]</sup>

随着纳米技术的快速发展, 越来越多的科研人员致力于纳米悬浮剂的制备工艺优化和性能提升研究, 一些粒径范围在200~800 nm的纳米悬浮剂产品已成功实现商业化应用。这些纳米悬浮剂凭借其优异的稳定性、生物活性和环保性, 在农药领域展现出广阔的市场前景, 但仍需进一步优化生产工艺以降低成本, 提升规模化生产能力。水基化纳米悬浮剂作为一种环境友好型制剂, 其推广应用将大幅减少传统剂型中有机溶剂的使用量, 对环境保护和农业可持续发展具有重要意义。

表1列举了部分纳米悬浮剂在农药领域中的应用实例。

表1 纳米悬浮剂在农药领域中的应用实例

类型	活性成分	制备方法	平均粒径/nm	形貌	生物活性	参考文献
杀虫剂	氯虫苯甲酰胺	湿法介质研磨	563.0 (DLS, $D_{90}$ )		对小菜蛾的防效相较于常规悬浮剂提高25%	[37]
	氯虫苯甲酰胺	湿法介质研磨	161.9 (DLS)、56.0 (SEM)	块状	18 g/hm <sup>2</sup> (有效成分用量, 下同) 纳米悬浮剂与30 g/hm <sup>2</sup> 常规悬浮剂对稻纵卷叶螟的防治效果相当	[24]
	氯虫苯甲酰胺	湿法介质研磨	163.7 (DLS)		对玉米螟 $LC_{50}$ 约为市售悬浮剂的3/5	[51]
	螺虫乙酯	湿法介质研磨	$<200$ (DLS, $D_{90}$ )		100.8 g/hm <sup>2</sup> 纳米悬浮剂与135.0 g/hm <sup>2</sup> 常规悬浮剂对烟粉虱的防效相当	[38]
	辣木提取物	反溶剂沉淀法	241.9 (DLS)		纳米悬浮剂对赤拟谷盗和谷蠹72 h死亡率分别为83.00%和92.48%; 辣木提取物分别为79.30%和81.15%	[39]
	茛蒿、印楝提取物	反溶剂沉淀法	121.1、170.1 (DLS)		对赤拟谷盗和谷蠹的最高死亡率达到100%	[40]
	阿维菌素	湿法介质研磨	223.0 (DLS)、90.0 (SEM)、140.0 (TEM)	球形或椭球形	对小菜蛾的生物活性约为常规制剂的2倍	[52]
	高效氯氟氰菊酯	熔融乳化-高压均质法	16.0 (DLS)、57.1 (SEM)	类球形		[53]

(续表1)

类型	活性成分	制备方法	平均粒径/nm	形貌	生物活性	参考文献
杀虫剂	高效氯氟氰菊酯	熔融乳化法	12.0(DLS)、11.2(SEM)、12.5(TEM)	球形	对萝卜蚜的LC <sub>50</sub> 约为市售制剂的1/2	[54]
	高效氯氟氰菊酯	瞬时纳米沉淀法	150.0(DLS)	球形	对花生蚜表现出与市售水乳剂和微乳剂相同的毒性水平	[55]
杀菌剂	丙硫菌唑	微乳液反应法	60.0(SEM)	球形	对6种植物病原菌有显著防效,其EC <sub>50</sub> 降至原药的17.2%~41.7%	[45]
	胡椒薄荷提取物	溶剂/反溶剂沉淀法	259.0(DLS)		对丁香假单胞菌的抑菌圈为16.18 mm,高于粗提取物(13.90 mm)	[46]
	联苯吡菌胺·嘧菌酯	湿法介质研磨	397.0(DLS, D <sub>90</sub> )		对丝瓜白粉病的防效相较于常规悬浮剂提升了29.5%	[47]
	嘧菌酯	瞬时纳米沉淀法	84.0(DLS)	球形	对瓜亡革菌的ED <sub>50</sub> 较市售悬浮剂降低了36.8%	[48]
	吡唑醚菌酯	湿法介质研磨	215.0(DLS, D <sub>90</sub> )	球形	对菜心霜霉病的防效相较于微米悬浮剂提高了30%	[56]
除草剂	二氯喹啉酸	湿法介质研磨	约为250.0		175 g/hm <sup>2</sup> 纳米悬浮剂对稗草的防效优于375 g/hm <sup>2</sup> 的常规悬浮剂	[50]

## 5 总结与展望

水基型纳米农药制剂通过与环境友好的纳米材料结合,显著提升了农药的表观溶解度、叶片黏附性、持留性和生物利用度,同时实现了可控释放和精准靶向递送<sup>[57]</sup>。纳米颗粒的小尺寸和高表面活性不仅大幅提高了农药与靶标生物接触的概率,还减少了施药量,最大限度地减轻了对环境的污染<sup>[58]</sup>。纳米悬浮剂的快速发展凸显了其在可持续农业发展中的应用前景,但同时也暴露出一些亟待解决的关键问题。

(1) 稳定性较差:农药悬浮剂作为一种亚稳体系,其物理稳定性较差,在贮存过程中易出现絮凝、析水、农药有效成分难以从包装物中倒出等现象,严重阻碍了悬浮剂的发展<sup>[59-60]</sup>。

(2) 制备成本高:纳米悬浮剂因其能够减少或避免有机溶剂的使用而备受行业青睐,但其产业化发展仍面临生产成本低、设备昂贵、工艺复杂等挑战,限制了其大规模的推广应用<sup>[4]</sup>。

(3) 缺乏风险评估:尽管纳米农药可通过降低施用剂量减少环境污染,但其可能会通过提高活性成分的生物利用度、改变作用机制等方式增加潜在的健康风险。因此,在纳米农药广泛应用之前,进行全面的风险评估是保障环境安全和人类健康的关键<sup>[61-62]</sup>。此外,必须承认的是,由于公众对纳米技术的认知不足,对于纳米农药的安全性和有效性存在疑虑,可能影响纳米悬浮剂的市场推广。

(4) 实验室研究的局限性:目前关于纳米悬浮剂的研究主要集中于实验室条件下的性能评估,而田间自然环境下的应用效果研究相对不足。实验室

环境通常无法完全模拟田间复杂的应用场景,如温度、湿度、光照、土壤类型等因素的交互影响。田间试验能够更真实地反映纳米悬浮剂因小尺度效应带来的性能提升,以及实际生物活性、环境残留风险等。因此,未来的研究应更加注重田间试验的设计与实施,开发以实际应用场景为导向的纳米悬浮剂配方,并全面评估纳米悬浮剂在实际应用中的性能和潜在风险。

(5) 缺乏机制探究:当前纳米悬浮剂研究主要集中于制剂开发与性能表征,而对其作用机制的系统研究明显欠缺,特别是在植物体内吸收、转运及分布的定量分析方面仍存在显著的知识空白。未来研究应利用荧光标记、同位素标记等示踪技术,深入探究纳米悬浮剂在靶标与非靶标生物中的长期环境行为及其分子作用机制。

综上所述,农药纳米悬浮剂在减少环境污染、增强生物活性等方面具有显著优势,但其较差的稳定性、较高的成本以及缺乏风险评估等挑战有待进一步研究和解决。随着科研工作的持续推进,农药纳米悬浮剂在制剂领域的应用前景将更加广阔,为实现农业生产和环境保护协同发展提供技术支撑。

### 参考文献

- [1] 熊秋雨,章浩楠,于斌,等.基于农药应用场景的纳米材料研究进展[J].现代农药,2024,23(5):17-23;31.
- [2] LOWRY G V, AVELLAN A, GILBERTSON L M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution[J]. Nature Nanotechnology, 2019, 14(6): 517-522.
- [3] 曹立冬,赵鹏跃,曹冲,等.纳米农药的研究进展及发展趋势[J].现代农药,2023,22(2):1-10.
- [4] 秦敦忠,李杰,刘变娥.面向纳米农药粒径调控的表面活性剂研究进展[J].农药,2024,63(4):235-242.
- [5] 张文博,潘兴鲁,吴小虎,等.纳米农药风险评价研究进展[J].现

- 代农药, 2023, 22(2): 36-39; 44.
- [6] 王旭, 朱晨江, 张一恒, 等. 16%甲维盐· 啉虫威悬浮剂稳定增效配方的研制[J]. 现代农药, 2022, 21(6): 28-35.
- [7] 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.
- [8] 熊振华, 王顺利, 夏红英. 简述农药悬浮剂的概况[J]. 江西科技师范大学学报, 2013(6): 71-76.
- [9] 李慧, 路福绥, 王祐英, 等. 莠灭净悬浮剂物理稳定性[J]. 应用化学, 2012, 29(3): 327-331.
- [10] 张小军, 刘广文. 农药助剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [11] 张国生. 农药水分散剂与悬浮剂的配方技术及其应用[J]. 世界农药, 2009, 31(2): 37-45.
- [12] GIGLIOBIANCO M R, CASADIDIO C, CENSI R, et al. Nanocrystals of poorly soluble drugs: drug bioavailability and physicochemical stability[J]. *Pharmaceutics*, 2018, 10(3): 134.
- [13] 胡帅, 上官文杰, 程雪健, 等. 农药可分散油悬浮剂的制备、发展现状及展望[J]. 农药学报, 2023, 25(3): 537-550.
- [14] 刘晓雪, 龚俊波, 魏振平. 纳米晶体技术及其提升水难溶药物药理学功效的研究进展[J]. 药学学报, 2021, 56(12): 3431-3440.
- [15] 黄啟良, 李风敏, 袁会珠, 等. 悬浮剂润湿分散剂选择方法研究[J]. 农药学报, 2001, 3(3): 66-70.
- [16] 陈福良. 农药新剂型加工与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [17] 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.
- [18] 李杨军, 安欣. 农药悬浮剂的配方组成[J]. 农家参谋, 2019(1): 18.
- [19] ZHANG S, BAO Z, WU Y, et al. Enhancing the stability and effectivity of multiple pesticide formulation mixtures by adding an eco-friendly adjuvant[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(42): 15385-15396.
- [20] LAKSHMI P, KUMAR G A. Nanosuspension technology: a review [J]. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 2010, 2(4): 35-40.
- [21] PATEL V R, AGRAWAL Y K. Nanosuspension: an approach to enhance solubility of drugs[J]. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2011, 2(2): 81-87.
- [22] 潘振中, 崔博, 崔海信, 等. 农药纳米混悬剂及其制备方法探析[J]. 农药学报, 2014, 16(6): 635-643.
- [23] 孔宪滨, 徐妍, 郭嘉, 等. 热熔凝聚法加工农药悬浮剂研究[J]. 农药, 2004, 43(12): 539-541.
- [24] DING X Q, GUO L, DU Q, et al. Preparation and comprehensive evaluation of the efficacy and safety of chlorantraniliprole nanosuspension[J]. *Toxics*, 2024, 12(1): 78.
- [25] 宋扬, 王晶珂, 彭冲. 药物纳米混悬剂制备研究进展[J]. 河北化工, 2013, 36(2): 13-16.
- [26] 潘振中. 高效氯氟氰菊酯纳米混悬剂的制备研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [27] SUTRADHAR K B, KHATUN S, LUNA I P. Increasing possibilities of nanosuspension[J]. *Journal of Nanotechnology*, 2013, 2013(1): 346581.
- [28] KOSTANSEK E C, KOSTANSEK, MATHIS W D. A method to produce pesticide suspension concentrates: Au, 20000037939 [P]. 2005-01-13.
- [29] LIN P C, LIN S, WANG P C, et al. Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials [J]. *Biotechnology Advances*, 2014, 32(4): 711-726.
- [30] DING X, GAO F, CHEN L, et al. Size-dependent effect on foliar utilization and biocontrol efficacy of emamectin benzoate delivery systems[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(17): 22558-22570.
- [31] ZHANG D, GUO X, RAO W, et al. A multi-stimuli-response metal-organic framework nanopesticide for smart weed control in agriculture[J]. *Environmental Science: Nano*, 2025, 12(1): 608-622.
- [32] IQBAL N, THIRUNAVUKKARASU S, KRISHNA R, et al. Environmentally benign design of renewable oleoresin-bioenergized imidacloprid nanohydrocolloids for improved activity, lower toxicity, and agroecological sustainability [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(42): 15480-15491.
- [33] 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.
- [34] 程雪健, 丁程瀛, 冉刚超, 等. 农药剂型的过去、现在与发展趋势 [J]. 现代农药, 2024, 23(5): 1-6.
- [35] 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.
- [36] 冯勃媛. 农药纳米微囊和光响应缓控释剂型的制备及评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [37] 李杰, 秦敦忠, 刘变娥, 等. 20%氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂粒径优化与特性研究[J]. 农药, 2025, 64(3): 174-181.
- [38] 张小兵, 王建伟, 王伟昌, 等. 100 g/L螺虫乙酯纳米悬浮剂的配方研制及其药效评价[J]. 世界农药, 2023, 45(9): 36-40.
- [39] IQBAL H, JAHAN N, ALI S, et al. Formulation of *Moringa oleifera* nanobiopesticides and their evaluation against *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica* [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2023, 131(1): 133-142.
- [40] HAZAFA A, JAHAN N, ZIA M A, et al. Evaluation and optimization of nanosuspensions of *Chrysanthemum coronarium* and *Azadirachta indica* using response surface methodology for pest management [J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133411.
- [41] ZHANG Q, SHI X, GAO T, et al. Precision management of *Fusarium fujikuroi* in rice through seed coating with an enhanced nanopesticide using a tannic acid-Zn<sup>II</sup> formulation [J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2024, 22(1): 717.
- [42] PEI H, WANG M, YANG T, et al. A hybrid of bimodal mesoporous silica and metal organic framework for intelligent co-delivery of dual-pesticide for synergistic controlling fungal disease and insect pest [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, 709: 136140.
- [43] LIANG B, LU S, HU J, et al. Green nanopesticide: pH response and molybdenum selenide carrier with photothermal effect to transport prochloraz to inhibit *Sclerotinia* disease [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(13): 15931-15945.
- [44] TONG X, TANG J, WANG J, et al. Engineered biodegradable nanopesticides for efficient leaf deposition and plant fungicides [J]. *AIChE Journal*, 2024, 70(6): e18414.
- [45] XU C, CAO L, CHEN H, et al. Copper-driven formation of prothioconazole nanocomplex: an innovative strategy to prepare nanopesticide with improved bioactivity and reduced environ-

(下转第 43 页)

- cell-penetrating peptides for intracellular delivery of siRNA [J]. *Drug Delivery*, 2018, 25(1): 1996-2006.
- [119] VARKOUHI A K, SCHOLTE M, STORM G, et al. Endosomal escape pathways for delivery of biologicals[J]. *Journal of Controlled Release*, 2011, 151(3): 220-228.
- [120] GILLERON J, QUERBES W, ZEIGERER A, et al. Image-based analysis of lipid nanoparticle-mediated siRNA delivery, intracellular trafficking and endosomal escape[J]. *Nature Biotechnology*, 2013, 31(7): 638-646.
- [121] YEZHELYEV M V, QI L, O'REGAN R M, et al. Proton-sponge coated quantum dots for siRNA delivery and intracellular imaging [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(28): 9006-9012.
- [122] TSENG Y C, MOZUMDAR S, HUANG L. Lipid-based systemic delivery of siRNA[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2009, 61(9): 721-731.
- [123] XU Y H, SZOKA F C. Mechanism of DNA release from cationic liposome/DNA complexes used in cell transfection[J]. *Biochemistry*, 1996, 35(18): 5616-5623.
- [124] ZELPHATI O, SZOKA JR F C. Mechanism of oligonucleotide release from cationic liposomes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1996, 93(21): 11493-11498.
- [125] KWON Y J. Before and after endosomal escape: roles of stimuli-converting siRNA/polymer interactions in determining gene silencing efficiency[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2012, 45(7): 1077-1088.
- [126] MORET I, PERIS J E, GUILLEM V M, et al. Stability of PEI-DNA and DOTAP-DNA complexes: effect of alkaline pH, heparin and serum [J]. *Journal of Controlled Release*, 2001, 76(1/2): 169-181.
- [127] LYNN D M, LANGER R. Degradable poly ( $\beta$ -amino esters): synthesis, characterization, and self-assembly with plasmid DNA [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, 122(44): 10761-10768.
- [128] TZENG S Y, GREEN J J. Subtle changes to polymer structure and degradation mechanism enable highly effective nanoparticles for siRNA and DNA delivery to human brain cancer[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2013, 2(3): 468-480.
- [129] UMA G S, SAAKRE M, SINGH J, et al. Double-stranded RNA mediated knockdown of sucrose gene induced mortality and reduced offspring production in *Aphis gossypii*[J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2023, 23(4): 305.
- [130] MA Z Z, ZHOU H, WEI Y L, et al. A novel plasmid-*Escherichia coli* system produces large batch dsRNAs for insect gene silencing [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76(7): 2505-2512.
- [131] YAN S, LI N, GUO Y K, et al. Chronic exposure to the star polycation (SPc) nanocarrier in the larval stage adversely impairs life history traits in *Drosophila melanogaster*[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, 20(1): 515.

(编辑:顾林玲)

(上接第9页)

- mental impacts[J]. *Small*, 2024, 20(52): 2406419.
- [46] JAHAN N, HUSSAIN N, TOUQEER S I, et al. Formulation of mentha piperita-based nanobiopesticides and assessment of the pesticidal and antimicrobial potential[J]. *Life*, 2024, 14(1): 144.
- [47] 解维星, 谢勇, 王同波, 等. 40%联苯吡菌胺·啉菌酯纳米悬浮剂的研制[J]. *农药科学与管理*, 2024, 45(9): 37-41.
- [48] ZHU Z, SHAO C, GUO Y, et al. Facile pathway to generate agrochemical nanosuspensions integrating super-high load, eco-friendly excipients, intensified preparation process, and enhanced potency[J]. *Nano Research*, 2021, 14(7): 2179-2187.
- [49] TAKESHITA V, OLIVEIRA F F, GARCIA A, et al. Delivering metribuzin from biodegradable nanocarriers: assessing herbicidal effects for soybean plant protection and weed control[J]. *Environmental Science: Nano*, 2025, 12(1): 388-404.
- [50] CHENG X, WANG A, CAO L, et al. Efficient delivery of the herbicide quinclorac by nanosuspension for enhancing deposition, uptake and herbicidal activity[J]. *Pest Management Science*, 2024, 80(9): 4665-4674.
- [51] 王帅, 张信楠, 苏雨桐, 等. 20%氯虫苯甲酰胺纳米悬浮剂的制备及对玉米螟的防治效果[J]. *农药学报*, 2025, 27(2): 358-364.
- [52] CUI B, LV Y, GAO F, et al. Improving abamectin bioavailability via nanosuspension constructed by wet milling technique[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(10): 2756-2764.
- [53] PAN Z, CUI B, ZENG Z, et al. *Lambda*-cyhalothrin nanosuspension prepared by the melt emulsification-high pressure homogenization method[J]. *Journal of Nanomaterials*, 2015(1): 123496.
- [54] WANG C, CUI B, GUO L, et al. Fabrication and evaluation of *lambda*-cyhalothrin nanosuspension by one-step melt emulsification technique[J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(2): 145.
- [55] CHEN K, FU Z, WANG M, et al. Preparation and characterization of size-controlled nanoparticles for high-loading  $\lambda$ -cyhalothrin delivery through flash nanoprecipitation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(31): 8246-8252.
- [56] 孙宇. 木质素分散剂及纳米微球在农药纳米水悬浮剂中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [57] DONG J, LIU X, CHEN Y, et al. User-safe and efficient chitosan-gated porous carbon nanopesticides and nanoherbicides [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 594: 20-34.
- [58] PARADVA K C, KALLA S. Nanopesticides: a review on current research and future perspective[J]. *Chemistry Select*, 2023, 8(26): e202300756.
- [59] 张源, 李杨, 陈波, 等. 有机改性膨润土对己唑醇水悬浮体系物理稳定性的影响[J]. *应用化学*, 2011, 28(5): 565-570.
- [60] 蔡梦玲, 马超, 徐妍, 等. 10%氟虫脲悬浮剂的配方优化及物理稳定性分析[J]. *农药*, 2013, 52(3): 188-191.
- [61] LI L, XU Z, KAH M, et al. Nanopesticides: a comprehensive assessment of environmental risk is needed before widespread agricultural application[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(14): 7923-7924.
- [62] KAH M, JOHNSTON L J, KOOKANA R S, et al. Comprehensive framework for human health risk assessment of nanopesticides[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(9): 955-964.

(编辑:顾林玲)