

# 纳米农药在植物病虫害防治中的前沿技术研究进展

张叶卓, 张准, 林金星, 李 晔\*

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院 林木遗传育种全国重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学生物科学与技术学院 林木育种与生态修复国家工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京林业大学生物科学与技术学院 林木、花卉遗传育种教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 高效、低毒的农药技术对植物病虫害防治起着至关重要的作用。随着纳米技术的发展, 纳米农药在农业病虫害防治技术中表现出药效高、残留少、剂量低等明显的优势, 近年来成为国内外研究的热点。针对目前纳米农药的前沿研究及其技术进展, 该文从纳米农药的类型、相关的纳米技术、以及纳米农药的应用前景和生物安全性等几个方面进行了总结归纳, 着重介绍了纳米农药的应用技术, 阐述了其在农业应用方面的优势, 讨论了纳米农药的生物安全性特点, 并针对纳米农药目前存在的问题和发展前景进行展望, 为高效的纳米农药的设计提供一定的理论和技术支撑。

**关键词:** 纳米农药; 纳米技术; 病虫害防治; 农业; 生物安全性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202412123

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-09-0245-09

张叶卓, 张准, 林金星, 等. 纳米农药在植物病虫害防治中的前沿技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 245-253. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202412123 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Yezhuo, ZHANG Zhun, LIN Jinxing, et al. Research progress on the advanced technologies of nano pesticides in plant pest control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(9): 245-253. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202412123 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

病虫害防治是农业发展面临的重要问题, 通过传统杂交育种进行品种改良的方法进展缓慢, 难以及时推广<sup>[1-2]</sup>, 而采用基因编辑技术会带来诸多食品安全问题<sup>[3-4]</sup>, 因此, 施用农药是针对农业病虫害防治最常用且有效的方法。然而, 农药的实施存在滥用、残留等问题, 据统计, 中国1990—2016年农药施用量从73.3万t增至174万t, 增幅达到137.78%, 位居世界第一, 而农药的大量施用使得砷、铜和铅等潜在有毒元素在土壤和植物中沉积和积累, 这对生态环境和食品安全造成不利的影 响<sup>[5-8]</sup>。因此, 高效、环保的新型农药对农业病虫害的防治, 解决传统农药存在的固有缺陷至关重要<sup>[9]</sup>。

随着纳米技术的发展, 近年来纳米农药在农业领域表现出明显的优势, 有研究表明纳米农业是一个机遇和挑战并存的领域, 将迎来高速发展的时期<sup>[10]</sup>。纳米农药是指其颗粒的直径在1~100 nm的材料<sup>[11]</sup>, 基于纳米技术合成纳米级尺寸的农药颗粒或农药载体, 进而通过叶面喷洒和根部施药等方式进行给药。相比于传统的农药, 纳米农药因具有小尺寸、多分散、高比表面积的性质,

可以有效地提高其在植物表面的吸附能力、提高药效、降低使用剂量。此外, 一些研究表明, 纳米农药具有促进植物的耐受性、提高种子发芽率、改善土壤肥力等显著优势<sup>[6]</sup>。

近年来, 纳米农药及其相关技术飞速发展, 对农业病虫害防治和新型农药研发起到重要的推动作用, 然而针对不同类型的纳米农药及其相关技术的系统性归纳仍较匮乏, 基于此, 本文针对目前的纳米农药进行系统分类, 总结纳米农药的最新技术, 探讨纳米农药的安全性及未来的发展前景, 以期为纳米农药相关的技术和安全使用提供指导。

## 1 纳米农药的种类

纳米农药主要是基于纳米技术将农药进行设计加工, 以得到纳米级别的颗粒。目前研究较为充分的纳米农药主要可以根据制备方法分为两种(图1), 第一种是将农药活性成分直接加工成纳米尺度的粒子, 属于非载体型纳米农药; 第二种是利用有机聚合物、脂质体等纳米载体, 通过吸附、偶联、包裹等形式负载农药有效成分, 制备成载体型纳米农药<sup>[12]</sup>。

### 1.1 非载体型纳米农药及相关技术

非载体型纳米农药, 即将传统的农药制备成纳米级别的颗粒。目前常用的非载体型纳米农药主要有纳米银颗粒、纳米铜颗粒和纳米二氧化硅颗粒等金属与氧化物类非载体型纳米农药, 以及纳米凝胶、纳米胶束、纳米分散体等也是非载体型纳米农药(图1)。此外, 非载体型纳米农药又可以根据其是否直接抑制病原菌或害虫,

收稿日期: 2024-12-17 修订日期: 2025-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31601149); 国家重点研发计划项目(2022YFF0712500); 高等学校学科创新引智计划(B13007)

作者简介: 张叶卓, 博士生, 研究方向为纳米肥料和纳米农药在植物中的应用。Email: zhangyezhuo@bjfu.edu.cn

\*通信作者: 李晔, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为纳米技术在植物体系的应用研究。Email: liye0223@bjfu.edu.cn

进一步分为直接型和间接型,例如纳米银颗粒、纳米铜颗粒为直接型,而纳米二氧化硅颗粒为间接型。

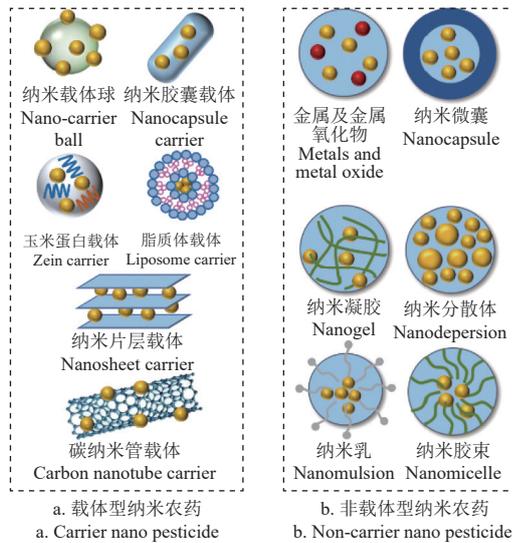


图 1 纳米农药的分类

Fig.1 Classification of nano-pesticides

### 1.1.1 纳米银颗粒农药

纳米银颗粒 (AgNP) 农药是粒径在 1~100 nm 单质银颗粒,可设计成不同的尺寸和形状<sup>[13]</sup>。研究表明低浓度的纳米银颗粒就可以产生杀菌的效果<sup>[14]</sup>,在低至  $8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的用药量下即实现对大肠杆菌的消杀<sup>[15]</sup>。此外,纳米银颗粒的大小会影响抗菌效果,随着纳米银粒径的减小,其对微生物活性的抗性降低<sup>[13-14]</sup>。随着纳米技术的发展,纳米银颗粒可以通过绿色合成法合成<sup>[16-18]</sup>。ROSELINE 等<sup>[16]</sup>采用红藻水提取物制备绿色纳米银颗粒 (g-AgNPs),发现其对柑桔溃疡病菌具有极强的抑制作用。试验表明  $20 \mu\text{g}$  g-AgNPs 在圆盘扩散试验中产生 57 mm 的抑菌圈,在肉汤试验中表现出高达 92.8% 的细菌生长抑制活性。此外, g-AgNPs 可通过刺激植物代谢防治柑橘类病害黄龙病<sup>[18]</sup>。将 g-AgNPs 喷洒于病株叶片 (图 2),发现处理后病株的光合能力、糖含量和其他品质指标都显著提高,同时处理后病株的抗氧化剂含量显著增加,表明 g-AgNPs 能有效缓解黄龙病的病情。此外,将不同浓度的 AgNP 与多种植物病原真菌混合进行体外试验发现在 0.01% 浓度的 AgNP 下,对大多数真菌表现出较强的抑制效果<sup>[18]</sup>。在杀虫性能上, SAYED 等<sup>[17]</sup>在前人研究的基础上利用苏云金芽孢杆菌 (*Bacillus thuringiensis kurstaki*, Btk) 合成纳米银颗粒 (Btk-AgNPs) 用作杀虫剂,较低浓度的 Btk-AgNPs 即表现出显著的杀虫性能,当 AgNPs 的浓度达到  $20 \text{mg}/\text{mL}$  时,粉纹夜蛾幼虫死亡率接近 100%。以上研究均表明 AgNP 对植物病原体和病虫害具有良好的防治效果。绿色纳米银颗粒较化学合成纳米银颗粒 (chem-AgNPs) 表现出更高的药效。通过对化学合成和绿色合成的纳米银颗粒进行的植物毒性试验发现 chem-AgNPs 可诱导活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的生成,进而对黄瓜表现出毒性,而绿色合成纳米银 g-AgNPs 会提高黄瓜叶片的光合作用并对蛋

白质含量增加等产生积极影响,进而促进黄瓜生长<sup>[19]</sup>。故 g-AgNPs 较 chem-AgNPs 更环保,植物毒性更小,可以在一定程度上替代 chem-AgNPs 作为农业纳米农药使用。因此,新型绿色环保的纳米农药对农药发展具有重要的推动作用。

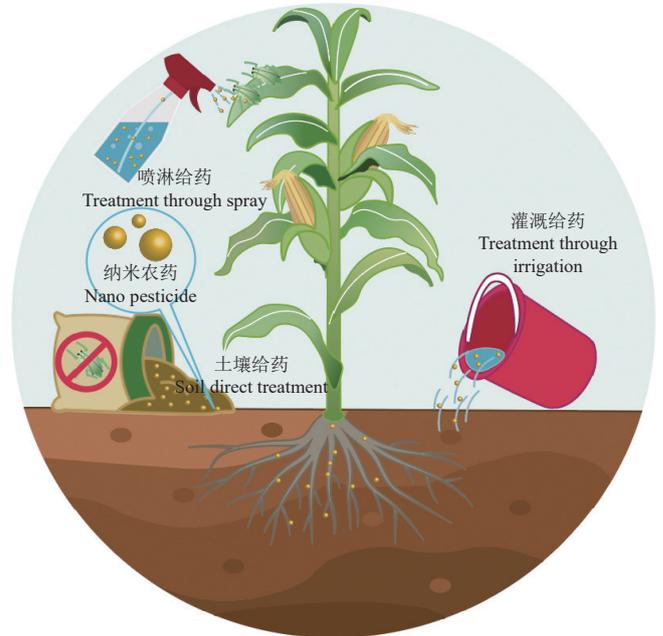


图 2 纳米农药施用示意图

Fig.2 Nanometer pesticide application diagram

### 1.1.2 纳米铜颗粒农药

纳米铜颗粒 (CuNP) 农药是指包括纳米级的单质铜和各种铜的化合物,其优秀的抗菌性能使部分纳米铜颗粒被用作农用抗菌剂, MAHAPATRA 等<sup>[20]</sup>通过湿式化学法合成的纳米氧化铜对多种细菌具有显著的抗菌活性,即在低剂量下就表现出较高的抗菌性。针对纳米氧化铜对植物生长发育的研究表明:高浓度 ( $2000 \text{mg}/\text{L}$ ) 的纳米氧化铜会抑制大麦 (*Hordeum sativum* L) 的生长,而低浓度纳米氧化铜 ( $300 \text{mg}/\text{L}$ ) 对大麦的生长没有显著影响<sup>[21]</sup>。此外,将纳米氧化铜混入土壤 ( $100 \text{mg}/\text{kg}$ ) 对西葫芦进行培养时 (图 2),西葫芦的植株形态、生长、花粉形成和活力等较对照组均无显著差异<sup>[22]</sup>。以上研究表明低浓度的纳米氧化铜可以有效抑制病原菌且对植物无明显危害,具有作为新型纳米农药的潜力。与纳米氧化铜相似,纳米氢氧化铜同样具有抗菌性,其喷雾制剂可以有效杀灭野生型大肠杆菌,防治柑橘溃烂<sup>[23]</sup>。此外, CuNPs 除了能有效防治植物病害,还可以促进作物生长。剂量为  $2.5 \text{mg}/\text{mL}$  的 CuNPs 可以使得植物枯萎病发病率降低 68%,此外,与阴性对照相比,研究发现在  $0.5 \text{mg}/\text{mL}$  的 CuNPs 处理下,番茄的茎长、根长和叶片数量显著增加 8.3%、21.7% 和 24.1%<sup>[24]</sup>。然而随着研究的深入,部分研究表明 CuNPs 的施用对土壤细菌丰度存在负面影响,同时铜的残留会对环境安全与食品安全造成一定的影响<sup>[25-28]</sup>,因此,如何对纳米铜农药进行技术改良,以提高其安全性仍值得进一步研究。

### 1.1.3 纳米二氧化硅颗粒

与直接型非载体型纳米农药不同，间接型非载体型纳米农药本身并不具备抑制病原菌生长的功能，如二氧化硅纳米农药（SiO<sub>2</sub>NP）。SHETEHY 及其研究团队将 SiO<sub>2</sub>NP 与丁香假单胞菌混合，体外培养发现纳米二氧化硅颗粒并没有抑制细菌的生长，但将纳米二氧化硅溶剂以喷淋方式处理拟南芥时，相比对照组，试验组 24 h 内丁香假单胞菌的数量减少 8 倍，此外，采用浓度为 100 mg/L 纳米二氧化硅处理拟南芥，对丁香假单胞菌的抗菌性可提高 90% 以上<sup>[29]</sup>。当以纳米二氧化硅颗粒处理青枯菌时，发现无论在固体培养基还是液体培养基中，青枯菌仍能迅速繁殖，这表明纳米二氧化硅颗粒对青枯菌没有直接的毒性作用，但用 100 和 500 mg/L 纳米二氧化硅溶液处理花生植株后，花生幼苗体内防卫激素水杨酸（salicylic acid, SA）含量升高，继而增强了花生抗青枯病的能力<sup>[30]</sup>。此外，SiO<sub>2</sub>NPs 还能通过提高 SA 含量提高植物对病原菌的抗性<sup>[29-32]</sup>，这是因为纳米二氧化硅可对植物产生刺激，产生类似病原体攻击以诱导植物产生防御机制，进而激活植物一系列免疫信号通路，提高植物生理生化与酶活性。

### 1.1.4 其他非载体型纳米农药

除上述几种非载体型纳米农药之外，非载体型纳米农药还包括：纳米氧化铝、纳米氧化钛，纳米凝胶、纳米胶束、纳米分散体等（图 1）。BUTELER 等<sup>[33]</sup>针对纳米氧化铝粉尘作为杀虫剂的研究表明纳米氧化铝粉尘在杀虫试验中表现出较高的杀虫性。当利用绿色纳米二氧化钛颗粒（g-TiO<sub>2</sub> NPs）喷洒处理番茄叶片时（图 2），发现 TiO<sub>2</sub> NPs 在光下会产生 ROS 并激活植物抗氧化防御系统<sup>[34]</sup>。促使植物通过酶促反应产生抗氧化剂，从而显著提高过氧化物酶和过氧化氢酶含量，进而增强植株对番茄枯萎病的抗病性，且对植株生长无明显负面影

响<sup>[35-37]</sup>。以上结果表明，TiO<sub>2</sub> NPs 可作为一种生态友好、生物相容性强的纳米农药。此外，最新研究表明，羧甲基壳聚糖接枝的瑞香素纳米颗粒可以诱导烟草对茄枯病菌产生免疫应答，从而显著提高过氧化氢酶的活性使得青枯病的防治效率提高 60% 以上<sup>[38]</sup>。

此外，纳米凝胶作为一种非载体型纳米农药，一般是指直径在 200 nm 以下的水凝胶，是一种三维网状的聚合物。纳米凝胶通常具有不熔不溶等特性。例如，以海藻酸钠为原料并与纳米氧化铜颗粒交联制备而成的纳米凝胶，不光可以对病原菌产生损伤，还可以对植物产生诱抗作用，具有良好的应用前景<sup>[39]</sup>。相比于纳米凝胶，纳米胶束是一种由表面活性剂和水组成的微小胶束，其直径通常在 10~100 nm 之间，研究发现以多糖壳聚糖和水杨酸制备的壳聚糖接枝水杨酸纳米胶束对水稻具有一定的促生长作用，且对稻瘟菌具有显著的杀灭效果，是水稻理想的生长杀菌剂<sup>[40]</sup>。此外，纳米分散体是指将纳米尺度的颗粒分散到另一种物质中形成的分散体系，用于分散的纳米颗粒的直径通常在 1~100 nm 之间。例如，阿维菌素（avermectin, AVM）是一种强效的杀虫剂，研究发现通过超重力法制备的甲氨基阿维菌素苯甲酸盐纳米分散体，较市售的水分散粒剂具有更好的紫外稳定性、水分散性和叶面亲附性，同时兼备 AVM 强效的杀虫性，可以作为良好的难溶性农用杀虫剂<sup>[41]</sup>。近年来越来越多的非载体型纳米农药被研制和报道，并相较于传统农药表现出显著的高效、低毒等优势<sup>[42-43]</sup>。

### 1.2 载体型纳米农药及相关技术

纳米农药除了包括非载体型纳米农药，还包括载体型纳米农药<sup>[44-46]</sup>。载体型纳米农药是指纳米材料作为载体负载农药，为药效成分提供稳定性和缓释性能，如二氧化硅载体型纳米农药、石墨烯载体型纳米农药和有机分子载体型纳米农药（表 1）。

表 1 纳米农药的分类及相关的应用技术  
Table 1 Classification of nano-pesticide and related application technology

农药类型 Pesticide type	控释类型 Controlled release type	载体 Carrier	药物分子 Drug molecule	应用的物种 The applied species	作用 Function	参考文献 Reference
非载体型 Non-carrier type	无控释	无	纳米铁酸锰	大豆	增加大豆根瘤数量，增强共生固氮作用	[47]
		无	纳米银	柑桔	提高光合能力、总糖和其他果实品质指标	[18]
		无	纳米二氧化钛	西红柿	提高过氧化物酶和过氧化氢酶含量	[34]
		无	纳米二氧化硅	拟南芥	提高植株的抗菌性	[32]
		无	纳米二氧化硅	花生	调节花生生理酶活性，提高水杨酸含量	[30]
		无	纳米氧化锌	西红柿	显著提高植株的株高、茎粗和干重	[48]
		无	纳米氧化锌	大米	改善植株的产量和养分的吸收	[49]
载体型 Carrier type	温度响应控释	氧化石墨烯	拟除虫菊酯	大豆	更好的生物活性与药效	[50]
	pH 响应控释	聚乙二醇化氧化石墨烯	甲维盐	小麦	显著提高水溶性，紫外光稳定性	[51]
	温度/pH 响应控释	氧化石墨烯	吡唑醚菌酯	油菜	更好的杀菌效果	[52]
	pH/氧化还原响应控释	玉米蛋白连接壳聚糖	阿维菌素	黄瓜	更好的杀虫效果	[53]
	缓释	木质素改性环氧树脂	阿维菌素	黄瓜	优越的生物活性和药物利用率	[54]
	缓释	星型多胺	阿维菌素	烟草	更强的胃毒性和接触毒性	[55]
	pH 响应控释	甘氨酸甲酯偶联聚琥珀酰亚胺	咯菌腈	香蕉	杀菌效果好	[56]
	pH 响应控释	单宁酸改性碳化钛	氟氯菊酯	玉米	良好的生物安全性	[57]
	缓释	纳米脂质体	柰皮素	烟草	良好的药物靶向性	[58]

#### 1.2.1 二氧化硅载体型纳米农药

二氧化硅纳米颗粒（MSNs）因其高容量介孔空间、

大比表面积和强稳定性成为纳米载体的理想材料<sup>[59-60]</sup>。

通过将药物负载到 MSNs 中，可以有效防止农药在外界

刺激下降解, 并且由于其生物相容性好, MSNs 有助于提高农作物对农药的吸收。MSNs 可以通过负载不同农药进而实现对不同病虫害的防治<sup>[61]</sup>, 例如负载啉虫脒的介孔二氧化硅纳米颗粒 (Ace@MSNSS-C10) 能有效控制蚜虫<sup>[62]</sup>。同时, 对 MSNs 进行修饰可提高农药负载量、半衰期与缓释性能<sup>[60]</sup>, 当对 MSNs 进行-CH<sub>3</sub> 修饰后, 农药负载量可达到 30% 以上, 是未修饰组负载量的一倍以上, -CH<sub>3</sub> 修饰可将农药分子的半衰期从游离状态下的 2 h 延长至 9 h。试验还表明, 游离农药分子在 48 h 后会从透析袋中完全释放, 而在相同条件下, MSNs 负载的农药分子在 48 h 后仅释放了 37%。这些结果表明, MSNs 具有较好的稳定性和缓释性能, 是理想的疏水性载体。在农药缓释的基础上, 通过将铁离子引入二氧化硅框架, 形成酸性条件下易断裂的配位键 (-Fe-O-), 使得所构建的载体型纳米农药在酸性环境中能够迅速释放, 从而实现农药的控释, 进一步推动了载体型纳米农药在农业中的应用<sup>[63]</sup>。LIN 等<sup>[64]</sup>以介孔二氧化硅 (DMONs) 为纳米载体, 木质素作为封端剂, 将农药分子包裹在 DMONs 内, 设计出了一种双重刺激响应型农药缓释纳米农药体系 (NES@DMONs@LGN), 能够有效提高其在叶面的粘附性和润湿性, 增强其亲水性和光稳定性, 并实现对 pH 和温度的双刺激响应。同时, 针对硅基载体型农药的应用安全研究表明其不会对作物、土壤与环境产生显著负面影响, 这进一步证明了硅基纳米农药的环保性与安全性<sup>[65]</sup>。二氧化硅纳米材料作为农药载体可以通过提高载药量实现缓释, 提高农药在植物表面的稳定性与粘附性等, 从而显著增强农药性能。然而针对大规模、低成本、环保地生产高纯度的二氧化硅纳米材料并适用于工业生产仍是一个挑战<sup>[61]</sup>。

### 1.2.2 石墨烯载体型纳米农药

石墨烯是一种由一层独立的 sp<sup>2</sup> 杂化碳原子组成的二维碳质材料, 具有六方蜂窝晶体结构。由于其独特而优异的电学、光学、机械和化学性能, 石墨烯基复合材料被广泛应用于多个领域<sup>[66]</sup>。在农业方面, 石墨烯和氧化石墨烯纳米材料被用作纳米农药载体, 以解决传统农药存在的问题。例如, 聚乙二醇化氧化石墨烯颗粒 (PEG-GO) 负载甲维盐 (EB) 的 EB@PEG-GO 可以解决 EB 水溶性低、持续时间短、光降解快等问题<sup>[44]</sup>。将 EB@PEG-GO 溶液静置 48 h, 未观察到明显的絮凝和沉淀; 在紫外灯下暴露 120 h (254 nm、36 W、垂直距离 20 cm), EB@PEG-GO 中的 EB 损失率仅为 13.87%<sup>[51]</sup>。这些结果证明水溶性 EB@PEG-GO 具有更好的水溶性和光稳定性。此外, 负载吡咯菌酯的氧化石墨烯颗粒具有较大的负载率、良好的稳定性以及温度和 pH 双重缓释的特性, 可在不同温度 (25、30、35 °C) 和 pH 条件 (pH 值为 5.0、7.0、9.0) 下处理 168 h 后累计释放量均约为 70%, 实现了可控和可持续的释放<sup>[52]</sup>。大量的研究表明氧化石墨烯与农药的纳米复合物具有良好的缓释性能、优异的稳定性以及较高的农药负载效率<sup>[52]</sup>, 从而能有效减少传统农药的用药量, 并提高其安全性。

### 1.2.3 有机分子载体型纳米农药

有机分子载体型纳米农药是基于纳米技术制备有机纳米载体并负载农药, 进而实现农药多方面的性能优化<sup>[67]</sup>。目前, 用于装载农药的有机分子纳米载体主要有天然有机分子载体 (如木质素) 和合成有机分子载体。

木质素在以往的研究中被发现可以自组装成纳米球, 是较为理想的载体模型。利用微球包埋技术所制成的纳米载体具有较好的稳定性。与游离药物对照组相比, 纳米微球载体药物的有效成分释放速度较慢, 具有显著的缓释性能<sup>[68]</sup>。同样, 通过使用木质素修饰电负性环氧树脂作为纳米载体, 可以构建一种电负性的纳米农药载体<sup>[54]</sup>。该类载体对 AVM 的包封率可达 93.4%, 可以防止 AVM 过早释放并保护其不被微生物降解, 防治效果较传统农药高 26%~40%。在前人研究的基础上, WU 等<sup>[56]</sup>以植物氨基酸转运体介导的聚琥珀酰亚胺作为纳米载体, 利用植物韧皮部内部 (pH≈8.0) 和外部 (pH≈5.0) 之间存在的 pH 梯度实现药物分子在植物韧皮部内部的有效递送。基于农药分子对 pH 敏感控释的基础上, ZHAO 等<sup>[53]</sup>进一步研究发现, 将玉米蛋白与壳聚糖共价连接获得的纳米载体可以实现对 AVM 的装载, 该纳米载体不仅可以对 pH 进行响应, 还可以在还原剂谷胱甘肽的作用下快速释放内容物, 实现了天然聚合物基纳米颗粒的 pH/氧化还原双响应控释。2024 年, 研究人员利用超分子共组装策略制备的甘草酸-多杀菌素纳米液滴, 基于其表面微/纳米结构优越的叶片亲和力, 使得液滴回弹受到抑制, 有效提高了农药分子在植物表面沉积效率, 从而提高了药效<sup>[69]</sup>。

除了应用天然有机分子材料之外, 近年来基于人工合成有机分子也逐渐应用于纳米农药载体。2020 年, HAO 等<sup>[70]</sup>构建了聚乙二醇等有机物与氮化硼的复合纳米载体。该载体具有高载药量、紫外稳定性等优点, 可实现对环境 pH 的响应。基于聚乙二醇酯基在碱性下水解性能, 能有效提高其释放速率约 2~3 倍。此外, 基于对天然有机分子进行改造得到新的玉米蛋白基纳米载体<sup>[71]</sup>, 该纳米载体通过包封农药成分, 在酸性条件下可加速农药的释放, 表现出良好的 pH 响应缓释性能。同时, 其良好的紫外稳定性可以保护农药减少降解, 提高杀虫效果。此外, WAN 等<sup>[57]</sup>设计了以单宁酸修饰二碳化三钛作为用于负载氯氟氰菊酯的新型纳米载体, 其缓释性能可在 pH=5, 处理 250 h 时, 释放约 50% 的内容物; 当 pH=7, 处理 250 h 释放约 20% 的内容物。YANG 等<sup>[55]</sup>针对高效农药输送体系进行研究, 构建了星形多胺纳米载体, 有效增强了 AVM 的药效。随着纳米技术的发展, 合成型的纳米农药载体具有显著的缓释性能和 pH 响应控释性能, 推动了载体型纳米农药的智能化发展。

## 2 纳米农药的应用优势

### 2.1 纳米农药的高效性

相比传统农药, 纳米农药具有更为高效的农药效能, 纳米农药在施用过程中用药少、药效强、生物安全性高、

环境污染小<sup>[50-51]</sup>。其高效性源于纳米尺寸带来的在物理和化学性质上较传统农药所不具备的独特优势<sup>[72]</sup>。较施用剂量而言, 由于传统农药在施用过程中存在耗散问题, 比如含磷农药的挥发, 因此在施用过程中不可避免的需要多次施用或更大剂量施用, 因而产生农药的浪费与环境的污染。然而纳米农药由于其纳米尺寸带来的更强的吸附性, 稳定性与更高效的细胞内化特点使得纳米农药可以高效发挥药效, 从而降低了农药施用量与可能的环境污染。就药效稳定性而言, 传统农药大多以有机物为主要药效成分, 在施用后会由于光线和温度等环境因素而降解失效, 药效成分无法有效发挥作用, 而纳米农药中的非载体型纳米农药主要以无机物作为药效成分, 在自然环境下不易降解失效, 载体型纳米农药也因为具有载体外壳的保护较纯有机物在自然环境下更稳定, 可以更好地发挥药效。因此, 纳米农药在施用剂量和药效稳定性上都已超越了传统农药, 从而更适合现代农业的生产需要, 具有更优的施用高效性。

## 2.2 纳米农药的智能响应释放

对传统农药来说, 控释/缓释是一个难题, 纳米农药不仅具有较传统农药更优的高效性, 还具有传统农药无可比拟的智能响应释放的独特优势。载体型纳米农药可以实现智能响应释放, 可以根据 pH 值和氧化还原反应对内含的药物分子进行释放, 实现药物分子控释和缓释的智能给药。NES@DMONs@LGN 是典型的 pH 响应的纳米农药, 在 pH 值为 5.7、7.4 和 8.0 时, 其累积释放百分比分别为 36.4%、46.7% 和 79.1%, 随着 pH 值的增加, 微球中 NES 的释放率显著增加。而鳞翅目植物食性害虫中肠的碱性条件有助于 LGN@NES@DMON 纳米颗粒在摄入时迅速分解, 产生了有效的杀虫效果, 提高了药物利用效率<sup>[64]</sup>。谷胱甘肽是昆虫细胞中的还原剂, AVM@CS-SS-Zein 在谷胱甘肽浓度为 2 mmol/L 时, AVM 在 131.5 h 内快速释放, 累积释放量为 97.99%±0.28%, 当谷胱甘肽浓度增加到 8 mmol/L 时, AVM 的释放速度更快, 58.5 h 时累积释放量为 99.10%±0.71%, 而不添加谷胱甘肽时, 131.5 h 后 AVM 的释放量仅为 54.13%±1.29%。这种氧化还原反应释放主要是由于谷胱甘肽破坏了二硫键, 随后破坏了载体的完整性<sup>[53]</sup>。因此, 氧化还原响应类纳米农药可以实现在昆虫体外缓释农药成分, 保留绝大部分农药成分, 当被昆虫取食时与昆虫体内的还原剂反应破坏载体结构, 从而完全释放药物分子完成杀虫。因此, 纳米农药智能响应释放的特点超越了传统农药, 更满足现代农业可持续发展的需要。

## 3 纳米农药的生物安全性和环境安全性

为保证纳米农药对环境、动物、植物和微生物的安全, 纳米农药的安全评估是一个复杂而重要的过程。目前针对纳米农药的评估研究表明, 在安全剂量下纳米农药的使用对动物是安全, 无毒副作用的。然而, 与传统农药相比, 纳米农药在动物体内的积累效应尚不明确, 需要进一步研究。研究人员针对纳米农药对植物影响的

评估表明: 与传统农药相比, 基于纳米农药良好的生物相容性、高效性、低剂量, 使得纳米农药在一定程度上减少了对植物生长和环境的负面影响<sup>[19,55,65]</sup>。此外, 针对纳米农药对微生物的影响研究发现, 传统农药往往会对微生物产生不良影响, 而纳米农药表现出明显的生态友好型<sup>[65]</sup>。综上所述, 纳米农药在生物与环境的安全评估显示出部分优势, 但仍需进一步研究来全面了解其风险性。

### 3.1 纳米农药对动物的生物安全性

纳米农药作为农作物病虫害防治的有效方法, 如何降低其对其他动物的毒副作用, 提高纳米农药选择性和特异性的杀虫能力至关重要。针对氧化石墨烯作为纳米载体制备纳米农药用于防治二斑叶螨 (*Tetranychus urticae* Koch), 研究表明纳米农药的半数致死量显著低于单独施用的农药, 证明纳米农药杀虫效率和毒性较传统农药更好<sup>[50]</sup>。众多试验研究也表明, 纳米载体装载农药分子可以更有效杀死病虫, 提高农药效率<sup>[53, 66, 68]</sup>。理想的纳米农药应具有高度的选择性, 而对其他动物无毒副作用, 但现实中纳米农药的施用不光对病虫有杀灭作用, 还对施用区域内的其他动物有影响, 包括病虫的天敌和其他动物。为解决该类问题, YANG 等<sup>[55]</sup>研究发现星型聚合物负载的溴氰虫酰胺具有较高的选择毒性, 其毒性选择比在星型聚合物载体的作用下从 2.33 提高到 3.23, 提升约 39%, 有利于减轻对捕食者的负面影响。通过提高对病虫的选择毒性, 降低对病虫天敌的毒副作用以实现更好的病虫防治。目前纳米农药对昆虫防治的研究取得了可喜的成果, 但是纳米农药对动物, 特别是哺乳类动物的安全评估仍需要进一步的研究。

### 3.2 纳米农药对植物的生物安全性

针对纳米农药对植物的生物安全性研究, ZHAO 等<sup>[25]</sup>应用代谢组学分析氢氧化铜纳米农药对生菜 (*Lactuca sativa*) 的影响, 发现铜积累在叶片 (823 ~ 1111 mg/kg) 以及维管组织和光合组织 (1353 ~ 2008 mg/kg) 中, 食用这些生菜时可能会增加生物体内 Cu 的累积, 同时研究还发现当叶面施用氢氧化铜纳米农药时可以显著提高生菜叶片维管组织 (6% ~ 7%) 和光合组织 (21% ~ 28%) 中钾的浓度, 此外, 通过对所有化合物进行聚类分析时发现施用氢氧化铜纳米农药的试验组的抗氧化成分含量显著降低, 总抗氧化能力显著下降。此外, 通过对不同合成途径的纳米银颗粒在黄瓜 (*Cumis sativus*) 叶片进行暴露测试表明, 绿色合成纳米银颗粒对黄瓜植株的毒性作用十分有限, 而化学合成纳米银颗粒不利于黄瓜植物的生长<sup>[19]</sup>, 因此, 绿色合成的纳米农药对植物的生长更友好。此外, 也有一些研究表明纳米农药具有促进植物生长的双重功效, 掺铁二氧化硅纳米颗粒由于金属微量元素供应丰富, 可以有效促进小麦的生长, 使用 300 mg/L 掺铁二氧化硅纳米颗粒处理 21 d 的小麦株高较空白对照组平均高约 3.4 cm (18%)<sup>[63]</sup>。因此, 构建既能提高杀虫效果, 又有助于植物生长的纳米农药是未来纳米农药发展的方向。

### 3.3 纳米农药对微生物的生物安全性

针对纳米农药对植物致病微生物的防治研究表明, 纳米颗粒可以对部分细菌, 如大肠杆菌等表现出抗菌性<sup>[19, 26]</sup>。然而针对纳米农药对动物细胞与土壤微生物的影响则研究较少, MAHAPATRA等<sup>[20]</sup>通过制备超细分散CuO纳米颗粒, 发现其对铜绿假单胞菌等细菌菌株表现出抗菌活性, 但将这种纳米颗粒用于对Hela细胞系进行细胞毒性研究时, 发现纳米颗粒没有表现出预期的细胞毒性。对于施用区域内的其他微生物, 如土壤微生物, PEIXOTO等<sup>[26]</sup>对氢氧化铜纳米农药暴露对土壤微生物群落的长期影响展开研究, 研究表明纳米农药的应用导致细菌和真菌群落的结构发生了显著变化, 包括细菌菌落表现出的较低丰度, 更高的多样性和均匀性; 真菌菌落表现出较低的多样性和丰度。因此, 纳米农药抗菌的特异性对微生物的生物安全性至关重要。

### 3.4 纳米农药对土壤的安全性影响

纳米农药对土壤安全性的影响与纳米农药的材质与种类有关, 例如研究表明铜基纳米农药的施用会带来一定的安全隐患, 针对其安全性评估的研究发现铜基纳米农药较为稳定, 对土壤细菌丰度存在特定的负面影响, 且这种影响可能会使土壤的质量、肥力和功能失衡, 同时铜的残留会对环境安全与食品安全造成一定的影响<sup>[25-28]</sup>。相比于铜基纳米农药, 硅基纳米农药即使在建议使用的最大农药浓度下, 硅基纳米颗粒载体型农药也不会对试验植株或土壤微生物群落和功能产生负面影响<sup>[65]</sup>。针对土质较差的土壤, 可以将纳米制剂与土壤改良结合提高土壤通气性与农产品品质<sup>[73]</sup>。但是纳米农药的环境安全性评估是复杂的, 不同的水体酸碱度、土壤盐度、湿度、温度以及环境中的其他污染物等都会影响纳米农药的生态毒性, 而环境因素对纳米农药的生态毒理学效应的相关研究仍较匮乏<sup>[74]</sup>。因此如何形成纳米农药环境风险识别技术与评估程序, 有效促进环境友好型纳米农药发展是一个亟待解决的重要课题。

## 4 总结与展望

纳米农药对农业的可持续发展展现出巨大的潜力。本文回顾并总结了近年来纳米农药的新技术, 包括纳米农药的种类与应用, 并对比说明了传统农药, 非载体型纳米农药和载体型纳米农药的区别。纳米农药在病虫害的防治中表现出高效、低毒等显著优势, 研究表明一些纳米农药能够促进植物生长, 提高了农药施用效率。然而目前针对纳米农药的发展机遇和挑战并存。首先, 纳米农药对环境的影响仍是值得思考的问题。需要建立系统化的纳米农药环境行为与毒理学研究体系, 尤其是长期暴露下对土壤微生物群落、非靶标生物(如传粉昆虫)及生态链的影响。结合人工智能模型预测纳米材料的环境归趋, 可为风险评估提供新工具。其次, 安全的纳米农药使用剂量也很关键, 如何减少农药的使用量并建立不同纳米农药的规范剂量至关重要。未来的研发重点应聚焦于响应环境刺激(如pH值、酶、光照)的智能控

释纳米农药, 实现病害发生时的靶向释放; 结合无人机喷洒与传感器技术, 构建“纳米农药-精准施药”一体化系统, 进一步减少用药量。最后, 虽然相比于传统的农药, 纳米农药表现出高效性、缓释性、靶向性等明显的优势, 但是纳米农药目前的造价较高, 且制备过程较为复杂, 在工业化过程中, 制备大量高稳定性的纳米农药的技术难度比较大。一个可能的解决方案是探索生物基纳米材料(如纤维素、壳聚糖)作为载体, 利用农业废弃物合成纳米农药, 降低原料成本并优化连续化学制备的工艺, 推动工业化生产的稳定性与效率。因此, 如何降低纳米农药的成本, 实现纳米农药的规模化生产和应用仍值得进一步研究。本综述基于对纳米农药的前沿技术及应用进行总结归纳, 以期推动纳米农药及相关技术在农业的发展应用。

### [参 考 文 献]

- [1] HUA K, ZHANG J S, BOTELLA J R, et al. Perspectives on the application of genome-editing technologies in crop breeding[J]. *Molecular Plant*, 2019, 12(8): 1047-1059.
- [2] REYNOLDS M, FOULKES J, FURBANK R, et al. Achieving yield gains in wheat[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, 35(10): 1799-1823.
- [3] ZHAO L J, LU L, WANG A D, et al. Nano-biotechnology in agriculture: Use of nanomaterials to promote plant growth and stress tolerance[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(7): 1935-1947.
- [4] SINGER S D, MUKTHAT M M, SUBEDI U, et al. CRISPR/Cas-mediated gene editing in plant immunity and its potential for the future development of fungal, oomycete, and bacterial pathogen-resistant pulse crops [J]. *Plant Cell and Environment*, 2024, 1-13.
- [5] ZHAO J J, HUANG J X, YAN J, et al. Economic loss of pine wood nematode disease in mainland china from 1998 to 2017[J]. *Forests*, 2020, 11(10): 1-19.
- [6] LI P, HUANG Y, FU C K, et al. Eco-friendly biomolecule-nanomaterial hybrids as next-generation agrochemicals for topical delivery[J]. *Ecomat*, 2021, 3(5): 1-19.
- [7] OKEKE E S, NWEZW E J, EZIKE T C, et al. Silicon-based nanoparticles for mitigating the effect of potentially toxic elements and plant stress in agroecosystems: A sustainable pathway towards food security[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 1-15.
- [8] 姚成胜, 刘伟芳, 杨一单. 2000—2022年中国主粮生产农药过量施用的时空演变特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(6): 227-236.
- YAO Chengsheng, LIU Weifang, YANG Yidan, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of excessive pesticide in major staple grain production of China from 2000 to 2022[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(6): 227-236. (in Chinese with English abstract)
- [9] ZHAO X, CUI H X, WANG Y, et al. Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(26): 6504-6512.
- [10] 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.
- [11] KAH M, HOFMANN T. Nanopesticide research: Current trends and future priorities[J]. *Environment International*, 2014, 63: 224-235.
- [12] 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.  
ZHANG Wenbo, PAN Xinglu, WU Xiaohu, et al. Research advance of nano pesticide risk assessment[J]. *Modern Agrochemicals*, 2023, 22(2): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [13] WAHAB M A, LI L M, MATIN M A, et al. Silver micro-nanoparticle-based nanoarchitectures: Synthesis routes, biomedical applications, and mechanisms of action[J]. *Polymers*, 2021, 13(17): 2870-2892.
- [14] THIRUVENGADAM V, BANSOD A V. Characterization of silver nanoparticles synthesized using chemical method and its antibacterial property[J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2020, 10(6): 7257-7264.
- [15] BAKER C, PRADHAN A, PAKSTIS L, et al. Synthesis and antibacterial properties of silver nanoparticles[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2005, 5(2): 244-249.
- [16] ROSELINE T A, MURUGAN M, SUDHAKAR M P, et al. Nanopesticidal potential of silver nanocomposites synthesized from the aqueous extracts of red seaweeds[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, 13: 82-93.
- [17] SAYED A M M, KIM S, BEHLE R W. Characterisation of silver nanoparticles synthesised by bacillus thuringiensis as a nanobiopesticide for insect pest control[J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2017, 27(11): 1308-1326.
- [18] RAZA M U, ABASI F, SHAHBAZ M, et al. Phytomediated silver nanoparticles (AgNPs) embellish antioxidant defense system, ameliorating hlb-diseased 'kinnow' mandarin plants[J]. *Molecules*, 2023, 28(5): 2044-2066.
- [19] ZHANG H, CHEN S, JIA X, et al. Comparison of the phytotoxicity between chemically and green synthesized silver nanoparticles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 142264-142272.
- [20] MAHAPATRA O, BHAGAT M, GOPALAKRISHNAN C, et al. Ultrafine dispersed CuO nanoparticles and their antibacterial activity[J]. *Journal of Experimental Nanoscience*, 2008, 3(3): 185-193.
- [21] RAJPUT V, CHAPLYGIN V, GOROYTSOY A, et al. Assessing the toxicity and accumulation of bulk- and nano-CuO in *Hordeum sativum* L[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(6): 2443-2454.
- [22] MARMIROLI M, PAGANO L, ROSSI R, et al. Copper oxide nanomaterial fate in plant tissue: Nanoscale impacts on reproductive tissues[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(15): 10769-10783.
- [23] NARCISO J A, FERENCO C M, RITENOUR M A, et al. Effect of copper hydroxide sprays for citrus canker control on wild-type *Escherichia coli*[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2012, 54(2): 108-111.
- [24] LOPEZ L D, MTZE A I, CARRION G, et al. The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for *Fusarium* wilt and plant growth promoter[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 277: 109810-109818.
- [25] ZHAO L, HUANG Y, HANNAH B C, et al. Application of metabolomics to assess the impact of Cu(OH)<sub>2</sub> nanopesticide on the nutritional value of lettuce (*Lactuca sativa*): Enhanced Cu intake and reduced antioxidants[J]. *NanoImpact*, 2016, 3-4: 58-66.
- [26] PEIXOTO S, HENRIQUES I, LOUREIRO S. Long-term effects of Cu(OH)<sub>2</sub> nanopesticide exposure on soil microbial communities[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 269: 116113-116124.
- [27] XU Z L, TANG Q, HONG A M, et al. Aggregation, sedimentation and dissolution of Cu(OH)<sub>2</sub>-nanorods-based nanopesticide in soil solutions[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(21): 3844-3852.
- [28] SHAHANE S P, KUMAR A. Estimation of health risks due to copper-based nanoagrochemicals[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(17): 25046-25059.
- [29] SHETEHY M, MORADI A, MACERONI M, et al. Silica nanoparticles enhance disease resistance in *Arabidopsis* plants[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(3): 344-353.
- [30] DENG Q, HUANG S, LIU H, et al. Silica nanoparticles conferring resistance to bacterial wilt in peanut (*Arachis hypogaea* L.)[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 915: 170112-170127.
- [31] GAO H, GUO M J, SONG J B, et al. Signals in systemic acquired resistance of plants against microbial pathogens[J]. *Molecular Biology Reports*, 2021, 48(4): 3747-3759.
- [32] KANDHOL N, SINGH V P, PERALTA V J, et al. Silica nanoparticles: The rising star in plant disease protection[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(1): 7-9.
- [33] BUTELER M, SOFIE S W, WEAVER D K, et al. Development of nanoalumina dust as insecticide against *Sitophilus oryzae* and *Rhizopertha dominica*[J]. *International Journal of Pest Management*, 2015, 61(1): 80-89.
- [34] PAN X, NIE D, GUO X, et al. Effective control of the tomato wilt pathogen using TiO<sub>2</sub> nanoparticles as a green nanopesticide[J]. *Environmental Science-Nano*, 2023, 10(5): 1441-1452.
- [35] KHOKON M A, OKUMA E, HOSSAIN M A, et al. Involvement of extracellular oxidative burst in salicylic acid-induced stomatal closure in *Arabidopsis*[J]. *Plant Cell and Environment*, 2011, 34(3): 434-443.
- [36] ALI M F, MUDAY G K. Reactive oxygen species are signaling molecules that modulate plant reproduction[J]. *Plant Cell and Environment*, 2024, 47(5): 1592-1605.
- [37] ALAZEM M, BURCH S T M. Roles of ROS and redox in regulating cell-to-cell communication: Spotlight on viral modulation of redox for local spread[J]. *Plant Cell and Environment*, 2024, 47(8): 830-841.
- [38] WANG Y, YANG L, ZHOU X, et al. Molecular mechanism of plant elicitor daphnetin-carboxymethyl chitosan nanoparticles against *Ralstonia solanacearum* by activating plant system resistance[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 241: 124580-124591.
- [39] 孙利. 基于金属有机框架的环境响应型农药纳米控释剂的制备及性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.  
SUN Li. Preparation and Properties of Environmentally Responsive Pesticide Nanocontrolled Release Agents Based on Metal-organic Framework[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [40] 秦孜琪. 聚合物胶束 AZOX/CS-graft-SA 的制备及杀菌活性和安全性评价[D]. 重庆: 西南大学, 2024.  
QIN Ziqi. Preparation, Bactericidal Activity and Safety Evaluation of Polymer Micelle AZOX/CS-graft-SA[D]. Chongqing: Southwest University, 2024. (in Chinese with

- English abstract)
- [41] 于清健. 超重力法制备难溶性农用杀虫剂纳米分散体[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.  
YU Qingjian. Preparation of Insoluble Agropesticide Nanodispersions by Super-gravity Method [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024. (in Chinese with English abstract)
- [42] XU C L, CAO L D, LIU T T, et al. Ph-responsive copper-doped ZIF-8 MOF nanoparticles for enhancing the delivery and translocation of pesticides in wheat plants[J]. *Environ Science-Nano*, 2023, 10(9): 2578-2590.
- [43] LI J Y, MENG S L, ZHANG Z X, et al. Nanoparticle-mediated calmodulin dsRNA and cyantraniliprole co-delivery system: High-efficient control of two key pear pests while ensuring safety for natural enemy insects[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 277(3): 134478-134489.
- [44] ARENA M, AUTERI D, BRANCATO A, et al. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance beta-cyfluthrin[J]. *Efsa Journal*, 2020, 18(9): 6058-6088.
- [45] PITTERNA T, CASSAYRE J, HUTER O F, et al. New ventures in the chemistry of avermectins[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2009, 17(12): 4085-4095.
- [46] 刘学文, 高军涛, 李赫, 等. 碳纳米管在作物研究中的应用进展与分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 1-11.  
LIU Xuewen, GAO Juntao, LI He, et al. Progress and analysis of carbon nanotube applications in crop research[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [47] MA J, ZHOU Y, LI J, et al. Novel approach to enhance *Bradyrhizobium diazoefficiens* nodulation through continuous induction of ROS by manganese ferrite nanomaterials in soybean[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, 20(1): 168-186.
- [48] PEREZ V E A, BETANCOURT G R, VALDEZ A L A, et al. Effects of the morphology, surface modification and application methods of ZnO-NPs on the growth and biomass of tomato plants[J]. *Molecules*, 2020, 25(6): 1282-1293.
- [49] ELSHAYB O M, FARROH K Y, AMIN H E, et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Fortification for rice grain yield and nutrients uptake enhancement[J]. *Molecules*, 2021, 26(3): 584-601.
- [50] GAO X, SHI F, PENG F, et al. Formulation of nanopesticide with graphene oxide as the nanocarrier of pyrethroid pesticide and its application in spider mite control[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(57): 36089-36097.
- [51] SONG S, WAN M, FENG W, et al. Graphene oxide as the potential vector of hydrophobic pesticides: Ultrahigh pesticide loading capacity and improved antipest activity[J]. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2021, 1(3): 182-191.
- [52] PENG F, WANG X P, ZHANG W J, et al. Nanopesticide formulation from pyraclostrobin and graphene oxide as a nanocarrier and application in controlling plant fungal pathogens[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(7): 1112-1126.
- [53] ZHAO M, LI P, ZHOU H, et al. Ph/redox dual responsive from natural polymer-based nanoparticles for on-demand delivery of pesticides[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 435(1): 134861-134875.
- [54] ZHANG D X, LIU G, JING T F, et al. Lignin-modified electronegative epoxy resin nanocarriers effectively deliver pesticides against plant root-knot nematodes (*Meloidogyne incognita*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(47): 13562-13572.
- [55] YANG Y, JIANG Q, PENG M, et al. A star polyamine-based nanocarrier delivery system for enhanced avermectin contact and stomach toxicity against green peach aphids[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(9): 1445-1459.
- [56] WU H, HU P, XU Y, et al. Phloem delivery of fludioxonil by plant amino acid transporter-mediated polysuccinimide nanocarriers for controlling fusarium wilt in banana[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(9): 2668-2678.
- [57] WAN M, SONG S, JIANG X, et al. Tannic acid-modified mxene as a nanocarrier for the delivery of  $\beta$ -cyfluthrin as a sustained release insecticide[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(10): 15583-15591.
- [58] WANG J, HAO K, YU F, et al. Field application of nanoliposomes delivered quercetin by inhibiting specific hsp70 gene expression against plant virus disease[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, 20(1): 1-16.
- [59] FLORENSA M, LLENAS M, MEDINA G E, et al. Key parameters for the rational design, synthesis, and functionalization of biocompatible mesoporous silica nanoparticles[J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(12): 2703-2752.
- [60] SELJAK K B, KOCBEK P, GASPERLIN M. Mesoporous silica nanoparticles as delivery carriers: An overview of drug loading techniques[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2020, 59: 101906-101915.
- [61] ZHANG J, KOTHALAWALA S, YU C. Engineered silica nanomaterials in pesticide delivery: Challenges and perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 320: 121045-121059.
- [62] DING Y, XIAO Z, CHEN F, et al. A mesoporous silica nanocarrier pesticide delivery system for loading acetamiprid: Effectively manage aphids and reduce plant pesticide residue[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160900-160912.
- [63] WU L, PAN H, HUANG W, et al. Self-assembled degradable iron-doped mesoporous silica nanoparticles for the smart delivery of prochloraz to improve plant protection and reduce environmental impact[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2022, 28: 102890-102906.
- [64] LIN H C, MA N, HE L X, et al. High deposition and precise stimulus-response release performance of lignin-coated dendritic mesoporous organosilica nanoparticles for efficient pesticide utilization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 259(1): 129163-129174.
- [65] GALHARDI J A, WANG P, BUENO V, et al. Field evaluation of the potential effects of polymer and silica-based nanopesticides on strawberries and agricultural soils[J]. *Environmental Science-Nano*, 2022, 9(10): 3833-3843.
- [66] WANG Y, LI S S, YANG H Y, et al. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide: A review[J]. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2020, 10(26): 15328-15345.
- [67] ÖZKAN S A, DEDEOĞLU A, KARADAS B N, et al. Nanocarriers used most in drug delivery and drug release: Nanohydrogel, chitosan, graphene, and solid lipid[J]. *Turkish Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2019, 16(4): 481-492.
- [68] ZHOU M, XIONG Z, YANG D, et al. Preparation of slow release nanopesticide microspheres from benzoyl lignin[J]. *Holzforchung*, 2018, 72(7): 599-607.
- [69] WEI K L, LI Z L, ZHENG Z R, et al. Natural glycyrrhizic acid-tailored nanoparticles toward the enhancement of pesticide bioavailability[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(28):

- 2315493-2315504.
- [70] HAO L, GONG L, CHEN L, et al. Composite pesticide nanocarriers involving functionalized boron nitride nanoplatelets for pH-responsive release and enhanced UV stability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 396: 125233-125244.
- [71] HAO L, LIN G, WANG H, et al. Preparation and characterization of zein-based nanoparticles via ring-opening reaction and self-assembly as aqueous nanocarriers for pesticides[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(36): 9624-9635.
- [72] MELLOR R D, UCHEGBU I F. Ultrasmall-in-nano: Why size matters[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(14): 2476-2493.
- [73] 欧阳赞, 张杰, 梁雪丽, 等. 微纳米气泡水耦合生物炭提升红壤通气性及水果黄瓜产量与品质效应[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(7): 89-101.
- OUYANG Zan, ZHANG Jie, LIANG Xueli, et al. Effects of micro-nano bubble water coupled with biochar on enhancing the red soil aeration, yield and quality of fruit cucumbers in greenhouses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(7): 89-101. (in Chinese with English abstract)
- [74] 陈朗, 姜辉, 周艳明, 等. 纳米农药的环境安全性浅析[J]. *农药科学与管理*, 2018, 39(5): 30-38.
- CHEN Lang, JIANG Hun, ZHOU Yanming, et al. Analysis of environmental safety of nano pesticides[J]. *Pesticide Science and Administration*, 2018, 39(5): 30-38. (in Chinese with English abstract)

## Research progress on the advanced technologies of nano pesticides in plant pest control

ZHANG Yezhuo, ZHANG Zhun, LIN Jinxing, LI Ye<sup>\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. National Engineering Research Center of Tree Breeding and Ecological Restoration, College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** High-efficiency and low-toxicity pesticides can play a vital role in plant pest control and food safety. Traditional pesticides cannot fully meet the production needs of modern agriculture in recent years, due to the different degrees of pollution and environmental issues. It is very necessary to replace traditional pesticides with more efficient and environmentally friendly pesticides. Nanopesticides can be expected to serve as the promising potential candidate in the development of nanotechnology. The high efficiency and low residue can greatly contribute to agricultural pest control. In this review, the two types of nanopesticides were first introduced and processed using function nanotechnology, in order to obtain the nanoscale particles. The first type was to directly process the active ingredients of the pesticides into the nanoscale particles, which belonged to the non-carrier nanopesticides. Among them, the direct and indirect types were divided from the non-carrier nanopesticides, in terms of their action. The direct type of nanopesticides was used to directly control the pests or microorganisms in the form of direct death, while the indirect type of nanopesticides was to indirectly control the diseases and pests after stimulating the plant metabolism and resistance. The second type was to use the nanocarriers, such as the organic polymers and liposomes, to load the pesticide-active components. The carrier-type nanometer pesticides were prepared after adsorption, coupling, and encapsulation. Non-carrier nanopesticides included metal and metal oxide particles, inorganic particles, nano-gels, nano-micelles, and nano-dispersions. Carrier nano pesticides include carrier drugs that are prepared from different nanomaterials, such as polymers, and liposomes. Secondly, one summary was made on the application and behaviors of different types of nanopesticides. In addition, a comparison was also made between the advanced nanopesticides over the traditional pesticides in agricultural applications. The nanopesticides were characterized by the slow-release and intelligent drug delivery response to the controlled release. The short efficacy and easy dispersion in the use of traditional pesticides were solved for the long-term and large-scale production under the controllable release. Thirdly, the biosafety of the nanopesticides and environmental safety were also evaluated as the agricultural drugs. A critical review was then made on the biosafety effects of the nano pesticides on animals, plants, microorganisms, and the environment, especially the soil environment from multiple perspectives. In theory, the nanopesticides normally share small or insignificant biosafety effects on different organisms, indicating better biosafety, or excellent selective toxicity, compared with traditional pesticides. Only lethal toxicity was observed on the target microorganisms or pests. There was no significant toxicity to other organisms. Nevertheless, there were still some gaps in the biosafety research of nanopesticides. Finally, the outlook was given for the prospects of the nanopesticides. Development standards were also required to evaluate the biosafety of nanopesticides for the safe dosage in industry. More importantly, the current research on the nanopesticides was mostly in the laboratory stage. The large-scale production and application of nanopesticides were then realized to balance the advantages and biosafety of nanopesticides, compared with traditional pesticides. The practical development of the current nanopesticide industry was summarized to provide theoretical and technical support for the design of efficient nanopesticides. The advanced technologies of nanopesticides can greatly contribute to sustainable and modern agriculture.

**Keywords:** nano-pesticide; nanotechnology; pest control; agriculture; biosecurity