

◆ 专论:纳米农药青年论坛(特约稿) ◆

纳米技术在农业真菌病害防控领域的研究进展

卢 嘉,孙思雨,裴洪玲,杨廷泽,王 腾,张 芳*

(北京工业大学化学与生命科学学院,北京 100124)

摘要:真菌病害为全球农作物带来重大损失,目前对真菌病害的防治方式面临高施低效、非靶标生物杀伤以及环境污染等挑战。基于纳米技术制备的纳米农药能够实现药物的智能缓控释放,并提高药物的叶面黏附性、稳定性以及内吸与传导等性能,提高了农药利用率。同时,纳米载体能够作为营养元素被植物吸收提供营养功能,展现了“一施多效”的特色。纳米农药在防治稻瘟病、水稻纹枯病、小麦赤霉病等重要真菌病害上具有显著的防治功效并展现出了多种优势,为实现国家减量增效的绿色防控战略提供技术支撑。

关键词:纳米技术;真菌病害;纳米农药;病害防控;研究进展

中图分类号:TQ 450 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2025.03.003

Research progress of nanotechnology for controlling agricultural fungal diseases

LU Jia, SUN Siyu, PEI Hongling, YANG Tingze, WANG Teng, ZHANG Fang*

(College of Chemistry and Life Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Fungal diseases cause significant losses to global agricultural crops. At present, the control methods for fungal diseases still face challenges, such as high application rates with low efficiency, non-target organism mortality, and environmental pollution. Nanopesticides developed based on nanotechnology can achieve intelligent controlled release of pesticides, and improve the foliar adhesion, stability, as well as absorption and conductivity of pesticides, thereby enhancing the utilization rates of pesticides. Furthermore, nanocarriers can be absorbed by plants as nutritional elements to provide nutritional functions, which demonstrates the distinctive features of "one-application-multi-effect". Nanopesticides exhibit significant efficacy in controlling critical fungal diseases including rice blast, rice sheath blight, and wheat scab. With their multifaceted advantages, nanopesticides provide technological support for achieving national strategies of green control through reducing pesticide use while increasing efficiency.

Key words: nanotechnology; fungal disease; nanopesticide; disease prevention and control; research progress

自20世纪以来,全球农作物真菌病害的严重性在持续增加,每年全球农作物因真菌病害受损10%~23%^[1-2]。真菌病害对全球粮食安全构成严重威胁^[3-4]。稻瘟病、小麦秆锈病和玉米黑穗病等真菌病害可导致水稻、小麦及玉米等重要粮食作物的产量在全球范围内每年减少1.25亿吨,给全球农业带来每年600亿美元的经济损失^[2]。此外,由于全球变暖使真菌病害进一步加重,条形柄锈菌和禾谷镰刀菌导致每年

水稻减产30%,严重时可达80%^[5]。2023年,小麦条锈病、小麦赤霉病和稻瘟病等7种病害被列入《一类农作物病虫害名录(2023年)》。

目前,真菌病害的防治措施主要有化学防治、抗病品种筛选和生物防治等。但这些传统的防控技术仍存在诸多瓶颈问题,如化学农药过量多次喷洒易造成真菌耐药性提高,导致农药残留累积增加,破坏生态平衡^[6-7];选育的抗病品种在应用中抗病范围

收稿日期:2025-04-11

基金项目:企业单位委托科技项目(40055002202502)

作者简介:卢嘉,女,硕士研究生。研究方向:纳米生物技术。E-mail: jialu126@126.com

通信作者:张芳,女,博士,副教授。研究方向:纳米生物技术。E-mail: zhangfang2000@bjut.edu.cn

有限且时效性不足,研发周期较长,同时存在基因漂移等潜在的生态风险;生物防治见效较慢,难以应对突发性病害^[6]。因此,如何有效提升对真菌病害的防控成为目前亟需解决的一个重要难题。纳米技术的出现为农业病害绿色防控提供了新的思路。基于纳米载体技术构建纳米农药递送体系用于病害防治,在提高药效的同时降低传统农药的环境风险。纳米农药被视为未来加速可持续农业的关键驱动力之一。本文对纳米农药的特性及其在真菌病害领域的防控研究进行了系统综述,为推动农业向高效、绿色和智能化转型,保障粮食安全与可持续发展提供解决方案。

1 纳米农药特性

纳米技术通过创新性改造农药的物理化学性质,赋予其高效性、精准性、安全性及智能化等新特性(图1),重构了传统农药的应用模式,有效缓解了抗药性加剧、环境污染等问题。

1.1 智能缓控释放

纳米载体技术可缓慢释放农药活性成分,延长作用周期,降低施用频率。通过利用环境因子,如内源性(pH、氧化还原和酶等)或外源性(温度和光照等)刺激响应载体,使其理化性质发生改变从而实

现药物的精准控释^[8]。由于田间环境的复杂性,有害生物的发生规律不固定,单重响应纳米农药已经不能满足应用需要。因此,可将多种刺激响应机制组合设计,制备多响应型控释农药,以应对不同的刺激变化精准靶向释放药物,确保有害生物得到最优控制,并减少农药对农产品与环境的负面影响(表1)。

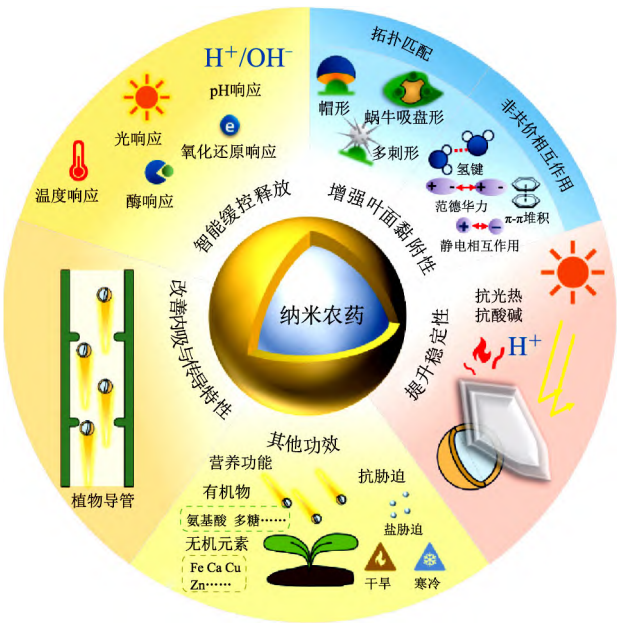


图 1 纳米农药特性示意图

表 1 多重响应特征的纳米载药体系

响应数量/个	响应对象	载药体系	包载药物	靶标真菌	参考文献
3	酸性pH、温度、漆酶	木质素纳米/微胶囊	吡唑醚菌酯	灰葡萄孢菌	[9]
3	中性偏酸性pH、温度、果胶酶	果胶修饰的树枝状介孔二氧化硅纳米颗粒	丁香酚	青枯雷尔氏菌	[10]
5	酸性pH、α-淀粉酶、植物表皮蜡质成分(如癸酸和熊果酸)、近红外光	包覆苯并咪唑接枝环糊精聚合物、嵌入二硫化钼核的介孔二氧化硅纳米颗粒	戊唑醇	立枯丝核菌、禾谷镰刀菌	[11]
7	酸性/碱性pH、过氧化氢、谷胱甘肽、磷酸盐、EDTA、近红外光	通过溶剂热法制备的Fe ³⁺ -单宁酸纳米颗粒	戊唑醇	立枯丝核菌、禾谷镰刀菌	[12]
8	酸性/碱性pH、谷胱甘肽、抗坏血酸、过氧化氢、磷酸盐、阳光	通过O/W 微乳液法制备的Fe ³⁺ -单宁酸纳米颗粒	戊唑醇、阿维菌素	立枯丝核菌、禾谷镰刀菌	[13]

1.2 增强叶面黏附性

与传统农药相比,纳米农药颗粒可通过增加比表面积,更均匀覆盖于作物表面,附着力增强,耐雨水冲刷,从而延长了药效持续时间,增强了与病虫害的接触概率,从而提高了药效。通过将单宁酸^[14]、果胶^[15]、羧甲基纤维素^[16]、木质素^[9]及聚多巴胺^[17]等富含极性基团的成分修饰纳米载体,增强其与叶片之间的非共价作用,进而提升纳米农药的黏附性。通过改变纳米颗粒形状,使之在拓扑结构上与农作物叶片的微观结构相匹配,也可以有效改善纳米颗粒的叶面黏附性^[18]。

1.3 提升稳定性

通过引入纳米载体,纳米农药的稳定性在物理结构优化、化学保护,以及复配兼容等方面实现多维提升,有效解决了传统农药易分解、利用率低的问题。采用纳米载药系统(如纳米乳液、微乳剂等)将农药活性成分细化至10~300 nm,通过增加表面积和均匀分散性,减少颗粒聚集和沉降,显著提升物理稳定性和生物利用度。此外,通过依赖于纳米载体的结构设计、表面修饰及环境响应特性,确保农药活性成分在复杂环境条件下(如雨水冲刷、高温和光照等)仍能维持结构和功能完整性,延长其

持效期^[7,19]。

1.4 改善内吸与传导特性

纳米载体的小尺寸、大比表面积等特性, 使其可突破植物表皮角质层屏障, 促进农药通过气孔或亲水通道快速渗透至植物体内, 在体内维管系统中传输转运, 并利用植物韧皮部与木质部的双向传导系统实现全株分布, 显著提高药效。纳米颗粒凭借小尺寸效应穿透植物表皮蜡质层或气孔, 将原本无法内吸的农药输送至表皮细胞间隙, 扩大作用范围, 弥补了非内吸性农药的固有缺陷^[8,20]。

1.5 其他功效

纳米农药作为现代农业技术的重要创新, 其核心功能聚焦于病虫害防治效能的提升, 但通过应用纳米技术, 还可间接对作物营养功能产生积极影响。纳米载体制备时, 通过技术融合, 掺入无机微量元素如Fe、Ca、Cu、Mg、Zn等或有机物如甘氨酸^[21]、聚谷氨酸^[22]等, 在形成载体骨架的同时能够作为营养物质被植物吸收^[18]; 还可通过清除自由基减少氧化应激对细胞膜的破坏, 提高非靶标作物抗氧化功效, 实现“一施多效”。此外, 纳米载体还可提高作物对生物/非生物胁迫(如干旱、盐碱)的耐受性, 减少逆境导致的营养代谢紊乱^[23-24]。纳米载体的引入可以显著减少农药残留对土壤微生物群落的破坏, 有利于维持土壤有机质分解和矿质元素转化功能, 改善土壤生态, 保障作物营养供给的可持续性。

2 纳米农药在对真菌病害防控中的研究

2.1 对稻瘟病的防控

稻瘟病是我国一类农作物病虫害, 其造成水稻减产30%~35%, 严重时可致水稻绝收^[1,25-26]。稻瘟病主要由稻瘟菌(*Pyricularia oryzae* Cav.)引起。纳米农药可以有效抑制稻瘟菌的生长, 常用的纳米载体材料有ZnO量子点^[27]、介孔二氧化硅纳米颗粒(MSN)^[28]、氧化石墨烯^[29]、层状双氢氧化物^[30]、金属有机框架材料(MOF)以及 β -环糊精^[31]等材料。

Abdelrahman等^[28]将咪鲜胺(Pro)负载到介孔二氧化硅纳米颗粒(MSN)中, 与商品化咪鲜胺乳液相比, 具有更好的吸收和转运能力、更强的抗菌活性。Hu等^[29]基于凝集素蛋白(ConA)和稻瘟菌孢子之间的强亲和力, 制备了负载氟环唑(EPX)的聚乙二醇(PEG)氧化石墨烯(GO)纳米颗粒。其可以特异性识别稻瘟菌孢子并抑制其萌发, 能够明显抑制秧苗期稻瘟病。

Hafeez等^[32]使用三聚磷酸钠(TTP)、天然生物材料辣木叶提取物和壳聚糖(Cs)构建了辣木壳聚糖纳米颗粒(M-CsNPs)。其能通过诱导细胞渗漏, 抑制稻瘟菌孢子萌发和胚管发育, 激活植物免疫反应, 调节受感染水稻植株中无机营养的平衡, 提高受稻瘟菌胁迫叶片的光合效率并保护叶绿体, 显著降低稻瘟菌的侵染。防控示意图如图2。

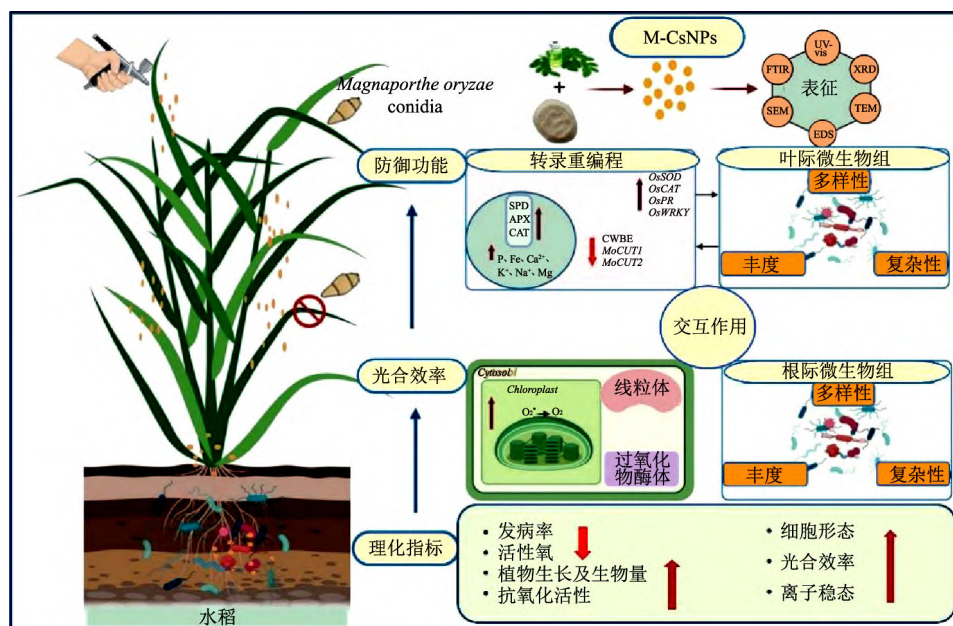


图2 M-CsNPs 防控稻瘟病示意图^[32]

2.2 对水稻纹枯病的防控

水稻纹枯病由立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*

Kuhn)引起, 是我国水稻的三大病害之一。其在华中稻区和华南稻区年均发病面积达到1 188.90 hm²次,

造成的产量损失占病害造成总产量损失的比例高达73.13%^[25]。目前,针对立枯丝核菌,防治的纳米载体包括水滑石类材料^[33]、铁基MOF^[34]及纤维素纳米晶体^[35]等。

Yang等^[15]通过水热法构建了果胶(PT)包覆、负载噻呋酰胺(TF)的铁基MOF纳米颗粒。与原药相比,其具有更好的抑菌活性,并减轻了噻呋酰胺悬浮液对种子茎长和根长的抑制作用。Hu等^[23]以白星花金龟幼虫虫砂(PBLF)提取物为原料,包封己唑醇(Hex)制备得到农药和肥料双重功能的酸响应可降解Hex@Fe-PBLF纳米颗粒。其对立枯丝核菌防治效果显著;同时Hex@Fe-PBLF还可作为肥料,促进了秧苗的生长。李柠君等^[36]通过W/O/W复乳法结合高压均质技术制备了井冈霉素纳米微囊和噻呋酰胺纳米微囊。与市售制剂相比,其具有更小的叶面接触角、更好的叶面润湿性及更高的杀菌活性。

2.3 对小麦赤霉病的防控

小麦赤霉病又称麦穗枯、红麦头,在全世界范围内均有发生,是我国一类农作物病虫害。小麦赤霉病在我国造成的年均产量损失高达55.34万吨^[37]。小麦赤霉病主要由镰刀菌引起,禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)为优势种。采用MOF、MSN等纳米载体包封戊唑醇、丙硫菌唑等传统农药,对禾谷镰刀菌有很好的抑制效果^[38]。

Sun等^[39]使用ZnMOFs纳米颗粒为载体装载戊唑醇(Tebu)并包封羧甲基纤维素(CMC),构建了一种具有pH和纤维素酶双响应特性的缓释纳米颗粒。与市售产品相比,其具有良好的抗真菌活性,同时具有很高的安全性。秦萌等^[40]使用纳米化的8%丙硫菌唑微乳剂和12%丙硫菌唑·戊唑醇微乳剂开展田间药效试验,纳米化的丙硫菌唑在有效成分用量减少20%~33%的情况下能达到与常规药剂相当甚至更优的防效,同时能有效控制真菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON),延缓叶片衰老,在提高籽粒容重和小麦品质等方面优势明显。此外,采用无载体自组装纳米颗粒如腈菌唑单宁酸共组装纳米颗粒及戊唑醇聚水杨酸共组装纳米颗粒递送杀菌剂,具有负载效率高、无载体诱导毒性等明显优势^[41-42]。

2.4 对灰霉病的防控

灰霉病是由灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)引起,能够影响200多种经济作物(如番茄、葡萄、草莓等)的世界性病害,是农业生产中极具破坏性的病害之一,在全球范围内带来严重的经济损失^[43]。纳米农药通过载体优化和智能响应病原菌侵染微环境(如酸

性分泌物、活性氧等)实现精准递送和释放,显著提升防控效率并减少环境毒性。

Xiong等^[44]将咯菌腈(Flu)负载在氨基化木葡聚糖基纳米颗粒(EXG)上,构建了Flu@EXG纳米颗粒,具有半纤维素酶和pH双响应。其在大豆上单次施用(灌根或叶面喷雾),即可同时抑制根部的大豆疫霉和叶片上的灰葡萄孢菌。Yu等^[9]通过基于木质素的皮克林乳液模板进行界面交联,制备了一种负载吡唑醚菌酯(Pyr)的木质素纳米微胶囊Pyr@LNC。其具有pH和漆酶响应、紫外线屏蔽能力、双向转运能力和灵活的拓扑结构。在喷施14 d后,Pyr@LNC的防治效果与吡唑醚菌酯悬浮剂相比提升近2倍,且Pyr@LNC对斑马鱼的急性毒性降至原药的10%以下。Yang等^[45]通过锌离子和钴离子与2-甲基咪唑的竞争配位作用制备了锌/钴ZIF纳米载体,并负载氟啶胺(Flu)和生物农药小干扰RNA(siRNA),构建了pH响应型双金属双农药纳米复合材料FZBR NPs,用于协同防治灰霉病(图3)。纳米颗粒中氟啶胺和siRNA表现出良好的协同杀菌效应,同时稳定性与商业制剂相比显著提高。FZBR NPs还能提供微量双金属元素促进农作物的生长。

2.5 对油菜菌核病的防控

油菜是我国最重要的油料作物,也是世界四大油料作物之一。由核盘菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)引起的油菜菌核病平均每年造成产量损失15.75万吨,占病害总损失比例的55.60%,是我国油菜生产中威胁最大的病害^[46]。

Tian等^[47]利用溶剂交换法自组装平均粒径为85 nm的球形纳米粒子(PB NPs),用于递送噻霉胺和丁酸,其对植物叶片上的核盘菌具有协同抗菌活性。此外,PB纳米粒子可作为营养物质促进植物生长,从而降低了噻霉胺对植物的毒性。Liang等^[48]构建了一种pH/近红外响应的纳米载体,使用高负载率的介孔硒化钼(MoSe₂)为核,以具有酸响应的聚丙烯酸(PAA)为壳,负载咪唑胺(Pro)形成pH/近红外响应核-壳纳米体系(PMP)。其具有更好黏附性与耐雨水冲刷能力,同时具有比商品化咪唑胺产品更高的杀菌活性及优异的生物相容性和安全性。

2.6 对马铃薯晚疫病的防控

马铃薯晚疫病由致病疫霉(*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary)引起,其症状表现为马铃薯叶片上的水渍状病斑^[49]。马铃薯晚疫病是马铃薯生产中的第一大毁灭性病害,每年在全球马铃薯产区造成巨大损失,其在中国造成的马铃薯年平均产

量损失占有病害所致产量损失的63.54%^[50]。

Wang等^[51]使用星形聚阳离子(SPc)为双链RNA(dsRNA)载体,设计了一种用于马铃薯晚疫病管理的自组装多组分纳米保护剂。该纳米颗粒有效克服了dsRNA难以被致病疫霉摄取的瓶颈问题,有效抑制了病原体并增强了植物防御机制,在田间环境中展现出更优异的防控效果。Wang等^[52]同样使用了

SPc包载壳聚糖和丁香酚,提高了壳聚糖和丁香酚对田间马铃薯晚疫病的防控效果。

Chen等^[53]发现,介孔二氧化硅纳米颗粒(MSNs)能够通过选择性诱导致病疫霉胞内产生过量活性氧,包括羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧自由基($\cdot\text{O}_2^-$)以及单线态氧($^1\text{O}_2$),引发致病疫霉产生氧化应激反应,从而导致细胞结构损伤。

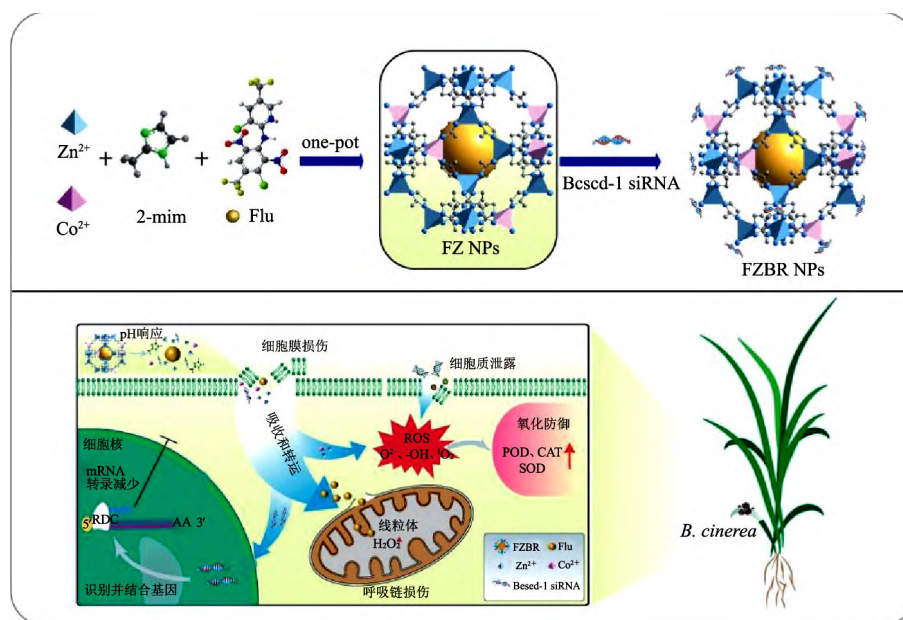


图3 FZBR NPs 抑菌机理图^[45]

2.7 对小麦条锈病的防控

小麦条锈病病原菌为条形柄锈菌(*Puccinia striiformis* West. f. sp. *tritici* Eriks.),小麦出苗至成熟均有可能感染。其影响60余个国家并出现过多次流行,造成严重的产量损失,是世界范围内的小麦重大病害^[54]。2023年,小麦条锈病被农业农村部列入《一类农作物病虫害名录(2023年)》。

Hembade等^[55]使用绿色方法合成了壳聚糖水杨酸纳米制剂(CH-NFs)和硫酸锌纳米制剂(Zn-NFs)。这2种纳米制剂(NFs)都能够激活小麦发病机制相关基因,显著提高苯丙氨酸解氨酶、酪氨酸解氨酶和多酚氧化酶的活性,有效控制小麦基因型(WH 711和WH 1123)中的条锈病。邓仕良等^[56]发现纳米银制剂可显著抑制小麦条锈菌CYR32在小麦幼苗叶片上产孢,具有良好的抑菌防病效果,具有开发成新型杀菌剂的良好潜力。

2.8 对枯萎病和根腐病的防控

尖孢镰刀菌是一种分布广泛的土传病原真菌,具有多种专化型,能够分别侵染百余种重要作物(如番茄、香蕉、西瓜、棉花、豌豆等),引发枯萎病和

根腐病,被列为世界十大植物病原真菌之一^[57-58]。

Su等^[59]首次合成了氧化锌-酿酒酵母纳米颗粒,用于防治尖孢镰刀菌黄芪专化型引起的黄芪根腐病。其在通过下调生理基因直接抑制病原菌的同时,通过激活黄芪中抗氧化酶、提高抗真菌代谢产物水平、诱导抗性基因表达的方式提高了黄芪的生物胁迫抗性。Noman等^[60]使用西瓜根际细菌巨大芽孢杆菌NOM14的无细胞培养滤液合成了生物源锰纳米颗粒(bio-MnNPs)。其通过抑制尖孢镰刀菌西瓜专化型在西瓜根/茎中的定殖和侵入性生长等方式防控西瓜枯萎病;同时触发了水杨酸信号通路,增加了西瓜根/茎中的锰含量,从而增强了西瓜的系统获得性抗性,改善了西瓜的生长状况。Ma等^[61]使用湿化学沉淀法合成了不同尺寸的纳米羟基磷灰石(nHA),抑制番茄镰刀菌枯萎病并促进植株生长。

2.9 对其他病害的防控

玉米大斑病是由大斑突脐孢菌(*Exserohilum turcicum* (Pass.) Leonay et Suggs)引起的玉米叶部病害,通过影响光合作用使玉米减产。Ma等^[62]设计了一种核-卫星形MOF纳米颗粒,基于锆的MOF作为

核并负载杀虫剂呋虫胺,负载杀菌剂戊唑醇的沸石咪唑酯骨架结构(ZIF)作为MOF卫星,同时防治害虫和真菌病害。其对玉米大斑病菌的EC₉₅降至单独使用戊唑醇的22.2%。

草莓炭疽病主要由炭疽菌属(*Colletotrichum*)引起,可造成草莓产量和品质下降。Wu等^[63]制备的壳聚糖/O-羧甲基壳聚糖/戊唑醇纳米颗粒(CS/O-CMCS/TBA NPs),对引起草莓炭疽病的胶孢炭疽菌(*C. gloeosporioides*)的活性较戊唑醇悬浮剂提高了3.13倍,并展现出更优异的叶面黏附性以及微生物靶点的黏附性能。Fang等^[64]通过原位硫化法在铜基金属有机框架(Cu-MOF)表面局部生长硫化铜(CuS)纳米颗粒,制备出封装苯醚甲环唑(DIF)的纳米颗粒DIF/CuS@Cu-MOF。与原药相比,其药效持续时间延长,对胶孢炭疽菌的防治效果提高了43.9%,在黄瓜叶片(亲水性)和花生叶片(疏水性)表面的持留量分别增加了36.5倍和9.4倍。

通过优化纳米递送体系,可有效改善作物种子的储存期。Ji等^[65]使用基于纤维素的光热涂层(PDA NPs@Cell-N⁺)来保护种子并实现谷物的长期储存。该涂层由光热聚多巴胺纳米粒子(PDA NPs)和带正电荷的纤维素衍生物(Cell-N⁺)组成,只需在红外辐射下即可根除种传细菌和真菌。其同时具有出色的溶解性和生物相容性,可以通过冲洗回收利用,降低了使用成本。

3 总结与展望

农作物的真菌病害是全球粮食安全面临的一个主要威胁。即使使用传统杀菌剂,真菌病害造成的损失估计仍占总收成的10%~23%,此外真菌导致的收获后腐烂还可造成20%的损失^[66]。纳米技术的迅猛发展为农业生产和植物保护注入新活力^[67]。与传统农药相比,纳米农药能够以响应方式包裹并递送农药活性成分,提高了药物的稳定性、叶面黏附性、内吸传导性等,并可在抵抗病害的同时发挥营养功效,提高农药效力并减少环境污染。

纳米农药在对抗多种重要的真菌病害上展现出比传统农药更优的防效,表现出多种优势,但仍存在一些值得关注的挑战。目前,纳米农药多针对单一真菌,自然界中常有多种真菌复合感染的情况发生,存在复杂的病原物-病原物-作物的相互作用关系,导致病害发生发展与单一侵染存在很大不同。针对每年导致全球大豆损失1亿~20亿美元的根腐病,研究发现镰刀菌-大豆疫霉-大豆之间广泛且复

杂的相互作用,其中镰刀菌产生的维生素B₆抑制大豆抗病相关基因的表达,使大豆疫霉逃避了大豆的免疫防御,导致镰刀菌属与大豆疫霉共存加重了大豆根腐病的发生^[68-69]。此外,纳米农药在田间复杂环境下的作用以及工业化大规模生产仍需进一步研究。总之,纳米农药领域正在蓬勃发展,基于纳米载体技术,多种突破传统方法的全新绿色高效杀菌方法正在不断涌现。纳米农药作为现代农业可持续发展的重要技术支撑,有望在全球重要真菌病害防控领域中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] STEINBERG G, GURR S J. Fungi, fungicide discovery and global food security[J]. Fungal Genetics and Biology: FG & B, 2020, 144: 103476.
- [2] STUKENBROCK E, GURR S. Address the growing urgency of fungal disease in crops[J]. Nature, 2023, 617(7959): 31-34.
- [3] FISHER M C, HENK D A, BRIGGS C J, et al. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health[J]. Nature, 2012, 484(7393): 186-194.
- [4] SAVARY S, WILLOQUET L, PETHYBRIDGE S J, et al. The global burden of pathogens and pests on major food crops[J]. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(3): 430-439.
- [5] DAGDAS Y F, YOSHINO K, DAGDAS G, et al. Septin-mediated plant cell invasion by the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae*[J]. Science, 2012, 336(6088): 1590-1595.
- [6] 吴佳奇, 朱学明, 鲍坚东, 等. 稻瘟病生物防治研究进展[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(3): 736-744.
- [7] TANG F H M, LENZEN M, MCBRATNEY A, et al. Risk of pesticide pollution at the global scale[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(4): 206-210.
- [8] ZHAO X, CUI H, 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.
- [9] YU B, CHENG J, FANG Y, et al. Multi-stimuli-responsive, topology-regulated, and lignin-based nano/microcapsules from pickering emulsion templates for bidirectional delivery of pesticides[J]. ACS Nano, 2024, 18(14): 10031-10044.
- [10] GUO X, LI H, LI Z, et al. Multi-stimuli-responsive pectin-coated dendritic mesoporous silica nanoparticles with eugenol as a sustained release nanocarrier for the control of tomato bacterial wilt[J]. Journal of Nanobiotechnology, 2025, 23(1): 191.
- [11] DONG J, CHEN W, QIN D, et al. Cyclodextrin polymer-valved MoS₂-embedded mesoporous silica nanopesticides toward hierarchical targets via multidimensional stimuli of biological and natural environments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 419: 126404.
- [12] DONG J, CHEN W, FENG J, et al. Facile, smart, and degradable

- metal-organic framework nanopesticides gated with Fe(III)-tannic acid networks in response to seven biological and environmental stimuli[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(16): 19507-19520.
- [13] CHEN Y, DONG J, SUN L, et al. Multidimensional stimuli-responsive and degradable pesticide nanocapsules through on site coordination assembly for enhanced pest and pathogen control[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(34): 12809-12820.
- [14] ZHOU Z, HU G, TANG G, et al. Fabrication of dual responsive microcapsules based on starch with enhanced foliar adhesion and photostability for improving control efficacy and reducing environmental risks[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 153290.
- [15] YANG L, CHEN H, ZHU S, et al. Pectin-coated iron-based metal-organic framework nanoparticles for enhanced foliar adhesion and targeted delivery of fungicides[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(8): 6533-6549.
- [16] HAO L, LIN G, LIAN J, et al. Carboxymethyl cellulose capsulated zein as pesticide nano-delivery system for improving adhesion and anti-UV properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 231: 115725.
- [17] WAN M, HONG T, ZHANG Y, et al. Polydopamine-coated matchstick-like mesoporous silica carriers for improving foliar retention and responsive pesticide release[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 700: 134746.
- [18] XU C, CHEN H, SHANGGUAN W, et al. Two birds with one stone: multifunctional controlled-release formulations of pesticides [J]. *New Plant Protection*, 2024, 1(1): 13.
- [19] 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.
- [20] LOWRY G V, GIRALDO J P, STEINMETZ N F, et al. Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants[J]. *Nat Nanotechnol*, 2024, 19(9): 1255-1269.
- [21] ZHAO M, ZHOU H, HAO L, et al. A high-efficient nano pesticide-fertilizer combination fabricated by amino acid-modified cellulose based carriers[J]. *Pest Manag Sci*, 2022, 78(2): 506-520.
- [22] HE C, WU T, LI J, et al. Bio-stimulant based nanodelivery system for pesticides with high adhesion and growth stimulation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 491: 151904.
- [23] HU Z, SHU C, WANG M, et al. Eco-friendly pH-responsive iron-doped insect larval frass extract as a hexaconazole nano-delivery system for controlling fungal disease and promoting crop growth[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 153025.
- [24] ZHAO W, WU Z, AMDE M, et al. Nanoenabled enhancement of plant tolerance to heat and drought stress on molecular response[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(51): 20405-20418.
- [25] 元璐, 张涛, 曾娟, 等. 近年我国水稻五大产区主要病害发生情况分析[J]. *中国植保导刊*, 2021, 41(4): 37-42; 65.
- [26] 李威, 梁平. 2014—2021年黔东南州稻瘟病发生特点及综合防治措施[J]. *中国植保导刊*, 2023, 43(2): 60-63.
- [27] HU J, GONG C, JIA Y, et al. Preparation of pH-responsive Kas@ZnO quantum dots for synergistic control of rice blast and enhanced disease resistance in rice[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(44): 60842-60855.
- [28] ABDELRAHMAN T M, QIN X, LI D, et al. Pectinase-responsive carriers based on mesoporous silica nanoparticles for improving the translocation and fungicidal activity of prochloraz in rice plants [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126440.
- [29] HU P, ZHU L, DENG W, et al. ConA-loaded PEGylated graphene oxide for targeted nanopesticide carriers against *Magnaporthe oryzae*[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, 6(11): 9484-9494.
- [30] ZHI H, CHEN H, YU M, et al. Layered double hydroxide nanosheets improve the adhesion of fungicides to leaves and the antifungal performance[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, 5(4): 5316-5325.
- [31] LI C, WANG N, JIAO L, et al. Safe and intelligent thermoresponsive β -cyclodextrin pyraclostrobin microcapsules for targeted pesticide release in rice disease management[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(3): 1922-1928.
- [32] HAFEEZ R, GUO J, AHMED T, et al. Bio-formulated chitosan nanoparticles enhance disease resistance against rice blast by physiomorphic, transcriptional, and microbiome modulation of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Carbohydr Polym*, 2024, 334: 122023.
- [33] GAO Y, ZHOU Z, TANG G, et al. Facile fabrication of a fungicide and plant immune inducer co-delivery nanosystem for enhanced control efficacy against plant disease[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 482: 148817.
- [34] YANG L, CHEN H, ZHU S, et al. Pectin-coated iron-based metal-organic framework nanoparticles for enhanced foliar adhesion and targeted delivery of fungicides[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(8): 6533-6549.
- [35] NING L, YOU C, JIA Y, et al. Cellulose nanocrystals for crop protection: leaf adhesion and controlled delivery of bioactive molecules[J]. *Green Chemistry*, 2023, 25(7): 2690-2698.
- [36] 李柠君, 崔建霞, 黄秉娜, 等. 防治水稻纹枯病的两种纳米微囊的制备与杀菌活性[J]. *山东农业科学*, 2021, 53(4): 108-114.
- [37] 王也, 蒋沁宏, 车琳, 等. 我国小麦产区间病害发生与损失差异比较研究[J]. *植物保护*, 2022, 48(4): 278-285.
- [38] KAZIEM A E, YANG L, LIN Y, et al. Efficiency of mesoporous silica/carboxymethyl β -glucan as a fungicide nano-delivery system for improving chlorothalonil bioactivity and reduce biotoxicity[J]. *Chemosphere*, 2022, 287: 131902.
- [39] SUN L, HOU C, WEI N, et al. pH/cellulase dual environmentally responsive nano-metal organic frameworks for targeted delivery of pesticides and improved biosafety[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478: 147294.
- [40] 秦萌, 梁冰, 窦道龙, 等. 含有丙硫菌唑的纳米化制剂防治小麦赤霉病效果调查[J]. *中国植保导刊*, 2024, 44(1): 83-86.

- [41] LI X, ZHOU Z, HUANG Y, et al. A high adhesion co-assembly based on myclobutanil and tannic acid for sustainable plant disease management[J]. *Pest Manag Sci*, 2023, 79(10): 3796-3807.
- [42] HUANG Y, WANG H, TANG G, et al. Fabrication of pH-responsive nanoparticles for co-delivery of fungicide and salicylic acid with synergistic antifungal activity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 451: 142093.
- [43] 张莉, 张博源, 黄继红, 等. 植物灰霉病生物防治研究进展[J]. *现代牧业*, 2021, 5(2): 55-60.
- [44] XIONG Q, XIE Z, YU B, et al. Bidirectional uptake and redistribution, bio-stimuli responsive xyloglucan-based nanodelivery system for enhanced translocation of non-systemic pesticide in soybean plants[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 500: 156310.
- [45] YANG T, PEI H, SUN S, et al. An eco-friendly bimetallic dual-pesticide metal-organic framework nanocomposite for synergistic control of grey mold[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(2): 115892.
- [46] 杨清坡, 刘万才, 黄冲. 近10年油菜主要病虫害发生危害情况的统计和分析[J]. *植物保护*, 2018, 44(3): 24-30.
- [47] TIAN Y, HUANG Y, ZHANG X, et al. Self-assembled nanoparticles of a prodrug conjugate based on pyrimethanil for efficient plant disease management[J]. *J Agric Food Chem*, 2022, 70(38): 11901-11910.
- [48] 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 Appl Mater Interfaces*, 2024, 16(13): 15931-15945.
- [49] YUEN J. Pathogens which threaten food security: *Phytophthora infestans*, the potato late blight pathogen[J]. *Food Security*, 2021, 13(2): 247-253.
- [50] 李洁, 闫硕, 张芳, 等. 近年来中国马铃薯晚疫病的时空演变特征及防控情况分析[J]. *植物保护学报*, 2021, 48(4): 703-711.
- [51] WANG Y, LI M, YING J, et al. High-efficiency green management of potato late blight by a self-assembled multicomponent nanobioprotectant[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 5622.
- [52] WANG X, ZHENG K, CHENG W, et al. Field application of star polymer-delivered chitosan to amplify plant defense against potato late blight[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417: 129327.
- [53] CHEN S, GUO X, ZHANG B, et al. Mesoporous silica nanoparticles induce intracellular peroxidation damage of *Phytophthora infestans*: a new type of green fungicide for late blight control[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(9): 3980-3989.
- [54] CHEN X. Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen[J]. *Food Security*, 2020, 12(2): 239-251.
- [55] HEMBADE V L, YASHVEER S, TAUNK J, et al. Chitosan-salicylic acid and zinc sulphate nano-formulations defend against yellow rust in wheat by activating pathogenesis-related genes and enzymes[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 192: 129-140.
- [56] 邓仕良, 张丕文, 杨宇衡. 纳米银对小麦条锈菌的抗菌效应研究[J]. *植物医生*, 2017, 30(10): 58-60.
- [57] 王泽华, 方香玲. 尖孢镰刀菌遗传多样性研究进展[J]. *中国草地学报*, 2021, 43(5): 106-114.
- [58] DEAN R, VAN KAN J A, PRETORIUS Z A, et al. The top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology[J]. *Mol Plant Pathol*, 2012, 13(4): 414-430.
- [59] SU Y, YANG W, WANG R, et al. ZnO-*S. cerevisiae*: an effective growth promoter of *Astragalus memranaceus* and nano-antifungal agent against *Fusarium oxysporum*[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 486: 149958.
- [60] NOMAN M, AHMED T, IJAZ U, et al. Bio-functionalized manganese nanoparticles suppress *Fusarium* wilt in watermelon (*Citrullus lanatus* L.) by infection disruption, host defense response potentiation, and soil microbial community modulation[J]. *Small*, 2023, 19(2): e2205687.
- [61] MA C, LI Q, JIA W, et al. Role of nanoscale hydroxyapatite in disease suppression of *Fusarium*-infected tomato[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(20): 13465-13476.
- [62] MA S, YANG X, WANG Y, et al. A core-satellite MOF-on-MOF hybrid for intelligent delivery of multi-agrochemicals for sustainable agriculture[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 624: 157129.
- [63] WU J, CHANG J, LIU J, et al. Chitosan-based nanopesticides enhanced anti-fungal activity against strawberry anthracnose as "sugar-coated bombs"[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126947.
- [64] FANG Y, XIE Z, ZHANG H, et al. Near-infrared-responsive CuS@Cu-MOF nanocomposite with high foliar retention and extended persistence for controlling strawberry anthracnose[J]. *Journal of Controlled Release*, 2024, 367: 837-847.
- [65] JI X, TIAN W, JIN K, et al. Cellulose-based photothermal coating: a sustainable solution for seed protection and long-term grain storage[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(14): 13861-13871.
- [66] CASE N T, GURR S J, FISHER M C, et al. Fungal impacts on Earth's ecosystems[J]. *Nature*, 2025, 638(8049): 49-57.
- [67] GILBERTSON L M, POURZAHEDI L, LAUGHTON S, et al. Guiding the design space for nanotechnology to advance sustainable crop production[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(9): 801-810.
- [68] CHAWLA S, BOWEN C R, SLAMINKO T L, et al. A public program to evaluate commercial soybean cultivars for pathogen and pest resistance[J]. *Plant Disease*, 2013, 97(5): 568-578.
- [69] WANG S, ZHANG X, ZHANG Z, et al. *Fusarium*-produced vitamin B(6) promotes the evasion of soybean resistance by *Phytophthora sojae*[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2023, 65(9): 2204-2217.

(编辑:顾林玲)