



黄元炬. 纳米技术在除草剂制备上的应用研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2024(6):113-118.

纳米技术在除草剂制备上的应用研究进展

黄元炬

(黑龙江省农业科学院 植物保护研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:目前纳米技术已经应用到农业的各个领域,其在农药领域的除草剂制备上也取得了一系列进展,纳米技术和纳米材料的应用能够改善除草剂药剂性能,进而实现节能减排和降污环保。本文简要介绍了纳米技术的定义、纳米农药的分类、使用安全性和纳米技术在农药中的应用,进一步阐明纳米技术在除草剂制备中的应用优势,并分别从纳米除草剂的作用机制、剂型种类、制备方法和应用现状等方面综述其研究情况,最后,对纳米技术在除草剂制备中应用的广阔前景、存在问题及发展方向进行展望。

关键词:纳米技术;除草剂;纳米农药

除草剂是农业生产中的一种常用农药,它可以彻底或选择性地杀灭农田杂草和有害植物,而农作物的病害传染源和虫害寄主数量也会随着杂草的消失而降低,所以除草剂的使用会给农业生产带来巨大的经济效益^[1]。纳米技术在现代科技和农业领域有着广泛的应用前景,利用纳米技术开发高效、安全的农药新剂型,实现农药的节能减排、提质增效、绿色环保,成为现阶段的研究热点^[2]。国内外关于纳米技术在除草剂上的应用已有许多文献报道,早在1986年Posanski等^[3]就报道了将除草剂制成粒径为10~200 nm制剂的研究,并与常规制剂进行对比试验,结果表明纳米制剂的生物活性提高了1倍~2倍;Yearla等^[4]优化的纳米除草剂,具有较高的敌草隆药剂负载和包封效率,所应用的茎秆木质素纳米载体材料成为制备纳米除草剂重要的开发对象;Lim等^[5]制备了草甘膦异丙胺纳米乳除草剂,并将其应用于毛地黄、阔叶丰花草和野牛草上进行验证试验,结果表明其叶面沉积率显著低于对照药剂农达,而可见伤害率却无差异,说明纳米乳制剂的生物活性明显增强,提高了药效。

纳米技术在除草剂制备上的应用在我国无疑还是一个充满挑战的创新领域,其研究热度处于持续升温状态,创制高效、安全、低残留、强降解的新型药剂便为理想目标。本文基于对纳米技术的定义、应用领域、使用安全性及其在农药中的应用简述,进一步阐明纳米技术在除草剂制备上的应用优势和研究现状,最后针对其发展前景和面临

的问题提出展望,以期纳米技术在农业领域的应用提供参考。

1 纳米技术与农药

1.1 纳米技术

1.1.1 定义及应用领域 关于纳米技术的定义很多文献都有提及,目前普遍接受的定义是美国纳米科学、工程和技术小组委员会(NSET)在2000年提出的定义:“在原子、分子或大分子水平上,长度在1~100 nm范围内的研究和技术开发;创建和使用由于其小或中等尺寸而具有新颖特性和功能的结构、器件与系统。”简言之,纳米技术就是有关原子重构及其应用的技术。然而纳米技术的基础是纳米材料,因此纳米材料可定义为:一切尺度在1~100 nm范围内,以及含有此类尺度大小的材料^[6]。

纳米技术的应用领域非常广泛,目前在材料、医学、环境、能量、电子信息及食品科学中均产生了重大影响^[7]。然而纳米技术在农业中的应用潜能还没有被充分发掘,纳米农药更是作为新生事物,在质疑和讨论中逐渐被认可。

1.1.2 应用的安全性 纳米技术作为一种独特的高新科技,应用发展前景十分广阔,由于技术的特殊性,其安全性和持续性需特别关注。一方面因为纳米材料的比表面积较大、结构尺寸小近原子级,更容易通过细胞膜进入人体内部,对人体细胞和组织产生损害;另一方面纳米粒子在环境中的生物毒性和生态影响存在着不确定性,若盲目

收稿日期:2024-01-22

基金项目:十四五国家重点研发计划项目(2023YFD1401100);黑龙江省农业科技创新跨越工程重点攻关项目(CX23GG14)。

作者简介:黄元炬(1970—),男,硕士,副研究员,从事农田杂草防除及除草剂应用技术研究。E-mail: huangyuanju01@sina.com。

应用纳米技术将会带来不可预知的安全隐患。所以纳米技术的安全性评估研究十分必要,国家对纳米技术的开发应用和监管工作也必须加强。一直以来科学技术都是一柄双刃剑,给人类带来利益的同时,也会带来疑惑和问题,科研人员需要有针对性地研究,使其有害性降到最小或者避免,然后再进行大规模应用。

1.2 纳米农药

1.2.1 定义 农药是预防、消灭或者控制病虫害的一种手段,是保障国家农业安全和稳定生产的物质基础^[8]。《中国农业百科全书·农药卷》定义了农药是用来防治危害农林牧业生产的有害生物和调节植物生长的化学药品,包括改善有效成分物理、化学性状的各种助剂。而纳米农药是通过纳米制备技术,使有效成分在制剂和使用分散体系中的平均粒径以纳米尺度分散状态稳定存在的农药,可以通过纳米载体、药物成分与助剂的有效复合,创制出靶向传输、智能释放和环境效应等功能,以实现药物的高效性、长效性、安全性、靶标特异性等。

1.2.2 分类 纳米农药主要分三类^[9-12]:一是,农药原药纳米化,即通过纳米制备技术,将农药中原药颗粒尺寸降低,比表面积增大,提高了药物本身的分散性和稳定性;二是,通过载体负药的方式可改善敏感性农药的稳定性,减少流失,也可控制药物的释放速度,延长持效期;三是,一些纳米金属或无机物与农药复配形成纳米级微粒农药,使用后在促进药物分解和降低残留方面效果明显。

1.3 纳米技术在农药中的应用

1.3.1 在开发农药新剂型上的应用 近年来,随着纳米技术在农业中的广泛应用,随之开发的纳米农药新剂型,实现了化学农药的提质增效、减量节能和环保可持续。如丁莹^[13]利用二氧化硅纳米颗粒设计合成了一种纳米啉虫脒农药用于防控作物病虫害,结果表明,试验药剂具有良好的润湿性、黏附性、稳定性、生物安全性和氧化还原响应释放特性,并且能够有效防控蚜虫、小菜蛾,降低叶片农药残留和减轻植物毒性,是一种良好的纳米杀虫剂;戚晨雨^[14]利用金属有机框架构建了噻虫嗪和吡虫啉纳米农药,试验结果表明,两种载药颗粒的缓释效果延长了作用时间,对烟粉虱的灭杀效果较好,不仅提高了利用率,减少用药量,还降低了药物残留;吴钦超^[15]利用 Fe_3O_4 纳米粒子及介

孔二氧化硅制备成铁基介孔二氧化硅纳米粒子,负载啉虫脒形成的纳米农药,能够增加其对水稻纹枯病菌的抑制作用,并显著降低了啉虫脒对赤子爱胜蚓的急性毒性;Jiang 等^[16]采用低能乳化法制备的环保型草甘膦异丙胺纳米乳,增加了水溶性异丙醇对叶面角质层和蜡质层的渗透性,对牛筋草的防治半数有效量(ED_{50})显著低于市售草甘膦剂型农达。

纳米材料作为核酸农药的递送载体,能够提高药物的转染效率、干扰效率和双链(ds)RNA 的稳定性。如 Wang 等^[17]报道由介孔二氧化硅纳米颗粒、层状双氢氧化物纳米片或碳纳米管等纳米材料负载 DNA 或 RNA,可直接穿透植物细胞和病原菌细胞的细胞壁,瞬时或稳定转化;Avila 等^[18]设计的 BiP-dsRNA 纳米胶囊相较于裸 BiP-dsRNA,可缩短豌豆蚜幼虫的死亡时间,并显著提高赤拟谷盗的死亡率;Christiaens 等^[19]利用鸟苷酸聚合物作为纳米载体,有效防治了外源 dsRNA 在甜菜夜蛾碱性肠道中的降解;李吉文^[20]利用纳米星型聚阳离子(SPC)为载体形成的复合物,喷施草地贪夜蛾雌蛾,其生殖能力显著降低,证实 SPC 作为纳米载体的可行性和优势。

1.3.2 在农药残留检测上的应用 纳米技术在农药残留检测上的应用具有许多独特的优势,如纳米材料的灵敏度高、选择性强,技术手段操作简单、结果快速等,直接达到农药残留的精准监测,减少污染,防止药害发生,其应用前景广阔。如覃祖成^[21]设计合成了两种新型复合纳米材料,应用到大米和玉米中除草剂残留检测,检出限低,精密度好,方法可行、有效;张佳^[22]制备一种特殊纳米材料,构建出的新型生物传感器,可有效监测稻谷中的啉虫脒农药,具有良好的选择性和检测性能;倪才雨^[23]通过构建纳米银探针,实现对百草枯、敌草快等 10 种吡啉类除草剂的痕量检测,检测限低达 $1 \times 10^{-10} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;尹雪峰等^[24]总结了 Fe_3O_4 纳米颗粒作为纳米吸附剂,用于痕量农药残留分析的技术优势,该技术在一定程度上满足农药残留检测的实际需求。

1.3.3 在农药污水处理上的应用 纳米材料可作为高活性的吸附剂、催化剂,解决一些残留农药污水的处理问题。如原研浩^[25]利用生物壳聚糖为原料,共组装纯化后的二硫化钨纳米片或柔性的还原氧化石墨烯纳米片,形成的复合气凝胶,具

有高吸附、吸光、吸热性能,对农药的污水处理具有很好的效果;张平^[26]通过总结纳滤膜截留污水中杀虫剂的研究发现,对二氯化物以外的其他不含酚杀虫剂截留率在 96.7% 以上;张新荣等^[27]研究发现,采用纳米 $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 附载型复合光催化剂,能在其表面迅速富集有机磷农药,当复合型光催化剂 $\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 摩尔比为 30:70 时,其活性最高,对有机磷农药的吸附量达 80.0% 左右,可高效处理农药污水中的有害物质。

2 纳米技术应用于除草剂制备的优势

2.1 技术优势

通过纳米材料或技术制备纳米除草剂,与传统除草剂相比,具有许多优势:(1)应用纳米技术制备的除草剂存在颗粒小、比表面积大等特点,与目标生物接触面积扩大,直接增加了药剂利用率^[28];(2)一些不易溶解的药剂,可以运用纳米技术增加其水分散性,减少有机溶剂的使用量,降低毒性^[29];(3)许多对环境敏感、易被降解的药剂,通过纳米载体的吸附或包埋能够增加除草剂的稳定性和生物活性,以提高药效^[30];(4)由于纳米载体表面的可修饰性,负载药剂的除草剂直接促使其在目标生物体上的黏附性增加,延长了滞留时间和沉积率,从而提高防效;(5)通过纳米级金属及其氧化物与除草剂药剂复配后,可以利用其还原作用分解有害药剂,减少药物残留,起到低毒、环保效果。

2.2 环保优势

纳米除草剂基于自身的结构特点在使用过程中,较传统除草剂更环保,主要优势体现在以下几个方面。

(1)药剂粒子尺寸降至纳米级,一方面改变了药剂粒子本身性质,降低毒性,并充分挖掘原药性能;另一方面改变其在液体中的分散性和溶出效率,部分药剂可以用水直接取代含苯的有机溶剂,降低溶剂的毒性。

(2)纳米级药剂粒子的小尺寸、大比表面积效应,降低了除草剂的使用量,减少污染。

(3)纳米技术增加了除草剂与作物叶面或有害生物的黏附性、亲和性,能够延长持效期,降低施用次数,并减少流失^[31]。

(4)通过纳米技术构建的缓释纳米载药系统,使除草剂药效可控,实现缓慢、快速、定时和导向释放,做到了精准防控,降低药剂毒副作用。

2.3 经济效益优势

除草剂制备中应用纳米技术,不仅能提高药效,减少药量,绿色环保,在经济效益上也表现出较强的优势:一方面改善了传统除草剂制备过程中的耗时长、耗能高、工序复杂和设备昂贵等问题,提高了产出速度和能源利用率,实现小设备的简单化生产;另一方面纳米除草剂的粒径小、低量高效特点,可满足无人机超低容量、粒径细、稳定性高的药剂喷施要求,适宜开展无人机飞防作业,从而节省大量人力和时间,增加经济效益^[32-33]。

3 纳米技术应用于除草剂制备的研究现状

随着传统除草剂的长期使用,逐渐造成农业生产中杂草抗药性、需药剂量大、严重污染环境等现象,所以开发新型高效且环保的除草剂成为当务之急^[34],纳米除草剂则应运而生。纳米除草剂不仅能够通过降低药量、提高药效、靶向除草以减少经济投入,更实现了低毒、减污、环保、绿色的安全除草过程。

3.1 纳米除草剂的作用机制和剂型种类

3.1.1 作用机制 除草剂的作用机制比较复杂,主要是干扰或破坏杂草的正常生理代谢导致杂草枯萎。通过抑制光合、破坏呼吸、打乱激素平衡、干扰核酸代谢和蛋白合成等,使杂草体内无法进行正常生理生化过程而导致死亡^[35]。目前所制备应用的纳米除草剂主要指药剂分子的结构尺寸为纳米级,其有效作用分子仍为各类化学药剂,所以作用机制与传统化学除草剂无异^[36]。

除草剂可根据作用方式分为输导型除草剂和触杀性除草剂;根据作用性质分为灭生性除草剂和选择性除草剂;根据施药时间分为播前处理剂、播后苗前处理剂和苗后处理剂;根据施药对象分为土壤处理剂和茎叶处理剂;根据剂型分为水剂、水溶性粉剂、可湿性粉剂、悬浮剂、乳剂、油剂、颗粒剂和粉剂等^[37-38]。

3.1.2 主要剂型种类 纳米除草剂的剂型种类研究主要集中在纳米微乳、纳米微囊、纳米微球和纳米包合物上^[39]。(1)纳米微乳是由水、油、表面活性剂和助剂等自组装形成的纳米级(10~100 nm)胶体分散体系。如 Jiang 等^[16]开发环保型水包油纳米乳液体系,制备的草甘膦除草剂;刘大会等^[40]发明的高效环保艾叶挥发油纳米乳除草剂。(2)纳米微囊是通过界面聚合、乳液聚合或原位聚合等

方法,将药剂封装于囊心而形成的纳米微囊载药系统。如王瑞兵等^[41]研发由葫芦脲、甲基紫晶和4-己氧基偶氮苯组装形成的太阳光敏感型除草剂纳米囊;Xiang等^[42]在微纳米多孔磁性载体(硅藻土/ Fe_3O_4)上,负载草甘膦,并以壳聚糖包埋形成的纳米微囊除草剂。(3)纳米微球是通过膜乳化法和相反转乳化技术,以聚酸乳、壳聚糖、聚丁二酸丁二酯、二氧化硅等为载体,构建的微米级小球。如Xiang等^[43]利用可溶性淀粉(SS)调控构建多孔碳酸钙微球(PCMs)制备的扑草净(PMT)纳米除草剂。(4)纳米包含物是指药剂有效成分被包嵌在另一种物质的空穴结构内形成的包含体,如Chi等^[44]利用凹凸棒石(ATP)多孔的微/纳米网格结构,结合大量的草甘膦(Gly)分子,制成的温度响应型控释除草剂颗粒(TCHP)。

3.2 纳米级除草剂的制备

3.2.1 制备方法 纳米除草剂就是利用纳米材料或技术制备的一种新型纳米农药^[45]。而纳米农药颗粒的制备方法包括物理法、化学法和生物法,通过这些方法制备出纳米粒子后,再经人工或自组装进一步制成纳米农药^[46]。其中物理法主要为高压均质法、超声波法等;化学法主要为沉淀法、溶胶-凝胶法、微乳液法等;生物法主要为生物还原法、生物合成法等。

(1)高压均质法是利用高压均质机将药物、载体加速至极高流速,产生空化作用,使其细化、均质;(2)超声波法是利用超声波的空化作用和机械作用,高频振动使得材料细化至纳米级,同时实现农药和载体均匀分散。(3)沉淀法是利用沉淀剂将金属溶液进行沉淀处理,从而得到高纯度纳米颗粒的一种方法,它包括直接沉淀和均匀沉淀;(4)溶胶-凝胶法是指无机物或金属化合物经过溶液溶解、溶胶陈化、聚合凝固的过程,形成固体纳米粒子的方法;(5)微乳液法是由两种互不相容的溶剂,在表面活性剂、助剂的作用下,形成均匀分散的微乳液,再通过减压、加热等方式从乳液中析出纳米颗粒固体;(6)生物还原法是指通过微生物的代谢活性,还原酸化金属离子形成金属纳米粒子,后载药形成纳米农药;(7)生物合成法是指利用植物、微生物或其他生物体等合成纳米材料,再与农药混合得到纳米农药的方法。

3.2.2 制备研究的现状 有关于纳米除草剂的制备,国内已有诸多成功案例,如王建良^[47]发明

了一种纳米除草剂的制备方法,包含纳米羟基磷灰石、丁草胺、氨基甲酸酯等有效组分,可用于瓜果芽前处理,除草效果好、药物残留少且无毒环保;杜学忠等^[48]发明一种壳聚糖包封介孔碳纳米除草剂的制备方法,利用羧基化的介孔碳纳米颗粒为载体,在溶液中强烈吸附除草剂分子,再通过壳聚糖包封,制备出的纳米除草剂生物相容性好、成本低、制备过程简单且对人体毒副作用极小;潘晓鸿等^[49]发明一种气候响应型纳米除草剂的制备方法,该药剂主要由沸石咪唑酯骨架材料(ZIF-8)负载双草醚形成,其水溶液喷洒于植物表面经太阳光照(紫外线)或雨水冲刷(环境pH)后,效果更佳;李战军等^[50]利用超声波分散技术,成功制备咪唑磺草胺除草剂微米粉和纳米粉,有效降低了药剂的使用残留和对后茬作物的毒害。

4 展望

纳米技术在除草剂制备领域中表现出巨大的应用潜力,不仅可以实现农业生产的节本增效、可持续发展,还能够降低药剂对生态环境的污染,促进全面绿色发展。然而由于纳米技术产品结构的特殊性,投入使用后也将会产生许多潜在问题,这就需要有针对性地加大科研力度,同时紧密结合农业生产进行深入细致地研究,从而保证技术产品的安全性和实用性。

我国纳米技术在农药中应用的政策法规还不够完善,而一个产业的发展与繁荣离不开国家政策的助推。近几年国内陆续出台了有关纳米农药的政策文件,如2017年中国农业科学院发布《“跨越2030”农业科技发展战略》中明确指出争取在纳米农药方面实现重大突破^[51];2018年农业农村部印发的《农业绿色发展技术导则(2018—2030)》也提出,要重点研发纳米智能控释肥料和绿色环保型纳米农药的观点^[52];2022年7月农业农村部在对十三届全国人大五次会议第5084号建议答复中表示,大力发展推广应用纳米化农药多元复配技术,推动产业化发展。国家一系列的政策无疑为纳米农药产业蓄积了大量人才和资金,促进其蓬勃发展。后续还需要继续并加强关注,进一步控制农药新剂型的制备流程及产品质量,起草相关标准和药品登记政策等,以促进纳米技术在农药中的应用。

目前应用纳米技术制备各类除草剂大部分还在实验室研究阶段,而纳米除草剂产品的应用也

主要以小范围的草坪保养、园林绿化等,距离大规模应用仍有一定距离。现有应用推广过程中不仅缺乏药剂的规模化和标准化生产条件,广大群众对纳米科技的认知也不足、接受程度不强。因此,在我国纳米技术应用于除草剂制备的研究属于新兴领域,具有很大的发展空间。

参考文献:

- [1] 李冬冬. 基于碳基纳米复合物的除草剂残留传感检测研究[D]. 长沙:湖南大学,2022.
- [2] 周闯,李普旺,冯岗,等. 纳米材料在缓/控释农药中的研究进展[J]. 农药,2019,58(5):318-323.
- [3] POSANSKI U, GHYCZY M, BAUER K H, et al. Liquid active ingredient concentrates for preparation of microemulsions; US4567161[P]. 1986-01-28.
- [4] YEURLA S R, PADMASREE K. Exploitation of subabul stem lignin as a matrix in controlled release agrochemical nanoformulations; a case study with herbicide diuron[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (18): 18085-18098.
- [5] LIM C J, BASRI M, OMAR D, et al. Green nanoemulsion-laden glyphosate isopropylamine formulation in suppressing creeping foxglove (*A. gangetica*), slender button weed (*D. ocimifolia*) and buffalo grass (*P. conjugatum*)[J]. Pest Management Science, 2013, 69(1): 104-111.
- [6] 张邦维. 纳米材料物理基础[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [7] 张莉,程晓宇,刘洪霞. 农业纳米技术应用分析与展望[J]. 农业展望,2018,14(5):63-67.
- [8] 张大侠,潘寿贺,白海秀,等. 纳米杀虫剂及其在农业害虫防治中的应用[J]. 昆虫学报,2020,63(10):1276-1286.
- [9] 宋玉东. 负载活性因子的电纺纤维膜的制备及应用研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
- [10] 徐春光,郑峰. 纳米农药的发展现状和潜在风险防范[J]. 种子科技,2023,41(14):103-105.
- [11] 孙长娇,崔海信,王琰,等. 纳米材料与技术 在农业上的应用研究进展[J]. 中国农业科技导报,2016,18(1):18-25.
- [12] 梁文龙. 壳聚糖纳米农药的构建及其生物应用研究[D]. 广州:华南农业大学,2018.
- [13] 丁莹. 氧化还原响应性纳米吡虫啉农药对作物害虫的防控[D]. 无锡:江南大学,2023.
- [14] 戚晨雨. 多孔 ZIF 纳米载体的制备及其农药负载-释放性能研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
- [15] 吴钦超. 基于铁基介孔材料的噻嗪酯纳米颗粒的制备及其对水稻纹枯病的防控研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [16] JIANG L C, BASRI M, OMAR D, et al. Green nano-emulsion intervention for water-soluble glyphosate isopropylamine (IPA) formulations in controlling *Eleusine indica* (E. indica) [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2012, 102 (1): 19-29.
- [17] WANG J W, GRANDIO E G, NEWKIRK G M, et al. Nanoparticle-mediated genetic engineering of plants[J]. Molecular Plant, 2019, 12(8): 1037-1040.
- [18] AVILA L A, CHANDRASEKAR R, WILKINSON K E, et al. Delivery of lethal dsRNAs in insect diets by branched amphiphilic peptide capsules[J]. Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society, 2018, 273: 139-146.
- [19] CHRISTIAENS O, TARDAJOS M G, MARTINEZ REYNA Z L, et al. Increased RNAi efficacy in *Spodoptera exigua* via the formulation of dsRNA with guanlylated polymers [J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 316.
- [20] 李吉文. 草地贪夜蛾 Met、EcR 和 USP 在生殖调控中的作用及纳米核酸农药制备[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
- [21] 覃组成. 复合纳米材料的制备及其在谷物中除草剂残留检测方面的应用[D]. 长春:吉林大学,2020.
- [22] 张佳. 稻谷中啮虫脲残留的测定[J]. 粮食与饲料工业, 2023(3):64-68.
- [23] 倪才雨. 纳米银的 SERS 衬底构建及其对联吡啶类除草剂探测[D]. 合肥:合肥学院,2022.
- [24] 尹雪峰,丁婉,石壮壮,等. 功能性 Fe₃O₄ 纳米颗粒在痕量农药残留分析中的应用研究进展[J]. 农药学报,2023, 25(6):1222-1237.
- [25] 原研浩. 生物质多糖基复合凝胶制备及其农业污水处理应用[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
- [26] 张平. 纳米技术在污水处理中的应用[J]. 能源与环境, 2013(2):93-94,96.
- [27] 张新荣,杨平,赵梦月. 负载型复合光催化剂 TiO₂·SiO₂/beads 降解有机磷农药[J]. 环境污染与防治,2002,24(4): 196-198.
- [28] 王婷婷. 改性生物炭的制备及其在大米农药残留分析中的应用[D]. 天津:天津商业大学,2020.
- [29] 刘倩. 纳米晶技术增加难溶性药物的透膜性和跨膜转运的机理研究[D]. 北京:军事科学院,2019.
- [30] 王杨. 环境响应性聚合物纳米药物载体的制备、表征及应用[D]. 上海:复旦大学,2013.
- [31] 杜谦,王听雨,陈龙,等. 纳米农药的优势与环境风险研究进展[J]. 现代农药,2023,22(2):28-35.
- [32] 钱虹. 纳米除草剂和靶标生物的相互作用[J]. 世界农药, 2019,41(3):38-44,56.
- [33] 赵莲英. 植保无人机喷施纳米农药防治水稻主要病虫的药效评价[J]. 安徽农业科学,2020,48(14):144-146,155.
- [34] 丁光龙. 新型除草剂的制备及应用研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
- [35] 唐韵. 除草剂使用技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [36] 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.
- [37] 余曼丽. 靶向亲和型农药纳米载药系统的构建及表征[D]. 北京:中国农业科学院,2017.
- [38] 孙家隆,周风艳,周振荣. 现代农药应用技术丛书-除草剂卷[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- [39] 张丽红. 新型纳米农药和马铃薯生长调节剂的制备及作用机理[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.

- [40] 刘大会,陈红,李金鑫,等.一种艾叶挥发油纳米乳除草剂及其制备方法与应用;CN116369316A[P]. 2023-07-04.
- [41] 王瑞兵,高成,李铭源,等.一种太阳光敏感型除草剂纳米囊及其制备方法和应用;CN110651786B[P]. 2021-09-03.
- [42] XIANG Y B, ZHANG G L, CHI Y, et al. Fabrication of a controllable nanopesticide system with magnetic collectability [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 328: 320-330.
- [43] XIANG Y B, HAN J, ZHANG G L, et al. Efficient synthesis of starch-regulated porous calcium carbonate microspheres as a carrier for slow-release herbicide[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(3): 3649-3658.
- [44] CHI Y, ZHANG G L, XIANG Y B, et al. Fabrication of a temperature-controlled-release herbicide using a nanocomposite [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5 (6): 4969-4975.
- [45] 杨勇.金属-有机骨架材料在农药残留分析与吸附移除中的研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [46] 倪星元.纳米材料制备技术[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [47] 王建良.一种纳米除草剂及其制备方法;CN104430417B [P]. 2016-05-25.
- [48] 杜学忠,董江涛.一种壳聚糖包封的介孔碳纳米除草剂的制备及应用;CN111727965A[P]. 2020-10-02.
- [49] 潘晓鸿,张顶洋,关雄.一种气候响应型纳米除草剂及其制备方法;CN115843809B[P]. 2023-09-08.
- [50] 李战军,杨明.超声波法制备唑啉草胺纳米粉体[J]. 声学技术,2009,28(5):686-688.
- [51] 中国农业科学院科技发展战略研究组.“跨越 2030”农业科技学科发展战略[M].北京:中国农业科学技术出版社,2017.
- [52] 中华人民共和国中央人民政府.农业农村部关于印发《农业绿色发展技术导则(2018-2030 年)》的通知[EB/OL]. (2018-07-20)[2023-11-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2018/content_535_0058.htm. 2018-07-02.

Research Progress on Application of Nanotechnology in Preparation of Herbicides

HUANG Yuanju

(Research Institute of Plant Protection, Helongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: At present, the application of nanotechnology has been involved in various fields of agriculture, and a series of progress has been made in the preparation of herbicide. The application of nanotechnology and nanomaterials can improve the performance of herbicides, thus achieving energy conservation and emission reduction and environmental protection. In this paper, the definition of nanotechnology, the classification of nanopesticides, the safety of nanopesticides and the application of nanotechnology in pesticides were briefly introduced. The application advantages of nanotechnology in herbicide preparation were further clarified. The research progress of nanoherbicide was reviewed from the aspects of mechanism, dosage form, preparation method and application status. Finally, the broad prospect, existing problems and development direction of nanotechnology in herbicide preparation were put forward.

Keywords: nanotechnology; herbicide; nanopesticides

协办单位

黑龙江省作物学会

黑龙江省农业科学院水稻研究所

黑龙江省农业科学院克山分院

黑龙江省农业科学院黑河分院

黑龙江省农业科学院绥化分院

黑龙江省农业科学院佳木斯分院

黑龙江省农业科学院牡丹江分院