

◆ 专论:农药加工与剂型(特约稿) ◆

静电纺丝技术与昆虫性信息素剂型加工

上官文杰¹, 郑莹莹², 陈慧萍¹, 边强², 王琳³, 黄啟良¹, 曹立冬^{1*}

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 北京 100193 2. 南开大学, 农药国家工程研究中心, 天津 300071 3. 中捷四方生物科技股份有限公司, 北京 101100)

摘要: 昆虫性信息素作为传统化学农药绿色替代品已在害虫综合治理中发挥重大作用。由于化学不稳定性和易挥发性, 借助于载体和剂型加工技术可保障该类化合物在田间持续发挥作用。近年来, 聚合物加工和纳米技术的发展为农药绿色革命带来了新的思路和方法, 其中也包括昆虫性信息素的载体设计与剂型开发。静电纺丝是一种灵活且可规模化的微/纳米级纤维加工制造技术, 该技术已经在昆虫性信息素的载体开发及释放行为研究中取得重要进展。本文讨论了昆虫性信息素的缓控释载体开发及应用, 重点综述了静电纺丝技术在昆虫性信息素载体设计及剂型加工方面的研究进展, 进而对未来发展做出展望, 以期对昆虫性信息素的创新载体设计及高效精准应用提供参考。

关键词: 静电纺丝; 纤维材料; 控制释放; 昆虫性信息素; 绿色农药

中图分类号: TQ 450.6 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-5284.2024.05.006

Electrospinning technology and the processing of formulations to insect sex pheromone

SHANGGUAN Wenjie¹, ZHENG Yingying², CHEN Huiping¹, BIAN Qiang², WANG Lin³, HUANG Qiliang¹, CAO Lidong^{1*}

(1. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Naikai University, National Engineering Research Center of Pesticide, Tianjin 300071, China; 3. Pherobio Technology Co. Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: Insect sex pheromones have played a significant role in integrated pest management as a green alternative. To address issues of chemical instability and volatility, carrier and formulation processing technologies can be employed to maintain the effectiveness of such compounds in the field. In recent years, advancements in polymer processing and nanotechnology have introduced new concepts and methods to the green revolution of pesticides, particularly in the carrier design and formulation development of insect sex pheromones. Electrospinning, a flexible and scalable micro/nanoscale fiber processing technology, has made significant advancements in the development of insect sex pheromone carriers and the study of their release behavior. In this review, the development and application of sustained-release carriers for insect sex pheromones were discussed, and the research progress of electrospinning technology in designing these carriers and processing formulation was reviewed in detail. We also provided a future outlook to offer a reference for innovative carrier design and the efficient, precise application of insect sex pheromones.

Key words: electrospinning; fiber material; controlled release; insect sex pheromone; green pesticide

全球气候变暖为未来农业生产及粮食安全带来巨大危机^[1]。气候变化导致植物遭受越发严重的生物和非生物胁迫, 这些胁迫危机已经成为当前植

物科学领域亟需解决的重大问题。在研究过程中, 传统化学农药因抗性上升、环境污染和危害非靶标生物等备受争议^[2]。为更好地满足可持续发展计划

收稿日期: 2024-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1700500) 北京市自然科学基金(6232033)

作者简介: 上官文杰(1999—), 男, 贵州遵义人, 博士研究生, 主要从事农药剂型加工与质量控制技术研究。E-mail: shanggwj@126.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

在农业中的要求,必须对传统化学农药进行创新与重构。其中,昆虫性信息素这一传统化学农药的绿色替代品在害虫综合防治中受到重视。但在实际使用过程中,此类化合物的持效期和生物活性仍面临较大挑战。

目前,多学科交叉的研究策略促进了许多重要的科学发现以及现实产业化问题的解决。其中,聚合物材料及其加工制造技术已经广泛应用于农业,也促使传统化学农药的改革进程得到显著提速^[3]。针对昆虫性信息素的释放及应用问题,可以利用聚合物材料对昆虫性信息素的释放行为进行优化并且提高其田间应用的实际效果^[4]。静电纺丝是制造微/纳米级聚合物纤维的重要技术,用于负载昆虫性信息素的纤维具有良好的释放性能和应用潜力。本文讨论了昆虫性信息素及其缓控释载体的开发及应用,综述了静电纺丝技术和纤维载体材料在昆虫性信息素中的研究进展,并对未来发展和潜在挑战进行总结论述。

1 昆虫性信息素

昆虫性信息素是一种能够引诱或激起同种异性个体进行交尾的化学物质,在害虫综合防治中可用于虫情监测、引诱和干扰交配^[5]。由于具有微量高效、靶向专一、环境友好等特点,昆虫性信息素在害虫综合防治领域占据重要地位。预计到2025年,昆虫性信息素在农业领域的全球市场份额将达到57亿美元,2027年则可能提升至72亿美元^[6]。随着开发与应用技术的不断进步,昆虫性信息素已经在各类高附加值水果、蔬菜和坚果害虫的防治中发挥重要作用,并在此基础上不断拓展于更多的害虫治理场景,比如玉米、水稻和棉花等大田作物。

1.1 在害虫防治中的应用

近百年来,研究人员已开发了数百种昆虫信息素类物质,包括不饱和脂肪酸酯、酮、醛、醇和环氧类化合物^[4-5]。此类物质最为成功的应用之一是利用昆虫性信息素开发的害虫引诱剂。针对害虫防治,昆虫性信息素搭配诱捕装置可用于虫情动态监测,从而掌握虫害的发生情况及规律,然后通过信息收集、整理及分析,提前做出防治决策及调整防治方案。另外,搭配昆虫性信息素的诱捕装置可在虫口密度增加时对靶标害虫实施大量诱杀,进而降低种群总体数量以降低危害程度。在田间大量使用性信息素可干扰昆虫的通讯系统,致使害虫迷向而无法交配,最终达到虫害控制的目的。然而,昆虫性信息

素在大规模推广应用方面仍存在一些阻碍,例如,在实际应用场景中,多组分昆虫性信息素的分子结构及配比容易发生变化,温度升高、光照、降雨或臭氧等都会导致活性物质加速挥发、氧化或降解^[7-8]。因此,鉴于昆虫性信息素在害虫综合治理中的重要地位,必须进行具体有效的科学研究以提出实际的解决方案。

1.2 缓控释载体的开发

昆虫性信息素有效浓度的控制是发挥理想防效的关键,与之直接相关的是其田间释放速率^[9]。通过长期的试验验证,最有效的应对措施是使性信息素负载于载体材料,以实现长效可控释放^[10]。因此,调控载体中活性分子的释放行为并明确其释放机制是最为核心的科学问题,其中涉及释放速率、组分配比、持续时间、分子间作用力、物相分布、生物响应阈值、环境因素等。在设计昆虫性信息素载体时,从分子角度应考虑到载体材料和信息素的相对分子质量、尺寸和形状,而载体材料分子的自由体积、链缠结程度、自由旋转能等也会影响活性成分的负载与释放。另外,信息素的溶解度、载体材料的聚合度和结晶度等参数也与释放曲线存在关联性^[4]。

理想化的昆虫性信息素释放曲线应遵循零级动力学方程,即随时间以恒定速率进行释放。但实际上大多数控释系统的释放曲线遵循一级释放动力学方程,即高浓度时释放速率较大,随时间降低释放速率^[11]。该释放动力学往往会导致性信息素分子的早期突释、拖尾及释放不完全等问题。由于存在剂量效应,不良释放造成的浓度过高或过低都将直接影响性诱剂在田间的生物活性^[9]。另外,释放过程中性信息素各组分的比例也会改变诱捕或迷向干扰的效果,这通常比释放速率更难实现精准控制^[12]。

目前,最常用的商业化载体主要由橡胶、聚乙烯、聚氨酯或聚脲类材料构成,具体产品包括橡胶塞、迷向丝和高分子缓释袋等^[13]。此类载体的加工方式便捷,并且拥有较高的性信息素负载和包封能力,释放周期一般可达数月。在此基础上,依靠电动力开发的控释系统解决了传统被动型释放器无法控制释放而造成不必要浪费的问题^[11]。但目前较大的困难是这些材料在田间难以被生物降解,需要人为回收处理,而这也增加本就昂贵的性诱剂使用成本。随着相关产品的大量应用,如果不及时对这些材料进行改良则可能进一步造成农业土壤的微塑料污染^[14]。另一方面,大面积喷施负载昆虫性信息素

的微胶囊/颗粒可对害虫迷向干扰,且该技术已经取得了一定的商业化进展。此类剂型在聚合、交联、封装等制备过程中,可以引入壳聚糖、明胶、植物源蛋白等生物友好材料以提高降解性能。然而,可能受多重环境因素的影响,此类剂型在田间的释放速率很快(数天到几周),无法保证良好的防控效果^[4]。开发者可以通过调节粒径分布、壁材厚度、密度或交联度等改善其释放曲线^[15-16]。

如今,材料科学和纳米技术的快速发展也为昆虫性信息素带来更多的载体材料和剂型选择。多孔结构、层状结构、拓扑结构等成为国内外该研究方向的重要创新切入点。相较于传统惰性材料,这些微/纳米材料在微观形貌、几何形状、空腔网络上的优势有望使得昆虫性信息素载体具备保护性、持效性、控释性、功能性、环保性等优异性能(图1)。例如,具有极强封装能力的水凝胶剂型^[17]、可通过多孔特性大量吸附性信息素分子的沸石材料^[18-19]。利用微/纳米材料的复杂结构特性可有效延长昆虫性信

息素分子的释放时间,如负载信息素的层状金属氢氧化物^[20]和石墨烯^[21]载体。未来,通过调控此类材料的微观纳米结构有望实现性信息素释放曲线的定制化^[22]。事实上,在昆虫性信息素的载体开发中,缺陷释放行为(如突释或拖尾)的优化以及响应型控释载体的制备都需要被重点研究。近年来,研究人员已经制备了能够响应光^[23]或热^[24]释放的性信息素载体。但在此需要强调的是,分析不同靶标害虫的出没习性及其对应的环境条件是开发此类载体的重要先决条件。Pan等^[25]根据树皮甲虫(*Ips typographus*)对光照和温度的依赖性开发了可匹配害虫生物节律的负载性信息素的光热响应型海绵材料。由此开发的载体实现了对树皮甲虫长期的智能化诱捕,对比常规缓释型载体具有更好的应用前景。此外,现有载体开发通常以性信息素分子的释放过程为重点,以其在空气介质中的扩散过程为主体的研究较少。了解此类活性化合物在空气中的扩散机制并借助载体实现高效传输也是重要的创新思路^[26]。

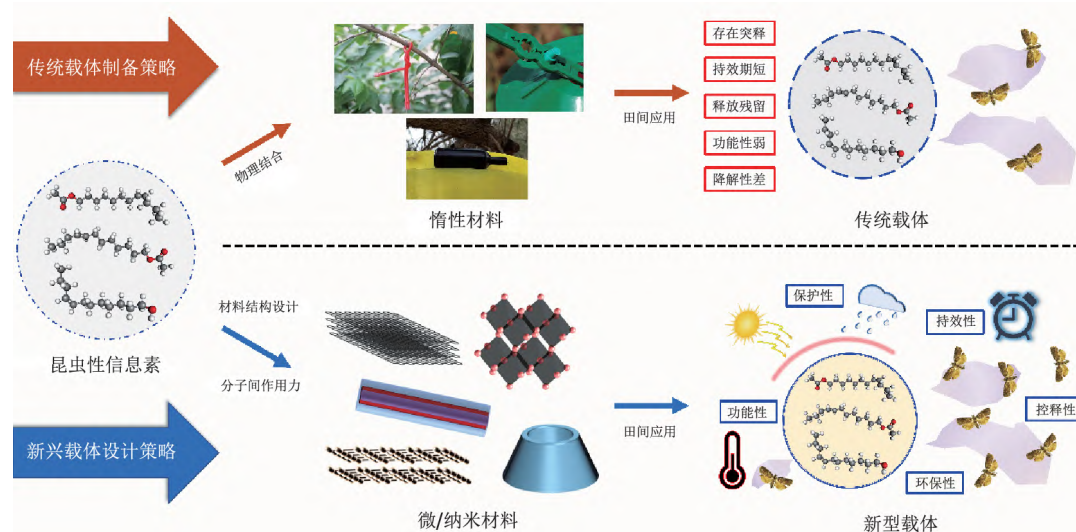


图1 昆虫性信息素载体设计的新兴策略

2 静电纺丝技术

静电纺丝是一种能够连续制备微/纳米纤维的加工技术,所制备的纤维材料具有大比表面积、高孔隙率、可变孔径和高度互连的多孔结构等特点^[27]。自上世纪90年代静电纺丝被发明,这项技术于2000年左右迎来发展的爆发期^[28]。由于静电纺丝可生产多样化材料组分、结构和特性的纤维,该技术已在过去20年间广泛应用于能源、织物、环境、食品和医药等领域^[29]。基于这项技术,研究者可以从微/纳米尺度广泛探索纤维材料的多种迷人特性,已开

发的商业化产品有智能口罩(NASK)、过滤装置(KOKEN)、细胞培养皿(Sigma Aldrich)等^[28]。未来,研究不同纤维材料的形成机制、探索复合新材料纤维的性能以及拓展纤维材料的应用场景都将促进这项技术的可持续发展。

2.1 静电纺丝纤维的控释作用

近年来,基于缓控释特性开发的、作为医药载体的静电纺丝纤维已经取得丰硕成果。在中国科学院发布的《2022研究前沿》报告中,“采用静电纺丝技术制备的纳米纤维材料在药物缓释与输送中的应用研究”入选化学与材料科学领域新兴前沿。活

性成分通过与聚合物溶液直接混合、纺丝后固定于纤维表面、乳液或同轴静电纺丝等方法进入纤维材料^[30]。静电纺丝可采用工艺改良、材料组合、物理化学改性等方法构建具有丰富微观结构和纤维直径的药物递送系统(图2)。在单轴纤维载体的释放动力学方面, 活性成分的释放主要由分子扩散、纤维膨胀和降解等行为单一或复合控制^[31]。经过修饰和改良的纤维载体可增强特定释放行为对整体释放曲线的贡献, 进而实现定制化的释放过程。例如, 利用同轴静电纺丝制备的核壳纤维载体可有效保护活性成分, 减少早期突释, 并使其接近零级释放动力学模型进行持续释放^[32]。灵活的静电纺丝技术还易于获取可负载多种活性成分的多腔室载体, 并通过特定材料组合实现不同的释放曲线以满足复杂的给药需求。

事实上, 在农药递送载体构建及其缓控释功能的研究中, 静电纺丝纤维已经取得了一定的进展^[33]。Pouladchang等^[34]制备用于负载福美双的不同直

径聚己内酯纤维, 该控释体系中微米纤维遵循Korsmeyer-Peppas中的非Fickian型释放, 而纳米纤维遵循Fickian型释放。Das等^[35]制备了负载莠去津与羟丙基- β -环糊精包合物的聚乙烯醇纤维, 其中莠去津的释放受纤维薄膜膨胀、松弛、扩散诱导和侵蚀降解等多种行为的影响。精油对害虫和病菌有较好生物活性, 研究者利用静电纺丝纤维有效延长了多种精油化合物在梨园的释放时间, 对梨木虱(*Cacopsylla pyri*)提供长达56 d的趋避作用^[36]。Shao等^[37]发现肉桂醛精油加入纺丝液后可制备具有超细纤维网状结构的薄膜, 同时实现了高效的空气过滤(过滤效率>99%)和长效的抗菌驱蚊(30 d以上)。在发挥静电纺丝纤维控释作用的基础上, 研究者还利用其灵活可调的材料组合和微观结构等特性探索了负载农药的其他开发方向。例如, 制备环糊精分子包合物的纤维用于提高多种难溶性农药的溶解度^[38]; 负载活性成分的静电纺丝纤维可用作种衣剂, 提供长期农药保护或输送营养元素^[39]。

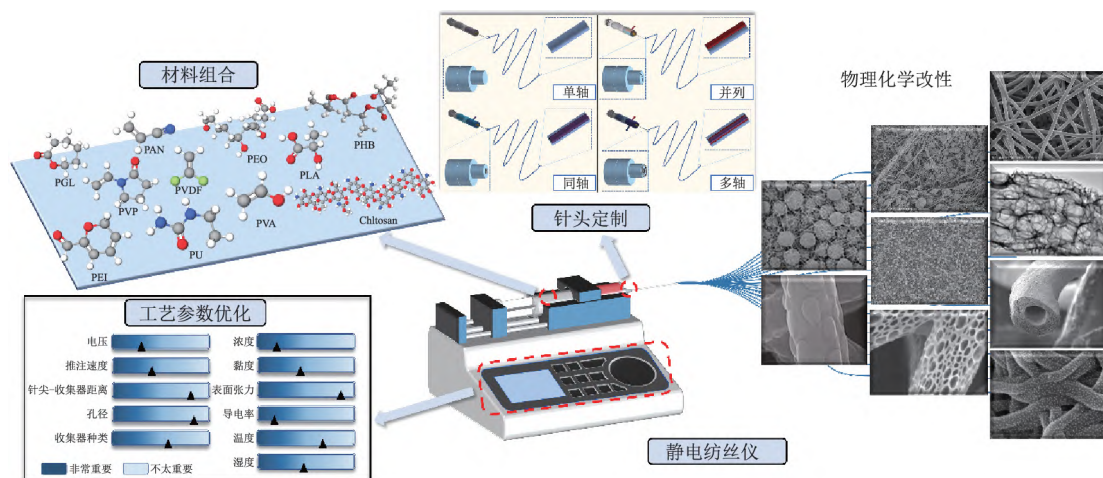


图2 利用静电纺丝设计不同微观结构的纳米纤维

2.2 静电纺丝纤维在昆虫性信息素中的应用

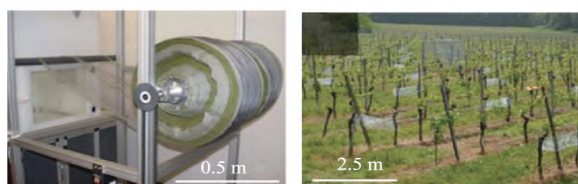
静电纺丝纤维逐渐成为一种极具开发潜力的昆虫性信息素载体材料。当前研究聚焦于优化昆虫性信息素的释放性能、负载信息素静电纺丝纤维的田间应用以及功能化载体的开发。关于这项技术的发展, Greiner等^[40]最早于2007年7月将搭配多喷嘴静电纺丝装置的大型农机在农田中直接喷施聚合物纤维的照片公布在《德国应用化学》期刊封面上(图3A)。后来, Hellmann等^[41]研究了负载性信息素(Z)-9-十二烯基乙酸酯的聚酰胺-6和醋酸纤维素静电纺丝纤维的形态结构、直径分布、载药能力以

及释放性能。与聚酰胺-6纤维相比, 醋酸纤维素纤维具有更高的载药量(载药体系总质量的33%)和持续性良好的释放曲线(8周内释放信息素总量的57%)。在透射电镜下并未发现醋酸纤维素纤维出现纳米级相分离。由该结果可推测, 纺丝溶液体系中Hansen溶解度参数和Flory-Huggins相互作用参数可能决定了成型固体体系中昆虫性信息素的负载与释放水平。同一时期, Hummel等^[42-43]发表了负载性信息素静电纺丝纤维用于欧洲葡萄蛾(*Lobesia botrana*)迷向干扰的研究报告, 其研究结果表明纤维型迷向剂在葡萄园中至少持效7周(图3B)。在这些研究中, 他

们使用了巴斯夫公司的聚酯类材料Ecoflex作为静电纺丝基材,该材料具有良好的降解性能^[44]。由于静电纺丝迷向剂表现出良好的持效性、生物活性和环保性,静电纺丝微纳纤维-信息素组合的开发与应用开始受到市场关注^[45]。



A 配备静电纺丝装置的大型农机直接在农田中喷施负载信息素的纤维^[40]



B 静电纺丝制备负载信息素的纤维网,大规模用于田间害虫诱捕或迷向^[42]



C 害虫诱捕装置装配负载信息素的静电纺丝纤维^[46]

图3 负载昆虫性信息素的静电纺丝纤维薄膜的田间应用方式

在害虫诱捕的应用方面,大部分静电纺丝纤维剂型虽在实验室条件下表现出长达数周甚至数十周的释放能力和生物活性,但田间实际诱捕效果相较于商业化剂型并不尽如人意^[47-48]。这可能是因为害虫诱捕应用中所需的单个载体信息素含量很少,而静电纺丝纤维剂型在田间环境条件下对活性成分的保护不足以及存在缺陷释放的行为,导致受损后的信息素纤维难以产生良好的诱捕效果。因此,基于静电纺丝改性手段对该体系的释放及其田间生物活性进行优化极为重要。早期研究中已有研究者提出,采用乳液静电纺丝将负载性信息素的微胶囊和静电纺丝纤维结合的假设,以期实现更好的封装与保护^[49]。其研究结果初步证明,复合体系的释放时间的确优于单一体系,但研究者并未进行系统的田间试验验证。中国农业科学院植物保护研究所研究团队采用可完全生物降解的聚羟基丁酸酯类材料作为静电纺丝基材,通过调控聚合物浓度和静

电纺丝机器参数优化纤维载体的防水、抗光和释放等性能^[50]。在未添加其他保护性助剂的情况下,静电纺丝纤维性诱剂最长可在田间持续诱捕斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)7周(图3C),部分处理的总诱捕数量优于市售橡胶塞剂型^[46]。Qian等^[51]制备了聚苯乙烯和聚乙二醇二丙烯酸酯复合静电纺丝纤维,用于负载桔小实蝇(*Bactrocera dorsalis*)性信息素甲基丁香酚。利用聚乙二醇二丙烯酸酯的光引发交联机制,甲基丁香酚在交联纤维薄膜中的释放时间可超过8周。值得注意的是,昆虫性信息素在载体中的早期突释可能是导致大部分剂型产品快速失效的主要原因之一^[7]。在静电纺丝纤维剂型的多数已有报道中,大部分单轴纤维载体的半衰期甚至90%衰期都很短,而这部分损失大多是在释放初期^[47-48, 50]。针对该问题,中国农业科学院植物保护研究所研究团队开发了由可降解聚酯类材料构成的核壳结构微纳纤维,用于负载斜纹夜蛾性信息素进行田间诱捕^[46]。在释放初期,核壳纤维中昆虫性信息素分子以扩散行为为主导进行释放,该机制有效减缓了早期突释并提升了释放时间。核壳纤维性诱剂在田间的诱捕数量和持效期明显优于单轴纤维。基于诱杀策略,Czarnobai等^[52]开发了同时负载氯氰菊酯和梨小食心虫(*Grapholita molesta*)性信息素的静电纺丝纳米纤维。在为期84 d的测试中,杀虫剂的加入并未影响梨小食心虫对性信息素的生理反应强度,并且该复合纤维在第84天时的触杀防效仍超过87%,诱杀防效超过56%。该研究拓展了昆虫性信息素的静电纺丝纤维剂型的功能化思路。

虽然现有结果已经充分证明静电纺丝纤维作为昆虫性信息素载体的可行性和研究价值,但该类载体的昆虫性信息素释放调控机制并未系统阐明,且其中活性成分的缺陷释放行为和田间持效期并未完全解决,这将阻碍该技术的规模化应用和持续发展。此外,静电纺丝纤维的控制释放功能已经在医药载体的开发中取得重大进展^[53]。这些先进研究成果有望被进一步应用于响应昆虫出没规律的性信息素纤维载体开发。

3 总结与展望

全球农业信息素市场不断扩张,昆虫性信息素已成为极具开发前景和应用潜力的绿色化学物质。未来,持续加强昆虫性信息素的基础及应用性研究以拓展其高效规模化应用是害虫综合防治领域十分重要的发展方向。鉴于现有剂型及结合方式难以

实现更加优化的释放动力学,以及智能化控制释放载体的缺失,开展新型载体研究是突破昆虫性信息素高效精准应用瓶颈的有效途径和迫切需求。但事实上,目前最成功的商业化昆虫性信息素剂型产品仍然只有数种,而这些产品已经被应用了数十年。除去成本、公众接受度和政策等因素的影响,昆虫性信息素剂型产品最为关键的指标是田间持效期。微胶囊、纳米颗粒和聚合物纤维等新开发的剂型虽然在室内释放试验中表现出良好的持效性,但往往忽视了田间环境的复杂性及其对释放的严重影响。已有大量的研究报道证明数种自然因子将致使昆虫性信息素降解失效,甚至同一剂型在田间的释放时间可能仅仅是其在室内的几十分之一^[8,10,54]。由此可见,缺乏田间试验验证的研究很可能无法对创新剂型的产业化进程起到实际推动作用。因此,在释放性能的相关试验设计中将温度、湿度、降雨、光照等环境因素进行单一变量甚至复合变量的研究,更有助于开发和筛选出符合田间使用条件的稳定剂型产品。当然,任何剂型产品的释放不能只关注持续时间,与靶标害虫的剂量-效应关系也十分关键。通常在害虫诱捕中存在昆虫性信息素的最佳释放速率和比例,异常的释放含量无法成功实现有效防治^[9]。另外,现有载体开发及释放性能的研究集中于昆虫性信息素作用过程的前端,而性信息素在空气中的传输^[26]以及被昆虫接收和输入^[55]也是值得探索的科学问题。

十余年前,静电纺丝技术及聚合纤维载体正式进入昆虫性信息素的应用研究领域。通过这项技术可以将针对不同靶标害虫的昆虫性信息素有效负载进微/纳米级的纤维材料中,进而实现长期持续释放。未来,昆虫性信息素的静电纺丝纤维剂型开发需要关注以下几个方面:(1)系统阐明负载信息素纤维的释放机制。不同的纤维载体在释放曲线方面存在较大不同,通过经典数学模型有助于解释复合体系的释放过程。但是从分子层面解析释放机理仍需要被进一步探索,这需要关注相对分子质量及分子体积、分子间作用力、聚合物中的自由体积等具体参数。(2)纺丝溶液的性质将影响昆虫性信息素的负载与释放。在静电纺丝中,电导率和黏度是影响可纺性最主要的参数。对于载药研究,还需注意聚合物和信息素分子的溶解度会直接决定溶液体系是否会出现相分离,而这与形成后纤维的形态相关。(3)通过载体材料与结构设计优化信息素纤维的释放性能以实现智能可控释放。当前静电纺丝微/纳

米纤维的研究在材料方面已经包括生物材料、无机材料、有机-无机杂化材料等,而在结构方面也已开发出核壳、并列、多轴、串珠等多种纤维结构。以上材料和结构为载药纤维的响应释放功能构建了一个巨大的“武器库”,可帮助研究者根据实际使用场景和靶标设计定制化的释放曲线。但该优势还未在昆虫性信息素的纤维剂型中充分体现,可作为未来主要的研究方向。(4)昆虫性信息素静电纺丝纤维剂型的规模化生产。利用无针头或多喷嘴的静电纺丝装置可以有效提高载药纤维的生产效率。在正式迈向商业化之前,纤维剂型的使用形态还需确定,相关的后处理工艺也应纳入讨论。综上所述,静电纺丝技术为昆虫性信息素载体设计提供了全新的研究视角和方法,新兴纤维载体有望推动重大农业害虫的绿色防治进展。

参考文献

- [1] ZUREK M, HEBINCK A, SELOMANE O. Climate change and the urgency to transform food systems[J]. *Science*, 2022, 376: 1416-1421.
- [2] 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.
- [3] SABERI RISEH R, HASSANISAADI M, VATANKHAH M, et al. Nano/micro-structural supramolecular biopolymers: innovative networks with the boundless potential in sustainable agriculture[J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(1): 147.
- [4] HELLMANN C, GREINER A, VILCINSKAS A. Design of polymer carriers for optimized pheromone release in sustainable insect control strategies[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(9): 2304098.
- [5] 王留洋, 杨超霞, 郭兵博, 等. 昆虫性信息素研究进展与应用前景[J]. *农药学报*, 2022, 24(5): 997-1016.
- [6] WANG H L, DING B J, DAI J Q, et al. Insect pest management with sex pheromone precursors from engineered oilseed plants[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(11): 981-990.
- [7] MUSKAT L C, PATEL A V. Innovations in semiochemical formulations[J]. *Entomologia Generalis*, 2022, 42(2): 231-249.
- [8] JIANG N J, DONG X, VEIT D, et al. Elevated ozone disrupts mating boundaries in drosophilid flies[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2872.
- [9] LIU W, XU J, ZHANG R. The optimal sex pheromone release rate for trapping the codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) in the field[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21081.
- [10] CAMPION D G, LESTER R, NESBITT B F. Controlled release of pheromones[J]. *Pesticide Science*, 1978, 9(5): 434-440.
- [11] KLASSEN D, LENNOX M D, DUMONT M J, et al. Dispensers for pheromonal pest control[J]. *J Environ Manage*, 2023, 325: 116590.

- [12] BYERS J A. Novel diffusion-dilution method for release of semiochemicals: testing pheromone component ratios on western pine beetle[J]. Journal of Chemical Ecology, 1988, 14(1): 199-212.
- [13] 严力, 李卓睿, 韩国志. 昆虫信息素缓释技术的研究进展[J]. 应用化学, 2019, 36(10): 1099-1108.
- [14] HE L, LI Z, JIA Q, et al. Soil microplastics pollution in agriculture [J]. Science, 2023, 379: 547.
- [15] CHEN Y, CHEN X, CHEN Y, et al. Preparation, characterisation, and controlled release of sex pheromone-loaded MPEG-PCL diblock copolymer micelles for *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. PLoS One, 2018, 13(9): e0203062.
- [16] GU X L, ZHU X, KONG X Z, et al. Comparisons of simple and complex coacervations for preparation of sprayable insect sex pheromone microcapsules and release control of the encapsulated pheromone molecule[J]. Journal of Microencapsulation, 2010, 27 (4): 355-364.
- [17] FLORES-CEPESDES F, VILLAFRANCA-SANCHEZ M, FERNANDEZ-PEREZ M. Alginate-bentonite-based hydrogels designed to obtain controlled-release formulations of dodecyl acetate[J]. Gels, 2023, 9(5): 388.
- [18] MUNOZ-PALLARES J, CORMA A, PRIMO J, et al. Zeolites as pheromone dispensers[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4801-4807.
- [19] SEO S M, LEE J M, LEE H Y, et al. Synthesis of nanoporous materials to dispense pheromone for trapping agricultural pests[J]. Journal of Porous Materials, 2015, 23(2): 557-562.
- [20] AHMAD R, HUSSEIN M Z, KADIR W R, et al. Evaluation of controlled-release property and phytotoxicity effect of insect pheromone zinc-layered hydroxide nanohybrid intercalated with hexanoic acid[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2015, 63(51): 10893-10902.
- [21] KAUR K, SHARMA S, GUPTA R, et al. Nanomaze lure: pheromone sandwich in graphene oxide interlayers for sustainable targeted pest control[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(41): 48349-48357.
- [22] MORENO J M, NAVARRO I, DIAZ U, et al. Single-layered hybrid materials based on 1d associated metalorganic nanoribbons for controlled release of pheromones[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(37): 11026-11030.
- [23] ATTA S, IKBAL M, BODA N, et al. Photoremovable protecting groups as controlled-release device for sex pheromone[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2013, 12(2): 393-403.
- [24] WEN Y, YU S, GE Z, et al. Temperature-responsive microcapsule hydrogel fabricated by pickering emulsion polymerization for pheromones application[J]. Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects, 2024, 684(5): 133127.
- [25] PAN Q, FANG J, ZHANG S, et al. Biorhythm paralleled release of pheromone by photothermal conversion for long-term bark beetle control[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 440(15): 135933.
- [26] JAMI L, ZEMB T, CASAS J, et al. How adsorption of pheromones on aerosols controls their transport[J]. ACS Central Science, 2020, 6(9): 1628-1638.
- [27] JI D, LIN Y, GUO X, et al. Electrospinning of nanofibres[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2024, 4: 1.
- [28] TEBYETERKERWA M, RAMAKRISHNA S. What is next for electrospinning?[J]. Matter, 2020, 2(2): 279-283.
- [29] XUE J, WU T, DAI Y, et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications[J]. Chemical Reviews, 2019, 119(8): 5298-5315.
- [30] LURAGHI A, PERI F, MORONI L. Electrospinning for drug delivery applications: a review[J]. Journal of Controlled Release, 2021, 334: 463-484.
- [31] WU J, ZHANG Z, GU J G, et al. Mechanism of a long-term controlled drug release system based on simple blended electrospun fibers[J]. Journal of Controlled Release, 2020, 320: 337-346.
- [32] YOON J, YANG H S, LEE B S, et al. Recent progress in coaxial electrospinning: new parameters, various structures, and wide applications[J]. Advanced Materials, 2018, 30(42): e1704765.
- [33] 上官文杰, 梅向东, 胡帅, 等. 静电纺丝技术在农药领域中的应用现状及发展前景[J]. 农药学报, 2023, 25(2): 267-281.
- [34] POULADCHANG A, TAVANAI H, MORSHED M, et al. Controlled release of thiram pesticide from polycaprolactone micro and nanofibrous mat matrix[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 139(6): 51641.
- [35] DAS K P, SINGH P, SATAPATHY B K. Nanofibrous-substrate-based controlled herbicidal release systems: atrazine/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex loaded PVA agro-augmenting electrospun mats[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(6): 111586.
- [36] CZARNOBAI D J B, HUMMEL H E, GROSS J. Repellent activity of clove essential oil volatiles and development of nanofiber-based dispensers against pear *Psyllids* (Hemiptera: Psyllidae)[J]. Insects, 2022, 13(8): 743.
- [37] SHAO Z, KANG G, XIE J, et al. Electrospun mutualism-inspired CA/CMA/PHMB ultrafine bimodal nanofibrous membrane for high-performance, antibacterial, and mosquito-repellent air filtration [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 327 (15): 124920.
- [38] GAO S, FENG W, SUN H, et al. Fabrication and characterization of antifungal hydroxypropyl- β -cyclodextrin/pyrimethanil inclusion compound nanofibers based on electrospinning [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2022, 70(26): 7911-7920.
- [39] HUSSAIN Z, KHAN M A, IQBAL F, et al. Electrospun

- microbial-encapsulated composite-based plasticized seed coat for rhizosphere stabilization and sustainable production of canola (*Brassica napus* L.) [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67 (18): 5085-5095.
- [40] GREINER A, WENDORFF J H. Cover picture: electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2007, 46(30): 5633.
- [41] HELLMANN C, GREINER A, WENDORFF J H. Design of pheromone releasing nanofibers for plant protection[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2011, 22(4): 407-413.
- [42] HUMMEL H E, EISINGER M T, HEIN D F, et al. New dispenser types for integrated pest management of agriculturally significant insect pests: an algorithm with specialized searching capacity in electronic data bases [J]. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2012, 77(4): 639-646.
- [43] LINDNER I, HEIN D F, BREUER M, et al. Organic electrospun nanofibers as vehicles toward intelligent pheromone dispensers: characterization by laboratory investigations[J]. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2011, 76 (4): 819-829.
- [44] HUMMEL H E, LANGNER S S. Lobesia botrana IPM: electrospun polyester microfibers serve as biodegradable sex pheromone dispensers[J]. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2013, 78(2): 253-266.
- [45] HUMMEL H E, LANGNER S S, EISINGER M T. Pheromone dispensers, including organic polymer fibers, described in the crop protection literature: comparison of their innovation potential [J]. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 2013, 78(2): 233-252.
- [46] SHANGGUAN W, XU H, DING W, et al. Nano-micro core-shell fibers for efficient pest trapping[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(24): 11809-11817.
- [47] BISOTTO D O R, MORAIS R M, ROGGIA I, et al. Polymers nanofibers as vehicles for the release of the synthetic sex pheromone of *Grapholita molesta* (Lepidoptera, Tortricidae) [J]. *Revista Colombiana de Entomologia*, 2015, 41(2): 262-269.
- [48] KIKIONIS S, IOANNOU E, KONSTANTOPOULOU M, et al. Electrospun micro/nanofibers as controlled release systems for pheromones of *Bactrocera oleae* and *Prays oleae* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2017, 43(3): 254-262.
- [49] BANSAL P, BUBEL K, AGARWAL S, et al. Water-stable all-biodegradable microparticles in nanofibers by electrospinning of aqueous dispersions for biotechnical plant protection[J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(2): 439-444.
- [50] SHANGGUAN W J, MEI X D, CHEN H P, et al. Biodegradable electrospun fibers as sustained-release carriers of insect pheromones for field trapping of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Pest Management Science*, 2023, 79(12): 4774-4783.
- [51] QIAN Y, ZHANG J, YU Y, et al. Preparation of long-lasting releasing methyl eugenol fiber membrane and its trapping analysis on *Bactrocera dorsalis* [J]. *Polymer*, 2023, 285(20): 126349.
- [52] CZARNOBAI D J B, BISOTTO D O R, PEREIRA C N, et al. Novel nanoscale pheromone dispenser for more accurate evaluation of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) attract-and-kill strategies in the laboratory [J]. *Pest Management Science*, 2017, 73(9): 1921-1926.
- [53] BORDAT A, BOISSENOT T, NICOLAS J, et al. Thermoresponsive polymer nanocarriers for biomedical applications [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2019, 138(1): 167-192.
- [54] VERSIC BRATINCEVIC M, BEGO A, NIZETIC KOSOVIC I, et al. A lifetime of a dispenser-release rates of olive fruit fly-associated yeast volatile compounds and their influence on olive fruit fly (*Bactrocera oleae* Rossi) attraction [J]. *Molecules*, 2023, 28(6): 2431.
- [55] GUPTA P, CHANDAK R, DEBNATH A, et al. Augmenting insect olfaction performance through nano-neuromodulation [J]. *Nature Nanotechnology*, 2024, 19: 677-687.

(编辑: 顾林玲)

7 个新有效成分、12 个新农药产品获得我国登记

根据农业农村部公告第827号, 5家企业申请的7个新有效成分、12个新农药产品获得我国登记。

新农药产品登记信息如下: 上海万力华生物科技有限公司多粘类芽孢杆菌P1 100亿CFU/g母药和20亿CFU/mL悬浮剂; 辽宁先达农业科学有限公司95%吡唑啉草酯原药和5%可分散油悬浮剂; 青岛清原农冠抗性杂草防治有限公司95%氟砒草胺原药, 60 g/L可溶剂剂和250 g/L敌稗·氟砒草胺微乳剂(敌稗220 g/L、氟砒草胺30 g/L); 山东清原农冠作物科学有限公司95%氟砒草胺原药, 40 g/L乳油, 210 g/L草铵膦·氟砒草胺微乳剂(草铵膦200 g/L、氟砒草胺10 g/L)和110 g/L氟砒草胺·精草铵膦微乳剂(氟砒草胺10 g/L、精草铵膦100 g/L); 宁波纽康生物技术有限公司玉米螟性诱剂挥发散芯(反-12-十四碳烯乙酸酯0.06%、十四醇乙酸酯0.03%、顺-12-十四碳烯乙酸酯0.06%)。

(来源: 农业农村部)