

交配干扰缓释剂研究及应用进展*

相会明^{1**} 刁红亮¹ 李先伟¹ 赵志国¹ 李拥虎² 马瑞燕^{1***}

(1. 山西农业大学植物保护学院, 太谷 030800; 2. 中捷四方生物科技股份有限公司, 杨凌 712100)

摘 要 昆虫性信息素是由性成熟的个体分泌, 能引诱异性同种个体进行交尾的微量化学物质。由于昆虫性信息素具有微量、高效、灵敏度及对天敌无害等特点, 广泛应用于目标昆虫的监测、诱捕和迷向等方面。利用昆虫性信息素进行交配干扰防治害虫是一种环境友好型植保策略, 在有害生物综合防治中的起到重要作用。昆虫性信息素干扰交配剂型的研究是昆虫性信息素的应用前提条件之一, 而多年来我国的交配干扰缓释剂品种单一, 严重制约该技术在生产中的应用。本文介绍了国内外 10 余种交配干扰缓释剂的制备方法及应用概况, 并对交配干扰缓释剂的开发做了展望, 旨在为我国交配干扰缓释剂的研究和应用提供参考。

关键词 交配干扰; 性信息素; 缓释; 生物防治

Advances in research on the application of disruptive mating formulations

XIANG Hui-Ming^{1**} DIAO Hong-Liang¹ LI Xian-Wei¹
ZHAO Zhi-Guo¹ LI Yong-Hu² MA Rui-Yan^{1***}

(1. Shanxi Agricultural University, College of Plant Protection, Taigu 030800, China;

2. Zhongjie Sifang Biotechnology Co., LTD, Yangling 712100, China)

Abstract Insect sex pheromones are chemicals generated by sexually mature individuals that stimulate the opposite sex to mate. Due to their high transmissibility, ease of detection and harmlessness to natural enemies, sex pheromone products have been widely used in mass trapping and monitoring, and to disrupt the mating of target pests. Using pheromones to disrupt mating is an environmentally-friendly plant protection strategy that plays an important role in integrated pest control. Research on pheromone formulations is a prerequisite for the successful application of these to disrupt mating. However, such research is deficient in our country, which seriously restricts the application of this technology. This paper introduces methods for preparing and applying more than 10 types of pheromone formulations to disrupt the mating of pest insects and suggests directions for future research in this field.

Key words disruption mating; pheromone; controlled-release; biological control

昆虫性信息素是由昆虫个体分泌于体外, 被同种异性个体感受器所接收, 并引起异性个体产生一定行为反应(如觅偶定向, 求偶交配等)或生理效应的微量化学物质。自 1959 年, 首个昆虫性信息素家蚕醇(8E, 10Z-16: OH)的化学

结构被鉴定后(Butenandt *et al.*, 1959), 各国科研工作者对昆虫性信息素的研究迅速展开, 60 多年来已经有 600 多种鳞翅目昆虫的性信息素被分离和鉴定(Petkevicius *et al.*, 2020)。由于性信息素具有专一性强、安全性高、不产生抗性、

*资助项目 Supported projects: 国家现代农业产业技术体系(CARS-28-19); 山西农业大学科技创新项目(2018YJ14); 山西省高等学校科技创新项目(2021L094); 山西农业大学植物保护学院科研培育创新项目(ZBXY23A-8); 晋中国家农高区植物保护教授与博士工作站科研项目(JZNGQBSGZZ001)

**第一作者 First author, E-mail: xianghuiming82@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: maruiyan2019@163.com

收稿日期 Received: 2022-09-29; 接受日期 Accepted: 2023-02-26

易降解及不伤害天敌等优点,使得昆虫性信息素技术在害虫综合治理、入侵害虫监测和濒危昆虫保护等方面应用前景广泛。

目前昆虫性信息素主要用于虫情监测(Monitoring)、大量诱捕(Mass trapping)、交配干扰(Mating disruption)及推拉策略(Push-pull strategies)。其中,利用昆虫性信息素进行交配干扰是大面积防控虫害的最广泛应用。交配干扰,最早由美国学者在 Nature 杂志上提出(Wright, 1964),又称“迷向法”,指利用性信息素来干扰雌雄虫之间的信息交流。其基本原理为:让环境中充分弥漫性信息素,导致雄虫无法完成对雌蛾的定位飞行,或使雄虫长时间接触高浓度性信息素产生麻痹作用,在短时间内停止识别性信息素,从而雌雄交配概率降低,次代虫口密度迅速减小。已经被鉴定的昆虫性信息素多数为长链的不饱和键的醇、醛、醋酸酯或酮类,碳链长度一般为 10-20,其中以 12、14 和 16C 居多,并且人工合成的昆虫性信息素多数为挥发性的油状液体,自然条件下易挥发和分解。采用交配干扰防治害虫时,昆虫性信息素必须在广大空间内长时间保持高浓度且组分比例相对稳定的状态,就需要适当载体,将其制作成缓释剂型。随着昆虫交配干扰行为机理的研究深入,国内外学者研发了多种用于交配干扰的缓释剂型,并推动了部分剂型的产业化。本论文对 10 种交配干扰缓释剂的制备工艺、缓释机理及国内外应用等方面进行综述,旨在为我国的性信息素防治害虫事业提供理论参考和技术支持。

1 交配干扰缓释剂的类型

用于害虫综合治理的交配干扰缓释剂型应具备以下四点:较长持效期、性信息素活性组分不降解、操作简便及市场价格可承受。按照不同剂型在田间施用密度,将缓释剂型分为密集分布型和稀疏分布型。根据剂型的释放原理,密集分布型又被称为被动释放型,而稀疏分布型称为主动释放型(Welter *et al.*, 2005)。前期研究观点认为,高密度高剂量性信息素的释放点源是干扰昆虫交配的必要条件,研究人员开发了一系列密集

分布型的剂型,其中包含塑料管状剂型(500-1 000 根/hm²)、微胶囊剂、夹层型、蜡滴、空心纤维和 PVC 树脂等。后来研究发现,低密度高剂量性信息素的释放点源也能起到干扰昆虫交配行为的作用,进而开发出定时定量释放性信息素的压力气雾剂(Puffer)。两种类型缓释剂的性信息素释放速率及作物冠层中性信息素分布均匀度有很大差别。密度越大的剂型,其性信息素释放速率越低,比如空心纤维剂型每小时释放量仅为几个纳克,而压力气雾剂的每小时释放量为毫克级别。密集分布型的依靠本身高密度的布置达到冠层中性信息素均匀分布,而稀疏分布型很大程度上则依靠风的流动实现。相应地,不同剂型在布置密度、释放速率及性信息素分布方面的差异会影响交配干扰的效果。

1.1 塑料管状剂型

塑料管状剂型,国内俗称“迷向丝”,其加工方式为:将昆虫性信息素灌装在不同材质的塑料管中,再封闭两端。迷向丝依靠管壁控制信息素扩散过程达到缓释效果,常用管壁材料有聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)以及乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)等其它高分子材料(Carde' and Minsk, 1995; Witzgall *et al.*, 2008; 李庆燕等, 2012)。迷向丝田间布置密度为 300-1 000 根/hm²,单根迷向丝信息素释放速率在每小时数微克左右,田间持效期可达 180 d。该剂型由于加工工艺简单,成本低廉,目前是全球范围内商业化生产最多的交配干扰缓释剂。我国目前有北京中捷四方、北京格瑞碧源及深圳百乐宝三家公司生产用于防治梨小食心虫 *Grapholitha molesta*、桃小食心虫 *Carposina sasakii* Matsumura 及苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 的 PVC 和 PE 迷向丝。近 20 年来,很多机构及研究人员致力于改善迷向丝的释放性能及使用便捷性。瑞士研究人员采用日本信越公司生产的苹果蠹蛾、苹白小卷蛾 *Spilonota ocellana* 和苹小卷叶蛾 *Adoxophyes orana* Fischer von Roslerstamm 复合迷向丝在商业苹果园进行迷向防治,结果表明 3 种害虫交配率显著下降,且在整个防治期内 3 种害虫的信息素释放速率保持恒定(Porcel *et al.*, 2015)。虽然多种性信

息素复合迷向丝可以相应减少劳动力成本,但由于迷向丝需要人工进行高密度的均匀布置,劳动力成本过高仍然是限制该剂型大规模使用的重要因素,特别是在一些果树冠层超过 5 m 以上的果园中。



图 1 国产梨小食心虫迷向丝
Fig. 1 Domestic tube dispensers for mating disruption of *Grapholitha molesta*

A. 迷向丝材质为 PVC 壁材; B. 迷向丝材质为 PE 壁材。
A. The wall material is made by PVC; B. The wall material is made by PE.

1.2 微胶囊剂型

微胶囊技术是采用天然高分子或合成高分子成膜材料,把一些固体或液体进行包埋形成微小粒子的技术。根据微粒的粒径不同,这些微粒

从大到小分别命名为微球、微粒、微囊和纳米胶囊(陈增良和张钟宁,2008)。该技术把性信息素成分封闭在囊壁内,降低其扩散速率,同时隔绝光照、空气和水分,减缓活性组分降解。用于生产性信息素微胶囊的工艺有相分离法和界面聚合法。一般情况下,采用性信息素微胶囊控制害虫时,每公顷性信息素使用量在 20-100 g,性信息素微胶囊可以采用传统施药器械及大规模无人机施药,也可以与其他农药或植物寄主挥发物兼容实施,节省劳动成本。

目前,该剂型在梨小食心虫防治应用中最为成功。在澳大利亚的桃园和梨园中,Il'ichev 等(2006)应用梨小食心虫性信息素微胶囊进行大面积交配干扰试验的结果表明,当梨小食心虫性信息素微胶囊喷洒剂量为 37.1 g/hm²时,梨小食心虫迷向率达到 96%-99%,与 PE 迷向丝(500 个/hm²)处理区效果相当,蛀果率与应用广谱杀虫剂的对照区相比显著降低。Knight(2010)发现,与单独使用苹果蠹蛾性信息素微胶囊的处理区相比较,性信息素微胶囊剂、效氰戊菊酯和啉虫脒结合使用果园中的果实受害率显著降低。Kovanci(2015)通过田间试验,比较了苹果蠹蛾性信息素微胶囊和梨酯微胶囊混合使用与单独使用条件下的交配干扰率,结果表明混合微胶囊处理区的交配干扰率为 85%,而单独使用苹果蠹蛾性信息素微胶囊的交配干扰率为 61%,说明喷施梨酯能增强苹果蠹蛾性信息素的干扰效果。

1.3 蜡滴 (Specialized pheromone and lure application technology, SPLAT)

蜡滴是一种以石蜡为缓释载体,可喷施的昆虫性信息素乳剂。其制备方法为:将昆虫性信息素(4%)、植物油(4%)、维生素 E(1%)及乳化剂(2%)依次加入熔融状态石蜡(30%)中,高速搅拌,待混合均匀后再加入 70 °C 去离子水(59%),得到粘稠状液体(Atterholt *et al.*, 1998)。该剂型在加工过程中不使用有机溶剂,且石蜡在土壤中易生物降解,与其他载体相比较对环境友好。蜡滴制剂可采用人工或卡车涂抹器方式,将蜡滴喷施在树叶或树皮上,蜡滴缓慢释

放信息素。Stelinski 等 (2005) 使用卡车涂抹器在苹果园喷施梨小食心虫性信息素蜡滴, 开展梨小食心虫高种群密度下的交配干扰试验。结果显示, 蜡滴处理区的交配干扰率显著高于迷向丝处理区; 使用卡车涂抹器处理 0.05 hm^2 果园仅需 23 min, 为手工悬挂迷向丝所需时间的一半; 但蜡滴处理区在 5-6 月的持效期为 56 d, 7-8 月仅为 7 d, 推测可能是由于高温导致蜡滴失效。Atterholt 等 (1999) 报道了梨小食心虫的石蜡乳剂, 在 27°C 时, 性信息素释放速率符合零级动力学方程, 缓释时间可达 100 d 以上; 当温度超过 38°C 时, 持效期缩短, 性信息素被氧化。因此, 如何降低高温下的性信息素释放速率, 是该剂型改进的关键技术。

美国 ISCA 公司对蜡滴工艺进行改进, 开发出用于害虫交配干扰和诱杀的 SPLAT 技术, 该技术已经应用于多种鳞翅目和鞘翅目害虫的防治。该剂型产品使用前为粘度较低且具有较好流动性的乳化膏体, 一旦喷施到作物上迅速变干, 粘度增加, 附着力增强, 挥发速率受环境影响小, 产品中可添加任意浓度性信息素、农药和植物挥发物。根据防治面积, SPLAT 可以选用手持填缝枪、传统机械化设备 (拖拉机、直升飞机), 以及最新研发的无人机喷施。2006-2008, 连续 3 年在美国弗吉尼亚州采用 SPLAT-GM 防治舞毒蛾, 每公顷性信息素用量在 7.5 g, 防治区雌蛾数量减少 99%, 90% 以上诱捕器中无法诱到雄蛾, SPLAT-GM 已经是美国 STS 主要使用产品 (Onufrieva *et al.*, 2010), 且 2009 年美国 SPLAT-GM 使用面积已达到 $41\ 000 \text{ hm}^2$ (Onufrieva *et al.*, 2015)。蔓越莓通常生长在特殊设计的栽培床层, 在蔓越莓植株周围使用轮廓沙和凸起的堤坝, 以促进水的有效流动和设备的使用。这种栽培条件, 传统的农业设备无法使用 SPLAT 产品防治越橘蜂斑螟 *Acrobasis vaccinii* 和苹黑痣小卷蛾 *Rhopobota naevana*。Luck 等 (2021) 采用改装的大疆无人机进行 SPLAT 产品的喷施, 发现无人机可以按照既定程序在蔓越莓栽培床上均匀布置含有两种害虫混合性信息素的 SPLAT 产品, 且处理区的两种害虫诱捕量均显著低于对

照区。只要解决了无人机电池的续航问题, 无人机应用性信息素干扰防治的方式未来可能发展为规模化应用 SPLAT 的主要技术。

1.4 夹层型

夹层型是指将性信息素贮存层放在中间, 两侧为塑料保护层。保护层控制贮存层中性信息素的释放, 并保护贮存层内的性信息素不受光解和氧化分解。但是使用时需要特定的设备, 劳动力应用成本较高, 且性信息素的释放率不恒定, 利用率较低 (Herbert, 1999)。

1.5 PVC 树脂剂

PVC 树脂剂是将性信息素分散在 PVC 中的一种固体缓释剂型。其加工过程为: 将 PVC 溶于 EVA 乳液中形成共混体系, 依次向共聚物体系中加入增塑剂、昆虫性信息素、抗氧剂和抗紫外剂, 然后在旋转蒸发器中将混合液充分混合并抽真空 1 h, 再倒入模具中于 150°C 下固化 15 min, 脱模制得 PVC 树脂缓释剂。Cork 等 (2008) 研究了 PVC 树脂对不同昆虫性信息素缓释能力, 同时针对水稻害虫三化螟 *Scirpophaga incertulas* 采用 PVC 树脂缓释剂进行迷向防治。试验结果表明, 由于释放过快, 半衰期过短, PVC 树脂剂不适用于 10C 至 14C 的脂肪链化合物缓释; 野外环境下, 在该剂型中添加抗紫外剂炭黑, 可有效减缓不稳定醛类化合物或不饱和化合物的降解, 从而增加持效期; 与使用化学农药处理区相比, 每公顷使用含有 10 g 三化螟性信息素的 PVC 树脂剂处理区的虫害显著减少。

1.6 空心纤维

空心纤维是由共聚甲醛 (Celcon) 制作的毛细管缓释剂型, 昆虫性信息素储存在空心纤维的空腔中 (Weatherston *et al.*, 1985)。空心纤维剂型的优点是性信息素的释放速率稳定, 有效期长, 且容易规模化工业生产。但多聚甲醛受紫外线照射会发生光解, 空心纤维剂型在紫外线较强地区使用时持效期会减小。在实际应用时, 一般将空心纤维和粘胶均匀混合, 采用机械设备将空心纤维喷洒至作物叶面, 信息素从作物叶面上释

放,从而产生性信息素弥散环境。美国阿尔巴尼公司开发了一种含性信息素的空心纤维并防治棉红铃虫获得了成功,该项产品已在南美和非洲等棉区大面积推广使用(李庆燕等,2012)。

1.7 压力气雾剂

压力气雾剂由气雾自动喷射装置、载有昆虫性信息素的压力罐和电池三部分构成,该装置的喷射触发依靠环境光强或者设定好的时间程序自动进行(Shorey and Gerber, 1996a; 1996b)。早期的压力气雾剂喷嘴前带有一块信息素缓释板,喷出的气雾剂在板上缓慢释放。后来的开发者摒弃了缓释板(图 2: A),让信息素直接喷洒到周围作物叶子上进行扩散。该装置田间布置密度为每公顷 2~5 个,单个压力气雾剂(图 2: B)每隔 15~30 min 喷雾一次,喷雾剂量为 7 mg。1998 年,美国首个登记的商业化压力气雾剂,是由 Paramount 农业公司开发用于防治桃枝麦蛾 *Anarsia lineatella* 的 Puffer[®] PTB (number 71281-1)。随后压力气雾剂被美国很多公司进行商业化生产并被用苹果蠹蛾、梨小食心虫及欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 等害虫的防治,该剂型在苹果蠹蛾的交配干扰效果最为成功。

2001-2003 年,在华盛顿州苹果园进行了 Puffer-CM 和 PE 迷向丝的交配干扰试验, Puffer-CM 每公顷设置 2.5 个,每个装置从每天下午 17:00 开始释放至次日 05:00,每隔 15 min 一次。连续 3 年试验结果表明,两种剂型的迷向率和田间防效均无显著性差异(Knight, 2004)。后来 McGhee 等(2016)将 Puffer-CM 释放的时间程序改变为间隔 30 min 释放一次,田间防效与间隔 15 min 的处理差异不显著。目前,压力气雾剂已在美国多个大型果园连续多年使用防控苹果蠹蛾,2013 年在欧洲登记后,也已广泛应用于欧洲的各个果园中防控苹果蠹蛾(Mori and Evenden, 2015)。中国的北京中捷四方公司改进了压力气雾剂的供电系统,采用太阳能供电代替电池(图 2: C),使压力气雾剂避免频繁更换电池,极大提高了压力气雾剂续航能力。采用这种剂型进行防治的最大风险在于,该剂型较低密度的布置会使边界区域信息素浓度过低,从而导致该区域干扰效果减弱。因此,在使用压力气雾剂进行交配干扰时,采取在边界区补充迷向丝是必要的手段(Miller and Gut, 2015)。这种剂型适宜于处理大面积连片种植地块,不适合小和不规则的种植土地。

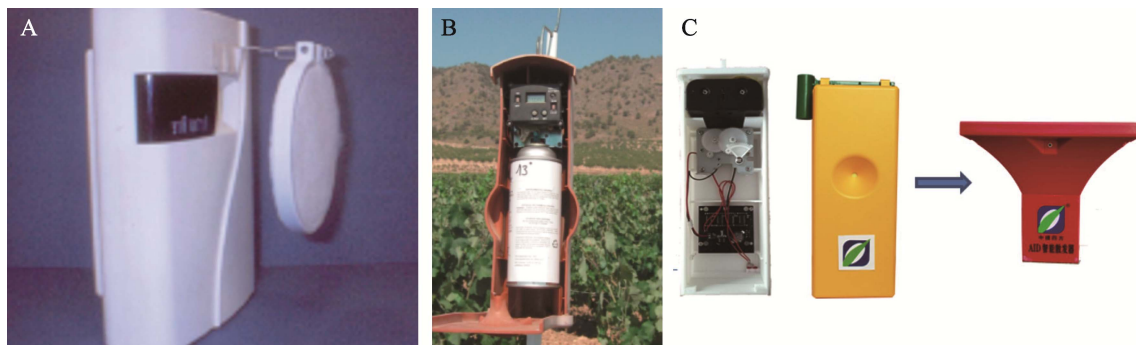


图 2 3 种类型的压力气雾剂
Fig. 2 3 kinds of puffer aerosols

A. 带缓释板的压力气雾剂; B. 无缓释板的压力气雾剂; C. 太阳能驱动国产压力气雾剂。
A. Puffer aerosol with spray pad; B. Puffer aerosol without spray pad; C. Puffer aerosol with solar power supply system.

1.8 MSTRS (Metered semiochemical timed release system) 缓释袋

MSTRS 缓释袋是一种可以定时定量释放性信息素的剂型,其外部为密封的丙烯酸塑料袋

(8 cm × 10 cm),袋内装有包含 1 g 左右性信息素的纸板(Baker *et al.*, 2016)。不同厂家生产的该剂型释放速率有差异,该剂型性信息素释放速率为 PE 迷向管的 10-20 倍之间,且挥发速率比较稳定。Baker 等(2016)测试 MSTRS 缓释

袋中苹黑痣小卷蛾性信息素释放速率与时间关系, 结果表明 80 d 测试期内 Z11-14: OAc 释放速率稳定在 $0.5 \mu\text{g}/\text{min}$ 。MSTRS 缓释袋在田间布置密度为每公顷 20-50 个, 其布置密度介于稀疏型和密集型之间, 在国外又被称为中间型 (Meso dispenser)。与塑料管状剂型设置密度 ($300-1\,000$ 个/ hm^2) 相比, 缓释袋密度很低, 可大幅度减少所需劳动力。在美国多个果园中, 采用 MSTRS 缓释袋对梨小食心虫的交配干扰取得成功并被商业化推广。随后, MSTRS 缓释袋被巴斯夫公司商业化, 并将该剂型命名为 “All lured”, 用于粉斑螟蛾 *Ephestia cautella*、印度谷螟 *Plodia interpunctella*、地中海斑螟 *Ephestia kuehniella*、欧洲玉米螟 (图 3) 等蛾类以及鞘翅目害虫的防治 (Ryne *et al.*, 2007; Sieminska *et al.*, 2009)。



图 3 欧洲玉米螟 MSTRS 缓释袋
Fig. 3 MSTRS European corn borer baggie

1.9 静电纺丝/纳米纤维

静电纺丝/纳米纤维技术指高分子聚合物溶液或者熔融物液滴在高压的静电场作用下带电, 使其密度达到一定的程度被拉伸为微纳米级超细纤维的一种技术。采用静电纺丝技术制备的纤维具有很大比表面积、中空多孔结构, 机械性能优异、性能多样化和成本低等优点 (Yi, 2015)。纳米纤维缓释机理为有效活性成分可以有效均匀地分散在纳米纤维的中空多孔结构中, 有效活性成分伴随纳米纤维的降解而释放出来。Kikionis 等 (2017) 将橄榄果实蝇 *Bactrocera oleae* 和橄榄巢蛾 *Prays oleae* 的性信息素分别与可生物降解型高分子材料醋酸纤维素 (CA)、聚己内酯

(PCL) 和聚羟基丁酸酯 (PHB) 混溶, 然后通过静电纺丝技术制备了含有性信息素的纳米纤维。通过固相微萃取技术测定不同微纳米纤维的性信息素释放曲线, 聚己内酯为最适宜的基质材料, 性信息素在其中的缓释周期可达 15 周以上。基于静电纺丝技术的性信息素纳米纤维容易实现工业化的制备水平, 在生物可降解信息素缓释产品领域具有广阔的应用前景。

1.10 自动扰乱系统 (Auto-confusion system)

在性信息素有效交配干扰过程中, 以上密集分布和稀疏分布剂型都需要使用大量的性信息素。而在实际应用中, 当昆虫性信息素价格比较低廉, 且与农药相比具有性价比时, 传统的干扰剂型才具有市场价值。此外, 还有消费者担心大量接触信息素的作物会受到污染, 特别是在粮食及干果储存场所使用。为了克服这些使用限制, Howse (2005) 开发一种称为自动扰乱系统, 该系统采用含有少量性信息素的静电粉末进行交配干扰。其原理为利用性诱芯引诱雄虫, 雄虫接触引诱剂后触角及体表会吸附上带含有性信息素的静电粉末, 雄虫对性信息素产生适应性后不再被雌虫引诱, 而且附着粉末的雄虫也是一个引诱点源, 对其他雄虫产生引诱作用, 接触后的雄虫体表又被静电粉末附着, 从而起到干扰作用。

Trematerra 等 (2013) 等采用自动扰乱系统, 在饲料厂进行仓储害虫地中海斑螟 *Ephestia kuehniella* 和印度谷螟 *Plodia interpunctella* 为期 3 年的交配干扰试验, 并利用性信息素诱捕器和产卵引诱剂诱捕器进行监测。结果显示, 第 2 年和第 3 年的性信息素诱捕器中两种害虫数量显著少于第一年数量 (对照), 后两年产卵引诱剂诱捕器中雌蛾数量也显著少于第一年。该研究表明, 在仓储场所, 自动扰乱系统对仓储害虫是一种有效可靠的技术。

2 交配干扰缓释剂在不同害虫防治中的应用概况

1978 年, 全球第一个交配干扰产品 (棉铃虫) 在美国登记。目前有超过 120 种交配干扰产

品在美国 EPA 登记, 这些产品针对 18 个靶标害虫 (于荣等, 2019)。其中已登记的苹果蠹蛾和梨小食心虫的相关交配干扰产品最多, 每种害虫均有 24 种产品被登记。迄今为止, 交配干扰技术已被成功用于 20 多种昆虫的防治, 并在全世界超过 75 万 hm^2 的土地上使用, 采用昆虫性信息素交配干扰法防控害虫应用面积最广的主要为舞毒蛾 *Lymantria dispar*、苹果蠹蛾、葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* 和梨小食心虫。

2.1 舞毒蛾

舞毒蛾是采用交配干扰技术防治面积最大的虫种, 每年 20 万 hm^2 左右的森林被喷施性信息素缓释剂。1970 年, 美国超过 300 多种的树木被舞毒蛾严重取食, 传播速度极快, 危害面积达 200 万 hm^2 。因此, 自舞毒蛾的性信息素被鉴定后, 舞毒蛾的交配干扰技术研究由美国林业局牵头, 并在 STS (Slow the spread) 项目中实施。舞毒蛾一年仅发生一代, 发生期在仲夏的几个星期, 故干扰剂能维持 1 个月的释放效果即可应用。项目早期, 低持效期的空心纤维、微胶囊和夹层 (商品名 Hercon Disrupt II) 3 种剂型均被用于舞毒蛾防控。性信息素为 75 g/hm^2 的剂量下, 夹层型具有最佳防控效果, 同时该剂型被商业登记。自 1989 年, 夹层成为众多剂型中的优势剂型并在 STS 项目中大规模连续喷洒, 使美国西部和南部的舞毒蛾种群扩散趋势得到成功抑制 (Miller and Gut, 2015)。尽管 20 年来, 各种机构和学者在舞毒蛾性信息素微胶囊剂的配方进行多项研究, 但由于微胶囊剂在实际使用过程中需要多次喷洒, 费用较高, 没有被大面积使用 (Onufrieva *et al.*, 2008)。随后其团队使用 SPLAT 剂型防治舞毒蛾亦取得了成功, 在 15-75 g/hm^2 的剂量下, SPLAT 处理区的雌性舞毒蛾交配率下降 90% 以上, 对雄蛾的迷向率亦高于 90% (Onufrieva *et al.*, 2010)。与夹层剂型相比, SPLAT 剂型易于喷施, 且该剂型在生产过程中不需使用额外有机溶剂, 是一种可生物降解剂型, 在后来 STS 项目中逐渐取代夹层剂型。

2.2 苹果蠹蛾

苹果蠹蛾是一种温带地区广泛分布的蛀果性害虫。1971 年, 苹果蠹蛾性信息素被鉴定后, 基于苹果蠹蛾性信息素的交配干扰展开大量研究, 20 年后第一个用于苹果蠹蛾防治的 1 号交配干扰剂在美国商业化销售。近年来使用面积逐渐扩大, 据估计全世界采用交配干扰苹果蠹蛾的果园面积达到 22 万 hm^2 , 其中有 7.7 万 hm^2 位于北美。苹果蠹蛾交配干扰剂的商业化开发, 是化学生态学在应用方面最成功案例之一。

尽管有很多报道关于苹果蠹蛾不同交配干扰缓释剂的研究, 但目前全球登记的苹果蠹蛾交配干扰缓释剂以塑料管状剂型为主。苹果蠹蛾一年多代, 交配干扰剂的持效期应保持 180 d 以上, 密集分布类剂型仅 PE 管可达到。Stelinski 等 (2008) 在亚利桑那州的苹果园中, 分别使用空心纤维型、夹层型和 PE 管干扰剂对苹果蠹蛾进行防治, 发现前两种剂型在大面积处理区 (4 hm^2) 的雄蛾诱虫量显著高于 PE 管处理区的雄蛾诱虫量。一项关于性信息素微胶囊的几种参数对苹果蠹蛾和其他 3 种卷叶蛾类害虫的防治效果影响的研究表明, 喷洒次数是该剂型防治中关键因素 (Stelinski *et al.*, 2007)。与对照区相比, 一年使用性信息素微胶囊 9 次处理区的 4 种卷叶蛾幼虫量才显著下降, 而一年使用 3 次的处理区诱蛾量与对照区无显著差异。微胶囊剂在不增加使用次数情况下, 即使单次使用量增大 20-30 倍, 田间防效也没有显著提高。与 PE 管相比, 微胶囊剂每年所需喷洒次数过多, 防治成本较高, 果园管理者使用较少。

2.3 梨小食心虫

梨小食心虫为害核果和仁果类果树, 在世界各大洲的果树产区均有分布, 采用性信息素防治梨小食心虫比较成熟。美国登记的梨小交配干扰产品有 20 多种, 但其剂型以塑料管状剂型为主。在中国登记的梨小性信息素产品有 8 个, 登记的剂型有: 原药、缓释管、缓释剂、挥散芯和诱芯等。据估计, 目前使用梨小性信息素进行交配干扰防治的果园面积超过 6 万 hm^2 。在加拿大桃园

中采用每 hm^2 布置 500 根 PE 梨小迷向管, 结合一年一次的化学农药喷施综合防控梨小食心虫, 调查结果发现, 与仅施用化学农药处理区相比, 综合防控处理区诱捕器中梨小雄蛾减少 98% (Trimble *et al.*, 2001)。中国学者 (相会明等, 2022) 通过气相色谱测定含有梨小性信息素 200 mg 的 PE 管田间释放速率随时间变化关系, 并研究了田间设置密度为 600 根/ hm^2 下的迷向效果及持效期。试验结果表明, 单根 PE 迷向管释放速率为 0.32-1.62 mg/d, 持效期可达 150 d 以上, 迷向率 95%。在加拿大苹果园中, 评估了梨小性信息素微胶囊剂对梨小干扰效果, 在剂量为 37.1 g/ hm^2 时, 微胶囊剂处理区蛀果率低于 1%, 性信息素诱捕器中诱蛾量显著低于传统农药处理区和对照区, 但微胶囊剂需要在梨小食心虫发生剂, 每月喷施一次 (Kovanci *et al.*, 2005)。目前市场上, 相比 PE 梨小迷向管, 微胶囊剂市场份额较低, 可能是由于其持效期短, 需要多次喷洒, 劳动力成本过高。Stelinski 等 (2007) 使用 Puffer 气雾剂防治梨小食心虫, 布置密度为 2.5 个/ hm^2 , 程序设定为: 每 15 min 喷射一次, 每天下午 15:00 开始, 每次持续 12 h, 每次喷射梨小性信息素混合物共 5 mg, 迷向率达到 98%, 与 PE 迷向管效果接近。

3 展望

尽管 40 年前就开始进行交配干扰防治害虫的研究, 并且全世界范围内广泛展开该技术的推广, 但是有关交配干扰的机制仍不明确。交配干扰机制的阐明, 有助交配干扰缓释剂开发的针对性, 减少性信息浪费, 降低使用成本。目前通过试验证实苹果蠹蛾的交配干扰机制为竞争型机制, 其交配干扰机制与缓释剂的性信息素挥发速率无关。而梨小食心虫的干扰机制与其缓释剂中的挥发速率有关, 低挥发速率缓释剂为竞争性机制, 高挥发速率为非竞争机制。采用高挥发速率的剂型时, 苹果蠹蛾干扰剂田间布置密度应都高于梨小干扰剂。目前国内交配干扰产品仅仅局限于仿制国外少数几个剂型, 且性信息素释放不够稳定, 或田间的持效期较短, 缺少省工的田间应

用装置。而交配干扰缓释剂的研究涉及化学生态学、高分子材料学、昆虫学及化学工程等多学科, 需要理论科学、应用研究人员以及企业生产机构共同合作。基于昆虫性信息素的交配干扰技术与传统化学农药相比, 具有高效安全、环境友好和专一性强等优点, 随着交配干扰技术的不断完善与应用, 将有助于实现我国化学农药减量目标, 并带来显著的经济效益、生态效益和社会效益。

参考文献 (References)

- Atterholt CA, Delwiche MJ, Rice RE, Krochta JM, 1998. Study of biopolymers and paraffin as potential controlled-release carriers for insect pheromones. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(10): 4429-4434.
- Atterholt CA, Delwiche MJ, Rice RE, Krochta JM, 1999. Controlled release of insect sex pheromones from paraffin wax and emulsions. *Journal of Controlled Release*, 57(3): 233-247.
- Butenandt A, Beckmann R, Stamm D, Hecker E, 1959. Über den sexual-lockstoff des seidenspinners *Bombyx mori*. *Reindarstellung und Constitution*. *Z. Naturforsch*, 14: 283-284.
- Baker TC, Myrick AJ, Park KC, 2016. Optimizing the point-source emission rates and geometries of pheromone mating disruption mega-dispensers. *Journal of Chemical Ecology*, 42(9): 1-12.
- Cork A, Souza KD, Hall DR, Jones OT, Casagrande E, Krishnaiah K, Syed Z, 2008. Development of pvc-resin-controlled release formulation for pheromones and use in mating disruption of yellow rice stem borer. *Scirpophaga Incertulas*. *Crop Protection*, 27(2): 248-255.
- Carde' RT, Minks AK, 1995. Control of moth pests by mating disruption: Successes and constraints. *Annual Review of Entomology*, 40: 559-585.
- Chen ZL, Zhang ZN, 2008. Development of microencapsulated sex pheromone formulations for insects. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(3): 362-367. [陈增良, 张钟宁, 2008. 昆虫性信息素微胶囊的研究进展. *昆虫知识*, 45(3): 362-367.]
- Herbert BS, 1999. *Controlled-Release Delivery Systems for Pesticides*. New York: Marcel Dekker, Inc. 295-317.
- Hansen M, 2008. Puffers save labor. *Good fruit Grower*, June 4. (<http://www.goodfruit.com/puffers-save-labor/>). Last accessed 15 April 2015.
- Howse P, 2005. Prevention of mating by auto confusion: New pest management technology using electrostatic powders. *IOBC/WPRS Bulletin*, 28: 477-478.

- Il'ichev AL, Stelinski LL, Williams DG, Gut LJ, 2006. Sprayable microencapsulated sex pheromone formulation for mating disruption of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in Australian peach and pear orchards. *Journal of Economic Entomology*, 99(6): 2048–2054.
- Knight AL, 2004. Managing codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with an internal grid of either aerosol puffers or dispenser clusters plus border applications of individual dispensers. *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 101: 69–77.
- Knight AL, 2005. Managing codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) with an internal grid of either aerosol puffers or dispenser clusters plus border applications of individual dispensers. *Journal of the Entomological Society British Colombia*, 104: 69–78.
- Knight AL, 2010. Targeting *Cydia pomonella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae) adults with low-volume applications of insecticides alone and in combination with sex pheromone. *Pest Management Science*, 66(7): 709–717.
- Kovanci OB, 2015. Co-application of microencapsulated pear ester and codlemone for mating disruption of *Cydia pomonella*. *Journal of Pest Science*, 88(2): 311–319.
- Kikionis S, Ioannou E, Konstantopoulou M, 2017. Electrospun micro/nanofibers as controlled release systems for pheromones of *Bactrocera oleae* and *Prays oleae*. *Journal of Chemical Ecology*, 43(3): 254–262.
- Kovanci OB, Schal C, Walgenbach JF, Kennedy GG, 2005. Comparison of mating disruption with pesticides for management of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in North Carolina apple orchards. *Journal of Economic Entomology*, 98(4): 1248–1258.
- Luck BD, Chasen EM, Williams PJ, Steffan SA, 2021. Drones that deliver: Pheromone-based mating disruption deployed via uncrewed aerial vehicles in U.S. cranberries. *Journal of Economic Entomology*, 114(5): 1910–1916.
- Li QY, Liu JL, Zhao LL, Ma RY, 2012. Applications of slow release technique of sex pheromone in pest control. *Chinese Journal of Biological Control*, 28(4): 589–593. [李庆燕, 刘金龙, 赵龙, 马瑞燕, 2012. 缓释技术在性信息素防治害虫中的应用. 中国生物防治学报, 28(4): 589–593.]
- Miller JR, Gut LJ, 2015. Mating disruption for the 21st century: Matching technology with mechanism. *Environmental Entomology*, 44(3): 427–453.
- McGhee PS, Miller JR, Thomson DR, Gut LJ, 2016. Optimizing aerosol dispensers for mating disruption of codling moth, *Cydia pomonella* L. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 1–10.
- Mori BA, Evenden ML, 2015. Challenges of mating disruption using aerosol-emitting pheromone puffers in red clover seed production fields to control *Coleophora deauratella* (Lepidoptera: Coleophoridae). *Environmental Entomology*, 44(1): 34–43.
- Onufrieva KS, Brewster CC, Thorpe KW, 2008. Effects of the 3M MEC sprayable pheromone formulation on gypsy moth mating success. *Journal of Applied Entomology*, 132(6): 461–468.
- Onufrieva KS, Hickman AD, Leonard DS, 2015. Efficacies and second-year effects of SPLAT GM™ and SPLAT GM™ organic formulations. *Insects*, 6(1): 1–12.
- Onufrieva KS, Thorpe KW, Hickman AD, Tobin PC, Leonard DS, Roberts EA, 2010. Effects of SPLAT[®] GM sprayable pheromone formulation on gypsy moth mating success. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 36(2): 109–115.
- Porcel M, Sjöberg P, Swiergiel W, Dinwiddie R, Ramert B, Tasin M, 2015. Mating disruption of *Spilonota ocellana* and other apple orchard tortricids using a multispecies reservoir dispenser. *Pest Management Science*, 71(4): 562–670.
- Petkevicius K, Löfstedt C, Borodina, 2020. Insect sex pheromone production in yeasts and plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 65: 259–267.
- Ryne C, Svensson GP, Anderbrant O, Löfstedt C, 2007. Evaluation of long-term mating disruption of *Ephestia kuehniella* and *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) in indoor storage facilities by pheromone traps and monitoring of relative aerial concentrations of pheromone. *Journal of Economic Entomology*, 100(4): 1017–1025.
- Sieminska E, Ryne C, Löfstedt C, Anderbrant O, 2009. Long-term pheromone-mediated mating disruption of the Mediterranean flour moth, *Ephestia kuehniella*, in a flour mill. *Entomol. Exp. Appl.*, 131(3): 294–299.
- Shorey HH, Gerber RG, 1996a. Use of puffers for disruption of sex pheromone communication of codling moths (Lepidoptera: Tortricidae) in walnut orchards. *Environmental Entomology*, 25(6): 1398–1400.
- Shorey HH, Gerber RG, 1996b. Use of puffers for disruption of sex pheromone communication among navel orangeworm moths (Lepidoptera: Pyralidae) in almonds, pistachios, and walnuts. *Environmental Entomology*, 25(5): 1154–1157.
- Stelinski LL, Gut L, Epstein D, McGhee P, Haas M, 2007. Evaluation of aerosol devices for simultaneous disruption of sex pheromone communication in *Cydia pomonella* and *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Pest Science*, 80(2): 225–233.

- Stelinski LL, Gut LJ, Mallinger RE, Epstein D, Reed TP, Miller JR, 2005. Small plot trials documenting effective mating disruption of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck), using high densities of wax-drop pheromone dispensers. *Journal of Economic Entomology*, 98(4): 1267–1274.
- Stelinski LL, Mcghee P, Grieshop M, Brunner J, Gut LJ, 2007. Sprayable microencapsulated sex pheromone formulations for mating disruption of four tortricid species: Effects of application height, rate, frequency, and sticker adjuvant. *Journal of Economic Entomology*, 100(4): 1360–1369.
- Stelinski LL, Mcghee P, Grieshop M, Brunner J, Gut LJ, 2008. Efficacy and mode of action of female-equivalent dispensers of pheromone for mating disruption of codling moth. *Agricultural and Forest Entomology*, 10(4): 389–397.
- Trematerra P, Athanassiou CG, Sciarretta A, Kavallieratos NG, Buchelos CT, 2013. Efficacy of the auto-confusion system for mating disruption of *Ephestia kuehniella* (Zeller) and *Plodia interpunctella* (Hübner). *Journal of Stored Products Research*, 55: 90–98.
- Trimble RM, Pree DJ, Carter NJ, 2001. Integrated control of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) in peach orchards using insecticide and mating disruption. *Journal of Economic Entomology*, 94(2): 476–485.
- Weatherston I, Miller D, Lavoie-Dornik J, 1985. Commercial hollow-fiber pheromone formulations: The degrading effect of sunlight on celcon fibers causing increased release rates of the active ingredient. *Journal of Chemical Ecology*, 11(12): 1631–1644.
- Witzgall P, Stelinski L, Gut L, Thomson D, 2008. Codling moth management and chemical ecology. *Annual Review of Entomology*, 53: 503–522.
- Wright RH, 1964. After pesticides-what? *Nature*, 204 (4954): 121–125.
- Welter S, Pickel C, Millar J, Cave F, Steenwyk R, Dunley J, 2005. Pheromone mating disruption offers selective management options for key pests. *California Agriculture*, 59(1): 16–22.
- Xiang HM, Diao HL, Li XW, Zhao ZG, Ma RY, 2022. Comparison of the pheromone release rate and degree of mating disruption achieved using four different types of pheromone dispenser to control the oriental fruit moth. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 311–317.[相会明, 刁红亮, 李先伟, 赵志国, 马瑞燕, 2022. 梨小食心虫性信息素在四种载体中释放速率及田间迷向率研究. *应用昆虫学报*, 59(2): 311–317.]
- Yi Q, 2015. *Micromanufacturing Engineering and Technology*. Norwich: William Andrew, Inc: 513–548.
- Yu R, Zhao YH, Yang S, Ji LL, 2019. Overview of pheromone pesticide registration in China and abroad and policy suggestions. *Pesticide Science and Administration*, 40(10): 6–9, 20. [于荣, 杨硕, 赵永辉, 嵇莉, 2019. 国内外信息素农药登记概况及登记政策建议. *农药科学与管理*, 40(10): 6–9, 20.]