

水稻蛾类害虫合成性信息素多靶标 交配干扰技术的田间评价*

李艳芳^{1**} 胡平平¹ 朱秀秀² 林宇丰² 伍绍龙³
刘天波³ 张政兵² 杜永均^{4***}

(1. 湖南省攸县植保植检站, 攸县 412300; 2. 湖南省植保植检站, 长沙 410006;
3. 湖南省烟草研究所, 长沙 410004; 4. 浙江大学农药与环境毒理研究所, 杭州 310058)

摘要 【目的】探索性信息素交配干扰法对水稻二化螟 *Chilo suppressalis*、大螟 *Sesamia inferens* 和稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 求偶行为和防控效果的影响, 以及对非靶标害虫稻飞虱 *Nilaparvata lugens* 种群的影响。【方法】在湖南攸县晚稻田中设置释放器, 在每日晚上求偶期主动喷射超剂量性信息素, 同期性诱监测二化螟、稻纵卷叶螟和大螟的蛾量, 田间调查二化螟、大螟和稻纵卷叶螟的危害率和幼虫密度, 以及褐飞虱的虫量。【结果】多靶标性信息素释放器释放的气味有效干扰了二化螟、大螟和稻纵卷叶螟的求偶行为, 田间 3 种鳞翅目害虫的诱蛾量显著下降, 二化螟、稻纵卷叶螟和大螟的平均总迷向率分别为 $86.84\% \pm 1.69\%$ 、 $86.18\% \pm 2.16\%$ 和 $86.13\% \pm 1.92\%$ 。二化螟田间危害情况调查交配干扰区平均防效为 $81.08\% \pm 4.73\%$, 相对对照区幼虫减退率为 $85.25\% \pm 4.89\%$ 。稻纵卷叶螟田间危害情况调查交配干扰区平均防效为 $90.63\% \pm 3.06\%$ 。大螟田间危害调查发现交配干扰区平均防效为 $56.85\% \pm 3.53\%$, 幼虫减退率为 $54.97\% \pm 3.52\%$ 。交配干扰区的稻飞虱种群数量显著低于对照区 ($t=4.12$, $df=18$, $P<0.001$), 平均减少 $83.54\% \pm 2.29\%$ 。在对照区, 二化螟外围幼虫数量显著高于中间田块 ($F=20.17$, $df=9$, $P<0.001$), 但在交配干扰环境下, 二化螟在水稻的外围密度与中间田块无显著差异 ($F=0.112$, $df=9$, $P=0.895$)。【结论】多靶标性信息素释放器可通过直接干扰求偶行为有效防控二化螟、大螟和稻纵卷叶螟, 可能由于保护了田间天敌种群, 间接抑制了稻飞虱的种群数量。

关键词 二化螟; 稻纵卷叶螟; 大螟; 稻飞虱; 性信息素; 交配干扰

The effectiveness of using high-dose, multi-target sex pheromone dispensers to control *Chilo suppressalis*, *Cnaphalocrocis medinalis* and *Sesamia inferens* in paddy fields

LI Yan-Fang^{1**} HU Ping-Ping¹ ZHU Xiu-Xiu² LIN Yu-Feng² WU Shao-Long³
LIU Tian-Bo³ ZHANG Zheng-Bing² DU Yong-Jun^{4***}

(1. Hunan Province Youxian Plant Protection and Quarantine Station, Youxian 412300, China;

2. Hunan Province Plant Protection and Quarantine Station, Changsha 410006, China;

3. Hunan Tobacco Research Institute, Changsha 410004, China;

4. Zhejiang University Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Hangzhou 310058, China)

Abstract [Aim] To investigate the effectiveness of using pheromones to disrupt the mating of the striped rice stem borer, *Chilo suppressalis*, the rice leaf-roller, *Cnaphalocrocis medinalis*, the pink stem borer, *Sesamia inferens*, as well as a non-targeted pest, the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. [Methods] High-dose, multi-target sex pheromone

*资助项目 Supported project: 中国烟草总公司重大科技项目[110202201027 (LS-11)]

**第一作者 First author, E-mail: 635804123@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yongjundu@zju.edu.cn

收稿日期 Received: 2024-04-11; 接受日期 Accepted: 2024-08-04

dispensers and pheromone traps were deployed in paddy fields and the number of adult moths of the above species captured, the amount of crop damage, the larval density of pests, and the abundance of brown planthoppers, were monitored. **[Results]** Pheromone dispensers effectively disrupted the mating behavior of *Ch. suppressalis*, *Cn. medinalis* and *S. inferens*, and significantly reduced the number of adults of these species captured. The average, total, disruption rates for *Ch. suppressalis*, *Cn. medinalis* and *S. inferens* moths were, 86.84% $\pm$ 1.69%, 86.18% $\pm$ 2.16%, and 86.13% $\pm$ 1.92%, respectively. The average abundance of *Ch. suppressalis* adults and larvae in the treatment area were 81.08% $\pm$ 4.73% and 85.25% $\pm$ 4.89%, respectively, less than in the control area. The average abundance of adult *Cn. medinalis* was 90.63% $\pm$ 3.06% less than in the control area, whereas the average abundance of *S. inferens* adults and larvae in the treatment area were 56.85% $\pm$ 3.53% and 54.97% $\pm$ 3.52%, respectively, less abundant than in the control area. The abundance of *N. lugens* in the treatment area was significantly lower than in the control, with an average reduction of 83.54% $\pm$ 2.29% ($t=4.12$, $df=18$, $P<0.001$). **[Conclusion]** Multi-targeted sex pheromone dispensers effectively controlled rice yellow stem borers, rice pink stem borers and rice leaf rollers, by disrupting their mating behavior, and may also indirectly suppress the population of rice planthoppers by protecting populations of their natural enemies in the field.

Key words *Chilo suppressalis*; *Cnaphalocrocis medinalis*; *Sesamia inferens*; *Nilaparavata lugens*; sex pheromone; mating disruption

二化螟 *Chilo suppressalis* 属鳞翅目 Lepidoptera 螟蛾科 Pyralidae, 广泛分布于亚洲、非洲北部和欧洲南部等热带及亚热带地区。长此以来, 二化螟一直是我国水稻作物上最重要的钻蛀性害虫, 对水稻生产造成严重损失; 另一钻蛀性害虫大螟 *Sesamia inferens* 在我国部分地区发生; 迁飞性害虫稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 也是我国大部分地区水稻上的重要卷叶害虫(叶恭银等, 2023)。近十多年, 二化螟在湖南大部分地区发生严重, 越冬基数大, 田间个体发育进程差异大, 成虫羽化时间跨度长, 幼虫各龄期参差不齐。由于单双季混栽和复杂耕作制度, 二化螟在一些地区存在严重的世代重叠。因此, 防控二化螟时不容易确定施药时间, 导致施药防效差和打药次数多(朱秀秀等, 2023)。二化螟 2 龄幼虫即钻蛀水稻茎秆, 一些水稻种植区没有测报服务, 农民按日历打药, 防治效果差, 盲目和过度施用化学农药导致二化螟抗药性水平快速上升(张乾, 2022)。利用二化螟性信息素监测其发生期, 指导适时施药, 可提高防治效果。应用群集诱杀技术可控制二化螟种群数量, 达到防治的目的(焦晓国等, 2006)。性信息素具有种专一性, 稻田中存在多种害虫, 因为性诱的专一性, 需要在田间设置多个害虫种类的性信息素诱捕器, 成本高且费时费力, 因此, 水稻害虫的性信息素群集诱

杀实际操作起来比较困难。

性信息素交配干扰是另一类性信息素技术, 利用田间到处弥漫性信息素化合物破坏雄虫的求偶定向行为反应, 致使雌、雄虫无法及时找到配偶而错过交配, 在国际上被广泛应用于害虫防控(Witzgall *et al.*, 2010)。性信息素的释放通过被动型或主动型释放器实现(Klassen *et al.*, 2023)。采用被动型释放器交配干扰防治水稻二化螟已有多报道, 但因其用量大、用工多且随着水稻植株长高信息素田间扩散受到影响等问题, 该方法在水稻作物中的应用受到很大限制(Chen *et al.*, 2014)。主动型释放器依据昆虫的求偶节律, 通过电子机械喷射系统控制性信息素的释放时间和释放量(王未英等, 2024), 在苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (McGhee *et al.*, 2016)、梨小食心虫 *Grapholitha molesta* (Stelinski *et al.*, 2007)、葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* (Lucchi *et al.*, 2018) 和粉蚧 *Planococcus ficus* (Daane *et al.*, 2021) 等害虫的交配干扰应用中取得了很好的效果, 但在水稻二化螟防治上还未见完整系统的报道。为此, 本研究在湖南攸县晚稻田, 设置主动型性信息素释放器, 高剂量喷射性信息素化合物, 系统调查了田间二化螟、大螟和稻纵卷叶螟幼虫种群数量的动态变化及其水稻各生育期被害情况, 以期为其进一步在水稻田大面积推

广应用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 交配干扰释放器

在水稻生境中,不同生态位的害虫之间存在性信息素的种间通讯关系,即二化螟的性信息素主成分顺 11-十六碳烯醛 (Z11-16: Ald) 刺激稻纵卷叶螟雄蛾的性信息素受体,并抑制其求偶行为 (Cheng *et al.*, 2023)。二化螟性信息素的次要成分顺 13-十八碳烯醛 (Z13-18: Ald) 是稻纵卷叶螟的性信息素主成分 (Wu *et al.*, 2013)。Z11-16: Ald 也是大螟性信息素的次要成分,在较高剂量环境下,可抑制大螟雄蛾的求偶和交配,其抑制作用低于顺 11-十六碳烯乙酸酯 (Z11-16: Ac) (桂嘉唯等, 2024)。依据水稻生境下这些害虫的互作通讯关系,交配干扰性信息素混合物经优化由 Z11-16: Ald、Z13-18: Ald、顺 9-十六碳烯醛 (Z9-16: Ald) 和 Z11-16: Ac (10 : 1 : 1 : 3) 组成,其中 Z11-16: Ald 占液体总量的 15%。所有性信息素化合物的纯度>93%,由宁波纽康生物技术有限公司合成。高剂量性信息素主动喷射释放器(宁波纽康生物技术有限公司生产,型号: HDMD-S-001) 由程序自动控制,每次喷射量 6 μL 。释放器的喷射时间设置在 16:00 pm-04:00 am, 16:00-18:00 pm 喷射间隔为 2 min, 18:00 PM-04:00 am 喷射间隔改为 6 min。

1.2 试验设计

试验于 2023 年在湖南攸县新市镇土楼村 (27.15° N, 113.34° E) 晚稻田中进行,该田块为小苗机插秧,7 月 25 日插秧,10 月 30 日收割。试验设 2 个处理,分别为水稻害虫交配干扰区和农户自防对照区,各处理区水肥和施药管理一致。交配干扰区和对照区间隔 500 m。

交配干扰区面积 8 hm^2 ,平均每 0.2 hm^2 设置 1 个性信息素高剂量主动喷射释放器,即每 2 个释放器间隔约 47 m,水稻插秧后均匀置于田间。农户自防对照区面积 8 hm^2 ,由农户按常规方式防治二化螟,不设置群集诱杀诱捕器和交

配干扰释放器。在交配干扰区和农户自防对照区的东、南、西、北和中心位置,分别设置二化螟、大螟和稻纵卷叶螟监测新型飞蛾诱捕器(宁波纽康生物技术有限公司)及其对应性信息素挥发芯各 5 套,每点 3 个诱捕器间隔约 20 m,用于监测二化螟、稻纵卷叶螟和大螟雄蛾诱捕量。

1.3 田间调查方法

1.3.1 性信息素诱蛾量监测 每日调查记录交配干扰区和对照区所有监测诱捕器中二化螟、稻纵卷叶螟和大螟的雄蛾数量,并当日清空诱捕器。二化螟性信息素由 980 μg Z11-16: Ald、98 μg Z9-16: Ald 和 120 μg Z13-18: Ald 组成;稻纵卷叶螟性信息素组成为 50 μg 顺 11-十八碳烯醛 (Z11-18: Ald)、500 μg Z13-18: Ald、120 μg 顺 11-十八碳烯醇 (Z11-18: OH) 和 90 μg 顺 13-十八碳烯醇 (Z13-18: OH);大螟性信息素由 750 μg Z11-16: Ac 和 250 μg 顺 11-十六碳烯醇 (Z11-16: OH) 组成。诱芯的载体为聚氯乙烯毛细管结构(宁波纽康生物技术有限公司生产)。

1.3.2 二化螟危害和幼虫数量调查 按照水稻二化螟测报调查规范 (GB/T 15792-2009) 的方法,调查从 7 月 31 日开始,10 月 26 日结束。分别在交配干扰区和农户自防对照区调查田间二化螟虫量和危害(虫伤株、枯心、白穗)数量。采用平行跳跃式取样,每个处理调查 5 个点,每点调查 100 丛,记录水稻被害株数。连根拔取全部被害水稻,记录枯鞘数、枯心数、虫伤株数、枯孕穗和白穗数等,剥查稻茎,记录幼虫和蛹的数量及其发育级别。

1.3.3 大螟危害和幼虫数量调查 参照水稻大螟测报调查规范 (DB34/T 2904-2017) 的方法,同期,在交配干扰区和农户自防对照区调查田间大螟虫量和危害(虫伤株、枯心、白穗)数量。采用平行跳跃式取样,每个处理调查 5 个点,每点调查 100 丛,记录被害株数。连根拔取全部被害水稻,记录枯心数、虫伤株数和枯孕穗等,剥查稻茎,记录幼虫和蛹的数量。

1.3.4 稻纵卷叶螟危害和幼虫数量调查 参照农业农村部稻纵卷叶螟测报技术规范 (GB/T

15793-2011), 同期, 采用平行跳跃式取样, 交配干扰区和农户自防对照区各调查 10 个点, 每点 2 丛, 记录卷叶数量, 将卷叶轻轻拨开, 观察幼虫并确定幼虫龄期和数量。记录调查总叶片数和卷叶数, 计算卷叶率。卷叶率=(卷叶数/调查总叶数)×100%。

1.3.5 稻飞虱数量调查 在 10 月 22 日和 10 月 26 日在交配干扰区和对照区, 采用平行双行跳跃式取样, 每点取 2 丛, 取 10 个点, 用水润湿白瓷盘 (33 cm×45 cm), 将瓷盘轻轻放入稻行中, 紧贴水稻基部, 拍击水稻植株的中下部, 连拍 3 下后计数瓷盘中各类飞虱成虫和若虫的数量。

1.3.6 稻田位置对二化螟和大螟危害率的影响 考虑到大螟危害植株多数靠近田埂, 在交配干扰区和对照区, 分别各选择 3 个靠近较宽机耕路的大方形田块, 每个田块约为 0.2 hm², 将每个方形田块分为 3 层来调查, 外层、中层和内层, 每层宽度为 15 m, 并在东、南、西和北方向各调查 4 个点, 每点调查 100 丛, 记录被害株数。连根拔取全部被害水稻, 记录枯鞘数、枯心数、虫伤株数、枯孕穗和白穗数等, 剥查稻茎, 分别记录大螟和二化螟幼虫和蛹的数量。

1.4 数据分析

迷向率=(对照区诱蛾量-交配干扰区诱蛾量)/对照区诱蛾量×100%,

危害率=(枯鞘、枯心、虫伤株和白穗总数)/调查总株数×100%。

数据分析采用软件 SPSS 17.0。多组平均数比较采用单因素完全随机设计的方差分析 (One-way ANOVA), 其中显著性分析使用 Duncan 多重比较法。两组平均数的差异, 采用 Student 氏 *t* 检验法比较。

2 结果与分析

2.1 交配干扰环境对田间诱蛾量的影响

交配干扰区和对照区二化螟监测诱捕器诱蛾量见图 1 (A)。结果显示 7 月 31 日在交配干扰区和对照区均未诱捕到二化螟, 8 月 7 日对照区二化螟平均诱捕量为 (5.8±1.4) 头, 显著高于

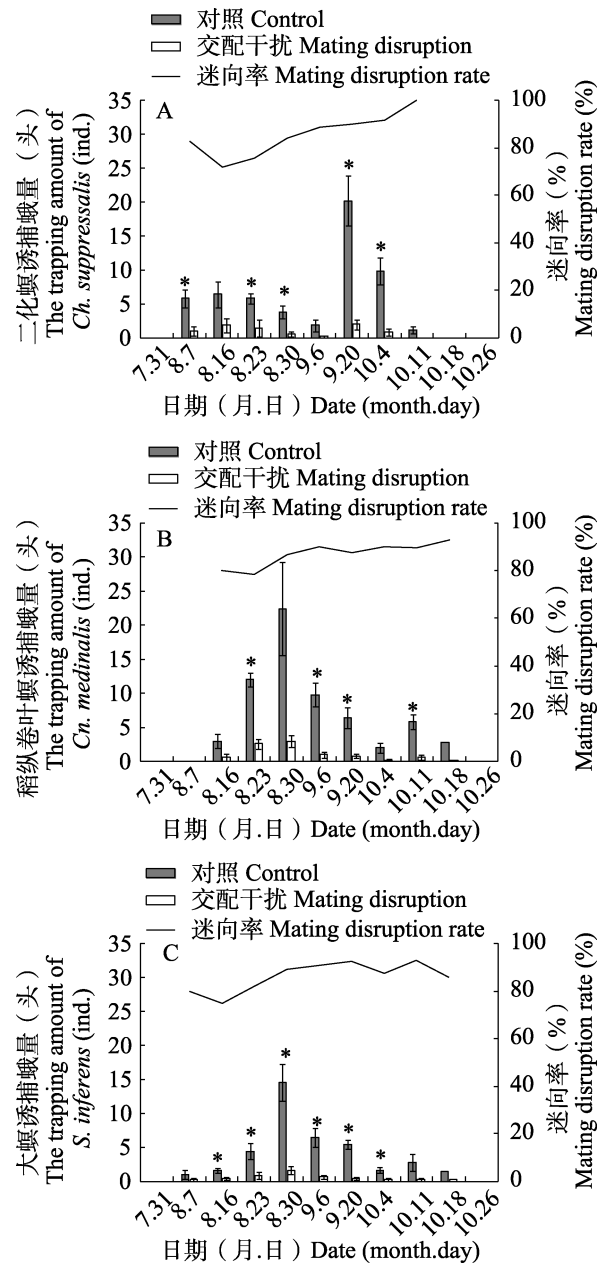


图 1 合成性信息素交配干扰对性诱蛾量的影响及其迷向率

Fig. 1 Effect of synthetic sex pheromone mating disruption on the moth catches and their disrupted rates

A. 二化螟 *Ch. suppressalis*; B. 稻纵卷叶螟 *Cn. medinalis*; C. 大螟 *S. inferens*.

对照: 不放置交配干扰释放器。图中数据为平均值±标准误, 下同。柱上星号代表两组间差异显著 ($P < 0.05$, Student 氏 *t* 检验), 图 2, 图 3 同。

Control: No mating disruption dispenser. Data in the figure are mean±SE. The same for the following figures. The asterisk represents significant difference between two groups ($P < 0.05$, Student's *t*-test). The same for Fig. 2 and Fig. 3.

交配干扰区的 (1.0 ± 0.7) 头 ($t=2.80$, $df=8$, $P=0.023$)。8 月 16 日对照区二化螟平均诱捕量为 (6.4 ± 1.9) 头, 交配干扰区 (1.8 ± 1.0) 头, 两者间无显著差异 ($t=1.93$, $df=8$, $P=0.102$)。8 月 23 日对照区二化螟平均诱捕量为 (5.8 ± 0.7) 头, 显著高于交配干扰区的 (1.4 ± 1.3) 头 ($t=2.73$, $df=8$, $P=0.032$)。8 月 30 日对照区二化螟平均诱捕量为 (3.8 ± 0.9) 头, 显著高于交配干扰区的 (0.6 ± 0.4) 头 ($t=2.92$, $df=8$, $P=0.019$)。9 月 20 日对照区二化螟平均诱捕量为 (20.2 ± 3.7) 头, 显著高于交配干扰区的 (2.0 ± 0.8) 头 ($t=4.33$, $df=8$, $P=0.003$)。10 月 4 日对照区二化螟平均诱捕量为 (9.8 ± 2.0) 头, 显著高于交配干扰区的 (0.8 ± 0.5) 头 ($t=3.85$, $df=8$, $P=0.005$)。10 月 11 日、10 月 18 日和 10 月 26 日, 交配干扰区未诱捕到二化螟。经计算二化螟平均迷向率为 $86.84\% \pm 1.69\%$ 。

在交配干扰区和对照区调查稻纵卷叶螟监测诱捕器发现 (图 1: B), 8 月 16 日前未诱捕到稻纵卷叶螟; 8 月 16 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (3.0 ± 1.0) 头, 交配干扰区诱捕量为 (0.6 ± 0.5) 头, 两者无显著差异 ($t=1.86$, $df=8$, $P=0.100$)。8 月 23 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (12.0 ± 1.0) 头, 显著高于交配干扰区的 (2.6 ± 0.7) 头 ($t=6.71$, $df=8$, $P<0.001$)。8 月 30 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (22.4 ± 6.8) 头, 交配干扰区诱捕量为 (3.0 ± 0.8) 头 ($t=2.53$, $df=8$, $P=0.063$)。9 月 6 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (9.8 ± 1.7) 头, 显著高于交配干扰区的 (1.0 ± 0.4) 头 ($t=4.43$, $df=8$, $P=0.009$)。9 月 20 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (6.4 ± 1.5) 头, 显著高于交配干扰区的 (0.8 ± 0.3) 头 ($t=3.35$, $df=8$, $P=0.010$)。10 月 4 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (2.0 ± 0.8) 头, 交配干扰区诱捕量为 (0.2 ± 0.2) 头, 两者之间无显著差异 ($t=3.35$, $df=8$, $P=0.010$)。10 月 11 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (5.8 ± 1.1) 头, 显著高于交配干扰区的 (0.6 ± 0.4) 头 ($t=3.99$, $df=8$, $P=0.011$)。10 月 18 日对照区稻纵卷叶螟平均诱捕量为 (2.8 ± 1.1) 头, 交配干扰区诱捕量为

(0.2 ± 0.2) 头, 两者之间无显著差异 ($t=2.06$, $df=8$, $P=0.072$)。10 月 26 日, 对照区和交配干扰区均未诱捕到稻纵卷叶螟。稻纵卷叶螟平均迷向率为 $86.18\% \pm 2.16\%$ 。

在交配干扰区和对照区调查大螟监测诱捕器发现 (图 1: C), 8 月 7 日对照区大螟平均诱捕量为 (1.0 ± 0.7) 头, 交配干扰区诱捕量为 (0.2 ± 0.2) 头, 两者之间无显著差异 ($t=1.00$, $df=8$, $P=0.347$)。8 月 16 日对照区大螟平均诱捕量为 (1.6 ± 0.4) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量 (0.4 ± 0.2) 头 ($t=2.56$, $df=8$, $P=0.034$)。8 月 23 日对照区大螟平均诱捕量为 (4.4 ± 1.2) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量 (0.8 ± 0.5) 头 ($t=2.55$, $df=8$, $P=0.047$)。8 月 30 日对照区大螟平均诱捕量为 (14.6 ± 2.7) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量 (1.6 ± 0.6) 头 ($t=4.17$, $df=8$, $P=0.003$)。9 月 6 日对照区大螟平均诱捕量为 (6.4 ± 1.4) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量 (0.6 ± 0.4) 头 ($t=3.65$, $df=8$, $P=0.006$)。9 月 20 日对照区大螟平均诱捕量为 (5.4 ± 0.7) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量的 (0.4 ± 0.2) 头 ($t=5.89$, $df=8$, $P<0.001$)。10 月 4 日对照区大螟平均诱捕量为 (1.6 ± 0.5) 头, 显著高于交配干扰区诱捕量 (0.2 ± 0.2) 头 ($t=5.56$, $df=8$, $P=0.034$)。10 月 11 日对照区大螟平均诱捕量为 (2.8 ± 1.3) 头, 交配干扰区诱捕量为 (0.2 ± 0.2) 头, 两者之间无显著差异 ($t=1.85$, $df=8$, $P=0.102$)。10 月 18 日对照区大螟平均诱捕量为 (1.4 ± 0.8) 头, 交配干扰区诱捕量为 (0.2 ± 0.2) 头, 两者之间无显著差异 ($t=1.34$, $df=8$, $P=0.217$)。经计算大螟平均迷向率为 $86.13\% \pm 1.92\%$ 。

2.2 交配干扰环境对危害率和幼虫种群的影响

在交配干扰区和对照区调查田间二化螟的幼虫数量和危害率发现 (表 1), 前期二化螟危害率较低, 随时间推移有逐渐增大的趋势。其中 8 月 23 日 ($t=2.31$, $df=8$, $P=0.049$)、9 月 6 日 ($t=4.27$, $df=8$, $P=0.003$)、10 月 5 日 ($t=5.16$, $df=8$, $P<0.001$) 和 10 月 18 日 ($t=6.44$, $df=8$, $P<0.001$) 对照区危害率显著高于交配干扰区。

对照区二化螟幼虫数量在 8 月 23 日 ($t=2.81$, $df=8$, $P=0.020$)、9 月 6 日 ($t=3.48$, $df=8$, $P=0.008$)、10 月 5 日 ($t=5.27$, $df=8$, $P<0.001$) 和 10 月 18 日 ($t=7.21$, $df=8$, $P<0.001$) 均显著高于交配干扰区。二化螟的平均防效为 $81.08\%\pm 4.73\%$, 相对对照区幼虫减退率为 $85.25\%\pm 4.89\%$ 。

在交配干扰区和对照区调查田间稻纵卷叶螟卷叶率发现 (表 2), 7 月 31 日, 交配干扰区的卷叶率显著高于对照区 ($t=-4.26$, $df=8$, $P=0.003$); 之后调查显示对照区的卷叶率均高于交配干扰区, 其中 8 月 30 日 ($t=2.44$, $df=18$, $P=0.025$)、9 月 6 日 ($t=2.73$, $df=18$, $P=0.014$)、9 月 18 日 ($t=2.97$, $df=18$, $P=0.009$) 和 10 月 5 日 ($t=5.29$, $df=18$, $P<0.001$) 对照区卷叶率显

著高于交配干扰区。9 月 18 日, 对照区稻纵卷叶螟幼虫数量显著高于交配干扰区 ($t=2.67$, $df=18$, $P=0.025$)。稻纵卷叶螟田间危害情况调查交配干扰区平均防效为 $90.63\%\pm 3.06\%$, 相对对照区幼虫减退率为 $100.00\%\pm 0.00\%$ 。因试验年度稻纵卷叶螟发生轻, 且农民施过化学农药, 因此基数非常低。

对大螟田间调查发现 (图 2: A-C), 10 月 5 日对照区大螟危害率为 $1.23\%\pm 0.23\%$, 显著高于交配干扰区的 $0.47\%\pm 0.12\%$ ($t=2.89$, $df=18$, $P=0.008$)。10 月 18 日对照区大螟危害率为 $1.31\%\pm 0.22\%$, 显著高于交配干扰区的 $0.63\%\pm 0.11\%$ ($t=2.70$, $df=18$, $P=0.012$)。10 月 5 日对照区大螟幼虫数量为 (0.08 ± 0.02) 头/百株, 显

表 1 合成性信息素交配干扰对二化螟危害率和田间幼虫的影响
Table 1 Effects of synthetic sex pheromone mating disruption on the damaged rate by rice purple stem borers and larval density of *Chilo suppressalis*

调查日期 (月-日) Sampling date (month-day)	处理 Treatments	调查株数 Sampling plants	平均危害率 (%) Mean damaged (%)	平均幼虫数 (头) Mean number of larvae (ind.)	防效 (%) Control efficacy (%)	幼虫减退率 (%) Decrease rate of larvae (%)
7-31	对照 Control	500	0.2±0.0	0.3±0.2		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.0±0.0	0.0±0.0	100.00	100.00
8-16	对照 Control	500	1.1±0.1	1.2±0.6		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.3±0.0	0.1±0.0	73.17	92.48
8-23	对照 Control	500	1.3±0.4*	1.7±0.3*		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.5±0.1	0.5±0.2	60.00	68.39
8-30	对照 Control	500	1.1±0.4	1.1±0.3		
	交配干扰 Mating disruption	500	2.7±0.1	0.3±0.2	74.49	70.41
9-6	对照 Control	500	2.1±0.3*	0.3±0.0*		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.4±0.3	0.1±0.0	79.83	72.73
10-5	对照 Control	500	4.8±0.9*	7.5±1.4*		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.3±0.1	0.2±0.1	93.54	97.19
10-18	对照 Control	500	5.3±0.7*	4.3±0.6*		
	交配干扰 Mating disruption	500	0.7±0.1	0.2±0.1	86.54	95.17

对照: 不放置交配干扰释放器。星号代表两组间差异显著 ($P<0.05$, Student 氏 t 检验)。下表同。

Control: No mating disruption dispenser. The asterisk represents significant difference between two groups ($P<0.05$, Student's t -test). The same below.

表 2 合成性信息素交配干扰对稻纵卷叶螟卷叶率和田间幼虫的影响

Table 2 Effects of synthetic sex pheromone mating disruption on the damaged rate by rice leaf rollers and larval density of *Cnaphalocrocis medinalis*

调查日期 (月-日) Sampling date (month-day)	处理 Treatments	调查株数 Sampling plants	平均危害率 (%) Mean damaged (%)	平均幼虫数 (头) Mean Number of larvae (ind.)	防效 (%) Control efficacy (%)	幼虫减退率 (%) Decrease rate of larvae (%)
7-31	对照 Control	20	0.1±0.1*	0.6±0.4		
	交配干扰 Mating disruption	20	1.6±0.3	5.1±3.3	/	/
8-16	对照 Control	20	1.0±0.7	0.0±0.0		
	交配干扰 Mating disruption	20	0.0±0.0	0.0±0.0	100.00	/
8-23	对照 Control	20	0.0±0.0	0.0±0.0		
	交配干扰 Mating disruption	20	0.0±0.0	0.0±0.0	/	/
8-30	对照 Control	20	5.8±2.1*	0.4±0.2		
	交配干扰 Mating disruption	20	0.6±0.6	0.0±0.0	90.48	100.00
9-6	对照 Control	20	6.8±2.1*	0.4±0.2		
	交配干扰 Mating disruption	20	0.7±0.7	0.0±0.0	90.00	100.00
9-18	对照 Control	20	7.3±1.9*	0.7±0.3*		
	交配干扰 Mating disruption	20	1.4±0.8	0.0±0.0	81.25	100.00
10-5	对照 Control	20	8.9±1.1*	0.2±0.1		
	交配干扰 Mating disruption	20	1.6±0.8	0.0±0.0	82.05	100.00
10-18	对照 Control	20	2.7±1.3	0.0±0.0		
	交配干扰 Mating disruption	20	0.0±0.0	0.0±0.0	100.00	/

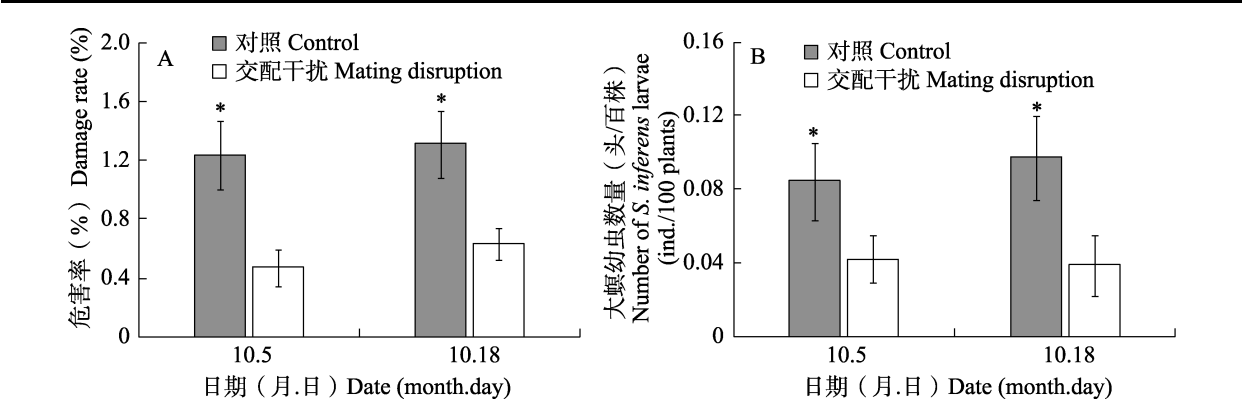


图 2 合成性信息素交配干扰对大螟危害 (A) 及其幼虫虫口 (B) 的影响

Fig. 2 Effects of synthetic sex pheromone mating disruption on the damaged rate (A) by rice pink stem borers and larval density (B) of *Sesamia inferens*

著高于交配干扰区的 (0.04±0.01) 头/百株 大螟幼虫数量为 (0.10±0.02) 头/百株, 显著高
($t=1.73$, $df=18$, $P=0.046$)。10 月 18 日对照区 于交配干扰区的 (0.04±0.02) 头/百株 ($t=2.08$,

$df=18$, $P=0.047$)。大螟的平均防效为 $56.85\% \pm 3.53\%$, 幼虫减退率为 $54.97\% \pm 3.52\%$ 。

2.3 交配干扰环境对稻飞虱种群的影响

对稻飞虱田间调查发现(图3), 10月22日对照区稻飞虱数量为 (5.3 ± 1.8) 头/丛, 显著高于交配干扰区的 (0.7 ± 0.5) 头/丛 ($t=2.50$, $df=18$, $P=0.022$)。10月26日对照区稻飞虱数量为 (6.6 ± 1.1) 头/丛, 显著高于交配干扰区的 (1.2 ± 0.6) 头/丛 ($t=4.12$, $df=18$, $P<0.001$)。交配干扰区相对对照区稻飞虱数量平均减少 $83.54\% \pm 2.29\%$ 。

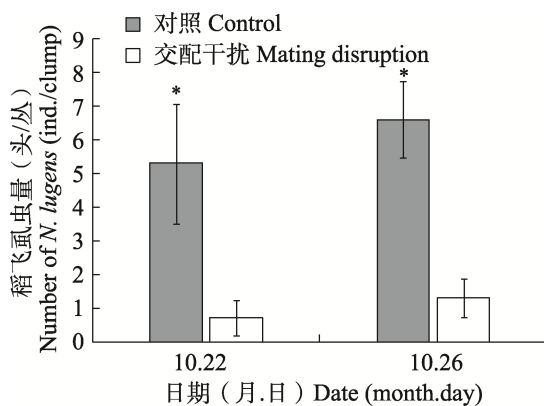


图3 交配干扰区和对照区稻飞虱
Nilaparvata lugens 种群比较

Fig. 3 Comparison on the population of rice planthopper *Nilaparvata lugens* between mating disruption and control

2.4 交配干扰对二化螟和大螟分布的影响

比较二化螟和大螟幼虫在交配干扰区和对照区中的分布, 结果如图4(A-F)所示。10月5日, 对照区田间二化螟的危害率在3个区域中的分布存在显著差异 ($F=8.89$, $df=9$, $P=0.005$), 外层危害率最高, 为 $7.77\% \pm 1.55\%$, 中层为 $3.91\% \pm 0.55\%$, 内层最低, 为 $2.10\% \pm 0.52\%$ 。大螟的危害率无显著差异 ($F=3.49$, $df=9$, $P=0.067$)。在3个区域中, 二化螟的幼虫数量存在显著差异 ($F=20.17$, $df=9$, $P<0.001$), 外层幼虫数量最高, 为 (2.65 ± 0.32) 头/百株, 中层为 (1.12 ± 0.17) 头/百株, 内层为 (0.56 ± 0.19) 头/百株。大螟的幼虫数量无差异显著 ($F=1.42$,

$df=9$, $P=0.283$)。在性信息素交配干扰区, 田间在外、中和内层3个区域中, 二化螟 ($F=0.935$, $df=9$, $P=0.422$) 和大螟 ($F=0.891$, $df=9$, $P=0.438$) 的危害率无显著差异, 且二化螟 ($F=0.112$, $df=9$, $P=0.895$) 和大螟 ($F=0.816$, $df=9$, $P=0.467$) 的幼虫数量也无差异显著。

10月18日, 对照区二化螟田间危害率在3个区域中存在显著差异 ($F=8.79$, $df=9$, $P=0.005$), 外层危害率最高, 为 $7.59\% \pm 0.83\%$, 中层为 $5.18\% \pm 0.76\%$, 内层最低, 为 $2.61\% \pm 0.86\%$ 。大螟在3个区域中的危害率无显著差异 ($F=3.49$, $df=9$, $P=0.067$)。在3个区域中, 二化螟的幼虫数量存在显著差异 ($F=22.17$, $df=9$, $P<0.001$), 外层幼虫数量最高, 为 (1.26 ± 0.07) 头/百株, 中层为 (0.90 ± 0.12) 头/百株, 内层为 (0.35 ± 0.10) 头/百株。大螟的幼虫数量无差异显著 ($F=1.42$, $df=9$, $P=0.291$)。在交配干扰区中, 田间二化螟的危害率在3个区域中存在显著差异 ($F=9.101$, $df=9$, $P=0.005$), 外层危害率最高, 为 $1.23\% \pm 0.18\%$, 中层为 $0.41\% \pm 0.15\%$, 内层为 $0.45\% \pm 0.09\%$ 。大螟在3个区域中的危害率无显著差异 ($F=0.457$, $df=9$, $P=0.645$)。在3个区域中, 二化螟 ($F=0.112$, $df=9$, $P=0.895$) 和大螟 ($F=0.144$, $df=9$, $P=0.867$) 的幼虫数量无显著差异。

通常情况下, 二化螟幼虫在水稻田块中的分布外周低, 中间高(武德功等, 2015)。通过性信息素交配干扰二化螟和大螟的求偶行为, 使其后代幼虫的分布更加均匀。因此, 从分布差异中可以看出交配干扰的有效性。

3 讨论

本文研究结果显示, 在水稻田中, 主动型喷射高剂量的合成性信息素明显影响了二化螟、大螟和稻纵卷叶螟雌、雄蛾的求偶和交配, 导致交配成功率下降, 有效卵数量减少, 幼虫虫口密度降低, 从而减少了害虫对水稻植株的为害, 直接表现为枯鞘、枯心、枯孕穗、虫伤株和白穗数量以及卷叶数量的减少。另一间接防控效果是稻飞虱种群数量的下降。

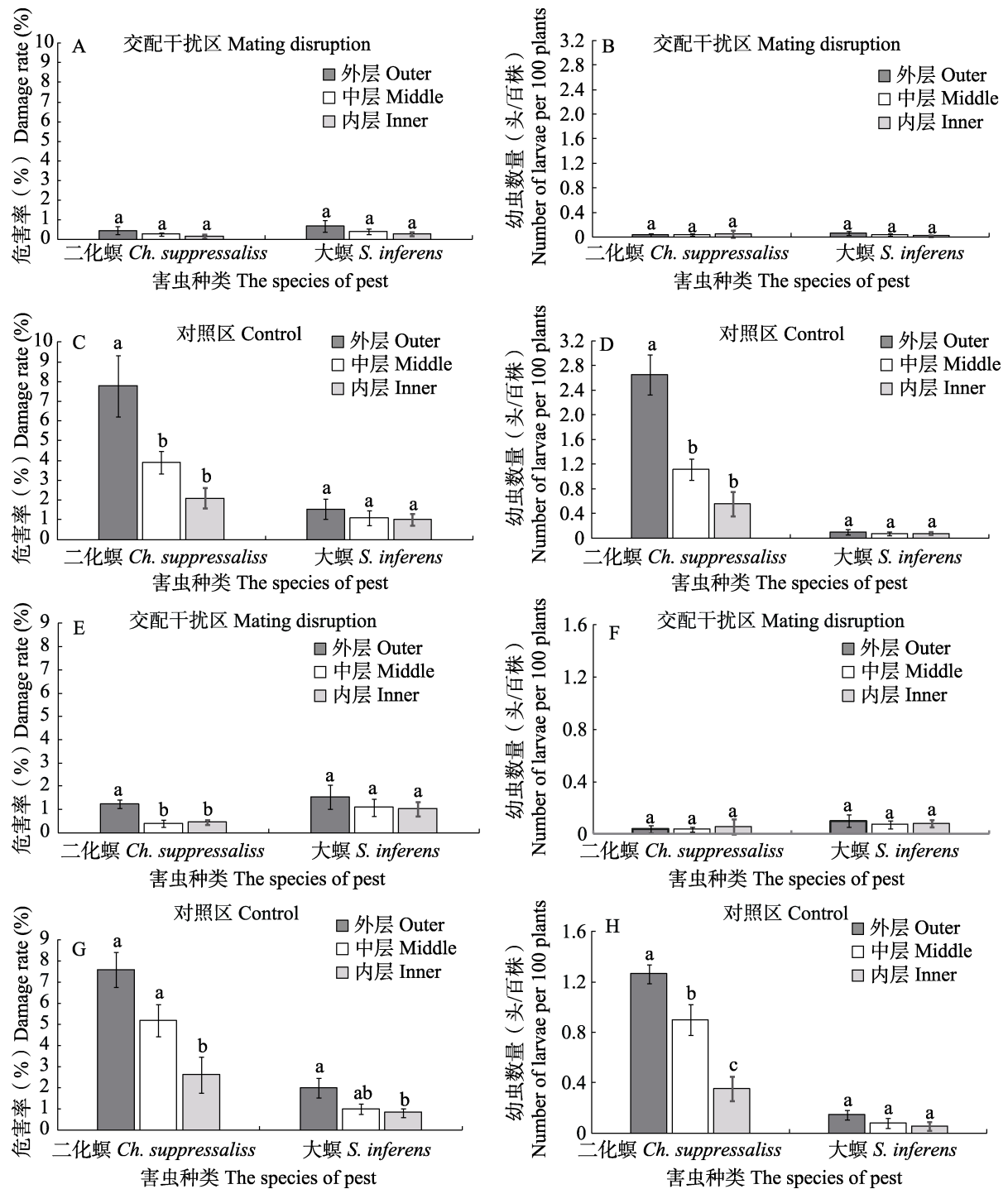


图 4 交配干扰区对二化螟和大螟田间分布的影响

Fig. 4 Effects of synthetic sex pheromone mating disruption on distribution of purple and pink stem borers in the paddy fields

A-D. 10 月 5 日调查; E-H. 10 月 18 日调查。A-D. Surveyed on October 5; E-H. Surveyed on October 18.

柱上不同小写字母表示调查区域之间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏多重比较法)。Data in the figure are mean $\pm$ SE. Different small letters above bars indicate significant difference among different investigation area ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test).

在田间高剂量释放性信息素交配干扰环境下, 性信息素化合物对雄蛾求偶行为的作用体现

在迷向率上, 迷向率高表明雄蛾难以找到同种雌蛾 (王未英等, 2024)。本文结果表明, 性信息

素化合物对二化螟、大螟和稻纵卷叶螟表现出高迷向率。田间雌蛾因不能及时找到配偶,随着雌、雄蛾日龄增长,即使部分雌雄成虫最终能够交配成功,但因交配时间上延后,导致此时雌雄成虫的日龄增大了,其后代卵的孵化率也低(Jiao *et al.*, 2006; Kawazu *et al.*, 2014; 郭前爽等, 2022c)。交配干扰与延后交配之间的关系在许多昆虫中得到了证实(Stelinski and Gut, 2009)。昆虫的求偶和交配行为通常都有一定的昼夜节律(郭前爽等, 2022b), 二化螟成虫的求偶行为通常发生在黑暗之后的 2-10 h 之间, 稻纵卷叶螟的成虫求偶发生在凌晨(Wu *et al.*, 2013)。结合这些害虫的求偶节律, 采用主动型释放性信息素的交配干扰释放器, 只在害虫的求偶阶段自动定时释放性信息素, 而在非求偶时段不释放, 有针对性地干扰二化螟、大螟和稻纵卷叶螟雄蛾对相应的雌蛾性信息素的定向行为反应, 可以减少喷射释放时间 50%, 大幅度减少了化合物的用量。由于释放量是程序定量控制, 不受温湿度和风等环境因子的影响, 相对比较均一、稳定和可控(McGhee *et al.*, 2016)。与被动型释放器相比, 这种主动型电子程序操控的释放器释放量较大, 喷射 90% 雾粒的直径只有 300 nm, 扩散性好, 扩散范围大, 单位面积所用释放器为 5 个/hm², 农民用工减少。Jami 等(2020, 2022)研究表明, 主动型释放器喷射性信息素化合物形成的气溶胶, 可能被植物叶面吸附并滞留一段时间, 从而成为额外的气味释放点。这样, 是否可以提早结束喷射, 减少信息素用量, 还需要进一步的试验。在目前报道的论文中, 水稻害虫的交配干扰法主要应用于针对二化螟的防控, 且采用主动型性信息素喷射释放器的较少(Vacas *et al.*, 2016), 主要是被动型的性信息素释放器(Cork *et al.*, 1996; Chen *et al.*, 2014)。

稻纵卷叶螟是迁飞性害虫, 可以多次交配, 在迁飞过程中, 部分雌、雄蛾可能在多次迁飞和着陆过程中已经交配(Kawazu *et al.*, 2014)。性信息素的作用对象是成熟正要求偶的雄蛾, 因此, 交配干扰对稻纵卷叶螟的控制与其迁飞状态密切相关(郭前爽等, 2022a)。三化螟 *Scirpophaga incertulas* 性信息素的主要成分也是

Z11-16: Ald 和 Z9-16: Ald(Cork *et al.*, 1996; Cork and Basu, 1996)。Z11-16: Ald 和 Z11-16: Ac 也是东方粘虫 *Mythimna separata* 的性信息素组分(Zhu *et al.*, 1987; Kou *et al.*, 1992; Chen *et al.*, 2018), 可以预见这一混合物对三化螟和东方粘虫的求偶抑制也是有效的。采用主动型释放器可根据当地害虫发生, 较方便地组合性信息素化合物, 实现对多靶标害虫的防控。

本研究中的交配干扰方法可以有效防控水稻鳞翅目害虫种群, 减少稻田中信息素释放器的设置密度, 降低劳动力成本。释放器在减少水稻害虫损害方面也取得比较好的效果。使用这种气溶胶装置在应用时需要考虑多种因素, 如地形、地貌、风向和风速, 这些因素会影响释放器的安置方位和喷射间隔时间。此外, 还需要对设备进行及时和适当的维护。通常迷向管每枚需要 3 元, 杆子 1 元, 667 m² 需要 40 枚迷向管, 667 m² 成本达到 160 元。目前 1 套主动型自动喷射释放器需要 300 元, 667 m² 成本在 60-100 元。与被动型迷向管释放器相比, 主动型装置每 667 m² 的一次性成本相对较低。如果硬件系统可以重复使用 3 年, 则每 667 m² 成本会更低。通过继续优化硬件结构以提高其稳定性和使用寿命, 同时优化使用方法和释放程序, 减少性信息素的使用量, 将进一步降低 667 m² 上的成本。

参考文献 (References)

- Chen QH, Zhu F, Tian ZH, Zhang WM, Guo R, Liu WC, Pan LM, Du YJ, 2018. Minor components play an important role in interspecific recognition of insects: A basis to pheromone based electronic monitoring tools for rice pests. *Insects*, 9(4): 192.
- Chen RZ, Klein MG, Sheng CF, Li QY, Li Y, Li LB, Hung X, 2014. Mating disruption or mass trapping, compared with chemical insecticides, for suppression of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) in northeastern China. *Journal of Economic Entomology*, 107(5): 1828-1838.
- Cheng JJ, Chen QH, Guo QS, Du YJ, 2023. Moth sex pheromones affect interspecific competition among sympatric species and possibly population distribution by modulating pre-mating behavior. *Insect Science*, 30(2): 501-516.
- Cork A, Basu SK, 1996. Control of the yellow stem borer,

- Scirpophaga incertulas* by mating disruption with a PVC resin formulation of the sex pheromone of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in India. *Bulletin of Entomological Research*, 86(1): 1–9.
- Cork A, De Souza K, Krishnaiah K, Kumar DVSSR, Reddy AA, Casagrande E, 1996. Control of yellow stem borer, *Scirpophaga incertulas* (Lepidoptera: Pyralidae) by mating disruption on rice in India: Effect of unnatural pheromone blends and application time on efficacy. *Bulletin of Entomological Research*, 86(5): 515–524.
- Daane KM, Cooper ML, Mercer NH, Hogg BN, Yokota GY, Haviland DR, Welter SC, Cave FE, Sial AA, Boyd EA, 2021. Pheromone deployment strategies for mating disruption of a vineyard mealybug. *Journal of Economic Entomology*, 114(6): 2439–2451.
- Gui JW, Wang WY, Yao XM, Wu SL, Liu TB, Lin YF, Zhao H, Guo QS, Du YJ, 2024. Calling and mating behaviors of *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae) adults in the environment of high-dose sex pheromone for mating disruption. *Acta Entomologica Sinica*, 67(4): 507–516. [桂嘉唯, 王未英, 姚晓明, 伍绍龙, 刘天波, 林宇丰, 赵洪, 郭前爽, 杜永均, 2024. 大螟成虫在性信息素交配干扰环境中的求偶和交配. *昆虫学报*, 67(4): 507–516.]
- Guo QS, Zhuo FY, Zhu JQ, Lin YF, Zhang ZB, Huang DC, Zhang SL, Du YJ, 2022a. Responses of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae) to sex pheromone and floral odor in olfactory behavior, and their application in its population monitoring. *Acta Entomologica Sinica*, 65(3): 289–303. [郭前爽, 卓富彦, 朱景全, 林宇丰, 张政兵, 黄德超, 张素丽, 杜永均, 2022a. 稻纵卷叶螟对性信息素和花香的嗅觉行为反应及其在种群监测中的应用. *昆虫学报*, 65(3): 289–303.]
- Guo QS, Zhuo FY, Zhu JQ, Chen QH, Zhu F, Huang DC, Du YJ, 2022b. Circadian rhythms of the sex pheromone biosynthesis and release and the calling and mating behaviors of adult *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 65(7): 877–885. [郭前爽, 卓富彦, 朱景全, 陈庆华, 朱风, 黄德超, 杜永均, 2022b. 大螟成虫性信息素生物合成和释放及求偶和交配行为的昼夜节律. *昆虫学报*, 65(7): 877–885.]
- Guo QS, Chen LL, Sui H, Yang B, Zhuo FY, Zhu XM, Guo R, Du YJ, 2022c. Effects of high dose sex pheromone on courtship, mating and oviposition of *Chilo suppressalis* (Walker) in the wind tunnel. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 48(6): 787–796. [郭前爽, 陈立玲, 隋华, 杨斌, 卓富彦, 朱晓明, 郭荣, 杜永均, 2022c. 风洞条件下高剂量性信息素对二化螟求偶、交配和产卵的影响. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 48(6): 787–796.]
- Jami L, Zemb T, Casas J, Dufrêche JF, 2020. How adsorption of pheromones on aerosols controls their transport. *ACS Central Science*, 6(9): 1628–1638.
- Jami L, Zemb T, Casas J, Dufrêche JF, 2022. Individual adsorption of low volatility pheromones: Amphiphilic molecules on a clean water-air interface. *Journal of Chemical Physics*, 157(9): 094708.
- Jiao X, Xuan W, Sheng CF, 2006. Forecasting model for emergence and flight pattern of the overwintering generation of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) based on pheromone trap catches and degree-days in northeastern China. *Acta Entomologica Sinica*, 49(4): 705–709.
- Jiao X, Xuan W, Sheng C, 2006. Effects of delayed mating and male mating history on longevity and reproductive performance of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lep., Pyralidae). *Journal of Applied Entomology*, 130(2): 108–112.
- Jiao XG, Xuan WJ, Sheng CF, 2006. Research advances in applying sex pheromones to forecasting and prediction of insect pests. *Plant Protection*, 32(6): 9–13. [焦晓国, 宣维健, 盛承发, 2006. 性信息素在害虫测报中的应用研究进展. *植物保护*, 32(6): 9–13.]
- Kawazu K, Shintani Y, Tatsuki S, 2014. Effect of increased male and female age at mating on the reproductive performance of *Cnaphalocrocis medinalis* (Crambidae: Lepidoptera). *Journal of Economic Entomology*, 107(4): 1434–1439.
- Klassen D, Lennox MD, Dumont M, Chouinard G, Tavares JR, 2023. Dispensers for pheromonal pest control. *Journal of Environmental Management*, 325(A): 116590.
- Kou R, Chow YS, Ho HY, 1992. Chemical composition of sex-pheromone gland extract in female oriental armyworm *Pseudaletia separata* Walker (Lepidoptera: Noctuidae) in Taiwan. *Bulletin of the Institute of Zoology Academia Sinica*, 31(4): 246–250.
- Lucchi A, Sambado P, Juan Royo AB, Bagnoli B, Conte G, Benelli G, 2018. Disrupting mating of *Lobesia botrana* using sex pheromone aerosol devices. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(22): 22196–22204.
- 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): 612–616.
- Stelinski LL, Gut LJ, Haas M, McGhee P, Epstein D, 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(4): 225–233.
- Stelinski LL, Gut LJ, 2009. Delayed mating in tortricid leafroller species: Simultaneously aging both sexes prior to mating is more detrimental to female reproductive potential than aging either sex alone. *Bulletin of Entomological Research*, 99(3): 245–251.
- Vacas S, Navarro I, Primo J, Navarro-Llopis V, 2016. Mating disruption to control the striped rice stem borer: Pheromone blend, dispensing technology and number of releasing points. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(2): 253–259.
- Wang WY, Chen Y, Zhao H, Guo QS, Du YJ, 2024. Evaluation of the control efficacy of mating disruption by active high dose aerosol pheromone dispensers on rice pests. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(6): 1293–1301. [王未英, 陈瑜, 赵洪, 郭前爽, 杜永均, 2024. 高剂量喷射型主动交配干扰技术对水稻害虫的防控效果评价. *中国生物防治学报*, 40(6): 1293–1301.]
- Witzgall P, Kirsch P, Cork A, 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36(1): 80–100.
- Wu DG, Du JL, Duan HM, Yin JG, Diao HHJ, Du YYJ, 2015. Research on the spatial distribution pattern of overwintering larvae of *Sesamia inferens* in the rice field. *Ecological Science*, 34(4): 114–117. [武德功, 杜军利, 段海明, 尹金刚, 刁慧娟, 杜玉洁, 2015. 大螟越冬幼虫空间分布型调查. *生态科学*, 34(4): 114–117.]
- Wu J, Wu X, Chen H, Xu L, Liu G, Mao B, Quo R, Du Y, 2013. Optimization of the sex pheromone of the rice leafroller moth *Cnaphalocrocis medinalis* as a monitoring tool in China. *Journal of Applied Entomology*, 137(7): 509–518.
- Ye GY, Fang Q, Xu HX, Wu S, Teng ZW, Xu G, Dang C, Xiong SJ, 2023. Research advances on the occurrence, damage and management of rice stem borers in China. *Plant Protection*, 49(5): 167–180. [叶恭银, 方琦, 徐红星, 吴顺, 滕子文, 徐刚, 党聪, 熊时姣, 2023. 我国水稻螟虫发生及治理研究进展. *植物保护*, 49(5): 167–180.]
- Zhang Q, 2022. Reasons for extensive outbreaks and resistance mechanism to abamectin in *Chilo suppressalis* in Hunan Province in recent years. Master dissertation. Changsha: Hunan Agricultural University. [张乾, 2022. 湖南地区近年二化螟大范围暴发成灾原因及其对阿维菌素的抗性机制. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Zhu PC, Kong FL, Yu YQ, 1987. Sex pheromone of oriental armyworm *Mythimna separata* Walker. *Journal of Chemical Ecology*, 13(5): 977–981.
- Zhu XX, Lin YF, Liu H, Li QS, Hu DY, Xu HH, Kong ZQ, Wu SH, Zhu XF, Guo HY, 2023. Preliminary analysis of the contribution rate of rice pest control and plant protection in Hunan Province in 2022. *China Plant Protection*, 43(7): 69–73. [朱秀秀, 林宇丰, 刘慧, 李秋生, 胡冬炎, 徐海涵, 孔志强, 吴声海, 朱小丰, 仇磊, 张政兵, 2023. 湖南省 2022 年度水稻病虫害防控植保贡献率初析. *中国植保导刊*, 43(7): 69–73.]