中国水稻科学(*Chin J Rice Sci*), 2026, 40(2): 264－272
http://www.ricesci.cn
DOI: 10.16819/j.1001-7216.2026.241113

智能喷射释放性信息素对水稻主要鳞翅目害虫的交配干扰效果

王未英[1] 赵洪[2] 陈瑜[2,*] 姚晓明[3] 陆剑飞[3] 郭前爽[4] 杜永均[4,*]
([1]浙江省嵊州市三界镇事业综合服务中心，浙江 嵊州 312452；[2]浙江省嵊州市农业技术推广中心，浙江 嵊州 312400；[3]浙江省植保检疫与农药管理总站， 杭州 310029；[4]浙江大学 农药与环境毒理研究所, 杭州 310058； *通信作者，email: chenyu932023@outlook.com; yongjundu@zju.edu.cn)

Disruption Efficacy of Intelligent Active Aerosol Sex Pheromone on Mating Behavior of Major Lepidopteran Pests in Rice

WANG Weiying[1], ZHAO Hong[2], CHEN Yu[2,*], YAO Xiaoming[3], LU Jianfei[3], GUO Qianshuang[4], DU Yongjun[4,*]
(*[1]Comprehensive Agricultural Service Center of Sanjie Town, Shengzhou City, Zhejiang Province, Shengzhou 312452, China; [2]Agricultural Technology Extension Center of Shengzhou City, Zhejiang Province, Shengzhou 312400, China; [3]Plant Protection, Quarantine and Pesticide Management Station of Zhejiang Province, Hangzhou 310029, China; [4]Institute of Pesticides and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; *Corresponding author，email: chenyu932023@outlook.com; yongjundu@zju.edu.cn*)

Abstract: 【Objective】The continuous cropping system in mixed single- and double-season rice areas provides an uninterrupted food supply for the overwintering and subsequent 2–3 generations of *Chilo suppressalis* (Walker), leading to increased pest populations and more severe crop damage. This study aimed to evaluate the control efficacy of an intelligent active aerosol dispenser for mating disruption against *C. suppressalis* in early and late rice.【Method】A mating disruption plot and a farmer-managed control plot were established in a mixed single- and double-season rice area in Sanjie Town, Shengzhou, Zhejiang Province. On April 12, 2024 (eight days before rice transplanting), intelligent active aerosol dispensers were deployed in the mating disruption area. High doses of sex pheromone were released continuously during both early and late rice seasons to disrupt the mating behavior of *C. suppressalis*. Field surveys were conducted to monitor moth catches in pheromone traps, the percentage of damaged plants, and larval density. Natural enemies were sampled using malaise traps and suction samplers during the early and late rice seasons, respectively.【Result】The mating disruption efficacy on *C. suppressalis* adults was 94.1% ± 0.02% for the overwintering generation, 78.6% ± 12.7% for the first generation, and 87.3% ± 0.01% for the second generation. The disrupted rates for non-target pests were 85.6% ± 0.07% for *Sesamia inferens* (Walker) in early rice and 79.2% ± 0.07% for *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in late rice. During the early rice season, the technology reduced larval density of *C. suppressalis* by 71.5%–83.3% and the percentage of damaged plants by 59.4%–74.5%. Although natural enemy abundance did not differ significantly, the beneficial-to-pest ratio was markedly higher in the mating disruption plot (2470.6% ± 594.5%) than in the control plot (148.8% ± 38.4%). In the late rice season, larval density and plant damage of *C. suppressalis* were reduced by 80.7%–90.9% and 61.2%–89.6%, respectively, while the leaf rolling rate caused by *C. medinalis* decreased by 63.7%. Again, natural enemy populations showed no significant difference, but the beneficial-to-pest ratio was higher in the mating disruption area (333.3% ± 91.3%) than in the control (64.2% ± 24.9%).【Conclusion】The intelligent active aerosol dispenser effectively suppressed the larval population of *C. suppressalis* and reduced crop damage in the mixed cropping rice area. It also demonstrated significant control effects against *S. inferens* and *C. medinalis*. Furthermore, the technology had no adverse impact on natural enemy populations and resulted in a higher beneficial-to-pest ratio compared to conventional farmer practice.
Keywords: *Chilo suppressalis* (Walker); *Sesamia inferens* (Walker); *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée; sex pheromone dispenser; mating disruption rate; double-season rice; cropping system; ratio of beneficial insects to pests

摘　要：【目的】单双季水稻混栽区的耕作制度为二化螟越冬代和后续的 2~3 个世代提供了不间断的食料条件，导致虫量增加，危害加重。本研究评价了智能主动喷射型交配干扰释放器对早晚两季水稻二化螟的防控效

收稿日期：2024-11-31；**修改稿收到日期**：2025-01-25。
基金项目：浙江省重点研发计划资助项目（2018C02027）。

果。【方法】在浙江嵊州三界镇的单双季混栽稻区，设置交配干扰区和农户自防对照区，在 2024 年 4 月 12 日，即水稻移栽 8 d 前，在交配干扰区设置主动释放的智能喷射型性信息素释放器，在早稻和晚稻期间连续不间断地喷射高剂量的性信息素干扰二化螟的求偶。同时，调查监测诱捕器中的诱蛾量、水稻被害植株数量和二化螟各龄幼虫数量，早稻、晚稻期间分别采用马氏网、吸虫器调查田间天敌种群量。【结果】越冬代二化螟成虫的交配干扰抑制率为 94.1%±0.02%，一代成虫抑制率为 78.6%±12.7%，二代成虫抑制率为 87.3%±0.01%。同时，对早稻大螟成虫的抑制率为 85.6%±0.07%，晚稻稻纵卷叶螟成虫的抑制率为 79.2%±0.07%。早稻期间，交配干扰区二化螟幼虫数量减少了 71.5%～83.3%，水稻植株被害率下降了 59.4%～74.5%。自然天敌的种群数量差异不显著，但对照区益害比为 148.8%±38.4%，交配干扰区益害比为 2470.6%±594.5%。晚稻期间，交配干扰区二化螟幼虫数量减少了 80.7%～90.9%，水稻植株被害率减少了 61.2%～89.6%，稻纵卷叶螟卷叶率降低了 63.7%。自然天敌数量没有差异，但益害比对照区为 64.2%±24.9%，交配干扰区为 333.3%±91.3%。【结论】主动释放的智能喷射型性信息素交配干扰技术有效控制了单双季稻区二化螟幼虫的数量，减轻了其危害，对大螟和稻纵卷叶螟也有显著的防治作用， 同时，对稻田自然天敌种群没有负面的影响，其益害比反而更高。

关键词：二化螟；大螟；稻纵卷叶螟；性信息素释放器；交配干扰抑制率；双季稻；耕作制度；益害比

钻蛀性的二化螟(*Chilo suppressalis* Walker)是中国大部分水稻种植区最重要的害虫[1]，该虫也分布于欧洲、南亚及东南亚国家[2]。在中国，二化螟的发生世代从北到南差异较大，最北的黑龙江发生 1 个世代，吉林、辽宁 2 个世代，浙江、湖南、湖北、江西、安徽等长江中下游稻区 3 个或 3 个半世代，最南部广东、广西 4 个世代，二化螟的一个主要特点是每个世代的羽化时间长达 2 个月左右，甚至更长，其原因是幼虫发育的个体差异大[3]。二化螟是寡寄主，寄主植物除水稻外，还有油菜、小麦、玉米、茭白、三棱草、稷、高粱、黍、稗属植物、芦苇、甘蔗属、香蒲等[2]。浙江水稻耕作制度差异大，不仅有双季稻还有单季稻，在单双季混栽区，水稻为各代次二化螟提供了不间断的食料条件。随着单双季混栽面积的扩大，二化螟种群量上升趋势非常显著，世代重叠严重。稻农常规防治施药次数较多，导致二化螟抗药性水平上升，但防治效果不理想，农药残留风险加大，而且稻田自然天敌被杀伤。因此，迫切需要推广应用环境友好型的生物防治技术，减少化学农药施用。二化螟的非化学防控措施包括生态工程[4]、人工释放稻螟赤眼蜂、生物农药[5]、群集诱杀二化螟雄蛾[7]等。其中，性信息素技术是最有效的方法之一[8, 9]。浙江双季稻区早稻期间田间还有少量大螟(*Sesamia inferens*)发生，晚稻期间有稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)为害，如果采用性信息素诱捕的方法进行防治，需要同时设置多个诱捕器，成本和用工均增加。

二化螟性信息素包括顺 11-十六碳烯醛(Z11-16:Ald)、顺 13-十八碳烯醛(Z13-18:Ald)和顺 9-十六碳烯醛(Z9-16:Ald)[10]，其中，顺 13-十八碳烯醛(Z13-18:Ald)也是稻纵卷叶螟性信息素的主成分[14]，而 Z11-16:Ald 则是稻纵卷叶螟的求偶抑制剂[15]。二化螟雄蛾对性信息素的嗅觉反应存在个体和地理区域的差异[16]，季节及环境温度、湿度、光强度和昼夜节律等因素对成虫飞行和活动均有显著影响[17]。在夏季高温的低气压季节，蛾子活动性强，飞得高，自然雌蛾的竞争力有优势，性信息素诱捕的效果差，二化螟雄蛾通常会就近与雌蛾求偶和交配[20]。极大部分雌蛾只交配 1 次，部分雄蛾可以多次交配[22]。性信息素群集诱杀的效率、田间应用方式和防控效果存在明显的局限性。而性信息素的另一种应用技术，即交配干扰法，则可以弥补群集诱杀的所有不足。交配干扰是通过释放器(pheromone dispenser)释放高剂量性信息素物质，通过空气的流动在稻田中扩散，致使田间到处弥漫性信息素气味，干扰了雄蛾的求偶及与雌蛾交配，致使雌蛾无法正常受精，产下的卵不能孵化。在水稻二化螟防控中也有采用性信息素交配干扰方法的报道[23]。

在浙江稻区，二化螟越冬代成虫羽化早于早稻秧苗移栽，移栽时田间已经有很多交配过的雌蛾，雌蛾将卵产在秧苗上。这一特性要求交配干扰释放器的设置早于移栽，如果采用被动释放的迷向管，田间设置密度高、数量大，移栽前设置会影响移栽操作，且田间设置用工多、可操作性差、使用成本高。智能喷射型性信息素释放器为主动释放型，其机制属于非竞争交配干扰，由电子机械喷射系统依据二化螟求偶和交配节律控制性信息素的释放时间和释放量[25, 27]，性信息素释放量大，田间设置密度相对低，在移栽前设置，对农事操作的影响可以忽略。

本研究采用智能主动喷射型性信息素交配干扰释放器，在早稻移栽之前即越冬代羽化之前设置，至晚稻收割结束，连续、不间断地在田间定时释放，调查二化螟成虫、幼虫的种群动态和对

水稻的危害，以及田间天敌种群动态变化，以不断完善性信息素交配干扰防治二化螟田间应用技术。

1 材料与方法

1.1 试验地点与时间

试验于 2024 年在浙江省嵊州市西后村(29.77°N ,120.81°E)附近双季稻田中进行。该田块为小苗机播，早稻品种为中早 39，移栽期 4 月 20 日，收割期 7 月 10 日，晚稻品种为甬优 1540，移栽期 8 月 1 日，收割期 10 月 22 日，田块面积 20 hm^2，水肥管理一致。

1.2 交配干扰释放器和监测用诱捕器

在水稻螟蛾类智能喷射型性信息素释放器(HDMD-S-001)中，性信息素由顺 11-十六碳烯醛(Z11-16:Ald)、顺 13-十八碳烯醛(Z13-18:Ald)、顺 9-十六碳烯醛(Z9-16:Ald)和顺 11-十六碳烯乙酸酯(Z11-16:Ac)按 10∶1∶1∶1 组成，其中 Z11-16:Ald 占总溶液的 15%。每次喷射 6 μL，喷射时间节律依据二化螟在当地的诱蛾节律确定。从二化螟性诱智能测报系统 APP 软件系统中查阅得到，当地二化螟在试验期间的诱蛾昼夜节律为每日 18:00 至次日凌晨 4:00，因此，起始喷射时间提前 2 h，使气味提早在稻田中均匀分布。从每日 16:00 开始，至次日凌晨 5:00 结束，即结束时间推迟 1 h。二化螟、大螟、稻纵卷叶螟为 PE 毛细管灌液结构，持效期 90 d。新型飞蛾诱捕器(PT-FMT)由宁波纽康生物技术有限公司生产。

1.3 试验设计

试验设置交配干扰区、农户自防对照区 2 个处理，交配干扰区面积 100 亩。平均每 3 亩设置 1 个水稻螟蛾类智能喷射型性信息素释放器，相邻释放器间隔约 47 m。在早稻田中，于 4 月 12 日翻耕后安插于稻田区域，10 d 后在插秧结束时调整位置，在田间保持释放器之间的均匀分布。农户自防对照区面积 100 亩，按农户防治习惯进行常规防治，不设置性信息素交配干扰释放器。交配干扰区和农户自防对照区之间间隔 100 m 以上。早稻收割时可以适当移动释放器位置，但不收回。晚稻移栽后调整并复位，连续不间断喷射性信息素。

早稻和晚稻试验期间交配干扰区和农户自防对照区均施药 2 次，药剂为 20%三唑磷和 10%烯啶•呋虫胺 375 g/hm^2。20%三唑磷使用量为 1.0 L/hm^2。早稻施药时间为 5 月 10 日和 6 月 10 日，晚稻施药时间为 8 月 19 日和 10 月 9 日。

1.4 性信息素诱蛾量监测及交配干扰率计算

分别在交配干扰区和农户自防对照区设置二化螟、稻纵卷叶螟监测诱捕器各 5 个，用于监测二化螟和稻纵卷叶螟雄蛾量。每日调查所有监测诱捕器中的雄蛾数量，记录并清空诱捕器，计算交配干扰率：

交配干扰率(%)=[(对照区诱蛾量−交配干扰区诱蛾量)/对照区诱蛾量]×100。

1.5 田间二化螟、稻纵卷叶螟为害率和幼虫数量调查

二化螟为害调查参照《水稻二化螟测报调查规范》 (GB/T 15792－2009)的方法，在交配干扰区、农户自防对照区每 7 d 调查 1 次二化螟田间虫量和为害情况，采用平行跳跃式 5 点取样，每点调查 100 丛，记录被害株数。连根拔取全部被害株(枯鞘、枯心、虫伤株、枯孕穗和白穗等)，剥查其中幼虫和蛹的数量及其发育级别。

为害率(%)=[被害株(枯鞘、枯心、虫伤株、白穗)数/调查总株数]×100。

稻纵卷叶螟调查参照《稻纵卷叶螟测报技术规范》(GB /T 15793－2011)的方法，分别在交配干扰区和农户自防对照区采用平行跳跃式 10 点取样，每点 2 丛，记录总叶片数和卷叶数，将卷叶轻轻拨开，观察幼虫并确定幼虫龄期及数量。计算卷叶率和虫口减退率。

卷叶率(%)=卷叶数/调查总叶数×100；

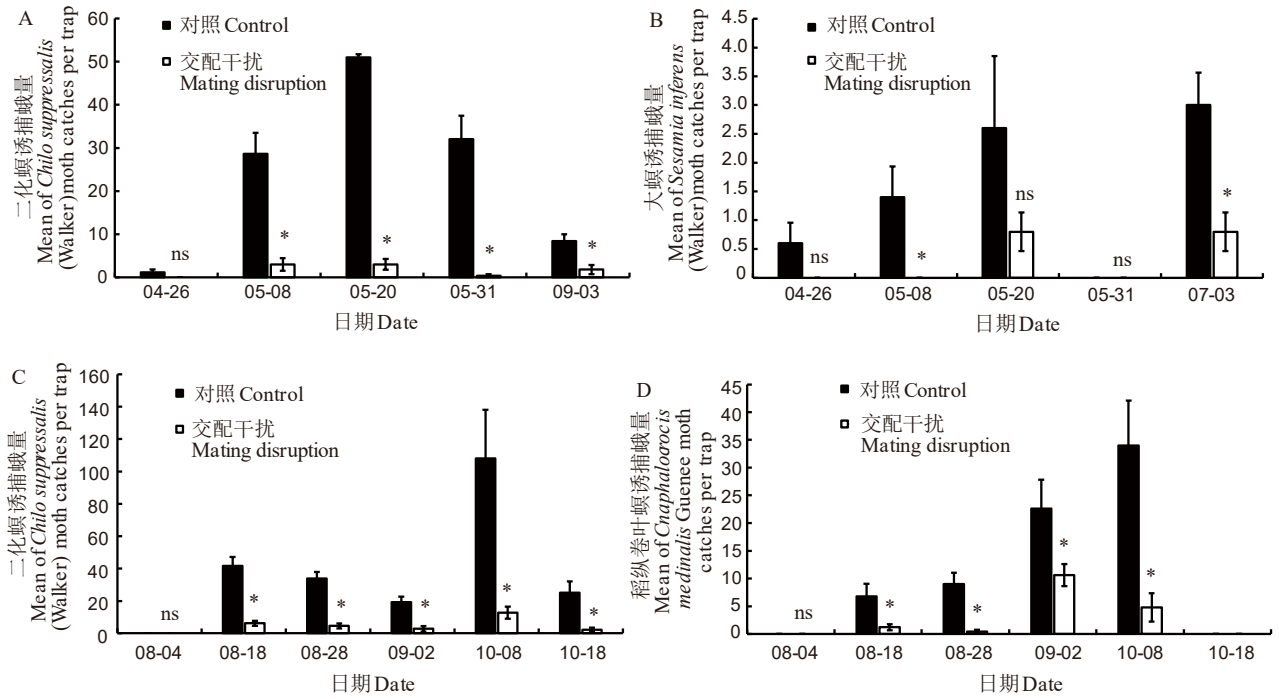
幼虫减退率(%)=[(被对照区幼虫量−处理区幼虫量)/对照区幼虫量] ×100。

1.6 田间天敌种群调查

早稻期间采用马氏网监测田间天敌数量，在交配干扰区和农户自防对照区各设置 6 套马氏网，收集田间昆虫，定期收集瓶中的昆虫，带回实验室鉴定并记录数量。晚稻田采用吸虫器法进行调查，所用的吸虫器为吸尘器改装而成。分别在交配干扰区和农户自防对照区采用 5 点取样法，每点取 5 丛水稻，用去底的塑料桶围住水稻，以防昆虫逃脱，吸虫器吸取 2 min。所吸虫样放入 75%酒精溶液中，带回室内鉴定并计算益害比。益害比(%)=(寄生蜂数量/二化螟幼虫数量)×100。

1.7 数据分析

数据分析采用软件 SPSS 17.0。两组数据平均



A: 早稻二化螟； B: 早稻大螟；C：晚稻二化螟；D：晚稻稻纵卷叶螟。柱上星号表示差异显著(P<0.05, t 检验)，ns 表示差异不显著(P>0.05, t 检验)。下同。

A, *Chilo suppressalis* in early rice field; B, *Sesamia inferens* in early rice field; C, *Chilo suppressalis* in late rice field; D, *Cnaphalocrocis medinalis* in late rice field. *, Significant difference at 0.05 level; ns, No significant difference at 0.05 level(Student's *t*-test).

图 1 交配干扰区和农户自防对照区蛾诱捕量比较

Fig. 1. Comparison of moth catches in the sex pheromone monitoring traps between mating disruption and control area

数的差异，采用学生氏 t 检验法比较。

2 结果与分析

2.1 交配干扰对性诱蛾量的影响

早稻期间共调查了 5 次，调查结果显示，农户自防对照区二化螟诱捕蛾量均高于交配干扰区(图 1-A)。4 月 26 日农户自防对照区和交配干扰区的诱捕蛾量无显著差异(t=1.63, df=8, P=0.141)；5 月 8 日(t=4.73, df=8, P=0.002)、5 月 20 日(t=29.77, df=8, P<0.001)、5 月 31 日(t=5.16, df=8, P=0.001)、7 月 3 日(t=3.11, df=8, P=0.014)交配干扰区诱蛾量均显著低于农户自防对照区。经计算，越冬代二化螟交配干扰率平均为 94.1%±0.02%，二代二化螟交配干扰率平均为 78.6%±12.7%。农户自防对照区大螟诱捕蛾量高于交配干扰区，其中，4 月 26 日(t=1.50, df=8, P=0.172)、5 月 20 日(t=1.24, df=8, P=0.249)交配干扰区与对照区无显著差异，但 5 月 8 日(t=2.33, df=8, P=0.048)、7 月 3 日(t=2.99, df=8, P=0.017)交配干扰区诱蛾量均显著低于农户自防对照区(图 1-B)。经计算，大螟的交配干扰率平均为 85.6%±0.07%。

晚稻期间共调查 6 次，调查结果显示，交配干扰区和对照区二化螟诱捕蛾量农户自防对照区均高于交配干扰区，其中 8 月 18 日(t=5.50, df=8, P=0.001)、8 月 28 日(t=5.92, df=8, P<0.001)、9 月 2 日(t=3.88, df=8, P=0.005)、10 月 8 日(t=2.81, df=8, P=0.047)、10 月 18 日(t=2.96, df=8, P=0.018)交配干扰区诱蛾量均显著低于农户自防对照区，经计算，二化螟交配干扰率平均为 87.3%±0.01%(图 1-C)。农户自防对照区稻纵卷叶螟诱捕蛾量均高于交配干扰区，其中 8 月 18 日(t=2.20, df=8, P=0.059)交配干扰区与农户自防对照区无显著差异，但 8 月 28 日(t=3.715, df=8, P=0.006)、9 月 2 日（t=1.92, df=8, P=0.045)、10 月 8 日(t=3.079, df=8, P=0.015)交配干扰区诱蛾量均显著低于农户自防对照区。经计算，稻纵卷叶螟交配干扰率平均为 79.2%±0.07%(图 1-D)。

2.2 交配干扰对二化螟幼虫量和为害的影响

早稻前三次调查均未发现二化螟为害(表 1)，5 月 31 日(t=－2.43，df=8，P=0.041)和 7 月 3 日(t=－7.07，df=8，P<0.001)二化螟为害率农户自防对照区显著高于交配干扰区。5 月 31 日(t=－2.87，df=8，P=0.021)和 7 月 3 日(t=－1.27，

表 1 早稻交配干扰区和农户自防对照区二化螟幼虫量和为害情况

Table 1. *Chilo suppressalis* larval count and plant damage in early rice under mating disruption and control

调查日期 Investigation date (Month-day)	处理 Treatment	平均危害率 Average damage rate(%)	每百丛平均幼虫数 Mean of larvae per hundred hills	防控效果 Control efficacy (%)	幼虫减退率 Larval reduction rate (%)
04-26	农户自防对照 Control	0.00±0.00	0.00±0.00		
	交配干扰 Mating disruption	0.00±0.00^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
05-08	农户自防对照 Control	0.00±0.00	0.00±0.00		
	交配干扰 Mating disruption	0.00±0.00^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
05-20	农户自防对照 Control	0.00±0.00	0.00±0.00		
	交配干扰 Mating disruption	0.00±0.00^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
05-31	农户自防对照 Control	0.85±0.24	0.60±0.16	74.5	83.3
	交配干扰 Mating disruption	0.22±0.10*	0.10±0.07*		
07-03	农户自防对照 Control	1.68±0.07	0.12±0.06	59.4	71.5
	交配干扰 Mating disruption	0.68±0.12*	0.03±0.03*		

$^{*}P<0.05$(学生氏 *t*-检验)。下同。

$^{*}P<0.05$(Student's *t*-test). The same applies below.

表 2 晚稻交配干扰区和农户自防对照区二化螟幼虫量和为害情况

Table 2. *Chilo suppressalis* larval count and plant damage in late rice under mating disruption and control

调查日期 Investigation date (Month-day)	处理 Treatment	平均危害率 Average damage rate (%)	每百丛平均幼虫数 Mean of larvae per hundred hills	防控效果 Control efficacy (%)	幼虫减退率 Larval reduction rate(%)
08-19	农户自防对照 Control	0.59±0.48	0.16±0.12	87.8	90.9
	交配干扰 Mating disruption	0.07±0.05^{ns}	0.01±0.01*		
08-29	农户自防对照 Control	0.96±0.36	0.44±0.20	89.6	87.1
	交配干扰 Mating disruption	0.10±0.05*	0.06±0.04*		
09-02	农户自防对照 Control	1.10±0.31	1.87±0.66	68.9	85.5
	交配干扰 Mating disruption	0.34±0.06*	0.27±0.07*		
10-08	农户自防对照 Control	1.40±0.16	1.71±0.38	61.2	83.3
	交配干扰 Mating disruption	0.54±0.22*	0.29±0.16*		
10-18	农户自防对照 Control	2.14±0.34	3.11±0.30	74.0	80.7
	交配干扰 Mating disruption	0.56±0.10*	0.60±0.22*		

df=8，*P*=0.024)田间二化螟幼虫数量农户自防对照区也显著高于交配干扰区。

晚稻期间，随时间延后二化螟为害率呈逐渐增加的趋势(表 2)，8 月 19 日调查结果显示，二化螟危害率农户自防对照区与交配干扰区无显著差异(t=1.07, df=8, P=0.318)。但 8 月 29 日(t=2.38, df=8, P=0.045)、9 月 2 日(t=2.35, df=8，P=0.047)、10 月 8 日(t=3.17, df=8, P=0.013)、10 月 18 日(t=4.50, df=8, P=0.002)二化螟为害率农户自防对照区显著高于交配干扰区(表 2)。

田间调查结果显示，交配干扰区和农户自防对照区 8 月 19 日未见稻纵卷叶螟为害，8 月 29 日开始出现零星为害，且调查到稻纵卷叶螟幼虫。10 月 8 日卷叶率交配干扰区显著低于农户自防对照区(t=2.35, df=18, P=0.03)。其他时间卷叶率和幼虫数量均无显著差异(表 3)。

2.3 交配干扰对稻田天敌种群的影响

试验田天敌种类以蜘蛛(锥腹肖蛸 *Tetragnatha*

表 3 晚稻交配干扰区和农户自防对照区稻纵卷叶螟幼虫量和卷叶率

Table 3. Number of *Cnaphalocrocis medinalis* larvae and leaf rolling rate under mating disruption and control in late rice

调查日期 Investitation date (Month-day)	处理 Treatment	卷叶率 Leaf rolling rate (%)	幼虫数量(头/丛) No. of larvae per hill	防控效果 Control effect(%)	幼虫减退率 Larval reduction rate (%)
08-19	农户自防对照 Control	0.00±0.00	0.00±0.00		
	交配干扰 Mating disruption	0.00±0.00^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
08-29	农户自防对照 Control	0.04±0.02	0.50±0.02		20.0
	交配干扰 Mating disruption	0.10±0.05^{ns}	0.40±0.02^{ns}		
09-02	农户自防对照 Control	0.02±0.01	0.00±0.00		
	交配干扰 Mating disruption	0.03±0.03^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
10-08	农户自防对照 Control	0.03±0.01	0.00±0.00	44.2	
	交配干扰 Mating disruption	0.02±0.01^{ns}	0.00±0.00^{ns}		
10-18	农户自防对照 Control	0.06±0.02	0.00±0.00	63.7	
	交配干扰 Mating disruption	0.02±0.01*	0.00±0.00^{ns}		

表 4 交配干扰区和农户自防对照区天敌数量调查

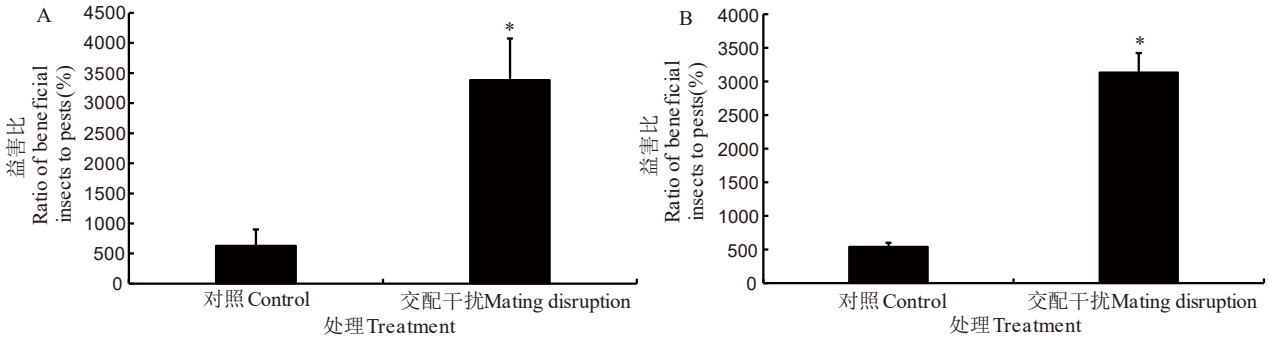
Table 4. Investigation of natural enemies under mating disruption and control

水稻季别 Growing season	处理 Treatment	蜘蛛 Spider	瓢虫 Coccinellidae	寄生蜂 Parasitoids
早稻 Early rice	农户自防对照 Control	0	1	0
		4	2	4
		5	2	3
		3	3	2
		1	0	1
		8	2	28
	交配干扰 Mating disruption	11	5	8
		3	3	25
		2	0	11
		2	0	12
		2	2	2
		18	0	7
晚稻 Late rice	农户自防对照 Control	12	0	1
		22	0	1
		15	0	5
		12	0	2
		12	1	1
	交配干扰 Mating disruption	19	1	2
		22	0	2
		14	1	1
		11	4	1
		8	4	4

maxillosa、斑管巢蛛 *Clubiona reichlini*)、瓢虫(二星瓢虫 *Adalia bipunctata*、异色瓢虫 *Harmonia axyridis*)和各类寄生蜂(螟蛉盘绒茧蜂 *Apanteles ruficrus*、稻螟小腹茧蜂 *Microgaster russata*、中华钝唇姬蜂 *Eriborus sinicus*、花胸姬蜂 *Gotra octocinctus*)为主(表 4)，在早稻(t=－3.07, df=10, P=0.0512)和晚稻(t=－0.76, df=8, P=0.471)期间其数量上没有显著差异。早稻交配干扰区的益害比显著高于农户自防对照区(t=－3.44, df=10, P=0.011)，农户自防对照区益害比仅为 148.8%±38.4%，交配干扰区益害比为 2470.6%±594.5%(图 4-A)。晚稻交配干扰区的益害比显著高于农户自防对照区(t=－2.84, df=8, P=0.022)，农户自防对照区益害比仅为 64.2%±24.9%，交配干扰区益害比为 333.3%±91.3%(图 4-B)。

3 讨论

本研究在双季稻区采用主动释放型的智能喷射释放器连续不间断地释放性信息素，干扰二化螟的求偶和交配，对交配干扰区和对照区诱蛾量监测的调查结果显示，合成性信息素有效干扰了早稻和晚稻期间越冬代、一代和二代二化螟雄蛾的求偶行为，降低了早稻田的一代、晚稻田的二代和三代幼虫的种群数量，从而减轻了早稻和晚稻二化螟危害。合成性信息素中加入了 Z11-16:Ac，与 Z11-16:Ald 一起干扰了越冬代和一代大螟的求偶行为。因为 Z11-16:Ac 和 Z11-16:Ald 也



A: 早稻田; B: 晚稻田。

A, Early rice field; B, Late rice field.

图 4 交配干扰区和农户自防对照区稻田的益害比

Fig. 4. Ratios of beneficial insects to pests in the mating disruption and control rice fields

是大螟的主要和次要性信息素成分[30, 31]。合成性信息素中含有 Z13-18:Ald 和 Z11-16:Ald，以及 Z11-16:Ac 和 Z9-16:Ald，Z13-18:Ald 是稻纵卷叶螟性信息素的主成分[14]，Z11-16:Ald，Z11-16:Ac 和 Z9-16:Ald 都对稻纵卷叶螟雄蛾的定向行为反应有抑制作用[15]，干扰了晚稻期间部分迁入代和本地繁殖代的稻纵卷叶螟雄蛾的求偶行为。在交配干扰区和农户自防对照区比较蜘蛛类、瓢虫、寄生蜂等天敌种群量，对照区和交配干扰区益虫数量在早稻(t=－1.091, df=10, P=0.301)和晚稻(t=－0.757, df=8, P=0.471)上均无显著差异。但交配干扰区益虫和害虫的比率则显著高于农户自防对照区。

主动喷射型的性信息素释放器释放 1 次的剂量为 6 μL，按 15%的活性化合物量来计算，达到约 750 μg 的活性化合物，释放量非常大。释放器的容积可控，可以根据需要设置性信息素制剂的容量，满足双季稻生育期以及田间二化螟发生历期的实际需要(约 6 个月)。释放器释放性信息素化合物的时间依据昆虫求偶的昼夜节律进行设置。没有求偶行为的时间段不释放，不浪费性信息素化合物。这与被动释放型释放器不同，后者在田间一直保持释放状态，但释放量与环境中的温度密切相关，在白天不需要性信息素时，由于气温高释放量大，夜晚需要较高浓度的气味时则释放量反而低。另外，被动型释放器在田间需要较多的数量和密度才能有效[28]。在主动型释放器喷射高剂量的合成化合物环境下，性信息素化合物不仅影响了雄蛾的嗅觉行为，即雄蛾对自然雌蛾性信息素的定向行为下降了，这体现在交配干扰率非常高，同时也影响了雌蛾的性信息素滴度，还影响了二化螟雌雄蛾的交配率[29]。因此，主动喷射型释放器释放的高剂量合成性信息素对二化螟的影响是多方面的，从田间调查结果来看，主动型释放器对稻田二化螟幼虫种群密度的控制效果非常好。浙江宁绍水稻种植区早稻移栽期正好为二化螟越冬代蛾的羽化始期，因此，释放器的设置应早于移栽期 8～10 d。早稻收割期正好是部分一代成虫的羽化期，可以适当移动释放器的位置，但不收回，继续在田间释放。

大螟的性信息素组分为 Z11-16:Ac、Z11-16:OH、Z11-16:Ald 的混合物[30]。Z11-16:Ac 和 Z11-16:Ald 组合可以显著干扰大螟求偶和交配行为[31]。稻纵卷叶螟性信息素主成分为 Z13-18:Ald[14]，但 Z11-16:Ald 和 Z11-16:Ac 作为种间性信息素抑制稻纵卷叶螟的雄蛾求偶行为[15]。因此，喷射器释放的合成信息素可以干扰稻纵卷叶螟的求偶。本研究结果显示了早稻田的大螟和晚稻田的稻纵卷叶螟诱蛾量在处理区田块比较低，交配干扰效果显著。但是，稻纵卷叶螟是迁飞性害虫，其生理状态比较复杂。进入浙江的迁入代稻纵卷叶螟的雌蛾和雄蛾部分在迁飞过程中已经交配，着陆后部分雌蛾就直接产卵，对于这批次的雄蛾，性信息素的交配干扰就没有作用，合成性信息素化合物的作用对象是正要求偶的稻纵卷叶螟雄蛾[32]。因此，该技术对于迁飞性的稻纵卷叶螟的防控有一定的局限性和不确定性，防控的效果依赖于其迁飞状态，而迁飞状态则与虫源地、气流等环境因子密切相关。因此，主动型智能喷射释放器可以针对作物生境中的害虫种类来配制交配干扰的性信息素混合物，达到对多靶标害虫的防控。

交配干扰采用的化合物是二化螟、大螟和稻纵卷叶螟的性信息素化合物，是这些虫的种内和种间性信息素，因此，只有能感受这些性信息素化合物的昆虫，其求偶行为才会被干扰，对于田间天敌种群的行为没有影响。田间天敌种群的调查结果显示，在数量上处理与对照之间差异并不显著，但益虫和害虫的比例差异显著。在稻田复杂生态系统下，影响稻田食物网，以及天敌种群的因素很多，生境、土肥、施药种类和次数等因子影响食腐质生物、浮游生物、水稻营养状态和植食性害虫的密度，形成从下而上的作用，从而构建了捕食性和寄生性天敌种群，后期这些天敌协同行动，抑制了包括稻飞虱在内的水稻食草动物种群[33]。在通常情况下，害虫密度高天敌种群量大，在交配干扰区，天敌种群并没有减少，其益害比反而更高。

参考文献：

[1] 叶恭银, 方琦, 徐红星, 吴顺凡, 滕子文, 徐刚, 党聪, 熊时姣. 我国水稻螟虫发生及治理研究进展[J]. 植物保护, 2023, 49(5): 167-180.
Ye G Y, Fang Q, Xu H X, Wu S F, Teng Z W, Xu G, Dang C, Xiong S J. Research advances on the occurrence, damage and management of rice stem borers in China[J]. *Plant Protection*, 2023, 49(5): 167-180. (in Chinese with English abstract)

[2] Hajjar M J, Ahmed N, Alhudaib K A, Ullah H. Integrated insect pest management techniques for rice[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4499.

[3] Luo G H, Yao J, Yang Q, Zhang Z C, Hoffmann A A,

Fang J C. Variability in development of the striped rice borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae), due to instar number and last instar duration[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35231.

[4] Zhu P Y, Liang R, Qin Y, Xu H X, Zou Y, Johnson A C, Zhang F C, Gurr G M, Lu Z X. Extrafloras and floral nectar promote biocontrol services provided by parasitoid wasps to rice crops[J]. *Entomologia Generalis*, 2023, 43(5): 971-979.

[5] Wang P, Li M J, Bai Q R, Ali A, Desneux N, Dai H J, Zang L S. Performance of *Trichogramma japonicum* as a vector of *Beauveria bassiana* for parasitizing eggs of rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*[J]. *Entomologia Generalis*, 2021, 41(2): 147-155.

[6] 焦晓国, 宣维健, 盛承发. 用诱蛾量和有效积温模型预测东北越冬代水稻二化螟发生期[J]. 昆虫学报, 2006, 49(4): 705-709.
Jiao X G, Xuan W J, Sheng C F. A 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[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2006, 49(4): 705-709. (in Chinese with English abstract)

[7] Su J, Xuan W, Sheng C, Ge F. Suppression of rice stem borer, *Chilo suppressalis*, by mass trapping using synthetic sex pheromone in paddy field[J]. *Rice Science*, 2023, 11(1): 52-56.

[8] 刘万才, 刘振东, 朱晓明, 杜永均. 我国昆虫性信息素技术的研发与应用进展[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4): 803-811.
Liu W C, Liu Z D, Zhu X M, Du Y J. Development and application of insect sex pheromone technology in China[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(4): 803-811. (in Chinese with English abstract)

[9] 杜永均, 郭荣, 韩清瑞. 利用昆虫性信息素防治水稻二化螟和稻纵卷叶螟应用技术[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(11): 40-42, 39.
Du Y J, Guo R, Han Q R. Application technology of using insect sex pheromone to control rice stem borer and rice leaf roller[J]. *China Plant Protection*, 2013, 33(11): 40-42, 39. (in Chinese)

[10] Beevor P S, Hall D R, Nesbitt B F, Dyck V A, Arida G, Lippold P C, Oloumi-Sadeghi H. Field trials of the synthetic sex pheromones of the striped rice borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae), and of related compounds[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1977, 67(3): 439-447.

[11] Chen Q H, Zhu F, Tian Z, Zhang W M, Guo R, Liu W, Pan L, Du Y. Minor components play an important role in interspecific recognition of insects: A basis to pheromone based electronic monitoring tools for rice pests[J]. *Insects*, 2018, 9(4): 192.

[12] Mochida O, Arida G S, Tatsuki S, Fukami J. A field test on a third component of the female sex pheromone of the rice striped stem borer, *Chilo suppressalis*, in the Philippines[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1984, 36(3): 295-296.

[13] Tatsuki S, Kurihara M, Usui K, Ohguchi Y, Uchiumi K, Arai K, Yabuki S, Tanaka F. Sex pheromone of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (WALKER) (Lepidoptera: Pyralidae): The third component, Z-9-hexadecenal[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1983, 18(3): 443-446.

[14] Wu J, Wu X, Chen H, Xu L, Liu G, Mao B, Quo R, Du Y. Optimization of the sex pheromone of the rice leaffolder moth *Cnaphalocrocis medinalis* as a monitoring tool in China[J]. *Journal of Applied Entomology*, 2013, 137(7): 509-518.

[15] Cheng J, Chen Q, Guo Q, Du Y. Moth sex pheromones affect interspecific competition among sympatric species and possibly population distribution by modulating pre-mating behavior[J]. *Insect Science*, 2023, 30(2): 501-516.

[16] 刘天伟, 陈运康, 许春梅, 郭荣, 冯波, 杜永均. 田间二化螟雄蛾对不同配比性信息素的嗅觉反应及性信息素识别相关基因表达水平差异[J]. 昆虫学报, 2021, 64(5): 585-596.
Liu T W, Chen Y K, Xu C M, Guo R, Feng B, Du Y J. Variation in the olfactory response and expression levels of genes involved in sex pheromone recognition in male moths of field *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) to sex pheromone blends at different ratios[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2021, 64(5): 585-596. (in Chinese with English abstract)

[17] Kanno H. Mating behaviour of the rice stem borer moth, chilosuppressalis WALKER (Lepidoptera: Pyralidae): V. critical illumination intensity for female calling and male sexual response under various temperatures[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1981, 16(3): 179-185.

[18] Kanno H. Mating behaviour of the rice stem borer moth, chilosuppressalis WALKER: Lepidoptera: Pyralidae: VI. Effects of photoperiod on the diel rhythms of mating behaviours[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1981, 16(4): 406-411.

[19] Kanno H. Seasonal variation in periodicity of mating behaviour in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. *Bulletin of Entomological Research*, 1981, 71(4): 631-637.

[20] Kondo A, Tanaka F. Effect of wild virgin females on pheromone trap efficiency in two annual generations of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* (WALKER) (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1994, 29(2): 279-281.

[21] Kanno H, Sato A. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* WALKER (Lepidoptera: Pyralidae): II. effects of temperature and relative

humidity on mating activity[J]. *Applied Entomology and Zoology*, 1979, 14(4): 419-427.

[22] 冯波, 刘天伟, 陆明红, 钟玲, 郭荣, 刘万才, 郭前爽, 杜永均. 二化螟的多次交配及其对雌蛾产卵量的影响[J]. 昆虫学报, 2020, 63(6): 759-768.
Feng B, Liu T W, Lu M H, Zhong L, Guo R, Liu W C, Guo Q S, Du Y J. Multiple mating of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) and its effect on the oviposition of female moths[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63(6): 759-768. (in Chinese with English abstract)

[23] Alfaro C, Navarro-Llopis V, Primo J. Optimization of pheromone dispenser density for managing the rice striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker), by mating disruption[J]. *Crop Protection*, 2009, 28(7): 567-572.

[24] Vacas S, Navarro I, Primo J, Navarro-Llopis V. Mating disruption to control the striped rice stem borer: Pheromone blend, dispensing technology and number of releasing points[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2016, 19(2): 253-259.

[25] Vacas S, Alfaro C, Navarro-Llopis V, Zarzo M, Primo J. Study on the optimum pheromone release rate for attraction of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae)[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2009, 102(3): 1094-1100.

[26] 姚晓明, 翟婧, 孙健, 王婉强, 张晓萌, 吴降星, 郭前爽, 杜永均. 主动型释放器喷射性信息素对二化螟虫量的影响及应用效果[J]. 中国植保导刊, 2024, 44(7): 59-63, 68.
Yao X M, Zhai J, Sun J, Wang W Q, Zhang X M, Wu J X, Guo Q S, Du Y J. Impact of sex pheromone aerosol puff on the behavior of *Chilo suppressalis* and its control effect in rice fields[J]. *China Plant Protection*, 2024, 44(7): 59-63, 68. (in Chinese with English abstract)

[27] 王未英, 陈瑜, 赵洪, 郭前爽, 杜永均. 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[J]. 中国生物防治学报, 2024, 40(6): 1293-1301.
Wang W Y, Chen Y, Zhao H, Guo Q S, Du Y J. Evaluation of the control efficacy of mating disruption by active high dose aerosol pheromone dispensers on rice pests[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40(6): 1293-1301. (in Chinese with English abstract)

[28] Huang J, Wu E, Yang C, Han X, Zhang J, Cao M, Deng F, Guo Q, Du Y. Mating disruption of the tomato leaf miner *Tuta absoluta* (Lepidoptera: Gelechiidae) on greenhouse tomatoes[J]. *Crop Health*, 2024, 2(1): 15.

[29] 郭前爽, 陈立玲, 隋华, 杨斌, 卓富彦, 朱晓明, 郭荣, 杜永均. 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[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2022, 48(6): 787-796.
Guo Q S, Chen L L, Sui H, Yang B, Zhuo F Y, Zhu X M, Guo R, Du Y J. Effects of high dose sex pheromone on courtship, mating and oviposition of *Chilo suppressalis* (Walker) in the wind tunnel[J]. *Journal of Zhejiang University*: *Agriculture and Life Sciences*, 2022, 48(6): 787-796. (in Chinese with English abstract)

[30] Zhu P, Kong F, Wang Z. Sex pheromone components of purple stem borer *Sesamia inferens* (Walker)[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1987, 13(5): 983-989.

[31] 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. 大螟成虫在高剂量性信息素交配干扰环境中的求偶和交配行为 [J]. 昆虫学报, 2024, 67(4): 507-516.
Gui J W, Wang W Y, Yao X M, Wu S L, Liu T B, Lin Y F, Zhao H, Guo Q S, Du Y J. Calling and mating behaviors of *Sesamia inferens* (Lepidoptera: Noctuidae) adults in the environment of high-dose sex pheromone for mating disruption[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2024, 67(4): 507-516. (in Chinese with English abstract)

[32] Lu J, Yao X, Shen Y, Du C, Guo Q, Du Y. Physiological status of rice leaf-roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae) adults trapped by sex pheromone and floral odor[J]. *Insects*, 2024, 15(9): 637.

[33] Gratton C, Denno R F. Seasonal shift from bottom-up to top-down impact in phytophagous insect populations[J]. *Oecologia*, 2003, 134(4): 487-495.