



二化螟雄蛾交配行为与精巢大小的关系

冯 波¹, 郭前爽², 姚晓明³, 李 迪⁴, 程建军², 陈庆华⁵, 杜永均^{2,*}

(1. 温州医科大学健康与环境生态研究所, 浙江温州 325035; 2. 浙江大学农药与环境毒理研究所, 杭州 310058;
3. 浙江省植物保护检疫局, 杭州 310029; 4. 黄岩区农业技术推广中心, 浙江台州 318020;
5. 四川省农业科学院植物保护研究所, 农业部西南作物有害生物综合治理重点实验室, 成都 610066)

摘要:【目的】为了明确二化螟 *Chilo suppressalis* 雄蛾交配行为与精巢大小的关系, 阐明信息素群集诱杀防治二化螟的有效性。【方法】本研究通过测定和比较不同日龄、交配状态以及性信息素诱捕的二化螟雄蛾精巢体积, 建立精巢体积与雄蛾发育及交配状态的相关性。【结果】雄蛾日龄显著影响二化螟的交配, 刚羽化(0 日龄)雄蛾的交配率较低, 1 日龄雄蛾的交配率最高, 之后随着日龄增加交配率逐渐降低。精巢体积与二化螟雄蛾日龄之间存在显著的负相关性。同一日龄交配的二化螟雄蛾的精巢体积显著大于未交配雄蛾; 性诱捕器诱捕雄蛾的精巢体积显著大于未被性诱捕器诱捕雄蛾, 与已交配雄蛾的精巢体积相似。交配之后, 精巢的发育过程和未交配雄蛾相似。田间性信息素引诱二化螟雄蛾精巢体积小于 0–1 日龄未交配雄蛾, 大于 2–6 日龄未交配雄蛾。【结论】本研究结果表明, 二化螟雄蛾对雌蛾性信息素的反应与其精巢大小存在正相关性; 性信息素引诱的二化螟雄蛾具有更强的性信息素反应能力, 同时性信息素引诱的大部分雄蛾为未交配状态; 交配过程并不影响二化螟雄蛾精巢体积, 也不影响精巢发育。二化螟交配能力与精巢大小的关系在理论上解释了性信息素群集诱杀二化螟的防控有效性, 并为其他蛾类昆虫的交配研究提供依据。

关键词: 二化螟; 精巢; 精巢体积; 交配状态; 性信息素; 日龄

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2019)07-0849-08

Association between the mating activity and testicular volume of male moths of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae)

FENG Bo¹, GUO Qian-Shuang², YAO Xiao-Ming³, LI Di⁴, CHENG Jian-Jun², CHEN Qing-Hua⁵, DU Yong-Jun^{2,*} (1. Institute of Health and Environmental Ecology, Wenzhou Medical University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China; 2. Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Provincial Plant Protection and Quarantine Bureau, Hangzhou 310029, China; 4. Agricultural Technology Extension Center of Huangyan District, Taizhou, Zhejiang 318020, China; 5. Key Laboratory of Integrated Management of Crop Pests in Southwest China, Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China)

Abstract: 【Aim】To explore the relationship between the testicular volume and mating activity of male moths of the striped rice stem borer, *Chilo suppressalis*, and to evaluate the effectiveness of sex pheromone trapping in the pest management. 【Methods】The testicular volume of different day-old male moths of *C. suppressalis* under different mating statuses and trapped by sex pheromone were measured and compared, and the relationship between the testicular volume and the developmental and mating statuses of male moths was established. 【Results】The age (day-old) of male moths of *C. suppressalis*

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871956); 浙江省重点研发计划(2018C02027)

作者简介: 冯波, 男, 1982 年生, 四川广安人, 博士, 副研究员, 研究方向为化学生态学和昆虫分类学, E-mail: fb@wmu.edu.cn

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

收稿日期 Received: 2018-12-27; 接受日期 Accepted: 2019-05-09

significantly affected their mating activity. The mating rate of the newly emerged (0-day-old) male moths was low, and the mating rate was the highest in the 1-day-old male moth and then decreased gradually as the age (day-old) of male moths increased. There was a significant negative correlation between the testicular volume and the age of male moths of *C. suppressalis*. The testicular volume of the mated male moths was significantly larger than that of the unmated male moths of the same age. The testicular volume of the male moths caught by pheromone traps was significantly larger than that of the untrapped male moths, but was as large as that of the mated male moths of the same age. The development of the testis in the mated moths was similar to that of the unmated individuals. The testicular volume of male moths caught by sex pheromone traps in the field was smaller than that of the unmated male moths of 0–1-day-old, but larger than that of the unmated male moths of 2–6-day-old. 【Conclusion】 The results indicate a positive correlation between the response of male moths of *C. suppressalis* to sex pheromone and their testicular volume. Male moths trapped by sex pheromone lures show stronger responding activity to sex pheromone, and most of individuals caught by sex pheromone traps are the unmated ones. Copulation does not affect the testicular volume and the development of the testis of male moths of *C. suppressalis*. The relationship between the mating ability and testicular volume of male moths of *C. suppressalis* explains the effectiveness of sex pheromone trapping in pest management, and provides a basis for the mating study of other moths.

Key words: *Chilo suppressalis*; testis; testicular volume; mating status; sex pheromone; age

交配是蛾类昆虫繁衍后代的基础。雄蛾的内生殖系统由精巢、输精管、附腺、复射精管和单射精管组成,精巢产生精子,成熟的精子通过输精管储存在储精囊和(或)复射精管中(Osanai *et al.*, 1987; Spurgeon *et al.*, 1994)。交配发生时,附腺分泌精液,保证精子达到雌蛾受精囊前有足够的营养和合适的环境,储存的成熟精子伴随精液通过射精管进入雌蛾体内(Baker *et al.*, 2003)。交配以雄蛾在雌蛾体内形成精包而完成。因此有学者研究了内生殖系统与交配的关系,例如黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 附腺越大,交配成功率越高,但交配成功率与精巢大小无直接相关性(Bangham *et al.*, 2002)。黄粪蝇 *Scathophaga stercoraria* 竞争激烈种群的精子比无竞争种群的精巢体积更大(Hosken and Ward, 2001)。但蛾类昆虫的交配能力是否受生殖系统的影响,目前还不清楚。

二化螟 *Chilo suppressalis* 是我国水稻重要害虫。为了更好地理解二化螟的性信息素调控行为,很多学者对二化螟的交配行为进行了研究(焦晓国等, 2006; Quan *et al.*, 2017),分析了日龄(Kanno and Sato, 1978)、温度和湿度(Kanno and Sato, 1979; 余棋等, 2017)、光强度(Kanno, 1981a)、光周期(Kanno, 1981b, 1984)、季节变化(Kanno, 1981c)、寄主差异(Cuong and Cohen, 2003; Ishiguro *et al.*, 2006; Ueno *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2016)等对二

化螟交配的影响,为二化螟的群集诱杀和嗅觉适应性提供了大量的理论依据。目前各地主要依靠化学农药进行二化螟防治,导致二化螟抗药性快速上升。为了减少施用化学农药给农业生态系统带来的不良影响,基于性信息素的交配干扰技术(Ueno and Hayasaka, 1997; Alfaro *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2014)和群集诱杀技术(苏建伟等, 2003; 左文等, 2008; Vacas *et al.*, 2009; 杜永均等, 2013)已经在防治二化螟过程中发挥重要作用。性信息素交配干扰技术可能通过延迟交配,抑制二化螟种群增长(Jiao *et al.*, 2006),达到高防治效果。性信息素群集诱杀二化螟是否具有相似的机理目前还不十分明确。因此,本研究通过比较不同日龄、不同交配状态二化螟雄蛾精巢体积,明确交配行为与精巢体积的关系;比较性信息素引诱和未引诱雄蛾的精巢差异,分析田间性信息素引诱雄蛾精巢体积,推测性信息素引诱雄蛾的交配状态和能力,以期从理论上解释性信息素群集诱杀二化螟的有效性。

1 材料与方法

1.1 试虫

2018年3月在浙江省温州市瑞安市塘下镇采集越冬代二化螟老熟幼虫并带回温州医科大学健康与环境生态研究所人工气候室进行饲养。饲养温度

为 $28 \pm 1^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 $70\% \pm 5\%$, 光周期为 14L: 10D(19:00 时开始)(雷妍圆等, 2009)。幼虫化蛹后, 在显微镜下根据生殖孔的有无进行雌雄蛹鉴别, 并将雌、雄蛹分别放入羽化笼中。每天 9:00 时收集新羽化的二化螟成虫。根据成虫体型、翅面特征和腹部末端特征再次鉴别二化螟雌雄。雌雄成虫分开饲养, 喂以 10% 蜂蜜水, 每天 18:00 时饲喂一次。9:00 时收集的二化螟成虫均为前一晚羽化(孙丽娟等, 2002), 标记为 1 日龄, 其余日龄以此类推。羽化 0 d 二化螟雄蛾通过以下方法获得: 9:00 时将前一晚羽化的二化螟成虫收集干净后, 在 19:00 时再次收集新羽化的二化螟雄成虫, 标记为羽化 0 d。

1.2 不同日龄二化螟雄蛾的交配率比较

虽然 2–3 日龄二化螟雌蛾的交配率(约 70%)显著高于 1 日龄(44%)和 5–7 日龄($\leq 28\%$)(焦晓国等, 2006), 但是羽化后 7–24 h 和 24–36 h 雌蛾性腺对雄蛾的引诱力最强并且相似(王良臣, 1981; 熊兴占等, 1984)。因此本研究利用 1 日龄雌蛾研究不同日龄雄蛾的交配率。18:00 时将 1, 2, 3 和 4 日龄, 19:00 时将 0 日龄的未交配雄蛾分别和 1 日龄未交配雌蛾按 8:8 比例放入交配笼(30 cm × 30 cm × 30 cm)中, 次日 9:00 时解剖雌蛾交配囊, 检查精包有无, 确定雌蛾交配状态。二化螟雄蛾和雌蛾在同一夜晚均最多交配一次(焦晓国等, 2006), 可以根据雌蛾的交配数量推测交配雄蛾的数量, 并按照交配数量/8 × 100% 计算各日龄雄蛾的交配率。本实验重复 6 次。

1.3 日龄对未交配二化螟雄蛾精巢体积的影响

21:00–23:00 时解剖 0–6 日龄未交配雄蛾精巢, 比较不同日龄雄蛾精巢体积大小, 具体解剖方法如下: 将蛾体背面向上, 从基部取下腹部, 放入 75% 酒精中, 利用镊子从腹基部开始, 小心地将腹部各节的背板和腹板去掉, 这样整个生殖器官可以完整地暴露在外。对于雄蛾而言, 找到精巢, 去掉精巢表面的脂肪体, 得到完好精巢。对于雌蛾而言, 找到雌蛾的交配囊, 确定其精包有无。摆好精巢姿势, 利用 Motic 显微镜 SMZ-168 和照相系统 Moticam2506(麦克奥迪, 厦门)在 1 × 物镜和 20 × 放大倍数条件下拍照。由于二化螟精巢为近圆球体, 我们利用软件 Motic Plus Images 2.0 分别测量了精巢赤道半径 a , b (沿着 x 和 y 轴)和极半径 c 的长度, 按照椭球体积公式 $V = 4\pi abc/3$ 计算二化螟精巢体积。各日龄分别解剖雄蛾 9~18 头。

1.4 不同日龄交配和未交配二化螟雄蛾精巢体积比较

按 1.2 节方法分别将 0–3 日龄的未交配雄蛾和 1 日龄未交配雌蛾按 8:8 比例放入交配笼(长 × 宽 × 高 = 30 cm × 30 cm × 30 cm)中, 每隔 20 min 检查一次交配情况, 将正在交配的二化螟雌雄蛾移入新的一次性塑料杯中, 次日 8:00–10:00 时解剖交配和未交配二化螟雄蛾精巢、同时解剖相应雌蛾交配囊, 检查精包有无, 确定雌雄是否交配, 比较交配和未交配雄蛾精巢体积。各日龄各交配状态分别解剖雄蛾 9~11 头。

1.5 室内性信息素诱集和已交配二化螟精巢比较

19:00 时将 0 日龄雄蛾分为两组, 一组进行室内性信息素诱集试验。在长 × 宽 × 高 = 3 m × 3 m × 2 m 的网室正中心悬挂一个二化螟性诱捕器。19:00 时将新羽化的 50 头雄蛾放入网室中, 每隔 20 min 检查一次诱捕器, 将诱捕器中引诱到的雄蛾取出立即进行解剖, 同时解剖相同数量的在网壁上停留不动的雄蛾作为对照。另一组则进行交配实验。19:00 时将新羽化的雄蛾与 1 日龄未交配雌蛾按 8:8 比例放入交配笼(长 × 宽 × 高 = 30 cm × 30 cm × 30 cm)中, 每隔 20 min 检查一次交配情况, 发现交配时, 将正在交配的雌雄蛾移入新的一次性塑料杯中, 记录交配时间。交配结束后, 立即解剖雄蛾生殖系统, 同时解剖与之交配的雌蛾交配囊, 检查精包有无, 确定雌雄成功交配。分别解剖诱捕器中和诱捕器外雄蛾 26 和 28 头, 交配雄蛾 9 头。

1.6 交配对二化螟雄蛾精巢发育的影响

19:00 将刚羽化雄蛾和 1 日龄未交配雌蛾按 8:8 比例放入交配笼(长 × 宽 × 高 = 30 cm × 30 cm × 30 cm)中, 每隔 20 min 检查一次交配情况, 将正在交配的雌雄蛾移入新的一次性塑料杯中, 记录交配时间。在交配结束后 0, 12, 24, 36 和 48 h 解剖雄蛾生殖系统, 同时解剖与之交配的雌蛾交配囊, 检查精包有无, 确定雌雄成功交配。在解剖交配雄蛾时, 解剖相同数量的同日羽化的未配对雄蛾作为对照。各时间点各交配状态分别解剖雄蛾 7~15 头。

1.7 田间性信息素诱捕试验

试验于 2018 年 3 月至 2018 年 4 月在浙江省温州市瓯海区稻田进行。选择水稻长势较均匀、日常管理基本一致的 3 个试验点, 各试验点间距大于 1 km。每个试验点设置 3 个诱捕器, 每个诱捕器安装一枚诱芯, 各诱捕器间距 30 m 以上。诱捕器悬挂高度为 50 cm。在 6:00–8:00 时, 将诱捕器中引诱的

二化螟雄蛾带回实验室进行解剖。本实验共解剖田间性诱雄蛾 24 头。试验用的二化螟性信息素 PVC 毛细管诱芯(农药登记证号 LS20150334)和新型飞蛾诱捕器都由宁波纽康生物技术有限公司提供。

1.8 数据分析

数据分析采用软件 SPSS 17.0。多组平均数间比较采用 One-way ANOVA 法,显著性分析采用 LSD (least significant difference)法,两组平均数间比较采用 Student 氏 *t* 检验法。利用双变量相关性分析中的 Pearson 相关系数进行相关性分析,相关性分析的显著性用双尾 *t* 检验分析。回归分析采用线性回归法。显著性分析时 *P* 值大于 0.05 表示差异不显著,小于 0.05 表示差异显著。

2 结果

2.1 日龄对二化螟雄蛾交配的影响

日龄对二化螟雄蛾交配具有显著影响 ($P < 0.001$)。羽化当晚(0 日龄)雄蛾交配率为 $27.9\% \pm 2.7\%$,1 日龄雄蛾的交配率升高到 $66.7\% \pm 5.3\%$,显著高于 0 日龄雄蛾(图 1)。2 日龄雄蛾的交配率为 $44.2\% \pm 6.6\%$,显著低于 1 日龄雄蛾($P=0.012$),但是显著高于 0 日龄雄蛾($P=0.047$)。3 日龄雄蛾的交配率为 $22.8\% \pm 8.0\%$,与 0 日龄雄蛾相似,显著低于 1–2 日龄雄蛾($P \leq 0.026$)。4 日龄雄蛾的交配率仅为 $13.3\% \pm 8.2\%$,与 0 和 3 日龄雄蛾差异不显著($P \geq 0.074$)。

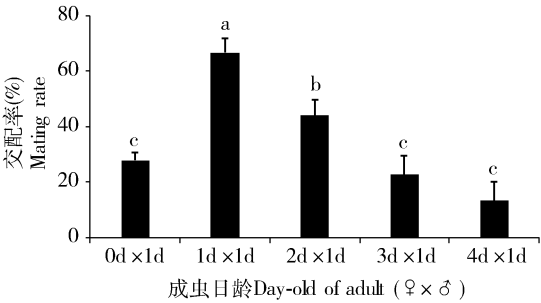


图 1 日龄对二化螟雄蛾交配的影响

Fig. 1 Effect of age (day-old) on mating of male moths of *Chilo suppressalis*

图中柱上不同字母表示不同日龄雄蛾交配率差异显著 (LSD 法, $P < 0.05$)。Different letters above bars indicate significant differences in the mating rate among different day-old male moths by LSD method ($P < 0.05$).

2.2 日龄对二化螟雄蛾精巢体积的影响

日龄对二化螟雄蛾精巢体积具有显著影响

($P < 0.001$)(图 2)。0 和 1 日龄雄蛾精巢体积相似,分别为 0.344 ± 0.034 和 $0.336 \pm 0.036 \text{ mm}^3$ 。2 日龄雄蛾精巢体积开始变小,为 $0.278 \pm 0.049 \text{ mm}^3$,但是与 0 和 1 日龄雄蛾精巢体积差异不显著($P \geq 0.201$)。3 日龄雄蛾精巢体积进一步减小为 $0.198 \pm 0.028 \text{ mm}^3$,显著小于 0 和 1 日龄雄蛾精巢体积($P \leq 0.008$),与 2 和 4 日龄雄蛾精巢体积($0.128 \pm 0.013 \text{ mm}^3$)差异不显著($P \geq 0.168$),显著大于 5 日龄($0.069 \pm 0.007 \text{ mm}^3$)和 6 日龄($0.062 \pm 0.008 \text{ mm}^3$)雄蛾精巢体积($P \leq 0.017$)。对精巢体积与二化螟雄蛾日龄进行 Pearson 相关性分析,得到的 Pearson 相关系数为 -0.675 ,精巢体积与二化螟雄蛾日龄之间存在极显著线性相关性($P < 0.001$)。对精巢体积与二化螟雄蛾日龄进行线性回归分析,得到精巢体积与二化螟雄蛾日龄之间的回归方程为 $y = -0.054x + 0.3667$,相关系数 $R^2 = 0.4543$ ($P < 0.001$)。

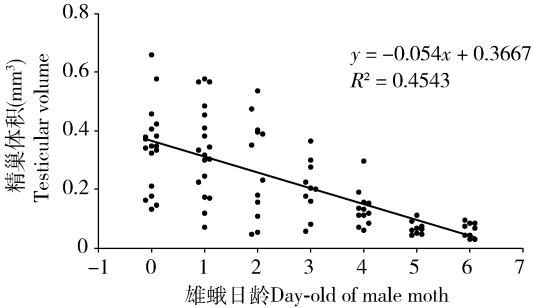


图 2 日龄对二化螟雄蛾精巢体积的影响

Fig. 2 Effect of age (day-old) on the testicular volume of male moths of *Chilo suppressalis*

2.3 不同日龄交配与未交配二化螟精巢大小比较

0–3 日龄交配二化螟雄蛾的精巢体积分别为 0.415 ± 0.023 , 0.390 ± 0.033 , 0.362 ± 0.031 和 $0.273 \pm 0.039 \text{ mm}^3$,未交配二化螟雄蛾的精巢体积分别为 0.276 ± 0.031 , 0.277 ± 0.024 , 0.201 ± 0.039 和 $0.162 \pm 0.023 \text{ mm}^3$ (图 3)。同一日龄交配二化螟雄蛾的精巢体积显著大于未交配雄蛾($P \leq 0.008$)。并且 3 日龄交配和未交配雄蛾的精巢体积均显著小于 0–1 日龄雄蛾精巢体积($P \leq 0.015$)。

2.4 交配状态与二化螟精巢体积的关系

进入和未进入性诱捕器内的雄蛾精巢体积分别为 0.401 ± 0.021 和 $0.291 \pm 0.018 \text{ mm}^3$,进入性诱捕器的雄蛾精巢体积显著大于未进入性诱捕器的雄蛾精巢体积($P = 0.028$)(图 4)。解剖同期的已交配雄蛾发现,其精巢体积为 $0.395 \pm 0.019 \text{ mm}^3$,与

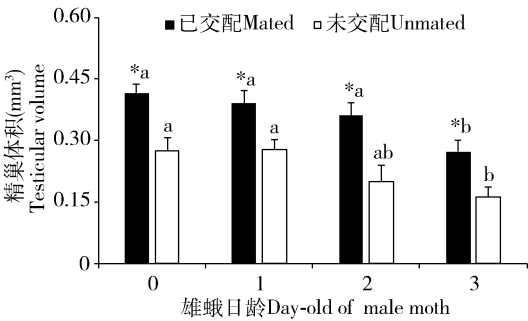


图3 不同日龄交配与未交配二化螟雄蛾精巢体积比较

Fig. 3 Comparison of testicular volume between the different day-old mated and unmated male moths of *Chilo suppressalis*

柱上星号表示同一日龄不同交配状态精巢体积差异显著 (T 检验, $P < 0.05$) ; 柱上不同字母表示相同交配状态不同日龄雄蛾精巢体积差异显著 (LSD 法, $P < 0.05$) 。The asterisk above bars indicates significant difference in the testicular volume between mated and unmated male moths at the same age (T -test, $P < 0.05$), while different letters above bars indicate significant differences in the testicular volume among different day-old male moths under the same mating status by LSD method ($P < 0.05$).

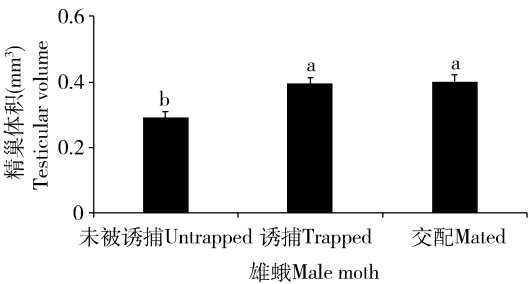


图4 已交配的、性诱剂诱捕的和未被性诱剂诱捕的二化螟雄蛾精巢体积比较

Fig. 4 Comparison of the testicular volume among mated moths, and trapped and untrapped moths by sex pheromone lure of *Chilo suppressalis*

柱上不同字母表示已交配的、性诱剂诱捕的和未被性诱剂诱捕的二化螟雄蛾精巢体积差异显著 (LSD 法, $P < 0.05$) 。Different letters above bars indicate significant differences in the testicular volume among mated moths and trapped and untrapped moths by sex pheromone lure by LSD method ($P < 0.05$).

进入性诱捕器的雄蛾精巢体积相似,交配过程并不显著影响二化螟雄蛾精巢体积。

2.5 交配对二化螟精巢发育的影响

交配后 0, 12, 24, 36 和 48 h 二化螟精巢体积分别为 0.420 ± 0.025 , 0.399 ± 0.042 , 0.395 ± 0.029 , 0.374 ± 0.030 和 0.334 ± 0.038 mm³, 同时期末交配二化螟精巢体积分别为 0.293 ± 0.034 , 0.295 ± 0.029 , 0.289 ± 0.028 , 0.248 ± 0.025 和

0.219 ± 0.018 mm³ (图 5)。对精巢体积与交配后时间进行相关性分析,发现它们之间存在极显著线性相关性 ($P < 0.001$)。对精巢体积和交配后时间进行线性回归分析,得到回归方程为 $y = -0.0016x + 0.4238$, 相关系数 $R^2 = 0.9104$, 未交配二化螟雄蛾的回归方程为 $y = -0.0016x + 0.3076$, 相关系数 $R^2 = 0.8284$ 。在回归方程中,交配和未交配雄蛾精巢与发育时间的斜率均为 -0.0016 ,表明交配并不明显影响二化螟精巢发育。

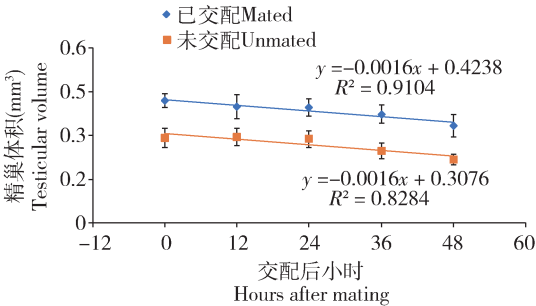


图5 交配对二化螟雄蛾精巢发育的影响

Fig. 5 Effect of mating on the development of testis in male moths of *Chilo suppressalis*

2.6 田间性信息素引诱二化螟雄蛾精巢大小

解剖测量性信息素引诱田间二化螟雄蛾精巢,发现其平均体积为 0.321 ± 0.014 mm³, 小于 0 - 1 日龄雄蛾精巢,大于 2 - 6 日龄雄蛾精巢。显著性分析表明,田间性诱二化螟雄蛾精巢与 0 - 2 日龄雄蛾精巢体积无显著差异 ($P \geq 0.332$),显著大于 3 - 6 日龄雄蛾精巢体积 ($P \leq 0.01$) (图 6)。

3 讨论

二化螟的交配行为受到多种环境因素影响,包括日龄 (Kanno and Sato, 1978)、环境温度和相对湿度 (Kanno and Sato, 1979)、光强度 (余棋等, 2017)、光周期 (Kanno, 1981b) 等。本研究发现,日龄对二化螟雄蛾的交配和精巢体积存在显著影响,1 日龄雄蛾的交配能力明显强于 2 - 4 日龄雄蛾,精巢体积明显大于 2 - 6 日龄,随着日龄的增加,雄蛾的交配能力和精巢体积均明显变小。精巢体积与日龄的负相关性在欧洲玉米螟 *Ostrinia nubilalis* (Chaudhury and Raun, 1966) 和黄钩蛱蝶 *Polygonia c-aureum* (Hiroyoshi and Reddy, 2018) 中也得到证实。进一步研究发现,同一日龄对性信息素有反应的雄蛾精巢体积显著大于无反应雄蛾。已交配雄蛾的精巢体

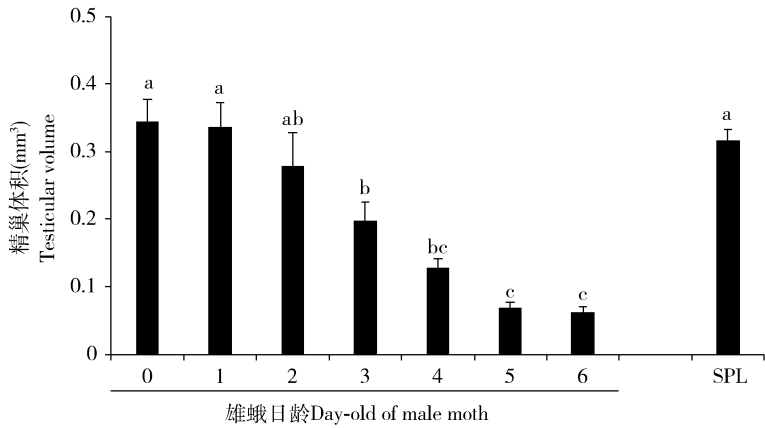


图6 田间性信息素引诱二化螟雄蛾精巢体积

Fig. 6 Testicular volume of male moths of *Chilo suppressalis* caught by sex pheromone traps in the field

SPL: 田间性诱剂引诱雄蛾 Male moths trapped by sex pheromone lure from field. 柱上不同字母表示不同日龄和性诱剂引诱的雄蛾精巢体积差异显著 (LSD 法, $P < 0.05$)。Different letters above bars indicate significant differences in the testicular volume among male moths of different day-old and those trapped by SPL by LSD method ($P < 0.05$).

积显著大于未交配雄蛾,和对性信息素有反应的雄蛾相似。精巢体积大的二化螟雄蛾交配能力更强,交配成功率更高,因此精巢体积大小与二化螟雄蛾的交配能力存在正相关性,可能是判别二化螟性成熟度或者交配能力的一个重要指标。精巢体积与雄性交配能力的相关性在其他昆虫中也有发现,例如精子竞争激烈的黄粪蝇 *Scathophaga stercoraria* 雄虫比无精子竞争雄虫的精巢体积更大 (Hosken and Ward, 2001),四纹豆象 *Callosobruchus maculatus* 雌虫再次交配的比例与交配雄虫的精巢大小存在正相关性,精巢体积大的雄虫的交配成功率更高 (Katvala *et al.*, 2008)。二化螟雌蛾一生只交配一次,平均 0.92 次 (焦晓国等, 2006),为了使种群能够更好地延续,雌蛾可能倾向于选择精巢体积大的雄蛾进行交配。当性信息素诱杀交配能力更强的雄蛾后,剩余雄蛾由于交配能力较弱,和雌蛾的交配率降低。因此性诱剂诱杀降低了田间种群的雄蛾数量和交配能力,更大程度地降低了田间二化螟雌蛾的交配率。但是交配过程并不显著影响二化螟雄蛾精巢体积,也不影响雄蛾精巢的后续发育。

精巢是产生精子的地方。在脊椎动物中,更大的精巢体积能够产生更多、质量更佳精子 (Gomendio *et al.*, 1998)。当存在精子竞争时,大精巢能够增加其产生精子的受精成功率 (Preston *et al.*, 2003),例如精巢体积大的金花鼠具有更高的繁殖成功率 (Schulte-Hostedde and Millar, 2004)。在昆虫中,飞蝗精巢体积与精巢管内成熟精子数量相关,当成熟精子数量急剧增加时,精巢体积就随之显

著增长 (郝锡联等, 2006)。精巢体积还与蝗虫交配时的射精量相关,精巢大的 *Chorthippus parallelus erythropus* 在第 2 次交配中的射精量显著大于精巢小的 *C. p. erythropus* (Reinhardt, 2007)。本研究发现,被性信息素诱捕雄蛾的精巢体积显著大于未被性信息素诱捕雄蛾的,未被性信息素诱捕的二化螟雄蛾由于精巢较小,产生的精子数量较少,即使和雌蛾交配成功,雌蛾产下的受精卵的数量也少于精巢大的雄蛾,这势必降低下代种群的数量。

二化螟雄蛾具有多次交配能力,最多达 4 次,平均 2.72 次 (焦晓国等, 2006)。对蝴蝶精巢体积研究发现,蝴蝶精巢体积的大小和其交配次数有正相关性 (Gage, 1994),精巢大的雄蝶可能具有更多的交配次数。交配 1 次的四纹豆象种群比多次交配种群的精巢体积更小 (Gay *et al.*, 2009)。当性信息素诱杀掉精巢体积大的雄蛾后,田间仅剩精巢体积小的二化螟雄蛾,这些雄蛾的多次交配能力较弱,可能导致田间有效雄虫数量不足,进一步降低田间二化螟种群的交配率。

有学者通过解剖二化螟雄性生殖系统单射精管内含物的颜色和充满状态,判定二化螟性信息素引诱雄蛾中的绝大部分 (85%) 已经交配 (Hu *et al.*, 2018)。最新研究却发现,利用二化螟生殖器内含物特征仅可以区别交配后 12 h 内的已交配和未交配雄蛾 (郭前爽等, 2019)。前者研究使用的是水盆诱捕器和早期的橡皮头诱芯,诱芯中性信息素含量只有后者研究使用诱芯的 1/3,其引诱力差、持效期短。水盆诱捕器的诱杀效率比后者使用的新型飞蛾

类诱捕器低很多。二化螟羽化之后即可交配。当诱芯引诱力强、诱捕器诱捕效率高时,可能比田间雌蛾更有引诱力,因此能够诱集到大量未交配雄蛾。反之则可能引诱到很多已交配雄蛾。本研究发现,新型飞蛾类诱捕器和高效诱芯引诱田间二化螟雄蛾精巢小于 0-1 日龄雄蛾精巢,大于 2-6 日龄雄蛾精巢,考虑到性信息素引诱雄蛾的解剖时间延后了 12 h,因此田间性信息素引诱雄蛾中大部分是 0-1 日龄。二化螟雄蛾的平均寿命为 7.1 d,其一生平均交配 2.72 次(焦晓国等, 2006),绝大部分二化螟雄蛾交配后需要恢复 2~3 d 才能进行第 2 次交配,性诱剂引诱的 0-1 日龄雄蛾最多交配 1 次。羽化当晚二化螟雄蛾的交配率较低,因此推测田间性诱剂引诱的绝大部分 0-1 日龄雄蛾未交配。

综上所述,性信息素群集诱杀通过以下 4 种途径达到有效防控田间二化螟的目的:(1)性信息素诱杀掉大量二化螟雄蛾,减少田间二化螟雄蛾数量,降低田间雌蛾的交配率;(2)性信息素诱杀的大部分为 0-1 日龄未交配雄蛾,即在雄蛾交配之前将其诱杀,进一步降低田间雌蛾的交配率;(3)性信息素诱杀掉精巢体积较大的雄蛾,田间剩余二化螟雄蛾由于精巢体积较小,其交配能力和再次交配能力较弱,更大程度地降低了田间雌蛾的交配率;(4)即使未被性信息素诱杀的雄蛾与雌蛾交配成功,由于其精巢体积较小,产生的精子数量较少,降低了交配雌蛾的有效产卵量。

参考文献 (References)

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

Baker RH, Denniff M, Futerman P, Fowler K, Pomiankowski A, Chapman T, 2003. Accessory gland size influences time to sexual maturity and mating frequency in the stalk-eyed fly, *Cyrtodiopsis dalmanni*. *Behav. Ecol.*, 14(5): 607-611.

Bangham J, Chapman T, Partridge L, 2002. Effects of body size, accessory gland and testis size on pre- and postcopulatory success in *Drosophila melanogaster*. *Anim. Behav.*, 64(6): 915-921.

Chaudhury MFB, Raun ES, 1966. Spermatogenesis and testicular development of the European corn borer, *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Pyraustidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 59(6): 1157-1159.

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. *J. Econ. Entomol.*, 107(5):

1828-1838.

Cuong NL, Cohen MB, 2003. Mating and dispersal behaviour of *Scirpophaga incertulas* and *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) in relation to resistance management for rice transformed with *Bacillus thuringiensis* toxin genes. *Int. J. Pest Manag.*, 49(4): 275-279.

Du YJ, Guo R, Han QR, 2013. The application of insect sex pheromone to control the rice stem borer and the rice leaf roller. *China Plant Prot.*, 33(11): 40-42, 39. [杜永均, 郭荣, 韩清瑞, 2013. 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. 中国植保导刊, 33(11): 40-42, 39]

Gage MJG, 1994. Associations between body size, mating pattern, testis size and sperm lengths across butterflies. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, 258(1353): 247-254.

Gay L, Hosken DJ, Vasudev R, Tregenza T, Eady PE, 2009. Sperm competition and maternal effects differentially influence testis and sperm size in *Callosobruchus maculatus*. *J. Evol. Biol.*, 22(5): 1143-1150.

Gomendio M, Harcourt AH, Roldán ERS, 1998. Sperm competition in mammals. In: Birkhead TR, Moller AP eds. *Sperm Competition and Sexual Selection* Academic Press, San Diego. 667-755.

Guo QS, Wang CR, Song XD, Feng B, Du YJ, 2019. Effects of age and mating status on the characteristics of internal genital organs of male adults of the striped rice borer, *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Acta Entomol. Sin.*, 62(7): 838-848. [郭前爽, 王春荣, 宋显东, 冯波, 陈庆华, 杜永均, 2019. 日龄和交配状态对二化螟雄蛾内生生殖器特征的影响. 昆虫学报, 62(7): 838-848]

Hao XL, Zhao Z, Zhou G, Ren BZ, 2006. Spermarian development of six dominant locust species in Siping area of Jilin Province, China. *Chin. J. Ecol.*, 25(8): 950-953. [郝锡联, 赵卓, 周革, 任炳忠, 2006. 四平地区六种优势蝗虫精巢发育的动态变化. 生态学杂志, 25(8): 950-953]

Hiroyoshi S, Reddy VG, 2018. Field and laboratory studies on the ecology, reproduction, and adult diapause of the asian comma butterfly, *Polygonia caureum* L. (Lepidoptera: Nymphalidae). *Insects*, 9(4): 1-30.

Hosken DJ, Ward PI, 2001. Experimental evidence for testis size evolution via sperm competition. *Ecol. Lett.*, 4(1): 10-13.

Hu Y, Dai C, He J, Zhu J, Zheng Y, Fu Q, 2018. A technique for determining the mating status of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) males. *J. Entomol. Sci.*, 53(1): 11-16.

Huang C, Hu B, Li J, Wang Y, 2016. Water-oats harbors two strains of the striped stem borer *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Crambidae) with temporal divergence in mating behavior. *App. Entomol. Zool.*, 51(3): 457-463.

Ishiguro N, Yoshida K, Tsuchida K, 2006. Genetic differences between rice and water-oat feeders in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae). *App. Entomol. Zool.*, 41(4): 585-593.

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). *J.*

Appl. Entomol., 130(2): 108–112.

- Jiao XG, Xuan WJ, Sheng CF, 2006. Mating behavior of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Acta Ecol. Sin.*, 26(4): 1110–1115. [焦晓国, 宣维健, 盛承发, 2006. 水稻二化螟的交配行为. *生态学报*, 26(4): 1110–1115]
- Kanno H, 1981a. Mating Behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). V. Critical illumination intensity for female calling and male sexual response under various temperatures. *Appl. Entomol. Zool.*, 16(3): 179–185.
- Kanno H, 1981b. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). VI. Effects of photoperiod on the diel rhythms of mating behaviours. *Appl. Entomol. Zool.*, 16(4): 406–411.
- Kanno H, 1981c. Seasonal variation in periodicity of mating behaviour in the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). *Bull. Entomol. Res.*, 71(4): 631–637.
- Kanno H, 1984. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae). VII. Circadian rhythm of mating behaviour. *Appl. Entomol. Zool.*, 19(2): 263–265.
- Kanno H, Sato A, 1978. Mating behavior of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). I. Effects of moth age on mating activity. *Appl. Entomol. Zool.*, 13(3): 215–221.
- Kanno H, Sato A, 1979. Mating behaviour of the rice stem borer moth, *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). II. Effects of temperature and relative humidity on mating activity. *Appl. Entomol. Zool.*, 14(4): 419–427.
- Katvala M, Ronn JL, Arnqvist G, 2008. Correlated evolution between male ejaculate allocation and female remating behaviour in seed beetles (Bruchidae). *J. Evol. Biol.*, 21: 471–479.
- Lei YY, Wei BX, He YR, Lan HX, Wen LK, Hu YH, Yang DZ, 2009. Utilization of sweet corn grain in mass-rearing experimental populations of the striped stem borer, *Chilo suppressalis*. *Chin. Bull. Entomol.*, 46(5): 795–798. [雷妍圆, 韦秉兴, 何余容, 蓝海讯, 温丽葵, 胡艳红, 杨东制, 2009. 用甜玉米粒饲养二化螟实验种群. *昆虫知识*, 46(5): 795–798]
- Osanai M, Aigaki T, Kasuga H, 1987. Energy metabolism in the testis of the silkmoth, *Bombyx mori*, associated with accumulation of alanine derived from arginine. *Insect Biochem.*, 17(1): 71–75.
- Preston BT, Stevenson IR, Pemberton JM, Coltman DW, Wilson K, 2003. Overt and covert competition in a promiscuous mammal: the importance of weaponry and testes size to male reproductive success. *Proc. Biol. Sci.*, 270(1515): 633–640.
- Quan WL, Liu W, Zhou RQ, Chen R, Ma WH, Lei CL, Wang XP, 2017. Difference in diel mating time contributes to assortative mating between host plant-associated populations of *Chilo suppressalis*. *Sci. Rep.*, 7: 45265.
- Reinhardt K, 2007. Ejaculate size varies with remating interval in the grasshopper *Chorthippus parallelus erythropus* (Caelifera: Acrididae). *Eur. J. Entomol.*, 104(4): 725–729.
- Schulte-Hostedde AI, Millar JS, 2004. Intraspecific variation of testis size and sperm length in the yellow-pine chipmunk (*Tamias amoenus*): implications for sperm competition and reproductive success. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 55(3): 272–277.
- Spurgeon DW, Raulston JR, Lingren PD, Shaver TN, Proshold IF, Gillespie JM, 1994. Temporal aspects of sperm transfer and testis condition in Mexican rice borers (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Econ. Entomol.*, 87(2): 371–376.
- Su JW, Xuan WJ, Sheng CF, Ge F, 2003. The sex pheromone of rice stem borer, *Chilo suppressalis* in paddy fields: suppressing effect of mass trapping with synthetic sex pheromone. *Chin. J. Rice Sci.*, 17(2): 171–174. [苏建伟, 宣维健, 盛承发, 戈峰, 2003. 水稻二化螟性信息素技术: 大量诱捕二化螟的防治效果研究. *中国水稻科学*, 17(2): 171–174]
- Sun LJ, Dai HG, Yi WX, Lu YQ, 2002. The adult emergence rhythm and mating rhythm of rice host population and water-oats host population of the rice stem borer. *Entomol. Knowl.*, 39(6): 421–423. [孙丽娟, 戴华国, 衣维贤, 陆永钦, 2002. 二化螟水稻类群与茭白类群成虫羽化节律和交配节律研究. *昆虫知识*, 39(6): 421–423]
- Ueno H, Furukawa S, Tsuchida K, 2006. Difference in the time of mating activity between host-associated populations of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Entomol. Sci.*, 9(3): 255–259.
- Ueno K, Hayasaka T, 1997. Control effect on mating disruption of rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Pyralidae) with synthetic pheromones in paddy fields. *Annu. Rpt. Soc. Plant Protect. North Japan*, 48: 159–163.
- Vacas S, Alfaro C, Navarro-Llopis V, Zarzo M, Primo J, 2009. Study on the optimum pheromone release rate for attraction of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Econ. Entomol.*, 102(3): 1094–1100.
- Wang LC, 1981. Sex pheromone and sex gland development of *Chilo suppressalis*. *Entomol. Knowl.*, 18(1): 34–36. [王良臣, 1981. 二化螟性外激素与其腺体的发育. *昆虫知识*, 18(1): 34–36]
- Xiong XZ, Sun Y, Hu CF, 1984. Study on copulation habit of *Chilo suppressalis* Walker and usage of sex hormone to control the pest. *J. Southwest Agric. Univ.*, (4): 42–49. [熊兴占, 孙英, 胡崇富, 1984. 水稻二化螟的交配习性性与性诱治螟的研究. *西南农学院学报*, (4): 42–49]
- Yu Q, Yan Q, Dong SL, 2017. Effect of temperature on the sex pheromone communication of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 28(11): 3784–3788. [余棋, 闫祺, 董双林, 2017. 温度对二化螟性信息素通讯的影响. *应用生态学报*, 28(11): 3784–3788]
- Zuo W, Zhu ZJ, Zhu ZR, Du YJ, Chen C, Cheng JA, 2008. An efficiency comparison of several trapping equipments baited with sex pheromone for capturing male moths of rice striped stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *J. Nucl. Agr. Sci.*, 22(2): 238–241. [左文, 巩中军, 祝增荣, 杜永均, 陈灿, 程家安, 2008. 水稻二化螟性信息素和诱捕器组合的田间诱蛾效果比较. *核农学报*, 22(2): 238–241]