

西花蓟马聚集信息素组分在两种载体中的释放规律及引诱效果*

孙冉冉^{1,2**} 李晓维² 章金明² 张治军² 张立猛^{3,4} 吕要斌^{1,2***}

(1. 南京农业大学植物保护学院, 南京 210095; 2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 农产品质量安全危害因子与风险防控国家重点实验室(筹), 杭州 310021; 3. 云南省烟草公司玉溪市公司, 玉溪 653100; 4. 烟草行业病虫害生物防治工程研究中心, 玉溪 653100)

摘要 【目的】应用蓟马聚集信息素是蓟马害虫绿色防控的重要措施。本研究旨在明确载体中西花蓟马聚集信息素 2 种组分 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯的释放规律, 为开发有效的诱芯提供指导。【方法】应用固相微萃取 (SPME) 和气相色谱-质谱联用技术在室内测定 2 种载体中 2 种组分连续 7 d 的释放速率, 并测定 2 种组分最佳配比时, 2 种组分的释放比值; 通过田间诱集试验, 比较 2 种载体诱芯的田间诱集效果。【结果】结果表明, 橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中 2 种组分的释放规律相反。相同剂量下, 橡胶塞中 (S)-2-甲基丁酸橙花酯的释放速率高于 PVC 管中释放速率, 而橡胶塞中 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率低于 PVC 管中释放速率。当 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯 8:1 混合加入载体时, 橡胶塞中 2 种组分 2-7 d 的释放比值在 5.84-19.24 之间, 与西花蓟马聚集信息素组分的释放比值相似。而 PVC 管中 2 种组分 2-7 d 的释放比值相对稳定, 维持在 4 左右。田间诱集试验结果表明, 当中 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯比例为 8:1 时, 橡胶塞载体诱芯的诱集效果优于 PVC 管载体诱芯。【结论】橡胶塞是西花蓟马聚集信息素释放的合适载体。另外, 由于 PVC 管中 2 种组分释放比值相对稳定, 优化加样比例后其也可作为聚集信息素释放的候选载体。

关键词 聚集信息素; 橡胶塞; PVC 管; 释放模式; 诱集效果

Comparison of two types of aggregation pheromone dispensers for trapping *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae)

SUN Ran-Ran^{1,2**} LI Xiao-Wei² ZHANG Jin-Ming²
ZHANG Zhi-Jun² ZHANG Li-Meng^{3,4} LÜ Yao-Bin^{1,2***}

(1. Department of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-products, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Yuxi Tobacco Company, Yuxi 653100, China; 4. Engineering Center for Biological Control for Diseases and Pests in Tobacco Industry, Yuxi 653100, China)

Abstract [Objectives] To compare the performance of two types of pheromone dispensers for releasing two aggregation pheromones of *Frankliniella occidentalis* [neryl (S)-2-methylbutanoate and (R)-lavandulyl acetate] and thereby inform the choice of pheromones and pheromone dispensers for controlling these pests. [Methods] The release profiles of the 2 active compounds from pheromone dispensers with a rubber septum or hollow PVC fibers were compared in a laboratory over a 7-day period using with solid phase microextraction (SPME) and a gas chromatography-mass spectrometer (GC-MS). In addition, the effect of time on the release ratios of N(S)2MB to (R)-LA was investigated to determine the optimal blend of these two compounds in both types of dispenser. The trapping efficacy of both types of dispenser baited with an optimal blend of aggregation pheromone compounds was then compared in field trials. [Results] The laboratory experiments show that the

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2017YFD0200400); 浙江省重点研发计划 (2018C02032); 国家自然科学基金 (31570387, 31901885); 云南省烟草公司科技计划项目 (2017YN13)

**第一作者 First author, E-mail: 1253715529@qq.com

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

收稿日期 Received: 2019-12-25; 接受日期 Accepted: 2020-01-10

amount of neryl (S)-2-methylbutanoate and (R)-lavandulyl acetate released from the two different types of dispenser were markedly different. Over the 7-day experimental period dispensers with a rubber septa released more neryl (S)-2-methylbutanoate, and less (R)-lavandulyl acetate, than those with hollow PVC fibers. In addition, dispensers with rubber septa loaded with a ratio of 8 : 1 neryl (S)-2-methylbutanoate to (R)-lavandulyl acetate released these pheromones at a ratio ranged from 5.84 to 19.24, which is within the natural range of *F. occidentalis*. Dispensers with PVC hollow fibers had a relatively stable release ratio of about 4. Furthermore, field trials indicate that dispensers with rubber septa performed better than those with hollow PVC fibers with respect to trapping *F. occidentalis* adults. **[Conclusion]** These results suggest that dispensers with rubber septa are superior to those with hollow PVC fibres for dispensing the aggregation pheromones of *F. occidentalis*. However, hollow PVC fibers can also perform well if the ratio of pheromones is optimized when the dispenser is loaded.

Key words aggregation pheromone; rubber septa; PVC hollow fibers; release pattern; trap catches

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande) 是农作物和园艺作物上的重要害虫,其通过取食植物叶片和/或花给作物造成直接危害,同时也是多种植物病毒的传播介体,如番茄斑萎病毒 (Tomato spotted wilt virus, TSWV), 给寄主植物造成更严重的危害 (Kirk and Terry, 2003; Morse and Hoddle, 2006; Reitz, 2009)。西花蓟马原产于北美洲,通过贸易和旅游等途径在全世界蔓延,目前已遍布世界各地,成为新入侵地重要的害虫 (Kirk and Terry, 2003)。西花蓟马于 2003 年在我国北京首次报道 (张友军等, 2003), 之后迅速蔓延,目前已在多个省份定殖 (吕要斌等, 2011)。目前,西花蓟马的防控主要依赖于化学防治 (Broughton and Herron, 2007; Funderburk, 2009; Wu *et al.*, 2018)。化学农药的大量使用导致西花蓟马对多种农药产生抗药性 (Gao *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016)。因此,西花蓟马新型绿色防控措施的研发迫在眉睫。

目前,西花蓟马已有多种信息素被鉴定,包括报警信息素、接触信息素和聚集信息素 (Teerling *et al.*, 1993; Hamilton *et al.*, 2005; Olaniran *et al.*, 2013), 其中聚集信息素研究最为广泛。聚集信息素是由西花蓟马雄虫释放、对雌雄成虫均具有引诱作用的信息化合物,其主要活性成分为 (S)-2-甲基丁酸橙花酯 [neryl (S)-2-methylbutanoate] 和 (R)-乙酸薰衣草酯 [(R)-lavandulyl acetate] (Hamilton *et al.*, 2005)。(S)-2-甲基丁酸橙花酯在田间引诱试验中对西花蓟马雌雄虫均具有较好的引诱效果 (Hamilton *et al.*, 2005)。相反,(R)-乙酸薰衣草酯在田间对

西花蓟马雌雄虫均无引诱效果 (Hamilton *et al.*, 2005)。国内学者在田间引诱试验中发现,虽然 (R)-乙酸薰衣草酯单独使用时没有显著的诱集活性,但对 (S)-2-甲基丁酸橙花酯具有明显的增效作用,2 种化合物的比例同样影响引诱效果,2 种组分最佳比例为 1 : 8 (吕要斌等, 2014; 耿双双等, 2017; Li *et al.*, 2019)。

信息素活性组分持续稳定的释放是应用昆虫信息素进行害虫监测和诱杀的关键 (Vrkoč *et al.*, 1988)。通常情况下,昆虫信息素组分具有挥发性,在自然条件下易挥发和降解。因此需要借助缓释载体来避免信息素组分受氧化、光照和其他环境因子的影响,并保持其稳定释放 (Vrkoč *et al.*, 1988)。信息素缓释载体的种类多样,其中橡胶塞载体和 PVC 管载体应用最为广泛 (Vrkoč *et al.*, 1988; Shaver *et al.*, 1989; Heuskin *et al.*, 2011)。由于不同载体的物理化学特性不同,不同缓释载体中昆虫信息素组分的释放模式具有差异,进而影响信息素在田间的诱集效果 (Cork *et al.*, 2001)。

本研究的目的在于研究西花蓟马聚集信息素 2 种组分 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中的释放规律,为开发有效的诱芯提供指导。首先,本研究在室内测定了橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯 7 d 的释放速率。另外,测定了 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯 8 : 1 混合加入不同载体后,2 种组分的释放比值随时间的变化规律。最后,测定了 2 种组分最佳配比下 2 种载体的田间诱集效果。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 聚集信息素 西花蓟马聚集信息素组分 (S)-2-甲基丁酸橙花酯[neryl (S)-2-methylbutanoate]和(R)-乙酸薰衣草酯[(R)-lavandulyl acetate]按照 Hamilton 等(2005)方法合成, 纯度 $\geq 98\%$, 旋光异构体 $\geq 99\%$ 。

1.1.2 载体 选择 2 种市场上广泛应用的诱芯载体绿色天然橡胶塞和 PVC 管 (Polyvinyl chloride, 聚氯乙烯)。绿色天然橡胶塞直径 1 cm、长 1.5 cm, 购于北京中捷四方生物科技有限公司, 使用前用正己烷浸泡 24 h, 于 80 °C 烘箱中烘干 2 h, 使正己烷挥发干净后装入密封玻璃瓶中备用; PVC 管外径 1.2 mm、壁厚 0.25 mm、长 8 cm, 购于杨凌翔林农业科技化工有限公司。

1.2 聚集信息素组分标准曲线的制作

利用正己烷溶液将 (S)-2-甲基丁酸橙花酯稀释为系列浓度 0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、1.2、1.6 和 1.8 ng/ μL , 将 (R)-乙酸薰衣草酯稀释为系列浓度 0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.0 和 1.2 ng/ μL , 分别取 2 种聚集信息素组分每个浓度的溶液 1 μL 注射到气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS, SHIMADZU GC-MS-QP2010 Plus) 中, 测定总离子流图中该物质的色谱峰面积, 分别制定 2 种聚集信息素组分剂量与其色谱峰面积的标准曲线。

GC-MS 联用仪工作条件: 色谱柱 Rxi-5MS, 长 30 m $\times$ 内径 0.32 mm $\times$ 膜厚 0.25 μm ; 无分流进样; 程序升温: 40 °C 保持 2 min, 以 10 °C/min 升到 120 °C 后, 以 6 °C/min 升到 180 °C, 再以 10 °C/min 升到 250 °C, 保持 1 min; 进样口温度为 200 °C; 载气为 He (>99.999%); 离子源 EI, 离子源温度 230 °C; 四级杆温度 150 °C; 电子能量 70 eV; 扫描质量范围 35-320 amu (Zhang *et al.*, 2011)。

1.3 西花蓟马聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放规律

应用固相微萃取 (Head space solid-phase

microextraction, HS-SPME) 和气相色谱-质谱联用技术 (Gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS) 测定载体中聚集信息素组分的释放规律。测定载体中聚集信息素释放速率的最佳条件为萃取时间 30 min、剂量 100 μg (李晓维等, 2020)。用正己烷将 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯稀释成 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的溶液, 取 100 μL 分别单独加入橡胶塞和 PVC 管 2 种载体, 放置在温度为 (25 $\pm$ 1) °C、相对湿度为 (60 $\pm$ 5) %、光照周期为 14 L: 10 D 的光照培养箱中, 分别于存放 2 h、2 d、3 d、4 d、5 d、6 d 和 7 d 后测定 SPME 萃取头 (100 μm , Polydimethylsiloxane Coating, Supelco 公司) 萃取的载体释放的聚集信息素组分。萃取时, 首先把待测的带样载体放入 20 mL 的封闭样品瓶中, 将萃取头刺穿样品瓶盖上的胶垫插入到释放空间萃取载体释放的聚集信息素组分。每种组分 2 种载体均设 4 次重复。之后, 通过 GC-MS 联用仪测定 SPME 萃取头对载体释放的聚集信息素的萃取量。基于 GC-MS 联用仪分析得到的聚集信息素的总离子流图色谱峰面积, 根据 1.2 所得标准曲线计算 SPME 萃取头对聚集信息素的萃取量, 并计算单位时间内聚集信息素的释放速率。萃取前, 将 SPME 萃取头在气相色谱进样口中于 200 °C 活化 1 h, 以去除萃取头中吸附的杂质。

1.4 西花蓟马聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放比值

前期研究发现, 西花蓟马聚集信息素田间诱集最佳配比为 10 000 ng (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 1 250 ng (R)-乙酸薰衣草酯混合 (耿双双等, 2017; Li *et al.*, 2019)。将 2 种组分最佳配比加入橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中, 放置在温度为 (25 $\pm$ 1) °C、相对湿度为 (60 $\pm$ 5) %、光照周期为 14 L: 10 D 的光照培养箱中, 分别于存放 2 h、2 d、3 d、4 d、5 d、6 d 和 7 d 后测定 SPME 萃取头萃取的载体释放的聚集信息素 2 种组分, 萃取方法同 1.3, 每种载体设 5 次重复。基于 GC-MS 联用仪分析得到的聚集信息素的总离子流图色谱峰面积, 按照 1.3 中的方法计算单位时间内 2 种聚集信息素组分的释放速率, 并计算 2 种聚集

信息素组分的释放比值。

1.5 橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中西花蓟马聚集信息素的田间诱集效果

田间引诱试验于 2018 年 8 月在河北省张家口市崇礼县石嘴子乡 (40°59'41"N, 115°0'40"E) 的甜椒大棚 (长×宽×高=80 m×11 m×2.5 m) 中进行。将西花蓟马聚集信息素最佳配比[10 000 ng 的 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 1 250 ng 的 (R)-乙酸薰衣草酯]加入橡胶塞和 PVC 管载体中, 固定在黄色诱虫板 (长×宽=25 cm×20 cm) 中央, 挂于植株上 10 cm 处。没有聚集信息素的黄板为空白对照。3 个处理各重复 20 次。将 3 个处理随机排列在大棚中, 不同诱虫板间相离 1.5 m, 最边缘诱虫板距大棚边缘约 1.5 m。挂板后第 2、第 4 及第 7 天记录黄板上累计诱集的西花蓟马数量。

1.6 数据处理

试验数据应用 SPSS 16.0 软件进行统计分析。每种聚集信息素组分在 2 种载体中的释放速率比较采用一般线性模型中的重复测量方差分析。2 种载体中 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯释放比值比较采用一般线性模型中的重复测量方差分析。田间诱集试验中 3 个处理诱虫数量的比较采用单因素方差分析, 多重比较采用 Dunnett's 法。

2 结果与分析

2.1 西花蓟马聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放规律

重复测量分析结果显示, 载体类型和存放时间均对 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率有显著影响。尽管 (S)-2-甲基丁酸橙花酯的释放速率随存放时间的延长逐渐降低 (Greenhouse-Geisser: $F=13.255$, $df=1.517$, $P=0.003$), 其在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中的释放规律显著不同 ($F=308.413$, $df=1$, $P<0.0001$) (图 1: A)。PVC 管载体中的初始释放速率 (0.28 ng/h) 与橡胶塞载体的初始释放速率 (0.25 ng/h) 相近) (图 1: A)。从第 2 天起,

PVC 管载体中的释放速率迅速下降至低于橡胶塞载体中的释放速率。2-7 d 之间, PVC 管载体中的释放速率均低于橡胶塞载体中的释放速率 (图 1: A)。

橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中 (R)-乙酸薰衣草酯的释放规律与 (S)-2-甲基丁酸橙花酯不同。尽管 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率随存放时间的延长逐渐降低 (Greenhouse-Geisser: $F=45.112$, $df=1.595$, $P<0.0001$), 其在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中的释放规律显著不同 ($F=160.017$, $df=1$, $P<0.0001$) (图 1: B)。7 d 时间内, PVC 管中 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率均显著高于橡胶塞中 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率 (图 1: B)。

另外, 2 种载体中, 相同剂量的 (R)-乙酸薰衣草酯的释放速率显著高于 (S)-2-甲基丁酸橙花酯的释放速率 (图 1: A, B)。

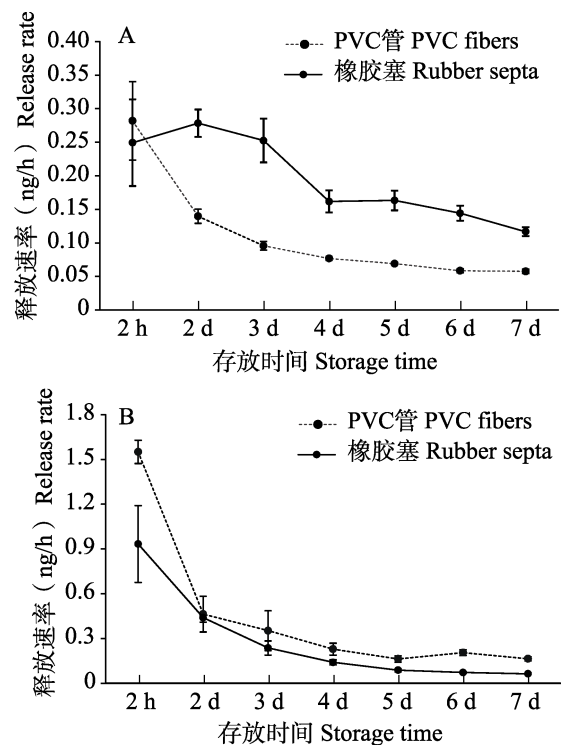


图 1 聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放规律

Fig. 1 The release dynamics of the two aggregation pheromone compounds loaded in rubber septa and PVC hollow fibers

A. (S)-2-甲基丁酸橙花酯; B. (R)-乙酸薰衣草酯。
A. Neryl (S)-2-methylbutanoate; B. (R)-lavandulyl acetate.

2.2 西花蓟马聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放比值

重复测量分析结果显示, 载体类型 ($F=210.307, df=1, P<0.0001$) 和存放时间 (Greenhouse-Geisser: $F=10.412, df=1.624, P=0.003$) 均对 (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯的释放比值有显著影响。橡胶塞载体中, 存放 2 h 时, (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯的释放比值为 1.72, 之后 2 组分的释放比值随存放时间逐渐变大: (图 2: A)。存放 2、3 和 4 d 的释放比值分别为 5.84、8.10 和 12.8。存放 5-7 d 期间, 释放比值到达最大值 (19.2) 后稍微回落 (图 2: A)。PVC 管载体中, 存放 2 h 时, (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯的释放比值为 1.29。存放 2 d 时, 释放比值增至 4.05,

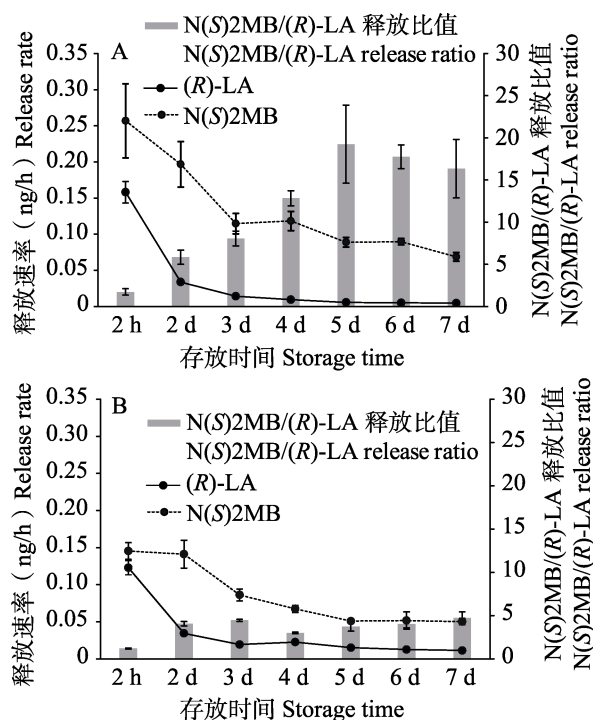


图 2 聚集信息素 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中释放比值

Fig. 2 The release amount and ratio of N(S)2MB to (R)-LA [N(S)2MB/(R)-LA] for the optimal blend of N(S)2MB and (R)-LA (10 000 ng: 1 250 ng) from two different dispensers

A. 橡胶塞; B. PVC 管。N(S)2MB: (S)-2-甲基丁酸橙花酯; (R)-LA: (R)-乙酸薰衣草酯。

A. Rubber septa; B. PVC hollow fibers. N(S)2MB: Neryl (S)-2-methylbutanoate; (R)-LA: (R)-lavandulyl acetate.

之后随存放时间的延长在 4 左右波动 (图 2: B) 与橡胶塞载体相比, PVC 管载体中 2 组分释放比值相对稳定。

2.3 橡胶塞和 PVC 管 2 种载体中西花蓟马聚集信息素的田间诱集效果

田间诱集试验结果表明, 不同处理诱虫板上诱集到的西花蓟马数量在第 2 天 ($F_{2,57}=5.452, P=0.007$)、第 4 天 ($F_{2,57}=4.575, P=0.014$) 和第 6 天 ($F_{2,57}=3.311, P=0.044$) 均具有显著差异。具体来说, 挂有橡胶塞诱虫板的诱虫板诱集到的西花蓟马数量最高, 与对照诱虫板诱虫数量相比, 挂有橡胶塞载体的诱虫板的累计诱虫数量分别第 2、第 4 和第 7 天增加 43.3%、35.8% 和 25% (图 3)。然而, 挂有 PVC 管载体诱虫板的诱虫板与对照诱虫板的诱虫数量没有显著差异 (图 3)。

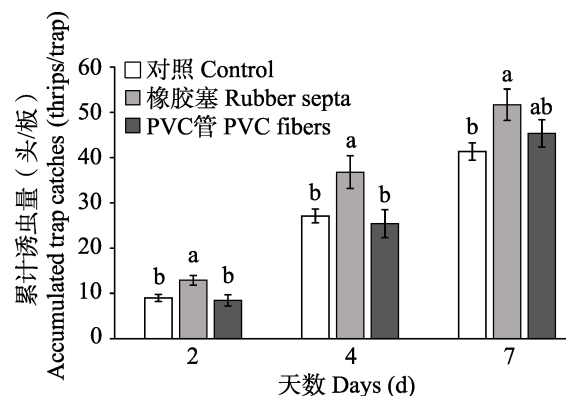


图 3 不同载体中西花蓟马聚集信息素的田间总诱虫量
Fig. 3 Total number of *Frankliniella occidentalis* adults caught in traps baited with different dispensers loaded with aggregation pheromones

柱上标有不同字母表示同一天不同

处理间具有显著差异。

Histograms with different letters indicate significant difference among treatments on the same day.

3 讨论

本研究结果表明, 在室内恒定条件下, (S)-2-甲基丁酸橙花酯和 (R)-乙酸薰衣草酯 2 种组分在橡胶塞和 PVC 管载体中的释放规律呈相反趋势。载体中信息素的释放模式与化合物的物理特性 (Alfarocid *et al.*, 2009) 和载体的特性 (基

质类型、大小、形状、厚度和信息化合物在基质中的分布等)共同决定(Golub *et al.*, 1983; Hofmeyr and Burger, 1995; Stipanovic *et al.*, 2004)。有研究报道,化合物的分子大小、链长和双键位置会影响载体中信息化合物的释放(Butler and McDonough, 1981)。(S)-2-甲基丁酸橙花酯是五碳羧酸和单萜醇形成的酯类化合物,相对分子质量(MW)为236,而(R)-乙酸薰衣草酯是十碳酯类化合物,相对分子质量(MW)为196。上述差异可能导致2种组分的释放模式不同。本研究结果证实以上推测,相同剂量下,2种载体中(R)-乙酸薰衣草酯的释放速率显著高于(S)-2-甲基丁酸橙花酯。另外,本研究中所用的橡胶塞载体和PVC管载体具有不同的结构。PVC是一种非交联聚合物,而橡胶塞则具有交联结构。橡胶中的交联结构对不同化合物的缓释效果有所不同(Butler and McDonough, 1981)。2种载体的不同结构和与信息素组分的互作可能是导致本研究中2种聚集信息素组分释放规律不同的原因。

本研究结果发现,2种载体中(S)-2-甲基丁酸橙花酯和(R)-乙酸薰衣草酯的释放模式均符合First-order模型。这种释放模式在多种昆虫信息素中均有报道,如苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (Brown *et al.*, 1992; McDonough *et al.*, 1992; Kehat *et al.*, 1994)、小菜蛾 *Plutella xylostella* (Möttus *et al.*, 1997)和可可荚螟 *Conopomorpha cramerella* (Zhang *et al.*, 2008)。在First-order释放模型,信息素组分的释放量开始时最大,随时间增长迅速降低,这种释放模式无法保证害虫发生期间一直能够释放有效的信息素量。因此,应用信息素的最佳方案为低剂量多次使用而不是一次高剂量使用(McDonough *et al.*, 1992)。

明确西花蓟马聚集信息素2种组分的释放差异对提高诱芯的诱集效率具有重要意义。前期研究发现2种组分混合比例影响田间诱集效果,最佳配比为(S)-2-甲基丁酸橙花酯和(R)-乙酸薰衣草酯8:1(吕要斌等, 2014; 耿双双等, 2017; Li *et al.*, 2019)。然而,由于2种组分的释放速率具有显著差异,制备诱芯时应考虑2

种组分的释放比例,而不是加入诱芯的比例。本研究结果表明,当(S)-2-甲基丁酸橙花酯和(R)-乙酸薰衣草酯8:1加入载体后,2组分的释放比值随时间发生变化。加样后2 h,2组分释放比值在2种载体中均最低(橡胶塞载体1.72, PVC管载体1.19)。从第2天开始,2组分释放比值逐渐升高。橡胶塞载体中,2组分2-7 d的释放比值在5.84-19.24间,而PVC管载体中,2组分2-7 d的释放比值相对稳定,为4左右。橡胶塞载体中的2组分释放比例与西花蓟马释放的2组分比例范围相近(李晓维等, 2017)。这一结果解释了本研究的田间诱集结果,7 d时间内,挂有橡胶塞诱芯载体的诱虫板的诱集效果优于挂有PVC管载体的诱虫板。

橡胶塞载体的应用效果优于其他载体类型的案例在多种害虫信息素应用中有报道,如覆盆子瘿蚊 *Resseliella theobaldi* (Hall *et al.*, 2009)、苹果瘿蚊 *Dasineura mali* (Cross *et al.*, 2009)、麦红吸浆虫 *Sitodiplosis mosellana* (Bruce *et al.*, 2007)。橡胶塞载体在鳞翅目昆虫信息素中广泛应用(Kehat *et al.*, 1994; Möttus *et al.*, 1997)。以橡胶塞作为载体的西花蓟马聚集信息素主要组分(S)-2-甲基丁酸橙花酯在欧美已经商业化,产品名称分别为Thripline™(Bioline Agrosciences Ltd)和ThriPher(Biobest Belgium N.V.),并在多种作物系统中能够显著降低西花蓟马的种群数量(Covaci *et al.*, 2012; Sampson and Kirk, 2013; Lucas *et al.*, 2014; Sampson, 2014; Broughton *et al.*, 2015; Kirk, 2017)。尽管本研究结果证明了加有西花蓟马聚集信息素2种组分最佳配比的橡胶塞诱芯载体具有显著的引诱效果,橡胶塞载体中2组分的释放比值随时间波动很大,这可能是导致田间引诱效果不稳定的重要原因。而对于PVC管载体而言,虽然在本研究中2种组分混合比例下,2组分的释放比值不在西花蓟马自然释放的比例范围内,但2种组分释放比值相对稳定。将来通过调整加入PVC管中2种组分的混合比例,可使2组分的释放比值也与西花蓟马2种聚集信息素组分释放比例范围相近。另外,PVC管载体是封闭的中空

微管,管中的信息素组分能够不受空气、水和光等外界条件的影响,从而降低信息素组分的氧化和降解。因此,优化 2 种组分的混合比例后,PVC 管载体也可作为西花蓟马聚集信息素的候选载体。

参考文献 (References)

- Alfarcid E, Esparciaalcázar AI, Moya P, Femeniaferrer B, Sharman K, Merelo JJ, 2009. Modeling pheromone dispensers using genetic programming//Evoworkshops 2009 on Applications of Evolutionary Computing: Evocomnet, Evoenvironment, Evofin, Evogames, Evohot, Evoiasp, Evointeraction, Evomusart, Evonum, Evostoc, Evotranslog, Tübingen, Germany, April 15-17. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag. 635-644.
- Broughton S, Cousins DA, Rahman T, 2015. Evaluation of semiochemicals for their potential application in mass trapping of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) in roses. *Crop Protection*, 67: 130-135.
- Broughton S, Herron GA, 2007. *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) chemical control: Insecticide efficacy associated with the three consecutive spray strategy. *Australian Journal of Entomology*, 46(2): 140-145.
- Brown DF, Knight AL, Howell JF, Sell CR, Krysan JL, Weiss M, 1992. Emission characteristics of a polyethylene pheromone dispenser for mating disruption of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Economic Entomology*, 85(3): 910-917.
- Bruce TJ, Hooper AM, Ireland L, Jones OT, Martin JL, Smart LE, Oakley J, Wadhams LJ, 2007. Development of a pheromone trap monitoring system for orange wheat blossom midge, *Sitodiplosis mosellana*, in the UK. *Pest Management Science*, 63(1): 49-56.
- Butler LI, McDonough LM, 1981. Insect sex pheromones: Evaporation rates of alcohols and acetates from natural rubber septa. *Journal of Chemical Ecology*, 7(3): 627-633.
- Cork A, Alam SN, Das A, Das CS, Ghosh GC, Farman DI, Hall DR, Maslen NR, Vedham K, Phythian SJ, Rouf FMA, Srinivasan K, 2001. Female sex pheromone of brinjal fruit and shoot borer, *Leucinodes orbonalis* blend optimization. *Journal of Chemical Ecology*, 27(9): 1867-1877.
- Covaci A, Oltean I, Pop A, 2012. Evaluation of pheromone lure as mass-trapping tools for western flower thrips. *Bulletin UASVM Agriculture*, 69(1): 333-334.
- Cross JV, Hall DR, Shaw P, Anfora G, 2009. Exploitation of the sex pheromone of apple leaf midge *Dasineura mali* Kieffer (Diptera: Cecidomyiidae): Part 2. Use of sex pheromone traps for pest monitoring. *Crop Protection*, 28(2): 128-133.
- Funderburk J, 2009. Management of the western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) in fruiting vegetables. *Florida Entomologist*, 92(1): 1-6.
- Gao YL, Lei ZR, Reitz SR, 2012. Western flower thrips resistance to insecticides: Detection, mechanisms and management strategies. *Pest Management Science*, 68(8): 1111-1121.
- Geng SS, Li XW, Zhang JM, Zhang ZJ, Lu YB, 2017. Field testing of aggregation pheromones of *Frankliniella occidentalis* and *F. intonsa* (Thysanoptera: Thripidae) and their roles in interspecific interaction. *Acta Entomologica Sinica*, 60(12): 1447-1456. [耿双双, 李晓维, 章金明, 张治军, 吕要斌, 2017. 西花蓟马和花蓟马聚集信息素田间引诱试验及其在种间互作中的作用. 昆虫学报, 60(12): 1447-1456.]
- Golub M, Weatherston J, Benn MH, 1983. Measurement of release rates of gossypure from controlled release formulations by mini-airflow method. *Journal of Chemical Ecology*, 9(3): 323-333.
- Hall DR, Farman DI, Cross JV, Pope TW, Ando T, Yamamoto M, 2009. (S)-2-Acetoxy-5-Undecanone, female sex pheromone of the raspberry cane midge, *Resseliella theobaldi* (Barnes). *Journal of Chemical Ecology*, 35(2): 230-242.
- Hamilton JGC, Hall DR, Kirk WDJ, 2005. Identification of a male-produced aggregation pheromone in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Chemical Ecology*, 31(6): 1369-1379.
- Heuskin S, Verheggen FJ, Haubruge E, Wathélet JP, Lognay G, 2011. The use of semiochemical slow-release devices in integrated pest management strategies. *Biotechnologie Agronomie Societe et Environnement*, 15(3): 459-470.
- Hofmeyr JH, Burger BV, 1995. Controlled-release pheromone dispenser for use in traps to monitor flight activity of false codling moth. *Journal of Chemical Ecology*, 21(3): 355-363.
- Kehat M, Anshelevich L, Dunkelblum E, Fraishat P, Greenberg S, 1994. Sex pheromone traps for monitoring the codling moth: Effect of dispenser type, and field aging of dispenser, pheromone dose and type of trap on male captures. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 70(1): 55-62.
- Kirk WDJ, 2017. The aggregation pheromones of thrips (Thysanoptera) and their potential for pest management. *International Journal of Tropical Insect Science*, 37(2): 41-49.
- Kirk WDJ, Terry LI, 2003. The spread of the western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande). *Agricultural & Forest Entomology*, 5(4): 301-310.
- Li DG, Shang XY, Reitz S, Nauen R, Lei ZR, Lee SH, Gao YL, 2016. Field resistance to spinosad in western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Integrative Agriculture*, 15(12): 2803-2808.
- Li X, Geng S, Zhang Z, Zhang J, Li W, Huang J, Lin W, Bei Y, Lu Y, 2019. Species-specific aggregation pheromones contribute to

- coexistence in two closely related thrips species. *Bulletin of Entomological Research*, 109(1): 119–126.
- Li XW, Sun RR, Zhang JM, Zhang ZJ, Zhang LM, Lü YB, 2020. The release rates of thrips aggregation pheromones from two dispensers and the selection of storage temperature. *Journal of Plant Protection*, 47(1): 26–34. [李晓维, 孙冉冉, 章金明, 张治军, 张立猛, 吕要斌, 2020. 载体中蓟马聚集信息素组分的释放速率测定及其储藏温度筛选. 植物保护学报, 47(1): 26–34.]
- Li XW, Sun RR, Zhang JM, Zhang ZJ, Lü YB, 2017. Mating behavior and aggregation pheromone release rhythm of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) adults during photophase. *Acta Entomologica Sinica*, 60(12): 1439–1446. [李晓维, 孙冉冉, 章金明, 张治军, 吕要斌, 2017. 西花蓟马成虫昼间交配习性和聚集信息素释放节律. 昆虫学报, 60(12): 1439–1446.]
- Lucas A, Cerón AH, Pallarés C, Abellán A, Cano JJ, Llamas M, 2014. Posibilidades del control tecnológico de trips (*Frankliniella occidentalis*) en uva de mesa. Experiencias en la región de Murcia. *Revista De Fruticultura*, 9: 32–42.
- Lü YB, Zhang JM, Li WD, Zhang ZJ, Bei YW, Zhang PJ, Huang F, Lin WC, 2015. Attractants of Western Flower Thrips. China Patent. CN 104381255 A. 2015-03-04. [吕要斌, 章金明, 郇卫弟, 张治军, 贝亚维, 张蓬军, 黄芳, 林文彩, 2014. 一种用于引诱西花蓟马的试剂. 中国. CN 104381255 A. 2014-11-02.]
- Lü YB, Zhang ZJ, Wu QJ, Du YZ, Zhang HR, Yu Y, Wang ED, Wang MH, Wang MQ, Tong XL, Lv LH, Tan XQ, Fu WD, 2011. Research progress of the monitoring, forecast and sustainable management of invasive alien pest *Frankliniella occidentalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 488–496. [吕要斌, 张治军, 吴青君, 杜予州, 张宏瑞, 于毅, 王恩东, 王鸣华, 王满国, 童晓立, 吕利华, 谭新球, 付卫东, 2011. 外来入侵害虫西花蓟马防控技术研究与示范. 应用昆虫学报, 48(3): 488–496.]
- Móttus E, Nõmm V, Williams IH, Liblikas I, 1997. Optimization of pheromone dispensers for diamondback moth *Plutella xylostella*. *Journal of Chemical Ecology*, 23(9): 2145–2159.
- Mcdonough LM, Aller WC, Knight AL, 1992. Performance characteristics of a commercial controlled-release dispenser of sex pheromone for control of codling moth (*Cydia pomonella*) by mating disruption. *Journal of Chemical Ecology*, 18(12): 2177–2189.
- Morse JG, Hoddle MS, 2006. Invasion biology of thrips. *Annual Review of Entomology*, 51: 67–89.
- Olaniran OA, Sudhakar AVS, Drijfhout FP, Dublon IAN, Hall DR, Hamilton JGC, Kirk WDJ, 2013. A male-predominant cuticular hydrocarbon, 7-methyltricosane, is used as a contact pheromone in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Chemical Ecology*, 39(4): 559–568.
- Reitz SR, 2009. Biology and ecology of the western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae): The making of a pest. *Florida Entomologist*, 92(1): 7–13.
- Sampson C, 2014. Management of the western flower thrips on strawberry. PhD dissertation. UK: Keele University.
- Sampson C, Kirk WDJ, 2013. Can mass trapping reduce thrips damage and is it economically viable? Management of the Western flower thrips in strawberry. *PLoS ONE*, 8(11): e80787.
- Shaver TN, Hendricks DE, Jr LJ, 1989. Influence of (Z)-11-hexadecen-1-ol on field performance of *Heliothis virescens* pheromone in a PVC dispenser as evidenced by trap capture. *Journal of Chemical Ecology*, 15(5): 1637–1644.
- Stipanovic AJ, Hennessy PJ, And FXW, Takahashi Y, 2004. Microparticledispensers for the controlled release of insect pheromones. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 52(8): 2301–2308.
- Teerling CR, Pierce HD, Borden JH, Gillespie DR, 1993. Identification and bioactivity of alarm pheromone in the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Journal of Chemical Ecology*, 19(4): 681–697.
- Vrkoč J, Konečný K, Valterová I, Hrdý I, 1988. Rubber substrates and their influence on isomerization of conjugated dienes in pheromone dispensers. *Journal of Chemical Ecology*, 14(5): 1347–1358.
- Wang ZH, Gong YJ, Jin GH, Li BY, Chen JC, Kang ZJ, Zhu L, Gao YL, Reitz S, Wei SJ, 2016. Field-evolved resistance to insecticides in the invasive western flower thrips *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) in China. *Pest Management Science*, 72(7): 1440–1444.
- Wu S, Tang L, Fang F, Li D, Yuan X, Lei Z, Gao Y, 2018. Chapter seven-screening, efficacy and mechanisms of microbial control agents against sucking pest insects as thrips// Smagghe G(ed.). *Advances in Insect Physiology*. London: Academic Press. 201–219.
- Zhang A, Kuang LF, Maisin N, Karumuru B, Hall DR, Virdiana I, Lambert S, Bin PH, Wang S, Hebban P, 2008. Activity evaluation of cocoa pod borer sex pheromone in cacao fields. *Environmental Entomology*, 37(3): 719–724.
- Zhang PJ, Zhu XY, Lu YB, 2011. Behavioural and chemical evidence of a male-produced aggregation pheromone in the flower thrips *Frankliniella intonsa*. *Physiological Entomology*, 36(4): 317–320.
- Zhang YJ, Wu QJ, Xu BY, Zhu GR, 2003. The occurrence of a dangerous alien invasive pest, western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*), in Beijing. *Plant Protection*, 29(4): 58–59. [张友军, 吴青君, 徐宝云, 朱国仁, 2003. 危险性外来入侵生物——西花蓟马在北京发生危害. 植物保护, 29(4): 58–59.]