性信息素迷向丝的优化及其对梨小食心虫的田间防效

牛国飞 韦小雪 王 怡 李 捷 马瑞燕* 孔维娜*

（山西农业大学植物保护学院，农业有益生物利用与生态农药创制山西省重点实验室，太原 030031）

摘要：为提升性信息素迷向技术对梨小食心虫*Grapholita molesta*的防效，采用两种载体（聚乙烯和聚氯乙烯）、两种抗氧化剂（2，6-二叔丁基对甲酚和没食子酸丙酯）和两种抗紫外线剂（UV-531和UV-P）进行正交组合，自制4种性信息素迷向丝，以两种市售性信息素迷向丝为对照，分别在山西省临汾市蒲县和晋中市太谷区开展田间试验，测定这6种性信息素迷向丝对诱蛾量、迷向率、折梢率、防效的影响以及性信息素的田间释放速率和稳定性。结果显示：4种自制性信息素迷向丝显著降低了蒲县（31~314头）和太谷区（3~18头）桃园的诱蛾量，迷向率可达71%~98%，相当或高于两种市售性信息素迷向丝。在蒲县桃园，自制性信息素迷向丝#1和#3以及市售长持效期性信息素迷向丝可降低折梢率（5%以下），防效达50%以上；在太谷区桃园，6种性信息素迷向丝均可显著降低折梢率（≤5%），防效达60%以上。6种性信息素迷向丝中物质的释放速率为0.249~0.522 mg/d。田间试验结束后，4种自制性信息素迷向丝中剩余性信息素主要组分顺-8-十二碳烯醇醋酸酯与初始相对含量差异较小。正交极差分析显示抗氧化剂对迷向丝田间防效的贡献高于抗紫外线剂；载体作用因地区不同存在差异，在蒲县的贡献最小，在太谷区的贡献最大。综合各项指标，试验最佳载体、抗氧化剂和抗紫外线剂组合为聚乙烯管、2，6-二叔丁基对甲酚和UV-531（自制性信息素迷向丝#1）。

关键词：梨小食心虫；性信息素迷向丝；载体；抗氧化剂；抗紫外线剂；田间防效

Optimization of sex pheromone-based mating disruption products and their field control efficacy against oriental fruit moth *Grapholita molesta*

Niu Guofei Wei Xiaoxue Wang Yi Li Jie Ma Ruiyan* Kong Weina*

（Shanxi Key Laboratory of Bioagent Utilization and Eco-Pesticide Innovation, College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi Province, China）

Abstract: To improve the control efficacy of sex pheromone-based mating disruption (MD) against oriental fruit moth *Grapholita molesta*, an orthogonal design was employed using two carriers (polyethylene and polyvinyl chloride), two antioxidants (butylated hydroxytoluene and propyl gallate), and two UV-protective agents (UV-531 and UV-P) to formulate four homemade MD dispensers. Two commercially available MD products were used as controls. Field experiments were conducted in Pu County (Linfen City) and Taigu District (Jinzhong City) of Shanxi Province to evaluate the effects of the six MD products on moth catches, mating disruption rate, shoot infestation ratio, and field control efficacy, as well as the pheromone release rate and stability. The results showed that the four homemade MD products significantly reduced moth catches in peach orchards in Pu County (31-314 moths) and Taigu

基金项目：山西省重点研发计划项目（202302140601011），国家现代农业（梨）产业技术体系资助项目（CARS-28），山西省科技创新人才团队专项（202304051001006）

* 通信作者（Authors for correspondence），E-mail：kwnlll@126.com，mary@sxau.edu.cn

收稿日期：2025-06-03

District (3−18 moths). The mating disruption rate reached 71%−98%, comparable to or exceeding that of the two commercial products. Regional differences were observed in field control efficacy. In Pu County, homemade MD products #1 and #3, as well as the commercial long-lasting MD product, reduced shoot infestation to below 5%, with control efficacy exceeding 50%. In Taigu District, all six MD products significantly reduced shoot infestation to 5% or lower, with control efficacy greater than 60%. The pheromone release rate of the six MD products ranged from 0.249 mg/d to 0.522 mg/d. After field deployment, the remaining relative content of the main pheromone component (cis-8-dodecenyl acetate) in the four homemade products showed little deviation from its initial level. Orthogonal range analysis indicated that antioxidants contributed more to field efficacy than UV-protective agents. The effect of carriers varied by region, showing the lowest contribution in Pu County but the highest in Taigu District. Based on all indicators, the optimal combination of carrier, antioxidant, and UV-protective agent was polyethylene tubing, butylated hydroxytoluene, and UV-531 (homemade MD product #1).

Key words: *Grapholita molesta*; sex pheromone-based mating disruption; carrier; antioxidant; UV-protective agent; field control efficacy

梨小食心虫 *Grapholita molesta* 属鳞翅目卷蛾科，是全球范围内主要的蛀果害虫，主要为害桃、梨、苹果等蔷薇科果树的果实和嫩梢（Kong et al.，2020a）。该虫1年发生多代，且世代重叠严重，由于其钻蛀及寄主转移等生物学特性，给防治工作带来了较大难度（Wang et al.，2025）。目前，梨小食心虫的防控主要依赖化学农药，但普遍存在用药次数多、用药量大的问题（冉红凡等，2016）。长期频繁使用化学农药，不仅导致害虫抗药性逐年增强，防治效果逐渐减弱，还会杀伤天敌，造成农药残留超标，严重影响食品安全和生态环境（冉红凡等，2016）。

近年来，性信息素迷向技术通过在田间多点位释放高浓度的性信息素，雄成虫触角在长期暴露于高浓度性信息素下产生麻痹，从而丧失响应能力，阻断或延迟害虫交配，导致下一代虫口数量显著下降，最终实现对害虫的有效控制（郑丽霞等，2018）。该技术不仅高效、无毒，而且对天敌友好，目前已广泛用于防治梨小食心虫（Yang et al.，2003；曹华毅等，2024）。例如，在美国及澳大利亚等国家的果园中，该技术对梨小食心虫有较好的防效，其中对雄成虫的迷向率高达96%~99%，可将幼虫的为害率降至1%以下（冉红凡等，2016）。然而在实际生产中性信息素的成分及其防治效果易受温度、湿度、光照和紫外线等环境因素影响（马涛等，2018；El-Sayed et al.，2021；Jiang et al.，2023）。尤其是梨小食心虫性信息素组分中含有双键，在光化学和热作用下易产生异构化，从而失去生物活性（孔维娜等，2018）。选择适宜的载体，同时添加抗氧化剂和抗紫外线剂可提升性信息素的稳定性、持效期和防效（陆鹏飞等，2010）。例如，在小菜蛾 *Plutella xylostella* 性信息素中分别添加抗氧化剂2，6-二叔丁基对甲酚（butylated hydroxytoluene，BHT）和没食子酸丙酯（propyl gallate，PG）后诱蛾量分别较未添加性信息素提升了83.08% 和 50.25%（邓建宇和杜家纬，2003）；添加40% 抗氧化剂BHT后，梨小食心虫性信息素诱芯的持效期显著延长，同时诱蛾量增加（孔维娜等，2018）。光吸收型抗紫外线剂具有吸收紫外线能量的功能，从而避免共轭双键被激发而发生异构化反应（黄姗姗等，2024）。适宜的载体可物理隔绝紫外线、雨水冲刷，从而降低性信息素的光氧化和水解速率，或通过吸附作用减少性信息素与氧气接触。昆虫性信息素载体主要有橡胶塞、聚氯乙烯（polyvinyl chloride，PVC）、聚乙烯（polyethylene，PE）和石蜡等（李学琳等，2015），而迷向剂释放载体多采用PE或PVC两种材料（相会明等，2022）。目前，未见从载体、抗氧化剂和抗紫外线剂这3个方面对性信息素迷向丝进行优化的研究。

为提升性信息素迷向技术对梨小食心虫的防效，本研究采用两种载体（PE和PVC）、两种抗氧化剂（BHT和PG）和两种抗紫外线剂（UV-531和UV-P）进行正交组合，自制4种性信息素迷向丝，以两种市售性信息素迷向丝为对照，分别在山西省临汾市蒲县和晋中市太谷区进行田间试验，测定这6种性信息素迷向丝对诱蛾量、迷向率、折梢率、防效的影响以及性信息素的田间释放速率和稳定性，以期为害

虫性信息素迷向技术的优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试试剂与材料：顺-8-十二碳烯醇醋酸酯（Z8-12-AC），美国Bedoukian公司；十二碳-1-醇（12:OH），上海阿拉丁生化科技股份有限公司；反-8-十二碳烯醇醋酸酯（E8-12-AC）和顺-8-十二碳烯醇（Z8-12-OH），本实验室自主合成；正己烷，无锡致远化学品有限公司；纯度均为99%的抗氧化剂BHT和PG，成都格雷西亚化学技术有限公司；抗紫外线剂UV-531（2-羟基-4-正辛氧基二苯甲酮）和UV-P（2-(2′-羟基-5′-甲基苯基)苯并三氮唑），东莞山一塑化有限公司；长持效期性信息素迷向丝（持效期3个月），北京中捷四方生物科技有限公司；短持效期性信息素迷向丝（持效期1个月）、性诱芯和三角形诱捕器，北京格瑞碧源科技有限公司；内径1.1 mm、外径2.5 mm、长度18 cm的PE管和PVC管，东莞市创元塑胶制品有限公司；20 mL螺口顶空瓶，安捷伦科技（中国）有限公司。

供试仪器：Trace ISQ气相色谱–质谱联用仪和30 m×0.25 mm×0.25 μm TG-5MS色谱柱，美国赛默飞世尔科技公司；50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头，默克化工技术（上海）有限公司。

1.2 方法

1.2.1 性信息素迷向丝的制备

本研究共选择两种载体（PE和PVC）、两种抗氧化剂（BHT和PG）和两种抗紫外线剂（UV-153和UV-P）对性信息素迷向丝进行优化。将载体、抗氧化剂和抗紫外线剂进行正交组合，得到4种组合，分别为PE载体、BHT抗氧化剂、UV-531抗紫外线剂（组合1），PE载体、PG抗氧化剂、UV-P抗紫外线剂（组合2），PVC载体、BHT抗氧化剂、UV-P抗紫外线剂（组合3），PVC载体、PG抗氧化剂、UV-153抗紫外线剂（组合4）。取100.0 mg顺-8-十二碳烯醇醋酸酯、6.8 mg反-8-十二碳烯醇醋酸酯、19.1 mg顺-8-十二碳烯醇和5.4 mg十二碳-1-醇混合，制成性信息素（李颖等，2025）。将131.3 mg性信息素、6.6 mg BHT抗氧化剂、6.6 mg UV-531抗紫外线剂和0.05 mL正己烷分别加入到PE载体中，制成性信息素迷向丝#1，按照同样方法将131.3 mg性信息素和0.05 mL正己烷加入到上述组合2、组合3和组合4中，制成性信息素迷向丝#2、#3和#4。

1.2.2 性信息素迷向丝的田间迷向效果测定

于2024年4月29日—7月1日在山西省临汾市蒲县和晋中市太谷区的桃园进行田间防效试验，此时桃树正处于新梢旺盛生长期和果实发育期。蒲县桃园面积约为20.00 hm^2，主栽品种早玉，树龄6年，树高约3 m，株距1.5 m，行距4 m，4月中旬开花，5月上旬结果，6月中旬收获，按绿色果品生产标准施用水、肥和农药。太谷区桃园面积约为46.67 hm^2，主栽品种大久保，树龄11年，树高约2.5 m，株距约3 m，行距约4 m，4月中旬开花，5月上中旬结果，7月下旬收获，按无公害果品生产标准施用水、肥和农药。每个试验点设7个处理，分别悬挂自制性信息素迷向丝#1、#2、#3和#4，市售长持效期性信息素迷向丝和短持效期性信息素迷向丝及不进行迷向防治的空白对照小区（CK），不同处理间距大于100 m，以防止相关干扰。每个处理1个试验小区，每个试验小区面积均为667 m^2，长约30 m、宽约23 m，悬挂60根迷向丝，且这60根迷向丝均匀分布于果树通风透气行间的粗壮树枝上，距地面1.5 m，距枝梢20~30 cm。田间防效试验开始日，每个小区沿单对角线均匀悬挂3个装有性信息素诱芯的三角形诱捕器，悬挂果树通风透气行间、距地面1.5 m处的粗壮枝条上，随后每隔1周统计诱捕器中的诱蛾量，计算迷向率，迷向率=(1–迷向区诱蛾量/对照区诱蛾量)×100%，每隔1月更换诱芯。田间防效试验开始后，每隔1周调查1次幼虫为害情况，共调查9次；每个试验小区采用五点取样法调查桃树嫩梢，每个点调查50枝，共调查250枝嫩梢，统计嫩梢上幼虫为害情况，计算折梢率和迷向效果。折梢率=虫梢数/调查总梢数×100%，迷向效果=(1–处理区折梢率/对照区折梢率)×100%。

1.2.3 性信息素迷向丝中性信息素释放速率的测定

于1.2.2田间试验中，于试验开始日14: 00—15: 00，每个小区随机选择3根性信息素迷向丝称重，随后每隔1周后于14: 00—15: 00，每个小区随机选择3根性信息素迷向丝称重，共调查10次。将不同取样时间的性信息素迷向丝质量与试验开始日的性信息素质量之间的差值作为性信息素释放量。性信息素的释放速率=试验结束日的性信息素迷向丝质量/田间试验持续天数。应用SPSS Statistics 27.0软件中Curvefit程序对性信息素迷向丝释放量随时间的变化进行线性拟合。

1.2.4 性信息素迷向丝中性信息素组分的稳定性测定

待1.2.2田间试验结束后，将每个小区内所有性

信息素迷向丝回收，每个处理随机选取6根（6个重复），将其内部剩余性信息素置于20 mL顶空瓶中，采用顶空固相微萃取–气相色谱–质谱联用技术测定各性信息素组分的相对含量。使用50/30 μm DVB/CAR/PDMS萃取头对顶空瓶内剩余性信息素的挥发性气体萃取10 min，采用自动进样法，解析5 min。使用Trace ISQ气相色谱–质谱联用仪检测挥发性气体成分。气相色谱条件：以氦气为载气，脉冲无分流进样，采用TG-5MS色谱柱，进样口温度300 ℃，检测器温度300 ℃，氢气流量30 mL/min，空气流量400 mL/min，氮气流量40 mL/min。升温程序：初始温度50 ℃，以10 ℃/min的速率升温至240 ℃，保持5 min。质谱条件：接口温度为280 ℃，离子源温度为280 ℃，EI离子化方式，全扫描模式采集信号，质量范围为45~550 amu。通过NIST 08标准库进行定性分析，并通过面积归一化法计算各挥发性化合物的相对含量（顶空气体中每种挥发性化合物的峰面积占所有挥发性化合物总峰面积的百分比）。

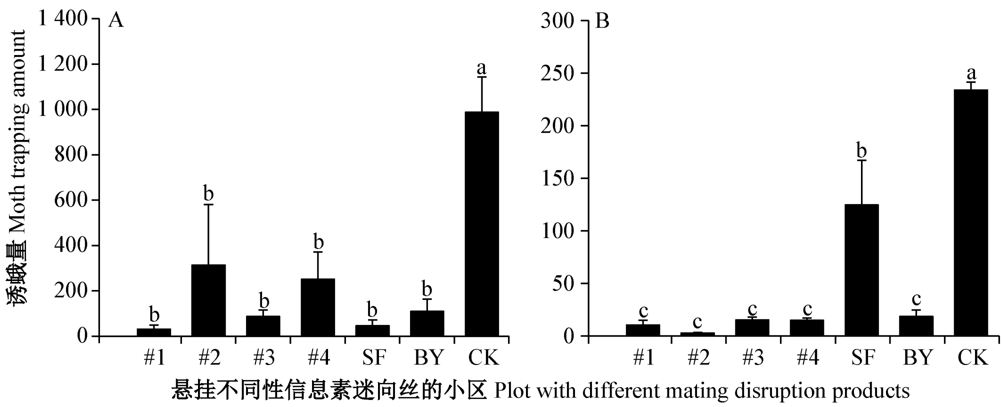
1.3 数据分析

采用软件SPSS Statistics 27.0对数据进行统计分析。应用Shapiro-Wilk检验法对所有数据进行正态检验，对不符合正态分布的数据进行平方根转换。当数据具有方差齐性时，采用Tukey HSD检验法进行差异显著性检验；若数据不具有方差齐性时，则采用Games-Howell检验法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同性信息素迷向丝对诱蛾量的影响

在蒲县桃园，悬挂4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4小区的诱蛾量与悬挂两种市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝小区的诱蛾量分别为31.00、314.00、87.00、250.67、46.33和109.33头，这六者之间差异不显著，但均显著少于空白对照小区的诱蛾量（987.67头）（$P<0.05$，图1-A）；在太谷区桃园，悬挂4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4小区的诱蛾量与悬挂市售短持效期性信息素迷向丝小区的诱蛾量分别为10.67、3.00、15.33、15.00和18.67头，这五者之间差异不显著，但均显著低于悬挂市售长持效期性信息素迷向丝小区的诱蛾量（124.67头）（$P<0.05$），且所有处理小区的诱蛾量均显著少于空白对照小区的诱蛾量（234.00头）（$P<0.05$，图1-B）。



#1~#4：4种自制性信息素迷向丝；SF和BY：市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝。#1–#4: Four homemade mating disruption products; SF and BY: commercially available long-duration and short-duration mating disruption products, respectively.

图1 在蒲县（A）和太谷区（B）桃园悬挂不同性信息素迷向丝小区的诱蛾量

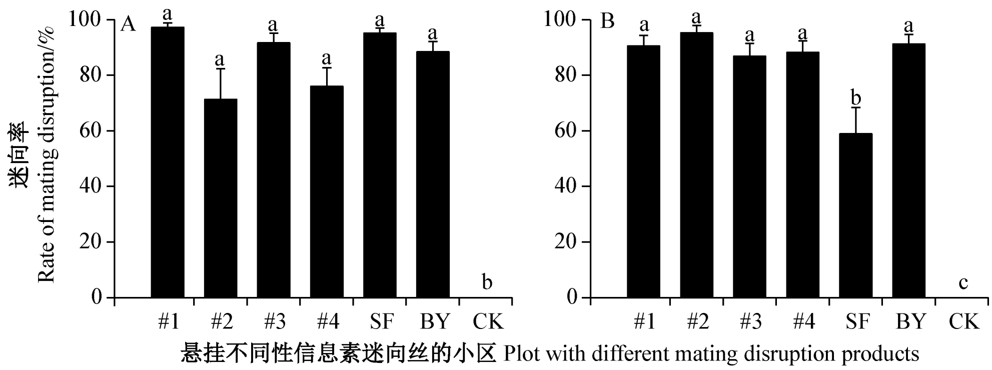
Fig. 1 Moth catches in plots with different mating disruption products in peach orchards of Pu County (A) and Taigu District (B)

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经Games-Howell检验法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences according to Games-Howell test ($P<0.05$).

2.2 不同性信息素迷向丝对迷向率的影响

在蒲县桃园，悬挂4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4与两种市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝小区的迷向率分别为97.18%、71.28%、91.61%、75.95%、95.07%和88.39%，这六者之间差异不显著，但均显著高于空白对照小区的迷向率（$P<0.05$，图2-A）。在太谷区桃园，悬挂4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4小区和市售短持效期性信息素迷向丝小区的迷向率分别为90.48%、95.17%、86.78%、88.18%和91.17%，这五者之间差异不显著，但均显著高于悬挂市售长持效期性信息素迷向丝小区的迷向率（58.92%）（$P<0.05$）；所有处理均显著高

于空白对照小区的迷向率（$P<0.05$，图2-B）。



#1~#4：4种自制性信息素迷向丝；SF和BY：市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝。#1–#4: Four homemade mating disruption products; SF and BY: commercially available long-duration and short-duration mating disruption products, respectively.

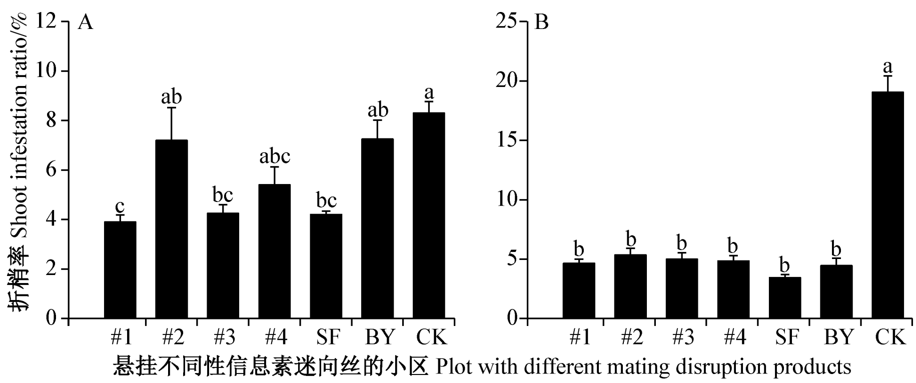
图2 在蒲县（A）和太谷区（B）桃园悬挂不同性信息素迷向丝小区的迷向率

Fig. 2 Mating disruption rates in plots with different mating disruption products in peach orchards of Pu County (A) and Taigu District (B)

数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经Games-Howell检验法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences according to Games-Howell test ($P<0.05$).

2.3 不同性信息素迷向丝对折梢率的影响

在蒲县桃园，悬挂自制性信息素迷向丝#2和市售短持效期性信息素迷向丝小区的折梢率较高，分别为7.20%和7.25%，与空白对照小区的折梢率（8.30%）差异不显著，但均高于悬挂自制性信息素迷向丝#1、#3和市售长持效期性信息素迷向丝小区的折梢率（$P<0.05$，图3-A）。在太谷区桃园，悬挂4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4与两种市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝小区的折梢率分别为4.65%、5.35%、5.00%、4.85%、3.45%和4.45%，这六者之间差异不显著，但均显著低于空白对照小区的折梢率（19.05%）（$P<0.05$，图3-B）。



#1~#4：4种自制性信息素迷向丝；SF和BY：市售长持效期和短持效期性信息素迷向丝。#1–#4: Four homemade mating disruption products; SF and BY: commercially available long-duration and short-duration mating disruption products, respectively.

图3 在蒲县（A）和太谷区（B）桃园悬挂不同性信息素迷向丝小区的折梢率

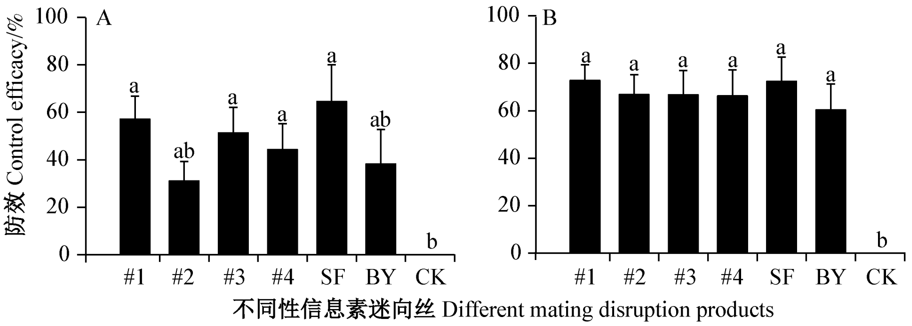
Fig. 3 Shoot infestation ratios in plots with different mating disruption products in peach orchards of Pu County (A) and Taigu District (B)

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经Games-Howell检验法检验差异显著（$P<0.05$）。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences according to Games-Howell test ($P<0.05$).

2.4 不同性信息素迷向丝的田间防效

在蒲县桃园，4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4和两种市售长持效期和短持效期性信息迷向丝对梨小食心虫的防效分别为57.10%、31.06%、51.34%、44.30%、64.50%和38.25%，这六者之间差异不显著。自制性信息素迷向丝#1、#3、#4和市售长持效期性信息素迷向丝的防效均显著高于空白对照（$P<0.05$），但自制性信息素迷向丝#2和市售短持

效期性信息素迷向丝的防效与空白对照差异不显著(图4-A)。在太谷区桃园,4种自制性信息素迷向丝#1、#2、#3、#4和两种市售长持效期和短持效期性信息迷向丝对梨小食心虫的防效分别为72.76%、66.80%、66.72%、66.23%、72.37%和60.31%,这六者之间差异不显著,但均显著高于空白对照(P<0.05,图4-B)。



#1~#4:4种自制性信息素迷向丝;SF和BY:市售长持效期性和短持效期性信息素迷向丝。#1−#4: Four homemade mating disruption products; SF and BY: commercially available long-duration and short-duration mating disruption products, respectively.

图4 在蒲县(A)和太谷区(B)桃园不同性信息素迷向丝对梨小食心虫的防效

Fig. 4 Control efficacy of different mating disruption products against *Grapholita molesta* in peach orchards of Pu County (A) and Taigu District (B)

数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经Games-Howell检验法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences according to Games-Howell test (P<0.05).

2.5 迷向率与防效的极差分析

在蒲县桃园,对迷向率和防效起主要作用的是性信息素迷向丝中的抗氧化剂,其次是性信息素迷向丝中的抗紫外线剂,性信息素迷向丝中载体的作用较小(表1)。在太谷区桃园,对迷向率和防效起主要作用的是性信息素迷向丝中的载体,其次是性信息素迷向丝中的抗氧化剂,性信息素迷向丝中抗紫外线剂的作用较小(表2)。

2.6 不同性信息素迷向丝的释放速率

在蒲县桃园,6种性信息素迷向丝中性信息素的释放量随时间的增加而线性增加(表3)。自制性信息素迷向丝#3和#4中性信息素的释放速率较快,分别为0.522 mg/d和0.488 mg/d;其次为自制性信息素迷向丝#1和市售短持效期性信息素迷向丝,释放速率分别为0.350 mg/d和0.353 mg/d;自制性信息素迷向丝#2和市售长持效期性信息素迷向丝中性信息素的释放速率较慢,分别为0.268 mg/d和0.264 mg/d。

在太谷区桃园,6种性信息素迷向丝中性信息素的释放量同样随时间的增加而线性增加(表3)。自制性信息素迷向丝#1和#4中性信息素的释放速率较快,分别为0.454 mg/d和0.487 mg/d;其次为自制性信息素迷向丝#3,释放速率为0.362 mg/d;自制性信息素迷向丝#2、市售长持效期性信息素迷向丝和短持效期性信息素迷向丝中性信息素的释放速率较慢,分别为0.278、0.257和0.249 mg/d。

表1 蒲县桃园迷向率与防效的极差分析

Table 1 Range analysis of mating disruption rate and control efficacy in peach orchards of Pu County

指标 Index	成分 Component	载体 Carrier	抗氧化剂 Antioxidant	抗紫外线剂 UV stabilizer
迷向率 Mating disruption rate	$K1$	164	189	173
	$K2$	168	142	158
	$k1$	82	94	87
	$k2$	84	71	79
	R	4	47	15
防治效果 Control efficacy	$K1$	67	107	94
	$K2$	88	48	62
	$k1$	34	54	47
	$k2$	44	24	31
	R	21	59	32

$K1$:水平1总和;$K2$:水平2总和;$k1$:水平1均值;$k2$:水平2均值;R:极差。$K1$: Sum of level 1; $K2$: sum of level 2; $k1$: mean of level 1; $k2$: mean of level 2; R: range.

2.7 不同性信息素迷向丝中各组分的稳定性

在蒲县桃园,在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中顺-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量分别为68.00%、74.86%、67.43%、80.29%,且四者之间差异不显著;在自制性信息素迷向丝#4中反-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量为0.14%,其余3种自制性信息素迷向丝中反-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量均

为0，且四者之间差异不显著；在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中顺-8-十二碳烯醇的相对含量分别为20.57%、23.14%、21.00%、19.576%，且四者之间差异不显著。在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中十二碳-1-醇的相对含量分别为11.29%、2.00%、11.57%、0，四者之间有差异，其中自制性信息素迷向丝#1和#3中的相对含量较高，显著高于自制性信息素迷向丝#4（P<0.05，图5-A）。

表2 太谷区桃园迷向率与防效的极差分析

Table 2 Range analysis of mating disruption rate and control efficacy in peach orchards of Taigu District

指标 Index	成分 Component	载体 Carrier	抗氧化剂 Antioxidant	抗紫外线剂 UV stabilizer
迷向率 Mating disruption rate	$K1$	186	177	179
	$K2$	175	183	182
	$k1$	93	89	89
	$k2$	87	92	91
	R	11	6	3
防治效果 Control efficacy	$K1$	140	139	139
	$K2$	133	133	134
	$k1$	70	70	69
	$k2$	66	67	67
	R	7	6	5

$K1$：水平1总和；$K2$：水平2总和；$k1$：水平1均值；$k2$：水平2均值；R：极差。$K1$: Sum of level 1; $K2$: sum of level 2; $k1$: mean of level 1; $k2$: mean of level 2; R: range.

在太谷区桃园，在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中顺-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量分别为63.14%、72.86%、68.00%、80.29%；在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中反-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量均为0；在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中顺-8-十二碳烯醇的相对含量分别为20.00%、23.14%、20.71%和19.43%；这3种组分在4种自制性信息素迷向丝中差异不显著，与蒲县桃园一致。在#1~#4四种自制性信息素迷向丝中十二碳-1-醇的相对含量分别为16.86%、3.86%、11.14%、0，四者之间差异显著，其中自制性信息素迷向丝#1中的相对含量最高，显著高于自制性信息素迷向丝#2和#4（P<0.05，图5-B）。

3 讨论

唐文颖等（2024）研究结果显示4种主流性信息素迷向丝对梨小食心虫的迷向率均高于80%。周洪旭等（2011）在桃园布置市售性信息素迷向丝450、900和1 350根/hm²，其对梨小食心虫的迷向率分别为67.80%、80.14%、89.29%。本研究结果显示4种自制性信息素迷向丝与两种市售性信息素迷向丝均可显著降低诱蛾量，对梨小食心虫表现出较好的迷向效果，其中4种自制性信息素迷向丝的迷向率介于71.00%~98.00%之间，两种市售性信息素迷向丝的迷向率介于58.00%~96.00%之间，表明本研究自制的4种性信息素迷向丝在迷向率上与市售产品相当，甚至本研究的部分组合在迷向率上表现更优。

表3 在蒲县和太谷区桃园不同性信息素迷向丝中性信息素的释放量随时间的动态变化

Table 3 Dynamic changes in pheromone release amounts of different mating disruption products over time in peach orchards of Pu County and Taigu District

性信息素迷向丝 Mating disruption product	蒲县 Pu County				太谷区 Taigu District			
	线性方程 Linear equation	R^2	F	P	线性方程 Linear equation	R^2	F	P
#1	y=1.901x−1.783	0.960	168.580	<0.05	y=2.280x−3.557	0.837	36.045	<0.05
#2	y=1.519x−1.750	0.982	371.654	<0.05	y=1.337x−0.636	0.886	54.378	<0.05
#3	y=2.864x−2.973	0.975	275.568	<0.05	y=1.878x+0.507	0.945	119.271	<0.05
#4	y=2.758x−3.827	0.971	231.874	<0.05	y=2.470x−1.704	0.935	101.133	<0.05
SF	y=1.468x−2.698	0.911	71.807	<0.05	y=1.391x−2.703	0.870	47.053	<0.05
BY	y=1.918x−1.684	0.982	375.624	<0.05	y=1.289x−0.708	0.913	73.829	<0.05

#1~#4：4种自制性信息素迷向丝；SF和BY：市售长持效期性和短持效期性信息素迷向丝。x：时间；y：性信息素迷向丝中性信息素的释放量。#1−#4: Four homemade mating disruption products; SF and BY: commercially available long-duration and short-duration mating disruption products. x: Time; y: pheromone release amount in mating disruption products.

本研究结果显示在蒲县桃园自制性信息素迷向丝#1和#3以及市售长持效期性信息素迷向丝对梨小食心虫的防效显著，可将折梢率有效降至5%以下；在太谷区4种自制性信息素迷向丝与两种市售性信息素迷向丝均可将折梢率显著降低至5%以下，对梨小食心虫表现出较好的防效；且这4种自制

性信息素迷向丝在蒲县和太谷区桃园的田间防效分别介于31.00%~58.00%和66.00%~73.00%之间，两种市售性信息素迷向丝在蒲县和太谷区桃园的田间防效分别介于38.00%~65.00%和60.00%~73.00%之间。性信息素迷向丝在太谷区对梨小食心虫的田间防治效果优于蒲县桃园，原因可能是太谷区桃园的梨小食心虫种群密度小于蒲县桃园。Sower et al.(1975)和Palaniswamy et al.(1982)同样报道随着蛾类害虫种群密度的增加，性信息素对交配的抑制效果降低，因为此时昆虫的嗅觉功能逐渐衰退，交配行为主要由随机相遇决定。此外，梨小食心虫雄成虫具有多次交配的特性，使得田间孕卵雌成虫数量增加，进而减弱了性信息素迷向丝的防效(Kong et al., 2024)。

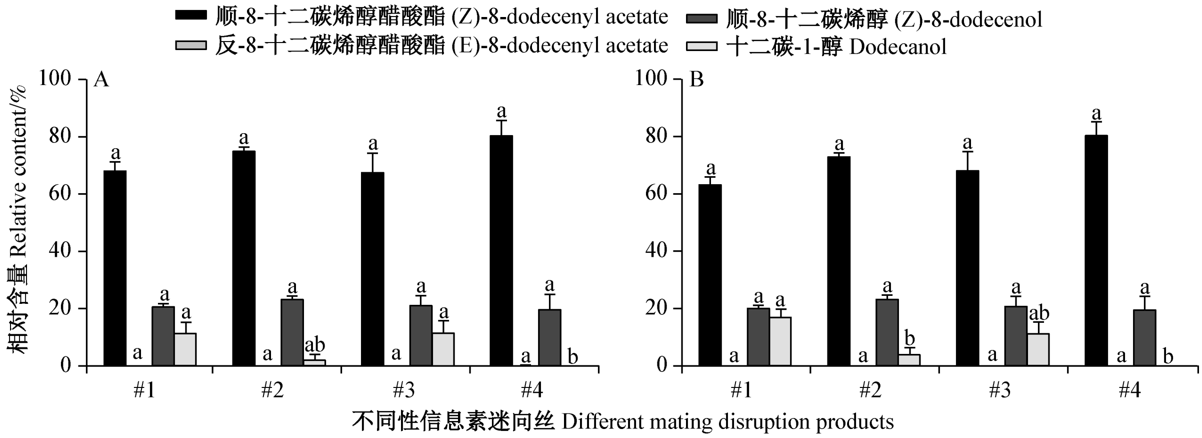


图5 在蒲县(A)和太谷区(B)桃园4种自制性信息素迷向丝中性信息素的相对含量

Fig. 5 Relative content of sex pheromone in four homemade mating disruption products in peach orchards of Pu County (A) and Taigu District (B)

数据为平均数±标准误。同色柱上不同小写字母表示经Games-Howell检验法检验差异显著(P<0.05)。Data are mean± SE. Different lowercase letters on the same color bars indicate significant differences according to Games-Howell test (P<0.05).

本研究通过正交极差分析发现在蒲县桃园对迷向丝防效的影响由大到小依次是抗氧化剂、抗紫外线剂和载体；而在太谷区桃园对迷向丝防效的影响由大到小依次是载体、抗氧化剂和抗紫外线剂。这种差异可能与两地的地理环境密切相关。蒲县试验地点位于山顶，平均海拔1 250 m，试验期间平均气温为15~29 ℃，总降雨量为119.7 mm，平均风速为9.2 ~13.3 km/h，Y形树形，光照条件较好。太谷试验地点位于山脚，海拔约870 m，试验期间平均气温为15~30 ℃，总降雨量为44.9 mm，平均风速为7.3~9.6 km/h，桃树树冠低矮，主枝开张角度大。因此蒲县地区紫外线较太谷地区更强，而迷向剂在使用中更需要抗紫外线剂的保护，与本研究结果相吻合。两地桃园的试验最佳组合均为自制性信息素迷向丝#1(PE载体+BHT抗氧化剂+UV-531抗紫外线剂)，该迷向丝与市售性信息素迷向丝的防效相当，在降低蒲县桃园折梢率上优于市售短持效期性信息素迷向丝。

BHT的抗氧化性能优于PG(Millar, 1995; Kong et al., 2020b)。添加5%~10% BHT后黄斑卷叶蛾*Acleris fimbriana*性诱剂的田间持效期可显著延长至6~8周(Liu & Meng, 2003)。抗紫外线剂UV-531表现优于UV-P，这可能与两种物质的吸收波长有关，UV-531能吸收240~340 nm的紫外光，对270~330 nm紫外光的吸收尤为强烈；而UV-P能吸收270~380 nm紫外光，吸收峰值为343 nm。因为紫外光的波长越短，能量越高，破坏双键的能力也越强，所以UV-531较UV-P能更好吸收较短波长的紫外光，从而保护性信息素成分。本研究还发现蒲县和太谷区桃园中PVC管中性信息素的释放速率较PE管快，分别为0.268~0.454 mg/d和0.362~0.522 mg/d。相会明等(2022)研究发现当PE管和PVC管分别作为载体时，梨小食心虫性信息素的释放速率分别为0.32~1.62 mg/d和0.71~6.86 mg/d，较本研究中释放速率略大，究其原因可能是迷向丝中添加了抗氧化剂和抗紫外剂。此外，本研究结果显示田间试验结束后性信息素主要成分顺-8-十二碳烯醇醋酸酯的相对含量介于63.1%~80.3%之间，与初始相对含量(76.2%)差异较小，表明其较稳定；而次要成分反-8-十二碳烯醇醋酸酯、顺-8-十二碳烯醇和十二碳-1-醇

变化较大。不同昆虫性信息素在同一载体中的释放速率差异较大。例如，刘奎伟等（2012）研究发现当松毛虫性信息素以PE管为载体时，共轭二烯E5,Z7构型中醛、醇和酯的释放速率大于相应的Z5,E7构型的释放速率，且醛和醇类性信息素释放速率大于酯类的释放速率。因此，当采用PE管作为其他昆虫性信息素的载体时，释放速率应结合具体化合物进行重新测定，以确保防效的稳定与可靠。

本研究系统测定了不同载体、抗氧化剂和抗紫外线剂对梨小食心虫性信息素田间迷向效果的影响，成功筛选出最佳组合，即PE管作为载体、BHT作为抗氧化剂和UV-531作为抗紫外线剂。然而，在梨小食心虫田间种群密度较高的蒲县桃园，尽管性信息素迷向丝对成虫的迷向率较好，但一些组合在降低幼虫的折梢率上并没有达到理想的效果。为此下一步围绕梨小食心虫高种群密度下性信息素迷向技术使用的关键限制因素进行研究，针对性地提高性信息素迷向技术在田间的适用性，为不同生态区梨小食心虫的精准防控策略制订提供思路。

参 考 文 献（References）

Cao HY, Yang L, Pan YF, Wang YQ, Feng HZ, Lu YH. 2024. Adult population dynamic of the oriental fruit moth *Grapholita molesta* and the control efficacy of sex pheromone disorientation against it in a plumcot orchard in southern Xinjiang. Journal of Plant Protection, 51(1): 170−177 (in Chinese) [曹华毅, 杨龙, 潘云飞, 王亚桥, 冯宏祖, 陆宴辉. 2024. 南疆杏李园梨小食心虫成虫消长动态及迷向防治效果. 植物保护学报, 51(1): 170−177]

Deng JY, Du JW. 2003. Study on *Plutella xylostella* sex pheromone formulations. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 21(Suppl. 1): 52−55 (in Chinese) [邓建宇, 杜家纬. 2003. 小菜蛾性信息素剂型的研究. 上海交通大学学报(农业科学版), 21(增刊1): 52−55]

El-Sayed AM, Ganji S, Gross J, Giesen N, Rid M, Lo PL, Kokeny A, Unelius CR. 2021. Correction to: climate change risk to pheromone application in pest management. Science of Nature, 109(1): 8

Huang SS, Zhao Y, Li JJ. 2024. Research progress in new ultraviolet absorbers. Chemistry, 87(5): 579−585 (in Chinese) [黄姗珊, 赵岩, 李进京. 2024. 新型紫外线吸收剂研究进展. 化学通报, 87(5): 579−585]

Jiang NJ, Chang HT, Weißflog J, Eberl F, Veit D, Weniger K, Hansson BS, Knaden M. 2023. Ozone exposure disrupts insect sexual communication. Nature Communications, 14: 1186

Kong WN, Wang Y, Guo YF, Chai XH, Li J, Ma RY. 2020a. Importance of preovipositional period of an oligophagous moth in predicting host suitability. Journal of Economic Entomology, 113(1): 222−229

Kong WN, Wang Y, Guo YF, Chai XH, Li J, Ma RY. 2020b. Behavioral effects of different attractants on adult male and female oriental fruit moths, *Grapholita molesta*. Pest Management Science, 76(9): 3225−3235

Kong WN, Wang Y, Li N, Cao WY, Hu XF, Liu CN, Niu GF, Li J, Ma RY. 2024. Variations in mating and reproduction in oriental fruit moth caused by adult physiological state in laboratory tests. Insects, 15(6): 457

Kong WN, Wang Y, Niu GF, Guo YF, Zhao F, Ma RY, Fan RJ. 2018. Screening and optimizing sex pheromone dispenser for *Grapholita molesta*. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 38(7): 8−12 (in Chinese) [孔维娜, 王怡, 牛国飞, 郭永福, 赵飞, 马瑞燕, 范仁俊. 2018. 梨小食心虫性信息素载体筛选与应用优化. 山西农业大学学报(自然科学版), 38(7): 8−12]

Li XL, Kong XB, Zhang SF, Wang HB, Zhang Z, Yang MF. 2015. Researches on the release rates of four types of insect semiochemicals from four dispenser types. Scientia Silvae Sinicae, 51(12): 63−70 (in Chinese) [李学琳, 孔祥波, 张苏芳, 王鸿斌, 张真, 杨茂发. 2015. 4类昆虫信息化学物质在不同缓释载体上的释放速率. 林业科学, 51(12): 63−70]

Li Y, Cao WY, Liu CN, Niu GF, Wang Y, Li J, Ma RY, Kong WN. 2025. Effects of sex pheromone on the EAG response, mating and reproduction of *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae). Acta Entomologica Sinica, 68(2): 184−193 (in Chinese) [李颖, 曹炜晔, 刘昌念, 牛国飞, 王怡, 李捷, 马瑞燕, 孔维娜. 2025. 性信息素对梨小食心虫触角电位反应、交配和繁殖的影响. 昆虫学报, 68(2): 184−193]

Liu KW, Kong XB, Zhang Z, Zhou CG, Chai JF. 2012. Release rates and isomerization effects of conjugated dienes sex pheromone from two types of dispensers. Scientia Silvae Sinicae, 48(7): 72−78 (in Chinese) [刘奎伟, 孔祥波, 张真, 周成刚, 柴景峰. 2012. 共轭二烯性信息素在2种载体上的释放速率和异构化效果. 林业科学, 48(7): 72−78]

Liu YX, Meng XZ. 2003. Trapping effect of synthetic sex pheromone of *Acleris fimbriana* (Lepidoptera: Tortricidae) in Chinese northern orchard. Journal of Biosciences, 58(5/6): 421−425

Lu PF, Huang LQ, Wang CZ. 2010. Semiochemicals used in chemical communication in the oriental fruit moth, *Grapholitha molesta* Busck (Lepidoptera: Tortricidae). Acta Entomologica Sinica, 53(12): 1390−1403 (in Chinese) [陆鹏飞, 黄玲巧, 王琛柱. 2010. 梨小食心虫化学通信中的信息物质. 昆虫学报, 53(12): 1390−1403]

Ma T, Lin N, Zhou LL, Shi XH, Zhou QH, Wang C, Sun ZH, Chen XY, He YR, Wen XJ. 2018. Research progress and application prospect of insect sex pheromone mating disruption. Forest Research, 31(4): 172−182 (in Chinese) [马涛, 林娜, 周丽丽, 史先慧, 周秋宏, 王偲, 孙朝辉, 陈晓阳, 何余容, 温秀军. 2018. 性信息素迷向干扰防控害虫的研究进展及应用前景. 林业科学研究, 31(4): 172−182]

Millar JG. 1995. Degradation and stabilization of E8, E10-dodecadienol, the major component of the sex pheromone of the codling moth (Lepidoptera: Tortricidae). Journal of Economic Entomology, 88(5): 1425−1432

Palaniswamy P, Ross RJ, Seabrook WD, Lonergan GC, Wiesner CJ, Tan SH, Silk PJ. 1982. Mating suppression of caged spruce budworm (Lepidoptera: Tortricidae) moths in different pheromone atmospheres and high population densities. Journal of Economic Entomology, 75(6): 989−993

Ran HF, Lu ZY, Liu WX, Ma AH, Liu XX, Sun HP, Li JC, Zhang QW. 2016. Advances in research on the biological control of the oriental fruit moth. Chinese Journal of Applied Entomology, 53(5): 931−941 (in Chinese) [冉红凡, 路子云, 刘文旭, 马爱红, 刘小侠, 孙海鹏, 李建成, 张青文. 2016. 梨小食心虫生物防治研究进展. 应用昆虫学报, 53(5): 931−941]

Sower LL, Turner WK, Fish JC. 1975. Population-density-dependent mating frequency among *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Phycitidae) in the presence of synthetic sex pheromone with behavioral observations. Journal of Chemical Ecology, 1(3): 335-342

Tang WY, Xiao YL, Sun SJ, Yu K, Guo D, Yu GH. 2024. The relative effectiveness of using different sex-pheromone products to disrupt the mating of *Grapholitha molesta* (Busck) in a pear orchard. Chinese Journal of Applied Entomology, 61(1): 145−150 (in Chinese) [唐文颖, 肖云丽, 孙淑建, 于凯, 国栋, 于国合. 2024. 不同迷向丝对梨园梨小食心虫的控制作用. 应用昆虫学报, 61(1): 145−150]

Wang Y, Li J, Chai XH, Guo YF, Hu XF, Kong WN, Ma RY. 2025. Differences in the link between female moth oviposition and larval fitness in *Grapholita molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) over seasonal variation of host fruit species. International Journal of Pest Management, 71(2): 159−169

Xiang HM, Diao HL, Li XW, Zhao ZG, Ma RY. 2022. Comparison of the pheromone release rate and degree of mating disruption achieved using four different types of pheromone dispenser to control the oriental fruit moth. Chinese Journal of Applied Entomology, 59(2): 311−317 (in Chinese) [相会明, 刁红亮, 李先伟, 赵志国, 马瑞燕. 2022. 梨小食心虫性信息素在四种载体中释放速率及田间迷向率研究. 应用昆虫学报, 59(2): 311−317]

Yang CY, Han KS, Jung JK, Boo KS, Yiem MS. 2003. Control of the oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) by mating disruption with sex pheromone in pear orchards. Journal of Asia-Pacific Entomology, 6(1): 97−104

Zheng LX, Wu LH, Yu L, Wu WJ, Wei HY. 2018. Advances in the research and application prospects of insect parapheromones. Journal of Plant Protection, 45(6): 1185−1193 (in Chinese) [郑丽霞, 吴兰花, 余玲, 吴伟坚, 魏洪义. 2018. 昆虫类信息素研究进展及应用前景. 植物保护学报, 45(6): 1185−1193]

Zhou HX, Li LL, Yu Y. 2011. Scale control over *Grapholitha molesta* with mating disruption of sex pheromone. Journal of Plant Protection, 38(5): 385−389 (in Chinese) [周洪旭, 李丽莉, 于毅. 2011. 信息素迷向法规模化防治梨小食心虫. 植物保护学报, 38(5): 385−389]

（责任编辑:张俊芳）