

# 草原毛虫雌蛾性腺提取物成分鉴定 及其室内活性测定\*

刘思雨<sup>1,2\*\*</sup> 梅向东<sup>1</sup> 来有鹏<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害综合治理全国重点实验室, 北京 100193;  
2. 青海大学农林科学院植物保护研究所, 青海省农业有害生物综合治理重点实验室, 西宁 810016)

**摘要** 【目的】性信息素作为一种对昆虫特异、高效且专一性强的诱控技术在国内外害虫的监测与防治中得到了广泛应用。本文以草原毛虫 *Gynaephora qinghaiensis* 为主要研究对象, 对其雌蛾性腺有效活性化合物进行提取分析与组分鉴定, 为此虫绿色防控技术提供科学依据。【方法】采用溶剂浸提法, 选用正己烷、二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯 4 种有机溶剂分别获得草原毛虫未交配雌蛾性腺浸提物; 其浸提物利用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 检测和总离子图 (TIC) 对比, 分析其中的化合物组分, 并利用 Y-型嗅觉仪明确未交配雄蛾对雌蛾性腺活性组分的行为反应。【结果】Y-型嗅觉选择试验结果发现雄蛾对 4 种雌蛾性腺有机溶剂粗提物均具有正趋向行为反应 ( $P < 0.01$ ), 其中利用乙酸乙酯有机溶剂提取的粗提物对雄蛾的引诱效果最好, 平均诱集数量为 (8.40±0.55) 头; 利用 GC-MS 分析草原毛虫雌蛾性腺挥发物共得到 55 种化合物, 其中 5 种特异成分即棕榈酸甲酯、棕榈酸、9,12,15-十八碳三烯醛、(Z)-9-十八烯酸甲酯、硬脂酸在色谱柱中的保留时间依次为 11.36、11.85、13.07、13.50 和 14.79 min。上述 5 种组分单独使用对其雄蛾均具有吸引作用, 其中以棕榈酸和 9,12,15-十八碳三烯醛的诱集效果最好, 平均诱集数量为 (8.00±0.71) 和 (6.40±1.14) 头; 二元混合物的引诱活性以棕榈酸甲酯和 9,12,15-十八碳三烯醛以 1:1 比例混合后的诱集效果最好, 平均诱集数量为 (5.60±0.55) 头。【结论】本研究初步完成了草原毛虫雌蛾性腺化合物的成分鉴定, 并确定 9,12,15-十八碳三烯醛单独或联合使用对草原毛虫雄虫均具有强烈的引诱作用, 研究成果对开发草原毛虫性诱剂具有重要意义。

**关键词** 草原毛虫; 性腺提取物; 气相色谱-质谱联用; 成分鉴定; 引诱效果

## Extraction and identification of active components of female moths of grassland caterpillars *Gynaephora qinghaiensis* and determination of their indoor activity efficacy

LIU Si-Yu<sup>1,2\*\*</sup> MEI Xiang-Dong<sup>1</sup> LAI You-Peng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Comprehensive Management of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection, Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract** [Aim] Sex pheromones, as a trapping technology, is specific, efficient, and highly specialized for insects, and have been widely used in pest monitoring and management at home and abroad. In this paper, we focused on the *Gynaephora qinghaiensis*, and the effective active components from sex pheromone glands of virgin female moths of *G. qinghaiensis* was extracted and componential analysis, so as to provide scientific basis for green control of this pest insect. [Methods] The volatiles released by female moths from sex pheromone glands were collected by solvent extraction. The extracts were obtained using four organic cosolvents, namely hexane, dichloromethane, methanol and ethyl acetate, respectively. The main

\*资助项目 Supported projects: 植物病虫害综合治理全国重点实验室开放课题 (SKLOF202315); 国家重点研发计划子课题 (2022YFD1401102-4)

\*\*第一作者及通讯作者 First author and corresponding author, E-mail: lsiyus@126.com

收稿日期 Received: 2025-07-25; 接受日期 Accepted: 2026-01-28

components of extracts were separated and identified by using a gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC-MS) combined with comparative analysis for the total ion chromatograph (TIC). And the behavioral responses of virgin male moths to bioactive components from sex pheromone glands of virgin female moths of *G. qinghaiensis* were tested using Y-tube olfactometer. **[Results]** The Y-tube olfactometer behavior selection experiments verified that crude extract using four different organic solvent about sex pheromone glands of virgin female moths were all attractive to the males ( $P < 0.01$ ). The attraction effect showed that the crude extraction of ethyl acetate attracted the greatest number of males, with the average number of  $(8.40 \pm 0.55)$  male moths. There were totally 55 compounds in the pheromone-gland extract of female *G. qinghaiensis* identified through GC-MS. Hexadecanoic acid methyl ester, n-hexadecanoic acid, 9,12,15-octadecatrienal, (Z)-9-octadecenoic acid methyl ester and octadecanoic acid, as the special components in the sexual gland extracts of single virgin female moths, were with a retention time of 11.36, 11.85, 13.07, 13.50 and 14.79 min, respectively. It was found that sole utilizing of above five compounds all had attractive effects for male moths, with the greatest attractant effect by using n-Hexadecanoic acid or 9,12,15-octadecatrienal alone, the average attraction number of male moths reached to  $(8.00 \pm 0.71)$  and  $(6.40 \pm 1.14)$  respectively; the binary mixture of hexadecanoic acid methyl ester and 9,12,15-octadecatrienal at the ratio of 1 : 1 also had an effect on male moths attractions, and the average attraction number of male moths reached to  $(5.60 \pm 0.55)$ . **[Conclusion]** The identification of compounds in sex pheromone glands of female moths of *G. qinghaiensis* was accomplished, the major component of 9,12,15-octadecatrienal used alone or in combination with hexadecanoic acid methyl ester all had strong attraction effect on male moths *G. qinghaiensis*. The results of research are of great important for the development of sex attractants.

**Key words** *Gynaephora qinghaiensis*; extraction in sex pheromone glands; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); componential identification; attraction effect

草原毛虫 *Gynaephora qinghaiensis*, 又名红头黑毛虫, 隶属鳞翅目 Lepidoptera 毒蛾科 Lymantriidae 草原毛虫属 *Gynaephora* 昆虫 (Wang *et al.*, 2020)。幼虫期是草原毛虫取食的营养阶段, 也是大量取食牧草的为害阶段, 种群易暴发, 影响草原牧草生长, 造成野生动物和畜牧业牛羊马等食物短缺, 严重危害牲畜的健康, 加剧草地生态环境恶化 (张棋麟和袁明龙, 2013)。此外, 由于草原毛虫体毛和茧壳具有毒性, 家畜误食后还会导致牛羊口腔黏膜溃烂、舌头糜烂等, 影响家畜健康和畜牧业发展 (李静玲等, 2024); 人体长期接触也可造成手部、眼部红肿过敏, 严重时引起感染 (张勤文等, 2011)。在长期适应性进化过程中草原毛虫已形成雌雄二型现象, 其雌蛾的胸足、翅以及触角皆退化, 完全丧失飞翔和爬行能力, 在成虫交配期只有通过原地释放性信息素引诱雄蛾才能完成交配 (沈南英等, 1983a; 严林, 2006)。

昆虫性信息素又称性外激素, 是性成熟后的昆虫求偶时分泌于特殊组织的能够被同种异性个体所接受并且引诱异性个体产生觅偶、求偶与

交配行为的挥发性气味化合物 (Rizvi *et al.*, 2021; 周卫青等, 2024)。自 20 世纪中期德国 Butenandt 团队从约 50 万头家蚕 *Bombyx mori* 体内分离并鉴定出世界上第一个昆虫性信息素 (10E,12Z)-10,12-十六碳二烯-1-醇, 命名为蚕蛾醇以来 (Butenandt *et al.*, 1959; Hecker and Butenandt, 1984), 昆虫性信息素逐渐成为化学生态学的研究热点, 越来越多昆虫性信息素被成功分离鉴定。此后随着化学分析技术的进步, 研究者已经在鳞翅目、鞘翅目、膜翅目和双翅目等昆虫体内发现了超过 3 000 种化学信息素物质, 其中全球商品化的昆虫信息素产品也超过了 600 多个 (于荣等, 2019; 吴帆等, 2023)。近年来, 昆虫性信息素用于害虫种群监测、入侵害虫检测、大规模诱捕、害虫求偶干扰及害虫推拉防控策略的报道较多, 对于一些隐蔽为害的害虫如筛胸梳爪叩甲 *Melanotus cribricollis* (彭观地, 2011)、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* (陈庆华等, 2017)、番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* (Meyrick) (张桂芬等, 2025) 等的防控上均表现出独特的优势, 特别是以鳞翅目昆虫性信息素的

应用最为广泛和深入 (Ando and Yamamoto, 2020; 李晨浩等, 2025), 如尺蛾科 Geometridae 害虫 (马涛等, 2019)、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (叶占峰等, 2020)、梨小食心虫 *Grapholitha molesta* (王希明, 2023)、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (李天菊等, 2023)、桑螟 *Diaphania pyralis* (李大波等, 2024) 等。相比而言, 草原毛虫作为青藏高原危害高山和亚高山草甸优良牧草最主要的鳞翅目害虫之一, 有关成虫性信息素的研究相对较少 (沈南英等, 1983b; 张善干等, 1988; 鲍根生和王宏生, 2015)。因此, 为了探索性信息素在草原毛虫防治中的应用前景, 本研究尝试使用有机溶剂浸提草原毛虫雌蛾性腺的性信息素物质, 并通过色谱-质谱 (GC-MS) 检测其中的有效成分, 并开展室内诱蛾试验, 为建立草原毛虫绿色、高效防控新途径奠定研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源

草原毛虫幼虫采自青海省海北州海晏县高寒草场 (37° 23' N, 100° 30' E)。将野外采集的幼虫带回实验室, 在温度 (25±1) °C、相对湿度 70%±5%、光周期 16L: 8D 条件下进行饲养。以新鲜垂穗披肩草 *Elymus nutans* 作为食物供其取食。待化蛹后, 将蛹小心取出置于网格饲养盒 (24 cm×15 cm) 中待其羽化, 羽化环境条件与饲养条件相同。待其羽化, 将雌雄成虫分别置于单独的养虫笼内, 以 10% 的蜂蜜水补充营养。统计日龄, 以成虫羽化后 0-24 h 视为 1 日龄, 挑选 2 日龄雌蛾、雄蛾备用。

### 1.2 供试化学试剂

色谱纯二氯甲烷 (分析纯, P3048495), 购于上海泰坦科技股份有限公司; 甲醇 (质谱纯, I1243235239), 购于 Merck 公司; 乙酸乙酯 (分析纯, P2935417), 购于上海泰坦科技股份有限公司; 正己烷 (分析纯, P3145791), 购于上海泰坦科技股份有限公司; 棕榈酸甲酯、棕榈酸、

9,12,15-十八碳三烯醛、(Z)-9-十八烯酸甲酯、(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸、硬脂酸、2-棕榈酰基甘油和胆固醇, 均为 AR 级别, 购于上海麦克林生化科技股份有限公司。

### 1.3 主要试验设备

Y-型嗅觉仪装置参考李俊龙等 (2019), 材质选用无色透明玻璃, 主臂、两侧臂长均为 20 cm, 直径均为 4 cm, 侧臂夹角 75°; Agilent 6890-5977A GC/MSD 气质联用仪, 安捷伦科技有限公司; 超声波清洗仪, KQ-300 BD, 昆山市超声仪器有限公司; 高速离心机, H1650-W, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

### 1.4 性信息素的提取与鉴定

**1.4.1 草原毛虫性腺化合物的提取** 将羽化第 2 天未交配的雌性成虫放置在黑暗条件下处理 4-5 h 后取出, 用手轻轻挤压雌蛾腹部末端, 迫使其性信息素腺体完全伸出腹部 (图 1: A, B), 随即利用洁净的手术剪将腺体剪下, 用滤纸吸去多余的体液后置于样品瓶中, 每瓶放置 20 个腺体, 然后添加 200 μL 正己烷, 务必使腺体完全浸泡在有机溶剂中, 加盖封闭防止挥发。按照上述相同方法制备二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯样品瓶, 统一在室温下浸提 50 min (胡可炎等, 2023)。浸提完毕后将浸泡液转移到毛细管中封口放入 -20 °C 保存备用。

### 1.4.2 草原毛虫性腺粗提物对雄蛾的引诱效果

在温度 (25±1) °C、相对湿度 70%±5%、空气基本静止的室内条件, 参考李俊龙等 (2019) 及张萌萌等 (2020) 方法, 测定雄蛾对性信息素粗提物的嗅觉行为反应。测试前先用移液枪吸取 10 μL 性信息素粗提取物滴在 1 cm<sup>2</sup> 定性滤纸上, 等到溶剂充分挥发后置于一侧味源瓶中, 另一侧为空气对照。打开真空抽气泵, 用气体流量器控制两臂气流稳定 (200 mL/min) 且相等后开始试验。生物测定在黑暗条件下进行, 从直管的末端依次放入羽化 2 d 且未交配的雄蛾, 让其在管内自由爬行, 10 min 后观察记录在管中的位置, 如果雄蛾在侧壁前 1/2 空间的位置且停留时间在

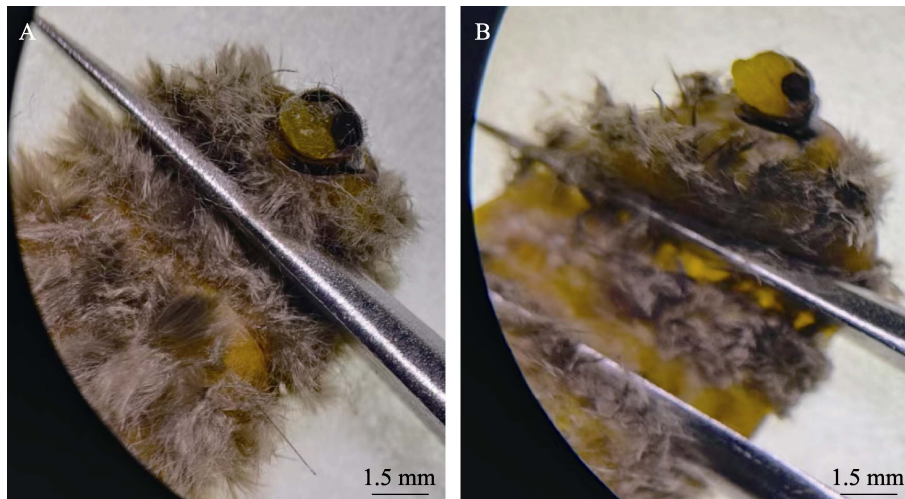


图 1 草原毛虫雌蛾腹部末端

Fig. 1 The abdominal end of female moth *Gynaephora qinghaiensis*

A. 雌蛾腹部末端整体正面观; B. 雌蛾腹部末端整体侧面观。

A. Anterior view of abdomen end; B. Lateral view of abdomen end.

5 s 以上, 表明该物质对其诱集效果好。每次放入 1 头雄蛾, 每组 10 头雄蛾, 每头雄蛾只测试 1 次, 每测定 5 组后更换一次 Y 管侧臂的位置和味源, 以消除几何位置及味源新鲜程度对试虫趋向行为的影响。每个处理完毕后用酒精彻底清洗装置并进行烘干, 每个处理重复 5 次。

**1.4.3 草原毛虫性腺化合物 GC-MS 分析** 将粗提液经氮吹 (99.99% 的高纯氮) 浓缩后, 利用气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用仪进行成分分离和检测。毛细色谱柱是 HP-5MS 毛细管柱 (长 30 m × 内径 250 μm × 固定相厚度 0.25 μm)。气相色谱 (GC) 条件: 柱温箱初始温度 70 °C, 以 15 °C/min 的速率升温至 220 °C, 维持 7 min; 然后以 3 °C/min 的速率升温至 280 °C, 维持 3 min。进样量 10 μL, 进样口和检测器温度分别为 220 和 280 °C, 不分流; 质谱 (MS) 条件: 载气为 99.99% 高纯度氮气, 流速 1.0 mL/min, 进样口温度为 220 °C, 电离方式为电子轰击 (EI), 电离能量为 70 eV, 四级杆和离子源温度分别为 150 和 230 °C, 质量扫描范围为 50-650 amu, 使用全扫描 (Scan) 模式采集。将所得的性腺浸提液的总离子流图 (TIC), 参考物质的峰形大小和保留时间, 找出性信息素化合物的特征离子碎片质谱图, 再通过比对

NIST 数据库中的标准化化合物的质谱图, 最终确定性信息素候选化合物组分的化学结构。

**1.4.4 雄蛾对雌蛾性腺主要组分的行为反应测定** 根据 1.4.3 节的 GC-MS 鉴定结果得到 8 种主要组分即棕榈酸甲酯、棕榈酸、9,12,15-十八碳三烯醛、(Z)-9-十八烯酸甲酯、(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸、硬脂酸、2-棕榈酰基甘油和胆固醇。选择上述 8 种性信息素主要组分作为处理组, 以对应有机溶剂作为对照组。准确称取各组分 0.1 g, 分别加入 1.0 mL 有机溶剂, 制成 100.0 μg/μL 的母液 (闫俊杰, 2021)。待测样品和对照溶剂各取 200 μL (王鑫辉等, 2022), 以定性滤纸为释放载体, 采用 Y-型嗅觉仪测定, 测试时方法同 1.4.2 节。每组测定 10 头雄蛾, 每个处理重复 5 次。

**1.4.5 雌蛾性腺主成分混合物对雄蛾的诱集效果** 根据 1.4.4 节测试结果表明 5 种组分对雄蛾具有引诱作用。将 5 种组分按体积比 1:1 两两混合, 获得 10 个二元混合样品组合作为处理组 (表 1), 随机置于 Y-型嗅觉仪的味源瓶中, 另一端则定为空气对照。采用 1.4.2 节相同方法测定雄蛾对每个处理的行为反应。每个组分 10 头雄蛾, 重复 5 次。

表 1 草原毛虫雄蛾嗅觉行为测定成分组合设计

Table 1 Testing of male moths *Gynaephora qinghaiensis* olfactory behavior with combination components screening

处理 Treatment	成分组合 Combination component
I	棕榈酸甲酯 vs 棕榈酸 Hexadecanoic acid methyl ester vs n-Hexadecanoic acid
II	棕榈酸甲酯 vs 9,12,15-十八碳三烯醛 Hexadecanoic acid methyl ester vs 9,12,15-Octadecatrienal
III	棕榈酸甲酯 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester
IV	棕榈酸甲酯 vs 硬脂酸 Hexadecanoic acid methyl ester vs Octadecanoic acid
V	棕榈酸 vs 9,12,15-十八碳三烯醛 n-Hexadecanoic acid vs 9,12,15-Octadecatrienal
VI	棕榈酸 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 n-Hexadecanoic acid vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester
VII	棕榈酸 vs 硬脂酸 n-Hexadecanoic acid vs Octadecanoic acid
VIII	9,12,15-十八碳三烯醛 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 9,12,15-Octadecatrienal vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester
IX	9,12,15-十八碳三烯醛 vs 硬脂酸 9,12,15-Octadecatrienal vs Octadecanoic acid
X	(Z)-9-十八烯酸甲酯 vs 硬脂酸 (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester vs Octadecanoic acid

## 1.5 数据分析

试验数据采用 SPSS 26.0 进行统计分析, 试验数据采用独立样本的  $t$  检验进行差异性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 性信息素粗提物对雄蛾的引诱效果

以 4 种雌蛾性信息素有机溶剂粗提取物作为气味源时, 对雄蛾的诱集效果与空气对照组相比均可以达到极显著水平 (表 2), 其中乙酸乙酯性信息素提取物的诱集效果最强 ( $t=24.03, P<0.01$ ), 平均诱集数量为 (8.40±0.55) 头雄蛾; 其次是正

己烷性信息素提取物的诱集效果 ( $t=17.90, P<0.01$ ), 平均诱集数量为 (7.60±0.55) 头雄蛾; 甲醇和二氯甲烷性信息素粗提物的诱集效果分别排第 3 和第 4 位 (甲醇提取物:  $t=14.36, P<0.01$ ; 二氯甲烷提取物:  $t=11.79, P<0.01$ ), 平均诱集数量分别为 (8.80±0.84) 和 (6.80±0.84) 头。

### 2.2 草原毛虫雌蛾性腺提取物 GC-MS 分析

通过对草原毛虫雌蛾性信息素腺体浸提物的 GC-MS 分析, 从处女雌蛾性腺体的粗提取物中共鉴定出 55 种物质 (表 3)。从二氯甲烷有机溶剂提取物中得到 36 种物质, 其中 16 种为主要成分, 依次分别标示为 A-P (图 2: A), 保留时间

表 2 草原毛虫雄蛾对不同性信息素粗提物的选择性

Table 2 Selectivity of crude extracts of sex pheromone in male moths *Gynaephora qinghaiensis*

有机溶剂提取物 Organic solvent extracts	供试雄蛾总数 (N) Total number of male moths (N)	趋向各味源雄蛾数 Tendency number of male moths to odour source		$t$	$P$
		有机溶剂提取物 Organic solvent extracts	空气对照 Air control		
二氯甲烷 Dichloromethane	50	6.80±0.84	1.80±0.45	11.785 1	0.000 1
甲醇 Methanol	50	8.80±0.84	1.20±0.84	14.362 6	0.000 1
乙酸乙酯 Ethyl acetate	50	8.40±0.55	0.80±0.45	24.033 3	0.000 1
正己烷 Hexane	50	7.60±0.55	1.40±0.55	17.897 9	0.000 1

表中数值为平均值±标准误,  $P < 0.05$  表示显著性差异 (Student's  $t$  检验),  $P < 0.01$  表示极显著性差异 (Student's  $t$  检验)。下表同。

Data in the table are presented as mean±SE, and  $P < 0.05$  indicates significant difference (Student's  $t$ -test),  $P < 0.01$  indicates extremely significant difference (Student's  $t$ -test). The same below.

表 3 草原毛虫处女雌蛾性腺挥发性化合物成分鉴定

Table 3 Identification of volatile compounds in sex pheromone glands of virgin female moths *Gynaephora qinghaiensi*

序号 No.	出峰时间 (min) Peak time (min)	挥发性化合物 Volatile compound	分子式 Molecular formula	CAS 号 CAS no.	样品峰面积 The peak areas of sample			
					二氯甲烷 Dichloromethane	甲醇 Methanol	乙酸乙酯 Ethyl acetate	正己烷 Hexane
1	4.02	4,5-二甲基壬烷 4,5-Dimethyl-nonane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	17302-23-7	47 247	/	/	/
2	4.00	十一烷 Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	1120-21-4	/	/	/	42 127
3	4.37	3,5-二甲基辛烷 3,5-Dimethyl-octane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	15869-93-9	/	/	12 516	10 208
4	4.45	壬醛 Nonanal	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	124-19-6	/	/	6 968	8 608
5	4.93	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮 2,3-Dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub>	28564-83-2	/	27 719	/	/
6	5.34	壬烷 Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	111-84-2	/	/	/	13 929
7	5.35	2,3,5,8-四甲基癸烷 2,3,5,8-Tetramethyl-decane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	192823-15-7	14 450	/	/	/
8	5.87	1,3-双(1,1-二甲基乙基)苯 1,3-bis(1,1-Dimethylethyl)-benzene	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub>	1014-60-4	127 146	/	17 549	109 891
9	6.04	2,6,11-三甲基十二烷 2,6,11-Trimethyl-dodecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	31295-56-4	160 969	/	18 032	132 840
10	6.45	2,6,10-三甲基十二烷 2,6,10-Trimethyl-dodecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	3891-98-3	55 533	/	/	46 169
11	6.45	3,3-二甲基己烷 3,3-Dimethyl-hexane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	563-16-6	/	/	7 872	/
12	7.10	十四烷 Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	629-59-4	52 643	/	11 007	47 066
13	7.30	十九烷 Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	629-92-5	65 914	/	7 793	55 657
14	7.64	2,6,10,14-四甲基十七烷 2,6,10,14-Tetramethyl-heptadecane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	18344-37-1	138 808	/	17 075	119 398
15	7.85	2-甲基十三烷 2-Methyl-tridecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	1560-96-9	105 303	/	11 707	85 573
16	7.87	2,6-二甲基-十七烷 2,6-Dimethyl-heptadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	54105-67-8	67 594	/	7 620	54 121
17	7.93	十六烷 Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	544-76-3	468 268	/	54 150	385 430
18	8.02	2,7,10-三甲基十二烷 2,7,10-Trimethyl-dodecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	74645-98-0	53 455	/	/	46 230
19	8.02	2-丁基-1-辛醇 2-Butyl-1-octanol	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O	3913-02-8	/	/	8 414	/

续表 3 (Table 3 continued)

序号 No.	出峰时间 (min) Peak time (min)	挥发性化合物 Volatile compound	分子式 Molecular formula	CAS 号 CAS no.	样品峰面积 The peak areas of sample			
					二氯甲烷 Dichloromethane	甲醇 Methanol	乙酸乙酯 Ethyl acetate	正己烷 Hexane
20	8.14	2,4-二叔丁基苯酚 2,4-Di-tert-butylphenol	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	96-76-4	612 911	/	56 592	440 040
21	8.22	3,7-二甲基十一烷 3,7-Dimethyl-undecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	17301-29-0	48 356	/	5 036	37 446
22	8.30	2,6,11,15-四甲基十六烷 2,6,11,15-Tetramethyl-hexadecane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	504-44-9	136 578	/	19 384	110 442
23	8.76	十三烷 Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	629-50-5	76 864	/	/	78 617
24	8.76	6-甲基十三烷 6-Methyl-tridecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	13287-21-3	/	/	17 232	/
25	9.62	2,6,10,15-四甲基十七烷 2,6,10,15-Tetramethyl-heptadecane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	54833-48-6	/	/	34 158	/
26	9.63	2-甲基十八烷 2-Methyl-octadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	1560-88-9	316 012	/	/	278 257
27	11.18	(Z)-十六碳 11-烯酸甲酯 (Z)-Methyl hexadec 11-enoate	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	822-05-9	/	76 279	/	/
28	11.36	2-甲基二十烷 2-Methyl-eicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>	1560-84-5	376 749	/	39 828	302 551
29	11.36	棕榈酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	112-39-0	/	967 669	/	/
30	11.48	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5] 癸-6,9-二烯-2,8-二酮 7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro [4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione	C <sub>17</sub> H <sub>24</sub> O <sub>3</sub>	82304-66-3	336 983	/	26 539	203 360
31	11.55	环戊烯酸 Cyclopentaneundecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	6053-49-2	/	/	35 145	/
32	11.57	(Z)-11-十六烯酸 (Z)-11-Hexadecenoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	2416-20-8	168 455	/	/	/
33	11.57	(Z)-7-十六碳烯醛 (Z)-7-Hexadecenal	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O	56797-40-1	/	/	/	134 267
34	11.85	棕榈酸 n-Hexadecanoic acid	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	57-10-3	8 171 473	567 738	1 717 650	5 188 577
35	12.40	棕榈酸异丙酯 Isopropyl palmitate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	142-91-6	74 142	/	28 752	26 369
36	12.88	2-甲基二十四烷 2-Methyltetracosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	1560-78-7	77 654	/	/	53 405
37	13.07	9,12,15-十八碳三烯醛 9,12,15-Octadecatrienal	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O	26537-71-3	768 372	339 992	942 477	678 283
38	13.38	(E,E)-9,12-十八碳二烯酸甲酯 (E,E)-9,12-Octadecadienoic acid methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	2566-97-4	/	272 902	/	/

续表 3 (Table 3 continued)

序号 No.	出峰时间 (min) Peak time (min)	挥发性化合物 Volatile compound	分子式 Molecular formula	CAS 号 CAS no.	样品峰面积 The peak areas of sample			
					二氯甲烷 Dichloromethane	甲醇 Methanol	乙酸乙酯 Ethyl acetate	正己烷 Hexane
39	13.50	(Z)-9-十八烯酸甲酯 (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	112-62-9	/	2 243 929	/	/
40	13.81	硬酯酸甲酯 Methyl stearate	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	112-61-8	/	498 951	/	/
41	14.51	(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸 (Z,Z)-9,12-Octadecadienoic acid	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	60-33-3	36 370 687	1 142 228	3 870 334	16 963 127
42	14.79	硬脂酸 Octadecanoic acid	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	57-11-4	4 869 933	205 899	1 170 986	1 219 993
43	22.18	2-十五醇 2-Pentadecanol	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub> O	1653-34-5	/	78 416	/	/
44	22.19	草酸十六烷基烯丙酯 Oxalic acid allyl hexadecyl ester	C <sub>21</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	959078-62-7	/	/	79 957	/
45	22.20	十四烷基环氧乙烷 Tetradecyl-oxirane	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O	7320-37-8	/	/	/	21 970
46	22.26	4-甲基-环十五烷酮 4-Methyl-cyclopentadecanone	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O	34894-60-5	44 230	/	/	/
47	22.84	2-棕榈酰基甘油 2-Palmitoylglycerol	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>4</sub>	23470-00-0	2 588 582	1 546 043	2 679 555	290 209
48	27.06	2-甲基十九烷 2-Methyl-nonadecane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	1560-86-7	178 447	142 049	229 692	68 358
49	27.48	甲氧基乙酸 4-十三烷基酯 Methoxyacetic acid 4-tridecyl ester	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>3</sub>	361149-15-7	941 102	152 877	468 109	270 873
50	28.00	硬脂酸 2,3-二羟基丙酯 Octadecanoic acid 2,3-dihydroxypropyl ester	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub> O <sub>4</sub>	123-94-4	751 518	453 588	791 030	63 855
51	31.37	甲氧基乙酸 3-十四烷基酯 Methoxyacetic acid 3-tetradecyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>3</sub>	361149-12-4	302 509	/	382 816	299 840
52	32.24	甲氧基乙酸 3-十三烷基酯 Methoxyacetic acid 3-tridecyl ester	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>3</sub>	361149-11-3	258 236	/	280 514	215 764
53	35.93	甲氧基乙酸 4-十四烷基酯 Methoxyacetic acid 4-tetradecyl ester	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>3</sub>	361149-16-8	549 919	/	420 922	403 625
54	37.00	胆固醇 Cholesterol	C <sub>27</sub> H <sub>46</sub> O	57-88-5	9 369 974	7 374 347	7 906 851	1 158 114
55	37.46	维生素 E Vitamin E	C <sub>29</sub> H <sub>50</sub> O <sub>2</sub>	2074-53-5	390 982	143 073	367 185	106 699

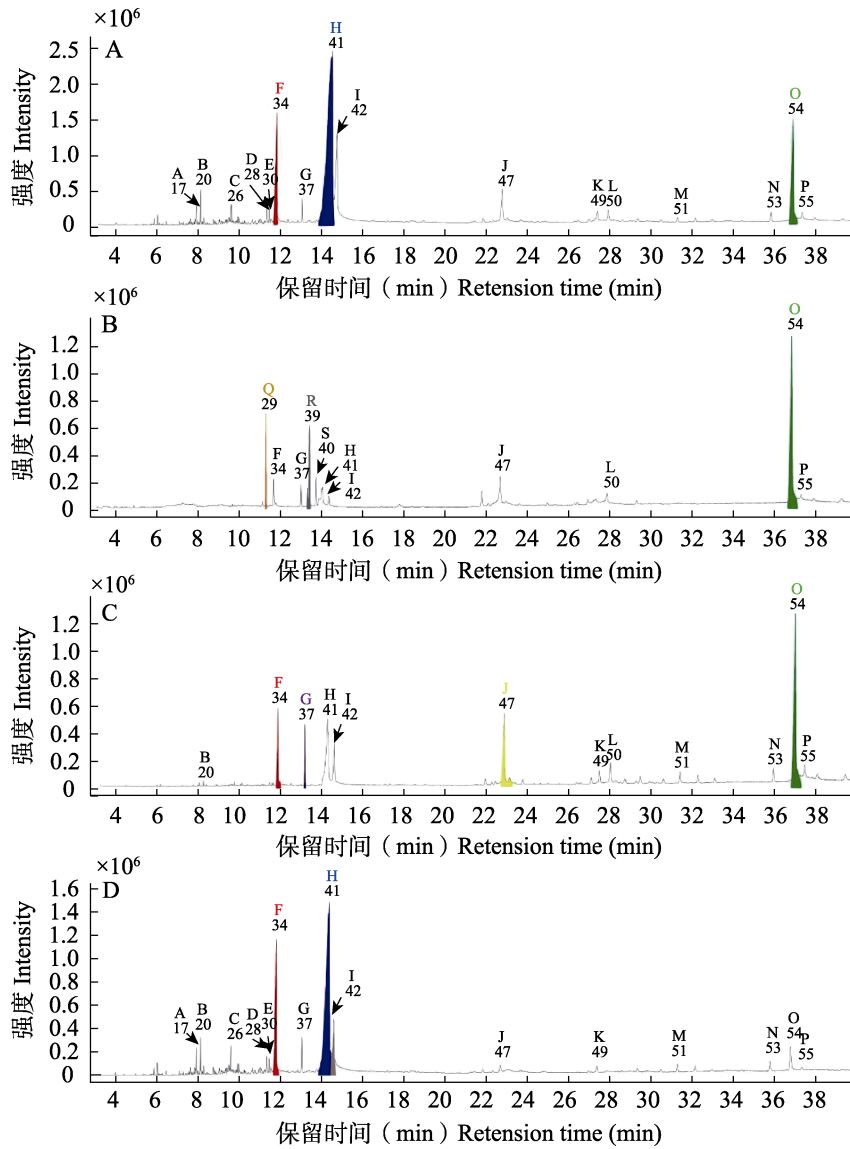


图 2 草原毛虫处女雌蛾性腺挥发性化合物 GC-MS 总离子流图

Fig. 2 Total GC-MS flow ion diagram of volatile components from sex pheromone glands of virgin female moths *Gynaephora qinghaiensis*

A. 草原毛虫雌腺体二氯甲烷提取物; B. 草原毛虫雌腺体甲醇提取物;

C. 草原毛虫雌腺体乙酸乙酯提取物; D. 草原毛虫雌腺体正己烷提取物。

A. Dichloromethane extract for sex pheromone in female adults of *G. qinghaiensis*; B. Methanol extract for sex pheromone in female adults of *G. qinghaiensis*; C. Ethyl acetate extract for sex pheromone in female adults of *G. qinghaiensis*; D. Hexane extract for sex pheromone in female adults of *G. qinghaiensis*.

A: 十六烷; B: 2,4-二叔丁基苯酚; C: 2-甲基十八烷; D: 2-甲基二十烷; E: 7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮; F: 棕榈酸; G: 9,12,15-十八碳三烯醛; H: (Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸; I: 硬脂酸; J: 2-棕榈酰基甘油; K: 甲氧基乙酸 4-十三烷基酯; L: 硬脂酸 2,3-二羟基丙酯; M: 甲氧基乙酸 3-十四烷基酯; N: 甲氧基乙酸 4-十四烷基酯; O: 胆固醇; P: 维生素 E; Q: 棕榈酸甲酯; R: (Z)-9-十八烯酸甲酯; S: 硬脂酸甲酯。

A: Hexadecane; B: 2,4-Di-tert-butylphenol; C: 2-Methyl-octadecane; D: 2-Methyl-eicosane;

E: 7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro[4.5]deca-6,9-diene-2,8-dione; F: n-Hexadecanoic acid; G: 9,12,15-Octadecatrienal;

H: (Z,Z)-9,12-Octadecadienoic acid; I: Octadecanoic acid; J: 2-Palmitoylglycerol; K: Methoxyacetic acid 4-tridecyl ester;

L: Octadecanoic acid 2,3-dihydroxypropyl ester; M: Methoxyacetic acid 3-tetradecyl ester; N: Methoxyacetic acid

4-tetradecyl ester; O: Cholesterol; P: Vitamin E; Q: Hexadecanoic acid methyl ester;

R: (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester; S: Methyl stearate.

集中在 7.93-37.46 min 之间, 其中在 11.85、14.51 和 37.00 min 得到了 3 个明显的物质峰, 分别代表的物质可能是棕榈酸、(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸和胆固醇, 匹配率分别为 91.10%、85.20%和 94.96%; 从甲醇提取物中得到 17 种化学成分, 11 种为主要成分 (图 2: B), 保留时间集中在 11.36-37.46 min 之间, 其中在 11.36、13.50 和 37.00 min 得到了 3 个明显的物质峰, 分别代表的物质可能是棕榈酸甲酯、(Z)-9-十八烯酸甲酯和胆固醇, 匹配率分别为 91.50%、84.80%和 94.96%; 从乙酸乙酯提取物中得到 35 种化学成分, 12 种为主要成分 (图 2: C), 保留时间集中在 8.14-37.46 min 之间, 其中在 11.85、13.07、22.84 和 37.00 min 得到了 4 个明显的物质峰, 分别代表的物质可能是棕榈酸、9,12,15-十八碳三烯醛、2-棕榈酰基甘油和胆固醇, 匹配率分别为 91.10%、86.50%、86.50%和 94.96%; 从正己烷提取物中得到 38 种化学成分, 15 种为主要成分 (图 2: D), 保留时间集中在 7.93-37.46 min 之

间, 其中在 11.85、14.51 和 14.79 min 得到了 3 个明显的物质峰, 分别代表的物质可能是棕榈酸、(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸和硬脂酸, 匹配率分别为 91.10%、85.20%和 90.30%。

### 2.3 雄蛾对雌蛾性腺主要组分的行为反应测定

从 8 种雌蛾性腺挥发性化合物对雄蛾诱集效果来看 (表 4): 棕榈酸和 9,12,15-十八碳三烯醛对雄蛾的引诱活性最强, 平均吸引的雄蛾数量分别为 (8.00±0.71) 和 (6.40±1.14) 头, 引诱效果极显著高于对照溶剂 (棕榈酸 vs 二氯甲烷:  $t=12.55$ ,  $P<0.01$ ; 9,12,15-十八碳三烯醛 vs 乙酸乙酯:  $t=10.61$ ,  $P<0.01$ ); 其次是(Z)-9-十八烯酸甲酯和棕榈酸甲酯的诱集效果, 平均吸引的雄蛾数量分别为 (5.00±0.71) 和 (7.60±1.14) 头, 引诱效果极显著高于对照溶剂[(Z)-9-十八烯酸甲酯 vs 甲醇:  $t=8.94$ ,  $P<0.01$ ; 棕榈酸甲酯 vs 甲醇:  $t=8.26$ ,  $P<0.01$ ]; 相比而言, 硬脂酸对雄蛾的吸引作用相对较弱, 但也极显著高于对照溶

表 4 草原毛虫雄蛾对 8 种雌蛾性腺挥发性化合物的嗅觉行为反应

Table 4 Olfactory behavioral responses of male moths *Gynaephora qinghaiensis* to eight volatile compounds in sex pheromone glands of female adults

味源 Odour sources	对照溶剂 Control solvent	供试雄蛾 总数 (N) Total number of male moths (N)	趋向各味源雄蛾数 Tendency number of male moths to odour source		t	P
			味源 Odour sources	对照溶剂 Control solvent		
棕榈酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester	甲醇 Methanol	50	7.60±1.14	2.00±1.00	8.256 7	0.000 1
棕榈酸 n-Hexadecanoic acid	二氯甲烷 Dichloromethane	50	8.00±0.71	1.60±0.89	12.551 4	0.000 1
9,12,15-十八碳三烯醛 9,12,15-Octadecatrienal	乙酸乙酯 Ethyl acetate	50	6.40±1.14	0.40±0.55	10.606 6	0.000 1
(Z)-9-十八烯酸甲酯 (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester	甲醇 Methanol	50	5.00±0.71	1.00±0.71	8.944 3	0.000 1
(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸 (Z,Z)-9,12-Octadecadienoic acid	二氯甲烷 Dichloromethane	50	4.80±1.30	3.80±0.84	1.443 4	0.186 9
硬脂酸 Octadecanoic acid	正己烷 Hexane	50	5.00±0.71	3.00±0.71	4.472 1	0.002 1
2-棕榈酰基甘油 2-Palmitoylglycerol	乙酸乙酯 Ethyl acetate	50	3.00±0.71	2.00±0.71	2.236 1	0.055 8
胆固醇 Cholesterol	二氯甲烷 Dichloromethane	50	4.00±1.00	5.00±0.71	- 1.825 7	0.105 3

剂正己烷 ( $t=4.47, P<0.01$ ), 平均可以吸引 ( $5.00\pm 0.71$ ) 头雄蛾。(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸和 2-棕榈酰基甘油, 相比于对照溶剂对雄蛾的引诱效果不显著[(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸 vs 二氯甲烷:  $t=1.44, P=0.19$ ; 2-棕榈酰基甘油 vs 乙酸乙酯:  $t=2.24, P=0.06$ ]。胆固醇, 相比于对照溶剂二氯甲烷溶剂对雄蛾具有驱避作用, 但效果不显著 ( $t= - 1.83, P=0.11$ )。

**2.4 雌蛾性腺主成分混合物对雄蛾的诱集效果**

从雄蛾对 10 种雌蛾性腺挥发性化合物混合组分的选择率 (表 5) 可知: 处理 II 即将棕榈酸

甲酯与 9,12,15-十八碳三烯醛进行 1:1 混合后对草原毛虫雄蛾具有较好的诱集效果, 平均可以诱集到 ( $5.60\pm 0.55$ ) 头雄蛾, 其诱集效果与空气对照组相比存在极显著性差异( $t=6.35, P<0.01$ ); 其次是处理 V (棕榈酸与 9,12,15-十八碳三烯醛混合)、处理 VIII (9,12,15-十八碳三烯醛与(Z)-9-十八烯酸甲酯混合) 和处理 IX (9,12,15-十八碳三烯醛与硬脂酸混合) 的引诱效果, 与空气对照组之间存在极显著性差异 (处理 V:  $t=5.67, P<0.01$ ; 处理 VIII:  $t=5.84, P<0.01$ ; 处理 IX:  $t=4.02, P<0.01$ )。上述 4 个处理中具有公共组分是 9,12,15-十八碳三烯醛。处理 I (棕榈酸甲

表 5 草原毛虫雄蛾对不同雌蛾性腺挥发性化合物组合的嗅觉行为反应  
Table 5 Olfactory behavioral responses of male moths *Gynaephora qinghaiensis* to combination components of volatile compounds in sex pheromone glands of female moths

味源 Odour sources	供试雄蛾 总数 (N) Total number of male moths (N)	趋向各味源雄蛾数 Tendency number of male moths to odour source		t	P
		味源 Odour sources	空气对照 Air control		
棕榈酸甲酯 vs 棕榈酸 Hexadecanoic acid methyl ester vs n-Hexadecanoic acid	50	4.60±0.55	3.20±1.10	2.556 0	0.033 9
棕榈酸甲酯 vs 9,12,15-十八碳三烯醛 Hexadecanoic acid methyl ester vs 9,12,15-Octadecatrienal	50	5.60±0.55	3.40±0.55	6.350 9	0.000 2
棕榈酸甲酯 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 Hexadecanoic acid methyl ester vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester	50	3.80±0.84	5.00±0.71	- 2.449 5	0.040 0
棕榈酸甲酯 vs 硬脂酸 Hexadecanoic acid methyl ester vs Octadecanoic acid	50	4.80±1.48	4.20±1.10	0.727 6	0.487 6
棕榈酸 vs 9,12,15-十八碳三烯醛 n-Hexadecanoic acid vs 9,12,15-Octadecatrienal	50	6.40±1.14	3.00±0.71	5.666 7	0.000 5
棕榈酸 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 n-Hexadecanoic acid vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester	50	2.80±0.84	5.80±0.84	- 5.669 5	0.000 5
棕榈酸 vs 硬脂酸 n-Hexadecanoic acid vs Octadecanoic acid	50	4.00±1.58	4.20±0.45	- 0.272 2	0.797 2
9,12,15-十八碳三烯醛 vs (Z)-9-十八烯酸甲酯 9,12,15-Octadecatrienal vs (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester	50	5.80±0.84	2.60±0.89	5.842 4	0.000 4
9,12,15-十八碳三烯醛 vs 硬脂酸 9,12,15-Octadecatrienal vs Octadecanoic acid	50	5.80±0.84	3.60±0.89	4.016 6	0.003 9
(Z)-9-十八烯酸甲酯 vs 硬脂酸 (Z)-9-Octadecenoic acid methyl ester vs Octadecanoic acid	50	3.60±0.89	5.40±0.55	- 3.837 6	0.005 0

酯与棕榈酸混合)的引诱效果可以达到显著水平( $t=2.56, P=0.03$ )。然而,有些组分单独使用时能有效诱集雄蛾,但与其他组分混合后效果反而下降,例如处理 IV(棕榈酸甲酯与硬脂酸混合)和处理 VII(棕榈酸与硬脂酸混合);甚至有的组分混合后反而对雄蛾起到驱避作用,例如处理 III[棕榈酸甲酯与(Z)-9-十八烯酸甲酯混合]、处理 VI[棕榈酸与(Z)-9-十八烯酸甲酯混合]和处理 X[(Z)-9-十八烯酸甲酯与硬脂酸混合],驱避效果均能达到显著水平及以上(处理 III: $t=-2.45, P=0.04$ ;处理 VI: $t=-5.67, P<0.01$ ;处理 X: $t=-3.84, P<0.01$ )。上述 3 个处理中具有的公共组分是(Z)-9-十八烯酸甲酯。

### 3 结论与讨论

随着昆虫化学生态学的发展,昆虫性信息素能够有效保证昆虫在种内雌雄个体间性的联系以及种群繁衍的有序进行,一般采用诱杀、迷向和交配干扰的推拉防治方式应用于种群监测和害虫防控中(Cook *et al.*, 2007;王安佳等, 2018)。昆虫性信息素的化学结构鉴定主要在鳞翅目、鞘翅目、半翅目等种类(陈学新等, 2023),此类物质具有物种特异性、高效、微量、无毒、无污染、对有益生物无害等优点,在害虫绿色防控方面中发挥着重要作用(刘万才等, 2022; Souza *et al.*, 2023),而且有关性信息素的研究与应用也取得了较多成果。鳞翅目昆虫作为仅次于鞘翅目的第二大类群,目前已有很多应用性信息素诱捕技术成功防治此类害虫的实例,例如针对高粱(黄源等, 2022)、烟草(张松涛等, 2023)、果树(周浩然, 2024;周浩然等, 2024)、水稻(王未英等, 2025)等作物上的鳞翅目害虫,以及其他常见种类如豆荚螟 *Etiella zinckenella*、黄野螟 *Heortia vitessoides*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、银纹夜蛾 *Argyrogramma agnata* 等(周亚奎等, 2017; 税静等, 2024),利用其性信息素进行预测预报与防治均取得了较好效果。在此基础上,将其他防治技术与性信息素联合应用,不仅在防治效果方面具有协同增效的作用,而且在保护生态安全和可持续性等方面也显示出明显优势,例

如马云波和高成龙(2017)采用性诱与灯诱联用的方式对沙棘木蠹蛾 *Eogystia hippophaecolus* 成虫进行诱捕试验,诱捕数量较单一使用杀虫灯或性诱剂大幅度提升,但随着诱芯数量的增多诱捕效果有降低的趋势;刘中芳等(2021)将高浓度性信息素与高效氯氟氰菊酯乳油(25 g/L、3 000 倍液)联用,迷向+杀虫剂防治区梨小食心虫 *G. molesta* 种群总量显著低于杀虫剂防治区、迷向防治区及空白对照区;同时,迷向防治区和迷向+杀虫剂防治区,此虫的交配率和蛀果率也显著降低;梁虎军等(2023)将性诱芯与蓝色粘虫板联用诱杀番茄潜叶蛾 *T. absoluta* 的效果显著高于黄色粘虫板,性信息素迷向技术的诱蛾下降率在 80%以上,迷向处理区蛀叶率和蛀果率均显著低于空白对照区;刘倩等(2025)将 430 nm 紫光 LED 灯与性信息素联用诱捕桃蛀螟 *Conogethes punctiferalis* 成虫,引诱效果也表明联用效果优于单一性诱和单一灯诱。此方法逐渐成为害虫综合治理中的重要措施之一,已受到国内外学者的高度重视。

大部分昆虫性信息素分泌腺体都位于前腹部和后腹部,鳞翅目昆虫性信息素的释放部位大部分都通常位于腹部末端 8-9 节,通常由特殊的节间膜组成(Foster and Anderson, 2021)。目前常用的提取方法主要有 4 种,即有机溶剂浸泡法、冷凝法(宋洋等, 2008)、动态顶空吸附法(Till *et al.*, 2012)和固相微萃取(孔祥波等, 2010)。有机溶剂浸泡法,在昆虫性信息素释放高峰期内剪下未交配雌蛾性腺,对于较小虫体可直接浸泡于有机溶剂中,室温静置时间通常在 30 min 左右,浸提液过滤后利用氮气将其浓缩至所需要的体积后进行仪器分析(朱侯伟, 2021)。此方法要求溶剂极性与所提取性信息素的极性相似,且溶剂纯度高。色谱纯正己烷是目前使用最多的溶剂,此外,庚烷、二氯甲烷、丙酮、二甲苯等溶剂也常用于提取昆虫性信息素(Witzgall *et al.*, 2000; Ryall *et al.*, 2010)。此方法简便,可以获得性信息素腺体中几乎所有组分。本研究利用二氯甲烷、甲醇、乙酸乙酯和正己烷 4 种有机溶剂,采用此方法制得性信息素粗

提取物,通过 Y-型嗅觉仪分析发现,4 种粗提取物对雄蛾均具有引诱作用,引诱效果依次为:乙酸乙酯 > 正己烷 > 甲醇 > 二氯甲烷。

当获得性信息素粗提取物后,利用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术能将性腺提取液的各种组分进行分离,同时获得各组分的质谱数据,借助化学物质信息库匹配出对应的化合物。此方法灵敏度高、分辨率高和分析过程简便快速,被广泛应用于各种复杂基质样品中痕量物质的分析。利用 GC-MS 可以确定性信息素活性成分的分子量、分子式、化学结构及双键位置(杨淑珍,2017)。目前已鉴定出超过 700 种蛾类的性信息素,主要成分为醇、醛、酯、酮、烷烃等化合物或衍生物,按其化学结构可分为 4 种类型,分别为 Type I、Type II、Type III 和 Type 0 (Löfstedt *et al.*, 2012; 马涛等, 2019), 其中 II 型性信息素主要为长链(C<sub>17</sub>-C<sub>27</sub>)不饱和的碳氢化合物或相应的环氧衍生物,其组分的结构常见于 6,9-二烯、3,6,9-三烯、1,3,6,9-四烯、3,6,9,12,15-五烯及其环氧衍生物,不具有末端官能团,双键多为顺式(Löfstedt *et al.*, 2016), 约占已鉴定鳞翅目蛾类昆虫信息素的 15% (Wyatt, 2017)。该型性信息素主要分布于尺蛾科、毒蛾科、灯蛾科和部分夜蛾科(Ando *et al.*, 2004a, 2004b)。本研究通过 GC-MS 技术,从草原毛虫未交配雌蛾性腺中共分离鉴定到 55 种挥发性化合物,结合单组分物质的 Y-型嗅觉仪测试,发现草原毛虫雄蛾对雌蛾性腺中的 5 种挥发性化合物:9,12,15-十八碳三烯醛、棕榈酸、(Z)-9-十八烯酸甲酯、棕榈酸甲酯、硬脂酸均表现一定的活性,从而推测这些化合物可能是草原毛虫雌蛾的性信息素成分。

昆虫性信息素不仅具有物种专一性,还具有结构多样性、合成复杂性等特征,而这些特征恰恰是引起蛾类物种多样性的主要因素(Martinazzo *et al.*, 2022)。除了结构变异外,只有少数情况下是一种化学物质,例如苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 和杨小舟蛾 *Micromelalopha siversi* (Liu *et al.*, 2021), 绝大多数性信息素通常包括若干个含量较高的主组分和微量组分,例如添加茶毛虫 *Euproctis pseudoconspersa* 性信息

素次要成分 14-甲基十五碳醇异丁酸酯可以提高主要组分 10,14-二甲基十五碳醇异丁酸酯的引诱效果(雷子寅等, 2023)。此外,由于昆虫种群间的生殖隔离导致性信息素中各个组分和比例都不尽相同,即使存在相同的主组分,但微量组分在性信息素的种特异性中也起着重要作用(Ryne *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2018; Yang and Wang, 2021; 高宇等, 2023), 例如将乙酸十二酯和 (8E,10Z)-8,10-十二碳二烯醇乙酸酯与 (8E,10E)-8,10-十二碳二烯醇乙酸酯按 10 : 2.5 : 100 的比例混合后对大豆食心虫 *Leguminivora glycinivorella* 雄虫的诱集效果反而低于 (8E,10E)-8,10-十二碳二烯醇乙酸酯主组分(Vang *et al.*, 2006)。本研究将 2 种具有诱集效果的化学物质按照同质量混合后,进行 Y-型嗅觉选择试验,结果表明草原毛虫雄虫对含有 9,12,15-十八碳三烯醛成分,另一成分如棕榈酸甲酯、棕榈酸、(Z)-9-十八烯酸甲酯和硬脂酸的混合成分均显著偏好;当含有共同成分(Z)-9-十八烯酸甲酯时,棕榈酸甲酯、棕榈酸和硬脂酸与其混合后反而对雄蛾具有趋避作用。究其原因可能在于蛾类昆虫性信息素组分的分子结构中通常含有双键,这些双键结构会发生顺反异构现象(闫祺等, 2023)。性信息素顺反异构体在生物化学领域内是一种常见的分子构型,确实会影响性信息素活性,例如茶小卷叶蛾 *Adoxophyes honmai* Yasuda 性信息素 9-十四碳烯-1-醇乙酸酯顺式异构体 Z9-TDA 对雄成虫有引诱作用,但反式异构体却是驱避作用(雷子寅等, 2023); Du 等(2013)在实际应用过程中发现金纹细蛾 *Phyllonorycter ringoniella* 的信息素组分为顺-10-十四碳烯乙酸酯(Z10-14:Ac)和反 4,顺 10-十四碳烯乙酸酯(E4,Z10-14:Ac),实际 1 mg E4,Z10-14:Ac 就具有显著的诱蛾效果。但由于在质谱电子轰击(EI)条件下,不饱和脂肪族化合物碳碳双键不容易发生裂解,化合物在形成分子离子后氢原子容易发生沿碳链重排,仅凭对质谱图的分析难以确定化合物具体的顺反构型(Ando and Yamakawa, 2011);此外,性信息素组分在腺体中的含量极低(ng 级水平),而且本研究获得的性腺粗提物

是利用溶剂浸提法提取的, 此方法不能反映活体昆虫动态释放的组分, 且对溶剂要求极其严格, 溶剂需与所提的化合物相似相容(马涛等, 2018), 但具体原因尚需进一步综合分析。

总之, 草原毛虫雌蛾性腺挥发性化合物组分的鉴定, 可有利于开发基于性信息素的高效引诱剂, 不仅可以监测草原毛虫的发生动态, 还可以通过大量诱捕或者迷向干扰降低雌雄交配率, 进而为草原毛虫的绿色防控技术提供可靠的技术参考和理论依据。

### 参考文献 (References)

- Ando T, Inomata S, Yamamoto M, 2004a. Lepidopteran sex pheromone// Schulz S (ed.). *The Chemistry of Pheromones and Other Semiochemicals I*. Berlin: Springer. 51–96.
- Ando T, Inomata S, Yamamoto M, 2004b. Lepidopteran sex pheromones. *Topics in Current Chemistry*, 239: 51–96.
- Ando T, Yamakawa R, 2011. Analyses of lepidopteran sex pheromones by mass spectrometry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(7): 990–1002.
- Ando T, Yamamoto M, 2020. Semiochemicals containing lepidopteran sex pheromones: Wonderland for a natural product chemist. *Journal of Pesticide Science*, 45(4): 191–205.
- Bao GS, Wang HS, 2015. Effects of female's sex pheromone of *Gynaephora alpherakii* on attracting male moth by extracting four organic solvents. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 45(3): 10–12. [鲍根生, 王宏生, 2015. 草原毛虫雌蛾性信息素粗提物对雄蛾引诱效果研究. 青海畜牧兽医杂志, 45(3): 10–12.]
- Butenandt A, Beckmann R, Stamm D, Hecker E, 1959. Über den sexual-lockstoff des seidenspinners *Bombyx mori*. reindarstellung und konstitution. *Zeitschrift für Naturforsch*, 14(4): 283–284.
- Chen QH, Zeng J, Zeng W, Li Q, Chen XJ, Zou Y, 2017. Application of the morphological indicators of the male internal reproductive system in forecasting the population dynamics of the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) by sex pheromone trapping. *Acta Entomologica Sinica*, 60(8): 927–935. [陈庆华, 曾娟, 曾伟, 李庆, 陈晓娟, 邹禹, 2017. 稻纵卷叶螟雄蛾内生生殖系统形态指标在性诱测报中的应用. 昆虫学报, 60(8): 927–935.]
- Chen QH, Zhu F, Tian ZH, Zhang WM, Guo R, Liu WC, Pan LM, Du YG, 2018. Minor components play an important role in interspecific recognition of insects: A basis to pheromone based electronic monitoring tools for rice pests. *Insects*, 9(4): 192.
- Chen XX, Du YJ, Huang JH, Li S, Jiang DH, Mo MH, Pang H, Sun XL, Wang Q, Wang S, Xia YX, Xue XN, Zang LS, Zhang J, Zhang LS, Zhang WQ, Yin H, 2023. Recent progresses in biological control of crop pathogens and insect pests in China. *Plant Protection*, 49(5): 340–370. [陈学新, 杜永均, 黄健华, 李姝, 姜道宏, 莫明和, 庞虹, 孙修炼, 王琦, 王甦, 夏玉先, 徐学农, 臧连生, 张杰, 张礼生, 张文庆, 尹恒, 2023. 我国作物病虫害生物防治研究与应用最新进展. 植物保护, 49(5): 340–370.]
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.
- Du YJ, Li P, Chen ZQ, Lin YR, Wang YH, Qin YX, 2013. Field trapping of male *Phyllonorycter ringoniella* using variable ratios of pheromone components. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 146(3): 357–363.
- Foster SP, Anderson KG, 2021. Some factors influencing calling behavior and mass emission rate of sex pheromone from the gland of the moth *Chloridea virescens*. *Journal of Chemical Ecology*, 48(2): 141–151.
- Gao Y, Wang L, Wang ZJ, Wang YY, Xu ML, Zhu SY, Han ZX, Shi SS, 2023. Research progress in insect sex pheromones of soybean pests. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 45(2): 221–230. [高宇, 王龙, 王自杰, 王月英, 徐梦蕾, 朱诗禹, 韩子鑫, 史树森, 2023. 大豆害虫性信息素研究进展. 中国油料作物学报, 45(2): 221–230.]
- Hecker E, Butenandt A, 1984. Bombykol revisited-reflections on a pioneering period and on some of its consequences// Hummel HE, Miller TA (eds.). *Techniques in Pheromone Research*. New York: Springer Verlag. 1–44.
- Hu KY, Yuan PY, Qian CY, Jia CJ, Yang WJ, Liu CY, Wen XJ, Ma T, 2023. Observation of the circadian rhythm of calling behavior and identification of the sex pheromone of female moths of *Brithys crini* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 66(12): 1602–1611. [胡可炎, 苑鹏宇, 钱沉鱼, 贾彩娟, 杨文娟, 刘春燕, 温秀军, 马涛, 2023. 葱兰夜蛾雌蛾求偶行为节律观察与性信息素鉴定. 昆虫学报, 66(12): 1602–1611.]
- Huang Y, Lin J, Shui J, He LY, Gu XH, Jia M, Liu XM, Zhou Y, Liu Y, Wang XQ, Zhang ZD, 2022. Dynamic monitoring of sorghum Lepidoptera pest occurrence by using sex pheromone technology. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 38(13): 135–140. [黄源, 林君, 税静, 贺利业, 古晓红, 贾敏, 刘雪梅, 周艳, 刘洋, 王小勤, 张志东, 2022. 性信息素技术在高粱鳞翅目害虫发生动态监测中的应用. 中国农学通报, 38(13): 135–140.]
- Kong XB, Zhao LL, Zhang Z, Wang HB, Bai FH, Yu GM, 2010. Solid-phase microextraction (SPME) of pheromone components of *Dendrolimus houi* (Lepidoptera: Lasiocampidae) and their characterization by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and GC-electroantennographic detection (GC-EAD). *Acta Entomologica Sinica*, 53(8): 857–863. [孔祥波, 赵莉茜,

- 张真, 王鸿斌, 柏芳华, 于国民, 2010. 松毛虫性信息素的固相微萃取及质谱和触角电位分析. *昆虫学报*, 53(8): 857–863.]
- Lei ZY, Lin SB, Zhang J, Zhang X, Yu GW, Sun XL, Sun XL, 2023. Progress in research on volatile semio-chemicals of insect tea pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(2): 449–462. [雷子寅, 蔺松波, 张瑾, 张新, 于广威, 孙晓玲, 孙小玲, 2023. 茶树害虫挥发性化学信息物质的研究进展. *应用昆虫学报*, 60(2): 449–462.]
- Li CH, Liang CZ, Lu Y, Zhu XH, Du YJ, Yan T, Lu JF, 2025. Recent progress on sex pheromones in lepidopteran insect. *China Plant Protection*, 45(5): 23–28, 40. [李晨浩, 梁赤周, 鲁毓, 朱旭晖, 杜永均, 严铁, 陆剑飞, 2025. 鳞翅目昆虫性信息素研究进展. *中国植保导刊*, 45(5): 23–28, 40.]
- Li DB, He XP, Chen YB, Xie MS, He ZZ, Mao J, Du ML, 2024. Preliminary reports on the effectiveness of using trapping technology of insect sex pheromones to control *Diaphania pyloalis* Walker. *China Plant Protection*, 44(11): 67–70. [李大波, 何晓平, 陈永波, 谢茂盛, 何忠泽, 毛建, 杜茂林, 2024. 应用昆虫性信息素诱集技术防治桑螟效果初报. *中国植保导刊*, 44(11): 67–70.]
- Li JL, Chen L, Liu CM, 2019. Olfactory and behavioral responses of *Solenopsis invicta* (Hymenoptera: Formicidae) workers to cotton volatiles induced by cotton aphids. *Acta Entomologica Sinica*, 62(5): 594–601. [李俊龙, 陈立, 刘长明, 2019. 红火蚁工蚁对棉蚜诱导的棉花挥发物的嗅觉和行为反应. *昆虫学报*, 62(5): 594–601.]
- Li JL, Li MQ, Lai YP, 2024. Research progress on ecological characteristics and control measures of *Gynaephora qinghaiensis*. *Qinghai Prataculture*, 33(3): 44–49. [李静玲, 李美琪, 来有鹏, 2024. 草原毛虫生态学特性及防治措施研究进展. *青海草业*, 33(3): 44–49.]
- Li TJ, Shi GR, Dong YX, Zheng JJ, Zhu XM, Liu WC, Du YJ, 2023. The effect of trap design and color on the pheromone trapping of *Spodoptera frugiperda*. *China Plant Protection*, 43(7): 49–56. [李天菊, 施乾芮, 董义霞, 郑静君, 朱晓明, 刘万才, 杜永均, 2023. 诱捕器结构和颜色及悬挂高度对草地贪夜蛾诱捕效果的影响. *中国植保导刊*, 43(7): 49–56.]
- Liang HJ, Liu R, Zhao Z, Liu LJ, Luo SK, 2023. Control efficacy of mating disruption control of *Tuta absoluta* by using sex pheromone in greenhouse. *China Plant Protection*, 43(12): 67–69, 88. [梁虎军, 刘容, 赵振, 刘丽娟, 罗树凯, 2023. 性信息素迷向技术对温室大棚番茄潜叶蛾的防治效果. *中国植保导刊*, 43(12): 67–69, 88.]
- Liu F, Guo L, Zhang SF, Kong XB, Zhang Z, 2021. Synthesis and bioactivity of (13Z, 15E)-octadecadienal: A sex pheromone component from *Micromelalopha siversi* Staudinger (Lepidoptera: Notodontidae). *Pest Management Science*, 77(1): 264–272.
- Liu Q, Meng X CZ, Huang TX, Liu YL, Li HD, Wang YP, Tu HT, 2025. Study on the trapping effect of different wavelengths LED lights combined with sex pheromones on *Conogethes punctiferalis*. *Journal of Fruit Science*, 42(10): 2382–2391. [刘倩, 孟祥成真, 黄天祥, 柳友亮, 李皓东, 王一芄, 涂洪涛, 2025. 不同波长光与性信息素联用对桃蛀螟的诱捕效果研究. *果树学报*, 42(10): 2382–2391.]
- Liu WC, Liu ZD, Zhu XM, Du YJ, 2022. Development and application of insect sex pheromone technology in China. *Chinese Journal of Biological Control*, 38(4): 803–811. [刘万才, 刘振东, 朱晓明, 杜永均, 2022. 我国昆虫性信息素技术的研发与应用进展. *中国生物防治学报*, 38(4): 803–811.]
- Liu ZF, Zhang M, Sun XT, Zhang PJ, Yang J, Gao Y, Fan JB, Fan RJ, 2021. Population dynamics and damage of *Grapholitha molesta* Busck exposed to high concentration sex pheromone and insecticide stress. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 914–919. [刘中芳, 张敏, 孙晓婷, 张鹏九, 杨静, 高越, 樊建斌, 范仁俊, 2021. 高浓度性信息素和杀虫剂胁迫下梨小食心虫种群特征和为害. *中国生物防治学报*, 37(5): 914–919.]
- Löfstedt C, Svensson GP, Jirle EV, Rosenberg O, Roques A, Millar JG, 2012. (3Z,6Z,9Z,12Z,15Z)-pentacosapentaene and (9Z,11E)-tetradecadienyl acetate: Sex pheromone of the spruce coneworm *Dioryctria abietella* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Applied Entomology*, 136(2): 70–78.
- Löfstedt C, Wahlberg N, Millar JG, 2016. Evolutionary patterns of pheromone diversity in Lepidoptera// Allison JD, Cardé RT (eds.). *Pheromone Communication in Moths*. Berkeley: University of California Press. 43–78.
- Ma T, Huang ZJ, Zhu Y, Lin N, Xiao Q, He YR, Wen XJ, 2019. Progress in sex pheromone components in geometrid species (Lepidoptera: Geometridae) and their applications. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(5): 152–162. [马涛, 黄志嘉, 朱映, 林娜, 肖强, 何余容, 温秀军, 2019. 尺蛾科昆虫性信息素组分特征及应用进展. *林业科学*, 55(5): 152–162.]
- Ma T, Lin N, Liu XB, Zhang N, Zhang MY, Huang XN, Wen XJ, 2018. Extraction and analysis of insect sex pheromone. *Experimental Technology and Management*, 35(12): 68–71. [马涛, 林娜, 刘小蓓, 张娜, 张曼玉, 黄夏宁, 温秀军, 2018. 昆虫性信息素提取与分析. *实验技术与管理*, 35(12): 68–71.]
- Ma YB, Gao CL, 2017. Experimental study on the effect of *Eogystia hippophaecolus* through combined use of light and sex attraction. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 23(8): 76, 103. [马云波, 高成龙, 2017. 性诱与灯诱结合使用对沙棘木蠹蛾的诱捕效果试验. *安徽农学通报*, 23(8): 76, 103.]
- Martinazzo J, Ballen SC, Steffens J, Steffens C, 2022. Sensing of pheromones from *Euschistus heros* (F.) stink bugs by nanosensors. *Sensors and Actuators Reports*, 4: 100071.
- Peng GD, 2011. Studies on sex pheromone in *Melanotus cribricollis*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Forestry. [彭

- 观地, 2011. 筛胸梳爪叩甲性信息素的初步研究. 硕士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院.]
- Rizvi SAH, George J, Reddy GVP, Zeng XN, Guerrero A, 2021. Latest developments in insect sex pheromone research and its application in agricultural pest management. *Insects*, 12(6): 484.
- Ryall K, Silk PJ, Wu JP, Mayo P, Lemay MA, MaGee D, 2010. Sex pheromone chemistry and field trapping studies of the elm spanworm *Ennomos subsignaria* (Hübner) (Lepidoptera: Geometridae). *Naturwissenschaften*, 97(8): 717–724.
- Ryne C, Svensson GP, Anderbrant O, Löfstedt C, 2007. Evaluation of long-term mating disruption of *Ephestia kuehniella* and *Plodia interpunctella* (Lepidoptera: Pyralidae) in indoor storage facilities by pheromone traps and monitoring of relative aerial concentrations of pheromone. *Journal of Economic Entomology*, 100(3): 1017–1025.
- Shen NY, Liu BL, Zeng L, Zhang XC, Yan SS, Gao XC, 1983a. Research on population dynamics of *Gynaephora chenghaiensis* Chou et Yin and its application in forecasting. *Chinese Journal of Grassland*, 5(4): 57–61. [沈南英, 刘伯良, 曾璐, 张显耻, 阎省三, 高晓春, 1983a. 草原毛虫消长规律及预测预报的研究. 中国草原, 5(4): 57–61.]
- Shen NY, Zeng L, Zhang XC, Shan Z, Zhou ZR, Yan SS, Gao XC, 1983b. Recent progress on sex pheromones in *Gynaephora chenghaiensis* Chou et Yin. *Chinese Journal of Grassland*, 5(1): 43–49. [沈南英, 曾璐, 张显耻, 善智, 周中蓉, 阎省三, 高晓春, 1983b. 草原毛虫性信息素的研究. 中国草原, 5(1): 43–49.]
- Shui J, Gu XH, Zeng CQ, Feng L, Xiao J, Lin J, Zhao XY, Jia M, Zhang ZD, 2024. Preliminary study of monitoring and control of lepidopteran pests by using belt compound planting patterns of sorghum and summer soybean. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 53(2): 51–55. [税静, 古晓红, 曾传清, 冯林, 肖俊, 林君, 赵形勇, 贾敏, 张志东, 2024. 性信息素在高粱套夏大豆带状复合种植鳞翅目害虫监测与防治中的应用初探. 农业科技通讯, 53(2): 51–55.]
- Song Y, Huang QY, Shu JP, Wang HJ, 2008. Study and application of sex pheromone of click beetle (Coleoptera: Elateridae). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 24(11): 359–364. [宋洋, 黄琼瑶, 舒金平, 王浩杰, 2008. 叩甲科昆虫性信息素研究及应用. 中国农学通报, 24(11): 359–364.]
- Souza JPA, Bandeira PT, Bergmann J, Zarbin PHG, 2023. Recent advances in the synthesis of insect pheromones: An overview from 2013 to 2022. *Natural Product Reports*, 40(4): 866–889.
- Till T, Siegfried K, Stefan D, 2012. First sex pheromone of the order Strepsiptera: (3R,5R,9R)-3,5,9-trimethyldodecanal in *Stylops melittae* Kirby, 1802. *Journal of Chemical Ecology*, 38(12): 1493–1503.
- Vang LV, Ishitani M, Komai F, Yamamoto M, Ando T, 2006. Sex pheromone of the soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae): Identification and field evaluation. *Applied Entomology and Zoology*, 41(3): 507–513.
- Wang AJ, Zhang KX, Mei XD, Gao YL, Zhang T, Zhe DM, Ning J, 2018. Research progress on mechanisms and applications of insect mating behavior disruption by insect sex pheromones and analogues. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 20(4): 425–438. [王安佳, 张开心, 梅向东, 高玉林, 张涛, 折冬梅, 宁君, 2018. 昆虫性信息素及其类似物干扰昆虫行为的机理和应用研究进展. 农药学学报, 20(4): 425–438.]
- Wang HZ, Zhong X, Zhang GR, Liu X, Gu L, 2020. Transcriptome characterization and gene expression analysis related to immune response in *Gynaephora qinghaiensis* pupae. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(2): 458–469.
- Wang WY, Zhao H, Chen Y, Yao XM, Lu JF, Guo QS, Du YJ, 2025. Control efficacy of sex pheromone mating disruption in major Lepidopteran pests in areas of double-season rice cropping system. *Chinese Journal of Rice Science*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1146.S.20250506.1344.002.html>. [王未英, 赵洪, 陈瑜, 姚晓明, 陆剑飞, 郭前爽, 杜永均, 2025. 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. 中国水稻科学, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1146.S.20250506.1344.002.html>.]
- Wang XH, Dong SQ, Yuan XX, Zhao M, Guo XR, 2022. Determination of the sex pheromone components of female *Athetis dissimilis* and their indoor activity. *Journal of Plant Protection*, 49(4): 1153–1161. [王鑫辉, 董少奇, 袁星星, 赵曼, 郭线茹, 2022. 双委夜蛾雌蛾性信息素组分及其室内活性测定. 植物保护学报, 49(4): 1153–1161.]
- Wang XM, 2023. Analysis of the control effect of mating disruption control of *Grapholium molesta* by using sex pheromone in pear orchard. *China Plant Protection*, 43(9): 73–74, 105. [王希明, 2023. 梨园梨小食心虫性信息素迷向防治效果分析. 中国植保导刊, 43(9): 73–74, 105.]
- Witzgall P, Bengtsson M, Trimble RM, 2000. Sex pheromone of grape berry moth (Lepidoptera: Tortricidae). *Environmental Entomology*, 29(3): 433–436.
- Wu F, Liu SY, Zhang L, Zhang XF, Li HL, 2023. Research advances in insect pheromones. *Journal of Plant Protection*, 50(2): 287–297. [吴帆, 刘深云, 张莉, 张旭凤, 李红亮, 2023. 昆虫信息素研究进展. 植物保护学报, 50(2): 287–297.]
- Wyatt TD, 2017. Pheromones. *Current Biology*, 27(15): 739–743.
- Yan JJ, 2021. Bioactivity study of sex pheromone and its additives of *Phthorimaea operculella* Zeller. Doctor dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University. [闫俊杰, 2021. 马铃薯块茎蛾性信息素及其添加物生物活性研究. 博士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.]
- Yan L, 2006. Studies of taxonomy, geographic distribution in

- Gynaephora* genus and life-history strategies on *Gynaephora menyuanensis*. Doctor dissertation. Lanzhou: Lanzhou University. [严林, 2006. 草原毛虫属的分类、地理分布及门源草原毛虫生活史对策的研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学.]
- Yan Q, Yang TT, Dong SL, 2023. Review of research on the hybrid pheromone system in lepidopteran insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(2): 323–334. [闫祺, 杨婷婷, 董双林, 2023. 蛾类昆虫混合型性信息素研究进展. 应用昆虫学报, 60(2): 323–334.]
- Yang K, Wang CZ, 2021. Review of pheromone receptors in heliothine species: Expression, function, and evolution. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 169(2): 156–171.
- Yang SZ, 2017. Identification, synthesis and field evaluation of the female sex pheromone in the nettle caterpillar, *Monema flavescens* Walker. Doctor dissertation. Taigu: Shanxi Agricultural University. [杨淑珍, 2017. 黄刺蛾性信息素的鉴定、合成及生物活性评估. 博士学位论文. 太谷: 山西农业大学.]
- Ye ZF, Liao H, Liu XL, Dong SL, 2020. Comparative study of sex pheromone communication system in *Helicoverpa armigera* populations of different geographic origins. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(5): 663–671. [叶占峰, 廖辉, 刘晓龙, 董双林, 2020. 棉铃虫不同地理种群性信息素通讯系统的比较分析. 中国生物防治学报, 36(5): 663–671.]
- Yu R, Yang S, Zhao YH, Ji LL, 2019. Overview of pheromone pesticide registration in China and abroad and policy suggestions. *Pesticide Science and Administration*, 40(10): 6–9, 20. [于荣, 杨硕, 赵永辉, 嵇莉莉, 2019. 国内外信息素农药登记概况及登记政策建议. 农药科学与管理, 40(10): 6–9, 20.]
- Zhang GF, Zhang YB, Xian XQ, Li P, Liu WC, Zeng J, Liu H, Huang C, Wang YS, Bian Y, Li YH, Wang TZ, Liu WX, Wan FH, 2025. Efficacy of sex pheromone and ultraviolet light trapping methods for monitoring of the tomato leafminer, *Tuta absoluta* (Meyrick), and analysis of adult emergence period in southwestern China. *Plant Protection*, 51(2): 225–236, 287. [张桂芬, 张毅波, 洗晓青, 李萍, 刘万才, 曾娟, 刘慧, 黄聪, 王玉生, 卞悦, 李亚红, 王田珍, 刘万学, 万方浩, 2025. 性信息素诱捕法和紫外光灯诱捕法对我国西南区域番茄潜叶蛾的监测诱捕效率及成虫发生期分析. 植物保护, 51(2): 225–236, 287.]
- Zhang MM, Chen HH, Wang WK, Chen L, 2020. Electroantennographic and behavioral responses of female adults of *Maladera orientalis* (Coleoptera: Scarabaeidae) to peach tree volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 63(12): 1482–1489. [张萌萌, 陈宏灏, 王文凯, 陈立, 2020. 东方绢龟雌成虫对桃树挥发物的触角电位和行为反应. 昆虫学报, 63(12): 1482–1489.]
- Zhang QL, Yuan ML, 2013. Research status and prospect of grassland caterpillars (Lepidoptera: Lymantriidae). *Pratacultural Science*, 30(4): 638–646. [张麒麟, 袁明龙, 2013. 草原毛虫研究现状与展望. 草业科学, 30(4): 638–646.]
- Zhang QW, Mo CH, Shen MH, He SD, Ni M, Dou QL, Ni XM, 2011. Sheep diagnosis of oral cavity mucous membrane canker diseases in grazed sheep in Haibei of Qinghai Province. *Progress in Veterinary Medicine*, 32(12): 126–129. [张勤文, 莫重辉, 沈明华, 河生德, 尼玛, 窦全林, 倪小敏, 2011. 食入草原毛虫导致放牧羊口腔黏膜溃烂的病理学诊断. 动物医学进展, 32(12): 126–129.]
- Zhang SG, Zhang YH, Chen DM, 1988. Position and histological parameters of the sex pheromone gland of *Gynaephora chenghaiensis* Chou et Ying. *Current Zoology*, 34(2): 101–105, 201. [张善干, 张玉华, 陈德明, 1988. 青海草原毛虫性信息素分泌腺的位置及组织学. 动物学报, 34(2): 101–105, 201.]
- Zhang ST, Huang LP, Hu LT, Peng J, Su MD, Li H, Ma X, Li WZ, 2023. Interactions between different sex pheromones used to trap different tobacco moth species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 210–215. [张松涛, 黄浪平, 胡丽涛, 彭军, 苏梦迪, 李航, 马啸, 李为争, 2023. 烟田蛾类害虫性诱芯之间的相互作用研究. 应用昆虫学报, 60(1): 210–215.]
- Zhou HR, 2024. Effectiveness evaluation of mixed use of sex pheromone traps for main lepidopteran pests in apple and peach orchards. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [周浩然, 2024. 苹果园和桃园主要鳞翅目害虫性诱芯混用效果测定. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhou HR, Liu Q, Tu HT, 2024. Synergistic trapping effect of mixed lure traps for the main lepidopteran pests in peach orchards. *Journal of Fruit Science*, 41(6): 1181–1187. [周浩然, 刘倩, 涂洪涛, 2024. 桃园主要鳞翅目害虫性诱芯的混用诱捕效果. 果树学报, 41(6): 1181–1187.]
- Zhou WQ, Hu YM, Peng GD, Zhang W, Shu JP, Chen H, 2024. Isolation and identification of sex pheromones of adult *Melanotus cribricollis* in bamboo forests. *Journal of Bamboo Research*, 43(3): 52–58. [周卫青, 胡云木琪儿, 彭观地, 张威, 舒金平, 陈海, 2024. 筛胸梳爪叩甲成虫性信息素分离与鉴定. 竹子学报, 43(3): 52–58.]
- Zhou YK, Zhan QQ, Zhao XS, Lu LL, Gan BC, 2017. Developmental threshold temperature and effective accumulative temperature of *Heortia vitessoides* in Hainan. *China Plant Protection*, 37(3): 32, 46–48. [周亚奎, 战晴晴, 赵祥升, 卢丽兰, 甘炳春, 2017. 海南白木香黄野螟发育起点温度和有效积温研究. 中国植保导刊, 37(3): 32, 46–48.]
- Zhu YW, 2021. The calling behavior and sex pheromone identification of *Sylepta derogata* Fabricius (Lepidoptera: Pyralidae). Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [朱侯伟, 2021. 棉大卷叶螟求偶行为节律和性信息素鉴定. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]