

两种寄主植物对淡足侧沟茧蜂的引诱作用 及挥发物成分分析*

张彤瑶^{1,3**} 蒋杰贤³ 张浩³ 王金彦³ 尤春梅³ 陈义娟^{2,3***} 季香云^{3***}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 上海润庄农业科技有限公司, 上海 201403;

3. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403)

摘要 【目的】为了更好的了解寄主植物和甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 幼虫对淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* 趋向行为的影响。【方法】本研究选用玉米和苋菜两种寄主植物, 采用“Y”型嗅觉仪测定了淡足侧沟茧蜂对正常植物和幼虫-植物复合体的行为反应, 并对其释放的挥发性物质进行了 GC-MS 分析与鉴定。【结果】正常的玉米和苋菜对淡足侧沟茧蜂无明显引诱作用, 而幼虫-玉米复合体和幼虫-苋菜复合体均有显著的吸引作用, 且幼虫-玉米复合体对该寄生蜂的引诱作用更强。GC-MS 检测结果显示在正常玉米中含有 22 种化合物, 主要为烷烃和芳香烃类化合物; 幼虫-玉米复合体中有 31 种化合物, 以烷烃和醇类化合物为主; 在正常苋菜检测到的 16 种化合物中, 烷烃类化合物含量最高, 约占 54.75%; 而幼虫-苋菜复合体中含有 55 种化合物, 其中以烷烃、芳香烃、烯烃、酸类和醛类物质含量相对较高。另外, 与正常植物相比, 2-己烯醛、(+)-柠檬烯、 α -石竹烯、DMNT 和 α -雪松烯等化合物仅在幼虫-植物复合体中产生或含量明显升高。【结论】淡足侧沟茧蜂更倾向于幼虫-玉米复合体, 并且玉米和苋菜在遭受甜菜夜蛾取食后, 会释放出更多种类的化合物。

关键词 淡足侧沟茧蜂; 玉米; 苋菜; 甜菜夜蛾; 引诱作用; GC-MS

Attractiveness of two host plants to *Microplitis pallidipes* and their volatile compounds identification

ZHANG Tong-Yao^{1,3**} JIANG Jie-Xian³ ZHANG Hao³ WANG Jin-Yan³
YOU Chun-Mei³ CHEN Yi-Juan^{2,3***} JI Xiang-Yun^{3***}

(1. College of Life Science and Fishery, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Runzhuang Agricultural Technology Co., Ltd. Shanghai 201403, China;

3. Eco-environment Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract [Aim] To better understand the effect of host plants and *Spodoptera exigua* on the tendency behavior of *Microplitis pallidipes*. [Methods] Maize and amaranth were chosen and the behavioral responses of *M. pallidipes* to normal plants and larva-plant complex were determined with Y-tube olfactometer, and the volatile compounds were analyzed and identified by GC-MS. [Results] The normal maize and amaranth had no attraction effect on *M. pallidipes*, but larva-maize complex and larva-amaranth complex exhibited significant attractiveness, and larva-maize complex showed stronger activity than larva-amaranth complex. GC-MS indicated that 22 compounds were detected in normal maize leaves with alkanes and aromatic hydrocarbons as the main constituents, while 31 compounds were identified in the larva-maize complex and mainly alkanes and alcohols. Similarly, there were 16 compounds in normal amaranth and the content of alkane compounds was the highest with 54.75%. The larva-amaranth complex contained 55 compounds, and alkanes, aromatics, alkenes, acids and aldehydes

*资助项目 Supported projects: 上海市青年科技启明星计划 (21QB1404100); 上海市农业科学院卓越创新团队[2022 (017)]; 上海市青年科技英才扬帆计划 (21YF1441100)

**第一作者 First author, E-mail: zty06172022@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: juanych99@163.com; hwyf2002@163.com

收稿日期 Received: 2023-06-27; 接受日期 Accepted: 2023-11-02

were relatively high. In addition, some compounds were only produced or increased remarkably in larva-plant complex, such as 2-hexenal, (+) -limonene, α -caryophyllene, DMNT, and α -himachalene. **[Conclusion]** *M. pallidipes* were prefer the larva-maize complex, and a wider variety of compounds were released by maize and amaranth after feeding by *Spodoptera exigua*.

Key words *Microplitis pallidipes*; maize; amaranth; *Spodoptera exigua*; attractant effect; GC-MS

夜蛾科害虫因具有发生代数多、发生量大、抗逆性强、易暴发成灾等特点,对农作物造成巨大危害,是当前国内外重要的农业害虫之一 (Azidah *et al.*, 2006; Nagoshi *et al.*, 2017)。目前对夜蛾科害虫防治还是以化学防治为主,然而长期使用化学农药,导致该类害虫产生了很强的抗药性,以致防治效果下降 (Wood *et al.*, 1981)。因此,利用天敌进行该类害虫的防治已然成为当前国内外开发领域的热点和重要发展方向 (唐艺婷, 2020)。

寄生蜂作为一类寄生性天敌昆虫,在自然界中分布广泛、种类繁多。当寄主幼虫被寄生后,会表现出食量下降、发育减缓、最后停食而死亡,从而能对害虫起到较好的防治效果 (曾爱平, 2005)。研究发现许多种类的寄生蜂在农林害虫综合治理中起着重要的作用 (时敏等, 2020)。例如,我国广东、福建等地利用平腹小蜂 *Anastatus japonicus* 长期防治荔枝种植地中的荔枝蜡象 *Tessaratoma papillosa*, 形成了一套完整的平腹小蜂田间释放技术体系 (余春仁等, 1997)。淡足侧沟茧蜂 *Microplitis pallidipes* 隶属膜翅目 Hymenoptera、茧蜂科 Braconidae、侧沟茧蜂属 *Microplitis* Foerster, 是一种能够寄生多种夜蛾科低龄幼虫的单性寄生蜂。在我国,该蜂主要分布于浙江、山东、台湾、福建,其田间自然寄生率一般为 6.3%-50%, 最高可达 70% 以上 (曾爱平等, 2005), 是夜蛾科害虫田间自然种群数量的重要调节因子。

在植物-害虫-天敌昆虫三级营养关系中,植物经过长期与昆虫的协同进化,拥有一系列抵御虫害的方法。大量研究证实,植物在被植食性昆虫取食后,会释放一些特异性挥发物,主要包括萜烯类物质以及一些饱和或不饱和醇、醛及酯类化合物,其中有些挥发物具有驱避害虫以及吸引天敌的作用 (Robert *et al.*, 2011)。对于寄生蜂而言,寄主植物可影响寄生蜂对植食性昆虫的选择

性 (江丽辉, 2001), 并且挥发物在其生境定位和寄主搜寻中承担着至关重要的作用 (许维岸等, 2000)。然而,目前国内外对淡足侧沟茧蜂的研究较少,特别是关于寄主植物和寄主对该寄生蜂选择行为的调控机制鲜见报道。因此,本研究以甜菜夜蛾的两种寄主植物-玉米和苋菜为对象,评价淡足侧沟茧蜂对两种植物和幼虫与植物复合体的选择性差异,并在此基础上运用 GC-MS 分析和鉴定其挥发物成分,探究可能影响淡足侧沟茧蜂寄主选择行为的挥发物质种类,为进一步明确寄主植物及寄主挥发物对该寄生蜂选择行为的调控机制提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试甜菜夜蛾幼虫和淡足侧沟茧蜂蜂茧均采集于上海市奉贤区庄行综合试验站且在室内饲养 3 代及以上后用于试验。采用人工饲料进行甜菜夜蛾室内饲养,饲养条件为 (28 ± 1) °C、相对湿度 RH 80% $\pm$ 5%、光周期 14L:10D。选用 3 龄幼虫用于繁殖寄生蜂和相关试验 (Chen *et al.*, 2020)。待淡足侧沟茧蜂蜂茧羽化后,进行雌、雄蜂交配 12 h, 将交配后的淡足侧沟茧蜂雌蜂和甜菜夜蛾 3 龄幼虫按 1:50 的比例放入繁蜂箱中进行寄生 24 h 后,将被寄生的甜菜夜蛾幼虫分装至指形试管中单头饲养,至出茧并羽化,雌、雄蜂交配 12 h 后选用触角完整、活力较强的 1-2 日龄个体用于试验。寄生蜂繁殖都在温度 (26 ± 1) °C, 相对湿度 RH 65% $\pm$ 5%, 光周期 14L:10D 的人工气候箱进行 (黄兰兰等, 2022)。

供试玉米种子为华耐种业“甜糯 182 号”; 供试苋菜种子为常丰种业“一点红苋菜”。

1.2 试验处理

选取健康且长势一致的玉米 (三叶期) 和苋

菜（五叶期）盆栽幼苗，用消毒后干净的剪刀沿玉米叶基部或苋菜茎部剪取相同量（3 g）的叶片分别置于含有 30 头 3 龄甜菜夜蛾幼虫的广口瓶和顶空瓶内，放在温度（ 26 ± 1 ）℃，相对湿度 RH 65%±5%，光周期 14L：10D 的人工培养箱（上海皓庄仪器有限公司，HZ-350C-LED）内饲养，24 h 后，将上述含有甜菜夜蛾幼虫和玉米叶（或苋菜叶）的广口瓶直接用于后续趋向行为测定（宋晓君等, 2011），与此同时，将放置于顶空瓶内的甜菜夜蛾幼虫和玉米叶（或苋菜叶）进行挥发物 GC-MS 分析（李易江成, 2022）。另外，剪取相同量健康的玉米和苋菜幼苗叶片作为阴性对照。上述所有叶片剪口处都用脱脂棉蘸蒸馏水包裹，为叶片提供保湿的同时去除伤口处的挥发物影响。

“Y”嗅觉行为测定试验共设 5 组，分别为：①正常玉米叶 vs 空白对照（清洁空气）；②30 头甜菜夜蛾幼虫-玉米叶复合体 vs 正常玉米叶；③正常苋菜叶 vs 空白对照（清洁空气）；④30 头甜菜夜蛾幼虫-苋菜叶复合体 vs 正常苋菜叶；⑤30 头甜菜夜蛾幼虫-玉米叶复合体 vs 30 头甜菜夜蛾幼虫-苋菜叶复合体。

1.3 趋向行为测定

采用“Y”型嗅觉仪测定淡足侧沟茧蜂对正常植物与甜菜夜蛾幼虫-植物复合体的行为反

应，如图 1 所示。以 250 mL 带磨砂口的广口瓶作味源瓶，用于放置不同处理组，见 1.2 试验处理。嗅觉仪的两臂及释放臂均长 15 cm，内径 1.8 cm，两臂夹角 60°。为避免周围光强不均匀影响寄生蜂的趋性行为，把嗅觉仪放于由金属丝制成的正方形盒子内，正方形盒子四周用蜡纸（80 cm×80 cm×50 cm）遮盖，在盒子的正上方放一个 40 W 白炽灯以使两测试臂的光强一致。

“Y”型嗅觉仪两臂分别通过硅胶管与味源瓶相连。在气流进入味源瓶之前，先经过活性炭和蒸馏水瓶过滤，以净化空气和增加空气湿度。测试时空气流量为 200 mL/min。

根据淡足侧沟茧蜂的生物学特性，试验安排在每日上午 8:30 至下午 5:00。从“Y”型嗅觉仪基管末端逐头引入淡足侧沟茧蜂，观察记录 5 min 内寄生蜂的行为反应。判定标准如下：当寄生蜂爬至出口处或超过某臂 1/3 处并停留 5 s 以上，则记作该蜂对该臂的气味源作出选择；如蜂引入后 5 min，仍不做出选择，则结束对该蜂的行为观察。每测定 5 头，调换嗅觉仪方位一次，以消除几何位置对寄生蜂行为可能产生的影响。每测定 10 头，用 95%乙醇清洗嗅觉仪并用吹风机吹干、冷却。每个处理共测 60 头蜂。当更换处理时，用超声波清洗装置，并用 95%乙醇清洗、烘干备用（李玉利, 2008）。

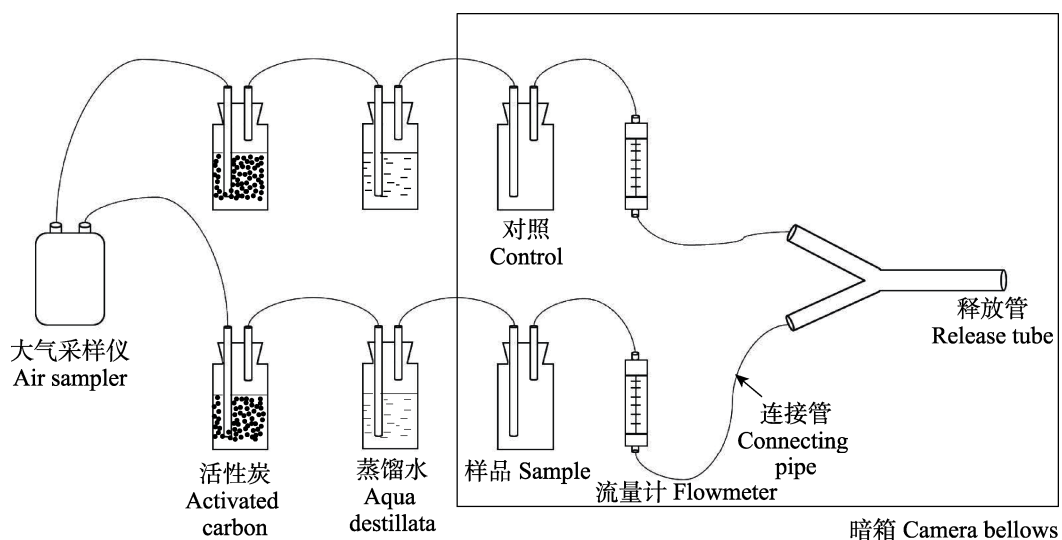


图 1 Y 型嗅觉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Y-type olfactory instrument

1.4 挥发物 GC-MS 分析

为探究玉米和苋菜在甜菜夜蛾为害下释放的挥发物种类,采用顶空固相微萃取法分别收集正常玉米叶、幼虫-玉米叶复合体、正常苋菜叶以及幼虫-苋菜叶复合体的挥发物,见 1.2 试验处理。萃取挥发物前,萃取头 (50/30 μm , DVB/CAR/PDMS) 先平衡 15 min, 后将萃取头插入到顶空瓶内富集挥发物,富集 30 min, 取出萃取头,在 260 $^{\circ}\text{C}$ 条件下热解析 5 min, 然后进行气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用分析 (余柳仪等, 2020)。

GC-MS 分析条件: 使用 7890B-5977B 气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS, 美国安捷伦公司); DB-WAX 石英毛细管色谱柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm), 气相以 99.999 % 氮气作为载气, 流量 1 mL/min, 汽化温度 260 $^{\circ}\text{C}$, 不分流进样; 柱起始温度 40 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min, 然后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 220 $^{\circ}\text{C}$, 以 20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 再保持 5 min; 电离方式 EI; 接口温度 260 $^{\circ}\text{C}$, 离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$; 四级杆温度 150 $^{\circ}\text{C}$; 电离能 70 eV; 全扫描; 扫描质量范围 29-400 amu (邓琳玥等, 2023)。

挥发性物质鉴定: 样品成分分析根据 GC-MS 得到的总离子流图中的各峰经质谱扫描后得到质谱图, 通过计算机谱库检索 (NIST17 库) 初步确定化合物。并与文献比较, 通过对比质谱图、保留时间等方法对挥发物进行鉴定, 扣

除空气本底后采用面积归一法计算样品中不同物质的相对含量, 并根据成分的峰面积值相对定量分析 (Guo *et al.*, 2004)。

1.5 统计分析

利用 SPSS 统计软件对淡足侧沟茧蜂的趋向行为测定结果进行 χ^2 分析。P 值 < 0.05 表明有显著差异, P 值 < 0.01 则为极显著差异。在试验中未做出选择的寄生蜂, 不计入数据统计。引诱率的计算公式为: 引诱率 (%) = 选择处理组的淡足侧沟茧蜂数量/总数量 $\times$ 100。

2 结果与分析

2.1 淡足侧沟茧蜂对两种寄主植物的趋向行为

通过“Y”型嗅觉仪测定了淡足侧沟茧蜂对不同处理的两种寄主植物的趋向反应。结果如图 2 所示, 淡足侧沟茧蜂对正常玉米叶和苋菜叶的行为反应与空白对照 (清洁空气) 没有显著差异。而与正常植物相比, 淡足侧沟茧蜂对两种幼虫-植物复合体的选择行为差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 其中幼虫-玉米复合体组的差异达到了极显著水平 ($P < 0.01$, $\chi^2 = 10.37$), 有 72.5% 的个体选择了幼虫-玉米复合体。另外, 与幼虫-苋菜复合体相比, 幼虫-玉米复合体对淡足侧沟茧蜂具有更显著的吸引作用 ($P < 0.05$, $\chi^2 = 3.96$), 引诱率达到 63%。

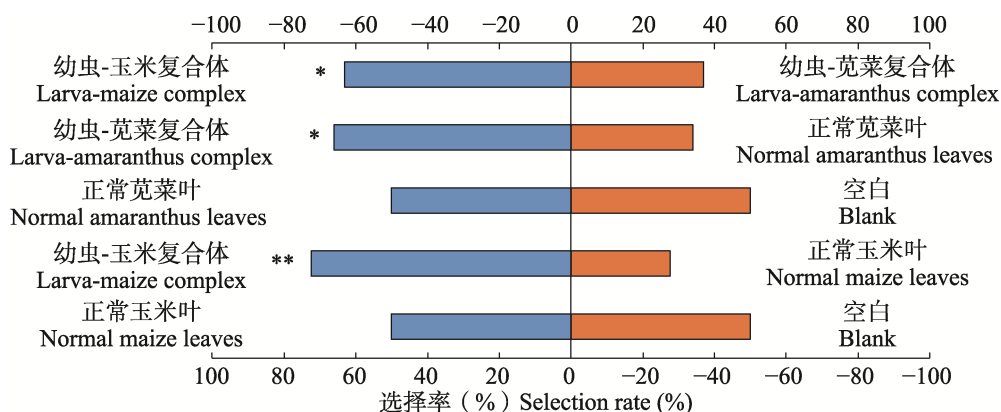


图 2 淡足侧沟茧蜂对不同处理玉米和苋菜的趋向行为

Fig. 2 Behavioral responses of *Microplitis pallidipes* to maize and amaranth with different treatments

星号表示差异显著 (*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, χ^2 检验)。

Asterisk indicates significant difference (* represents $P < 0.05$, ** represents $P < 0.01$, χ^2 test).

2.2 两种寄主植物挥发性化学物质成分分析

2.2.1 不同处理玉米挥发物质测定与分析
GC-MS 检测分析结果显示正常玉米叶中有 22 种化合物，而幼虫-玉米复合体中有 31 种化合物（图 3）。这些化合物主要包括烷烃、芳香烃、烯烃、醇类、酯类、酮类和酸类等，其中以烷烃、烯烃和芳香烃种类较多。在正常玉米叶中，烷烃和芳香烃类物质含量相对较高，分别为 38.01% 和 24.36%，其中相对含量最高的是甲氧基苯基肟（17.95%），其他含量较高的物质依次为六甲

基环三硅氧烷（15.75%）、八甲基环四硅氧烷（11.24%）、顺-3-己烯-1-醇（8.65%）、1,2-双(三甲基硅烷基)苯（6.41%）、环五聚二甲基硅氧烷（5.30%）和(+)-环苜蓿烯（3.39%）。而在在幼虫-玉米复合体中，以烷烃（35.01%）和醇类（31.00%）物质为主，其中相对含量最高的为反-3-己烯-1-醇（26.59%），其他含量较高的物质依次为正十五烷（16.11%）、六甲基环三硅氧烷（7.91%）、甲氧基苯基肟（7.09%）、 α -雪松烯（4.57%）和八甲基环四硅氧烷（4.29%）（表 1）。

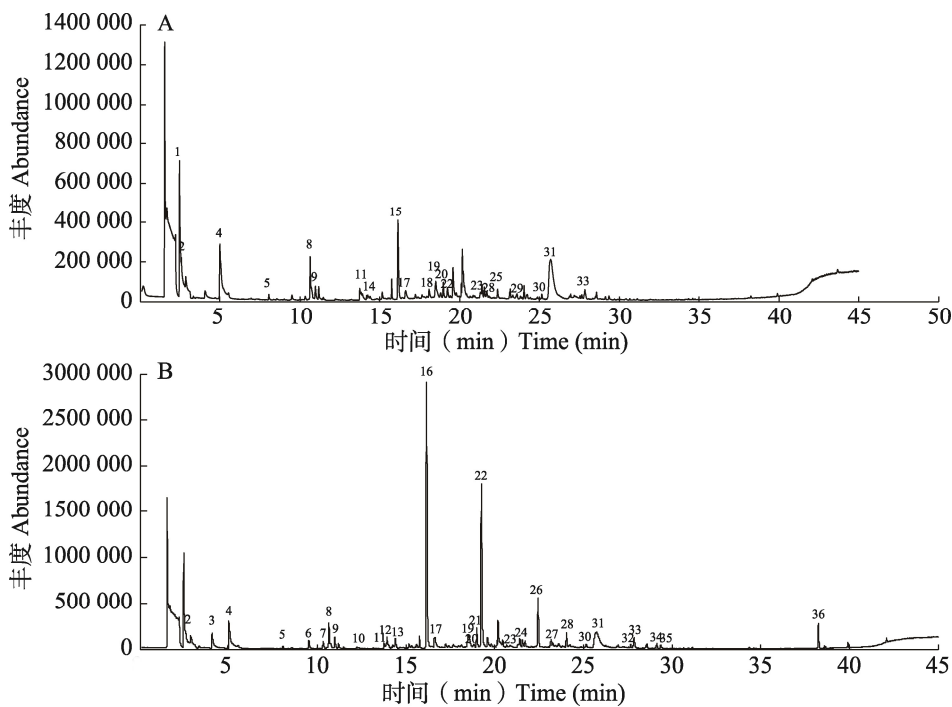


图 3 不同玉米挥发物组分的气相色谱图
Fig. 3 GC of different components of maize

A. 正常玉米叶挥发物组分的气相色谱图；B. 甜菜夜蛾幼虫-玉米复合体挥发物组分的气相色谱图。
A. GC of volatiles in normal maize leaves; B. GC of volatiles in larva-maize complex.
图中编号见表 1。The number is same as Table 1.

表 1 正常玉米叶和幼虫-玉米复合体主要挥发性物质的 GC-MS 分析
Table 1 GC-MS analysis of major volatile compounds in normal maize leaves and larva-maize complex

编号 No.	名称 Name	健康玉米叶 (%) Normal maize leaves (%)	幼虫-玉米复合体 (%) Larva- maize complex (%)
1	六甲基环三硅氧烷 Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	15.75	7.91
2	1,2-双(三甲基硅烷基)苯 Benzene,1,2-bis(trimethylsilyl)-	6.41	2.28
3	3-戊酮 Diethyl ketone	1.15	2.27
4	八甲基环四硅氧烷 Octamethylcyclotetrasilazane	11.24	4.29
5	十甲基四硅氧烷 Decamethyltetrasiloxane	0.42	0.18

续表 1 (Table 1 continued)

编号 No.	名称 Name	健康玉米叶 (%) Normal maize leaves (%)	幼虫-玉米复合体 (%) Larva- maize complex (%)
6	1-戊烯-3-醇 Ethyl vinyl carbinol	—	0.72
7	(+)-柠檬烯 D-Limonene	—	0.71
8	环五聚二甲基硅氧烷 Cyclopentasiloxane, decamethyl-	5.23	2.54
9	异戊醇 Isoamylol	1.60	1.01
10	罗勒烯(异构体混合物) 1,3,6-Octatriene,3,7-dimethyl-	—	0.09
11	正十三烷 Tridecane	1.92	0.75
12	DMNT (3E)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	—	1.47
13	顺-2-戊烯醇 cis-2-Penten-1-ol	—	1.06
14	十二甲基五硅氧烷 Pentasiloxane,1,1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,9-dodecamethyl-	0.20	—
15	顺-3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol, (Z)-	8.65	—
16	反-3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol, (E)-	—	26.59
17	正十四烷 Tetradecane	1.40	1.52
18	乙酸 Acetic acid	0.97	—
19	(+)-环苜蓿烯 Cyclosativene	3.39	2.56
20	α -蒎烯 α -Copaene	0.32	0.35
21	2-乙基己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	—	1.62
22	正十五烷 Pentadecane	1.13	16.11
23	α -瓜烯 α -Guaiene	0.71	0.34
24	正十六烷 Hexadecane	—	0.57
25	正丁酸 n-Butyric acid	0.88	—
26	α -雪松烯 α -Himachalene	—	4.57
27	α -石竹烯 α -Caryophyllene	—	0.49
28	正二十烷 Eicosane	0.67	1.14
29	γ -依兰油烯 γ -Muurokene	0.67	—
30	Δ -杜松烯 (+)- Δ -Cadinene	0.48	0.29
31	甲氧基苯基肟 Oxime-, methoxy-phenyl-	17.95	7.09
32	2-甲基-丙酸 3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯 Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4-trimethylpentyl ester	—	0.27
33	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol	1.38	1.16
34	茉莉酮 cis-Jasmone	—	0.39
35	苯并噻唑 Benzothiazole	—	0.37
36	吲哚 Indole	—	1.88
	烷烃 Alkane	38.01	35.00
	芳香烃 Aromatic hydrocarbon	24.36	11.63
	烯烃 Alkene	5.57	10.87
	酮类 Ketone	1.15	2.66
	酸类 Acid	1.85	—
	酯类 Ester	1.38	1.44
	醇类 Alcohol	10.26	31.00
	总计 Total	82.58	92.61

此外,与正常玉米相比,幼虫-玉米复合体中明显释放了更多种类的烯类和醇类物质且含量呈现明显上升(表1)。这也表明正常玉米经甜菜夜蛾幼虫取食后会释放出更多的特定次生代谢物质。其中,DMNT、(+)-柠檬烯、 α -雪松烯、反-3-己烯-1-醇、顺-2-戊烯醇、1-戊烯-3-醇等化合物仅在幼虫-玉米复合体中检测出。在正常玉米和幼虫-玉米复合体中共同检测出的17种化合物中,相较于正常玉米,六甲基环三硅氧烷、甲氧基苯基肼和八甲基环四硅氧烷等化合物含量表现出明显下降,而3-戊酮、正十五烷等化合物含量则有所升高。

2.2.2 不同处理苋菜挥发物质测定与分析

如图4所示,分别有16和55种化合物在正常苋菜叶和幼虫-苋菜复合体中检测出,主要包括烷烃、醛类和芳香烃类化合物。在正常苋菜叶中,烷烃含量最高,高达54.75%,六甲基环三硅氧烷(48.61%)、1-戊烯-3-醇(19.88%)、反式-3-

己烯-1-醇(9.16%)和八甲基环四硅氧烷(3.11%)含量相对较高。而在幼虫-苋菜复合体中则以烷烃、芳香烃、烯烃、酸类和醛类物质的含量较高且相对均一,在11%-14%之间,其中 α -雪松烯的相对含量最高(11.02%),其他含量较高的物质依次为二甲基硫醚(9.00%)、乙酸(7.58%)、正十五烷(4.94%)、六甲基环三硅氧烷(4.78%)和2-己烯醛(4.44%)。与此同时,与正常苋菜相比,在幼虫-苋菜复合体处理组中含较高含量的烯类、酮类、酸类和醛类物质,并且酮类、酸类和醛类物质仅在该组合内被检测出,例如2-己烯醛、乙酸和 α -雪松烯。而在幼虫-苋菜复合体中六甲基环三硅氧烷、八甲基环四硅氧烷、 α -甲基萘和邻苯二甲酸二丁酯的含量相较于正常苋菜则大幅下降(表2)。

2.2.3 两种幼虫-植物复合体挥发物成分比较

与在正常玉米和苋菜中高含量的烷烃类物质不同,在幼虫-玉米复合体和幼虫-苋菜复合体中,

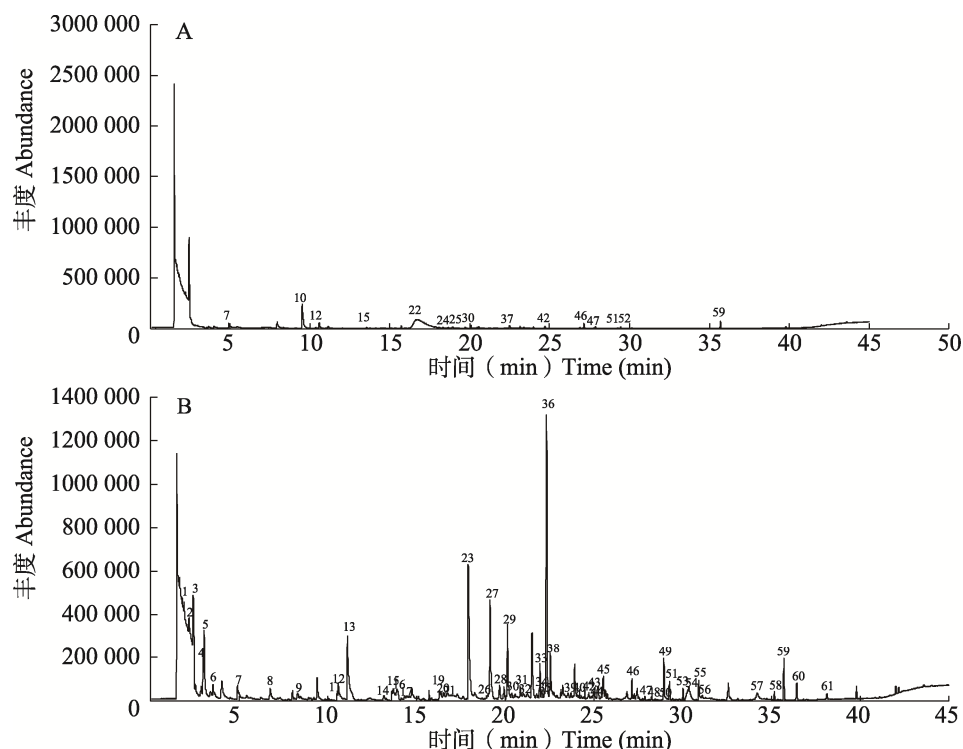


图4 不同苋菜挥发物组分的气相色谱图

Fig. 4 GC of different components of amaranthus

A. 正常苋菜叶挥发物组分的气相色谱图; B. 幼虫-苋菜复合体挥发物组分的气相色谱图。

A. GC of volatiles in normal amaranthus leaves; B. GC of volatiles in larva-amaranthus complex.

图中编号见表2。The number is same as Table 2.

表 2 正常苋菜和幼虫-苋菜复合体主要挥发性物质的 GC-MS 分析

Table 2 Analysis of main volatile compounds in normal amaranth and larva-amaranth complex by GC-MS

编号 No.	名称 Name	健康苋菜 (%) Normal amaranthus leaves (%)	幼虫-苋菜复合体 (%) Larva-amaranthus complex (%)
1	二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	—	9.00
2	异丁醛 Isobutyraldehyde	—	1.81
3	六甲基环三硅氧烷 Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	48.61	4.78
4	2-苄氧基苯甲醛 2-Benzoyloxybenzaldehyde	—	1.06
5	异戊醛 Isovaleraldehyde	—	2.93
6	2-乙基呋喃 2-Ethylfuran	—	0.54
7	八甲基环四硅氧烷 Octamethylcyclotetrasilazane	3.11	0.86
8	正己醛 Caproaldehyde	—	0.76
9	6,6-二甲基富烯 6,6-Dimethylfulvene	—	0.24
10	1-戊烯-3-醇 Ethyl vinyl carbinol	19.88	—
11	正十二烷 Dodecane	—	0.25
12	环五聚二甲基硅氧烷 Cyclopentasiloxane, decamethyl-	2.41	0.46
13	2-己烯醛 trans-2-hexenal	—	4.44
14	乙偶姻 Acetyl methyl carbinol	—	0.24
15	正十三烷 Tridecane	0.62	1.21
16	DMNT (3E)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	—	0.98
17	2-庚烯醛 2-Heptenal, (Z)-	—	0.24
18	甲基庚烯酮 5-Hepten-2-one, 6-methyl-	—	0.88
19	壬醛 Nonanal	—	0.39
20	正十四烷 Tetradecane	—	0.40
21	3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol	—	0.03
22	反式-3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol, (E)	9.16	—
23	乙酸 Acetic acid	—	7.58
24	1,2,3,5-四甲基苯 Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	0.39	—
25	1,4-二甲基-2-(1-甲基乙基)苯 Benzene, 1,4-dimethyl-2-(1-methylethyl)-	0.30	—
26	庚二烯醛 trans, trans-2,4-Heptadienal	—	0.14
27	正十五烷 Pentadecane	—	4.94
28	苯甲醛 Benzaldehyde	—	0.74
29	丙酸 Propanoic acid	—	2.96
30	α -柏木烯 α -Cedrene	0.28	0.29
31	异丁酸 Isobutyric acid	—	0.64
32	二甲基亚砷 Methyl sulfoxide	—	0.46
33	β -环柠檬醛 β -Cyclocitral	—	1.16
34	苯甲酸甲酯 Methyl benzoate	—	0.40
35	γ -丁内酯 γ -Butyrolactone	—	0.27

续表 2 (Table 2 continued)

编号 No.	名称 Name	健康苋菜 (%) Normal amaranthus leaves (%)	幼虫-苋菜复合体 (%) Larva-amaranthus complex (%)
1	二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	—	9.00
36	α -雪松烯 α -Himachalene	—	11.02
37	五甲基苯 Benzene, pentamethyl-	1.10	—
38	N-乙基乙酰胺 N-Ethylacetamide	—	2.43
39	雪松烯 cis-(-)-2,4a,5,6,9a-Hexahydro-3,5,5,9-tetramethyl(1H) benzocycloheptene	—	0.39
40	3-乙基苯甲醛 3-Ethylbenzaldehyde	—	0.17
41	β -红没药烯 β -Bisabolene	—	0.08
42	萘 Naphthalene	1.04	0.33
43	α -金合欢烯 α -Farnesene	—	0.31
44	γ -依兰油烯 γ -Muurolene	—	0.16
45	水杨酸甲酯 2-Carbomethoxyphenol	—	0.95
46	α -甲基萘 1-Methylnaphthalene	2.29	0.69
47	β -甲基萘 2-Methylnaphthalene	0.74	0.13
48	二甲基砜 Methyl sulfone	—	0.14
49	β -紫罗兰酮 trans- β -Ionone	—	1.29
50	苯甲醇 Benzyl alcohol	—	0.19
51	苯并噻唑 Benzothiazole	0.33	0.60
52	2,7-二甲基萘 2,7-Dimethylnaphthalene	0.53	—
53	4-[2,2,6-三甲基-7-氧杂二环[4.1.0]庚-1-基]-3-丁烯-2-酮 β -Ionone 5,6-epoxide	—	0.35
54	苯乙醇 Phenylethylalcohol	—	0.59
55	α -吡咯烷酮 2-Pyrrolidinone	—	0.81
56	顺式-橙花叔醇 cis-Nerolidol	—	0.24
57	乙二醇苯醚 2-Phenoxyethanol	—	0.72
58	3-乙基-4-甲基吡咯-2,5-二酮 1H-Pyrrole-2,5-dione,3-ethyl-4-methyl-	—	0.27
59	邻苯二甲酸二丁酯 Dimethyl phthalate	2.64	1.22
60	二氢猕猴桃内酯 Dihydroactinidiolide	—	0.55
61	吲哚 Indole	—	0.20
	烷烃 Alkane	54.75	12.66
	芳香烃 Aromatic hydrocarbon	6.71	13.71
	烯烃 Alkene	0.28	11.87
	酮类 Ketone	—	3.84
	酸类 Acid	—	11.19
	醛类 Aldehyde	—	12.68
	酯类 Ester	2.64	2.04
	总计 Total	93.42	74.92

烯烃,尤其是萜烯类物质,无论是化合物种类还是物质含量都有明显的提高,如 α -雪松烯、(+)-柠檬烯、 α -石竹烯、 α -金合欢烯(表1,表2)。值得注意的是,在玉米遭受甜菜夜蛾幼虫取食后,释放出大量的反-3-己烯-1-醇(26.59%),而在幼虫-苋菜复合体中并未检测出该化合物。另外,在幼虫-玉米复合体和幼虫苋菜复合体中分别检测出了2种共有化合物(DMNT和吡啶)以及54种差异化合物,其中顺-2-戊烯醇、1-戊烯-3-醇、(+)-柠檬烯、罗勒烯、 α -石竹烯及顺-茉莉酮等物质仅在幼虫-玉米复合体中存在,而 β -紫罗兰酮、顺-橙花叔醇、2-己烯醛、水杨酸甲酯、 α -金合欢烯、 β -环柠檬醛、异戊醛、正己醛和2-庚烯醛等物质也仅在幼虫-苋菜复合体中被检测出。

3 讨论

寄生蜂能否准确的选择、识别和定位寄主对于其成功寄生具有至关重要的作用。然而影响寄生蜂搜索定位寄主的因素有很多。以往研究发现寄主植物可影响寄生蜂对植食性昆虫的选择性。例如,赵海燕等(2016)研究发现,蝇蛹金小蜂 *Pachycrepoideus vindemmiae* 对橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* 为害后的杨桃和番石榴有趋向性,而芒果则无法引起蝇蛹金小蜂的明显行为反应。Yang等(2009)研究发现遭受桃蚜 *Myzus persicae* 为害后的烟草植株对烟蚜茧蜂 *Aphidius gifuensis* 有显著的引诱作用。本研究也发现与正常植物相比,经甜菜夜蛾幼虫取食之后的玉米和苋菜都可对淡足侧沟茧蜂呈现出明显的吸引作用,并且两种植物对于该寄生蜂的吸引作用存在显著差异。

大量研究证实害虫为害植物后,会诱导植物分泌挥发性信息物质,而这些挥发性物质又会通过吸引寄生蜂等害虫的天敌来对付害虫,进而发挥自然天敌的生物控害功能(Xiu et al., 2019),并且害虫取食寄主植物后,虫体及虫粪也会释放挥发性物质。为了更好的探究两种寄主植物对淡足侧沟茧蜂趋向行为的调控机制,本研究采用GC-MS分别对正常植物和甜菜夜蛾幼虫-植物复

合体进行了挥发性物质分析与鉴定,结果发现经甜菜夜蛾取食后两种寄主植物会释放出更多的挥发性物质种类或者含量,特别是萜烯类物质以及一些醇类和醛类物质,如, α -石竹烯、顺-3-己烯-1-醇、2-己烯醛、(+)-柠檬烯、DMNT和 α -雪松烯等。此外,某些特定的挥发性物质已被发现可影响天敌昆虫的趋向行为。例如,Morawo和Fadamiro(2016)发现 α -石竹烯可显著影响红足侧沟茧蜂 *Microplitis croceipes* 的选择行为反应;萜烯同系物DMNT可以吸引丹溶腔茧蜂 *Lytopylus rufipes* 等掠食性或寄生性天敌昆虫(Liu et al., 2018, 2019);王勇(2008)研究表明柠檬烯能够引起松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 显著的行为反应;而螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 的雌蜂和雄蜂对石竹烯和R-(+)-柠檬烯都有强烈的触角电位响应(Sen et al., 2005)。由此可知,经甜菜夜蛾取食后的两种植物对淡足侧沟茧蜂表现出的引诱作用与其诱导释放的特异性挥发物种类和含量具有密不可分的关系,并且这种引诱效果的产生往往是多种挥发性物质协同作用的结果,而并非仅是某个单一化学物质的作用。

此外,本研究还发现淡足侧沟茧蜂更偏好于选择甜菜夜蛾取食后的玉米,而非苋菜。通过对比甜菜夜蛾幼虫-玉米复合体与幼虫-苋菜复合体两个处理组所释放的挥发物种类与含量,我们发现化合物反-3-己烯-1-醇在幼虫-玉米复合体中表现出高释放量,而在幼虫-苋菜复合体中则未被检测出。前期研究表明3-己烯-1-醇作为典型的绿叶挥发物,可吸引欧洲粉蝶 *Pieris brassicae* L.的天敌昆虫菜粉蝶盘绒茧蜂 *Cotesia glomerata* L.,而且该化合物对天敌昆虫具有普遍的引诱作用(Laima et al., 2023)。结合本研究结果,我们认为反-3-己烯-1-醇可能是玉米受甜菜夜蛾危害后释放的重要化学信号物质,这也可能是导致淡足侧沟茧蜂对寄主玉米和苋菜的选择性差异的重要因素之一。

参考文献 (References)

Azidah AA, Sofian-Azirun M, 2006. Life history of *Spodoptera*

- exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) on various host plants. *Bulletin of Entomological Research*, 96(6): 613–618.
- Chen YJ, Guo L, Wan NF, Ji XY, Zhang H, Jiang JX, 2020. Transcriptomic analysis of the interactions between the *Spodoptera exigua* midgut and nucleopolyhedrovirus. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 163: 241–253.
- Deng LY, Luo LX, Gao J, Su ZS, Zhang ZQ, Huang XM, Fang F, Lin WH, 2023. Analysis of aroma components in different varieties of nymphaea hybrid based on headspace solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Guangdong Agricultural Sciences*, 50(9): 207–217. [邓琳玥, 罗丽霞, 高杰, 苏忠书, 张昭其, 黄雪梅, 方方, 林文洪, 2023. 顶空固相微萃取结合气相色谱质谱法分析不同品种香水莲花的香气成分. 广东农业科学, 50(9): 207–217.]
- Guo FQ, Liang YZ, Xu CJ, Li XN, Huang LF, 2004. Analyzing of the volatile chemical constituents in *Artemisia capillaris* herba by GC-MS and correlative chemometric resolution methods. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 35(3): 469–478.
- Huang LL, Jiang JX, Wang JY, Zhang H, 2022. Effects of the parasitoid *Microplitis pallidipes* on the menanization and phenoloxidase activity of the hemolymph of *Spodoptera frugiperda* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 512–522. [黄兰兰, 蒋杰贤, 王金彦, 张浩, 2022. 淡足侧沟茧蜂寄生对草地贪夜蛾幼虫血淋巴黑化反应及酚氧化酶的影响. 应用昆虫学报, 59(3): 512–522.]
- Jiang LH, 2001. Functions of infochemicals in the host selection of *Plutella xylostella*, and its parasitoid, *Cotesia plutellae*. Doctor dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [江丽辉, 2001. 信息化合物在小菜蛾和菜蛾绒茧蜂寄主选择中的作用. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.]
- Laima B, Dominykas A, Violeta A, Vincas B, 2022. Response of parasitic wasp *Cotesia glomerata* L. (Hymenoptera: Braconidae) to cabbage plants of two varieties: Olfactory spectra of males and females. *Journal of Economic Entomology*, 115(5): 1464–1471.
- Li YJC, 2022. Studies on binding characteristics of odorant-binding proteins and mulberry leaf volatiles in *Glyphodes pyloalis* and its parasitoid wasps. Master dissertation. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology. [李易江成, 2022. 桑螟及其寄生蜂气味结合蛋白与桑叶挥发物的结合特性研究. 硕士学位论文. 江苏: 江苏科技大学.]
- Li YL, 2008. Preliminary study on the location of the parasitoids *Microplitis mediator* to the solanum host plant. Master dissertation. Harbin: Dongbei Agricultural University. [李玉利, 2008. 中红侧沟茧蜂对茄科寄主植物行为选择的初步研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北农业大学.]
- Liu CM, Matsuyama S, Kainoh Y, 2019. Synergistic effects of volatiles from host-infested plants on host-searching behavior in the parasitoid wasp *Lytopylus rufipes* (Hymenoptera: Braconidae). *Journal of Chemical Ecology*, 45(8): 684–692.
- Liu DF, Huang XZ, Jing WX, An XK, Zhang Q, Zhang H, Zhou JJ, Zhang YJ, Guo YY, 2018. Identification and functional analysis of two P450 enzymes of *Gossypium hirsutum* involved in DMNT and TMTT biosynthesis. *Plant Biotechnology Journal*, 16(2): 581–590.
- Morawo T, Fadamiro H, 2016. Identification of key plant-associated volatiles emitted by *Heliothis virescens* larvae that attract the parasitoid, *Microplitis croceipes*: Implications for parasitoid perception of odor blends. *Journal of Chemical Ecology*, 42(11): 1112–1121.
- Nagoshi RN, Fleischer S, Meagher RL, Hay-Roe M, Khan A, Murúa MG, Silvie P, Vergara C, Westbrook J, 2017. Fall armyworm migration across the lesser antilles and the potential for genetic exchanges between North and South American populations. *PLoS ONE*, 12(2): e0171743.
- Robert G, Velemir N, Jan P, 2011. Chemical interaction between undamaged plants-effects on herbivores and natural enemies. *Phytochemistry*, 72(13): 1683–1689.
- Sen A, Raina R, Joseph M, Tungikar VB, 2005. Response of *Trichogramma chilonis* to infochemicals: An SEM and electrophysiological investigation. *Biocontrol*, 50(3): 429–447.
- She CR, Pan RY, Gu DX, Chen HD, 1997. Several technological problems of applying *Anastatus* sp. to control *Tessaratoma papillosa*. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 26(4): 441–445. [余春仁, 潘蓉英, 古德祥, 陈海东, 1997. 利用平腹小蜂防治荔枝蝽若干技术问题探讨. 福建农业大学学报, 26(4): 40–41.]
- Shi M, Tang P, Wang ZZ, Huang JH, Chen XX, 2020. Review of research on parasitoids and their use in biological control in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(3): 491–548. [时敏, 唐璞, 王知知, 黄健华, 陈学新, 2020. 中国寄生蜂研究及其在害虫生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 57(3): 491–548.]
- Song XJ, Chen Q, Tang C, Jin QA, Wen HB, Peng ZQ, 2011. The attraction of volatiles from coconut heart leaves induced by *Brontispa longissima* to *Asecodes hispinarum*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 32(11): 2123–2128. [宋晓君, 陈青, 唐超, 金启安, 温海波, 彭正强, 2011. 椰甲截脉姬小蜂对椰心叶甲及其寄主植物挥发物的行为反应. 热带作物学报, 32(11): 2123–2128.]

- Tang YT, 2020. Study on potential of a novel natural enemy insect *Picromerus lewisi* Scott in biological control. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [唐艺婷, 2020. 一种新天敌-益蝽的生物防治潜能研究. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Wang Y, 2008. Effects of masson pine volatiles on olfactory and parasitic behavior of *Trichogramma dendrolimi* (Hymenoptera: Trichogrammatidae). Master dissertation. Changsha: Hunan Agricultural University. [王勇, 2008. 马尾松树针叶挥发性化学物质对松毛虫赤眼蜂嗅觉及寄生行为的影响. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Wood KA, Wilson BH, Graves JB, 1981. Influence of host plant on the susceptibility of the fall armyworm to insecticides. *Journal of Economic Entomology*, 74(1): 96–98.
- Xiu CL, Dai WJ, Pan HS, Zhang W, Luo SP, Wyckhuys KAG, Yang YZ, Lu YH, 2019. Herbivore-induced plant volatiles enhance field-level parasitism of the mirid bug *Apolygus lucorum*. *Biological Control*, 135: 41–47.
- Xu WA, Li ZH, Ye BH, 2000. Chemical regulation of semiochemical on the action of host-selection by parasitoid. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 31(3): 320–324. [许维岸, 李照会, 叶保华, 2000. 化学信息素在寄生蜂寄主选择行为中的调控作用. 山东农业大学学报(自然科学版), 31(3): 320–324.]
- Yang S, Xu R, Yang SY, Kuang RP, 2009. Olfactory responses of *Aphidius gifuensis* to odors of host plants and aphid-plant complexes. *Insect Science*, 16(6): 503–510.
- Yu LY, Chen MF, Liu JH, Huang XQ, Qing ZX, Zeng JG, 2020. Analysis of the volatile components of mulberry collected from different parts at various maturity. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 46(1): 63–69. [余柳仪, 陈森芬, 刘京宏, 黄秀琼, 卿志星, 曾建国, 2020. 桑不同部位及不同成熟度桑葚挥发性成分分析. 湖南农业大学学报(自然科学版), 46(1): 63–69.]
- Zhao HY, Liang GW, Lu YY, 2016. Attraction of *Pachycrepoideus vindemmiae* by herbivore-induced fruit volatiles to and extraction and GC-MS identification of the active components. *Plant Protection*, 42(4): 83–88. [赵海燕, 梁广文, 陆永跃, 2016. 虫害诱导果实挥发物对蝇蛹金小蜂趋性行为的影响及其成分初步鉴定. 植物保护, 42(4): 83–88.]
- Zeng AP, Wang KW, Jiang JX, Ji XY, You LS, 2005. On the Bionomics of *Microplitis pallidipes*. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 31(5): 502–505. [曾爱平, 王奎武, 蒋杰贤, 季香云, 游兰韶, 2005. 淡足侧沟茧蜂生物学特性研究. 湖南农业大学学报(自然科学版), 31(5): 502–505.]
- Zeng AP, 2005. Studies on the biology of *Microplitis pallidipes* Szépligeti and its control effects on the population of *Spodoptera exigua* (Hübner). Doctor dissertation. Changsha: Hunan Agricultural University. [曾爱平, 2005. 淡足侧沟茧蜂生物学及其对甜菜夜蛾的控制研究. 博士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]