

陈义娟,张彤瑶,蒋杰贤,等.甜菜夜蛾与虫害苋菜及其挥发物对淡足侧沟茧蜂趋向行为的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(2):199-206.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.021

甜菜夜蛾与虫害苋菜及其挥发物对淡足侧沟茧蜂趋向行为的影响

陈义娟,张彤瑶,蒋杰贤,季香云

上海市农业科学院生态环境保护研究所/上海市设施园艺技术重点实验室/
农业农村部东南沿海农业绿色低碳重点实验室,上海 201403

摘要 淡足侧沟茧蜂(*Microplitis pallidipes*)是甜菜夜蛾田间自然种群数量的重要调节因子,为深入探究有效影响该寄生蜂趋向行为的挥发性物质来源与种类,利用“Y”型嗅觉仪分别测定了淡足侧沟茧蜂对甜菜夜蛾幼虫取食后的虫害苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫及其虫粪的行为反应,并利用顶空固相微萃取法和GC-MS对虫害苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫及其虫粪释放的挥发性物质进行收集与分析。研究结果显示,虫害苋菜和甜菜夜蛾幼虫对淡足侧沟茧蜂均展现出显著的引诱作用(引诱率分别为67.86%和65.38%),而甜菜夜蛾虫粪的引诱效果不明显。GC-MS结果显示,在虫害苋菜、甜菜夜蛾幼虫和虫粪中分别检测到40、27和32种化合物,主要为烯烃和烷烃类化合物。其中,分别有22、17和11种化合物仅在虫害苋菜、甜菜夜蛾幼虫和虫粪中检测出。另外,在7种共同被检测出的化合物中,(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯(DMNT)、水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯在虫害苋菜中的含量高于甜菜夜蛾幼虫和虫粪,而甜菜夜蛾幼虫中的 α -雪松烯含量高于虫害苋菜和甜菜夜蛾虫粪。以上研究表明,虫害苋菜和甜菜夜蛾幼虫是苋菜-甜菜夜蛾复合体显著引诱淡足侧沟茧蜂的挥发物的主要来源。

关键词 苋菜;甜菜夜蛾;淡足侧沟茧蜂;趋向行为;GC-MS

中图分类号 S476.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0199-08

甜菜夜蛾[*Spodoptera exigua* (Hübner)]是一种世界性分布、间歇性大发生的多食性害虫^[1-2]。自1986年以来,甜菜夜蛾在我国发生危害的范围逐渐扩大,危害程度也逐步提高,特别是在长江以南地区,危害尤为严重,导致农产品严重减产^[3]。目前甜菜夜蛾主要还是依靠化学农药进行防治。由于长期不合理使用化学农药,甜菜夜蛾的抗性越来越强,其防治效果很不理想^[4-5]。淡足侧沟茧蜂(*Microplitis pallidipes*)作为甜菜夜蛾的重要寄生性天敌,对甜菜夜蛾的田间种群有较好的控制作用^[6]。因此,利用淡足侧沟茧蜂防治甜菜夜蛾可有效调节其田间种群数量,从而实现安全、有效、可持续控制。

在植物-害虫-天敌三级营养关系中,挥发性物质能够调节昆虫与植物、昆虫与昆虫的行为关系,这种调节作用在天敌搜寻寄主与繁殖过程中发挥着重要作用^[7]。现有研究表明,在远距离时,寄生蜂的搜寻

主要依靠植物挥发性物质,而在近距离时,寄主昆虫挥发性物质对寄生蜂行为的影响明显增加^[8-10]。例如,石庆型等^[11]发现来自玉米(11种)和棉铃虫幼虫体表(6种)的挥发物对中红侧沟茧蜂触角具有电生理活性,可显著影响该寄生蜂的寄主定位行为。此外,陶宇道等^[12]研究表明,包含2,4-二甲基庚烷、5-乙基-2-甲基辛烷等在内的10种黏虫幼虫体表挥发物也对中红侧沟茧蜂有寄主定位作用。笔者所在课题组前期试验发现,由甜菜夜蛾幼虫和寄主植物(苋菜)组成的幼虫-植物复合体可以对淡足侧沟茧蜂表现出显著的引诱作用。为了进一步探究该幼虫-植物复合体中不同来源的挥发性物质对淡足侧沟茧蜂选择行为的影响,本研究以苋菜-甜菜夜蛾-淡足侧沟茧蜂为系统,分别测定了取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫、虫粪以及虫害苋菜对淡足侧沟茧蜂的吸引作用,并对其挥发性物质进行了鉴定与分析,以期阐明挥

收稿日期:2025-06-04

基金项目:上海市青年科技启明星计划项目(21QB1404100);上海市农业科学院卓越创新团队项目[2022(017)]

陈义娟,E-mail:juanych99@163.com

通信作者:季香云,E-mail:hwfy2002@163.com

发性物质对淡足侧沟茧蜂栖境选择和寄主定位的调控作用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试虫源与植物

1)甜菜夜蛾:幼虫采集于上海市奉贤区庄行综合试验站,采用人工饲料(含有黄豆粉120 g、小麦胚芽96 g、琼脂32 g、酵母粉40 g、酪蛋白16 g、抗坏血酸9.6 g、氯化胆碱1.2 g、对羟基苯甲酸甲酯2.0 g、山梨酸钾6.0 g、胆固醇0.4 g、肌醇0.24 g、维生素B复合物0.08 g和水1 280 mL)^[6]进行室内饲养,饲养条件为(28±1)℃、相对湿度(80±5)%、光周期14L:10D,选用3龄初幼虫,用于繁殖寄生蜂和相关试验^[13]。

2)淡足侧沟茧蜂:将田间采集的蜂茧饲养至羽化后饲喂20%的蜂蜜水,待雌蜂和雄蜂交配12 h后,取已交配的淡足侧沟茧蜂雌蜂与甜菜夜蛾3龄幼虫,按雌蜂:幼虫=1:50的比例放入繁蜂箱内供其寄生。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,直至出茧并羽化。寄生蜂于(26±1)℃、相对湿度(65±5)%、14L:10D的人工气候箱(上海皓庄仪器有限公司HZ-350C-LED)中繁殖^[14]。挑选交配12 h后触角完整、活力较强的1~2日龄蜂用于试验。上述甜菜夜蛾幼虫与淡足侧沟茧蜂均在室内饲养3代及以上后用于后续试验。

3)供试苋菜:品种为常丰种业的“一点红苋菜”,于人工气候培养箱中培养。待苋菜幼苗长到4~6片叶片时,选取健康且长势一致的苋菜植株用于试验。

1.2 试验处理

将剪刀用70%乙醇溶液消毒后沿苋菜茎部剪取约3 g叶片,用脱脂棉蘸蒸馏水包裹伤口处,将苋菜叶片置于含有30头3龄初甜菜夜蛾幼虫的广口瓶内,放在温度(26±1)℃、相对湿度(65±5)%、光周期14L:10D的人工培养箱内24 h后,将上述广口瓶中被甜菜夜蛾幼虫取食后的苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫及其虫粪分别收集后置于新的广口瓶中用于后续趋向行为反应试验。另外,剪取相同量的未被甜菜夜蛾取食的苋菜幼苗叶片作为对照。同时,采用相同的处理方法将甜菜夜蛾幼虫取食后的苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫和虫粪分别收集于顶空瓶内用于后续GC-MS分析。

1.3 趋向行为反应测定

参照Belz等^[15]的方法,采用“Y”型嗅觉仪测定

淡足侧沟茧蜂对虫害苋菜、甜菜夜蛾幼虫及其虫粪挥发性物质的趋向行为反应。鉴于前期甜菜夜蛾幼虫和苋菜组成的幼虫-植物复合体对淡足侧沟茧蜂展现出引诱效果的研究结果^[16],本研究在进一步探究该幼虫-植物复合体中甜菜夜蛾幼虫、虫害苋菜和虫粪分别对淡足侧沟茧蜂是否具有引诱作用时也都采用正常苋菜叶作为对照。测定试验共设4个处理,即:①正常苋菜叶vs空白对照(清洁空气);②甜菜夜蛾取食后的虫害苋菜叶(去除幼虫和虫粪)vs正常苋菜叶;③取食苋菜叶片的30头甜菜夜蛾幼虫vs正常苋菜叶;④取食苋菜叶片的甜菜夜蛾幼虫粪便vs正常苋菜叶。测试系统是通过硅胶管将真空泵、活性炭瓶、蒸馏水瓶、味源瓶、气流计相连,活性炭瓶、蒸馏水瓶和味源瓶均为磨砂口广口瓶(250 mL),其中味源瓶内盛有上述不同处理的材料。测试时空气流量为200 mL/min。在“Y”型嗅觉仪释放管末端引入1头淡足侧沟茧蜂,当寄生蜂爬至出口处或超过连接不同味源瓶的Y型管两臂中任意一臂1/3处并停留5 s以上时,则记为该蜂对该臂的气味源作出选择。若蜂引入5 min后仍不做出选择,则结束对该蜂的行为观察。每测定5头,嗅觉仪方位调换1次以避免几何位置对寄生蜂行为可能产生的影响。每测定10头,更换新的嗅觉仪,每个处理测定60头蜂^[16]。

1.4 挥发性物质的收集与鉴定分析

为探究甜菜夜蛾与甜菜夜蛾取食后的苋菜所释放的挥发性物质种类和含量,参照张彤瑶等^[16]的方法,采用顶空固相微萃取法分别收集虫害苋菜(3.046 5 g)、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫(30头,0.427 3 g)及其虫粪(1.182 4 g)的挥发性物质。首先,将平衡15 min后的萃取头(50/30 μm, DVB/CAR/PDMS)加入放有样品的密封顶空瓶内进行挥发性物质富集,30 min后取出萃取头于260℃条件下热解析5 min,然后采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS,美国安捷伦公司7890B-5977B)进行检测与分析。

采用DB-WAX石英毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),1 mL/min的氦气(99.999%)为载气,在汽化温度260℃下不分流进样。色谱柱起始温度为40℃,保持5 min后以5℃/min升至220℃,然后以20℃/min升至250℃后再保持5 min。电离方式为EI;接口、离子源和四级杆温度分别为260、230和150℃;电离能为70 eV;通过全扫描方式进行采集,扫描质量范围为29~400 amu^[17]。

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,采用计算机谱库检索(NIST17库)初步确定化合物。参照文献[18],通过比对保留时间、质谱图等方法对挥发性物质进行鉴定,采用面积归一法在扣除空气本底后计算样品中不同物质的相对含量,并根据成分的峰面积值进行相对定量分析。

1.5 统计分析

在嗅觉趋向行为反应测定中以做出选择反应的淡足侧沟茧蜂数量为样本总数,利用SPSS软件对淡足侧沟茧蜂的趋向行为测定结果进行 χ^2 测验。 $P < 0.05$ 表示有显著差异。选择率的计算参照文献[19]的公式。

2 结果与分析

2.1 淡足侧沟茧蜂对苋菜与甜菜夜蛾的趋向行为

“Y”型嗅觉仪测定结果(图1)表明,与正常苋菜相比,甜菜夜蛾幼虫取食后的虫害苋菜和甜菜夜蛾幼虫对淡足侧沟茧蜂均有显著的引诱作用(虫害苋菜: $\chi^2=6.33$, $P=0.012$;甜菜夜蛾幼虫: $\chi^2=4.92$, $P=0.026$),选择率分别为67.86%和65.38%,而甜菜夜蛾幼虫粪便对淡足侧沟茧蜂无明显的吸引作用($\chi^2=0.07$, $P=0.785$),并且正常苋菜与清洁空气(空白对照)对淡足侧沟茧蜂的趋向行为无差异($\chi^2=0.02$, $P=0.889$)。

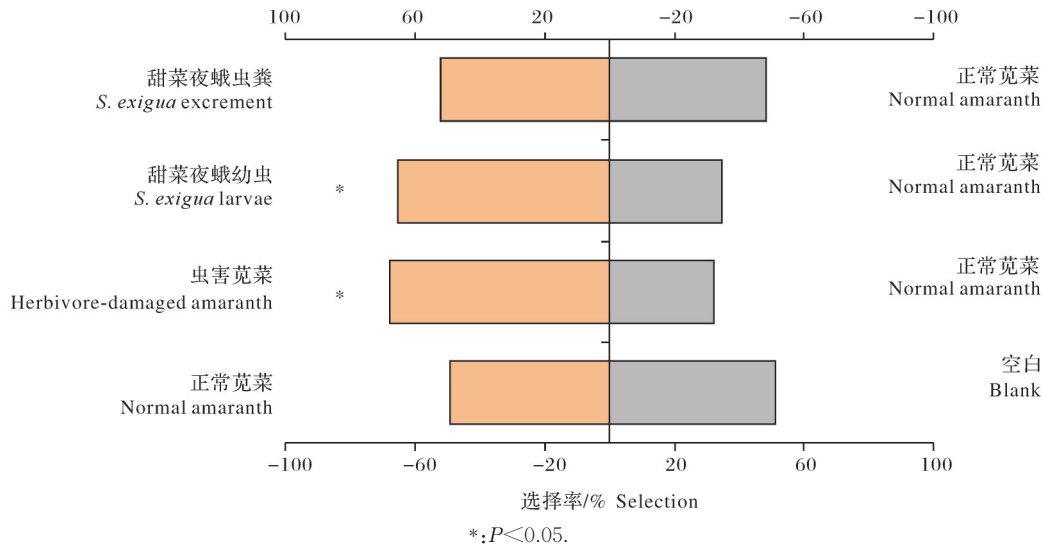


图1 淡足侧沟茧蜂对双选处理的选择比例

Fig. 1 Proportions of the choice between two items in *M. pallidipes*

2.2 苋菜与甜菜夜蛾挥发性物质成分分析

为深入探究影响淡足侧沟茧蜂趋向行为的挥发性物质种类,对甜菜夜蛾幼虫取食后的虫害苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫及其虫粪释放的挥发性物质进行GC-MS分析。结果(表1)显示,苋菜被甜菜夜蛾取食后主要释放的挥发性物质为烯烃类物质(占比为65.00%),且在被检测出的40种挥发性物质中含量最高的是(E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯(DMNT)(占比为50.96%),其次为 α -法尼烯(占比为10.24%),再次为水杨酸甲酯(占比为6.54%)和苯甲酸甲酯(占比为4.99%)。取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫释放出的27种挥发性物质中主要以烷烃(占比为56.60%)和烯烃(占比为37.74%)类物质为主,约占挥发性物质总量的94.34%,其中正十五烷(占比为48.85%)和 α -雪松烯(占比为29.72%)的含量较高。然而,在甜菜夜蛾幼虫粪便中烷烃类物质含量最高

为61.16%,在检测出的32种物质中相对含量较高的有正十五烷(占比为50.48%)、 α -雪松烯(占比为10.21%)、正十四烷(占比为7.75%)和1-戊烯-3醇(占比为5.30%)。

通过对3个处理组检测出的挥发性物质种类与含量比较发现,被甜菜夜蛾取食后的虫害苋菜中烯烃含量相对最高,主要为DMNT,而取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫和虫粪均检测出高含量的烷烃,其中十五烷为主要成分。另外,虫害苋菜释放的化合物种类最多且含有22种独有化合物,例如异戊酸叶醇酯、芳樟醇和(+)- β -柏木萜烯;甜菜夜蛾幼虫则被检测出(Z)- β -罗勒烯、 α -石竹烯等17种独有化合物;虫粪中也发现含有3-戊酮、 β -倍半水芹烯等11种未在虫害苋菜和甜菜夜蛾幼虫中检测出的化合物。除此之外,3个处理组共有7种相同化合物,分别为(+)-柠檬烯、正十三烷、DMNT、苯甲酸甲酯、 α -雪松烯、水

杨酸甲酯和邻苯二甲酸二丁酯,其中虫害苋菜挥发性物质中DMNT、苯甲酸甲酯和水杨酸甲酯的含量高于甜菜夜蛾幼虫和虫粪中的含量;而 α -雪松烯在甜菜夜蛾幼虫中的含量(占比为29.72%)高于虫害苋菜(占比为0.17%)和甜菜夜蛾幼虫粪便(占比为10.21%)(表1)。

表1 GC-MS分析虫害苋菜及甜菜夜蛾幼虫与虫粪释放的主要挥发性物质的相对含量

Table 1 GC-MS analysis for the relative proportions of main volatiles of herbivore-damaged amaranth and *S. exigua* larvae and excrement

编号 No.	挥发性物质名称 Name of volatiles	CAS 登录号 CAS No.	虫害苋菜 Herbivore- damaged amaranth	甜菜夜蛾幼虫 <i>S. exigua</i> larvae	甜菜夜蛾虫粪 <i>S. exigua</i> excrement	%
1	3-戊酮 3-Pentanone	96-22-0	—	—	0.78	
2	(R)-(-)-2-丁醇 (R)-Butan-2-ol	14898-79-4	1.58	—	—	
3	3-戊醇 3-Pentanol	584-02-1	4.02	—	—	
4	对二甲苯 1,4-Dimethylbenzene	106-42-3	0.31	—	—	
5	1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	616-25-1	3.91	—	5.30	
6	2-茨烯 2-Bornene	464-17-5	—	0.06	—	
7	邻二甲苯 1,2-Dimethylbenzene	95-47-6	0.20	—	—	
8	(+)-柠檬烯 <i>D</i> -Limonene	5989-27-5	0.04	0.86	2.71	
9	正十二烷 Dodecane	112-40-3	0.28	—	0.46	
10	异戊醇 1-Butanol, 3-methyl-	123-51-3	0.32	—	—	
11	(<i>Z</i>)- β -罗勒烯 (<i>Z</i>)- β -Ocimene	3338-55-4	—	0.10	—	
12	β -罗勒烯 β -Ocimene	13877-91-3	0.34	—	0.26	
13	正十三烷 Tridecane	629-50-5	0.30	0.18	0.69	
14	DMNT (<i>E</i>)-4,8-Dimethylnona-1,3,7-triene	19945-61-0	50.96	1.76	2.31	
15	正十四烷 Tetradecane	629-59-4	—	2.89	7.75	
16	反式-3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol, (<i>E</i> -)	928-97-2	2.68	—	2.85	
17	乙酸 Acetic acid	64-19-7	—	0.77	—	
18	(<i>Z</i>)-芳樟醇氧化物(呋喃) (<i>Z</i>)-Linalool oxide (furanoid)	5989-33-3	0.31	—	—	
19	1,2,4,5-四甲基苯 Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	95-93-2	0.17	—	0.16	
20	异戊酸叶醇酯 <i>cis</i> -3-Hexenyl isovalerate	35154-45-1	1.29	—	—	
21	5-异丙基间二甲苯 1-Isopropyl-3,5-dimethylbenzene	4706-90-5	—	—	0.14	
22	正十五烷 Pentadecane	629-62-9	—	48.85	50.48	
23	1-甲基-3-(1-甲基)环己烯 Cyclohexene, 1-methyl-3-(1-methylethenyl)-	499-03-6	0.06	—	—	
24	丙酸 Propanoic acid	79-09-4	—	0.71	—	
25	(5 <i>E</i>)-5-十八碳烯 5-Octadecene, (<i>E</i> -)	7206-21-5	—	—	0.06	
26	1-十五烯 1-Pentadecene	13360-61-7	—	0.33	—	
27	芳樟醇 Linalool	78-70-6	1.41	—	—	
28	α -柏木烯 α -Cedrene	469-61-4	0.57	—	0.25	
29	(+)- γ -古芸烯 γ -Gurjunene	22567-17-5	—	0.14	—	
30	β -倍半水芹烯 β -Sesquiphellandrene	20307-83-9	—	—	0.29	
31	(+)- β -柏木萜烯 (+)- β -Funebrebe	79120-98-2	0.67	—	—	
32	正二十六烷 Hexacosane	630-01-3	—	—	0.29	
33	正十六烷 Hexadecane	544-76-3	—	0.51	—	
34	β -环柠檬醛 β -Cyclocitral	432-25-7	0.09	—	—	
35	苯甲酸甲酯 Methyl benzoate	93-58-3	4.99	0.21	0.25	
36	α -雪松烯 α -Himachalene	3853-83-6	0.17	29.72	10.21	
37	五甲基苯 Benzene, pentamethyl-	700-12-9	0.12	—	0.47	
38	紫穗槐二烯 (-)-Amorpha-4,11-diene	92692-39-2	—	—	0.46	
39	γ -榄香烯 γ -Elemene	3242-08-8	—	0.45	—	
40	α -红没药烯 α -Bisabolene	25532-79-0	—	—	0.53	

续表1 Continued Table 1

编号 No.	挥发性物质名称 Name of volatiles	CAS 登录号 CAS No.	虫害苋菜 Herbivore- damaged amaranth	甜菜夜蛾幼虫 <i>S. exigua</i> larvae	甜菜夜蛾虫粪 <i>S. exigua</i> excrement
41	α -石竹烯 α -Humulene	6753-98-6	—	1.75	—
42	雪松烯 <i>cis</i> -(-)-2,4a,5,6,9a-Hexahydro-3,5,5,9-tetra- methyl(1H)benzocycloheptene	1000104-20-1	—	—	0.19
43	(+)- γ -古芸烯 γ -Gurjunene	22567-17-5	—	0.16	—
44	α -花侧柏烯 α -Cuprenene	29621-78-1	—	—	0.17
45	十七烷 Heptadecane	629-78-7	—	4.17	1.49
46	Δ -杜松烯 (+)- Δ -Cadinene	483-76-1	—	0.36	—
47	β -瑟林烯 β -Selinene	17066-67-0	0.05	—	—
48	9,11-愈创木二烯 Guaia-9,11-diene	1000374-19-8	0.06	—	—
49	β -红没药烯 β -Bisabolene	495-61-4	—	0.60	—
50	顺式- α -佛柑油烯 <i>cis</i> - α -Bergamotene	18252-46-5	0.18	—	—
51	1-亚甲基-1H-茛 1H-Indene, 1-methylene-	2471-84-3	0.33	—	0.24
52	(1Z,5Z,8S)-1,5-二甲基-8-丙-1-烯-2-基环癸-1,5-二烯 (-)-Helminthogermacrene	75023-40-4	—	0.55	—
53	α -法尼烯 α -Farnesene	502-61-4	10.24	—	0.66
54	δ -杜松烯 4,7-Dimethyl-1-propan-2-yl-1,2,3,5,6,8a- hexahydronaphthalene	16729-01-4	—	0.88	—
55	水杨酸甲酯 Methyl salicylate	119-36-8	6.54	0.29	0.22
56	(3E,7E)-4,8,12-三甲基十三-1,3,7,11-四烯 (3E,7E)-4,8,12-Trimethyltrideca-1,3,7,11-tetraene	62235-06-7	1.66	—	—
57	2-十三烷酮 2-Tridecanone	593-08-8	—	0.05	—
58	α -甲基萘 1-Methylnaphthalene	90-12-0	0.38	—	0.41
59	β -甲基萘 2-Methylnaphthalene	91-57-6	0.13	—	0.20
60	苯甲酸正己酯 Hexyl benzoate	6789-88-4	0.06	—	—
61	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯 2,2,4-Trimethyl- 1,3-pentanediol	6846-50-0	—	0.06	—
62	戊酸苄酯 Benzyl valerate	10361-39-4	0.16	—	—
63	α -二氢莨菪蒲烯 α -Calacorene	21391-99-1	—	0.02	—
64	苯甲酸异戊酯 Isopentyl benzoate	94-46-2	0.15	—	—
65	β -紫罗兰酮 Irisone	14901-07-6	—	—	0.08
66	1,7-二甲基萘 1,7-Dimethylnaphthalene	575-37-1	0.10	—	—
67	2,6-二甲基萘 2,6-Dimethylnaphthalene	581-42-0	—	—	0.17
68	3-甲基丁酸苯乙酯 Phenylethyl isovalerate	140-26-1	0.08	—	—
69	反式-橙花叔醇 <i>trans</i> -Nerolidol	40716-66-3	0.20	—	—
70	苯甲酸叶醇酯 <i>cis</i> -3-Hexenyl benzoate	25152-85-6	0.38	—	—
71	邻苯二甲酸二丁酯 Dimethyl phthalate	131-11-3	0.63	0.04	0.98
	烷烃 Alkane		0.58	56.60	61.16
	烯烃 Alkene		65.00	37.74	18.10
	芳香烃 Aromatic hydrocarbon		1.74	—	1.79
	醇类 Alcohols		14.43	—	8.15
	醛类 Aldehydes		0.09	—	—
	酸类 Acid		—	1.48	—
	酯类 Esters		14.28	0.60	1.45
	酮类 Ketones		—	0.05	0.86
	总计 Total		96.12	96.47	91.51

注:“—”表示未检测到该化合物。Note:“—” indicates that the compound was not detected.

3 讨论

气味挥发性物质是寄生蜂在生境定位、寄主搜索过程中的重要化学信息物质^[20-21]。目前,通过探索与寄生蜂趋向行为相关的挥发性气味物质,利用其有效调控寄生蜂搜寻寄主的效率,提高害虫寄生率已经成为一种有效的害虫防控手段。以往研究证实具有调控寄生蜂寄主选择行为的挥发性气味物质有多种有效来源,如虫害诱导的植物、寄主本身及其粪便等。潘洪生等^[22]在研究中红侧沟茧蜂(*Microplitis mediator* Haliday)对棉花植株和棉铃虫(*Helicoverpa armigera* Hübner)的行为反应时,发现遭受棉铃虫为害后的去虫棉株和1~2龄棉铃虫均能引起中红侧沟茧蜂的趋向行为反应,这也就表明虫害棉株与棉铃虫幼虫都会释放出可影响中红侧沟茧蜂寄主选择行为的挥发性物质。我们前期研究也发现苋菜-甜菜夜蛾复合体能够显著吸引淡足侧沟茧蜂,然而有效影响该寄生蜂趋向行为的挥发性物质具体来源还不明晰。因此,本研究分别测定了被甜菜夜蛾取食后的虫害苋菜、取食苋菜的甜菜夜蛾幼虫及其虫粪对淡足侧沟茧蜂选择行为的影响。研究结果表明淡足侧沟茧蜂能有效区分正常苋菜与虫害苋菜,可显著地趋向虫害苋菜,并且甜菜夜蛾幼虫本身对淡足侧沟茧蜂也有吸引作用。这也表明虫害苋菜与甜菜夜蛾幼虫释放的挥发性物质可显著影响淡足侧沟茧蜂的寄主选择行为。

为进一步探究引起淡足侧沟茧蜂行为反应的物质种类和含量,本研究采用顶空固相微萃取联合GC-MS分别对甜菜夜蛾取食后的虫害苋菜和甜菜夜蛾幼虫及其虫粪进行收集并进行了挥发性物质成分分析。结果显示经过甜菜夜蛾取食后的虫害苋菜释放出了更多种类的挥发性物质,主要为烯烃化合物,其中包括一些萜烯和绿叶挥发物。另外,在虫害苋菜中DMNT、 α -法尼烯、水杨酸甲酯、苯甲酸甲酯等物质含量较高,而在甜菜夜蛾幼虫和虫粪中含量很低或没有检测到。现有研究也发现以上部分挥发性物质可能对寄生蜂具有引诱作用。例如,0.001%水杨酸甲酯对桑天牛卵啮小蜂(*Aprostocetus prolixus*)雌蜂具有显著的引诱作用^[23];榆树在遭受榆黄萤叶甲(*Galerucella luteola*)取食诱导后能释放大量可引起欧米啮小蜂(*Oomyzus gallerucae*)明显的行为反应的化合物—DMNT^[24]; α -法尼烯能引起长尾潜蝇茧蜂(*Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead))雌蜂强烈的触角电位反应^[25]。因此,我们认为

DMNT、 α -法尼烯和水杨酸甲酯可能是影响虫害苋菜引诱淡足侧沟茧蜂的重要挥发性物质,这一结果也进一步证实了寄主植物在遭受植食性昆虫为害后,会诱导释放出某些特异性挥发性物质引诱天敌^[26]。

除了虫害诱导的植物,植食性昆虫体表释放的挥发性物质同样也是天敌昆虫定位的重要依据^[27-28]。本研究从甜菜夜蛾幼虫中收集并鉴定出27种化合物,其中十五烷、 α -雪松烯、十七烷、十四烷等物质含量相对较高。此外,虽在甜菜夜蛾幼虫及其虫粪中都检测到 α -雪松烯,但其在幼虫中的含量高于虫粪,表明 α -雪松烯可能是导致淡足侧沟茧蜂对甜菜夜蛾幼虫与虫粪选择性差异的重要化合物之一。然而,目前暂未有研究表明该化合物对寄生蜂是否存在吸引作用。因此,对于甜菜夜蛾幼虫释放的众多挥发性物质中具体是有哪些化合物在影响淡足侧沟茧蜂趋向行为还有待进一步研究。

参考文献 References

- [1] 张彬,刘怀,王进军,等.甜菜夜蛾研究进展[J].中国农学通报,2008,24(10):427-433. ZHANG B, LIU H, WANG J J, et al. Advance in the research on *Spodoptera exigua* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Chinese agricultural science bulletin, 2008, 24 (10) : 427-433 (in Chinese with English abstract).
- [2] SHOWLER A T. *Spodoptera exigua* oviposition and larval feeding preferences for pigweed, *Amaranthus hybridus*, over squaring cotton, *Gossypium hirsutum*, and a comparison of free amino acids in each host plant [J]. Journal of chemical ecology, 2001, 27(10) : 2013-2028.
- [3] 王桂荣,郭予元,徐广,等.甜菜夜蛾GOBP2基因的克隆及序列测定[J].中国农业科学,2001,34(6):619-625. WANG G R, GUO Y Y, XU G, et al. Cloning and sequencing of a gene encoding GOBP2 in the antenna of *Spodoptera exigua* [J]. Scientia agricultura sinica, 2001, 34(6) : 619-625 (in Chinese with English abstract).
- [4] WANG P, YANG F, WANG Y, et al. Monitoring the resistance of the beet armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to four insecticides in Southern China from 2014 to 2018 [J]. Journal of economic entomology, 2021, 114(1) : 332-338.
- [5] 苏宏华,宋彬,李丽,等.甜菜夜蛾的抗性及其机理研究进展[J].应用昆虫学报,2012,49(6):1659-1663. SU H H, SONG B, LI L, et al. Resistance of *Spodoptera exigua* to insecticides and mechanisms of resistance [J]. Chinese journal of applied entomology, 2012, 49(6) : 1659-1663 (in Chinese with English abstract).
- [6] JIANG J X, ZENG A P, JI X Y, et al. Combined effect of nu-

- cleopolyhedrovirus and *Microplitis pallidipes* for the control of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* [J]. Pest management science, 2011, 67(6):705-713.
- [7] VETERANS L. Ecology of infochemical use by natural enemies in a tritrophic context [J]. Annual review of entomology, 1992, 37:141-172.
- [8] FARZAN S, GLASSER S. Host-associated volatiles attract parasitoids of a native solitary bee, *Osmia lignaria* Say (Hymenoptera, Megachilidae) [J]. Journal of hymenoptera research, 2016, 51:249-256.
- [9] CHEN C S, ZHAO C, WU Z Y, et al. Whitefly-induced tomato volatiles mediate host habitat location of the parasitic wasp *Encarsia formosa*, and enhance its efficacy as a bio-control agent [J]. Pest management science, 2021, 77(2):749-757.
- [10] GONZÁLEZ J M, CUSUMANO A, WILLIAMS H J, et al. Behavioral and chemical investigations of contact kairomones released by the mud dauber wasp *Trypoxylon politum*, a host of the parasitoid *Melittobia digitata* [J]. Journal of chemical ecology, 2011, 37(6):629-639.
- [11] 石庆型, 罗庆怀, 赵龙, 等. 与中红侧沟茧蜂生境与寄主定位相关的玉米及棉铃虫幼虫体表挥发性成分的提取与鉴定 [J]. 昆虫学报, 2015, 58(3):244-255. SHI Q X, LUO Q H, ZHAO L, et al. Extraction and identification of maize volatiles and cuticular volatiles of larval *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) related to host-habitat location and host location of parasitic wasp *Microplitis mediator* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. Acta entomologica sinica, 2015, 58(3):244-255 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陶宇道, 单双, 王山宁, 等. 黏虫幼虫体表挥发物成分鉴定及其对中红侧沟茧蜂寄主定位行为的影响 [J]. 植物保护学报, 2023, 50(4):952-961. TAO Y X, SHAN S, WANG S N, et al. Volatile components from the body surface of oriental armyworm *Mythimna separata* larvae and their effects on the host location behavior of parasitoid wasp *Microplitis mediator* [J]. Journal of plant protection, 2023, 50(4):952-961 (in Chinese with English abstract).
- [13] CHEN Y J, GUO L, WAN N F, et al. Transcriptomic analysis of the interactions between the *Spodoptera exigua* midgut and nucleopolyhedrovirus [J]. Pesticide biochemistry and physiology, 2020, 163:241-253.
- [14] WAN N F, JI X Y, ZHANG H, et al. Nucleopolyhedrovirus infection and/or parasitism by *Microplitis pallidipes* Szepligetii affect hemocyte apoptosis of *Spodoptera exigua* (Hübner) larvae [J]. Journal of invertebrate pathology, 2015, 132:165-170.
- [15] BELZ E, KÖLLIKER M, BALMER O. Olfactory attractiveness of flowering plants to the parasitoid *Microplitis mediator*: potential implications for biological control [J]. BioControl, 2013, 58(2):163-173.
- [16] 张彤瑶, 蒋杰贤, 张浩, 等. 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 [J]. 昆虫应用学报, 2024, 61(1):62-73. ZHANG T Y, JIANG J X, ZHANG H, et al. Attractiveness of two host plants to *Microplitis pallidipes* and their volatile compounds identification [J]. Chinese journal of applied entomology, 2024, 61(1):62-73 (in Chinese with English abstract).
- [17] 关思慧, 刘晨旭, 姚祝平, 等. 腐植酸处理对樱桃番茄挥发性有机化合物成分和含量的影响 [J]. 园艺学报, 2024, 51(2):346-360. GUAN S H, LIU C X, YAO Z P, et al. Effects of humic acid treatment on the composition and content of volatile organic compounds in cherry tomato [J]. Acta horticulturae sinica, 2024, 51(2):346-360 (in Chinese with English abstract).
- [18] GUO F Q, LIANG Y Z, XU C J, et al. Analyzing of the volatile chemical constituents in *Artemisia capillaris* herba by GC-MS and correlative chemometric resolution methods [J]. Journal of pharmaceutical and biomedical analysis, 2004, 35(3):469-478.
- [19] 程曼曼, 王森, 马梦然, 等. 云南派姬小蜂对其寄主及寄主植物相关化学线索的行为反应 [J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(6):1189-1196. CHENG M M, WANG M, MA M R, et al. The behavioral responses of *Pediobius yunnanensis* to the chemical cues related to its host and host plant [J]. Chinese journal of biological control, 2021, 37(6):1189-1196 (in Chinese with English abstract).
- [20] VOSS S C, SPAFFORD H, DADOUR I R. Host location and behavioural response patterns of the parasitoid, *Tachinaephagus zealandicus* Ashmead (Hymenoptera: Encyrtidae), to host and host-habitat odours [J]. Ecological entomology, 2009, 34(2):204-213.
- [21] AVILA G A, WITHERS T M, HOLWELL G I. Olfactory cues used in host-habitat location and host location by the parasitoid *Cotesia urabae* [J]. Entomologia experimentalis et applicata, 2016, 158(2):202-209.
- [22] 潘洪生, 赵秋剑, 赵奎军, 等. 中红侧沟茧蜂对不同龄期棉铃虫幼虫及其为害棉株的趋性反应 [J]. 昆虫学报, 2011, 54(4):437-442. PAN H S, ZHAO Q J, ZHAO K J, et al. Responses of *Microplitis mediator* Haliday (Hymenoptera: Braconidae) to different instar larvae of *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) and damaged cotton plants [J]. Acta entomologica sinica, 2011, 54(4):437-442 (in Chinese with English abstract).
- [23] 王薇, 李继泉, 崔建州, 等. 桑天牛卵啮小蜂雌蜂对茉莉酸诱导的桑枝挥发物的触角电位和嗅觉反应 [J]. 昆虫学报, 2017, 60(9):1013-1020. WANG W, LI J Q, CUI J Z, et al. Electroantennographic and olfactory responses of female wasps of *Aprostocetus prolixus* (Hymenoptera: Eulophidae) to volatiles from *Morus alba* branches induced by jasmonic acid [J]. Acta entomologica sinica, 2017, 60(9):1013-1020 (in Chinese with English abstract).
- [24] BÜCHEL K, MALSKIES S, MAYER M, et al. How plants give early herbivore alert: volatile terpenoids attract parasitoids

- to egg-infested elms[J]. Basic and applied ecology, 2011, 12 (5):403-412.
- [25] 涂蓉,季清娥,杨建全,等.布氏潜蝇茧蜂和长尾潜蝇茧蜂的触角电位反应[J].热带作物学报,2012,33(9):1690-1692. TU R, JI Q E, YANG J Q, et al. Electroantennographic responses of *Fopius vandenboschi* and *Diachasmimorpha longicaudata* to volatile compounds of inhabit plants [J]. Chinese journal of tropical crops, 2012, 33(9):1690-1692 (in Chinese with English abstract).
- [26] POTTING R P J, VET L E M, DICKE M. Host microhabitat location by stem-borer parasitoid *Cotesia flavipes*: the role of herbivore volatiles and locally and systemically induced plant volatiles [J]. Journal of chemical ecology, 1995, 21 (5): 525-539.
- [27] 郭浩,黄玲巧,王琛柱.信息化学物质在寄生蜂寻找配偶和寄主中的作用及其应用潜力[J].应用昆虫学报,2023,60(2):375-388. GUO H, HUANG L Q, WANG C Z. Infochemicals used by parasitoids to find mates and hosts and their application in pest control [J]. Chinese journal of applied entomology, 2023, 60(2):375-388 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈华才,娄永根,程家安.寄主昆虫及被害水稻的挥发物对螟蛉绒茧蜂寄主选择行为的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,29(1):18-23. CHEN H C, LOU Y G, CHENG J A. Effect of volatiles from herbivores and herbivore-damaged rice plants on the behavioral selection of parasitoid *Cotesia ruficrus* Haliday [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2003, 29 (1): 18-23 (in Chinese with English abstract).

Effects of *Spodoptera exigua*, herbivore-damaged amaranth and their volatiles on ontendency behavior of *Microplitis pallidipes*

CHEN Yijuan, ZHANG Tongyao, JIANG Jiexian, JI Xiangyun

Eco-environment Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai Key Laboratory of Protected Horticultural Technology, Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Southeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P.R.China, Shanghai 201403, China

Abstract *Microplitis pallidipes* is a crucial parasitoid wasp regulating natural populations of *Spodoptera exigua* in the field. To clarify the sources and compositions of volatile compounds that influence the host-seeking behavior of this parasitoid, a Y-tube olfactometer assay was conducted to evaluate the behavioral responses of *M. pallidipes* to amaranth damaged by larvae, *S. exigua* larvae feeding on amaranth, and larval excrement. The volatiles emitted by these sources were collected and analyzed using headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that both larvae-damaged amaranth and *S. exigua* larvae exhibited significant attractiveness to *M. pallidipes*, with attraction rates of 67.86% and 65.38%, respectively, whereas *S. exigua* excrement showed no attraction. GC-MS analysis identified 40, 27, and 32 compounds in larvae-damaged amaranth, *S. exigua* larvae, and larval excrement, respectively, with alkenes and alkanes as the primary components. Among these, 22, 17, and 11 compounds were uniquely detected in the three respective treatments. Additionally, among the seven compounds common to all three sources, the relative levels of (*E*)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene (DMNT), methyl salicylate, and methyl benzoate were higher in larvae-damaged amaranth than in the larvae and their excrements, whereas α -himachalene was more abundant in *S. exigua* larvae compared to the damaged amaranth and excrements. These results indicate that larvae-damaged amaranth and *S. exigua* larvae are the primary sources of volatiles from the amaranth-*S. exigua* complex that significantly attract *M. pallidipes*.

Keywords amaranth; *Spodoptera exigua*; *Microplitis pallidipes*; tendency behavior; GC-MS

(责任编辑:边书京)