

引用格式:

张治科, 虎花, 尚小霞. 黄瓜花挥发性化学物质鉴定及其对西花蓟马行为反应的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(1): 39-45.

ZHANG Z K, HU H, SHANG X X. Identification of volatiles in cucumber flowers and their effects on behavioral response of *Frankliniella occidentalis*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(1): 39-45.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



黄瓜花挥发性化学物质鉴定及其对西花蓟马行为反应的影响

张治科, 虎花, 尚小霞

(宁夏农林科学院植物保护研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术, 鉴定出黄瓜(品种‘L-1’)花挥发性化合物共 81 种, 包括醇类、醛类、酯类等 16 大类, 主要成分有叶醇、(S)-氧化芳樟醇、正己醛和乙酸癸酯等。应用自制“Y”形嗅觉仪测定了 11 种挥发性化合物不同梯度(10 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5)稀释后对西花蓟马行为的影响, 发现西花蓟马对苯甲醛($10\sim 10^5$)、1-辛烯-3-醇($10\sim 10^5$)、月桂烯(10^2)、1-戊烯-3-醇(10^2 、 10^5)、芳樟醇(10 、 10^3 、 10^4)、乙酸癸酯(10 、 10^2 、 10^4)、叶醇(10 、 10^3 、 10^5)、异戊醛(10 、 10^4 、 10^5)、异戊醇(10^2)有明显的正趋向反应; 对月桂烯(10 、 10^4 、 10^5)、苯甲醇(10)、苯乙醛(10^2 、 10^4)、1-戊烯-3-醇(10)、芳樟醇(10)和乙酸癸酯(10^3)有较强的驱避反应。

关键词: 黄瓜花; 挥发性化学物质; 西花蓟马; 行为反应

中图分类号: S436.421.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)01-0039-07

Identification of volatiles in cucumber flowers and their effects on behavioral response of *Frankliniella occidentalis*

ZHANG Zhike, HU Hua, SHANG Xiaoxia

(Institute of Plant Protection, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

Abstract: Eighty-one volatiles in cucumber flowers, including alcohols, aldehydes and esters, etc. which clustering to 16 groups, were identified using headspace solid phase microextraction(HS-SPME) and gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS). The main components were leaf alcohol, linalool oxide, hexanal and decyl acetate. The effects of gradient dilutions of 11 volatiles on the behavior of *Frankliniella occidentalis* were determined by y-olfactometer. *Frankliniella occidentalis* had positive preference to benzaldehyde($10\sim 10^5$), 1-octen-3-ol($10\sim 10^5$), myrcene(10^2), 1-penten-3-ol($10^2, 10^5$), linalool($10, 10^3, 10^4$), decyl acetate($10, 10^2, 10^4$), leaf alcohol($10, 10^3, 10^5$), isovaleraldehyde($10, 10^4, 10^5$) and isoamyl alcohol(10^2); and had repellent reaction to myrcene($10, 10^4, 10^5$), benzyl alcohol(10), phenylacetaldehyde($10^2, 10^4$), 1-penten-3-ol(10), linalool(10^5) and decyl acetate(10^3).

Keywords: cucumber flower; volatile chemical substances; *Frankliniella occidentalis*; behavioral response

西花蓟马(*Frankliniella occidentalis*(Pergande)), 又称苜蓿蓟马, 属缨翅目(Thysanoptera)蓟马科(Thripidae)花蓟马属(*Frankliniella*)昆虫, 原产于北美洲, 迄今为止, 已遍布美洲、欧洲、亚洲、非洲、大洋洲。西花蓟马以锉吸式口器为害植物, 致使植

株花瓣退色, 叶片皱缩, 茎和果形成伤疤, 甚至枯死, 同时还传播番茄斑萎病毒等^[1]。由于西花蓟马食性杂, 繁殖能力强^[2-3], 适生区广泛^[4], 竞争能力强^[5], 个体微小, 极具隐匿性, 采用多次、高浓度化学药剂防治很容易使其产生抗药性^[6-10], 且严重

收稿日期: 2021-01-19

修回日期: 2021-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660621)

作者简介: 张治科(1980—), 男, 宁夏同心人, 博士, 副研究员, 主要从事昆虫生态与害虫综合防治研究, zhangzhike98@163.com

污染环境,生物防治技术研究^[11-12]大多仍处于探索阶段。

宁夏地区自2012年发现西花蓟马,该害虫已对辣椒、黄瓜等设施蔬菜作物造成了比较严重的危害^[13-14]。鉴于植食性昆虫能识别寄主植物挥发的特异性气味^[15-17],从而引起寄主定向、求偶^[18-21]等行为反应的特征,笔者借鉴西花蓟马对寄主植物的选择性^[22-27]及其嗅觉识别机制方面的研究^[28-30],运用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对黄瓜花中的挥发性化合物进行分离和鉴定,基本探明了黄瓜花中信息化学物质的组成,并采用自制的“Y”形嗅觉仪测定西花蓟马对这些挥发性化合物的行为反应,以期找出对西花蓟马引诱或趋避效果理想的植物源挥发性化合物及其最佳浓度,为西花蓟马的理化诱控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

西花蓟马以新鲜四季豆饲喂,在(26±1)℃、相对湿度(65±5)%、14 h光照条件下饲养,选取羽化3 d的西花蓟马成虫作为供试虫源。供试黄瓜为宁夏近年大面积推广种植的“L-1”品种,由宁夏农林科学院植物保护研究所提供。

1.2 方法

1.2.1 黄瓜花挥发性化学物质的提取和鉴定

采集新鲜黄瓜花,研碎,加入20 mL顶空瓶,60℃水浴预热5 min,插入SPME针,以顶空方式萃取30 min,采用Agilent 7890 A/5975C气相色谱-质谱联用仪解析进样:柱箱程序升温40℃,保持5 min,8℃/min升温至250℃,恒温10 min;运行41.25 min,前进样口He,模式分流,加热器250℃,压力7.069 9 psi,总流速9 mL/min,分流比5:1;毛细色谱柱DB-5ms,325℃,长30 m、内径250 μm、液膜厚0.25 μm;低质量数40.0,高质量数400.0,离子源温度230℃(最大值250℃),四极杆温度150℃(最大值200℃)。

根据总离子流图中的各峰经质谱计算机数据系统检索标准质谱图,确定挥发物成分,用峰面积归一化法测定各成分的相对质量分数,鉴定黄瓜花的挥发性成分的结构,计算相对含量。

1.2.2 西花蓟马对黄瓜花挥发性物质的行为反应的测定

将黄瓜花挥发性化合物单一组分分别用液体

石蜡稀释为 10^2 的制剂,通过对西花蓟马进行行为反应的测试,初步筛选出对西花蓟马具有吸引或趋避作用的植物源挥发性化合物11种;再将这些单一组分分别用液体石蜡稀释梯度为 10 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5 的制剂对西花蓟马进行行为反应测试。

自制“Y”形嗅觉仪由透明玻璃制成,基部长16 cm,两臂长15 cm,内径2 cm,两臂夹角60°。对西花蓟马成虫进行行为测试时,将“Y”形嗅觉仪一侧臂连接放有黄瓜花挥发性物质的味源瓶,另一侧臂连接放有液体石蜡的味源瓶,作为对照,通气5 min,使气味充满管道。“Y”形管两臂的气流量控制在200 mL/min,室内温度控制在(25±1)℃,相对湿度60%~80%。

在“Y”形嗅觉玻璃管的基臂端引入经饥饿处理5 h的西花蓟马成虫,单头测试5 min。对西花蓟马成虫爬至超过连接味源瓶侧臂1/3处并持续30 s以上的,记为该成虫对该臂作出选择,产生正向反应;如果成虫爬行至另一侧臂,则记为产生负向反应;如果在5 min内没有作出选择,则记为无反应。每处理测定供试西花蓟马5头,重复3次。对照以液体石蜡为味源剂进行测试。试验中每头西花蓟马仅测试1次。

1.3 数据处理

采用Excel 2010和DPS数据处理系统分析试验数据。

2 结果与分析

2.1 黄瓜花挥发性物质的组分及含量

经GC-MS分析,得到黄瓜花挥发性物质的总离子流图(图1)。经质谱计算机数据系统检索以及人工谱图分析,鉴定出81种挥发性物质(表1),大致可分为16类(图2),分别是醇类、醛类、酯类、酮

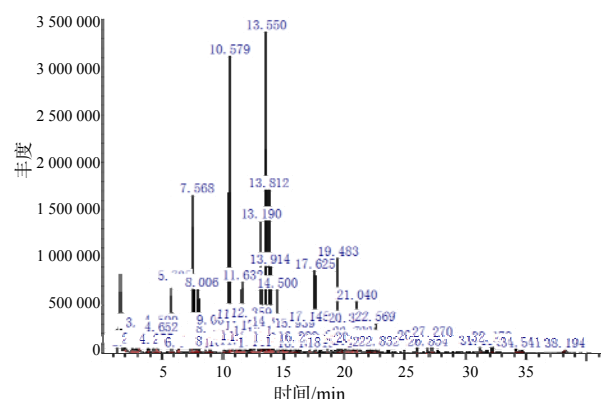


图1 黄瓜花挥发性化合物 HSSPME GC-MS 图谱

Fig. 1 Spectrum of volatile compounds in cucumber flowers

类、环烷烃、烷烃、烯烃、环烯烃、芳香烃、醚类、芳香醛、芳香醇、酚类、胺类、酰卤类、其他类。

表 1 黄瓜花的主要挥发性化学物质

Table 1 Main volatile compounds in cucumber flowers

序号	成分	相对含量/%	CAS 号	序号	成分	相对含量/%	CAS 号
1	甲氨基乙醇	0.19	109-83-1	42	(4-甲基戊烷-3-烯基)-3,6-二氢-1,2-二噻	0.77	73188-23-5
2	异戊醛	0.79	590-86-3	43	1,2,3,4-四甲基苯	0.35	488-23-3
3	戊烯-3-醇	0.46	616-25-1	44	十甲基环五硅氧烷	2.09	541-02-6
4	乙基呋喃	1.14	3208-16-0	45	邻苯二甲醚	0.25	91-16-7
5	二甲基硅烷二醇	0.76	1066-42-8	46	顺-4-癸烯-1-醇	0.22	57074-37-0
6	异戊醇	0.18	123-51-3	47	亚甲基-2-降冰片酮	0.27	5597-27-3
7	甲基丁醇	0.30	137-32-6	48	6,6-二甲基-双环[3.1.1]庚烷-2-吡咯甲醛	0.25	4764-14-1
8	顺-2-甲基-2-丁醛	0.51	497-03-0	49	2,3-二甲基氢醌	0.13	608-43-5
9	甲苯	1.44	108-88-3	50	壬醇	0.59	143-08-8
10	戊醇	1.22	71-41-0	51	萘	0.33	91-20-3
11	正己醛	4.89	66-25-1	52	正十二烷	0.16	112-40-3
12	六甲基环三硅氧烷	0.88	541-05-9	53	癸醛	0.71	112-31-2
13	1-己烯醛	3.52	6728-26-3	54	八甲基环四硅氧烷	0.16	556-67-2
14	叶醇	7.88	928-96-1	55	2-甲基-3-氧代丁酸甲酯	0.11	17094-21-2
15	反式-2-己烯-1-醇	0.30	928-95-0	56	2,5-二羟基苯乙酮	0.29	490-78-8
16	甲基环戊烷	2.73	96-37-7	57	环癸烷	1.21	293-96-9
17	苯乙烯	0.23	100-42-5	58	甲氧基-苯基)-(6-甲基-4-苯基-2-噻唑啉)-胺	2.45	1000317-62-7
18	CIS-4-庚烯醇	0.21	6728-31-0	59	乙酸癸酯	2.90	112-17-4
19	庚醛	0.62	111-71-7	60	松油烯	0.10	99-86-5
20	甲氧基苯基肟	1.09	1000222-86-6	61	蒎烯	0.20	79-92-5
21	环己烯-1-甲醇	0.17	4845-04-9	62	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	0.40	689-67-8
22	反式-2-庚烯醛	0.14	18829-55-5	63	2,6,10-三甲基十二烷	0.11	3891-98-3
23	苯甲醛	13.01	100-52-7	64	四(三甲基硅氧基)硅烷	0.80	3555-47-3
24	正庚醇	0.33	111-70-6	65	β -紫罗酮	0.16	79-77-6
25	辛烯-3-醇	0.35	3391-86-4	66	1-(2,6,6-三甲基-1,2-环氧环基)-3-丁烯-2-酮 3-(2,6,6)	0.44	23267-57-4
26	梨醇酯	1.56	1191-16-8	67	甲基-2-丁烯酸苯甲酯	0.23	37526-88-8
27	7-辛烯-2-酮	1.18	3664-60-6	68	2,6-二叔丁基苯酚	2.17	128-39-2
28	2-正戊基呋喃	0.48	3777-69-3	69	S-(Z)-3,7,11-三甲基-1,6,10-十二烷三烯-3-醇	0.10	142-50-7
29	2-甲基-外双环[2.2.1]庚烷	0.21	872-78-6	70	月桂烯	0.24	123-35-3
30	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1.29	4313-03-5	71	邻苯二甲酸二乙酯	0.16	84-66-2
31	正辛醛	2.80	124-13-0	72	乙酸月桂酯	0.89	112-66-3
32	乙基己醇	0.41	104-76-7	73	邻苯二甲酸二异丁酯	0.58	84-69-5
33	苯甲醇	1.65	100-51-6	74	棕榈酸甲酯	0.24	112-39-0
34	苯乙醛	0.66	122-78-1	75	棕榈酸	0.74	57-10-3
35	1-氮杂双环[3.1.0]己烷	0.12	285-76-7	76	正二十三烷	0.18	638-67-5
36	(S)-氧化芳樟醇	15.16	5989-33-3	77	己二酸二异辛酯	0.38	1330-86-5
37	3,5,5-三甲基-环己烯	0.16	933-12-0	78	邻苯二甲酸单(2-乙基己基)酯	0.26	4376-20-9
38	3,5-辛二烯-2-(E,E)-酮	0.54	30086-02-3	79	胆固醇	0.55	57-88-5
39	双(p-叔丁基苯基)醚	0.27	24085-65-2	80	壬醛	2.70	124-19-6
40	芳樟醇	5.03	78-70-6	81	甲瓦龙酸内酯	0.11	674-26-0
41	亚麻酰氯	0.16	7459-33-8				

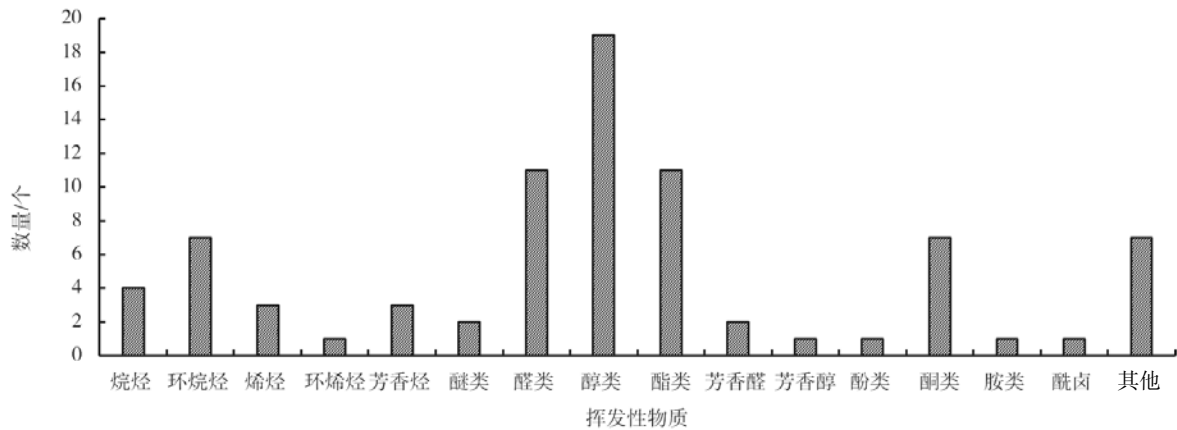


图2 黄瓜花主要挥发性化学物质的种类及其数量

Fig.2 Types and quantities of volatile compounds in cucumber flowers

黄瓜花挥发性化合物中种类最多的是醇类,共包含 19 种化合物,占总含量的 34.41%,其中含量超过 5%的化合物有 3 种,即叶醇、(S)-氧化芳樟醇和芳樟醇;其次为醛类化合物,共有 11 种,占总含量的 18.22%,主要包括正己醛、2-己烯醛、正辛醛和壬醛;酯类化合物共有 11 种,占总含量的 7.42%,以梨醇酯和乙酸癸酯为主,其余几种化合物的含量均小于 1%;环烷烃化合物共 7 种,占总含量的 7.4%,以甲基环戊烷、十甲基环五硅氧烷和环癸烷为主;酮类化合物共有 7 种,占总含量的 3.28%,以 7-辛烯-2-酮和 3,5-辛二烯-2-(E,E)-酮为主;烷烃化合物共有 4 种,占总含量的 1.25%,包括正十二烷、2,6,10-三甲基十二烷、四(三甲基硅氧基)硅烷和正二十三烷;烯烃化合物共有 3 种,占总含量的 0.54%,包括松油烯、蒎烯和月桂烯;芳香烃类化合物共有 3 种,占总含量的 2.02%,以甲苯为主;醚类化合物有 2 种,包括双(p-叔丁基苯基)醚和邻苯二甲醚,占总含量的 5.2%;芳香醛类化合物共有 2 种,占总含量的 13.67%,包含苯甲醛和苯乙醛;环烯烃仅有 3,5,5-三甲基-环己烯,占总含量的 0.16%;芳香醇、酚类、胺类、酰卤类均只有 1 种化合物,分别占总含量的 1.65%、2.17%、2.45%、

0.16%,分别为苯甲醇、2,6-二叔丁基苯酚、(3-甲氧基-苯基)-(6-甲基-4-苯基-2-噻唑啉)-胺和亚麻酰氯;其他化合物共 7 种,占总含量的 4.68%,主要包括 2-乙基咪喃、甲氧基苯基脒和 4-(4-甲基戊烷-3-烯基)-3,6-二氢-1,2-二噻。

2.2 西花蓟马对黄瓜花挥发性物质的行为反应

西花蓟马成虫对黄瓜花 11 种挥发性物质的行为反应的测定结果列于表 2。稀释梯度为 10^{-1} ~ 10^{-5} 的 1-辛烯 3-醇和苯甲醛对西花蓟马均有引诱作用,1-辛烯 3-醇稀释梯度为 10^{-4} 时的引诱能力最强,正反应率为 73.33%,苯甲醛稀释梯度为 10^{-2} 和 10^{-4} 时引诱西花蓟马的正反应率为 66.67%;稀释梯度为 10^{-1} 的叶醇、芳樟醇、异戊醛和乙酸癸酯对西花蓟马具有较强的引诱力,其中芳樟醇、异戊醛和乙酸癸酯的正反应率为 53.33%; 10^{-2} 的乙酸癸酯、异戊醇、1-戊烯-3-醇和月桂烯对西花蓟马具有一定的引诱作用,其中 1-戊烯-3-醇引诱能力最强; 10^{-3} 叶醇和芳樟醇对西花蓟马的正反应率分别为 66.67%和 46.67%; 10^{-4} 芳樟醇、异戊醛和乙酸癸酯对西花蓟马的正反应率分别为 66.67%、46.67%和 46.67%。

表2 西花蓟马对黄瓜花 11 种挥发性化合物的行为反应

Table 2 Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* to volatiles in different concentrations

化合物	稀释梯度	反应率/%		反应	化合物	稀释梯度	反应率/%		反应
		正向	负向				正向	负向	
月桂烯	10^{-1}		> 50.00	Y	苯甲醛	10^{-1}	53.33		Y
	10^{-2}	46.67		Y		10^{-2}	66.67		Y
	10^{-3}			N		10^{-3}	60.00		Y
	10^{-4}		> 50.00	Y		10^{-4}	66.67		Y
	10^{-5}		> 50.00	Y		10^{-5}	46.67		Y

表 2(续)

化合物	稀释梯度	反应率/%		反应	化合物	稀释梯度	反应率/%		反应
		正向	负向				正向	负向	
苯甲醇	10		66.67	Y	1-辛烯-3-醇	10	66.67		Y
	10 ²			N		10 ²	60.00		Y
	10 ³			N		10 ³	53.33		Y
	10 ⁴			N		10 ⁴	73.33		Y
	10 ⁵			N		10 ⁵	66.67		Y
苯乙醛	10			N	叶醇	10	40.00		Y
	10 ²		40.00	Y		10 ²			N
	10 ³			N		10 ³	66.67		Y
	10 ⁴		53.33	Y		10 ⁴			N
	10 ⁵			N		10 ⁵	53.33		Y
1-戊烯-3-醇	10		40.00	Y	异戊醛	10	53.33		Y
	10 ²	> 46.67		Y		10 ²			N
	10 ³			N		10 ³			N
	10 ⁴			N		10 ⁴	46.67		Y
	10 ⁵	> 46.67		Y		10 ⁵	40.00		Y
芳樟醇	10	53.33		Y	异戊醇	10			N
	10 ²			N		10 ²	46.67		Y
	10 ³	46.67		Y		10 ³			N
	10 ⁴	66.67		Y		10 ⁴			N
	10 ⁵		53.33	Y		10 ⁵			N
乙酸癸酯	10	53.33		Y					
	10 ²	40.00		Y					
	10 ³		46.67	Y					
	10 ⁴	46.67		Y					
	10 ⁵			N					

“Y”示有反应，“N”示无反应。

稀释梯度为 10 的月桂烯、苯甲醇和 1-戊烯-3-醇对西花蓟马具有驱避作用，负向选择率为 66.67%；10² 的苯乙醛和 10³ 的乙酸癸酯可驱避西花蓟马，负向反应率分别为 40% 和 46.67%；10⁴ 月桂烯和苯乙醛均对西花蓟马有驱避作用，苯乙醛的负向反应率为 53.33%；10⁵ 月桂烯和芳樟醇对西花蓟马也具有驱避作用，芳樟醇负向反应率为 53.33%。

西花蓟马对稀释梯度为 10~10³ 的异戊醛、10 和 10³ 的苯乙醛、10⁴ 和 10⁵ 的苯甲醇、10² 的芳樟醇、10³ 的月桂烯和 10⁴ 的 1-戊烯-3-醇均没有明显的趋性反应。

3 结论与讨论

植物的挥发性化合物以一定的浓度比例构成了植物特定的化学指纹图谱^[31]，在植物与昆虫之间的相互联系中发挥传递信息的作用。植食性昆虫在嗅觉相关蛋白的参与下完成对寄主的远程定位^[32]，

例如马铃薯甲虫会对马铃薯叶片气味产生定向行为^[33]，棉铃虫对胡萝卜花中的 5 种组分具有明显的引诱作用^[34]。张治科^[35-36]采用扫描电镜观察发现西花蓟马触角上存在大量的毛形感器，可能在寄主植物识别过程中发挥关键作用。

对从黄瓜花中初步筛选出的 11 种挥发性化合物设置不同的浓度，对西花蓟马进行行为趋性测定，发现对西花蓟马有吸引作用的化合物有苯甲醛(稀释梯度 10~10⁵)、1-辛烯-3-醇(10~10⁵)、月桂烯(10²)、1-戊烯-3-醇(10²、10⁵)、芳樟醇(10、10³、10⁴)、乙酸癸酯(10、10²、10⁴)、叶醇(10、10³、10⁵)、异戊醛(10、10⁴、10⁵)、异戊醇(10²)；对西花蓟马驱避作用较好的挥发性化合物有月桂烯(10、10⁴、10⁵)、苯甲醇(10)、苯乙醛(10²、10⁴)、1-戊烯-3-醇(10)、芳樟醇(10⁵)和乙酸癸酯(10³)。

植食性昆虫对寄主植物的挥发性信息化合物的反应具有特异性。韩云等^[37]研究发现，稀释梯度

10^6 的烟酸乙酯、芳樟醇, 10^4 的苯甲醛、月桂烯、邻茴香醛, 10^2 的月桂烯和 10^6 橙花醇对花蓟马具有较好的引诱作用, 10^6 β -香茅醇对花蓟马具有一定的驱避反应, 本研究中西花蓟马对月桂烯(10^2)和苯甲醛(10^4 ~ 10^5)的行为反应结果与其相似。西花蓟马对 10^2 芳樟醇没有明显反应, 但唐良德等^[38]研究发现 10^2 橙花醇、芳樟醇和 3-苯丙醛、 10^6 邻茴香醛、 10^4 3-苯丙醛和橙花醇对豆大蓟马具有极显著的引诱反应, 10^4 β -香茅醇、 10^6 β -香茅醇和苯甲醛对豆大蓟马具有显著的驱避反应, 这可能与所测试的蓟马种类不同有较大关系。

植物挥发性化合物的浓度对昆虫的行为反应影响较大。本研究发现, 芳樟醇在高浓度(稀释 10 倍)时对西花蓟马有引诱作用, 在 10^2 时对其无影响, 在低浓度(10^5)时对其有驱避作用; 1-戊烯-3-醇在稀释 10 倍时对西花蓟马有驱避作用, 在 10^2 时对其有引诱作用, 在 10^4 时没有明显反应。

通常认为虫害发生后大多数寄主植物挥发性物的种类要多于健康植物的, 如西花蓟马为害后的黄瓜挥发物比健康的黄瓜多出了 E- β -罗勒烯、吡啶、(E, E)- α -法尼烯、十六烯等 7 种化合物, 但西花蓟马对黄瓜健康植株与虫害寄主之间的选择没有显著差异^[39]; 因此, 西花蓟马虫害后寄主植物多出的挥发物的具体作用尚待进一步研究。寄主植物通常包含多个以特定的浓度和比例形成的具有特异性调控植食性昆虫具体行为的挥发性化合物的混合物。本研究仅测试了西花蓟马对黄瓜花单一挥发性化合物在不同浓度下对的趋性行为, 后续将开展不同挥发性化合物组分的比例、浓度以及剂量对西花蓟马的行为反应的影响研究, 旨在为进一步研发特异性强、活性高、成本低廉、使用简便、不杀伤天敌的西花蓟马监测和防控的植物源诱控剂提供依据。

参考文献:

- [1] JONES T, SCOTTDUPREE C, HARRIS R, et al. The efficacy of spinosad against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*, and its impact on associated biological control agents on greenhouse cucumbers in southern Ontario[J]. Pest Management Science, 2010, 61(2): 179-185.
- [2] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁. 宁夏设施辣椒上西花蓟马的生长发育和繁殖研究[J]. 中国植保导刊, 2017, 37(7): 35-38.
- [3] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 等. 西花蓟马生长发育和繁殖参数测定[J]. 山西农业大学学报, 2020, 40(1): 30-37.
- [4] 程俊峰, 万方浩, 郭建英. 入侵昆虫西花蓟马的潜在适生区分析[J]. 昆虫学报, 2006, 49(3): 438-446.
- [5] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 等. 银川设施辣椒上西花蓟马与花蓟马的种群竞争及发生态势[J]. 植物检疫, 2019, 33(5): 13-17.
- [6] 万岩然, 何秉青, 苑广迪, 等. 北京和云南地区西花蓟马对多杀菌素类药剂产生抗药性[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(2): 396-402.
- [7] BIELZA P. Insecticide resistance management strategies against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*[J]. Pest Management Science, 2010, 64: 1131-1138.
- [8] DAĞLI F, TUNÇ I. Insecticide resistance in *Frankliniella occidentalis*: corroboration of laboratory assays with field data and cross-resistance in a cypermethrin-resistant strain[J]. Phytoparasitica, 2008, 36: 352-359.
- [9] GAO C F, MA S Z, SHAN C H, et al. Thiamethoxam resistance selected in the western flower thrips *Frankliniella occidentalis*(Thysanoptera: Thripidae): cross-resistance patterns, possible biochemical mechanisms and fitness costs analysis[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2014, 114: 90-96.
- [10] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 等. 不同杀虫剂对西花蓟马的室内毒力及田间药效[J]. 生物安全学报, 2019, 28(2): 127-132.
- [11] WU S Y, ZHANG Z K, GAO Y L, et al. Interactions between foliage- and soil-dwelling predatory mites and consequences for biological control of *Frankliniella occidentalis*[J]. Bio Control, 2016, 61(6): 1-11.
- [12] SARKAR S C, WANG E D, ZHANG Z K, et al. Laboratory and glasshouse evaluation of the green lacewing, *Chrysopa pallens*(Neuroptera: Chrysopidae) against the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae)[J]. Applied Entomology and Zoology, 2019, 54(1): 115-121.
- [13] 张治科, 张焯, 吴圣勇. 西花蓟马在宁夏的发生及防控措施[J]. 植物检疫, 2016, 30(4): 75-77.
- [14] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁, 等. 银川设施黄瓜西花蓟马及其天敌种群动态研究[J]. 农业科学研究, 2019, 40(4): 48-52.
- [15] HALLORAN S T, MAUCK K E, FLEISHER S F, et al. Volatiles from intact and Lygus-damaged *Erigeron annuus*(L.) Pers. are highly attractive to ovipositing Lygus and its parasitoid *Peristenus relictus* Ruthe [J]. Journal of Chemical Ecology, 2013, 39(8): 1115-1128.
- [16] TABILIO M R, FIORINI D, MARCANTONI E, et al.

- Impact of the Mediterranean fruit fly(Medfly) *Ceratitis capitata* on different peach cultivars: the possible role of peach volatile compounds [J]. *Food Chemistry*, 2013, 140(1/2): 375–381.
- [17] TAKASU F, YAMAMOTO N, KAWASAKI K. Modeling the expansion of an introduced treedisease [J]. *Biol Invtot*, 2000, 2(2): 141–150.
- [18] 范丽清, 严善春, 程红, 等. 光肩星天牛对寄主植物萜烯类化合物触角活性和电位反应[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(11): 143–146.
- [19] ANSTETT M C, HOSSAERT-MCKEY M, KJELLER G F. Figs and fig pollinators: evolutionary conflicts in a coevolved mutualism[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1997, 12(3): 94–99.
- [20] REDDY G V P, GUERRERO A. Interactions of insect pheromones and plant semiochemicals[J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9(5): 253–261.
- [21] 方宇凌, 张钟宁. 植物气味化合物对棉铃虫产卵及田间诱蛾的影响[J]. *昆虫学报*, 2002, 45(1): 63–67.
- [22] 裴昌莹, 郑长英. 西花蓟马对不同蔬菜寄主的选择性研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 383–387.
- [23] KOSCHIER E H, KOGEL W J D, HANS J. Assessing the attractiveness of volatile plant compounds to west flower thrips(*Frankliniella occidentalis*)[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2000, 26: 2643–2656.
- [24] 张治科, 虎花, 尚小霞. 黄瓜叶信息化学物质鉴定及其对西花蓟马的行为调控[J]. *山西农业大学学报*, 2021, 41(4): 83–89.
- [25] 张治科, 虎花, 马荣. 西花蓟马 *FoccOBP3* 的分子克隆、序列分析及表达特征[J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37(3): 495–507.
- [26] 田甜, 鄧军锐, 牟峰. 西花蓟马对二斑叶螨为害菜豆的选择性与挥发物的关系[J]. *植物保护*, 2014, 40(1): 77–83.
- [27] 袁成明, 鄧军锐, 曹宇, 等. 西花蓟马对蔬菜寄主的选择性[J]. *生态学报*, 2011, 31(6): 1720–1726.
- [28] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁. 西花蓟马化学感受蛋白的 cDNA 克隆、时空表达分析及组织定位[J]. *昆虫学报*, 2015, 58(1): 1–14.
- [29] ZHANG Z K, LEI Z R. Identification, expression profiling and fluorescence-based binding assays of a chemosensory protein gene from the western flower Thrips, *Frankliniella occidentalis*[J]. *PLoS One*, 2015, 10(1): e0117726.
- [30] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁. 西花蓟马气味结合蛋白的 cDNA 克隆、序列分析及时空表达[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1106–1116.
- [31] 周琼, 梁广文. 植物挥发性物质在蚜虫寄主定位中的作用[J]. *昆虫知识*, 2001, 38(5): 334–336.
- [32] 张治科, 张焯, 吴圣勇, 等. 昆虫气味结合蛋白研究进展[J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39(3): 713–720.
- [33] SCHOONHOVEN L M, JERMY T, VANLOON J A. *Insect-Plant Biology: From Hysiology to Evolution*[M]. London: Chapman and Hall, 1998.
- [34] 丁红建, 郭予元, 吴才宏. 胡萝卜花挥发油中棉铃虫它感信息化合物的分离、鉴定及行为测定[J]. *昆虫学报*, 1997, 40(增刊): 73–77.
- [35] 张治科. 西花蓟马嗅觉相关蛋白鉴定及功能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [36] 张治科, 吴圣勇, 雷仲仁. 宁夏辣椒花期西花蓟马的空间分布特征研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(3): 142–147.
- [37] 韩云, 刘奎, 吴建辉, 等. 花蓟马对 11 种挥发性化合物的室内趋性[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(9): 1646–1649.
- [38] 唐良德, 韩云, 吴建辉, 等. 豆大蓟马对寄主植物及挥发性化合物的趋性[J]. *环境昆虫学报*, 2015, 37(5): 1024–1029.
- [39] 高杭, 鄧军锐, 张骏, 等. 西花蓟马对六种蔬菜的选择性及受害蔬菜挥发物化学成分的变化[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 1019–1025.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维