

绿盲蝽对四种挥发性物质的触角电位和行为反应

张尚卿^{1,2}, 高占林², 党志红², 李耀发², 潘文亮²

(1. 河北农业大学 植物保护学院, 河北 保定 071000;

2. 河北省农林科学院 植物保护研究所, 河北省农业有害生物综合治理工程技术研究中心, 河北 保定 071000)

摘要: 本研究测定了绿盲蝽(*Apolygus lucorum*) 雌、雄成虫对苯乙醛、反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇和苯乙酮的触角电位(EAG)反应和行为反应。结果表明,这4种挥发性物质均能引起绿盲蝽明显的EAG反应,雌成虫对顺-3-己烯醇的EAG反应最强,雄成虫对反-2-己烯醛反应最强。雌成虫对各物质的反应均明显高于雄成虫。Y形嗅觉仪测定结果表明,绿盲蝽雌成虫对4种挥发性物质反应的总体趋势相似,呈倒“V”字型,对苯乙酮 10^{-5} (V/V)引诱率最高,达到72%,各挥发性物质各浓度对雄虫没有明显的引诱作用。罩笼试验同样表明,4种挥发性物质的诱芯对绿盲蝽雌成虫有一定的诱集作用。

关键词: 绿盲蝽; 苯乙醛; 反-2-己烯醛; 顺-3-己烯醇; 苯乙酮; 触角电位反应

中图分类号: S433.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2011)03-0189-06

Electroantennogram and Behavioral Responses of the Green Leaf Bug , *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) , to Four Plant Volatiles

ZHANG Shang-qing^{1,2}, GAO Zhan-lin², DANG Zhi-hong², LI Yao-fa², PAN Wen-liang²

(1. College of Plant Protection, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2. Institute of Plant Protection, Hebei Academy of Agriculture and Sciences; IPM Centre of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: To better employ attracting method for monitoring and controlling *Apolygus lucorum*, the electroantennogram and behavioral responses of *Apolygus lucorum* to four plant volatiles were researched. Electroantennogram analyses indicated that the females *Apolygus lucorum* were usually more responsive to (Z)-3-hexenol than males. And the males had the strongest response to (E)-2-hexenal. Behavioral assays in the Y-tube olfactometer demonstrated that females had similar shapes of concentration-response curves to the four plant volatiles, and to Acetophenone 10^{-5} (V/V) led to strongest preference. Males were not attracted distinctly by volatiles. Trapping experiment also indicated that the lures of four volatiles have a significant role in trapping females.

Key words: *Apolygus lucorum*; Phenylacetaldehyde; (E)-2-hexenal; (Z)-3-hexenol; Acetophenone; Electroantennogram

近些年, B₁棉花的大面积种植,使得棉铃虫等鳞翅目害虫的数量显著减少,但以绿盲蝽为主的盲蝽蟥种群数量剧增,成为棉花以及其他作物如枣、樱桃、葡萄、豆角、麻山药等的主要害虫^[1-3]。绿盲蝽(*Apolygus lucorum* (Meyer-Dür))属半翅目,盲蝽科^[4]。目前,对于绿盲蝽的防治仍以药剂防治为主^[3]。但是,由于绿盲蝽寄主广泛^[5,6],行动迅捷,迁移性强等行为特点,使其成虫能够通过快速迁移,以躲避药剂,而造成药剂防治效果较差。

导致棉农只能以增加化学农药的用量或用药次数,来控制该虫对棉花等作物的为害。但是,化学药剂的大量和不合理施用造成了对农田生态环境的严重污染^[6]。

研究表明,在植物-植食性昆虫两者关系中,植物气味在其取食和产卵定位中起着重要作用。而利用植物挥发性气味特质对昆虫的引诱或趋避作用来进行昆虫种群的治理,已成为当前害虫综合防治研究中的重点。植物挥发性物质大多分子量在100~

收稿日期: 2011-02-05

基金项目: 国家公益性行业科研专项(201103012)

作者简介: 张尚卿(1985-),男,河北唐山人,在读硕士,主要从事农业害虫综合防治研究。

通讯作者: 潘文亮(1958-),男,河北霸州人,博士,研究员,主要从事农业害虫综合防治研究。

200 之间,其中包括烃类、醇类、醛类、酮类、酯类、萜烯类、有机酸、含氮化合物和含硫化合物等,这些物质极大影响着植食性昆虫的寄主选择、交配、产卵、取食及发育行为^[7-10]。近年来,研究人员开始关注植物挥发性物质对绿盲蝽的行为调控。陈展册等^[11]在绿盲蝽对性信息素类似物和植物挥发物的触角电位反应的研究中发现绿盲蝽对反-2-己烯醛和顺-3-己烯醇都有较强的 EAG 反应。陆宴辉等^[2]在盲蝽生态适应性研究中发现绿豆挥发性物质中苯乙酮对绿盲蝽的 GC-EAD 反应明显强于其他物质。结合项目组前期工作,发现绿盲蝽对苯乙醛也有较强的嗅觉反应。

本研究旨在通过绿盲蝽成虫对反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇、苯乙酮、苯乙醛 4 种植物挥发性物质的电生理、嗅觉反应及罩笼试验,为绿盲蝽的虫情测报及

作为诱杀剂提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试虫

绿盲蝽 *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür): 试验用绿盲蝽成虫于 2009 年 5 月采自河北省沧州市献县棉田,在河北省农林科学研究院植物保护研究所养虫室(温度(28±1)℃,相对湿度 60%~80%),以豇豆为饲料进行饲养。试虫均选择羽化后 7 d 身体健壮、大小一致的成虫。

1.2 挥发性物质及其配制方法

将各供试挥发性物质以丙酮为溶剂配制成 10⁻³ (V/V) 母液,4℃ 冰箱低温储藏备用。试验前,将母液用丙酮稀释至试验所需浓度。各试剂名称、来源、纯度详见表 1。

表 1 标准化合物纯度及来源

Tab. 1 Purity and source of standard chemical compounds

化合物 Compounds	纯度/% Purity	来源 Sources
反-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	99	ACROS ORGANICS
顺-3-己烯醇 (Z)-3-hexenol	98.9	东京化成工业株式会社
苯乙酮 Acetopenone	>94	国药集团化学试剂有限公司
苯乙醛 Penylacetaldehyde	95	上海双香助剂厂

1.3 试验方法

1.3.1 触角电位测定方法 用单面刀片将绿盲蝽连头切下,并用刀片轻轻摩擦触角末端,使触角对刺激的感觉更为灵敏。将绿盲蝽的头部和两根触角的末端用导电胶分别固定于金属电极上。插入探针。取 5 μL 待测样品滴于 4 cm×0.5 cm 的滤纸上,立刻将滤纸条放入巴斯德管内。气味混合管口距触角 1 cm。待基线平稳,开始测定。持续气流和刺激气流流速均为 1 000 mL/min,刺激时间为 0.1 s,待基线完全恢复,再进行下一次刺激。在测试样品前后均进行对照和标准参照刺激,以便对测试样品进行标准化校正。以丙酮为对照以正己醇 10⁻³ (V/V) 作为标准参照刺激。每个测试样品测试 3 对触角,每触角刺激 3 次以上。计算公式见公式一(同王明^[12])。

公式一:

$$S_r = \frac{S_c - CK_m}{R_m - CK_m}$$

式中: S_r 为刺激样品的触角电位反应的相对值; S_c 为刺激样品的触角电位反应值; CK_m 为刺激样品测定前后正己烷对触角电位的反应值的平均值; R_m 为测定刺激样品触角电位前后标准化合物触角电位的平均值。

公式二:

$$\text{引诱率} = \frac{\text{处理虫数}}{\text{测试总虫数}} \times 100\%$$

公式三:

$$\text{趋避率} = \frac{\text{对照虫数}}{\text{测试总虫数}} \times 100\%$$

公式四:

$$\text{反应率} = \frac{\text{处理虫数} + \text{对照虫数}}{\text{测试总虫数}} \times 100\%$$

1.3.2 行为反应测定方法 采用 Y 形嗅觉仪测定不同挥发性物质对绿盲蝽成虫的行为反应。Y 形嗅觉仪主臂 20 cm,两侧臂 15 cm,侧臂间夹角 60°。通过 LS-2800 型气泵推动空气进入系统,气流经活性炭、蒸馏水净化加湿后通过玻璃转子流量计进入 Y 形管两侧,流速控制在 0.5 L/min。测试时,将 5 μL 样品滴在 3 cm×0.5 cm 的滤纸条上,作为气味源,放入某一侧臂,以丙酮作为对照放入另一侧臂。从基管端部接入试虫,每头试虫观察 5 min,如试虫爬过侧壁 1/3 处并停留 1 min 以上记为对该物质有反应,否则记为无反应。测试温度为(25±2)℃。重复 3 次,每次测试 25 头试虫。计算公式见公式二、三、四(同丁红建^[13])。

1.3.3 罩笼法 参考文礼章^[14]、卢辉^[15]、毕明娟^[16]等的试验方法,结合本试验内容设计试验如下:将用样品浸泡 24 h 的天然橡胶塞作为诱心固定在 25 cm×10 cm 黄色粘虫板上备用。将 2 m×1 m

的绿豆苗用高 1 m 的纱网罩扣住,罩内间隔 1 m 悬挂两块粘虫板,一块固定诱心,另一块作为对照,均距地面 0.8 m。每个罩笼内接入雌、雄成虫各 50 头,处理后 48 h 记录各板上雌雄虫数。每个处理重复 3 次。

1.4 数据统计与分析

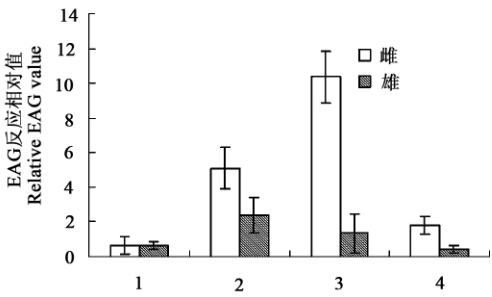
利用 DPS6.55 对数据进行处理和分析。EAG 反应的相对值采用 Duncan 氏新复极差检验差异显著性,雌、雄虫对同一化合物的差异则采用 t 检验 ($P<0.05$); Y 形嗅觉仪生测结果采用卡方检验 ($P<0.05$); 罩笼法采用 t 检验 ($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 对 4 种挥发性物质的 EAG 反应

测定了绿盲蝽雌、雄成虫对 4 种挥发性物质的 EAG 反应(图 1)。从测定结果来看,绿盲蝽雌成虫对各挥发性物质 EAG 反应顺序为:顺-3-己烯醇>反-2-己烯醛>苯乙酮>苯乙醛,而其对 4 种挥发性物质的 EAG 反应相对值差异显著。供试雄成虫对各挥发性物质 EAG 顺序为:反-2-己烯醛>顺-3-己烯醇>苯乙酮>苯乙醛,其中对反-2-己烯醛和其他 3 种挥发性物质的 EAG 反应均有显著差异,而试虫对苯乙酮和苯乙醛之间没有显著性差异。雌性试虫

对各挥发性物质的 EAG 反应均明显高于雄虫。经 t 检验,绿盲蝽雌、雄虫之间仅对苯乙醛的 EAG 反应差异不显著,对其他 3 种挥发性物质具显著性差异。



1. 苯乙醛; 2. 反-2-己烯醛; 3. 顺-3-己烯醇; 4. 苯乙酮。
1. Phenylacetaldehyde; 2. (E)-2-hexenal; 3. (Z)-3-hexenol;
4. Acetopenone.

图 1 四种挥发性物质的触角电位反应

Fig.1 EAG responses of *Apolygus lucorum* to four volatiles

2.2 对种挥发性物质的嗅觉行为反应

采用 Y 形嗅觉仪测定了绿盲蝽雌、雄成虫对苯乙醛、反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇和苯乙酮 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} (V/V) 5 个浓度的行为反应。 χ^2 检验结果表明(表 2、表 3) 绿盲蝽雌虫对 4 种挥发性物质多数浓度的行为反应差异极显著。对 4 种挥发性物质反应的总体趋势相似,呈倒“V”字型。

表 2 绿盲蝽雌虫对 4 种挥发物质的行为反应

Tab.2 Response of female adults of *Apolygus lucorum* to four volatiles in the Y-tube

样品名称 Volatiles	浓度/(V/V) Concentrations	趋避率/% Repellent rate	引诱率/% Luring rate	χ^2	反应率/% Response rate
苯乙醛 Phenylacetalde- hyde	10^{-2}	36.0	48.0	1.3 ^{ns}	84.0
	10^{-3}	41.3	50.7	0.7 ^{ns}	92.0
	10^{-4}	26.7	62.7	10.9 ^{**}	89.4
	10^{-5}	25.3	61.3	11.2 ^{**}	86.6
	10^{-6}	30.7	60.0	7.1 ^{**}	90.7
反-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	10^{-2}	46.7	49.3	0.1 ^{ns}	96.0
	10^{-3}	36.0	52.0	2.2 ^{ns}	88.0
	10^{-4}	26.7	64.0	11.5 ^{**}	90.7
	10^{-5}	33.3	60.0	5.7 [*]	93.3
	10^{-6}	42.7	49.3	0.4 ^{ns}	92.0
顺-3-己烯醇 (Z)-3-hexenol	10^{-2}	49.3	41.3	0.5 ^{ns}	90.6
	10^{-3}	36.0	50.7	1.9 ^{ns}	86.7
	10^{-4}	30.7	56.0	5.6 [*]	86.7
	10^{-5}	37.3	42.7	0.3 ^{ns}	80.0
	10^{-6}	37.3	56.0	2.8 ^{ns}	93.3
苯乙酮 Acetopenone	10^{-2}	41.1	43.8	0.1 ^{ns}	84.9
	10^{-3}	26.7	54.7	7.2 ^{**}	81.4
	10^{-4}	25.3	60.0	10.6 ^{**}	85.3
	10^{-5}	22.7	72.0	19.3 ^{**}	94.0
	10^{-6}	28.0	60.0	8.9 ^{**}	88.0

注: χ^2 检验中 ns 表示 $P>0.05$, * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$,下同。
Note: * . Significantly at 0.05; ** . Significantly at 0.01. The same as followed.

随着浓度的增加反应率增加,当苯乙酮、苯乙醛浓度达到 10^{-5} (V/V),反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇浓度达到 10^{-4} (V/V) 时,绿盲蝽雌成虫对各挥发性物质的反应率达到最高,之后随着浓度的增加反应率逐渐降低,其中对苯乙酮 10^{-4} (V/V) 的反应率最高,

达到 72%。另外,试验结果表明,除苯乙酮 10^{-4} (V/V) 对试虫雄性成虫具有显著性引诱作用外,其他 4 种物质各浓度均对试虫无明显引诱作用,而 4 种挥发性物质对绿盲蝽雌成虫引诱作用均明显高于雄成虫。

表 3 绿盲蝽雄虫对 4 种挥发性物质的行为反应

Tab. 3 Response of male adults of *Apolygus lucorum* to four volatiles in the Y-tube

样品名称 Volatiles	浓度/(V/V) Concentrations	趋避率/% Repellent rate	引诱率/% Luring rate	χ^2	反应率/% Response rate
苯乙醛 Phenylacetalde- hyde	10^{-2}	44.0	49.3	0.2 ^{ns}	84.0
	10^{-3}	36.0	50.7	1.9 ^{ns}	92.0
	10^{-4}	40.0	52.0	1.2 ^{ns}	89.4
	10^{-5}	46.7	48.0	0.0 ^{ns}	86.6
	10^{-6}	40.0	49.3	0.7 ^{ns}	90.7
反-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	10^{-2}	41.3	48.0	0.4 ^{ns}	96.0
	10^{-3}	44.0	40.0	0.1 ^{ns}	88.0
	10^{-4}	47.6	42.9	0.2 ^{ns}	90.7
	10^{-5}	44.7	50.0	0.2 ^{ns}	93.3
	10^{-6}	37.3	49.3	1.2 ^{ns}	92.0
顺-3-己烯醇 (Z)-3-hexenol	10^{-2}	38.7	53.3	1.8 ^{ns}	90.6
	10^{-3}	45.3	45.3	0.0 ^{ns}	86.7
	10^{-4}	48.0	42.7	0.2 ^{ns}	86.7
	10^{-5}	41.3	48.0	0.4 ^{ns}	80.0
	10^{-6}	42.7	53.3	0.9 ^{ns}	93.3
苯乙酮 Acetopenone	10^{-2}	37.3	53.3	2.1 ^{ns}	84.9
	10^{-3}	38.7	54.7	2.1 ^{ns}	81.4
	10^{-4}	34.2	56.6	4.2 [*]	85.3
	10^{-5}	46.7	49.3	0.1 ^{ns}	94.0
	10^{-6}	36.0	52.0	2.2 ^{ns}	88.0

2.3 各挥发性物质对绿盲蝽的田间罩笼诱集效果
采用田间罩笼法,初步测定了 4 种挥发性物质对绿盲蝽成虫的诱集效果(表 4)。从测定结果来看,除反-2-己烯醛 10^{-5} (V/V) 和顺-3-己烯醇 10^{-4} (V/V) 对绿盲蝽雌虫没有明显的诱集效果外,其他

各处理均对试虫具有较强的诱集作用,其中,苯乙醛 10^{-5} (V/V) 对该虫的引诱效果最佳。而各处理对雄性试虫的诱集效果来看,除苯乙醛 10^{-5} (V/V) 和顺-3-己烯醇 10^{-4} (V/V) 对试虫具有明显的诱集作用外,其他各处理对试虫的诱集作用均较差。

表 4 4 种挥发性物质对绿盲蝽诱集效果

Tab. 4 Four volatile's trapping effect on male adults of *Apolygus lucorum*

样品名称 Volatiles	浓度/(V/V) Concentrations	雌/(头/板) Female				雄/(头/板) Male			
		处理	对照	t	相对增效	处理	对照	t	
		Treatments	Contrast			Treatments	Contrast		
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	10^{-5}	5.68 ± 1.15	2.00 ± 1.00	4.16 [*]	1.84	3.67 ± 0.58	2.00 ± 0.00	5.00 [*]	
	10^{-3}	5.33 ± 1.15	2.00 ± 1.00	3.02 [*]	1.67	3.00 ± 2.00	2.33 ± 2.08	0.40 ^{ns}	
反-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	10^{-4}	3.33 ± 3.05	2.33 ± 2.08	0.46 ^{ns}	0.42	4.33 ± 0.58	3.00 ± 0.00	4.00 ^{ns}	
	10^{-3}	3.33 ± 0.58	1.67 ± 0.58	3.54 [*]	0.99	2.67 ± 2.01	2.67 ± 4.04	0.24 ^{ns}	
顺-3-己烯醇 (Z)-3-hexenol	10^{-4}	4.00 ± 1.73	5.00 ± 1.00	0.86 ^{ns}	-0.25	4.67 ± 0.58	6.67 ± 0.58	4.24 [*]	
	10^{-3}	3.67 ± 0.58	1.67 ± 0.58	4.24 [*]	1.20	2.00 ± 0.00	0.67 ± 0.58	4.00 ^{ns}	
苯乙酮 Acetopenone	10^{-5}	3.00 ± 0.00	4.67 ± 0.58	5.00 [*]	-0.56	2.67 ± 2.08	3.33 ± 1.15	0.48 ^{ns}	
	10^{-3}	3.33 ± 0.58	1.33 ± 0.58	4.24 [*]	1.50	2.66 ± 0.58	4.33 ± 2.52	1.18 ^{ns}	

注:表中数据为平均值 ± 标准差。t 值后*表示差异达显著水平,ns表示未达到显著水平(P < 0.05)。相对增效为处理虫量减去对照虫量的值除以对照虫量。

Note: * . Significantly at 0.05.

3 结论与讨论

在植物-植食性昆虫两者关系中,植物气味在其中起重要作用^[17]。而多达数十种甚至上百种的植物气味物质中,只有一小部分关键化合物对昆虫的行为起决定作用^[18]。目前,通过电生理、嗅觉仪、风动和田间诱捕试验^[19-24]等对植物气味物质的研究已成为确定这些关键化合物的主要方法。本研究通过绿盲蝽的电生理、嗅觉仪及罩笼法证明了苯乙醛、反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇和苯乙酮均可在不同程度上影响绿盲蝽成虫的寄主定向选择。

3.1 四种挥发性物质对绿盲蝽雌成虫具有一定的引诱作用

研究发现四种挥发性物质对绿盲蝽雌成虫具有一定的引诱作用,而对雄成虫几乎没有引诱作用。这可能是由于昆虫雌、雄虫的个体在寻找寄主、繁殖后代等行为中所起的作用不同,雌、雄成虫触角感受器可能存在特殊的与性别有关的数量差异,或存在嗅觉生理方面的定性差异^[25]。并且,绿色气味物质与性信息素结合对雌虫的产卵行为有很大的影响。本研究 EAG 反应、行为反应和罩笼试验的结果充分验证了这一理论。

3.2 对绿盲蝽具有引诱作用挥发性物质具有广阔的应用前景

近年来,化学生态学的迅猛发展,使人们意识到对昆虫化学生态学、植物化学生态、微生物化学生态、环境化学生态等的深入研究,将为解决农林有害生物的综合防治提供新的生态防治途径。在化学生态领域中开展深层次的基础研究,并通过这些基础研究发展全新概念的害虫防治技术。探明植物挥发性物质的性质及其作用机理,将有助于探索、提出新的害虫防治策略^[26]。目前,国内外有关植物挥发性物质与昆虫行为调控方面的报道较多,人们主要从以下几方面进行研究:引诱作用^[27-29]、驱避作用^[30]、致死作用^[31]。

本研究从电生理和行为方面对四种挥发性物质进行了研究,证明了四种挥发性物质在不同程度上对绿盲蝽具有引诱作用。由于绿盲蝽取食植物的幼嫩组织,组织长大后才能发现明显被害,给绿盲蝽的测报工作带来了很大的困难。本研究将挥发性物质与粘虫板结合,提高了粘虫板对绿盲蝽的诱集效果。为绿盲蝽的测报工作提供了新的思路和方法。将其应用于绿盲蝽的测报工作中,可以更为精确地把握绿盲蝽的防治适期,指导农民科学用药,在减少药剂浪费的同时,降低了环境的污染。

近年来,随着研究工作的不断深入,研究人员发现植物挥发性物质可以提高性信息素的引诱效果。虽然这方面报道较少,且不同昆虫对植物挥发性物质和性信息素的互作关系并不一致,但显然已经成为植物挥发性物质开发利用的重要研究领域^[32]。目前,国内的研究人员已经研究了绿盲蝽对多种植物挥发性物质和性信息素类似物的触角电位反应^[2,11,30],但对于植物挥发性物质与性信息素结合对绿盲蝽的行为调控方面未见报道。将植物挥发性物质与性信息素结合,通过气相色谱与脑部多元电极电生理记录、风洞等技术筛选最佳浓度及特定配比,利用它们对雌、雄虫的引诱作用,可研制开发出针对绿盲蝽的高效诱杀剂。本研究对四种挥发性物质以天然橡胶塞为载体的释放方法进行了初步研究,但对于各挥发性物质的其他释放方法(如以硅胶塞为载体或以微胶囊等剂型缓释)有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 李耀发,党志红,高占林,等. 不同类型杀虫剂对绿盲蝽室内毒力及田间药效评价[J]. 河北农业科学, 2008, 12(1): 49-50, 57.
- [2] 陆宴辉. 盲蝽生态适应性研究[D]. 北京: 中国农科院植物保护研究所, 2008.
- [3] 陆宴辉,吴孔明. 棉花盲蝽象及其防治[M]. 北京: 金盾出版社, 2008: 118-121.
- [4] 吴伟坚,余金咏,梁广文. 盲蝽科昆虫的食性[J]. 昆虫知识, 2003, 40(2): 108-111.
- [5] Wu Kongming, Lu Yanhui, Feng Hongqiang. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton [J]. Science, 2008, 321(5896): 1676-1678.
- [6] 李耀发,党志红,高占林,等. 河北省沧州棉区绿盲蝽在不同寄主上的动态分布[J]. 植物保护, 2009, 35(5): 118-121.
- [7] 鲁继红. 东北大黑鳃金龟信息物质的提取及鉴定[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [8] 卢伟,侯茂林,文吉辉,等. 植物挥发性次生物质对植食性昆虫的影响[J]. 植物保护, 2007, 33(3): 7-11.
- [9] 路常宽,王晓勤,张巨山,等. 苹毛丽金龟对植物挥发物成分的触角电位及行为反应[J]. 昆虫学报, 2009, 52(12): 1379-1384.
- [10] 诸葛飘飘. 杨树云斑天牛成虫寄主定位中的信息化学物质[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [11] 陈展册,苏丽,戈峰. 绿盲蝽对性信息素类似物和植物挥发物的触角电位反应[J]. 昆虫学报, 2010, 53(1): 47-54.
- [12] 王明,伍德明,阎云花. 新疆棉铃虫性信息素的电

- 生理研究[J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(4): 311-316.
- [13] 丁红建, 郭予元. 用于昆虫嗅觉行为研究的四臂嗅觉仪的设计、制作和应用[J]. 昆虫知识, 1996, 33(4): 241-243.
- [14] 文礼章. 昆虫学研究方法与技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] 卢辉, 余鸣, 张礼生, 等. 不同龄期及密度亚洲小车蝗取食对牧草产量的影响[J]. 植物保护, 2005, 31(4): 55-58.
- [16] 毕明娟, 薛明, 李庆亮. 取食 B 型烟粉虱前侵染的烟草对 B 型烟粉虱和烟蚜体内保护酶和消化酶活性的影响[J]. 昆虫学报, 2010, 53(2): 139-146.
- [17] 杜永均, 严福顺. 植物挥发性次生物质在植食性昆虫、寄主植物和昆虫天敌关系中的作用机理[J]. 昆虫学报, 1994, 37(2): 233-250.
- [18] Tasin M, Backman A C, Coracini M, et al. Synergism and redundancy in a plant volatile blend attracting grapevine moth females [J]. Phytochemistry, 2007, 68(2): 203-209.
- [19] 杨元. 桑天牛长尾啮小蜂寄主定向的挥发性信息物质研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- [20] 赵辉, 张茂新, 凌冰, 等. 非寄主植物挥发油对黄曲条跳甲成虫嗅觉、取食及产卵行为的影响[J]. 华南农业大学学报, 2003, 24(2): 38-40.
- [21] 付晓, 郭线茹, 罗梅浩, 等. 烟夜蛾和棉铃虫对高浓度烟草挥发物的电生理和行为反应[J]. 昆虫学报, 2008, 51(9): 902-909.
- [22] 孙晓玲. 云杉八齿小蠹化学信息物质的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.
- [23] 薛皎亮, 贺珺, 谢映平. 植物挥发物对天敌昆虫异色瓢虫的引诱效应[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(4): 494-498.
- [24] 王翠英, 刘建, 宋凤瑞, 等. 大豆食心虫性信息素的化学结构触角电位及田间诱蛾效果[J]. 植物保护学报, 1992, 19(4): 331-335.
- [25] Raguso R A, Light D M, Pickersky E. Electroantennogram responses of *Hyles lineata* (Sphingidae: Lepidoptera) to volatile compounds from *Clarkia breweri* (Onagraceae) and other moth-pollinated flowers [J]. Journal of Chemical Ecology, 1996, 22(10): 1735-1766.
- [26] 王婷. 双条杉天牛生物学特性及侧柏提取物对其引诱活性的研究[J]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [27] 魏娟, 覃伟权, 马子龙, 等. 红棕象甲成虫对 5 种植物发酵挥发物的行为反应[J]. 热带作物学报, 2009, 30(11): 1651-1655.
- [28] 蒋小龙. 谷象对植物油和信息素趋性反应的研究[J]. 昆虫知识, 1995, 32(1): 23-25.
- [29] 陈培育, 封洪强, 李国平, 等. 3 种豆科植物对棉田育苗蚜的诱集效果研究[J]. 河南农业科学, 2010(5): 66-68.
- [30] 张立娟, 崔建州, 李继泉, 等. 绿盲蝽对不同处理具花枣枝挥发物的趋性反应[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(4): 81-84.
- [31] Musetti L, Neal J J. Toxicological effects of *Lycopersicon hirsutum* f. *glabratum* and behavioral response of *Macrosiphum euphorbiae*. [J]. J Chem Ecol, 1997, 23(5): 1321-1332.
- [32] 沈幼莲, 高扬, 杜永均. 植物气味化合物与斜纹夜蛾性信息素的协同作用[J]. 昆虫学报, 2009, 52(12): 1290-1297.