应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2016, 53(1): 148−156. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2016.019

二化螟雌蛾对香根草挥发物的 EAG 和行为反应*

王广利** 付小刚** 韩晓霞 张宇瑶 魏洪义***

（江西农业大学农学院，南昌 330045）

摘 要 **【目的】** 为研发二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker) 雌蛾植物源引诱剂提供参考。**【方法】** 采用电生理及风洞技术测试了二化螟雌蛾对香根草挥发性物质的定向行为反应。**【结果】** 二化螟雌蛾对供试的 16 种香根草挥发性物质均能产生 EAG 反应，且对 0.1、1.0、10.0 μg/μL 3 种浓度下的油酸、胆固醇的 EAG 反应随浓度升高而增大，对柠檬醛、樟脑、软脂酸的 EAG 反应随浓度增加而降低。二化螟雌蛾对 1.0 μg/μL 浓度的香根草提取物的 EAG 反应值为 426.11×10^{-3} Mv，显著高于其他化合物标样（$P<0.05$）。在风洞中，胆固醇、柠檬醛、正十五酸、正十四碳酸、单棕榈酸甘油、邻苯二甲酸二异辛脂等香根草挥发物对二化螟雌蛾均有引诱作用，并筛选出了具有较好引诱效果的不同配比的混合物，分别为胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸=33：24：11、邻苯二甲酸二异辛脂：柠檬醛：单棕榈酸甘油=130：48：1、胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸:单棕榈酸甘油=66：48：22：1、柠檬醛：单棕榈酸甘油=48：1。**【结论】** 具有电生理和行为活性的香根草挥发物可作为二化螟雌蛾植物源引诱剂的候选化合物成分。

关键词 二化螟，雌蛾，香根草挥发物，EAG，定向行为

EAG and behavioral responses of *Chilo suppressalis* females to plant volatiles from *Vetiveria zizanioides*

WANG Guang-Li** FU Xiao-Gang** HAN Xiao-Xia ZHANG Yu-Yao WEI Hong-Yi***

(College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract **[Objectives]** To provide a basis for developing botanical attractants for the female rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker) (Lepidoptera: Crambidae). **[Methods]** The behavioral responses of *C. suppressalis* females to 16 plant volatiles substances from vetiver, *Vetiveria zizanioiaes,* were studied using an electroantennograph (EAG) and wind tunnel techniques. **[Results]** All 16 substances induced EAG responses in female moths. Responses to oleic acid and cholesterol at concentrations of 0.1、1.0 and 10.0 μg/μL increased with increasing concentration, but decreased for citral, bornan-2-one and palmitic acid. The EAG value of *C. suppressalis* females to vetiver extracts at a concentration of 1.0 μg/μL was 426.11×10^{-3} Mv, significantly higher than that recorded for other standard compounds ($P<0.05$). *C. suppressalis* females could be attracted by volatile compounds including cholesterol, citral, n-pentadecanoic acid, myristic acid, glycerol 1-palmitate and diisooctyl phthalate in wind tunnel assays, and different ratios of these compounds could be ranked in order of decreasing attractiveness to female moths as follows, cholesterol：citral：myristic acid=33：24：11, diisooctyl phthalate：citral：glycerol 1-palmitate=130：48：1, cholesterol： citral： myristic acid: glycerol 1-palmitate=66：48：22：1, citral：glycerol 1-palmitate=48：1. **[Conclusion]** Vetiver volatile compounds to which *C. suppressalis* females displayed electrophysiological and behavioral responses have potential as botanical attractants for these pests.

Key words *Chilo suppressalis*, female moths, vetiver volatiles, electroantennography, orientational behavior

---

* 资助项目 Supported projects：十二五国家科技支撑计划课题（2012BAD14B14）

**第一作者 First author，E-mail：wgl_2002@126.com，937313823@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：hywei@jxau.edu.cn

收稿日期 Received：2015-03-28，接受日期 Accepted：2015-05-23

二化螟 *Chilo suppressalis* (Walker)为水稻重要的钻蛀性害虫，在我国稻区为害严重，发生普遍（盛承发等, 2003）。目前还主要依靠化学药剂来防治二化螟，长期、连续及不合理使用药剂使田间二化螟产生了不同水平的抗药性（吴敏等，2013）。结合二化螟性诱剂的绿色防控是尤为重要的，而目前二化螟性信息素的作用方式均为诱杀雄虫，以此减少雌虫与雄虫的交配，降低下一代的虫口数量而间接达到防治二化螟的目的。由于二化螟雌雄成虫在交配能力上并不对称（焦晓国等，2006），该生物学特性使得二化螟性信息素的作用具有不对称性，导致其引诱效果具有一定的局限性。因此，研发二化螟雌蛾引诱剂将具有重要的实践意义。

近半个世纪以来，害虫可持续控制成为研究的重点（Glaser and Matten, 2003; Kumar and Kumar, 2004; Shelton and Nault, 2004; Shelton and Badenes-Perez, 2006）。对二化螟的生态防治策略方面，雄蛾引诱剂研究较多，而对二化螟雌蛾引诱剂的研究鲜有报道（陈华才等，2002，2004；左文，2007；）。有研究指出水稻螟虫在香根草 *Vetiveria zizanioides* 上的产卵趋性高于水稻，提出了利用香根草防治害虫的可能性（陈先茂等，2007）。二化螟产在香根草上的卵能够正常孵化，但孵化后的幼虫在香根草上不能完成其生活史，仅有极少数幼虫可存活至 2~3 龄，且香根草作为诱虫植物对二化螟种群有抑制作用（郑许松等，2009）。同时，在二化螟植物源行为调节剂的研究上，提出了以樟脑、杜稀、芳樟醇等为主要组分的混合物作为诱芯来诱集二化螟雌蛾（黄京华等，2004；吕仲贤等，2012）。尽管对二化螟雌蛾的诱集植物及其化合物的研究取得了一定成效，但目前尚未有研究指出香根草挥发物中的哪些成分对二化螟雌蛾具有较强的引诱效果，具有引诱效果的这些挥发物单独使用及混合使用的诱集效果如何？混合物中的不同单体化合物的比例如何？为进一步探明二化螟诱集植物对二化螟雌蛾行为的调节作用，本文选择已报道的香根草茎叶挥发物中的 16 种化合物标样作为供试植物气味源，分别测试二化螟雌蛾对这些化合物标样的电生理和行为反应，以期筛选出对二化螟雌蛾引诱效果较好的化合物标样或一定比例的混合物，为进一步开发二化螟雌蛾引诱剂提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

于 2013—2014 年在江西省万年县采用灯诱的方法获得二化螟雌蛾，带回室内进行继代饲养。将水稻茎杆放入 10 cm×12 cm 的圆形养虫盒中，水稻茎杆每 2 d 更换一次，饲养条件为温度 (28±1)℃、湿度 85%、光照 14L∶10D，羽化成虫用 10%蔗糖溶液补充营养，以保持成虫行为活性。

1.2　实验材料

香根草提取物的制备：将香根草嫩叶、老叶分别剪碎后称取 4 g，加甲醇 40 mL，水浴（65℃）回流 1.5 h，过滤，残渣再加甲醇 20 mL 后回流 1 h，合并滤液，用甲醇定容至 50 mL 容量瓶中，置于－5℃冰箱中备用。

供试化合物：香根草茎叶挥发物的化合物标样均购自上海遐瑞医药科技有限公司（表 1）。以二氯甲烷为溶剂，将 16 种香根草茎叶挥发物化合物标样分别配制为 10.0、1.0、0.1 μg/μL 3 个不同浓度的溶液供试验测试和配置混合物。

1.3　仪器

触角电位仪：德国 SYNTECH 公司，由微动操纵器 MP-15、放大器 UN-06、气味刺激控制装置 CS-05 和触角电位记录显示输出装置组成，采用 EAG 2000 软件记录电位的变化。

风洞装置：为有机玻璃制，圆柱形，长 2.0 m，直径 0.5 m，风洞上风端侧面有一个滑门，风源由小型排气扇产生，风速均匀，约 0.4 m/s。

1.4　试验方法

（1）触角电位测试：以二氯甲烷作对照，测试二化螟雌蛾对不同浓度标准品的 EAG 反应。同一种浓度的不同标准品为一个组，共 3 组。

表 1　16 种标准化合物的纯度、来源及其在香根草挥发物中的含量（黄京华等，2004）
Table 1　Purity, sources and contents of 16 standard chemical compounds from *Vetiveria zizanioides* (Huang *et al*., 2004)

化合物 Compounds	纯度 Purity	在香根草挥发物中的含量(%) The content of vetiver volatile	来源 Source of supply
芳樟醇 Linalool	97.0%	0.13	Alfa Aesar
柠檬醛 Citral	＞98.0%	2.14	TCI
樟脑 Bornan-2-one	98.0%	0.79	Aladdin
香叶醇 Geraniol	99.0%	1.37	Acros
杜烯 Durene	＞98.0%	0.16	TCI
油酸 Oleic acid	≥99.0%	0.48	Aladdin
软脂酸 Palmitic acid	≥99.0%	1.49	Aladdin
胆固醇 Cholesterol	≥99.0%	3.98	Aladdin
单棕榈酸甘油 Glycerol 1-palmitate	＞95.0%	0.06	TCI
正十四碳酸 Myristic acid	99.0%	1.34	Acros
反式角鲨烯 (E,E,E,E)-squalene	99.0%	27.46	Acros
棕榈油酸 Palmitoleic acid	98.0%	4.02	TCI
正十五酸 N-Pentadecanoic acid	99.0%	0.64	Acros
油酰胺 Oleamide	＞99.0%	33.50	Sigma
十二甲基环六硅氧烷 Dodecamethylcyclohexasiloxane	97.0%	0.58	Sigma
邻苯二甲酸二异辛酯 Diisooctyl phthalate	96.0%	19.85	Accustandard

每组分别测试 3 次，每次测试一根触角，每根触角重复 3 次（王彦阳等，2011；隋学良等，2012；王保新等，2014）。

（2）风洞试验：风洞室温 23~25℃，相对湿度 60%~70%。试验前将待测雌蛾单头置于长 13 cm、直径 3 cm 的玻璃管里，两端用钢丝网盖住，于试验前 0.5 h 将其转到风洞室内适应环境，之后开始进行试验。

本实验取羽化 2 d 的雌蛾进行定向行为测试。实验前将二化螟雌蛾进行暗处理 2 h 后操作，观察不同浓度化合物标样及其不同配比混合物的引诱效果。实验时，信息源置于上风端的支架上，雌蛾置于下风端与信息源等高处（李静静等，2014）。测试时，先将信息源放进风洞中 3~4 min，使风洞内充满信息素气味，然后引入雌蛾到释放支架上，任其反应 5 min，观察记录每头雌蛾在风洞中的行为，包括兴奋、起飞、沿信息源定向飞行以及在信息源处降落 4 个指标，同时用秒表记录起飞潜伏期（从被测雌蛾被置于释放架上开始至起飞的过程所需的时间）。每头雌蛾只测试一次，不同浓度的化合物标样及其不同配比的混合物分别测试 3 次，每次分别测试 10 头雌蛾（周弘春和杜家纬，2001）。

吕仲贤等（2012）提出樟脑、杜烯和芳樟醇的混合物对二化螟雌蛾的最佳引诱效果比例为 200∶120∶30。据此配方开展了浓度筛选试验，即以二氯甲烷为溶剂，配置 100.0、10.0、1.0、0.1 μg/μL 4 种不同浓度的混合物作为诱源，对二化螟雌蛾进行定向行为反应测试。由于二化螟雌蛾对 4 种不同浓度气味源的反应率均较低，仅在 1.0 μg/μL 浓度下，有 3.3%的个体降落至信息源，其他浓度均无雌蛾降落。因此在后续实验中选用 1.0 μg/μL 的浓度作为定向行为反应测试浓度。

1.5　数据统计与分析

EAG 反应相对值(Sr)=Sc－(Ra+Rb)/2，式中 Sc 为各化合物标样的 EAG 反应值，Ra 为每组样品测试前对照的 EAG 反应值，Rb 为每组样品测

试后的对照的 EAG 反应值。利用 Duncan's 多重分析法比较二化螟雌蛾对不同挥发性物质的 EAG 反应之间差异，利用学生氏 *t*-检验比较分析同一挥发性物质不同浓度之间的 EAG 反应（凌娜等，2014）。定向行为试验数据采用 SPSS16.0 软件进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　二化螟雌蛾对香根草茎叶提取物及其化合物标样的 EAG 反应

供试的 16 种香根草挥发物化合物标样均能引起二化螟雌蛾的 EAG 反应（表 2）。在 0.1、1.0、10.0 μg/μL 3 种浓度下的 16 种挥发性物质中，二化螟雌蛾对柠檬醛、樟脑、软脂酸的 EAG 反应值随浓度的增加而降低，而油酸、胆固醇等挥发物的 EAG 反应值则随浓度的增加而增强，且芳樟醇、柠檬醛、香叶醇、正十四碳酸、反式角鲨烯、棕榈油酸对二化螟雌蛾引起的 EAG 反应在不同浓度之间差异显著（表 2），表明供试化合物的浓度对二化螟雌蛾的 EAG 活性具有一定影响。反式角鲨烯的 EAG 反应值在不同浓度下均较低，说明二化螟雌蛾对反式角鲨烯的电生理活性不强。

在 0.1 μg/μL 浓度下，软脂酸的 EAG 反应较强，为 276.11×10^{-3} Mv，其次是棕榈油酸、樟脑、香根草提取物和正十五酸，反应值分别为 273.9×10^{-3}、250.0×10^{-3}、247.8×10^{-3} 和 228.3×10^{-3} Mv。二化螟雌蛾对 1.0 μg/μL 的香根草提取

表 2　二化螟雌蛾对 16 种香根草挥发物化合物标样的 EAG 反应

Table 2　EAG responses of *Chilo suppressalis* to 16 standard compounds from vetiver volatiles

试验样品 Test samples	平均 EAG 绝对值（$\times10^{-3}$ Mv）Mean absolute EAG values		
	0.1 μg/μL	1.0 μg/μL	10.0 μg/μL
芳樟醇 Linalool	85.56±42.92 ABbc	42.78±26.97 Bc	167.78±28.65 Acde
柠檬醛 Citral	127.78±29.21 Aabc	32.78±6.76 Bc	51.11±10.56 Be
樟脑 Bornan-2-one	250.00±94.83 Aab	166.11±9.10Abc	76.67±12.50 Ade
香叶醇 Geraniol	180.00±37.17Babc	91.67±9.62 Bbc	420.78±74.84Aabc
杜烯 Durene	93.34±20.28Aabc	57.22±8.89 Ac	104.44±28.16Ade
油酸 Oleic acid	155.00±27.50 Aabc	162.22±29.96 Abc	323.89±85.47Aabcd
软酸脂 Soft acid lipid	276.11±126.13 Aa	101.11±12.52 Abc	107.22±29.21 Ade
胆固醇 Cholesterol	116.11±7.72 Aabc	118.89±42.00 Abc	217.22±78.91 Abcde
单棕榈酸甘油 Glycerol 1-palmitate	125.00±39.52 Aabc	110.00±55.01 Abc	239.44±52.78 Abcde
正十四碳酸 Myristic acid	101.67±43.79 Babc	52.22±19.28 Bc	299.44±12.52 Abcde
反式角鲨烯 (E,E,E,E)-squalene	130.55±14.41 ABabc	233.33±50.04 Ab	99.45±23.91Bde
棕榈油酸 Palmitoleic acid	273.89±25.76 Ba	96.67±44.01 Cbc	453.89±52.54 Aab
正十五酸 N-Pentadecanoic acid	228.33±58.22 Aabc	95.56±4.84Abc	383.89±178.56 Aabc
油酰胺 Oleamide	65.56±9.87 Abc	30.67±14.92 Ac	37.78±25.23Ae
十二甲基环六硅氧烷 Dodecamethylcyclohexasiloxane	77.78±13.52 Abc	12.78±1.12 Ac	80.11±32.34 Ade
邻苯二甲酸二异辛酯 Diisooctyl phthalate	57.78±9.49　Ac	38.33±10.59 Ac	43.33±5.29 Ae
香根草提取物（CK）Vetiver extracts	247.78±106.33 Aab	426.11±151.10 Aa	503.33±218.65 Aa

表中数据为平均值±标准差，同行数值后标有相同大写字母表示经 *t*-检验差异不显著(P>0.05)，同列数值后标有相同小写字母表示经 Duncan 氏多重比较差异不显著(P>0.05)。

Data in the table are mean ± SD, and followed by the same capital letters within the same row are not significantly different (P>0.05, student's *t*-test), while followed by same lowercase letters within the same column are not significantly different (P>0.05, Duncan's new multiple range test).

物的 EAG 反应较强烈，为 426.1×10^{-3} Mv，显著高于其他 16 种香根草挥发物化合物标样（$P<0.05$）；其次是反式角鲨烯，EAG 反应值为 233.3×10^{-3} Mv；而柠檬醛、油酰胺和十二甲基环六硅氧烷的 EAG 反应值最弱，均低于 35.0×10^{-3} Mv，且与反式角鲨烯反应值存在显著性差异（$P<0.05$）。樟脑、柠檬醛、邻苯二甲酸二异辛酯和油酰胺在 10.0 μg/μL 浓度下的 EAG 反应值较低（分别为 76.7×10^{-3}、51.1×10^{-3}、43.3×10^{-3} 和 37.8×10^{-3} Mv），且显著低于香根草提取物（503.3×10^{-3} Mv）、棕榈油酸（453.9×10^{-3} Mv）、香叶醇（420.8×10^{-3} Mv）、正十五碳酸（383.9×10^{-3} Mv）的 EAG 反应值。其中，二化螟雌蛾对 10.0 μg/μL 的香根草提取物的 EAG 反应值最高，但与 1.0 μg/μL 的香根草提取物的 EAG 反应之间无显著差异（表 2）。

2.2 二化螟雌蛾对不同香根草挥发物化合物标样的定向行为反应

二化螟雌蛾对不同香根草茎叶挥发物单品的风洞反应中，其兴奋率均较高（表 3）。其中，正十四碳酸的兴奋率最高，达 73.3%；其次是油酸、油酰胺、香根草提取物，兴奋率均为 70.0%；杜烯、十二甲基环六硅氧烷的兴奋率相对较低，分别为 43.3%和 36.7%。与兴奋行为相同，雌蛾对正十四碳酸的起飞率也较高，为 66.7%，其次为反式角鲨烯、单棕榈酸甘油，分别为 63.3%和 60.0%，而起飞率最低的仍然是十二甲基环六硅氧烷，仅为 33.3%。雌蛾接近单品信息源的比例相对较低，最高仅有 23.3%的个体接近正十四碳酸信息源处，其次是单棕榈酸甘油和胆固醇，均为 20.0%；其他单品接近信息源的比例均低于

表 3 风洞中二化螟雌蛾对 16 种香根草挥发物 16 种化合物标样的行为反应

Table 3 Behavioral responses of *Chilo suppressalis* females to 16 standard compounds from vetiver volatiles in wind tunnel assays

试验样品 Test samples	雌蛾反应百分率（%）Female response			
	兴奋 Excited	起飞 Take off	接近诱源 Approaching the source of lures	降落 Landing
香根草提取物（CK）Vetiver extracts	70.00	56.67	16.67	6.67
正十四碳酸 Myristic acid	73.33	66.67	23.33	16.67
单棕榈酸甘油 Glycerol 1-palmitate	66.67	60.00	20.00	13.33
胆固醇 Cholesterol	66.67	60.00	20.00	13.33
柠檬醛 Citral	60.00	50.00	13.33	10.00
邻苯二甲酸二异辛酯 Diisooctyl phthalate	53.33	53.33	16.67	10.00
正十五酸 N-Pentadecanoic acid	53.33	46.67	16.67	10.00
樟脑 Bornan-2-one	56.67	53.33	10.00	10.00
反式角鲨烯 (E,E,E,E)-squalene	63.33	63.33	10.00	6.67
棕榈油酸 Palmitoleic acid	50.00	40.00	13.33	6.67
软酸脂 Soft acid lipid	53.33	46.67	16.67	6.67
杜烯 Durene	43.33	43.33	16.67	6.67
香叶醇 Geraniol	66.67	46.67	13.33	3.33
芳樟醇 Linalool	60.00	43.33	10.00	3.33
油酸 Oleic acid	70.00	50.00	6.67	3.33
油酰胺 Oleamide	70.00	53.33	6.67	0.00
十二甲基环六硅氧烷 Dodecamethylcyclohexasiloxane	36.67	33.33	10.00	0.00

20.0%；兴奋率较高的油酸、油酰胺也仅能诱导6.7%的个体接近信息源；雌蛾对正十四碳酸单品的降落率最高，为 16.7%，其次为单棕榈酸甘油和胆固醇，均为 13.3%，除油酰胺和十二甲基环六硅氧烷的降落率为 0 外，其他单品的降落率均超过 10.0%（表 3）。

2.3　二化螟雌蛾对化合物标样配成不同比例混合物的定向行为反应

将表 3 中 6 种对二化螟行为反应效果接近于香根草提取物的化合物（胆固醇、柠檬醛、正十五酸、正十四碳酸、单棕榈酸甘油、邻苯二甲酸二异辛脂）以不同比例配成了 17 种混合物，并以香根草提取物为对照，测试其对二化螟雌蛾定向行为反应的影响。结果显示，邻苯二甲酸二异辛脂：柠檬醛：单棕榈酸甘油=130：48：1 的混合物引起二化螟雌蛾兴奋率（76.6%）最高，其次是胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸=33：24：11、胆固醇 ：柠檬醛 ：正十四碳酸 ：单棕榈酸甘油=66：48：22：1 以及柠檬醛:单棕榈酸甘油=48：1 的混合物可诱导 10.0%的个体降落至诱源处（图 1）。其他 13 种混合物也能一定的行为反应，但效果均不明显。以上 4 种混合物与香根草提取物相比，胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸=33：24：11、邻苯二甲酸二异辛脂：柠檬醛：单棕榈酸甘油=130：48：1、胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸：单棕榈酸甘油=66：48：22：1、柠檬醛：单棕榈酸甘油=48：1 这 4 种配比的混合物对二化螟雌蛾的引诱在起飞、接近信息源、降落等指标上均高于香根草提取物，但不存在显著差异，表明这 4 种配比的混合物对二化螟雌蛾的定向引诱效果相对较高（图 1）。

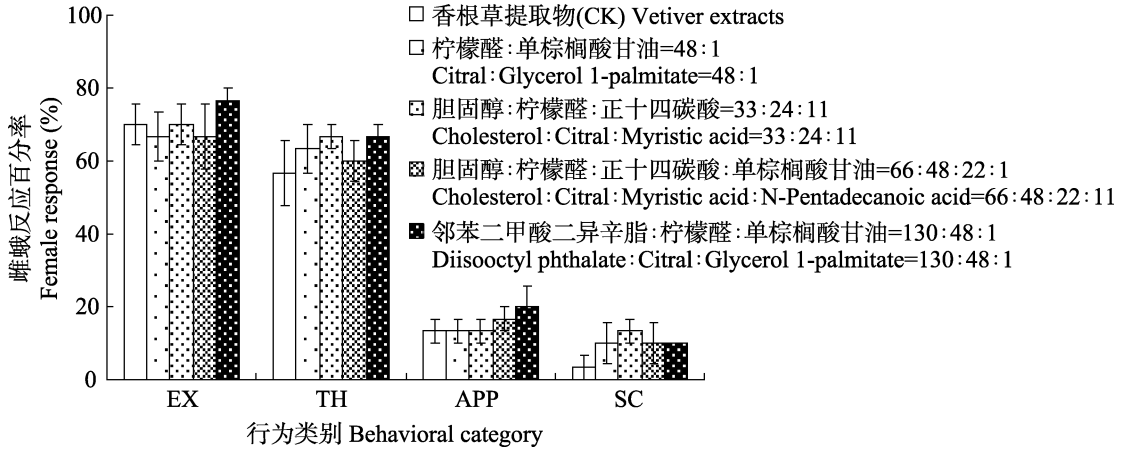

图 1　二化螟雌蛾对香根草挥发物不同配比混合物的行为反应

Fig.1　Behavioral responses of *Chilo suppressalis* females to mixture of vetiver volatile compounds at different proportions

EX：兴奋；TH：起飞；APP：接近诱源；SC：降落。图中数据为平均值±标准差。

EX: Excited; TH: Take off; APP: Approaching the source of lures; SC: Landing. Data in the figure are mean ± SD.

3　结论与讨论

植物自身产生并释放的挥发性气味物质可以诱导昆虫产生多种行为，即昆虫可根据这些挥发性物质进行寄主定向选择、产卵、逃避、取食和聚集行为等（杜家纬，2001；樊慧等，2004）。有研究指出香根草能够诱导二化螟雌蛾产卵，为进一步明确香根草对二化螟雌蛾的诱集作用，本研究测试了二化螟雌蛾对 16 种香根草挥发物化合物标样在 0.1、1.0、10.0 μg/μL 3 种不同浓度下的 EAG 反应。结果显示不同浓度下的香根草挥发性物质均能引起二化螟雌蛾 EAG 反应，说明二化螟雌蛾嗅觉感受器外周神经系统对植物挥发物的反应不是特异型的（只感受特定的信息化合物），而是有广谱型（可感受多种信息化合物），这种广泛的嗅觉感受能力确保了二化螟雌

蛾对香根草挥发性物质定位能力的准确性，同时也说明香根草挥发性物质的化学组成成分具有开发为二化螟雌蛾植物源行为调节剂的可能。

不同植物挥发性信息化合物产生活性的浓度范围不同，即使同一物质在不同浓度时的生理活性也不相同（赵成华等，1995；颜增光等，2006；黄毅等，2009）。同时，每种昆虫对于挥发性信息化合物的反应都有一个最佳的剂量范围，一般低于此范围时，反应率随剂量的增加逐渐升高，高于该范围时，反应率便随剂量的增加而下降（Fan *et al.*，2003）。二化螟雌蛾对不同香根草挥发性物质的 EAG 反应值大部分都随浓度的增加而增强，如香根草提取物、油酸和胆固醇；相反，柠檬醛、樟脑、软脂酸的反应值随浓度的增加而降低。二化螟雌蛾对较低或较高浓度下的反式角鲨烯的 EAG 反应值均表现出降低，说明反式角鲨烯对二化螟雌蛾生理活性的影响较小，因此在后续行为测试实验中予以筛除。芳樟醇、柠檬醛、香叶醇、正十四碳酸、反式角鲨烯、棕榈油酸等引起的 EAG 反应在 3 个浓度之间差异显著，表明二化螟雌蛾对这些香根草挥发性物质的嗅觉感受能力与剂量存在一定相关性。在 0.1 μg/μL 浓度下，EAG 反应值最大的为软脂酸，其次是棕榈油酸、樟脑、香根草提取物和正十五酸，这些挥发物的 EAG 反应显著高于油酰胺、邻苯二甲酸二异辛酯。在 1.0 μg/μL 浓度下，二化螟雌蛾对香根草提取物的 EAG 反应较强烈，且与其他 16 种香根草挥发物化合物标样之间存在显著差异，说明这一浓度的香根草提取物对二化螟雌蛾的电生理活性影响最为强烈。在不同浓度的供试化合物中，二化螟雌蛾对 10.0 μg/μL 的香根草提取物 EAG 反应值最大，对 1.0 μg/μL 的十二甲基环六硅氧烷的 EAG 反应值最小，且显著低于对照香根草提取物的 EAG 反应值，上述结果表明了香根草中的 16 种挥发物化合物标样均对二化螟雌蛾的电生理活性产生了影响。综合分析，不同浓度下二化螟雌蛾的 EAG 反应值较强的香根草挥发物化合物标样分别为油酸、樟脑、反式角鲨烯、胆固醇、单棕榈酸甘油、棕榈油酸，其次是正十四碳酸、正十五酸、香叶醇。由于任何一种昆虫的性诱剂、性外激素或抑制剂均能引起强烈的电生理反应，所以仅仅根据 EAG 反应值并不能完全推断出供试气味物质的诱蛾活性（赵成华等，1995；Fan *et al.*，2003；Yan *et al.*，2006；黄毅等，2009）。根据香根草对二化螟雌蛾具有很强的诱集产卵作用这一前期研究基础（陈先茂等，2007），本研究利用风洞技术进一步测试香根草挥发性物质中的 16 种化合物标样对二化螟雌蛾定向行为的影响，结果表明正十四碳酸、单棕榈酸甘油、胆固醇、柠檬醛、正十五酸以及邻苯二甲酸二异辛酯对二化螟雌蛾有较好的引诱效果，且引诱效果均高于香根草提取物。同时，不同配比的香根草混合物中以胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸=33：24：11 的混合物引诱效果最佳，邻苯二甲酸二异辛脂：柠檬醛：单棕榈酸甘油=130：48：1 和胆固醇：柠檬醛：正十四碳酸：单棕榈酸甘油=66：48：22：1 的引诱效果次之，之后是柠檬醛 ：单棕榈酸甘油=48：1 的混合物。这些配比的香根草混合物均能引起二化螟雌蛾的定向行为反应，表明由香根草挥发物化合物标样配制而成的上述混合物在田间调节二化螟雌蛾定向行为上具有一定的应用潜力。

植食性昆虫在寻找寄主阶段主要通过嗅觉寻找寄主植物，而环境中由植物释放的不同浓度不同挥发物构成的植物气味化学指纹图是昆虫识别寄主的关键（Turlings *et al.*，1990；Vison and Williams，1991；杜永均和严福顺，1994；娄永根和程家安，2000）。本文依照香根草挥发性物质物中各组分的相对含量以一定比例配制不同挥发物单品的混合物，结果发现胆固醇、柠檬醛、正十四碳酸、邻苯二甲酸二异辛脂、单棕榈酸甘油这些化合物标样以一定比例配制而成的混合物在室内对二化螟雌蛾均具有一定引诱效果。开发昆虫植物源行为调节剂，需要将植物挥发性物质的室内生测结果和大量的田间验证试验相结合，本研究虽然初步完成了二化螟雌蛾对香根草挥发性物质的室内生测试验并取得了一定成果，但后续田间验证试验还需大量工作的开展，而将研究成果应用于实践也将有一段距离。因此，本研究结果为下一步开发二化螟雌蛾植物源引诱

剂提供了重要参考。

参考文献 (References)

Chen HC, Shen QC, Lou YG, Cheng JA, 2004. Effect of rice volatiles on the larvae orientational behavior of the striped stem borer (*Chilo suppressalis*). *Chinese Journal of Rice Science*, 18(5): 473–475. [陈华才, 沈群超, 娄永根, 程家安, 2004. 水稻挥发物对二化螟幼虫趋性行为的影响. 中国水稻科学, 18(5): 473–475.]

Chen HC, Lou YG, Cheng JA, 2002. Selection responses of *Cotesia chilonis*, a larval parasitoid of the rice striped stem borer *Chilo suppressalis*, to volatile compounds from its host and host-plants. *Acta Entomologica Sinica*, 45(5): 617–622. [陈华才, 娄永根, 程家安, 2002. 二化螟绒茧蜂对二化螟及其寄主植物挥发物的趋性反应. 昆虫学报, 45(5): 617–622.]

Chen XM, Peng CR, Yao FX, Guan XJ, Wang HL, Deng GQ, 2007. Study on technique and effect of vetiver for trapping and killing rice borer. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 19(12): 51–52. [陈先茂, 彭春瑞, 姚锋先, 关贤交, 王华伶, 邓国强, 2007. 利用香根草诱杀水稻螟虫的技术及效果研究. 江西农业学报, 19(12): 51–52.]

Du JW, 2001. Plant-insect chemical communication and its behavior control. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 27(3): 193–200. [杜家纬, 2001. 植物–昆虫间的化学通讯及其行为控制. 植物生理学报, 27(3): 193–200.]

Du YJ, Yan FS, 1994. The role of plant volatiles in tritrophic interactions among phytophagous insects, their host plants and natural enemies. *Acta Entomologica Sinica*, 37(2): 233–249. [杜永均, 严福顺, 1994. 植物挥发性次生物质在植食性昆虫、寄生植物和昆虫天敌关系中的作用机理. 昆虫学报, 37(2): 233–249.]

Fan H, Li JQ, Jin YJ, 2003. Electrophysiological and behavioral responses of adult *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) to volatile components of host plant. *Forestry Studies in China*, 5(1): 25–29.

Fan H, Jin YJ, Li JQ, Chen HJ, 2004. Advances on plant volatile semiochemicals attracting herbivorous insects. *Journal of Beijing Forestry University*, 26(3): 76–81. [樊慧, 金幼菊, 李继泉, 陈华君, 2004. 引诱植食性昆虫的植物挥发性信息化合物的研究进展.北京林业大学学报, 26(3): 76–81.]

Glaser JA, Matten SR, 2003. Sustainability of insect resistance management strategies for transgenic Bt corn. *Biotechnology Advances*, 22(1/2): 45–69.

Huang JH, Li HS, Yang J, Chen YF, Liu YH, Li N, Nie CR, 2004. Chemical components of *Vetiveria zizanioides* volatiles. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(1): 170–172. [黄京华, 黎华寿, 杨军, 陈玉芬, 刘迎湖, 黎宁, 聂呈荣, 2004. 香根草挥发物化学成分的分析. 应用生态学报, 15(1): 170–172.]

Huang Y, Han BY, Tang Q, Xu H, Wang YG, 2009. EAG and behavioural responses of *Apanteles* sp. (Hymenoptera: Braconidae) parasitizing *Teageom etrids* by volatiles from tea shoots. *Acta Entomologica Sinica*, 52(11): 1191–1198. [黄毅, 韩宝瑜, 唐茜, 徐欢, 汪云刚, 2009. 茶尺蠖绒茧蜂对茶梢挥发物的 EAG 和行为反应. 昆虫学报, 52(11): 1191–1198.]

Jiao XG, Xuan WD, Sheng CF, 2006. Mating behaviour of the rice stem borer, *Chilo suppressalis* (Walker). *Acta Ecologica Sinica*, 26(4): 1111–1115. [焦晓国, 宣维健, 盛承发, 2006. 水稻二化螟的交配行为. 生态学报, 26(4): 1111–1115.]

Kumar H, Kumar V, 2004. Tomato expressing Cry1A(b) insecticidal protein from *Bacillus thuringiensis* protected against tomato fruit borer, *Helicoverpa armigera* damage in the laboratory, greenhouse and field. *Crop Protection*, 23: 135–139.

Li JJ, Huang CH, Zhou L, Yan FM, 2014. The windtunnel technique. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 591–596. [李静静, 黄翠虹, 周琳, 闫凤鸣, 2014. 风洞技术. 应用昆虫学报, 51(2): 591–596.]

Lv ZX, Zheng XS, Gao GC, Xu HX, Yang YJ, Chen GH, Zhang FC, Yao XM, 2012. A compound combination and lure trapping *Chilo suppressalis* female moth. 33. Inventor, CN 102428916 A. 2012-05-02. [吕仲贤, 郑许松, 高广春, 徐红星, 杨亚军, 陈桂华, 张发成, 姚小明, 2012. 一种诱集二化螟雌蛾的化合物组合及其诱芯. 33. 发明型, CN 102428916 A. 2012-05-02.]

Ling N, Tang JG, Yin YS, Zhang F, An YL, 2014. Electroantennogram responses of *Clostera anastomosis* adults to plant volatile of *Populus nigra*. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 30(3): 514–519. [凌娜, 唐进根, 殷玉生, 张帆, 安榆林, 2014. 分月扇舟蛾成虫对黑杨挥发物的触角电位反应. 江苏农业学报, 30(3): 514–519.]

Lou YG, Cheng JA, 2000. Herbivore-induced plant volatiles: primary characteristics, ecological functions and its release mechanism. *Acta Ecologica Sinica*, 20(6): 1097–1106. [娄永根, 程家安, 2000. 虫害诱导的植物挥发物: 基本特性、生态学功能及释放机制. 生态学报, 20(6): 1097–1106.]

Sheng CF, Wang HT, Sheng SY, Gao LD, Xuan WJ, 2003. Pest status and loss assessment of crop damage caused by the rice borers, *Chilo suppressalis* and *Tryporyza incertulas* in China. *Entomological Knowledge*, 40(4): 289–294. [盛承发, 王红托, 盛世余, 高留德, 宣维健, 2003. 我国稻螟灾害的现状及损失估计. 昆虫知识, 40(4): 289–294.]

Shelton AM, Nault BA, 2004. Dead-end trap cropping: a technique to improve management of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Crop Protection*, 23(6): 497–503.

Shelton AM, Badenes-Perez FR, 2006. Concepts and applications of trap cropping in pest management. *Annual Review of Entomology*, 51: 285–308.

Sui XL, Xu ZC, Tian CM, 2012. Analysis of *Prunus armeniaca* volatiles and the electroantennogram responses induced by them in *Lcolytus rugulosus*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 980–985. [隋学良, 许志春, 田呈明, 2012. 杏树挥发物成分的鉴定及其对杏树皱小蠹的触角电位的测定. 应用昆虫学报, 49(4): 980–985.]

Turlings TC, Tumlinson JH, Lewis WJ, 1990. Exploitation of herbivore-induced plant odors by host-seeking parasitic wasps. *Science*, 250(4985): 1251 –1253.

Vison SB, Williams HJ, 1991. Host selection behavior of *Campopletis sonorensis*: A model system. *Biological Control*, 1: 107 –117.

Wang BX, Yang H, Yang W, Yang CP, Cai Y, Zhou M, He XH, 2014. EAG and behavioral responses of *Batocera lineolata* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae) to ten plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 481–489. [王保新, 杨桦, 杨伟, 杨春平, 蔡艳, 周梦, 何晓华, 2014. 云斑天牛对 10 种植物挥发物的 EAG 和行为反应. 应用昆虫学报, 51(2): 481–489.]

Wu M, Zhang ZZ, Gao CF, 2013. Methods of insecticides resistance monitoring of the stripedstem borer, *Chilo suppressalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 548–552. [吴敏, 张真真, 高聪芬, 2013. 水稻二化螟抗药性监测方法. 应用昆虫学报, 50(2): 548–552.]

Wang YY, Cui ZX, Liang GW, 2011. Studies on *Plutella xylostella* about the antennae potentiometer (EAG) and tendency by using plant volatiles of *Abelmoschus esculentus*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(2): 328–331. [王彦阳, 崔志新, 梁广文, 2011. 黄秋葵挥发油对小菜蛾的触角电位反应及趋性研究. 应用昆虫学报, 48(2): 328–331.]

Yan ZG, Yan YH, Kang L, Wang CZ, 2006. EAG responses of *Campoletis chlorideae* Uchida to plant volatiles and host pheromone gland compounds. *Acta Entomologica Sinica*, 49(1): 1–9. [颜增光, 阎云花, 康乐, 王琛柱, 2006. 棉铃虫齿唇姬蜂对植物挥发物和寄主性信息素腺体化合物的 EAG 反应. 昆虫学报, 49(1): 1–9.]

Zuo W, 2007. Co-effect of rice volatile and sex pheromone to the striped stem borer, *Chilo suppressalis* Walker. Master dissertation. Zhejiang: Zhejiang University. [左文, 2007. 水稻挥发物与二化螟性信息素对二化螟的协同作用. 硕士学位论文. 浙江: 浙江大学.]

Zheng XS, Xu HX, Chen GH, Wu JX, Lv ZX, 2009. Potential function of sudan grass and vetiver grass as trap crops for suppressing population of stripped stem borer, *Chilo suppressalis* in rice. *Chinese Journal of Biological Control*, 25(4): 299–303. [郑许松, 徐红星, 陈桂华, 吴降星, 吕仲贤, 2009. 苏丹草和香根草作为诱虫植物对稻田二化螟种群的抑制作用评估. 中国生物防治, 25(4) : 299–303.]

Zhou HC, Du JW, 2001. Wind tunnel technique in the study of insect chemical communication. *Entomological Knowledge*, 28(4): 267–272. [周弘春, 杜家纬, 2001. 风洞技术在昆虫化学通讯研究中的应用. 昆虫知识, 28(4): 267–272.]

Zhao CH, Wu DM, Yan YH, LI Q, 1995. Analysis of masson pine needle volatiles and their electroantennogram activity with masson pine caterpillar. *Scientia Silvae Sinicae*, 31(2): 125–131. [赵成华, 伍德明, 阎云花, 李群, 1995. 马尾松针叶中挥发性成分的鉴定及其对马尾松毛虫的触角电位反应. 林业科学, 31(2): 125–131.]