牧草盲蝽对七种寄主植物不同挥发物的 EAG 和行为反应*

孙 鹏** 迪丽努尔·艾麦提 苟长青 冯宏祖***

（塔里木大学，南疆特色果树高效优质栽培与深加工技术国家地方联合工程实验室，农业部阿拉尔作物有害生物科学观测实验站，塔里木大学南疆农业有害生物综合治理重点实验室，阿拉尔 843300）

摘 要 **【目的】** 研究牧草盲蝽 *Lygus pmtensis* 对寄主植物挥发物的 EAG 及趋向行为反应，为研发牧草盲蝽引诱剂或趋避剂策略提供科学依据。**【方法】** 利用固相微萃取方法收集 7 种寄主植物包括木地肤 *Kochia prostrata* (L.) Schrad.、灰绿藜 *Chenopodium glaucum*、花椰菜 *Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.、小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino、田旋花 *Convolvulus arvensis* L.、小藜 *Chenopodium serotinum* L.、番茄 *Lycopersicon esculentum* Mill.的挥发物，通过室内气相-质谱联用系统（GC-MS）进行挥发物的定性及定量分析，最终测定了 9 种候选特征挥发物的触角电位（EAG）反应和嗅觉趋向行为反应。**【结果】** 7 种寄主植物共鉴定到的化合物有 31 种，且种类和含量有较大差异，差异显著。9 种候选特征挥发物均能引起牧草盲蝽雌、雄成虫的 EAG 反应。其中牧草盲蝽雌、雄成虫对壬醛的 EAG 反应绝对值最大，雌、雄虫对不同植物挥发物质 EAG 反应相对值均有显著差异，且对同种化合物雌虫的反应相对值均大于雄虫的反应，乙酸顺式-3-己烯酯和壬醛引发的 EAG 反应值差异显著；趋向行为测定中，牧草盲蝽雌虫对壬醛、金合欢烯、α-蒎烯、1-石竹烯、乙酸顺式-3-己烯酯、2-甲基-1-醇的大部分浓度的行为反应差异显著，雄虫仅对 α-蒎烯、壬醛的部分浓度的行为反应差异显著。**【结论】** 7 种寄主植物的挥发物对牧草盲蝽雌、雄成虫具有不同 EAG 和趋向行为反应影响，候选气味化合物可以作为设计牧草盲蝽引诱剂组分进行田间害虫防控实践。

关键词 牧草盲蝽；寄主植物；挥发物；EAG 反应；趋向行为

EAG and olfactory behavioral responses of *Lygus pmtensis* to volatiles from seven host plants species

SUN Peng** Dilinuer Aimaiti GOU Chang-Qing FENG Hong-Zu***

(Tarim Uuiversity, The National and Local Joint Engineering Laboratory of High Efficiency and Superior-Quality Cultivation and Fruit Deep Processing Technology of Characteristic Fruit Trees in South Xinjiang, Scientific Observing and Experimental Station of Crop Pests in Alar, Ministry of Agriculture, P. R. China.Southern Xinjiang Key Laboratory of IPM of Tarim Uuiversity, Alar 843300, China)

Abstract **[Objectives]** To identify potential attractants, or repellents, for use in the IPM of *Lygus pmtensis*. **[Methods]** The EAG and behavioral responses of *L. pmtensis* to volatiles from seven different host plants (*Kochia prostrata* (L.) Schrad., *Chenopodium glaucum*, *Brassica oleracea* L. *var. botrytis* L., *Convolvulus arvensis* L., *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino, *Chenopodium serotinum* L., *Lycopersicon esculentum* Mill.) were measured and compared. Volatile organic compounds from the different host plants were sampled using SPEM and then identified and quantified with GC-MS. EAG and behavioral responses to 9 candidate volatiles from different host plants were then measured and compared. **[Results]** Thirty-one distinct volatile compounds were isolated from the seven host plants. There was a significant difference in volatiles between species. All 9 of the candidate volatiles tested elicited EAG responses; the strongest EAG response was elicited by

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（31560513）

**第一作者 First author，E-mail：suns152930@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fhzzky@163.com

收稿日期 Received：2018-06-25；接受日期 Accepted：2018-08-31

Nonanal. There were significant differences in the EAG responses of males and females to the volatile compounds tested; females responded to 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)- and Nonanal more strongly than males. Females also had significantly different behavioral responses to Nonanal, 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)-, α-Pinene, Caryophyllene, 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-, 1-Hexanol, 2-ethyl. **[Conclusion]** Male and female *L. pmtensis* have different EAG and behavioral responses to volatiles from different host plants. Some potential attractants for the control of *L. pmtensis* were identified.

Key words *Lygus pmtensis*; host plants; volatiles; EAG response; taxis behavior

牧草盲蝽 *Lygus pmtensis* 属半翅目，盲蝽科，为害玉米、小麦、棉花、豆类、蔬菜等作物。成、若虫刺吸嫩芽幼叶及叶片汁液，幼嫩组织受害后初现黑褐色小点，后变黄枯萎，展叶后出现穿孔、破裂或皱缩变黄。其危害隐蔽，很容易被忽视，严重影响植株的正常发育，对农作物的产量和品质造成了严重的影响。自 1997 年我国开始大面积商业化种植转 Bt 基因棉花而来，棉田中广谱性杀虫剂的使用量大幅度的减少，使原本在防治棉铃虫等鳞翅目害虫时兼治的刺吸式害虫在棉田内暴发成灾，造成了严重的产量损失。新疆是我国的植棉大省，自 2000 年以来牧草盲蝽逐渐上升成为棉田中的主要害虫，并波及了包括枣、苜蓿、苹果等多种重要作物（Lu *et al.*，2008；陆宴辉等，2008a）。

植物挥发物在植食性昆虫的寄主选择过程中发挥着重要的作用（杜永均和严福顺，1994；娄永根和程家安，2000；杜家纬，2001；严善春等，2003；樊慧等，2004；蔡晓明等，2008；戴建青等，2010；耿辉辉，2012）。研究表明马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 对马铃薯叶片气味的定向选择行为，只要有马铃薯叶片气味的存在，马铃薯甲虫就会产生寄主定向行为（Schoonhoven *et al.*，1998）；果实自然释放的挥发性物质对桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel 雌虫有明显的趋性，芒果、番木瓜的果实对雌蝇有显著的产卵引诱作用（胡菡青等，2007）。植物挥发性物质对盲蝽科昆虫的行为调控方面的研究有所增多，国外研究的中点多集中于美洲牧草盲蝽 *Lygus lineolaris* Knight 和豆荚草盲蝽 *Lygus hesperus* 等（Snodgrass *et al.*，2009），我国主要对近几年呈灾变趋势的绿盲蝽 *Apolygus lucorum*（Meyer-Dür.）也进行研究。张立娟等（2010）发现绿盲蝽雌虫对寄主植物挥发物表现敏感，而雄虫反应迟钝。相对于机械损伤和被不同虫口密度的绿盲蝽雌虫刺吸后的具花枣枝而言，健康具花枣枝对绿盲蝽雌虫的引诱作用最强；随着虫口密度的不断增强，接虫具花枣枝对绿盲蝽雌虫会产生明显的驱避作用。丁红建等（1995）发现胡萝卜花的气味对 1-2 龄棉铃虫 *Helicoverpa armigera*（Hübner）成虫有明显的取食引诱作用。

近年来，随着行为测定、化学分析、电生理技术的快速发展，植物挥发性物质和植食性昆虫之间的互作关系成为研究的热点。电生理技术在昆虫感受方面的运用和发展，使得人们能在分子水平上对昆虫的化学感受机理进行研究。自 Schneider 首次利用电生理学技术完整的记录了整个触角对刺激所产生的综合电位即昆虫触角电位（EAG）起，EAG 技术已被广泛的用于化学生态学、昆虫与植物关系领域的研究。该技术可以鉴定昆虫对化学信号的感受通道，因而可以从一系列的化学物质中筛选出昆虫有生理反应的部分化合物。陈展册等（2010）用 9 种性信息素类似物和 12 种植物挥发物对绿盲蝽进行了触角电位（EAG）反应，结果表明绿盲蝽对反-2-己烯醛的 EAG 反应最强，雌虫对反-2-己烯醇、反-2-己烯醛、顺-3-己烯醇等绿叶气味物质的 EAG 反应相对高于萜类化合物的反应。雄虫对反-2-丁酸乙烯酯的反应比雌虫显著高，而对 β-蒎烯的反应则比雌虫显著低。

前人关于牧草盲蝽的发生危害特点和防治技术进行了一些研究，其中阐明了牧草盲蝽在不同地区及不同寄主上的危害症状、发生规律等生物学特性（李号宾等，2007），但是对于牧草盲蝽与不同寄主间的互作关系及作用机理方面还

未见报道。鉴于如上陈述，本文定性分析了牧草盲蝽 7 种寄主植物的挥发性化学物质，并研究了牧草盲蝽对 7 种寄主植物挥发性化学物质的 EAG 和趋向行为反应，以期对牧草盲蝽与不同寄主间的互作关系进行初步探究，并为牧草盲蝽生态调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试植物

参考曹娜等(2017)并根据本人前期试验(孙鹏等，2017）结果，选取 7 种供试植物，包括木地肤 *Kochia prostrata* (L.) Schrad.、灰绿藜 *Chenopodium glaucum*、花椰菜 *Brassica oleracea* L. *var. botrytis* L.、小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino、田旋花 *Convolvulus arvensis* L.、小藜 *Chenopodium serotinum* L.、番茄 *Lycopersicon esculentum* Mill.。其中木地肤、灰绿藜、小藜、田旋花均由田间移栽，罩 60 目尼龙纱网种植；小白菜、花椰菜、番茄则在塔里木大学园艺实验站采集。

1.2 供试昆虫

牧草盲蝽成虫于 2016 年采自新疆第一师十二团农业科技产业园区周边杂草地中，带回实验室置于 50 cm×50 cm×50 cm 自制养虫网内并用新鲜四季豆饲养，饲养方法参考陆宴辉等（2008b）。

1.3 植物挥发物收集及检测

1.3.1 固相微萃取（**SPME**）法收集寄主植物挥发物 于实验前采取的新鲜离体植株，伤口部分用沾水的棉球包裹，防止伤口产生的挥发物散发，并迅速带回实验室。将带回实验室的寄主植物植株放入 500 mL 的广口瓶中，瓶口用硅胶塞塞紧。将萃取头放在 250 ℃的 GC 进样口活化 1 h，用铁架台固定好 SPME 的手柄，缓缓将萃取头推出，插入广口瓶中，进行挥发物的提取，提取时间为 40 min。

1.3.2 寄主植物挥发物的鉴定分析方法 对于木地肤、灰绿藜、小藜、田旋花、番茄，将收集到寄主植物挥发物的萃取头直接在 250 ℃的 GC 进样口内进行热解析，解析时间为 3 min。GC-MS 工作条件参照吴志毅（2006），色谱柱采用 HP-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm ID，0.25 μm film thickness），无分流进样；柱温采取程序升温：40 ℃(2 min)，6 ℃/min 至 220 ℃(2 min)。以 99.999%高纯氦气作为载气，柱气流量 1.0 mL/min。气谱-质谱接口温度 280 ℃，EI 离子源，电离能 70 eV，全扫描。

对于小白菜和花椰菜，将收集到寄主植物挥发物的萃取头直接在 250 ℃的 GC 进样口内进行热解析，解析时间为 5 min。GC-MS 工作条件参照戴建青等（2011），色谱柱采用 HP-5MS 毛细管柱，检测室温度 250 ℃，无分流进样；柱温采取程序升温：50 ℃（2 min），2 ℃/min 至 120 ℃，10 ℃/min 至 160 ℃，20 ℃/min 至 220 ℃（5 min）。以 99.999%高纯氦气作为载气，柱气流量 1.0 mL/min。气谱-质谱接口温度 280 ℃，EI 离子源，扫描范围 30-500 m/z，离子源和四级杆温度分别为 250 ℃和 150 ℃，扫描频率为 5 次/s。

采用 NIST2005 谱图数据库并参考相关文献对采集气味样品进行定性鉴定，随后购置气味化合物标样（表 1）。

1.4 触角电位（EAG）测定

触角电位仪由荷兰 Syntech 公司生产，测定所需软件也由该公司提供，测定方法参照张俊宇等（2016）。用指形管套取一只 6-10 日龄的牧草盲蝽雌成虫，然后放在冰上冻晕。将其放在体视显微镜下，腹面向上，用昆虫针按住其腹部，用双面刀片沿牧草盲蝽前足腿节中部迅速向下切去，切下后观察头部分开处的组织膜是否有组织液流出，如果没有则确认膜完好无损，可以进一步试验；如果组织膜破裂则不能使用，需重新准备。之后将两根触角尖端切去很小一部分，然后用事先准备好的参考电极（毛细管中浸有 0.9%的 NaCl 溶液）对准切口处的组织膜轻轻地插入，插入时稍靠下部且不能插入太深，当感觉

表 1　试验中的标准化合物
Table 1　The standard chemical samples in the experiment

化合物 Compound	CAS 号 CAS number	纯度 Purity (%)	来源 Producer
α-蒎烯 α-Pinene	3856-25-5	98	Sigma-Aldrich
1-石竹烯 Caryophyllene	87-44-5	98	Sigma-Aldrich
金合欢烯 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)-	18794-84-8	97	Sigma-Aldrich
乙酸顺式-3-己烯酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	3681-71-8	98	上海亚亦生物有限公司
2-乙基-1-己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	104-76-7	98	上海亚亦生物有限公司
壬醛 Nonanal	124-19-6	98	Sigma-Aldrich
2,6-二叔丁基对甲苯酚 Butylated Hydroxytoluene	128-37-0	96	上海亚亦生物有限公司
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	84-74-2	97	上海亚亦生物有限公司
结晶紫内酯 1(3H)-Isobenzofuranone, 6-(dimethylamino)-3,3-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-	1552-42-7	96	上海亚亦生物有限公司
3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol	544-12-7	98	Sigma-Aldrich

到轻微的阻力便停止，将带有头部的参比电极连接到 EAG 微操作台上，先调节微操作台上的旋钮并用昆虫针辅助将一根触角拨入记录电极的毛细管中，再用昆虫针将另一根触角也轻轻拨入毛细管中连通。两个电极通过银丝连接，这样整个 EAG 系统（包括 IDAC-2 双通道 USB 接口信号采集控制器、探头信号放大器、MP-15 显微操作台）便连通了。

设石蜡油为空白对照，以叶醇为内参，分别将内参和气味标样配制浓度为 100 μL/mL，测试剂量为 10 μL。

待 EAG 信号稳定以后，开始记录触角电位反应值。每头牧草盲蝽先测试对照刺激，然后测试参照刺激，再随机测试其余标准化合物，最后再分别测试参照和对照刺激。将巴斯德滴管的尖端通过管壁上的小孔插入到钢管中，刺激时间为 0.5 s，两次刺激的间隔时间为 30 s，重复 6 次。EAG 仪器通过 IDAC-2 信号采集器与计算机相连。触角距离钢管口大约 1 mm，150 mL/min 的气流经过活性碳和加湿瓶进入钢管，然后携带刺激源吹向触角，刺激气流为 20 mL/min。试验过程中环境温度为（25±2）℃，湿度 60%-70%。通过以下公式：R=（挥发物反应值-对照反应值）/（参照反应值-对照反应值），R 为挥发物的 EAG 反应相对值。采用 SPSS22.0 统计软件的 Duncan's 新复极差法比较候选挥发物 EAG 反应绝对值差异。

1.5　嗅觉趋向行为测定

嗅觉趋向行为测定参照潘洪生（2013），并稍作改进。利用 Y 型嗅觉仪测定牧草盲蝽对 10 种寄主植物挥发物的趋向行为，Y 型嗅觉仪由内径为 3 cm 的无色透明玻璃制成，其基部及两臂长均为 15 cm，两臂夹角 60°。基部与牧草盲蝽成虫的释放管相连接，两臂用木塞塞紧，用玻璃管连接气味源。用移液枪吸取 10 μL 含有单组分纯品的液体石蜡滴加到对折的滤纸条（0.5 cm×5 cm）上，放置 30 s 后把滤纸条放入到锥形瓶中作为气味源，以液体石蜡为溶剂和对照。用 QC-1B 大气采样仪作为气流动力系统，气味源连接真空泵，气流进入味源前，经过活性碳过滤，以及蒸馏水加湿，气体流速 500 mL/min。将单头成虫释放至 Y 型管基部，当牧草盲蝽成虫处于基部管长 1/2 处开始计时，观察牧草盲蝽成虫 5 min 内的行为反应。评判标准如下：若成虫越过某臂 3 cm 处且在此区域停留 5 s 以上时，则记为试虫对该臂所连接的气味源做出选择；若成虫放入后 5 min 内未做出选择，则记为不反应。每头成虫只测试一次，每测试 10 头时交换左右两臂位置，测试 10 头时交换气体来向并更换 Y 型

管，测试 20 头时更换气味源内的植物材料。每组处理测试牧草盲蝽雌雄成虫各 60 头，牧草盲蝽成虫饥饿 5 h 后用于试验。试验在（26±1）℃下进行。每天测试完成后用丙酮清洗 Y 型管、洗气瓶与连接胶管。用 χ^2 检验牧草盲蝽成虫在两个味源间选择是否呈假设 H_0 为 50∶50 的理论分布，计算 χ^2 值和相应的显著性水平 P 值。

2 结果与分析

2.1 植物挥发物鉴定与分析

2.1.1 不同寄主植物挥发性物质定性分析 采用 GC-MS 联用技术对提取物进行分离测定，结合计算机检索技术对分离的化合物进行鉴定，结果见图 1。从图 1 可以看出，7 种牧草盲蝽寄

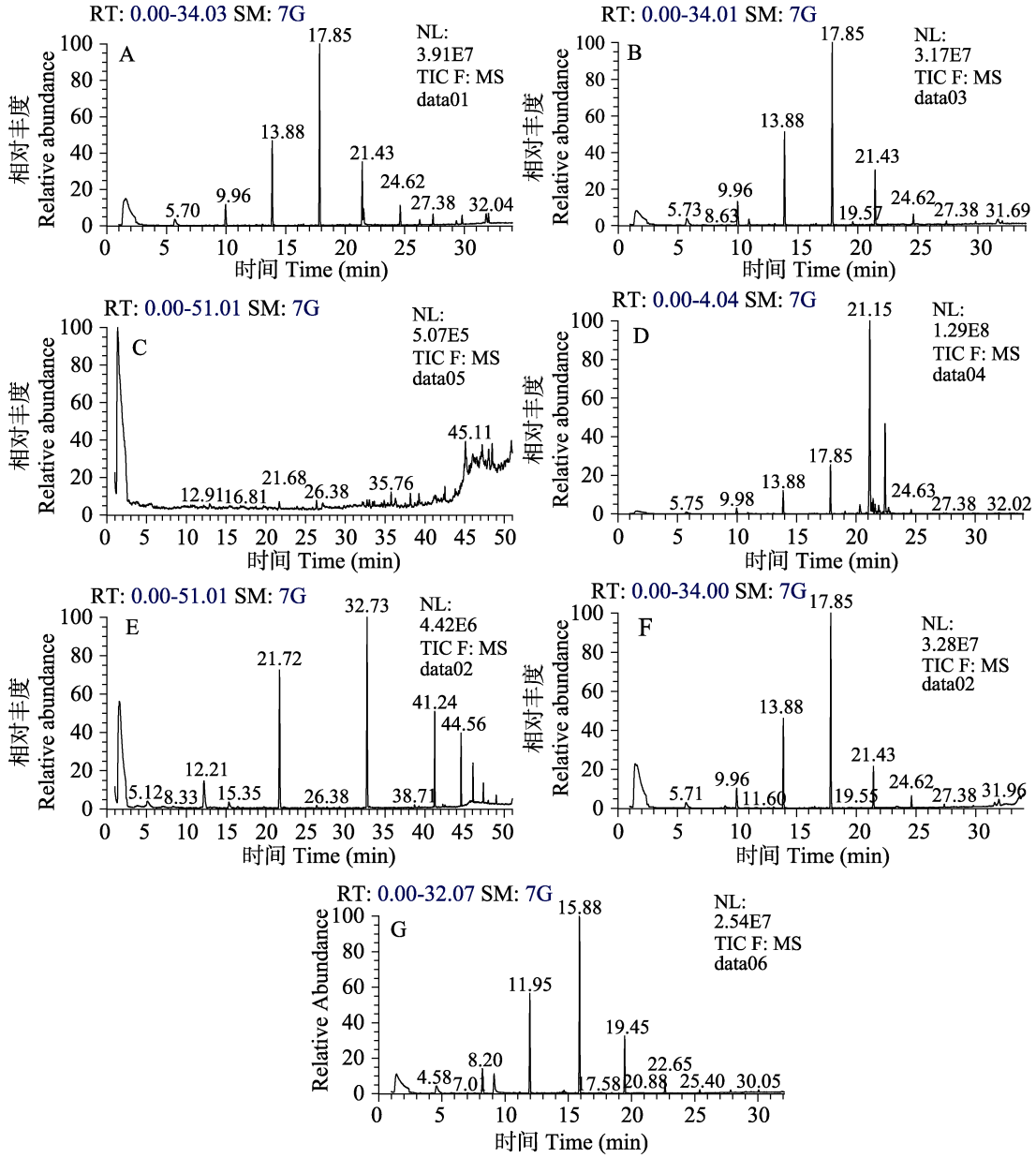

图 1 7 种寄主植物释放的挥发物 GC-MS 检测图谱

Fig. 1 GC-MS chromatograms of volatiles in 7 host plants

A. 木地肤 *Kochia prostrata* (L.) Schrad.；B. 灰绿藜 *Chenopodium glaucum*；C. 花椰菜 *Brassica oleracea* L. *var. botrytis* L.；D. 田旋花 *Convolvulus arvensis* L.；E. 小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino；F. 小藜 *Chenopodium serotinum* L.；G. 番茄 *Lycopersicon esculentum* Mill. 下图同。The same below.

主植物均能分离出大量的挥发性化学信息化合物。鉴定出的化合物种类共有 31 种，其中灰绿藜鉴定出的化合物种类最多，有 9 种；其次是番茄，有 8 种；小藜和小白菜最少，为 5 种；其他如木地肤、花椰菜和番茄各 6 种。在所鉴定到的化合物中，烷烃类和酯类最多，各 9 种；其次是萜烯类 5 种；醇类 4 种，醛类 2 种，酮、酚各 1 种。在 7 种寄主植物中，十二烷在灰绿藜、花椰菜、田旋花、小白菜中均有发现；乙酸顺式-3-己烯酯、四十四烷、α-蒎烯为 3 种植物共有；2-乙基-1-己醇、壬醛、结晶紫内酯、1-石竹烯、二十七烷均在两种不同植物中发现；剩余挥发性化合物均为各寄主植物所特有。

2.1.2　不同寄主植物挥发性物质定量分析　GC-MS 用面积归一化法计算各组分的百分比含量，如表 2 所示。分析结果表明，1-石竹烯在田旋花中的相对含量达到 49.2%，金合欢烯在田旋花中的相对含量为 4.79%；乙酸顺式-3-己烯酯在番茄中的相对含量为 8.71%；邻苯二甲酸二异丁酯在花椰菜中的相对含量为 8.44%；剩余所鉴定出的化合物在各自寄主植物中的相对含量均小于 3%，属微量水平。

表 2　7 种寄主植物释放的挥发物种类及相对含量

Table 2　The name and content list of volatile of different host plants

化合物 Volatile compound	相对含量（%）Relative content (%)						
	A	B	C	D	E	F	G
2-乙基-1-己醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	0.09	0.2	–	–	–	–	–
壬醛 Nonanal	0.04	0.04	–	–	–	–	–
结晶紫内酯 1(3H)-Isobenzofuranone, 6-(dimethylamino)-3,3-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-	0.26	–	–	–	0.19	–	–
十九烷 Nonadecane	0.29	–	–	–	–	–	–
十五烷 Pentadecane	0.14	–	–	–	–	–	–
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	0.33	–	–	–	–	–	–
乙酸顺式-3-己烯酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	–	1.93	–	0.41	–	–	8.71
四十四烷 Tetratetracontane	–	0.15	0.69	-	–	–	0.09
1-石竹烯 Caryophyllene	–	0.13	–	49.32	–	–	–
α-蒎烯 α-Pinene	–	0.07	–	0.21	-	1.00	–
十二烷 Dodecane	–	0.22	1.64	0.03	0.43	-	–
二十七烷 Heptacosane	–	0.84	–	–	–	0.20	–
3-己烯-1-醇 3-Hexen-1-ol	–	0.38	–	–	–	–	–
正癸醛 Decanal	–	-	1.32	–	–	–	–
β-蒎烯 β-Pinene	–	–	1.01	–	–	–	–
2,6-二叔丁基对甲苯酚 Butylated Hydroxytoluene	–	–	2.66	–	–	–	–
邻苯二甲酸二异丁酯 1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	–	–	8.44	–	–	–	–
反式-2-癸烯醇 2-Decen-1-ol, (*E*)-	–	–	–	0.05	–	–	–
Z-3-甲基丁酸-3-己烯酯 cis-3-Hexenyl isovalerate	–	–	–	0.07	–	–	–
alpha-柏木烯 1H-3a,7-Methanoazulene, 2,3,4,7,8,8a-hexahydro-3,6,8,8-tetramethyl-, [3R-(3à,3aá,7á,8aà)]-	–	–	–	2.37	–	–	–
金合欢烯 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (*E*)-	–	–	–	4.79	–	–	–
螺内酯 Spironolactone	–	–	–	–	0.16	–	–
硬脂酰胺 Octadecanamide	–	–	–	–	2.04	–	–

续表 2（**Table 2 continued**）

化合物 Volatile compound	相对含量（%）Relative content (%)						
	A	B	C	D	E	F	G
十四烷 Tetradecane	–	–	–	–	0.27	-	–
十七烷 Heptadecane	–	–	–	–	–	0.08	–
三十四烷 Tetratriacontane	–	–	–	–	–	2.29	–
二十八烷 Octacosane	–	–	–	–	–	0.14	–
beta-紫罗兰酮 3-Buten-2-one,4-(2,6,6-trimethyl-1-cyclohexen-1-yl)-	–	–	–	–	–	–	0.08
Z-3-甲基丁酸-3-己烯酯 cis-3-Hexenyl isovalerate	–	–	–	–	–	–	1.40
(*Z*)-丁酸-3-己烯酯 Butanoic acid, 3-hexenyl ester, (*Z*)-	–	–	–	–	–	–	0.18
(*E*)-4-己烯-1-醇 4-Hexen-1-ol, (*E*)-	–	–	–	–	–	–	0.44

A. 木地肤 *Kochia prostrata* (L.) Schrad.；B. 灰绿藜 *Chenopodium glaucum*；C. 花椰菜 *Brassica oleracea* L. *var. botrytis* L.；D. 田旋花 *Convolvulus arvensis* L.；E. 小白菜 *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* Makino；F. 小藜 *Chenopodium serotinum* L.；G. 番茄 *Lycopersicon esculentum* Mill.

– 表示未检测到。– indicates negative result.

2.2 牧草盲蝽对寄主植物挥发物气味标样的 EAG 反应

从图 2 可以看出，牧草盲蝽成虫对壬醛的 EAG 反应相对值最高，对结晶紫内酯的 EAG 反应相对值最低。雌虫对这些化合物的 EAG 反应相对值大小依次为：壬醛＞金合欢烯＞α-蒎烯＞1-石竹烯＞乙酸顺式-3-己烯酯＞2,6-二叔丁基对甲苯酚＞邻苯二甲酸二丁酯＞2-甲基-1-醇＞结晶紫内酯；雄虫的 EAG 反应相对值大小依次为：壬醛＞α-蒎烯＞金合欢烯＞1-石竹烯＞2,6-二叔丁基对甲苯酚＞邻苯二甲酸二丁酯＞2-甲基-1-醇＞乙酸顺式-3-己烯酯＞结晶紫内酯。雌、雄虫对不同植物挥发物质 EAG 反应相对值经 Duncan's 新复极差法检验均有显著差异（P<0.05）（图 2）。对同种化合物雌虫的反应相对值均大于雄虫的反应，但只有乙酸顺式-3-己烯酯和壬醛引发的 EAG 反应值，经独立 t-检验，有显著差异（P<0.05）。

2.3 牧草盲蝽对寄主植物挥发物气味标样的趋向行为反应

采用 Y 型嗅觉仪测定了牧草盲蝽雌、雄成虫对壬醛、金合欢烯、α-蒎烯、1-石竹烯、乙酸顺式-3-己烯酯、2,6-二叔丁基对甲苯酚、邻苯二甲酸二丁酯、2-甲基-1-醇和结晶紫内酯共 9 种化合物 10^{-2}、10^{-3}、10^{-4}（V/V）3 个浓度的趋向行为反应。总体来看，雌、雄成虫在同一化合物

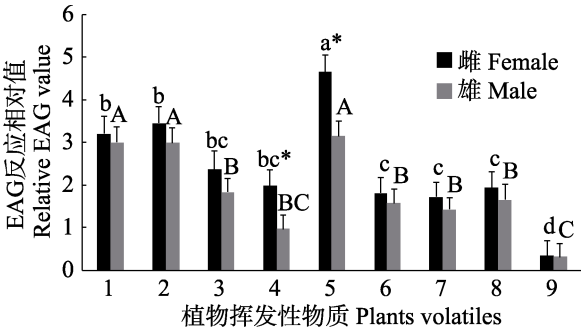

图 2 牧草盲蝽对 9 种寄主植物挥发性物质的触角电位反应

Fig. 2 EAG responses of *Lygus pmtensis* to 9 host plants volatiles

1: α-蒎烯 Copaene; 2: 金合欢烯 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (*E*)-; 3: 1-石竹烯 Caryophyllene; 4: 乙酸顺式-3-己烯酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (*Z*)-; 5: 壬醛 Nonanal; 6: 邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate; 7: 2-甲基-1-醇 1-Hexanol, 2-ethyl-; 8: 2,6-二叔丁基对甲苯酚 Butylated Hydroxytoluene; 9: 结晶紫内酯 1(3H)-Isobenzofuranone, 6-(dimethylamino)-3,3-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-. 柱上标有不同大写字母和小写字母分别表示牧草盲蝽雌虫和雄虫对不同刺激物的触角电位相对值之间差异显著（Duncan's 新复极差比较，P<0.05）。*表示雌、雄虫对同一化合物的 EAG 反应相对值达到显著差异水平（t-检验，P<0.05）。

Histograms with different capital letters and small letters indicate significant different between *Lygus pratensis* females and males to different stimuli at 0.05 level by Duncan's multiple range test, respectively. Asterisks above bars indicate that the relative values of EAG responses of males and females to the same compound reaches a significant difference level at 0.05 leve by t-test.

下，不同浓度的引诱作用呈倒“ V ”型，且大体上挥发性物质对雌虫的引诱作用均明显高于雄虫。X^2 检验结果表明（表 3，表 4），牧草盲蝽雌虫对壬醛、金合欢烯、α-蒎烯、1-石竹烯、乙酸顺式-3-己烯酯、2-甲基-1-醇的大部分浓度的行为反应差异显著（P<0.05），其中 1-石竹烯、壬醛浓度为 10^{-3}（V/V）时，达到极显著差异（P<0.01）；当 α-蒎烯浓度达到 10^{-3}，壬醛浓度达到 10^{-4} 时，牧草盲蝽雄虫的行为反应差异显著（P<0.05），当壬醛浓度达到 10^{-3} 时，牧草盲蝽雄虫的行为反应差异极显著（P<0.01），其余各浓度差异均不显著（P>0.05）。

表 3　牧草盲蝽雌虫对不同寄主植物挥发物质的行为反应

Table 3　Response of female adults of *Lygus pmtensis* to different host plants 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	显著性 Significantly
α-蒎烯 α-Pinene	10^{-2}	26.7	60.0	4.257	86.7	*
	10^{-3}	28.3	63.3	4.328	91.7	*
	10^{-4}	35.0	53.3	1.224	88.3	ns
1-石竹烯 Caryophyllene	10^{-2}	25.0	66.7	6.223	91.7	*
	10^{-3}	21.7	63.3	6.978	85.0	**
	10^{-4}	30.0	58.3	2.962	88.3	ns
乙酸顺式-3-己烯酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	10^{-2}	35.0	50.0	0.864	85.0	ns
	10^{-3}	23.3	60.0	5.500	91.7	*
	10^{-4}	33.3	50.0	1.100	83.3	ns
壬醛 Nonanal	10^{-2}	25.0	63.3	5.529	88.3	*
	10^{-3}	18.3	66.7	9.567	85.0	**
	10^{-4}	26.7	58.3	3.942	85.0	*
金合欢烯 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (*E*)-	10^{-2}	30.0	53.3	2.173	83.3	ns
	10^{-3}	26.7	60.0	4.257	86.7	*
	10^{-4}	28.3	51.7	2.307	80.0	ns
2-甲基-1-醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	10^{-2}	28.3	60.0	3.722	88.3	*
	10^{-3}	23.3	61.7	5.858	85.0	*
	10^{-4}	38.3	41.7	0.046	80.0	ns
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	10^{-2}	38.3	51.7	0.627	90.0	ns
	10^{-3}	25.0	56.7	4.183	81.7	*
	10^{-4}	38.3	45.0	0.175	83.3	ns
2，6-二叔丁基对甲苯酚 Butylated Hydroxytoluene	10^{-2}	36.7	45.0	0.281	81.7	ns
	10^{-3}	31.7	51.7	1.590	83.3	ns
	10^{-4}	36.7	43.3	0.185	80.0	ns
结晶紫内酯 1(3H)-Isobenzofuranone, 6-(dimethylamino)-3,3-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-	10^{-2}	33.3	48.3	0.916	81.7	ns
	10^{-3}	35.0	53.3	1.224	88.3	ns
	10^{-4}	31.7	50.0	1.373	81.7	ns

ns 表示差异不显著（P>0.05），*表示差异显著（P<0.05），**表示差异极显著（P<0.01）。下表同。

ns indicates no significantly different at 0.05 level; * indicates significantly different at 0.05 level; ** indicates extremely significantly different at 0.01 level. The same below.

表 4 牧草盲蝽雄虫对不同寄主植物挥发物质的行为反应

Table 4 Response of male adults of *Lygus pmtensis* to different host plants 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	显著性 Significantly
α-蒎烯 α-Pinene	10^{-2}	30.0	48.3	1.459	78.3	ns
	10^{-3}	25.0	53.3	3.537	78.3	*
	10^{-4}	38.3	50.0	0.493	88.3	ns
1-石竹烯 Caryophyllene	10^{-2}	35.0	48.3	0.702	88.3	ns
	10^{-3}	33.3	50.0	1.100	88.3	ns
	10^{-4}	28.3	50.0	2.047	78.3	ns
乙酸顺式-3-己烯酯 3-Hexen-1-ol, acetate, (Z)-	10^{-2}	36.7	46.7	0.394	88.3	ns
	10^{-3}	30.0	50.0	1.688	80.0	ns
	10^{-4}	26.7	51.7	2.738	78.3	ns
壬醛 Nonanal	10^{-2}	26.7	53.3	3.029	80.0	ns
	10^{-3}	20.0	58.3	6.617	78.3	**
	10^{-4}	23.3	53.3	4.105	76.7	*
金合欢烯 1,6,10-Dodecatriene, 7,11-dimethyl-3-methylene-, (E)-	10^{-2}	30.0	46.7	1.242	76.7	ns
	10^{-3}	31.7	48.3	1.167	80.0	ns
	10^{-4}	33.3	51.7	1.295	85.0	ns
2-甲基-1-醇 1-Hexanol, 2-ethyl-	10^{-2}	31.7	41.7	0.474	76.7	ns
	10^{-3}	33.3	48.3	0.916	81.7	ns
	10^{-4}	30.0	46.7	1.242	76.7	ns
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	10^{-2}	38.3	40.0	0.012	78.3	ns
	10^{-3}	40.0	46.7	0.165	86.7	ns
	10^{-4}	35.0	46.7	0.553	81.7	ns
2，6-二叔丁基对甲苯酚 Butylated Hydroxytoluene	10^{-2}	36.7	43.3	0.185	80.0	ns
	10^{-3}	31.7	45.0	0.792	76.7	ns
	10^{-4}	40.0	41.7	0.011	81.7	ns
结晶紫内酯 1(3H)-Isobenzofuranone, 6-(dimethylamino)-3,3-bis[4-(dimethylamino)phenyl]-	10^{-2}	33.3	46.7	0.745	80.0	ns
	10^{-3}	38.3	46.7	0.266	85.0	ns
	10^{-4}	33.3	43.3	0.444	76.7	ns

3 讨论

植物自然释放的挥发物通常指一类分子量小于 250，沸点小于 340 ℃，从植物地上部分（如叶、花和芽等）表面散发的多种微浓度的挥发性次生物质所组成的，包括醇、醛、酮、酯和萜类化合物在内的复杂混合物（莫圣书等，2006）。迄今为止，已鉴定出超过 90 科植物中的近 1 700 种挥发性化合物（Dudareva *et al.*, 2006）。这类化合物在植食性昆虫的寄主选择中起着重要作用。本试验中，7 种牧草盲蝽的寄主植物中共检测到 31 种信息化合物，其中，7 种寄主植物所鉴定到的信息化合物存在较大的种类上的差异，且即便含有同种化合物的寄主植物，其相对含量在各自寄主植物中也存在着不同。证明虽然 7 种供试植物均为牧草盲蝽的寄主植物，但其所含信息化合物并不完全相同，对牧草盲蝽引诱的成分也并不是单一成分，造成这些结果的原因可能是牧草盲蝽寄主植物的生长环境及长期进化的差异所导致。

触角电位和嗅觉行为测定时评价化学物质对昆虫生物活性的常用方法，前者测定的是昆虫触角对化学信号刺激所产生的电生理反应，后者测定的是昆虫对化学信号的嗅觉趋向行为表现

（闫凤鸣，2011）；通常情况下用触角电位技术初步筛选活性物质，用嗅觉仪评价这些活性物质的生物学作用。本试验采用触角电位及行为测定两种技术，比较了牧草盲蝽雌雄成虫对来自 7 种寄主植物不同挥发物的反应，发现牧草盲蝽的电生理反应和行为选择反应的测试结果存在着一定的差异，尽管壬醛和 α-蒎烯对牧草盲蝽在 EAG 反应和趋向行为反应中都表现出显著地引诱作用，但在 EAG 反应中，牧草盲蝽对金合欢烯、1-石竹烯、乙酸顺式-3-己烯酯均有较高的 EAG 反应值，却趋向行为反应中表现不显著。EAG 反应与行为反应结果不一致的现象在植食性昆虫中普遍存在（Wee *et al.*，2008）。Williams 等（2010）研究发现，豆荚草盲蝽雌、雄成虫对 α-蒎烯 EAG 反应较低，但行为反应明显；对正己醇电生理反应较高，但无明显行为趋性。

植食性昆虫主要通过嗅觉感受器感知植物挥发性物质。在本研究中 9 种挥发性物质中有大部分对牧草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个体在寻找寄主、繁殖后代等行为中所起的作用不同而导致，同时牧草盲蝽的触角感受器可能受性别的不同而存在一些差异，对气味的感受也会存在不同。

本研究从电生理和行为方面对 9 种牧草盲蝽寄主植物挥发物进行了研究，证明了壬醛、金合欢烯、α-蒎烯、1-石竹烯、乙酸顺式-3-己烯酯对牧草盲蝽的引诱作用，其中壬醛的引诱效果最好。由于牧草盲蝽取食植物的幼嫩组织，组织长大后才能发现明显被害状，这给牧草盲蝽的测报及防治工作都带来了不小的困难。而这些对牧草盲蝽具有去趋向行为调控作用的信息化合物是潜在的趋避剂或引诱剂的候选组分，可设计牧草盲蝽趋向行为调控剂用于牧草盲蝽的测报及防治，这也迎合了绿色植保的理念。当然本文只是初步对单体挥发物进行了相关研究，后续有必要开展不同挥发物复配对牧草盲蝽行为功能的验证及更进一步的田间试验以供绿色防治牧草盲蝽提供基础。

参考文献（References)

Cai XM, Sun XL, Gao Y, Chen ZM, 2008. Herbivore-induced plant volatiles: from induction to ecological functions. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 28(8): 3969–3980. [蔡晓明, 孙晓玲, 董文霞, 陈宗懋, 2008. 虫害诱导植物挥发物(HIPVs): 从诱导到生态功能. 生态学报, 28(8): 3969–3980.]

Cao N, Leng LY, Liu DC, Feng HZ, 2017. Host plants and diet selection of *Lygus pratenszs*. *China Cotton*, 44(3): 27–29, 38. [曹娜, 冷凌云, 刘端春, 冯宏祖, 2017. 牧草盲蝽的寄主种类及取食选择性研究. 中国棉花, 44(3): 27–29, 38.]

Chen ZC, Su Li, Ge Feng, Su JW, 2010. Electroantennogram responses of the green leaf bug *Lygus lucorum Meyer-Dur* to sex pheromone analogs and plant volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 53(1): 47–54. [陈展册, 苏丽, 戈峰, 苏建伟, 2010. 绿盲蝽对性信息素类似物和植物挥发物的触角电位反应. 昆虫学报, 53(1): 47–54.]

Dai JQ, Han SS, Du JW, 2010. Progress in studies on behavioural effect of semio chemicals of host plant to insects. *Journal of Environmental Entomology*, 32(3): 407–414. [戴建青, 韩诗畴, 杜家纬, 2010. 植物挥发性信息化学物质在昆虫寄主选择行为中的作用. 环境昆虫学报, 32(3): 407–414.]

Dai JQ, Li ZY, Chen HY, Feng Xia, Han SC, 2011. Isolation and identification of plant volatiles from 3 kind of cruciferous vegetables. *Guangdong Agricultural Sciences*, 38(22): 106–108. [戴建青, 李振宇, 陈焕瑜, 冯夏, 韩诗畴, 2011. 3 种十字花科蔬菜植物挥发性物质的分离鉴定. 广东农业科学, 38(22): 106–108.]

Ding HJ, Wu CH, Guo YY, 1995. The behavioral responses of adult cotton bollworm to volatiles of its host plants//Advances in the Biological Research of Plant Diseases and Insect Pests. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 193–200. [丁红建, 吴才宏, 郭予元, 1995. 棉铃虫成虫对寄主植物挥发性它感信息物的嗅觉行为研究//植物病虫害生物学研究进展. 北京: 中国农业科技出版社. 193–200.]

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): 233–250. [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): 233–250.]

Dudareva N, Negre F, Nagegowda DA, Orlova I, 2006. Plant volatiles: recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25: 417–440.

Fan Hui, 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.]

Geng HH, 2012. The behavior and its mechanisms of host preference of *Apolygus lucorum* (Meyer-Dur) to mungbean plants. Master thesis. Yangzhou: Yangzhou University. [耿辉辉, 2012. 绿盲蝽偏好绿豆的选择行为及其机制. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Hu HQ, Wei XX, Cai ZJ, Wu RJ, 2007. Study and application of host selectivity of *Bactrocera dorsalis* Hendel. *Jiangxi Agricultural Sciences*, 19(2): 68–71. [胡菡青, 韦晓霞, 蔡子坚, 吴如健, 2007. 桔小实蝇寄主选择性的研究与应用. 江西农业学报, 19(2): 68–71.]

Li HB, Wu KM, Xu Y, Yang XR, Yao J, Wang F, 2007. Population dynamics of pest mirids in cotton filed in southern Xinjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(2): 219–222. [李号宾, 吴孔明, 徐遥, 杨秀荣, 姚举, 汪飞, 2007. 南疆棉田盲蝽类害虫种群数量动态. 昆虫知识，44(2): 219–222.]

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.]

Lu YH, Qiu F, Feng HQ, Li HB, Yang ZC, Wyckhuys KAG, Wu KM, 2008. Species composition and seasonal abundance of pestiferous plant bugs (Hemiptera: Miridae) on Bt cotton in China. *Crop Protection*, 27(3/5): 465–472.

Lu YH, Wu KM, Cai XM, Liu YQ, 2008b. A rearing method for mirids using the green bean, *Phaseolus vulgaris* in the laboratory. *Acta Phytophylacica Sinica*, 35(3): 215–219. [陆宴辉, 吴孔明, 蔡晓明, 刘仰青, 2008b. 利用四季豆饲养盲蝽的方法. 植物保护学报, 35(3): 215–219.]

Lu YH, Zhang YJ, Wu KM, 2008a. Host plant selection mechanisms and behavioural manipulation strategies of phytophagous insects. *Acta Ecologica Sinica*, 28(10): 5113–5122. [陆宴辉, 张永军, 吴孔明, 2008a. 植食性昆虫的寄主选择机理及行为调控策略. 生态学报, 28(10): 5113–5122.]

Mo SS, Zhao DX, Chen Qing, 2006. Advances on relationships between plant volatiles and insect behavior. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 26(6): 84–89, 93. [莫圣书, 赵冬香, 陈青, 2006. 植物挥发物与昆虫行为关系研究进展. 热带农业科学, 26(6): 84–89, 93.]

Pan HS, 2013. Chemical communication mechanism between *Apolygus lucorum* (Meyer-Dur) and its fall host plants of *Artemisia* spp. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [潘洪生, 2013. 绿盲蝽与秋季蒿类寄主的化学通讯机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]

Schoonhoven LM, Jermy T, Van Loon JJA, 1998. Insect-Plant Biology: From Physiology to Evolution. London: Chapman and Hall. 136–138.

Snodgrass GL, Gore J, Abel CA, Jackson R, 2009. Acephate resistance in populations of the tarnished plant bug (Heteroptera: Miridae) from the Mississippi River Delta. *Journal of Economic Entomology*, 102(2): 699–707.

Sun P, Yang Q, Liu DC, Gou CQ, Feng HZ, 2017. Taxis responses of *Lygus pmtensis* to 7 different host plants. *XinJiang Agricultural Sciences*, 54(5): 925–930. [孙鹏, 杨琪, 刘端春, 苟长青, 冯宏祖, 2017. 牧草盲蝽对七种寄主植物的趋性行为反应研究. 新疆农业科学, 54(5): 925–930.]

Wee SL, El-Sayed AM, Gibb AR, Mitcholl V, Suckling DM, 2008. Behavioural and electrophysiologieal responses of *Pantotnorus cervinus* (Boheman) (Coleoptera: Curculionidae) to host plant volatiles. *Austral Entomology*, 47(1): 24–31.

Williams III L, Blackmer JL, Rodriguez-Saona C, Zhu S, 2010. Plant volatiles influence electrophysiological and behavioral responses of *Lygus hesperus*. *Journal of Chemical Ecology,* 36(5): 467–478.

Wu ZY, 2006. Study on interaction between beet armyworm, *Spodoptera exigua* and chenopodiaceous plant. Doctoral dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [吴志毅, 2006. 甜菜夜蛾与藜科植物互作关系研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.]

Yan FM, 2011. Chemical Ecology (Second). Beijing: Science Press. 237–399. [闫凤鸣, 2011. 化学生态学(第二版). 北京: 科学出版社. 237–399.]

Yan SC, Zhang DD, Chi DF, 2003. Advances of studies on the effects of plant volatiles on insect behavior. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14(2): 310–313. [严善春, 张丹丹, 迟德富, 2003. 植物挥发性物质对昆虫作用的研究进展. 应用生态学报, 14(2): 310–313.]

Zhang JY, Lin KJ, Huang XZ, Geng T, Wei HY, Zhang YJ, 2016. EAG responses and taxis selection of green plant bug *Apolygus lucorum* to volatiles from seven species of kinds of malvaceae plants. *Chinese Journal of Biological Control*, 32(2): 135–141. [张俊宇, 林克剑, 黄欣蒸, 耿亭, 魏洪义, 张永军, 2016. 绿盲蝽对七种锦葵科植物挥发物的 EAG 和趋向行为反应. 中国生物防治学报, 32(2): 135–141.]

Zhang LJ, Cui JZ, Li JQ, Liu CQ, Pan WL, Gao ZL, 2010. Taxis responses of *Lygus lucorum* Meyer-Dur to volatiles of *Ziziphus jujuba* flowering branches with different treatments. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 33(4): 81–84. [张立娟, 崔建州, 李继泉, 刘春琴, 潘文亮, 高占林, 2010. 绿盲蝽对不同处理具花 枣枝挥发物的趋性反应. 河北农业大学学报, 33(4): 81–84.]