

茶尺蠖绒茧蜂对茶梢挥发物的 EAG 和行为反应

黄毅^{1,2}, 韩宝瑜^{2,*}, 唐茜^{1,*}, 徐欢³, 汪云刚⁴

(1. 四川农业大学茶学系, 四川雅安 625014; 2. 中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008;

3. 浙江更香有机茶业开发有限公司, 浙江武义 321200; 4. 云南省农业科学院茶叶研究所, 云南勐海 662000)

摘要:为筛选有效诱集茶尺蠖绒茧蜂 *Apanteles* sp. 的信息化合物及其组合, 选用了源于健康和虫害茶梢的 27 种典型挥发物的 10^{-2} g/mL 石蜡溶液、混合物 1 (含等量反-2-己烯醛、顺-3-己烯-1-醇和芳樟醇石蜡溶液) 和混合物 2 (含等量反-2-己烯醛、顺-3-己烯-1-醇、2-戊烯-1-醇、反-2-戊烯醛、顺-3-己烯乙酸酯、正戊醇、正己醇和 1-戊烯-3-醇石蜡溶液), 用 1~2 日龄雌蜂为试虫, 测试其 EAG 反应, 并采用 Y 形嗅觉仪测定其行为反应; 另外, 选择 5 个茶园进行了野外生测试验。EAG 结果表明: 各味源的 EAG 值之间差异显著; 脂肪酸衍生物引起较强 EAG 反应, 其次为芳香化合物和异硫氰酸酯, 再次为倍半萜类和单萜类; 单组分中, 顺-3-己烯乙酸酯、反-2-己烯醛、水杨酸甲酯、反-2-戊烯醛、苯乙酮、苯乙醇、苯甲醇、苯甲醛和茉莉酸甲酯引起的 EAG 值较大, 1-戊烯-3-醇、2-戊烯-1-醇、顺-3-己烯-1-醇、香叶醇、罗勒烯、 α -萜品烯、(+)-雪松醇、(+)-3-萜烯、 α -忽布烯和 β -紫罗酮引起的值较小, Z-茉莉酮引起的最小; 混合物 1 引起的 EAG 值最大, 混合物 2 引起的较小。使用 EAG 值较大的水杨酸甲酯、反-2-戊烯醛和混合物 1 等 8 种味源, 以 Y 形嗅觉仪进行的行为测定结果与 EAG 反应基本一致。以正己烷为溶剂的 10^{-3} , 10^{-2} 和 10^{-1} g/mL 水杨酸甲酯、 10^{-2} g/mL 水杨酸甲酯和反-2-己烯醛混合溶液分别制成诱集剂, 载于橡皮头诱芯, 在浙江闽粤茶园强烈地诱集茶尺蠖绒茧蜂、单白绵绒茧蜂和其他茧蜂, 并表现梯度效应。据此认为虫害诱发的茶梢互利素引起该蜂强烈 EAG 反应和趋向性, 互利素与互利素或普通植物挥发物的恰当组合可于茶园中有效诱集该蜂。

关键词: 茶尺蠖绒茧蜂; 茶梢; 植物挥发物; 触角电位; 行为反应; 互利素; 信息素; 诱集效应

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2009)11-1191-08

EAG and behavioural responses of *Apanteles* sp. (Hymenoptera: Braconidae) parasitizing tea geometrids by volatiles from tea shoots

HUANG Yi^{1,2}, HAN Bao-Yu^{2,*}, TANG Qian^{1,*}, XU Huan³, WANG Yun-Gang⁴ (1. Tea Science Department, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310008, China; 3. Zhejiang Gengxiang Organic Tea Industry Development Co. Ltd., Wuyi, Zhejiang 321200, China; 4. Tea Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Menghai, Yunnan 662000, China)

Abstract: In order to screen the infochemicals and their combinations, which effectively attract the important natural enemies *Apanteles* sp. parasitizing the larvae of tea geometrids *Ectropis obliqua* Prout, 27 representative volatile compounds from the intact tea shoots and tea shoots damaged by tea geometrids, tea green leafhoppers *Empoasca vitis* Gothe and tea aphids *Toxoptera aurantii* Boyer were chosen and prepared into liquid paraffin solution at the dosage of 10^{-2} g/mL, respectively. The equivalent *E*-2-hexenal, *Z*-3-hexen-1-ol and linalool paraffin solution were prepared into blend 1, and the equivalent *E*-2-hexenal, *Z*-3-hexen-1-ol, 2-penten-1-ol, *E*-2-pentenal, *Z*-3-hexenyl acetate, *n*-pentanol, *n*-hexanol and 1-penten-3-ol paraffin solution into blend 2. The female parasitic wasps of 1–2 d old were used as the test insects. The results of electroantennogram (EAG) responses showed that the difference among EAG values from these odor resources reached the significant level of $P < 0.05$. The fatty acid derivatives elicited the strongest antennal-electrophysiological responses, the next were aromatics and isothiocyanate, and the third sesquiterpenes and monoterpenes. The single component eliciting stronger responses were *Z*-3-hexenyl acetate, *E*-2-hexenal, methyl salicylate, *E*-2-pentenal, acetophenone, phenethyl alcohol, benzyl alcohol,

基金项目: 浙江省重大科技专项(2008C02007-4); CFC 项目(CFC/FIGT/04); 浙江省农业科技成果转化资金项目(2006D70068, 2008D70015)

作者简介: 黄毅, 女, 四川广汉人, 1982 年生, 硕士研究生, 主要从事茶树病虫害防治和昆虫化学生态学研究, E-mail: huangyi198205@yahoo.com.cn

com.cn

* 通讯作者 Authors for correspondence, E-mail: han-insect@263.net; tangqi2008@126.com

收稿日期 Received: 2009-02-07; 接受日期 Accepted: 2009-10-13

benzaldehyde and methyl jasmonate; the single components eliciting weaker responses were 1-penten-3-ol, 2-penten-1-ol, *Z*-3-hexen-1-ol, geraniol, ocimene, α -terpinen, (+)-cedrol, (+)-3-carene, α -humulen, and β -ionone; the single component eliciting the least responses was *Z*-jasmone. The blend 1 elicited the highest EAG-value, while the blend 2 elicited the low EAG-value. Eight odor resources eliciting higher EAG values, including methyl salicylate, *E*-2-hexenal and blend 1, were selected and used in behaviour assay by Y-shaped olfactometer. The results accorded with those of EAG responses on the whole. So methyl salicylate and *E*-2-hexenal were again selected, and methyl salicylate solution at the dosage of 10^{-3} , 10^{-2} and 10^{-1} g / mL, as well as the blend of methyl salicylate plus *E*-2-hexenal at the dosage of 10^{-2} g / mL were prepared with hexane as solvent. These solutions were loaded onto the lures, which exhibited the intense attraction to *Apanteles* sp. and other braconids with the dosage gradient effect in the tested tea gardens in Zhejiang, Yunnan, Fujian and Guangdong Province. It is so concluded that the synomones from the tea shoots induced by pests damaging can elicit the strong EAG responses and taxis of *Apanteles* sp., and the appropriate combinations of synomone plus synomone or common plant volatiles can effectively attract the wasps.

Key words: *Apanteles* sp.; tea shoots; plant volatiles; electroantennogram (EAG); behavioural response; synomone; infochemicals; attraction effect

20 世纪 70 年代以来茶尺蠖 *Ectropis obliqua* (Prout) 在浙苏皖茶区常发, 有些年份重发, 比如 2008 年 6–9 月第 3~5 代大发生, 浙江省武义县就有 1 500 公顷茶园被吃成光杆, 常年不受虫害的一些植被较好的高山茶园也遭了虫灾, 成群茶尺蠖成虫在茶园之间迁飞, 已将茶园吃成光杆的大批幼虫在少数领头的幼虫带领下爬过道路、田埂, 徙于可取食的茶园中。而该县更香有机茶业开发有限公司数千公顷茶园基本上未受害。其有机茶园分布于植物较丰富的山林间, 禁用化学防治; 5 月下旬春茶结束后实施重修剪以更新复壮茶树树势, 因为剪除了茶丛的 2/3, 也就抑制了茶尺蠖等害虫种群; 茶尺蠖等虫害偶发生严重时, 则施用植物源农药或矿物源农药。调查发现其茶园中天敌种类较丰富、个体数量也较大, 尤其是茶尺蠖绒茧蜂 *Apanteles* sp. 1 和单白绵绒茧蜂 *Apanteles* sp. 2。这两种寄生蜂是茶尺蠖幼虫期的重要寄生性天敌, 在茶园中混合发生(洪北边和殷坤山, 1978; 胡萃等, 1979, 1994; 候建文和赵烨峰, 1988), 在大片茶园中, 或在茶丛上、中、下层的小生境中, 两种绒茧蜂对茶尺蠖的跟随效应都很显著, 但在自然条件下不足以控制茶尺蠖种群(韩宝瑜等, 2006b, 2007)。若能提前使用信息物质诱集、指引绒茧蜂于茶尺蠖幼虫种群中搜寻产卵, 则将缩短绒茧蜂种群与茶尺蠖种群的时滞, 并提高搜寻效率、增大寄生率。

源于害虫的气味、分泌物、体表、卵表、鳞片和附腺提取物含有的利它素对寄生性和捕食性天敌昆虫具有不同程度的引诱效应(Padmavathi and Paul,

1998; 韩宝瑜和周成松, 2007; 练永国等, 2007)。通常认为, 害虫在其活动过程中虽然不时地释放利它素, 实时标明害虫位置, 但量微, 可探测性小; 虫害之后, 植物释放的挥发性化合物中含有的互利索引诱天敌, 量大, 可探测性强(Turlings *et al.*, 1998; 程丽坤等, 2007; 李继泉等, 2007)。本研究将以茶尺蠖、茶蚜 *Toxoptera aurantii* Boyer 和假眼小绿叶蝉 *Empoasca vitis* Gothe 为害茶梢挥发物(许宁等, 1999; Han and Chen, 2002; 赵冬香等, 2002)、正常茶梢挥发物(李名君, 2000)中典型的 27 种单组分、以及从正常茶梢和虫害茶梢挥发物中选出的含量较大的 3 种组分的混合物和 8 种常见绿叶气味的混合物为味源, 先以触角电位(electro-antennogram, EAG)反应测出活性强的组分, 再选其中代表性组分进行行为测定, 接着挑选活性更强的组分或将其混合后于茶园中诱集茶尺蠖绒茧蜂, 为研制高效绒茧蜂诱集剂提供参考。

1 材料和方法

1.1 试虫

20 世纪 80 年代后期以来, 本研究室以新鲜茶叶逐代饲养茶尺蠖供试验用, 不时采集野外茶尺蠖与饲养茶尺蠖交配以复壮种群。生长季节分批将 3 日龄的 1 龄茶尺蠖幼虫置于中国农业科学院茶叶研究所试验茶园茶树上饲养 5 d, 期间一些幼虫被茶尺蠖绒茧蜂寄生, 取回幼虫于室内饲养, 3 龄期间比较整齐地羽化出茶尺蠖绒茧蜂, 收集于若干个

500 mL 罐头瓶中让其自由交尾, 施以 10% 蜂蜜水以补充营养。罐头瓶置于 25℃、光周期 L:D = 14:10 的光照培养箱中。挑选 1~2 日龄雌蜂供 EAG 试验和行为测定。

茶尺蠖绒茧蜂 *Apanteles* sp. 凭证标本 (voucher specimens) 保存在中国农业科学院茶叶研究所植保研究室。

1.2 触角电位试验

1.2.1 味源: 选择茶尺蠖、茶蚜和假眼小绿叶蝉为害前、后茶梢挥发物(许宁等, 1999; 李名君, 2000; Han and Chen, 2002; 赵冬香等, 2002) 中 27 种典型组分, 购自 Sigma 公司 (Sigma-Aldrich) 或东京化成公司 (Tokyo Chemical Industry Co., LTD), 纯度均为色谱纯 ($\geq 98\%$) (表 1)。以液体石蜡为溶剂, 将 27 种单组分分别配成 10^{-2} g/mL 溶液, 配制过程中使用陀螺仪充分振荡均匀。由于虫害前、后茶梢挥发物中芳樟醇、反-2-己烯醛和顺-3-己烯-1-醇的含量都较大, 且虫害之后反-2-己烯醛的含量显著增加, 遂以 3 者的石蜡溶液等量混合物为味源, 记为混合物 1。还因新鲜茶梢散发浓烈的绿叶气味, 遂以 8 种常见绿叶组分反-2-己烯醛、顺-3-己烯-1-醇、2-戊烯-1-醇、反-2-戊烯醛、顺-3-己烯乙酸酯、正戊醇、正己醇和 1-戊烯-3-醇石蜡溶液的等量混合物模拟“绿叶气味”, 记为混合物 2 (表 1)。

1.2.2 测试程序: 昆虫触角电位仪购自 Syntech 公司, 采用常规测试方法 (Park *et al.*, 2000)。每头绒茧蜂只用其左侧触角, 用虹膜剪刀从触角基剪下触角, 从基部插入参考电极, 再把触角端部减去少许, 套入记录电极内, 注入触角电生理盐水。先用液体石蜡测试, 测试时从低浓度向高浓度, 每次的味源刺激时间是 0.5 s, 两次味源刺激之间的间隔为 2 min, 以便空气刺激控制器 (Model CS-05b, Syntech) 提供的洁净湿润空气带走供试触角周围的气味及触角恢复常态。实验室装有换气扇, 以排除室内气味。每只触角用于测定两种味源的 10^{-2} g/mL 溶液, 每种味源检测 10 根触角。得到的 EAG 信号经放大器 (Syntech CS-05) 放大, 展示于示波器上, 经 Syntech 软件转换后贮存于计算机中供数学分析。

1.2.3 数据统计与分析: EAG 反应值参照付晓伟等 (2008), $EAG \text{ 反应相对值} = (\text{样品的反应值} - \text{对照的反应值}) / (\text{参照物的反应值} - \text{对照的反应值}) \times 100\%$ 。以液体石蜡为对照, 以同浓度的顺-3-己烯-1-醇为参照物。28 种味源 10^{-2} g/mL 剂量的 EAG 值之间的差异用 Duncan 氏方法分析。

1.3 室内行为测定

Y 形嗅觉仪及其测定程序同韩宝瑜和周成松 (2004), 以引起较大 EAG 值的水杨酸甲酯、反-2-己烯醛、反-2-戊烯醛、苯乙酮、苯乙醇、 α -萜品醇、芳樟醇和混合物 1 等 8 种代表性味源作为测试味源 (表 2)。其中水杨酸甲酯供试剂量为 10, 10^{-1} , 10^{-3} 和 10^{-5} g/mL, 其余 7 种味源供试剂量为 10^{-3} g/mL, 以液体石蜡为溶剂, 分别以洁净空气为 CK。若味源对天敌无引诱力, 则天敌趋向味源和 CK 的百分率都是 50%, 便有假设测验 $H_0: 50:50$, 选用 χ^2 测验分析趋向性的差异。

1.4 茶园中诱集绒茧蜂试验

1.4.1 试验方法: 生物测定条件: 温度 21~24℃, 湿度 75%~83%, 时间 9:00~14:00, 光照 3 200~3 400 lux, 茶树品种为群体种。

以行为测定结果显示引诱力较强的水杨酸甲酯和反-2-己烯醛为引诱试验成分, 正己烷为溶剂, 配制 10^{-3} , 10^{-2} 和 10^{-1} g/mL 水杨酸甲酯以及 10^{-2} g/mL 反-2-己烯醛溶液, 再取等量 10^{-2} g/mL 水杨酸甲酯和 10^{-2} g/mL 反-2-己烯醛溶液均匀混合。分别将未吸附信息素的干净橡皮头浸于 3 个剂量的水杨酸甲酯、 10^{-2} g/mL 水杨酸甲酯和反-2-己烯醛混合液中 24 h, 充分吸收, 制成信息素诱芯。每个诱芯附于一块 20 cm × 40 cm 芽绿粘板上, 组成诱集器; 同时, 以浸于正己烷 24 h 的干净橡皮头附于芽绿粘板上, 作为对照 (CK)。

另一种茶尺蠖幼虫期重要寄生蜂单白绵绒茧蜂 *Apanteles* sp. 常与茶尺蠖绒茧蜂在茶园中混合发生, 2008 年 9 月 5 日在更香公司有机茶园、2008 年 8 月 20 日在西双版纳州景洪市大渡岗茶场、2008 年 8 月 25 日在云南省农业科学院茶叶研究所茶园、2007 年 10 月 12 日在福建省农业科学院茶叶研究所茶园、2007 年 10 月 20 日在广东省农业科学院茶叶研究所茶园诱集茶尺蠖绒茧蜂、单白绵绒茧蜂和其他茧蜂。每次诱集时间均为 24 h, 每种处理含有 10 个诱集器, 诱集器间距为 7 m × 7 m。

1.4.2 数据统计与分析: 由于 2008 年 9 月 5 日在更香公司有机茶园每种处理的诱集器上均捕获了较多的茶尺蠖绒茧蜂、单白绵绒茧蜂及其他茧蜂, 且各处理间诱集的蜂数差异明显, 遂分别对每种处理的诱集器上茶尺蠖绒茧蜂和单白绵绒茧蜂、以及其他茧蜂的数量差异作 Duncan 氏分析。分别列出其他 4 次诱集试验的每种处理的 10 个诱集器上诱集的茶尺蠖绒茧蜂和其他茧蜂数之和, 以作比较。

再列出每次试验的每种处理的 10 个诱集器上诱集的茶尺蠖绒茧蜂和其他茧蜂种类数, 比较差异性。

2 结果与分析

2.1 触角 EAG 反应

从化合物类群来看, 脂肪酸衍生物引起的 EAG 反应较强, 其次为芳香化合物和异硫氰酸酯, 再次为倍半萜类, 单萜类化合物的 EAG 反应最弱。醛类化合物引起的 EAG 反应强于醇类化合物引起的 EAG 反应。就单组分味源而言, 引起较强 EAG 反应的为顺-3-己烯乙酸酯、反-2-己烯醛、水杨酸甲酯、反-2-戊烯醛、苯乙酮、苯乙醇、苯甲醇、苯甲醛和茉莉酸甲酯; 绿叶气味中的 1-戊烯-3-醇、2-戊烯-1-醇和顺-3-己烯-1-醇, 单萜类的香叶醇和罗勒烯, 倍半萜类 α -萜品烯、(+)-雪松醇、(+)-3-萜烯和 α -忽布烯, 以及芳香化合物中的 Z-茉莉酮和 β -紫罗酮引起的 EAG 反应较弱。而引起最强 EAG 反应的是混合物 1, Z-茉莉酮引起的 EAG 反应最弱。Duncan 氏多重比较的结果表明 28 种味源引起的 EAG 反应差异显著(表 1)。

2.2 行为反应

测定结果表明, 用于行为反应的 8 种代表性味源中水杨酸甲酯、反-2-己烯醛、反-2-戊烯醛、苯乙酮和混合物 1 显著地引起茶尺蠖绒茧蜂趋向反应(表 2), 与 EAG 反应的结果基本一致。在 Y 形嗅觉仪中, 就水杨酸甲酯而言, 中等剂量 10^{-3} g / mL 的引诱力最强, 低剂量的引诱力稍弱, 高剂量则产生了抑制效应, 引诱力也减弱。

2.3 水杨酸甲酯及其与反-2-己烯醛混合物在茶园中诱集茶尺蠖绒茧蜂和其他茧蜂的效应

在不同时间、不同地点诱集茶尺蠖绒茧蜂以及其他茧蜂的试验结果表明, 3 个剂量的水杨酸甲酯对茶尺蠖绒茧蜂和其他茧蜂都有诱集效应, 诱集效应随着剂量的增大而增强, 水杨酸甲酯与反-2-己烯醛组合之后诱效增强。3 个剂量的水杨酸甲酯以及水杨酸甲酯与反-2-己烯醛组合, 于 2008 年 9 月 5 日在更香公司有机茶园均诱集了较多的茶尺蠖绒茧蜂和单白绵绒茧蜂, 这 4 种处理诱得的蜂数与 CK 诱得的蜂数之间的差异显著(表 3)。

表 1 28 种茶梢挥发物 (10^{-2} g/mL) 引起的茶尺蠖绒茧蜂 EAG 相对反应值

Table 1 Relative EAG values of *Apanteles* sp. elicited by 28 volatile compounds from tea shoots at the dosage of 10^{-2} g/mL

供试化合物 Test compounds	EAG 相对反应值 Relative EAG value
脂肪酸衍生物 Fatty acid derivatives	
反-2-己烯醛 E-2-hexenal	186.4 $\pm$ 8.5 fE
顺-3-己烯乙酸酯 Z-3-hexenyl acetate	345.3 $\pm$ 19.9 bB
反-2-戊烯醛 E-2-pentenal	274.0 $\pm$ 14.2 dC
2-戊烯-1-醇 2-penten-1-ol	94.6 $\pm$ 12.0l mKL
正戊醇 n-pentanol	159.1 $\pm$ 17.3 hFG
正己醇 n-hexanol	143.0 $\pm$ 10.2 iGH
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	17.8 $\pm$ 3.5 qP
芳香化合物 Aromatics	
苯甲醛 Benzaldehyde	172.2 $\pm$ 15.4 gEF
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	177.1 $\pm$ 14.3 fgE
吲哚 Indole	108.0 $\pm$ 10.9 kJK
茉莉酸甲酯 Methyl jasmonate	154.7 $\pm$ 17.0 hiG
苯乙酮 Acetophenone	223.2 $\pm$ 13.5 eD
Z-茉莉酮 Z-jasmone	10.7 $\pm$ 3.6 qP
β -紫罗酮 β -ionone	23.2 $\pm$ 4.7 qP
苯乙醇 Phenethyl alcohol	286.5 $\pm$ 20.4 cC
苯甲醇 Benzyl alcohol	158.6 $\pm$ 13.4 hFG
烯丙基异硫氰酸酯 Allyl isothiocyanate	108.4 $\pm$ 10.9 kJK
倍半萜类 Sesquiterpenes	
橙花醇 Nerol	105.6 $\pm$ 9.9 kLK
α -萜品烯 α -terpinen	54.0 $\pm$ 6.5 pO
α -萜品醇 α -terpineol	127.9 $\pm$ 15.1 jHI
(+)-雪松醇 (+)-cedrol	15.8 $\pm$ 4.2 qP
(+)-3-萜烯 (+)-3-caren	70.9 $\pm$ 9.7 oMNO
α -忽布烯 α -humulen	63.9 $\pm$ 7.6 opNO
单萜类 Monoterpenes	
芳樟醇 Linalool	123.1 $\pm$ 10.3 jIJ
香叶醇 Geraniol	75.7 $\pm$ 9.2 noMN
罗勒烯 Ocimene	87.4 $\pm$ 10.2 mnLM
混合物 Blend	
混合物 1 Blend 1	364.0 $\pm$ 36.5 aA
混合物 2 Blend 2	56.3 $\pm$ 8.4 pO

带有不同小写字母的同—列数据之间的差异达显著水平($P < 0.05$); 带有不同大写字母的同—列数据之间的差异达极显著水平($P < 0.01$)(Duncan 氏检验)。Difference in data within a column with different small letters reaches the significant level of $P < 0.05$; difference in data within a column with different capital letters reaches the significant level of $P < 0.01$ (Duncan's test).

表 2 Y 形嗅觉仪测定的茶尺蠖绒茧蜂对不同挥发物的行为反应

Table 2 Behavioural response of *Apanteles* sp. wasps to different volatiles detected with Y-shaped olfactometer

供试化合物 Test compounds	剂量 (g/mL) Dosage	引诱的绒茧蜂数 Number of attracted wasps	选择洁净空气的绒茧蜂数 Number of wasps choosing CK
水杨酸甲酯 Methyl salicylate	10	13	7
	10 ⁻¹	15 *	5
	10 ⁻³	16 *	4
	10 ⁻⁵	12	8
反-2-己烯醛 <i>E</i> -2-hexenal	10 ⁻³	15 *	5
反-2-戊烯醛 <i>E</i> -2-pentenal	10 ⁻³	15 *	4
苯乙酮 Acetophenone	10 ⁻³	15 *	5
苯乙醇 Phenethyl alcohol	10 ⁻³	12	7
α-萜品醇 α-terpineol	10 ⁻³	11	9
芳樟醇 Linalool	10 ⁻³	14	6
混合物 1 Blend 1	10 ⁻³	16 *	4

* 表明该数值与 CK 之间的差异达显著水平。The asterisk indicates the difference between the datum and CK reaches the level of $P < 0.05$.

表 3 水杨酸甲酯及其与反-2-己烯醛的混合物于茶园中诱集的茶尺蠖绒茧蜂及其他茧蜂数

Table 3 Trapping of *Apanteles* sp. and other braconids by three dosages of methyl salicylate and mixture of MeSA plus *E*-2-hexenal in tea gardens

茶园 Tea garden	茧蜂种类 Species of braconids	MeSA						MeSA + <i>E</i> -2-hexenal			CK
		10 ⁻³ g/mL		10 ⁻² g/mL		10 ⁻¹ g/mL		(10 ⁻² g/mL)			
		SN	IN	SN	IN	SN	IN	SN	IN	SN	IN
GX	绒茧蜂 <i>Apanteles</i> spp.	2	2.2 ± 0.2 c	2	3.1 ± 0.3 b	3	4.7 ± 0.4 a	3	5.0 ± 0.5 a	2	1.2 ± 0.1 d
	OBW	3	1.9 ± 0.2 c	3	2.9 ± 0.3 b	4	3.8 ± 0.3 a	4	4.0 ± 0.4 a	2	1.1 ± 0.1 d
DD	绒茧蜂 <i>Apanteles</i> spp.	2	16	2	20	2	30	2	33	2	12
	OBW	2	15	3	20	4	30	4	31	2	6
YN	绒茧蜂 <i>Apanteles</i> spp.	2	24	3	26	5	35	5	36	2	20
	OBW	2	14	3	18	5	28	5	29	2	11
FJ	绒茧蜂 <i>Apanteles</i> spp.	2	5	3	18	4	20	4	21	1	1
	OBW	2	5	2	6	3	7	3	8	2	4
GD	绒茧蜂 <i>Apanteles</i>	1	2	1	3	2	6	2	6	0	0
	OBW	1	1	2	3	2	6	2	7	1	1

表中绒茧蜂包含茶尺蠖绒茧蜂和单白绵绒茧蜂；每种剂量含有 10 个信息素色板诱集器，更香公司有机茶园茧蜂个体数量为平均数 ± 标准差，标有不同小些字母的同一行数据间的差异达显著水平；表中其他茶园的各个体数数据源于 10 个诱捕器上茧蜂之和。In the list, *Apanteles* spp. contain two species which parasitize tea geometrids; each dosage contains 10 pheromone-coloured plates, the number of individuals of braconids in organic tea gardens of Gengxiang Tea Co. are mean ± *SD*, and the difference in data followed by different letters in the same row reaches the level of $P < 0.05$; data of number of individuals for other tea gardens represent the sum from the 10 plates for each tea garden. OBW: 其他茧蜂 Other braconid wasps. GX: 浙江更香有机茶业开发有限公司有机茶园 Organic Tea Garden of Zhejiang Gengxiang Organic Tea Co. Ltd., Wuyi, Zhejiang; DD: 西双版纳州大渡岗茶场 Dadugang Tea Farm in Xishuangbanna, Yunnan; YN: 云南省农业科学院茶叶研究所试验茶园 Experimental tea garden of Tea Research Institute of Yunnan Academy of Agricultural Sciences; FJ: 福建省农业科学院茶叶研究所试验茶园 Experimental tea garden of Tea Research Institute of Fujian Academy of Agricultural Sciences; GD: 广东省农业科学院茶叶研究所试验茶园 Experimental tea garden of Tea Research Institute of Guangdong Academy of Agricultural Sciences. SN 种数 Number of species; IN: 个体数 Number of individuals.

3 讨论

虫害诱导植物释放挥发性互利素、或改变挥发物各组分的相对比例而引诱天敌, 这些植物挥发物的释放量大、传播距离远, 易被天敌觉察, 在天敌对寄主的定位过程中起着重要的作用 (Turlings *et al.*, 1998; 程丽坤等, 2007; 李继泉等, 2007)。因此, 就人为使用信息素诱集寄生蜂趋向于高密度害虫种群而言, 植物挥发物可着重考虑。

桑天牛 *Apriona germari* (Hopp) 为害之后, 桑枝气味对长尾啮小蜂 *Aprostocetus prolixus* LaSalle *et* Huang 的引诱作用增强, 桑天牛产卵枝的挥发物引诱作用更强 (李继泉等, 2007), 因此桑天牛的为害诱导桑树释放了特异性的气味。重度产卵危害马尾松树干与取食危害树枝枯梢中, α -烯、 β -蒎烯、柠檬烯和 β -水芹烯相对含量差异显著 (宁眺等, 2006)。受茶尺蠖的为害诱导, 茶树释放较多的 C_5 、 C_6 醛类, 如本研究中的反-2-己烯醛和反-2-戊烯醛, 引起单白绵绒茧蜂较强的 EAG 反应 (许宁等, 1999)。假眼小绿叶蝉为害之后, 茶树释放较多的反-2-己烯醛和吲哚等, 在行为测定中显著地引诱白斑猎蛛 *Evarcha albaria* (L. Koch) (赵冬香等, 2002)。茶蚜为害可诱导茶树释放较多的苯甲醛、反-2-己烯醛和吲哚 (Han and Chen, 2002), 强烈地引起七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* L.、中华草蛉 *Chrysopa sinica* Tjeder 和蚜茧蜂 *Aphidius* sp. 的 EAG 和行为反应。本课题组还发现假眼小绿叶蝉或茶尺蠖为害福鼎大白茶品种之后, 茶树释放较多的水杨酸甲酯和反-2-己烯醛, 引起七星瓢虫、中华草蛉、蚜茧蜂和大草蛉 *Chrysopa septempunctata* Wesmael 强烈的行为反应 (韩宝瑜等, 2006a)。用 Y 形嗅觉仪进行的行为测定结果 (Shimoda *et al.*, 2002) 和田间诱集天敌试验 (James and Price, 2004) 皆证明水杨酸甲酯对天敌昆虫的诱集活性较强。七星瓢虫以水杨酸甲酯作为互利素定位大豆蚜 *Aphis glycines* Matsumura (Zhu and Park, 2005)。茶尺蠖、叶蝉和茶蚜的为害诱导茶树释放反-2-己烯醛、反-2-戊烯醛、吲哚、苯甲醛和水杨酸甲酯作为互利素, 引诱天敌, 也可引起茶尺蠖绒茧蜂较强烈的 EAG 和行为反应。所以, 本研究也证实了虫害可诱导植株释放特异性化合物 (即互利素) 而引起寄生蜂强烈的趋向反应。

健康植株挥发物中的正辛醇和香叶醇显著地引诱门氏食蚜蝇 *Sphaerophoria menthastri* L. 和大草蛉

Chrysopa septempunctata Wesmael (韩宝瑜和周成松, 2004), 顺-3-己烯-1-醇、顺-3-己烯乙酸酯、1-辛烯-3-醇和辛醇引起蚕饰腹寄蝇 *Blepharipa zebina* (Walker) 雌蝇较强的 EAG 反应 (徐延熙等, 2007)。正常桑枝气味对长尾啮小蜂也有引诱作用, 可指引该小蜂找到桑树群落 (李继泉等, 2007)。顺-3-己烯乙酸酯、苯乙醇和苯甲醇是新鲜茶梢香气的主要组分 (李名君, 2000); 苯乙酮是茶花香气的主要组分, 在每个茶树品种的茶花香气总量中, 其含量占 20% 以上 (Han *et al.*, 2007)。顺-3-己烯乙酸酯、苯乙醇和苯甲醇以及苯乙酮这 4 种信息物皆能引起茶尺蠖绒茧蜂较强烈的 EAG 反应, 尚未见报道健康植物挥发物中的少数组分对某些种类的天敌也会有较强引诱活性。

用外源茉莉酸甲酯喷雾或缓释处理茶树, 会诱导茶树释放挥发性化合物, 对单白绵绒茧蜂成虫具有很强的引诱作用 (Gui *et al.*, 2004)。田间水杨酸甲酯对多种天敌有显著引诱效应 (James and Price, 2004), 水杨酸甲酯与苯乙醛的混合物对绿草蛉 *Chrysoperla carnea* s. l. (Neuroptera: Chrysopidae) 的田间诱效显著 (Tóth *et al.*, 2009)。本研究以 EAG 技术从众多的茶梢挥发物中筛选出水杨酸甲酯等 8 种代表性成分进行行为测定, 再选出水杨酸甲酯与反-2-己烯醛进行组合, 于茶园中诱集寄生蜂, 除了诱集目标昆虫茶尺蠖绒茧蜂之外, 还可诱集其他茧蜂, 证明了虫害茶树挥发物及其组合可于茶园诱集茶尺蠖绒茧蜂, 鲜见类似报道。

而本研究的 8 种普通绿叶组分组成的混合物 2, 类似于“绿叶气味”, 只能引起茶尺蠖绒茧蜂较弱的 EAG 反应。但反-2-己烯醛、芳樟醇和顺-3-己烯-1-醇组成的混合物 1 能引起茶尺蠖绒茧蜂最强的 EAG 反应 (表 1), 水杨酸甲酯与反-2-己烯醛的混合物可有效地诱集茶尺蠖绒茧蜂, 所以互利素之间、或者互利素与普通植物挥发性组分的恰当组合, 才可相互增进对寄生蜂的诱效。

参考文献 (References)

- Cheng LK, Ren Q, Liu XX, Guo CS, Teng ZQ, Zhang QW, 2007. Behavioral responses of *Aphis gossypii* and *Coccinella septempunctata* to volatiles from *Eupatorium adenophorum* and an analysis of chemical components of the volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 50 (11): 1 194–1 199. [程丽坤, 任琴, 刘小侠, 果春山, 滕兆乾, 张青文, 2007. 棉蚜和七星瓢虫对紫茎泽兰挥发物的行为反应及挥发物化学成分初步分析. 昆虫学报, 50 (11): 1 194–1 199]

- Fu XW, Guo XR, Luo MH, Yuan GH, Li WZ, Wu SY, 2008. Electrophysiological and behavioral responses of *Helicoverpa assulta* (Guenée) and *H. armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) to tobacco volatile compounds of high concentration. *Acta Entomologica Sinica*, 51 (9): 902–909. [付晓伟, 郭线茹, 罗梅浩, 原国辉, 李为争, 吴少英, 2008. 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. 昆虫学报, 51 (9): 902–909]
- Gui LY, Chen ZM, Liu SS, 2004. Effect of exogenous methyl jasmonate-induced tea volatiles on host-selection behavior of insects. *Journal of Tea Science*, 24 (3): 166–171. [桂连友, 陈宗懋, 刘树生, 2004. 外源茉莉酸甲酯诱导茶树挥发物对昆虫寄生选择行为的影响. 茶叶科学, 24 (3): 166–171]
- Han BY, Chen ZM, 2002. Behavioral and electrophysiological responses of natural enemies to synomones from tea shoots and kairomones from tea aphids, *Toxoptera aurantii*. *Journal of Chemical Ecology*, 28 (11): 2 203–2 219.
- Han BY, Zhou CS, 2004. Attractive effect of primary volatile components from tea shoots and flowers on *Sphaerophoria menthastris* L. (Diptera: Syrphidae) and *Chrysopa septempunctata* Wesm. (Neuroptera: Chrysopidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15 (4): 623–626. [韩宝瑜, 周成松, 2004. 茶梢和茶花主要挥发物对门氏食蚜蝇和大草蛉引诱效应. 应用生态学报, 15 (4): 623–626]
- Han BY, Zhou CS, 2007. Rhythm of honeydew excretion by the tea aphid and its attraction to various natural enemies. *Acta Ecologica Sinica*, 27 (9): 3 637–3 643. [韩宝瑜, 周成松, 2007. 茶蚜 (*Toxoptera aurantii* (Boyer)) 蜜露分泌节律及对多种天敌的引诱效应. 生态学报, 27 (9): 3 637–3 643]
- Han BY, Zhou P, Cui L, Zhou XG, Xia Y, 2007. Impact of farming methods and tea garden habitats on population density of *Ectopis oblique* and its main natural enemies. *Acta Phytophylogica Sinica*, 34 (1): 15–21. [韩宝瑜, 周鹏, 崔林, 周孝贵, 夏艳, 2007. 不同管理方式的茶园生境中茶尺蠖及其天敌密度的差异. 植物保护学报, 34 (1): 15–21]
- Han BY, Zhou P, Zhang JM, 2006a. Releases of MeSA and E-2-hexenal from tea shoots induced by pests' damaging and exotic MeSA and attraction impact of both synomones on natural enemies in tea gardens. In: Chinese Tea Society & Tea Association of Taiwan ed. Proceedings of the 4th Symposium on Tea Industry across Straits in Pujiang, Sichuan, September 3–10, 2006. 342–351. [韩宝瑜, 周鹏, 章金明, 2006a. 茶梢水杨酸甲酯和反-2-己烯醛的诱导释放及其诱集天敌的效应. 见: 中国茶叶学会 & 台湾茶协会主编. 第四届海峡两岸茶业学术研讨会论文集. 342–351]
- Han BY, Zhou XG, Zhou P, Cui L, 2006b. Braconid wasp numeral and spatial dynamics and their relativity with host insects, *Ectopis oblique*, in tea gardens. *Acta Agricultura Zhejiangensis*, 18 (4): 203–206. [韩宝瑜, 周孝贵, 周鹏, 崔林, 2006b. 茶园绒茧蜂数量和空间动态及其与茶尺蠖的相关性. 浙江农业学报, 18 (4): 203–206]
- Hong BB, Yin KS, 1978. Preliminary observation on biological characteristics of *Apanteles* sp. *Bulletin of Tea Science and Technology*, (9): 14–17. [洪北边, 殷坤山, 1978. 单白绵绒茧蜂生物学特性初步观察. 茶叶科技简报, (9): 14–17]
- Hou JW, Zhao YF, 1988. Natural enemies of tea geometrids and their control effect. *Journal of Tea*, 14 (1): 15–18. [侯建文, 赵焯峰, 1988. 茶尺蠖的天敌及其控制作用. 茶叶, 14 (1): 15–18]
- Hu C, Zhao QQ, Zheng RL, 1979. The larval parasites of the tea geometrid *Ectopis obliqua hypulina* Wehrli. *Acta Entomologica Sinica*, 22 (4): 413–419. [胡萃, 赵启泉, 郑蕊莉, 1979. 茶尺蠖幼虫期的寄生天敌. 昆虫学报, 22 (4): 413–419]
- Hu C, Zhu JQ, Ye GY, Hong J, 1994. *Ectopis oblique* Prout, A Serious Geometrid Pest of Tea Bush in East China. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. [胡萃, 朱俊庆, 叶恭银, 洪健, 1994. 茶尺蠖. 上海: 上海科学技术出版社]
- James DG, Price TS, 2004. Field-testing of methyl salicylate for recruitment and retention of beneficial insects in grapes and hops. *Journal of Chemical Ecology*, 30 (8): 1 613–1 628.
- Li JQ, Yang Y, Wang SX, Feng HC, Huang DZ, Jin YJ, 2007. Host selection and location behavior of *Aprostocetus prolixus* LaSalle et Huang (Hymenoptera: Eulophidae), an egg parasitoid of *Apriona germari* (Hope) (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50 (11): 1 122–1 128. [李继泉, 杨元, 王树香, 冯会藏, 黄大庄, 金幼菊, 2007. 桑天牛卵长尾啮小蜂的寄主选择定位行为. 昆虫学报, 50 (11): 1 122–1 128]
- Li MJ, 2000. Tea Chemistry. In: Chen ZM ed. Big Dictionary of Chinese Teas. China Light Industry Press, Beijing. 323–359. [李名君, 2000. 茶叶化学. 见: 陈宗懋主编. 中国茶叶大辞典. 北京: 中国轻工业出版社. 323–359]
- Lian YG, Wang SQ, Bai SX, Kang ZJ, Wang ZY, Mo TL, 2007. The effect of volatile infochemicals on host selection behavior of *Trichogramma ostrinae*. *Acta Entomologica Sinica*, 50 (5): 448–453. [练永国, 王素琴, 白树雄, 康总江, 王振营, 墨铁路, 2007. 挥发性信息化合物对玉米螟赤眼蜂寄主选择行为的影响. 昆虫学报, 50 (5): 448–453]
- Ning T, Fan JT, Fang YL, Sun JH, 2006. Changes in contents of host volatile terpenes under different damaged states and electroantennogram response of *Monochamus alternatus* Hope to these volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 49 (2): 448–453. [宁眺, 樊建庭, 方宇凌, 孙江华, 2006. 不同危害状态下寄主萜烯挥发物含量的变化及松墨天牛对其组分的触角电位反应. 昆虫学报, 49 (2): 448–453]
- Padmavathi C, Paul AVN, 1998. Saturated hydrocarbons as kairomonal source for the egg parasitoid, *Trichogramma chilonis* Ishii (Hym., Trichogrammatidae). *Journal of Applied Entomology*, 122 (1): 29–32.
- Park KC, Elias D, Donato B, Hardie J, 2000. Electroantennogram and behavioural responses of different forms of the bird cherry-oat aphid, *Rhopalosiphum padi*, to sex pheromone and a plant volatile. *Journal of Insect Physiology*, 46: 597–604.
- Shimoda T, Ozawa R, Arimura G, Takabayashi J, Nishioka T, 2002. Olfactory responses of two specialist insect predators of spider mites toward plant volatiles from lima bean leaves induced by jasmonic acid and/or methyl salicylate. *Applied Entomology and Zoology*, 37

- (4): 535–541.
- Tóth M, Szentkirályi F, Vuts J, Letardi A, Tabilio MR, Jaastad G, Knudsen GK, 2009. Optimization of a phenylacetaldehyde-based attractant for common green lacewings (*Chrysoperla carnea* s. l.). *Journal of Chemical Ecology*, 35 (4): 449–458.
- Turlings TCJ, Bernasconi M, Bertossa R, Bigler F, Caloz G, Dorn S, 1998. The induction of volatile emissions in maize by three herbivore species with different feeding habits: Possible consequences for their natural enemies. *Biological Control*, 11: 122–129.
- Xu N, Chen ZM, You XQ, 1999. Isolation and identification of tea plant volatiles attractive to tea geometrid parasitoids. *Acta Entomologica Sinica*, 42 (2): 126–131. [许宁, 陈宗懋, 游小清, 1999. 引诱茶尺蠖天敌寄生蜂的茶树挥发物的分离与鉴定. 昆虫学报, 42 (2): 126–131]
- Xu YX, Sun XG, Qin XW, Su JW, Ge F, 2007. The absorption and identification of volatiles from pine needles of *Pinus massoniana* Lamb. damaged by *Dendrolimus punctata* (Walker) and the antennal responses of female *Blepharipa zebina* (Walker) to these volatile compounds. *Acta Ecologica Sinica*, 27 (11): 4 403–4 411. [徐延熙, 孙绪良, 秦小微, 苏建伟, 戈峰, 2007. 被害马尾松 (*Pinus massoniana*) 针叶挥发性物质的提取、鉴定及蚕饰腹寄蝇 (*Blepharipa zebina*) 的电生理活性. 生态学报, 27 (11): 4 403–4 411].
- Zhao DX, Chen ZM, Cheng JA, 2002. Isolation and activity identification of volatiles among tea plant-green leafhopper-*Evarcha* spider. *Journal of Tea Science*, 2002, 22 (2): 109–114. [赵冬香, 陈宗懋, 程家安, 2002, 茶树-假眼小绿叶蝉-白斑猎蛛间化学通讯物的分离与活性鉴定. 茶叶科学, 22 (2): 109–114]
- Zhu JW, Park KC, 2005. Methyl salicylate, a soybean aphid-induced plant volatile attractive to the predator *Coccinella septempunctata*. *Journal of Chemical Ecology*, 31 (8): 1 733–1 746.

(责任编辑:赵利辉)