

# 西花蓟马对二斑叶螨为害后番茄的行为反应及挥发物成分分析\*

温娟\*\* 鄧军锐\*\*\* 吕召云 李顺欣

(贵州大学昆虫研究所, 贵州省山地农业病虫害重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要** 【目的】为明确二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 为害番茄后诱导的防御反应对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 行为的影响。【方法】采用四臂嗅觉仪测定了西花蓟马对二斑叶螨不同密度和时间为害后番茄植株的选择行为, 并用气相色谱-质谱联用仪测定了不同处理下番茄挥发物的成分, 比较了它们的异同。

【结果】西花蓟马对二斑叶螨不同为害株的选择率与为害时间和为害密度密切相关, 并且西花蓟马对二斑叶螨为害程度居中的番茄喜好性强。10 种不同处理番茄挥发性物质种类、含量及其比例在各处理间存在较大差异, 二斑叶螨为害后诱导番茄新产生了香橙烯, 并且在为害程度较高的番茄上检测到邻-异丙基苯、2-甲基-1-丁醇和(E)-2-己烯醛 3 种化合物。结合嗅觉仪的结果, 推测间伞花烃和邻-异丙基苯对西花蓟马具有一定的驱避作用, 对伞花烃和 1-辛烯-3-醇对西花蓟马具有一定的引诱作用。【结论】西花蓟马对二斑叶螨为害程度居中的番茄植株有一定的偏好, 二斑叶螨为害能诱导番茄挥发物种类和含量的变化, 并且与螨害的密度和时间有关。

**关键词** 二斑叶螨, 西花蓟马, 番茄, 寄主选择, 挥发物

## Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* to tomato plants infested with *Tetranychus urticae* and analysis of the volatile compounds of tomato plants

WEN Juan\*\* ZHI Jun-Rui\*\*\* LÜ Zhao-Yun LI Shun-Xin

(Institute of Entomology, Guizhou University, Guizhou Provincial Key Laboratory for Agricultural Pest Management of the Mountainous Region, Guiyang 550025, China)

**Abstract** [Objectives] To investigate the effects of tomato plants infested with *Tetranychus urticae* on the behavioral responses of *Frankliniella occidentalis*. [Methods] The behavioral responses of *F. occidentalis* to tomato plants infested with different densities of *T. urticae* for different periods of time were tested in a four-armed olfactometer. Volatiles emitted by tomato plants with different densities of *T. urticae* were identified by GC-MS and compared. [Results] The preference of *F. occidentalis* for tomato plants infested with *T. urticae* was closely related to the period of infestation and density. *F. occidentalis* was more likely to select tomato plants with a moderate amount of damage. Volatile compounds differed among tomato plants with different densities and durations of infestation by *T. urticae*; Aromadendrene, O-Cymene, 2-Methyl-1-Butanol and (E)-2-Hexenal were only emitted by plants with a relatively high degree of damage. M-Cymene and O-Cymene could be repellent to *F. occidentalis*, whereas P-Cymene and 1-Octen-3-ol are attractive to this species. [Conclusion] *F. occidentalis* were most attracted to tomato plants that had sustained moderate damage from *T. urticae*. Different densities and durations of infestation by *T. urticae* affected the volatile compounds emitted by tomato plants.

**Key words** *Tetranychus urticae*, *Frankliniella occidentalis*, tomato, plants selectivity, volatile

\* 资助项目 Supported projects: 系统与应用螨学创新团队 ([2014]33); 贵州省国际合作项目 (黔科合外 G 字[2011]7002 号)

\*\*第一作者 First author, E-mail: juanwen787@163.com

\*\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhijunrui@126.com

收稿日期 Received: 2015-02-09, 接受日期 Accepted: 2015-05-02

植物挥发物能调节昆虫的多种行为,例如刺激昆虫取食,引诱昆虫趋向寄主植物,诱导昆虫选择产卵场所和防御昆虫等,在植物与昆虫的化学通讯中起着决定性的作用(杜家纬, 2001; Kessler and Baldwin, 2004; 秦秋菊和高希武, 2005)。同时,植物挥发物在植物-害虫-天敌三者关系中也有着非常重要的意义。目前对三级营养关系的研究,主要集中于虫害诱导的寄主植物产生的挥发物对寄生和捕食性天敌的吸引作用(Girling and Hassall, 2008; Leroy *et al.*, 2012; 李艳艳等, 2013),而挥发物对同种或异种昆虫的行为产生影响的研究也越来越引起人们的重视,这对于了解和掌握害虫之间的关系具有重要意义。

西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* (Pergande)是 2003 年入侵我国的一种重要害虫(吕要斌等, 2011),其不仅能取食植物叶片、花、果实等组织汁液,还可以捕食二斑叶螨、温室粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* Westwood、亚洲柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 的卵(孟和生等, 2001; Janssen *et al.*, 2003; Maanen *et al.*, 2012; Martini *et al.*, 2013; David, 2014)。二斑叶螨 *Tetranychus urticae* Koch 也是世界性的重要害虫,通过口针刺吸植物的汁液进行为害,给农林生产造成了巨大的损失(孟和生等, 2001; 洪晓月等, 2013)。这两种害虫常在一种植物上同时发生,据报道二斑叶螨会强烈的避开西花蓟马取食为害后的黄瓜(Pallini *et al.*, 1997)。而西花蓟马对二斑叶螨为害后植物的反应,不同学者的研究结果不完全相同, Pallini 等(1998)发现西花蓟马既不喜欢也不回避二斑叶螨为害的黄瓜;岳臻(2012)报道西花蓟马雌成虫对健康和二斑叶螨为害菜豆之间的选择性差异不显著,而西花蓟马对二斑叶螨为害菜豆的喜好明显高于对西花蓟马为害的菜豆;田甜等(2014)研究发现西花蓟马对二斑叶螨为害程度较高的菜豆有一定的吸引作用。推测原因可能是西花蓟马能捕食二斑叶螨的卵(Pallini *et al.*, 1997),也可以利用二斑叶螨的丝网躲避天敌,但二斑叶螨的

内禀增长率大,能在较短时间内形成数量庞大的种群,以数量的绝对优势抢先占领食物和空间,同时二斑叶螨的丝网对西花蓟马的行走和取食有一定的阻碍作用(Roda *et al.*, 2000)。西花蓟马会平衡各种利弊,以有利于其种群增长。

害虫之间的关系与寄主植物密切相关,前人在西花蓟马嗜食的菜豆和黄瓜上研究了西花蓟马和二斑叶螨之间的关系,但番茄对西花蓟马有明显的忌避作用(裴昌莹和郑长英, 2011),是西花蓟马的非适宜寄主(袁成明等, 2011)。番茄却是二斑叶螨的嗜食寄主(贺达汉等, 2001),并且二斑叶螨取食番茄会诱导茉莉酸途径的防御基因表达(Li *et al.*, 2002),西花蓟马对二斑叶螨为害后的番茄行为反应如何?与对嗜食的菜豆和黄瓜的反应有何异同?因此,本文研究了二斑叶螨取食番茄后释放的植物挥发物对西花蓟马行为反应的影响,并对二斑叶螨为害后番茄挥发物的成分进行分析,以期进一步明确西花蓟马和二斑叶螨的相互关系,为害虫的综合治理提供新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试虫源

西花蓟马:采自贵州省贵阳市花溪区蔬菜基地的菜豆 *Phaseolus vulgaris* Linn., 在人工气候箱[L:D=14:10;温度(25±1)℃;湿度70%±5%]中用菜豆豆荚饲养3代以上供试。试验前将西花蓟马雌成虫饥饿2h后用于试验。

二斑叶螨:采自贵州省贵阳市花溪区蔬菜基地的菜豆上,经鉴定纯化后,在人工气候室内培养的菜豆植株上连续饲养多代。二斑叶螨雌成螨作为供试虫源。

### 1.2 供试植物

选取番茄 *Lycopersicon esculentum* Miller 品种为合作 903(上海番茄研究所),将番茄种子播种于温室大棚花盆中,温室保持无害虫危害状态,株高约为20cm(生长约1个月左右)供试。

### 1.3 试验处理

在每株植株上用软毛笔分别接入雌成螨5、

15 和 25 头, 为害时间分别为 1、2 和 3 d, 并以同期生长的健康植株作为对照。

**1.3.1 西花蓟马对二斑叶螨不同为害处理组合中番茄植株的选择性** 四臂嗅觉仪由无色有机玻璃制成, 昆虫活动室直径 15 cm, 每臂依次连接味源瓶(或对照瓶)、加湿瓶、活性炭过滤瓶和流量计, 各装置之间以硅胶管相连。每臂的气流量通过气体流量计控制在 300 mL/min, 生测时间为 8:00—15:00, 室内温度控制在  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。抽气 10 min 使气味充满管道, 以保证测试结果, 之后将西花蓟马引入嗅觉仪的测试腔。每组味源测试 60 头西花蓟马, 重复 4 次。测试 10 min, 当雌成虫爬至梨形瓶处或梨形瓶口则视为选择, 不作出选择则记为无反应。每测试一组后, 用无水乙醇擦拭嗅觉仪内外并烘干。每次重复后都要转动嗅觉仪, 与各味源瓶和对照瓶重新连接。

**1.3.2 二斑叶螨不同密度和时间为害番茄挥发性物质的鉴定与分析** 采用气相色谱-质谱联用仪(GC:HP6890, MS:5975C)测定挥发物成分。不分流进样, 色谱柱为 ZB-5MSI 5% Phenyl- 95% DiMethylpolysiloxane(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ ) 弹性石英毛细管柱, 柱温  $45^\circ\text{C}$ (保留 2 min), 以  $4^\circ\text{C}$  每分钟升温至  $220^\circ\text{C}$ , 保持 2 min, 汽化室温度  $250^\circ\text{C}$ , 载气为高纯 He(99.999%), 柱前压 7.62 psi, 载气流量 1.0 mL/min, 溶剂延迟时间 1.5 min。质谱条件: 离子源为 EI 源, 离子源温度  $230^\circ\text{C}$ , 四极杆温度  $150^\circ\text{C}$ , 电子能量 70 eV, 发射电流 34.6  $\mu\text{A}$ , 倍增器电压 1 518 V, 接口温度  $280^\circ\text{C}$ , 质量范围 20~450 amu。对总离子流图中的各峰经质谱计算机数据系统检索及核对 Nist2005 和 Wiley275 标准质谱图, 确定挥发性化学成分, 用峰面积归一化法测定了各化学成分的相对质量分数。试验重复 3 次。

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS13.0 软件对数据进行处理和制图。利用 Tukey's 多重比较检验不同处理番茄的挥发物相对含量的差异和测试植物对西花蓟马引诱率的差异显著性。选择率(%)=处理或对照诱集瓶中测试昆虫的数量/总

的测试昆虫数量 $\times 100$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 西花蓟马对二斑叶螨不同为害密度和时间番茄植株的选择性

嗅觉仪测定表明在西花蓟马对二斑叶螨相同密度但不同为害时间植株的选择率与为害时间密切相关(图 1)。二斑叶螨密度为 5 头/株时, 西花蓟马偏好选择二斑叶螨为害 1 d 的番茄, 对健康和为害 2 d 的番茄选择次之, 对为害 3 d 的选择率最低。二斑叶螨密度为 15 头/株时, 西花蓟马依然对为害 1 d 的番茄选择率最高, 对为害 2 d 的选择率居中, 对健康和为害 3 d 的选择率不存在差异且最低。当二斑叶螨为害密度为 25 头/株时, 西花蓟马对为害 2 d 的番茄植株选择率高达 39.56%, 其次是为害 3 d 的番茄, 对健康和为害 1 d 的番茄选择率最低, 且在它们之间没有差异。

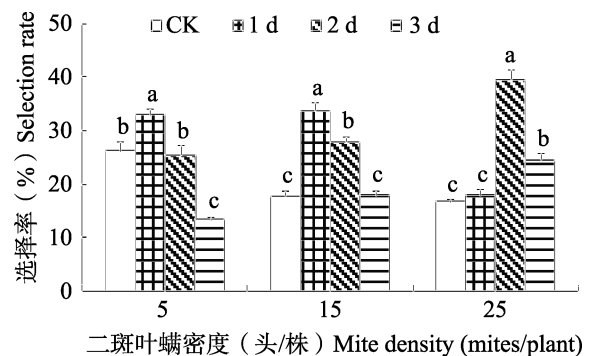


图 1 西花蓟马对二斑叶螨同一密度不同为害时间番茄的选择率

Fig. 1 The section rate of *Frankliniella occidentalis* to tomato damaged by *Tetranychus urticae* at the same density but different time

柱上标有不同小写字母表示在 0.05 水平显著差异。

下图同。

Histograms with different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

西花蓟马对二斑叶螨为害相同时间但不同为害密度番茄植株的选择性随着密度不同而有所不同(图 2)。二斑叶螨为害 1 d 时, 西花蓟马

对二斑叶螨为害密度为 15 头/株选择率最高, 对健康和密度为 25 头/株的番茄次之, 对密度为 5 头/株的选择性最少。二斑叶螨为害 2 d 时, 西花蓟马依然对密度为 15 头/株的番茄选择率最高, 对 5 头/株的选择性次之, 最不喜欢选择健康和 25 头/株的番茄。二斑叶螨为害时间为 3 d 时, 西花蓟马对密度为 5 头/株的番茄植株选择率最高, 达 40.63%, 对其余几种处理的番茄的选择性差异不显著。

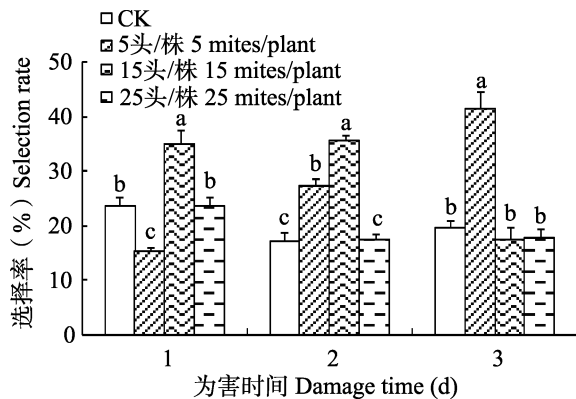


图 2 西花蓟马对二斑叶螨同一时间不同为害密度番茄的选择率

Fig. 2 The section rate of *Frankliniella occidentalis* to tomato damaged by *Tetranychus urticae* at the same time but different densities

## 2.2 二斑叶螨不同密度和时间为害番茄挥发性物质的鉴定与分析

健康及不同二斑叶螨为害不同时间和密度 10 种处理下番茄的挥发物既有共同点又有各自的特点(表 1), 不论是健康的番茄还是虫害的番茄, 含量最高的 2 种化合物, 均是  $\beta$ -水芹烯和 (Z)-3-己烯-1-醇, 只是健康番茄的  $\beta$ -水芹烯含量高于 (Z)-3-己烯-1-醇, 但虫害番茄正好相反。挥发物含量排在第 3 位的均是 (+)-2-萜烯, 这 3 种化合物含量之和在不同处理下占挥发物总量的比例均很高, 为 63.83%~73.26%。其余单种化合物的含量均低于 5%。

与健康番茄相比, 二斑叶螨为害后番茄释放的挥发物, 除了相对百分含量发生显著变化外, 还检测到特异性挥发物组分。(Z)-3-己烯-1-醇和

1-己醇在健康番茄的含量显著高于二斑叶螨为害株, (+)-2-萜烯和  $\beta$ -水芹烯的相对百分含量则明显低于二斑叶螨为害株。二斑叶螨为害后新产生了香橙烯。邻-异丙基苯、2-甲基-1-丁醇和 (E)-2-己烯醛均在健康、二斑叶螨 5 头/株为害的 3 个时间段及 15 头/株为害 1 d 时未被检测到, 但在其余 5 种处理下检测到, 说明这 3 种化合物随着二斑叶螨为害程度的增加而被诱导出来。对伞花烃、(Z)-1,5-二烯-3-醇和 1-辛烯-3-醇均在健康和 15 头二斑叶螨为害 2 d 时没有检测到。

## 3 讨论

昆虫对不同植物的取食或产卵选择是昆虫与植物长期协同进化过程中所形成的重要生存策略, 植食性昆虫可利用植物传达的信息通过嗅觉或者结合视觉共同识别寄主植物(闫凤鸣, 2011)。植物在遭受植食性昆虫为害后, 其挥发物的组成方面会产生明显的变化, 影响到植食性昆虫的行为。本研究表明, 二斑叶螨为害番茄植株后, 与健康植物相比受害寄主对西花蓟马有明显的引诱作用, 并对西花蓟马作用的程度与二斑叶螨为害的密度和时间有关。在二斑叶螨相同密度、不同时间为害处理中, 西花蓟马对健康植株的选择率随着为害密度的增加而降低, 为害密度为 5 头/株和 15 头/株时, 西花蓟马明显趋向选择为害程度较轻的番茄植株, 而在高密度 25 头/株为害时, 西花蓟马偏向选择为害程度居中的寄主, 这很可能是健康或受害程度高的番茄植株会释放出更多驱避西花蓟马的挥发物。在二斑叶螨为害相同时间但不同密度番茄的处理中, 不论是为害 1 d 还是 2 d, 西花蓟马均偏好选择为害程度居中的 15 头/株, 但在二斑叶螨为害 3 d 时, 西花蓟马则明显选择 5 头为害株, 以上结果说明西花蓟马对二斑叶螨为害程度居中的番茄喜好性强。Martini 等 (2013) 研究结果发现二斑叶螨为害后的棉花对西花蓟马产生了一定吸引力, 并且增加二斑叶螨为害密度会吸引更多西花蓟马; 田甜等 (2014) 研究也发现对二斑叶螨为害程度较高的菜豆对西花蓟马吸引作用最强。这些

表 1 不同处理番茄主要挥发性物质的成分与含量  
Table 1 Components and relative contents (%) of the volatiles from various treated tomato

| 化合物<br>Compound               | 二斑叶螨密度 Mites density |             |             |                       |             |              |                       |              |              |                  |     |     |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|--------------|------------------|-----|-----|
|                               | 5 头/株 5 mites/plant  |             |             | 15 头/株 15 mites/plant |             |              | 25 头/株 25 mites/plant |              |              |                  |     |     |
|                               | 为害时间 Damage time     |             |             | 为害时间 Damage time      |             |              | 为害时间 Damage time      |              |              | 为害时间 Damage time |     |     |
|                               | 1 d                  | 2 d         | 3 d         | 1 d                   | 2 d         | 3 d          | 1 d                   | 2 d          | 3 d          | 1 d              | 2 d | 3 d |
| 间伞花烃 m-cymene                 | 0.98±0.04e           | 1.19±0.06d  | 2.80±0.02a  | 1.33±0.03c            | ND          | 1.20±0.06cd  | 1.70±0.08b            | 2.71±0.04a   | 1.59±0.02b   | 2.71±0.03a       |     |     |
| 月桂烯 β-myrcene                 | 1.66±0.02bcd         | 1.69±0.01bc | ND          | 1.77±0.04b            | 1.26±0.01e  | 1.60±0.03cd  | 1.58±0.04d            | ND           | 1.67±0.02bcd | 2.07±0.09a       |     |     |
| (+)-2-萜烯 (+)-2-carene         | 5.67±0.14f           | 8.26±0.12e  | 11.22±0.05a | 9.38±0.22cd           | 10.18±0.35b | 7.58±0.09e   | 9.86±0.44bc           | 9.57±0.40bcd | 9.45±0.31bcd | 9.06±0.18d       |     |     |
| α-水芹烯 α-phellandrene          | 1.36±0.04d           | 1.38±0.03d  | 2.27±0.09ab | 1.97±0.26c            | 2.04±0.07bc | 2.05±0.07bc  | 2.11±0.11abc          | 2.16±0.05abc | 2.37±0.04a   | 2.26±0.05abc     |     |     |
| 邻-异丙基苯 o-cymene               | ND                   | ND          | ND          | ND                    | ND          | 0.287±0.02bc | 0.44±0.02a            | 0.286±0.01bc | 0.30±0.01b   | 0.25±0.01c       |     |     |
| β-水芹烯 β-phellandrene          | 25.80±0.22h          | 34.01±.42g  | 34.98±0.15f | 35.30±0.06f           | 40.07±0.22d | 37.21±0.10e  | 46.09±0.08b           | 47.60±0.20a  | 44.46±0.21c  | 47.16±0.19a      |     |     |
| 对伞花烃 p-cymene                 | ND                   | 0.11±0.00c  | 0.10±0.02c  | 0.13±0.01bc           | 0.17±0.01a  | ND           | 0.13±0.01b            | 0.14±0.01b   | 0.13±0.01bc  | 0.12±0.01bc      |     |     |
| (e)-β-罗勒烯(e)-β-ocimene        | 0.40±0.01b           | 0.39±0.02b  | ND          | 0.32±0.02b            | 0.51±0.05a  | 0.47±0.03a   | 0.48±0.02a            | ND           | 0.38±0.03b   | ND               |     |     |
| δ-榄香烯 δ-elemene               | 2.09±0.06c           | 0.92±0.10f  | 0.95±0.01f  | 1.47±0.07e            | 1.63±0.12e  | 2.13±0.06c   | 3.80±0.02a            | 1.92±0.13cd  | 1.72±0.11de  | 2.86±0.14b       |     |     |
| β-石竹烯 β-caryophyllene         | 4.66±0.10c           | 3.41±0.06e  | 3.48±0.13e  | 4.18±0.08d            | 3.41±0.06e  | 4.93±0.10c   | 7.70±0.07a            | 4.07±0.24d   | 2.87±0.12e   | 6.13±0.13b       |     |     |
| α-蛇麻烯 α-humulene              | 1.20±0.03b           | 0.49±0.00f  | 0.9±0.04f   | 1.05±0.05d            | 1.16±0.01bc | 1.23±0.01b   | 2.19±0.02a            | 1.01±0.04d   | 0.68±0.03e   | 1.07±0.03cd      |     |     |
| 香橙烯 Aromadendrene             | ND                   | 0.12±0.00b  | 0.12±0.00b  | 0.18±0.02a            | 0.12±0.01b  | 0.16±0.01a   | 0.17±0.02a            | 0.17±0.01a   | 0.10±0.00b   | 0.11±0.00b       |     |     |
| 1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol        | 0.78±0.01a           | 0.77±0.01a  | 0.31±0.00c  | 0.31±0.01c            | 0.48±0.01b  | 0.29±0.01cd  | 0.21±0.01e            | 0.28±0.01d   | 0.17±0.01f   | 0.09±0.01g       |     |     |
| 2-甲基-1-丁醇 2-methyl-1-butanol  | ND                   | ND          | ND          | ND                    | ND          | 0.40±0.01ab  | 0.42±0.02a            | 0.33±0.02c   | 0.35±0.02bc  | 0.41±0.01a       |     |     |
| 正戊醇 1-pentanol                | 0.38±0.00a           | 0.32±0.00b  | 0.15±0.01c  | ND                    | 0.39±0.00a  | 0.11±0.01de  | 0.06±0.01f            | 0.11±0.01d   | 0.11±0.01de  | 0.09±0.01e       |     |     |
| (z)-3-己烯-1-醇 (z)-3-hexen-1-ol | 39.15±0.20a          | 26.88±0.28b | 17.63±0.11f | 24.03±0.11c           | 22.14±0.22d | 23.64±0.10c  | 10.51±0.11i           | 13.81±0.07g  | 19.35±0.21e  | 11.52±0.12h      |     |     |
| 1-己醇 1-hexanol                | 4.16±0.07a           | 2.14±0.03d  | 2.17±0.02d  | 2.25±0.07d            | 1.59±0.04f  | 3.56±0.09b   | 1.53±0.06f            | 1.92±0.08e   | 2.50±0.01c   | 1.54±0.07f       |     |     |

续表 1 (Table 1 continued)

| 化合物<br>Compound                      | CK          | 二斑叶螨密度 Mites density |             |            |                       |             |            |                       |             |            |                  |     |     |
|--------------------------------------|-------------|----------------------|-------------|------------|-----------------------|-------------|------------|-----------------------|-------------|------------|------------------|-----|-----|
|                                      |             | 5 头/株 5 mites/plant  |             |            | 15 头/株 15 mites/plant |             |            | 25 头/株 25 mites/plant |             |            |                  |     |     |
|                                      |             | 为害时间 Damage time     |             |            | 为害时间 Damage time      |             |            | 为害时间 Damage time      |             |            | 为害时间 Damage time |     |     |
|                                      |             | 1 d                  | 2 d         | 3 d        | 1 d                   | 2 d         | 3 d        | 1 d                   | 2 d         | 3 d        | 1 d              | 2 d | 3 d |
| (z)-1,5-二烯-3-醇 (z)-1,5-octadien-3-ol | ND          | 0.90±0.02a           | 0.47±0.10d  | 0.92±0.03a | 0.83±0.03b            | ND          | 0.12±0.01e | 0.69±0.02c            | 0.08±0.02e  | 0.13±0.01e |                  |     |     |
| 1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol                | ND          | 0.91±0.01b           | 0.97±0.02b  | 0.92±0.03b | 1.72±0.05a            | ND          | ND         | 0.95±0.06b            | 0.09±0.01c  | 0.08±0.01c |                  |     |     |
| 芳樟醇 1 linalool                       | 0.16±0.00ab | 0.18±0.01ab          | 0.17±0.00ab | 0.15±0.01b | 0.20±0.01a            | 0.16±0.01b  | 0.10±0.03c | 0.16±0.02b            | 0.08±0.01c  | 0.09±0.01c |                  |     |     |
| 异丁醛 Isobutanal                       | 0.19±0.02c  | 0.45±0.02a           | 0.46±0.01a  | 0.45±0.02a | 0.16±0.01c            | 0.38±0.01b  | 0.20±0.01c | 0.43±0.02ab           | 0.39±0.04b  | 0.48±0.01a |                  |     |     |
| 异戊醛 3-methyl-butanal                 | 0.44±0.01g  | 1.28±0.00a           | 1.03±0.02c  | 1.09±0.01b | 0.79±0.02e            | 1.27±0.01a  | 0.90±0.01d | 1.01±0.02c            | 0.69±0.01f  | 0.18±0.01h |                  |     |     |
| 甲基丁醛 2-methyl-butanal                | 0.59±0.01e  | 1.24±0.01a           | 1.11±0.01b  | 1.21±0.01a | 0.70±0.01e            | 0.70±0.03c  | 0.68±0.02e | 1.11±0.01b            | 0.93±0.02d  | 0.99±0.01c |                  |     |     |
| (z)-3-己烯醛 (z)-3-hexenal              | 0.11±0.01ef | ND                   | 0.24±0.03b  | 0.2±0.02bc | 0.19±0.02bcd          | 0.08±0.01f  | ND         | 0.15±0.02de           | 0.16±0.01cd | 0.58±0.01a |                  |     |     |
| (e)-2-己烯醛 (E)-2-hexenal              | ND          | ND                   | ND          | ND         | ND                    | 0.80±0.02a  | 0.55±0.02b | 0.24±0.02d            | 0.22±0.00d  | 0.34±0.01c |                  |     |     |
| β-紫罗酮 β-ionone                       | 0.60±0.02c  | 0.45±0.02d           | 0.43±0.01d  | 0.39±0.02d | 0.21±0.01f            | 0.70±0.02b  | 0.58±0.03c | 0.44±0.02d            | 0.81±0.02a  | 0.31±0.03e |                  |     |     |
| 2-乙基-呋喃 2-ethyl-furan                | 0.71±0.02b  | 1.34±0.03a           | 0.70±0.02b  | 0.54±0.03c | 0.20±0.02e            | 0.64±0.02bc | 0.69±0.03b | 0.3±0.09d             | 0.39±0.04d  | 0.40±0.01d |                  |     |     |
| 二甲基硫醚 2-thiapropane                  | 0.91±0.01f  | 2.46±0.10a           | 1.76±0.02d  | 1.74±0.03d | 0.8±0.02g             | 2.29±0.07b  | 0.46±0.03h | 1.9±0.02e             | 2.14±0.04c  | 2.15±0.04c |                  |     |     |

ND 表示未检测到。同一行数据后标有不同小写字母, 表示在 0.05 水平上差异显著。

ND indicates not detected. Data followed by different small letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level.

结果与本研究不一致,造成这种差异的原因可能是寄主植物不同,在受到不同水平为害后所释放的挥发物不同,也不排除高密度二斑叶螨为害番茄诱导的防御反应不利于西花蓟马做出选择(Li *et al.*, 2002)。

本研究发现 10 种不同处理番茄挥发性物质的种类、含量及其比例在各处理间存在较大差异。健康植株挥发性物质种类比二斑叶螨为害后的种类少,表明寄主植物受二斑叶螨为害后挥发物明显增多。前人研究表明大多数植物遭遇虫害后均会释放萜烯类化合物(娄永根和程家安, 2000),萜烯类是很重要的植食性昆虫诱导的植物抗性物质,在抑制害虫吸引天敌方面起着重要作用(Dicke *et al.*, 2009),Thaler 等(2002)通过顶空抽样分析与未受害野生型西红柿植株相比,被害的野生型植株诱导了大量的挥发物产生,诱导的挥发物主要是萜烯类,包括了 $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯和 2-萘烯等。本文的研究也有类似的结果,二斑叶螨为害后诱导新增加了香橙烯, (+)-2-萘烯、 $\alpha$ -水芹烯和 $\beta$ -水芹烯的相对百分含量则明显增加。但有的挥发物含量在螨害后降低,如(Z)-3-己烯-1-醇的相对百分含量在健康番茄占总挥发物的比例最高,二斑叶螨为害后其含量明显降低,1-己醇的含量也是受螨害后明显降低。二斑叶螨为害程度加重后新增加邻-异丙基苯、2-甲基-1-丁醇和(E)-2-己烯醛等 3 种挥发物。这符合虫害诱导的植物挥发物具有很高的多样性和可变性的规律(娄永根和程家安, 2000)。

本研究发现在二斑叶螨为害密度为 15 头/株时,西花蓟马对为害 1 d 番茄的选择性最高,对伞花烃和 1-辛烯-3-醇的相对百分含量在为害 1 d 时明显高于其它时间。在二斑叶螨为害 1 d 时,西花蓟马对 15 头二斑叶螨为害的番茄植株选择率最高,挥发物检测结果表明也是这 2 种化合物的相对百分含量在此处理最高,因此推测对伞花烃和 1-辛烯-3-醇对西花蓟马有引诱作用。但对伞花烃已被证实是一种对烟粉虱具有强烈驱避作用的挥发物(Bleeker *et al.*, 2009)。这个结果和本文结果正好相反,可能是同一挥发物对不同

昆虫产生的作用不同。二斑叶螨为害密度为 15 头/株时,西花蓟马对为害 3 d 和健康番茄的选择性最低,而邻-异丙基苯的相对百分含量在为害 3 d 时最高,并且邻-异丙基苯随着二斑叶螨为害程度的增加而被诱导出来,而西花蓟马偏向选择为害程度居中的寄主,推测邻-异丙基苯对西花蓟马有一定的驱避性。在二斑叶螨为害 3 d 时,西花蓟马对 15 头和 25 头为害株的选择率最低,间伞花烃的相对百分含量在这 2 个处理最高;在二斑叶螨为害 1 d 时,西花蓟马对 15 头二斑叶螨为害的番茄植株选择率最高,但间伞花烃在 15 头为害株上未检测到。综合 2 个结果,推测间伞花烃对西花蓟马有一定的驱避作用。这些挥发性物质的驱避或引诱作用还有待于进一步研究,西花蓟马对以上挥发物标样的行为及触角电位反应也有待进一步探讨。

植食性昆虫为害植物后诱导植物产生挥发物具有普遍性,但是诱导产生的挥发物种类及其含量因植物种类、品种、叶片生长阶段,植食性昆虫的种类、龄期和非生物因子(光照强度、季节和水压)不同而有所差异(Takabayashi *et al.*, 1994a)。有研究者在利马豆受二斑叶螨为害后释放的挥发物中检测到芳樟醇、(E)- $\beta$ -罗勒烯、(3E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯和水杨酸甲酯(Dicke *et al.*, 1990),在受害的黄瓜植株中检测到 2-甲基丁腈、3-甲基丁腈和 2-甲基丁醛邻-甲基肼、3-甲基丁醛邻-甲基肼等一些不常见的腈类和肼类化合物(Takabayashi *et al.*, 1994b)。而本研究发现,二斑叶螨为害番茄后释放的挥发物主要以萜烯类化合物为主,其次是醇类和醛类化合物,与利马豆和黄瓜所释放的挥发物有所差异。

烟粉虱 *Bemisia tabaci* Gennadius 取食番茄后诱导的番茄产生强烈的防御反应,对后取食斑潜蝇 *Liriomyza frifolii* Burgess 产生了影响,而斑潜蝇先取食诱导的番茄反应则对烟粉虱没有影响(Murugan and Dhandapani, 2007)。表明不同害虫为害诱导的挥发物对害虫的影响不同。挥发物在引诱或驱避害虫中的关键作用需要深入

探讨,对于诱导途径的机理还需从分子水平上更进一步研究。

## 参考文献 (References)

- Bleeker PM, Diergaarde PJ, Ament K, José G, Monique W, Stefan S, de Both MT, Haring MA, Schuurink RC, 2009. The role of specific tomato volatiles in tomato-whitefly interaction. *Plant Physiology*, 151(2): 925–935.
- Dicke M, Van Beek TA, Posthumus MA, Ben Dom N, Van Bokhoven H, De Groot A, 1990. Isolation and identification of volatile kairomone that affects acarine predator-prey interactions: Involvement of host plant in its production. *Journal of Chemical Ecology*, 16(2): 381–396.
- Dicke M, Van Loon JJA, Soler R, 2009. Chemical complexity of volatiles from plants induced by multiple attack. *Nature Chemical Biology*, 5(5): 317–324.
- 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.]
- Girling RD, Hassall M, 2008. Behavioural response of the seven-spot ladybird *Coccinella septempunctata* to plant headspace chemicals collected from four crop brassicas and *Arabidopsis thaliana*, infested with *Myzus persicae*. *Agricultural and Forest Entomology*, 10(4): 29–306.
- He DH, Zhao XP, Jin QH, Zhang BB, Liu C, 2001. Dispersion of two spotted spider mites, *Tetranychus urticae* Koch, and its selection of host plants on farmland in NingXia. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 7(5): 447–451. [贺达汉, 赵晓萍, 靳巧红, 张蓓蓓, 刘超, 2001. 宁夏地区二斑叶螨的寄主植物选择及其季节转移. 应用与环境生物学报, 7(5): 447–451.]
- Hall DG, 2014. Interference by western flower thrips in rearing Asian citrus psyllid: Damage to host plants and facultative predation. *Crop Protection*, 60: 66–69.
- Hong XY, Xue XF, Wang JJ, Dou W, Zhang YX, Chen HJ, Zhang JY, Qiu GS, Hu JH, Wang SL, Yu LC, Shen HM, Sun RH, Guo JJ, Wu WN, Guo MF, Zhang JP, Chen BX, Song ZW, Gui LY, 2013. Integrated control techniques for spider mites on important crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 321–328. [洪晓月, 薛晓峰, 王进军, 豆威, 张艳璇, 陈汉杰, 张金勇, 仇贵生, 胡军华, 王少丽, 余丽辰, 沈慧敏, 孙瑞红, 郭建军, 吴伟南, 郭明昉, 张建萍, 陈炳旭, 宋子伟, 桂连友, 2013. 作物重要叶螨综合防控技术研究与示范推广. 应用昆虫学报, 50(2): 321–328.]
- Janssen A, Willemse E, Van Der Hammen T, 2003. Poor Host plant quality causes omnivore to consume predator eggs. *Journal of Animal Ecology*, 72(3): 478–483.
- Kessler A, Baldwin IT, 2004. Herbivore-induced plant vaccination. Part I. The orchestration of plant defenses in nature and their fitness consequences in the wild tobacco *Nicotiana attenuate*. *The Plant Journal*, 38(4): 639–649.
- Leroy PD, Schillings T, Farmakidis J, Heuskin S, Lognay G, Verheggen FJ, Brostaux Y, Haubeuge E, Francis F, 2012. Testing semiochemicals from aphid, plant and conspecific: attraction of *Harmonia axyridis*. *Insect Science*, 19(3): 372–382.
- Li C, Williams MM, Loh YT, Lee GI, Howe GA, 2002. Resistance of cultivated tomato to cell content-feeding herbivore is regulated by the octadecanoid-signaling pathway. *Plant Physiology*, 130(1): 494–503.
- Li YY, Zhou XR, Pang BP, Han HB, Yan F, 2013. Behavioral responses of *Hippodamia variegata* (Coleoptera: Coccinellidae) to volatiles from plants infested by *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphidae) and analysis of volatile components. *Acta Entomologica Sinica*, 56(2): 153–160. [李艳艳, 周晓榕, 庞保平, 韩海斌, 闫锋, 2013. 多异瓢虫对瓜蚜为害后植物挥发物的行为反应及挥发物成分分析. 昆虫学报, 56(2): 153–160.]
- 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、生态学功能和释放机制. 生态学报, 20(6): 1097–1106.]
- Lv YB, Zhang ZJ, Wu QJ, Du YZ, Zhang HR, Yu Y, Wang WD, Wang MH, Wang MQ, Tong XL, Lv LH, Tan XQ, Fu WD, 2011. Research progress of the monitoring, forecast and sustainable management of invasive alien pest *Frankliniella occidentalis* in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 488–496. [吕要斌, 张治军, 吴青君, 杜予州, 张宏瑞, 于毅, 王恩东, 王鸣华, 王满困, 童晓立, 吕利华, 谭新球, 付卫东, 2011. 外来入侵害虫西花蓟马防控技术研究与示范. 应用昆虫学报, 48(3): 488–496.]
- Maanen RV, Broufas G, Oveja MF, Sabelis MW, Janssen A, 2012.

- Intraguild predation among plant pests: western flower thrips larvae feed on whitefly crawlers. *BioControl*, 57(4): 533–539.
- Martini X, Kincy N, Vaughn K, Dever J, Nansen C, 2013. Positive association between thrips and spider mites in seedling cotton. *Agricultural and Forest Entomology*, 15(2): 197–203.
- Meng HS, Wang KY, Jiang XY, Yi MQ, 2001. Occurrence characteristics of *Tetranychus urticae* and its control methods. *Entomological Knowledge*, 38(1): 52–54. [孟和生, 王开运, 姜兴印, 仪美芹, 2001. 二斑叶螨发生危害特点及防治对策. 昆虫知识, 38(1): 52–54.]
- Murugan M, Dhandapani N, 2007. Induced systemic resistance activates defense responses to interspecific insect infestations on tomato. *Journal of Vegetable Science*, 12(3): 43–62.
- Pallini A, Janssen A, Sabelis MW, 1997. Odour-mediated responses of phytophagous mites to conspecific and heterospecific competitors. *Oecologia*, 110(2): 179–185.
- Pallini A, Janssen A, Sabelis MW, 1998. Predators induce interspecific herbivore competition for food in refuge space. *Ecology Letters*, 1(3): 171–177.
- Pei CY, Zheng CY, 2011. Selectivity of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) on different host vegetables. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 19(2): 383–387. [裴昌莹, 郑长英, 2011. 西花蓟马对不同蔬菜寄主的选择性研究. 中国生态农业学报, 19(2): 383–387.]
- Qin QJ, Gao XW, 2005. Plant defense responses induced by insect herbivory. *Acta Entomologica Sinica*, 48(1): 125–134. [秦秋菊, 高希武, 2005. 昆虫取食诱导的植物防御反应. 昆虫学报, 48(1): 125–134.]
- Roda A, Nyrop J, Dicke M, English-Loeb G, 2000. Trichomes and spider-mite webbing protect predatory mite eggs from intraguild predation. *Oecologia*, 125(3): 438–435.
- Takabayashi J, Dicke M, Posthumus MA, 1994a. Volatile herbivore-induced terpenoids in plant mite interactions: variation caused by biotic and abiotic factors. *Journal of Chemical Ecology*, 20(6): 1329–1354.
- Takabayashi J, Dicke M, Takahashi S, Posthumus MA, Beek TAV, 1994b. Leaf age affects composition of herbivore-induced synomones and attraction of predatory mites. *Journal of Chemical Ecology*, 20(2): 373–386.
- Thaler JS, Farag MA, Pare PW, Dicke M, 2002. Jasmonate-deficient plants have reduced direct and indirect defence against herbivores. *Ecology Letters*, 5(6): 764–774.
- Tian T, Zhi JR, Mou F, 2014. The interactions between volatiles and selectivity of *Frankliniella occidentalis* to kidney bean damaged by *Tetranychus urticae*. *Plant Protection*, 40(1): 77–83. [田甜, 鄧军锐, 牟峰, 2014. 西花蓟马对二斑叶螨为害菜豆的选择性与挥发物的关系. 植物保护, 40(1): 77–83.]
- Yan FM, 2011. Chemical Ecology. Beijing: Science Press. 93–98. [闫凤鸣, 2011. 化学生态学. 北京: 科学出版社. 93–98.]
- Yuan CM, Zhi JR, Cao Y, Ma H, 2011. Selectivity of *Frankliniella occidentalis* to vegetable hosts. *Acta Ecologica Sinica*, 31(6): 1720–1726. [袁成明, 鄧军锐, 曹宇, 马恒, 2011. 西花蓟马对蔬菜寄主的选择性. 生态学报, 31(6): 1720–1726.]
- Yue Z, 2012. The research of interpecies competition between *Frankliniella occidentalis* and *Tetranychus urticae*. Master Thesis. Guiyang: Guizhou University. [岳臻, 2012. 西花蓟马与二斑叶螨种间关系研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学.]