

# 垂叶榕叶片表面蜡质化学组分及蓟马锉吸胁迫对其含量的影响

余德亿<sup>1\*</sup>, 姚锦爱<sup>1</sup>, 黄鹏<sup>1</sup>, 陈峰<sup>1</sup>, 康文斌<sup>2</sup>

(1. 福建省农业科学院植物保护研究所, 福州 350013; 2. 福州市农产品质量安全检验检测中心, 福州 350004)

**摘要:** 为明确垂叶榕(*Ficus benjamina*)叶片表面蜡质的化学组分和蓟马(*Thrips* spp.)锉吸胁迫对蜡质含量的影响, 采用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对不同危害等级蓟马锉吸叶片的表面蜡质化学组分及含量进行了检测和比较分析。结果表明, 垂叶榕叶片的表面蜡质中含有 32 种化合物, 包含有 9 种酸、8 种醇、5 种酯、5 种酮和 5 种烃。不同危害等级叶片的表面蜡质总量、已分离化合物的总离子峰面积、各类化合物的相对含量、各类化合物及其主要组分的离子峰面积均不同。垂叶榕叶片的表面蜡质的化学组分和含量可直接或间接反映叶片受蓟马锉吸危害的程度。这说明叶片表面蜡质的化学组分及含量在垂叶榕与蓟马的互动和协同进化中扮演着重要角色。

**关键词:** 垂叶榕; 蓟马; 锉吸胁迫; 表面蜡质

doi: 10.396/j.issn.1005-3395.2013.05.011

## Chemical Constitution of Surface Wax and Effect of Rasp-ing-sucking by Thrips on Wax Contents in *Ficus benjamina* Leaves

YU De-yi<sup>1\*</sup>, YAO Jin-ai<sup>1</sup>, HUANG Peng<sup>1</sup>, CHEN Feng<sup>1</sup>, KANG Wen-bin<sup>2</sup>

(1. Institute of Plant Protection, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 2. Fuzhou Inspection and Testing Centre for Agricultural Product Quality and Safety, Fuzhou 350004, China)

**Abstract:** In order to understand the chemical constitution of surface wax in leaves of *Ficus benjamina* Linn. and the changes in wax contents rasp-sucked by thrips, the chemical constitution of surface wax and its contents in leaves at different damage grades by thrips were determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that there were 32 compounds in surface wax of *F. benjamina* leaves, including 9 acids, 8 alcohols, 5 esters, 5 ketones and 5 hydrocarbons. The changes in total amount of surface wax, the total ion peak area of compounds, the relative content of each compounds, the ion peak area of each compounds and its main component in different grade leaves damaged by thrips were different. The chemical constitution and contents of surface wax could reflect the damage degree by thrips either directly or indirectly. It was suggested that the chemical constitution of surface wax and its contents had played a major role in interaction and co-evolution between *F. benjamina* and thrips.

**Key words:** *Ficus benjamina*; Thrips; Rasp-suck stress; Surface wax

收稿日期: 2013-04-01 接受日期: 2013-06-25

基金项目: 福建省农业科技重大专项专题(2010NZ0003-2-3); 福建省属公益类科研院所基本科研专项(2010R1026-4); 福建省农业科技重点项目(2011N0009); 国家国际科技合作专项项目(2013DFA31830)资助

作者简介: 余德亿(1972~), 男, 副研究员。研究方向为农业昆虫与害虫防治研究。

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yudy\_2004@126.com

植物叶片表面蜡质具有各种各样的结晶体,由酯类等化合物组成,是植物、植食性昆虫及其捕食者和寄生者相互作用的竞技场,在昆虫与寄主植物互作和协同进化过程中扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>。目前,已有表面蜡质影响植食性昆虫对寄主植物的选择、取食和产卵等方面的研究,如 Blenn 等<sup>[2]</sup>研究了拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)表面蜡质对大菜粉蝶(*Pieris brassicae*)产卵的影响;Eigenbrode 等<sup>[3]</sup>研究了甘蓝(*Brassica oleracea*)的 1 种抗虫品种叶片表面蜡质对小菜蛾(*Plutella xylostella*)幼虫选择行为的影响;王美芳等<sup>[4]</sup>研究了小麦(*Triticum aestivum*)叶片表面蜡质及其与抗蚜性的关系;刘勇等<sup>[5]</sup>研究了不同小麦品种(系)叶片表面蜡质对麦长管蚜(*Sitobion avenae*)和禾谷缢管蚜(*Rhopalosiphum padi*)取食的影响。这些研究均证实表面蜡质的理化特性能够改变害虫与寄主植物间的相互作用,对寄主植物抗性的利用具有重要意义。

蓟马(Thrips)是垂叶榕(*Ficus benjamina* Linn.)上最重要的锉吸类害虫,多地调查证实包括榕管蓟马(*Gynairothrips uzeli* Zimmerman)在内的多种蓟马对垂叶榕叶片具有极强的嗜好性<sup>[6]</sup>。为有效控制垂叶榕高感品种上的蓟马锉吸危害,有必要了解植物表面蜡质的化学组分及其在寄主植物抗性利用中的作用,目前有关这方面的研究尚未见报道。本研究通过对垂叶榕叶片表面蜡质进行提取、分离及鉴定,检测垂叶榕受蓟马锉吸不同危害等级叶片表面蜡质的化学组分及含量,探讨蓟马锉吸胁迫对其含量的影响,以了解叶片表面蜡质的化学组分及含量在垂叶榕与蓟马的互作和协同进化中扮演的角色,从而为深入研究表面蜡质单一组分与抗虫性的关系打下基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

2012 年 4 月 6 日,在福州市金祥路路旁的园林绿化带中,选择垂叶榕(*Ficus benjamina* Linn.)种植带做样本采集地块,地块属长方形,长约 400 m,宽约 10 m,持续培育年限约 5 年,密植行道造型,株高约 2.0 ~ 2.5 m;随后以平行线式取样法随机采集垂叶榕当年生嫩枝 60 枝,嫩枝顶端至少保留有 5 片新叶,带回室内从嫩枝顶端 1 ~ 5 片新叶中选出

未受蓟马锉吸危害的叶片 100 片,用毛笔轻轻刷除灰尘等杂质,于 4℃ 恒温保存,用于检测表面蜡质化学组分。2012 年 5 月 11 日,在样本采集地块以 5 点式取样法定好采样点,每点选取 4 株垂叶榕,在每株树冠的东、南、西、北及内部等 5 个方位随机采集当年生嫩枝 3 枝,嫩枝顶端至少保留有 5 片新叶,共采集 300 枝当年生嫩枝带回室内,剪取每根嫩枝顶端的 1 ~ 5 片新叶,用毛笔轻轻刷除蓟马及杂质,按余德亿等<sup>[5]</sup>提出的分级标准分别将叶片分为 0 ~ 4 级叶片,每级叶片至少 100 张,于 4℃ 恒温保存,用于分析蓟马锉吸危害对叶片表面蜡质含量的影响。

### 1.2 叶片表面蜡质提取

用电子天平(SPN302F,美国 OHAUS 公司)称取 10.00 g 叶片样品 3 份分别进行叶片表面蜡质提取。提取方法如下:在通风厨内将称好的叶片样品浸入装有 100.0 mL 三氯甲烷分析纯( $\text{CHCl}_3$ ,衡阳凯信化工试剂有限公司)的玻璃烧杯中漂洗 15 s,后将漂洗液用 0.22  $\mu\text{m}$  微孔有机滤膜抽滤,再用 10.0 mL  $\text{CHCl}_3$  漂洗玻璃用具,用滤膜抽滤后并入抽滤液;将抽滤液置于旋转蒸发仪(RE-52B,上海亚荣生化仪器厂)上,在 45.0℃ 下浓缩至 0.5 ~ 0.8 mL,然后用玻璃移液管吸取 2.0 mL  $\text{CHCl}_3$  漂洗蒸发瓶,漂洗 5 次,漂洗液均回收至已用电子天平(AR224,美国 OHAUS 公司)称重的浓缩瓶中;将浓缩瓶置于氮吸仪(SE812,北京帅恩科技有限责任公司)上,用 99.999% 氮气吹干浓缩瓶中的溶剂后再称重,计算叶片的表面蜡质质量。加入  $\text{CHCl}_3$  配成浓度为 10.0  $\text{mg mL}^{-1}$  的提取蜡液,吸取 1.0 mL 提取蜡液移入 5.0 mL 的小试管中,置于氮吸仪上用氮气吹干溶剂,然后加入 0.1 mL 的 BSTFA [ $\text{CF}_3\text{C}=\text{NSi}(\text{CH}_3)_3\text{OSi}(\text{CH}_3)_3$ , 美国 SUPELCO 公司],在 70.0℃ 的水浴锅中衍生 30 min,衍生后再用氮气吹去衍生剂,加入 1.0 mL  $\text{CHCl}_3$ ,供 GC-MS 分离及鉴定。

### 1.3 叶片表面蜡质 GC-MS 分离及鉴定

**蜡质成分 GC-MS 分离** 从 3 份蜡质提取液中随机选取 1 份,参考王美芳等<sup>[4]</sup>的方法并略加改进,用气相色谱-质谱联用仪 GC-MS (TraceGC-PolarisQ, 美国 Thermo Finnigan 公司)进行蜡质成分分离。自动进样器为美国 Thermo Finnigan 公

司的 AS3000。色谱条件:色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(30.0 m × 0.25 mm × 0.25 μm),固定相为聚二甲基硅氧烷;载气为氦气(纯度 > 99.999%),流量为 1.0 mL min<sup>-1</sup>;不分流进样,进样体积 1.0 μL;进样口温度 250℃,连接器温度 250℃。程序升温:初始温度 50℃,保持 1 min;以 20 ℃ min<sup>-1</sup> 升温到 170℃,保持 2 min;再以 5 ℃ min<sup>-1</sup> 升温至 280℃,保持 20 min。质谱条件:电子轰击电离源(EI),能量 70 eV;离子源温度 230℃,溶剂延迟 3 min;SCAN 全扫描采集,质量范围 50 ~ 650 amu。

**表面蜡质化合物鉴定** 表面蜡质中各化合物经 GC-MS 检测后得到其离子峰,通过检索 NIST 2.0 和 Wiley Registry of Mass Spectral Data (第 7 版) 质谱数据库以及人工鉴定,解析出正确的酸、醇、

酯、酮、烃等化合物;利用 Xcalibur 化学工作站数据处理系统对离子峰面积进行自动求和,计算各化合物的相对百分含量。

#### 1.4 数据统计和分析

利用 DPS v6.55 数据统计软件,对叶片表面蜡质总量进行单因素试验统计分析,探讨蓟马锉吸胁迫对垂叶榕叶片表面蜡质总量变化的影响。

## 2 结果和分析

### 2.1 垂叶榕叶片表面蜡质化学组分

未受蓟马锉吸危害的垂叶榕新叶表面蜡质的 GC-MS 分离图谱及其对应化合物见图 1。垂

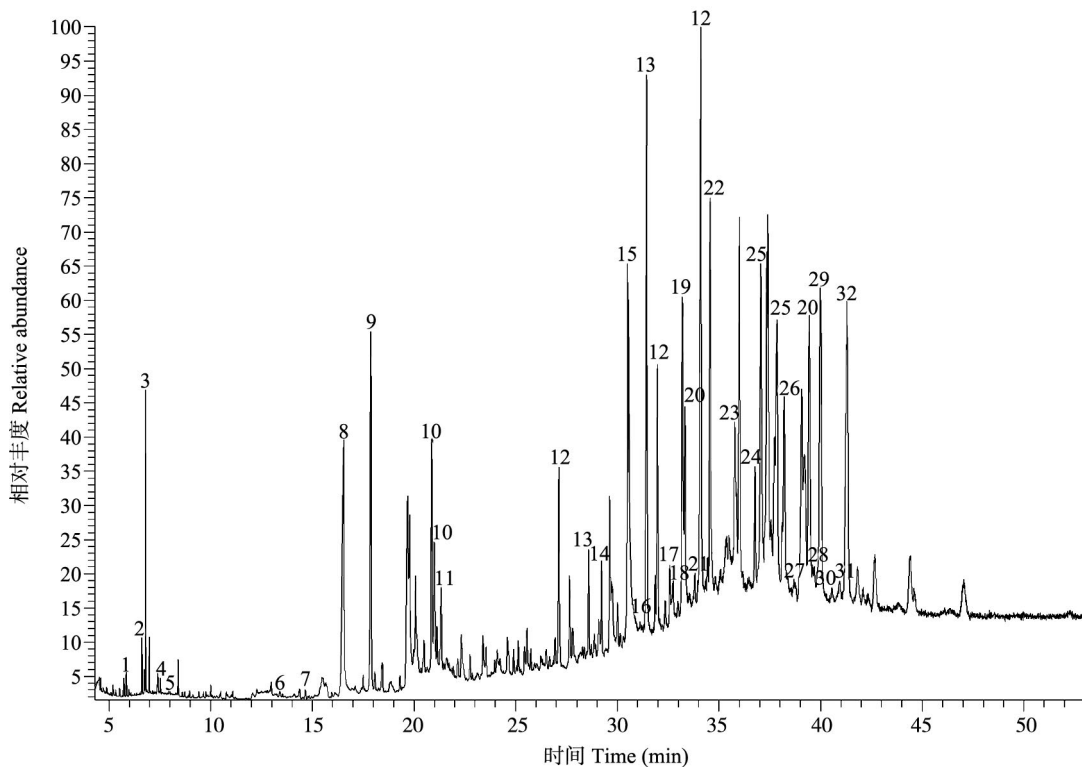


图 1 垂叶榕叶片表面蜡质化合物的总离子流图。1. C<sub>5</sub> 酮酸(C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>); 2. C<sub>4</sub> 二甘醇(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>); 3. C<sub>7</sub> 酸(C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>); 4. C<sub>9</sub> 酸(C<sub>9</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>); 5. C<sub>15</sub> 烃(C<sub>15</sub>H<sub>24</sub>); 6. C<sub>9</sub> 二羧酸(C<sub>9</sub>H<sub>16</sub>O<sub>4</sub>); 7. C<sub>20</sub> 酯(C<sub>20</sub>H<sub>30</sub>O<sub>4</sub>); 8. C<sub>16</sub> 酸(C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>); 9. C<sub>16</sub> 酸(C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub> 同分异构体); 10. C<sub>18</sub> 酸(C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>); 11. C<sub>15</sub> 二羧酸(C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>O<sub>4</sub>); 12. C<sub>34</sub> 烃(C<sub>34</sub>H<sub>70</sub>); 13. C<sub>44</sub> 烃(C<sub>44</sub>H<sub>90</sub>); 14. C<sub>30</sub> 醇(C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>); 15. C<sub>18</sub> 二羧酸(C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>4</sub>); 16. C<sub>27</sub> 醇(C<sub>27</sub>H<sub>46</sub>O<sub>2</sub>); 17. C<sub>28</sub> 醇(C<sub>28</sub>H<sub>48</sub>O<sub>2</sub>); 18. C<sub>34</sub> 酯(C<sub>34</sub>H<sub>34</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>); 19. C<sub>27</sub> 酮(C<sub>27</sub>H<sub>18</sub>O<sub>8</sub>); 20. C<sub>20</sub> 醇(C<sub>20</sub>H<sub>40</sub>O); 21. C<sub>39</sub> 酮(C<sub>39</sub>H<sub>60</sub>O<sub>3</sub>); 22. C<sub>28</sub> 醇(C<sub>28</sub>H<sub>58</sub>O); 23. C<sub>31</sub> 醇(C<sub>31</sub>H<sub>38</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>); 24. C<sub>36</sub> 烃(C<sub>36</sub>H<sub>74</sub>); 25. C<sub>30</sub> 酮(C<sub>30</sub>H<sub>48</sub>O); 26. C<sub>15</sub> 酮(C<sub>15</sub>H<sub>22</sub>O); 27. C<sub>20</sub> 烃(C<sub>20</sub>H<sub>34</sub>); 28. C<sub>35</sub> 酯(C<sub>35</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>); 29. C<sub>32</sub> 酯(C<sub>32</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>); 30. C<sub>30</sub> 醇(C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O); 31. C<sub>30</sub> 酮(C<sub>30</sub>H<sub>50</sub>O); 32. C<sub>51</sub> 酯(C<sub>51</sub>H<sub>102</sub>O<sub>4</sub>)。 Fig. 1 Total ion chromatography of compounds of surface wax in *Ficus benjamina* leaves. 1. C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>, ketonic acid; 2. C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>, diethylene glycol; 3. C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>, acid; 4. C<sub>9</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>, acid; 5. C<sub>15</sub>H<sub>24</sub>, hydrocarbon; 6. C<sub>9</sub>H<sub>16</sub>O<sub>4</sub>, dibasic carboxylic acid; 7. C<sub>20</sub>H<sub>30</sub>O<sub>4</sub>, ester; 8. C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>, acid; 9. C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>, isomerism acid; 10. C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>, acid; 11. C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>O<sub>4</sub>, dibasic carboxylic acid; 12. C<sub>34</sub>H<sub>70</sub>, hydrocarbon; 13. C<sub>44</sub>H<sub>90</sub>, hydrocarbon; 14. C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>, alcohol; 15. C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>4</sub>, dibasic carboxylic acid; 16. C<sub>27</sub>H<sub>46</sub>O<sub>2</sub>, alcohol; 17. C<sub>28</sub>H<sub>48</sub>O<sub>2</sub>, alcohol; 18. C<sub>34</sub>H<sub>34</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>, ester; 19. C<sub>27</sub>H<sub>18</sub>O<sub>8</sub>, ketones; 20. C<sub>20</sub>H<sub>40</sub>O, alcohol; 21. C<sub>39</sub>H<sub>60</sub>O<sub>3</sub>, ketones; 22. C<sub>28</sub>H<sub>58</sub>O, alcohol; 23. C<sub>31</sub>H<sub>38</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, alcohol; 24. C<sub>36</sub>H<sub>74</sub>, hydrocarbon; 25. C<sub>30</sub>H<sub>48</sub>O, ketones; 26. C<sub>15</sub>H<sub>22</sub>O, ketones; 27. C<sub>20</sub>H<sub>34</sub>, hydrocarbon; 28. C<sub>35</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>, ester; 29. C<sub>32</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>, ester; 30. C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O, alcohol; 31. C<sub>30</sub>H<sub>50</sub>O, ketones; 32. C<sub>51</sub>H<sub>102</sub>O<sub>4</sub>, ester.

叶榕新叶的表面蜡质中含有 32 种已知化学结构的化合物, 其中酸类有 9 种, 7 种饱和脂肪酸分别为短链的 C<sub>5</sub> 酮酸(C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>)、中链的 C<sub>9</sub> 酸(C<sub>9</sub>H<sub>18</sub>O<sub>2</sub>)和 C<sub>9</sub> 二羧酸(C<sub>9</sub>H<sub>16</sub>O<sub>4</sub>)、长链的 C<sub>15</sub> 二羧酸(C<sub>15</sub>H<sub>28</sub>O<sub>4</sub>)、C<sub>16</sub> 酸(C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub> 的 2 种同分异构体)和 C<sub>18</sub> 二羧酸(C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>4</sub>), 2 种不饱和脂肪酸为中链的 C<sub>7</sub> 酸(C<sub>7</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)和长链的 C<sub>18</sub> 酸(C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>); 醇类有 8 种, 3 种脂肪醇分别为饱和一元醇 C<sub>28</sub> 醇(C<sub>28</sub>H<sub>58</sub>O)和二元醇 C<sub>4</sub> 二甘醇(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>)、不饱和一元醇 C<sub>20</sub> 醇(C<sub>20</sub>H<sub>40</sub>O), 3 种脂环醇分别为一元醇 C<sub>30</sub> 醇(C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O)、二元醇 C<sub>30</sub> 醇(C<sub>30</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>)和 C<sub>31</sub> 醇(C<sub>31</sub>H<sub>38</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>), 2 种芳香醇均为有侧链的一元醇, 分别为 C<sub>27</sub> 醇(C<sub>27</sub>H<sub>46</sub>O<sub>2</sub>)和 C<sub>28</sub> 醇(C<sub>28</sub>H<sub>48</sub>O<sub>2</sub>); 酯类有 5 种, 4 种不饱和酯均为复杂的环状化合物, 分别为一元环酯 C<sub>32</sub> 酯(C<sub>32</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>)、C<sub>34</sub> 酯(C<sub>34</sub>H<sub>34</sub>N<sub>4</sub>O<sub>4</sub>)和 C<sub>35</sub> 酯(C<sub>35</sub>H<sub>52</sub>O<sub>2</sub>)、二元环酯 C<sub>20</sub> 酯(C<sub>20</sub>H<sub>30</sub>O<sub>4</sub>), 1 种饱和酯为一元链酯 C<sub>51</sub> 酯(C<sub>51</sub>H<sub>102</sub>O<sub>4</sub>); 酮类有 5 种, 均为复杂的环状化合物, 3 种脂环酮分别为一元酮 C<sub>15</sub> 酮(C<sub>15</sub>H<sub>22</sub>O)和 C<sub>30</sub> 酮(C<sub>30</sub>H<sub>48</sub>O 和 C<sub>30</sub>H<sub>50</sub>O), 2 种芳香酮分别为一元酮 C<sub>39</sub> 酮(C<sub>39</sub>H<sub>60</sub>O<sub>3</sub>)和二元酮 C<sub>27</sub> 酮(C<sub>27</sub>H<sub>18</sub>O<sub>8</sub>); 烃类有 5 种, 3 种开链烃分别为

饱和烷烃中的 C<sub>34</sub> 烃(C<sub>34</sub>H<sub>70</sub>)、C<sub>36</sub> 烃(C<sub>36</sub>H<sub>74</sub>)和 C<sub>44</sub> 烃(C<sub>44</sub>H<sub>90</sub>), 2 种脂环烃分别为环烯烃中的 C<sub>15</sub> 烃(C<sub>15</sub>H<sub>24</sub>)和 C<sub>20</sub> 烃(C<sub>20</sub>H<sub>34</sub>)。

## 2.2 蓟马锉吸胁迫对垂叶榕叶片表面蜡质含量的影响

### 2.2.1 不同危害等级蓟马锉吸叶片表面蜡质总量的变化

对不同危害等级(0~4 级)蓟马锉吸叶片的表面蜡质总量进行单因素方差分析(表 1)和多重比较(表 2), 可知蓟马锉吸胁迫对垂叶榕叶片表面蜡质总量产生了极显著影响( $P = 3.19 \times 10^{-9} < 0.01$ ,  $F = 176.1030 > F_{0.01} = 5.9943$ )。各等级叶片(0~4 级)的表面蜡质总量发生变化, 1 级叶片的表面蜡质总量大幅下降, 比 0 级叶片下降了 28.47%, 达极显著差异; 但垂叶榕很快就能适应蓟马的锉吸胁迫, 2 级和 3 级叶片表面蜡质总量快速回升, 甚至略超过蓟马锉吸危害前的水平, 与 0 级叶片的差异不显著; 随着胁迫的继续, 垂叶榕还是抵抗不住蓟马的锉吸危害, 表面蜡质遭到极大破坏, 4 级叶片的蜡质总量大幅度地下降, 比 0 级叶片下降了 58.50%, 与 0~3 级叶片达极显著差异水平。

表 1 不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质总量的单因素方差分析

Table 1 One-Way analysis of surface wax contents in leaves with different damage grades by thrips

差异来源 Difference source	平方和 Square sum	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i> <sub>0.01</sub>
处理间 Between treatments	0.0300	4	0.0075	176.1030	3.19×10 <sup>-9</sup>	5.9943
处理内 Within treatment	0.0004	10	4.25×10 <sup>-5</sup>			
总变异 Total variation	0.0304	14				

表 2 不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质总量

Table 2 Surface wax contents in leaves with different grades damaged by thrips

危害等级 Damage grade	表面蜡质总量 [g (10.00 g) <sup>-1</sup> ] Surface wax content
0	0.1858 ± 0.0057aA
1	0.1329 ± 0.0062bB
2	0.1859 ± 0.0068aA
3	0.1941 ± 0.0069aA
4	0.0771 ± 0.0069cC

数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著( $P < 0.01$ )和显著( $P < 0.05$ ) (Duncan 氏新复极差法检验)。

Data followed different capital and small letters indicate significant differences at 0.01 and 0.05 levels by Duncan's new multiple rang test, respectively.

### 2.2.2 不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质各组分含量比较

比较不同等级(0~4 级)蓟马锉吸叶片已分离化合物的总离子峰面积及各类化合物的相对含量(图 2), 结果表明, 刚受蓟马锉吸危害的 1 级叶片, 表面蜡质的化合物总离子峰面积出现快速下降, 比 0 级叶片下降了 27.65%; 各类化合物的相对含量出现波动, 但仍是烃 > 醇 > 酮 > 酯 > 酸, 与 0 级叶片的排序一致。危害略微加重的 2 级叶片, 总离子峰面积降速变缓, 比 1 级叶片仅下降了 3.76%; 各类化合物的相对含量出现变化, 醇类物质含量提升较多, 排序变为醇 > 烃 > 酮 > 酯 > 酸。危害更为严重的 3 级叶片, 总离子峰面积不降反升, 比 2 级叶片上升了 24.11%; 各类化合物相对含量虽有波动, 但



排序与2级叶片保持一致。危害最严重的4级叶片，总离子峰面积仍有一定幅度的上升，但升幅减缓，比3级叶片仅上升了6.49%，未达到0级叶片的水平；各类化合物的相对含量出现变动，烃类物质含量得到较快提升，排序变为烃 > 醇 > 酮 > 酯 > 酸，

与0级叶片一致。

将不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质各类化合物及其主要组分的离子峰面积进行比较(图3)，结果表明，在蓟马锉吸过程中，榕树叶片由“0级→4级”危害逐步加重，但其表面蜡质的各类化合物含

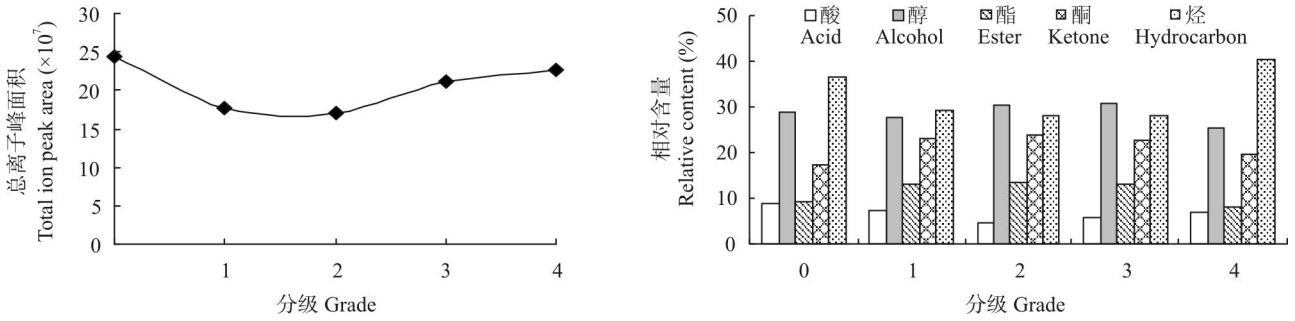


图2 不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质总离子峰面积及各类化合物的相对含量  
Fig. 2 Total ion peak area of surface wax and relative content of each compound from different grade leaves damaged by thrips

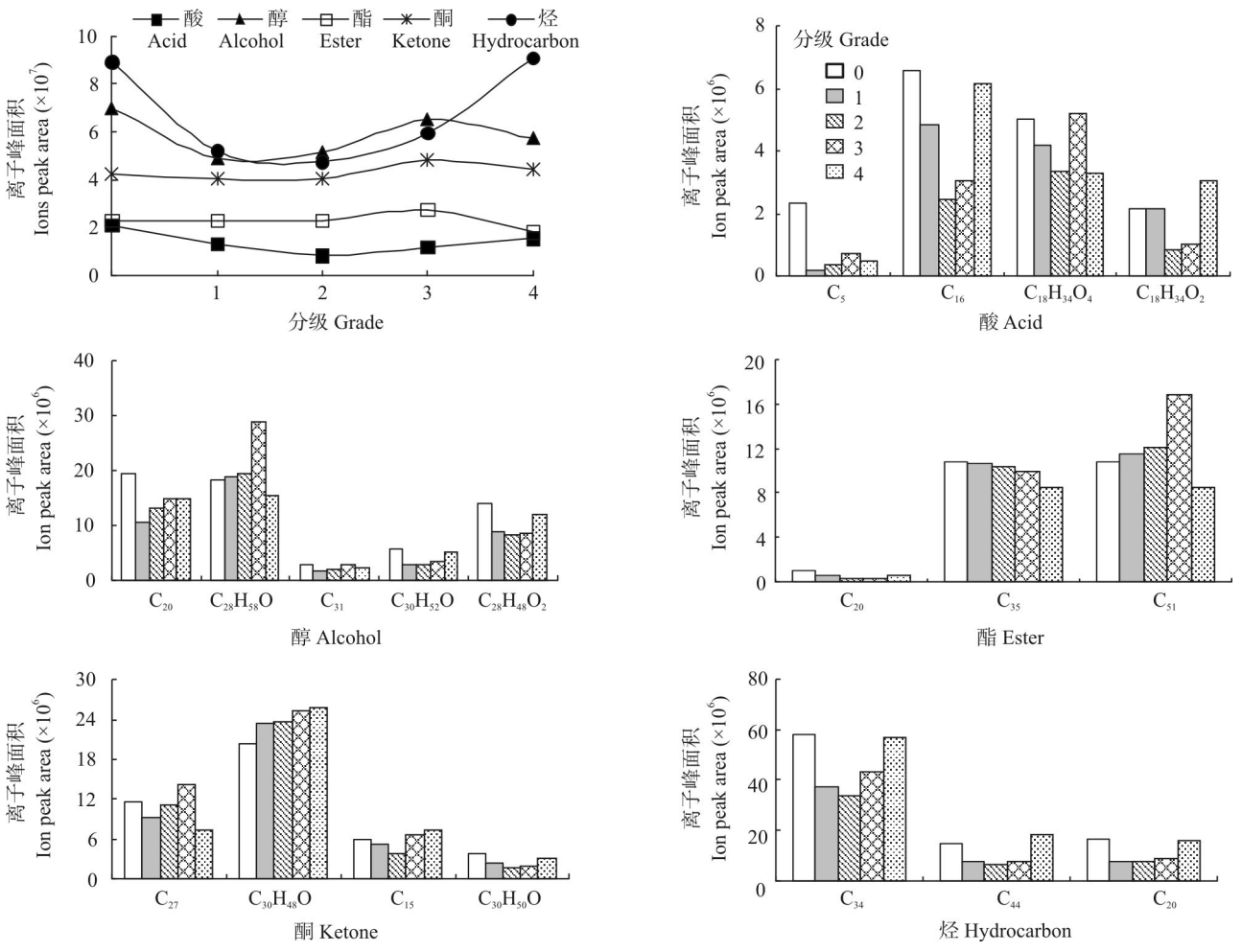


图3 不同等级蓟马锉吸叶片表面蜡质各类化合物及其主要组分离子峰面积比较  
Fig. 3 Comparison of ion peak area of each compound and its main component in the surface wax from different grades of leaves damaged by thrips

量的变化则大不相同,酸类和烃类化合物先下降后回升,醇类化合物则是“下降→回升→下降”,酯类和酮类则是平稳后上升再下降。主要组分的离子峰面积的变化更为复杂,如 $C_5$ 酸在各级叶片均出现显著下降,1级叶片下降最多,2、3级叶片略有回升,4级叶片又下降,呈现“下降→回升→下降”的变化趋势; $C_{16}$ 酸在各级叶片均出现不同程度的下降,表现“下降→回升”的变化; $C_{18}H_{34}O_4$ 酸的变化与 $C_5$ 酸一致; $C_{18}H_{34}O_2$ 酸在1级叶片的变化幅度很小,呈现“平稳→下降→上升”的趋势;醇、酯、酮和烃的变化方式也各具特点,但均可直接或间接反映叶片受蓟马锉吸危害的程度。

### 3 结论和讨论

蜡质是一类有机混合物的总称,双子叶植物的叶片表面蜡质中主要含有烷烃、醛、酯、酮、脂肪醇(伯醇和仲醇)、脂肪酸及游离脂肪酸和环状化合物等<sup>[1,7]</sup>。本研究在分析小麦、水稻(*Oryza sativa*)、覆盆子(*Rubus idaeus*)、山楂(*Crataegus monogyna*)等植物叶片表面蜡质的基础上<sup>[4,8-9]</sup>,首次对桑科榕属植物的叶片表面蜡质进行测定,摸索建立了垂叶榕叶片表面蜡质提取和气相色谱-质谱联用(GC-MS)分离及鉴定的方法。该方法能将叶片表面蜡质中的酸、醇、酯、酮和烃等类化合物较好地分离,鉴定出32种已知化学结构的化合物,包含有9种酸、8种醇、5种酯、5种酮和5种烃。但在总离子流图中未解析到醛类化合物,只在 $C_{34}$ 酯中发现有醛官能团,同时也尚有少量相互重叠的峰出现,这可能与色谱或质谱条件设置有关,也可能与三氯甲烷的使用浓度有关,仍有待进一步完善提取、分离和测定条件。

表面蜡质总量会在一定程度上影响植食性昆虫对寄主植物的选择<sup>[1,10-11]</sup>。本研究证实蓟马锉吸胁迫对垂叶榕叶片表面蜡质总量产生了极显著影响,蓟马锉吸前后垂叶榕叶片的蜡质总量变化很大,呈现先下降后上升再下降的变化,最终表面蜡质遭到极大破坏,说明在蓟马与寄主植物的互动中,表面蜡质总量会影响蓟马对寄主植物的选择,反过来蓟马锉吸危害也会影响寄主植物表面蜡质的含量。同时,表面蜡质的化学成分在植物和昆虫的长期协同关系中扮演重要角色,影响植食性昆虫的取食,主要包括诱导和阻止作用<sup>[12]</sup>。Eigenbrode

等<sup>[11]</sup>研究表明甘蓝叶片中 $C_{14}$ 脂肪酸以及 $C_{24}$ 、 $C_{25}$ 、 $C_{26}$ 脂肪醇是小菜蛾幼虫取食的抵制剂,而14- $C_{29}$ 醇、15- $C_{29}$ 醇、14,15- $C_{29}$ 二醇以及 $C_{30}$ 脂肪醇则被认为是小菜蛾幼虫取食的刺激剂;Shepherd等<sup>[13]</sup>研究表明覆盆子表皮蜡质中不同碳链长的脂肪酸也是影响害虫取食的主要因素,感蚜品种中 $C_{12}$ - $C_{16}$ 脂肪酸以及 $C_{28}$ 、 $C_{30}$ 脂肪酸的含量高,而抗蚜品种中 $C_{18}$ - $C_{22}$ 脂肪酸的含量则相对较高。本研究表明在蓟马锉吸危害过程中垂叶榕叶片表面蜡质已分离化合物的总离子峰面积、各类化合物的相对含量、各类化合物及其主要组分的离子峰面积均出现不同规律的变化,蓟马锉吸胁迫对这些化合物产生了不同程度的影响;同时,这些变化可能是由于寄主植物受蓟马锉吸后,自身迅速调整受害叶片水势、电势等细胞内环境,调控表面蜡质各化合物含量的变化,以协同抵抗这种锉吸胁迫造成的危害,说明在垂叶榕与蓟马的互动和协同进化中,各类化合物及其主要组分含量扮演着重要角色,蓟马常依靠这些物质的含量来选择或淘汰寄主植物,但这些物质对蓟马选择锉吸寄主的影响力如何?哪些是关键因子?受何种基因调控?这些问题仍有待后续研究来解决。

### 参考文献

- [1] Wang M F, Chen J L, Yuan G H, et al. Effects of plant epicuticular waxes on phytophagous insects behaviour [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, 18(3): 1155-1160.  
王美芳, 陈巨莲, 原国辉, 等. 植物表面蜡质对植食性昆虫的影响研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 1155-1160.
- [2] Blenn B, Bandoly M, Küffner A, et al. Insect egg deposition induces indirect defense and epicuticular wax changes in *Arabidopsis thaliana* [J]. *J Chem Ecol*, 2012, 38(7): 882-892.
- [3] Eigenbrode S D, Satish P K. Neonate *Plutella xylostella* responses to surface wax components of a resistant cabbage (*Brassica oleracea*) [J]. *J Chem Ecol*, 1998, 24(10): 1611-1627.
- [4] Wang M F, Chen J L, Cheng D F, et al. Epicuticular wax on wheat leaves and its relationship with cultivars resistance to wheat aphids [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, 14(3): 341-346.  
王美芳, 陈巨莲, 程登发, 等. 小麦叶片表面蜡质及其与品种抗蚜性的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(3): 341-346.
- [5] Liu Y, Chen J L, Cheng D F. Effects of wheat leaf surface waxes on the feeding of two wheat aphid species [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, 18(8): 1785-1788.  
刘勇, 陈巨莲, 程登发. 不同小麦品种(系)叶片表面蜡质对两种麦蚜取食的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1785-1788.

- [6] Yu D Y, Huang P, Yao J A, et al. Species of thrips on potted ficus and the degree of damage to different host plants by the dominant species *Gynaikothrips uzeli* (Thysanoptera: Thripidae) [J]. Acta Entomol Sin, 2012, 55(7): 832–840.  
余德亿, 黄鹏, 姚锦爱, 等. 盆栽榕树蓟马种类及优势种榕管蓟马对寄主植物的致害性 [J]. 昆虫学报, 2012, 55(7): 832–840.
- [7] Kerstiens G. Plant Cuticles: An Integrated Functional Approach [M]. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1996: 201–221.
- [8] Griffiths D W, Robertson G W, Shepherd T, et al. A comparison of the composition of epicuticular wax from red raspberry (*Rubus idaeus* L.) and hawthorn (*Crataegus monogyna* Jacq.) flowers [J]. Phytochemistry, 2000, 55(2): 111–116.
- [9] Zhou X Y, Chen X B, Xu X L, et al. On comparison of extraction methods of epicuticular wax and content of rice leaves [J]. J Hunan Agri Univ (Nat Sci), 2007, 33(3): 273–276.  
周小云, 陈信波, 徐向丽, 等. 稻叶表皮蜡质提取方法及含量的比较 [J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 33(3): 273–276.
- [10] Bergman D K, Dillwith J W, Zarrabi A A, et al. Epicuticular lipids of alfalfa relative to its susceptibility to spotted alfalfa aphids (Homoptera: Aphididae) [J]. Environ Entomol, 1991, 20(3): 781–785.
- [11] Eigenbrode S D, Espelie K E, Shelton A M. Behavior of neonate diamondback moth larvae [*Plutella xylostella* (L.)] on leaves and on extracted leaf waxes of resistant and susceptible cabbages [J]. J Chem Ecol, 1991, 17(8): 1691–1704.
- [12] Li J J, Huang J H, Xie S C. Plant wax and its response to environmental conditions: An overview [J]. Acta Ecol Sin, 2011, 31(2): 565–574.  
李婧婧, 黄俊华, 谢树成. 植物蜡质及其与环境的关系 [J]. 生态学报, 2011, 31(2): 565–574.
- [13] Shepherd T, Robertson G W, Griffiths D W, et al. Epicuticular wax composition in relation to aphid infestation and resistance in red raspberry (*Rubus idaeus* L.) [J]. Phytochemistry, 1999, 52(7): 1239–1254.