



# 四种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 对 Q 型烟粉虱成虫取食行为的影响

何云川, 王新谱<sup>✉</sup>, 洪波, 张婷婷, 周雪飞, 贾彦霞

宁夏大学农学院, 银川 750021

**摘要:** 【目的】利用刺吸电位技术(electronic penetration graph, EPG)研究 Q 型烟粉虱(*Bemisia tabaci*)成虫对吡虫啉、吡蚜酮、螺虫乙酯和溴氰虫酰胺 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 处理 24 h 番茄苗的取食行为, 探明内吸性杀虫剂亚致死剂量对烟粉虱成虫取食行为的影响。【方法】以无农药暴露史的 Q 型烟粉虱成虫为供试昆虫, 番茄品种‘粉印三号’为供试植株。通过水培生测法确定 4 种内吸性杀虫剂的亚致死浓度 LC<sub>25</sub>。在此基础上利用 EPG 监测 Q 型烟粉虱成虫取食寄主的 13 个非韧皮部指标和 8 个韧皮部指标, 并对叶片刺吸孔进行显微观察。以无农药处理为对照(CK)。【结果】4 种杀虫剂对 Q 型烟粉虱成虫的 LC<sub>25</sub> 值为溴氰虫酰胺>吡蚜酮>吡虫啉>螺虫乙酯。在总记录时间 8 h 内, Q 型烟粉虱成虫的取食在各处理中均产生非刺探波(np)、路径波(C)、电位下降波(pd)、韧皮部分泌唾液波(E1)、韧皮部被动吸食波(E2)以及木质部主动吸食波(G)6 种波形。在非韧皮部的 np 波次数上, 溴氰虫酰胺处理的次数最多, 其次是螺虫乙酯处理, 两者间差异不显著( $P>0.05$ ), 但均显著高于 CK 和吡虫啉处理( $P<0.05$ )。C 波和 G 波总持续时间均为 CK 处理最长, 溴氰虫酰胺处理最短, 两处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK 处理的 pd 波总持续时间显著长于 4 种杀虫剂处理( $P<0.05$ ), 其中螺虫乙酯处理最短, 但 4 种杀虫剂处理间差异不显著( $P>0.05$ )。螺虫乙酯处理的 F 波总持续时间最长, 吡虫啉处理最短, 两者间差异显著( $P<0.05$ )。CK 处理韧皮部的 E1 波和 E2 波总持续时间分别为 20.52 和 50.60 min, 显著长于吡虫啉处理和溴氰虫酰胺处理对应波的总持续时间( $P<0.05$ ), 但 E1 波总持续时间与吡蚜酮和螺虫乙酯处理均差异不显著( $P>0.05$ )。【结论】4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 均引起 Q 型烟粉虱成虫的拒食行为, 为研究烟粉虱或具刺吸式口器农业害虫对 4 类杀虫剂亚致死效应的拒食作用机理及防治提供了理论依据。

**关键词:** Q 型烟粉虱; 内吸性杀虫剂; 亚致死浓度; 取食行为; 刺吸电位技术(EPG)

## Effects of Four Insecticides LC<sub>25</sub> on Feeding Behavior of Q-Type *Bemisia tabaci* Adults

HE YunChuan, WANG XinPu<sup>✉</sup>, HONG Bo, ZHANG TingTing, ZHOU XueFei, JIA YanXia

School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021

**Abstract:** 【Objective】The objective of this study is to investigate the effects of sub-lethal concentration imidacloprid, pymetrozine, spirotetramat, and cyantraniliprole on the feeding behavior of Q-type *Bemisia tabaci* adults on tomato seedlings, the feeding behaviors of insects were recorded by the thorn-suck potential technique electronic penetration graph (EPG) after treating with four insecticides LC<sub>25</sub> for 24 h. 【Method】The Q-type *B. tabaci* adults that were not exposed to pesticides were used as test insects, and Fenying No.3, the main tomato variety was employed as the test plant. These plants fed by whitefly were well managed in the lab with hydroponic condition for the experiment. The sub-lethal concentration LC<sub>25</sub> of four systemic insecticides was determined by bioassay. On this basis, 13 non-phloem and 8 phloem parameters of *B. tabaci* adults feeding host were monitored by EPG. Moreover, the leaf piercing suction holes were observed with microscopy. No pesticide treatment was set as control (CK). 【Result】The rank of LC<sub>25</sub>

收稿日期: 2020-04-20; 接受日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(31660630)、宁夏“十三五”重点研发计划重大项目(2016BZ09-03, 2018BBF02021-02)

联系方式: 何云川, E-mail: ml8301109328@163.com. 通信作者王新谱, E-mail: wangxinpu@nxu.edu.cn

values of whitefly adult to four insecticides was cyantraniliprole > pymetrozine > imidacloprid > spirotetramat. Within 8 h monitoring of whitefly on plants, the six kinds of waveforms, including non-probing wave (np), pathway phase wave (C), potential drop wave (pd), phloem activities (waveform E: E1 and E2), and xylem activities wave (G), were occurred after the treatment of LC<sub>25</sub> of each pesticide. The number of np wave in the cyantraniliprole treatment was largest in all treatments, followed by the spirotetramat treatment. There was no significant difference between the two above pesticides ( $P>0.05$ ), but was significantly higher than that in CK and imidacloprid treatments ( $P<0.05$ ). The total duration of C wave and G wave was longest in CK treatment and shortest in cyantraniliprole treatment, and there was significant difference between the two treatments ( $P<0.05$ ). The total duration of pd wave was longest in CK treatment and shortest in spirotetramat, there was significant difference between the two treatments ( $P<0.05$ ). The total duration of F wave was longest in spirotetramat and shortest in imidacloprid, and there was significant difference between the two treatments ( $P<0.05$ ). The total duration of E1 wave and E2 wave was 20.52 and 50.60 min on the phloem of the CK treatment, respectively. There was significant difference with treatments of imidacloprid and cyantraniliprole in the two indicators ( $P<0.05$ ). However, there was no significant difference with pymetrozine and spirotetramat treatments in the total duration of E1 wave indicator ( $P>0.05$ ). 【Conclusion】 The refusal effects on the feeding behavior of Q-type *B. tabaci* adults have been found by four insecticides with LC<sub>25</sub> treatments. It provides a theoretical basis for the feeding refusal mechanism study of the sub-lethal effects of *B. tabaci* and piercing-sucking mouthparts pests on the four pesticides and pest control.

**Key words:** Q-type *Bemisia tabaci*; systemic insecticide; sub-lethal concentration; feeding behavior; electrical penetration graph (EPG)

## 0 引言

【研究意义】烟粉虱 (*Bemisia tabaci*) 属半翅目 (Hemiptera) 粉虱科 (Aleyrodidae), 是一种世界性的农业害虫。在我国危害严重的主要是 B 型和 Q 型烟粉虱, 生产中多采用化学药剂进行防治。常用的内吸性杀虫剂有吡虫啉 (imidacloprid)、吡蚜酮 (pymetrozine)、螺虫乙酯 (spirotetramat) 和溴氰虫酰胺 (cyantraniliprole), 分别为新烟碱类、嘧啶酮类、季酮酸类和鱼尼丁受体类杀虫剂。这 4 种杀虫剂在不同地区因不平衡施用使害虫产生抗药性, 或出现亚致死效应<sup>[1-5]</sup>。化学农药的亚致死效应往往因药剂类型、害虫种类、时空而异, 对害虫存在有害和刺激生殖效应<sup>[6]</sup>, 易导致种群发生多因子抗性 (多基因、基因扩增、连续的等位基因突变) 和靶标基因突变抗性<sup>[7]</sup>。因此, 研究杀虫剂亚致死浓度对烟粉虱取食行为的影响, 有助于进一步了解烟粉虱的生态学和行为学信息, 为化学农药的合理使用提供依据。【前人研究进展】研究表明, 杀虫剂对节肢动物的行为和生理特性具有亚致死效应, 如取食活动、发育持续时间、繁殖、搜寻宿主等<sup>[8-10]</sup>。刺吸电位技术 (electrical penetration graph, EPG) 是研究刺吸式口器昆虫取食行为的重要方法, 其核心在于建立昆虫的取食行为与 EPG 波形的对应关系<sup>[11]</sup>。基于该技术的研究表明, 噻虫嗪 (thiamethoxam) 处理下, B 型烟粉虱抗性种群取食能力略强于敏感种群<sup>[12]</sup>; 吡蚜酮亚致死剂量下, 禾谷

缢管蚜 (*Rhopalosiphum padi*) 成虫吸食植物汁液的总时间明显延长, 持续取食的时间明显缩短<sup>[13]</sup>; 烟粉虱能在吡蚜酮亚致死剂量处理过的植物上刺探和取食, 而在高浓度处理时则无法取食<sup>[14]</sup>; 用吡虫啉和联苯菊酯 (bifenthrin) 亚致死剂量处理棉花幼苗, 可导致烟粉虱对韧皮部的取食减少<sup>[15]</sup>; 吡虫啉亚致死浓度处理显著影响棉蚜 (*Aphis gossypii*) 在韧皮部的刺吸时间, 并缩短了若虫的发育期、成虫寿命, 降低了总生殖力<sup>[8]</sup>。此外, 环氧虫啉 (cycloxaprid) LC<sub>25</sub>、噻虫胺 (clothianidin) LC<sub>25</sub>、溴氰虫酰胺 (LC<sub>10</sub> 和 LC<sub>25</sub>) 和呋虫胺 (dinotefuran) LC<sub>25</sub> 处理能延长烟粉虱各龄若虫、伪蛹和成虫的发育期, 降低其存活率, 雌虫产卵时间显著缩短, 产卵量和孵化率均降低<sup>[16-19]</sup>。【本研究切入点】杀虫剂亚致死效应对烟粉虱的研究主要集中于发育历期、繁殖与毒力影响等方面, 而多种类的杀虫剂亚致死浓度对其取食行为的比较研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】明确 4 种内吸性杀虫剂 (吡虫啉、吡蚜酮、螺虫乙酯和溴氰虫酰胺) LC<sub>25</sub> 处理下, Q 型烟粉虱成虫对番茄叶片的取食行为特征, 为烟粉虱的防治提供理论依据。

## 1 材料与方法

试验于 2018 年 5 月至 2019 年 10 月在宁夏大学农业害虫防治实验室完成。

### 1.1 供试烟粉虱

烟粉虱成虫于 2017 年采自宁夏银川市西夏区军马场 (38°32'29.53"—38°32'29.66" N, 106°07'47.39"

—106°07'49.88" E; 海拔 1 108.30 m) 番茄大棚, 在室内以‘粉印三号’ (*Solanum lycopersicum*, 宁夏红禾种子有限公司生产) 番茄植株继代饲养, 其间未暴露于任何杀虫剂; 饲养室平均温度 ( $25.7 \pm 2.4$ ) °C, 平均相对湿度 ( $60.6 \pm 2.3$ ) %, 由 Cos-03 温湿度记录仪自动记录。根据李小凤等<sup>[20]</sup>方法, 试验种群被鉴定为 Q 生物型, NCBI 登录号 MK281483<sup>[21]</sup>。

## 1.2 供试植株

采用宁夏地区主栽番茄品种‘粉印三号’为供试植株。将种子在 25°C 智能人工气候箱中催芽, 移栽于盛有珍珠岩和泥炭 (体积比为 1:1) 的穴盘内, 置于智能人工气候箱, 培养温度 ( $25 \pm 2$ ) °C, 相对湿度 60%—80%, 光周期 L:D=12 h:12 h 条件下培育, 待幼苗长至 4—5 片真叶, 选健壮、长势相近的番茄苗移栽至水培盒内进行水培, 每盒 1 株, 待其长至 8 片真叶时供试。

## 1.3 供试杀虫剂

4 种杀虫剂分别为 25%吡蚜酮悬浮剂 (江苏克胜集团股份有限公司)、35%吡虫啉悬浮剂 (浙江海正化工股份有限公司)、22.4%螺虫乙酯悬浮剂 (拜耳作物科学 (中国) 有限公司) 和 19%溴氰虫酰胺悬浮剂 (上海杜邦农化有限公司)。

## 1.4 供试营养液

在 Hoagland 营养液<sup>[22]</sup>基础上经试验操作筛选出适合‘粉印三号’幼苗生长的营养液浓度。其中, 除大量元素中的  $\text{MgSO}_4$  用量为  $241 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  外, 其余元素用量与 Hoagland 营养液一致。试剂均为分析纯, 购于国药集团试剂有限公司, 用超纯水进行营养液的配制, 用 KOH ( $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 调节营养液 pH 至 5.5。为减少营养液的蒸发, 在水培盒口覆上一层保鲜膜。

## 1.5 4 种内吸性杀虫剂对烟粉虱成虫的生物活性测定

采用水培法测定 4 种内吸性杀虫剂对烟粉虱成虫的室内生物活性。先将供试杀虫剂分别配制成一定浓度的母液, 用含 0.1%吐温 80 的营养液进行梯度稀释, 配成系列含药营养液培养植株, 以含 0.1%吐温 80 的营养液培养的植株作为对照 (CK)。番茄植株水培 24 h, 往改良的昆虫毒力测定装置<sup>[23]</sup>中各接入烟粉虱成虫 40 头, 放入温度 ( $25 \pm 2$ ) °C, 相对湿度 60%的智能人工气候箱中, 每处理 3 个重复。48 h 后检查成虫死亡情况并计算死亡率。CK 的死亡率 <10% 为有效测定, 否则为无效测定。

## 1.6 试虫的连接及仪器的运用

每头烟粉虱和每株番茄苗只作一次记录。将整套

装置放入接了地线的法拉第笼 (50 cm×50 cm×60 cm) 内, 以屏蔽外界噪声及其他信号的干扰。供试昆虫的 EPG 试验条件与其饲养条件尽量保持一致, 用免驱 USB 温湿度记录仪进行 EPG 环境监测。试验期间 EPG 环境平均温度为 ( $25 \pm 1$ ) °C, 相对湿度 60%—80%。

选取羽化 1 d 的烟粉虱成虫, 用银胶将其分别与昆虫电极和植物电极相连。昆虫电极为长 2—3 cm、直径 12.5  $\mu\text{m}$  的金丝。先将烟粉虱饥饿处理 24 h, 然后将连接电极的试虫放在经杀虫剂  $\text{LC}_{25}$  处理 24 h 的番茄叶片背面, 保证试虫能够自由活动。植物电极插入营养液中, 通过仪器记录波形。每头烟粉虱连续记录 8 h, 记录时间段均保持为每天 9:00—17:00, 每处理成功记录 15 次及以上。以含 0.1%吐温 80 的营养液水培植株和单头试虫作为对照。

## 1.7 叶片的透明操作步骤及染色

将经杀虫剂  $\text{LC}_{25}$  处理 24 h 的新鲜番茄叶片带柄剪下, 用脱脂棉包裹叶柄, 外包保鲜膜用于保湿; 将叶片背面朝上, 放入垫有湿滤纸的培养皿内; 平皿以保鲜膜封口, 无菌针扎孔若干; 以蒸馏水处理为对照。每皿内置 10 头羽化 1 d 的试虫, 每处理 3 个重复。将平皿置于智能人工气候箱, 温度 ( $25 \pm 2$ ) °C, 相对湿度 60%, 培养 24 h 后取出叶片进行透明、染色及镜检等。

取出叶片, 放入固定液中 24 h, 用不同浓度的乙醇梯度脱水, 再参照谢兆森等<sup>[24]</sup>方法进行组织透明。采用超景深三维 750 倍 Leica 体式显微镜 (德国, DMC4500) 和 20 倍 Olympus 显微镜 (美国, U-RFL-T) 观察叶片上的刺吸孔并计数; 利用 Leica 体式显微镜分析工具中的区域线工具测量叶面积; 利用 40 倍 Olympus 显微镜测量刺吸孔直径, 拍照保存。

## 1.8 数据处理与分析

采用 Excel 2016 进行数据汇总整理, 使用统计学软件 IBM SPSS Statistics 19 中的 probit 进行 4 种杀虫剂的  $\text{LC}_{50}$ 、 $\text{LC}_{25}$  值、95%置信区间、斜率及标准误计算; 选用 LSD 多重比较法 ( $\alpha=0.05$ ) 对各处理的数据进行单因素 ANOVA 分析; 绘图采用 Origin Pro8。

EPG 数据记录和波形识别使用 EPG style+a 与 EPG style+d 软件 (Giga-8 DC-EPG 系统, 荷兰瓦赫宁根大学), 根据文献记录的波形图、振幅、相对电压水平、R/emf 原点、频率和波形的秒数来识别波形<sup>[25-37]</sup>。根据 MORENO-DELA FUENTE 等<sup>[28]</sup>和汤清波等<sup>[29]</sup>标准对 np、C、pd、E1、E2、G 6 种波形进行

归纳统计，利用 EPG\_analysisworksheet\_v 5.0 软件<sup>[30]</sup>处理 21 个 EPG 参考指标。

2 结果

2.1 4 种杀虫剂对 Q 型烟粉虱成虫的毒力

吡虫啉、吡蚜酮、螺虫乙酯和溴氰虫酰胺对 Q 型烟粉虱成虫的 LC<sub>50</sub> 和 LC<sub>25</sub> 值分别为 43.54、114.67、29.95 和 100.46 mg·L<sup>-1</sup>；14.23、24.52、4.41 和 27.52 mg·L<sup>-1</sup>（表 1）。

2.2 烟粉虱成虫口针在寄主叶片非韧皮部刺探行为的差异

4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 及对照处理下，烟粉虱成虫取食寄主叶片非韧皮部的 EPG 参数见表 2。经 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 处理番茄幼苗 24 h 后，CK 处理的 np 波次数与螺虫乙酯和溴氰虫酰胺处理差异显著。溴氰虫酰胺处理的刺探次数最多，与螺虫乙酯、吡蚜酮和 CK 处理均差异不显著，但与吡虫啉处理差异显著。4 种杀虫剂和 CK 处理在第一次刺探持续时间上无显著差异。CK 处理的 C 波总持续时间最长，与吡虫啉处理无显著差异，与其他 3 个处理均差异显著。pd 波的次数、pd 波的总持续时间、G 波的次数和 G 波的总持续时间 4 项指标均为 CK 处理值最大，除 G 波的总持续时间外，其余 3 项指标均与 4 种杀虫剂处理差异显著，且 4 种杀虫剂处理间差异不显著。螺虫乙酯处理的 F 波次数和 F 波总持续时间 2 项指标值均最大，与 CK 处理均差异显著。CK 处理中粉虱从第一次刺探开始至第一个 pd 波产生的用时最短，而吡虫啉处理用时最长；吡虫啉和吡蚜酮均与 CK 处理差异显著，溴氰虫酰胺和螺虫乙酯均与 CK 处理差异不显著。

2.3 烟粉虱成虫口针在寄主叶片韧皮部取食行为的差异

4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 及对照处理下，烟粉虱成虫取食

寄主叶片韧皮部的 EPG 参数见表 3。经 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 处理番茄幼苗 24 h 后，烟粉虱取食参数中 CK 处理的 E1 波次数最多，与 4 种杀虫剂处理差异显著，而 4 种杀虫剂处理间均无显著差异。CK、吡蚜酮和螺虫乙酯处理在 E1 波总持续时间上无显著差异。吡蚜酮处理的 E1 波占总 E 波的时间值最大，与 CK 和吡虫啉处理差异显著。CK 处理的 E2 波次数和 E2 波总持续时间两项指标均为最大值，与 4 种杀虫剂处理均差异显著。CK 处理中粉虱第一次刺探韧皮部持续时间最长，与吡虫啉处理差异显著。溴氰虫酰胺处理的第一次刺探至第一次 E 波的时间最长，与 CK 和吡虫啉处理差异显著。CK 处理的 E2 波持续次数（超过 10 min）最多，与 4 种杀虫剂处理差异显著，而 4 种杀虫剂处理间均无显著差异。

2.4 不同处理下烟粉虱成虫各阶段取食时间占比

烟粉虱成虫在 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 及对照处理下的各 EPG 波形持续时间占比见图 1。np 波持续时间由长至短的占比顺序为螺虫乙酯（51.63%）> 溴氰虫酰胺（43.00%）> 吡蚜酮（36.76%）> CK（15.80%）> 吡虫啉（4.32%）。C 波持续时间由长至短的占比顺序为吡虫啉（90.07%）> CK（52.27%）> 溴氰虫酰胺（48.20%）> 吡蚜酮（46.00%）> 螺虫乙酯（33.15%）。F 波持续时间由长至短的占比顺序为溴氰虫酰胺（0.75%）> 螺虫乙酯（0.55%）> 吡蚜酮（0.39%）> CK（0.29%）> 吡虫啉（0.18%）。E1 波持续时间由长至短的占比顺序为吡蚜酮（8.16%）> 螺虫乙酯（6.32%）> CK（5.96%）> 溴氰虫酰胺（3.47%）> 吡虫啉（0.43%）。E2 波持续时间由长至短的占比顺序为 CK（21.63%）> 吡蚜酮（8.61%）> 螺虫乙酯（6.63%）> 溴氰虫酰胺（4.51%）> 吡虫啉（2.90%）。G 波持续时间由长至短的占比顺序为 CK（4.05%）> 吡虫啉（2.10%）> 螺虫乙酯（1.72%）> 吡蚜酮（0.08%）> 溴氰虫酰胺（0.07%）。

表 1 4 种杀虫剂对 Q 型烟粉虱成虫的毒力  
Table 1 Toxicity of four insecticides to Q-type *B. tabaci* adults

杀虫剂 Insecticide	斜率±标准误 Slope±SE	LC <sub>25</sub> 95%置信区间 95% CI (mg·L <sup>-1</sup> )	LC <sub>50</sub> 95%置信区间 95% CI (mg·L <sup>-1</sup> )	卡方值 χ <sup>2</sup> value	相关系数 Correlation coefficient (r)	P 值 P value
吡虫啉 Imidacloprid	1.3883±0.1079	14.23 (11.62-17.42)	43.54 (37.37-50.74)	1.6857	0.9911	0.0010
溴氰虫酰胺 Cyantranilprole	1.0069±0.0563	27.52 (23.41-32.36)	100.46 (80.71-125.04)	0.4109	0.9953	0.0004
吡蚜酮 Pymetrozine	1.1994±0.0964	24.52 (21.54-27.92)	114.67 (99.24-132.50)	1.0909	0.9905	0.0011
螺虫乙酯 Spirotetramat	0.8104±0.0621	4.41 (3.11-6.25)	29.95 (23.69-37.86)	1.3893	0.9913	0.0010

供试昆虫数量均为 120 只 The number of tested insects is 120



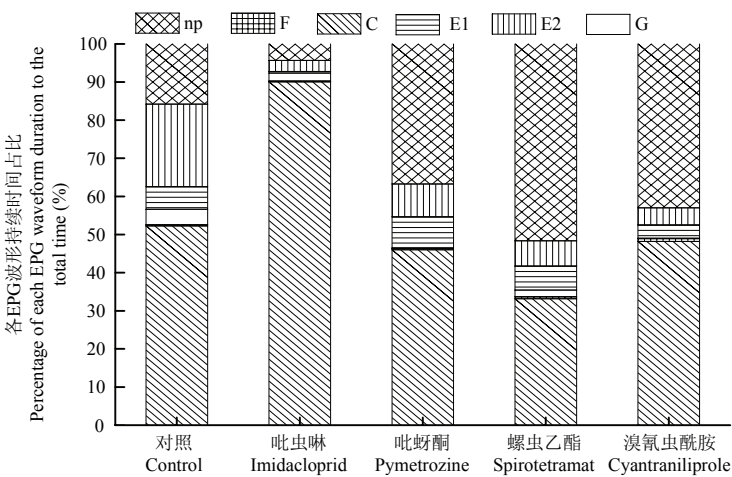


图 1 烟粉虱成虫在 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 下的各 EPG 波形持续时间占比

Fig. 1 Percentage of each EPG waveform duration to the total time of *B. tabaci* adults under LC<sub>25</sub> of four insecticides

2.5 烟粉虱成虫取食不同杀虫剂处理番茄叶片后刺吸孔的显微观察

烟粉虱成虫取食不同杀虫剂处理番茄叶片后刺吸孔的显微观察结果见表 4 和图 2。番茄叶片平均叶面积范围为 189.81—299.71 mm<sup>2</sup>，溴氰虫酰胺处理与吡虫啉、

吡蚜酮和 CK 处理差异显著。刺吸孔产生个数由多至少依次为 CK>螺虫乙酯>溴氰虫酰胺>吡虫啉>吡蚜酮，CK 处理与 4 种杀虫剂处理产生的刺吸孔数存在显著差异，4 种杀虫剂处理间的刺吸孔数无显著差异。各处理中烟粉虱成虫取食番茄叶片的刺吸孔直径差异不显著。

表 4 烟粉虱成虫取食不同杀虫剂处理番茄叶片刺吸孔数

Table 4 Number of thorn holes by *B. tabaci* adults in tomato leaves treated with different insecticides

处理 Treatment	叶面积 Leaf area (mm <sup>2</sup> )	刺吸孔数 (个) Number of sucking holes	刺吸孔直径 Piercing hole diameter (μm)
吡虫啉 Imidacloprid	299.71±14.18a	9.00±2.31b	76.78±8.02a
溴氰虫酰胺 Cyantraniliprole	189.81±11.74c	11.00±3.79b	73.48±6.09a
吡蚜酮 Pymetrozine	270.10±24.18ab	7.67±0.88b	75.27±16.90a
螺虫乙酯 Spirotetramat	237.53±16.17bc	13.33±3.76b	72.16±12.49a
对照 Control	274.54±12.15ab	23.67±1.20a	71.78±7.06a

供试昆虫数量均为 30 只 The number of tested insects is 30

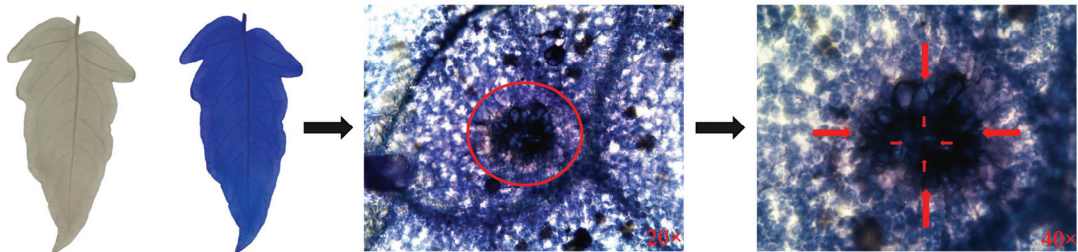


图 2 烟粉虱成虫取食不同杀虫剂处理番茄叶片刺吸孔显微观察图

Fig. 2 Microscopic observation of piercing holes on tomato leaves of *B. tabaci* adults treated with different insecticides



### 3 讨论

本研究通过 EPG 技术记录了 Q 型烟粉虱成虫在吡虫啉、吡蚜酮、螺虫乙酯和溴氰虫酰胺 4 种杀虫剂 LC<sub>25</sub> 处理下取食 8 h 的情况, 结果表明 4 种杀虫剂对烟粉虱均存在拒食作用。烟粉虱成虫拒食时间长短依次为新烟碱类吡虫啉、鱼尼丁受体类溴氰虫酰胺、噻嗪酮类吡蚜酮和季酮酸类螺虫乙酯。以上结果表明, 具体施用 4 类杀虫剂时, 应考虑用药后烟粉虱产生的拒食行为, 进而做到精准有效施用, 最终可降低用药总量。此外, 本文溴氰虫酰胺和螺虫乙酯研究结果与 CAMERON 等<sup>[31]</sup>采用荧光法证明了烟粉虱取食量减少或停食研究结果一致。ZENG 等<sup>[32]</sup>研究表明, 吡虫啉和溴氰虫酰胺能抑制绿色型烟蚜 (*Myzus persicae*) 的取食行为; 孙文青<sup>[33]</sup>研究表明, 三氟苯嘧啶对褐飞虱 (*Nilaparvata lugens*) 和白背飞虱 (*Sogatella furcifera*) 有明显的拒食作用, 经 LC<sub>50</sub> 和 LC<sub>90</sub> 处理后的稻飞虱非刺探和唾液分泌时间增长, 口针在临近韧皮部的细胞外移动和韧皮部的持续取食时间显著减短; 彭建红等<sup>[34]</sup>研究发现, 新烟碱类杀虫剂亚致死剂量对麦长管蚜 (*Sitobion avenae*) 具有很强的拒食作用, 而对棉蚜则无此效果; 吴佳星等<sup>[35]</sup>选取吡虫啉对 3 种色型烟蚜取食行为的 31 个 EPG 参考指标进行分析, 结果表明吡虫啉处理烟苗后能明显抑制烟蚜对烟草韧皮部的取食; 都振宝<sup>[36]</sup>利用 EPG 技术研究表明, 吡虫啉和噻虫嗪均能抑制荻草谷网蚜 (*Sitobion miscanthi*) 的取食活动。本研究中 Q 型烟粉虱成虫能在溴氰虫酰胺 LC<sub>25</sub> 上取食, 与 CIVOLANI 等<sup>[26]</sup>报道的 Q 型烟粉虱成虫完全不能在溴氰虫酰胺处理过的番茄植株韧皮部取食研究结果不一致, 推测可能由于溴氰虫酰胺的施用方式 (叶面喷施和灌根) 不同所致。

对大多数昆虫来说, 取食量取决于昆虫每次取食持续时间及取食速率。刺吸式口器昆虫刺吸汁液的过程与肌肉活动密切相关, 口针刺入寄主筛管组织吸食时, 需依靠咽喉唧筒与食窦唧筒交替伸缩将汁液抽吸入食道<sup>[37]</sup>。本研究中, 烟粉虱在吡蚜酮 LC<sub>25</sub> 浓度下 E1 波持续时间占比最大, 说明吡蚜酮刺激了烟粉虱的唾液分泌, 但对咽喉唧筒与食窦唧筒产生了堵塞作用, 进而导致烟粉虱的取食能力减弱。而 HARREWIJN 等<sup>[38]</sup>研究却提出吡蚜酮是通过控制扩张肌活动的前额神经结或上唇神经节引起昆虫的取食变化。此外, 本试验通过不同处理下烟粉虱成虫各阶段取食时间占比得出

4 种杀虫剂可能因内吸速度不一致而导致烟粉虱成虫的取食行为存在差异。其中, 螺虫乙酯对烟粉虱取食行为的影响大于其他 3 种杀虫剂, 推测主要原因与螺虫乙酯具双向内吸性有关。烟粉虱在 4 种杀虫剂处理的韧皮部和非韧皮部取食均存在差异性, 除了上述取食持续时间、取食速率及药剂内吸性等因素外, 本试验未考虑烟粉虱成虫性别因素, 推测烟粉虱雌雄个体也存在取食差异, 这也是影响本试验取食行为差异的因素之一。

烟粉虱的口器为刺吸式, 其口器由上唇、上颚和下唇组成, 上颚和下唇被糅合为细长、柔韧的细针, 具穿透植物组织细胞的功能。下颚口针为食物通道和唾液通道, 用于取食植物汁液, 并将唾液分泌到植物组织中<sup>[39]</sup>; 上颚口针的针束为穿透植物提供了大部分穿刺力。此外, 口针上还布满了微毛, 内腔是实心的, 无神经元, 无感觉功能<sup>[40]</sup>。4 种药剂处理间烟粉虱的刺吸孔数无显著差异, 而使用叶片叶面积存在显著差异, 说明刺吸孔数的多少与叶面积大小无相关性。烟粉虱若虫的口针长度为 113—200  $\mu\text{m}$ , 成虫的口针长度约为 217  $\mu\text{m}$ <sup>[41]</sup>, 与洪慧金等<sup>[40]</sup>报道的成虫口针长约 300  $\mu\text{m}$  有差别。本试验烟粉虱成虫取食不同杀虫剂处理番茄叶片平均刺吸孔直径范围为 72.16—76.78  $\mu\text{m}$ , 所测值偏大, 其一可能存在测量误差, 其二可能是所测值为粉虱成虫的唇槽直径, 因为口针可从唇槽内伸出进行取食。黄翠虹等<sup>[42]</sup>研究也表明人工饲料囊膜口径孔洞直径越大则烟粉虱口针刺进去得越深, 说明烟粉虱越喜食该食物。烟粉虱口针刺入囊膜的深度不同, 膜上则出现大小不一的孔洞。而本试验 5 个处理产生的刺吸孔直径值无显著差异, 进一步表明此次刺吸孔直径值测量存在较大误差, 主要由于试验时间较短 (24 h), 使得 Q 型烟粉虱在 4 种杀虫剂中产生的刺吸孔数量差异并不明显。但从刺吸孔数量上来看, Q 型烟粉虱刺探所形成的孔数在 CK 处理下的比在 4 种杀虫剂中的多, 说明与 4 种杀虫剂处理相比, Q 型烟粉虱在 CK 处理下更容易取食。为了能更客观地反映不同杀虫剂对烟粉虱刺探行为的影响, 在以后此类试验中, 应延长昆虫取食时间, 并增加试虫数量。

### 4 结论

在 LC<sub>25</sub> 亚致死浓度处理下, Q 型烟粉成虫对吡虫啉、吡蚜酮、螺虫乙酯和溴氰虫酰胺 4 种杀虫剂处理的番茄叶片均产生拒食作用。研究结果可为烟粉虱

或具刺吸式口器农业害虫对 4 类杀虫剂亚致死效应的拒食作用机理研究及田间的生产实践用药提供理论依据。

**致谢:** 中国科学院动物研究所白明研究员和中国科学院新疆生态与地理研究所吕昭智研究员对英文摘要进行了修改润色, 在此表示感谢!

## 参考文献 References

- [1] BIONDI A, DESNEUX N, SISCARO G, ZAPPALÀ L. Using organic-certified rather than synthetic pesticides may not be safer for biological control agents: Selectivity and side effects of 14 pesticides on the predator *Orius laevigatus*. *Chemosphere*, 2012, 87(7): 803-812.
- [2] ZHANG P, ZHANG X F, ZHAO Y H, WEI Y, MU W, LIU F. Effects of imidacloprid and clothianidin seed treatments on wheat aphids and their natural enemies on winter wheat. *Pest Management Science*, 2015, 72(6): 1141-1149.
- [3] HOROWITZ A R, ISHAAYA I. Dynamics of biotypes B and Q of the whitefly *Bemisia tabaci* and its impact on insecticide resistance. *Pest Management Science*, 2014, 70(10): 1568-1572.
- [4] SHADMANY M, OMAR D, MUHAMAD R. Biotype and insecticide resistance status of *Bemisia tabaci* populations from Peninsular Malaysia. *Journal of Applied Entomology*, 2015, 139(1/2): 67-75.
- [5] DESNEUX N, DECOURTYE A, DELPUECH J M. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52: 81-106.
- [6] BAO H B, LIU S H, GU J H, WANG X Z, LIANG X L, LIU Z W. Sublethal effects of four insecticides on the reproduction and wing formation of brown plant hopper, *Nilaparvata lugens*. *Pest Management Science*, 2009, 65(2): 170-174.
- [7] GRESSL J. Low pesticide rates may hasten the evolution of resistance by increasing mutation frequencies. *Pest Management Science*, 2011, 67(3): 253-257.
- [8] KOO H N, LEE S W, YUN S H, KIM H K, KIM G H. Feeding response of the cotton aphid, *Aphis gossypii*, to sublethal rates of flonicamid and imidacloprid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2015, 154(2): 110-119.
- [9] WANG S Y, QI Y F, DESNEUX N, SHI X Y, BIONDI A, GAO X W. Sublethal and transgenerational effects of short-term and chronic exposures to the neonicotinoid nitenpyram on the cotton aphid *Aphis gossypii*. *Journal of Pest Science*, 2017, 90: 389-396.
- [10] QU Y Y, XIAO D, LIU J J, CHEN Z, SONG L F, DESNEUX N, BENELLI G, GAO X W, SONG D L. Sublethal and hormesis effects of beta-cypermethrin on the biology, life table parameters and reproductive potential of soybean aphid *Aphis glycines*. *Ecotoxicology*, 2017, 26(7): 1002-1009.
- [11] 李静静, 潘建斌, 吴莉莉, 卢少华, 闫凤鸣. 我国刺吸电位技术三十年应用及创新. *应用昆虫学报*, 2019, 56(6): 1224-1234.
- [12] LI J J, PAN J B, WU L L, LU S H, YAN F M. Three-decades of electrical penetration graph technique innovation in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56(6): 1224-1234. (in Chinese)
- [13] 刘佰明, 焦晓国, 杨鑫, 杨妮娜, 张友军. 噻虫嗪对 B 型烟粉虱抗性种群取食行为的影响. *植物保护学报*, 2016, 43(1): 175-176.
- [14] LIU B M, JIAO X G, YANG X, YANG N N, ZHANG Y J. Effects of resistance to thiamethoxam on the feeding behavior of *Bemisia tabaci* biotype B (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Plant Protection*, 2016, 43(1): 175-176. (in Chinese)
- [15] 崔丽, 杨代斌, 李克斌, 曹雅忠, 袁会珠. 吡蚜酮对禾谷缢管蚜的亚致死效应. *植物保护*, 2010, 36(6): 26-30.
- [16] CUI L, YANG D B, LI K B, CAO Y Z, YUAN H Z. Sublethal effects of pymetrozine on *Rhopalosiphum padi*. *Plant Protection*, 2010, 36(6): 26-30. (in Chinese)
- [17] 王海鸿, 雷仲仁, 岳梅, 李硕, 纪云亮. 吡蚜酮对烟粉虱取食干扰效应的探讨. *应用昆虫学报*, 2011, 48(1): 54-59.
- [18] WANG H H, LEI Z R, YUE M, LI S, JI Y L. Effect of pymetrozine interferes with feeding behaviour of *Bemisia tabaci* (Homoptera, Aleyrodidae). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48(1): 54-59. (in Chinese)
- [19] HE Y X, ZHAO J W, ZHENG Y, WENG Q Y, BIONDI A, DESNEUX N, WU K M. Assessment of potential sublethal effects of various insecticides on key biological traits of the tobacco whitefly, *Bemisia tabaci*. *International Journal of Biological Sciences*, 2013, 9(3): 246-255.
- [20] WANG R, ZHENG H X, QU C, WANG Z H, KONG Z Q, LUO C. Lethal and sublethal effects of a novel cis-nitromethylene neonicotinoid insecticide, cycloxaprid, on *Bemisia tabaci*. *Crop Protection*, 2016, 83: 15-19.
- [21] FANG Y, WANG J D, LUO C, WANG R. Lethal and sublethal effects of clothianidin on the development and reproduction of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) MED and MEAM1. *Journal of Insect Science*, 2018, 18(2): 37.
- [22] WANG R, ZHANG W, CHE W N, QU C, LI F Q, DESNEUX N, LUO C. Lethal and sublethal effects of cyantraniliprole, a new anthranilic diamide insecticide, on *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) MED. *Crop Protection*, 2017, 91: 108-113.



- [19] QU C, ZHANG W, LI F Q, TETREAU G, LUO C, WANG R. Lethal and sublethal effects of dinotefuran on two invasive whiteflies, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2017, 20(2): 325-330.
- [20] 李小凤, 田虎, 张金良, 张桂芬, 陈苗苗, 万方浩. 基于 COI 基因 5' 端与 3' 端序列田间常见粉虱的分子鉴定. *昆虫学报*, 2014, 57(4): 466-476.
- LI X F, TIAN H, ZHANG J L, ZHANG G F, CHEN M M, WAN F H. Identification of common whitefly species (Hemiptera: Aleyrodidae) in China based on the 5'- and 3'-end sequences of the COI gene. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57(4): 466-476. (in Chinese)
- [21] 何云川, 宋鲜梅, 李楠, 王新谱, 辛明, 贾彦霞. 供氮水平对番茄苗期 Q 型烟粉虱成虫种群动态的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1222-1230.
- HE Y C, SONG X M, LI N, WANG X P, XIN M, JIA Y X. Effects of nitrogen level on population dynamics of adult Q-type *Bemisia tabaci* from tomato seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1222-1230. (in Chinese)
- [22] KILINC S S, ERTAN E, SEFEROGLU S. Effects of different nutrient solution formulations on morphological and biochemical characteristics of nursery fig trees grown in substrate culture. *Scientia Horticulturae*, 2007, 113(1): 20-27.
- [23] 李洁, 褚栋, 丁天波, 潘雪莲. 一种烟粉虱饲养与生物学观察装置: CN207355278U[P]. (2018-05-15) [2020-04-20].
- LI J, CHU D, DING T B, PAN X L. *Bemisia tabaci* feeding and biological observation device: CN207355278U[P]. (2018-05-15) [2020-04-20]. (in Chinese)
- [24] 谢兆森, 杜鸿儒, 李建宝, BONDADA B. 组织透明法观察葡萄叶片生长过程中气孔与叶脉形态结构特征变化. *植物生理学报*, 2018, 54(2): 237-246.
- XIE Z S, DU H R, LI J B, BONDADA B. Morphological and structural changes of stomata and leaf veins during growth of grape leaves using tissue clearing technique. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(2): 237-246. (in Chinese)
- [25] JIANG Y X, LEI H, COLLAR J L, MARTIN B, MUÑIZ M, FERERES A. Probing and feeding behavior of two distinct biotypes of *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) on tomato plants. *Journal of Economic Entomology*, 1999, 92(2): 357-366.
- [26] CIVOLANI S, CASSANELLI S, CHICCA M, RISON J L, BASSI A, ALVAREZ J M, ANNAN I B, PARRELLA G, GIORGINI M, FANO E A. An EPG study of the probing behavior of adult *Bemisia tabaci* biotype Q (Hemiptera: Aleyrodidae) following exposure to cyantraniliprole. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107(3): 910-919.
- [27] PRADO MALUTA N K, GARZO E, MORENO A, NAVAS-CASTILLO J, FIALLO-OLIVÉ E, SPOTTI LOPES J R, FERERES A. Stylet penetration activities of the whitefly *Bemisia tabaci* associated with inoculation of the crinivirus tomato chlorosis virus. *Journal of General Virology*, 2017, 98: 1515-1520.
- [28] MORENO-DELA FUENTE A, GARZO E, MORENO A, FERERES A. A plant virus manipulates the behavior of its whitefly vector to enhance its transmission efficiency and spread. *PLoS ONE*, 2013, 8(4): e61543.
- [29] 汤清波, 张大山, 姬琨, 丁识伯, 闫凤鸣. 刺吸电位技术应用中的几个问题. *应用昆虫学报*, 2011, 48(5): 1519-1527.
- TANG Q B, ZHANG D S, JI K, DING S B, YAN F M. Some key points in applications of electrical penetration graph technique. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48(5): 1519-1527. (in Chinese)
- [30] SARRIA E, CID M, GARZO E, FERERES A. Excel Workbook for automatic parameter calculation of EPG data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 67: 35-42.
- [31] CAMERON R, LANG E B, ANNAN I B, PROTILLO H E, ALVAREZ J M. Use of fluorescence, a novel technique to determine reduction in *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) nymph feeding when exposed to benevia and other insecticides. *Journal of Economic Entomology*, 2013, 106(2): 597-603.
- [32] ZENG X Y, HE Y Q, WU J X, TANG Y M, GU J T, DING W, ZHANG Y Q. Sublethal effects of cyantraniliprole and imidacloprid on feeding behavior and life table parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109(4): 1595-1602.
- [33] 孙文青. 三氟苯嘧啶对稻飞虱取食行为和生殖的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- SUN W Q. The effects of triflumezopyrim on the feeding behaviour and reproduction of rice planthoppers[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [34] 彭建红, 李耀发, 高占林, 党志红, 安静杰, 潘文亮. 新烟碱类杀虫剂亚致死剂量对麦长管蚜和棉蚜取食行为的影响. *植物保护*, 2019, 45(4): 91-96.
- PENG J H, LI Y F, GAO Z L, DANG Z H, AN J J, PAN W L. Effects of the sublethal dose of neonicotinoid insecticides on the feeding behavior of *Sitobion miscanthi* and *Aphis gossypii*. *Plant Protection*,

- 2019, 45(4): 91-96. (in Chinese)
- [35] 吴佳星, 何应琴, 曾贤义, 张永强, 丁伟. 吡虫啉对 3 种体色型烟蚜取食行为的影响. 环境昆虫学报, 2017, 39(5): 1148-1154.
- WU J X, HE Y Q, ZENG X Y, ZHANG Y Q, DING W. The effects of imidacloprid on the feeding behaviors of *Myzus persicae* in three colors. Journal of Environmental Entomology, 2017, 39(5): 1148-1154. (in Chinese)
- [36] 都振宝. 吡虫啉和噻虫嗪亚致死剂量对荻草谷网蚜生命表参数及取食行为的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- DU Z B. Effect of sublethal concentration of imidacloprid and thiamethoxam on the life-table parameters and feeding behavior of *Sitobion miscanthi*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [37] DOUGLAS A E. The nutritional physiology of aphids. Advances in Insect Physiology, 2003, 31: 73-140.
- [38] HARREWIJN P, KAYSER H. Pymetrozine, a fast-acting and selective inhibitor of aphid feeding. *in-situ* studies with electronic monitoring of feeding behavior. Pest Management Science, 1997, 49: 130-140.
- [39] ROSELL R C, LICHTY J E, BROWN J K. Ultrastructure of the mouthparts of adult sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae). International Journal of Insect Morphology and Embryology, 1995, 24(3): 297-306.
- [40] 洪慧金, 任顺祥, 杜予州, 王联德. 三种粉虱触角、口针及跗节感受器的超微结构观察. 应用昆虫学报, 2011, 48(1): 77-83.
- HONG H J, REN S X, DU Y Z, WANG L D. Ultra-structure of the antennal, stylet, and tarsal sensilla of three whiteflies: *Bemisia tabaci*, *Trialeurodes vaporariorum*, *Aleyrocybotus indice* (Homoptera: Aleyrodidae). Chinese Journal of Applied Entomology, 2011, 48(1): 77-83. (in Chinese)
- [41] FREEMAN T P, BUCKNER J S, NELSON D R, CHU C C, HENNEBERRY T. J. Stylet penetration by *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) into host leaf tissue. Annals of the Entomological Society of America, 2001, 94(5): 761-768.
- [42] 黄翠虹, 王雪丽, 李静静, 闫凤鸣. L-阿拉伯糖对 B 型和 Q 型烟粉虱毒性及取食行为的影响. 植物保护学报, 2016, 43(1): 111-116.
- HUANG C H, WANG X L, LI J J, YAN F M. Toxic and feeding behavioral effects of L-arabinose on *Bemisia tabaci* biotypes B and Q. Journal of Plant Protection, 2016, 43(1): 111-116. (in Chinese)

(责任编辑 岳梅)