

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170372

李传明, 何菁, 顾爱祥, 苏宏华, 吴晓霞, 张海波, 解雅梅, 邬亚红, 周福才. 烟粉虱取食对不同抗虫性辣椒品种营养物质和抗性物质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1456–1462

Li C M, He J, Gu A X, Su H H, Wu X X, Zhang H B, Xie Y M, Wu Y H, Zhou F C. Effects of *Bemisia tabaci* feeding on nutrients and resistance-related compounds of pepper varieties with different insect resistances[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1456–1462

烟粉虱取食对不同抗虫性辣椒品种营养物质和抗性物质的影响*

李传明^{1,2}, 何菁², 顾爱祥³, 苏宏华², 吴晓霞⁴, 张海波²,
解雅梅², 邬亚红², 周福才^{2,4**}

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所 扬州 225009; 2. 扬州大学园艺与植物保护学院 扬州 225009; 3. 江苏省农垦农业发展股份有限公司弶港分公司 东台 221200; 4. 农业部农产品质量安全生物性危害因子(动物源)控制重点实验室(26116120) 扬州 225009)

摘 要: 为了探讨烟粉虱取食对辣椒体内营养物质和抗性物质的影响, 选择抗虫辣椒品种(‘新一代三鹰椒’、‘新苏椒五号’)和感虫品种(‘苏椒 13 号’、‘苏椒 15 号’)各 2 个, 每株辣椒分别接烟粉虱成虫 0 头(对照)、30 头(低密度)、60 头(中密度)和 120 头(高密度), 取食 24 h 后测定辣椒叶片中叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白以及酚类、黄酮类化合物含量。结果发现, 低密度的烟粉虱取食后, 辣椒叶片叶绿素含量显著上升, 随着虫口密度的提高, 叶绿素含量有所下降, 但仍高于对照; 感虫辣椒品种的叶绿素含量增加幅度高于抗虫品种。低密度和高密度的烟粉虱取食后, 辣椒叶片中可溶性糖含量出现明显下降趋势, 抗虫品种的下降幅度大于感虫品种。低密度和中密度的烟粉虱取食后, 辣椒叶片中可溶性蛋白含量显著下降, 但高密度烟粉虱取食后辣椒叶片中可溶性蛋白含量明显上升; 抗虫品种的变化幅度明显高于感虫品种。烟粉虱取食后, 叶片中酚类化合物含量明显上升, 感虫品种的上升幅度较抗虫品种上升幅度大; 随着虫量的增加, 辣椒叶片中酚类化合物含量呈明显上升趋势, 但高密度烟粉虱取食后酚类化合物含量出现明显下降趋势。烟粉虱取食后, 感虫辣椒品种‘苏椒 15 号’叶片中黄酮类化合物含量明显上升; 其他 3 个品种在中等以下密度的烟粉虱取食时, 黄酮类化合物与对照差异不显著, 但在高密度烟粉虱取食时, 黄酮类化合物明显高于对照。研究表明, 烟粉虱取食可引起辣椒营养物质和抗性物质含量向着有利于提高抗虫性的方向改变, 但不同虫口密度下不同辣椒品种的改变幅度不同。研究结果为进一步揭示寄主植物与烟粉虱之间的防御和反防御机制提供了基础。

关键词: 烟粉虱; 辣椒; 虫口密度; 营养物质; 抗性物质; 抗虫性; 诱导抗虫性

中图分类号: Q969 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1456-07

Effects of *Bemisia tabaci* feeding on nutrients and resistance-related compounds of pepper varieties with different insect resistances*

LI Chuanming^{1,2}, HE Jing², GU Ai'xiang³, SU Honghua², WU Xiaoxia⁴, ZHANG Haibo²,

* 江苏省科技支撑项目(BE2017347)、江苏省农业科技自主创新资金[cx(15)1041, cx(12)1004]和江苏省农业三新工程项目[SXGC(2016)224]资助

** 通讯作者: 周福才, 主要从事蔬菜害虫绿色防控研究。E-mail: fczhou@yzu.edu.cn

李传明, 研究方向为昆虫生态学。E-mail: liming0595@163.com

收稿日期: 2017-04-29 接受日期: 2017-06-30

* The study was supported by the Science & Technology Support Project of Jiangsu Province (BE2017347), the Fund of Jiangsu Agricultural Science and Technology Innovation [cx(15)1041, cx(12)1004] and Jiangsu Sanxin Agri-Industry Project [SXGC(2016)224].

** Corresponding author, E-mail: fczhou@yzu.edu.cn

Received Apr. 29, 2017; accepted Jun. 30, 2017

XIE Yamei², WU Yahong², ZHOU Fucui^{2,4**}

(1. Jiangsu Lixiahe Institute of Agricultural Sciences, Yangzhou 225009, China; 2. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. The Jianggang Branch of Jiangsu Provincial Agricultural Reclamation and Development Co., Ltd., Dongtai 221200, China; 4. Key Laboratory of Prevention and Control of Biological Hazard Factors (Animal Origin) for Agrifood Safety and Quality, Ministry of Agriculture of China (26116120), Yangzhou 225009, China)

Abstract: Induced insect resistance is a series of defending reactions of plant under biotic and abiotic stress. In order to explore the effects of *Bemisia tabaci* feeding on induced insect resistance of different varieties of pepper, and illuminate the insect resistance mechanisms, we conducted an experiment in insectary. In the experiment, two insect-resistant varieties ('Xinyidai Sanying' and 'Xinsujiao 5') and two insect-susceptible varieties ('Sujiao 13' and 'Sujiao 15') of pepper were selected and infected with *B. tabaci* adults 0 (control), 30 (lower density), 60 (middle density) and 120 (higher density) heads per plant, respectively. The contents of chlorophyll, soluble sugar, soluble protein, phenol compound and flavonoids in pepper leaves were determined after 24 h of feeding of *B. tabaci*. The results showed that leaf chlorophyll content of pepper under feeding of lower density of *B. tabaci* was significantly increased, and the chlorophyll content decreased with the increase of population density of the insect, but was still higher than that of the control. The increase of chlorophyll content in the insect-susceptible pepper varieties was higher than that of the insect-resistant varieties. The content of soluble sugar in pepper leaves showed a decreasing trend after infected with the insects with lower and higher densities, and the decreased level of insect-resistant varieties was higher than that of insect-susceptible varieties. The content of soluble protein in pepper leaves decreased after infected by the insects with lower and middle densities, but increased when fed by high density insects. The changing range of soluble protein contents of insect-resistant pepper varieties was higher than that of insect-susceptible varieties. The contents of phenolic compounds in leaves increased significantly after *B. tabaci* feeding, and the increase rate of insect-susceptible varieties was higher than that of the insect-resistant cultivars. With the increased insect density, the content of phenolic compounds in pepper leaves showed a significant upward trend, but decreased obviously when the population density was 120 head per plant. We also found that the content of flavonoids in the leaves of pepper 'Sujiao 15' was significantly increased after *B. tabaci* feeding, and that in other varieties under middle insect density were not significantly different from that of the control. However, in the case of higher insect density, the content of flavonoids was significantly higher than that of control. Our results indicated that the feeding of *B. tabaci* changed contents of nutrients and resistant substances in the direction of improving insect resistance. The extents of change of different pepper varieties under different insect densities were different. The results provided a basis for further revealing the defense and anti-defense mechanisms between host plant and *B. tabaci*.

Keywords: *Bemisia tabaci*; Pepper; Insect density; Nutrients; Resistance-related compounds; Insect resistance; Induced insect resistance

植物的抗虫性包括组成抗性和诱导抗性, 组成抗性的物质基础是植物的理化因子, 包括植物形态、组织和生长特性, 例如叶片表面茸毛^[1]、厚度^[2]以及植物组织的结构等, 化学因子包括植物的营养物质、次生代谢物质等。诱导抗性是植物在生物或非生物因子刺激后产生的一系列防御反应。诱导防御产生的理化反应在某种程度上会更大启动物理和化学防御, 从而使植食性昆虫的生长发育以及种群建立的依赖条件遭受破坏, 这种现象类似于免疫反应, 因此, 诱导出来的这种防御抗性具有开-关效应^[3]。诱导出来的这些抗性有时还有继代效应, 被害植物中所诱导的抗性在第 2 代个体中能继续保持, 这方面的证据在野萝卜(*Raphanus raphanistrum* L.)^[4]、烟草(*Nicotiana tabacum* L.)^[5]中已得到证实。

植物遭受昆虫攻击时, 会产生大量次生化合物,

阻碍昆虫对食物进行消化和利用; 或在组织和器官中积累和贮存能产生有毒化合物的前体, 当细胞受损时, 释放有毒化合物^[6]。如烟草受到烟蚜[*Myzus persicae* (Sulzer)]为害后, 体内的生物碱含量迅速上升^[7]; 烟蚜和麦长管蚜[*Sitobion avenae* (Fabricius)]取食甘蓝(*Brassica oleracea* L.)和小麦(*Triticum aestivum* L.)后可诱导多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的增加^[8-9]; 马铃薯长管蚜(*Macrosiphum euphorbiae* L.)取食番茄后会诱导 POD 活性的增加^[10]。昆虫取食为害寄主植物还可以破坏植物体内系统稳定, 导致某种营养物质的缺乏或比例的失调, 或某些次生代谢产物的产生, 这些物质的变化会影响昆虫的生长发育以及繁殖, 引起植物对植食性昆虫的抗性^[11-12]。诱导抗性是植物受害时被激活的一种防御机制, 是一种类似于免

疫反应的抗性现象^[4,13]。

研究发现,烟粉虱[*Bemisia tabaci* (Gennadius)]取食烟草后,其可溶性糖和可溶性蛋白的含量降低;危害棉花(*Gossypium hirsutum* L.)后显著降低棉花叶片的净光合速率,损害碳水化合物的输出,使果糖、葡萄糖和蔗糖浓度成倍增加,并降低淀粉的浓度^[14],但烟粉虱取食后作物抗虫品种和感虫品种中这些物质如何变化目前未见系统报道。本文选用辣椒(*Capsicum annuum* L.)抗虫与感虫品种各 2 个,研究烟粉虱取食后辣椒叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白以及总酚、总黄酮的含量变化,以期阐明烟粉虱取食对辣椒抗性诱导的影响,为进一步阐明辣椒品种对烟粉虱的抗性机制提供新的依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试昆虫

烟粉虱初始虫源来自扬州大学园艺与植物保护学院试验田,实验室内用番茄(*Lycopersicon esculentum* Miller)繁殖 3 代以上供试。试验前饥饿 4 h。

1.1.2 供试辣椒品种

试验用辣椒品种‘苏椒 13 号’和‘苏椒 15 号’由江苏省农业科学院蔬菜研究所提供,‘新苏椒五号’为徐州市彭大种苗有限公司生产,‘新一代三鹰椒’为青县纯丰蔬菜良种繁育场生产。其中,‘新一代三鹰椒’和‘新苏椒五号’为抗虫品种,‘苏椒 13 号’和‘苏椒 15 号’为感虫品种。

1.2 试验方法

1.2.1 辣椒处理及取样

将供试辣椒种子催芽后播于穴盘内,挂牌标记,待幼苗长至 2~3 片真叶时,选长势旺盛、健壮的辣椒苗移栽于盆内,每盆 1 株,用 60 目防虫网覆盖,以获取洁净的寄主植物。统一肥水管理,待用。

供试辣椒长至 10 张叶片左右时接虫。每个品种分别设置低密度(每株接烟粉虱成虫 30 头)、中密度(60 头)和高密度(120 头)3 个密度处理,以不接虫作对照。供试辣椒用 60 目的防虫网罩住,放在(22±1)℃的养虫室内。接虫 24 h 后(根据前期试验,烟粉虱取食后,寄主植物会迅速作出反应,24 h 后相关反应基本呈现)每盆分别取上、中、下部叶片各 1 片,混合后用于物质测定。每个处理 3 盆。试验重复 3 次。

1.2.2 测定方法

叶绿素含量的测定参照张宪政^[15]的方法,可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法^[16],可溶性蛋白含

量的测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[16]。

酚类化合物含量的测定参照韩富根等^[17]的方法,略有改动。取新鲜辣椒叶片 0.5 g,加入 3 mL 95%乙醇研磨成匀浆状,再加入 5 mL 95%乙醇过滤,用 95%乙醇定容至 25 mL 待测,以儿茶酚做标准曲线。取 2 mL 待测液于 10 mL 离心管中,加入 2 mL 福林试剂,摇匀 3 min 后加入 10%碳酸钠,2 mL 震荡。静置 1 h 后在 700 nm 波长处测定吸光度,以 2 mL 蒸馏水代替待测液作为空白,根据标准曲线计算总酚含量。

黄酮类化合物含量的测定参照刘斌等^[18]的方法,略有改动。取新鲜辣椒叶片洗净,晾干至表面无水分,置于恒温干燥箱中,80℃下干燥,取出制成干粉。称取辣椒叶片干粉 0.5 g,置于 100 mL 具塞锥形瓶中,加体积分数 60%乙醇 20 mL,浸泡 24 h,超声提取 1 h,过滤,洗涤,滤液用体积分数 60%乙醇定容于 50 mL 容量瓶中,得到黄酮类化合物提取液,待测。吸取提取液 1.0 mL 到 10 mL 试管中,加质量分数 5%亚硝酸钠 0.3 mL,混匀,放置 6 min。加质量分数 10%硝酸铝 0.3 mL,混匀,静置 6 min。加质量分数 4.3%氢氧化钠 4.0 mL,再加 60%乙醇定容至刻度线,摇匀,静置 15 min。以试剂空白为参比,在 500 nm 波长处测定吸光度。用芦丁绘制标准曲线。

1.3 数据处理

试验数据采用 DPS 软件处理,应用 Duncan 新复极差法进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 烟粉虱取食对辣椒叶片中叶绿素含量的影响

不同抗性辣椒品种叶片中叶绿素含量有显著差异($P<0.05$)(表 1),抗虫品种‘新苏椒五号’和‘新一代三鹰椒’明显高于感虫品种‘苏椒 15 号’和‘苏椒 13 号’。烟粉虱取食后,辣椒叶片中叶绿素含量显著上升,随着虫量的提高叶绿素含量出现下降的趋势,但仍然高于对照。如‘苏椒 15 号’在低密度、中密度和高密度烟粉虱取食后,叶绿素含量分别提高 56.52%、50.00%和 41.85%。在供试 4 个辣椒品种中,感虫品种对烟粉虱的取食相对更敏感,叶绿素含量增长幅度相对更大,如低密度烟粉虱取食后,感虫品种‘苏椒 15 号’和‘苏椒 13 号’叶绿素含量分别增长 56.52%和 69.93%,而抗虫品种‘新苏椒五号’和‘新一代三鹰椒’仅分别增长 36.14%和 17.19%。

表 1 不同密度烟粉虱取食后辣椒叶片叶绿素含量的变化

Table 1 Leaf chlorophyll contents of different varieties of pepper under feeding of different densities of *Bemisia tabaci* $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

品种 Variety	对照 Control (0 head·plant ⁻¹)	低密度 Lower density (30 heads·plant ⁻¹)	中密度 Middle density (60 heads·plant ⁻¹)	高密度 Higher density (120 heads·plant ⁻¹)
苏椒 15 号 Sujiao 15	1.84±0.11bC	2.88±0.07aA	2.76±0.07aAB	2.61±0.06aB
苏椒 13 号 Sujiao 13	1.43±0.14cC	2.43±0.04cA	2.38±0.08bA	1.92±0.13bB
新苏椒五号 Xinsujiao 5	2.02±0.08abC	2.75±0.12abA	2.32±0.11bB	2.30±0.06aB
新一代三鹰椒 Xinyidai Sanyingjiao	2.21±0.11aB	2.59±0.10bcA	2.43±0.12bAB	2.36±0.13aB

表中数值为平均值±标准差。同列不同小写字母或同行不同大写字母分别表示不同品种间或不同密度间在 0.05 水平上差异显著。The data in the table are mean ± SD Different lowercase letters within the same column or different capital letters within the same row indicate significant differences among varieties or densities at 0.05 level.

2.2 烟粉虱取食对辣椒叶片中可溶性糖含量的影响

低密度和高密度烟粉虱取食后, 辣椒叶片中可溶性糖含量出现明显下降趋势; 而中密度烟粉虱取食时, 抗性品种可溶性糖含量显著下降, 感虫品种可溶性糖含量没有显著变化(表 2)。如‘苏椒 15 号’在低密度和高密度烟粉虱取食后, 叶片中可

溶性糖分别下降 20.0%和 34.5%。从表 2 还可以看出, 烟粉虱取食后, 抗性品种可溶性糖含量的下降幅度比感虫品种大, 如低密度烟粉虱取食后, 感虫品种‘苏椒 15 号’下降 20.0%, 而抗性品种‘新一代三鹰椒’叶片可溶性糖含量比对照下降 29.9%。

表 2 不同密度烟粉虱取食后辣椒叶片可溶性糖含量的变化

Table 2 Leaf soluble sugar contents of different varieties of pepper under feeding of different densities of *Bemisia tabaci* %

品种 Variety	对照 Control (0 head·plant ⁻¹)	低密度 Lower density (30 heads·plant ⁻¹)	中密度 Middle density (60 heads·plant ⁻¹)	高密度 Higher density (120 heads·plant ⁻¹)
苏椒 15 号 Sujiao 15	0.55±0.04bA	0.44±0.02cB	0.57±0.02bA	0.36±0.02cB
苏椒 13 号 Sujiao 13	0.57±0.05bA	0.50±0.02bcAB	0.50±0.02cAB	0.42±0.03bB
新苏椒五号 Xinsujiao 5	0.68±0.04aA	0.60±0.06abB	0.47±0.01cB	0.41±0.04bB
新一代三鹰椒 Xinyidai Sanyingjiao	0.97±0.07aA	0.68±0.01aB	0.65±0.01aB	0.57±0.03aB

表中数值为平均值±标准差。同列不同小写字母或同行不同大写字母分别表示不同品种间或不同密度间在 0.05 水平上差异显著。The data in the table are mean ± SD Different lowercase letters within the same column or different capital letters within the same row indicate significant differences among varieties or densities at 0.05 level.

2.3 烟粉虱取食对辣椒叶片中可溶性蛋白含量的影响

中等以下密度的烟粉虱取食后辣椒叶片中可溶性蛋白含量显著下降, 但高密度烟粉虱取食后辣椒叶片中可溶性蛋白含量显著上升(表 3)。如‘苏椒 15 号’在低密度的烟粉虱取食后, 叶片中可溶性蛋白含量下降 30.92%, 而高密度的烟粉虱取食后, 叶片可

溶性蛋白含量则上升 34.30%。抗性品种的可溶性蛋白对烟粉虱的取食比感虫品种敏感, 如在中密度烟粉虱取食后, 抗性品种‘新苏椒五号’辣椒可溶性蛋白含量下降 76.44%, 而感虫品种‘苏椒 15 号’辣椒下降 12.56%; 在高密度烟粉虱取食后, ‘新苏椒五号’辣椒可溶性蛋白比对照上升 174.04%, 而‘苏椒 15 号’辣椒仅比对照上升 34.30%。

表 3 不同密度烟粉虱取食后辣椒叶片可溶性蛋白含量的变化

Table 3 Leaf soluble protein contents of different varieties of pepper under feeding of different densities of *Bemisia tabaci* $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

品种 Variety	对照 Control (0 head·plant ⁻¹)	低密度 Lower density (30 heads·plant ⁻¹)	中密度 Middle density (60 heads·plant ⁻¹)	高密度 Higher density (120 heads·plant ⁻¹)
苏椒 15 号 Sujiao 15	2.07±0.09bcB	1.43±0.05aD	1.81±0.05aC	2.78±0.18cA
苏椒 13 号 Sujiao 13	3.25±0.12aB	0.95±0.07bC	1.26±0.04bcC	6.22±0.58aA
新苏椒五号 Xinsujiao 5	2.08±0.21bB	0.42±0.04cC	0.49±0.07cC	5.70±0.16aA
新一代三鹰椒 Xinyidai Sanyingjiao	1.61±0.03cB	0.86±0.07bD	1.36±0.03bC	4.11±0.21bA

表中数值为平均值±标准差。同列不同小写字母或同行不同大写字母分别表示不同品种间或不同密度间在 0.05 水平上差异显著。The data in the table are mean ± SD Different lowercase letters within the same column or different capital letters within the same row indicate significant differences among varieties or densities at 0.05 level.

2.4 烟粉虱取食对辣椒叶片中酚类化合物含量的影响

不同抗性品种辣椒叶片中酚类化合物含量具有显著差异, 抗虫品种‘新苏椒五号’和‘新一代三鹰椒’叶片中酚类化合物的含量明显较感虫品种‘苏椒 15 号’和‘苏椒 13 号’高($P<0.05$) (表 4)。烟粉虱取食后, 辣椒叶片中酚类化合物含量显著上升, 其中中密度

烟粉虱取食后辣椒叶片中酚类化合物含量最高。在供试的 4 个辣椒品种中, 感虫品种的上升幅度较抗虫品种上升幅度大, 如低密度和中密度烟粉虱取食后感虫品种‘苏椒 15 号’叶片中酚类化合物分别上升 47.80%和 152.20%, 而抗虫品种‘新一代三鹰椒’分别上升 37.36%和 62.47%。

表 4 不同密度烟粉虱取食后辣椒叶片酚类化合物含量的变化

Table 4 Leaf phenolic compound contents of different varieties of pepper under feeding of different densities of *Bemisia tabaci* $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$

品种 Variety	对照 Control (0 head·plant ⁻¹)	低密度 Lower density (30 heads·plant ⁻¹)	中密度 Middle density (60 heads·plant ⁻¹)	高密度 Higher density (120 heads·plant ⁻¹)
苏椒 15 号 Sujiao 15	15.25±0.44cC	22.54±0.22bC	38.46±3.11aA	32.06±1.05aB
苏椒 13 号 Sujiao 13	9.87±2.41dB	24.03±0.98abA	21.60±1.09cA	19.20±0.71bA
新苏椒五号 Xinsujiao 5	19.96±1.10bB	29.84±0.80aA	32.65±1.10bA	30.92±3.51aA
新一代三鹰椒 Xinyidai Sanyingjiao	22.54±0.97aC	30.96±1.12aB	36.62±2.78abA	30.84±1.23aB

表中数值为平均值±标准差。同列不同小写字母或同行不同大写字母分别表示不同品种间或不同密度间在 0.05 水平上差异显著。The data in the table are mean ± SD Different lowercase letters within the same column or different capital letters within the same row indicate significant differences among varieties or densities at 0.05 level.

2.5 烟粉虱取食对辣椒叶片中黄酮类化合物含量的影响

烟粉虱取食对不同品种辣椒叶片中黄酮类化合物含量的影响不同。烟粉虱取食后, 感虫品种‘苏椒 15 号’辣椒叶片中黄酮类化合物含量明显上升, 低密度烟粉虱取食后叶片黄酮化合物含量[1.73 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$]比对照

高 76.53%; 抗虫品种‘新苏椒五号’辣椒叶片中黄酮类化合物含量没有明显影响; 其他 2 个品种在低密度和中密度烟粉虱取食的情况下, 黄酮类化合物与对照差异不显著, 但在高密度烟粉虱取食后, 黄酮类化合物明显高于对照($P<0.05$) (表 5)。

表 5 不同密度烟粉虱取食后辣椒叶片黄酮类化合物含量的变化

Table 5 Leaf flavonoids contents of different varieties of pepper under feeding of different densities of *Bemisia tabaci* $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}(\text{FW})$

品种 Variety	对照 Control (0 head·plant ⁻¹)	低密度 Lower density (30 heads·plant ⁻¹)	中密度 Middle density (60 heads·plant ⁻¹)	高密度 Higher density (120 heads·plant ⁻¹)
苏椒 15 号 Sujiao 15	0.98±0.04bD	1.73±0.15bC	2.3±0.09bB	2.66±0.03bA
苏椒 13 号 Sujiao 13	2.15±0.33abB	2.55±0.10aAB	2.70±0.07aAB	3.08±0.09aA
新苏椒五号 Xinsujiao 5	3.07±1.59aA	2.34±0.16abAB	2.40±0.08bAB	3.11±0.13aA
新一代三鹰椒 Xinyidai Sanyingjiao	2.31±0.22aBC	2.51±0.13aAB	2.88±0.26aC	3.07±0.11aA

表中数值为平均值±标准差。同列不同小写字母或同行不同大写字母分别表示不同品种间或不同密度间在 0.05 水平上差异显著。The data in the table are mean ± SD Different lowercase letters within the same column or different capital letters within the same row indicate significant differences among varieties or densities at 0.05 level.

3 结论与讨论

在长期的协同进化过程中, 植物已进化出有效的防御系统, 来应付多样化的害虫的攻击^[19]。植物在遭受植食性昆虫的攻击后, 会在生理生化以及形态等方面作出一系列的适应性反应, 表现为营养物质、次生代谢物质、有毒物质及防御蛋白的改变, 从而对同种或异种昆虫的生长发育和繁殖产生不利的影响^[20-21]。当昆虫再次取食先前取食过的植物时, 由于某些必需物质的缺乏, 或是某些有害物质的产生, 导致昆虫的生长发育、繁殖受到影响, 从而使寄主植物本身获得抗虫性^[22]。瓜蚜(*Aphis gossypii* Glover)取食后会诱导黄瓜(*Cucumis sativus* L.)体内

酚类和黄酮化合物表达量的上升^[23], 棉铃虫 [*Helicoverpa armigera* (Hübner)]取食也会诱导棉花叶片内棉酚和单宁含量的升高^[24], 从而对后续取食者的生长发育和繁殖产生不利影响。

植物叶绿素含量是反映植物叶片光合能力的一个重要指标^[25], 同时也是对害虫的抗性指标之一。植物被昆虫取食造成细胞被破坏时, 叶绿素酶能迅速将叶绿素转化成叶绿素酸酯, 阻止色素蛋白流失, 进而抑制植食性昆虫的繁殖^[26]。同时叶片中的叶绿素含量还与烟粉虱的寄主选择率呈显著的负相关, 即叶绿素还影响烟粉虱的寄主选择性^[27]。本研究发现, 烟粉虱取食后, 叶片叶绿素含量迅速增加, 说

明烟粉虱取食能诱导辣椒叶片中叶绿素的合成, 从而增强对烟粉虱的抗性。

寄主植物中可溶性糖、蛋白质、氨基酸是昆虫的重要营养物质, 而酚类和黄酮化合物是重要的抗生物质, 这些物质对昆虫的生长发育有重要影响^[28-31]。本研究发现, 不同的虫量取食对植物营养物质和次生代谢物质的诱导反应不完全一样, 烟粉虱取食对辣椒叶片中酚类化合物诱导有明显影响, 但不同虫量之间没有明显差异; 低密度烟粉虱取食后辣椒叶片中可溶性蛋白含量显著下降, 表现出抗虫性上升, 高密度烟粉虱取食后可溶性蛋白含量显著上升, 表现出抗虫性下降; 在烟粉虱取食后辣椒叶片中可溶性糖含量出现下降, 表现出抗虫性下降。上述研究结果验证了抗性相关防御蛋白、次生代谢物质和主要营养成分具有多样性和可变性的特点^[32-35]。

不同抗性品种对害虫的取食反应也不完全相同。汤德良等^[23]研究发现, 棉铃虫为害后, 抗虫棉花品种单宁含量变化大, 而感虫品种叶片内棉酚含量变化大; 在瓜蚜(*Aphis gossypii* Glover)取食为害后, 抗性黄瓜叶片中可溶性糖含量的变化大, 而感虫品种的变化小^[23]。本研究发现, 在感虫和抗虫辣椒品种中, 烟粉虱取食后抗虫品种可溶性糖含量的下降幅度比感虫品种大, 而可溶性蛋白的下降幅度正好相反, 感虫品种的下降幅度比抗虫品种大。

尽管植物对烟粉虱取食存在一定的防御能力, 但烟粉虱仍然能“突破”防御系统并成功在寄主植物上发育和繁殖, 甚至造成暴发。烟粉虱与寄主植物如何保持这种防御和反防御的平衡? 又是如何“突破”防御屏障, 打破这种平衡? 有关机制还有待进一步研究。

研究表明, 烟粉虱取食可引起辣椒营养物质和抗性物质含量向着有利于提高抗虫性的方向改变, 但不同虫口密度和不同辣椒品种引起改变的幅度不同。研究结果为进一步揭示寄主植物与烟粉虱之间的防御和反防御机制提供了基础。

参考文献 References

- [1] 常金华, 张丽, 夏雪岩, 等. 不同基因型高粱植株的物理性状与抗蚜性的关系[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(2): 5-7
Chang J H, Zhang L, Xia X Y, et al. Aphid resistant characteristics and the relations with physical characteristics of sorghum[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2004, 27(2): 5-7
- [2] 张寰, 王志刚, 黄大庄, 等. 柳树物理性状与光肩星天牛危害相关性分析[J]. 河北农业大学学报, 2005, 28(5): 75-79
Zhang H, Wang Z G, Huang D Z, et al. Studies on relations between the physical characters of willows and damaging degree by *Anoplophora glabripennis* Motsch[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2005, 28(5): 75-79
- [3] 姜永根, 程家安. 植物的诱导抗性[J]. 昆虫学报, 1997, 40(3): 320-331
Lou Y G, Cheng J A. Induced plant resistance to phytophagous insects[J]. Acta Entomologica Sinica, 1997, 40(3): 320-331
- [4] Agrawal A A. Induced responses to herbivory in wild radish: Effects on several herbivores and plant fitness[J]. Ecology, 1999, 80(5): 1713-1723
- [5] Baldwin I T, Schmelz E A. Immunological “memory” in the induced accumulation of nicotine in wild tobacco[J]. Ecology, 1996, 77(1): 236-246
- [6] 钦俊德. 昆虫与植物的关系[M]. 北京: 科学出版社, 1987
Qin J D. The Relationship Between Insects and Plants[M]. Beijing: Science Press, 1987
- [7] 秦焕菊, 张怀保, 王桂芬. 烟草次生物质——烟碱对烟蚜影响的研究[J]. 中国烟草学报, 1997, 3(3): 53-57
Qin H J, Zhang H B, Wang G F. Study on the influence of nicotine allelochemical of tobacco over peach aphids[J]. Acta Tabacaria Sinica, 1997, 3(3): 53-57
- [8] Han Y, Wang Y, Bi J L, et al. Constitutive and induced activities of defense-related enzymes in aphid-resistant and aphid-susceptible cultivars of wheat[J]. Journal of Chemical Ecology, 2009, 35(2): 176-182
- [9] 张春妮, 仵均祥, 戴武, 等. 甘蓝幼苗受桃蚜危害后叶片中部分酶活性的变化[J]. 西北植物学报, 2005, 25(8): 1566-1569
Zhang C N, Wu J X, Dai W, et al. Activities of some isoenzymes in the leaves of *Brassica oleracea* seedlings infested by peach aphid (*Myzus persicae*)[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(8): 1566-1569
- [10] Stout M J, Workman K V, Bostock R M, et al. Specificity of induced resistance in the tomato, *Lycopersicon esculentum*[J]. Oecologia, 1997, 113(1): 74-81
- [11] 钦俊德. 植食性昆虫食性的生理基础[J]. 昆虫学报, 1980, 23(1): 106-122
Qin J D. The physiological bases of host-plant specificity of phytophagous insects[J]. Acta Entomologica Sinica, 1980, 23(1): 106-122
- [12] Painter R H. Plant and animal resistance to insects[M]//Insect-Pest Management and Control. Principles of Plant and Animal Pest Control. Washington DC: National Academy of Sciences (United States), 1995, 3: 64-69
- [13] Agrawal A A. Induced responses to herbivory and increased plant performance[J]. Science, 1998, 279(5354): 1201-1202
- [14] Lin T B, Wolf S, Schwartz A, et al. Silverleaf whitefly stress impairs sugar export from cotton source leaves[J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(3): 291-297
- [15] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986, (3): 26-28
Zhang X Z. Determination of chlorophyll content in plants using acetone and alcohol mixture method[J]. Journal of Liaoning Agricultural Sciences, 1986, (3): 26-28

- [16] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
Zou Q. Plant Physiology Experimental Guidance[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [17] 韩富根, 刘学芝, 焦桂珍. 用福林法测定烟叶中总酚含量的探讨[J]. 河南农业大学学报, 1993, 27(1): 95–98
Han F G, Liu X Z, Jiao G Z. The use of Folin method for determining the total phenols content in tobacco leaves[J]. Journal of Henan Agricultural University, 1993, 27(1): 95–98
- [18] 刘斌, 石任兵, 王伟. 蒲黄总黄酮含量测定方法研究[J]. 北京中医药大学学报, 2001, 24(4): 23–25
Liu B, Shi R B, Wang W. Study on the method for the quantitative determination of total flavone in pollen typhae[J]. Journal of Beijing University of Chinese Medicine, 2001, 24(4): 23–25
- [19] Ausubel F M. Are innate immune signaling pathways in plants and animals conserved?[J]. Nature Immunology, 2005, 6(10): 973–979
- [20] Karban R, Myers J H. Induced plant responses to herbivory[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20: 331–348
- [21] 张海静, 严盈, 彭露, 等. 韧皮部取食昆虫诱导的植物防御反应[J]. 昆虫学报, 2012, 55(6): 736–748
Zhang H J, Yan Y, Peng L, et al. Plant defense responses induced by phloem-feeding insects[J]. Acta Entomologica Sinica, 2012, 55(6): 736–748
- [22] 王琛柱. 棉酚和单宁酸对棉铃虫幼虫生长和消化生理的影响[J]. 植物保护学报, 1997, 24(1): 13–18
Wang C Z. Effects of gossypol and tannic acid on the growth and digestion physiology of cotton bollworm larvae[J]. Acta Phytopythologica Sinica, 1997, 24(1): 13–18
- [23] 周福才, 任佳, 陈学好, 等. 瓜蚜取食对黄瓜叶片中抗生物质的影响[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2014, 35(4): 99–103
Zhou F C, Ren J, Chen X H, et al. The effects of *Aphis gossypii* sucking on the antibiotic substances in cucumber leaves[J]. Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition, 2014, 35(4): 99–103
- [24] 汤德良, 王武刚, 谭维嘉, 等. 棉铃虫为害诱导棉花内物质含量变化[J]. 昆虫学报, 1997, 40(3): 332–333
Tang D L, Wang W G, Tan W J, et al. Changes of contents of some substances in cotton leaves induced by cotton bollworm *Helicoverpa armigera* (Hübner) attack[J]. Acta Entomologica Sinica, 1997, 40(3): 332–333
- [25] 朱丽梅, 罗凤霞. 百合叶片中可溶性蛋白、叶绿素、可溶性糖含量与灰霉病抗性的关系[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 134–136
Zhu L M, Luo F X. Relationship between soluble protein, chlorophyll, soluble sugar content and resistance to *Botrytis cinerea*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011, 39(5): 134–136
- [26] Hu X Y, Makita S, Schelbert S, et al. Reexamination of chlorophyllase function implies its involvement in defense against chewing herbivores[J]. Plant Physiology, 2015, 167(3): 660–670
- [27] 何菁, 周福才, 陈学好, 等. 辣椒叶片物理性状对烟粉虱寄主选择的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3045–3050
He J, Zhou F C, Chen X H, et al. Effects of physical characteristics of pepper leaves on host selection of *Bemisia tabaci*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(11): 3045–3050
- [28] 王承香, 薛明, 毕明娟, 等. B 型烟粉虱取食诱导烟草对烟蚜防御反应的时间效应[J]. 昆虫学报, 2010, 53(3): 314–322
Wang C X, Xue M, Bi M J, et al. Temporal effect of tobacco defense responses to *Myzus Persicae* (Sulzer) (Homoptera: Aphididae) induced by *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae) B biotype[J]. Acta Entomologica Sinica, 2010, 53(3): 314–322
- [29] 曹宇, 邱军锐, 孔译贤. 西花蓟马繁殖力与寄主营养物质的关系[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(3): 524–529
Cao Y, Zhi J R, Kong Y X. Relationships between fertility of *Frankliniella occidentalis* and nutrient contents in host foliage[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2011, 48(3): 524–529
- [30] McAuslane H J, Alborn H T. Influence of previous herbivory on behavior and development of *Spodoptera exigua* larvae on glanded and glandless cotton[J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 2000, 97(3): 283–291
- [31] 李勇, 邓望喜, 韦新葵. 美洲斑潜蝇对番茄的选择性行为及其机制[J]. 植物保护学报, 2003, 30(1): 25–29
Li Y, Deng W X, Wei X K. On the selection behavior and mechanism of *Liriomyza sativae* Blanchard in choosing tomato varieties[J]. Acta Phytopythologica Sinica, 2003, 30(1): 25–29
- [32] 王燕, 李镇宇, 戈峰. 马尾松受害诱导的化学物质滞后变化[J]. 昆虫学报, 2000, 43(3): 291–296
Wang Y, Li Z Y, Ge F. Lag-change of chemical components in needles of injured pine, *Pinus massoniana*[J]. Acta Entomologica Sinica, 2000, 43(3): 291–296
- [33] 王燕, 戈峰, 李镇宇. 马尾松诱导化学物质变化的时空动态[J]. 生态学报, 2001, 21(8): 1256–1261
Wang Y, Ge F, Li Z Y. Spatial-temporal trends of induced chemical change in pine *Pinus massoniana*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(8): 1256–1261
- [34] 陈威, 周强, 李欣, 等. 不同水稻品种对虫害胁迫的生理响应[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2161–2166
Chen W, Zhou Q, Li X, et al. Physiological responses of different rice cultivars under herbivore stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(7): 2161–2166
- [35] Inbar M, Doostdar H, Leibee G L, et al. The role of plant rapidly induced responses in asymmetric interspecific interactions among insect herbivores[J]. Journal of Chemical Ecology, 1999, 25(8): 1961–1979