应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2017, 54(4): 629–638. DOI: 10.7679/j.issn.2095–1353.2017.077

辣椒品种对烟粉虱的抗生性研究*

何 菁[1**] 周福才[1, 2***] 苏宏华[1] 赵 斌[3] 邵益栋[4]
杨爱民[1] 张心宁[5] 衡 森[1] 张海波[1] 夏秋霞[4]

（1.扬州大学，生物科学与技术学院，扬州 225009；2. 扬州大学农业与农产品安全国际合作联合实验室，扬州 225009；3. 兴化市农业技术推广中心，兴化 225700；4. 江苏省江阴市农业技术推广中心，江阴 214431；5. 江苏省睢宁县农业委员会，睢宁 221200）

摘 要 【目的】通过对不同品种辣椒叶片内容物和烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 种群数量的相关关系研究，探讨辣椒品种对烟粉虱的抗生性机制。【方法】在不同品种辣椒上饲养烟粉虱，研究烟粉虱的种群趋势指数，同时测定不同辣椒品种叶片中可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、酚类化合物和黄酮类化合物含量，分析烟粉虱种群数量与辣椒内容物的相关关系。【结果】不同品种辣椒上烟粉虱的种群趋势指数存在显著差异；抗虫辣椒品种叶片中可溶性糖、酚类化合物和黄酮类化合物含量显著高于感虫品种，可溶性蛋白、游离脯氨酸含量显著低于感虫品种。烟粉虱种群趋势指数与可溶性糖、酚类化合物和黄酮类化合物含量呈显著负相关，与可溶性蛋白、游离脯氨酸含量呈显著的正相关，其中可溶性糖含量对烟粉虱种群趋势指数影响最大。对可溶性糖（X_1）、可溶性蛋白（X_2）、游离脯氨酸（X_3）、酚类化合物（X_4）、黄酮类化合物（X_5）的含量 5 个因素与烟粉虱种群趋势指数(Y)进行多元回归分析，其回归方程为：$Y = 47.801–1.754X_1+1.206X_2+ 1.108X_3–0.437X_4–0.649X_5$（$R^2 = 0.688$）。【结论】抗性辣椒品种对烟粉虱具有明显的抗生性。

关键词 烟粉虱，辣椒，抗虫性，抗生性

Population growth of *Bemisia tabaci* (Gennadius) on different varieties of pepper

HE Jing[1**] ZHOU Fu-Cai[1, 2***] SU Hong-Hua[1] ZHAO Bin[3] SAO Yi-Dong[4]
YANG Ai-Min[1] ZHANG Xin-Ning[5] HENG Sen[1] ZHANG Hai-Bo[1] XIA Qiu-Xia[4]

(1. College of Biological Science and Technology,Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
2. Joint International Research Laboratory of Agriculture & Agri-Product Safety, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;
3. Agricultural Technology Extension Center of Xanghua City, Xanghua 225700, China;
4. Agricultural Technology Extension Center of Jiangyin City, Jiangyin 214431, China;
5. Agricultural Committee of Suining County, Suining 221200, China)

Abstract [Objectives] To compare the population growth of *Bemisia tabaci* (Gennadius) on different pepper varieties by establishing the correlation between the content of the leaves of each variety and the population size of *B. tabaci*. **[Methods]** The population trend index (*I*) of whiteflies feeding on different varieties of peppers was calculated, and the quantity of soluble sugar, soluble protein, free proline, phenolic compounds and flavonoids, in pepper leaves, measured. The correlation between whitefly population size and leaf content was analyzed. **[Results]** There were significant differences in the size of whitefly populations that fed on different varieties of peppers. Insect-resistant varieties had significantly higher amounts of soluble sugar, phenolic compounds and flavonoids, but lower soluble protein and free proline, than susceptible varieties. *I* was significantly, negatively correlated with soluble sugar, phenolic compounds and flavonoids, and significantly, positively

*资助项目 Supported projects：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）；江苏省农业三新工程项目（SXGC[2016]029、SXGC[2016]057）；苏州市 2015 年度产业技术创新专项资金（农业科技创新工程）（SNG201504）

**第一作者 First author，E-mail：157857645@qq.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：fczhou@yzu.edu.cn

收稿日期 Received：2016-11-08，接受日期 Accepted：2016-12-05

correlated with soluble protein and free proline. Among the factors measured, soluble sugar had the most important effect on *I*. Multiple regression analysis was used to model the relationship between *I* and five factors; soluble sugar (X_1), soluble protein (X_2), free proline (X_3), phenolic compounds (X_4) and flavonoids (X_5). The regression equation was: $Y = 47.801 - 1.754X_1 + 1.206X_2 + 1.108X_3 - 0.437X_4 - 0.649X_5$ ($R^2 = 0.688$). **[Conclusion]** Insect-resistant pepper varieties had significantly lower whitefly populations than susceptible varieties.

Key words *Bemisia tabaci* (Gennadius), pepper, insect-resistance,antibiosis

辣椒 *Capsicum annuum* L. 是我国重要的蔬菜作物之一，种植面积仅次于白菜，居蔬菜作物第二位，而其产值和效益则高于白菜而雄居于蔬菜作物之首。我国辣椒种植面积居世界第一（马艳青，2011）。烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 是我国设施辣椒上的重要害虫之一，为害严重时可造成辣椒的减产和品质下降，影响辣椒的商品性（杨爱民等，2014）。长期以来，辣椒烟粉虱主要依靠化学农药防治，但由此造成的抗药性上升和农药残留超标问题成为无公害辣椒生产的主要障碍之一。近年来，利用非化学农药控制方式对辣椒烟粉虱实施绿色防控越来越受到重视，并取得了较好的成果，如在辣椒生长中期摘除下部 3 张老叶降低烟粉虱的若虫量（丁志宽等，2005；荀贤玉等，2014）；利用黄板诱杀烟粉虱成虫（周福才等，2015）；利用间作非嗜好寄主或弱嗜好性寄主的方式对烟粉虱实施驱避，或间作嗜好寄主植物诱集烟粉虱等措施，以及采用综合措施对辣椒烟粉虱进行生态控制（周福才等，2014；田喜庆等，2015）等，这些技术在辣椒烟粉虱的绿色防控中发挥了重要作用。

作物抗虫性是害虫绿色防控的重要手段，选用抗虫品种控制蔬菜烟粉虱也受到了人们越来越多的关注，在作物品种对烟粉虱抗性机理方面开展了较多研究，如烟粉虱取食对蔬菜作物抗性物质的诱导（姬秀枝等，2005；高建昌等，2011；吕敏，2014；乔辰云，2014)，叶片的物理性状对抗烟粉虱选择性的影响（曹凤勤等，2008）等。何菁等（2016）分析了不同辣椒品种叶片物理性状与烟粉虱成虫选择性的关系，探讨了辣椒品种对烟粉虱寄主选择性的影响。本文通过对辣椒叶片中重要生化物质与烟粉虱在这些辣椒叶片上种群趋势关系的分析，探讨辣椒品种对烟粉虱的抗生性机制，以期为辣椒抗烟粉虱品种的筛选提供理论依据，为辣椒烟粉虱的绿色防控提供新的方法和手段。

1 材料与方法

1.1 供试辣椒

苏椒 13 号、苏椒 14 号、苏椒 15 号、苏椒 16 号、苏椒 17 号，由江苏省农科院蔬菜研究所提供；超大甜椒王、新一代三鹰椒、新苏椒五号、特大茄门甜椒、韩育牛角椒，市购。

辣椒种子催芽后播于穴盘内，待幼苗长至 4~5 片真叶时，选长势相近、健壮的辣椒移栽于盆内，每盆 1 株，用 40 目防虫网罩住。辣椒生长期间不使用任何杀虫药剂，常规水肥管理，辣椒成株期供试。

1.2 试验方法

1.2.1 烟粉虱的发育历期及存活率 试验在（20±1）℃的室内进行。每株辣椒选上、中、下部叶片各 1 张，用吸虫管吸取烟粉虱成虫 30 头接到每张叶片的背面，用 40 目的养虫网罩住叶片。24 h 后去除成虫，统计每张叶片上的烟粉虱的产卵粒数。每张叶片保留并标记初产烟粉虱卵 30 粒，用毛笔轻轻除去多余的卵粒。卵孵化后再标记若虫，记隔 24 h 检查 1 次若虫的发育进度，至成虫羽化为止。计算烟粉虱在不同辣椒品种上各虫期的发育历期及存活率。试验重复 3 次。

1.2.2 不同品种辣椒上烟粉虱种群趋势指数 取 1.2.1 试验中同期羽化的雌雄成虫成对接到辣椒叶片上，辣椒叶柄插在湿润的脱脂棉中，每叶接成虫 1 对，每 2 d 观察 1 次雌虫的产卵量，至成虫死亡为止。

烟粉虱的种群趋势指数 I 用下列公式计算：

$$I=S_E S_1 S_2 S_3 S_4 F_♀$$

式中，S_E、S_1、S_2、S_3、S_4 分别为烟粉虱卵、1、2、3、4 龄（伪蛹）存活率，$F_♀$为单雌产卵量（粒/♀）。

1.2.3　可溶性糖含量的测定　采用蒽酮比色法。称取剪碎混匀的新鲜辣椒叶片 0.5 g，放入 50 mL 试管中，加入 10 mL 蒸馏水，在沸水浴中煮沸 10 min，取出冷却，过滤定容至 25 mL 容量瓶中，取 5 mL 2 次定容到 50 mL 为待测液。取待测液 1.0 mL，加 4 mL 蒽酮试剂，在沸水浴中煮沸 10 min，冷却后在 620 nm 波长下测定光密度。重复 3 次。用葡萄糖制作标准曲线，然后计算可溶性糖的含量。

$$可溶性糖含量(\%)= C\times V/a\times n)/(W\times 106)$$

式中：C 为标准曲线求得糖量（μg）；V 为提取液量（mL）；a 为吸取样品液体积（mL）；n 为稀释倍数；W 为叶片鲜重（g）。

1.2.4　可溶性蛋白含量的测定　考马斯亮蓝 G-250 染色法（邹琦，2000)。取新鲜辣椒叶片 0.2 g，加入 5 mL 去离子水研磨成匀浆，4 000 r/min 离心 10 min，弃去沉淀，上清液转入 10 mL 容量瓶中，定容摇匀后待测。吸取提取液 1 mL，加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液，充分混合后放置 2 min，在 595 nm 波长下测定光密度，用牛血清蛋白制作标准曲线，然后计算可溶性蛋白质的含量。

$$可溶性蛋白含量(mg/g)=(C\times VT)/(1\ 000\ VS\times W)$$

式中：C 为查的标准曲线值（μg）；VT 为提取液总体积（mL）；W 为样品鲜重（g）；VS 为测定时加样量（mL）。

1.2.5　游离脯氨酸含量的测定　游离脯氨酸的测定采用茚三酮显色法，参照李波等（2003）略有改动。取剪碎混匀的辣椒叶片 0.5 g 置于 50 mL 试管中，加入 5 mL 3%的磺基水杨酸溶液，沸水浴中提取 10 min，冷却后过滤于干净的试管中待测。吸取 2 mL 提取液于带塞试管中，加入 2 mL 冰醋酸及 2 mL2.5%酸性茚三酮试剂，在沸水浴中加热 30 min，冷却后再加入 4 mL 甲苯，摇荡 30 s，静置片刻。取上层溶液，3 000 r/min 离心 5 min。以甲苯溶液为空白对照，吸取上层脯氨酸红色甲苯溶液，在 520 mm 波长处测定吸光度。用脯氨酸绘制标准曲线。

$$脯氨酸含量(\mu g/g)=(C\times V)\times(A\times W)^{-1}$$

式中：C 为提取液中脯氨酸浓度，由标准曲线求得；V 为提取液总体积（mL）；A 为测定时加样量（mL）；W 为样品鲜重（g）。

1.2.6　酚类化合物含量的测定　参照韩富根（1993）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。

样品测定：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。

1.2.7　黄酮类化合物含量的测定　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。

样品测定：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’s 新复极差法进行多重比较。不同辣椒品种叶片特性与烟粉虱种群趋势指数的关系用 Excel 进行相关性分析，并用 DPS 处理系统进行多元逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同品种辣椒上烟粉虱的发育历期

不同品种辣椒上烟粉虱的发育历期存在一定的差异（表 1），其中新苏椒五号与苏椒 15 号之间的差异最大，烟粉虱在新苏椒五号辣椒上从卵至成虫的发育历期（40.65 d）比苏椒 15 号辣椒（35.10 d）上长 5.55 d（$P<0.05$）。

2.2 不同辣椒品种上烟粉虱的存活率

不同辣椒品种上烟粉虱的存活率存在明显差异（表 2），从表 2 可以看出，烟粉虱从卵至成虫的世代存活率在新一代三鹰椒上的最低（40%），与其他 9 个辣椒品种有显著差异，在苏椒 13 号和韩育特大牛角椒上烟粉虱存活率最高，分别为 75.57%和 71.11%。烟粉虱各个虫态的存活率除 1 龄、4 龄若虫外，其他各个虫态在不同辣椒品种上差异显著（$P<0.05$）。卵的存活率以新苏椒五号上最高（93.33%），新一代三鹰椒上最低（73.34%）前者比后者高 19.99%。2 龄若虫的存活率以苏椒 14 号上最高（98.89%），苏椒 16 号上最低（91.11%），两者存在显著差异，其他各个品种间差异不显著。3 龄若虫的存活率以苏椒 13 号上最高（96.67%），新一代三鹰椒上最低（78.33%），前者比后者高 18.34%。

2.3 不同品种辣椒对烟粉虱种群的影响

应用种群趋势指数法对 10 个辣椒品种上烟粉虱的种群趋势进行分析（图 1），结果表明，苏椒 15 号辣椒品种上烟粉虱种群趋势指数最高，达到 78.90，新一代三鹰椒上最低，为 34.68，前者为后者的 2.3 倍。

2.4 不同品种辣椒叶片主要生化物质对辣椒抗性的影响

2.4.1 不同品种辣椒叶片可溶性糖含量 不同品种辣椒叶片可溶性糖含量间存在显著差异（$P<0.05$）（图 2），其中苏椒 13、苏椒 16 和韩育特大牛角椒辣椒叶片的可溶性糖含量最低，分别为 0.15%、0.17%和 0.12%，新一代三鹰椒辣椒叶片可溶性糖的含量最高，为 0.92%，后者为前者的 6 倍左右。

表 1 不同品种辣椒上烟粉虱的发育历期

Table 1 Development periods of *Bemisia tabaci* on different pepper varieties

品种 Variety	烟粉虱各虫期发育历期 Developments of *B.tabaci* of different stages（d）					
	卵 Egg	1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄+伪蛹 4th instar+pupa	卵-成虫 Egg to adult
苏椒 13 号 Sujiao No.13	8.08±0.25def	3.26±0.44c	5.52±0.23cd	4.52±0.22b	15.37±0.71b	36.26±0.90ab
苏椒 14 号 Sujiao No.14	7.95±0.22ef	3.26±0.47c	6.26±0.20ab	4.97±0.37ab	18.29±1.22ab	38.86±1.32ab
苏椒 15 号 Sujiao No.15	7.52±0.24f	3.25±0.44c	5.14±0.25d	4.64±0.374b	15.45±1.42b	35.10±1.75b
苏椒 16 号 Sujiao No.16	8.40±0.20bcde	3.24±0.05c	6.10±0.23abc	5.00±2.40ab	19.78±1.08a	40.60±0.96a
苏椒 17 号 Sujiao No.17	7.76±0.19ef	3.49±0.08c	6.73±0.23a	4.69±0.34b	18.68±1.02ab	39.56±1.34ab
超大甜椒王 Chaodatianjiaowang	8.70±0.07abcd	3.30±0.07ab	5.27±0.17d	4.61±0.31b	18.31±1.04ab	38.22±1.17ab
新一代三鹰椒 Xinyidaisanyingjiao	9.06±0.26ab	3.42±0.08abc	6.35±0.25ab	6.06±0.56a	19.93±1.69a	40.00±2.04a
新苏椒五号 Xinsujiao No.5	9.38±0.20a	3.31±0.06bc	5.02±0.18d	5.46±0.44ab	19.45±1.01a	40.65±1.19a
特大茄门甜椒 Tedaqiementianjiao	8.89±0.30abc	3.48±0.06ab	5.25±0.20d	5.63±0.35ab	19.85±0.82a	40.35±1.06a
韩育特大牛角椒 Hanyutedaniujiaojiao	8.21±0.29cdef	3.58±0.07a	5.68±0.26bcd	4.72±0.28b	16.21±0.92ab	36.42±1.15ab

表中的数值为平均值±标准误。同列数据后标有不同小写英文字母表示在 0.05 水平上差异显著。下表同。

Data in the table are mean±SE, and followed by the different letters in the same column indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

表 2　不同辣椒品种上烟粉虱的存活率

Table 2　Survival rate of *Bemisia tabaci* on different pepper varieties

品种 Variety	烟粉虱各虫期存活率 Survival rate of different stages（%）					
	卵 Egg	1 龄 1st instar	2 龄 2nd instar	3 龄 3rd instar	4 龄+伪蛹 4th instar+pupa	卵-成虫 Egg to adult
苏椒 13 号 Sujiao No.13	88.89±2.22abc	98.89±1.11a	95.55±2.22ab	96.67±1.93a	95.56±1.17a	75.56±2.94a
苏椒 14 号 Sujiao No.14	92.22±1.11ab	97.78±1.31a	98.89±1.17a	84.45±2.17abc	94.45±4.01a	67.78±2.07ab
苏椒 15 号 Sujiao No.15	81.67±1.66cde	96.67±0.17a	91.66±1.67ab	83.34±3.33abc	96.67±3.61a	50.00±0.12bcd
苏椒 16 号 Sujiao No.16	90.00±1.92abc	97.78±1.15a	91.11±2.02b	91.11±2.94abc	96.67±1.93a	66.67±5.09ab
苏椒 17 号 Sujiao No.17	76.66±3.34de	96.67±3.33a	95.00±1.41ab	81.66±8.34bc	93.33±3.34a	43.33±11.33cd
超大甜椒王 Chaodatianjiaowang	83.34±3.33bcd	96.67±3.01a	98.34±1.66ab	91.66±1.67abc	96.67±0.07a	66.67±0.07ab
新一代三鹰椒 Xinyidaisanyingjiao	73.34±3.34e	96.67±0.13a	96.67±3.33ab	78.33±6.37c	95.00±1.57a	40.00±10.00d
新苏椒五号 Xinsujiao No.5	93.33±3.14a	98.34±1.66a	96.67±0.37ab	83.34±6.67abc	90.0±3.33a	61.66±11.66abc
特大茄门甜椒 Tedaqiementianjiao	91.11±2.94ab	97.78±1.01a	92.22±1.11ab	88.89±2.94abc	97.78±1.11a	67.78±1.11ab
韩育特大牛角椒 Hanyutedaniujiaojiao	87.78±2.94abc	97.78±1.73a	94.44±2.94ab	93.34±3.33ab	97.78±2.03a	71.11±5.88a

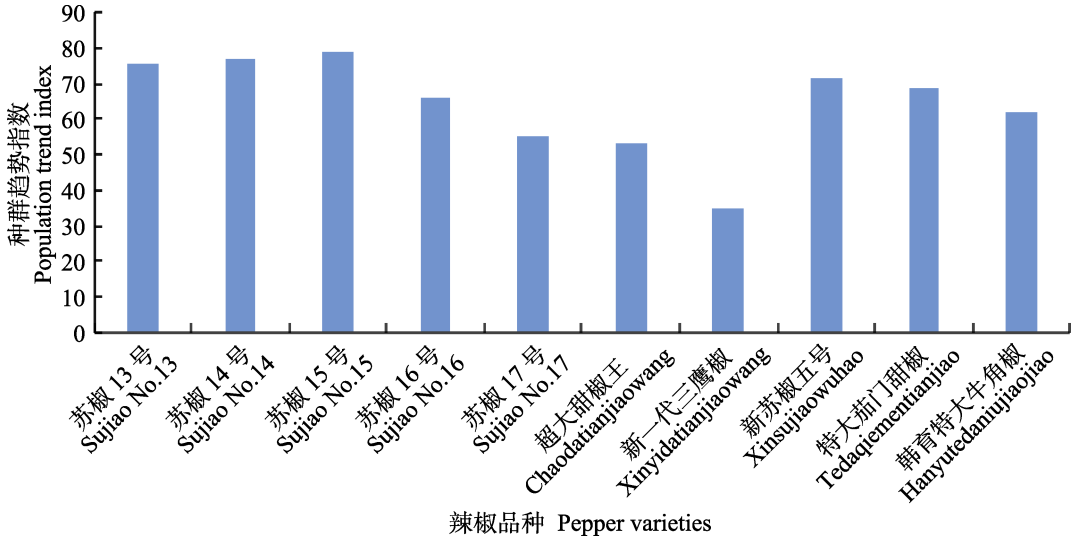

图 1　不同辣椒品种上烟粉虱种群趋势指数

Fig. 1　Population trend index of *Bemisia tabaci* on different pepper varieties

对叶片可溶性糖含量与烟粉虱种群趋势指数（*I*）进行相关性分析，结果发现，叶片可溶性糖含量与烟粉虱种群趋势指数呈显著负相关（$P<0.05$），即叶片可溶性糖含量越高烟粉虱种群趋势指数越小。其回归方程为：$y=-72.772x+88.158$（$r=-0.68$，$P=0.033$）。

2.4.2　不同品种辣椒叶片可溶性蛋白含量　不同品种辣椒叶片可溶性蛋白含量间存在显著差异（$P<0.05$）（图 3），其中苏椒 13 号辣椒叶片的可溶性蛋白含量最高（7.18 mg/g），超大甜椒王辣椒叶片中可溶性蛋白的含量最低（3.79 mg/g），前者为后者的 1.89 倍。

对叶片可溶性蛋白含量与烟粉虱种群趋势指数（*I*）进行相关性分析，结果发现，叶片可溶性蛋白含量与烟粉虱种群趋势指数呈显著正相关（$P<0.05$），即叶片可溶性糖含量越高烟粉

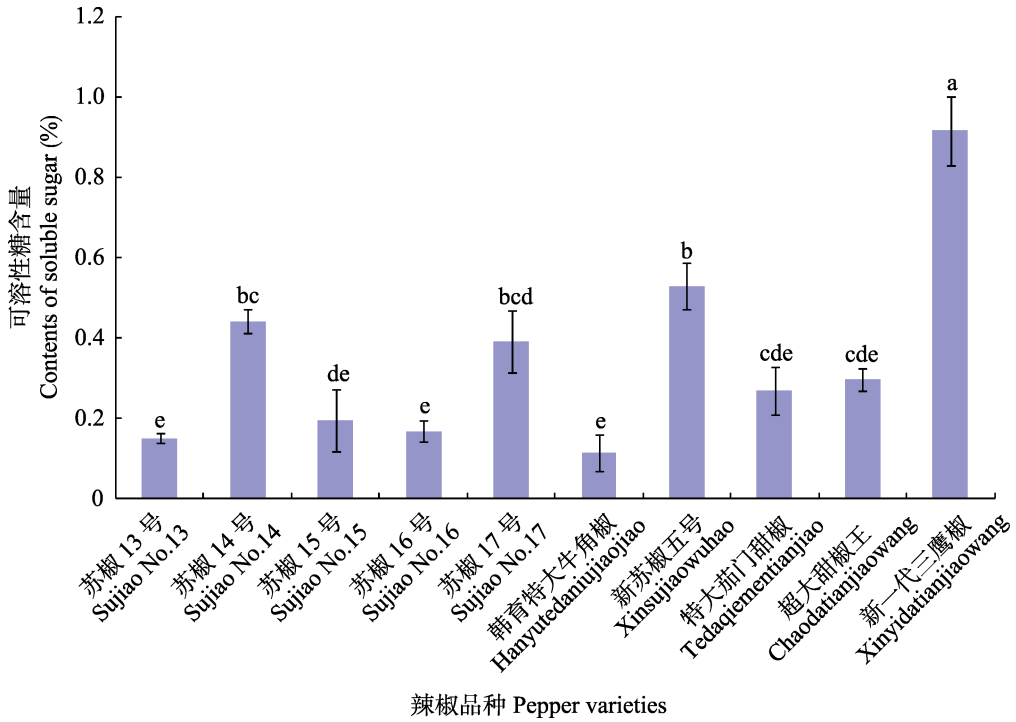

图 2　不同辣椒品种叶片可溶性糖含量

Fig. 2　Contents of soluble sugar on different pepper varieties

柱上标有不同小写英文字母表示在 0.05 水平上差异显著。下图同。

Histograms with the difference small letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

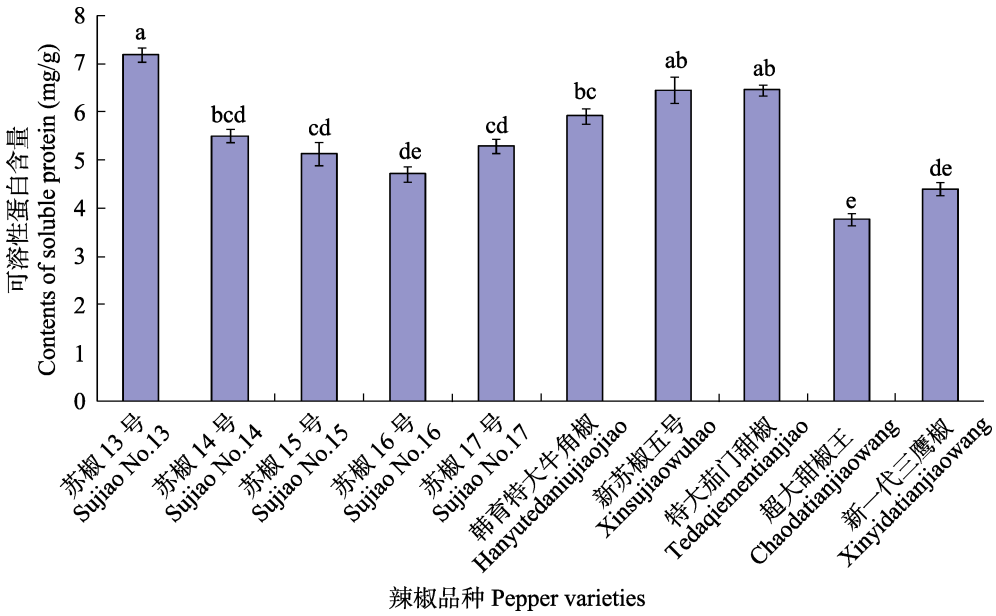

图 3　不同辣椒品种叶片可溶性蛋白含量

Fig. 3　Contents of soluble protein on different pepper varieties

虱种群趋势指数越大。其回归方程为：y=7.665x+22.167（r=0.597，P=0.038）。

2.4.3　不同品种辣椒叶片游离脯氨酸含量　不同品种辣椒叶片游离脯氨酸含量间存在显著差异（P<0.05）（图 4），其中苏椒 15 号辣椒叶片的游离脯氨酸含量最高（26.91 μg/g），韩育牛角椒叶片中游离脯氨酸的含量最低（13.02 μg/g），前者为后者的 2.07 倍。

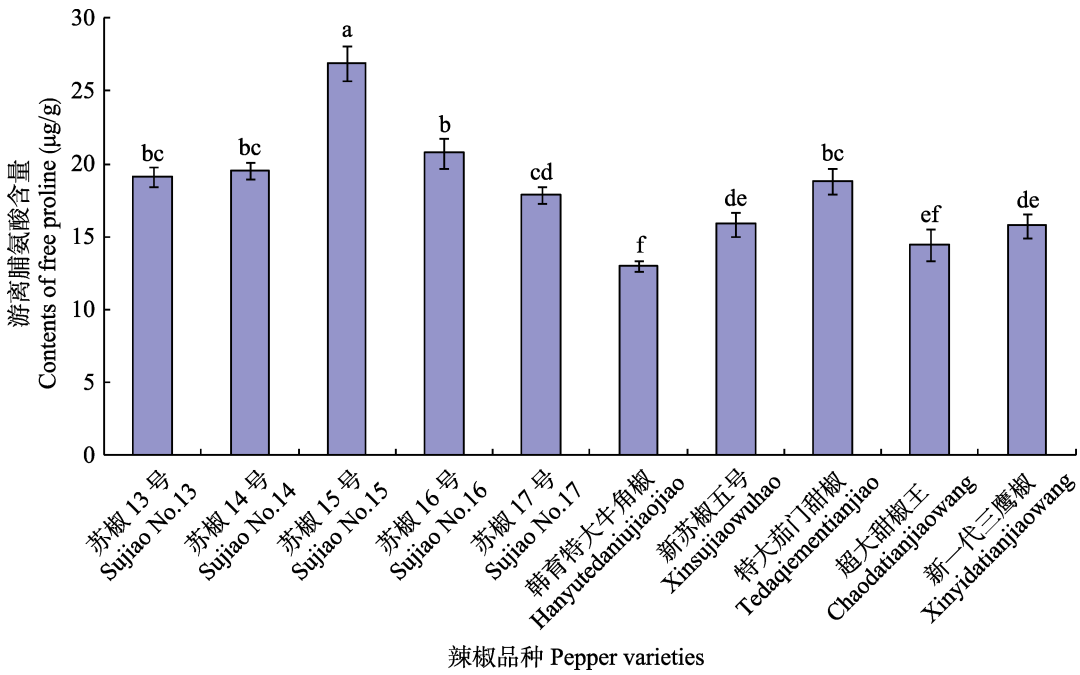

图 4　不同辣椒品种叶片游离脯氨酸含量

Fig. 4　Contents of free proline on different pepper varieties

对叶片游离脯氨酸含量与烟粉虱种群趋势指数（*I*）进行相关性分析，结果发现，叶片游离脯氨酸含量与烟粉虱种群趋势指数呈显著正相关（$P<0.05$），即叶片游离脯氨酸含量越高烟粉虱种群趋势指数越小。其回归方程为：$y=1.987x+28.011$（$r=0.506$，$P=0.042$）。

2.4.4　不同品种辣椒叶片酚类化合物含量　不同品种辣椒叶片酚类化合物含量间存在显著差异（$P<0.05$）（图 5）。酚类化合物含量最高的辣椒品种是韩育特大牛角椒，为 61.02 μg/g，含量最低的辣椒品种是超大甜椒王，为 38.42 μg/g，前者为后者的 1.59 倍。

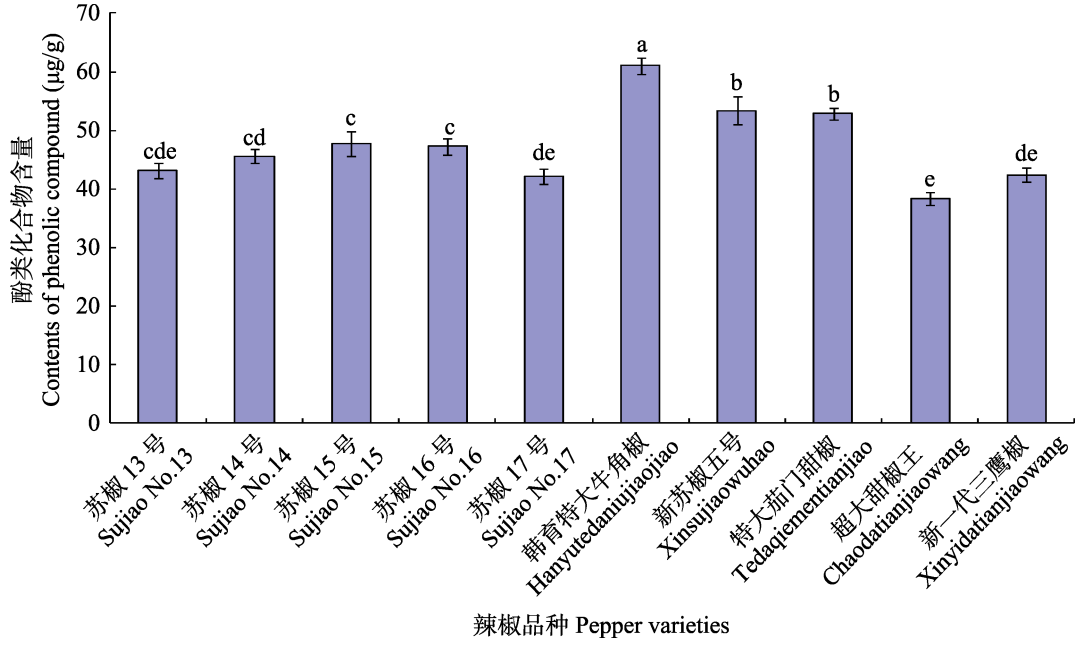

图 5　不同辣椒品种叶片酚类化合物含量

Fig. 5　Contents of phenolic compound on different pepper varieties

对叶片酚类化合物含量与烟粉虱种群趋势指数（*I*）进行相关性分析，结果发现，叶片酚类化合物含量与烟粉虱种群趋势指数呈显著负相关（$P < 0.05$），即叶片酚类化合物含量越高烟粉虱种群趋势指数越小。其回归方程为：$y = -0.813x+102.727$（$r = -0.504$，$P=0.047$）。

2.4.5 不同品种辣椒叶片黄酮类化合物含量

不同品种辣椒叶片黄酮类化合物含量存在显著差异（$P<0.05$）（图 6）。韩育特大牛角椒辣椒叶片内黄酮类化合物含量最高，为 2.03 mg/g，新一代三鹰椒辣椒叶片内黄酮类化合物含量最低，为 0.09 mg/g，前者为后者的 22.6 倍。

对叶片黄酮类化合物含量与烟粉虱种群趋势指数（*I*）进行相关性分析，结果发现，叶片黄酮类化合物含量与烟粉虱种群趋势指数呈显著负相关（$P<0.05$），即叶片黄酮类化合物含量越高烟粉虱种群趋势指数越小。其回归方程为：$y = -6.098x+73.952$（$r = -0.489$，$P=0.049$）。

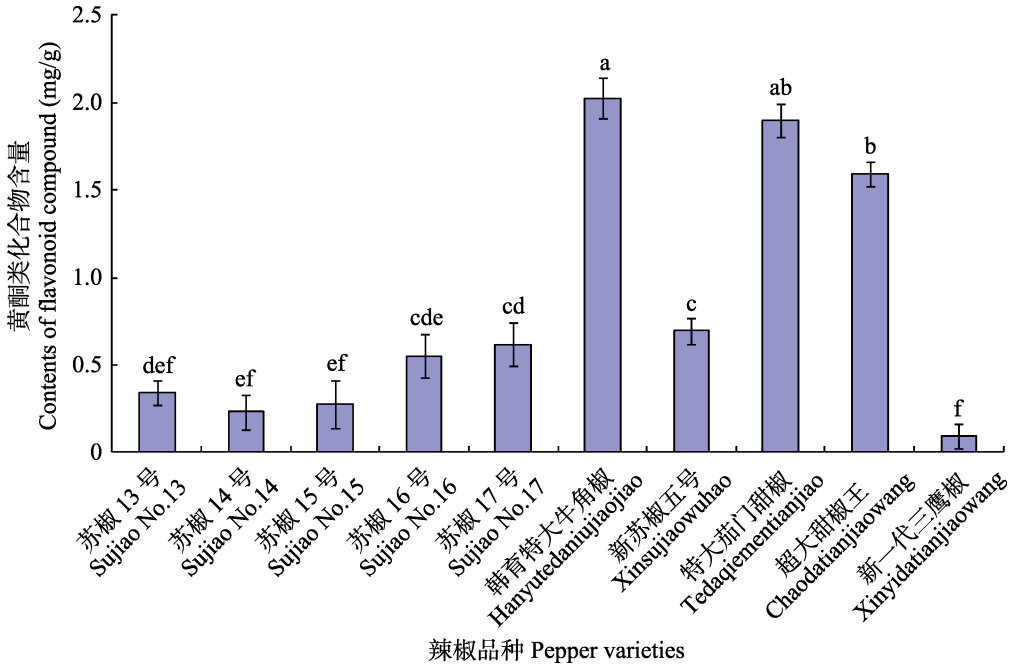

图 **6** 不同辣椒品种叶片黄酮类化合物含量

Fig. 6 Contents of flavonoid compound on different pepper varieties

2.5 辣椒叶片主要生化物质含量与烟粉虱种群趋势指数的关系

上述分析表明，烟粉虱种群趋势指数与可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、酚类化合物及黄酮类化合物均存在显著的相关性。对可溶性糖（X_1）、可溶性蛋白（X_2）、游离脯氨酸（X_3）、酚类化合物（X_4）、黄酮类化合物（X_5）的含量 5 个因素对烟粉虱种群趋势指数(Y)进行多元回归分析，其回归方程为：

$Y = 47.801 - 1.754X_1 + 1.206X_2 + 1.108X_3 - 0.437X_4 - 0.649X_5$ ($R^2 = 0.688$)。

通径系数分别为 $P_{可溶性糖} \rightarrow Y = -0.031$，

$P_{可溶性蛋白} \rightarrow Y = 0.717$，$P_{游离脯氨酸} \rightarrow Y = 0.631$，

$P_{酚类化合物} \rightarrow Y = -0.217$，$P_{黄酮类化合物} \rightarrow Y = -0.035$。

上述方程表明，从种群趋势指数来看，在可溶性蛋白、游离脯氨酸、酚类化合物、黄酮类化合物不变的情况下，可溶性糖每增加 1 个单位，种群趋势指数可以减少 1.754 个单位；在可溶性糖、游离脯氨酸、酚类化合物、黄酮类化合物含量不变的情况下，可溶性蛋白每增加 1 个单位，种群趋势指数可以增加 1.206 个单位；在可溶性糖、可溶性蛋白、酚类化合物、黄酮类化合物含量不变的情况下，游离脯氨酸每增加 1 个单位，种群趋势指数可以增加 1.108 个单位；在可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、黄酮类化合物不变的情况下，酚类化合物每增加 1 个单位，种群

趋势指数可以减少 0.437 个单位；在可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、酚类化合物含量不变的情况下，黄酮类化合物含量增加 1 个单位，种群趋势指数可以减少 0.649 个单位。

3　结论与讨论

植食性昆虫通过视觉、嗅觉、触觉、味觉等方式对寄主植物进行选择（陆宴辉等，2008），定居到植物表面后，昆虫的种群繁殖与寄主植物体内的营养物质和抗生物质有关（Strong *et al.*，1984），寄主植物对害虫的抗生性通常是由寄主的营养水平和次生物质含量来决定（钦俊德，2003)。对昆虫具有重要影响的营养物质包括可溶性糖、蛋白、氨基酸等，次生代谢产物主要包括生物碱、酚类化合物和萜类化合物三大类（陈建新，1997；黄瑞冬等，1998；Awmack and Leather，2002），不仅这些物质的绝对量影响昆虫的种群，植物体内的相对量，包括植物体内某些营养物质的缺乏或有效营养成分的不平衡也可以引起植物对植食性昆虫的抗性（Painter，1969），同时植物接受到某些信号后，还可以通过改变代谢途径来主动调节这些物质的含量或相对比例，使害虫的存活率或繁殖量下降（钦俊德，1980；王琛柱等，1993）。同一种植物不同品种之间体内这些物质绝对数量或相对数量的差异构成了植物品种对害虫抗生性的物质基础。

不同抗性品种中，蛋白质、氨基酸和可溶性糖等物质的含量不同，一些抗虫植物品种中的蛋白质、氨基酸含量通常低于感虫品种，而可溶性糖的含量则相对较高（Ahmed *et al.*，1994；周福才等，1997；曹宇等，2011；周奋启，2011；胡荣利等，2015）。本研究也发现，不同辣椒品种叶片中可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸、酚类化合物和黄酮类化合物含量存在明显差异，抗性辣椒品种中的蛋白质、氨基酸含量低于感虫品种，而可溶性糖的含量则高于感虫品种，这些物质与烟粉虱的种群趋势指数之间存在明显的相关性。表明辣椒品种对烟粉虱具有明显的抗生性，可溶性蛋白和游离脯氨酸在其中起着相对更重要的作用。

植物对害虫的抗生性是由植物体内的一些物质引起的，但这些物质的表达会受到环境因素的影响，从而引起抗生性的变化，如夏栎叶片中酚类物质的含量存在明显的季节性变化，舞毒蛾的产卵量与夏栎叶片中酚类物质的季节性变化密切相关（Rossiter *et al.*，1988）。目前，江苏辣椒生产除了正常的露地和保护地外，在保护地中还有春提早和秋延后茬口，实现了辣椒的周年生产，在这种生产模式下，辣椒叶片中抗性物质如何变化，辣椒对烟粉虱的抗生性如何变化还有待进一步研究。同时在辣椒抗性品种的筛选和抗性品种的应用中也应该关注抗生性的这种变化。

参考文献 (References)

Ahmed EL, Ghaouth AE, Joseph A, 1994. Effects of chitosan on cucumber plants: suppression of *Pythium aphanidermatum* and induction of defense reactions. *Phytopathol*, 84(3): 313–320.

Awmack CS, Leather SR, 2002. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. *Annual Review of Entomology*, 47: 817–841.

Cao FQ, Liu WX, Wan FH, Chen LS, 2008. Behavior selection of *Bemisia tabaci* B-biotype to different host plants and colors. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(3): 431–436. [曹凤勤, 刘万学, 万方浩, 程立生, 2008. 寄主挥发物、叶色在 B 型烟粉虱寄主选择中的作用. 昆虫知识, 45(3): 431–436.]

Cao Y, Zhi JR, Kong YX, 2011. Relationships between fertility of *Frankliniella occidentalis* and nutrient contents in host foliage. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(3): 524–529. [曹宇, 郅军锐, 孔译贤, 2011. 西花蓟马繁殖力与寄主营养物质的关系. 应用昆虫学报, 48(3): 524–529.]

Chen JX, Song DL, Chang CQ, 1997. Biochemical studies on the resistance of wheat to aphids in wheat. *Acta Entomologica Sinica*, 40(1): 186–189. [陈建新, 宋敦伦, 采长群, 1997. 小麦抗禾益管蚜的生化研究. 昆虫学报, 40(1): 186–189.]

Ding ZK, Lin SX, Xun XY, 2005. The studies on hazard and control technology of *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Journal of Jiangxi Plant Protection*, 28(3): 115–116. [丁志宽, 林双喜, 荀贤玉, 2005. 烟粉虱发生危害及控制技术. 江西植保, 28(3): 115–116.]

Gao JC, Guo GJ, Guo YM, Wang XX, Zhang YJ, Du YC, 2011. Development and reproduction of *Bemisia tabaci* biotype B on wild and cultivated tomato accessions. *Acta Ecologica Sinica*, 31(23): 7211–7217. [高建昌, 郭广君, 国艳梅, 王孝宣, 张友军, 杜永臣, 2011. 不同番茄材料对 B 型烟粉虱个体发育和繁殖能力的影响. 生态学报, 31(23): 7211–7217.]

Han FG, Liu XZ, Jiao GZ, 1993. The studies of determining the total phenol content in tobacco leaves with the method of Folin. *Journal of Henan Agricultural University*, 27(1): 95–98. [韩富根, 刘学芝, 焦桂珍, 1993. 用福林法测定烟叶中总酚含量的探讨. 河南农业大学学报, 27(1): 95–98.]

He J, Zhou FC, Chen XH, Su HH,Yang AM, Heng S, 2016. Effects

of physical characteristics of pepper leaves on host selection of *Bemisia tabaci*. *Chinese Journal of Ecology*, 35(11): 3045–3050。 [何菁, 周福才, 陈学好, 苏宏华, 杨爱民, 衡森, 2016. 辣椒叶片物理性状对烟粉虱寄主选择的影响. 生态学杂志, 35(11): 3045–3050.]

Hu RL, Qiao CY, Kong HL, Lü M, Mao N, Zhu SD, 2016. Adaptation of *Bemisia tabaci* biotype Q (Hemiptera: Aleyrodidae) to different tomato cultivars. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 734–740. [胡荣利, 乔辰云, 孔海龙, 吕敏, 毛念, 祝树德, 2016. Q 型烟粉虱对不同番茄品种的适生性. 植物保护学报, 42(5): 734–740.]

Huang RD, Ma HT, Wu Q, Wang CH, Guan X, Jia YX, 1998. Aphid-resistant characteristics and their relations with secondary metabolites in sorghum. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 29(4): 287–290. [黄瑞冬, 马鸿图, 吴琼, 王春慧, 关欣, 贾永旭, 1998. 高粱抗蚜虫性状与次生代谢物关系的研究. 沈阳农业大学学报, 29(4): 287–290.]

Ji XZ, Zhang QW, Liu XX, Yang MS, 2005. Selection of different varieties of cucumber by *Bemisia tabaci* (Gennadius). *Plant Protection*, 31(4): 62–64. [姬秀枝, 张青文, 刘小侠, 杨麦生, 2005. 烟粉虱对不同黄瓜品种的选择性. 植物保护, 31(4): 62–64.]

Li B, Jia XF, Bai QW, 2003. Effects of drought stress on prolin accumulation of alfalfa. *Bulletin of Botanical Research*, 23(2): 189–191. [李波, 贾秀峰, 白庆武, 2003. 干旱胁迫对苜蓿脯氨酸累积的影响. 植物研究, 23(2): 189–191.]

Lu YH, Zhang YJ, Wu KM, 2008. Host-plant selection mechanisms and behavioural manipulation strategies of phytophagous insects. *Acta Ecologica Sinica*, 28(10): 5113–5122. [陆宴辉, 张永军, 吴孔明, 2008. 植食性昆虫的寄主选择机理及行为调控策略. 生态学报, 28(10): 5113–5122.]

Lü M, Wu L, Su JK, Zhu SD, 2014. Contents of chlorophyll and nutrients in pepper varieties exposed to Q biotype *Bemisia tabaci*. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 30(6): 1316–1320. [吕敏, 吴琳, 苏建坤, 祝树德, 2014. Q 型烟粉虱为害对不同辣椒品种叶绿素及营养物质的影响. 江苏农业学报, 30(6): 1316–1320.]

Ma YQ, 2011. Analysis on the situation of Chinese pepper industry. *Journal of China Capsicum*, (1): 1–5. [马艳青, 2011. 我国辣椒产业形势分析. 辣椒杂志, (1): 1–5.]

Painter RH, 1969. Plant and animal resistance to insect. *Principles of Plant and Animal Pest Control*, 3: 64–69.

Qiao CY, 2014. Studies on the resistance mechanism of different tomato varieties to *Bemisia tabaci*. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [乔辰云, 2014. 不同番茄品种对烟粉虱的抗性及其机制研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Qin JD, 1980. The physiological bases of host-plant specificity of phytophagous insects. *Acta Entomologica Sinica*, 23(1): 108–124. [钦俊德, 1980. 植食性昆虫食性的生理基础. 昆虫学报, 23(1): 108–124.]

Qin JD, 2003. Decripting how herbivorous insects select their foodplants. *Bulletin of Biology*, 38(6): 1–3. [钦俊德. 诠释植食性昆虫是怎样选择食料植物的. 生物学通报, 38(6): 1–3.]

Rossiter M, Schultz JC, Baldwin IT, 1988. Relationships among defoliation, red oak phenolics, and gypsy moth growth and reproduction. *Ecology*, 69(l): 267–277.

Strong DR, Lawton JH, Southwood TRE, 1984. Insects on Plants: Community Patterns and Mechanisms. Cambridge: Harvard University Press. 1137.

Tian XQ, Li N, Liu XC, Xu YJ, Zhang SZ, 2015. Occurrence and integrated control techniques of *Bemisia tabaci* on vegetable. *Journal of Shaanxi Agricultural Sciences*, 61(1): 123–126. [田喜庆, 李宁, 刘晓才, 徐雅君, 张世泽, 2015. 蔬菜害虫烟粉虱的发生及综合治理技术. 陕西农业科学, 61(1): 123–126.]

Wang SZ, Zhang QW, Yang QH, Zhou MX, 1993. Chemical basis of plant resistance to insect resistance. *Journal of Plant Protection*, 19(6): 39–41. [王深柱, 张青文, 杨奇华, 周明牂, 1993. 植物抗虫性的化学基础. 植物保护, 19(6): 39–41.]

Xun XY, Li Y, Ding ZK, 2014. The investigation of whitefly composition on greenhouse peppers and its application on controlling. *Journal of Scientific Breeding*, 6: 33. [荀贤玉, 李瑛, 丁志宽, 2014. 大棚青椒烟粉虱虫量构成调查及其在绿色防控上的应用. 科学种养, 6: 33.]

Yang AM, Zhou FC, Hu QJ, Chen XH, Zhang JJ, Ren J, Zhou JH, Shao JZ, 2014. Effects of *Bemisia tabaci* (Gennadius) on yield and quality of chilli. *Journal of Yangzhou University* (*Agricultural and Life Science Edition*), 34(1): 77–80. [杨爱民, 周福才, 胡其靖, 陈学好, 张建军, 任佳, 周建华, 邵久之, 2014. 烟粉虱对辣椒产量和品质的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 34(1): 77–80.]

Zhou FC, Lu ZQ, Chen LF, Xu YH, Xie KZ, Wu J, 1997. Study on resistance mechanism of wheat to *Rhopalosiphum padi* varieties. *Journal of Jiangsu Agricultural College*, 18(4): 53–56. [周福才, 陆自强, 陈丽芳, 徐勇惠, 谢恺舟, 吴剑, 1997. 小麦品种对禾谷缢管蚜的抗性机理研究. 江苏农学院学报, 18(4): 53–56.]

Zhou FC, Zhou JH, Yang AM, Heng S, Chen XH, Zhang JJ, He J, 2015. The comparison of the effects of sex attractant and yellow sticky card to *Bemisia tabaci* (Gennadius) on vegetables in greenhouse. *Journal of Biosafety*, 24(1): 51–56. [周福才, 周建华, 杨爱民, 衡森, 陈学好, 张建军, 何菁, 2015. 性诱剂和黄板对设施蔬菜烟粉虱诱集效果的比较. 生物安全学报, 24(1): 51–56.]

Zhou FC, Yang AM, Chen XH, Yang F, Fan JD, Zhou JH, Hu QJ, Zhang JJ, He J, 2014. The studies on technology of ecological control against *Bemisia tabaci* (Gennadius) on facilities vegetables. *Journal of Yangzhou University* (*Agricultural and Life Science Edition*), 35(3): 75–79. [周福才, 杨爱民, 陈学好, 杨峰, 樊继德, 周建华, 胡其靖, 张建军, 何菁, 2014. 设施蔬菜烟粉虱生态控制技术研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 35(3): 75–79.]

Zhou FQ, 2011. Studies of different eggplant varieties on resistance and physiological and biochemical mechanism to *Bemisia tabaci* (Gennadius). Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [周奋启, 2011. 不同茄子品种对烟粉虱的抗性及其生理生化机制研究. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Zuo Q, 2000. Experimental Instruction of Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press. 127. [邹琦, 2000. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社. 127.]