

# 外源 Bt 基因导入对棉花叶片维管束汁液的生化物质含量及烟粉虱种群增殖的影响<sup>\* \* \*</sup>

周福才<sup>1,2</sup> 任顺祥<sup>2</sup> 陈德华<sup>3</sup> 李传明<sup>1</sup>

(1. 扬州大学园艺与植物保护学院 扬州 225009;  
2. 华南农业大学资源与环境学院 广州 510642; 3. 扬州大学农学院 扬州 225009)

**摘要** 以转 Bt 基因棉花“国抗 22”和常规棉亲本“泗棉 3 号”为试材,研究外源 Bt 基因导入对棉花叶片维管束汁液中营养物质和次生物质含量以及烟粉虱种群增殖的影响。结果表明,和“泗棉 3 号”相比,“国抗 22”叶片维管束汁液中可溶性糖含量较低;单宁浓度苗期较低,但花铃期两个品种无明显差异;花铃期游离氨基酸总量无明显差异,但谷氨酸、脯氨酸、丙氨酸含量均明显高于“泗棉 3 号”;在苗期和花铃期两品种棉花叶片维管束汁液中均未检测到棉酚。取食苗期和花铃期“国抗 22”棉花的 B 型烟粉虱内禀增长率  $r_m$  分别比取食“泗棉 3 号”对应生育期的高 13.7% 和 20.2%。研究表明,外源 Bt 基因的导入影响转基因棉花中可溶性糖、游离氨基酸和其他抗生物质的合成,从而影响烟粉虱的种群发展。

**关键词** Bt 基因棉花 烟粉虱 叶片维管束汁液 营养物质 抗生物质 内禀增长率

**中图分类号:** S562.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2008)06-1508-05

## Effect of introducing Bt gene in cotton on biochemical content of vascular bundle sap of cotton leaf and reproduction of *Bemisia tabaci* (Gennadius)

ZHOU Fu-Cai<sup>1,2</sup>, REN Shun-Xiang<sup>2</sup>, CHEN De-Hua<sup>3</sup>, LI Chuan-Ming<sup>1</sup>

(1. School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract** Using transgenic Bt cotton “Guokang 22” and conventional parental cotton “Simian No. 3” as tested varieties, the effect of introducing Bt gene on physiological indices of vascular bundle sap of cotton leaf and reproduction of *Bemisia tabaci* (Gennadius) was studied. The results show that transgenic Bt cotton “Guokang 22” contains more soluble sugar in vascular bundle sap both at seedling and flowering stages than the conventional parental cotton “Simian No. 3”. Tannin content in vascular bundle sap of “Guokang 22” is lower than that of “Simian No. 3” at seedling stage, but not significantly different at flowering stage. Although no significant difference exists in total free amino acid content between two varieties, some amino acids (including glutamic acid, proline and alanine) that are closely related to *B. tabaci* metabolism are significantly higher in “Guokang 22” than in “Simian No. 3” at flowering stage. No gossypol is detected from the sap at both seeding and flowering stages. The intrinsic rates of increase ( $r_m$ ) of B-type *B. tabaci* feeding on the leaves of transgenic Bt cotton “Guokang 22” at seeding and flowering stages are respectively 13.7% and 20.2% higher than those feeding on conventional parental cotton “Simian No. 3”. This indicates that the introduction of foreign Bt gene produces profound effect on the syntheses of soluble sugars, free amino acids and anti-bioses, and thus on the population of *B. tabaci*.

**Key words** Transgenic Bt cotton, *Bemisia tabaci* (Gennadius), Vascular bundle sap, Nutrients, Anti-bioses, Intrinsic rate of increase (Received Jan. 18, 2008; accepted April 27, 2008)

转 Bt 基因棉花的大面积种植对棉铃虫 [*Helicoverpa armigera* (Hübner)] 等鳞翅目害虫起到了

\* 国家自然科学基金项目(30270901)、国家“十五”科技攻关项目(2001BA509B0604)、国家科技部转基因植物重大专项课题(2008ZX08012-004)、江苏省自然科学基金(BK2006067、BK2008056)和江苏省教育厅自然科学基金(07KJB210134)资助

周福才(1964~),男,博士,副研究员,主要从事昆虫生态和农业害虫综合治理等研究。E-mail: fczhou@yzu.edu.cn

收稿日期:2008-01-18 接受日期:2008-04-27

较好的控制作用<sup>[1]</sup>,20 世纪 90 年代以来,我国转基因棉花的种植面积也因此得到了迅速扩大。但大量研究发现,转基因棉田中烟粉虱 [*Bemisia tabaci* (Gennadius)]、棉蚜 (*Aphis gossypii* Glover) 等刺吸式口器害虫的种群数量呈明显上升趋势,部分地区甚至出现了烟粉虱多年持续暴发的现象,对棉花产量和品质造成了严重影响,并对棉花的安全生产带来了新的威胁<sup>[2-4]</sup>。室内研究也表明,转 Bt 基因棉花有利于 B 型烟粉虱的生长发育和繁殖<sup>[5]</sup>。

昆虫生长发育与其摄入的营养物质、抗生物物质和有毒物质的种类、数量有关。烟粉虱、稻飞虱等刺吸式口器害虫利用其口针插入植物的筛管吸食汁液获取营养<sup>[6,7]</sup>,因此,寄主植物筛管汁液成分及其含量直接影响这些害虫的生长发育和繁殖。但由于寄主植物筛管汁液的获取比较困难,在寄主植物与刺吸式口器害虫关系的研究中,目前主要应用寄主植物全叶片<sup>[8]</sup>、寄主植物叶片茎部伤流液<sup>[7]</sup>等为分析研究对象,也有的以人工饲料饲养法进行研究<sup>[9,10]</sup>,这些间接取样的分析方法造成了较大的试验误差。为此,我们采用压力法直接获取棉花叶片维管束汁液,以转 Bt 基因棉花“国抗 22”和常规棉亲本“泗棉 3 号”为研究对象,分析、比较转 Bt 基因棉与常规棉亲本之间维管束汁液中营养物质与抗生物物质的差异,及其对烟粉虱种群增殖的影响,初步探讨转 Bt 基因棉田烟粉虱种群数量上升的原因。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试棉花品种为“国抗 22”(转 Bt 基因棉)、“泗棉 3 号”(“国抗 22”的转基因前常规棉亲本),由江苏省沿海地区农业科学研究所提供。室内试验采用盆栽方法;田间试验种植小区面积 66 m<sup>2</sup>,各处理随机排列,种植密度为 45 000 株·hm<sup>-2</sup>,常规管理。

供试虫源为 B 型烟粉虱,将最初采自“一品红” (*Euphorbia pulcherrima* Willd) 上的 B 型烟粉虱分别接到盆栽“国抗 22”和“泗棉 3 号”上,在养虫室内隔离繁殖 5 代以后供试。

### 1.2 维管束汁液的收集

采用压力法收集棉花叶片维管束汁液。选大田棉花上部花后 10 d 左右的内围叶片若干,在叶柄基部用刀片切断,放在瓷盘中用湿纱布保湿,外包黑布避光。田间取样在上午 7:00 前完成,样品在尽可能短的时间内处理完毕,以减少因叶片本身的生理活动而引起的试验误差。用洁净的手术刀片

在叶柄基部横切,保留 6 cm 左右的叶柄,在距棉花叶柄端部 0.5 cm 处半环切,切出筛管部分。将处理过的棉花叶片放入压力室内,叶柄留在压力室外,加压,使叶片筛管内汁液从叶柄切口处流出,收集流出的汁液。每处理 20 张叶片,收集的汁液混匀,在液氮中处理 2~3 min 后,放入 -37 ℃ 的冰箱中保存、待测。压力室工作气体为钢瓶装氮气,工作压力 1.5~3.5 kPa。

### 1.3 维管束汁液中生化物质测定

可溶性糖采用蒽酮法测定,取一定量上述维管束汁液,加入 3 mL 蒽酮试剂,90 ℃ 加热 15 min,在 620 nm 处测定光密度。取 10~50 μg 葡萄糖采用同样方法测定光密度,作标准曲线。

游离氨基酸采用美国安捷伦 1100 型液相色谱仪测定,色谱条件为: C<sub>18</sub> 柱 (4.0 × 125 mm); 流速: 1.0 mL·min<sup>-1</sup>; 流动相: A 相为 25 mmol 醋酸钠, B 相为 25 mmol 醋酸钠: 甲醇: 乙腈 = 1: 2: 2; 荧光检测器激发波长 340 nm, 发射波长 450 nm; 脯氨酸激发波长 266 nm, 发射波长 305 nm。样品经 1 000 rpm 离心后直接进样。

棉酚、单宁采用液相色谱测定,美国 Waters 公司生产 HPLC, 515 pump, 2478 紫外检测器, 7725i 手动进样器, WDL-95 色谱工作站。色谱柱为 C<sub>18</sub> 柱; Lichrospher C<sub>18</sub> 柱 (4.6 × 250 mm, 5 μm)。棉酚测定时流动相为乙醇: 甲醇: 异丙醇: 乙腈: 水: 乙酸乙酯: 甲酰: 甲胺: 磷酸 = 12.7: 11.2: 9.2: 30.7: 29.4: 2.9: 3.8: 0.5 (v/v), 流速 1.5 mL·min<sup>-1</sup>, 波长 λ = 272 nm, 柱温 50 ℃。单宁测定时流动相为: 乙腈: 水 = 40: 60 (v/v); 流速 0.8 mL·min<sup>-1</sup>, 波长 λ = 272 nm, 柱温 35 ℃。

Bt 毒蛋白含量采用酶联免疫吸附 (ELISA) 测定,检测试剂和检测方法由中国农业大学作物化控中心提供。

### 1.4 烟粉虱的生命表参数测定

取盆栽棉花“国抗 22”和“泗棉 3 号”各 10 盆,每盆选相同果枝上基本一致的完全展开叶 1 片,分别接烟粉虱成虫若干,放入人工气候箱中,24 h 后移去成虫,在解剖镜下每叶标记卵 30~40 粒,每天观察 1 次发育进度;卵孵化后,标记刚固定的 1 龄若虫 20 头,每日观察 1 次各虫的发育和死亡情况;取同期羽化的成虫配成 20 对,接到笼罩的棉花叶片上,棉花叶柄插在湿润的花泥中,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。试验温度为 28 ± 0.5 ℃。

### 1.5 数据处理

试验数据用 DPS 软件处理。成对数据应用

$t$  测验。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉花叶片维管束汁液中营养物质含量的变化

#### 2.1.1 游离氨基酸

“国抗 22”和“泗棉 3 号”棉花叶片维管束汁液中氨基酸总量在苗期差异显著( $t = 6.31^{**}$ )。测定的 18 中氨基酸中,除天门冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸和甘氨酸外,其他氨基酸含量“国抗 22”均高于“泗棉 3 号”;但花铃期两个棉花品种的氨基酸总量差异不显著( $t = 1.76$ ) (表 1)。值得关注的是,在花铃期“国抗 22”棉花维管束汁液中脯氨酸、谷氨酸、丙氨酸含量分别比常规棉亲本“泗棉 3 号”高 43.5%、35.1% 和 27.7% ( $t_{脯} = 12.41^{**}$ ,  $t_{谷} = 123.27^{**}$ ,  $t_{丙} = 24.13^{**}$ )。叶片维管束汁液中游离氨基酸含量随棉花生育进程而增加。从表 1 可以看出,两品种花铃期的叶片维管束汁液中游离氨基酸总量均明显高于苗期( $t_{国抗22} = 548.39^{**}$ ,  $t_{泗棉3号} = 122.86^{**}$ ), 上升幅度均超过 30%。

表 1 不同品种棉花叶片维管束汁液氨基酸含量

Tab.1 Amino acids contents in vascular bundle sap of two cotton varieties  $mg \cdot mL^{-1}$

氨基酸 Amino acids	苗期 Seedling stage		花铃期 Flowering stage	
	国抗 22 Guokang 22	泗棉 3 号 Simian No. 3	国抗 22 Guokang 22	泗棉 3 号 Simian No. 3
天门冬氨酸 Asp	2.59	13.04 <sup>**</sup>	5.67	8.09 <sup>**</sup>
谷氨酸 Glu	3.46	4.84 <sup>**</sup>	12.47	7.05 <sup>**</sup>
丝氨酸 Ser	2.48	2.73 <sup>**</sup>	4.16	5.02 <sup>**</sup>
组氨酸 His	1.45	0.85 <sup>**</sup>	1.30	1.63 <sup>*</sup>
甘氨酸*Gly	1.39	1.41	1.75	2.33 <sup>**</sup>
苏氨酸 Thr	3.36	1.46 <sup>**</sup>	2.24	3.14 <sup>**</sup>
丙氨酸 Ala	1.70	1.62	3.99	2.59 <sup>**</sup>
精氨酸 Arg	1.13	0.58 <sup>**</sup>	0.92	1.33 <sup>**</sup>
酪氨酸 Try	1.16	0.69 <sup>**</sup>	1.34	1.76 <sup>**</sup>
胱氨酸 Cys	0.72	0.21 <sup>**</sup>	0.31	0.54 <sup>**</sup>
缬氨酸 Val	3.47	2.79 <sup>**</sup>	3.28	3.76 <sup>**</sup>
蛋氨酸 Met	1.05	0.64 <sup>*</sup>	3.18	0.98 <sup>**</sup>
色氨酸 Trp	0.56	0.20 <sup>**</sup>	0.49	0.82 <sup>**</sup>
苯丙氨酸 Phe	1.69	1.05 <sup>**</sup>	2.10	2.39 <sup>*</sup>
异亮氨酸 Ile	1.15	0.52 <sup>**</sup>	0.98	1.54 <sup>**</sup>
亮氨酸 Leu	1.88	0.89 <sup>**</sup>	1.98	2.76 <sup>**</sup>
赖氨酸 Lys	0.58	0.49 <sup>*</sup>	1.04	1.28 <sup>*</sup>
脯氨酸 Pro	1.54	0.70 <sup>**</sup>	3.40	2.46 <sup>**</sup>
总量 Total	31.34	34.71 <sup>**</sup>	50.59	49.47

#### 2.1.2 可溶性糖

转 Bt 基因棉花“国抗 22”叶片维管束汁液中可

溶性糖含量明显低于常规棉亲本“泗棉 3 号” ( $t_{苗期} = 64.73^{**}$ ,  $t_{花铃期} = 24.39^{**}$ ), 其中, 苗期和花铃期分别低 63.1% 和 26.6% (表 2)。叶片维管束汁液中可溶性糖含量随棉花生育进程而增加。研究发现, 棉花苗期叶片维管束汁液可溶性糖含量相对较低, 花铃期叶片维管束汁液中含量迅速提高, 其中, “国抗 22”花铃期的可溶性糖含量是苗期的 3.3 倍 ( $t = 1\ 036.84^{**}$ )。

表 2 棉花叶片维管束汁液可溶性糖与抗生物质的含量

Tab.2 Contents of soluble sugar and anti-biosies in vascular bundle sap of two cotton varieties

指标 Index	苗期 Seedling stage		花铃期 Flowering stage	
	国抗 22 Guokang 22	泗棉 3 号 Simian No. 3	国抗 22 Guokang 22	泗棉 3 号 Simian No. 3
可溶性糖 Soluble sugar	103.93	281.83 <sup>**</sup>	345.30	470.34 <sup>**</sup>
单宁 Tannin	0.04	0.19 <sup>**</sup>	1.42	1.40
棉酚 Gossypol	0.00	0.00	0.00	0.00
Bt 毒蛋白 Bt protein	0.016	0.00	0.008	0.00

### 2.2 棉花叶片维管束汁液抗生物物质含量的变化

苗期转 Bt 基因棉“国抗 22”叶片维管束汁液单宁含量明显低于“泗棉 3 号” ( $t = 6.94^{**}$ ), 两者相差 4.4 倍, 但花铃期两者差异不显著 ( $t = 0.23$ ) (表 2)。棉花叶片维管束汁液中未检测到棉酚。苗期“国抗 22”叶片维管束中毒蛋白的表达量明显高于花铃期 ( $t = 8.00^{**}$ ), 苗期表达量是花铃期的 2 倍。

### 2.3 两种棉花对 B 型烟粉虱种群生命表参数的影响

两品种棉花上烟粉虱实验种群的生命表参数见表 3。从表 3 可以发现, 转 Bt 基因棉花“国抗 22”和常规棉花亲本“泗棉 3 号”上烟粉虱内禀增长率差异明显。苗期和花铃期“国抗 22”棉花上烟粉虱的内禀增长率  $r_m$  分别比饲养在“泗棉 3 号”棉花上的高 13.7% 和 20.2%;  $\lambda$  高于对应生育期的“泗棉 3 号”, 而  $T$  则小于相应生育期的“泗棉 3 号”。结果说明“国抗 22”棉花更有利于烟粉虱增殖和种群的扩大。

## 3 讨论

植物的同化产物在叶片中合成后, 大部分通过维管束在体内传输。因此, 维管束汁液中主要物质含量的变化与叶片中的变化具有一定的相关性。本试验测定不同品种、不同生育期棉花叶片维管束汁液可溶性糖、氨基酸、Bt 毒蛋白含量的变化趋势与相关文献中利用全叶片测定的结果基本一致<sup>[10-14]</sup>,

表3 取食不同品种棉花的烟粉虱实验种群的生命表  
Tab. 3 Life table of *B. tabaci* feeding on different cotton varieties

生育期 Growth stage	品种 Variety	生命表参数 Parameter of life table			
		$r_m$	$R_0$	$T$	$\lambda$
苗期 Seedling stage	国抗 22 Guokang 22	0.160 7	56.597 1	25.106 8	1.174 4
花铃期 Flowering stage	泗棉 3 号 Simian No. 3	0.141 4	53.647 7	28.163 3	1.151 9
	国抗 22 Guokang 22	0.182 2	84.895 6	24.376 2	1.199 8
	泗棉 3 号 Simian No. 3	0.151 6	64.604 1	27.496 3	1.163 7

但部分物质含量与比例存在一定的差异。与相同棉花品种的全叶片测定值相比,本试验测定的叶片维管束汁液可溶性糖和氨基酸总量均高于全叶片测定值,但单宁含量低于全叶片测定值<sup>[14]</sup>,并且在叶片维管束汁液中未测到棉酚。由于绝大部分刺吸式口器的昆虫都是直接刺吸维管束汁液,因此,直接测定韧皮部维管束汁液可以更准确地分析寄主植物对刺吸式害虫的影响。

植物 N 素水平影响着植食性昆虫的生长发育<sup>[15-17]</sup>,而维管束汁液作为大部分刺吸式口器昆虫的食料往往 N 素含量不足<sup>[18,19]</sup>。研究证实,植物 N 素水平直接影响着烟粉虱的产卵量和低龄若虫的成活率<sup>[20,21]</sup>。而含 N 量较大的脯氨酸、谷氨酸和丙氨酸不仅是烟粉虱重要的营养物质,而且还在烟粉虱 N 素代谢过程中起着十分重要的调节作用。其中,谷氨酸和丙氨酸直接影响着烟粉虱的 N 素代谢,而脯氨酸维持着烟粉虱的能量平衡<sup>[22]</sup>。本研究发现,棉花从苗期进入花铃期,叶片维管束中游离氨基酸总量显著上升,“国抗 22”和“泗棉 3 号”的上升幅度均超过 30%。虽然在花铃期,“国抗 22”和“泗棉 3 号”叶片中游离氨基酸总量无明显差异,但“国抗 22”叶片维管束汁液中的脯氨酸、谷氨酸和丙氨酸均高于“泗棉 3 号”,三者总量比“泗棉 3 号”高 53.3%。结合表 1、表 3 可以看出,上述 3 种氨基酸含量的变化与烟粉虱在不同棉花品种及棉花不同生育期内禀增长率变化趋势一致。

可溶性糖和游离氨基酸是昆虫重要的营养物质,一般情况下可溶性糖和游离氨基酸含量与昆虫的发育速率呈正相关。研究发现,与对应的常规棉亲本相比,转 Bt 基因棉花光合面积较小,输出的同化产物也相对较少<sup>[11]</sup>。本研究发现,在苗期和花铃期,转 Bt 基因棉花中可溶性糖含量均大大低于常规棉。韧皮部汁液中干物质含量占 10%~25%,其中 90%以上是糖,另外还有少量的氨基酸和其他高分子物质<sup>[23]</sup>。对于大多数同翅目昆虫来说,食料中过高的糖含量不仅对其生长发育无益,而且还影响对其他物质的吸收,从而造成食物中营养物质失衡,进而影响其生长发育。因此,这类昆虫往往通过排

泄蜜露的方式来减少对糖的吸收,以增加对其他营养物质的吸收量<sup>[24]</sup>,从而保证吸收的营养物质在量上的平衡。通过对蜜露的分析测定发现,烟粉虱也有通过蜜露的方式排出多余糖分现象<sup>[22]</sup>,说明在正常的取食情况下,烟粉虱食料中的可溶性糖已超出它的需求量,食料中的可溶性糖不是烟粉虱生长发育的直接制约因子。相对较低的含糖量还可以使烟粉虱获取更多的其他营养物质,更有利于其生长发育,从而加速种群的快速上升。

单宁是棉花重要的抗生物质,能抑制昆虫消化酶的活性,影响昆虫对食物的利用,从而影响昆虫的生长发育和繁殖<sup>[25,26]</sup>,害虫取食部位单宁的含量直接影响寄主对害虫的抗性。一般情况下,单宁含量增高,昆虫繁殖量下降<sup>[25]</sup>。本研究发现,苗期转 Bt 基因棉“国抗 22”单宁含量远低于常规棉,而花铃期单宁含量与常规棉无明显差异。在江苏省,大田棉花上烟粉虱一般发生在 8 月中、下旬<sup>[4]</sup>,此时棉花已进行入开花结铃期,因此,单宁对转基因棉花上烟粉虱种群上升的影响作用相对较小。

棉酚是棉花另一重要的抗生物质,它能降低昆虫的食物消化率<sup>[26]</sup>,抑制昆虫发育速率,降低繁殖率。因此,棉花体内棉酚的含量常作为棉花品种抗虫性的重要指标<sup>[27]</sup>。棉酚存在于棉花的色素腺体中,棉酚含量与腺体密度有关<sup>[25]</sup>。棉花不同生育阶段、不同器官中棉酚含量不同。张永军等应用 HPLC 对棉花不同生育阶段、不同器官中棉酚的动态分析发现,棉酚主要存在于棉花的繁殖器官,如花瓣和蕾中,叶片中含量很低,有些生育阶段甚至检测不到<sup>[26]</sup>。本试验应用 HPLC 分别对苗期和花铃期的“国抗 22”和“泗棉 3 号”棉花叶片维管束汁液进行分析,均未检测到棉酚。据此推测,棉花叶片维管束汁液中无棉酚或含量极微,棉花体内的棉酚对烟粉虱无直接影响,或影响甚微,棉酚也不是引起转基因棉花上烟粉虱种群上升的主要影响因素。

转 Bt 基因棉花中的 Bt 毒蛋白可以到达叶片维管束汁液中。在转 Bt 基因棉田采集的棉蚜体内能够检测到 Bt 毒蛋白<sup>[29]</sup>。但 Bt 毒蛋白只有在碱性

环境下被蛋白酶水解激活后才具有杀虫活性,而除多数鳞翅目幼虫外,大多数昆虫中肠呈现微酸性( $\text{pH } 6 \sim 7$ )<sup>[24]</sup>。因此,Bt 毒蛋白对这些昆虫无毒杀作用或作用不明显。Dadidson 等利用人工饲料研究也发现,Bt 外毒素对烟粉虱成虫无任何影响<sup>[30]</sup>。

在生物进化过程中,棉花已形成了一套有利于自身发育的基因系统,当外源基因被导入后,必将打破其自身固有的连锁群,从而对棉花的性状和生理代谢产生意想不到的影响,并进一步影响其与有害生物之间的关系。转 Bt 基因棉花上烟粉虱种群的上升,有外部环境变化的影响,但外源 Bt 基因导入而引起的棉花自身生理生化变化可能是更直接和更重要的原因。

## 参考文献

- [1] 方宣钧,贾士荣. 中国转基因抗虫棉产业化进展[J]. 生物技术通报,1999(2):39-42
- [2] 吴孔明,徐广,郭予元. 华北北部地区棉田烟粉虱成虫季节性动态[J]. 植物保护,2001,27(2):14-15
- [3] 邓曙东,徐静,张青文,等. 转 Bt 基因棉对非靶标害虫及害虫天敌种群动态的影响[J]. 昆虫学报,2003,46(1):1-5
- [4] 周福才,杜予州,任顺祥,等. 江苏棉田烟粉虱的种群动态及控制[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2005,26(1):89-93
- [5] 周福才,任顺祥,杜予州,等. 转 Bt 基因棉和常规棉对烟粉虱生长发育和繁殖的影响[J]. 植物保护学报,2006,33(3):230-234
- [6] Gerling D., Lindenbaum M. Host-plant related behavior of *Bemisia tabaci*[J]. WPRS Bull., 1991,14: 83-88
- [7] 刘光杰,Wilkins R. M., Saxena R. C. 白背飞虱对不同抗虫稻株糖类物质的利用[J]. 昆虫学报,1995,38(4):421-427
- [8] 谢永寿,杨奇华,谢以铨,等. 冬小麦品种中糖和氨基酸含量与抗麦长管蚜的关系[J]. 植物保护学报,1987,14(1):37-39
- [9] 孟玲,李保平. 棉苗缺素对棉蚜生长发育和排蜜的影响[J]. 西北农业学报,1998,7(4):24-27
- [10] 陆宴辉,李晓慧,薛文杰,等. 4 种生化物质对棉蚜实验种群增长的影响[J]. 扬州大学学报:农业与生命科学版,2005,26(3):83-87
- [11] 田晓莉,杨培珠. 转 Bt 基因抗虫棉中棉所 30 的碳、氮代谢特征[J]. 棉花学报,2000,12(4):173-175
- [12] 崔金杰,夏敬源. 转 Bt 基因棉对棉铃虫抗性的时空动态[J]. 棉花学报,1999,11(3):141-146
- [13] 陈松,周冬生,吴振延,等. 转 Bt 基因棉 32B 不同生育期抗虫性的变化及其机理[J]. 江苏农业学报,2002,18(2):80-84
- [14] 杨益众,陆宴辉,薛文杰,等. 转基因棉花中糖类和游离氨基酸含量的变化对棉蚜泌蜜量及蜜露主要成分的影响[J]. 昆虫学报,2006,48(4):491-497
- [15] White T. C. R. The abundance of invertebrate herbivores in relation to availability of nitrogen in stressed food plants [J]. Oecologia, 1984,63:90-105
- [16] Broadway R. M., Duffey S. S. Plant proteinase inhibitors: mechanism of action and effect on the growth and digestive physiology of larval *Heliothis zea* and *Spodoptera exigua*[J]. J. Insect Physiol., 1986,32:827-833
- [17] 卢伟,侯茂林,文吉辉,等. 土壤施肥对烟粉虱生长发育、寄主选择及繁殖的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(4):914-920
- [18] Montllor C. B. The inference of plant chemistry on aphid feeding behavior[M]// Bermays E. Insect Plant Interaction(3). Boca Raton, FL: CRC Press, 1989:125-173
- [19] Byrne D. N., Miller W. B. Carbohydrate and amino acid composition of phloem sap and honeydew produced by *Bemisia tabaci*[J]. J. Insect Physiol., 1990,36:433-439
- [20] Bentz L., Reeves J. III, Barboas P., et al. Nitrogen fertilizer effect on selection, acceptance, and suitability of *Euphorbia pulcherrima* as a host plant to *Bemisia tabaci*[J]. Environ. Entomol., 1995,24: 40-45
- [21] Bentz L. Within plant variation in nitrogen and sugar content of poinsettia and its effects on the oviposition pattern, survival, and development of *Bemisia argentifolii*[J]. Environ. Entomol., 1995,24: 271-277
- [22] Crafts-Brandner S. J. Plant nitrogen status rapidly alters amino acid metabolism and excretion in *Bemisia tabaci* [J]. J. Insect Physiology, 2002,48: 33-41
- [23] 高煜珠. 植物生理学[M]. 北京:农业出版社,1986:143-170
- [24] 管致和. 昆虫学通论(下册)[M]. 北京:农业出版社,1993:458-460
- [25] 张宝红,丰嵘. 棉花的抗虫性与抗虫棉[M]. 北京:中国农业出版社,2000:32-45
- [26] 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
- [27] 宋庆奇. 几种棉花内含物质与抗棉铃虫关系的研究[J]. 山东农业大学学报,1995,26(增刊):66-70
- [28] 张永军,杨舰,郭予元,等. 外源 Bt 杀虫蛋白和棉花主要抗虫萜烯类物质互作关系研究[J]. 中国农业科学,2002,35(5):514-519
- [29] 张桂芬,万方浩,郭建英,等. Bt 毒蛋白在转 Bt 基因棉中的表达及其在害虫-天敌间的转移[J]. 昆虫学报,2004,47(3):334-341
- [30] Dadison E. W., Rosell R. C., Xendrix D. L. Culturable bacteria associated with the whitefly, *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) [J]. Fla. Entomol., 2000, 83:159-171