

Bt 玉米光合作用和生长性状的变化

聂呈荣^{1,2}, 骆世明¹, 王建武^{1,*}

(1. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642; 2. 佛山科学技术学院作物遗传育种研究所, 广东佛山 528231)

摘要: 在华南地区种植美国先锋公司的 Bt 玉米 34B24 与其非转基因近等基因系 34B23, 比较它们的光合作用和部分重要的生理生长性状。结果表明, Bt 玉米由于 Bt 基因的插入和表达使植株得到保护, 受玉米螟危害的叶片显著减少; 但 Bt 玉米植株的光合作用和部分生理生长性状也发生了一定的变化。与其非转基因近等基因系 34B23 相比, 虽然 Bt 玉米 34B24 的胞间 CO₂ 浓度变化不大; 并且在绝大多数生长时期, Bt 玉米的蒸腾速率和气孔导度大于非转基因玉米; 但是从生长中期始, Bt 玉米的净光合速率却一直小于非转基因玉米, 在生长后期, 这种差异甚至达到显著水平。在生长性状方面, 各时期观察到的 Bt 玉米植株叶片数一直略少于非转基因玉米, 表明 Bt 玉米的生长发育受到一定的延缓。同时, Bt 玉米植株的株高变矮, 单株叶面积变小, 根系活力显著降低。在地下部, Bt 玉米 34B24 的植株根系总长度、根总表面积、根总体积和平均根直径均小于相对应的非转基因近等基因系 34B23。

关键词: Bt 玉米; 光合作用; 生长性状

文章编号: 1008-0933(2006)06-1957-06 中图分类号: Q143, S314 文献标识码: A

Change of photosynthesis and growth of Bt corn

NIE Cheng-Rong^{1,2}, LUO Shi-Ming¹, WANG Jian-Wu^{1,*} (1. Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China; 2. Institute of Crop Genetics and Breeding, Foshan University, Foshan, 528231, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1957~1963.

Abstract: Bt corn is one of the large-scale commercialized GM crops being planted around the world. The debate surrounding the potential ecological risk of Bt corn is ongoing. Among these there are concerns over the photosynthesis and growth properties of corn hybrids with the Bt trait transferred from *Bacillus thuringiensis*. In order to learn the behave of transgenic Bt corn in South China a plot experiment was conducted in a greenhouse in South China Agricultural University. The experiment compared the photosynthesis and some growth characteristics of Bt corn 34B24 with its non-transgenic near isogenic line 34B23. From the experiment it can be found that because of the expression of Bt gene, Bt corn had no leaves damaged by corn borer (*Ostrinia nubilalis*) while its non-transgenic counterpart had many leaves damaged by corn borer. But Bt corn plant was also found some physiological and ecological changes. The difference of the internal CO₂ concentration between Bt corn 34B24 and its near isogenic line 34B23 was not significant. In most stages Bt corns had higher transpiration rate and leaf stomatal conductance. In the late stage, the differences of transpiration rate and leaf stomatal conductance between 34B24 and 34B23 were significant. But the net

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30570336 和 30270270); 中国博士后科学基金资助项目(2005038179); 广东省自然科学基金资助项目(05300829, 021043, 000569); 华南农业大学校长基金资助项目(2005K075)

收稿日期: 2005-11-28; **修订日期:** 2006-04-28

作者简介: 聂呈荣(1966~), 男, 瑶族, 广西富川县人, 博士, 副教授, 主要从事农业生态、分子生态和环境生态研究. E-mail: niecr@126.com or niecr@scau.edu.cn.

* 通讯作者 Corresponding author.

Foundation item: This project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30570336 and 30270270), China Postdoctoral Science Foundation(No. 2005038179), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 05300829, 021043 and 000569), and the President Foundation of South China Agricultural University(No. 2005K075)

Received date: 2005-11-28; **Accepted date:** 2006-04-28

Biography: NIE Cheng-Rong, Ph. D., Associate professor; main engaged in agroecology, molecular ecology and environmental ecology. E-mail: niecr@126.com or niecr@scau.edu.cn.

photosynthesis rate of Bt corn 34B24 was smaller than that of 34B23, and in the late stage the difference was significant. Bt corn plant had slightly delay for the growth and development. Bt corn 34B24 were found slightly less leaves than its conventional near isogenic line 34B23 at every observation. Bt corns also had shorter plant height, smaller leaf area than 34B23. As to the underground property, Bt corn 34B24 had decreased root vigor. 34B24 also had less total root length, total root surface area, and average root diameter than its near isogenic line 34B23.

Key words: Bt corn; photosynthesis; growth

转 Bt 基因玉米(以下简称 Bt 玉米)是全球商品化程度最快的抗虫转基因作物之一。2004 年,全球共种植转 Bt 基因玉米 1100 万 hm^2 , 占转基因作物总播种面积的 14%^[1]。在国内, 中国农业大学、中国农业科学院生物技术中心等单位业已成功地培育出 Bt 玉米; 中国农业大学选育的 Bt 玉米已获准在河北和东北等地环境释放。已有试验证明, 外源 Bt 基因的导入有可能引起受体在其它生理生态特征方面的改变^[2~16]。在所有这些生理生态特征的变化中, 作为产量和品质形成基础的光合作用和植株生长性状的改变是最值得关注的一个方面。为了了解 Bt 玉米在华南地区种植时的表现, 本文对来自美国先锋公司的 Bt 玉米 34B24 与其非转基因近等基因系 34B23 的光合作用和部分生长性状进行了观察比较。

1 材料与方法

1.1 供试品种

供试 Bt 玉米品种为美国先锋种子子公司培育的 34B24(以下简称 B24), 所导入的杀虫蛋白为 Cry1A(b); 作为对照的非转基因常规玉米品种为 34B23(以下简称 B23), 是 34B24 的近等基因系。这两个品种均由美国普渡大学农学系 Cindy Nakatus 博士惠赠。

1.2 试验设计和田间管理

小区试验在华南农业大学农学院教学实习农场的玻璃温室内进行。试验土壤取自水稻田 0~20 cm 表土层, 质地为粘壤土, pH 值 6.1, 有机质含量 1.81%, 全氮 0.09%, 全磷(P%) 0.16%, 全钾(K₂O) 0.56%。每个品种重复 4 次(即 4 个小区), 随机排列。各实验小区种植 10 株玉米(株距 34 cm, 行距 75 cm)。实验于 2002 年 10 月 12 日播种。

在整个实验观察期间, 都没有发现 Bt 玉米 B24 植株的叶片遭受玉米螟危害, 而非转基因玉米 B23 的植株却都能发现有玉米螟危害的叶片。表明 Bt 玉米具有保护叶片不受玉米螟危害的作用。

按常规方法进行田间管理。肥水管理情况是: 每个小区播种前均匀撒施复合肥 93 g 做基肥, 然后根据作物长势各小区分别在播种后 16 d、30 d、40 d、50 d 和 60 d 追施复合肥 150 g、150 g、47 g、125 g 和 150 g; 每隔 3 d 浇水 1 次。

1.3 测定项目和测定方法

1.3.1 光合作用测定 分别在播种后 27 d、34 d、41 d、55 d、62 d、69 d、76 d 和 83 d 共 8 个时期测光合作用各有关性状。具体以各时期的倒三叶作为材料, 定点测定其净光合速率(Net photosynthesis rate, P_n)、蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s)和胞间 CO_2 浓度(Internal CO_2 concentration, C_i)。测定仪器为便携式光合作用测定仪 CI-310。测定使用人工光源, 光照强度控制在 $1000 \sim 1040 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。

1.3.2 生长性状测定 分别在播种后 25 d(苗期)、39 d(拔节期)、53 d(大喇叭口期)、67 d(抽丝期)和 82 d(孕穗期)观察各小区玉米植株的株高、叶龄和玉米螟危害的叶片数; 在各小区随机选取 1 个植株, 测其单株叶面积, 扫描根系获取有关根系生长性状, 并测定根系活力。

叶面积测定采用叶面积测定仪, 根系扫描及有关性状的分析采用 WIN/MAC 根系图象分析系统, 根系活力测定采用 TTC 法^[17]。

1.4 数据分析

本试验的所有数据均用 Excel 整理, 统计软件 SAS6.12 进行统计分析。符号检验按中国科学院数学研究

所统计组的方法进行^[18]。

2 结果与分析

2.1 Bt 玉米光合作用的变化

2.1.1 净光合速率(P_n)的变化 虽然在生长前、中期(播种后 69 d 以前) Bt 玉米 B24 的净光合速率与其非转基因近等基因系 B23 差异不显著(图 1),但从生长中期(播种后 41 d)开始, B24 的净光合速率表现出低于 B23;在生长后期, B24 的净光合速率显著小于 B23。可见,随着生长进程的不断推移, Bt 玉米的净光合速率逐渐小于相应的非转基因玉米。

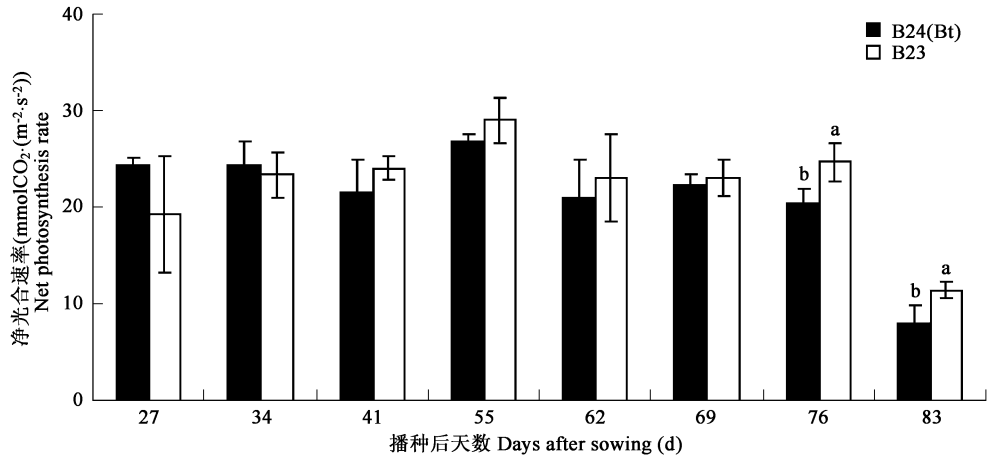


图1 Bt 玉米 B24 与其非转基因近等基因系 B23 的净光合速率变化动态
Fig. 1 The met photosynthesis rate of Bt corn B24 and its nontransgenic near isogenic line B23

2.1.2 蒸腾速率(Tr)的变化 除播种后 27 d 和 69 d 外,在其余时期 Bt 玉米 B24 的蒸腾速率一直大于其非转基因近等基因系 B23;在多个时期,尤其是在生长后期,可观察到这两个品种蒸腾速率的差异达到显著水平(图 2)。符号检验表明($p < 0.10$), Bt 玉米 B24 的蒸腾速率大于非转基因玉米 B23。

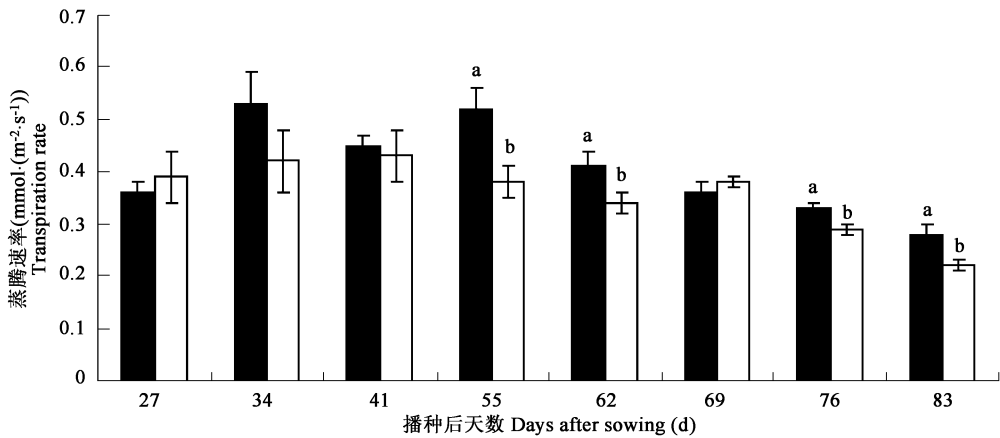


图2 Bt 玉米 B24 与其非转基因近等基因系 B23 的蒸腾速率
Fig. 2 The transpiration rate of Bt com B24 and its nontransgenic near isogenic line B23

2.1.3 叶片气孔导度(G_s)的变化 玉米叶片的气孔导度(G_s)在植株的生长后期(播种后 69 d 以后)显著小于生长前中期(表 1)。符号检验表明($p < 0.05$), Bt 玉米 B24 叶片的气孔导度大于其非转基因近等基因系 B23;尤其是在生长后期,这种差异达到显著水平。

2.1.4 胞间 CO_2 浓度(C_i)的变化 在整个生长期间, Bt 玉米 B24 与其近等基因系 B23 的胞间 CO_2 浓度(C_i)一直差异不大(表 1)。在整个观察期间的不同生长时期,各品种的胞间 CO_2 浓度变化幅度也不大;以播种后

55 d 和 69 d 两个时期的胞间 CO₂ 浓度相对较高。结果表明, 与非转基因玉米相比, Bt 玉米的胞间 CO₂ 浓度没有太大的变化。

表 1 Bt 玉米 B24 与其非转基因近等基因系 B23 的叶片气孔导度和胞间 CO₂ 浓度

Table 1 The stomatal conductance and internal CO ₂ concentration of Bt corn B24 and its nontransgenic near isogenic line B23		播后天数 Days after sowing(d)							
性状 Characters	品种 Varieties	27	34	41	55	62	69	76	83
气孔导度 Stomatal conductance($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	B24(Bt)	16. 34	19. 18	19. 25	20. 14	15. 62	9. 09a	10. 14a	8. 56a
	B23	16. 85	17. 62	18. 34	18. 36	13. 25	7. 32b	7. 68b	6. 68b
胞间 CO ₂ 浓度 Internal CO ₂ concentration($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	B24(Bt)	425. 97	379. 48	393. 41	485. 42	419. 59	497. 57	436. 21	359. 75
	B23	428. 65	374. 09	399. 67	479. 16	444. 92	490. 50	427. 81	355. 30

* 每种性状的各列中标有不同小写字母的表示在 5% 水平上差异显著 Means with different letters within the column of every character were significantly different ($p > 0.05$) using Duncan's multiple test. The same as below

2.2 Bt 玉米植株地上部生长性状的变化

2.2.1 株高的变化 虽然 Bt 玉米 B24 与其非转基因近等基因系 B23 的株高差异不显著, 但在整个生长期间, B24 的株高都小于 B23(表 2) 。因此, Bt 玉米的株高有变矮的趋势。

表 2 Bt 玉米 B24 与其近等基因系 B23 的部分地上部生长性状

Table 2 Some aerial characters of Bt corn B24 and its nontransgenic near isogenic line B23		播后天数 Days after sowing				
性状 Characters	品种 Varieties	25	39	53	67	82
株高 Height(cm)	B24(Bt)	43. 75±4. 07	114. 50±2. 60	150. 00±5. 24	199. 75±9. 46	216. 00±5. 37
	B23	45. 50±1. 94	117. 75±1. 49	156. 00±2. 74	213. 50±8. 22	220. 25±5. 15
叶龄 Number of leaves	B24(Bt)	6. 00±0. 22	8. 80±0. 27	12. 85±0. 22	13. 75±0. 25	
	B23	6. 35±0. 05	9. 25±0. 36	12. 95±0. 32	14. 00±0. 00	
单株叶面积 Leaf area per plant(cm ²)	B24(Bt)	502. 03±42. 5	2838. 51±417. 5	4091. 64±293. 4	3737. 09±102. 6	3428. 69±450. 7
	B23	556. 07±16. 3	3111. 17±292. 0	4271. 01±65. 9	3990. 15±150. 5	3909. 01±187. 5

2.2.2 叶龄的变化 与非其非转基因近等基因系 B23 相比, Bt 玉米 B24 植株的叶龄也没有显著变化(表 2) ; 但是从播种后 25 d 开始的每一次观察, B24 的叶龄却都一直小于 B23。因此, Bt 玉米的生长发育有变得略为缓慢的趋势。

2.2.3 单株叶面积的变化 虽然没有达到差异显著水平, 但是在整个生长期间, Bt 玉米 B24 的单株叶面积都小于其非转基因近等基因系 B23(表 2) 。结果表明, Bt 玉米的单株叶面积有明显的变小趋势。

2.3 Bt 玉米根系活力的变化

Bt 玉米 B24 的根系活力在所有观察期均小于其近等基因系 B23(表 3) ; 除了在播种后 39 d 观察的结果差异不显著外, 在其余时期两者之间的差异均达到显著水平。结果表明, 与非其非转基因近等基因系 B23 相比, Bt 玉米 B24 的根系活力显著降低。

表 3 Bt 玉米 B24 与非其非转基因近等基因系 B23 的根系活力变化动态($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)

Table 3 Dynamic of root vigor for Bt corn B24 and its nontransgenic near isogenic line B23		39 d	53 d	67 d	82 d
品种 Varieties					
B24(Bt)		71. 57±17. 06	61. 76±5. 61a	296. 81±22. 60a	44. 85±7. 37a
B23		90. 52±21. 70	126. 76±6. 20b	411. 75±23. 55b	144. 04±9. 40b

2.4 Bt 玉米地下部生长性状的变化

虽然 Bt 玉米 B24 与其近等基因系 B23 的根尖数差异不显著(表 4) ; 在绝大多数时期, Bt 玉米 B24 的根系总根长、总表面积、平均直径和单位根体积长度在与 B23 比较时也差异不显著, 但是在所有观察期, Bt 玉米 B24 的根系总根长、总表面积、平均直径和单位根体积长度均小于其近等基因系 B23(表 4) 。结果表明 Bt 玉米

的根系不如非转基因玉米发达。

表 4 Bt 玉米 B24 与其近等基因系 B23 的部分地下部生长性状

Table 4 Some underground characters of Bt corn B24 and its nontransgenic near isogenic line B23

性状 Characters	品种 Varieties	播后天数 Days after sowing(d)				
		25	39	53	67	82
总根长 Total root length (cm)	B24(Bt)	183. 89±11. 66	399. 18±15. 31	565. 34±16. 79	1046. 85±14. 92	1035. 40±41. 68a
	B23	182. 79±15. 86	420. 06±37. 90	754. 27±17. 25	1081. 81±29. 04	1160. 04±30. 53b
根总表面积 Total root area(cm ²)	B24(Bt)	111. 05±7. 93	272. 59±19. 59	548. 78±19. 42a	907. 37±14. 02a	853. 81±47. 92a
	B23	116. 34±6. 69	314. 38±34. 37	698. 95±31. 66b	1026. 10±26. 71b	1065. 17±41. 69b
平均根直径 Leaf area per plant(cm)	B24(Bt)	0. 20±0. 01	0. 23±0. 01	0. 37±0. 01	0. 31±0. 00	0. 28±0. 02
	B23	0. 22±0. 01	0. 25±0. 01	0. 38±0. 01	0. 34±0. 02	0. 32±0. 01
根总体积 Total root volume(cm ³)	B24(Bt)	5. 74±0. 66	16. 35±1. 83	50. 80±3. 35	69. 36±1. 53a	61. 48±5. 45a
	B23	6. 35±0. 59	20. 73±2. 98	59. 29±4. 80	89. 66±7. 80b	84. 56±4. 37b
单位根体积长度 Root length per volume(cm·cm ⁻³)	B24(Bt)	177. 50±10. 51	375. 87±14. 49	479. 40±26. 53a	945. 90±13. 37	972. 50±43. 64a
	B23	174. 67±15. 56	392. 13±33. 04	664. 30±11. 77b	980. 68±43. 48	1070. 42±27. 74b
根尖数 Number of root tips	B24(Bt)	260. 25±14. 80	471. 50±25. 33	708. 00±49. 60	925. 00±46. 71	864. 50±47. 59
	B23	274. 00±19. 84	455. 25±34. 20	676. 00±10. 26	843. 25±79. 36	879. 00±37. 65

3 讨论

3.1 Bt 玉米光合能力下降的可能原因

光合作用是产量形成的物质基础。在作物中导入外源 Bt 基因的目的,就是为了防治害虫对农作物产生危害,通过减少损失而达到增加作物产量的目的。与其非转基因近等基因系 B23 相比,虽然 Bt 玉米 B24 的胞间 CO₂ 浓度变化不大;并且在绝大多数生长时期, Bt 玉米的蒸腾速率和气孔导度还要大于非转基因玉米;但是从生长中期始, Bt 玉米的净光合速率却不但没有大于非转基因玉米,反而一直小于非转基因玉米,在生长后期,这种差异甚至达到显著水平。这说明 Bt 玉米对水分和 CO₂ 的利用效率不高,光合效率低于非转基因玉米;在相同的水分利用效率和 CO₂ 浓度下, Bt 玉米的净光合速率小于非转基因玉米。根据本试验结果, Bt 玉米光合作用降低并不是由于气孔因素所引起的;因此,关于 Bt 玉米光合作用不同于非转基因玉米的机制,值得进一步研究。现有研究表明,植物光合机构的形成是由核质基因共同编码。其中 Rubisco 的小亚基、捕光色素蛋白、PS II 放氧复合体、PS I 中若干亚基以及铁硫蛋白等由核基因组编码; Rubisco 大亚基、QB 蛋白、PS II 反应中心、细胞色素 b559、细胞色素 f 及细胞色素 b6 等由叶绿体基因组编码^[9]。与非转基因玉米相比, Bt 玉米细胞核及可能发生的核质互作效应的变化有可能造成其光合调控基因时空表达的变化,进而导致其光合机构及功能上发生改变;但要确定外源 Bt 基因转入玉米后是否影响了光合调控基因的时空表达,尚有待进一步研究验证。

3.2 Bt 基因导入对玉米和棉花等受体作物生理生长指标的影响

在所查阅的资料中,有关外源 Bt 基因对植株受体生理指标影响的报道主要有以转 Bt 棉为材料所做的一些研究工作^[2~12];而关于外源 Bt 基因对植株受体特别是对玉米生理指标影响的报道相对较少^[13~16]。利用有限的资料以及本试验的结果,可以比较外源 Bt 基因插入对玉米和棉花等不同受体光合作用和其它生长生理指标影响。

转 Bt 棉前期出苗慢、幼苗素质差,后期红叶茎枯病发病率上升^[10];在源库关系方面,田晓莉等发现^[3~8],转 Bt 棉营养生长势弱、结铃性强,源库关系失调,容易早衰。转 Bt 棉的光合叶面积、侧根数量以及根系活力均低于对照品种,侧根的分布局限在 0~20cm 的上层土壤;转 Bt 棉叶片和根系这两大源器官数量的减少会导致其截获光能和吸收矿质元素方面受到明显的限制。另一方面,转 Bt 棉源器官的功能较为低下,果枝叶输出的蔗糖、可溶性糖和氨基酸及输入棉铃的蔗糖、可溶性糖和全氮含量较对照品种大幅度下降;单株根系活力、根系吸收、合成和运输能力也全面下降,根系与地上部的协调性差,容易导致早衰。Zhang 等还发现^[12],在盆栽及营养液培养条件下转 Bt 棉的钾营养效率较常规棉低;在田间种植条件下转 Bt 棉对钾肥反应较常规棉敏感。转 Bt 棉钾营养效率较低不是因为其体内钾利用效率和单位根重吸钾能力低,而主要是在低钾条件

下, 转 Bt 棉的根系不够发达、根长和根表面积小, 使其对钾的亲合力减弱、利用钾的能力下降。低钾条件下, 应用缩节安、NAA 和降低培养液浓度等方法不同程度提高了转 Bt 棉根系的表面积, 但并没相应地提高钾吸收量和地上部干物重, 说明调控措施对转 Bt 棉的生理吸钾能力也有影响。转 Bt 棉和常规棉互相嫁接的试验结果显示, 根系生长明显受到地上部的反馈调节。

国外一些研究表明, 外源 Bt 基因的导入, 只是提高了 Bt 玉米对玉米螟的抗性, 而对于其它农艺性状却没有改善; 在没有欧洲玉米螟危害或危害较轻的情况下, Bt 玉米却没有产量上的优势, 一些农艺性状甚至还会变差^[13~16]。在本试验中, 同样可以观察到 Bt 玉米生长发育变缓、株高变矮、单株叶面积变小和根系活力降低的现象。另外, Bt 玉米 B24 根系的总根长、根总表面积、根总体积和平均根直径均小于其非转基因近等基因系 B23。所有这些结果都与外源 Bt 基因插入对棉花的影响十分相似。

上述结果表明, 外源 Bt 基因的插入, 有可能使受体玉米和棉花等作物的一些生理和生长性状发生改变。其可能的原因有两个方面, 一是由于外源基因的导入所直接造成的, 另一种可能就是在材料的组培过程中所发生的体细胞变异而导致的。

References:

- [1] James C. Preview: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2004. ISAAA Briefs No. 32. ISAAA: Ithaca, NY, 2004.
- [2] Ding ZY, Xu CR, Wang RJ. Comparison of several important isoenzymes between Bt cotton and regular cotton. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 332~336.
- [3] Tian XL, He ZP, Wang BM. Boll development and yield components of Bt cotton CCRI30 influenced by flowering date. *Acta Gossypii Sinica*, 2000, 12(6): 306~309.
- [4] Tian XL, Yang PZ. Study on the yield and its components of Bt cotton CCRI30. *Chinese Cotton*, 2000b, 27(2): 9~10.
- [5] Tian XL, Yang PZ, Wang BM, *et al.* Nitrogen and carbon metabolizing of Bt transgenic cotton CCRI 30. *Acta Gossypii Sinica*, 2000, 12(4): 172~175.
- [6] Tian XL, Yang PZ, Wang BM, *et al.* The carbon metabolizing of yield organs in Bt transgenic cotton. *Crop Journal*, 2003a, (2): 17~20.
- [7] Tian XL, Yang PZ, Wang BM, *et al.* The morphological characters and physiological function of source organs in Bt transgenic cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 2003, 15(2): 91~96.
- [8] Tian XL, Yang PZ, Duan LS, *et al.* Preliminary study on the source-sink relationship of Bt transgenic cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 1999, 11(3): 151~156.
- [9] Dong HZ, Li WJ, Li ZH, *et al.* Comparative studies on the intensity of photosynthesis between Bt transgenic hybrid cotton and its parents. *Acta Agricultural Nucleatae Sinica*, 2000, 14(5): 284~289.
- [10] Qin XM, Yu FL, Song YQ, *et al.* the biological character of new cotton variety 33B and cultural technology. *Chinese Cotton*, 2000, 27(5): 37~38.
- [11] Li FG. The study on physiological and biochemical characters of insect resistant transgenic cotton harbouring double gene. *Acta Gossypii Sinica*, 2003, 15(3): 131~137.
- [12] Zhang ZY, Tian XL, Zhao Li, *et al.* Studies of differential sensitivities between conventional and transgenic insect resistant cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars to potassium deficiency. International, Poster, 4th International Crop Science Congress, 26 Sep-1 Oct 2004, Brisbane, Australia, 2004.
- [13] Ma BL, Subedi KD. Development, yield, grain moisture and nitrogen uptake of Bt corn hybrids and their conventional near-isolines. *Field Crops Research*, 2005, 93: 199~211.
- [14] Graeber JV, Nafziger ED, Mies DW. Evaluation of transgenic Bt-containing corn hybrids. *J. Prod. Agric.*, 1999, 12: 659~663.
- [15] Lauer J, Wedberg J. Grain yield of initial Bt corn hybrid introductions to farmers in the Northern corn belt. *J. Prod. Agric.*, 1999, 12: 373~376.
- [16] Traore SB, Carlson RE, Pilcher CD, *et al.* Bt and non-Bt maize growth and development as affected by temperature and drought stress. *Agron. J.*, 2000, 92: 1027~1035.
- [17] Zhou Q. Experimental Manual for Plant Physiology. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] Statistic Group, Institute of Mathematics, Chinese Academy of Science. Basic methods for statistics. Beijing: Science Press, 1973. 26~28.

参考文献:

- [2] 丁志勇, 许崇任, 王戎疆. 转 Bt 基因抗虫棉与常规棉中几种同工酶的比较——转基因植物安全性评价生理指标初探. *生态学报*, 2001, 21(2): 332~336.
- [3] 田晓莉, 何钟佩, 王保民. 转 Bt 基因棉中棉所 30 不同开花期棉铃发育及产量构成因素的研究. *棉花学报*, 2000a, 12(6): 306~309.
- [4] 田晓莉, 杨培珠. 转 Bt 基因抗虫棉中棉所 30 的产量及其构成因素研究. *中国棉花*, 2000b, 27(2): 9~10.
- [5] 田晓莉, 杨培珠, 王保民, 何钟佩. 转 Bt 基因抗虫棉中棉所 30 的碳、氮代谢特征. *棉花学报*, 2000c, 12(4): 172~175.
- [6] 田晓莉, 杨培珠, 王保民, 等. 转 Bt 基因抗虫棉产量器官的碳水化合物代谢. *作物杂志*, 2003, (2): 17~20.
- [7] 田晓莉, 杨培珠, 王保民, 等. 转 Bt 基因抗虫棉源器官的建成及其功能. *棉花学报*, 2003, 15(2): 91~96.
- [9] 董合忠, 李维江, 李振怀, 唐薇. 转 Bt 基因抗虫杂交棉与其亲本的光合能力比较. *核农学报*, 2000, 14(5): 284~289.
- [10] 秦新敏, 于凤玲, 宋燕青, 等. 新棉 33B 生物学特性及配套栽培技术. *中国棉花*, 2000, 27(5): 37~38.
- [11] 李付广. 双价基因抗虫棉生理生化特征研究. *棉花学报*, 2003. 15(3): 131~137.
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 中国科学院数学研究所统计组. 常用数理统计方法. 北京: 科学出版社, 1973. 26~28.