

# 虫压胁迫对抗虫转基因水稻生长发育及产量性状的影响<sup>\*</sup>

张富丽<sup>1\*\*</sup> 雷绍荣<sup>1</sup> 刘勇<sup>1,2</sup> 宋君<sup>1</sup> 牛蓓<sup>3</sup> 尹全<sup>1</sup> 代晓航<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>四川省农业科学院分析测试中心, 成都 610066; <sup>2</sup>四川省农业科学院植物保护研究所, 成都 610066; <sup>3</sup>成都学院医护学院, 成都 610106)

**摘要** 在大田条件下,以转基因抗虫水稻 Bt63、R1 和 R2 及非转基因水稻汕优 63(对照)为材料,设置高、低两种虫压环境条件,研究虫压胁迫对转 *Bt* 抗虫基因水稻生长发育及产量相关性状的影响.结果表明:抗虫水稻在虫压胁迫条件下可充分体现出外源基因的抗性特点.在高虫压条件下,3 种转 *Bt* 基因水稻受螟虫危害程度远低于对照植株,株高、分蘖数、地上部鲜质量、穗长、穗质量、单株穗数、单株实粒数、实粒质量、结实率、千粒重等生长发育和产量指标均高于对照,但仅株高、分蘖数和穗长 3 个指标与对照有显著差异.因此,抗虫外源 *Bt* 基因的引入对水稻结实性不会产生负面效应,高虫压胁迫条件对抗虫转基因水稻产量的影响较小.

**关键词** 抗虫 转基因水稻 虫压胁迫 生长发育 产量

**文章编号** 1001-9332(2013)08-2173-06 **中图分类号** Q89; S181 **文献标识码** A

**Effects of herbivorous insect stress on the growth and yield-related traits of insect-resistant transgenic rice.** ZHANG Fu-li<sup>1</sup>, LEI Shao-rong<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1,2</sup>, SONG Jun<sup>1</sup>, NIU Bei<sup>3</sup>, YIN Quan<sup>1</sup>, DAI Xiao-hang<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Analysis and Determination Center, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China*; <sup>2</sup>*Plant Protection Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China*; <sup>3</sup>*Medical and Nursing School, Chengdu University, Chengdu 610106, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(8): 2173–2178.

**Abstract:** A field experiment was conducted to test the effects of high and low herbivorous insect stresses on the growth, development and yield-related traits of insect-resistant transgenic rice. Three *Bt* transgenic rice Bt63, R1 and R2 were selected as the test materials, and non-transgenic rice Shanyou63 was taken as the control. The differences in the vegetative growth, seed-setting, and stem borer resistance between transgenic and non-transgenic rice were compared. Under herbivorous insect stress, the transgenic rice fully displayed the stem borer-resistance of exogenous gene. Under the high stress, the stem borer-damaged degree of the three transgenic rice lines was much lower than that of the control. The plant height, tillers per plant, aboveground fresh mass, panicle length, panicle fresh mass, productive panicles per plant, filled grains per plant, grain mass per plant, seed setting rate, and 1000-grain mass of the three transgenic rice lines excelled the control, but had no significant differences except plant height, tillers per plant, and panicle length. Therefore, introducing exogenous *Bt* gene into rice had no negative effect on rice seed-setting, and high herbivorous insect stress had less impacts on transgenic rice yield.

**Key words:** insect-resistant; transgenic rice; herbivorous insect stress; growth; yield.

在农业生产中,为防治农作物病虫害而长期施用化学药剂已对自然生态环境造成严重污染.抗病、

抗虫基因育种工程技术给农作物病虫害的防治带来了新的契机.随着转基因技术的快速发展,转基因作物种植面积不断增加,农药的使用量大大减少,这不仅节省了农业生产成本,还减少了对环境的污染,为社会带来了巨大的经济和环境效益<sup>[1]</sup>.与此同时,

<sup>\*</sup> 四川省财政基因工程项目(2012QNJJ-027)和农业部“转基因生物安全评价共性技术”项目(2011ZX08011-006)资助.

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. E-mail: zhang\_fannie@163.com

2012-12-31 收稿,2013-06-04 接受.

转基因植物的生物和环境安全性亦成为社会各界关注的焦点,目前转基因植物已被国内外相关机构纳为安全检测和评估的重点对象.对于外源基因的引入是否会改变受体植物的生态适合度及环境竞争能力,以及由此带来的生物及生态安全性问题亦成为目前研究的热点之一.外源基因的介入必然会打破植物自身固有的基因连锁群,从而干扰其自身生长发育的基因体系表达,表现为对作物自身生理生化、代谢途径及相关性状的改变<sup>[2-6]</sup>.植物生理生化及代谢途径的改变可能导致转基因植物逆境应答能力的变化<sup>[7]</sup>,进而影响植株与有害生物之间的关系.刘微等<sup>[8]</sup>对温室条件下转 *Bt* 基因水稻光合特性及光合产物积累特性的研究结果显示,*Bt* 基因的导入明显影响了水稻的光合速率、叶绿素含量及相关光合酶活性.聂呈荣等<sup>[9]</sup>研究发现,在逆境条件下,转基因玉米叶片中重要的防御性次生代谢物质丁布和阿魏酸显著低于非转基因玉米,说明外源基因的介入可能降低了受体玉米的防御能力.周军英等<sup>[10]</sup>的研究表明,耐草甘膦外源基因的插入会影响大豆种子及幼苗对温度、水分和盐分等逆境条件的敏感性.冯远娇等<sup>[11]</sup>研究发现,外源 *Bt* 基因的引入对玉米应对机械损伤胁迫的反应比非转基因玉米明显增强.这一系列研究结果均在一定程度上说明外源基因的引入会影响受体植株抵御逆境胁迫的能力,而不同转基因品系对不同逆境胁迫条件的反应也可能不同.李秀菊等<sup>[12]</sup>对抗虫棉的研究亦表明,在逆境条件下抗虫棉的生理及形态发生了改变,进而影响了转基因棉的抗虫活力.由此可见,外源基因的插入使植物体在响应环境条件变化时产生不同的生理生化反应,这将对植株与有害生物之间的关系产生影响,进而影响整个生态系统,三者之间存在一定层级连锁反应关系.因此,对不同环境条件下外源基因导入对受体植株的影响进行深入而系统的研究具有重要意义.

影响农业生产的逆境条件主要来自两个方面:生物性胁迫和非生物性胁迫.其中,虫害是影响农业生产的重要生物性胁迫因子之一.植物在受植食性昆虫为害后将启动相关的生理代谢功能,激活相应的防御信号,启动防御相关物质的合成或释放挥发物,从而产生相应的防御响应机制<sup>[6,13-14]</sup>.初生代谢合成的碳水化合物在植物生长和防御之间进行不断调整,可能影响植物生长及产量的形成<sup>[15-16]</sup>.目前,虫害胁迫条件对抗虫转基因植物生长发育及产量形成的影响机制还未见系统研究.*Bt* 基因是抗虫转基

因育种利用的主要外源基因之一,其全称为苏云金芽孢杆菌杀虫晶体蛋白(*Bacillus thuringiensis* insecticidal crystal protein)基因,来源于苏云金杆菌(*Bacillus thuringiensis*)<sup>[17]</sup>,其表达的晶体蛋白对二化螟、三化螟、大螟、稻纵卷叶螟、稻青虫等 8 种水稻鳞翅目害虫都有较高的抗性<sup>[18-19]</sup>,在植物基因工程及转基因植物育种中应用广泛.近年来,在转 *Bt* 抗虫水稻的研究和选育方面取得了较大的进展,获得了不少抗虫效果好的转基因水稻品系.但外源基因 *Bt* 的引入是否会对受体水稻抗虫害胁迫能力及生长发育产生影响,目前还鲜有研究.为此,本试验以 3 种转 *Bt* 基因的抗虫水稻 R1、R2、Bt63 及非转基因常规稻汕优 63 为研究材料,比较转基因水稻与非转基因水稻在不同虫压胁迫条件下生长及产量等相关指标的变化,以期为抗虫转基因水稻的田间栽培管理和风险评估提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2010 年在四川省农业科学院温江转基因植物环境安全评价基地进行.土壤为沙壤土,肥力良好,排灌情况良好,0~20 cm 土层有机质含量  $1.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $176.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 6.2~6.9.

供试材料为 3 个转 *Bt* 抗虫基因水稻品种 Bt63 [由农业部转基因植物环境安全监督检验测试中心(杭州)惠赠]、R1 和 R2 (由四川省农业科学院作物研究所惠赠),以非转基因水稻品种汕优 63 [由农业部转基因植物环境安全监督检验测试中心(杭州)惠赠]为对照(CK).

### 1.2 试验设计

试验于 2010 年 4 月底至 10 月上旬进行.试验设计为单因素多重复试验,在相邻两块水肥条件相当的田块中进行,分别设置高虫压和低虫压两个处理.每田块分为 8 排,为 8 次重复.每排 6 个  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  区块,区块之间间距为 0.5 m.各水稻品系各占一个区块,转基因水稻与非转基因水稻相间种植于各个区块中.3 个转基因抗虫水稻品种 Bt63、R1、R2 随机排列,以避免试验地微环境不同可能导致的位置效应.

在高虫压处理中,除了在大田翻耕前进行一次人工除草外,从幼苗移栽到收获期均不采取任何害虫防治措施,仅按常规田间管理方法进行水肥管理,保持杂草生长和害虫危害的自然状态,以形成高虫压胁迫条件.在低虫压处理中,大田翻耕前撒施 3%

呋喃丹颗粒和除草剂,幼苗移栽前用 50% 杀螟松乳油喷洒苗圃秧苗,在水稻分蘖期和孕穗期用 50% 杀螟松、25% 杀虫双水剂、40% 乐果乳油各喷洒 1 次作防虫处理.其他按常规田间管理方法进行水肥管理.

供试水稻品种经浸种催芽后,撒播于育苗床中培育幼苗约 30 d 后,选择大小一致、生长健壮的幼苗按试验设计位点移栽到各个区块中.株距和行距均为 0.2 m,每个区块 7 行 7 列共种植 49 株植株.在每组试验田块四周种植至少 1 m 宽常规非转基因水稻品种作为保护带.

试验基地按照国家对转基因材料环境安全有关条例规定进行围墙和相应隔离设施设置,并在试验后将所有试验材料进行焚烧处理.

1.3 测定项目与方法

为避免边缘效应对试验结果的影响,测定时采用五点取样法,取各个区块外第二轮的 4 个角点及最中间的 1 个点共 5 个点来进行数据调查.每次调查在同点进行.选取所有转基因水稻区块及每排中间一个非转基因水稻区块进行调查.

1.3.1 田间虫害危害情况 调查试验田中主要害虫发生情况.分别于水稻分蘖盛期(移栽后 35 d)及水稻成熟后收获时调查施用农药田块和未施用农药田块害虫的发生种类和数量.对稻纵卷叶螟、二化螟及三化螟等 *Bt* 抗虫水稻的靶标害虫导致的枯心苗数或受螟虫钻食的茎蘖数进行统计,并计算受害株率:受害株率=受害茎蘖数/单株茎蘖总数×100%.

1.3.2 水稻生长相关指标 分别在移栽后的 20 d(幼苗期)、35 d(分蘖盛期)、50 d(分蘖末期)测定水稻株高、分蘖数等生长指标,在移栽后 65 d(拔节孕穗期)测定水稻株高.

1.3.3 水稻产量性状相关指标 成熟期测定株高、地上部鲜质量、单株穗数、穗长、穗质量、单株总粒数、单株实粒数、单株实粒质量、结实率、千粒重等指标.水稻成熟期株高的测定与生长期的株高测定有差别:营养生长阶段的株高是指植株基部到剑叶顶端的长度,成熟期株高是指植株基部到穗顶端的长度.

1.4 数据处理

所有数据均采用 Excel 2003 和 SPSS 19.0 统计分析软件进行统计分析.采用 Duncan 法进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ ).

2 结果与分析

2.1 田间虫害危害情况

经调查发现,虫害主要发生在未进行施药处理

的试验田块中,主要发生的害虫有鳞翅目害虫稻纵卷叶螟、水稻螟虫(二化螟、三化螟、大螟)、直翅目蝗虫、蚱蜢、螽蜥、蟋蟀、蝼蛄、膜翅目蚂蚁、半翅目蝽象、蜘蛛目蜘蛛、同翅目蚜虫、稻飞虱(白背飞虱和褐飞虱)等,占所有害虫数量的 90% 以上.而在施药处理的田块中虫害发生的数量很少,主要是蝗虫、蚱蜢、螽蜥、蟋蟀等害虫.稻纵卷叶螟、二化螟、三化螟等鳞翅目害虫是水稻生产上的主要害虫,也是 *Bt* 抗虫转基因水稻防治的靶标害虫,因此本试验对水稻分蘖盛期(代表营养生长期)和收获期(代表成熟期)受几种鳞翅目害虫危害的茎蘖数量进行了统计,并计算受害株率.结果表明,施药处理田中水稻植株受螟虫危害程度远低于未施药处理.可见,不施用任何药剂防治虫害的措施可以使田间形成高虫压胁迫条件.在水稻营养生长期(图 1A),施药处理田中 3 种转基因水稻品系及对照受螟虫危害株率均较低,<1%.而在未施用农药处理中,几种水稻的受害株率均明显增加,尤其非转基因水稻植株受螟虫危害株率近 15%.在水稻成熟期(图 1B),施药处理水稻的受害株率远低于未施药处理.施药处理中转基因水稻 R1、R2、Bt63 受害株率<2.5%,非转基因水稻受害株率稍高,但<10%;而在未施药处理中,3 种转基因水稻品系受害株率近 10%,而非转基因水稻植株受害株率则高达 35%.

同时,在两个时期对螟虫危害情况的调查结果

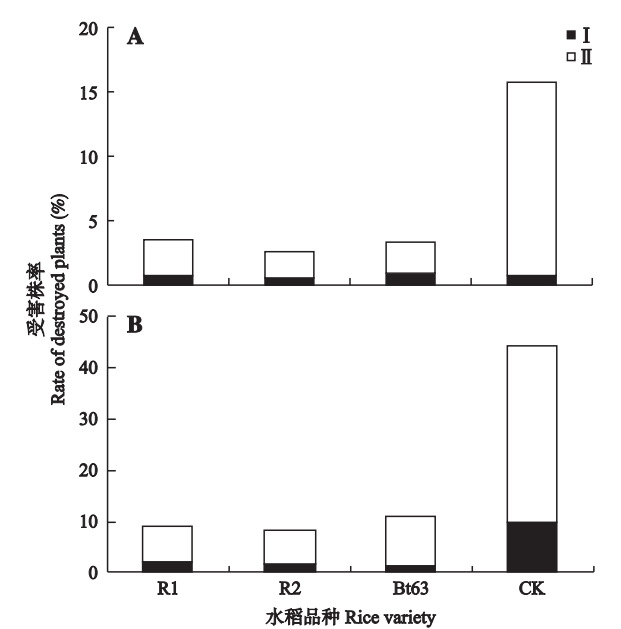


图1 水稻受螟虫危害株率  
Fig.1 Rate of destroyed plants by rice stem borer.  
A: 营养生长期 Vegetative growth stage; B: 成熟期 Mature stage. I: 施药 Pesticides application; II: 未施药 Non-pesticides application.



表 1 水稻营养生长期的株高  
Table 1 Plant height of rice at vegetative stage (cm, mean±SE, n=40)

处理 Treatment	品系 Variety	移栽后天数 Days after transplanting			
		20	35	50	65
施药 Pesticides application	R1	63.02±0.78bc	96.61±0.78b	110.99±0.95bc	112.33±1.18bc
	R2	61.15±0.81ab	95.41±0.90ab	107.84±0.96ab	109.35±0.92ab
	Bt63	60.12±0.70a	93.44±0.70a	105.80±1.02a	107.69±1.12a
	CK	63.96±0.53c	97.72±0.84b	111.22±0.64c	113.91±1.36c
未施药 Non-pesticides application	R1	56.18±0.78b	87.87±0.76b	98.65±0.80b	107.45±1.80a
	R2	54.75±0.88ab	86.94±0.68ab	96.17±0.68ab	105.95±1.00a
	Bt63	54.47±0.71ab	86.72±0.75ab	95.54±1.11ab	104.14±1.36a
	CK	52.61±0.55a	84.88±0.93a	94.32±1.03a	102.97±1.05a

同列不同字母表示同一处理不同品系间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference among varieties under the same treatment at 0.05 level. 下同 The same below.

还表明,在高虫压胁迫条件下,3 种转基因水稻受害株率显著低于非转基因对照(图 1). 可见,在虫害胁迫条件下抗虫转基因水稻可充分体现出外源基因的抗性特点.

2.2 虫压胁迫对抗虫转基因水稻生长发育的影响

由表 1 可知,在施用农药的低虫压试验组中,移栽后 20、35、50 及 65 d 时 3 种抗虫转基因水稻 R1、R2、Bt63 的株高均低于非转基因对照(CK),其中 R1 与对照之间差异不显著.而在未施用农药的高虫压胁迫条件下,抗虫转基因水稻株高均高于非转基因对照,在移栽后 20、35、50 d 时,R1 显著高于对照,而 R2 和 Bt63 与对照间差异不显著;在移栽后 65 d 时,3 种转基因水稻与对照间均无显著差异.可见,抗虫水稻植株生长前期受虫害胁迫的负面影响小于非转基因水稻.

在幼苗移栽后 65 d 时,水稻已停止分蘖,进入拔节孕穗期,因此本试验仅调查移栽后 20、35、50 d 3 个时间点的分蘖数.由表 2 可知,3 种转基因水稻在高虫压条件下分蘖数明显多于低虫压条件下,而对照在高虫压条件下分蘖数低于低虫压条件下.在高虫压条件下,移栽后 20 d 时,转基因水稻 R1、

表 2 水稻营养生长期的分蘖数  
Table 2 Tiller number of rice at vegetative stage (mean±SE, n=40)

处理 Treatment	品系 Variety	移栽后天数 Days after transplanting		
		20	35	50
施药 Pesticides application	R1	10.6±0.6a	12.6±0.6a	10.8±0.5a
	R2	10.8±0.6a	13.9±0.6a	11.1±0.5a
	Bt63	10.4±0.5a	13.1±0.6a	10.8±0.5a
	CK	10.9±0.5a	13.7±0.4a	11.8±0.4a
未施药 Non-pesticides application	R1	12.3±0.6b	17.1±0.7b	11.3±0.4ab
	R2	11.9±0.6b	18.9±0.9b	11.2±0.4ab
	Bt63	11.4±0.6ab	17.6±0.8b	11.6±0.4b
	CK	9.8±0.4a	13.0±0.8a	10.1±0.4a

R2 分蘖数显著高于对照;在移栽后 35 d 时,3 种转基因水稻均显著高于对照;在移栽后 50 d 时,3 种转基因水稻均高于对照,但 R1、R2 与对照间差异不显著.在所有调查中 3 种转基因水稻间差异均不显著.在无虫压胁迫条件下,移栽后 20、35 及 50 d 时,3 种转基因水稻分蘖数比对照少或与对照相当.

2.3 虫压胁迫对抗虫转基因水稻产量性状的影响  
水稻成熟期株高、地上部鲜质量、穗质量、穗长、单株穗数、单株实粒数、结实率等农艺性状是影响产量的重要因素.由表 3 可知,水稻成熟期株高、地上

表 3 水稻产量相关性状  
Table 3 Yield-related traits of rice (mean±SE, n=40)

处理 Treatment	品系 Species	株高 Plant height (cm)	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass (g)	单株穗数 Productive panicles per plant	穗长 Panicle length (cm)	穗质量 Panicle fresh mass (g)	单株实粒质量 Grain mass per plant (g)	单株实粒数 Filled grains per plant	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain mass (g)
施药 Pesticides application	R1	112.6±1.4a	197.9±11.2b	10.78±0.47a	26.89±0.34ab	48.02±2.28a	27.03±1.09a	1060±56a	82.07±1.72a	25.63±0.53a
	R2	105.8±1.1b	179.9±8.8b	10.15±0.50a	25.84±0.33bc	47.86±2.87a	30.03±1.35a	1155±54a	83.60±2.37a	26.04±0.44a
	Bt63	101.8±1.7b	200.0±11.7b	10.45±0.47a	24.58±0.43c	41.69±1.71a	25.00±1.87b	977±65a	81.21±1.32a	25.50±0.37a
	CK	115.9±2.3a	244.9±10.6a	11.05±0.48a	27.48±0.37a	49.03±1.86a	30.81±1.03a	1171±31a	86.26±1.42a	26.31±0.45a
未施药 Non-pesticides application	R1	105.0±0.7a	165.1±5.5a	9.53±0.34a	27.86±0.21b	38.98±1.71a	23.25±1.16a	993±41a	69.59±1.37a	23.40±0.48a
	R2	104.8±1.3a	164.7±8.9a	9.32±0.44a	27.41±0.29b	37.02±3.17a	25.89±3.61a	1055±107a	72.71±2.49a	24.05±0.90a
	Bt63	103.6±0.8a	161.5±9.6a	9.48±0.44a	25.66±0.40a	35.98±4.80a	18.88±3.57a	799±145a	67.94±3.59a	23.31±0.64a
	CK	103.5±1.1a	158.3±5.8a	8.32±0.41a	24.85±0.30a	33.64±2.08a	15.34±1.67a	714±69a	63.92±2.68a	21.42±1.20a

部鲜质量和穗长在品种间的差异与营养生长阶段生长指标的差异趋势一致,在低虫压条件下,R1、R2、Bt63 水稻地上部分鲜质量显著低于对照,株高和穗长也低于对照,但 R1 与对照间无显著性差异。在高虫压胁迫条件下,3 种转基因水稻株高、地上部鲜质量均高于对照,但差异不显著,穗长则显著高于对照。在低虫压条件下,3 种抗虫转基因水稻单株穗数、单株实粒质量、穗质量、单株实粒数、结实率和千粒重均低于对照;在高虫压胁迫条件下,3 种抗虫转基因水稻均高于对照,但差异不显著。可见,抗虫外源 *Bt* 基因的引入对受体水稻结实性不会产生负面效应,高虫压胁迫条件对抗虫转基因水稻产量的影响较小。

### 3 讨 论

本研究表明,3 种抗虫转基因水稻营养生长期的株高和分蘖以及成熟期的株高和地上部鲜质量在低虫压条件下均低于非转基因对照,而在高虫压胁迫条件下,株高、分蘖、穗长及地上部鲜质量则高于对照,这可用“适合度效应”理论来解释。陈良燕<sup>[20]</sup>将转基因品系相对于非转基因品系在某些指标上显著增加或减少的效应定义为外源基因所引起的适合度利益或成本,也即外源基因适合度效应。外源基因转入受体植物后,植物机体需要额外消耗一定的能量维持转入基因的运转,造成受体植物在能量分配上的改变,产生转基因植物的“适合度成本”<sup>[21-22]</sup>。本研究中,抗虫基因插入受体植株后,可能增加受体水稻的能量运行成本。在低虫压条件下,选择和竞争小或无,转基因水稻需额外消耗能量来维持引入的外源基因运转而产生相应的代谢补偿,外源基因的抗性优势得不到体现;同时,能量分配的改变影响受体植株生长发育水平,导致株高、分蘖及地上部鲜质量等指标低于非转基因水稻。相反,在高虫压条件下,因外源基因表达赋予植物抗性特性超过维持其性状产生的代谢补偿而表现“适合度利益”<sup>[23-24]</sup>,植株生长发育得到保障,从而使生长发育及产量性状相关指标高于对照。另外,高、低两种不同虫压条件下水稻受螟虫危害株率亦是外源 *Bt* 基因适合度效应的最直观表现。在施药处理的田块,植株处于低虫压条件下,*Bt* 基因的抗虫优势不明显;而在未施药处理的高虫压条件下,受 *Bt* 基因表达蛋白的保护,转基因水稻对靶标害虫耐受性明显高于非转基因水稻,*Bt* 基因的适合度利益得到体现,受害株率远低于对照。

外源基因适合度效应影响其在自然环境中的扩散效率,在一定程度上决定着外源基因是否向近缘种及杂草逃逸并导致潜在生态风险<sup>[25]</sup>,目前它已成为转基因植物生态风险评估的重要内容。适合度成本太低或无成本可能导致外源基因产生逃逸而引发一定的环境风险,对生态系统造成长期的潜在影响<sup>[26-28]</sup>。本研究中,低虫压胁迫条件下,转 *Bt* 基因水稻株高、分蘖等生长发育指标及单株穗数、穗长、穗质量、实粒数等产量相关指标比非转基因水稻低或差异不显著,说明外源 *Bt* 基因对转基因水稻存在一定的适合度成本,所以 *Bt* 抗虫转基因水稻外源基因逃逸的风险比较小,引发环境风险的可能性低。但是,转基因生物与环境之间存在长期的互作关系,它对环境的影响具有不确定性,对抗虫转基因水稻在不同生境中的生态风险仍需加强监测和研究,不可简单推测。

本研究中,3 种转基因水稻在高虫压胁迫条件下分蘖数明显多于低虫压条件下,而对照品系汕优 63 在高虫压胁迫条件下分蘖数少于低虫压条件下。可见,在受虫压胁迫时,外源 *Bt* 基因的插入可能会促进水稻植株分蘖的发生。但转基因水稻并未在虫压胁迫条件下形成更多的单株穗数,相反,在高虫压条件下单株穗数比低虫压条件下有所降低。初步分析,这可能是转基因水稻在虫压胁迫环境下的适应性生长表现,以补偿恶劣环境条件给植株生长发育带来的负面影响。

此外,不同品种或同一品种的不同发育时期,水稻植株受虫压胁迫影响的程度存在一定差异,不论是在转基因水稻与非转基因水稻之间,还是在转基因水稻不同品系之间均存在这样的现象,不同品系对环境响应的适合度效应不尽相同,这可能与受体品系本身的特性有关,或者因外源基因随机插入而产生的非预期效应使不同品系对环境胁迫的敏感性不同。此外,有研究表明,转基因作物适合度效应在不同环境下具有不同的表现,靶标害虫的发生率对受体植株在生长发育和结实等方面的预期优势也有很大影响<sup>[20]</sup>。魏兴华等<sup>[29]</sup>研究还发现,不同外源基因插入对受体水稻品种异交潜力的影响也有所不同。因此,对转基因品系适合度效应的评估须遵循“逐案评估”的原则。不同外源基因类型、不同受体植物都需要根据拟释放地点的环境条件进行具体分析和评估,在特定条件下得到的结果可以作为其他条件下的参考,但不能简单地将其结果进行外推。加之水稻的生长发育与水分、温度、矿质元素、光合效

率等多种因素有关,因此,在以后的研究中,还应结合这些因素全面分析虫压胁迫条件对转基因水稻生长发育的影响,以更准确地评估外源基因的引入对不同环境胁迫条件下水稻的影响程度。

# 参考文献

- [1] James C. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops; 2011. ISAAA Brief No. 43. Ithaca, NY: The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA), 2011
- [2] Tian X-L (田晓莉), Yang P-Z (杨培珠), Wang B-M (王保民), *et al.* Nitrogen and carbon metabolizing of *Bt* transgenic cotton CCRI 30. *Acta Gossypii Sinica* (棉花学报), 2000, **12**(4): 172–175 (in Chinese)
- [3] Tian X-L (田晓莉), Yang P-Z (杨培珠), Wang B-M (王保民), *et al.* The carbon metabolizing of yield organs in *Bt* transgenic cotton. *Crop Journal* (作物杂志), 2003(2): 17–20 (in Chinese)
- [4] Sun C-X (孙彩霞), Chen L-J (陈利军), Wu Z-J (武志杰), *et al.* Photosynthetic characters and *Bt* toxin content of different transgenic *Bt* cottons. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(10): 1878–1882 (in Chinese)
- [5] Nie C-R (聂呈荣), Luo S-M (骆世明), Wang J-W (王建武). Change of photosynthesis and growth of *Bt* corn. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1957–1962 (in Chinese)
- [6] Wu J (武娟), Qi F-J (齐放军), Tian W-H (田文华), *et al.* Screening and identification of differentially expressed genes induced by cotton bollworm infestation from cotton plants with cDNA microarray method. *Journal of Agricultural Biotechnology* (农业生物技术学报), 2011, **19**(5): 908–915 (in Chinese)
- [7] Chen W (陈威), Zhou Q (周强), Li X (李欣), *et al.* Physiological responses of different rice cultivars under herbivore stress. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(7): 2161–2165 (in Chinese)
- [8] Liu W (刘微), Wang S-T (王树涛), Chen Y-X (陈英旭), *et al.* Effect of *Cry1Ab* gene on photosynthetic characteristics and photosynthate accumulation of rice. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(3): 627–633 (in Chinese)
- [9] Nie C-R (聂呈荣), Luo S-M (骆世明), Wang J-W (王建武), *et al.* Change in concentration of secondary metabolites DIMBOA and phenolic acids in leaves of *Bt* corn. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(4): 814–823 (in Chinese)
- [10] Zhou J-Y (周军英), Wang C-Y (王长永), Xu W-L (续卫利). Comparison between transgenic soybean and non-transgenic soybean in resistance to stresses. *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 2006, **22**(2): 26–30 (in Chinese)
- [11] Feng Y-J (冯远娇), Jin Q (金琼), Wang J-W (王建武). Systemic induced effects of mechanical wounding on the chemical defense of *Bt* corn (*Zea mays*). *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34**(6): 695–703 (in Chinese)
- [12] Li X-J (李秀菊), Zhi M-X (职明星), Lü W-Y (吕文彦). Effect of adversity on insect-resistance of transgenic *Bt+CPTi* gene cotton. *Hubei Agricultural Sciences* (湖北农业科学), 2010, **49**(1): 73–76 (in Chinese)
- [13] Lou Y-G (娄永根), Cheng J-A (程家安). Herbivore-induced plant volatiles: Primary characteristics, ecological functions and its release mechanism. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(6): 1097–1106 (in Chinese)
- [14] Sarmiento RA, Lemos F, Bleeker PM, *et al.* A herbivore that manipulates plant defence. *Ecology Letters*, 2011, **14**: 229–236
- [15] Cardoza YJ, Alborn HT, Tumlinson JH. *In vivo* volatile emissions from peanut plants induced by simultaneous fungal infection and insect damage. *Journal of Chemical Ecology*, 2002, **28**: 161–174
- [16] Loeuille N, Loreau M, Ferriere R. Consequences of plant-herbivore coevolution on the dynamics and functioning of ecosystems. *Journal of Theoretical Biology*, 2002, **217**: 369–381
- [17] Schnepf E, Crickmore N, Van Rie J, *et al.* *Bacillus thuringiensis* and its pesticidal crystal proteins. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1998, **62**: 775–806
- [18] Ye GY, Yao HW, Shu QY, *et al.* High levels of stable resistance in transgenic rice with a *cry1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* Berliner to rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) under field conditions. *Crop Protection*, 2003, **22**: 171–178
- [19] Shu QY, Ye GY, Cui H, *et al.* Transgenic rice plants with a synthetic *cry1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* were highly resistant to eight lepidopteran rice pest species. *Molecular Breeding*, 2000, **6**: 433–439
- [20] Chen L-Y (陈良燕). Fitness Effect of Insect-resistance Transgenes on Rice Act as Receptors. PhD Thesis. Shanghai: Fudan University, 2005 (in Chinese)
- [21] Bartsch D, Brand U, Morak C, *et al.* Biosafety of hybrids between transgenic virus-resistant sugar beet and Swiss chard. *Ecological Applications*, 2001, **11**: 142–147
- [22] Burke JM, Rieseberg LH. Fitness effects of transgenic disease resistance in sunflowers. *Science*, 2003, **300**: 1250
- [23] Chen LY, Snow AA, Wang F, *et al.* Effect of insect-resistance transgenes on fecundity in rice (*Oryza sativa* Poaceae): A test for underlying costs. *American Journal of Botany*, 2006, **93**: 94–101
- [24] Clark EA. Environmental risks of genetic engineering. *Euphytica*, 2006, **148**: 47–60
- [25] Rieseberg LH, Burke JM. The biological reality of species: Gene flow, selection, and collective evolution. *Taxon*, 2001, **50**: 47–67
- [26] Zhang L (张磊), Zhu Z (朱祯). Effect of transgenic insect-resistant rice on biodiversity. *Hereditas* (遗传), 2011, **33**(5): 1–8 (in Chinese)
- [27] Snow AA, Pilon D, Rieseberg LH, *et al.* A *Bt* transgene reduces herbivory and enhances fecundity in wild sunflowers. *Ecological Applications*, 2003, **13**: 279–286
- [28] Chen LJ, Lee DS, Song ZP, *et al.* Gene flow from cultivated rice (*Oryza sativa*) to its weedy and wild relatives. *Annals of Botany*, 2004, **93**: 67–73
- [29] Wei X-H (魏兴华), Yuan X-P (袁筱萍), Yu H-Y (余汉勇), *et al.* Effects of transgenes insertion on pollen vigor and hybrid seed set of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(1): 115–118 (in Chinese)

作者简介 张富丽,女,1978年生,助理研究员.主要从事转基因成分检测及转基因植物环境安全评价研究. E-mail: zhang\_fannie@163.com

责任编辑 张凤丽