

不同氮肥水平下转 *Bt* 基因水稻对褐飞虱和白背飞虱生态适应性的继代影响

刘凯^{1,2} 杨亚军¹ 田俊策¹ 鲁艳辉¹ 徐红星¹ 郑许松¹ 吕仲贤^{1,2,*}

(¹浙江省农业科学院 植物保护与微生物研究所, 杭州 310021; ²浙江师范大学 化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; * 通讯联系人, E-mail: luzxmh2004@aliyun.com)

Effects of *Bt* Rice with *cry1C* and *cry2A* on the Ecological Generation Fitness of Rice Brown Planthoppers (*Nilaparvata lugens*) and Whitebacked Planthoppers (*Sogatella furcifera*) at Various Nitrogen Rates

LIU Kai^{1,2}, YANG Ya-jun¹, TIAN Jun-ce¹, LU Yan-hui¹, XU Hong-xing¹, ZHENG Xu-song¹, LV Zhong-xian^{1,2,*}

(¹Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; ²College of Chemistry and Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; * Corresponding author, E-mail: luzxmh2004@aliyun.com)

LIU Kai, YANG Yajun, TIAN Junce, et al. Effects of *Bt* rice with *cry1C* and *cry2A* on the ecological generation fitness of rice brown planthoppers (*Nilaparvata lugens*) and whitebacked planthoppers (*Sogatella furcifera*) at various nitrogen rates. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30(2): 200–209.

Abstract: In order to evaluate the effects of *Bt* rice on the generation fitness of non-target pest at different nitrogen rates, as well as the potential impact of *Bt* rice and nitrogen fertilizer levels on non-target pest, the brown planthopper (BPH) (*Nilaparvata lugens*) and the whitebacked planthopper (WBPH) (*Sogatella furcifera*), were successively cultured for four generations on *Bt* rice, T1C-19 with *cry1C* and T2A-1 with *cry2A*, and their parental rice Minghui 63, at nitrogen rates of 0, 100 and 250 kg/hm². The results indicated that the ecological fitness of the BPH and WBPH was increased with the increasing nitrogen fertilizer level, including shortened nymph developmental duration, enhanced fecundity, prolonged longevity, increased nymph survival rate, female weight, egg hatchability and population growth rate. There were significant differences in rice planthopper nymphal development duration, body weight of female adult, fecundity and population growth rate for four successive generations under different nitrogen rates. Transgenic *Bt* rice, T1C-19 and T2A-1, had no significant effect on the fitness of BPH and WBPH at the same generations and nitrogen rates, except the BPH fecundity. BPH fecundity on transgenic *Bt* rice T1C-19 at the nitrogen levels of 100 kg/hm² and 250 kg/hm² (N) was lower compared with the transgenic *Bt* rice T2A-1 and its parent Minghui 63 from the first generation to the third generation, but no significant difference was found among varieties at the fourth generation at three nitrogen rates. No significant difference was found on the fitness of BPH and WBPH with the generation increase, between non-transgenic *Bt* rice and transgenic *Bt* rice. Therefore, the present study demonstrated that nitrogen fertilizer levels exerted a significant influence on the ecological fitness of the rice planthoppers with the generation increase, while transgenic *Bt* rice didn't.

Key words: nitrogen fertilizer; transgenic *Bt* rice; *Nilaparvata lugens*; *Sogatella furcifera*; successive generations; ecological fitness

刘凯, 杨亚军, 田俊策, 等. 不同氮肥水平下转 *Bt* 基因水稻对褐飞虱和白背飞虱生态适应性的继代影响. 中国水稻科学, 2016, 30(2): 200–209.

摘要: 在目前氮肥施用量依然偏多的大背景下, 氮肥与转 *Bt* 基因水稻的相互作用是否会对稻田中非靶标节肢动物产生影响是转基因水稻安全评价的重要内容。本研究在室内条件下用 0 kg/hm²、100 kg/hm² 和 250 kg/hm² 3 个氮肥水平处理的转 *Bt* 基因水稻 T1C-19 和 T2A-1 以及非转基因亲本水稻明恢 63, 连续饲养褐飞虱和白背飞虱 4 代, 研究在不同氮肥条件下, 转 *Bt* 基因水稻对褐飞虱和白背飞虱生态适应性的继代影响。结果显示, 在同一水稻品种上, 氮肥的过量施用, 显著提高

收稿日期: 2015-06-01; 修改稿收到日期: 2015-12-18。

基金项目: 国家转基因生物新品种培育重大专项(2014ZX08001-001); 国家水稻产业技术体系资助项目(CARS-01-17)。

了褐飞虱和白背飞虱的生态适应性,并且随着代数的增加具有一定的累加效果。同一氮肥水平条件下,转 *Bt* 基因水稻和对照相比对同代褐飞虱和白背飞虱的若虫发育历期、雌虫体质量、成虫寿命、褐飞虱若虫孵化率、存活率均无显著影响。而在 100 kg/hm² 和 250 kg/hm² 施氮水平下取食转基因水稻 T1C-19 的褐飞虱在第 1 代至第 3 代的每雌产卵量均显著低于另一转基因品种 T2A-1 以及对照品种明恢 63,但第 4 代褐飞虱在各品种上的产卵量无显著差异。本研究结果表明,氮肥的施用显著提高了褐飞虱和白背飞虱的生态适应性,供试两种转 *Bt* 基因水稻对褐飞虱和白背飞虱的生态适应性无显著影响。这为转基因水稻的安全评价提供了一定的理论依据。

关键词: 氮肥; 转 *Bt* 基因水稻; 白背飞虱; 褐飞虱; 代别; 生态适应性

中图分类号: Q785; S435.112⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2016)02-0200-10

褐飞虱 (*Nilaparvata lugens*) 属于远距离迁飞性、r-对策昆虫,其对环境因子的高度适应性以及对水稻为害的突发性和猖獗性,使其极易暴发成灾^[1]。我国褐飞虱每年发生面积在 2000 万 hm² 以上,造成稻谷产量损失达数十亿 kg^[2],是我国和亚洲许多国家当前水稻生产上的首要害虫。

褐飞虱成为亚洲许多国家的主要水稻害虫,主要归咎于 20 世纪 60 年代的“绿色革命”,它倡导人们通过大面积使用广谱杀虫剂以及以氮肥为主的化学肥料^[3]来控制害虫和提高水稻等粮食作物的产量。但是连续过量使用氮肥并不会显著增加水稻的产量^[4],反而使稻飞虱从次要害虫转变为主要害虫^[5-6],因此,过量的施用氮肥也被认为是导致褐飞虱猖獗的主要原因之一^[7]。

白背飞虱 (*Sogatella furcifera*) 亦是水稻上主要迁飞性害虫之一,它主要通过刺吸取食水稻,为害严重时造成水稻“虱烧”。同时,其在取食过程中能够传播水稻齿叶矮缩病、水稻南方黑条矮缩病等病害^[8],虫病的同时发生导致中国、越南北部以及日本水稻产量损失严重^[9-10]。

到目前为止,转 *Bt* 基因抗虫水稻的研究已经取得很大进展,且已获得许多抗虫效果好的水稻品系^[11-13],有的已经进入了田间试验阶段^[14-16]。转 *Bt* 水稻对螟虫具有较好的抗性,能有效降低田间农药的使用及增加农民收益^[17],但能否商业化生产主要取决于环境和食品安全性系统评价的结果。在稻田系统中,转 *Bt* 基因水稻是否会对生态系统中生物群落的稳定性,尤其是对天敌等非靶标节肢动物种群产生影响,是转 *Bt* 基因水稻安全评价的重要内容。目前为止,关于 *Bt* 水稻对非靶标生物的影响的研究已有很多,主要集中在对非靶标重要害虫^[18-20]、重要害虫天敌^[21-27]以及对某些中性昆虫,如弹尾目跳虫 (*Folsomia candida*)^[23,28] (经常被作为一种标准物质来检测环境污染物质对土壤生物的影响)的生物学特性的影响。但前人的研究结果基本都局限

在对非靶标昆虫当代的研究,不能完整地模拟田间情况,不能准确地评价转 *Bt* 水稻对稻田系统中非靶标节肢动物的影响。因此,室内条件下对非靶标昆虫连续多代的饲养对转 *Bt* 水稻的安全评价十分必要。

转 *Bt* 基因水稻对农田系统来说是一种新物种,在目前氮肥施用量依然偏多的大背景下,氮肥与转 *Bt* 基因水稻的相互作用是否会对稻飞虱产生影响我们不得而知。本研究在室内比较了不同氮肥水平下不同转 *Bt* 基因水稻品种对褐飞虱和白背飞虱生长发育和繁殖的连续影响,旨在探究转 *Bt* 基因水稻在不同氮肥水平下,对连续饲养的褐飞虱和白背飞虱生物学参数的影响。

1 材料与方法

1.1 供试水稻和昆虫

供试水稻为转 *cry1C* 基因抗虫水稻品系 T1C-19 和转 *cry2A* 基因抗虫水稻品系 T2A-1,其非转基因亲本对照为明恢 63,均由华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室提供。水稻种子浸种后,在 30℃ 下萌发 24 h,播种在无虫网室的水泥槽(2 m×0.9 m×0.15 m)中,3 叶期时移栽至盆钵(高 10 cm,直径 15 cm)中,每盆钵 3 株水稻苗。设置 3 个不同氮肥水平(250 kg/hm², 100 kg/hm², 0 kg/hm²),移栽 7 d 后施用总氮量的 30%,在分蘖期施用总氮量的 30%,生长期施用总氮量的 40%,从而得到每个水稻品种的高含氮量稻株和低含氮量稻株。60 日龄分蘖期稻苗用于试验。供试水稻每 20 d 播种一批。

供试褐飞虱和白背飞虱均采自浙江金华水稻田间。首先将其在敏感品系 TN1 上连续饲养繁殖,选育同步化的后代作为原始代稻飞虱的试验种群。将初羽化成虫接入到种有水稻苗(不同氮肥水平)的产卵笼(100 cm×60 cm×80 cm)内,交配产卵 24 h 后取出产卵苗,移入相同大小的饲养笼内饲养,定期

表 1 转 Bt 基因水稻与氮肥水平对褐飞虱和白背飞虱生态适应性的继代影响的方差分析

Table 1. ANOVA of successive effects of Bt rice and nitrogen level on the ecological fitness of <i>Nilaparvata lugens</i> and <i>Sogatella furcifera</i> .							
参数 Parameters	代别 Generation(G)	品种 Variety(V)	氮肥水平 Nitrogen(N)	代别×品种 G×V	代别×氮肥水平 G×N	品种×氮肥水平 V×N	代别×品种 ×氮肥水平 G×V×N
若虫历期 Nymph duration							
BPH	$P<0.001$	0.545	$P<0.001$	0.373	$P<0.001$	0.803	0.952
WBPH	$P<0.001$	0.552	$P<0.001$	0.525	$P<0.001$	0.995	0.652
雌成虫体质量 Weight of female adult							
BPH	0.012	0.055	$P<0.001$	0.387	$P<0.001$	0.244	0.997
WBPH	$P<0.001$	0.053	$P<0.001$	0.024	$P<0.001$	0.001	0.108
若虫存活率 Nymph survival rate							
BPH	0.666	0.106	$P<0.001$	0.960	0.936	0.528	0.992
WBPH	$P<0.001$	0.240	$P<0.001$	0.764	$P<0.001$	0.318	0.396
产卵量 Female fecundity							
BPH	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	$P<0.001$	0.254
WBPH	$P<0.001$	0.393	$P<0.001$	0.949	$P<0.001$	0.148	0.548
卵孵化率 Egg hatchability							
BPH	0.513	0.468	$P<0.001$	0.449	0.787	0.455	0.974
WBPH	0.068	0.941	$P<0.001$	0.026	$P<0.001$	0.811	0.680

换苗。连续饲养 4 代。

1.2 试验方法

1.2.1 取食不同氮肥水平转 Bt 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱生长发育和存活率的影响

在室内条件下用转 Bt 基因水稻 T2A-1 和 T1C-19 对褐飞虱和白背飞虱进行连续多代的饲养,以明恢 63 作为对照,记录其生长发育情况。将产卵笼内的产卵苗用聚乙烯薄膜笼罩(直径 10 cm,高 50 cm;下同)套住,待卵孵化,选取 12 h 内孵化的若虫备用。取 60 日龄的不同水稻品种稻苗(不同氮肥水平),除去次生分蘖和外叶鞘,剪去无活力的根须,在自来水中漂洗后分别放入注有相应浓度氮肥溶液的试管(直径 1.5 cm,高 15.0 cm)中,待水稻根系恢复后,接入飞虱初孵若虫,脱脂棉封口。每个试管接入 10 头初孵若虫,每个品种和浓度均重复 10 次。每日观察若虫的生长发育和存活情况并及时更换同日龄的新鲜稻苗,直至羽化,记录其羽化时间和数量,计算若虫存活率。试验在(26±1)℃和 12h 光照/12h 黑暗光周期的人工气候室内进行。试验连续开展 4 代。

1.2.2 取食不同氮肥水平转 Bt 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱繁殖和寿命的影响

上述试验中褐飞虱或白背飞虱羽化后,取 12 h 内羽化的雌成虫,在电子天平(精度为 0.01 mg)上称量其体质量。准备试验稻株和试管(同 1.2.1)。每管中分别接入 1 对初羽化成虫,然后置于(26±

1)℃和 12h 光照/12h 黑暗光周期的人工气候室内交配、产卵。每品种重复 10 次。每日观察产卵和若虫孵化情况,当有若虫孵化后每天考查孵出若虫数,并去除,直至连续 5 d 没有若虫孵出为止。同时记录飞虱雌成虫的死亡时间。在解剖镜下解剖稻株,考查并记录未孵化的卵量。根据孵化若虫数、未孵化卵量,计算卵孵化率。将孵化出的若虫(<12 h)用与第 1 代相同的方法继续饲养至第 4 代,观测和统计每代褐飞虱和白背飞虱雌成虫的体质量、产卵量、卵孵化率和寿命。

1.3 数据分析

试验所有数据采用 SPSS 18.0 软件进行双因素方差分析并采用 Tukey 测验法进行多重比较。百分率数据先进行反正弦平方根转换后再作方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥水平下转 Bt 基因水稻对四代褐飞虱和白背飞虱若虫存活率的影响

方差分析结果显示,代别、品种、代别与品种互作、代别与氮肥水平互作、品种与氮肥水平互作、代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱若虫存活率没有显著影响。氮肥水平($P<0.001$)对褐飞虱若虫存活率具有极显著影响(表 1 和表 2)。随着氮肥水平的提高,褐飞虱的若虫存活率显著增加;各品种同一氮肥水平不同代别之间若虫存活率无显著差异;转

表 2 不同施氮水平下转 *Bt* 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱若虫存活率的影响

Table 2. Nymphal survival rate of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on Bt rice and Minghui 63 at various nitrogen levels.

代别 Generation	品种 Variety	褐飞虱若虫存活率 Nymphal survival rate of BPH/%			白背飞虱若虫存活率 Nymphal survival rate of WBPH/%		
		Nymphal survival rate of BPH/%			Nymphal survival rate of WBPH/%		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	66.9±2.3 abB	80.8±2.6 aA	83.3±2.2 aA	81.3±1.7 aB	86.2±2.2 aA	89.0±2.8 aA
	T2A-1	70.0±1.3 aB	83.1±2.8 aA	85.0±3.0 aA	78.1±2.1 aB	87.9±3.1 aA	87.6±1.8 aA
	T1C-19	62.5±2.1 bB	81.5±2.1 aA	84.2±2.3 aA	79.5±1.5 aB	85.8±1.7 aA	89.1±2.9 aA
F ₂	MH63	67.5±3.6 aB	80.0±1.8 bA	81.8±3.0 aA	76.0±3.1 aB	87.3±1.2 aA	87.8±3.8 aA
	T2A-1	66.7±3.7 aB	88.1±2.4 aA	81.8±3.0 aA	75.7±3.2 aB	86.4±3.7 aA	90.1±1.7 aA
	T1C-19	63.6±3.5 aB	82.7±2.9 bA	80.8±2.8 aA	73.6±2.9 aB	87.5±1.7 aA	86.5±2.2 aA
F ₃	MH63	72.1±2.5 aB	85.0±2.7 aA	80.7±2.6 aA	70.9±2.3 aB	84.6±1.6 aA	86.6±2.4 aA
	T2A-1	70.7±1.7 aB	82.9±1.6 aA	82.3±4.5 aA	69.2±2.1 aB	86.7±1.7 aA	90.6±1.7 aA
	T1C-19	70.0±2.0 aB	84.3±4.6 aA	81.4±2.4 aA	66.1±2.7 aB	83.4±2.7 aA	88.6±2.2 aA
F ₄	MH63	70.8±2.2 aB	82.4±2.6 aA	81.8±2.8 aA	63.1±3.1 aB	87.1±1.3 aA	90.5±1.8 aA
	T2A-1	72.9±1.8 aB	83.3±2.2 aA	86.0±3.4 aA	60.1±3.0 aB	90.1±2.7 aA	88.2±1.7 aA
	T1C-19	66.9±4.6 aB	82.9±3.7 aA	84.1±4.1 aA	61.2±2.8 aB	85.2±1.7 aA	91.2±2.2 aA

N₁、N₂和 N₃表示施氮水平分别为 0 kg/hm²、100 kg/hm²和 250 kg/hm²。MH63—明恢 63；表中数据为平均值±标准误。不同小写字母代表品种之间差异显著；不同大写字母代表氮肥水平之间差异显著(*P*<0.05)。下同。

N₁, N₂ and N₃ refer to nitrogen application levels of 0 kg/hm², 100 kg/hm² and 250 kg/hm². MH63, Minghui 63. Figures in the table are means±SE. Different lowercase letters mean significant difference among varieties and different uppercase letters mean significant difference among nitrogen levels at 0.05 level. The same as below.

表 3 不同施氮水平下转 *Bt* 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱若虫历期的影响

Table 3. Nymph duration of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on Bt rice and Minghui 63 at various nitrogen levels for four generations.

代别 Generation	品种 Variety	褐飞虱若虫历期 Nymph duration of BPH/d			白背飞虱若虫历期 Nymph duration of WBPH/d		
		Nymph duration of BPH/d			Nymph duration of WBPH/d		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	13.9±0.1 aA	11.7±0.1 aB	11.5±0.1 aB	13.3±0.1 aA	12.6±0.1 aB	12.4±0.1 aC
	T2A-1	14.0±0.1 aA	11.7±0.1 aB	11.4±0.1 aC	13.4±0.2 aA	12.4±0.1 aB	12.2±0.1 aB
	T1C-19	14.0±0.1 aA	11.6±0.1 aB	11.5±0.1 aB	13.3±0.1 aA	12.6±0.2 aB	12.4±0.1 aC
F ₂	MH63	13.4±0.1 aA	12.1±0.1 aB	11.9±0.1 aB	13.5±0.1 aA	12.1±0.2 aB	11.8±0.1 aB
	T2A-1	13.3±0.1 aA	12.1±0.1 aB	12.0±0.1 aB	13.5±0.1 aA	12.2±0.1 aB	12.0±0.1 aB
	T1C-19	13.7±0.2 aA	12.2±0.0 aB	12.1±0.1 aB	13.6±0.2 aA	12.2±0.2 aB	11.9±0.1 aB
F ₃	MH63	14.4±0.1 aA	11.3±0.1 aB	11.2±0.1 aB	14.0±0.1 aA	11.7±0.2 aB	11.4±0.1 aC
	T2A-1	14.4±0.1 aA	11.5±0.1 aB	11.3±0.1 aB	14.1±0.2 aA	11.8±0.1 aB	11.6±0.1 aC
	T1C-19	14.4±0.1 aA	11.3±0.1 aB	11.3±0.1 aB	14.2±0.1 aA	11.7±0.1 aB	11.4±0.1 aC
F ₄	MH63	14.5±0.1 aA	11.3±0.1 aB	11.2±0.1 aB	14.7±0.1 aA	11.4±0.2 aB	11.0±0.1 aC
	T2A-1	14.4±0.1 aA	11.2±0.1 aB	11.1±0.2 aB	14.6±0.1 aA	11.5±0.1 aB	11.1±0.2 aC
	T1C-19	14.4±0.1 aA	11.3±0.2 aB	11.2±0.2 aB	14.5±0.1 aA	11.3±0.1 aB	11.0±0.1 aC

Bt 基因水稻与对照相比对褐飞虱若虫存活率没有显著影响。

水稻品种、代别与品种互作、品种与氮肥水平互作、代别与品种与氮肥水平互作对 4 代白背飞虱的若虫存活率无显著影响；代别(*P*<0.001)、氮肥水平(*P*<0.001)、代别和氮肥水平互作(*P*<0.001)对 4 代白背飞虱的若虫存活率有极显著影响(表 1 和表 2)。随着氮肥水平的提高,白背飞虱的若虫存活

率显著增加。在不施氮肥稻株上取食的白背飞虱,随着取食代数的增加,其若虫存活率显著降低;在高氮水平下白背飞虱的若虫存活率变化不显著。与对照相比,转 *Bt* 基因水稻对 4 代白背飞虱的若虫存活率无显著影响。

2.2 不同氮肥水平下转 *Bt* 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱若虫历期的影响

水稻品种、品种与代别互作、品种与氮肥水平互

表 4 取食不同施氮水平转 *Bt* 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱雌虫体质量的影响

Table 4. Female adult weight of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on Bt rice and Minghui 63 at three nitrogen levels for four generations.

代别	品种	褐飞虱雌成虫体质量			白背飞虱雌成虫体质量		
		Female adult weight of BPH/mg			Female adult weight of WBPH/mg		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	1.74±0.31 aC	2.28±0.02 aB	2.44±0.03 aA	1.21±0.01 aC	1.56±0.02 aB	1.86±0.02 aA
	T2A-1	1.80±0.16 aC	2.32±0.03 aB	2.51±0.02 aA	1.19±0.01 aC	1.55±0.01 aB	1.86±0.02 aA
	T1C-19	1.74±0.21 aB	2.31±0.02 aA	2.47±0.02 aA	1.20±0.01 aC	1.57±0.02 aB	1.89±0.02 aA
F ₂	MH63	1.69±0.02 aC	2.31±0.02 aB	2.53±0.03 aA	1.16±0.01 aC	1.60±0.02 aB	2.12±0.03 aA
	T2A-1	1.66±0.03 aC	2.31±0.03 aB	2.55±0.03 aA	1.17±0.01 aC	1.62±0.01 aB	2.26±0.03 aA
	T1C-19	1.63±0.02 aB	2.31±0.01 aA	2.52±0.02 aA	1.13±0.01 aC	1.59±0.02 aB	2.24±0.03 aA
F ₃	MH63	1.61±0.01 aC	2.26±0.06 aB	2.60±0.01 aA	1.16±0.01 aC	1.62±0.02 aB	2.25±0.01 aA
	T2A-1	1.59±0.32 aB	2.24±0.02 aA	2.61±0.01 aA	1.15±0.01 aC	1.64±0.02 aB	2.27±0.01 aA
	T1C-19	1.53±0.33 aC	2.25±0.04 aB	2.57±0.02 aA	1.12±0.02 aC	1.65±0.03 aB	2.26±0.02 aA
F ₄	MH63	1.56±0.03 aC	2.27±0.02 aB	2.66±0.02 aA	1.13±0.01 aC	1.70±0.02 aB	2.26±0.01 aA
	T2A-1	1.56±0.26 aC	2.24±0.03 aB	2.72±0.03 aA	1.08±0.01 aC	1.68±0.01 aB	2.29±0.01 aA
	T1C-19	1.54±0.16 aC	2.23±0.02 aB	2.77±0.02 aA	1.11±0.02 aC	1.71±0.02 aB	2.28±0.03 aA

作以及代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱若虫历期没有显著影响,代别($P<0.001$)、氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对褐飞虱若虫历期具有极显著的影响(表 1 和表 3)。随着取食稻株氮肥水平的升高,褐飞虱若虫历期随之缩短。在同一氮肥水平下,Bt 水稻对各代的褐飞虱若虫历期均无显著影响。

代别($P<0.001$)、氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对 4 代白背飞虱的若虫历期具有极显著影响。水稻品种、代别与品种互作、品种与氮肥水平互作以及代别与品种与氮肥水平互作对 4 代白背飞虱的若虫历期无显著影响(表 1 和表 3)。在不施氮肥稻株上取食的白背飞虱随着取食代别的增加,其若虫历期显著增加;在施氮稻株上取食的白背飞虱,随着取食代数的增加,其若虫历期显著缩短。施氮稻株上取食的白背飞虱的若虫历期显著短于在不施氮肥稻株上取食的白背飞虱。随着氮肥水平的升高,若虫历期逐渐缩短。与对照相比,转 *Bt* 基因水稻对 4 代白背飞虱的若虫历期无显著影响。

2.3 不同氮肥水平下转 *Bt* 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱雌成虫体质量的影响

水稻品种、代别与水稻品种互作、水稻品种与氮肥水平互作以及代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱雌虫体质量没有显著影响;代别($P=0.012$)对褐飞虱雌成虫体质量有显著影响;氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对褐飞虱

雌虫体质量具有极显著的影响(表 1 和表 4)。随着取食稻株氮肥水平的升高,褐飞虱雌虫体质量也随之增加。在不施氮肥稻株上取食时,随着取食代别的增加,褐飞虱雌成虫体质量显著减小,在施氮肥稻株上取食的褐飞虱的雌成虫体质量随着取食代别的增加显著增加。在任一氮肥水平条件下,两种转 *Bt* 基因水稻品种与对照相比对褐飞虱雌成虫体质量无显著影响。

水稻品种、代别与品种与氮肥水平互作对白背飞虱雌虫体质量没有显著影响;代别与品种互作($P=0.024$)、品种与氮肥水平互作($P=0.002$)对白背飞虱雌成虫体质量有显著影响;代别($P<0.001$)、氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对白背飞虱雌虫体质量具有极显著的影响(表 1 和表 4)。随着取食稻株氮肥水平的升高,白背飞虱雌虫体质量也随之升高。在不施氮肥稻株上取食时,随着取食代别的增加,白背飞虱雌成虫体质量显著下降,在施氮稻株上取食的白背飞虱的雌成虫体质量随着取食代别的增加显著增加。两种转 *Bt* 基因水稻品种与对照相比对白背飞虱雌成虫体质量无显著影响。

2.4 取食不同氮肥水平转 *Bt* 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱雌成虫寿命的影响

代别、水稻品种、代别与氮肥水平互作、代别与品种互作、品种与氮肥水平互作、代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱雌成虫寿命没有显著影响。氮肥水平($P<0.001$)对褐飞虱雌成虫寿命具有极显著

表 5 取食不同施氮水平转 *Bt* 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱雌成虫寿命的影响

Table 5. Adult longevity of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on *Bt* rice and Minghui 63 at three nitrogen levels for 4 generations.

代别 Generation	品种 Variety	褐飞虱雌成虫寿命 Adult longevity of BPH/d			白背飞虱雌成虫寿命 Adult longevity of WBPH/d		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	8.2±0.5 aB	14.2±0.8 aA	15.6±0.7 aA	8.8±0.4 aC	11.7±0.5 aB	14.5±0.5 aA
	T2A-1	7.7±0.5 aC	13.5±0.6 aB	15.8±0.6 aA	8.3±0.5 aC	12.2±0.5 aB	14.7±0.6 aA
	T1C-19	7.5±0.5 aB	13.6±0.5 aA	15.1±0.5 aA	8.5±0.5 aC	11.6±0.6 aB	14.8±0.4 aA
F ₂	MH63	8.3±0.5 aC	14.4±0.5 aB	16.1±0.4 aA	8.0±0.5 aC	12.7±0.3 aB	15.6±0.5 aA
	T2A-1	7.1±0.3 aC	14.1±0.5 aB	15.8±0.6 aA	7.9±0.4 aC	12.4±0.5 aB	15.2±0.5 aA
	T1C-19	7.3±0.5 aB	14.0±0.4 aA	15.9±0.5 aA	7.7±0.6 aC	12.3±0.5 aB	15.1±0.6 aA
F ₃	MH63	8.1±0.3 aC	14.0±0.6 aB	16.3±0.4 aA	7.3±0.4 aC	13.2±0.6 aB	16.1±0.4 aA
	T2A-1	7.3±0.3 aC	13.5±0.6 aB	15.9±0.5 aA	7.0±0.3 aC	12.9±0.5 aB	16.3±0.4 aA
	T1C-19	7.4±0.4 aC	13.8±0.5 aB	16.1±0.3 aA	6.9±0.4 aC	12.8±0.4 aB	15.9±0.3 aA
F ₄	MH63	7.6±0.5 aC	14.1±0.4 aB	16.9±0.6 aA	6.9±0.4 aC	13.5±0.4 aB	16.4±0.4 aA
	T2A-1	7.2±0.4 aC	14.8±0.5 aB	16.7±0.5 aA	6.5±0.3 aC	13.2±0.3 aB	16.7±0.3 aA
	T1C-19	6.8±0.4 aC	14.3±0.4 aB	16.5±0.5 aA	6.6±0.3 aC	14.1±0.5 aB	16.9±0.3 aA

表 6 取食不同施氮水平转 *Bt* 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱产卵量的影响

Table 6. Number of eggs laid by *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on *Bt* rice and Minghui 63 at three nitrogen levels for four generations.

代别 Generation	品种 Variety	褐飞虱产卵量 Number of eggs laid per female (BPH)			白背飞虱产卵量 Number of eggs laid per female (WBPH)		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	63.6±5.6 aC	247.0±24.1 aB	414.3±16.2 aA	75.6±3.8 aC	97.0±11.4 aB	120.4±4.7 aA
	T2A-1	60.1±4.4 aC	199.6±12.1 abB	404.7±11.4 aA	72.5±2.5 aC	98.6±6.1 aB	118.2±5.4 aA
	T1C-19	52.5±5.0 aC	153.5±13.3 bB	293.8±15.7 bA	74.4±2.3 aC	100.5±9.8 aB	123.4±4.0 aA
F ₂	MH63	74.4±3.8 aC	263.0±14.4 aB	439.6±15.3 aA	68.4±3.6 aC	110.1±2.7 aB	130.5±4.1 aA
	T2A-1	70.2±4.6 aC	252.1±12.8 abB	427.1±11.4 aA	70.4±4.1 aC	108.9±4.1 aB	135.8±3.9 aA
	T1C-19	64.3±5.3 aC	214.1±12.1 bB	346.6±11.4 bA	67.5±3.7 aC	112.5±3.6 aB	127.9±2.8 aA
F ₃	MH63	59.7±4.9 aC	280.4±8.3 aB	424.9±14.8 abA	62.4±2.1 aC	119.7±3.3 aB	138.7±3.9 aA
	T2A-1	67.5±6.9 aC	280.3±11.7 aB	431.0±10.2 aA	65.8±3.1 aC	124.8±2.9 aB	141.1±3.3 aA
	T1C-19	68.1±6.6 aC	236.6±14.9 bB	390.6±5.5 bB	59.4±2.6 aC	122.5±3.7 aB	144.6±3.1 aA
F ₄	MH63	64.7±6.2 aC	300.4±7.2 aB	449.7±21.3 aA	53.7±2.4 aC	133.1±3.7 aB	150.9±2.5 aA
	T2A-1	67.2±5.0 aC	305.4±12.9 aB	443.7±15.7 aA	50.9±3.1 aC	129.3±3.1 aB	156.5±2.8 aA
	T1C-19	70.9±6.1 aC	278.4±13.0 aB	424.3±10.9 aA	55.1±3.9 aC	137.1±2.8 aB	151.4±2.4 aA

影响(表 1 和表 5)。取食施氮稻株的褐飞虱成虫寿命明显高于取食不施氮稻株的褐飞虱。在相同氮肥水平和相同代别下,转 *Bt* 基因水稻品种对褐飞虱的成虫寿命没有显著影响。

水稻品种、代别与品种互作、水稻品种与氮肥水平互作、水稻品种与氮肥水平与代别互作对白背飞虱寿命无显著影响;代别($P=0.024$)对白背飞虱的寿命有显著影响;氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对 4 代白背飞虱的寿命具有极显著影响(表 1 和表 5)。氮肥的施用使饲养的白背飞虱寿命显著延长,随着代别的增加,寿命显著

增加。在不施氮稻株上取食的白背飞虱随着代别的增加寿命显著缩短。转 *Bt* 基因水稻品种对白背飞虱的寿命无显著影响。

2.5 取食不同氮肥水平转 *Bt* 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱产卵量的影响

代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱产卵量没有显著的影响,代别($P<0.001$)、品种($P<0.001$)、浓度($P<0.001$)、代别与品种互作($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)、品种与浓度互作($P<0.001$)对褐飞虱产卵量具有极显著影响(表 1 和表 6)。取食施氮稻株的褐飞虱的产卵量明显高于

表 7 取食不同施氮水平转 Bt 基因水稻和对照明恢 63 稻株对 4 代褐飞虱和白背飞虱卵孵化率的影响

Table 7. Egg hatchability of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* reared on Bt rice and Minghui 63 at three nitrogen levels for four generations.

代别 Generation	品种 Variety	褐飞虱卵孵化率 Egg hatchability of BPH/%			白背飞虱卵孵化率 Egg hatchability of WBPH/%		
		N ₁	N ₂	N ₃	N ₁	N ₂	N ₃
F ₁	MH63	90.1±1.1 aB	92.3±1.2 aAB	93.5±0.4 aA	75.3±1.9 aB	85.7±1.3 aA	89.4±1.4 aA
	T2A-1	88.1±1.5 aB	90.8±1.6 aAB	92.2±0.8 aA	77.8±2.2 aB	87.5±3.4 aA	91.5±2.1 aA
	T1C-19	87.7±1.9 aB	92.1±1.2 aA	92.3±0.8 aA	76.4±2.0 aB	86.3±1.4 aA	88.9±1.3 aA
F ₂	MH63	86.6±1.2 aB	91.3±1.3 aA	92.9±0.9 aA	73.3±2.4 aB	89.3±1.7 aA	90.9±2.3 aA
	T2A-1	89.7±1.5 aA	92.3±1.1 aA	92.7±0.9 aA	75.7±1.9 aB	88.2±1.1 aA	89.4±1.3 aA
	T1C-19	87.7±1.5 aA	90.9±1.4 aA	92.6±1.0 aA	74.0±2.7 aB	86.2±3.4 aA	87.7±3.7 aA
F ₃	MH63	87.1±1.8 aB	91.8±1.4 aA	91.9±0.6 aA	66.1±2.5 aB	87.3±1.2 aA	91.6±1.3 aA
	T2A-1	88.1±1.1 aB	91.3±1.2 aA	92.2±1.0 aA	70.3±1.9 aB	90.3±2.8 aA	90.3±1.9 aA
	T1C-19	84.5±1.4 aB	91.8±1.0 aA	93.3±0.7 aA	67.7±3.3 aB	90.8±2.1 aA	92.1±2.7 aA
F ₄	MH63	86.6±1.8 aB	91.5±1.2 aA	92.8±1.0 aA	64.4±2.9 aB	90.1±1.2 aA	90.9±2.4 aA
	T2A-1	90.3±1.2 aA	92.1±1.2 aA	93.4±1.4 aA	59.4±2.3 aB	89.3±1.3 aA	89.4±3.3 aA
	T1C-19	86.4±1.8 aB	91.8±0.7 aA	93.2±1.0 aA	61.5±3.0 aB	91.5±2.1 aA	93.1±2.9 aA

取食不施氮稻株的褐飞虱,随着施氮量的增加,褐飞虱的产卵量增加;在 100 kg/hm² 和 250 kg/hm² 施氮水平下取食转基因水稻 T1C-19 的褐飞虱在第 1 代至第 3 代的每雌产卵量(153.5、214.1、236.6 粒/雌,293.8、346.6、390.6 粒/雌)均显著低于另一转基因品种 T2A-1(199.6、252.1、280.3 粒/雌,404.7、427.1、431 粒/雌)以及对照明恢 63(247、263、280.4 粒/雌,414.3、439.6、424.9 粒/雌),但在褐飞虱取食的第 4 代,在各品种上的产卵量无显著差异。

水稻品种、代别与水稻品种互作、水稻品种与氮肥水平互作、水稻品种与氮肥水平与代别互作对 4 代白背飞虱的产卵量无显著影响。代别($P<0.001$)、氮肥水平($P<0.001$)、代别与氮肥水平互作($P<0.001$)对白背飞虱的产卵量有极显著影响(表 1 和表 6)。取食氮肥水平为 250 kg/hm² 稻株的白背飞虱产卵量最高,取食不施氮稻株的白背飞虱产卵量最低。

在不施氮稻株上取食的白背飞虱的产卵量随着取食代别的增加显著减少,在施氮稻株上取食的白背飞虱的产卵量随着取食代别的增加而逐渐增加。与对照相比,供试的两种转 Bt 基因水稻对白背飞虱各代的产卵量没有显著地影响。

2.6 取食不同氮肥水平转 Bt 基因水稻对 4 代褐飞虱和白背飞虱卵孵化率的影响

代别、水稻品种、代别与品种互作、代别与氮肥水平互作、品种与氮肥水平互作、代别与品种与氮肥水平互作对褐飞虱卵孵化率没有显著影响。氮肥水

平对褐飞虱卵孵化率具有极显著影响($P<0.001$) (表 1 和表 7)。取食不施氮肥稻株的褐飞虱的卵孵化率显著低于取食含氮稻株褐飞虱的卵孵化率;转 Bt 基因水稻与对照相比对褐飞虱卵孵化率没有显著影响。

氮肥水平($P<0.001$)、氮肥水平和代别互作($P<0.001$)对白背飞虱卵孵化率具有极显著影响。代别、水稻品种、代别和水稻品种互作、水稻品种和氮肥水平互作以及代别与品种与氮肥水平互作对四代白背飞虱的卵孵化率无显著影响(表 1 和表 7)。在施氮稻株上取食的白背飞虱卵孵化率显著高于在不施氮稻株上取食的白背飞虱。在不施氮稻株上取食的白背飞虱的卵孵化率随着取食代别的增加显著降低,但在施氮稻株上的变化不显著。水稻品种对白背飞虱的卵孵化率无显著影响。

3 讨论

植食性昆虫的生长和发育与植株营养物质的变化密切相关。不同施氮水平能导致水稻植株内氨基酸的含量的不同。氨基酸含量的变化对取食韧皮部的植食性昆虫影响较大^[29]。稻飞虱通过刺吸植株汁液和产卵等对稻株产生危害,因此,水稻植株营养物质的改变可以直接影响它的生长发育和繁殖,进而可能影响天敌的种群变化,甚至影响稻田害虫的群落结构。氮肥中的氮元素是水稻合成氨基酸以及进行光合作用所需叶绿素的重要原料,同时氮肥的施用能增加水稻稻株的株高、分蘖数及叶面积等,并

且提高稻谷产量^[6]。但是过量的氮肥施用不仅不会被水稻吸收而增产,反而会引起水稻的减产,而且过量的氮肥会对生态环境造成的污染^[30]。同时过量施氮会使稻株的相对含水量降低,增加体内游离氨基酸和可溶性糖的浓度,减少体内有效防御化学物质的数量和质量^[29],从而改善了昆虫的营养条件^[31],降低了植株对昆虫的抗性^[32],而且动植物体内含氮量的巨大差异提高了昆虫对高氮稻株的搜索和取食能力^[33]。更严重的是,氮肥的过量使用能够降低天敌对害虫的自然控制能力^[7,34]。由此可知,过量施氮对稻株和昆虫的双重影响可导致害虫的大暴发。本研究结果表明,随着氮肥施用水平的增加,氮肥的施用对褐飞虱和白背飞虱的生长发育和繁殖有显著的促进作用,高氮肥水平更有利于其生长发育和繁殖。随着取食代数的增加,过量氮肥的施用对褐飞虱和白背飞虱的体质量和产卵量的影响具有一定的累积效应。此结果与 Lu 等^[35]报道的高氮植株上褐飞虱若虫存活率高、生殖力强以及对褐飞虱种群生态适应性有一定的累积效应的结果相同。

目前为止,转 *Bt* 基因水稻对非靶标节肢动物的连续影响的探究基本都局限在室外连续多年的田间调查。田间调查研究主要有转 *Bt* 基因水稻对褐飞虱若虫、成虫和成若虫总密度^[36]的影响,对飞虱和叶蝉的种类组成和种群密度^[37]以及飞虱和叶蝉及其卵寄生蜂扩散规律^[38]的影响,对飞虱捕食性天敌黑肩绿盲蝽 (*Cyrtorrhinus livdipennis*) 种群密度^[39]、食虫沟瘤蛛 (*Ummeliata insecticeps*)、拟环纹豹蛛 (*Pardosa pseudoannulata*)、草间钻头蛛 (*Hylyphantes graminicola*)、棕绯蛛 (*Phlegra fuscipes*)^[40]以及拟水狼蛛 (*Pirata subpiraticus*)、八斑球腹蛛 (*Theridium octomaculatum*)^[41]的丰富度、种群密度和种群动态的影响。刘志诚等^[42-43]对整个转基因稻田节肢动物的宏观评价显示,转 *Bt* 水稻对整个节肢动物群落没有明显的负面影响。本研究通过室内 4 代褐飞虱和白背飞虱的饲养,模拟田间发生情况,发现与对照明恢 63 和 T2A-1 相比,转 *Bt* 基因水稻与对照明恢 63 相比对白背飞虱的生态适应性无显著影响,与刘凯等^[44]的转 *cry1C* 和 *cry2A* 基因 *Bt* 水稻对 4 代白背飞虱的生长发育及繁殖没有显著影响的结果相同。转 *Bt* 基因水稻 T1C-19 对褐飞虱的产卵量有一定的影响,但当褐飞虱取食到第 4 代时各品种之间无显著差异。但与陈洋等^[36]的连续 4 代取食转 *Bt* 基因水稻的褐飞虱与

取食非转 *Bt* 基因水稻的褐飞虱相比,成虫寿命和产卵量都没有显著差异的结果不同。原因可能是相同的外源基因导入相同的受体水稻得到的不同株系对非靶标生物有不同的影响^[45]。由此可见,评价转 *Bt* 基因水稻对其非靶标生物的影响时,应遵循 Timmons 等^[46]提出的评价转基因作物的环境安全性个案原则,逐一评估和分析,不能轻易下结论。

综上所述,氮肥的施用对转 *Bt* 基因水稻和非转 *Bt* 基因水稻的影响一致,相同氮肥水平下转 *Bt* 基因水稻对非靶标褐飞虱和白背飞虱的生长发育和繁殖没有显著影响。探究转 *Bt* 基因水稻对非靶标生物的影响对转 *Bt* 基因水稻的发展具有重要意义,除了研究转 *Bt* 基因水稻对飞虱连续多代的影响以外,其对飞虱以及自然天敌各方面连续多代的影响的评价也非常有必要。

参考文献:

- [1] 程家安, 祝增荣. 2005 年长江流域稻区褐飞虱暴发成灾原因分析. 植物保护, 2006, 32: 1-4.
- [2] Chen J A, Zhu Z R. Analysis on the key factors causing the outbreak of brown planthopper in Yangtze Area, China in 2005. *Plant Prot*, 2006, 32: 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [2] 林拥军, 华红霞, 何予卿, 等. 水稻褐飞虱综合治理研究与示范——农业公益性行业专项“水稻褐飞虱综合防控技术研究”进展. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1194-1201.
- [2] Lin Y J, Hua H X, He Y Q, et al. Progress in research on the integrated management of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) in China. *Chin J Appl Entomol*, 2011, 48(5): 1194-1201. (in Chinese with English abstract)
- [3] Gallagher K D, Kenmore P E, Sogawa K. Judicial use of insecticides deter planthopper outbreaks and extend the role of resistant varieties in Southeast Asian rice//Denno R F, Perfect T J. *Plant hoppers: Their Ecology and Management*. London: Chapman Hall, 1994: 559-614.
- [4] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 等. 氮肥对水稻叶冠层捕食性天敌种群及其自然控制能力的影响. 植物保护学报, 2006, 33(3): 225-229.
- [4] Lu Z X, Yu X P, Heong K L, et al. Dynamics of predators in rice canopy and capacity of natural control on insect pests in paddy fields with different nitrogen regimes. *Acta Phytophyl Sin*, 2006, 33(3): 225-229. (in Chinese with English abstract)
- [5] Sogawa K. Windborn displacements of rice planthoppers related to the seasonal weather patterns in Kyushu district. *Bull Kyushu Nat Agri Exper Stat*, 1995, 28(4): 219-278.
- [6] Conway G R, Barbier E B. *After the Green Revolution: Sustainable Agriculture for Development*. London: Earthscan

- Publications Ltd, 1990.
- [7] Sinclair T R. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Sci*, 1998, 38:638-643.
- [8] 邓伟, 胡兰香, 陈红萍, 等. 水稻抗白背飞虱研究进展. 江西农业学报, 2012, 24(1): 91-97.
- Deng W, Hu L X, Chen H P, et al. Research progress in resistance of rice to *Sogatella furcifera*. *Acta Agric Jiangxi*, 2012, 24(1): 91-97. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhou G H, Wen J J, Cai D J, et al. Southern rice black-streak dwarf virus: A new proposed Fijivirus species in the family Reoviridae. *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 3677-3685.
- [10] Li Y Z, Cao Y, Zhou Q, et al. The efficiency of southern rice black-streaked dwarf virus transmission by the vector *Sogatella furcifera* to different host plant species. *J Integ Agric*, 2012, 11:621-627.
- [11] Tu J, Zhang G, Datta K, et al. Field performance of transgenic elite commercial hybrid rice expressing *Bacillus thuringiensis* δ -endotoxin. *Nat Biotechnol*, 2000, 18(10):1101-1104.
- [12] Datta K, Vasquez A, Tu J, et al. Constitutive and tissue-specific differential expression of the *cryIA* (*b*) gene in transgenic rice plants conferring resistance to rice insect pests. *Theoret Appl Genet*, 1998, 97: 20-30.
- [13] Shu Q Y, Ye G Y, Cui H R, et al. Transgenic rice plants with a synthetic *cry1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* were highly resistant to eight lepidopteran rice pest species. *Mol Breeding*, 2000, 6 (4): 433-439.
- [14] Ye G Y, Shu Q Y, Yao H W, et al. Field resistance evaluation of transgenic containing a synthetic *cry 1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* Berliner to two stem borers. *J Econom Entomol*, 2001, 94(1): 271-276.
- [15] Ye G Y, Tu J, Hu C, et al. Transgenic IR72 with fused Bt gene *cry 1Ab/ cry 1Ac* from *Bacillus thuringiensis* is resistant against four lepidopteran species under field conditions. *Plant Biotechnol*, 2001, 18 (2): 125-133.
- [16] Ye G Y, Yao H W, Shu Q R, et al. High levels of stable resistance in transgenic rice with a synthetic *cry 1Ab* gene from *Bacillus thuringiensis* Berliner to rice leafhopper, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) under field conditions. *Crop Prot*, 2003, 22(1):171-178.
- [17] Qiu J. Agriculture: Is China ready for GM rice? *Nature* (Lond.), 2008, 455(7215): 850-852.
- [18] Akhtar Z R, Tian J C, Chen M, et al. Impacts of six Bt rice lines on nontarget rice feeding thrips under laboratory and field conditions. *Environ Entomol*, 2010, 39(2): 715-726.
- [19] 傅强, 王锋, 李冬虎, 等. 转基因抗虫水稻 MSA 和 MSB 对非靶标害虫褐飞虱和白背飞虱的影响. 昆虫学报, 2003, 46(6): 697-704.
- Fu Q, Wang F, Li D H, et al. Effects of insect-resistant transgenic rice lines MSA and MSB on non-target pests *Nilaparvata lugens* and *Sogatella fucifera*. *Acta Entomol Sin*, 2003, 46(6):697-704. (in Chinese with English abstract)
- [20] 谭红, 叶恭银, 胡萃, 等. 转 *cry1Ab* 基因抗虫水稻对非靶标害虫白背飞虱发育与繁殖的影响. 植物保护学报, 2006, 33(3): 251-256.
- Tan H, Ye G Y, Hu C, et al. Effects of transgenic indica rice expressing a gene of *cry1Ab* with insect resistance on the development and reproduction of nontarget pest, *Sogatella furcifera* (Homoptera: Delphacidae). *Acta Phytophyl Sin*, 2006, 33(3): 251-256. (in Chinese with English abstract)
- [21] Gao M Q, Hou S P, Chen X X, et al. Multi-generation effects of Bt rice on *Anagrus nilaparvatae*, a parasitoid of the nontarget pest *Nilaparvata lugens*. *Economic Entomol*, 2010, 39 (6): 2039-2044.
- [22] 姜永厚, 傅强, 程家安, 等. 转 Bt 基因水稻对二化螟绒茧蜂生物学特性的影响. 昆虫学报, 2004, 47(1): 124-129.
- Jiang Y H, Fu Q, Cheng J A, et al. Effects of transgenic Bt rice on the biological characteristics of *Apanteles chilonis* (Munakata) (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomol Sin*, 2004, 47(1): 124-129. (in Chinese with English abstract)
- [23] 白耀宇, 蒋明星, 程家安. 转 Bt 基因水稻对两种弹尾虫及尖钩宽尾蜂捕食作用的影响. 昆虫学报, 2005, 48(1):42-47.
- Bai Y Y, Jiang M X, Cheng J A. Impacts of transgenic *cry1Ab* rice on two collembolan species and predation of *Microvelia horvathi* (Hemiptera: Veliidae). *Acta Entomol Sin*, 2005, 48 (1): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- [24] Bai Y Y, Jing M X, Cheng J A. Effects of transgenic *cry1Ab* rice pollen on fitness of *Propylea japonica* (Thunberg). *J Pest Sci*, 2005, 78: 123-128.
- [25] Bai Y Y, Jing M X, Cheng J A, et al. Effects of *Cry1Ab* toxin on *Propylea japonica* (Thunberg) (Coleoptera: Coccinellidae) through its prey, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae), feeding on transgenic Bt rice. *Entomol Soc Amer*, 2006, 35(4):1130-1136.
- [26] 刘志诚, 叶恭银, 胡萃, 等. 转 *Cry1Ab* 基因水稻对拟水狼蛛捕食作用间接影响的评价. 中国水稻科学, 2003, 17(2): 175-178.
- Liu Z C, Ye G Y, Hu C, et al. Indirect impact assessment of transgenic rice with *cry1Ab* gene on predations by the wolf spider, *Pirata subpiraticus*. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(2): 175-178. (in Chinese with English abstract)
- [27] Tian J C, Liu Z C, Chen M, et al. Laboratory and field assessments of prey-mediated effects of transgenic Bt rice on *Ummeliata insecticeps* (Araneida: Linyphiidae). *Econom Entomol*, 2010, 39(4): 1369-1377.
- [28] Bai Y Y, Yan R H, Ke X, et al. Effects of transgenic Bt rice on growth, reproduction, and superoxide dismutase activity of *Folsomia candida* (Collembola: Isotomidae) in Laboratory studies. *J Econom Entomol*, 2011, 104(6):1892-1899.
- [29] 吕仲贤, Villareal S, 俞晓平, 等. 氮肥对稻株含水量和伤流液的影响及其与对褐飞虱为害耐性的关系. 中国水稻科学, 2004, 18(2): 161-166.
- Lu Z X, Villareal S, Yu X P, et al. Effect of nitrogen on water

- content, sap flow of rice plants in association with tolerance to brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chin J Rice Sci*, 2004, 18(2): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- [30] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2006, 32(1): 60-64.
- Feng T, Yang J P, Shi H X, et al. Effect of N fertilizer and N use efficiency under different N levels of application in high-fertility paddy field. *J Zhejiang Univ: (Agric Life Sci)*, 2006, 32(1): 60-64. (in Chinese with English abstract)
- [31] Simpson S J, Simpson C L. The mechanisms of nutritional compensation by phytophagous insects//Bernays E A. Insect-plant interactions, Vol. II. New York: CPC Press, Inc, 1990: 111-160.
- [32] Lu Z X, Heong K L, Yu X P, et al. Effects of plant nitrogen on ecological fitness of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, in rice. *J Asia-Pac Entomol*, 2004, 7(1): 97-104.
- [33] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 等. 氮肥对植食性昆虫的影响及其对水稻主要害虫种群的诱导. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 649-656.
- Lu Z X, Yu X P, Heong K L, et al. Nitrogen fertilizer affects herbivores and stimulates the populations of major insect pest of rice. *Chin J Rice Sci*, 2006, 20(6): 649-656. (in Chinese with English abstract)
- [34] 吕仲贤, 俞晓平, Heong K L, 等. 稻田氮肥施用量对黑肩绿盲蝽捕食功能的影响. 昆虫学报, 2005, 48(1): 48-56.
- Lu Z X, Yu X P, Heong K L, et al. Effects of nitrogenous fertilization in rice fields on the predatory function of *Cyrtorhinus lividipennis* reuter to *Nilaparvata lugens* Stål. *Acta Entomol Sin*, 2005, 48(1): 48-56. (in Chinese with English abstract)
- [35] Lu Z X, Yu X P, Heong K L, et al. Effects of nitrogen nutrient on the behavior of feeding and oviposition of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, on IR64. *J Zhejiang Univ: Agric Life Sci*, 2005, 31(1): 62-70.
- [36] 陈洋, 田俊策, 彭于发, 等. 转 *Cry1Ab/vip3H* 基因水稻对非靶标害虫褐飞虱连续多代生长发育与繁殖的影响. 中国生物防治学报, 2011, 27(4): 490-497.
- Chen Y, Tian J C, Peng Y F, et al. Multi-generation effects of transgenic *cry1Ab/vip3H* rice G6H1 on development and reproduction of the non-target pest, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Chin J Biol Cont*, 2011, 27(4): 490-497. (in Chinese with English abstract)
- [37] Chen M, Ye G Y, Liu Z C, et al. Field assessment of the effects of transgenic rice expressing a fused gene of *cry1Ab* and *cry1Ac* from *Bacillus thuringiensis* Berliner on nontarget planthoppers and leafhoppers populations. *Environ Entomol*, 2006, 35: 127-134.
- [38] 陈茂, 叶恭银, 胡萃, 等. Bt 水稻对飞虱和叶蝉及其卵寄生蜂扩散规律的影响. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2003, 29(1): 29-33.
- Chen M, Ye G Y, Hu C, et al. Effect of transgenic Bt rice on dispersal of planthoppers and leafhoppers as well as their egg parasitic wasps. *J Zhejiang Agric Univ (Agric Life Sci)*, 2003, 29(1): 29-33. (in Chinese with English abstract)
- [39] Chen M, Liu Z C, Ye G Y, et al. Impacts of transgenic *Cry1Ab* rice on non-target planthoppers and their main predator *Cyrtorhinus lividipennis* (Hemiptera: Miridae)-A case study of the compatibility of Bt rice with biological control. *Biol Cont*, 2007, 42: 242.
- [40] Xu X L, Han Y, Hua H X, et al. Field evaluation of effects of transgenic *cry1Ab/cry1Ac, cry1C* and *cry2A* rice on *Cnaphalocrocis medinalis* and its arthropod predators. *Sci China Life Sci*, 2011, 54: 1019-1028.
- [41] Han Y, Xu X L, Ma W H, et al. The influence of transgenic *cry1Ab/cry1Ac, cry1C* and *cry2A* rice on non-target planthoppers and their main predators under field conditions. *Agric Sci China*, 2011, 10(11): 1739-1747.
- [42] 刘志诚, 叶恭银, 胡萃, 等. 转 *cry1Ab/cry1Ac* 基因籼稻对稻田节肢动物群落影响. 昆虫学报, 2003, 46(4): 454-465.
- Liu Z C, Ye G Y, Hu C, et al. Impact of transgenic *indica* rice with a fused gene of *cry1Ab/cry1Ac* on the rice paddy arthropod community. *Acta Entomol Sin*, 2003, 46(4): 454-465. (in Chinese with English abstract)
- [43] 刘志诚, 叶恭银, 胡萃. 抗虫转基因水稻和化学杀虫剂对稻田节肢动物群落的影响. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2309-2314.
- Liu Z C, Ye G Y, Hu C. Effects of *Bacillus thuringiensis* transgenic rice and chemical insecticides on arthropod communities in paddy fields. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(12): 2309-2314. (in Chinese with English abstract)
- [44] 刘凯, 杨亚军, 吕仲贤, 等. 转 *cry1C* 和 *cry2A* 基因 Bt 水稻对白背飞虱生长、发育及繁殖的继代影响. 浙江农业学报, 2014, 26(3): 730-735.
- Liu K, Yang Y J, Lu Z X, et al. Multi-generation effect of Bt rice with *cry1C* and *cry2A* on survival, development and reproduction of non-target pest *Sogatella furcifera* (Horvath). *Acta Agric Zhejiangensis*, 2014, 26(3): 730-735. (in Chinese with English abstract)
- [45] 刘雨芳, 贺玲, 汪琼, 等. 转 *cry1Ac/sck* 基因抗虫水稻对稻田主要非靶标害虫的田间影响评价. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1181-1189.
- Liu Y F, He L, Wang Q, et al. Effects of and ecological safety insect-resistant *Cry1Ac/sck* transgenic rice on key non-target pests in paddy fields. *Sci Agric Sin*, 2007, 40(6): 1181-1189. (in Chinese with English abstract)
- [46] Timmons A M, Charters Y M, Crawford J W, et al. Risks from transgenic crops. *Nature*, 1996, 380 (6574): 487.