

杀虫剂胁迫下褐飞虱迁飞虫和本地虫后代体内粗脂肪、可溶性糖及氨基酸含量的比较

印建莉, 胡君欢, 徐海伟, 吴进才*, 王 飞, 杨国庆

(扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 为了解迁飞种群与居留种群后代发生再猖獗的生理生化差异, 探讨再猖獗的机制, 比较研究了在两个水稻品种(TN1 和协优 963)上施用杀虫剂后褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 迁飞虫和本地虫后代 3 龄、5 龄若虫和成虫体内可溶性糖和粗脂肪含量以及迁飞成虫与其后代成虫体内游离氨基酸含量的变化。结果表明: 施药以及未施药处理(对照)TN1 水稻品种上的迁飞后代 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量均显著高于本地虫。与可溶性糖含量相比, 施药以及对照 TN1 水稻品种上的迁飞后代 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的粗脂肪含量均显著低于本地虫。协优 963 上 3 龄、5 龄若虫体内可溶性糖含量的变化趋势与 TN1 上相同。对照水稻上迁飞成虫的粗脂肪含量显著高于本地种群, 迁飞与本地 3 龄、5 龄若虫间粗脂肪含量没有显著差异。杀虫剂处理后的水稻上迁飞后代 5 龄若虫和成虫体内粗脂肪含量显著高于本地虫。方差分析结果也显示, 可溶性糖和粗脂肪含量的变化在虫源和杀虫剂, 虫源和杀虫剂浓度以及杀虫剂类型和浓度方面有显著交互作用。两种水稻品种上, 迁飞当代成虫体内的游离氨基酸含量显著低于其后代成虫。在经 3 种杀虫剂处理后, TN1 上施用三唑磷后成虫体内的氨基酸含量显著高于施用溴氰菊酯和吡虫啉的处理, 而协优 963 上施用溴氰菊酯和吡虫啉显著高于施用三唑磷的处理。本研究结果对深入阐明农药诱导褐飞虱再猖獗的机制具有参考价值。

关键词: 褐飞虱; 迁飞种群; 本地种群; 粗脂肪; 可溶性糖; 氨基酸

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2008)11-1103-10

Comparisons of levels of crude fat, soluble sugars, and free amino acids in offsprings of the immigrant and non-immigrant populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae), under insecticide stress

YIN Jian-Li, HU Jun-Huan, XU Hai-Wei, WU Jin-Cai*, WANG Fei, YANG Guo-Qing (College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: To understand the biochemical difference between immigrant and non-immigrant *Nilaparvata lugens* offspring populations, we compared the changes in soluble sugar and crude fat contents in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of the offsprings from immigrant and non-immigrant *N. lugens*, and free amino acid content in immigrant adults and their offspring adults on two rice varieties (TN1 and Xieyou 963) under insecticide stress. The biochemical substances were associated with insect origin (immigrant or non-immigrant), developmental stage, and insecticide type and insecticide concentration. Soluble sugar contents in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of the offsprings that developed from the plants treated with insecticides and control (untreated) plants of TN1 for immigrant *N. lugens* were significantly higher than those for non-immigrant *N. lugens*. In contrast to soluble sugar content, crude fat content in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of the offsprings that developed from the plants treated with insecticides and control plants of TN1 for immigrant *N. lugens* was significantly lower than that for non-immigrant *N. lugens*. For Xieyou 963,

基金项目: 国家“973 计划”项目(2006CB102003); 上海市科技兴农重点攻关项目(2006-1-4)

作者简介: 印建莉, 女, 1982 年 8 月生, 博士研究生, 主要从事褐飞虱再猖獗的研究, E-mail: jianli-yin@hotmail.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: jc.wu@public.yz.js.cn

收稿日期 Received: 2008-05-12; 接受日期 Accepted: 2008-09-26

soluble sugar content in the 3rd and 5th instar nymphs showed the same tendency as TN1. Crude fat content in adults developed from control plants for immigrants was significantly higher than that for non-immigrant populations, and that in the 3rd and 5th instar nymphs did not show a significant difference between immigrant and non-immigrant *N. lugens*. Crude fat content in the 5th instar nymphs and adults which developed from the rice plants treated with insecticides for immigrant populations was significantly higher than that for non-immigrant. ANOVA results also demonstrated that as for changes in soluble sugar and crude fat contents, there were significant interactions between insect origin and insecticide type, insect origin and insecticide concentration, and insecticide type and insecticide concentration. For the two rice varieties, free amino acid content in immigrant adults was significantly lower than that in their offspring adults. Amino acid content in adults that developed from TN1 plants treated with triazophos was significantly higher than with deltamethrin and imidacloprid, while in adults that developed from Xieyou 963 plants treated with deltamethrin and imidacloprid it was significantly higher than that with triazophos. The present findings have important significance for understanding the mechanism of insecticide-induced resurgence of the *N. lugens*.

Key words: *Nilaparvata lugens*; immigrant population; non-immigrant population; crude fat; soluble sugar; amino acid

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) (同翅目: 飞虱科) 是温带东亚地区的一种远距离的迁飞害虫, 它每年在热带和亚热带地区发生, 借助风力进行迁飞(程遐年等, 1979)。种群发生周期短以及远距离迁飞, 最终褐飞虱的发生地域远至中国华北、韩国和日本(程遐年等, 1979; Kisimoto, 1987; Watanabe *et al.*, 1991; Riley *et al.*, 1994)。在中国, 褐飞虱夏季从南方迁飞至长江中下游的水稻产区, 即季节性地向北迁飞, 经过 2~3 代繁殖后褐飞虱在长江中下游水稻产区爆发(程遐年等, 1979)。有证据表明褐飞虱在秋季普遍从北向南迁飞(程遐年等, 1979; Kisimoto, 1987; Rosenberg and Magor, 1987; Riley *et al.*, 1994)。褐飞虱种群密度很高时, 取食为害会导致虱烧的发生, 症状表现为水稻叶片干枯、分蘖处萎焉(Bae and Pathak 1970)。在 2005–2006 年, 褐飞虱导致华南及长江中下游地区的水稻产量遭受巨大损失, 并危及到这些地区高产优质稻米的产量。目前已证实褐飞虱的爆发与其迁飞种群的数量及其环境适合度有高度的相关性(程遐年等, 2003)。据报道, 经过远距离迁飞的雌成虫的产卵量显著增加, 但是其后代雌成虫的这种效应消失(沈丽和程遐年, 1998)。

脂肪和糖并不只是昆虫生长、发育的必需物质, 在昆虫飞行运动过程中可提供能量, 同时也是昆虫卵黄的重要组成物质(王荫长, 2004)。褐飞虱在一定范围的飞行过程中用脂肪作为燃料, 因此迁飞虫的体重和脂肪含量均下降(陈若簏, 1983)。一些研究表明, 在褐飞虱飞行过程中糖原是主要的能源物质(邹运鼎等, 1983)。然而, 目前还没有研究迁飞和

本地褐飞虱后代的生理差异。本研究旨在探讨褐飞虱迁飞后代与本地虫在糖、脂肪和游离氨基酸含量方面的差异。此调查可能对了解褐飞虱爆发及种群适合度的生理机制产生重要的作用。

1 材料与方法

1.1 水稻和虫源

实验中使用了两种水稻品种, 感虫品种 TN1 和抗虫品种协优 963。水稻种子分批播在 60 cm × 100 cm × 200 cm 的水泥池中, 培育至分蘖期使用。褐飞虱本地虫 2001 年由水稻研究所提供, 每年 4–10 月在自然情况下(水泥池)饲养繁殖。实验前将褐飞虱转移至温度 $28 \pm 4^\circ\text{C}$ 和光周期 14L: 10D 的养虫室中培养。迁飞虫是 2006 年 8 月 30 日褐飞虱成虫迁入高峰期(当时当地田间没有成虫发生)在远离稻田的校园中收集的迁飞型雌性成虫, 其产卵孵化的若虫作为迁飞后代种群, 迁入成虫和后代若虫均在盆栽水稻上饲养。本地虫和迁飞虫饲养条件条件相同且同步。

1.2 杀虫剂

实验中使用了 3 种杀虫剂: 2.5% 溴氰菊酯 EC (南京红太阳集团有限公司)、20% 三唑磷 EC (扬州长青农化有限公司) 和 10% 吡虫啉 WP (扬州扬农集团有限公司)。

1.3 杀虫剂对 F_1 代 3 龄、5 龄若虫及成虫体内的粗脂肪和可溶性糖含量的影响

基于褐飞虱亚致死剂量, 设计了杀虫剂的 3 种

浓度,即低、中、高浓度。在分蘖期喷洒盆栽水稻:用装有一个锥形喷嘴(直径 1 mm),压力 45 psi,流量 300 mL/min)的小喷雾器分别喷洒 1,3,6 mL/L 的溴氰菊酯,10,20,40 mL/L 的三唑磷和 1,5,10 mL/L 的吡虫啉(100 mL/盆)。对照水稻喷洒自来水(100 mL/盆)。处理水稻上覆盖网罩。将 3 龄若虫分别接到处理和对照(未处理)水稻上。各处理和对照水稻均在同一自然温度(25~28℃)和光照(日照为 16 h)的温室中生长。各处理与对照重复 3 次。在 3 龄若虫接到处理和对照水稻上 48 h 后,测定虫体内的粗脂肪和可溶性糖含量。5 龄若虫和成虫的处理次数与 3 龄若虫的不同。对 5 龄若虫取食的水稻进行两次喷洒处理:(i) 3 龄若虫接虫前 1 d;(ii) 3 龄若虫接虫后 5 d。对成虫取食的水稻进行 3 次喷洒处理:(i) 3 龄若虫接虫前 1 d;(ii) 3 龄若虫接虫后 5 d;(iii) 3 龄若虫接虫后 10 d。盆栽水稻每盆 4 穴,接入 200 头 3 龄若虫,设置 3 次重复。所有处理和对照水稻在上述条件下的温室中生长。3 龄若虫取食经杀虫剂处理的水稻后发育至 5 龄若虫和成虫后测定粗脂肪和可溶性总糖含量。

1.4 杀虫剂对迁飞成虫及其后代 F_1 代成虫体内游离氨基酸含量的作用

迁飞成虫及后代成虫取食与上述相同处理的水稻。所有处理和对照水稻在上述同样条件的温室中生长。处理和对照(迁入成虫和后代成虫均设不用药为对照)均重复 3 次。2006 年 8 月 30 日,即正值褐飞虱成虫迁入高峰,在远离稻田的校园中收集迁飞型成虫。测定迁飞型成虫及其后代成虫体内的游离氨基酸含量。

1.5 粗脂肪和可溶性糖的测定

粗脂肪含量采用索氏抽提法测定。将一定数量的褐飞虱称重,并用滤纸包裹,放入 80℃ 的烘箱内处理 4 h,然后放入提取管内。空滤纸(没有褐飞虱)作为对照。提取后除去用于包裹的滤纸,在 80℃ 的烘箱内干燥并称重。可溶性糖含量用恩酮法测定。将按上述方法提取过粗脂肪的 10 只褐飞虱放入装有 10 mL 99.7% 酒精的匀浆器中匀浆,然后将匀浆液倒入试管中,80℃ 水浴 30 min 后,2 000 g 冷冻离心 15 min。将上清液到入测量管。提取过程重复 3 次。用蒸馏水将上清液定容至 50 mL。吸取 1 mL 的上清液加入装有 1 mL 蒸馏水和 4 mL 蒽酮的 10 mL 试管中,沸水浴 15 min,冷却。用 722 型分光光度计在吸收波长为 620 nm 处测吸光度。用葡萄糖建立标准曲线。

1.6 游离氨基酸的测定

游离氨基酸含量采用茚三酮法测定。称 1 g 成虫,放入装有 5 mL 10% 乙酸的匀浆器中研磨,再将匀浆液到入 100 mL 的测量瓶中。用无氨蒸馏水定容作待测液,然后摇匀过滤。吸取 1 mL 匀浆液加入 25 mL 的测量瓶中,加入 3.5 mL 茚三酮缓冲液,和 0.1 mL 抗坏血酸溶液,充分震荡。将此混合液沸水浴 20 min,取出并迅速冷却,然后加入 10 mL 80% 的乙醇,蒸馏水定容至 25 mL。用 752 型分光光度计在吸收波长为 570 nm 处测吸光度。用谷氨酸建立标准曲线。

1.7 统计分析

方差分析前进行了正态分布和方差的同质性检验。三因素方差分析法(褐飞虱来源 × 杀虫剂类型 × 杀虫剂浓度)用于进行粗脂肪,可溶性糖和氨基酸含量的数据分析。对照数据则用二因素方差分析法对水稻品种 × 褐飞虱来源(即迁飞种群和本地种群)进行可溶性糖和粗脂肪含量变化的分析。基于 Fisher 氏保护最小显著差数(PLSD)检验法进行多重比较,所有数据均采用 SPSS 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 未施药处理(对照)褐飞虱迁飞后代虫与本地虫体内可溶性糖、粗脂肪含量的比较

表 1~2 中对照数据方差分析表明迁飞褐飞虱后代 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量显著高于本地虫(3 龄若虫: $F = 45.73$, $df = 1, 11$, $P = 0.0021$; 5 龄若虫: $F = 69.01$, $df = 1, 11$, $P = 0.0014$; 成虫: $F = 31.70$, $df = 1, 11$, $P = 0.00304$),分别增加了 16.41, 14.91 和 2.50 倍。但 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量在两个水稻品种间均无显著差异性。

对于两个水稻品种,表 3~4 中对照数据的二因素方差分析表明协优 963 上 3 龄、5 龄若虫体内的粗脂肪含量显著高于 TN1 水稻品种(3 龄若虫: $F = 9.10$, $df = 1, 11$, $P = 0.027$; 5 龄若虫: $F = 5.38$, $df = 1, 11$, $P = 0.045$),分别增加了 37.2% 和 21.7%。与可溶性糖相反,TN1 上的褐飞虱本地 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的粗脂肪含量显著高于迁飞虫,分别增加了 47.1%, 71.2% 和 55.8%。协优 963 上褐飞虱迁飞后代成虫体内的粗脂肪含量显著高于本地虫,增加了 56.8%,但是迁飞和本地 3 龄、5 龄若虫体内的粗脂肪含量没有显著性差异。

表 1 施用农药后水稻 TN1 上本地虫与迁入虫体内可溶性糖含量

Table 1 Soluble sugar content (mg/g) in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of non-immigrant and immigrant *Nilaparvata lugens* developed from TN1 plants treated with insecticides

虫源 Insect origin	杀虫剂 Insecticide	杀虫剂浓度 Concentration (mL/L)	3 龄若虫 3rd instar nymph	5 龄若虫 5th instar nymph	成虫 Adult	
本地虫 Non-immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	0.76 ± 0.09 c	1.46 ± 0.16 de	2.59 ± 0.03 b	
		3	2.29 ± 0.18 ab	2.19 ± 0.14 bc	2.48 ± 0.15 b	
		6	1.28 ± 0.25 bc	2.88 ± 0.24 a	2.64 ± 0.11 b	
	三唑磷 Triazophos	10	1.72 ± 0.17 abc	1.92 ± 0.26 bcd	3.61 ± 0.06 a	
		20	1.70 ± 0.17 abc	1.09 ± 0.09 e	2.73 ± 0.10 b	
		40	1.98 ± 0.48 ab	1.73 ± 0.39 cde	4.09 ± 0.26 a	
	吡虫啉 Imidacloprid	1	2.29 ± 0.81 ab	2.51 ± 0.24 ab	1.72 ± 0.03 c	
		5	2.43 ± 0.04 a	2.43 ± 0.06 ab	2.15 ± 0.16 bc	
		10	2.59 ± 0.36 a	2.55 ± 0.34 ab	2.44 ± 0.06 b	
	对照(未处理) Control (untreated)	0	1.17 ± 0.45 bc	1.30 ± 0.20 de	0.99 ± 0.41 d	
	迁入虫 Immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	21.11 ± 4.53 bc	12.62 ± 1.01 cd	2.96 ± 0.26 d
			3	16.46 ± 0.31 c	2.15 ± 0.44 g	4.06 ± 0.09 cd
6			24.25 ± 12.18 bc	4.70 ± 0.47 fg	8.34 ± 0.17 c	
三唑磷 Triazophos		10	29.77 ± 7.92 bc	12.85 ± 0.46 bcd	3.05 ± 0.71 d	
		20	36.99 ± 7.74 ab	15.97 ± 0.56 b	7.91 ± 0.62 c	
		40	18.61 ± 2.45 c	19.62 ± 0.65 a	6.69 ± 2.74 cd	
吡虫啉 Imidacloprid		1	15.00 ± 1.61 c	10.51 ± 2.52 de	21.43 ± 1.01 a	
		5	47.85 ± 1.92 a	6.69 ± 0.54 f	5.45 ± 1.43 cd	
		10	31.11 ± 1.13 abc	14.93 ± 0.59 bc	15.50 ± 3.61 b	
对照(未处理) Control (untreated)		0	19.85 ± 6.51 bc	7.45 ± 1.40 ef	4.65 ± 1.40 cd	

表中数据为平均值 ± SD, 同一虫源同一虫龄数据后不同的字母标注表示在 5% 水平上具有显著性差异 (PLSD 统计检验方法); 下同。Data are means ± SD, and those followed by different letters within the same column of the same insect origin show significant difference at 5% level (by PLSD test). The same below.

表 2 施用农药后水稻协优 963 上本地虫与迁入虫体内可溶性糖含量

Table 2 Soluble sugar content (mg/g) in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of non-immigrant and immigrant *Nilaparvata lugens* developed from Xieyou 963 plants treated with insecticides

虫源 Insect origin	杀虫剂 Insecticide	杀虫剂浓度 Concentration (mL/L)	3 龄若虫 3rd instar nymph	5 龄若虫 5th instar nymph	成虫 Adult	
本地虫 Non-immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	1.60 ± 0.38 ab	1.37 ± 0.02 d	2.59 ± 0.03 b	
		3	0.81 ± 0.35 bc	1.36 ± 0.02 cd	2.48 ± 0.15 b	
		6	2.35 ± 0.05 a	1.68 ± 0.19 abcd	2.64 ± 0.11 b	
	三唑磷 Triazophos	10	0.76 ± 0.36 c	1.87 ± 0.26 abcd	3.61 ± 0.06 a	
		20	0.69 ± 0.19 c	1.47 ± 0.06 bcd	2.73 ± 0.10 b	
		40	0.56 ± 0.19 c	2.40 ± 0.68 a	4.09 ± 0.26 a	
	吡虫啉 Imidacloprid	1	1.29 ± 0.35 bc	2.27 ± 0.50 ab	1.72 ± 0.03 c	
		5	0.71 ± 0.42 c	2.05 ± 0.09 abc	2.15 ± 0.16 bc	
		10	2.25 ± 0.34 a	1.91 ± 0.45 abcd	2.44 ± 0.06 b	
	对照(未处理) Control (untreated)	0	0.61 ± 0.09 c	1.10 ± 0.04 d	1.16 ± 0.12 c	
	迁入虫 Immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	1.70 ± 0.15 c	12.25 ± 5.70 cd	2.96 ± 0.26 d
			3	10.64 ± 1.79 abc	29.51 ± 0.66 ab	4.06 ± 0.09 cd
6			14.86 ± 3.67 abc	25.75 ± 0.51 abc	8.34 ± 0.17 c	
三唑磷 Triazophos		10	21.52 ± 6.36 ab	11.83 ± 0.92 d	3.05 ± 0.71 d	
		20	8.83 ± 0.73 abc	21.79 ± 0.51 abcd	7.91 ± 0.62 c	
		40	19.10 ± 7.23 ab	27.66 ± 7.90 ab	6.69 ± 2.74 cd	
吡虫啉 Imidacloprid		1	18.69 ± 1.63 ab	28.61 ± 2.04 ab	21.43 ± 1.01 a	
		5	23.52 ± 12.23 a	16.79 ± 0.46 bcd	5.45 ± 1.43 cd	
		10	7.22 ± 1.32 bc	11.53 ± 0.88 d	15.50 ± 3.61 b	
对照(未处理) Control (untreated)		0	11.36 ± 3.76 abc	30.80 ± 7.34 a	2.93 ± 0.79 e	

表 3 施用农药后水稻 TN1 上本地虫与迁入虫体内粗脂肪含量

Table 3 Crude fat content (mg/g) in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of non-immigrant and immigrant *Nilaparvata lugens* developed from TN1 plants treated with insecticides

虫源 Insect origin	杀虫剂 Insecticide	杀虫剂浓度 Concentration (mL/L)	3 龄若虫 3rd instar nymph	5 龄若虫 5th instar nymph	成虫 Adult	
本地虫 Non-immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	0.63 ± 0.01 b	0.66 ± 0.03 a	0.91 ± 0.02 a	
		3	0.63 ± 0.02 b	0.71 ± 0.01 a	0.85 ± 0.01 a	
		6	0.61 ± 0.06 b	0.75 ± 0.03 a	0.85 ± 0.06 a	
	三唑磷 Triazophos	10	0.60 ± 0.02 b	0.76 ± 0.03 a	0.89 ± 0.02 a	
		20	0.63 ± 0.02 b	0.76 ± 0.03 a	0.85 ± 0.03 a	
		40	0.68 ± 0.06 b	0.74 ± 0.01 a	0.90 ± 0.02 a	
	吡虫啉 Imidacloprid	1	0.66 ± 0.02 b	0.75 ± 0.06 a	0.81 ± 0.11 a	
		5	0.66 ± 0.01 b	0.70 ± 0.04 a	0.79 ± 0.01 a	
		10	0.64 ± 0.03 b	0.63 ± 0.04 a	0.83 ± 0.04 a	
	对照(未对照) Control (untreated)	0	0.78 ± 0.01 a	0.72 ± 0.10 a	0.62 ± 0.07 b	
	迁入虫 Immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	0.69 ± 0.15 a	0.44 ± 0.10 cd	0.67 ± 0.05 abc
			3	0.55 ± 0.09 a	0.56 ± 0.02 bc	0.68 ± 0.15 abc
6			0.65 ± 0.09 a	0.68 ± 0.04 ab	0.79 ± 0.14 a	
三唑磷 Triazophos		10	0.52 ± 0.22 a	0.86 ± 0.06 a	0.80 ± 0.07 a	
		20	0.54 ± 0.14 a	0.71 ± 0.04 ab	0.47 ± 0.07 cde	
		40	0.68 ± 0.17 a	0.43 ± 0.05 cd	0.28 ± 0.01 de	
吡虫啉 Imidacloprid		1	0.34 ± 0.06 a	0.61 ± 0.17 bc	0.51 ± 0.03 bcd	
		5	0.74 ± 0.03 a	0.33 ± 0.03 de	0.70 ± 0.12 ab	
		10	0.60 ± 0.10 a	0.60 ± 0.02 bc	0.28 ± 0.08 de	
对照(未处理) Control (untreated)		0	0.42 ± 0.22 a	0.21 ± 0.071 e	0.27 ± 0.02 e	

表 4 施用农药后水稻协优 963 上本地虫与迁入虫体内粗脂肪含量

Table 4 Crude fat content (mg/g) in the 3rd and 5th instar nymphs and adults of non-immigrant and immigrant *Nilaparvata lugens* developed from Xieyou 963 plants treated with insecticides

虫源 Insect origin	杀虫剂 Insecticide	杀虫剂浓度 Concentration (mL/L)	3 龄若虫 3rd instar nymph	5 龄若虫 5th instar nymph	成虫 Adult	
本地虫 Non-immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	0.69 ± 0.13 a	0.39 ± 0.02 bc	0.36 ± 0.02 bc	
		3	0.54 ± 0.12 a	0.39 ± 0.03 bc	0.32 ± 0.01 cde	
		6	0.73 ± 0.17 a	0.39 ± 0.02 bc	0.28 ± 0.01 de	
	三唑磷 Triazophos	10	0.57 ± 0.14 a	0.40 ± 0.03 bc	0.28 ± 0.02 de	
		20	0.65 ± 0.04 a	0.43 ± 0.02 bc	0.34 ± 0.02 bcd	
		40	0.62 ± 0.06 a	0.47 ± 0.03 b	0.45 ± 0.04 a	
	吡虫啉 Imidacloprid	1	0.65 ± 0.04 a	0.40 ± 0.01 bc	0.40 ± 0.05 ab	
		5	0.54 ± 0.15 a	0.36 ± 0.02 c	0.34 ± 0.01 bcd	
		10	0.62 ± 0.16 a	0.35 ± 0.01 c	0.37 ± 0.01 bc	
	对照(未处理) Control (untreated)	0	0.84 ± 0.03 a	0.58 ± 0.04 a	0.26 ± 0.01 e	
	迁入虫 Immigrant	溴氰菊酯 Deltamethrin	1	0.66 ± 0.18 abc	0.81 ± 0.02 ab	0.74 ± 0.08 a
			3	0.41 ± 0.11 cd	0.78 ± 0.04 abc	0.28 ± 0.01 b
6			0.41 ± 0.03 cd	0.44 ± 0.09 d	0.18 ± 0.03 b	
三唑磷 Triazophos		10	0.31 ± 0.06 d	0.76 ± 0.19 abc	0.69 ± 0.27 a	
		20	0.58 ± 0.06 abcd	0.89 ± 0.05 a	0.77 ± 0.03 a	
		40	0.47 ± 0.13 bcd	0.68 ± 0.12 abcd	0.25 ± 0.03 b	
吡虫啉 Imidacloprid		1	0.44 ± 0.11 bcd	0.42 ± 0.08 d	0.73 ± 0.12 a	
		5	0.75 ± 0.11 ab	0.68 ± 0.10 abcd	0.86 ± 0.05 a	
		10	0.69 ± 0.10 abc	0.53 ± 0.06 cd	0.81 ± 0.05 a	
对照(未处理) Control (untreated)		0	0.81 ± 0.12 a	0.55 ± 0.07 bcd	0.67 ± 0.02 a	

2.2 杀虫剂处理的两个水稻品种上 3 龄、5 龄若虫和成虫体内可溶性糖含量的变化

在 TN1 上,3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量随褐飞虱来源、杀虫剂类型、杀虫剂浓度的不同而变化。表 1 中数据的三因素方差分析表明褐飞虱迁飞后代与本地 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量有显著差异(表 5),与本地后代虫相比分别增加了 13.64, 4.39 和 2.25 倍,增加值随褐飞虱发育而呈下降趋势。多重比较显示,3 种杀虫剂中,经溴氰菊酯和三唑磷处理过的 3 龄若虫体内的可溶性糖含量显著高于经吡虫啉的处理,分别增加了 40.29% 和 28.28%。经三唑磷处理过的水稻上培养的 5 龄若虫体内的可溶性糖含量显著高于经吡虫啉和溴氰菊酯的处理,分别增加了 28.1% 和 78.34%,而吡虫啉处理过的 5 龄若虫体内的可溶性糖含量又显著高于溴氰菊酯处理。杀虫剂浓度对 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量的影响有显著差异(表 5)。多重比较显示,包括对照的 4 个浓度中,经中浓度处理的 3 龄若虫体内的可溶性糖含量显著高于高、低浓度及对照,分别增加了 34.96%, 52.51% 和 70.79%。经高、低浓度处理的 5 龄若虫体内的可溶性糖含量显著高于中浓度及对照处理,与对照浓度相比分别增加了 76.89% 和 59.72%。经高、低浓度处理的成虫体内的可溶性糖

含量显著高于中浓度及对照处理成虫体内的可溶性糖含量,与中浓度相比分别增加了 60.05% 和 42.62%,与对照浓度相比分别增加了 134.39% 和 108.86%。

同时褐飞虱来源 × 杀虫剂类型、褐飞虱来源 × 杀虫剂浓度、杀虫剂类型 × 杀虫剂的浓度之间具有显著的交互作用(表 5)。例如,在所有处理组合中,经 10 mL/L 吡虫啉处理的本地 3 龄若虫体内的可溶性糖含量与经 5 mL/L 吡虫啉处理的迁飞 3 龄若虫体内的可溶性糖含量具有最大值(表 1),与对照相比分别增加了 121.36% 和 141.06%。经 6 mL/L 溴氰菊酯处理的本地 5 龄若虫体内的可溶性糖含量与经 10 mL/L 吡虫啉处理的迁飞 5 龄若虫体内的可溶性糖含量具有最大值,与对照相比分别增加了 121.54% 和 100.40%。经 10 mL/L 溴氰菊酯处理的本地成虫体内的可溶性糖含量与经 1 mL/L 吡虫啉处理的迁飞成虫体内的可溶性糖含量具有最大值,与对照相比分别增加了 264.65% 和 360.86%。这表明处理后的 TN1 水稻品种有利于褐飞虱尤其是迁飞型褐飞虱积累糖分。

在协优 963 上,3 龄、5 龄若虫和成虫体内的可溶性糖含量随褐飞虱来源、杀虫剂类型、杀虫剂浓度的不同而变化。表 2 中数据的三因素方差分析表明迁飞褐飞虱后代与本地 3 龄、5 龄若虫和成虫体内

表 5 褐飞虱取食杀虫剂处理的 TN1 后粗脂肪和可溶性糖的方差分析

Table 5 Analysis of variance for crude fat and soluble sugar contents in *Nilaparvata lugens* feeding on TN1 plants treated with insecticides

生生物质 Biochemical substance	变异来源 Variance source	3 龄若虫 3rd instar nymph		5 龄若虫 5th instar nymph		成虫 Adult	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
		粗脂肪 Crude fat	Ins	25.4	0.0001	211.0	0.0001
	Insecti	0.10	0.90	8.5	0.001	14.4	0.0001
	Inc	1.41	0.24	35.7	0.0001	77.2	0.0001
	Ins × Insecti	0.67	0.51	1.4	0.24	8.5	0.001
	Ins × Inc	9.2	0.0001	34.1	0.0001	9.4	0.001
	Insecti × Inc	1.6	0.14	11.2	0.001	9.3	0.001
	Ins × Insecti × Inc	1.6	0.14	7.4	0.001	11.0	0.001
可溶性糖 Soluble sugars	Ins	541.8	0.0001	1 874.1	0.0001	368.1	0.0001
	Insecti	6.7	0.002	104.4	0.0001	53.2	0.001
	Inc	10.5	0.0002	67.3	0.0001	40.8	0.001
	Ins × Insecti	4.8	0.01	136.2	0.0001	78.9	0.001
	Ins × Inc	8.2	0.001	38.6	0.001	12.9	0.01
	Insecti × Inc	7.4	0.001	34.9	0.001	27.8	0.01
	Ins × Insecti × Inc	8.0	0.001	51.7	0.001	36.4	0.01

Ins: 虫源 Insect origin; Insecti: 杀虫剂 Insecticide; Inc: 杀虫剂浓度 Insecticide concentration. 表 6 同 The same for Table 6.

的可溶性糖含量有显著差异(表 6),与本地虫相比分别增加了 11.46, 13.39 和 1.75 倍。多重比较显示,3 种杀虫剂中,经吡虫啉处理过的水稻上培养的 3 龄若虫体内可溶性糖含量显著高于经溴氰菊酯的处理,增加了 49.54%。经三唑磷和溴氰菊酯处理过的水稻上培养的成虫体内的可溶性糖含量显著高于对照,分别增加了 96.86% 和 80.0%。

杀虫剂浓度对 5 龄若虫和成虫体内可溶性糖含量的作用有显著差异(表 6)。多重比较结果表明,对照 5 龄若虫体内的可溶性糖含量显著高于其他处理,与低、中、高浓度处理相比分别增加了 31.17%, 34.94% 和 65.28%。经高、低、中浓度处理的成虫体内的可溶性糖含量显著高于对照,分别增加了 141.67%, 132.35% 和 120.09%。

同时 3 龄若虫及成虫在褐飞虱虫源 × 杀虫剂类

型、5 龄若虫及成虫在褐飞虱来源 × 杀虫剂浓度、3 龄、5 龄若虫及成虫在杀虫剂类型 × 杀虫剂浓度可溶性糖含量的变化具有显著的交互作用。例如,在所有处理组合中,经 10 mL/L 吡虫啉处理的本地 3 龄若虫体内的可溶性糖含量与经 5 mL/L 吡虫啉处理的迁飞 3 龄若虫体内的可溶性糖含量具有最大值(表 2),与对照相比分别增加了 268.85% 和 107.04%。经 40 mL/L 三唑磷处理的本地 5 龄若虫体内的可溶性糖含量具有最大值(表 2),增加了 118.18%。经 10 mL/L 吡虫啉处理的迁飞 5 龄若虫体内的可溶性糖含量具有最大值,与对照相比增加了 2.98 倍。经 40 mL/L 三唑磷处理的本地成虫体内的可溶性糖含量与经 1 mL/L 吡虫啉处理的迁飞型成虫体内的可溶性糖含量具有最大值,与对照相比分别增加了 252.58% 和 632.39%。

表 6 褐飞虱取食杀虫剂处理的协优 963 后粗脂肪和可溶性糖含量的方差分析

Table 6 Analysis of variance for crude fat and soluble sugar contents in *Nilaparvata lugens* feeding on Xieyou 963 plants treated with insecticides

生 化 物 质 Biochemical substance	变 异 来 源 Variance source	3 龄 若 虫 3rd instar nymph		5 龄 若 虫 5th instar nymph		成 虫 Adult	
		F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value	F 值 F value	P 值 P value
		粗脂肪 Crude fat	Ins	13.1	0.001	133.4	0.0001
	Insecti	2.4	0.09	16.1	0.001	37.8	0.0001
	Inc	22.5	0.001	9.2	0.001	14.5	0.001
	Ins × Insecti	2.1	0.13	5.2	0.001	23.3	0.001
	Ins × Inc	2.6	0.06	31.0	0.001	27.8	0.001
	Insecti × Inc	3.7	0.003	4.6	0.001	14.8	0.001
	Ins × Insecti × Inc	2.1	0.06	4.4	0.001	15.5	0.001
可溶性糖 Soluble sugar	Ins	211.6	0.0001	758.8	0.0001	360.3	0.0001
	Insecti	4.2	0.02	0.61	0.54	58.6	0.001
	Inc	0.94	0.42	11.17	0.001	46.1	0.001
	Ins Insecti	5.6	0.006	1.39	0.25	16.2	0.001
	Ins Inc	0.51	0.67	14.01	0.0001	15.0	0.001
	Insecti Inc	6.39	0.0005	9.66	0.001	22.3	0.001
	Ins Insecti Inc	13.1	0.001	133.4	0.0001	316.2	0.0001

2.3 杀虫剂处理的两个水稻品种上 3 龄、5 龄若虫和成虫体内粗脂肪含量的变化

在 TN1 上,表 3 中数据方差分析结果表明虫源间 3 龄、5 龄若虫及成虫体内的粗脂肪含量有显著差异(表 5);与可溶性糖含量相反,迁飞后代比本地褐飞虱分别降低了 19.89%, 32.59% 和 37.05%,百分数降低量随虫龄的发育有增加的趋势。

杀虫剂类型对 5 龄若虫和成虫体内粗脂肪含量的影响有显著差异(表 5)。多重比较结果表明,3 种杀虫剂中,经三唑磷处理过的 5 龄若虫体内的粗脂肪含量显著高于经溴氰菊酯和吡虫啉的处理,分别

增加了 9.6% 和 13.95%。经溴氰菊酯处理过的成虫体内的粗脂肪含量显著高于经三唑磷和吡虫啉的处理,分别增加了 10.86% 和 17.22%。

杀虫剂浓度对粗脂肪含量的影响有显著差异(表 5)。多重比较结果表明,经低、中、高浓度处理的 5 龄若虫体内的粗脂肪含量显著高于对照,分别增加了 47.64%, 37.77% 和 36.16%。经低、中、高浓度处理的成虫体内的粗脂肪含量显著高于对照,分别增加了 70.83%, 61.7% 和 46.44%。经高、低浓度处理的成虫体内的粗脂肪含量显著高于中浓度及对照,与中浓度相比分别增加了 60.05% 和 42.62%,

与对照相比分别增加了 134.39% 和 108.86%。

同时 3 龄若虫在褐飞虱虫源 × 杀虫剂浓度, 5 龄若虫在褐飞虱虫源 × 杀虫剂浓度和杀虫剂类型 × 杀虫剂浓度, 成虫在褐飞虱虫源 × 杀虫剂类型和褐飞虱虫源 × 杀虫剂浓度以及杀虫剂类型 × 杀虫剂浓度方面具有显著的交互作用。例如, 在所有处理组合中, 经 5 mL/L 吡虫啉处理的迁飞 3 龄若虫体内的粗脂肪含量具有最大值(表 3), 与对照相比增加了 76.19%。经 10 mL/L 三唑磷处理的迁飞 5 龄若虫体内的粗脂肪含量具有最大值(表 3), 与对照相比增加了 309.52%。经 1 mL/L 溴氰菊酯处理的本地成虫体内的粗脂肪含量与经 10 mL/L 三唑磷处理的迁飞型成虫体内的粗脂肪含量具有最大值, 与对照相比分别增加了 46.77% 和 196.29%。百分数的增加表明处理过的水稻有利于褐飞虱积累脂肪。

在协优 963 上, 与 TN1 水稻品种相反, 表 4 中数据的方差分析表明, 迁飞型褐飞虱后代除 3 龄若虫以外, 5 龄若虫及成虫体内的粗脂肪含量显著高于本地褐飞虱, 分别增加了 41.11% 和 85.98%。

杀虫剂类型对粗脂肪含量有显著影响(表 6)。多重比较结果表明, 3 种杀虫剂中, 经三唑磷处理过的水稻上培养的 5 龄若虫体内的粗脂肪含量显著高于经吡虫啉和溴氰菊酯的处理, 分别增加了 9.67% 和 22.89%, 相反, 经溴氰菊酯处理的显著高于经吡虫啉的处理, 增加了 11.99%。经吡虫啉处理过的水稻上培养的成虫体内的粗脂肪含量显著高于三唑磷和溴氰菊酯的处理, 分别增加了 19.45% 和 43.36%, 而经吡虫啉处理的显著高于溴氰菊酯的处理, 增加了 20.04%。

杀虫剂浓度对 3 龄、5 龄若虫和成虫体内的粗脂肪含量的作用有显著差异(表 6)。多重比较结果表明, 未施药处理的 3 龄若虫体内的粗脂肪含量显著高于经其他浓度的处理, 与高、中、低浓度相比分别增加了 35.91%, 42.94%, 和 48.41%, 5 龄若虫按相同的处理, 也有类似的变化趋势。成虫体内粗脂肪含量与 3 龄、5 龄若虫体内粗脂肪含量不同, 经低浓度处理的成虫体内的粗脂肪含量显著高于对照, 增加了 14.57%, 但经高浓度处理的成虫体内的粗脂肪含量显著低于对照, 下降了 16.67%。

所有处理组合间的交互作用显著。如本地 3 龄若虫体内的粗脂肪含量, 包括对照的所有处理组合的多重比较没有显著差异(表 4), 但是一些迁飞种群的处理组合显著低于其对照。在经 10 mL/L 三唑磷处理过的水稻上培养的 3 龄若虫体内的粗脂肪含

量具有最小值, 与对照相比下降了 61.73%。在所有处理组合中, 本地 5 龄若虫体内的粗脂肪含量显著低于其对照, 但是经 20 mL/L 三唑磷处理过的水稻上培养的 5 龄若虫体内的粗脂肪含量具有最大值, 与对照相比增加了 61.82%。与 3 龄、5 龄若虫相反, 在多次使用杀虫剂处理过的水稻上培养的本地种群成虫体内的粗脂肪含量显著低于对照。

2.4 杀虫剂处理的两个水稻品种对迁飞成虫及其后代成虫体内游离氨基酸含量的作用

对于 TN1 水稻品种, 表 7 中数据的方差分析结果表明迁飞型成虫体内的游离氨基酸含量显著低于其后代成虫($F = 878.46$, $df = 1, 48$, $P = 0.000082$), 下降了 70.39%。杀虫剂类型和浓度对游离氨基酸含量的影响具有显著差异(杀虫剂类型: $F = 8.32$, $df = 2, 48$, $P = 0.0087$; 杀虫剂浓度: $F = 17.64$, $df = 3, 48$, $P = 0.0041$)。多重比较结果表明, 经三唑磷处理过的水稻上培养的成虫体内的游离氨基酸含量显著高于经溴氰菊酯和吡虫啉的处理, 分别增加了 12.11% 和 19.78%, 且在低、高浓度处理下游离氨基酸含量显著高于中浓度及对照, 与中浓度处理相比分别增加了 17.24% 和 15.77%, 与对照相比分别增加了 41.19% 和 39.36%。成虫种群和杀虫剂类型、成虫种群和杀虫剂浓度、杀虫剂类型和杀虫剂浓度之间有显著交互作用。经 10 mL/L 三唑磷处理过的水稻上培养的迁飞成虫及其后代成虫体内的游离氨基酸含量最高, 与对照相比分别增加了 74.13% 和 81.16%。

对于协优 963 水稻品种, 表 7 中数据的方差分析结果表明迁飞成虫体内的游离氨基酸含量显著低于其后代成虫($F = 533.64$, $df = 1, 48$, $P = 0.00013$), 下降了 78.88%。杀虫剂类型及其浓度对游离氨基酸含量的影响具有显著差异(杀虫剂类型: $F = 6.16$, $df = 2, 48$, $P = 0.041$; 杀虫剂浓度: $F = 12.06$, $df = 3, 48$, $P = 0.0035$)。多重比较结果表明经溴氰菊酯和吡虫啉处理过的水稻上培养的成虫体内的游离氨基酸含量显著高于经三唑磷的处理, 分别增加了 26.59% 和 21.22%。在高、低、中浓度处理下游离氨基酸含量显著高于对照, 分别增加了 56.68%, 54.14% 和 29.06%。成虫种群和杀虫剂类型、成虫种群和杀虫剂浓度、杀虫剂类型和杀虫剂浓度之间有显著交互作用。5 mL/L 三唑磷处理过的水稻上培养的迁飞成虫以及 1 mL/L 溴氰菊酯处理过的水稻上培养的后代成虫, 它们体内的游离氨基酸含量最高, 与对照相比分别增加了 147.77% 和 144.67%。

表 7 施用农药后水稻上迁入当代与其后代褐飞虱成虫体内游离氨基酸总量

Table 7 Free amino acid content in immigrant brown planthopper adults and their offspring adults that developed from the nymphs feeding on Xieyou 963 and TN1 plants treated with insecticides

杀虫剂 Insecticide	杀虫剂浓度 Concentration (mL/L)	迁入成虫 Immigrant adults		后代成虫 Offspring adults	
		TN1	协优 963 Xieyou 963	TN1	协优 963 Xieyou 963
溴氰菊酯 Deltamethrin	1	21.98 ± 2.51 a	17.65 ± 0.22 e	62.89 ± 11.33 ab	167.04 ± 33.90 a
	3	15.20 ± 0.77 bc	13.61 ± 2.24 f	45.36 ± 3.32 b	35.74 ± 6.85 f
	6	22.08 ± 1.78 a	22.31 ± 1.92 c	62.16 ± 2.71 ab	137.09 ± 30.20 ab
三唑磷 Triazophos	10	22.62 ± 1.00 a	25.18 ± 0.58 b	82.21 ± 13.51 a	41.15 ± 8.09 ef
	20	18.09 ± 1.70 b	19.09 ± 0.65 de	75.10 ± 11.03 a	85.75 ± 6.43 bedef
	40	17.19 ± 0.91 b	14.57 ± 0.49 f	47.56 ± 6.57 b	108.25 ± 7.63 bcd
吡虫啉 Imidacloprid	1	12.56 ± 1.65 c	27.10 ± 0.79 b	44.97 ± 4.72 b	93.59 ± 7.23 bede
	5	14.73 ± 0.52 bc	30.03 ± 0.32 a	42.36 ± 1.54 b	127.06 ± 6.71 abc
	10	17.04 ± 0.81 b	21.17 ± 0.65 cd	78.11 ± 9.14 a	74.43 ± 16.16 cdef
对照(未处理) Control (untreated)	0	12.99 ± 0.55 c	12.12 ± 0.36 f	45.38 ± 7.16 b	68.27 ± 21.59 def

3 讨论

褐飞虱是气候温和的东亚地区一种远距离迁徙性害虫(程遐年等, 1979; Riley *et al.*, 1994)。因此, 迁飞型褐飞虱种群和本地褐飞虱种群的生理生态机制与害虫的治理和预测预报有着密切的联系。我们的研究表明: 在处理和对照上生长的迁飞种群和本地种群后代, 其体内的可溶性糖、粗脂肪、游离氨基酸含量具有显著性差异, 并随水稻品种、杀虫剂类型、杀虫剂浓度的不同而变化。因为害虫的季节性迁飞是一种生态策略和种群适应, 所以迁飞种群和本地种群在生理生化上的差异取决于种群的进化和适合度。由于变动的环境对害虫种群发展的有利作用(马世骏, 1964), 昆虫迁飞导致害虫的持续性爆发(马世骏, 1982)。长距离迁飞使褐飞虱种群的繁殖率显著增加, 然而, 迁飞没有对后代种群的繁殖率产生刺激效应(沈丽和程遐年, 1988)。据一项有关稻纵卷叶螟地理性种群迁飞的比较研究证实, 向高纬度迁飞的种群适合度显著高于低纬度迁飞的种群(张孝羲和吴进才, 1988), 这表明迁飞型种群在生态和生理方面不同于本地种群。

糖、脂肪、蛋白质是生物体的重要营养物质, 并可相互转化(陈阅增, 2002)。糖提供能量用于昆虫的生长、发育和飞行。例如粘虫在其飞行的初期阶段利用糖原作为燃料(王宗舜和欧阳迎春, 1995)。棉铃虫飞行时的主要供能物质是甘油三酯酸和糖原(吴孔明和郭予元, 1998)。然而, 一些研究表明, 昆虫飞行时主要利用脂类作为能源物质(陈若箴, 1983; 邹运鼎等, 1984; 曹雅忠等, 1995)。此外, 一

些昆虫在飞行时利用的能量, 不同的研究显示不同的结果(邹运鼎等, 1984; 曹雅忠等, 1995)。这可能与昆虫的飞行年龄有关。我们的结果表明迁飞型种群后代体内可溶性糖含量显著高于本地种群, 尤其是感虫品种 TN1, 这可能与迁飞型种群更有活力和能量物质的高效使用有关, 因为褐飞虱迁入一地后经 3~4 代的繁殖又迁出, 因此迁飞昆虫需要为它们的下一次迁飞积累能量。本研究显示在经常用杀虫剂处理过的水稻上培养的褐飞虱体内的可溶性糖含量显著高于在对照水稻上培养的褐飞虱, 表明处理过的水稻有利于褐飞虱的取食, 因为农药改变了水稻的生化性质, 但是这一结果与水稻品种也有关系。例如, 用吡虫啉和三唑磷处理协优 963 水稻品种, 植株内的糖含量比对照水稻植株内的糖含量分别增加了 23.91% 和 22.58%, 但是对镇稻 2 号水稻品种叶面喷施三唑磷, 植株体内的糖含量没有显著增加(吴进才等, 2003)。相比之下, 水稻植株内的抗性物质草酸的含量明显下降(吴进才等, 2003)。褐飞虱在水稻叶鞘部位吸取汁液, 其主要成分是碳水化合物, 也包括可溶性糖。农药处理后水稻植株内生物质的改变表明喷洒农药后的水稻易引诱褐飞虱(Wu *et al.*, 2001)。喷洒过农药的水稻更容易引起迁飞褐飞虱种群的爆发, 尤其是易感型水稻品种。

本研究迁飞种群是扬州 8 月底的一个迁入高峰种群, 其来源可能与 7 月中下旬的迁入种群有差异, 有关不同时段迁入种群与本地种群后代生理生化差异的比较我们将另行研究。

参考文献 (References)

Bae SH, Pathak MD, 1970. Life history of *Nilaparvata lugens* (Homoptera:

- Delphacidae) and susceptibility of rice varieties to its attacks. *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 63: 149 – 155.
- Cao YZ, Luo LZ, Li GB, Hu Y, 1995. The relationship between utilization of energy materials and sustained flight in the moths of oriental armyworm *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*, 38(3): 290 – 295. [曹雅忠, 罗礼智, 李光博, 胡毅, 1995. 粘虫飞翔能源物质及其消耗. 昆虫学报, 38(3): 290 – 295]
- Chen RC, 1983. Studies on lipids as fuel of flight in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål). *Acta Entomol. Sin.*, 26(1): 42 – 48. [陈若麓, 1983. 脂类作为褐飞虱飞行能量来源的研究. 昆虫学报, 26(1): 42 – 48]
- Cheng XN, Chen RC, Xi X, Yang LM, Zhu ZL, Wu JC, Qian RG, Yang JS, 1979. Studies on the migrations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). *Acta Entomol. Sin.*, 22(1): 1 – 21. [程遐年, 陈若麓, 习学, 杨联民, 朱子龙, 吴进才, 钱仁贵, 杨金生, 1979. 稻褐飞虱迁飞规律的研究. 昆虫学报, 22(1): 1 – 21]
- Cheng XN, Wu JC, Ma F, 2003. Brown Planthopper: Occurrence and Control. China Agriculture Press, Beijing. 95 – 101. [程遐年, 吴进才, 马飞, 2003. 褐飞虱研究与防治. 北京: 中国农业出版社. 95 – 101]
- Chen YZ, 2002. General Biology. Higher Education Press, Beijing. 119 – 121. [陈阅增, 2002. 普通生物学. 北京: 高等教育出版社. 119 – 121]
- Kisimoto R, 1987. Ecology of planthopper migration. In: Wilson MR, Nault LR eds. Proceedings of the 2nd International Workshop on Leafhoppers and Planthoppers of Economic Importance. Provo, Utah, U. S. A. 28 July – 1 August 1986. CAB International Institute of Entomology, London. 41 – 54.
- Ma SC, 1964. The structure and dynamics of space, number and time of insect population. *Acta Entomol. Sin.*, 13(1): 38 – 55. [马世骏, 1964. 昆虫种群的空间、数量、时间结构及其动态. 昆虫学报, 13(1): 38 – 55]
- Ma SC, 1982. The ecological adaptation of insect population. *Acta Ecol. Sin.*, 2(3): 225 – 227. [马世骏, 1982. 昆虫种群的生态适应. 生态学报, 2(3): 225 – 227]
- Riley JR, Reynolds DR, Smith AD, Rosenberg LJ, Cheng XN, Zhang XX, Xu GM, Cheng JY, Bao AD, Zhai BP, Wang HK, 1994. Observations on the autumn migration of *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and other pests in east central China. *Bull. Entomol. Res.*, 84: 389 – 402.
- Rosenberg LJ, Magor JL, 1987. Predicting windborne displacements of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* from synoptic weather data. I. Long-distance displacements in the north-east monsoon. *J. Anim. Ecol.*, 56: 39 – 51.
- Shen L, Cheng XN, 1998. The effect of migration on reproduction of *Nilaparvata lugens*. *J. Nanjing Agric. Univ.*, 21(3): 32 – 35. [沈丽, 程遐年, 1998. 迁飞对褐飞虱生殖的影响. 南京农业大学学报, 21(3): 32 – 35]
- Wang ZS, Ouyang YC, 1995. Carbohydrates mobilization and utilization during initial flight period in the moths *Mythimna separata* (Walker). *Acta Entomol. Sin.*, 38(2): 146 – 151. [王宗舜, 欧阳迎春, 1995. 东方粘虫飞行初期糖类的动用和消耗. 昆虫学报, 38(2): 146 – 151]
- Wang YC, 2004. Insect Biochemistry. China Agriculture Press, Beijing. [王荫长, 2004. 昆虫生物化学. 北京: 中国农业出版社]
- Watanabe T, Sogawa K, Hirai Y, Tsurumachi M, Fukamachi S, Ogawa Y, 1991. Correlation between migratory flight of rice planthoppers and the low-level jet stream in Kyushu southwestern Japan. *Appl. Entomol. Zool.*, 26: 215 – 222.
- Wu KM, Guo YY, 1998. The relationship between utilization of energy substances and sustained flight in cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomol. Sin.*, 41(1): 15 – 20. [吴孔明, 郭予元, 1998. 棉铃虫飞翔的能源物质及消耗. 昆虫学报, 41(1): 15 – 20]
- Wu JC, Xu JX, Yuan SZ, Liu JL, 2001. Pesticide-induced susceptibility of rice to brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Entomol. Exp. Appl.*, 100: 119 – 126.
- Zhang XX, Wu JC, 1988. A comparative study on geographical population of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée). *Acta Entomol. Sin.*, 31(3): 260 – 267. [张孝羲, 吴进才, 1988. 稻纵卷叶螟地理种群的比较研究. 昆虫学报, 31(3): 260 – 267]
- Zou YD, Chen JC, Wang SH, 1983. Study on the relationship between the internal contents of energy substance and the vitality of lipase with the migration of rice leaf roller (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée) and brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål). *Acta Ecol. Sin.*, 3(1): 63 – 68. [邹运鼎, 陈基诚, 王士槐, 1983. 稻纵卷叶螟、褐飞虱体内能源物质动态与迁飞关系的研究. 生态学报, 3(1): 63 – 68]
- Zou YD, Wang SH, Wang HF, 1984. Study on the energy substance for migration of armyworm, *Leucania separata* Walker. *Acta Ecol. Sin.*, 4(4): 372 – 377. [邹运鼎, 王士槐, 王弘法, 1984. 粘虫迁飞能源物质的研究. 生态学报, 4(4): 372 – 377]

(责任编辑: 赵利辉)