

褐飞虱侵害对不同抗性水平水稻 根部吸收氮、磷、钾的影响

刘井兰, 吴进才*

(扬州大学园艺与植物保护学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 为了解褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 侵害后水稻抗性水平与根系吸收氮(N)、磷(P)、钾(K)的关系, 对不同抗性水平的水稻受褐飞虱侵害后的平均受害水平、植株功能损失指数及水稻吸收水培液营养元素 N, P, K 情况进行了研究。结果表明: 不同水稻品种(TN1、协优 63、协优 963 和超级培矮 64S/E32)接种褐飞虱后, TN1 受害最严重, 协优 63 和超级培矮 64S/E32 次之; 受害最轻的是协优 963, 30 头/株侵害后植株功能损失指数仅为 0.661。40, 60 和 80 头/株侵害水稻后根系对 K 吸收下降程度最显著, 其次为 P, 最后为 N; 且随褐飞虱侵害时间的延长(6 d, 9 d)影响愈显著。60 头/株侵害 TN1、协优 63、协优 963 和超级培矮 64S/E32 后 9 d, 根系对 K 吸收下降率分别为 164.11%, 74.61%, 55.16% 和 46.60%。由此可见, 随水稻品种抗性水平的下降, 接种褐飞虱后, 水稻根部对水培液营养元素吸收下降程度愈显著。本研究结果可对深入阐明不同抗性水平水稻抗(耐)虫机制与根系吸收能力关系提供参考。

关键词: 褐飞虱; 水稻品种; 植物抗性; 根系; 植株功能损失指数; 营养元素吸收

中图分类号: Q965.9 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2010)04-0411-09

Effects of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae) infestation on the uptake level of nitrogen, phosphorus and potassium by roots of rice varieties with different resistant levels

LIU Jing-Lan, WU Jin-Cai* (School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: To understand the relationship between rice plant resistance and the uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by roots under *Nilaparvata lugens* infestation, we examined the rice plant resistance (average injury scale), functional plant loss index (FPLI) and uptake of nitrogen, phosphorus and potassium by roots of rice varieties under *N. lugens* infestation. The results showed that the FPLI of TN1 was the greatest, followed by Xieyou 63 and super-high yield rice Peiai 64S/E32, and that of Xieyou 963 was the lowest (0.661) under the infestation of 30 nymphs per plant. The percent reduction of K uptake in hydroponic solution under the infestation of 40, 60 and 80 nymphs per plant was the highest, followed by P and the last was N. The uptake of N, P and K by roots significantly declined with the increase of *N. lugens* feeding duration (6 and 9 d). Percent reduction of K uptake by roots after infestation by 60 nymphs was 164.11% on TN1, 74.61% on Xieyou 63, 55.16% on Xieyou 963 and 46.60% on super-high yield rice Peiai 64S/E32, respectively. It is so concluded that the level of uptake by roots decreased dramatically with the rice plant resistance decreasing. The present findings may have significance for understanding the relationship between rice resistant level and uptake levels of rice roots.

Key words: *Nilaparvata lugens*; rice varieties; plant resistance; roots; functional plant loss index (FPLI); nutrient element uptake

基金项目: 国家自然科学基金项目(30670323); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20061117001); 扬州大学科技创新培育基金(2007CXJ017)

作者简介: 刘井兰, 女, 1974 年生, 江苏邳州人, 博士, 副教授, 研究方向为害虫综合治理与农药环境毒理, E-mail: drjinglan@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author, Tel.: 0514-87979246, E-mail: jc.wu@public.yz.js.cn

收稿日期 Received: 2009-06-26; 接受日期 Accepted: 2010-03-29

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 是水稻生产上重要的害虫之一, 以直接刺吸稻株的韧皮部汁液为害水稻, 严重影响了水稻的产量(马来宝等, 2006; 穆兰芳等, 2006; 夏华兴和姜方新, 2006)。褐飞虱防治主要依靠化学农药。滥用、不科学使用农药导致近年褐飞虱对吡虫啉的抗性逐年上升, 加上生产上乱用菊酯类农药防治食叶性害虫, 这类农药刺激褐飞虱生殖(王荫长等, 1994; 程家安和祝增荣, 2006)。褐飞虱再度大面积危害实际上是人类遭到了生态系的报复, 这给滥用农药又一次敲响了警钟。在害虫综合治理三大要素中, 利用水稻品种的抗(耐)虫性是非常重要的害虫控制策略(程家安等, 2008)。植物抗、耐虫性机理研究涉及最多的是光合作用能力的变化, 同化产物的分配等(陈建明等, 2005), 但是否与根系有关至今未见报道。

水稻根系是植物生理活动重要部位, 也是一些激素如细胞分裂素(玉米素、玉米素核苷)的合成部位(Yang *et al.*, 2000, 2002; 杨建昌等, 2001)。根功能和地上部光合作用产物的传导、分配与作物的灌浆和产量关系密切, 部分根系缺磷利于小麦幼苗的生长并促进同化物向根系的运输(庞欣等, 2000), 生育中期短期增加氮素供应水平可提高单位根重的活力, 与植株可溶性糖含量呈正相关(王余龙等, 1997), 根系活力与灌浆速率、水稻产量呈极显著的线性正相关(徐家宽等, 2005; 黄农荣等, 2006)。已有研究表明, 褐飞虱取食后引起同化产物如可溶性糖在根、冠(叶片)间的分配, 引起根冠比发生改变(Liu *et al.*, 2008), 褐飞虱取食水稻地上部会影响地下部(根部)的生理活性, 如显著降低根对营养元素的吸收(Wu *et al.*, 2003; Qiu *et al.*, 2004)。然而, 褐飞虱取食不同抗性水平的水稻后对营养元素的吸收有无差异未见报道。本研究期望测定不同抗性水平的水稻在褐飞虱侵害后吸收水培液营养元素氮(N)、磷(P)、钾(K)的变化, 来阐明褐飞虱侵害后水稻根部对水培液营养元素吸收与水稻抗性水平两者之间的关系, 为水稻虱烧发生及褐飞虱综合治理提供重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试水稻: 以分蘖期 TN1(中国水稻研究所提供)、协优 63(浙江省农科种业有限公司提供)、协优 963(浙江省农科种业有限公司提供)、超级培

矮 64S/E32(江苏省农业科学院提供)作为供试品种。挑选饱满种子, 清水浸种 12 h 后用次氯酸钠消毒 20 min, 再用清水冲洗干净, 放于 35℃ 阴处催芽, 露出胚根后播于筛子筛过的细土中, 待 4 叶期时清水洗去根部泥土, 将其插入预备好的泡沫板孔中, 每孔移栽 6 株幼苗, 再将泡沫板放入充满 Espino 培养液(Yoshida *et al.*, 1975) (储备液制备: 大量元素 914 g NH_4NO_3 , 403 g $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 714 g K_2SO_4 , 3 240 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 886 g CaCl_2 , 分别用 10 L 蒸馏水配制放在玻璃器皿中保存。微量元素 15.0 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.74 g $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 9.34 g H_3BO_3 , 77.0 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.35 g $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.31 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 119 g 柠檬酸, 先将各物质溶解后与 500 mL 浓 H_2SO_4 混在一起, 加蒸馏水至 10 L 放在玻璃器皿中保存。培养液制备: 4 L 培养液的每种大量元素及微量元素储备液的毫升数分别取 5 mL) 的小桶(高 13.7 cm, 直径为 10.4 cm)中水培, 每天用酸或碱调试使 pH 保持在 5.0 左右, 5 d 更换一次营养液。10 d 后分蘖初期的水稻苗为水稻平均受害水平及功能损失指数测定所用的材料, 15 d 后水稻培养至分蘖盛期为水稻根系吸收营养元素测定所用的材料, 每株水稻取 1 主茎 2 分蘖作为实验材料。

1.1.2 供试虫源: 实验中所用褐飞虱来自于中国水稻研究所(杭州), 接虫实验前, 褐飞虱在养虫圃中繁殖 2 代后使用。

1.2 接虫处理

1.2.1 褐飞虱侵害后水稻平均受害水平及植株功能损失指数的测定: 每株分别接上不同褐飞虱密度(3~4 龄若虫), 15 和 30 头/株; 接虫后 24 h, 检查一次每个处理的飞虱数量, 如有死亡, 补足至所设计的密度。对照不接虫。每一处理重复 8 次。当 TN1 受害达 7~9 级时, 目测各品种的受害程度, 用改进的植物功能损失指数(functional plant loss index, FPLI)估计水稻品种对褐飞虱的抗性反应(陈建明等, 2003, 2009)。

计算方法为 $\text{FPLI} = 1 - (\text{供试品种受害植株干重} / \text{供试品种未受害植株干重}) \times [1 - (\text{供试品种受害级别} / \text{感虫受害级别})] \times 100\%$ 。

1.2.2 水培液 N, P 和 K 含量的测定: 每株分别接上不同褐飞虱密度(4~5 龄若虫), TN1 为 10, 20, 40 和 60 头/株; 协优 63 为 10, 20, 40, 60 和 80 头/株; 协优 963 和超级培矮 64S/E32 为 20, 40, 60 和 80 头/株。接虫后 24 h, 检查每个处理

的飞虱数量, 如有死亡, 补足至所设计的密度。对照不接虫。接虫后 3, 6 和 9 d 采样后将样品立即放入冰箱保存, 但不得超过 24 h, 水样 pH 值为 5~9, 此水样为待测样。褐飞虱侵害不同水稻品种后根系对 N, P, K 吸收的测定具体参照 Qiu 等 (2004), 每一处理重复 4 次。用吸管吸取 5 mL 待测样, 放入蒸馏水, 稀释至 10 mL 测定, 由标准曲线查得样品含 N 量。移取 50 mL 待测样, 加入 20 mL 钼钼酸铵试剂加水至刻度并充分混匀, 静置 10 min 测定, 由标准曲线查得样品含 P 量。取待测样, 做预备实验, 了解水培液的 K 浓度, 根据浓度大小稀释使浓度在 0~2 mg/L 之内, 测定后由标准曲线查得样品含 K 量。

1.3 数据统计与分析

数据统计分析采用 DPS 软件系统提供的软件包 (唐启义和冯明光, 2002)。各品种各数据未经数据转换。采用双因素方差分析同一侵害时间内水培液中同一营养元素含量在水稻品种、密度 (0, 10, 20, 40, 60 和 80 头/株) 变化, 多重比较均采用 Duncan 氏新复极差法。

2 结果与分析

2.1 褐飞虱侵害不同水稻品种后水稻平均受害级别及植物功能损失指数的比较

从水稻植株的受害程度来看 (表 1), 接种褐飞虱后, TN1 平均受害级别在 7 级以上, 稻株基本枯死; 协优 63 和超级培矮 64S/E32 次之; 平均受害级别较低的是协优 963, 可能水稻在这一时期抗虫性相对较强的缘故。由表 2 可见, 30 头褐飞虱/株侵害不同水稻品种后, 协优 963 植株功能损失指数最低仅为 0.661。这与褐飞虱侵害后不同水稻品种的平均受害级别结果 (表 1) 相一致。

2.2 褐飞虱侵害对水稻根系吸收 N 的影响

统计分析结果表明, 褐飞虱侵害后 3 d, 水稻品种间水培液中 N 含量差异显著 ($F = 31.320$, $df = 3, 38$, $P = 0.00001$), 水培液中 N 含量的大小顺序为 TN1 > 协优 63 > 协优 963 > 超级培矮 64S/E32。接虫密度间差异不显著 ($F = 1.068$, $df = 3, 38$, $P = 0.4102$), 品种与接虫密度间无显著交互作用 ($F = 1.562$, $df = 3, 38$, $P = 0.1622$)。6 d 后水稻品种间 N 含量差异显著 ($F = 12.64$, $df = 3, 43$, $P = 0.0014$), 水培液中 N 含量的大小顺序为 TN1 > 协优 63 > 协优 963 > 超级培矮 64S/E32。接

虫密度间差异不显著 ($F = 0.25$, $df = 3, 43$, $P = 0.8594$), 品种与接虫密度间无显著交互作用 ($F = 1.296$, $df = 9, 43$, $P = 0.267$)。9 d 后水稻品种间 N 含量差异显著 ($F = 9.384$, $df = 3, 45$, $P = 0.0039$), 水培液中 N 含量的大小顺序为协优 63 > TN1 > 超级培矮 64S/E32 > 协优 963。接虫密度间差异显著 ($F = 4.412$, $df = 3, 45$, $P = 0.0361$), 品种与接虫密度间有显著交互作用 ($F = 2.654$, $df = 9, 45$, $P = 0.0147$) (表 3~6)。

表 1 褐飞虱侵害不同水稻品种后平均受害级别的变化
Table 1 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on rice plant resistance (average injury scale) of different rice varieties

水稻品种 Rice variety	飞虱密度 (头/株) <i>N. lugens</i> density (nymphs/plant)	平均受害级别 Rice plant resistance (average injury scale)
TN1	0	3.000 ± 0.001 b
	15	8.167 ± 0.408 a
	30	8.333 ± 0.516 a
协优 63 Xieyou 63	0	5.000 ± 0.001 a
	15	5.000 ± 0.001 a
	30	5.333 ± 0.817 a
	协优 963 Xieyou 963	0
15		4.000 ± 1.095 b
	30	5.000 ± 0.001 a
	超级培矮 64S/E32 Super-high yield rice Peiai 64S/E32	0
15		5.667 ± 1.033 a
	30	5.667 ± 1.033 a

表中数值是平均值 ± 标准差, 不同品种进行多重比较。平均值后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法)。Data are mean ± SD. Multiple comparisons were carried out on the same rice variety after *N. lugens* infestation. Means within a column followed by different small letters showed significant differences at the 5% level ($P < 0.05$, Duncan's test).

表 2 褐飞虱侵害后不同水稻品种的植株功能损失指数
Table 2 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on functional plant loss indexes of different rice varieties

水稻品种 Rice variety	植株功能损失指数 Functional plant loss index
TN1	1.000
协优 63 Xieyou 63	0.787
协优 963 Xieyou 963	0.661
超级培矮 64S/E32 Super-high yield rice Peiai 64S/E32	0.759

表 3 褐飞虱侵害对 TN1 水培液 N, P, K 含量的影响

Table 3 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on N, P and K concentrations in hydroponic solution for TN1

侵害后天数(d) Days after infestation	飞虱密度(头/株) Planthopper density (nymphs/plant)	水培液营养物质含量 Nutrient contents in water solution (mg/L)		
		N	P	K
3	0	52.845 ± 14.487 a	3.127 ± 0.138 a	18.635 ± 1.082 c
	10	50.441 ± 11.206 a	3.373 ± 0.172 a	20.173 ± 0.758 bc
	20	65.265 ± 7.723 a	3.235 ± 0.166 a	21.288 ± 0.991 b
	40	54.047 ± 12.718 a	3.153 ± 0.514 a	21.858 ± 1.463 b
	60	69.669 ± 5.608 a	2.886 ± 0.140 a	24.788 ± 1.396 a
6	0	29.833 ± 2.285 a	2.516 ± 0.169 b	19.317 ± 1.974 c
	10	33.418 ± 7.440 a	2.802 ± 0.362 ab	25.473 ± 3.337 b
	20	32.016 ± 0.463 a	3.180 ± 0.202 a	25.435 ± 0.256 b
	40	26.809 ± 7.958 a	3.323 ± 0.199 a	24.910 ± 1.978 b
	60	31.415 ± 7.440 a	3.337 ± 0.262 a	26.670 ± 1.265 a
9	0	13.039 ± 4.237 c	2.748 ± 0.185 c	15.043 ± 2.086 d
	10	17.796 ± 1.912 b	3.461 ± 0.475 b	21.603 ± 2.659 c
	20	22.653 ± 1.816 a	3.511 ± 0.076 b	24.445 ± 5.340 c
	40	22.380 ± 1.995 a	3.743 ± 0.593 ab	32.593 ± 4.887 b
	60	25.614 ± 0.927 a	4.296 ± 0.297 a	39.730 ± 2.317 a

表中数据是平均值 ± 标准差; 在同一侵害天数内进行多重比较, 平均值后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法)。下同。Data are means ± SD. Multiple comparisons were carried out on the same days after planthopper infestation. Means within the same column followed by different small letters showed significant difference at the 5% level ($P < 0.05$, Duncan's test). The same below.

表 4 褐飞虱侵害对协 63 水培液 N, P, K 含量的影响

Table 4 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on N, P and K concentrations in hydroponic solution for Xieyou 63

侵害后天数(d) Days after infestation	飞虱密度(头/株) Planthopper density (nymphs/plant)	水培液营养物质含量 Nutrient contents in water solution (mg/L)		
		N	P	K
3	0	53.446 ± 10.163 a	3.089 ± 0.344 b	16.330 ± 2.149 c
	10	65.530 ± 18.274 a	3.580 ± 0.307 ab	17.945 ± 1.369 bc
	20	57.852 ± 13.186 a	3.411 ± 0.266 ab	19.383 ± 0.417 abc
	40	61.257 ± 6.048 a	3.335 ± 0.031 ab	19.050 ± 2.230 abc
	60	52.979 ± 12.026 a	3.381 ± 0.232 ab	20.068 ± 1.558 ab
	80	65.864 ± 10.099 a	3.887 ± 0.368 a	21.870 ± 1.278 a
6	0	31.615 ± 5.253 a	2.990 ± 0.126 b	16.235 ± 1.096 e
	10	35.823 ± 4.208 a	3.899 ± 0.374 a	22.745 ± 3.536 b
	20	29.412 ± 2.107 a	3.630 ± 0.708 a	22.295 ± 3.300 bc
	40	30.547 ± 2.575 a	3.282 ± 0.101 a	22.265 ± 2.033 bed
	60	34.462 ± 2.814 a	3.724 ± 0.579 a	30.723 ± 1.121 a
	80	34.419 ± 3.729 a	6.229 ± 0.538 a	24.42 ± 2.886 b
9	0	14.693 ± 0.539 a	2.926 ± 0.575 b	13.610 ± 0.384 c
	10	29.212 ± 2.069 b	3.545 ± 1.166 b	15.803 ± 0.988 bc
	20	27.212 ± 2.069 b	3.585 ± 0.261 b	16.706 ± 1.933 bc
	40	25.407 ± 5.248 b	3.670 ± 0.446 b	21.323 ± 4.787 ab
	60	28.010 ± 1.534 b	3.937 ± 0.223 ab	23.765 ± 1.870 a
	80	29.412 ± 1.202 b	5.879 ± 1.474 a	24.090 ± 1.335 a

表 5 褐飞虱侵害对协优 963 水培液 N, P, K 含量的影响

Table 5 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on N, P and K concentrations in hydroponic solution for Xieyou 963

侵害后天数(d) Days after infestation	飞虱密度(头/株) Planthopper density (nymphs/plant)	水培液营养物质含量 Nutrient contents in water solution (mg/L)		
		N	P	K
3	0	44.995 ± 6.844 a	2.805 ± 0.143 a	15.010 ± 0.416 a
	20	57.867 ± 9.937 a	2.686 ± 0.112 a	16.488 ± 0.845 a
	40	43.921 ± 3.958 a	2.754 ± 0.319 a	19.233 ± 3.391 a
	60	50.596 ± 5.123 a	2.847 ± 0.135 a	18.897 ± 2.747 a
	80	54.848 ± 11.683 a	3.016 ± 0.053 a	16.700 ± 0.555 a
6	0	24.939 ± 0.925 ab	2.368 ± 0.153 b	21.937 ± 0.800 a
	20	25.407 ± 1.368 ab	2.978 ± 0.217 a	22.213 ± 1.533 b
	40	24.205 ± 3.359 b	2.921 ± 0.333 a	25.163 ± 2.091 b
	60	26.208 ± 4.156 ab	2.943 ± 0.190 a	34.470 ± 1.715 b
	80	29.210 ± 2.775 a	2.914 ± 0.045 a	31.903 ± 2.287 b
9	0	7.314 ± 2.297 a	2.391 ± 0.204 c	14.02 ± 1.439 c
	20	12.288 ± 1.918 b	2.809 ± 0.413 bc	14.748 ± 1.260 bc
	40	14.258 ± 2.814 b	3.437 ± 0.561 ab	20.965 ± 6.502 abc
	60	12.455 ± 3.651 b	3.363 ± 0.144 ab	21.753 ± 2.102 ab
	80	15.943 ± 2.297 b	3.678 ± 0.064 a	22.543 ± 2.017 a

表 6 褐飞虱侵害对超级培矮 64S/E32 水培液 N, P, K 含量的影响

Table 6 Effects of *Nilaparvata lugens* infestation on N, P and K concentrations in hydroponic solution for super-high yield rice Peiai 64S/E32

侵害后天数(d) Days after infestation	飞虱密度(头/株) Planthopper density (nymphs/plant)	水培液营养物质含量 Nutrient contents in water solution (mg/L)		
		N	P	K
3	0	31.882 ± 5.905 a	3.665 ± 0.141 a	21.260 ± 1.521 bc
	20	21.735 ± 1.668 b	3.726 ± 0.089 a	17.865 ± 0.605 c
	40	17.195 ± 4.461 b	3.829 ± 0.119 a	19.073 ± 2.522 bc
	60	21.606 ± 1.065 b	3.911 ± 0.124 ab	25.778 ± 1.582 a
	80	18.597 ± 4.406 b	3.887 ± 0.208 a	22.860 ± 1.675 ab
6	0	18.756 ± 1.202 b	3.731 ± 0.182 c	20.995 ± 1.442 b
	20	20.359 ± 3.664 ab	3.939 ± 0.152 bc	23.988 ± 1.866 a
	40	21.761 ± 4.648 ab	4.115 ± 0.033 ab	23.893 ± 0.682 a
	60	22.962 ± 0.801 a	4.143 ± 0.006 ab	23.968 ± 1.248 a
	80	22.361 ± 2.953 ab	4.229 ± 0.031 a	23.708 ± 1.126 a
9	0	19.371 ± 4.484 a	3.321 ± 0.101 a	16.388 ± 2.012 b
	20	21.789 ± 1.388 a	3.690 ± 0.430 ab	22.550 ± 2.700 a
	40	17.168 ± 3.295 a	3.917 ± 0.235 b	23.110 ± 2.958 a
	60	15.566 ± 10.07 a	3.899 ± 0.138 b	24.025 ± 1.009 a
	80	18.370 ± 1.368 a	3.949 ± 0.078 b	24.228 ± 3.051 a

褐飞虱侵害 TN1 后 3 和 6 d, 水培液 N 含量变化不明显; 20, 40 和 60 头/株侵害后 9 d, 水培液 N 含量显著上升, 水培液 N 含量(Y)与接虫褐飞虱密度(X)间存在显著的正相关关系($Y = 0.183X + 15.539$, $R^2 = 0.8001^*$)(表 3)。褐飞虱侵害后 3 和 6 d, 协优 63 水培液 N 含量变化不明显; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 9 d, 水培液 N 含量显著上升(表 4)。协优 963 在褐飞虱侵害后 3 和 6 d, 水培液 N 含量变化不明显; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 9 d, 水培液 N 含量显著上升(表 5)。超级培矮 64S/E32 在 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 3 d, 水培液 N 含量显著下降; 60 头/株侵害后 6 d 水培液 N 含量显著上升; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 9 d, 水培液 N 含量变化不明显(表 6)。

2.3 褐飞虱侵害对水稻根系吸收 P 的影响

褐飞虱侵害后 3 d, 水稻品种间水培液 P 含量差异显著($F = 49.783$, $df = 3, 44$, $P = 0.00001$)。水培液 P 含量大小顺序为超级培矮 64S/E32 > 协优 63 > TN1 > 协优 63。4 品种间均有显著差异。接虫密度间无显著差异($F = 1.139$, $df = 3, 44$, $P = 0.3845$), 品种与接虫密度间无显著交互作用($F = 1.077$, $df = 9, 44$, $P = 0.3984$)。6 d 后水稻品种间水培液 P 含量差异显著($F = 41.808$, $df = 3, 46$, $P = 0.00001$), 水培液 P 含量大小顺序为超级培矮 64S/E32 > 协优 63 > TN1 > 协优 963。4 品种间均有显著差异。接虫密度间差异显著($F = 10.53$, $df = 3, 46$, $P = 0.0027$), 品种与接虫密度间无显著交互作用($F = 1.321$, $df = 9, 46$, $P = 0.2524$)。9 d 后水稻品种间水培液 P 含量差异显著($F = 11.151$, $df = 3, 42$, $P = 0.0022$), 水培液 P 含量大小顺序为超级培矮 64S/E32 > 协优 63 > TN1 > 协优 963。超级培矮 64S/E32、协优 63 和 TN1 3 品种间无显著差异, 水培液 P 含量均显著大于协优 963。接虫密度间差异显著($F = 23.324$, $df = 3, 42$, $P = 0.0001$)。品种与接虫密度间无显著交互作用($F = 1.0940$, $df = 9, 42$, $P = 0.3879$)(表 3~6)。

10, 20, 40 和 60 头/株侵害 TN1 后 3 d, 水培液 P 含量变化不明显; 20, 40 和 60 头/株侵害后 6 d, 水培液 P 含量均显著增加, 且水培液 P 含量与接虫密度间呈显著正相关关系($Y = 0.0132X + 2.6879$, $R^2 = 0.7813^*$); 10, 20, 40 和 60 头/株侵害后 9 d, 水培液 P 含量均显著增加(表 3)。80 头/株侵害协优 63 后 3 d, 水培液 P 含量显著高于

对照; 10, 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 6 d, 水培液 P 含量均显著高于对照; 80 头/株侵害后 9 d, 水培液 P 含量显著升高, 水培液 P 含量与接虫密度间呈显著正相关关系($Y = 0.4579X + 2.3211$, $R^2 = 0.7136^*$)(表 4)。褐飞虱侵害协优 963 后 3 d, 水培液 P 含量变化不明显; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 6 d, P 含量均显著增加, 侵害后 9 d 影响更显著, 水培液 P 含量与接虫密度间呈显著正相关关系($Y = 0.019X + 2.4512$, $R^2 = 0.8954^*$)(表 5)。20, 40, 60 和 80 头/株侵害超级培矮 64S/E32 后 3 d, 水培液 P 含量变化不明显; 40, 60 和 80 头/株侵害后 6 和 9 d, 水培液 P 含量均显著上升, P 含量与接虫密度间均呈显著正相关关系($Y = 0.1171X + 3.5603$, $R^2 = 0.8923^*$; $Y = 0.1465X + 3.3157$, $R^2 = 0.7743^*$)(表 6)。

2.4 褐飞虱侵害对水稻根系吸收 K 的影响

褐飞虱侵害后 3 d, 水稻品种间水培液 K 含量差异显著($F = 5.665$, $df = 3, 45$, $P = 0.0185$)。水培液 K 含量大小顺序为超级培矮 64S/E32 > TN1 > 协优 63 > 协优 963。褐飞虱密度间差异显著($F = 5.293$, $df = 3, 45$, $P = 0.0223$)。品种、接虫密度间无显著交互作用($F = 2.613$, $df = 9, 45$, $P = 0.0161$)。6 d 后水稻品种间无显著差异($F = 1.061$, $df = 3, 44$, $P = 0.4128$), 水培液 K 含量大小顺序为协优 963 > TN1 > 超级培矮 64S/E32 > 协优 63。接虫密度间差异显著($F = 7.442$, $df = 3, 44$, $P = 0.0083$), 品种与接虫密度间有显著交互作用($F = 9.229$, $df = 9, 44$, $P = 0.00001$)。9 d 后水稻品种间无显著差异($F = 4.122$, $df = 3, 45$, $P = 0.0427$), 接虫密度间差异显著($F = 7.117$, $df = 3, 45$, $P = 0.0095$), 品种与接虫密度间有显著交互作用($F = 5.555$, $df = 9, 45$, $P = 0.00001$)(表 3~6)。

20, 40 和 60 头/株侵害 TN1 后 3 d, 水培液 K 含量显著增加, K 含量与接虫密度间呈显著正相关关系($Y = 0.0922X + 18.952$, $R^2 = 0.9455^*$); 10, 20, 40 和 60 头/株侵害后 6 和 9 d, 水培液 K 含量显著增加, K 含量与接虫密度间有显著正相关关系($Y = 0.1881X + 17.961$, $R^2 = 0.7718^*$; $Y = 0.3064X + 17.464$, $R^2 = 0.9096^*$)(表 3)。60 和 80 头/株侵害协优 63 后 3 d, 水培液 K 含量显著上升, K 含量与接虫密度间有显著正相关关系($Y = 0.9639X + 15.734$, $R^2 = 0.9186^*$); 10, 20, 40 和 60 头/株侵害后 6 d, 水培液 K 含量显著上升; 10

和 20 头/株侵害后 9 d, 水培液 K 含量变化不明显; 40, 60 和 80 头/株侵害后水培液 K 含量显著上升, K 含量与接虫密度间呈显著正相关关系 ($Y = 2.3115X + 11.126$, $R^2 = 0.9516^*$) (表 4)。20, 40, 60 和 80 头/株侵害协优 963 后 3 d, 水培液 K 含量变化不明显; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 6 和 9 d, 水培液 K 含量均显著增加, K 含量与接虫密度间呈显著正相关关系 ($Y = 0.2114X + 21.639$, $R^2 = 0.7877^*$; $Y = 0.1486X + 14.942$, $R^2 = 0.7681^*$) (表 5)。60 和 80 头/株侵害超级培矮 64S/E32 后 3 d, 水培液 K 含量显著上升; 20, 40, 60 和 80 头/株侵害后 6 d 和 9 d, 水培液 K 含量显

著上升(表 6)。

2.5 褐飞虱侵害分蘖期不同水稻品种后水培液 N, P 和 K 含量变化对比分析

褐飞虱侵害分蘖期不同抗性水平的水稻后水培液 N, P 和 K 含量变化的比较得出: 褐飞虱侵害后水培液 K 含量上升幅度最明显; 其次为 P; N 在褐飞虱侵害后 3 d 和 6 d 变化不明显, 9 d 变化较明显。不同抗性水平的水稻品种比较, TN1 水培液营养元素含量上升最明显, 其次为协优 63, 最后为协优 963 和超级培矮 64S/E32。且随褐飞虱侵害时间的延长(6 d, 9 d), 水培液营养元素含量上升愈显著(表 7)。

表 7 褐飞虱侵害分蘖期不同水稻品种后水培液不同营养元素变化的百分比
Table 7 Percentages of increase or decrease of nutrient contents in hydroponic solution following *Nilaparvata lugens* infestation at the tillering stage

水稻品种 Rice variety	飞虱密度(头/株) <i>N. lugens</i> density (nymphs/plant)	N			P			K		
		褐飞虱侵害后天数(d)			褐飞虱侵害后天数(d)			褐飞虱侵害后天数(d)		
		Days after infestation			Days after infestation			Days after infestation		
		3	6	9	3	6	9	3	6	9
TN1	10	-4.55	12.02	36.48*	7.85	11.39	25.91*	8.25	31.87*	43.60*
	20	23.50	7.32	73.73*	3.46	26.38*	27.75*	14.23*	31.67*	62.50*
	40	2.27	-0.08	71.64*	0.84	32.08*	36.21*	17.29*	28.96*	116.67*
	60	31.84	5.30	96.44*	-7.70	32.66*	56.33*	33.02*	43.97*	164.11*
协优 63	10	22.61	13.31	-98.81*	15.90	30.42*	21.16	9.89	40.10*	16.11
Xieyou 63	20	8.24	-6.97	-85.20*	10.41	21.42*	22.52	18.69	37.33*	22.75
	40	14.61	-3.38	-72.90*	7.95	9.781*	25.44	16.66	37.14*	56.67*
	60	-0.87	9.01	-90.60*	9.47	24.58*	34.58*	22.89*	89.24*	74.61*
	80	23.23	8.87	-100.00*	25.84*	108.40*	101.90*	33.93*	50.42*	77.00*
协优 963	20	28.61	1.88	68.01*	-4.27	25.73*	17.51	9.84	9.40*	5.19
Xieyou 963	40	-2.39	-2.94	94.94*	-1.84	14.87*	43.77*	28.13	14.71*	49.40
	60	12.45	5.09	70.29*	1.49	24.25*	40.66*	25.89	57.13*	55.16*
	80	21.90	17.13	117.98*	7.50	23.02*	53.83*	11.26	45.43*	60.79*
超级培矮 64S/E32	20	-31.83*	8.55	12.25	1.68	5.56	11.12	-16.00	14.47*	37.60*
Super-high yield	40	-46.07*	16.02	-11.37	4.47	10.29*	17.95*	-10.30	16.18*	41.02*
rice Peiai 64S/E32	60	-32.23*	22.41*	-19.64	6.70	11.04*	17.42*	21.25*	14.16*	46.60*
	80	-41.67*	19.20	-5.17	6.06	13.35*	18.91*	7.53	12.92*	47.84*

* 表示在同一品种、同一侵害时间接虫处理与不接虫对照相比差异显著; 百分率数据计算依据表 3~6。* shows significant differences between the treatment and the control of the same rice variety at the same infestation time. Percentages in the table were calculated based on the data in tables 3-6.

3 结论与讨论

根在生态学中的地位特殊(Cody, 1986; Skene,

1998)。褐飞虱侵害后水稻根系对各营养元素(N, P 和 K)的吸收反应速度不同, 水培液各营养元素含量的显著升高, 表明根系吸收营养元素的速度显著下降。褐飞虱的取食活动对根系吸收能力的影响

与所吸收的营养元素有关。N 是植物蛋白质和核酸的组成元素，也是植物体内多种酶的主要成分，一些维生素和生物碱中也含有氮素。P 是核酸和生物膜的能量代谢和生物合成的重要底物之一，在光合作用、呼吸作用及一系列酶的调节中起重要作用，是影响植物生长和新陈代谢的最重要的矿质元素之一。K 具有控制气孔开、闭的功能，有利于植物经济用水。K 是植物生长的必需营养元素，也是所有有机必需的唯一的一价阳离子，它的生理功能是其其他一价阳离子无法替代的，是作物生产中影响作物产量及质量的一个重要限制因子，已经日益引起植物生理学、植物营养学等学科的重视，它能促进碳水化合物化合物的代谢，并加速同化产物向储藏器官中运输；K 能增强植物的抗逆性，如抗旱、抗病等（印莉萍等，2006）。K 素与植物的抗性变化紧密（王明香等，2000）。褐飞虱的取食对根部吸收水培液 P 和 K 两营养元素影响较大，这与前人的研究结论一致（Wu *et al.*, 2003; Qiu *et al.*, 2004），这种现象的产生可能是因为植株体内含 N 量较高，或者是 N 在植株体内可以被重复利用，因而对 N 的吸收影响较小，但随侵害时间的延长，对 N 吸收影响越显著，9 d 后 TN1、协优 63 和协优 963 水培液 N 含量与对照（未接虫）相比均显著增加。

从不同抗性水平的植株受害水平及植株功能损失指数可见，褐飞虱侵害后 TN1 受害最严重。而感虫品种根对水培液营养元素吸收能力下降较抗（耐）虫水稻品种明显。褐飞虱的取食虽直接作用于地上部，但会影响根对水培液营养元素 N、P 和 K 的吸收，且对感虫品种 TN1 影响最显著。另有研究报道褐飞虱侵害不同抗性水平水稻后根及地上部的主要营养元素 N、P 和 K 含量显著下降，协优 63 较协优 963 明显，K 含量下降最明显，其次为 P，最后为 N（刘井兰等，2007）。本实验褐飞虱侵害不同抗性水平的水稻后根部吸收 N、P 和 K 变化差异与之一致，水培液营养元素含量显著上升，表明水稻根部吸收营养元素的速度显著下降，水稻地上部与地下部 N、P 和 K 含量均显著下降。从不同抗性水平的植株外在平均受害水平来看，感虫品种植株变得矮小枯黄，这利于虱烧的发生。

抗性水平不同的水稻在褐飞虱侵害后吸收营养元素变化程度基本与植株的平均受害级别一致，也与植株功能损失指数相关。可见，褐飞虱侵害后根系吸收营养元素能力变化差异可以用来评价水稻抗（耐）虫性。但本实验所研究的时间只有 9 d，是否

随时间的延长，不同抗性水平的水稻吸收营养元素程度差异有所变化，这还有待于进一步研究证实。

参考文献 (References)

- Chen JM, Yu XP, Chen JW, Lu ZJ, Cheng JA, Tao LY, Zheng XS, Xu HX, 2003. Relationship between photosynthesis changes in leaves of rice plants infested by whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera* Horvath and its resistance. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 17 (6): 423–423. [陈建明, 俞晓平, 陈俊伟, 吕仲贤, 程家安, 陶林勇, 郑许松, 徐红星, 2003. 水稻植株光合作用能力的变化与其抗白背飞虱的关系. 核农学报, 17(6): 423–427]
- Chen JM, Yu XP, Cheng JA, 2009. Evaluation for tolerance characteristics of different rice varieties to brown planthopper (BPH), *Nilaparvata lugens* (Stål). *Acta Agronomica Sinica*, 35 (5): 795–801. [陈建明, 俞晓平, 程家安, 2009. 不同水稻品种对褐飞虱的耐虫特性研究. 作物学报, 35(5): 795–801]
- Chen JM, Yu XP, Cheng JA, Zheng XS, Xu HX, Lu ZX, Zhang J F, Chen LZ, 2005. Plant tolerance against insect pests and its mechanisms. *Acta Entomologica Sinica*, 48(2): 262–272. [陈建明, 俞晓平, 程家安, 郑许松, 徐红星, 吕仲贤, 张珏锋, 陈列忠, 2005. 植物耐虫性研究进展. 昆虫学报, 48(2): 262–272]
- Cheng JA, Zhu JL, Zhu ZR, Zhang LG, 2008. Rice planthopper outbreak and environment regulation. *Journal of Environmental Entomology*, 30(2): 176–182. [程家安, 朱金良, 祝增荣, 章连观, 2008. 稻田飞虱灾变与环境调控. 环境昆虫学报, 30(2): 176–182]
- Cheng JA, Zhu ZR, 2006. Analysis on the key factors causing the outbreaks of brown planthopper in Yangtze area, China in 2005. *Plant Protection*, 32(4): 1–4. [程家安, 祝增荣, 2006. 2005 年长江流域稻区褐飞虱暴发成灾原因分析. 植物保护, 32(4): 1–4]
- Cody ML, 1986. Roots in plant ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 1(3): 76–78.
- Huang NR, Zhong XH, Wang F, Zheng HB, 2006. Root vigor and grain-filling characteristics in super hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 39(9): 1 772–1 779. [黄农荣, 钟旭华, 王丰, 郑海波, 2006. 超级杂交稻结实期根系活力与籽粒灌浆特性研究. 中国农业科学, 39(9): 1 772–1 779]
- Liu JL, Yu JF, Wu JC, Wu DH, Wang LP, 2007. Changes in levels of nitrogen, phosphorus and potassium in roots and shoots of different rice varieties under infestation by *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50 (10): 1 034–1 041. [刘井兰, 于建飞, 吴进才, 吴东浩, 王丽萍, 2007. 褐飞虱侵害后不同水稻品种根及地上部氮、磷、钾含量的变化. 昆虫学报, 50(10): 1 034–1 041]
- Liu JL, Yu JF, Wu JC, Yin JL, Gu HN, 2008. Physiological responses to *Nilaparvata lugens* in susceptible and resistant rice varieties: Allocation of assimilates between shoots and roots. *Journal of Economical Entomology*, 101(2): 384–390.
- Ma LB, Ge YL, Hang FG, Ding ZJ, Wang CH, 2006. Outbreak of

- brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, in Lixiahe region of 2005. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 12(2): 78. [马来宝, 葛玉林, 黄付根, 丁治军, 王存华, 2006. 江苏里下河地区 2005 年褐飞虱大发生的特点及其原因分析. *安徽农学通报*, 12(2): 78]
- Mu LF, Liu YC, Zhu FG, Ding HH, Teng JH, Qian BB, Cao WJ, 2006. Outbreak of later brown plant hopper, *Nilaparvata lugens* (Stål), in Wujiang City of 2005 and its control strategies. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(5): 706-709. [穆兰芳, 刘于成, 朱福官, 丁海红, 滕金洪, 钱斌彬, 曹卫菊, 2006. 2005 年吴江市褐飞虱后期特大发生原因及其防治对策. *昆虫知识*, 43(5): 706-709]
- Pang X, Li CJ, Zhang FS, 2000. Effect of partial-root supply of P nutrient on the growth and assimilate distribution of wheat seedlings. *Acta Agronomica Sinica*, 26(6): 719-724. [庞欣, 李春俭, 张福锁, 2000. 部分根系供磷对小麦幼苗生长及同化物分配的影响. *作物学报*, 26(6): 719-724]
- Qiu HM, Wu JC, Yang GQ, Dong B, Li DH, 2004. Changes in the uptake function of the rice root to nitrogen, phosphorus and potassium under brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae) and pesticide stresses, and effect of pesticides on rice grain filling in field. *Crop Protection*, 23(11): 1 041-1 048.
- Skene KR, 1998. Cluster roots: Some ecological considerations. *Journal of Ecology*, 86(1): 1 060-1 064.
- Tang QY, Feng MG, 2002. DPS Data Processing System for Practical Statistics. Science Press, Beijing. 65-70. [唐启义, 冯明光, 2002. DPS 实用统计分析. 北京: 科学出版社. 65-70]
- Wang MX, Nie JH, Zhang HF, 2000. The research advance of potassium nutrition. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 15(4): 356-358. [王明香, 聂俊华, 张华芳, 2000. 钾素营养研究进展. *云南农业大学学报*, 15(4): 356-358]
- Wang YC, Fan JQ, Tian XZ, Gao BZ, Fan XR, 1994. Studies on the resurgent question of planthoppers induced by deltamethrin and methamidophos. *Entomological Knowledge*, 31(5): 257-262. [王荫长, 范加勤, 田学志, 高保宗, 范岳荣, 1994. 溴氰菊酯和甲胺磷引起稻飞虱再猖獗问题的研究. *昆虫知识*, 31(5): 257-262]
- Wang YL, Yao YL, Liu BY, Lu ZL, Huang JY, Xu JK, Cai JZ, 1997. Effect of nitrogen supplying levels and timings on the development of roots in hybrid indica rice. *Acta Agronomica Sinica*, 23(6): 699-706. [王余龙, 姚友礼, 刘宝玉, 吕贞龙, 黄建晔, 徐家宽, 蔡建中, 1997. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响. *作物学报*, 23(6): 699-706]
- Wu JC, Qiu HM, Yang GQ, Dong B, Gu HN, 2003. Nutrient uptake of rice roots in response to infestation of *Nilaparvata lugens* (Stål) (Homoptera: Delphacidae). *Journal of Economical Entomology*, 96(6): 1 798-1 804.
- Xia HX, Jiang FX, 2006. Outbreak of brown plant hopper, *Nilaparvata lugens* of 2005 and its control strategies. *Modern Agricultural Science and Technology*, (5): 43. [夏华兴, 姜方新, 2006. 2005 年褐飞虱重发原因及防治对策. *现代农业科技*, (5): 43]
- Xu JK, Yang LX, Wang ZQ, Dong GC, Huang JY, Wang YL, 2005. Effects of soil Cu content on root traits in association with grain yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 19(5): 427-433. [徐加宽, 杨连新, 王志强, 董桂春, 黄建晔, 王余龙, 2005. 土壤铜含量对水稻根系的影响及其与产量的关系. *中国水稻科学*, 19(5): 427-433]
- Yang JC, Peng SB, Gu SL, Visperas RM, Zhu QS, 2001. Changes in zeatin and zeatin riboside content in rice grains and roots during grain filling and the relationship to grain plumpness. *Acta Agronomica Sinica*, 27(1): 35-42. [杨建昌, 彭少兵, 顾世梁, Visperas RM, 朱庆森, 2001. 水稻结实期籽粒和根系中玉米素与玉米素核苷含量的变化及其与籽粒充实的关系. *作物学报*, 27(1): 35-42]
- Yang JC, Peng SB, Visperas RM, Sanico AL, Zhu QS, Gu SL, 2000. Grain filling pattern and cytokinin content in the grains and roots of rice plants. *Plant Growth Regulation*, 30(1): 261-270.
- Yang JC, Zhang JH, Wang ZQ, 2002. Abscisic acid and cytokinins in the root exudates and leaves and their relationship to senescence and remobilization of carbon reserves in rice subjected to water stress during grain filling. *Planta*, 215(4): 645-652.
- Yin LP, Huang QN, Wu P, 2006. Molecular Biology of Plant Nutrition and Signal Transduction. 2nd ed. Science Press, Beijing. 5-21. [印莉萍, 黄勤妮, 吴平, 2006. 植物营养分子生物学及信号转导(第 2 版). 北京: 科学出版社. 5-21]
- Yoshida S, Fomo DA, Cock JH, Gomez KA (Translated by Information and Documentation Services of Research Institute of Beijing Academy of Agricultural Sciences), 1975. Routine procedure for growing rice plants in culture solution. In: *Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice*. 2nd ed. Science Press, Beijing. 57-63. [吉田昌一, 福尔诺 DA, 科克 JH, 戈梅斯 KA(北京市农业科学院作物研究所资料情报组译), 1975. 稻株水培的常规方法. *水稻生理学实验手册(第 2 版)*. 北京: 科学出版社. 57-63]

(责任编辑: 赵利辉)