



胡大星, 李成, 吴碧球, 黄所生, 凌炎, 黄芊, 黄凤宽, 龙丽萍. 褐飞虱为害对不同抗性水稻品种苗期根系几种营养物质和总酚含量的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (2): 413–419.

褐飞虱为害对不同抗性水稻品种苗期根系 几种营养物质和总酚含量的影响

胡大星^{1,2}, 李成^{1*}, 吴碧球¹, 黄所生¹, 凌炎¹, 黄芊¹,
黄凤宽^{1*}, 龙丽萍¹

(1. 广西农业科学院植物保护研究所, 广西农作物病虫害生物学重点实验室, 南宁 530007;

2. 华中师范大学附属息县高级中学, 河南信阳 464300)

摘要: 本文以对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 具不同抗性水平的水稻品种为研究对象, 通过在苗期接入不同密度褐飞虱后测定水稻根系可溶性糖、游离氨基酸、可溶性蛋白质和总酚变化情况, 以明确水稻抗虫性与根系生理生化物质含量的关系。研究结果表明, 根系中的可溶性糖除了苗龄 8 d 不接虫的处理, 其余处理均以感虫品种 TN1 含量最高, 显著高于 3 个抗虫品种 IR36、Rathu-Heenati (RHT)、Ptb33。各苗龄不同接虫密度 TN1 根系游离氨基酸及可溶性蛋白质含量均显著高于 3 个抗虫品种。各苗龄不同接虫密度 TN1 根系总酚含量均显著低于 3 个抗虫品种, 以 Ptb33 总酚含量最高, 各处理均显著高于 IR36 及 RHT。结果可为进一步开发利用根系指标优良的抗性水稻品种提供科学依据。

关键词: 褐飞虱; 抗性品种; 根系; 营养物质; 总酚

中图分类号: Q965; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 02-0413-07

Influence of brown planthopper on the contents of several nutrients and total phenols in roots of different resistant rice varieties at seedling stage

HU Da-Xing^{1,2}, LI Cheng^{1*}, WU Bi-Qiu¹, HUANG Suo-Sheng¹, LING Yan¹, HUANG Qian¹, HUANG Feng-Kuan^{1*}, LONG Li-Ping¹ (1. Plant Protection Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Guangxi Key Laboratory of Biology for Crop Diseases and Insect Pests, Nanning 530007, China; 2. Xixian Senior High School Affiliated to Central China Normal University, Xinyang 464300, Henan Province, China)

Abstract: In this study, rice varieties with different levels of resistance to *Nilaparvata lugens* (Stål) were selected as the research objects. The changes of soluble sugar, free amino acid, soluble protein and total phenol content in rice roots were measured after different densities of brown planthopper were introduced at seedling stage to clarify the relationship between rice resistance and roots. The results showed that the content of soluble sugar in roots was the highest in susceptible varieties (TN1) except for the treatment of no inoculation for 8 days, which was significantly higher than that of resistant varieties (IR36, Rathu-

基金项目: 广西青年科学基金项目 (2018GXNSFBA281155); 国家重点研发计划课题 (2018YFD0200306); 广西农业科学院科技发展基金项目 (桂农科 2017JM30); 国家现代农业产业技术体系广西 (水稻) 创新团队建设 (nyctxgxcxtd-01-04); 广西农业科学院基本科研业务专项 (2015YT40); 广西农业科学院科技发展基金项目 (2015JZ44, 2015JZ45, 2015JZ46)

作者简介: 胡大星, 男, 硕士, 二级教师, 研究方向为农业害虫综合治理, E-mail: 1536676162@qq.com

* 共同通讯作者 Author for correspondence: 李成, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水稻害虫综合防控, E-mail: lichengov@gxaas.net; 黄凤宽, 博士, 研究员, 主要研究方向为水稻害虫综合防控, E-mail: huangfengkuan@gxaas.net

收稿日期 Received: 2020-03-10; 接受日期 Accepted: 2020-04-26

Heenati (RHT), Ptb33). The contents of free amino acids and soluble protein in the roots of TN1 were significantly higher than those of IR36, RHT and ptb33. The total phenol content of TN1 root was significantly lower than that of IR36, RHT and ptb33, and the highest was ptb33, which was significantly higher than that of IR36 and RHT. The results could provide scientific basis for the development and utilization of resistant rice varieties with excellent root characters.

Key words: Brown planthopper; resistant varieties; root system; nutrients; total phenols

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* Stål 是水稻生产上的重要害虫。遭受褐飞虱为害后, 稻株组织被破坏, 同化作用减弱, 植株变黄、倒伏, 导致减产甚至绝收 (杨建昌, 2011; Huang *et al.*, 2015)。利用抗虫品种防控褐飞虱具有很好的经济性和防控效果。有关学者研究结果表明, 水稻品种的抗虫性与其生物物质有直接关系, 营养物质差异影响稻飞虱取食选择性, 代谢途径分析表明, 褐飞虱的侵染可以干扰感虫水稻品种 KD 及抗虫水稻品种 IL7 和 IL308 被侵染早期 (1~3 d) 的转氨作用, 到侵染的第 8 天, KD 品种通过激活氨基酸介导的从头合成途径作出应激反应 (Uawisetwathana *et al.*, 2015)。水稻被褐飞虱侵害后其叶鞘中氨基酸含量会产生明显变化 (王荣富等, 2001)。病虫害为害植物的行为会与植物发生复杂的相互作用, 从而导致一些基因和蛋白发生变化 (Pineda *et al.*, 2010)。水稻对褐飞虱具不同抗性, 而根系是水稻营养物质和防御物质运输和合成的重要器官 (杨建昌等, 2011), 可能对水稻抗虫表现起重要作用。褐飞虱取食对水稻品种根系的作用已有报道, 孙祖雄等研究结果表明受褐飞虱取食后, 抗虫水稻品种的根系形态受影响比感虫品种小 (孙祖雄等, 2015); 胡大星等研究发现水稻苗期根系形态多种指标与水稻品种抗虫性以及接虫密度有关 (胡大星等, 2017)。目前, 有关褐飞虱取食对不同抗性水稻品种苗期根系营养及次生物质含量的影响未见有报道。为此, 本研究以对褐飞虱抗性不同的 4 个水稻品种为对象, 通过测定在苗期接入不同密度褐飞虱后水稻根几种物质含量的变化, 明确根系营养及次生物质含量与水稻抗虫性的关系, 为开发利用根系性状优良的抗性水稻品种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试水稻品种

供试水稻品种选择国际水稻研究所提供的 3 个对褐飞虱具不同抗性的水稻品种: IR36 (含抗性

基因)、Rathu-Heenati (RHT) (含)、Ptb33 (含), 以 TN1 为感虫对照, 验证抗性表现与前人报道一致 (黄凤宽等, 2005; 黄所生等, 2014; Sable *et al.*, 2014; Dharshini and Gowda, 2014)。

表 1 供试水稻品种所含抗性基因及抗性水平表现
Table 1 Resistance genes and resistance level performance of the tested rice varieties

品种 Variety	抗性基因 Resistance gene	抗性级别 Resistance grade	抗性水平 Resistance level
TN1	无 (absent)	9	感 S
IR36	<i>Bph2</i>	5	中抗 MR
RHT	<i>Bph3</i>	3	抗 R
Ptb33	<i>Bph2</i> and <i>Bph3</i>	1	高抗 HR

1.1.2 供试虫源

在田间采集褐飞虱怀卵雌成虫, 在网室内使用感虫品种 TN1 饲养至足够数量。

1.2 试验方法

把不同品种水稻种子分别播入单穴 $d = 4$ cm, $h = 7$ cm 的育秧盘中, 每穴 1 粒, 每盘 20 粒, 待 8 d、13 d、18 d 时, 剔除弱苗, 每苗分别接入褐飞虱 1 龄若虫 0 (CK)、3 头、5 头、7 头, 每个接虫密度为 1 个处理, 每处理 4 个重复, 每重复为 1 个育秧盘。用 100 目纱网虫罩将育秧盘罩住。接虫 7 d 后每个重复选长势一致的 9 株秧苗对根系取样, 洗净后剪碎混匀, 再分别测定可溶性糖、游离氨基酸、可溶性蛋白质和总酚的含量。

1.2.1 可溶性糖含量测定

参考改进的蒽酮法 (刘海英等, 2013; 位杰等, 2014), 用标准蔗糖溶液制成标准曲线, 取 0.2 g 水稻根系研磨成匀浆, 移入 10 mL 离心管中, 加超纯水至刻度线, 沸水提取 2 次 (30 min 每次), 用 3 000 rpm 离心 30 min 后移至 25 mL 容量瓶中, 定容。用移液枪取 1.5 mL 移至试管中, 以加入 1.5 mL 超纯水的试管为空白对照, 分别加入现配的蒽酮试剂 5 mL, 充分显色自然冷却至室温后于 630 nm 波长下测吸光度, 计算可溶性糖含量。

1.2.2 游离氨基酸含量测定

采用优化的茚三酮显色法 (邵金良等, 2008; 杨远帆等, 2013; 中华人民共和国国家标准化委员会, 2013), 以谷氨酸 (纯度 99%) 制作标准曲线, 取 1 g 水稻根系研磨成匀浆, 过滤移至 100 mL 容量瓶定容。吸取过滤后的样品液 1.0 mL 至试管中, 按顺序加入超纯水 1.0 mL、抗坏血酸 0.1 mL 及水合茚三酮 3.0 mL, 混匀后沸水浴提取 15 min, 取出后置于冷水中摇晃冷却, 加超纯水定容至 25 mL 放置 10 min, 记录 570 nm 波长下的吸光度, 计算游离氨基酸含量。

1.2.3 可溶性蛋白质含量测定

采用毛伍祥改进的考马斯亮蓝法 (毛伍祥, 2017), 制作标准曲线, 称取 0.3 g 新鲜根系研磨成匀浆, 3 000 rpm 离心 20 min 后取上清液 1 mL 置于试管中, 加考马斯亮蓝溶液 5 mL 后静置 23 min, 记录 595 nm 波长下的吸光度, 计算可溶性蛋白质含量。

1.2.4 总酚含量测定

根系总酚含量测定参考王治同等优化的福林-酚法 (王治同等, 2018)。以没食子酸粉末制备标准曲线。将水稻根系剪碎混匀后, 称取 0.1 g, 用 5 mL 95% 甲醇溶液浸提 12 h, 8 000 rpm 离心 15 min, 取上清液保存备用。吸取 1.0 mL 样品至刻度试管, 加入 0.5 mL 现配的福林-酚试剂溶液, 混合均匀后迅速加入 1 mL 12% Na_2CO_3 溶液,

摇匀后在 20℃ 下反应 4 h, 记录 765 nm 波长下的吸光度, 计算总酚含量。

1.3 数据处理

用 OringinPro 2018C 对原始数据进行整理及制图, 采用 SPSS 17.0 数据处理系统及邓肯氏法 (DMRT, $\alpha = 0.05$) 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同抗性的水稻品种受害后根系可溶性糖含量变化

不同接虫密度的抗感褐飞虱水稻品种可溶性糖含量变化见图 1。供试水稻品种根系可溶性糖含量均随着苗龄增大而显著增高, 苗龄相同时含量差异与水稻品种和接虫密度两个因子相关。苗龄 8 d 时根系可溶性糖含量, 接虫密度为 0 头/苗, TN1 与 IR36 差异不显著, 显著高于 RHT、Ptb33, RHT 和 Ptb33 差异不显著; 接虫密度为 3、5、7 头/苗, TN1 显著高于 3 个抗虫品种 IR36、RHT 和 Ptb33, IR36 显著高于 RHT、Ptb33。苗龄 13 d、18 d 时根系可溶性糖含量, 各接虫密度下 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种, 而 IR36 均显著高于 Ptb33。由此可见, 根系可溶性糖含量, 除了苗龄 8 d、接虫密度为 0 头/苗的处理, 其余处理均以感虫品种 TN1 最高, 显著高于 3 个抗虫品种。

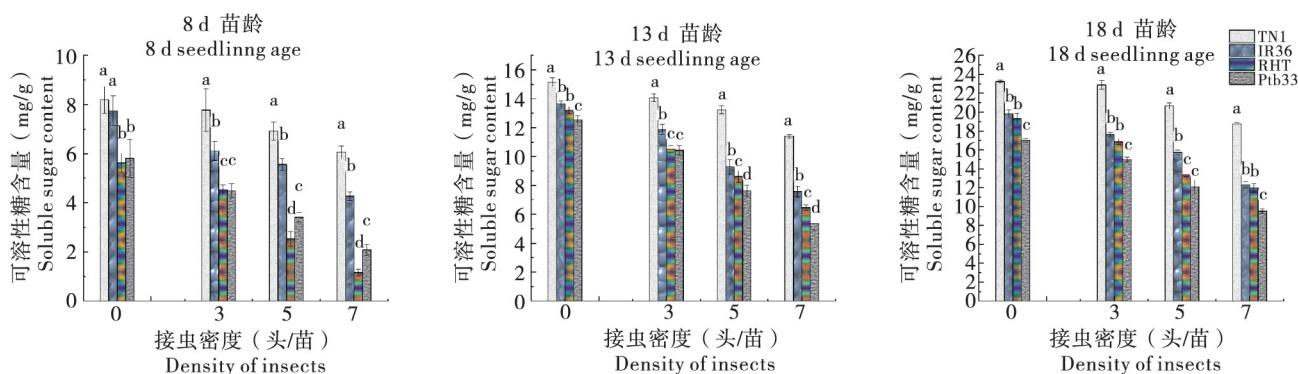


图 1 不同接虫密度下不同苗龄水稻品种根系可溶性糖含量

Fig. 1 Soluble sugar content in roots of rice varieties of different seedling age under different insect density

注: 数据处理系统及邓肯氏法 (DMRT, $\alpha = 0.05$) 进行差异显著性分析, 柱形图中带有相同字母的数据柱即在 0.05 水平上没有显著差异, 图 2 - 图 4 同上。Note: Data analysis by the Duncan multiple range test (DMRT, $\alpha = 0.05$). Data in columns followed by the same letter were not significantly different at the 0.05 level, as in Fig. 2 - Fig. 4.

2.2 不同抗性的水稻品种受害后根系游离氨基酸含量变化

不同接虫密度的抗感褐飞虱水稻品种游离氨

基酸含量变化见图 2。供试水稻品种根系游离氨基酸含量均随着苗龄增大而显著降低, 苗龄相同时含量差异与水稻品种和接虫密度两个因子相关。

苗龄 8 d 时根系游离氨基酸含量, 各接虫密度下 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种, IR36 也均显著高于 RHT、Ptb33; 接虫密度 0、5、7 头/苗, RHT 和 Ptb33 差异不显著。苗龄 13 d 时根系游离氨基酸含量, 各接虫密度下 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种, IR36 也均显著高于 RHT、Ptb33, 而 RHT、Ptb33 差异不显著。苗龄 18 d 时根系游离氨基酸含量, 各接虫密度下 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种, 接

虫密度 0 头/苗, 3 个抗虫品种之间差异不显著; 接虫密度 3 头/苗, IR36 和 RHT 差异不显著, 但均显著低于 Ptb33; 接虫密度 5 头/苗, IR36 和 Ptb33 差异不显著, 但均显著高于 RHT; 接虫密度 7 头/苗, RHT 和 Ptb33 差异不显著, 但均显著低于 IR36。由此可见, 试验中各苗龄不同接虫密度感虫品种 TN1 游离氨基酸含量均显著高于抗性品种 IR36、RHT、Ptb33。

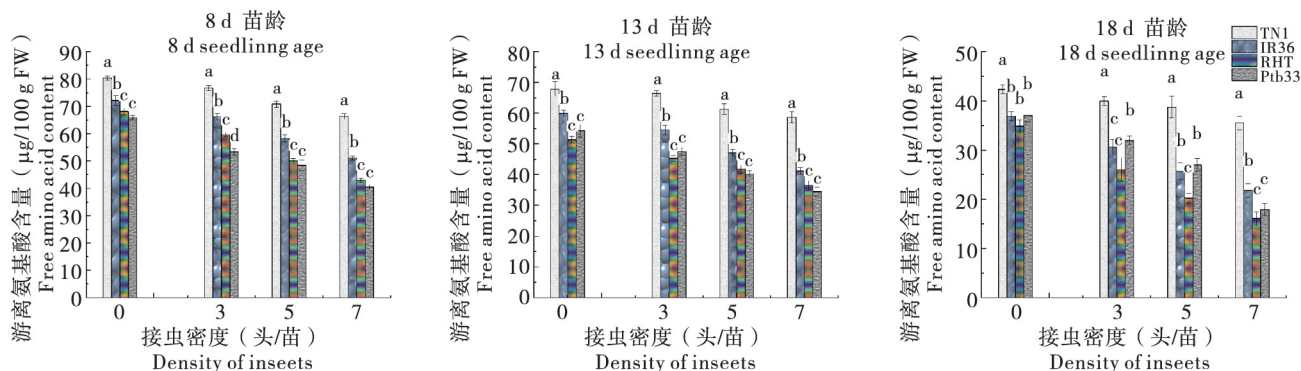


图2 不同接虫密度下不同苗龄水稻品种游离氨基酸含量

Fig. 2 Free amino acid content of rice varieties of different seedling age under different density of inoculation

2.3 不同抗性的水稻品种受害后根系可溶性蛋白质含量变化

不同接虫密度的抗感褐飞虱水稻品种可溶性蛋白质含量变化见图3。供试水稻品种根系可溶性蛋白质含量均随着苗龄增大而显著增高, 苗龄相同时含量差异与水稻品种和接虫密度两个因子相关。苗龄 8 d 时根系可溶性蛋白质含量, 各接虫密度 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种, IR36 也均显著高于 Ptb33; 接虫密度 0、5、7 头/苗, RHT 均显著高于 Ptb33。苗龄 13 d 时根系可溶性蛋白质含量, 各接虫密度 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种; 接虫密度 0 头/苗, 3 个抗虫品种之间差异不显著; 接虫

密度 3、7 头/苗, IR36 和 RHT 差异不显著, 但均显著高于 Ptb33; 接虫密度 5 头/苗, IR36 显著高于 RHT、Ptb33, RHT 和 Ptb33 差异不显著。苗龄 18 d 时根系可溶性蛋白质含量, 各接虫密度 TN1 均显著高于 3 个抗虫品种; 接虫密度 0 头/苗, 3 个抗虫品种之间差异不显著; 接虫密度 3、5 头/苗, RHT 和 Ptb33 差异不显著, 但均显著低于 IR36; 接虫密度 7 头/苗, IR36 显著高于 RHT 和 Ptb33, RHT 显著高于 Ptb33。由此可见, 各苗龄不同接虫密度 TN1 根系可溶性蛋白质含量均显著高于 3 个抗虫品种。

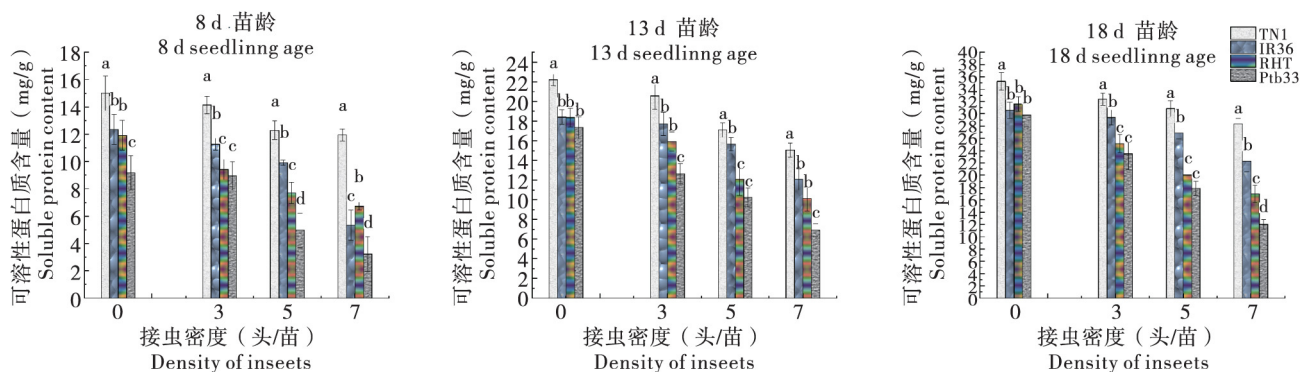


图3 不同接虫密度下不同苗龄水稻品种根系可溶性蛋白质含量

Fig. 3 Soluble protein content in roots of rice varieties of different seedling age under different insect density

2.4 不同抗性的水稻品种受害后根系总酚含量变化

不同接虫密度的抗感褐飞虱水稻品种总酚含量变化见图4。供试水稻品种根系总酚含量均随苗龄增大而增高。但感虫品种 TN1 在苗龄 8 d 到 13 d 时, 相同接虫密度下总酚含量各处理间均无显著差异, 13 d 到 18 d 显著增高; 而 3 个抗性品种在相同接虫密度下各处理总酚含量均随苗龄增加显著增高。苗龄相同时总酚含量与水稻品种和接虫密度两个因子相关。苗龄 8 d 时总酚含量, 各接虫密度 TN1 均显著低于 3 个抗虫品种, Ptb33 均显著高于 IR36、RHT; 接虫密度 0、3、5 头/苗, IR36

和 RHT 差异不显著; 接虫密度 7 头/苗, RHT 显著高于 IR36。苗龄 13 d 时总酚含量, 各接虫密度 TN1 均显著低于 3 个抗虫品种, Ptb33 均显著高于 IR36、RHT; 接虫密度 0 头/苗, IR36 显著高于 RHT; 接虫密度 3、5、7 头/苗, IR36 和 RHT 差异不显著。苗龄 18 d 时总酚含量, 各接虫密度 TN1 均显著低于 3 个抗虫品种, Ptb33 均显著高于 IR36、RHT; 接虫密度 0、3 头/苗时, IR36 和 RHT 差异不显著; 接虫密度 5、7 头/苗, IR36 显著低于 RHT。由此可见, 各苗龄不同接虫密度 TN1 根系总酚含量均显著低于 3 个抗虫品种, 以 Ptb33 最高, 均显著高于 IR36、RHT。

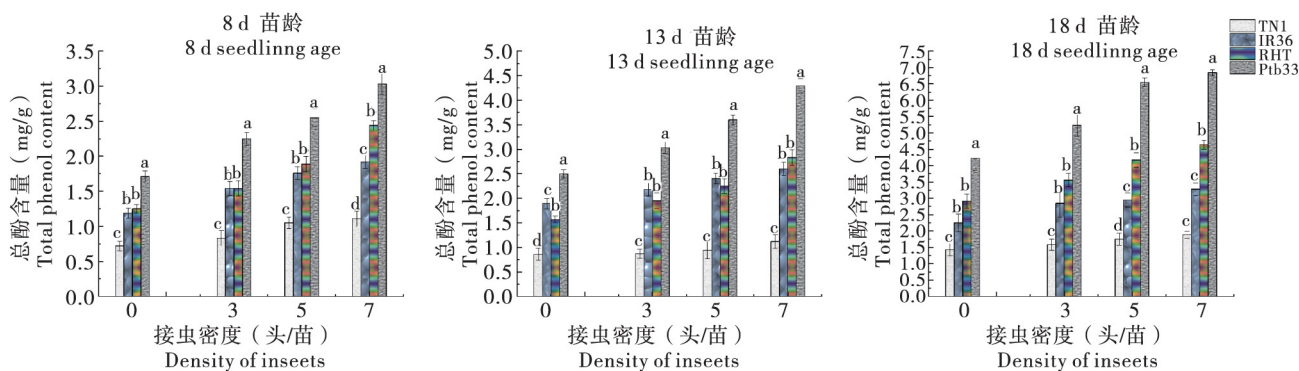


图4 不同接虫密度下不同苗龄水稻品种根系总酚含量

Fig. 4 Total phenol content in roots of rice varieties of different seedling age under different density of inoculation

3 结论与讨论

本研究结果表明, 除了苗龄 8 d 不接虫的处理, 其余处理根系可溶性糖含量均以感虫品种 TN1 最高, 显著高于 3 个抗虫品种 IR36、RHT 和 Ptb33。各苗龄不同接虫密度 TN1 根系游离氨基酸含量、可溶性蛋白质含量均显著高于 3 个抗虫品种。各苗龄不同接虫密度 TN1 根系总酚含量均显著低于 3 个抗虫品种, 苗龄和接虫密度相同时, 均以 Ptb33 总酚含量最高, 显著高于 IR36、RHT。上述结果同 TN1、IR36、RHT、Ptb33 对褐飞虱的抗性表现一致 (IRRI, 2002; 黄凤宽等, 2005、2012; 陈桂华等, 2011)。

褐飞虱对水稻的取食倾向与其营养物质含量有关。吴碧球等的研究结果表明淹水、光照和施氮量对稻茎游离氨基酸和可溶性糖等营养物质的含量有显著影响, 且这些营养物质的含量与 RHT、Ptb33 等水稻品种抗褐飞虱表现密切相关 (吴碧球等, 2015; 2016; 2017)。受灰飞虱 *Laodelphax*

striatellus 为害后水稻可溶性蛋白质和可溶性糖含量均下降, 但抗虫品种的下降幅度显著小于感虫品种, 且取食时长及接虫密度不同均会造成显著差异 (段灿星等, 2013); 陈建明等发现抗 (耐) 虫性强的水稻品种可溶性糖含量比感虫品种低 (陈建明等, 2003、2004; 张宏, 2006; 商科科, 2012)。李再园等的研究表明水稻受白背飞虱 *Sogatella furcifera* 为害后可溶性糖含量下降 (李再园等, 2018)。本研究结果同上述作者的研究结果一致。诱导处理后水稻叶片总酚含量增加, TN1 及 IR36 的抗性会显著提升 (吴莹莹等, 2012), 而对稻茎的测定表明感虫品种 TN1 总酚含量显著低于抗虫品种 Ptb33 和 RHT (周君雷等, 2015)。本研究结果表明, 感虫品种 TN1 根系总酚含量低于 3 个抗虫品种 IR36、RHT 和 Ptb33, 且随接虫密度增加, 抗虫品种总酚含量增速大于感虫品种, 说明受害后抗性水平不同的水稻品种根系总酚含量变化与其他部位趋势一致, 侧面验证了上述结论。但靳勇等对野生稻转育抗性品系 B3、B5、B12 分蘖期稻茎中 17 中主要氨基酸含量与 TN1 比较, 认为含

量变化较大的谷氨酸、天冬氨酸等 9 种游离氨基酸含量与前述水稻品种抗虫性不存在明显相关性 (靳勇等, 2002), 这与本研究结果不一致, 可能与供试品种和地理气候等的差别有关。由于水稻抗虫机制复杂, 本文仅对水稻品种苗期进行研究, 褐飞虱为害后对不同抗性水稻品种成株期根系的影响有待于今后进一步的研究。

参考文献 (References)

- Chen GH, Zhang FC, Sheng XQ, *et al.* Field resistance of rice varieties to brown planthopper and its ecological mechanism [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (5): 1354 – 1358. [陈桂华, 张发成, 盛仙俏, 等. 水稻品种对褐飞虱的田间抗性及其生态学机制 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (5): 1354 – 1358]
- Chen JM, Yu XP, Cheng JA, *et al.* Changes in physiological indexes of different rice varieties to brown planthopper [J]. *Journal of Plant Protection*, 2003, 30 (3): 225 – 231. [陈建明, 俞晓平, 程家安, 等. 不同水稻品种受褐飞虱危害后体内生理指标的变化 [J]. 植物保护学报, 2003, 30 (3): 225 – 231]
- Chen JM. Study on Tolerance of Rice Varieties to Brown Planthopper and its Physiological Mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang University Master Thesis, 2004. [陈建明. 水稻品种对褐飞虱为害的耐性及其生理机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2004]
- National Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of Total Amount of Free Amino Acids in Tea: GB/T 8314 – 2013 [S]. 2013: 1 – 3. [中华人民共和国国家标准化管理委员会. 茶游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314 – 2013 [S]. 2013: 1 – 3]
- Dharshini GM, Gowda DKS. Biochemical basis of resistance in rice landraces to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) [J]. *Current Biotica*, 2014, 8 (3): 213 – 219.
- Duan CX, Peng GS, Wang XM, *et al.* Differences in physiological responses of resistant rice varieties to brown planthopper [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50 (1): 145 – 153. [段灿星, 彭高松, 王晓鸣, 等. 抗感水稻品种受灰飞虱为害后的生理反应差异 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 50 (1): 145 – 153]
- Hu DX, Wu BQ, Huang SS, *et al.* Effects of inoculation density on root morphological indexes of BPH rice varieties at seedling stage [J]. *Guangxi Plant Protection*, 2017 (3): 15 – 18. [胡大星, 吴碧球, 黄所生, 等. 接虫密度对抗褐飞虱水稻品种苗期根系形态指标的影响 [J]. 广西植保, 2017 (3): 15 – 18]
- Hu DX. Study on the Effect of Brown Planthopper Damage on Root Morphology and Physiological and Biochemical Indexes of Different Resistant Rice Varieties [D]. Nanning: Guangxi University Master Thesis, 2017. [胡大星. 褐飞虱为害对不同抗性水稻品种根系形态和生理生化指标的影响研究 [D]. 南宁: 广西大学硕士论文, 2017]
- Huang FK, Huang SS, Wu BQ, *et al.* Germplasm resource exploration of rice resistant to brown planthopper and white back planthopper [J]. *Plant Protection*, 2012, 38 (4): 152 – 155. [黄凤宽, 黄所生, 吴碧球, 等. 抗褐飞虱兼抗白背飞虱水稻种质资源发掘 [J]. 植物保护, 2012, 38 (4): 152 – 155]
- Huang FK, Wei SM, Huang SS, *et al.* Dynamic monitoring of variation of brown planthopper biotype and selection of broad – spectrum resistant varieties (materials) [J]. *Journal of Plant Protection*, 2005, 1: 111 – 112. [黄凤宽, 韦素美, 黄所生, 等. 褐飞虱生物型的变异动态监测及广谱抗性品种 (材料) 的筛选 [J]. 植物保护学报, 2005, 1: 111 – 112]
- Huang J, Liu M, Chen X, *et al.* Effects of intraspecific variation in rice resistance to aboveground herbivore, brown planthopper, and rice root nematodes on plant yield, labile pools of plant, and rhizosphere soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, 51 (4): 417 – 425.
- Huang SS, Huang FK, Wu BQ, *et al.* Evaluation of resistance of new rice varieties (combinations) to brown planthopper [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27 (5): 1919 – 1923. [黄所生, 黄凤宽, 吴碧球, 等. 水稻新品种 (组合) 对褐飞虱的抗性评价 [J]. 西南农业学报, 2014, 27 (5): 1919 – 1923]
- Inger. Standard Evaluation System for Rice (5th Edition) [M]. Manila, Philippines: Genetic Resources Center, IRRI, 2002: 56.
- Jin Y, Yang CJ, Hua HX, *et al.* Preliminary study on the resistance mechanism of wild rice lines to brown planthopper and the relationship between amino acid content and resistance to brown planthopper. In: Henan Entomological Society, ed. *Insect Research in Central China (Volume I)* [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002, 63 – 69. [靳勇, 杨长举, 华红霞, 等. 野生稻转育品系对褐飞虱的抗性机制以及氨基酸含量与抗褐飞虱关系的初步研究. 见: 河南省昆虫学会主编. 华中昆虫研究 (第一卷) [C]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002: 63 – 69]
- Li ZY, Xu B, Wang FL, *et al.* Physiological changes of rice plants in different nitrogen application levels after the damage of white backed planthopper [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32 (5): 501 – 508. [李再园, 许博, 王福莲, 等. 不同施氮水平下水稻植株在白背飞虱为害后的生理变化 [J]. 中国水稻科学, 2018, 32 (5): 501 – 508]
- Liu HY, Wang HH, Cui CH, *et al.* Improvement on the experiment of soluble sugar content determination (anthrone method) [J]. *Laboratory Science*, 2013, 16 (2): 19 – 20. [刘海英, 王华华, 崔长海, 等. 可溶性糖含量测定 (蒽酮法) 实验的改进 [J]. 实验室科学, 2013, 16 (2): 19 – 20]
- Mao WX. Error analysis and improvement of protein concentration determination experiment by coomassie brilliant blue method [J]. *Curriculum Education Research*, 2017, 6 (38): 248. [毛伍祥. 关于考马斯亮蓝法测定蛋白质浓度实验的误差分析与改进 [J]. 课程教育研究, 2017, 6 (38): 248]
- Pineda M, Sajani C, Barón M. Changes induced by the pepper mild mottle tobamovirus on the chloroplast proteome of *Nicotiana glauca* [J]. *Photosynthesis Research*, 2010, 103 (1): 31 – 45.

- Sable A , Suresh S , Kumar S , *et al.* Antixenosis mechanism of resistance to brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in selected rice genotypes [J]. *Trends in Biosciences* , 2014 , 7 (13) : 1594 – 1598.
- Shang KK. Study on Resistance of New Rice Resistant Varieties (Lines) to *Nilaparvata lugens* (Stål) and Adaptability Changes of *Nilaparvata lugens* (Stål) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University Master Thesis, 2012. [商科科. 水稻新材料对褐飞虱的抗性及其适应性变化 [D]. 武汉: 华中农业大学硕士论文, 2012]
- Shao JL , Li QW , Dong BS , *et al.* Determination of total free amino acids in tea by ninhydrin colorimetry [J]. *China Food Additive* , 2008 , 19 (2) : 162 – 165. [邵金良, 黎其万, 董宝生, 等. 茚三酮比色法测定茶叶中游离氨基酸总量 [J]. 中国食品添加剂, 2008 , 19 (2) : 162 – 165]
- Sun ZX , Wu BQ , Huang SS , *et al.* Effects of BPH on root morphological characteristics of different resistant rice varieties at seedling stage [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* , 2015 , 28 (5) : 2052 – 2055. [孙祖雄, 吴碧球, 黄所生, 等. 褐飞虱危害对不同抗虫水稻品种苗期根系形态特征的影响 [J]. 西南农业学报, 2015 , 28 (5) : 2052 – 2055]
- Uawisetwathana U , Graham , Kamolsukyonyong , *et al.* Quantitative 1H-NMR metabolome profiling of Thai jasmine rice (*Oryza sativa*) reveals primary metabolic response during brown planthopper infestation [J]. *Metabolomics* , 2015 , 11 (6) : 1640 – 1655.
- Wang RF , Zhao GR , Ding ZQ. Effect of two kinds of rice planthopper on amino acid content of rice plant [J]. *Journal of Anhui Agricultural University* , 2001 , 28 (2) : 133 – 138. [王荣富, 赵国荣, 丁震乾. 两种稻飞虱的取食为害对稻株氨基酸含量的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2001 , 28 (2) : 133 – 138]
- Wang ZT , Liang R , Nan HL. Determination of total phenols in Zuoyou red berries byfulin phenol method [J]. *Food Industry* , 2018 , 39 (8) : 281 – 284. [王治同, 梁瑞, 南海龙. 福林 - 酚法测定成熟期左优红浆果中的总酚含量 [J]. 食品工业, 2018 , 39 (8) : 281 – 284]
- Wei J , Wu CY , Jiang Y , *et al.* Optimization of conditions for determination of soluble sugar content in jujube by anthrone method [J]. *Food Science* , 2014 , 35 (24) : 136 – 140. [位杰, 吴翠云, 蒋媛, 等. 蒽酮法测定红枣可溶性糖含量条件的优化 [J]. 食品科学, 2014 , 35 (24) : 136 – 140]
- Wu BQ , Huang SS , Hu DX , *et al.* Effects of seedling age , light intensity and nitrogen application on rice nutrients and their relationship with resistance to brown planthopper [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* , 2017 , 30 (5) : 1048 – 1056. [吴碧球, 黄所生, 胡大星, 等. 苗龄、光照强度和施氮量对水稻营养物质的影响及其与抗褐飞虱的关系 [J]. 西南农业学报, 2017 , 30 (5) : 1048 – 1056]
- Wu BQ , Huang SS , Huang FK , *et al.* The effect of flood stress on the nutrients of insect resistant rice varieties and its relationship with the feed intake of brown planthopper [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University* , 2015 , 34 (2) : 36 – 40. [吴碧球, 黄所生, 黄凤宽, 等. 淹水胁迫对抗虫水稻品种营养物质的影响及其与褐飞虱取食量的关系 [J]. 华中农业大学学报, 2015 , 34 (2) : 36 – 40]
- Wu BQ , Li C , Sun ZX , *et al.* The effects of seedling age , light intensity and nitrogen application on the main defense enzyme activities of brown planthopper rice varieties [J]. *Journal of Environmental Entomology* , 2016 , 38 (6) : 1121 – 1133. [吴碧球, 李成, 孙祖雄, 等. 苗龄、光照强度和施氮量对抗褐飞虱水稻品种主要防御酶活性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2016 , 38 (6) : 1121 – 1133]
- Wu YY , Wu BQ , Chen Y , *et al.* Study on the relationship between resistance to brown planthopper induced by methyl jasmonate and total phenol content of plants [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* , 2012 , 25 (2) : 462 – 466. [吴莹莹, 吴碧球, 陈燕, 等. 茉莉酸甲酯诱导水稻对褐飞虱抗性与植株总酚含量的关系研究 [J]. 西南农业学报, 2012 , 25 (2) : 462 – 466]
- Yang JC. Relationship between rice root morphology and physiology , yield , quality formation and nutrient absorption and utilization [J]. *China Agricultural Science* , 2011 , 44 (1) : 36 – 46. [杨建昌. 水稻根系形态生理与产量、品质形成及养分吸收利用的关系 [J]. 中国农业科学, 2011 , 44 (1) : 36 – 46]
- Yang YF , Ni H , Wu LM. Determination of amino acids in honey and fructose glucose syrup by ninhydrin method [J]. *China Food Journal* , 2013 , 13 (2) : 171 – 176. [杨远帆, 倪辉, 吴黎明. 茚三酮法测定蜂蜜及果葡糖浆中的氨基酸含量 [J]. 中国食品学报, 2013 , 13 (2) : 171 – 176]
- Zhang H. Study on the Influence of Host Plants on the Population of *Grifola Nilaparvata* and the Mechanism of Wing Type Differentiation [D]. Yangzhou: Yangzhou University Master Thesis, 2006. [张宏. 寄主植物对灰飞虱种群的影响及翅型分化机制研究 [D]. 扬州: 扬州大学硕士论文, 2006]
- Zhou JL , Wu BQ , Huang SS , *et al.* The effect of flood stress on the secondary biomass of rice varieties and its relationship with the intake of brown planthopper [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* , 2015 , 28 (1) : 115 – 119. [周君雷, 吴碧球, 黄所生, 等. 淹水胁迫对水稻品种次生物质的影响及其与褐飞虱取食量关系 [J]. 西南农业学报, 2015 , 28 (1) : 115 – 119]