

## 不同施氮水平下水稻植株在白背飞虱为害后的生理变化

李再园 许博 王福莲\* 田小海 马跃坤 钟裕俊 程世阳

(主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 长江大学 昆虫研究所, 湖北 荆州 434025; \*通讯联系人, E-mail: wangfl\_hb@163.com)

### Physiological Changes in Rice Plants After Infestation by Whitebacked Planthoppers at Different Nitrogen Levels

LI Zaiyuan, XU Bo, WANG Fulian\*, TIAN Xiaohai, MA Yuekun, ZHONG Yujun, CHENG Shiyang

(Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry/Institute of Entomological Science, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; \*Corresponding author, E-mail: wangfl\_hb@163.com)

**Abstract:** 【Objective】In order to clarify the physiological mechanism in regulating the resistance of rice to whitebacked planthoppers at different nitrogen levels, 【Method】we compared the differences in contents of chlorophyll, relative water content, bleeding sap, water content, dry matter content, soluble sugar contents in infected rice at different nitrogen levels by indoors cage-raising method. 【Result】The results showed that there were significant changes in different defensive substances in rice after infection by whitebacked planthoppers. The contents of chlorophyll, dry matter weight and soluble sugar contents in rice plants decreased after BPH infection, while the content of bleeding sap, relative water content and water content increased. With increasing nitrogen levels, chlorophyll (SPAD) contents and dry matter weight of rice increased, and the increase of water content and bleeding sap content followed an upward trend. Water content, soluble sugar contents were on a decreasing trend. 【Conclusion】Nitrogen level could affect the resistance of rice to whitebacked planthoppers by regulating the contents of chlorophyll (SPAD), relative water content, water content, dry matter weight and soluble sugar contents in rice, subsequently influencing the population of whitebacked planthoppers.

**Key words:** rice; nitrogen level; whitebacked planthoppers; defensive substance

**摘要:** 【目的】为明确不同施氮水平调控水稻对白背飞虱抵御能力的生理机制, 【方法】采用室内笼罩饲喂胁迫法, 比较了不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后, 体内叶绿素(SPAD)含量、含水量、伤流液含量和干物质含量、可溶性糖含量等防御相关物质含量的变化。【结果】水稻受白背飞虱为害后, 水稻体内不同防御物质含量变化存在差异。水稻受白背飞虱为害后体内叶绿素含量、干物质含量、可溶性糖含量均有所下降, 伤流液含量、相对含水量、含水量有所上升。随着水稻施氮水平的增加, 受害水稻叶绿素含量、干物质质量降幅呈上升趋势, 含水量、伤流液含量增幅呈上升趋势, 相对含水量、可溶性糖含量增幅呈下降趋势。【结论】不同施氮水平可通过调控水稻体内叶绿素含量、相对含水量、含水量、干物质含量、可溶性糖含量影响水稻对白背飞虱的抵御能力, 从而影响白背飞虱种群数量。

**关键词:** 水稻; 施氮水平; 白背飞虱; 抵御物质

中图分类号: S143.1; S435.112<sup>+</sup>.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-7216(2018)05-0501-08

白背飞虱 [*Sogatella furcifera* (Horváth)] 是我国稻区发生最严重的迁飞性害虫之一, 严重影响我国水稻生产。其成虫、若虫刺吸稻株的韧皮部汁液, 造成水稻生长缓慢, 分蘖延迟, 瘪粒增加; 为害严重时, 造成稻株枯死, 呈“虱烧”状<sup>[1]</sup>。同时, 白背飞虱在取食过程中可传播病害, 如水稻南方黑条矮缩病、水稻齿矮等病毒, 导致中国南部、朝鲜、日本和越南水稻产量损失严重<sup>[2-3]</sup>。

水稻遭受昆虫为害胁迫后, 将激活相应的防御

信号途径, 合成与防御相关的物质或诱导产生挥发性物质, 形成直接或间接的防御保障。在稻飞虱取食胁迫下, 水稻体内许多生理生化物质如叶绿素、水分、伤流液、地上干物质、可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸、酚类物质、丙二醛(MDA)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)的含量或活性均有一定的变化, 且不同抗(耐)性品种水稻变化幅度不同<sup>[4-10]</sup>。

氮肥的过量施用是诱发白背飞虱和褐飞虱种

收稿日期: 2018-01-29; 修改稿收到日期: 2018-04-21。

基金项目: 主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心开放基金资助项目(2015MS023); 长江大学农学院大学生创新项目(2017)。

群暴发的关键因素之一<sup>[11-12]</sup>。施氮后水稻体内叶绿素<sup>[13]</sup>、游离氨基酸<sup>[14]</sup>、可溶性糖<sup>[15]</sup>、水分<sup>[8]</sup>、地上干物质<sup>[16]</sup>等含量提高,增加昆虫对其选择和嗜好,提高水稻对昆虫的适宜程度,导致昆虫种群数量增长。其中,田间水稻氮肥施用水平可间接影响白背飞虱的种群发生量,其种群密度随氮肥施用量的增加而显著提高<sup>[17]</sup>。也有研究表明,随着施氮水平的提高,水稻对褐飞虱的抗性下降。水稻施氮水平在200 kg/hm<sup>2</sup>以下时,水稻对褐飞虱的耐害性随施氮水平的上升而降低<sup>[8]</sup>。

氮肥在水稻产量和品质形成中起着关键作用,目前全球氮肥施用量呈每年1.4%的增长趋势,中国是氮肥施用大国,约占世界施用量30%,水稻合理施用氮肥范围为150~250 kg/hm<sup>2</sup><sup>[18]</sup>,而我国超出该施用范围上限的稻田面积占播种面积20%,施氮量高达350 kg/hm<sup>2</sup>,且存在逐渐增长趋势<sup>[19]</sup>。目前关于水稻不同抗性品种在稻飞虱取食为害胁迫下生理生化物质含量及活性的变化差异研究已取得大量进展。而施氮水平调控水稻对白背飞虱的抵御能力的生理机制尚不清楚。其中,叶绿素含量、水分含量、伤流液量、干物质、可溶性糖含量在水稻抵御稻飞虱时起重要作用<sup>[20]</sup>。故此,本研究通过设置不同施氮水平,在水稻受白背飞虱为害胁迫后,分析不同施氮水平下水稻叶绿素(SPAD)含量、相对含水量、含水量、伤流液量和干物质、可溶性糖含量等防御物质的差异变化,以期揭示不同施氮水平调控水稻对白背飞虱抵御能力的生理机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 水稻品种

供试水稻品种为感虫水稻品种TN1,由中国农业科学院植物保护研究所农业害虫研究室水稻害虫研究组提供。

### 1.2 虫源

白背飞虱由中国农业科学院植物保护研究所农业害虫研究室水稻害虫研究组提供,在养虫室(温度26±1℃;12 h光照/12 h黑暗)内使用未施氮的感虫品种TN1(N0)饲养。

### 1.3 不同施氮水平水稻苗培育与接种

将TN1水稻种子浸种至露白,后单株种植于设有不同施氮水平水稻土(334.5 cm<sup>3</sup>)的小水桶( $d_{顶}=8.6$  cm,  $d_{底}=5.2$  cm,  $h=12.3$  cm)内。施氮水平分别为0、50、150、200、250、350 kg/hm<sup>2</sup>(N0、N50、N150、N200、N250、N350)。正常水分管理。待

水稻45日龄后,将其置于温室内[温度(26±1)℃,12 h光照/12 h黑暗]。按20头/株的密度接入3~4龄若虫,使用80目尼龙网罩住进行饲喂胁迫,以未受害水稻为对照,10 d后测定水稻各生理指标。重复3次。

### 1.4 叶绿素含量(SPAD)的测定

于上午9:00—12:00,采用叶绿素含氮测定仪(SPAD-502,日本佳能公司出品)单株测定不同施氮水平的稻株(受害和未受害)顶端的全展叶(1.5叶龄)的叶绿素含量。在顶叶上部、中部和下部各3 cm处,沿中脉分别测定1次,以3处测定平均值表示该叶片的叶绿素含量(以SPAD值表示)。各施氮水平水稻测定重复3次,每重复为单株水稻。

### 1.5 主茎相对含水量、含水量和干物质含量的测定

齐泥剪取不同施氮水平水稻(受害和未受害,单株)主茎,称其鲜质量( $W$ )。放入试管(直径2.5 cm,高10 cm)内,立即注入蒸馏水,用瓶盖密封后放入10±1℃的培养箱内,使主茎完全吸水膨胀。12 h后取出主茎,用滤纸吸干表面的水珠后称重得到完全吸水后的主茎质量( $TW$ )。后将主茎在110℃下杀青30 min,80℃烘箱内干燥24 h,称主茎干质量( $DW$ ),重复3次。主茎相对含水量= $[(W-DW)/(TW-DW)] \times 100$ ;主茎含水量= $(W-DW)/W \times 100$ ;主茎干物质质量为主茎每克鲜质量中所含干物质,即主茎干物质质量= $DW_1/W_1$ 。

### 1.6 主茎伤流液量测定

伤流液量是衡量稻株根系活力的重要指标,伤流液量大表示根系活力强。伤流液量小表示根系活力弱。

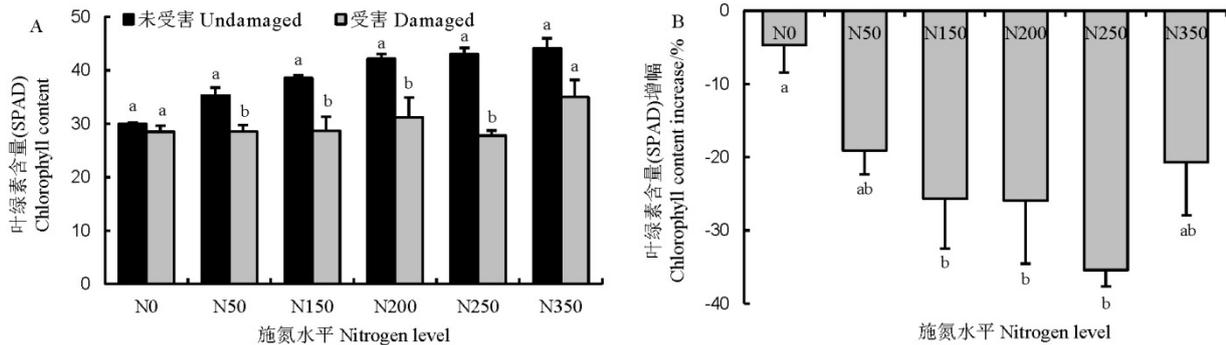
测定不同施氮水平水稻(受害和未受害,单株)主茎48 h伤流液。使用已消毒剪刀在距离泥面5 cm处快速剪下稻株,用事先装有脱脂棉且已称量( $W_1$ )的离心管1套在主茎上,使棉花和稻株切口充分接触,吸收伤流液,24 h后取下离心管1并称量( $W_2$ ),同时更换已称量( $W_3$ )离心管2,48 h后取下离心管2并称量( $W_4$ )。根据离心管在吸收伤流液前后的质量变化来计算主茎伤流液的量。试验重复3次。伤流量= $(W_2-W_1)+(W_4-W_3)$ 。

### 1.7 叶鞘可溶性糖量测定

参考郝建军等的《植物生理学实验技术》中的植物组织中可溶性糖含量的测定方法测定叶鞘可溶性糖含量。

### 1.8 数据分析

数据均采用SPSS 17.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)数据处理系统进行分析。白背飞虱为害



不同小写字母表示在某一施氮水平下, 未受害水稻与受害水稻叶绿素含量增幅在 0.05 水平差异显著。

Various lowercase letters above or under the bars mean that the fluctuation and increment of leaf chlorophyll contents in rice at a given nitrogen level after WBPH infection are significantly different at 0.05 level.

图 1 不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后叶绿素含量的变化

Fig. 1. Changes in chlorophyll contents in rice at various nitrogen levels as infected by whitebacked planthoppers.

后不同施氮量水稻中叶绿素含量、水稻主茎的相对含水量与含水量、主茎伤流液、主茎干物质比重及叶鞘可溶性糖含量的变化及增幅, 进行单因子方差分析, 平均数差异均采用 LSD 法多重比较。水稻受白背飞虱为害后其叶绿素含量、相对含水量、含水量、伤流液量、干物质质量、可溶性糖含量与水稻施氮水平之间的相关性在 SPSS 17.0 中采用双变量 Pearson 法进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施氮水平下白背飞虱为害后水稻叶片中叶绿素含量的变化

施氮水平为 0 kg/hm<sup>2</sup>、50 kg/hm<sup>2</sup>、150 kg/hm<sup>2</sup>、200 kg/hm<sup>2</sup>、250 kg/hm<sup>2</sup>、350 kg/hm<sup>2</sup> 的 45 日龄 TN1 水稻(N0、N50、N150、N200、N250、N350)受白背飞虱为害 10 d 后, 其叶绿素含量较未受害水稻均有所下降, 其中 N50、N150、N200、N250 显著下降 ( $P_{N50}=0.022$ ,  $P_{N150}=0.021$ ,  $P_{N200}=0.044$ ,  $P_{N250}=0.001$ ) (图 1-A)。

不同施氮水平水稻受白背飞虱为害后, 叶绿素含量的降幅明显不同。其中 N0 降幅最小(4.68%), N150、N200、N250 降幅最大(25.67%、25.93%、35.40%), N0 降幅显著低于施氮水稻(N150、N200、N250)( $P=0.025$ , 0.024, 0.003)(图 1-B)。

### 2.2 白背飞虱为害后不同施氮水平水稻主茎相对含水量及含水量的变化

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害 10 d 后水稻主茎相对含水量(除 N350 外)和含水量均有所上升(图 2-A~C)。其中 N0、50、250 水稻受白背飞

虱为害后主茎相对含水量(91.01%、91.24%、91.91%)显著高于未受害水稻(85.67%、81.31%、87.23%)( $P_{N0}=0.027$ ,  $P_{N50}=0.004$ ,  $P_{N250}=0.036$ )。

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后主茎相对含水量增幅因施氮水平不同而异(图 2-B), 施氮水稻中, 主茎相对含水量的增幅随施氮水平的增加而降低。N350 主茎相对含水量增幅最小, 为 -1.83%, 显著低于 N50、150、200、250 处理 ( $P=0.006$ , 0.000, 0.000, 0.007, 0.011)。N50 主茎相对含水量增幅最大(12.20%), 显著高于 N0(6.23%)和 N200(6.03%)、N250(5.36%)、N350(-1.83%) 处理 ( $P=0.029$ , 0.025, 0.015, 0.000), 与 N150(9.74%)无差异( $P=0.326$ )。

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后主茎含水量增幅与因施氮水平不同而不同(图 2-D), N0 主茎含水量增幅最小, 为 0.13%, 显著低于施氮水稻 N50、200、250、350( $P=0.037$ 、0.002、0.000、0.001)。施氮水稻中, N250 主茎含水量增幅最大(6.90%), 明显高于 N50(2.50%)、150(2.25%)、200(4.25%)、350(4.32%)( $P=0.001$ , 0.001, 0.022, 0.025)。

### 2.3 不同施氮水平下白背飞虱为害后水稻主茎伤流液量的变化

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害 10 d 后水稻 48 h 内主茎伤流液量较未受害水稻均有所增加, 其中 N50、N250 水稻受白背飞虱为害后伤流液量(0.99 g, 1.23 g)显著高于未受害水稻(0.45 g, 0.15 g)( $P=0.018$ , 0.002)(图 3-A)。

由图 3-B 可见, 与未受害水稻相比, N250、N350 处理受白背飞虱为害后伤流液量增幅最大, 分别为

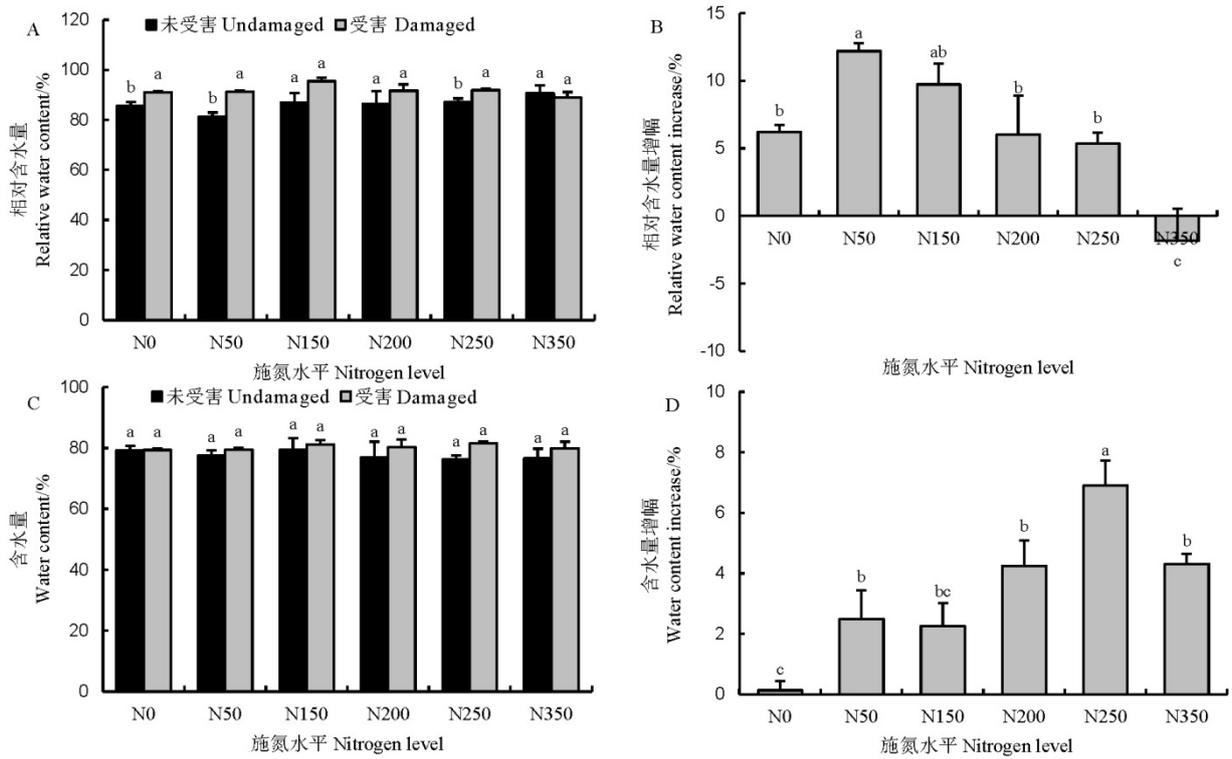


图2 不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后相对含水量和含水量的变化

Fig. 2. Changes in water content in rice at various nitrogen levels as infected by whitebacked planthoppers.

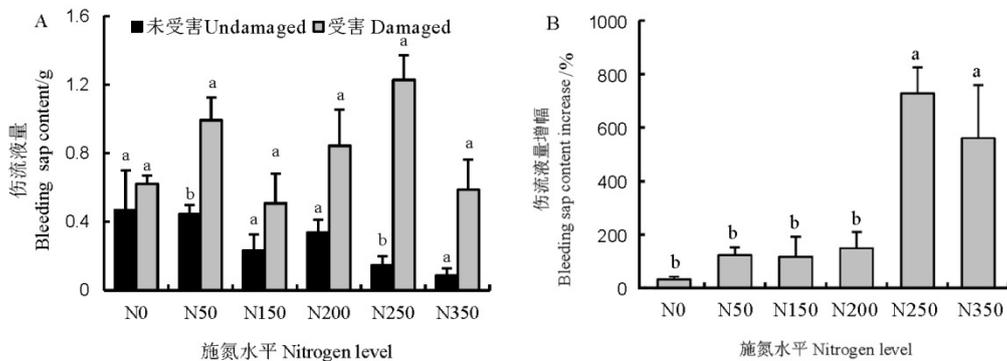


图3 不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后伤流液量的变化

Fig. 3. Changes in bleeding sap content in rice at various nitrogen levels as affected by whitebacked planthoppers.

728.67%、560.23%，显著高于未施氮 N0(32.97%) ( $P=0.000, 0.003$ )和 N50(123.12%) ( $P=0.001, 0.009$ )、N150(117.85%) ( $P=0.001, 0.008$ )、N200(149.16%) ( $P=0.001, 0.013$ )。

2.4 不同施氮水平下白背飞虱为害后水稻主茎干物质质量的变化

不同施氮水平水稻受白背飞虱为害 10 d 后水稻主茎干物质质量较未受害水稻均有所降低(图 4-A)。

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后主茎干物质质量较未受害水稻降幅表现为(图 4-B)。N0 水稻干物质质量降幅最小，为 0.52%，显著低于施氮处

理 N200、N250、N350( $P=0.034, 0.000, 0.009$ )。施氮水稻中，N250 干物质质量减幅最大，为 22.16%，明显高于 N50(8.66%)、N150(8.70%)、N200(11.02%) ( $P=0.010, 0.010, 0.026$ )，但与 N350(14.17%)无显著差异( $P=0.094$ )。

2.5 不同施氮水平下白背飞虱为害后水稻叶鞘可溶性糖含量的变化

不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害 10 d 后水稻叶鞘可溶性糖含量与未受害水稻无明显差异，N250 受白背飞虱为害后可溶性糖含量(77.74  $\mu\text{g}/\text{mg}$ )显著低于未受害水稻(103.01  $\mu\text{g}/\text{mg}$ )

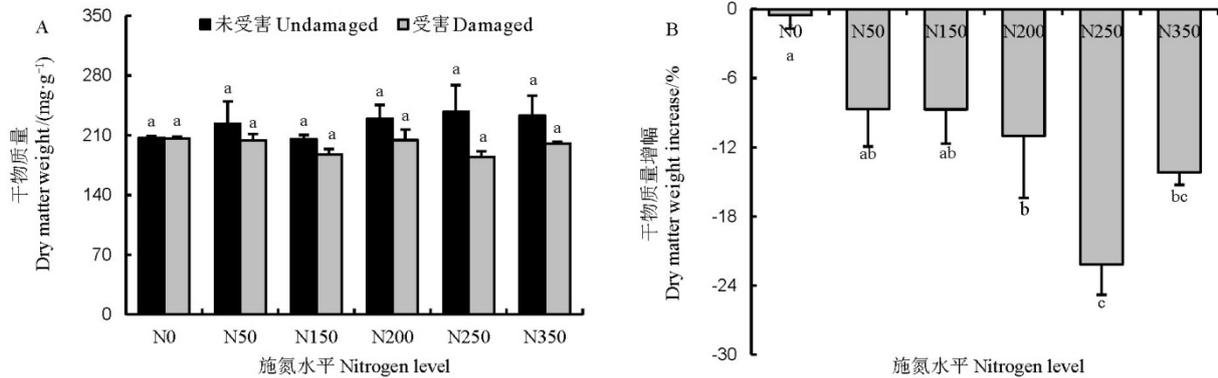


图4 不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后干物质含量的变化

Fig. 4. Changes in dry matter weight in rice at various nitrogen levels as affected by whitebacked planthoppers.

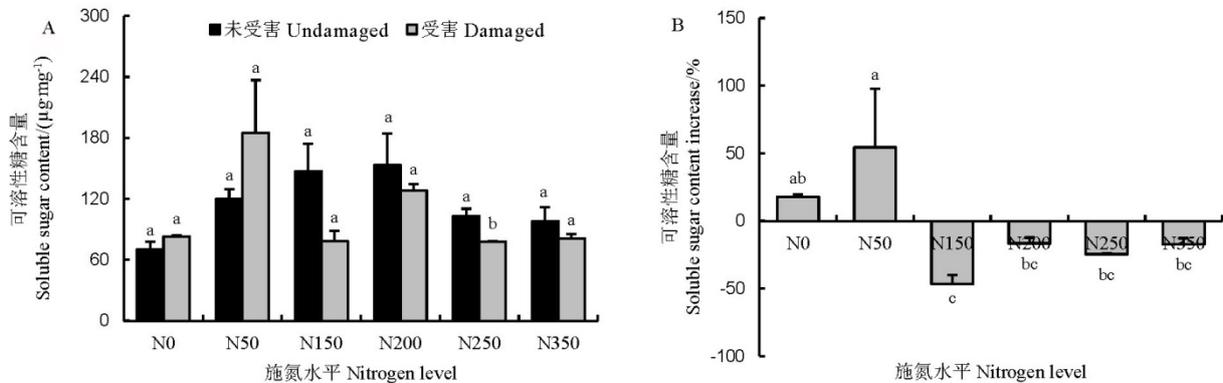


图5 不同施氮水平下水稻受白背飞虱为害后可溶性糖含量的变化

Fig. 5. Changes in soluble sugar contents in rice at various nitrogen levels as infected by whitebacked planthoppers.

( $P=0.027$ )(图 5-A)。

不同施氮水平下水稻受害后叶鞘可溶性糖含量较未受害水稻增幅表现为(图 5-B), N0 水稻增幅为 17.86%, 显著高于施氮水稻 N150( $P=0.027$ )。施氮水稻中, N150, N200, N250 和 N350 受白背飞虱为害后, 其叶鞘可溶性糖含量减少。其中 N150 增幅最小, 为 -46.66%, 明显低于 N50(54.43%) ( $P=0.002$ ), 但与 N200(-16.48%)、250(-24.53%)、350(-17.13%)无差异( $P=0.262, 0.405, 0.272$ )。

## 2.6 水稻受白背飞虱为害后生理物质含量与施氮水平的相关性

水稻受白背飞虱为害后其叶绿素含量、相对含水量、含水量、伤流液量、干物质质量、可溶性糖含量与水稻施氮水平之间无显著相关( $P > 0.05$ ), 相关系数  $R$  值为 0.059~0.685(表 1)。

## 3 结论与讨论

本研究结果表明不同施氮水平下水稻遭受白

背飞虱为害后, 其体内抵御白背飞虱相关生理物质(叶绿素含量、水分含量、伤流液量、干物质质量、可溶性糖含量)含量变化存在差异。

叶绿素(SPAD)是植物光合作用最重要的色素之一, 也是评价叶片光合能力的主要指标之一。水稻叶片中SPAD含量和蛋白质含量的下降是水稻叶片衰老的重要标志<sup>[21]</sup>。有研究表明水稻遭受飞虱为害后, 其体内SPAD含量均有所降低<sup>[6,21]</sup>。本研究结果表明不同施氮水平下, 水稻受白背飞虱为害 10 d 后, SPAD 含量均有所降低, 这与前人研究结果一致。水稻受白背飞虱为害后, 感虫品种水稻的SPAD 含量降幅较抗虫品种水稻大<sup>[21]</sup>。不同施氮量下水稻 SPAD 含量降幅中, 施氮量在 0~250 kg/hm<sup>2</sup> 时, SPAD 含量降幅随水稻施氮量的增加而上升。中高氮植株 N150、N200、N250 降幅较未施氮 N0 稻株大, 这可能与水稻施氮水平对白背飞虱的忌避性(白背飞虱对水稻取食、产卵不喜好性)有关。水稻对白背飞虱的忌避性随施氮水平提高而降低<sup>[22]</sup>。

相对含水量反应植物体内生理缺水而引起的

表1 水稻受白背飞虱为害后生理物质含量与施氮水平之间相关系数及显著性

Table 1. Correlative coefficients and significance of physiological substances and nitrogen level in rice infested with whitebacked planthoppers.

参数 Parameters	叶绿素含量 Chlorophyll content	相对含水量 Relative water content	含水量 Water content	伤流液量 Bleeding sap content	干物质含量 Dry matter weight	可溶性糖含量 Soluble sugar content
R 值 R value	0.685	-0.276	0.471	0.059	-0.402	-0.394
P 值 P value	0.133	0.597	0.345	0.917	0.430	0.440

水状态变化,植物体内相对含水量的降低将导致植食性昆虫种群增加<sup>[23]</sup>。本研究结果表明,不同施氮量水稻受白背飞虱为害后,高氮(N350)处理相对含水量较受害水稻降低。施氮水稻中,N50相对含水量增幅最大,N350相对含水量增幅最小,随施氮水平的提高,水稻相对含水量增幅呈下降趋势,这可能是导致白背飞虱对高氮植株嗜好性较高的原因之一。水稻含水量越大,飞虱的虫口密度就越大,选择性越高<sup>[24]</sup>。受白背飞虱为害后,不同施氮水平下水稻含水量均有所提高,随施氮水平的提高水稻含水量的增幅也呈上升趋势,这可能是导致白背飞虱对高氮植株嗜好性较高的另一原因。

植株主茎伤流液量是植物根系活力的重要指标,单位时间内伤流液的量多,则表明植物根系活力强,吸水能力强<sup>[25]</sup>。本研究结果表明不同施氮量水稻受白背飞虱为害10d后,主茎伤流液量均有所增加,水稻随施氮水平的提高主茎伤流液量增幅也呈上升趋势,这也可能是导致不同施氮水平水稻含水量增幅不同的原因,间接影响白背飞虱种群数量。

水稻受飞虱为害后体内的干物质量和可溶性糖含量降低,其中感虫品种水稻干物质量和可溶性糖含量较耐、抗虫品种水稻降幅小<sup>[10,26]</sup>。本研究结果表明,不同施氮水平水稻受白背飞虱为害10d后,干物质量均有所下降,这与前人研究结果一致。水稻随施氮水平的提高干物质量降幅增加,可溶性糖含量增幅减少,这可能与施氮水平水稻对白背飞虱的忌避性有关,水稻对白背飞虱的忌避性随施氮水平提高而降低<sup>[22]</sup>。

研究也表明水稻受白背飞虱为害后其叶绿素含量、相对含水量、含水量、伤流液量、干物质量、可溶性糖含量与施氮水平之间无相关性。说明不同施氮水平可通过调控水稻体内叶绿素含量、相对含水量、含水量、干物质含量、可溶性糖含量影响水稻对白背飞虱的抵御能力。

本研究从生理营养物质变化揭示不同施氮水平下水稻在白背飞虱为害胁迫下体内变化,然而水稻在遭受飞虱为害后,体内可溶性蛋白、游离氨基

酸、酚类物质、丙二醛(MDA)、过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)含量或活性均有一定的变化<sup>[4-5]</sup>。因此,不同施氮水平水稻对白背飞虱为害后体内生化物质变化有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 沈君辉,尚金梅,刘光杰. 中国的白背飞虱研究概况. *中国水稻科学*, 2003, 17(S1): 7-22.  
Shen J H, Shang J M, Liu G J. Management of the whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera* in China: A mini-review. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(S1): 7-22.
- [2] Li P, Li F, Han Y Q, Yang L, Liao X L, Hou M L. Asymmetric spread of SRBSDV between rice and corn plants by the vector *Sogatella furcifera* (Hemiptera: Delphacidae). *PLoS one*, 2016, 11(10): e0165014.
- [3] 周国辉,张曙光,邹寿发,许兆伟,周志强. 水稻新病害南方水稻黑条矮缩病发生特点及危害趋势分析. *植物保护*, 2010, 36(1):144-146.  
Zhou G H, Zhang S G, Zou S F, Xu Z W, Zhou Z Q. Occurrence and damage analysis of a new rice dwarf disease caused by *Southern rice black-streaked dwarf virus*. *Plant Prot*, 2010, 36(1):144-146.
- [4] Jayasimha G T, Nalini R, Chinniah C, Muthamilan M, Mini M L. Evaluation of biochemical constituents in healthy and brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål)(Hemiptera: Delphacidae) damaged rice plants. *Curr Biot*, 2015, 9(2): 129-136.
- [5] 孙凯,钟乐荣,丁文兵,李有志. 水稻对白背飞虱取食胁迫的生理反应. *湖南农业大学学报:自然科学版*, 2014, 40(5): 501-505.  
Sun K, Kai L R, Ding W B, Li Y Z. Physiological response in different rice varieties against *Sogatella furcifera* undergone feeding stress. *J Hunan Agric Univ: Nat Sci*, 2014, 40(5): 501-505.
- [6] 陈威,周强,李欣,何国锋. 不同水稻品种对虫害胁迫的生理响应. *生态学报*, 2006, 26(7): 2161-2166.  
Chen W, Zhou Q, Li X, He G F. Physiological responses of different rice cultivars under herbivore stress. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(7): 2161-2166.
- [7] 张金锋,薛庆中. 稻飞虱为害胁迫对水稻植株内主要

- 保护酶活性的影响. 中国农业科学, 2004, 37(10): 1487-1491.
- Zhang J F, Xue Q Z. The activity dynamics of main protective enzymes in rice plants under feeding stresses of *Sogatella furcifera* and *Nilaparvata lugens*. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(10): 1487-1491.
- [8] 吕仲贤, Sylvia V, 俞晓平, HEONG K L, 胡萃. 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, Sylvia V, Yu X P, HEONG K L, Hu C. 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.
- [9] 陈建明, 俞晓平, 程家安, 吕仲贤, 郑许松, 徐红星. 不同水稻品种对褐飞虱为害的耐性和补偿作用评价. 中国水稻科学, 2003, 17(3): 265-269.
- Chen J M, Yu X P, Cheng J A, Lv Z X, Zhen X S, Xu H X. Evaluation for tolerance and compensation of rice varieties to infesting of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chin J Rice Sci*, 2003, 17(3): 265-269.
- [10] Rubia-Sanchez E, Suzuki Y, Miyamoto K, Watanabe T. The potential for compensation of the effects of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* Stal (Homoptera: Delphacidae) feeding on rice. *Crop Prot*, 1999, 18(1): 39-45.
- [11] 秦厚国, 叶正襄, 黄荣华. 施肥对白背飞虱田间种群和水稻产量的影响研究. 江西农业大学学报, 1991, 13(02): 125-128.
- Qin H G, Ye Z X, Huang R H. Study on effect of fertilization on the field population density of *Sogatella Furcifera* (Horvath) and the rice yield. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 1991, 13(02): 125-128.
- [12] Horgan F G, Srinivasan T S, Naik B S, Ramal A F, Bernal C C, Almazan M L P. Effects of nitrogen on egg-laying inhibition and ovicidal response in planthopper-resistant rice varieties. *Crop Prot*, 2016, 89: 223-230.
- [13] 杨军, 陈小荣, 朱昌兰, 彭小松, 贺晓鹏, 傅军如, 欧阳林娟, 边建民, 胡丽芳, 贺浩华. 氮肥和孕穗后期高温对两个早稻品种产量和生理特性的影响. 中国水稻科学, 2014, 28(5): 523-533.
- Yang J, Chen X R, Zhu C L, Peng X S, He X P, Fu J R, Ouyang L J, Bian J M, Hu L F, He H H. Effects of nitrogen level and high temperature at late booting stage on yield and physiological characteristics of two early rice cultivars. *Chin J Rice Sci*, 2014, 28(5): 523-533.
- [14] Zhao Y, Xi M, Zhang X, Lin Z, Ding C, Tang S, Liu Z, Wang S, Ding Y. Nitrogen effect on amino acid composition in leaf and grain of japonica rice during grain filling stage. *J Cereal Sci*, 2015, 64: 29-33.
- [15] Yang J, Yu Q Y, Cheng X R, Zhu C L, Peng X S, He X P, Fu J R, Ouyang L J, Bian J M, Hu L F, Sun X T, Xu J, He H H. Effects of nitrogen level and high temperature stress on yield, SPAD value and soluble sugar content of early rice Ganxin 203. *Agric Sci & Technol*, 2016, 17(2): 385-390.
- [16] 梁国斌, 莫亿伟, 柳敏, 王忠. 施氮对水稻植株和颖果发育及稻米品质的影响. 西北植物学报, 2008, 28(9): 1794-1802.
- Liang G B, Mo Y W, Liu M, Wang Z. Effects of nitrogen fertilizer on rice seedling growth and caryopsis development and grain quality. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2008, 28(9): 1794-1802.
- [17] 周小军, 徐红星, 郑许松, 杨亚军, 陈礼威, 何锦豪, 吕仲贤. 氮肥施用量对杂交稻田白背飞虱和蜘蛛种群数量的影响. 浙江农业学报, 2012, 24(5): 865-869.
- Zhou X J, Xu H X, Zheng X S, Yang Y J, Chen L W, He J H, Lv Z X. Population dynamics of white-backed planthopper and its predatory spiders in hybrid rice fields with different nitrogen regimes. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2012, 24(5): 865-869.
- [18] 张福锁, 陈新平, 陈清. 中国主要作物施肥指南. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
- Zhang F S, Chen X P, Chen Q. Guidelines for Fertilization of Major Crops in China. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [19] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. 植物营养与肥料学报, 2014, 04: 783-795.
- Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China. *J Plant Nut Fer*, 2014, 04: 783-795.
- [20] 李再园, 王福莲, 田小海. 水稻对稻飞虱抵御机制研究. 热带作物学报, 2017 (4): 769-774.
- Li Z Y, Wang F L, Tian X H. The resistance mechanism of rice to rice plant hopper. *Chin J Trop Crops*, 2017 (4): 769-774.
- [21] 段灿星, 彭高松, 王晓鸣, 朱振东. 抗感水稻品种受灰飞虱为害后的生理反应差异. 应用昆虫学报, 2013, 50(1): 145-153.
- Duan C X, Peng G S, Wang X M, Zhu Z D. Differences in the physiological response of resistant and susceptible rice varieties infested by the small brown planthopper. *Chin J Appl Entomol*, 2013, 50(1): 145-153.
- [22] 李再园, 马跃坤, 王福莲, 田小海. 施氮水平对水稻抵御白背飞虱能力的影响机制. 江苏农业科学, 2018, 2018, 46(03):88-91.
- Li Z Y, Ma Y K, Wang F L, Tian X H. The influence mechanism of nitrogen level resists *Sogatella furcifera* of rice. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(03):88-91.
- [23] Mattson W J, Haack R A. The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience*, 1987, 37(2): 110-118.
- [24] 薛俊杰. 水稻品种抗虫性与叶片含水率的关系. 河南农业科学, 1986(7): 6, 24.
- Xue J J. Relationship between insect resistance and leaf

- water content of rice varieties. *J Henan Agric Sci*, 1986 (7): 6, 24.
- [25] Morita S, Okamoto M, Abe J, Yamagishi J. Bleeding rate of field-grown maize with reference to root system development. *Jap J Crop Sci*, 2000, 69(1): 80-85.
- [26] 陈建明, 俞晓平, 程家安, 吕仲贤, 徐红星. 不同水稻品种受褐飞虱危害后体内生理指标的变化. *植物保护学报*, 2003, 30(3): 225-231.
- Chen J M, Yu X P, Cheng J A, Lv Z X, Xu H X. Changes in physiological indexes of different rice varieties after attacked by brown planthopper. *J Plant Prot*, 2003, 30(3): 225-231.