

抗虫品种桂育 11 号对褐飞虱取食、生长发育及种群增长的影响*

吴碧球^{1, 2, 3**} 黄所生^{1, 2, 3**} 李 成^{1, 2, 3} 凌 炎^{1, 2, 3}
黄 芊^{1, 2, 3} 龙丽萍^{1, 2, 3} 黄凤宽^{1, 2, 3***}

(1. 广西壮族自治区农业科学院植物保护研究所, 南宁 530007; 2. 广西农作物病虫害生物学重点实验室, 南宁 530007;
3. 农业农村部华南果蔬绿色防控重点实验室, 南宁 530007)

摘 要 【目的】 种植抗虫品种水稻是控制褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 发生的有效措施。桂育 11 号是在广西推广种植的高产、优质的常规稻品种, 兼具中抗褐飞虱和氮高效利用特性。本文通过研究褐飞虱在桂育 11 号上的蜜露分泌量、若虫存活率、种群趋势指数及相对发育适合度等指标, 以明确桂育 11 号对褐飞虱的抗性及其对褐飞虱种群的控制作用。【方法】 采用生命表方法, 选择柳沙油占 202 作为感虫对照品种, Rathu Heenati 作为抗虫对照品种, 研究不同抗性水稻对褐飞虱实验种群的取食、生长发育、存活和繁殖的影响。【结果】 褐飞虱在桂育 11 号的取食量 (7.82 mg/24 h)、若虫存活率 (低龄 74.00%, 高龄 90.64%)、雌成虫比率 (46.22%)、成虫短翅率 (80.77%)、雌成虫寿命 (14.9 d)、雌成虫体重 (1.71 mg/头) 和产卵量 (524.1 粒/雌) 均与在感虫对照品种柳沙油占 202 的差异不显著 ($P>0.05$), 羽化率 (61.00%) 和卵孵化率 (76.86%) 显著低于在柳沙油占 202 的 ($P<0.05$); 但取食量、若虫存活率、羽化率、成虫寿命、体重、产卵量和卵孵化率显著高于在抗虫对照品种 Rathu Heenati 的 ($P<0.05$), 仅若虫历期 (15.52 d) 显著低于在对照品种 Rathu Heenati 的 ($P<0.05$)。生命表参数综合评价发现, 褐飞虱在感虫对照品种柳沙油占 202、桂育 11 号和抗虫对照品种 Rathu Heenati 的种群趋势指数分别为 84.97、61.52 和 0.00, 褐飞虱在桂育 11 号和对对照品种 Rathu Heenati 的相对发育适合度分别为 0.72 和 0.00。【结论】 在广西当前常规施氮条件下, 桂育 11 号对褐飞虱的抗性为耐害性, 相对于感虫对照品种柳沙油占 202, 褐飞虱在桂育 11 号的发育适合度下降, 可能影响其田间种群增长数量。

关键词 桂育 11 号; 褐飞虱; 抗性; 发育适合度; 种群增长

Feeding and population growth of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) on the resistant rice variety Guiyu No.11

WU Bi-Qiu^{1, 2, 3**} HUANG Suo-Sheng^{1, 2, 3**} LI Cheng^{1, 2, 3} LING Yan^{1, 2, 3}
HUANG Qian^{1, 2, 3} LONG Li-Ping^{1, 2, 3} HUANG Feng-Kuan^{1, 2, 3***}

(1. Plant Protection Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Biology for Crop Diseases and Insect Pests, Nanning 530007, China; 3. Key Laboratory of Green Prevention and Control on Fruits and Vegetables in South China Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanning 530007, China)

Abstract 【Objectives】 To determine the resistance of the Guiyu No.11 rice variety, a high-yield, high-quality variety with efficient nitrogen utilization that is widely planted in Guangxi, to the brown planthopper (*Nilaparvata lugens*, BPH) and the

*资助项目 Supported projects: 广西自然科学基金 (2021GXNSFAA196059); 广西创新驱动发展专项 (桂科 AA20302019-3); 国家自然科学基金 (32160663); 国家现代农业产业技术体系广西 (水稻) 创新团队建设专项 (nycytxgxcxtd-2021-01-05); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021YT073)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: wubiq@126.com; huangss@gxaas.net

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: huangfengkuan@gxaas.net

收稿日期 Received: 2022-06-07; 接受日期 Accepted: 2022-07-29

effect of feeding on this variety on BPH population growth. [Methods] The amount of honey-dew secreted, nymph survival rate, population trend index, relative developmental fitness, and other BPH population indices were measured on three different rice varieties with varying degrees of resistance to the BPH; Guiyu No.11 (moderate resistance), Rathu heenati (resistant) and Liushayouzhuan 202 (susceptible). Life tables were then used to compare the effects of feeding on each rice variety on BPH feeding, growth, development, survival and reproduction. [Results] There was no significant difference in the amount of honeydew secreted (7.82 mg/ 24 h), nymph survival rate (74.00% young nymphs, 90.64% older nymphs), female: male sex ratio (46.22%), proportion of brachypterous individuals (80.77%), adult female longevity (14.9 d), adult female body weight (1.71 mg) or egg capsules per female (524.10 capsules), between BPH that fed on Guiyu No.11 and those that fed on Liushayouzhuan 202 ($P>0.05$), but the eclosion rate (61.00%) and egg hatchability rate (76.86%) of those that fed on Guiyu No.11 were significantly lower than that of those that fed on Liushayouzhuan 202 ($P<0.05$). The amount of honeydew secreted, nymph survival rate, eclosion rate, adult longevity, female body weight, oviposition and hatchability of BPH that fed on Guiyu No.11 were all significantly higher than those that fed on Rathu heenati ($P<0.05$). Only the duration of the nymph period (15.52 d) was significantly lower on Guiyu No.11 than on Rathu heenati ($P<0.05$). The population trend indices for Liushayouzhuan 202, Guiyu No.11 and Rathu heenati were 84.97, 61.52 and 0.00, respectively, and relative developmental fitness on Guiyu No.11 and Rathu heenati were 0.72 and 0.00, respectively. [Conclusion] Guiyu No.11 is moderately resistant to the BPH under current conventional nitrogen application conditions in Guangxi. Compared to the susceptible variety Liushayouzhuan 202, the development of the BPH is significantly lower on Guiyu No.11, which may slow the population growth of this pest in the field.

Key words Guiyu No.11; *Nilaparvata lugens*; insect resistance; developmental fitness; population growth

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* (Stål) 是东南亚各国水稻上的重大害虫, 该虫具有迁飞性和爆发性, 严重威胁水稻生产。广西是褐飞虱从越南等国迁入我国的第一站, 广西褐飞虱防控的成败直接影响我国其他水稻种植区的发生危害程度。因此, 有效控制该虫在广西的种群数量是全国防控稻飞虱的关键。研究表明, 种植抗虫品种水稻是控制该虫既经济环保又有效的措施 (Horgan *et al.*, 2015; Sarao and Bentur, 2016)。桂育 11 号是广西农业科学院水稻研究所育成的早晚兼用型优质常规稻品种, 2018 年通过广西农作物品种审定委员会审定, 可在桂南和桂中早、晚稻种植及桂北一季稻种植 (陈传华等, 2019)。桂育 11 号品种水稻的产量高, 平均产量为 6 735.0 kg/hm²; 米质特优, 符合部标优质一等食用长粒形籼稻品种品质规定要求 (陈传华等, 2019), 2019 年获农业农村部举办的第二届全国优质稻品种食味品质鉴评籼稻组金奖 (戴高兴, 2019); 属于氮高效利用型水稻品种 (刘广林等, 2020), 目前已在广西大面积推广种植。研究发现不同施氮量处理的田间桂育 11 号上, 稻飞虱的虫口密度均显著

低于非氮高效利用常规稻品种柳沙油占 202 的, 且产量在低、中和高施氮水平均与杂交稻百香优 9978 差异不显著, 但显著高于柳沙油占 202 (吴碧球等, 2020); 进一步抗性鉴定发现该品种中抗褐飞虱 (黄所生等, 2021)。田间桂育 11 号上褐飞虱的数量显著低于感虫对照品种柳沙油占 202 的原因是否由于该品种对褐飞虱的生长发育和繁殖有影响? 据报道, 褐飞虱在不同抗性品种上各生物学参数的表现不一致 (郝树广等, 2000)。实验种群生命表方法不仅能反映出昆虫发育历期和生长指数, 明确褐飞虱个体对水稻品种的反应, 并有助于综合评价作物栽培品种的抗虫性 (李国清等, 1994), 使水稻抗虫性评定方法更具科学性和系统性 (丁识伯等, 2012)。为探索桂育 11 号成株期对褐飞虱的抗性, 综合评价该品种对褐飞虱的抗性, 本研究采用生命表方法比较评价桂育 11 号、抗虫对照品种 Rathu Heenati 和感虫对照品种柳沙油占 202 对褐飞虱生长发育、存活和繁殖的影响, 以期对综合评价桂育 11 号对褐飞虱的抗虫机制提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

褐飞虱为南宁水稻田采集,网室内用 TN1 饲养扩繁。

1.2 供试水稻品种

桂育 11 号和柳沙油占 202 由广西壮族自治区农业科学院水稻所优质常规稻育种研究室提供,其中桂育 11 号是广西主栽高产、优质、氮高效利用中抗褐飞虱常规水稻品种;柳沙油占 202 是高产、优质、非氮高效利用常规水稻品种(刘广林等, 2020),中感褐飞虱(黄所生等, 2021),故选择该品种作为感虫对照品种;Rathu Heenati,来源于国际水稻所,为籼型常规水稻抗虫对照品种。

1.3 试验方法

将桂育 11 号、Rathu Heenati 和柳沙油占 202 这 3 个供试水稻品种每隔 3 d 分批移栽至直径为 15 cm 的花盆中,每盆移栽 6 苗。模拟当前广西农民在水稻移栽大田常规的施肥时间和施肥量,分别于移栽后 7 d、14 d 和孕穗初期施用总氮量 30%、45%和 25%的氮肥,氮肥施用量为 150 kg/hm²,根据土壤体积计算每盆水稻氮肥的施用量。待稻苗长至 45-60 d 苗龄,进行以下实验。

1.3.1 水稻品种对褐飞虱雌成虫取食的影响 在桂育 11 号、Rathu Heenati 和柳沙油占 202 稻株主茎基部套 1-2 个石蜡膜小袋(3.0 cm×3.4 cm),接入经饥饿处理 2 h 的褐飞虱羽化 1-2 d 尚未交配的雌成虫 1 头,取食 24 h 后取下小袋。用精密分析天平称量褐飞虱分泌蜜露量,以计算取食量(刘光杰等, 2003)。每个品种接 20 头雌成虫,即重复 20 次。试验在温度为 24-37 °C、相对湿度为 65%-85%、光周期为 16 L : 8 D 的人工网室内进行。

1.3.2 褐飞虱在不同水稻品种上生长发育参数和实验种群生命表构建 将 45 d 桂育 11 号、Rathu Heenati 和柳沙油占 202 稻苗连根拔起,清洗根部除杂,单株放入内含 35 mL 蒸馏水的玻璃

试管(直径 3 cm,高 24 cm)。然后,接入 TN1 上饲养的 24 h 内孵化的褐飞虱若虫 10 头,用棉花封试管口。为保障实验期间若虫获得营养状况尽量一致的水稻苗,每 3 d 更换同苗龄和施氮量新鲜稻苗,重复 10 次。实验在温度为(26±1)°C、相对湿度为 80%±2%、光周期为 16L : 8 D 的人工气候箱中进行。每天定时观察记录若虫蜕皮和各龄期的发育和死亡情况,直至所有存活若虫羽化为成虫止,分别统计低龄若虫(初孵-2 龄)存活率、高龄若虫(3-5 龄)存活率及若虫历期。当若虫开始羽化时,每天观察记录成虫羽化数量、性别和翅型,并取 12 h 内羽化雌成虫,在精密电子天平(精度为 0.000 1 g)上称量体重。

选取在取食各品种后新羽化 24 h 内的全部短翅雌雄成虫配对,每对短翅成虫接入预先放有同一品种的单株稻苗(45 d)的玻璃试管(直径 3 cm,高 24 cm)中,让其取食、交配和产卵,产卵前雄虫出现死亡时,补充雄虫以保证雌虫交配。接虫第 4 天后,每隔 48 h 更换新鲜稻苗,直至雌成虫死亡为止。更换的产卵苗置于温度为(26±1)°C、相对湿度为 80%±2%、光周期为 16L : 8 D 的人工气候箱继续培养,直至出现初孵若虫,每天观察记录初孵若虫数,直至连续 3 d 没有若虫孵出止,再将产卵苗置于尼康体式镜(SM2745)查看卵量,记录未孵化卵数量。实验期间,统计雌雄成虫的寿命、卵历期、产卵量及孵化率。根据褐飞虱生长发育参数计算下代初孵若虫数和种群趋势指数(黄寿山, 1994;刘泽文等, 2001),并确定抗虫品种相对发育适合度的变化。实验在温度为(26±1)°C、相对湿度为 80%±2%、光周期为 16L : 8 D 的人工气候箱中进行。

种群趋势指数 $I = S_E \times S_S \times S_L \times FP_F \times P_h \times P_{\text{♀}}$

其中, S_E 为卵孵化率; S_S 为低龄若虫存活率; S_L 为高龄若虫存活率; FP_F 每雌平均总产卵量; P_h 居留率(即短翅型比例); $P_{\text{♀}}$ 雌虫比例。

$$\text{相对发育适合度} = \frac{I_R}{I_S}$$

其中, I_R 为褐飞虱在抗虫品种上的种群数量趋势指数; I_S 为褐飞虱在感虫品种上的种群趋势

指数。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 整理试验数据及制图, 采用 SPSS22.0 中统计软件中的单因素方差分析比较褐飞虱在不同水稻品种上的取食量、低龄若虫存活率、高龄若虫存活率、羽化率、若虫历期、雌虫比例、短翅率、雌成虫体重、雌成虫寿命、雄成虫寿命、产卵量及孵化率的差异显著性, 用 t -检验比较褐飞虱在桂育 11 号和柳沙油占 202 上卵历期的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 水稻品种对褐飞虱取食的影响

褐飞虱雌成虫在柳沙油占、桂育 11 号和 Rathu Heenati 上的蜜露量见图 1。褐飞虱在不同水稻品种上的蜜露量由高到低依次为: 柳沙油占 202 (11.65 mg) > 桂育 11 号 (7.82 mg) > Rathu Heenati (5.34 mg), 其中褐飞虱在柳沙油占 202 上分泌的蜜露量极显著高于在 Rathu Heenati 上分泌的蜜露量 ($P<0.01$), 在桂育 11 号上分泌的

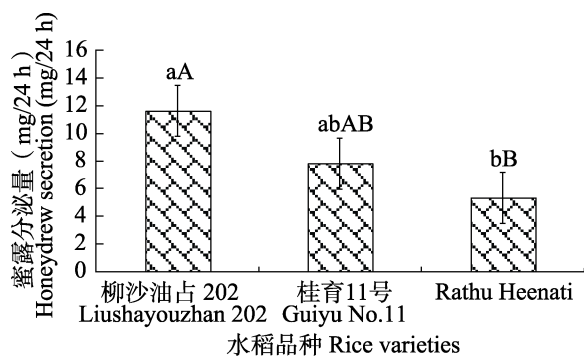


图 1 褐飞虱在不同水稻品种上分泌的蜜露量

Fig. 1 Honeydew secretion of brown planthopper on different rice varieties

数据为平均值±标准误。柱上标有不同小写字母表示蜜露量经单因素方差分析差异显著 ($P<0.05$), 标有不同大写字母表示蜜露量经单因素方差分析差异极显著 ($P<0.01$)。

Data are mean±SE. Histograms with different lowercase letters indicate the honeydew amount is significantly different by one-way ANOVA ($P<0.05$), while with different capital letters indicate the honeydew amount extremely significantly different by one-way ANOVA ($P<0.01$).

蜜露量与在柳沙油占 202 和 Rathu Heenati 上分泌的蜜露量差异均不显著 ($P>0.05$)。说明水稻对褐飞虱抗性的高低影响其取食量的多少。

2.2 不同水稻品种对褐飞虱生长发育的影响

2.2.1 不同水稻品种对若虫存活和发育历期的影响 褐飞虱在柳沙油占 202、桂育 11 号和 Rathu Heenati 上低龄若虫 (初孵-2 龄若虫) 存活率分别为 82.09%、74.00%和 55.21%, 高龄若虫 (3-5 龄若虫) 存活率分别为 97.50%、90.6%和 63.10%。其中, 取食桂育 11 号的低龄若虫和高龄若虫的存活率均与取食柳沙油占 202 的差异不显著 ($P>0.05$), 但极显著高于取食 Rathu Heenati 的 ($P<0.01$)。褐飞虱若虫在 Rathu Heenati 上的发育历期最长 (18.42 d), 极显著长于取食桂育 11 号 (15.52 d) 和取食柳沙油占 202 的 (15.15 d) ($P<0.01$), 但后两者间差异不显著 ($P>0.05$) (表 1)。

2.2.2 不同水稻品种对成虫羽化、雌虫比和翅型分化的影响 褐飞虱取食柳沙油占 202 后的羽化率最高, 达 74.00%, 显著高于取食桂育 11 号的 (61.00%) ($P<0.05$), 极显著高于取食 Rathu Heenati 的 (27.48%) ($P<0.01$); 其次为取食桂育 11 号的羽化率, 取食 Rathu Heenati 的羽化率最低, 其中取食桂育 11 号的羽化率极显著高于取食 Rathu Heenati 的 ($P<0.01$)。褐飞虱取食柳沙油占 202、桂育 11 号和 Rathu Heenati 后羽化的雌虫比例分别为 42.56%、46.22%和 47.02%, 短翅型成虫比例分别为 76.66%、80.77%和 89.64%, 但三者间差异均不显著 ($P>0.05$) (表 1)。说明桂育 11 号对褐飞虱成虫羽化有一定的影响, 但对雌虫比例和居留率的影响很小。此外, 褐飞虱取食 3 个水稻品种后羽化的成虫大多为短翅型成虫, 其中雌成虫均为短翅型, 而取食柳沙油占 202、桂育 11 号和 Rathu Heenati 后分别共发现长翅型雄成虫 14、11 和 5 头。

2.2.3 不同水稻品种对成虫体重和寿命的影响 取食桂育 11 号的褐飞虱初羽化雄成虫寿命最长 (10.80 d), 极显著长于取食柳沙油占 202 (7.90 d) 和 Rathu Heenati 的 (6.90 d) ($P<0.01$), 而后两者间差异不显著 ($P>0.05$)。取食柳沙油占 202

的褐飞虱初羽化雌成虫寿命最长 (16.30 d), 显著长于取食桂育 11 号的 (14.90 d) ($P<0.05$), 极显著长于取食 Rathu Heenati 的 (12.80 d) ($P<0.01$); 其次为取食桂育 11 号的初羽化雌成虫寿命, 极显著长于取食 Rathu Heenati 的 ($P<0.01$)。在 3 个水稻品种上取食的初羽化雌成虫体重从高到低依次为: 桂育 11 号 (1.71 mg) > 柳沙油占 202 (1.60 mg) > Rathu Heenati (1.30 mg), 其中在桂育 11 号和柳沙油占 202 上取食的雌成虫体重差异不显著 ($P>0.05$), 但均极显著高于在 Rathu Heenati 上取食的雌成虫 ($P<0.01$) (表 1)。

2.2.4 不同水稻品种对产卵量、卵历期和孵化的影响 褐飞虱雌成虫在桂育 11 号的产卵量最高 (524.10 粒), 其次为在柳沙油占 202 的 (477.10

粒), 在 Rathu Heenati 的产卵量最少, 仅为 144.50 粒; 其中褐飞虱雌成虫在桂育 11 号的产卵量与在柳沙油占 202 的产卵量差异不显著 ($P>0.05$), 但均极显著高于在 Rathu Heenati 的产卵量 ($P<0.01$)。褐飞虱雌成虫产在柳沙油占 202 的卵孵化率最高 (92.18 %), 其次为产在桂育 11 号 (76.86 %) 的卵, 产在 Rathu Heenati 的卵孵化率最低 (0), 且三者间差异均极显著 ($P<0.01$)。由于观察 25 d 后仍未见 Rathu Heenati 上有若虫孵出, 镜检发现产在稻苗上的所有卵均未见红色眼点, 则判定为未受精卵。因此, 采用 t -检验比较褐飞虱产在柳沙油占 202 和桂育 11 号上卵的历期, 结果发现褐飞虱产在桂育 11 号上卵的历期为 15.46 d, 极显著长于产在柳沙油占 202 (12.64 d) 上卵的历期 ($P<0.01$) (表 1)。

表 1 褐飞虱在水稻品种上的生长发育和实验种群生命表参数
Table 1 Life table and growth parameters of experimental populations of *Nilaparvata lugens* on different rice varieties

生命表参数 Life table parameters	水稻品种 Rice variety		
	柳沙油占 202 Liushayouzhhan 202	桂育 11 号 Guiyu No.11	Rathu Heenati
初孵若虫数量 (头) Neonate number (ind.)	100	100	100
低龄若虫存活率 (%) Survival rate of young nymphs (%)	82.09±3.61aA	74.00±3.06aA	55.21±3.59bB
高龄若虫存活率 (%) Survival rate of old nymphs (%)	97.50±1.67aA	90.64±3.73aA	63.10±7.18bB
羽化率 (%) Emergence rate (%)	74.00±4.00aA	61.00±3.48bA	27.48±2.66cB
若虫历期 (d) Larva duration (d)	15.15±0.43bA	15.52±0.27bA	18.42±0.58aB
雌虫比例 (%) Female ratio	42.56±8.01aA	46.22±6.70aA	47.02±11.33aA
居留率 (短翅型比例) (%) Residence rate (brachypterous ratio)	76.66±7.84aA	80.77±5.48aA	89.64±3.87aA
雄成虫寿命 (d) Female adult duration (d)	7.90±0.53bB	10.80±0.91aA	6.90±1.05bB
雌成虫寿命 (d) Male adult duration (d)	16.30±0.93aA	14.90±0.57aAB	12.80±1.93bB
雌成虫体重 (mg) Weight of female adult (mg)	1.60±0.05aA	1.71±0.05aA	1.30±0.07bB
均产卵量 (粒) Average eggs	477.10±62.01aA	524.10±68.82aA	144.50±12.53bB

续表 1 (Table 1 continued)

生命表参数 Life table parameters	水稻品种 Rice variety		
	柳沙油占 202 Liushayouzhhan 202	桂育 11 号 Guiyu No.11	Rathu Heenati
孵化率 (%) Hatchability rate (%)	92.18±1.60aA	76.86±4.06bB	0.00±0.00cC
卵历期 (d) Egg duration (d)	12.64±0.25	15.46±0.31**	—
推算下代初孵若虫数量 (头) Next generation nymph	8 497.00	6 152.00	0.00
种群数量趋势指数 Population number tendency index	84.97	61.52	0.00
相对发育适合度 Relative developmental fitness	1.00	0.72	0.00

同列数据后标有不同小写字母表示经单因素方差分析差异显著 ($P<0.05$), 同列数据后标有不同大写字母表示经单因素方差分析差异极显著 ($P<0.01$)。**表示褐飞虱在抗感品种上的卵历期差异极显著 (t -检验, $P<0.01$)。

Data with different lowercase letters in the same column indicate significant differences through one-way ANOVA ($P<0.05$), while with different uppercase letters in the same column indicate extremely significant differences through one-way ANOVA ($P<0.01$). ** indicates that the egg duration of brown planthopper on resistant and susceptible varieties is significantly different (t -test, $P<0.01$).

2.3 褐飞虱在抗虫水稻品种上的发育适合度

相对于感虫品种柳沙油占 202, 褐飞虱在中抗品种桂育 11 号的取食量、若虫存活率及羽化率下降, 雌成虫寿命缩短, 若虫历期和卵历期延长, 卵孵化率下降; 而在抗虫品种 Rathu Heenati 上的取食量、若虫存活率、羽化率、产卵量和孵化率急剧下降, 雌成虫寿命缩短及体重减轻明显, 若虫历期明显延长, 且卵未见孵化, 无法产生下一代若虫。用种群数量趋势指数来确定桂育 11 号和 Rathu Heenati 对褐飞虱的相对发育适合度分别为 0.72 和 0.00。说明桂育 11 号对褐飞虱的发育适合度下降, 而 Rathu Heenati 根本不适合褐飞虱生长发育。

3 结论与讨论

褐飞虱在水稻上取食分泌的蜜露量一般与其从稻株中吸食的汁液直接相关, 因此, 褐飞虱在不同水稻品种上同一单位时间内分泌的蜜露量可作为取食量参考指标 (Ramulamma *et al.*, 2015)。据报道, 尽管抗虫品种与感虫品种具有同等或更多的糖, 但褐飞虱难以吸收利用抗虫品种韧皮部的营养物质 (Jin and Im, 2005), 从而

导致褐飞虱在抗虫品种上的蜜露量显著低于感虫品种 (张良佑等, 1992; Manisegaran *et al.*, 1993)。而褐飞虱在中抗水稻品种上的蜜露量表现不尽相同, 有些中抗品种明显高于感虫品种, 有些与感虫品种差异不显著, 如褐飞虱初羽化雌成虫在中抗品种 577741 和 577663 上的蜜露量与感虫对照 TN1 的差异不显著 (Ramulamma *et al.*, 2015), 这与本研究结果相似, 即褐飞虱在桂育 11 号上的蜜露量与在感虫对照柳沙油占 202 上的差异不显著。

根据作物对害虫的反应, 抗虫机制可分为忌避性、抗生性和耐害性 3 种。水稻对褐飞虱的忌避性和抗生性机制表现为抗虫水稻直接影响褐飞虱在植株上的取食、存活、生长发育和繁殖等生物学特性, 如抑制褐飞虱的取食量 (Jena *et al.*, 2015)、降低若虫密度和存活率 (Pahalada *et al.*, 2017)、延长若虫发育历期 (Thamarai and Soundararajan, 2017)、减少成虫羽化率 (Reddy *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2017), 从而降低褐飞虱种群增长指数 (Singh *et al.*, 2017; Thamarai and Soundararajan, 2017)。张良佑和吴荣宗 (1992) 研究发现我国南方稻种多以耐虫性为主, 界定的抗性标准有两种: 一是飞虱在该品种上的生存

率、虫口密度和分泌蜜露量均与在感虫对照品种上的差异不显著;二是在抗虫品种上,飞虱的虫口密度虽然明显低于感虫对照品种,但其生存率和分泌蜜露量与感虫对照品种差异不显著。本研究结果发现,褐飞虱在桂育 11 号的取食量、若虫存活率、雌成虫比例、成虫居留率(短翅率)、雌成虫寿命、体重和产卵量均与在感虫对照品种柳沙油占 202 上的差异不显著($P>0.05$),羽化率和卵孵化率显著低于在柳沙油占 202 的($P<0.05$);但取食量、若虫存活率、羽化率、成虫寿命、体重、产卵量和卵孵化率显著高于在抗虫对照品种 Rathu Heenati 的($P<0.05$),仅若虫历期显著低于在 Rathu Heenati 的($P<0.05$)。褐飞虱口针刺探次数、蜜露分泌量和体重的增加或减少都与水稻抗虫性程度密切相关,与抗虫品种相比,褐飞虱在一些中抗品种上的取食刺探较少、蜜露分泌量和体重增加量较高(Reddy and Kalode, 1985)。本研究发现,褐飞虱在桂育 11 号取食的蜜露量、初羽化雌成虫体重和产卵量与在感虫对照品种柳沙油占 202 上相比差异不显著,初羽化雌成虫体重和产卵量甚至略微高于柳沙油占 202,这说明桂育 11 号不影响褐飞虱正常的生长发育。但大田高、中、低施氮条件下,褐飞虱在桂育 11 号上的虫口密度显著低于在柳沙油占 202 的(吴碧球等, 2020)。综上所述,本施氮量(150 kg/hm^2)条件下桂育 11 号对褐飞虱的抗性偏向于耐害性。

黄所生等(2021)对桂育 11 号抗褐飞虱进行评价,发现褐飞虱在桂育 11 号的蜜露量显著低于在感虫品种柳沙油占 202 和 TN1 上的蜜露量,而与在抗虫品种 Rathu Heenati 上的蜜露量差异不显著,这与本研究结果相反。究其原因,可能与进行取食量研究时提供的水稻苗经不同施氮量处理有关,本研究对桂育 11 号、柳沙油占 202 和 Rathu Heenati 按照当前广西农民水稻常规施氮量 150 kg/hm^2 进行处理,而黄所生等(2021)进行取食量研究的稻苗未经施氮处理,即供试水稻处于低施氮水平。由于褐飞虱在低施氮水平桂育 11 号上的取食量和虫口密度显著低于在柳沙油占 202 上的,据张良佑和吴荣宗

(1992)对稻种对褐飞虱抗虫性质的界定标准,认为在低施氮水平桂育 11 号对褐飞虱的抗性可能是抗生性,或者是耐虫性兼抗生性。水稻对褐飞虱的耐害性机制主要体现在水稻应对褐飞虱为害胁迫后稻株的生理变化,如在受褐飞虱为害后,抗虫品种稻株萎蔫的时间比感虫对照更长(Reddy *et al.*, 2016),耐害性指数大于抗生性指数(陈建明等, 2009),功能植物损失指数显著低于感虫对照(黄水金等, 2016)等。桂育 11 号为氮高效利用水稻品种,在施用中低氮(112.5 kg/hm^2)条件下,其产量能达到或超过施常氮(150 kg/hm^2)和高氮(187.5 kg/hm^2)时的产量,且显著高于对照品种柳沙油占 202 在施用常氮下的产量(刘广林等, 2020);不同施氮量桂育 11 号田间稻飞虱种群数量均显著低于柳沙油占 202,表现对稻飞虱种群数量具有显著控制作用(吴碧球等, 2020),中抗褐飞虱(黄所生等, 2021)。在中低施氮条件下,桂育 11 号对褐飞虱的抗性是耐虫性还是抗生性,或者耐虫性兼具抗虫性?这有待于进一步的研究。

施氮是提高水稻对害虫为害敏感性关键因素之一(Horgan *et al.*, 2016a)。国内外学者研究发现,施用氮肥后,水稻叶面积、净同化率、分蘖数等生长指标增加(Salim, 2002; Azarpour *et al.*, 2014),稻株氮、可溶性糖、可溶性蛋白和氨基酸等营养物质含量增加(Salim, 2002; Rashid *et al.*, 2017),胍胍质、硅、挥发性萜烯类和酚酸类等防御物质含量也下降(Rashid *et al.*, 2017),可为褐飞虱提供营养多汁的食物以改善取食和产卵条件(Salim, 2002),从而增加水稻对褐飞虱的生态适合度(Lü *et al.*, 2004; Horgan *et al.*, 2016b),间接影响褐飞虱的为害。据报道,褐飞虱雌成虫更趋向于在施氮的水稻上取食和产卵(Lü *et al.*, 2005; Rashid *et al.*, 2017)、在高氮稻株上口针刺探频率减少(Lu *et al.*, 2004)、取食量和产卵量增加(Sogawa, 1970; Horgan *et al.*, 2016c);高氮植株上褐飞虱雌成虫寿命更长(吕仲贤等, 2005),卵孵化率、若虫存活率和成虫生殖力明显高于低氮稻株(郑许松等, 2009; Sun *et al.*, 2020),促进褐飞虱种群更快增长(Preap

et al., 2001; Lü *et al.*, 2004), 从而降低水稻对褐飞虱的抗性(Srinivasan *et al.*, 2015; Horgan *et al.*, 2016a)。氮高效利用品种桂育 11 号在中低施氮水平即能获得高产, 而中低施氮条件下, 该品种稻株的生理有何变化? 对褐飞虱的抗性表现如何? 亦需要作进一步的探讨。

参考文献 (References)

- Azarpour E, Moraditochae M, Bozorgi HR, 2014. Effect of nitrogen fertilizer management on growth analysis of rice cultivars. *International Journal of Biosciences*, 4(5): 35–47.
- Chen CH, Liu GL, Li H, Luo QC, Chen YM, Zhu QN, 2019. Breeding of a new conventional rice variety Guiyu No.11 with special high-gulity. *Seed*, 38(2): 121–123. [陈传华, 刘广林, 李虎, 罗群昌, 陈远孟, 朱其南, 2019. 优质常规稻新品种桂育 11 号的选育. 种子, 38(2): 121–123.]
- 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.]
- Dai GX, 2019. A new rice variety in Guangxi won the “gold” all over the country. *Friends of Farmers*, 2019(4): 9. [戴高兴, 2019. 广西一水稻新品种全国夺“金”. 农家之友, 2019(4): 9.]
- Ding SB, Zeng Z, Yan FM, Jiang JW, 2012. The development and life table parameters of *Nilaparvata lugens* (Stål) feeding on nine rice varieties. *Journal of Plant Protection*, 39(4): 334–340. [丁识伯, 曾铮, 闫凤鸣, 蒋金炜, 2012. 褐飞虱在九个水稻品种上的生长发育和生命表参数. 植物保护学报, 39(4): 334–340.]
- Hao SG, Cheng XN, Zhang XX, 2000. Effects of nine rice varieties on survival and oviposition of *Nilaparvata lugens* (Stål). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 23(2): 39–42. [郝树广, 程遐年, 张孝羲, 2000. 9 个水稻品种对褐飞虱存活与繁殖的影响. 南京农业大学学报, 23(2): 39–42.]
- Horgan F, Ramal AF, Bentur JS, Kumar R, Bhanu KV, Sarao PS, Iswanto EH, Chien HV, Phyu MH, Bernal CC, Almazan MLP, Alam MZ, Lu Z, Huang SH, 2015. Virulence of brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) populations from South and South East Asia against resistant rice varieties. *Crop Protection*, 78: 222–231.
- Horgan FG, Crisol-Martínez E, Almazan MLP, Romena A, Ramal AF, Ferrater JB, Bernal CC, 2016a. Susceptibility and tolerance in hybrid and pureline rice varieties to herbivore attack: Biomass partitioning and resource-based compensation in response to damage. *Annals of Applied Biology*, doi:10.1111/aab.12296.
- Horgan FG, Naik BS, Iswanto EH, Almazan MLP, Ramal AF, Bernal CC, 2016b. Responses by the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, to conspecific density on resistant and susceptible rice varieties. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 158(3): 284–294.
- Huang JS, Chen Q, Ma HG, Qin WJ, Fu Q, Luo J, Qin HG, 2016. Evaluation of tolerance of rice varieties to rice planthopper. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 38(1): 97–105. [黄水金, 陈琼, 马辉刚, 秦文婧, 傅强, 罗举, 秦厚国, 2016. 水稻品种对稻飞虱的耐害性评价. 江西农业大学学报, 38(1): 97–105.]
- Huang SS, 1994. The construction of the life table of whitebacked planthopper. *Journal of South China Agricultural University*, 15(3): 45–49. [黄寿山, 1994. 白背飞虱自然种群生命表的编制方法. 华南农业大学学报, 15(3): 45–49.]
- Huang SS, Qin LS, Wu BQ, Liu GL, Li C, Chen CH, Ling Y, Huang Q, Luo QC, Huang FK, Long LP, 2021. Resistance evaluation of rice variety ‘Guiyu 11’ to *Nilaparvata lugens*. *Journal of South China Agricultural University*, 42(1): 82–86. [黄所生, 覃丽莎, 吴碧球, 刘广林, 李成, 陈传华, 凌炎, 黄芊, 罗群昌, 黄凤宽, 龙丽萍, 2021. 水稻品种‘桂育 11 号’对褐飞虱的抗性评价. 华南农业大学学报, 42(1): 82–86.]
- Jena M, Panda RS, Sahu RK, Mukherjee AK, Dhua U, 2015. Evaluation of rice genotypes for rice brown plant hopper resistance through phenotypic reaction and genotypic analysis. *Crop Protection*, 78: 119–126.
- Jin KJ, Im DJ, 2005. Feeding inhibition of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) on a resistant rice variety. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 8(3): 301–308.
- Li GQ, Wang YC, Han ZJ, Gu ZY, Xiao YF, 1994. Studies on resistance of rice variety NJ14 to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) I. Evaluation of the resistance with life table of laboratory population. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 17(4): 131–133. [李国清, 王荫长, 韩召军, 顾正远, 肖英方, 1994. 水稻品种南京 14 号对褐飞虱抗性的研究-I.应用生命表技术评价南京 14 号的抗虫性. 南京农业大学学报, 17(4): 131–133.]
- Liu GJ, Sogawa K, Pu ZG, Yang YS, Qiao QC, Shen JH, Xie XM, Xie XM, Chen SG, Shi DG, 2003. Resistance in two hybrid rice combinations and their parents to the whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera*. *Chinese J. Rice Sci.*, 17(Suppl.): 89–94. [刘光杰, 寒川一成, 蒲正国, 杨英松, 谯青春, 沈君辉, 谢雪梅, 陈仕高, 石敦贵, 2003. 两个杂交稻组合及其亲本材料对白背飞虱抗性的研究. 中国水稻科学, 17(增刊): 89–94.]
- Liu GL, Wu ZS, Luo QC, Li H, Zhu QN, Li QW, Chen CH, 2020. Analysis of nitrogen fertilizer efficiency of six high-quality conventional rice varieties under different nitrogen application levels. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 33(8): 1716–1721. [刘广林, 吴子帅, 罗群昌, 李虎, 朱其南, 李秋雯, 陈传华, 2020. 不同施氮水平下 6 个优质常规稻品种的氮肥利用率分析. 西南农业学报, 33(8): 1716–1721.]

- Liu ZW, Han ZJ, Wang YC, 2001. Cross resistance and relative biological fitness of methamidophos and malathion resistant strains of *Nilaparvata lugens* (Stål). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 24(4): 37–40. [刘泽文, 韩召军, 王荫长, 2001. 褐飞虱抗有机磷品系的交互抗性及其适合度研究. 南京农业大学学报, 24(4): 37–40.]
- Lü ZX, Heong KL, Yu XP, Hu C, 2004. Effects of plant nitrogen on ecological fitness of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, in rice. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 7(1): 97–104.
- Lü ZX, Yu XP, Heong KL, Hu C, 2005. Effects of nitrogen nutrient on the behavior of feeding and oviposition of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, on IR64. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 31(1): 62–70. [吕仲贤, 俞晓平, Heong Kong-luen, 胡萃, 2005. 氮营养对褐飞虱在 IR64 稻株上取食和产卵行为的影响. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 31(1): 62–70.]
- Manisegaran S, Gopalan M, Hanifa AM, 1993. Differential reaction of selected rice cultivars to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* Stål. (Homoptera: Delphacidae). *Indian Journal of Plant Protection*, 21: 31–33.
- Prahalada GD, Shivakumar N, Lohithaswa HC, Gowda DKS, Ramkumar G, Kim S, Ramachandra C, Hittalmani S, Mohapatra T, Jena KK, 2017. Identification and fine mapping of a new gene, *BPH31* conferring resistance to brown planthopper biotype 4 of India to improve rice. *Oryza sativa* L. *Rice*, 10(1): 41.
- Preap V, Zalucki MP, Nesbitt HJ, Jahn GC, 2001. Effect of fertilizer, pesticide treatment, and plant variety on the realized fecundity and survival rates of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, generating outbreaks in Cambodia. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 4: 75–84.
- Ramulamma A, Sridevi D, Jhansilakshmi V, Reddy BN, Bhat BN, 2015. Evaluation of different rice germplasm accessions for resistance to brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). *Progressive Research-An International Journal*, 10(3): 223–225.
- Rashid MM, Jahan M, Islam KS, 2017. Effects of nitrogen, phosphorous and potassium on host-choice behavior of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) on rice cultivar. *Journal of Insect Behavior*, 30(1): 1–15.
- Reddy BN, Lakshmi VJ, Maheswari TU, Ramulamma A, Katti GR, 2016. *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae) in the selected rice entries. *An International Quarterly Journal of Environmental Sciences*, 10(1/2): 269–275.
- Reddy KV, Kalode MB, 1985. Mechanism of resistance in rice varieties showing differential reaction to brown planthopper. *Indian Academy Sciences (Animal Sciences)*, 94(1): 37–48.
- Salim M, 2002. Nitrogen induced changes in rice plants: Effects on host-insect interactions. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 17(3): 210–220.
- Sarao PS, Bentur JS, 2016. Antixenosis and tolerance of rice genotypes against brown planthopper. *Rice Science*, 23(2): 96–103.
- Singh I, Sarao PS, Sharma N, 2017. Antibiosis components and antioxidant defense of rice as mechanism of resistance to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Cereal Research Communications*, 45(2): 284–295.
- Sogawa K, 1970. Studies on feeding habits of brown planthopper: I. Effects of nitrogen-deficiency of host plants on insect feeding. *Japanese Journal of Applied Entomology & Zoology*, 14: 101–106.
- Srinivasan TS, Almazan MLP, Bernal CC, Fujita D, Ramal AF, Yasui H, Subbarayalu MK, Horgan FG, 2015. Current utility of the BPH25 and BPH26 genes and possibilities for further resistance against plant-and leafhoppers from the donor cultivar ADR52. *Applied Entomology and Zoology*, 50: 533–543.
- Sun Z, Shi JH, Fan T, Wang C, Liu L, Jin H, Foba CN, Wang MQ, 2020. The control of the brown planthopper by the rice *Bph14* gene is affected by nitrogen. *Pest Management Science*, 76(11): 3649–3656.
- Thamarai M, Soundararajan RP, 2017. Evaluation of antibiosis resistance to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) in rice. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(3): 954–957.
- Wu BQ, Huang SS, Qin LS, Li C, Chen CH, Liu GL, Ling Y, Huang Q, Luo QC, Huang FK, Long LP, 2020. Effect of High-efficiency nitrogen utilization rice cultivar Guiyu No.11 to rice pests and diseases. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 33(10): 2250–2255. [吴碧球, 黄所生, 覃丽莎, 李成, 陈传华, 刘广林, 凌炎, 黄芊, 罗群昌, 黄凤宽, 龙丽萍, 2020. 氮高效利用水稻品种桂育 11 号病虫害发生效应研究. 西南农业学报, 33(10): 2250–2255.]
- Zhang LY, Wu RZ, 1992. On the screening of resistant rice varieties to brown planthopper and the resistance mechanism. *Journal of Plant Protection*, 19(2): 133–137. [张良佑, 吴荣宗, 1992. 水稻品种对褐飞虱抗性的筛选及其抗虫性的研究. 植物保护学报, 19(2): 133–137.]
- Zheng XS, Chen GH, Xu HX, Lu ZX, 2009. Interactive effects of temperature and nitrogen fertilizer on the survival, development, and reproduction of brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(5): 1171–1175. [郑许松, 陈桂华, 徐红星, 吕仲贤, 2009. 温度和氮肥对褐飞虱存活、生长发育和繁殖的交互作用. 应用生态学报, 20(5): 1171–1175.]