

胡杰, 贡常委, 袁好, 等. 水稻次生代谢物质介导红腹缢管蚜与白背飞虱的种间互作关系 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(5): 735-741.
HU Jie, GONG Changwei, YUAN Hao, et al. Interspecific relationships between *Rhopalosiphum rufiabdominalis* and *Sogatella furcifera* mediated by rice secondary metabolites[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(5): 735-741.

水稻次生代谢物质介导红腹缢管蚜与白背飞虱的种间互作关系

胡杰^{1,2}, 贡常委^{1,2}, 袁好², 蒲建^{1,2}, 王学贵^{1,2}

(1 四川农业大学 西南作物基因资源发掘与利用国家重点实验室, 四川 成都 611130;

2 四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130)

摘要:【目的】探究白背飞虱 *Sogatella furcifera* 与红腹缢管蚜 *Rhopalosiphum rufiabdominalis* 种间互作机制, 以及 2 种昆虫互作过程中水稻次生代谢物质的作用。【方法】将白背飞虱和红腹缢管蚜按不同比例混合饲养, 待白背飞虱长至成虫后分组配对, 分析白背飞虱总产卵量及日均产卵量; 测定各处理的水稻草酸、黄酮及总酚含量, 利用 GC/MS 仪器分析各处理水稻幼苗次生代谢物质成分的差异。【结果】“15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱”处理的白背飞虱总产卵量仅为 131.67 粒, 与“20 头白背飞虱”处理 (214.60 粒) 差异显著, 日均产卵量也呈现相同的规律; “15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱”处理的水稻黄酮和总酚含量分别为 1.98 和 63.71 mg/L, 均显著高于其他处理。GC/MS 分析表明, “15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱”处理的水稻中丙丁酚相对含量高达 75.78%, 而其余处理的水稻中不存在此种酚类物质。【结论】红腹缢管蚜可能是通过刺激水稻提高黄酮及总酚含量, 进而抑制白背飞虱的生殖能力, 其中丙丁酚可能在白背飞虱和红腹缢管蚜种间互作中起着关键作用。

关键词: 水稻; 白背飞虱; 红腹缢管蚜; 种间互作; 次生代谢物质; 总酚

中图分类号: Q946.8

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)05-0735-07

Interspecific relationships between *Rhopalosiphum rufiabdominalis* and *Sogatella furcifera* mediated by rice secondary metabolites

HU Jie^{1,2}, GONG Changwei^{1,2}, YUAN Hao², PU Jian^{1,2}, WANG Xuegui^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Crop Gene Exploration and Utilization in Southwest China, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: 【Objective】To explore the interaction mechanism between species of *Sogatella furcifera* (white-backed planthopper) and *Rhopalosiphum rufiabdominalis* (aphid), and the role of secondary metabolites in rice during the interaction between the two insects. 【Method】*S. furcifera* and *R. rufiabdominalis* were mixed in different proportions, and the total egg production and average daily spawning of white-backed planthopper adults were analyzed after pairing. The contents of oxalic acid, flavones and total phenols of each treated rice seedlings were determined, and the differences in compositions of secondary metabolites were analyzed by

收稿日期: 2023-05-08 网络首发时间: 2023-07-07 12:35:27

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/44.1110.S.20230706.1944.004.html>

作者简介: 胡杰, 硕士研究生, 主要从事植物保护研究, E-mail: hojay@stu.sicau.edu.cn; 通信作者: 王学贵, 教授, 博士, 主要从事农药毒理学研究, E-mail: wangxuegui@sicau.edu.cn

基金项目: 西南作物基因资源发掘与利用国家重点实验室“生物育种”揭榜挂帅项目 (SKL-ZY202221)

GC/MS instrument. 【Result】 The total egg production of white-backed planthoppers treated with “15 aphids + 5 white-backed planthoppers” was only 131.67 grains, which was significantly different from that of “20 white-backed planthoppers” (214.60 grains), and the average daily fecundity was the same. The contents of rice flavones and total phenols treated with “15 aphids + 5 white-backed planthoppers” were 1.98 and 63.71 mg/L, respectively, which were significantly higher than those of other treatments. GC/MS analysis showed that the relative content of probucol in rice treated with “15 aphids + 5 white-backed planthoppers” was as high as 75.78%, while this phenolic substance was not present in the rest of the treatments. 【Conclusion】 *R. rufiabdominalis* may inhibit the reproductive ability of *S. furcifer* through stimulating rice to promote the content of flavones and total phenols. The probucol may play a key role in the interaction between *S. furcifer* and *R. rufiabdominalis*.

Key words: Rice; *Sogatella furcifer*; *Rhopalosiphum rufiabdominalis*; Interspecific interplay; Secondary metabolite; Total phenols

在昆虫纲中,昆虫互作的现象频繁发生,其互作关系的类型包括中性、竞争、偏害、捕食、寄生、偏利及互利等^[1]。其中,捕食、寄生和竞争是目前较为普遍的类型。例如,邱良妙等^[2]研究发现六斑月瓢虫 *Menochilus sexmaculata* 4 龄幼虫及成虫对低龄的草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 均有较好的防治潜能。张晓明等^[3] 研究发现海氏浆角蚜小蜂 *Eretmocerus hayati* 和浅黄恩蚜小蜂 *Encarsia sophia* 均能寄生于烟粉虱 *Bemisia tabaci* 体内,两者在 3:1 比例数量组合下对烟粉虱的寄生率最高。Kaplan 等^[4] 总结了 333 种植食性昆虫的种间关系,其中 62% 属于竞争关系,因此竞争关系在昆虫互作中占有重要地位。刘晓飞等^[5] 比较了桔小实蝇 *Bactrocera (Bactrocera) dorsalis* 及番石榴实蝇 *Bactrocera (Bactrocera) correcta* 幼虫在不同温度下存活率的差异,结果表明在 33 ℃ 条件下番石榴实蝇存活率更高,说明番石榴实蝇具有较强的竞争优势。禹云超等^[6] 发现,西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 作为入侵性害虫,与本地的东方花蓟马 *Frankliniella tritici* 存在种间竞争关系,东方花蓟马能显著降低西花蓟马若虫的存活率,说明东方花蓟马具有竞争优势。

昆虫间的互作受到其自身和环境因素的影响,有研究表明,许多食草昆虫之间的相互作用与寄主植物相关^[7]。例如,李建领^[8] 研究发现,枸杞瘿螨 *Aceria pallida* 通过取食诱导枸杞产生防御酶及类黄酮、总酚等次生物质,进而抑制枸杞木虱 *Bactericera gobica* 的生长发育。Zhao 等^[9] 亦研究发现烟粉虱取食烟草,从而促进烟草水杨酸含量的增高,进而提高桃蚜 *Myzus persicae* 死亡率,显著降低桃蚜的繁殖力。寄主植物为抵抗昆虫的危害,在危

害过程中被诱导产生防御性次生代谢物质,如黄酮类、酚类、有机酸、生物碱等化合物,极大影响了昆虫的取食、生长发育等行为^[10-11],以上研究均证明了植物次生代谢物质能够间接参与昆虫的种间互作行为。我们前期研究表明,白背飞虱 *Sogatella furcifer* 和红腹缢管蚜 *Rhopalosiphum rufiabdominalis* 存在种间互作,将两者混养后,白背飞虱后代数量显著减少。为明确红腹缢管蚜和白背飞虱种间互作的原理,同时验证与植物次生代谢物质的关联性,本研究将红腹缢管蚜和白背飞虱按不同比例混合饲养,探究红腹缢管蚜抑制白背飞虱繁殖的最佳有效比例,以及红腹缢管蚜刺激水稻产生的次生代谢物质反作用抑制白背飞虱生殖的机理,为科学合理利用昆虫互作控制红腹缢管蚜和白背飞虱提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试水稻

选用四川农业大学水稻研究所提供的 TN1 水稻品种,种子用水冲洗,浸泡 2 d 后,置于恒温箱 (30±1) ℃ 中培养备用。

1.1.2 供试虫源

由华中农业大学提供白背飞虱敏感品系,于养虫笼内 (45 cm × 35 cm × 22 cm) 以 TN1 水稻繁育。饲养条件:温度 (26±1) ℃,相对湿度 70%~80%,光周期 14 h 光照:10 h 黑暗。本试验所需的白背飞虱为 3 龄若虫。

由四川农业大学无公害农药实验室提供红腹缢管蚜,于透明塑料盒内 (33 cm × 18 cm × 14 cm) 以 TN1 水稻繁育。饲养条件:温度 (26±1) ℃,相对湿度 70%~80%,光周期 14 h 光照:10 h 黑暗。本试验所需的红腹缢管蚜为 3~4 龄若虫。

1.1.3 主要设备和仪器 三重四级杆气质联用仪 GC-MS-TQ8040(岛津); UV-3 000 紫外可见分光光度计 (上海美谱达仪器有限公司); D37520 离心机 (美国科峻仪器公司); RXZ 型智能人工气候箱 (宁波江南仪器厂)。

1.2 试验方法

1.2.1 水稻前期处理 用 φ 为 5% 的过氧化氢水溶液浸泡 TN1 水稻种子 2 d, 催芽露白后, 将种子播种于底部垫有营养液棉花的 500 mL 塑料杯内, 每杯种子 15 粒, 然后置于 (26±1) °C、湿度 70%~80% 的培养箱内, 期间补充适量营养液。待幼苗长至 5~6 cm 备用。

1.2.2 白背飞虱与红腹缢管蚜互作装置 挑选出 3~4 龄的无翅红腹缢管蚜和处于 3 龄期的白背飞虱备用。试验处理见表 1, 仅有水稻的处理为对照 (CK)。培养箱温度控制在 (26±1) °C, 相对湿度 70%~80%, 每天光照 14 h, 每个处理重复 10 次。

表 1 各试验处理的白背飞虱和红腹缢管蚜初始数量
Table 1 Initial number of white-backed planthopper and aphid in each experimental treatment

处理 Treatment	蚜虫/头 Aphid	白背飞虱/头 White-backed planthopper
T1	20	0
T2	15	5
T3	10	10
T4	5	15
T5	0	20
T6(CK)	0	0

1.2.3 白背飞虱产卵量的测定 待上述处理的白背飞虱发育至 5 龄若虫, 准备 2 株新鲜的水稻苗并转移至玻璃试管内 (直径 2.0 cm, 高度 14.5 cm) 备用。选取同一天羽化的雄/雌虫进行一一配对, 吸取至上述玻璃试管内, 然后每天将雌、雄成虫转移至新的试管中, 并且定时向旧的稻苗中添加营养液以防枯黄坏死, 所有配对的白背飞虱均在同一条件下培养。于 10 d 后记录试管中白背飞虱的孵化情况, 使用镊子剖开整株稻苗统计未孵化的卵数, 然后对比 T2~T5 这 4 个处理的总产卵量及日均产卵量, 筛选出抑制白背飞虱产卵量的最佳配比^[12]。每个处理重复 15 次。

1.3 水稻次生代谢物质含量的测定

待白背飞虱发育至成虫后, 移除塑料杯内所有的白背飞虱和红腹缢管蚜, 清理水稻叶片上残留的蜕皮及蜜露, 选用整株水稻以测定水稻中的草酸、

黄酮及总酚含量。

1.3.1 草酸含量的测定 样品制备: 参考段立珍等^[13]的方法, 称取各处理水稻幼苗 0.5 g, 加入 10 mL KCl-HCl 缓冲液 (pH 2.0), 用石英砂研磨数分钟至匀浆, 然后用 15 mL 超纯水清洗转入容量瓶中, 在 75~80 °C 水浴锅中加热震荡 30 min, 过滤装入离心管中并用超纯水定容至刻度线, 即得到草酸待测液。

水稻草酸含量的测定: 参考段立珍等^[13]的方法, 用样品草酸待测液代替草酸铵标准溶液, 室温下静置 30 min 后在 510 nm 波长处测定光密度, 代入标准曲线计算出水稻草酸含量。

1.3.2 黄酮含量的测定 样品制备: 参考李明阳等^[14]的方法, 称取 0.5 g 水稻幼苗, 在离心管中研磨至粉状, 然后加入 φ 为 40% 的乙醇溶液 10 mL, 于 40 °C 超声波清洗仪中提取 45 min, 期间超声波辅助作用 15 min(20 kHz), 取出后在 7 000 r/min 下离心 5 min, 取上清液为待测样品。

水稻黄酮含量的测定: 参考李明阳等^[14]的方法, 用黄酮待测液代替芦丁标准溶液, 在 510 nm 波长下测定光密度, 根据芦丁标准曲线计算出水稻中黄酮含量。

1.3.3 总酚含量的测定 待测样品制备方法与“1.3.2”一致。

水稻总酚含量的测定: 参考蔡文国等^[15]的方法, 用上述待测液代替没食子酸标准溶液, 在 760 nm 波长下测定其光密度。测得的光密度代入标准曲线, 计算各处理水稻总酚的含量。

1.4 GC/MS 法测定水稻化学成分相对含量

取处理 T2、T4 及 T6(CK) 的整株稻苗测定水稻中化合物的成分及相对含量。样品处理^[14,16]: 称取 0.1 g 整株水稻样品研磨至粉状, 装入 5 mL 离心管中, 加入 1.4 mL 预冷后的甲醇, 充分摇匀, 在 10 700 r/min 下离心 10 min。转移上清液至 10 mL 离心管, 加入 0.75 mL 三氯甲烷及 1.4 mL 超纯水 (均预冷至-20 °C) 充分摇匀混合, 在 4 800 r/min 下离心 10 min, 然后将上清液转入 1.5 mL 离心管中备用。

GC/MS 仪器程序设定: 参照李明阳等^[14]的方法。分析仪器: GC-MS-TQ8040, RTX-5MS 毛细管柱 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)。以氦气为载体, 柱流量为 1 mL/min。柱温从 100 °C (保持 3 min) 以 5 °C/min 速度升温到 280 °C (保持 5 min)。进样体积 1 μL, 配备一个 AS-3 000 自动取样器, 并设置用于采样无分离注射。注射温度 250 °C, 轰击电压 70 eV, 质量扫描范围 m/z 为 50~650。记录各处理

中水稻化学成分的保留时间 (Retention time), 在 NIST98 MS 数据库中对分析并记录各成分的名称及其分子式, 找出不同处理下相对含量变化明显的成分。

1.5 数据处理及分析

采用 Excel 及 IBM SPSS Statistics 27 软件整理分析数据, 采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 法分析不同处理间白背飞虱总产卵量及水稻草酸、黄酮、总酚含量的差异性, 处理间差异显著性采用 Duncan’s 法检验, 作图使用 SigmaPlot 10.0 软件。

2 结果与分析

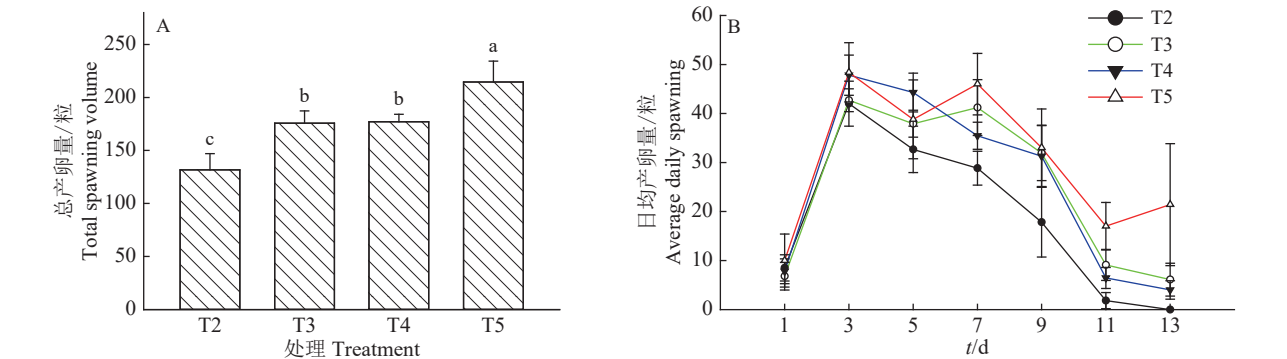
2.1 红腹缢管蚜和白背飞虱不同比例混合对白背飞虱产卵量的影响

白背飞虱总产卵量见图 1A, 处理 T5 总产卵量高达 214.60 粒, 处理 T4(177.09 粒) 和处理 T3 (175.70 粒) 次之, 处理 T2 最低, 仅 131.67 粒, 且处

理间差异显著 ($P<0.05$)(T3、T4 间除外)。白背飞虱日均产卵量见图 1B, 第 1 天处理 T2 产卵量与其余 3 组近似相同, 第 3~13 天每日产卵量均低于其余 3 组; 前期, 处理 T3 产卵量低于 T4, 但中后期与之相反, 且中后期两组产卵量相差较小。处理 T5 除第 5 天产卵量稍低于 T4 以外, 其余时间产卵量均高于其他处理, 第 3 天高达 48.40 粒, 且后期产卵量远超过其余处理。可见, 红腹缢管蚜能够显著影响白背飞虱的产卵量, 且初始红腹缢管蚜数量越多, 对白背飞虱产卵量的抑制程度越明显。

2.2 红腹缢管蚜和白背飞虱共存对水稻次生代谢物质含量的影响

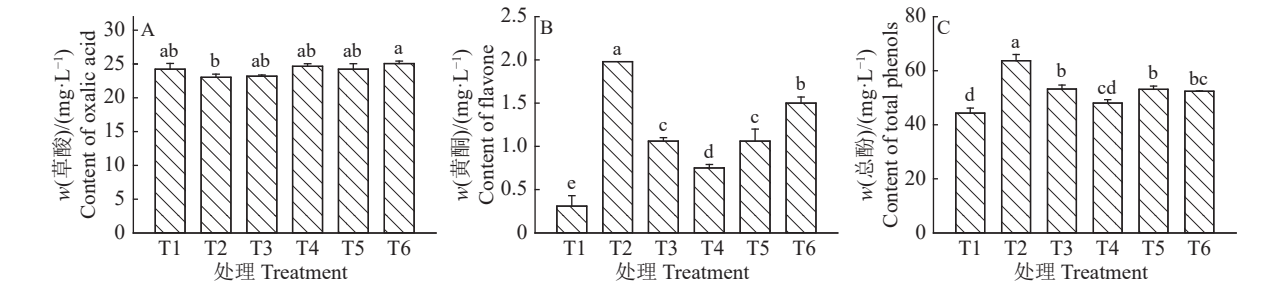
不同处理间水稻草酸含量的测定结果见图 2A, 处理 T6(CK) 的草酸含量最高, 达到了 25.06 mg/L, 其余由高到低依次为 T4(24.65 mg/L)、T1(24.23 mg/L)、T5(24.23 mg/L) 和 T3(23.19 mg/L), T2 含量最低 (23.03 mg/L), 除 T2 以外, 其余处理之间差异均不显著。可见, 在 T2 处理下高初始量的红腹缢



T2: 15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱, T3: 10 头蚜虫 + 10 头白背飞虱, T4: 5 头蚜虫 + 15 头白背飞虱, T5: 20 头白背飞虱; 图 A 中, 柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s 法)
T2: 15 aphids + 5 white-backed planthoppers, T3: 10 aphids + 10 white-backed planthoppers, T4: 5 aphids + 15 white-backed planthoppers, T5: 20 white-backed planthoppers; In figure A, different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan’s method)

图 1 各处理组白背飞虱的单雌总产卵量及日均产卵量

Fig. 1 Total egg production and average daily spawning of white-backed planthopper in each treatment



T1: 20 头蚜虫, T2: 15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱, T3: 10 头蚜虫 + 10 头白背飞虱, T4: 5 头蚜虫 + 15 头白背飞虱, T5: 20 头白背飞虱, T6(CK): 0 头蚜虫 + 0 头白背飞虱; 各图中, 柱子上方的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s 法)
T1: 20 aphids, T2: 15 aphids + 5 white-backed planthoppers, T3: 10 aphids + 10 white-backed planthoppers, T4: 5 aphids + 15 white-backed planthoppers, T5: 20 white-backed planthoppers, T6 (Control treatment): 0 aphid + 0 white-backed planthopper; In each figure, different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan’s method)

图 2 各处理组水稻的草酸、黄酮和总酚含量

Fig. 2 Contents of oxalic acid, flavones and total phenols in rice of each treatment

管蚜能够降低水稻草酸含量。

不同处理间水稻黄酮含量的测定结果见图 2B, 处理 T2 的黄酮含量高达 1.98 mg/L, 其余由高到低依次为 T6(CK)(1.50 mg/L)、T5(1.06 mg/L)、T3(1.06 mg/L) 和 T4(0.75 mg/L), T1 最低 (0.31 mg/L), 除 T3 与 T5 之间差异不显著以外, 其余处理之间均差异显著。因此, 在红腹缢管蚜与白背飞虱共存的情况下, 高初始量的红腹缢管蚜能够明显提高水稻黄酮含量, T2 处理尤为显著。

不同处理间水稻总酚含量的测定结果见图 2C, 处理 T2 的总酚含量最高, 达到 63.71 mg/L, 其余由高到低依次为 T3(53.20 mg/L)、T5(53.10 mg/L)、

T6(CK)(52.37 mg/L)、T4(48.01 mg/L), T1 最低 (44.29 mg/L), 且处理 T2、T3、T4 间差异显著。因此, 红腹缢管蚜与白背飞虱互作对水稻总酚含量影响显著, 且高初始量的红腹缢管蚜能够明显提升水稻总酚含量, T2 处理尤为显著。

2.3 GC/MS 法分析水稻次生代谢物质成分

经过 NIST98 MS 数据库对比, 发现不同处理间水稻幼苗次生代谢物质种类及相对含量存在较大的差别, 共涉及 18 种化合物 (表 2)。处理 T2 中, 丙丁酚相对含量最高 (75.78%), 其余较高的为 2,4-二叔丁基苯酚 (5.38%)、二苯基砷 (4.21%); 处理 T4 中, 2,4-二叔丁基苯酚相对含量最高 (28.59%),

表 2 各处理组水稻主要次生代谢物质成分及相对含量
Table 2 The main secondary metabolite components and relative contents in rice of each treatment

化合物名称 Compound name	分子式 Molecular formula	<i>t</i> _{保留} /min Retention time	相对含量 ¹⁾ / % Relative content		
			T2	T4	T6
2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮 2,3-Dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-4H-pyran-4-one	C ₆ H ₈ O ₄	5.664	0.67	3.71	13.21
萘 Naphthalene	C ₁₀ H ₈	5.931	0.41	0.95	2.82
2,4-二甲基苯甲醛 2,4-Dimethyl-benzaldehyde	C ₉ H ₁₀ O	6.662	1.53	8.38	3.45
3-乙酰氧基-3-羟基丙酸甲酯 3-Acetoxy-3-hydroxypropionic acid-methyl ester	C ₆ H ₁₀ O ₅	7.800	0	0	6.39
1-硝基-1-脱氧- <i>d</i> -甘油- <i>l</i> -甘露庚糖 1-Nitro-1-deoxy- <i>d</i> -glycero- <i>l</i> -mannoheptitol	C ₇ H ₁₅ NO ₈	8.943	0	0	1.87
十二烷醛 Dodecanal	C ₁₂ H ₂₄ O	11.407	0.08	1.07	1.70
5-羟甲基糠醛 5-Hydroxymethylfurfural	C ₆ H ₆ O ₃	12.881	0.35	0	16.67
2,4-二叔丁基苯酚 2,4-Di- <i>tert</i> -butylphenol	C ₁₄ H ₂₂ O	14.001	5.38	28.59	2.70
7,9-二叔丁基-1-氧杂螺(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮 7,9-Di- <i>tert</i> -butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	22.629	2.79	15.95	2.23
二苯基砷 Diphenyl sulfone	C ₁₂ H ₁₀ O ₂ S	23.036	4.21	28.02	23.68
9-十八烯酰胺 (Z)-9-Octadecenamide	C ₁₈ H ₃₅ NO	30.918	0	0.73	1.30
β-谷甾醇 Beta-sitosterol	C ₂₉ H ₅₀ O	33.250	0.24	0.74	1.33
3-[(三甲基硅)氧基]麦角甾-7-烯 3-[(Trimethylsilyl)oxy]ergost-7-ene	C ₃₁ H ₅₆ OSi	35.274	0	0	0.98
1,6-双[甲基(三甲基)硅氧基]己烷 1,6-Bis[methyl (trimethylene) silyloxy]hexane	C ₁₄ H ₃₀ O ₂ Si ₂	36.375	0	0	0.92
(1 <i>R</i> ,4 <i>R</i>)-4-二丙基-1-甲基环己基-2-烯醇 (1 <i>R</i> ,4 <i>R</i>)-4- <i>Isopropyl</i> -1-methylcyclohex-2-enol	C ₁₀ H ₁₈ O	38.780	0	0	0.90
丙丁酚 Probucol	C ₃₁ H ₄₈ O ₂ S ₂	38.935	75.78	0	0
3-羟基-(3β,5α,14β,20β,22β,25 <i>R</i>)-螺甾-8-烯-11-酮 3-hydroxy-(3β,5α,14β,20β,22β,25 <i>R</i>)-Spirost-8-en-11-one	C ₂₇ H ₄₀ O ₄	38.941	0	0	1.05
7-溴-8-氯-2-甲基十八烷 7-Bromo-8-chloro-2-methyloctadecane	C ₁₉ H ₃₈ BrCl	41.439	1.12	0	1.53
其他 Other			7.44	11.86	17.27

1) T2: 15头蚜虫 + 5头白背飞虱; T4: 5头蚜虫 + 15头白背飞虱; T6(CK): 0头蚜虫 + 0头白背飞虱
1) T2: 15 aphids + 5 white-backed planthoppers; T4: 5 aphids + 15 white-backed planthoppers; T6 (Control treatment): 0 aphid + 0 white-backed planthopper

其余为二苯基砒 (28.02%)、7,9-二叔丁基-1-氧杂螺 (4,5) 癸-6,9-二烯-2,8-二酮 (15.95%); 处理 T6(CK) 中, 二苯基砒相对含量最高 (23.68%), 其余为 5-羟甲基糠醛 (16.67%)、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮 (13.21%)。其中, 区别最明显的为处理 T4 及 T6 水稻中均无丙丁酚, 而处理 T2 水稻中的丙丁酚相对含量高达 75.78%, 表明丙丁酚可能在白背飞虱与红腹缢管蚜互作中起着重要作用, 且相对含量与红腹缢管蚜/白背飞虱的初始比可能有密切联系。另外, 相对含量差别较大的还有 2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮、5-羟甲基糠醛、2,4-二叔丁基苯酚、二苯基砒、7,9-二叔丁基-1-氧杂螺 (4,5) 癸-6,9-二烯-2,8-二酮等成分, 这可能与两者互作有一定的关系。

3 讨论与结论

植食性口器昆虫种间互作包含竞争、中性、偏利及互利 4 类, 其中, 刺吸式口器昆虫间的种间竞争尤为明显^[17-18]。本研究将白背飞虱和红腹缢管蚜在不同比例下进行混养, 发现红腹缢管蚜初始量越大, 对白背飞虱产卵量的抑制程度更明显, 尤其以 T2 处理 (15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱) 最为显著, 甚至红腹缢管蚜的初始数量处于劣势下也能够显著抑制白背飞虱生殖, 且日均产卵量也呈现近似的规律。相互竞争的动力体现在昆虫为争夺同一寄主资源产生了相互作用及影响, 当两种昆虫生殖能力差异较大时, 往往发生竞争取代现象, 即生殖能力强的一方凭着绝对的数量优势取代竞争者^[1,19]。蚜虫的生殖方式主要为孤雌生殖, 具有严重的世代重叠^[20], 在生殖能力方面占据绝对的优势, 与其他物种争夺同一寄主资源的过程中易凭借数量优势胜出。类似的种间竞争在其他昆虫中也有着广泛的报道。石永秀等^[18]研究了不同异种共存密度对豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum* 与黑豆蚜 *Aphis fabae* 生长发育及生殖的影响, 结果表明黑豆蚜能够显著抑制豌豆蚜的成蚜体质量及生殖能力, 而黑豆蚜不受影响。王健立等^[21]的研究结果表明, 烟蓟马 *Thrips tabaci* 具有更强的繁殖能力且可以显著降低西花蓟马的产卵量, 甚至西花蓟马在初始混合种群中占据较大比例的情况下, 烟蓟马也可以经繁育后完全取代西花蓟马, 与本研究的结论基本一致。但本文仅侧重于白背飞虱, 未对红腹缢管蚜生长发育及繁殖力参数进行测定, 同时仅测定了对当代白背飞虱繁殖力的影响, 没有深究互作效应是否会对后代的生长发育及繁殖能力造成同等的影响, 这些均需进一

步研究。

此外, 本研究通过测定水稻次生代谢物质含量, 发现在 T2 处理 (15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱) 中, 高初始量的红腹缢管蚜能够降低水稻草酸含量, 同时明显提高水稻黄酮及总酚含量, 且与此对应的白背飞虱总产卵量显著降低。该结果表明昆虫之间的竞争除直接竞争外, 还存在以寄主植物为纽带的间接竞争, 即昆虫取食能够诱导寄主产生次生代谢物质, 在调节物种间的竞争关系中起着关键作用^[22-24]。一部分植食性昆虫的种间互作通常是由寄主植物介导的^[17], 纪祥龙等^[25]发现桃蚜取食后可以改变甘蓝 *Brassica oleracea* var. *capitata* 中游离氨基酸含量, 显著降低后取食的萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 种群数量。另外有研究表明, 取食叶部的大菜粉蝶 *Pieris brassicae* 对取食根部的甘蓝地种蝇 *Delia radicum* 的生长发育有明显影响, 与根组织中化感物质水平增加有一定的关联性^[26]。张茂新等^[11]已经从寄主植物中分离鉴定出多个具有抑制昆虫产卵的化合物, 主要包含黄酮类、酚类、有机酸等化合物。枸杞瘿螨和枸杞木虱共同为害能够引起寄主植物总酚含量升高, 进而抑制枸杞木虱种群数量的发展^[8]。在马广民^[27]的研究中, 朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 取食后会诱导棉花 *Gossypium* spp. 的水杨酸信号途径增强, 造成棉蚜 *Aphis gossypii* 发育历期延长及产卵量降低, 施用外源性水杨酸亦引起相同的现象。本文因红腹缢管蚜可能是通过刺激寄主植物水稻产生防御性的次生代谢物质黄酮及总酚, 其含量的积累能够抑制白背飞虱产卵量, 从而证实水稻间接参与了种间互作, 与前人的研究结果一致。但处理 T5(20 头白背飞虱) 与处理 T3(10 头蚜虫 + 10 头白背飞虱) 的黄酮与总酚含量无差异性, 而在产卵量方面差异显著, 推测白背飞虱与红腹缢管蚜危害后诱导水稻产生了不同类型的防御性次生代谢物质, 不同昆虫危害诱导寄主植物产生的防御途径有差异性^[28]。另外, 研究发现红腹缢管蚜与白背飞虱的数量初始比可能与水稻黄酮和总酚含量的变化有一定的联系, 有待进一步研究。结合 GC/MS 仪器检测到了与酚类相关的化合物, 其中丙丁酚物质仅存在于处理 T2(15 头蚜虫 + 5 头白背飞虱), 其规律也与上述的结论相匹配, 其他相对含量有明显变化的成分也可能参与了种间互作。然而, 仪器未检测到与草酸相关的次生代谢物质, 这表明红腹缢管蚜与白背飞虱的互作效应可能对草酸没有明显影响。另外本文仅筛选出相对含量变化较大的成分, 未明确其具体的

作用,后续需进一步将上述变化幅度较大的成分添至人工饲料中,筛选并验证具有抑制白背飞虱生殖能力的成分。

本研究仅从植物的生理生化层面解释种间互作现象,没有深入到分子层面,因此在后续开展的试验中可以进一步对植物进行代谢组分析,以明确红腹缢管蚜与白背飞虱互作的分子基础,同时分析研究白背飞虱和红腹缢管蚜中与生殖发育相关基因表达情况,找出内在互作机制,为害虫的综合防控提供理论参考。

参考文献:

[1] 陈堃. 麦长管蚜与禾谷缢管蚜种间竞争的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[2] 邱良妙, 刘其全, 陈秀琴, 等. 六斑月瓢虫对草地贪夜蛾低龄幼虫的捕食作用[J]. 中国生物防治学报, 2023, 39(2): 471-477.

[3] 张晓明, 徐海云, 杨念婉, 等. 两种蚜小蜂对烟粉虱 MED 隐种的田间笼罩控效评价[J]. 植物保护学报, 2018, 45(6): 1281-1288.

[4] KAPLAN I, DENNO R F. Interspecific interactions in phytophagous insects revisited: A quantitative assessment of competition theory[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(10): 977-994.

[5] 刘晓飞, 陈强, 叶辉. 桔小实蝇与番石榴实蝇幼虫的种间竞争研究[J]. 环境昆虫学报, 2014, 36(1): 33-38.

[6] 禹云超, 鄧军锐, 曾广, 等. 入侵种西花蓟马与其它昆虫的种间竞争[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(1): 94-100.

[7] ANDERSON P, SADEK M M, WÄCKERS F L. Root herbivory affects oviposition and feeding behavior of a foliar herbivore[J]. *Behavioral Ecology*, 2011, 22(6): 1272-1277.

[8] 李建领. 寄主植物介导的枸杞瘿螨和枸杞木虱种间互作关系研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2019.

[9] ZHAO H P, ZHANG X Y, XUE M, et al. Feeding of whitefly on tobacco decreases aphid performance via increased salicylate signaling[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0138584. doi: 10.1371/journal.pone.0138584.

[10] 陈华才. 挥发物在水稻-二化螟、稻纵卷叶螟-二化螟绒茧蜂、螟蛉绒茧蜂相互关系中的作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.

[11] 张茂新, 凌冰, 庞雄飞. 非嗜食植物中的昆虫产卵驱避物及其利用[J]. 昆虫天敌, 2003, 25(1): 28-36.

[12] 张钰明. 三氟苯嘧啶介导的核受体 USP 过表达对白背飞虱生殖发育的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.

[13] 段立珍, 汪建飞, 赵建荣. 比色法测定菠菜中草酸含量的条件研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(3): 632-633.

[14] 李明阳, 姚宇波, 徐翔, 等. 几种水稻对褐飞虱的抗性鉴定及抗性相关次生物质分析[J]. 应用昆虫学报, 2020, 57(6): 1375-1384.

[15] 蔡文国, 吴卫, 邵金凤, 等. Folin-Ciocalteu 法测定鱼腥草多酚的含量[J]. 食品科学, 2010, 31(14): 201-204.

[16] PENG L, ZHAO Y, WANG H Y, et al. Comparative metabolomics of the interaction between rice and the brown planthopper[J]. *Metabolomics*, 2016, 12(8): 28746-28764.

[17] DENNO R F, MCCLURE M S, OTT J R. Interspecific interactions in phytophagous insects: Competition reexamined and resurrected[J]. *Annual Review of Entomology*, 1995, 40: 297-331.

[18] 石永秀, 上官超智, 王婷婷, 等. 黑豆蚜与豌豆蚜的种间竞争及密度效应[J]. 应用昆虫学报, 2022, 59(4): 862-873.

[19] 吴佳昊, 黄波, 王德辉, 等. 光肩星天牛与星天牛种间竞争行为研究[J]. *环境昆虫学报*, 2022, 44(3): 651-657.

[20] 张祥, 刘长仲, 宋维虎. 不同 CO₂ 浓度条件下两种色型豌豆蚜的种群密度效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 78-83+92.

[21] 王健立, 李洪刚, 马志国, 等. 西花蓟马与烟蓟马在紫甘蓝上的种间竞争[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5006-5012.

[22] 闫文静, 王俊刚, 张玉栋, 等. 棉长管蚜和棉蚜对受蚜虫取食胁迫棉花植株的选择行为[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(1): 52-60.

[23] PAPADOPOULOU G V, DAM N M. Mechanisms and ecological implications of plant-mediated interactions between belowground and aboveground insect herbivores[J]. *Ecological Research*, 2017, 32(1): 13-26.

[24] NGUYEN D, RIEU I, MARIANI C, et al. How plants handle multiple stresses: Hormonal interactions underlying responses to abiotic stress and insect herbivory[J]. *Plant Molecular Biology*, 2016, 91(6): 727-740.

[25] 纪祥龙, 刘长庆, 胡玲玲, 等. 桃蚜与萝卜蚜交互为害对寄主氮营养及蚜虫种间竞争的调节[J]. 中国农学通报, 2019, 35(4): 97-101.

[26] SOLER R, BEZEMER T M, CORTESERO A M, et al. Impact of foliar herbivory on the development of a root-feeding insect and its parasitoid[J]. *Oecologia*, 2007, 152(2): 257-264.

[27] 马广民. 朱砂叶螨取食诱导的棉花防御反应及其对棉蚜发育的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[28] WALLING L L. Avoiding effective defenses: Strategies employed by phloem-feeding insects[J]. *Plant Physiology*, 2008, 146(3): 859-866.

【责任编辑 李晓卉】