

褐飞虱和二化螟取食对水稻 植株挥发物的影响*

刘旭¹ 吕静² 王满囤^{1**}

(1. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 浙江大学农业与生物技术学院, 杭州 310058)

摘要 【目的】为了探究害虫取食对水稻植物挥发性化合物 (Volatile organic compounds, VOCs) 的影响。【方法】利用动态顶空吸附法及 GC-MS 技术, 对褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、二化螟 *Chilo suppressalis* 取食水稻植株不同时间的 VOCs 进行了分离鉴定。【结果】在本试验条件下, 共分离鉴定出水稻 VOCs 共 43 种; 虫害为害后均未对水稻植株 VOCs 的种类产生影响, 但对水稻植株 VOCs 的相对含量产生了显著影响, 褐飞虱和二化螟取食分别导致 3 种 VOCs (β -水芹烯、癸醛和 (E)-5-十四烯) 和 6 种 VOCs (2-壬酮、(E)-3-十二烯、十二烷、2,6-二甲基-十一烷、1-癸醇和十八烷) 产生显著变化; 两种害虫取食的时间对水稻 VOCs 的相对含量也产生了显著影响。【结论】害虫取食可对水稻植株 VOCs 产生显著影响, 但 VOCs 的诱导变化规律与害虫种类及害虫取食时间相关。

关键词 水稻; 褐飞虱; 二化螟; 诱导挥发物

Effects of the volatiles of rice plants fed by *Nilaparvata lugens* and *Chilo suppressalis*

LIU Xu¹ LÜ Jing² WANG Man-Qun^{1**}

(1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. College of Agriculture & Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the effects of volatiles of rice plants fed by insect pests. 【Methods】The volatile compounds induced by the feeding of *Nilaparvata lugens* and *Chilo suppressalis* were isolated and identified by dynamic headspace adsorption and Gas Chromatography-Mass Spectrometer. 【Results】Under the experimental conditions, a total of 43 kinds of volatiles were isolated and identified from rice plant. After fed by insect pests, the types of volatiles in rice were not different from those in healthy rice, but the relative contents of some volatiles changed significantly. The relative contents of 3 kinds of volatiles were significantly different among rice fed by *N. lugens* at different time, while the relative contents of 6 kinds of volatiles were significantly different among rice fed by *C. suppressalis* at different time. The duration of feeding had a significant effect on volatiles in rice plants. 【Conclusion】The feeding of insect pests has a significant effect on volatiles in rice plants, and induction and variation of VOCs in rice plants are related to the species of insects and their duration of feeding.

Key words rice; *Nilaparvata lugens*; *Chilo suppressalis*; induced plant volatiles

植物在其生长发育过程中能够向环境中释放挥发性有机物 (Volatile organic compounds, VOCs) (D'alessandro and Turlings 2006)。植物 VOCs 的种类繁多, 包括萜类化合物、脂肪酸衍生物、苯环型和苯丙素类化合物、C₅-支链化合

物、含氮和含硫化合物等 (孙仲享等, 2019)。作为一种分子量介于 100-200 之间的化学物质 (Dudareva et al., 2004), 影响着昆虫的寄主定位 (Baronio and Oliveira, 2019)。例如, 欧洲山芥 *Barbarea vulgaris* 释放的 VOCs 可以吸引小菜

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划“稻飞虱灾变机制与可持续防控技术研究”(项目编号 2021YFD1401100)

**通讯作者 Corresponding author, E-mail: mqwang@mail.hzau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-09-29; 接受日期 Accepted: 2023-02-28

蛾 *Plutella xylostella* 产卵 (王诗琪等, 2020); 美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 可以通过豇豆 *Vigna unguiculata* 和菜豆 *Phaseolus vulgaris* 释放的 α -紫罗酮和 β -紫罗酮进行寄主定位 (袁格格等, 2021)。

研究表明, 植食性昆虫的取食可以诱导植物释放诱导 VOCs, 植物受到植食性昆虫取食为害后所释放的挥发物又被称为虫害诱导的植物挥发物 (Herbivore-induced plant volatiles, HIPVs) (Lin *et al.*, 2021)。与健康植物释放的 VOCs 相比, 植食性昆虫为害植物诱导的 HIPVs 在其种类和相对含量上会发生变化 (徐元, 2021)。例如, 玉米 *Zea mays* 被甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 取食后, 萜类 VOCs 的释放量上升 (Bolter *et al.*, 1997); 水稻受稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 为害后, 诱导水稻植株释放水杨酸甲酯、芳樟醇氧化物和 2-庚醇 3 种特有 VOCs (张云宣, 2018)。HIPVs 还会通过调控天敌昆虫的行为反应 (Ye *et al.*, 2018), 来影响植食性昆虫的生长发育。例如, 二化螟绒茧蜂 *Apanteles chilonis* 显著地偏好二化螟幼虫取食过的寄主植株 (张宇皓, 2016); 蚕豆 *Vicia faba* 植株被稻绿蝽 *Nezara viridula* 取食为害后, 释放的信息化合物反式- β -石竹烯对稻绿蝽卵寄生蜂有显著地吸引作用 (Bicchi *et al.*, 2008)。

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 和二化螟 *Chilo suppressalis* 是水稻重要的害虫, 严重发生时, 可导致水稻大量减产甚至绝收 (Zeigler, 2009)。有研究发现, 褐飞虱和二化螟取食可诱导水稻植株产生 HIPVs, 但不同的研究所得结果有一定差异。如胡晓云 (2019) 在褐飞虱为害的水稻中分离鉴定出 49 种 VOCs, 多于健康水稻中的 41 种 VOCs; 苏双丽 (2020) 则在褐飞虱和二化螟为害的水稻植株及健康水稻植株中分别分离鉴定出 52、61 和 48 种 VOCs; 而张凡 (2021) 在褐飞虱和二化螟为害的水稻植株及健康水稻植株中分别分离鉴定出 52、30 和 22 种 VOCs。水稻植株 VOCs 的释放可能受虫害的种类、病虫害为害时间、水稻品种类型及水稻生长发育阶段等众多因素的影响 (王璐丰, 2017)。为了系统探讨水稻受到褐飞虱和二化螟取食为害后, 水稻

植株 VOCs 的变化规律, 本研究对两种害虫取食水稻植株在不同时间维度 VOCs 进行了分离鉴定。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试水稻: 实验所用的水稻品种为常规籼稻品种明恢 63 (MH63)。种子浸泡催芽后, 移栽于温室[温度 (28 ± 4) $^{\circ}\text{C}$; 湿度 70%-80%]内的塑料花盆 (140 cm $\times$ 220 cm) 中, 每盆一株。取生育期 50 d, 长势相同, 形态大小相似的, 处于分蘖期的水稻植株用于实验。

供试昆虫: 二化螟幼虫和饲料购于神农生物科技有限公司。饲养环境条件为: 温度 (28 ± 1) $^{\circ}\text{C}$; 湿度 70%-80%; 光暗比 L:D=16:8, 挑选大小相近的 3 龄幼虫饥饿处理 12 h 用于实验。褐飞虱原始虫源为 2008 年采集于湖北武汉 ($114^{\circ}16'\text{E}$, $30^{\circ}63'\text{N}$) 的水稻田中, 种植台中本地 1 号 (TN1) 水稻饲养传代至今。饲养环境条件为: 温度 (27 ± 1) $^{\circ}\text{C}$; 湿度 80%; 光暗比 L:D=14:10。

1.2 实验方法

1.2.1 昆虫取食诱导 褐飞虱取食诱导: 将生育期 50 d, 长势相同, 处于分蘖期的水稻植株用 PC 管罩住茎基部, 然后在 PC 管中释放 15 头 5 龄褐飞虱进行取食诱导。实验共有 4 个处理 (褐飞虱取食水稻 12、24、36 和 48 h), 每处理 8 个重复。

二化螟取食诱导: 将生育期 50 d, 长势相同, 处于分蘖期的水稻植株用 PC 管罩住茎基部, 然后放入 2 头 3 龄二化螟。实验共有 4 个处理 (二化螟取食水稻 12、24、36 和 48 h), 每处理 8 个重复。

1.2.2 水稻植株挥发物的收集与分离鉴定 采用动态顶空吸附法收集不同处理下的水稻植株挥发物。动态顶空吸附装置由气泵、空气净化瓶、气流调节器、样品存放缸和吸附柱 (内含 Super-Q 吸附剂) 五部分组成, 利用无气味的橡胶管连接各装置。净化后的气体由气泵从样品存放缸的一

侧泵入装有水稻的样品存放缸内, 后从样品存放缸另一侧的吸附柱流出, 气体携带的水稻 VOCs 经过吸附柱时被吸附剂所吸附收集。

测定时, 将整株的水稻植株从种植盆中取出, 用清水洗去根部的泥土后放入 250 mL 锥形瓶中, 加入 100 mL 蒸馏水液封水稻植株根系, 再用锡箔纸紧密包裹好锥形瓶, 仅让水稻茎秆和叶片暴露在外。

气流设置为 400 mL/min, 在室内室温条件下收集。水稻植株虫害诱导挥发物的收集时间为 12 h, 全部为光期。挥发物收集完成后利用色谱纯的正己烷 (1 mL) 将吸附柱上吸附的水稻挥发物洗脱下来, 保存于 2 mL 棕色安捷伦瓶中。为分析鉴定不同种挥发物的相对含量, 在 Gas chromatography-Mass spectrometer (GC-MS) 上机检测前向样品溶液中加入 10 μ L 浓度为 0.1 mg/mL 的乙酸壬酯作为内标。

GC 分析条件: 色谱柱为 HP-5 毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m); 柱流速为 1.0 mL/min; 无分流进样; 升温程序: 起始温度为 40 $^{\circ}$ C; 保持 1 min, 然后以 8 $^{\circ}$ C/min 升至 300 $^{\circ}$ C, 持续 5 min。MS 分析条件: HP5975I 电子捕获型 (EI), 离子源温度 230 $^{\circ}$ C。化学物质成分的分析鉴定根据物质总离子流图 (TIC) 色谱保留时间进行定性, 同时比对 NIST 2017 库和通过使用 C₇-C₃₀ 的支链烷烃混合标准品 (Sigma-Aldrich, 美国) 来获得各物质保留指数的协助判断, 利用峰面积归一化法得到各挥发物组分相对于内标 (乙酸壬酯) 的

含量。

1.3 数据处理

采用 R 语言对试验数据进行分析, 利用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 检测不同处理下水稻 VOCs 的差异性。当 $P>0.05$ 时, 表明处理间差异不显著; $P<0.05$ 时, 表明处理间差异显著; $P<0.01$ 时, 表明处理间差异极显著。通过主坐标分析 (PCoA) 对不同处理下水稻挥发物的变化进行分析。

2 结果与分析

2.1 水稻植株挥发物的种类

在本实验条件下, 从水稻植株中分离鉴定出 43 种 VOCs, 包括烷烃类、烯烃类、酮类、醇类和醛类 5 类 VOCs (图 1)。在分离鉴定出的 43 种 VOCs 中, 烷烃类 VOCs 有 23 种, 占总 VOCs 数量的 30%; 酮类 VOCs 和醇类 VOCs 各占总 VOCs 数量的 7%, 共 6 种; 醛类 VOCs 仅 1 种, 占总 VOCs 数量的 2%。

2.2 褐飞虱取食对水稻植株挥发物的影响

与健康水稻植株相比, 褐飞虱取食水稻不同时间后, 对水稻植株 VOCs 的种类不存在影响; 但对 β -水芹烯 ($P=0.017$)、癸醛 ($P=0.007$) 和 (E)-5-十四烯 ($P=0.044$) 3 种 VOCs 的相对含量产生显著影响 (图 2)。

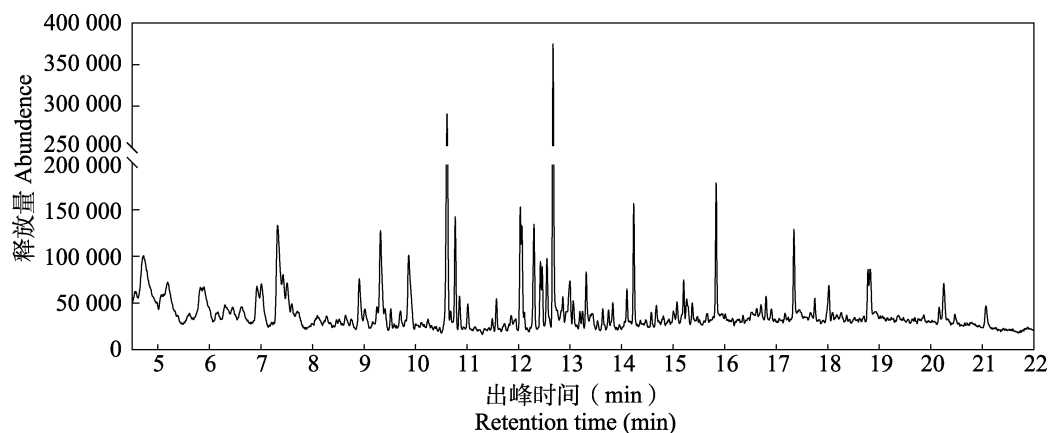


图 1 水稻植株 VOCs 色谱图
Fig. 1 Chromatogram of VOCs in rice

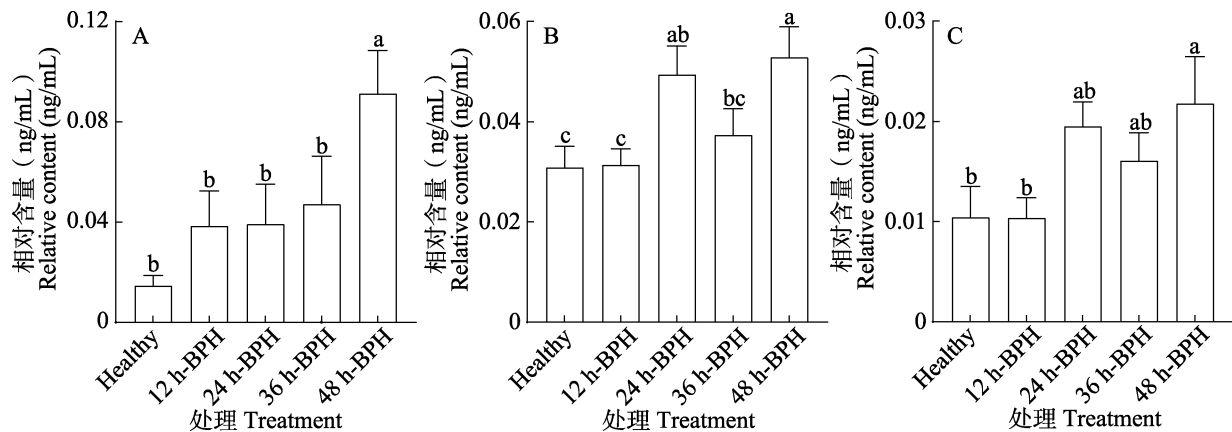


图 2 褐飞虱取食不同时间后相对含量显著变化的水稻植株 VOCs

Fig. 2 Relative contents of VOCs in rice with significant changes after fed by brown rice planthopper for different time

A-C. 依次是取食不同时间后 β -水芹烯, 癸醛, (E)-5-十四烯相对含量的变化情况。Healthy 是未被褐飞虱取食的健康水稻, BPH 是被褐飞虱取食的水稻, 前面的数字为取食时间。图中数据为平均值 $\pm$ 标准误 ($n=8$);

柱上不同小写字母表示不同处理之间经 Tukey 氏检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。图 3 同。

A-C. The relative contents change of β -Phellandrene, Decanal and (E)-5-Tetradecene, respectively. Healthy for healthy rice that is not eaten by insect pests, BPH is rice after fed by the brown rice planthopper, the preceding number is feeding time. Data in the figure are mean $\pm$ SE ($n=8$). Different small letters above the bars mean significant differences among treatments ($P<0.05$, Tukey's test). The same as Fig. 3.

2.3 二化螟取食对水稻植株挥发物的影响

与健康水稻植株相比, 二化螟取食不同时间后, 对水稻植株 VOCs 的种类无影响; 但对 2-壬酮 ($P=0.005$)、(E)-3-十二烯 ($P=0.005$)、十二烷 ($P=0.006$)、2,6-二甲基-十一烷 ($P=0.048$)、1-癸醇 ($P=0.048$) 和十八烷 ($P=0.033$) 6 种 VOCs 的相对含量产生显著影响 (图 3)。

2.4 水稻虫害取食不同时间对水稻植株挥发物的影响

利用主坐标分析 (PCoA) 和置换多元方差分析对褐飞虱和二化螟取食不同时间 (0、12、24、36 和 48 h) 后的水稻植株 VOCs 组成进行分析。结果显示, 褐飞虱和二化螟取食诱导的 VOCs 与健康水稻的 VOCs 组成在 PCoA1 (41.06%) 和 PCoA2 (13.91%) 上能够明显区分 ($P=0.004$) (图 4: A)。褐飞虱取食不同时间后的水稻植株 VOCs 在 PCoA1 (59.33%) 和 PCoA2 (12.22%) 上未能显著区分开 ($P=0.59$) (图 4: B); 二化螟取食不同时间后的水稻植株 VOCs 在 PCoA1 (28.49%) 和 PCoA2 (23.91%)

上能够显著区分 ($P=0.043$) (图 4: C)。不同害虫取食水稻植株相同时间后, 水稻植株 VOCs 组成在 PCoA1 和 PCoA2 上均不能明显区分 (图 4: D-F)。

3 讨论

HIPVs 在植物-植物互作、植物-昆虫互作、植物-昆虫-天敌互作中起着重要的作用 (Hassan *et al.*, 2015; Takabayashi and Shiojiri, 2019)。HIPVs 的释放常根据植物和植食性昆虫的种类与状态的不同而有所差异。多种植食性昆虫取食后, 它们的寄主植物都能释放单萜或倍半萜烯等一些新形成的 VOCs (Deganhardt *et al.*, 2003); 也有些虫害诱导的植物挥发物与机械损伤株和健康株释放的挥发物的组分相似, 但存在量的差别 (刘芳等, 2003); 但不是所有的植食性昆虫的取食都能引起植物释放 HIPVs, 研究发现小麦瘿蚊 *Mayetiola destructor* 幼虫取食小麦植株后, 并没有改变小麦植株释放的 VOCs (Tcoker and de Moraes, 2007)。本研究发现褐飞虱和二化螟为害水稻植株后, 并没有引起水稻植株 VOCs 种类的改变, 只引起了水稻植株 VOCs 相对含量的变化。

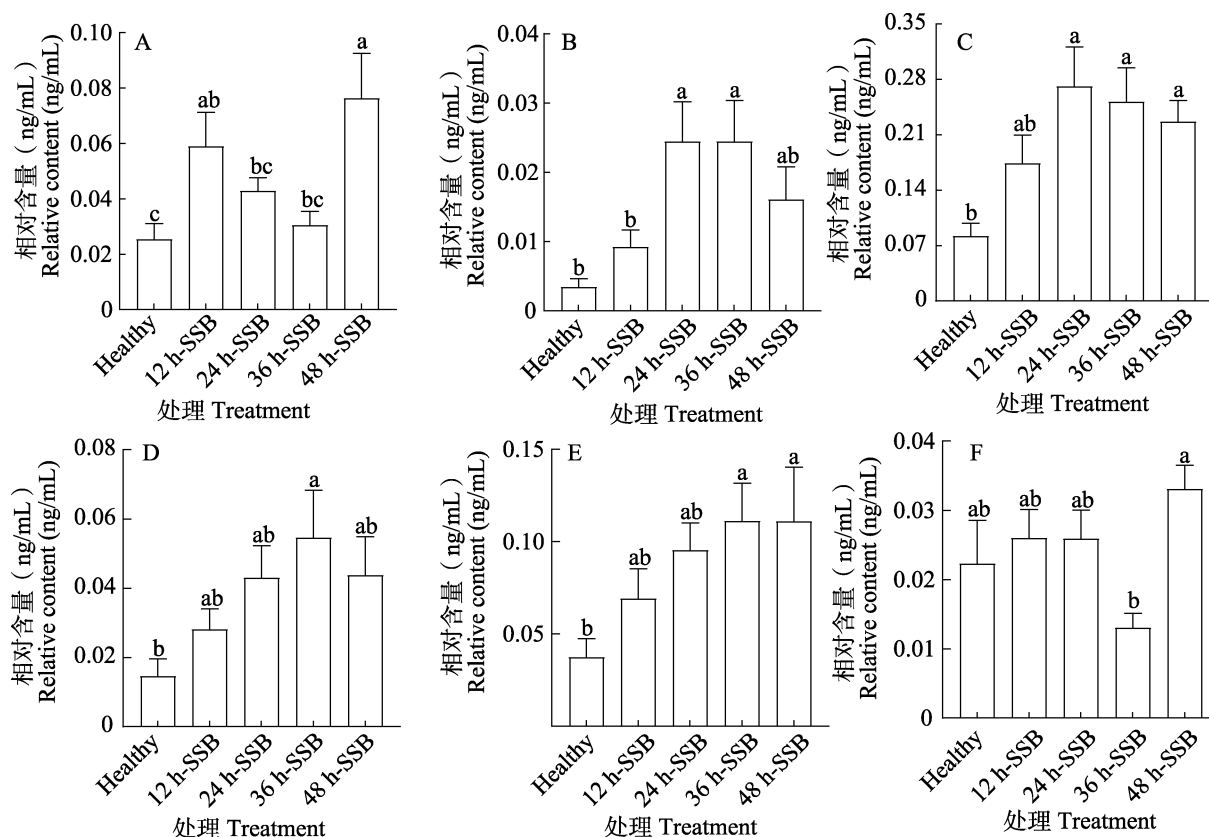


图 3 二化螟取食不同时间后相对含量显著变化的水稻植株 VOCs

Fig. 3 Relative contents of VOCs in rice with significant changes after fed by rice stem borer for different time

A-F. 依次是 2-壬酮、(E)-3-十二烯、十二烷、2,6-二甲基-十一烷、1-癸醇和十八烷相对含量的变化情况。

Healthy 是未被二化螟取食的健康水稻, SSB 是被二化螟取食的水稻, 前面的数字为取食时间。

A-F. The relative contents change of 2-Nonanone, (E)-3-Dodecene, Dodecane, 2,6-dimethyl-Undecane, 1-Decanol and Octadecane, respectively. Healthy for healthy rice that is not eaten by insect pests, SSB is rice after fed by rice stem borer, the preceding number is feeding time.

植物的 VOCs 还受到生长期、虫害诱导时间及昆虫种类的影响。在生长期为 20 d 的香根草 *Vetiveria zizanioides* 植株中, α -雪松醇的相对含量显著高于生长期为 40 d 的香根草植株, 而在生长期为 40 d 的香根草植株中, 十四烷的相对含量显著高于生长期为 20 d 香根草植株 (鲁艳辉等, 2016)。苏双丽 (2020) 的研究发现水稻植株 VOCs 的相对含量在二化螟取食不同时间的水稻植株之间存在显著差异。在本研究中, 褐飞虱和二化螟取食后的水稻植株中, 分别有 3 种和 6 种水稻植株 VOCs 的相对含量在害虫取食不同时间的水稻植株之间存在显著差异, 水稻植株受褐飞虱或二化螟趋势后 VOCs 的变化不同, 可以明显区分开。在病害的研究中也发现类似的现

象, 如西葫芦 *Cucurbita pepo* 感染不同植物病原菌胡瓜青枯病菌 *Erwinia tracheiphila* 和小西葫芦黄花叶病毒 *Zucchini yellow mosaic virus* (ZYMV) 时, 其释放的挥发物的不同 (Shapiro *et al.*, 2012)。我们也发现, 在本研究中褐飞虱与二化螟取食诱导的水稻植株 VOCs 的变化规律与胡晓云 (2019) 及苏双丽 (2020) 等的研究结果并不一致, 这可能是由于研究水稻品种、水稻的生长阶段及处理的时间相关。

HIPVs 在植物-植食性昆虫-天敌互动中起着非常重要的化学信息交流作用, 探明水稻受到褐飞虱和二化螟等重要虫害为害后 HIPVs 的变化特征, 将为探明 HIPVs 在稻田生态系统中的生态调控作用及昆虫行为调控剂的开发利用提供重要的基础。

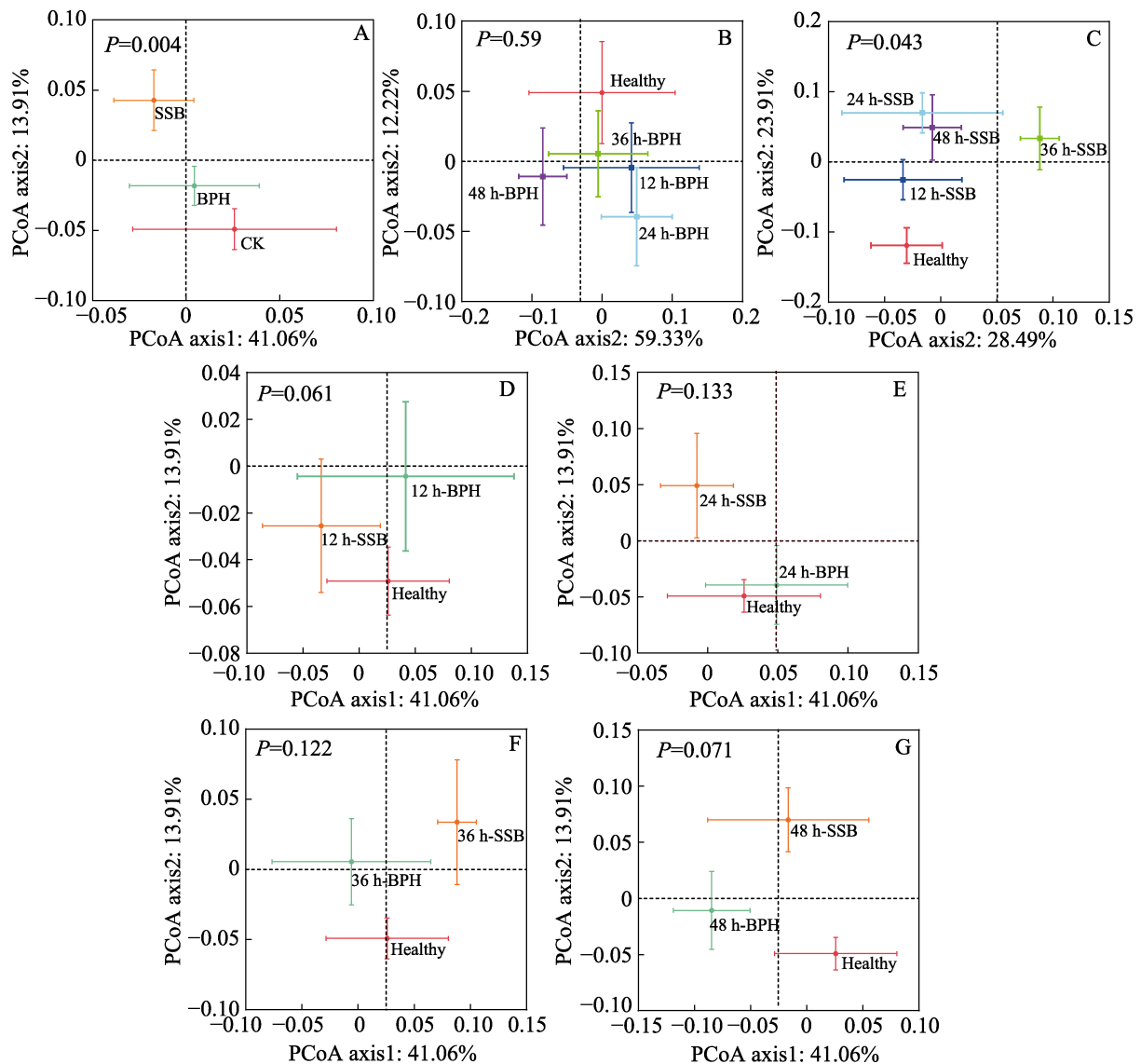


图 4 不同害虫取食不同时间后水稻植株 VOCs 相对含量的 PCoA 分析

Fig. 4 PCoA analysis of relative contents of VOCs in rice after fed by different insect pests for different time

A. 褐飞虱和二化螟分别取食水稻后水稻 VOCs 相对含量的 PCoA 分析; B. 褐飞虱取食水稻 12、24、36 和 48 h 后水稻 VOCs 相对含量的 PCoA 分析; C. 二化螟取食水稻 12、24、36 和 48 h 后水稻 VOCs 相对含量的 PCoA 分析; D-G. 褐飞虱和二化螟分别取食水稻 12、24、36 和 48 h 后水稻 VOCs 相对含量的 PCoA 分析。Healthy 为未被害虫取食的健康水稻, BPH 为褐飞虱取食后的水稻, SSB 为二化螟取食后的水稻, 前面的数字为取食时间。P<0.05 表示处理间差异显著; P<0.01 表示处理间差异极显著。

A. PCoA analysis of relative contents of VOCs in rice fed by brown rice planthopper and striped stem borer;

B. PCoA analysis of relative contents of VOCs in rice fed by brown rice planthopper for 12, 24, 36 and 48 h; C. PCoA analysis of relative contents of VOCs in rice fed by striped stem borer for 12, 24, 36 and 48 h; D-G. PCoA analysis of the relative contents of VOCs in rice fed by brown rice planthopper and striped stem borer for 12, 24, 36 and 48 h, respectively.

Healthy for healthy rice that is not eaten by insect pests, BPH is rice fed by brown rice planthopper,

SSB is rice fed by striped stem borer, the preceding number is feeding time. P<0.05 means significant differences; P<0.01 means extremely significant differences.

参考文献 (References)

Baronio GJ, Oliveira DC, 2019. Eavesdropping on gall-plant interactions: The importance of the signaling function of induced

volatiles. *Plant Signal. Behav.*, 14(11): e1665454.

Bicchi C, Cordero C, Liberto E, Sgorbini B, Rubiolo P, 2008. Headspace sampling of the volatile fraction of vegetable matrices. *J. Chromatogr. A*, 1184(1/2): 220–233.

- Bolter CJ, Dicke M, Vanloon JJA, Visser JH, Posthumus MA, 1997. Attraction of Colorado potato beetle to herbivore-damaged plants during herbivory and after its termination. *J. Chem. Ecol.*, 23(4): 1003–1023.
- D'alessandro M, Turlings TC, 2006. Advances and challenges in the identification of volatiles that mediate interactions among plants and arthropods. *Analyst*, 131(1): 24–32.
- Deganhardt J, Gershenzon J, Baldwin IT, 2003. Attracting friends to feast on foes: Engineering terpene emission to make crop plants more attractive to herbivore enemies. *Plant Biotechnol.*, 14(2): 169–176.
- Hassan MN, Zainal Z, Ismail I, 2015. Green leaf volatiles: Biosynthesis, biological functions and their applications in biotechnology. *Plant Biotechnol. J.*, 13(6): 727–739.
- Lin TT, Vrieling K, Laplanche D, Klinkhamer PGL, Lou YG, Bekooy L, Degen T, Bustos-Segura C, Turlings TCJ, Desurmont GA, 2021. Evolutionary changes in an invasive plant support the defensive role of plant volatiles. *Curr. Biol.*, 31(15): 3450–3456.
- Dudareva N, Pichersky E, Gershenzon J, 2004. Biochemistry of plant volatiles. *Plant Physiol.*, 135(4): 1893–1902.
- Shapiro L, De Moraes CM, Stephenson AG, Mescher MC, 2012. Pathogen effects on vegetative and floral odours mediate vector attraction and host exposure in a complex pathosystem. *Ecol. Lett.*, 15(12): 1430–1438.
- Takabayashi J, Shiojiri K, 2019. Multifunctionality of herbivory-induced plant volatiles in chemical communication in tritrophic interactions. *Curr. Opin. Insect Sci.*, 32: 110–117.
- Toker JF, de Moraes CM, 2010. Feeding by Hessian fly [*Mayetiola destructor* (Say)] larvae does not induce plant indirect defences. *Ecol. Entomol.*, 32(3): 153–161.
- Ye M, Veyrat N, Xu H, Hu L, Turlings TCJ, Erb M, 2018. An herbivore-induced plant volatile reduces parasitoid attraction by changing the smell of caterpillars. *Sci. Adv.*, 4(5): eaar4767.
- Zeigler RS, 2009. Preface// Heong KL, Hardy N(eds.). *Planthoppers: New Threats to the Sustainability of Intensive Rice Production System in Asia*. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines. 221–232.
- Hu XY, 2019. Ecological mechanism of *Nilaparvata lugens* preferring to *Chilo suppressalis*-Damaged rice plants. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [胡晓云, 2019. 褐飞虱偏爱二化螟为害稻株的生态机制. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Liu F, Lou YG, Cheng JA, 2003. Herbivory insect induced plant volatiles: Evolutionary products of plant-herbivore-natural enemy interactions. *Entomological Knowledge*, 40(6): 481–486. [刘芳, 娄永根, 程家安, 2003. 虫害诱导的植物挥发物: 植物与植食性昆虫及其天敌相互作用的进化产物. 昆虫知识, 40(6): 481–486.]
- Lu YH, Gao GC, Zheng XS, Wang GR, Lv ZX, 2016. Effect of growth stages and nitrogen fertilization on the volatiles of rice stem borer trap plant vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*). *Chinese J. Biol. Control*, 32(5): 604–609. [鲁艳辉, 高广春, 郑许松, 王国荣, 吕仲贤, 2016. 不同生育期和氮肥水平对水稻螟虫诱集植物香根草挥发物的影响. 中国生物防治学报, 32(5): 604–609.]
- Su SL, 2020. Regulation of herbivore-induced rice volatiles on interspecific interaction of *Nilaparvata lugens* and *Chilo suppressalis*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [苏双丽, 2020. 虫害诱导水稻挥发物对褐飞虱和二化螟种间关系的调控. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Sun ZX, Song YY, Zeng RS, 2019. Advances in studies on intraspecific and interspecific relationships mediated by plant volatiles. *Journal of South China Agricultural University*, 40(5): 166–174. [孙仲享, 宋圆圆, 曾任森, 2019. 植物挥发物介导的种内与种间关系研究进展. 华南农业大学学报, 40(5): 166–174.]
- Wang LF, 2017. The change of volatiles from rice seedlings induced by SRBSDV and their effects on the host selection behavior of *Sogatella furcifera*. Master dissertation. Changsha: Hunan Agricultural University. [王璐丰, 2017. SRBSDV 诱导水稻挥发物的变化及其对白背飞虱寄主选择行为的影响. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学.]
- Wang SQ, Zhang L, Wang ZD, Zhong YH, 2020. Research progress in the regulation of plant volatiles on the behavior of *Plutella xylostella* (L.). *Gansu Agri. Sci. Tech.*, 2020(4): 82–86. [王诗琪, 张啦, 王占娣, 仲一卉, 2020. 植物挥发物对小菜蛾行为的调节研究综述. 甘肃农业科技, 2020(4): 82–86.]
- Xu Y, 2021. Selection of volatiles in host plants by *Halyomorpha halys*. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [徐元, 2021. 茶翅蝽对寄主植物挥发物及灯光颜色的选择行为. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Yuan GG, Huang GH, Chen G, 2021. Advances in volatiles induced by herbivores in vegetable crops. *J. Environ. Entomol.*, 43(3): 567–575. [袁格格, 黄国华, 陈功, 2021. 虫害诱导蔬菜作物挥发物的研究进展. 环境昆虫学报, 43(3): 567–575.]
- Zhang F, 2021. Circadian rhythms and ecological function of key volatiles in rice plants infested by rice stem borer, *Chilo suppressalis*. Master dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [张凡, 2021. 二化螟为害诱导水稻关键挥发物的释放节律及其功能分析. 硕士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Zhang YH, 2016. Study on attraction effect of rice volatiles on *Chilo suppressalis* and rice parasitoid wasps. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [张宇皓, 2016. 水稻挥发物对二化螟及稻田寄生蜂的引诱效果研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学.]
- Zhang YY, 2018. A preliminary study on volatile substance-mediated *Stenomiesius msculatus* searching and positioning host behavioral mechanism. Master dissertation. Guilin: Guangxi University. [张云宣, 2018. 挥发性物质介导的稻纵卷叶螟姬小蜂搜寻与定位寄主行为机制初步研究. 硕士学位论文. 桂林: 广西大学.]