亚致死浓度烯啶虫胺对水稻抗性物质及褐飞虱生殖参数的影响

王怀奇 董俏俏 王婷婷 邓 迪 丁雨婷 张 文 赵旭东* 戈林泉*

(扬州大学植物保护学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为明确烯啶虫胺对褐飞虱*Nilaparvata lugens*的防控效果,采用稻茎浸渍法测定亚致死浓度烯啶虫胺对水稻生理生化指标以及褐飞虱雌成虫繁殖力的影响。结果表明,亚致死浓度烯啶虫胺处理后,水稻中草酸含量在第2天时无明显变化,在第4天时升高了20.5%;类黄酮含量分别升高了9.6%和40.6%;游离氨基酸含量分别下降了20.1%和42.4%;蔗糖含量在第2天时与对照间无显著差异,在第4天时升高了38.5%。亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱生殖存在显著影响,雌成虫羽化2 d和4 d时,卵巢中可溶性蛋白含量分别下降了31.2%和40.9%;脂肪体中可溶性蛋白含量分别下降了19.0%和38.8%。亚致死浓度烯啶虫胺处理抑制了雌成虫卵巢发育,褐飞虱卵黄原蛋白(*Nilaparvata lugens* vitellogenin, NlVg)基因表达量在第2天时与对照间无显著差异,在第4天下降了57.5%;同时显著影响了褐飞虱生殖力,雌成虫产卵量减少了58.1%,产卵历期缩短了36.7%,寿命缩短了28.0%,但对雌成虫产卵前期无显著影响。表明亚致死浓度烯啶虫胺处理后可能通过诱导水稻次生代谢产物含量上升来提高水稻对褐飞虱的抗性,而且对褐飞虱繁殖力也有显著影响。

关键词: 烯啶虫胺; 褐飞虱; 水稻; 抗性物质; 生殖参数

Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on resistance substances in rice and reproductive parameters of the brown planthopper *Nilaparvata lugens*

Wang Huaiqi Dong Qiaoqiao Wang Tingting Deng Di Ding Yuting Zhang Wen Zhao Xudong* Ge Linquan*

(College of Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu Province, China)

Abstract: To elucidate the control efficacy of sulfoxaflor against the brown planthopper, *Nilaparvata lugens*, the rice stem impregnation method was employed to determine the effects of sublethal concentrations of nitenpyram on physiological and biochemical indices of rice, as well as on the reproductive capacity of female brown planthoppers. The results showed that the oxalic acid content of rice treated with sublethal concentrations of nitenpyram for two and four days showed no significant difference at two days and increased by 20.5% at four days. Flavonoids levels increased by 9.6% and 40.6%, respectively. The content of free amino acids decreased by 20.1% at two days and 42.4% at four days, respectively. The sucrose content showed no significant difference at two days but increased by 38.5% at four days after treatment with sublethal concentrations of nitenpyram. The sublethal concentration of nitenpyram significantly affected the reproduction of the brown planthopper. Soluble protein content in the ovaries of female adults decreased by 31.2% and 40.9% on days two and four post-emergence, respectively, and

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072415),江苏省重点研发计划(BE2022345)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: zhaoxudong032z@outlook.com, lqge@yzu.edu.cn

收稿日期: 2024-01-06

by 19.0% and 38.8% in the fat body. Nitenpyram inhibited ovarian development in female adults, with *Nilaparvata lugens* vitellogenin (*NlVg*) gene expression showing no significant difference at two days after emergence and a 57.5% decrease at four days after emergence. Additionally, it significantly affected the reproductive capacity of the brown planthopper, with the number of eggs laid by females decreasing by 58.1%, the oviposition period shortening by 36.7%, and lifespan decreasing by 28.0%, although there was no significant impact on the pre-oviposition period. This indicates that sublethal concentrations of nitenpyram induce an increase in secondary metabolites in rice to enhance resistance against the brown planthopper and significantly impact the reproductive capacity of the pest.

Key words: nitenpyram; *Nilaparvata lugens*; rice; resistance substances; reproductive parameter

褐飞虱*Nilaparvata lugens*属半翅目飞虱科，是我国为害水稻最严重的害虫之一（程家安等，2008；何帅洁等，2021；Zhu et al.，2023）。该害虫是一种以水稻韧皮部汁液为食的单食性害虫，主要通过刺吸水稻茎基部造成植株枯萎、倒伏等症状（张合红等，2022；Wu et al.，2020；Shi et al.，2023），而且可以传播水稻草矮病毒（rice grassy stunt virus，RGSV）和水稻齿叶矮缩病毒（rice ragged stunt virus，RRSV）等（Wang et al.，2022）；其具有迁飞习性，对水稻生产造成巨大的经济损失，对生态安全构成严重威胁（陆明红等，2020；Jeevanandham et al.，2023；陆宴辉等，2023）。

目前，化学防治仍是防控褐飞虱的主要手段（Garrood et al.，2016；吴进才，2017；Wu et al.，2020）。但由于施用剂量和田间残留降解等原因，化学杀虫剂在环境中的毒力会随着时间的推移逐渐递减至亚致死浓度从而对存活个体产生亚致死效应（Dai et al.，2023）。药剂亚致死效应一方面能够缩短害虫寿命，降低其繁殖力，抑制害虫的种群数量（Huang et al.，2016；Zhang et al.，2021），另一方面却会导致害虫在亚致死浓度的选择压力下提高其对药剂的耐受性，并刺激害虫的生殖，导致害虫再猖獗（Rix et al.，2016；Wu et al.，2020）。药剂还可以诱导植物体内生理生化物质发生变化，如Wu et al.（2021）研究发现三氟苯嘧啶拌种处理提高了水稻体内草酸、类黄酮、总酚、胼胝质等物质含量及蔗糖/游离氨基酸比值，增强了水稻对褐飞虱的抗性。此外，也有研究表明，溴氰菊酯、三唑磷等杀虫剂在亚致死浓度下可以通过介导雌性褐飞虱生理响应和基因表达水平的变化，从而影响褐飞虱种群的增长与繁殖（Ge et al.，2010；Gong et al.，2023）。

烯啶虫胺是由日本武田公司与先正达公司共同研发的第2代新型烟碱类杀虫剂，主要作用于昆虫神经系统的乙酰胆碱受体，对害虫的突触受体具有神经阻断作用，使害虫神经系统遭到破坏，从而达到杀虫效果（Yoshida et al.，2013；闫虹江等，2021）。烯啶虫胺具有较强的内吸和渗透作用，其用量少、毒性低、持效期长，且对作物安全无药害，是防治刺吸式口器害虫的主要杀虫剂之一，目前广泛用于水稻、果树、蔬菜和茶叶等农业和园艺上稻飞虱、蚜虫、烟粉虱*Bemisia tabaci*、白粉虱*Trialeurodes vaporariorum*、叶蝉和蓟马等多种害虫的防治（Elbert et al.，2008；Wang et al.，2017；Khoa et al.，2018）。前期研究结果显示，烯啶虫胺对褐飞虱具有较好的防治效果，亚致死浓度LC_{15}烯啶虫胺对褐飞虱生长发育和繁殖存在不利影响（程世阳等，2020；刘章扬等，2023），但未有关于该药剂对褐飞虱生理、生殖以及水稻化学物质影响的研究报道。本研究通过测定亚致死浓度烯啶虫胺对水稻生理生化物质和褐飞虱生殖相关参数的变化来探究其对褐飞虱种群的防控效果及相关机制，以期为田间合理施用烯啶虫胺防控褐飞虱提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻：水稻品种为扬稻6号（籼稻），由江苏里下河地区农业科学研究所提供。将种子浸泡发芽后，播种于高60 cm×宽100 cm×长200 cm的室外标准水泥池中，长至6叶期移栽至直径16 cm的塑料桶中种植，每桶3穴，每穴4株，至水稻分蘖期备用。试验全程采用0.18 mm防虫网覆盖，以防其他害虫侵入。

供试虫源：褐飞虱种群来自中国水稻研究所，在实验室内连续饲养多年且未接触任何药剂，取3龄若虫供试。饲养温度为（26±2）℃，相对湿度为65%~75%，光周期为L 16 h∶D 8 h。

药剂及试剂：96%烯啶虫胺（nitenpyram）原药，上海麦克林生物科技有限公司。Triton X-100，国药

集团化学试剂有限公司；水合茚三酮、蒽酮、三氯化钛，上海麦克林生物科技有限公司；FastPure Cell/Tissue Total RNA Isolation Kit、HiScript QRT SuperMix和ChamQ SYBR qPCR Master Mix，南京诺唯赞生物技术有限公司；其他试剂均为国产分析纯。

仪器：Spark 20M多功能酶标仪，瑞士Tecan公司；T100 PCR扩增仪、CFX96 Touch实时定量PCR仪，美国Bio-Rad公司；SZX16立体式显微镜，日本Olympus公司；DS-Fi2数码摄像头，日本Nikon公司；FA1004电子天平，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；GXZ-160D人工气候箱，宁波江南仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 亚致死浓度烯啶虫胺处理

采用稻苗浸渍法测定烯啶虫胺对褐飞虱亚致死效应。根据程世阳等（2020）研究结果，烯啶虫胺亚致死浓度LC_{15}为0.009 mg/L。利用电子天平精准称取烯啶虫胺原药90 mg，添加少量丙酮溶解配制成9 mg/L浓度的母液后加入含0.1% Triton X-100的蒸馏水稀释至0.009 mg/L。选取长势一致的分蘖期水稻植株，洗净，剪成高约10 cm的连根水稻茎秆，晾干后浸入上述药液中30 s，取出晾干后用湿润脱脂棉包裹根部，置于直径21 cm、高16 cm的育苗杯中培育。烯啶虫胺处理后2 d和4 d取水稻茎秆测定水稻体内抗性和营养物质含量。以含0.1% Triton X-100蒸馏水培育的水稻为对照。1个育苗杯为1个重复，每个育苗杯至少10株水稻，3个生物学重复。

1.2.2 水稻草酸、类黄酮含量的测定

采用三氯化钛显色法测定水稻中草酸含量（程耀等，2011）。分别剪取处理2 d和4 d后长势一致的分蘖期水稻植株茎秆1 g，将其剪碎后充分研磨，用超纯水10 mL冲洗至50 mL锥形瓶中，加入约1/3体积的活性炭，摇匀后静置脱色30 min，脱色后于4 ℃下以3 000 r/min离心15 min分离活性炭，一次脱色不完全时可多次脱色，直至溶液呈无色或略呈乳白色。取上清液3 mL，加入3%三氯化钛（10%稀盐酸配制）240 μL，然后用多功能酶标仪在波长400 nm处测定吸光值。用草酸（分析纯）建立标准曲线，计算各样品中草酸含量。3个生物学重复。

水稻中类黄酮含量测定参照宋元清等（2005）方法并加以改进。分别剪取处理2 d和4 d后长势一致的分蘖期水稻植株茎秆，擦拭干净后烘干，剪碎加入液氮在研钵中充分研磨，称取干粉1 g放入离心管中，加入60%乙醇溶液10 mL，混匀后将离心管置于70 ℃条件下进行超声波处理，超声波功率保持350 W，超声时间30 min，然后以3 000 r/min离心5 min取上清液，同一样品按上述方法重复操作3次。将离心后的上清液转移至25 mL容量瓶中，用60%乙醇溶液定容至25 mL。混匀后吸取定容的提取液1 mL于25 mL容量瓶中，加入5% $NaNO_2$溶液1 mL，混匀后静置6 min，随后加入10% $AlCl_3·6H_2O$溶液1 mL，混匀后静置5 min。随后加入4% NaOH溶液10 mL，再加入30%乙醇溶液定容，摇匀后静置15 min。用多功能酶标仪在波长415 nm处测定吸光值。用芦丁标准品建立标准曲线，计算各样品中类黄酮含量。3个生物学重复。

1.2.3 水稻蔗糖、游离氨基酸含量的测定

水稻蔗糖含量采用蒽酮比色法测定（李晓旭和李家政，2013）。分别取处理2 d和4 d后长势一致的分蘖期水稻植株茎秆，称取烘干的水稻茎秆0.2 g，放入50 mL试管中，加入蒸馏水10 mL，沸水浴20 min后取出冷却，用滤纸过滤至25 mL容量瓶中，再用蒸馏水冲洗几次残渣，最后定容至25 mL。吸取0.5 mL定容的提取液于试管中，加入蒸馏水1.5 mL，再加入蒽酮乙酸乙酯试剂（1 g蒽酮溶于50 mL乙酸乙酯）0.5 mL和浓硫酸5 mL，充分振荡，立即沸水浴加热5 min，然后冷却至室温，用多功能酶标仪在波长620 nm处测定吸光值。用蔗糖建立标准曲线，计算各样品中蔗糖含量。3个生物学重复。蔗糖含量=$(C_1×V_1×n_1)/(W_1×a_1×1\ 000)$，式中，$C_1$为标准曲线求得糖量，$V_1$为提取液量，$a_1$为吸取样品液体积，$n_1$为稀释倍数，$W_1$为组织质量。

采用茚三酮显色法测定水稻茎秆游离氨基酸含量（邵金良等，2008）。分别取处理2 d和4 d后长势一致的分蘖期水稻植株茎秆1 g，加入10%乙酸溶液5 mL，放入研钵中研磨至匀浆状态，将过滤液转移至100 mL容量瓶中，用10%乙酸溶液定容至100 mL。吸取定容的提取液1 mL至20 mL试管中，加入蒸馏水1 mL、抗坏血酸0.1 mL和水合茚三酮显色液3 mL，摇匀后置于沸水浴中处理，显色15 min，待冷却后加入80%乙醇溶液10 mL，加蒸馏水定容至25 mL。用多功能酶标仪在波长570 nm处测定吸光值。用氨基酸建立标准曲线，计算各样品中游离氨基酸含量。3个生物学重复。游离氨基酸含量=$(C_3×n_3)/(W_3×1\ 000)$，式中，C_3为标准曲线求得糖量，n_3为总系数倍数，W_3为组织质量。

1.2.4 褐飞虱卵巢和脂肪体可溶性蛋白含量测定

采用考马斯亮蓝法测定褐飞虱雌成虫卵巢及脂肪体可溶性蛋白含量(王琛柱和钦俊德,1996)。参照1.2.1将水稻植株经亚致死浓度烯啶虫胺处理后,选取褐飞虱3龄若虫接至水稻植株上,每杯育苗杯接入30头,置于温度为(26±2)℃、相对湿度75%~85%、光周期为L 16 h∶D 8 h的人工气候箱中培养。待若虫羽化后,取羽化2 d和4 d后未交配的短翅雌成虫进行解剖,以正常羽化2 d和4 d未交配的雌成虫作对照,每组解剖10头,3个生物学重复。将解剖好的卵巢和脂肪体组织分别加入PBS溶液5 mL匀浆,取匀浆液以1 000 r/min离心20 min,取上清液用玻璃纤维过滤,保留滤液待分析。以牛血清蛋白绘制蛋白标准曲线。每试管内加入1 mL样品滤液和5 mL考马斯亮蓝G-250溶液混合摇匀,静置后在595 nm波长下测定吸光值。根据蛋白标准曲线计算可溶性蛋白含量。

1.2.5 褐飞虱卵黄原蛋白相关基因表达量的测定

参照1.2.4方法接入褐飞虱3龄若虫并待其羽化为雌成虫后,取羽化2 d和4 d后未交配短翅雌成虫测定褐飞虱卵黄原蛋白(*Nilaparvata lugens* vitellogenin,NlVg)和卵黄原蛋白受体(*Nilaparvata lugens* vitellogenin receptor,NlVgR)基因的表达水平。以正常羽化2 d和4 d未交配的褐飞虱雌成虫作对照。3个生物学重复,每个重复测定10头褐飞虱。利用FastPure Cell/Tissue Total RNA Isolation Kit试剂盒提取褐飞虱雌成虫的总RNA,用HiScript QRT Super Mix试剂盒去除基因组DNA,并反转录合成cDNA供试。

根据本课题组已发表的数据(Ge et al.,2015)合成褐飞虱*NlVg*和*NlVgR*荧光定量引物,分别为*NlVg*-F (5′-GTGGCTCGTTCAAGGTTATGG-3′)/*NlVg*-R (5′-GCAATCTCTGGGTGCTGTTG-3′)和*NlVgR*-F (5′-AGGCAGCCACACAGATAACCGC-3′)/*NlVgR*-R(5′-AGCCGCTCGCTCCAGAACATT-3′),以*β-actin*为内参基因,引物为*β-actin*-F(5′-TGCGTGACATCAAGGAGAAGC-3′)/*β-actin*-R(5′-CCATACCCAAGAAGGAAGGCT-3′),引物委托生工生物工程(上海)股份有限公司合成。以cDNA为模板采用荧光定量PCR (real-time fluorescence quantitative PCR,RT-qPCR)技术进行基因表达量测定。20 μL RT-qPCR反应体系:2×ChamQ SYBR qPCR Master Mix 10 μL、10 pmol/L上下游引物各0.5 μL、cDNA 2 μL、ddH_2O 7 μL。反应程序:95 ℃预变性3 min;95 ℃变性15 s,58 ℃退火30 s,72 ℃延伸20 s,循环39次。每个样品设置3个生物学重复,每个生物学重复设置3个技术重复。采用$2^{-\Delta\Delta Ct}$法计算*NlVg*和*NlVgR*的相对表达量(Livak & Schmittgen,2001)。

1.2.6 卵巢解剖观察

参照1.2.4方法接入褐飞虱3龄若虫并待其羽化为雌成虫后,取羽化2 d和4 d后未交配的短翅雌成虫进行解剖,以正常羽化2 d和4 d未交配的雌成虫作对照,每组解剖15头,3个生物学重复。在0.9%生理盐水中解剖雌成虫的内生殖系统,用镊子小心剥离黏附在内生殖器中的脂肪体和微气管,卵巢的完整形态通过立体式显微镜观察,并用数码摄像头拍照。

1.2.7 褐飞虱雌成虫繁殖参数的测定

参照Ge et al.(2015)方法测定亚致死浓度烯啶虫胺处理后褐飞虱雌成虫的繁殖参数。参照1.2.4方法接入褐飞虱3龄若虫并待其羽化为成虫后,取初羽化雌成虫与初羽化雄成虫按照1∶1比例进行交配,放置于有1株分蘖期水稻苗的直径1.8 cm、高18 cm的玻璃试管中饲养。产卵前期每24 h更换新鲜水稻苗,在产卵历期每72 h更换新鲜的水稻苗,直至雌成虫死亡。以正常羽化的雌成虫与雄成虫交配处理作对照。记录雌成虫的产卵前期(从雌成虫羽化到开始产卵)、产卵历期、寿命和产卵量。3个生物学重复。

1.3 数据分析

试验数据采用DPS 7.05软件进行统计分析,应用独立样本*t*检验法对试验数据进行差异显著性检验。采用GraphPad Prism 7软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 亚致死浓度烯啶虫胺对水稻次生物质含量的影响

亚致死浓度烯啶虫胺处理对水稻中草酸、类黄酮含量产生显著影响。亚致死浓度烯啶虫胺处理水稻2 d后,与对照相比,水稻中草酸含量无显著差异(t=1.8,P=0.146;图1-A),处理4 d后,水稻中草酸含量显著增加了20.5%(t=6.2,P=0.003;图1-B)。处理2 d后,水稻中类黄酮含量显著增加了9.6%(t=5.9,P=0.004;图1-C);而处理4 d后,水稻中类黄酮含量显著增加了40.6%(t=6.4,P=0.003;图1-D)。

2.2 亚致死浓度烯啶虫胺对水稻营养物质含量的影响

亚致死浓度烯啶虫胺处理对水稻中蔗糖、游离氨基酸含量存在显著影响。处理水稻2 d后,与对照

相比，水稻中游离氨基酸含量显著下降了20.1%（t=8.4，P<0.001；图2-A），处理4 d后，水稻中游离氨基酸含量显著下降了42.4%（t=6.5，P=0.003；图2-B）；处理2 d后，水稻中蔗糖含量无显著变化（t=1.7，P=0.171；图2-C），处理4 d后，水稻中蔗糖含量显著提高了38.5%（t=5.0，P=0.007；图2-D）。

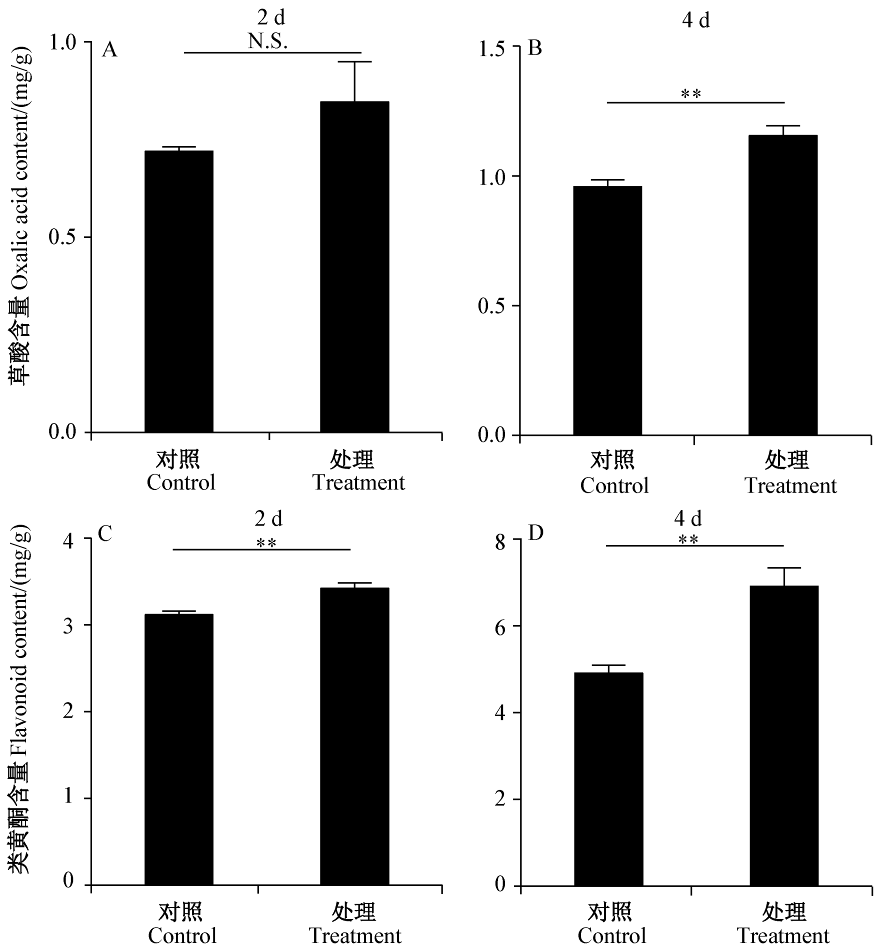

图1 亚致死浓度烯啶虫胺对水稻中草酸（A、B）和类黄酮含量（C、D）的影响

Fig. 1 Effect of sublethal concentration of nitenpyram on the content of oxalic acid (A, B) and flavonoids (C, D) in rice

图中数据为平均数±标准误。**表示处理与对照之间经独立样本t检验法检验差异显著（P<0.01）；N.S.表示无显著差异。Data are mean±SE. ** indicates significant difference between treatment and control groups by t test (P<0.01); N.S. indicates no significant difference.

2.3 亚致死浓度烯啶虫胺对雌成虫组织蛋白含量的影响

亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱雌成虫卵巢及脂肪体可溶性蛋白含量存在显著影响。羽化2 d的褐飞虱雌成虫取食亚致死浓度烯啶虫胺处理的水稻后，卵巢中可溶性蛋白含量相比对照组显著下降了31.2%（t=12.1，P<0.001；图3-A）；羽化4 d显著下降了40.9%（t=17.8，P<0.001；图3-B）。羽化2 d的褐飞虱雌成虫取食亚致死浓度烯啶虫胺处理的水稻后，脂肪体内可溶性蛋白含量相比对照组下降了19.0%（t=5.7，P=0.005；图3-C）；羽化4 d显著下降了38.8%（t=21.8，P<0.001；图3-D）。

2.4 亚致死浓度对*NlVg*、*NlVgR*及卵巢发育的影响

亚致死浓度烯啶虫胺对羽化2 d褐飞虱雌成虫体内*NlVg*表达量无显著影响（t=1.7，P=0.158；图4-A），而羽化4 d后，褐飞虱雌成虫体内*NlVg*表达水平与对照组相比显著下降了57.5%（t=8.7，P<0.001；图4-B）。而亚致死浓度烯啶虫胺处理对不同羽化时间的褐飞虱雌成虫的*NlVgR*的表达水平均无显著影响（羽化2 d：t=0.6，P=0.575；羽化4 d：t=1.1，P=0.333；图4-C~D）。

亚致死浓度烯啶虫胺处理同样对褐飞虱雌成虫卵巢发育均有不同程度的抑制。与对照相比（图5-A~B），取食亚致死浓度烯啶虫胺处理的水稻后，羽化2 d的雌成虫卵巢内没有观察到成熟的卵母细胞（图5-C），而羽化4 d的雌成虫体内只有少量成熟的卵母细胞（图5-D）。

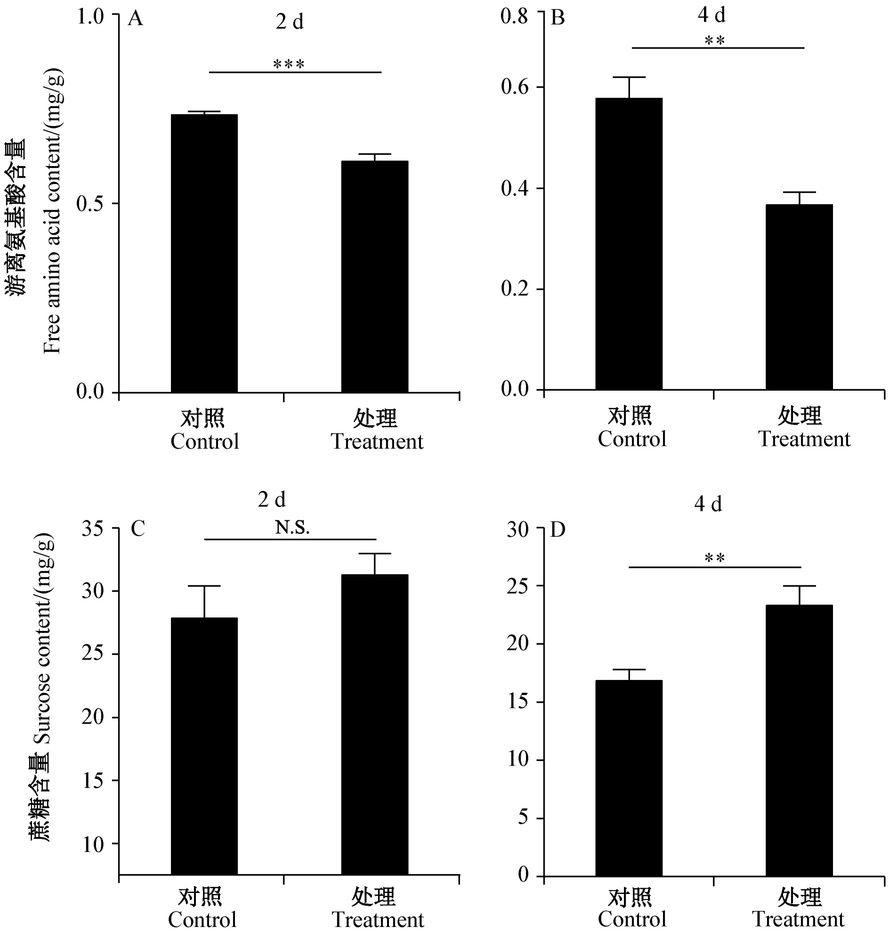

图2 亚致死浓度烯啶虫胺对水稻中蔗糖(A、B)和游离氨基酸(C、D)含量的影响

Fig. 2 Effect of sublethal concentrations of nitenpyram on the content of sucrose (A, B) and free amino acids (C, D) in rice

图中数据为平均数±标准误。**和***表示处理与对照之间经独立样本*t*检验法检验差异显著(*P*<0.01和*P*<0.001); N.S. 表示无显著差异。Data are mean±SE. ** or *** indicates significant difference between treatment and control groups by *t* test (*P*<0.01 or *P*<0.001); N.S. indicates no significant difference.

2.5 亚致死浓度烯啶虫胺对雌成虫繁殖参数的影响

亚致死浓度烯啶虫胺还能够显著影响褐飞虱雌成虫主要的生殖参数。与对照组相比,亚致死浓度烯啶虫胺处理后,褐飞虱雌成虫产卵量显著减少了58.1%(t=9.0,P<0.001),且雌成虫寿命(t=8.6,P<0.001)与雌成虫产卵历期(t=5.5,P=0.005)分别显著缩短了28.0%和36.7%,但产卵前期与对照组相比无显著差异(t=5.5,P=0.067;表1)。

3 讨论

已有研究表明,外源农药的喷施会引起水稻植株体内生理生化物质代谢发生改变,从而影响褐飞虱种群参数以及生殖参数(Wu et al.,2004;Xi et al.,2022)。本研究结果显示,亚致死浓度烯啶虫胺处理水稻4 d后,与对照相比,水稻体内草酸含量升高了20.5%,水稻机体草酸可能对褐飞虱生殖以及子代种群数量起到抑制作用。草酸是植物组织中一种常见的二羧酸,可以保护寄主植物免受植食性害虫的侵害(Kang et al.,2023)。有研究表明,水稻中草酸含量与对褐飞虱的抗性显著正相关,抗性品系水稻中草酸含量显著高于正常品系(商科科,2012;李明阳等,2020)。类黄酮是植物中一类分布最为广泛的次生代谢产物,可作为抗氧化剂减少植物组织中的活性氧(reactive oxygen species,ROS),同时抑制植食性害虫的取食和生长发育,在植物组成型防御中起到关键作用(Mierziak et al.,2014;Himanshi et al.,2023)。在本研究中,亚致死浓度烯啶虫胺处理水稻2 d和4 d后,与对照相比,类黄酮含量分别升高了9.6%和40.6%,类黄酮含量的升高可能对褐飞虱雌成虫的卵巢发育以及生殖力有一定抑制效果。这与其他研究结果一致,如凌冰等(2007)研究发现,在人工饲料中添加类黄酮外源也能够显著降低褐飞

虱的存活率以及排蜜露量；Silva et al.（2016）研究结果也显示食物中高浓度的类黄酮会引起草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 幼虫发育历期延长，幼虫体重与蛹重以及生殖力均显著降低。

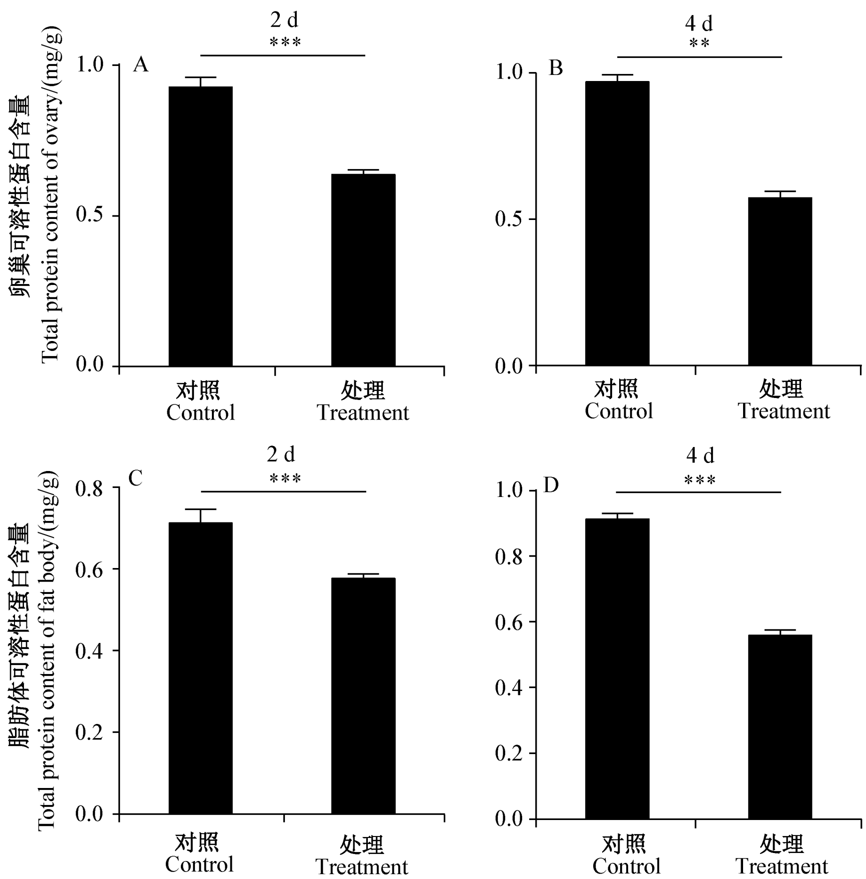

图3　亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱雌成虫卵巢（A、B）以及脂肪体（C、D）中可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3　Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on soluble protein content in ovaries (A, B) and fat bodies (C, D) of female *Nilaparvata lugens*

图中数据为平均数±标准误。**和***表示处理与对照之间经独立样本 *t* 检验法检验差异显著（$P<0.01$, $P<0.001$）。Data are mean±SE. ** or *** indicates significant difference between treatment and control groups by *t* test ($P<0.01$ or $P<0.001$).

寄主植物作为植食性昆虫的主要营养来源，不仅可以影响植食性昆虫的生长发育表现，也可以通过体内营养物质的含量影响植食性昆虫对杀虫剂的易感性（Vogelweith et al.，2011；Wang et al.，2021；宋程飞等，2022）。糖以及氨基酸是植物生长发育、机体代谢所需的重要物质（Hildebrandt et al.，2015；Li et al.，2020；麦翠珊等，2023）。已有研究表明，植物机体内可溶性糖和氨基酸含量的变化会影响植物对害虫的抗性，以及害虫对杀虫剂的敏感性（韩永强等，2017； Liu et al.，2020）。本研究发现亚致死浓度烯啶虫胺处理水稻2 d和4 d后，与对照相比，2 d时蔗糖含量无显著差异，4 d时升高了38.5%，游离氨基酸含量分别下降了20.1%和42.4%，即水稻体内碳氮比相对增加，而水稻中碳氮比的增加可能抑制了褐飞虱卵巢发育以及繁殖。Wu et al.（2021）也得到相似的结论，即三氟苯嘧啶拌种处理水稻后蔗糖含量显著增加，游离氨基酸含量显著减少，碳氮比上升，从而抑制褐飞虱的取食。在对草地贪夜蛾的研究中同样发现，食物中碳氮比升高，幼虫免疫力降低，更易受病毒侵染（Povey et al.，2014）。寄主植物碳氮比的变化会直接影响害虫的营养摄入（Zhao et al.，2024）。碳氮比的升高意味着植物体内的氮含量相对减少，而氮是蛋白质、核酸等生物大分子的基本组成元素，对昆虫的生长发育和繁殖至关重要（Awmack & Leather，2002），氮缺乏会导致昆虫体内蛋白质合成受阻，进而影响其生长速率和生殖能力（Rode et al.，2017）。

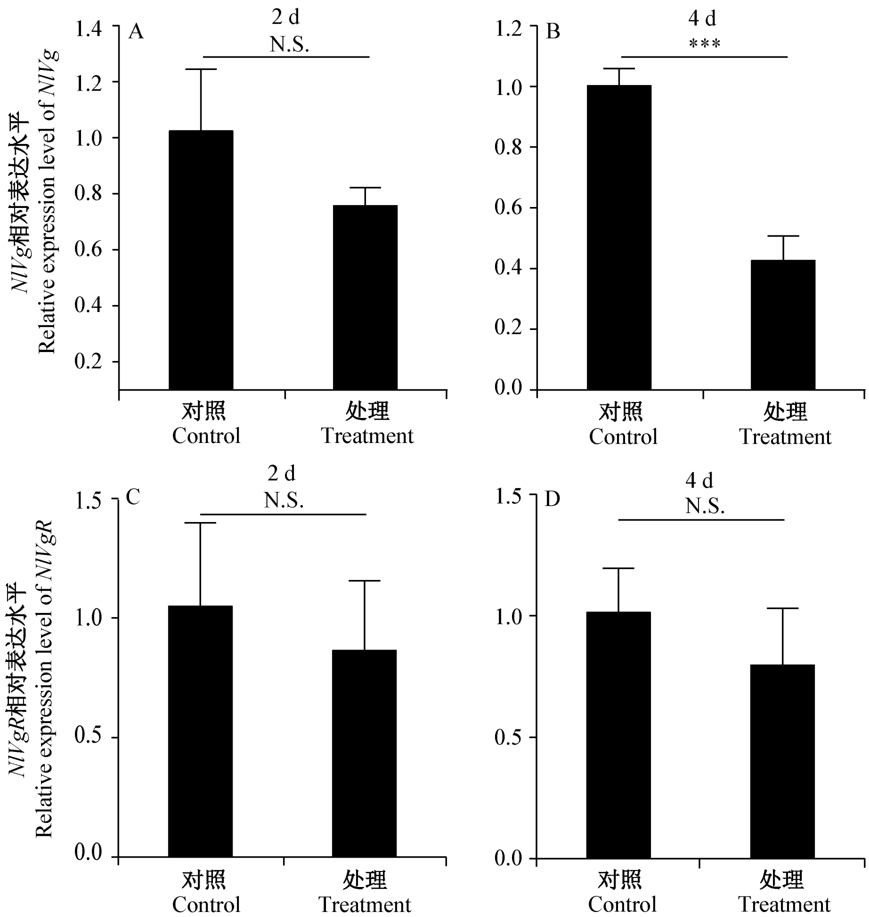

图4 亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱雌成虫*NlVg*(A、B)和*NlVgR*(C、D)表达量的影响

Fig. 4 Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on the expression level of *NlVg* (A, B) and *NlVgR* (C, D) in female adult *Nilaparvata lugens*

图中数据为平均数±标准误。***表示处理与对照之间经独立样本*t*检验法检验差异显著(*P*<0.001); N.S.表示无显著差异。Data are mean±SE. *** indicates significant difference between treatment and control groups by *t* test (*P*<0.001); N.S. indicates no significant difference.

亚致死浓度烯啶虫胺除了能够引起水稻生理生化物质发生改变从而降低褐飞虱生殖力,也会直接作用于褐飞虱产生亚致死效应。本研究结果表明,3龄若虫取食烯啶虫胺处理的水稻后,褐飞虱雌成虫在羽化2 d和4 d时,卵巢中可溶性蛋白含量分别下降了31.2%和40.9%;脂肪体中可溶性蛋白含量分别下降了19.0%和38.8%;褐飞虱雌成虫*NlVg*表达水平在羽化4 d时下降了57.5%;并且雌成虫产卵量减少了58.1%、产卵历期下降了36.7%以及寿命缩短28.0%。Vg和VgR是调节昆虫繁殖力的重要蛋白质,Vg为胚胎发育提供了营养来源,在昆虫的脂肪体内合成,之后被分泌到血淋巴中,最终通过VgR介导的内吞作用进入卵母细胞(Tufail & Takeda,2009;Shen et al.,2019;赵静等,2021)。已有研究结果表明,亚致死浓度杀虫剂会影响害虫生殖相关基因*Vg*和*VgR*的表达水平、卵巢发育以及生殖力,如LC_{10}和LC_{30}甲胺基阿维菌素处理后,荔枝蛀蒂虫*Conopomorpha sinensis*雌成虫的*CsVg*和*CsVgR*的表达水平显著降低,卵巢发育和繁殖力受到抑制(Yao et al.,2018);LC_{10}噻虫嗪显著降低了白背飞虱F_1代雌成虫产卵量(杨航等,2017);LC_{10}、LC_{15}和LC_{20}烯啶虫胺处理后中红侧沟茧蜂*Microplitis mediator*成蜂寿命、雌雄比例以及成蜂体质量均有所降低(闫虹江等,2021)。当亚致死浓度烯啶虫胺作用到害虫时,可能会影响其能量代谢,导致能量短缺,从而将体内能量资源优先分配给生存所需能量,因此影响其生殖力(Shi et al.,2011;Gong et al.,2023)。

本研究分别从亚致死浓度烯啶虫胺对水稻体内生理生化指标的变化以及褐飞虱雌成虫生殖参数的影响2方面分析了亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱的影响,有助于进一步评价烯啶虫胺对褐飞虱种群的

控制效果及控制机理，而烯啶虫胺如何引起水稻生理生化指标发生变化以及水稻响应烯啶虫胺而产生的“增强抗性”与“牺牲营养”之间的权衡还有待进一步研究。

A~B：羽化2 d和4 d的健康褐飞虱雌成虫卵巢；C~D：亚致死浓度烯啶虫胺处理后，羽化2 d和4 d的褐飞虱雌成虫卵巢。A−B: Ovaries of *Nilaparvata lugens* healthy females at two or four days after emergence; C−D: ovaries of *N. lugens* females treated with sublethal concentrations of nitenpyram at two or four days after emergence.

图5　亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱雌成虫卵巢发育的影响

Fig. 5　Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on ovarian development in *Nilaparvata lugens* females

表1　亚致死浓度烯啶虫胺对褐飞虱雌成虫生殖参数的影响

Table 1　Effect of sublethal concentrations of nitenpyram on reproductive parameters of *Nilaparvata lugens* females

生殖参数 Reproductive parameter	对照组 Control	处理组 Treatment
产卵量 No. of eggs laid per female	250.0±15.9 a	104.7±2.7 b
雌成虫寿命 Longevity of females	25.0±0.6 a	18.0±0.6 b
雌成虫产卵前期 Preovipositon period of females	3.3±0.3 a	5.0±0.6 a
雌成虫产卵历期 Oviposition period of females	20.0±0.6 a	12.7±1.2 b

表中数据为平均数±标准误。同行不同小写字母表示处理与对照之间经独立样本*t*检验法检验差异显著（*P*<0.01）。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the same row indicate significant difference between treatment and control groups by *t* test (*P*<0.01).

参 考 文 献（References）

Awmack CS, Leather SR. 2002. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. Annual Review of Entomology, 47(1): 817−844

Cheng JA, Zhu JL, Zhu ZZ, Zhang LG. 2008. Rice planthopper outbreak and environment regulation. Journal of Environmental Entomology, 30(2): 176−182 (in Chinese) [程家安, 朱金良, 祝增荣, 章连观. 2008. 稻田飞虱灾变与环境调控. 环境昆虫学报, 30(2): 176−182]

Cheng SY, Gong YH, Wang FL, Hou ML. 2020. Sublethal effects of nitenpyram on performance of brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. Plant Protection, 46(2): 243−247, 286 (in Chinese) [程世阳, 龚佑辉, 王福莲, 侯茂林. 2020. 烯啶虫胺对褐飞虱的亚致死效应. 植物保护, 46(2): 243−247, 286]

Cheng Y, Zhao KF, Shi ZP, Wu JC. 2011. Effects of pesticides on oxalic acid content and oxalic acid oxidase activity in rice. Jiangsu Agricultural Sciences, 39(5): 128−130 (in Chinese) [程耀, 赵克非, 石朝鹏, 吴进才. 2011. 农药对水稻体内草酸含量及草酸氧化酶活性的影响. 江苏农业科学, 39(5): 128−130]

Dai X, Jiao J, Quan Q, Zhou AR. 2023. Dynamics of a predator-prey system with sublethal effects of pesticides on pests and natural enemies. International Journal of Biomathematics, 17(1): 2350007

Elbert A, Haas M, Springer B, Thielert W, Nauen R. 2008. Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. Pest Management Science, 64(11): 1099−1105

Garrood WT, Zimmer CT, Gorman KJ, Nauen R, Bass C, Davies TG. 2016. Field-evolved resistance to imidacloprid and ethiprole in populations of brown planthopper *Nilaparvata lugens* collected from across South and East Asia. Pest Management Science, 72(1): 140−149

Ge LQ, Jiang YP, Xia T, Song QS, Stanley D, Kuai P, Lu XL, Yang GQ, Wu JC. 2015. Silencing a sugar transporter gene reduces growth and fecundity in the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae). Scientific Reports, 5: 12194

Ge LQ, Wu JC, Zhao KF, Chen Y, Yang GQ. 2010. Induction of Nlvg and suppression of *Nljhe* gene expression in *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae) adult females and males exposed to two insecticides. Pesticide Biochemistry and Physiology, 98(2): 269−278

Gong YH, Cheng SY, Desneux N, Gao XW, Xiu XJ, Wang FL, Hou ML. 2023. Transgenerational hormesis effects of nitenpyram on fitness and insecticide tolerance/resistance of *Nilaparvata lugens*. Journal of Pest Science, 96(1): 161−180

Han YQ, Gong SL, Wen LZ, Hou ML. 2017. Effect of silicon addition to rice plants on *Cnaphalocrocis medinalis* feeding and oviposition preference. Acta Ecologica Sinica, 37(5): 1623−1629 (in Chinese) [韩永强, 弓少龙, 文礼章, 侯茂林. 2017. 水稻施用硅肥对稻纵卷叶螟幼虫取食和成虫产卵选择性的影响. 生态学报, 37(5): 1623−1629]

He SJ, Xiao NW, Zheng XX, Zhao MH, Li XM, Yang FL, Wu G. 2021. The life history parameters and population dynamics of brown planthopper *Nilaparvata lugens* feeding on different rice varieties in central China. Journal of Plant Protection, 48(2): 357−366 (in Chinese) [何帅洁, 肖能文, 郑晓旭, 赵慕华, 李雪梅, 杨凤连, 吴刚. 2021. 褐飞虱在华中地区不同主栽水稻品种上的生活史和种群动态. 植物保护学报, 48(2): 357−366]

Hildebrandt TM, Nesi AN, Araújo WL, Braun H. 2015. Amino acid catabolism in plants. Molecular Plant, 8(11): 1563−1579

Himanshi G, Ashish S, Kumar TP. 2023. The role of flavonols in insect resistance and stress response. Current Opinion in Plant Biology, 73: 102353

Huang L, Lu MX, Han GJ, Du YZ, Wang JJ. 2016. Sublethal effects of chlorantraniliprole on development, reproduction and vitellogenin gene (*CsVg*) expression in the rice stem borer, *Chilo suppressalis*. Pest Management Science, 72(12): 2280−2286

Jeevanandham N, Raman R, Ramaiah D, Senthilvel V, Mookaiah S, Jegadeesan R. 2023. Rice: *Nilaparvata lugens* Stål interaction — current status and future prospects of brown planthopper management. Journal of Plant Diseases and Protection, 130(1): 125−141

Kang K, Zhang MY, Yue L, Chen WW, Dai YS, Lin K, Liu K, Lv J, Guan ZW, Xiao S, et al. 2023. Oxalic acid inhibits feeding behavior of the brown planthopper via binding to gustatory receptor Gr23a. Cells, 12(5):771

Khoa DB, Thang BX, Van Liem N, Holst N, Kristensen M. 2018. Variation in susceptibility of eight insecticides in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* in three regions of Vietnam 2015—2017. PLoS ONE, 13(10): e0204962

Li MY, Yao YB, Xu X, Gong CW, Yang XD, Yang DB, Wang XG. 2020. Relative resistance of several rice varieties to *Nilaparvata lugens* (Stål) and analysis of resistance-related secondary substances. Chinese Journal of Applied Entomology, 57(6): 1375−1384 (in Chinese) [李明阳, 姚宇波, 徐翔, 贡常委, 杨旭东, 杨德斌, 王学贵. 2020. 几种水稻对褐飞虱的抗性鉴定及抗性相关次生物质分析. 应用昆虫学报, 57(6): 1375−1384]

Li XX, Li JZ. 2013. Determination of the content of soluble sugar in sweet corn with optimized anthrone colorimetric method. Storage & Process, 13(4): 24−27 (in Chinese) [李晓旭, 李家政. 2013. 优化蒽酮比色法测定甜玉米中可溶性糖的含量. 保鲜与加工, 13(4): 24−27]

Li Y, Wang S, Liu Y, Lu Y, Zhou M, Wang S, Wang S. 2020. The effect of different dietary sugars on the development and fecundity of *Harmonia axyridis*. Frontiers in physiology, 11: 574851

Ling B, Dong HX, Zhang MX, Xu D, Wang JS. 2007. Potential resistance of tricin in rice against brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). Acta Ecologica Sinica, 27(4): 1300−1307 (in Chinese) [凌冰, 董红霞, 张茂新, 徐迪, 王敬淑. 2007. 水稻麦黄酮对褐飞虱的抗性潜力. 生态学报, 27(4): 1300−1307]

Liu SL, Wang XH, Zhang R, Song MJ, Zhang NQ, Li WY, Wang YP, Xu YH, Zhang LX. 2020. Amino acid, fatty acid, and carbohydrate metabolomic profiles with ginsenoside-induced insecticidal efficacy against *Ostrinia furnacalis* (Guenee). Journal of Ginseng Research, 44(4): 544−551

Liu ZY, Tan QM, Liu ZM, Ma HH, Zhu H, Liu J, Zhou XM. 2023. Synergistic effect and field control of compositon of nitenpyram and imidaclothiz on *Nilaparvata lugens* (Stål). Agrochemicals, 62(9): 693−697 (in Chinese) [刘章扬, 谭奇美, 刘哲铭, 马海昊, 朱航, 刘佳, 周小毛. 2023. 烯啶虫胺和氯噻啉复配对褐飞虱的增效作用及田间防效. 农药, 62(9): 693−697]

Livak KJ, Schmittgen TD. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta Ct}$ method. Methods, 25(4): 402−408

Lu MH, Zhou LL, Yin L, Huang CY, Qiu K, Wan XW, Zhai BP, Liu

WC. 2020. Occurrence characteristics and cause analysis of rice planthopper in China in 2019. China Plant Protection, 40(5): 52−57 (in Chinese) [陆明红, 周丽丽, 尹丽, 黄成宇, 邱坤, 万宣伍, 翟保平, 刘万才. 2020. 2019年我国稻飞虱发生特点及原因分析. 中国植保导刊, 40(5): 52−57]

Lu YH, Liu Y, Yang XM, Jing YP, Hu G, Luan JB, Guo ZJ, Ma G, Yan S, Liang P, et al. 2023. Advances in integrated management of agricultural insect pests in China: 2018—2022. Plant Protection, 49(5): 145−166 (in Chinese) [陆宴辉, 刘杨, 杨现明, 荆玉谱, 胡高, 栾军波, 郭兆将, 马罡, 闫硕, 梁沛, 等. 2023. 中国农业害虫综合防治研究进展: 2018年—2022年. 植物保护, 49(5): 145−166]

Mai CS, Li FJ, Deng YR, Li TM, Wang JX. 2023. Recent advances in sugar signal transduction in higher plants. Plant Physiology Journal, 59(8): 1474−1488 (in Chinese) [麦翠珊, 李方剑, 邓雅茹, 李铁梅, 王金祥. 2023. 高等植物糖信号转导研究进展. 植物生理学报, 59(8): 1474−1488]

Mierziak J, Kostyn K, Kulma A. 2014. Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. Molecules, 19(10): 16240−16265

Povey S, Cotter SC, Simpson SJ, Wilson K. 2014. Dynamics of macronutrient self-medication and illness-induced anorexia in virally infected insects. Journal of Animal Ecology, 83(1): 245−255

Rix RR, Ayyanath MM, Christopher Cutler G. 2016. Sublethal concentrations of imidacloprid increase reproduction, alter expression of detoxification genes, and prime *Myzus persicae* for subsequent stress. Journal of Pest Science, 89(2): 581−589

Rode M, Lemoine NP, Smith MD. 2017. Prospective evidence for independent nitrogen and phosphorus limitation of grasshopper (*Chorthippus curtipennis*) growth in a tallgrass prairie. PLoS ONE, 12(5): e0177754

Shang KK. 2012. Study on resistance of new rice resistant varieties (lines) to *Nilaparvata lugens* (Stål) and adaptability changes of *Nilaparvata lugens* (Stål). Master thesis. Wuhan: Huazhong Agriculture University (in Chinese) [商科科. 2012. 水稻新材料对褐飞虱的抗性及褐飞虱适应性变化. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学]

Shao JL, Li QW, Dong BS, Liu HC, Shu JH. 2008. Determination of total free-amino acid in tea by nihydrin colorimetry. China Food Additives, (2): 162−165 (in Chinese) [邵金良, 黎其万, 董宝生, 刘宏程, 束继红. 2008. 茚三酮比色法测定茶叶中游离氨基酸总量. 中国食品添加剂, (2): 162−165]

Shen Y, Chen YZ, Lou YH, Zhang CX. 2019. Vitellogenin and vitellogenin-like genes in the brown planthopper. Frontiers in Physiology, 10: 1181

Shi SJ, Wang HY, Zha WJ, Wu Y, Liu K, Xu DZ, He GC, Zhou L, You AQ. 2023. Recent advances in the genetic and biochemical mechanisms of rice resistance to brown planthoppers (*Nilaparvata lugens* Stål). International Journal of Molecular Sciences, 24(23): 16959

Shi XB, Jiang LL, Wang HY, Qiao K, Wang D, Wang KY. 2011. Toxicities and sublethal effects of seven neonicotinoid insecticides on survival, growth and reproduction of imidacloprid-resistant cotton aphid, *Aphis gossypii*. Pest Management Science, 67(12): 1528−1533

Silva TRFB, Almeida ACDS, Moura TDL, Silva ARD, Freitas SDS, Jesus FG. 2016. Effect of the flavonoid rutin on the biology of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Acta Scientiarum. Agronomy, 38: 165−170

Song CF, Feng XM, Wang ZY, Yan XZ, Hao C. 2022. Bioactivities of the essential oils derived from four species of non-host plants against diamondback moth *Plutella xylostella*. Journal of Plant Protection, 49(2): 671−682 (in Chinese) [宋程飞, 冯雪梦, 王志宇, 闫喜中, 郝赤. 2022. 四种非寄主植物精油对小菜蛾的生物活性. 植物保护学报, 49(2): 671−682]

Song YQ, Wang YP, Mao YJ. 2005. Determination of total flavonoid content in *Asparagus officinalis* Linn by spectrophotometry. Chemical Analysis and Meterage, 14(4): 52−53 (in Chinese) [宋元清, 王艳平, 毛远菁. 2005. 分光光度法测定芦笋中总黄酮的含量. 化学分析计量, 14(4): 52−53]

Tufail M, Takeda M. 2009. Insect vitellogenin/lipophorin receptors: molecular structures, role in oogenesis, and regulatory mechanisms. Journal of Insect Physiology, 55(2):87−103

Vogelweith F, Thiéry D, Quaglietti B, Moret Y, Moreau J. 2011. Host plant variation plastically impacts different traits of the immune system of a phytophagous insect. Functional Ecology, 25(6): 1241−1247

Wang CZ, Qin JD. 1996. Identification of the main protease activity in the midgut of cotton bollworm larvae. Acta Entomologica Sinica, 39(1): 7−11 (in Chinese) [王琛柱, 钦俊德. 1996. 棉铃虫幼虫中肠主要蛋白酶活性的鉴定. 昆虫学报, 39(1): 7−11]

Wang JY, Fan NN, Siemann E, Jiang JX, Wan NF. 2021. Plant-mediated effects on life history traits of entomovirus infected caterpillars of *Spodoptera exigua*. Journal of Applied Entomology, 145(6): 567−574

Wang PY, Liu JJ, Lyu YJ, Huang ZT, Zhang XL, Sun BJ, Li PB, Jing XX, Li HL, Zhang C. 2022. A review of vector-borne rice viruses. Viruses, 14(10): 2258

Wang SY, Qi YF, Desneux N, Shi XY, Biondi A, Gao XW. 2017. Sublethal and transgenerational effects of short-term and chronic exposures to the neonicotinoid nitenpyram on the cotton aphid *Aphis gossypii*. Journal of Pest Science, 90: 389−396

Wu JC. 2017. Pesticide-induced resurgence of rice planthoppers and scientific application of pesticides. Journal of Plant Protection, 44(6): 919−924 (in Chinese) [吴进才. 2017. 药剂诱导稻飞虱再猖獗及科学用药. 植物保护学报, 44(6): 919−924]

Wu JC, Ge LQ, Liu F, Song QS, Stanley D. 2020. Pesticide-induced planthopper population resurgence in rice cropping systems. Annual Review of Entomology, 65: 409−429

Wu JC, Qiu HM, Yang GQ, Liu JL, Liu GJ, Wilkins RM. 2004. Effective duration of pesticide-induced susceptibility of rice to brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål, Homoptera: Delphacidae), and physiological and biochemical changes in rice plants following pesticide application. International Journal of Pest Management, 50(1): 55−62

Wu Q, Zhang G, Chen Y, Yu JL, Zhou YK, Shu ZL, Ge LQ. 2021. Seed dressing with triflumezopyrim controls brown planthopper populations by inhibiting feeding behavior, fecundity and enhancing rice plant resistance. Pest Management Science, 77(6): 2870−2886

Xi CY, Ahmad S, Yu JL, Zhang JY, Chen Y, Zhang G, Zhu H, Ge L, Yu XY, Shu ZL. 2022. Seed coating with triflumezopyrim induces the rice plant's defense and inhibits the brown planthopper's feeding behavior. Agronomy, 12(5): 1202

Yan HJ, Yue L, Wen HY, Li WZ, Liang H, Ning ZX, Yu F, Lu W. 2021. Effects of nitenpyram on sublethal effect and antioxidant enzymes of *Microplitis mediator*. Agrochemicals, 60(10): 738−742 (in Chinese) [闫虹江, 岳磊, 文弘昱, 李维政, 梁赫, 宁忠雄, 郁帆, 路伟. 2021. 烯啶虫胺对中红侧沟茧蜂亚致死效应及抗氧化酶的影响. 农药, 60(10):738−742]

Yang H, Yang H, Jin DC, Dai RH, Zhou C. 2017. Sublethal effects of thiamethoxam on the fecundity of lab populations of white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth). Journal of Plant Protection, 44(3): 509−514 (in Chinese) [杨航, 杨洪, 金道超, 戴仁怀, 周操. 2017. 噻虫嗪对白背飞虱试验种群繁殖力的亚致死效应. 植物保护学报, 44(3): 509−514]

Yao Q, Xu S, Dong YZ, Que YL, Quan LF, Chen BX. 2018. Characterization of vitellogenin and vitellogenin receptor of *Conopomorpha sinensis* Bradley and their responses to sublethal concentrations of insecticide. Frontiers in Physiology, 9: 1250

Yoshida T, Murakawa H, Toda K. 2013. Determination of nitenpyram and its metabolites in agricultural products by using hydrophilic interaction liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Journal of Pesticide Science, 38(1): 27−32

Zhang HH, Li YJ, Sun ZT, Yan F, Chen JP. 2022. Recent advances in the studies of rice virus-plant host interaction. Journal of Plant Protection, 49(1): 33−41 (in Chinese) [张合红, 李雁军, 孙宗涛, 燕飞, 陈剑平. 2022. 水稻病毒与植物寄主互作研究新进展. 植物保护学报, 49(1): 33−41]

Zhang YY, Xu G, Jiang Y, Ma C, Yang GQ. 2021. Sublethal effects of imidacloprid on fecundity, apoptosis and virus transmission in the small brown planthopper *Laodelphax striatellus*. Insects, 12(12): 1131

Zhao J, Qiu ZY, Xiao LB, Tan YA, Jiang YP, Bai LX. 2021. Molecular and expression characteristics of vitellogenin gene in fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. Journal of Plant Protection, 48(4): 798−805 (in Chinese) [赵静, 邱之雨, 肖留斌, 谭永安, 姜义平, 柏立新. 2021. 草地贪夜蛾卵黄原蛋白基因的分子特征及表达特性. 植物保护学报, 48(4): 798−805]

Zhao XD, Geng YS, Qiao H, Liu Y, Hu TY, Xu WX, Hao DJ. 2024. Nutrition of host plants influence the infectivity of nucleopolyhedrovirus to polyphagous caterpillar, *Hyphantria cunea*. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 11(1): 17

Zhu HW, Ahmad S, Duan ZR, Shi JT, Tang XY, Dong QQ, Xi CY, Ge LQ, Wu T, Tan YA. 2023. The jinggangmycin-induced *mthl2* gene regulates the development and stress resistance in *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae). Pesticide Biochemistry and Physiology, 196: 105630

（责任编辑：王　璇）