

高 CO₂ 浓度下烯啉虫胺亚致死浓度对褐飞虱生活史和种群动态的影响*

周洪汕^{1**} 尚方格¹ 陈亮² 赵慕华¹ 郝涛³ 吴刚^{1***}

(1. 华中农业大学植物科技学院, 武汉 430070; 2. 湖北省林业有害生物防治检疫总站, 武汉 430079; 3. 湖北省野生动植物保护总站, 武汉 430079)

摘要 【目的】通过研究高 CO₂ 浓度下烯啉虫胺亚致死浓度对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 生活史和种群参数的影响, 明确褐飞虱在高 CO₂ 浓度下生物学响应特征, 为未来全球气候变暖下褐飞虱的防控提供理论参考。【方法】利用两性生命表, 研究了当前大气 CO₂ 浓度 (Ambient CO₂) 和高 CO₂ 浓度 (Elevated CO₂) 下烯啉虫胺亚致死浓度 LC₁₅ 对褐飞虱生活史参数的影响, 并用软件模拟了褐飞虱的种群动态。【结果】烯啉虫胺亚致死浓度 LC₁₅ 处理, 两个 CO₂ 浓度下均可显著延长褐飞虱的若虫发育历期 ($P < 0.05$), 进一步延长褐飞虱平均世代周期。两个 CO₂ 浓度下对照处理无显著差异 ($P > 0.05$)。烯啉虫胺亚致死浓度 LC₁₅ 处理褐飞虱 3 龄若虫后, 当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱雌虫产卵量无显著差异 ($P > 0.05$), 高 CO₂ 浓度下雌虫产卵量显著增加 ($P < 0.05$), 从 366.5 粒上升到 473.4 粒; 当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱种群内禀增长率从 0.195 0 下降到 0.174 1, 净增殖率从 181.7 下降到 129.8; 高 CO₂ 浓度下褐飞虱种群内禀增长率从 0.187 0 上升到 0.198 5, 净增殖率从 137.4 上升到 236.7。【结论】烯啉虫胺亚致死浓度处理褐飞虱, 高 CO₂ 浓度下褐飞虱繁殖力增加, 有利于种群增长, 可能存在再猖獗的风险。

关键词 褐飞虱; 高 CO₂ 浓度; 烯啉虫胺; 种群动态; 两性生命表

Effects of sublethal concentration of nitenpyram on the life history and population dynamics of brown planthopper, *Nilaparvata lugens* under elevated CO₂ levels

ZHOU Hong-Shan^{1**} SHANG Fang-Ge¹ CHEN Liang²
ZHAO Mu-Hua¹ HAO Tao³ WU Gang^{1***}

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

2. Hubei Forestry Pest Control and Quarantine General Station, Wuhan 430079, China;

3. Hubei Wildlife Conservation Station, Wuhan 430079, China)

Abstract [Aim] To investigate the effects of sublethal concentrations of nitenpyram on the individual life history and population parameters of *Nilaparvata lugens* under elevated CO₂, and clarify the biological characteristics of *N. lugens* to elevated CO₂, and thereby provide information relevant to the prevention and control of this pest in the future global warming. [Methods] The effects of a sublethal concentration of nitenpyram LC₁₅ on the life history parameters of the brown planthopper under ambient, and elevated, CO₂ concentrations were investigated using a two-sex life table, and the population dynamics of this species was simulated using software. [Results] An LC₁₅ sublethal concentration of nitenpyram significantly prolonged nymph development under both CO₂ concentrations ($P < 0.05$), and further extended the average generation history. No significant difference was found between control treatments under both CO₂ concentrations ($P > 0.05$). There was no significant difference in egg production under ambient CO₂ conditions ($P > 0.05$), but female fecundity increased

*资助项目 Supported project: 中国工程院院地合作项目 (项目编号: HB2023B06)

**第一作者 First author, E-mail: zhs318@163.com

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

收稿日期 Received: 2023-12-08; 接受日期 Accepted: 2024-03-06

significantly from 366.5 to 473.4 under elevated CO₂ levels ($P < 0.05$). The intrinsic growth rate also increased from 0.187 0 to 0.198 5, and the net reproductive rate increased from 137.4 to 236.7 under elevated CO₂ levels. **[Conclusion]** Brown planthoppers treated with a sublethal concentration of nitenpyram had increased fecundity under an elevated CO₂ conditions, which suggests that global warming may make it harder to control of this pest.

Key words *Nilaparvata lugens*; elevated CO₂; nitenpyram; population dynamic; two-sex life table

CO₂ 浓度升高和温度上升是全球气候变化的主要表现,二氧化碳是导致全球变暖最主要的温室气体之一。大气 CO₂ 浓度已从工业革命前 280 μL/L 达到 2019 年 410 μL/L 左右;预计 2090 年大气 CO₂ 浓度将达到 809 μL/L (Pan *et al.*, 2014)。大气 CO₂ 浓度的升高可直接影响昆虫宿主植物的生长发育,进而影响到昆虫的行为和生理代谢(戈峰和陈法军, 2006; Thomson *et al.*, 2010)。

褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 是水稻上重要的害虫,其为害对水稻的生产和经济效益可造成严重的影响(Garrod *et al.*, 2016),亚洲地区水稻平均每年减产约 100 万吨都是由褐飞虱造成的(Zhang *et al.*, 2016)。当前对褐飞虱主要采取化学防治,化学防治伴随的褐飞虱抗药性逐年增加,是未来褐飞虱防控需要面临的问题(Wu *et al.*, 2018)。

杀虫剂毒力会随着施用时间的推移和环境的改变会发生改变,一般杀虫剂毒力会逐渐递减进而形成亚致死浓度(张莉娅等, 2021)。不同种类的昆虫暴露在亚致死浓度下,其亚致死效应也存在极大的差异(马冲等, 2012),如不利于昆虫生长发育(Kang *et al.*, 2018),增加昆虫抗药性(Gong *et al.*, 2015),刺激繁殖(Tang *et al.*, 2019)及害虫再猖獗(吴进才, 2011)。烯啶虫胺属于氯代烟碱类杀虫剂,是防治刺吸式口器害虫的主要药剂,作用于昆虫中枢神经系统的烟碱型乙酰胆碱受体。近年来大规模应用于水稻褐飞虱的防治,由于其大量使用,褐飞虱对其也呈现出一定的抗性(Zhang *et al.*, 2017)。已有研究表明 CO₂ 浓度升高可能不利于抗吡虫啉褐飞虱的发育和存活,从而对其种群增长造成不利影响(刘敬, 2014)。大气 CO₂ 浓度不断增加的环境下,褐飞虱对烯啶虫胺敏感性及烯啶虫胺亚

致死效应将如何变化?本试验通过研究烯啶虫胺亚致死浓度 LC₁₅ 对当前大气 CO₂ 浓度和高 CO₂ 浓度下褐飞虱连续多代个体生长发育和生活史参数的影响,分析其种群动态的变化,旨在着眼于 CO₂ 不断升高环境下,预测褐飞虱对烯啶虫胺敏感性变化,为将来有效防治褐飞虱提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试昆虫

供试褐飞虱由华中农业大学湖北省重点实验室水稻教研组提供,以水稻品种 TN1(种植于正常 CO₂ 浓度下,加有 Kimura B 营养液(郑晓旭, 2021; Liang *et al.*, 2006)的塑料盆中,待三叶期转移到 2 L 的玻璃烧杯中供褐飞虱取食和产卵,连续饲养多代(文栋, 2018),本试验共设置 2 个 CO₂ 浓度处理,分别为当前大气 CO₂ 浓度(Ambient CO₂)、高 CO₂ 浓度(Elevated CO₂, 800 μL/L)。饲养条件为人工气候培养箱内温度(27±1)℃,相对湿度 70%±5%,光周期 14 L : 10 D。

1.2 供试药剂

烯啶虫胺(Nitenpyram)原药,纯度 97%,购自湖北康宝泰精细化工有限公司, TritongX-100 购自 Sigma 公司,丙酮(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司。

1.3 毒力测定

稻苗浸渍法(倪珏萍, 2007):将培养好的 TN1 水稻苗(约 10 cm 高)洗净,15 根一组,放于阴凉处晾至稻苗表面无水痕,将稻苗浸于配制好的系列浓度药液约 30 s,取出放在干净报纸上晾干,用脱脂棉包住稻苗根部,将脱脂棉浸

水后放入一次性塑料杯 (500 mL PP 杯) 中, 以标准一致的 3 龄中期若虫为试虫, 每个杯子接入 15 头, 每个浓度重复 3 次, 以含 0.1% Triton X-100 的清水为对照。接入试虫后用纱布封口 (杨鹏, 2017), 放于温度 (27±1) °C, 光周期 14 L : 10 D 的恒温恒湿人工气候箱中培养, 96 h 后检查结果, 以不能自由活动为死亡, 记录活虫数, 使用 DPS 软件分析 LC₁₅ 值、95% 置信区间、自由度、斜率和毒力回归曲线。

1.4 褐飞虱若虫发育历期和存活率

试验前消毒处理 400 支试管 (18 cm × 18 mm), 分成 4 组, 每组 100 支, 分别取当前大气 CO₂ 浓度和高 CO₂ 浓度下当天初孵的 1 龄褐飞虱若虫各 100 头, 分别接入加有 1 株三叶期健康水稻苗的 100 支试管 (18 cm × 18 mm, 试管底部加入 1 mL 营养液) (文栋, 2018)。接种完成后, 褐飞虱若虫发育历期及存活率记录方法参考文栋 (2018)。

1.5 褐飞虱成虫寿命和繁殖率记录

褐飞虱成虫初羽化后, 在 1-2 d 内分别在 25 cm × 30 mm 规格大试管中完成雌雄成虫配对 (每管接入 1 头雄虫和 1 头雌虫。完成配对后分别放回对应处理的培养箱中, 每天观察记录成虫存活情况, 从羽化到死亡为成虫寿命。自初次配对 6-7 d 后记录每管孵化若虫的数量, 依次记录每次转移的孵化情况, 以此来估算褐飞虱产卵量

(文栋, 2018; 郑晓旭, 2021)。

1.6 褐飞虱两性生命表的建立和种群动态模拟

利用两性生命表理论 (Chi and Liu 1985; Chi, 1988) 建立当前大气 CO₂ 浓度和高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度 LC₁₅ 处理后褐飞虱的两性生命表 (Two-Sex life table), 并用软件模拟褐飞虱种群动态发生情况。

1.7 数据分析

本试验数据采用两性生命表软件 (Twosex-MSChart) (Chi, 2017a) 进行统计分析。本研究同时模拟了褐飞虱种群动态变化 (Chi, 2017b), 统计其种群参数。褐飞虱个体两性生命表及种群参数分析与计算方法参考文栋 (2018) 和郑晓旭 (2021)。

2 结果与分析

2.1 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺对褐飞虱的毒力

烯啶虫胺对褐飞虱的毒力测定结果见表 1。当前大气 CO₂ 浓度和高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺对褐飞虱 3 龄若虫的 LC₁₅ 分别为 0.50 和 1.68 mg/L, 高 CO₂ 浓度下褐飞虱对烯啶虫胺的敏感性较当前大气 CO₂ 浓度下显著降低 ($P < 0.05$), 大气 CO₂ 浓度升高可能影响褐飞虱对烯啶虫胺的敏感性。本试验以烯啶虫胺 0.50 mg/L 处理当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱的 3 龄若虫, 以 1.68 mg/L 处理高 CO₂ 浓度下褐飞虱的 3 龄若虫。

表 1 当前 CO₂ (aCO₂) 和高 CO₂ (eCO₂) 浓度下烯啶虫胺对褐飞虱 3 龄若虫的毒力测定
Table 1 Toxicity of nitenpyram to the 3rd instar nymph of *Nilaparvata lugens* under ambient CO₂ (aCO₂) and elevated CO₂ (eCO₂) concentrations

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentrations	斜率±标准差 Slope±SE	LC ₁₅ (95% CI) (mg/L)	LC ₅₀ (95% CI) (mg/L)	卡方值 χ^2 (df)
aCO ₂	1.99±0.22	0.50 (0.34-0.66)	1.66 (1.33-2.08)	9.81 (3)
eCO ₂	2.44±0.29	1.68 (1.13-2.64)	4.46 (2.78-6.89)	14.23 (3)

CI: 置信区间 Confidence interval.

2.2 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱生活史参数的影响

由表 2 可以看出, 不同 CO₂ 浓度下, 褐飞

虱卵期 (Egg)、1 龄 (N1) 的历期无显著性差异 ($P > 0.05$); 烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱 3 龄若虫后, 不同 CO₂ 浓度下褐飞虱 3 龄 (N3)、4 龄 (N4)、5 龄 (N5) 发育历期延长, 总产卵

表 2 当前 CO₂ (aCO₂) 和高 CO₂ (eCO₂) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱的生活史参数的影响
Table 2 Effects of the sublethal concentrations of nitenpyram on the life history parameters of *Nilaparvata lugens* under ambient CO₂ (aCO₂) and elevated CO₂ (eCO₂) concentrations

参数 Parameters	不同 CO ₂ 浓度 Different CO ₂ concentrations			
	aCO ₂ -CK	aCO ₂ -LC ₁₅	eCO ₂ -CK	eCO ₂ -LC ₁₅
卵期 (d) Egg stage (d)	8.00±0.04 a	8.00±0.04 a	8.00±0.04 a	8.00±0.04 a
1 龄 (d) 1st instar N1 (d)	2.92±0.03 a	2.97±0.02 a	2.94±0.03 a	2.89±0.04 a
2 龄 (d) 2nd instar N2 (d)	2.00±0.04 c	2.06±0.03 ab	2.00±0.04 c	2.01±0.01 bc
3 龄 (d) 3rd instar N3 (d)	2.15±0.04 a	2.18±0.04 a	2.04±0.02 b	2.12±0.04 ab
4 龄 (d) 4th instar N4 (d)	2.10±0.04 bc	2.20±0.05 ab	2.05±0.03 c	2.22±0.05 a
5 龄 (d) 5th instar N5 (d)	3.11±0.05 c	3.87±0.07 a	3.17±0.04 c	3.41±0.06 b
产卵前期 (d) Pre-oviposition, APOP (d)	1.24±0.23 a	1.00±0.07 a	0.90±0.06 a	0.79±0.06 a
总产卵前期 (d) Total pre-oviposition, TPOP (d)	21.50±0.27 b	22.40±0.16 a	21.27±0.09 b	21.62±0.16 b
产卵量 (粒/雌) Fecundity (grains/female)	403.7±42.3 ab	405.6±40.9 ab	366.5±31.0 b	473.35±31.32 a
雌成虫寿命 (d) Female adult longevity (d)	18.72 ± 1.01 a	19.19 ± 1.17 a	19.47 ± 1.20 a	20.98 ± 1.27 a
雄成虫寿命 (d) Male adult longevity (d)	26.96 ± 1.67 ab	27.08 ± 1.06 a	23.44 ± 1.47a	27.90 ± 1.78 a
成虫前存活率 (%) Preadult survival rate (%)	78.75 ± 5.00 ab	71.00 ± 5.00 b	88.75 ± 4.00a	87.50 ± 4.00 a

CK: 未进行烯啶虫胺药剂处理; 表中数据为平均值±标准误, 不同小写字母代表不同处理间差异显著 ($P<0.05$, 配对引导检验)。下表同。

CK: The treatment without nitenpyram; Data in the table are mean±SE, and followed by the different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level by paired bootstrap test. The same below.

前期由高到低依次为 aCO₂-LC₁₅>eCO₂-LC₁₅>aCO₂-CK>eCO₂-CK。当前 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱后繁殖力无显著差异 ($P>0.05$); 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱后繁殖力显著增加 ($P<0.05$), 产卵量从 366.5 粒上升到 473.4 粒; 烯啶虫胺亚致死浓度处理后, 当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱存活率下降, 但差异不显著 ($P>0.05$); 高 CO₂ 浓度下褐飞虱存活率基本不变, 分别为 88.75% 和 87.50%。结果表明烯啶虫胺亚致死浓度处理后, 当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱受到一定的遏制, 但高 CO₂ 浓度下褐飞虱产卵量增加, 有利于褐飞虱种群增长。

2.3 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱特定年龄-龄期生命期望 (e_{xj}) 的影响

对不同 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱的特定年龄-龄期生命期望 (The

age-stage life expectancy, e_{xj}) 作图 (图 1), 由图 1 (A-D) 可以看出, 不同 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱的特定年龄-龄期生命期望 (e_{xj}) 由高到低依次为 eCO₂-LC₁₅ (41.18) > eCO₂-CK (39.13) > aCO₂-CK (36.89) > aCO₂-LC₁₅ (36.85)。研究表明, 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱的生命期望最高, 增加危害时间。

2.4 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱种群参数的影响

从表 3 可以看出, 烯啶虫胺亚致死浓度处理后, 当前大气 CO₂ 浓度下褐飞虱种群内禀增长率 (the intrinsic rate of increase, r) 和周限增长率 (the finite rate of increase, λ) 显著下降 ($P<0.05$), 高 CO₂ 浓度下有所上升, 差异不显著 ($P>0.05$); 当前大气 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱净增殖率 (the net reproductive

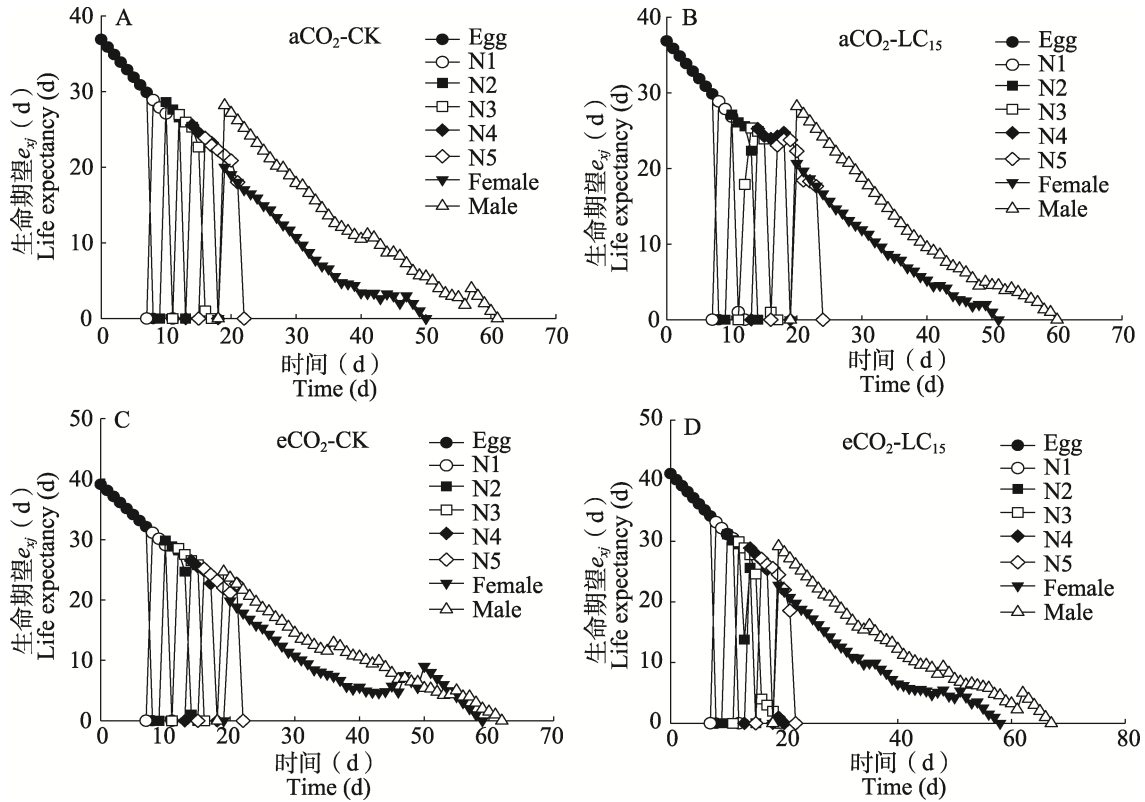


图 1 当前 CO₂ (aCO₂) 和高 CO₂ (eCO₂) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱特定年龄-龄期生命期望 (e_{xj}) 的影响

Fig. 1 Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on the age-stage specific life expectancy (e_{xj}) of brown planthopper under ambient CO₂ (aCO₂) and elevated CO₂ (eCO₂) concentrations

A. aCO₂-CK; B. aCO₂-LC₁₅; C. eCO₂-CK; D. eCO₂-LC₁₅.

CK: 未进行烯啶虫胺药剂处理; Egg: 卵期; Female: 雌虫; Male: 雄虫。

N1: 1 龄; N2: 2 龄; N3: 3 龄; N4: 4 龄; N5: 5 龄。下同。

CK: The treatment without nitenpyram; Egg: Egg stage; N1: 1st instar; N2: 2nd instar;

N3: 3rd instar; N4: 4th instar; N5: 5th instar. The same below.

表 3 当前 CO₂ (aCO₂) 和高 CO₂ (eCO₂) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度褐飞虱的种群参数

Table 3 Population parameters of the generation *Nilaparvata lugens* in response to nitenpyram's sublethal concentrations under ambient CO₂ (aCO₂) and elevated CO₂ (eCO₂) concentrations

种群参数 Population parameters	不同 CO ₂ 浓度 Different CO ₂ concentrations			
	aCO ₂ -CK	aCO ₂ -LC ₁₅	eCO ₂ -CK	eCO ₂ -LC ₁₅
内禀增长率 r (d ⁻¹) Intrinsic rate of increase (d ⁻¹)	0.195 0±0.006 3 a	0.174 1±0.006 6 b	0.187 0±0.006 4 ab	0.198 5±0.004 7 a
周限增长率 λ (d ⁻¹) Finite rate of increase (d ⁻¹)	1.215 3±0.007 6 a	1.190 2±0.007 9 b	1.205 6±0.007 7 ab	1.219 6±0.005 8 a
净繁殖率 R_0 Net reproduction rate of increase	181.7±29.3 ab	129.8±23.0 b	137.4±22.9 b	236.7±30.8 a
平均世代周期 T (d) Mean generation time (d)	26.7±0.2 b	28.0±0.2 a	26.3±0.3 b	27.5±0.3 a

rate, R_0) 下降, 差异不显著 ($P>0.05$); 高 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱净增殖率 (R_0) 显著增加 ($P<0.05$); 当前大气 CO_2 浓度和高 CO_2 浓度烯啶虫胺亚致死浓度处理后, 褐飞虱平均世代周期 (Mean generation time, T) 显著增加 ($P<0.05$)。结果显示高 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度利于褐飞虱种群增长, 再猖獗可能性较大, 加重对水稻的危害。

对当前大气 CO_2 浓度和高 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱的种群动态进行模拟 (图 2), 发现当前大气 CO_2 浓度下, 烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱的种群增长低于对照处理, 烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱种群增长有一定的遏制作用; 但高 CO_2 浓度下, 烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱的种群增长较对照处理加快, 促进其种群增长。

2.5 不同 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱特定年龄-龄期存活率 (s_{xj}) 的影响

对不同 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱的特定年龄-龄期存活率 (The age-stage

specific survival rate, s_{xj}) 作图 (图 3), 分析不同 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱寿命的影响。如图 3 所示, 当前大气 CO_2 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱存活率较对照处理下降但无显著差异 ($P>0.05$); 高 CO_2

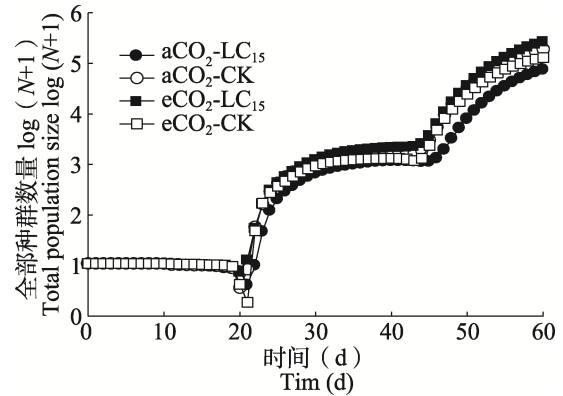


图 2 当前 CO_2 (aCO_2) 和高 CO_2 (eCO_2) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱的种群增长模拟

Fig. 2 Simulation of population growth of brown planthopper under sublethal concentrations of nitenpyram treatments under ambient CO_2 (aCO_2) and elevated CO_2 (eCO_2) concentrations

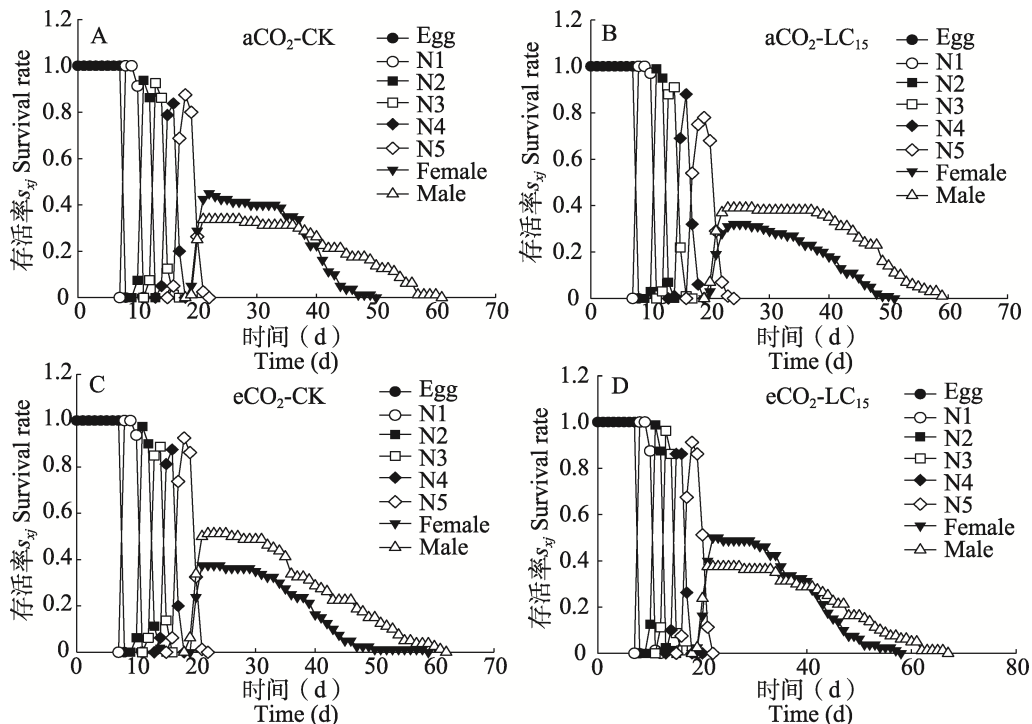


图 3 当前 CO_2 (aCO_2) 和高 CO_2 (eCO_2) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱特定年龄-龄期存活率 (s_{xj}) 的影响
Fig. 3 Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on the specific age-stage survival rate (s_{xj}) of brown planthopper under ambient CO_2 (aCO_2) and elevated CO_2 (eCO_2) concentration

A. aCO_2 -CK; B. aCO_2 -LC₁₅; C. eCO_2 -CK; D. eCO_2 -LC₁₅.

浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理后褐飞虱存活率较对照处理无显著差异 ($P>0.05$)。

2.6 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱特定年龄-龄期繁殖贡献 (v_{xj}) 的影响

对不同 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱特定年龄-龄期繁殖贡献 (Age-stage

specific reproductive value v_{xj}) 作图 (图 4), 结果表明高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱在繁殖高峰期时雌虫繁殖贡献值最高, 繁殖贡献值越高, 越有利于害虫的适合度和种群增长。本试验结果表明, 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱后可能有利于褐飞虱种群增长, 加重危害。

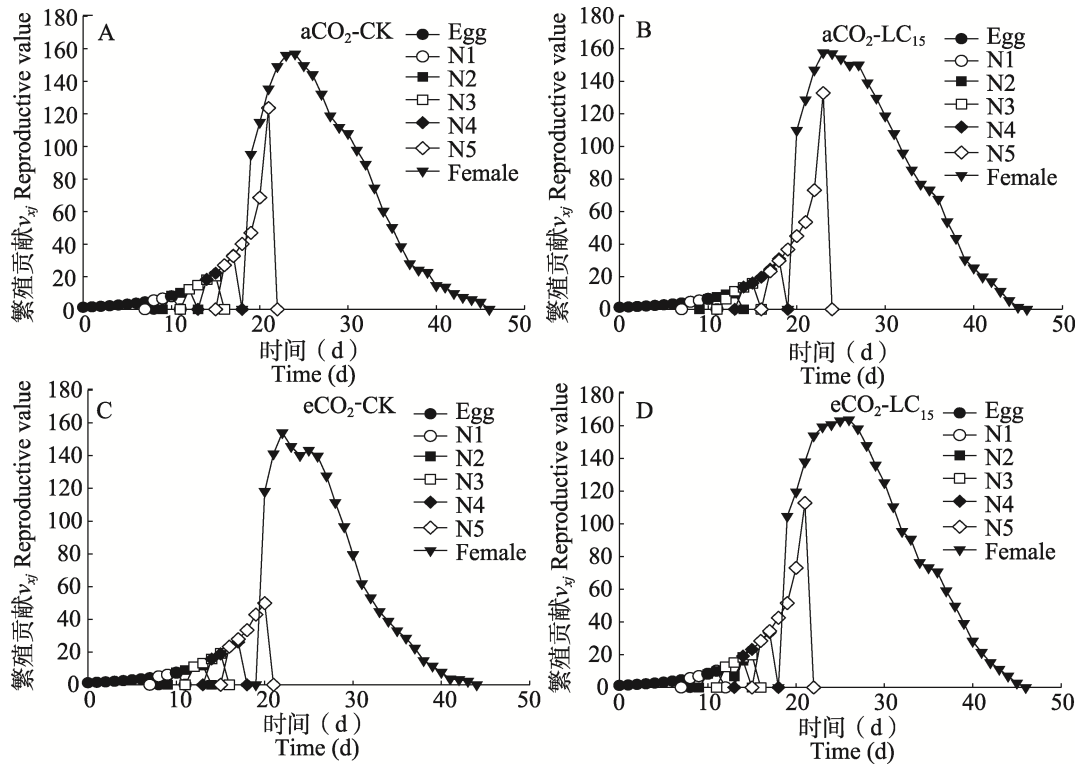


图 4 当前 CO₂ (aCO₂) 和高 CO₂ (eCO₂) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱特定年龄-龄期繁殖贡献 (v_{xj})
Fig. 4 Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on specific age-stage reproductive value (v_{xj}) of brown planthopper under ambient CO₂ (aCO₂) and elevated CO₂ (eCO₂) concentrations

A. aCO₂-CK; B. aCO₂-LC₁₅; C. eCO₂-CK; D. eCO₂-LC₁₅.

2.7 高 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理对褐飞虱特定年龄存活率和特定年龄繁殖力的影响

我们将特定年龄存活率和特定年龄龄期繁殖力结合作图 (图 5), 以便掌握褐飞虱随发育历期的增加其存活率及繁殖力的动态变化情况。从图 5 可以看出, 当前大气 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度处理褐飞虱, 在第 10-20 天区间内的特定年龄存活率 (The age-specific survival rate, l_x) 低于对照处理, 烯啶虫胺亚致死浓度处理对

褐飞虱的繁殖有一定的抑制作用。

3 讨论

大量试验结果显示全球气候变暖将导致昆虫分布区域扩大, 向高海拔和高纬度地区扩张 (Jespen *et al.*, 2011); 加快生长发育、增加发生世代 (Fand *et al.*, 2014); 大气 CO₂ 浓度升高将改变农业害虫的种间关系 (Sun *et al.*, 2009)、与寄主植物的关系 (Sun *et al.*, 2014) 以及与天敌的互作 (Sun *et al.*, 2011) 进而影响农业害虫

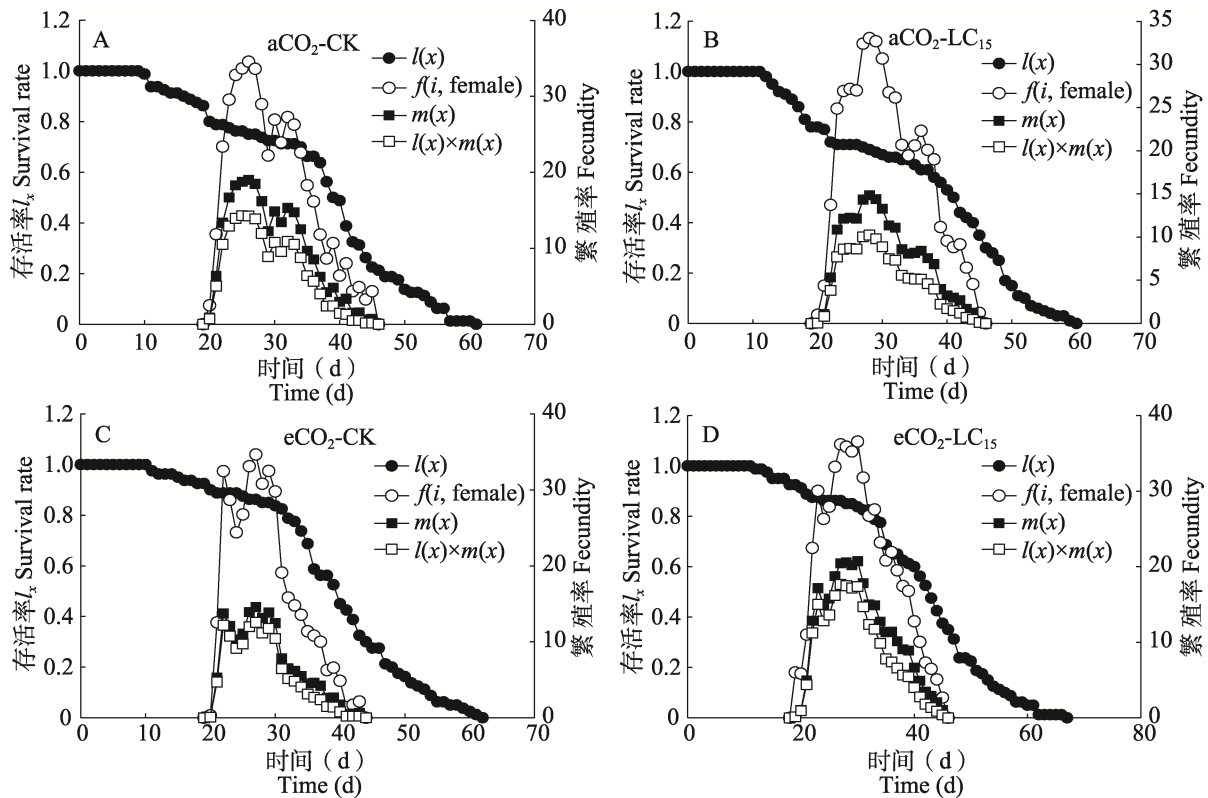


图5 当前 CO_2 (aCO_2) 和高 CO_2 (eCO_2) 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱特定年龄存活率 (L_x)、种群年龄特征繁殖力 (The age-specific fecundity, m_x) 和种群年龄特征净增殖率 ($L_x \times m_x$) 的影响
Fig. 5 Effects of sublethal concentrations of nitenpyram on the specific age-specific survival rate (L_x), age-specific fecundity (m_x) and age-specific maternity ($L_x \times m_x$) of brown planthopper under ambient CO_2 (aCO_2) and elevated CO_2 (eCO_2) concentrations

A. aCO_2 -CK; B. aCO_2 - LC_{15} ; C. eCO_2 -CK; D. eCO_2 - LC_{15} .

暴发危害程度。褐飞虱作为水稻主要害虫之一，其防控效果直接影响水稻的产量和经济效益。化学防治作为主要的防治手段，长期大量不合理使用药剂，褐飞虱抗药性逐年升高 (Wu *et al.*, 2018)。烯啶虫胺作为当前防治褐飞虱的主要药剂，预测未来大气 CO_2 浓度升高环境烯啶虫胺对褐飞虱的防治效果有重要意义，可为科学合理使用农药提供理论参考，而了解药剂的亚致死效应是评估其管理风险的关键环节 (刘宴弟等, 2021)。

杀虫剂亚致死浓度对昆虫的生长发育、生殖力和抗药性会产生不同程度的影响 (Desneux *et al.*, 2007)。杀虫剂亚致死浓度会对害虫生长发育产生不利影响，如亚致死浓度的氯虫苯甲酰胺和毒死蜱处理可显著降低甜菜夜蛾的化蛹率、蛹重、羽化率和雌虫产卵量，不利于甜菜夜蛾的

种群增长 (马冲等, 2012)。即使同一种药剂，不同的亚致死浓度处理或者是处理不同的世代也表现出不同的亚致死效应。研究发现，用亚致死浓度 LC_{25} 氟吡呋喃酮处理后， F_1 代桃蚜增殖力增加，但 F_2 代增殖力降低 (Tang *et al.*, 2019)。 LC_{10} 浓度噻虫嗪可显著增加桃蚜的繁殖，但 LC_{30} 浓度不利于桃蚜的生长发育和繁殖 (Wang *et al.*, 2017)。本研究发现，当前大气 CO_2 浓度下，烯啶虫胺亚致死浓度 LC_{15} 处理后褐飞虱繁殖力变化不大，内禀增长率和净增殖率下降，不利于其种群发展。但在高 CO_2 浓度下，烯啶虫胺亚致死浓度 LC_{15} 处理后褐飞虱繁殖力显著增加，净增殖率显著上升，利于其种群增长。

本试验结果表明，高 CO_2 浓度下褐飞虱对烯啶虫胺的敏感性降低，烯啶虫胺亚致死浓度下存在褐飞虱暴发的可能，应持续监测大气 CO_2 浓度

升高环境下褐飞虱对烯啶虫胺的敏感性变化。在大气 CO₂ 浓度不断升高环境下, 本试验结果对褐飞虱的防治具有一定的参考意义, 但未进行田间试验, 尚不清楚实际田间用药后会对褐飞虱生物学特性和抗药性会产生怎样的影响。另外, 烯啶虫胺的抗药性和褐飞虱 P450 多功能氧化酶和酯酶的活性有关 (Mao *et al.*, 2021), 气候变化下昆虫体内微生物和抗药性也存在相互作用 (Zhang *et al.*, 2021), 在倍增 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度连续处理褐飞虱后, 其体内解毒酶活性和微生物变化情况需要进一步研究, 以便为大气 CO₂ 浓度不断增加的气候条件下, 褐飞虱的科学防控和烯啶虫胺合理使用提供更多科学依据。

本研究结果表明, 当前大气 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度对褐飞虱的繁殖有一定的抑制作用, 不利于其种群增长; 倍增大气 CO₂ 浓度下烯啶虫胺亚致死浓度刺激褐飞虱繁殖, 延长其生命期望值, 可能促进种群的增长, 加重褐飞虱的危害程度。

参考文献 (References)

- Chi H, Liu H, 1985. Two new methods for study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology*, 24(2): 225–240.
- Chi H, 1988. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals. *Environmental Entomology*, 17 (1): 26–34.
- Chi H, 2017a. TWSEX-MSChart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, China. [RLhttp://140.120.197.173/Ecology/Download/CONSUME-MSChart.rar](http://140.120.197.173/Ecology/Download/CONSUME-MSChart.rar).
- Chi H, 2017b. TIMING-MSChart: A computer program for the population projection based on age-stage, two-sex life table. Chung Hsing University, Taichung, Taiwan, Chian. URL <http://140.120.197.173/Ecology/>.
- Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81–106.
- Fand BB, Tonnang HEZ, Kumar M, Bal SK, Singh NP, Rao DVKN, Kamble AL, Nangare DD, Minhas PS, 2014. Predicting the impact of climate change on regional and seasonal abundance of the mealybug *Phenacoccus solenopsis* Tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae) using temperature-driven phenology model linked to GIS. *Ecological Modelling*, 288: 62–78.
- Garrod WT, Zimmer CT, Gorman KJ, Nauen R, 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 F, Chen FJ, 2006. Impacts of elevated CO₂ on insects. *Acta Ecologica Sinica*, 26 (3): 935–944. [戈峰, 陈法军, 2006. 大气 CO₂ 浓度增加对昆虫的影响. *生态学报*, 26(3): 935–944.]
- Gong YH, Xu BY, Zhang YJ, Gao XW, Wu QJ, 2015. Demonstration of an adaptive response to preconditioning *Frankliniella occidentalis* (Pergande) to sublethal doses of spinosad: A hormetic-dose response. *Ecotoxicology*, 24(5): 1141–1151.
- Jepsen JU, Kapari L, Hagen SB, Schott T, Vindstad OPL, Nilssen AC, Ims RA, 2011. Rapid northwards expansion of a forest insect pest attributed to spring phenology matching with sub-Arctic birch. *Global Change Biology*, 17(6): 2071–2083.
- Kang ZW, Liu FH, Pang RP, Tian HG, Liu TX, 2018. Effect of sublethal doses of imidacloprid on the biological performance of aphid endoparasitoid *Aphidius gifuensis* (Hymenoptera: Aphidiidae) and influence on its related gene expression. *Front in Physiology*, 11(9): 1729.
- Liang YC, Hua HX, Zhu YG, Zhang J, Cheng CM, Römheld V, 2006. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. *New Phytologist*, 172(1): 63–72.
- Liu J, 2014. Effects of CO₂ enrichment on fitness performances of *Nilaparvata lugens* (Hemiptera:Delphacidae) on pest-resistant rice and with pesticide resistance. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [刘敬, 2014. CO₂ 浓度升高对抗药性褐飞虱和抗虫水稻上褐飞虱适合度的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Liu YD, Sun LN, Zhang HJ, Yan WT, Yue Q, Qiu GS, 2021. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the growth and development of *Carposina sasakii*. *Plant Protection*, 47(5): 158–163. [刘宴弟, 孙丽娜, 张怀江, 闫文涛, 岳强, 仇贵生, 2021. 氯虫苯甲酰胺对桃小食心虫生长发育的亚致死效应. *植物保护*, 47(5): 158–163.]
- Ma C, Lu XT, Liu Z, Ma SZ, Zhang TT, 2012. Sublethal effects of chlorantraniliprole and chlorpyrifos on the growth, development and fecundity of *Spodoptera exigua*. *Plant Protection*, 38(4): 38–41, 46. [马冲, 路兴涛, 刘震, 马士仲, 张田田, 2012. 氯虫苯甲酰胺、毒死蜱亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育和繁殖力的影响. *植物保护*, 38(4): 38–41, 46.]
- Mao KK, Ren ZJ, Li WH, Cai TW, Qin XY, Wan H, Jin BR, He S,

- Li JH, 2021. Carboxylesterase genes in nitenpyram-resistant brown planthoppers, *Nilaparvata lugens*. *Insect Science*, 28(4): 1049–1060.
- Ni JP, 2007. Optimization and application of dipping seedling method for controlling brown rice planthopper. *Pesticide Science and Administration*, 2007(8): 36–41. [倪珏萍, 2007. 褐飞虱室内活性测定法的优化与应用. *农药科学与管理*, 2007(8): 36–41.]
- Pan SF, Tian HQ, Dangal SRS, Zhang C, Yang J, Tao B, Ouyang ZY, Wang XK, Lu CQ, Ren W, Banger K, Yang QC, Zhang BW, Li X, 2014. Complex spatiotemporal responses of global terrestrial primary production to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century. *PLoS ONE*, 9(11): e112810.
- Sun YC, Feng L, Gao F, Ge F, 2011. Effects of elevated CO₂ and plant genotype on interactions among cotton, aphids and parasitoids. *Insect Science*, 18(4): 451–461.
- Sun YC, Chen FJ, Ge F, 2009. Elevated CO₂ changes interspecific competition among three species of wheat aphids: *Stobion avenae*, *Rhopalosiphum padi*, and *Schizaphis graminum*. *Environmental Entomology*, 38(1): 26–34.
- Sun YX, Liu TX, 2016. Effectiveness of imidacloprid in combination with a root nitrogen fertilizer applied to tomato seedlings against *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Crop Protection*, 80: 56–64.
- Tang QL, Ma KS, Chi H, Hou YM, Gao XW, 2019. Transgenerational hormetic effects of sublethal dose of flupyradifurone on the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). *PLoS ONE*, 14(1): e0208058.
- Thomson LJ, MacFadyen S, Hoffmann AA, 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52(3): 296–306.
- Wang P, Zhou LL, Yang F, Li M, Liu XM, Wang Y, Lei CL, Si SY, 2017. Sublethal effects of thiamethoxam on the demographic parameters of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). *Journal of Economic Entomology*, 110(4): 1750–1754.
- Wen D, 2018. The effects of different CO₂ concentrations on age-stage, two-sex life table and symbiotic bacteria diversity of *Nilaparvata lugens*. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [文栋, 2018. 不同 CO₂ 浓度对褐飞虱两性生命表及共生菌多样性的影响. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Wu JC, 2011. Mechanisms on pesticide-induced resurgence of pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(4): 799–803. [吴进才, 2011. 农药诱导害虫再猖獗机制. *应用昆虫学报*, 48(4): 799–803.]
- Wu SF, Zeng B, Zheng C, Mu XC, Zhang Y, Hu J, Zhang S, Gao CF, Shen JL, 2018. The evolution of insecticide resistance in the brown planthopper (*Nilaparvata lugens* Stål) of China in the period 2012–2016. *Scientific Reports*, 8(1): 45–66.
- Yang P, 2017. Study on the sensitivity of wing dimorphic brown planthopper to insecticides and sublethal effect of nitenpyram. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [杨鹏, 2017. 长短翅型褐飞虱对杀虫剂敏感性及烯啶虫胺亚致死效应研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]
- Zhang LY, Ruan CC, Hou ZG, Lu ZB, Wang XM, 2021. Effects of Sublethal concentration stress of three insecticides on the diffusion behavior of *Myzus persicae*. *Agrochemicals*, 60(2): 107–110, 114. [张莉娅, 阮长春, 侯志广, 逯忠斌, 王秀梅, 2021. 3种杀虫剂亚致死浓度胁迫对桃蚜扩散行为的影响. *农药*, 60(2): 107–110, 114.]
- Zhang XL, Liao X, Mao KK, Zhang KX, Wan H, Li JH, 2016. Insecticide resistance monitoring and correlation analysis of insecticides in field populations of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål) in China 2012–2014. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 132: 13–20.
- Zhang XL, Liao X, Mao KK, Yang P, Li DY, Alia E, Wan H, Li JH, 2017. The role of detoxifying enzymes in field-evolved resistance to nitenpyram in the brown planthopper *Nilaparvata lugens* in China. *Crop Protection*, 94: 106–114.
- Zhang YH, Cai TW, Ren ZJ, Liu Y, Yuan MJ, Cai YF, Yu C, Shu RH, He S, Li JH, Wong ACN, Wan H, 2021. Decline in symbiont-dependent host detoxification metabolism contributes to increased insecticide susceptibility of insects under high temperature. *ISME Journal*, 15(12): 3693–3703.
- Zheng XX, 2021. Studies on the correlation between symbiotic bacteria in brown planthopper and four insecticides under elevated CO₂. Master dissertation. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [郑晓旭, 2021. 高 CO₂ 浓度下褐飞虱体内共生菌与四种杀虫剂的相关性研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中农业大学.]