

稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟的杀卵作用*

郭嘉雯^{1**} 何晓婵^{2**} 成义沙^{1,3} AUNG Thura¹ 鲁艳辉¹
李文强^{1,4} 徐红星¹ 黄建雷⁴ 吴 俨³ 吕仲贤^{1***}

(1. 农产品质量安全危害因子与风险防控省部共建国家重点实验室, 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 杭州 310021; 2. 金华市农业科学研究院, 金华 321000; 3. 贵州省山地珍稀动物与经济昆虫重点实验室, 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵阳 550005; 4. 河北北方学院, 张家口 075000)

摘 要 【目的】明确稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的杀卵作用, 为科学安全高效防控稻纵卷叶螟提供理论依据。【方法】选用稻田主导的 8 种杀虫剂(氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻虫啉), 比较不同杀虫剂对不同日龄卵的毒杀效果及其对初孵幼虫存活和卵后续发育的影响。【结果】选择产后 1-4 日卵进行处理发现, 氯虫苯甲酰胺对卵的校正孵化抑制率在 10.42%-100.00% 之间, 杀卵活性最强。其中, 氯虫苯甲酰胺处理 1 日龄和 3 日龄卵时毒力较大 (LC_{50} 为 2.123 和 1.904 mg/L), 处理 1 日龄卵可导致卵无法正常发育成胚胎, 说明其在稻纵卷叶螟卵初产时防治更佳。吡虫啉对卵的校正孵化抑制率在 20.00%-91.67% 之间, 杀卵作用最强。3-4 日龄卵经吡虫啉处理后卵孵化受抑制, 此时期处理卵对稻纵卷叶螟的杀卵效果最好, 初孵幼虫的致死率更高, 说明其可在产卵 2 日后防治。【结论】8 种杀虫剂中氯虫苯甲酰胺对稻纵卷叶螟杀卵活性最强, 其在卵初产时处理杀卵效果最高, 吡虫啉和噻虫嗪对稻纵卷叶螟也具有一定杀卵作用, 其中吡虫啉的杀卵作用更强, 其更适宜处理产后 3-4 日龄卵。

关键词 稻纵卷叶螟; 卵发育; 杀虫剂; 毒力; 浸卵法

Ovicidal effect of primary insecticides on *Cnaphalocrocis medinalis* in paddy field

GUO Jia-Wen^{1**} HE Xiao-Chan^{2**} CHENG Yi-Sha^{1,3} AUNG Thura¹ LU Yan-Hui¹
LI Wen-Qiang^{1,4} XU Hong-Xing¹ HUNG Jian-Lei⁴ WU Yan³ LÜ Zhong-Xian^{1***}

(1. State Key Laboratory for Managing Biotic and Chemical Threats to the Quality and Safety of Agro-Products, Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Jinhua Academy of Agricultural Sciences, Jinhua 321000, China; 3. Guizhou Provincial Key Laboratory for Rare Animal and Economic Insect of the Mountainous Region, Department of Biology and Engineering of Environment, Guiyang University, Guiyang 550005, China; 4. Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract 【Objectives】To clarify the ovicidal effect of primary insecticides on the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*, in paddy fields and thereby provide a scientific basis for the safe and efficient control of this pest. 【Methods】The toxicity of eight primary insecticides (chlorantraniliprole, abamectin, chlorpyrifos, indoxacarb, imidacloprid, pymetrozine, thiamethoxam and thiazide) commonly used in rice fields was determined in a laboratory. The toxicity of these insecticides on *C. medinalis* eggs of different ages, and their effects on the survival of newly hatched larvae, were measured, and the effect of insecticides on the subsequent development of eggs was observed. 【Results】Chlorantraniliprole had a corrected egg hatching inhibition rate of 10.42%-100.00%, and had stronger ovicidal activity than abamectin, chlorpyrifos or indoxacarb. Chlorantraniliprole was most toxic to 1 and 3-day-old (LC_{50} 2.123 and 1.904 mg/L, respectively). Treatment soon after eggs

*资助项目 Supported projects: 浙江省自然科学基金 (LQ22C140006、LY20C140004); 国家水稻产业技术体系 (CARS-01)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: guojiawen91@126.com; 164607454@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: luzxmh@163.com

收稿日期 Received: 2022-06-10; 接受日期 Accepted: 2022-08-01

are laid can cause them to fail to develop normally and the age at which eggs were treated significantly affected the mortality of newly hatched larvae, indicating that it is better to treat eggs as soon as possible. The corrected hatching inhibition rate for imidacloprid ranged from 20.00% and 91.67%. Imidacloprid had stronger ovicidal effect than pymetrozine and thiamethoxam. Thiazide had the least ovicidal effect. Treating 3 to 4-day-old eggs with imidacloprid resulted in larvae developing normally but inhibited hatching. Treating eggs at this time achieved both the best ovicidal effect and the highest mortality among newly hatched larvae, indicating that imidacloprid should be applied 2 days after eggs have been laid. **[Conclusion]** Of the eight insecticides, chlorantraniliprole had the strongest ovicidal activity to the rice leaf folder, and its ovicidal effect was higher when applied to newly laid eggs. Imidacloprid and thiamethoxam had a lower ovicidal effect, but, of these imidacloprid had the stronger effect and can achieve good results when applied to eggs 3 to 4 days after laying.

Key words *Cnaphalocrocis medinalis*; egg development; insecticides; toxicity; egg dipping method

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 是水稻上最具破坏性的迁飞害虫之一,它通过幼虫取食和纵卷叶片影响水稻光合作用和生长,对水稻生产造成了严重损害(杨亚军等, 2015)。其发生范围很广,每年通过多次远距离迁飞造成大规模为害,造成的粮食产量损失 63%-80%,严重时甚至可造成绝产绝收(Yang *et al.*, 2018)。当稻纵卷叶螟幼虫发育至 3 龄时,其开始纵卷水稻叶片,取食量大幅增加,而由卵发育到 3 龄用时不到一周(陈萍等, 2021)。若防治不及时,易暴发成灾。目前,对稻纵卷叶螟的防治主要以化学防治为主,但随着化学药剂的频繁使用,稻纵卷叶螟幼虫对常用农药的抗药性不断加强(李增鑫等, 2021)。相对于 3 龄幼虫,稻纵卷叶螟卵暴露于叶片表面,更易被杀虫剂接触,如果能在卵期进行防治,即可降低卵的孵化率,大大降低田间虫口基数,又可延缓抗药性的产生。再配合适当的杀虫剂防治初孵幼虫,降低杀虫剂的使用量,可更加有效地防控稻纵卷叶螟对水稻的为害。

稻田主导使用的杀虫剂包括氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮。其中,氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱和茚虫威是当前田间用量较大的几类稻纵卷叶螟靶标杀虫剂(Zhang *et al.*, 2018);吡虫啉和噻虫嗪是已发现对稻纵卷叶螟幼虫也有一定毒力的靶向稻飞虱的杀虫剂(黄剑等, 1997; Chalapathi *et al.*, 2006; 刘宏等, 2008; 张帅等, 2014);吡蚜酮和噻嗪酮是稻田中常用于防治稻飞虱的主导杀虫剂,其在褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 及日本通草蛉 *Chrysoperla nipponensis* 等昆虫中

均有杀卵作用(邱光等, 1997; 王晓等, 2019)。目前对这些稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟杀虫活性的相关研究大多针对 2-3 龄幼虫(游泳等, 2007; 王世玉等, 2016),对其卵的毒杀能力仍知之甚少,尤其是卵期接触杀虫剂后是否会影响后续的卵发育仍不明确。

为了明确稻田主导的杀虫剂对稻纵卷叶螟的杀卵作用及其对卵发育的影响,本研究选用氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮对稻纵卷叶螟卵进行室内触杀试验,并进一步观察卵期用药后卵的后续生长发育情况,以期科学、安全、高效防控稻纵卷叶螟提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试虫源和小麦

本研究所用稻纵卷叶螟由浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所提供,该种群成虫采集于南京水稻田,幼虫利用小麦进行室内饲养(Guo *et al.*, 2019)。稻纵卷叶螟成虫置于 500 mL 透明塑料杯中,塑料杯底部预先装有用 5% 蜂蜜水浸润的脱脂棉,塑料杯顶部覆盖塑料膜供其产卵。待成虫产卵后收集卵块用于后续实验。所有试虫均饲养于人工气候箱(RXZ-380C-LED,宁波江南仪器厂)中,饲养温度为 $(26 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度为 80%-90%,光周期为 14L:10D。

供试小麦品种为浙丰 2 号(浙江农科种业有限公司)。小麦种子经浸泡 24 h 和催芽 24 h 后,播种于底部打孔的 350 mL 一次性塑料杯中。随

后, 放于人工气候箱 (RXZ-380C-LED, 宁波江南仪器厂) 中培养, 温湿度和光周期条件同试虫饲养条件。当小麦苗长至约 10 cm 高时用于试验。

1.2 供试药剂及仪器

选用 95% 氯虫苯甲酰胺 (武汉远城科技发展有限公司)、98% 阿维菌素 (河北威远生物化工有限公司)、98% 毒死蜱 (山东华阳化工有限公司)、99% 茚虫威 (陕西惠诚生物科技有限公司)、98.5% 吡虫啉 (青岛海利尔药业有限公司)、98.40% 吡蚜酮 (上海安谱实验科技股份有限公司)、97.9% 噻虫嗪 (济南绿霸化工有限公司) 和 95% 噻嗪酮 (江西正邦生物化工有限责任公司) 8 种杀虫剂原药。使用丙酮 (国药集团化学试剂有限公司) 将原药配制成母液。

Triton-X 100, 北京索莱宝科技有限公司; RXZ 型智能人工气候箱, 宁波江南仪器厂, KEYENCE 数码显微镜, 型号: VHX-950F, 基恩士 (中国) 有限公司。

1.3 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟卵和初孵幼虫的毒杀效果

采用浸卵法 (中华人民共和国农业部, 2006) 测定杀虫剂对稻纵卷叶螟卵的毒杀活性。用含有 0.1% Triton-X 100 水溶液将杀虫剂母液分别稀释。阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮分别稀释至 800.000、200.000、50.000、12.500、3.125 和 0.781 mg/L; 氯虫苯甲酰胺稀释至 800.000、200.000、50.000、12.500、3.125、0.781 和 0.195 mg/L, 以 0.1% Triton-X 100 水溶液为对照。收集 1-4 日龄卵进行毒杀活性测定, 将卵片分别在不同药液中浸渍 10 s 后用滤纸吸除多余的药液, 置于滤纸上自然晾干后放入 700 mL 塑料杯中。杯中放新鲜小麦叶片, 并于底部铺三层湿润的滤纸进行保湿。每个处理 20 粒卵, 每处理重复 3 次。处理完成后置于智能人工气候箱内 (同饲养条件)。使用 KEYENCE 数码显微镜每天观察稻纵卷叶螟卵的孵化情况, 将剩余空壳的卵数作为已孵化的卵数记为存活数, 将干瘪或者畸形的卵数作为未孵

化的卵数记为死亡数, 直至卵全部孵化或者死亡后计算卵的校正孵化抑制率。同时观察孵化幼虫的死亡情况, 直至幼虫长至 2 龄后停止观察, 将 2 龄前的幼虫记为初孵幼虫, 计算初孵幼虫校正死亡率。具体计算公式参考赵士文等 (2019)。

1.4 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟卵发育的影响

取初产的稻纵卷叶螟卵, 分别用 800 mg/L 的阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮浸渍 1-4 日龄卵, 具体浸渍方法见 1.3, 每处理 30 粒卵。以 0.1% Triton-X 100 水溶液浸渍的卵为对照。每天观察卵的发育情况直至卵死亡或孵化, 选择形态特征较为明显且稳定的卵利用配有数码显微系统的 KEYENCE 数码显微镜采集特征图像。

1.5 数据分析

试验所获数据以平均值 $\pm$ 标准误表示。使用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析, 采用 Tukey'HSD 法比较不同杀虫剂不同处理的卵校正孵化抑制率和初孵幼虫校正死亡率的差异显著性。采用回归分析法拟合卵的校正孵化抑制率与供试药剂浓度的关系, 得到毒力回归方程, 参照 Liao 等 (2021) 的方法计算致死中浓度 LC_{50} 、95% 置信限和相对毒力指数。毒力分析使用 Polo Plus 软件进行计算。

2 结果与分析

2.1 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟卵孵化的抑制作用

氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮的校正孵化抑制率分别在 10.42%-100.00%、18.75%-31.92%、2.08%-56.25%、2.08%-51.07%、20.00%-91.67%、5.88%-52.08%、12.50%-72.92% 和 2.00%-46.00% 之间 (表 1)。校正孵化抑制率随着氯虫苯甲酰胺浓度的升高而显著提高 ($P < 0.05$), 在浓度高于 3.125 mg/L 时, 卵的校正孵化抑制率随处理日龄的延迟而显著降低 ($P < 0.05$) (表 1)。这

表 1 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟不同日龄卵孵化的影响
Table 1 Effects of primary insecticides in paddy field on the hatching of different day-old *Cnaphalocrocis medinalis* eggs

杀虫剂 Insecticides	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	卵的校正孵化抑制率 (%) Corrected egg hatching inhibition rate (%)			
		1 日龄 1-day-old	2 日龄 2-day-old	3 日龄 3-day-old	4 日龄 4-day-old
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	0.195	12.50 ± 3.61 bA	20.00 ± 8.42 bA	19.15 ± 5.63 aA	10.42 ± 5.51 bA
	0.781	43.75 ± 13.01 abA	34.74 ± 11.72 abA	53.19 ± 11.85 aA	35.42 ± 12.67 abA
	3.125	47.92 ± 11.6 abA	45.26 ± 7.59 abB	57.45 ± 11.26 aAB	47.92 ± 4.17 abB
	12.500	85.42 ± 2.08 abA	53.68 ± 9.18 abB	61.70 ± 7.37 aAB	54.17 ± 5.51 abB
	50.000	85.42 ± 5.51 abA	55.79 ± 10.94 abA	72.34 ± 11.84 aA	56.25 ± 6.25 abB
	200.000	100.00 ± 0.00 aA	70.53 ± 11.14 aA	74.47 ± 11.06 aA	64.58 ± 7.51 aB
	800.000	100.00 ± 0.00 aA	74.74 ± 3.65 aAB	76.6 ± 9.28 aAB	72.92 ± 5.51 aB
阿维菌素 Abamectin	0.781	18.75 ± 9.55 aA	10.42 ± 5.51 aA	23.40 ± 6.38 aA	14.58 ± 5.51 aA
	3.125	22.92 ± 5.51 aA	10.42 ± 5.51 aA	19.15 ± 7.67 aA	10.42 ± 4.17 aA
	12.500	20.83 ± 7.51 aA	27.08 ± 7.51 aA	31.92 ± 2.13 aA	22.92 ± 7.51 aA
	50.000	31.25 ± 7.22 aA	22.92 ± 2.08 aA	36.17 ± 20.52 aA	12.50 ± 6.25 aA
	200.000	22.92 ± 8.33 aA	22.92 ± 5.51 aA	23.40 ± 7.37 aA	29.17 ± 14.58 aA
	800.000	14.58 ± 5.51 aA	16.67 ± 11.02 aA	21.28 ± 11.26 aA	22.92 ± 9.08 aA
毒死蜱 Chlorpyrifos	0.781	8.33 ± 2.08 aA	20.00 ± 2.11 aA	17.02 ± 3.68 aA	10.42 ± 4.17 bA
	3.125	4.17 ± 2.08 aA	7.37 ± 2.11 aA	38.30 ± 18.55 aA	20.83 ± 9.08 bA
	12.500	8.33 ± 5.51 aA	34.74 ± 2.10 aA	10.64 ± 3.68 aB	14.58 ± 5.51 bB
	50.000	2.08 ± 2.08 aB	36.84 ± 14.59 aA	21.28 ± 9.27 aA	8.33 ± 2.08 bA
	200.000	6.25 ± 3.61 aA	26.32 ± 9.18 aA	14.89 ± 5.63 aA	18.75 ± 9.55 bA
	800.000	18.75 ± 6.25 aA	38.95 ± 9.18 aA	42.56 ± 26.57 aA	56.25 ± 0.00 aA
茚虫威 Indoxacarb	0.781	2.08 ± 2.08 bA	2.08 ± 2.08 bA	4.26 ± 0.00 bA	2.08 ± 2.08 bA
	3.125	6.25 ± 3.61 bA	6.25 ± 3.61 bA	6.39 ± 2.13 bA	8.33 ± 2.08 bA
	12.500	10.42 ± 4.17 abA	10.42 ± 5.51 bA	12.77 ± 8.51 bA	12.50 ± 3.61 abA
	50.000	12.50 ± 6.25 abA	12.50 ± 9.55 bA	19.15 ± 9.27 abA	16.67 ± 10.42 abA
	200.000	22.92 ± 7.51 abA	22.92 ± 5.51 abA	23.40 ± 7.37 abA	25.00 ± 7.22 abA
	800.000	37.50 ± 13.01 aA	43.75 ± 9.55 aA	51.07 ± 11.26 aA	37.50 ± 3.61 aA
吡虫啉 Imidacloprid	0.781	20.83 ± 2.08 cA	20.00 ± 7.59 cA	38.30 ± 5.63 bA	20.83 ± 5.51 bA
	3.125	27.08 ± 2.08 bcA	28.42 ± 5.57 bcA	42.55 ± 3.69 bA	31.25 ± 10.83 bA
	12.500	29.17 ± 4.17 bcA	34.74 ± 12.81 bcA	51.06 ± 5.63 bA	37.50 ± 6.25 bA
	50.000	43.75 ± 6.25 bcA	41.05 ± 7.59 bcA	59.58 ± 7.67 bA	50.00 ± 13.01 bA
	200.000	50.00 ± 3.61 bA	57.90 ± 4.21 abA	63.83 ± 5.63 bA	54.17 ± 11.02 abA
	800.000	85.42 ± 5.51 aA	91.58 ± 2.10 aAB	91.49 ± 2.13 aA	91.67 ± 2.08 aA
吡蚜酮 Pymetrozine	0.781	50.00 ± 7.22 aA	5.88 ± 5.88 bB	8.51 ± 4.25 aB	10.42 ± 4.17 bB
	3.125	52.08 ± 11.60 aA	5.88 ± 3.39 bB	8.51 ± 4.25 aB	16.67 ± 5.51 abB
	12.500	52.08 ± 11.02 aA	7.84 ± 1.96 bB	8.51 ± 4.25 aB	16.67 ± 5.51 abB
	50.000	52.08 ± 11.02 aA	15.69 ± 5.19 bB	8.51 ± 4.25 aB	22.92 ± 5.51 abAB
	200.000	52.08 ± 12.67 aA	15.68 ± 7.07 abB	12.77 ± 4.25 aB	22.92 ± 9.08 abAB
	800.000	56.25 ± 9.55 aA	31.37 ± 5.19 aAB	17.02 ± 6.38 aB	35.42 ± 2.08 aAB

续表 1 (Table 1 continued)

杀虫剂 Insecticides	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	卵的校正孵化抑制率 (%) Corrected egg hatching inhibition rate (%)			
		1 日龄 1-day-old	2 日龄 2-day-old	3 日龄 3-day-old	4 日龄 4-day-old
噻虫嗪 Thiamethoxam	0.781	41.67 ± 9.08 aA	21.57 ± 1.96 aAB	14.89 ± 5.63 aB	12.50 ± 3.61 bB
	3.125	52.08 ± 5.51 aA	23.53 ± 3.39 aAB	17.02 ± 7.37 aB	16.67 ± 10.42 bB
	12.500	56.25 ± 7.22 aA	39.21 ± 20.47 aA	19.15 ± 5.63 aA	20.83 ± 2.08 abA
	50.000	64.58 ± 7.51 aA	66.67 ± 7.07 aA	23.40 ± 7.37 aB	41.67 ± 5.51 abAB
	200.000	66.67 ± 7.51 aA	68.63 ± 7.84 aA	40.42 ± 2.13 abB	66.67 ± 4.17 aAB
	800.000	72.92 ± 5.51 aA	70.59 ± 5.88 aA	65.96 ± 5.63 aA	66.67 ± 5.51 aA
噻嗪酮 Buprofezin	0.781	35.33 ± 17.75 aA	15.67 ± 8.45 abA	4.00 ± 0.00 bA	10.67 ± 5.61 bA
	3.125	43.67 ± 12.33 aA	10.00 ± 7.21 abB	6.33 ± 2.33 abB	13.00 ± 0.00 bAB
	12.500	10.33 ± 4.33 aA	15.67 ± 12.78 abA	14.67 ± 5.61 abA	12.67 ± 3.76 bA
	50.000	27.33 ± 11.46 aA	2.00 ± 2.00 bA	14.67 ± 5.61 abA	14.33 ± 8.33 bA
	200.000	18.67 ± 12.67 aA	8.00 ± 5.29 abA	23.33 ± 7.22 abA	31.67 ± 9.49 abA
	800.000	33.33 ± 2.33 aA	39.00 ± 2.00 aA	34.33 ± 11.79 aA	46.00 ± 5.29 aA

表中数据为平均数±标准误。同列数据后标有不同小写字母表示相同日龄下不同浓度杀虫剂处理之间经 Tukey’ HSD 检验在 0.05 水平差异显著; 同列数据后标有不同大写字母表示相同浓度下不同日龄经杀虫剂处理存在显著性差异 ($P < 0.05$, Tukey’s HSD)。表 3 同。

Data are mean ±SE, and followed by different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level by Tukey’s HSD test between treatments with different concentrations of insecticides at the same age, and followed by different uppercase letters indicate significant differences under the same concentration of different ages treated with pesticides ($P < 0.05$, Tukey’s HSD). The same as table 3.

些结果说明氯虫苯甲酰胺对卵孵化的抑制作用最好, 且卵初孵时抑制效果更佳, 吡虫啉对稻纵卷叶螟卵孵化的抑制作用比吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮强 (表 1)。但处理日龄和浓度对卵的校正孵化抑制率不同。处理 1 日龄时, 卵的校正孵化抑制率不受吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮浓度的显著影响, 但因吡虫啉处理浓度的增加显著升高 (表 1)。这些杀虫剂处理 2-4 日龄卵的校正孵化抑制率均随浓度增加而显著升高 ($P < 0.05$) (表 1)。但当处理浓度相同时, 吡虫啉处理 3-4 日龄卵的校正孵化抑制率最高 (表 1)。综合以上结果表明, 对稻纵卷叶螟卵孵化的抑制作用较为显著的杀虫剂分别是氯虫苯甲酰胺和吡虫啉。氯虫苯甲酰胺对稻纵卷叶螟初产卵的孵化抑制作用最强, 而吡虫啉抑制 3-4 日龄卵孵化的能力较强。

2.2 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟卵的毒力水平

利用稻田主导的杀虫剂处理稻纵卷叶螟卵

后发现, 氯虫苯甲酰胺对卵的毒力最高, LC_{50} 分别为 2.123、9.113、1.904 和 14.195 mg/L, 阿维菌素、毒死蜱和茚虫威处理不同日龄卵的毒力均较低 ($LC_{50} > 800$ mg/L) (表 2)。吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮对卵的毒杀效果随着处理日龄不同而变化。处理为 1 日龄和 2 日龄时, 噻虫嗪对卵的毒力最高 LC_{50} 分别为 3.036 mg/L 和 36.445 mg/L, 其次是吡虫啉, LC_{50} 分别为 61.717 mg/L 和 42.023 mg/L (表 2)。但处理 3 日龄和 4 日龄时, 吡虫啉对卵的毒力高于噻虫嗪。不管处理日龄如何变化, 吡蚜酮和噻嗪酮对卵的毒力非常低 ($LC_{50} > 800$ mg/L) (表 2)。氯虫苯甲酰胺处理 1-4 日龄卵的相对毒力指数分别为 1.43、4.00、163.43 和 7.31, 远高于吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理组。茚虫威处理 1-4 日龄卵的相对毒力指数远低于噻虫嗪处理组。这些结果说明氯虫苯甲酰胺对稻纵卷叶螟杀卵作用最好, 吡虫啉对稻纵卷叶螟也具有明显的杀卵作用。

表 2 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟不同日龄卵的毒力

Table 2 Toxicity of primary insecticides in paddy field against different day-old eggs of *Cnaphalocrocis medinalis*

杀虫剂 Insecticides	卵日龄 (d) Egg age (d)	致死中浓度 (95%置信限) LC ₅₀ (95% FI) (mg/L)	卡方值 χ^2	毒力回归方程 Toxicity regression equation	相对毒力指数 Relative toxicity
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	1	2.123 (0.527-5.175)	9.31	$y=0.20+1.04x$	1.43
	2	9.113 (1.432-37.355)	0.82	$y=0.21+0.31x$	4.00
	3	1.904 (0.085-9.832)	5.02	$y=0.21+0.34x$	163.43
	4	14.195 (3.773-44.614)	4.73	$y=0.20+0.39x$	7.31
阿维菌素 Abamectin	1	—	2.51	—	—
	2	—	3.30	—	—
	3	—	3.22	—	—
	4	—	2.68	—	—
毒死蜱 Chlorpyrifos	1	—	2.22	—	—
	2	—	6.33	—	—
	3	—	12.13	—	—
	4	—	11.92	—	—
茚虫威 Indoxacarb	1	—	0.325	—	—
	2	—	0.670	—	—
	3	—	1.708	—	—
	4	—	0.203	—	—
吡虫啉 Imidacloprid	1	61.717 (10.489-491.249)	7.40	$y=0.20+0.57x$	0.05
	2	42.023 (5.328-234.665)	8.81	$y=0.21+0.65x$	0.15
	3	8.304 (0.289-36.702)	5.96	$y=0.22+0.45x$	37.47
	4	33.737 (3.734-202.238)	8.94	$y=0.20+0.60x$	3.08
吡蚜酮 Pymetrozine	1	—	0.12	—	—
	2	—	0.91	—	—
	3	—	0.27	—	—
	4	—	0.57	—	—
噻虫嗪 Thiamethoxam	1	3.036 (0.061-13.191)	0.28	$y=0.20+0.26x$	1.00
	2	36.445 (7.703-163.898)	5.70	$y=0.20+0.53x$	1.00
	3	311.164 (85.971-11 014.333)	4.25	$y=0.20+0.51x$	1.00
	4	103.783 (52.077-231.853)	3.07	$y=0.20+0.63x$	1.00
噻嗪酮 Buprofezin	1	—	10.27	—	—
	2	—	13.28	—	—
	3	—	0.33	—	—
	4	—	2.01	—	—

x: 杀虫剂剂量的常用对数值; y: 死亡率转换的概率值。—表示无法根据卵的校正孵化抑制率与杀虫剂浓度计算获得相应数值。

x: Common logarithm of dose; y: Mortality rate is converted into the probability value. — indicates that the corresponding value could not be obtained from the calculation of the corrected hatching inhibition rate of the eggs with the insecticide concentration.

2.3 稻田主导杀虫剂处理稻纵卷叶螟卵对其初孵幼虫存活的影响

氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理卵后初孵幼虫校正死亡率分别为 62.21%-100%、62.55%-100%、22.15%-93.60%、21.17%-91.53%、36.50%-100%、16.84%-100%、37.56%-100%和 19.68%-100%。氯虫苯甲酰胺和阿维菌素处理卵的初孵幼虫校正死亡率相对较高(表 3)。相同浓度下,阿维菌素和茚虫威不同日龄处理卵对初孵幼虫

校正死亡率没有显著影响($P > 0.05$),但处理浓度在 3.125 mg/L 及以下时,氯虫苯甲酰胺和毒死蜱卵处理日龄越晚,初孵幼虫校正死亡率相对越高($P < 0.05$)。虽然低浓度吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理卵后的初孵幼虫校正死亡率因处理日龄不同而有所差异,但不同浓度和不同处理日龄下其初孵幼虫校正死亡率绝大多数超过 50%,高浓度处理高日龄卵时,甚至高达 100%(表 3),说明吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理卵对其初孵幼虫均有一定的毒杀作用。

表 3 稻田主导杀虫剂处理不同日龄稻纵卷叶螟卵对其初孵幼虫的校正死亡率的影响
Table 3 Effects of primary insecticides in paddy field treated eggs at different ages on corrected mortality rate of newly hatched larvae of *Cnaphalocrocis medinalis*

杀虫剂 Insecticides	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	初孵幼虫校正死亡率 (%) Corrected mortality rate of newly hatched larvae (%)			
		1 日龄 1-day-old	2 日龄 2-day-old	3 日龄 3-day-old	4 日龄 4-day-old
氯虫苯甲酰胺 Chlorantraniliprole	0.195	77.68 ± 6.55 abA	78.64 ± 4.93 aA	74.10 ± 1.46 aA	78.95 ± 6.78 aA
	0.781	62.21 ± 4.39 bB	62.74 ± 7.21 aAB	91.85 ± 8.15 aA	71.83 ± 5.58 aAB
	3.125	74.03 ± 4.52 abB	76.97 ± 8.28 aB	88.05 ± 6.51 aAB	95.02 ± 4.98 aA
	12.500	100.00 ± 0.00 aA	81.63 ± 18.37 aA	79.46 ± 13.07 aA	100.00 ± 0.00 aA
	50.000	100.00 ± 0.00 aA	95.41 ± 4.59 aA	94.40 ± 5.60 aA	100.00 ± 0.00 aA
	200.000	—	100.00 ± 0.00 aA	93.60 ± 6.40 aA	100.00 ± 0.00 aA
	800.000	—	73.98 ± 15.98 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA
阿维菌素 Abamectin	0.781	62.55 ± 7.88 bA	78.43 ± 6.95 aA	48.98 ± 15.12 aA	71.08 ± 14.48 aA
	3.125	84.38 ± 4.87 abA	93.85 ± 3.10 aA	89.21 ± 0.96 aA	83.68 ± 7.36 aA
	12.500	96.13 ± 3.87 abA	85.99 ± 8.55 aA	95.93 ± 4.07 aA	96.80 ± 3.20 aA
	50.000	91.27 ± 4.57 abA	88.52 ± 6.63 aA	81.74 ± 7.73 aA	100.00 ± 0.00 aA
	200.000	100.00 ± 0.00 aA	93.44 ± 6.56 aA	87.30 ± 7.80 aA	100.00 ± 0.00 aA
	800.000	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA
毒死蜱 Chlorpyrifos	0.781	42.53 ± 11.05 abAB	24.05 ± 4.67 bB	56.05 ± 11.66 aAB	65.75 ± 5.42 aA
	3.125	26.51 ± 19.34 abA	22.15 ± 9.77 bA	53.19 ± 26.12 aA	51.85 ± 7.30 aA
	12.500	18.62 ± 8.72 bA	55.33 ± 12.45 abA	21.34 ± 18.66 aA	66.49 ± 5.68 aA
	50.000	55.71 ± 17.95 abA	61.51 ± 20.29 abA	31.28 ± 11.95 aA	39.18 ± 14.43 aA
	200.000	54.30 ± 13.42 abA	55.72 ± 8.09 abA	50.76 ± 21.57 aA	43.02 ± 21.80 aA
	800.000	85.83 ± 2.97 aA	88.85 ± 5.83 aA	86.96 ± 2.62 aA	93.60 ± 6.40 aA
茚虫威 Indoxacarb	0.781	34.63 ± 10.99 bA	21.17 ± 7.27 bA	64.15 ± 18.66 aA	42.49 ± 8.60 aA
	3.125	34.60 ± 7.25 bA	37.82 ± 19.35 bA	45.58 ± 18.20 aA	59.67 ± 14.40 aA
	12.500	55.25 ± 6.86 bA	50.55 ± 19.43 abA	45.95 ± 13.51 aA	53.02 ± 19.49 aA
	50.000	31.94 ± 15.38 abA	40.93 ± 15.49 abA	51.39 ± 4.18 aA	35.76 ± 15.16 aA
	200.000	57.46 ± 6.94 abA	24.31 ± 8.59 abA	26.06 ± 13.99 aA	50.49 ± 24.51 aA
	800.000	91.53 ± 4.53 aA	91.23 ± 4.40 aA	82.89 ± 8.58 aA	84.05 ± 2.49 aA

续表 3 (Table 3 continued)

杀虫剂 Insecticides	浓度 (mg/L) Concentration (mg/L)	初孵幼虫校正死亡率 (%) Corrected mortality rate of newly hatched larvae (%)			
		1 日龄 1-day-old	2 日龄 2-day-old	3 日龄 3-day-old	4 日龄 4-day-old
吡虫啉 Imidacloprid	0.781	63.40 ± 3.22 aA	43.85 ± 10.38 bA	47.85 ± 7.93 abA	41.98 ± 19.05 aA
	3.125	54.99 ± 25.59 aA	47.69 ± 6.16 bA	36.51 ± 16.28 bA	95.93 ± 4.07 aA
	12.500	65.19 ± 20.10 aA	63.26 ± 3.65 abA	48.96 ± 12.26 abA	46.47 ± 4.49 aA
	50.000	60.97 ± 24.04 aA	52.23 ± 7.45 bA	88.80 ± 11.20 abA	86.87 ± 7.11 aA
	200.000	88.21 ± 6.03 aA	73.21 ± 13.80 abA	81.33 ± 9.88 abA	100.00 ± 0.00 aA
	800.000	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA	—
吡蚜酮 Pymetrozine	0.781	68.67 ± 15.95 bA	91.91 ± 4.58 aA	90.12 ± 5.99 aA	62.77 ± 23.49 aA
	3.125	85.56 ± 8.06 bA	87.88 ± 3.46 aA	88.05 ± 7.91 aA	86.10 ± 4.27 aA
	12.500	77.45 ± 11.79 abA	90.88 ± 0.20 aA	71.73 ± 5.35 aA	90.29 ± 5.23 aA
	50.000	58.77 ± 17.51 abA	90.39 ± 5.20 aA	90.58 ± 0.46 aA	88.12 ± 7.06 aA
	200.000	75.74 ± 12.17 abA	86.91 ± 2.48 aA	86.67 ± 3.70 aA	88.05 ± 6.51 aA
	800.000	16.84 ± 15.83 aB	91.58 ± 4.32 aA	93.60 ± 3.20 aA	91.04 ± 4.48 aA
噻虫嗪 Thiamethoxam	0.781	37.56 ± 10.14 aB	85.36 ± 3.66 aA	57.37 ± 10.13 aAB	74.08 ± 4.05 aA
	3.125	61.98 ± 5.43 aA	88.41 ± 6.87 aA	44.82 ± 19.82 aA	82.07 ± 8.96 aA
	12.500	38.11 ± 7.73 aA	75.12 ± 12.47 aA	59.86 ± 12.48 aA	67.82 ± 16.21 aA
	50.000	79.11 ± 10.63 aA	84.53 ± 8.33 aA	92.53 ± 3.95 aA	100.00 ± 0.00 aA
	200.000	76.79 ± 13.40 aA	88.10 ± 11.90 aA	91.04 ± 8.96 aA	100.00 ± 0.00 aA
	800.000	84.53 ± 15.47 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA	100.00 ± 0.00 aA
噻嗪酮 Buprofezin	0.781	62.70 ± 18.77 aA	89.43 ± 6.99 aA	28.30 ± 18.66 aA	79.59 ± 12.14 aA
	3.125	72.97 ± 17.46 aA	82.48 ± 13.74 aA	44.73 ± 6.51 aA	83.99 ± 16.01 aA
	12.500	75.96 ± 15.70 aA	69.48 ± 11.31 aAB	20.02 ± 14.37 aB	100.00 ± 0.00 aA
	50.000	59.26 ± 17.49 aA	81.58 ± 9.32 aAB	19.68 ± 7.47 aB	82.07 ± 17.93 aA
	200.000	52.55 ± 9.84 aA	81.35 ± 6.67 aA	35.55 ± 27.45 aA	91.04 ± 8.96 aA
	800.000	77.64 ± 9.70 aA	76.64 ± 5.19 aA	74.21 ± 5.60 aA	100.00 ± 0.00 aA

2.4 稻田主导杀虫剂对稻纵卷叶螟卵发育的影响

未经杀虫剂处理的对照组稻纵卷叶螟卵初产时呈半透明乳白色,卵内有大量卵黄颗粒(图 1: A)。在卵产后第 1-2 天,卵粒中心逐渐透明,隐约可见卵黄沉积的黄色环形(图 1: B)。卵产后 2-3 d 之后,卵粒中心半透明面积增加呈现镜面对称的两个浅黄色 G 字型(图 1: C)。在卵产后 3-4 d,头部、胸部和腹部逐渐开始分节,黑色单眼隐约可见(图 1: D)。产后 4-5 d,卵粒中央可见形成的头,头上有黑色单眼和褐色的口器,头壳为深褐色(图 1: E)。胚胎逐渐成熟,至产后 4-5 d 后进入器官形成期,卵粒中头部清晰可见,口器顶端深棕色末端棕色,躯体已经发

育完整,能明显观察到体内液体的流动,幼虫在卵中开始小幅运动(图 1: F)。发育成熟后通过咬破卵壳钻出离开,留下透明卵壳。

稻纵卷叶螟 1 日龄卵经稻田主导杀虫剂处理后发现,不同杀虫剂处理死亡卵形态特征各不相同(图 2)。氯虫苯甲酰胺组药后第 1-2 天卵与对照组形态特征无明显差异,但药后第 3 天卵黄颜色明显加深,药后第 4 天卵黄异常收缩后卵死亡(图 2: A);阿维菌素和茚虫威组药后第 2 天卵终止发育直接干瘪死亡(图 2: E, M);毒死蜱组药后第 3 天卵黄失水呈龟裂状后死亡(图 2: I);吡虫啉、吡蚜酮和噻虫嗪组卵死亡形态特征相似,都显示药后第 2 天卵黄因逐渐失水皱缩后,卵干瘪死亡(图 3: A, E, I),而噻嗪酮组

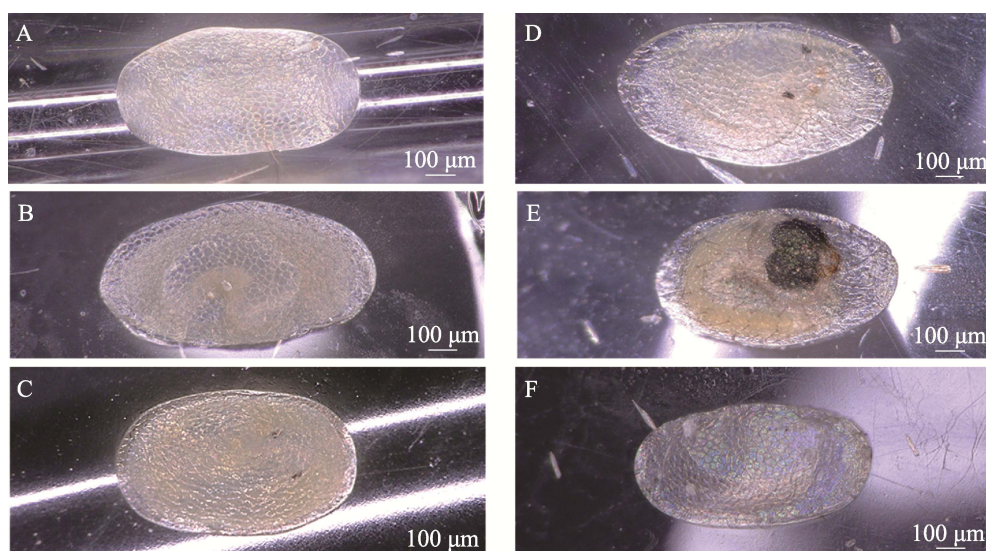


图 1 稻纵卷叶螟卵发育过程的形态特征

Fig. 1 Morphological characteristics of egg development of *Cnaphalocrocis medinalis*

A-F. 分别为稻纵卷叶螟第 1-6 天的卵。

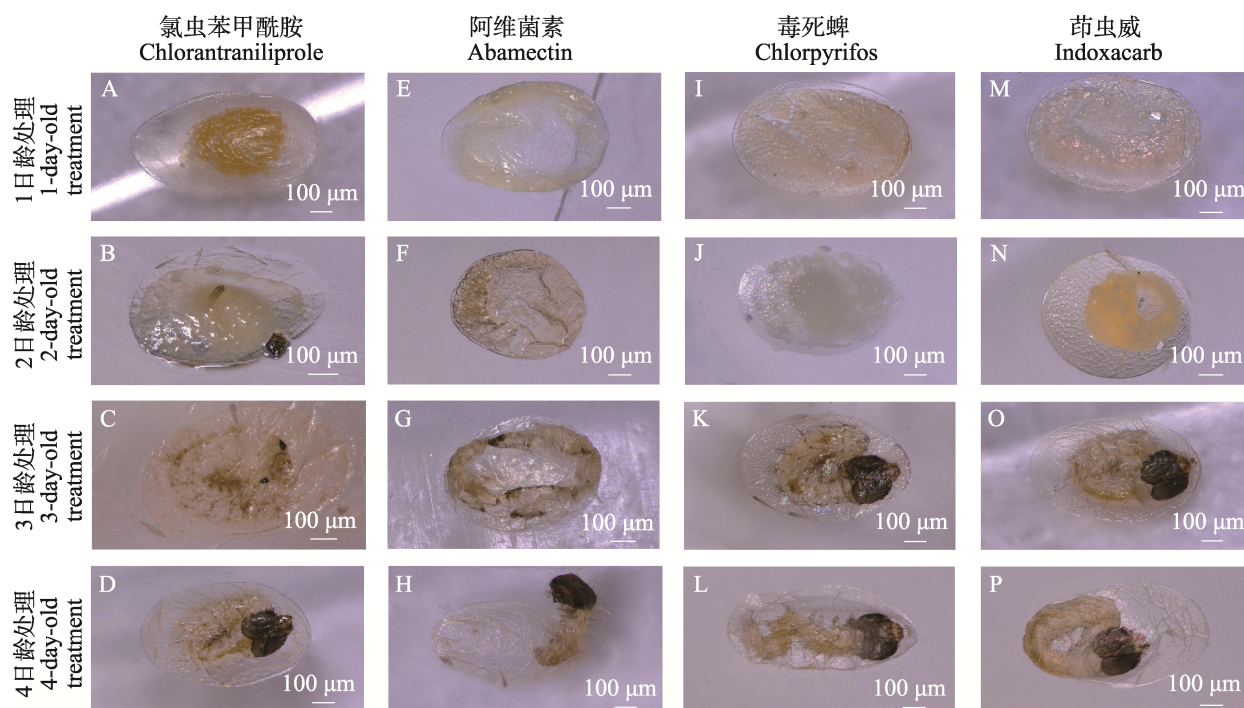
A-F. The *C. medinalis* eggs from the first day to the sixth day after laying, respectively.

图 2 氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、毒死蜱和茚虫威处理后死亡卵的形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of dead eggs treated by chlorantraniliprole, abamectin, chlorpyrifos and indoxacarb

A-D. 分别为 1-4 日龄氯虫苯甲酰胺处理后死亡卵；E-H. 分别为 1-4 日龄阿维菌素处理后死亡卵；

I-L. 分别为 1-4 日龄毒死蜱处理后死亡卵；M-P. 分别为 1-4 日龄茚虫威处理后死亡卵。

A-D. Dead eggs after 1 to 4-day-old chlorantraniliprole treatment, respectively; E-H. Dead eggs after 1 to 4-day-old avermectin treatment, respectively; I-L. Dead eggs after 1 to 4-day-old chlorpyrifos treatment, respectively;

M-P. Dead eggs after 1 to 4-day-old indoxacarb treatment, respectively.

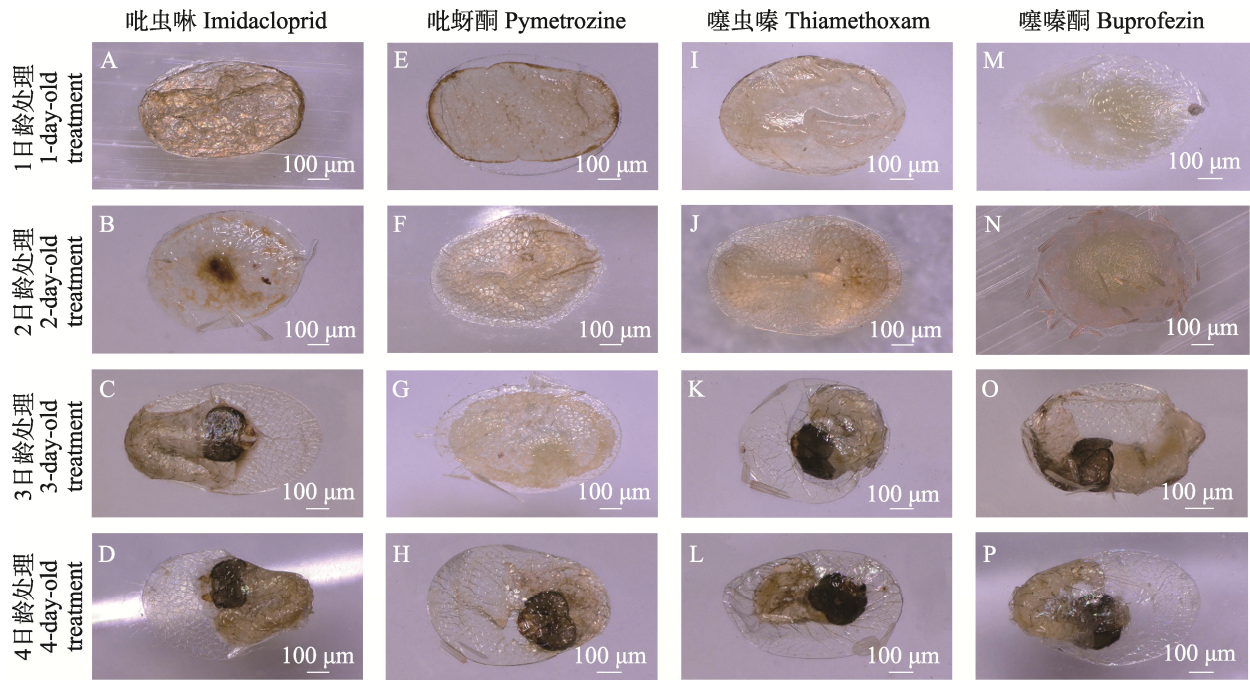


图 3 吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理后死亡卵的形态特征

Fig. 3 Morphological characteristics of dead eggs treated by imidacloprid, pymetrozine, thiamethoxam and thiazide

A-D. 分别为 1-4 日龄吡虫啉处理后死亡卵；E-H. 分别为 1-4 日龄吡蚜酮处理后死亡卵；

I-L. 分别为 1-4 日龄噻虫嗪处理后死亡卵；M-P. 分别为 1-4 日龄噻嗪酮处理后死亡卵。

A-D. Dead eggs after 1 to 4-day-old imidacloprid treatment, respectively; E-H. Dead eggs after 1 to 4-day-old pymetrozine treatment, respectively; I-L. Dead eggs after 1 to 4-day-old thiamethoxam treatment, respectively;

M-P. Dead eggs after 1 to 4-day-old thiazide treatment, respectively.

药后第 2 天卵黄不规则结团后不再发育死亡(图 3: M)。8 种杀虫剂处理 2 日龄卵后, 氯虫苯甲酰胺和茚虫威组卵药后第 3 天卵黄逐渐收缩形成团状后死亡(图 2: B, N); 阿维菌素组药后第 3 天卵黄向卵周边散开, 卵失水干瘪死亡(图 2: F); 毒死蜱组药后第 2 天卵黄呈云絮状四散不成型后干瘪死亡(图 2: J); 吡虫啉组药后第 2 日卵黄开始呈现不规则颜色加深, 直至药后第 4 天卵黄皱缩死亡(图 3: B); 吡蚜酮和噻虫嗪组药后第 3 天卵出现凹陷后停止发育死亡(图 3: F); 噻嗪酮组药后第 2 天卵颜色逐渐加深, 药后第 3 日卵黄凝结成团聚于卵中心呈黄球状(图 3: N)。3 日龄卵经杀虫剂处理后, 氯虫苯甲酰胺和阿维菌素组药后第 2 天卵中头部、胸部和腹部分节不如对照组明显, 尤其阿维菌素组卵内虽隐约可见虫形但头部、胸部和腹部没有清晰分节, 且发育停止随后干瘪不再孵化(图 2: C, G); 毒死蜱和茚虫威组卵仍能发育至幼虫成型, 但未见

幼虫破壳(图 2: K, O)。吡虫啉、噻虫嗪和噻嗪酮组的卵发育基本相似, 均发育至幼虫成型, 但未见破壳现象(图 3: C, K, O); 吡蚜酮组药后第 3 天虫体发育慢于对照组, 仅隐约可见眼和虫体部分轮廓, 但此后不再发育死亡(图 3: G)。8 种杀虫剂对 4 日龄卵发育没有明显影响, 此时幼虫已基本发育成型, 但吡虫啉组在未破卵壳时便有部分死亡, 而其他杀虫剂处理组成型幼虫死亡多在咬破卵壳时(图 2: D, H, L, P; 图 3: D, H, L, P)。然而, 吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理 1-2 日龄卵死亡较少, 而 3-4 日龄卵处理后多数是破壳时死亡。

3 讨论

本研究对利用稻田主导的 8 种杀虫剂分别处理稻纵卷叶螟 1-4 日龄卵后发现, 对稻纵卷叶螟幼虫有防治效果的杀虫剂不一定具有杀卵活性, 而吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮等稻飞

虱靶标杀虫剂对稻纵卷叶螟具有杀卵作用, 且其毒杀效果与处理日龄也密切相关。然而, 不同杀虫剂处理对卵发育作用存在差异。

本研究所用 8 种杀虫剂均具有触杀作用, 其中吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮还具有内吸活性 (伍一军和冷欣夫, 2003; Hannig *et al.*, 2010), 但这些杀虫剂对稻纵卷叶螟卵的毒杀效果具有明显差异。氯虫苯甲酰胺和吡虫啉对稻纵卷叶螟卵的毒杀效果较好, 毒力最强; 阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮对稻纵卷叶螟卵也具有一定的毒杀作用, 但毒杀效果相对较弱。氯虫苯甲酰胺主要作用于昆虫的鱼尼丁受体, 会引起细胞内钙库中的钙离子过度释放, 钙离子信号调节许多细胞和生理过程, 对卵黄生成也有一定影响 (Brown *et al.*, 2010; Doğan *et al.*, 2021)。结合氯虫苯甲酰胺处理对稻纵卷叶螟卵发育的影响, 推测其可能激活鱼尼丁受体影响钙离子释放从而抑制卵黄生成和幼虫发育。虽然吡虫啉、噻虫嗪和毒死蜱均作用于昆虫乙酰胆碱受体 (伍一军和冷欣夫, 2003), 但其对卵的毒杀作用不同, 这可能是由于这类杀虫剂所作用的乙酰胆碱受体的位点不同。然而, 这些杀虫剂对不同昆虫卵的毒杀作用不同。在草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 中发现, 氯虫苯甲酰胺对其卵也具有较强的毒杀作用, 但与稻纵卷叶螟不同的是阿维菌素对草地贪夜蛾的杀卵活性高 (林玉英等, 2020)。而对桃小食心虫 *Carposina niponensis* 的研究却未发现氯虫苯甲酰胺杀卵作用, 但阿维菌素和茚虫威对桃小食心虫卵毒力较低, 毒死蜱杀卵毒力较高 (于欣等, 2012)。在小地老虎 *Agrotis ypsilon* 中发现茚虫威对卵有较高的杀虫活性 (武海斌等, 2013)。但与稻纵卷叶螟不同的是, 在褐飞虱中发现, 毒死蜱对卵有效, 但吡蚜酮无明显杀卵活性 (何佳春等, 2019)。这可能与不同昆虫对不同杀虫剂敏感性不同有关。

本研究发现处理日龄不同会影响不同杀虫剂的杀卵活性。氯虫苯甲酰胺处理稻纵卷叶螟 1 日龄卵时, 其孵化抑制率更高。值得注意的是, 2 日龄卵的致死中浓度比 1 日龄和 3 日龄均高。结合杀虫剂处理后对卵发育的结果来看, 稻纵卷

叶螟卵壳的组成可能易于氯虫苯甲酰胺渗透, 1 日龄时胚胎可能未形成保护物质或保护结构即被毒杀。2 日龄原肠形成时保护物质可能逐渐形成, 使得该日龄致死中浓度较高。而后 3 日龄进入神经系统发育时期, 由于氯虫苯甲酰胺作用于鱼尼丁受体, 可能对突触神经递质的释放和生物信号的跨膜传递造成的影响较大, 可能对氯虫苯甲酰胺敏感性较 2 龄高。4 日龄处理的卵未孵化情况大多是幼虫发育成型破壳时死亡, 是直接作用于幼虫。但氯虫苯甲酰胺对不同日龄的作用差异还需进一步研究分析以明确氯虫苯甲酰胺对稻纵卷叶螟卵的毒杀机制。吡虫啉对 1-2 日龄卵的毒杀作用无显著差异, 但对 3-4 日龄卵毒力稍强, 这可能与吡虫啉作用机制有关。吡虫啉主要作用于昆虫突触后膜的烟碱型乙酰胆碱受体, 干扰害虫运动神经系统使化学信号传递失灵 (Belzunces *et al.*, 2012)。在粘虫 *Mythimna separata* 中发现神经系统发生并不是在产卵初期而是在原肠发生之后 (王进忠等, 1997)。进一步对杀虫剂处理后的稻纵卷叶螟卵发育观察发现, 吡虫啉处理的 3-4 日龄卵虽然都可以发育至幼虫成型, 但都无法咬破卵壳直接在卵中死亡。更有趣的是, 吡虫啉 3 日龄处理 LC_{50} 最小, 该时期神经系统正在逐步形成, 此时期的卵可能对吡虫啉相较于其他日龄时更敏感。吡虫啉在不同日龄处理稻纵卷叶螟卵的毒杀作用不同的原因可能与胚胎发育进度有关, 但还需进一步研究。本研究虽然也观察到了阿维菌素、毒死蜱、茚虫威、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮引起稻纵卷叶螟卵发育停滞的现象, 但卵致死率不高, 这可能是因为卵对不同杀虫剂渗透性不同 (夏邦颖, 1982), 对卵发育的影响程度存在差异。

本研究还就这些稻田主导杀虫剂处理卵后对初孵幼虫死亡情况的影响进行了研究, 结果表明, 8 种杀虫剂处理卵都会影响稻纵卷叶螟初孵幼虫的存活。氯虫苯甲酰胺、阿维菌素、吡虫啉、吡蚜酮、噻虫嗪和噻嗪酮处理稻纵卷叶螟卵对其初孵幼虫都有较高致死率, 毒杀作用明显。绝大多数杀虫剂对稻纵卷叶螟低龄幼虫的毒效更好 (梁立成等, 2014), 这可能与初孵幼虫对杀虫

剂敏感性更高有关。此外,本研究还发现杀虫剂处理稻纵卷叶螟卵的时间越靠近孵化时间,其初孵幼虫死亡率更高,这可能与杀虫剂药效持续时间相关,越接近初孵时间浸药,药效更高。

综上所述,氯虫苯甲酰胺对稻纵卷叶螟杀卵活性更强,氯虫苯甲酰胺在卵初产时处理杀卵效果更高,可直接导致卵发育异常而死亡,对初孵幼虫也有很高的致死作用。虽然吡虫啉是稻田中主导使用的稻飞虱靶标杀虫剂,但其对稻纵卷叶螟卵也具有较强的毒杀作用。吡虫啉处理产后3-4日龄卵时杀卵效果和初孵幼虫致死率更高。因此,本研究认为这些稻田主导杀虫剂中,氯虫苯甲酰胺在稻纵卷叶螟卵初产时防治更佳,吡虫啉可在稻纵卷叶螟卵产2日后防治。吡虫啉虽然对稻飞虱和稻纵卷叶螟均有一定毒杀作用,但稻飞虱对吡虫啉的抗药性问题较为严重,吡虫啉需根据田间实际情况合理选用。本文的研究结果将为科学安全高效防控稻纵卷叶螟提供基础依据。

参考文献 (References)

- Belzunces LP, Tchamitchian S, Brunet JL, 2012. Neural effects of insecticides in the honey bee. *Apidologie*, 43(3): 348–370.
- Brown PT, Herbert P, Woodruff RI, 2010. Vitellogenesis in *Oncopeltus fasciatus*: PLC/IP(3), DAG/PKC pathway triggered by CaM. *Journal of Insect Physiology*, 56(9): 1300–1305.
- Chalapathi RNBV, Sagar SV, Subash C, 2006. Effect of various combinations on rice leaf folder and its coleopteran predators. *Journal of Entomological Research*, 30(3): 219–223.
- Chen P, Liu H, Hou ML, 2021. Effects of host switch on the performance and life-table parameters of host populations of *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 64(3): 400–408. [陈萍, 刘欢, 侯茂林, 2021. 寄主转换对稻纵卷叶螟寄主种群适合度及生命表参数的影响. 昆虫学报, 64(3): 400–408.]
- Doğan C, Hänniger S, Heckel DG, Coutu C, Hegedus DD, Crubagha L, Groves RL, Mutlu DA, Suludere Z, Bayram Ş, Toprak U, 2021. Characterization of calcium signaling proteins from the fat body of the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* (Coleoptera: Chrysomelidae): Implications for diapause and lipid metabolism. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 133: 103549.
- Guo JW, Yang F, Li P, Liu XD, Wu QL, Hu G, Zhai BP, 2019. Female bias in an immigratory population of *Cnaphalocrocis medinalis* moths based on field surveys and laboratory tests. *Scientific Reports*, 9(1): 18388.
- Hannig GT, Ziegler M, Marçon PG, 2010. Feeding cessation effects of chlorantraniliprole, a new anthranilic diamide insecticide, in comparison with several insecticides in distinct chemical classes and mode-of-action groups. *Pest Management Science*, 65(9): 969–974.
- He JC, Li B, Xie MC, Lai FX, Hu GW, Fu Q, 2019. Laboratory bioactivity study on neonicotinoid and other rice paddy used insecticides against the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål) (Hemiptera: Delphacidae). *Chinese Journal of Rice Science*, 33(5): 467–478. [何佳春, 李波, 谢茂成, 赖凤香, 胡国文, 傅强, 2019. 新烟碱类及其他稻田杀虫剂对褐飞虱的室内药效评价. 中国水稻科学, 33(5): 467–478.]
- Huang J, Zhao Y, Song HW, Lei BH, Yuan RJ, 1997. Application of imidacloprid in controlling rice planthopper and rice leaf roller. *Pesticides*, 36(5): 31–33. [黄剑, 赵豫, 松会武, 雷邦海, 袁仁阶, 1997. 吡虫啉防治稻飞虱和稻纵卷叶螟的应用研究. 农药, 36(5): 31–33.]
- Li ZX, Li L, Zhu KM, Zhu JH, Zhou HY, Liu XQ, Long M, Zhao J, He YP, 2021. Sensitivity monitoring of *Cnaphalocrocis medinalis* to seven pesticides in central China. *Journal of Huazhong Agricultural*, 40(2): 130–141. [李增鑫, 李亮, 朱坤森, 朱菁华, 周涵宇, 刘小青, 龙幔, 赵景, 何月平, 2021. 华中地区稻纵卷叶螟对7种杀虫剂的敏感性监测. 华中农业大学学报, 40(2): 130–141.]
- Liang LC, Wang YS, Chen W, Xian ZH, 2014. Toxicity and feeding inhibition effect of three insecticides on rice leaf folder larvae (*Cnaphalocrocis medinalis* Guenée) and rice borer larvae (*Chilo suppressalis* Walker). *Journal of Southern Agriculture*, 45(10): 1797–1802. [梁立成, 王昱莎, 陈伟, 贤振华, 2014. 3种药剂对稻纵卷叶螟和二化螟不同龄期幼虫的毒效及抑制取食作用. 南方农业学报, 45(10): 1797–1802.]
- Liao X, Xu PF, Gong PP, Wan H, Li JH, 2021. Current susceptibilities of brown planthopper *Nilaparvata lugens* to triflumezopyrim and other frequently used insecticides in China. *Insect Science*, 28(1): 115–126.
- Lin YY, Jin T, Ma GC, Wen HB, Xiang KP, Peng ZQ, Yi KX, 2020. Toxicity of 15 insecticides against eggs of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*). *Plant Protection*, 46(1): 82–86. [林玉英, 金涛, 马光昌, 温海波, 向凯萍, 彭正强, 易克贤, 2020. 15种杀虫剂对草地贪夜蛾卵的毒力测定. 植物保护, 46(1): 82–86.]
- Liu H, Chen WJ, Yao WJ, 2008. Toxicity determination of imidacloprid and insecticidal monomixes against the rice leaf roller. *Chinese Bulletin of Entomology*, 45(2): 298–299. [刘宏, 陈文娟, 姚维君, 2008. 吡虫啉和杀虫单混配对稻纵卷叶螟的

- 毒力测定. 昆虫知识, 45(2): 298–299.]
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2006. Pesticide indoor bioassay test guidelines for pesticides part 5: Eggicidal activity test impregnation method: NY/T1154.5-2006. Beijing: China Agricultural Press. 1–5. [中华人民共和国农业部, 2006. 农药室内生物测定试验准则杀虫剂第 5 部分: 杀卵活性试验浸渍法: NY/T1154.5-2006. 北京: 中国农业出版社. 1–5.]
- Qiu G, Gu ZY, Liu XJ, Xiao YF, 1997. Studies on comparison of toxicities and biological activities of imidacloprid and buprofezin against BPH (*Nilaparvata lugens* Stål). *Entomological Journal of East China*, 6(2): 81–86. [邱光, 顾正远, 刘贤金, 肖英方, 1997. 吡虫啉、扑虱灵对褐稻虱的作用机制及药效特征比较研究. 华东昆虫学报, 6(2): 81–86.]
- Wang JZ, Ding JY, Wang ZS, 1997. Embryonic development of armyworms. *Acta Entomologica Sinica*, 40(3): 276–282, 337–338. [王进忠, 丁建云, 王宗舜, 1997. 粘虫的胚胎发育. 昆虫学报, 40(3): 276–282, 337–338.]
- Wang SY, Tang YJ, Ren MM, Hu B, Su JY, 2016. The establishment of insecticide susceptibility baselines and resistance monitoring for rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Günée). *Journal of Nanjing Agricultural University*, 39(3): 402–407. [王世玉, 汤雨洁, 任森森, 胡波, 苏建亚, 2016. 稻纵卷叶螟杀虫剂敏感基线的建立与抗药性监测. 南京农业大学学报, 39(3): 402–407.]
- Wang X, Chen P, Zhang S, Li ZB, Wang F, Liu J, Liu YJ, 2019. Toxicity and safety evaluation of 12 insecticides against *Chrysoperla nipponensis* (Okamoto). *Plant Protection*, 45(2): 211–217. [王晓, 陈鹏, 张硕, 李振斌, 王凡, 刘锦, 刘永杰, 2019. 12 种杀虫剂对日本通草蛉不同虫态的毒力及安全性评价. 植物保护, 45(2): 211–217.]
- Wu HB, Fan K, Zhang KP, Gong QT, Sun RH, 2013. Biological activity of 13 insecticides to eggs and larva of *Agrotis ypsilon* Rottemberg. *Journal of Environmental Entomology*, 35(3): 409–414. [武海斌, 范昆, 张坤鹏, 宫庆涛, 孙瑞红, 2013. 13 种杀虫剂对小地老虎卵和幼虫的生物活性. 环境昆虫学报, 35(3): 409–414.]
- Wu YJ, Leng XF, 2003. Recent advances in insecticide neurotoxicology. *Acta Entomologica Sinica*, 46(3): 382–389. [伍一军, 冷欣夫, 2003. 杀虫药剂的神经毒理学研究进展. 昆虫学报, 46(3): 382–389.]
- Xia BY, 1982. Practical significance of studying insect eggshell. *Entomological Knowledge*, 28(1): 25–28. [夏邦颖, 1982. 研究昆虫卵壳的实践意义. 昆虫知识, 28(1): 25–28.]
- Yang YJ, Wang CY, Xu HX, Lü XX, 2018. Sublethal effects of four insecticides on folding and spinning behavior in the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae). *Pest Management Science*, 74(3): 658–664.
- Yang YJ, Xu HX, Zheng XS, Tian JC, Lu YH, Lü ZX, 2015. Progresses in management technology of rice leaffolders in China. *Journal of Plant Protection*, 42(5): 691–701. [杨亚军, 徐红星, 郑许松, 田俊策, 鲁艳辉, 吕仲贤, 2015. 中国水稻纵卷叶螟防控技术进展. 植物保护学报, 42(5): 691–701.]
- You Y, Hu JF, Wang CF, Chen F, 2007. Indoor toxicity and field control effect of several insecticides against *Cnaphalocrocis medinalis* (Günée). *Entomological Journal of East China*, 16(4): 268–270. [游泳, 胡进锋, 王长方, 陈峰, 2007. 杀虫剂对稻纵卷叶螟的室内毒力及田间药效. 华东昆虫学报, 16(4): 268–270.]
- Yu X, Wu HB, Zhang KP, Yang F, Zhang XP, Sun RH, 2012. Toxicity of nineteen insecticides to eggs of *Carposina nipponensis* Walsingham. *Shandong Agricultural Sciences*, 44(5): 96–98. [于欣, 武海斌, 张坤鹏, 杨福, 张学萍, 孙瑞红, 2012. 19 种杀虫剂对桃小食心虫卵的毒力测定. 山东农业科学, 44(5): 96–98.]
- Zhang S, Shao ZR, Li YP, Li Q, Xu L, Kang XX, Gao XW, 2014. Control efficacy of different pesticides on rice brown planthopper and rice leaf roller in the field. *Plant Protection*, 40(3): 191–194, 198. [张帅, 邵振润, 李永平, 李群, 徐蕾, 康晓霞, 高希武, 2014. 不同杀虫药剂对水稻“两迁”害虫田间药效研究. 植物保护, 40(3): 191–194, 198.]
- Zhang YX, Li SG, Rao XJ, Liu S, 2018. Molecular characterization of a NADPH-cytochrome P450 reductase gene from the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Applied Entomology and Zoology*, 53(1): 19–27.
- Zhao SW, Li MM, Li BL, Wu JX, Xu XL, 2019. Contact toxicity of five insecticides against oriental armyworm eggs and their effects on embryonic development of the armyworm. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 1045–1056. [赵士文, 李梅梅, 李伯辽, 仵均祥, 许向利, 2019. 五种药剂对黏虫卵的室内触杀效果及胚胎发育的影响. 植物保护学报, 46(5): 1045–1056.]