

5种新烟碱类杀虫剂对休眠期和发育期红裸须摇蚊幼虫的急性毒性研究

姚媛媛¹, 龙辰², 王斌³, 李琦³, 李秀仙³, 张冬华⁴, 闫春财², 刘文彬^{2*}

(1.天津自然博物馆, 天津 300201; 2.天津师范大学生命科学院, 天津市动物多样性保护与利用重点实验室, 天津 300387; 3.天津市北大港湿地自然保护区管理中心, 天津 300270; 4.天津市滨海新区林业服务中心, 天津 300450)

摘要 为了解新烟碱类杀虫剂对红裸须摇蚊的毒性影响, 以休眠期和发育期红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)幼虫为材料, 测试吡虫啉(IMI)、噻虫嗪(THI)、噻虫胺(CLO)、呋虫胺(DIN)、啶虫脒(ACE)5种新烟碱类杀虫剂对幼虫的急性毒性差异, 并探究亚致死浓度胁迫下发育期幼虫体长和湿重的变化。结果表明, IMI、ACE和CLO毒性始终处于剧毒水平, 且CLO毒性低于IMI和ACE; IMI对发育期幼虫毒性略高于ACE, 对休眠期则相反; DIN毒性始终为高毒水平; 暴露于THI下, 休眠期幼虫耐受性显著高于发育期幼虫, 并且在24~96 h的持续时间内LC₅₀出现30.90~95.49倍不等的耐受性差异。IMI胁迫组体长略有增长, 其余组均表现为缩短, 仅ACE组出现显著变化; 幼虫湿重变化方面, IMI处理组幼虫湿重增长显著, 均值在23.3 mg, 其余组均保持在20.0 mg左右。

关键词 红裸须摇蚊; 新烟碱类杀虫剂; 休眠期; 发育期; 急性毒性

中图分类号 S482.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)20-0001-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.20.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Acute Toxicity of Five Neonicotinoid Insecticides to the Larvae of *Prosilocerus akamusi* in Dormant and Developmental Phase

YAO Yuan-yuan¹, LONG Chen², WANG Bin³ et al (1. Tianjin Natural History Museum, Tianjin 300201; 2. College of Life Sciences, Tianjin Key Laboratory of Conservation and Utilization of Animal Diversity, Tianjin Normal University, Tianjin 300387; 3. Tianjin Beidagang Wetland Nature Reserve Management Center, Tianjin 300270)

Abstract To understand the toxic effects of neonicotinoid insecticides on *Prosilocerus akamusi*, the larvae of *Prosilocerus akamusi* during the dormant and developmental phases were used as materials to test the acute toxicity difference of 5 neonicotinoid insecticides of imidacloprid (IMI), thiamethoxam (THI), clothianidin (CLO), dinotefuran (DIN) and acetamiprid (ACE) to larvae, and explore the changes of body length and wet weight of larvae during developmental phase under sublethal concentration stress. The result showed that the toxicity of IMI, ACE and CLO was always at a severe level, and toxicity of CLO was lower than that of IMI and ACE. The toxicity of IMI higher than that of ACE in developmental phase, but lower in dormancy period; the toxicity of DIN was at a high level. In the case of THI, the tolerance of dormant larvae was significantly higher than that of developmental larvae, and the tolerance difference of LC₅₀ varied from 30.90 to 95.49 times in 24-96 h. The body length of IMI stress group increased slightly, while that of the other groups decreased. Only ACE group showed significant changes. In terms of the change of larvae wet weight, the larvae wet weight of IMI treatment group increased significantly, with an average of 23.3 mg, and the rest groups maintained about 20.0 mg.

Key words *Prosilocerus akamusi*; Neonicotinoid insecticides; Dormant phase; Developmental phase; Acute toxicity

摇蚊幼虫对水质变化敏感, 常作为评估水体质量的重要指示生物^[1]。红裸须摇蚊, 隶属于摇蚊科直突摇蚊亚科裸须摇蚊属, 为我国北方水体的优势种之一^[2]。近年来, 我国水污染情况严峻, 尤其在红裸须摇蚊广泛分布的海河流域, 自2011年起水质监测中为V类水质的比例在我国大型流域一直位于较高水平^[3]。一系列研究发现污染物对水生生物产生较大毒害作用, 为评估多种污染物对水生生物的毒性效应, 许多学者以摇蚊幼虫为材料开展了毒理学研究, 如Arambourou等^[4]研究发现暴露于重金属污染的沉积物会使摇蚊幼虫生长和繁殖活动受到显著抑制; 邓万蓉等^[5]探究非对摇蚊幼虫的毒性效应, 发现大于5 mg/kg的非胁迫下可使摇蚊羽化时间显著提前; Dos Santos Morais等^[6]研究发现摇蚊暴露于亚慢性浓度邻苯二甲酸苄基丁酯时, 出现头壳变窄、雌性成虫翅长减小的现象, 但这些研究多集中于重金属和有机污染物, 对杀虫剂类污染物毒性研究较少。

新烟碱类杀虫剂是目前生产中大量使用的一类杀虫剂,

具有无交互抗性、高效和低毒等特点, 至2011年, 全球年销售额已近20亿美元, 占世界杀虫剂1/5的市场份额。但由于该类杀虫剂的大量和不合理使用, 加之其高水溶性, 造成了严重的环境污染问题, 在各国水体和土壤中检出多种新烟碱类杀虫剂^[7-9]。为评测该杀虫剂大剂量使用及外排对非靶标生物的影响, 相关毒性效应试验已广泛开展, 许多研究发现, 该杀虫剂污染可通过花蜜残留等方式对以蜜蜂为首的非靶标生物造成较大危害^[10], 对家蚕、赤眼蜂等陆生昆虫羽化及一系列生命活动产生极不利的影响^[11-13], 此外, 在致毒机理等方面也已取得较大的研究进展^[14], 但这些研究一般为陆生非靶标昆虫的成虫阶段, 而对水生非靶标昆虫幼虫阶段的研究则鲜有开展。

休眠和羽化为摇蚊生活史的重要阶段, 发育期幼虫受环境因子影响积累达一定阈值可诱导羽化过程。Zou等^[15]研究发现, 红裸须摇蚊幼虫属于狭温性耐寒幼虫, 在4—10月时处于休眠状态, 11—12月时出现显著发育现象, 1月开始观察到成虫出现。休眠和羽化过程中, 昆虫体内发生一系列复杂基因表达和代谢变化, 对环境因子抗性也相应改变^[16], 但红裸须摇蚊对新烟碱类杀虫剂是否存在基于休眠过程而表现的抗性差异目前尚不明确。该研究以休眠期和发育期

基金项目 国家自然科学基金项目(31672324, 31801994); 天津市应用基础研究计划项目(18JJCQJNC14700, 18JCYBJC96100)。

作者简介 姚媛媛(1987—), 女, 天津人, 助理馆员, 硕士, 从事动物系统学研究。*通信作者, 讲师, 博士, 从事动物系统学研究。

收稿日期 2021-02-03; **修回日期** 2021-03-29

红裸须摇蚊幼虫为材料,选择农田使用量较广的5种新烟碱类杀虫剂开展急性毒性试验,为评价水体新烟碱类杀虫剂污染对摇蚊幼虫危害、探究昆虫休眠期抗性变化和摇蚊幼虫用作新烟碱类杀虫剂污染指示生物提供数据支持。

1 材料与与方法

1.1 供试生物 试验用摇蚊幼虫分别于红裸须摇蚊发育期(2019年11月)和休眠期(2020年6月)购于红虫捕捞商,经核实2批幼虫在潮白河同一点位捕捞,根据 Sæther^[17] 的研究鉴定物种为红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*),根据头壳宽度判断龄期,使用体视镜挑选4龄幼虫作为试验材料。

1.2 驯化处理 将摇蚊幼虫放置于实验室内长23.5 cm、宽13.5 cm、高14.5 cm的塑料容器中,使用光照除氯的自来水驯化培养7 d(水温18~23℃、pH 8.2、溶解氧7.7~9.6 mg/L、总硬度7.1 mmol/L),容器存放于自然光照处,驯养期间用气泵进行微曝气,观察到每日自然死亡幼虫少于2%时,即挑选活性较强、体型大小均一的幼虫进行毒性试验。

1.3 供试试剂 70%吡虫啉(IMI),浙江威尔达化工有限公司;25%噻虫嗪(THI),江苏剑牌农化股份有限公司;30%噻虫胺(CLO),北京华戎生物激素厂;70%呋虫胺(DIN),山东埃森化学有限公司;70%啶虫脒(ACE),山东中新科农生物科技有限公司。剂型均为水分散粒剂,配制所需浓度时,用除氯的自来水将颗粒溶解为一定浓度的母液,再稀释至试验所需浓度。

1.4 毒性试验方法 试验采用静水染毒法,5种药液试验浓度设定具体见表1。设置仅添加除氯自来水的烧杯为空白对照,将试验幼虫放入盛有100 mL药液的烧杯中,每个处理组添加20头,设置3组重复,试验过程中及时挑出死亡幼虫,于处理24、48、72和96 h观察染毒现象并统计死亡数,死亡标准为玻璃棒多次触碰摇蚊幼虫腹部后端未观察到身体卷曲或摆动反应。

表1 试验浓度梯度设置

Table 1 Test concentration gradient settings

试验时间 Test time	杀虫剂 Insecticide	浓度梯度 Concentration gradient// $\mu\text{g/L}$				
		1	2	3	4	5
2019-11	IMI	4	8	16	32	64
	THI	4	8	16	32	64
	CLO	20	40	80	160	320
	DIN	100	200	400	800	1 600
	ACE	4	8	16	32	64
2020-06	IMI	3	6	12	24	48
	THI	320	640	1 280	2 560	5 120
	CLO	15	30	60	120	240
	DIN	100	200	400	800	1 600
	ACE	3	6	12	24	48

1.5 体长和湿重的测定 取发育期(2019年11月)幼虫,使用96 h亚致死浓度(96 h-LC₂₀)药液胁迫摇蚊幼虫,处理方法同“1.4”,暴露96 h后从每个处理组中随机选取10头摇蚊幼虫,使用体视镜和电子天平测定体长及湿重。

1.6 数据处理 采用概率单位法^[18],使用SPSS 19.0进行线

性回归分析,计算半致死浓度(LC₅₀)及其95%置信区间,设置自变量为对数药液浓度,因变量为幼虫死亡概率单位,使用单因素ANOVA方差分析效应显著性,P值小于0.05时视为影响显著。将分析数据总结至Excel 2019制作表格,导入OriginPro 2017进行制图。

2 结果与分析

2.1 急性暴露下的中毒状态 从5种新烟碱类杀虫剂胁迫下的中毒状态(表2)可以观察到中毒行为随处理浓度增大而显著,具体表现为IMI、ACE、DIN胁迫下幼虫均为头尾向内弯曲蜷缩,而THI和CLO则出现无规则摆动和身形扭曲。对于体色变化,除THI胁迫下幼虫体色仍保持较红外,其余4种杀虫剂均出现体色变暗的现象,但程度不一,DIN胁迫下体色变为暗红色,而IMI、CLO、ACE均为棕黑色。对死亡形态,与中毒行为存在一定程度上的对应,如出现向内蜷缩行为的IMI、ACE、DIN胁迫组,最终死亡形态为“O”字型,而无规则摆动的THI最终死亡形态为棒直状,对于CLO,则部分呈现一定程度的扭曲,另一部分为棒直状。

表2 新烟碱类杀虫剂胁迫下红裸须摇蚊幼虫的急性毒性状态

Table 2 Acute toxicity status of the larvae of *Prosilocerus akamusi* under the stress of neonicotinoid insecticides

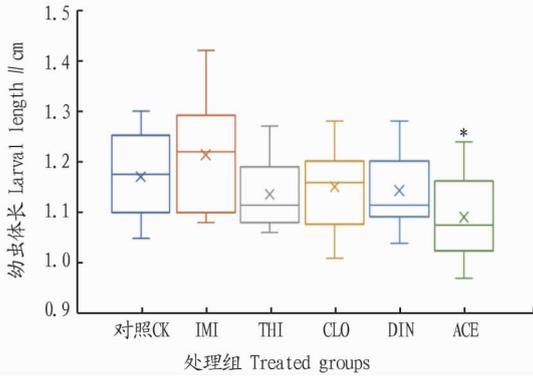
杀虫剂 Insecticide	中毒行为 Poisoning behavior	体色变化 Body colour variation	死亡形态 Death state
IMI	头尾向内弯曲、蜷缩	变为棕黑色	呈“O”字型
THI	无规则摆动	保持较红体色	棒直状
CLO	扭曲呈“弓”字型或S型	变为棕黑色	部分呈“弓”字型或S型,部分棒直状
DIN	头尾向内弯曲、蜷缩	变为暗红色	呈“O”字型
ACE	头尾向内弯曲、蜷缩	变为棕黑色	呈“O”字型

2.2 亚致死浓度胁迫下幼虫的体长和湿重变化

2.2.1 体长变化。从图1可以看出,亚致死浓度胁迫下,除IMI胁迫组体长略有增长,其余处理组均使摇蚊体长变短,但除ACE外,影响均不显著。对箱体所示范围,除IMI处理组使个体差异略有增大,其余各组均使组内个体差异减小。

2.2.2 湿重变化。从新烟碱类杀虫剂处理下的湿重变化(图2)可以看出,IMI处理组湿重增大显著,均值在23.3 mg,其余处理组及对照组均保持在20.0 mg左右。IMI、THI和ACE处理组内差异个体变大,而CLO和DIN处理组内差异与对照组接近。

2.3 新烟碱类杀虫剂对不同发育时期红裸须摇蚊幼虫的急性毒性差异 5种新烟碱类杀虫剂对不同时期红裸须摇蚊幼虫的急性毒性如表3和表4所示, R^2 表明采用了线性回归分析的毒力回归方程拟合效果较好。总体上,5种新烟碱类杀虫剂随作用时间增长,对红裸须摇蚊幼虫的LC₅₀均下降,以LC₅₀为依据分析,对发育期幼虫毒性由大到小依次为IMI、ACE、THI、CLO和DIN,而对休眠期幼虫毒性由大到小依次为ACE、IMI、CLO、DIN和THI。根据世界卫生组织(WHO)规定外来污染物的急性毒性等级标准(表5)评价5种杀虫剂急性毒性等级,结果显示,对发育期幼虫,除DIN为高毒外,其余杀虫剂均为剧毒,而对休眠期幼虫,DIN和THI均为



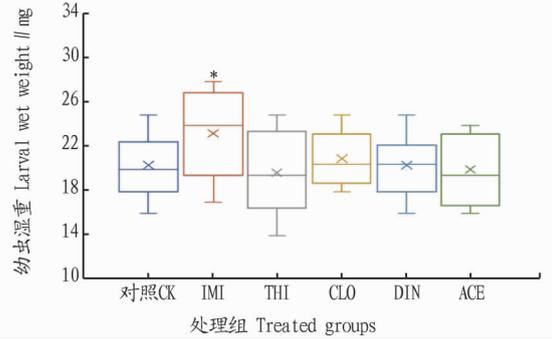
注:箱体的顶部和底部分别表示 75% 和 25% 的范围,上下须分别表示 90% 和 10% 的范围,箱体内的实线和差号分别显示中值和平均值水平。* 表示处理组与对照组间存在显著差异 ($P < 0.05$)

Note: The tops and bottoms of the rectangles indicate the 75th and 25th percentiles, the whiskers define the 90th and 10th percentiles, the full lines and cross within the boxes show the median and mean values. * indicates significant difference between the treatment group and the control group ($P < 0.05$)

图 1 亚致死浓度 (96 h- LC_{20}) 胁迫下幼虫的体长变化

Fig.1 Larvae body length changes under sub-lethal concentration (96 h- LC_{20}) stress

高毒,其余为剧毒,表明水体新烟碱类杀虫剂对红裸须摇蚊幼虫毒性较大,且对不同发育时期幼虫毒性存在差异,具体表现为:对 IMI 和 THI,在 96 h 内休眠期幼虫的耐受性均高于发育期;而对于 CLO、DIN 和 ACE,在 24 h 内休眠期幼虫耐受性高,24 h 后则为发育期幼虫耐受性较高。需要特别指出,



注:箱体的顶部和底部分别表示 75% 和 25% 的范围,上下须分别表示 90% 和 10% 的范围,箱体内的实线和差号分别显示中值和平均值水平。* 表示处理组与对照组间存在显著差异 ($P < 0.05$)

Note: The tops and bottoms of the rectangles indicate the 75th and 25th percentiles, the whiskers define the 90th and 10th percentiles, the full lines and cross within the boxes show the median and mean values. * indicates significant difference between the treatment group and the control group ($P < 0.05$)

图 2 亚致死浓度 (96 h- LC_{20}) 胁迫下幼虫的湿重变化

Fig.2 Larvae wet weight changes under sub-lethal concentration (96 h- LC_{20}) stress

对于 THI 胁迫,相较于发育期,休眠期幼虫在 24 h 内耐受性高出 94.49 倍,96 h 时高出 29.90 倍,耐受性差异显著;而对其他几种杀虫剂,耐受性差异均在 0.72~1.51 倍。此外,同一处理组在 24~96 h 下休眠期与发育期的 LC_{50} 差异倍数在 2.35~13.80 倍,表明在半致死效应下,毒性的剂量对染毒时间的依赖程度存在较大差异。

表 3 5 种新烟碱类杀虫剂对发育期红裸须摇蚊幼虫的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of 5 neonicotinoid insecticides to the larvae of *Prosilocerus akamusi* during the developmental phase

杀虫剂 Insecticide	暴露时间 Exposure time//h	线性回归方程 Linear equation	决定系数 (R^2) Determination coefficient	半致死浓度 LC_{50} $\mu\text{g/L}$	95% 置信区间 95% confidence interval// $\mu\text{g/L}$
吡虫啉 IMI	24	$y = 2.699x + 1.381$	0.967	21.88	17.38~27.51
	48	$y = 2.649x + 1.933$	0.941	14.45	11.48~18.20
	72	$y = 2.463x + 2.309$	0.929	12.30	9.33~16.22
	96	$y = 2.839x + 2.258$	0.920	9.33	7.41~11.75
噻虫嗪 THI	24	$y = 1.657x + 2.044$	0.976	60.26	41.69~87.10
	48	$y = 2.063x + 2.007$	0.950	28.18	21.38~37.15
	72	$y = 2.218x + 2.321$	0.852	16.22	12.30~21.38
	96	$y = 2.161x + 2.566$	0.906	13.49	10.23~17.78
噻虫胺 CLO	24	$y = 2.598x - 0.463$	0.969	125.89	100.00~158.49
	48	$y = 2.671x - 0.198$	0.987	89.13	70.79~112.20
	72	$y = 2.498x + 0.691$	0.971	52.48	41.69~66.07
	96	$y = 2.222x + 1.526$	0.943	36.31	27.54~47.86
呋虫胺 DIN	24	$y = 1.794x - 0.699$	0.932	1 513.56	1 096.48~2 089.30
	48	$y = 1.698x - 0.146$	0.919	1 071.52	741.31~1 548.82
	72	$y = 1.743x - 0.092$	0.813	831.76	575.44~1 202.26
	96	$y = 1.813x + 0.326$	0.899	380.19	275.42~524.81
啶虫脒 ACE	24	$y = 3.026x + 0.826$	0.895	23.99	19.95~28.84
	48	$y = 2.799x + 1.344$	0.910	20.42	16.22~25.70
	72	$y = 2.857x + 1.508$	0.965	16.60	12.59~21.88
	96	$y = 2.635x + 2.267$	0.883	10.96	8.32~14.45

注: y 表示死亡率, x 表示杀虫剂离子浓度对数

Note: y represents the mortality rate, x represents the logarithm of the pesticide ion concentration

表 4 5 种新烟碱类杀虫剂对休眠期红裸须摇蚊幼虫的急性毒性

Table 4 Acute toxicity of 5 neonicotinoid insecticides to the larvae of *Prosilocerus akamusi* during the dormant phase

杀虫剂 Insecticide	暴露时间 Exposure time//h	线性回归方程 Linear equation	决定系数(R^2) Determination coefficient	半致死浓度 LC_{50} $\mu\text{g/L}$	95%置信区间 95% confidence interval// $\mu\text{g/L}$
吡虫啉 IMI	24	$y=2.678x+1.017$	0.989	30.90	22.44~40.74
	48	$y=2.362x+1.834$	0.972	21.88	16.60~28.84
	72	$y=2.440x+2.151$	0.952	14.79	11.22~20.41
	96	$y=3.176x+1.818$	0.979	10.00	7.94~12.59
噻虫嗪 THI	24	$y=1.255x+0.286$	0.844	5 754.40	1 467.37~9 549.93
	48	$y=1.881x-1.299$	0.883	2 238.72	1 621.81~3 090.30
	72	$y=1.581x+0.271$	0.914	977.24	645.65~1 479.11
	96	$y=1.369x+1.408$	0.846	416.87	288.40~602.56
噻虫胺 CLO	24	$y=2.596x-0.598$	0.996	144.54	109.65~190.55
	48	$y=1.841x+1.598$	0.909	70.79	51.29~97.72
	72	$y=2.126x+1.407$	0.957	48.98	37.15~64.57
	96	$y=3.006x+0.524$	0.992	30.30	24.55~38.90
呋虫胺 DIN	24	$y=1.873x-1.047$	0.858	1 698.24	1 230.27~2 344.23
	48	$y=1.759x-0.290$	0.982	1 000.00	724.44~1 380.38
	72	$y=1.780x-0.010$	0.961	645.65	467.71~891.25
	96	$y=1.686x+0.792$	0.901	316.23	208.93~478.63
啶虫脒 ACE	24	$y=2.281x+1.668$	0.994	28.84	20.89~39.81
	48	$y=2.560x+1.835$	0.990	17.38	13.80~21.88
	72	$y=2.544x+2.251$	0.981	12.02	9.55~15.14
	96	$y=3.018x+2.264$	0.964	8.13	6.46~10.23

注: y 表示死亡率, x 表示杀虫剂离子浓度对数

Note: y represents the mortality rate, x represents the logarithm of the pesticide ion concentration

表 5 新烟碱类杀虫剂对水生生物的急性毒性分级标准

Table 5 Classification criteria for acute toxicity of neonicotinoid insecticides to aquatic organisms

等级 Level	96 h- LC_{50} $\mu\text{g/L}$	毒性 Toxicity
1	< 50	剧毒
2	50~500	高毒
3	>500~5 000	中毒
4	>5 000~50 000	低毒
5	>50 000	微毒

3 结论与讨论

该试验以休眠期和发育期红裸须摇蚊(*Prosilocerus akamusi*)4龄幼虫为材料,探究5种新烟碱类杀虫剂对不同发育时期幼虫的急性毒性差异,结果显示,在5种杀虫剂中,吡虫啉(IMI)、啶虫脒(ACE)和噻虫胺(CLO)毒性始终处于剧毒水平,且发育期IMI毒性略高于ACE,休眠期则相反,但CLO毒性始终低于IMI和ACE。呋虫胺(DIN)毒性始终为高毒水平,且不同发育期毒性差异较小。而对于噻虫嗪(THI),休眠期幼虫耐受性显著高于发育期幼虫,在24~96h的持续时间内 LC_{50} 出现30.90~95.49倍不等的差异。

吡虫啉为目前农田使用量最大的新烟碱类杀虫剂,为科学制定该类杀虫剂排放标准,该试验使用4龄红裸须摇蚊幼虫对其进行急性毒性试验,结果表明,吡虫啉对4龄红裸须摇蚊幼虫的24h- LC_{50} 、48h- LC_{50} 、96h- LC_{50} 分别为27.21、19.27、12.71 $\mu\text{g/L}$ 。该结果与其他种摇蚊幼虫相比,抗性差异不大,如Njattuvetty Chandran等^[19]用吡虫啉对1龄溪流摇蚊(*Chironomus riparius*)幼虫胁迫得出24h- LC_{50} 为

31.5 $\mu\text{g/L}$,Azevedo-Pereira等^[20]用2龄溪流摇蚊幼虫试验得出48h- LC_{50} 为19.9 $\mu\text{g/L}$,Pestana等^[21]用2龄溪流摇蚊幼虫试验得出96h- LC_{50} 为12.94 $\mu\text{g/L}$ 。比较发现,红裸须摇蚊在吡虫啉抗性上与溪流摇蚊无显著差异。另有研究对3龄的伸展摇蚊幼虫(*Chironomus tentans*)进行吡虫啉暴露,算得96h- LC_{50} 为5.75 $\mu\text{g/L}$ ^[22]。而近年来,稀疏摇蚊(*Chironomus dilutus*)幼虫也逐渐进入国内外毒理学学者视野,一系列试验结果显示吡虫啉对2龄幼虫96h- LC_{50} 为4.63 $\mu\text{g/L}$ ^[23]、3龄幼虫96h- LC_{50} 为2.65 $\mu\text{g/L}$ ^[24]和11.8 $\mu\text{g/L}$ ^[25],试验结果存在一定差异,其原因在于不同学者使用的毒性暴露方式和前处理条件不同,但总体上红裸须摇蚊对吡虫啉抗性略高于稀疏摇蚊。而吡虫啉对其他水生生物的急性毒性试验已有大量学者完成,如大型蚤^[26]、斑马鱼^[27-29]、泽蛙蝌蚪^[30]、鲤鱼^[31]、日本沼虾^[31]、克氏原螯虾^[32]等,总结如下:大型蚤48h- LC_{50} 为5.02mg/L;斑马鱼96h- LC_{50} 为281.37mg/L;泽蛙蝌蚪24、48、72、96h的 LC_{50} 分别为365.9、307.7、257.1和217.9mg/L;鲤鱼24、48、72、96h的 LC_{50} 分别为208.3、138.8、108.9和96.4mg/L;日本沼虾24和48h的 LC_{50} 分别为88.5和34.8 $\mu\text{g/L}$;克氏原螯虾96h- LC_{50} 为10.98mg/L。总体上看,耐受性斑马鱼>泽蛙蝌蚪>鲤鱼>克氏原螯虾>大型蚤>日本沼虾>摇蚊幼虫,其中,吡虫啉对摇蚊幼虫和日本沼虾达到剧毒评级,大型蚤接近中毒,而克氏原螯虾、斑马鱼、泽蛙蝌蚪和鲤鱼均为微毒。

对其余几种新烟碱类杀虫剂,有学者研究稀疏摇蚊(*Chironomus dilutus*)2龄幼虫对噻虫胺和噻虫嗪的96h- LC_{50} 分别为5.93和55.34 $\mu\text{g/L}$ ^[23]。Raby等^[25]研究了多种新烟

碱类对 3 龄稀疏摇蚊幼虫的 96 h-LC₅₀ 分别为啉虫脒 2.8 μg/L、噻虫胺 11.6 μg/L、呋虫胺 23.5 μg/L、吡虫啉 11.8 μg/L、噻虫嗪 61.9 μg/L。与该试验结果相比,红裸须摇蚊对呋虫胺抗性高,但对噻虫嗪抗性较低。

尽管近 10 年多种新烟碱类杀虫剂的污染受到毒理学学者持续关注,但对除吡虫啉以外的新烟碱类杀虫剂研究仍较少,近年来我国噻虫嗪仅有对中华蟾蜍蝌蚪^[33]、斑马鱼^[27]等研究;啉虫脒仅有对大型蚤^[26]、斑马鱼^[29]、虎纹蛙蝌蚪^[34]、中华蟾蜍蝌蚪^[35]等研究;呋虫胺仅有对斑马鱼^[36]等研究;噻虫胺仅有对大型蚤^[27]等研究。在杀虫剂市场多元化的大趋势下,多种污染物并存的情况愈发常见,在这个沉重的背景下,为科学衡量污染物含量与毒性关系,合理制定相关排放标准,毒理学的研究已刻不容缓。

参考文献

- [1] 王俊才,方志刚,鞠复华,等.摇蚊幼虫分布及其与水质的关系[J].生态学杂志,2000,19(4):27-37.
- [2] 赵广君,刘婷,吴鹏,等.天津北大港湿地摇蚊幼虫多样性分析及水质评价[J].内蒙古大学学报(自然科学版),2017,48(5):577-583.
- [3] 张仙娥,冯成洪,黄蓓蓓,等.海河流域分水系河系污染特征分析[J].灌溉排水学报,2016,35(11):47-51.
- [4] ARAMBOUROU H, LLORENTE L, MORENO-OCIO I, et al. Exposure to heavy metal-contaminated sediments disrupts gene expression, lipid profile, and life history traits in the midge *Chironomus riparius* [J]. Water research, 2020, 168: 115-165.
- [5] 邓万蓉,刘志红,孙梨宗,等.非对摇蚊幼虫的急、慢性毒性效应[J].生态学杂志,2017,36(9):2556-2563.
- [6] DOS SANTOS MORAIS G, VIEIRA T B, SANTOS G S, et al. Genotoxic, metabolic, and biological responses of *Chironomus sancticaroli* Strixino & Strixino, 1981 (Diptera: Chironomidae) after exposure to BBP [J]. Science of the total environment, 2020, 175: 1-8.
- [7] ANDERSON J C, DUBETZ C, PALACE V P. Neonicotinoids in the Canadian aquatic environment: A literature review on current use products with a focus on fate, exposure, and biological effects [J]. Science of the total environment, 2015, 505: 409-422.
- [8] SAMSON-ROBERT O, LABRIE G, CHAGNON M, et al. Neonicotinoid-contaminated puddles of water represent a risk of intoxication for honey bees [J]. PLoS One, 2014, 9(12): 1-17.
- [9] VAN DIJK T C, VAN STAALDUINEN M A, VAN DER SLUIJS J P. Macroinvertebrate decline in surface water polluted with imidacloprid [J]. PLoS One, 2013, 8(5): 1-10.
- [10] JONES A G, HOOVER K, PEARSONS K, et al. Potential impacts of translocation of neonicotinoid insecticides to cotton (*Gossypium hirsutum* (Malvales: Malvaceae)) extrafloral nectar on parasitoids [J]. Environmental entomology, 2020, 49(1): 159-168.
- [11] 贾伟,蒋红云,张兰,等.新烟碱类杀虫剂对非靶标生物的影响研究进展[C]//中国植物保护学会.2014 年中国植物保护学会学术年会论文集.北京:中国农业科学技术出版社,2014.
- [12] PISA L W, AMARAL-ROGERS V, BELZUNCES L P, et al. Effects of neonicotinoids and fipronil on non-target invertebrates [J]. Environmental science and pollution research, 2015, 22(1): 68-102.
- [13] 吴岩函,丁悦,严海娟,等.新烟碱类杀虫剂对几种环境生物的安全性评价[J].江苏农业科学,2016,44(1):295-297.
- [14] WANG Y H, XU P, CHANG J, et al. Unraveling the toxic effects of neonicotinoid insecticides on the thyroid endocrine system of lizards [J/OL]. Environmental pollution, 2020, 258 [2020-11-03]. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113731.
- [15] ZOU W, CAI Y J, TOLONEN K T, et al. The adaptations to tube-dwelling life of *Prosilocerus akamusi* (Diptera: Chironomidae) larvae and its eutrophication-tolerant mechanisms [J/OL]. Limnologia, 2019, 77 [2020-11-03]. https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125684.
- [16] 徐卫华.昆虫滞育研究进展[J].昆虫知识,2008,45(4):512-517.
- [17] SÆTHER O A. Glossary of Chironomid morphology terminology (Diptera: Chironomidae) [J]. Entomologica scandinavica (supplement), 1980, 14: 1-51.
- [18] 张毓琪,陈叙龙.环境生物毒理学[M].天津:天津大学出版社,1993:252-256.
- [19] NJATTUVETTY CHANDRAN N, FOJTOVA D, BLAHOVA L, et al. Acute and (sub) chronic toxicity of the neonicotinoid imidacloprid on *Chironomus riparius* [J]. Chemosphere, 2018, 209: 568-577.
- [20] AZEVEDO-PEREIRA H M V S, LEMOS M F L, SOARES A M V M. Behaviour and growth of *Chironomus riparius* Meigen (Diptera: Chironomidae) under imidacloprid pulse and constant exposure scenarios [J]. Water, air, & soil pollution, 2011, 219(1/2/3/4): 215-224.
- [21] PESTANA J L T, LOUREIRO S, BAIRD D J, et al. Fear and loathing in the benthos: Responses of aquatic insect larvae to the pesticide imidacloprid in the presence of chemical signals of predation risk [J]. Aquatic toxicology, 2009, 93(2/3): 138-149.
- [22] STOUGHTON S J, LIBER K, CULP J, et al. Acute and chronic toxicity of imidacloprid to the aquatic invertebrates *Chironomus tentans* and *Hyalella azteca* under constant- and pulse-exposure conditions [J]. Archives of environmental contamination and toxicology, 2008, 54(4): 662-673.
- [23] MALONEY E M, MORRISSEY C A, HEADLEY J V, et al. Cumulative toxicity of neonicotinoid insecticide mixtures to *Chironomus dilutus* under acute exposure scenarios [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2017, 36(11): 3091-3101.
- [24] LEBLANC H M K, CULP J M, BAIRD D J, et al. Single versus combined lethal effects of three agricultural insecticides on larvae of the freshwater insect *Chironomus dilutus* [J]. Archives of environmental contamination and toxicology, 2012, 63(3): 378-390.
- [25] RABY M, NOWIERSKI M, PERLOV D, et al. Acute toxicity of 6 neonicotinoid insecticides to freshwater invertebrates [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2018, 37(5): 1430-1445.
- [26] 陈丽萍,吴声敢,吴长兴,等.3 种杀虫剂对大型蚤的急性毒性与安全评价[C]//中国毒理学学会环境与生态毒理学专业委员会第二届学术研讨会暨中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会 2011 年学术研讨会会议论文集.北京:中国毒理学学会,2011:29-33.
- [27] 陈爱梅,王金花,夏晓明,等.不同剂型吡虫啉对蚯蚓和斑马鱼的急性毒性评价[J].农业环境科学学报,2013,32(9):1758-1763.
- [28] 丁中海,杨怡,金洪钧,等.三种农药对斑马鱼的急性毒性和生物浓缩系数[J].应用生态学报,2004,15(5):888-890.
- [29] 赵丽娟,张洪,康乐. UHPLC-QE 研究吡虫啉对斑马鱼肝脏代谢物的影响[J].环境化学,2017,36(8):1880-1882.
- [30] 念宇,杨再福,魏倩倩.三唑磷·敌百虫和吡虫啉对泽蛙蝌蚪的毒性研究[J].安徽农业科学,2009,37(18):8538-8540.
- [31] 龚瑞忠,陈锐,陈良燕.吡虫啉对环境生物的毒性与安全性评价[J].农药科学与管理,1999,20(3):12-16.
- [32] 黄婷. 氯氟菊酯和吡虫啉对克氏原螯虾的毒性作用[D].南昌:南昌大学,2008.
- [33] 陈皎皎,陈晓芳,郑书梅,等.噻虫嗪对中华蟾蜍蝌蚪抗氧化系统及丙二醛含量的影响[J].福建师范大学学报(自然科学版),2019,35(5):61-66.
- [34] 符史杭,李玉凤,曹露露,等.农药啉虫脒对虎纹蛙蝌蚪的急性毒性研究[J].北京农业,2014(15):9-10.
- [35] 张玲玲,耿宝荣.啉虫脒对中华蟾蜍蝌蚪的急性毒性和微核异常的诱导作用[J].福建师范大学学报(自然科学版),2015,31(6):70-76.
- [36] 孙琦,范咏梅,赖柯华,等.呋虫胺对斑马鱼胚胎-幼鱼生长发育及细胞凋亡的影响[J].生态毒理学报,2016,11(3):356-364.