

马拉硫磷对双齿围沙蚕乙酰胆碱酯酶和过氧化氢酶的影响

吕林兰^{1,2}, 杨家新², 董学兴¹, 黄金田¹, 吕 富¹

(1.盐城工学院化学与生物工程学院, 江苏 盐城 224051; 2.南京师范大学生命科学学院, 南京 210046)

摘 要:采用浓度梯度污染暴露室内模拟方法,研究了沙蚕暴露于不同浓度有机磷农药马拉硫磷的急性毒性效应,以及低浓度马拉硫磷对双齿围沙蚕乙酰胆碱酯酶(AChE)和过氧化氢酶(CAT)的影响。结果表明,马拉硫磷对沙蚕 48、72、96 h 的 LC_{50} 分别为 71.68、49.21、33.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,安全浓度为 3.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在低浓度(0.001 8~9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)马拉硫磷中暴露 3 和 6 d,沙蚕体内乙酰胆碱酯酶活性受到显著抑制,暴露 6 d 时 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组最高抑制率达 88.92%,且乙酰胆碱酯酶抑制率与马拉硫磷浓度对数具有显著的剂量效应。沙蚕 CAT 活性随马拉硫磷浓度增加表现出先降后升再降的趋势,暴露 3 d 时 0.018 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组 CAT 活性最高,6 d 时 0.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组 CAT 活性最高,分别比对照组高 52.02%和 53.42%($P<0.05$),而浓度达 1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 CAT 活力均显著下降($P<0.05$)。结果显示,沙蚕乙酰胆碱酯酶是较好的滩涂有机磷农药污染生物标记物。

关键词:马拉硫磷;双齿围沙蚕;乙酰胆碱酯酶;过氧化氢酶

中图分类号:X503.223 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0431-06

Effect of Malathion on the Activity of Acetylcholinesterase and Catalase of Polychaete *Perinereis aibuhitensis*

LV Lin-lan^{1,2}, YANG Jia-xin², DONG Xue-xing¹, HUANG Jin-tian¹, LV Fu¹

(1. College of Chemistry and Biology Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China; 2. School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Polychaete *Perinereis aibuhitensis* is considered to be a key species in estuarine ecosystem, and has proved to be a sentinel organism for pollution stress. In order to test the possibility of *Perinereis aibuhitensis* acting as an indicator organism to organophosphorus pesticide malathion pollution, we conducted the experiment to determine the acute toxic effects of various concentrations of malathion on the *P. aibuhitensis*, and to examine the change pattern of their acetylcholinesterase(AChE) activity and catalase(CAT) activity after exposed to low concentration of malathion. The results indicated that the malathion had a strong toxic effect on *P. aibuhitensis*. The 48 h, 72 h, 96 h LC_{50} values of *P. aibuhitensis* were 71.68, 49.21, 33.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and the safety concentration was 3.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The AChE activity of the *P. aibuhitensis* was significantly inhibited by the malathion, with the maximum inhibition of 88.92% which appeared at 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ on 6 d. Moreover, the inhibition of AChE significantly correlated with the malathion concentration. Malathion treatment led to an initial decline in CAT activity followed by a sharp increase and then declined again. These results showed that the AChE activity of *P. aibuhitensis* could be used as a good biomarkers to malathion pollution in coastal beach.

Keywords: malathion; polychaete *Perinereis aibuhitensis*; acetylcholinesterase; catalase

我国自 1983 年起停止生产高毒、高残留、高富集性的有机氯农药,而代之以低残留的有机磷农药。有

机磷农药以杀虫剂居多(据统计,1997 年生产有机磷杀虫剂约 17 万 t, 占整个农药使用量的 50%左右),使用后相当大一部分进入大气、地表水、地下水,形成跨介质污染,直接危害人类健康,且可以通过降水、地表径流等方式流入海洋,对近海非目标生物造成严重危害。而处于水-陆交错带的沿海滩涂是海洋生态系统的重要组成部分,是鸟类和鱼、虾等生物的重要栖

收稿日期:2009-08-06

基金项目:盐城工学院校级重点课题(XKY2007032)

作者简介:吕林兰(1976—),女,重庆人,讲师,在读博士,主要从事水域生态学和水产养殖教学与研究工作。

E-mail:lvlinlan@ycit.cn

息地和繁殖场所^[1]。此外,因滩涂对经过的物质和能量有拦截、过滤作用,从而成为重要的水质净化区和污染缓冲带。基于上述原因,监测有机磷农药类污染物。分析其对生物体造成的毒害作用,并对其进行风险评估和管理显得十分必要。我国目前用于海洋环境生物标记物的研究主要以海水鱼类和贝类为主^[2]。

20世纪50年代发现第一代农药(有机氯)对蚯蚓的毒害后,蚯蚓开始被认为是土壤有毒化学物质的指示生物^[3],环节动物的环境监测预警作用也随即受到了广大专家学者的关注。双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)是一种广泛分布于潮间带上部至深海底部的环节动物,栖息于水-陆交错带,对温度和盐度具有较强的适应能力,是沿海滩涂鱼、虾、蟹和鸟类的主要食物来源,其数量丰欠会直接影响到滩涂生物食物链的长短及生物多样性。已有研究表明,沙蚕可作为评价河口生态系统重金属、石油烃等有毒污染物的指示生物^[4-6],Pérez等^[7]分析了污染地区浅沟蛤(*Scrobicularia plana*)和双齿围沙蚕的过氧化氢酶、谷胱甘肽、谷胱甘肽转移酶、乙酰胆碱酯酶(AChE)和金属硫蛋白等生物标记物响应,结果显示AChE在这两种生物中都是最敏感的生物标记物。相对贝类而言,沙蚕更适合对沉积物污染进行监测。

本文研究了我国广泛使用的有机磷农药马拉硫磷对双齿围沙蚕的急性毒性效应和低浓度马拉硫磷对沙蚕乙酰胆碱酯酶、过氧化氢酶的影响。以期为沿海滩涂有机磷污染的预警监测提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

双齿围沙蚕采自盐城市大丰港滩涂,个体均重为 (2.34 ± 0.05) g。

马拉硫磷乳油(含量为45%),河北圣亚达化工有限公司生产。

1.2 试验方法

1.2.1 污染浓度的确定

首先进行预试验确定急性毒性试验的药物浓度范围,在最小致死浓度MLC和最大致死浓度 LC_{100} 之间,设置马拉硫磷的急性毒性试验浓度为0、29.25、42.75、62.82、92.07、135.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2.2 急性毒性试验

沙蚕冰盒密封运送到试验室后,先打开冰盒使温度缓慢回升至室温,然后用沙蚕生活区域海水清洗,挑选出健康完整的个体,用海水人工配制海水盐度为

$(28 \pm 1)\%$ 暂养7d。暂养结束后,挑选出大小相近的5尾沙蚕放入500 mL烧杯中,分别加入不同浓度的测试液250 mL,每个浓度梯度3个平行。每24 h换液一次,观察沙蚕中毒症状,并记录死亡数目,根据加权概率法计算48、72和96 h半致死浓度(LC_{50}),并根据以下公式计算安全浓度:

$$\text{安全浓度} = 96 \text{ h } LC_{50} \times 0.1$$

1.2.3 亚急性毒性试验

根据急性毒性试验结果设定亚急性毒性试验浓度梯度为0、0.0018、0.018、0.18、1.8、3.6、9 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。挑选大小相近的3尾沙蚕置于150 mL的马拉硫磷水溶液中,每个浓度做6个重复。每24 h换水一次,暴露3 d和6 d后,各取3个平行组沙蚕,每组取一尾沙蚕头部测定AChE、CAT活性及蛋白含量。

1.2.4 组织匀浆液的制备

迅速称取0.5 g沙蚕头部置于冰浴中,然后加入4.5 mL 0.9%的生理盐水匀浆,将匀浆液于4℃、3 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心15 min,上清液即为10%的组织匀浆提取液,低温保存备用。

1.2.5 测定方法

AChE、CAT活性及蛋白质含量均采用南京建成生物技术公司试剂盒测定。试验操作步骤按照试剂盒说明书进行。

AChE单位定义:以每毫克组织蛋白在37℃保温6 min,水解反应体系中1 μmol 基质为1个活力单位(U)。

CAT单位定义:以每1 min催化1 μmol H_2O_2 分解的酶量定义为一个酶活力单位(U)。

1.3 数据处理

原始数据经Excel2003初步整理后,用SPSS16.0进行单因素方差分析和 t 检验,分析各处理组与对照的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 马拉硫磷对双齿围沙蚕急性毒性效应

马拉硫磷对双齿围沙蚕具有较强的毒性,受试沙蚕中毒症状显著,表现为:在高浓度下几分钟后即出现剧烈的弹跳和翻转扭动,躯体卷曲、不安,活力随时间延长而减低,躯体变软,触碰才会有轻微的摆动。高浓度组92.07和135 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 在放入1 min后即表现出明显中毒症状,29.25、42.75、62.82 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组受试沙蚕暴露8 h后均有不同程度的中毒症状。持续暴露较长时间后个体从尾部开始出现血点或血溶,溃烂自尾部渐至头部,最后死亡。

在相同浓度下,双齿围沙蚕的死亡率随暴露于马拉硫磷中时间延长而升高(表 1)。在一定试验时间内,马拉硫磷浓度越高,双齿围沙蚕死亡率越高,说明马拉硫磷的毒性作用越强。

表 1 不同浓度马拉硫磷对双齿围沙蚕的毒性效应

Table 1 Toxicity of different concentrations of malathion to polychaete *Perinereis aibuhitensis*

浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	浓度对数	死亡率/%			
		24 h	48 h	72 h	96 h
0	0	0	0	0	0
29.25	1.47	0	6.7	6.7	46.7
42.75	1.63	0	26.7	46.7	60.0
62.82	1.80	0	46.7	73.3	80.0
92.07	1.96	6.7	60	93.3	93.3
135.00	2.13	60	100	100	100

试验结果表明,马拉硫磷浓度对数与沙蚕死亡率呈直线相关(表 2),采用概率法求得其对双齿围沙蚕的 48、72、96 h 的 LC_{50} 分别为 71.68、49.21、33.16 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,安全浓度为 3.32 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 2 马拉硫磷对双齿围沙蚕的半致死浓度及其回归方程

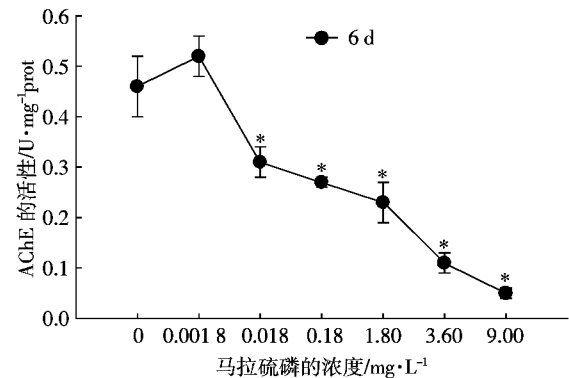
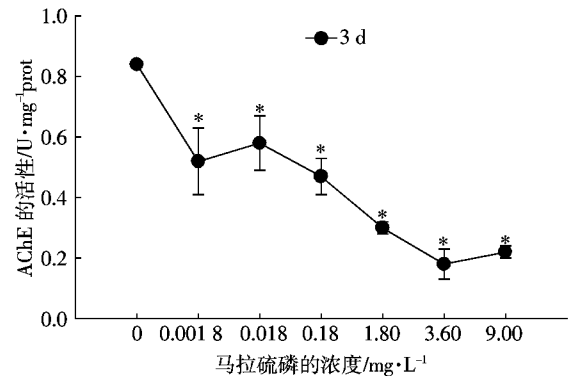
Table 2 Median lethal concentrations of the polychaete *Perinereis aibuhitensis* by malathion and relevant regression equations

时间/h	$LC_{50}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	相关系数/ r	相关性	回归方程	95%置信限/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
48	71.68	0.99	显著	$Y=-1.47+3.49X$	50.23~102.27
72	49.21	0.98	显著	$Y=-4.90+5.85X$	36.74~65.90
96	33.16	0.99	极显著	$Y=0.092+3.23X$	19.71~55.79

注:回归方程均为概率单位与质量浓度对数回归方程。

2.2 马拉硫磷对双齿围沙蚕乙酰胆碱酯酶和过氧化氢酶的影响

在马拉硫磷胁迫下,沙蚕体内 AChE 活性变化如图 1 所示。暴露 3 d 时,最低浓度组(0.001 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)沙蚕 AChE 活性较对照显著降低了 38.09%,且活性随马拉硫磷浓度增大进一步显著下降($P<0.05$),3.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度下 AChE 的抑制率(图 2)达最大值 78.83%,而 9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组抑制率与 3.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比变化不显著。在马拉硫磷中暴露 6 d 时,沙蚕体内 AChE 活性变化趋势与暴露 3 d 时大致相同,随马拉硫磷浓度增大而降低,9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度组对 AChE 抑制率达最大值 88.92%。在 0.018~9 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内,马拉硫磷浓度对数与沙蚕 AChE 抑制率存在线性回归关系(表 3)。同一浓度组沙蚕 AChE 活性随暴露时间延长而显著降低,表明马拉硫磷对沙蚕的毒害作用随



* 表示与对照相比差异显著($P<0.05$),下同

图 1 马拉硫磷对沙蚕 AChE 活性的影响

Figure 1 The effect of malathion on the activity of AChE of polychaete *Perinereis aibuhitensis*

表 3 马拉硫磷浓度对数(X)与乙酰胆碱酯酶抑制率(Y)回归关系

Table 3 Regression equations between malathion logarithmic concentration (X) and inhibition rate of AChE activity (Y) of polychaete *Perinereis aibuhitensis*

暴露时间/d	回归方程	相关系数	显著性
3	$Y=18.12X+61.23$	$R^2=0.95$	显著($P<0.05$)
6	$Y=19.30X+60.87$	$R^2=0.81$	显著($P<0.05$)

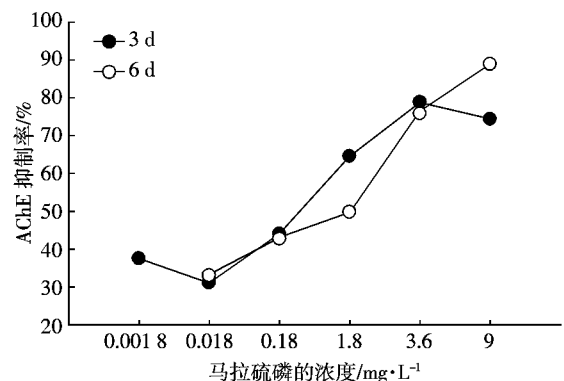


图 2 马拉硫磷对沙蚕 AChE 抑制率

Figure 2 The effect of malathion on the inhibition rate of AChE activity of polychaete *Perinereis aibuhitensis*

时间延长而增强。

沙蚕暴露于不同浓度马拉硫磷 3 d 和 6 d, 其 CAT 活性变化情况如图 3 所示。随着马拉硫磷浓度增加, 沙蚕 CAT 活性表现出先降后升再降的趋势。沙蚕暴露于马拉硫磷 3 d 时, CAT 活性在 $0.018 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 达到峰值, 比对照组高出 52.09%, 差异显著; 除 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组外的其余各组 CAT 活性均较对照组显著降低 ($P < 0.05$)。暴露 6 d 时, 沙蚕 CAT 活性在马拉硫磷浓度为 0.018 、 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时显著高于对照, 其余浓度组的活性明显受到抑制。

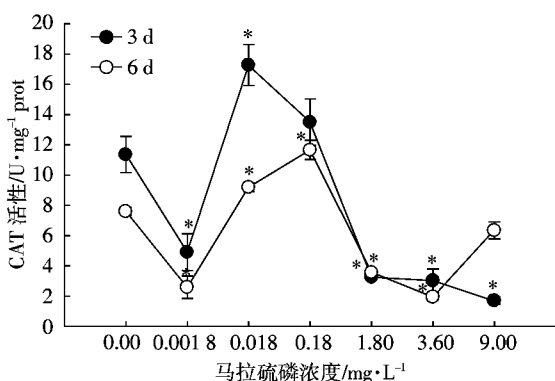


图 3 马拉硫磷对沙蚕过氧化氢酶的影响

Figure 3 The effect of malathion on the catalase activity of polychaete *Perinereis aibuhitensis*

3 讨论

3.1 沙蚕对马拉硫磷的敏感性

马拉硫磷具有良好的触杀和一定的熏蒸作用, 无内吸作用。进入虫体后氧化成马拉氧磷, 从而更能发挥毒杀作用。进入温血动物时, 则被在昆虫体内所没有的羧酸酯酶水解, 因而失去毒性。根据我国农药急性毒性暂行标准, 马拉硫磷属于低毒农药 (大白鼠, 口服: $LD_{50} > 500 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。马拉硫磷对鱼类具有中等毒性, 如马拉硫磷对麦穗鱼 (*Pseudorasbora parva*) 96 h 的 LC_{50} 是 $14.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8], 对罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 96 h LC_{50} 为 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9], 而水蚤相对敏感, 马拉硫磷对多刺裸腹蚤 (*Moina macrocopa*) 24、48、72 h 的 LC_{50} 在 $5.00 \sim 10.00 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[10]。本研究得出马拉硫磷对双齿围沙蚕 96 h 的 LC_{50} 为 $33.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3.2 沙蚕乙酰胆碱酯酶对马拉硫磷的响应

乙酰胆碱酯酶 AChE (EC 3.1.1.7) 是一种广泛存在于脊椎动物和无脊椎动物体内的水解酶, 能被有机磷和氨基甲酸酯农药特异性抑制, 因此被广泛用作监测环境中有机磷和氨基甲酸酯农药污染^[11-13]的生物标

记物。朱小山等^[14]研究了 5 种鱼脑 AChE 对两种有机磷的敏感性, 表明鱼脑 AChE 活力抑制作用与水体中有机磷农药 (OPs) 具有良好的剂量-效应关系, 在 $1 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内, 两者间呈现较好的线性相关性。穆大刚等^[15]研究了海水鱼 AChE 对马拉硫磷和甲基对硫磷的灵敏度, 分别达到 0.28 和 $0.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; 在一定浓度范围内, AChE 活力对 OPs 具有显著的线性响应, 表明利用鲈鱼 AChE 指示和监测海水 OPs 微污染是完全可行的。本研究也表明, 沙蚕短时间 (3 d) 暴露于低浓度 ($0.0018 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 马拉硫磷后 AChE 活性便显著下降, 在 $0.018 \sim 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 其抑制率与浓度对数具有较好的直线回归关系, 因此沙蚕 AChE 可作为敏感的滩涂有机磷农药污染监测指标。

一般认为 20% 以上的 AChE 活力抑制可以确认暴露作用的存在, 至于抑制达到何种程度才会导致生物死亡则仍存争议, 部分学者认为鱼类 AChE 活力抑制率达到 70%~85% 会导致死亡。Heatha^[16]的研究表明, 鱼类可以耐受 AChE 的抑制范围为 70%~80%; 而 Grue 等^[17]认为有机磷农药对鱼类 AChE 的抑制可从 50% 变化到 90% 以上。Abdullah 等^[18]研究扑粉硫磷对澳洲淡水虾 (*Paratya australiensis*) 胁迫发现, AChE 抑制率在 84%~97% 时会引起其死亡。本试验结果显示, 马拉硫磷对沙蚕 AChE 抑制率达 88.92% 时亦未见沙蚕死亡。可见不同受试动物可能存在不同的污染物抑制 AChE 耐受范围。也有研究者认为, AChE 的活力并不会受到绝对抑制 (抑制率达 100%), 当抑制率达到 80% 左右时, 抑制作用接近稳态, 抑制率便不再有明显的变化, 此时可能导致生物死亡^[18-19]。

3.3 马拉硫磷对沙蚕过氧化氢酶的影响

在污染物胁迫等逆境情况下, 生物体内广泛存在活性氧爆发现象而使自由基增多, 细胞膜产生过氧化, 导致细胞膜的破坏和损伤。CAT 与超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 共同组成了生物体内活性氧防御系统, 在清除超氧自由基、 H_2O_2 和过氧化物以及阻止或减少羟基自由基形成等方面发挥着重要作用。贾秀英等^[20]研究了铅胁迫下蟾蜍抗氧化酶活性的变化, 发现当 $\text{Pb} > 2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 蟾蜍肝、肾组织 SOD、CAT 活性显著升高; 当 $\text{Pb} > 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 肝、肾 CAT 活性又降至对照组水平甚至被明显抑制; 而肝、肾谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 活性则随着 Pb 浓度的升高而升高。孙淑红等^[21]研究了 Cd (II) 胁迫下, 泥鳅肝组织内抗氧化酶活性的变化, 结果显示低浓度 Cd (II) ($0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对泥鳅肝脏 SOD 活性有诱导

作用,并随着处理时间的延长而升高,对CAT、POD活性和MDA含量无显著影响,说明动物机体内的各种抗氧化酶对胁迫的响应并不一致,相互作用机制较为复杂。

本试验结果表明,马拉硫磷对沙蚕CAT活性有明显影响。随着马拉硫磷浓度的增大,沙蚕CAT活性总体趋势呈先降后升再降,说明沙蚕在低浓度马拉硫磷作用下细胞已受到一定程度的伤害,但还不足以激发酶活响应机制。随着浓度进一步加大,酶活响应机制被激发,组织清除 $O_2^{\cdot-}$ 的能力增强,反映了机体对氧化胁迫的适应性。这种引起动物抗氧化酶出现的增益现象被Stebbing称为“毒物兴奋效应”^[2],这一点与蟾蜍铅中毒后CAT活性增加相一致^[20]。而后CAT活性降低则可能是中毒加深的表现,表明沙蚕在较高浓度马拉硫磷胁迫下组织严重受损或CAT发生钝化,也可能是其他种类抗氧化酶的活性被激活清除了自由基所致,这一问题还有待进一步研究。

4 结论

本文通过研究马拉硫磷对双齿围沙蚕急性和亚慢性毒性效应,得出以下结论:

(1)马拉硫磷对双齿围沙蚕安全浓度为 $3.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2)双齿围沙蚕在马拉硫磷胁迫下,体内AChE活性被显著抑制,AChE抑制率与马拉硫磷浓度对数具有显著的剂量效应,沙蚕AChE可作为检测滩涂有机磷污染的敏感生物标记物。

(3)暴露在不同浓度下,双齿围沙蚕CAT活性随马拉硫磷浓度增加呈先降后升再降的变化趋势;在同一浓度下,双齿围沙蚕CAT活性随暴露时间延长而逐渐减低。

参考文献:

- [1] 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 331-335.
YIN Cheng-qing. The ecological function, protection and utilization of land/inland water ecotones[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 331-335.
- [2] 刘日先, 王新红, 洪华生, 等. 生物标记物检测在海洋环境污染监测中的应用[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 68-73.
LIU Ri-xian, WANG Xin-hong, HONG Hua-sheng, et al. Application of biomarkers in marine environment monitoring[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3): 68-73.
- [3] 邱江平. 蚯蚓与环境保护[J]. 贵州科学, 2000, 18(1-2): 116-133.
QIU Jiang-ping. Earthworms and environmental protection[J]. *Guizhou Science*, 2000, 18(1-2): 116-133.
- [4] Scaps P, Demuyne S, Decamps M, et al. Effects of organophosphate and carbamate pesticides on acetylcholinesterase and choline acetyltransferase activities of the polychaete *Nereis diversicolor*[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1997, 33: 203-208.
- [5] Durou C, Smith B D, Roméo M, et al. From biomarkers to population responses in *Nereis diversicolor*: Assessment of stress in estuarine ecosystems[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 66: 402-411.
- [6] Burlinson F C, Lawrence A J. Development and validation of a behavioural assay to measure the tolerance of *Hediste diversicolor* to copper[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 274-278.
- [7] Pérez E, Blasco J, Solé M. Biomarker responses to pollution in two invertebrate species: *Scrobicularia plana* and *Nereis diversicolor* from the Cádiz bay (SW Spain)[J]. *Marine Environmental Research*, 2004, 58: 275-279.
- [8] Li S N, Fan D F. Correlation between biochemical parameters and susceptibility of freshwater fish to malathion[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 1996, 48: 413-418.
- [9] Pathiratne A, Georg S G. Toxicity of malathion to Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* and modulation by other environmental contaminants[J]. *Aquatic Toxicology*, 1998, 43: 261-271.
- [10] Wong C K, Chu K H, Shum E E. Acute and chronic toxicity of malathion to the freshwater cladoceran *Moina macrocopa*[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 84: 399-405.
- [11] Pascal M, Michel X, Narbonne J F. Cholinesterase activity as potential biomarker in two bivalves[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 1999, 7(4): 253-260.
- [12] de la Torre F R, Ferrari L, Salibián A. Freshwater pollution biomarker: Response of brain acetylcholinesterase activity in two fish species[J]. *Comp Biochem Physiology Part C*, 2002, 131: 271-280.
- [13] Rodríguez-Fuentes G, Gold-Bouchot G. Environmental monitoring using acetylcholinesterase inhibition in vitro, a case study in two Mexican lagoons[J]. *Marine Environmental Research*, 2000, 50: 357-360.
- [14] 朱小山, 孟范平, 杨正先. 5种海鱼脑AChE对2种有机磷农药的敏感性比较[J]. 上海环境科学, 2003, 22(8): 521-525.
ZHU Xiao-shan, MENG Fan-ping, YANG Zheng-xian. Comparative study sensitivities of brain acetylcholinesterase from five marine fishes to two organophosphorus pesticides[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(8): 521-525.
- [15] 穆大刚, 孟范平, 朱小山, 等. 海鱼AChE监测海水有机磷农药的可行性研究[J]. 海洋湖沼通报, 2004(1): 68-72.
MU Da-gang, MENG Fan-ping, ZHU Xiao-shan, et al. A study on the feasibility of monitoring organophosphorus pesticides in seawater using AChE in marine fish: *Lateolabrax japonicus* (Cuvier)[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2004(1): 68-72.
- [16] Heath A G. Behavior and nervous system function[M]// Heath A G. Water pollution and fish physiology. Boca Raton, FL: CRC Press, 1987: 181-196.
- [17] Grue C E, Hart A D M, Mineau P. Biological consequences of depressed brain cholinesterase activity in wildlife[M]// Mineau P (ed). Cholinesterase inhibiting insecticides, chemicals in agriculture Vol. 2 Amsterdam: Elsevier, 1991: 152.

- [18] Abdullah A R, Kumar A, Chapman J C. Inhibition of acetylcholine-sterase in the Australian freshwater shrimp (*Paratya australiensis*) by profenofos[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1994, 13(11): 1861-1866.
- [19] Sancho E, Ferrand M D, Andreu E. Response and recovery of brain acetylcholinesterase activity in the European eel, *Anguilla anguilla*, exposed to fenitrothion[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, 38:205-209.
- [20] 贾秀英, 董爱华, 马小梅. 铅胁迫对蟾蜍抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(2):155-158.
- JIA Xiu-ying, DONG Ai-hua, MA Xiao-mei. Affection of lead stress on antioxidant enzyme activities and malonyldialdehyde contents of *Bufo bufo gargarizans*[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 155-158.
- [21] 孙淑红, 焦传珍, 刘小林, 等. Cd(Ⅱ)对泥鳅抗氧化酶活性和脂质过氧化的影响[J]. *大连水产学院学报*, 2009, 24(1):52-56.
- SUN Shu-hong, JIAO Chuan-zhen, LIU Xiao-lin, et al. Effects of cadmium(Ⅱ) stress on xanthine oxidase and antioxidant enzyme activities in hepatopancreas of oriental weatherfish *Misgurnus anguillicaudatus*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2009, 24(1):52-56.
- [22] Stebbing A R. Hormesis—the stimulation of growth by low levies of inhibition[J]. *The Science of the Total Environment*, 1982, 22(3):213-234.