

宿丽丽, 阎希柱. BDE-47 胁迫对双齿围沙蚕抗氧化防御系统的影响 [J]. 福建农业学报, 2016, 31 (6): 560—565.
SU L-L, YAN X-Z. Effect of the Antioxidant Defense System of *Perinereis aibuhitensis* Exposed to Tetrabromodiphenyl Ether [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31 (6): 560—565.

BDE-47 胁迫对双齿围沙蚕抗氧化防御系统的影响

宿丽丽, 阎希柱*

(集美大学水产学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 将双齿围沙蚕 *Perinereis aibuhitensis* 暴露在 BDE-47 下进行急性毒性试验, 测定 96 h-LC₅₀。在此基础上, 研究了暴露在 0、2、4、8 mg·L⁻¹ 的 BDE-47 污染物下, 双齿围沙蚕的谷胱甘肽 (GSH) 含量、谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx) 活力、超氧化物歧化酶 (SOD) 活力、过氧化氢酶 (CAT) 活力以及丙二醛 (MDA) 含量、谷胱甘肽硫转移酶 (GST) 活力的变化情况。结果表明 BDE-47 对双齿围沙蚕的 96 h-LC₅₀ 为 31.24 mg·L⁻¹。在暴露期间, 与对照组比较, 各处理组的 GSH 含量、GST 活力、CAT 活力总体上无显著变化, 仅 8 mg·L⁻¹ 组的 GST 活力在 14 d 极显著性升高 ($P<0.01$)。暴露 1 d 时, 4 mg·L⁻¹ 处理组 GPx 活力显著升高 ($P<0.05$), 在第 7~14 d 时, 2 mg·L⁻¹ 处理组的 GPx 活力呈上升趋势; 在暴露 1 d 时, 4 mg·L⁻¹、8 mg·L⁻¹ 两组的 SOD 活力显著下降 ($P<0.05$), 整体上看, 在 1~7 d 时, SOD 活力被诱导升高。14 d 时, 与对照组的比较, 4、8 mg·L⁻¹ 处理组的 SOD 活力分别被显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 抑制。在暴露 1 d 时, MDA 含量被诱导升高 ($P<0.05$), 且 4 mg·L⁻¹ 极显著升高 ($P<0.01$)。在暴露 4~14 d MDA 含量总体上无明显变化, 仅第 7 d 的 8 mg·L⁻¹ 处理组显著升高 ($P<0.05$)。结论: 在双齿围沙蚕抗氧化防御系统中, MDA 含量和 SOD 活力均在胁迫初期有显著变化, 因此 MDA 含量和 SOD 活力可以作为潜在的生物标志物。

关键词: 双齿围沙蚕; BDE-47; 抗氧化酶; GSH; MDA; 生物标志物

中图分类号: X 171

文献标识码: A

文章编号: 1008—0384 (2016) 06—560—06

Effect of the Antioxidant Defense System of *Perinereis aibuhitensis* Exposed to Tetrabromodiphenyl Ether

SU Li-li, YAN Xi-zhu*

(Fisheries College of Jimei University, Xiamen, Fujian 361012, China)

Abstract: *Perinereis aibuhitensis* is used as biological subject in acute toxicity test, for determining the 96 h-LC₅₀ of tetrabromodiphenyl ether(BDE-47). On this basis, the activities of SOD,CAT ,GST,GPx and the contents of GSH, MDA of the antioxidant defense system of *Perinereis aibuhitensis* exposed to 0,2,4,8 mg · L⁻¹ of BDE-47 pollutants were determined. The results were as follows: the 96h-LC₅₀ of BDE-47 to *Perinereis aibuhitensis* was 31.24 mg · L⁻¹. Compared with the control group, the content of GSH and activities of GST and CAT had basically no significant change, only the GST activity of 8 mg · L⁻¹ group was significantly higher ($P<0.01$) on 14 th day. The GPx activity of 4 mg · L⁻¹ group was significantly higher ($P<0.05$) on 1 th day, and 2 mg · L⁻¹ group showed the increasing trend during the 7 th to 14 th day. On 1 th day, the SOD activity of the 4 mg · L⁻¹ and 8 mg · L⁻¹ groups significantly decreased ($P<0.05$). Overall, during the period of 1~7 d, SOD activity of the 2 mg · L⁻¹, 4 mg · L⁻¹ groups were induced to rise. On 14 th day, SOD activity in 4 mg · L⁻¹, 8 mg · L⁻¹ groups were significant ($P<0.05$) and significantly ($P<0.01$) inhibited respectively. The MDA content of all the treatment groups were induced to increase ($P<0.05$), and 4 mg · L⁻¹ group significantly increased ($P<0.01$) on 1 th day. There was no significant change in the content of MDA of the treatment groups during the exposure period of 4—14 th day, only 8 mg · L⁻¹ group was significantly higher ($P<0.05$) on 7 th day. In conclusion: the content of MDA and activity of SOD of the antioxidant defense system of *Perinereis aibuhitensis* had significant changes at the early exposure stage ($P<0.05$), which could be used as potential biomarkers.

Key words: *Perinereis aibuhitensis*; BDE-47; antioxidant enzyme; GSH; MDA; biomarker

收稿日期: 2016—02—12 初稿; 2016—04—10 修改稿

作者简介: 宿丽丽 (1989—), 女, 硕士生, 主要从事分子生物学和海洋生物修复研究 (E-mail: 1090011725@qq.com)

* 通讯作者: 阎希柱(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事水生生物生态毒理学和养殖水域生境修复研究 (E-mail: yanxizhu@tom.com)

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项子课题 (201205009-4)

多溴联苯醚 *polybrominated diphenyl ethers*, PBDEs 是一类新型的持久性有机污染物, 2009 年被正式列入《斯德哥尔摩公约》^[1]。PBDEs 阻燃效率高, 热稳定性好, 常被应用于电力行业家用电器等领域^[2], 这些电子产品使用及废旧电子设备的拆卸处理过程, 是 PBDEs 进入环境的主要途径^[3]。欧寿铭等^[4]对厦门地区沉积物进行了监测, 发现沉积物中总 PBDE 最高值为厦门第一码头, 含量 $2.06 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。PBDEs 主要以低溴代联苯醚的形式大量蓄积在生物体内。 $2,2',4,4'$ -四溴联苯醚 ($2,2',4,4'$ -tetra-bromodiphenylether, BDE-47) 是 PBDEs 中主要存在的一种低溴代联苯醚^[5]。周明莹等^[6]对青岛胶州湾养殖水体中的 PBDEs 进行了调查, 主要检测出 BDE-47、BDE-17、BDE-85、BDE-99 等 4 种, 并且 BDE-47 为主要的污染物, 含量达到 $183.5 \text{ pg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

PBDEs 具有亲脂性和生物累积等特点^[7], 可以通过食物链放大, 对高营养级的生物造成影响。Verslycke 等^[8]检测出 Scheldt 河河口的沉积物中 PBDEs 的含量为 $14 \sim 22 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 栖息在河里的虾体内 PBDEs 为 $1765 \sim 2962 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (脂肪), PBDEs 在鱼虾体内大量的蓄积, 含量远远超过该地区环境中的含量。当 PBDEs 的蓄积量达到一定程度时, 会引发生物体的生殖发育毒性, 甲状腺毒性, 神经毒性, 免疫毒性等, 对生物造成损害。

双齿围沙蚕 *Perinereis aibuhitensis*, 属滩涂生物中的优势种, 喜穴居于风浪平静、营养丰富的潮间带泥沙滩, 数量多^[9-10], 丰富度高, 稳定性好, 地理分布广, 并且对海洋环境中持久性有机污染物反应敏感, 同时具有极强耐受性, 具有重要的生态学研究价值^[11]。因此常常选用双齿围沙蚕来评估滩涂及海洋沉积物的污染情况^[8,12-13]。

抗氧化防御系统在需氧生物体内具有十分重要的作用, 其中抗氧化酶在清除氧自由基和过氧化氢、遏制或减少羟自由基形成、保护机体免受自由基损害等方面具有关键作用。在正常的生理状态下, 动物体内的活性氧簇 (reactive oxygen species, ROS: O_2^- 、 H_2O_2 及 $\text{HO}_2 \cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$) 种类处于动态平衡状态。当有机体受到外源刺激时, ROS 大量产生, 引起细胞功能的紊乱, 从而使抗氧化防御系统发挥作用, 防止氧化损伤的产生。

许超群等^[14]用 0.25 、 1.25 、 $6.25 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BDE-47 对菲律宾蛤仔 *Ruditapes philippinarum* 进行处理, 鳃丝和消化盲囊 GSH 含量分别被显著诱导和抑制 ($P < 0.05$)。徐湘博^[15]将赤子爱胜蚓

Eisenia fetida 暴露于 10 、 50 、 100 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 BDE-47 中, 在暴露阶段, GST 活力变化不存在显著差异 ($P > 0.05$)。赵欢等^[16]将双齿围沙蚕暴露在 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ B (a) P 中, GPx 酶活性与 B (a) P 质量浓度和暴露时间成正相关 ($P < 0.01$)。周科^[17]将铜锈环棱螺 *Bellamya aeruginosa* 的肝胰脏暴露在 $40 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $160 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $640 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ BDE-47 污染沉积物中, SOD 活性和 CAT 活性有较显著的变化趋势。范灿鹏等^[18]将雌性剑尾鱼 *Xiphophorus helleri* 暴露在 BDE-47 下, MDA 含量先下降后逐渐上升。

本研究拟通过测定在 BDE-47 胁迫下谷胱甘肽硫转移酶 (GST)、过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx) 的活力以及谷胱甘肽 (GSH)、丙二醛 (MDA) 的含量在双齿围沙蚕体内的变化, 根据其含量和活性变化的敏感性, 从而为判定这些指标是否可以用作 BDE-47 污染的生物标志物提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试双齿围沙蚕购于宁德市霞浦县下土鼻海蜈蚣养殖场, 暂养于装有滩涂沉积物的塑料箱 ($100 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) 内 $5 \sim 10 \text{ d}$, 箱内沉积物的高度为 $7 \sim 8 \text{ cm}$, 期间及时挑出死亡个体。暂养采用过滤的海水, 海水盐度为 (30 ± 2) , pH 为 $7 \sim 8$, 温度为 $(25.00 \pm 0.50)^\circ\text{C}$, 日换水 $1 \sim 2$ 次, 投喂广东海大集团股份有限公司的凡纳滨对虾的 1 号配合饲料 $1 \sim 2$ 次。在试验前 1 d 停止投喂饵料, 挑取形态完整、健康活泼、规格相近的沙蚕 [体长 $(5.0 \pm 0.5) \text{ cm}$ 、体重 $(0.5 \pm 0.2) \text{ g}$] 进行试验。

BDE-47 购自武汉凯美克化学科技有限公司, 纯度为 98%; DMSO 分析纯; TP、GPX、GSH、GST、CAT、MDA、SOD 试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

1.2 试验方法

采用 DMSO 分析纯作为 BDE-47 的助溶剂, 配制质量浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 DMSO 储备液, 试验时分别用自然海水稀释所需的浓度, 且各处理组 DMSO 的体积分数均为 0.001%。

1.2.1 急性毒性试验 根据预试验的处理结果, 设置了 5 、 10 、 20 、 60 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 4 个处理组 (此浓度由 BDE-47 直接配制), 另外设置 1 个空白对照组和 DMSO 对照组, 1 个 100 mL 烧杯中加 20 mL BDE-47 溶液, 放入 1 条沙蚕, 每个处理组设

置 30 条沙蚕。试验期间不投喂, 8:00 和 20:00 各全部更新 1 次污染物溶液, 观察并记录 24、48、72、96 h 沙蚕的死亡个体数。计算 96h-LC₅₀ 和 95% 置信区间。

1.2.2 暴露试验及抗氧化防御系统测定 BDE-47 的浓度梯度设置为双齿围沙蚕 96h-LC₅₀ 的 1/4、1/8、1/16, 另外设置 DMSO 对照组和空白对照组, 每个处理组共 30 条沙蚕, 每个烧杯 1 尾沙蚕, 分别在 1、4、7、14 d 取样, 各处理组在胁迫 14 d 后, 再进行 5 d 的净水恢复 (recovery 5, r5), 于第 19 d 取样。在每个时间节点, 从每个处理组之中随机挑选取 3 条沙蚕作为 3 个重复, 分别进行测定, 每条沙蚕取组织 0.2~1.0 g, 加入 0.86% 生理盐水, 生理盐水的体积总量是组织块重量的 9 倍, 低温匀浆。将匀浆液于 4℃、2 000 r·min⁻¹ 条件下离心 15 min。取上清液, 严格按照南京建成生物工程研究所提供的试剂盒说明书进行抗氧化酶抗氧化防御酶系统指标的测定。蛋白含量采用考马斯亮蓝法, 以试剂盒蛋白标准液为标准蛋白, 同样按照试剂盒说明进行测定。

1.3 数据统计分析

运用 Excel 对数据进行初步处理, 采用 SPSS 19.0 单因素方差分析 (ANOVA) 对数据进行 LSD 多重分析。“*”表示处理组与对照组差异显著 ($P < 0.05$); “**”表示处理组与对照组差异极显著 ($P < 0.01$)。采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 BDE-47 对双齿围沙蚕的急性毒性的影响

方差分析结果表明, 0.001% 的 DMSO 助溶剂对照组与空白对照组中的双齿围沙蚕各指标的响应无显著差异 ($P > 0.05$), 因此, 选取助溶剂作为对照组。

双齿围沙蚕暴露在 BDE-47 溶液中, 开始时游动缓慢, 逐渐会有断尾的现象, 吻部会出现肿胀, 后期表皮破裂, 虫体泛白腐烂直至死亡。BDE-47 对双齿围沙蚕的 96h-LC₅₀ 为 31.24 mg·L⁻¹, 95% 置信度为 15.73~45.12 mg·L⁻¹。

2.2 BDE-47 对双齿围沙蚕抗氧化酶活性的影响

如图 1 所示, 在暴露期间 GSH 含量与对照组比较均无显著变化。净水恢复期时, GSH 含量反而被诱导显著升高, 2、4 mg·L⁻¹ 处理组极显著升高 ($P < 0.01$), 8 mg·L⁻¹ 组显著性升高 ($P < 0.05$)。

如图 2 所示, 与对照组比较 GST 活力总体上

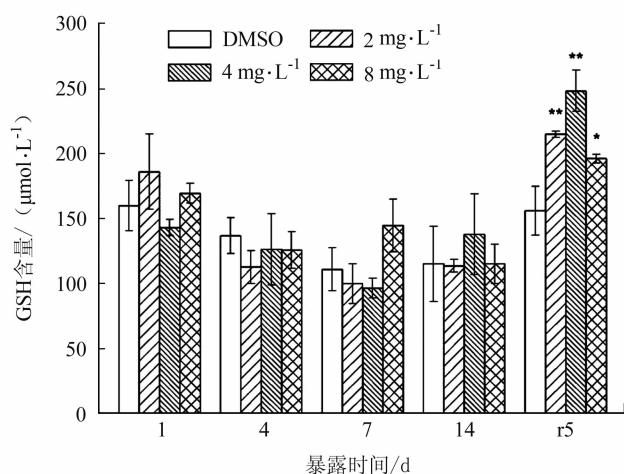


图 1 BDE-47 对双齿围沙蚕 GSH 含量的影响

Fig. 1 The effect of BDE-47 on the GSH quantity of *P. aibuhitensis*

没有显著变化, 仅 8 mg·L⁻¹ 组在 14 d 极显著性升高 ($P < 0.01$), 净水恢复期, 4 mg·L⁻¹ 被诱导极显著性升高 ($P < 0.01$)。

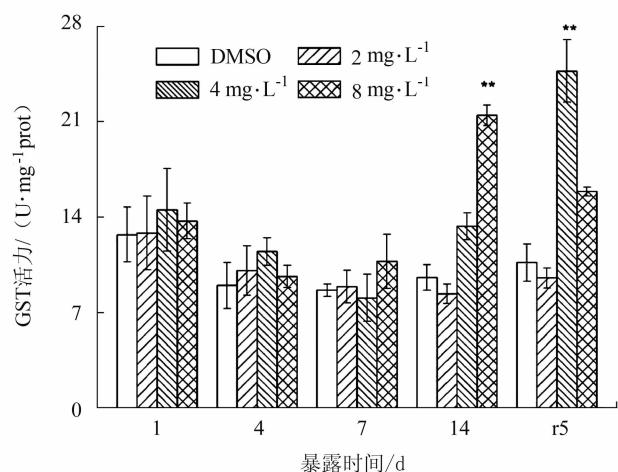


图 2 BDE-47 对双齿围沙蚕 GST 活力的影响

Fig. 2 The effect of BDE-47 on the GST activity of *P. aibuhitensis*

如图 3 所示, 暴露 1 d 时, 4 mg·L⁻¹ 处理组 GPx 活力显著性升高 ($P < 0.05$), 2 mg·L⁻¹ 的 GPx 活性在胁迫第 7~14 d 呈上升趋势 ($P < 0.05$), 在净水恢复阶段, 2、4 mg·L⁻¹ 处理组显著性升高 ($P < 0.05$), 8 mg·L⁻¹ 组极显著性升高 ($P < 0.01$)。

SOD 活力随时间的变化如图 4 所示: 暴露 1 d 时, 4、8 mg·L⁻¹ 两组 SOD 酶活力显著性下降 ($P < 0.05$), 暴露 4 d 时, 2 mg·L⁻¹ 处理组, SOD 活力继续下降, 而 4、8 mg·L⁻¹ 处理组 SOD

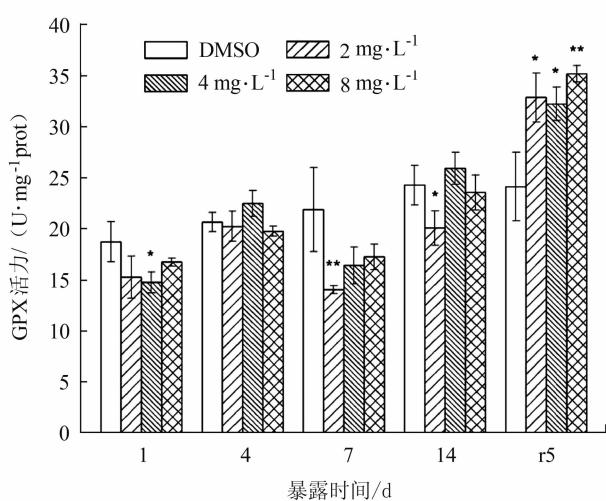


图3 BDE-47对双齿围沙蚕GPx活力的影响

Fig. 3 The effect of BDE-47 on the GPx activity of *P. aibuhitensis*

活力升高至与对照组一致,无显著变化;暴露7 d时,8 mg·L⁻¹组活力显著升高($P < 0.05$),而2、4 mg·L⁻¹两组SOD活力均无显著性变化。总体上看,在胁迫前期(1~7 d)SOD活力被诱导升高。14 d时,4 mg·L⁻¹、8 mg·L⁻¹处理组的SOD活力与对照组的比较,分别被显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)地抑制。净水恢复期,各处理组SOD活力与对照组基本一致,且差异不显著($P > 0.05$)。

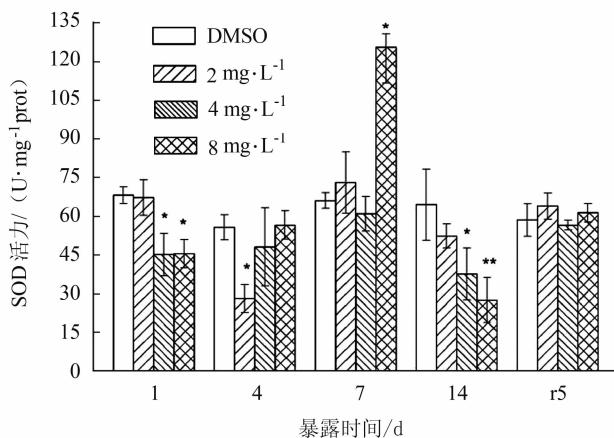


图4 BDE-47对双齿围沙蚕SOD活力的影响

Fig. 4 The effect of BDE-47 on the SOD activity of *P. aibuhitensis*

MDA含量随时间的变化如图5所示。暴露1 d时,MDA含量与对照组相比,均被诱导升高($P < 0.05$),且4 mg·L⁻¹极显著升高($P < 0.01$)。暴露4、7 d时,2 mg·L⁻¹、4 mg·L⁻¹

两组均无显著变化,8 mg·L⁻¹显著升高($P < 0.05$)。总体上看,在暴露4~14 d期间,MDA含量无显著变化($P > 0.05$),仅7 d的8 mg·L⁻¹组活力显著升高($P < 0.05$)。在净水恢复期,2 mg·L⁻¹处理组MDA含量极显著性升高($P < 0.01$),4 mg·L⁻¹处理组MDA含量显著升高($P < 0.05$)。

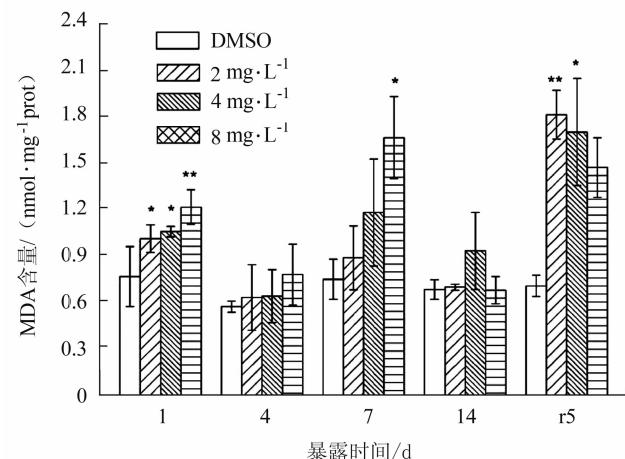


图5 BDE-47对双齿围沙蚕MDA含量的影响

Fig. 5 The effect of BDE-47 on the MDA quantity of *P. aibuhitensis*

如图6所示,在暴露期间,各处理组的CAT活力与对照组的相比,均差异不显著($P > 0.05$),在净水恢复期,2、4 mg·L⁻¹极显著高于对照组($P < 0.01$),8 mg·L⁻¹处理组无显著变化($P > 0.05$)。

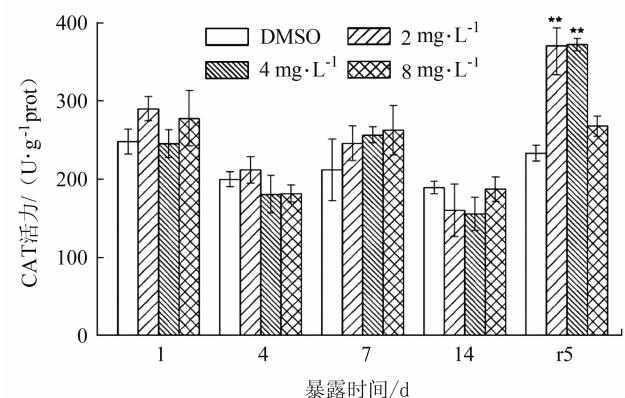


图6 BDE-47对双齿围沙蚕CAT活力的影响

Fig. 6 The effect of BDE-47 on the CAT activity of *P. aibuhitensis*

3 讨论与结论

3.1 BDE-47对双齿围沙蚕急性毒性试验的影响

在急性毒性试验中,随着暴露时间的延长,沙蚕会出现断尾现象。Lucan-Bouché等^[19]研究表明:

沙蚕的断尾现象是一种自我保护机制, 来消除体内不断积累的有害物质。BDE-47 对太平洋真宽水蚤 *Eurytemora pacifica* 的 96 h-LC₅₀ 为 $57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 对日本虎斑猛水蚤 *Tigriopus japonicus* 的 96 h-LC₅₀ 为 $851 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20]; 而 BDE-47 对剑尾鱼 *Xiphophorus helleri* 的 96 h-LC₅₀ 为 $2.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[18]。本研究结果表明, BDE-47 对双齿围沙蚕的 96 h-LC₅₀ 为 $31.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这说明不同种类的水生生物对 BDE-47 的敏感性有很大差异, 而沙蚕的 96 h-LC₅₀ 之所以达到这么高, 可能是因为沙蚕对 BDE-47 的耐受性较强; 沙蚕自身会分泌黏液形成一个保护膜, 从而减少环境中 BDE-47 对沙蚕产生毒性, 还有可能是机体自身代谢, 会使部分的毒物排除体外。

3.2 BDE-47 对双齿围沙蚕 GSH 含量和 GST、GPx 活性的影响

GSH 是水溶性抗氧化剂, 具有重要的抗氧化作用, 其结构中的活性基团-巯基, 易与体内自由基、重金属等毒素结合, 参与生物体内的生物转化过程, 具有整合解毒、保护生物体内膜系统的作用。可以清除细胞内被诱导产生的过量 H₂O₂; 能直接与 ROS 发生非酶促反应; 同时还是 GST 的底物。GST 是生物体内重要的 II 相代谢酶之一, GST 在清除体内自由基的同时还可以调控 GSH 发挥作用, GST 的活性能够反映出生物机体抗氧化能力^[21]。GPx 可以催化 GSH, 把 H₂O₂还原为 H₂O, 其自身被氧化成为氧化型谷胱甘肽 (GSSG), GSSG 受到谷胱甘肽还原酶 (GR) 的催化作用, 被还原成 GSH, 使体内自由基的清除反应能够持续进行。

在本研究中, GSH 含量和 GST 活力总体上没有显著变化, 仅 GST 活力的 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组在第 14 d 极显著性升高 ($P < 0.01$)。说明在 1~14 d 的受胁迫期间双齿围沙蚕 GSH 和 GST 未发挥作用。随着胁迫时间的延长, ROS 在体内不断的积累, 可能在净水恢复期 GSH 和 GST 才发挥作用清除体内 ROS, 因此 GSH 含量显著性升高, $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组的 GST 活力显著性升高。 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 组的 GPx 活力在胁迫第 7~14 d 呈上升趋势, 在胁迫后期发挥作用, 同样净水恢复期, GPx 活力显著升高来清除体内积累的 ROS。

在暴露期间, 各处理组的 GSH 含量和 GST、GPx 活力与对照组的相比较, 总体上均差异不大, 但在恢复期, 此 3 个指标总体上被显著诱导, 这可能是由于胁迫时间较短, 它们尚未对 BDE-47 做出

响应的缘故, 所以, 不宜将它们作为 BDE-47 污染的早期预警生物标志物。

3.3 BDE-47 对双齿围沙蚕 SOD、CAT 活性和 MDA 含量的影响

SOD 是生物体内一种重要的抗氧化酶, 能够催化体内的 O₂⁻发生歧化反应生成 O₂ 和 H₂O₂^[22], 清除细胞内新陈代谢等过程中产生的氧自由基, 并能稳定细胞膜。SOD 的活力间接反映了机体清除氧自由基的能力。丙二醛 (MDA) 是 ROS 攻击细胞膜磷脂中多不饱和脂肪酸后发生膜脂质过氧化的主要产物之一, 可加剧膜损伤, 是细胞发生脂质过氧化反应中最具代表性的产物, 其含量可直接反应脂质过氧化的程度, 间接反应自由基对机体的损伤程度^[23~24]。

本研究在暴露 1 d 时, 沙蚕细胞受到胁迫, 产生大量的 ROS, 使抗氧化防御系统受到损伤, 4 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两组 SOD 酶活力下降, 总体上看, 4 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 在胁迫前期 (1~7 d) SOD 活力呈升高趋势, 说明此时抗氧化防御系统发挥作用, 清除了沙蚕受到胁迫产生的 ROS, 第 7 d 的 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度可能过高, 需要产生大量的 SOD 清除体内 ROS, 因此显著性升高。随着暴露时间的继续延长, 持续胁迫 14 d 时, ROS 在沙蚕体内累积, 需要消耗大量的 SOD 酶来清除。因此, 4 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两组 SOD 活力受到显著抑制 ($P < 0.05$)。沙蚕在受到胁迫时 SOD 活力会受到影响, 但自身具有恢复能力, 在外界刺激消失时恢复到了自然水平^[25]。SOD 活力的变化主要是在前期和后期, 而胁迫中期, 总体上无显著差异。

在本研究之中, 与 SOD 活力相对应, MDA 含量暴露 1 d 时被诱导升高, 可能是因为 ROS 使机体发生脂质过氧化反应, 导致 MDA 大量的产生。随后, 可能是抗氧化防御系统发挥作用清除了过量的 ROS, MDA 含量降低, 并且在胁迫 4~14 d 机体所产生的 ROS 不够引起脂质过氧化反应, 因此 MDA 含量无显著性变化。但第 7 d 的 $8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 可能是因为浓度过高, 才会导致脂质过氧化产物短时间内不能完全清除, 因此显著升高。在净水恢复期, BDE-47 胁迫消失, MDA 含量持续升高, 可能是由于细胞脂质过氧化反应, 导致细胞膜受到严重破坏, 可能已经无法维持生物膜功能的完整性。MDA 含量对 BDE-47 的响应主要是在胁迫初期 (1 d), 后期总体上无显著变化。

CAT 酶是以铁卟啉为辅基, 能分解羟自由基和 H₂O₂, 从而减轻活性氧对机体细胞的氧化损

伤^[26]。在暴露期间, CAT 活力处理组与对照组相比较均没有显著变化 ($P > 0.05$), 只在净水恢复期 CAT 活力整体上呈现升高的趋势, 可能是沙蚕体内积累的过量 ROS 需要 CAT 发挥作用清除, 因此 CAT 活力升高。

从总体结果看, 除了 SOD 活力外, 其他指标都是在恢复期显著诱导, 这可能是由于胁迫期间产生的 ROS 需要经历一定时间, 并在体内累积达到了一定的量, 才需要抗氧化防御系统来清除, 其他指标在胁迫后期才逐渐发挥作用所致。

抗氧化防御系统指标是防御型生物标志物, 对机体氧化应激比较敏感。通过本研究可以得出以下结论: ① GSH 含量与 GST、GPx、CAT 活力对照组相比, 总体上差异不显著 ($P > 0.05$), 所以不宜作为监测环境污染的早期预警的生物标志物; ② MDA 含量和 SOD 活力的显著性变化主要是在胁迫初期 (1 d), 因此 MDA 含量和 SOD 活力可以作为潜在的生物标志物。

参考文献:

- [1] 董亮, 张秀蓝, 史双昕, 等. 新型持久性有机污染物分析方法研究进展 [J]. 中国科学: 化学, 2013, 43 (3): 336—350.
- [2] ALAEE M, ARIAS P, SJIDIN A, et al. An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release [J]. Environment International, 2003, 29 (6): 683—689.
- [3] DARNERUD P O, VILUKSELA M. Polybrominated Diphenyl Ethers: Occurrence, Dietary Exposure, and Toxicology [J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109 (S1): 49—68.
- [4] 欧寿铭. 厦门港和筼筜湖沉积物中多溴联苯醚类防火剂 (PBDEs) 的色谱-质谱联机同位素稀释法测定 [J]. 福建分析测试, 2006, 15 (1): 1—3.
- [5] CHRISTENSEN J H, GLASIUS M, P CSELI M, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in marine fish and blue mussels from southern Greenland [J]. Chemosphere, 2002, 47 (6): 631—638.
- [6] 周明莹, 张惠珍, 夏斌, 等. 多溴联苯醚在胶州湾养殖水域含量水平与分布 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29 (6): 884—8.
- [7] CHEN J W, HARNER T, YANG P, et al. Quantitative predictive models for octanol-air partition coefficients of polybrominated diphenyl ethers at different temperatures [J]. Chemosphere, 2003, 51 (7): 577—584.
- [8] VERSLYCKE T A, A DICK V, KATRIEN A, et al. Flame retardants, surfactants and organotins in sediment and mysid shrimp of the Scheldt estuary (The Netherlands) [J]. Environmental Pollution, 2005, 136 (1): 19—31.
- [9] JIE H. Study on the Macrofauna Abundance and Biomass in Bohai Sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31 (8): 89—96.
- [10] 周进, 李新正. 中国海多毛纲动物研究现状及展望 [J]. 海洋科学, 2011, (6): 82—89.
- [11] 盖珊珊. 山东沿海不同地理群体双齿围沙蚕 (*Perinereis abuhitensis*) 的早期发育及遗传多样性研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [12] LECOEUR S, VIDEMANN B, BERNY P. Evaluation of metallothionein as a biomarker of single and combined Cd/Cu exposure in *Dreissena polymorpha* [J]. Environmental Research, 2004, 94 (2): 184—191.
- [13] BAT L. A review of sediment toxicity bioassays using the amphipods and polychaetes [J]. Turkish Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2005, (2): 119—139.
- [14] 许超群, 潘鲁青, 王琳. 四溴联苯醚 (BDE-47) 对菲律宾蛤仔组织解毒代谢酶活力与 DNA 损伤的影响 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30 (5): 653—658.
- [15] 徐湘博, 史雅娟, 吕永龙, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚对赤子爱胜蚓的抗氧化酶、代谢酶及其基因表达的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, 34 (11): 2948—2955.
- [16] 赵欢, 赵新达, 岳宗豪, 等. 苯并 (a) 芘对双齿围沙蚕抗氧化酶活性和细胞色素 P450 基因表达的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2014, (4): 342—346.
- [17] 周科, 马陶武, 朱程, 等. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚 (BDE-47) 污染沉积物对铜锈环棱螺肝胰脏的 SOD、CAT 和 EROD 活性的影响 [J]. 环境科学学报, 2010, 30 (8): 1666—1673.
- [18] 范灿鹏, 王奇, 刘昕宇, 等. 四溴联苯醚对剑尾鱼毒性及其抗氧化系统的影响 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 642—648.
- [19] LUCAN-BOUCH M L, BIAGIANTI-RISBOURG S, ARSAC F, et al. An original decontamination process developed by the aquatic oligochaete *Tubifex tubifex* exposed to copper and lead [J]. Aquatic Toxicology, 1999, 45 (1): 9—17.
- [20] 徐风风. 四溴联苯醚 (BDE-47) 对两种海洋桡足类的毒性影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [21] 聂凤琴. 多溴联苯醚对鲫鱼分子毒理效应的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [22] 董亮, 何永志, 王远亮, 等. 超氧化物歧化酶 (SOD) 的应用研究进展 [J]. 中国农业科技导报, 2013, (5): 53—58.
- [23] 陈汉, 王慧君, 李学锋, 等. 甲基苯丙胺对大鼠脑组织中 NO、SOD 和 MDA 的影响 [J]. 中国药物依赖性杂志, 2007, 16 (2): 102—104.
- [24] PELLERIN-MASSICOTTE J. Oxidative processes as indicators of chemical stress in marine bivalves [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Stress & Recovery, 1994, 3(2): 101—111.
- [25] 刘嫦娥, 段昌群, 王旭, 等. 丁草胺和乙草胺对蚯蚓 CAT 和 SOD 活性的影响 [J]. 环境化学, 2008, 27 (6): 756—761.
- [26] 陈家长, 杨光, 孟顺龙, 等. 不同浓度阿维菌素对鲤鱼过氧化氢酶和谷胱甘肽-S-转移酶活性的影响 [J]. 生态学杂志, 2010, 29 (4): 680—686.

(责任编辑: 林海清)