

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2012.05.004

BDE3 胁迫对翡翠贻贝 (*Perna viridis*) SOD、MDA 和 GSH 的影响

黄志斐^{1,2}, 马胜伟¹, 张喆¹, 王贺威^{1,2}, 巩秀玉^{1,2},
蔡文贵¹, 陈海刚¹, 贾晓平¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学, 上海 201306)

摘要: 采用半静态试验方法, 研究了不同质量浓度的一溴联苯醚(BDE3) ($1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 胁迫 1 d、3 d、7 d 和 15 d 且清洁海水释放 3 d 和 7 d 后, 翡翠贻贝 (*Perna viridis*) 外套膜和内脏团超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度和谷胱甘肽(GSH)质量分数的变化规律。结果表明, BDE3 胁迫后低浓度组翡翠贻贝两组织 SOD 活性均受到诱导 ($P < 0.01$), 诱导率随胁迫时间延长而下降, 中、高浓度组外套膜对 BDE3 响应比内脏团灵敏; BDE3 对翡翠贻贝外套膜 b(MDA) 的影响总体呈诱导后抑制趋势, 对内脏团 b(MDA) 的影响表现抑制-诱导反复变化, 其中低浓度组第 3 天时诱导率最高 (26.04%), 高浓度组第 7 天时抑制率最高 (14.92%); 翡翠贻贝外套膜 w(GSH) 在 BDE3 胁迫下, 低浓度组一直被诱导 ($P < 0.01$), 中、高浓度组总体呈诱导后抑制作用, 内脏团中高浓度组 w(GSH) 胁迫第 1 天受到显著抑制 ($P < 0.05$), 随暴露时间的延长, 低浓度组 w(GSH) 显著增加 ($P < 0.01$), 中、高浓度组出现诱导抑制的不规律变化。释放阶段结束后仅个别浓度组恢复至对照组水平。

关键词: BDE3; 翡翠贻贝; 外套膜; 内脏团; SOD; MDA; GSH

中图分类号: X 592

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2012)05-0025-06

Effects of BDE3 on SOD, MDA and GSH of *Perna viridis*

HUANG Zhifei^{1,2}, MA Shengwei¹, ZHANG Zhe¹, WANG Hewei^{1,2}, GONG Xiuyu^{1,2},
CAI Wengui¹, CHEN Haigang¹, JIA Xiaoping¹

(1. Key Lab. of Fishery Ecology and Environments, Guangdong Province; Key Lab. of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture; Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources & Environments, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To study the variation trends of superoxide dismutase (SOD) activity, malondialdehyde (MDA) level and glutathione (GSH) content in tissues of mantle and visceral mass of *Perna viridis*, we performed an experiment under semi-static conditions by exposing the samples to BDE3 ($1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) for 1 d, 3 d, 7 d and 15 d then releasing them by clean seawater for 3 d and 7 d. The results show that during the exposing period, SOD activities of the 2 tissues in $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ group were induced very significantly ($P < 0.01$), and the induction rate decreased with exposing time; SOD activities of mantle in groups of $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ were more sensible than those of visceral mass. MDA level increased at first then inhibited later in mantle, while induction and inhibition alternated in visceral mass; for $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ group, the highest induction rate reached 26.04% on 3rd day of expo-

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-05-11

资助项目: 广东省科技计划项目(2009B030600001, 2011A060902006); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国水产科学研究院南海水产研究所)资助项目(2009YD01, 2010YD04, 2010TS12); 广东省自然科学基金博士启动项目(S2011040005251); 广东省渔业生态环境重点实验室资助项目(GDKL2010-001); 中国水产科学研究院基本科研业务费资助(2012A0203)

作者简介: 黄志斐(1985-), 女, 硕士研究生, 从事渔业生态环境保护研究。E-mail: ali_lovelyfei@126.com

通讯作者: 贾晓平, E-mail: jxp60@tom.com

sing while the highest inhibitory rate reached 14.92% on 7th day. GSH content in mantle in 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ group was induced significantly ($P < 0.01$) all the time, while it increased at first then inhibited later for groups of 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; in visceral mass, GSH content in 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ group was induced significantly ($P < 0.01$) on 1st day, while that in 1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ group increased significantly with exposing time ($P < 0.01$); groups of 10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ showed irregular trends of induction-inhibition. After the releasing period, only individual groups recovered to the same level in the control.

Key words: BDE3; *Perna viridis*; mantle; viscera mass; SOD; MDA; GSH

多溴联苯醚 (polybrominated diphenyl ethers, PBDEs) 是一类广泛使用的溴代阻燃剂, 1960 年开始生产并大规模应用。1981 年瑞典学者在梭鱼 (*Liza soiuy*)、日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 和海鲢 (*Squaliobarbus ourriculus*) 中首次发现了 PBDEs 的存在, 并确定其为一种环境污染物^[1-2]。PBDEs 的结构和多氯联苯相似, 由于没有化学键的约束容易散逸到环境中^[3], PBDEs 具有较高的亲脂性, 化学性质比较稳定, 可远距离传输到地球各种环境介质中, 并通过食物链累积放大, 在生物体内蓄积产生毒性效应, 属于持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 的一种^[4], 对试验动物有致癌性、生殖毒性、神经毒性和内分泌干扰毒性^[5-7], 已形成全球性环境污染之势^[8]。PBDEs 众多同系物中低溴代联苯醚具有比高溴代联苯醚高的挥发性、水溶性和生物富集性, 因此底泥、水生生物、水和空气中都有低溴代联苯醚的存在^[9]。一溴联苯醚 (BDE3) 为仅含一个溴原子的低溴代联苯醚, 关于其毒性毒理研究甚少。近年来随着对海洋生态系统安全性的广泛关注, 关于 PBDEs 对海洋生物影响的研究日益增多, 但大多集中于 PBDEs 在生物体内的含量和分布的测定以及作为内分泌干扰物质对陆生哺乳类的生理毒害等方面, 今后应加强 PBDEs 对海洋生物的毒害作用及其机制的研究^[10]。

翡翠贻贝 (*Perna viridis*) 在中国南海分布广泛, 繁殖能力很强, 易于养殖, 为滤食性的双壳类动物, 营固着生活被动滤食, 对许多有机污染物都有很高蓄积能力, 可以较准确地反映环境污染情况, 因此可作为海洋环境污染的指示生物。随着中国溴化阻燃剂的用量不断加大, 海洋环境中的 PBDEs 的安全问题值得更多关注, 此研究旨在通过分析 BDE3 对翡翠贻贝外套膜和内脏团的超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 质量摩尔浓度和谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 质量分数的影响, 筛选灵敏的

PBDEs 污染监测的生物标志物, 为海洋环境中 PBDEs 的生态毒理研究和污染监测提供科学参考资料与理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

翡翠贻贝购于广东省深圳市南澳养殖海域, 体质量为 (21.79 ± 3.62) g。试验海水取自大鹏澳实验站附近, 经沉淀池沉淀和砂滤后待用。翡翠贻贝先置于过滤的海水中驯养, 驯养期间温度保持在 (20 ± 3) °C, 盐度为 34 ± 2 , pH 为 7.6 ± 0.1 , ρ (溶解氧) $> 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验容器为 200 L 的玻璃圆筒, 密度为 $200 \sim 300 \text{ 只}\cdot\text{m}^{-3}$, 连续充气, 每日上午 8:00 ~ 9:00 投喂螺旋藻粉 1 次, 每 48 h 完全更换海水 1 次。每天观察贝的生长情况, 驯养期间自然死亡率 $< 1\%$, 及时捞出死亡生物个体。

BDE3 为分析纯, 购于 TCI 公司; 二甲基亚砜 (DMSO) 为分析纯, 购于广州化学试剂公司, 其他试剂均为分析纯。SOD、MDA、GSH 和蛋白质试剂盒均购自南京建成生物工程研究所。

1.2 试验方法

1.2.1 浓度设置 首先用 DMSO 溶解 BDE3 配成质量浓度为 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液。根据预试验结果设置 ρ (BDE3) 为 $1 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (低)、 $10 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (中)、 $100 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (高) 和 DMSO 对照 (DMSO 体积比 $< 0.1\%$) 4 个浓度组。每组 2 个平行, 每个平行各放入 30 只翡翠贻贝, 连续暴露 15 d, 然后将剩余翡翠贻贝取出并置于清洁海水中释放 7 d。试验期间每日上午 8:00 ~ 9:00 投喂螺旋藻粉并及时捞出死亡的贻贝个体, 每 48 h 完全更换试验溶液 1 次。试验过程连续充气, 并采用自然光照。分别于胁迫试验的第 1、第 3、第 7、第 15 天和释放试验的第 3 (R3)、第 7 天 (R7), 在每个试验组各取 6 只翡翠贻贝进行分析。翡翠贻贝洗净并滤干, 置于冰盘上用眼科剪刀快速解剖, 取出外套膜组织和内脏团组织用生理盐水洗涤并置于液氮罐内保存待用。

1.2.2 组织匀浆的制备及指标测定 将翡翠贻贝组织样品于液氮中研磨,按组织质量(g)/缓冲液体积(mL)为1:10的比例称取0.4 g组织样加入3.6 mL预冷的Tris-蔗糖缓冲液,冷冻离心机4℃条件下4 000 r·min⁻¹下离心10 min,取上清液待测。SOD、GSH、MDA和蛋白质各指标测试方法均按试剂盒说明进行。SOD活性[λ(SOD)]单位定义为每毫克组织蛋白在1 mL反应液中SOD抑制率达50%时所对应的SOD量为1个SOD活性单位(U);GSH质量分数单位定义为每克组织蛋白内谷胱甘肽的毫克数[mg·g⁻¹(protein)];MDA质量摩尔浓度定义为每毫克组织蛋白丙二醛的摩尔数[nmol·mg⁻¹(protein)]。所有指标吸光值均用UV-2550紫外可见分光光度计(日本岛津公司出品)测定。

1.3 数据处理

试验结果采用平均数±标准差($\bar{X} \pm SD$)进行表示,用SPSS 13.0统计软件对所得数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),用LSD法对均值进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 BDE3 对 SOD 活性的影响

与对照组相比,低浓度试验组翡翠贻贝外套膜SOD活性呈先诱导后抑制再诱导的趋势,在第1天就被极显著性诱导($P < 0.01$),并在第3天达到与对照组相比的最高值,诱导率为71.13%;中、高浓度组先被抑制后被诱导,高浓度组在第1天达到最高抑制率15.46%。释放阶段中浓度组SOD活性恢复至对照组水平,低、高浓度组SOD活性被显著性抑制,但随恢复时间延长抑制率下降(图1-a)。

在BDE3胁迫下与对照组相比,低浓度组翡翠贻贝内脏团中SOD活性先受到诱导后随胁迫时间延长而降低到对照组水平,其中第3天的诱导率最高,为26.04%;中、高浓度组无明显的变化规律,高浓度组第7天达到最大抑制率14.92%。释放阶段中浓度组SOD活性恢复至对照组水平,低、高浓度组SOD活性仍被显著性抑制(图1-b)。

2.2 BDE3 对 b(MDA) 的影响

低浓度组翡翠贻贝外套膜MDA呈先诱导后抑制再恢复至对照水平的波动;中浓度组在第1天与对照组无显著性差异,从第3天开始先被诱导,第7天降低至对照组水平,第15天又被极显著性诱

导;高浓度组呈抑制-诱导-抑制趋势。清水释放第3天高浓度组恢复到对照组水平,低、高浓度组与对照组相比受到极显著性诱导($P < 0.01$),诱导率分别为31.21%和46.10%,随释放时间延长诱导率下降至22.95%和34.48%(图1-c)。

与对照组相比,低浓度组翡翠贻贝内脏团MDA呈抑制诱导交替出现的波动状,其中第3天达到最高诱导率60.66%;中浓度组胁迫初期与对照组无显著性差异,直到胁迫第7天才显著降低,达到最大抑制率29.54%,胁迫第15天又恢复至对照组水平;高浓度组在胁迫第1天时显著低于对照组水平,随后恢复至对照组水平直到暴毒阶段结束。释放阶段结束后仅低浓度组与对照组无显著差异(图1-d)。

2.3 BDE3 对 w(GSH) 的影响

在BDE3胁迫下与对照组相比,翡翠贻贝外套膜w(GSH)在低浓度组一直呈诱导趋势,胁迫第7天达到最大值,诱导率为72.2%;中浓度组先抑制再诱导,在第7天达到峰值,诱导率为126.51%;高浓度组先抑制后诱导然后恢复至对照组水平,第15天时又被极显著性诱导($P < 0.01$)。清水释放第3天,各浓度组均明显降低($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$),后随释放时间延长而逐渐恢复至对照组水平(图1-e)。

与对照组相比,翡翠贻贝内脏团w(GSH)在低浓度组呈先升高后降低的趋势,其中第3天低浓度组诱导率达到峰值93.76%;中浓度组则先降低后随胁迫时间延长升高,到胁迫后期又显著性降低,胁迫第15天时达到最大抑制率27.38%;高浓度组从胁迫早期就显著降低,随胁迫时间延长抑制率下降,在胁迫第15天时较对照组显著增加。释放阶段结束后仅中浓度组与对照组无显著差异(图1-f)。

3 讨论

SOD是一种诱导酶,可以催化超氧阴离子自由基($\cdot O_2^-$)发生歧化反应生成过氧化氢(H_2O_2),清除生物体内过高浓度的 O_2^- ,当细胞受到氧化损伤时其活性受到诱导增加,其活性改变可以反映生物体受氧化胁迫的程度。BDE3胁迫初期翡翠贻贝两组织中、低浓度组SOD活性都受到诱导作用,高浓度组都受到抑制,而中浓度组与对照组无显著性差异,即低、高2个浓度组对翡翠贻贝的胁迫较

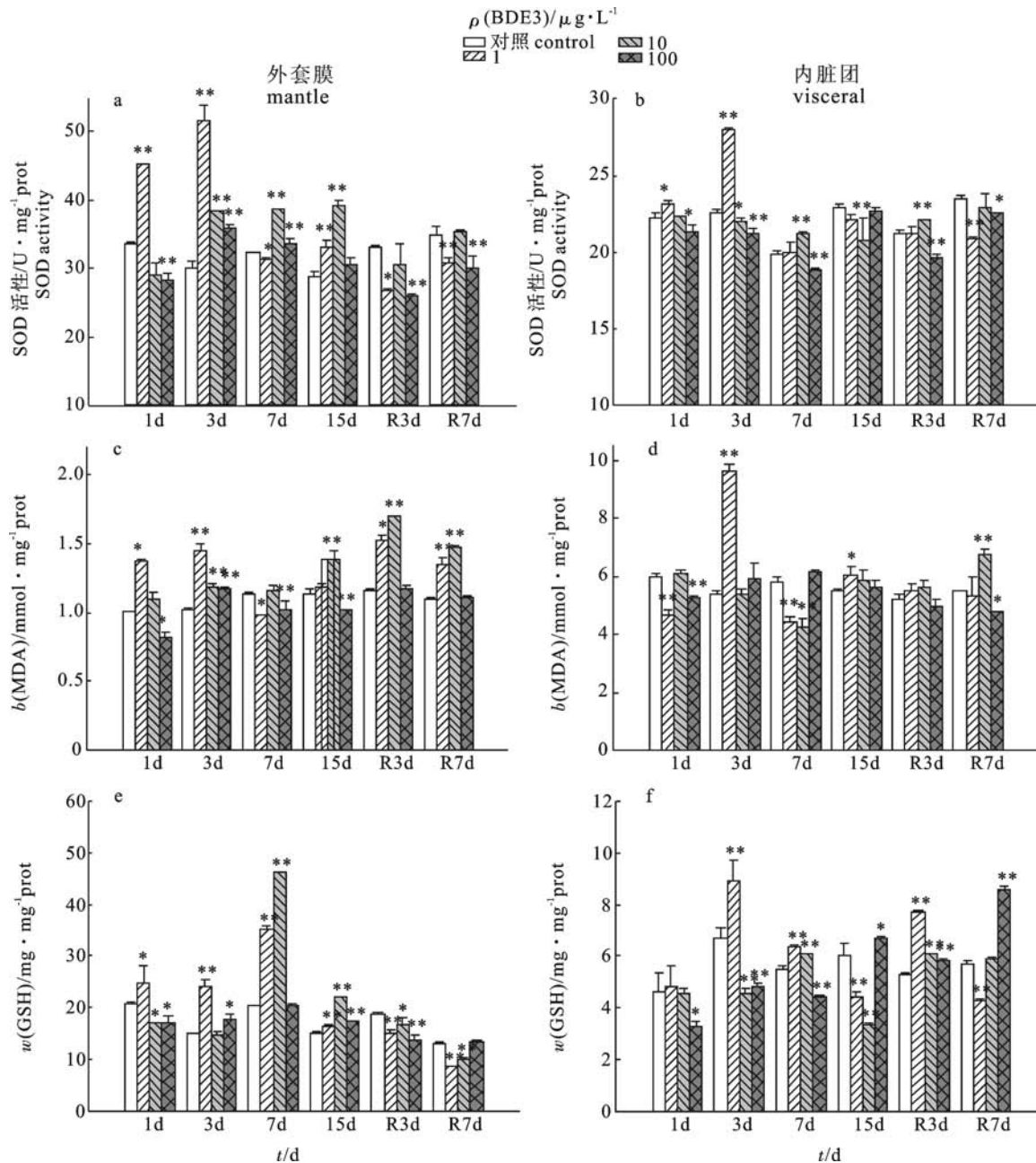


图1 BDE3对翡翠贻贝外套膜和内脏团SOD活性、MDA质量摩尔浓度和GSH质量分数的影响
Fig. 1 Effect of BDE3 on SOD activity, $b(\text{MDA})$ and $w(\text{GSH})$ in mantle and visceral mass of *P. viridis*

中浓度组明显,生物体这种在低毒状况下活性被诱导、高浓度下被抑制的应激反应,被 STEBBING^[11]称为“毒物兴奋效应”,对于保护生物机体避免抗氧化损伤具有重要意义。随胁迫时间延长,翡翠贻贝外套膜和内脏团组织中低浓度组诱导率下降,内脏团中更是恢复至对照组水平,反映出生物体对外界环境的胁迫做出了适应性反应^[12]。中浓度组翡翠贻贝外套膜中SOD活性随胁迫时间延长受到诱导,意味着此时该组织中抗氧化系统已经发生了应激反应,SOD活性受到诱导增加以清除体

内过高浓度的大量氧自由基,而同样中浓度组的翡翠贻贝内脏团中SOD活性则表现出抑制诱导交替出现的规律,表明该组织中的抗氧化系统功能出现反复,处于不断调整中,与外套膜相比,内脏团的SOD活性的胁迫效应不太明显,随着BDE3暴露时间延长,SOD活性下降。该研究中外套膜和内脏团对BDE3胁迫的不同响应模式是由生物体内吸收代谢过程导致的延迟效应导致的^[13]。高浓度组翡翠贻贝两组织在胁迫后期都与对照组无显著性差异,但这并不说明BDE3胁迫对其无影响,可能只

是抗氧化平衡系统在自身修复阶段的一个短暂平衡。

MDA 是自由基引发的脂质过氧化作用的最终分解产物, 是细胞发生脂质过氧化反应中最具代表性的产物, 其水平高低可直接反映脂质过氧化的程度, 间接反映自由基对机体的损伤程度^[13-14]。BDE3 胁迫初期, 与内脏团相比, 翡翠贻贝外套膜对 BDE3 胁迫响应更灵敏。两组织中各浓度组相比, 低浓度组 $b(\text{MDA})$ 对胁迫响应更显著, 中浓度组影响最小, 这种现象也许与 PBDEs 的毒性效应通常发生在相对较低剂量的特性有关, DARNER-UD 和 ERIKSEN^[15] 发现 PBDEs 对大鼠肝脏和甲状腺素的毒性效应通常发生在相对低的剂量。在翡翠贻贝外套膜中, 低浓度组因受到胁迫产生大量氧自由基引起膜脂质过氧化导致 $b(\text{MDA})$ 显著增加, 高浓度组生物机体随暴露时间延长对 BDE3 胁迫产生适应机制, 促使抗氧化防御系统迅速清除体内过量氧自由基, 从而 $b(\text{MDA})$ 降低, 这与陈海刚等^[16] 的研究结果一致, 其研究发现随着氯化三丁基锡暴露时间延长, 黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 肝组织中 $b(\text{MDA})$ 下降, 鳃组织中的 $b(\text{MDA})$ 变化与肝脏中的趋势具有一致性。随着胁迫时间延长, 各浓度组 $b(\text{MDA})$ 整体呈波动状, 这可能与机体抗氧化酶活性迅速降低或增加有关, 说明此时机体的氧化-抗氧化酶系统有自我恢复的能力。在翡翠贻贝内脏团中, 除低浓度组外, 中、高浓度的胁迫效果并不显著, 与对照组相比无显著性差异 ($P > 0.05$), 但是在释放阶段, 中、高浓度组又显著地被诱导或抑制, 意味着在胁迫阶段翡翠贻贝并不是对 BDE3 胁迫无响应, 而可能是与 SOD 活性的情况类似, 只是抗氧化系统在发挥修复作用的一个表现。

GSH 是动物体内重要的水溶性抗氧化剂, 可在谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx) 的作用下把 H_2O_2 还原为水 (H_2O), 其自身被氧化为氧化型谷胱甘肽 (GSSG), GSSG 受到谷胱甘肽还原酶 (GR) 的催化作用, 接受氢 (H) 还原成 GSH, 使体内自由基的清除反应能够持续进行^[17], 其含量变化可间接反映环境中氧化污染的存在^[18]。BDE3 胁迫下外套膜中 $w(\text{GSH})$ 初期就出现显著变化, 表现为低浓度增加, 中、高浓度降低; 内脏团中尽管也呈现同样的变化趋势, 但出现时间较外套膜有所延迟, 这意味着 $w(\text{GSH})$ 在外套膜中对胁迫响应更灵敏。 $w(\text{GSH})$ 增加可认为是由在胁迫阶段翡翠贻贝对

BDE3 污染胁迫出现保护性反应发生“超射作用”所致, 即因 GSH 的消耗引起的 GSH 合成暂时增加^[19], $w(\text{GSH})$ 的增加可能代表了机体对污染物暴露的适应性反应, 随胁迫时间延长, 内脏团中的中、高浓度组 $w(\text{GSH})$ 显著低于对照组水平, 其含量的降低则可能与细胞对污染物及其代谢物解毒能力的饱和和作用有关, 或者由于 GSH 消耗过快引起^[18]。

释放阶段结束仅个别浓度组抗氧化指标恢复至对照组水平, 尤其是内脏团 $b(\text{MDA})$, 胁迫阶段一直与对照组无显著差异, 此时却显著降低, 这可能是因为胁迫阶段翡翠贻贝抗氧化酶系统及时清除了体内的过量氧自由基以保持酶系平衡, 所以与对照组无显著差异; 释放阶段胁迫产生的氧自由基减少, 膜脂质过氧化作用降低, 但抗氧化酶系修复功能仍持续作用, 因此导致 $b(\text{MDA})$ 降低。外套膜和内脏团的各指标在释放过程中均出现反复, 意味着翡翠贻贝体内的抗氧化系统仍不够稳定, 在胁迫解除早期, 活性氧自由基 (ROS) 减少, 但由于 BDE3 长期胁迫已对机体造成损伤, 虽经过净化可以排除部分污染物, 但短期内不能完全恢复至对照组水平。其他研究也有类似情况, 如秦洁芳等^[13] 发现邻苯二甲酸二丁酯胁迫解除 5 d 后, 翡翠贻贝外套膜 SOD 活性仍然显著高于对照组 ($P < 0.05$), 杨涛等^[14] 的研究表明翡翠贻贝外套膜在高浓度菲 (PHE) 的胁迫下释放 7 d 后其 SOD 活性仍显著低于对照组。对比两组织试验结果发现, 同种酶在不同组织间的活性差异很大, 内脏团对 BDE3 的胁迫响应不如外套膜灵敏。推测是因为内脏团作为代谢组织对摄入体内的 BDE3 产生响应, 但随胁迫时间和浓度的增加, 作为双壳类能产生一种保护性的应激反应增强防御, 如闭壳停止摄食或者降低滤食率以尽可能降低摄入体内污染物的量, 但外套膜作为辅助摄食、呼吸和游泳的组织, 不可避免地要更多接触试验溶液所致。

4 结论

BDE3 对翡翠贻贝有明显的毒性效应, 2 种组织相比外套膜对 BDE3 胁迫响应更灵敏, 但不具明显的时间剂量-效应, 低剂量组对 BDE3 胁迫毒性效应更显著, 高浓度组其次, 中浓度组影响最小。3 种指标相比 GSH 对 BDE3 胁迫响应最灵敏。释放后两组织仅个别浓度组与对照组无显著差异, 表明

BDE3 对翡翠贻贝抗氧化防御系统有明显损伤, 但损伤所需的恢复时间和机制尚待进一步研究。

参考文献:

- [1] SJODIN A, PATTERSON D G Jr., BERGMAN A. A review on human exposure to brominated flame retardants-particularly polybrominated diphenylethers[J]. *Environ Int*, 2003, 29(6): 829 - 839.
- [2] ANDERSSON O, BLOMKVIST G. Polybrominated aromatic pollutants found in fish in Sweden [J]. *Chemosphere*, 1981, 10(9): 1051 - 1060.
- [3] 马新东. 海洋沉积物和生物中多溴联苯醚的方法研究及应用[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
MA Xindong. The method research and application of polybrominated diphenyl ethers in marine sediment and organism[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (in Chinese)
- [4] BETTS K. Does a key PBDE break down in the environment? [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(18): 6781.
- [5] BRANCHI I, CAPONE F, VITALONE A, et al. Early developmental exposure to BDE 99 or Aroclor 1254 affects neurobehavioural profile: interference from the administration route[J]. *Neuro Toxicol*, 2005, 26(2): 183 - 192.
- [6] DARNERUD P O, RISBERG S. Tissue localisation of tetra- and pentabromodiphenyl ether congeners (BDE-47, -85, and -99) in perinatal and adult C57BL mice [J]. *Chemosphere*, 2006, 62(3): 485 - 493.
- [7] DARNERUD P O, WONG J, BERGMAN A, et al. Common viral infection affects pentabrominated diphenyl ether (PBDE) distribution and metabolic and hormonal activities in mice [J]. *Toxicology*, 2005, 210(2/3): 159 - 167.
- [8] 任金亮, 王平. 多溴联苯醚环境行为的特征与研究进展[J]. *化工进展*, 2006, 25(10): 1152 - 1157.
REN Jinliang, WANG Ping. Progress and characteristics of environmental behavior of polybrominated diphenyl ethers[J]. *Chem Ind Eng Prog*, 2006, 25(10): 1152 - 1157. (in Chinese)
- [9] 孟范平, 李卓娜. 多溴联苯醚(PBDEs)在海洋环境中的行为研究进展[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 34(5): 25 - 27.
MENG Fanping, LI Zhuona. Research progress on the behavior of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in marine environment [J]. *Periodic Ocean Univ China*, 2006, 34(5): 25 - 27. (in Chinese)
- [10] 唐学玺, 柯可, 王悠. 多溴联苯醚在海洋环境中的分布及其对海洋生物的影响研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(1): 36 - 46.
TANG Xuexi, KE Ke, WANG You. Effects of anthracene on activity of superoxide dismutase in *Sebastes fuscescens* [J]. *Trans Oceanol Limnol*, 2010(1): 36 - 46. (in Chinese)
- [11] STEBBING A R D. Tolerance and hormesis-increased resistance to copper in hydroids linked to hormesis [J]. *Mar Environ Res*, 2002, 54(3/4/5): 805 - 809.
- [12] 王辅明, 朱祥伟, 马永鹏, 等. 低浓度五氯酚暴露对稀有鮈鲫体内 SOD 活性、GSH 和 HSP70 含量的影响[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(3): 415 - 421.
WANG Fuming, ZHU Xiangwei, MA Yongpeng, et al. Effects of low concentration of pentachlorophenol exposure on SOD activity, GSH and HSP70 content in rare minnow [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2009, 4(3): 415 - 421. (in Chinese)
- [13] 秦洁芳, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 邻苯二甲酸二丁酯对翡翠贻贝抗氧化酶及脂质过氧化水平的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1878 - 1884.
QIN Jiefang, CHEN Haigang, CAI Wengui, et al. Effects of di-n-butyl phthalate on the antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation level of *Perna viridis* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, 22(7): 1878 - 1884. (in Chinese)
- [14] 杨涛, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 菲和苯并(b)荧蒹暴露对翡翠贻贝外套膜的氧化胁迫及损伤[J]. *南方水产科学*, 2011, 7(4): 24 - 29.
YANG Tao, CHEN Haigang, CAI Wengui, et al. Oxidative stress and damage of by exposure to phenanthrene and benzo (b) fluoranthene [J]. *South China Fish Sci*, 2011, 7(4): 24 - 29. (in Chinese)
- [15] DARNERUD P O, ERIKSEN G S. Polybrominated diphenyl ethers: occurrence, dietary exposure, and toxicology [J]. *Environ Health Persp*, 2001, 109(Suppl 1): 49 - 68.
- [16] 陈海刚, 马胜伟, 林钦, 等. 氯化三丁基锡对黑鲷和肝组织 SOD、MDA 和 GPx 的影响[J]. *南方水产*, 2009, 5(2): 23 - 27.
CHEN Haigang, MA Shengwei, LIN Qin, et al. Effects of tributyltin chloride (TBTCI) on SOD activities, MDA contents and GPx activities in gill and liver of the black porgy (*Sparus macrocephalus*) [J]. *South China Fish Sci*, 2009, 5(2): 23 - 27. (in Chinese)
- [17] 向金梅, 郭定宗, 杨世锦. N-乙酰半胱氨酸对砷致小鼠脂质过氧化损伤的保护作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
XIANG Jinmei, GUO Dingzong, YANG Shijin. Study on the protective effect of N-acetyl-cysteine and VitE on lipid peroxidation damage induced by arsenic in rat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [18] 冯涛, 郑微云. 苯并(a)芘对大弹涂鱼肝脏还原型谷胱甘肽含量的影响[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2001, 40(5): 1095 - 1099.
FENG Tao, ZHENG Weiyun. Effect of benzo (a) pyrene on content of reduced-glutathione in the liver of *Boleophthalmus pectinirostris* [J]. *J Xiamen Univ: Natural Science*, 2001, 40(5): 1095 - 1099. (in Chinese)
- [19] 吕杨, 王立宁, 黄俊, 等. 海河渤海湾地区沉积物、鱼体样品中多溴联苯醚的水平与分布[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(9): 652 - 660.
LÜ Yang, WANG Lining, HUANG Jun, et al. PBDEs in sediments and crucians of Haihe River and Bohai Bay [J]. *Environ Pollut & Control*, 2007, 29(9): 652 - 660. (in Chinese)