

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2011.04.004

菲和苯并(b)荧蒽曝露对翡翠贻贝外套膜的氧化胁迫及损伤

杨涛^{1,2}, 陈海刚¹, 蔡文贵¹, 秦洁芳^{1,2}, 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环境重点野外科学观测试验站, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 实验室条件下研究了不同质量浓度(2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和50.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)的菲(PHE)和苯并(b)荧蒽(BbF)胁迫15 d和清洁海水恢复7 d中翡翠贻贝(*Perna viridis*)外套膜组织中超氧化物歧化酶(SOD)活力和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度的变化。结果表明, PHE胁迫下翡翠贻贝外套膜SOD活力呈先升高后降低的变化规律; BbF胁迫下的翡翠贻贝外套膜SOD活力在胁迫第15天时被显著诱导($P < 0.05$)。从b(MDA)的变化来看, PHE和BbF均可导致翡翠贻贝外套膜明显的氧化损伤, 之后在清洁海水的净化过程中, 这种损伤逐渐降低并恢复至正常水平。鉴于2种PAHs胁迫下翡翠贻贝外套膜SOD活力和b(MDA)均发生明显变化并表现出一定的差异性, 翡翠贻贝体内的生化指标适合指示PAHs对海洋环境的污染。

关键词: 翡翠贻贝; 外套膜; 菲; 苯并(b)荧蒽; 超氧化物歧化酶; 丙二醛

中图分类号: X 174

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2011)04-0024-06

Oxidative stress and damage of *Perna viridis* by exposure to phenanthrene and benzo(b) fluoranthene

YANG Tao^{1,2}, CHEN Haigang¹, CAI Wengui¹, QIN Jiefang^{1,2}, JIA Xiaoping¹

(1. Key Lab. of Fishery Ecology Environment of Guangdong Province; Key Field Scientific Experimental Station of South China Fishery Resource and Environment, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Guangzhou 510300, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The SOD activity and MDA content in mantle were studied after *Perna viridis* exposing to different concentrations (2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 50.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) of phenanthrene (PHE) and benzo (b) fluoranthene (BbF) separately under experimental conditions. The results indicate that the SOD activity follows an induced-inhibited trend with phenanthrene exposure, and it is significantly induced by exposure to benzo (b) fluoranthene at 15th day ($P < 0.05$). The change in MDA content suggests both PHE and BbF exposure may cause oxidative damage to the mantle, but in clean water, the damage is ameliorated gradually until it returns to normal. Since SOD activity and MDA content in the mantle of *P. viridis* change obviously and differently with 2 kinds of PAHs exposure, the biochemical indicators for *P. viridis* are suitable to indicate the pollution to the marine environment by PAHs.

Key words: *Perna viridis*; mantle; phenanthrene (PHE); benzo (b) fluoranthene (BbF); superoxide dismutase (SOD); malondialdehyde (MDA)

收稿日期: 2010-12-30; 修回日期: 2011-01-15

资助项目: 科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J021); 广东省科技计划项目(2009B030600001); 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); 中国水产科学研究院淡水生态与健康养殖重点开放实验室开放课题(2010FEA03006)

作者简介: 杨涛(1986-), 男, 硕士研究生, 从事渔业生态环境保护研究。E-mail: yt860112@163.com

通讯作者: 贾晓平, E-mail: jxp60@tom.com

菲(phenanthrene, PHE)是由3个苯环连接而成的多环芳烃类(PAHs)化合物,并存在与有致癌性相关的“K区”(即9,10双键)。苯并(b)荧蒽[benzo(b)fluoranthene, BbF]是具有5个苯环的典型PAHs化合物,致癌性仅次于苯并(a)芘。近年来随着海上石油和轮船运输业的发展以及工业、生活污水的大量排放,海洋环境中PAHs的污染日益加重,PHE和BbF在水体环境中的含量也越来越高。据报道珠江三角洲地区河流表层沉积物中 $w(\text{PHE})$ 高达 $1\,460.61\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, $w(\text{BbF})$ 达到 $828.50\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ [1];长江流域南京段沉积物中 $w(\text{PHE})$ 为 $16.78\sim 64.11\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, $w(\text{BbF})$ 为 $3.54\sim 104.78\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ [2]。PHE和BbF对水生生物具有很强的毒性,PHE对麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)的96 h半数致死质量浓度(LC₅₀)为 $0.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [3],CORREIA等[4]发现在高浓度的PHE暴露条件下鲫(*Sparus aurata*)表现出昏睡、行为迟钝的现象;任加云等[5]通过苯并(a)芘和苯并(k)荧蒽对栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)染毒后检测到其脂质过氧化(LPO)损伤水平升高。由于这2种PAHs化合物与水底淤泥结合力较强,在水底淤泥中降解速度较慢,且含量呈不断增加的趋势,因此对水生生物有较大的潜在威胁。

超氧化物歧化酶(SOD)是生物体内抗氧化防御系统的重要酶之一,可清除生物体内的 $\cdot\text{O}_2^-$ 自由基,如果 $\cdot\text{O}_2^-$ 及时得到清除, $\cdot\text{OH}$ 产生的可能性就极小,即机体受损伤的可能性不大。SOD清除 $\cdot\text{O}_2^-$ 的能力与其含量和活力有关,当生物体受到污染胁迫时往往会伴随着机体内抗氧化酶活力的上升或下降,因此,国际海洋监测委员会(ICES)于1994年颁布推荐的海洋污染早期生化监测指标中就有包括SOD在内的抗氧化防御系统;而丙二醛(MDA)是膜LPO的主要产物之一,其含量的高低可直接指示生物膜受氧化损伤的程度,是目前应用非常普遍的海洋污染生物监测指标。

贝类为滤食性生物,代谢率低,对污染物具有较强的累积作用,常被用作海洋环境污染的指示生物。近年来国内外学者多采用贝类研究重金属[汞(Hg)和镉(Cd)等]和有机污染物(三丁基锡等)对其酶活力的影响[6-9],但有关PHE和BbF对贝类外套膜中SOD活力和 $b(\text{MDA})$ 的影响尚未见报道。文章以翡翠贻贝(*Perna viridis*)为生物材料,通过

观察单一PHE和BbF静态暴露和清水恢复条件下翡翠贻贝外套膜中SOD活力和 $b(\text{MDA})$ 的变化,探讨PAHs对翡翠贻贝的致毒机理,不仅可为贝类养殖的环境毒理学研究提供理论基础,同时可为海洋环境污染监测提供有益的参考资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

从海南陵水新村港附近育苗场采购体色鲜艳、大小均匀和平均壳高为 $(5.0\pm 0.5)\text{ cm}$ 、体质量为 $(15.6\pm 2.9)\text{ g}$ 的翡翠贻贝为试验对象。试验容器采用底部半径0.4 m、高1.2 m、容积为600 L的玻璃圆筒。翡翠贻贝暂养7 d,日换水1/2,养殖密度为 $200\sim 300\text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$,期间连续充气,并投喂螺旋藻粉。试验海水取自育苗场附近,经沉淀池沉淀和砂滤后待用,海水盐度 $34\sim 36$,pH $7.7\sim 7.9$,水温 $22\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

PHE和BbF均为分析纯,购于美国Sigma公司。丙酮为分析纯,购于广州化学试剂公司,其他试剂均为分析纯。SOD和MDA和蛋白质测试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 质量浓度设置 首先用丙酮溶解PHE和BbF,各自配成 $1.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液。在预试验基础上设置此试验质量浓度,各设PHE和BbF $2.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $10.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 3个处理组和1个丙酮对照组(丙酮体积比 $<0.01\%$),每组放入35只翡翠贻贝,设2个平行试验组,每48 h完全更换试验溶液1次。昼夜充气,采用自然光照,每天定时投喂螺旋藻粉。

1.2.2 组织匀浆的制备 分别在PHE和BbF暴露的第1、第4、第8和第15天和清水恢复后第2及第7天从各处理组随机取5只贻贝个体,迅速解剖取出外套膜组织,用预冷的生理盐水漂洗去血液,再用滤纸吸去表面水分。准确称取外套膜 0.4 g 置匀浆器中,加预冷的Tris-HCl缓冲液(pH 7.5) 1 mL ,在 $1\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ 的冰水浴下匀浆,再用Tris-HCl定容到 4 mL ,然后于冷冻离心机($0\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$, $3\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)离心 15 min ,取上清液待测。

1.2.3 酶活测定 各指标测试方法均按试剂盒说明进行。SOD活力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 活力单位 [$U \cdot mg^{-1}(\text{protein})$]。 $b(\text{MDA})$ 定义为每毫克组织蛋白 MDA 的质量摩尔浓度 [$nmol \cdot mg^{-1}(\text{protein})$]。蛋白含量采用考马斯亮兰法进行测定,以试剂盒中的蛋白标准液为标准蛋白。所有指标吸光值均用 UV-7504 单光束紫外可见分光光度计(江苏省常州市诺基仪器有限公司出品)测定。

1.3 数据处理

试验数据用统计学方法进行处理,结果均用平均值 \pm 标准差 ($\bar{X} \pm SD$) 表示。用 SPSS 软件中单因素方差分析法分析暴露引起的差异,用最小显著差数法(LSD)比较组间数据, $P < 0.05$ 时即被认为差异显著,用 Pearsom 法作相关性检验。

2 结果

2.1 PHE 和 BbF 对 SOD 活力的影响

在 PHE 胁迫阶段,各处理组 SOD 活力呈先被

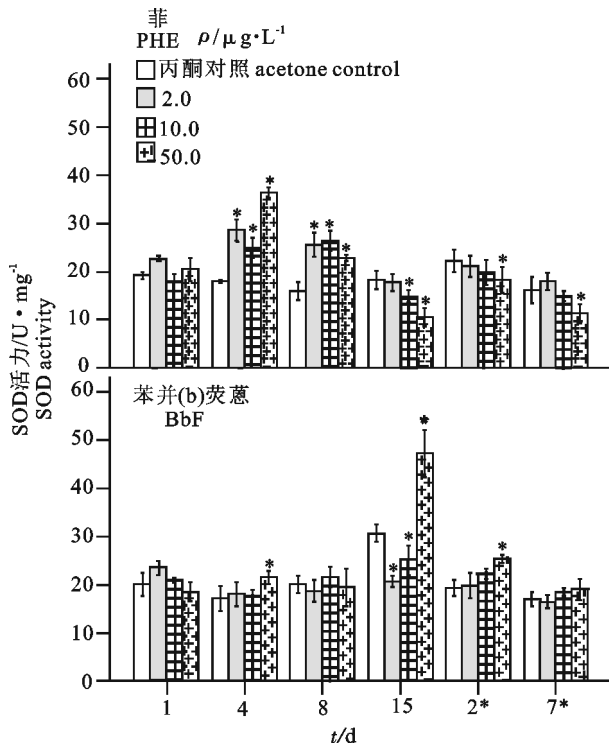


图1 PHE 和 BbF 对翡翠贻贝外套膜 SOD 活力的影响

. 表示相同胁迫时间段内处理组与对照组间生化影响的比较结果 ($P < 0.05$); 2 和 7*. 清水解毒阶段,后图同此

Fig. 1 Effects of phenanthrene and benzo(b) fluoranthene on SOD activity in *P. viridis* mantle

, significant difference between treatment groups and the control ($P < 0.05$) within the same period; 2 and 7*. detoxification phase in clean water. The same case in the following figure.

诱导后被抑制的变化趋势,高浓度处理组 ($50.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 在第 4 天诱导率达到极大值,为 102.6% ($P < 0.01$),低和中浓度组 ($2.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) SOD 诱导率在随后的第 8 天也达到峰值,分别为 59.9% 和 65.2% ($P < 0.01$),在胁迫的第 15 天中、高浓度组 SOD 活力被显著抑制 ($P < 0.05$),抑制率分别为 18.8% 和 42.8% (图 1)。清水释放后中、低浓度组 SOD 活力逐渐恢复至对照组水平 ($P > 0.05$),而高浓度组 SOD 与对照组仍有显著性差异 ($P < 0.05$)。

BbF 胁迫第 1 天,各处理组 SOD 活力与对照无显著性差异 ($P > 0.05$); 随着时间的延长,高浓度组 SOD 活力开始被诱导,并与对照组有显著性差异 ($P < 0.05$),经 15 d 胁迫后 $50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 组高出对照组 54.3%。中、低浓度组在清水释放的第 2 天已与对照组无显著差异 ($P > 0.05$),第 7 天高浓度组也逐渐恢复至对照组水平 ($P > 0.05$)。

2.2 PHE 和 BbF 对 LPO 水平的影响

PHE 暴露 1 d 后各处理组与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$),而随胁迫时间的延长 $b(\text{MDA})$ 呈上

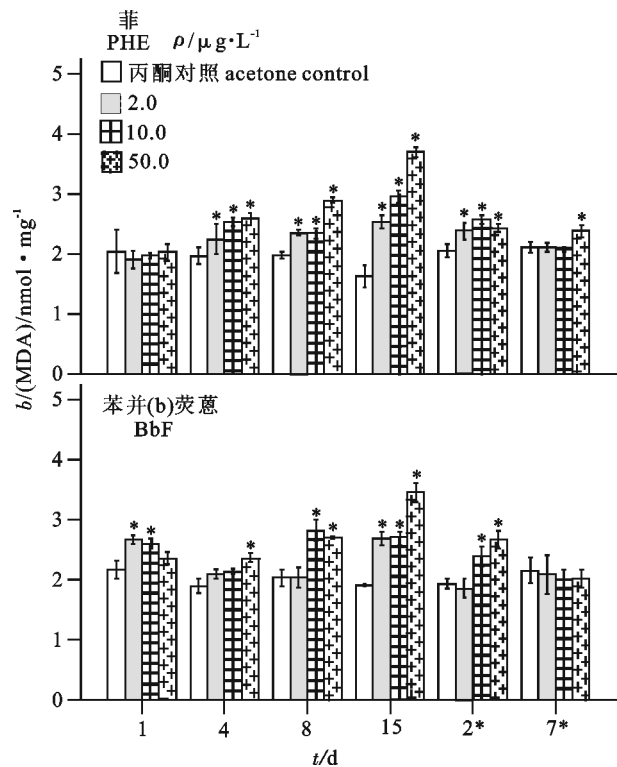


图2 PHE 和 BbF 对翡翠贻贝外套膜 $b(\text{MDA})$ 的影响

Fig. 2 Effects of phenanthrene and benzo(b) fluoranthene on MDA content in *P. viridis* mantle

升趋势,并在第15天胁迫结束时达到峰值,分别比对照组高出55.8%、81.6%和127.0% ($P < 0.01$) (图2)。清水释放阶段各处理组 b (MDA) 有所降低,到第7天释放结束时中、低浓度组 b (MDA) 已与对照无显著性差异 ($P > 0.05$)。

BbF 胁迫第1天中、低浓度组 b (MDA) 显著高于对照组 ($P < 0.05$),随着时间的延长,中、高浓度组 b (MDA) 呈显著的上升趋势,而低浓度组只有轻微的上升,并在第4天和第8天时与对照组无显著性差异 ($P > 0.05$),第15天时各浓度组分别上升了21.0%、50.7%和93.4%。清水释放7d后各处理组均恢复到对照组水平 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 2种PAHs对SOD活力的影响

水环境中PAHs对贝类的正常生理功能均存在不同程度的影响。在污染胁迫下贝类组织SOD活力可能会发生激活或抑制2种应激改变,但这些改变并不是最终的毒理效应,只是反映生物体暂时所处的一种状态。2种状态的出现取决于暴露的强度和时长,同时也取决于生物种类的敏感性。诱导效应可认为是生物体克服不良反应的一种适应性改变;而活力减弱则反映了生物体对环境压力十分敏感,并可能受到进一步的损伤。王淑红等^[10]发现荧蒽、PHE与芘3种PAHs混合暴露对菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinaram*) SOD活力影响为一个先诱导后抑制的动态变化过程。此试验中PHE胁迫下翡翠贻贝外套膜SOD活力变化呈先升高后降低的趋势,胁迫初期SOD活力的提高可能是贻贝对外界环境的一种应激和自我保护反应,通过调节SOD活力去适应逆境并再次建立活性氧产生与清除的平衡关系;随着暴露时间延长,活性氧自由基的产生超出SOD的清除能力,贝体外套膜SOD受抑程度超出自身的适应与保护能力,因此SOD活力降低。较PHE而言,贻贝外套膜SOD活力变化对BbF表现出较低的敏感性,表现在第15天胁迫结束时SOD活力在高浓度除胁迫下才被显著诱导,这可能是由于PHE和BbF因化学性质及结构的不同而引起贻贝对其生物响应的差异。

清洁海水中恢复7d后,PHE处理的中、低浓度组和BbF胁迫处理过的各处理组SOD活力均恢复到正常水平,而PHE处理过的高浓度组SOD活力

仍然显著低于对照组。表明BbF及轻度PHE胁迫带来的氧化压力可以逐渐恢复,但高浓度PHE给外套膜带来的氧化压力较大,已超出贻贝机体的自我恢复能力,其随着释放时间的延长能不能修复尚需进一步的研究。

3.2 2种PAHs对LPO水平的影响

当生物体受到不利因素胁迫时机体内会产生过量的 $\cdot O_2^-$ 、 $\cdot OH$ 和 H_2O_2 等分子,这些活性氧分子的大量产生会引发或加剧膜LPO作用,对膜系统造成严重伤害^[11-13]。此试验结果显示2种PAHs对翡翠贻贝高浓度或长时间胁迫时,外套膜细胞 b (MDA) 明显高于对照组,表明PHE和BbF胁迫对外套膜产生了一定的氧化压力,导致细胞膜LPO作用增强,可能会对细胞膜的正常功能产生不利影响。清水释放阶段2种PAHs胁迫下的外套膜 b (MDA) 逐渐降低至对照组水平,这是由于机体的抗氧化防御系统在发挥功能,消除多余的活性氧;同时也可能是体内富集的PAHs经代谢逐渐释放到清水中从而使其毒性作用降低。杨慧赞^[14]在对栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 进行苯并(a)芘暴露15d后转移到清水中暂养后发现其体内的BaP含量迅速下降,3d便下降50%。

3.3 2种PAHs对氧化胁迫影响的差异性

氧自由基可造成细胞膜的LPO,致使 b (MDA) 升高,而SOD是清除氧自由基的关键性酶,因此,SOD活力与 b (MDA) 之间存在一定的相关性。张培玉等^[15]通过葱对太平洋牡蛎 (*Crassostrea gigas*) 的胁迫研究发现SOD活力呈下降趋势,相应的其膜质过氧化程度则有不同程度的上升。聂芳红等^[16]利用2种二噁英对斑马鱼 (*Brachydanio rerio*) 染毒后得出,TCDD和PCB77分别能导致肝脏 b (MDA) 增加,SOD活力下降。此试验中PHE处理早期就对贻贝外套膜造成LPO作用,但SOD活力却仍然升高,这可能是由于PHE进入外套膜后,诱导了SOD基因的表达,产生一些SOD,但这种诱导作用较弱,而且持续时间较短。到了第15天时贻贝外套膜SOD活力被显著抑制,间接反映了机体清除自由基的能力降低,同时 b (MDA) 显著上升,间接说明了贻贝的机体细胞受到自由基的攻击,两者呈明显的负相关性。上述结果表明,PHE的重要毒理机制之一是引起贻贝的LPO作用,导致机体受到过多氧自由基的攻击,从而造成机体细胞相应

的毒性反应。而在 BbF 胁迫下 SOD 活力与 b (MDA) 之间的相关性却不够显著, 可能由于贻贝外套膜 SOD 基因对 BbF 的胁迫表达较慢, 以致活力在第 15 天时才被显著诱导, 但膜系统并没有随 SOD 活力的上升而免受损伤, 其原因可能是翡翠贻贝受到的胁迫程度过重而使其自身修复系统难以发挥作用^[17]。

综上所述, 单一 PHE 和 BbF 暴露下翡翠贻贝外套膜 SOD 活力和 b (MDA) 的变化, 反映了贝体抗氧化防御系统对不同程度 PAHs 胁迫的响应。2 种 PAHs 胁迫下贻贝受到的氧化胁迫程度均呈上升趋势。但 PHE 暴露 4 d 后翡翠贻贝外套膜 SOD 活力即明显被诱导, 说明 PHE 带来的氧化压力明显高于 BbF。由于海洋环境是一个多变体系, 在不同季节以及翡翠贻贝不同的生长期、性别及组织中, PAHs 对翡翠贻贝外套膜中 SOD 活力和 b (MDA) 的变化是否仍然遵循这一规律, 还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究: 多环芳烃和有机氯农药的分布及特征[J]. 环境科学学报, 2000, 20(2): 192-198.
MAI Bixian, LIN Zheng, ZHANG Gan, et al. Organic contaminants in surface sediments from rivers of the Pearl River Delta and estuary: the distributions and characteristics of PAHs and organochlorine pesticides [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(2): 192-198. (in Chinese)
- [2] 许士奋, 蒋新, 王连生, 等. 长江和辽河沉积物中的多环芳烃类污染物[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2): 128-131.
XU Shifen, JIANG Xin, WANG Liansheng, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollutants in sediments of the Yangtse River and Liaohe River [J]. China Environ Sci, 2000, 20(2): 128-131. (in Chinese)
- [3] 解静芳, 吴骏, 潘绍先, 等. 气相色谱法估算多环芳烃半数致死浓度[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 36-39.
XIE Jingfang, WU Tao, PAN Shaoxian, et al. The estimation of median tolerance limit of polynuclear aromatic hydrocarbons by gas chromatography [J]. China Environ Sci, 2000, 20(1): 36-39. (in Chinese)
- [4] CORREIA A D, GONALVES R, SCHOLZE M. Biochemical and behavioral responses in gilthead seabream (*Sparus aurata*) to phenanthrene [J]. Exp Mar Biol Ecol, 2007, 347(1/2): 109-122.
- [5] 任加云, 潘鲁青, 苗晶晶. 苯并(a)芘和苯并(k)荧蒹混合物对栉孔扇贝毒理学指标的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(7): 1180-1186.
REN Jiayun, PAN Luqing, MIAO Jingjing. Effects of benzo (a) pyrene and benzo (k) fluoranthene mixture on the toxicology parameter of scallop *Chlamys farreri* [J]. China J Environ Sci, 2006, 26(7): 1180-1186. (in Chinese)
- [6] 马胜伟, 林钦, 陈海刚, 等. 混合重金属对翡翠贻贝的积累与排放规律研究[J]. 南方水产, 2008, 4(6): 78-83.
MA Shengwei, LIN Qin, CHEN Haigang, et al. Accumulation and elimination of mixed heavy metals in green mussle *Mytilus edulis* [J]. South China Fish Sci, 2008, 4(6): 78-83. (in Chinese)
- [7] 宗虎民, 马德毅, 王菊英, 等. 氟苯尼考对菲律宾蛤仔抗氧化酶活性的影响[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(4): 489-495.
ZONG Humin, MA Deyi, WANG Juying, et al. Florfenicol effects on activity of antioxidant enzyme in *Ruditapes philippinarum* [J]. Adv Mar Sci, 2009, 27(4): 489-495. (in Chinese)
- [8] 黄周英, 陈奕欣, 左正宏, 等. 三丁基锡对文蛤消化腺脂质过氧化及抗氧化酶活性的影响 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2006, 45(1): 102-105.
HUANG Zhouying, CHEN Yixin, ZUO Zhenghong, et al. Effects of tributyltin on lipid peroxidation and antioxidant enzymes activity of digestive gland in hard clam *Meretrix meretrix* [J]. J Xiamen Univ: Natural Science, 2006, 45(1): 102-105. (in Chinese)
- [9] 胡莹莹, 李爱, 叶赛, 等. 氯霉素对菲律宾蛤仔的急性和亚急性毒性作用[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 125-128.
HU Yingying, LI Ai, YE Sai, et al. The acute and subacute toxicity action of chloramphenicol on *Ruditapes philippinarum* [J]. China Environ Sci, 2006, 26(1): 125-128. (in Chinese)
- [10] 王淑红, 王新红, 陈荣, 等. 荧蒹、菲、芘对菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*) 超氧化物歧化酶的影响 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2000, 39(4): 504-509.
WANG Shuhong, WANG Xinhong, CHEN Rong, et al. The effects of fluoranthene, phenanthrene and pyrene on superoxide dismutase (SOD) of *Ruditapes philippinarum* [J]. J Xiamen Univ: Natural Science, 2000, 39(4): 504-509. (in Chinese)
- [11] D'ISCHIA M, CONSTANTINI C, PROTA G. Lipofuscin-like pigments by autoxidation of polyunsaturated fatty acids in the presence of amine neurotransmitters: the role of malondialdehyde [J]. Biochim Biophys Acta, 1996, 1290(3): 319-326.
- [12] 陈海刚, 马胜伟, 林钦, 等. 氯化三丁基锡对黑鲷鳃和肝组织 SOD、MDA 和 GPx 的影响 [J]. 南方水产, 2009, 5(2): 23-28.
CHEN Haigang, MA Shengwei, LIN Qin, et al. Effects of tributyltin chloride (TBTCl) 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): 23-28. (in Chinese)
- [13] 王学锋, 陈海刚, 蔡文贵, 等. 汞离子胁迫对红鳍笛鲷抗氧化酶及乙酰胆碱酯酶活性的影响 [J]. 水产学报, 2010, 34(12): 1829-1837.
WANG Xuefeng, CHEN Haigang, CAI Wengui, et al. Effects of mercury exposure on the antioxidant enzymes and acetylcholinesterase

- ase activities in the young crimson snapper (*Lutjanus erythropterus*) [J]. *J Fish China*, 2010, 34(12): 1829–1837. (in Chinese)
- [14] 杨慧赞. 苯并[a]芘在栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*) 体内的毒代与毒效动力学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- YANG Huizan. Toxicokinetics and toxicodynamics for benzo [a] pyrene in *Chlamys farreri* [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese)
- [15] 张培玉, 唐学玺, 董双林. 蒽对太平洋牡蛎不同组织抗氧化酶活力差异性影响与膜脂质过氧化研究[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(5): 434–438.
- ZHANG Peiyu, TANG Xuexi, DONG Shuanglin. Effects of anthracene on differences of antioxidant enzymes activities and peroxide of membrane lipid of different tissues of *Crassostrea gigas* [J]. *Mar Environ Sci*, 2007, 26(5): 434–438. (in Chinese)
- [16] 聂芳红, 孔庆波, 刘连平, 等. 两种二噁英类化合物对斑马鱼肝脏 MDA、SOD 和 GST 影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2009, 28(2): 210–214.
- NIE Fanghong, KONG Qingbo, LIU Lianping, et al. Effects of two DLCs on hepatic MDA, SOD and GST in zebra fish [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2009, 28(2): 210–214. (in Chinese)
- [17] 刘苑, 李培军, 周启星, 等. 短期非胁迫对大豆幼苗超氧化物歧化酶活力及丙二醛含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 581–584.
- LIU Yuan, LI Peijun, ZHOU Qixing, et al. Effect of short-term phenanthrene stress on SOD activities and MDA contents in soybean (*Glycine max*) seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(4): 581–584. (in Chinese)