

Aroclor 1248 对大弹涂鱼的毒性与氧化胁迫

何闪英 陈昆柏

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 310012 杭州)

EFFECTS OF AROCLOR 1248 ON OXIDATIVE STRESS AND TOXICITY IN *BOLEOPHTHALMUS PECTINIROSTRIS*

HE Shan-Ying and CHEN Kun-Bai

(College of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012)

关键词: PCBs; 大弹涂鱼; 氧化胁迫

Key words: PCBs; *Boleophthalmus pectinirostris*; Oxidative stress

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2010)02-0442-06

多氯联苯(PCBs)是典型的持久性有机污染物(POPs),具有难降解性、生物毒性、生物蓄积性、远距离迁移性,因此可通过食物链而富集并直接危害人类健康,已成为全球性的重要污染物之一。近20年来,虽然在多数工业化国家都已禁止生产和使用PCBs,但PCBs仍在环境中广泛存在^[1]。氧化应激可以表征氯化化合物例如二噁英(TCDD)和PCBs的毒性作用。研究表明,TCDD和PCBs可以引起鱼类^[2]、贝类^[3]、鼠类^[4]和鸟类^[5]等的氧化应激。此外,PCBs可影响鸡胚胎的氧化应激状态,并可引起胚胎发育畸形^[6]。PCBs可能与胞内芳香烃受体(AHR)有关,从而引起细胞色素P4501A(CYP1A)等的表达量和活性增加。各种AHR相关机制包括CYP1A的表达和活性的改变导致活性氧(ROS)的产生^[7]。在对各种刺激产生的应答中,各种酶系统如环氧化酶(COX)、一氧化氮合成酶(NOS)、黄嘌呤氧化酶、核糖核苷酸还原酶、线粒体电子传递系统和NADPH氧化酶也参与了ROS的产生。ROS可诱导能对蛋白、脂类和核酸有大规模损伤作用的H₂O₂和·OH的形成。细胞内含有能为ROS解毒的抗氧化防御系统,如过氧化物歧化酶(SODs)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽氧化还原循环酶(GPx与GR)、类胡萝卜素、维生素A和E等^[8]。正常体内平衡状态要求氧化和抗氧化系统处于平衡,而过度抗氧化防御可能产生不利影响。

然而到目前为止,对PCBs作为两栖动物的氧化应激诱导剂的潜在作用鲜见报道。两栖鱼类-大弹涂鱼

(*Boleophthalmus pectinirostris*)盛产于东南亚沿海滩涂,营养丰富,肉质鲜美,经济价值高,在东南亚地区素有“水中人参”的美誉,是我国名特优海水养殖种类^[9],因其食物链短、养殖成本低、鱼病少,活鱼耐长途运输,国际国内需求量大,市场前景极为乐观^[10]。研究表明^[11,12],有机污染物对大弹涂鱼有很大的毒理效应,会造成大弹涂鱼的多项生理学指标受损,从而导致种质下降,资源衰退。同时,由于大弹涂鱼主要生活在近岸地带,且食物链较短,环境的变化能够较快地通过体内各项指标内检测到,所以在海洋环境监测,尤其是近岸养殖水体监测方面能够起到重要作用。本文以大弹涂鱼为材料,将其暴露于PCBs混合物Aroclor 1248 (10和100 µg/L)中,研究PCBs污染胁迫下大弹涂鱼体内常规毒性指标(死亡率、鱼体内PCBs含量、最终的平均体重)、鱼体抗氧化系统-抗氧化酶(SOD、CAT、GPx和GR)和谷胱甘肽硫转移酶(GST)活性、总谷胱甘肽(t-GSH)以及脂质过氧化水平,以了解PCBs对大弹涂鱼的毒性和抗氧化系统的干扰作用,为通过检测大弹涂鱼体内生化指标以监测沿海滩涂环境提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 大弹涂鱼的培养

实验所用大弹涂鱼采自浙江象山某养殖场,体长均

收稿日期: 2009-02-20; 修订日期: 2009-11-01

基金项目: 浙江省自然科学基金 Y5080149 资助

通讯作者: 何闪英(1980—),女,浙江人;副教授,博士;主要从事环境生物学研究。Tel: 0571-88071024-7016; E-mail: heshanying2007@yahoo.com.cn

为 7 cm 左右, 体重 14 g 左右, 置于装有 3 L 消毒海水(盐度为 18‰)的玻璃鱼缸(规格为 50 cm × 40 cm × 30 cm)中, 培养温度为(25±1)℃, 光照: 黑暗为 12h: 12h, 24h 更换一次海水, 投喂底栖硅藻。大弹涂鱼在实验室暂养 7d 后进行毒性试验。

1.2 致毒

Aroclor 1248 购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司, 先用一定量 0.05% 的二甲基亚砜(DMSO)(Sigma)助溶配成储备液, 再用海水配置成浓度为 10 和 100 μg/L 的溶液, 分别以不加 PCBs 和只加入 DMSO 的海水作为对照, 所有浓度均设 3 个平行组。每组选用 20 条大弹涂鱼, 培养条件同 2.1, 每日去除死亡的鱼, 记录存活率, 并更换培养溶液。28d 后, 收集每组存活的鱼并称重, 液氮速冻后 -81℃ 保存。

1.3 样品处理

获得的大弹涂鱼用 1:5 (w:v) 含 0.25% 蛋白酶抑制剂(Sigma)的磷酸盐缓冲液(0.125 mol/L Na₂HPO₄·12H₂O + 0.125 mol/L KH₂PO₄ + 0.05 mol/L Na₂EDTA)冰浴中匀浆 3 min。取 200 μL 匀浆液进行脂质过氧化和 t-GSH 检测。剩余匀浆液再 10000 r/min 离心(4℃)10min, 分装后 -81℃ 保存, 待生化分析。

1.4 酶活性、t-GSH 和脂质过氧化测定

总 SOD、CAT、GPx、GR 和 GST 活性采用试剂盒(南京建成生物研究所)测定。t-GSH 含量采用 Baker, et al.^[13] 的方法测定。脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量的测定参照文献[14]的方法。蛋白含量用 Bradford^[15] 的 G-250 染色法测定。

1.5 PCBs 检测

PCBs 提取如 Debier, et al.^[16] 所述的 EPA608 方法加以改良。选用 Aroclor 1248 中所含有的 12 个纯的 PCB 异构物(IUPAC 44、52、66、70、87、95、118、138、149、156、170、180), 这 12 个纯异构物的浓度可通过加入内标-氯化物灭蚊灵(Mirex)的量进行计算。这组异构物的重量代表了 45.5% 的 Aroclor 1248, 因此, Aroclor 1248 的总量可通过检测到的 12 个单体的量换算得到, 计算方法参考 Thome, et al.^[17] 建立的公式。总 PCB 浓度转化为 Aroclor 1248 当量, 并以 μg/g 组织或 μg/g 脂质表示。

样品在快速溶剂萃取仪(ASE200) (Dionex, USA) 中用正己烷提取脂质, 用 Turbo Vap 型浓缩仪 (Zymark, USA) 蒸发溶剂, 直至恒重, 测定脂质含量。

样品中加入 3 mL PCB 112 (终浓度为 50 pg/μL, 用正己烷溶解)考察操作中可能引起的 PCBs 损失。提取物用硫酸洗涤以去除脂、蛋白和糖类等有机物, 振荡混匀后 14000 r/min 离心, 去上清液后, 加入 3 mL 正己烷再次振荡, 离心, 取上清液。经旋转蒸发仪浓缩后, 用吸附柱 (Supelclean™ ENVI-Florisil SPE, SUPELCO, USA) 去除极性分子, 吸附柱先用 5 mL 丙酮、5 mL 丙酮-正己烷和 12

mL 正己烷洗脱, 最后用 6 mL 正己烷洗脱。另两个平行样品分别以 125 μL PCB30 (100 pg/μL, 溶于正己烷) 和 125 μL 灭蚊灵 (100 pg/μL, 溶于正己烷) 为内标提取 PCBs。提取后用配备电子捕获检测器的岛津 GC-2010 气相色谱仪 (Shimadzu, Japan) 进行分析, 采用 HP-5 石英毛细管柱, 气相色谱仪进样口 260℃, 检测器温度 280℃, 以 1 mL/min 高纯度氮气为载气。程序为: 210℃ 8min, 8℃/min 升至 250℃, 保持 35min, 随着温度的上升 PCBs 异构物相互分离, 各异构物的类别和含量根据保留时间的不同而确定。PCBs 在组织中的检测限为 1 ng/g, 在脂质中检测限为 200 ng/g。

1.6 统计分析

所有数据以平均值±标准差表示。正态性分析采用 KS (Kolmogorov-Smirnov) 检验方法, 方差齐性采用 Bartlett 检验, 组间差异比较采用多样本重复比较检验法 (Post-hoc LSD)。所有统计分析使用 SPSS16.0 软件 (SPSS, Microsoft, Redmond, WA)。

2 结 果

2.1 组织中 PCBs 的浓度以及对鱼体生长的影响

空白对照中大弹涂鱼的存活率为 (93.6±3.8)%, DMSO 对照组中存活率为 (91.8±2.6)%, Aroclor 1248 浓度为 10 μg/L 时存活率为 (86.2±2.2)%, 与两个对照组无显著差异 ($P = 0.86$), 而 Aroclor 1248 浓度为 100 μg/L 时大弹涂鱼的存活率显著下降 [$P < 0.05$, 存活率为 (57.2±3.4)%]。如图 1 所示, 暴露于 100 μg/L Aroclor 1248 的鱼体平均体重明显小于其他 3 组 ($P < 0.05$)。

虽然在两个对照组组织中也检测到微量 PCBs, 但如表 1 所示, 鱼体中的 PCBs 含量随着培养环境中 Aroclor 1248 剂量的增加而显著增加。

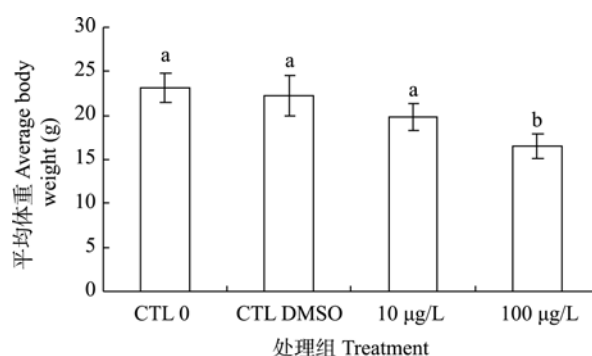


图 1 大弹涂鱼接触 Aroclor 1248 28d 后的平均体重

Fig. 1 The average body weight of *B. pectinirostris* exposed during 28 days to Aroclor 1248

标有字母 a 者表示组间差异不显著 ($P > 0.05$); 标有字母 b 者表示组间差异显著 ($P < 0.05$)

The means with letter a superscripts are not significantly ($P > 0.05$); and means with letter b superscripts within a column are significantly different ($P < 0.05$)

表 1 培养 28d 后鱼组织和脂肪中 PCBs 含量(Aroclor 1248 当量)

Tab. 1 Levels of PCBs(Aroclor 1248 equivalent)in *B. pectinirostris* exposed during 28 days to Aroclor 1248

处理组 Treatment	组织中含量 PCBs content in tissue ($\mu\text{g/g}$)	脂肪中含量 PCBs content in lipids ($\mu\text{g/g}$ 脂肪)
CTL 0	0.2±0.1	62±9
CTL DMSO	0.3±0.1	70±7
10 $\mu\text{g/L}$	4.8±0.9	1536±51
100 $\mu\text{g/L}$	75.5±6.2	20385±294

2.2 Aroclor 1248 对鱼体内酶活性、总 GSH 和脂质过氧化的影响

抗氧化酶活性检测结果(表 2)。暴露于 10 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 中的大弹涂鱼 SOD 活性明显大于空白和 100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 剂量组($P < 0.05$)。添加 Aroclor 1248 的实验组中 CAT 活性均高于对照组, 但 10 $\mu\text{g/L}$ 与 100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 强度下无显著差异($P = 0.82$)。100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 强度下 GPx 活性明显高于其他 3 组($P < 0.05$), 10 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 强度下 GPx 活性略高于对照组, 但与对照组无显著差异($P = 0.80$)。PCBs 接触下鱼体中 GR 活性略高于对照组, 但 4 组间活性值无显著差异 $P = 0.86$)。10 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 剂量组中的鱼体 GST 活性明显高于其他 3 组($P < 0.05$), 但 100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 剂量组 GST 活性与对照组无显著差异($P = 0.75$)。4 组中 t-GSH 水平无显著差异($P = 0.90$)。100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 强度中 MDA 明显高于其他 3 组($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 PCBs 对大弹涂鱼存活的影响

PCBs 的潜在毒性已经在许多动物种类中被证实, 其中, PCBs 对两栖动物的影响成为近年来的研究热点。过去几十年间, 多种两栖动物的数量在全球众多地区有所下降^[18]。其原因除了人为改变环境, 例如栖息地的破坏和紫外线的辐射, 还与环境污染物如 PCBs 的影响密切相关。据报道, PCBs 可以使两栖动物免疫系统受影响^[19]、性腺发育中断^[20]、变态延迟^[21]和死亡^[22]等。本研究发现 PCBs 在大弹涂鱼体内达(4.8±0.9) $\mu\text{g/g}$ 对大弹涂鱼的存活影响较小, 但累积量达(75.5±6.2) $\mu\text{g/g}$ 已严重影响大弹涂鱼的存活。而 2003 年 Fisher, et al.^[23]对另一种两栖类动物-非洲爪蟾(*Xenopus laevis*)的研究发现, 当其蝌蚪体内 PCBs 达到 114.1 $\mu\text{g/g}$ 时仍不影响存活, 这可能是由于氯化化合物对于蛙类的致死能力比大多数鱼类小 100—1000 倍^[24]。

此外, 在鱼类研究中发现, Aroclor 1254 对斑马鱼(*Danio rerio*) 30d 半致死浓度为 5.09 $\mu\text{g/L}$ ^[25], 黑头软口鲮鱼(*Pimephales promelas*)接触 Aroclor 1260 30d 其半致死量为 3.3 $\mu\text{g/L}$, 与 Aroclor 1248 接触 30d 其半致死量为 4.7 $\mu\text{g/L}$; 鲮鱼(Bluegill)和鲶鱼(Catfish) 在 Aroclor 1248

浓度达 20—50 $\mu\text{g/L}$ 时数周死亡; Aroclor 1254 对虹鳟(*Salmo gairdneri*)的 10d 半致死浓度为 38—326 $\mu\text{g/L}$, 20d 的半致死浓度为 6.4—49 $\mu\text{g/L}$ ^[26]。而本研究中大弹涂鱼接触 Aroclor 1248 28d 后仍有(57.2±3.4)%存活率, 表明比上述研究中的鱼体对 PCBs 有更好的耐受性, 这可能与实验用鱼种类、鱼的发育阶段、鱼的生活习性等有关。

3.2 PCBs 对大弹涂鱼生长的影响

大弹涂鱼成鱼平均体长 11 cm, 体重 23 g 左右, 本研究选用体长 7 cm 左右的大弹涂鱼作为试验材料, 处于生长最旺盛时期。如表 1 所示, 在 100 $\mu\text{g/L}$ Aroclor 1248 接触 28d 后大弹涂鱼平均体重比对照组明显下降, 前人的研究也表明 PCBs 可影响人类^[27]、大鼠^[28]、禽类^[29]、斑马鱼^[30]、蟾蜍^[31]等多种动物的生长。可能是由于 PCBs 污染可以引起动物体内甘油醛-3-磷酸脱氢酶(GAPDH)基因的表达式减少, 而 GAPDH 为糖酵解中重要酶类, 其低表达使葡萄糖更多进入戊糖磷酸途径, 生成 NADPH, NADPH 为谷胱甘肽/硫氧还蛋白氧化还原系统的主要还原当量, 这种机制在氧化胁迫中较为有利。

3.3 PCBs 对大弹涂鱼抗氧化系统的影响

使用化学分析方法虽可准确测定环境及生物体中 PCBs 污染物的含量, 但不能反映 PCBs 对生物体的毒害作用。使用生物学标记方法, 将相关的酶活性作为生物体功能和器官损伤的标记, 不仅能指示生物体对污染物的暴露, 还能指示污染物的毒性效应, 具有很好的预警作用。SOD 将 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 转化为 H_2O_2 , 而 CAT 因继续分解 H_2O_2 而被诱导, 这是机体面临氧化胁迫时一个十分重要的代谢途径。除 CAT 外, GPx 也利用还原型 GSH 作为电子供体参与 H_2O_2 分解, 生成氧化型 GSH(GSSG), 而 GSSG 可被 GR 还原。

本研究发现, 较低浓度 PCBs 接触后大弹涂鱼组织中的 SOD 活性约为对照组 2 倍, 而较高浓度 PCBs 作用下 SOD 活性约为对照组 1.4 倍, 比低浓度作用时明显下降, 这与其他鱼类受污染物胁迫的研究结果一致^[32,33]。当生物体受到环境污染轻度胁迫时, SOD 活性往往升高; 而当受到较重度逆境胁迫时, SOD 活性通常降低, 使生物体内积累过量的活性氧, 从而导致生物体受到伤害。

此外, 鱼体内 CAT 与 GPx 活性在 PCBs 胁迫下均增

加, 且 CAT 活性在高浓度作用时约为对照组的 1.3 倍, 低浓度时约为对照组的 1.6 倍, 而 GPx 活性与 CAT 相反, 在高浓度 PCBs 作用时约为对照组的 1.6 倍, 低浓度时约为对照组 1.2 倍, 可能是由于 GPx 和 CAT 有共同的作用底物 H₂O₂。在较高 PCBs 胁迫强度下, 鱼体内主要依赖增强 GPx 活性来抵抗由污染物引起的氧化胁迫, 即此时 GPx 对 H₂O₂ 的清除能力比 CAT 强, 削弱了 H₂O₂ 对 CAT 的底物诱导作用。类似现象在硒胁迫对钝顶螺旋藻抗氧化酶系统的影响的研究中也有报道^[34]。而鱼体内 GR 活性在

PCBs 胁迫下也有增加, 且与 SOD 和 CAT 相似, 随着胁迫强度的增加呈现先上升后下降的趋势。这些结果都表明 PCBs 是大弹涂鱼抗氧化酶的有效诱导剂。

谷胱甘肽硫转移酶(GST)为一种重要的第 2 阶段解毒酶, 可催化污染物与 GSH 结合, 生成极性小分子物质, 从而减轻其毒性。如表 2 所示, 低浓度 PCBs 胁迫下大弹涂鱼组织中的 GST 活性约为对照组 1.5 倍, 这说明大弹涂鱼体内 GST 活性被诱导得较为显著。在大鼠^[35]和鱼类^[36]研究中也类似报道。

表 2 大弹涂鱼接触 Aroclor 1248 28d 后抗氧化酶活性和脂质过氧化水平
Tab. 2 Lipid peroxidation and antioxidant system levels in *B. pectinirostris* after cultured 28 days

指标 Indicator	CTL 0	CTL DMSO	10 µg/L	100 µg/L
SOD	47.2±19.8	45.4±16.3	92.1±10.3 ^b	63.4±9.1
CAT	6.2±2.5	7.3±1.0	10.1±0.4	8.9±1.2
GPx	32.2±10.1	30.8±11.3	38.3±9.5	49.5±12.9 ^b
GR	7.2±0.8	7.1±0.6	8.5±1.3	7.9±0.8
GST	1560.7±188.4	1544.9±320.8	2430.7±311.5 ^b	1921.4±425.6
t-GSH	170.8±41.2	173.4±50.8	166.4±37.9	186.4±54.7
MDA	25.9±15.6	36.4±19.7	46.4±9.4	64.2±17.6 ^b

注: 标有字母 b 者表示组间差异显著($P < 0.05$); 各指标单位: SOD(mU/mg 蛋白); CAT(mU/mg 蛋白); GPx (nmol NADPH 氧化/min·mg 蛋白); GR (nmol NADPH 氧化/min·mg 蛋白); GST (nmol CDNB 氧化/min·mg 蛋白); t-GSH(nmol GSH/g 组织); MDA(nmol MDA/g 组织)

Note: The letter b indicated the significantly different among the groups ($P < 0.05$). Indicator unit: SOD (mU/mg protein); CAT (mU/mg protein); GPx (nmol NADPH oxidized/min·mg protein); GR (nmol NADPH oxidized/min·mg protein); GST (nmol CDNB/min·mg protein); t-GSH (nmol GSH/g tissue); MDA (nmol MDA/g tissue)

MDA 为脂质过氧化作用的典型产物, 也是研究生物体的活性氧伤害的常用指标。高浓度 PCBs 作用下鱼体内 MDA 含量达到空白对照 2.6 倍, 这可能是由于高浓度下过量自由基使组织抗氧化系统失衡, 引发脂质过氧化反应产生大量 MDA, 而 MDA 的增加将导致细胞内脂肪代谢的异常, 使组织破坏和老化。

本研究中发现 PCBs 作用下细胞内 t-GSH 水平变化并不显著, 细胞内的 t-GSH 含量是其被 GPx 和 GST 利用、GR 对 GSSG 的还原以及 GSH 的从头合成之间的综合结果。GST 参与机体对 PCBs 胁迫的保护可使 t-GSH 水平上升, 此外, 胞内 GSH 水平还受氨基酸转运酶和 GR 等控制, GSH 的合成有赖于多种酶的活性如 γ -谷氨酰半胱氨酸合成酶(γ -GCS)以及氨基酸前体谷氨酸、甘氨酸和半胱氨酸的可利用性。因此, PCBs 对参与 GSH 合成过程的酶系统以及氨基酸前体的利用性的影响有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] Ulbrich B, Stahlmann R. Developmental toxicity of polychlorinated biphenyls (PCBs): a systematic review of experimental data [J]. *Archives of Toxicology*, 2004, **78**(5): 252—268
[2] Vega-Lopez A, Galar-Martinez M, Jimenez-Orozco FA, et al.

Gender related differences in the oxidative stress response to PCB exposure in an endangered goodeid fish (*Girardinichthys viviparus*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2006, **146**(4): 672—678
[3] Ren J Y, Li S F. Effects of polychlorinated biphenyls 1254 (PCB1254) on two enzyme activity of biotransformation in digestive gland and gills of scallop *Chlamys farreri* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, **15**(2): 342—346 [任加云, 李树峰. 多氯联苯(PCB1254) 对栉孔扇贝消化盲囊和鳃丝 EROD、GST 酶活力的影响. *中国水产科学*, 2008, **15**(2): 342—346]
[4] Muthuvel R, Venkataraman P, Krishnamoorthy G, et al. Antioxidant effect of ascorbic acid on PCB (Aroclor 1254) induced oxidative stress in hypothalamus of albino rats [J]. *Clinica Chimica Acta*, 2006, **365**(1—2): 297—303
[5] Hilscherova K, Blankenship A L, Nie M, et al. Oxidative stress in liver and brain of the hatchling chicken (*Gallus domesticus*) following in vivo injection with TCDD [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2003, **136**(1): 29—45
[6] Xie M N, Zhang C Q, Zeng W D, et al. Toxic and estrogenic effects of polychlorinated biphenyls on chicken gonadal development [J]. *Chinese Journal of Veterinary Science*, 2004, **24**(13): 274—276 [解美娜, 张才乔, 曾卫东, 等. 多氯联苯对鸡胚性腺发育的毒性和雌性激素作用. *中国兽医学*

- 报, 2004, **24**(13): 274—276]
- [7] Dalton T P, Puga A, Shertzer H G. Induction of cellular oxidative stress by aryl hydrocarbon receptor activation [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2002, **141**(1-2): 77—95
- [8] Kashiwagi K, Shinkai T, Kajii E, *et al.* The effects of reactive oxygen species on amphibian aging [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2005, **140**(2): 197—205
- [9] Lin S S, Fang J Z. Study on the rearing technology of *Boleophthalmus pectinirostris* [J]. *Journal of Zhejiang aquatic University*, 1995, **14**(2): 96—104 [林叔森, 方家仲. 大弹涂鱼 *Boleophthalmus pectinirostris* 养殖技术研究. 浙江水产学院学报, 1995, **14**(2): 96—104]
- [10] Jin C H, Zhong A H, Zhang H Q, *et al.* Tissue-specificity of the isozymes in various parts of *Boleophthalmus pectinirostris* [J]. *Marine Sciences*, 2004, **28**(3): 35—40 [金春华, 钟爱华, 张海琪, 等. 大弹涂鱼不同组织器官的同工酶研究. 海洋科学, 2004, **28**(3): 35—40]
- [11] Zhang Q Y, Hong W S, Zheng W Y, *et al.* Effects of benzo(a)pyrene exposure on aryl hydrocarbon hydroxylase activities in the liver of *Boleophthalmus pectinirostris* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, **25**(2): 27—30 [张其永, 洪万树, 郑微云, 等. 苯并(a)芘对大弹涂鱼肝脏芳烃羟化酶活性的影响. 水产学报, 2001, **25**(2): 27—30]
- [12] Feng T, Guo X Q, Zheng W Y, *et al.* Detection of DNA Strand Breaks in the Liver of *Boleophthalmus pectinirostris* Treated with Benzo(a)pyrene [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **71**: 263—269
- [13] Baker M A, Cerniglia G J, Zaman A. Microtiter plate assay for the measurement of glutathione and glutathione disulfide in large numbers of biological samples [J]. *Analytical Biochemistry*, 1990, **190**(2): 360—365
- [14] Lin Z F, Li S S, Lin G Z, *et al.* Superoxide dismutase activity and lipid peroxidation in relation to senescence of rice leaves [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1984, **26**(6): 605—615 [林植芳, 李双顺, 林桂珠, 等. 水稻叶片的衰老与超氧化物歧化酶活性及脂质过氧化作用的关系. 植物学报, 1984, **26**(6): 605—615]
- [15] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**: 248—254
- [16] Debier C, Pomeroy P P, Dupont C, *et al.* Quantitative dynamics of PCB transfer from mother to pup during lactation in UK grey seals *Halichoerus grypus* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, **247**: 237—248
- [17] Thome J P, Roelandt L, Goffinet G, *et al.* Cytotoxic effects of Aroclor 1254 on ultrastructure and biochemical parameters in cultured foetal rat hepatocytes [J]. *Toxicology*, 1995, **98**: 83—94
- [18] Pasmans F, Mutschmann F, Halliday T, *et al.* Amphibian decline: the urgent need for amphibian research in Europe [J]. *Veterinary Journal*, 2006, **171**(1): 18—19
- [19] Linzey D W, Burroughs J, Hudson L, *et al.* Role of environmental pollutants on immune functions, parasitic infections and limb malformations in marine toads and whistling frogs from Bermuda [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2003, **13**(2): 125—148
- [20] Qin Z F, Zhou J M, Chu S G, *et al.* Effects of Chinese domestic polychlorinated biphenyls (PCBs) on gonadal differentiation in *Xenopus laevis* [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2003, **111**(4): 553—556
- [21] Lehigh-Shirey E A, Jelaso-langerveld A, Mihalko D, *et al.* Polychlorinated biphenyl exposure delays metamorphosis and alters thyroid hormone system gene expression in developing *Xenopus laevis* [J]. *Environmental Research*, 2006, **2**(2): 205—214
- [22] Savage W K, Quimby F W, DeCaprio A P. Lethal and sublethal effects of polychlorinated biphenyls on *Rana sylvatica* tadpoles [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2002, **21**(1): 168—174
- [23] Fisher M A, Jelaso A M, Predenkiewicz A, *et al.* Exposure to the polychlorinated biphenyl mixture Aroclors 1254 alters melanocyte and tail muscle morphology in developing *Xenopus laevis* tadpoles [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(2): 321—328
- [24] Jung R E, Walker M K. Effects of 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) on development of anuran amphibians [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**: 230—240
- [25] Nie X P, Zhang F J, Lan C. The acute toxicity and effects of PCB1254 upon zebrafish (*Brachydanio rerio*) and its tissue structures [J]. *Ecological Science*, 2004, **23**(2): 106—109 [聂湘平, 张凤君, 蓝崇. 多氯联苯(PCB1254)对斑马鱼 (*Brachydanio rerio*) 毒性及其组织结构的影响. 生态科学, 2004, **23**(2): 106—109]
- [26] Dai S G. Environmental Chemistry [M]. Beijing: Science Press. 1990, 271—272 [戴树桂. 环境化学. 北京: 科学出版社. 1990, 271—272]
- [27] Aoki, Y. Polychlorinated biphenyls, polychlorinated dibenzo-p-dioxins, and polychlorinated dibenzofurans as endocrine disrupters—what we have learned from Yusho disease [J]. *Environmental Research*, 2001, **86**(1): 2—11
- [28] Zhao H B, Ma L, Liang T, *et al.* Study on the ability of learning and memory affected by PCB in rats [J]. *Chinese Journal of Behavioral Medical Science*, 2000, **9**(6): 412—413 [赵红斌, 马立, 梁涛, 等. 多氯联苯对大鼠学习记忆能力影响的研究. 中国行为医学科学, 2000, **9**(6): 412—413]
- [29] Jin X, Kennedy S W, Di Muccio T, *et al.* Role of oxidative stress and antioxidant defense in 3, 30, 4, 40, 5-pentachlorobiphenyl-induced toxicity and species-differential sensitivity in chicken and duck embryos [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2001, **172**(3): 241—248
- [30] Henry T R, Spitsbergen J M, Hornung M W, *et al.* Early life

- stage toxicity of 2, 3, 7, 8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 1997, **142**(1): 56—68
- [31] Zhou J M, Qin Z F, Xu X B. Effects of polychlorinated biphenyl on the developmental by metamorphosis of *Xenopus laevis* [J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2007, **28**(7): 1—6 [周景明, 秦占芬, 徐晓白. 多氯联苯对非洲爪蟾变态发育的影响研究. 动物医学进展, 2007, **28**(7): 1—6]
- [32] Fang Z Q, Zhang F J, Zheng W B, *et al.* Effects of Polychlorinated Biphenyls on Activity of Superoxide Dismutase in Swordtails (*Xiphophorus helleri*) [J]. *Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica*, 2004, **12** (2): 96—99 [方展强, 张凤君, 郑文彪, 等. 多氯联苯对剑尾鱼超氧化物歧化酶活性的影响. 中国实验动物学报, 2004, **12**(2): 96—99]
- [33] Tang X X, Zhang P Y. Effects of anthracene on activity of superoxide dismutase in *Sebastes fuscescens* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2000, **24**(3): 217—220 [唐学玺, 张培玉. 蒽对黑鲷超氧化物歧化酶活性的影响. 水产学报, 2000, **24**(3): 217—220]
- [34] Chen S J, Yang F, Zheng W J, *et al.* Effects of selenium stress on antioxidant system of *Sprullina platensis* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(5): 706—711 [陈思嘉, 杨芳, 郑文杰, 等. 硒胁迫对钝顶螺旋藻抗氧化酶系统的影响. 水生生物学报, 2007, **31**(5): 706—711]
- [35] Twaroski T P, O'Brien M L, Robertson L W. Effects of selected polychlorinated biphenyl (PCB) congeners on hepatic glutathione, glutathione-related enzymes, and selenium status: implications for oxidative stress [J]. *Biochemistry Pharmacology*, 2001, **62**(3): 273—281
- [36] Schmidt K, Staaks G B, Pflugmacher S, *et al.* Impact of PCB mixture (Aroclor 1254) and TBT and a mixture of both on swimming behaviour, body growth and enzymatic biotransformation activities (GST) of young carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, **71**(1): 49—59

《水生生物学报》编辑委员会

EDITORIAL BOARD OF ACTA HYDROBIOLOGICA SINICA

主 编 Chief Editor 桂建芳 GUI Jian-Fang

副主编 Associate Editor 解绶启 XIE Shou-Qi

委 员 Members (以姓氏拼音为序)

蔡庆华	CAI Qing-Hua	曹文宣	CAO Wen-Xuan	常剑波	CHANG Jian-Bo
陈家宽	CHEN Jia-Kuan	陈宜瑜	CHEN Yi-Yu	陈毅峰	CHEN Yi-Feng
高坤山	GAO Kun-Shan	何舜平	HE Shun-Ping	洪云汉	HONG Yun-Han
胡征宇	HU Zheng-Yu	李文鑫	LI Wen-Xin	李钟杰	LI Zhong-Jie
林浩然	LIN Hao-Ran	刘建康	LIU Jian-Kang	刘永定	LIU Yong-Ding
麦康森	MAI Kang-Sen	聂 品	NIE Pin	曲久辉	QU Jiu-Hui
沈韞芬	SHEN Yun-Fen	宋立荣	SONG Li-Rong	唐启升	TANG Qi-Sheng
王 丁	WANG Ding	吴灶和	WU Zao-He	吴振斌	WU Zhen-Bin
相建海	XIANG Jian-Hai	肖 伟	XIAO Wei	谢 平	XIE Ping
谢小军	XIE Xiao-Jun	熊邦喜	XIONG Bang-Xi	熊思岳	XIONG Si-Yue
徐旭东	XU Xu-Dong	杨先乐	YANG Xian-Le	于 丹	YU Dan
余其兴	YU Qi-Xing	游 力	YOU Li	张奇亚	ZHANG Qi-Ya
朱作言	ZHU Zuo-Yan	Harald Rosenthal (德国)			

编辑部 Editorial office 杜新征 DU Xin-Zheng 王 芹 WANG Qin 余 茜 YU Xi