

网络出版时间:2013-07-18 16:05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130718.1605.031.html>

辛基酚对泥鳅的毒性作用及鳃、肝的组织学影响

雷 忻,任立松,薛 浩,延志莲,白重炎

(延安大学 生命科学学院,陕西 延安 716000)

【摘 要】 【目的】探讨辛基酚(Octylphenol,OP)对泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)的毒性效应及对鳃、肝组织结构的影响,为评价酚类化合物对水生生物的毒害作用提供理论依据。**【方法】**采用单因子毒性试验法和组织切片法,检测 OP 对泥鳅的急性毒性效应,统计死亡率,建立回归方程,计算半数致死质量浓度(LC_{50})和安全质量浓度(SC),并观察 OP 对鳃、肝组织结构的影响。**【结果】**OP 对泥鳅 24,48,72 和 96 h LC_{50} 分别为 3.27,2.70,2.13 和 1.84 mg/L,SC 为 0.55 mg/L;0.52 mg/L OP 可导致泥鳅鳃小片顶端膨大、卷曲,细胞坏死脱落,肝细胞肿大、空泡化、核溶解、核变形及细胞溶解。**【结论】**OP 属于高毒等级污染物,对泥鳅存在较强的急性毒性效应,且毒性随着质量浓度的增加及作用时间的延长而增强;当质量浓度小于 SC 的 OP 对泥鳅胁迫一段时间后,会导致泥鳅鳃、肝组织结构严重受损。

【关键词】 辛基酚;泥鳅;半致死质量浓度;鳃;肝

【中图分类号】 Q958,X171

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2013)08-0013-06

Acute and histological toxicity of octylphenol to gill and liver of *Misgurnus anguillicaudatus*

LEI Xin,REN Li-song,XUE Hao,YAN Zhi-lian,BAI Chong-yan

(College of Life Science,Yan'an University,Yan'an,Shaanxi 716000,China)

Abstract: 【Objective】 This paper studied the acute and histological toxicity of octylphenol (OP) to *Misgurnus anguillicaudatus* to evaluate toxicity of phenolic compound to hydrobiont. **【Method】** Methods of single factor toxicity test and histological observation were used to detect the acute toxicity effects of OP to *Misgurnus anguillicaudatus*, count the death ratios, build regression equations, and compute the median lethal concentrations (LD_{50}) and the safety concentrations (SC). The histological effects on gill and liver of *M. anguillicaudatus* were investigated as well. **【Result】** The 24, 48, 72, and 96 hours LC_{50} of OP were 3.27, 2.70, 2.13 and 1.84 mg/L, respectively, and the SC was 0.55 mg/L. After being exposed to 0.52 mg/L OP, the distal of branchial leaflets enlarged and curled, and gill cells necrotizing exfoliated. Some liver cells became enlarged and bubbled, and cytolysis occurred after nucleus deformation and karyolysis. **【Conclusion】** OP had high toxicity to *M. anguillicaudatus*, and with the increase concentration and exposure time of OP, the toxicity effects increased. When being exposed to OP concentrations lower than SC for a few days, the gill and liver of *M. Anguillicaudatus* were damaged severely.

Key words: octylphenol; *Misgurnus anguillicaudatus*; median lethal concentration; gill; liver

* [收稿日期] 2013-02-25

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31240076);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JM3012);陕西省高水平大学建设专项资金资助项目(2012SXTS03);陕西省教育厅科学研究项目(2013JK0710);延安市科学技术研究发展计划项目(2012KS-15);延安大学博士科研启动项目;生态学陕西省重点学科专项

[作者简介] 雷 忻(1972—),女,陕西延安人,副教授,博士,主要从事动物学及生态毒理学研究。E-mail:leizz66@126.com

辛基酚(octylphenol, OP)作为一种重要的精细化工原料和中间体,被广泛用于表面活性剂、塑料制品、纸制品、纺织原料、农药、食物制品等产品的生产中^[1-2]。它是烷基酚乙烯醚(Alkylphenol polyethenoxy ethers, APEs)类物质中雌激素活性较强的一种^[3-4],具有易富集、难降解等特点,其引发的毒性可以通过食物链传递和放大,除可对水生生物产生毒害作用外,还可危及陆生动物、鸟类和人类的健康^[5-6],已成为当今环境中重要的污染物,特别是含酚废水已对水生生态环境造成了严重的污染^[7-8]。随着陕北地区能源化工基地建设的快速发展,当地工业、生活废水及农药污染日渐增多,河水中的 OP 等酚类化合物污染也有加剧之势,对当地水生生物及人体的毒害作用不容忽视。

泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*) 隶属鲤形目(Cypriniformes) 鳅科(Cobitidae) 泥鳅属(*Misgurnus*)^[9],系一种小型淡水鱼,适应于淤泥、水体 2 种栖息环境,抗病能力较强,食性广,易于驯养,是一种良好的可用以监测土壤与水域环境污染的动物^[10]。近年来,关于 OP 对水生动物的毒性作用已有一些报道^[11-12],但有关其对鱼类鳃、肝组织结构的损伤目前鲜见报道。本研究以泥鳅为试验动物,研究了 OP 的急性毒性效应,并探讨了其对鳃、肝组织结构的影响,旨在为深入探讨酚类化合物对鱼类的毒性效应机制提供基础资料,为当地水环境污染的检测和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用泥鳅购自延安市农贸市场。在室温下,用经过 3 d 自然脱氯的自来水驯养 2 周后,挑选健康、强壮的鱼种进行试验。受试泥鳅平均体质量(12.6±3.5) g,平均体长为(11.4±2.5) cm。OP 分析纯,购自成都格雷西亚化学技术有限公司。

1.2 急性毒性试验

在正式试验前先进行 2 次预试验,确定 OP 最大耐受质量浓度(1.06 mg/L)和最小全致死质量浓度(3.32 mg/L)。按等对数(常用对数)间距,将 OP 设置 5 个质量浓度处理组(1.28,1.55,1.87,2.27,2.75 mg/L),同时设空白对照组(加蒸馏水),每处理设 3 个重复,每重复 20 条泥鳅。试验开始后,在泥鳅出现死亡之前,连续 8 h 观察其活动、中毒情况及体色变化;每 24 h 统计 1 次泥鳅的死亡数,更换 1 次受试药液,以保证药液溶氧量、pH、水温及其他理

化指标的稳定^[13],并及时捞出死亡泥鳅,计算死亡率。试验共进行了 96 h。空白对照组泥鳅在试验期间未出现死亡。

1.3 慢性毒性试验

根据急性毒性试验所得结果,在安全质量浓度(SC)以下,按照等对数(常用对数)法将 OP 设置 4 个质量浓度处理组(0.12,0.19,0.32,0.52 mg/L),同时设置空白对照组(加蒸馏水),每处理设 2 个重复,每重复放入 10 条泥鳅。试验期间每 48 h 更换 1 次受试药液,隔天喂食少许小米和玉米碎粒,取样前 1 d 停止喂食。

1.4 鳃、肝组织切片的制作

分别在慢性染毒 7,14,21,28 d 处死泥鳅,剖取鳃、肝组织,置于 Bouin 固定液中固定 3 h,经洗涤、脱水、透明后,用石蜡包埋,石蜡切片机切成 6 μm 厚薄片,并贴片。用苏木素-伊红染色法(Hematoxylin and Eosin Stain, H. E)进行染色,脱水、透明后用中性树胶封藏切片。显微镜(OLYMPUS BX51TRF)下观察并拍照。

1.5 数据处理

运用 SPSS 18.0 软件对 OP 质量浓度常用对数值(x)与泥鳅死亡几率(y)的关系进行回归分析,得到回归方程 $y=ax+b$,其中 a 为直线的斜率。由回归方程分别计算出 24,48,72 和 96 h 的半致死质量浓度(Median lethal concentration, LC_{50})和 95%置信区间(95% credibility range),由 LC_{50} 可以计算出 SC ^[14]: $SC = 48\text{ h } LC_{50} \times 0.3 / (24\text{ h } LC_{50} / 48\text{ h } LC_{50})^2$ 。

2 结果与分析

2.1 辛基酚对泥鳅的急性毒性效应

泥鳅死亡率与 OP 质量浓度的关系见图 1。

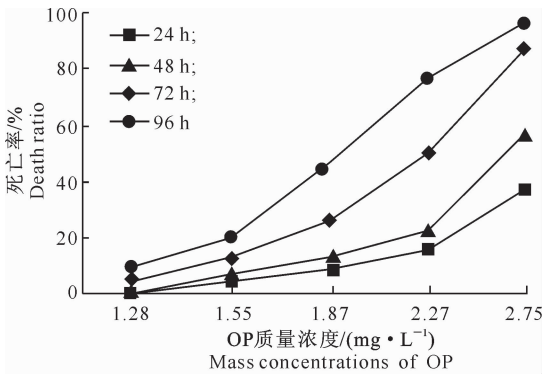


图 1 泥鳅死亡率与 OP 质量浓度的关系
Fig.1 Correlation between the death ratios of *M. anguillicaudatus* and OP concentrations

从症状来看,在试验最初的 6 h 内,较低质量浓度(1.28,1.55 mg/L)OP 处理泥鳅没有明显的中毒症状。而较高质量浓度(2.27,2.75 mg/L)OP 处理 2 h 后,泥鳅就开始出现中毒症状,游动急速,四处乱窜;6 h 后游泳失衡,出现抽搐,不时跃出水面,碰撞桶壁,逐渐侧翻在水中;8 h 开始出现死亡,体表黏液明显增多。

表 1 泥鳅暴露于 OP 中的死亡几率与 OP 质量浓度常用对数的回归方程

Table 1 Regression equation between the death probabilities of *M. anguillicaudatus* and OP mass concentrations

暴露时间/h Time	回归方程 Regression equation	相关系数(R^2) Correlation coefficient	半致死质量浓度(LC_{50})/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Median lethal concentration	95%置信区间/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 95% credibility range	安全质量浓度(SC)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Safe concentration
24	$y=5.434x+2.201$	0.952**	3.27 a	1.90~12.07	0.55
48	$y=6.976x+1.986$	0.974**	2.70 b	1.84~5.50	
72	$y=7.747x+2.455$	0.953**	2.13 c	1.41~5.71	
96	$y=9.506x+2.487$	0.975**	1.84 d	1.37~3.15	

注:回归方程中, x 为 OP 质量浓度的常用对数值, y 为泥鳅死亡几率;“**”表示相关性极显著($P<0.01$)。同列数据后标不同小写字母者表示差异显著($P<0.05$)。

Note: In the regression equations, x represents common logarithm value of compound mass concentration, y represents death probability of *M. anguillicaudatus*. “**” represents remarkably significant difference ($P<0.01$). Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 辛基酚对泥鳅鳃组织结构的影响

试验结果显示,空白对照组中,泥鳅鳃小片结构完整,鳃丝排列有序,表面平滑舒展(图 2a)。与空白对照组相比,在 0.52 mg/L OP 中暴露 7 和 14 d 后,鳃小片基部组织细胞排列松散,开始脱落,顶端膨大、卷曲(图 2b 和 2c);暴露 28 d 后,鳃小片基部

由图 1 可知,随着 OP 质量浓度的增大,泥鳅死亡率逐渐升高,基本呈正相关趋势。将死亡率转化为死亡几率单位,将 OP 质量浓度转化为常用对数,进行回归分析,得到的回归方程见表 1。由表 1 可见,泥鳅在 24,48,72,96 h 的 LC_{50} 分别为 3.27, 2.70,2.13,1.84 mg/L,SC 为 0.55 mg/L,表明随着 OP 染毒时间的延长, LC_{50} 逐渐减小。

的组织细胞大量坏死脱落(图 2d)。表明在慢性毒性试验中,高质量浓度(0.52 mg/L)OP 胁迫下,泥鳅鳃组织结构随胁迫时间的延长损伤加剧。0.12, 0.19 和 0.32 mg/L OP 对泥鳅鳃组织结构损伤不明显。

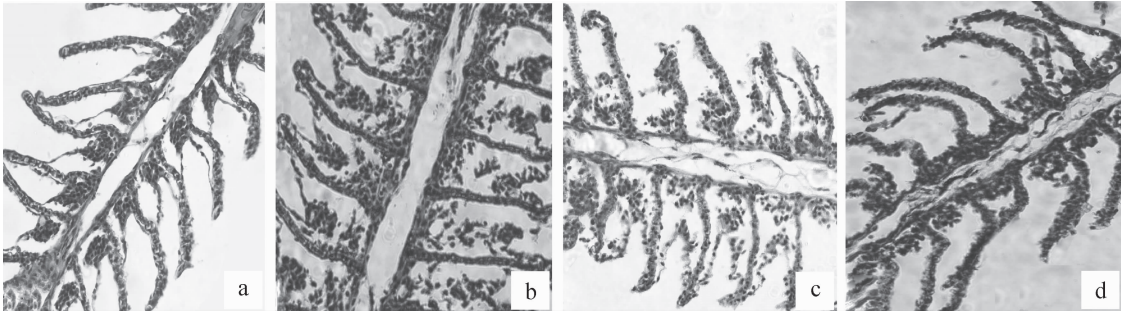


图 2 在 0.52 mg/L OP 中暴露不同时间时泥鳅鳃组织结构的变化(×400)
a. 对照组;b. 暴露 7 d;c. 暴露 14 d;d. 暴露 28 d

Fig. 2 Structure changes in gill of *M. anguillicaudatus* exposed to 0.52 mg/L OP (×400)
a. Control group;b. Exposing for 7 days;c. Exposing for 14 days;d. Exposing for 28 days

2.3 辛基酚对泥鳅肝组织结构的影响

显微观察结果显示,空白对照组泥鳅肝细胞分布均匀,细胞核位于细胞中央,呈圆形或椭圆形(图 3a)。与空白对照组相比,在 0.52 mg/L OP 中暴露 7 d 时,肝细胞出现肿大和空泡化(图 3b);暴露 14 d

时,肝细胞发生肿大、空泡化及核溶解(图 3c);暴露 28 d 时,除肿大、空泡化、核溶解外,还出现了核变形、肝细胞溶解和组织间隙明显增大等现象,肝组织受损严重(图 3d)。0.12,0.19 和 0.32 mg/L OP 对泥鳅肝组织结构损伤不明显。

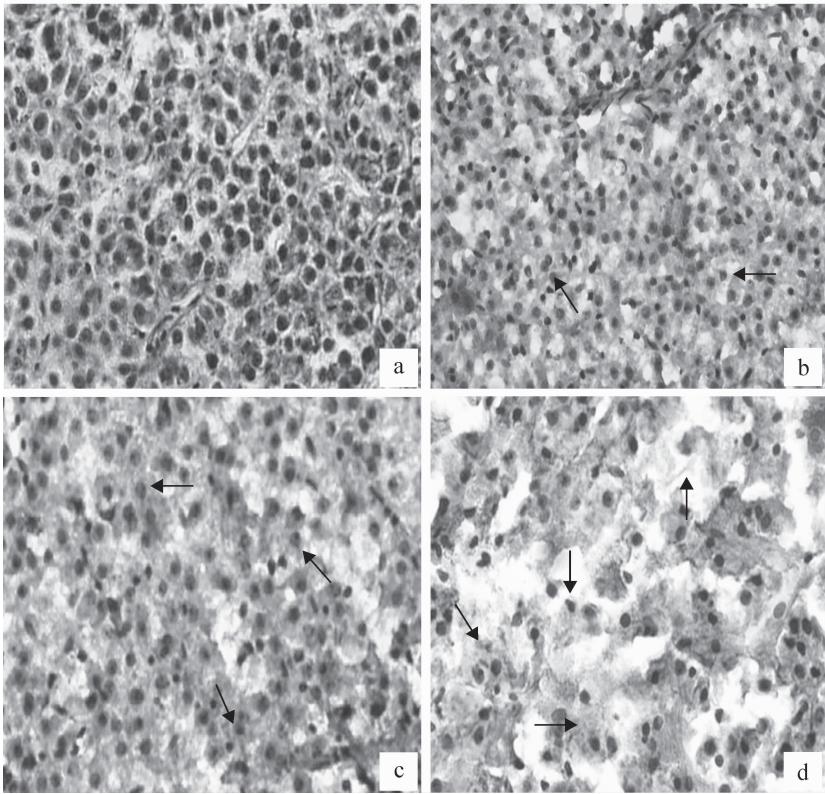


图 3 在 0.52 mg/L OP 中暴露不同时间时泥鳅肝组织结构的变化

a. 空白对照组($\times 400$); b. 暴露 7 d ($\times 200$), $\leftarrow$ 示肿大细胞, $\blacktriangledown$ 示空泡化细胞; c. 暴露 14 d ($\times 400$), $\leftarrow$ 示肿大细胞, $\blacktriangledown$ 示空泡化细胞, $\blacktriangledown$ 示核溶解细胞; d. 暴露 28 d ($\times 400$), $\rightarrow$ 示溶解细胞, $\blacktriangledown$ 示核溶解细胞, $\downarrow$ 示核变形细胞, $\uparrow$ 示肝组织间隙

Fig. 3 Structure changes in liver of *M. anguillicaudatus* exposed to 0.52 mg/L OP

a. Control group ($\times 400$); b. Exposing for 7 days ($\times 200$), cell enlarged ($\leftarrow$) and cell bubbled ($\blacktriangledown$);

c. Exposing for 14 days ($\times 400$), cell enlarged ($\leftarrow$), cell bubbled ($\blacktriangledown$) and karyolysis ($\blacktriangledown$); d. Exposing for 28 days ($\times 400$), cell lysis ($\rightarrow$), karyolysis ($\blacktriangledown$), nucleus deformed ($\downarrow$) and tissue space of liver ($\uparrow$)

3 讨 论

3.1 OP 对泥鳅的急性毒性效应

洪燕燕等^[12]在 OP 对中国林蛙蝌蚪生长发育毒性效应的研究中发现,蝌蚪死亡率随 OP 浓度的升高和暴露时间的延长而升高,OP 对其具有较强的毒性作用。闫鹏等^[15]、陆璐等^[16]研究表明,OP 对小鼠、大鼠均具有较强的毒性作用。本研究中的急性毒性试验结果表明,在相同时间内,泥鳅的死亡率随 OP 质量浓度的增大呈上升趋势,说明在一定质量浓度范围内,OP 对泥鳅存在明显的急性毒性效应;而在同一 OP 质量浓度下,死亡率均随着染毒时间的延长逐渐升高,说明 OP 在泥鳅体内具有累积效应。

一般以 LC_{50} 作为环境污染物对水生生物毒性评价的依据。根据 96 h 的 LC_{50} 大小,可将化合物对鱼类的急性毒性分为 5 个等级: $LC_{50} < 1$ mg/L 时为剧毒, 1 mg/L $\leq LC_{50} < 100$ mg/L 时为高毒, 100

mg/L $\leq LC_{50} < 1\ 000$ mg/L 时为中等毒性, $1\ 000$ mg/L $\leq LC_{50} < 10\ 000$ mg/L 时为低毒, $LC_{50} \geq 10\ 000$ mg/L 时为微毒^[17]。根据本试验结果,OP 96 h LC_{50} 为 1.84 mg/L,可知 OP 属于高毒等级的酚类污染物,其对水生生物的毒害作用非常严重,应该引起高度重视。

双酚 A(BPA)、对硝基酚(PNP)、间苯二酚、邻苯二酚及 OP 均属于酚类化合物,是目前水污染中毒性较强的污染物。雷忻等^[18-19]研究了 BPA、PNP、间苯二酚和邻苯二酚对泥鳅的急性毒性效应,得出 BPA 的 48 h LC_{50} 为 8.02 mg/L, SC 为 2.24 mg/L; PNP 的 48 h LC_{50} 为 17.58 mg/L, SC 为 4.40 mg/L; 间苯二酚 48 h LC_{50} 为 23.44 mg/L, SC 为 5.29 mg/L; 邻苯二酚 48 h LC_{50} 为 96.74 mg/L, SC 为 16.71 mg/L。本研究中,OP 48 h LC_{50} 为 2.70 mg/L, SC 为 0.55 mg/L。比较上述 5 种酚类化合物的 48 h LC_{50} 和 SC,可知其对泥鳅的毒性作用由强到弱依次为 OP > BPA > PNP > 间苯二酚 > 邻苯

二酚,其中,OP 的毒性作用最强,BPA、PNP 次之,间苯二酚和邻苯二酚最弱,说明烷基酚(OP、BPA)的毒性大于硝基酚(PNP),硝基酚大于苯二酚(间苯二酚、邻苯二酚),提示酚类化合物的毒性作用可能与化合物分子结构如苯环及取代基团的类型、数量、位置等关系密切。

3.2 OP 对泥鳅鳃组织结构的影响

鳃是鱼类的呼吸器官,参与代谢产物排泄、体液渗透平衡和酸碱平衡调节等生理活动,它因直接与水环境接触,极易因水体污染而受损伤,是污染物发挥毒性作用的主要靶器官,其结构和生理变化可以直接反应化学物质对鱼的毒害程度^[20]。

Fanta 等^[21]提出,鱼类受到外源性有害物质作用后,鳃组织细胞会发生肥大、增生、坏死和脱落等变化。Jiraungkoorskul 等^[22]将尼罗罗非鱼暴露于草甘膦除草剂后,观察到鳃丝上皮细胞增生,鳃小片顶端膨大。雷忻等^[18]在研究 BPA 和 PNP 对泥鳅鳃组织的影响时,观察到鳃小片顶端膨大、卷曲,细胞大量坏死性脱落。本研究观察了慢性毒性试验中,OP 对泥鳅鳃组织结构的影响,结果发现,在 0.52 mg/L OP 中暴露 7 d 后,鳃小片顶端膨大、卷曲,基部细胞开始脱落;28 d 后,鳃小片基部的细胞大量坏死性脱落。说明泥鳅在质量浓度小于 SC (0.55 mg/L)的 OP 中暴露一段时间,OP 在鳃组织中会逐渐积累,达到一定质量浓度时,便会产生慢性毒性效应,对鳃组织造成较为严重的损伤。

3.3 OP 对泥鳅肝组织结构的影响

肝脏是鱼类生命活动中物质代谢的重要枢纽,是外源性有毒物质在体内进行生物转化的主要场所。鱼类肝组织结构的变化可以反映水环境中有毒物质痕量污染的情况,目前已经在环境毒理学研究中得到广泛应用^[23-25]。

Cengiz 等^[26]在研究亚致死浓度溴氰菊酯(Deltamethrin)对食蚊鱼(*Gambusia affinis*)的毒性作用时,观察到了肝细胞肿大、核萎缩及组织坏死等现象。吴玲玲等^[27]在非对斑马鱼肝组织结构影响的研究中观察到,肝细胞在低质量浓度菲中暴露 36 d 时发生了肿大、空泡化等轻微变性,而在高质量浓度菲中暴露 36 d 时出现核溶解、萎缩变形及细胞溶解等严重受损症状。本研究观察到,在 0.52 mg/L OP 中暴露 7 d 时,泥鳅肝细胞已经出现肿大、空泡化等症状;暴露 28 d 时,还出现了核变形、肝细胞溶解及组织间隙增大等严重损伤症状,说明当泥鳅暴露在小于 SC (0.55 mg/L)的低质量浓度 OP 中时,

肝组织结构会发生改变,这种结构性损伤可随暴露时间的延长而逐渐累积,致使肝细胞溶解坏死,肝组织受损,加之鳃组织的损伤,严重影响了机体的各种代谢功能,最终导致个体死亡。

4 结 论

OP 96 h LC_{50} 为 1.84 mg/L,SC 为 0.55 mg/L,属于高毒等级的酚类污染物,对泥鳅存在较强的急性毒性效应,且随着时间的延长,在泥鳅体内具有累积效应。小于 SC 的低质量浓度(0.52 mg/L)OP 对泥鳅胁迫一段时间后,会导致其鳃、肝组织结构严重受损,影响呼吸代谢、物质合成及转化功能。

[参考文献]

- [1] Routledge E J, Sumpter J P. Structural features of alkylphenolic chemicals associated with estrogen activity [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1997, 272(6): 3280-3288.
- [2] Vázquez R G, Meijide F J, Da Cuña R H, et al. Exposure to waterborne 4-tert-octylphenol induces vitellogenin synthesis and disrupts testis morphology in the South American freshwater fish *Cichlasoma dimeris* (Teleostei, Perciformes) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2009, 150(2): 298-306.
- [3] White R, Jobling S, Hoare S A, et al. Environmentally persistent alkylphenolic compounds are estrogenic [J]. Endocrinology, 1994, 135(1): 175-182.
- [4] Jobling S, Sheahan D, Osborne J A, et al. Inhibition of testicular growth in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) exposed to estrogenic alkylphenolic chemicals [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15(2): 194-202.
- [5] Rudel R. Predicting health effects of exposures to compounds with estrogenic activity: Methodological issues [J]. Environmental Health Perspectives, 1997(Suppl 3): 105:655-663.
- [6] 杜克久,徐晓白. 环境雌激素研究进展 [J]. 科学通报, 2000, 45(21): 2241-2251.
Du K J, Xu X B. Advances in environmental estrogens [J]. Chinese Sci Bull, 2000, 45(21): 2241-2251. (in Chinese)
- [7] 吴永民,李 甫,黄咸雨,等. 含酚废水处理新技术及其发展前景 [J]. 环境科学与管理, 2007, 3(3): 150-154.
Wu Y M, Li F, Huang X Y, et al. New techniques for treatment of phenol-containing waste water and prospect of them [J]. Environmental Science and Management, 2007, 3(3): 150-154. (in Chinese)
- [8] Sun X B, Wu G J, Chen J P, et al. Toxic effect of detergents on *Daphnia magna* [J]. Acta Hydrobiol Sin, 2000, 24(3): 296-297.
- [9] 成庆泰,郑葆珊. 中国鱼类系统检索 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Cheng Q T, Zheng B S. Systematic synopsis of Chinese fishes [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)

- [10] 王万云,丁海华,毛治彦,等.秦岭地区泥鳅生物学特性及人工繁殖技术研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2003,31(S2):153-157.
Wang W Y, Ding H H, Mao Z Y, et al. On biological characteristics and technology of artificial reproduction of loach in Qinling Mountain [J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2003, 31(S2): 153-157. (in Chinese)
- [11] 吴翠琴.己烯雌酚和辛基酚对真鲷幼鱼的雌激素效应研究[J].水产科学,2008,27(12):611-614.
Wu C Q. Estrogenic effects of diethylstilbestrol and octylphenol on juvenile genuine porgy *Pagrosomus major* [J]. Fisheries Science, 2008, 27(12): 611-614. (in Chinese)
- [12] 洪燕燕,张辉.辛基酚对中国林蛙蝌蚪生长发育的毒性效应[J].生态毒理学报,2010,5(3):343-350.
Hong Y Y, Zhang Y H. Toxicity effects of octylphenol on growth and development of tadpoles (*Rana chensinensis*) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2010, 5(3): 343-350. (in Chinese)
- [13] 沈洪艳,宋存义,甄芳芳,等.对氯硝基苯对锦鲤鱼的急性毒性效应[J].河北师范大学学报:自然科学版,2007,31(4):514-516.
Shen H Y, Song C Y, Zhen F F, et al. The acute toxicity effect of P-NCB on *Brocarded carp* [J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition, 2007, 31(4): 514-516. (in Chinese)
- [14] 张克杰,张维平.环境污染生物监测与评价[M].北京:中国环境科学出版社,1991.
Zhang K J, Zhang W P. Biological monitoring and assessment of environmental pollution [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991. (in Chinese)
- [15] 闫鹏,郑剑,杨元斌,等.壬基酚和辛基酚对小鼠遗传毒性联合作用[J].中国卫生检验杂志,2008,18(12):2505-2506, 2524.
Yan P, Zheng J, Yang Y B, et al. Study of nonylphenol and octylphenol on combined genetic toxicity of mice [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2008, 18(12): 2505-2506, 2524. (in Chinese)
- [16] 陆璐,杨晓燕,李晖.辛基酚、壬基酚联合毒性作用对雄性大鼠精子影响的实验研究[J].新疆医科大学学报,2008,31(12):1659-1660,1663.
Lu L, Yang X Y, Li H. Experimental study of octylphenol, nonylphenol joint toxic effect on the sperm of male rats [J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2008, 31(12): 1659-1660, 1663. (in Chinese)
- [17] 孔志明.环境毒理学[M].3版.南京:南京大学出版社,2006.
Kong Z M. Environmental toxicology [M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2006. (in Chinese)
- [18] 雷忻,李宗强,廉振民,等.双酚A和对硝基酚对泥鳅的急性毒性效应[J].生态学杂志,2009,28(11):2257-2261.
Lei X, Li Z Q, Lian Z M, et al. Acute toxicity effects of bisphenol A and p-nitrophenol to *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2257-2261. (in Chinese)
- [19] 雷忻,陈超,王文强,等.间苯二酚与邻苯二酚对泥鳅的急性毒性效应[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):175-179.
Lei X, Chen C, Wang W Q, et al. Acute toxicity effects of m-dihydroxybenzene and o-dihydroxybenzene to *Misgurnus anguillicaudatus* [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(4): 175-179. (in Chinese)
- [20] Alazemi B M, Lewis J W, Andrews E B. Gill damage in the freshwater fish *Gnathonemus petersii* (family: Mormyridae) exposed to selected pollutants: an ultrastructural study [J]. Environmental Technology, 1996, 17(3): 225-238.
- [21] Fanta E, Rios F S, Romas, et al. Histopathology of the fish *Corydoras paleatus* contaminated with sublethal levels of organophosphorus in water and food [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, 54(2): 119-130.
- [22] Jiraunkoorskul W, Upatham E S, Kruatrachue M, et al. Biochemical and histopathological effects of glyphosate herbicide on Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Environmental Technology, 2003, 18(4): 260-268.
- [23] Triebkorn R, Köhler H R, Honnen W, et al. Induction of heat shock proteins, changes in liver ultrastructure, and alterations of fish behavior: Are these biomarkers related and are they useful to reflect the state of pollution in the field [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery, 1997, 6(1): 57-73.
- [24] Schramm M, Müller E, Triebkorn R. Brown trout (*Salmo trutta f. fario*) liver ultrastructure as a biomarker for assessment of small stream pollution [J]. Biomarkers, 1998, 3(2): 93-108.
- [25] Gernhöfer M, Pawert M, Schramm M, et al. Ultrastructural biomarkers as tools to characterize the health status of fish in contaminated streams [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery, 2001, 8(3/4): 241-260.
- [26] Cengiz E I, Unlu E. Sublethal effects of commercial deltamethrin on the structure of the gill, liver and gut tissues of mosquitofish, *Gambusia affinis*: A microscopic study [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2006, 21(3): 246-253.
- [27] 吴玲玲,陈玲,张亚雷,等.菲对斑马鱼鳃和肝组织结构的影响[J].生态学杂志,2007,26(5):688-692.
Wu L L, Chen L, Zhang Y L, et al. Effects of phenanthrene toxicity on histopathology of *Brachydanio rerio* gill and liver [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(5): 688-692. (in Chinese)