

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20200519001

王京, 郑磊, 闫振广, 等. 代表性鲤科鱼类青鱼的物种敏感性评价[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(2): 270-276

Wang J, Zheng L, Yan Z G, et al. Species sensitivity evaluation of a Chinese representative Cyprinid *Mylopharyngodon piceus* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(2): 270-276 (in Chinese)

代表性鲤科鱼类青鱼的物种敏感性评价

王京^{1,2}, 郑磊³, 闫振广^{2,*}, 李娟英¹

1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306

2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

3. 国家环境分析测试中心, 北京 100029

收稿日期: 2020-05-19 录用日期: 2020-07-02

摘要: 物种敏感性评价是水质基准研究的重要内容。青鱼是我国典型淡水底栖鲤科鱼类。搜集和筛选了水体代表性污染物毒死蜱、苯并[a]芘、荧蒹和三价砷对青鱼的毒性数据,并开展了这4种污染物对青鱼的急性毒性实验,评价青鱼的物种敏感性。结果表明:(1) 毒死蜱、苯并[a]芘、荧蒹和三价砷对青鱼96 h的半致死浓度(LC₅₀)分别为0.31、0.011、7.00和0.87 mg·L⁻¹;4种污染物对青鱼幼稚鱼均属于中高毒性,青鱼幼稚鱼敏感性整体上高于国际标准测试物种斑马鱼,说明青鱼幼稚鱼可能是较为灵敏的受试生物;(2) 青鱼对各类污染物敏感性具有显著差异,对三价砷非常敏感,物种累积频率为8%,在无机砷的水质基准研究中值得关注;(3) 在鱼类敏感性排序中,鲤科和鲑科鱼类对各种污染物较为敏感,青鱼作为典型底栖鲤科鱼类,在水质基准和生态风险评估研究中应给予更多关注。

关键词: 青鱼;物种敏感性;鲤科;淡水鱼类;受试生物

文章编号: 1673-5897(2021)2-270-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Species Sensitivity Evaluation of a Chinese Representative Cyprinid *Mylopharyngodon piceus*

Wang Jing^{1,2}, Zheng Lei³, Yan Zhenguang^{2,*}, Li Juanying¹

1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. National Research Center of Environmental Analysis and Measurement, Beijing 100029, China

Received 19 May 2020 accepted 2 July 2020

Abstract: Species sensitivity evaluation is an important part of water quality criteria research. *Mylopharyngodon piceus* is a typical benthic cyprinid in China's freshwater bodies. In this study, toxicity data of chlorpyrifos, benzo[a]pyrene, fluoranthene and trivalent arsenic were collected and screened and acute toxicity tests of the above four pollutants were performed to evaluate the sensitivity of *Mylopharyngodon piceus*. The results showed that: (1) The 96 h median lethal concentrations (LC₅₀) of chlorpyrifos, benzo[a]pyrene, fluoranthene and trivalent arsenic for *Mylopharyngodon piceus* were 0.31, 0.011, 7.00 and 0.87 mg·L⁻¹, respectively. The four pollutants were all mod-

基金项目: 河北省重点研发计划项目(20374204D)

第一作者: 王京(1995—),男,硕士,研究方向为人体健康水质基准, E-mail: steviewang123@163.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: zgyan@caees.org.cn

erately or highly toxic to *Mylopharyngodon piceus* fry, whose sensitivity was generally higher than that of the international standard test species *Danio rerio*, indicating that the fry may be a more sensitive test organism. (2) *Mylopharyngodon piceus* has significant differences in sensitivity to various pollutants, which is sensitive to trivalent arsenic with the cumulative frequency of 8%. Therefore, it is worthy of attention in the study of inorganic arsenic water quality criteria. (3) Cyprinidae and Salmonidae are relatively sensitive to various pollutants in fish sensitivity distribution. More attention should be given to *Mylopharyngodon piceus*, the typical benthic cyprinid, in the study of water quality criteria and ecological risk assessment.

Keywords: *Mylopharyngodon piceus*; species sensitivity; Cyprinidae; freshwater fish; test organisms

鱼类是水生生态系统的重要组成部分,对维持水生生态系统功能完整性具有重要作用。同时鱼类也是水质基准推导中所必需的一类生物,在美国、澳大利亚和欧盟等发达国家或地区的水质基准研究中,均要求使用鱼类的毒性数据以加强对其的保护^[1-4]。相对于大部分发达国家和地区,我国正处于水质基准的探索研究阶段,本土物种的筛选和毒性测试是水生生物基准推导的关键因素之一。

中国的淡水鱼类资源中,有一半以上属鲤科,其中在中国渔业生产中占有重要地位的四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼和鳙鱼)、鲫鱼和鲤鱼都是鲤科鱼类^[5-6]。由于其分布广泛、易获得且在鱼类资源经济中具有重要地位等特点,对鲤科鱼类进行物种敏感性评价很有必要。

青鱼属鲤科,青鱼属,因其具有生长速度快、产量高、营养价值高等特点,在中国的淡水渔业中得到广泛养殖,成为中国淡水养殖的“四大家鱼”之一^[7]。截至2018年,青鱼养殖年产量已达到69.13万t^[5],因此在淡水鱼经济中具有重要意义。青鱼在中国分布广泛、适应性和繁殖能力强且易于培养^[8],开发青鱼作为中国水质基准受试生物不仅易于获得,且其毒性数据更能反映本土水环境的特点。青鱼一般生活于水体底层,作为典型的底栖鱼类,在外观、体型和生活习性等方面均与其他鱼类有差异,因此,开发青鱼作为受试生物更有利于制定适合本土的水质基准以及对水环境风险进行全面评估。

目前污染物对青鱼的毒性方面有一些研究^[9-10],但尚无对青鱼物种敏感性的研究,且青鱼在水质基准中的应用研究也尚未报道。近年来,农药、有毒有机化学品和金属因其对水生生物的潜在危害而备受关注^[11-17]。因此本研究选用毒死蜱、苯并[a]芘、荧蒹和三价砷这4种毒性较强危害较大的污染物作为代表性化学物质来评价青鱼的物种敏感性。

本研究开展了上述4种物质对青鱼的急性毒性

试验,并搜集和筛选了文献毒性数据。通过分析和比较,对青鱼的物种敏感性进行了评价,以期与研究水质基准受试物种的选择提供参考。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 测试生物与化学品

青鱼鱼苗,体长3.2~3.8 cm,体质量0.31~0.39 g,购自河南省平顶山天惠花鸟市场。驯养所使用的容器为经过高锰酸钾消毒过的化学惰性材料制成的鱼缸和水槽。实验所使用的化学品均为分析级,购自国药集团化学试剂北京有限公司。实验用水为除氯自来水,经72 h充分曝气后使用,测定的水质参数如下:pH 7.5±0.3,温度(25±1) °C,溶解氧≤空气饱和值的60%,总硬度(以CaCO₃计)185 mg·L⁻¹。

1.2 实验前处理

购买后的鱼苗用少量高锰酸钾消毒,经过3次换水使鱼适应水质,最后将鱼放入准备好的容器中进行驯化。驯化过程中,光照时间设定为12 h:12 h(光照:黑暗)。急性毒性试验在实验室驯化7 d后开始,在此期间,每2 d更换一次水,每天清理容器中的排泄物。每天在固定时间投喂少量食物,试验前24 h内不投喂食物。

1.3 急性毒性试验

开展了水环境代表性污染物毒死蜱、苯并[a]芘、荧蒹和三价砷对青鱼的96 h急性毒性试验,试验方法参照经济合作与发展组织(OECD)标准测试方法^[18],有机污染物实验选用丙酮作为助溶剂(<0.1 mL·L⁻¹)。所有试验均采用半静态试验,每24 h更换一次试验溶液,4种污染物试验浓度设定值如表1所示。每种污染物试验均设一个空白对照组,每组试验3个平行,每个平行放10尾鱼。试验开始3 h后开始连续观察并记录异常行为,并于24、48、72和96 h记录死鱼情况,试验中及时捞出死亡个体。试验结束时对照组鱼死亡率不得超过10%。

表1 4种污染物的试验浓度设置

Table 1 Exposure concentrations of the four pollutants

毒死蜱/(mg·L ⁻¹) Chlorpyrifos/(mg·L ⁻¹)	苯并[a]芘/(μg·L ⁻¹) Benzo[a]pyrene/(μg·L ⁻¹)	荧蒹/(mg·L ⁻¹) Fluoranthene/(mg·L ⁻¹)	三价砷/(mg·L ⁻¹) Trivalent arsenic/(mg·L ⁻¹)
0.10	5.00	3.13	0.49
0.20	8.00	5.00	0.78
0.40	12.80	8.00	1.25
0.80	20.50	12.80	2.00
1.60	32.80	20.48	2.75

1.4 化学分析

检测4种污染物试验的最低浓度组和最高浓度组在试验溶液更新前后浓度,依据OECD化学物质测试方法指南的质量控制标准^[18],4种污染物的浓度变化均<20%,满足毒性试验的要求。具体检测方法如下。

对于苯并[a]芘和荧蒹,采用高效液相色谱-荧光检测器(Agilent 1200,美国)进行样品分析^[19]。色谱柱为Eclipse PAH柱(250 mm×4.6 mm,粒径为5 μm),柱温为20℃。进样量为20 μL,流动相为乙腈和水(60:40, V/V)的混合液,流速为2.0 mL·min⁻¹。苯并[a]芘和荧蒹的检出限分别为0.004 μg·L⁻¹和0.002 μg·L⁻¹,不同浓度组平均回收率为95.0%~98.7%。

对于As₂O₃溶液,样品分析采用原子荧光法(PF 6-3,北京PG仪器有限公司)^[20-21]。仪器条件如下:负高压280 V,灯电流40 mA,雾化器预热温度200℃,载气流速400 mL·min⁻¹,保护气流速900 mL·min⁻¹。三价砷的检出限为0.3 μg·L⁻¹,不同浓度组平均回收率为94.4%~99.3%。

毒死蜱溶液采用高效液相色谱-紫外检测器(Agilent 1100,美国)进行样品分析^[22]。色谱柱为HC-18柱(150 mm×4.6 mm,粒径为5 μm),柱温为25℃。进样量为20 μL,流动相为甲醇和水(80:20, V/V)的混合液,流速为1.0 mL·min⁻¹。毒死蜱的检出限为30 μg·L⁻¹,不同浓度组平均回收率为90.0%~93.8%。

1.5 数据分析

采用直线回归法求得青鱼96 h的半致死浓度(96 h-LC₅₀)的95%置信区间^[23],以污染物的浓度为自变量(X),以相应浓度下死亡概率作为因变量(Y),应用分析软件SPSS 20.0进行数据处理,建立“浓度-死亡概率”线性方程,并得出回归方程以及相关

的系数LC₅₀、R²和95%置信区间等参数。

急性毒性数据来源于美国环境保护局(US EPA) ECOTOX(<http://epa.gov/ecotox/>)毒性数据库和公开发表的文献。急性毒性试验数据的筛选原则:蚤或其他枝角类和摇蚊幼虫的急性毒性试验终点选择48 h半数致死或抑制浓度(48 h-LC₅₀或EC₅₀),鱼类及其他动物的急性毒性试验终点选择96 h-LC₅₀或EC₅₀^[1],单细胞动物的急性毒性试验数据不予采用,未设立对照组、对照死亡超过10%的毒性数据弃用,同物种的急性毒性数据如果差异过大,应被判断为有疑点的数据而谨慎使用。

对所有获得的急性毒性数据进行整理和排序:首先求得各个物种的种平均急性值(SMAV),SMAV等于同一物种的所有LC₅₀或EC₅₀求几何平均值。然后根据污染物对全部物种的SMAV从小到大进行排序并编号,以SMAV的对数值为横坐标,以每个数据的编号除以数据总数加1(即累积频率)为纵坐标作图,数据处理使用Origin 2018软件进行。

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 4种污染物对青鱼的急性毒性

4种污染物对青鱼急性毒性的试验结果如表2所示。对4种毒物的毒性数据比较来看,苯并[a]芘对青鱼的毒性最高,其次为毒死蜱。根据OECD制定的毒性标准分级LC₅₀<1 mg·L⁻¹(第一等级)、1~10 mg·L⁻¹(第二等级)、10~100 mg·L⁻¹(第三等级)^[24],结合表2中青鱼的毒性数据:荧蒹<10 mg·L⁻¹,苯并[a]芘、三价砷和毒死蜱<1 mg·L⁻¹,可知4种污染物对青鱼的急性毒性均属中高毒级,说明青鱼可能是较为灵敏的受试生物。

2.2 青鱼的敏感性排序

按上述方法搜集并筛选了苯并[a]芘、毒死蜱、三价砷和荧蒹的急性毒性数据,获得可接受的数据

如下:苯并芘包括 3 门 8 科的 13 个物种毒性数据,其中 5 种鱼类毒性数据;毒死蜱包括 7 门 55 科的 120 个物种毒性数据,其中 40 种鱼类毒性数据;三价砷包括 4 门 18 科的 24 个物种毒性数据,其中 15 种鱼类毒性数据;荧蒽包括 5 门 25 科的 31 个物种毒性数据,其中 8 种鱼类毒性数据。对毒性数据进行分类排序,如表 3 和图 1 所示。

在物种敏感性分布曲线上,物种敏感性随累积频率的降低而增加。前人研究发现^[25],生物受污染物胁迫的比例超过 15% 会对水生生物及群落造成一定风险,超过 30% 时会有明显风险,超过 50% 时则会有严重风险^[26]。按此,本研究设定物种敏感性和累积频率的关系为:累积频率<5% 为非常敏感,5% ~ <15% 为敏感,15% ~ <30% 为较敏感,30% ~ <50% 为较不敏感,≥50% 为不敏感。

从图 1 和表 3 中可知,在全部物种敏感性排序中,鱼类对各类污染物的敏感程度跨度较大,一般而言其敏感性低于浮游甲壳类动物(如大型溞等)和软体动物(如无褶螺等),而高于两栖类动物(如泽蛙等)和昆虫类(摇蚊幼虫等),在利用物种敏感性分布法推导苯并芘、硝基苯和三价砷水生生物水质基准时

也出现类似的现象^[27-29]。在鱼类敏感性排序中,各科鱼类排序差别也较大,一般鲤科鱼类和鲑科鱼类排在较为敏感的位置,而丽鱼科鱼类则对污染物不太敏感,造成该差异的原因可能是因为不同科的鱼类对污染物的生物利用度差别较大。

青鱼对各类污染物敏感性具有显著差异。虽然在毒性测试中,三价砷对青鱼属于中等毒性,但是无论是和全部测试物种还是和鱼类相比,青鱼对三价砷的反应都是非常灵敏的。而相对于毒死蜱和苯并[a]芘而言,尽管这 2 种污染物对青鱼的急性毒性为剧毒,但青鱼的物种敏感性排序仅处于末端区域。究其原因,对于毒死蜱,徐瑞祥和陈亚华^[30]曾报道,有机磷农药对无脊椎动物的毒性高于脊椎动物,尤其对甲壳类动物毒性最大,对鱼类毒性较小;而对于苯并[a]芘,可能是因为其对鱼类毒性研究较少且多为慢性毒性,造成数据不足所致。青鱼对荧蒽的敏感性表现一般,Wu 等^[31]报道,相对于重金属而言有机物对淡水水生生物的毒性较小,产生的毒性效应主要由其代谢产物引起,且不如对重金属的毒性效应敏感。对以上 4 种污染物分析可得青鱼具有成为三价砷的生物监测指示生物的潜力。

表 2 4 种污染物对青鱼的 96 h-LC₅₀ 值

Table 2 96 h-LC₅₀ values of four pollutants to *Mylopharyngodon piceus*

污染物 Pollutants	LC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)	95% 置信区间/(mg·L ⁻¹) 95% confidence interval/(mg·L ⁻¹)	回归方程 Regression equation	R ²
毒死蜱 Chlorpyrifos	0.31	0.16 ~ 0.61	y=2.4416x+6.2456	0.9687
苯并[a]芘 Benzo[a]pyrene	0.011	0.006 ~ 0.019	y=3.6867x+1.1214	0.9625
荧蒽 Fluoranthene	7.00	5.89 ~ 8.33	y=3.1333x+2.3511	0.9956
三价砷 Trivalent arsenic	0.87	0.52 ~ 1.45	y=2.2611x+5.1418	0.9587

表 3 青鱼对不同污染物敏感性排序

Table 3 Sensitivity of *Mylopharyngodon piceus* to different pollutants

污染物 Pollutants	全部物种敏感性排序 Sensitivity rank of all species			鱼类敏感性排序 Sensitivity rank of fishes	
	青鱼敏感性次序 Sensitivity order of <i>Mylopharyngodon piceus</i>	排序总物种数 The total number of sorted species	累积频率 Cumulative frequency	青鱼敏感性次序 Sensitivity order of <i>Mylopharyngodon piceus</i>	排序鱼类总数 The total number of sorted fishes
	苯并[a]芘 Benzo[a]pyrene	10	13	0.7143	4
毒死蜱 Chlorpyrifos	98	120	0.8099	29	40
三价砷 Trivalent arsenic	2	24	0.0800	1	15
荧蒽 Fluoranthene	27	31	0.8438	8	8

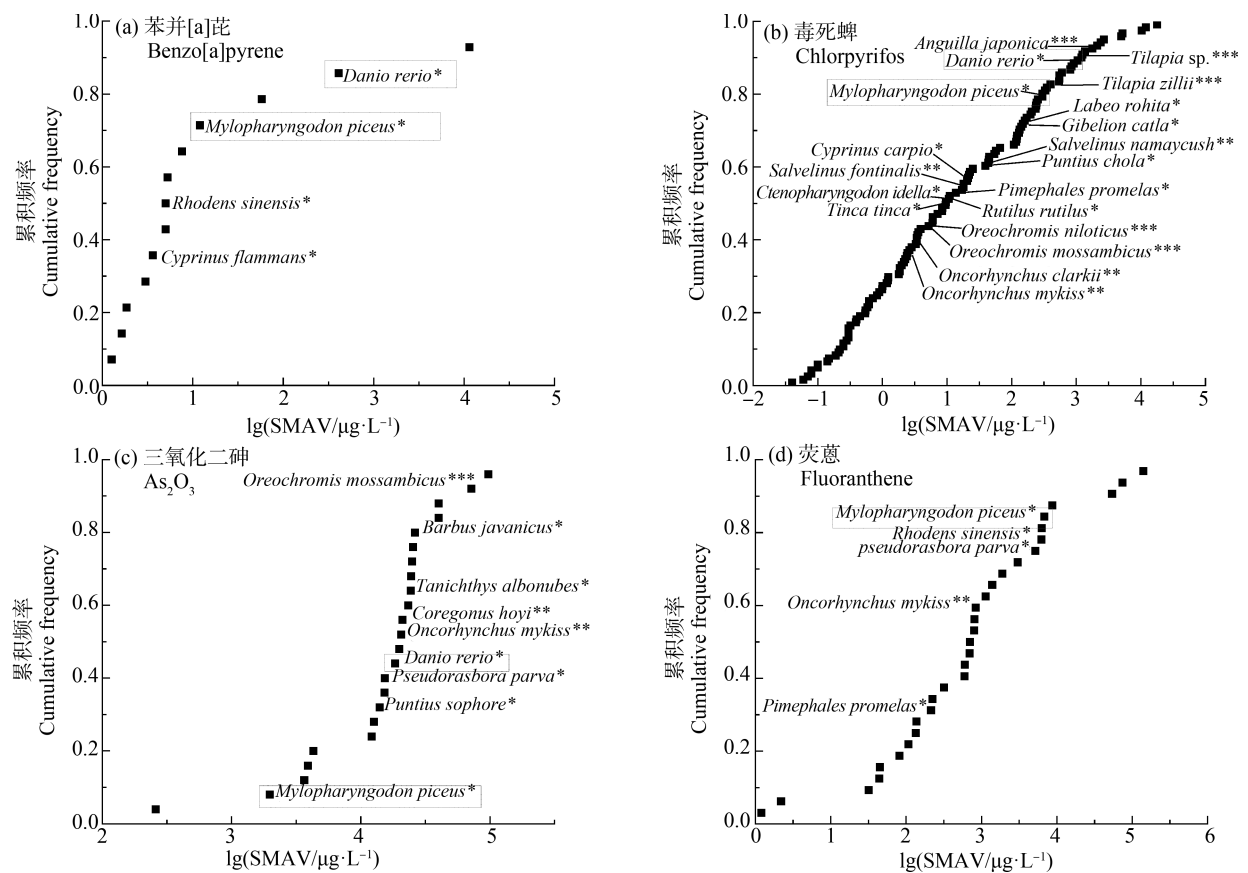


图1 青鱼对不同污染物的敏感性排序

注: *鲤科鱼类; **鲑科鱼类; ***丽鱼科鱼类。

Fig. 1 Sensitivity order of *Mylopharyngodon piceus* to different pollutants

Notes: The scientific name with "*" represents Cyprinidae; the scientific name with "***" represents Salmonidae; the scientific name with "****" represents Cichlidae.

青鱼和斑马鱼同属鲤科鱼类,斑马鱼是毒理学研究中重要的模式生物,也是国际标准测试物种^[32]。斑马鱼的毒性数据多为对处于胚胎和幼稚期的鱼体进行毒性测试得到的,而本研究选取的青鱼也处于幼稚鱼期,将青鱼和斑马鱼的物种敏感性进行比较发现(图1),整体而言青鱼对污染物的敏感性优于斑马鱼,尤其对于污染物三价砷和苯并[a]芘。三价砷和苯并[a]芘对青鱼的 SMAV 值分别为 $1.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.012 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对斑马鱼的 SMAV 值分别为 $18.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,两者都相差了接近一个数量级。本结论是基于青鱼幼稚鱼的毒性测试得出的,是否具有普遍性还需要进一步研究。另外,青鱼对三价砷特别敏感,而对于其他的污染物敏感性则较弱,这也体现了青鱼可能的特异性。

综上所述,本研究结果表明:

(1) 4种污染物对青鱼的毒性均较高,青鱼幼稚

鱼的物种敏感性整体上可能比模式生物斑马鱼要高,说明青鱼可能是较为敏感的受试生物;

(2) 青鱼对本研究中4种污染物的敏感性具有显著差异,对三价砷非常敏感,物种累积频率为8%,对于其他污染物的敏感性则表现一般,因此在无机砷水质基准研究中值得关注;

(3) 鱼类对本研究中4种污染物的敏感性差异较大,相对来说,鲤科鱼类和鲑科鱼类较为敏感,而丽鱼科鱼类则不太敏感;青鱼作为中国典型的鲤科底栖鱼类,在水质基准和风险评估受试生物选择中值得关注。

通讯作者简介:闫振广(1972—),男,博士,研究员,主要研究方向为分子生态毒理学与水质基准。

参考文献 (References):

[1] United States Environmental Protection Agency (US

- EPA). Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB85-227049) [R]. Washington DC: US EPA, 1985
- [2] European Chemicals Bureau. Technical guidance document on risk assessment: Part II. Environmental risk assessment [R]. Ispra: European Chemicals Bureau, European Commission Joint Research Center, European Communities, 2003
- [3] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: Introduction [R]. Winnipeg, Manitoba: CCME, 1999
- [4] Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand (ANZECC, ARM-CANZ). Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality [R]. Canberra: ANZECC, ARM-CANZ, 2000
- [5] 中华人民共和国农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 25-26
- [6] Qin D L, Jiang H F, Bai S Y, et al. Determination of 28 trace elements in three farmed cyprinid fish species from Northeast China [J]. Food Control, 2015, 50: 1-8
- [7] Wang Y Y, Kao Y C, Zhou Y M, et al. Can water level management, stock enhancement, and fishery restriction offset negative effects of hydrological changes on the four major Chinese carps in China's largest freshwater lake? [J]. Ecological Modelling, 2019, 403: 1-10
- [8] Ban X, Diplas P, Shih W, et al. Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps [J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 268-275
- [9] 金小伟, 查金苗, 许宜平, 等. 氯酚类化合物对青鱼和细鳞斜颌鲷幼鱼的毒性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(6): 1235-1242
- Jin X W, Zha J M, Xu Y P, et al. Acute and chronic toxicities of three chlorophenols to *Mylopharyngodon piceus* and *Plagiognathops microlepis* at early life stage [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(6): 1235-1242 (in Chinese)
- [10] Jin X W, Zha J M, Xu Y P, et al. Derivation of predicted no effect concentrations (PNEC) for 2,4,6-trichlorophenol based on Chinese resident species [J]. Chemosphere, 2012, 86(1): 17-23
- [11] Nunes M E M, Müller T E, Murussi C, et al. Oxidative effects of the acute exposure to a pesticide mixture of cypermethrin and chlorpyrifos on carp and zebrafish—A comparative study [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2018, 206-207: 48-53
- [12] Ke C L, Gu Y G, Liu Q, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wild marine organisms from South China Sea: Occurrence, sources, and human health implications [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 117(1-2): 507-511
- [13] Liu Z H, Li X J, Tai P D, et al. Toxicity of ammonia, cadmium, and nitrobenzene to four local fishes in the Liao River, China and the derivation of site-specific water quality criteria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 147: 656-663
- [14] Duan W Y, Meng F P, Cui H W, et al. Ecotoxicity of phenol and cresols to aquatic organisms: A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 157: 441-456
- [15] Kahlon S K, Sharma G, Julka J M, et al. Impact of heavy metals and nanoparticles on aquatic biota [J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(3): 919-946
- [16] Zhong W J, Zhang Y F, Wu Z H, et al. Health risk assessment of heavy metals in freshwater fish in the central and eastern North China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 157: 343-349
- [17] Jin X W, Wang Z J, Wang Y Y, et al. Do water quality criteria based on nonnative species provide appropriate protection for native species? [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015, 34(8): 1793-1798
- [18] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Test No. 203: Fish, acute toxicity test [R]. Paris: OECD, 2019
- [19] Girelli A M, Apriceno A, Tarola A M, et al. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in tea infusions samples by high performance liquid chromatography with fluorimetric detection [J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017: 1-7
- [20] Ren C, Peng H, Huang W, et al. Speciation of inorganic As(V)/As(III) in water and soil by hydride generation-atomic fluorescence spectrometry [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 20(4A): 1069-1074
- [21] Liang J, Wang Q Q, Huang B L. Concentrations of hazardous heavy metals in environmental samples collected in Xiamen, China, as determined by vapor generation non-dispersive atomic fluorescence spectrometry [J]. Ana-

- lytical Sciences: the International Journal of the Japan Society for Analytical Chemistry, 2004, 20(1): 85-88
- [22] Abu-Qare A W, Abou-Donia M B. Quantification of nicotine, chlorpyrifos and their metabolites in rat plasma and urine using high-performance liquid chromatography [J]. *Journal of Chromatography B, Biomedical Sciences and Applications*, 2001, 757(2): 295-300
- [23] 中华人民共和国国家环保局. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993: 435-449
- [24] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Guidance document on the use of the harmonised system for the classification of chemicals which are hazardous for the aquatic environment [R]. Paris: OECD, 2002
- [25] 闫振广, 刘征涛, 孟伟. 辽河流域六价铬和无机汞应急水质标准研究[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(3): 26-32
Yan Z G, Liu Z T, Meng W. Development of emergency water quality standards for Cr^{6+} and Hg^{2+} in Liaohe River basin [J]. *Engineering Sciences*, 2013, 15(3): 26-32 (in Chinese)
- [26] Van Vlaardingen P L A, Verbruggen E M J. Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of 'International and National Environmental Quality Standards for Substances in the Netherlands' (INS) [R]. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment, 2007
- [27] Zheng L, Liu Z T, Yan Z G, et al. Deriving water quality criteria for trivalent and pentavalent arsenic [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 587-588: 68-74
- [28] Yan Z G, Zhang Z S, Wang H, et al. Development of aquatic life criteria for nitrobenzene in China [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 86-90
- [29] Yan Z G, Wang H, Wang Y Z, et al. Developing a national water quality criteria system in China [J]. *Water Policy*, 2013, 15(6): 936-942
- [30] 徐瑞祥, 陈亚华. 应用物种敏感性分布评估有机磷农药对淡水生物的急性生态风险[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(6): 811-821
Xu R X, Chen Y H. Assessing acute ecological risks of organophosphorus pesticides to freshwater organisms by species sensitivity distributions [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2012, 24(6): 811-821 (in Chinese)
- [31] Wu F C, Feng C L, Zhang R Q, et al. Derivation of water quality criteria for representative water-body pollutants in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(6): 900-906
- [32] Zhao J, Zhu X W, Xu T, et al. Structure-dependent activities of polybrominated diphenyl ethers and hydroxylated metabolites on zebrafish retinoic acid receptor [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(3): 1723-1730
- ◆