ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学 (HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第6期
2013年6月15日

目 次

麦穗鱼物种敏感性评价

王晓南[1,2]，刘征涛[1]，闫振广[1*]，张聪[3]，何丽[1]，孟双双[1]

(1. 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，国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室，北京 100012；2. 北京师范大学水科学研究院，北京 100875；3. 北京师范大学环境学院，北京 100875)

摘要：分别进行了 Cd、Cu 对麦穗鱼和 Cu 对大型溞的急性毒性试验，结合麦穗鱼、大型溞的室内毒性试验数据和文献毒性数据，使用物种敏感性分布法对麦穗鱼的 6 种典型污染物的敏感性进行了对比分析. 结果表明：①麦穗鱼对各类污染物的敏感性较高，尤其对有机污染物反应灵敏，其中对农药类相对最为敏感，表明麦穗鱼可以作为潜在的有机污染监测的指示生物和水质基准的代表性受试生物. ②在鱼类敏感性排序中，鲤科鱼类对各类污染物的敏感性较强，而我国的鱼类以鲤科为主，因此在水质基准制定和环境监测中应充分考虑鲤科鱼类的作用及其毒性数据；③麦穗鱼在鱼类敏感性排序中位置稳定，并且具有体型小、易获得等特性，表明麦穗鱼是环境监测中较为理想的指示生物，同时也是潜在的水质基准受试生物.

关键词：麦穗鱼；物种敏感性；水质基准；环境监测；本土生物

中图分类号：X171.5 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2013)06-2329-06

Species Sensitivity Evaluation of *Pseudorasbora parva*

WANG Xiao-nan[1,2], LIU Zheng-tao[1], YAN Zhen-guang[1], ZHANG Cong[3], HE Li[1], MENG Shuang-shuang[1]

(1. State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Water Science Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Acute toxic effects of cadmium and copper to *Pseudorasbora parva* and copper to *Daphnia magna* were tested in this study. Then comparative analysis of species sensitivity of *P. parva* to six typical pollutants was performed with toxicity data from our experiments and published literatures. The result showed that: ① *P. parva* was generally sensitive to various pollutants, especially to organic pollutants, and it was relatively most sensitive to pesticides. *P. parva* might be an indicator organism in organic pollution monitoring and a representative testing organism in the development of water quality criteria. ② Cyprinidae was sensitive to various pollutants in fish sensitivity distribution, therefore the toxicity data of Cyprinidae should be given more attention in the study of water quality criteria and environmental monitoring. ③ *P. parva* was sensitive to various pollutants, and it had a stable position in fish sensitivity rank. This study indicated that *P. parva* might be an ideal indicator organism in environmental monitoring and a potential model organism in water quality criteria considering that it has a small size and is easy to obtain.

Key words: *Pseudorasbora parva*; species sensitivity; water quality criteria; environmental monitoring; local species

鱼类是水生生态系统的重要组成部分，是人类主要的食物来源，同时是水质基准推导中所必需的一类生物，在美国、澳大利亚、欧盟等国家和地区的水质基准中均要求使用鱼类的毒性数据[1~4]，我国正处在水质基准的探索研究阶段，对水质基准推导中本土物种的选择亟需研究.

我国鱼类毒性试验中经常使用鲢鱼、金鱼、鲤鱼、鲫鱼、草鱼等[5~9]，这些鱼类体型较大，饲养不便，且受到繁殖季节的限制难以常年获得，因此需要寻找体型较小、分布广泛、来源方便、不受季节限制、易于在实验室培养的毒理学试验生物.

麦穗鱼(*Pseudorasbora parva*)属鲤科，麦穗鱼属，在国内分布广泛，是江河、湖泊、池塘等水体中常见的小型鱼类，具有适应性广、繁殖力强、易于培养等特点[10]. 国内在污染物对麦穗鱼的毒性方面有一些研究[11~16]，但尚无对麦穗鱼的敏感性研究，对麦穗鱼在水质基准中的应用研究也尚未见到. 近年来，我国重金属污染事故频发，农药、多环芳烃、溴化阻燃剂等因其对人类的潜在危害而备受社会关注，因此本研究以重金属(Cd、Cu、Hg)、溴化阻燃剂[四溴双酚 A(TBBPA)]、多环芳烃(萘)以及有机磷农药类(三唑磷)对麦穗鱼的毒性效应进行分析比较，评价其对各类污染物的敏感性，同时利用国际标准毒理测试生物大型溞进行对比试验，以

收稿日期：2012-09-20；**修订日期**：2012-11-14
基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-003-06)；中国环境科学研究院改革启动经费专项(2011GQ-02)；环境保护公益性行业科研专项(2011467054)
作者简介：王晓南(1986～)，男，博士研究生，主要研究方向为水质基准与生态毒理学，E-mail：nan625@sina.com
* 通讯联系人，E-mail：zgyan@craes.org.cn

期为环境污染防治、环境监测等研究提供参考,也对麦穗鱼作为水质基准受试生物的可行性进行探讨.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用鱼:麦穗鱼幼鱼,体长 28 ~ 34 mm,体重量 0.16 ~ 0.24 g,购自北京朝来花鸟市场. 驯养容器为 100 L 圆柱形玻璃缸,驯养 7 d,试验前 1 d 停止喂食,选取活泼健康麦穗鱼进行试验.

试验用大型溞:来自本试验室,溞龄不超过 24 h,试验前驯养 48 h.

试验用水:为除氯自来水,经 72 h 充分曝气后使用, pH 7.7 ~ 8.0, 总硬度($CaCO_3$ 计)180 $mg\cdot L^{-1}$,温度 22℃ ±0.5℃(麦穗鱼),20℃ ±0.5℃(大型溞).

试验用化学药品均为分析纯,购自北京国药集团.

1.2 试验方法

为补充麦穗鱼的毒性数据,本研究进行了 Cd^{2+}、Cu^{2+} 对麦穗鱼的 96 h 急性毒性试验,同时进行了 Cu^{2+} 对大型溞的 48 h 急性毒性试验. 麦穗鱼急性毒性试验参照 OECD 标准测试方法[17],采用半静态试验,每 24 h 换一次试验溶液,Cd^{2+} 试验浓度设置为 0.5、1、2、4、8、16、32、64 $mg\cdot L^{-1}$,Cu^{2+} 试验浓度设置为 0.025、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 $mg\cdot L^{-1}$,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. 大型溞急性毒性试验参照 OECD 标准测试方法[18],Cu^{2+} 试验浓度设置为 40、52、67.6、87.88、114.2、148.5 $\mu g\cdot L^{-1}$ 和一个空白对照组,每组试验 4 个平行,每个平行放 5 只溞,试验开始后经常观察溞的活动与生存情况,并于 24 h、48 h 记录溞的累计活动抑制数,试验中及时取出死溞.

采用直线回归法[19]分别求得 96 h-LC_{50}(麦穗鱼)和 48 h-EC_{50}(大型溞)及其 95% 置信区间,数据分析采用软件 SPSS 20.0.

1.3 目标污染物的选择

近年来,我国工农业发展迅速,但随之产生的"三废"物质不合理排放, 农药的滥用,使环境中的重金属、有机污染物含量超出正常范围,导致环境质量恶化. 本研究对众多污染物的毒性数据进行了初步筛选,筛选原则见 1.4,发现重金属 Cd、Cu、Hg[20,21]、多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)[22~25]、溴化阻燃剂(brominated flame retardants, BFRs)[26~30]以及有机磷农药(organophosphorus pesticides, OPPs)[31~35]的麦穗鱼毒性数据丰度较高,同时也是国内比较常见且分布广泛的污染物,因而被选择用于麦穗鱼的物种敏感性分析.

1.4 数据筛选和分析

文献毒性数据来源于美国环境保护署 US EPA ECOTOX(http://epa. gov/ecotox/)毒性数据库、中国知网 CNKI(http://www. cnki. net/)和公开发表的文献. 毒性试验数据的筛选原则:溞或其他枝角类和摇蚊幼虫的急性毒性试验终点选择 48 h-LC_{50} 或 EC_{50},鱼类及其他动物的急性毒性试验终点选择 96 h-LC_{50} 或 EC_{50}[1],单细胞动物的急性毒性试验数据不予以采用,未设立对照组、对照死亡超过 10% 的、试验设计不科学的、试验生物曾经暴露于污染物中的毒性数据等均不能采用,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.

对所得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(species mean acute value, SMAV),SMAV 等于同一物种的急性毒性值的几何平均值,即对同一物种的所有 LC_{50} 或 EC_{50} 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,数据排序使用 Origin 8.0 软件进行.

2 结果与分析

2.1 Cd、Cu 对麦穗鱼和大型溞的急性毒性

为了丰富与对比麦穗鱼的毒性数据,本研究分别进行了 Cd、Cu 对麦穗鱼的 96 h 急性毒性试验和 Cu 对大型溞的 48 h 急性毒性试验,试验设置 3 个平行组,对照组鱼的死亡率为 0%,$LC(EC)_{50}$ 值见表 1. 从中可知: Cu 对麦穗鱼的毒性高于 Cd,大型溞对 Cu 的敏感性高于麦穗鱼.

2.2 麦穗鱼的敏感性排序

按上述方法搜集重金属(Cd、Cu、Hg)、溴化阻燃剂四溴双酚 A(TBBPA)、多环芳烃(萘)以及有机磷农药类(三唑磷)的毒性数据,主要分为:Cd 包括 6 门 12 科的 18 个物种毒性数据,其中 7 种鱼类毒性数据; Cu 包括 5 门 10 科的 18 个物种毒性数据,其中 8 种鱼类毒性数据; Hg 包括 3 门 10 科的 17 个物种毒性数据,其中 6 种鱼类毒性数据; TBBPA 包

表 1　Cd、Cu 胁迫对麦穗鱼、大型溞的 LC (EC)$_{50}$ 值

Table 1　LC (EC)$_{50}$ values of *P. parva* and *D. magna* exposed to Cd and Cu

物种/污染物	暴露时间 /h	LC(EC)$_{50}$ /mg·L^{-1}	95% 置信区间 /mg·L^{-1}	回归方程	R^2
麦穗鱼/Cd	96	30.510	27.28 ~ 33.74	$y = 0.8595x + 3.7241$	0.9346
麦穗鱼/Cu	96	0.101	0.069 ~ 0.134	$y = 1.7277x + 6.7177$	0.9934
大型溞/Cu	48	0.078	0.060 ~ 0.091	$y = 4.2581x - 3.0530$	0.9385

括 3 门 8 科的 10 个物种毒性数据,其中 5 种鱼类毒性数据; 萘包括 2 门 6 科的 10 个物种毒性数据,其中 6 种鱼类毒性数据; 三唑磷包括 2 门 10 科的 13 个物种毒性数据,其中 9 种鱼类毒性数据. 并对毒性数据进行分类排序,见表 2、图 1(具体数据表单略),从中可知:①在全部物种敏感性排序中,鱼类对各类污染物的敏感性排序一般排在较敏感的位置,而在所有鱼类中鲤科鱼类较敏感; ②麦穗鱼对各类污染物敏感性较高,尤其对 3 种有机污染物反应灵敏,对三唑磷的敏感性相对最高,对 3 种重金属的敏感性相对较低; ③麦穗鱼对重金属和有机污染物的敏感性排序位置差异不大,均处于中间区域,其中麦穗鱼对三唑磷的敏感性较高,对 Cd 的耐受性相对较高.

表 2　麦穗鱼对不同污染物敏感性排序

Table 2　Sensitivity distribution of *P. parva* to different pollutants

污染物	全部物种敏感性排序		鱼类敏感性排序	
	麦穗鱼敏感度次序	排序总物种数	麦穗鱼敏感度次序	排序鱼类总数
Cd	16	18	6	7
Cu	11	18	5	8
Hg	8	17	3	6
TBBPA	3	10	3	5
萘	5	10	3	6
三唑磷	1	13	1	9

3　讨论

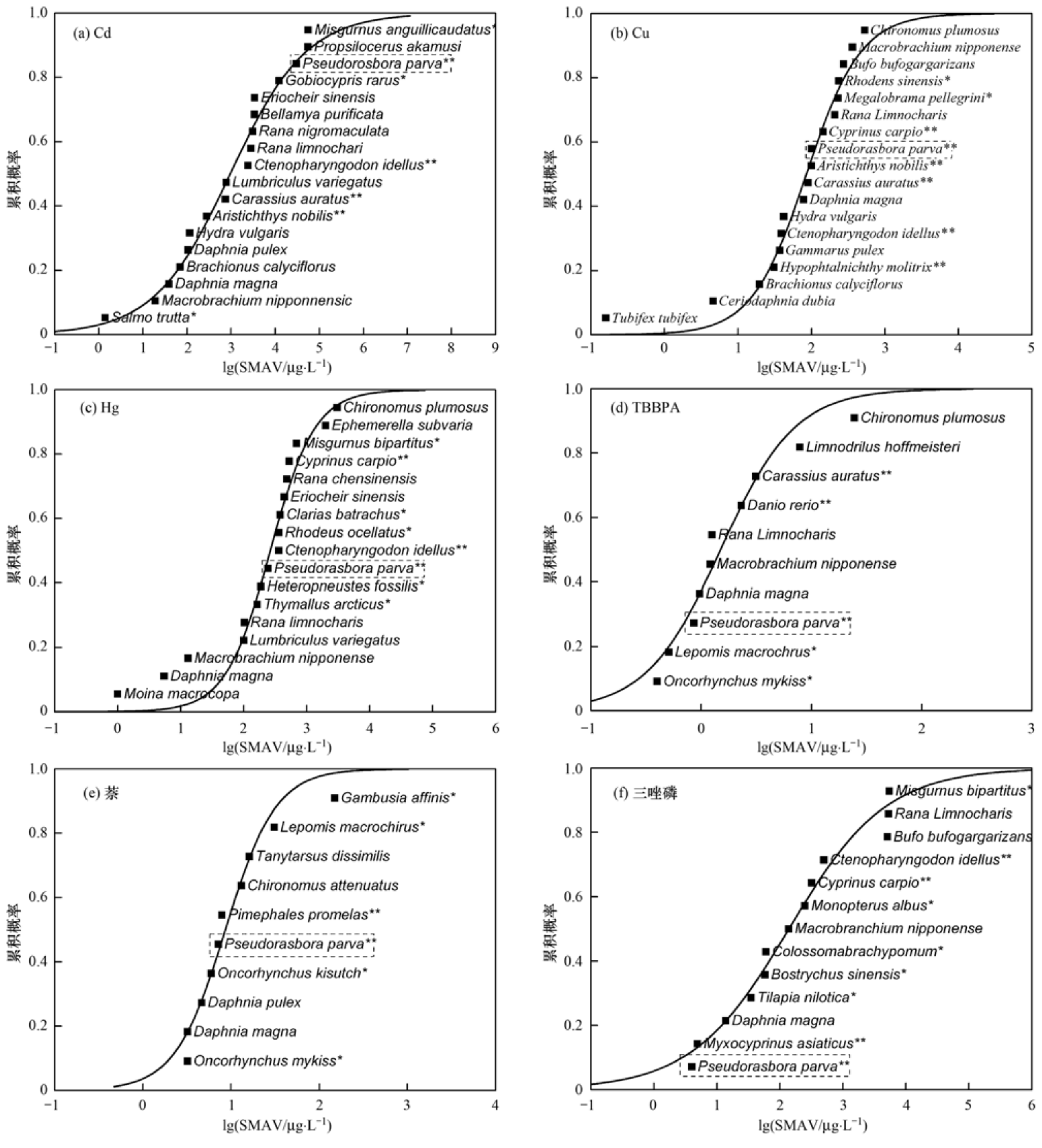
表 1 中 Cu 对大型溞的 48 h 急性毒性为 0.078 mg·L^{-1},这与前人的研究比较接近,Winner 等[36]研究发现 Cu 对大型溞的 48 h 急性毒性为 0.082 mg·L^{-1},De Schamphelaera 等[37]研究得出 Cu 对大型溞的 48 h 急性毒性为 0.067 mg·L^{-1}. Cu 对麦穗鱼的毒性高于 Cd,原因是自来水中的杂质离子如 CO_3^{2-}、SO_4^{2-} 等可能对 Cd 起解毒作用,朱毅等[38]也曾报道了 Cd 活性受水环境的 pH 值影响,pH 升高,其活性降低,同时水体的硬度也会对重金属毒性产生影响,另外生物体对不同污染物的生物利用度的不同也是影响其敏感性的潜在因素[39].

按照毒性标准分级 $LC_{50} < 1$ mg·L^{-1} (高毒)、1 ~ 10 mg·L^{-1} (中等毒)、> 10 mg·L^{-1} (低毒)[40],结合图 1 中对麦穗鱼的毒性数据:Cd > 10 mg·L^{-1},Cu、Hg < 1 mg·L^{-1},TBBPA、萘、三唑磷 < 0.01 mg·L^{-1},可知除 Cd 外几类污染物对麦穗鱼的急性毒性均属高毒级,说明小型鱼类麦穗鱼是环境监测中较为灵敏的指示生物.

在全部物种敏感性排序中(表 2、图 1),鱼类的敏感性一般排在较敏感的位置,低于浮游甲壳类动物(大型溞等)、软体动物(无褶螺等),而高于两栖类动物(泽蛙蝌蚪等)、昆虫类(摇蚊幼虫等),在利用物种敏感度分布法推导 Cd、氨氮、硝基苯水生生物水质基准时也出现类似的现象[41~44]. 麦穗鱼对 3 种重金属污染物的耐受性较高,相反对 3 种有机污染物的敏感性较高. 有学者通过毒性试验发现 4 种污染物对麦穗鱼的急性毒性由强至弱依次为三唑磷 > 氟虫腈 > Cd > Pb[35],这也表明麦穗鱼对重金属的敏感性低于有机污染物.

在鱼类敏感性排序中(表 2、图 1),各科鱼类排序差别较大,一般以鲑科鱼类最为敏感,鲤科次之[41,42],在其他的毒理试验中也有相似的报道[45~47],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,而我国鱼类以鲤科为主,“四大家鱼”均为鲤科鱼类,因此在环境保护工作中应充分考虑对鲤科鱼类的保护. 本研究中小型鲤科鱼类麦穗鱼对重金属和有机污染物的敏感性排序差异不大,均在敏感性适中的位置,有人曾做了 4 种化合物对 6 种鱼类的毒性试验证明麦穗鱼的敏感性较高[48],这进一步表明在鱼类中小型鲤科鱼类麦穗鱼将是环境监测中较为理想的指示生物.

世界发达国家和地区在水质基准推导中均规定



图中虚线框中为麦穗鱼,加“∗”的为鱼类,加“∗∗”的为鲤科鱼类

图1 麦穗鱼对不同污染物的敏感性排序

Fig. 1 Sensitivity distribution of *P. parva* to different pollutants

必须有鱼类毒性数据,我国正处在水质基准的探索研究阶段,对水质基准推导中本土物种的选择亟需进一步的研究. 本研究通过物种敏感性排序发现麦穗鱼对各类污染物反应比较灵敏,在鱼类中敏感性适中,是我国广泛分布的鲤科小型鱼类,易获得且易于在试验室驯养,这表明小型鲤科鱼类麦穗鱼是潜在的水质基准理想的模式生物.

4 结论

(1)通过全部物种的敏感性排序发现麦穗鱼对重金属(Cd、Cu、Hg)、溴代阻燃剂[四溴双酚 A (TBBPA)]、多环芳烃(萘)以及有机磷农药类(三

唑磷)污染物反应较灵敏,尤其对有机污染物敏感,其中对农药类污染物相对最为敏感,表明麦穗鱼是潜在的有机污染监测指示生物和水质基准的代表性受试生物.

(2)在鱼类中鲤科鱼类对各类污染物更敏感,而我国鱼类以鲤科为主,同时鲤科中的小型鱼类麦穗鱼对各类污染物敏感性稳定,进一步表明麦穗鱼可以作为环境监测中较为理想的指示生物.

(3)由于在物种敏感性排序中较为敏感的位置和自身特性,麦穗鱼可以作为潜在的水质基准研究的受试生物. 本研究可为环境污染防治、环境监测、水质基准等研究工作提供参考.

参考文献:

[1] US EPA. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses (PB 85-227049)[R]. Washington: US EPA, 1985.

[2] ECB. Technical guidance document on risk assessment: part Ⅱ. environmental risk assessment [R]. Ispra, Italy: European Chemicals Bureau, European Commission Joint Research Center, European Communities, 2003.

[3] CCME. Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: introduction[R]. Winnipeg, Manitoba: Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999.

[4] ANZECC, ARMCANZ. Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality[R]. Canberra, Australia: Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, 2000.

[5] 黄晓容, 钟成华, 邓春光. 苯胺,二甲苯和硝基苯对白鲢的急性毒性研究[J]. 安徽农业科学, 2008, **36**(25): 10908-10909.

[6] 沈洪艳, 甄芳芳, 宋存义, 等. 3 种硝基苯污染物对锦鲤鱼的急性毒性[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(增刊): 63-67.

[7] 李婷, 周启星. 水环境中氯丙嗪污染对鲫鱼和大型蚤的急性毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2008, **3**(4): 410-415.

[8] 聂晶磊, 刘锋, 周春玉, 等. 氯酚类化合物对金鱼的急性和亚急性毒性研究[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(3): 6-8.

[9] 王桂燕, 胡筱敏, 周启星, 等. 对二氯苯和镉对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的联合毒性效应研究[J]. 环境科学研究, 2007, **28**(1): 156-159.

[10] 肖智, 蓝宗辉, 陈湘. 中国麦穗鱼属一新种(鲤形目, 鲤科)[J]. 动物分类学报, 2007, **32**(4): 977-980.

[11] 王军, 吴继松, 李彩艳, 等. 锌离子胁迫下溴氰菊酯对麦穗鱼的急性毒性[J]. 安全与环境学报, 2007, **7**(4): 23-27.

[12] 宋维彦, 解相林. 重金属离子对麦穗鱼的急性毒性作用研究[J]. 江苏农业科学, 2010, (1): 239-241.

[13] 孟顺龙, 陈家长, 冷春梅. 除草剂阿特拉津与丁草胺对麦穗鱼的联合毒性研究[J]. 环境污染与防治, 2007, **29**(4): 254-260.

[14] 张旋, 刘利民, 皮钰珍, 等. 吡啶硫酮锌对水生生物的急性毒性[J]. 生态毒理学报, 2010, **5**(1): 83-86.

[15] 朱国念, 楼正云, 孙锦荷. 草甘膦对水生生物的毒性效应及环境安全性研究[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2000, **26**(3): 309-312.

[16] 陈叙龙, 张富国, 张文成, 等. 亚硒酸钠对麦穗鱼的遗传毒性效应研究[J]. 南开大学学报 (自然科学版), 1994, (3): 87-90.

[17] OECD Guidelines for Testing of Chemicals, Standard Guide for Conducting Acute Toxicity Tests on Test Materials with Fishes, Macroinvertebrates, and Amphibians [S]. Paris: OECD, (E 729-96, reapproved 2007).

[18] OECD Guidelines for Testing of Chemicals, *Daphnia* sp. Acute Immobilization Test and Reproduction Test[S]. Paris: OECD, (202, Adopted 4 April 1984).

[19] 国家环境保护局. 水生生物监测手册[M]. 南京: 东南大学出版社, 1993.

[20] 张瑞凌, 魏云波, 刘书花, 等. 我国重金属污染现状及其微生物处理方法研究进展[J]. 现代农业科技, 2011, (20): 272, 277.

[21] 宋维彦, 辛荣, 李慷均. Hg^{2+} 对 3 种水生生物的急性毒性作用研究[J]. 现代农业科技, 2009, (18): 264-265.

[22] 陈来国, 冉勇, 麦碧娴, 等. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状[J]. 环境化学, 2004, **23**(3): 341-344.

[23] Daane L L, Harjono I, Zylstra G J, *et al*. Isolation and characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria associated with the rhizosphere of salt marsh plants[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, **67**(6): 2683-2691.

[24] 解静芳, 吴张, 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.

[25] 刘新, 王东红, 马梅, 等. 中国饮用水中多环芳烃的分布和健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(2): 207-214.

[26] Bi X H, Qu W Y, Sheng G Y, *et al*. Polybrominated diPhenyl ethers in South China maternal and fetal blood and breast milk [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 1024-1030.

[27] Sehuhmacher M, Kiviranta H, Vartiainen T, *et al*. Concentrations of polychlorinated biPhenyls (PCBs) and Polybrominated diPhenyl ethers (PBDEs) in milk of women from Catalonia, Spain[J]. Chemosphere, 2007, **67**(9): 295-300.

[28] Berger U, Herzke D, Sandanger T M, *et al*. Two trace analytical methods for determination of hydroxylated PCBs and other halogenated phenolic compounds in eggs from Norwegian birds of prey[J]. Analytical Chemistry, 2004, **76**(2): 441-452.

[29] Law R J, Allchin C R, De B J. Levels and trends of brominated flame retardants in the European environment[J]. Chemosphere, **64**(2): 187-208.

[30] Yang S W, Yan Z G, Xu F F, *et al*. Development of freshwater aquatic life criteria for Tetrabromobisphenol A in China [J]. Environmental Pollution, 2012, **169**: 59-63.

[31] Habib B, Zahra A, Babanezhad E. A sol-gel-based amino functionalized fiber for immersed solid-phase microextraction of

organophosphorus pesticides from environmental samples [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(1): 1-6.

[32] Zhang Y Y, Xiao Z Y, Chen F, *et al*. Degradation behavior and products of malathion and chlorpyrifos spiked in apple juice by ultrasonic treatment [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2010, **17**(1): 72-77.

[33] 李少南. 甲基异柳磷和三唑磷对几种淡水鱼的毒性比较[J]. 环境污染与防治, 1998, **20**(3): 13-14.

[34] 丁跃平, 金彩杏, 郭远明, 等. 三唑磷对海水虾类、蟹类的急性毒性试验[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2002, **21**(2): 116-118.

[35] 楼建晴. 三唑磷、氰虫腈、Cd^{2+}、Pb^{2+}对麦穗鱼的联合作用与毒理学机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[36] Winner R. Food Type Related to Copper Sensitivity of Daphnids [A]. In: Int. Conf. on Heavy Metals in the Environment, Abstracts[C]. Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Ontario, Canada, 1975.

[37] De Schamphelaere K A C, Unamuno V I R, Tack F M G, *et al*. Reverse osmosis sampling does not affect the protective effect of dissolved organic matter on copper and zinc toxicity to freshwater organisms[J]. Chemosphere, 2005, **58**(8): 653-658.

[38] 朱毅, 胡小玲. 重金属对鱼类毒性效应研究进展[J]. 水产养殖, 1998, (2): 22-23.

[39] 陈本亮, 张其中, 于相满. 盐酸诺氟沙星在奥尼罗非鱼体内的生物利用度研究[J]. 淡水渔业, 2011, **41**(3): 66-71.

[40] 国家环境保护局. 化学农药环境安全评价试验准则[J]. 农药科学与管理, 1990, (2): 4-9.

[41] 闫振广, 余若祯, 焦聪颖, 等. 水质基准方法学中若干关键技术探讨[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(4): 397-403.

[42] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水水生生物镉基准研究[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2393-2406.

[43] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水生物氨氮基准研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1564-1570.

[44] 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.

[45] Henderson C, Pickering Q H, Tarzwell C M. Relative toxicity of ten chlorinated hydrocarbon insecticides to four species of fish [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1959, **88**(1): 23-32.

[46] Pickering Q H, Henderson C, Lemke A E. The toxicity of organic phosphorus insecticides to different species of warmwater fishes [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1962, **91**(2): 175-184.

[47] Kenneth J M, William A M. Insecticide susceptibility of some common fish family representatives [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1970, **99**(1): 20-27.

[48] 庄德辉, 尹伊伟, 张甫英, 等. 对硫磷等四种化合物对六种鱼的急性毒性比较[J]. 中国环境科学, 1981, (创刊号): 37-40.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 6

Jun. 15, 2013

CONTENTS

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2013 年 6 月 15 日　34 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 6　Jun. 15，2013

主　　管	中国科学院	**Superintended**	by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored**	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences，Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored**	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment，Tsinghua University
主　　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**		OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn	**Edited**	by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871，Beijing 100085，China Tel：010-62941102，010-62849343；Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http：//www. hjkx. ac. cn
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published**	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street， Beijing　100717，China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed**	by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed**	by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司（北京 399 信箱）	**Foreign**		China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian），P. O. Box 399，Beijing 100044，China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：90. 00 元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行