

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



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 迟建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

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-tao¹, YAN Zhen-guang¹, ZHANG Cong³, HE Li¹, MENG Shuang-shuang¹

(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@cares.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 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。

试验用大型蚤:来自本试验室,蚤龄不超过 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 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,温度 $22^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ (麦穗鱼), $20^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ (大型蚤)。

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+} 对大型蚤的 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 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Cu^{2+} 试验浓度设置为 0.025、0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,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。大型蚤急性毒性试验参照 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 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和一个空白对照组,每组试验 4 个平行,每个平行放 5 只蚤,试验开始后经常观察蚤的活动与生存情况,并于 24 h、48 h 记录蚤的累计活动抑制数,试验中及时取出死蚤。

采用直线回归法^[19]分别求得 96 h- LC_{50} (麦穗鱼)和 48 h- EC_{50} (大型蚤)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: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- 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 对麦穗鱼和大型蚤的急性毒性

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 对大型蚤的 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%, $\text{LC}(\text{EC})_{50}$ 值见表 1。从中可知: Cu 对麦穗鱼的毒性高于 Cd,大型蚤对 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、大型蚤的 LC (EC)₅₀ 值

Table 1 LC (EC) ₅₀ values of <i>P. parva</i> and <i>D. magna</i> 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 = 0.859 5x + 3.724 1	0.934 6
麦穗鱼/Cu	96	0.101	0.069 ~ 0.134	y = 1.727 7x + 6.717 7	0.993 4
大型蚤/Cu	48	0.078	0.060 ~ 0.091	y = 4.258 1x - 3.053 0	0.938 5

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 <i>P. parva</i> 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 对大型蚤的 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 对大型蚤的 48 h 急性毒性为 0.082 mg·L⁻¹,De Schamphelaera 等^[37]研究得出 Cu 对大型蚤的 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 CO₃²⁻、SO₄²⁻ 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].

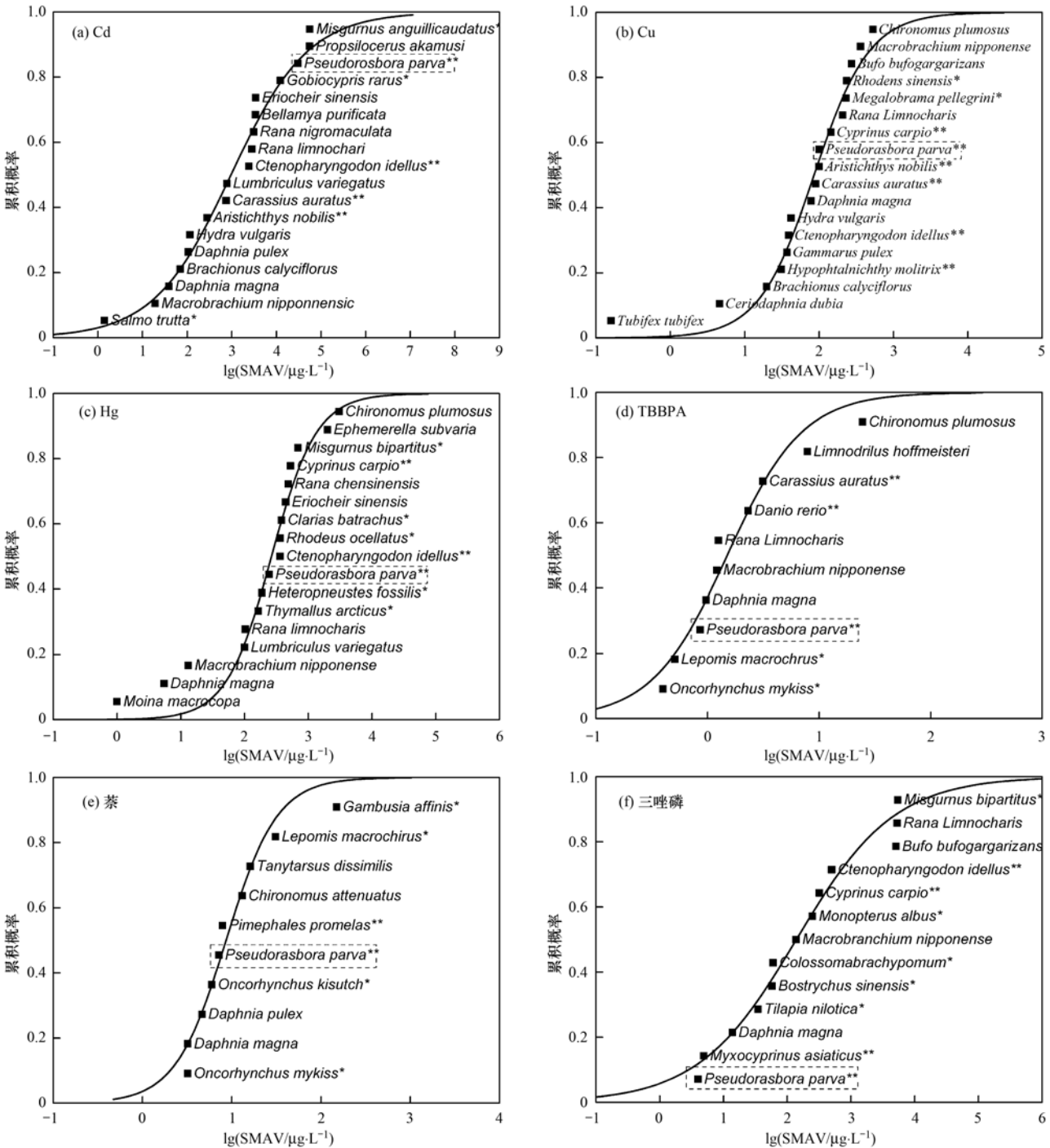
按照毒性标准分级 LC₅₀ < 1 mg·L⁻¹ (高毒)、1 ~ 10 mg·L⁻¹ (中等毒)、> 10 mg·L⁻¹ (低毒)^[40],结合图 1 中对麦穗鱼的毒性数据:Cd > 10 mg·L⁻¹, Cu、Hg < 1 mg·L⁻¹, TBBPA、萘、三唑磷 < 0.01 mg·L⁻¹,可知除 Cd 外几类污染物对麦穗鱼的急性毒性均属高毒级,说明小型鱼类麦穗鱼是环境监测中较为灵敏的指示生物.

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(大型蚤等)、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,一般以鲢科鱼类最为敏感,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. 锌离子胁迫下溴萘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] Schuhmacher 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, 金彩查, 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、氟虫腈、 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 Schampelaere 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. 我国淡水水生生物铜基准研究 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2393-2406.
- [43] 闫振广, 孟伟, 刘征涛, 等. 我国淡水水生生物氨氮基准研究 [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.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

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

国内外公开发刊