

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山铈矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征

安立会¹, 张艳强², 郑丙辉^{1*}, 刘玥², 宋双双¹, 李子成¹, 陈浩¹, 赵兴茹¹, 林进²

(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, 国家环境保护河口与海岸带重点实验室, 北京 100012;
2. 河北师范大学化学与材料科学学院, 石家庄 050012)

摘要: 为揭示三峡库区重金属污染的潜在风险, 分析了三峡库区大宁河和磨刀溪两条典型支流沉积物和野生鲫鱼体内重金属水平, 并分别采用潜在生态危害指数法和综合污染指数法对重金属污染风险进行了评价。结果表明, 沉积物中 Zn 和 Cr 含量均处于较高水平(大宁河: 78.31 和 83.98 mg·kg⁻¹; 磨刀溪: 99.03 和 94.20 mg·kg⁻¹), 而 Cd 含量水平最低(大宁河: 0.62 mg·kg⁻¹; 磨刀溪: 0.75 mg·kg⁻¹), 并从上游到下游表现为明显的升高趋势。野生鲫鱼各组织以肌肉中各种重金属水平最低, 肠最高, 但在 2 条支流中均没有表现出上下游的变化趋势。潜在生态危害指数法评价沉积物重金属污染处于较高风险, 综合污染指数法评价鱼体重金属污染的风险低于背景值。

关键词: 三峡库区; 重金属; 鲫鱼; 沉积物; 潜在生态危害指数法; 综合污染指数法

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2592-07

Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas

AN Li-hui¹, ZHANG Yan-qiang², ZHENG Bing-hui¹, LIU Yue², SONG Shuang-shuang¹, LI Zi-cheng¹, CHEN Hao¹, ZHAO Xing-ru¹, LIN Jin²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Chemistry & Material Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050012, China)

Abstract: In order to explore the potential ecological risk of heavy metals in Three Gorges Reservoir areas, the present study analyzed the heavy metals in sediments and wild crucian carp from Daning River and Modaoxi River which are two typical tributaries, and then the potential risk was evaluated using potential ecological risk index for sediments and comprehensive pollution index for fish, respectively. The results showed that concentrations of Zn and Cr were higher (Daning River: 78.31 and 83.98 mg·kg⁻¹; Modaoxi River: 99.03 and 94.20 mg·kg⁻¹), while Cd was the lowest (Daning River: 0.62 mg·kg⁻¹; Modaoxi River: 0.75 mg·kg⁻¹). Moreover, an obvious increasing trend of these elements was observed in these tributaries from upstream to downstream. For the wild crucian carp, the lowest concentrations of these elements were detected in muscles, and the highest concentrations were in the intestinal. However, no obvious increasing trend of these elements was observed from upstream to downstream. The potential ecological risk in sediments showed a high risk, while no risk was observed in fish.

Key words: Three Gorges Reservoir; heavy metals; crucian carp (*Carassius carassius*); sediments; potential ecological risk index; comprehensive pollution index

三峡库区蓄水后, 库区的水文水动力、泥沙沉积速率以及沿江形成的消落带等环境条件发生了显著变化, 直接影响到库区水环境中各种污染物的存在形态、分布和迁移转化行为^[1,2]。其中, 重金属作为一类毒性大、难降解和易富集的环境污染物, 在库区水环境尤其是沉积物中的污染日益严重^[3~5], 降低了库区水环境质量^[6~8], 对库区水生态和人体健康安全造成潜在风险^[9~12]。因此, 揭示库区重金属污染特征、阐明重金属污染的生态风险, 对保障库区水环境(生态)安全具有重要意义。

本研究通过分析库区 2 条主要支流——大宁河和磨刀溪沉积物和野生鲫鱼体内重金属水平, 揭示重金属污染特征, 并以潜在生态风险法和综合污染指数

法对两条支流重金属污染进行初步评价, 以期对三峡库区水环境监控预警和风险管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

为了使 2 条支流的分析结果便于比较, 本研究在前期水生态调查基础上, 选取了在三峡库区分布广泛的鲫鱼作为水生生物代表种进行相关分析。研

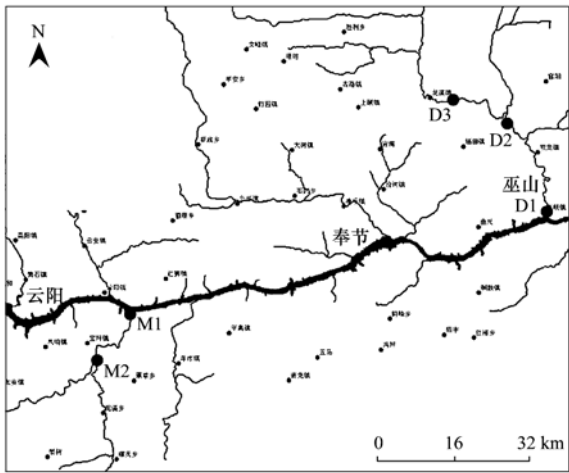
收稿日期: 2011-10-16; 修订日期: 2012-01-11

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07528-003)

作者简介: 安立会(1975~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为水环境(生态)毒理与风险评价, E-mail: anlh@craes.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: zheng-an@craes.org.cn

究于 2010 年 9 月采集大宁河和磨刀溪沉积物和野生鲫鱼样品(由于河道上游底质为大型砾石而无法采集到有效沉积物,因此在大宁河溯河往上布设 3 个站点、在磨刀溪布设 2 个站点以保证同时采集沉积物和鲫鱼,见图 1). 沉积物样品用抓斗式采集器采取,每点平行采集 3 次,混合后冷冻保存;野生鲫鱼用定置网具采捕,每点选择规格接近、体表无明显损伤、活力强的鲫鱼,现场测量体长、体重(见表 1),然后解剖分取肠、鳃和肌肉组织并冻存.



大宁河:D1~D3; 磨刀溪:M1,M2

图 1 三峡库区大宁河和磨刀溪样品采集点示意

Fig. 1 Sampling sites for collecting sediments and crucian carp from Daning River and Modaoxi River in Three Gorges Reservoir areas

表 1 大宁河和磨刀溪野生鲫鱼基本参数

Table 1 Parameters of the wild crucian carp from Daning

River and Modaoxi River			
站点	体长/cm	体重/g	<i>n</i>
D1	19.08 ± 1.88	102.78 ± 32.04	18
D2	20.75 ± 4.33	163.80 ± 94.72	15
D3	10.76 ± 0.85	15.27 ± 5.02	23
M1	25.50 ± 3.40	271.01 ± 76.32	24
M2	13.50 ± 3.50	45.24 ± 23.24	12

1.2 样品处理

取沉积物原样分析粒径和比表面积(Malvern, MS2000)、pH 值(Sartorius PB-10, 德国),利用重铬酸钾氧化-还原容量法测定沉积物有机碳含量,利用醋酸铵法测定阳离子交换量.

将冷冻干燥后沉积物首先过 1 mm 筛,去除砾石以及植物组织等大颗粒杂质,研磨,过 80 目筛备用;取解冻的鱼体肌肉(去皮与肌间刺)、鳃和肠(去除内含物),滤纸吸干表面残留水分,研磨成肉糜状,备用. 精确称取沉积物和鱼体组织各

0.100 0 g,加入 9 mL $m(\text{HF}):m(\text{HCl}):m(\text{HNO}_3)=1:2:3$ 的混合酸,密闭微波消解(120℃,3 min; 150℃,5 min; 190℃,20 min). 待冷却后转移至坩埚内加热赶酸至近干,加入 2 mL HNO_3 并用超纯水定容至 100 mL,待测.

1.3 样品分析

利用 ICP-MS (Agilent 7500) 测定样品中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn,并以 Sc、Ge、Rh、In、Tb、Lu 和 Bi 作为在线内标(Agilent Part Number: 5188-6525). 以上实验所用硝酸和氢氟酸均为优级纯,超纯水电阻率 $\geq 18.0 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$. 目标元素标样购自国家有色金属及电子材料分析测试中心.

实验过程中同步分析了水系沉积物成分分析标准物质(GBW07309,地球物理地球化学勘查研究所),元素 As、Ni、Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的回收率分别为 95%、90%、98%、89%、89%、108% 和 87%,满足实验质量要求. 测定时所有样品平行样测定,以保证实验的精密性. 各种目标重金属的相对标准偏差均小于 5%.

1.4 评价方法

沉积物的评价方法采用潜在生态危害指数法(RI)^[13]:

$$C_i^i = c^i/c_n, \quad E_r^i = T_r^i \times C_i^i, \quad \text{RI} = \sum E_r^i$$

式中, C_i^i 是重金属的污染系数, c^i 为样品浓度实测值, c_n 为沉积物背景参考值, E_r^i 是单种重金属的潜在生态危害系数, T_r^i 是重金属的毒性系数,RI 是多种重金属潜在生态危害指数. 其中,重金属的毒性系数分别取 Cd = 30, As = 10, Pb = Cu = 5, Ni = 2, Cr = 2, Zn = 1. 采用长江水系河流沉积物($< 63 \mu\text{m}$)重金属元素背景含量作为本研究的背景值^[14]. 考虑到本研究中分析的目标重金属种类与 Hakanson 提出的 8 种污染物不完全一致^[13],因此结合相关研究^[15]对 RI 值进行了必要调整(见表 2).

表 2 重金属污染的潜在生态风险分级标准

Table 2 Standards for the potential ecological risk of heavy metal pollutions

项目	潜在生态风险				
	低	中	高	严重	很严重
E_r^i	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	< 62	62 ~ 124	124 ~ 248	> 248	

考虑到环境中各种重金属的污染和鱼类摄食的差异,对鱼体重金属污染评价采用均值型综合污染指数法^[16],即取各种重金属在鱼体中残留指数(I)的均值作为综合污染指数. I 值大小可表示某重金

属单一污染程度,综合污染指数均值大小可表示各种重金属的综合污染程度。 I 值计算公式为:

$$I = c^i / c_s^i$$

式中, c^i 为鱼体内 i 类重金属残留量,即实测值 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); c_s^i 为 i 类重金属允许残留量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 其中,As、Cd、Cr、Cu 和 Pb 的评价标准按照文献[17](分别为 0.5、0.1、2.0、50 和 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算; Zn 按照(50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算. 由于水产品质量中没有 Ni 的标准,因此 Ni 未参与评价. 根据相关研究^[18,19],鱼体重金属污染程度依此划分: 污染综合指数均值 <0.2 视为正常背景水平,0.2 ~

<0.6 为轻污染水平,0.6 ~ <1.0 污染水平,≥1.0 则视为重污染水平.

2 结果与讨论

2.1 沉积物理化特征与重金属水平

本研究中沉积物粒径 <5 μm [$d(0.1)$] 的占 10%, <60 μm [$d(0.5)$] 的占 50%, <300 μm [$d(0.9)$] 的占 90%. 有机质的质量分数为 0.53% ~1.42%, pH 值为 7.98 ~8.63,比表面积为 0.56 ~0.67 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,阳离子交换量为 5 011.20 ~16 733.11 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,详见表 3.

表 3 沉积物基本理化成分

Table 3 Basic physical and chemical composition of sediments from Daning River and Modaoxi River							
站 位	pH	有机质 /%	比表面积 / $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	阳离子交换量 / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	各粒度百分数/%		
					$d(0.1)$	$d(0.5)$	$d(0.9)$
D1	7.98	0.98	0.56	7 499.35	4.57	54.09	151.11
D2	8.03	1.42	0.67	15 879.04	3.94	41.23	172.87
D3	8.63	0.53	0.65	16 733.11	3.93	54.62	277.15
M1	8.04	1.21	0.58	8 143.79	4.88	37.63	131.23
M2	8.08	0.84	0.62	5 011.20	3.86	59.13	249.35

大宁河和磨刀溪沉积物中重金属的含量水平见表 4. 从中可知,Zn 的绝对含量最高(135.25 ~39.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cd 的绝对含量最低(0.37 ~0.86 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 考虑到长江水系河流沉积物重金属元素背景值,大宁河和磨刀溪沉积物中 Cd 含量分别是背景值的 2.75 倍和 3.30 倍,As 分别是 3.33 倍和 3.25 倍,而 Zn 水平与背景值相近. 另外,重金属含量水平沿大宁河和磨刀溪流向呈升高趋势,在入江口区域含量最高(各种重金属的含量水平是上游的 2.02 ~4.73 倍,其中 Cu 是 4.73 倍),并且各种目标重金属含量均显著高于长江水系河流沉积物重金属背景值(见图 2). 大宁河的上游站位(D3)只有 Cd 和 As 高于背景值,Pb、Ni、Cu、Cr 和 Zn 则低于背景值,磨刀溪采样点上游(M2)处沉积物中重金属含量均高于背景值,这与肖尚斌等^[20]在三峡香溪河库湾发现沉积物重金属含量从上游向下游呈增加趋势的现象一致. 根据通常的河流沉积分异作用原理,这

可能是下游尤其在河口区水流变缓,水体中重金属在悬浮物微粒的吸附、絮凝、沉降等的作用下,很快在沉积物中沉积^[21],导致各种重金属在河口区沉积物中的含量急剧升高^[22~24].

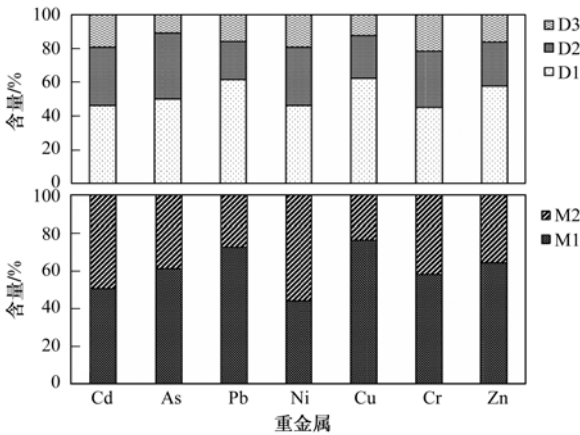


图 2 大宁河和磨刀溪上下游沉积物重金属水平变化
Fig. 2 Trends of heavy metals in sediments form Daning River and Modaoxi River from upstream to downstream

表 4 大宁河和磨刀溪沉积物重金属含量(干重)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Concentrations of heavy metals in sediments from Daning River and Modaoxi River (dry weight)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
站 点	Cd	As	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn
D1	0.86	44.70	59.59	60.90	81.66	112.80	135.25
D2	0.64	34.97	21.66	45.25	32.96	83.32	60.47
D3	0.37	10.20	16.03	26.47	17.23	55.81	39.20
平均值	0.62	29.96	32.43	44.21	43.95	83.98	78.31
M1	0.76	35.92	79.21	31.99	89.73	109.61	127.66
M2	0.74	22.66	29.97	40.21	27.70	78.79	70.39
平均值	0.75	29.29	54.59	36.10	58.72	94.20	99.03

与三峡库区其它支流表层沉积物中重金属水平相比,本研究大宁河和磨刀溪沉积物重金属的污染特征与香溪河库湾一致并且含量水平接近^[20],但远低于长江万州段沉积物的重金属水平^[25].与徐小清等^[26]在 1985 年对三峡库区江段沉积物的调查结果相比,重金属 Cd、As、Cu 和 Pb 均呈明显升高趋势,其中 As 升高尤其明显(14.66 倍).但 Cr 呈下降趋

势,而 Zn 和 Ni 变化不大.与国内其他水系沉积物相比(表 5),As、Cu 和 Cr 污染呈较高水平,Cd、Pb 和 Zn 污染呈中等水平.其中,As 的含量水平是最高的,而 Pb 和 Cu 水平也只低于珠江沉积物,而高于其他水系.这说明长江支流河口区沉积物重金属污染已经不容忽视,尤其是近年呈升高趋势的 Cd、As、Cu 和 Pb 的污染.

表 5 不同水系表层沉积物重金属含量(干重)/mg·kg⁻¹

Table 5 Concentrations of heavy metals in sediments from different watersheds (dry weight)/mg·kg ⁻¹								
水系	Cd	As	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn	文献
松花江	0.15	12.18	23.87	— ¹⁾	21.45	34.16	84.55	[27]
辽河	0.49	12.3	32.9	26.5	37.9	90.3	—	[28]
淮河	0.29	12.6	29.5	—	29.9	63.7	79.2	[29]
海河	3.11	18.9	58.8	—	71.3	66.5	278.6	[30]
珠江	1.72	25.0	102.6	—	348.0	93.1	383.4	[31]
D1(巫山)	0.86	44.70	59.59	60.90	81.66	112.80	135.25	本研究
M1(云阳)	0.76	35.92	79.21	31.99	89.73	109.61	127.66	本研究

1) 原文献中未测定

2.2 鲫鱼组织重金属水平

大宁河和磨刀溪野生鲫鱼组织包括肌肉、鳃和肠重金属含量水平见表 6.可以看出,2 条支流鱼体组织中目标重金属含量水平没有明显区别.其中,各组织中 Zn 含量水平最高,而 Cd 最低,与沉积物重金属特征一致.本研究鲫鱼肌肉组织各种目标重金属含量与长江巴南区鲫鱼体内重金属水平接近^[32],但均低

于松花江野生鲫鱼^[16],尤其 Pb 水平明显低于北江野生鲫鱼(0.49 mg·kg⁻¹)^[33].与珠江三角洲河网区鲫鱼肌肉组织重金属水平相比^[34],本研究中鲫鱼肌肉组织中 Cd 和 Ni 水平较高,而 Pb、Cr 和 Cu 含量较低,但 As 和 Zn 水平与珠江鲫鱼接近.参比水产品行业标准^[17],本研究中鲫鱼组织中重金属 As 已经超出该标准,对食用人群的人体健康存在潜在风险.

表 6 大宁河与磨刀溪鲫鱼组织重金属含量(湿重)/mg·kg⁻¹

Table 6 Concentrations of heavy metal in fish from Daninghe River and Modaoxi River (wet weight)/mg·kg ⁻¹								
组织	站点	Cd	Pb	Cr	As	Cu	Zn	Ni
肌肉	D1	0.01 ± 0.01	0.12 ± 0.09	0.15 ± 0.11	0.17 ± 0.10	0.37 ± 0.21	5.03 ± 2.43	0.15 ± 0.12
	D2	0.01 ± 0.01	0.09 ± 0.07	0.11 ± 0.04	0.25 ± 0.14	0.35 ± 0.16	7.84 ± 3.61	0.20 ± 0.17
	D3	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.13 ± 0.05	0.13 ± 0.07	0.51 ± 0.27	6.38 ± 4.04	0.18 ± 0.08
	平均值	0.01	0.08	0.13	0.18	0.41	6.42	0.18
	M1	0.01 ± 0.01	0.08 ± 0.03	0.07 ± 0.04	0.10 ± 0.06	0.25 ± 0.16	6.38 ± 2.37	0.15 ± 0.09
	M2	0.02 ± 0.01	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.06	0.12 ± 0.10	0.33 ± 0.24	6.44 ± 3.39	0.22 ± 0.16
	平均值	0.02	0.08	0.08	0.11	0.29	6.41	0.19
鳃	D1	0.04 ± 0.01	0.38 ± 0.21	0.13 ± 0.12	0.21 ± 0.13	0.67 ± 0.27	52.83 ± 5.76	0.08 ± 0.05
	D2	0.02 ± 0.01	0.16 ± 0.10	0.13 ± 0.10	0.09 ± 0.01	1.06 ± 0.41	68.04 ± 1.23	0.12 ± 0.08
	D3	0.03 ± 0.01	0.32 ± 0.32	0.31 ± 0.23	0.22 ± 0.11	0.68 ± 0.37	17.90 ± 8.32	0.32 ± 0.19
	平均值	0.03	0.29	0.19	0.17	0.80	46.26	0.17
	M1	0.05 ± 0.01	0.17 ± 0.09	0.16 ± 0.12	0.60 ± 0.29	0.65 ± 0.30	26.17 ± 8.06	0.05 ± 0.02
	M2	0.03 ± 0.01	0.12 ± 0.10	0.12 ± 0.10	0.13 ± 0.07	0.44 ± 0.29	76.72 ± 4.22	0.24 ± 0.11
	平均值	0.04	0.15	0.14	0.37	0.55	51.45	0.15
肠	D1	0.64 ± 0.38	0.20 ± 0.17	0.58 ± 0.34	0.34 ± 0.21	6.00 ± 2.62	65.14 ± 33.15	0.28 ± 0.17
	D2	0.20 ± 0.10	0.21 ± 0.14	0.21 ± 0.18	0.18 ± 0.14	3.49 ± 1.67	94.59 ± 46.24	0.17 ± 0.11
	D3	0.26 ± 0.17	0.41 ± 0.20	1.53 ± 0.05	0.56 ± 0.01	1.31 ± 0.62	18.68 ± 7.82	0.85 ± 0.40
	平均值	0.37	0.27	0.77	0.36	3.60	59.47	0.43
	M1	0.34 ± 0.16	0.12 ± 0.07	0.14 ± 0.07	0.14 ± 0.06	4.01 ± 2.08	27.23 ± 11.26	0.06 ± 0.04
	M2	0.33 ± 0.27	0.20 ± 0.11	0.16 ± 0.11	0.23 ± 0.12	4.32 ± 2.45	109.70 ± 16.79	0.24 ± 0.16
	平均值	0.34	0.16	0.15	0.19	4.17	68.47	0.15

从组织分布来看,各种重金属在肌肉组织中的含量水平最低,而在肠组织中的含量最高. 其中,尤其是肠组织 Cd 含量($0.20 \sim 0.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 湿重)是肌肉组织含量($0.01 \sim 0.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 湿重)的 $13.00 \sim 130.77$ 倍,而鳃组织 Cd 含量是肌肉的 $1.5 \sim 5.0$ 倍,但含量均较低($0.02 \sim 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 湿重),说明 Cd 主要是通过肠组织进入鱼体. 但与沉积物不同,鱼体各组织器官中的各种重金属含量水平并没有表现出明显的上下游差异,这可能与河口区的水位较深(大宁河入江口: $35.9 \sim 37.2 \text{ m}$;磨刀溪入江口: $54.9 \sim 56.5 \text{ m}$)、而上游水位较浅(龙溪镇: $1.5 \sim 2.7 \text{ m}$;龙角镇: $12.0 \sim 16.0 \text{ m}$)有关. 因为相对于其它鱼类,鲫鱼属于定居性底层鱼类,喜好在 $0.3 \sim 2.5 \text{ m}$ 深的水环境觅食和栖息. 尽管河口区沉积物重金属含量较高,但水位较深导致鲫鱼不易摄食底层沉积物中食物,因此河口深水区野生鲫鱼体内重金属含量水平没有真实反映出沉积物重金属污染水平. 由此可以看出,鱼类对重金属的富集能力受多种因素包括鱼类的行为、食性、栖息环境等影响^[35],

因此对重金属在不同鱼类体内的富集规律还需更深入的研究.

2.3 沉积物和鱼体重金属污染评价

根据沉积物中重金属水平,利用潜在生态危害指数法对大宁河和磨刀溪沉积物重金属污染进行了评价(见表7). 由表7可以看出,2条支流沉积物重金属污染的风险指数从上游到下游表现为明显的升高趋势,即在下游入江口处最高,大宁河入江口($124 < RI_{D1} = 199.57 < 248$)和磨刀溪入江口处($124 < RI_{M1} = 179.67 < 248$)均处于高风险;而上游的风险指数均较下游(入江口)低,其中大宁河上游($RI_{D3} = 70.72 < 124$)处于中风险,而磨刀溪上游($124 < RI_{M2} = 140.19 < 248$)则仍处于中高风险. 具体来说,Cd 和 As 污染是沉积物重金属风险指数的主要贡献因子,分别占 $55.90\% \sim 69.76\%$ 和 $16.02\% \sim 27.67\%$. 尽管 Zn 含量水平最高,但由于其毒性较低,只占风险指数的 $0.50\% \sim 0.83\%$,因此对重金属污染风险的贡献较小.

表7 大宁河与磨刀溪沉积物重金属污染潜在生态危害系数和风险指数

Table 7 Ecological risk coefficient (E_r^i) and risk index (RI) of heavy metal in sediments from Daning River and Modaoxi River

站点	潜在生态危害系数(E_r^i)							风险指数 (RI)
	Cd	As	Pb	Ni	Cu	Cr	Zn	
D1	113.66	49.67	11.42	4.19	15.12	3.95	1.57	199.57
D2	84.58	38.86	4.15	3.11	6.10	2.92	0.70	140.42
D3	48.90	11.33	3.07	1.82	3.19	1.95	0.46	70.72
M1	100.44	39.91	15.17	2.20	16.62	3.84	1.49	179.67
M2	97.80	25.18	5.74	2.76	5.13	2.76	0.82	140.19

同样,利用综合污染指数法对重金属的生物污染状况进行评价(见表8). 可以看出,鱼体(主要是肌肉)重金属以 As 的残留量指数最高($0.19 \sim 0.51$,均值为 0.31),其次为 Cd($0.11 \sim 0.24$,均值为 0.15)、Zn($0.10 \sim 0.16$,均值为 0.13)、Pb($0.04 \sim 0.12$,均值为 0.08)、Cr($0.04 \sim 0.08$,均值为 0.06)、Cu 的残留量指数最低(0.01 ,均值为 0.01). 其中 As 的残留量指数超出背景值($0.31 > 0.20$),说明 As 处于轻微污染水平,这与沉积物中重金属

As 具有较高风险一致. 综合污染指数结果表明大宁河和磨刀溪野生鲫鱼重金属的均值综合污染指数在 $0.10 \sim 0.16$,均处于背景值范围(<0.2),并且没有呈现明显的上下游变化规律,说明该流域鲫鱼没有受到重金属的明显污染,这与两条支流沉积物重金属污染的风险指数从上游到下游升高的结论不同. 这可能与调查区域的水深和沉积物的理化特征有关,即本研究调查的2条支流上游水位较浅但沉积物以砾石为主,而下游沉积物以泥沙为主但水位较

表8 大宁河与磨刀溪野生鲫鱼重金属残留指数与均值综合污染指数

Table 8 Residue index and comprehensive pollution index of heavy metals in fish from Daning River and Modaoxi River

站点地点	残留量指数(I)						均值综合 污染指数
	I_{Cr}	I_{Cu}	I_{Zn}	I_{As}	I_{Cd}	I_{Pb}	
D1	0.08	0.01	0.10	0.34	0.11	0.12	0.13
D2	0.05	0.01	0.16	0.51	0.11	0.09	0.16
D3	0.07	0.01	0.13	0.25	0.24	0.04	0.12
M1	0.04	0.01	0.13	0.19	0.12	0.08	0.10
M2	0.04	0.01	0.13	0.25	0.17	0.08	0.11

深,这就导致鲫鱼在上下游均无法通过摄食沉积物摄入重金属,因此鲫鱼体内重金属水平也就无法真实反映沉积物重金属的潜在生态风险.因此,在今后的研究中,可以结合调查区域的生物群落结构,考虑采用不同栖息水层包括中上层生物和底层生物、不同食性包括杂食性和植食性生物共同评价沉积物重金属的潜在生态风险.

3 结论

(1)大宁河与磨刀溪沉积物重金属以 Zn 的绝对含量水平最高、Cd 最低,但 Cd 和 As 含量水平均明显高于背景值.潜在生态风险评价结果显示 2 条支流入江口处沉积物重金属污染均具有较高的潜在风险,并从上游到下游呈升高趋势.

(2)大宁河与磨刀溪野生鲫鱼体内重金属以 Zn 绝对含量水平最高、Cd 最低.重金属综合污染指数评价结果显示野生鲫鱼没有受到重金属污染,但 As 污染需要引起关注.

致谢:感谢梁友光研究员、丁庆秋研究员和陈峰博士,及云阳县环境监测站、巫山县环境监测站在采样方面给予的帮助.

参考文献:

- [1] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(1): 1-6.
- [2] 周怀东, 袁浩, 王雨春, 等. 长江水系沉积物中重金属的赋存形态[J]. 环境化学, 2008, **12**(4): 5115-5119.
- [3] Feng H, Han X F, Zhang W G, *et al.* A preliminary study of heavy metal contamination in Yangtze river intertidal zone due to urbanization[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, **49**(11-12): 910-915.
- [4] 黎莉莉. 三峡水库 135 m 蓄水前后水体重金属变异研究[D]. 重庆: 西南大学, 2005. 17-24.
- [5] 李倩. 三峡水库蓄水后水体中有毒重金属砷、铅、铬研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006. 40-41.
- [6] Chapman P M. Sediment quality assessment: Status and outlook[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1995, **4**(3): 183-194.
- [7] Ferreira M F, Chiu W S, Cheok H K, *et al.* Accumulation of nutrients and heavy metals in surface sediments near Macao[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, **32**(5): 420-425.
- [8] Marengo E, Gennaro M C, Robotti E, *et al.* Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida river sediments[J]. Analytica Chimica Acta, 2006, **560**(1-2): 172-183.
- [9] 张晟, 黎莉莉, 张勇, 等. 三峡水库 135m 蓄水前后水体重金属环境健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(11): 865-867.
- [10] 叶琛, 李思悦, 卜红梅, 等. 三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. 土壤学报, 2010, **47**(6): 1264-1269.
- [11] 黎莉莉, 张晟, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, **27**(4): 470-473.
- [12] 刘丽琼, 魏世强, 江韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1204-1211.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [14] 张朝生, 章申, 张立成, 等. 长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究[J]. 环境科学学报, 1995, **15**(3): 257-264.
- [15] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, **15**(5): 33-37.
- [16] 祝惠, 阎百兴, 张凤英. 松花江鱼体中重金属的富集及污染评价[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(5): 492-496.
- [17] NY 5073-2006, 无公害食品-水产品中有毒有害物质限量[S].
- [18] 贾晓平, 林钦, 李纯厚, 等. 广东沿海牡蛎体 Pb 含量水平及时空变化趋势[J]. 水产学报, 2000, **24**(6): 527-532.
- [19] 魏泰莉, 杨婉玲, 赖子尼, 等. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查[J]. 中国水产科学, 2002, **9**(2): 172-176.
- [20] 肖尚斌, 刘德富, 王雨春, 等. 三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 983-989.
- [21] 黄廷林. 水体沉积物中重金属释放动力学及试验研究[J]. 环境科学学报, 1995, **15**(4): 440-446.
- [22] Almeida C M R, Mucha A P, Vasconcelos M T S D. Influence of the sea rush juncus maritimus on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant[J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(11): 3112-3118.
- [23] Bryan G W, Langston W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review[J]. Environmental Pollution, 1992, **76**(2): 89-131.
- [24] 董丽华, 李亚男, 常素云, 等. 沉积物中重金属的形态分析及风险评价[J]. 天津大学学报, 2009, **42**(12): 1112-1117.
- [25] 付川, 潘杰, 牟新利, 等. 长江(万州段)沉积物中重金属污染生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(2): 236-239.
- [26] 徐小清, 邓冠强, 惠嘉玉, 等. 长江三峡库区江段沉积物的重金属污染特征[J]. 水生生物学报, 1999, **23**(1): 1-10.
- [27] 张凤英, 阎百兴, 潘月鹏, 等. 松花江沉积物重金属时空变化与来源分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2010, **25**(5): 670-674.
- [28] 张婧, 王淑秋, 谢琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2413-2418.
- [29] 罗斌, 刘玲, 张金良, 等. 淮河干流沉积物中重金属含量及

- 分布特征[J]. 环境与健康杂志, 2010, **27**(12): 1122-1127.
- [30] 张淑娜, 刘伟, 王德龙. 海河干流(市区段)表层沉积物重金属污染及变化趋势分析[J]. 干旱环境监测, 2008, **22**(3): 129-133.
- [31] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中的重金属污染调查与评价[J]. 环境监测管理与技术, 2007, **19**(2): 23-25.
- [32] Zhang Z, He L, Li J, *et al.* Analysis of heavy metals of muscle and intestine tissue in fish - in Banan Section of Chongqing from Three Gorges Reservoir, China [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, **16**(6): 949-958.
- [33] 杨婉玲, 赖子尼, 魏泰莉, 等. 北江清远段水产品中铅含量调查[J]. 淡水渔业, 2007, **37**(3): 67-69.
- [34] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10): 1917-1923.
- [35] Li S X, Zhou L F, Wang H J, *et al.* Feeding habits and habitats preferences affecting mercury bioaccumulation in 37 subtropical fish species from Wujiang River, China [J]. Ecotoxicology, 2009, **18**(2): 204-210.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行