

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响

韦丽丽^{1,2}, 周琼^{1,2*}, 谢从新^{1,2}, 王军^{1,2}, 李君^{1,2}

(1. 华中农业大学水产学院, 农业部淡水生物繁育重点实验室, 武汉 430070; 2. 淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心, 武汉 430070)

摘要: 三峡水库于 2010 年 10 月蓄水到最大水位 (175 m), 为揭示最大水位蓄水对库区典型水域重金属污染可能存在的影响, 于 2011 年 7 月至 2012 年 8 月研究了三峡库区水生生物体内汞 (Hg)、镉 (Cd)、铅 (Pb) 的含量水平及其沿着水体食物链可能存在的生物放大现象, 并分析水体无脊椎动物、鱼类组织的重金属含量与生物因子 (体长、体重、食性、栖息水层、碳源、营养级) 之间的关系。结果表明, 3 种重金属浓度的最大值均未超过我国水产品食用安全标准, Hg 浓度比库区蓄水前稍高, Cd 和 Pb 浓度则低于蓄水前的水平。与国外水库相比, 三峡库区重金属的浓度整体上偏低。鲤鱼 Cd 浓度与其体长、体重有显著的相关性, 翘嘴鲇和鲢的 Hg 浓度与体长、体重显著性相关。整体上 3 种重金属的浓度与食性显著相关, 与栖息水层之间的相关性并不显著, 底栖生活鱼类的重金属浓度高于中上层鱼类。3 种重金属的浓度与 $\delta^{15}\text{N}$ 值的回归分析结果显示, Hg 浓度与 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间表现出显著的相关性, 但生物放大效率低于美国及加拿大等地水库的水平, 这与三峡库区土壤中较低的有机碳含量有关。

关键词: 三峡水库; 重金属; 生物富集; 生物放大; 食物网; 稳定同位素

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0325-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.01.042

Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors

WEI Li-li^{1,2}, ZHOU Qiong^{1,2*}, XIE Cong-xin^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, LI Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture, College of Fishery, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Freshwater Aquaculture Collaborative Innovation Center of Hubei Province, Wuhan 430070, China)

Abstract: Three Gorges Reservoir (TGR) reached the maximum water level (175 m) of impoundment in Oct. 2010. In order to reveal the potential influence of the greatest water-level impoundment on the heavy metal pollution in the typical waters of TGR, the content level of trace metals (Hg, Cd and Pb) in biota and potential biomagnification along the aquatic food chain were investigated in the main stem of TGR from July 2011 to August 2012, as well as the relationship between the trace metal concentrations of aquatic consumers (fish and aquatic invertebrate) and biological factors. Our study showed that no individual data of the three trace metals in biota exceeded the edible safety criteria of aquatic products in China and FAO. In contrast with those before the impoundment of TGR, Hg showed a little higher, while Cd and Pb exhibited a little lower level after the impoundment. Trace metals in TGR exhibited relatively lower concentrations compared with those in reservoirs in other countries. Significant correlations were found between the Cd concentration and body size (body length and body weight) of *Cyprinus carpio*, as well as the Hg concentration and body size (body length and body weight) of *Erythroculter ilishaeformis*. As for feeding habits, there was statistically significant difference between trace metal concentrations in herbivorous, planktonic, omnivorous and carnivorous fish. However, no significant difference was found between the metal concentrations in fish with different habitats (pelagic, mesopelagic and benthic). Even so, the overall trend was that fish living in benthic layer had higher heavy metal concentrations than those in pelagic and mesopelagic zones. The regression slopes of log-Hg concentration versus $\delta^{15}\text{N}$, served as an indicator of trophic magnification factor (TMF). Significant correlations ($P < 0.05$) were observed for Hg in the food web of TGR. TMF of Hg in TGR indicated lower level (0.046-0.066) in contrast with those in the reservoirs of United States and Canada, and this was explained by the relatively lower organic carbon in the soil and sediment of TGR.

Key words: Three Gorges Reservoir; heavy metal; bioaccumulation; biomagnification; food web; stable isotope

三峡水库位于长江的干流, 是世界上最大的水利水电型水库。蓄水以后, 库区的鱼类资源急剧减少, 水流变慢, 泥沙沉降速度减缓, 水体自净能力减弱等一系列的生态环境问题日益凸显^[1]。重金属是水生生态系统中常见的污染物, 微量浓度的重金属就可产生毒性作用。自然环境中的汞、镉、铅等重

金属不能被微生物利用和分解, 这些重金属进入生

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31100343); 中央高校基本科研业务费专项 (2010QC024)

作者简介: 韦丽丽 (1990 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为水体重金属污染与淡水生态学, E-mail: 569193744@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: hainan@mail.hzau.edu.cn

物体后会产生生物富集,并转化成更难被生物降解且毒性更强的化合物,最后通过食物链的生物放大进入人体^[2, 3]. 由于特殊的地理位置及人为活动的影响,三峡库区是我国重金属背景值较高的区域之一,重金属污染对人类健康的影响越来越严重^[4, 5]. 因此,蓄水后重金属污染存在的生态安全和水产品安全问题备受关注^[6~8].

三峡库区重金属水平在蓄水后有明显的升高趋势. 2003 年 6 月第一次蓄水后库区水体中溶解型无机汞的浓度得到显著升高^[9], 2007 年第二次蓄水后典型库湾中溶解态重金属铅和镉的浓度较蓄水初呈升高趋势^[10], 这些研究可能表明: 逐步的蓄水过程导致库区水体中重金属水平进一步升高. 蓄水前库区鱼类重金属的研究表明, 库区鱼类受到了轻微污染, 但并未超过我国水产品食用安全标准^[11]. 徐小清等^[12]根据早期长江流域河流、天然湖泊、水库的调查数据预测, 三峡水库蓄水运行后有可能出现鱼类汞含量显著增加的现象. 与蓄水前相比, 三峡水库蓄水后, 生活垃圾区及消落带土壤中重金属水平显著升高, 特别是汞的水平相对较高^[13]. 另有研究表明, 135 m 水位蓄水后, 三峡库区铅浓度有所上升^[14], 库区干流及香溪河库湾中溶解态的无机汞浓度显著升高^[15, 16], 库区表层沉积物中镉的污染最为严重^[17]. 尽管如此, 大多数研究主要聚焦于重金属在库区消落带土壤、水体及鱼体中的分布^[9, 18]与迁徙^[19], 缺乏重金属在水体食物网中从低营养级到高营养级的营养转移(生物放大)相关研究. 此外, 与蓄水前相比, 库区蓄水后鱼类重金属含量的报道较少^[20].

自然界中天然存在的稳定同位素在水生生态系统中的应用越来越广泛^[21, 22]. 在水生生态系统中, 由于捕食者的稳定氮同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)相对于其食物会产生 3‰~4‰的富集^[23], 因此稳定氮同位素主要用于确定水体消费者在食物网中的营养级. 本研究通过稳定同位素技术与重金属分析相结合, 分析三峡库区最大水位蓄水后水体消费者的重金属(Hg、Cd、Pb)浓度水平及其沿着食物链从低营养级到高营养级的营养转移, 以及生物因子的影响. 以前的研究主要通过土壤、沉积物、水体、鱼类等单一途径来评价三峡库区重金属的污染现状, 而本研究主要从整个水体食物网的角度理解库区重金属的生物富集和生物放大. 通过蓄水前后的重金属水平比较, 评价三峡库区蓄水后可能存在的“水库效应”与生态安全, 以期对三峡水库水资源的管理和水生生态系统的保护提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

三峡水库位于长江的中上游地区, 贯穿宜昌市(湖北省)和江津市(重庆)的 20 个县区(图 1), 库区总长 660 km, 总面积 $5.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水域面积 1 080 km^2 , 其中重庆市境内长 573 km, 总面积达 $4.54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占三峡库区总面积的 84%^[24]. 根据三峡库区的水系分布状况, 选择库区干流典型水域(涪陵、万州和秭归)分别作为上、中、下游的研究位置, 同时在每个研究位置选择 3 个采样点进行采样. 3 个研究位置的气候、环境与水文状况见表 1.

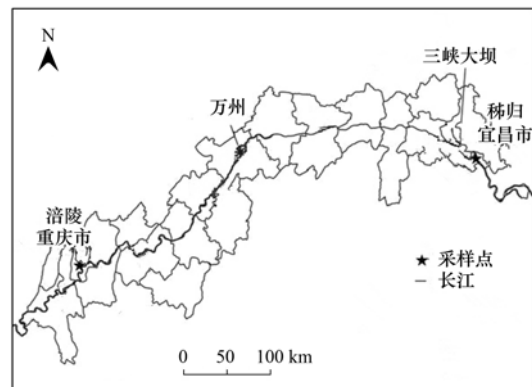


图 1 三峡库区采样点位置及分布示意

Fig. 1 Location and distribution of sampling sites in Three Gorges Reservoir (TGR)

1.2 样品采集与前处理

2011 年 7 月、11 月和 2012 年 5 月、8 月分别在三峡库区的涪陵、万州和秭归水域采集水样以及颗粒有机物、水生无脊椎动物与鱼类等生物样品. 通过采水器采集表底层水样充分混合, 混合水样使用真空泵通过玻璃纤维滤膜(Whatman GF/C, 0.45 μm)过滤, 留在滤膜上的物质作为悬浮颗粒有机物样品. 鱼类和无脊椎动物样品均从当地的渔民处购买, 每一条鱼均测量体长与体重, 贝壳类与虾类仅测量体重即可. 所收集到的水样与生物样品均现场保存在便携式冰箱中, 并带回实验室作进一步的处理. 解剖鱼类背部的白肌肉, 取 5~10 g 的肉片, 用塑料封口袋包好放入便携式冰箱, 并带回实验室转移到 -20°C 超低温冰箱中保存. 螺、蚌类取斧足肌肉作为分析样品, 虾类则取腹部肌肉. 底栖动物、鱼类的肌肉与浮游动物样品均在烘箱中 60°C 条件下烘至恒重, 并用研钵和研棒磨成颗粒均匀的细小粉末后分成两份, 分别用于测定重金属含量和碳、氮同位素比值.

表 1 三峡库区采样位置的相关参数特征^[8]

Table 1 Selected parametric characteristics of three sampling stations in TGR

参数	采样点		
	涪陵	万州	秭归
经纬度	E 107°23′/N 29°42′	E 108°22′/N 30°50′	E 110°57′/N 30°52′
流域面积/km ²	87 920	228. 6	113
河流长度/km	65	30. 6	24
河流深度/m	77	92	168
河流宽度/m	1 605	1 302	1 693
年均流量/m ³ ·s ⁻¹	1 650	4. 4	2. 5
降雨量/mm	1 096. 3	1 162. 5	1 200. 5
蒸发量/mm	1 048	1 096	1 601
风速/m·s ⁻¹	1. 4	0. 5	0. 9
离大坝距离/km	484	277	1

1.3 样品分析

1.3.1 稳定同位素分析

分析所用的仪器为 Carlo Erba EA-1110 元素分析仪与 Delta PlusFinnigan (Thermo Scientific, Waltham, Massachusetts, USA) 同位素比率质谱联用仪。

根据某水体消费者对基准线生物 (baseline indicator) 的氮稳定同位素相对值, 计算该水生动物的营养级。营养级计算公式如下:

$$TL = [(\delta^{15}N_{\text{consumer}} - \delta^{15}N_{\text{baseline}}) / \Delta\delta^{15}N] + 2$$

式中, TL 表示所计算生物的营养级, $\delta^{15}N_{\text{consumer}}$ 表示消费者的氮同位素值, $\delta^{15}N_{\text{baseline}}$ 表示该食物网中基准线生物的氮同位素值, 本研究采用初级消费者螺体内的氮同位素值作为基准值; $\Delta\delta^{15}N$ 表示相邻营养级之间氮同位素的富集程度 (一般为 3. 4‰)^[22, 25]。

1.3.2 重金属分析

总汞含量的测定是在 60 ~ 70℃ 条件下用 HNO₃ : HClO₄ (体积比 5: 1) 进行消化, 其消化液通过安装在原子吸收光谱仪 (Perkin Elmer 2380) 上的汞氰化物系统 (MHS-10) 进行测定。肌肉的总汞浓度测定参照中华人民共和国卫生部与标准管理局 (2003) 公布的方法。

Cd 和 Pb 浓度的测定根据 Mendil 等^[26] 的方法来测定, 称取 0. 500 g 冻干后的样品, 加入 6 mL HNO₃ 和 2 mL 的 H₂O₂, 混合浸泡 1 h 后, 置于恒温电热板上于 120℃ 下消解 24 h, 消解结束后将消化液中的酸蒸干, 冷却后加入 0. 5 mL HNO₃, 再转移至 50 mL 的容量瓶中, 用适量超纯水多次洗涤消化罐, 最后定容混匀后待测。利用 ICP-MS (Perkin-Elmer) 测定样品中的 Cd 和 Pb。

1.4 统计分析与数据处理

所有数据均采用 Excel 软件进行统计和处理,

文中所有的图均使用 Excel 和 Origin 8. 0 软件制作, 所有的统计检验均使用 19. 0 版本的 SPSS 软件分析, 差异显著性采用 ANOVA 分析方法, 当 $P < 0. 05$ 时被认为存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 颗粒有机物、无脊椎动物与鱼类中的重金属含量

重金属在颗粒悬浮物、无脊椎动物、鱼类中的浓度存在显著性差异 (表 2)。虽然不同种类水生生物体内的重金属浓度有差异, 但整体上的浓度 (以湿重计, 下同) 依次为 (ng·g⁻¹) : Hg (17. 8 ~ 117. 0) > Pb (20. 3 ~ 92. 6) > Cd (3. 2 ~ 45. 8)。生物样品中 Hg、Cd、Pb 最低浓度分别出现于草鱼、鳊、铜鱼中, 最大浓度均未超过世界卫生组织 (FAO) 和我国水产品的食用安全标准 (500 ng·g⁻¹)。

水生生物组织中 Hg 的浓度范围 (以湿重计, 下同) 为 17. 8 ~ 117. 0 ng·g⁻¹, 平均值为 61. 0 ng·g⁻¹。其中, Hg 浓度的最大值出现在鲇的肌肉中, 其次是鳊和翘嘴鲇, 草鱼体内的 Hg 浓度最低。无脊椎动物和鱼类中 Cd 的浓度范围为 3. 2 ~ 45. 8 ng·g⁻¹, 平均值为 18. 0 ng·g⁻¹, Cd 平均浓度值最高的是螺, 其次是鳊和青梢红鲇, 鳊体内的 Cd 浓度最低。所采集到的水生生物样品中 Pb 的浓度范围为 20. 3 ~ 92. 6 ng·g⁻¹, 平均值为 49. 6 ng·g⁻¹, Pb 平均浓度值最高的为肉食性的翘嘴鲇, 其次是鲇、鳊, 铜鱼体内的 Pb 浓度最低。

2.2 重金属的生物富集与生物因子之间的关系

2.2.1 体长、体重

所采集到的无脊椎动物和鱼类的相关信息见表 3, 采集到的 20 种鱼类基本上涵盖了不同食性和栖息水层的种类, 代表了三峡库区食物链中的不同营养级水体消费者。

表 2 三峡库区悬浮颗粒物、无脊椎动物与鱼类的重金属浓度/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$
Table 2 Averaged heavy metal concentrations of seston, invertebrates and fish in TGR/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

种类	Hg	Cd	Pb
	(Mean $\pm$ SD)	(Mean $\pm$ SD)	(Mean $\pm$ SD)
颗粒有机物(POM)	5.2 $\pm$ 4.5	2.1 $\pm$ 0.3	2.2 $\pm$ 0.4
无脊椎动物			
螺 <i>Turbo fluctuosa</i>	22.6 $\pm$ 3.8	45.8 $\pm$ 9.4	57.2 $\pm$ 14.5
青虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	37.8 $\pm$ 9.7	20.3 $\pm$ 6.9	42.5 $\pm$ 14.5
白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	41.5 $\pm$ 12.9	19.5 $\pm$ 5.9	47.4 $\pm$ 9.9
鱼类			
草鱼 <i>Ctenopharynodon idellus</i>	17.8 $\pm$ 7.7	18.8 $\pm$ 10.4	27.3 $\pm$ 6.9
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	35.4 $\pm$ 6.9	12.8 $\pm$ 3.8	44.7 $\pm$ 6.9
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	46.4 $\pm$ 14.3	3.2 $\pm$ 0.8	53.2 $\pm$ 13.4
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	57.5 $\pm$ 19.8	7.5 $\pm$ 2.0	32.3 $\pm$ 8.3
油鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	78.2 $\pm$ 17.6	17.0 $\pm$ 3.2	54.9 $\pm$ 5.5
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	80.4 $\pm$ 16.7	12.1 $\pm$ 6.8	34.6 $\pm$ 9.6
鲫 <i>Carassius auratus</i>	54.9 $\pm$ 12.2	17.1 $\pm$ 7.1	50.1 $\pm$ 14.4
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	55.8 $\pm$ 11.9	6.8 $\pm$ 1.0	20.3 $\pm$ 7.4
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	70.4 $\pm$ 4.5	10.3 $\pm$ 6.0	52.5 $\pm$ 9.0
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	64.7 $\pm$ 15.5	13.1 $\pm$ 2.0	52.5 $\pm$ 13.5
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	50.4 $\pm$ 7.8	25.5 $\pm$ 7.0	36.6 $\pm$ 12.6
瓦氏黄颡 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	61.9 $\pm$ 12.7	14.1 $\pm$ 1.6	34.9 $\pm$ 11.0
泥鳅 <i>Oriental weatherfish</i>	71.4 $\pm$ 14.1	12.3 $\pm$ 4.7	34.8 $\pm$ 12.3
青梢鮠 <i>Erythroculter dabryi</i>	62.4 $\pm$ 9.9	29.7 $\pm$ 8.6	62.7 $\pm$ 13.8
翘嘴鮠 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	80.9 $\pm$ 4.6	10.8 $\pm$ 2.1	92.6 $\pm$ 9.1
鲇 <i>Silurus asotus</i>	117.0 $\pm$ 10.0	21.9 $\pm$ 2.6	84.3 $\pm$ 21.8
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	112.0 $\pm$ 23.5	41.6 $\pm$ 12.8	75.8 $\pm$ 14.7

表 3 三峡库区水生生物样品的相关参数特征
Table 3 Selected parametric characteristics of aquatic organisms in TGR

种类	代码	体长/cm		体重/g		栖息 水层	食性	样品数量		
		Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max			涪陵	万州	秭归
无脊椎动物										
螺 <i>Turbo fluctuosa</i>	STF			7.6	6.0 ~ 8.9	底栖	杂食	3	2	3
青虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	SMN			7.5	6.4 ~ 9.7	底栖	杂食	7	6	8
白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	SEM			2.5	2.0 ~ 2.9	底栖	杂食	7	5	7
鱼类										
草鱼 <i>Ctenopharynodon idellus</i>	CI	53.7	45.7 ~ 59.3	1 507.8	1 092 ~ 2 235	中层	草食	8	10	7
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	HM	37.8	33.5 ~ 42.0	1 425	827 ~ 2 114	上层	滤食	5	6	5
鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	AN	46.5	37.4 ~ 53.5	1 956	785 ~ 3 008	上层	滤食	4	7	3
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	HL	18.8	15.4 ~ 25.6	37.8	22.0 ~ 54.8	上层	杂食	3	7	8
油鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	HBW	14.6	13.8 ~ 15.5	22.6	18.5 ~ 26.8	上层	杂食	3	4	3
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	CCO	33.5	22.6 ~ 38.6	445.8	251.4 ~ 631.6	中层	杂食	7	9	10
鲫 <i>Carassius auratus</i>	CA	21.4	19.5 ~ 25.5	168.9	104.3 ~ 223.8	中层	杂食	12	9	12
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	CH	25.3	18.7 ~ 29.0	148.9	93.3 ~ 213.9	中层	杂食	7	5	11
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	CG	22.7	20.6 ~ 25.6	88.08	54.1 ~ 113.9	中层	杂食	5	6	7
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	SD	15.8	14.9 ~ 18.5	25.8	19.6 ~ 38.1	中层	杂食	11	6	12
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	SAR	12.5	10.5 ~ 15.3	17.5	14.2 ~ 27.4	中层	杂食	3	6	12
瓦氏黄颡 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	PV	28.7	25.4 ~ 40.5	295.6	246.0 ~ 438.4	中层	杂食	3	7	14
泥鳅 <i>Oriental weatherfish</i>	OW	18.5	15.7 ~ 20.4	28.5	22.4 ~ 38.5	底栖	杂食	4	3	9
青梢鮠 <i>Erythroculter dabryi</i>	ED	32.2	29.6 ~ 37.5	327.6	221.4 ~ 446.7	上层	肉食	4	7	2
翘嘴鮠 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	EI	43.0	36.8 ~ 49.2	655	546 ~ 833	上层	肉食	2	6	8
鲇 <i>Silurus asotus</i>	SAS	43.8	37.4 ~ 51.2	746.5	584 ~ 913	中层	肉食	9	8	6
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	SC	35.9	32.6 ~ 37.8	563.5	475 ~ 797	中层	肉食	6	5	4

本研究选择各食性鱼类中数量最多的种类,分别对其组织中的重金属浓度与体长、体重的相关性

进行了分析(表 4)。结果显示,鲤的体长、体重均与 Cd 浓度呈显著性正相关;青梢鮠和鲇的体长、体重

表 4 鱼类的个体大小(体长、体重)
与重金属浓度的相关性分析¹⁾

Table 4 Pearson correlation analysis between heavy metal concentrations and body size (body length or body weight) of fish				
项目	种类	Hg	Cd	Pb
体长	草鱼	-0.132	0.121	0.227
	鲢	0.008	0.361	0.094
	鳙	-0.253	0.430	-0.005
	鲤	0.068	0.690 **	0.370
	铜鱼	0.252	0.324	-0.001
	青梢鲈	0.557 *	0.240	0.098
	鳊	0.429 *	0.187	0.105
体重	草鱼	-0.311	0.100	0.232
	鲢	0.004	0.332	0.096
	鳙	-0.343	0.393	-0.003
	鲤	0.373	0.662 **	0.337
	铜鱼	0.223	0.201	-0.190
	青梢鲈	0.513 *	0.295	0.195
	鳊	0.327 *	0.123	0.196

1) ** 表示在 0.01 处显著, * 表示在 0.05 处显著

均与 Hg 浓度呈显著性正相关。

2.2.2 食性、栖息水层

草食性、滤食性、杂食性和肉食性鱼类 Hg 的浓度分别为 20.24、43.14、66.90 和 78.77 ng·g⁻¹; 草食性、滤食性、杂食性和肉食性鱼类 Cd 的浓度分别为 10.78、19.16、19.33 和 23.96 ng·g⁻¹; 草食性、滤食性、杂食性和肉食性鱼类 Pb 的浓度分别

为 35.12、32.88、60.21 和 56.43 ng·g⁻¹(图 2)。不同食性的鱼类中 Hg、Cd 和 Pb 的浓度在总体上的变化趋势为:肉食性>杂食性>滤食性>草食性,这和营养级的变化趋势一致,进一步说明了 Hg、Cd 和 Pb 在食物链的传递过程中可能存在生物放大现象(图 3)。

就栖息水层而言,生活于水体上层、中层和底层的鱼类 Hg 浓度分别为 66.88、63.68 和 80.57 ng·g⁻¹; 生活于水体上层、中层和底层的鱼类 Cd 浓度分别为 18.47、21.03 和 34.07 ng·g⁻¹; 生活于水体上层、中层和底层的鱼类 Pb 浓度分别为 46.09、58.30 和 61.53 ng·g⁻¹。鱼类的重金属浓度在不同栖息水层之间没有表现出一致的变化规律(图 2)。

2.3 重金属沿着水体食物链的生物放大

本研究比较了库区上游(涪陵)、中游(万州)和下游(秭归)食物网中各水体消费者的营养级(表 5),其中涪陵水生动物营养级的变化范围为 1.82~3.66,最小值为鲢,最大值为肉食性的鳊;万州江段营养级的变化范围为 1.39~3.16,最小值为草鱼,最大值为鳊;秭归江段营养级的变化范围为 1.9~3.71,最小值为鲫,最大值为青梢鲈。涪陵、万州和秭归地区水生生物的营养级跨度相差不大,分别为 1.84、1.75 和 1.85,3 个地区的营养级之间存在显著性差异($F=4.48, P<0.05$)。

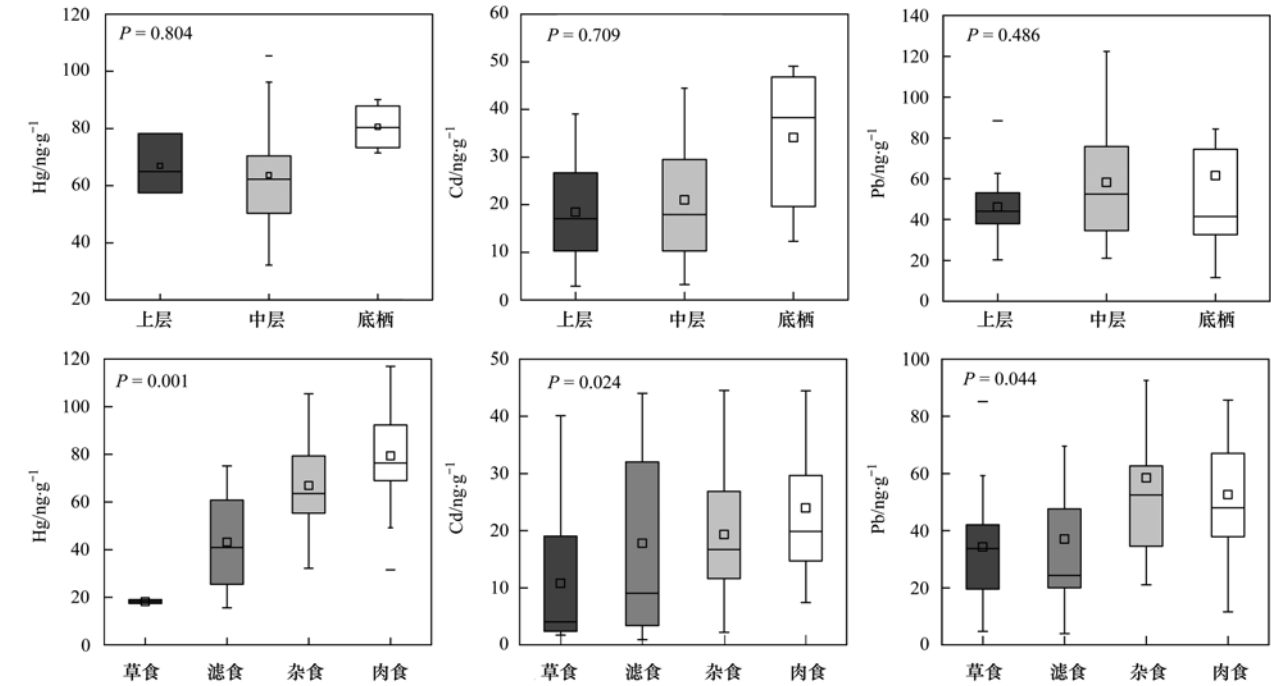


图 2 水生动物中重金属含量与栖息水层、食性的关系

Fig. 2 Relationships between heavy metal concentrations and habitat type, feeding habit of aquatic consumers in TGR

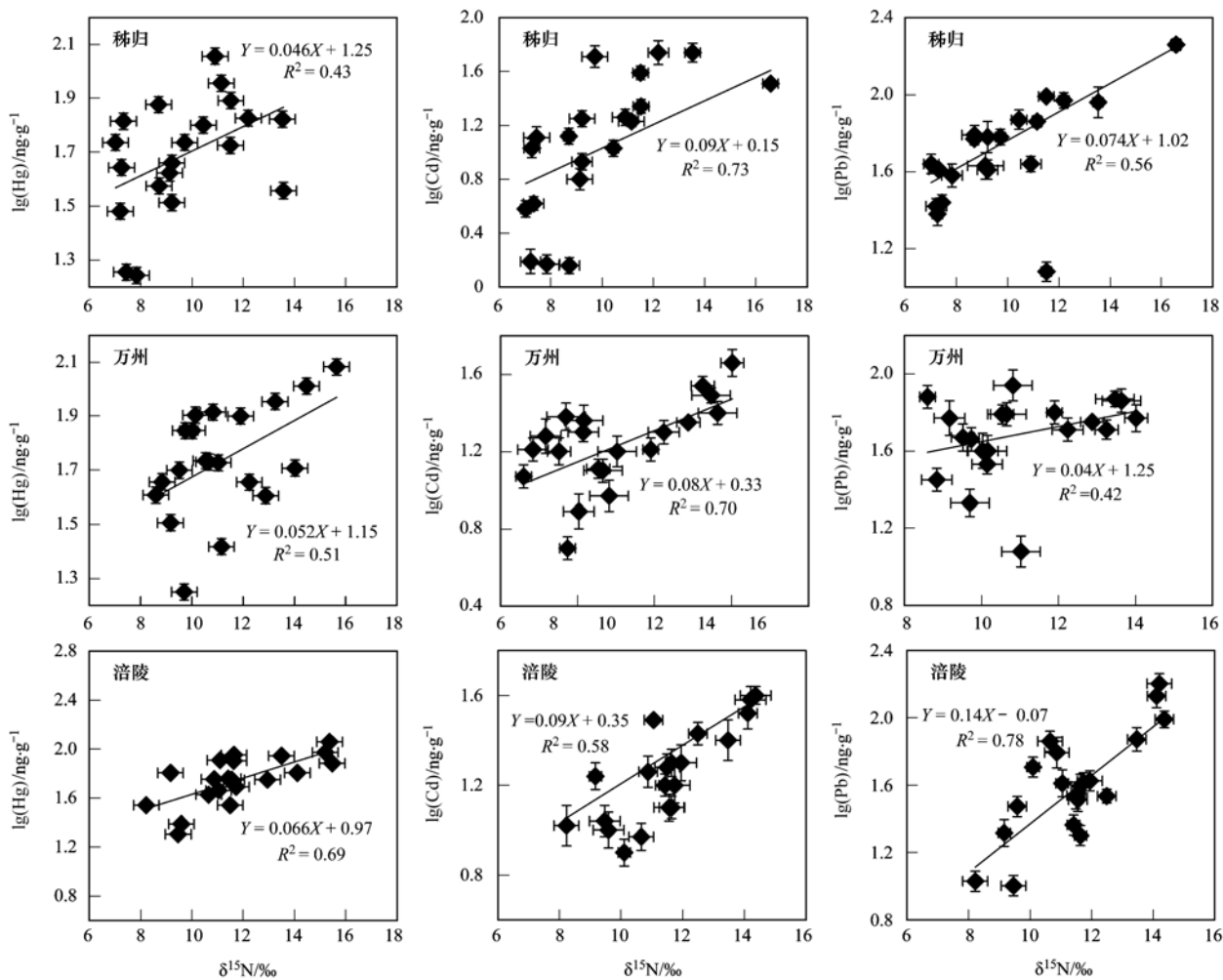


图3 3个研究位置 Hg、Cd、Pb 的生物放大能力

Fig. 3 Biomagnification power of Hg, Cd and Pb across three sampling stations

表5 不同采样位置水生动物(无脊椎动物、鱼类)营养级的比较

Table 5 Comparison of trophic positions in aquatic invertebrate and fish at different sampling stations

种类	代码	营养级 (TP)		
		涪陵	万州	秭归
无脊椎动物				
螺 <i>Turbo fluctuosa</i>	STF	2	2	2
青虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	SMN	2. 54	2. 47	2. 49
白虾 <i>Exopalaemon modestus</i>	SEM	2. 54	2. 62	3. 71
鱼类				
草鱼 <i>Ctenopharynodon idellus</i>	CI	1. 99	1. 39	1. 94
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	HM	1. 82	1. 62	1. 93
鳊 <i>Aristichthys nobilis</i>	AN	2. 22	1. 41	2. 4
鲮 <i>Hemiculter leucisculus</i>	HL	2. 27	1. 76	2. 12
油鲮 <i>Hemiculter bleekeri</i>	HBW	2. 55	2. 29	2. 41
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	CCO	2. 42	1. 97	1. 91
鲫 <i>Carassius auratus</i>	CA	2. 01	1. 46	1. 9
铜鱼 <i>Coreius heterodon</i>	CH	2. 39	2	3. 11
圆口铜鱼 <i>Coreius guichenoti</i>	CG	2. 21	1. 8	2. 84
蛇鮈 <i>Saurogobio dabryi</i>	SD	2. 46	2. 05	2. 52
银鮈 <i>Squalidus argentatus</i>	SAR	2. 59	2. 19	2. 53
瓦氏黄颡鱼 <i>Pelteobagrus vachelli</i>	PV	2. 54	1. 97	2. 65
泥鳅 <i>Oriental weatherfish</i>	OW	2. 9	1. 91	3. 37
青梢鲌 <i>Erythroculter dabryi</i>	ED	3. 45	3. 01	3. 75
翘嘴鲌 <i>Erythroculter ilishaeformis</i>	EI	3. 04	2. 79	3. 14
鲇 <i>Silurus asotus</i>	SAS	3. 63	3. 16	3. 11
鳊 <i>Siniperca chuatsi</i>	SC	3. 66	3. 14	3. 14

Hg、Cd 和 Pb 的浓度随着营养级的增加而升高,Hg、Cd 和 Pb 的生物放大因子(biomagnifications factor, BMF)值的范围分别为 0.046 ~ 0.066、0.08 ~ 0.09 和 0.04 ~ 0.14,其中 Hg 浓度的对数与 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间有显著性相关(图 3)。

3 讨论

3.1 蓄水对重金属生物富集的影响

从表 2 可以看出,Cd 的浓度在无脊椎动物组织中高于鱼类,而 Hg 和 Pb 的浓度则是鱼类较高,这与黄河流域中重金属浓度的研究结果相一致^[27],Farag 等^[28]的研究也表明无脊椎动物中 Hg 和 Cd 的浓度高于鱼类,这可能是底栖生活的鱼类的食物来源大多为富含重金属的无脊椎动物,重金属更易在体内产生蓄积^[29]。

大量研究比较了三峡库区蓄水前后的重金属特征.本研究与余杨等^[8]对三峡库区中上游鱼类重金属研究的结果相近,Hg 浓度稍高于蓄水前的水平^[30],但是显著低于蓄水之前的预测值^[5],当时预测库区中肉食性鱼类鲈和鳊体内的 Hg 浓度可能会超过水产品食用安全标准($500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)的情况并没有发生.一方面是由于三峡水库蓄水后,水域面积增大,水体滞留时间延长,从而显著地影响到水库中的甲基汞含量^[31].另一方面,徐小清等^[5]在预测三峡水库蓄水后的汞浓度时,主要考虑的是水文参数对汞浓度变化的影响,并基于此建立了汞浓度的回归方程,虽然水环境中重金属的迁移转化直接受到水环境因素变化的影响^[32],但是其他生物及生态因子同样会对汞的浓度产生影响.三峡水库蓄水后,极大地改变了水体及周边的生态环境,从而改变了水生生物的潜在食物来源,影响了鱼类的摄食习性,引起生态系统的失衡,因此 Hg 的浓度低于之前的预测值. Cd 和 Pb 浓度低于长江上游其他水库的相关报道^[33~35]。

三峡库区重金属浓度水平整体上偏低,表明蓄水对库区水环境的影响作用还不明显,这主要是库区蓄水时间较短,生态系统还不稳定,但是随着水库蓄水年限的增长,库区周边环境具有较高浓度的重金属背景值^[36,37],这将逐步释放到水体中并参与食物网的营养循环,同时随着经济的快速发展与人为活动的加剧,可以预见三峡库区重金属浓度有升高的趋势,需要引起有关职能部门的重视。

3.2 重金属的生物富集与生物因子之间的关系

关于鱼类的体长、体重与重金属浓度之间关系

的研究较多^[38,39],一些研究表明重金属浓度与年龄、体长、体重之间存在显著性相关^[40,41].随着年龄的增长,重金属会在生物体内产生富集(或稀释),但也有研究持不同的看法^[42,43],这可能与不同种类的鱼类体内重金属的代谢机制不同有关,因此不同的重金属在不同种类的鱼类中累积效应不同.此外,中国水库中的鱼类大多为快速生长的经济型鱼类^[44],在快速生长过程中存在对重金属的生长稀释作用^[45,46],因此体长、体重等生长指标与重金属浓度之间并非总具有一定的相关性。

不同食性鱼类重金属浓度的差异主要是由食物源引起的^[47].本研究中汞浓度与食性之间表现出极显著的相关性($P = 0.001$),高营养级生物体内的汞浓度较高.有研究表明鱼类的汞浓度随着营养级的升高而升高^[40,48],这与本研究的结果一致.食性是影响汞在水生生物体内富集的主要因素之一^[49,50],一般而言食物链中肉食性生物的营养级较高,体内也更容易蓄积高浓度的汞^[41,51].另一方面,汞浓度在水体中有明显的垂直分布特征,缺氧层($>4 \text{ m}$)的重金属浓度低于富氧层($0 \sim 4 \text{ m}$),所以生活在肉层的肉食性鱼类可以通过食物链富集更多的汞^[52].同时笔者发现,一些肉食性鱼类(如青梢鲌)的汞浓度并非总比杂食性(如鲤)鱼类高,这可能与其栖息水层等有关。

Hg、Cd 和 Pb 浓度与其栖息水层之间相关性不显著,总体而言,底栖生活的鱼类重金属浓度高于中上层鱼类,一方面是由于三峡水库蓄水后,水流减缓,大量的重金属滞留到水体底层,生活在底层的鱼类通过长期的体表重金属暴露引起体内重金属浓度的升高;另一方面,底栖生活的鱼类的食物来源大多为富含重金属浓度的无脊椎动物,通过食物链的传递,最终富集在生物体内^[29]。

3.3 三峡库区重金属的生物放大特征及其原因探讨

重金属主要通过食物暴露而进入生物体内,并在食物链之间传递,同种重金属在不同生物体内的浓度存在差异,而消费者体内的重金属是否随着其营养级的升高而产生生物富集或生物稀释也存在差异.生态系统的环境状况、动物体的摄食习性及重金属的同化迁移特性等都会对重金属的生物富集产生重要影响^[53,54].本研究发现 Hg 沿着食物链的生物放大现象最显著,Cd 和 Pb 存在生物放大现象,但是放大效应不显著,这与之前的研究结果一致^[55],可能与三峡库区部分生长较快的经济鱼类较强的 Cd 和 Pb 生物稀释作用有关^[56,57].而对于 Hg 而

言,生物稀释作用相对较弱,这主要是由于无机汞在微生物的作用下转变为不易降解的甲基汞^[4, 11]。

研究表明 Hg 在三峡库区食物链中具有明显的生物放大现象,放大系数为 0.046 ~ 0.09,低于美国及加拿大等地水库中的报道^[58, 59],表明三峡水库中 Hg 的生物放大效率较低,实际上中国大部分水生生态系统中 Hg 的生物放大率都不高^[7, 52],产生这种现象的主要原因是中国区域的土壤中有有机质含量较低。土壤中的有机质(主要是溶解性有机碳)通过其主要成分腐殖质对重金属的强烈吸附和络合作用与重金属相结合,使得重金属浓度随有机质浓度的增加而增大^[60],因此土壤中的有机质浓度在重金属的传递及生物活性方面发挥重要作用^[38]。

相比于南美洲及加拿大等地的水库,中国水库被淹没土壤中的有机碳含量较低,因此甲基汞活性较低^[44]。三峡库区中紫色土壤占到总面积的 80% 以上^[61],而紫色土壤中有有机质含量相当低^[62]。淹没区土壤中的有机质是新建水库中营养物质的主要来源^[63],低的有机碳含量不利于水体中的微生物将其其他形式的汞转化为易于生物体吸收的甲基汞。此外,中国水库中的鱼类大多为生长快速的经济型种类^[44],在快速生长过程中存在对重金属的生长稀释作用^[45, 46],因此生物放大率不高。

4 结论

(1)三峡库区最大水位蓄水初期(2011 ~ 2012 年),水生生物组织中 Hg、Cd、Pb 浓度的最大值均没有超过世界卫生组织和我国水产品食用的安全标准。通过蓄水前后的比较,Hg 浓度比蓄水前稍高,Cd 与 Pb 浓度则低于蓄水前的水平;与国外水库相比,三峡库区重金属的浓度整体上偏低。

(2)三峡库区鱼类对重金属污染具有生物稀释作用,其中只有鲤鱼的 Cd 浓度与其体长、体重有显著的相关性,翘嘴鲇和鲢中 Hg 的浓度与其相应体长、体重显著性相关。Hg、Cd 和 Pb 浓度与鱼类食性显著性相关,整体上表现为肉食性 > 杂食性 > 滤食性 > 草食性;3 种重金属的浓度与栖息水层之间无显著性相关,但存在底栖生活鱼类高于中上层鱼类的趋势。

(3)3 种重金属(Hg、Cd、Pb)中只有 Hg 浓度的对数与 $\delta^{15}\text{N}$ 值之间有显著性相关,但是其生物放大效率低于美国及加拿大等地水库的报道,这主要和三峡库区土壤中有有机质含量低有关。

参考文献:

- [1] 胡征宇,蔡庆华. 三峡水库蓄水前后水生生态系统动态的初步研究[J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 1-6.
- [2] Agah H, Leemakers M, Elskens M, *et al.* Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **157**(1-4): 499-514.
- [3] Soto D X, Roig R, Gacia E, *et al.* Differential accumulation of mercury and other trace metals in the food web components of a reservoir impacted by a chlor-alkali plant (Flix, Ebro River, Spain): implications for biomonitoring[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(6): 1481-1489.
- [4] Feng X B, Qiu G L. Mercury pollution in Guizhou, Southwestern China-An overview[J]. Science of the Total Environment, 2008, **400**(1-3): 227-237.
- [5] 徐小清,张晓华,靳立军,等. 三峡水库汞活化效应对鱼汞含量影响的预测[J]. 长江流域资源与环境, 1999, **8**(2): 198-204.
- [6] 靳立军,徐小清. 三峡库区地表水和鱼体中甲基汞含量的分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 1997, (4): 324-328.
- [7] Zhang L, Zang X, Xu J, *et al.* Mercury bioaccumulation in fishes of Three Gorges Reservoir after impoundment[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **78**(3-4): 262-264.
- [8] 余杨,王雨春,周怀东,等. 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(13): 4059-4067.
- [9] 冉祥滨,于志刚,陈洪涛,等. 三峡水库蓄水至 135 m 后坝前及香溪河水域溶解无机汞分布特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1775-1779.
- [10] 赵军,于志刚,陈洪涛,等. 三峡水库 156 m 蓄水后典型库湾溶解态重金属分布特征研究[J]. 水生态学杂志, 2009, **2**(2): 9-14.
- [11] 王文义. 三峡库区蓄水前重庆段鱼类中重金属含量水平调查[J]. 水资源保护, 2008, **24**(5): 34-37.
- [12] 徐小清,丘昌强,邓冠强,等. 水库鱼体汞积累的预测[J]. 水生生物学报, 1998, **22**(3): 244-250.
- [13] 雷丹,王亮. 三峡库区重庆段土壤重金属污染富集的矿物学分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, **32**(1): 68-74.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Tian X S, Zhu C, Sun Z B, *et al.* An evaluation of heavy metal pollution within historic cultural strata at a specialized salt production site at Zhongba in the Three Gorges Reservoir region of the Yangtze River, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **69**(7): 2129-2138.
- [17] 王健康,高博,周怀东,等. 三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1693-1699.

- [18] 周谐, 郑坚, 张晟, 等. 三峡库区重庆段淹没区土壤重金属分布及评价[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(6): 86-88.
- [19] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 等. 三峡库区消落区水体-沉积物重金属迁移转化特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3481-3487.
- [20] 余杨, 王雨春, 高博, 等. 三峡水库 175 m 蓄水运行后鱼类汞污染风险研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(5): 547-551.
- [21] Hobson K A, Schell D M, Renouf D, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotope fractionation between diet and tissues of captive seals: implications for dietary reconstructions involving marine mammals [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science, 1996, **53**(3): 528-533.
- [22] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods and assumptions[J]. Ecology, 2002, **83**(3): 703-718.
- [23] Minagawa M, Wada E. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1984, **48**(5): 1135-1140.
- [24] 孟伟. 流域水污染物总量控制技术与示范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 40-46.
- [25] Jardine T D, Kidd K A, Fisk A T. Applications, considerations, and sources of uncertainty when using stable isotope analysis in ecotoxicology [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(24): 7501-7511.
- [26] Mendil D, Uluözlü Ö D, Hasdemir E, *et al.* Determination of trace metal levels in seven fish species in lakes in Tokat, Turkey [J]. Food Chemistry, 2005, **90**(1-2): 175-179.
- [27] Cui B S, Zhang Q J, Zhang K J, *et al.* Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(5): 1297-1306.
- [28] Farag A M, Nimick D A, Kimball B A, *et al.* Concentrations of metals in water, sediment, biofilm, benthic macroinvertebrates, and fish in the Boulder river watershed, Montana, and the role of colloids in metal uptake [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, **52**(3): 397-409.
- [29] Willis J N, Sunda W G. Relative contributions of food and water in the accumulation of zinc by 2 species of marine fish [J]. Marine Biology, 1984, **80**(3): 273-279.
- [30] 祁俊生, 傅川, 黄秀山, 等. 微量元素在三峡库区水域生态系统中的迁移[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, **25**(1): 17-20.
- [31] Montgomery S, Mucci A, Lucotte M. The application of *in situ* dialysis samplers for close interval investigations of total dissolved mercury in interstitial waters [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1996, **87**(1-4): 219-229.
- [32] Kelderman P, Osman A A. Effect of redox potential on heavy metal binding forms in polluted canal sediments in Delft (The Netherlands) [J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4251-4261.
- [33] 蔡深文, 倪朝辉, 李云峰, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区鱼体肌肉重金属残留调查与分析[J]. 中国水产科学, 2011, **18**(6): 1351-1357.
- [34] Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2575-2585.
- [35] Mishra S, Bhalke S, Saradhi I V, *et al.* Trace metals and organometals in selected marine species and preliminary risk assessment to human beings in Thane Creek area, Mumbai [J]. Chemosphere, 2007, **69**(6): 972-978.
- [36] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997. 56-61.
- [37] Huang S S, Liao Q L, Hua M, *et al.* Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China [J]. Chemosphere, 2007, **67**(11): 2148-2155.
- [38] Driscoll C T, Yan C, Schofield C L, *et al.* The mercury cycle and fish in the Adirondack lakes [J]. Environmental Science & Technology, 1994, **28**(3): 136-143.
- [39] Rask M, Jones R I, Järvinen M, *et al.* Changes in fish mercury concentrations over 20 years in an acidified lake subject to experimental liming [J]. Applied Geochemistry, 2007, **22**(6): 1229-1240.
- [40] Kinghorn A, Solomon P, Chan H M. Temporal and spatial trends of mercury in fish collected in the English-Wabigoon river system in Ontario, Canada [J]. Science of the Total Environment, 2007, **372**(2-3): 615-623.
- [41] Farias R A, Hacon S, Campos R C, *et al.* Mercury contamination in farmed fish setup on former garimpo mining areas in the Northern Mato Grosso State, Amazonian region, Brazil [J]. Science of the Total Environment, 2005, **348**(1-3): 128-134.
- [42] 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.
- [43] Schwindt A R, Fournie J W, Landers D H, *et al.* Mercury concentrations in salmonids from western US national parks and relationships with age and macrophage aggregates [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(4): 1365-1370.
- [44] Larssen T. Mercury in Chinese reservoirs [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(1): 24-25.
- [45] Simoneau M, Lucotte M, Garceau S, *et al.* Fish growth rates modulate mercury concentrations in walleye (*Sander vitreus*) from eastern Canadian lakes [J]. Environmental Research, 2005, **98**(1): 73-82.
- [46] Dittman J A, Driscoll C T. Factors influencing changes in mercury concentrations in lake water and yellow perch (*Perca flavescens*) in Adirondack lakes [J]. Biogeochemistry, 2009, **93**

- (3): 179-196.
- [47] Power M, Power G, Caron F, *et al.* Growth and dietary niche in *Salvelinus alpinus* and *Salvelinus fontinalis* as revealed by stable isotope analysis[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2002, **64** (1-3): 75-85.
- [48] Jeune A H L, Bourdiol F, Aldamman L, *et al.* Factors affecting methylmercury biomagnification by a widespread aquatic invertebrate predator, the phantom midge larvae chaoborus[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **165**: 100-108.
- [49] 路永正, 阎百兴, 李宏伟, 等. 松花江鱼类中汞含量的演变趋势及其生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27** (6): 2430-2433.
- [50] 张仲胜, 王起超, 郑冬梅, 等. 葫芦岛地区汞在土壤-植物-昆虫系统中的生物地球化学迁移[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2118-2124.
- [51] Marrugo-Negrete J, Verbel J O, Ceballos E L, *et al.* Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia [J]. *Environment Geochemistry Health*, 2008, **30**(1): 21-30
- [52] Liu B, Yan H Y, Wang C P, *et al.* Insights into low fish mercury bioaccumulation in a mercury contaminated reservoir, Guizhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **160**(1): 109-117.
- [53] Meador J P, Ernest D W, Kagley A N. A comparison of the non-essential elements cadmium, mercury, and lead found in fish and sediment from Alaska and California[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **339**(1-3): 189-205.
- [54] Blum J D, Popp B N, Drzen J C, *et al.* Methylmercury production below the mixed layer in the North Pacific Ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(10): 879-884
- [55] Dietz R, Riget F, Cleemann M, *et al.* Comparison of contaminants from different trophic levels and ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **245**(1-3): 221-231.
- [56] Dehn L A, Follmann E H, Thomas D L, *et al.* Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **362** (1-3): 103-123.
- [57] Nfon E, Cousins I T, Jarvinen O, *et al.* Trophodynamics of mercury and other trace elements in a pelagic food chain from the Baltic Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407** (24): 6267-6274.
- [58] Lavoie R A, Hebert C E, Rail J F, *et al.* Trophic structure and mercury distribution in a Gulf of St. Lawrence (Canada) food web using stable isotope analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(22): 5529-5539.
- [59] Zhang L, Campbell L M, Johnson T B. Seasonal variation in mercury and food web biomagnification in Lake Ontario, Canada [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **161**: 178-184.
- [60] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1266-1273.
- [61] 袁仁茂, 杨晓燕, 李树德. 论城市水土流失及其类型系统[J]. *北京大学学报*, 2001, **37**(3): 400-406.
- [62] 杜佐华. 三峡库区的水土保持与生态环境[J]. *中国水土保持*, 1999, (5): 7-9.
- [63] Cox J A, Carnahan J, DiNunzio J, *et al.* Source of mercury in fish in new impoundments [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1979, **23**(1): 779-783.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行