

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析

王俊能^{1,2,3}, 赵学敏¹, 胡国成¹, 钟松雄^{2,3}, 姚玲爱¹, 马千里¹, 许振成^{1*}

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 突发镉污染事件能引起江河水体恶化, 破坏水生态环境和威胁人类健康. 本研究为证实突发镉污染事件引起生态环境风险, 以不同类型鱼类以及鱼类不同组织器官为研究对象, 分别前后6次对龙江进行采样调查, 并对各鱼类根据水层和食性进行分类及分析. 调查结果表明, 前3次调查鱼类肌肉镉含量显著高于后3次调查鱼类肌肉镉含量; 草食性, 肉食性和杂食性鱼类不同组织器官镉的含量大小均可排序为: 肾 > 肝 > 肠 > 鳃 > 卵 > 鳞 ≈ 肌肉, 且3种类型肾的镉含量均显著高于其他任何组织器官 ($P < 0.05$); 鱼类同一组织器官镉的含量根据不同水层鱼类依次为: 底层鱼类 > 中下层鱼类 > 中上层鱼类. 不同食性鱼类肌肉中镉平均富集系数 BAF 从大到小依次为杂食性, 肉食性和草食性, 分别为 8.32、6.33 和 5.15; 不同生活水层鱼类肌肉中镉平均富集系数大小排序为: 底层鱼类 (8.18) > 中下层鱼类 (7.70) > 中上层鱼类 (4.99).

关键词: 镉; 龙江; 鱼类; 组织器官; 富集系数

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0488-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805013

Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region

WANG Jun-neng^{1,2,3}, ZHAO Xue-min¹, HU Guo-cheng¹, ZHONG Song-xiong^{2,3}, YAO Ling-ai¹, MA Qian-li¹, XU Zhen-cheng^{1*}

(1. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Emergent cadmium pollution can cause water quality deterioration in rivers, which destroys the aquatic eco-environment and poses threats to human health. Fish species in these aquatic systems are prone to such pollution incidents and act as important indicators of the pollution level. Because cadmium enters the systematic circulation of fish and is non-biodegradable, the investigation of cadmium accumulation in fish bodies provides insights into the detrimental effects of cadmium pollution on the aquatic biological system. This research aims to validate the eco-environmental risks associated with emergent cadmium pollution incidents based on the investigation of the different tissues and organs of diverse fish species. The investigation was conducted six times along the Longjiang River using sampling methods during which all fish species were also classified and analyzed based on the water layer they reside in and their feeding habits. The results show that the cadmium concentration in the fish tissues is significantly higher in the former three investigations compared with that of the latter three analyses. For herbivorous, carnivorous, and omnivorous fish species, the cadmium concentration of their different tissues and organs follows the order: kidney > liver > gut > gill > egg > scale ≈ muscle. The cadmium concentration in the kidney is significantly higher ($P < 0.05$) than that in any other organs of the fish species. This agrees with the fact that the kidney intensively metabolizes and accumulates heavy metals. The cadmium concentration in the same tissues or organs of the fish species living in different water layers follows the trend: demersal fish species > middle lower-layer species > middle upper-layer species. The sequence of the cadmium bioaccumulation factors in the muscles of different fish species is omnivore > carnivorous > herbivorous, that is, 8.32, 6.33, and 5.15, respectively, while the bioaccumulation factors in the muscles of the fish species in different water layers decrease in the following sequence: demersal fish species (8.18) > middle bottom-layer fish species (7.70) > middle upper-layer fish species (4.99). These experimental results indicate the biomagnification effects in heavy metal-polluted aquatic environments, where the bioaccumulation of heavy metals by fish is related to both the overall pollution level and local residential environment.

Key words: cadmium; Longjiang River; fish species; tissues and organs; bioaccumulation factor

突发水污染是最常见、剧烈的“瞬态污染”, 且污染物的排放通常没有固定的方式及途径. 突发水污染危害水生态环境, 导致生态失衡, 且严重影响水资源的有效利用, 从而威胁人类健康及生命财产安全^[1, 2]. 2012年1月13日龙江河发生突发性镉污染事件, 约21 t的镉被排放至龙江河中, 龙江拉浪电站坝首前200 m处镉浓度高达405 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 超

过《地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准 (5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 约80倍. 重金属镉具有长期性、累积性、

收稿日期: 2018-05-02; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201309049); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (PM-zx703-201803-055)

作者简介: 王俊能 (1984~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境风险管理, E-mail: wangjunneng@scies.org

* 通信作者, E-mail: xuzhencheng@scies.org

高毒性、隐蔽性、潜伏性和不可逆性等特点, 由于重金属污染物在环境中难以降解, 故可随着食物链发生迁移和累积^[3]并富集到更高营养级的生物体内, 出现生物放大的现象^[4, 5]. 鱼类能长期从水体和沉积物中积累富集镉^[6, 7], 从而对镉在生物圈中的生物地球化学循环产生影响. 以往研究表明, 鱼类重金属富集程度与水体中不同区域污染的严重程度息息相关, 且不同重金属在鱼类的不同器官中具有不同的富集特征. Wei 等^[8]和 Yi 等^[9]分别研究鄱阳湖和长江中水生生物对镉等重金属的富集, 发现生活于水体底部沉积物附近的鱼各组织部位中相比于水体上部的鱼积累更多的镉等重金属, 且进一步研究表明鱼类肝脏、肾脏对镉等重金属或具有更强的富集作用^[10-12]. 鱼类是人们食用的最主要的水产品之一, 富含对人体健康有益的高蛋白、低饱和脂肪酸和奥米伽脂肪酸, 是人体蛋白质的重要来源^[13]. 镉沿着食物链的生物累积作用会引发人体健康风险, 因而摄入重金属污染鱼类的量超过允许/每日推荐摄入量时, 存在一定的人体健康风险^[14, 15]. FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会 (JECFA) 制定人体对镉的周允许摄入量限值 (PTWI) 为 $7 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]. 有研究进一步表明, 重金属镉造成组织损伤^[17]和扰乱生物体内的各种生理过程主要和镉对在多数酶的功能和结构中扮演重要角色的巯基有很强的亲合力有关^[18].

突发性重金属污染发生后, 鱼类通过呼吸、摄食等途径从污染水体蓄积重金属, 因此有必要研究突发性镉污染事件后食物链最顶层消费者的人类食用鱼类的镉累积特性. 为此, 本文将以广西龙江水系鱼类为研究对象, 分析鱼类重金属镉含量分布特征, 探讨镉在不同鱼类体内的积累特征, 以期为保障突发性重金属污染事件发生后人们食用鱼类的安全提供科学依据, 降低因大量食用鱼类引起的重金属健康危害.

1 材料与方法

1.1 鱼类样品采集与处理

于 2012 年 2 月至 2013 年 12 月进行 6 次鱼类资源调查, 即于 2012 年的 2、3、7、12 月, 2013 年 8 月和 12 月对龙江鱼类进行采样, 6 次调查中采集 73 种鱼类共 699 个样品, 具体的采样点见图 1, 其水体化学组成和鱼类及样品数分别见表 1 和表 2. 本研究中采用的不同组织器官为: 肌肉、鳃、肝、肾、肠、鳞、卵, 选择 55 个鱼类样品作为分析研究对象.

1.2 鱼类样品分析

在室内对采集的样本: 鱼类的肌肉、不同脏器等组织进行切片分析与重金属分析. 准确称取鱼类样品 1.000 0 g 到聚四氟乙烯试管中, 加入 20 mL HNO_3 加盖放置过夜后, 将聚四氟乙烯试管放入石



图 1 龙江采样布点示意

Fig. 1 Sampling plan of Longjiang River

表 1 龙江水化学组成

项目	4 月	10 月
T/°C	23.60 ~ 26.90	22.30 ~ 26.10
pH	7.71 ~ 8.59	7.68 ~ 8.12
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	270.0 ~ 490.02	168.50 ~ 371.00
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.51 ~ 16.16	7.50 ~ 10.10
DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.63 ~ 5.82	0.90 ~ 1.39
$\text{Cl}^-/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.01 ~ 0.20	0.05 ~ 0.09
$\text{K}^+/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.03 ~ 0.04	0.02 ~ 0.03
$\text{Na}^+/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	0.05 ~ 0.18	0.06 ~ 0.15

表 2 龙江鱼类和样品数

Table 2 Fish species of Longjiang and number of fish samples

鱼名	样品个数	鱼名	样品个数	鱼名	样品个数
河虾	1	银鲷	4	草鱼	30
鳊鱼	1	白鱼仔	2	埃及革胡子鲶	4
美丽沙鳅	3	大眼华鳊	21	蛇鲷	1
大斑薄鳅	4	粗唇鳊	42	斑鳊	23
瓦氏黄颡鱼	2	黄颡鱼	45	黄尾鲮	1
壮体沙鳅	4	大眼卷口鱼	4	赤眼鳟	12
光唇鱼	1	乌原鲤	2	须鲫	4
里鳍鳊	1	三角鲤	3	罗非鱼	49
南方大口鲶	1	海南华鳊	10	鲇	2
翘嘴红鲌	5	东方墨头鱼	4	斑鳢	2
弓斑东方鲀	1	大口鲶	2	南方拟餐	12
泥鳅	13	鲫鱼	48	北江光唇鱼	20
银鲮	2	伍氏半餐	7	青鱼	3
子陵吻鰕虎鱼	4	长鳍光唇鱼	2	鲮鱼	1
三角鲂	1	马口鱼	9	暗色唇鲮	1
月鳢	1	沙塘鳢	2	棒花鱼	1
美丽小条鳅	2	斑鳢	29	唇鱼骨	1
卷口鱼	52	鲶	8	大眼红鲌	4
鳙	2	拟细鲫	1	荷包红鲤	1
江黄颡鱼	1	四须盘鲷	13	光倒刺鲃	2
海南似鳊	3	鲤鱼	46	白甲鱼	3
禾花鲤	2	倒刺鲃	17	南方白甲鱼	1
宽鳍鱮	1	大眼鳊	31	窄条光唇鱼	2
大鳍鱮	4	鰕虎鱼	1		
大刺鲃	26	餐鱼	28		

1.3 生物富集系数

生物富集系数(BAF)是生物体内重金属镉的含量(C_f , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)与其所生存的水体环境中镉含量(C_w , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的比值,其计算公式如下:

$$\text{BAF} = C_f/C_w$$

1.4 数据分析

本实验过程中,设置系统空白,按照 10% 的原则进行平行样品测试,利用加标回收方法进行质量控制,每隔 10 个样品设置 2 个有证标准物质(GBW-10020)进行质量控制,其中加标回收率范围为 89.12% ~ 109.10%,符合重金属分析质量控制的相关要求.本研究采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行单因素方差分析处理数据,当 $P < 0.05$ 时,为

显著,否则为不显著.数据绘图主要采用 Origin 8.1.

显著,否则为不显著.数据绘图主要采用 Origin 8.1.

显著,否则为不显著.数据绘图主要采用 Origin 8.1.

显著,否则为不显著.数据绘图主要采用 Origin 8.1.

2 结果与分析

2.1 不同河段鱼类镉含量分布

由图 2 可知,不同河段前 3 次调查中鱼类肌肉镉含量显著高于后 3 次调查中鱼类肌肉镉含量($P < 0.05$),且后 3 次调查中鱼类肌肉镉含量均已降至国家食品安全标准《食品中污染物限量》(GB 2762-2012)鱼类镉的限制值($0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)以下.2012 年 2 月至 2013 年 12 月的 6 次调查中不同河段鱼类肌肉镉含量的分布特征可能与龙江水体及沉积物镉含量有关.前 3 次调查结果和总体情况显示,

重污染河段(S3~S7)镉含量均最高,其次依次为中低污染河段(S8~S12)、受影响河段(S13~S17)、可能受影响河段(S18~S20)和背景河段(S1与S2).

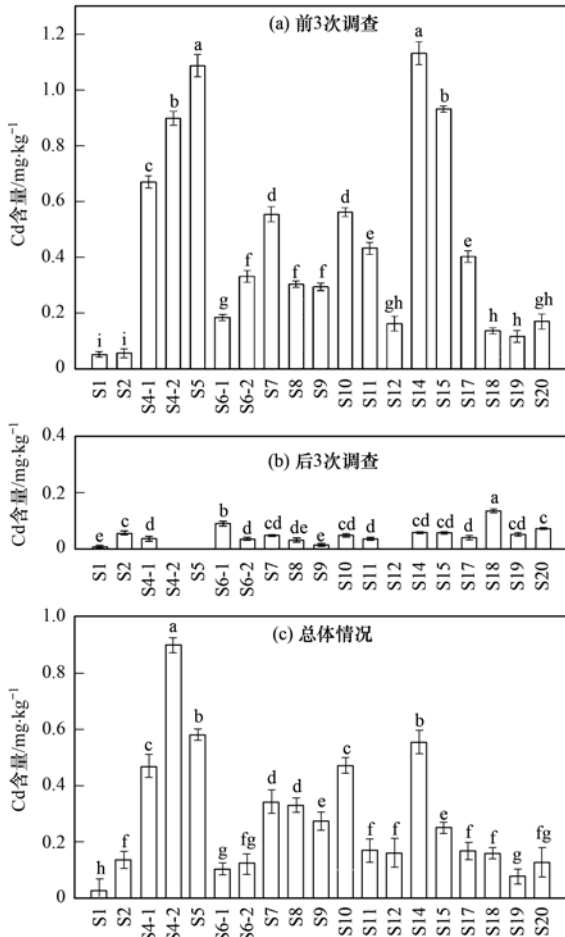


图2 不同河段鱼类镉含量分布

Fig. 2 Distribution of Cd in fish from different sections

2.2 不同食性鱼类不同组织器官镉含量分布

由图3可知,草食性鱼类不同组织镉的含量大小依次为肾>肝>肠>鳃>卵>鳞>肌肉,这与Qiu等^[19]和刘芳芳等^[20]的研究结果一致,且肾的镉含量高达12.04 mg·kg⁻¹,显著高于任何其他组织(P<0.05),为肌肉含量的103.33倍;肝脏、肠、鳃的镉含量,分别为4.15、2.20和0.92 mg·kg⁻¹,且依次是肌肉含量的35.62、18.89和7.85倍,其中镉含量最低的肌肉为0.12 mg·kg⁻¹.对杂食性鱼类不同组织器官进行研究得出了相似的结果,且相比于草食性鱼类同个组织器官,杂食性鱼类的组织器官具有更高的镉含量,尤其是肾,肠和鳃.

肉食性鱼类不同组织镉的含量从大到小依次为:肾>肝>肠>鳃>卵>肌肉,肾的镉含量最高,且显著高于其他组织镉含量(P<0.05),是肌肉镉含量的30.10倍;肾、肝、肠、鳃和卵镉含量均较

大,且其含量大小与草食性和杂食性鱼类肾、肝、肠、鳃和卵镉含量相一致.肝脏(5.30 mg·kg⁻¹)、肠的镉含量(3.30 mg·kg⁻¹)和鳃的镉含量(2.80 mg·kg⁻¹)分别为肌肉镉含量的11.69、7.28和6.18倍;其中镉含量最低的是肌肉,为0.45 mg·kg⁻¹.各鱼类组织器官镉含量差异性,可能与不同鱼种的自身代谢能力和不同组织或器官对重金属的亲合性等有关^[21, 22].

总体上,不同食性鱼类镉的含量大小排序为:杂食性>肉食性>草食性,这也表现出生物累积放大的现象.

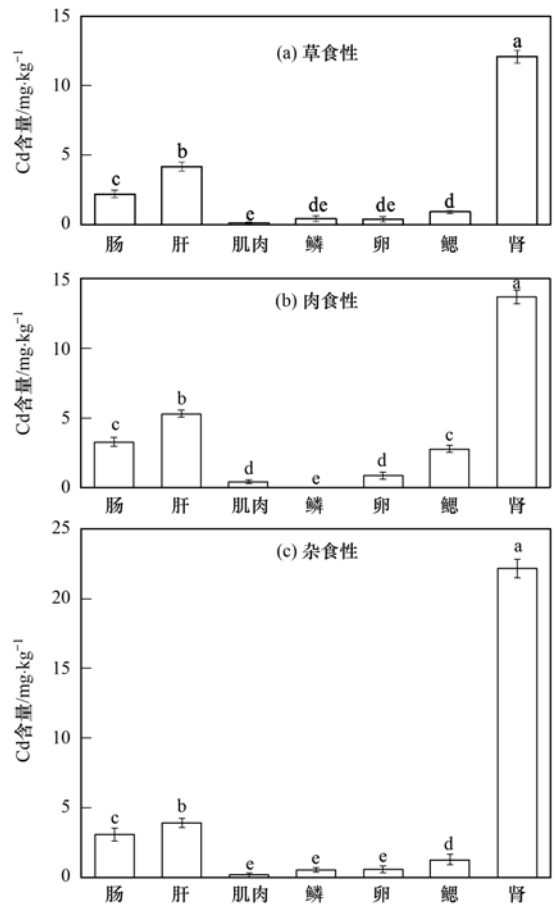


图3 不同食性鱼类不同组织器官镉含量分布

Fig. 3 Distribution of Cd in different tissues of fish with different feeding habits

2.3 不同生活水层鱼类不同组织器官镉含量分布

由图4可知,中上层鱼类不同组织镉的含量大小排列为:鳃>肾>肌肉,其中鳃和肾中镉的含量分别为4.67 mg·kg⁻¹和4.50 mg·kg⁻¹,均显著高于肌肉组织(P<0.05);相反肌肉镉含量最低,为0.56 mg·kg⁻¹.中下层鱼类不同组织镉的含量大小依次为:肾>肝>肠>鳃>卵>鳞>肌肉,中下层鱼类肾的镉含量均显著高于其他组织(P<0.05).其中肾的镉含量最高,相反肌肉具有最低的镉含量,而肝脏,肠和鳃的镉含量分别是2.55、2.52和

1.22 mg·kg⁻¹. 底层鱼类不同组织镉的含量则与中下层的鱼类各组织镉的含量呈一致性,这可能与中下层和底层鱼类更接近河底沉积物以及它们相似的生理代谢功能有关.其中底层鱼类肾、肠、肝脏镉含量分别为 20.24、7.70 和 3.90 mg·kg⁻¹,底层鱼类肠和肝组织镉的含量均高于中上层和中下层鱼类的.总体上,鱼类同一组织器官镉的含量根据不同水层鱼类依次为:底层鱼类 > 中下层鱼类 > 中上层鱼类,而在 3 个水层中鱼体的肾、肝脏、肠、鳃等器官组织均表现出更高的蓄积镉的能力,相反鱼的肌肉的镉累积能力均最弱.

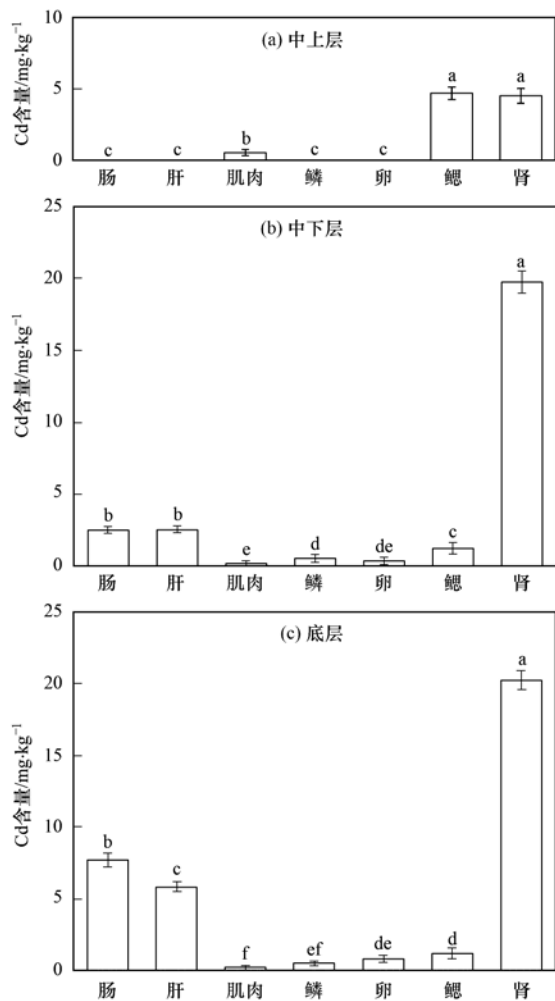


图 4 不同生活水层鱼类不同组织器官镉含量分布

Fig. 4 Distribution of Cd in different tissues of fish with different living water layers

2.4 不同时间段鱼类肌肉镉含量分布

由图 5(b) 和 5(d) 可知,不同食性鱼类肌肉镉的含量大小排序为:杂食性 > 肉食性 > 草食性.杂食性鱼类、肉食性鱼类和草食性鱼类肌肉镉含量 (mg·kg⁻¹) 的平均值分别为 0.2935 (0.0015 ~ 9.5)、0.2233 (0.00005 ~ 3.6) 和 0.1819 (0.00005 ~ 1.1). 这表明营养级不同重金属的蓄积能力不同,鱼类对重金属的蓄积能力随营养级提高而提

高. 据图 5(c) 和 5(e) 可知,不同生活水层鱼类肌肉镉的含量大小排序为:底层鱼类 (均值:0.2887 mg·kg⁻¹, 范围:0.0015 ~ 9.5 mg·kg⁻¹) > 中下层鱼类 (均值:0.2716 mg·kg⁻¹, 范围:0.00005 ~ 3.6 mg·kg⁻¹) > 中上层鱼类 (均值:0.1761 mg·kg⁻¹, 范围:0.00005 ~ 1.3 mg·kg⁻¹). 这与不同深度的鱼类所处的水环境有关,其中底层鱼类更易接触含镉沉积物,因而肌肉平均镉含量高于中下层鱼类和中上层鱼类.

由图 5(a) 可知,污染事件发生后到 2012 年 7 月这段时期,鱼类肌肉中镉含量比较高.2012 年 2 月、2012 年 3 月和 2012 年 7 月采集到的鱼类肌肉中镉平均含量分别为 0.4272、0.4950 和 0.4787 mg·kg⁻¹,前 3 次鱼类肌肉中镉含量均显著高于后 3 次的调查结果 ($P < 0.05$). 这表明广西龙江镉污染对鱼类镉含量的累积有显著影响,但并未随着时间延长出现持续累积放大现象.草食性、肉食性、杂食性鱼类肌肉在前 3 次调查中镉平均含量分别为 0.2895、0.2610 和 0.5238 mg·kg⁻¹,均显著高于后 3 次的调查结果 ($P < 0.05$). 杂食性鱼类受广西龙江镉污染事件影响较大,草食性次之,肉食性相对较小.这表明镉在食物链各级均有积累,营养级不同重金属的蓄积能力不同,但鱼类肌肉对镉的蓄积水平并没有随食物链等级的增加而放大.

2.5 鱼类镉富集特征

由图 6 可知,不同食性鱼类肌肉中镉平均富集系数 BAF 从大到小依次为杂食性、肉食性和草食性,分别为 5.15、6.33 和 8.32,且杂食性鱼类肌肉对镉的富集系数显著高于肉食性和草食性 ($P < 0.05$). 这说明杂食性鱼类受广西龙江镉污染事件影响较大,肉食性鱼类次之,草食性鱼类最小.不同生活水层鱼类肌肉中镉平均富集系数大小排序为:底层鱼类 (8.18) > 中下层鱼类 (7.70) > 中上层鱼类 (4.99). 其中,底层和中下层鱼类肌肉对镉的富集系数均显著高于中上层鱼类的 ($P < 0.05$). 这表明受广西龙江镉污染事件影响最大的为底层鱼类,其次为中下层鱼类,最小的为中上层鱼类,相应地肉食性和杂食性鱼类重金属含量均较高,而草食性鱼类重金属含量水平较低.这可能与食物链中处于高营养级的生物富集能力要强于低营养级的生物,而肉食性和杂食性鱼类在食物链中处于较高的营养级有关. Ahmad 等^[15]、Chi 等^[23] 和盛蒂等^[24] 进一步证实了其它肉食性和杂食性鱼类肌肉对重金属的富集水平要高于草食性鱼类. 同样,这与不同食性鱼类所处的环境密切相关,草食性鱼类多在水体中上层活动,而肉食性鱼类和杂食性鱼类多栖息

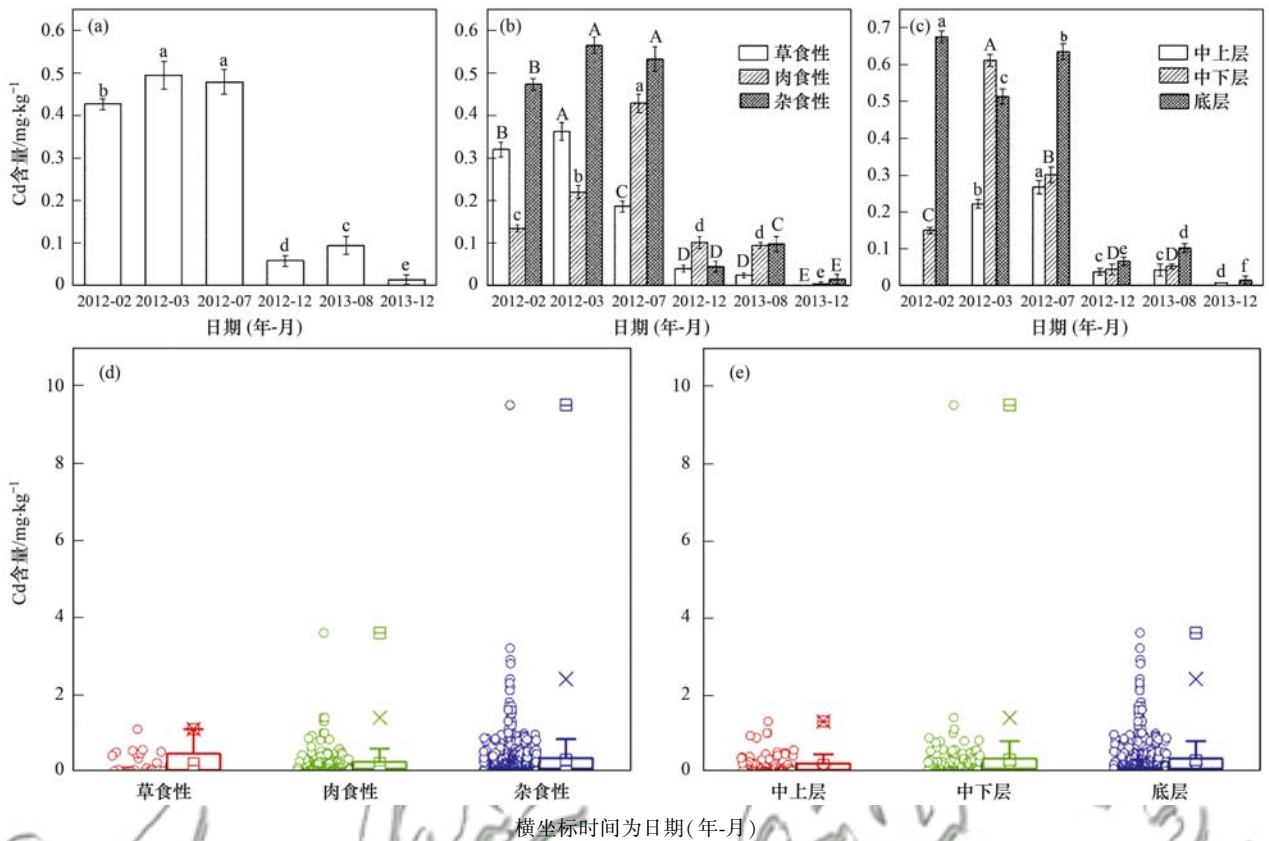


图 5 不同时期鱼类镉含量分布, 不同时期不同食性鱼类镉含量分布和不同时期不同水层鱼类镉含量分布
 Fig. 5 Cadmium concentration of the fish species, different tissues of fish with different feeding habits, and different tissues of fish with different living water layers in different stages

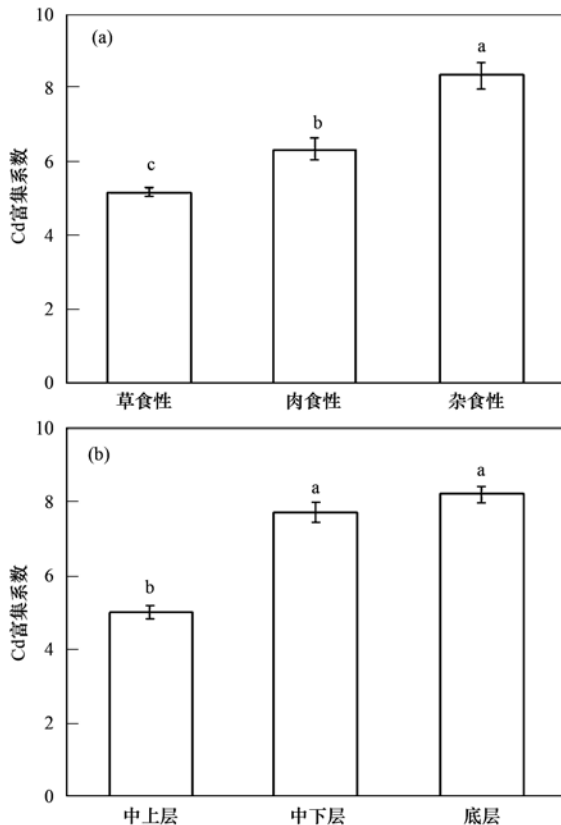


图 6 鱼类镉的富集系数

Fig. 6 Bioaccumulation factors of Cd in fish

于水体中下层, 大量的重金属可能通过迁移转换储藏在沉于水体沉积物中, 而肉食性和杂食性鱼类摄食过程中可能吞食大量被含重金属镉的沉积物, 从而导致肉食性和杂食性鱼类体内对重金属镉的富集程度较高^[4, 25, 26]. 而本研究结果显示杂食性鱼类对镉的富集系数高于肉食性的, 这与突发镉污染事件后, 施加 PAC 絮凝剂促使水体镉定向地转化为沉积物镉, 使镉污染风险发生转移有关.

3 讨论

龙江广西境内淡水鱼类 290 种, 隶属于 144 属 37 科 15 目, 其中柳江鱼类 170 种, 隶属 93 属 23 科 11 目^[27]. 这些鱼类中, 骨鲮类 (*Ostariophsi*) 计 136 种, 占全部的 84%, 构成了柳江鱼类的主体. 龙江沿河两岸的厂矿企业生产废水和居民生活污水大部分未经处理便直接排入河中, 导致龙江水体受到较大污染, 鱼类等生物资源逐年变少^[28], 流域上中下游用水矛盾日益突出, 生态环境脆弱. 2012 年突发事件发生后导致大量的镉排入龙江后, 大面积的水体污染出现, 造成严重的生态破坏, 其中对鱼类的影响是最为严重的. 前 3 次调查中鱼类各组织器官比后 3 次中具有更高的镉含量, 这表明龙江突发镉污染事件对龙江鱼类的影响持续了一段时间. 同

样, 龙江中各河段镉含量大小依次为: 重污染河段 (S3 ~ S7) \gg 中低污染河段 (S8 ~ S12) > 受影响河段 (S13 ~ S17) > 可能受影响河段 (S18 ~ S20) > 背景河段 (S1 与 S2). 这结果进一步表明, 不同河段对鱼类的富集累积效果不同, 主要与不同河段污染程度不同有关.

上述结果表明, 草食性、肉食性和杂食性鱼类不同组织器官镉的含量大小依次为肾 > 肝 > 肠 > 鳃 > 卵 > 鳞 \approx 肌肉. 同样地, 有其他研究同样表明污染水体中鱼类的肾、肝对镉的累积量高于其他器官, 这可能与不同组织或器官对重金属的亲亲和性和鱼内组织或器官代谢能力不同等有关. Atobatele 等^[29] 研究尼日利亚艾坝水库中的鱼类的器官对镉、汞、铅的累积也发现了相似的现象, 镉在各器官中的含量大小依次为肾 > 肝 > 鳃 \geq 肠 \geq 肌肉. 鱼类肌肉部分是人类可食部分, 对人类健康极其重要, 草食性、肉食性和杂食性鱼类肌肉镉含量分别为 0.181 9、0.223 3 和 0.293 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 不同食性的鱼类肌肉对镉的累积能力不一, 这与 3 种类型的鱼类所处的营养级不同有关. 本研究结果表明, 根据不同水层鱼类划分, 不同组织器官对镉的吸收累积效果从大到小依次为: 底层鱼类 > 中下层鱼类 > 中上层鱼类. 镉污染突发事件发生后, 添加聚合氯化铝 (PAC) 等以及河底沉积物对镉的吸收和共沉淀导致沉积物截留更多的重金属镉. 而在本研究中, 底层和中下层鱼类更易生活接触河底沉积物, 因而底层和中下层鱼类相比中上层具有更高的镉含量. 其中 3 种类型鱼类肌肉镉含量同样呈一致性, 即底层鱼类 (均值: 0.288 7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 中下层鱼类 (均值: 0.271 6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 中上层鱼类 (均值: 0.176 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 此外, 污染事件发生后到 2012 年 7 月这段时期鱼类肌肉中镉含量均显著比 2012 年 12 月、2013 年 8 月和 2013 年 12 月所采集到的鱼类肌肉中镉平均含量高, 这表明突发镉污染事件后鱼类肌肉富集累积镉, 对人类健康造成潜在的威胁.

本研究同样表明不同食性鱼类肌肉中镉平均富集系数 BAF 从大到小依次为杂食性, 肉食性和草食性. 鱼类肌肉对重金属的累积与具体的鱼种有关^[11], 但总体而言, BAF 的大小顺序与重金属沿食物链传递放大相一致. 鱼类生活在水域环境中的重金属污染状况直接影响着鱼体重金属的含量水平以及河底沉积物同样影响着栖息于底层甚至中下层鱼类^[30]. 此外, 不同鱼类对镉的吸收累积能力不同, 与不同组织器官对重金属镉的亲亲和力和代谢能力不同相关. 这也是导致不同组织器官尤其是鱼类肌肉对镉的富集累积具有显著性差异的原因.

4 结论

(1) 草食性、杂食性和肉食性鱼类不同组织镉的含量水平高低顺序均基本呈现一致性, 依次为: 肾 > 肝 > 肠 > 鳃 > 卵 > 鳞 > 肌肉, 其中肾组织镉的含量显著高于其他组织 ($P < 0.05$); 不同食性鱼类组织器官镉的含量大小排序为: 杂食性 > 肉食性 > 草食性. 镉在食物链各营养级均有积累, 营养级不同重金属的蓄积能力不同.

(2) 污染事件发生后的 2012 年 2 月至 2012 年 7 月之间 3 次调查中鱼类肌肉中镉平均含量 (0.467 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著高于 2012 年 12 月、2013 年 8 月以及 2013 年 12 月的后 3 次调查的结果, 表明广西龙江镉污染事件对鱼类镉含量的累积有显著影响; 不同生活水层鱼类在不同组织器官镉的含量大小依次为: 底层鱼类 > 中下层鱼类 > 中上层鱼类. 受广西龙江镉污染事件影响较大主要为底层鱼类, 中上层和中下层相差不大.

(3) 不同食性鱼类肌肉中镉平均富集系数从大到小依次为杂食性, 肉食性和草食性; 在不同水层生活的鱼类的肌肉中镉平均富集系数从大到小依次为底层鱼类, 中下层鱼类和中上层鱼类.

参考文献:

- [1] Duodu G O, Goonetilleke A, Ayoko G A. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 1077-1091.
- [2] Zhao X M, Yao L A, Ma Q L, et al. Distribution and ecological risk assessment of cadmium in water and sediment in Longjiang River, China: implication on water quality management after pollution accident[J]. *Chemosphere*, 2018, **194**: 107-116.
- [3] Komjarova I, Bury N R. Evidence of common cadmium and copper uptake routes in zebrafish *Danio rerio*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(21): 12946-12951.
- [4] Weber P, Behr E R, De Lellis Knorr C, et al. Metals in the water, sediment, and tissues of two fish species from different trophic levels in a subtropical Brazilian river[J]. *Microchemical Journal*, 2013, **106**: 61-66.
- [5] 谢文平, 朱新平, 郑光明, 等. 广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4663-4670.
Xie W P, Zhu X P, Zheng G M, et al. Residues and health risk assessment of HCHs, DDTs and heavy metals in water and *Tilapia* from fish ponds of Guangdong [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4663-4670.
- [6] Yilmaz F, Özdemir N, Demirak A, et al. Heavy metal levels in two fish species *Leuciscus cephalus* and *Lepomis gibbosus* [J]. *Food Chemistry*, 2007, **100**(2): 830-835.
- [7] Zhao S, Feng C H, Quan W M, et al. Role of living environments in the accumulation characteristics of heavy metals in fishes and crabs in the Yangtze River Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(6): 1163-1171.
- [8] Wei Y H, Zhang J Y, Zhang D W, et al. Metal concentrations in

- various fish organs of different fish species from Poyang Lake, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **104**: 182-188.
- [9] Yi Y J, Tang C H, Yi T C, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in fish and accumulation patterns in food web in the upper Yangtze River, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **145**: 295-302.
- [10] Zeng J, Yang L Y, Wang X, *et al.* Metal accumulation in fish from different zones of a large, shallow freshwater lake [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **86**: 116-124.
- [11] Rajeshkumar S, Li X Y. Bioaccumulation of heavy metals in fish species from the Meiliang Bay, Taihu Lake, China [J]. *Toxicology Reports*, 2018, **5**: 288-295.
- [12] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖鱼体器官及肌肉组织中重金属的分布特征及其与水体重金属污染水平的相关性[J]. *水产学报*, 2012, **36**(5): 714-722.
- Tian L F, Hu J W, Luo G L, *et al.* Heavy metals in muscle tissues and organs of fish species from Lake Baihua[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(5): 714-722.
- [13] Sinha A K, Kumar V, Makkar H P S, *et al.* Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition-a review[J]. *Food Chemistry*, 2011, **127**(4): 1409-1426.
- [14] Kaneko J J, Ralston N V C. Selenium and mercury in pelagic fish in the central north pacific near Hawaii[J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, **119**(3): 242-254.
- [15] Ahmad M K, Islam S, Rahman S, *et al.* Heavy metals in water, sediment and some fishes of Buriganga river, Bangladesh[J]. *International Journal of Environmental Research*, 2010, **4**(2): 321-332.
- [16] 刘潇威, 何英, 赵玉杰, 等. 农产品中重金属风险评估的研究与进展[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(1): 15-18.
- Liu X W, He Y, Zhao Y J, *et al.* Risk assessments for heavy metals in agri-foods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(1): 15-18.
- [17] 刘阳, 陈曦, 覃剑晖. 镉对食蚊鱼 (*Gambusia affinis*) 的急性毒性效应[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(3): 362-366.
- Liu Y, Chen X, Qin J H. Acute toxicity effects of cadmium on *Gambusia affinis*[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(3): 362-366.
- [18] Dorts J, Kestemont P, Dieu M, *et al.* Proteomic response to sublethal cadmium exposure in a sentinel fish species, *Cottus gobio*[J]. *Journal of Proteome Research*, 2011, **10**(2): 470-478.
- [19] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(3): 284-293.
- [20] 刘芳芳, 李忠海, 付湘晋, 等. 东洞庭湖网箱养殖鲤鱼生长期中重金属的富集特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(2): 166-172.
- Liu F F, Li Z H, Fu X J, *et al.* Enrichment of heavy metals in growth period of cage cultured carp (*Cyprinus carpio*) from the east Dongting lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(2): 166-172.
- [21] 孙笑川, 王德良, 王元兰, 等. Cd、Pb 在东洞庭湖乌鳢、鳊鱼中的蓄积水平研究[J]. *山东大学学报(理学版)*, 2016, **51**(7): 137-142.
- Sun X C, Wang D L, Wang Y L, *et al.* Research into the accumulative levels about Cd, Pb in *Channa argus* and *Siniperca chuatsi* from the East Dongting lake [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2016, **51**(7): 137-142.
- [22] 邢艳帅, 朱桂芬. 重金属对水生生物的生态毒理效应及生物耐受机制研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2017, **12**(3): 13-26.
- Xing Y S, Zhu G F. Advances on ecotoxicological effects of heavy metals to aquatic organisms and the tolerance mechanisms of aquatic organisms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(3): 13-26.
- [23] Chi Q Q, Zhu G W, Langdon A. Bioaccumulation of heavy metals in fishes from Taihu Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(12): 1500-1504.
- [24] 盛蒂, 朱兰保. 蚌埠市场食用鱼重金属含量及安全性评价 [J]. *食品工业科技*, 2014, **35**(22): 49-52, 56.
- Sheng D, Zhu L B. Heavy metal content and safety evaluation of fish in Bengbu market [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, **35**(22): 49-52, 56.
- [25] Wagner A, Boman J. Biomonitoring of trace elements in muscle and liver tissue of freshwater fish [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2003, **58**(12): 2215-2226.
- [26] Rejomon G, Nair M, Joseph T. Trace metal dynamics in fishes from the southwest coast of India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **167**(1-4): 243-255.
- [27] 广西壮族自治区水产研究所, 中国科学院动物研究所. 广西淡水鱼类志 [M]. (第二版). 南宁: 广西人民出版社, 1981.
- [28] 陆尚旭. 河池地区江河水质污染现状评价及防治对策 [J]. *水资源保护*, 2004, **20**(2): 41-43.
- Lu S X. Evaluation of current situation of water pollution in rivers in Hechi area and measures for pollution remediation [J]. *Water Resources Protection*, 2004, **20**(2): 41-43.
- [29] Atobatele O E, Olutona G O. Distribution of three non-essential trace metals (Cadmium, Mercury and Lead) in the organs of fish from Aiba Reservoir, Iwo, Nigeria [J]. *Toxicology Reports*, 2015, **2**: 896-903.
- [30] Liang P, Wu S C, Zhang J, *et al.* The effects of mariculture on heavy metal distribution in sediments and cultured fish around the Pearl River Delta region, south China [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 171-177.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)