

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价

方志青^{1,2}, 陈秋禹¹, 尹德良¹, 王志康², 孙涛¹, 王永敏^{1,3}, 谢德体^{1,3}, 王定勇^{1,3*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵阳 550025; 3. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400716)

摘要: 为了解三峡库区一级支流河口沉积物污染物分布特征, 在重庆忠县汝溪河和长江交界处采集了河口、中游以及左右两个断面春、夏、秋、冬这4个季节的沉积物, 采用ICP-MS测定了沉积物中Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As、Cd和Pb等8种重金属元素的含量, 运用地累积指数法、单因子重金属潜在生态风险指数法和沉积物质量基准法对研究区的重金属含量进行污染和生态风险评价。结果表明, Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As、Cd和Pb等8种重金属平均含量分别为: 45.24、46.46、406.1、20.885、12.49、7.02、0.253和11.042 mg·kg⁻¹, 8种重金属含量均表现为河口处高于中游及左右两个断面, 季节分布显示春季沉积物中重金属含量高于夏、秋、冬季, 相关性分析表明8种重金属具有一定的同源特征, 存在共同的外源输入, 地累积指数法评价结果显示支流汝溪河河口属于Cd的轻度污染, 单因子重金属潜在生态风险指数法显示Cd属于中等生态风险等级, 沉积物质量基准表明该支流在与干流交界处Ni可能对底栖生物产生毒性效应。整体而言, 该支流河口处于低生态危害等级, 未受到严重的重金属污染。

关键词: 支流河口; 沉积物; 重金属; 分布; 风险评价

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2607-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711066

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China

FANG Zhi-qing^{1,2}, CHEN Qiu-yu¹, YIN De-liang¹, WANG Zhi-kang², SUN Tao¹, WANG Yong-min^{1,3}, XIE De-ti^{1,3}, WANG Ding-yong^{1,3*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Ecological Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 3. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400716, China)

Abstract: To investigate the pollution status of sediments at the junction of the Three Gorges Reservoir area, sediment samples were collected over four seasons from the junction of the estuary located at a tributary of the Ruxi River and the Yangtze River. The content of eight heavy metals (HMs), including Cr, Zn, Mn, Ni, Cu, As, Cd, and Pb, in sediments was determined by ICP-MS. The results showed the average levels of investigated HMs (in mg·kg⁻¹) were Cr (45.24), Zn (46.46), Mn (406.14), Ni (20.885), Cu (12.49), As (7.02), Cd (0.253), and Pb (11.042). The distribution analysis indicated that the levels of HMs at the river mouth were higher than that of the tributaries of the middle reaches and the two sections nearby. The seasonal distribution shows that the heavy metal content in the spring sediment is higher than in summer, autumn and winter. In addition, the correlation analysis indicated that the eight HMs possessed similar homologous characteristics and had common exogenous inputs. The assessment of the Geo Accumulation Index showed slight Cd pollution in the estuary of Ruxi River, and the Potential Ecological Risk index showed that Cd presented moderate ecological risks. The toxic effect of benthonic organisms was possibly correlated to Ni contamination at the intersection of the tributary and main stream, which was supported by the evidence from the sediment quality criteria. In conclusion, the rating of ecological risk at the mouth of the Ruxi River tributary is slight.

Key words: estuary of tributary; sediments; heavy metals; distribution; risk assessment

沉积物是水体的重要组成部分, 重金属能够通过复杂的物理化学过程进入沉积物中。因此, 沉积物被认为是水环境中重金属等污染物的主要蓄积库^[1,2]。随着沉积物-水界面环境条件的变化, 沉积物中的重金属能够直接扩散或通过表层颗粒物的再悬浮进入到水体中, 对水体造成“二次污染”^[3,4]。因此, 沉积物可以作为水体污染的指示物, 其重金

属含量能反映水体重金属的污染状况及生态风险等信息^[5]。

收稿日期: 2017-11-07; 修订日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41603103); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017D202)

作者简介: 方志青(1985~), 女, 博士研究生, 高级实验师, 主要研究方向为环境分析化学, E-mail: fangzhiqing112@163.com

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

三峡水库是目前世界上最大的水利工程,它的建成及运行使库区干流原有的水文、水动力特征发生改变.而在干流回水顶托影响下,库区大小支流形成库湾回水区^[6,7],致使支流河口成为泥沙沉积的重要区域.在水体泥沙沉积的过程中,污染物会因悬浮颗粒物的吸附、离子交换、絮凝、氧化还原等物理化学作用,大都进入河口沉积物^[8].近年来,研究人员在研究长江口、黄河口以及各湖泊入湖口、海湾入海口等地区沉积物特征时发现,在河口处沉积物重金属含量相对较高,并且都存在一定程度的重金属污染^[9~12].三峡水库腹心地带分布有32条大小不一的一级支流^[13],其河口沉积物重金属污染状况也值得关注.肖尚斌等^[14]对三峡库区香溪河库湾沉积物重金属污染特征的研究发现,该区域河口处原水与沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd等重金属均高于香溪河各点的最高值,安立会等^[15]对三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征的研究发现,大宁河和磨刀溪的重金属含量在入江口区域含量最高.为此,本文以位于库区腹心地带忠县的汝溪河为研究对象,在其河口分时采集沉积物样品,分析了8种重金属含

量,并采用地累积指数法、潜在生态风险评价指数法和沉积物质量基准法研究沉积物中重金属污染程度和生态风险,以期为该区域生态环境质量评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

汝溪河是三峡库区长江重要一级支流之一,其发源于万州区分水镇三角函,流经培文镇,在梁平县境内和汝溪河另一支流交汇,流经忠县汝溪镇,最后经忠县涂井乡注入长江.全流域面积720 km²,主河道长54.5 km,在忠县境内流域面积272.9 km²,主河道长25.4 km.多年平均径流总量达 1.49×10^9 m³^[16],在三峡水库175 m蓄水以后,长江水淹没至涂井乡以上,形成了长达15 km的汝溪河回水区^[17].

1.2 样品采集与分析

1.2.1 采样点布设

根据汝溪河河口与长江干流交汇处所形成的回水区特点设置河口、中游以及左右两个断面S1~S4(图1)这4个采样点.

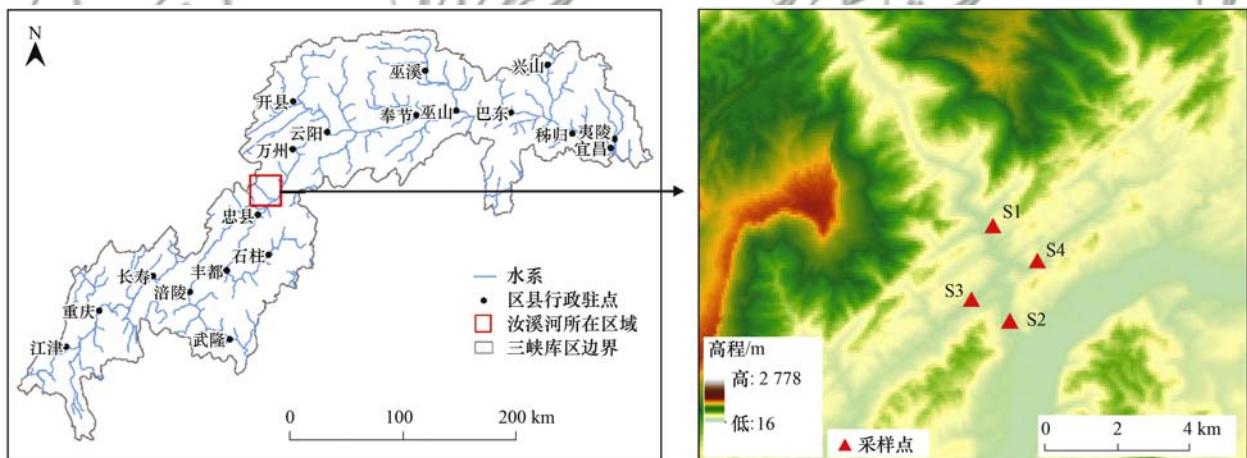


图1 研究区域及采样点分布示意

Fig. 1 Study area and sediment sampling sites

1.2.2 样品的采集与分析

分别于2016年7月、9月、12月和2017年3月这4个月采集样品分别代表夏、秋、冬和春季.采用SWB-1型不扰动湖泊沉积物采样器采集S1~S4样点的沉积物柱(0~10 cm),按1 cm间距进行分割,将样品装入自封袋中,于4℃的车载冰箱中保存并尽快带回实验室,经冷干机进行冷冻干燥后,用玛瑙研钵进行研磨并过100目尼龙筛,存放于自封袋中于4℃下保存.

样品采用HF-HNO₃-HClO₄三酸微波消解后,电热板上150℃赶酸,冷却至室温用超纯水定容至50 mL,过0.45 μm滤膜后保存待测.采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Scientific iCAP RQ)测定Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As、Cd和Pb等8种重金属元素的含量.实验中所用试剂均为优级纯,分析过程中采用平行样和标准参考物质GBW-07408进行质量控制,各元素的回收率在90%~105%之间,相对误差均小于10%.将每个沉积物柱状样的重金属含

量均值作为该柱状样的重金属含量。

1.2.3 数据处理

数据统计分析采用 SPSS 19.0 上进行，图表制作采用 Origin 8.0 软件完成。

1.3 重金属污染及风险评价方法

本研究分别运用了地累积指数法、潜在生态风险评价指数值法和沉积物质量基准法对研究区域沉积物中重金属的污染程度及生态风险进行评价。

1.3.1 地累积指数法

地累积指数 (index of geoaccumulation, I_{geo}) 法是一种对土壤和沉积物重金属污染程度进行定量评

价常用方法之一，根据 I_{geo} 值重金属的污染程度分为 7 级，分级标准见表 1，计算公式为：

$$I_{geo} = \log_2 (C_i / k B_i)$$

式中， C_i 为重金属 i 在沉积物中的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)， k 为常数，一般为 1.5； B_i 为沉积物中重金属元素 i 地球化学背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)，本研究以长江水系沉积物背景值作为参比值^[18]。

1.3.2 潜在生态风险评价指数法

潜在生态危害指数法^[19]是从沉积学的角度对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法。采用重金属实测值与背景值的比值，及重金属的生物毒

表 1 地累积指数分级标准

Table 1 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree							
等级	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo} 值	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
污染程度	无污染	轻度	偏中度	中度	偏重度	严重	极重

性系数进行加权求和得到生态危害指数，其计算方法如下：

$$RI = \sum E_i = \sum T_i (C^i / C_n^i)$$

式中， C^i 为表层沉积物中重金属 i 的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)； C_n^i 为重金属 i 的背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)， T_i 为重金属 i 的毒性系数 (As、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的毒性系数分别为 10、30、2、5、5 和 1)， E_i 为单个重金属的潜在生态危害系数；RI 为多种重金属潜在生态风危害指数，Hakanson 基于 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn 和 PCBs 8 种污染物对 RI 划分了 4 个等级。由于 PCBs 和 Hg 未在本研究中涉及，采用原有的 RI 等级划分标准可能会低估重金属的生态风险，所以本文主要采用单重金属的潜在生态危害系数 E_i 进行评价，潜在生态风险指数 RI 值及相应的生态危害程度见表 2。

表 2 生态危害系数、指数与危害程度分级

Table 2 Ecological risk coefficient, risk index, and classification of risk intensity		
E_i	RI	生态危害程度
≤ 40	≤ 150	低潜在生态风险
40 ~ 80	150 ~ 300	中等潜在生态风险
80 ~ 160	300 ~ 600	较高潜在生态风险
160 ~ 320	≥ 600	很高潜在生态风险
≥ 320		极高潜在生态风险

1.3.3 沉积物质量基准

沉积物质量基准 (SQGs) 主要基于生物有效性的评价指标，用于评价沉积物中重金属的生物毒性。它是由 MacDonald 等^[21]提出的关于淡水水体

沉积物的质量基准，包括最低效应阈值 (TEC) 和可能效应阈值 (PEC)，当重金属含量低于 TEC 时，该金属不会对底栖生物产生毒性效应，当高于 PEC 时，该金属会对底栖生物产生毒性，若介于两者之间，则可能会产生毒性效应^[21]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量与分布

研究区域 4 个采样点沉积物中重金属的含量变化见图 2。Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As、Cd 和 Pb 的含量范围分别为 14.19 ~ 75.34、6.77 ~ 87.14、116.82 ~ 657.14、6.658 ~ 33.382、4.84 ~ 21.14、2.82 ~ 11.10、0.132 ~ 0.394 和 4.844 ~ 17.900 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4 个采样点 Mn、As 和 Cd 含量均超过了三峡库区沉积物重金属背景值 242.8、5.84 和 0.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22]，S2 点河口处 Mn (453.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 Cd (0.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 超过背景值的两倍。8 种重金属含量均表现为河口处高于中游及左右两个断面，该结论与刘恩峰等^[23]和王健康等^[24]的研究基本一致。其主要原因为河口处由于干流水体以倒灌异重流的形式进入支流与其进行水交换，水动力作用减弱伴随细颗粒物、有机物等的吸附沉淀作用，有研究表明^[25]，自然成因的重金属主要存在于沉积物和土壤的细粒级部分，在没有人为影响的情况下，沉积物和土壤的质地越细则其中金属含量越高，而细颗粒物主要由黏土矿物和有机物质组成，其对重金属元素的吸附交换能力较强，能够更多地“捕获”

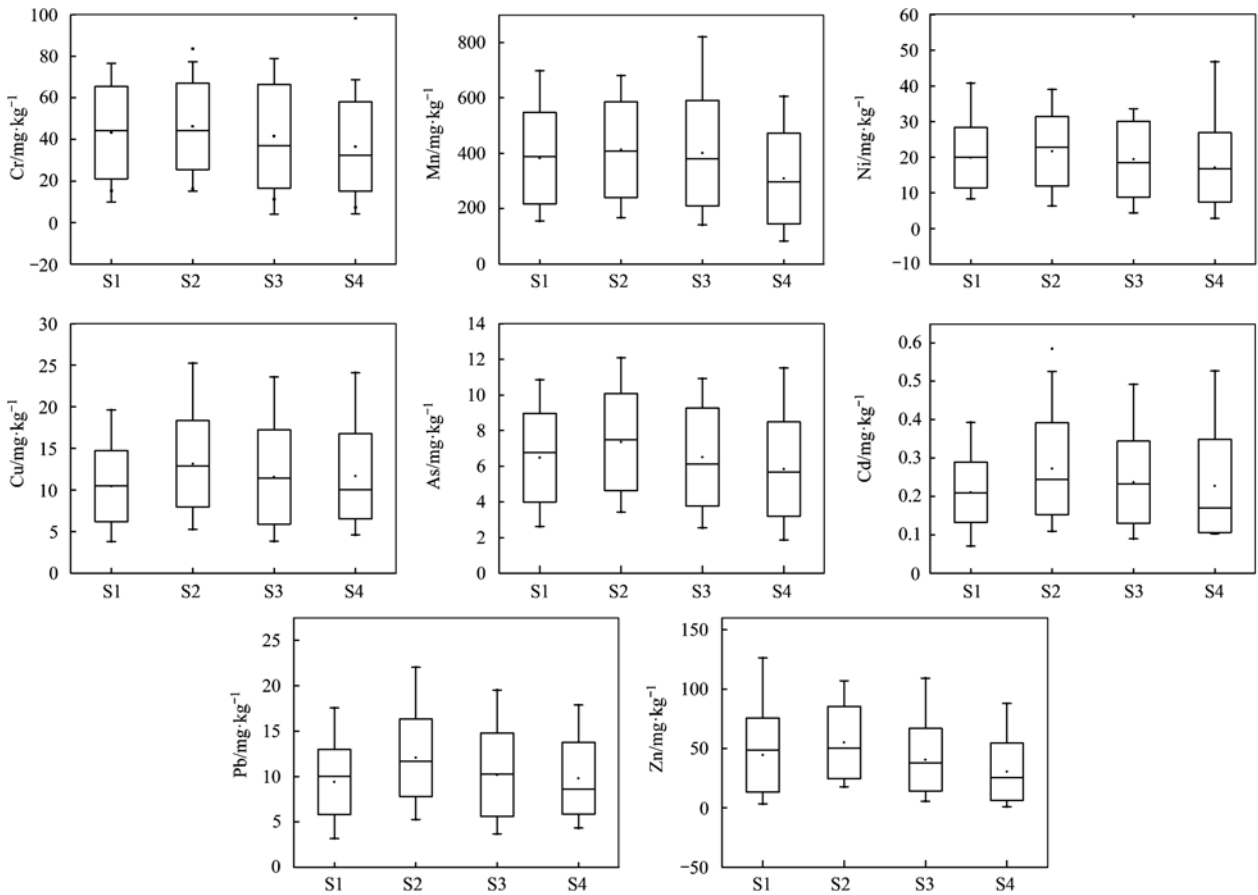


图2 沉积物重金属的含量分布

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in sediments

水体中的重金属,从而成为较强的“汇”,使得河口处重金属比中游和左右断面要高.

2.2 表层沉积物重金属含量的季节变化

S1~S4 这4个采样点重金属含量随季节的变化分级结果见图3,结果显示:Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As、Cd和Pb这8种重金属含量均随季节的变化呈现规律性的下降,大小依次为春季>夏季>秋季>冬季,这与许多研究学者^[26~28]对湖泊的重金属含量随季节的变化结论不一致,而研究区域与湖泊所不同的是,三峡库区每年9月开始蓄水,10月底蓄水至高程175 m水位,次年的3月开始退水,5月降至防洪水位145 m,本研究采样的春季正值3月,经过半年的蓄水,水体的滞留时间最长,随着时间的增加,加速了水体中的悬浮物的沉积,而水体中的重金属因易于吸附在水体颗粒物上而沉降.同时,沉积物中的黏土矿物和有机物质等从水体中吸附重金属也是导致其含量增加的更重要原因,因此导致春季的沉积物重金属含量高于其它季节.

2.3 沉积物中重金属的相关性及来源解析

确定重金属的来源对有效控制重金属的污染至

关重要.利用SPSS Pearson相关分析对研究区域的沉积物中金属含量进行了相关性分析(表3),结果显示沉积物中8种元素均呈现显著性的正相关性($P<0.01$),说明该研究区域沉积物中8种重金属元素具有相似的元素地球化学性质或来源^[29].研究区域周边没有工厂,没有人为因素,如农业和渔业活动等直接污染源,可以判断,重金属极有可能来源于上游来水、农田的面源污染及样点周边区域地表径流携带泥沙的沉积影响.

2.4 研究区沉积物重金属污染评价

采用地累积指数对该支流河口沉积物重金属污染程度进行评价分析,结果见图4所示,S1~S4这4个采样点中Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、As和Pb这7种重金属地累积指数均小于0,仅Cd为轻度污染状态,即研究区域属于重金属Cd的轻微污染类型,这与王健康等^[24]对三峡库区表层沉积物的重金属污染研究一致.

同时计算研究区域沉积物中重金属元素的潜在生态危害系数 E_i 和潜在生态危害综合指数RI(表4).从单因子潜在生态危害系数 E_i 看,Cr、Zn、

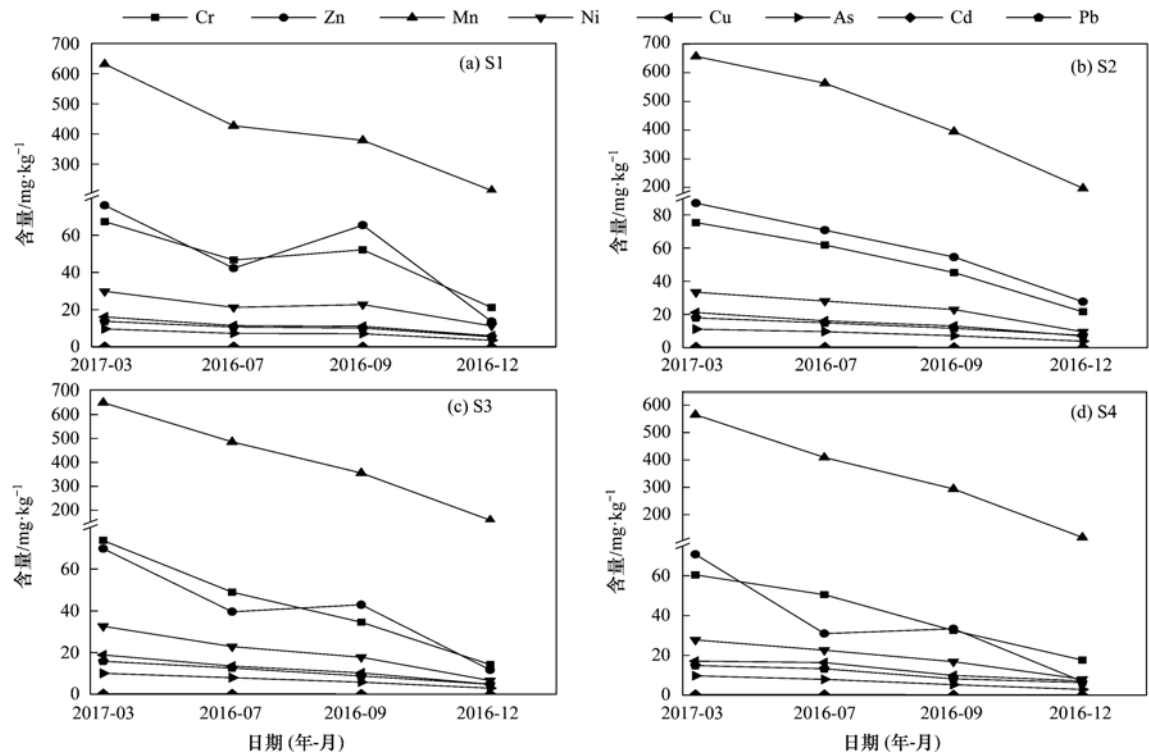


图3 表层沉积物重金属含量的季节变化
Fig. 3 Heavy metal contents distribution in surface sediment in different seasons

表3 表层沉积物中重金属的相关性
Table 3 Correlation of the heavy metal contents in surface sediment

	Cr	Zn	Mn	Ni	Cu	As	Cd	Pb
Cr	1							
Zn	0.930 **	1						
Mn	0.980 **	0.916 **	1					
Ni	0.993 **	0.932 **	0.983 **	1				
Cu	0.963 **	0.857 **	0.945 **	0.961 **	1			
As	0.988 **	0.923 **	0.987 **	0.989 **	0.970 **	1		
Cd	0.940 **	0.840 **	0.936 **	0.935 **	0.970 **	0.966 **	1	
Pb	0.968 **	0.882 **	0.956 **	0.964 **	0.990 **	0.982 **	0.982 **	1

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表4 表层沉积物的重金属风险评价
Table 4 Risk assessment of heavy metals in the surface sediments

采样点	E_i						RI
	Cr	Zn	Cu	As	Cd	Pb	
S1	1.20	0.71	2.24	11.93	51.76	2.11	69.95
S2	1.31	0.86	2.86	13.65	68.02	2.72	89.41
S3	1.10	0.59	2.37	11.47	56.25	2.20	73.98
S4	1.03	0.51	2.51	11.00	57.81	2.22	75.09

Cu、As 和 Pb 这 5 种污染物均属于低潜在生态风险，Cd 在 4 个采样点均为中等潜在生态风险，从重金属的综合潜在生态风险指数分析，4 个采样点 RI 均低于 150，总体都处于低潜在生态风险，但 Cd 的 E_i 对 RI 的权重贡献最大，是首要的潜在生态风险

因子。总体来说，该支流河口沉积物的潜在生态风险的来源主要是 Cd。

如图 5 所示，参照沉积物质量基准(SQGs)的最低效应阈值(TEC)和可能效应阈值(PEC)，研究区域 Cr、Zn、Cu、As、Cd 和 Pb 这 6 种重金属含量

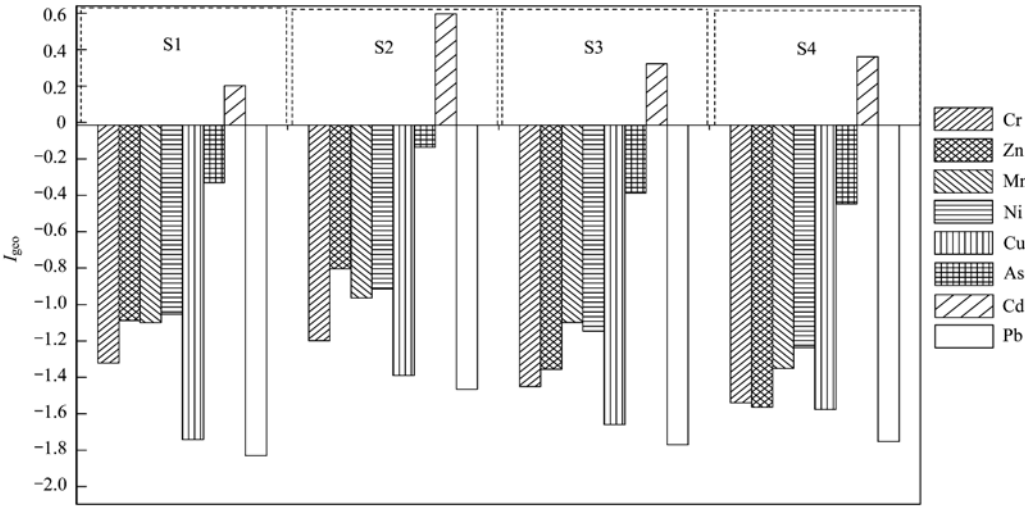


图 4 表层沉积物重金属污染的地累积指数
Fig. 4 The I_{geo} of heavy metals pollution in the surface sediments

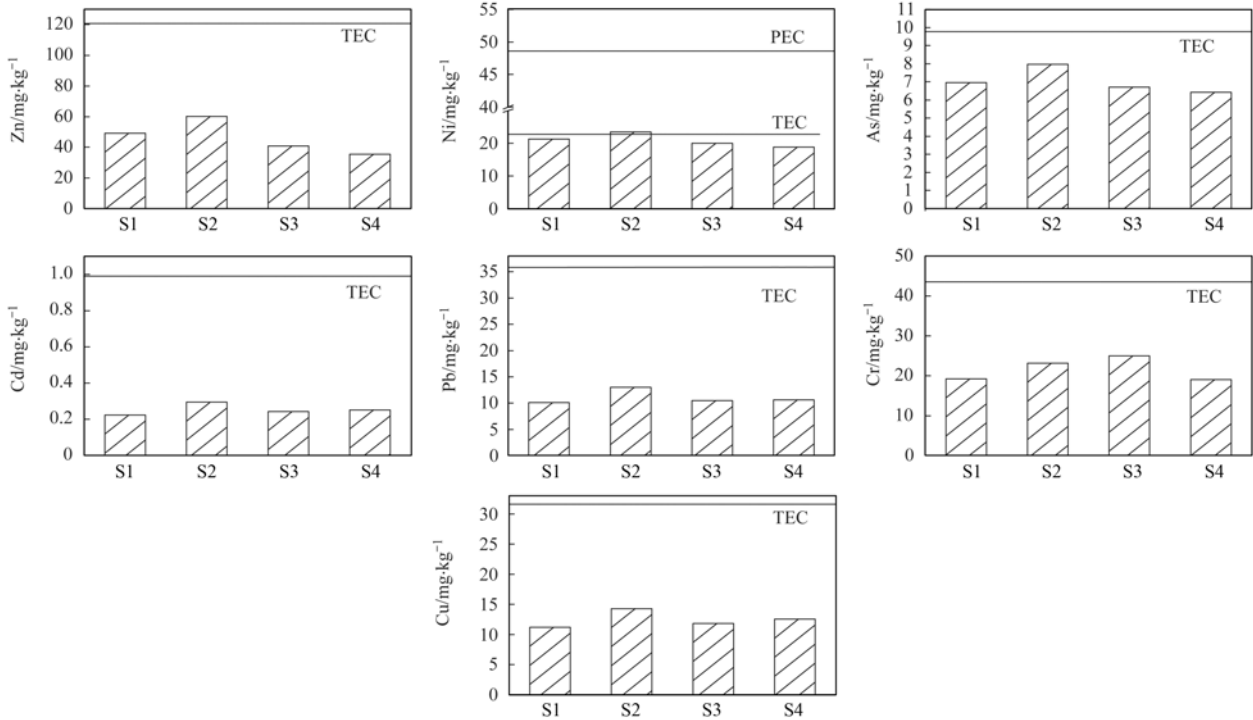


图 5 沉积物重金属含量与沉积物质量基准法阈值 (TEC 和 PEC)
Fig. 5 Heavy metal concentration in the sediment and the thresholds of sediment quality guidelines (TEC and PEC)

均低于 TEC 阈值(图 5). 仅 S2 点(与干流交界的河口处)Ni 的含量介于 TEC 和 PEC 之间, 根据 SQGs 生态风险等级标准^[19], Ni 可能会对底栖生物产生毒性效应. 综合 E_i 和 SQGs 评价结果, 并参考重金属的污染程度, 研究区域表层沉积物中重金属 Cd 具有中等潜在生态风险, 只根据 SQGs 法, Cd 的潜在生态风险会被低估, Ni 的生态风险会被高估, 因此, 采用多种生态风险评方法进行对比分析, 能够减小单一评估方法带来的不确定性, 提供更加可靠

的评估结果.

3 结论

- (1) 汝溪河支流河口沉积物中 8 种重金属元素的来源无明显人为污染源, 其主要来源于干流及周边区域地表径流携带泥沙的沉积.
- (2) 8 种重金属含量均随季节的变化呈现规律性变化, 其中春季最高, 主要原因为经过半年蓄水, 水体的滞留时间最长, 时间的增加加速了水体

中的悬浮物的沉积以及沉积物的黏土物质和有机物质对重金属的吸附。

(3)从单个重金属生态风险看,Cd 处于中等生态风险状态,其余重金属处于低生态风险状态,沉积物除 Cd 为轻度污染,Ni 可能对底栖生物有毒性效应外,其余 6 种重金属含量均处于安全水平。

参考文献:

- [1] Habib M R, Mohamed A H, Osman G Y, *et al.* *Biomphalaria alexandrina* as a bioindicator of metal toxicity[J]. *Chemosphere*, 2016, **157**: 97-106.
- [2] 李法松,韩铖,林大松,等. 安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(3): 574-582.
Li F S, Han C, Lin D S, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from Lakes of Anqing City and Anqing section of Yangtze River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(3): 574-582.
- [3] Sun W M, Xiao E Z, Dong Y R, *et al.* Profiling microbial community in a watershed heavily contaminated by an active antimony (Sb) mine in Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 297-308.
- [4] 李莹杰,张列宇,吴易雯,等. 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
Li Y J, Zhang L Y, Wu Y W, *et al.* GIS spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1321-1329.
- [5] 匡晓亮,彭渤,张坤,等. 湘江下游沉积物重金属污染模糊评价[J]. *环境化学*, 2016, **35**(4): 800-809.
Kuang X L, Peng B, Zhang K, *et al.* Assessment of heavy metal pollution using the fuzzy function normalization method for sediments of the lowermost Xiangjiang River[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(4): 800-809.
- [6] Kawara O, Yura E, Fujii S, *et al.* A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam Reservoir[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(2): 245-252.
- [7] 吴挺峰,高光,晁建颖,等. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策[J]. *水利学报*, 2009, **40**(4): 391-397.
Wu T F, Gao G, Chao J Y, *et al.* Analysis on factors inducing algal bloom in reservoir based on basin eutrophication model[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(4): 391-397.
- [8] 蓝先洪. 中国主要河口沉积物的重金属地球化学研究[J]. *海洋地质动态*, 2004, **20**(12): 1-4, 37.
Lan X H. Heavy metal geochemistry of sediments in the main river mouths of China[J]. *Marine Geology Letters*, 2004, **20**(12): 1-4, 37.
- [9] 张雷,秦延文,马迎群,等. 大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3336-3345.
Zhang L, Qin Y W, Ma Y Q, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the tidal reach and its adjacent sea estuary of Daliaohe Area, China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3336-3345.
- [10] 闫兴成,杨晓薇,黄烯茜,等. 太湖主要入湖河口表层沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(9): 1515-1521.
Yan X C, Yang X W, Huang X Q, *et al.* Distribution and risk assessment of heavy metals in the surface estuarine sediments of main inflow rivers in Taihu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(9): 1515-1521.
- [11] 吕书丛,张洪,单保庆,等. 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4204-4210.
Lu S C, Zhang H, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the estuaries surface sediments from the Haihe river basin [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4204-4210.
- [12] 安立会,郑丙辉,张雷,等. 渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 666-670.
An L H, Zhang B H, Zhang L, *et al.* Occurrence of heavy metals in surface sediments from estuaries in Bohai Bay and their ecological risk assessment [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(5): 666-670.
- [13] 胡正峰. 三峡库区澎溪河回水区营养盐分布变化及富营养化成因初探[D]. 重庆:西南大学,2010.
Hu Z F. Study of nutrient distribution and causes of eutrophication in backwater area of Pengxi River as a tributary of the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [14] 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.
Xiao S B, Liu D F, Wang Y C, *et al.* Characteristics heavy metal pollution in sediments at the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(8): 983-989.
- [15] 安立会,张艳强,郑丙辉,等. 三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2592-2598.
Aa L H, Zhang Y Q, Zheng B H, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in Daninghe river and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2592-2598.
- [16] 李仁芳,张信伟. 忠县汝溪河流域水质现状调查[J]. *三峡环境与生态*, 2011, **33**(2): 10-12.
Li R F, Zhang X F. Investigation on water quality of the Ruxi River in Zhong County of Chongqing municipality [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011, **33**(2): 10-12.
- [17] 张穗,姜莹,李喆. 3S 技术支持下的汝溪河水土流失动态监测及分析[J]. *长江科学院院报*, 2016, **33**(11): 21-27.
Zhang S, Jiang Y, Li Z. Dynamic monitoring and analysis on the changes of soil and water loss of Ruxi River based on 3S technology [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, **33**(11): 21-27.
- [18] 赵一阳,鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京:科学出版社,1994.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution

- control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] Lin Q, Liu E F, Zhang E L, *et al.* Spatial distribution, contamination and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Erhai Lake, a large eutrophic plateau lake in southwest China[J]. *Catena*, 2016, **145**: 193-203.
- [21] Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, **39**(1): 20-31.
- [22] 陈年, 赖维平, 徐茂其, 等. 重庆市土壤中 11 种元素环境背景值图[J]. *重庆环境科学*, 1982, (4): 38-51.
- [23] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1377-1383.
- Liu E F, Shen J, Yang L Y, *et al.* Chemical fractionation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Nansihu Lake and its main inflow rivers, China [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(6): 1377-1383.
- [24] 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.
- Wang J K, Gao B, Zhou H D, *et al.* Heavy metals pollution and its potential ecological risk of the sediments in Three Gorges Reservoir during its impounding period [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1693-1699.
- [25] 魏晓, 吴鹏豹, 张欢, 等. 长江安徽段江心洲土壤重金属的分布特征及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(5): 1921-1930.
- Wei X, Wu P B, Zhang H, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils on the alluvial islands in the Anhui Section of Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1921-1930.
- [26] 郭海涛, 张进忠, 魏世强, 等. 长寿湖底泥中重金属的季节性变化[J]. *中国农学通报*, 2011, **27**(6): 327-332.
- Guo H T, Zhang J Z, Wei S Q, *et al.* Seasonal variation of heavy metals in the sediment of Changshou Lake [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(6): 327-332.
- [27] 刘超, 毕春娟, 陶征楷, 等. 滴水湖沉积物中重金属季节性变化及其潜在生态风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2016, **29**(2): 38-42, 46.
- Liu C, Bi C J, Tao Z K, *et al.* Seasonal variation of heavy metals in surface sediment of the Dishui Lake and its potential ecological risk[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2016, **29**(2): 38-42, 46.
- [28] 张晔. 南海湖水水质特征及沉积物重金属季节性分布特征研究[J]. *西南农业学报*, 2017, **30**(5): 1205-1213.
- Zhang Y. Distribution of water quality and heavy metals in bottom sediment of Nanhai Lake during seasons [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(5): 1205-1213.
- [29] 卓海华, 孙志伟, 谭凌智, 等. 三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4633-4643.
- Zhuo H H, Sun Z W, Tan L Z, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of the heavy metals content in the surface sediment and the potential ecological risk trends in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4633-4643.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)