

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



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造行业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险

方志青^{1,2}, 王永敏¹, 王训¹, 谢德体¹, 王定勇^{1*}

(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)

摘要: 为了解三峡库区支流沉积物重金属空间分布、来源及生物毒害效应, 选择典型入库支流汝溪河, 分4个区域12个采样点采集沉积物柱状样和沿岸土壤样品, 分析了Cr、Ni、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb和Hg这8种重金属的空间和垂向分布特征。结果表明, 沉积物中Cr、Ni、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb、Hg平均含量分别为 $(79.60 \pm 11.87) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(41.340 \pm 4.999) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(32.69 \pm 8.70) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(823.34 \pm 125.76) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(122.11 \pm 22.82) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.393 \pm 0.140) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(29.122 \pm 6.811) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(74.84 \pm 39.50) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 8种重金属含量均超过长江水系沉积物背景值, 空间上总体表现为受汝溪镇生活影响河段>回水区>自然河段, 回水区河道沿岸沉积物及土壤中重金属含量均远低于沉积物中, 说明河道沿岸沉积物和土壤并不是汝溪河回水区沉积物重金属的主要污染来源。在垂向分布上, 受汝溪镇生活影响河段重金属(除Pb外)含量最大值均出现在8cm处, 而自然河段和回水区重金属含量随深度的增加呈下降的趋势。除Ni外, 其他几种重金属之间具有显著相关($P < 0.01$), 说明汝溪河重金属存在一定的同源性。地累积指数评价得出汝溪河整体呈现Cd和Zn的轻度至偏中度污染。生物毒性效应评价得出, Ni有10%~75%可能对生物造成毒害效应, Cd、Zn、Hg、Cu、Pb和Cr有<10%的可能会出现生物毒害效应。综合效应系数表明汝溪河沉积物重金属的生物毒害风险为低级至中低级。

关键词: 汝溪河; 重金属; 沉积物; 空间分布; 生物毒害效应

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1338-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909208

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir

FANG Zhi-qing^{1,2}, WANG Yong-min¹, WANG Xun¹, XIE De-ti¹, WANG Ding-yong^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Ecological Environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Sediment column and soil samples collected from 12 sampling sites in four regions of the Ruxi River, a typical tributary of the Three Gorges Reservoir, were analyzed for eight selected heavy metals including Cr, Ni, Cu, Mn, Zn, Cd, Pb, and Hg to evaluate their spatial and vertical distribution, source, and biological toxic effects. The results showed that the average concentrations of heavy metals were (79.60 ± 11.87) , (41.340 ± 4.999) , (32.69 ± 8.70) , (823.34 ± 125.76) , (122.11 ± 22.82) , (0.393 ± 0.140) , and $(29.122 \pm 6.811) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for Cr, Ni, Cu, Mn, Zn, Cd, and Pb, respectively, and $(74.84 \pm 39.50) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for Hg, all of which exceeded the sediment background values of the Yangtze River. A spatial trend of decreasing metal concentrations was observed from the reach influenced by the human activities of Ruxi town to the backwater zone and then to the natural river reach. Moreover, in the backwater zone, the heavy metals in sediments and soil along the river were significantly lower than those in sediments, indicating that the sediments and soil were not one primary source for these metals in backwater zone sediment. From the vertical distribution of sediment, in addition to Pb, the highest level of metals was observed at 8 cm in the reach influenced by human activities, and their concentrations decreased with sediment depth in the backwater zone and natural river beach. Significant correlation was found between all the heavy metals ($P < 0.01$, except Ni), indicating a potential homology of these metals in the Ruxi River. Evaluation results of the geoaccumulation index reveal that there exists light to partial moderate Cd and Zn pollution in the Ruxi River. The evaluation of biotoxicity effects showed that Ni was likely to have toxic effects on organisms with a probability of 10% to 75%, and Cd, Zn, Hg, Cu, Pb, and Cr are likely to have biotoxic effects at <10% probability. The combined effect values of multiple metals indicated that the risk of adverse effects was between low and lower medium in the sediments of the Ruxi River.

Key words: Ruxi River; heavy metals; sediment; spatial distribution; biological toxic effect

沉积物是水体生态系统的重要组成部分, 为水生动植物生长提供了场所, 亦可以反映自然环境或人类活动等诸多因素对水体的影响, 是水体环境污染的指示器^[1,2]。重金属在工业、采矿和农业生产等方面具有广泛的应用, 近年来, 这些活动所造成的重金属污染十分严重, 在制约经济发展的同时也危及水体生物及人类的健康安全^[3-6]。当人类活动、生物扰动或水环境条件(如水体流速、氧化还原电位、pH值、溶解氧等)变化等因素影响下, 富集于沉积

物中的重金属会再次向上覆水体释放, 造成二次污染^[7-9]。因此, 对水生生态系统中沉积物重金属的污染行为及环境风险评价已成为研究热点。

三峡水库是目前我国最大的水库, 水库面积

收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2019-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877384, 41603103); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017B035); 贵州省2018年大学生创新创业训练计划项目(2018520253)

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

1 084 km², 在全长 650 km 的库区干流中, 包含有流域面积大于 100 km² 的支流达 40 多条^[10,11]. 汝溪河是三峡库区一条典型的入库支流, 流域横贯三个区县 5 个乡镇, 涉及忠县城乡居民约 19 万人. 经实地调查, 汝溪河流域周边没有工厂, 汝溪河主要功能为发电、供水、灌溉、水产养殖及旅游, 因流域两岸乡镇的生活污水、垃圾和畜禽养殖场粪便未达标处理便排入汝溪河, 导致水污染日趋严重. 当三峡大坝蓄水后, 受水位调节影响, 支流水体汇入长江的同时, 长江的干流水体也倒灌入支流致使支流水动力条件发生改变^[12]. 目前, 已有学者开展了三峡库区干流及支流重金属分布特征的研究^[13~15], 但对重金属在沉积物的垂向上分布特征鲜少阐述; 同时, 现有研究也更多关注于重金属生态环境效应评价, 鲜有重金属对生物产生的毒性效应评价, 也缺乏其来源分析.

综上, 本文在汝溪河主干河道及与干流交汇形成的回水区采集表层和柱状沉积物, 研究了 Cr、Cd、Zn、Cu、Hg、Mn、Ni 和 Pb 这 8 种重金属的空间和垂向分布特征, 并结合沉积物质量基准评价其生物毒性效应. 此外, 运用 PCA 主成分分析对重金属的来源及影响因素进行分析, 以期为该区域的重金属污染治理提供理论数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域

汝溪河是三峡库区重要一级支流之一, 全流域面积 720 km², 主河道长 54.5 km, 起源于重庆市万州区分水镇三角函, 流经忠县汝溪镇和涂井乡后汇入长江 (见图 1). 当三峡水库蓄水至 175 m, 干流水体倒灌至涂井乡形成约 15 km 的汝溪河支流回水区.

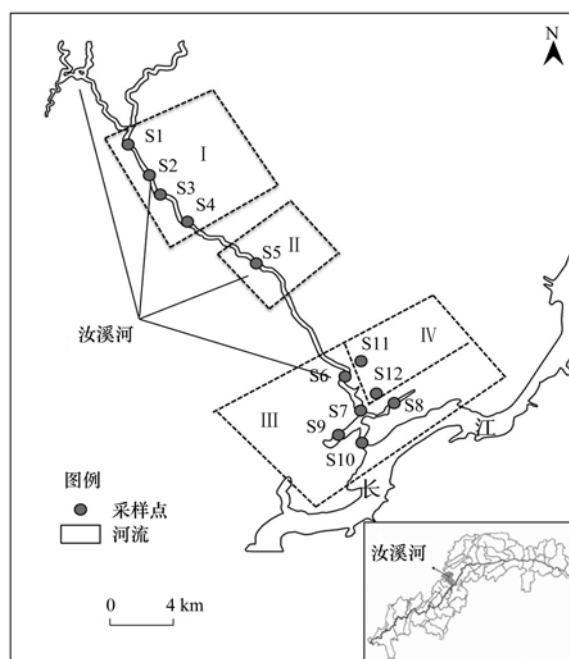
1.2 样品的采集与制备

根据汝溪河受三峡水库水位和受人为活动影响程度将研究区域划分为 4 个区域, I: 自然河段 (S1~S4); II: 受汝溪场镇生活影响河段 (S5); III: 回水区 (S6~S10); IV: 回水区河道沿岸 (S11~S12), (S1~S5) 河道沿岸为石壁, 借助 GPS 卫星定位系统, 于 2017 年 12 月采集 4 个区域 S1~S10 监测断面沉积物柱状样和 S11~S12 河道沿岸全淹水沉积物, 半淹水沉积物以及永久性未淹水表层土壤样品, 沉积物柱状样表层 0~4 cm 按每 2 cm 间距进行分割, 4 cm 以下按每 4 cm 间距进行分割. 沉积物/土壤存于自封袋冷冻保存运回实验室.

1.3 样品分析

1.3.1 重金属含量分析

先将沉积物样品冷冻干燥, 玛瑙研钵研磨, 然后



I: 自然河段; II: 受汝溪场镇生活影响河段;
III: 回水区; IV: 回水区河道沿岸

图 1 汝溪河沉积物重金属采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in sediments of the Ruxi River

过 100 目尼龙筛备用. Cr、Zn、Ni、Cu、Mn、Cd 和 Pb 等 7 种重金属元素的含量采用 HF-HNO₃-HClO₄ 三酸混合微波消解后 150℃ 赶酸, 冷却至室温后定容至 50 mL 待测, 测定时预先过 0.45 μm 滤膜后采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (Thermo Scientific iCAP RQ) 测定; Hg 含量使用直接测汞仪 DMA-80 (Milestone) 测定. 为了提高方法的准确度和可靠性, 采用标准参考物质 GBW-07408 进行质量控制, 以 10% 比例测定平行样, 相对标准偏差均低于 10%.

1.3.2 粒度分析

取采集的沉积物鲜样, 采用 BT-9300HT 型激光粒度分析仪, 测量范围为 0.1~1 000 μm. 根据沉积物粒径分类表^[16], 以 <4 μm、4~63 μm 和 >63 μm 为界的 3 个粒径范围分别对应黏粒、粉粒和砂粒.

1.3.3 有机质 (TOC) 测定

沉积物中有机质含量采用重铬酸钾氧化滴定法测定^[17], 称取过 60 目筛的沉积物 0.200 0 g 于硬质试管 (做空白), 加 K₂CrO₇-H₂SO₄ 混合液 5 mL, 放入小漏斗, 用石蜡锅煮沸 5 min, 冷却后转移至三角瓶, 洗到 40~50 mL, 加 2 滴邻啡罗啉指示剂, 用 FeSO₄ 溶液滴定至紫红色.

1.4 沉积物重金属评价方法

1.4.1 地累积指数法 (I_{geo})

地累积指数法是一种能直观地反映外源重金属在沉积物中的富集程度定量评价的常用方法, 计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (kB_i)] \quad (1)$$

式中, C_i 为沉积物中重金属 i 的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为该重金属 i 地球化学背景 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 参比值为长江水系沉积物背景值^[18], k 为修正系数(1.5). 根据 I_{geo} 值重金属的污染程度分为 7 级^[13], 分级标准见表 1.

表 1 沉积物中重金属评价方法及分级标准

Table 1 Assessment methods and grading of heavy metal contamination in sediments

方法名称	地累积指数 I_{geo}	生物毒性效应
方法特点	单一重金属的污染评价	多种重金属综合的生物毒性评价
评价等级	≤ 0 , 无污染; 0 ~ 1, 轻度污染; 1 ~ 2, 偏中度; 2 ~ 3, 中度污染; 3 ~ 4, 偏重度; 4 ~ 5, 严重; > 5, 极重	< 0.1, 低级; 0.1 ~ 0.5, 中低级; 0.51 ~ 1.5, 中高级; > 1.5, 高级

1.4.2 重金属的生物毒性效应评价方法

沉积物质量基准(SQGs)是 MacDonald 等^[19]提出的主要用于评价沉积物重金属在淡水水体中潜在生物毒性的方法, 包括效应范围低值(ERL)和效应范围中值(ERM), 当重金属浓度低于 ERL 时, 该金属出现生物毒害效应的概率低于 10%; 当高于效应范围中值(ERM)时, 其出现生物毒害效应的概率高于 75%. Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 这 7 种重金属的 ERL 和 ERM 分别为 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$): Cr(80, 370)、Ni(21, 52)、Cu(34, 270)、Zn(150, 470)、Cd(1.2, 9.6)、Pb(47, 218)、Hg(0.15, 0.71)^[20,21]. 同时, 采用 ERMQ(效应系数)来评价不同采样点的危害等级, C_i 为重金属 i 在沉积物中的实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), ERM_i 是为该元素 i 对应的 ERM 阈值, n 为重金属的种类. 根据 ERMQ 值重金属的生物毒性分为 4 个不同的危害等级^[22], 分级标准见表 1.

$$\text{ERMQ} = \frac{1}{n} \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ERM}_i} \right) \quad (2)$$

1.5 数据处理

数据 Pearson 相关分析(双侧检验)和 PCA 主成分分析采用 SPSS 19.0 进行, 数据处理及绘制图表制作采用 Origin 8.0、Excel、ArcGIS 10.2 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 汝溪河沉积物和沿岸土壤重金属含量的空间分布特征

汝溪河沉积物和沿岸土壤中重金属的含量变化见图 2. Cr、Ni、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb 和 Hg 平均含量分别为 (79.60 ± 11.87) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、($41.340 \pm$

4.999) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(32.69 ± 8.70) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(823.34 ± 125.76) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(122.11 ± 22.82) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(0.393 ± 0.140) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(29.122 ± 6.811) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 (74.84 ± 39.50) $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 8 种重金属的含量均超过了长江水系沉积物重金属背景值, 其中 Cd 和 Hg 的含量分别为背景值的 2.36 和 2.24 倍, 各元素富集程度为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Pb}$. 从空间分布来看, 沉积物中 8 种重金属分布一致, 均表现为 $\text{II} > \text{III} > \text{I} > \text{IV}$.

Hg、Cd、Zn、Ni、Cr、Cu、Mn 和 Pb 这 8 种重金属含量在回水区均表现为与干流交汇河口处高于其他回水区样点, 该研究结果与文献[14,23]的结论一致. 原因为干流水体以倒灌异重流的形式通过河口处进入汝溪河, 导致水动力作用减弱的同时伴随有机物、细颗粒物等的吸附沉淀作用. 同时, 图 2 可知, 回水区河道沿岸 S11 ~ S12 半淹水、淹水沉积物以及土壤中重金属含量均远低于沉积物重金属含量, 说明河道沿岸沉积物及土壤并不是汝溪河回水区沉积物重金属的主要污染来源, 这与王图锦^[24]对三峡库区消落带重金属的迁移转化中研究结果一致.

2.2 汝溪河沉积物重金属含量的垂向分布特征

重金属在沉积物中的垂向分布特征可直观反映其不同历史阶段下的污染累积状况^[25]. 汝溪河沉积物 8 种重金属的垂向分布特征见图 3, 从中可知, 汝溪河 3 个区域沉积物重金属含量在垂向上分布存在明显的差异, 但均超过了沉积物背景值, 且整体均呈现 II 区重金属含量高于 I 和 III 区. 在 II 区, 除 Pb 外, Cr、Zn、Mn、Ni、Cu、Hg 和 Cd 分布基本一致, 最大值均出现在 8cm 处, 且 Hg 的污染较重, 最大值超过了沉积物背景值的 6.1 倍, 8cm 向上有所降低, 说明近年来加大了对农村生活污水的处理, 减少了生活污水对汝溪河的污染, 因此较以往重金属含量有所降低. I 和 III 区 8 种重金属在垂向分布基本一致, 总体在表层表现为明显的重金属富集, I 区为汝溪河自然河段, 未直接受到人为活动以及三峡水库水位影响, 但近年农业面源污染是目前造成三峡库区水体富营养化的重要原因之一^[26], 该区域重金属表现为由下层至表层的富集趋势可能为农业面源污染通过地表径流、大气迁移和降雨等途径进入汝溪河水体, 进而沉降于沉积物中. III 区为汝溪回水区, 周期性的水位变化导致大量干流水体倒灌至汝溪河回水区, 水动力作用减弱导致水体中细颗粒物吸附的重金属大量地沉积至沉积物中.

2.3 汝溪河沉积物重金属污染评价及生物毒性效应

地累积指数评价法显示汝溪河表层沉积物的 I_{geo} 为 $-0.79 \sim 1.69$, 总体污染程度为: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Hg}$

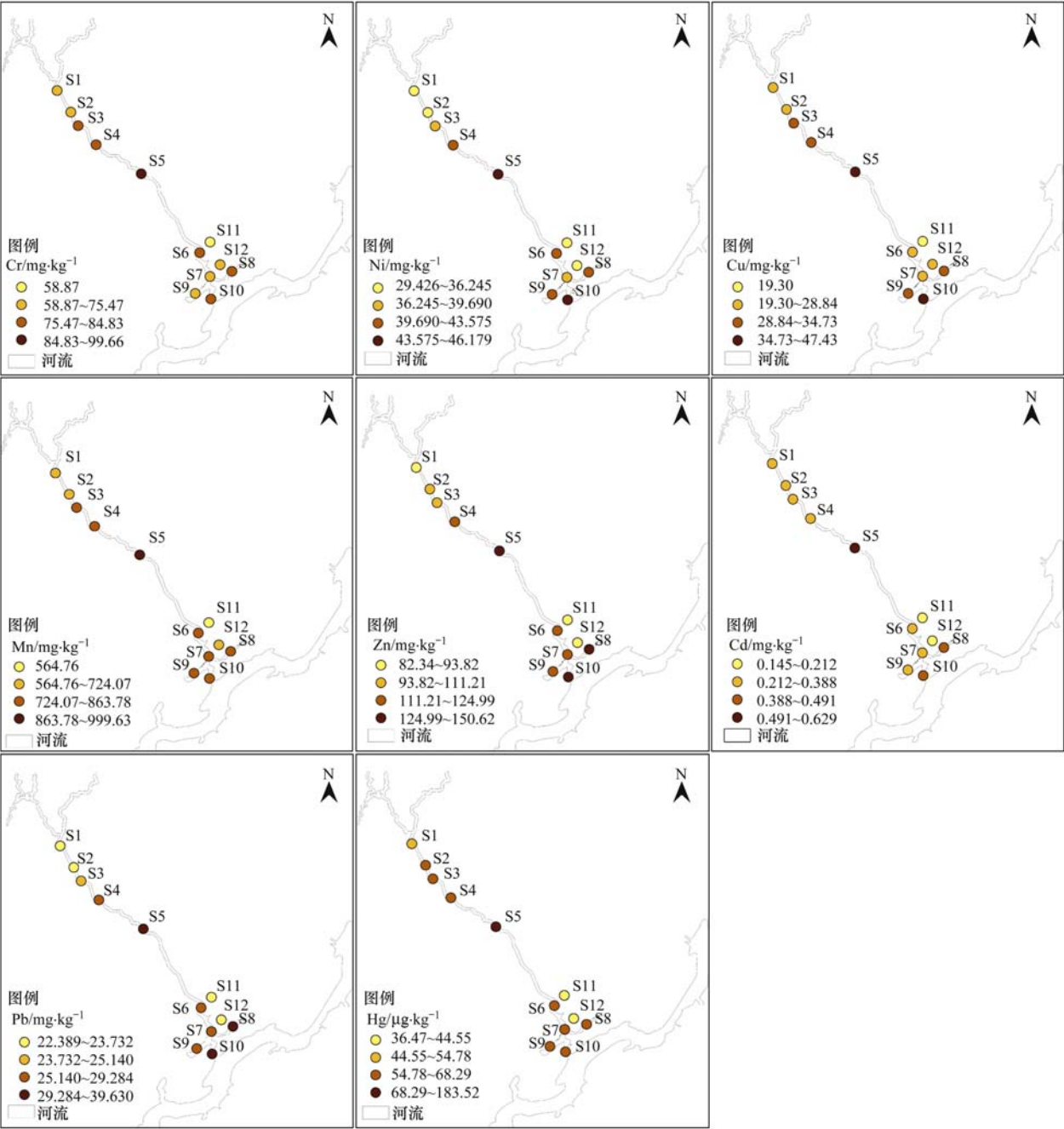


图2 汝溪河表层沉积物重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in the surface sediment of the Ruxi River

> Ni > Mn > Cu > Pb > Cr (图4), 其中, 在所有样点中, Cr 地累积指数均 < 0, 呈现出无污染状态, Hg 和 Mn 呈现只在 S5 点呈现偏重度和轻度污染, Pb 在 S10 河口处呈现轻度污染, Ni 和 Cu 都在 S10 和 S5 点位呈现轻度污染, 其余点位均呈现无污染状态, Zn 除了在自然河段 S1 和 S2 点位呈现无污染外, 其余点位均呈现轻度污染, 污染最重的为 Cd, 所有点位均呈现不同程度污染, 其中 S5、S8 和 S10 为偏中度污染. 整体而言, 整条河段主要呈现 Cd 和 Zn 污染, 受汝溪场镇生活影响河段和河口还呈现出 Hg、Pb、Ni 和 Cu 等重金属污染, 从河道划分的研究区域来看, 重金属污染程度表现为 II > III > I. II 区域

沉积物重金属含量高主要原因: 一是该区域为汝溪场镇生活影响河段, 大量未来得及处理的生活污水、网箱养鱼废水输送至汝溪河; 二是成库后, 干流水体淹没至汝溪河涂井乡约 15km 河段, 致使汝溪镇至长江河段长度减少, 导致水体的自净能力降低, 三是因为汝溪场镇至涂井乡之间的拦河电站将水积蓄, 水流速度减慢, 在重力的作用下水体中吸附了重金属的悬浮颗粒物进入沉积物. 因此, 污染物进入汝溪河后未能“稀释”或“搬运”而转移至进入沉积物中.

从生物毒性效应看, 汝溪河整条河段所有点位上 Cd、Zn、Hg、Ni、Cu、Pb 和 Cr 这 7 种重金属浓度均未超过 ERM 水平[图 5(a)], 同时, Cd 和 Pb 的

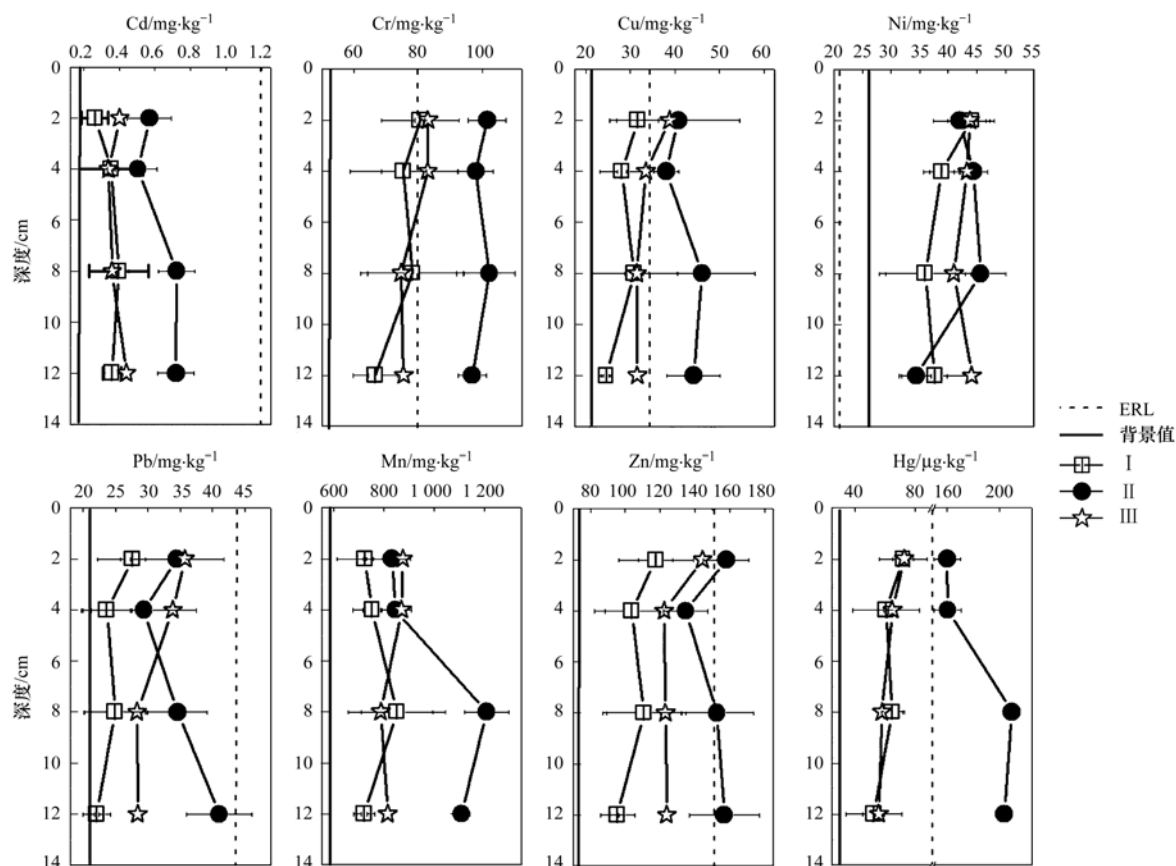
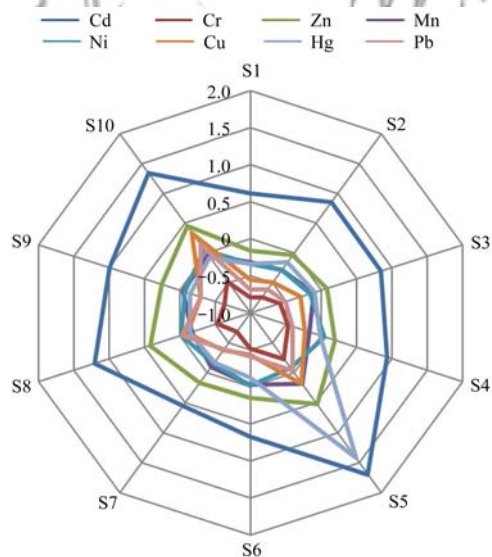


图3 汝溪河沉积物中重金属的垂直分布特征

Fig. 3 Vertical profiles of heavy metals in sediments of the Ruxi River

图4 汝溪河表层沉积物中重金属 I_{geo} 值Fig. 4 The I_{geo} of heavy metals in the surface sediment of the Ruxi River

浓度均未超过 ERL 水平,部分样本重金属 Zn、Hg、Cu 和 Cr 的浓度超过 ERL 水平,分别占总样本数的 12.5%、10.0%、40.0% 和 45.0%,重金属 Ni 的浓度在所有样点均超过 ERL,介于 ERL 和 ERM 之间.从整体看,汝溪河沉积物 Cd、Zn、Hg、Cu、Pb 和 Cr 的平均浓度均为超过相应的 ERL,仅有 <10% 的可能

会出现生物毒害效应,形成的负面效应较小,而 Ni 的平均浓度超过了 ERL 水平,则有 10%~75% 可能对生物造成毒害效应.图 5(b) 是汝溪河不同样点 ERMQ 效应系数,所有样点均处于低级至中低级水平,这说明汝溪河采样点沉积物中 Cd、Zn、Hg、Ni、Cu、Pb 和 Cr 这 7 种重金属造成的生物毒性效应较小,但均未出现低级标准,这说明汝溪河的生物正面临着沉积物重金属造成的生物毒害风险.

2 种评价方法的结果具有一定的差异性,地累积指数法显示 Cd 和 Zn 为轻度至偏中度污染, Ni 仅有在 S10 和 S5 点位呈现轻度污染,其余样点为无污染,而生物毒性效应毒性效应显示 Ni 有 10%~75% 可能对生物造成毒害效应,这主要归因于评估指标的原则不同.地累积指数法主要将重金属含量与背景值比较反映外源重金属的输入累积状况, SQG 主要揭示重金属当前的生物毒性状况,因此尽管汝溪河沉积物重金属中存在一定 Cd 和 Zn 的污染,但它们的毒性并未威胁到水生生物.

2.4 汝溪河沉积物重金属来源和影响因素分析

有研究认为^[27,28],当一定区域内沉积物重金属来源相同或相似时,重金属间会呈现显著的相关性^[7].汝溪河表层及岩心沉积物 8 种重金属元素含量、黏粒组分及 TOC 含量 Pearson 相关分析见表 2,

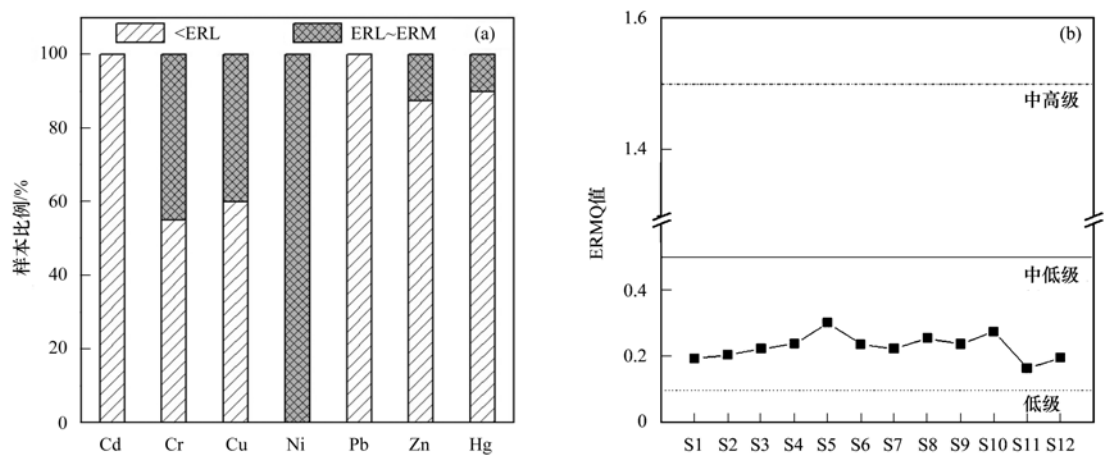


图5 SQGs 效应阈值样本比例和 ERMQ 值分布

Fig. 5 Sample percentage based on SQGs effect threshold and distribution of the ERMQ value

可以看出除 Ni 外,Cd、Zn、Hg、Mn、Cu、Pb 和 Cr 均呈现两两显著性正相关,相关系数为 0.442 (Hg vs. Pb, $P < 0.01$) ~ 0.850 (Zn vs. Pb, $P < 0.01$), 因 Cd、Zn、Hg、Cu、Pb 和 Cr 普遍存在于化肥和农药中^[29,30],且结合汝溪河重金属的空间分布特征看,这 7 种重金属主要集中在受人为活动影响的 II 区,表明这 7 种重金属可能受同一因素控制或具有相似的来源性.同时,沉积物的粒度组成和有机质含量被认为是影响沉积物中重金属含量的重要因素^[3,31],在沉积过程中,粒度不同的沉积物的沉积行为和动力学也不同,主要由有机物质和黏土矿物组成的细颗粒物,比表面积较大,有较强的吸附交换能力,能够更多地吸附和富集水体中的重金属,从而成为较强的“汇”^[32].汝溪河沉积物中除 Ni 无显著相关关系外,Cd、Zn、Hg、Mn、Cu、Pb 和 Cr 这 7 种重金属与黏粒组分均呈显著正相关关系. Cd、Zn、Mn、Cu、Pb、Cr 与 TOC 呈现显著负相关,Ni 和 Hg 与 TOC 无明显相关性.表明在汝溪河沉积物中粒度组成与重金属在汝溪河中环境行为存在密切关系.沉积物的粒度分布也证实了这一点(见图 6),河口处表层沉积物粒度主要以黏粒和粉粒为主,高达

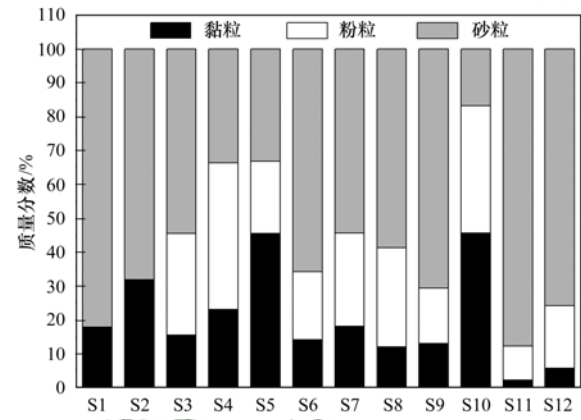


图6 汝溪河表层沉积物粒度分布

Fig. 6 Percentage of grain size of heavy metals in the surface sediment of the Ruxi River

83%,增加了该位点对重金属的吸附能力.

通过主成分分析法对重金属的污染来源进行分析(图 7),Cd、Zn、Hg、Mn、Ni、Cu、Pb 和 Cr 这 8 种重金属、TOC 及黏粒组分之间共提取出 2 个主成分,解释了总方差的 67.16%,主成分 1 是控制沉积物重金属分布及来源的主要因子,对总方差的贡献为 55.47%,该成分主要为 Cd、Zn、Hg、Mn、Cu、Pb、Cr 和黏粒,结合相关性分析(表 2),说明黏粒可

表2 汝溪河沉积物重金属含量、黏粒组分(<4 μm)及 TOC 含量相关性矩阵¹⁾

Table 2 Correlation matrix of heavy metals and mud fraction (<4 μm) and TOC in sediments of the Ruxi River										
	Cd	Cr	Zn	Mn	Ni	Cu	Hg	Pb	TOC	黏粒
Cd	1	0.559 **	0.599 **	0.527 **	0.066	0.534 **	0.612 **	0.540 **	-0.371 *	0.458 **
Cr		1	0.808 **	0.677 **	0.379 *	0.719 **	0.720 **	0.691 **	-0.410 **	0.412 **
Zn			1	0.622 **	0.399 *	0.780 **	0.538 **	0.850 **	-0.481 **	0.430 **
Mn				1	0.126	0.559 **	0.611 **	0.557 **	-0.423 **	0.360 *
Ni					1	0.326 *	0.096	0.409 *	-0.180	0.157
Cu						1	0.506 **	0.776 **	-0.368 *	0.563 **
Hg							1	0.442 **	-0.269	0.590 **
Pb								1	-0.437 **	0.424 **
TOC									1	-0.300
黏粒										1

1) * * 表示相关系数在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

能是这些重金属元素的主要载体,环境中的 Pb 和 Zn 主要来源于燃煤和铅锌矿业,含铅汽油也是 Pb 污染的主要来源,而 Cu 主要来源于金属冶炼等, Zn、Cu、Cd、Pb 和 Cr 普遍存在于农药化肥中,经实地调查,汝溪河周边没有工厂,说明这几种重金属主要来源于燃煤、交通尾气以及农药和化肥的施用.主成分 2 能解释总方差的 11.69%,是次要的重金属分布控制因子,该成分为 Ni,说明汝溪河中 Ni 具有单独的来源,Ni 主要来源于冶金锻造行业,而汝溪河周边并没有相关的工厂,说明汝溪河中 Ni 主要来源于岩石风化、大气沉降以及河流的搬运作用.

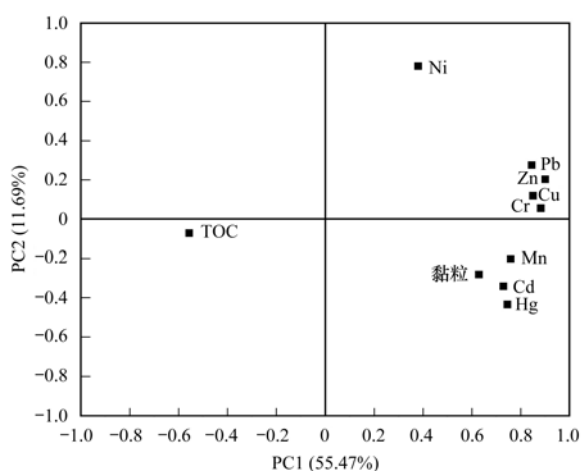


图7 汝溪河沉积物中 TOC、黏粒组分及重金属元素主成分载荷图

Fig. 7 Main plane of the principal component analysis of TOC and mud fraction and heavy metals in the sediments from the Ruxi River

3 结论

(1) 汝溪河沉积物中重金属含量分布具有明显的空间差异性,表现为受汝溪场镇生活影响河段 > 回水区 > 自然河段,回水区河道沿岸沉积物及土壤中重金属含量远低于沉积物中,说明河道沿岸土壤并不是汝溪河回水区沉积物重金属的主要来源.垂向分布上,受汝溪场镇生活影响河段最大值出现在 8 cm 处,自然河段和回水区随深度的增加呈下降的趋势.

(2) 相关性分析和主成分分析表明,除 Ni 外, Cd、Zn、Pb、Mn、Cu、Hg、Cr 之间具有相似的来源,主要来源于燃煤、交通尾气以及农药和化肥的施用,且黏粒可能是这些重金属元素的主要载体. Ni 主要来源于岩石风化、大气沉降以及河流的搬运作用.

(3) 根据地累积指数评价结果得出,重金属 Cd 和 Zn 在汝溪河沉积物中呈现轻度至偏中度污染. SQGs 评价结果知,汝溪河沉积物中 Ni 造成生物毒

害效应的概率为 10% ~ 75%, ERMQ 综合评价结果显示,重金属在汝溪河沉积物中造成的生物毒害风险为低级至中低级,这说明汝溪河的生物正面临着沉积物重金属造成的生物毒害风险.

参考文献:

- [1] 张杰,郭西亚,曾野,等.太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J].环境科学,2019,40(5):2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river Sediments from Lake Taihu basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2202-2210.
- [2] 唐黎,李秋华,陈椽,等.贵州普定水库沉积物重金属分布及污染特征[J].中国环境科学,2017,37(12):4710-4721.
Tang L, Li Q H, Chen C, *et al.* Distribution and pollution characteristics of heavy metals in sediments of Puding Reservoir, Guizhou Province[J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4710-4721.
- [3] 李小林,刘恩峰,于真真,等.异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险[J].环境科学,2019,40(2):614-624.
Li X L, Liu E F, Yu Z Z, *et al.* Contamination and potential ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Yilong Lake, southwest China [J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 614-624.
- [4] Yang Z F, Wang Y, Shen Z Y, *et al.* Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(2-3): 1186-1194.
- [5] Deng J C, Wang Y S, Liu X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals and As pollution in the sediments of a shallow lake [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(5): 596.
- [6] 徐晨,王沛芳,陈娟,等.望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学,2019,40(11):4914-4923.
- [7] 覃雪波,孙红文,彭士涛,等.生物扰动对沉积物中污染物环境行为的影响研究进展[J].生态学报,2014,34(1):59-69.
Qin X B, Sun H W, Peng S T, *et al.* Review of the impacts of bioturbation on the environmental behavior of contaminant in sediment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 59-69.
- [8] 钟宇,付广义,向仁军,等.湘江沉积物重金属生态风险及释放通量研究[J].中国环境科学,2018,38(10):3933-3940.
Zhong Y, Fu G Y, Xiang R J, *et al.* The ecological risk assessment and releasing flux estimation of heavy metal in the Xiangjiang River sediments[J]. China Environmental Science, 2018, 38(10): 3933-3940.
- [9] 边博,周燕,张琴.太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价[J].环境科学,2017,38(4):1442-1450.
Bian B, Zhou Y, Zhang Q. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals from river network sediment in Western Area of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2017, 38(4): 1442-1450.
- [10] 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.
- [11] 李锦秀,禹雪中,幸治国.三峡库区支流富营养化模型开发研究[J].水科学进展,2005,16(6):777-783.
Li J X, Yu X Z, Xing Z G. Eutrophication model for the branch of Three-Gorges Reservoir [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 777-783.
- [12] 纪道斌,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水动力

- 特性分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, **40** (1): 101-112.
- Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2010, **40** (1): 101-112.
- [13] 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 等. 三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39** (6): 2607-2614.
- Fang Z Q, Chen Q Y, Yin D L, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in the sediments of the estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (6): 2607-2614.
- [14] 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.
- [15] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Spatial variation of heavy metal contamination in the riparian sediments after two-year flow regulation in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1004-1016.
- [16] 商和辉, 林伟清. 不同预处理方法对南海东沙海域沉积物粒度的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, **30** (1): 141-146.
- Shang H H, Lin W Q. Influence of different pretreatment methods on grain sizes of the Dongsha sediments of the South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, **30** (1): 141-146.
- [17] Walkley A. An examination of methods for determining organic carbon and nitrogen in Soils. (with one text-figure.) [J]. *Journal of Agricultural Science*, 1935, **25** (4): 598-609.
- [18] 赵一阳, 鄯明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [19] 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.
- [20] Roach A C. Assessment of metals in sediments from Lake Macquarie, New South Wales, Australia, using normalisation models and sediment quality guidelines [J]. *Marine Environmental Research*, 2005, **59** (5): 453-472.
- [21] 方晓航, 刘晓文, 魏东洋, 等. 太湖流域漕桥河沉积物重金属污染特征分布[J]. *环境化学*, 2012, **31** (6): 771-776.
- Fang X H, Liu X W, Wei D Y, *et al.* Heavy metal distribution characteristics in sediment of Caoqiao River, Taihu Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31** (6): 771-776.
- [22] Long E R, MacDonald D D. Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine Ecosystems [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1998, **4** (5): 1019-1039.
- [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] 王图锦. 三峡库区消落带重金属迁移转化特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [25] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究[J]. *地质地球化学*, 1998, **26** (2): 1-8.
- [26] 崔超. 三峡库区香溪河流域氮磷入库负荷及迁移特征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [27] 郭西亚, 高敏, 张杰, 等. 阳澄湖沉积物重金属空间分布及生物毒害特征[J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (2): 802-811.
- Guo X Y, Gao M, Zhang J, *et al.* Characteristics of spatial distribution and biological toxicity for heavy metals in sediments of the Yangcheng Lake [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (2): 802-811.
- [28] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35** (1): 186-193.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (1): 186-193.
- [29] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. *浙江理工大学学报*, 2009, **26** (2): 223-227.
- [30] 平令文. 典型北方菜田常用肥料中重金属含量分析与评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [31] Liu E F, Shen J. A comparative study of metal pollution and potential eco-risk in the sediment of Chaohu Lake (China) based on total concentration and chemical speciation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21** (12): 7285-7295.
- [32] 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.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)