

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

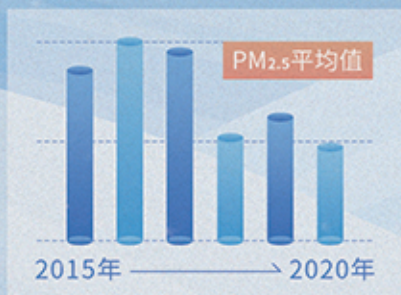
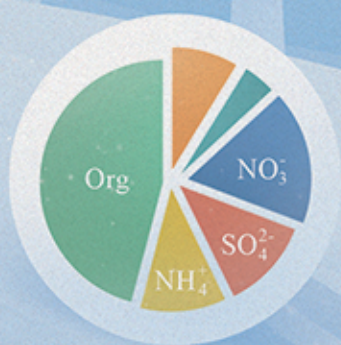
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同整合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应：以重庆市梁滩河为例

王超¹, 贾伯阳², 潘成勇², 何文战^{2*}, 叶秋², 罗杉山², 张夏武²

(1. 中国长江三峡集团有限公司博士后科研工作站, 北京 100038; 2. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430062)

摘要: 梯级拦河堰通过改变水力条件的方式将大量重金属元素滞留到河底沉积物中, 滞留在沉积物中的重金属会长期影响地表水质和水生态。在 2020 年 5 月采集位于重庆市主城区、布设有梯级拦河堰的典型山地城市河流——梁滩河干流河底沉积物, 并监测各河段内沉积物累积量和样品中重金属元素含量以及其它基本理化指标。结果表明, 梁滩河干流沉积物 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 均值分别为 (4.66 ± 4.78) 、 (0.361 ± 0.256) 、 (32.30 ± 14.38) 、 (0.069 ± 0.039) 、 (33.47 ± 15.37) 和 $(26.34 \pm 11.52) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 由于污染源空间分布不均和梯级拦河堰对河流连通性的破坏, 各点位沉积物重金属含量有着较大的空间变异系数。改进的地累积指数 (I_m) 显示, Cd 是沉积物中污染水平最高的重金属元素; 有 12.50% 的监测点位处于偏中度或中度污染水平, 污染主要分布于建设用地集中的上下游区域。潜在生态风险评价指数法 (RI) 和沉积物质量基准法 (SQGs) 显示, 除污染水平较高、毒性强的 Cd 和 Hg 外, 流域内背景值含量较高的 Ni 也对地表水生态风险形成威胁。在梯级拦河堰的影响下, 干流沉积物中滞留 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 总量分别为 446.10、47.28、4 997.80、10.81、5 135.68 和 4 048.16 kg, 其中 Cd、Ni 和 Pb 会长期威胁地表水生态安全。由于较高的重金属滞留总量和更易形成厌氧环境, 各级拦河堰上游附近河段也是重金属内源释放所需关注的重点区域。利用主成分分析和聚类分析解析沉积物中重金属元素来源: Cd、Cu 和 Pb 主要源于居民/工业点源污染; Hg 主要源于农业面源污染; As 和 Ni 主要源于自然土壤侵蚀。

关键词: 山地城市河流; 梯级拦河堰; 沉积物; 重金属元素; 生态风险; 来源解析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4018-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111040

Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs: A Case Study of Liangtan River in Chongqing

WANG Chao¹, JIA Bo-yang², PAN Cheng-yong², HE Wen-zhan^{2*}, YE Qiu², LUO Shan-shan², ZHANG Xia-wu²

(1. Post-Doctoral Scientific Research Workstation, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430062, China)

Abstract: Contaminants such as heavy metals in rivers are partially retained in the sediments at the bottom as a result of the altered water regime within the cascade weirs. The associated heavy metals in the sediments can affect surface water quality and ecology for a long period. In May 2020, sediments were collected in a typical mountainous river (Liangtan River) with cascade weirs in the main urban area of Chongqing. The accumulation of sediments in each river section, the content of heavy metals, and other basic physicochemical indicators in the samples were monitored. The results showed that the average $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Hg})$, $\omega(\text{Ni})$, and $\omega(\text{Pb})$ in the sediments of the main stream of Liangtan River were (4.66 ± 4.78) , (0.361 ± 0.256) , (32.30 ± 14.38) , (0.069 ± 0.039) , (33.47 ± 15.37) , and $(26.34 \pm 11.52) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. A large coefficient of spatial variation regarding the content of heavy metals in the sediments across the sampling sites was observed owing to the uneven spatial distribution of pollution sources and the destruction of river connectivity by cascade weirs. The modified geoaccumulation index (I_m) showed that Cd was the most polluted heavy metal element in the sediments. Of the monitored river sections, 12.50% approached or were at moderate pollution levels, and these sections were mainly found in the upstream and downstream reaches of Liangtan River with relatively concentrated construction lands. The potential ecological risk assessment index method (RI) and the sediment quality guideline method (SQGs) showed that, in addition to Cd and Hg with a high pollution level and strong toxicity, Ni in the sediments also posed a potential threat to the ecological safety of surface water due to its high background content in the watershed. The total amounts of As, Cd, Cu, Hg, Ni, and Pb retained in the sediments by cascade weirs were estimated to be 446.10, 47.28, 4 997.80, 10.81, 5 135.68, and 4 048.16 kg, respectively, in which Cd, Ni, and Pb were identified to be the major threats to the ecological safety of surface water over a long period. The upper reaches prior to the weirs with the most retained heavy metals and the easier formation of an anaerobic environment are suggested to be the key areas for investigation of the endogenous release of heavy metals. Source apportionment of heavy metals in river sediments through the combination of principal component analysis and cluster analysis revealed that Cd, Cu, and Pb mainly originated from residential/industrial point source pollution. Hg mainly originated from agricultural non-point source pollution, whereas As and Ni mainly originated from natural soil erosion.

Key words: mountainous urban river; cascade weirs; sediment; heavy metals; ecological risk; source analysis

重金属具有不易迁移且难降解的特性, 有相当比例外源输入地表水的重金属会滞留在沉积物中, 成为影响地表水质的潜在威胁^[1~3]。我国城市经历了长期缺乏环境监管和快速扩张的发展时期, 城市内存在有大量污染严重的工业, 也缺乏市政设施处理城市居民生活污水; 新纳入城市区域的远郊仍存

在农业生产, 这些区域包含大量过度施肥、施用农药的种植农业和饲料添加剂滥用、粪污不能得到妥

收稿日期: 2021-11-04; 修订日期: 2021-12-14

作者简介: 王超(1987~), 男, 博士, 主要研究方向为元素地球化学循环, E-mail: wangchao241221@163.com

* 通信作者, E-mail: he_wenzhan@ctg.com.cn

善处理的畜禽养殖业^[4,5]、工业废水、生活污水和农业面源污染等外源重金属向地表水的长期输入,造成了重金属在城市河湖系统沉积物中的累积^[6~8]。重金属内源释放对地表水质的降低和现阶段城市居民对人居水环境的更高要求形成了一对不可调和的矛盾。

水坝和拦河堰等水工构筑物通过改变流速等水力条件的方式,将泥沙和吸附泥沙上的重金属元素滞留水工构筑物上游^[9,10]。学者们通过野外监测出入库地表水重金属浓度和水工构筑物影响区沉积物中重金属含量,基本掌握了水工构筑物对重金属元素的滞留效应与机制,库区重金属的时空分布特征、污染程度和毒理情况等^[11~13]。但现有研究多集中于大型水库^[11~13],对分布于次级支流中的拦河堰关注较少。由于次级支流具有水量较小、不稳定等特点,位于城市的次级支流水质更易与人类活动间产生双向影响^[5,14]。拦河堰对重金属元素的滞留会长期影响城市地表水质^[9],梯级拦河堰会强化滞留效应。因此,有必要开展拦河堰、特别是梯级拦河堰对重金属元素滞留的研究。此外,重金属含量和总量均是沉积物中重金属元素内源释放的关键因素^[15,16],但受限于较大的研究尺度,学者们对重金属元素在大型水库中的累积总量缺乏实测数据,更多研究集中于水库滞留作用对沉积物中重金属含量空间分布的影响^[11~13]。在较小尺度的次级支流流域,有利于开展拦河堰等水工构筑物滞留地表水中重金属元素总量的相关研究。

梁滩河位于三峡库区库尾,是长江的二级支流。梁滩河流域位于主城区西侧,属典型的城市山地流域。为充分利用水资源,沿河布设有 18 座拦河堰。梯级拦河堰在拦蓄水源的同时,也滞留了大量的重金属等污染物。由于长期缺乏水环境监管,从 20 世纪 90 年代市属环境监测站开始监测水质起,梁滩河干流水质基本维持在劣 V 类水,其中以氮磷等营养元素污染为主,重金属也存在一定程度的污染^[17]。随着近些年对越来越严厉的环保监察和环保措施的有效实施,外源污染输入得到有效控制,但对梁滩河上下游河段水质监测中发现地表水中仍维持着较高的重金属浓度,单以重金属为评判因子,地表水污染程度达到了 IV 类水标准^[18,19]。沉积物中重金属元素的内源释放可能是现阶段地表水重金属的重要来源之一。本研究通过对梁滩河干流沉积物重金属含量、沉积量的监测与分析,揭示梯级拦河堰对山地城市流域地表水重金属元素的滞留效应和空间分布的影响,以期对山地城市流域地表水环境综合治理提供理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

梁滩河是嘉陵江下游右岸一级支流,起源于重庆市九龙坡区白市驿镇廖家沟水库,贯穿重庆市九龙坡、沙坪坝和北碚这 3 个区。流域总面积 510 km²,干流河道总长 88.7 km,总落差 224 m,平均坡降 2.60‰。流域地形属狭长的山间拗陷,东西两侧被中梁山和缙云山相隔,呈现南北长、东西窄。流域属亚热带季风性气候,历年均气温 18.3℃,年均降水量 1 088.6 mm,年内降雨分配不均,4~9 月降雨量占全年降雨量的 80.4%。年均径流量 2.08 亿 m³,年均流量 6.6 m³·s⁻¹^[4]。土壤类型包含紫色土、石灰岩土、黄壤、冲积土和水稻土这 5 类土,其中以紫色土为主。流域内共有小(2)型及以上规模的水库 45 座,山坪塘 179 处,干流分布有 18 座拦河堰(图 1)。

1.2 样品采集与分析

2020 年 5 月沿梁滩河干流进行河底沉积物样品采集(图 1)。利用重力式抓斗沿河流深泓线采集沉积物样品,采样深度为 20~30 cm。同一点位采集 3 次并将其混合为一个样品,共采集 32 个沉积物样品。样品当日送回实验室冷冻干燥处理,过 100 目筛后低温保存。样品采集的同时,沿梁滩河干流每隔约 400 m 左右测定沉积物淤积深度和河道断面面积,并计算各段河流沉积物滞留总量,计算公式如下所示:

$$M_i^j = C_i^j \times S \times L \times \rho_s$$

$$k_i^n = \sum_{j=1}^n M_i^j / \sum_{j=1}^{208} M_i^j$$

式中, M_i^j 为第 i 种重金属在第 j 段河道中的累积量,共将河道分为 208 段; C_i^j 为第 i 种重金属在第 j 段河道中的含量,本文用监测点位沉积物中重金属含量指代同一座拦河堰影响河段内附近未监测的沉积物; S 为沉积物断面面积(河道宽度在 12~50 m,沉积物深度在 15~120 cm); L 为每段河道的长度,约 400 m; ρ_s 为沉积物容重,取 $1.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 k_i^n 为从上游至下游 n 段河道内重金属滞留总量占全干流总量的比例。

采用 pH 玻璃电极测定沉积物悬浊液的方式测定沉积物 pH 值(NY/T 1121.2-2006);有机质(TOC)测定采用灼烧减量法(HJ 761-2015);沉积物中的总砷(As)和总汞(Hg)采用原子荧光法测定(GB/T 22105-2008),总镉(Cd)、总铜(Cu)、总镍(Ni)和总铅(Pb)采用王水提取-电感耦合等离子体质谱法测定(HJ 803-2016)。重金属含量测定中加标

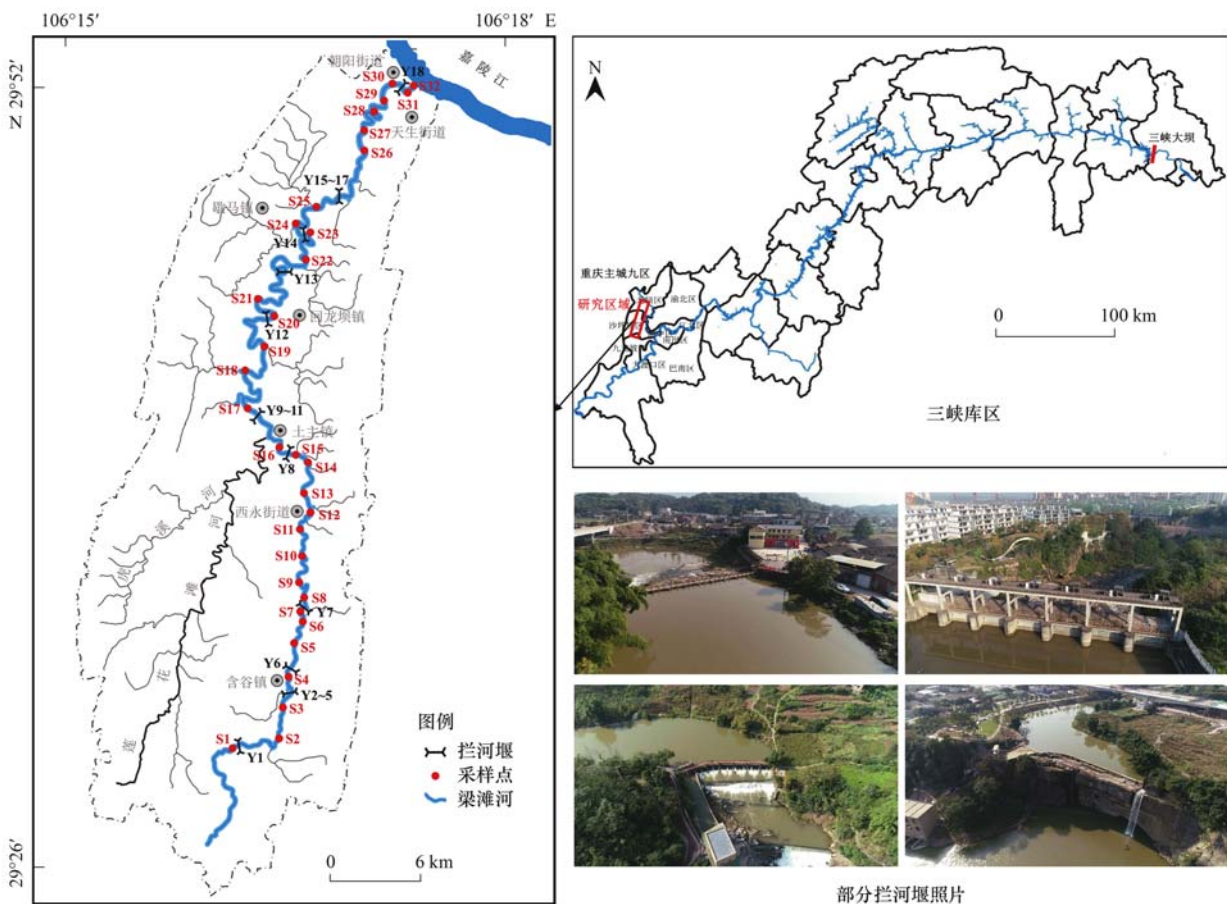


图1 采样点分布示意
Fig. 1 Locations of sampling sites in the study area

回收率在 95%~115% 之间, 3 组平行样品分析误差均小于 15%.

1.3 数据处理

相关计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 (C_i / k \times B_i)$$
$$I_m = \log_2 \left[\left(0.5 \times \left\{ \text{ave} \left(\frac{C_i}{k \times B_i} \right)^2 + \max \left(\frac{C_i}{k \times B_i} \right)^2 \right\} \right)^{0.5} \right]$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, 用于判断沉积物中重金属的污染程度^[20]; C_i 为第 i 种重金属实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为克服流域内不同成土母质空间变异性而取的修正系数, 一般取 1.5; B_i 为第 i 种重金属背景值, 选取重庆市都市圈土壤为背景值, As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 背景值分别为 5.82、0.133、23.83、0.053、30.65 和 25.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21]. I_{geo} 为利用内梅罗指数法改进的地累积指数, $\text{ave} [C_i / (k \times B_i)]$ 和 $\max [C_i / (k \times B_i)]$ 分别为所测重金属污染指数平均值和最大值, I_m 为改进的地累积指数. 评价等级共分无污染 ($I_{geo} / I_m \leq 0$)、轻度污染 (0~1)、偏中度污染 (1~2)、中度污染 (2~3)、中强度污染

(3~4)、强度污染 (4~5) 和极强度污染 (≥ 5) 这 7 个等级^[22].

$$RI = \sum_{i=1}^n [T_i \times (C_i / B_i)]$$

式中, RI 为潜在生态危害指数, 用于判断沉积物中重金属的潜在生态风险^[23]; T_i 为第 i 种重金属的毒性系数, As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 分别为 10、30、5、40、5 和 5; C_i 为第 i 种重金属含量实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为第 i 种重金属背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 评价等级共分低风险 ($RI < 150$)、中等风险 (150~300)、较高风险 (300~600) 和高风险 (≥ 600) 这 4 个等级^[23].

$$ERMQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{ERM_i} \right)$$

式中, ERMQ 为基于沉积物质量基准 (SQGs)^[24] 所计算的沉积物中重金属生物毒害效应系数, 也用于评价沉积物中重金属的潜在生态风险. C_i 为第 i 种重金属实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; ERM_i 为第 i 种重金属生物毒害效应中值, As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 分别为 70、9.6、270、0.71、52 和 218 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 当沉积物中任意重金属含量高于 ERM 时, 出现生物毒害现象的概率高于 75%. 评价等级共分低风险 (ERMQ <

0.1)、中等风险(0.1~0.5)、较高风险(0.5~1.5)和高风险(≥ 1.5)这4个等级^[25]。

采用 SPSS 19 数据处理软件,利用冗余分析和 Pearson 相关性分析解析沉积物中各种重金属间的相关关系;利用主成分分析和聚类分析定性判断沉积物中重金属来源.利用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 和 Bartlett 球形测试实验数据进行统计分析的适用性,KMO 值和球形测试概率分别为 0.729 和 0,证明实验数据合适做因子分析.由于沉积物中各重金属含量间存在差异,在主成分分析和聚类分析前,使用 Z-score 对重金属含量进行标准化处理。

2 结果与讨论

2.1 梁滩河干流沉积物重金属含量、污染程度和生态风险

如图 2 所示,梁滩河干流沉积物 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 均值分别为 (4.66 ± 4.78) 、 (0.361 ± 0.256) 、 (32.30 ± 14.38) 、 (0.069 ± 0.039) 、 (33.47 ± 15.37) 和 $(26.34 \pm 11.52) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别为重庆市都市圈背景值^[21]的 0.80、2.71、1.36、1.30、1.09 和 1.03 倍,污染最为严重的是 Cd,然后依次为 Cu 和 Hg.各采样点位沉积物 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 含量间的变异系数分别为 102.73%、71.01%、44.51%、56.78%、45.93% 和 43.93%,说明梁滩河干流沉积物中重金属元素有着较大的空间变异。

利用传统地累积指数法对沉积物中重金属污染情况做进一步分析,干流沉积物中 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 的 I_{geo} 均值分别为 -1.59、0.61、-0.26、-0.41、-0.60 和 -0.64(图 3).根据 I_{geo} 分级标准,梁滩河干流沉积物中仅 Cd 含量均值达到轻度污染,其中有 15.43% 和 9.38% 的点位达到偏中度和中度污染,还有 53.13% 的点位达到轻度污染。

刘子赫等^[26]认为传统地累积指数法会低估重金属污染风险,并结合内梅罗指数法进行了改进,其改进的地累积指数法更加重视找出研究区域内沉积物中污染严重的重金属元素,本研究是利用内梅罗指数法改进传统地累积指数法,意在突出研究区域中污染严重的重点位置.干流沉积物各点位改进的地累积指数 I_m 均值为 0.35(图 4),属轻度污染,其中有 6.25% 和 6.25% 的点位达到偏中度和中度污染,还有 50.00% 的点位达到轻度污染,与依据 I_{geo} 分级的结果基本一致.梁滩河干流沉积物中重金属污染程度较高的区域主要集中于梁滩河上游源头和下游入河口附近(图 4),土地利用状况和梯级拦河堰共同导致了流域内沉积物中污染较为严重的 Cd、Cu 和

Hg 含量上下游高、中游低的空间分布特征(图 2).首先,在上游源头和下游入河口,大量建设用地沿梁滩河干流带状分布^[27],这些河段长期承接大量未经处理的、富含重金属的居民生活污水和工业废水.研究表明当变异系数大于 20% 时流域沉积物中重金属含量受到人类活动的影响^[7].梁滩河沉积物中重金属污染程度较低(图 3 和图 4),但有着较高的重金属空间变异系数(43.93%~102.73%),梯级拦河堰对梁滩河干流联通性的破坏起到了一定作用^[28],它减小了重金属元素向下游输移的可能,使进入河流的重金属更易就近滞留到河底沉积物中。

利用潜在生态风险评价指数法和沉积物质量基准法评价沉积物重金属污染对水生态造成的不良影响.梁滩河干流沉积物各点位 RI 均值为 158.66,其中有 34.38% 和 9.38% 的点位达到中等和较高风险,剩余点位均处于低风险水平(图 5).各点位 ERMQ 均值为 0.18,其中有 96.88% 的点位达到中等风险,仅有 1 个点位处于低风险(图 5),较高的 RI 和 ERMQ 可能是梁滩河水生态较差的重要原因之一^[29].其中,Cd 和 Hg 是对 RI 贡献最高的两个重金属元素,贡献率分别达到了 51.31% 和 32.67%,这也是我国其它流域河流、湖泊沉积物污染最为常见的两种重金属元素^[3,7,8].Cd 和 Hg 对 RI 贡献大的原因主要有两个,一是梁滩河干流沉积物中相较于区域背景值更高的 Cd 和 Hg 含量,二是在 RI 评价体系中赋予了 Cd 和 Hg 很高的毒性系数^[23].与 RI 评价体系不同,Ni 是对 ERMQ 贡献最高的重金属元素,贡献率达到了 59.32%.造成两种方法存在显著差异的原因是两者计算中的所参考标准不同导致的,潜在生态风险评价指数法参考研究区域重金属背景值,而沉积物质量基准法以 ERM 为参考标准.较高的 Ni 背景值含量也让潜在生态风险评价指数法忽视了 Ni 对水生态带来的影响.71.88% 的点位 $\omega(\text{Ni})$ 处在生物毒害效应范围低值(ERL)($21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 ERM($52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)之间,出现生物毒害性的概率在 10%~75% 之间;9.38% 的点位大于 ERM,出现生物毒害性的概率高于 75%^[24].高俊敏等在对梁滩河干流地表水的研究发现,Ni 是水体中超标最为严重的重金属元素^[19],间接佐证了除了含量高且毒性强的 Cd 和 Hg,流域内背景值含量高的 Ni 也对地表水生态形成威胁。

2.2 梯级拦河堰影响下梁滩河干流沉积物中重金属滞留总量

在上覆水氧化还原电位、pH、温度和流速等环境因素发生改变时^[2,16,30],滞留在沉积物中的重金属通过解析-扩散或生物吸收的方式重新释放到上

覆水中,沉积物中重金属总量可以在一定程度上反映河流系统中重金属内源释放潜力. 在梯级拦河堰

的作用下,梁滩河干流沉积物中滞留 As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 总量分别为 446. 10、47. 28、4 997. 80、

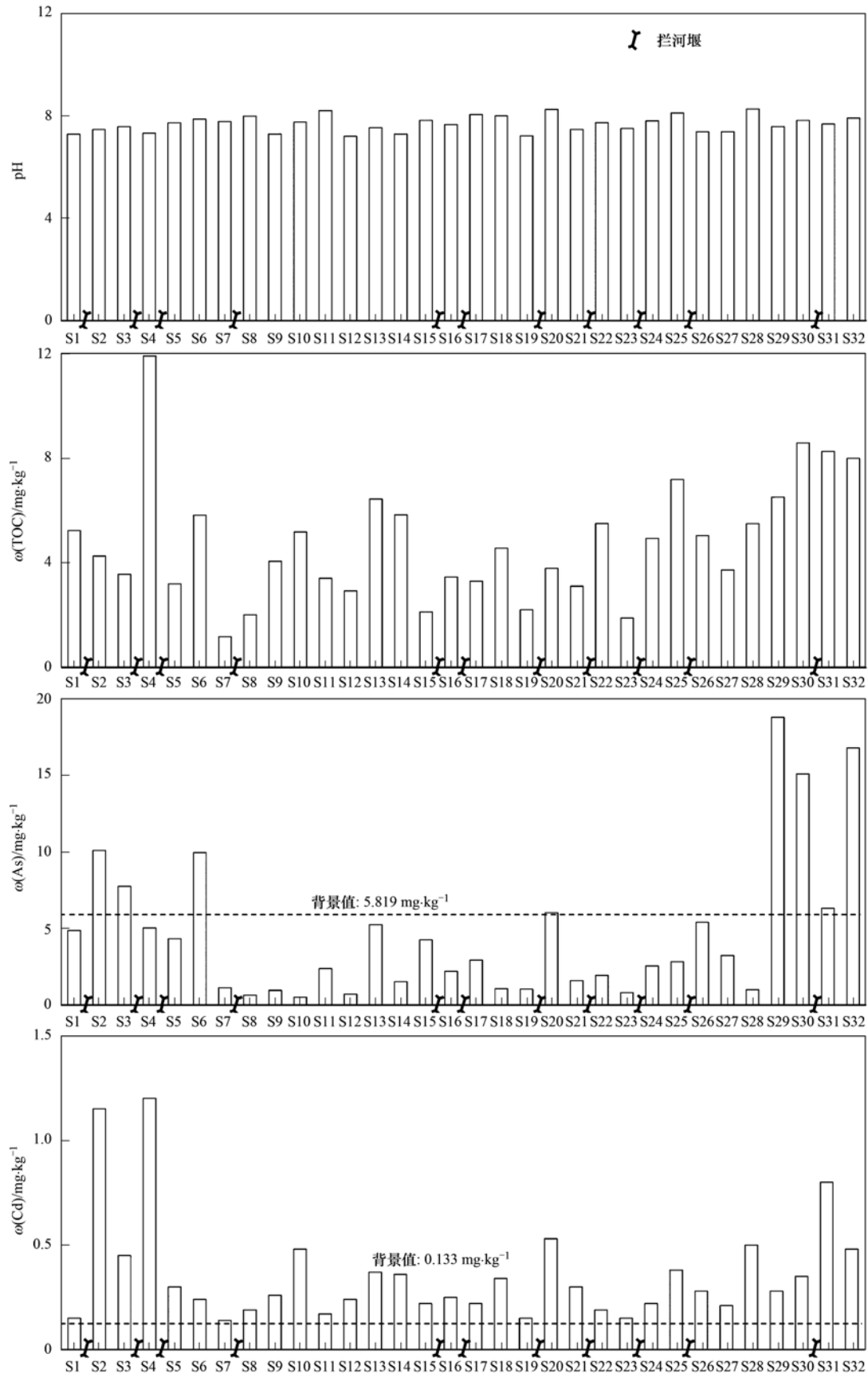
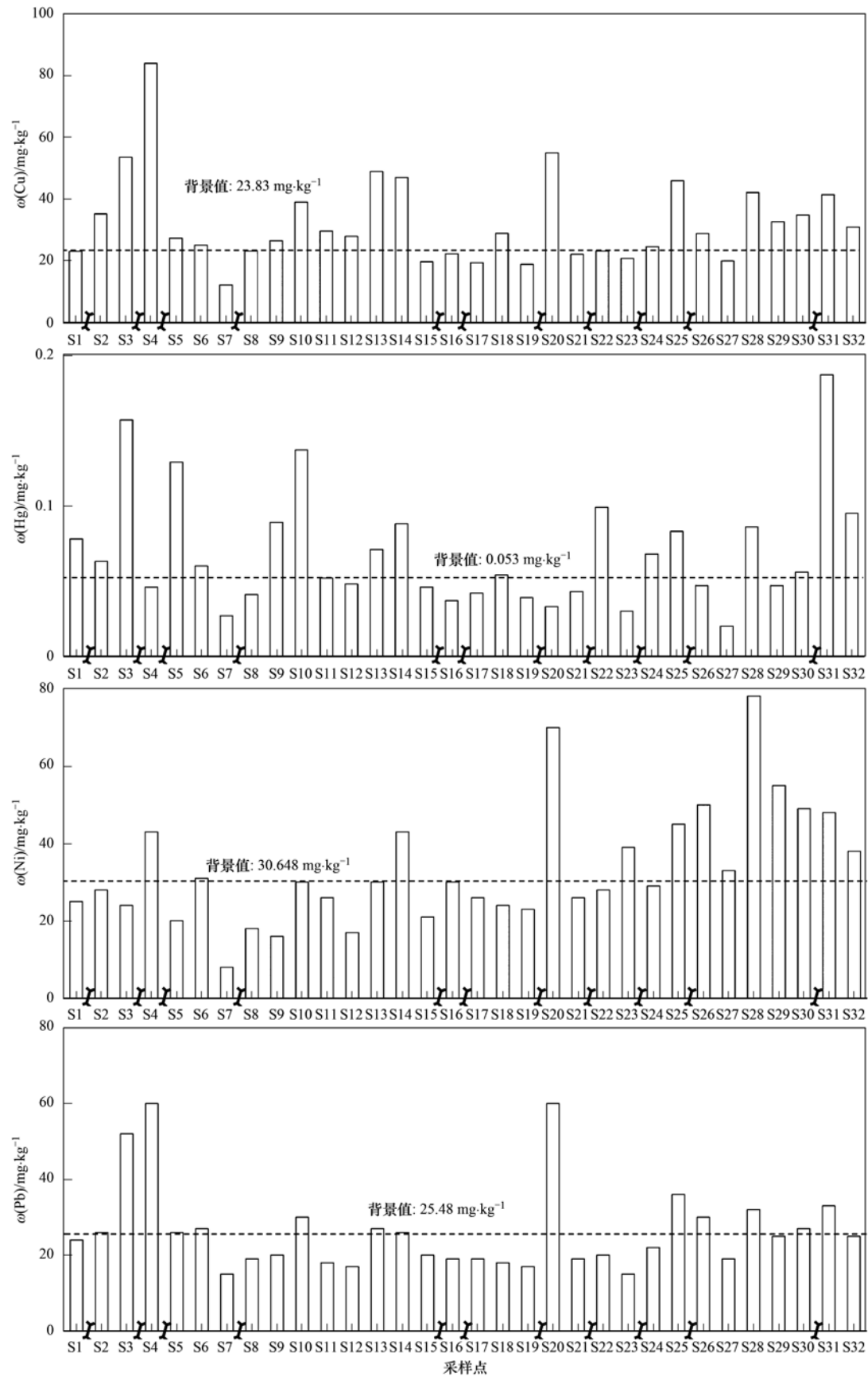


图 2 沉积物中各种重金属元素的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of the concentrations of various heavy metals in sediments

续图2



10.81、5 135.68和4 048.16 kg (图6). 美国 EPA Ecotox 毒理数据库(<https://www.epa.gov/ecotox>)所公布的淡水水生生物慢性毒性的 As、Cd、Hg、Ni 和 Pb 限值分别为 150、0.72、0.77、52 和 2.5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 长期以来梁滩河干流水体重金属浓度高于此生态风险阈值^[19]. 要维持梁滩河地表水全年达到慢性毒性限值, 每年需向地表水中输入 As、Cd、Hg、Ni 和 Pb 约为 30.0、0.144、0.154、10.4 和 0.5

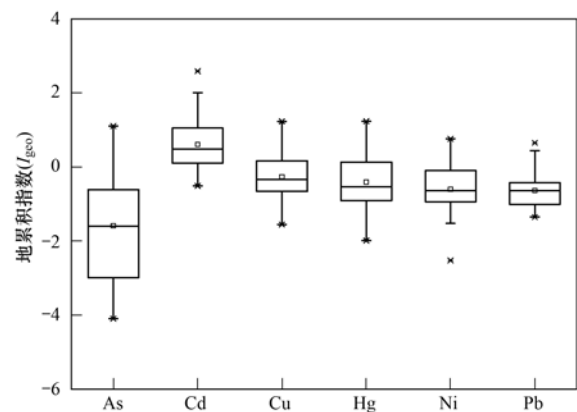


图3 沉积物中重金属的地累积指数(I_{geo})

Fig. 3 Geoaccumulation index of heavy metals in sediments

t,分别是干流沉积物中滞留重金属的67.2、3.0、14.2、2.0和0.1倍。Wang等^[31]利用梯度薄膜扩散技术(DGT)对白洋淀沉积物内源释放过程进行原位监测表明,即使沉积物中重金属含量接近区域背景值,Cd、Ni和Pb等重金属元素也存在一定程度的内源释放通量。假设地表水中的重金属均来自内源释放且全年维持在生物慢性毒性限值,从上述粗略的总量计算可以看出,沉积物中仅有Pb能够长期影响地表水生态。

本研究中仅计算了干流中滞留的重金属总量,流域内还有莲花滩河和虎溪河等众多支流,各支流上也布设有拦河堰、水库等小型水利工程,支流沉积物中同样滞留了相当规模的重金属总量。此外,梁滩河流域大概80%的径流量集中于雨季的降雨-洪水过程。由于降雨-洪水过程中河水流速快,没有充足的时间使沉积物与地表水间的重金属总量达到平衡,内源释放对降雨-洪水过程中地表水重金属浓度贡献有限,沉积物中滞留重金属对地表水质的影响

更多集中于水力停留时间更长的枯水期和平水期。同时,考虑到基流中本身存在的重金属浓度和人类活动所造成的外部输入,沉积物中滞留总量较高的Cd、Ni和Pb均会长期影响地表水生态。

梁滩河干流沉积物滞留As、Cd、Cu、Hg、Ni和Pb总量占比达到全干流总量50%的距离分别为3.24、4.50、4.88、4.90、5.48和5.14 km,泥沙沉积量为5.34 km(图6)。各河段重金属在沉积物中的滞留量主要受泥沙沉积量的影响,如沉积物中Cu、Hg、Ni和Pb在各河段的滞留总量分布状况与泥沙沉积量类似。流域土地利用情况图显示,流域内农业旱地主要集中于梁滩河中游,上下游也有部分分布^[27]。上下游建设用地导致的土地硬化减少了土壤侵蚀,中游受大面积农业面源侵蚀影响,在梯级拦河堰对河流连通性形成严重破坏的情况下,河道内的泥沙沉积呈现上下游低、中游高的趋势。其次,各河段重金属在沉积物中的滞留量还受重金属含量的影响。相关性分析中,沉积物中As含量与沉积量呈显著负相关($n=30, P<0.05$,表1),导致As主要滞留在泥沙沉积量较小的上游沉积物中。由于Cd在泥沙沉积量较小的上下游沉积物中含量较高,Cd在上中下游各河段内的滞留总量分布较为平均。

如图6所示,各级拦河堰的上游河段均会出现重金属滞留量的极大值点,大量滞留的重金属总量为内源释放提供了物质基础^[16]。沉积物重金属含量往往是向上覆水释放重金属总量大小的决定因素。但当重金属含量一定时,通过降低水土比,增加相对于上覆水的沉积物中重金属总量,仍能增加重金属释放风险^[16]。白冬锐等在对于重金属迁移特性相似的磷素研究发现,磷素总量在沉积物和上覆水间的分配系数决定了沉积物中磷素的内源释放量^[32]。此

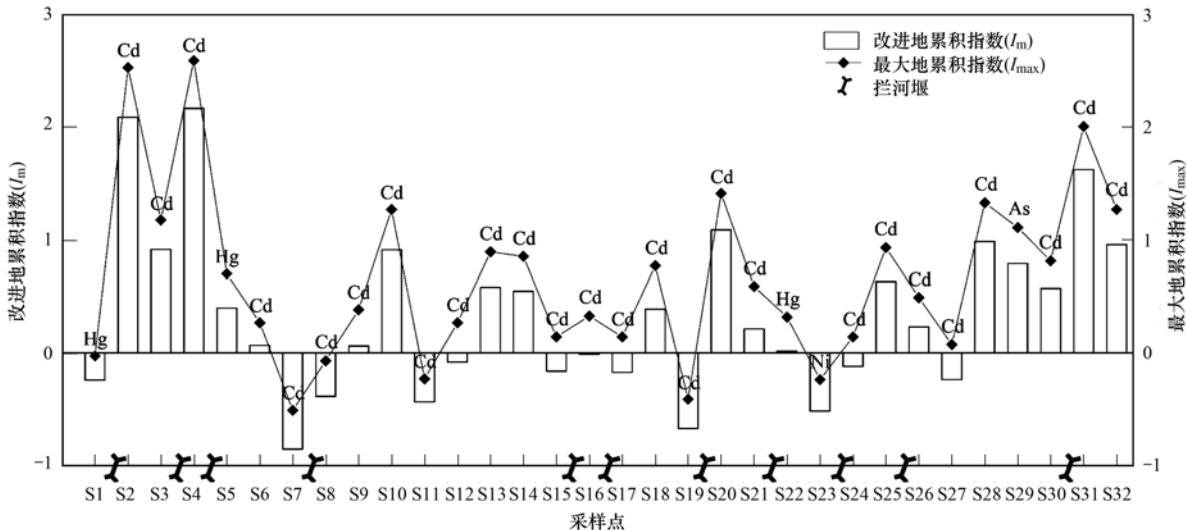


图4 沉积物中重金属的改进地累积指数(I_m)

Fig. 4 Modified geoaccumulation index of heavy metals in sediments

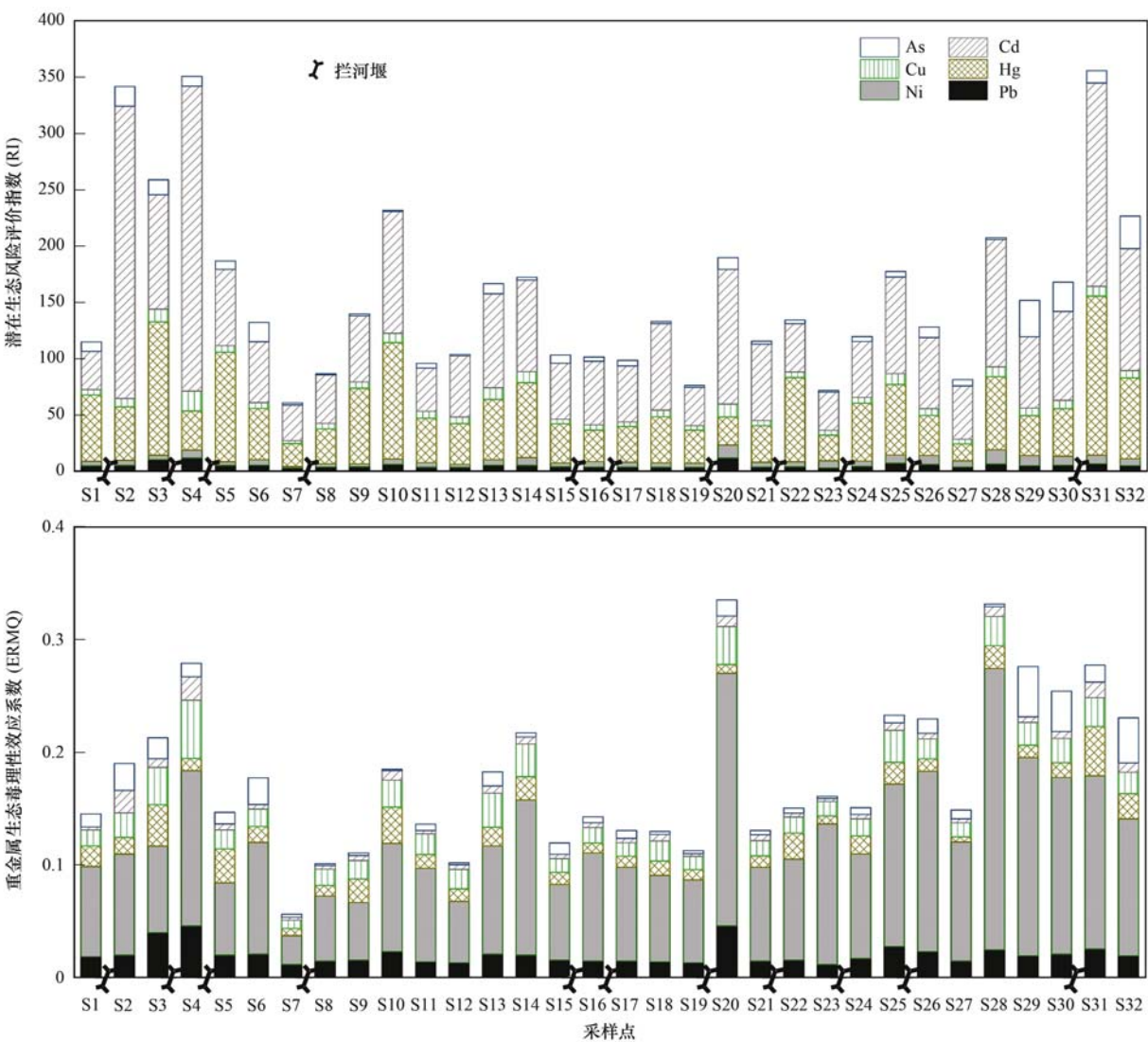


图5 沉积物中重金属的生态风险

Fig. 5 Ecological risks of heavy metals in sediments

表1 沉积物中各种组分间的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation among various components in sediments

	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	pH	TOC	沉积量
As	1.000								
Cd	0.274	1.000							
Cu	0.184	0.734 **	1.000						
Hg	0.097	0.290	0.306	1.000					
Ni	0.335	0.340	0.502 **	0.053	1.000				
Pb	0.247	0.634 **	0.879 **	0.293	0.533 **	1.000			
pH	0.052	-0.065	0.013	0.022	0.312	0.129	1.000		
TOC	0.493 **	0.596 **	0.688 **	0.321	0.498 **	0.523 **	-0.017	1.000	
沉积量	-0.405 *	-0.228	0.018	0.074	-0.111	-0.167	-0.009	-0.051	1.000

1) 除沉积率外各组分 $n=32$, 沉积率 $n=30$; * 表示显著相关性 $P<0.05$, ** 表示显著相关性 $P<0.01$

外,拦河堰增加了上游河段的水力停留时间,增加了在堰前河段沉积物中形成厌氧环境的可能性^[30],为内源释放提供了环境基础.因此,各级拦河堰上游附近河段是重金属内源释放所需关注的重点区域.

2.3 梁滩河干流重金属元素来源解析

利用 RDA 分析影响本研究区域沉积物中重金

属含量空间分布的主要沉积物理化因子,如图 7(a)所示,河底沉积物中仅有 TOC($n=32$, $F=14.6$, $P<0.01$)对梁滩河干流沉积物中重金属含量的空间变异有显著贡献.相关性分析中,除 Hg 外,其余重金属含量也与 TOC 呈显著相关(表 1).TOC 对流域内沉积物中重金属元素空间规律造成显著影响的原因

主要有 3 个：一是沉积物中重金属元素和 TOC 的来 源相同,如居民/工业等点源污染和农业面源污染中

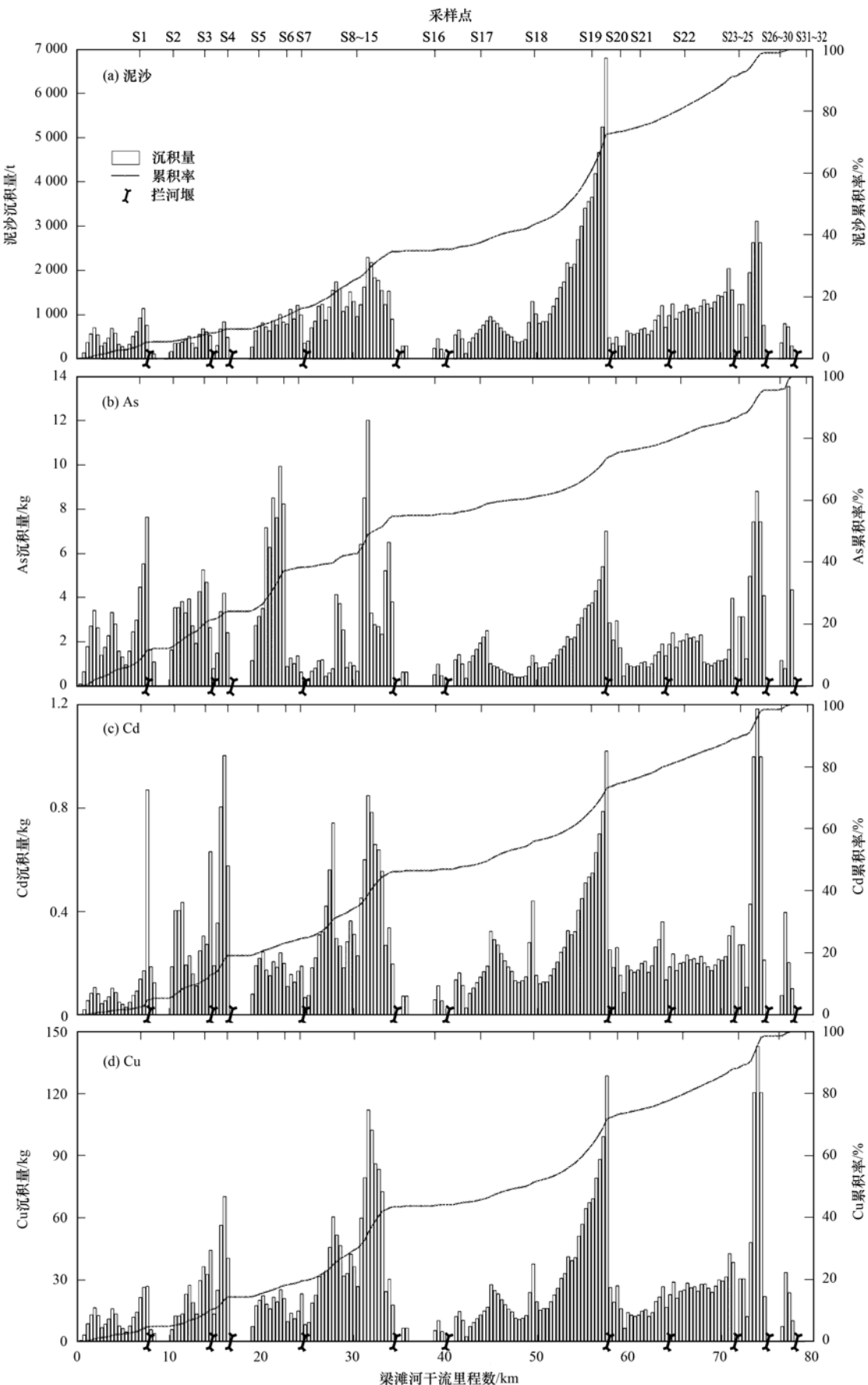
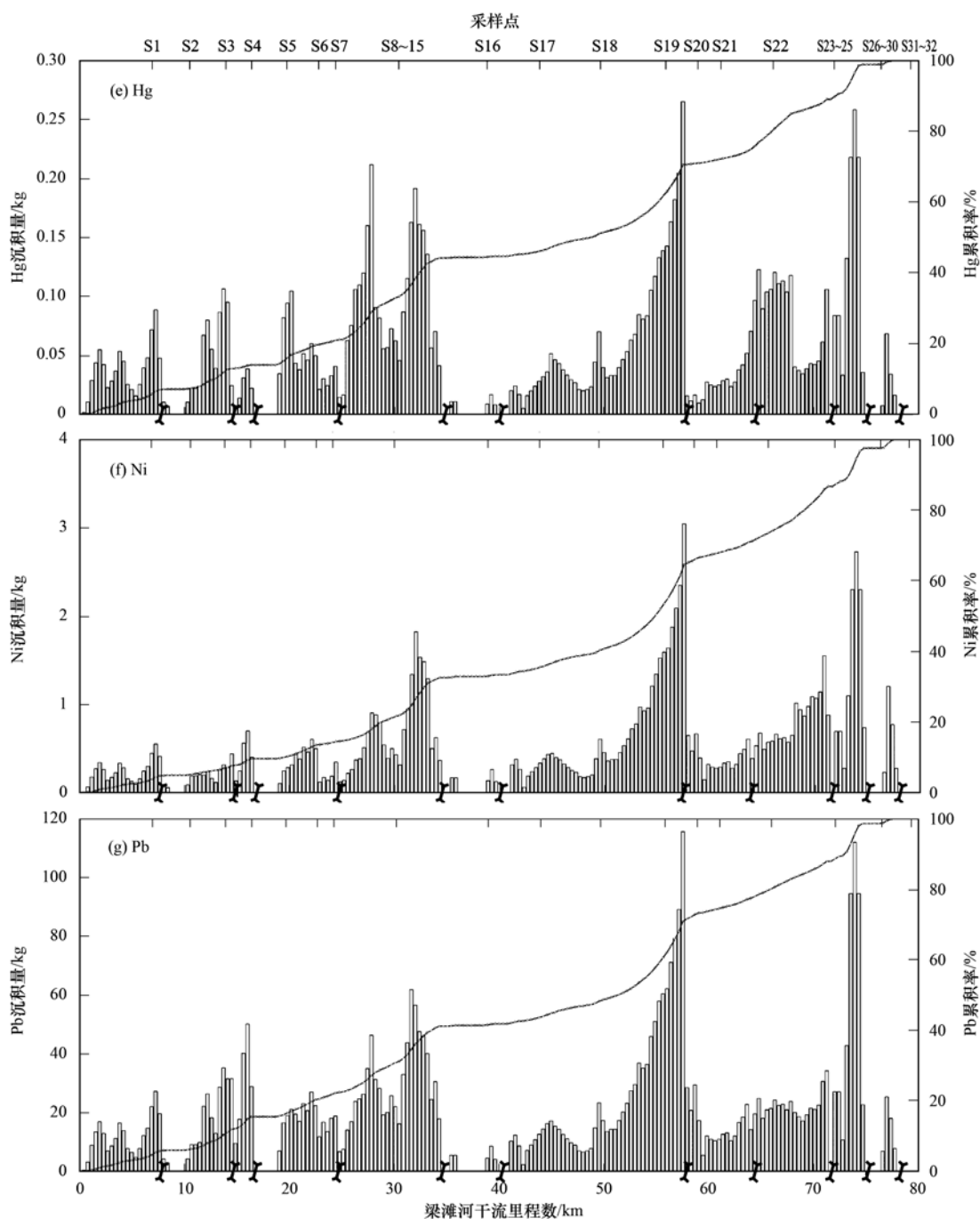


图 6 沉积物中滞留重金属总量

Fig. 6 Total amount of heavy metals retained in sediments

续图6



均可能同时包含有重金属和 TOC^[7]; 二是由于有机质有着极大的比表面积, 有机质吸附重金属离子后两者同步沉积进入沉积物中^[30]; 三是水生植物通过吸收作用富集重金属元素^[33], 水生植物死亡分解后重金属元素也和有机质同步进入沉积物。

主成分分析中将沉积物理化信息的数据集降维为 3 组成分, 共解释了 69.76% 的总方差。第一成分主要包含 Cd、Cu、Pb、As 和 TOC, 解释了 40.74% 的总方差; 第二成分主要包含 Hg 和沉积量, 解释了 15.51% 的总方差; 第三成分主要包含 Ni 和 pH, 解释了 13.51% 的总方差[图 7(b) 和表 2]。对梁滩河干流沉积物重金属进行系统聚类分析发现, 6 种重金属元素大致可以分为两类: 第一类为 Cd、Pb 和

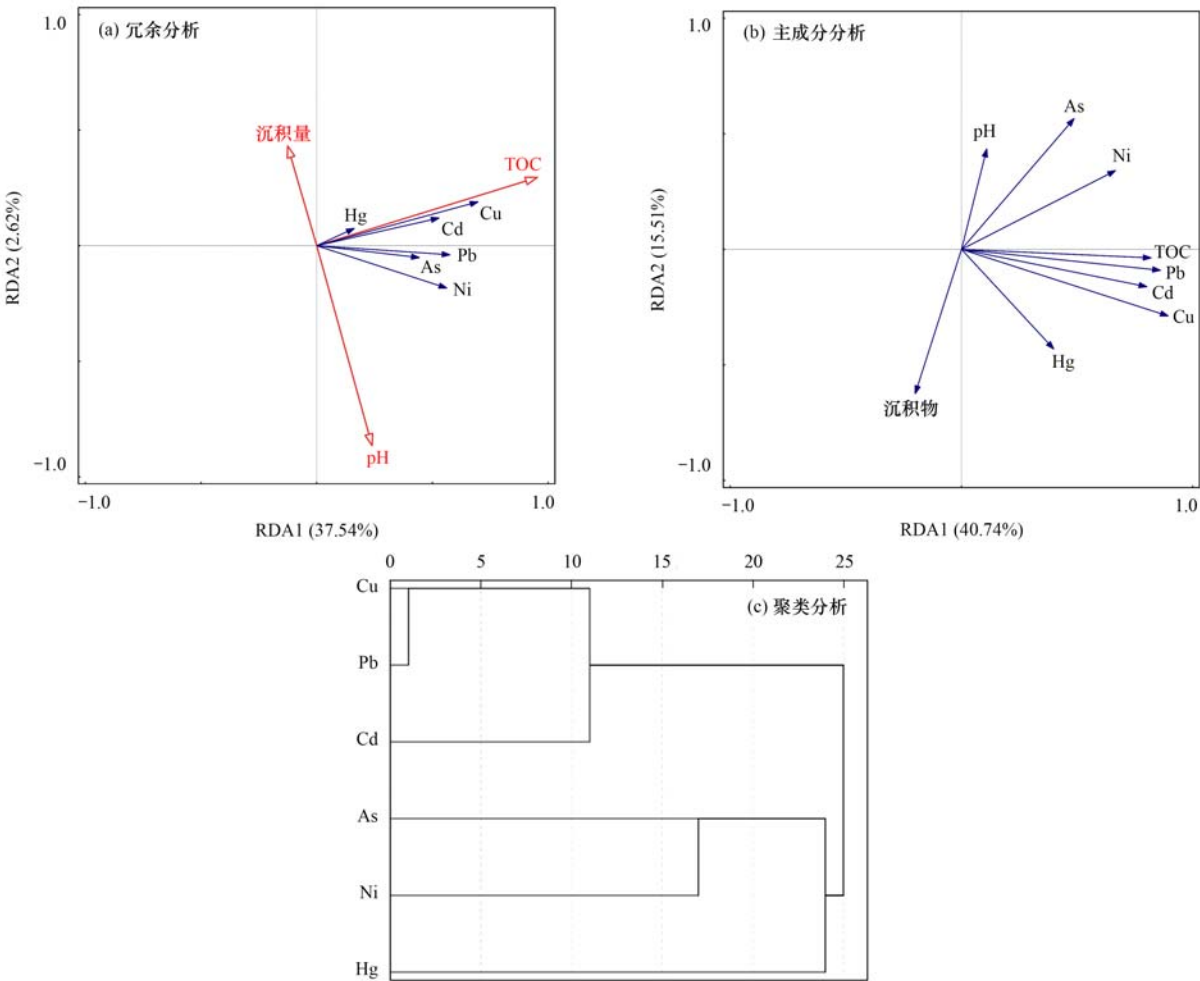
Cu, 3 种元素间的距离较为接近; 第二类为 As、Hg 和 Ni, 3 种元素间的距离较为松散[图 7(c)]。

梁滩河干流依次流经九龙坡(上游)、沙坪坝(中游)和北碚(下游)这 3 个区, 其中流域内各区域建设用地占比分别为 13.13%、13.23% 和 16.12%, 农业用地占比分别为 39.60%、46.97% 和 24.97%^[34]。上游建设用地占比虽然较小, 但主要沿干流分布^[27], 其中含谷镇附近集中了以建材加工、机械制造和食品加工业为主的 7 个产业园。中游建设用地占比也比较小, 且分散于干流和各支流, 工业以规模较小的电镀业为主。下游建设用地占比比较高, 人口也最为稠密, 工业较为分散^[27], 以电镀和机械制造业为主。结合主成分分析和聚类分析解析沉积物

表 2 沉积物中各种组分主成分分析

Table 2 Principal component analysis of various components in sediments

变量	因子载荷			变量共同度
	PCA1	PCA2	PCA3	
As	0.487	-0.604	-0.215	0.648
Cd	0.784	0.080	-0.246	0.682
Cu	0.914	0.309	0.012	0.931
Hg	0.267	0.556	-0.104	0.391
Ni	0.652	-0.270	0.477	0.726
Pb	0.881	0.132	0.096	0.803
pH	0.084	-0.171	0.871	0.795
TOC	0.805	0.042	-0.107	0.661
沉积量	-0.226	0.707	0.301	0.642
特征值	3.667	1.396	1.215	—
方差贡献率/%	40.743	15.514	13.505	—
累积贡献率/%	40.743	56.256	69.761	—



蓝线为目标因子,红线为影响因子

图 7 沉积物中重金属元素的冗余分析、主成分分析和聚类分析

Fig. 7 Redundancy analysis, principal component analysis, and cluster analysis of heavy metals in sediments

中重金属的来源,本研究梁滩河干流沉积物中的重金属来源主要有:居民/工业点源污染、农业面源污染和自然土壤侵蚀这3种来源.沉积物中的Cd、Cu和Pb主要源于居民/工业点源污染,研究表明制造业是河流沉积物中Cd、Cu和Pb污染的重要来

源^[35,36].在制造业集中分布的干流上下游沉积物中,Cd、Cu和Pb有着较高的含量和污染程度(I_{geo}),说明该河段沉积物受到了如居民/工业点源污染等强烈的人类活动干扰.Hg主要来自于农业面源污染,很多杀虫剂和除草剂等农药中含有Hg,伍

福琳等^[37]在对重庆市农地土壤重金属的研究发现,Hg 是梁滩河流域所处的渝中中高丘平行岭谷区累积程度最高的重金属元素.黄朝冉等^[38]对重庆市售卖蔬菜的重金属研究发现,叶菜类蔬菜中 Hg 的质量分数较高,位于重庆主城远郊的梁滩河主要种植也正是经济价值高且不易保存运输的叶菜类蔬菜.Ni 主要源于自然土壤侵蚀,Ni 与区域内背景值接近.电镀业会造成 Ni 等重金属污染^[7],因此虽然整体而言梁滩河干流沉积物中 Ni 污染程度较低,但在分布有电镀厂的中下游河段,部分点位沉积物中存在着较高的 Ni 含量.

主成分分析和聚类分析在对 As 来源的解析中出现了分歧,主成分分析将 As 与 Cd、Cu 和 Pb 归为点源污染一类;而聚类分析将 As 与 Ni 和 Hg 归为面源污染一类.As 是本研究中污染程度最低的重金属元素(图 3),除上下游部分点位外,流域内大部分点位沉积物中 As 含量显著低于背景值.陈高武^[21]对重庆主城区土壤重金属背景值的研究发现,不同点位成土母质间所研究重金属中 As 含量差异最为显著,其中泥岩和灰岩的 $\omega(\text{As})$ 分别为 $5.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.重庆主城区不同岩石类型间隔分布^[21]、不同岩石类型在流域内的空间分布导致了不同河段间沉积物 As 的含量差异,如在梁滩河上下游分布了 As 含量较高的泥岩,而在中游分布了 As 含量较低的灰岩,这也导致了 As 含量与沉积量的负相关关系和流域内沉积物中 As 滞留量的空间分布特征.因此,As 更应该源于自然土壤侵蚀.

3 结论

(1)在污染源空间分布不均和梯级拦河堰对河流连通性的破坏的双重作用下,梁滩河干流各点位沉积物重金属含量间有较大的空间变异性.通过内梅罗指数法改进的地累积指数(I_m)显示,沉积物中 Cd 的污染程度最高;有 12.50% 的监测点位达到偏中度或中度污染水平,污染集中于人口聚居的上下游河段,还有一半点位处于轻度污染水平.沉积物中 Cd、Hg 和 Ni 会对地表水生态形成威胁.

(2)梯级拦河堰共将 446.10 kg As、47.28 kg Cd、4997.80 kg Cu、10.81 kg Hg、5 135.68 kg Ni 和 4 048.16 kg Pb 滞留到梁滩河干流沉积物中.根据滞留总量粗略估算,所监测的重金属中 Cd、Ni 和 Pb 会长期影响地表水生态安全.各级拦河堰前河段沉积物中滞留了较高的重金属总量,在堰前沉积物中易于形成有利于重金属内源释放的厌氧环境.因此,拦河堰上游附近河段应作为重金属内源污染关心的重点区域.

(3)由于与重金属同源、吸附能力强和植物对重金属的富集效应等原因,TOC 是影响干流沉积物中重金属含量空间分布的关键因子.利用主成分分析和聚类分析综合判断沉积物中重金属元素来源主要有 3 类: Cd、Cu 和 Pb 主要源于居民/工业点源污染; Hg 主要源于农业面源污染; As 和 Ni 主要源于自然土壤侵蚀.

参考文献:

- [1] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment; a preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 282-291.
- [2] Kong M, Zhu Y Z, Han T L, *et al.* Interactions of heavy metal elements across sediment-water interface in Lake Jiaogang [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117578.
- [3] 李星谕,李朋,苏业旺,等. 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 859-866.
Li X Y, Li P, Su Y W, *et al.* Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 859-866.
- [4] 吴林键. 梁滩河流域污染原因分析及改善措施探讨[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2011, **30**(3): 456-460, 518.
Wu L J. On pollution sources and improvement measures of the Liangtan River watershed water quality [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2011, **30**(3): 456-460, 518.
- [5] 樊卫国,敖亮,张晟. 山地城市小流域污染状况和对策研究——以重庆市巴南区花溪河为例[J]. *安徽农业科学*, 2020, **48**(6): 55-58, 63.
Fan W G, Ao L, Zhang S. Study on pollution status and countermeasures of small watersheds in mountainous cities—Taking Huaxi River in Banan district of Chongqing as an example [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, **48**(6): 55-58, 63.
- [6] Zhu Y J, Lu X W, Yang L N, *et al.* Accumulation and source of heavy metals in sediment of a reservoir near an industrial park of northwest China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2016, **10**(4): 707-716.
- [7] 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.
- [8] 伍娟丽,王永刚,王旭,等. 通州区河流沉积物重金属污染评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(1): 71-78.
Wu J L, Wang Y G, Wang X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface sediment of rivers in Tongzhou District [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(1): 71-78.
- [9] Thoms M C. The distribution of heavy metals in a highly regulated river: the River Murray, Australia [A]. In: *Water Quality and Sediment Behaviour of the Future: Predictions for the 21st Century* [C]. Perugia: IAHS, 2007.
- [10] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al.* Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges

- Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-480**: 258-266.
- [11] Zhu H, Bing H J, Wu Y H, *et al.* The spatial and vertical distribution of heavy metal contamination in sediments of the Three Gorges Reservoir determined by anti-seasonal flow regulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 79-88.
- [12] 匡帅, 保琦蓓, 康得军, 等. 典型小型水库表层沉积物重金属分布特征及生态风险[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(2): 336-348.
- Kuang S, Bao Q B, Kang D J, *et al.* Distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface sediments deposited in a typical small sized water reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(2): 336-348.
- [13] 王蒙蒙, 宋刚福, 翟付杰, 等. 陆浑水库沉积物重金属空间分布特征及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1331-1339.
- Wang M M, Song G F, Zhai F J, *et al.* Spatial distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments of Luhun Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1331-1339.
- [14] 毕见霖, 王立硕, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
- Bi J L, Wang L S, Wang X H, *et al.* Temporal and spatial variations of eutrophication and its risks in the urban rivers with unconventional water sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
- [15] 霍文毅, 陈静生. 我国部分河流重金属水-固分配系数及在河流质量基准研究中的应用[J]. *环境科学*, 1997, **18**(4): 10-13.
- Huo W Y, Chen J S. Water particulate distribution coefficient of heavy metal and application in sediment quality criteria in China river[J]. *Environmental Science*, 1997, **18**(4): 10-13.
- [16] 黄斌. 重金属在稻田土壤中的吸附、富集、迁移特征及稳定化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- Huang B. Studies on the adsorption, accumulation, transportation and immobilization of heavy metals in paddy soil [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [17] 郑学琴, 李杨, 吴林键, 等. 三峡库区梁滩河流域水质污染状况研究[J]. *三峡环境与生态*, 2012, **34**(3): 24-28.
- Zheng X Q, Li Y, Wu L J, *et al.* Investigation on water pollution of Liangtan River watershed in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2012, **34**(3): 24-28.
- [18] 袁红, 傅瓦利. 城镇化对水体重金属分布影响及生态风险分析[J]. *人民长江*, 2009, **40**(11): 34-36.
- Yuan H, Fu W L. Impact of urbanization on heavy metal elements distribution in water and ecological risk analysis[J]. *Yangtze River*, 2009, **40**(11): 34-36.
- [19] 高俊敏, 张科, 周彬, 等. 三峡库区次级河流梁滩河重金属污染特征分析及风险评价[J]. *重庆大学学报*, 2013, **36**(5): 86-93.
- Gao J M, Zhang K, Zhou B, *et al.* Characteristic analysis and risk assessment of heavy metal pollution in Liangtan River, a tributary of Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, **36**(5): 86-93.
- [20] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [21] 陈高武. 重庆都市圈土壤重金属元素迁移富集及生态效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- Chen G W. A study on migration and enrichment of heavy metals in soil and their ecological effects in Chongqing metropolitan area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [22] Bhuiyan M A H, Parvez L, Islam M A, *et al.* Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **173**(1-3): 384-392.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(9): 2157-2164.
- Liu Z H, Meng R H, Dai H X, *et al.* Evaluation of heavy metals pollution in surface sediments using an improved geo-accumulation index method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(9): 2157-2164.
- [27] 潘昭宇. 基于GIS的城市用地生态适宜性分析研究[J]. *福建建筑*, 2012, (10): 9-11, 15.
- Pan Z Y. Ecological suitability analysis based on GIS land [J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2012, (10): 9-11, 15.
- [28] Huang H Q, Liu J H, Zhang F H, *et al.* Characteristics of planktonic and sediment bacterial communities in a heavily polluted urban river[J]. *PeerJ*, 2021, **9**, doi: 10.7717/peerj.10866.
- [29] 张方辉, 黄河清, 李雪飞, 等. 基于底栖动物完整性指数(B-BI)的水生态健康评价——以梁滩河和濑溪河为例[J]. *环境影响评价*, 2019, **41**(6): 79-85.
- Zhang F H, Huang H Q, Li X F, *et al.* Assessment for ecosystem health based on benthic index of biotic integrity (B-BI): a case study of Liangtan River and Laixi River [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2019, **41**(6): 79-85.
- [30] Lin J J, Zhang S, Liu D, *et al.* Mobility and potential risk of sediment-associated heavy metal fractions under continuous drought-rewetting cycles[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **625**: 79-86.
- [31] Wang J K, Zeng X L, Xu D Y, *et al.* Chemical fractions, diffusion flux and risk assessment of potentially toxic elements in sediments of Baiyangdian Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138046.
- [32] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- Bai D R, Zhang T, Chen T, *et al.* Distribution characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus bearing pollutants in the ancient town rivers of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1403-1415.
- [33] Gao J M, Sun X Q, Jiang W C, *et al.* Heavy metals in sediments, soils, and aquatic plants from a secondary anabranch of the three gorges reservoir region, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 10415-10425.
- [34] 龚得春. 梁滩河流域拟除虫菊酯农药多介质残留和环境行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.

- [35] 陈志凡, 徐薇, 化艳旭, 等. 开封城市河流底泥重金属积累生态风险评价及同位素源解析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1321-1330.
Chen Z F, Xu W, Hua Y X, *et al.* Ecological risk assessment and isotope source analysis of heavy metals accumulated in sediments of Kaifeng urban rivers [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1321-1330.
- [36] 贾宝杰, 何淑芳, 黄茁, 等. 台州市安溶泾河道底泥重金属污染特征及生态风险评价[J]. 长江科学院院报, 2021, **38**(6): 32-36.
Jia B J, He S F, Huang Z, *et al.* Heavy metals pollution characteristics and ecological risk assessment of sediments in Anrongjing River in Taizhou city [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, **38**(6): 32-36.
- [37] 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 等. 重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5116-5126.
Wu F L, Chen L, Yi T H, *et al.* Determination of heavy metal baseline values and analysis of its accumulation characteristics in agricultural land in Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 5116-5126.
- [38] 黄朝冉, 江玲, 徐卫红, 等. 菜园土壤和蔬菜中 Pb, Cd, Hg 和 As 的质量分数及相关性研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, **41**(11): 40-48.
Huang Z R, Jiang L, Xu W H, *et al.* On contents of Pb, Cd, Hg and As in vegetables and soil and their relations [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, **41**(11): 40-48.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果。《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)