

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价

罗鹏程¹, 涂耀仁^{1,2*}, 孙婷婷¹, 刘生辉¹, 高佳欣¹, 寇佳怡¹, 顾心彤¹, 段艳平^{1,2}

(1. 上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234; 2. 上海长三角城市湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 上海 200234)

摘要: 太浦河是长三角生态绿色一体化发展示范区内唯一横跨两省一市的代表性河流,也是黄浦江上游的重要备用水源地,为了解太浦河重金属的多介质(表层水、上覆水、孔隙水和沉积物)分布特征、污染现状和生态风险,对太浦河重金属(As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb和Zn)含量进行分析,采用内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对沉积物重金属污染现状和潜在生态风险进行评价,此外还利用健康风险评价模型对太浦河表层水重金属进行健康风险评价。结果表明,太浦河表层水在春季时上游点位Cd、Cr、Mn和Ni的浓度超过Ⅲ类水限值,Sb在冬季时所有点位浓度均超过Ⅲ类水限值;上覆水在丰水期时As的平均值超过Ⅲ类水限值;孔隙水在丰水期时As和Cd的平均值超过Ⅲ类水限值。表层水健康风险评价表明成人和儿童均在春季有较高的健康风险,其余季节健康风险较低;儿童的健康风险明显高于成人;健康风险主要来自于化学致癌重金属元素As、Cd和Cr。太浦河沉积物中Co、Mn、Sb和Zn在4个季节平均值均超过上海市土壤环境背景值,As、Cr和Cu在夏季、秋季和冬季平均含量超过上海市土壤环境背景值,Cd、Ni和Pb在夏季和冬季平均含量超过上海市土壤环境背景值。内梅罗综合污染指数法和地累积指数法评价结果均表明,太浦河中游污染程度高于上游和下游且Sb污染较为严重。潜在生态风险指数法表明,太浦河沉积物在丰水期和枯水期均处于低风险,Cd在丰水期和枯水期贡献率较高,是太浦河沉积物潜在生态风险的主要重金属元素。

关键词: 太浦河; 水体; 沉积物; 重金属; 污染评价; 健康风险评价

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3184-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207057

Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River

LUO Peng-cheng¹, TU Yao-jen^{1,2*}, SUN Ting-ting¹, LIU Sheng-hui¹, GAO Jia-xin¹, KOU Jia-yi¹, GU Xin-tong¹, DUAN Yan-ping^{1,2}

(1. School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Yangtze River Delta Urban Wetland Ecosystem National Field Observation and Research Station, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Taipu River is a river spanning two provinces and one city in a demonstration area in the Yangtze River Delta on an ecologically friendly development and an important water source in the upper reaches of the Huangpu River in Shanghai. To understand the multi-media distribution characteristics, pollution status, and ecological risk of heavy metals in the Taipu River, the contents of heavy metals (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, and Zn) in the sediments of Taipu River were analyzed, and the pollution status and potential ecological risk were evaluated using the Nemerow comprehensive pollution index, geo-accumulation index, and potential ecological risk index methods. In addition, the health risk assessment model was used to assess the health risk of heavy metals in surface water of Taipu River. The results showed that the concentrations of Cd, Cr, Mn, and Ni in the surface water of Taipu River exceeded the class III water limit at the upstream point in spring; the concentrations of Sb exceeded the class III water limit at all points in winter; the average value of As exceeded the class III water limit in overlying water during the wet season; and the average values of As and Cd exceeded the class III water limit in pore water during the wet season. The health risk assessment of surface water implied that both adults and children had higher health risk in spring and lower health risk in other seasons. The health risk of children was significantly higher than that of adults, and it mainly came from chemical carcinogenic heavy metal elements As, Cd, and Cr. The average contents of Co, Mn, Sb, and Zn in Taipu River sediments in the four seasons all exceeded the Shanghai soil baseline; the average contents of As, Cr, and Cu in summer, autumn, and winter exceeded the Shanghai soil baseline; and the average contents of Cd, Ni, and Pb in summer and winter exceeded the Shanghai soil baseline. The evaluation results of the Nemerow comprehensive pollution index and geo-accumulation index showed that the pollution degree of the middle reaches of Taipu River was higher than that of the upper and lower reaches, and the Sb pollution was more serious. The potential ecological risk index method revealed that the Taipu River sediment was at a low risk. Cd had a high contribution in both the wet and dry seasons and could be regarded as the main heavy metal of potential ecological risk in the Taipu River sediment.

Key words: Taipu River; water; sediments; heavy metals; pollution assessment; health risk assessment

长三角生态绿色一体化发展示范区是落实长三角一体化发展的重要国家战略,是率先探索跨行政区高质量一体化发展的关键路径,也是绿色创新发展新高地,人与自然和谐宜居的新典范。示范区中的太浦河是太湖流域的重要河流,也是上海的备用水源地,嘉善的重要取水口。然而,随着工业化和城市

收稿日期: 2022-07-05; 修订日期: 2022-08-31

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020105); 上海市自然科学基金项目(20ZR1441100); 国家自然科学基金项目(41730642, 42077175); 国家社科基金重大项目(17ZDA058)

作者简介: 罗鹏程(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染评价与源解析, E-mail: pc.luo@qq.com

* 通信作者, E-mail: yjtu@shnu.edu.cn

化进程的加快,太浦河两岸聚集了许多的纺织、印染、化工和建材等工业污染源和畜禽养殖污染源。据统计,太浦河沿岸约有 299 家工业企业,每年约有 2 152 万 t 的工业废水排入太浦河,对河流的重金属污染负荷将产生一定的影响^[1,2]。由于重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆转性,因此需重点监测^[3,4]。有文献报道太浦河存在一定的重金属污染,孙晓宇等^[5]对太浦河中锑元素(Sb)进行环境风险评估,结果表明太浦闸下泄水量对流域 Sb 污染环境风险的影响最大,当下泄水量小于 $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,流域水中的 Sb 浓度将显著增加,有超标的风险。王漫漫等对太浦河河水重金属展开研究,内梅罗综合污染指数表明太浦河存在 Mn 和 Sb 污染,且主要污染重金属为 Mn^[6]。有鉴于此,研究重金属多介质分布特征、污染现状和生态风险是提升长三角生态绿色一体化发展示范区环境质量综合治理能力的必要环节。

本文以太浦河为研究对象,从上游到下游共设置 15 个采样点,分四季进行采样,全面获取重金属污染的时空特征,并采用多种重金属污染评价方法(内梅罗综合污染指数法和地累积指数法)和潜在生态风险指数法对沉积物重金属污染现状和潜在生态风险进行评价,此外还利用健康风险评价模型对太浦河表层水重金属进行健康风险评价,以期对长三角一体化的生态良性发展提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

太浦河因沟通太湖和黄浦江而得名,是太湖流域的重要河流,上承东太湖,下接黄浦江,流域地势

平坦,中游湖泊众多是排泄太湖洪水的主要通道之一,兼排杭嘉湖区部分涝水,也是流域向下游地区供水的骨干河道。太浦河流经江、浙和沪这 3 个省市的 15 个乡镇,全长 57.6 km,即江苏省苏州市吴江区段为 40.7 km,浙江省嘉善县段为 1.7 km,上海市青浦区段为 15.2 km,最后与西泖河相接。太浦河流域属于亚热带季风性气候,气候温和湿润。

1.2 样品的采集与保存

样品的采集时间为春、夏、秋和冬这 4 个季节,分别为 2021 年 4 月、2021 年 7 月(丰水期)、2020 年 10 月和 2021 年 1 月(枯水期)。沿太浦河上游到下游共设置了 15 个采样点,具体采样点位如图 1 所示。T1 ~ T11 在江苏省苏州市吴江区境内,T12 在浙江省嘉善县境内,T13 ~ T15 在上海市青浦区境内。T1 ~ T5 为太浦河上游,上游流域有较多居民区、耕地和交通过地;T6 ~ T10 为太浦河中游,中游流域有较多居民区、工业区、耕地和交通过地;T11 ~ T15 为太浦河下游,下游流域以住宅用地和林地为主。

现场分别采集表层水、上覆水和柱状沉积物样品。表层水通过采样器于水面下 20 cm 处采集,上覆水使用沉积物柱状采样器距离沉积物-水界面 20 cm 处采集,使用 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤以除去其中的悬浮物、沉淀、藻类和其他微生物,表层水和上覆水均加入硝酸将水样酸化,调节至 $\text{pH} < 2$ 。酸化后的表层水和上覆水于冰箱中保存,按照《水质样品的保存和管理技术规定》(HJ 493-2009)进行保存和管理^[7],用于重金属测定。使用沉积物柱状采样器采集深度为 0 ~ 5 cm 处柱状沉积物,样品采集后

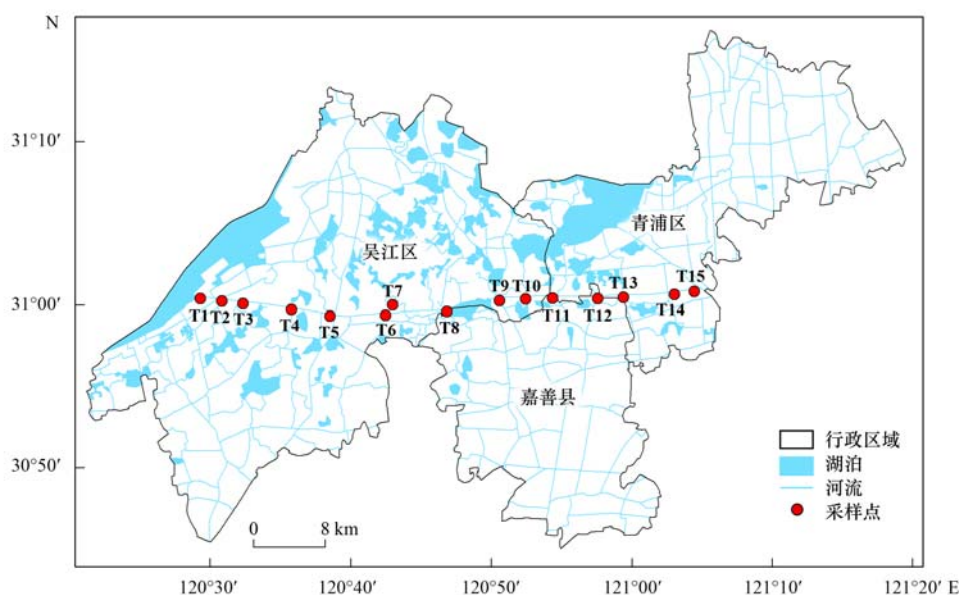


图1 太浦河采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of Taipu River

装入干净的聚乙烯袋中密封储存. 带回实验室后, 取部分沉积物于 50 mL 离心管中, 在 $4\,750\,\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 20 min 以获得孔隙水, 后使用 $0.45\,\mu\text{m}$ 的滤膜过滤, 加入硝酸进行酸化, 置于 $4\,^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存, 用于重金属测定. 剩余的沉积物置于真空冷冻干燥机中干燥, 将干燥的沉积物放入旋转破碎机中将其破碎, 再转移至玛瑙研钵中研磨, 用 100 目的尼龙筛网过筛, 最后将研磨好的沉积物样品充分地混匀并及时放置于 $-4\,^{\circ}\text{C}$ 的冰柜中保存, 用于重金属测定.

1.3 样品的分析测试与质量控制

所采集的水样根据《水质 金属总量的消解 微波消解法》进行消解^[8], 测定方法参考《水质 32 种元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》^[9], 所采集的沉积物样品根据《土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法》^[10]进行消解, 使用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定 As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb 和 Zn 的含量. 实验中所使用的消解管和离心管等容器均在酸缸中浸泡 24 h 并清洗. 实验过程中设置空白样品与平行样品, 所有样品均做 3 次平行样, 最后的结果取 3 次测试分析

的平均值, 3 次分析结果的误差范围小于 10%, 同时每 10 个样品做 1 次空白分析.

1.4 研究方法

1.4.1 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是沉积物重金属污染评价的常用方法, 该方法能够反映沉积物重金属污染现状和各种重金属对复合污染的不同贡献, 并甄别主要污染物. 内梅罗综合污染指数法采用以下公式计算.

单因子污染指数:

$$P_i = C_i/B_i \tag{1}$$

综合污染指数:

$$P_n = \sqrt{(P_{\text{imax}})^2 + (P_{\text{iave}})^2}/2 \tag{2}$$

式中, C_i 为重金属 i 的实测含量; B_i 为重金属 i 相应的地球化学背景值, 本研究中地球化学背景值参考上海市土壤环境背景值^[11], As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb 和 Zn 的背景值分别为 8.80、0.18、12.60、74.40、26.70、560.20、29.80、17.00、0.83 和 $78.20\,\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; P_{imax} 为各重金属单因子污染指数的最大值; P_{iave} 为各金属单因子污染指数的平均值. 内梅罗综合污染指数法的评价标准见表 1.

表 1 单因子污染指数和综合污染指数评价标准

Table 1 Evaluation standard of single factor pollution index and comprehensive pollution index			
单因子污染指数(P_i)	污染程度	综合污染指数(P_n)	污染程度
$P_i \leq 1$	无污染	$P_n \leq 0.7$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$0.7 < P_n \leq 1$	轻度污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1 < P_n \leq 2$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$P_n > 2$	重度污染

1.4.2 地累积指数法

地累积指数法 (geo-accumulation index) 是研究重金属污染程度的定量指标, 主要考虑重金属污染的人为因素、环境的地球化学背景值和自然成岩作用引起背景值变化的因素^[12]. 其具体计算方法如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \cdot B_i)] \tag{3}$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属 i 在沉积物中的含量; B_i 为重金属 i 的地球化学背景值, 本研究中地球化学背景值参考上海市土壤环境背景值; k 为考虑到成岩作用可能会引起重金属背景值的变动而取的系数, 一般取 1.5. 地累积指数法的评价标准见表 2.

1.4.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法 (potential ecological risk index, PERI) 是瑞典学者 Hakanson^[13] 于 1980 年提出. 潜在生态风险指数法综合考虑了不同重金属的浓度效应和毒性效应, 对单一金属污染风险和重金

表 2 地累积指数法评价标准

Table 2 Evaluation standard of geo-accumulation index	
地累积指数(I_{geo})	污染程度
$I_{\text{geo}} \leq 0$	无污染
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	轻度污染
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	偏中度污染
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度污染
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	偏重度污染
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	重度污染
$I_{\text{geo}} > 5$	严重污染

属复合污染风险的评估都能够适用. 其具体计算方法如下:

$$\text{PERI} = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_0^i}{B_n^i} \tag{4}$$

式中, PERI 为潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性影响因子, As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb 和 Zn 的毒性影响因子分别为 10、30、5、2、5、1、5、5、7 和 1^[14~17]; C_r^i 为重金属 i 的污染参数; C_0^i 为重

金属 i 的实测含量; B_n^i 为重金属 i 的地球化学背景值, 本研究地球化学背景值参考上海市土壤环境背景值. 潜在生态风险指数法的评价标准见表 3.

表 3 潜在生态风险指数法评价标准
Table 3 Evaluation standard of PERI

E_r^i	风险等级	RI	风险等级
$E_r^i < 40$	低风险	$RI < 150$	低风险
$40 \leq E_r^i < 80$	中度风险	$150 \leq RI < 300$	中度风险
$80 \leq E_r^i < 160$	偏高度风险	$300 \leq RI < 600$	高度风险
$160 \leq E_r^i < 320$	高度风险	$RI \geq 600$	极高风险
$E_r^i \geq 320$	极高风险		

1.4.4 健康风险评价

本研究利用美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险评价模型对太浦河表层水重金属产生的危害进行评价, 模型中针对重金属类型主要分为化学致癌物 (As、Cd 和 Cr)^[18,19] 和非化学致癌物 (Co、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb 和 Zn) 这两类^[18~22]. 重金属对当地人群造成健康风险的途径包含饮用途径、呼吸途径和接触途径^[23], 其中呼吸、接触途径与饮用途径的健康风险存在极大的差距 (约 2~3 个数量级), 故评价时前两者可忽略不计^[18], 因此本研究仅考虑重金属通过饮用途径对当地不同人群造成的健康风险. 化学致癌物评价模型 (R^c) 具体计算方法如下^[24]:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c = \sum_{i=1}^k \frac{1 - \exp(-D_{ig} Q_{ig})}{W} \quad (5)$$
$$D_{ig} = A \times C_i / B$$

式中, D_{ig} 为第 i 种化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; Q_{ig} 为第 i 种化学致癌物评价模型参数, 见表 4^[18~22]; R_{ig}^c 为某点位第 i 种化学致癌物健康风险指数, a^{-1} ; c_i 为第 i 种化学致癌物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; W 为研究区域居民平均寿命, 上海市、浙江省嘉善县和苏州市吴江区人均寿命分别为 83.66a^[25]、81.95a^[26] 和 83.46a^[27]; A 为人均饮水量, 成人为 2.2 L^[23], 儿童为 1.0 L^[28]; B 为当地居民人均体重, 成人为 56 kg^[23], 儿童为 22 kg^[28]. 非化学致癌物评价模型 (R^n) 具体计算方法如下^[29]:

$$R^n = \sum_{j=1}^m R_{jg}^n = \sum_{j=1}^m \frac{D_{jg} \times 10^{-6}}{\text{RfD}_{jg} \times W} \quad (6)$$
$$D_{jg} = A \times c_j / B$$

式中, D_{jg} 为第 j 种非化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; RfD_{jg} 为第 j 种非化学致癌物模型参数, 见表 4^[18~22]; R_{jg}^n 为某点位第 j 种非化学致癌物健康风险指数, a^{-1} ; c_j 为第 j 种非化学致癌物浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 总健康风险具体计算方法如下:

$$R_{\text{总}} = R^c + R^n \quad (7)$$

表 4 重金属毒理学参数/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 4 Toxicological parameters of heavy metals/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

元素	化学致癌物 Q_{ig}	非化学致癌物 RfD_{jg}
As	15	—
Cd	6.1	—
Cr	41	—
Co	—	0.003
Cu	—	0.005
Mn	—	1.4
Ni	—	0.02
Pb	—	0.0014
Sb	—	0.004
Zn	—	0.3

2 结果与讨论

2.1 太浦河水体重金属浓度

2.1.1 太浦河表层水重金属浓度

太浦河表层水重金属浓度如表 5 和图 2 所示. $\rho(\text{Cd})$ 的四季平均值介于 0~0.004 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 上游在春季时超过Ⅲ类水限值, 其余季节均在Ⅲ类水限值以下. $\rho(\text{Cr})$ 的四季平均值介于 0.002~0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 上游在春季高于其余季节, T1 超过Ⅲ类水限值, 其余季节均在Ⅲ类水限值以下. $\rho(\text{Mn})$ 的四季平均值介于 0.01~0.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 春季时 T1、T6、T7 和秋季时 T2、T3、T5、T6、T7、T8、T11 超过Ⅲ类水限值, 且 T7 在春季和秋季均达到高值. $\rho(\text{Ni})$ 的四季平均值介于 0.0002~0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, T1 和 T7 在春季时超过Ⅲ类水限值. $\rho(\text{Sb})$ 的四季平均值介于 0.0003~0.008 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 冬季浓度高于其余 3 个季节, 且在冬季时全流域超过Ⅲ类水限值, 污染较为严重, T7 在 4 个季节均达到最大值. As、Co、Cu 和 Pb 在四季均低于Ⅲ类水限值, 但上游浓度高于中下游.

总体来说, As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni 和 Zn 在春季浓度较高, 而 Sb 在冬季浓度较高. As、Mn 和 Sb 在四季中的最大值均有 T7, $\rho(\text{As})$ 在春季最大值为 0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Mn})$ 在春季最大值为 0.57 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Sb})$ 在冬季最大值为 0.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经现场调查 T7 点附近存在工业污染源, 以纺织和印染业为主.

表 5 太浦河表层水重金属浓度¹⁾/mg·L⁻¹
Table 5 Concentration of heavy metals in surface water of Taipu River/mg·L⁻¹

季节	元素	MDL	Min	Max	Avg	I 类水	II 类水	III 类水	IV 类水	V 类水	饮用水标准
春季	As	0.002	ND	0.02	0.005	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.01
	Cd	0.002	ND	0.01	0.004	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
	Co	0.001	ND	0.02	0.005	—	—	—	—	—	1.0
	Cr	0.001	ND	0.13	0.02	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05
	Cu	0.001	0.01	0.19	0.04	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mn	0.001	ND	0.57	0.12	—	—	—	—	—	0.1
	Ni	0.001	ND	0.16	0.02	—	—	—	—	—	0.02
	Pb	0.002	ND	0.02	0.001	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.01
	Sb	0.001	ND	0.01	0.002	—	—	—	—	—	0.005
	Zn	0.002	ND	0.58	0.07	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0
夏季	As	0.002	ND	0.002	0.000 5	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.01
	Cd	0.002	ND	0.001	0.000 9	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
	Co	0.001	0.001	0.001	0.001	—	—	—	—	—	—
	Cr	0.001	0.002	0.003	0.003	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05
	Cu	0.001	0.006	0.007	0.006	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mn	0.001	0.01	0.02	0.01	—	—	—	—	—	0.1
	Ni	0.001	ND	0.001	0.000 2	—	—	—	—	—	0.02
	Pb	0.002	ND	0.01	0.002	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.01
	Sb	0.001	ND	0.003	0.000 3	—	—	—	—	—	0.005
	Zn	0.002	0.004	0.01	0.007	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0
秋季	As	0.002	ND	0.009	0.004	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.01
	Cd	0.002	ND	0.003	0.000 2	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
	Co	0.002	0.001	0.003	0.001	—	—	—	—	—	—
	Cr	0.001	0.001	0.02	0.002	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05
	Cu	0.001	0.003	0.01	0.006	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mn	0.001	0.05	0.36	0.13	—	—	—	—	—	0.1
	Ni	0.001	ND	0.01	0.002	—	—	—	—	—	0.02
	Pb	0.002	ND	0.002	0.000 3	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.01
	Sb	0.001	ND	0.01	0.003	—	—	—	—	—	0.005
	Zn	0.002	0.002	0.03	0.01	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0
冬季	As	0.002	ND	0.002	0.001	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.01
	Cd	0.002	ND	ND	0.00	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01	0.005
	Co	0.002	ND	0.001	0.0001	—	—	—	—	—	—
	Cr	0.001	ND	0.01	0.002	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1	0.05
	Cu	0.001	ND	0.03	0.01	0.01	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Mn	0.001	0.02	0.15	0.06	—	—	—	—	—	0.1
	Ni	0.001	0.002	0.02	0.004	—	—	—	—	—	0.02
	Pb	0.002	ND	0.002	0.000 1	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1	0.01
	Sb	0.001	0.005	0.02	0.008	—	—	—	—	—	0.005
	Zn	0.002	0.009	0.06	0.03	0.05	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0

1) MDL (method detection limit):检测极限,Min:最小值,Max:最大值,Avg:平均值;ND (not detected)表示未检测出,“—”表示无数据;I~V 类水参考《地表水环境质量标准》^[30],饮用水标准参考《生活饮用水卫生标准》^[31]

2.1.2 太浦河上覆水与孔隙水重金属浓度

太浦河上覆水与孔隙水重金属浓度如表 6 和图 3 所示. $\rho(\text{As})$ 在丰水期上覆水中介于 ND ~ 0.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(ND 表示未检测出,下同),孔隙水中介于 ND ~ 0.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,丰水期时上覆水和孔隙水均存在点位超过 III 类水限值. $\rho(\text{Cd})$ 在丰水期孔隙水中介于 ND ~ 0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,下游点位超过 III 类水限值. $\rho(\text{Mn})$ 在丰水期上覆水、孔隙水和枯水期上覆水中分别介于 ND ~ 1.58、ND ~ 4.40 和 0.07 ~ 2.19 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,全流域超过 III 类水限值.

$\rho(\text{Ni})$ 在枯水期上覆水中介于 0.002 ~ 0.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,T3 在枯水期时上覆水超过 III 类水限值. $\rho(\text{Pb})$ 在枯水期孔隙水中介于 0.007 ~ 0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,T3 在枯水期时孔隙水超过 III 类水限值. $\rho(\text{Sb})$ 在丰水期孔隙水中介于 ND ~ 0.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,下游点位超过 III 类水限值. Co、Cr、Cu 和 Zn 在丰水期和枯水期上覆水和孔隙水均低于 III 类水限值,但 Cr 和 Cu 在枯水期上覆水浓度沿程波动变化较大,可能存在外源重金属的输入. 从平均值来看,上覆水在丰水期时 As 的平均值超过 III 类水限值,孔

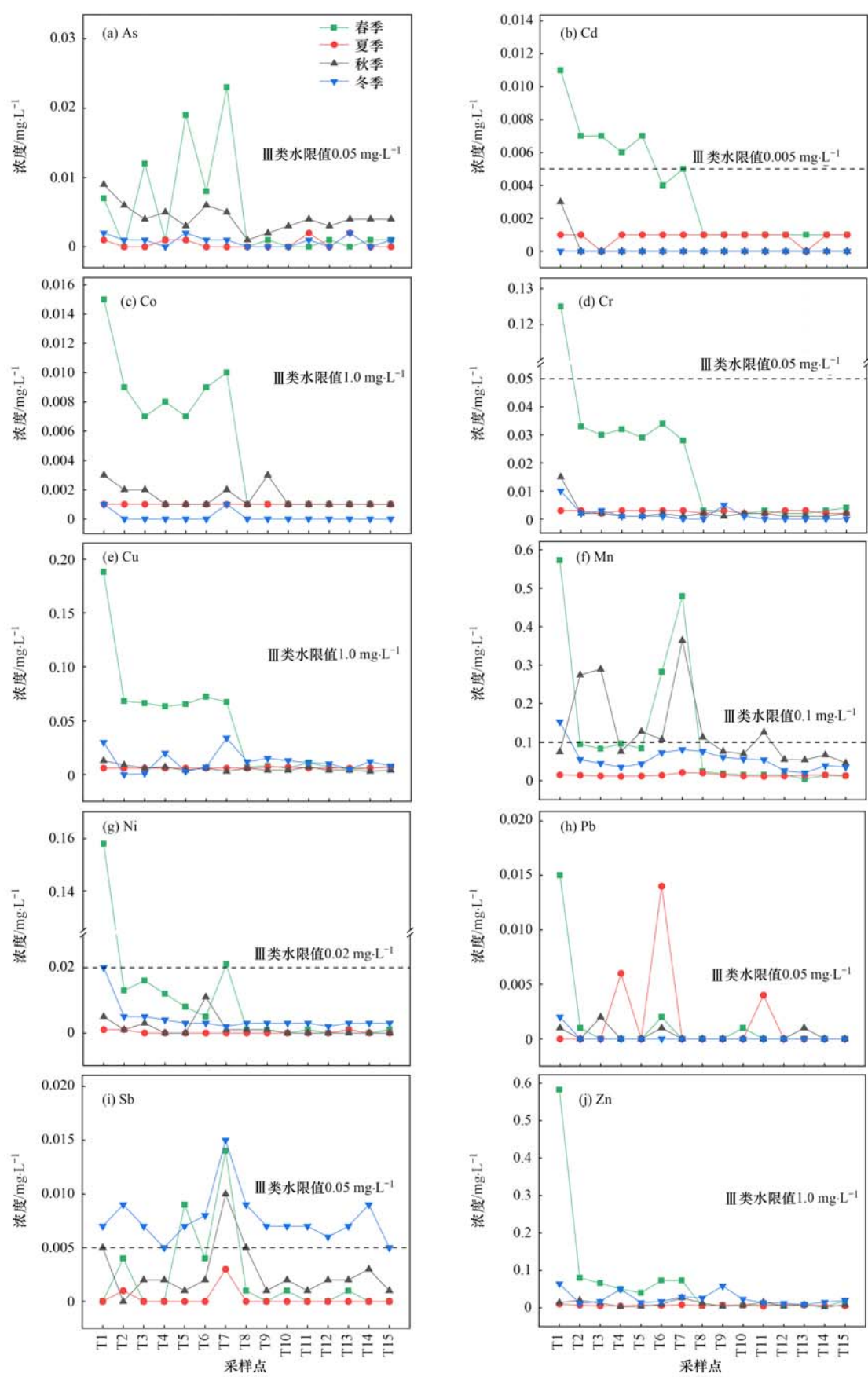


图2 太浦河表层水重金属浓度

Fig. 2 Concentration of heavy metals in surface water of Taipu River

隙水在丰水期时 As 和 Cd 存在点位超过Ⅲ类水限值. Co 的浓度在丰水期和枯水期按表层水、上覆水、孔隙水的顺序增加,这与 Kong^[32] 研究的结果相一致,表明 Co 更容易在深处富集,上覆水中的重金属

可以释放到孔隙水中^[33]. Cu 和 Ni 的浓度在丰水期和枯水期上覆水高于表层水和孔隙水, Cu 和 Ni 可通过扩散通量作用从沉积物进入上覆水中^[34]. 而 As、Cd、Cr、Mn、Pb、Sb 和 Zn 的浓度在丰水期和枯水期随深度具有不同的变化, 表明重金属浓度受水文状况、有机质浓度和溶解配体等多种因素控

制^[35]. As、Cd、Co 和 Sb 在丰水期孔隙水的浓度具有相似的变化特征, 从 T9 开始迅速上升, 这是因为 T9 处于汾湖出口, 水流速度较大, 在较大的水流速度扰动下促进了沉积物中有机物的氧化, 进而促进了重金属的释放, 此外较大的水流速度使沉积物再悬浮也有利于沉积物向水体释放重金属^[36,37].

表 6 太浦河上覆水与孔隙水重金属浓度¹⁾/mg·L⁻¹

Table 6 Concentration of heavy metals in overlying water and pore water of Taipu River/mg·L⁻¹

时期	项目	类型	As	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Sb	Zn
丰水期	表层水	Min	ND	ND	ND	0.002	0.006	0.01	ND	ND	ND	0.004
		Max	0.002	ND	ND	0.003	0.007	0.02	0.001	ND	0.003	0.01
		Avg	0.0005	—	—	0.003	0.006	0.01	0.000 2	—	0.000 3	0.007
	上覆水	Min	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		Max	0.58	ND	0.003	0.01	0.11	1.58	0.008	0.02	0.002	0.08
		Avg	0.13	—	0.002	0.004	0.02	0.72	0.001	0.003	0.000 3	0.02
	孔隙水	Min	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		Max	1.13	0.06	0.04	0.01	0.08	4.40	0.001	0.007	0.41	0.06
		Avg	0.31	0.02	0.01	0.003	0.01	1.34	0.000 1	0.001	0.12	0.02
	表层水	Min	ND	ND	ND	ND	ND	0.02	0.002	ND	0.005	0.009
		Max	0.002	ND	ND	0.01	0.03	0.15	0.02	0.002	0.02	0.06
		Avg	0.001	—	—	0.002	0.01	0.06	0.004	0.0001	0.008	0.03
枯水期	上覆水	Min	ND	ND	ND	ND	0.01	0.07	0.002	ND	0.004	0.02
		Max	0.003	ND	0.003	0.02	0.15	2.19	0.04	0.03	0.01	0.41
		Avg	0.002	—	0.000 9	0.004	0.06	0.86	0.007	0.004	0.007	0.08
	孔隙水	Min	ND	ND	ND	0.009	ND	0.01	ND	0.007	0.004	ND
		Max	0.007	ND	0.002	0.01	0.12	1.04	ND	0.06	0.01	0.05
		Avg	0.000 5	—	0.001	0.01	0.01	0.24	—	0.02	0.006	0.005

1) Min: 最小值, Max: 最大值, Avg: 平均值; ND (not detected) 表示未检测出, “—” 表示无数据

2.2 太浦河沉积物重金属含量

太浦河沉积物重金属含量如表 7 所示. Co、Mn、Sb 和 Zn 在 4 个季节平均值均超过上海市土壤环境背景值, As、Cr 和 Cu 在夏季、秋季和冬季平均值超过上海市土壤环境背景值, Cd、Ni 和 Pb 在夏季和冬季平均值超过上海市土壤环境背景值. As、Cd、Co、Cd、Cu、Mn、Pb、Sb 和 Zn 的平均值均在春季达到最小, 此外 Cd、Cu、Mn 和 Pb 的含量均有相同的季节变化规律: 冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季, 其余重金属无明显季节变化规律. 综上相较于春季, 太浦河在夏季、秋季和冬季时沉积物重金属含量较高. 从变异系数来看, Cu 在春季和 Cd、Sb、Zn 在秋季的变异系数较大, 分别为 111.86% 和 118.19%、112.59%、79.04%, 表明以上重金属受到外源污染的影响. 表层水重金属浓度与沉积物重金属含量存在明显的季节差异, 春季时表层水重金属浓度较高, 而沉积物重金属含量(除 Ni 外)相较于其余季节较低, 这是因为春季时太浦河水温较低, 溶解氧含量较高, 氧化作用有利于重金属从沉积物向水中释放, 此外底栖生物活动在春季明显增强, 再加上春季时太浦河水量较小, 使得春季表层水重金属浓度较高而

沉积物重金属含量较低.

2.3 太浦河表层水健康风险评价

根据太浦河四季重金属浓度数据, 按照健康风险评价可计算出太浦河水体重金属通过饮用水途径所致的健康风险, 如图 4 所示. 从季节来看成人和儿童均在春季有较高的重金属健康风险, 其余季节重金属健康风险较低, 儿童的重金属健康风险明显高于成人. 与成人相比, 儿童是更加敏感的风险受体, 这是由于儿童的免疫力较低, 更容易受到重金属的危害, 这与已有评价结果一致^[38~40]. 太浦河中化学致癌重金属(As、Cd 和 Cr)对成人和儿童的总风险值高于非化学致癌重金属 4~7 个数量级, 其中以 Cr 的总风险值最大, As 次之, Cd 最小. 不管对成人还是儿童, As、Cd 和 Cr 在 4 个季节中均存在点位均超过国际辐射防护委员会(ICRP)所推荐的最大可接受水平($5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). 非化学致癌重金属的总风险对成人和儿童的风险值均远低于最大可接受水平 4~7 个数量级, 表明是可以接受的风险水平, 对成人和儿童不产生危害, 故太浦河的重金属健康风险主要来自于化学致癌重金属元素 As、Cd 和 Cr.

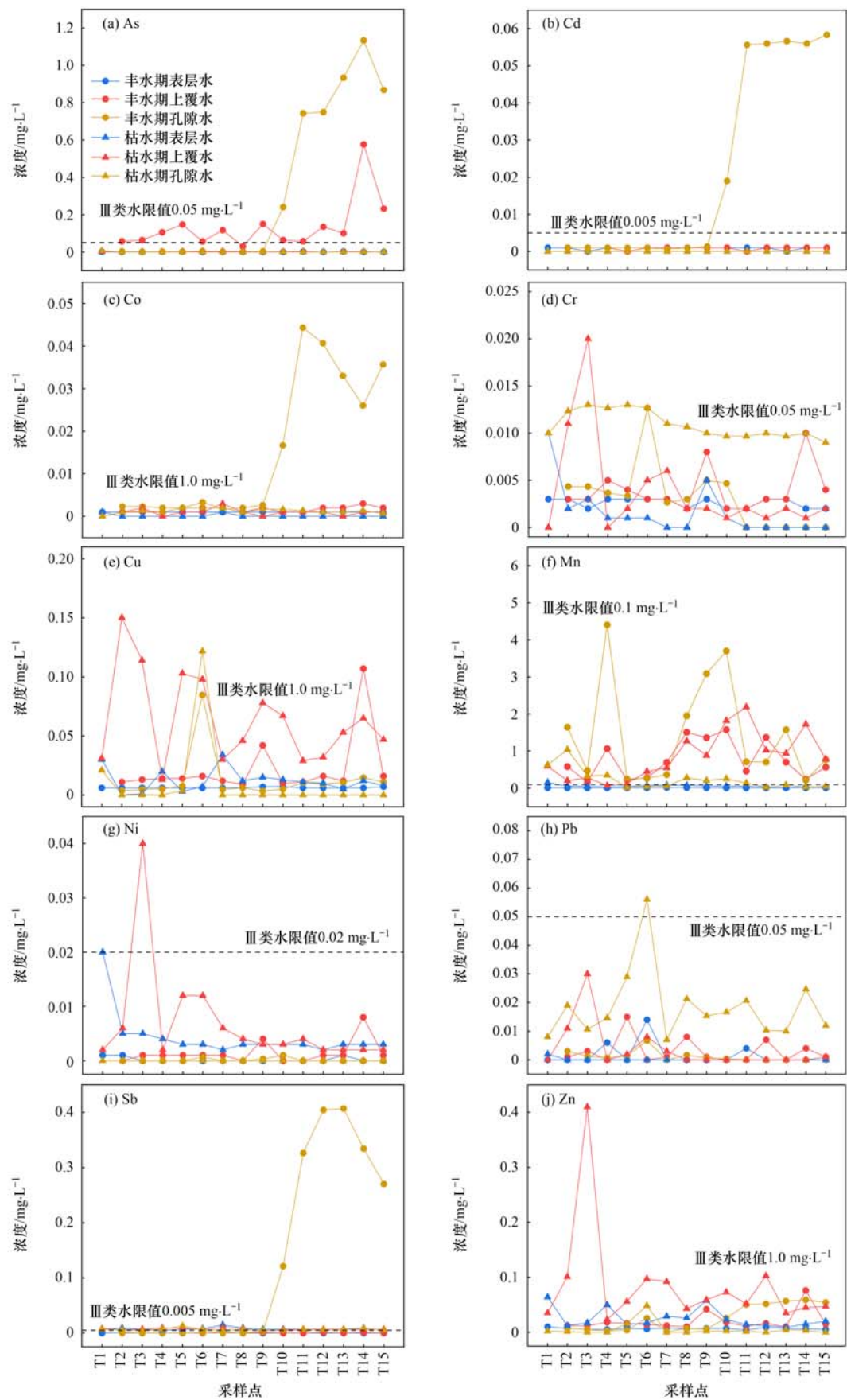


图3 太浦河上覆水与孔隙水重金属浓度

Fig. 3 Concentration of heavy metals in overlying water and pore water of Taipu River

2.4 太浦河沉积物重金属污染评价和潜在生态风险评价

2.4.1 内梅罗综合污染指数法

以太浦河四季沉积物重金属数据为基础,使用内梅罗综合污染指数法对 As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Sb 和 Zn 进行污染评价. 单因子污染指数如图 5(a) 所示. Pb 在冬季处于中度污染; Sb 在春季和夏季处于中度污染,在秋季和冬季处于重度

污染; 其余重金属在四季处于无污染至轻度污染. 综合污染指数如图 5(b) 所示. 综合污染指数 P_n 在四季的平均值分别是: 春季 2.22、夏季 2.23、秋季 4.50 和冬季 2.75,在四季均处于重度污染. 从沿程来看中游污染程度高于上游和下游, T4、T6、T7、T8、T9 和 T10 污染较为严重,其中 T6 和 T9 在四季均达到重度污染, T4、T7、T8 和 T10 均在 3 个季节达到重度污染.

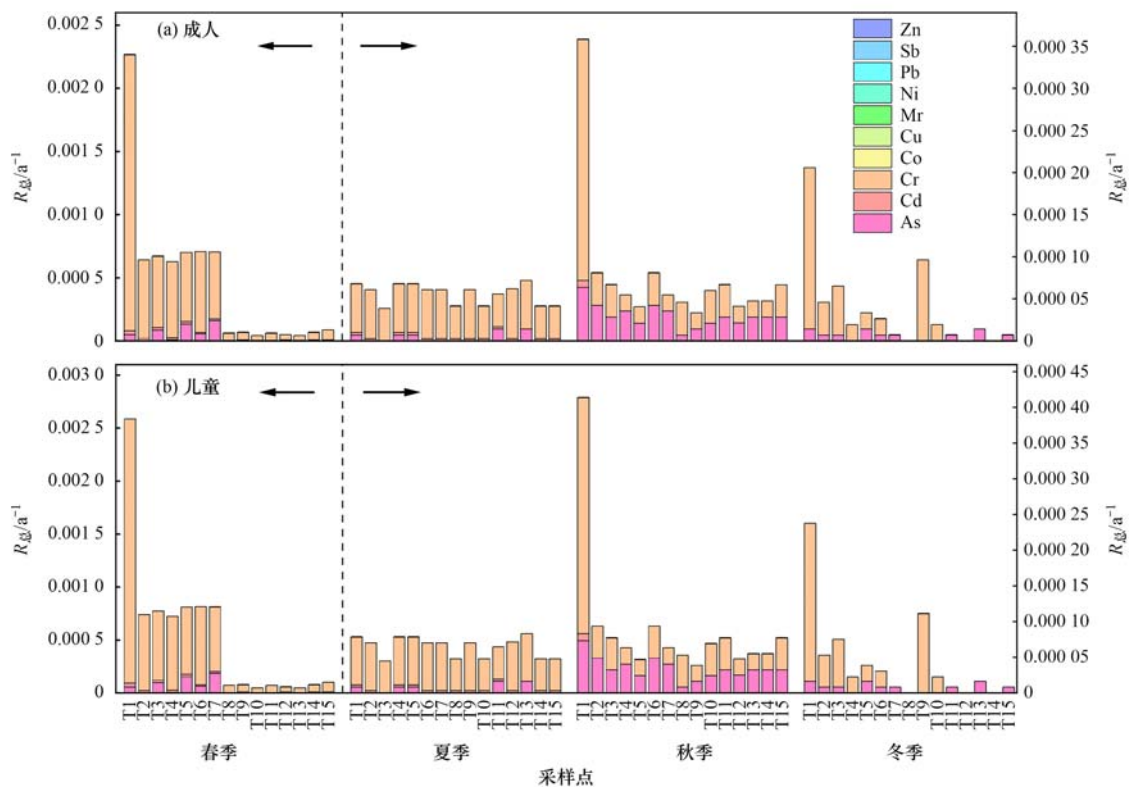


图 4 太浦河表层水健康风险

Fig. 4 Health risk of surface water in Taipu River

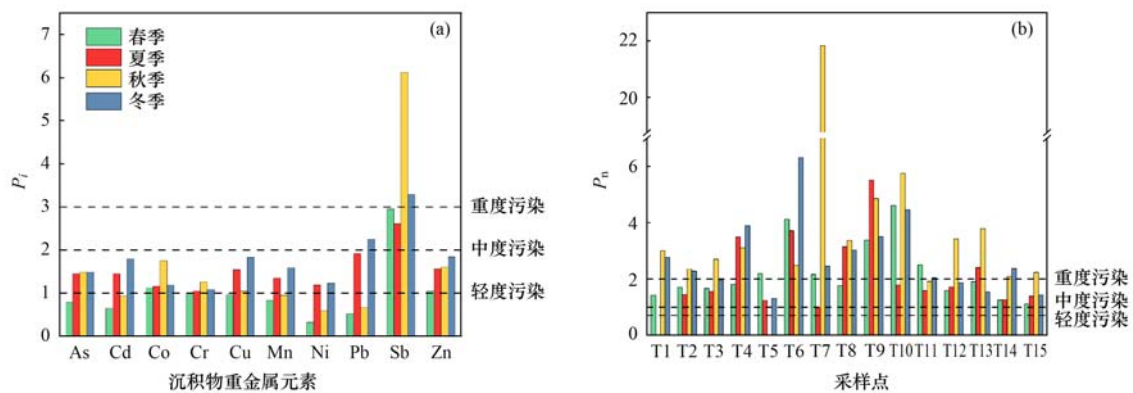


图 5 太浦河沉积物重金属内梅罗综合污染指数

Fig. 5 Nemero comprehensive pollution index of heavy metals in sediments of Taipu River

2.4.2 地累积指数法

太浦河沉积物重金属地累积指数如图 6 所示. 太浦河沉积物中 Sb 污染较为严重,在春季和夏季处于轻度污染,在冬季处于偏重度污染,在秋季处于中度污染,这与内梅罗综合污染指数法评价结果相一

致. Cd 和 Mn 在冬季处于轻度污染, Co 在秋季处于轻度污染, Cu 和 Pb 在夏季和冬季处于轻度污染, Zn 在夏季、秋季和冬季处于轻度污染. As、Cr 和 Ni 在四季均处于无污染水平. 从沿程来看,太浦河沉积物重金属中游污染程度高于上游和下游,这也与内梅

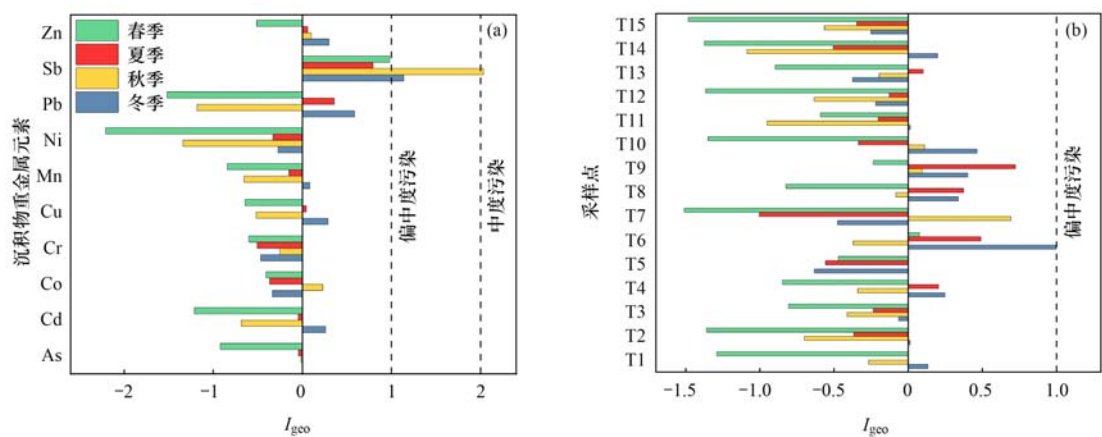


图 6 太浦河沉积物重金属地累积指数

Fig. 6 The I_{geo} of heavy metals in sediments of Taipu River

表 7 太浦河沉积物重金属含量¹⁾

Table 7 Content of heavy metals in sediments of Taipu River

元素	参数	春季	夏季	秋季	冬季	上海市土壤环境背景值
As	Min/mg·kg ⁻¹	5.01	7.42	6.09	7.53	8.80
	Max/mg·kg ⁻¹	10.22	18.04	17.76	19.42	
	Avg/mg·kg ⁻¹	6.96	12.79	13.04	13.15	
	CV/%	19.72	22.79	20.51	22.75	
Cd	Min/mg·kg ⁻¹	0.00	0.10	0.00	0.11	0.18
	Max/mg·kg ⁻¹	0.28	0.63	0.65	0.63	
	Avg/mg·kg ⁻¹	0.12	0.26	0.17	0.32	
	CV/%	77.39	53.70	118.19	44.41	
Co	Min/mg·kg ⁻¹	11.10	9.67	18.02	11.56	12.60
	Max/mg·kg ⁻¹	18.19	19.58	28.18	21.01	
	Avg/mg·kg ⁻¹	14.22	14.64	22.11	14.95	
	CV/%	13.54	18.09	14.38	15.50	
Cr	Min/mg·kg ⁻¹	55.17	57.33	65.66	63.16	74.40
	Max/mg·kg ⁻¹	108.65	110.03	151.74	125.31	
	Avg/mg·kg ⁻¹	73.53	78.45	93.57	80.58	
	CV/%	19.59	18.19	21.22	18.36	
Cu	Min/mg·kg ⁻¹	7.07	16.25	6.74	18.24	26.70
	Max/mg·kg ⁻¹	125.98	125.28	100.45	192.75	
	Avg/mg·kg ⁻¹	25.64	41.25	27.95	48.81	
	CV/%	111.86	68.07	84.29	83.85	
Mn	Min/mg·kg ⁻¹	271.57	311.63	284.53	483.30	560.20
	Max/mg·kg ⁻¹	738.74	1 096.63	906.36	1 823.24	
	Avg/mg·kg ⁻¹	468.15	756.06	532.30	889.23	
	CV/%	23.61	28.75	27.60	33.33	
Ni	Min/mg·kg ⁻¹	5.60	23.44	11.32	26.05	29.80
	Max/mg·kg ⁻¹	15.66	50.11	26.43	49.62	
	Avg/mg·kg ⁻¹	9.67	35.51	17.64	36.93	
	CV/%	31.60	18.82	21.87	16.70	
Pb	Min/mg·kg ⁻¹	3.46	19.40	6.32	22.73	17.00
	Max/mg·kg ⁻¹	24.08	56.73	21.59	97.86	
	Avg/mg·kg ⁻¹	8.89	32.66	11.23	38.24	
	CV/%	54.37	34.66	36.19	46.28	
Sb	Min/mg·kg ⁻¹	1.20	0.78	2.14	1.00	0.83
	Max/mg·kg ⁻¹	5.33	6.02	25.27	6.75	
	Avg/mg·kg ⁻¹	2.45	2.17	5.08	2.73	
	CV/%	46.89	64.99	112.59	56.45	
Zn	Min/mg·kg ⁻¹	36.71	52.31	55.57	67.57	78.20
	Max/mg·kg ⁻¹	183.94	285.40	456.87	268.08	
	Avg/mg·kg ⁻¹	82.14	122.22	125.51	144.22	
	CV/%	57.16	48.86	79.04	39.47	

1) Min:最小值,Max:最大值,Avg:平均值,CV:变异系数

罗综合污染指数法评价结果相一致. T1、T11 和 T14 在冬季处于轻度污染, T4 和 T8 在夏季和冬季处于

轻度污染, T6 在春季、夏季和冬季处于轻度污染, T7 在秋季处于轻度污染, T9 在夏季、秋季和冬季处

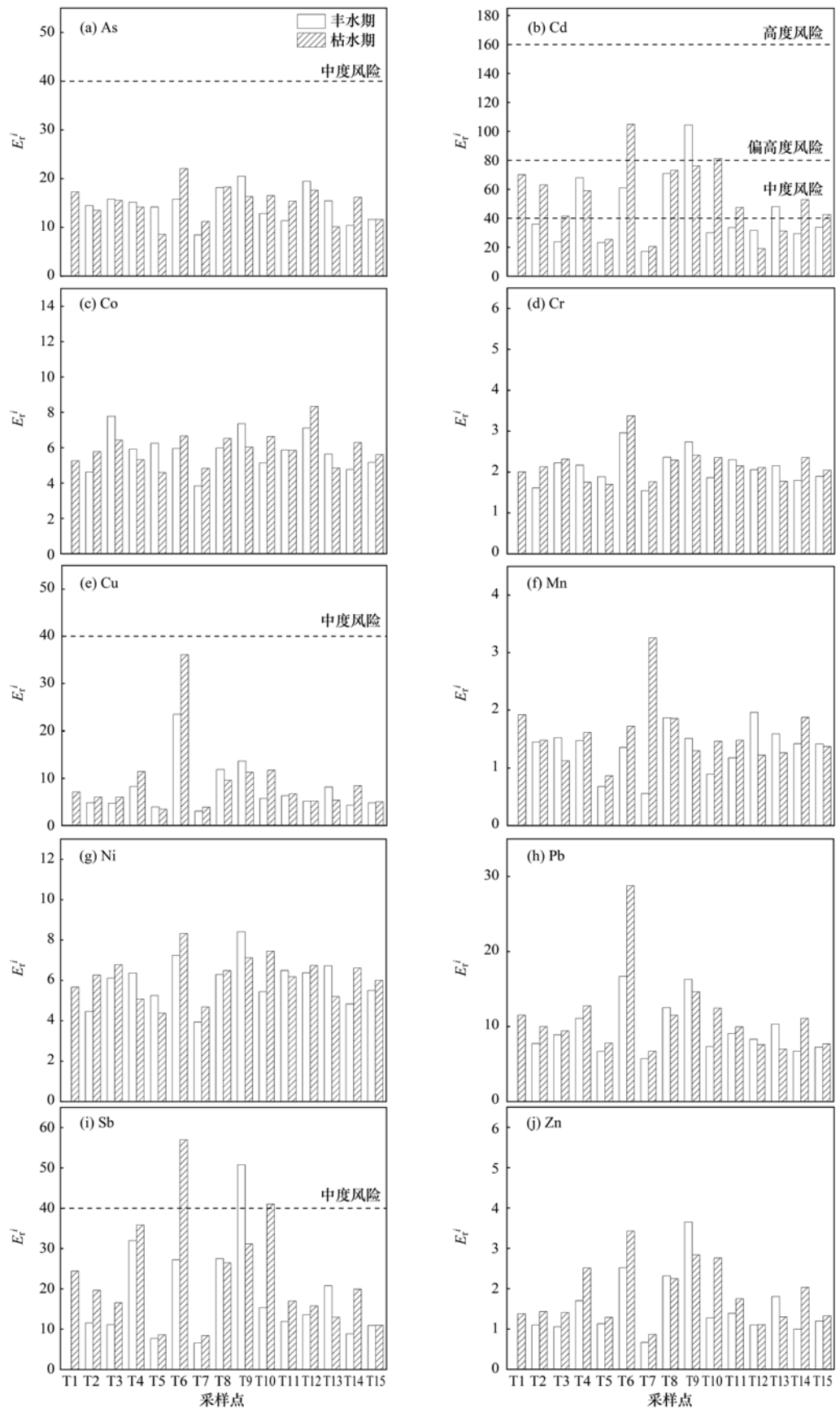


图 7 太浦河沉积物重金属潜在生态风险系数 E_r^i

Fig. 7 The E_r^i of heavy metals in sediments of Taipu River

于轻度污染, T10 在秋季和冬季处于轻度污染, T13 在夏季处于轻度污染, T3、T5、T12 和 T15 在四季均处于无污染水平。

2.4.3 潜在生态风险指数法

太浦河沉积物重金属潜在生态风险系数如图 7 所示。Cd 在丰水期和枯水期 E_r^i 均值分别为 40.68 和 53.83, 均处于中度风险, T6 和 T10 在枯水期处于偏高度风险, T9 在丰水期处于偏高度风险。Sb 在丰水期和枯水期 E_r^i 平均值分别为 17.05 和 23.04, 均处于低风险, T9 在丰水期处于偏高度风险, T6 和 T10 在枯水期处于偏高度风险。As、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 在丰水期和枯水期均为低风险。总风险指数如图 8 所示, 太浦河沉积物在丰水期

和枯水期 RI 平均值分别为 103.14 和 129.92, 均处于低风险, T4、T6、T8 和 T9 在丰水期和枯水期均处于中度风险, 太浦河中游具有较高的风险指数, 这与在中游聚集的大量工业企业相关。此外, Cd 在丰水期和枯水期贡献率较高, 平均贡献率分别为 35.51% 和 40.47%, 因此 Cd 是太浦河沉积物潜在生态风险的主要重金属元素, 其他研究也在湖泊和湿地中发现了类似结果^[41~43]。值得注意的是表层水健康风险与沉积物潜在生态风险中具风险的重金属种类存在明显差异, 这是因为重金属在不同介质中含量存在差异, 也与评价方法的不同相关, Cd 在表层水和沉积物中均存在风险, 应当引起足够重视。

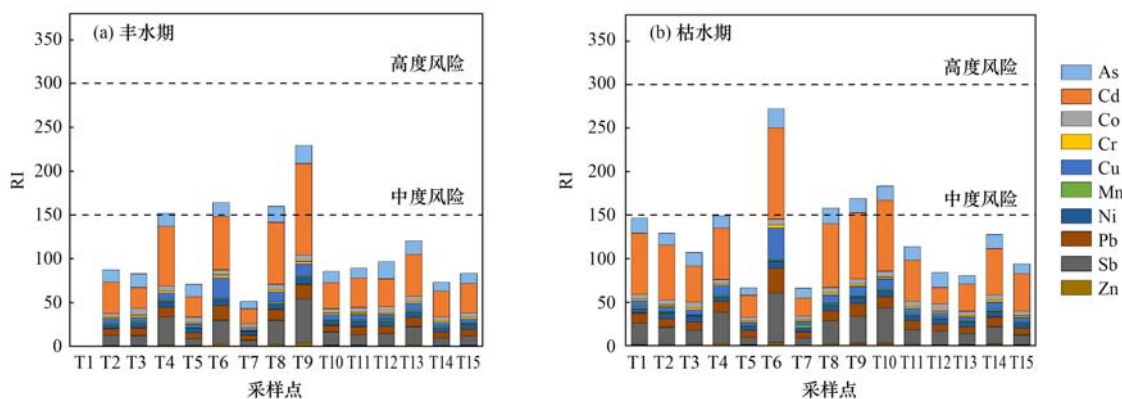


图 8 太浦河沉积物重金属潜在生态风险指数

Fig. 8 PERI of heavy metals in sediments of Taipu River

3 结论

(1) 太浦河表层水在春季时上游点位 Cd、Cr、Mn 和 Ni 的浓度超过Ⅲ类水限值, Sb 在冬季时所有点位浓度均超过Ⅲ类水限值; 上覆水在丰水期时 As 的平均值超过Ⅲ类水限值; 孔隙水在丰水期时 As 和 Cd 的平均值超过Ⅲ类水限值。太浦河水体重金属浓度受水文状况、有机质浓度和溶解配体等多种因素控制。

(2) 太浦河沉积物中 Co、Mn、Sb 和 Zn 在 4 个季节的平均值均超过上海市土壤环境背景值, As、Cr 和 Cu 在夏季、秋季和冬季平均值超过上海市土壤环境背景值, Cd、Ni 和 Pb 在夏季和冬季平均值超过上海市土壤环境背景值; Cd、Cu、Mn 和 Pb 的含量存在相同的季节变化规律: 冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季。

(3) 太浦河表层水健康风险评价表明成人和儿童均在春季有较高的健康风险, 其余季节健康风险较低; 儿童的健康风险明显高于成人, 归因于儿童较低的免疫力; 健康风险主要来自于化学致癌重金属元素 As、Cd 和 Cr。

(4) 内梅罗综合污染指数法和地累积指数法评价结果均表明太浦河中游污染程度高于上游和下游且 Sb 污染较为严重。

(5) 潜在生态风险指数法表明太浦河沉积物在丰水期和枯水期均处于低风险, Cd 在丰水期和枯水期贡献率较高, 平均贡献率分别为 35.51% 和 40.47%, 是太浦河沉积物潜在生态风险的主要重金属元素, 应引起足够重视。

参考文献:

- [1] 李昊洋, 周宏伟, 陆沈钧. 太浦河沿线污水环境污染源调查[J]. 水利技术监督, 2017, 25(4): 52-56.
- [2] 田爱军, 颜润润, 俞启升. 江苏省太浦河流域污染特征及污染控制对策[J]. 环境与发展, 2018, 30(5): 1-3.
Tian A J, Yan R R, Yu Q S. Pollution characteristics and pollution control countermeasures of Taipu River basin in Jiangsu Province[J]. Environment and Development, 2018, 30(5): 1-3.
- [3] 丁婷婷, 李强, 杜士林, 等. 沙颍河流域水环境重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 2386-2401.
Ding T T, Li Q, Du S L, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Shaying River Basin[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(10): 2386-2401.
- [4] 何宇, 洪欣, 闭潇予, 等. 九洲江流域水环境重金属污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 240-253.

- He Y, Hong X, Bi X Y, *et al.* Characteristics and sources of heavy metal pollution in water environment of Jiuzhou River basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(1): 240-253.
- [5] 孙晓宇, 杨雾晨, 唐晓迪, 等. 太浦河流域镉污染环境风险评估[J]. *环境保护科学*, 2017, **43**(3): 120-124.
- Sun X Y, Yang W C, Tang X D, *et al.* Environmental risk assessment of antimony pollution in Taipu River Basin [J]. *Environmental Protection Science*, 2017, **43**(3): 120-124.
- [6] 王漫漫, 陆昊, 李慧明, 等. 太湖流域典型河流重金属污染和生态风险评估[J]. *环境化学*, 2016, **35**(10): 2025-2035.
- Wang M M, Lu H, Li H M, *et al.* Pollution level and ecological risk assessment of heavy metals in typical rivers of Taihu basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(10): 2025-2035.
- [7] HJ 493-2009, 水质样品的保存和管理技术规定[S].
- [8] HJ 678-2013, 水质金属总量的消解微波消解法[S].
- [9] HJ 776-2015, 水质 32 种元素的测定电感耦合等离子体发射光谱仪[S].
- [10] HJ 832-2017, 土壤和沉积物金属元素总量的消解微波消解法[S].
- [11] 陈玲, 夏俊, 李宇庆, 等. 上海化学工业区土壤环境背景值调查[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(1): 65-69.
- Chen L, Xia J, Li Y Q, *et al.* Investigation on the soil baseline in Shanghai Chemical Industrial Park [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(1): 65-69.
- [12] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [14] Xu D Y, Gao B, Peng W Q, *et al.* Geochemical and health risk assessments of antimony (Sb) in sediments of the Three Gorges Reservoir in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1433-1440.
- [15] 陈姗, 许凡, 谢三桃, 等. 合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4932-4943.
- Chen S, Xu F, Xie S T, *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrients and heavy metals in surface sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4932-4943.
- [16] 许梦雅, 张超, 单保庆, 等. 白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4532-4542.
- Xu M Y, Zhang C, Shan B Q, *et al.* Speciation and risk of heavy metals in surface sediments of different types of water bodies in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4532-4542.
- [17] 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 等. 九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4601-4612.
- Zhang H L, Yu R L, Wan R A, *et al.* Speciation and pollution assessment of heavy metals in mangrove surface sediments in Jiulong River estuary [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4601-4612.
- [18] 李军, 邹胜章, 梁永平, 等. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4948-4957.
- Li J, Zou S Z, Liang Y P, *et al.* Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian karst wetland, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4948-4957.
- [19] 刘昭, 周宏, 曹文佳, 等. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 175-183.
- Liu Z, Zhou H, Cao W J, *et al.* Seasonal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of Qingjiang River [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 175-183.
- [20] 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 等. 漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1714-1723.
- Huang H W, Xiao H, Wang D Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in the water of Lijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1714-1723.
- [21] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, *et al.* Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang river basin, and related health risk assessments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- [22] 张妍, 李发东, 欧阳竹, 等. 黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 121-128.
- Zhang Y, Li F D, Ouyang Z, *et al.* Distribution and health risk assessment of heavy metals of groundwaters in the irrigation district of the lower reaches of Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 121-128.
- [23] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [24] Adimalla N. Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: a case study from semi-arid region of south India [J]. *Exposure and Health*, 2019, **11**(2): 109-123.
- [25] 上海市人民政府[EB/OL]. <https://www.shanghai.gov.cn/>, 2022-08-22.
- [26] 嘉兴市人民政府[EB/OL]. http://www.jiaxing.gov.cn/art/2021/1/21/art_1578787_59081018.html, 2022-08-22.
- [27] 苏州市人民政府[EB/OL]. <http://www.suzhou.gov.cn/OpenResourceWeb/fileDetail/5ef1ab536c3cbc00013cc0cb>, 2022-08-22.
- [28] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要-儿童卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [29] Ahada C P S, Suthar S. Groundwater nitrate contamination and associated human health risk assessment in southern districts of Punjab, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(25): 25336-25347.
- [30] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [31] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [32] 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.
- [33] Tao Y, Yuan Z, Wei M, *et al.* Characterization of heavy metals in water and sediments in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(7): 4367-4382.
- [34] Ahmadov M, Humbatov F, Mammadzade S, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in coastal sediments of the western Caspian Sea [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**, doi: 10.1007/s10661-020-08401-3.
- [35] Kumar M, Furumai H, Kasuga I, *et al.* Metal partitioning and

- leaching vulnerability in soil, soakaway sediments, and road dust in the urban area of Japan[J]. *Chemosphere*, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126605.
- [36] 陈三雄, 周春坚, 谢江松, 等. 广东大宝山矿区堆积土水土流失对重金属迁移量的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(1): 16-21.
- Chen S X, Zhou C J, Xie J S, *et al.* Effects of soil erosion of accumulative soil on the migration of heavy metals in Dabaoshan mining area, Guangdong Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(1): 16-21.
- [37] 张倩, 刘湘伟, 税勇, 等. 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, **57**(2): 333-340.
- Zhang Q, Liu X W, Shui Y, *et al.* Distribution of heavy metals in the upstream of Yellow River and ecological risk assessment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57**(2): 333-340.
- [38] Nguyen B T, Do D D, Nguyen T X, *et al.* Seasonal, spatial variation, and pollution sources of heavy metals in the sediment of the Saigon River, Vietnam[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113412.
- [39] Xiao H, Shahab A, Xi B D, *et al.* Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116189.
- [40] 张勇, 郭纯青, 孙平安, 等. 基于空间分析荞麦地流域地下水健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4762-4768.
- Zhang Y, Guo C Q, Sun P A, *et al.* Groundwater health risk assessment based on spatial analysis in the Qiaomaidi watershed[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4762-4768.
- [41] 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 等. 黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(12), doi: 10.13227/j.hjxx.202301095.
- Wang Y D, Ouyang W, Liu L H, *et al.* Fraction characteristic and risk assessment of heavy metals in surface sediments of the Yellow River mainstream[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(12), doi:10.13227/j.hjxx.202301095.
- [42] 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.
- [43] 尹宇莹, 彭高卓, 谢意南, 等. 洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析[J]. *环境化学*, 2021, **40**(8): 2399-2409.
- Yin Y Y, Peng G Z, Xie Y N, *et al.* Characteristics and risk assessment of nutrients and heavy metals pollution in sediments of Dongting Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(8): 2399-2409.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)