

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价

白冬锐¹, 张涛¹, 包峻松¹, 陈坦^{1*}, 王洪涛^{2*}, 金曦², 金军¹, 杨婷¹

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 本文分析了苏州古城区域20个代表性断面中8种重金属(Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb和Zn)的含量, 评价了重金属的污染程度和潜在生态风险并甄别了污染来源。结果表明, 苏州古城区域河道底泥中Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb和Zn的平均含量分别为1.1、142.6、90.2、17.2、800.1、63.3、199.1和384.2 mg·kg⁻¹, 超过江苏省土壤背景值的采样点比例分别为100%、100%、65%、95%、70%、100%、95%和100%。利用地累积指数评价发现, 8种重金属元素污染程度依次为Pb > Cd > Cu > Zn > Cr > Ni > As > Mn, 总体上Pb处于强度污染水平, Cd、Cu、Zn和Cr处于中强度污染水平, Ni和As处于轻度污染水平, Mn处于无污染水平。潜在生态风险指数评价显示, 8种重元素的潜在生态风险依次为Cd > Pb > Cu > As > Ni > Zn > Cr > Mn, 总体上Cd、Pb和Cu处于中风险水平, 其余5种重金属处于低风险水平。古城区域内北部河道和南部河道底泥重金属的平均含量、地累积指数值和潜在生态风险指数值均大于干将河和环城河, 水环境重金属治理应重点关注古城区域内部。相关性分析和主成分分析表明, Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb和Zn元素可能源于化肥、路面老化、轮胎磨损和尾气排放等人为因素, Mn则主要源于自然因素。

关键词: 苏州古城区域河道; 底泥; 重金属; 污染分布; 生态风险; 来源解析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3206-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011048

Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou

BAI Dong-rui¹, ZHANG Tao¹, BAO Jun-song¹, CHEN Tan^{1*}, WANG Hong-tao^{2*}, JIN Xi², JIN Jun¹, YANG Ting¹

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The contents of heavy metals (Cd, Cu, Cr, As, Mn, Ni, Pb, and Zn) in sediments from 20 representative sections of the ancient town of Suzhou were analyzed to determine the pollution degree and potential ecological risk, and pollution sources were identified. The results showed that the average concentrations of Cd, Cu, Cr, As, Mn, Ni, Pb, and Zn in river sediments from the ancient town of Suzhou were 1.1, 142.6, 90.2, 17.2, 800.1, 63.3, 199.1, and 384.2 mg·kg⁻¹, respectively, and the proportions of sampling points that exceeded the soil background value of Jiangsu Province were 100%, 100%, 65%, 95%, 70%, 100%, 95%, and 100%, respectively. The geo-accumulation index indicated that the pollution degree of heavy metals followed the order of Pb > Cd > Cu > Zn > Cr > Ni > As > Mn. In general, high Pb pollution, moderate Cd, Cu, Zn, and Cr pollution, slight Ni and As pollution, and no Mn pollution were observed. The potential ecological risk index for heavy metals was determined to follow the order of Cd > Pb > Cu > As > Ni > Zn > Cr > Mn. Generally, Cd, Pb, and Cu presented moderate potential ecological risk, and the others presented low potential ecological risk. The average concentration of heavy metals, geo-accumulation index, and potential ecological risk index of river sediments in the northern and southern of ancient town were all higher than that of Ganjiang River and Huancheng River, indicating that the control of heavy metals should focus on the inner part of the ancient town. According to correlation analysis and principal component analysis, Cd, Cu, Cr, As, Ni, Pb, and Zn might be derived from man-made factors such as fertilizer, road aging, tire wear, exhaust emissions and so on, which Mn was mainly derived from natural factors.

Key words: ancient town rivers of Suzhou; sediments; heavy metals; pollution characteristics; ecological risk; source apportionment

重金属毒性大、不可降解且积累性强^[1], 通过各种途径进入河道的重金属的最终途径几乎都被悬浮物或底泥所吸附而沉积到河道底部^[2, 3], 并通过生物富集或食物链放大^[4], 对生态系统产生直接或潜在的风险, 危害人体健康^[5~7]。底泥是河道污染物的重要载体, 能吸附河道水体中的重金属, 当底泥-水界面的理化条件改变时, 底泥中的重金属会再次释放, 造成“二次污染”, 影响河道水质^[8~12]。河道

底泥不仅是重金属的主要储存介质, 也可能是河道水质的重要污染源, 对河道底泥重金属污染现状进

收稿日期: 2020-11-04; 修订日期: 2020-12-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205001); 国家重点研发计划项目(2018YFC1903000); 中央民族大学校级交叉学科研究专项(2020MDJC18); 国家自然科学基金项目(41877188)

作者简介: 白冬锐(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理与资源化, E-mail: bdraxyj@163.com

* 通信作者, E-mail: chentant05@tsinghua.org.cn; htwang@tsinghua.edu.cn

行监测和评价具有重要的现实意义。

长江三角洲是综合实力快速发展的代表性地区之一^[13],随着传统能源大量消耗、土地利用方式改变和农业过度开垦等各因素的综合影响,底泥重金属污染呈现恶化趋势^[14]。上海黄浦江近年来重金属问题较为突出,工业废水、交通污染和农药化肥污染等导致底泥中 Cd、Pb、Zn 和 Cu 污染最为严重,且潜在生态危害性高,会对水生生物及人体健康产生危害^[15];江苏太湖流域河流底泥中有 7 种重金属(Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As 和 Cd)的平均含量高于背景值,其中 Cd 和 Hg 处于中等潜在生态风险程度,工业结构布局分散、污水排放处理达标率有待进一步提升、农业面源污染控制难是该区域底泥重金属污染严重的主要原因^[16];杭州西湖作为城市湖泊,周围大量的机动车尾气排放和西湖上的柴油动力船均会造成 Pb 污染,而 Pb 作为西湖底泥中的主要污染物,极有可能损害西湖水生态环境^[17]。因此,妥善处理长江三角洲地区的底泥重金属污染问题已经迫在眉睫。

苏州市位于江苏省南部,毗邻浙江省和上海市,是长江三角洲地区乃至全国城市化进程最为迅猛的地区^[18]。苏州曾将未经处理的生活污水或工业废水直接或间接排入河道^[18],导致河道底泥积累了大量重金属等污染物,可能会成为污染水质的源。本文分析了苏州古城区域 20 个代表性断面的 8 种重金属空间分布特征,分别采用地累积指数和潜在风险指数评价了底泥重金属的污染程度和潜在危害,通过相关性分析和主成分分析识别了底泥中重金属的来源,以期能为苏州古城区域水系重金属综合治理提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

研究区域概况与样品采集参见文献^[19]。于 2019 年 5 月(平水期),综合考虑水文条件、河道情况、周边布局及支流汇水等实际情况,选取 20 个代表性断面(图 1)。环城河点位包括 S1、S2、S3、S4、S5 和 S6;古城北部河道点位包括 S7、S8、S9、S10 和 S11;干将河点位包括 S12、S13 和 S14;古城南部河道点位包括 S15、S16、S17、S18、S19 和 S20。

各采样点同时采集 5~6 个平行样,现场混匀为 1 个样品,每个采样点的范围约 2 m × 2 m。底泥样品采集利用活塞式柱状底泥采样器采集河道底部 0~20 cm 的泥样,放入聚乙烯密封袋中现场混匀,冰袋低温保存。

1.2 分析方法

底泥样品经冷冻干燥后,研磨过 100 目筛备用。

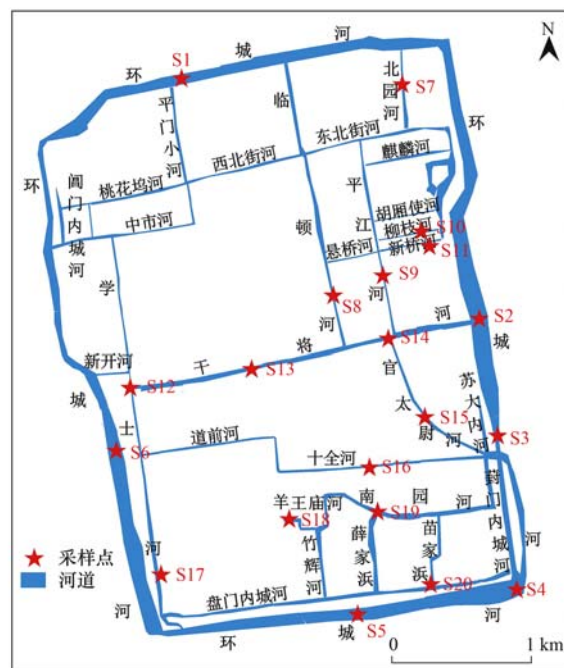


图 1 苏州古城区域河道代表性断面位置^[20]

Fig. 1 Location of representative sections in rivers of the ancient town of Suzhou

底泥重金属监测指标包括镉(Cd)、铜(Cu)、铬(Cr)、砷(As)、锰(Mn)、镍(Ni)、铅(Pb)和锌(Zn),均采用王水体系微波消解-电感耦合等离子体质谱法(HJ 803-2016; 7500a, ICP-MS, Agilent, 美国)测定。为保证测定结果的准确度和精度,对样品进行了重复分析(重复率为 20%) and 标样分析(加标回收率在 85%~115% 之间),所有样品分析误差均小于 20%,符合 HJ 803-2016 质量控制要求。所有分析结果均以底泥干重计。

1.3 评价方法

1.3.1 重金属污染评价

地累积指数法在分析重金属元素的污染程度时,将样品中元素的含量与该元素背景值对比,以此判断元素的污染情况,计算方法参见文献^[16, 20, 21]。本文选取江苏省土壤背景值^[22](Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 含量分别为 0.1、22.3、77.8、10.6、585.0、26.7、26.2 和 62.6 mg·kg⁻¹)作为基准。根据地累积指数值(I_{geo})可将污染程度划分为 6 个等级: $I_{geo} \leq 0$ 为无污染, 0~1 轻度污染, 1~2 中度污染, 2~3 中强度污染, 3~5 强度污染, $I_{geo} \geq 5$ 为极强度污染^[16, 20, 21]。

1.3.2 重金属生态风险评价

潜在生态风险指数法可进一步反映环境中多种重金属的复合污染情况及环境对重金属污染的敏感性。该方法综合考虑了化学、生物毒理学和生态学等知识,可有效反映特定环境中单一重金属污染物的

影响和多种重金属污染物的复合影响,计算方法参见文献[23]. 运用潜在生态风险指数法评价时,充分考虑到了各种重金属的毒性和有效性,选取各种重金属元素对应的毒性系数(Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 分别为 30、5、2、10、1、5、5 和 1),计算单一重金属潜在生态风险指数(E_i), E_i 的等级划分为 <40,低风险; 40 ~ 80,中等风险; 80 ~ 160,较高风险; 160 ~ 320,高风险; ≥ 320 ,极高风险. E_i 累加即得研究区域中多种重金属潜在生态风险指数(RI),RI 的分级标准为: <150 为低风险, 150 ~ 300 中等风险, 300 ~ 600 较高风险, > 600 为高风险^[23].

2 结果与讨论

2.1 苏州古城区域河道底泥重金属分布特征

苏州古城区域河道底泥中 8 种重金属元素含量的最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数等详见表 1. 全部监测点位的底泥中重金属 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 1.1、142.6、90.2、17.2、800.1、63.3、199.1 和 384.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过江苏省土壤背景值的采样点比例分别为 100%、100%、65%、95%、70%、100%、95% 和 100%,整体污染水平较高. 由图 2 可知,环城河、古城北部、干将河和古城南部重金属含量的空间分布

差异较大,8 种重金属 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 含量分布总体表现为古城南部 > 古城北部 > 干将河 > 环城河. 苏州古城区域河道水流路径为北进南出、东进西出,且古城南部河道底泥深度高于北部,故古城南部河道底泥污染物沉积量大^[19]. 干将河比环城河河面窄,与污染物接触空间更大,累积的污染物相对较多. 环城河和干将河底泥中 8 种重金属含量分布规律相似,环城河底泥重金属高含量区域均出现在 S1,干将河底泥重金属高含量区域均出现在 S14,S1 和 S14 分别为北部和东部的水流输入口,可能有含重金属的污水流入. 古城北部和古城南部底泥中 Cd、Cu、As、Ni 和 Zn 的含量分布规律相似,可能同源.

有研究表明,当变异系数超过 20% 时,人类活动是导致重金属空间差异的主要驱动因子^[16,24~26]. 苏州古城区域河道底泥中 Cr、As 和 Ni 的变异系数在 20% ~ 50% 之间,Cd、Cr、Mn、Pb 和 Zn 的变异系数超过了 50%. 由于苏州古城区域用地类型和污染排放情况都非常复杂,土地资源紧张,河道与商业区、老旧住宅区和园林旅游区相连^[27],且紧靠道路,导致河道底泥中的重金属受污水排放和汽车尾气等因素影响. 因此,人类活动密集和经济高度发达是河道底泥重金属含量差异的主要驱动力^[16,28,29].

表 1 苏州古城区域河道底泥重金属含量描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistical results of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

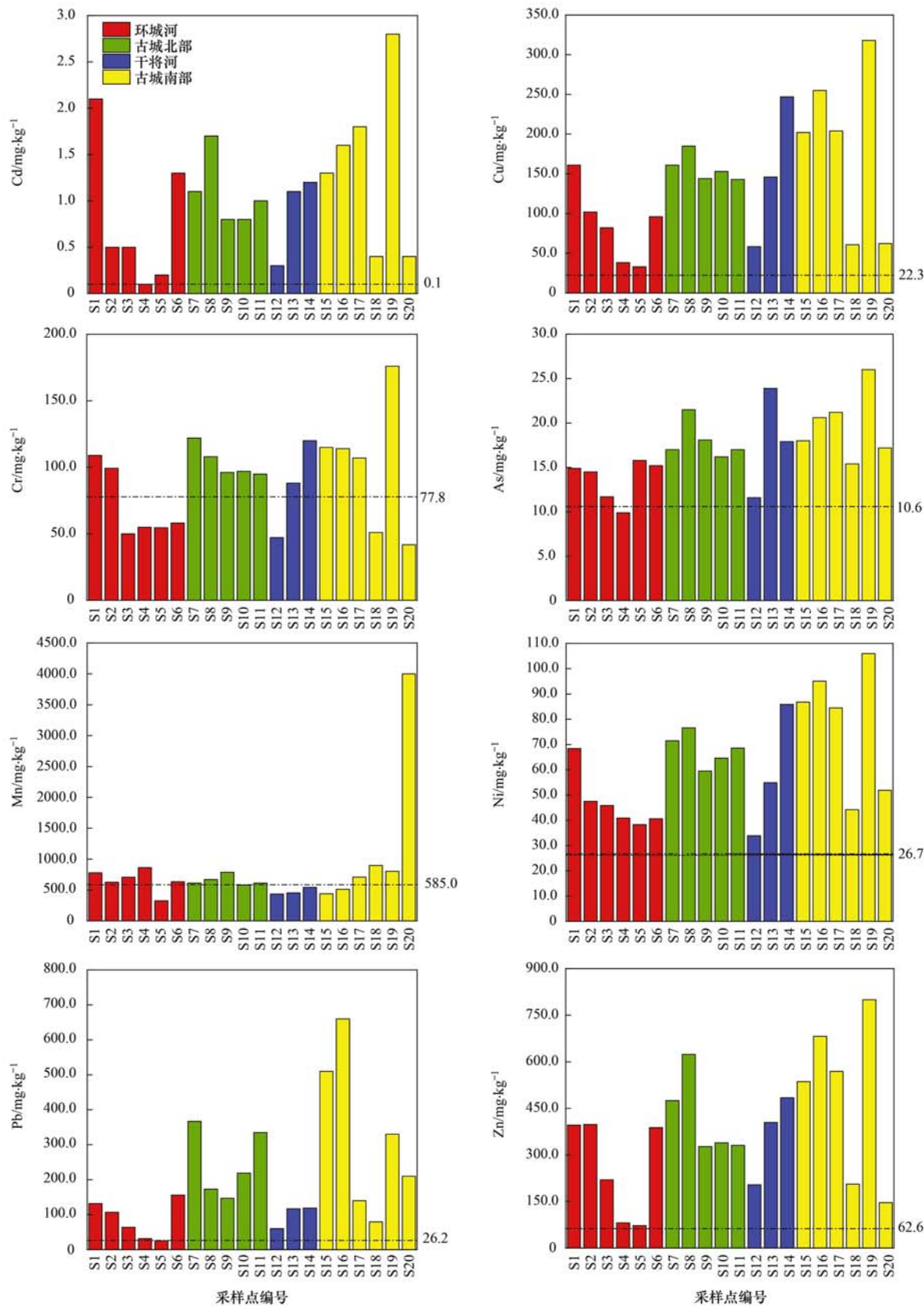
元素	最大值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	江苏省土壤背景值 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超标点位比例 /%
Cd	2.8	0.1	1.1	0.7	67	0.1	100
Cu	318.0	33.1	142.6	77.7	54	22.3	100
Cr	176.0	41.8	90.2	34.4	38	77.8	65
As	26.0	9.9	17.2	4.0	23	10.6	95
Mn	4 000.0	326.0	800.1	768.4	96	585.0	70
Ni	106.0	33.9	63.3	20.9	33	26.7	100
Pb	660.0	25.4	199.1	165.2	83	26.2	95
Zn	800.0	72.5	384.2	197.4	51	62.6	100

2.2 苏州古城区域河道底泥重金属污染程度评价

地累积指数评价结果表明(图 3),苏州古城区域 8 种重金属元素污染程度依次为 $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Mn}$. 底泥中 Pb 污染程度最高,85% 点位的 I_{geo} 值超过 3,达到强度污染级别,甚至 40% 点位的 I_{geo} 值超过 5,为极强度污染级别;其次是 Cd,20% 的点位达到强度污染级别;Cu 和 Zn 也均有点位达到强度污染级别;Cr 有 40% 左右点位的 I_{geo} 值超过 2,为中强度污染级别;绝大多数点位的 Ni 在轻度及中度污染之间;大部分点位 As 的 I_{geo} 值在 0 ~ 1 之间,处于轻度污染;所有采样点位 Mn 的 I_{geo} 值均小于 0,处于无污染水平. 与珠江三角

洲流域的贺江底泥重金属污染状况(As、Cd 和 Pb 的 I_{geo} 值超过 5,处于极强度污染)^[30] 相比较,处在长江三角洲流域的苏州古城区域河道底泥中 As 污染程度较轻. 江苏近岸海域底泥中绝大多数点位的 Cu、Pb、Cd、Zn、Hg 和 Cr 可达到清洁水平^[31],苏州工业园区部分湿地沉积物中 As、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均地累积指数几乎都小于 1^[32],相比之下,苏州古城区域河道底泥重金属污染程度较重.

从表 2 可知,Pb、Cd、Zn、Ni 和 As 在研究区域河道底泥中 I_{geo} 值排序为古城南部 > 古城北部 > 干将河 > 环城河,Cu、Cr 的 I_{geo} 值排序为古城北部 > 古城南部 > 干将河 > 环城河. 古城内部河道底泥比



虚线表示江苏省土壤背景值
图2 苏州古城区域河道底泥的重金属含量分布

Fig. 2 Concentration distribution of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

中间河流和外围河流底泥重金属污染程度高,可能因为内部河道更靠近交通和各类产业,随着社会的

发展,交通和各类产业也在不断完善和发展,对煤炭和汽油的需求增多,且苏州古城区域用地类型复杂,

河道与商业区、老旧住宅区和园林旅游区相连^[27],紧靠道路,河道底泥中的重金属受污水排放和汽车尾气等因素影响较大,由此导致 Pb 污染逐年加重^[33].苏州古城区域河道底泥 Pb 的 I_{geo} 均大于 1,处于中度污染及以上水平,Cr 的 I_{geo} 均大于 0,处于轻度污染及以上水平.在环城河、古城北部、干将河和古城南部河道底泥中,大多数采样点 (> 65%) 的 Cd、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Zn 处于污染状态.其中,古城南部和古城北部河道底泥中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 有超过 65% 的点位于中度污染水平以上.

2.3 苏州古城区域河道底泥重金属生态风险评价

潜在生态风险指数评价结果如图 4 所示,RI 值介于 65.8 ~ 1 037.3,平均值为 422.9,苏州古城区域河道底泥整体属于较高生态风险水平.20% 点位的

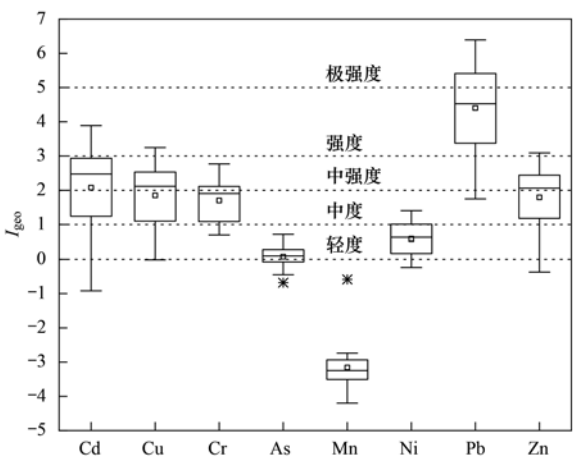


图3 苏州古城区域河道底泥重金属地累积指数箱式图
Fig. 3 Box diagram of I_{geo} of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

表 2 苏州古城区域河道底泥中重金属污染地累积指数值 I_{geo}

Table 2 The I_{geo} of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

项目	采样点	Cd	Cu	Cr	As	Mn	Ni	Pb	Zn
环城河	S1	3.47	2.27	2.08	-0.09	-2.94	0.77	1.75	2.08
	S2	1.40	1.61	1.94	-0.13	-3.26	0.25	5.35	2.08
	S3	1.40	1.30	0.95	-0.44	-3.08	0.20	3.00	1.23
	S4	-0.92	0.20	1.09	-0.68	-2.80	0.03	2.80	-0.21
	S5	0.08	-0.02	1.08	-0.01	-4.20	-0.06	2.59	-0.37
	S6	2.78	1.52	1.17	-0.06	-3.24	0.02	5.33	2.05
古城北部	平均值	1.37	1.15	1.39	-0.23	-3.25	0.20	3.47	1.14
	S7	2.54	2.27	2.24	0.10	-3.29	0.84	5.52	2.34
	S8	3.17	2.47	2.07	0.44	-3.16	0.94	4.38	2.73
	S9	2.08	2.11	1.90	0.19	-2.93	0.57	4.48	1.80
	S10	2.08	2.19	1.91	0.03	-3.37	0.69	5.03	1.85
	S11	2.40	2.10	1.88	0.10	-3.29	0.78	5.47	1.82
干将河	平均值	2.46	2.23	2.00	0.17	-3.21	0.76	4.98	2.11
	S12	0.67	0.80	0.87	-0.45	-3.78	-0.24	2.87	1.12
	S13	2.54	2.13	1.77	0.59	-3.72	0.46	4.76	2.11
	S14	2.67	2.88	2.22	0.18	-3.46	1.10	4.06	2.37
古城南部	平均值	1.96	1.94	1.62	0.11	-3.65	0.44	3.90	1.86
	S15	2.78	2.59	2.16	0.18	-3.77	1.12	6.39	2.51
	S16	3.08	2.93	2.14	0.38	-3.55	1.25	6.11	2.86
	S17	3.25	2.61	2.05	0.42	-3.08	1.08	3.93	2.60
	S18	1.08	0.86	0.98	-0.04	-2.74	0.14	3.75	1.13
	S19	3.89	3.25	2.77	0.71	-2.90	1.40	5.87	3.09
古城南部	S20	1.08	0.90	0.70	0.12	-0.58	0.37	4.57	0.64
	平均值	2.53	2.19	1.80	0.29	-2.77	0.89	5.10	2.14

RI 值在 150 ~ 300 之间,处于中高风险水平; 40% 点位的 RI 值介于 300 ~ 600,处于较高风险水平; 25% 点位的 RI 值超过 600,处于高风险水平.综合潜在生态风险高的区域绝大部分集中在古城北部和古城南部河道底泥.

具体到每种重金属元素,潜在生态风险高低依次为 Cd > Pb > Cu > As > Ni > Zn > Cr > Mn. Cd 的潜在危害最大,90% 点位 Cd 的潜在生态风险系数 E_i 大于 40,达到中风险程度,超过 60% 点位的 E_i 大于

160,达到高风险和极高风险程度.35% 的点位中 Pb 的潜在生态风险系数 E_i 处于中风险程度,10% 处于较高风险.30% 底泥样品 Cu 处于中风险.其余 5 种重金属的 E_i 值均低于 40,即处于低风险水平.太湖西岸河流底泥中单一重金属潜在风险指数依次为 Cd > Cu > As > Ni > Pb > Zn > Cr, E_i 最大值的重金属为 Cd,68% 的点位达到中风险以上^[34],相比之下,苏州古城区域河道底泥受重金属 Cd 潜在生态风险程度较大.与苏州常熟河网区河道底泥中重金属的

潜在风险危害程度 ($Cu > Pb > Zn$, 整体上低风险)^[33]相比,苏州古城区域河道底泥受 Cu 和 Pb 的潜在生态风险可能更大。

图 5 所示为苏州古城区域河道底泥中各重金属潜在生态风险指数值 E_i , Cd 、 Cu 、 As 、 Ni 、 Pb 和 Zn 在研究区域河道底泥中 E_i 值排序为古城南部 > 古城北部 > 干将河 > 环城河, Mn 的 E_i 值排序为古城南部 > 环城河 > 古城北部 > 干将河。古城南部和干将河主要受 Cd 的潜在生态危害影响,两个区域超过 65% 的点位处于极高风险程度。古城北部和古城南部也受 Pb 的潜在生态危害影响,超过 50% 的点位处于中风险程度。因此,古城南部河道和干将河底泥中 Cd 及古城北部和古城南部河道底泥中 Pb 的潜在生态风险很大,需重点关注。

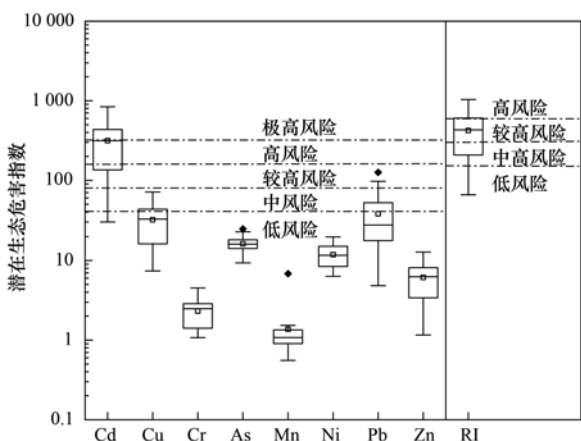


图 4 苏州古城区域河道底泥重金属潜在生态风险指数箱式图

Fig. 4 Box diagram of potential ecological risk index of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

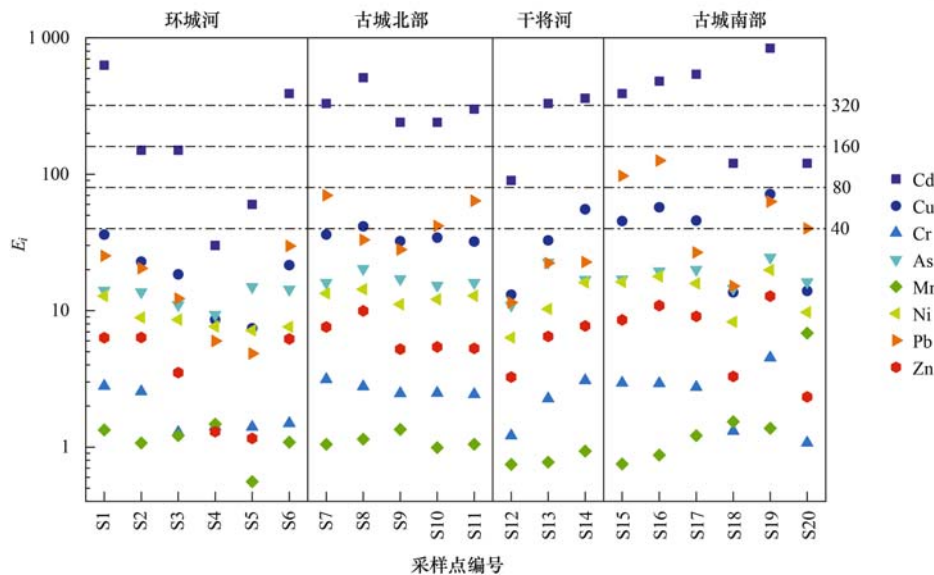


图 5 苏州古城区域河道底泥中各重金属潜在生态风险指数值 E_i

Fig. 5 The E_i of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

2.4 苏州古城区域河道底泥中重金属的来源分析

2.4.1 基于相关性分析的重金属来源解析

底泥中各种重金属的含量主要取决于底泥母质性质和流域人为活动的影响,不同重金属元素间含量相关性分析可以了解元素之间的空间变化趋势,

可反映元素来源、存在形式和污染状况^[30,35]。苏州古城区域河道底泥重金属含量的相关性分析见表 3。结果显示, Cd 、 Cu 、 Cr 、 As 、 Ni 、 Pb 和 Zn 元素两两之间显著正相关,表明这 7 种重金属可能有相似的来源,而 Mn 和其他重金属的相关性不显著。太湖

表 3 苏州古城区域河道底泥重金属含量相关性分析¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients between heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou								
	Cd	Cu	Cr	As	Mn	Ni	Pb	Zn
Cd	1							
Cu	0.86 *	1						
Cr	0.82 *	0.92 *	1					
As	0.72 *	0.76 *	0.70 *	1				
Mn	-0.18	-0.24	-0.31	-0.02	1			
Ni	0.82 *	0.96 *	0.89 *	0.73 *	-0.12	1		
Pb	0.46 *	0.63 *	0.55 *	0.44 *	-0.03	0.70 *	1	
Zn	0.88 *	0.94 *	0.88 *	0.77 *	-0.27	0.88 *	0.63 *	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

流域河流底泥重金属与苏州古城区域河道底泥重金属的相关性相似,太湖流域河流底泥中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 之间存在显著正相关,且主要来自人为源,Mn 与其他组分相关性不显著,表明 Mn 与这些组分不具有同源性,可能来自于自然源^[16].

2.4.2 基于主成分分析的重金属来源解析

为了进一步分析苏州古城区域河道底泥中 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重元素的污染来源,采用主成分分析法解析,结果见表 4. 提取出前 2 个主成分,解释了总方差的 83.85%,表明这两个主成分完全可以代表 8 种重金属元素的绝大部分信息.

表 4 苏州古城区域河道底泥重金属主成分分析结果
Table 4 Principle component analysis of heavy metals
in river sediments from the ancient town of Suzhou

项目	主成分 1	主成分 2
Cd	0.38	-0.01
Cu	0.41	-0.02
Cr	0.39	-0.13
As	0.34	0.20
Mn	-0.10	0.93
Ni	0.40	0.11
Pb	0.29	0.24
Zn	0.40	-0.06
特征值	5.66	1.04
贡献率/%	70.80	13.05
累积贡献率/%	70.80	83.85

第一主成分的贡献率为 70.80%,特征表现为重金属 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 有较高的载荷,分别为 0.38、0.41、0.39、0.34、0.40、0.29 和 0.40,表明这些元素可能具有相同的来源. Cd、Cu、As 和 Zn 普遍用于化肥和农药中,且 Cd 被认为是使用农药化肥等农业活动的标志元素^[36~38]. 从苏州古城区域河道底泥中 Cd、Cu、As 和 Zn 的含量分布情况来看,含量最高值河段几乎都出现在公园或绿化草丛附近,植物生长茂密,径流中极易夹带植物残渣等^[39],且不排除有农药或化肥随降雨流入河道的可能性. 苏州古城区域与苏州工业园区相邻,园区 25% 是工业用地,故古城区域河道底泥中的部分 Cr、Cu、Ni 和 Zn 可能来源于工业园区已迁出电镀企业生产活动的积累^[32]. 另外,苏州古城区域具有水陆相依的独特格局,河流紧挨着道路,河道底泥中 Ni 和 Pb 的浓度受初期径流、沥青路面老化分解、轮胎磨损、汽车尾气排放以及行人活动等影响相对较大^[39],故推测 Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 主要来源于人为污染.

第二主成分的贡献率为 13.05%,特征表现为重金属 Mn 有很高的载荷,为 0.93. 苏州古城区域河道

底泥所有采样点位 Mn 的地累积指数均小于 0,可以推测 Mn 主要来源于自然源(岩石的风化等)^[32]. 图 6 为前两个主成分载荷的二维图,其中各金属元素间的离散程度较直观地反映了苏州古城区域河道底泥重金属的来源.

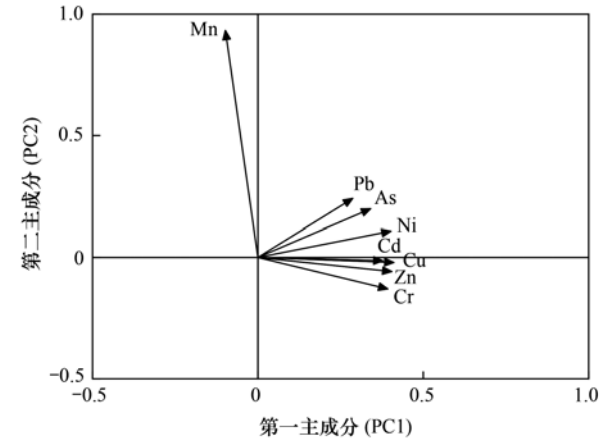


图 6 苏州古城区域河道底泥重金属的二维因子载荷

Fig. 6 Loading plot of the heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou

3 结论

(1)苏州古城区域河道 20 个监测点位的底泥中重金属 Cd、Cu、Cr、As、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 1.1、142.6、90.2、17.2、800.1、63.3、199.1 和 384.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过江苏省土壤背景值的采样点比例分别为 100%、100%、65%、95%、70%、100%、95% 和 100%,整体污染水平较高.

(2)地累积指数评价苏州古城区域河道底泥重金属的结果表明,8 种重金属元素污染程度依次为 $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Mn}$. 40% 点位的 Pb 为极强度污染,5% 的 Cu 和 Zn 处于强度污染级别,40% 左右的 Cr 为中强度污染,绝大多数点位的 Ni 在轻度及中度污染之间,大部分点位的 As 处于轻度污染,所有采样点位的 Mn 均处于无污染水平. 根据 8 种重金属的 I_{geo} 值排序,古城内部河道底泥比中间河流(干将河)和外围河流(环城河)底泥重金属污染程度高.

(3)潜在生态风险指数评价结果表明,各种重金属的潜在生态风险高低依次为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Mn}$. 超过 60% 底泥样品 Cd 的潜在生态风险指数达到高风险和极高风险程度,10% 的 Pb 处于较高风险程度,30% Cu 处于中风险,其余 5 种重金属均处于低风险水平. 根据 E_i 值排序,古城内部河道底泥的潜在生态风险大于干将河和环城河. 由综合潜在生态风险指数可以看出,大于 50% 的点位处于较高以上风险.

(4)相关性分析和主成分分析表明,Cd、Cu、Cr、As、Ni、Pb 和 Zn 元素同源,可能源于化肥、路面老化、轮胎磨损和尾气排放等人为因素,Mn 则主要源于自然因素。

参考文献:

- [1] Sakan S, Dević G, Relić D, *et al.* Risk assessment of trace element contamination in river sediments in Serbia using pollution indices and statistical methods: a pilot study[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(10): 6625-6638.
- [2] Chau K W. Persistent organic pollution characterization of sediments in Pearl River estuary[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(9): 1545-1549.
- [3] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- Wang B, Zhao S, Xia D S, *et al.* Characteristics of heavy metal elements and their relationship with magnetic properties of river sediment from urban area in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- [4] Young S M, Ishiga H, Roser B P, *et al.* Geochemistry of sediments in three sectors of Trincomalee Bay, Sri Lanka: provenance, modifying factors and present environmental status [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, **14**(1): 204-217.
- [5] Mance G. Pollution threat of heavy metals in aquatic environments[M]. Dordrecht: Springer, 1987.
- [6] Pardo R, Barrado E, Perez L, *et al.* Determination and speciation of heavy metals in sediments of the Pisuerga River[J]. *Water Research*, 1990, **24**(3): 373-379.
- [7] Hamed Y A, Abdelmoneim T S, Elkiki M H, *et al.* Assessment of heavy metals pollution and microbial contamination in water, sediments and fish of Lake Manzala, Egypt[J]. *Life Science Journal*, 2013, **10**(1): 86-99.
- [8] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2355-2363.
- [9] Ali H, Khan E, Sajad M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications[J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(7): 869-881.
- [10] Guo G H, Xu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [11] Liu X M, Song Q J, Tang Y, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 530-540.
- [12] 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 等. 截污调水后滇池表层沉积物中 16 种 PAHs 的分布特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3501-3508.
- Hu X Y, Gao B L, Chen T, *et al.* Distribution of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in Dianchi lake surface sediments after the integrated water environment control project[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3501-3508.
- [13] 蔡晔, 林休休. 长江三角洲近岸水域表层沉积物重金属分布特征及其影响因子[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(3): 331-338.
- Cai Y, Lin X X. Distribution and influencing factors of heavy metals in bottom sediment of Yangtze River Delta region during seasons[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(3): 331-338.
- [14] Huang B, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, **112**(4): 391-402.
- [15] 刘靳, 涂耀仁, 蒲雅丽, 等. 重金属在黄浦江流域的污染现状与来源解析[J]. *环境科技*, 2019, **32**(6): 1-7.
- Liu J, Tu Y R, Pu Y L, *et al.* Pollution status and source analysis of heavy metals in Huangpu River Basin [J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, **32**(6): 1-7.
- [16] 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.
- [17] 朱晨阳. 西湖和苕溪沉积物重金属生态风险评价和源解析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2017.
- Zhu C Y. Ecological risk assessment and source identification of heavy metals in surface sediments of West Lake and Tiaoxi River [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [18] 匡俊, 顾凤祥. 京杭运河苏州段沉积物重金属污染现状及评价[J]. *海洋地质动态*, 2008, **24**(9): 8-12.
- Kuang J, Gu F X. Assessment of heavy metal contamination in sediments in Suzhou of the Jinghang Canal [J]. *Marine Geology Letters*, 2008, **24**(9): 8-12.
- [19] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **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*, 2020, **42**(3): 1403-1415.
- [20] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [21] 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.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] Wang L F, Yang L Y, Kong L H, *et al.* Spatial distribution, source identification and pollution assessment of metal content in the surface sediments of Nansi Lake, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **140**: 87-95.
- [25] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [26] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [27] 李淮, 吴玮, 田永静, 等. 苏州市古城区降雨径流颗粒物粒

- 径分布及污染物赋存形态[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 565-572.
- Li H, Wu W, Tian Y J, *et al.* Particle size distribution and pollutant speciation analyses of stormwater runoff in the ancient town of Suzhou[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 565-572.
- [28] Liu Y Z, Engel B A, Collingsworth P D, *et al.* Optimal implementation of green infrastructure practices to minimize influences of land use change and climate change on hydrology and water quality: case study in Spy Run Creek watershed, Indiana[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 1400-1411.
- [29] Putro B, Kjeldsen T R, Hutchins M G, *et al.* An empirical investigation of climate and land-use effects on water quantity and quality in two urbanising catchments in the southern United Kingdom[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 164-172.
- [30] 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(8): 3036-3047.
- Ning Z P, Lan X L, Huang Z Y, *et al.* Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang River [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3036-3047.
- [31] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- Zheng J P, Jiao X M, Fang N J, *et al.* Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1514-1522.
- [32] 孙保金, 庄起帆, 罗小进, 等. 苏州海绵城市试点区湿地沉积物中重金属的分布特征——以苏州工业园区为例[J]. 科学与社会, 2020, **47**(3): 62-68.
- Sun B J, Zhuang Q F, Luo X J, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in wetland sediments of sponge city pilot area of suzhou: a case study on SIP[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2020, **47**(3): 62-68.
- [33] 魏荣菲, 庄舜尧, 杨浩, 等. 苏州河网区河道沉积物重金属的污染特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 527-537.
- Wei R F, Zhuang S Y, Yang H, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in sediments from the river network of Suzhou city [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 527-537.
- [34] 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.
- [35] 何海星, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门西港近岸沉积物重金属污染历史及源解析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(4): 1045-1051.
- He H X, Yu R L, Hu G R, *et al.* Pollution history and source of heavy metals in coastal sediments from Xiamen Western Bay[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1045-1051.
- [36] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, *et al.* The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, **54**(3): 267-277.
- [37] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [38] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(5): 517-568.
- [39] 王旭婷, 吴玮, 李淮. 苏州古城各功能区路面降雨径流分析[J]. 江苏水利, 2019, (7): 9-14.
- Wang X T, Wu W, Li H. Analysis of pavement rainfall runoff in various functional areas of Suzhou ancient city[J]. *Jiangsu Water Resources*, 2019, (7): 9-14.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)