

聂世勇, 黄志金, 王建芹. 上海市城区某河道底泥重金属污染评价及来源分析[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 150–158.

NIE S Y, HUANG Z J, WANG J Q. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediment of a river in Shanghai City [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 150–158.

上海市城区某河道底泥重金属污染评价及来源分析

聂世勇^{1,2}, 黄志金^{1,2,*}, 王建芹^{1,2}

(1. 上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海 201707; 2. 上海市水务局河湖生态修复工程技术研究中心, 上海 201707)

摘 要 【目的】开展河道底泥重金属污染评价及来源分析工作, 对河道污染防治具有重要意义。【方法】以上海市城区河道外环西河底泥为研究对象, 分析了 8 种重金属 (Cd、Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cr、Ni) 的含量分布特征, 采用地累积指数和潜在生态风险指数法评价底泥中重金属污染程度, 并通过 Pearson 相关性和主成分分析法对重金属进行溯源分析。【结果】结果表明, 外环西河底泥重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cr、Ni 的平均质量分数为 0.11、24.26、24.40、76.91、0.07、6.93、85.52、69.57 mg/kg, Cd、Cr、Hg 在河道底泥中分布极不均匀。地累积指数评价发现, 河道底泥重金属元素污染程度依次为 Ni>As>Cr>Pb>Cu>Cd>Zn>Hg, 所有点位底泥中 Ni 为轻度污染, 部分点位的 Hg、Cr 为轻度污染。潜在生态风险指数评价显示, W10、W11 点位重金属 Hg 为较高风险, Cd 为中等风险, W12、W13、W16、W17 点位的 Hg、W18 点位的 Cd 生态风险为中等风险, 生态风险主要以重金属 Hg、Cd、As、Ni 等贡献为主。Pearson 相关性和主成分分析结果表明, 底泥中重金属 Pb、Cu、Zn 可能与交通运输有关, 重金属 Cr、Ni 可能与工业生产有关, 重金属 Cd、Hg 可能与大气污染有关。【结论】城区河道底泥可能受到复合污染, 建议重点关注 Hg、Cd、As、Ni 等重金属变化情况。

关键词 上海市 河道底泥 重金属 污染评价 来源分析 生态风险

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)04-0150-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.018

Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediment of a River in Shanghai City

NIE Shiyong^{1,2}, HUANG Zhijin^{1,2,*}, WANG Jianqin^{1,2}

(1. Shanghai Hongbo Engineering Consulting Management Co., Ltd., Shanghai 201707, China;

2. River and Lake Water Ecological Restoration Engineering Technology Research Center of Shanghai Water Affairs Bureau, Shanghai 201707, China)

Abstract [Objective] The assessment and source identification of heavy metal contamination in river sediments are of critical importance for the prevention and mitigation of river pollution. [Methods] In this paper, the distribution characteristics of eight heavy metals (Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, As, Cr and Ni) in the sediment of West River of Outer Ring Road were analyzed. The pollution degree of heavy metals in the sediment was evaluated by local accumulation index and potential ecological risk index. The trace analysis of heavy metals was carried out by Pearson correlation and principal component analysis. [Results] The result showed that the average contents of heavy metals Cd, Cu, Pb, Zn, Hg, As, Cr, Ni in river sediment of West River of Outer Ring Road were 0.11, 24.26, 24.40, 76.91, 0.07, 6.93, 85.52, 69.57 mg/kg, and the distribution of Cd, Cr and Hg in river sediment was very uneven. According to the evaluation of ground accumulation index, the pollution degree of heavy metal elements in the river sediment was in the order of Ni>As>Cr>Pb>Cu>Cd>Zn>Hg, and the Ni in the sediment at all points was mildly polluted, while the Hg and Cr in some points were mildly polluted. The evaluation of potential ecological risk index showed that heavy metal Hg at W10 and W11 was a high risk, Cd was a medium risk, Hg at W12, W13, W16, W17 and Cd at W18 was a medium risk, and the ecological risk was mainly

[收稿日期] 2023-04-13

[基金项目] 上海市水务局 2022 年度科研计划项目(沪水科 2022-01)

[作者简介] 聂世勇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水环境治理工作, E-mail: 995701864@qq.com。

[通信作者] 黄志金(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事河湖、区域水环境治理技术研究和设计工作, E-mail: 185881296@qq.com。

contributed by heavy metal Hg, Cd, As and Ni. Pearson correlation and principal component analysis showed that heavy metals Pb, Cu and Zn in sediment may be related to transportation, Cr and Ni may be related to industrial production, and Cd and Hg may be related to air pollution. [**Conclusion**] The sediment in urban river channels may be subject to complex pollution, and it is imperative to closely monitor the variations in heavy metals such as Hg, Cd, As and Ni.

Keywords Shanghai City sediment heavy metals pollution assessment source analysis ecological risk

底泥作为河流生态系统重要的组成部分,是水体生物的营养物质基础,也是重金属、难溶有机物等污染物的“源”与“汇”^[1-2]。与底泥中其他污染物的不同,重金属具有毒性大及难降解、易富集等特点^[3-4]。重金属等污染物通过地表径流、大气沉降等方式进入河流中,在水体中因吸附、络合或沉淀等作用会沉积在底泥中,从而对生态系统构成直接或间接的潜在威胁^[5]。当水环境中的氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、酸碱度(pH)等条件发生变化时,底泥中的重金属可能再次释放到上覆水体中,引起“二次污染”,严重影响水环境质量^[6-7]。

底泥中重金属可直观反映水体污染程度及水环境演变过程,在河道水生态研究工作中备受关注^[8]。随着城市经济发展进程不断加快,导致部分城市河道受到不同程度的重金属污染。从环境学的角度来看,重金属评价主要是分析其污染程度及对生态环境或人类健康潜在威胁程度。底泥重金属污染评价是了解河道水体污染状况有效手段,也是分析周边人为活动对河道的影响。因此,开展底泥重金属污染评价及来源分析,找出影响河道底泥的潜在污染因素,可为河道管理部门制定准确的防治措施提供决策支撑。

上海市某区拟对城市河道开展整治工作,以提升河道水环境治理。本文以该河道底泥为研究对象,分析底泥镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)、铅(Pb)含量分布特征,利用地累积指数法和潜在生态风险法来评价底泥重金属污染水平,并通过主成分分析法和 Pearson 相关性方法探讨底泥各种重金属来源,厘清河道底泥污染状况与城市化发展进程之间的关系,以期河道水环境质量稳步提升工作提供可参考的技术数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及样品采集

外环西河位于上海长宁区外环高速旁,北起苏州河,南至夏家浜,河道全长为 5.39 km,宽约为 33 m,水面积为 17 余万 m²,是长宁区“两纵七横”河网

水系中重要的纵向骨干河道之一。河道东侧临近外环西路高速,西侧有居民生活区、航空配件制造企业、物流运输企业。

水动力方面,外环西河位于上海市水利分片中的“淀北片”,外环西河与虹桥机场相连。按照《长宁区水资源调度实施细则》管理办法,该河防汛期间外排内河涝水,提高虹桥机场及周围水系防汛能力,引水时,通过泵站运作,引入苏州河,保证区内主要河道水体有序流动,从而提高相连水系河道自净能力。由此可见,外环西河在长宁区水环境统一调度工作中发挥重要作用。开展外环西河底泥污染物水平及其污染物与周边环境的关联性研究工作,可为河道水体质量保护及活水调度安全提供科学依据。

底泥采样要求如下:(1)根据河道两侧周边情况,在引水口附近、企业生产区、居民生活区、临近道路旁等分别设置采样单元,单个采样单元面积不宜大于 10 000 m²,如图 1 所示;(2)每个采样单元中设置 5 个采样点,采样方法因地制宜选择对角线法、梅花点法、棋盘式法或蛇形法等其中一种,5 个采样点均匀混合制成 1 个样品进行检测;(3)采用活塞式柱状采泥器对河道底泥进行取样,每个采样点深度控制在 0~50 cm。将采集的底泥样品装入自封袋并进行编号,在 4℃的冰箱中保存运送至实验室。

1.2 样品测试

所有底泥样品经冷冻干燥,研磨后过 100 目筛备用。底泥重金属检测指标、检测方法及仪器信息如表 1 所示。

1.3 重金属评价方法

研究^[3-4]发现,地累积指数法较好地考虑了地质背景的影响,但难以反映单个采样点综合污染特征;污染负荷指数法反映的是各项重金属对区域污染的贡献程度,忽略不同污染源带来的影响;潜在生态风险法综合考虑了不同重金属引起的潜在影响,同时也能反映各项重金属的贡献率,但其计算过程中的权重及响应系数具有一定的主观性。因此,为

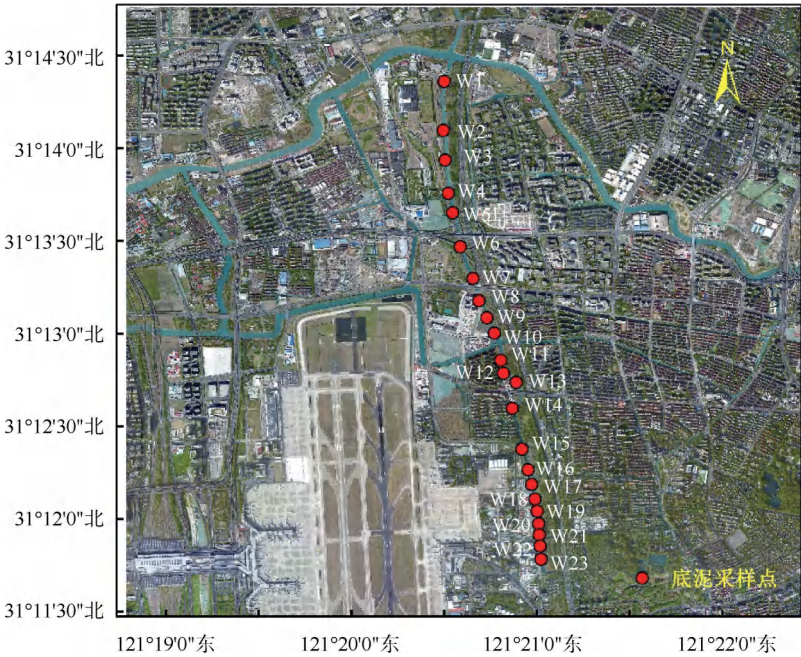


图 1 底泥采样点位

Fig. 1 Bitmap of Sediment Sampling Points

表 1 重金属检测方法及仪器信息

Tab. 1 Heavy Metal Detection Method and Instrument Information

检测项目	检测依据	检出限/(mg·kg ⁻¹)	仪器信息
Ni	《土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019)	3	AAAnalyst400 原子吸收光谱仪 S-194
Cu		1	AAAnalyst400 原子吸收光谱仪 S-194
Zn		1	AAAnalyst400 原子吸收光谱仪 S-194
Cr		4	AAAnalyst400 原子吸收光谱仪 S-194
Pb	《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)	0.1	PinAAcle 900T 原子吸收光谱仪 S-234
Cd		0.01	PinAAcle 900T 原子吸收光谱仪 S-234
总 Hg	《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分: 土壤中总汞的测定》(GB/T 22105. 1—2008)	0.002	AFS-8220 原子荧光光度计 S-097
总 As		0.01	AFS-8220 原子荧光光度计 S-097

保证评价结果的合理性,本文选用地累积指数法和潜在生态风险法来对底泥重金属进行评价。

1. 3. 1 地累积指数法

地累积指数法是用来评估水环境中重金属的污染程度,能直观地反映重金属的自然变化及人为活动对重金属含量的影响^[9],计算如式(1)。将计算得到的地累积指数 I_{geo} 值进行等级划分^[10],如表 2 所示。

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

表 2 地累积指数评价标准

Tab. 2 Evaluation Criteria of Geo-Accumulation Index

级别	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	≥ 5
污染程度	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	严重污染

其中: I_{geo} ——地累积指数值;
 k ——考虑当地岩石差异可能引起的背景值变动而取的系数,一般取 1.5;
 C_i ——底泥中重金属 i 的质量分数,mg/kg;
 B_i ——重金属 i 的环境背景值,mg/kg,选取上海市土壤重金属背景作为环境背景值(表 3); k 为修正系数,一般取 1.5。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是基于综合考虑多种重金属污染类型、毒性水平、环境对重金属污染敏感性的重金属污染评价方法,也作为《湖泊河流环保疏浚工程技术指南(试行)》文件中推荐的底泥重金属污染评估的鉴别方法^[11]。计算如式(2)~式(3)。

$$E_r^i = T_r^i C_i / C_0 \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

其中: T_r^i ——重金属的毒性响应指数;
 C_0 ——重金属*i*的参比值,即为重金属的背景值,mg/kg;
 E_r^i ——单一重金属*i*的潜在生态风险指数;
 R ——底泥中多种重金属的综合潜在生态风险指数。

本文选用上海土壤重金属含量背景值作为参比值(表3)。

表3 不同重金属毒性响应指数和背景值

Tab.3 Toxicity Response Indices and Background Values of Different Heavy Metals

指标	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Hg	Zn	参考文献
T_r^i	10	30	2	5	5	5	40	1	[12]
C_0	7	0.12	88	28	37	27	0.075	107	[13]

潜在生态风险指数与污染程度等级^[14-15]如表4所示。

表4 重金属 E_r^i 和 R 与污染程度的关系

Tab.4 Relationship between Heavy Metals E_r^i and R and Pollution Degree

E_r^i	污染程度	R	污染程度
[0,40)	低	[0,150)	低
[40,80)	中等	[150,300)	中等
[80,160)	较重	[300,600)	较重
[160,320)	重	[600,+∞)	严重
[320,+∞)	严重	-	-

1.4 重金属源解析方法

底泥中重金属主要受到自然环境沉积作用及周边区域的工业废水排放、生活污水及矿物开采等人为活动造成的影响^[16-17]。底泥重金属来源分析方法有主成分分析法、相关性分析法^[18]。主成分分析

法是通过数学降维或特征提取将许多的相关性原始变量进行线性转换,提取出具有代表性的重要因子,以此来判断重金属来源相关信息^[19]。一般认为,当底泥中重金属来源相似或相同时,不同重金属相关性分析可反映重金属间的空间变化趋势,进一步推测重金属的来源、存在形式及污染状况等信息^[20-21]。本文使用 SPSS 软件进行主成分分析和 Pearson 相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 底泥重金属含量分布特征

本研究对 23 个采样点底泥中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cr 和 Ni 含量分别就进行描述性统计,结果如表 5 所示。与上海市土壤重金属背景值相比,外环西河底泥中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Cr 的平均质量分数均未超过上海市土壤背景值。其中,重金属 Ni 的平均质量分数超过上海市土壤背景值,约是背景值的 1.88 倍。从重金属超标点位比例来看,重金属 Ni 的超标点位比例最高,达 100%;重金属 Cd、Cu、Pb、Hg、As、Cr 的超标点位比例为 13%~48%,所有采样点位中的重金属 Zn 均未超过上海市土壤背景值。由此可见,外环西河底泥中的重金属 Ni 存在富集现象。

变异系数是表示一组数据的离散程度指标,变异系数超过 20%,造成重金属含量空间差异主要因素为人类活动^[22]。外环西河底泥中的 Cd、Cr 的变异系数分别为 34.80%、22.63%,底泥中 Hg 的变异系数为 61.06%,说明 Cd、Cr、Hg 在河道底泥中分布极不均匀。这可能是外环西河周边土地类型和污染情况较为复杂,河道紧靠城市快速路、机场、商业区、居民住宅区等,导致底泥中重金属含量易受到汽车尾气、污水排放等影响^[23]。

2.2 重金属污染评价

2.2.1 地累积指数法

外环西河底泥中各项重金属含量的地累积指数评价结果如图 2 所示。外环西河底泥中重金属元素污染程度依次为 Ni>As>Cr>Pb>Cu>Cd>Zn>Hg。底泥中 Ni 的污染程度最高,23 个采样点位的 I_{geo} 值均超过 0,达到轻度污染;底泥中的 Hg,3 个采用点位的 I_{geo} 值超过 0,为轻度污染;底泥中的 Cr,1 个采样点位的 I_{geo} 值超过 0,为轻度污染;其余重金属元素均为无污染。

表 5 河道底泥重金属统计结果
Tab. 5 Statistical Results of Heavy Metals in River Sediment

元素	最小值/ (mg·kg ⁻¹)	最大值/ (mg·kg ⁻¹)	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差	变异系数	上海市土壤背景值/ (mg·kg ⁻¹)	超标点 位比例
Cd	0.08	0.24	0.11	0.04	34.80%	0.12	26%
Cu	18.00	30.00	24.26	3.71	15.28%	28	13%
Pb	17.70	30.60	24.40	3.55	14.55%	27	26%
Zn	47.00	102.00	76.91	13.51	17.57%	107	0
Hg	0.03	0.20	0.07	0.04	61.06%	0.075	26%
As	4.29	9.28	6.93	1.37	19.79%	7	48%
Cr	59.00	135.00	85.52	19.35	22.63%	88	35%
Ni	56.00	82.00	69.57	7.48	10.75%	37	100%

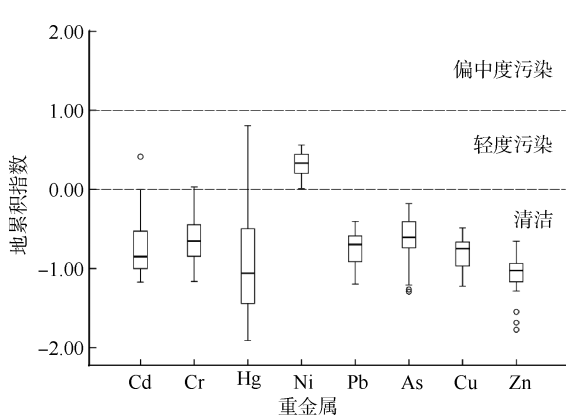


图 2 河道底泥重金属地累积指数箱式图

Fig. 2 Box Diagram of Heavy Metal Geo-Accumulation Index in River Sediment

2.2.2 潜在生态风险指数法

外环西河底泥中各项重金属元素的潜在生态风险指数如图 3 所示。W1~W9 点位底泥中的各项重金属的 $E_i < 40$, 属于低风险; W10、W11 点位重金属 Hg E_i 为 80~160, 属于较高风险, Cd E_i 为 40~80, 属于中等风险; W12、W13、W16、W17 点位的 Hg E_i 为 40~80, 属于中等风险; W18 点位的 Cd E_i 为 40~80, 属于中等风险; 其余点位底泥重金属属于低风险。结合底泥采样位置分析, W1~W9 点位河道两侧土地用地基本为绿地, 人口稀少; W10 处于周家浜与外环西河交界口, W10、W11、W12、W13 处于人口居住较多的区域; W16、W17、W18 处于工业生产(飞机检修及配件制造)区域。由此可见, 人为活动、工业生产等行为对底泥中具有一定的重金属生态风险。

底泥重金属综合潜在生态风险指数如图 4 所示。W1~W9 点位底泥均为低风险, R 平均值为

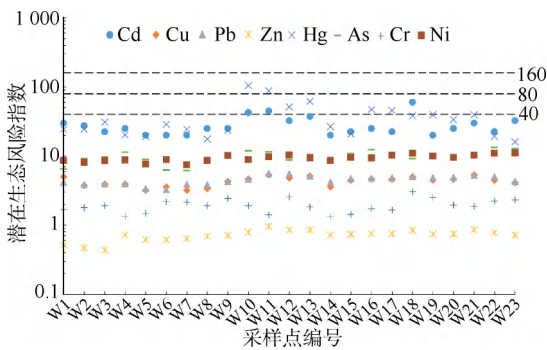


图 3 河道底泥重金属潜在生态风险指数

Fig. 3 Potential Ecological Risk Index of Heavy Metals in River Sediments

74.88; W11 和 W12 点位的 R 在 150~300, 表现为中等风险, W10~W15 点位底泥的 R 为 124.30; W16~W23 点位底泥均为低风险, R 平均值为 98.61。结合上述分析结果, 造成底泥重金属生态风险的主要来源主要是人为活动、工业生产等影响。

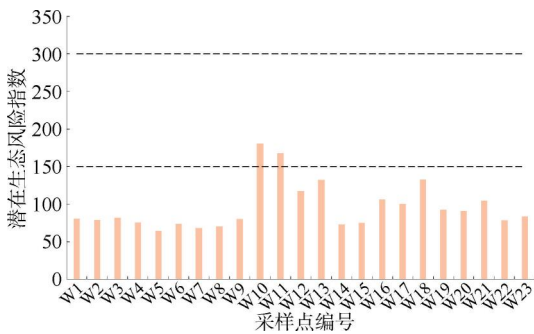


图 4 河道底泥重金属综合潜在生态风险指数

Fig. 4 Comprehensive Potential Ecological Risk Index of Heavy Metals in River Sediment

进一步分析外环西河不同采样点位底泥重

金属的生态风险贡献(图5),结果表明各点位的底泥的生态风险主要以 Hg、Cd、As、Ni 等重金属为主,其中重金属元素 Hg 和 Cd 两者占比之和超过 50%,说明外环西河底泥主要表现为 Hg、Cd 复合污染。

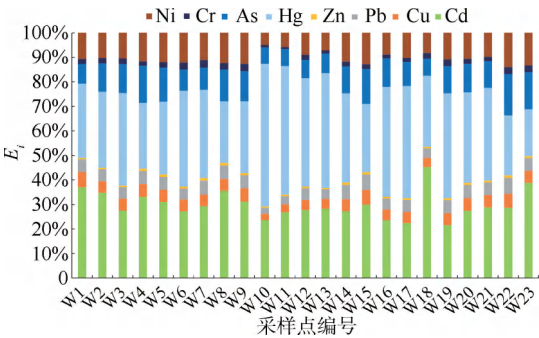


图5 河道底泥重金属潜在生态风险贡献
Fig. 5 Potential Ecological Risk Contribution of Heavy Metals in River Sediment

表6 河道底泥重金属 Pearson 相关性分析
Tab. 6 Pearson Correlation Analysis of Heavy Metals in River Sediment

重金属	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	As	Cr	Ni
Cd	1	0.602 **	0.514 *	0.503 *	0.566 **	0.208	0.351	0.396
Cu	-	1	0.863 **	0.620 **	0.566 **	0.418 *	0.135	0.632 **
Pb	-	-	1	0.799 **	0.546 **	0.499 *	0.198	0.691 **
Zn	-	-	-	1	0.544 **	0.484 *	0.136	0.617 **
Hg	-	-	-	-	1	0.279	-0.049	0.114
As	-	-	-	-	-	1	-0.071	0.549 **
Cr	-	-	-	-	-	-	1	0.522 *
Ni	-	-	-	-	-	-	-	1

注: ** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性极显著, * 表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

由分析结果可知,主成分 F_1 与重金属 Pb、Cu、Zn 有较大的相关性,表明主成分 F_1 主要反映这 3 种重金属元素的信息。结合重金属相关性分析结果(表 6), Pb、Cu、Zn 两者之间为极显著相关($p < 0.01$),说明 Pb、Cu、Zn 存在相同或相似的来源。研究^[25-27]表明,Pb 来源与交通运输密切相关,Cu 与工、农业生产活动和交通运输等有关,Zn 主要与汽车轮胎磨损及润滑油产生的污染物有关。河道周边临近外环高速,车流量大,因此,可以将主成分 F_1 看作是交通运输等来源。

主成分 F_2 与重金属 Cr、Ni 有较大的相关性,表明主成分 F_2 主要反映这两种重金属元素的信息。由各项重金属含量描述性结果(表 3)和相关性分析

2.3 重金属来源分析

一般认为,两种金属之间存在显著相关,说明这两种金属可能存在相似或相同的来源^[24]。本研究对 23 个采样点底泥重金属进行 Pearson 相关性分析如表 6 所示。结果表明,外环西河底泥重金属;Cu、Pb、Zn 两两之间极显著相关($p < 0.01$),说明这 3 种重金属来源相似或相同;Hg 与 Cd 极显著相关($p < 0.01$),说明 Hg、Cd 来源相似或相同;Ni 与 Cr 显著相关(显著性水平 $p < 0.05$),与其他重金属均不相关,推测 Ni、Cr 可能存在相似或相同的来源。

利用主成分分析法进一步分析底泥中重金属的来源,本次研究中通过特征值和累积方差贡献率两种方法来确定主成分数量,如表 7 所示。结果表明,发现特征值大于 1 的成分有 3 个(F_1 、 F_2 、 F_3),其累计贡献率为 83.078%,表明从重金属中提取出 3 个主成分可代表大部分污染物信息。

结果可知,在本次研究中,底泥中的重金属 Ni 均超过上海土壤背景值,有 8 个采样点位 Cr 超过背景值,Cr 与 Ni 之间存在极显著,但与它重金属均不相关,说明两种重金属来源以 Ni 污染为主。研究^[28]表明,合金生产过程可能会释放重金属 Cr、Ni。采样点位周边有航空制造相关的工厂,因此可以将主成分 F_2 看作是工业生产污染源。

同样,主成分 F_3 与重金属 Cd、Hg 有较大的相关性,表明主成分 F_3 主要反映这两种重金属元素的信息。Cd 与 Hg 之间存在极显著,说明 Cd 与 Hg 来源相似或相同。Cd 主要与化石燃料燃烧、农业生产等人为活动有关,Hg 与石油产品燃烧产生的污染物有关,产生的烟尘经大气沉降进入土壤和河流

表7 河道底泥重金属主成分分析结果
Tab.7 Principal Component Analysis of Heavy Metals
in River Sediment

重金属	主成分载荷		
	F_1	F_2	F_3
Cd	0.707	0.062	0.526
Cu	0.877	-0.102	0.058
Pb	0.923	-0.057	-0.077
Zn	0.847	-0.113	-0.080
Hg	0.638	-0.509	0.430
As	0.597	-0.186	-0.622
Cr	0.302	0.871	0.257
Ni	0.775	0.474	-0.340
特征值	4.294	1.306	1.046
贡献率	53.676%	16.329%	13.073%
累计贡献率	53.676%	70.005%	83.078%

中^[28-30]。结合本研究河道的地理位置,河道位于城市快速路、机场跑道附近。因此,可以将主成分 F_3 看作是大气污染源。

3 结论

(1)外环西河 23 个采样点位底泥中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cr、Ni 平均质量分数分别为 0.11、24.26、24.40、76.91、0.07、6.93、85.52、69.57 mg/kg,超过上海市土壤背景值的采样点位比例分别为 26%、13%、26%、0、26%、48%、35%、100%。其中,外环西河底泥中的重金属 Ni 存在富集现象,平均质量分数约是上海市土壤背景值的 1.88 倍。底泥中的 Cd、Cr 的变异系数分别为 34.80%、22.63%,底泥中的 Hg 的变异系数为 61.06%,Cd、Cr、Hg 在河道底泥中分布极不均匀。

(2)地累积指数结果显示重金属元素污染程度依次为 Ni>As>Cr>Pb>Cu>Cd>Zn>Hg,所有点位底泥中 Ni 为轻度污染,部分点位的 Hg、Cr 为轻度污染。潜在生态风险指数评价结果显示,W1~W9 点位底泥中各项重金属的生态风险为低风险,W10、W11 点位重金属 Hg 为较高风险,Cd 为中等风险,W12、W13、W16、W17 点位的 Hg、W18 点位的 Cd 生态风险为中等风险。生态风险综合指数贡献率主要以 Hg、Cd、As、Ni 等重金属为主,造成底泥重金属生态风险的原因与人为活动、工业生产等影响有关。

(3)对底泥中重金属进行来源分析,Cu、Pb、Zn

两两之间极显著相关($p<0.01$),Hg 与 Cd 极显著相关($p<0.01$),Ni 与 Cr 显著相关(显著性水平 $p<0.05$)。进一步通过主成分分析可知,重金属 Pb、Cu、Zn 属于第一主成分,主要来源是交通运输;重金属 Cr、Ni 属于第二主成分,主要来源是工业生产;重金属 Cd、Hg 属于第三主成分,主要来源是大气污染源。

参考文献

- [1] 杨帆,袁隆湖,黎一夫,等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1934-1946.
YANG F, YUAN L H, LI Y F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1934-1946.
- [2] LI Y, GAO B, XU D, et al. Hydrodynamic impact on trace metals in sediments in the cascade reservoirs, North China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 136914. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136914.
- [3] 易雨君,王文君,宋劫. 长江中下游底泥重金属污染特征、潜在生态风险评价及来源分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2):1-7.
YI Y J, WANG W J, SONG J. Pollution characteristics, potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals of sediment in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2): 1-7.
- [4] 郭杰,王珂,于琪,等. 长江中游近岸表层沉积物重金属污染特征分析及风险评估[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4625-4636.
GUO J, WANG K, YU Q, et al. Pollution characteristics of the heavy metals and their potential ecological risk assessment in nearshore sediments of the middle reaches of the Yangtze River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11): 4625-4636.
- [5] 胡明,薛娇,严玉林,等. 北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 73-81.
HU M, XUE J, YAN Y L, et al. Assessment and trace back to source of heavy metal pollution in typical river sediments in Beijing[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 73-81.
- [6] HARISH, LOOI L J, ARIS A Z, et al. Geo-accumulation index and contamination factors of heavy metals (Zn and Pb) in urban river sediment [J]. Environmental Geochemistry & Health, 2017, 39(6): 1259-1271.
- [7] 李勇,单雅洁,程浩,等. 城市重污染河流沉积物营养盐和

- 重金属分布及潜在生态风险[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 31-38.
- LI Y, SHAN Y J, CHENG H, et al. Distribution and potential ecological risks of nutrient elements and heavy metals in sediments of a heavily polluted urban river[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 31-38.
- [8] 范成新, 刘敏, 王圣瑞, 等. 近20年来我国沉积物环境与污染控制研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(4): 346-374.
- FAN C X, LIU M, WANG S R, et al. Research progress and prospect of sediment environment and pollution control in China in recent 20 years[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(4): 346-374.
- [9] 江雅琪, 桂和荣, 陈晨, 等. 宿州市城市景区水域底泥重金属含量特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2410-2418.
- JIANG Y Q, GUI H R, CHEN C, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediment in urban scenic area[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(8): 2410-2418.
- [10] 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.
- [11] 陆志华, 蔡梅, 王元元, 等. 太湖沿岸区浅层底泥重金属污染分析及生态风险评价[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 455-467.
- LU Z H, CAI M, WANG Y Y, et al. Heavy metal pollution analysis and ecological risk assessment of shallow sediments in the coastal area of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 455-467.
- [12] 龙佳, 张宁, 崔佳. 黑臭水体底泥污染源调查及污染特性评价方法研究[J]. 市政技术, 2018, 36(6): 171-173.
- LONG J, ZHANG N, CUI J. Study on pollutant investigation and characteristics evaluation of black and odorous water substrate sludge[J]. Environmental Protection Engineering, 2018, 36(6): 171-173.
- [13] 成杭新, 李括, 李敏, 等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- CHENG H X, LI K, LI M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3): 265-306.
- [14] 崔飞剑, 覃光雄, 曾海龙, 等. 沙河流域重污染支流表层沉积物中氮、磷和重金属的空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程, 2022, 40(1): 110-116.
- CUI F J, QIN G X, ZENG H L, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metal in surface sediments of heavily polluted tributaries of Shahe River Basin[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(1): 110-116.
- [15] 白冬锐, 张涛, 包峻松, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3206-3214.
- BAI D R, ZHANG T, BAO J S, et al. Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the ancient town of Suzhou[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3206-3214.
- [16] 姜玉玲, 阮心玲, 马建华. 新乡市某电池厂附近污灌农田重金属污染特征与分类管理[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 645-654.
- JIANG Y L, RUAN X L, MA J H. Heavy metal pollution and classification management of sewage irrigation farmland around a battery factory in Xinxiang, Henan Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 40(2): 645-654.
- [17] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3018-3027.
- WANG R, DENG H, JIA Z M, et al. Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3018-3027.
- [18] 李照全, 方平, 黄博, 等. 洞庭湖区典型内湖表层沉积物中氮、磷和重金属空间分布与污染风险评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(6): 1409-1420.
- LI Z Q, FANG P, HUANG B, et al. Distribution and ecological risk assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of typical internal lakes in Dongting Lake Area[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(6): 1409-1420.
- [19] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(4): 964-976.
- KUANG H F, HU C H, WU G L, et al. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(4): 964-976.
- [20] 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.
- [21] 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 等. 苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 198-209.

- ZHENG M H, BAI D R, ZHANG T, et al. Distribution characteristics and pollution risk of heavy metals in river sediment of Suzhou water network area, China [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1):198-209.
- [22] 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. DOI: 10.1016/j.gexplo.2014.02.008.
- [23] 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.
- [24] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(6): 2237-2246.
- XIANG Y X, WANG X, SHAN B Q, et al. Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(6): 2237-2246.
- [25] 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.
- [26] 吴金莲. 北京城市流域底泥重金属形态特征及其生态风险评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 321-328.
- WU J L. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of watershed in Beijing[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(5): 321-328.
- [27] 韩金龙, 杨兰琴, 王培京, 等. 北京通惠河底泥重金属风险评价及溯源[J]. *人民黄河*, 2022, 44(4): 107-111.
- HAN J L, YANG L Q, WANG P J, et al. Risk assessment and source of heavy metals in the sediment of Tonghui River in Beijing[J]. *Yellow River*, 2022, 44(4): 107-111.
- [28] 刘玮晶, 黄顺生, 金洋, 等. 江苏省中部城镇河流水底泥重金属污染评价及来源分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 97-102.
- LIU W J, HUANG S S, JIN Y, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in river sediment of a town in central Jiangsu Province [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2021, 32(2): 97-102.
- [29] 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 等. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属Cr、Hg、As空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2532-2544.
- GAO R Z, ZHANG A L, ZHANG S, et al. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg, and As in soils of the Salt Lake Basin in northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2532-2544.
- [30] 滕彦国, 倪师军, 林学钰, 等. 城市环境地球化学研究综述[J]. *地质论评*, 2005(1): 64-76.
- TENG Y G, NI S J, LIN X Y, et al. Review on urban environmental geochemistry[J]. *Geological Review*, 2005(1): 64-76.

(上接第 107 页)

- [16] TUMENDELGER A, ALSHBOUL Z, LORKE A. Methane and nitrous oxide emission from different treatment units of municipal wastewater treatment plants in Southwest Germany [J]. *PLOS One*, 2019, 14(1): e0209763. DOI: 10.1371/journal.pone.0209763.
- [17] DESLOOVER J, VLAEMINCK S E, CLAUWAERT P, et al. Strategies to mitigate N₂O emissions from biological nitrogen removal systems[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(3): 474-482.
- [18] ZHANG W, PENG Y, REN N, et al. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(11): 2859-2863.
- [19] PENG L, NI B J, YE L, et al. The combined effect of dissolved oxygen and nitrite on N₂O production by ammonia oxidizing bacteria in an enriched Nitrifying sludge[J]. *Water Research*, 2015, 73: 29-36. DOI: 10.1016/j.watres.2015.01.021.
- [20] 孙强强, 陈贻龙. 南方某省城镇污水处理厂碳排放特征[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(10): 3231-3244.
- SUN Q Q, CHEN Y L. Characteristics of carbon emission from municipal wastewater treatment plants in a south-China province [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(10): 3231-3244.