

城镇水系统研究与应用

尹立群, 夏虎成, 殷海平, 等. 淮安市河道淤泥重金属污染特征、生态风险及来源分析[J]. 净水技术, 2026, 45(2): 152-159.

Yin L Q, Xia H C, Yin H P, et al. Pollution characteristics, ecological risk and source analysis of heavy metals in river sediments in Huai'an City[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(2): 152-159.

淮安市河道淤泥重金属污染特征、生态风险及来源分析

尹立群¹, 夏虎成^{2,*}, 殷海平³, 徐 昕⁴, 蒋 力⁴, 谢昶琰⁵

(1. 淮安市古黄河枢纽控制工程管理站, 江苏淮安 223400; 2. 淮安市水利局, 江苏淮安 223005; 3. 淮安市高良涧水利工程管理站, 江苏淮安 223005; 4. 淮安市水利工程建设管理服务中心, 江苏淮安 223005; 5. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏淮安 223001)

摘要 【目的】 本文旨在通过探究不同河道淤泥重金属污染特征及存在的生态风险, 为淮安市城乡河道重金属污染防治和生态修复提供科学依据。【方法】 以淮安市 5 条拟清淤河道为研究对象, 采用电感耦合等离子体质谱仪对河道淤泥重金属开展特征分析, 运用几种重金属污染评价方法对重金属污染程度进行评价, 并采用相关性分析和主成分分析对重金属的污染来源进行分析。【结果】 里运河、洪福河、大寨河、小盐河、新涧河 5 条河道淤泥中 Cd 元素含量均高于淮安市土壤背景值, 但 5 条河道淤泥的 6 种重金属含量均未超过《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018) 中 A 级污染产物限值。运用多元统计方法的评价结果表明: 5 条河道淤泥中 6 种重金属综合污染较轻, 不会造成生态性风险。相关性分析及主成分分析结果表明: Cd、Ni、Cr、As 和 Pb 间具有较强的同源性, 为污染物的第一主成分, 受人类活动、农业活动和工业活动的共同影响, Hg 为第二主要污染物, 与大气沉降、交通运输有关。【结论】 5 条河道淤泥潜在生态风险水平较低, 总体为轻微污染。其 Cd 元素的后续污染变化值得关注, 在进行淤泥资源化利用前应该重视 Cd 的控制。

关键词 河道淤泥 重金属 潜在生态风险 污染源 来源分析

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)02-0152-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.02.016

Pollution Characteristics, Ecological Risk and Source Analysis of Heavy Metals in River Sediments in Huai'an City

Yin Liqun¹, Xia Hucheng^{2,*}, Yin Haiping³, Xu Xin⁴, Jiang Li⁴, Xie Changyan⁵

(1. Huai'an Ancient Yellow River Hub Control Engineering Management Station, Huai'an 223400, China;

2. Huai'an Water Resources Bureau, Huai'an 223005, China;

3. Huai'an Gaoliangjian Water Conservancy Project Management Station, Huai'an 223005, China;

4. Huai'an Water Conservancy Engineering Construction Management Service Center, Huai'an 223005, China;

5. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of Xuhuai Region in Jiangsu, Huai'an 223001, China)

Abstract [Objective] This paper aims to provide the scientific basis for heavy metal pollution prevention and ecological restoration in Huai'an urban and rural river channels by exploring the pollution characteristics and ecological risks of heavy metal sediments from different river channels. [Methods] Five rivers to be dredged in Huai'an City were used to analyze the characteristics of heavy metals in river sediments were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry, and the degree of heavy metal pollution was evaluated by several heavy metal pollution evaluation method. Correlation analysis and principle component analysis were applied to

[收稿日期] 2024-12-12

[基金项目] 江苏省水利科技项目(2023056)

[作者简介] 尹立群(1977—), 女, 副研究员, 研究方向为水利生产运行管理、工程建设管理, E-mail: 630165263@qq.com。

[通信作者] 夏虎成(1987—), 男, 研究员, 研究方向为水利生产运行管理、工程建设管理, E-mail: 879827562@qq.com。

identify the possible pollution sources of heavy metals. [**Results**] The content of Cd element in the sediments of Li Canal, Hongfu River, Dazhai River, Xiaoyan River and Xinjian River was higher than the soil background value of Huai'an City, but the content of 6 heavy metals in the sediments of 5 river channels did not exceed the limit of *Control Standards of Pollutants in Sludge for Agricultural Use* (GB 4284—2018). The evaluation result by using multivariate statistical method showed that the comprehensive pollution of 6 heavy metals in the sediments of 5 river channels was light and did not cause ecological risk. Correlation analysis and principle component analysis analysis showed that Cd, Ni, Cr, As and Pb had strong homology, and they were the first major component of pollutants affected by human activities, agricultural activities and industrial activities. Hg was the second major pollutant, which was related to atmospheric subsidence and transportation. [**Conclusion**] The potential ecological risk level of the sediments in 5 rivers is low, and the overall level is slight pollution. The subsequent pollution changes of the Cd element deserve attention, and the control of Cd should be emphasized before the utilization of sediment resources.

Keywords river sediment heavy metal potential ecological risk pollution source source analysis

淤泥是河湖生态环境的重要组成部分,是重金属等污染物的重要蓄积库,进入水体后,重金属被水体颗粒物吸附、络合、絮凝、沉降,经过复杂的物理化学过程进入淤泥中,随着外部环境的变化,能够直接扩散或通过表层颗粒物的再悬浮进入到水体中,进而引发水体造成“二次污染”现象^[1-4]。淤泥重金属污染特征可作为评估水环境质量的重要依据,其污染调查结果能够全面反映水体的综合污染状况^[5]。当前众多专家学者对典型水域(如太湖、白洋淀、巢湖等)沉积物重金属的污染特征、空间分布及生态风险已开展系统性研究,相关成果^[6-7]对指导河湖污染防治和生态修复工程提供了重要的理论支撑和技术指导。但是不同城区河道间污染水平均不相同,因此,有针对性地开展重金属风险评价和来源追溯,对于清晰掌握河流淤泥中重金属污染现状、实施源头控制措施具有重要意义。

淮安地处淮河流域中下游,位于北纬 32°43'00"~34°06'00",东经 118°12'00"~119°36'30"。境内水运河道纵横交错,上游的来水进入洪泽湖后由淮河入江水道、苏北灌溉总渠、淮河入海水道、二河和淮沭河入江入海,素有“洪水走廊”之称。河水浅显,物质交换受阻,导致自我净化能力相对减弱,同时,跨流域调水工程带来的外源污染物输入、农业面源污染通过农田退水进入水体、城镇居民生活污水的直接排放及长期河道淤积导致的污染物累积效应等这些因素协同作用使得淤泥和水质面临污染的风险。鉴于此,查清淮安市城乡河道淤泥重金属污染状况,保护生态系统显得尤为必要。本研究在对不同城乡河道淤泥采样与测试的基础上,分析了铅(Pb)、镍(Ni)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As)、汞(Hg)这6项重金属元素的分布特征。为了评估淮安市不同

河道淤泥重金属污染程度及其潜在的生态风险,本文采用了单项污染指数法、内梅罗综合指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数法多种方法,并通过相关性分析和主成分分析进一步探索淤泥中重金属的来源,旨在为淤泥重金属风险识别和控制提供参考,也为淮安市城乡河道重金属污染防治和生态修复工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 河道信息

针对淮安城区拟开展清淤工程的河道超前进行淤泥重金属污染特征调查分析,选取里运河、洪福河等5条具有代表性的河道(表1),涵盖居住区、工业区等不同土地利用类型。采样点设置综合考虑水文特征与空间代表性。

表1 河道基本信息

Tab. 1 Basic Information of Rivers

河道名称	全长/km	起点	终点	周围土地利用类型
里运河	24.3	淮阴船闸	大运河汇合处	居住用地、道路交通用地、农业用地
洪福河	2.74	洪福河闸	大寨河	居住用地、道路交通用地
大寨河	3.96	四门闸	板闸干渠	居住用地、道路交通用地
小盐河	7.88	四门闸	茭陵站引河	居住用地、道路交通用地
新涧河	4.10	工业园区	入海水道 调度河	工业用地、道路交通用地、农业用地

1.2 样品采集

2023年9月、12月,采用柱状采样器(内径为8.8 cm,长为50 cm)对5条拟清淤河道的淤泥进行采样,采样深度为0~30 cm。为确保能准确反映5条河道中淤泥的重金属富集情况,综合考虑了流域的水文条件、采样点的代表性以及样品的可达性

等因素,按照蛇形法布设取样点 9 个,每个取样点辐射 1 m 内采集 3 份制成 1 个混合样品,每份样品 5 kg 以上。淤泥样品装入自封袋装好后带回实验室,经过自然风干、除杂、混合均匀后通过 5 mm 筛网,并采用四分法进行缩分,从中取出 500~1 000 g 混合后备用。

1.3 重金属含量测定

准确称取 0.050 0 g 淤泥样品至消解管底部,加少量去离子水(0.5~1.0 mL)湿润样品,运用盐酸-硝酸-氢氟酸-过氧化氢(HCL-HNO₃-HF-H₂O₂)法经消煮炉设置 175~180 °C 消解后定容至 50 mL,过滤到 10 mL 离心管中,采用电感耦合等离子体质谱仪(Thermo Fisher iCAP Q ICP-MS)检测淤泥中 As、Cd、Cr、Hg、Ni、Pb 的含量,检出限为 0.000 1 mg/L。

1.4 重金属污染评价方法

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定的风险筛选值(pH 值>7.5)作为参比值,采用单项污染指数和内梅罗综合指数对淤泥重金属进行污染评价,评价分级依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)执行^[8-10]。参考韩金龙等^[11]、秦红^[12]方法开展地累积指数评价。以 GB 15618—2018 中的农用地污染风险筛选值为标准,采用潜在生态风险指数(某一重金属的毒性响应系数和综合潜在生态风险指数)评价淤泥重金属污染的潜在生态风险^[12-14],其中 Cd、Pb、Ni、Cr、Hg、As 的毒性系数分别为 30、5、5、2、40、10,评价等级参见文献^[15]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2017 软件进行数据计算,采用 SPSS 25 进行单因素方差分析和主成分分析,采用 R (v3.5.0)软件中的 Pearson 相关性分析法分析重金属元素间的相关关系。

2 结果与讨论

2.1 不同河道淤泥重金属含量特征

淮安市 5 条河道淤泥重金属含量如表 2 所示,其中里运河、大寨河和小盐河淤泥的 6 种重金属含量平均值均为 Cr>Pb>Ni>As>Cd>Hg,洪福河、新涧河淤泥的重金属平均值均为 Cr>Ni>Pb>As>Cd>Hg,这 5 条河道 Cr 元素含量均为最高。与淮安市土壤背景值相比,5 条河道淤泥的 Cd 元素平均值均超过背景值,其中,里运河河道淤泥 Pb、Ni、Cd、Cr、

As、Hg 平均值分别为背景值的 2.51、1.30、6.19、1.44、2.35、7.81 倍,洪福河河道淤泥 Pb、Cd、As、Hg 平均值相比背景值分别提高了 1.50%、83.77%、47.91%、54.35%,大寨河河道淤泥 Cd、Hg 平均值相比背景值分别提高了 54.97%、41.67%,小盐河河道淤泥 Cd、As 含量平均值相比背景值增幅分别为 69.06%、4.80%,新涧河河道淤泥 Cd、As、Hg 含量平均值相比背景值增幅分别为 70.95%、26.34%、34.38%。说明河道淤泥重金属富集程度较高,可能主要来源于内外源环境污染,外源污染主要包括排污口排放的污水,而内源污染则主要涉及航运污染、河道内码头和居民生产生活污水直接排入河道以及水面养殖污染等。但是 5 条河道淤泥的 6 种重金属含量均未超过《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018)的 A 级污染产物限值。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中标准来看,除里运河淤泥中 As 含量平均值略高于标准含量外,其他河道淤泥重金属含量平均值均未超过风险值筛选标准。

通常认为,重金属含量的离散以及受人为活动影响的程度可通过变异系数(CV)来反映,CV 越大,表明受外界活动干扰越强烈。根据 Wilding^[16]对变异系数的分类,CV<15%属于弱变异,15%<CV<36%属于中等变异,CV>36%属于强变异。研究^[17]表明,当 CV 值超过 20%时,通常指示人类活动已成为影响元素空间分异的主导因子,因此,较高的 CV 值可能反映工业点源污染排放、城镇生活污水输入、矿产资源开发活动或特殊地质背景条件下的风化迁移的影响。从数据来看(表 2),里运河淤泥的 6 种重金属的 CV 均小于 15%,属于弱变异;洪福河淤泥除 Pb 属于弱变异之外,其余重金属均属于中等变异;大寨河淤泥 Hg 的 CV 远大于 36%,表现为强变异,其余重金属属于中等变异或弱变异;小盐河淤泥除 Ni 和 Hg 的 CV 小于 15%外,其余重金属的 CV 均为 15%~36%,属于中等变异;新涧河淤泥的 Ni 和 Hg 的 CV 达到 41.37%以上,表现为强变异,说明这些重金属元素在淤泥中存在显著的迁移或外来聚集现象,这可能是外源输入的影响导致其分布的不均匀性。

2.2 不同河道淤泥重金属污染程度及风险评价

2.2.1 内梅罗综合指数法评价

采用内梅罗综合指数法对 5 条河道淤泥中 6 种重金属的污染程度进行系统评估。首先计算各

表 2 淤泥重金属含量(单位:mg/kg)
Tab. 2 Heavy Metals Content in River Sediments (Unit: mg/kg)

项目		Pb	Ni	Cd	Cr	As	Hg
里运河	数值	51.84~59.64	43.50~53.11	0.501~0.573	108.82~127.05	22.46~29.74	0.148~0.183
	平均值	56.25±3.99 ^a	47.73±4.91 ^a	0.532±0.037 ^a	115.64±9.94 ^a	26.10±3.64 ^a	0.164±0.018 ^a
	CV	7.09%	10.29%	6.95%	8.60%	13.95%	10.98%
洪福河	数值	20.59~25.04	21.73~32.97	0.403~0.682	38.42~64.37	18.53~26.12	0.037~0.055
	平均值	22.74±2.23 ^b	27.49±5.63 ^b	0.530±0.141 ^a	50.38±13.09 ^b	21.31±4.17 ^a	0.046±0.009 ^b
	CV	9.81%	20.48%	26.60%	25.98%	19.57%	19.57%
大寨河	数值	13.03~16.51	7.79~10.96	0.121~0.229	13.45~22.49	7.84~9.82	0.011~0.053
	平均值	14.54±1.79 ^c	9.52±1.60 ^c	0.191±0.061 ^b	16.64±5.07 ^d	8.69±1.02 ^b	0.036±0.022 ^b
	CV	12.31%	16.81%	31.94%	30.47%	11.74%	61.11%
小盐河	数值	10.95~14.78	11.69~12.48	0.171~0.337	30.55~56.17	8.60~14.16	0.012~0.016
	平均值	12.80±1.92 ^c	12.22±0.47 ^{bc}	0.278±0.093 ^b	44.79±13.05 ^b	11.66±2.82 ^b	0.014±0.002 ^c
	CV	15.00%	3.85%	33.45%	29.14%	24.19%	14.29%
新涧河	数值	13.03~20.15	10.27~25.40	0.191~0.392	22.81~35.13	9.45~19.03	0.023~0.048
	平均值	16.86±3.59 ^c	18.54±7.67 ^b	0.296±0.101 ^b	27.02±7.03 ^c	15.07±5.00 ^b	0.032±0.014 ^b
	CV	21.29%	41.37%	34.12%	26.02%	33.18%	43.75%
淮安市土壤背景值		22.4	36.6	0.086	80.2	11.1	0.021
GB 4284—2018 A 级		300	100	3	500	30	3
GB 15618—2018 风险筛选值		170	190	0.6	250	25	3.4

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

重金属的单因子污染指数,继而基于单因子污染指数计算内梅罗综合指数。如表 3 所示,评估结果表明:除里运河和新涧河淤泥中 As 的单因子污染指数略大于 1(属轻度污染)外,其余采样点各重金属单因子污染指数均小于 1,污染等级为清洁级。内梅

罗综合指数分析显示:5 条河道的内梅罗综合指数为 0.267~0.819,其中里运河和新涧河处于尚清洁等级(0.7~1.0),其余 3 条河道均为清洁等级(<0.7)。整体而言,研究区域淤泥重金属含量不会造成环境污染。

表 3 单因子污染指数和内梅罗综合指数评价结果
Tab. 3 Evaluation Results of Single Factor Pollution Index and Nemerow Composite Index

河道	单项污染指数						内梅罗综合指数
	Pb	Ni	Cd	Cr	As	Hg	
里运河	0.331 0	0.251 0	0.887	0.463	1.044	0.048	0.819
洪福河	0.134 0	0.145 0	0.883	0.202	0.852	0.014	0.657
大寨河	0.085 6	0.050 1	0.318	0.066	0.348	0.011	0.267
小盐河	0.075 3	0.064 3	0.463	0.179	0.467	0.004	0.362
新涧河	0.099 0	0.097 6	0.493	0.108	1.081	0.010	0.796

2.2.2 地累积污染评价

如表 4 所示,里运河淤泥中各重金属地累积指数为 $Hg>Cd>Pb>As>Cr>Ni$,Hg 和 Cd 元素的污染程度最高,均达到中-强污染,Pb 和 As 元素处于轻污染,Cr、Ni 无污染;洪福河淤泥中各重金属地累积指

数以 Cd 元素的污染程度最高,达到中-强污染,其余重金属均为轻度污染或无污染;小盐河、新涧河淤泥中 Pb、Ni、Cr、As、Hg 这 5 种重金属地累积指数均为轻度污染或无污染,而 Cd 元素一直处于较高水平,达到中污染范围;大寨河淤泥中 6 种重金属地累

积指数均为轻度污染或无污染。着眼于生态环境保护高质量发展,河道清淤工程中 Cd 元素的后续污

染变化值得关注,在进行淤泥资源化利用前应该重视 Cd 的控制。

表 4 地累积污染评价

Tab. 4 Cumulative Pollution Evaluation

河道	Pb	Ni	Cd	Cr	As	Hg
里运河	0.743	-0.202	2.044	-0.057	0.649	2.380
洪福河	-0.563	-0.998	2.039	-1.256	0.356	0.546
大寨河	-1.208	-2.528	0.566	-2.854	-0.938	0.193
小盐河	-1.392	-2.168	1.108	-1.425	-0.514	-1.170
新涧河	-0.995	-1.566	1.198	-2.155	-0.144	0.023

2.2.3 潜在生态风险指数评价

生态风险评估结果显示(表 5):研究区域所有采样点均呈现较低的风险水平。通过计算 6 种重金属元素的综合潜在生态风险指数,其数值分布在 14.27~42.81。值得注意的是,该数值范围显

著低于生态风险警戒阈值(150),表明 5 条河道淤泥中重金属的潜在生态风险等级均为轻微。这一结果证实,研究区域河道清淤工程产生的淤泥中重金属含量处于安全可控范围,不会造成生态性风险。

表 5 潜在性生态风险评价结果

Tab. 5 Results of Potential Ecological Risk Assessment

河道	潜在性生态风险评价						综合潜在生态风险指数
	Pb	Ni	Cd	Cr	As	Hg	
里运河	1.66	1.26	26.61	0.93	10.44	1.92	42.81
洪福河	0.67	0.73	26.49	0.40	8.52	0.56	37.37
大寨河	0.43	0.25	9.54	0.13	3.48	0.44	14.27
小盐河	0.38	0.32	13.89	0.36	4.67	0.16	19.78
新涧河	0.50	0.49	14.79	0.22	10.81	0.40	27.20

2.3 不同河道淤泥重金属来源解析

通过不同重金属元素间的相关性分析,可了解其空间变化趋势,并判断这些元素是否具有同源性^[18-19]。对 5 条河道淤泥重金属元素进行 Pearson 相关性分析发现(图 1),Pb、Ni、Cd、Cr、As 两两之间均存在显著相关性($p < 0.01$),变化趋势相似,相关系数为 0.60~0.87,说明 Pb、Ni、Cd、Cr 和 As 这些元素具有一定程度上的同源性或受到共同因素影响。Hg 与其他元素均无相关性,表明其有其他来源。

运用主成分分析法对拟清淤的 5 条河道淤泥 6 种重金属进行分析(图 2)。PC1 方差贡献率为 66.74%,远高于第二主成分,其中 Ni 和 As 具有最高正载荷,分别为 0.914 和 0.897,正载荷较高的还有 Pb、Cd 和 Cr,进一步说明了 5 条河道淤泥中的这几种重金属的来源相似。资料显示:里运河主要承担防洪排涝和通航任务,兼顾饮用水水源地、灌溉输水、调水和景观等功能。从 6 种重金属含量测定结

果来看,其含量均显著高于淮安市土壤背景值,说明这几种元素的来源主要为人为源,但 6 种重金属的 CV 均表现为弱变异,而根据里运河所处的位置及对该河流周围环境的观测发现,其淤泥重金属应主要受人类活动影响;洪福河淤泥中除 Pb 属于弱变异之外,其余重金属均属于中等变异,根据洪福河所处位置所示,周边主要是居民生活区,居民生产生活污水、生活垃圾堆放及交通活动尾气排放对河道附近的水体污染问题造成了显著影响,导致淤泥中的多数样点 Pb、Cd、As、Hg 含量高于淮安市土壤背景值;大寨河和小盐河周边以道路交通和居民生活区为主,人口居住较为密集,受到城市频繁交通活动的影响,加之生活污水、汽车尾气排放量的增加,极易造成河道淤泥中的重金属的富集,这与 2 条河道重金属分布及 CV 情况相一致;新涧河起点位于工业园区,周围土地利用类型以工业用地、道路通用地、农业用地为主。其淤泥 Cd、As 重金属富集程度

较高,而 Ni 和 Hg 的 CV 高达 41.37%。研究^[20-22]发现:工业生产活动所产生的“三废”,农田土壤长期施用含有重金属的农药、化肥所造成的面源污染是周边土壤中 As、Cd、Hg、Pb 等的主要来源,而这些积累在土壤中的重金属元素又会随着地表径流等方式进入河流和淤泥中,导致重金属累积。基于主成分分析与相关性分析结果,可以得出以下结论:PC1 (方差贡献率 66.74%) 所代表的重金属元素 (Pb、Ni、Cd、Cr、As) 具有显著同源性,其污染来源主要与流域内的人类生产活动(包括工业生产、农业生产、人类活动等)密切相关。

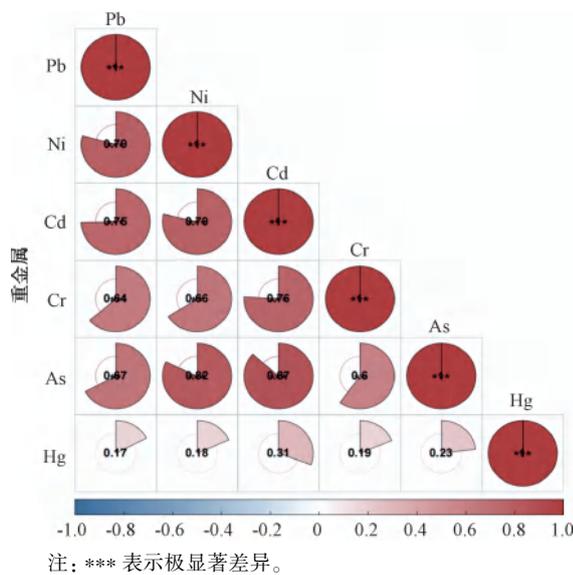


图 1 重金属含量间的相关系数

Fig. 1 Correlation Coefficient of Heavy Metal Content

第二主成分 PC2 (方差贡献率为 15.99%) 的特征元素 Hg (正载荷为 0.956) 则表现出独特的污染特征, Pearson 相关性分析表明: Hg 与其他重金属元素无显著相关性 ($p > 0.05$)。结合重金属空间分布特征及变异系数分析, Hg 的污染来源明显区别于其他重金属元素, 呈现出独特的迁移转化规律。里运河河道淤泥中 Hg 元素含量最高, 航运业较发达, 而大寨河和新涧河淤泥中 Hg 变异程度较高, 表明受人为影响较大, 这几条河道周边经济环境城镇化程度高, 而 Hg 是大气中唯一以气态形式远距离迁移的金属, 在环境迁移的作用下, Hg 元素被带入到水体和大气环境中, 重金属进入水体后被水体中的悬浮物和淤泥等物质吸附并储存, 在人类活动、水下生物分解或水环境化学反应等因素的影响下, 淤泥中的 Hg 再次释放到水体中而造成水体污染。降尘

作为大气颗粒物的一种, 由于其表面疏松多孔的结构, 能够吸附环境中的 Hg 元素, 而 Hg 也会随着重力作用、降水等原因重新落入到淤泥和水体, 进一步加重环境中 Hg 污染^[23-24]。因此, PC2 结果表明: 大气沉降、交通运输也是淮安市河道水体中重金属的重要来源。

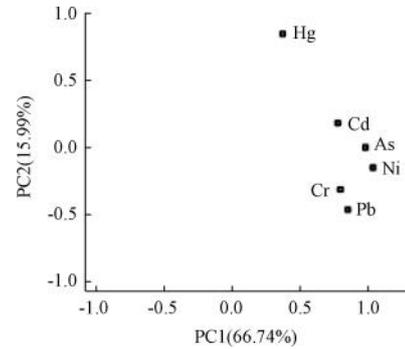


图 2 主成分分析二维荷载

Fig. 2 Principal Component Analysis of Two-Dimensional Loads

3 结论

(1) 淮安市里运河、洪福河、大寨河、小盐河、新涧河 5 条河道淤泥的 6 种重金属含量相比淮安市土壤背景值均呈现不同程度的变化, 其中以 Cd 元素超标最严重, 重金属富集程度较高, 推测受内外源环境污染导致。但 5 条河道淤泥的 6 种重金属含量均未超过《农用污泥污染物控制标准》(GB 4284—2018) 的 A 级污染产物限值, 除里运河淤泥中 As 含量平均值略高于标准含量外, 其他河道淤泥重金属含量平均值均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 风险值筛选标准。重金属 CV 可以反映人类活动对淤泥的影响, 其中里运河淤泥 6 种重金属 CV 均小于 15%, 受人类活动干扰较小, 其他 4 条河道均受到人类活动不同程度的干扰。

(2) 内梅罗综合指数法评价显示: 5 条河道淤泥重金属均未超警戒限值。地累积污染评价发现: 河道清淤工程中 Cd 元素的后续污染变化值得关注, 在开展淤泥处理处置及资源化利用途径前应该重视 Cd 的控制。潜在生态风险指数评价结果表明: 5 条河道淤泥样品的潜在生态风险均为轻微生态风险, 不会造成生态性风险。

(3) 对 5 条河道进行溯源分析发现: Pearson 相关性分析显示 Pb、Ni、Cd、Cr 和 As 两两之间具有显著相关性, 说明这些元素具有一定程度上的同源性

或受到共同因素影响。Hg 与其他元素均无相关性,表明其有其他来源。主成分分析发现:Pb、Ni、Cd、Cr 和 As 5 种重金属属于第一主成分,主要受人类活动、农业活动和工业活动的共同影响。而 Hg 元素来源则主要为大气沉降、交通运输。

参考文献

- [1] 易升泽,王明超,董晏良. 茅洲河清淤后底泥重金属污染特征及风险评价[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(12): 26-34.
Yi S Z, Wang M C, Dong Y L. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution in sediments after dredging in Maozhou River [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(12): 26-34.
- [2] 郑国辉,丁玉,孟凯,等. 高关注度饮用水水源地清淤关键技术与工程应用[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 70-75, 213.
Zheng G H, Ding Y, Meng K, et al. Key technologies and engineering applications for dredging of high attention drinking water source areas[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 70-75, 213.
- [3] 任晶晶,付兴涛. 汾河中游底泥重金属分布特征与来源解析[J]. 人民黄河, 2024, 46(3): 80-84.
Ren J J, Fu X T. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of the middle reaches of Fenhe River [J]. Yellow River, 2024, 46(3): 80-84.
- [4] 陈建民,李东灵,肖合顺,等. 城市黑臭河道底泥内源污染控制的固化与稳定化技术[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 154-159, 166.
Chen J M, Li D L, Xiao H S, et al. Technology of solidification and stabilization of internal pollution control for urban black and odorous river sediments [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 154-159, 166.
- [5] 张闯,王苒,孙勇刚,等. 衡水湖底泥重金属元素分布特征及污染评价[J]. 能源与环保, 2024, 46(1): 64-68, 75.
Zhang C, Wang R, Sun Y G, et al. Distribution characteristics of heavy metal elements and pollution evaluation of sediment in Hengshui Lake[J]. China Energy and Environmental Protection, 2024, 46(1): 64-68, 75.
- [6] 陈珏,支鸣强,朱德龙,等. 太湖沉积物营养物及重金属污染分布特征及风险评估[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1457-1465.
Chen J, Zhi M Q, Zhu D L, et al. Distribution characteristics and risk assessment of nutrient and heavy metal pollution in sediment in Taihu Lake [J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1457-1465.
- [7] 陈实. 巢湖水体及沉积物中重金属污染特征和风险评价 [D]. 合肥:安徽建筑大学, 2024.
Chen S. Characterization and risk assessment of heavy metal pollution in water and sediment of Chaohu Lake [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2024.
- [8] 谢昶琰,徐昕,蒋力,等. 里运河淮安段清淤淤泥重金属污染特征及风险评估[J]. 江苏水利, 2025(1): 44-48.
Xie C Y, Xu X, Jiang L, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal pollution from dredging sludge in Huai'an section of Li Canal[J]. Jiangsu Water Resources, 2025(1): 44-48.
- [9] 孙博闻,孙文宁,傅长锋,等. 白洋淀底泥重金属空间分布特征及污染评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(11): 173-185.
Sun B W, Sun W N, Fu C F, et al. Spatial distribution characteristics and assessment on pollution status of heavy metals in sediments of Baiyangdian Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(11): 173-185.
- [10] 徐其土,魏金良. 广州车陂涌底泥重金属污染及生态风险评估[J]. 人民长江, 2020, 51(2): 28-31, 124.
Xu Q S, Wei J L. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Chebeichong River in Guangzhou City [J]. Yangtze River, 2020, 51(2): 28-31, 124.
- [11] 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.
- [12] 秦红. 太湖沿岸湖区底泥重金属污染分布特征及生态风险评估[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 161-168, 178.
Qin H. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments in coastal area of Taihu Lake [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 161-168, 178.
- [13] 周杨,周文斌,马嘉伟,等. 缙云县某复垦地块土壤环境质量调查及生态风险评估[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2): 388-395.
Zhou Y, Zhou W B, Ma J W, et al. Soil environmental quality investigation and ecological risk assessment of a reclamation land in Jinyun County [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(2): 388-395.
- [14] 赵靓,梁云平,陈倩,等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, et al. Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5552-5561.
- [15] 张云芸,马瑾,魏海英,等. 浙江省典型农田土壤重金属污

- 染及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1233-1241.
- Zhang Y Y, Ma J, Wei H Y, et al. Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: Levels, sources and ecological risks[J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, 28(6): 1233-1241.
- [16] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil survey [J]. Spatial Variations, 1985, 166-194.
- [17] 程琰勋, 徐磊, 吴亮, 等. 金沙江流域底泥重金属污染特征及来源解析——以蜻蛉河为例[J]. 物探与化探, 2025, 49(2): 500-509.
- Cheng Y X, Xu L, Wu L, et al. Characteristics and source analysis of heavy metal contamination in the sediments of the Jinsha River Basin: A case study of the Qingling River [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(2): 500-509.
- [18] 宫健, 王耀锋, 李强, 等. 某区饮用水源地重金属分布特征、污染评价及源解析[J]. 环境化学, 2022, 41(7): 2276-2288.
- Gong J, Wang Y F, Li Q, et al. Distribution characteristics, pollution assessment and source analysis of heavy metals in a drinking water source area[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(7): 2276-2288.
- [19] 程琰勋, 赵萌生, 张亚, 等. 滇中姚安地区土壤重(类)金属来源分析及生态风险评价[J]. 沉积与特提斯地质, 2024, 44(1): 172-184.
- Cheng Y X, Zhao M S, Zhang Y, et al. Sources analysis and ecological risk assessment of soil heavy metals and metalloids in Yaoan area of central Yunnan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2024, 44(1): 172-184.
- [20] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn Mine in southwestern China [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2884-2892.
- [21] 李旗, 白凯华, 姜大伟, 等. 漓江上游青狮潭灌区干支渠沉积物重金属分布规律及来源解析[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 16-24.
- Li Q, Bai K H, Jiang D W, et al. Distribution and source analysis of heavy metals in sediments of Qingshitan irrigation district in Lijiang River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7): 16-24.
- [22] 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 276-283.
- Chen Z F, Hua Y X, Xu W, et al. Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 276-283.
- [23] 刘楠涛. 基于汞同位素解析青藏高原表层土壤汞分布、来源及主控因素[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- Liu N T. Quantifying mercury distribution and source contribution in surface soil of Qinghai-Tibetan Plateau using mercury isotopes [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.
- [24] 杨昱, 许洁. 贵州省环境中重金属污染特征及来源[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(11): 1347-1353.
- Yang Y, Xu J. Characteristics and source analysis of heavy metal pollution in environment in Guizhou Province [J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2023, 40(11): 1347-1353.