

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2024.02.004

江苏徐圩港区表层沉积物重金属污染评价及来源分析*

何 烽^{1,2}, 李 昂³, 程 铮¹, 董志国², 唐玉泽³, 李 镇¹, 李加琦³, 毛玉泽³

(1. 江苏香河农业开发有限公司, 江苏 连云港 222047; 2. 江苏海洋大学 海洋科学与水产学院, 江苏 连云港 222005;
3. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:为科学评估江苏徐圩港区建设开发对周边生态环境的影响, 2022年9月测定了徐圩港区表层沉积物10种常见重金属含量, 运用单因子污染指数法、潜在生态风险指数法、地质累积指数法、相关性分析和主成分分析, 对该港区进行重金属污染评价及来源分析。调查区域沉积物中所有站位重金属含量均符合第一类海洋沉积物标准, 单因子污染指数法显示有个别站位属于中等污染, 综合污染指数结果显示, 有4个站位属于轻微污染, 5个站位属于中等污染。潜在生态风险指数显示沉积物重金属潜在生态风险由高到低为Cd>As>Cu>Ni>Pb>Co>Zn>V>Cr>Mn, 综合生态风险指数结果显示仅有1个站位属于严重污染。地质累积指数显示沉积物重金属污染程度由高到低为Cd>As>Zn>Cu>Ni>Mn>Co>Pb>V>Cr, 总体污染情况较轻。Cr, V, Co, Pb, Ni和Cu之间具有极显著相关性, Cd与其他重金属元素均无强相关性。PC1(V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb)主要为水产养殖、工业生产、航运交通和自然源的混合源; PC2(Cd)主要为机械制造等工业活动来源; PC3(As, Zn)主要为农业和生活污染等人为来源。Cd是徐圩港区潜在污染重金属, 生态风险指数较高, 因此应加强对徐圩港区相关重金属的监测, 查清重金属污染的主要来源, 为生态环境保护和管理提供基础资料。

关键词:表层沉积物; 重金属; 生态风险评价; 相关性分析; 主成分分析

中图分类号:X826 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-8248(2024)02-0023-08

引用格式:何烽, 李昂, 程铮, 等. 江苏徐圩港区表层沉积物重金属污染评价及来源分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(2): 23-30.

Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the Surface Sediments of Xuwei Harbor District, Jiangsu Province

HE Feng^{1,2}, LI Ang³, CHENG Zheng¹, DONG Zhiguo², TANG Yuze³, LI Zhen¹, LI Jiaqi³, MAO Yuze³

(1. Jiangsu Xianghe Agricultural Development Corporation, Lianyungang 222047, China;

2. School of Marine Science and Fisheries, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;

3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: In order to scientifically assess the impact of the construction and development of Xuwei Harbor District on the surrounding ecological environment, the contents of 10 common heavy metals in the surface sediments of Xuwei Harbor District in Jiangsu Province were measured in September 2022, and the single-factor contamination index method, potential ecological risk in-

* 收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2023-12-26

基金项目:江苏香河农业开发有限公司港区生物多样性调查及生态修复技术研发项目(20220901); 连云港市重点研发计划(社会发展)项目(SF2338)

作者简介:何烽(1982—), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为港区工程建设和环境治理, (E-mail) herofeng@qq.com。

通信作者:毛玉泽(1969—), 男, 内蒙古赤峰人, 研究员, 博士, 研究方向为多营养层次综合养殖、养殖环境生物修复等, (E-mail) maoyz@ysfri.ac.cn。

dex method, geologic cumulative index method, correlation analysis, and principal component analysis were used to evaluate the heavy metal contamination in the port area and analyze the sources. The study showed that the heavy metal contents in the sediments of the investigated area at all stations met the standards for marine sediments of the first category, and the single-factor contamination index method showed that some individual stations were moderately contaminated. The results of the comprehensive pollution index showed that 4 stations were slightly polluted and 5 stations were moderately polluted. The potential ecological risk index showed that the potential ecological risk of heavy metals in sediments was $Cd > As > Cu > Ni > Pb > Co > Zn > V > Cr > Mn$, the results of the comprehensive ecological risk index showed that only 1 station was seriously polluted. The geoaccumulation index method showed that the degree of contamination of heavy metals in sediments was $Cd > As > Zn > Cu > Ni > Mn > Co > Pb > V > Cr$, and the overall contamination situation was relatively light. A significant correlation between Cr, V, Co, Pb, Ni and Cu, and there was no strong correlation between Cd and other heavy metal elements. PC1 (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb) was mainly a mixed source of aquaculture, industrial production, shipping traffic and natural sources. PC2 (Cd) was mainly industrial activities such as machinery manufacturing. PC3 (As, Zn) was mainly from anthropogenic sources such as agricultural and domestic pollution. Cd were potentially polluting heavy metals with high ecological risk index in Xuwei Harbor District, so the monitoring of related heavy metals in Xuwei Harbor District should be strengthened to find out the main sources of heavy metal pollution and provide basic information for ecological environmental protection and management.

Key words: surface sediment; heavy metal; ecological risk assessment; correlation analysis; principal component analysis

江苏省连云港市徐圩新区是江苏沿海开发、“一带一路”支点建设中产业合作的主要实施载体,是连云港市委市政府确定的发展新型临港产业的核心区。徐圩港区东临黄海,是徐圩新区建设的重要支撑。伴随港区的飞速发展,围填海工程、工农业污水废水排放等都对近岸生态系统带来了极大压力^[1-2]。

重金属具有显著的生物毒性和非降解性,可以在水体和沉积物中不断积累,对环境造成持续破坏,是港区近岸海域的主要污染物之一^[3]。目前重金属污染评价在海洋环境中的作用越来越重要^[4],单因子污染指数法、单因子潜在生态风险指数法^[5]和地质累积指数法^[6]在国内评价区域环境重金属污染程度上得到了广泛应用。如义家吉等^[7]采用地质累积指数法和潜在生态风险指数法对粤东近岸海域表层沉积物进行了重金属污染现状和生态风险评价。

重金属污染源解析是重金属污染防治的重要环节之一,相关性分析可以分析重金属之间的相关性,在一定程度下粗略确定重金属的来源,主成分分析目前已成为重金属溯源分析的重要手段之一^[8]。目前关于徐圩港区表层沉积物重金属的污染评价和

来源分析尚未见报道。本文通过调查徐圩港区周边海域表层沉积物中重金属含量,运用单因子污染指数法、单因子潜在生态风险指数法和地质累积指数法分析了沉积物中重金属的污染程度和潜在生态风险,通过相关性分析和主成分分析研究其来源特征,为掌握该海域环境质量状况、指导环境监测方案和控制重金属风险提供参考,对该港区生态保护和生态环境修复具有意义。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

2022年9月在徐圩港区周边海域采集了表层沉积物样品,共设置9个站位,站位编号为S1~S9(见图1)。使用重力式柱状采泥器采集沉积物表层以下15~20 cm的柱状沉积样,所有样品装入聚乙烯密封袋后运回实验室后于阴凉处自然风干,样品经研磨后过100目网筛进行重金属测定,样品采集、保存和运输均严格按照《海洋监测规范》(GB 17378.5—2007)进行。

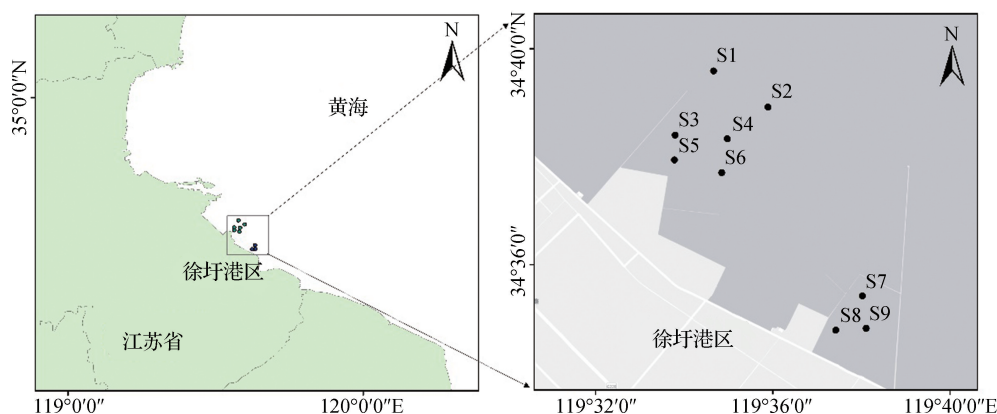


图 1 徐圩港区研究区采样站位示意图

Fig. 1 Sampling sites distribution in the Xuwei Harbor District

1.2 重金属测定

沉积物重金属采用王水提取-电感耦合等离子体质谱法(HJ 803—2016)测定,共测定 10 种重金属(Mn, Zn, V, Cr, Cu, Ni, Co, Pb, As, Cd),具体步骤为:取经过处理的沉积物样品,用盐酸/硝酸(王水)混合溶液经电热板消解后,用型号为 PerkinElmer NexION 1000G ICP-MS(美国)的电感耦合等离子体质谱仪进行检测,根据元素的特征离子进行定性,内标法定量。重金属检出限为: Mn 0.7 mg/kg, Zn 7 mg/kg, V 0.7 mg/kg, Cr 2 mg/kg, Cu 0.5 mg/kg, Ni 2 mg/kg, Co 0.03 mg/kg, Pb 2 mg/kg, As 0.6 mg/kg, Cd 0.07 mg/kg。

1.3 评价方法

单因子污染指数计算公式为

$$P_i = C_i / S_i。$$

式中, P_i 为某种重金属的污染指数, C_i 为某种重金属的含量测定值, S_i 为该重金属对应的评价标准值。沉积物重金属的评价标准值选用江苏省土壤元素背景值^[9] ($S_{Mn} = 718.0$ mg/kg, $S_{Zn} = 64.8$ mg/kg, $S_V = 87.0$ mg/kg, $S_{Cr} = 75.6$ mg/kg, $S_{Cu} = 23.4$ mg/kg, $S_{Ni} = 32.8$ mg/kg, $S_{Co} = 14.6$ mg/kg, $S_{Pb} = 22.0$ mg/kg, $S_{As} = 9.4$ mg/kg, $S_{Cd} = 0.085$ mg/kg)。

综合污染指数计算公式为

$$CPI = \sum_1^n P_i。$$

式中, CPI 为重金属的综合污染指数, n 为重金属元素的个数。

单因子潜在生态风险指数计算公式为

$$E_i = T_i P_i。$$

式中, E_i 为某种重金属的潜在生态风险指数; T_i 为重金属毒性响应系数 ($T_{Mn} = T_{Zn} = 1 < T_V = T_{Cr} = 2 < T_{Cu} = T_{Ni} = T_{Co} = T_{Pb} = 5 < T_{As} = 10 < T_{Cd} = 30$)。

综合潜在生态风险指数计算公式为

$$ER = \sum_1^n E_i。$$

式中, ER 为重金属的综合潜在生态风险指数。

地质累积指数计算公式为

$$I = \log_2 \frac{C_i}{KB_n}。$$

式中, I 为地质累积指数, K 为考虑到造岩运动对背景值造成的影响而设定的常数, 本文取 1.5。 B_n 是指在沉积母质中元素 n 的地球化学背景值, 本文以江苏省土壤元素背景值作为本研究的背景值。

本研究沉积物涉及 10 种重金属, 依照 Fernandez 等^[10]的方法, 建立本研究各重金属评价指标的等级划分标准(见表 1 和表 2)。

表 1 沉积物重金属污染指数及潜在生态风险指数的分级标准

Table 1 Classification standard of P_i and E_i in sediment

P_i	CPI	污染程度	E_i	ER	潜在生态风险程度
$P_i < 1$	$CPI < 10$	轻微	$E_i < 30$	$ER < 70$	轻微
$1 \leq P_i < 3$	$10 \leq CPI < 20$	中等	$30 \leq E_i < 60$	$70 \leq ER < 140$	中等
$3 \leq P_i < 6$	$20 \leq CPI < 40$	严重	$60 \leq E_i < 120$	$140 \leq ER < 280$	严重
$P_i \geq 6$	$CPI \geq 40$	极严重	$E_i \geq 120$	$ER \geq 280$	极严重

表2 沉积物重金属地质累积指数的分级标准

Table 2 Classification standard of I in sediment

I	级别	污染程度
$I \leq 0$	0	清洁
$0 < I \leq 1$	1	轻微
$1 < I \leq 2$	2	偏中等
$2 < I \leq 3$	3	中等
$3 < I \leq 4$	4	偏严重
$4 < I \leq 5$	5	严重
$I > 5$	6	极严重

1.4 数据统计与分析

采用 SPSS 19 计算平均值、标准差和变异系数(%),变异系数(%)的计算公式为平均值/标准差;采用 R 3.6.2 对表层沉积物重金属进行相关性分析和主成分分析;采用 ArcMap 10.2 绘制站位图,其他绘图采用 origin 9.0 进行绘制;显著性水平设置为 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量及空间分布

徐圩港区海域各站位重金属含量见图2。As, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb 含量的最大值均出现在 S4 站位,而 Cd 的最大值出现在 S1 站位。结果表明重金属污染多集中于近港区域,可能是由于近岸大量生活污水和工业废水排入港区并逐渐积累^[11]。

徐圩港区海域表层沉积物的重金属含量见表3。根据《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[12],所有站位重金属含量均符合第一类海洋沉积物标准。变异系数可以反映沉积物重金属空间分布的差异程度^[13],Cd 的变异系数最高,为 129.66%,为强变异,表明 Cd 空间分布不均匀,存在高值区域,容易受外界影响。其他重金属元素的变异系数均小于 35%,为弱变异。

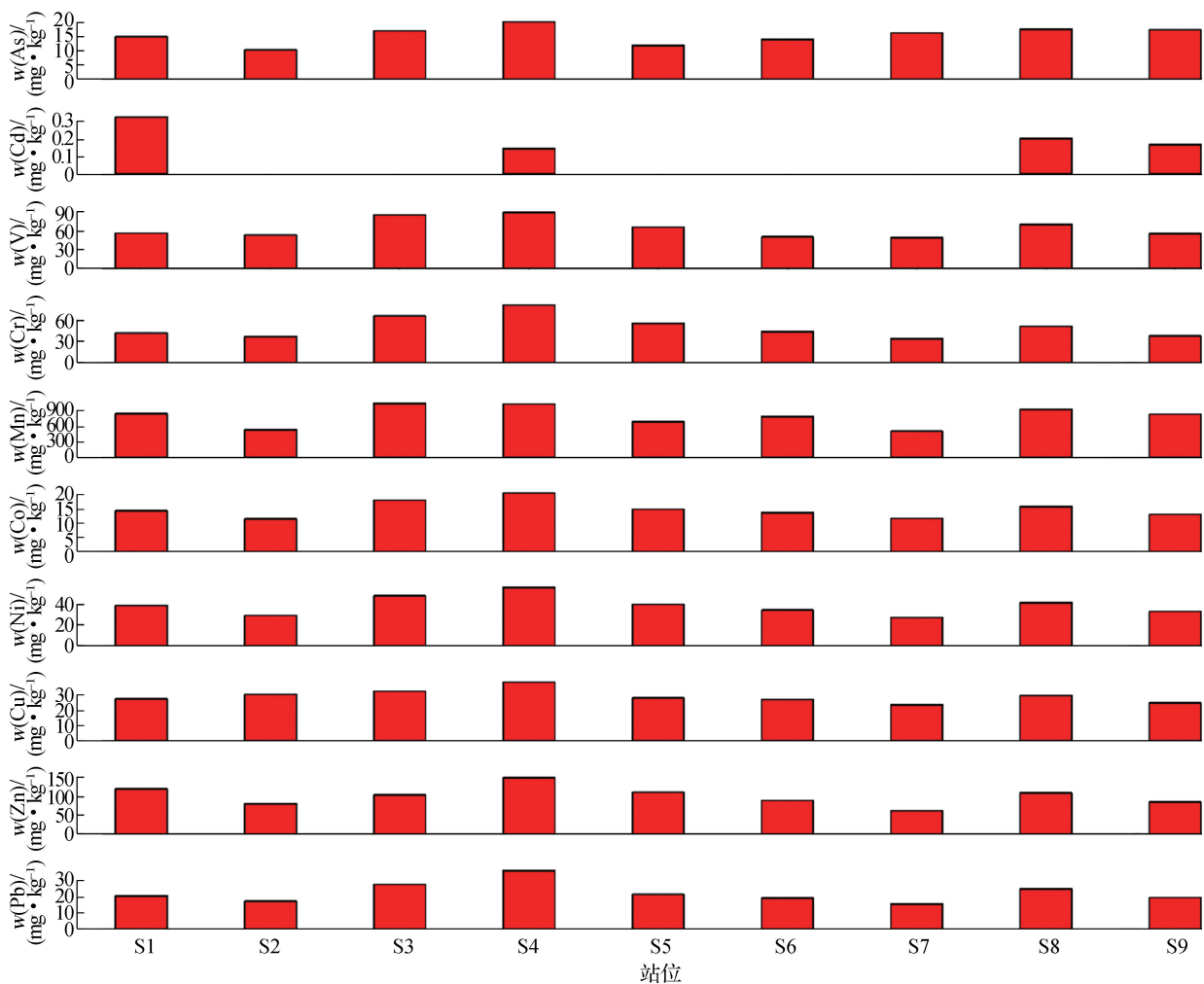


图2 徐圩港区各站位表层沉积物重金属含量

Fig. 2 Content of heavy metals in surface sediment of each sampling point in Xuwei Harbor District

表 3 徐圩港区表层沉积物重金属含量
Table 3 Heavy metal content in surface sediment of Xuwei Harbor District

统计量	不同重金属元素质量分数/(mg · kg ⁻¹)									
	As	Cd	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
最小值	9.28	—	43.34	30.34	451.53	10.28	24.57	20.97	56.62	13.96
最大值	18.05	0.29	78.96	72.56	931.90	18.46	50.74	34.44	134.20	32.19
平均值	13.93	0.08	56.53	44.62	713.00	13.28	34.96	25.95	91.26	20.05
标准差	2.74	0.11	13.25	13.91	173.36	2.68	8.24	4.01	22.58	5.61
变异系数/%	19.68	129.66	23.44	31.18	24.31	20.18	23.57	15.45	24.73	27.99

注:“—”代表未检出。

2.2 重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数 徐圩港区沉积物重金属单因子污染指数结果按照 P_i 平均值由高到低顺序为: Cd(2.21) > As(1.48) > Zn(1.41) > Cu(1.11) > Ni(1.07) > Mn(0.99) > Pb(0.91) > Co(0.90) > V(0.65) > Cr(0.59)。单因子污染指数结果显示部分站点属于中等污染(见图 3), 1 个站点 Cd 属于严重污染, 可能是由于港区内制造等工业活动频繁, 大量废水排放导致 Cd 积累过量^[14]。综合污染指数 CPI 结果显示, 4 个站点属于轻微污染, 5 个站点属于中等污染。

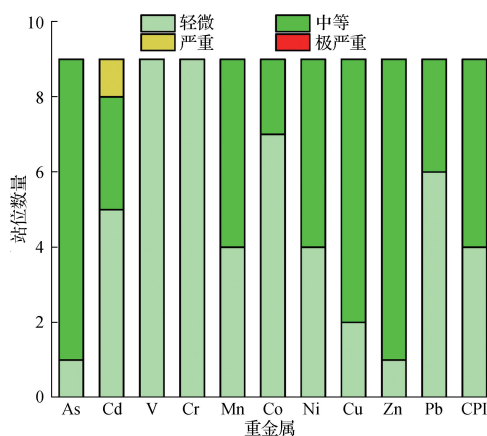


图 3 沉积物重金属单因子污染指数和综合污染指数堆积柱状图

Fig. 3 Stacked bar chart of P_i and CPI of the heavy metals of sediments

2.2.2 潜在生态风险指数 徐圩港区沉积物重金属潜在生态风险指数结果按照 E_i 平均值由高到低顺序为: Cd(66.18) > As(14.82) > Cu(5.55) > Ni(5.33) > Pb(4.56) > Co(4.55) > Zn(1.41) > V(1.30) > Cr(1.18) > Mn(0.99)。综合污染指数 ER 结果显示, 有 5 个站点属于轻微污染, 3 个站点属于中等污染, 1 个站点属于严重污染(见图 4)。潜在生态风险系数显示部分站点 Cd 生态危害系数较高, 原因可能是 Cd 毒

性系数较高。本研究中 E_i (Cd) > E_i (As), 与李兆河^[15]对涓洲湾北岸潮间带沉积物重金属潜在生态风险大小排序相同, 在其调查中 3 个站点达到高强度水平, 分别与秀屿港和东吴港较近, 因此推测可能与港区排污有关; 但与时运红等^[16]对深圳湾沉积物重金属潜在生态风险大小排序不同, 原因可能与深圳湾内频繁的煤炭运输有关, 煤炭中含有 As, 在海运过程中可能由于风力或者水流作用进入深圳湾海域^[17]。蔡於杞等^[18]对盐城新洋港河的研究表明总体上处于轻度生态风险水平, 许星鸿等^[19]的研究表明连云港近海沉积物重金属污染为轻度生态风险。与本研究结果不一致, 可能由于该研究采样的位置较浅, 沉积物被海水剧烈冲刷, 其中的重金属又释放至海水中, 导致海水重金属污染严重。

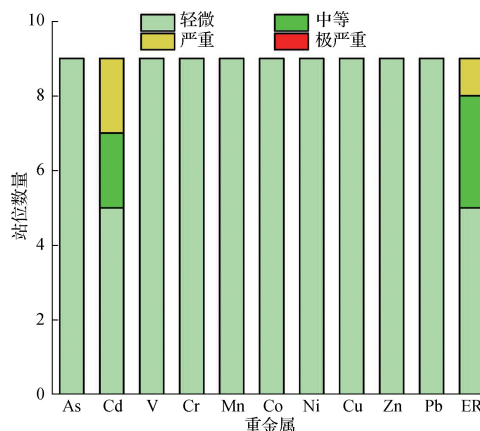


图 4 沉积物重金属单因子潜在生态风险指数和综合潜在生态风险指数堆积柱状图

Fig. 4 Stacked bar chart of E_i and ER of the heavy metals of sediments

2.2.3 地质累积指数 徐圩港区沉积物重金属地质累积指数结果(见图 5)按照 I 平均值由高到低顺序为: Cd(0.49) > As(-0.04) > Zn(-0.13) > Cu(-0.45) > Ni(-0.53) > Mn(-0.64) > Co(-0.74) > Pb(-0.76) > V(-1.24) > Cr(-1.40)。

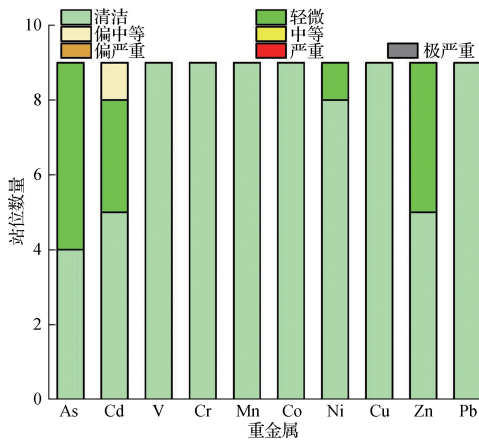


图5 沉积物重金属地质累积指数堆积柱状图

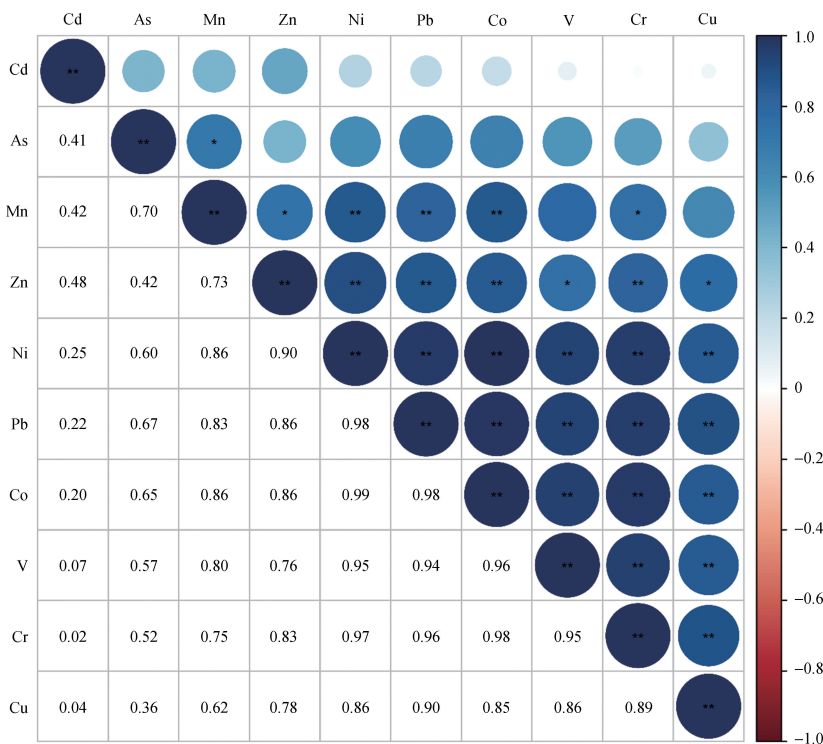
Fig. 5 Stacked bar chart of *I* of the heavy metals of sediments

由图5可看出V, Cr, Mn, Co, Cu, Pb, Ni污染较轻(多为清洁状态或有1个站点为轻微污染状态), 而Cd, As, Zn呈现出不同程度的污染, 有1个

站点Cd达到了偏中等污染状态。重金属地质累积指数结果显示Cd, As, Zn对环境影响较大, 应加强监测。

2.3 重金属污染来源

徐圩港区海域沉积物重金属的相关性分析如图6所示。相关性可作为判定重金属元素来源的依据, 如果重金属元素间相关性高且显著, 则重金属元素之间可能是复合污染或具有同源关系^[20]。Cr, V, Co, Pb, Ni和Cu两两间均呈极显著正相关($r_{Cr-V}=0.95, r_{Cr-Co}=0.98, r_{Cr-Pb}=0.96, r_{Cr-Ni}=0.97, r_{Cr-Cu}=0.89, r_{V-Co}=0.96, r_{V-Pb}=0.94, r_{V-Ni}=0.95, r_{V-Cu}=0.86, r_{Co-Pb}=0.98, r_{Co-Ni}=0.99, r_{Co-Cu}=0.85, r_{Pb-Ni}=0.98, r_{Pb-Cu}=0.90, r_{Ni-Cu}=0.86$), 这几种重金属元素同源或具有关联性。Cd与其他重金属元素均无强相关性; Mn与Ni, Pb, Co之间具有极显著相关性; Zn与Ni, Pb, Co, Cr之间具有极显著相关性。



注: 对角线左下角为相关性系数, 右上角为显著性标记, *代表差异显著, **代表差异极显著。

图6 沉积物重金属之间的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis among heavy metals of sediments

徐圩港区海域沉积物重金属的主成分分析如表4所示。将主成分分析提取的解释总方差中初始特征值大于1的因子作为主要影响因子, 共提取3个主成分(PC1~PC3), PC1方差贡献率为75.930%, 重金属V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb为主要载荷因子。PC2

方差贡献率为13.149%, Cd为主要载荷因子。PC3方差贡献率为6.656%, As和Zn为主要载荷因子。3个主成分累积方差贡献率达到了95.735%, 可解释数据大部分的信息。仅有4.265%的信息未被解析出, 对重金属来源分析影响较小。

表 4 沉积物重金属主成分分析

Table 4 Principal components of the heavy metals of sediments

重金属	因子载荷		
	PC1	PC2	PC3
As	-0.239	0.379	-0.708
Cd	-0.102	0.788	0.372
V	-0.344	-0.176	-0.107
Cr	-0.347	-0.235	-0.002
Mn	-0.318	0.230	-0.173
Co	-0.360	-0.060	-0.065
Ni	-0.360	-0.040	0.062
Cu	-0.315	-0.274	0.245
Zn	-0.322	0.118	0.501
Pb	-0.360	-0.050	-0.037
特征值	7.593	1.315	0.666
方差贡献率/%	75.930	13.149	6.656
累积方差贡献率/%	75.930	89.079	95.735

PC1 中 V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb 之间具有相似的来源特征,与相关性分析的结果较为一致。连云港市自 2000 年划分海洋渔业养殖区^[21],开始规模化水产养殖,附近水体养殖区大量使用的硫酸铜可能是 Cu 的主要来源^[22];港区周围存在大量化工企业、造船厂, Cr 主要来源于工业废水的排放^[23];而 Ni 是工业冶炼和石油燃烧的常见产物^[24],徐圩港区靠近公路交通主干道,燃油尾气排放、汽车机械磨损以及轮胎磨损会产生 Pb 污染^[25],且海上贸易繁荣、船舶来往频繁,因此 Ni, Pb 的主要来源可能是海港交通和航运; V, Co 和 Mn 在研究区域均未超过土壤环境背景值,且各站位元素含量上下波动幅度小,可能来源于土壤母质,有可能是在成土过程中累积的^[26]。所以 PC1 主要为水产养殖、工业生产、航运交通和自然源的混合源。

PC2 中,重金属 Cd 对人体健康危害极大,其主要来源于以 Cd 为原料的工业。有研究表明,工业原料(如调色剂)所含的 Cd 是导致局部河流 Cd 污染的重要来源^[27],Cd 在电镀、制作合金、充电电池等工业生产上也得到了大量应用,含 Cd 的废渣、废水很容易汇聚到河流沉积物中。因此 PC2 可表示机械制造等工业活动对重金属含量的影响。

PC3 中主要为 As 和 Zn。As 是农药、化肥的主要成分,现代农业活动中农药和化肥的过度使用会导致 As 含量增加^[28],最终通过河流进入海水中,造成污染,且餐具洗涤剂中也含有 As; Zn 常被作为禽畜饲料的添加剂,但在实际操作中常存在超大量添加现象,有研究表明长期使用高添加 Zn 的日粮, Zn

被禽畜大量排出体外,对环境造成污染,且镀 Zn 管道在城市管网大量使用,易造成 Zn 的释放。因此 PC3 表示农业和生活污染等人为来源对重金属含量的影响。

徐圩港区所检测的表层沉积物均符合第一类海洋沉积物标准,进一步结合单因子污染指数、潜在生态风险指数以及地质累积指数分析发现, Cd 元素污染情况高度一致,且 Cd 对港区环境存在严重生态危害。Cd 具有毒性强、周期长、难降解、移动性大等特点,且可通过食物链进入人体,最终对人类健康造成危害^[29]。首次全国土壤污染状况调查结果显示, Cd 污染物站位超标率位于 Cd, Hg, As, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni 等 8 种重金属之首^[30]。Cd 会导致浮游植物、浮游动物、鱼类等水生生物内分泌和免疫系统抑制,进而影响其生存和生长^[31]。因此应加强对海洋沉积物中 Cd 的管控治理,关注含 Cd 的工业废水、废渣排放,进而助力港区生态环境修复。为更好地评价重金属对港区水域的影响程度,在后续调查中应增加港区海洋生物体内重金属检测。

3 结论

本文对江苏徐圩港区表层沉积物重金属进行了污染评价及来源分析,并确定了主要的污染金属,主要结果如下。

(1) 所有站位重金属含量均符合第一类海洋沉积物标准,单因子污染指数显示有个别站位属于中等污染,潜在生态风险指数显示沉积物重金属潜在生态风险由高到低为 Cd>As>Cu>Ni>Pb>Co>Zn>V>Cr>Mn。地质累积指数显示总体污染情况较轻,沉积物重金属污染程度由高到低为 Cd>As>Zn>Cu>Ni>Mn>Co>Pb>V>Cr。

(2) 结合相关性分析和主成分分析结果,徐圩港区表层沉积物重金属 V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb 主要来源为水产养殖、工业生产、航运交通和自然源的混合源; Cd 主要来源为机械制造业等工业活动; As 和 Zn 主要来源为农业和生活污染等人为来源。

(3) Cd 为徐圩港区主要潜在生态污染重金属,对环境存在严重生态危害,因此应加强对海洋沉积物中 Cd 的管控治理,关注含 Cd 的工业废水、废渣排放,从而助力港区生态环境修复。

参考文献:

[1] DING Xiaosong, SHAN Xiujuan, CHEN Yunlong, et

- al. Variations in fish habitat fragmentation caused by marine reclamation activities in the Bohai coastal region, China [J]. *Ocean and Coastal Management*, 2020, 184(C): 105038.
- [2] TURNER S J, THRUSH S F, HEWITT J E, et al. Fishing impacts and the degradation or loss of habitat structure [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 1999, 6(5): 401-420.
- [3] PAN Ke, WANG Wenxiong. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421/422: 3-16.
- [4] 李亚琳,姜欣,汪天祥,等. 蛤蜊岛附近海域重金属的分布特征及污染评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(6):98-105.
- [5] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [6] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 109-118.
- [7] 义家吉,颜历,王洋,等. 粤东近岸海域表层沉积物重金属污染评价及来源解析[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(2):200-208.
- [8] 李国莲,李肖,张玉,等. 南漪湖沉积物中重金属分布及其潜在生态风险评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(6):1267-1280.
- [9] 廖启林,刘聪,许艳,等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. *中国地质*, 2011, 38(5):1363-1378.
- [10] FERNÁNDEZ J A, CARBALLEIRA A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(4): 461-468.
- [11] 栗启仲,雷学铁,申友利,等. 广西铁山港及其近岸海域不同海洋功能区重金属污染特征研究[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(6):876-885.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 海洋沉积物质量:GB 18668—2002[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [13] 彭修强,项立辉,郭娜,等. 南黄海南部海域表层沉积物重金属来源解析及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11):3628-3638.
- [14] 沈芳,毛龙江,邓晓茜,等. 江苏海岸沉积物重金属空间分布与污染性评价再分析[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(5):62-71.
- [15] 李兆河. 2010年涓洲湾北岸潮间带沉积物重金属污染分布及污染评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(6): 49-57.
- [16] 时运红,李明远,李波,等. 深圳湾沉积物重金属污染时空分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(2):186-191.
- [17] 唐得昊,刘兴健,邹欣庆. 海湾表层沉积物重金属污染与潜在生态危害评价——以深圳湾为例[J]. *环境化学*, 2014, 33(8):1294-1300.
- [18] 蔡於杞,毛龙江,邹春辉,等. 盐城新洋港河表层沉积物重金属污染评价与来源解析[J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(5):33-42.
- [19] 许星鸿,姚海洋,孟霄,等. 连云港附近海域海水、表层沉积物和水产品的重金属污染及生态风险评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2019(5):110-116.
- [20] 黄桂云,蔡玉鹏,徐敏,等. 三峡水库近坝段消落区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(4):107-114.
- [21] 《水产养殖》编辑部. 连云港市划定海洋渔业养殖区[J]. *水产养殖*, 2000(3):20.
- [22] 李玉,李宏观. 连云港近海沉积物重金属历史分布特征及其来源[J]. *水生态学杂志*, 2016, 37(6):59-67.
- [23] 王昱,李宝龙,冯起,等. 黑河重金属空间分布及与大型底栖动物的关系[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(3): 1354-1365.
- [24] 王伟,孔少飞,刘海彪,等. 南京市春节前后大气PM_{2.5}中重金属来源及健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7):2186-2195.
- [25] WANG Yazhu, DUAN Xuejun, WANG Lei. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: case study in Jiangsu Province[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710(C): 134953.
- [26] WANG Shuo, CAI Limei, WEN Hanhui, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655: 92-101.
- [27] 廖启林,任静华,姜丽,等. 江苏典型地区河流沉积物重金属元素分布特征及其污染来源[J]. *地质学刊*, 2018, 42(4):651-661.
- [28] 孟昆,徐敏,徐文健,等. 海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2018, 41(2):99-106.
- [29] 邢艳帅,朱桂芬. 重金属对水生生物的生态毒理效应及生物耐受机制研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(3):13-26.
- [30] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等. 全国土壤污染状况调查公报[J]. *中国环保产业*, 2014(5):10-11.
- [31] 吴迪. 虾壳生物炭对水中重金属Pb(II)和Cd(II)的吸附特性及机理[D]. 上海:上海海洋大学, 2022.
- [32] 葛伟宏,王兴强,苏家齐,等. 大亚湾深水网箱养殖海域表层沉积物碳、氮、磷分布特征及污染评估[J]. *江苏海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 32(4):51-59.

(责任编辑:李琴,秦海明 实习编辑:易圣杰)