调水调沙对黄河口邻近海域沉积环境的影响

赵玉庭, 孙 珊, 王立明, 苏 博, 由丽萍, 齐延民, 马元庆

(山东省海洋资源与环境研究院,山东省海洋生态修复重点实验室,山东烟台 264006)

摘 要:本文依据 2020 年黄河口邻近海域调水调沙过程中的沉积物现场调查结果,分析了主要沉积环境指标及分布特征,评估了重金属生态风险并解析了污染源。结果表明,黄河口邻近海域沉积物粒度组成以粉砂为主,砂次之,粘土最少,调水调沙中期粉砂含量增高,砂和粘土含量降低;调水调沙过程中硫化物含量基本稳定,Cd、Cu、Zn含量增高,中、后期有机碳含量升高明显,受调水调沙影响显著;生态风险评估显示潜在生态风险因子以Cd为主,受调水调沙影响,中期、后期Cd污染较前期严重;Cd、Cu、Zn含量受沉积物粒径和有机碳含量影响,Pb、As含量影响因素较多;Cd、Pb、Cu、As、Zn主要来源于陆源径流输入、自然风化和化石燃料开采,Hg主要来源于大气沉降,受调水调沙影响不明显。
关键词:调水调沙;黄河口;沉积物;重金属;分布特征;生态风险评价
中图分类号:X820.2;X55
文献标识码:A
文章编号:1007-6336(2024)05-0743-12

Effects of water and sediment discharge regulation on sediment environment in the Yellow River Estuary and adjacent waters

ZHAO Yuting, SUN Shan, WANG Liming, SU Bo, YOU Liping,

QI Yanmin, MA Yuanqing

(Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China)

Abstract: Based on geochemical properties of sediment observed in Yellow River Estuary during the water and sediment discharge regulation (WSDR) project period, 2020, the changes of the content and distribution characteristics of major sediment factors in the surface sediment were analyzed, and ecological risk assessment and pollution source analysis were conducted on heavy metals. The results showed that the contents of silt and sand were higher than that of clay, and the content of silt increases, while the content of sand and clay decreases during WSDR project; The sulfide content did not change significantly during WSDR project leads to an increase of the contents of Cd, Cu, and Zn, while the contents of other heavy metals did not change; Cadmium was determined as the principal ecological risk factor, and its contribution ratio was the highest among six studied elements. Cd pollution in the middle and later stages was more severe than early stages which was affected by WSDR project. Pearson correlation coefficient between environmental factors showed that sediment grain size and organic carbon were two important factors in the distribution of heavy metal of cadmium, copper and zinc; other heavy metals had no obvious correlation with grain size, which may be caused by

收稿日期: 2023-10-18,修订日期: 2024-01-23

基金项目:山东省重点研发计划项目(2020CXGC011404)

作者简介:赵玉庭(1986-),男,山东诸城人,高级工程师,主要研究方向为海洋环境监测与评价, E-mail: zhaoyutingnihao@126.com 通信作者:孙 珊(1983-),男,研究员,主要研究方向为海洋环境监测与评价, E-mail: sunsan18@163.com

comprehensive factors. The analysis of pollution sources indicated that Cd, Pb, Cu, As, and Zn mainly come from composite pollution sources such as natural weathering, terrestrial river input, and fossil fuel extraction such as oil and gas; Hg mainly come from atmospheric sedimentation pollution and was not significantly affected by WSDR project.

Key words: water and sediment discharge regulation (WSDR); Yellow River Estuary; sediment; heavy metals; distribution characteristics; ecological risk

河口是陆-海相互作用最强烈的地区,在 淡、海水的交汇作用下,河口区会发生剧烈的物 理、化学作用,河口是陆源污染物质和海岸侵蚀 物质的主要沉降区,也是元素地球化学循环的重 要区域^[1-2]。近年来,河口受人类活动的影响显 著,环境污染、资源过度开发利用、水利工程建 设等对河口生态系统的干扰最为严重^[3]。因此, 人类活动干扰下的河口生态系统研究越来越受 到人们重视。

黄河是我国第二大河,每年由黄河口输入的 淡水占渤海淡水输入总量的75%以上,是渤海 陆源物质输入的重要来源^[4]。黄河入海径流的 持续减少导致黄河下游河道泥沙淤积^[5],黄河水 利委员会于2002年7月首次对黄河进行调水调 沙工程^[6],通过人造洪峰冲刷黄河下游河道,短 期内输沙量剧增,使人类活动成为黄河口水沙变 化的主控因素^[7],剧烈的环境变化对河口及近海 海域沉积系统造成显著影响^[8],短期内大量陆源 物质入海对黄河口邻近海域沉积环境的影响值 得关注。

当前,关于黄河口近岸沉积物中污染物生态 风险研究主要集中于某一个阶段污染物分布及 其生态风险^[8-10],对一个完整的调水调沙工程周 期内沉积环境指标的变化及生态风险研究还鲜 有报道。本文通过对黄河调水调沙前期、中期、 后期3个阶段黄河口邻近海域沉积环境的调查, 分析了主要沉积环境指标及分布特征,并对重金 属进行了生态风险评估和污染源解析,以期为调 水调沙的陆-海相互作用及其生态环境效应评价 提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查时间与站位

黄河调水调沙于 2020 年 6 月 23 日开始,7 月

10 日结束, 历时 18 d。调水调沙期间, 小浪底水 库入库沙量为 0.90 亿吨, 出库沙量为 2.62 亿吨, 排沙比为 293%, 排沙效果显著^[11]。本研究于调 水调沙前期(6月15日-20日)、中期(7月4日-9日)、后期(7月20日-25日)在黄河口周边海 域共设置 5个断面 18个站位(图1), 进行了 3次 沉积环境调查。



图 1 黄河口邻近海域调查站位



1.2 调查项目与分析方法

样品采集、保存均按照海洋监测规范^[12]和海洋调查规范^[13]进行。悬浮物采用重量法测定^[12]; Cd、Pb、Zn、Cu及As采用电感耦合等离子体质 谱法测定^[14];Hg采用原子荧光法测定^[12];有机碳 采用重铬酸钾-氧化还原容量法测定^[12];粒度采 用激光粒度仪测定^[13],沉积物粒度采用尤登-温 德华氏等比值粒级标准粒径由细到粗归纳为 3类,分别为粘土(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂 (63~2000 μm)。实验分析过程中使用近海海 洋沉积物成分分析标准物质 [GBW(E)07314]进 行质量控制与保证,Cd、Pb、Zn、Cu、As、Hg和 有机碳的回收率分别为(98~103)%、(96~ 102)%、(98~104)%、(99~102)%、(97~ 102)%、(96~101)% 和(99~103)%。

1.3 数据统计及评价方法

沉积环境指标的空间分布图采用 ArcGis10.8 软件克里金插值法绘制;采用 SPSS19.0 软件进 行显著性差异分析、相关性分析及主成分分析。

重金属环境影响评价采用潜在生态风险指数法^[15],计算公式如下:

$E_i = T_i (S_i / C_i)$

式中: E_i 、 T_i 分别为重金属 i的潜在生态风险指数、毒性系数; S_i 、 C_i 分别为重金属 i的实测值、背景值。本文选取渤海沉积物重金属含量^[16]作为背景值, Hakanson 法中有毒污染物的毒性系数^[15]及背景值见表 1, 潜在生态风险指数分级标准见表 2。

表 1 Hakanson 指数法重金属的毒性系数及背景值

Tab.1 Toxicity coefficients and background reference level of heavy metals

元素	Hg	Cd	Pb	Cu	As	Zn
毒性系数	40	30	5	5	10	1
背景值/mg·kg ⁻¹	0.036	0.09	20	22	9	64

表 2 潜在生态风险分级标准

Fab.2 Grade standard of p	otential ecological risk	
---------------------------	--------------------------	--

E分级标准	E程度分级
<i>E</i> <40	低潜在生态风险
40 <i>≤E</i> <80	中潜在生态风险
80 <i>≤E</i> <160	较高潜在生态风险
160 <i>≤E</i> <320	高潜在生态风险
<i>E</i> ≥320	很高潜在生态风险

2 结果与讨论

2.1 沉积环境指标的时空分布特征

2.1.1 粒度与悬浮物分布特征

调水调沙阶段黄河口邻近海域沉积环境指标含量及变动状况见表 3。沉积物粒度组成主要以粉砂为主,砂次之,粘土最少。调水调沙前期、中期、后期的粉砂含量分别为(71.65±20.00)%、(77.76±11.08)%和(72.96±19.96)%; 3次调查粉砂分布区域基本一致,高值区位于东北及中部海域,低值区位于黄河入海口与老黄河 口之间的近岸区域,中期含量显著升高,后期恢 复至前期水平。前期、中期、后期的砂含量分别 为(21.87±23.23)%、(16.90±13.98)%和(20.06± 23.52)%,3次调查砂分布区域基本一致,高值区 位于黄河入海口与老黄河口之间的近岸海域,分 布区域与粉砂相反,中期含量明显降低,后期 恢复至前期水平。前期、中期、后期的粘土含量 分别为(6.47±4.19)%、(5.34±4.46)%和(6.98± 4.74)%,粘土含量无明显变化,分布区域与粉砂 相似,与砂相反。砂、粉砂和粘土含量在调水调 沙中期、后期和前期均不存在显著性差异。

调水调沙前期、中期、后期表层悬浮物含量 分别为(35.0±18.7)mg/L、(103±135)mg/L和 (44.9±30.1)mg/L,中期黄河口附近海域含量较前 期明显升高,后期恢复至前期水平。分布特征与 砂分布特征相似,高值区位于黄河口附近海域。 调水调沙中期、后期和前期均不存在显著性差异。 2.1.2 硫化物、有机碳分布特征

调水调沙前期、中期、后期硫化物含量分别 为(10.1±5.20)mg/kg、(10.3±9.13)mg/kg和(9.28± 3.94)mg/kg,含量无明显变化,均符合一类沉积 物质量标准,分布区域基本一致,高值区位于老 黄河口的近岸海域。调水调沙中期、后期和前 期均不存在显著性差异。

调水调沙前期、中期、后期有机碳含量分别 为(0.178±0.131)%、(0.285±0.131)%和(0.284± 0.129)%,中期、后期含量较前期明显增高,均符 合一类沉积物质量标准。3次调查有机碳分布 区域基本一致,高值区位于东北及中南部海域, 低值区位于黄河入海口与老黄河口之间的近岸 区域。调水调沙中期、后期和前期均存在显著 性差异。

2.1.3 重金属分布特征

调水调沙前期、中期、后期 Hg 含量分别为 (0.0280±0.0122) mg/kg、(0.0314±0.0105) mg/kg 和(0.0225±0.00690) mg/kg, 中期含量较前期略有 增高, 后期降低, 均符合一类沉积物质量标准。 整体分布特征表现为前期西北部海域和中南部 海域含量高, 中期河口附近及西北部海域高, 后 期东北部海域高。调水调沙中期、后期和前期 均不存在显著性差异。

		Tab.3 The conter	its of sediment enviro	onmental parameters				
+K +	调水调	沙前期	调水调	沙中期	调水调	调水调沙后期		
1日 72小	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值		
硫化物/mg·kg ⁻¹	3.74 ~ 25.8	10.1±5.20	4.01 ~ 45.3	10.3±9.13	3.44 ~ 19.0	9.28±3.94		
有机碳/(%)	0.00519 ~ 0.409	0.178±0.131	0.0894 ~ 0.569	0.285±0.131	0.0933 ~ 0.487	0.284±0.129		
$Hg/mg \cdot kg^{-1}$	0.0134 ~ 0.0680	0.0280±0.0122	0.0166 ~ 0.0477	0.0314±0.0105	0.0107 ~ 0.0372	0.0225 ± 0.00690		
$Cd/mg \cdot kg^{-1}$	0.0508 ~ 0.177	0.0953±0.0334	0.137 ~ 0.241	0.182±0.0318	0.0745 ~ 0.202	$0.129{\pm}0.0394$		
$Pb/mg \cdot kg^{-1}$	9.34 ~ 26.4	15.1±4.51	12.4 ~ 18.4	14.9±1.93	12.0 ~ 28.7	20.4±4.48		
$Cu/mg \cdot kg^{-1}$	6.27 ~ 24.3	14.1±5.05	14.0 ~ 22.3	18.1±2.00	10.0 ~ 28.7	18.4±4.84		
$As/mg \cdot kg^{-1}$	5.47 ~ 19.5	10.6±3.77	8.45 ~ 10.9	10.0±0.725	6.81 ~ 11.9	9.44±1.63		
$Zn/mg \cdot kg^{-1}$	24.9 ~ 54.5	43.9±9.74	47.5 ~ 76.3	57.0±8.54	24.1 ~ 70.1	47.0±16.4		
砂/(%)	1.01 ~ 92.62	21.87±23.23	0.39 ~ 41.24	16.90±13.98	0 ~ 90.50	20.06±23.52		
粉砂/(%)	7.38 ~ 89.26	71.65±20.00	56.65 ~ 94.05	77.76±11.08	9.50 ~ 90.04	72.96±19.96		
粘土/(%)	0~15.56	6.47±4.19	0~15.05	5.34±4.46	0 ~ 17.39	6.98±4.74		
悬浮物/mg·L ⁻¹	3.30 ~ 102	35.0±18.7	26.7 ~ 1854	102±135	25.0 ~ 181	44.9±30.1		

表 3 沉积环境指标含量

调水调沙前期、中期、后期 Cd 含量分别为 (0.0953±0.0334)mg/kg、(0.182±0.0318)mg/kg和 (0.129±0.0394)mg/kg,中期黄河入海口附近海域 含量较前期明显升高,后期基本降至前期水平, 均符合一类沉积物质量标准。前期和后期分布 区域相似,呈现近河口低、远离河口高的分布特 征,高值区主要分布在东北部和中南部海域。调 水调沙中期、后期和前期均存在显著性差异。

调水调沙前期、中期、后期 Pb 含量分别为 (15.1±4.51) mg/kg、(14.9±1.93) mg/kg 和(20.4± 4.48) mg/kg,后期含量较前、中期有所增高,均符 合一类沉积物质量标准。呈现近河口低、远离 河口高的分布特征,高值区主要分布在东北部海 域和中南部海域。调水调沙后期和前期存在显 著性差异。

调水调沙前期、中期、后期 Cu 含量分别为 (14.1±5.05) mg/kg、(18.1±2.00) mg/kg 和(18.4± 4.84) mg/kg,中、后期含量较前期有所增高,均符 合一类沉积物质量标准。呈现近河口低、远离 河口高的分布特征,高值区主要分布在东北部海 域和中南部海域。调水调沙中期、后期和前期 均存在显著性差异。

调水调沙前期、中期、后期 As 含量分别为 (10.6±3.77)mg/kg、(10.0±0.725)mg/kg和(9.44± 1.63)mg/kg,含量变化不大,均符合一类沉积物 质量标准。前期和后期 As 分布区域相似,呈现 近河口低、远离河口高的分布特征,高值区主要 分布在东部海域。调水调沙中期、后期和前期 均不存在显著性差异。

调水调沙前期、中期、后期 Zn 含量分别为 (43.9±9.74)mg/kg、(57.0±8.54)mg/kg和(47.0± 16.4)mg/kg,中期黄河口附近海域含量较前期明 显升高,后期恢复至前期水平,均符合一类沉积 物质量标准。分布特征与 As 相似,即前期和后 期近河口低而远离河口高,高值区主要分布在东 北部和中南部海域。调水调沙中期和前期存在 显著性差异。

黄河口近岸海域表层沉积物中重金属含量 呈现近河口低、远离河口高的空间分布特征,主 要原因可能有3个方面。一是与沉积物的粒径 大小有关^[17]。沉积物粒径越小,对重金属的吸 附、结合能力越强,重金属含量越高。本研究 中,近河口处沉积物中的砂含量较高,粉砂、粘 土含量较低,重金属元素空间分布与细粒级的粉 砂、粘土含量的空间分布具有较好的一致性 (图2)。二是与Cu、Pb、Zn等元素自身的结合 态有关。王正方等^[18]研究指出,黄河口为高活 性铁锰区,重金属元素均可与铁锰氧化物态结 合^[19],故可能导致这3种重金属分布区域趋于一 致。三是与pH有关。陆源径流的输入可导致河 口区域 pH 降低, 重金属元素与 pH 呈极显著负 相关关系^[20], pH 低的海域, 水体中重金属含量 高, 悬浮沉降的重金属少, 导致沉积物中重金属 含量低,由于黄河输送大量淡水入海,使得河口 区的 pH 相对偏低^[21],导致河口区域沉积物重金 属含量降低。









图 2 黄河口邻近海域表层沉积物平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of environmental parameters in surface sediment of the Yellow River Estuary

调水调沙中期与前期相比,悬浮物浓度有明

显升高,同时重金属 Hg、Cd、Cu、Zn 含量也明显

升高,相关研究表明,附近海水中颗粒态重金属 的含量明显高于溶解态重金属含量,由于海水中 大部分重金属都富集在悬浮颗粒物表面,咸淡水 混合,水化学条件突然变化,使大量悬浮物絮凝 沉降,导致沉积物中重金属含量升高^[22]。黄河口 邻近海域表层沉积物重金属含量部分历史数据 列于表 4。与调水调沙工程实施前^[23]相比, Cu、 Pb 和 Zn 含量呈上升趋势, As 含量无明显变化; 与 2006 年^[10]相比, Hg、Cd、Cu、Pb、Zn 含量呈 上升趋势, As 含量无明显变化; 与 2010 年^[24]相 比, Hg 含量降低, Cu 和 Pb 含量无明显变化, As 和 Zn 含量升高。

表 4 黄河口邻近海域表层沉积物重金属含量历史数据 Tab.4 Statistics of heavy mental contents in surface sediment of the Yellow River Estuary

研究海域	Hg	Cd	Cu	Pb	As	Cr	Zn	资料来源
黄河口(20世纪80年代)	—	0.11	10.87	6.80	_	_	35.44	[23]
黄河口(2006年)	0.049	0.16	24.81	18.62	9.63	30.95	33.08	[10]
长江口(2006年)	0.052	0.13	23.03	22.10	6.51	17.87	75.75	[10]
珠江口(2006年)	0.086	0.51	11.94	24.61	17.73	15.04	29.47	[10]
黄河口(2010年)	0.0444	_	16.5	16.0	6.5	17.4	21.0	[24]
黄河口及近海(2020年)	0.0280	0.0953	14.1	15.1	10.6	_	43.9	本研究

2.2 重金属潜在生态风险评价

调水调沙前期,各元素潜在生态危害指数 E从大到小依次为Cd、Hg、As、Pb、Cu和Zn,分 别为31.77、31.12、11.76、3.77、3.21、0.69。11.7% 的站位Cd和Hg属中潜在生态风险,所有站位 As、Pb、Cu、Zn均属低潜在生态风险,沉积物受 Cd和Hg污染较为严重。

调水调沙中期,各元素潜在生态危害指数 E从大到小依次为Cd、Hg、As、Cu、Pb和Zn,分 别为60.69、34.83、11.15、4.11、3.73、0.89。94.4% 的站位Cd属中潜在生态风险,5.6%的站位 Cd属较高潜在生态风险,44.4%的站位Hg属中 潜在生态风险;所有站位As、Cu、Pb、Zn属低潜 在生态风险。中期Cd、Hg污染较前期更为严重。

调水调沙后期,各元素潜在生态危害指数 E从大到小依次为Cd、Hg、As、Pb、Cu和Zn,分 别为43.04、24.94、10.49、5.11、4.18、0.73。55.6% 的站位Cd属中潜在生态风险,5.6%的站位 Hg属中潜在生态风险,所有站位As、Pb、Cu、 Zn属低潜在生态风险。

调水调沙过程中, Cd 潜在生态危害指数 E 增大, 中期平均为 60.69, 几乎是前期的两倍, 后期较中期有所降低, 其他元素潜在生态危害指 数变化不大。调水调沙前期、中期、后期, Cd 为 主要潜在生态风险因子, Cd 的潜在生态风险因 子指数偏高,与 Cd 含量较高和 Cd 生物毒性较强有关。受调水调沙影响,中期、后期 Cd 污染较前期更为严重。

2.3 相关性分析

相关性分析结果显示(表 5), 调水调沙前期, 有机碳含量与砂含量呈极显著的负相关关系 (p<0.01), 与粘土含量和粉砂含量呈极显著的正 相关关系(p<0.01),有机碳迁移和积累与沉积物 的细粒径组分相关,含量受水动力影响显著。 Cd、Pb、Cu、As、Zn 含量与有机碳含量呈极显著 的正相关关系(p<0.01), Cd、Cu、Zn含量与粘土 含量呈极显著的正相关关系(p<0.01), 与砂含量 呈极显著的负相关关系(p<0.01),说明沉积物重 金属 Cd、Cu、Zn 含量受粒径和有机碳含量影 响,这与 Bilali 等^[25] 和赵玉庭等^[26] 的研究结果一 致。细粒径组分具有较大的比表面积,其表面吸 附重金属的能力较强^[27],所以,单位体积沉积物 的重金属含量就越高[17],本研究中,研究海域东 北部及中南部沉积物中细粒径组分的粘土、粉 砂含量较高,粗粒径组分砂含量较低,Cd、Pb、 Cu和 Zn等元素空间分布也呈现东北部及中南 部海域高的特点,与粘土、粉砂含量的空间变化 具有较好的一致性;有机碳具有大量不同的功能 团(如羧基、酚羟基和酮基等),这些功能团具有 较高的阳离子交换量(CEC),它们通过表面络

合、离子交换和沉淀等作用吸附金属元素,因而 沉积物中有机碳含量高,对重金属的吸附量也较 高^[28]。Cd、Cu与Zn的地球化学行为相近,它们 之间存在显著正相关关系,具有相似的构型和性质,具有沉积同源性。Pb含量与粘土含量呈显著的正相关关系(p<0.05),As含量与粘土含量相

表 5 环境指标间 Pearson 相关系

Tab.5	Pearson correlation	n coefficient between	environmental parameters
1 410 10			Pur p

		硫化物	有机碳	Hg	Cd	Pb	Cu	As	Zn	悬浮物	砂	粉砂	粘土
	硫化物	1											
	有机碳	-0.140	1										
	Hg	-0.429	-0.115	1									
	Cd	0.164	0.703**	0.028	1								
	Pb	0.326	0.686**	-0.028	0.890**	1							
润水润沙带相	Cu	0.025	0.866**	-0.042	0.902**	0.861**	1						
阿尔阿伊时朔	As	0.320	0.647**	-0.068	0.823**	0.963**	0.815**	1					
	Zn	0.103	0.813**	-0.108	0.754**	0.782**	0.888**	0.744**	1				
	悬浮物	-0.056	-0.366	0.013	-0.184	-0.204	-0.271	-0.328	-0.292	1			
	砂	0.211	-0.675**	0.066	-0.632**	-0.426	-0.737**	-0.419	-0.726**	0.300	1		
	粉砂	-0.211	0.615**	-0.056	0.584*	0.396	0.690**	0.406	0.698**	-0.303	-0.992**	1	
	粘土	-0.162	0.806**	-0.099	0.712**	0.470*	0.795**	0.386	0.694**	-0.217	-0.807**	0.727**	1
	硫化物	1											
	有机碳	-0.133	1										
	Hg	-0.168	-0.480*	1									
	Cd	-0.101	-0.299	0.445	1								
润水油沙中和	Pb	-0.108	0.364	0.011	-0.326	1							
	Cu	0.051	0.613**	-0.376	-0.153	0.111	1						
例7、例121731	As	0.137	-0.183	0.071	0.409	-0.425	0.043	1					
	Zn	-0.295	-0.326	0.187	0.637**	-0.518*	-0.086	0.574*	1				
	悬浮物	-0.043	-0.358	0.325	0.175	-0.059	-0.133	0.004	0.048	1			
	砂	0.406	-0.654**	0.369	0.115	-0.154	-0.508*	0.291	0.159	0.202	1		
	粉砂	-0.503*	0.500*	-0.216	-0.047	0.105	0.388	-0.303	-0.087	-0.130	-0.963**	1	
	粘土	-0.022	0.807**	-0.621**	-0.243	0.221	0.627**	-0.158	-0.283	-0.312	-0.743**	0.535*	1
	硫化物	1											
	有机碳	-0.168	1										
	Hg	0.019	-0.103	1									
	Cd	-0.134	0.588*	0.409	1								
	Pb	-0.164	0.655**	0.175	0.747**	1							
调水调沙后期	Cu	-0.294	0.659**	0.117	0.718**	0.592**	1						
0.1/1=0.1 () (1)/91	As	0.245	0.635**	0.239	0.606**	0.471*	0.499*	1					
	Zn	-0.081	0.701**	0.290	0.882**	0.721**	0.625**	0.794**	1				
	悬浮物	0.019	-0.262	-0.152	-0.432	-0.178	0.004	-0.404	-0.516*	1			
	砂	0.156	-0.714**	0.105	-0.692**	-0.698**	-0.598**	-0.456	-0.666**	0.132	1		
	粉砂	-0.121	0.640**	-0.138	0.634**	0.671**	0.527*	0.429	0.626**	-0.093	-0.990**	1	
	粘土	-0.267	0.844**	0.061	0.765**	0.640**	0.749**	0.452	0.671**	-0.266	-0.794**	0.698**	1

注:^{*}表示显著相关(p<0.05); ^{**}表示极显著相关(p<0.01); 前期、中期、后期样本数量n=18

关系数为 0.386, 说明 Pb、As 含量除受沉积物粒 径影响外, 还受到其他因素的影响。Hg 与 Cd、 Cu 等其他重金属元素间不存在显著相关关系, 与沉积物粒径也不存在显著相关关系, 与"元素 的粒度控制理论"^[29]不相符, 说明 Hg 不受沉积 物粒度影响。硫化物与重金属元素间无显著相 关关系, 与砂、粉砂、粘土也不存在显著相关关 系, 悬浮物与其他指标也不存在显著相关关系。

调水调沙中期,有机碳含量与粘土含量呈极 显著的正相关关系(p<0.01), 与粉砂含量呈显著 的正相关关系(p<0.05), 与砂含量呈极显著的负 相关关系(p<0.01),相关性与调水调沙前期相 似,含量受水动力影响。在各重金属元素中, Cu与有机碳和粘土含量呈极显著的正相关关系 (p<0.01), 与砂含量呈显著的负相关关系 (p<0.05); Hg 与粘土含量呈极显著的负相关关 系(p<0.01),与有机碳含量呈显著的负相关关系 (p<0.05); Zn 与 Cd 含量呈极显著的正相关关系 (*p*<0.01), 与 As 含量呈显著的正相关关系 (p<0.05), 与 Pb 含量呈显著的负相关关系 (p<0.05),其他重金属元素之间没有相关性。悬 浮物与其他指标不存在显著相关关系,相关研究 表明,由于丰水期水量较大,水中悬浮物随着水 体的流动逐渐沉降,悬浮物的浓度最高值会比沉 积物重金属浓度高值提前2个站位左右^[22],所以 悬浮物与重金属相关关系不明显。调水调沙中 期,受水沙输入的影响,各重金属之间以及与有 机碳、粒度的相关性降低。

调水调沙后期,调查海域各环境指标间的相 关性与调水调沙前期相似,表现为 Cd、Cu 与 Zn 具有沉积同源性,受沉积物粒径组分和有机 碳含量的影响; Pb、As 含量除受沉积物粒径组分 影响外,还受到其他因素的影响; Hg 不受沉积物 粒径组分影响; 硫化物可能受多种控制因素的 影响。

2.4 沉积物重金属污染源解析

珠江口^[30]、九龙江口^[31]和长江口^[32]的相关 研究表明,河口海域沉积物中的重金属大多源于 农业、工业、居民生活等的人为排污,加上沿岸 土壤侵蚀等自然来源构成了多样化的来源方 式。黄河入海口位于莱州湾与渤海湾之间,属于 胜利油田开采区,特殊的地理位置决定了重金属 来源的多样性和复杂性,不仅有土壤侵蚀、水土 流失的自然来源,还有工业污染物、城市排污、 海上航运、大气沉降以及水产养殖等的人为来 源^[33-36],另外,石油天然气等化石燃料开采、燃烧 或泄漏也可能是黄河口海域重金属的重要来 源。重金属的输入源是决定其在河口及近岸海 域沉积物中含量与分布特征的关键因素之一。

近年来,主成分分析(PCA)方法已广泛应用 于海洋沉积物的来源分析,采用主成分分析法对 调水调沙前期重金属来源进行解析,首先对原始 数据矩阵进行归一化处理,以特征值≥1的标准 提取出 2 个主成分, 分别为 PC1 和 PC2。2 个主 成分的解释方差比例依次降低,特征值分别为 5.088 和 1.465, 分别解释总方差的 63.596% 和 18.309%, 累计方差贡献率为 81.906%, 可以反映 沉积物重金属数据的大部分信息,各主成分矩 阵、特征值和方差贡献率列于表 6。有机碳、Cd、 Pb、Cu、As、Zn在PC1上具有较高的正载荷,这 些重金属可能具有相似来源。徐亚岩等^[37]在对 渤海柱状沉积物的研究中指出,自然来源是控 制 Cd 分布的主要因素。除自然来源外,还可能 来自人为源,其主要为:源于河流污染物中的生 活污水;电池、电镀工业;农业活动中的磷肥;航 道的船舶污染^[38]。岩石和人类活动是影响沉积 物中As含量的主要因素。19世纪40年代以 来,黄河沉积物中的 As 含量主要受岩石风化的 控制^[39],并未因人为活动的影响而发生数量级的 变化,另外,As是化肥和农药的重要成分,As含 量的高低也反映了陆地的农药使用和化肥残留 等信息。胡宁静等^[40]指出,黄河口北部沉积物 中的 Pb 主要来自黄河流域自然风化,同时也受 人为源的双重影响。李睿等^[41] 通过 Pb 同位素 追踪技术,发现矿物开采及冶炼和化石燃料燃烧 是土壤中 Pb 的主要来源。傅晓文^[42] 通过主成 分分析法和聚类分析法得出 Cu 与总石油烃或者 油井密度密切相关。黄河入海口位于胜利油田 开采区,石油、天然气等化石燃料燃烧或泄漏可 能是河口近岸海域 Cu 和 Pb 的重要来源。Zn 与 Cu地球化学行为相近,具有相似的构型和性质, Cu与Zn相关系数为0.888(p<0.01),存在极显著

正相关关系,说明 Zn 也来源于化石风化、交通 排放、化石燃料燃烧或泄漏等。因此,PC1 主要 反映 3 个类别污染源:一是自然风化源;二是工 农业生产、居民生活的陆源径流输入源;三是化 石燃料开采、燃烧的污染源。2017 年黄河全流 域废、污水排放量为 44.94 亿吨,其中城镇居民 生活、第二产业和第三产业的排放量分别为 17.26 亿吨、22.61 亿吨和 5.06 亿吨,占比分别为 38.4%、50.3%和11.3%^[43],黄河携带着大量的排 污产物入海,成为决定黄河口沉积物金属元素组 成的决定性因素。Hg 在 PC2 上具有较高的正载 荷,研究认为小清河口 30.3%的 Hg 来自工业活 动和与煤炭燃烧有关的大气沉降,虞河口 53.1% 的 Hg 来自工、农业活动和与煤炭燃烧有关的大 气沉降^[44],因此 PC2 主要反映大气沉降污染源, 调水调沙对沉积物 Hg 含量变化的影响较小。

		Tab.6 T	he main calculated	results of principal com	ponent analys	is		
	之中八	赴江店	玉井南((0/)	用计子带变/(0/)	二本		主成分	
	主风刀	村北山	贝毗平/(70)	系灯贝瞅平/(70)	儿系	PC1	PC2	PC3
	1	5.088	63.596	63.596	硫化物	0.194	-0.883	/
	2	1.465	18.309	81.906	有机碳	0.842	0.233	/
	3	0.834	10.431	92.337	Hg	-0.093	0.759	/
调水调沙前期	4	0.238	2.971	95.307	Cd	0.922	0.061	/
	5	0.182	2.275	97.582	Pb	0.950	-0.095	/
	6	0.133	1.667	99.249	Cu	0.963	0.149	/
	7	0.038	0.475	99.724	As	0.916	-0.127	/
	8	0.022	0.276	100.000	Zn	0.902	0.057	/
	1	2.937	36.718	36.718	硫化物	-0.094	0.094	-0.887
	2	1.623	20.291	57.010	有机碳	-0.692	0.473	0.354
	3	1.273	15.909	72.919	Hg	0.536	-0.559	0.243
	4	0.796	9.955	82.874	Cd	0.763	0.120	0.249
调水调沙甲期	5	0.496	6.204	89.077	Pb	-0.621	-0.369	0.330
	6	0.413	5.158	94.235	Cu	-0.443	0.701	0.180
	7	0.307	3.842	98.077	As	0.602	0.543	-0.155
	8	0.154	1.923	100.000	Zn	0.797	0.374	0.274
	1	4.397	54.968	54.968	硫化物	-0.150	0.818	0.467
	2	1.285	16.064	71.032	有机碳	0.809	-0.246	0.373
	3	1.071	13.382	84.415	Hg	0.289	0.526	-0.765
	4	0.444	5.549	89.963	Cd	0.913	0.075	-0.214
调水调沙后期	5	0.365	4.557	94.520	Pb	0.825	-0.122	-0.027
	6	0.247	3.088	97.608	Cu	0.803	-0.282	-0.029
	7	0.149	1.857	99.465	As	0.775	0.404	0.284
	8	0.043	0.535	100.000	Zn	0.936	0.124	0.012

表 6 主成分分析计算结果

采用主成分分析法对调水调沙中期重金属 来源进行解析,以特征值≥1的标准提取出3个 主成分,特征值分别为2.937、1.623和1.273,分 别解释总方差的36.718%、20.291%和15.909%, 累计方差贡献率为72.919%,相较于调水调沙前

期,主成分特征值与解释的总方差均减小,这是 由于调水调沙中期受水沙输入的影响,各种来源 的污染物都会被带入海洋,即重金属来源复杂, 主成分分析不明显。

采用主成分分析法对调水调沙后期重金属

来源进行解析,以特征值≥1的标准提取出3个 主成分,特征值分别为4.397、1.285和1.071,分 别解释总方差的54.968%、16.064%和13.382%, 累计方差贡献率为84.415%,调水调沙后期主成 分分析计算结果与前期相似,有机碳、Cd、Pb、 Cu、As、Zn在PC1上具有较高的正载荷,Hg和 硫化物在PC2上具有较高的正载荷。

3 结论

(1)黄河口邻近海域沉积物粒度组成以粉砂 为主,砂含量次之,粘土含量最少,调水调沙中期 粉砂含量增高,砂和粘土含量降低;在调水调沙 过程中硫化物含量无明显变化,调水调沙中期、 后期有机碳含量较前期明显升高;调水调沙导 致 Cd、Cu、Zn含量增高,其他重金属含量无明 显变化。

(2)调水调沙前期和后期,各金属元素潜在 生态危害指数 E 从大到小依次为 Cd、Hg、As、 Pb、Cu、Zn,中期依次为 Cd、Hg、As、Cu、Pb、 Zn; Cd 的生态危害指数 E 较高,为主要潜在生态 风险因子,受调水调沙影响,中期、后期 Cd 污染 较前期严重。

(3)调水调沙前期和后期各沉积环境指标间 相关性相似,沉积物粒径和有机碳含量与Cd、 Cu、Zn含量相关,Pb、As含量除受沉积物粒径 影响外,还受其他因素影响,Hg含量不受粒度和 有机碳影响。调水调沙中期,受水沙输入的影 响,重金属与有机碳、粒度相关性降低。

(4)有机碳、Cd、Pb、Cu、As、Zn在PC1上 具有较高正载荷,主要污染源为自然风化、陆源 径流和化石燃料开采,受调水调沙影响显著; Hg在PC2上具有较高正载荷,主要污染源为大 气沉降,受调水调沙影响不明显。调水调沙中 期,受水沙输入的影响,重金属来源复杂,主成分 分析不明显。

参考文献:

- [1] 王秀霞,高彦洁,左 明,等.2011-2020年调水调沙前后黄河口海域浮游动物年间变化及影响因子[J].海洋科学, 2022,46(12):115-127.
- [2] STATHAM P J. Nutrients in estuaries-An overview and the potential impacts of climate change[J]. Science of the Total

Environment, 2012, 434: 213-227.

- [3] ZHANG J, LIU S M, REN J L, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf[J]. Progress in Oceanography, 2007, 74(4): 449-478.
- [4] LIU S M. Response of nutrient transports to water-sediment regulation events in the Huanghe basin and its impact on the biogeochemistry of the Bohai[J]. Journal of Marine Systems, 2015, 141: 59-70.
- [5] 水利部黄河水利委员会. 2002年黄河水资源公报[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2002.
- [6] 李国英. 黄河调水调沙[J]. 人民黄河, 2002, 24(11): 1-4.
- [7] 杨作升,李国刚,王厚杰,等.55年来黄河下游逐日水沙过程 变化及其对干流建库的响应[J].海洋地质与第四纪地质, 2008,28(6):9-18.
- [8] 田莉萍,孙志高,王传远,等.调水调沙工程黄河口近岸沉积 物重金属和砷含量的空间分布及其生态风险评估[J].生态 学报,2018,38(15):5529-5540.
- [9] WANG Y, LING M, LIU R H, et al. Distribution and source identification of trace metals in the sediment of Yellow River Estuary and the adjacent Laizhou Bay[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B /C, 2017, 97: 62-70.
- [10] 张亚南. 黄河口、长江口、珠江口及其邻近海域重金属的河 口过程和沉积物污染风险评价[D]. 厦门: 国家海洋局第三 海洋研究所, 2013.
- [11] 水利部黄河水利委员会. 2020年黄河泥沙公报[R]. 郑州:水 利部黄河水利委员会, 2020.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 17378-2007 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [14] 国家海洋局. HY/T 147-2013, 海洋监测技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013..
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 96-97.
- [17] 乔永民, 黄长江. 汕头湾表层沉积物重金属元素含量和分布 特征研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(1): 106-116.
- [18] 王正方, 应时理, 何祖文, 等. 浙江沿岸第四纪沉积物中重金 属形态的初析[J]. 东海海洋, 1986, 4(1): 62-68.
- [19] 孙文广, 甘卓亭, 孙志高, 等. 黄河口新生湿地土壤Fe和 Mn元素的空间分布特征[J]. 环境科学, 2013, 34(11): 4411-4419.

- [20] 邹建军. 浙江东部近岸海域海底沉积物环境地球化学研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [21] 孙 珊, 苏 博, 李 凡, 等. 调水调沙对黄河口及邻近海域 环境状况的影响[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(3): 399-406.
- [22] 吴晓燕. 黄河入海过程中重金属的变化特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [23] 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境 背景值[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5): 370-376.
- [24] 吴 斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环 境地球化学特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1324-1332.
- [25] BILALI L E, RASMUSSEN P E, HALL G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17(9): 1171-1181.
- [26] 赵玉庭, 孙 珊, 由丽萍, 等. 莱州湾沉积物粒度与重金属分 布特征[J]. 海洋科学, 2021, 45(03): 43-50.
- [27] HOROWITZ A J, ELRICK K A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry[J]. Applied Geochemistry, 1987, 2(4): 437-451.
- [28] HOODA P S, ALLOWAY B J. Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils[J]. Geoderma, 1998, 84(1/2/3): 121-134.
- [29] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地质 科学, 1983 (4): 307-314.
- [30] 陈 康,方展强,安 东,等.珠江口沿岸水域表层沉积物中 重金属含量分布及污染评价[J].应用海洋学学报,2013, 32(1): 20-28.
- [31] 王 帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金 属污染评价及来源[J]. 环境科学研究, 2014, 27(10): 1110-1118.
- [32] 王 蓓. 长江口及其邻近海域沉积物重金属环境地球化学 研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [33] HUNG L L, PU X M, PAN J F, et al. Heavy metal pollution

status in surface sediments of Swan Lake lagoon and Rongcheng Bay in the northern Yellow Sea[J]. Chemosphere, 2013, 93(9): 1957-1964.

- [34] 李 玉, 刘付程, 吴建新. 连云港西大堤海域水环境污染特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 84-89.
- [35] 叶 然,江再昌,郭清荣,等.洋山深水港区海域秋、冬季沉积物中重金属来源分析及生态风险评价[J].海洋通报, 2015,34(1):76-82.
- [36] PAN J J, PAN J F, WANG M. Trace elements distribution and ecological risk assessment of seawater and sediments from Dingzi Bay Shandong Peninsula, North China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 89: 427-434.
- [37] 徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海湾表层沉积物各形态重金 属的分布特征与生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 732-740.
- [38] 张丽洁, 王 贵, 姚 德, 等. 近海沉积物重金属研究及环境 意义[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(3): 6-9.
- [39] ZHANG J. Geochemistry of arsenic in the Huanghe (Yellow River) and its delta region—a review of available data[J]. Aquatic Geochemistry, 1995, 1(3): 241-275.
- [40] 胡宁静, 刘季花, 张 辉, 等. 黄河口及毗邻海域沉积物铅的 来源: 铅同位素证据[J]. 地质学报, 2015, 89(增刊): 139-141.
- [41] 李 睿, 吴艳宏, 邴海健, 等. 青藏高原东麓贡嘎山东坡土壤 中Pb的来源解析[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1439-1448.
- [42] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征、分布和 来源解析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [43] 水利部黄河水利委员会. 2017年黄河水资源公报[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2017.
- [44] 王亚梦. 莱州湾南岸典型河口沉积物重金属空间分布特征 及来源解析[D]. 济南: 山东师范大学, 2020.

(本文编辑:胡莹莹)