

海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价

孟 昆¹, 徐 敏¹, 徐文健¹, 丁言者², 周 聪¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 国家海洋局南通海洋环境监测中心站, 江苏 南通 226005)

[摘要] 基于海州湾北部海域 15 个采样站位表层沉积物 7 种重金属含量 (As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、Cd) 测定, 研究了重金属空间分布特征, 采用主成分分析法解析重金属来源, 应用地累积指数法和潜在生态风险指数法评价重金属污染程度和生态危害程度。结果表明: Cd、Pb、Zn、Cu 和 As 5 种元素平均含量超过江苏海涂背景值, 分别是背景值的 2.62、2.58、1.80、1.35 和 1.24 倍, 存在明显的富集。研究区重金属来源以自然来源为主, Cr 和 Hg 受自然来源控制; Zn、As、Cd 和 Cu 主要来源于工业、农业和生活污染; Pb 来源于船舶污染。地累积指数法评价结果显示, Pb 和 Cd 地累积指数高于其他元素, 为轻度—偏中度污染。潜在生态风险指数法评价结果显示, 研究区总体处于低生态风险水平, Cd 为主要风险元素, 达到中—较高生态风险水平, 其他元素均为低风险。

[关键词] 表层沉积物, 重金属污染, 源解析, 海州湾北部

[中图分类号] X55 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2018)02-0099-08

Sources Apportionment and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Northern Haizhou Bay in China

Meng Kun¹, Xu Min¹, Xu Wenjian¹, Ding Yanzhe², Zhou Cong¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. Nantong Marine Environmental Monitoring Center, Nantong 226005, China)

Abstract: In this paper, concentrations of 7 heavy metals (As, Hg, Cu, Pb, Zn, Cr, Cd) in 15 surface sediments of the Northern Haizhou Bay were investigated to determine their spatial distribution, pollution and sources of heavy metals. The results indicated the mean contents of Cd, Pb, Zn, Cu and As were 2.62, 2.58, 1.80, 1.35 and 1.24 times of their respective background values of the coastal regions of Jiangsu Province, which indicated there were obvious accumulations of these heavy metals. A multivariate analysis (PCA) indicated that Cr and Hg were mainly from natural contributions, while Zn, As, Cd and Cu were influenced by industrial, agricultural and domestic pollution. Pb may be mainly derived from ship pollution. The geoaccumulation index for Haizhou Bay indicated a slight to moderate pollution by Pb and Cd. The overall ecological risk of study area was at low ecological risk level, Cd was the most important contaminating element with a middle-level to high-level ecological risk while other elements had low ecological risk level.

Key words: surface sediments, heavy metals contamination, source analysis, the Northern Haizhou Bay

随着江苏沿海经济的快速发展, 人类活动强度不断加剧, 大量重金属污染物通过河流和大气沉降等方式进入海洋。重金属污染具有来源广、残毒时间长和难降解等特点, 可随生物链不断累积, 势必对海洋生物乃至海洋环境构成潜在危害^[1-2]。重金属污染物进入海洋水体后被颗粒物吸附、络合、絮凝、沉降在沉积物中, 但通过解吸机制又重新进入水体。因此, 海洋沉积物既是入海重金属污染物的“汇”, 又是海洋重金属污染的“二次源”^[3]。自 20 世纪 50 年代日本近海发现“水俣病”(Hg 污染)和“骨痛病”(Cd 污染)等一系列灾难事件后, 近海重金属污染成为全世界普遍关注的问题^[4-7]。已有研究证实, 人类生产生活活动已造成海洋沉积物中重金属含量的显著增加^[8-9]。2014 年中国海洋环境质量公报调查显示, 由长江、珠江和

收稿日期: 2018-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金(41373112).

通讯联系人: 徐敏, 教授, 博士生导师, 研究方向: 海洋资源与环境. E-mail: xumin0895@njnu.edu.cn

黄河等河流携带入海的重金属污染物总量约为 2.1 万 t^[10],对海洋环境危害巨大.

海州湾位于江苏省连云港市北部海域,是江苏省唯一的港湾型海域. 海州湾北部则是江苏沿海传统养殖、港口开发和临海工业的主要聚集地,港口的兴起建设和源源不断的陆源污染物入海势必对海洋生态环境造成巨大的压力. 在对海州湾北部海域的研究中,已有对重金属含量和分布特征的研究^[11],但关于海州湾北部海域重金属来源解析和污染评价等研究鲜见报道. 2012 年 12 月位于海州湾北部的赣榆港区开港运营,港区运营后的沉积物环境研究更是空白. 本研究以海州湾北部海域为研究区域,运用主成分分析研究重金属来源和主要控制因素,并进行污染和生态风险评价,以期为研究区环境预警、环境管理和保护提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海州湾是典型的弧形海湾,南至连云港市东西连岛,北至山东省岚山头,海床自西北向东南方向缓倾. 海州湾位于基岩—砂质海岸与粉砂淤泥质海岸的交汇处,北部属于砂质海岸. 海州湾整体处于微冲刷和基本稳定状态. 2010 年海州湾北部开始建设赣榆港区,先后建成东防波堤、一期码头及配套堆场和航道工程. 海州湾北部海域既是传统养殖区,又是新兴的港口工业区,同时接纳龙王河等沿海排污河流携带的陆源污染物. 2009 年江苏沿海开发上升为国家战略,给海州湾经济发展带来新契机的同时,也加大了海洋环境压力.

1.2 样品采集和处理

2014 年 10 月在海州湾北部海域进行 1 个航次的表层沉积物重金属 (As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd) 调查采样,共布设 15 个站位(图 1). 采用抓斗式采泥器采集表层沉积物,用塑料刀或勺取上部 0~5 cm 表层沉积物,取 3~4 份分析样品分别盛于磨口广口瓶或聚乙烯袋中,并低温冷藏. 将保存样品置于室内阴凉通风处自然风干,手动研磨至过 160 目筛. 沉积物化学元素测试方法按照《海洋监测规范 第 5 部分:沉积物

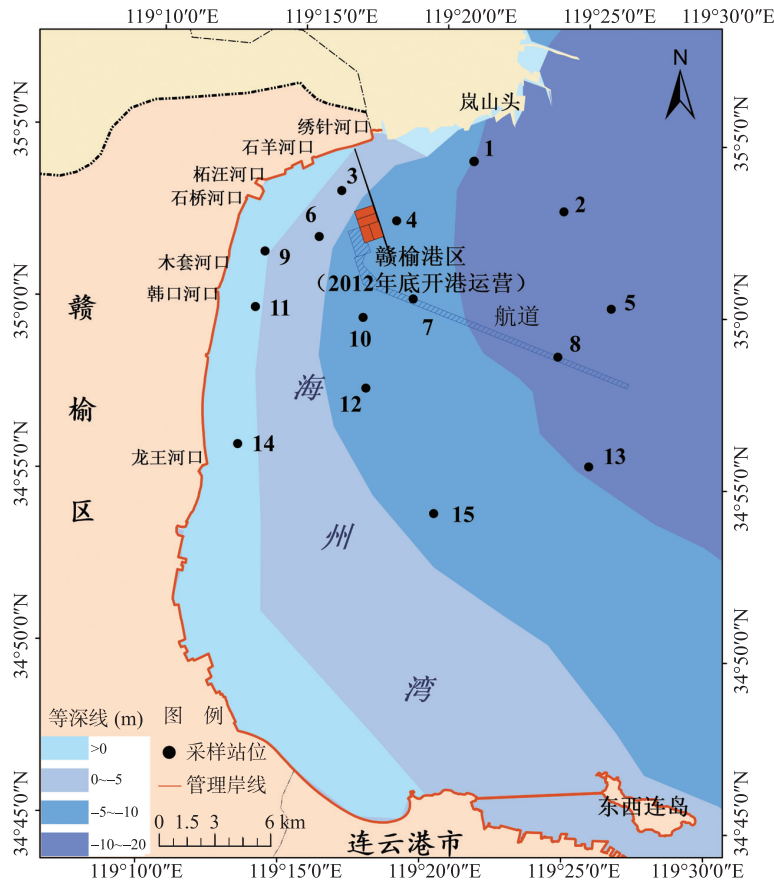


图 1 采样站位图

Fig. 1 Location of sample sites

分析》(GB 17378.5—2007)中规定进行,Cu、Pb、Zn 和 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法,Cd 采用无火焰原子吸收分光光度法,测试仪器为 PinAAcle 900T 型原子吸收分光光度计;As 和 Hg 采用原子荧光法,分析仪器为 XGY—1011A 型原子荧光光度计。在重金属的分析过程中使用的试剂均为优级纯,实验用水为超纯水,并采用平行样品进行过程质量控制,7 种元素平行样的测试相对误差均小于 5%。

1.3 主要方法

(1) 地累积指数法

地累积指数评价法(Geoaccumulation Index, I_{geo})是德国科学家 Müller^[12]于 1969 年提出的一种研究沉积物中重金属的定量指标,可用于评估重金属污染程度。计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5B_n},$$

式中: C_n 是实测元素 n 含量, B_n 为该元素地球化学背景值;1.5 为考虑了各地岩石差异可能会引起的变动而取的系数。地累积指数分级标准见表 1。

地球化学背景值是指自然环境中重金属元素的正常含量,一般选择未受污染的元素含量。江苏沿海工业化从 20 世纪 80 年代中后期开始^[13],因此本研究采用 1980—1981 年获取的江苏海涂土壤元素含量^[14]作为背景值。

(2) 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(Potential Ecological Risk Index)是瑞典环境学家 Hakanson^[15]于 1980 年提出,用于评价沉积物重金属生态危害。该方法将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,反映重金属的潜在生态危害。其计算公式为:

$$RI = \sum (E_r^i),$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$

$$C_f^i = C_0^i / C_n^i,$$

式中, RI 为综合潜在生态风险值, E_r^i 为单因子潜在生态风险值。 T_r^i 为某一重金属的毒理系数,采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒理系数;Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn 和 Hg 的重金属毒理系数取值分别为 30、10、5、5、2、1 和 40。 C_f^i 为单项污染系数, C_0^i 为背景值, C_n^i 为实测值。潜在生态风险单项系数和潜在风险综合指数分级标准见表 1。

表 1 地累积指数和潜在生态风险指数的评价等级划分^[12,15]

Table 1 Standards for geoaccumulation indices and potential ecological risk indices of heavy metals^[12,15]

I_{geo}	污染程度	E_r^i	单因子潜在生态风险程度	RI	综合潜在生态风险程度
≤ 0	无污染	< 40	低	< 150	低
0~1	轻度污染	40~80	中等	150~300	中等
1~2	偏中度污染	80~160	较高	300~600	高
2~3	中度污染	160~320	高	≥ 600	极高
3~4	偏重污染	≥ 320	极高		
4~5	重污染				
> 5	严重污染				

(3) 统计分析

采样数理统计软件 SPSS21.0 对元素含量进行主成分分析。把实验室数据输入 SPSS 21.0 软件中因子分析模板,依据元素矩阵 KMO 值均大于 0.6 和 Bartlett 球形检验 P 值小于 0.05 判定数据是否适合进行主成分分析,按照特征根 $\lambda \geq 1$ 和累积方差贡献量 $\alpha \geq 80\%$ 提取主成分。

2 结果与分析

2.1 重金属含量描述性统计

由表 2 可以看出,研究区各站 As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 含量变化范围分别为 5.56~11.31、0.002~0.009、3.23~30.69、21.22~43.28、15.6~122.1、10.58~77.01 和 0.07~0.15 mg/kg,平均含量分别为 9.18、

0.005、20.23、29.46、84.92、42.38 和 0.11 mg/kg. 重金属元素含量均未超过《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)规定的一类标准,表明海州湾北部海域沉积物环境总体较好. 但 Cd、Pb、Zn、Cu 和 As 等 5 种重金属元素的平均含量超过江苏海涂背景值,分别是江苏海涂背景值的 2.62、2.58、1.80、1.35 和 1.24 倍,表明这 5 种元素在沉积物中存在一定的富集. 重金属变异系数范围为 19.90%~43.85%,离散性相对较小,说明海州湾北部海域表层沉积物重金属元素分布较均匀.

表 2 研究区表层沉积物重金属含量与江苏省其他典型海域含量平均值比较

Table 2 Comparison of heavy metals content in the study area and other typical areas in Jiangsu Province									mg/kg
项目(采样时间)		As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	参考文献
海州湾北部 (2014-10)	变化范围	5.56~11.31	0.002~0.009	3.23~30.69	21.22~43.28	15.6~122.1	10.58~77.01	0.07~0.15	本研究
	平均值	9.18	0.005	20.23	29.46	84.92	42.38	0.11	
	变异系数	21.33%	43.34%	36.37%	26.07%	37.65%	43.85%	19.90%	
海州湾(2009-12)		6.62	n.d.	19.41	18.23	73.29	74.18	0.17	文献[16]
连云港埭子口海域(2012-05)		8.43	0.014 5	11.97	18.50	39.91	65.92	0.11	文献[17]
盐城北部海域(2014-04)		15.49	0.1	24.98	22.54	71.84	63.63	0.25	文献[18]
南通近岸海域(2012-10)		5.93	0.013	14.08	24.84	45.30	56.94	0.11	文献[19]
海洋沉积物质量一类标准		20	0.2	35	60	150	80	0.5	
江苏海涂背景值		7.38	0.023	15.02	11.40	47.15	60.11	0.042	文献[14]

n.d.表示未测.

李飞等^[16]于 2009 年 12 月在整个海州湾海域采集 As、Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 共 6 种重金属元素含量(表 2). 由本研究与其时间尺度上的对比分析可知:Cr 和 Cd 含量呈减小趋势,Pb、As、Zn 和 Cu 含量呈增加趋势,Pb 含量增幅最大,可能受到人为输入. 对比江苏省其他典型海域,海州湾北部 As、Cu、Pb 和 Zn 含量高于连云港埭子口海域,Pb 和 Zn 含量高于盐城北部海域,As、Cu、Pb 和 Zn 含量高于南通海域,表明研究区 Pb 和 Zn 富集程度相对较高.

2.2 空间分布特征

海州湾北部表层沉积物重金属空间分布存在一定的差异性(图 2). As、Hg、Cu、Zn、Cr 和 Cd 等 6 种元素总体分布趋势为由南向北逐步减少. 众多研究已证实,重金属含量和沉积物粒径之间有良好的“粒控效应”^[20-21],细颗粒沉积物表面积大,可吸附较多重金属,而粒径越粗,重金属富集程度也越低. 刘付程等^[22]和张存勇等^[23]在海州湾的调查研究表明海州湾北部表层沉积物粒径由南向北逐步增大,这与重金属空间分布趋势一致,说明海州湾北部沉积物重金属含量和沉积物粒径之间存在“粒控效应”. 重金属含量富集区位于龙王河口附近海域,贫瘠区位于绣针河口—石羊河口近岸海域. 富集区的分布表明龙王河携带的陆源污染物是重金属重要的污染来源. 目前赣榆港区处于港口开发初期阶段,位于近岸的绣针河口—石羊河口尚无开发活动,重金属输入较少,沉积物重金属含量也相对较低.

Pb 元素含量高值区整体呈条带式分布,主要位于赣榆港区和韩口河口附近海域. 赣榆港区港作船舶及其他运输船舶较多,而位于韩口河口的韩口渔港是国家二级渔港,周边作业渔船众多. Pb 元素空间分布与船舶集中区分布有关.

2.3 重金属来源解析

沉积物中重金属的来源包括自然来源(沉积母质)和人为来源等,常用主成分分析法判定来源^[24-25]. 运用 SPSS 21.0 进行重金属元素分析显示,KMO 检验值为 0.649>0.5,Bartlett 球形检验结果为 0.000<0.05,表明此次的调查数据适用于主成分分析. 以沉积物重金属元素为变量进行主成分分析,按照特征根大于 1 为主成分原则,研究区 7 种重金属元素共提取了 3 个主成分(表 3). 主成分累积方差贡献率为 86.487%,可以反映原始数据的大部分信息.

PC1(第 1 主成分)贡献率为 55.099%,表明 PC1 对沉积物重金属来源起主要作用. 涉及的重金属元素均

表 3 研究区表层沉积物重金属 3 类主成分的载荷值

Table 3 Loading of each index on three principal components of heavy metals in surface sediments of the study area

元素	成份		
	PC1	PC2	PC3
Cr	0.937	-0.005	0.122
Hg	0.886	0.165	0.052
Cu	0.543	0.785	-0.048
Cd	0.561	0.576	-0.257
Zn	0.013	0.930	0.223
As	0.594	0.658	-0.248
Pb	0.067	0.057	0.974
特征根	3.857	1.141	1.057
贡献率	55.099%	16.293%	15.095%
累积贡献率	55.099%	71.392%	86.487%

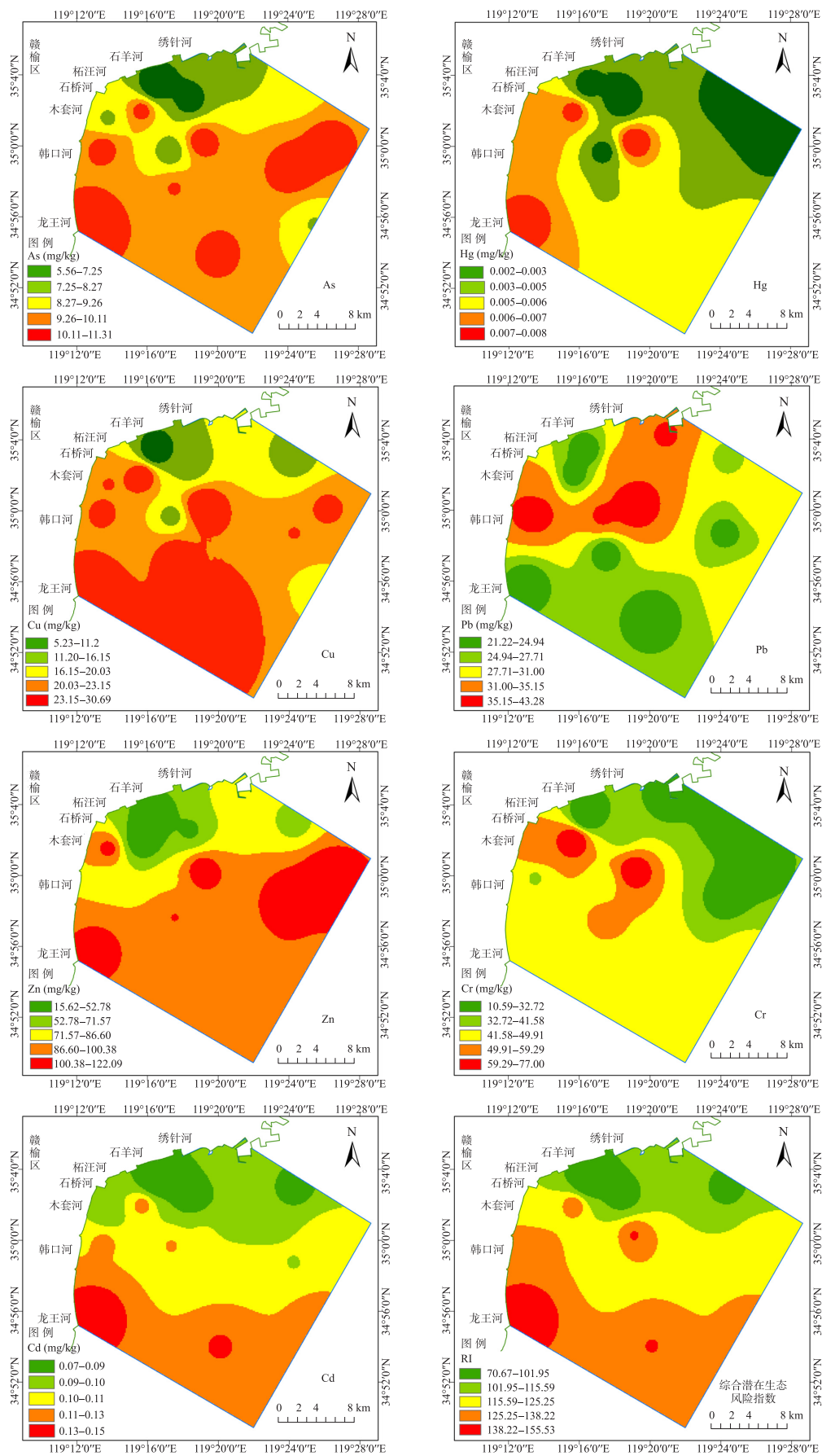


图2 重金属空间分布和RI空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals and comprehensive potential ecological risk index

与其正相关. 其中 Cr 和 Hg 在 F1 上的载荷值较高,达到 0.937 和 0.886,说明 PC1 支配着 Cr 和 Hg 的来源. Cr 和 Hg 元素平均含量低于江苏海涂背景值,因此未受到人类活动的影响,可以认为 PC1 代表的是自然因素,主要反映了沉积母质对重金属含量的影响. Cu、Cd 和 As 在 PC1 上也有较高的正载荷,说明 PC1 也部分支配着 Cu、Cd 和 As 的来源.

PC2(第 2 主成分)贡献率为 16.293%,涉及的重金属元素 Zn、As、Cd 和 Cu 与其呈显著正相关,载荷值表明 PC2 主要支配着 Zn、As、Cd 和 Cu 的来源. Zn、As、Cd 和 Cu 4 种元素平均含量超过江苏海涂背景值,主要受到人类活动的影响. 由 Zn、As、Cd 和 Cu 空间分布特征可知,该 4 种元素富集区位于龙王河口附近海域,PC2 可表示为龙王河入海污染物排放对重金属元素含量的影响. 通过对龙王河流域环境调查,龙王河流域分布有金山镇工业园区以及众多农田和乡镇. 金山镇工业园区的已入驻企业涉及化肥生产、木材加工等产业. 龙王河为区域主要排污河流,接纳两岸工业、农业及生活污水. 化肥是重金属 Cd 的重要来源,如我国磷肥中 Cd 的平均含量达 0.6 mg/kg^[26],而磷肥中的 Cd 主要来源于磷矿石^[27]. 因此化肥的生产和施用会导致环境中的 Cd 含量增加^[28-29]. 禽畜粪便是重金属 Cu 和 Zn 的重要来源. Cu 和 Zn 常作为禽畜饲料添加剂^[30-31],但并不能完全被禽畜吸收,约 95% 以上随粪便排出体外^[32-33]. 姜萍等^[34]研究发现猪的粪便中 Cu 和 Zn 含量高达 679~892 mg/kg 和 1 570~3 200 mg/kg. 禽畜粪便作为有机肥料,其施用能增加环境中的 Cu 和 Zn 含量. 此外我国居民生活中的给排水管多为镀锌水管^[35-36],易造成重金属 Zn 元素的释放. 木材加工可能会使用含 As 木材防腐剂(铬化砷酸铜)^[36],农业生产过程中含砷化学物质如杀虫剂、除草剂和其他农药的大量使用也会造成 As 含量增加. 生活中常用的洗涤剂也含有 As,洗洁精中 As 含量为 0.036 mg/kg,洁厕剂中 As 含量则高达 1.8 mg/kg^[37]. 上述工业、农业和生活污染物释放 Zn、As、Cd 和 Cu 元素,进入水体后随龙王河入海沉降在沉积物中. 因此,PC2 可进一步表示工业、农业和生活污染等人为来源对重金属含量的影响.

PC3(第 3 主成分)贡献率为 15.095%,涉及的元素 Pb 与其为正相关. Pb 平均含量是江苏海涂背景值的 2.58 倍,因此主要受到人类活动的影响. 从 Pb 元素空间分布来看,富集区位于赣榆港区和韩口河口附近海域,与船舶集中区分布有关. 船舶产生 Pb 污染的来源包括燃油废气和船舶表层防污漆. Pb 是机动车燃油污染的标志元素^[38-39],韩口河口和赣榆港区船舶众多,燃油污染较大易造成 Pb 污染^[40-41]. 田亚静等^[42]对船舶防污漆的分析检测发现,Pb 含量远高于其他元素,平均值达 490 mg/kg. 因此,PC3 可进一步表示为船舶污染对重金属含量的影响.

2.4 污染评价

地累积指数评价结果表明(表 4),重金属元素地累积指数排序为 Pb>Cd>Zn>Cu>As>Cr>Hg. Pb 和 Cd 的 I_{geo} 值在 0~2 之间,污染程度为轻度-偏中度污染. Zn、Cu 和 As 污染程度为清洁-轻度污染,Hg 和 Cr 污染程度为清洁,无污染. 重金属来源解析表明,Pb 主要是船舶污染产生,Cd 元素主要来自龙王河入海污染物. 因此,船舶污染和龙王河陆源污染是区域环境治理的重点.

表 4 研究区表层沉积物重金属地累积指数和潜在生态风险指数
Table 4 Geoaccumulation index and potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments of the study area

项目		As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
I_{geo}	平均值	-0.30	-2.86	-0.31	0.74	0.11	-1.24	0.71
	最小值	-0.99	-4.10	-2.80	0.31	-2.18	-3.09	0.04
	最大值	0.03	-1.93	0.45	1.34	0.79	-0.23	1.22
	污染程度	清洁—轻度污染	清洁	清洁—轻度污染	轻度—偏中度污染	清洁—轻度污染	清洁	轻度—偏中度污染
E_r^i	平均值	12.51	9.16	6.73	12.92	1.80	1.41	75.29
	最小值	7.53	3.48	1.08	9.31	0.33	0.35	46.43
	最大值	15.33	15.65	10.22	18.98	2.59	2.56	105.00
	生态风险	低	低	低	低	低	低	中—较高
RI	平均值	119.82						
	范围	70.66~155.53						
生态风险		低—中						

单因子潜在生态风险指数排序为 Cd>Pb>As>Cu>Hg>Zn>Cr,重金属 Cd 的潜在生态风险指数介于 46.43~105.00 之间,总体处于中—较高生态风险水平,其中 60% 站位处于中等生态风险水平,40% 站位处

于较高生态风险水平. 其余重金属元素均处于低生态风险水平. 表明 Cd 是区域生态风险主要贡献因子. 综合潜在生态风险指数评价表明,各站位 RI 值介于 70.66~155.53 之间,平均值为 119.82,总体处于低生态风险水平. 其中仅有 1 个站位点处于中等生态风险水平,占总站位数的 6.6%,其余站位均处于低风险水平. 从综合潜在生态风险指数分布图(图 2)可以看出,龙王河口附近海域综合潜在生态风险指数值最高,向北逐步减少,与主要污染元素 Cd 的空间分布特征相似(图 2). 可见龙王河口海域是生态风险易发的区域,应给予重视.

3 结论

(1)研究区 As、Hg、Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 平均含量分别为 9.18、0.005、20.23、29.46、84.92、42.38 和 0.11 mg/kg. 重金属含量均未超过《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)规定的一类标准,但 As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 5 种重金属元素的平均含量超过江苏海涂背景值,存在一定程度的重金属富集.

(2)研究区 As、Hg、Cu、Zn、Cr 和 Cd 6 种重金属总体空间分布特征为从南向北逐步减少,元素富集区位于龙王河口附近海域,赤贫区位于绣针河口—石羊河之间海域. Pb 元素富集区位于赣榆港区和韩口河口附近,与船舶集中区分布有关.

(3)研究区重金属来源于沉积母质、龙王河入海污染物(工业排放、农业和生活污染)和船舶污染,平均贡献率分别为 55.099%、16.293%和 15.095%. Cr 和 Hg 主要受沉积母质控制,为自然来源;Zn、As、Cd 和 Cu 主要来源于龙王河口陆源污染物排放,包括工业污染、农业和生活污染;Pb 来源于船舶污染.

(4)地累积污染指数评价表明,研究区 Pb 和 Cd 处于轻度—偏中度污染,Pb 和 Cd 应作为海州湾北部海域环境决策管理优先控制对象. 潜在生态风险指数评价表明,研究区总体处于低生态风险水平,Cd 为主要风险元素,达到中—较高生态风险水平. 龙王河口海域是生态风险易发的区域,应给予重视.

[参考文献]

- [1] BRYAN G W, LANGSTON W J. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review[J]. *Environmental pollution*, 1992, 76(2): 89–131.
- [2] GAO X, ZHOU F, CHEN C T. Pollution status of the Bohai Sea: an overview of the environmental quality assessment related trace metals[J]. *Environment international*, 2014, 62(4): 12–30.
- [3] 胡姝. 江苏滨海潮滩沉积物中还原无机硫和重金属的形态特征[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [4] ERLÉNKEUSER H, SUESS E, WILLKOMM H. Industrialization affects heavy metal and carbon isotope concentrations in recent Baltic Sea sediments[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1974, 38(6): 823–842.
- [5] SONG Y, CHOI M S. Assessment of heavy metal contamination in sediments along the coast of South Korea using Cs-normalized background concentrations[J]. *Marine pollution bulletin*, 2017, 117(1/2): 532–537.
- [6] 许昆灿, 黄水龙, 吴丽卿. 长江口沉积物中重金属的含量分布及其与环境因素的关系[J]. *海洋学报(中文版)*, 1982, 4(4): 440–449.
- [7] 陈亮, 李团结, 杨文丰, 等. 南海北部近海沉积物重金属分布及来源[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 464–470.
- [8] 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 等. 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2359–2367.
- [9] 张志锋, 王燕, 韩庚辰, 等. 北部湾沉积物中重金属元素的地球化学特征及物源初探[J]. *海洋学报(中文版)*, 2013, 35(2): 72–81.
- [10] 国家海洋局. 2014 年中国海洋环境质量公报[R/OL][2018-03-01]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyhjzlgbl/201712/t20171205_59464.html.
- [11] 张亮, 吴凤丛, 宋春丽, 等. 海州湾北部海域表层沉积物污染分布特征及环境质量评价[J]. *海岸工程*, 2012, 31(2): 54–61.
- [12] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 108–118.
- [13] 吕建树. 江苏典型海岸带土壤及沉积物重金属环境地球化学研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [14] 陈邦本, 胡蓉卿, 陈铭达. 江苏海涂土壤环境元素的自然背景值[J]. *南京农业大学学报*, 1985, 8(3): 54–60.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [16] 李飞, 徐敏. 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1035–1040.
- [17] 刘佰琼, 徐敏. 埭子口海域表层沉积物重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(5):

- 581-587.
- [18] 欧阳凯,闫玉茹,项立辉,等.盐城北部潮间带表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J].海洋环境科学,2016,35(2):256-263.
- [19] 顾佳,闫玉茹,平利姣.南通近海潮滩表层沉积物重金属含量特征与生态风险评价[J].华东地质,2017,38(2):155-160.
- [20] 赵一阳,喻德科.黄海沉积物地球化学分析[J].海洋与湖沼,1983,14(5):432-446.
- [21] LIN S,HSIEH I J,HUANG K M,et al. Influence of the Yangtze River and grain size on spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments[J]. Chemical geology,2002,182(2/4):377-394.
- [22] 刘付程,张存勇,彭俊.海州湾表层沉积物粒度的空间变异特征[J].海洋科学,2010,34(7):54-58.
- [23] 张存勇,冯秀丽.连云港近岸海域沉积物粒度空间分布特征及其分析[J].海洋学报(中文版),2009,31(4):120-127.
- [24] SINGH K P,MALIK A,SINHA S,et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River(India) using principal component analysis[J]. Water air and soil pollution,2005,166(1/4):321-341.
- [25] SPROVIERI M,FEO M L,PREVEDELLO L,et al. Heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in surface sediments of the Naples harbour(southern Italy)[J]. Chemosphere,2007,67(5):998-1009.
- [26] 鲁如坤,时正元,熊礼明.我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J].土壤学报,1992,29(2):150-157.
- [27] 黄青青,刘星,张倩,等.磷肥中镉的环境风险及生物有效性分析[J].环境科学与技术,2016,39(2):156-161.
- [28] 王美,李书田.肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J].植物营养与肥料学报,2014(2):466-480.
- [29] 张青梅,向仁军,刘湛,等.湖南省磷肥中重金属含量及形态特征[J].有色金属科学与工程,2016,7(5):125-130.
- [30] 朱亦君,郑袁明,贺纪正,等.猪粪中铜对东北黑土的污染风险评价[J].应用生态学报,2008,19(12):2751-2756.
- [31] 于炎湖.饲料中的重金属污染及其预防[J].粮食与饲料工业,2001(6):12-14.
- [32] 闫秋良,刘福柱.通过营养调控缓解畜禽生产对环境的污染[J].家畜生态学报,2002,23(3):68-70.
- [33] 关受江,田有庆,胡明照,等.高铜添加剂对猪生长和屠体的影响[J].动物营养学报,1995,7(3):64.
- [34] 姜萍,金盛杨,郝秀珍,等.重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J].农业环境科学学报,2010,29(5):942-947.
- [35] 孙玉焕,骆永明,吴龙华,等.长江三角洲地区城市污水污泥重金属含量研究[J].环境保护科学,2009,35(4):26-29.
- [36] 郭广慧,陈同斌,杨军,等.中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J].环境科学学报,2014,34(10):2455-2461.
- [37] 柴明青,许菲菲,王晓平.洗涤剂中有害重金属的分析[J].应用化工,2012,41(4):713-715.
- [38] 王学松,秦勇.徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J].中国矿业大学学报,2006,35(1):84-88.
- [39] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7):109-122.
- [40] 马立杰,崔迎春,王海荣.运用因子分析评价山东黑泥湾沉积物重金属污染来源[J].海洋地质前沿,2012(4):57-61.
- [41] 余骏.杭埠河流域贝类重金属的污染特征及源解析[D].合肥:安徽大学,2016.
- [42] 田亚静,陈经浩,黄建新,等.船舶防污漆中污染物分析及处置技术[J].环境工程学报,2017,11(2):1164-1170.

[责任编辑:丁 蓉]