

江苏南部沿海鸕鹚类迁徙停息地潮间带 表层沉积物重金属分布及污染评价

葛晓辉¹, 胡东方¹, 陈建琴², 刘 威¹, 张 怡¹, 胡超超¹, 常 青¹

(1. 南京师范大学生命科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 江苏第二师范学院生物科学与化学化工学院, 江苏 南京 210013)

[摘要] 对江苏南部沿海鸕鹚类迁徙停息地潮间带 18 个样点的 36 份表层沉积物中重金属的分布特征、污染状况及可能来源进行了分析。分析结果表明: 春、秋两季 7 种重金属平均含量的大小顺序均为 $Zn > Pb > As > Cu > Cr > Cd > Hg$, 其中 As、Hg 的含量在两季间存在显著性差异, Cu、Zn 的含量在各潮间带存在显著性差异, Cd 在各断面之间存在显著差异。基于地质累积指数法评价各重金属污染程度从强到弱为: 春季 $Cd > Pb > As > Cu > Zn > Cr > Hg$, 秋季 $Cd > As > Pb > Cu > Zn > Hg > Cr$; 潜在生态危害指数法评价分析表明: As、Pb、Cu、Hg、Zn、Cr 均处于低生态危害等级, Cd 整体上处于较重生态危害等级。主成分分析(principal component analysis, PCA)表明: 研究区重金属污染主要来源于经济开发区企业的工业排污、周边地区机动车尾气及当地渔港船舶污染的排放。

[关键词] 鸕鹚类迁徙停息地, 表层沉积物, 重金属, 分布, 污染评价, 来源

[中图分类号] Q958 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2017)01-0086-09

Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Intertidal Wetland of Globally Important Shorebird Stopover Sites in Southern Jiangsu Province, China

Ge Xiaohui¹, Hu Dongfang¹, Chen Jianqin², Liu Wei¹, Zhang Yi¹, Hu Chaochao¹, Chang Qing¹

(1. School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Life Science and Chemical Engineering, Jiangsu Second Normal University, Nanjing 210013, China)

Abstract: Total of 36 surface sediment samples were collected from 18 sampling sites of intertidal zone, and the distribution, contamination and source of heavy metals in the globally important shorebirds stopover sites of south Jiangsu were investigated. The results showed that the average content of heavy metals were $Zn > Pb > As > Cu > Cr > Cd > Hg$ both in spring and autumn, and there were no significant differences in the contents of heavy metals, except for As and Hg in different season, Cu and Zn in different intertidal zones, and Cd in different transects. The geoaccumulation index assessment indicated that the pollution status was $Cd > Pb > As > Cu > Zn > Cr > Hg$ in spring, and $Cd > As > Pb > Cu > Zn > Hg > Cr$ in autumn. The potential ecological risk index indicated that As, Pb, Cu, Hg, Zn and Cr were all at the low ecological risk level, and Cd was at slightly high level. The principal component analysis indicated that the heavy metals mainly came from industrial emissions of the Rudong Economic Development Zone, motor vehicle exhaust and the ship pollution emissions of the local fishing ports.

Key words: shorebird stopover site, surface sediment, heavy metals, distribution, pollution assessment, source

重金属是具有潜在危害的重要污染物,其毒性大、难以降解、残留时间长,可通过生物富集破坏生态系统平衡^[1]。随着沿海地区工业化及城市化的快速发展,重金属经入海河流、海洋倾废等被不断带入河口及滨海湿地环境。沉积物是海洋环境中重金属重要的源和汇,其重金属含量比水样更稳定且更易检测。因

收稿日期: 2016-09-18.

基金项目: 江苏省优势学科建设项目(201504).

通讯联系人: 常青, 教授, 研究方向: 动物分子系统学方面及湿地生态学方面. E-mail: changq@njnu.edu.cn

此,针对表层沉积物重金属含量及分布的调查可用来评估海洋环境质量和污染状况^[2]。

潮间带受到陆地和海洋等多重因素的影响,是典型的环境脆弱和敏感地带^[3],这里不仅有人类的经济活动,同时还栖息着大量的水鸟。调查数据表明,中国黄海海滨是鸕鹚类在东亚-澳大利亚迁徙路线(East Asian-Australasian Flyway, EAAF)上春、秋两季极其关键的停息地^[4],而位于江苏南部沿海的条子泥、小洋口及东凌湿地的潮间带对全球极危物种勺嘴鹬(*Eurynorhynchus pygmeus*)及其他受胁种类尤为重要。在每年鸕鹚类春迁和秋迁期间,有 21 种超过迁徙种群个体数量 1% 的物种在该地区停息补给,并完成换羽过程^[5]。

目前对黄海重金属含量及分布特征的研究已有不少报道^[6-10],而针对水鸟迁徙重要停息地潮间带沉积物中重金属的研究尚少。本研究在测定春、秋两季江苏南部沿海迁徙鸕鹚类主要停息地潮间带表层沉积物重金属含量的基础上,分析其分布特征,开展重金属污染评价和来源分析,旨在了解鸕鹚类重要停息地的环境状况,以期为滨海湿地生态系统及迁徙水鸟的保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015 年 4 月和 9 月,在江苏南部沿海的东台条子泥(I)、如东小洋口(II)和东凌(III)3 个滩涂湿地(图 1),于垂直海岸线方向各设置了 2 个断面(条子泥:A、B;小洋口:C、D;东凌:E、F),分别在高潮带(H)、中潮带(M)和低潮带(L)各设一个取样站(50 m×50 m),在其正方形四角及中心点各设 1 个取样点,用箱式取样器采样。采样时用塑料勺小心采集取样器中央未受干扰的 0 cm~5 cm 的表层沉积物,将每个取样站所有样点的表层沉积物混匀后,密封保存于聚乙烯自封袋,带回实验室室温保存待测。18 个取样站两次共采集 36 份表层沉积物样品。

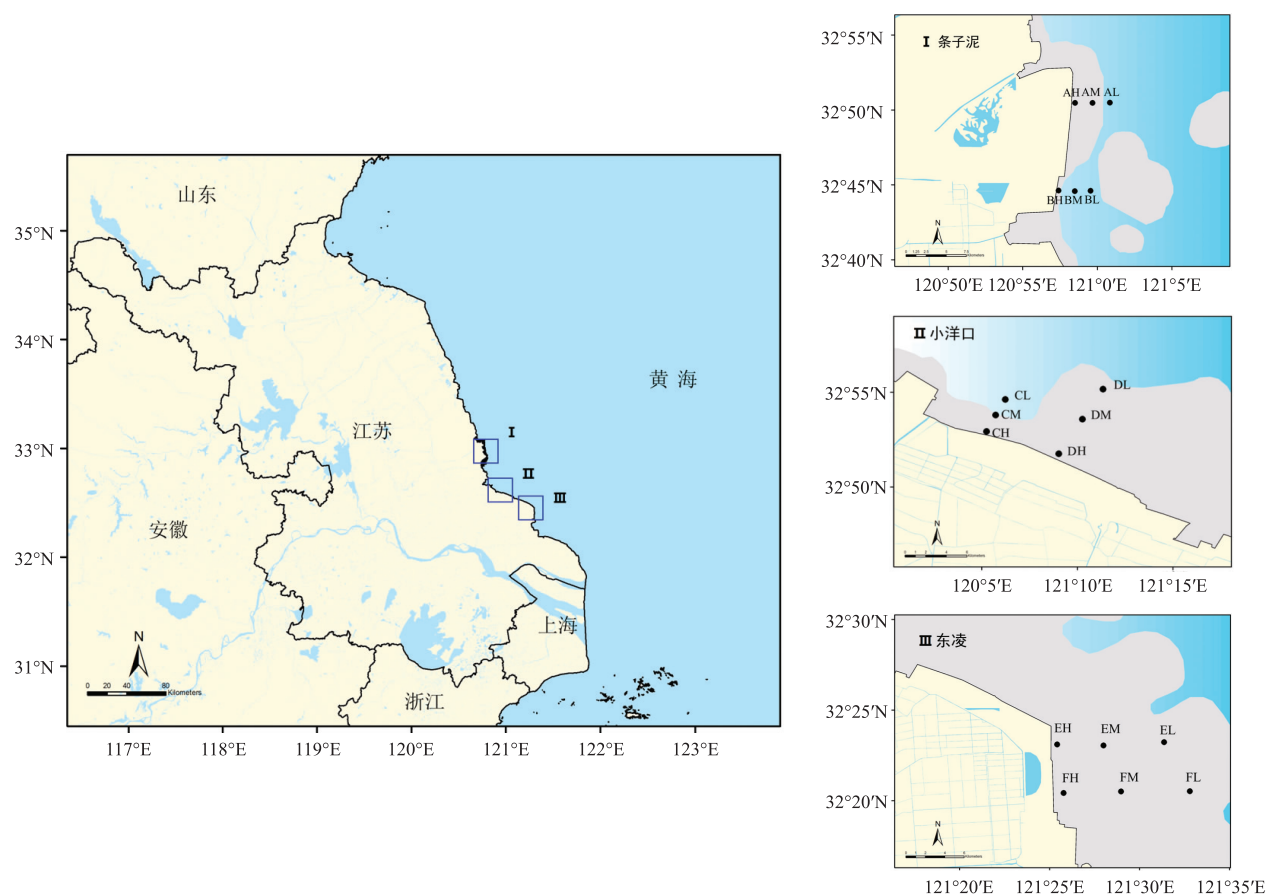


图 1 研究区位置与采样站点图

Fig. 1 Location of study areas and sample sites

1.2 样品处理和分析

将沉积物样品置于烘箱内 105 ℃ 恒温烘干,然后用玛瑙研钵将烘干的样品研磨至完全通过 100 目筛.称取 0.1 g 样品(精确至 0.000 1 g),置于聚四氟乙烯(PTFE)烧杯中, $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 高温溶解后,采用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES,LEEMAN LABS 公司生产)测定 Al、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Pb、As 和 Zn 的含量,原子荧光光度计(AFS-230E)测定 Hg 的含量.对所有样品进行样品溶解和测定的平行分析,以消除在样品处理及测定过程中可能带入的污染.为监控测试的精度和准确度,利用沉积物标准物质(GBW07406)与样品同时进行前处理和分析测定,所用标准物质的回收率在 80%~120%之间.

1.3 数据分析

采用 T 检验或 Mann-Whitney U 检验比较春季与秋季间各金属元素含量的差异,采用 ANOVA 或 Kruskal-Wallis H 检验比较不同断面及不同潮带间金属元素含量的差异.用 Pearson 分析金属之间的相关性,双尾检测确定其相关关系的显著水平.基于主成分分析(principal component analysis,PCA)方法分析重金属的来源,经最大方差(Varimax)旋转后提取特征值大于 1 的因子.所有统计分析用 SPSS 16.0 软件进行.

1.4 重金属评价方法

1.4.1 地质累积指数法

地质累积指数法是由德国海德堡大学沉积物研究所的 Müller 教授提出,是研究水体沉积物中重金属污染程度的一种定量指标,被广泛用于研究现代沉积物中重金属污染的评价^[11].计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)]$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数; C_n 为重金属元素 n 在沉积物中的实测含量; B_n 为沉积岩(即普通页岩)中所测元素的地球化学背景值(参照陈邦本等的研究结果^[12]); k 是考虑到成岩作用可能会引起的背景值的变动而设定的常数,一般取值 1.5. I_{geo} 值对应的污染等级标准见表 1.

表 1 I_{geo} 、 C_f^i 、 E_r^i 和 RI 值对应的污染程度及潜在生态风险程度

Table 1 The corresponding pollution degree and potential ecological risk degree of I_{geo} , C_f^i , E_r^i and RI

污染指标	I_{geo}	C_f^i	单个污染物污染程度	E_r^i	单个污染物生态危害程度	RI	总潜在生态危害程度
无污染	≤ 0	$C_f^i < 1$	低	$E_r^i < 40$	低	$RI < 150$	低
轻度污染	$0 \sim 1$	$1 \leq C_f^i < 3$	中等	$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
偏中度污染	$1 \sim 2$	$3 \leq C_f^i < 6$	重	$80 \leq E_r^i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	重
中度污染	$2 \sim 3$	$C_f^i \geq 6$	严重	$160 \leq E_r^i < 320$	重	$RI \geq 600$	严重
偏重污染	$3 \sim 4$			$E_r^i \geq 320$	严重		
重污染	$4 \sim 5$						
严重污染	> 5						

1.4.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是瑞典学者 Hakanson 在 1980 年基于沉积学原理提出的评价重金属污染及生态危害的一种方法,它综合考虑了重金属的毒性和研究区域对重金属污染的敏感性等,并且消除了区域差异和异源污染的影响^[13].其计算公式如下:

$$C_f^i = C^i / C_n^i,$$
$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i,$$
$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times C^i / C_n^i.$$

式中, C_f^i 为重金属 i 的污染系数; C^i 为沉积物中重金属 i 的实测含量; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值(参照陈邦本等的研究结果^[12]); E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害系数, T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数(Cu、Zn、As、Pb、Cd、Cr、Hg 的毒性响应系数分别为 5, 1, 10, 5, 30, 2, 40); RI 为多种重金属的潜在生态风险危害指数.重金属污染评价指标(C_f^i 、 E_r^i 、 RI)及其与污染程度和潜在生态危害程度的关系见表 1.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量的时空分布特征

Fe、Mn、Al 的水合(氢)氧化物是沉积物中重要的无机胶体,如针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)、水铝矿和水锰矿

(γ -MnOOH)等,可以通过吸附、共沉淀等作用影响沉积物中的重金属含量^[14].从表2可以看出,Fe、Mn、Al作为重要的地球化学元素,含量十分丰富. Fe、Mn、Al的含量在春、秋季之间均无显著差异($P>0.05$),不同断面(A~F)和不同潮带(H、M、L)之间也无显著性差异($P>0.05$).此外,Fe、Mn、Al在春、秋两季含量的变异系数均小于10%,说明这3种金属在整个研究区的时空分布差异很小.

春、秋两季7种重金属平均含量的大小顺序均为 $Zn>Pb>As>Cu>Cr>Cd>Hg$,Cr、Hg的平均含量均明显低于背景值,Zn略低于背景值,Cu略高于背景值,而As、Pb、Cd的平均含量均明显高于背景值. As在春、秋两季均有部分站点的含量高于国家海洋沉积物一类标准(GB 18668-2002),其他6种重金属的最大含量均低于国家海洋沉积物一类标准(GB 18668-2002).重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr的含量在春、秋季之间无显著差异($P>0.05$),而As($P<0.05$)和Hg($P<0.01$)的含量在两个季节之间存在显著性差异,秋季的平均含量高于春季.各重金属的变异系数大小顺序为春季 $Hg>Cd>Cr>Zn>As>Cu>Pb$,秋季 $Cd>Cr>Hg>Zn>Cu>As>Pb$.

表2 研究区表层沉积物重金属含量的统计特征及背景值

Table 2 Summary statistics of heavy metal contents and the background values in surface sediment of the study area

时间	统计量	重金属含量/ $\times 10^{-6}$									
		Cu	Mn	Zn	Fe	As	Pb	Al	Cd	Cr	Hg
春季	平均值	15.87	434.57	44.79	14 905.89	19.16	32.37	33 171.17	0.142	14.00	0.001 62
	中值	15.62	436.91	42.87	15 055.27	19.23	32.06	33 549.86	0.151	12.83	0.001 25
	标准差	1.63	31.73	7.47	818.06	2.31	1.78	1 356.47	0.073	6.86	0.001 49
	最小值	13.14	369.88	34.38	13 367.37	14.08	30.11	29 982.27	0.003	6.61	0.000 15
	最大值	19.21	489.94	63.37	16 512.89	22.63	36.55	34 638.95	0.252	36.61	0.004 72
	变异系数/%	10.27	7.30	16.68	5.50	12.06	5.50	4.10	51.41	49.00	91.98
秋季	平均值	17.13	440.81	46.38	15 307.98	20.94	32.21	33 716.08	0.123	14.43	0.006 13
	中值	16.35	435.51	42.85	15 169.21	20.42	31.86	34 165.63	0.127	12.67	0.006 40
	标准差	3.00	30.87	9.47	742.41	2.35	1.55	1 200.34	0.057	6.38	0.001 50
	最小值	13.96	390.00	37.24	14 201.51	16.59	30.76	30 373.21	0.015	7.79	0.003 72
	最大值	24.31	506.73	67.40	17 092.21	25.91	37.72	35 708.64	0.211	37.13	0.009 56
	变异系数/%	17.51	7.00	20.42	4.83	11.22	4.81	3.56	46.34	44.21	24.47
背景值 ^[12]		15.02	—	47.15	—	7.38	11.40	—	0.042	60.11	0.023 00
国家沉积物一类标准		35.00	—	150.00	—	20.00	60.00	—	0.500	80.00	0.200 00

注:“—”表示无数据.

Cu的含量在各断面间无显著性差异($P>0.05$),从北向南(A、B、C、D、E、F)6条断面的平均含量分别为 16.96×10^{-6} 、 17.12×10^{-6} 、 16.27×10^{-6} 、 17.49×10^{-6} 、 16.46×10^{-6} 、 14.73×10^{-6} .在潮带间,Cu的含量存在显著差异($P<0.01$),高、中、低潮带的平均含量分别为 18.18×10^{-6} 、 15.19×10^{-6} 、 16.14×10^{-6} ,中潮带含量最低.

Zn的含量在各断面间无显著性差异($P>0.05$),自北向南各断面的平均含量分别为 42.84×10^{-6} 、 47.54×10^{-6} 、 51.69×10^{-6} 、 43.34×10^{-6} 、 44.57×10^{-6} 、 43.53×10^{-6} ;在潮带之间,其含量有显著性差异($P<0.05$),高、中、低潮带的平均含量分别为 49.44×10^{-6} 、 40.70×10^{-6} 、 46.61×10^{-6} ,中潮带的含量最低.

As的含量在潮带和断面之间都没有显著性差异($P>0.05$),高、中、低潮带的平均含量分别为 20.22×10^{-6} 、 19.23×10^{-6} 、 20.71×10^{-6} ,自北向南各断面的平均含量分别为 20.49×10^{-6} 、 21.73×10^{-6} 、 20.16×10^{-6} 、 20.21×10^{-6} 、 20.36×10^{-6} 、 17.36×10^{-6} .

Pb的含量在潮带和断面之间均没有显著性差异($P>0.05$),从高到低各潮带的平均含量分别为 32.58×10^{-6} 、 31.54×10^{-6} 、 32.75×10^{-6} ,自北向南各断面的平均含量分别为 33.17×10^{-6} 、 32.56×10^{-6} 、 32.79×10^{-6} 、 32.29×10^{-6} 、 31.35×10^{-6} 、 31.59×10^{-6} .

Cd在各潮带间无显著性差异($P>0.05$),而在各断面间存在显著性差异($P<0.05$),从高到低各潮带的平均含量分别为 0.160×10^{-6} 、 0.123×10^{-6} 、 0.114×10^{-6} ,自北向南各断面的平均含量分别为 0.180×10^{-6} 、 0.173×10^{-6} 、 0.143×10^{-6} 、 0.132×10^{-6} 、 0.077×10^{-6} 、 0.089×10^{-6} ,条子泥地区的含量相对较高,而东凌地区的相对较低.

Cr和Hg在各潮带和断面之间同样无显著性差异($P>0.05$),Cr和Hg的高、中、低潮带的平均含量分

别为 15.11×10^{-6} 、 12.42×10^{-6} 、 15.11×10^{-6} 和 $0.003\ 66\times10^{-6}$ 、 $0.003\ 95\times10^{-6}$ 、 $0.003\ 98\times10^{-6}$, 从北向南各断面的平均含量分别为 11.25×10^{-6} 、 14.43×10^{-6} 、 13.26×10^{-6} 、 12.39×10^{-6} 、 19.95×10^{-6} 、 14.01×10^{-6} 和 $0.002\ 15\times10^{-6}$ 、 $0.002\ 61\times10^{-6}$ 、 $0.003\ 30\times10^{-6}$ 、 $0.004\ 09\times10^{-6}$ 、 $0.004\ 99\times10^{-6}$ 、 $0.006\ 06\times10^{-6}$.

与国内其它滨海湿地相比(表 3), 江苏南部沿海潮间带表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Cd、Cr、Hg 的含量整体处于较低水平, Pb 的含量整体上与其他地区相当, 而 As 的含量略高. 与路震等^[9]对如东小洋口地区的研究相比, Zn 的含量基本一致, 而其他金属的含量略有差异.

表 3 与国内其他滨岸地区重金属元素的平均含量比较

Table 3 The average content of heavy metals of study area compared with other coastal regions in China

地区	重金属含量/ $\times10^{-6}$							文献来源
	Cu	Zn	As	Pb	Cd	Cr	Hg	
渤海	14.92	73.68	11.34	21.94	0.45	31.73	—	文献[15]
胶州湾	28.20	60.10	9.21	23.60	0.03	78.50	—	文献[16]
海州湾	39.01	297.48	—	83.95	1.57	111.30	—	文献[17]
盐城北部	24.98	71.84	15.94	22.54	0.25	63.63	0.100	文献[10]
东台条子泥	17.04	45.19	21.11	32.86	0.18	12.84	0.002	本研究
如东小洋口	16.88	47.51	20.19	32.54	0.14	12.83	0.004	本研究
如东小洋口	10.55	47.79	6.58	16.04	0.07	58.84	0.013	文献[9]
如东东凌	15.59	44.05	18.86	31.47	0.08	16.98	0.006	本研究
崇明东滩	38.00	81.00	—	27.00	0.22	71.00	—	文献[18]
长江口	30.70	94.30	—	27.30	0.26	78.90	—	文献[8]
罗源湾	23.24	111.21	—	36.25	—	77.82	—	文献[9]
泉州湾	71.40	179.60	21.70	67.70	0.59	82.00	0.400	文献[19]
北海	12.76	69.81	9.08	16.58	0.22	—	0.070	文献[20]

注:“—”表示无数据.

2.2 重金属污染的风险评价

2.2.1 地质累积指数法

从表 4 可以看出, 研究区表层沉积物中各重金属元素的污染程度从强到弱依次为: 春季 $Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr>Hg$, 秋季 $Cd>As>Pb>Cu>Zn>Hg>Cr$. Zn、Cr、Hg 属于无污染; Cu 总体上属于无污染, 仅在秋季 AH(0.02)和 EH(0.11)站位达到轻度污染; As 总体上属于轻度污染, 仅在春季 BL(1.03)站位, 秋季 AH(1.23)、BM(1.04)、BL(1.12)、CL(1.07)和 DH(1.05)站位达到偏中度污染; Pb 总体上属于轻度污染, 仅在春季 AH(1.04)、CL(1.10)和 FL(1.04)站位, 秋季 AH(1.14)站位达到偏中度污染; Cd 是研究区内相对污染较重的重金属元素, 春季总体上为偏中度污染, 秋季为轻度污染.

表 4 研究区表层沉积物中重金属的 I_{geo} 及其级别

Table 4 The I_{geo} value of heavy metals and their pollution level in surface sediment of the study area

时间	统计量	Cu		Zn		As		Pb		Cd		Cr		Hg	
		I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别	I_{geo}	级别
春	平均值	-0.51	0	-0.66	0	0.79	1	0.92	1	1.17	2	-2.69	0	-4.41	0
	最小值	-0.78	0	-1.04	0	0.35	1	0.82	1	-4.39	0	-3.77	0	-7.85	0
	最大值	-0.23	0	-0.16	0	1.03	2	1.10	2	2.00	2	-1.30	0	-2.87	0
秋	平均值	-0.40	0	-0.61	0	0.92	1	0.91	1	0.97	1	-1.28	0	-1.85	0
	最小值	-0.69	0	-0.93	0	0.58	1	0.85	1	-2.07	0	-2.64	0	-2.49	0
	最大值	0.11	1	-0.07	0	1.23	2	1.14	2	1.74	2	-3.53	0	-3.21	0

2.2.2 潜在生态危害指数法

从表 5 可以看出, 研究区表层沉积物中 7 种重金属的 C_p^i 污染程度为: 春季 $Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr>Hg$, 秋季 $Cd>As>Pb>Cu>Zn>Hg>Cr$, 与地质累积指数的评价结果一致. 总体来看, Cd 春季达到重污染程度, 秋季为中等污染程度; Cu、As、Pb 达到中等污染程度; Zn、Cr、Hg 为低污染程度.

表 5 研究区表层沉积物中重金属污染系数 C_f^i
Table 5 Pollution index of heavy metals in surface sediment of the study area

时间	统计量	Cu	Zn	As	Pb	Cd	Cr	Hg
春	平均值	1.06	0.95	2.60	2.84	3.38	0.23	0.07
	最小值	0.87	0.73	1.91	2.64	0.07	0.11	0.01
	最大值	1.28	1.34	3.07	3.21	6.00	0.61	0.21
秋	平均值	1.14	0.98	2.84	2.83	2.93	0.24	0.27
	最小值	0.93	0.79	2.25	2.70	0.36	0.13	0.16
	最大值	1.62	1.43	3.51	3.31	5.02	0.62	0.42

重金属单因子潜在生态危害程度(表 6)为:春季 $Cd>As>Pb>Cu>Hg>Zn>Cr$, 秋季 $Cd>As>Pb>Hg>Cu>Zn>Cr$. Cd 整体上处于较重生态危害等级,其中春季的 BH(180.16)、CH(164.84)、DM(167.08) 站位达到重生态危害程度. 春、秋季 As、Pb、Cu、Hg、Zn、Cr 均处于低生态危害等级, E_r^i 值均低于 40. 在整个研究区域内,春、秋两季的总潜在生态危害程度均处于中等生态危害等级.

表 6 研究区表层沉积物重金属污染的潜在生态危害参数(E_r^i)和危害指数(RI)
Table 6 The potential ecological risk parameter and risk index of heavy metals in surface sediment of the study area

时间	统计量	E_r^i							RI
		Cu	Zn	As	Pb	Cd	Cr	Hg	
春	平均值	5.28	0.95	25.96	14.20	101.43	0.47	2.82	156.18
	最小值	4.37	0.73	19.08	13.21	2.14	0.22	0.26	40.12
	最大值	6.39	1.34	30.66	16.03	180.00	1.22	8.21	252.86
秋	平均值	5.70	0.98	28.37	14.13	87.86	0.48	10.66	152.58
	最小值	4.65	0.79	22.48	13.49	10.71	0.26	6.47	59.39
	最大值	8.09	1.43	35.11	16.54	150.71	1.24	16.63	237.29

2.3 重金属来源分析

基于 Pearson 相关分析获得春、秋季 10 种金属元素间的相关系数,见表 7. 可以看出,春季表层沉积物中 Mn 和 Fe 含量分别与 Hg、Pb 含量呈显著正相关,Mn 和 Fe 的氢氧化物或者氧化物成为 Hg 和 Pb 的主要赋存相. 秋季 Mn 和 Cu、Fe 和 Zn 分别呈显著正相关,Mn 的氢氧化物或者氧化物成为 Cu 的主要赋存相,而 Fe 的氢氧化物或者氧化物则可能为 Zn 的主要赋存相.

表 7 研究区表层沉积物中重金属元素相关性分析
Table 7 Results of correlation analysis of heavy metals in surface sediment of study area

元素	季节	Cu	Mn	Zn	Fe	As	Pb	Al	Cd	Cr
Mn	春	0.315								
	秋	0.491 *								
Zn	春	0.301	0.466							
	秋	0.341	0.437							
Fe	春	0.182	0.892 **	0.455						
	秋	0.425	0.878 **	0.490 *						
As	春	0.192	0.030	0.383	0.098					
	秋	0.581 *	0.403	0.408	0.420					
Pb	春	0.630 **	0.669 **	0.186	0.573 *	0.089				
	秋	0.511 *	0.336	0.454	0.432	0.628 **				
Al	春	0.032	-0.047	0.166	0.235	0.104	0.043			
	秋	-0.102	-0.361	-0.233	-0.405	-0.128	-0.047			
Cd	春	0.462	-0.271	-0.131	-0.433	0.294	0.267	0.102		
	秋	0.227	-0.112	0.129	-0.240	0.308	0.228	0.048		
Cr	春	-0.092	0.368	0.466	0.404	0.065	-0.146	-0.126	-0.377	
	秋	0.182	0.234	0.105	0.276	0.416	0.273	-0.130	0.113	
Hg	春	-0.543 *	0.482 *	0.018	0.503 *	-0.336	-0.107	-0.035	-0.731 **	0.416
	秋	-0.066	0.314	-0.351	0.173	-0.414	-0.489 *	-0.090	-0.328	-0.005

注: ** 表示 $p<0.01$, * 表示 $p<0.05$.

对春、秋两季沉积物金属元素的主成分分析(PCA)结果见表 8. 春季沉积物金属元素的主成分分析提取了 4 个主成分,累计方差为 84.36%. 其中,第 1 主成分 Cu、Cd、Hg 有较高的载荷,而且 Cu、Cd 含量分别与 Hg 含量呈显著相关,说明三者来源相同. 第 2 主成分 Mn、Fe、Pb 具有较高的载荷,且三者之间具有显著的正相关,第 2 主成分主要支配着 Pb 的来源. 第 3 主成分 Zn、As、Cr 的载荷较高,三者之间没有显著相关性,来源不同. 第 4 主成分金属 Al 的载荷较高. 位于研究区中部小洋口的如东沿海经济开发区,拥有规模以上企业 113 家,主导产业为新农药、新医药与新材料,产品类型有有机物中间体(成品)、金属制品、电镀、水处理产品等. 工业废水和废料是 Cu、Cd、Hg 的主要来源^[21-23],结合 3 种金属的工业用途,开发区内与机械制造、电镀和金属制品有关的企业排放的工业废水和废料可能是第 1 主成分 Cu、Cd、Hg 的主要来源. 沉积物中大部分 Pb 来自大气沉降^[24],与石油等化石燃料有关,而交通发达的地方 Pb 的含量也较高^[25],因此,第 2 主成分中 Pb 不仅可能来源于开发区水处理企业(焚烧废渣和化石燃料),还与区域内机动车尾气及渔港船舶的污染排放有关. 第 3 主成分中,As 是化肥和农药的重要成分^[26],开发区农药生产及各种化工企业的废物排放可能是 As 污染的主要来源;有研究表明,Zn 与镀锌工业和机械制造业有关,而 Cr 则大量应用于化工业和镀铬工业^[27],因此,Zn 与开发区内镀锌工业和机械制造业有关,Cr 主要来自开发区的工业颜料生产和镀铬工业的排放. Al 从陆地到海洋的过程相对稳定,通常将其作为海洋沉积物中陆源成分的指标^[28],因此第 4 主成分代表金属元素的自然来源.

表 8 主成分分析的因子载荷和累计方差

Table 8 Factor loading and accumulated variance based upon principal component analysis

元素	春季				秋季		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cu	-0.639	0.599	0.167	-0.084	0.358	0.362	0.532
Mn	0.342	0.878	0.242	-0.073	0.867	0.012	0.338
Zn	0.053	0.302	0.821	0.098	0.519	0.665	-0.043
Fe	0.454	0.778	0.297	0.221	0.903	0.104	0.261
As	-0.394	-0.041	0.693	0.148	0.227	0.583	0.618
Pb	-0.286	0.915	-0.073	0.030	0.246	0.705	0.386
Al	-0.026	0.036	0.075	0.971	-0.571	-0.008	0.028
Cd	-0.878	-0.007	-0.055	0.056	-0.408	0.433	0.396
Cr	0.504	0.060	0.647	-0.268	0.072	-0.065	0.802
Hg	0.931	0.162	-0.062	0.002	0.309	-0.859	0.069
特征值	2.864	2.696	1.764	1.112	2.671	2.351	1.803
方差(%)	28.636	26.962	17.643	11.118	26.711	23.508	18.033
累计方差(%)	28.636	55.599	73.242	84.360	26.711	50.219	68.253

秋季沉积物金属元素提取了 3 个主成分,累计方差为 68.253%. 其中,第 1 主成分 Mn、Fe 具有较高的载荷,二者显著相关,其次是 Al 的载荷;第 2 主成分 Zn、Pb、Hg 具有较高载荷,其中 Pb 和 Hg 呈显著相关,Zn 与 Pb、Hg 来源不同;第 3 主成分 As 和 Cr 的载荷较高,二者相关性不显著,来源不同. 由于 Fe、Mn 作为土壤中的常量元素,一般认为它们不是土壤污染元素^[29],因此,第 1 主成分可代表沉积物中金属污染物的自然来源. 第 2 主成分中 Zn 主要来自于开发区内镀锌工业和机械制造企业的排放,Pb 和 Hg 则主要来自水处理企业、机动车尾气及海港船舶污染的排放. 第 3 主成分 As 来自开发区农药生产及相关的化工企业,Cr 来自工业颜料生产和镀铬工业的排放.

尽管春、秋两季的分析结果略有差异,但均表明重金属主要来源于区域内开发区企业的工业排放、机动车尾气及海港船舶污染的排放. 如何进一步加强对如东沿海经济开发区内企业排放的管理,促进其转型升级,由现有的产业格局向精细化工方向发展,是江苏南部沿海湿地环境保护面临的主要问题.

3 结论

(1)对江苏南部沿海潮间带表层沉积物重金属含量分析表明,春、秋两季 7 种重金属平均含量的大小顺序均为 Zn>Pb>As>Cu>Cr>Cd>Hg. As、Hg 的含量在两季之间存在显著差异,Cu、Zn 的含量在不同潮带间存在显著性差异,Cd 在各断面间存在显著性差异.

(2)基于地质累积指数法对重金属污染程度评价结果显示,春季 Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr>Hg,秋季 Cd>

As>Pb>Cu>Zn>Hg>Cr. Zn、Cr、Hg 属于无污染,Cu 总体属于无污染,As 和 Pb 总体属于轻度污染,Cd 是研究区内相对污染较重的重金属元素,春季总体上为偏中度污染,秋季为轻度污染。

(3) 基于潜在生态危害指数法评价重金属的潜在生态危害程度,结果显示,As、Pb、Cu、Hg、Zn、Cr 均处于低生态危害等级,Cd 整体上处于相对较重生态危害等级;各重金属危害程度为:春季 Cd>As>Pb>Cu>Hg>Zn>Cr,秋季 Cd>As>Pb>Hg>Cu>Zn>Cr。

(4) PCA 结果初步表明,春、秋两季表层沉积物中的重金属主要来源于区域内开发区企业的工业排污、机动车尾气及海港船舶污染的排放。

致谢:课题组赵芳正、杨瑞颖、仲心同参与了样品采集,南京师范大学分析测试中心冯玉英老师和杨红晓老师在样品测定过程中给予了耐心指导,国家地球系统科学数据共享平台-长江三角洲科学数据中心(<http://nnu.geodata.cn:8008/>)提供制图数据支撑,谨此深表感谢。

[参考文献]

- [1] GAO X, CHEN C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. Water research, 2012, 46(6): 1 901-1 911.
- [2] RIBEIRO G S, RIZZO A, SÁNCHEZ R, et al. Heavy metal inputs in Northern Patagonia lakes from short sediment core analysis[J]. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 2005, 265(3): 481-493.
- [3] 高文华, 杜永芬, 王丹丹, 等. 福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3 097-3 103.
- [4] BARTER M. Shorebirds of the Yellow Sea: importance, threats and conservation status[M]. The Netherlands: Wetlands International, 2002.
- [5] BAI Q, CHEN J, CHEN Z, et al. Identification of coastal wetlands of international importance for waterbirds: a review of China Coastal Waterbird Surveys 2005-2013[J]. Avian research, 2015, 6(1): 1-16.
- [6] HUANG P, LI T, LI A, et al. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of the North Yellow Sea[J]. Continental shelf research, 2014, 73: 1-13.
- [7] JIANG X, TENG A, XU W, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea[J]. Marine pollution bulletin, 2014, 83(1): 366-375.
- [8] ZHANG W, FENG H, CHANG J, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes[J]. Environmental pollution, 2009, 157(5): 1 533-1 543.
- [9] 路震, 张徐. 如东潮间带表层沉积物重金属含量及其污染评价[J]. 江西农业学报, 2015, 27(5): 116-119.
- [10] 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.
- [11] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.
- [12] 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(自然科学版), 1985(3): 54-60.
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1 001.
- [14] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾天津段潮间带沉积物柱状样重金属污染特征[J]. 环境科学, 2006, 27(2): 268-273.
- [15] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1 676-1 684.
- [16] 李玉, 俞志明, 曹西华, 等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(6): 580-589.
- [17] ZHANG R, ZHOU L, ZHANG F, et al. Heavy metal pollution and assessment in the tidal flat sediments of Haizhou Bay, China.[J]. Marine pollution bulletin, 2013, 74(1): 403-412.
- [18] 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 等. 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2 368-2 375.
- [19] YU R L, YUAN X, ZHAO Y H, et al. Heavy metal pollution in intertidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. Journal of environmental sciences, 2008, 20(6): 664-669.
- [20] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. 海洋科学进展, 2008,

- 26(4):471-477.
- [21] 任伯帜,刘斌全,郑谐,等. 锰矿区土-水界面污染流中重金属来源分析[J]. 环境污染与防治,2014,36(12):6-10.
- [22] 王应飞,高建华,石勇,等. 鸭绿江河口西岸潮间带柱状沉积物中重金属的分布特征及其对流域变化的响应[J]. 地球化学,2014,43(1):64-76.
- [23] 邱孟龙,李芳柏,王琦,等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报,2015,31(2):298-305.
- [24] COCHRAN J K, HIRSCHBERG D J, WANG J, et al. Atmospheric deposition of metals to coastal waters(Long Island Sound, New York U.S.A.):evidence from saltmarsh deposits[J]. Estuarine coastal and shelf science,1998,46(4):503-522.
- [25] SAEEDI M, HOSSEINZADEH M, JAMSHIDI A, et al. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils,Iran.[J]. Environmental monitoring and assessment,2009,151(151):231-241.
- [26] 李玉,冯志华,李谷祺,等. 连云港近岸海域沉积物中重金属污染来源及生态评价[J]. 海洋与湖沼,2010,41(6):829-833.
- [27] 刘珊珊,张勇,龚淑云,等. 长江三角洲经济区海域沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013(5):63-71.
- [28] 顾家伟. 尼罗河三角洲泻湖沉积物重金属时空分布特征及其环境意义[D]. 上海:华东师范大学,2011.
- [29] 李德文. 环境监测对土壤重金属污染防治的影响[J]. 中国科技博览,2015(26):340-340.

[责任编辑:黄 敏]