DOI:10.19789/j.1004-9398.2018.05.014

江苏海岸沉积物重金属空间分布与污染性评价再分析*

沈 芳[1] 毛龙江[1]** 邓晓茜[1] 孙晨蕾[1] 朱紫容[1] 丁 敏[2]

(1. 南京信息工程大学海洋科学学院,江苏 南京 210044; 2. 泰山学院地理与旅游学院,山东 泰安 271000)

摘 要

本文集成近几年江苏海岸沉积物重金属数据,建立数据库,并全面分析江苏海岸沉积物重金属空间分布特征,然后运用潜在生态风险指数法和地累积指数法对沉积物中 7 种重金属(Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As)进行了污染生态风险评估,运用多变量分析方法进行了重金属来源识别. 结果表明: 7 种重金属元素空间分布不均,重金属污染区域主要集中在河口区、盐城原生湿地、贝类养殖区和少数港口,如王港、启东港、新洋港和洋口港. Cr、Zn、Pb、Cu、Cd 和 As 污染表现为轻度 - 中度污染,Hg 污染表现为中度 - 高度污染. 多变量来源分析结果表明,重金属来源可分为两类: 第一类包括 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As,来源于化工、海港交通、农业和海水养殖; 第二类包括 Cu 和 Cd,来源于汽车制造业、机械制造业等工业活动.

关键词: 重金属,沉积物,污染性评价,空间分布,江苏海岸.

中图分类号: X55

0 引 言

随着经济的快速发展,城市化进程不断加快、沿海港口吞吐量不断加大,人类对海洋资源的开发利用进一步加强. 人类活动所引起的海洋环境污染日趋严重,导致海岸带环境承载压力也在不断加大. 海岸带污染主要来源于陆地污染物排放、海上水产养殖和大气沉降等,目前影响我国海岸带地区的主要污染物有营养盐、石油类物质和重金属[1]. 其中,重金属是具有潜在生态危害的污染物,沉降到沉积物里的重金属元素富集在沉积物内,最终通过食物链在人体内吸收和富集,从而对人体健康产生危害[2].

前人对江苏省海岸带区域的重金属污染已开展过相关研究,并取得了一些进展[2-6]. 但是,已有成果都主要集中在江苏海岸的局部区域,缺乏对江苏省海岸带重金属污染的整体认识. 因此,本文收集近几年江苏海岸沉积物重金属数据,以期分析江苏海岸沉积物重金属空间分布特征,然后运用潜在生态风险指数法和地累积指数评价方法对 7 种重金属进行污染生态风险评估,使用多变量分析方法对沉积物重金属的可能来源进行鉴别.

1 研究区概况

江苏海岸带北起苏鲁交界的绣针河口,南至长江口,海岸线全长 954 km,占全国大陆海岸线的 5.3%. 沿海地区包括连云港、盐城、南通 3 个省辖市,这 3 个省辖市内有海岸线的县市有 14 个[3-6](图 1). 江苏省水网密布,沿海水系发达,有临洪河、埒子河、灌河、射阳河等多条河流入海. 这些河流是沿海地区重金属污染输入的重要通道. 临洪河是海州湾的主要入海河流,临洪河携带大量重金属污染物入海[7]; 埒子河口附近园区发展化工、造纸和制药等这些产业产生的部分污水通过入海口排放[8]; 灌河流经淮安、盐城和连云港,最终汇入黄海,附近的产业园区产生的污染物部分通过河道排污[9]; 射阳河是里下河地区最重要的入海通道,临港工业区和农业经济开发区产生的污染物通过射阳河排放入海[10]. 江苏沿海还分布了 15 个主要港口,承担了江苏省大量煤炭、原油、铁

收稿日期: 2017-12-01

* 2017 年江苏省大学生创新创业训练计划项目; 2016 年江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目和国家自然科学基金项目(41771218, 41402319).

**通信作者: mlj1214@163.com.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矿石等能源、原材料的进口,外贸进出口和货物运输. 依托港口码头,临港产业迅速发展,如冶金和石化企业、电力企业以及水泥和造纸企业[11],这些产业的兴起和发展,必然对江苏海岸环境造成一定的压力.

2　数据来源

全面收集近几年已发表的江苏海岸沉积物重金属数据,对数据资料经过筛选、分析和综合,得到江苏海岸沉积物重金属含量数据(表 1),地理分布见图 1. 基于数据完整性原则,对收集的江苏海岸沉积物重金属数据进行筛选; 然后根据时间、研究方法和研究区域对筛选得到的数据进行分析,得到江苏海岸沉积物重金属含量数据. 若同一区域使用相同的研究方法,则保留时间较近的数据,剔除时间久远的数据,若同一区域在相近时间使用相同的方法研究,则取它们的平均值. 其中,临洪河口的重金属含量由临洪河口南侧潮滩、临洪河口北侧潮滩和近河口河道 3 个样点的重金属含量取平均值得到; 盐城原生湿地的重金属含量由该原生湿地的芦苇滩、盐蒿滩、米草滩、泥螺光滩和青蛤光滩 5 个滩面的重金属含量取平均值得到; 王港的重金属含量由大丰王港海岸带的农田、养殖鱼塘、米草滩和河口光滩 4 个样点的重金属含量取平均值得到.

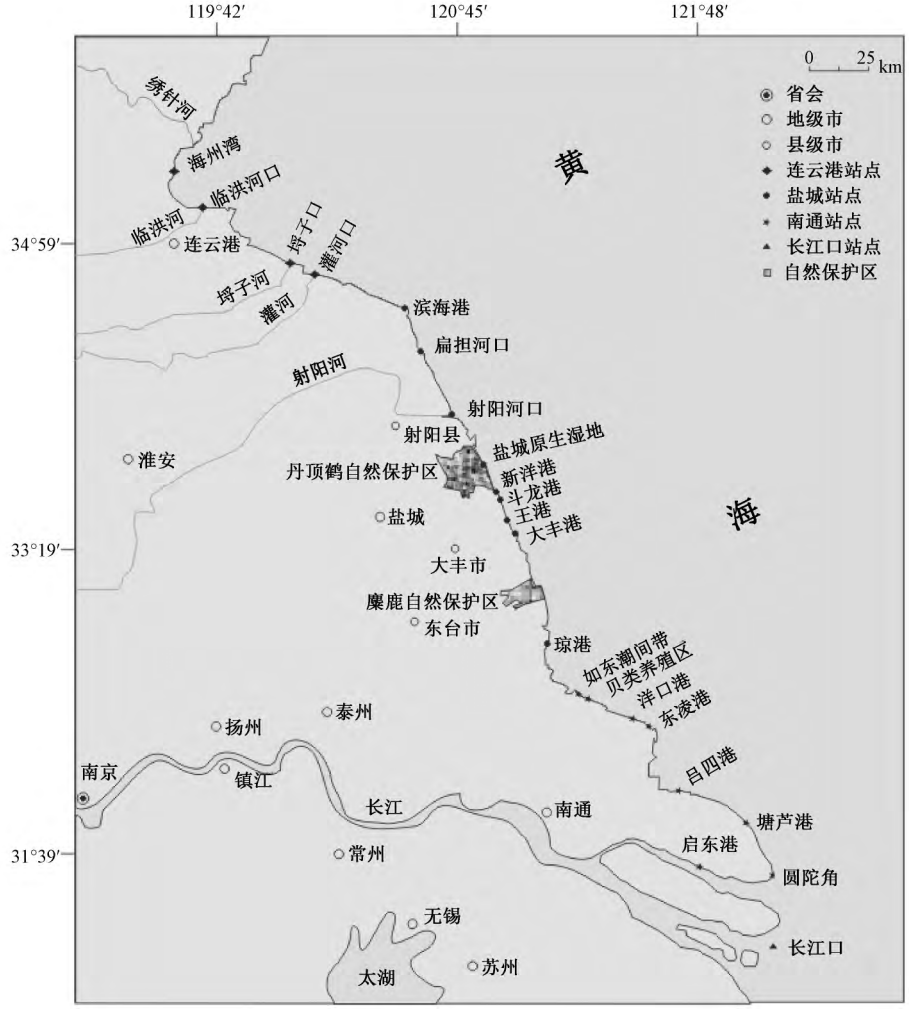


图 1　江苏省海岸带

3　研究方法

3.1　重金属污染评价方法

采用潜在生态风险指数法和地累积指数法评价江苏海岸沉积物重金属污染特征. 以江苏沿海滨海土壤元素 Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As 的含量作为背景值. 潜在生态风险指数法和地累积指数法的污染等级评价标准见表 2.

3.1.1　潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(potential ecological risk

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 江苏海岸表层沉积物中重金属含量分布

地区		重金属含量/(mg·kg^{-1})							数据来源
		Cr	Zn	Pb	Cu	Cd	Hg	As	
连云港	海州湾	74.18	73.29	18.23	19.41	0.17	—	6.62	2014 [12]
	临洪河口	70.53	76.83	30.64	31.19	0.25	0.13	11.53	2011 [7]
	埒子口	65.92	39.91	18.50	11.97	0.11	0.01	8.43	2014 [8]
	灌河口	70.10	161.00	29.70	34.40	0.32	0.11	17.80	2013 [13]
	平均值	71.60	103.71	26.19	28.33	0.25	0.12	11.98	
盐城	滨海港	41.31	41.37	20.01	10.80	0.09	0.01	4.36	2012 [14]
	扁担河口	63.36	79.97	21.67	27.58	0.08	0.01	12.24	2012 [14]
	射阳河口	44.14	56.02	21.04	14.05	0.05	0.02	17.04	2012 [14]
	盐城原生湿地	69.20	71.40	23.60	102.40	3.00	0.01	10.00	2010 [15]
	新洋港	52.83	68.95	65.83	20.84	—	—	—	2007 [16]
	斗龙港	52.15	58.91	37.51	21.46	0.10	0.02	11.79	2012 [14]
	王港	54.41	76.22	93.64	35.11	—	—	—	2007 [17]
	大丰港	74.50	48.7	14.70	10.30	0.10	—	12.10	2014 [18]
	琼港	48.78	53.32	18.71	18.27	0.09	0.01	10.14	2012 [14]
	平均值	55.98	60.74	31.36	30.00	0.50	0.01	11.10	
南通	如东潮间带	58.84	47.79	16.04	10.55	0.07	0.01	6.58	2015 [19]
	贝类养殖区	—	441.64	38.41	22.08	0.38	0.124	18.17	2012 [20]
	洋口港	44.24	144.78	16.21	10.26	0.22	0.02	6.14	2012 [14]
	东凌港	46.69	85.44	18.17	15.16	0.19	0.02	7.43	2012 [14]
	吕四港	50.00	83.30	15.82	11.37	0.21	0.04	5.26	2012 [14]
	塘芦港	61.07	73.06	16.52	9.56	0.21	0.02	8.40	2012 [14]
	圆陀角	46.92	58.61	14.83	11.03	0.00	0.03	5.26	2012 [14]
	启东港	84.30	111.34	36.82	42.79	0.19	0.08	16.65	2012 [14]
	平均值	55.54	130.75	21.60	16.60	0.18	0.04	9.24	
长江口	长江口	91.55	91.20	28.96	30.23	0.23	0.03	13.47	2013 [21]
江苏沿海滨海土壤背景值		60.28	64.68	24.7	15.84	0.37	0.03	8.59	1987 [23]

表 2 污染指数和生态风险水平评价标准 [23]

E_r^i	E_R	潜在生态风险程度	I_{geo}	污染程度
<40	<95	轻度	<0	清洁
40~80	95~190	中度	0~1	轻度
80~160	190~380	高	1~2	偏中度
160~320	≥380	很高	2~3	中度
≥320		极高	3~4	偏重度
			4~5	重度
			≥5	严重

index)根据重金属的潜在毒性和环境的反应来评估沉积物中重金属的污染程度,是一种相对简便而有效的方法[23].计算公式为:

$$C_r^i = C_f^i / C_n^i, E_r^i = T_r^i \times C_r^i, E_R = \sum E_r^i,$$

式中: C_r^i 是重金属元素 i 的单项污染系数; C_f^i 和 C_n^i 分别是重金属元素 i 的实测值和背景值; T_r^i 是重金属元素 i 的毒性响应系数; E_r^i 是重金属元素 i 的潜在生态风险指数; E_R 是多种重金属元素综合潜在生态风险指数[23]. Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As 的 T_r^i 值分别为:2、1、5、5、30、40、10[23].

3.1.2 地累积指数法

地累积指数(geoaccumulation index),又称为 Muller 指数,考虑了人类活动和自然地质过程造成的对背景值的影响,是一种定量评价重金属污染程度的常用方法[24].计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{kB_n}\right),$$

式中: C_n 和 B_n 分别是重金属元素 n 的实测值和背景值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,取值为 1.5; I_{geo} 是地累积指数.

3.2 多变量分析

相关性分析、主成分分析和聚类分析相结合的多变量分析方法是识别重金属来源的有效手段[25-26].相关性分析根据重金属元素之间的相关性来判断区域沉积物中重金属的来源是否相同[27];主成分分析能够反映各变量之间的关系,可以用来评价沉积物重金属污染的可能来源[28];聚类分析用以分析区域沉积物中重金属元素是否具有相同的来源或地球化学过程[29-30].使用软件 SPSS13.0 对数据进行相关性分析、主成分分析(PCA)、聚类分析(CA),并用 KMO 值(Kaiser-Meyer-Olin)和 Bartlett 球形检验对主成分分析进行验证.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　结　果

4.1　重金属含量空间分布

江苏海岸表层沉积物中重金属含量分布见表 1. 重金属元素(Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As) 含量整体分布特征为: Cr 最大值出现在长江口(91.55 mg/kg) ,其次为连云港(平均值为 71.60 mg/kg) . Zn 含量由大到小排列为: 南通 > 连云港 > 长江口 > 盐城. 南通 Pb 含量低于背景值,Cu 含量略高于背景值,其他三地 Pb 含量和 Cu 含量均高于背景值. 盐城 Cd 含量高于背景值,而 Hg 含量低于背景值. 各地 As 含量均高于背景值,其中长江口最高.

从各个站点的 7 种重金属分布来看,Cr 含量以海州湾沿岸的 4 个站点和长江口相对较高,整体表现为南北两侧较高、中部较低的空间分布趋势; Zn 以贝类养殖区含量最大,为 441.64 mg/kg,埒子口含量最小,为 39.91 mg/kg,较大值分布在南通沿岸,包括启东港、洋口港; Pb 含量以王港最高(93.64 mg/kg) ,大丰港最低(14.70 mg/kg) ; Cu 含量最高出现在盐城原生湿地(102.40 mg/kg) ,最低出现在塘芦港(9.56 mg/kg) ; Cd 含量最大值出现在盐城原生湿地(3.00 mg/kg) ,其次为贝类养殖区、灌河口,圆陀角附近最低; Hg 最大值出现在临洪河口,其值为 0.13 mg/kg,其次在贝类养殖区和灌河口,最小值在滨海港、扁担河口、盐城原生湿地和琼港,总体表现为北部高、中部相对南部低的分布特征; As 含量最高分布在贝类养殖区(18.17 mg/kg) ,最低为滨海港(4.36 mg/kg) .

4.2　重金属污染评价

4.1.1　潜在生态风险指数法

江苏海岸沉积物重金属元素潜在生态风险指数见图 2. 重金属在江苏海岸 22 个地区的潜在生态风险程度由大到小为: Hg > Cd > As > Cu > Pb > Zn > Cr,其中重金属 Cd 和 Hg 为主要生态风险贡献因子. 除重金属 Cd 和 Hg 之外,其余 5 种重金属元素的潜在生态风险指数 E_r^i 均小于 40,属于轻度潜在生态风险. 重金属元素 Cd 在盐城原生湿地引起高度潜在生态风险,潜在生态风险指数 E_r^i 高达 247. 重金属元素 Hg 在临洪河口、灌河口、贝类养殖区、吕四港、启东港和长江口的潜在生态风险指数均大于 40,存在中度及以上潜在生态风险,其中除吕四港外,其余四个地区均属于高度潜在风险(图 2) .

江苏海岸省辖市(长江口) 沉积物重金属元素潜在生态风险指数见图 3,重金属 Cr、Zn、Pb、Cu、As 这 5 种元素在连云港、盐城、南通和长江口四个地区的潜在生态风险指数均低于 40,属于轻度潜在生态风险. 连云港、盐城、南通和长江口均只有一种重

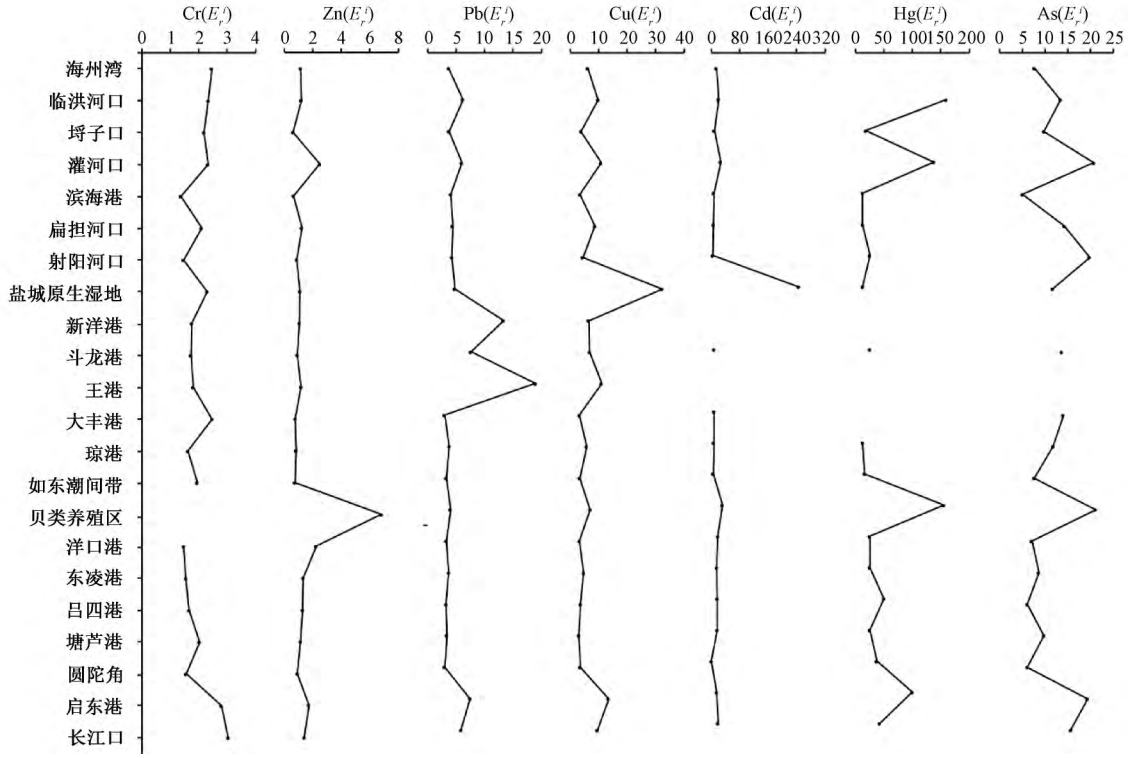


图 2　江苏海岸沉积物重金属元素潜在生态风险指数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

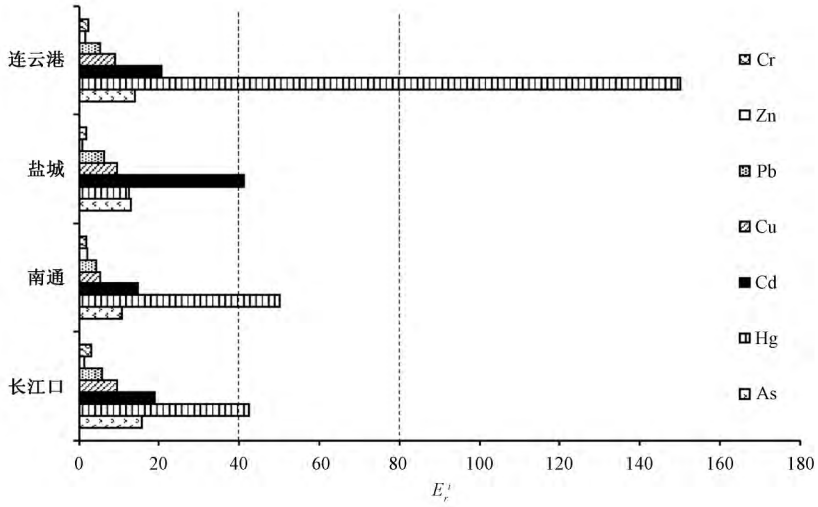


图3 江苏海岸沉积物重金属元素潜在生态风险指数

金属元素的潜在生态风险为轻度以上,盐城为重金属 Cd 污染,其余是三地都为 Hg 重金属污染. 其中,盐城 Cd 元素的值为 41.1,存在中度潜在生态风险,而连云港 Hg 元素的值高达 150.0,存在高度潜在生态风险,在南通和长江口重金属 Hg 引起中度潜在生态风险. Hg 潜在生态风险指数为 12.5 ~ 150.0,属于轻度 - 高度潜在生态风险.

江苏海岸沉积物重金属元素综合潜在生态风险指数如图 4. 连云港、盐城、南通和长江口的综合潜在生态风险指数 E_R 分别为 202.72、85.13、89.03 和 96.94,为轻度 - 高度,平均值为 118.45,总体处于中度生态风险状况. 盐城和南通两地存在轻度潜在生态风险,长江口存在中度潜在生态风险,连云港则存在高度潜在生态风险(图 4).

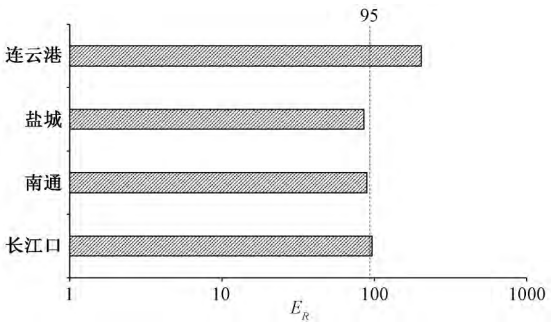


图4 江苏海岸沉积物重金属元素综合潜在生态风险指数

4.1.2 地累积指数法

江苏海岸沉积物重金属元素地累积指数结果见图 5,临洪河口受 Cu 元素的轻度污染和 Hg 元素的偏中度污染;灌河口受重金属 Zn、Cu 和 As 的轻度污染以及 Hg 的偏中度污染;扁担河口和射阳河口分别受 Cu 和 As 的轻度污染;新洋港和斗龙港受 Pb 的轻度污染,而王港重金属污染为 Pb 偏中度污染和 Cu 轻度污染;贝类养殖区受重金属 Zn、Hg 和 As 的污染程度分别为中度、偏中度和轻度;洋口港受 Zn 的轻度污染;启东港为轻度污染,4 种重金属元素为 Zn、Cu、Hg 和 As;长江口受 Cr、Cu 和 As 轻度污染. 盐城原生湿地的重金属污染程度最为严重,Cu 和 Cd 均为中度污染.

江苏海岸沉积物重金属元素地累积指数见图 6,重金属 Pb 和 Cd 在连云港、盐城、南通、长江口四个地区的地累积指数 I_{geo} 都小于 0,没有引起重金属污染,Cr、Zn、Cu、Hg 和 As 五种重金属的污染程度为轻度 - 偏中度. 重金属元素 Zn、Cu 和 Hg 对连云港地区造成污染,其中 Zn 和 Cu 的 I_{geo} 值介于 0 ~ 1 之间,属于轻度污染,Hg 元素的 I_{geo} 为 1.32,属于偏中度污染;盐城 Cu 元素(I_{geo} 值为 0.34)和南通 Zn 元素(I_{geo} 值为 0.43)均介于 0 ~ 1 之间,为轻度污染;长江口重金属 Cr、Cu 和 As 元素都为轻度污染.

4.3 多变量分析

4.2.1 相关性分析

江苏海岸重金属变量之间的 Pearson 相关矩阵见表 3,江苏海岸沉积物重金属 Cu 和 Cd 的相关系数为 0.908,属于显著极强正相关;Zn 和 Hg,Pb 与 Hg、As 之间的相关系数都介于 0.600 ~ 0.800,分别为 0.639、0.657 和 0.721,都属于显著强相关;As 与 Cr、Zn、Hg 之间的相关系数分别为 0.490、0.498 和 0.590,都介于 0.400 ~ 0.600 之间,存在显著中等程度相关;Cr 和 Cu、As 的相关系数是 0.401 和 0.490,

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

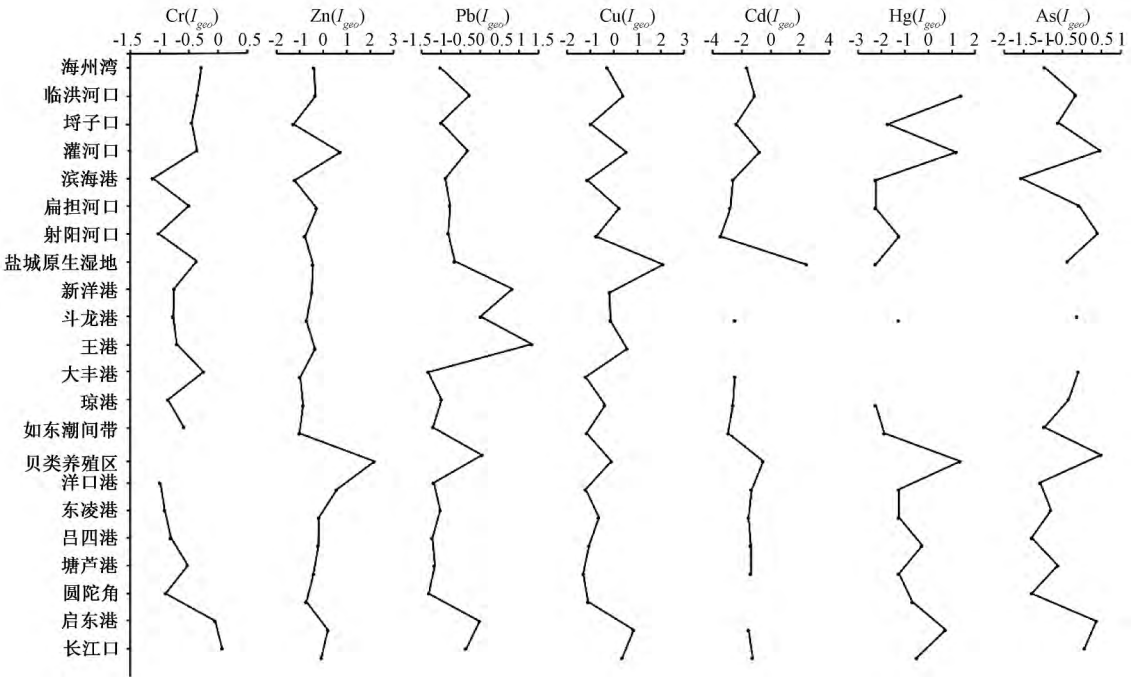


图 5　江苏海岸沉积物重金属元素地累积指数

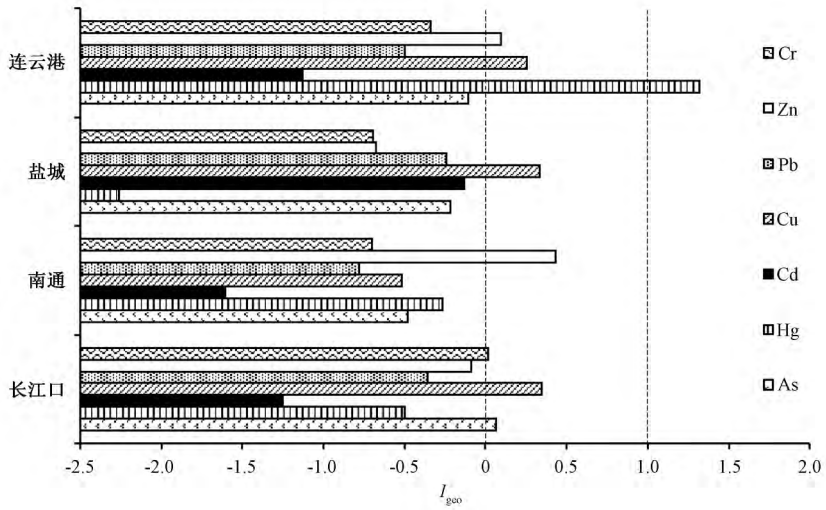


图 6　江苏海岸沉积物重金属元素地累积指数

表 3　江苏海岸重金属变量之间的 Pearson 相关矩阵

	Cr	Zn	Pb	Cu	Cd	Hg
Zn	0.220					
Pb	0.020	0.146				
Cu	0.401	0.054	0.235			
Cd	0.189	0.046	0.099	0.908**		
Hg	0.464	0.639**	0.657**	0.119	−0.071	
As	0.490*	0.498*	0.721**	0.289	0.036	0.590**

注: **在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关; * 在 $P < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关

存在中等程度相关.

4.2.2　主成分分析

江苏海岸沉积物重金属变量的载荷矩阵见表 4, KMO 值和 Bartlett 分别为 0.613 (> 0.5) 和 70.441, 显著性水平为 0.000, 表明数据可用. 第一主成分和第二主成分的特征值分别为 3.728 和 1.752. 第一主成分和第二主成分的变量解释分别为 46.833% 和 25.024%, 累加解释方差占总解释方差的 71.857%. 两个主成分可以反映整个数据的大部分信息. 江苏海岸沉积物重金属元素主成分载荷因子见图 7, 第一主成分包括 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As 五种

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 江苏海岸沉积物重金属变量的载荷矩阵

重金属元素	成分		共同度
	成分 1	成分 2	
Cr	0.796	0.021	1
Zn	0.550	−0.304	1
Pb	0.816	−0.188	1
Cu	0.672	0.728	1
Cd	0.366	0.903	1
Hg	0.684	−0.465	1
As	0.789	−0.251	1
特征值	3.728	1.752	
变量解释/%	46.833	25.024	
累加/%	46.833	71.857	

重金属元素,第二主成分包括 Cu 和 Cd 两种重金属元素.

4.2.3 聚类分析

聚类分析采用最远邻元素的聚类方法,测量组建采用 Pearson 相关性. 由图 8 重金属元素聚类分析树状图可见,基于重金属元素之间的相关性,将 7 种重金属分为两类: 第一类为 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As 五种重金属; 第二类为 Cu 和 Cd 两种重金属.

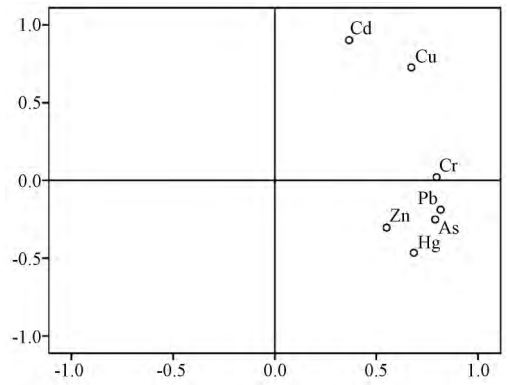


图 7 江苏海岸沉积物重金属元素主成分载荷因子

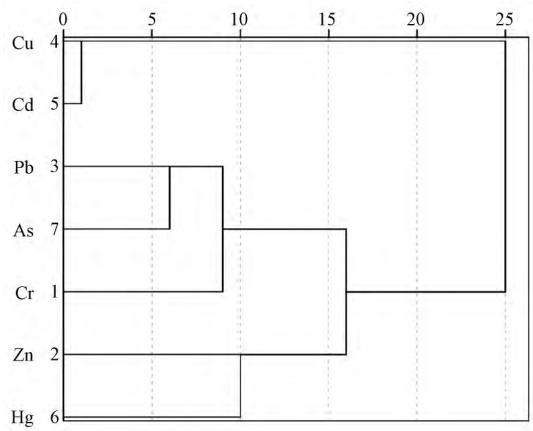


图 8 重金属元素聚类分析树状图

5 讨 论

5.1 重金属空间分布特征的的成因分析

7 种重金属元素(Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As)在江苏海岸带分布不均. 潜在生态风险指数法是考虑了不同重金属的生物毒性对重金属污染程度的影响,而地累积指数法主要反映人类活动和自然成岩作用等外源影响[25]. 然而,重金属富集往往是多种因素共同导致的结果. 因此,进行综合潜在生态风险指数法和地累积指数评价多种方法综合分析重金属的污染程度会使结果更合理[25].

综合潜在生态风险指数和地累积指数研究结果表明: 相对江苏海岸其它区域,连云港区域的重金属污染最严重,存在高度综合潜在风险. 这可能是由于重金属 Hg 元素在临洪河口和灌河口富集造成偏中度污染,同时临洪河口的轻度 Cu 污染和灌河口的 Zn、Cu、As 轻度污染也加剧了连云港区域的重金属污染. 盐城范围内的重金属污染程度属于中度 − 轻度污染,综合潜在生态指数最低. 盐城原生湿地大量重金属元素富集是造成盐城区域重金属污染的主要原因,从污染评价结果来看,盐城原生湿地的重金属 Cu 和 Cd 均表现为中度污染. 其次是由于王港的偏中度 Pb 污染和轻度 Cu 污染,以及扁担河口的轻度 Cu 污染和射阳河口的轻度 As 污染引起. 南通海岸的重金属污染主要是由贝类养殖区和港口引起,贝类养殖区的污染较为严重,重金属元素 Hg 偏中度污染和重金属 Zn 中度污染,其次是启东港、新洋港和洋口港存在轻度重金属污染,这使得南通海岸的重金属污染在一定程度上加剧. 长江口受到重金属 Cr、Cu 和 As 的轻度污染,但并未引起潜在生态风险. 综上分析可以看出,江苏海岸重金属污染主要是由于重金属在河口区、盐城原生湿地、贝类养殖区和港口富集所造成.

5.2 重金属来源识别

从评价结果可以看出,7 种重金属在江苏海岸不同地段有不同程度的污染,这也表明江苏海岸污染物有不同来源. 多变量分析方法如相关性分析、主成分分析和聚类分析结果表明江苏海岸表层沉积物重金属可以分为两类: 第一类包括 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As,第二类有 Cu 和 Cd.

由多变量分析结果可以看出,重金属 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As 具有相似的来源. 重金属 Cr 元素 I_{geo} 值在长江口仅为 0.018,其他区域均小于 0,表明江苏

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

海岸仅有长江口为轻度或无污染. Zn 污染存在于灌河口、贝类养殖区、洋口港和启东港,其中贝类养殖区的污染最严重. Zn 可用于镀锌、黄铜和青铜、制造合金和干电池等相关的化工工业. 有研究表明: 东沿海工业园区排污是造成贝类养殖区 Zn 污染的主要原因[20],灌河沿岸化工园区的排污使得该海域以 Zn 等为主的重金属污染不断加重[13]; 洋口港的临港工业区内有台湾中石化、中国中石化、中石油等大型化工企业; 启东港附近 5 km 范围内就有 69 家化工公司,这些化工企业污染物的排放导致 Zn 污染. Pb 的主要来源有石油工业、汽车尾气排放和蓄电池的极板等[31]. 另外,Pb 也是燃油的主要成分,与石油燃烧有关[32]. 江苏海岸 Pb 污染只发生在三个港口如王港、新洋港和斗龙港. 王港、新洋港和斗龙港作为地区性港口,海上贸易繁荣,船舶来往频繁. 因此海港交通、航运是 Pb 污染的可能来源. 金属 Hg 具有挥发性,主要通过大气进入海洋,其主要应用于生产工业用化学药物和电子工业[33]. 江苏海岸中 Hg 污染最严重的是临洪河口,其次是贝类养殖区和灌河口. 因此,Hg 污染可能来源于农业污染. 金属 As 与其化合物被运用在农药、除草剂、杀虫剂和多种合金中. 其中 As 是农药和化肥的主要成分,农业生产活动中使用含有元素 As 的农药、化肥的残留物会通过地表径流进入海洋[34]. As 污染出现在灌河口、射阳河口、贝类养殖区、启东港和长江口,其中贝类养殖区的污染最为严重,因为贝类养殖区在养殖过程中会使用大量化肥; 灌河口的污染物主要来源于水产养殖和农业化肥[35]. 据统计,2014 年江苏省农药制剂用量 7.95 万吨[36]. 因此,第一类重金属(Cr、Zn、Pb、Hg 和 As) 可能来源于化工、海港交通、农业和海水养殖.

重金属 Cu 和 Cd 来源具有一致性,可能来源于工业活动. Cu 是一种有色金属,主要应用于机械制造、电气、轻工、建筑工业等领域,其中在电子、电气工业中的应用最多[37]. Cu 污染主要集中在盐城原生湿地,临洪河口、灌河口、扁担河口、王港、启东港和长江口均为轻度污染,可能主要来自工业活动. Cd 主要来源于以 Cd 为原料的工业[38]. 重金属 Cd 在工业上的应用主要有电镀和制造合金、充电电池、颜料、杀虫杀菌剂、油漆等[39]. 综上所述,第二类重金属(Cu 和 Cd) 可能来源于汽车制造业、机械制造业等工业活动.

6　结　论

通过对江苏海岸沉积物重金属数据的收集和整理,进行了空间分布分析和污染性评价,得到以下结论:

(1) 7 种重金属元素 Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As 在江苏海岸空间上分布不均匀,污染区域主要集中在河口区、盐城原生湿地、贝类养殖区和少数港口,如王港、启东港、新洋港和洋口港.

(2) 潜在生态风险指数和地累积指数两种评价结果基本一致,重金属 Cr、Zn、Pb、Cu、Cd 和 As 污染属于轻度 - 中度污染,Hg 污染主要分布在河口,表现为中度 - 高度污染.

(3) 多变量分析结果表明江苏海岸表层沉积物中重金属 Cr、Zn、Pb、Cu、Cd、Hg、As 有不同的来源,可以分为两类,第一类包括重金属 Cr、Zn、Pb、Hg 和 As,来源于化工、海港交通、农业和海水养殖; 第二类包括重金属 Cu 和 Cd,来源于汽车制造业、机械制造业等工业活动.

参　考　文　献

[1] 吕剑,骆永明,章海波. 中国海岸带污染问题与防治措施[J]. 中国科学院院刊,2016(10):1175 - 1181.

[2] Davutluoglu O I, Seckin G, Ersu C B, et al. Heavy metal content and distribution in surface sediments of the Seyhan River, Turkey[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(9): 2250 - 2259.

[3] 戴亚南,彭检贵. 江苏省海岸带生态脆弱区循环经济发展模式[J]. 水土保持通报,2007(6):216 - 219.

[4] 唐得昊,邹欣庆,刘兴健. 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例[J]. 生态学报,2013(4):1240 - 1250.

[5] 谢蓉蓉,逄勇,屈健,等. 江苏省沿海区域水环境容量计算研究[J]. 海洋通报,2012(2):214 - 222.

[6] 乔磊,袁旭音,李阿梅. 江苏海岸带的重金属特征及生态风险分析[J]. 农业环境科学学报,2005(S1): 178 - 182.

[7] 刘志勇,潘少明,殷勇,等. 临洪河口现代沉积环境及重金属元素的分布特征[J]. 地球化学,2010(5): 456 - 468.

[8] 刘佰琼,徐敏. 埒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(5):581 - 587.

[9] 季健,张晓燕,康冬梅. 基于“一带一路”战略的江苏灌河流域水环境现状分析[J]. 环境保护与循环经济,2015,35

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(10):45 –48.
[10] 高燕云. 射阳河口现代沉积速率及其重金属污染评价[D]. 南京:南京师范大学,2011.
[11] 顾晓丽. 江苏沿江沿海港口网络规划研究[D]. 南京:河海大学,2007.
[12] 李飞,徐敏. 江苏港口海域沉积物重金属污染状况[J]. 长江流域资源与环境,2014(9):1275 –1282.
[13] 宋晓娟,贺心然,陈斌林,等. 灌河口海域表层沉积物中重金属的污染变化及潜在生态危害[J]. 海洋科学,2013(5):25 –32.
[14] 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.
[15] 左平,赵善道,赵雪琴,等. 江苏盐城原生盐沼湿地表层沉积物中的重金属分布特征[J]. 海洋通报,2010(4):372 –377.
[16] 于文金,邹欣庆. 江苏新洋港潮滩湿地重金属元素 Pb、Cu、Zn、Cr 分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报,2007,27(12):2088 –2094.
[17] 王晓辉,邹欣庆,于文金. 江苏王港海岸带沉积物重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报,2007(2): 784 –789.
[18] 李飞,徐敏. 江苏港口海域沉积物重金属污染状况[J]. 长江流域资源与环境,2014(9):1275 –1282.
[19] 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(5):116 –119.
[20] 李磊,王云龙,蒋玫,等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. 环境科学,2012,33(8):2607 –2613.
[21] 张晓琳. 长江口、黄河口及邻近海域重金属的分布特征及影响因素研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
[22] 夏增禄. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京:气象出版社,1987:57.
[23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980,14(8):975 –1001.
[24] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal,1969, 2(108):108 –118.
[25] 何东明,王晓飞,陈丽君,等. 基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 126 –131.
[26] 李致春,桂和荣,陈松. 宿州市护城河沉积物重金属污染程度及来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015(4): 559 –565.
[27] Luo Y, Xu L, Rysz M, et al. Occurrence and transport of tetracycline, sulfonamide, quinolone, and macrolide antibiotics in the Haihe River Basin, China.[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(5): 1827 –1833.
[28] 蔡龙炎. 基于主成分分析法的泉州湾表层沉积物中重金属污染可能来源分析[J]. 台湾海峡, 2010(3): 325 –331.
[29] 李杰,王英辉,刘枝刚,等. 漓江桂林市区段沉积物重金属环境地球化学特征[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 456 –463.
[30] Zaharescu D G, Hooda P S, Soler A P, et al. Trace metals and their source in the catchment of the high altitude lake Respomuso, central Pyrenees[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(11): 3546 –3553.
[31] 黄河. 淮河中下游河道沉积物重金属元素分布特征研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2005.
[32] Saeedi M,Hosseinzadeh M,Jamshidi A,et al. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils,Iran[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009,151(1 –4):231.
[33] Cheung K C,Poon B H,Lan C Y,et al. Assessment of metal and nutrient concentrations in river water and sediment collected from the cities in the Pearl River Delta, South China.[J]. Chemosphere,2003,52(9):1431.
[34] 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.
[35] 李婧慧,吕赢,花卫华,等. 江苏灌河口污染源调查[J]. 水产养殖,2014,35(7):25 –29.
[36] 周汝琴,王甫同,唐义军,等. 盐城市现代农业产业发展情况调研及发展对策[J]. 江苏农业科学,2017, 45(1):270 –275.
[37] 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.
[38] 鲁如坤,熊礼明,时正元. 关于土壤—作物生态系统中镉的研究[J]. 土壤,1992,24(3):19 –22.
[39] 赵雪琴,赵善道,左平,等. 江苏盐城原生湿地表层沉积物中的重金属污染评价[J]. 环境保护科学,2010(1):64 –68.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Reanalysis of Distribution Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in Coastal Sediments of Jiangsu Province

Shen Fang[1]　Mao Longjiang[1]　Deng Xiaoqian[1]　Sun Chenlei[1]　Zhu Zirong[1]　Ding Min[2]

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Sciences&Technology, Nanjing Jiangsu　210044;
2. Department of Geography and Tourism, Taishan University, Taian Shandong　271000)

Abstract

In this study, the data of heavy metals in coastal sediments of Jiangsu are collected to establish a database from the published papers in recent years. Then, the spatial distribution characteristics are analyzed based on the database. The contamination degree of 7 heavy metals is evaluated by adopting the methods of geoaccumulation index and potential ecological risk index, and the metal source identification of 7 heavy metals is conducted by using multivariate analysis. The results show the spatial distribution is uneven, the areas polluted by heavy metals are mainly concentrated in estuaries, Yancheng native wetland, shellfish culture area and a few ports such as Wanggang, Qidonggang, Xinyanggang and Yangkougang. The level of pollution of Cr, Zn, Pb, Cu, Cd and As is mild-to-moderate, while the level of pollution of Hg is moderate-to-high. The results of multivariate analysis shows 7 heavy metals can be divided into two groups. Cr, Zn, Pb, Hg and As belong to the first class of heavy metals, which come from the pollution of the chemical industry, harbor traffic, agriculture and mariculture; the second group is Cu and Cd, which are derived from the pollution of the automotive industry, machine building industry and other industrial activities.

Key words: heavy metals, sediment, pollution assessment, spatial distribution, Jiangsu coast.

作者简介　沈芳(1997 -),女,浙江嘉兴市人,本科生,主要从事海洋沉积环境等方面的研究. E-mail: sf3amy@163.com.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net