

辽东湾西北部海域沉积物重金属含量分析及污染评价

段一明^{1,2}, 张戈¹, 于大涛²

(1. 辽宁师范大学 大连 116029; 2. 国家海洋环境监测中心 大连 116029)

摘要:为了解辽东湾西北部海域沉积物重金属的分布特征及污染程度,文章基于 2017 年 3 月辽东湾西北部 12 个采样站位表层沉积物 7 种重金属含量(Hg、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、As)的测定,对辽东湾西北部海洋沉积物中的重金属进行了研究。SPSS 用于沉积物中重金属含量统计分析并通过地累积指数和潜在生态风险指数的方法评估重金属污染和生态危害的程度。结果显示:(1)辽东湾西北部沉积物重金属含量平均值只有 Cd 符合海洋沉积物一类标准,变异程度由高到低依次为 Hg、Cd、As、Zn、Pb、Cu,汞和镉受人为来源控制最高;(2)地累积指数法评价结果表明重金属元素污染程度由大到小依次为 Hg、Cd、Zn、As、Cu、Pb;(3)潜在生态风险指数法评价结果表明,单因子潜在生态风险系数由高到低依次为 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr, Hg 具有很强的生态风险,综合生态风险指数在 233.77 ~ 4 785.15,平均 1 224.12,处于很强的生态风险水平。文章揭示了辽东湾西北部海域沉积物重金属的分布特征,为该海域的生态环境建设提供依据。

关键词:辽东湾;沉积物;重金属;污染评价;生态环境

中图分类号:P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2020)01-0039-07

Heavy Metal Content Analysis and Pollution Evaluation in the Northwest Area of Liaodong Bay

DUAN Yiming^{1,2}, ZHANG Ge¹, YU Datao²

(1. Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116029, China)

Abstract: In order to understand the distribution characteristics and pollution degree of heavy metals in sediments, heavy metals in marine sediments in the northwest Liaodong bay were studied based on the determination of 7 heavy metals(Hg, Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, As) in surface sediments at 12 sampling stations in the northwest of Liaodong bay in March 2017. SPSS was used for the statistical analysis of heavy metal content in sediments and to evaluate the degree of heavy metal pollution and ecological harm through the method of ground accumulation index and potential ecological risk index. The results showed that : (1) only Cd in the average heavy metal content of

收稿日期:2019-07-08;修订日期:2019-12-19

基金项目:辽宁省社会科学规划基金项目(L16CGL009);国家海洋局海域管理技术重点实验室基金(201611)。

作者简介:段一明,硕士研究生,研究方向为自然地理

通信作者:于大涛,工程师,硕士,研究方向为海洋环境监测、海洋生态环境保护与治理

sediments in the northwest of Liaodong bay met the standard of marine sediments, and the variation degree from high to low was Hg, Cd, As, Zn, Pb, Cu, the mercury and cadmium were the most controlled by human sources. (2) the evaluation results of the cumulative index method showed that the pollution degree of heavy metal elements from high to low was Hg, Cd, Zn, As, Cu, Pb. (3) the evaluation results of potential ecological risk index method, which showed that the potential ecological risk coefficient of single factor from high to low was Hg, Cd, As, Cu, Pb, Zn, Cr. Hg has strong ecological risk, and the comprehensive ecological risk index was between 233.77 and 4785.15, with an average of 1224.12, which was at a strong ecological risk level. The paper revealed the distribution characteristics of heavy metals in sediments in the northwest of Liaodong bay, which provided a basis for the ecological environment construction in this area.

Key words: Liaodong bay, Sediments, Heavy metals, Pollution evaluation, Ecological environment

0 引言

密度大于 4.5 g/cm^3 的金属被称为重金属, 包括 Pb、Cr、Hg 等化学元素^[1]。1950 年, 日本发现了由 Hg、Cd 引起的水俣病、痛痛病等环境灾害, 从而开始了对重金属的研究^[2]。持久性、蓄积性、生物毒性是重金属的三大特点^[3-5]。另外, 重金属之所以被认为是沿岸地区重要的污染物之一就是因为它的特点是来源广泛、不易降解、残留时间长, 更具危害的是它极易容易在食物链中积累和富集^[6-7]。易蓄积的特点使得重金属被海洋生物吸收进入食物链后沿着食物链富集, 变为更具有毒性的金属有机化合物^[8], 并最终进入人体后影响人类的健康^[9-10]。基于此, 对海洋沉积物的研究具有很重要的现实意义。重金属进入海洋的方式多种多样, 主要有大气沉降、沿岸地区排污以及地表河流等, 并通过吸附、絮凝、沉降等物理化学作用以颗粒形态转移到沉积物, 使沉积物成为重金属主要的存储库^[11-14]。海洋水体在不断变化, 使海洋沉积物在不断地进行着复杂的物理、化学和生物过程, 造成沉积物中的重金属重新进入海水中, 对海洋水环境再次造成了污染^[15-16]。本研究主要运用地累积指数法^[17-18]和潜在生态风险评价法^[18-20]对辽东湾西北部海洋沉积物重金属污染进行评价研究。

辽东湾作为渤海海域三大海湾之一, 它是我国重要的渔业基地, 也是东北唯一的沿海经济区。辽东湾西北部是我国东北地区工业的主要聚集地, 经济的发展和源源不断的陆源污染物注入, 对海洋生

态环境造成了巨大的危害。近年来, 由于沿海城市的快速发展, 使得渤海海域的污染越来越严重。并且由于辽东湾有多条河流的注入以及特殊的海洋沉积特征, 使得此区域成为重金属污染严重的区域。关于辽东湾重金属的研究前人已经做了大量工作, 但多是将辽东湾作为一个整体去研究, 对于某一小区域的研究较少。为积极响应《渤海综合治理攻坚战行动计划》, 本研究利用 2017 年 3 月在辽东湾西北部海域所测数据, 研究海洋沉积物重金属的含量和分布特征并进行污染评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2017 年 3 月, 将辽东湾西北部的 12 个站位采集样品(图 1), 放入干净的塑料袋中, 在低温环境下密封保存。将采集回来的样品在 45°C 烘箱内烘干用玛瑙研钵碾细过 80 目尼龙筛。重金属测定方法严格遵守《海洋监测规范第 5 部分: 沉积物分析》(GB17378.5—2007)中规定测定。

1.2 研究方法

1.2.1 数据处理

采样站位图用 ArcGIS10.5 制作, 使用 Excel 和数学软件 SPSS22.0 分析各个站位的重金属含量的平均值等参数, 研究其异常特征, 在此基础上分析辽东湾西北部重金属元素的分布特征。

1.2.2 地累积指数法

1969 年, 德国科学家 MÜLLER G^[21]提出一种定量指标法——地累积指数法 (I_{geo}), 用于评估重

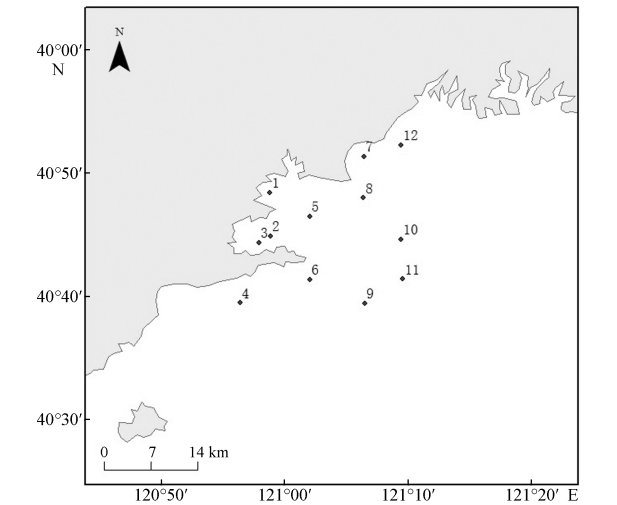


图 1 站位分布

金属污染程度。计算公式为：

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n}$$

式中： C_n 为实测元素 n 含量； B_n 为该元素地球化学背景值； 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($K=1.5$)^[22-24]。 B_n 选用了中国浅海沉积物重金属丰度平均值含量，地累积指数的分级标准见表 1。

表 1 地累积指数与污染等级

重金属	中国浅海沉积物 重金属背景值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	I_{geo}	污染 等级	污染 程度
Hg	0.025	$I_{geo} \leq 0$	0	无
Cu	15.00	$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度
Pb	17.00	$1 < I_{geo} \leq 2$	2	偏中度
Cd	0.065	$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度
Zn	65.00	$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强
Cr	61.00	$4 < I_{geo} \leq 5$	5	严重
As	7.70	$5 < I_{geo} \leq 6$	6	极严重

1.2.3 潜在生态危害指数法

1980 年,瑞典科学家 HÅKANSON L^[25] 提出了潜在生态危害指数法来评价沉积物中重金属的危害^[26]。并指出重金属的生态环境效应与毒理学有关,这反映了重金属的生态危害^[16,27]。计算公式为：

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

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

$$C_f^i = \frac{C_0^i}{C_n^i}$$

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 为某一重金属独立系数,采用 Hakanson 制定的标准化重金属毒理系数,即 Hg、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、As 重金属的毒理系数为 40、5、5、30、1、2、10^[16]; 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生态风险综合指数分级见表 2。

表 2 潜在生态风险指数评价等级划分^[5]

E_r^i	单因子潜在生态 风险程度	RI	总潜在生态 风险程度
<40	轻微	<150	轻微
40~80	中等	150~300	中等
80~160	强	300~600	强
160~320	很强	≥ 600	很强
≥ 320	极强		

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属含量统计分析

测定结果表明(表 3),在辽东湾西北部海洋沉积物重金属研究中只有 Cd 符合一类沉积物标准,说明辽东湾沉积环境不容乐观。并且重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 均超过了中国浅海背景值,分别是中国浅海的 4.38 倍、1.35 倍、4.55 倍、6.44 倍、0.86 倍、23.79 倍、4.44 倍,说明这几种元素在沉积物中有一定的富集。

Cu 的含量符合二类沉积物标准,从各个站位来看,只有 4 号站位符合一类沉积物标准,除 2 号、3 号站位为三类沉积物外其余站位均为二类沉积物;Pb 属于一类沉积物,总体状况较好;Zn 属于二类沉积物,但是 1 号、2 号、3 号站位均属于劣三类;Cd 属于一类沉积物,但从单个站位看,2 号、3 号站位却属于劣三类;Cr 为一类沉积物,从单个站位上看只有 7 号、8 号站位属于二类沉积物,其余均为一类沉积物;沉积物中 Hg 属于三类沉积物,除 1 号、2 号、3 号站位为劣三类外,其余均符合二类标准;As 的

含量是 $(6.84\sim121)\times10^{-6}$,平均值为 34.16×10^{-6} 属二类沉积物,同样除 1 号、2 号、3 号站位含量较高外,其余站位均符合二类沉积物标准。并且辽东湾西北部沉积物重金属含量的高值区出现在葫芦岛

附近海域,这与李小月^[28]、张现荣等^[29]、孙钦帮等^[30]、胡宁静^[31]的研究结果一致。Hg 和 Cd 超标严重,这与林曼曼等^[32]、许艳等^[33]的研究结论一致。

表 3 辽东湾西北部海域表层沉积物重金属含量统计

元素	表层沉积物重金属含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$			变异系数/%	海洋沉积物标准/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$		
	变化范围	均值	标准差		一类	二类	三类
Cu	35~132	65.76	27.40	41.67	35.0	100.0	200.0
Pb	15.2~70.2	27.03	15.73	58.21	60.0	130.0	250.0
Zn	80.5~922	295.44	300.90	101.85	150.0	350.0	600.0
Cd	0.08~1.71	0.42	0.54	130.15	0.5	1.5	5.0
Cr	31.9~80.3	51.62	16.75	32.45	80.0	150.0	270.0
Hg	0.077~2.41	0.59	0.80	134.93	0.2	0.5	1.0
As	6.84~121	34.16	41.10	120.31	20.0	65.0	93.0

重金属的变异程度反映了其空间分布的差异程度,一般情况下,小于 15%的变异系数称为小变异,15%~36%之间称为中等变异,高度变异即大于 36%^[34-35]。结果表明,Cr 是中度变异,其余 6 种重金属元素均为高度变异,说明这 6 种重金属元素分布极不均匀,可能受到人为来源的控制。且变异程度由高到低依次为 Hg、Cd、Cr、As、Zn、Pb、Cu,说明汞和镉受人为来源控制最高。

2.2 沉积物重金属空间分布特征

辽东湾西北部海洋沉积物重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 有相似的空间分布,主要表现为高值区主要在葫芦岛北港工业与城镇用海区。并且呈现出由近岸向外海沉积物重金属的含量表现为逐渐减少的趋势。另外,Cu 在锦州湾与小笔架山附近含量也较高。Pb、Zn、Cd、Hg、As 在锦州湾与小笔架山附近的含量较高。Cr 的分布特征则与其他几种重金属不同,表现为在锦州湾和葫芦岛的含量较低,在小笔架山的附近含量较高。

2.3 辽东湾西北部海域沉积物重金属污染评价

2.3.1 地累积指数法

研究区域地累积指数法评价结果见表 4。7 种海洋沉积物重金属中除 Cr 为无污染外,其余 6 种重金属均被污染,且污染程度由高到低依次为 Hg、Cd、Zn、As、Cu、Pb。Hg 污染最严重,污染程

度从中度到极重度不等。且偏中度污染占到了 58%,强污染占 17%,严重污染占 8%,并且极严重占到了 17%。Cd 污染程度为无污染到严重,绝大部分为轻度污染,占到了 58%,中度、强、严重、极严重污染均占比 8%。Zn 也同样是轻度污染居多,为 33%,强度污染占到了 17%。As 的污染程度为轻度到强污染,从各个站位来看,轻度污染和强度污染均占 17%,偏中度和中度污染占比为 8%。Cu 的污染程度为轻度到中度污染,但是 Cu 的污染范围最广,偏中度污染占到了 66%,轻度和中度污染占 17%。

表 4 辽东湾西北部海域表层沉积物重金属地累积指数

元素	<i>Igeo</i>			污染程度
	最大值	最小值	平均值	
Cu	2.55	0.64	1.55	轻度—中度
Pb	1.23	-0.98	-0.15	无一偏中度
Zn	3.24	-0.28	1.60	无一强
Cd	4.13	-0.29	2.10	无一严重
Cr	-0.15	-1.50	-0.80	无
Hg	6.01	1.04	3.99	偏中度—极严重
As	3.39	-0.76	1.56	轻度—强

2.3.2 潜在生态风险法评价

潜在生态风险指数如表 5 所示。辽东湾西北部

海域沉积物重金属单因子生态风险指数由高到低依次为 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr。因此,Hg 为最大潜在生态风险因素,Hg 污染处于极强生态风险水平,并且极强生态风险水平占到了 42%,很强占比 33%,强生态风险水平占 25%。Cd 污染次于 Hg 污染,属于很强生态风险水平,但是很强生态风险水平的站位只占 8%,绝大部分(58%)属于中等生

态风险水平,极强生态风险水平占 16%,强生态风险和若生态风险水平各占 8%。As 的平均值是 44.37,属中等生态风险水平,但所有站位中轻微生态风险水平占多数,达到了 75%,其余的 25%属于强生态风险水平。Cu、Pb、Zn 和 Cr 的潜在生态风险系数为 22.92、6.76、4.55、1.72,潜在生态风险系数均低于 40,所以都属于轻微生态风险水平。

表 5 研究区沉积物重金属的 E_r^i 和 RI

站位	E_r^i							RI	分级
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As		
1	16.33	8.40	9.54	198.46	1.33	1 696.00	88.70	2 018.77	很强
2	37.67	17.55	14.18	701.54	1.06	3 856.00	157.14	4 785.15	很强
3	44.00	11.93	13.03	789.23	1.08	3 456.00	150.65	4 465.91	很强
4	11.67	6.28	1.24	143.08	1.08	123.20	8.88	295.42	中等
5	20.93	4.28	4.35	36.92	1.34	678.40	34.55	780.77	很强
6	13.93	4.33	1.31	60.00	2.06	142.40	9.74	233.77	中等
7	18.67	5.83	2.71	55.38	2.68	547.20	18.96	651.42	很强
8	16.23	5.13	1.82	60.00	2.71	228.80	12.21	326.89	强
9	18.20	4.28	1.42	69.23	2.00	156.80	10.47	262.39	中等
10	20.00	4.85	1.83	69.23	1.51	198.40	13.25	309.06	强
11	21.53	3.80	1.44	64.62	1.89	169.60	11.39	274.27	中等
12	23.87	4.45	1.68	69.23	1.91	168.00	16.49	285.63	中等
平均	21.92	6.76	4.55	193.08	1.72	951.73	44.37	1 224.12	很强

重金属综合生态风险指数在 233.77~4 785.15,平均 1 224.12,总体处于很强的生态风险水平。表明辽东湾西北部的海洋沉积物重金属污染很严重。1 号、2 号和 3 号站位的 Hg 和 Cd 的贡献较高,RI 分别为 2 018.77、4 785.15、4 465.91,都在 600 以上,有很强的生态风险。5 号和 7 号站位 Hg 贡献较高,RI 值也均在 600 以上,所以也有很强的生态风险。8 号和 10 号站位生态破坏程度较强,其余站位处于中等水平。

蓝先洪等^[36]在 2016 年的研究中表明,锦州湾污染水平极高的重金属为 As、Cd、Zn,生态风险也处于较高水平,符合本研究结果。这表明,近年来 Cd 等重金属在我国沿岸水域有严重蓄积。有强大的生物累积性和生物毒性的 Cd 元素,其快速增长

的趋势对海洋动植物以及人类健康构成严重危害,因此必须加强对 Cd 的监测,以预防其可能造成的生态危机^[39]。辽东湾西北部生态风险较高的区域主要集中于葫芦附近海域,这与前人的研究结果一致。自从振兴东北以来,葫芦岛就作为重要的工业区,工业企业尤其是锌厂排放的含有重金属的废水造成葫芦岛重金属污染严重。另外辽东湾西北部海域周边有众多河流入海,重金属在河口区域沉积也是重金属沉积的一个原因。除了 Cr 外,其他重金属的含量分布特征都有由近岸向外海逐渐减少的趋势。

辽东湾西北部海域沉积物中重金属从河口或工业区向外的分布趋势导致了不同海域生态风险的差异。近岸经济活动区引起的海洋沉积物生态

风险较高,而远海的海洋生态风险较低,这也是锦州湾地区重金属生态风险较高的原因。这也可能是因为研究区重金属的生态风险主要来自近岸和内陆河流的经济活动。因此,应该调整近海企业发展模式,严格控制河口和河流的污染物排放,对于降低重金属导致的生态风险至关重要。

3 结论

(1)辽东湾西北部近岸海域表层沉积物重金属总体状况较差,平均含量达到国家一类海洋沉积物质量标准的只有 Cd。根据重金属的变异系数可知,除 Cr 为中度变异外,其余的 6 种重金属元素均为高度变异,且变异程度由高到低依次为 Hg、Cd、As、Zn、Pb、Cu。这说明这 6 种重金属元素的分布极不均匀,离散性很强。

(2)根据地累积指数法评价结果,辽东湾西北部海洋沉积物重金属污染水平由高到低依次为 Hg、Cd、Zn、As、Cu、Pb。其中 Hg 污染是最严重的,污染程度为偏中度到极严重。

(3)潜在生态风险评价结果表明,重金属单因子生态风险指数由高到低依次为 Hg、Cd、As、Cu、Pb、Zn、Cr。因此, Hg 和 Cd 是最具有生态危险的重金属元素。重金属综合生态风险指数在 233.77~4 785.15,平均 1 224.12,总体处于很强的生态风险水平,辽东湾西北部的海洋沉积物重金属污染很严重。1 号、2 号、3 号站位的 RI 是最高的,有很强的生态风险。

参考文献

[1] 罗绪强,陈光美,张桂玲,等.茂兰喀斯特森林特种植物叶片重金属含量特征[J].广东农业科学,2014,41(21):149-152.

[2] 陈静生,周家义.中国水环境重金属研究[M].北京:中国环境科学出版社,1992.

[3] BODIN N,GOM-KA R N',KA S,et al.Assessment of trace metal contamination in mangrove ecosystems from Senegal, West Africa[J].Chemosphere,2013,90(2):150-157.

[4] BASTAMI K D,BAGHERi H,KHEIRABADI V,et al.Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea[J].Marine Pollution Bulletin,2014,81(1):262-267.

[5] 杨玉峰,梁浩亮,范开文,等.2016 年惠州海域表层沉积物重金属污染分析[J].海洋湖沼通报,2018(3):88-94.

[6] FORSTNER U,WITTMAN G T W.Metal contamination in aquatic environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 197-270.

[7] 霍素霞,邢聪聪,朱超祁,等.渤海沉积物重金属含量时间演化特征及影响因素研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2017,47(10):42-49.

[8] 吕双燕.黄河三角洲滨海湿地石油烃和重金属空间分布规律与潜在生态风险研究[D].烟台:鲁东大学,2017.

[9] GERSTENBERGER S L,MARTINSON A,KRAMER J L.An evaluation of mercury concentrations in three brands of canned tuna[J].Environmental Toxicology and Chemistry,2010,29(2):237-242.

[10] MANDAL B K,SUZUKI K T.Arsenic round the world:a review[J].Talanta,2002,58:201-235.

[11] CHAPMAN P M,WANGF Y,ADAMS W J,et al.Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J].Environmental Science & Technology,1999,33(22):3937-3941.

[12] SCHUBEL R J.The estuary as a filter for fine grained suspendedsediments in the estuarine environment[J].Technical ReportReld,1983(14):310-313.

[13] 王义,黄先飞,胡继伟,等.重金属污染与修复研究进展[J].河南农业科学,2012,41(e4):1-6.

[14] 王增焕,林钦,李纯厚,等.珠江口表层沉积物铜铅锌镉的分布与评价[J].环境科学研究,2004(4):5-9+24.

[15] 雷凯.渭河西安段水体及水系沉积物重金属环境地球化学研究[D].西安:陕西师范大学,2008.

[16] 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.

[17] MÜLLER G.Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J].Geojournal,1969,2(3):108-118.

[18] HAN D,CHENG J,HU X,et al.Spatial distribution,risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China.[J].Marine Pollution Bulletin,2017,115(1-2):141-148.

[19] HÅKANSON L.An ecological risk index for aquatic pollution control;a sediment ecological approach[J].Water Research,1980,14(8):975-1001.

[20] MACDONALD D D,INGERSOLL C G,BERGER T A.Development and Evaluation of Consensus-Based Sediment Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems[J].Archives of Environmental Contamination and Toxicology,2000,39(1):20-31.

[21] MÜLLER G.Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J].Geo Journal,1969,2(3):108-118.

[22] 杨婉玲,赖子尼,曾艳艺,等.珠三角河网水、沉积物中 As 含量分布特征及污染评价[J].生态环境学报,2015,24(5):831—837.

[23] 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):1676—1684.

[24] 陈江麟,刘文新,刘书臻,等.渤海表层沉积物重金属污染评价[J].海洋科学,2004,28(12):16—21.

[25] HAKANSON L,HÅKANSON L,HAKANSONN L.An ecological risk index for aquatic pollution control:a sediment ecological approach[J].Water Research,1980,14(8):975—1001.

[26] 郭曙林,王荔娟.沉积物重金属污染生态风险评价方法比较研究[J].广东化工,2015,42(16):158—159.

[27] 王鹏,赵志忠,王军广,等.海南岛砖红壤重金属污染特征及其风险评价[J].江苏农业科学,2011,39(5):461—463.

[28] 李小月.中国近海典型海域沉积物重金属分布特征及控制因素[D].石家庄:河北地质大学,2016.

[29] 张现荣,张勇,叶青,等.辽东湾北部海域沉积物重金属环境质量和污染演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(2):21—29.

[30] 孙钦帮,陈燕珍,孙丽艳,等.辽东湾西部海域表层沉积物重金属的含量分布与污染评价[J].应用海洋学报,2015,34(1):73—79.

[31] 胡宁静,渤海辽东湾表层沉积物中重金属元素分布特征[J].中国环境科学,2010,30(3):380—388.

[32] 林曼曼,张勇,薛春汀,等.环渤海海域沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(6):41—46.

[33] 许艳,王秋璐,李潇,等.环渤海典型海湾沉积物重金属环境特征与污染评价[J].海洋科学进展,2017,35(3):428—438.

[34] 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.

[35] 郑江鹏,矫新明,方南娟,等.江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价[J].中国环境科学,2017,37(4):1514—1522.

[36] 蓝先洪,孟祥君,侯方辉,等.渤海辽东湾沉积物的元素地球化学[J].海洋地质前沿,2016,32(5):48—53.