杭州湾表层沉积物中重金属空间 分布特征与污染状况评价

姜文博¹, 梁 斌¹, 高 范^{1,2}, 包吉明¹, 孟庆辉¹, 孙钦帮^{1,2}

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2.国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:本文对杭州湾海域 2018年8-9月25个沉积物样品中的7种重金属含量进行了研究,结果表明,该海域表层沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As含量平均值分别为22.50×10⁻⁶、21.93×10⁻⁶、63.39×10⁻⁶、0.10×10⁻⁶、48.32×10⁻⁶、0.05×10⁻⁶、5.45×10⁻⁶,所有评价因子的含量平均值均低于全国海岸带重金属的背景值。单因子污染指数法的评价结果显示,Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As的平均含量均符合第一类海洋沉积物质量标准,7种重金属的污染程度依次为:Cu>Cr>Zn>Pb>As>Hg>Cd。重金属富集程度分析结果显示,Cd、Hg和As的富集程度较低,Pb和Zn的富集程度相对较高。潜在生态风险指数法评价结果显示,Cd、Hg和As的富集程度较低,Pb和Zn的富集程度相对较高。潜在生态风险指数法评价结果显示,杭州湾海域潜在生态风险等级为"较低",海洋生态环境状况较好。表层沉积物中重金属和TOC相关性分析结果显示,该海域表层沉积物TOC含量与重金属Cu、Pb、Zn、Cd和Cr含量具有一定的正相关性。主成分分析法结果表明,前两个主成分的贡献率分别为64.42%和16.59%;结合相关性分析表明,Cu、Pb、Zn、Cd和Cr主要的来源为工业生产与生活污水。

中图分类号:P736;X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2021)04-0555-07

Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Hangzhou bay

JIANG Wen-bo¹, LIANG Bin¹, GAO Fan^{1,2}, BAO Ji-ming¹, MENG Qing-hui¹, SUN Qin-bang^{1,2}

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, Dalian 116023, China)

Abstract: From August to September 2018, the distribution of 7 kinds of heavy metals in the sediment samples collected at 25 stations in Hangzhou bay was studied. The results showed that the average concentrations of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As in the surface sediment were 22.50, 21.93, 63.39, 0.10, 48.32, 0.05 and 5.45×10^{-6} , respectively. The average concentrations of all the evaluation factors were lower than the background values of heavy metals in the national coastal zone. According to the evaluated result by the single factor pollution index method of marine sediment quality, all the average contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As were in the line with the class I standard of marine sediment quality. The pollution degree of the average contents of 7 kinds of

基金项目:国家重点研究开发项目(2018YFC1407604);大连青年科技之星项目(2018RQ77)

作者简介:姜文博(1979-),黑龙江阿城人,男,高级工程师,主要从事海洋环境监测工作,E-mail:wbjiang@nmemc.org.cn 通讯作者:孙钦帮(1977-),男,正高级工程师,主要从事海洋环境影响评价工作,E-mail:gbsun@nmemc.org.cn

收稿日期:2020-06-24,修订日期:2020-12-30

heavy metals was Cu > Cr > Zn > Pb > As > Hg > Cd. According to the analysis result of heavy metal enrichment degree, the enrichment degree of Cd, Hg and As was relatively lower, and the enrichment degree of Pb and Zn was relatively higher. According to the evaluation result of potential ecological hazard index, the potential ecological risk index of Hangzhou bay was "low" and the marine ecological environment was in the good condition. The correlation analysis of heavy metals and TOC in the surface sediments showed that the TOC content in the surface sediments of the bay was positively correlated with the contents of heavy metals Cu, Pb, Zn, Cd and Cr. Based on the principal component analysis, the sources of heavy metal pollution in the sediments were further studied, and the contribution rates of the first two principal components were 64.42% and 16.59%, respectively. Combined with the correlation analysis, it was found that the main sources of heavy metal Cu, Pb, Zn, Cd and Cr were the pollution of industrial production and domestic sewage to marine sediments.

Key words: sediment; heavy metal; enrichment degree; principal component analysis; Hangzhou bay

海洋沉积物是重金属的重要环境归宿^[1-2],也 是海洋水体中溶解态和颗粒态污染物的潜在来 源,作为污染物的集散地,在维护海洋生态系统 健康中具有重要的地位^[3]。因此,海洋沉积物可 作为沉积环境中重金属污染程度的"指示剂"^[4-5]。 作为难降解的污染物质,重金属因其生物富集性 而对海洋生态系统具有极大威胁,甚至可通过食 物链累积对人类和动物的生命产生威胁^[6],重金 属污染已经成为海洋环境污染评价的重要内容^[7]。

杭州湾是典型的喇叭形强潮河口,湾内物质 来源复杂多样,近年来随着沿岸开发力度不断加 强,陆源污染持续加剧,杭州湾生态环境受到了 较大冲击^[8]。尽管柴小平等^[8]对于杭州湾海域中 重金属污染已有研究,但主要通过沉积物粒度分 析利用单因子评价沉积物中重金属污染,没有对 沉积物的重金属污染水平及潜在生态风险进行 综合评价。本文利用 2018 年 8 月 – 9 月杭州湾 海域表层沉积物中重金属调查数据,研究了沉积 物中重金属含量空间分布特征,并利用单因子指 数法、富集因子评价法、潜在生态危害指数法和 主成分分析法分别对其污染状况及重金属污染 来源进行了评价,研究结果可为海湾生态保护修 复和环境治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

杭州湾位于浙江省东北部,是钱塘江汇流入 海而形成的喇叭形河口湾,从湾顶澉浦断面到湾 口芦潮港断面,长 85 km,湾宽变幅从 19.4 km 到 98.5 km,其间的乍浦至庵东断面宽 32.2 km,金山 至四灶浦宽 45.5 km,湾口北部与长江口毗连,南 部有甬江注入,东部则通过舟山群岛间的诸多水 道与东海沟通^[9]。杭州湾湾底形态自湾口至乍 浦地势平坦;从乍浦起,以 0.1‰~2‰的坡度向 西抬升,在钱塘江河口段形成巨大的沙坎;北岸 为长江三角洲南缘,沿岸深槽发育;南岸为宁绍 平原,沿岸滩地宽广。杭州湾湾底的地貌形态和 海湾的喇叭形特征,使其成为中国沿海潮差最大 的海湾。

杭州湾泥沙以海域来沙为主,其中,长江来 沙对杭州湾的形成起着重要作用;物质以颗粒匀 细的细粉沙为主,极为松散,抗冲击能力小。涨 潮主流多经王盘山北,北岸岸线缓慢后退;落潮 主流一般经王盘山南,因流速沿程降低,南岸发 生淤积。湾内物质来源不仅有长江、钱塘江、甬 江、姚江等众多入海河流的泥沙,还有驾潮而入 的海沙以及来自舟山群岛的风化产物^[8]。

1.2 样品采集和分析

本研究数据来源于 2018 年原国家海洋局组 织实施的全国海洋沉积物质量监测工作,采样时 间为 2018 年 8-9月,共选取了杭州湾海域 25 个 沉积物调查站位(图 1),取样深度为 0~10 cm, 监测参数为 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 和 TOC。 样品采集和分析按照《2018 年海洋生态环境监 测工作任务基本技术要求》《海洋监测规范》(GB 17378-2007)和《海洋监测技术规程第 2 部分:沉 积物》(HY/T 147.2-2013)有关要求执行,质量控 制按照《2018 年全国海洋生态环境监测质量保 证工作方案》执行。



图 1 采样站位

Fig. 1 Distribution of sampling stations

1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法

单因子指数法是最简单的环境质量评价方法,该方法将每个污染因子单独进行评价,通过评价因子实测值与标准参照值相比较而求得单因子指数,经统计得出各自的达标率或超标率、超标倍数等结果^[10]。单因子指数计算公式为:

$$I_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中: *I*_i为第 *i* 项因子的污染指数; *C*_i为第 *i* 项因子的实测值; *S*_i为第 *i* 项因子的标准参照值。 1.3.2 富集因子评价法

富集因子评价法主要用来甄别沉积物中重 金属的人为来源和富集状况^[11-12]。沉积物重金 属的富集系数计算公式为:

$$C_f = C_s / C_n \tag{2}$$

式中: C_f为沉积物中某种重金属的富集系数; C_s为沉积物中某种重金属含量的实测值; C_n为沉积物中某种重金属含量的实测值;

1.3.3 潜在生态风险指数法

1980 年瑞典学者 Hakanson 首次提出了潜在生态风险指数法^[13],该评价方法可以综合反映沉积物中重金属对生态环境的影响潜力^[14-15]。Hakanson提出的沉积物中重金属潜在生态风险的计算公式为:

$$C_f^i = C_d^i / C_b^i \tag{3}$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \tag{4}$$

$$RI = \sum T_r^i \cdot C_d^i / C_b^i \tag{5}$$

式中: C_f^i 为第 *i* 种重金属的污染系数; E_r^i 为 第 *i* 种重金属的潜在生态风险指数; T_r^i 为毒性系 数; C_d^i 为重金属含量的实测值; C_b^i 为评价参照值; RI为重金属综合潜在生态风险指数。 Hakanson 潜在生态风险指标及分级标准如 表1所示。

Tab.1	Hakanson	potential	ecological	risk	index	and	classification
-------	----------	-----------	------------	------	-------	-----	----------------

ヮは共国	单项污染物	DI英国	综合生态风险
E_r 氾围	生态风险分级	RI犯违	指数分级
$E_r^i < 40$	较低风险	<i>RI</i> <150	低风险
$40 < E_r^i \leq 80$	中等风险	150< <i>RI</i> ≤300	中等风险
$80 < E_r^i \leq 160$	较高风险	300< <i>RI</i> ≤600	较高风险
$160 < E_r^i \leq 320$	高风险	<i>RI</i> ≥600	高风险
$E_r^i \geq 320$	很高风险	_	

1.3.4 主成分分析法

主成分分析(principal component analysis, PCA) 也称主分量分析, 旨在利用降维的思想, 用较少 的综合指标代替原来具有一定相关性的较多的 指标, 将复杂因素归结为几个主成分, 使问题简 单化, 同时得到更加科学有效的数据信息。许 多研究证实, 主成分分析法能够为分析沉积物中 的元素来源和影响元素富集的主要因素提供明 确的信息, 因此, 现在越来越多的研究者运用主 成分分析法评价沉积物中污染物的来源^[16-17]。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属的含量和平面分布

由表 2 可知, 2018 年 8 月 - 9 月杭州湾海域 表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 含量 平均值分别为 22.50×10⁻⁶、21.93×10⁻⁶、63.39×10⁻⁶、 0.10×10⁻⁶、48.32×10⁻⁶、0.05×10⁻⁶、5.45×10⁻⁶,以 中国海岸带和海涂资源综合调查专业报告中的 全国海岸带重金属的背景值为参照值^[18],本次研 究中所有评价因子的含量平均值均低于背景值。

表 2 表层沉积物重金属含量(×10⁻⁶)

1a0.2 C	ontents of neavy	metals I	ii surface sediments(×10)
重金属元素	含量范围	平均值	全国海岸带重金属的背景值
Cu	9.90 ~ 36.00	22.50	30
Pb	8.10 ~ 50.30	21.93	25
Zn	41.90 ~ 108.20	69.39	80
Cd	0.06 ~ 0.15	0.10	0.5
Cr	27.50 ~ 72.90	48.32	60
Hg	$0.04\sim 0.05$	0.05	0.2
As	4.31 ~ 7.20	5.45	10

染态势。

Pb、Zn分布与含量情况与柴小平^[8]和陈思杨^[1]

得到的杭州湾表层沉积物中研究结果基本一

致。与全国海岸带重金属的背景值总体比较来

看,杭州湾海域沉积物中重金属呈现了一定的污

面分布特征相似,呈现南北两岸和中部高、湾底

低的特征; Hg 含量的平面分布特征与 As 的相

由图 2 可知, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr的含量平

其中,各站位 Cd、Hg 和 As 含量均低于背景 值;有7个站位 Cu 含量超过背景值,最高的为 15号站位,是背景值的 1.20倍;有 11个站位 Pb 含量超过背景值,最高的为 13号站位,是背 景值的 2.01倍;有8个站位 Zn 含量超过背景 值,最高的为 15号站位,是背景值的 1.35倍;有 7个站位 Cr 含量超过背景值,最高的为 21号站 位,是背景值的 1.22倍。本次调查结果中,Cu、



图 2 表层沉积物重金属和 TOC 含量的平面分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals and TOC in surface sediments

似,总体分布均匀;TOC 与 Cu 含量的分布特征 较为一致,呈现中部高,湾口低的特征。 2.2 表层沉积物重金属污染风险评价

2.2.1 重金属单因子污染指数

本研究以海洋沉积物质量第一类标准值作 为评价标准值,对杭州湾海域表层沉积物各重金 属含量平均值进行单因子污染指数法评价,计算 结果见表 3。

表	ŧ 3	表层沉积物中重金属元素的单因子污染指数
Tab.3	Singl	e factor pollution index evaluation in surface sediment

エィローギ	メロマル北	海洋沉积物质量标准值/×10 ⁻⁶				
<u>里金</u> 属兀系	甲因于指数	I类				
Cu	0.64	≤35.0				
Pb	0.37	\leqslant 60.0				
Zn	0.51	≤150.0				
Cd	0.20	≪0.50				
Cr	0.60	\leqslant 80.0				
Hg	0.23	≪0.20				
As	0.27	≤20.0				

由表3可知,Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As的单因子污染指数均小于1,各评价因子均符合第一类海洋沉积物质量标准,7种重金属的污染程度排序为:Cu>Cr>Zn>Pb>As>Hg>Cd。

2.2.2 重金属富集程度分析

沉积物中的重金属既有自然来源又有人为 来源,本文通过杭州湾表层沉积物重金属的富集 程度,探究人为排污对杭州湾环境的影响程度。 本研究采用全国海岸带重金属的背景值作为沉 积物中重金属富集程度计算的参照值^[18],各重金 属的富集系数计算结果见表 4。

表 4 表层沉积物主要重金属的富集系数

	Fab.4	Enrichment	factor	of ma	in heavy	v metals	s in	sediment
--	-------	------------	--------	-------	----------	----------	------	----------

统计值	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
最小值	0.33	0.32	0.52	0.12	0.46	0.20	0.43
最大值	1.20	2.01	1.35	0.30	1.22	0.27	0.72
平均值	0.75	0.88	0.87	0.20	0.81	0.23	0.54

由表 4 可知, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的富集系数平均值均小于 1, Cd、Hg 和 As 的富 集程度较低, Pb 和 Zn 的富集程度相对较高, 最 高站位分别为 13 号站位(C_f =2.01)和 15 号站位 (C_f =1.35)。各重金属富集程度排序为: Pb>Zn> Cr>Cu>As>Hg>Cd_o

2.2.3 重金属元素潜在生态风险指数

为了保证选择的背景值能够最大程度接近 该海域的实际值,同时为了保证评价的一致性, 本研究仍采用全国海岸带重金属的背景值作为 参照值,重金属的毒性响应参数选取参照表 5^[18]。 重金属潜在生态风险指数(*Eⁱ_r*)和综合潜在生态 风险指数(*RI*)计算结果见表 6。

表 5 沉积物中重金属的参照值和毒性系数

Tab.5 Background reference values and toxicity coefficients of heavy metals in the sediments

评价因子	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
C_{b}^{i} /×10 ⁻⁶	30	25	80	0.5	60	0.2	10
T_r^i	5	5	1	30	2	40	10

表 6 表层沉积物中重金属的潜在生态风险指数

Tab.6 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments

(),) I (H-				E_r^i				
统计值	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	RI
最小值	1.65	1.62	0.52	3.60	0.92	8.00	4.31	22.80
最大值	6.00	10.06	1.35	9.00	2.43	10.60	7.20	41.06
平均值	3.75	4.39	0.87	6.10	1.61	9.26	5.45	31.42

由表 6 可知, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的单项污染物生态风险指数均小于 40, 各单项 污染物生态风险等级(*E*^{*i*}_{*r*})较低, 7 种重金属的潜 在生态风险指数顺序为: Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr> Zn。综合生态风险指数(*RI*=31.42)小于 150, 该 海域重金属的潜在生态风险等级为"较低"。

由图 3 可以看出,杭州湾海域沉积物中重金 属潜在生态风险指数空间分布特征为 E-W 向,



图 3 重金属综合潜在生态风险指数分布



E高W低,南北两岸相对较高;该海域沉积物中 重金属生态风险指数整体相差不大,海洋生态环 境状况较好。

2.2.4 重金属元素与 TOC 相关性分析

TOC 含量和成分的变化是决定表层沉积物 中重金属分布的重要因素之一^[19],因此可以通过 重金属元素之间的相关分析确定沉积物中重金 属的同源性。本研究利用国产数理统计软件 DPS18.10 对 2018 年 8-9 月 25 个调查站位的表 层沉积物中 7 种重金属含量和 TOC 含量进行了 Pearson 相关性分析,结果见表 7。

表 7 表层沉积物各重金属含量和 TOC 含量间的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients among heavy metals and TOC in sediments

要素	$C_{\rm Cu}$	$C_{\rm Pb}$	$C_{\rm Zn}$	$C_{\rm Cd}$	C _{Cr}	C_{Hg}	$C_{\rm As}$	C_{TOC}
$C_{\rm Cu}$	1							
$C_{\rm Pb}$	0.849**	1						
C_{Zn}	0.968**	0.820***	1					
$C_{\rm Cd}$	0.926**	0.719**	0.887**	1				
$C_{\rm Cr}$	0.955**	0.745**	0.931**	0.863**	1			
C_{Hg}	0.143	0.061	0.174	0.105	0.069	1		
$C_{\rm As}$	-0.158	-0.236	-0.117	-0.187	-0.145	0.316	1	
C _{TOC}	0.915**	0.916**	0.860**	0.810**	0.839**	0.143	-0.167	1

注:**在0.01级别(双尾)相关性显著

由表 7 可知, Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 相互之间 呈正相关性, 且相关性较大, 这表明它们具有一 定的同源性, 这与陈思杨等^[1] 对杭州湾的研究结 果一致。该海域表层沉积物 TOC 含量与重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 含量具有一定的正相关性, 这表明研究区海水中的重金属可能易与 TOC 通 过表面吸附而发生螯合反应, 反应生成的金属有 机络合物从水体中移出, 并吸附于表层沉积物的 颗粒中^[20]。由图 2 可知, TOC 含量的平面分布 特征与 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的相似, 在南北两 岸海域含量相对较高。因此, TOC 对 Cu、Pb、 Zn、Cd 和 Cr 的分布具有一定的影响。

2.2.5 基于 PCA 方法重金属污染物来源分析

根据 2.2.4 节杭州湾海域表层沉积物中重金属与 TOC 相关性分析可知, Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 相互之间具有较强的相关性, 主成分分析计算结果(表 8)表明, 杭州湾海域表层沉积物中

7种污染物的全部信息可由两个主成分(特征 值:5.393+1.327=6.72个变量)反映(84.01%),即 对前两个主成分进行分析已经能够反映全部监 测数据的绝大部分信息。

表 8 主成分分析主要计算结果

Tab.8	The	main	calculated	results	of	principal	component
	analy	sis(PC	A)				

成分	第一主成分	第二主成分
特征值	5.393	1.327
贡献率/(%)	64.42	16.59
累计贡献率/(%)	64.42	84.01
Cu	0.992	0.036
Pb	0.892	-0.083
Zn	0.966	0.082
Cd	0.920	-0.006
Cr	0.941	0.000
Hg	0.136	0.821
As	-0.206	0.799
TOC	0.943	0.019

通过表8可知,第一主成分的贡献率为 64.42%, 显著的特点表现为 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr等因子变量具有较高的正载荷;第一主成分 在 TOC 上的高载荷(CTOC, 0.943)说明有机质是 金属离子重要的结合物,从表7可以看出Cu、 Pb、Zn、Cd和Cr与TOC都呈显著的正相关性, 由此可以推断,有机质在降解过程中释放金属离 子是沉积物中重金属的来源之一,因此,第一主 成分主要表征了有机质对沉积物中重金属来源 的贡献,这与本文2.2.4节重金属与TOC相关性 分析结论一致。通过查阅对比相关文献^[9]可知, 杭州湾海域沉积环境受到工业生产和生活污水 的影响,在杭州湾海域的沉积物中 Cu、Pb、Zn、 Cd和Cr有污染的迹象,因此,Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 等重金属对第一主成分的贡献基本反映了 工业生产与生活污水对海洋沉积物的污染影 响。根据各污染物相关性分析可知, Cu、Pb、 Zn、Cd和Cr之间具有较强的相关性,相关系数 从 0.719(Pb-Cd)至 0.968(Cu-Zn),因此,第一主 成分主要支配着沉积物中 Cu 和 Zn 的来源,同时 也部分支配着 Pb、Cd 和 Cr 的来源。从表 8 可 以得到第二主成分在 Hg 和 As 的载荷情况,其

中以 Hg(0.821)为最高,其次为 As(0.799),由于 Hg、As与 TOC 相关性较小,可以推断 Hg和 As 在沉积物中作为有机质结合物存在的可能性 较小,因此,区域的工业生产与生活污水对 Hg 和 As 含量分布的影响较小。

3 结 论

(1)杭州湾海域表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、 Cd、Cr、Hg 和 As 含量的平均值均低于全国海岸 带重金属的背景值。Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的含 量平面分布特征相似,呈现南北两岸和中部高、 湾底低的特征;Hg 含量的平面分布特征与 As 的 相似,总体分布均匀;TOC 与 Cu 含量的分布特 征较为一致,呈现中部高、湾口低的特征。

(2)海洋沉积物质量单因子污染指数法的评价结果显示,Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As的平均含量均满足海洋沉积物质量一类标准。结合重金属富集程度分析,该海域各重金属富集系数平均值均小于1,Cd、Hg和As的富集程度较低,Pb和Zn的富集程度相对较高。潜在生态风险指数法的评价结果显示,杭州湾海域沉积物中重金属潜在生态风险指数等级为"较低",7种重金属各平均含量的潜在生态风险指数顺序为:Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn;空间分布特征为E-W向,E高W低,南北两岸相对较高;该海域沉积物中重金属生态风险指数整体相差不大,海洋生态环境状况较好。

(3)表层沉积物中重金属和 TOC 的相关性 分析结果显示: Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 相互之间 呈正相关性,且相关性较大,表明它们具有一定 的同源性。主成分分析法研究发现,前两个主成 分的贡献率分别为 64.42% 和 16.59%;结合相关 性分析表明, Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 的主要来源 为工业生产与生活污水。

参考文献:

- [1] 陈思杨, 宋琍琍, 刘希真, 等. 浙江典型海湾潮间带沉积物污染及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4): 1771-1781.
- [2] AHMED I, MOSTEFA B, BERNARD A, et al. Levels and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of fishing grounds along Algerian coast[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 322-333.
- [3] 向友权,韩建波,韩庚辰.海洋沉积物的质量评价与管理[J].

海洋环境科学, 2006, 25(2): 96-100.

- [4] 刘淑民,姚庆祯,刘月良,等.黄河口湿地表层沉积物中重金 属的分布特征及其影响因素[J].中国环境科学,2012,32(9): 1625-1631.
- [5] ALIRANJBAR A R, BAKHTIYARI A R, TOOSI A S, et al. Spatial distribution, ecological and health risk assessment of heavy metals in marine surface sediments and coastal seawaters of fringing coral reefs of the Persian Gulf, Iran[J]. Chemosphere, 2017, 185: 1090-1111.
- [6] HE Z L, SHENTU J L, YANG X E, et al. Heavy metal contamination of soils: sources, indicators, and assessment[J]. Journal of Environmental Indicators, 2015, 9: 17-18.
- [7] 李 军,张 原,龚香宜,等. 福建省兴化湾表层沉积物中重 金属污染与评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 125-128.
- [8] 柴小平,魏 娜,任世军,等.杭州湾及其邻近海域表层沉积物的沉积环境分区及重金属污染特征分析[J].海洋科学, 2019,43(8):29-35.
- [9] 孟庆辉, 王 林, 毛志华, 等. 基于HJ CCD的杭州湾海域水 质评价[J]. 广西科学, 2015, 22(3): 322-328, 336.
- [10] 罗 芳, 伍国荣, 王 冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评 价法在水质评价中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 87-89.
- [11] 蓝先洪, 顾兆峰, 密蓓蓓, 等. 渤海西部表层沉积物中重金属 的环境地球化学特征[J]. 现代地质, 2017, 31(2): 367-373.
- [12] 李 娟, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 长江沉积物环境地球化学特征 及生态风险评价[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 939-946.
- [13] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 何海军, 甘华阳, 何金先, 等. 海南岛南部滨海沉积物中重金 属分布特征及生态风险评价[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(3): 47-55.
- [15] 闫兴成,杨晓薇,黄烯茜,等.太湖主要入湖河口表层沉积物 重金属分布特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9): 1515-1521.
- [16] 李 玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
- [17] LOSKA K, WIECHUŁA D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. Chemosphere, 2003, 51(8): 723-733.
- [18] 全国海岸带办公室《环境质量调查报告》编写组.中国海岸带和海涂资源综合调查专业报告集:环境质量调查报告[M]. 北京:海洋出版社,1989.
- [19] BORG H, JONSSON P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32(1): 8-21.
- [20] QIU Y W, ZHU L S, LI M Q. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay, China[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 7(1): 69-76.