

大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价

徐 勇^{1,2}, 马绍赛², 陈聚法^{2*}, 赵 俊², 夏 斌², 崔正国²

(1.中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2.农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘 要:胶州湾属半封闭海湾, 水体交换能力较弱, 受多条河流入海影响, 污染日趋加重, 通过大沽河的径流量、输沙量和溶解污染物占到胶州湾入海河流的首位。根据区域特征, 于 2009 年 2、5、8、11 月对大沽河湿地 48 个采样点表层沉积物中的 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As、有机碳、粒度进行测定, 探讨了重金属含量和污染特征与总有机碳、粒度的关系, 利用污染评价法和潜在生态风险评价法进行污染和风险分析。结果表明: 胶州湾大沽河湿地表层沉积物重金属含量较低, 大部分测站符合海洋沉积物质量(GB 18668—2002) I 类标准的要求。表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 含量 8 月份最高、2 月份次之、5 月份最低。Pb、Hg、As 3 种重金属含量在 2 月份最高。Cu、Pb、Zn 和 Cd 重金属之间存在显著正相关关系, Hg 与 As 存在明显的相关关系; 除 Cd 和 As 外的 4 种重金属与沉积物粘土、有机碳含量之间也存在显著正相关性。重金属单因子污染程度总体较轻, 属于低污染水平, 污染程度依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn。大沽河河口区表层沉积物重金属潜在生态风险总体处于较低水平, 风险程度依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn。

关键词:大沽河湿地; 表层沉积物; 重金属; 时空特征; 潜在生态风险评价

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)06-1209-08

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in Dagou River Wetland

XU Yong^{1,2}, MA Shao-sai², CHEN Ju-fa^{2*}, ZHAO Jun², XIA Bin², CUI Zheng-guo²

(1.Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China ; 2.Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries , Ministry of Agriculture, Shandong Province Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment, Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Jiaozhou Bay is a semi-enclosed bay of weak water exchange capacity, the pollution is increasingly heavier for the rivers into the sea, the account of river runoff, sediment and dissolved pollutants into the sea through Dagou River are the first in all the rivers for Jiaozhou Bay. According to the characteristics of Dagou River, the contents of Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As, clay and organic carbon in the 48 surface sediments samples in the wetland of Dagou River were measured, in February, May, August, November of 2009. Firstly, the content and distributed characteristics of these heavy metals, and the relevance with different particle size and organic carbon were discussed, and methods of pollution assessment and the potential ecological risk assessment were used. The result indicated that the average contents of heavy metals were low, and most of them were lower than the first class of GB 18668—2002. Surface sediments of Cu, Pb, Zn had a similar seasonal variation, its highest level was in August, followed in February, the lowest levels in May. The highest concentrations in three heavy metals of Pb, Hg, As were in February. The Dagou River wetland surface sediment contents of Cu, Pb, Zn and Cd were controlled by clay and organic carbon. The single-factor of heavy metals in surface sediment indicated a lower pollution degree, and the descending order was Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn. A low potential ecological risk assessment in wetland of Dagou River was showed, and the descending order was Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn.

Keywords: Dagou River wetland; surface sediment; heavy metals; spatial and temporal characteristics; potential ecological risk assessment

收稿日期: 2011-11-25

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(200805066); 国家科技支撑计划课题项目(2009BADB7B02)

作者简介: 徐 勇(1980—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事海洋生态环境研究。E-mail: xuyong@ysfri.ac.cn

* 通讯作者: 陈聚法 E-mail: chenjf@ysfri.ac.cn

胶州湾是一个半封闭型的浅海湾,面积为 374.4 km²,平均水深 7 m,最大水深 64 m^[1]。龙泉河、洋河、大沽河、墨水河、白沙河、李村河和海泊河等 12 条较大型的河流注入为其带来了丰富的营养物质,同时也使得胶州湾的环境污染问题日益突出。大沽河是胶东半岛最大的河流,流域面积 7 511.5 km²,流域水资源丰富,多年平均河川径流量为 6.31×10⁸ m³。降水年际变化显著,主要集中于 5—9 月,占年降水总量的 80%左右,多年平均降水量为 734.24 mm。通过大沽河携带的径流量、输沙量和溶解污染物占到胶州湾入海河流的首位,是胶州湾重金属、无机氮、磷的主要输入源^[2]。

重金属作为持久性和生物累积性污染物,由于不可逆累积性,易于富集,不易降解,并能通过食物链传递危害人类健康,已成为影响海洋环境的主要污染因素。重金属进入海洋后在复杂的物理、化学和生物作用下,最终富集于沉积物中,并与上覆水之间形成动态平衡。当环境条件发生变化时,此种平衡就会被打破,沉积物中的重金属重新进入水体。因此,具有释放和汇聚双重功能的沉积物在重金属评价中具有重要作用^[3]。沉积物作为水环境重金属的主要蓄积库,处于液-固两相界面的交界处,对海洋的生态环境、生态系统结构及生态服务功能都有重要的影响。有关胶州湾海域环境质量评价与富营养化研究、营养物质溶出动力学以及重金属污染等方面的研究已有许多报道^[4-9],

但上述研究仅限于胶州湾水深较大的区域或胶州湾东北部潮间带区域,有关大沽河湿地区域沉积物中重金属含量水平、季节变化及潜在生态风险评价的系统研究鲜见报道。本文利用 2009 年 4 个季节 48 个站位的调查资料,从沉积物中重金属的分布、季节变化和污染评价 3 个层次对该海域重金属污染进行全面系统研究,对于有效保护大沽河口湿地和海湾生态环境具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

沉积物样品采集于大沽河河道、潮间带和-6 m 等深线以上浅海区域,采样站位为 48 个(图 1),其中大沽河河道 6 个(1~6 号),潮间带 21 个(7~27 号),浅海区域 21 个(28~48 号)。采样时间为 2009 年 2、5、8、11 月。用抓斗式采泥器采集沉积物,用塑料勺取其中央未受干扰的表层 0~2 cm 泥样于聚乙烯袋中,0~4℃下保存,回实验室待测。将解冻至室温的样品在 80℃烘箱内烘干 24 h,用玛瑙研钵将其研碎并全部通过 160 目筛,充分混匀后取样以供测定(为避免样品被玷污,取样及碎样等工具及器皿均先经净化处理),沉积物用微波消解。沉积物中铅、镉含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,铜、锌用火焰原子吸收分光光度法测定,汞采用冷原子吸收法测定,砷用原子荧

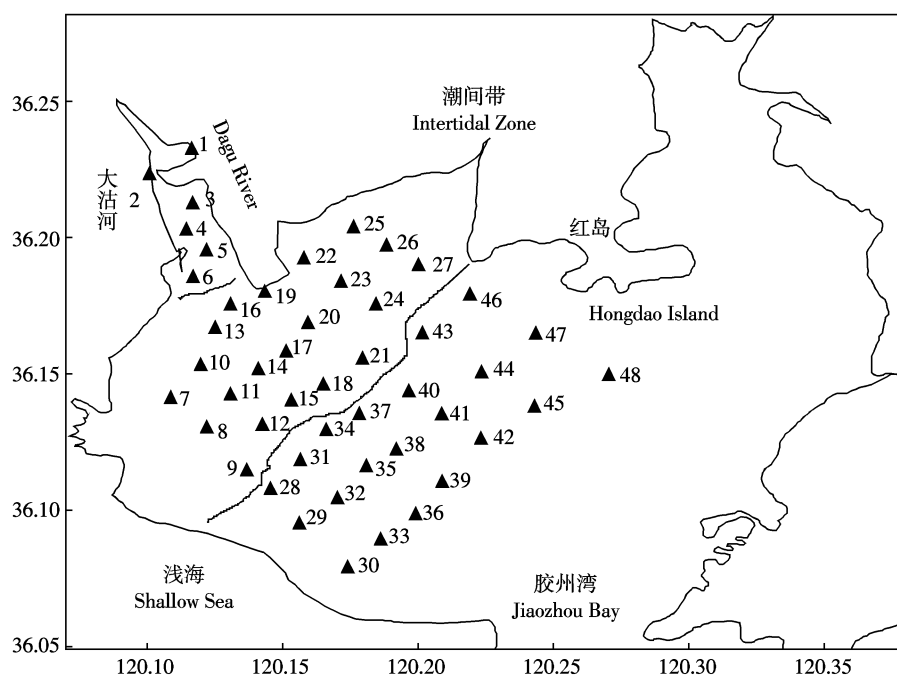


图 1 调查区域和采样站位

Figure 1 Surveyed area and sampling locations of surface sediments

光光谱法测定。以上具体操作方法见《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[10]。

粒度测定:称取 20 g 左右烘干的沉积物样品,检出明显异物,加偏磷酸钠浸泡 8 h 后过水筛,采用比重计法测定。

总有机碳测定:沉积物样品经阴干,除去明显杂物,充分混合均匀后研磨过 80 目筛,准确称取样品 100 mg,加 10%的盐酸浸泡去除无机碳,105 ℃烘 5 h 后,用德国 EA2000 元素分析仪测定,测定相对标准偏差小于 2%。

1.2 沉积物潜在生态风险评价方法

关于沉积物重金属污染评价的方法较多,有地质累积指数法、污染负荷指数法、回归过量分析法和潜在生态危害指数法等。本文选用国内外沉积物质量评价应用最为广泛的方法——瑞典科学家 Hakanson 的潜在生态危害指数法^[11]进行重金属生态危害评价,其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$
$$RI = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_i^n \left(\frac{T_r^i \times C_s^i}{C_n^i} \right)$$

式中:RI 为所有重金属的潜在生态风险指数; E_r^i 为金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度,分别为 Cu=5、Zn=1、Pb=5、Cd=30、Hg=40、As=10; C_f^i 为重金属富集系数 ($C_f^i = C_s^i / C_n^i$); C_s^i 为表层沉积物中重金属浓度实测值; C_n^i 为所需背景值,本文采用现代工业化前沉积物中重金属的正常最高背景值(表 1)。

具体重金属潜在生态风险评价等级见表 2。

表 1 重金属含量背景值(mg·kg⁻¹)
Table 1 Background reference values of heavy metals(mg·kg⁻¹)

地区	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	文献
全球工业化前	30	25	80	0.5	0.2	15	[11]

2 结果与讨论

2.1 大沽河口表层沉积物重金属含量时空分布特征

胶州湾大沽河湿地表层沉积物中重金属的含量及污染系数见表 3。研究区域表层沉积物中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的含量水平总体较低,除部分站位 Cu 含量超一类标准外,其余 5 项重金属的含量均符合《海洋沉积物质量》^[12]一类标准的要求。另外,除重金属 Cu 含量的变异系数大于 50%外,其余 5 种重金属含量的变异系数均较小(16.61%~41.86%),说明其含量在整个研究区域分布差异性较小。由表 3 可以发现,在空间分布上,表层沉积物 Cu、Zn 平均含量由高到低顺序为大沽河感潮河段>浅海区域>潮间带;Pb、As 平均含量由高到低顺序为潮间带>大沽河感潮河段>浅海区域;Cd、Hg 2 种重金属平均含量在大沽河感潮河段、潮间带、浅海区域分布差异不明显。与其他海湾比较,大沽河湿地表层沉积物 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 平均值均低于国内典型海湾莱州湾^[13]、锦州湾^[14]、深圳湾^[15]、汕头湾^[16]、泉州湾^[17]、香港湾^[18]的表层沉积物重金属的平均含量,相对而言,胶州湾大沽河湿地表层沉积物重金属污染程度较轻。

研究区域表层沉积物 Cu、Zn、Cd 含量以 8 月最高,11 月次之,5 月最低(表 3)。河流水文条件(丰水期、枯水期)是决定大沽河湿地沉积物重金属的季节性变化的主要因素,同时海水温度、pH、盐度及有机质含量等因素也会对沉积物重金属含量造成影响。丰水期(8 月)沿岸悬浮泥沙及污染物随着降雨被带入河道及附近海域,使得表层沉积物中 Cu、Zn、Cd 快速富集。表层沉积物中 Pb、Hg、As 含量在 2 月份最高,最低值出现在 5 月与 8 月。表层沉积物中重金属 Pb、Hg、As 含量随着时间的这种变化特征可能与水体温度、pH 值、沉积物中有机质含量以及藻类活动等因素具有密切关系。从冬季至夏季期间,水温逐渐升高,根据分子热运动理论,温度升高有利于底泥中重金属向水相的迁移以及释放,pH 值的逐渐降低也促进了碳

表 2 评价指标与污染程度和潜在生态风险程度的关系
Table 2 The relation between evaluation indexes and the contamination degree and potential ecological risk

C_f^i	单因子污染程度	C_d	综合污染程度	E_r^i	单因子生态风险	E_{RI}	总潜在生态风险
<1	低	<5	低	<40	低	<150	低
1~3	中	5~10	中	40~80	中	150~300	中
3~6	高	10~20	高	80~160	高	300~600	高
≥6	严重	≥20	严重	160~320	严重	≥600	严重
				≥320	很严重		

酸盐和氢氧化物结合态重金属的溶解与释放^[9],沉积物中有机质含量的减少降低了重金属在沉积物中的吸附作用,从而使一部分重金属发生解吸转移到间隙水或者上覆水中。

2.2 胶州湾表层沉积物重金属分布特征与粒度、有机碳关系分析

沉积物粒度和有机碳含量是控制沉积物重金属分布特征最重要的两个参数^[20]。图 2 和图 3 是大沽河湿地表层沉积物粒度特征和有机碳含量分布图。

总体来看,大沽河湿地表层沉积物大部分站位以粉砂为主,少数站位以砂为主,粘土含量较低。大沽河湿地表层沉积物有机碳含量在 0.25%~0.79%之间。由图 3 可以看出,26 号站有机碳含量最高,其次是潮间带和浅海交汇地区(25、27 号站位),其他区域含量较低。从表 4 可以看出,除了 Hg、As 与其他 4 种重金属相关性不显著外,Cu、Pb、Zn、Cd 彼此之间显著正相关,Hg 与 As 存在明显的正相关关系。Cu、Pb、Zn、Cd 含量与粘土含量在 0.01 水平上显著正相关,Hg、As 与粘土含量之间不存在显著相关关系。Pb、Zn、Cd 与有机碳含量在 0.01 水平上显著正相关,Cu 与有机碳含量在 0.05 水平上显著正相关,Hg、As 与有机碳含

量之间不存在显著相关关系。以上分析说明,粘土与有机质含量是控制大沽河湿地表层沉积物重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 分布的主要因素。

Hg、As 与粘土含量之间不存在相关性,主要有以下原因。虽然自然状态下沉积物粒级越细,重金属元素的含量就越高,但受排污的影响,沉积物中人为输入的重金属往往要高于其自然背景值的几倍甚至十几倍,而且受输入源、水动力作用等因素的影响,其空间分布的差异性较大。这样就使得地球化学特性相似、细粒级组分含量相近的沉积物,因所在的区域不同,其重金属元素含量出现明显差异的情况,改变了粒级分布重金属元素含量之间的内在比例关系,使两者之间的相关性不再显著。

总有机质是影响这些重金属元素分布特征的重要因素,但总有机质的这种特性并非适用于所有的重金属。因为不同的重金属的化学性质有差异,往往对其所结合的位点具有一定的选择性,即只与其化学性质相匹配的位点相结合。受此影响,某些重金属元素与总有机质在分布特征上并不一定有必然的联系。本次研究中 Hg、As 元素与总有机质的相关性不显著,原因可能就在于此。

表 3 大沽河湿地表层沉积物重金属含量统计表

Table 3 The content of the heavy metal in surface sediments in wetland of Dagou River

调查区域 Surveyed area	时间	重金属含量/mg·kg ⁻¹					
		Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
大沽河感潮河段 Tidal reach of Dagou River	2 月	26.80	63.44	15.93	0.100	0.089	1.79
	5 月	14.07	44.00	12.40	0.090	0.063	1.23
	8 月	22.43	57.51	12.85	0.113	0.039	1.24
	11 月	25.72	69.99	13.53	0.086	0.071	1.38
	平均值	22.26	58.73	13.68	0.100	0.070	1.41
潮间带 Intertidal zone	2 月	16.91	51.09	13.19	0.112	0.099	1.54
	5 月	21.53	47.96	13.10	0.098	0.050	1.26
	8 月	25.81	55.73	14.63	0.125	0.051	1.31
	11 月	14.67	46.96	13.21	0.096	0.070	1.32
	平均值	19.73	50.44	13.53	0.110	0.070	1.36
浅海区域 Shallow sea	2 月	16.16	53.92	16.15	0.109	0.090	1.56
	5 月	14.07	49.57	12.26	0.097	0.073	1.26
	8 月	18.36	56.62	15.19	0.122	0.070	1.38
	11 月	15.15	50.17	13.46	0.098	0.067	1.44
	平均值	15.93	52.57	14.26	0.110	0.070	1.41
湿地区域 Wetland area	范围	5.40~86.71	19.45~128.65	4.82~22.43	0.03~0.28	0.01~0.16	0.86~2.37
	平均值	18.38	52.01	13.84	0.11	0.07	1.39
	标准偏差	10.43	15.24	3.86	0.04	0.03	0.23
	变异系数/%	56.73	29.30	27.87	41.86	37.80	16.61
	沉积物 I / II 质量标准 ^[22]	35/100	150/350	60/130	0.5/1.5	0.2/0.5	20/65

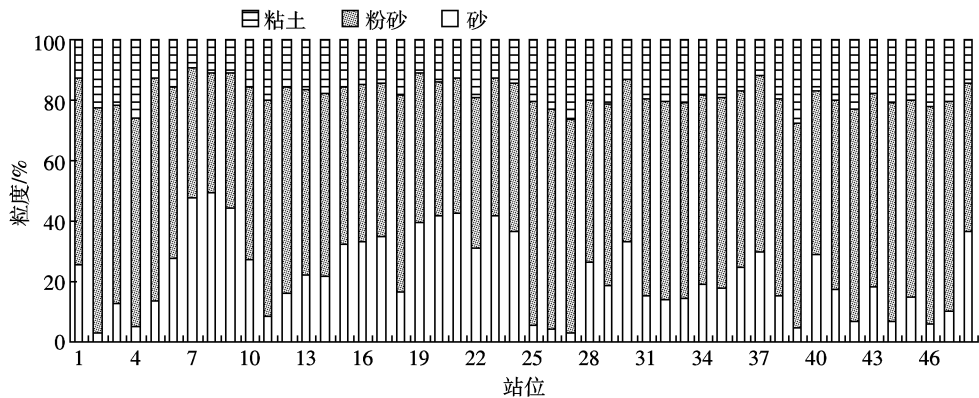


图 2 大沽河湿地表层沉积物粒度分布图

Figure 2 Distribution of the particle in surface sediments in Dagou River wetland

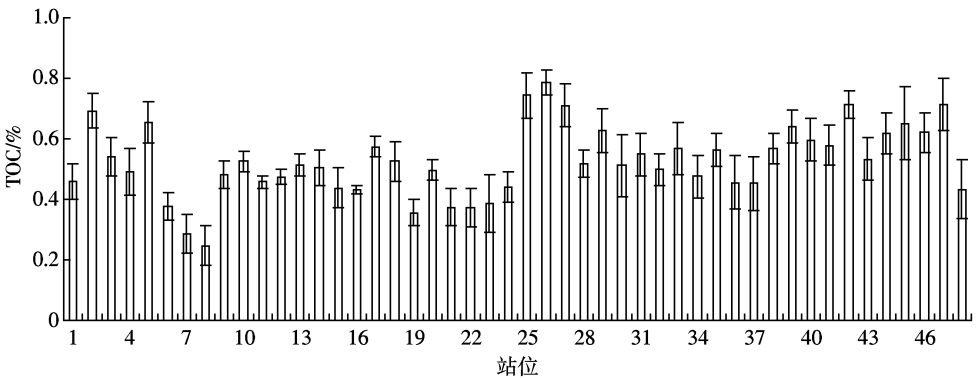


图 3 大沽河湿地表层沉积物有机碳分布图

Figure 3 Distribution of the organic carbon in surface sediments in Dagou River wetland

表 4 大沽河湿地表层沉积物重金属之间及其与有机碳、粘土之间的相关分析

Table 4 The revelence of heavy metals ,different particles size and organic carbon in Dagou River wetland

	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	TOC	粘土
Cu	1							
Zn	0.731**	1						
Pb	0.643**	0.639**	1					
Cd	0.642**	0.535**	0.424*	1				
Hg	-0.111	0.006	0.107	0.145	1			
As	0.011	0.060	0.233	-0.048	0.335*	1		
TOC	0.430*	0.573**	0.665**	0.690**	-0.023	0.040	1	
粘土	0.618**	0.528**	0.607**	0.551**	-0.117	0.224	0.681**	1

注:** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.3 大沽湿地表层沉积物重金属污染程度分析

表 5 分析结果显示,从整个调查区域范围来看,重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As 单因子污染系数均值都小于 1,属于低污染水平;污染系数均值由大到小依次为 Zn>Cu>Pb>Hg>Cd>As。因此,Zn、Cu、Pb 是整个大沽河湿地沉积物中最主要的环境污染因子。大沽河感潮河段、潮间带区域、浅海区域各调查月份沉积物中重金属综合污染指数 Cd 均小于 5,属于低等污染

程度。但随着生活污水及工业污水的排放,经各条河流流入胶州湾污水的逐渐增多,致使大沽河湿地的污染物总量不断增加,尤其近 20 年来随着青岛市沿海经济的快速发展,污染呈现加重趋势。与 1990 年相比,2000 年陆源总有机碳从 69%~77% 上升至 93%^[21]。2004—2007 年间,胶州湾氮、磷等营养盐超标,Cu、Zn、Pb 等重金属也集中分布在河口区,湿地生态环境遭到不同程度的破坏^[22-24]。因此,在以后的研究中大沽

河湿地表层沉积物重金属污染程度仍需要予以关注。

胶州湾大沽河湿地各区域重金属综合污染程度由高至低依次为大沽河感潮河段>潮间带区域>浅海区域,说明浅海区域、大沽河感潮河段是 Cu、Zn、Pb、Hg、As、Cd 等的主要点污染源。在时间分布上,重金属综合污染指数由高到低为:①大沽河感潮河段为 2 月>11 月>8 月>5 月;②潮间带为 8 月>2 月>5 月>11 月;③浅海区域为 2 月>8 月>11 月>5 月。总体趋势是,大沽河湿地区域重金属综合污染程度 2 月份最高,5 月份最低。

2.4 大沽河湿地表层沉积物重金属潜在生态风险评价

通过对大沽河湿地表层沉积物重金属潜在生态风险进行评价,得到重金属潜在生态风险系数和风险指数两项指标,具体结果见表 6。

从整个调查区域来看,6 种重金属在各站位的潜在生态风险系数均小于 40, 均值范围为 0.55~19.76。潜在生态风险系数均值由大到小依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn,因此 Hg 是大沽河湿地最主要的潜在生态风险因子。各站位重金属综合潜在生态风险指数均小于 150,属于低潜在生态风险水平。各区域重金属元素总潜在生态危害程度由大到小依次为:①大沽河感潮河段: Hg>Cd>Cu>Pb>As>Zn;②潮间带区域: Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn;③浅海区域: Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn。由此可见, Hg 元素的潜在生态危害系数在调查海域中最高, 而 Zn 元素的潜在生态危害系数在调查海

域中最低。这可能与各区域所接纳陆源污染物的性质以及该海域沉积环境重金属的生物地球化学循环的差异有关^[9]。在时间分布上,各区域重金属元素总潜在生态危害程度由大到小依次为:①大沽河感潮河段: 2 月>11 月>5 月≈8 月;②潮间带区域: 2 月>8 月>11 月>5 月;③浅海区域: 2 月>8 月>5 月>11 月。

3 结 论

(1)除 Cu 外,大沽河湿地表层沉积物重金属 Pb、Zn、Cd、Hg 和 As 的含量均符合海洋沉积物质量一类标准的要求, 与国内典型海湾港口相比处于较低水平。Cu、Zn、Cd 含量在 8 月最高,2 月次之,5 月最低; Pb、Hg、As 3 种重金属含量在 2 月份最高。

(2)粘土与有机质含量是控制大沽河湿地表层沉积物重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 分布的主要因素。Hg、As 分布主要受人为排污、水动力作用等因素的影响,而以细粒级组分为主且分布相对均匀的沉积特征对其的分布影响较小, 且受元素本身化学性质影响,本研究中 Hg、As 元素与总有机质的相关性不显著。

(3)污染评价的结果表明,大沽河湿地表层沉积物 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 单因子污染系数均值都小于 1, 属于低污染水平; 综合污染程度属于低等污染水平,综合污染指数按从高到低的顺序依次为 Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn。大沽河湿地区域重金属综合污染程度 2 月份最高,5 月份最低。

表 5 沉积物中重金属污染单因子评价结果

Table 5 The results of single factor evaluation on heavy metal pollution in sediment

调查区域	时间	单因子污染系数 C_j						综合污染系数 C_d
		Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	
大沽河感潮河段 Tidal reach of Dagu River	2 月	0.89	0.79	0.64	0.20	0.44	0.12	3.09
	5 月	0.47	0.55	0.50	0.18	0.31	0.08	2.09
	8 月	0.75	0.72	0.51	0.23	0.20	0.08	2.48
	11 月	0.86	0.87	0.54	0.17	0.35	0.09	2.89
	平均值	0.74	0.73	0.55	0.19	0.33	0.09	2.64
潮间带 Intertidal zone	2 月	0.56	0.64	0.53	0.22	0.49	0.10	2.55
	5 月	0.72	0.60	0.52	0.20	0.25	0.08	2.37
	8 月	0.86	0.70	0.59	0.25	0.26	0.09	2.74
	11 月	0.49	0.59	0.53	0.19	0.35	0.09	2.23
	平均值	0.66	0.63	0.54	0.22	0.34	0.09	2.47
浅海区域 Shallow sea	2 月	0.54	0.67	0.65	0.22	0.45	0.10	2.63
	5 月	0.47	0.62	0.49	0.19	0.36	0.08	2.22
	8 月	0.61	0.71	0.61	0.24	0.35	0.09	2.61
	11 月	0.50	0.63	0.54	0.20	0.33	0.10	2.30
	平均值	0.53	0.66	0.57	0.21	0.37	0.09	2.44
总体均值		0.64	0.67	0.55	0.21	0.35	0.09	2.52

表 6 表层沉积物重金属潜在生态风险系数和风险指数

Table 6 The potential ecological risk factors(E_i^i) and risk indices(E_{RI}) of heavy metals in surface sediments

调查区域	时间	单因子潜在生态风险系数 E_i^i						综合潜在生态 风险指数 RI
		Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As	
大沽河感潮河段 Tidal reach of Dagu River	2 月	4.47	0.79	3.19	6.00	17.76	1.19	33.40
	5 月	2.34	0.55	2.48	5.40	12.51	0.82	24.11
	8 月	3.74	0.72	2.57	6.77	7.81	0.82	22.43
	11 月	4.29	0.87	2.71	5.13	14.20	0.92	28.11
	平均值	3.71	0.73	2.74	5.83	13.07	0.94	27.01
潮间带 Intertidal zone	2 月	2.82	0.64	2.64	6.71	19.76	1.02	33.60
	5 月	3.59	0.60	2.62	5.87	10.05	0.84	23.57
	8 月	4.30	0.70	2.93	7.48	10.26	0.87	26.54
	11 月	2.45	0.59	2.64	5.75	13.92	0.88	26.22
	平均值	3.29	0.63	2.71	6.45	13.50	0.90	27.48
浅海区域 Shallow sea	2 月	2.69	0.67	3.23	6.54	18.07	1.04	32.24
	5 月	2.35	0.62	2.45	5.84	14.58	0.84	26.67
	8 月	3.06	0.71	3.04	7.32	13.95	0.92	28.99
	11 月	2.52	0.63	2.69	5.89	13.40	0.96	26.09
	平均值	2.66	0.66	2.85	6.40	15.00	0.94	28.50
总体平均值		3.22	0.67	2.76	6.23	13.86	0.93	27.67

(4)大沽河湿地表层沉积物 6 种重金属对该区域生态风险构成低潜在生态风险,风险程度由高到低依次为 $Hg>Cd>Pb>Cu>As>Zn$, 其中 Hg 的潜在生态风险最大。2 月份各区域重金属元素综合潜在生态危害程度最高。

参考文献:

- [1] 周召千, 刘素美, 戚晓红, 等. 胶州湾潮滩沉积物-水界面交换对海湾营养盐的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5):422-426.
ZHOU Zhao-qian, LIU Su-mei, QI Xiao-hong, et al. Influence of exchanges at sediment-seawater interface on nutrient loads in tidal flat of Jiaozhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5):422-426.
- [2] 周贵忠, 张金恒, 王军强, 等. 利用模糊数学评价大沽河干流水质的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29:191-195.
ZHOU Gui-zhong, ZHANG Jin-heng, WANG Jun-qiang, et al. Application of the fuzzy mathematics in evaluation Dagu River water quality [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29:191-195.
- [3] Chapman P, M Wang F Y. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33:3937-3941.
- [4] 张丽洁, 王 贵, 姚 德, 等. 胶州湾李村河口沉积物重金属污染特征研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版, 2003, 17(1):8-14.
ZHANG Li-jie, WANG Gui, YAO De, et al. Characteristics of heavy metal pollution in the Licun River estuary, Jiaozhou Bay, Qingdao[J]. *Journal of Shandong University of Technology:Natural Sciences*, 2003, 17(1):8-14.
- [5] 韩 彬, 辛 明, 陈发荣, 等. 胶州湾东北部海域生态环境污染状况研究[J]. 岩矿测试, 2009, 28(6):524-528.
HAN Bin, XIN Ming, CHEN Fa-rong, et al. Study on ecological environmental pollution status in sea areas of northeastern Jiaozhou Bay[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(6):524-528.
- [6] 孙丕喜, 王宗灵, 战 闰, 等. 胶州湾海水中无机氮的分布与富营养化研究[J]. 海洋科学研究进展, 2005, 23(4):466-471.
SUN Pei-xi, WANG Zong-ling, ZHAN Run, et al. Study on dissolved inorganic nitrogen distributions and eutrophication in the Jiaozhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(4):466-471.
- [7] 刘义峰, 吴桑云, 陈 勇, 等. 胶州湾潮间带沉积物主要污染来源及分布特征[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(2):163-169.
LIU Yi-feng, WU Sang-yun, CHEN Yong, et al. Sources and distributions of main pollutants in the intertidal sediments of the Jiaozhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2):163-169.
- [8] Zhang Y P, Yang G P, Chen Y. Chemical characterization and composition of dissolved organic matter in Jiaozhou Bay[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27:851-858.
- [9] 陈正新, 王保军, 黄海燕, 等. 胶州湾底质痕量元素污染研究[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(3):280-288.
CHEN Zheng-xin, WANG Bao-jun, HUANG Hai-yan, et al. Trace elements pollution in sediment of the Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(3):280-288.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB 17378—2007 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
State General Administration for Quality Supervision and Inspection of China, Quarantine of Standardization Administration of China. GB 17378—2007. The specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.

- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8):975-1001.
- [12] 国家技术监督局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- State Bureau of Technical Supervision. GB 18668—2002 Marine sediment quality[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [13] 罗先香, 张 蕊, 杨建强, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2):262-269.
- LUO Xian-xiang, ZHANG Rui, YANG Jian-qiang, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2):262-269.
- [14] 张玉凤, 王立军, 霍传林, 等. 锦州湾表层沉积物重金属污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(3):258-260.
- ZHANG Yu-feng, WANG Li-jun, HUO Chuan-lin, et al. Pollution evaluation on heavy metals in surface sediments in Jinzhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(3):258-260.
- [15] 左 平, 汪亚平, 程 珺, 等. 深圳湾近岸海域表层沉积物中重金属污染评价[J]. 海洋通报, 2009, 28(1):50-54.
- ZUO Ping, WANG Ya-ping, CHENG Jun, et al. Pollution assessment of heavy metals in coastal surface sediments of the Shenzhen Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(1):50-54.
- [16] 乔永民, 黄长江. 汕头湾表层沉积物重金属元素含量和分布特征研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(1):106-116.
- QIAO Yong-min, HUANG Chang-jiang. A study on concentration and distribution characteristics of heavy metals in surface sediment of the Shantou Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(1):106-116.
- [17] YU Rui-lian, YUAN Xing, ZHAO Yuan-hui, et al. Heavy metal pollution in inter tidal sediments from Quanzhou Bay, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:664-669.
- [18] ZHOU Feng, GUO Huai-cheng, HAO Ze-jia. Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GISP-based chemometric approach[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54:1372-1384.
- [19] Barbier F, Due G, Petit Ramel M. Adsorption of lead and cadmium ions from aqueous solution to the montmorillonite/water interface[J]. *Colloids and Surfaces, A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 16:153-159.
- [20] Blilali L E I, Rasmussen P E, Hall G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17:1171-1181.
- [21] Li X G, Yuan H M, Li N, et al. Organic carbon source and burial during the past one hundred years in Jiaozhou Bay, North China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:551-557.
- [22] 马妍妍, 李广雪, 史经昊, 等. 胶州湾大沽河口湿地现状的遥感分析[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36:179-184.
- MA Yan-yan, LI Guang-xue, SHI Jing-hao, et al. Detection and analysis of land use change of Daguhe estuary with remotely sensed imagery[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36:179-184.
- [23] 姚 云, 沈志良. 水域富营养化研究进展[J]. 海洋科学, 2004, 28(6):14-22.
- YAO Yun, SHEN Zhi-liang. Assessment of seawater eutrophication in the Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(6):14-22.
- [24] 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.
- LI Yu, YU Zhi-ming, CAO Xi-hua, et al. Distribution and enrichment of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6):580-589.