

海南老爷海表层沉积物重金属分布特征及污染评价

卢振峰¹, 唐 棣², 李 乐³, 陈石泉²,
朱志雄³, 马 坤⁴

(1.山东宜维检测有限公司, 山东 枣庄 277400; 2.海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 570125; 3.广东省汕头生态环境监测中心站, 广东 汕头 515041; 4.枣庄市生态环境局台儿庄分局, 山东 枣庄 277400)

摘 要:通过 2019 年测定的表层沉积物中重金属 (Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As)、环境因子 (TOC、TP、TN、硫化物) 和石油类污染物的含量, 探讨了老爷海表层沉积物中各因子的空间分布特征、相关性及其重金属的潜在生态风险。结果表明, 老爷海沉积物中各因子的分布不均匀, 除 TP 和 TN 为中度变异外, 其他因子均为高度变异。沉积物中各因子的分布整体表现为从内湾到外湾的递减趋势, 且 Cu、Pb、As、硫化物、石油类均在口门附近出现高值区。各因子的空间波动顺序为石油类>Hg>TOC>Cd>Cu>硫化物>Pb>As>Zn>Cr>TN>TP。Pearson 相关性分析表明, Cd、Zn、Pb、Cr、TN、石油类、TOC、硫化物、Cu 具有相同的来源或途径, 均来自陆源和海源输入, 主要受沿岸的海水养殖、网箱养殖、城镇工农业生产的影响。硫化物与 Cd 和 As 的富集作用相关, 而 Hg 与其他因子的相关性较低或无相关性, 说明 Hg 的来源不同于其他因子。7 种沉积物中重金属的潜在生态风险依次为 Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr, Hg 与 Cd 为主要潜在生态风险因子。地累积指数的污染排序为 Cd>Hg>Pb>Zn>Cr>As>Cu, 老爷海沉积物为轻度污染, Cd 和 Hg 为主要污染因子。

关键词:老爷海; 沉积物; 潜在生态风险指数; 地累积指数

中图分类号: P736; X508 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2023)03-0410-08

Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediment of Laoyehai lagoon, Hainan province

LU Zhen-feng¹, TANG Di², LI Le³, CHEN Shi-quan², ZHU Zhi-xiong³, MA Kun⁴
(1. Shandong Yiwei Testing Limited Company, Zaozhuang 277400, China; 2. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 570125, China; 3. Shantou Ecological Environment Monitoring Center Station of Guangdong, Shantou 515041, China; 4. Taierzhuang Bureau of Ecological Environment Bureau of Zaozhuang, Zaozhuang 277400, China)

Abstract: The spatial distribution characteristics, correlation and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments of the Laoyehai lagoon were investigated by measuring the contents of heavy metals Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg, As, and environment factors TOC, TP, TN, sulfide and petroleum in 2019. The results showed that the distribution of each factor in the sediments of the Laoyehai lagoon was very irregular, except for TP and TN, which were moderately variable, while all other factors were highly variable. The overall sediment factors showed a decreasing trend from the inner lagoon to the outer lagoon, and Cu, Pb, As, sulfide and petroleum all had high values near the mouth area. The coefficient of variation of each factor was in the following order,

收稿日期: 2022-08-12, 修订日期: 2022-12-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900905); 国家自然科学基金项目(42166006); 海南省高层次人才项目(421RC662)

作者简介: 卢振峰(1981—), 男, 山东枣庄人, 工程师, 从事环境保护及环境监测工作, E-mail: lzfsml10000@163.com

通讯作者: 朱志雄(1984—), 男, 湖南攸县人, 工程师, 从事环境监测研究, E-mail: zzxboy168@163.com

Petroleum>Hg>TOC>Cd>Cu>sulfide>Pb>As>Zn>Cr>TN>TP. Pearson correlation analysis shows that Cd, Zn, Pb, Cr, TN, Petroleum, TOC, sulfide, Cu come from the same source or in the same way, input of land and sea source pollution, it was mainly influenced by marine aquaculture, net farming, urban industrial and agricultural production. sulfide was related to the enrichment of Cd and As. The correlation between Hg and other factors is low or not, indicating that the main source of Hg is different from other factors. The potential ecological risk of 7 sediment heavy metals were in the following order, Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr. Hg and Cd are the main potential ecological risk factors. The geological accumulation index evaluates of pollution degree in the following order, Cd>Hg>Pb>Zn>Cr>As>Cu, the sediment of the Laoyehai lagoon is lightly polluted, and Cd and Hg were the main pollution factors.

Key words: Laoyehai lagoon; sediment; potential ecological risk; geoaccumulation index

海岸潟湖地处陆、海过渡带,在碳库平衡、消减陆源污染物以及维系海岸带地区生态安全方面,扮演着重要的角色^[1]。在海岸潟湖资源密集开发过程中,含有机物、营养盐和重金属等污染物的水体进入海岸潟湖,储存在潟湖沉积物中,由微生物驱动着碳、氮、磷、硫和重金属等元素以及持久性有机物的循环^[1-2]。其中,重金属具有高毒性、难以降解和生物累积等特征,可以通过各级食物链进行生物累积、放大,从而影响生态系统,并对人体和环境产生毒性^[3]。然而,目前对于老爷海沉积物中重金属的含量分布及污染评价方面的研究却鲜有报道。

潟湖沉积物承载着污染物的归宿地和蓄积库,能够很好地记录当地的气候、水文或人为活动引起的环境变化信息,是研究历史时期潟湖自然环境变化和人类活动影响的理想场所^[4]。本研究通过老爷海沉积物中总有机碳、总磷、总氮、硫化物、石油类、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg和As的含量、分布特征及污染源进行分析,并对其潜在生态风险程度和地累积指数进行评价,旨在为老爷海沉积物污染评价和海湾生态环境保护提供基础数据及科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

老爷海位于万宁市南部,是一个自然形成的狭长半封闭状态潟湖,面积约 6.6 km²,以龙堡桥为界分为外湾和内湾,水深为 0.5~6.0 m,外湾浅、内湾深,通过西南侧岸段上的宽约 70 m 的狭窄潮汐通道与南海相连^[5]。潟湖内水生动、植物资源丰富,其中海草主要有卵叶喜盐草

(*Halophila ovalis*)、贝克喜盐草(*Halophila beccarii*)和单脉二药草(*Halodule uninervis*)等种类。自 20 世纪 90 年代以来,老爷海沿岸池塘养殖、渔排养殖和网箱养殖等发展迅猛,潮汐通道不断减小,纳潮量日益减少,潟湖与外海水体交换减缓,生态环境也随之恶化^[6]。2016 年 8 月,国家海洋局下发《关于批准建立大连仙浴湾等 9 处国家级海洋公园的通知》(国海环字[2016]361 号),批准建立万宁老爷海国家级海洋公园。2017 年,万宁老爷海被列入《海南省海洋生态保护与整治修复规划(2017—2020 年)》海洋生态保护与整治修复重点区域,随后开展了一系列退塘还海、红树林修复和内湾疏浚工程,旨在恢复老爷海的潟湖生境条件,以提高潟湖的生态系统服务功能。2019 年 6 月,在老爷海布设 10 个沉积物调查点位,涵盖整个老爷海潟湖及口门区域(图 1)。

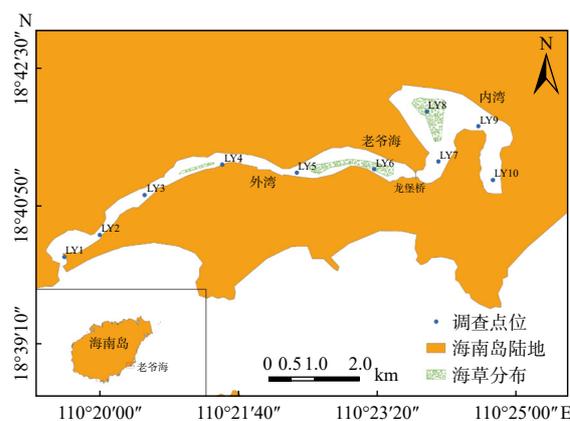


图 1 监测点位分布

Fig. 1 Location of sampling stations

1.2 样品采集与分析

表层沉积物样品采用抓斗式采泥器(DDC1-

4 型号, 开口面积为 0.1 m^2) 采集, 剔除海藻、海草及动植物残骸等后, 采集 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 的沉积物, 做好记录带回实验室。总有机碳(TOC)含量测定采用重铬酸钾氧化-还原容量法, 总氮(TN)含量测定采用凯氏滴定法, 总磷(TP)和石油类含量测定采用分光光度法, 硫化物含量测定采用碘量法, Cu、Pb、Zn、Cd 及 Cr 含量测定采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, iCAP RQ, Thermo Scientific, 德国), Hg 及 As 含量测定采用原子荧光光度仪(吉天 AFS-933)。使用平行样和标准物质进行质量控制, 回收率为 $86.0\% \sim 110.0\%$, 测试相对误差均小于 5% 。样品采集、保存、制备和前处理均符合《海洋监测规范》^[7] 的要求。

1.3 数据处理

老爷海表层沉积物各因子利用软件 IBM SPSS Statistics 26.0 进行数理统计、相关性分析, 采用软件 ArcGIS 10.7 绘制反距离加权法(inverse distance weighted, IDW)空间分布图。

1.4 评价方法

1.4.1 潜在生态风险指数法

老爷海表层沉积物采用瑞典科学家 Håkanson 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法(potential ecological risk index)评价^[8], 目前该方法已被广泛用于沉积物的生态风险评价^[9-11]。计算公式如下:

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (1)$$

$$C_d = \sum_i^k C_f^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (3)$$

式中: C^i 为元素 i 的浓度实测值; C_n^i 为元素 i 的评价参考值, 老爷海处于南海近海海域, 故重金属参考值采用中国浅海沉积物重金属背景值^[12], Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As 和 Hg 背景值分别为 15、20、65、0.065、61、7.7 和 0.025; C_f^i 表示元素 i 的污染系数; C_d 为多种重金属综合污染指数; T_r^i 为元素 i 的毒性系数, Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、As、Hg 对应元素 i 的毒性系数为 1、30、5、5、2、10、40; E_r^i 表示元素 i 的潜在生态风险系数。具体评价标准见表 1^[8]。

表 1 沉积物潜在风险评价标准及等级

Tab.1 Index and ranking of potential ecological risk for sediments

等级	C_f^i	C_d	E_r^i
低	<1	<8	<40
中等	1~3	8~16	40~80
强	3~6	16~32	80~160
很强	/	/	160~320
极强	≥ 6	≥ 32	≥ 320

1.4.2 地累积指数

地累积指数(geoaccumulation index, I_{geo})是由 Muller 于 1969 年提出的一种评价沉积物中重金属污染程度的方法^[13], 该方法考虑了地球环境背景、地球化学背景及人为污染可能对沉积物重金属的富集污染程度, 可综合反映出外源重金属在沉积物中的污染状况^[14-15]。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_i}{1.5B_i} \quad (4)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数, C_i 为元素 i 的实测值 (mg/kg), B_i 为元素 i 的地球化学背景值 (mg/kg)。 B_i 选用中国浅海沉积物重金属背景值^[12]。地累积指数污染等级见表 2。

表 2 地累积指数污染等级

Tab.2 Geoaccumulation Index of pollution levels

I_{geo}	等级	地累积指数污染程度
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	轻度
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	偏中度
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中度
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	严重
$5 < I_{\text{geo}} \leq 10$	6	极严重

2 结果与讨论

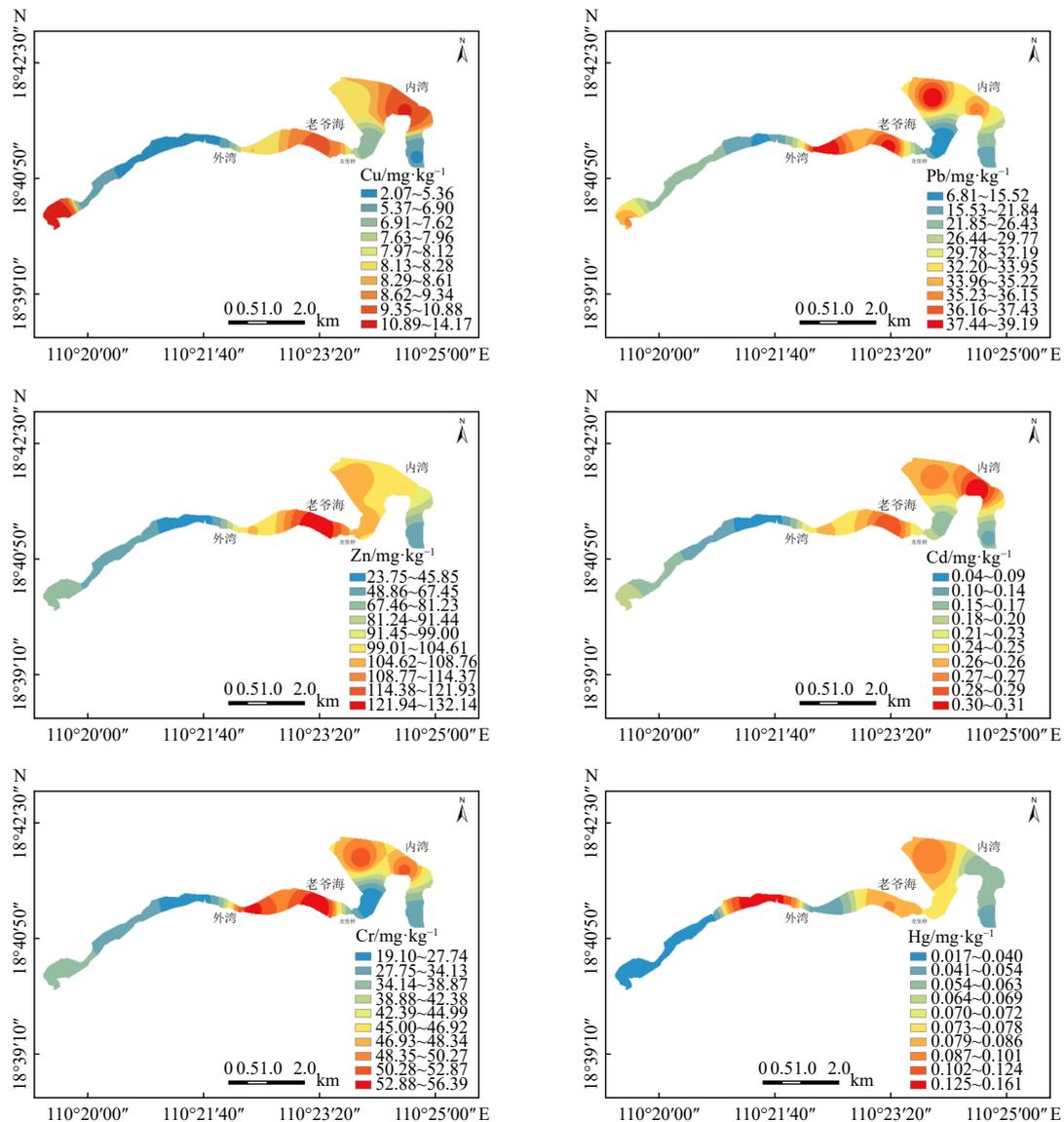
2.1 老爷海表层沉积物中环境因子分布特征及含量评价

老爷海表层沉积物中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 及 As 的含量范围分别为 2.07 ~ 14.17 mg/kg、6.81 ~ 39.19 mg/kg、23.75 ~ 132.15 mg/kg、0.04 ~ 0.31 mg/kg、19.10 ~ 56.39 mg/kg、

0.017 ~ 0.161 mg/kg、2.311 ~ 7.753 mg/kg, 平均值分别为 (7.74±3.42) mg/kg、(27.73±11.55) mg/kg、(82.99±32.69) mg/kg、(0.19±0.09) mg/kg、(38.38±14.07) mg/kg、(0.063±0.044) mg/kg、(4.353±1.739) mg/kg。环境因子 TOC、TP、TN、硫化物和石油类污染物的含量范围分别为 0.73% ~ 2.32%、348.32 ~ 905.16 mg/kg、202.14 ~ 1101.03 mg/kg、13.24 ~ 208.17 mg/kg、14.36 ~ 470.21 mg/kg, 平均值分别为 (1.40±0.64) %、(587.66±193.56) mg/kg、(743.36±262.40) mg/kg、(112.62±48.71) mg/kg、(182.51±160.34) mg/kg。从老爷海沉积物各因子空间分布特征(图 2)可以看出, 重金属、环境因子和石油类污染物含量整体表现为从内湾向外湾的递减趋势, 且 Cu、Pb、As、硫化物、石油类

均在口门附近出现高值区。

对老爷海表层沉积物中各因子含量进行变异系数分析, 结果表明, 各因子空间波动程度的顺序依次为石油类>Hg>TOC>Cd>Cu>硫化物>Pb>As>Zn>Cr>TN>TP。石油类的空间变异系数最大为 0.88, 其次为 Hg, 变异系数为 0.69。变异系数可以反映污染物的空间分布情况, 变异系数越高, 空间波动越大^[10,16]。老爷海表层沉积物中石油类、Hg、TOC、Cd、Cu、硫化物、Pb、As、Zn、Cr 高度变异, 空间分布不均匀, 离散性大; TN、TP 为中等变异, 空间分布相对不均匀, 离散性较大。上述分析表明, 不同点位的污染物存在不同的污染源, 推测与老爷海的沉积物粒度及地形结构有关。



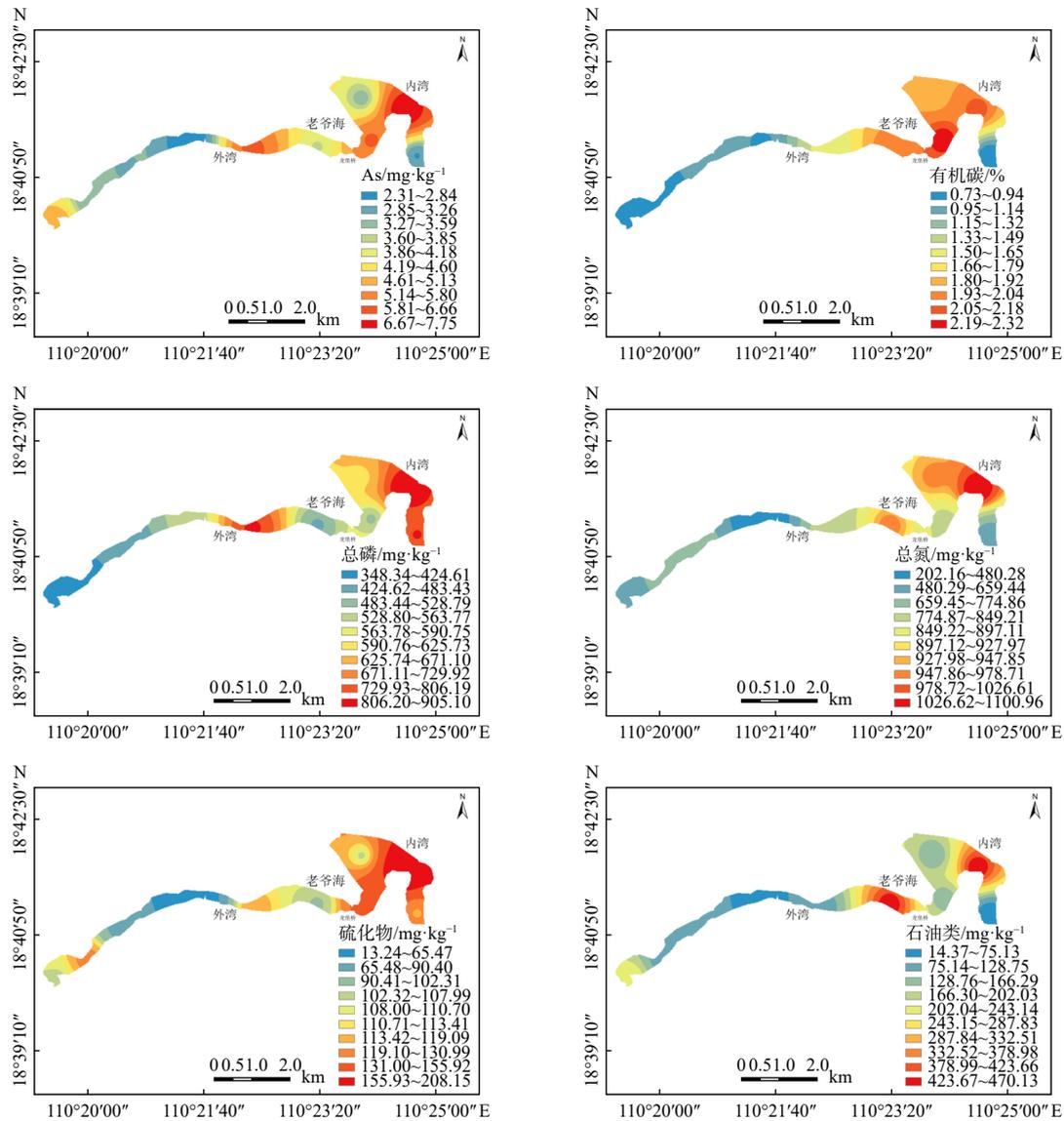


图 2 表层沉积物中各因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of factors in surface sediments of Laoyehai lagoon

《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[17] 和美国 NOAA 污染物生态风险阈值(沉积物质量基准值见表 3)可用于评价老爷海沉积物重金属对底栖生物的危害^[9]。老爷海沉积物各因子的分析结果显示,各点位中 Zn、Cd、Pb、Cu、As、Hg、硫化物、石油类的最大值均小于沉积物一类标准, TOC 均值小于一类, 30% 点位未超过二类。各点位中重金属含量均小于 ERL 基准值, 绝大部分点位 Zn、Cd、Pb、Cu、Cr、As、Hg 浓度几乎不会对底栖生物产生潜在危害, 总体来看, 老爷海沉积物质量较好, 重金属的生态风险较低。

2.2 重金属潜在生态风险评价

老爷海表层沉积物中重金属的污染因子 C_f^i 依次为 Cd(2.94)>Hg(2.54)>Pb(1.39)>Zn(1.28)>Cr(0.63)>As(0.57)>Cu(0.52), 其中, Cr、As、Cu 污染等级为轻微, Cd、Hg、Pb、Zn 的污染等级为中等, Cd 在老爷海(LY5、LY6、LY8、LY9)的 C_f^i 值超过 3, 污染等级为强, Hg 在老爷海(LY6、LY7、LY8)的 C_f^i 值超过 3, 污染等级为强, LY4 的 C_f^i 值超过了 6, 污染等级为极强, 需引起注意。7 种重金属的 C_d 值为 6.2~14.0, 其中, 70.0% 点位的 C_d 值>8, 老爷海 C_d 均值为 9.8 ± 0.3 , 污染等级为中等, 表明老爷海表层沉积物已经受到重金属污染的影响。

表 3 表层沉积物中各因子含量的统计特征

Tab.3 Statistics characteristics of heavy metal elements in surface sediments

参数	Cu /mg·kg ⁻¹	Pb /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Cr /mg·kg ⁻¹	Hg /mg·kg ⁻¹	As /mg·kg ⁻¹	TOC /(%)	TP /mg·kg ⁻¹	TN /mg·kg ⁻¹	硫化物 /mg·kg ⁻¹	石油类 /mg·kg ⁻¹
最小值	2.07	6.81	23.75	0.04	19.1	0.017	2.311	0.73	348.32	202.14	13.24	14.36
最大值	14.17	39.19	132.15	0.31	56.39	0.161	7.753	2.32	905.16	1101.03	208.17	470.21
平均值	7.74	27.73	82.99	0.19	38.38	0.063	4.353	1.4	587.66	743.36	112.62	182.51
标准偏差	3.42	11.55	32.69	0.09	14.07	0.044	1.739	0.64	193.56	262.40	48.71	160.34
变异系数	0.44	0.42	0.39	0.45	0.37	0.69	0.4	0.46	0.33	0.35	0.43	0.88
ERL	34	46.7	150	1.2	81	0.15	8.2	—	—	—	—	—
ERM	270	218	410	9.6	370	0.71	70	—	—	—	—	—
一类标准	35	60	150	0.5	80	0.2	20	2	—	—	300	500
二类标准	100	130	350	1.5	150	0.5	65	3	—	—	500	1000

对表层沉积物重金属进行潜在风险系数 (E_r^i) 分析(表 4), 沉积物中 7 种重金属潜在生态风险依次为 Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr, 其中, Hg 和 Cd 的 E_r^i 值最高, 属于强生态风险, 其他 5 种重金属均为轻微生态风险。Hg 的潜在生态风险等级为强, 其中轻微、中等、强和很强的调查点位比例为 20.0%、20.0%、50.0% 和 10.0%。Cd 潜在生态风险等级为强, 其中轻微、中等和强的调查点位比例为 10.0%、40.0% 和 50.0%。老爷海 Hg 的潜在生态风险在外湾中段 LY4 点位

出现高值区, Cd 的潜在生态风险大体为从内湾向外湾的递减趋势, 且在口门附近出现高值区, Hg 和 Cd 的潜在生态风险均值都达到强等级(图 3)。Hg 和 Cd 是生物的非必需元素, 毒副作用很强, 甲基汞可致人类患“水俣病”, 镉可致“骨痛病”。Hg 和 Cd 极易富集于生物体内, 通过食物链进入人体, 影响人类健康, 对人类和海洋生物生长都存在严重威胁^[18]。因此, 建议相关部门加强对老爷海沉积物中 Hg 和 Cd 的监测和预警, 以避免对海洋生态环境造成更大的危害。

表 4 表层沉积物中重金属的潜在风险系数 (E_r^i)

Tab.4 The potential ecological risk facotter of heavy metals in surface sediments

点位	单重金属潜在生态风险系数/ E_r^i						
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
LY1	4.72	8.88	1.13	83.08	1.15	44.80	6.38
LY2	2.09	5.92	1.03	73.85	1.12	27.20	4.34
LY3	1.72	5.82	0.93	60.00	1.08	30.40	4.18
LY4	0.69	3.59	0.37	18.46	0.63	257.60	3.00
LY5	2.76	9.80	1.62	115.38	1.77	67.20	7.85
LY6	3.25	9.54	2.03	133.85	1.85	139.20	4.95
LY7	2.39	1.70	1.65	69.23	0.63	123.20	7.68
LY8	2.73	9.80	1.63	124.62	1.70	150.40	4.43
LY9	3.73	9.04	1.56	143.08	1.68	92.80	10.07
LY10	1.73	5.24	0.82	60.00	0.98	81.60	3.65
平均值	2.58	6.93	1.28	88.15	1.26	101.44	5.65
风险等级	轻微	轻微	轻微	强	轻微	强	轻微

2.3 地累积指数评价

由图 4 可知, Cu、Cr 及 As 在调查点位的 I_{geo} 值均为负值, 污染等级为 0, 为无污染状态。Zn 的 I_{geo} 为 -2.0 ~ 0.4 (均值为 -0.4), Pb 的 I_{geo} 为 -2.1 ~ 0.4 (均值为 -0.3), Zn 和 Pb 为无污染状态, 其中, 无污染、轻度污染的调查点位均为 50%。

Cd 的 I_{geo} 范围为 -1.3 ~ 1.7, 均值为 0.8, 处于轻度污染, 其中, 无污染、轻度污染和偏中度污染的调查点位为 10%、50% 和 40%。Hg 的 I_{geo} 为 -1.1 ~ 2.1, 均值为 0.4, 处于轻度污染, 其中无污染、轻度污染、偏中度污染和中度污染的调查点位为 30%、30%、30% 和 10%。7 种重金属 I_{geo}

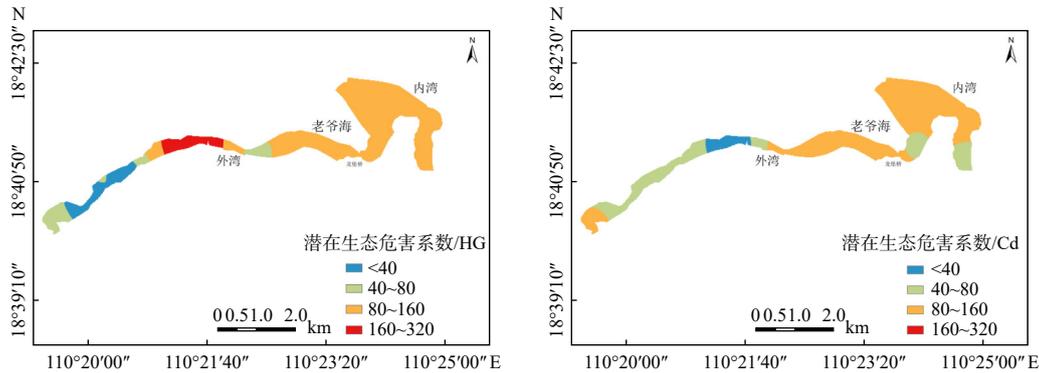


图 3 表层沉积物重金属潜在生态风险空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of potential ecological risks of heavy metals in surface sediments

排序为 $Cd > Hg > Pb > Zn > Cr > As > Cu$ 。老爷海表层沉积物总体污染程度为轻度污染, Cd 和 Hg 为主要污染因子。

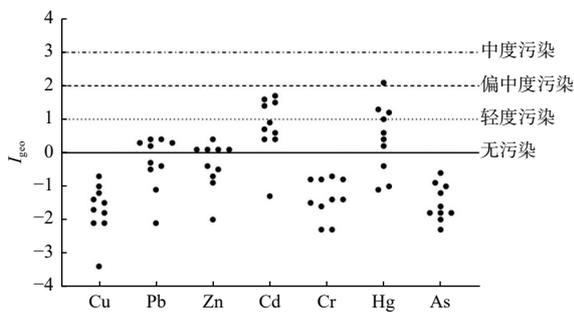


图 4 重金属地累积指数

Fig. 4 Geological accumulation index of heavy metal

2.4 相关性分析

蛋白质是生命体的重要组成部分, TOC 与 TN 比可以指示蛋白质的含量, 因此可以用 TOC/TN 区分有机质的种类, 目前已被广泛应用

于区分沉积物中的有机质来自海源或陆源。已有研究表明, 海源有机质的 TOC/TN < 8, 陆源有机质的 TOC/TN > 12, 水生植物的 TOC/TN 通常为 6 ~ 8 和 10 ~ 30, 陆源和海源有机质中的 TOC/TN 分别为 6 ~ 9 和大于 12^[19]。分析结果表明, 老爷海沉积物的 TOC/TN 为 9.0 ~ 44.5, 平均值为 24.8, 说明老爷海沉积物中的有机质可能包括水生有机质、陆源有机质、海源有机质, 来自沿岸的海水养殖、网箱养殖、城镇工农业生产等人类活动的影响。

表层沉积物中吸附态重金属的分布特征通常受 pH、水温、硫化物、盐度、悬浮物含量等多种环境因子的共同影响^[20-21], 继而影响沉积物中各种物理、生化过程的相互作用。本研究进一步对表层沉积物中 7 种重金属 (Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As)、4 种环境因子 (TOC、TP、TN、硫化物) 和石油类进行 Pearson 相关分析 (表 5)。结

表 5 表层沉积物各因子间相关性分析 (n=10)

Tab.5 Person correlation matrix of factors in the surface sediments (n=10)

因子	TOC	TP	TN	硫化物	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	石油类
TOC	1											
TP	0.316	1										
TN	0.746*	0.353	1									
硫化物	0.509	0.482	0.762*	1								
Cu	0.297	-0.019	0.452	0.575	1							
Pb	0.163	0.230	0.488	0.263	0.657*	1						
Zn	0.819**	0.165	0.851**	0.575	0.600	0.520	1					
Cd	0.648*	0.381	0.871**	0.661*	0.695*	0.806**	0.866**	1				
Cr	0.409	0.359	0.711*	0.385	0.544	0.931**	0.705*	0.917**	1			
Hg	0.270	0.083	-0.309	-0.490	-0.403	-0.240	-0.133	-0.211	-0.188	1		
As	0.608	0.458	0.582	0.803**	0.629	0.277	0.571	0.600	0.352	-0.260	1	
石油类	0.575	0.117	0.653*	0.570	0.705*	0.541	0.678*	0.772**	0.623	-0.085	0.580	1

注: *代表 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; **代表 0.01 级别 (双尾), 相关性极显著

果显示,Cd与Zn、Pb、Cr、TN、石油类呈现极显著正相关($r>0.8, p<0.01$),与TOC、硫化物、Cu为显著正相关($0.6<r\leq 0.8, p<0.01$);TOC与Zn呈现极显著正相关($r>0.8, p<0.01$),与TN、Cd为显著正相关($0.6<r\leq 0.8, p<0.01$);Cr与TN、Zn为显著正相关($0.6<r\leq 0.8, p<0.01$);Pb与Cd、Cr呈现极显著正相关($r>0.8, p<0.01$),与Cu呈现极显著正相关($r>0.8, p<0.01$);石油类与TN、Cu、Zn为显著正相关($0.6<r\leq 0.8, p<0.01$)。上述分析说明,Cd、Zn、Pb、Cr、TN、石油类、TOC、硫化物、Cu的来源相同,或以相同的途径来自陆源和海源输入,主要受沿岸的海水养殖、网箱养殖、城镇工农业生产等的影响。硫化物与As呈高度正相关($r>0.8, p<0.01$),硫化物、As、Cd在内湾出现明显的高值区,该区域的硫化物含量较高(LY9点位硫化物含量为208.17 mg/kg),高值区的形成可能与硫化物对Cd和As两种重金属的富集作用有关^[11]。Hg与其他因子之间的相关性较低或不相关,说明Hg的来源与其他因子不同。

3 结论

(1)老爷海表层沉积物中各因子整体表现为从内湾向外湾的递减趋势,且Cu、Pb、As、硫化物、石油类均在门口附近出现高值区。

(2)7种沉积物重金属潜在生态风险依次为Hg>Cd>Pb>As>Cu>Zn>Cr,其中,Hg与Cd为主要的潜在生态风险因子。

(3)地累积指数的排序为Cd>Hg>Pb>Zn>Cr>As>Cu,老爷海沉积物总体表现为轻度污染,Cd和Hg为主要污染因子。

(4)Pearson相关性分析表明,老爷海表层沉积物中Cd、Zn、Pb、Cr、TN、石油类、TOC、硫化物、Cu的来源相同,或以相同的途径来自陆源和海源输入,主要受沿岸的海水养殖、网箱养殖、城镇工农业生产等的影响。硫化物对Cd和As富集作用有关。Hg与其他因子的相关性较低或不相关,说明Hg的来源与其他因子不同。

参考文献:

[1] 范成新,刘敏,王圣瑞,等.近20年来我国沉积物环境与污

- 染控制研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(4):346-374.
- [2] 温学发,张心昱,魏杰,等.地球关键带视角理解生态系统碳生物地球化学过程与机制[J].地球科学进展,2019,34(5):471-479.
- [3] 甘华阳,梁开,林进清,等.北部湾北部滨海湿地沉积物中砷与镉和汞元素的分布与累积[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):15-28.
- [4] 宋德卓,薛积彬,孙升升,等.海南小海潟湖沉积物地球化学揭示的近千年气候环境变化[J].地球化学,2022,51(2):202-212.
- [5] 马文超,王焱,朱卓毅.高强度养殖活动下老爷海溶解氧的亏损及有机质成分的响应[J].华东师范大学学报:自然科学版,2021(2):85-99.
- [6] 李瑞环.海南东部近海地区营养盐动力学的研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [7] GB 17378—2007,海洋监测规范[S].
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [9] 骆丽珍,朱志雄,陈石泉,等.万宁小海潟湖表层沉积物时空分布特征与污染评价[J].海洋湖沼通报,2022,44(2):103-111.
- [10] 李杰,祁士华,王向琴,等.海南小海沉积物中的重金属分布特征及潜在生态风险评价[J].安全与环境工程,2008,15(2):18-22.
- [11] 柴小平,胡宝兰,魏娜,等.杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J].环境科学学报,2015,35(12):3906-3916.
- [12] 赵一阳,鄢明才.中国浅海沉积物化学元素丰度[J].中国科学(B辑),1993,23(10):1084-1090.
- [13] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [14] 徐方建,闫慧梅,田旭,等.海南岛东部陆架表层沉积物重金属污染评价[J].中国环境科学,2016,36(5):1530-1539.
- [15] 朱爱美,张辉,崔菁菁,等.渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素[J].海洋学报,2019,41(12):134-144.
- [16] 毕宝帅,余宏昌,张亚,等.上海东风西沙水库表层沉积物重金属含量及生态风险评价[J].上海海洋大学学报,2020,29(5):709-719.
- [17] GB 18668—2002,海洋沉积物质量[S].
- [18] 陈斌,尹晓娜,姜广甲,等.珠江口外陆架海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价及来源分析[J].应用海洋学报,2021,40(3):520-528.
- [19] 吕双燕,金秉福,贺世杰,等.莱州湾-龙口湾表层沉积物有机质特征及来源分析[J].环境化学,2017,36(3):650-658.
- [20] 徐程,杨斌,朱雪菁,等.大风江口海域沉积物酸可挥发性硫化物、重金属分布及风险评价[J].环境科学研究,2020,33(6):1530-1538.
- [21] 廖宝淦,刘秋辛,贾珍珍,等.珠江口磨刀门水体中重金属分布、分配特征及其影响因素[J].海洋环境科学,2021,40(1):8-15.