

雷州半岛近海表层沉积物重金属污染评价

夏 嘉^{1,2,3}, 高 苑^{2,3}, 王思波^{2,3}, 王遥平^{2,3}

(1.南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江), 广东 湛江 524013; 2.广东海洋大学 化学与环境学院, 广东 湛江 524088; 3.广东海洋大学 深圳研究院, 广东 深圳 518120)

摘 要: 本文测定了雷州半岛近海 43 个表层沉积物中重金属元素 (Hg、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Cr) 和类金属元素 (As) 的含量, 并分析其空间分布特征, 采用潜在生态风险指数法对重金属的污染风险等级进行评价。结果表明: 各站位中 Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 和 As 的平均含量分别为 0.037×10^{-6} 、 15.62×10^{-6} 、 66.33×10^{-6} 、 0.13×10^{-6} 、 26.71×10^{-6} 、 59.54×10^{-6} 和 11.20×10^{-6} , 均超过南海北部陆架区沉积物背景值; 研究区综合潜在生态风险指数 *RI* 平均值为 130, 属于低生态风险, 但雷州半岛东侧鉴江入海口海域和西侧流沙湾近海海域达到中等生态风险程度, Hg 是主要的污染因子; 与前人 2010 年结果比较, 雷州半岛近海沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As 含量呈现逐渐增加的趋势, 反映了人类活动对该海域的影响。

关键词: 重金属; 分布特征; 污染评价; 生态风险; 雷州半岛

中图分类号: P736; X142 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2022)02-0276-07

Assessment of the heavy metal pollution in the offshore surface sediments of the Leizhou peninsula

XIA Jia^{1,2,3}, GAO Yuan^{2,3}, WANG Si-bo^{2,3}, WANG Yao-ping^{2,3}

(1.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang), Zhanjiang 524013, China; 2.College of Chemistry and Environmental Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3.Shenzhen Research Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China)

Abstract: The content and spatial distribution characteristics of heavy metal elements (Hg, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr) and metal-like element (As) in 43 surface sediments from the offshore Leizhou peninsula were determined. The risk grade of heavy metal pollution was evaluated by the potential ecological risk index method. The results showed that the average contents of Hg, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr and As in each station were 0.037×10^{-6} , 15.62×10^{-6} , 66.33×10^{-6} , 0.13×10^{-6} , 26.71×10^{-6} , 59.54×10^{-6} and 11.20×10^{-6} , respectively, which exceeded the background values of sediments in the northern shelf area of the South China Sea. The mean value of *RI* in the study area was 130, which at low ecological risk. However, the moderate ecological risk was found in the Jianjiang river's estuary on the east side of the Leizhou peninsula and the offshore area of Liusha bay on the west side, and Hg was the main pollution factor. Compared with the results in 2010, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, and As contents in the Leizhou peninsula's offshore sediments showed a gradual increase, reflecting the influence of human activities on the study area.

收稿日期: 2020-10-14, 修订日期: 2021-02-20

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2019-08); 国家自然科学基金项目(41802150); 广东海洋大学“创新强校”资助项目(Q18301); 广东海洋大学“冲一流”项目(231419029); 广东海洋大学博士科研启动项目(R20033)

作者简介: 夏 嘉(1989—), 男, 江西九江人, 讲师, 博士, 主要从事有机地球化学及元素地球化学研究, E-mail: xiaj@gdou.edu.cn

通讯作者: 高 苑(1987—), 女, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要从事海洋有机地球化学研究, E-mail: gaoy@gdou.edu.cn

Key words: heavy metal; distribution characteristics; pollution assessment; ecological risk; the Leizhou peninsula

环境中的重金属一部分来自自然环境,另一部分来源于人类的生产和生活等活动,它们可以通过地表径流、大气沉降、废水排放、垃圾焚烧等方式进入海洋中^[1-3]。海洋环境中常见的重金属如锌(Zn)、铜(Cu)、镍(Ni)、锡(Sn)、钴(Co)等一般具有一定毒性,而汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)及类金属砷(As)等元素的生物毒害作用显著^[4-5]。重金属由于具有潜在毒性、不可逆性、普遍性以及生物累积放大作用而引起人们的关注,普遍认为其会对海洋生态系统产生严重威胁^[6-7]。海洋环境与沉积物的地球化学特征存在密切的关系,重金属经排放入海后会在吸附、络合、沉淀等作用下存储在沉积物中,当水文动力、环境条件(如pH、盐度、氧化还原电位)等因素改变时,这部分元素会重新释放到上覆水体中,对水体造成“二次污染”。因此,海洋沉积物重金属污染问题一直都是国内外研究的重点^[8-9]。

海湾、港口等近海海域的养殖业发达、海上运输繁忙,受人类生产、生活影响较大,同时水体交换能力也较差,其水体污染日趋严重,对海洋生态环境和养殖业的发展造成很大威胁。雷州半岛位于中国大陆的最南端,其海岸线曲折,海湾与岛屿众多,且其近海海域是东亚低纬度海洋性季风影响的重要海陆连接带。同时,雷州半岛人口稠密,人类生活、生产活动频繁,对半岛周围的海洋环境具有潜在威胁。本文对这一海域沉积物中重金属污染进行了研究,旨在了解研究海域沉积物中重金属的沉积变化趋势,为近海海洋污染防治、生态系统修复保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 站位布设及样品采集

本研究于2017年秋季(9月29日—10月7日)广东海洋大学环雷州半岛海洋环境与生态综合科学考察公共航次期间搭载“天龙”号调查船,通过重力箱式采样器采集海底表层沉积物样品。使用塑料铲将表层0~5 cm的沉积物装

入洁净的聚乙烯样品袋中,放入冰箱中冷冻保存,直至实验室分析。在预先设定的57个采样站位中共获取43个表层沉积物(图1),未获得沉积物样品的站位主要是砂质海底。获取样品的站位水深范围为8~50 m,平均水深15.5 m。

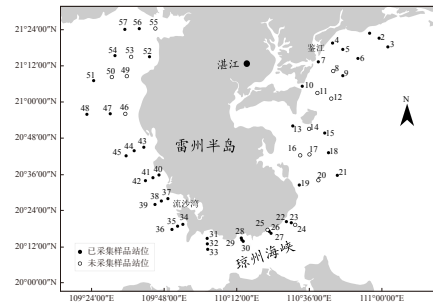


图1 研究区域及采样站位

Fig. 1 Map of the study area and sampling locations

1.2 样品的前处理及分析

沉积物样品经冷冻干燥后,使用玛瑙研钵研磨过200目网筛,混合均匀后装入洁净样品袋并置于干燥器内备用。取0.1 g沉积物粉末放于聚乙烯烧杯中,采用浓硝酸-高氯酸-氢氟酸混合液进行消解,使用安捷伦7500Cx电感耦合等离子体质谱仪测定样品中的Cr、Cu、Cd、Pb、Zn 5种重金属和As的含量。Hg的测定采用美国Labtech MAX-L测汞仪。实验中选用的试剂为优级纯,实验用水为超纯水,使用国家标准物质(近海沉积物标准物质GBW07314)进行质量控制以确保数据的可靠性。

1.3 生态风险评价方法

采用潜在生态风险指数法对沉积物重金属的生态风险进行评价,综合考虑重金属毒性、重金属背景值等因素,定量划分潜在生态风险等级,其计算公式如下:

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

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (2)$$

式中: T_r^i 为第*i*种重金属的毒性系数,体现重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度,Hg、Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、As的毒性系数分别

为 40、5、1、30、5、2、 $10^{[10]}$; C_p^i 为第 i 种重金属的污染指数; C^i 为重金属元素 i 的实际测量含量 ($\times 10^{-6}$); C_n^i 为重金属元素 i 的背景值 ($\times 10^{-6}$), 分别选取雷州半岛典型砖红壤重金属背景值^[11] 及中国南海北部陆架区表层沉积物重金属环境背景值^[12]; E_i^p 为单个重金属的潜在生态危害指数; RI 为各项重金属的综合潜在生态危害指数。

2 结果与讨论

2.1 雷州半岛近海表层沉积物重金属含量 雷州半岛近海表层沉积物中 Cr、Cu、Cd、Pb、

Zn、Hg 和 As 的含量如表 1 所示。研究海域内各重金属平均含量表现为 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$ 的特征。其中, Cr 的含量为 $(10.52 \sim 93.05) \times 10^{-6}$, 平均值为 59.54×10^{-6} ; Zn 的含量为 $(14.61 \sim 108.01) \times 10^{-6}$, 平均值为 66.33×10^{-6} ; Pb 的含量为 $(7.15 \sim 41.71) \times 10^{-6}$, 平均值为 26.71×10^{-6} ; Cu 的含量为 $(1.63 \sim 33.76) \times 10^{-6}$, 平均值为 15.62×10^{-6} ; As 的含量为 $(2.65 \sim 30.1) \times 10^{-6}$, 平均值为 11.20×10^{-6} ; Cd 的含量为 $(0.01 \sim 0.86) \times 10^{-6}$, 平均值为 0.13×10^{-6} ; Hg 的含量为 $(0.007 \sim 0.074) \times 10^{-6}$, 平均值为 0.037×10^{-6} 。

表 1 沉积物中各重金属含量及环境背景值

Tab.1 Contents of heavy metals in sediments and their environmental background values

统计值	Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
平均值/ $\times 10^{-6}$	0.037	15.62	66.33	0.13	26.71	59.54	11.20
最大值/ $\times 10^{-6}$	0.074	1.63	108.01	0.86	41.71	93.05	30.1
最小值/ $\times 10^{-6}$	0.007	33.76	14.61	0.01	7.15	10.52	2.65
变异系数/ (%)	43.8	44.6	34.3	93.0	29.7	34.6	43.6
南海北部陆架沉积物背景值/ $\times 10^{-6}$	0.020	7.43	54.40	0.18	15.60	39.30	9.71
雷州半岛砖红壤背景值/ $\times 10^{-6}$	0.030	8.00	21.00	0.03	23.40	36.14	5.40
沉积物I类标准/ $\times 10^{-6}$	0.2	35	150	0.5	60	80	20

由表 1 可以看出, Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Hg、As 的平均含量均优于《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)规定的沉积物 I 类标准。与雷州半岛典型砖红壤重金属背景值相比^[11], Cr、Cu、Cd、Pb、Zn、Hg、As 平均含量依次超过该背景值的 1.2、2.0、3.2、3.8、1.1、1.6 和 2.1 倍。与南海陆架区表层沉积物重金属环境背景值相比^[12], Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、As 平均含量依次是该背景值的 1.8、2.1、1.2、1.7、1.5 和 1.2 倍, Cd 平均含量未超过其背景值。与上述两种背景值相比, 本文结果显示研究海域存在一定程度的重金属污染。此外, 不同采样站位之间的变异系数可以反映某一重金属在一定区域内的分布和污染程度的差异性^[13]。本研究海域表层沉积物中 Cd 的变异系数为 93%, 说明其含量空间分布差异大, 受外界环境影响严重, 可能存在一定的人为污染。其余元素的变异系数为 29.7%~44.6%, 属于中等变异水平, 说明受人为干扰相对较小。

利用 Suffer 软件对本研究区各重金属含量的空间变化特征进行绘制(图 2), 该方法可利用采样站位的已知数据通过克里金插值来估计未知点的值。如图 2 所示, 本研究区重金属的空间分布具有明显的区域性。在雷州半岛东侧海域, Hg、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 的高值区较为一致, 均位于鉴江入海口附近海域, 显示了鉴江输入对沉积物重金属的贡献。其中, Pb 含量在靠近鉴江入海口较高, 而其他元素则在离岸较远处含量较高。这表明该区域沉积物中 Pb 可能主要来自鉴江输入, 而其他 6 种元素除鉴江河流输入外可能还存在其他来源。柯东胜^[14]指出, 珠江水系携带的污染物会随粤西沿岸流进入雷州半岛东部海域, 由于水动力减弱, 同时在南海暖流及上升流的共同控制下, 粤西沿岸流携带的物质大多沿岸运输并最终沉积在近岸区域^[15-16]。在琼州海峡海域, Zn、Pb、Cr 含量相对较高, Hg、Cu、Cd、As 含量较低, 整体呈现出西高东低的趋

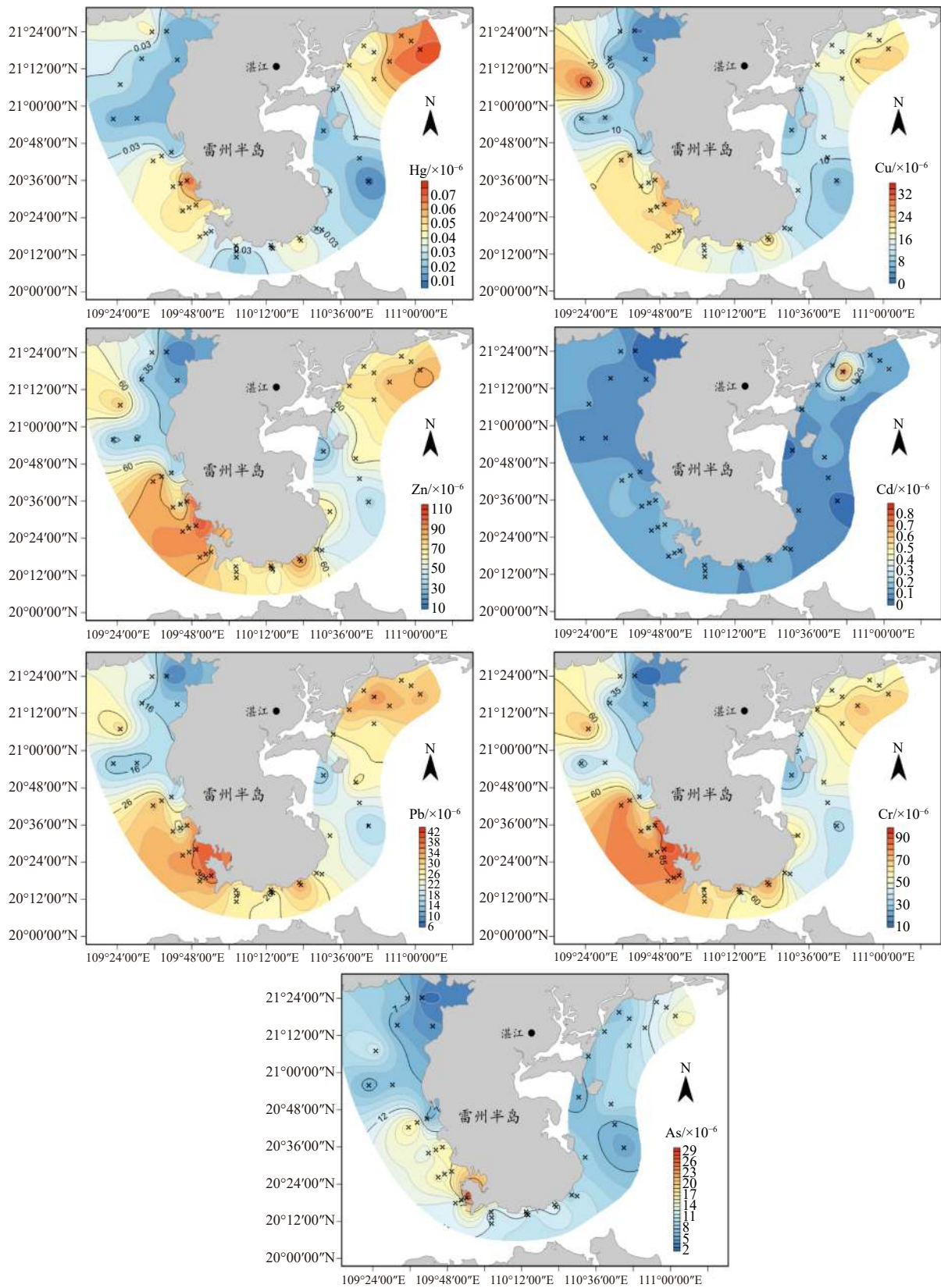


图 2 雷州半岛近海表层沉积物重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of heavy metals in the offshore surface sediments of the Leizhou Peninsula

势。在雷州半岛西侧海域,重金属含量分布呈现出北低南高的特征,Hg、Cu、Zn、Pb、Cr、Cd均在流沙湾附近海域出现高值区。流沙湾是著名的海水珍珠养殖生产基地,人类生产活动会造成重金属在该海区沉积物中累积^[17]。水产养殖饵料中通常富含Cu和Zn两种微量元素,饵料的投放会引起水体中这两种元素浓度的增加,因此,水产养殖的内源性重金属污染通常以Cu、Zn为主^[18],这可能是造成本文中流沙湾附近海域沉积物中Cu和Zn含量较高的主要原因(图2)。此外,琼州海峡潮流冲刷物出海峡西口后,在北部湾环流的作用下向北输运并沉积^[19],也可成为该海域重金属的重要来源。

2.2 表层沉积物重金属含量相关性分析

雷州半岛近海表层沉积物中的重金属含量及平均粒径的Pearson相关性分析结果(表2)显示,Cu、Zn、Pb、Cr具有较好的相关性($r>0.85$),Zn与Cr相关系数最高。较高的相关性说明这几种重金属具有同源性,其迁移路径、迁移过程以及沉积行为具有相似性。Cd与其他元素相关程度较低($r\leq 0.493$),表明Cd的沉积行为与其他元素差异较大。Cu和Pb与沉积物平均粒径的相关性最高($r\geq 0.6$),说明它们易被细粒物质吸附;Zn、Cr、Hg、As与平均粒径相关性次之,Cd与平均粒径的相关性最低。

表2 重金属及平均粒径的Pearson相关性分析

Tab.2 Pearson correlation analysis of heavy metals and mean particle size

	Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	平均粒径/ φ
Hg	1							
Cu	0.661*	1						
Zn	0.676*	0.925*	1					
Cd	0.249	0.266	0.346	1				
Pb	0.636*	0.857*	0.934*	0.493*	1			
Cr	0.592*	0.908*	0.969*	0.291	0.898*	1		
As	0.516*	0.710*	0.725*	0.149	0.758*	0.791*	1	
平均粒径/ φ	0.477*	0.615*	0.596*	0.276	0.600*	0.583*	0.457*	1

注: *在0.01水平(双侧)上显著相关, $n=43$

2.3 表层沉积物重金属污染生态风险评价

由表3可知,单项重金属潜在生态风险程度依次为 $Hg>Cd>As>Cu>Pb>Cr>Zn$ 。Hg在81.4%的采样站位达到中风险以上等级,其他6种元素除Cd存在一个采样站位为强风险外,整体均为

低潜在生态风险。虽然7种元素中Hg的含量最低,但由于其具有极强的生物毒性,因此潜在生态风险最高。从综合潜在生态风险指数来看(表4),研究区内RI均值为130,整体属于低生态风险程度。从各站位来看,41.9%的采样站位

表3 雷州半岛近海海域沉积物各元素潜在风险指数单项评价

Tab.3 Individual evaluation of potential risk index of each heavy metal and As in the Leizhou peninsula offshore sediments

	Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
低风险($E_i^p < 40$)	18.6	100	100	97.7	100	100	100
中等风险($40 \leq E_i^p < 80$)	39.5						
所占比例/(%)	41.9			2.3			
强风险($80 \leq E_i^p < 160$)							
很强风险($160 \leq E_i^p < 320$)							
极强风险($E_i^p \geq 320$)							
潜在风险指数/ E_i^p							
最大值	147.19	22.72	1.99	142.99	13.37	4.74	31.00
最小值	14.66	1.09	0.27	2.2	2.29	0.54	2.72
平均值	73.51	10.51	1.22	21.68	8.56	3.03	11.53

表 4 雷州半岛近海海域沉积物重金属潜在生态风险指数综合评价

Tab.4 Comprehensive evaluation of potential ecological risk index of heavy metals in the Leizhou peninsula offshore sediments

RI	潜在生态风险	所占比例 / (%)	站点编号
RI<150	低	58.1	4、10、13、15、18、19、21、22、23、26、28、29、30、31、32、33、34、43、47、48、51、52、54、56、57
150≤RI<300	中等	41.9	1、2、3、5、6、7、9、27、35、36、37、38、39、40、41、42、44、45
300≤RI<600	强	0	
RI≥600	极强	0	

为中等生态风险,主要位于雷州半岛东部鉴江入海口海域的 7 个站位以及雷州半岛西部流沙湾近海海域的 10 个站位,这可能反映了鉴江河流输入以及海湾养殖产业对沉积物重金属含量的影响。

虽然雷州半岛近海沉积物中重金属污染程度相对较低,但与历史监测记录相比(表 5),沉积物中重金属含量均呈现增加的趋势^[20]。庄宇

君^[20]在 2010 年 10 月利用与本文相同的站位设计采集了 38 个表层沉积物,与其研究结果进行对比,在约 7 年时间内,雷州半岛近海表层沉积物中重金属含量均有所增加,其中,As 增加了 0.75 倍,变化最大;Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 分别增加了 0.3、0.49、0.61、0.26 和 0.32 倍。结果说明,近年来雷州半岛近海表层沉积物中重金属污染呈逐渐加重的趋势。

河流输入及沿海人为活动产生的生活污水和工业废水是海洋中重金属的重要来源。根据《2017 年广东省海洋环境状况公报》^[21],广东省 2017 年主要入海河流共排放重金属(Cu、Zn、Pb、Cr、Hg)和 As 约 0.35 万吨。人类活动导致的重金属排放量增加对沿海环境质量构成潜在的生态威胁。雷州半岛重要海湾如湛江湾接纳了湛江市的大部分生活、工业和港口航运污水^[22-23],流沙湾内存在大规模的海水珍珠贝苗培育和生^[24-25]。这些受人类活动影响较为强烈的区域重金属含量通常较高,进而影响邻近海域的重金属污染水平,因此,相关部门需采取一定措施减轻雷州半岛近海重金属污染加剧的趋势。

表 5 雷州半岛近海沉积物重金属平均含量对比($\times 10^{-6}$)

Tab.5 Comparison of the average heavy metal content in the Leizhou peninsula offshore sediments

Hg	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	调查时间	数据来源
0.037	15.62	66.33	0.13	26.71	59.54	11.20	2017-09	本研究
-	12.0	44.6	0.081	21.2	45.0	6.4	2010-07	环雷州半岛近海 ^[20]

3 结论

(1) 研究区表层沉积物中 6 种重金属和 As 的平均含量为 Zn>Cr>Pb>Cu>As>Cd>Hg。除 Cd 外,其他重金属和 As 的平均含量均超过南海北部陆架区表层沉积物中重金属背景值。Cu、Zn、Pb、Cr 具有较好的相关性($r>0.85$),显示它们具有同源性及相似的沉积行为。

(2) 潜在生态风险指数均值为 Hg>Cd>As>Cu>Pb>Cr>Zn, 其中, Hg 呈现中等以上风险。RI 分析显示,雷州半岛东侧鉴江入海口海域和西侧流沙湾近海海域属于中等生态风险程度。与前人 2010 年监测结果相比,6 种重金属和 As 含量均呈现增加的趋势。

参考文献:

- [1] TANNER P A, LEONG L S, PAN S M. Contamination of heavy metals in marine sediment cores from Victoria Harbour, Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(9): 769-779.
- [2] DAI J C, SONG J M, LI X G, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 656-667.
- [3] 孙元敏, 陈 彬, 黄海萍, 等. 中国南亚热带海岛海域沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(1): 123-130.
- [4] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [5] 毛天宇, 戴明新, 彭士涛, 等. 近 10 年渤海湾重金属(Cu, Zn,

- Pb, Cd, Hg)污染时空变化趋势分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(9): 817-825.
- [6] 彭加喜, 刘金铃, 徐向荣, 等. 西沙永兴岛珊瑚重金属水平及其富集效应[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 848-853.
- [7] 李平, 郭晓娟, 杨清书, 等. 珠江磨刀门河口表层沉积物中重金属的分布特征及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 746-753.
- [8] 张际标, 刘加飞, 张才学, 等. 湛江湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(5): 644-648.
- [9] WANG S L, XU X R, SUN Y X, et al. Heavy metal pollution in coastal areas of South China: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 76(1/2): 7-15.
- [10] ZHANG W F, LIU X P, CHENG H F, et al. Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture zone in South China[J]. Marine pollution bulletin, 2012, 64(4): 712-720.
- [11] 许炼烽, 刘腾辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4): 58-62.
- [12] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 161-166.
- [13] 卢霞, 范礼强, 包诗玉, 等. 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(4): 570-575.
- [14] 柯东胜. 粤西沿海海水、底质、生物体中重金属含量及其分布状况的研究[J]. 海洋通报, 1985, 4(4): 20-24.
- [15] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 1-8.
- [16] 浦泳修. 沿岸上升流研究的概况[J]. 海洋通报, 1985, 4(6): 55-58, 20.
- [17] 王增焕, 柯常亮, 王许诺, 等. 流沙湾贝类养殖海域环境质量评价[J]. 南方水产科学, 2011, 7(3): 24-30.
- [18] 蔡继晗, 李凯, 郑向勇, 等. 水产养殖重金属污染现状及治理技术研究进展[J]. 水产科学, 2010, 29(12): 749-752.
- [19] 陈亮, 张玉芬, 李团结, 等. 珠江口及琼东北海区元素地球化学特征及物质来源[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 130-138.
- [20] 庄宇君. 雷州半岛近岸沉积物重金属分布特征及化学形态研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2011: 17-22.
- [21] 广东省海洋与渔业厅. 2017年广东省海洋环境状况公报[R]. 广州: 广东省海洋与渔业厅, 2018.
- [22] 兰圣迎, 吴玲玲, 陈洁, 等. 湛江南柳河入海排污口邻近海域沉积物重金属污染评价[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 38-41.
- [23] 施玉珍, 张际标, 李雪英, 等. 湛江湾沉积物中酸可挥发性硫和重金属含量分布及重金属生态风险评价[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 466-471.
- [24] 张际标, 刘加飞, 张瑜斌, 等. 流沙湾重金属变化特征与潜在生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 352-356.
- [25] 许战州, 朱艾嘉, 蔡伟叙, 等. 流沙湾海草床重金属富集特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7244-7250.

~~~~~

(上接第 275 页)

- [3] 俞丞. 近期建设规划中土地供应调控手段的研究[D]. 上海: 同济大学, 2004: 1-10.
- [4] 张学良. 新旧版《城市规划编制办法》之异同——与总体规划关系[J]. 江西建材, 2014 (10): 21-22.
- [5] 钱国栋. 城镇控制性详细规划管理信息系统研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-3.
- [6] 刘丰, 韩雪松. 国土空间规划背景下区域交通规划方法探析[C]//品质交通与协同共治——2019年中国城市交通规划年会论文集. 成都: 中国城市规划设计研究院城市交通专业研究院, 2019: 689-698.
- [7] 黄征学. 国家规划体系的演进历程与融合对策[J]. 经济研究参考, 2020 (10): 109-116.
- [8] 徐毅松, 熊健, 范宇, 等. 关于上海建立国土空间规划体系并监督实施的实践和思考[J]. 城市规划学刊, 2020 (3): 57-64.
- [9] 李修颖, 林坚, 楚建群, 等. 国土空间规划的陆海统筹方法探析[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 60-68.
- [10] 叶果, 李欣, 王天青. 国土空间规划体系中的涉海详细规划编制研究[J]. 规划师, 2020, 36(20): 45-49.
- [11] 徐启薇. 建设项目用海面积控制指标体系研究——以浙江省为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 1-4.
- [12] 刘麒. 山东省海域综合管理中生态用海的对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34(S2): 49-52.