doi：10.19388/j.zgdzdc.2022.05.12
引用格式：张晓磊，杨源祯，阎琨，等.广西珍珠湾红树林湿地沉积物重金属分布及评价[J].中国地质调查，2022，9(5)：104－110.(Zhang X L, Yang Y Z, Yan K, et al. Distribution and evaluation of heavy metals in sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland in Guangxi[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5)：104－110.)

广西珍珠湾红树林湿地沉积物重金属分布及评价

张晓磊[1,2]，杨源祯[2]，阎 琨[2,3]，庞国涛[2]
(1.中国海洋大学海洋地球科学学院，山东 青岛 266100；2.中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心，山东 烟台 264000；3.中国地质大学(武汉)环境学院，湖北 武汉 430074)

摘要：沉积物中的重金属属于持久性污染物，具有富集性、难降解性和毒性，长时间累积会对生态环境和人体健康造成威胁。为研究珍珠湾红树林湿地表层沉积物中的重金属含量分布特征及质量现状，2021年9月在珍珠湾红树林分布区采集13件表层沉积物样品，分析测试重金属含量。结果表明：与国内其他红树林湿地相比，珍珠湾红树林湿地表层沉积物中的重金属含量处于相对较低水平；地累积指数法显示大部分表层沉积物样品无重金属污染，仅有2个站位受到Cd和Hg的轻微污染，潜在生态风险指数法表明湾内各站位均为低生态风险；相关性分析和主成分分析表明，Cd主要受江平江输入和珍珠湾东南部海水养殖的影响，其他元素主要为自然背景的岩石风化沉积，利用主成分－多元线性回归模型对重金属的来源进行解析认为，表明江平江输入的重金属贡献率为57%，海水养殖影响的重金属贡献率为43%。综上所述，珍珠湾红树林湿地整体生态状况良好，但仍需重点关注Cd的输入。

关键词：珍珠湾；红树林湿地；沉积物重金属；污染评价
中图分类号：P736.21；X508 **文献标志码：**A **文章编号：**2095－8706(2022)05－0104－07

0 引言

湿地被称为“地球之肾”，红树林湿地作为地球上生产力水平最高的海洋自然生态系统之一，具有丰富的生产力和生物多样性，在护岸消浪、抗灾减灾、净化水体、促淤保滩、优化海岸带环境等方面发挥着重要作用[1-2]。红树林湿地表层沉积物受人类活动、入海河流及海洋等因素共同影响，沉积环境较为特殊，沉积物来源广、沉积速率快且更易积累来自入海河流、潮水和近岸生活垃圾等污染。红树林湿地中沉积的重金属通常具有来源范围广、存在时间长、污染后难以恢复等特点，对生态系统具有潜在的危害[3-4]，且一旦进入生态循环就很难被生物降解，往往会通过低等生物、水体等进入食物链，进而破环生物体的正常生理代谢活动，最终通过生物富集作用危害人体健康和生态环境[5]。此外，沉积物中的重金属还会抑制酶的活性，从而干扰生态环境中的生化反应，威胁湿地底栖生物的生理健康[6]。近年来随着城市发展，沿岸工业、海洋牧场、海水养殖、旅游等活动的日渐密集为近岸污染物，特别是重金属元素的富集沉淀创造了有利条件。前人对珍珠湾的研究多集中在红树林的种类和固碳方面[7-9]，周边区域的重金属研究多集中在防城港和钦州湾海域[10-12]。因此，对珍珠湾国家级红树林保护区开展沉积物重金属含量、分布及污染状况的研究，可为珍珠湾红树林的保护与修复治理等提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于广西北仑河口国家级红树林自然保护区的珍珠湾区域，因盛产珍珠而得名。海湾出

收稿日期：2022－05－05；**修订日期：**2022－09－19。
基金项目：中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心“广西仑北河口—茅尾海一带重要红树林湿地资源调查(编号：ZD20220131)”与中国地质调查局“广西钦州湾海岸综合地质调查(编号：DD20191024)”项目联合资助。
第一作者简介：张晓磊(1982—)，男，工程师，主要从事基础地质与海洋地质调查工作。Email：117220755@qq.com。
通信作者简介：庞国涛(1990—)，男，工程师，主要从事海岸带环境地质调查与评价工作。Email：pgt5241@163.com。

口狭窄,呈漏斗状,湾口西起万尾金滩的东沙头,北与防城区江山镇接壤,东临白龙半岛风景区的白龙台,南部与防城湾相连,湾口宽约 3.5 km,湾内海岸线长约 46 km,海湾面积 94.2 km^2(图 1)。研究区属南亚热带海洋季风气候,年日照时长大于 1 600 h,平均气温 22.5 ℃,平均降雨量为 2 220.5 mm[13]。潮汐类型以正规全日潮为主,多年平均潮差 2.22 m,最大潮差可达 5.1 m[14]。海岸带土壤以风沙土和冲积土为主,陆地土壤主要为红壤土和黄壤土。湾内红树林具有连片面积大、分布集中、观赏性强等特点,总分布面积可达 10.68 km^2,占北仑河口保护区红树林面积的 83.8%[15]。

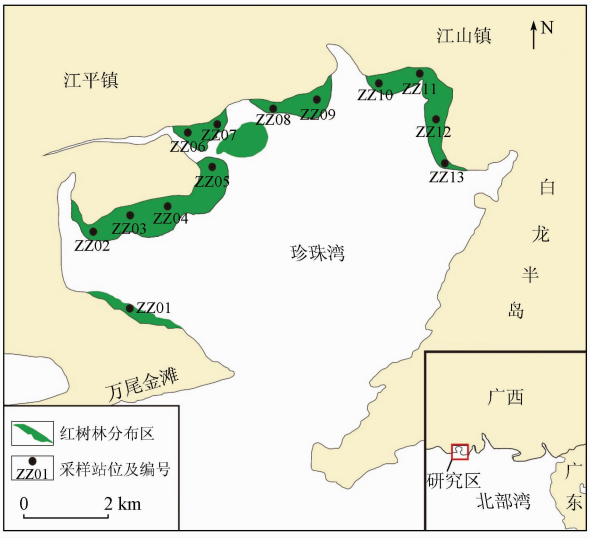


图 1　珍珠湾红树林采样站位分布

Fig. 1　Distribution of mangrove sampling points in Zhenzhu Bay

2　材料与方法

2.1　样品采集与处理

本研究于 2021 年 9 月在珍珠湾红树林分布区采集表层沉积物样品 13 件,采样位置如图 1 所示。采样时先将沉积物表层杂物清理干净,再用洁净木铲取表层 0 ~ 5 cm 深的泥质沉积物,去除样品中的根系等杂质后,快速装入聚乙烯袋密封保存并送样。样品的采集、保存及后期处理等依据《GB 17378.3—2007 海洋监测规范》[16]的相关规定,所有样品均进行重金属检测。

样品测试分析由青岛海洋地质研究所海洋地质实验检测中心完成。样品在实验室常温解冻后使用烘箱烘干(60 ℃),之后研磨至 200 目以下,放在马弗炉中灼烧破坏有机质,之后用 HNO_3 – HF – $HClO_4$ 消解。Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 和 Ni 使用电感耦合等离子质谱仪 Thermo X Series 2 测定; Hg 和 As 使用双道原子荧光光度计 AFS – 920 测定。重金属元素平行样的相对误差 < 0.5%,标准物的回收率为 110% ~ 125%。

2.2　重金属污染评价方法

2.2.1　地累积指数法

地累积指数(the Geo – accumulation Index, I_g)法是评价单一种类重金属污染程度的方法,该方法既考虑自然成岩作用,又兼顾了人类综合活动等对沉积环境的影响,经常用于评价沉积物中的重金属污染水平[17],其公式为

$$I_g = \mathrm{lb}\left[\frac{C_m^i}{1.5 \times C_b^i}\right]。\qquad (1)$$

式中: I_g 为地累积指数,可分为 7 个污染程度,具体见表 1; C_m^i 和 C_b^i 分别为第 i 种重金属的实测浓度和背景值;1.5 为成岩作用可能引起重金属变化的变动系数。

表 1　地累积指数和污染程度关系

Tab. 1　Relationship between I_g and pollution levels

I_g	污染程度
$I_g \leq 0$	无
$0 < I_g \leq 1$	轻度
$1 < I_g \leq 2$	偏中度
$2 < I_g \leq 3$	中度
$3 < I_g \leq 4$	偏重度
$4 < I_g \leq 5$	重度
$I_g > 5$	严重

2.2.2　潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数(Potential Risk Index, RI)法是通过先评价单个重金属元素潜在危害,再累加评价站位多种重金属综合潜在生态风险的方法。该方法综合应用生物毒理学、生态学和环境化学等方面的内容,定量分析重金属的潜在危害程度,是国内外评价沉积物质量最为有效的方法之一[18],其公式为

$$R_I = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times \frac{C_m^i}{C_b^i}。\qquad (2)$$

式中: R_I 为多种重金属综合潜在生态风险指数; E_r^i 和 T_r^i 分别为第 i 种重金属的潜在生态风险指数和毒性系数, C_m^i 为第 i 种重金属的检测浓度; C_b^i 为第 i 种重金属的区域背景值。本文重金属的毒性系数

采用徐争启等[19]的研究成果，背景值采用 Zhao 等[20]计算的中国海岸带沉积物中化学元素的平均值，如表 2 所示。不同的 E_r^i 和 R_I 值范围所对应的重金属潜在生态风险程度见表 3。

表 2 沉积物重金属元素的背景值和毒性系数

Tab. 2 Background value and toxicity index of heavy metal elements in sediment

重金属元素	$C_b^i/10^{-6}$	T_r^i
Cu	15.00	5
Pb	20.00	5
Zn	65.00	1
Cr	60.00	2
Ni	24.00	5
Cd	0.70	30
As	7.70	10
Hg	0.03	40

表 3 重金属元素潜在生态风险程度

Tab. 3 Potential ecological risk levels of heavy metal elements

E_r^i 范围	潜在生态风险程度	R_I 范围	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	低	$R_I < 150$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq R_I < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	高	$300 \leq R_I < 600$	高
$160 \leq E_r^i < 320$	较高	$R_I \geq 600$	较高
$E_r^i \geq 320$	很高		

3 结果与分析

3.1 沉积物重金属含量及分布特征

珍珠湾红树林湿地 13 个站位表层沉积物的重金属含量特征如表 4 所示，8 种重金属平均含量表现为 Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg。变异系数越大说明沉积物中的重金属污染受人为活动干扰越强烈[26]，研究区 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 的变异系数均低于 40%，离散程度较低，说明元素分布较均匀，推测这几种元素在沉积过程中受人类活动干扰较弱；Ni 和 Hg 的变异系数分别为 40% 和 47%，属中等变异，分布不均匀，可能受到了一定程度的人为干扰。

表 4 珍珠湾表层沉积物重金属元素含量特征

Tab. 4 Content characteristics of heavy metal elements in surface sediments of Zhenzhu Bay

统计特征	$w_B/10^{-6}$							
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
最小值	6.26	8.25	17.20	12.10	3.39	0.04	2.67	0.01
最大值	16.80	21.50	43.00	39.90	11.80	0.11	10.10	0.05
平均值	10.58	14.35	28.29	24.04	7.16	0.07	6.59	0.03
标准差	3.45	4.71	9.28	8.58	2.84	0.02	2.49	0.01
变异系数/%	33	33	33	36	40	35	38	47

为判断珍珠湾表层沉积物重金属含量水平，本文收集了中国海岸带背景值及国内其他地区红树林沉积物的重金属含量（表 5）。珍珠湾红树林湿地表层沉积物中只有 Cd 和 Hg 平均值略高于中国海岸带背景值，Cu、Pb、Zn、Cd、As 均低于中国红树林均值，只有 Cr 略高于中国红树林均值；珍珠湾表层沉积物重金属含量与湛江湾区域相近，略低于茅尾海，远低于九龙江口。综合对比显示，珍珠湾红树林湿地表层沉积物中的重金属含量处于相对较低的水平。

表 5 研究区与其他地区红树林沉积物重金属含量

Tab. 5 Contents of heavy metals in mangrove sediments between the study area and other areas

研究区域	$w_B/10^{-6}$							
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
本研究	10.58	14.35	28.29	24.04	7.16	0.07	6.59	0.03
中国海岸带背景值[20]	15.00	20.00	65.00	60.00	24.00	0.07	7.70	0.03
湛江湾[21]	9.62	16.70	29.68	24.17	7.22	0.14	4.97	0.16
九龙江口[22]	34.25	73.54	149.57	63.98	28.62	0.23	12.99	0.15
茅尾海[23]	24.81	18.31	59.85	30.02	9.24	0.34	11.56	0.10
海南八门湾[24]	10.55	12.63	49.51	55.07	21.11	0.63	12.80	—
中国红树林均值[25]	22.77	75.87	86.12	18.19	—	0.21	8.14	—

3.2 重金属污染评价

应用地累积指数法评价珍珠湾表层沉积物中的 8 种重金属，结果见图 2。可以看出珍珠湾区域表层沉积物重金属的 I_g 值分布比较集中，说明其在各站位的污染情况相似，I_g 值表现为 Hg > Cd > As > Pb > Cu > Zn > Cr > Ni。13 个站位的样品中 Cd 元素有 2 个站位（ZZ06 和 ZZ13）、Hg 元素有 4 个站位（ZZ02、ZZ03、ZZ04 和 ZZ06）的 I_g 为 0 ~ 1，处于轻微污染，其他站位的重金属 I_g 值均 < 1，无污染。除 ZZ13 站位外其他受污染站位均位于江平江入海河口附近，推测重金属来源可能与江平江输入有关。

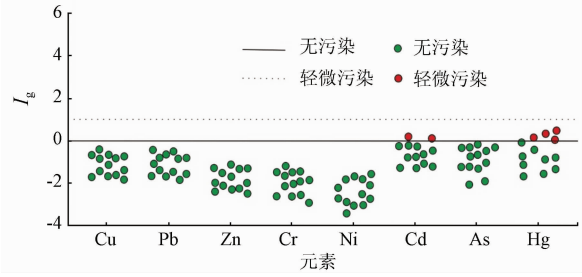


图 2　重金属元素地累积指数

Fig. 2　Geological accumulation index of heavy metal elements

3.3　重金属潜在生态风险分析

珍珠湾表层沉积物各重金属的潜在生态风险指数评价如图 3 所示,其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As 的 E_r^i 均值分别为 3.53、3.59、0.44、0.80、1.50、8.56,均低于40,处于低生态风险。Cd 的 E_r^i 值为 18.46 ~ 50.77,有 2 个站位处于中等生态风险,占总站位的 15.38%；Hg 的 E_r^i 值为 19.22 ~ 81.67,有 5 个站位处于中等生态风险,占总站位的 38.46%,有 1 个站位处于高生态风险,占总站位的 7.69%。

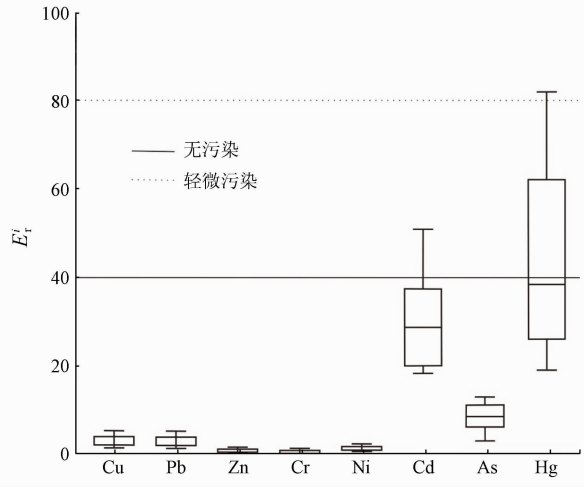


图 3　重金属元素潜在生态风险指数

Fig. 3　Potential ecological hazard index of heavy metal elements

珍珠湾表层沉积物各站位的重金属潜在生态风险指数分布如图 4 所示,湾内 13 个站位的 R_I 变化范围为 49.07 ~ 147.71,平均值为 95.90,所有站位均处于低潜在生态风险,说明珍珠湾区域重金属危害较弱,生态风险整体较低。Cd 和 Hg 在各站位 R_I 的贡献率之和为 68.07% ~ 81.99%,且沉积物中 Cd 和 Hg 的 E_r^i 与相应的 R_I 值在各采样点的分布具有明显的一致性,可以看出主要由 Cd 和 Hg 增加了珍珠湾区域沉积物的重金属潜在生态风险。从湾内各站位潜在生态风险指数分布图可以看出,R_I 峰值出现在 ZZ02、ZZ06 和 ZZ13 站位(图 4),ZZ02 和 ZZ06 站位分别位于江平江的南北入海河口处,推测该区域重金属含量可能受江平江污染物输入的影响；ZZ13 站位南部为海水养殖区,该站位重金属可能受海水养殖废水排放的影响。

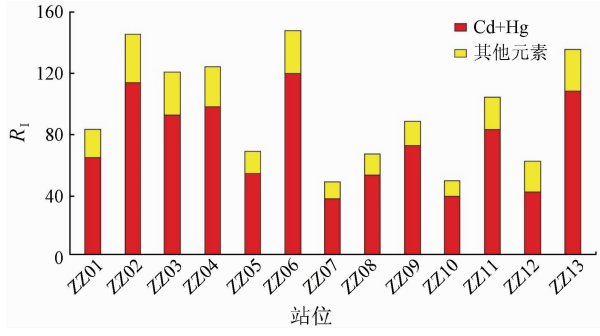


图 4　珍珠湾表层沉积物重金属潜在生态风险指数

Fig. 4　Potential ecological hazard index of heavy metals in surface sediments of Zhenzhu Bay

3.4　重金属来源分析

3.4.1　重金属相关性分析

对珍珠湾表层沉积物中 8 种重金属的含量开展 Pearson 相关性分析,采用单尾 t 检验(Sig. < 0.05)进行显著性检验,分析结果见表 6。可以看出除 Cd 外的其他 7 种重金属相关性均在 0.79 以上,说明这 7 种重金属元素在沉积基础上具有较强的相似性和同源性。Cd 元素与其他重金属元素相关系数相对较小,说明 Cd 的来源与其他金属元素存在一定的差异,这可能与人类经济活动以及其自身的沉积特性有关。

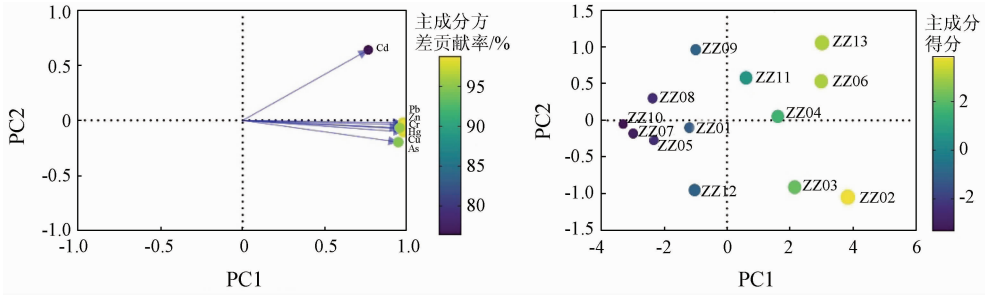
表 6　重金属相关性分析

Tab. 6　Correlation analysis of heavy metals

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As
Cu	1						
Pb	0.79	1					
Zn	0.86	0.97	1				
Cr	0.93	0.94	0.96	1			
Ni	0.86	0.98	0.98	0.97	1		
Cd	0.57	0.73	0.72	0.68	0.70	1	
As	0.83	0.93	0.92	0.93	0.93	0.61	1
Hg	0.94	0.88	0.94	0.95	0.93	0.69	0.90

3.4.2　主成分分析

主成分分析可以较好地分析沉积物中的重金属来源。对重金属元素处理后进行主成分分析，得到 7 个主成分，提取其中特征值大于 1 的 2 个主成分，累计方差贡献率为 96.09%，可以解释大部分的物源信息（图 6）。其中第一主成分正载荷较高的元素有 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As 和 Hg，均表现出较高的相关性，通过分析各站位的含量发现其分布较均匀，说明这 7 种元素主要为自然沉积，受人类活动影响较小；第二主成分仅有 Cd 有明显的正载荷，结合 Cd 的分布发现峰值站位为 ZZ06 和 ZZ13，含量分别为 0.10×10^{-6} 和 0.11×10^{-6}，说明其含量受江平江污染物输入和珍珠湾东南部海水养殖的影响较显著。



（a）载荷分布　　（b）主成分得分

图 5　主成分分析图

Fig. 5　Principal component analysis diagram

为了进一步讨论各污染源的相对贡献率，利用主成分－多元线性回归（PCA－MLR）模型计算金属来源贡献率，以标准化后的 8 种重金属浓度之和为因变量，以主成分因子得分为自变量，得到标准化后的回归方程，公式为

$$C = 0.625 \times P_{C1} + 0.476 \times P_{C2} 。\quad (5)$$

式中：C 为 8 种重金属浓度之和；P_{C1} 和 P_{C2} 分别为第一和第二主成分得分。结果值与预测值之间的相关系数为 0.992，表明拟合效果较好。

通过计算，江平江输入重金属贡献率为 57%，海水养殖重金属贡献率为 43%。以江平江为代表的第一主成分自然背景来源的贡献率最高，与研究区环境保护较好具有良好的对应关系。

4　结论

（1）珍珠湾红树林湿地表层沉积物中重金属含量表现为：Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Hg，除 Ni 和 Hg 外其他元素变异系数较低，分布较均匀，未见明显污染；与国内其他地区的红树林相比，珍珠湾表层沉积物中重金属含量整体处于较低水平，沉积环境较清洁。

（2）地累积指数法表明，珍珠湾红树林沉积物主要为清洁级，仅有部分站位的 Cd 和 Hg 表现为轻微污染；潜在生态风险指数法结果表明，大部分元素为低生态风险，Cd 和 Hg 在部分站位处于中等生态风险；湾内生态风险指数 R_I 范围为 49.07 ~ 147.71，所有站位均为低生态风险。

（3）主成分－多元线性回归模型显示研究区重金属主要受江平江输入和珍珠湾东南部海水养殖的影响，二者的相对贡献率分别为 57% 和 43%。

（4）珍珠湾红树林湿地整体生态环境良好，但需持续关注来自江平江和海水养殖的 Cd 输入。

参考文献（References）：

[1] Mcleod E, Chmura G L, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 [J]. Front Ecol Environ, 2011, 9(10): 552－560.

[2] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253－260.

[3] 李啸宇，何祥英，罗万次，等. 广西防城湾表层沉积物重金属的分布及其潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学，2016，35(5)：712－717.
Li X Y, He X Y, Luo W C, et al. Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Fangcheng bay of Guangxi[J]. Mar Environ Sci, 2016, 35(5): 712－717.

[4] Loska K, Wiechula 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.

[5] Tang D G, Warnken K W, Santschi P H. Distribution and partitioning of trace metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in Galveston Bay waters[J]. Mar Chem, 2002, 78(1): 29 – 45.

[6] 曹欢,胡钰梅,潘迎捷,等. 水产品中重金属异质性导致的风险[J]. 生态毒理学报,2021,16(6):161 – 173.
Cao H, Hu Y M, Pan Y J, et al. Risk caused by heterogeneity of heavy metals in aquatic products[J]. Asian J Ecotoxicol, 2021, 16(6): 161 – 173.

[7] 宁秋云,赖廷和,曹庆先,等. 广西珍珠湾红树种群结构与动态特征[J]. 应用海洋学学报,2022,41(1):42 – 52.
Ning Q Y, Lai T H, Cao Q X, et al. Structures and dynamics of mangrove populations in Zhenzhu Bay, Guangxi [J]. J Appl Oceanogr, 2022, 41(1): 42 – 52.

[8] 王亚丽,张芬芬,陈小刚,等. 海底地下水排放对典型红树林蓝碳收支的影响——以广西珍珠湾为例[J]. 海洋学报,2020,42(10):37 – 46.
Wang Y L, Zhang F F, Chen X G, et al. Influence of submarine groundwater discharge in the blue carbon budget of typical mangrove: A case study from the Zhenzhu Bay, Guangxi[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(10): 37 – 46.

[9] 陶玉华,黄星,王薛平,等. 广西珍珠湾三种红树林林分土壤碳氮储量的研究[J]. 广西植物,2020,40(3):285 – 292.
Tao Y H, Huang X, Wang X P, et al. Soil carbon and nitrogen storages in three mangrove stands of Zhenzhu Gulf, Guangxi[J]. Guihaia, 2020, 40(3): 285 – 292.

[10] 庞国涛,阎琨,李伟. 广西防城港近岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 中国地质调查,2022,9(1):82 – 90.
Pang G T, Yan K, Li W. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in coastal surface sediments of Fangchenggang in Guangxi[J]. Geol Surv China, 2022, 9(1): 82 – 90.

[11] 林红梅,王伟力,林彩,等. 钦州湾及其邻近海域重金属的时空变化特征和影响因素[J]. 应用海洋学学报,2020,39(4):490 – 500.
Lin H M, Wang W L, Lin C, et al. Temporal and spatial variations of heavy metals and influencing factors in Qinzhou Bay and its adjacent waters in 2013 – 2014[J]. J Appl Oceanogr, 2020, 39(4): 490 – 500.

[12] 张少峰,林明裕,魏春雷,等. 广西钦州湾沉积物重金属污染现状及潜在生态风险评价[J]. 海洋通报,2010,29(4):450 – 454.
Zhang S F, Lin M Y, Wei C L, et al. Pollution assessment and potential ecological risk evolution for heavy metals in the sediments of Qinzhou Bay[J]. Mar Sci Bull, 2010, 29(4): 450 – 454.

[13] 牛安逸,高一飞,徐颂军. 重金属污染对珠江口红树林表层沉积物碳含量的影响[J]. 生态学报,2020,40(23):8549 – 8558.
Niu A Y, Gao Y F, Xu S J. Effects of heavy metal pollution on the carbon content of surface sediments of mangroves in the Pearl River Estuary[J]. Acta Ecol Sin, 2020, 40(23): 8549 – 8558.

[14] Deng J, Guo P Y, Zhang X Y, et al. An evaluation on the bioavailability of heavy metals in the sediments from a restored mangrove forest in the Jinjiang Estuary, Fujian, China[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2019, 180: 501 – 508.

[15] Chai M W, Shen X X, Li R L, et al. The risk assessment of heavy metals in Futian mangrove forest sediment in Shenzhen Bay (South China) based on SEM – AVS analysis[J]. Mar Pollut Bull, 2015, 97(1/2): 431 – 439.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第 3 部分:样品采集、贮存与运输[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.3—2007 The Specification for Marine Monitoring – Part 3: Sample Collection Storage and Transportation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[17] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, 2(3): 108 – 118.

[18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975 – 1001.

[19] 徐争启,倪师军,庹先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术,2008,31(2):112 – 115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environ Sci Technol, 2008, 31(2): 112 – 115.

[20] Zhao Y Y, Jiang R H, Yan M C. Abundance of chemical elements in continental shelf sediment of China[J]. Geo – Mar Lett, 1995, 15(2): 71 – 76.

[21] 孙志佳,李保飞,陈玉海,等. 广东湛江湾红树林沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 海洋环境科学,2022,41(2):215 – 221.
Sun Z J, Li B F, Chen Y H, et al. Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments in Zhanjiang bay, Guangdong Province[J]. Mar Environ Sci, 2022, 41(2): 215 – 221.

[22] 万瑞安. 九龙江口红树林湿地表层沉积物重金属分布特征及来源解析[D]. 泉州:华侨大学,2020.
Wan R A. Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Mangrove Wetland Surface Sediments in Jiulong River Estuary[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2020.

[23] 耿俊杰,黄亮亮,吴志强,等. 茅尾海红树林表层沉积物重金属含量分布特征及评价[J]. 生态科学,2015,34(1):38 – 43.
Geng J J, Huang L L, Wu Z Q, et al. The distribution of heavy metals in surface sediments of the mangrove of Maowei Gulf[J]. Ecol Sci, 2015, 34(1): 38 – 43.

[24] 吴丹,赵志忠,季一诺,等. 海南岛八门湾红树林湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 海南师范大学学报:自然科学版,2015,28(4):432 – 437.
Wu D, Zhao Z Z, Ji Y N, et al. The spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments of Bame-

nwan mangrove wetland, Hainan Island[J]. J Hainan Normal Univ: Nat Sci, 2015, 28(4): 432 – 437.

[25] 李柳强. 中国红树林湿地重金属污染研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
Li L Q. Heavy Metals in the Mangrove Wetland of China[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008.

[26] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 133 – 141.
Zhao X F, Wang Q S, Shi N N, et al. Analysis and assessment of soil heavy metals around a petrochemical industry park[J]. Acta Sci Circumst, 2010, 30(1): 133 – 141.

Distribution and evaluation of heavy metals in sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland in Guangxi

ZHANG Xiaolei[1,2], YANG Yuanzhen[2], YAN Kun[2,3], PANG Guotao[2]

(1. *College of Marine Earth Sciences, Ocean University of China, Shandong Qingdao* 266100, *China*; 2. *Yantai Geological Survey center of Coastal Zone, China Geological Survey, Shandong Yantai* 264000, *China*; 3. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Hubei Wuhan* 430074, *China*)

Abstract: Heavy metals in sediments belongs to persistent pollutants, with characteristics of enrichment, recalcitrance and toxicity, which would pose a threat to the ecological environment and human safety after long – term accumulation. In order to study the distribution characteristics and quality status of heavy metals in the surface sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland, the authors collected 13 surface sediment samples in the mangrove distribution area of Zhenzhu Bay on September in 2021 to analyze the heavy metal content. The results shows that the content of heavy metals in the surface sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland is relatively low compared with other mangrove wetlands in China. Only some stations showed weak Cd and Hg pollution and most stations wasn't plolluted by heavy metals, with two showed weak Cd and Hg pollution according to the geo-accumulation index. and all stations in the bay are at low ecological risk based on potential risk index method. Correlation analysis and principal component analysis show that Cd was mainly affected by the input of Jiangping River and mariculture in the southeast of Zhenzhu Bay, and other elements were mainly affected by the weathering and normal deposition of natural background rocks. The contribution rates of Jiangping River input and Zhenzhu Bay mariculture were 57% and 43% respectively through PCA – MLR model analysis on the heavy metal source. The results show that the overall ecological condition of the Zhenzhu Bay Mangrove Wetland is good, however, it is still necessary to pay attention to the input of Cd.

Keywords: Zhenzhu Bay; mangrove wetland; heavy metals in sediments; pollution assessment

(责任编辑: 魏昊明)