

雷州半岛滨海湿地表层沉积物中重金属含量分布与生态风险评价*

甘华阳¹, 林进清¹, 梁开¹, 利锋², 段志鹏²

1. 广州海洋地质调查局(国土资源部海底矿产资源重点实验室), 广东 广州 510760;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641

摘要: 采用多元统计方法分析了雷州半岛滨海湿地表层沉积物中重金属的含量、相关性、空间分布特征和来源, 并对其生态风险进行了评价。研究区表层沉积物中的 Cu、Zn、Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 的含量平均值分别为 10.29 ± 7.80 、 47.06 ± 28.47 、 24.74 ± 10.78 、 41.70 ± 26.25 、 7.98 ± 4.73 、 0.042 ± 0.029 和 $0.020 \pm 0.027 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。Cu、Zn 和 Cr 以及 Pb、Cd 和 Hg 为 2 个强正相关群, 第一个群中的重金属元素以自然来源为主, 第二个群则兼有人为输入和自然 2 个来源。重金属含量的高值区主要分布在流沙港、湛江港西部、海安港和雷州湾西部海域。对照美国海洋与大气管理局(NOAA)的生物效应标准, 研究区绝大部分海域内的表层沉积物中除 As 含量在约 50% 的站位的值在“效应范围低”(effect range low)和“效应范围中等”(effect range median)阈值之间, 对底栖生物会偶尔发生负面效应外, 其他重金属基本不发生负面效应。重金属总体为低污染程度和低潜在生态风险。应重视人类活动较强的区域如湛江港西部、流沙港、海安港等海区的重金属污染, 以避免持续累积至能对生物造成危害的水平。

关键词: 重金属; 沉积物; 滨海湿地; 雷州半岛; 生态风险评价

中图分类号: P736.41; P762.2; X503.225 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2014)03-0079-09

Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

GAN Hua-yang¹, LIN Jin-qing¹, LIANG Kai¹, LI Feng², DUAN Zhi-peng²

1. Guangzhou Marine Geological Survey (Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources), Guangzhou 510760, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract: The concentrations, spatial distributions and sources of heavy metals in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular were analyzed through multiple statistics. The ecological risk assessments of heavy metals were conducted. The mean concentrations of Cu, Zn, Pb, Cr, As, Cd, and Hg were 10.29 ± 7.80 , 47.06 ± 28.47 , 24.74 ± 10.78 , 41.70 ± 26.25 , 7.98 ± 4.73 , 0.042 ± 0.029 , and $0.020 \pm 0.027 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. High positive correlations were found in two groups among the seven metals. The metals including Cu, Zn and Cr in the first group were mainly originated naturally, whereas the second group consisting of Pb, Cd and Hg were originated from both human activities and natural sources. The high concentration areas of the metals were in the Liusha Bay, western Zhanjiang Bay, Hai'an Bay, and western Leizhou Bay. According to the biological effect criterion suggested by the NOAA, nearly no negative effects would occur for the metals in the study area except As. This is because its concentration is between the effect range low (ERL) and effect range median (ERM) level at about 50% of the sampling stations, which indicates the negative effects would occur occasionally. The degree of contamination and potential ecological risk index of the heavy metals were both low for the whole study area. However, the

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2013-10-08。殷波编辑

基金项目: 中国地质调查局华南西部滨海湿地地质调查与生态环境评价项目(1212010914020)

作者简介: 甘华阳(1979~), 男, 湖北省枝江市人, 博士, 从事海洋环境地质的调查和研究。E-mail: ghuayang@126.com

*在野外调查取样过程中得到了粤西地质工程勘察院罗兴桓工程师等人的大力协助, 谨致谢忱。

contaminations in some areas such as the western Zhangjiang Bay, Liusha Bay and Hai'an Bay need further investigation and monitoring to avoid inducing ecological risk to benthos under continued accumulation due to human activities.

Key words: heavy metals; sediment; coastal wetland; Leizhou Peninsular; ecological risk assessment

滨海湿地是指海陆交互作用下经常被静止或流动的水体所浸淹的沿海低地, 潮间带滩地及低潮时水深不超过 6m 的浅水水域, 它不仅具有丰富的生物多样性, 也是重要的生态屏障(Doody, 1992)。滨海湿地沉积物是陆源污染物最主要的“汇”, 因为它们最终会通过吸附、絮凝和共沉降等物理化学过程大部分赋存于沉积物中(Li, et al, 2007)。重金属由于其高毒、不可降解和随食物链的生物放大性, 在沉积物中累积到一定水平不仅可能危害破坏滨海湿地中的生物的生态功能, 也能在沉积物受到扰动的前提下再次释放进入上覆水体而成为二次污染源(Ennouri, et al, 2010; Manahan, 2000)。因此对滨海湿地沉积物中重金属的研究具有重要的环境意义(Chatterjee, et al, 2009; Ennouri, et al, 2010; Vane, et al, 2009)。

地处广东省西南部的雷州半岛沿岸滨海湿地广泛分布, 拥有“湛江红树林”和“徐闻珊瑚礁”2 个国家级滨海湿地自然保护区。前者总面积近 2 万公顷, 是目前我国保护红树林湿地面积最大的自然保护区(屈家树, 2006); 后者是我国大陆沿岸唯一能形成珊瑚礁的海域(赵焕庭 等, 2009)。然而近年来随着雷州半岛沿岸经济的发展, 其滨海湿地面临的环境压力也在不断加大, 面积出现减少、污染逐渐加重, 生态功能也遭受破坏。现有资料显示雷州半岛滨海湿地沉积物重金属仅有针对少数特定海域如湛江港(郭笑宇和黄长江, 2006; 兰圣迎 等, 2007; 施玉珍 等, 2012; 张才学 等, 2006)和流沙湾(许战州 等, 2011; 张际标 等, 2011)的研究, 缺乏整体系统的调查和评价。文章通过测试分析雷州半岛沿岸滨海湿地(沿岸最低潮时水深<6m 的水域)的表层沉积物中重金属含量, 揭示其空间分布特征及相互关系、来源和影响因素, 为该区域滨海湿地的保护和可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雷州半岛东临南海北部, 西倚北部湾, 南与海南岛隔琼州海峡相望, 岸线曲折, 港湾众多。雷州半岛沿岸海浪冬季主要为偏北向, 夏季为偏南向; 潮汐类型在东岸为不正规半日潮, 平均潮差为 1.0~1.5m, 西岸为正规半日潮, 平均潮差为 1.0~2.0m, 南部琼州海峡为规则全日潮和不规则全日潮(广东省海岸带和海涂资源综合调查大队 等, 1988)。雷

州半岛沿岸地层和岩石较为简单, 在半岛北部的出露地层主要为第四系, 南部和北部偏东地区则为喜山期中、晚更新世玄武岩(广东省地质矿产局, 1988)。根据广州海洋地质调查局高分辨率遥感影像解译和野外调查的结果(甘华阳 等, 2013), 雷州半岛沿岸滨海湿地除了浅海水域之外, 主要滨海湿地类型还有红树林、珊瑚礁、盐田和养殖水塘。

1.2 取样与分析测试

研究区表层地质样品于 2012 年 5~6 月采用抓斗取样器获得, 取样深度为 0~20cm。共获取 133 个站位的表层地质样品, 其中 124 个样品为沉积物, 其余 9 个站位样品为岩石或珊瑚礁(图 1)。所有沉积物样品在获取后均保存于 4℃ 的冷柜中。

沉积物样品在返回实验室后进行粒度和地球化学分析。其中粒度分析采用激光粒度法, 所用仪器是 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪(Malvern Instruments Ltd., 英国)。地球化学分析包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、有机碳(OrgC)、Cu、Pb、Cr、Zn、As、Cd 和 Hg 等元素。其中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 和 Cr 含量采用 X 荧光光谱法(Axios XRF, PANalytical B.V., 荷兰、ZSXmini Rigaku Corp., 日本)测定; Cu、Zn 和 Pb 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Optima 4300DV, Perkin Elmer Inc., 美国)测定; OrgC 含量采用重铬酸钾氧化-还原容量法测定; As 和 Hg 含量采用原子荧光法(AFS-820, 北京吉天仪器有限公司)测定; Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法(Jena Zeenit60, Analytik Jena AG, 德国)测定。化学测试过程中采用插入标准样(GBW07406、GBW07408 和 GBW07430)、空白样和重复样(测试样品数量的 15%)等方法对测试质量进行全程监控。各元素在标准样品中重复测试的回收率为 94%~103%。重复样品测试的相对偏差在 1%~7%之间。

2 结果与讨论

2.1 沉积物类型与分布

粒度分析结果表明, 研究区内表层沉积物存在着砂(S)、粉砂质砂(TS)、砂-粉砂-黏土(STY)、砂质粉砂(ST)、粘土质砂(YS)、粘土质粉砂(YT)和粉砂质黏土(TY)等多种类型(采用 Shepard(1954)沉积物结构分类)。沉积物中值粒径(Md)范围为 4.2~1148.7 μm (图 2a), 大部分区域表层以细粒沉积物为主, 粉砂质黏土比例最大, 其次为粘土质粉砂。

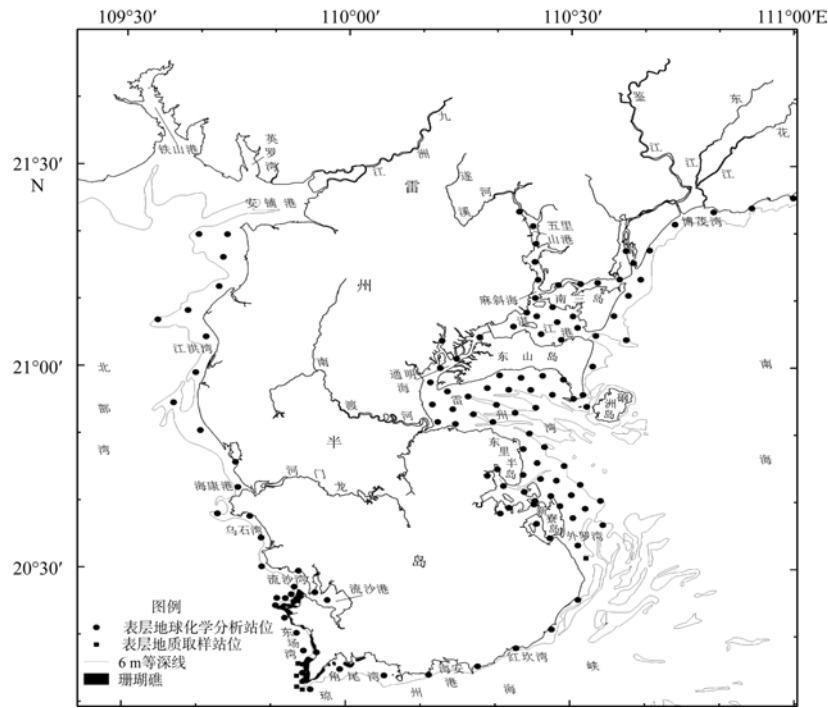


图 1 雷州半岛滨海湿地表层沉积物取样站位分布
Fig. 1 Sampling stations of the surface sediments in the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

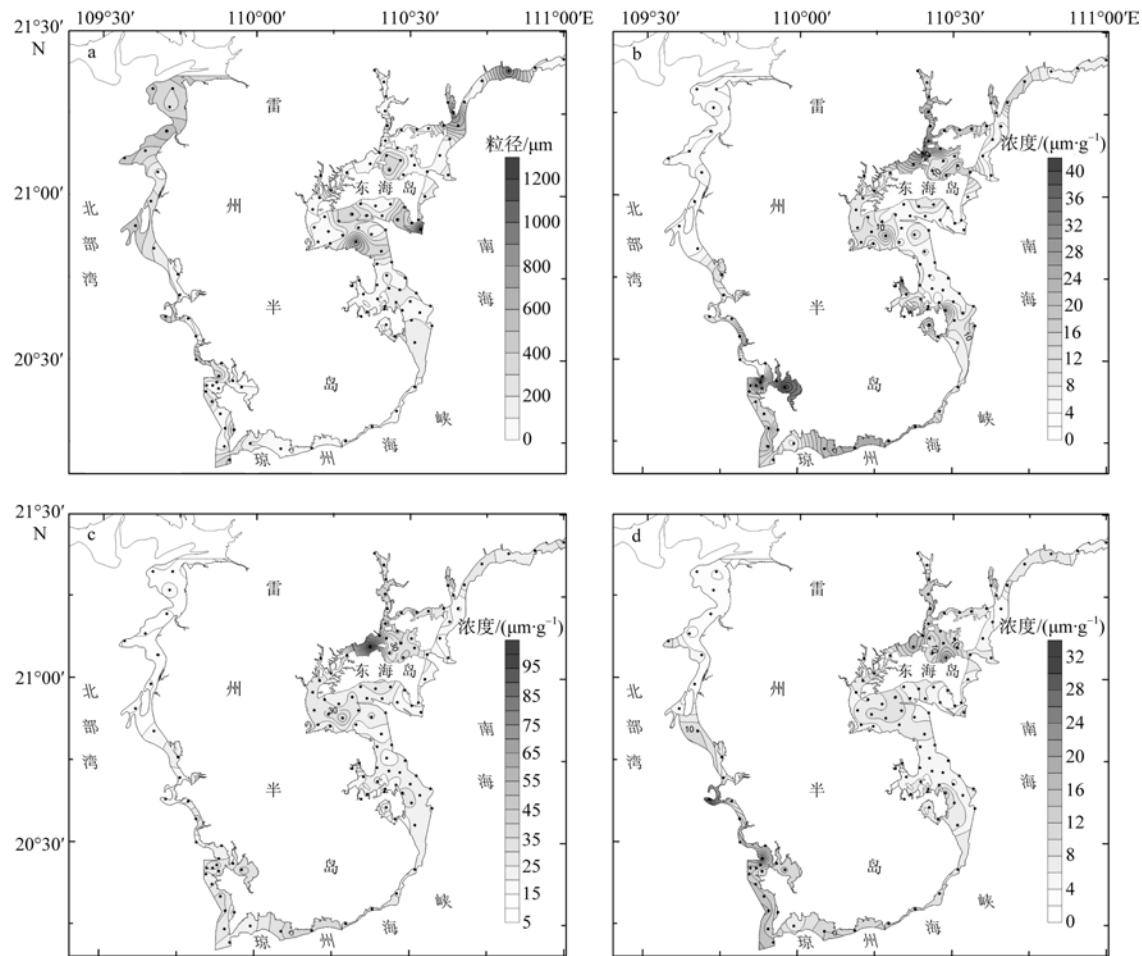


图 2 雷州半岛滨海湿地表层沉积物的中值粒径(Md)(a)、Cu(b)、Pb(c)和 As(d)含量图
黑点表示表层沉积物地球化学测试站位
Fig. 2 Contours of (a) median grain size (Md), (b) Cu, (c) Pb, and (d) As concentrations in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

2.2 重金属含量及与其他海域比较分析

表层沉积物的 7 种重金属中 Hg 含量相对最低, 平均值仅为 $0.020\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 其次为 Cd; Zn 和 Cr 的平均含量分别为 $47.06\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $41.70\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 相对最高。尽

管 Hg 和 Cd 这 2 种元素含量的标准差最小, 但其变异系数却最大, 分别为 1.391 和 0.688 (表 1), 说明这 2 种元素在沉积物中的含量虽然最低, 但波动幅度却最大。

表 1 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中 7 种重金属/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 、3 种主量元素/(%)和 OrgC/(%)含量统计特征

Tab. 1 Concentrations of seven heavy metals ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), three major elements (%) and OrgC (%) in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

统计量	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	OrgC
样品数量/个	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
最小值	0.45	8.85	8.53	0.77	1.15	0.001	0.001	0.41	0.23	0.01	0.008
最大值	40.10	129.00	96.55	128.43	30.20	0.218	0.174	21.35	14.30	0.19	1.606
平均值	10.29	47.06	24.74	41.70	7.98	0.042	0.020	7.14	3.42	0.05	0.403
中间值	8.14	39.60	23.20	37.73	6.62	0.036	0.008	5.84	3.01	0.05	0.263
标准差	7.80	28.47	10.78	26.25	4.73	0.029	0.027	5.06	2.17	0.03	0.389
变异系数	0.76	0.61	0.44	0.63	0.59	0.688	1.391	0.71	0.64	0.59	0.966

与郭笑宇和黄长江(2006)在湛江港和张际标等(2011)在流沙湾获得的数据相比(表 2), 本文中各重金属含量均明显低于湛江港, Cd 甚至低一个数量级。流沙湾表层沉积物中 Cu 的含量与文中研究结果相近, Cr 低近 50%, 而 Cd、Zn 和 Pb 却分别高约 10、2 和 3 倍。湛江港容纳了湛江市的大部分生活、工业和港口航运污水(郭笑宇和黄长江, 2006; 兰圣迎 等, 2007;

施玉珍 等, 2012; 张才学 等, 2006), 流沙港内存在大规模的海水珍珠贝苗培育和生产(许战州 等, 2011; 张际标 等, 2011), 因此这 2 个区域都是研究区内受人类活动影响较为强烈的区域。另外, 这 2 个区域都地处内湾, 与外海水交换率低, 水动力条件微弱导致沉积物的粒径较细且有机质含量高, 能吸附更多微量元素, 导致沉积物中重金属含量高于整个研究区。

表 2 雷州半岛滨海湿地和其他海域表层沉积物中重金属含量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ 比较

Tab. 2 Comparisons of the concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) in the surface sediments from other studies as well as the sea areas of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

研究海域	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg
雷州半岛滨海湿地(本研究)	10.29 ± 7.80	47.06 ± 28.47	24.74 ± 10.78	41.70 ± 26.25	7.98 ± 4.73	0.042 ± 0.029	0.020 ± 0.027
湛江港(郭笑宇 等, 2006)	21.3 ± 6.7	55.2 ± 17.8	41.7 ± 8.7	72.2 ± 4.9	13.1 ± 3.5	0.46 ± 0.04	×
流沙湾(张际标 等, 2011)	10.16 ± 1.34	86.74 ± 18.65	62.46 ± 4.42	22.81 ± 2.80	×	0.50 ± 0.03	×
琼州海峡(刘华峰 等, 2010)	12.92 ± 5.81	56.54 ± 36.19	25.37 ± 9.13	49.46 ± 22.26	11.22 ± 5.05	0.06 ± 0.04	0.03 ± 0.02
北部湾广西沿岸(Xia, et al, 2012)	×	×	18.34 ± 12.97	33.23 ± 23.94	×	0.14 ± 0.11	×
北部湾(Dou, et al, 2013)	58.26 ± 20.17	67.28 ± 26.56	27.99 ± 8.69	53.65 ± 19.73	9.53 ± 3.99	0.16 ± 0.05	0.06 ± 0.03
南海浅海(赵一阳 等, 1994)	13	61	19	53	7.2	0.053	0.027
阳江海陵湾(Zhang, et al, 2012)	13.3 ± 6.56	70.8 ± 31.8	37.7 ± 12.1	33.9 ± 16.1	10.7 ± 4.48	0.089 ± 0.048	×
珠江口滨海湿地(Li, et al, 2007)	$\text{nd}\sim 351.2$	$239.4\sim 345.7$	$12.3\sim 86.0$	$13.5\sim 191.2$	×	$2.79\sim 4.65$	×
汕头湾(Qiao, et al, 2013)	48.52	153.28	51.63	53.56	×	0.67	×
渤海湾潮间带(Gao, et al, 2012)	$7.9\sim 46.7$	$34.0\sim 123$	$18.8\sim 39.1$	$36.7\sim 110$	×	$0.05\sim 0.19$	×

注: “×”表示缺数据; “nd”表示未检出

与相邻海域如琼州海峡(刘华峰 等, 2010)、北部湾广西沿岸(Xia, et al, 2012)、北部湾(Dou, et al, 2013)比较发现(表 2), 研究区表层沉积物中的重金属含量与前两者相差不大, 但除了 Pb 之外全部低于北部湾的数据, 特别是 Cu 和 Cd 含量仅为北部湾的 1/4 左右。由于北部湾海域在我国总体上仍属污染程度较低的海域(Xia, et al, 2013), 因此该海域表层沉积物中大部分重金属含量高于本研究的结果, 应

该是沉积物的“粒度效应”对微量元素含量的影响, 即细粒沉积物相对粗粒沉积物拥有更大的比表面积, 能吸附更多的微量元素造成的。

表 2 还列出了几个开发程度较高的海湾和河口如阳江海陵湾(Zhang, et al, 2012)、珠江口滨海湿地(Li, et al, 2007)、汕头湾(Qiao, et al, 2013)以及渤海湾潮间带(Gao and Li, 2012)等表层沉积物中重金属的含量平均值或范围。毫无例外, 这些海域的调查

结果均不同程度地高于此次调查数据。珠江口滨海湿地中的 Cd 的最低值(Li, et al, 2007)甚至高出本次调查结果平均值约 65 倍。研究显示, 雷州半岛沿岸尽管有少部分海域如湛江港和流沙湾的表层沉积物受到了人类活动的强烈影响而导致重金属含量升高, 但总体上仍处于较低水平。

2.3 重金属的相关性与空间分布

从 Pearson 相关性上看(表 3), 文中分析的 10 种元

素和沉积物 Md 中明显存在 2 个强正相关群, 第一个群包括 Al、Fe、Cu、Zn、Cr, 第二个群则包括 Pb、Cd、Hg, 群内的各参数彼此之间的相关系数 r 都不小于 0.80($p<0.01$, 双侧 t 检验)。OrgC 由于和第一强相关群中的 3 个元素存在强相关性, 也可划入该群。As 和 Md 与其他参数都未表现出强相关性, 前者仅与 Fe 和 Mn 呈中等正相关($0.50 < r < 0.80$, $p<0.01$, 双侧 t 检验), 后者与除 Mn 和 As 之外的参数都呈中等正相关。

表 3 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中 10 种元素含量和中值粒径(Md)的 Pearson 相关系数($p<0.01$)矩阵

Tab. 3 Pearson correlation coefficients ($p<0.01$) among element concentrations and median grain diameter (Md) of the surface sediments in the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg	OrgC	Md
Al ₂ O ₃	1.00											
Fe ₂ O ₃	0.80	1.00										
MnO	0.39	0.56	1.00									
Cu	0.93	0.74	0.36	1.00								
Zn	0.96	0.80	0.41	0.93	1.00							
Pb	0.75	0.64	0.28	0.73	0.84	1.00						
Cr	0.83	0.81	0.50	0.81	0.82	0.54	1.00					
As	0.48	0.63	0.63	0.51	0.52	0.52	0.49	1.00				
Cd	0.67	0.51	0.26	0.71	0.77	0.83	0.51	0.51	1.00			
Hg	0.78	0.55	0.16	0.82	0.85	0.88	0.56	0.50	0.86	1.00		
OrgC	0.88	0.66	0.25	0.89	0.87	0.67	0.73	0.45	0.64	0.77	1.00	
Md	0.78	0.57	0.22	0.71	0.76	0.56	0.65	0.21	0.53	0.58	0.71	1.00

由于彼此之间的强正相关性, Al₂O₃、Fe₂O₃、Cu、Zn、Cr 和 OrgC 在研究区表层沉积物中含量的空间分布具有相似性, 高值区基本上都位于流沙港、湛江港西部、五里山港南部、雷州湾西部、海安港以及新寮岛东西两侧海域(图 2b)。Pb、Cd 和 Hg 含量的空间分布也基本相同, 高值区位于湛江港的西南部和西北部近岸, 其次为海安港和流沙港海域, 其他海域的含量都相对较低(图 2c)。As 在从企水港至海安港的海域表层沉积物中含量较高, 但在研究区东部其高值区仅分布在湛江港西部和中南部海域(图 2d)。

沉积环境中的水动力特征是影响研究区重金属空间分布的重要因素, 与其他环境要素如水体盐度、pH 值和有机质含量等因素的联合作用决定了各子区域的沉积物类型, 而沉积物中重金属含量高低则与沉积物类型密切相关。从表 3 中重金属元素与沉积物中值粒径的相关性可以看出, 除了 As 之外, 其他元素都与中值粒径呈中等程度的正相关, 即沉积物越细蕴含的重金属元素含量也随之增加。由于细粒沉积物除了本身含有重金属元素之外, 其表面吸附作用较强, 可吸附许多微量元素共沉淀; 此外

细粒沉积物中氧化还原电位较低且富含有机质, 引发的氧化还原反应也能造成微量元素富集, 这就是沉积物对微量元素含量的“粒度效应”(陈绍谋等, 1986; 赵一阳和鄢明才, 1994)。在雷州湾西部近岸、湛江港的东西部、流沙港以及海安港海域表层沉积物的中值粒径都小于 63 μ m, 为粘土质粉砂并且有机质含量也比较高, 因此相对其他海域更易富集重金属元素。

2.4 重金属生态风险评价

文中采用美国海洋与大气管理局(NOAA)的生物效应数据标准(Buchman, 2008)和 Hakanson(1980)提出的潜在生态风险指数法来评价研究区表层沉积物中重金属的综合潜在生态风险。有关这 2 种方法的具体参数及计算方法、污染程度和潜在生态风险程度划分标准(阈值)可参见相关文献(丁喜桂等, 2005; 王菊英, 2004; Zhang, et al, 2013), 此处不再赘述。

对照 NOAA 的生物效应标准, 研究区表层沉积物中 Zn、Cd 和 Hg 的含量在所有表层站位中都在“效应范围低(effects range low, ERL)”阈值以下, 说明它们对底栖生物的负面效应基本不发生, 而

Cu、Pb、Cr 和 As 分别有 1 个、3 个、11 个和 60 个站位于 ERL 和“效应浓度中等(effects range median, ERM)”阈值之间,意味着它们在这些站位对底栖生物的负面效应会偶尔发生。鉴于 As 在近 50% 的站位都可能会对底栖生物产生负面影响,因此,应该重视该元素可能引发的生态效应。

图 3 的箱状图显示了研究区各站位表层沉积物中重金属污染系数 C_f (采用全球工业化之前沉积物中重金属元素的最高背景值计算)和潜在生态风险系数 E_r 值分布。依据 Hakanson(1980)给出的评价标准,研究区除了 Pb、Cd 和 As 有少数站位的 C_f 值在 1~3 之间属于低到中等污染程度之外,其他金属的 C_f 值都小于 1(图 3a),为低污染程度(图 3a 中的虚线表示其阈值)。各重金属的 E_r 值均小于 40,属于低潜在生态风

险等级,但由于 Cd 和 Hg 的毒性系数与其他元素的差异较大,它们的 E_r 值范围也相应扩大很多(图 3b)。As 和 Hg 有少数站位的 E_r 值大幅度超出平均值,主要集中在湛江港东部和流沙港,表明应将这些海域沉积物中 As 和 Hg 污染纳入密切监控和重点研究的范畴。

研究区表层沉积物中重金属总体污染程度 C_d 的范围为 0.35~5.12,平均值为 1.94,为低污染程度(图 4a)。全区总体污染较严重的区域为湛江港东部、流沙港和五里山港南部。潜在生态风险指数 RI 值的范围为 2.52~56.87,平均值为 13.71,总体为低潜在生态危害程度(图 4b)。雷州半岛沿岸人类活动较强的区域,如湛江港东部、流沙港、海安港等海区重金属污染应该引起重视,避免其在沉积物中持续累积达到对底栖生物造成危害的水平。

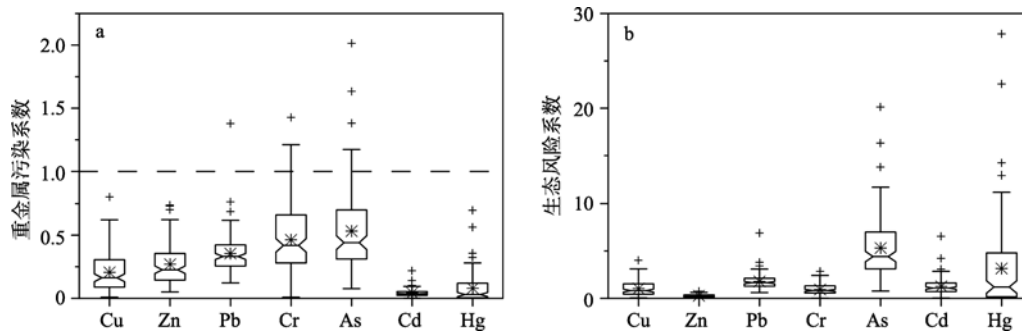


图 3 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中各种重金属污染系数(C_f)(a)和潜在生态风险系数(E_r)(b)的范围、Q1、Q2、Q3 和平均值

图中箱体下端为第 25 百分位数(Q1)、上端为第 75 百分位数(Q3),它们的差值为四分位差(IQR);中间的横线为中位数;星形符号表示为平均值;两头伸出的线条下端为第 25 百分位数-1.5×四分位差($Q1-1.5 \times IQR$)、上端为第 75 百分位数+1.5×四分位差($Q3+1.5 \times IQR$);十字符号表示 $>(Q3+1.5 \times IQR)$ 的离群值

Fig. 3 Ranges, Q1, Q2, Q3, and their means of (a) contamination factor (C_f) and (b) potential ecological risk factor (E_r) for the heavy metals in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

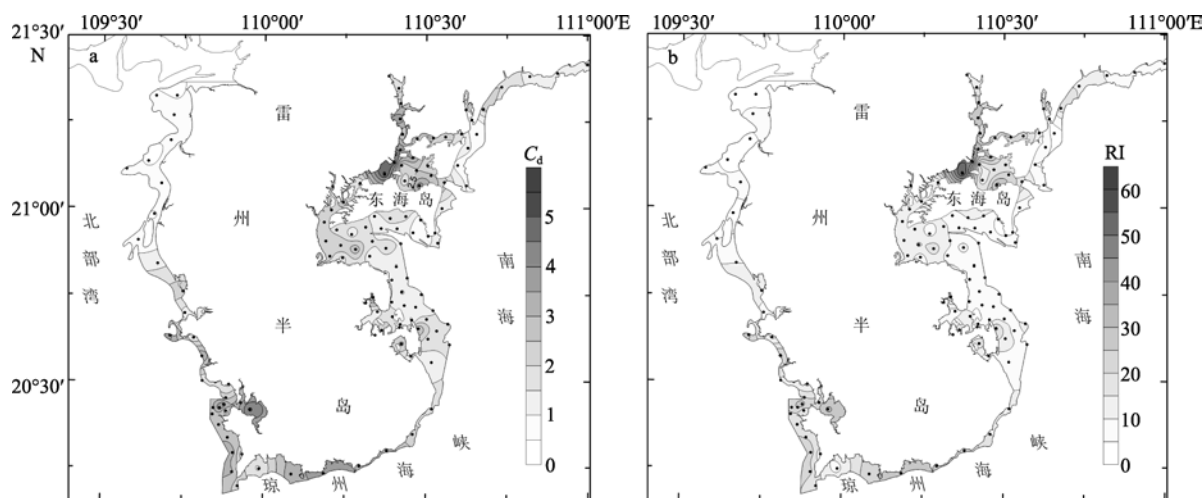


图 4 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中重金属总体污染程度 C_d (a)和总体潜在生态风险指数 RI(b)的空间分布图

Fig. 4 Contours of (a) the degree of contamination (C_d) and (b) the potential ecological risk factor index (RI) for the heavy metals in the surface sediments of the coastal wetland on the Leizhou Peninsular

2.5 重金属的来源分析

主成分分析法曾被广泛应用于近岸海域沉积物中重金属的来源分析(蔡龙炎, 2010; 李玉 等, 2006; DelValls, et al, 1998; Singh, et al, 2005), 文中采用该方法进行分析。为了更加准确和全面, 分析过程中除了前述的 7 种重金属元素、3 种主量元素和 OrgC 含量之外, 同时分析了其他 11 种元素, 包括 TiO_2 、Co、Ni、Sr、V、Ba、Sc、Ga、Zr、N 和 P 的含量和砂、粉砂和黏土含量, 并作为分析变量纳入。限于文中论述的重点, 不对其他 11 种元素进行讨论。分析前的 KMO 检验(Kaiser-Meyer-Olkin test)和巴特利球形检验(Bartlett test of sphericity)表明, 测试结果适合做主成分分析。

主成分分析计算结果表明, 研究区表层沉积物中 25 个变量的 74.740% 的信息可由前 3 个特征值大于 1 的主成分反映(表 4), 即对前 3 个主成分进行分析已经能够反映全部数据的大部分信息。3 个主成分中均有一些载荷较高的元素出现, 因此各主成分代表的意义也比较明晰。根据绝对值最大化原则进行元素归类, 主成分 1 的方差贡献为 64.703%, 可能代表了元素的自然来源。在该主成分中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Cu、Zn、Cr、OrgC 和黏土等都具有较高的正载荷(表 4), 表明这些元素最主要的来源是沉积物自身, 而最初来源则是研究区临近陆地及水系沿岸岩石的风化剥蚀释放。沉积物中的黏土矿物、

表 4 主成分分析结果及各变量的主成分载荷

Tab. 4 The results of principal component analysis (PCA) and component loadings of the variables

	主成分 1	主成分 2	主成分 3
特征值	14.463	2.152	2.070
贡献率/%	57.853	8.609	8.279
累积贡献率/%	57.853	66.461	74.740
Al_2O_3	0.958	0.002	-0.019
Fe_2O_3	0.713	-0.174	0.358
MnO	0.420	-0.421	0.518
OrgC	0.833	0.053	-0.139
Cu	0.935	0.072	0.010
Zn	0.958	0.163	0.033
Pb	0.651	0.672	0.057
Cr	0.859	-0.346	0.165
As	0.665	0.250	0.526
Cd	0.621	0.613	0.030
Hg	0.744	0.608	-0.027
砂	-0.692	0.165	0.493
粉砂	0.631	-0.122	-0.573
黏土	0.681	-0.181	-0.516

铁氧化物和有机质等都能显著吸附各种金属离子(赵一阳和鄢明才, 1994)。主成分 2 的方差贡献为 8.609%, 可能代表了人为因素对研究区微量元素来源的影响。Pb、Cd 和 Hg 在该主成分中都具有较高的正载荷, 表明这 3 种元素的含量受人为因素如工业、海运排污、生活污水和海水养殖等的影响较为显著。主成分 3 的方差贡献为 8.279%, 代表元素为 MnO 和 As。该主成分可能反映了自生锰($\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)的沉积和锰氧化物胶体的对 As 吸附聚集。已有研究表明海洋表层沉积物中水合锰氧化物吸附 As 的能力要比水合铝和铁氧化物要高(马锡年 等, 1984)。值得注意的是, 某些元素如 Pb、Cd 和 Hg 在主成分 2 和 3 上的载荷接近, 表明 2 种主成分所代表的来源对沉积物中这些元素的贡献程度相当。

元素富集因子(EF)常用来消除碳酸盐含量和粒度变化所产生的影响而达到评价沉积物重金属污染程度和判断物源的目的。沉积物中某一元素相对于背景区元素丰度的富集因子 $EF = (C_e/C_{Al})_{\text{沉积物}} / (C_e/C_{Al})_{\text{背景值}}$, 其中 $(C_e/C_{Al})_{\text{沉积物}}$ 为元素含量与 Al 元素含量的比值, $(C_e/C_{Al})_{\text{背景值}}$ 为背景区元素含量与 Al 元素含量的比值。然而当被研究元素与 Al 元素无强相关性时该方法不适用(Alagarsamy and Zhang, 2010; Morelli, et al, 2012; Rubio, et al, 2000; Shi, et al, 2010)。文中仅 Cu、Zn 和 Cr 与 Al 存在强相关性(表 3), 通过以南海浅海沉积物中元素含量(表 2)作为背景值计算出的这 3 种重金属 EF 为 1.5 的站位比例分别为 92.7%、94.4%和 94.4%, 表明其含量在绝大部分区域沉积物中与背景区相当或亏损, 主要来源为岸岩石或沉积物的侵蚀, 与主成分分析结果一致。

3 结论

1) 研究区大部分区域的表层以细粒沉积物为主, 粉砂质黏土比例最大, 其次为粘土质粉砂。细粒沉积物主要分布在流沙港、雷州湾西部、海安港和湛江港东西部。

2) 表层沉积物中的重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 的含量平均值分别为 10.29 ± 7.80 、 47.06 ± 28.47 、 24.74 ± 10.78 、 41.70 ± 26.25 、 7.98 ± 4.73 、 0.042 ± 0.029 和 $0.020 \pm 0.027 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。重金属含量的高值区主要分布在流沙港、湛江港西部、海安港和雷州湾西部海域。大部分重金属含量都与沉积物的中值粒径和有机碳含量成中等或强正相关, 表明粒度和有机质是控制研究区重金属空间分布的重要因素。

3) 对照 NOAA 的生物效应标准, As 在研究区

近 50% 的站位可能会对底栖生物产生负面影响。重金属总体为低污染程度和低潜在生态风险, 但应重视人类活动较强的区域如湛江港西部、流沙港、海安港等海区的重金属污染, 避免其在沉积物中的持续累积达到能对底栖生物造成危害的水平。

4) 主成分和元素富集因子分析表明, 研究区表层沉积物中重金属主要来源于临近陆地及水系沿岸岩石的风化剥蚀释放, 但某些区域的部分 Pb、Cd 和 Hg 来源于人类活动输入, As 的富集可能与某些自生矿物有关。

参考文献

- 蔡龙炎. 2010. 基于主成分分析法的泉州湾表层沉积物中重金属污染可能来源分析[J]. 台湾海峡, 29(3): 325–331.
- 陈绍谋, 路秀云, 吴传芝, 等. 1986. 南海北部沉积物的地球化学特征及元素赋存状态的研究[J]. 热带海洋学报, 5(4): 62–70.
- 丁喜桂, 叶思源, 高宗军, 等. 2005. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 21(8): 31–36.
- 甘华阳, 林进清, 夏真, 等. 2013. 雷州半岛沿岸滨海地质调查与生态环境评价报告[R]. 广州: 广州海洋地质调查局: 1–232.
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 6–264.
- 广东省海岸带和海涂资源综合调查大队, 广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 1988. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社: 1–148.
- 郭笑宇, 黄长江. 2006. 粤西湛江港海底沉积物重金属的分布特征与来源[J]. 热带海洋学报, 25(5): 91–96.
- 兰圣迎, 吴玲玲, 陈洁, 等. 2007. 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, 26(2): 38–41.
- 李玉, 俞志明, 宋秀贤, 等. 2006. 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, 27(1): 37–41.
- 刘华峰, 傅杨荣, 杨奕, 等. 2010. 琼州海峡表层沉积物重金属元素分布特征与生态风险评价[J]. 安全与环境工程, 17(4): 33–36.
- 马锡年, 李全生, 沈万仁, 等. 1984. 渤海湾表层沉积物中的砷与铁、铝、锰等元素的关系[J]. 海洋与湖沼, 15(5): 448–456.
- 屈家树. 2006. 雷州半岛红树林湿地资源综合管理[M]. 广州: 广东科技出版社: 1–96.
- 施玉珍, 张际标, 李雪英, 等. 2012. 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, 31(4): 466–471.
- 王菊英. 2004. 海洋沉积物的环境质量评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 1–171.
- 许战州, 朱艾嘉, 蔡伟叙, 等. 2011. 流沙湾海草床重金属富集特征[J]. 生态学报, 31(23): 7244–7250.
- 张才学, 孙省利, 陈春亮, 等. 2006. 湛江港湾表层沉积物重金属的分布特征及潜在生态危害评价[J]. 湛江海洋大学学报, 26(3): 45–49.
- 张际标, 刘加飞, 张瑜斌, 等. 2011. 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, 34(12H): 352–356.
- 赵焕庭, 王丽荣, 宋朝景, 等. 2009. 广东徐闻西岸珊瑚礁[M]. 广州: 广东科技出版社: 180–181.
- 赵一阳, 鄢明才. 1994. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 1–200.
- ALAGARSAMY R, ZHANG J. 2010. Geochemical characterisation of major and trace elements in the coastal sediments of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 161(1–4): 161–176.
- BUCHMAN M F. 2008. NOAA screening quick reference tables[R]. Seattle, WA: Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration: 1–34.
- CHATTERJEE M, MASSOLO S, SARKAR S K, et al. 2009. An assessment of trace element contamination in intertidal sediment cores of Sunderban mangrove wetland, India for evaluating sediment quality guidelines[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 150(1–4): 307–322.
- DELVALLS T A, FORJA J M, GONZALEZ-MAZO E, et al. 1998. Determining contamination sources in marine sediments using multivariate analysis[J]. Trends in Analytical Chemistry, 17(4): 181–192.
- DOODY J P. 1992. The conservation of British saltmarshes[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 80.
- DOU YANGUANG, LI JUN, ZHAO JJINGTAO, et al. 2013. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 67(1–2): 137–145.
- ENNOURI R, CHOUBA L, MAGNI P, et al. 2010. Spatial distribution of trace metals (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Fe and Mn) and oligo-elements (Mg, Ca, Na and K) in surface sediments of the Gulf of Tunis (Northern Tunisia)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 163(1–4): 229–239.
- GAO XUELU, LI PEIMIAO. 2012. Concentration and fractionation of trace metals in surface sediments of intertidal Bohai Bay, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 64(8): 1529–1536.
- HAKANSON L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 14(8): 975–1001.
- LI QUSHENG, WU ZHIFENG, CHU BEI, et al. 2007. Heavy metals in coastal wetland sediments of the Pearl River Estuary, China[J]. Environmental Pollution, 49(2): 158–164.
- MANAHAN S E. 2000. Environmental chemistry[M]. 7th ed. Boca Raton, FL: Lewis Publisher: 458–499.
- MORELLI G, GASPARON M, FIERRO D, et al. 2012. Historical trends in trace metal and sediment accumulation in intertidal sediments of Moreton Bay, southeast Queensland, Australia[J]. Chemical Geology, 300–301: 152–164.
- QIAO YONGMING, YANG YANG, GU JIGANG, et al. 2013. Distribution and geochemical speciation of heavy metals in

- sediments from coastal area suffered rapid urbanization, a case study of Shantou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 68(1-2): 140-146.
- RUBIO B, NOMBELA M, VILAS F, et al. 2000. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 40(11): 968-980.
- SHEPARD F P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. *Journal Sedimentary Petrology*, 24(3): 151-158.
- SHI QI, LEIPE T, RUECKERT P, et al. 2010. Geochemical sources, deposition and enrichment of heavy metals in short sediment cores from the Pearl River Estuary, Southern China[J]. *Journal of Marine Systems*, 82(Suppl): S28-S42.
- SINGH K, MALIK A, SINHA S, et al. 2005. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component analysis[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 166(1-4): 321-341.
- VANE C H, HARRISON I, KIM A W, et al. 2009. Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 58(1): 134-144.
- XIA PENG, MENG XIANWEI, FENG AIPING, et al. 2012. Geochemical characteristics of heavy metals in coastal sediments from the northern Beibu Gulf (SW China): the background levels and recent contamination[J]. *Environmental Earth Science*, 66(5): 1337-1344.
- XIA ZHEN, WANIEK J J, LEIPE T, et al. 2013. Anthropogenic fingerprint in Beibu Gulf (South China Sea) sediments[J]. *Journal of Coastal Research*, (Special Issue 66): 72-90.
- ZHANG RUI, ZHOU LI, ZHANG FAN, et al. 2013. Heavy metal pollution and assessment in the tidal flat sediments of Haizhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1): 403-412.
- ZHANG WENFENG, LIU XUEPING, CHENG HEFA, et al. 2012. Heavy metal pollution in sediments of a typical mariculture zone in South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 64(4): 712-720.