

# 广西近岸海域水下平原表层沉积物中重金属分布及其积累\*

## The Distribution and Accumulation of Heavy Metals in Surficial Sediment in Submarine Plain of Guangxi Nearshore Waters

黄向青, 林进清, 梁开, 陈太浩, 甘华阳, 潘毅

HUANG Xiang-qing, LIN Jin-qing, LIANG Kai, CHEN Tai-hao, GAN Hua-yang, PAN Yi

(国土资源部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)  
(Guangzhou Marine Geological Survey, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou, Guangdong, 510760, China)

**摘要:**【目的】研究广西近岸水下平原沉积物重金属分布和积累特征, 促进对重金属自河口海湾向陆架扩散规律的对比与把握。【方法】从广西近岸水下平原采集表层沉积物和岩芯, 通过实验测试的手段, 分析表层沉积物重金属 Pb、As、Hg 的分布和积累特征。【结果】广西近岸水下平原表层沉积物中 Pb 含量为  $8.0 \times 10^{-6} \sim 44.7 \times 10^{-6}$ , As 含量为  $1.6 \times 10^{-6} \sim 31.4 \times 10^{-6}$ , Hg 含量为  $0.001 \times 10^{-6} \sim 0.086 \times 10^{-6}$ , 变化较大; Pb、As、Hg 的分布受沉积环境和沉积物类型影响, As 含量在水下平原北部水动力作用强烈之处出现局部高值, 与含 As 的母岩风化有关; Pb、As、Hg 有一定的共聚性, 并显示亲 Ni、Zn、Ga、Zr 和疏 Sr 的特征; Pb、As、Hg 与粒度参数有线性及聚类关系, 对粒级响应性即斜率  $k$  的拐点在  $\sim 0.125\text{mm}$  至  $\sim 0.063\text{mm}$  之间, 视沉积环境和沉积物的不同而有所移动; 贫有机质站位由于水动力作用强烈, 以自然风化的物理过程为主, 重金属含量很低, 而有机质积累成为为主的站位重金属含量积累增幅区间的频率, Pb 的以 40%~60% 最高, As 和 Hg 的均是 60%~80% 最高, 增幅序列均遵循单增自然对数关系, 曲线分段对应不同的沉积环境。【结论】广西近岸水下平原表层沉积物质量总体较好, 但相对区域本底值来看, Pb 积累性比较突出, As 次之。

**关键词:** 水下平原 沉积物 重金属 分布 积累

中图分类号: P736.41 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2014)02-0120-07

**Abstract:** 【Objective】The distribution and accumulation of heavy metals in sediments of nearshore submarine plain along Guangxi coast was studied in order to understand heavy metal transport from estuaries and bays to shallow shelf. 【Methods】Based on surficial sediment and core samples from nearshore submarine plain of Guangxi, laboratory test data analyzed mainly with statistical method showed the distribution and accumulation of heavy metals Pb, As, Hg in sediment. 【Results】The results showed that main sediment types are sand and clay sand. Pb is  $8.0 \times 10^{-6} \sim 44.7 \times 10^{-6}$ ; As is  $1.6 \times 10^{-6} \sim 31.4 \times 10^{-6}$ ; and Hg is  $0.001 \times 10^{-6} \sim 0.086 \times 10^{-6}$ . The concentration of heavy metal is affected by environments and types of sedimentary. The high concentration of As in the area with strong hydrodynamic force of submarine plain northern part might be due to the airslaking of mother rock. Pb, As and Hg often show co-occurrence, are correlation with Ni, Zn, Ga, Zr etc. and are poor or negative

correlation with Sr. There are linear and cluster relationship between heavy metals and grain parameters, and the transition grain sizes is from  $\sim 0.125\text{mm}$  to  $\sim 0.063\text{mm}$  using LST method. Stations of poor organic matters showed low heavy metals and thus the heavy metals percentage of organic matter accumulation station varied from 40% to 80%. 【Conclusion】Although the sediment quality of Pb, As and Hg is still in

收稿日期: 2013-08-03

修回日期: 2013-10-14

作者简介: 黄向青(1964-), 女, 高级工程师, 主要从事海洋地质环境研究。

\* 中国地质调查局“我国重点海岸带滨海环境地质调查与评价”项目(编号 1212010611403)资助。

the range of national marine sediment standards. However, the accumulation is still significant especially Pb compared with their background values.

**Key words:** nearshore submarine plain, sediment, heavy metal, distribution, accumulation

**【研究意义】**由于形成环境的原因,与华南东部台地式溺谷湾,例如大亚湾、大鹏湾湾内水下平原<sup>[1,2]</sup>不同的是,广西近岸水下平原分布在海湾之外,湾内地貌主要是以砂为主的潮成槽脊体系或者河口拦门砂,再经水下斜坡逐步过渡到海底平原,继续向陆架方向扩展<sup>[3]</sup>。由于近年来加大对广西海岸经济开发的力度,工业快速发展,向海排污量居高不下(北海市海洋环境质量公报,2010~2012年)。

**【前人研究进展】**诸多对海湾、浅滩海水和沉积物化学要素的研究和评价显示,石油类、有机物、营养盐含量比较高,一些重金属含量超标<sup>[4~11]</sup>。

**【本研究切入点】**对离岸较远、水域宽阔的水下平原,由于条件的限制,尚未开展此类工作。20m以浅海域调查表明,广西近岸水下平原岸线绵长,坡降缓慢,水深4~20m,面积约2000km<sup>2</sup>,主体西起钦州湾口外水下斜坡东侧,东至雷州半岛西岸水下斜坡坡底,以北依次有广西主要河流大风江与南流江河口三角洲、夷平一堆积海岸,受到海湾、河流输出和海岸侵蚀影响,北边砂沉积物多有分布,南部逐渐积累粘土等细颗粒<sup>[3]</sup>,是海湾与北部湾陆架浅海的交换地带。因此,进一步往陆架方向开展重金属的研究和对比,是具有积极意义的。**【拟解决的关键问题】**本文以广西近岸水下平原作为研究区,通过取样测试的方法,以Pb、As、Hg 3种具有明显环境毒性的重金属作为研究对象,分析了三者在水下平原的分布以及三者之间、三者与沉积物等之间的关系,横向研究了Pb、As、Hg 3种重金属在原有风化基质上的进一步积累,并利用同步取得的钻孔数据得出背景值,纵向研究了Pb、As、Hg相对背景值的积累特征,从而达到厘清亟待需要认识的广西近岸水下平原重金属的分布、联系以及积累现况之目的。

## 1 样品采集和分析方法

在中国地质调查局“我国重点海岸带滨海环境地质调查与评价”项目的资助下,我们对包含水下平原的广西近岸20m以浅的水域进行了环境地质综合调查,样品采集时间为2007年至2010年,以租用渔船方式自西向东逐年完成<sup>[3]</sup>。采用箱式采样器采集表层沉积物,采用GY-100型钻机进行全芯取样,过程执行质量管理体系,对样品进行分样、编录并及时送回标准岩芯库保存和开展实验室测试,分样的

样品量不少于2kg,以满足样品重金属元素和微量元素测试分析的需要。

Pb是使用美国ICP 4300DV(SYC002)电感耦合等离子体发射光谱仪进行测量,在广州海洋地质调查局实验测试中心完成;As是使用美国Perkin-Elmer公司的原子吸收光谱仪AA-800测量,Hg是采用日本HITACHI公司的180-80原子吸收分光光度计测量,在广东省物料实验检测中心完成。化学测试过程中采用插入标准样、空白样和重复样等手段对测试质量进行了全程监控,所有样品测试的相对偏差均在±10%之内,达到化学分析要求。沉积物粒度测试标准为GB/T 12763.8-2007,采用沉降法,测试单位为广州海洋地质调查局实验测试所。

## 2 结果与分析

沉积物粒度、微量元素和矿物特征表明,广西近岸水下平原的物质来源方式主要为径流输入、海湾输入和沿岸北海组/湛江组地层侵蚀,海域来沙微弱<sup>[3,12,13]</sup>。主要沉积物类型是砂和粘土质砂,砂多分布于水下平原北侧,由于夷平一堆积海岸波浪作用明显,该区的砂来自于水下浅滩和斜坡的扩散,以推移组和悬移组居多,砂含量64.78%~94.20%,有少量砾石和粉砂,粘土多为0,平均粒径0.03~4.52φ,分选系数为好~差,偏态-0.49~0.76,峰态0.83~3.96;在海水相对深的南部,沉积环境趋稳,广泛分布粘土质砂,以悬移组占优势,平均粒径2.00~7.33φ,分选系数3.84~6.09φ,分选为差~很差,正偏为主,峰态0.82~3.13,砂含量降低到38.51%~71.80%,粉砂含量为4.95%~24.56%,粘土含量明显增高,为12.71%~40.06%。

### 2.1 表层沉积物中重金属分布

#### 2.1.1 不同沉积环境下的重金属分布

广西近岸水下平原水域宽阔,海岸类型多样,在研究区可以进一步划分为西部河流三角洲水下平原、中部夷平一堆积海岸水下平原和东部水下平原,主要影响因素依次为西部入海河流、海岸侵蚀、东北部海湾与雷州半岛西岸。由于水域联通,相互之间的物质交换也不可忽略。三角洲水下平原Pb含量为 $8.0 \times 10^{-6}$ ~ $33.8 \times 10^{-6}$ ,平均为 $17.6 \times 10^{-6}$ ,As含量为 $1.6 \times 10^{-6}$ ~ $21.4 \times 10^{-6}$ ,平均为 $7.8 \times$

$10^{-6}$ , Hg 含量为  $0.007 \times 10^{-6} \sim 0.086 \times 10^{-6}$ , 平均为  $0.025 \times 10^{-6}$ ; 夷平一堆积海岸水下平原 Pb 含量为  $10.9 \times 10^{-6} \sim 44.7 \times 10^{-6}$ , 平均为  $23.8 \times 10^{-6}$ , As 含量为  $2.8 \times 10^{-6} \sim 31.4 \times 10^{-6}$ , 平均为  $9.1 \times 10^{-6}$ , Hg 含量为  $0.002 \times 10^{-6} \sim 0.046 \times 10^{-6}$ , 平均为  $0.020 \times 10^{-6}$ ; 东部水下平原 Pb 含量为  $11.9 \times 10^{-6} \sim 36.3 \times 10^{-6}$ , As 含量为  $2.0 \times 10^{-6} \sim 11.9 \times 10^{-6}$ , Hg 含量为  $0.001 \times 10^{-6} \sim 0.039 \times 10^{-6}$ , 平均含量分别是  $25.7 \times 10^{-6}$ 、 $7.2 \times 10^{-6}$ 、 $0.019 \times 10^{-6}$ 。可见, 上述重金属富集程度各有不同, 在西部、中部和东部最为富集的分别是 Hg、As 和 Pb。

对比前人在水下平原以北的潮间带断面对重金属的研究结果, 廉州湾断面 Pb、As、Hg 的平均含量分别为  $28.4 \times 10^{-6}$ 、 $15.9 \times 10^{-6}$ 、 $0.108 \times 10^{-6}$ , 明显高于其在离岸较远的三角洲水下平原的含量, 而北海银滩至营盘向海段断面 Pb 含量为  $16.58 \times 10^{-6}$ 、As 含量为  $9.08 \times 10^{-6}$ 、Hg 含量为  $0.07 \times 10^{-6}$ , 对应的夷平一堆积海岸水下平原的 Pb 含量要高, As 相近, Hg 要低, 说明重金属并非都是自岸向海降低, 水下平原重金属也有富集的情况, 与其它研究结果<sup>[14,15]</sup>对比也是如此。

从重金属含量区间频率  $f$  分布可见, 三角洲水下平原 Pb 含量以  $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ 、 $12 \times 10^{-6} \sim 16 \times 10^{-6}$  频率最高, 依次为 0.32 和 0.28, As 含量以  $4 \times 10^{-6} \sim 6 \times 10^{-6}$  频率最高, 超过 0.40, Hg 含量则以  $0 \sim 0.01 \times 10^{-6}$ 、 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.02 \times 10^{-6}$  频率依次最高, 超过 0.30; 夷平一堆积海岸水下平原 Pb 含量以  $24 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$  频率最高, As 含量以  $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$  和  $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$  频率依次最高, 超过 0.40, Hg 含量则是  $0.012 \times 10^{-6} \sim 0.018 \times 10^{-6}$  频率最高(图 1), 分布形态均以左偏尖峰占优。

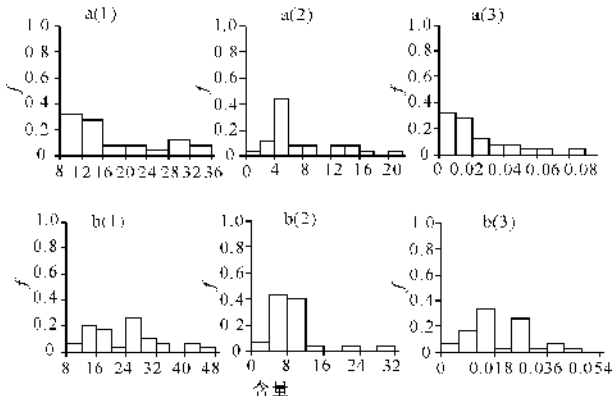


图 1 不同研究区的表层沉积物重金属含量( $\times 10^{-6}$ )频率  $f$  分布

a. 三角洲水下平原, b. 夷平一堆积海岸水下平原; 1: Pb, 2: As, 3: Hg。

## 2.1.2 不同沉积物类型中的重金属分布

粘土质砂中 Pb 含量以  $20 \times 10^{-6} \sim 24 \times 10^{-6}$  频率最高, As 含量以  $6 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$  频率最高, Hg 含量以  $0.010 \times 10^{-6} \sim 0.020 \times 10^{-6}$  频率最高(图 2a); 在砂中这 3 种重金属分布不均尤其明显, Pb、As、Hg 的含量分别以  $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ 、 $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$ 、 $0.006 \times 10^{-6} \sim 0.012 \times 10^{-6}$  频率最高(图 2b), 含量频率分布形态同样以左偏尖峰为主。以上均表明重金属分布不均, 仍然处于不断积累的阶段。

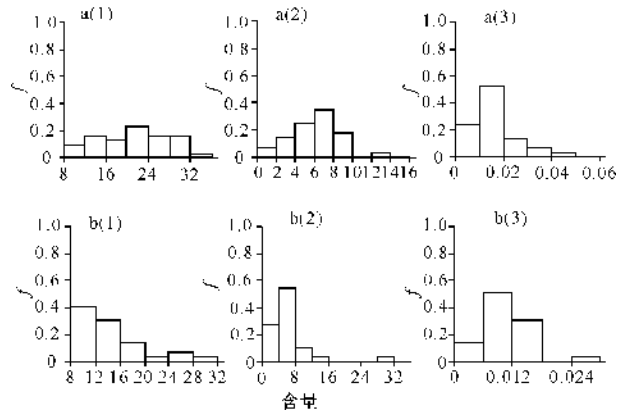


图 2 不同类型表层沉积物中重金属含量( $\times 10^{-6}$ )频率  $f$  分布

a. 粘土质砂, b. 砂; 1: Pb, 2: As, 3: Hg。

## 2.1.3 表层沉积物重金属平面分布

Pb 含量等值线为  $16 \times 10^{-6} \sim 40 \times 10^{-6}$ (图 3), 以夷平一堆积海岸水下平原南部最高; As 含量等值线最高值区出现在北部, 该处沉积物颗粒偏粗, 水动力作用明显, 应该与含 As 母岩风化有关, As 含量在河流三角洲水下平原西北部出现次高值; Hg 含量则是出现最高值, 含量等值线为  $0.07 \times 10^{-6}$ , 而在夷平一堆积海岸水下平原北部达到最低, 该处含砂量偏高影响了 Hg 积累。上述 3 种重金属均在北海半岛西南水域出现次高值, 是因为该处近南北向槽道为廉州湾对外交换之通道, 有较为丰富的细颗粒沉积物; 除此之外, Pb 含量还在东部水下平原出现次高值, 这是由于该处与铁山港、安铺港之间的中央水域呈东北—西南向“U”形浅槽相接<sup>[3]</sup>, 水深较深, 海湾输出和海岸侵蚀物质在此相汇并向外扩散。

## 2.2 表层沉积物重金属关系

### 2.2.1 重金属之间的关系

以  $x_i$  代表实测值,  $\bar{x}$  为平均值,  $\sigma$  为标准差。采用无量纲标准化变量  $x_z = (x_i - \bar{x}) / \sigma$  处理方法<sup>[16]</sup>, 结果表明, Pb、As、Hg 3 种重金属的  $x_z$  走势和形态基本一致(图 4), 尤其是在三角洲水下平原, 其波动也略为平缓, 夷平一堆积海岸水下平原以北

海岸受到波浪影响明显,风化强烈,受其影响,波动要频繁一些,略有分化,东部水下平原 Pb 略呈不同步,As、Hg 比较一致。

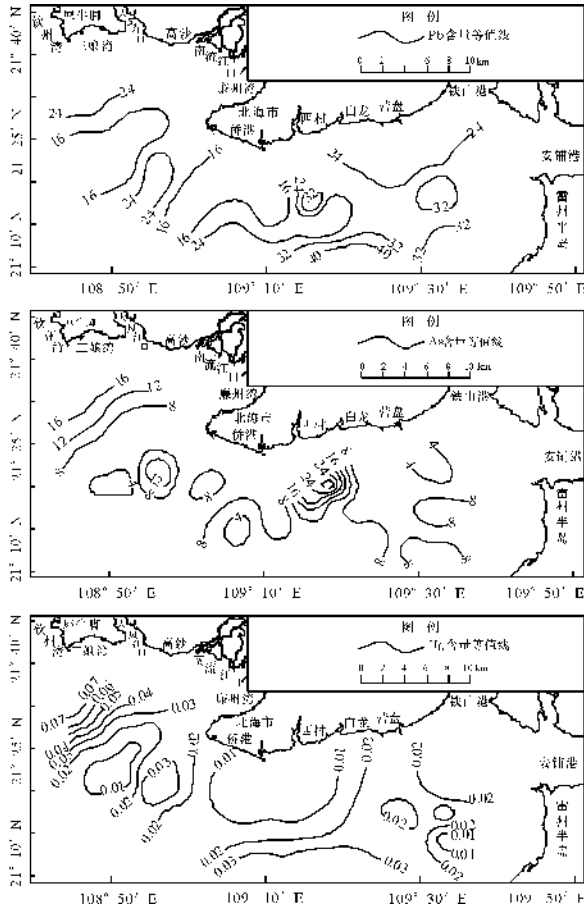


图3 研究区表层沉积物重金属含量( $\times 10^{-6}$ )的平面分布

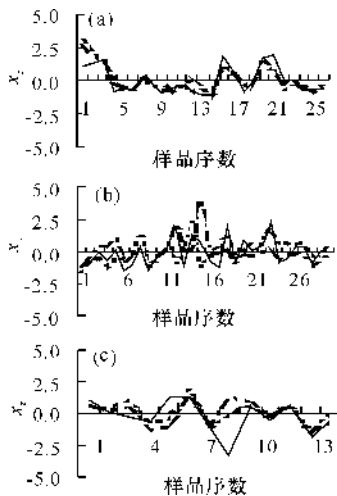


图4 研究区表层沉积物重金属含量标准化变量  $x_s$  分布

a. 三角洲水下平原, b. 夷平-堆积海岸水下平原, c. 东部水下平原; —: Pb, - - - -: As, .....: Hg。

采用 Pearson 矩积法计算相关系数,并进行双

尾、双精度 F-检验<sup>[16]</sup>。可见,相关系数随不同位置的水下平原而有所改变。三角洲水下平原 Pb、As、Hg 三者之间相关系数较大,为 0.82~0.93,经检验为显著正相关,但是在夷平-堆积海岸水下平原,相关系数偏小,除了 Pb、Hg 之间为 0.58,其它相关性不明显,甚至 As 和 Hg 为负相关。在东部水下平原相关性又有所改善,相关系数增大,为 0.52~0.79,As 与 Hg 为显著正相关,它们之间的关系与以上对标准化变量分析结果是对应的。主要原因是河口地区物质输入丰富、来源广泛,重金属积聚行为比较一致,而夷平-顺直海岸水下平原以北海组/湛江组母岩侵蚀为主,物质来源有限,重金属有一定的分化,在东部水下平原同样又由于物质来源多而有所改善。

2.2.2 重金属与表层沉积物微量元素的关系

Pb、As、Hg 3 项重金属在三角洲水下平原与微量元素有较好的相关性,Pb 与 Co、Ni、Zn、Zr、Ba、Ga 相关系数偏高,为 0.85~0.96(表 1),为显著正相关,Pb 与 Cu 关系不明显,As 与 Co、Cu、Ni、Zn、Zr、Ba、Ga 相关系数为 0.73~0.93,Hg 为 0.74~0.98,均为显著正相关;在夷平-堆积海岸水下平原,As 的表现仍然有些特别,与各微量元素相关系数很低,有一定的独立性,如前所述,与母岩风化有关,Pb 与微量元素相关系数有所降低,但总的趋势未变,而 Hg 基本保持像在三角洲水下平原的那样,相关性比较好,相关系数为 0.60~0.93,均为显著正相关。

表 1 研究区重金属与微量元素相关系数

研究区	重金属	微量元素						
		Co	Cu	Ni	Zn	Zr	Ba	Ga
三角洲水下平原	Pb	0.96	0.33	0.85	0.95	0.92	0.92	0.90
	As	0.85	0.73	0.92	0.89	0.91	0.91	0.93
	Hg	0.92	0.74	0.98	0.95	0.98	0.98	0.91
夷平-堆积海岸水下平原	Pb	0.42	0.50	0.60	0.70	0.64	0.64	0.68
	As	0.00	-0.09	-0.06	0.02	-0.06	-0.11	0.01
	Hg	0.60	0.61	0.81	0.87	0.93	0.93	0.91

一般 Sr 来源于生物产出或者作为海相指示<sup>[17,18]</sup>,Pb、As、Hg 3 项重金属与 Sr 的相关系数很小或者为负,在 -0.40~0.27 之间,再次表明 Pb、As、Hg 的陆源性。

2.2.3 重金属与表层沉积物组分的关系

Pb、As、Hg 含量与砂为显著负相关或负相关,但与粉砂和粘土关系明显改善(表 2),在三角洲水下平原均显著正相关,而在夷平-堆积海岸水下平原,Pb 与粉砂、粘土为显著正相关,As 与砂和粉砂

总体关系不甚明显,在南部与粘土为正相关。

表2 研究区重金属与沉积物颗粒组分相关系数

研究区	组分	重金属		
		Pb	As	Hg
三角洲 水下平原	砂	-0.94	-0.84	-0.92
	粉砂	0.93	0.86	0.92
	粘土	0.95	0.87	0.93
夷平-堆积海 岸水下平原	砂	-0.71	-0.28	-0.83
	粉砂	0.72	0.15	0.82
	粘土	0.77	0.52	0.85

2.2.4 重金属与表层沉积物粒度参数的关系

Pb、As、Hg与平均粒径  $M_z$  的相关系数在三角洲水下平原为 0.85~0.94,经检验为显著正相关,在夷平-堆积海岸水下平原为 0.42~0.88,As与平均粒径关系并不明显,Pb、Hg则为显著正相关。Pb、As、Hg与分选系数、偏态、峰态存在聚类关系,即低分选系数/左偏/单峰/低含量(I类)和高分选系数/右偏/双峰/高含量(II类)。I类主要分布在夷平-堆积海岸水下平原北部,波浪作用较强,II类主要分布在水下平原南部,水动力减缓,以潮流运输为主,重金属含量明显高于I类,尤其是Pb、Hg(表3)。

2.2.5 重金属与表层沉积物粒级的关系

由于砂含量较高,粒级多在~2mm至~0.032mm之间,其平均含量2.39%~25.91%,以~0.5mm最高,~0.25mm次之,~0.032mm则最低,考虑到重金属和沉积物颗粒的来源、丰度和意义不同,采用了  $x_i/x$  无量纲化数据处理,  $x_i/x$  意义上,便于在同一水平上比较,再使用最小二乘法逐粒级进行线性拟合。结果显示,Pb、As、Hg3项重金属随粒级的变细的响应性,即斜率  $k$  由负值到正值,且以  $R^2$  衡量的趋向关系逐步改善。三角洲水下平原  $k$  值拐点均在~0.25mm至~0.125mm之间,夷平-堆积海岸水下平原拐点均在~0.125mm处;在砂中的拐点在~0.25mm至~0.125mm之间,粘土质砂则拐点右移到~0.125mm至~0.063mm的区

表3 研究区表层沉积物重金属在粒度参数聚类类型中的分布

类别	项目	Pb	As	Hg	分选	偏态	峰态	沉积物频率曲线特征
I类	最低	5.9	1.61	0.002	0.40	-0.49	0.83	单峰,略宽,集中在~1mm至~0.125mm之间,余下粒级几乎为0,砂含量极高,多左偏或者接近0偏
	最高	30.6	31.50	0.019	2.34	0.63	2.20	
	平均	12.9	5.47	0.010	0.92	-0.05	1.09	
	几何*	12.2	4.47	0.009	0.86	-0.04	1.06	
II类	最低	12.7	4.09	0.014	3.76	0.15	0.81	双峰,主峰集中在~0.125mm至~0.032mm,较为对称,次峰出现在粘土F粒级,右偏
	最高	33.8	17.27	0.067	6.05	0.88	4.07	
	平均	23.9	9.08	0.028	4.40	0.59	1.76	
	几何*	22.9	8.41	0.026	4.36	0.53	1.50	

\* 几何平均值。

间(图5)。 $k$ 值还有随粒级变细而增大的趋势,说明Pb、As、Hg对细颗粒的响应灵敏。

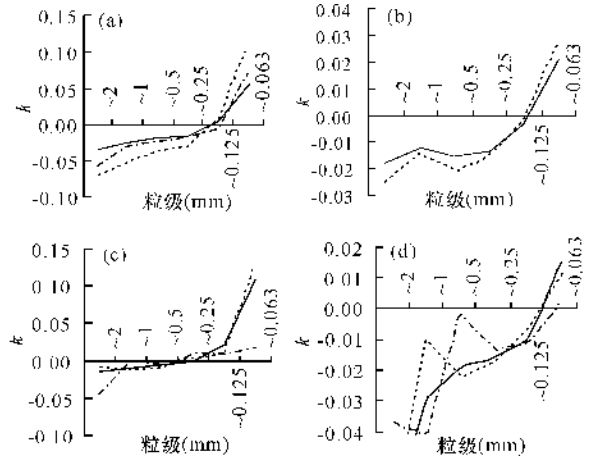


图5 研究区表层沉积物重金属粒级响应斜率  $k$  分布 (a)三角洲水下平原,(b)夷平-堆积海岸水下平原,(c)砂,(d)粘土质砂;—: Pb, - - -: As, .....: Hg。

2.3 表层沉积物重金属积累

依据海洋沉积物质量标准(GB 18668—2002),以  $S_i$  为站位重金属实测含量、 $S$  为评价标准(一类沉积物),质量系数  $S_i/S$  结果显示,Pb的质量系数为 0.01~0.75,As的为 0.08~0.84,个别站位>1,Hg的为 0.01~0.23,表明在广西近岸水下平原Pb、As、Hg3项重金属的沉积物质量总体较好,  $S_i/S$  大部分偏低。

2.3.1 重金属在原有基质的积累

以上分析表明广西近岸水下平原沉积条件多样,有机质最高含量为 1.53%,而在三角洲水下平原河口拦门砂和古滨海平原,尤其是夷平-堆积海岸水下平原北端的高能环境,砂广泛分布,石英含量高,圆磨度好,有机质贫乏,最低为 0.02%,几乎接近0,颗粒集中在粗砂和中砂粒级,对应重金属含量也很低,Pb、As、Hg平均含量依次为  $15.5 \times 10^{-6}$ 、 $4.2 \times 10^{-6}$ 、 $0.07 \times 10^{-6}$ ,可视为自然风化下的初始基质,以此为基础,得到其它站位在表面吸附和有机

质络合成因下的积累增幅  $M'(\%) = (M - M_0)/M$ , 式中,  $M$  为实测含量,  $M_0$  为贫有机质本底含量。结果显示, 广西近岸水下平原 Pb、As、Hg 3 种重金属含量增幅的频率  $f$  分布明显右偏, Pb 含量以 40%~60% 最高, 20%~40% 次之, As 含量以 40%~80% 最高, Hg 含量以 60%~80% 最高, 40%~60% 次之(图 6)。

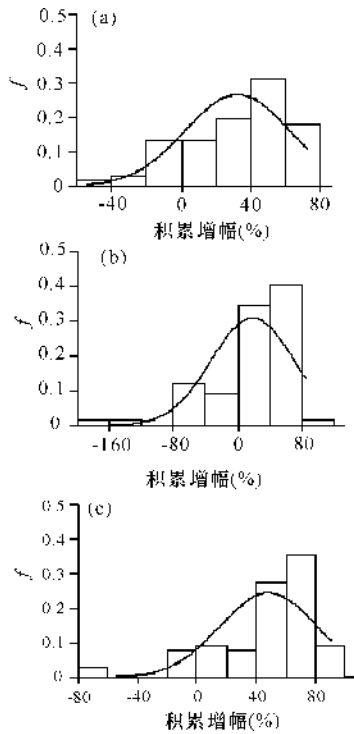


图 6 研究区表层沉积物重金属 Pb(a), As(b) 和 Hg(c) 的积累增幅的频率  $f$  分布

增幅序列均遵循单调递增自然对数函数关系, 最小二乘法拟合  $R^2 > 0.9500$ (图 7), 各自然对数函数系数均在同一个量级之上, 但大小有所不同。进一步将曲线分为两个部分, 前段斜率较大, 站位多分布在广西近岸水下平原北部, 后段斜率变缓, 多分布在该水下平原南部。

### 2.3.2 重金属相对本底值的积累

作为一种横向比较, 2.3.1 小节分析了表层沉积物重金属在进一步吸附之下的内在积累关系。考虑到沉积物质量标准难以全面反映重金属的积累现状, 作为一种纵向比较, 进一步分析重金属相对本底值的积累情况。采用积累指数  $S_i/S$  来表示沉积物重金属的积累水平,  $S_i$  意义上, 为站位重金属实测含量,  $S$  则变为区域本底值<sup>[19~21]</sup>。Pb 本底值依据自西向东同步布置的 3 个钻孔 ZK5、ZK6、ZK7 的岩芯, 样品分层为 20~50cm<sup>[3]</sup>, 对测试数据的分析显示 Pb 含量为对数正态分布, 采用几何平均得到

其本底值为  $23.89 \times 10^{-6} \pm 5.50 \times 10^{-6}$ , As 和 Hg 的本底值来自同步进行的滨海湿地调查钻孔数据<sup>[22]</sup>, 分别为正态分布和对数正态分布, 采用算术平均和几何平均的方法, 得到 As 本底值为  $8.9 \times 10^{-6} \pm 3.50 \times 10^{-6}$ , Hg 本底值为  $0.025 \times 10^{-6} \pm 0.005 \times 10^{-6}$ 。结果表明, Pb 积累指数为 0.01~1.88, As 积累指数为 0.10~1.13, 个别站位  $> 2$ ,  $> 1$  的站位占 11.5%, Hg 积累指数为 0.03~1.15,  $> 1$  的站位占 6.5%, 平面分布格局与其含量等值线分布一致(图 8), Pb 积累指数  $> 1$  的等值线分布在广西近岸水下平原西部、中部、东部, As 积累指数  $> 1$  的分布在西部、中部局部, 而中部 Hg 积累指数最低, 最高等值线 0.8 出现西部和东部小范围。总体上该区 Pb 积累性比较突出, 其次是 As。

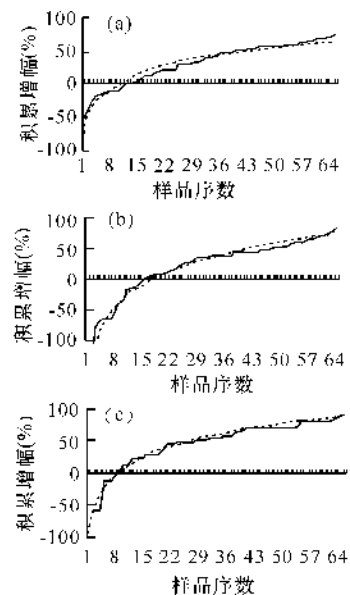


图 7 研究区表层沉积物重金属的积累增幅序列拟合 (a)Pb,  $y = 0.3254 \ln(x) - 0.7356$ ,  $R^2 = 0.958$ ; (b) As,  $y = 0.5686 \ln(x) - 1.6605$ ,  $R^2 = 0.9776$ ; (c) Hg,  $y = 0.429 \ln(x) - 0.9519$ ,  $R^2 = 0.9781$ 。——: 增幅, .....: 增幅拟合。

## 3 结论

(1) 研究区表层沉积物 Pb 含量为  $8.0 \times 10^{-6} \sim 44.7 \times 10^{-6}$ , As 含量为  $1.6 \times 10^{-6} \sim 31.4 \times 10^{-6}$ , Hg 含量为  $0.001 \times 10^{-6} \sim 0.086 \times 10^{-6}$ , 变化较大, 随水下平原位置不同而有改变, 高值区的出现多与物质来源丰富、水动力减弱、沉积环境稳定有关。As、Pb 在夷平—堆积海岸水下平原局部也有较高含量出现, 与该处波浪作用明显, 母岩风化产出有关。

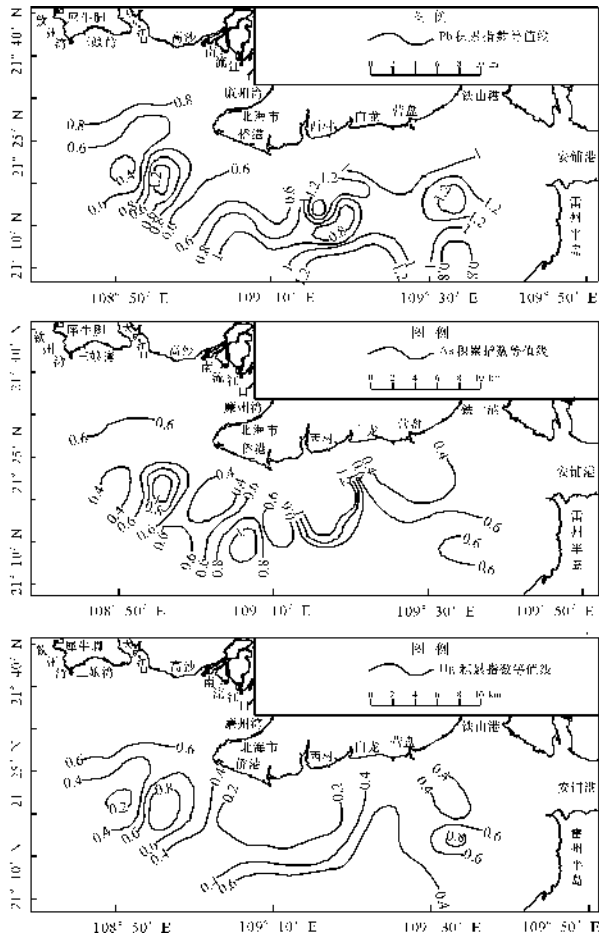


图8 研究区表层沉积物重金属积累系数  $S_i/S$  平面分布

(2) 广西近岸水下平原 Pb、As、Hg 具有陆源性和共聚性,但是 As 由于其性质和来源的原因,表现略有不同。Pb、As、Hg 除了与 Sr 关系不明显或者负相关,与微量元素关系比较密切,显示其陆源性。Pb、As、Hg 与平均粒径为显著正相关,显示亲细颗粒特性,与分选、偏态、峰态为聚类关系,粒级对 Pb、As、Hg 的吸附拐点在  $\sim 0.125\text{mm}$  至  $\sim 0.063\text{mm}$  之间。

(3) 以有机质影响为主的 Pb、As、Hg 3 项重金属积累增幅序列遵循自然对数增长率,分段曲线斜率变化趋势不同,表明处于不同的沉积积累环境。

(4) 从 Pb、As、Hg 3 项重金属来看,广西近岸水下平原表层沉积物质量总体良好,但是结合本底值的积累指数分析表明,该区 Pb 积累比较突出,As 次之。

#### 参考文献:

[1] 冯志强,李学杰,林进清,等. 广东大亚湾海洋地质环境综合评价[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002.

- [2] 夏真,林进清,郑志昌,等. 深圳大鹏湾海洋地质环境综合评价[M]. 北京:地质出版社,2004.
- [3] 广州海洋地质调查局. 北部湾广西近岸海洋地质环境与地质灾害调查成果报告(钦州湾幅、北海幅、银滩幅、铁山港幅)[R]. 2007-2010.
- [4] 韦蔓新,何本茂. 广西北海港近岸海水环境污染状况初探[J]. 海洋通报,1989,8(2):86-92.
- [5] 李树华,黎广钊. 中国海湾志第十二分册(广西海湾)[M]. 北京:海洋出版社,1993:144-216.
- [6] 韦蔓新,何本茂. 钦州湾近 20 a 来水环境指标的变化趋势——油类的分布特征及其污染状况[J]. 海洋环境科学,2003,22(2):49-52.
- [7] 韦蔓新,何本茂. 钦州湾近 20 a 来水环境指标的变化趋势——有机污染物(COD)的含量变化[J]. 海洋环境科学,2006,25(4):48-51.
- [8] 邱绍芳,赖廷和. 廉州湾近岸的海水理化要素含量的变化特征[J]. 广西科学院学报,2005,21(3):151-154.
- [9] 黎小正. 广西合浦廉州湾增殖养殖区水域营养水平分析与评价[J]. 广西科学院学报,2007,23(1):39-44.
- [10] 辛明,王保栋,孙霞,等. 广西近海营养盐的时空分布特征[J]. 海洋科学,2010,34(9):5-9.
- [11] 龙晓红,蒋清华,邓琰. 广西钦州湾近岸海域“十一·五”期间营养盐变化趋势分析及污染控制重点[J]. 环境科学与管理,2011,36(8):65-68.
- [12] 广西红树林研究中心. 北部湾广西南流江三角洲形成演变研究报告[R]. 2013.
- [13] 邓朝亮,黎广钊,刘敬合,等. 铁山港湾水下动力地貌特征及其成因[J]. 海洋科学进展,2004,22(2):170-176.
- [14] 夏鹏,孟宪伟,印萍,等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. 海洋科学进展,2008,4(26):471-476.
- [15] 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[J]. 海洋通报,2010,4(29):450-454.
- [16] 杨小平. 统计分析方法与 SPSS 应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008:244-260.
- [17] 陈绍勇,田正隆,龙爱民,等. 南沙群岛海域以钡为指标的古生产力研究[J]. 海洋学报,2005,27(4):53-58.
- [18] 郭志刚,杨作升,范德江,等. 东海中陆架泥质区及其周边底质中钙、锶、钡的地球化学特征[J]. 青岛海洋大学学报,1998,28(3):481-488.
- [19] 马玉,李团结,王迪,等. 珠江口滨海湿地沉积物重金属污染现状及潜在生态危害[J]. 热带地理,2011,31(4):353-355.
- [20] 牛显春,周建敏,李春晖,等. 茂名近岸海域底质重金属污染及潜在生态风险综合评价[J]. 黑龙江水专学报,2007,34(3):101-107.
- [21] 王越兴,尹魁浩,彭盛华,等. 深圳市河流底泥重金属的污染现状及生态风险评[J]. 环境与健康杂志,2011,28(10):918-919.
- [22] 广州海洋地质调查局. 华南西部(北部湾广西沿岸)滨海湿地地质调查与生态环境评价调查报告[R]. 2011.

(责任编辑:陈小玲)