

# 钦州湾口沉积物中重金属变化特征及其与粒度的关系\* Variation Characteristics of Heavy Metals and Their Relationship With Grain Sizes in Qinzhou Bay Mouth, Guangxi

黄向青, 梁开, 林进清, 刘鑫, 霍振海

HUANG Xiang-qing, LIANG Kai, LIN Jin-qing, LIU Xin, HUO Zhen-hai

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

(Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, MLR, Guangzhou, Guangdong, 510760, China)

**摘要:**【目的】开展钦州湾口晚全新世以来沉积物中重金属变化特征及其与粒度关系的研究, 为掌握近岸海区重金属分布、迁移、积累规律提供依据。【方法】利用钦州湾口内和湾口外水下斜坡沉积物样品测试数据, 着重分析近 2.20 m 深度即晚全新世以来重要重金属 Pb、Cr、Zn 的变化特征及其与沉积物粒度的关系, 并与其在表层沉积物的积累行为进行比较。【结果】重金属 Pb、Cr、Zn 具有陆源性, 相对含量介于 0.0328~0.3630, 变异性以 Cr 最大, Zn 最小, 在垂向上呈现分段变化; 岩芯沉积物颗粒主要分布在  $1\phi\sim F$ , 主成分为  $8\phi\sim F$ , 临界粒级为  $3\phi\sim 4\phi$ ; 在与粒级关系上, Pb、Zn 满足粒度控制律, Cr 为反粒度控制律, 均与其相态有关, 同步变化概率  $P$  曲线、重金属对粒级变化的响应率  $k$  的共轭特征也进一步佐证; Cr 具有正响应区间窄、负响应区间宽的特征, 而 Pb、Zn 则相反; 在表层沉积物中, Cr 与粒度之间的关系已经与 Pb、Zn 趋向一致, 且临界粒级有所右移, 表明重金属对细颗粒的选择性增强。【结论】重金属与粒度的关系反映出钦州湾口沉积环境的演变情况; Cr 对环境变化敏感, 其与粒度的关系具有环境变化示踪意义。

**关键词:** 晚全新世 重金属 粒度 关系

**中图分类号:** X55, P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0281-07

**Abstract:**【Objective】The relationship between heavy metals and grain parameters is studied in order to understand the distribution, transportation and accumulation of heavy metals in Guangxi coast waters since late Holocene.【Methods】The distribution variation of heavy metals and their relationship with grain sizes and grain parameters are mainly analyzed, based on the sample test data from surficial and 2.20 m length of core sediments since late Holocene near the mouth of Qinzhou Bay.【Results】The heavy metals in above sediments have land-sourcing characteristics. The vertical relative concentration of Pb, Cr and Zn is from 0.0328 to 0.3630 in an oscillation way, and the variance of Cr reaches the maximum among above heavy metals. Vertical grain sizes fall into  $1\phi\sim F$  and the primary component is  $8\phi\sim F$  in grain series with  $3\phi\sim 4\phi$  as critical grain size. Related with chemical phases, Pb and Zn meet grain-controlled law, whereas Cr behaves anti-grain-controlled law, which is further proven by the conjugate of probability  $P$  curves and the response  $k$  to grain size variation. Cr shows narrow positive response interval and wide negative interval in grain size series, but Pb and Zn oppose to Cr instead. Considering the relationship with grain sizes, Cr has acted almost the same as Pb and Zn in surficial sediments, and

收稿日期: 2014-12-01

修回日期: 2015-03-23

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 critical grain size moves right to  $4\phi \sim 5\phi$ , suggesting that the enhancement of selectivity shifts to finer grain sizes. **【Conclusion】**The relationship between heavy metals and grain sizes in the studied area reflects the environmental change in this area, and Cr is sensitive to environmental change and its relationship with grain sizes owns the significance of environmental change tracer.

**Key words:** late Holocene, heavy metal, grain size, relationship

## 0 引言

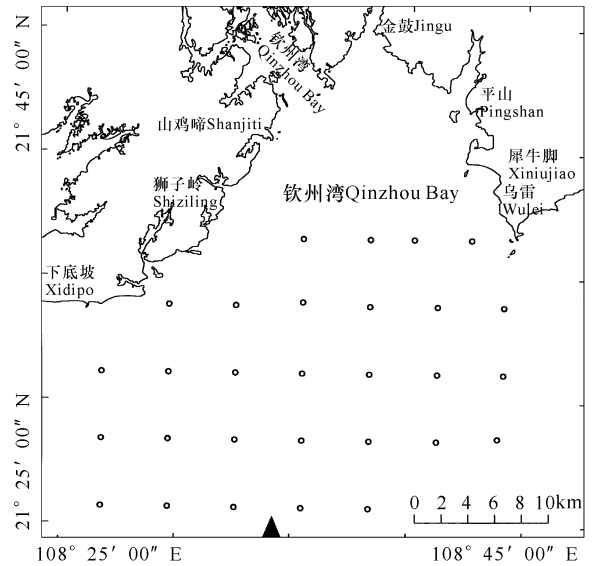
**【研究意义】**重金属作为地球化学元素重要组成部分,其含量、分布情况与迁移行为广受人们关注。自晚全新世以来人类影响肇始,环境变化加快,而对此时期的广西近岸沉积物中重金属分布、变化及其与沉积物的物理、化学组分关系的分析尚为少见,有必要及时开展这方面的工作,为掌握广西近岸重金属积累特征提供依据。**【前人研究进展】**已有学者对广西钦州湾及邻区沉积物的分布、矿物组合、全新世沉积环境进行基础性研究<sup>[1~4]</sup>。莫永杰<sup>[1]</sup>对钦州湾地貌环境、泥沙来源、沉积物粒度及其分布变化特征进行研究;黎广钊等<sup>[2,3]</sup>研究了钦州湾重矿物分布及其动力分区应用,以及沉积物来源和运移趋向;还对钦州湾口至廉州湾一带水域重矿物分布、组合分区及其所反映的沉积物扩散进行了分析;张伯虎等<sup>[4]</sup>进一步对钦州湾沉积物类型、粒径分布以及沉积动力分区进行研究,为了解钦州湾现代沉积物来源、分布、变化等奠定基础。**【本研究切入点】**鉴于重金属 Pb、Zn、Cr 在广西近岸有污染加大的趋势<sup>[5]</sup>,因此在钦州湾口进行沉积物取样和测试,在分析重金属与其它地球化学要素关系的基础上,着重分析其与沉积物粒度,即沉积物粒级、粒度参数之间的关系。**【拟解决的关键问题】**研究晚全新世以来重金属在岩芯、表面沉积物的分布变化情况,及其与粒度的关系、对粒度变化的响应。

## 1 数据来源以及处理方法

### 1.1 数据来源

数据来源于中国地质调查局资助的“我国重点海岸带滨海环境地质调查与评价”项目。表层沉积物取样站位于钦州湾口内和湾口外水下斜坡,岩芯取样站位于靠近钦州湾西口的水下斜坡水深 18 m 处(图 1)。采样时段为 2006~2009 年,取样、编录、处理按照有关质量管理体系进行,并及时送回标准岩芯库储存,随后进行分样测试,尤其是对 2.2 m 以上岩芯进行了较细间距 10 cm 逐层分样测试。在岩芯全新世底界 10.1 m 深度的<sup>14</sup>C 测年为  $11598 \pm 510$ a. B. P. 广州地球化学研究所,根据平均沉积速率,可知 2.2 m 岩芯为晚全新世以来沉积物<sup>[5]</sup>。重金属等地球化

学要素的测试标准为 GB/T 20260.8—2006,采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP4300DV 和 AJ100 电子天平进行测试(为控制测试质量采用空白样与回收样,抽检合格率为 100%);沉积物粒度的测试标准为 GB/T 12763.8—2007,采用沉降法,粒级间距为  $1\phi$ ,仪器为激光衍射粒度仪。以上测试单位均为广州海洋地质调查局实验测试所。



○ 表层沉积物取样站位 Sampling stations of surficial sediment  
▲ 钻孔沉积物取样站位 Sampling stations of drilling sediment

图 1 研究区表层沉积物和岩芯取样站位

Fig. 1 Surficial sediment sampling and borehole drilling position in study area

### 1.2 数据处理方法

利用统计学方法对上述晚全新世以来岩芯和表层沉积物的数据进行分析。鉴于化学要素以及沉积物颗粒的性质和意义的不同,均采用无量纲的相对含量,便于进行对比分析。即某化学要素  $i$  的相对含量 =  $\frac{C_i}{\sum_{j=1}^{10} C_j}$ , 式中分母为同步测试的 Co、Cu、Ni、Pb、Cr、Sr、Zn、Zr、Ga、Ba 共 10 种代表性的元素质量含量总和,分子  $C_i$  为化学要素  $i$  的质量含量。沉积物粒级的测试结果已为相对含量,例如岩芯 0.40 m 处  $1\phi$  粒级的含量为 10.08%, 即 0.1008。以上转换结果均保持小数点后 4 位。

## 2 结果与分析

### 2.1 岩芯地球化学要素的主成分和活跃成分

以上除了重金属, Co、Cu、Ni、Sr、Zr、Ga、Ba 共 7 种元素相对含量协方差阵  $Covar(x, y)$  在  $-0.0017 \sim 0.0037$ , 得到特征向量矩阵为  $(Co, Cu, Ni, Sr, Zr, Ga, Ba)^T = (0.0039, 0.0005, 0.0038, -0.6784, 0.0762, 0.0030, 0.1502)^T$ , 主成分是 Sr、Ba, 这与元素的含量大小及其方差贡献有关, 显示 Sr、Ba 的控制性; 但考虑到不应忽略一些含量低、相应方差贡献小的元素, 引进相对协方差的概念, 以消除含量的影响, 突出相对活跃性。相对协方差公式为  $Covar(x, y)/x' \cdot y', x', y'$  为平均值, 得特征向量矩阵  $(Co, Cu, Ni, Sr, Zr, Ga, Ba)^T = (0.1525, 0.0469, 0.1220, -0.4428, 0.1264, 0.1649, 0.0840)^T$ , 显示 Sr 既是岩芯地球化学要素的主成分, 也是活跃成分, 其它活跃成分还有非主成分的 Co、Ni、Zr、Ga。

### 2.2 岩芯重金属含量和变化

重金属的相对含量为  $0.0328 \sim 0.3630$ , 平均为  $0.0452 \sim 0.1388$ , 总体来说  $Cr > Zn > Pb$ ; 变异系数则以 Cr 最大, Zn 最小, Pb 居中(表 1)。

表 2 岩芯重金属与其它地球化学要素相关系数/显著性

Table 2 Correlation coefficient/significance between heavy metals and other geochemical elements in core sediments

	Pb	Cr	Zn	Co	Cu	Ni	Sr	Zr	Ga	Ba
Pb	1.00	-0.73/0.00	0.20/0.40	0.36/0.12	0.09/0.70	0.24/0.30	-0.34/0.14	0.36/0.12	0.28/0.20	0.35/0.13
Cr	-0.73/0.00	1.00	-0.64/0.00	-0.79/0.00	-0.17/0.47	-0.68/0.00	0.67/0.00	-0.78/0.00	-0.62/0.00	-0.67/0.00
Zn	0.20/0.40	-0.64/0.00	1.00	0.84/0.00	0.13/0.59	0.77/0.00	-0.84/0.00	0.82/0.00	0.81/0.00	0.69/0.00

### 2.4 岩芯沉积物粒度特征

#### 2.4.1 沉积物的粒度参数

岩芯沉积物自下到上逐渐变粗, 由粉砂质粘土变为粉砂质砂, 平均粒径  $M_z$  在  $3.46\phi \sim 9.74\phi$  之间, 分选系数为  $2.64\phi \sim 5.77\phi$ , 偏态为  $0 \sim 0.72$ , 峰态为  $0.79 \sim 0.98$ 。颗粒主要分布在  $1\phi \sim F, -2\phi \sim 0\phi$  含量基本为 0。主要粒级序列中含量较高的有粗颗粒  $3\phi, 4\phi$  和最细颗粒 F, 粒级变异系数较大, 介于  $0.63 \sim 1.55$ (表 3), 系沉积环境变化所致。

#### 2.4.2 粒级的主成分和活跃成分

$1\phi \sim F$  粒级绝对协方差矩阵  $Covar(x, y)$  矩阵在  $-0.0080 \sim 0.0343$ , 特征向量矩阵为  $(1\phi, 2\phi, 3\phi, 4\phi, 5\phi, 6\phi, 7\phi, 8\phi, 9\phi, 10\phi, F)^T = (-0.0035, -0.0063, -0.056, 0.0526, 0.0766, 0.0847, 0.0982, 0.1122, 0.1286, 0.1356, 0.1557)^T$ , 主成分粒级有  $8\phi \sim F$ , 以细颗粒占据优势。相对协方差矩阵在  $-0.5140 \sim 2.2693$ , 特征向量矩阵为  $(1\phi, 2\phi, 3\phi, 4\phi, 5\phi, 6\phi, 7\phi, 8\phi, 9\phi, 10\phi, F)^T = (-0.1390, -0.1290,$

### 2.3 岩芯重金属与地球化学要素之间的关系

相对含量之间的相关系数计算检验显示, 在显著性水平  $\alpha = 0.001$  下, 绝大部分地球化学要素之间为正相关, 表明其主要来源均为陆源, 矿物组合分析也证实其陆源性<sup>[5]</sup>。同样的相关分析显示, 重金属 Pb 与地球化学元素 Co、Ni、Zr、Ga、Ba 为正相关, Zn 为显著正相关性, 两者均与 Cu 无关; Pb 与 Sr 为负相关, Zn 与 Sr 为显著负相关; Cr 与 Cu 无关, 但与 Sr 为显著正相关(表 2)。以上表明地球化学要素的主成分与活跃成分对重金属含量有较大影响, 也表明虽然重金属与地球化学要素同为陆源, 但自晚全新世之后的积累行为出现分化。

表 1 岩芯重金属相对含量统计特征

Table 1 Statistics of relative concentration of heavy metals in core sediments

项目 Items	相对含量 Relative quantity			变异系数 Variance
	最低 Minimum	最高 Maximum	平均 Average	
Pb	0.0328	0.0889	0.0452	0.29
Cr	0.0816	0.3630	0.1388	0.48
Zn	0.0932	0.1545	0.1188	0.14

$-0.092, 0.3070, 1.091, 0.8600, 1.073, 1.282, 1.537, 1.392, 0.521)^T$ , 可知活跃成分粒级为  $1\phi \sim 2\phi$  和  $8\phi \sim 10\phi$ 。

表 3 岩芯沉积物粒级统计特征

Table 3 Statistical characteristics of grain sizes' in core sediments

项目 Items	相对含量 Relative quantity			变异系数 Variance
	最低 Minimum	最高 Maximum	平均 Average	
$1\phi$	0.0000	0.0683	0.0257	0.95
$2\phi$	0.0006	0.1271	0.0562	0.89
$3\phi$	0.0017	0.2281	0.1296	0.70
$4\phi$	0.0425	0.3238	0.1274	0.67
$5\phi$	0.0305	0.1232	0.0541	1.14
$6\phi$	0.0435	0.1301	0.0818	0.87
$7\phi$	0.0389	0.1217	0.0708	1.09
$8\phi$	0.0363	0.1298	0.0638	1.31
$9\phi$	0.0362	0.0805	0.0554	1.55
$10\phi$	0.0015	0.1958	0.0691	1.48
F	0.1473	0.4887	0.2643	0.63

## 2.5 岩芯重金属与沉积物粒级的关系

### 2.5.1 重金属与粒级之间的关系

如表 4 所示,在同样显著性水平  $\alpha = 0.001$  下, Pb、Zn 与  $1\varphi \sim 3\varphi$  为显著负相关,与主成分粒级 F 为显著正相关。Cr 则相反,与  $1\varphi \sim 3\varphi$  为显著正相关,

表 4 岩芯重金属与粒级的相关系数/显著性

Table 4 Correlation coefficient/significance between heavy metals and grain sizes in core sediments

	$1\varphi$	$2\varphi$	$3\varphi$	$4\varphi$	$5\varphi$	$6\varphi$	$7\varphi$	$8\varphi$	$9\varphi$	$10\varphi$	F
Pb	-0.49/0.03	-0.44/0.05	-0.45/0.05	0.09/0.71	0.26/0.27	0.22/0.36	0.23/0.33	0.28/0.24	0.26/0.26	0.24/0.31	0.48/0.03
Cr	0.86/0.00	0.78/0.00	0.66/0.002	-0.39/0.09	-0.38/0.10	-0.31/0.19	-0.38/0.10	-0.43/0.06	-0.41/0.07	-0.46/0.04	-0.68/0.00
Zn	-0.68/0.00	-0.77/0.00	-0.63/0.00	0.40/0.08	0.15/0.53	0.06/0.81	0.12/0.61	0.16/0.50	0.15/0.54	0.23/0.32	0.42/0.05

### 2.5.2 重金属与粒级的垂直变化走势与分布形态

采用标准化变量  $s = (x_i - \bar{x}') / \sigma$ , 比较重金属、粒级的垂直变化走势与分布形态,式中  $x_i$  代表相对含量,  $\bar{x}'$  为平均值,  $\sigma$  为标准差。结果显示,自下往上,重金属垂直变化为分段变化。Pb、Zn 走势基本一致,两者在 2.2~1.0 m 段呈波动式下降,1.0 m 以上基本为左右波动,但自 0.5 m 以上略有上升趋势。Cr 在 2.2~1.5 m 为波动式下降,1.5 m 以上为波动式上升,但自 0.5 m 略有下降;在分布形态上,Pb、Zn 基本上与  $1\varphi \sim 3\varphi$  以 y 轴共轭,即表明两组呈反相变化(图 2a 和图 2c)。当然,共轭关系也不完全保持,例如 2.0~1.5 m 局部段,Zn 呈现小幅波动而  $1\varphi \sim 3\varphi$  走势比较平缓,表明 Zn 在此还受到其它因素的影响,但在 1.5 m 以上共轭关系又趋明显;Cr 则与 Pb、Zn 不同,它与  $1\varphi \sim 3\varphi$  走势保持一致,尤其是  $1\varphi$ 、 $2\varphi$  (图 2b),这与近岸砂沉积物常出现 Cr 高值的现象吻合<sup>[6~8]</sup>。Pb、Zn 与 F 粒级存在同步关系,Cr 则与 F 粒级反相,大体以 y 轴共轭(图 2d~图 2f)。以上可见,Pb、Zn 两者的表现符合粒度控制律<sup>[9~15]</sup>,Cr 则为反粒度控制律,三者行为出现分化,表明 Pb、Zn 两者为非稳定的结合相态,亲细颗粒,Cr 则为较为稳定的氧化相态,亲粗颗粒。

### 2.5.3 重金属与粒级、化学要素的同步变化情况

以两个量的垂直梯度乘积  $k_1 \cdot k_2 > 0$  表示变化同步、 $k_1 \cdot k_2 < 0$  表示异步、 $k_1 \cdot k_2 = 0$  表示无关,来分析重金属与粒级、化学要素的同步变化情况。从图 3 结果可以看出,同步概率  $P$  基本上随沉积物深度而波动变化,无关的情况仅为极个别。重金属与粒级的同步概率  $P_{\text{粒级}}$  为 0.06~0.44,显示重金属只与某些粒级同步,对粒级存在选择性;重金属与化学要素的同步概率  $P_{\text{要素}}$  为 0~0.39,说明重金属虽然与化学要素同为陆源,但两者变化并非都同步;Pb 与 Cr 的  $P_{\text{粒级}}$  曲线具有较明显的共轭对称特征,尤其是 1.20 m 以上,两者的  $P_{\text{要素}}$  曲线也具有该特征,说明重金属

与 F 为显著负相关;Pb、Zn 与余下粒级正相关,Cr 则为负相关。以上显示,同地球化学元素一样,粒级主成分和活跃成分对重金属分布有较大影响,正、负相关性的临界粒级为  $4\varphi$ 。

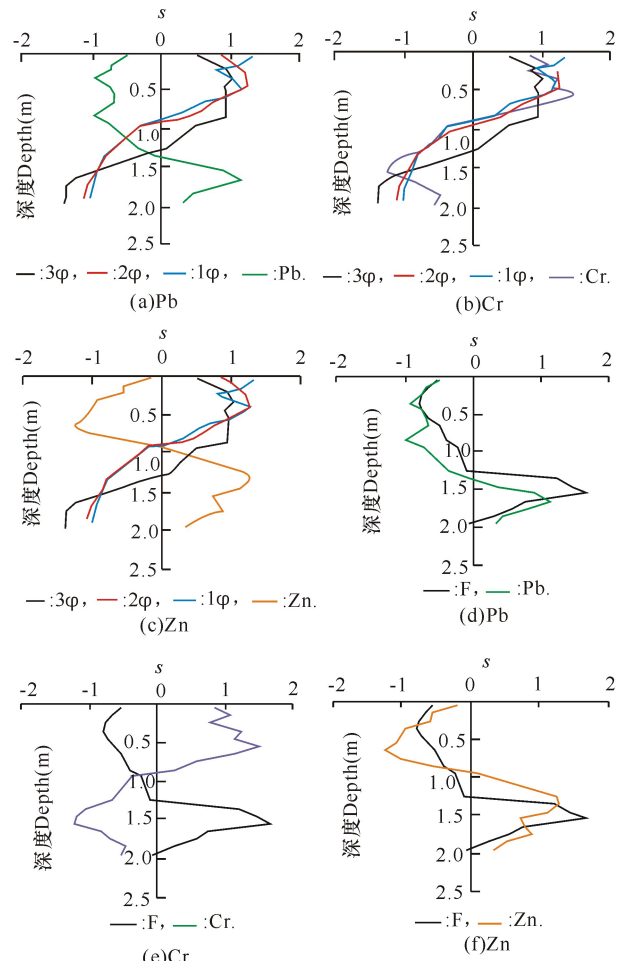


图 2 岩芯重金属和粒级标准化变量  $s$  的 3 阶移动平均曲线分布

Fig. 2 Standardized variable  $s$  of 3-order average moving of heavy metals and grain sizes in core sediments  
行为具有分化性或者互斥性。总体上  $P_{\text{粒级}} > P_{\text{要素}}$ , 表明该岩芯的粒级对重金属积累起着更多的作用。

### 2.5.4 岩芯重金属对粒度参数变化的响应

使用线性最小二乘法拟合求出粒级-重金属、粒度参数-重金属的趋势斜率  $k$ ,用以说明重金属对粒度变化的响应情况。可见, $1\varphi \sim F$  粒级序列中,Pb 的  $k$  值为  $-0.5921 \sim 0.4909$ ,Cr 为  $-0.6890 \sim 0.8610$ ,Zn 为  $-0.7732 \sim 0.4246$ ,三者绝对值基本相近但 Cr 略高,表明 Cr 对粒级更为敏感;Cr 的正响应区间为

1 $\phi$ ~3 $\phi$ ,宽度 2 $\phi$ ,负响应区间 5 $\phi$ ~F,宽度 6 $\phi$ ,具有正响应区间窄、负响应区间宽的特征,而 Pb、Zn 则相反。Cr 的粒级变化  $k$  值曲线与 Pb、Zn 以  $x$  轴共轭,转折粒级同样为 3 $\phi$ ~4 $\phi$ (图 4a)。在对粒度参数的响应,Cr 的  $k$  值均为正,最大为 5.2099,Pb、Zn 的  $k$  值均为负,为 -0.0790~-5.5571,Cr 与 Pb、Zn 的粒度参数  $k$  值曲线也以  $x$  轴共轭(图 4b)。

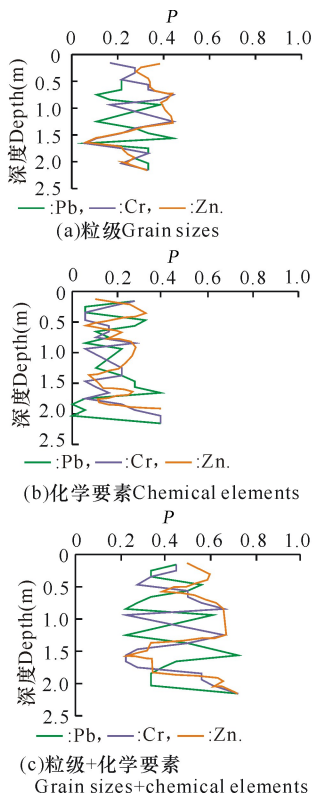


图 3 岩芯重金属与粒级、化学要素同步变化概率  $P$  曲线分布

Fig. 3 Probability of synchronous variation of heavy metals with grain sizes and chemical elements in core sediments

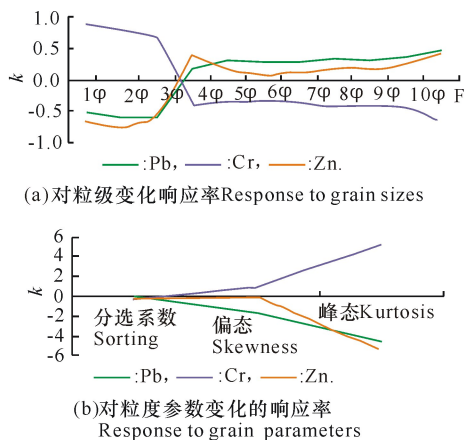


图 4 岩芯重金属对粒级和粒度参数变化响应率  $k$  的分布

Fig. 4 Response  $k$  of heavy metals to grain sizes and grain parameters' variation in core sediments

## 2.6 表层沉积物重金属与沉积物粒度的关系

### 2.6.1 表层沉积物粒度特征

表层沉积物粒级集中在 3 $\phi$ ~F,粒级含量为 0.010~0.4880,平均含量最高的为 F 粒级,4 $\phi$  次之,其它大体接近。分选系数为 2.77 $\phi$ ~5.59 $\phi$ ,偏态为 0.00~0.76,峰态为 0.85~2.27。岩芯周边表层沉积物多为粉砂质粘土,平均粒径  $M_z$  为 8.60 $\phi$ ~9.28 $\phi$ 。均显示出表层沉积物明显趋细,总体上分选变差,偏态左偏减弱,右偏趋强,峰态趋尖。

### 2.6.2 表层沉积物重金属对粒度变化的响应

同样的线性最小二乘法拟合分析揭示,表层沉积物中的 Cr 与粒级之间的关系已转为正相关,Cr、Pb、Zn 三者与粒级的关系趋同,响应率  $k$  的分布亦是如此。Pb 对粒级序列 1 $\phi$ ~F 的响应率  $k$  为 -0.0807~0.1497,Cr 为 -0.1721~0.4302,Zn 为 -0.2726~0.1191,在大于零的区间  $k$  值也增大,表明三者均对细颗粒的敏感性增加,尤其是 Cr;临界粒级右移至 4 $\phi$ ~5 $\phi$ ,正响应区间右移略有收窄,显示三者对细颗粒的选择性增加(图 5a);重金属对粒度参数的  $k$  值均为负值,为 -0.0439~-0.0057,Cr 的  $k$  值曲线位于最下方,表明 Cr 对粒度参数变化最为敏感(图 5b)。

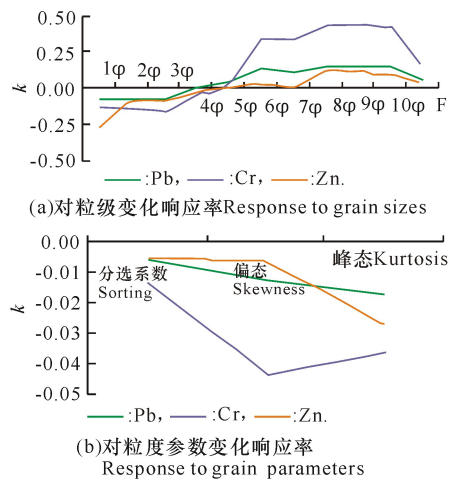


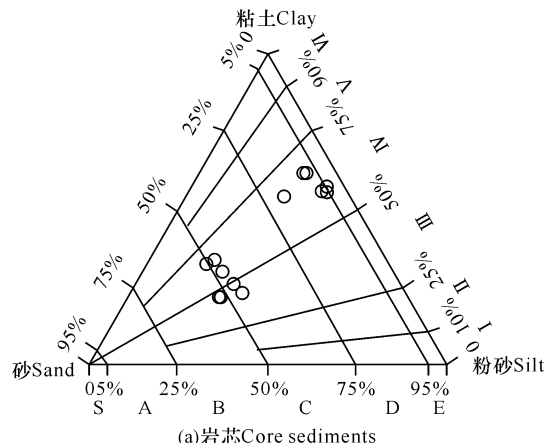
图 5 表层沉积物重金属对粒级和粒度参数变化响应率  $k$  的分布

Fig. 5 Response  $k$  of heavy metals to grain sizes and grain parameters' variation in surficial sediments

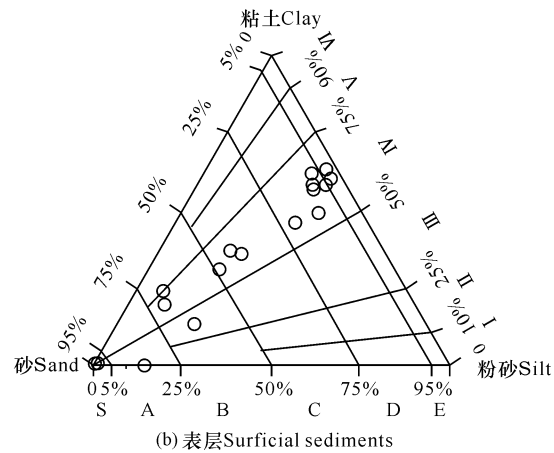
## 2.7 岩芯和表层沉积物重金属行为的比较

从 2.6.2 可知,表层沉积物中的 Pb、Zn 仍然保持着与岩芯一致的行为,但 Cr 的行为明显转变。在 Flemming 沉积动力环境分类图(图 6)上,沉积环境类型由岩芯的 C-IV 区向表层的 E-IV 区转移,表明沉积动力进一步减弱。这主要是由于全新世以来海水对陆地的侵浸作用,导致岩芯附近位置水深加深,水动力减弱,使得动力沉积环境由波控转为潮控,

由砂沉积物转向粘土沉积物,表层沉积物颗粒变细,有利于Cr的吸附与积累,Cr的相态由稳定态转为不稳定态。有报道也认为该区表层沉积物粒度与环境成分有关,由于气候变化和水土流失加快,人类向海排污逐渐加重,使得该区细颗粒和重金属有富集趋势<sup>[16~20]</sup>。重金属行为之变化是对环境变化的响应。



(a)岩芯Core sediments



(b)表层Surficial sediments

图6 研究区动力沉积环境划分

Fig. 6 Sub-division of dynamic sedimentary environments according to Flemming's method in study area

### 3 结论

本文分析比较了研究区自晚全新世以来3项重金属Pb、Cr、Zn的分布、变化及其与沉积物粒度的关系,得出如下结论:

(1)岩芯重金属相对含量为分段波动变化。自下往上,Pb、Zn垂直走势基本一致,Pb、Zn在2.2~1.0 m段呈波动式下降,1.0 m以上基本为左右波动,但0.5 m以上略有上升趋势;Cr在2.2~1.5 m为波动式下降,1.5 m以上为波动式上升,自0.5 m起略有下降。

(2)岩芯重金属受到主成分、活跃成分的粒级和化学要素的共同影响,垂直分布上Pb、Zn基本与Cr

反相,前两者满足粒度控制律,Cr则为反粒度控制律,相关分析亦是如此。三者虽具有陆源性,但在之后的沉积物积累行为中出现分化。岩芯重金属对粒级变化的响应率为-0.7732~0.8610,显示重金属之间互斥性;对表层沉积物粒级响应率为-0.2726~0.4302,显示重金属有同聚性,这些特征与重金属相态和环境有关。3φ~4φ、4φ~5φ分别为岩芯、表层沉积物中重金属与粒级关系的转折粒级。

(3)表层沉积物中,Cr的行为与Pb、Zn趋向一致,这主要是由于钦州湾口沉积环境变化、颗粒趋细而致,也表明Cr与沉积物粒度的关系具有环境变化指示性。

### 参考文献:

[1] 莫永杰. 钦州湾溺谷湾地貌、沉积与物质运移[J]. 海洋通报,1993,12(5):56-60.  
Mo Y J. Coastal geomorphological and sediment type of Qinzhou drowned-valley-bays[J]. Marine Science Bulletin,1993,12(5):56-60.

[2] 黎广钊,梁文,刘敬合. 从沉积物中重矿物动力分区论钦州湾泥沙来源及运移趋势[J]. 海洋通报,2002,21(5):61-68.  
Li G Z, Liang W, Liu J H. Discussion on the source and transport tendency of silt in the Qinzhou Bay in terms of the dynamic partition zones of heavy minerals in the sediments[J]. Marine Science Bulletin,2002,21(5):61-68.

[3] 黎广钊,梁文,刘敬合. 廉州湾重矿物组合区与泥沙来源[J]. 广西科学,2002,9(2):119-123.  
Li G Z, Liang W, Liu J H. Heavy mineral assemblies and silt sources in the sediment of Lianzhou Bay[J]. Guangxi Sciences,2002,9(2):119-123.

[4] 张伯虎,陈沈良,刘焱雄,等. 广西钦州湾海域表层沉积物分异特征与规律[J]. 热带海洋学报,2011,30(4):66-70.  
Zhang B H, Chen S L, Liu Y X, et al. Sediment characteristics and differentiation in the Qinzhou Bay, Guangxi, China [J]. Journal of Tropical Oceanography,2011,30(4):66-70.

[5] 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(银滩幅)[R]. 广州:广州海洋地质调查局,2009.  
Guangzhou Marine Geological Survey Bureau. Research Report of Guangxi Near Shore Geological Environment and Geological Hazards, Beibu Gulf (Yintan Waters) [R]. Guangzhou:Guangzhou Marine Geological Survey, 2009.

[6] 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.

- Feng Z Q, Li X J, Lin J Q, et al. Integrated Marine Geological Environmental Assessments on Daya Bay, Guangdong[M]. Wuhan: China Geosciences Press, 2002.
- [7] 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.
- Xia Z, Lin J Q, Zheng Z C, et al. Integrated Marine Geological Environmental Assessments on Dapeng Bay, Guangdong[M]. Beijing: Geological Press, 2004.
- [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.
- Zhang J B, Liu J F, Zhang C X, et al. Distribution and pollution assessment on heavy metals in surface sediments of Zhanjiang Bay[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(5): 644-648.
- [9] 庄云龙, 石秀春, 张荣亮. 重金属在沉积物系统中吸附行为的研究进展[J]. 四川环境, 2002, 21(2): 13-16.
- Zhuang Y L, Shi X C, Zhang R L. Progress of studies on the adsorption of heavy metals in sediments system[J]. Sichuan Environment, 2002, 21(2): 13-16.
- [10] Xu Y H, Sun Q Q, Yi L, et al. The source of natural and anthropogenic heavy metals in the sediments of the Minjiang River Estuary (SE China): Implications for historical pollution[J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 729-736.
- [11] 丘耀文, 朱良生, 黎满球, 等. 海陵湾沉积物重金属与粒度分布特征[J]. 海洋通报, 2004, 23(6): 49-53.
- Qiu Y W, Zhu L S, Li M Q, et al. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(6): 49-53.
- [12] 栗俊, 鲍永恩, 刘广远, 等. 东海陆架沉积物中重金属地球化学行为研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 63-66.
- Li J, Bao Y E, Liu G Y, et al. Study on geochemistry of heavy metals in the sediment in the East China Sea continental shelf [J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(1): 63-66.
- [13] 梁涛, 陈岩, 张朝生, 等. 利用网格采样法比较潮间带沉积物不同粒度区域重金属含量特征[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 421-427.
- Liang T, Chen Y, Zhang C S, et al. Comparison of characteristics of heavy metals in different grain sizes of intertidal sediment by using grid sampling method[J]. Environmental Science, 2008, 29(2): 421-427.
- [14] 罗先香, 张蕊, 杨建强, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269.
- Luo X X, Zhang R, Yang J Q, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 262-269.
- [15] 任加国, 武倩倩. 黄河口海域沉积物对重金属的吸附[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(4): 129-133.
- Ren J G, Wu Q Q. Study on heavy metal adsorption to coastal sediment of the Yellow River Estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(4): 129-133.
- [16] 张志锋, 王燕, 韩庚辰, 等. 北部湾海洋沉积物中重金属的地球化学行为及物源初探[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(2): 72-81.
- Zhang Z F, Wang Y, Han G C, et al. The geochemical characteristics and the source of heavy metals in sediment for the Beibu Gulf [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(2): 72-81.
- [17] 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西龙门岛潮间带近 150 年来环境演变的沉积记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 51-59.
- Xia P, Meng X W, Yin P, et al. Depositional records of environmental evolution during the recent 150 years in the intertidal zone of Longmen Island, Guangxi province [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(1): 51-59.
- [18] 蓝文陆, 杨绍美, 苏伟. 环钦州湾河流入海污染物通量及其对海水生态环境的影响[J]. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.
- Lan W L, Yang S M, Su W. Variation of river pollutant fluxes around Qinzhou Bay and their environmental impacts[J]. Guangxi Sciences, 2012, 19(3): 257-262.
- [19] 梁文, 李智, 范航清, 等. 防城港湾红树林表层沉积物粒度分形特征及与环境因子的相关性[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 184-192.
- Liang W, Li Z, Fan H Q, et al. Fractal characteristics and correlation with environmental factor on the surface sediments in mangrove areas of Fangchenggang Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(2): 184-192.
- [20] 黄向青, 林进清, 梁开, 等. 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[J]. 广西科学院学报, 2014, 30(2): 120-126.
- Huang X Q, Lin J Q, Liang K, et al. The distribution and accumulation of heavy metals in surficial sediment in submarine plain of Guangxi nearshore waters [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2014, 30(2): 120-126.

(责任编辑: 米慧芝)