

北部湾海槽中全新世以来气候变化与重金属积累关系* Climatic Change and Accumulative Characteristics of Heavy Metals in Beibu Gulf Trough Since Middle Holocene

黄向青,崔振昂,夏真,梁开,张顺枝,潘毅

HUANG Xiangqing, CUI Zhen'ang, XIA Zhen, LIANG Kai, ZHANG Shunzhi, PAN Yi

(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)

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

摘要:【目的】为了探寻北部湾湾口重金属沉积规律,研究中全新世以来该地区海槽重金属分布、累积及联系。【方法】在北部湾南部海槽处钻取 200 cm 长度岩芯进行垂直分样,并对典型重金属 Pb、Cr、Zn,微量元素,粒度,矿物,¹⁴C 定年等指标进行综合测试及分析。【结果】岩芯沉积物的化学蚀变指标 CIA 显示,气候波动变化,总体上气候趋向暖湿,陆源供给加大,可分为两个基本气候阶段;重金属具有陆源性,且细粒级与重金属对气候波动响应明显,含量随深度变浅,即随气候演进而呈增加趋势;岩芯沉积物组分以悬移质为主,与海水悬移质粒级有对应性,其中重金属来自吸附与再沉积,6~9 φ 为吸附粒级;重金属积累系数 f_a 变化曲线显示,重金属自 25 cm 以来积累加快,Pb 的相对斜率增加且分化明显。【结论】重金属含量变化是对气候波动的响应,晚全新世后期重金属(尤其是 Pb)积累有加快趋势,可能与人类活动有关。

关键词:北部湾 重金属 气候变化 积累

中图分类号:X142 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2016)03-0286-07

Abstract:【Objective】Because of less understanding to heavy metal accumulation in sedimentary center in Beibu Gulf trough in coastal bays and estuaries, it is necessary to study the distribution, accumulation and relationship of heavy metals along with sedimentary environment change since Holocene. 【Methods】Based on ¹⁴C dating, laboratory test of granularity and geochemistry was conducted in 30 samples from 200 cm-length sediment core in Beibu Gulf trough. The distribution of heavy metals Pb, Cr and Zn and their relation with environment factors were analyzed. 【Results】Chemical erosion indicator CIA and other indicator basically oscillated in two stages, showing a climatic trend to warmer and wetter. Heavy metals had continent provenance and an increasing trend with positive respond to climatic change. Sediment core was mainly

composed of suspended sediment compositions, revealing that heavy metals accumulated by the way of suspended matters' adsorption and re-settlement with adhesive grain sizes 6~9 φ. Through the method of 150 cm-length progressive and dynamic background value calculation, the vertical accumulation index f_a from 50 cm

收稿日期:2016-01-25

修回日期:2016-03-10

作者简介:黄向青(1964—),女,高级工程师,从事海洋地质环境研究。

* 中国地质调查局项目(基[2009]03-19-04)资助。

was obtained firstly, showing that heavy metals came into the accumulation state from 25 cm and their accumulation rate especially Pb distinguished with other two heavy metals. **【Conclusion】**The vertical distribution and behavior characteristics of heavy metals are basically the response to climatic variation and trend, and a growing trend of abovementioned heavy metals especially Pb since latest Holocene reveals anthropogenic impacts.

Key words: Beibu Gulf, heavy metal, climatic variation, accumulation

0 引言

【研究意义】北部湾湾口海槽是该湾的沉积中心所在之处,也是主要对外交换通道,其沉积物来源多样。全新世早期,该海域海面明显升高,海侵显著,海面波动较大,中全新世以来沉积环境趋向稳定,但有小幅波动。北部湾近岸重金属监测和评价已有报道,但对南部湾口重金属的研究鲜见。**【前人研究进展】**文献[1-2]把近岸和浅海相结合,大面站位和断面相结合,评价了北部湾北部近岸海底沉积物重金属质量现状,文献[3-6]分析了北部湾主要海湾海洋污染和生态风险,文献[7]分析了北部湾海底表层沉积物重金属分布。**【本研究切入点】**由于北部湾南部是北部湾的重要组成部分和沉积中心,而重金属的分布和积累是环境变化影响的结果,故研究该区域重金属的垂直分布和变化,可以在整体上了解北部湾海洋沉积物重金属与气候响应的联系。**【拟解决的关键问题】**鉴于 Pb、Cr、Zn 是基本的地球化学元素和海洋环境质量指标,本研究通过岩芯取样和测试手段获取沉积物粒度、矿物、化学、年代等数据,并进行重金属含量、变化、关系等综合分析,以揭示北部湾海槽在中全新世以后重金属沉积规律及其对气候变化的响应和联系。

1 取样位置和样品测试

2009年8~10月在位于北部湾湾口海槽水深75 m、距东岸102 km处(图1)进行岩芯重力取样。对200 cm长度岩芯按5 cm间隔分样,共测试了38个样品。沉积物粒度测试标准参考 GB/T 12763.8.6.3-2007 执行,常量、微量、稀土元素测试依据 GB/T 20260.10-2006,仪器为激光衍射粒度仪和 ICP-OES 4300DV 型质谱仪^[8]。测试之前对测试仪器进行校验和标定,使用一级标准物质进行比对,除了置入空白样以外,插入标准物质样和随机抽取重复样,回收率为100%。测试结果的相对偏差均在±10%之内,满足要求。测试单位为广州海洋地质调查局实验测试所。另外,由北京大学核物理与核技术国家重点实验室完成 AMS¹⁴C 测年。

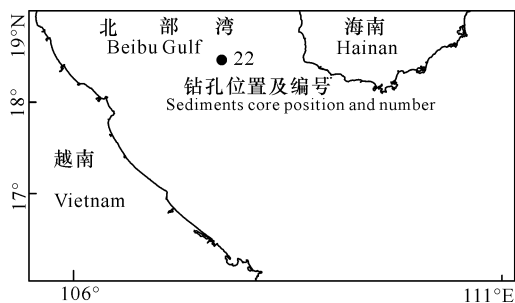


图1 岩芯编号和取样位置

Fig. 1 Sediments core drilling position in study area of southern Beibu Gulf trough

2 岩芯沉积物反映的气候变化基本特征和物源特征

2.1 气候变化基本特征

分析的岩芯底部204 cm处测年为 $(4\ 147 \pm 27)$ a BP,为中全新世以来沉积物。为便于不同意义量的比较采用无量纲标准化变量 $s = (x_i - \bar{x}') / \sigma$ 。式中, x_i 代表实测值, \bar{x}' 为平均值, σ 为标准差。以 CIA 表示陆地铝硅酸盐风化程度,即化学蚀变。用 TiO_2 表示陆壳一般风化程度^[8-9],得到 CIA 为 54.70~61.10,说明风化程度中等。按 CIA 趋势可划分两个基本气候阶段(图2):第一阶段(200~100 cm), 4 000~1 900 a BP,即中全新世晚期至晚全新世中期。CIA 围绕 y 轴波动并逐步进入正区间,说明陆源风化有所增强,先降后升,气候趋向暖湿。继前期显著海侵之后,该阶段 Sr/Ba 进入负区间保持海退趋势,显示出海弱陆强。 TiO_2 同样围绕 y 轴波动,说明该阶段具有气候转变的过渡性质;第二阶段(100~0 cm), 1 900 a BP,即晚全新世中期以来。CIA 继续波动上升。 TiO_2 虽然波动剧烈,但多在正区间维持高值。Sr/Ba 继续在负区间波动,前升后降,达到最低,海弱陆强格局维持。以上特征与北部湾沿岸同期气候有可比性^[10-11]。根据岩芯年龄-深度模式得到的平均沉积速率,72.5~0.0 cm 段平均沉积速率为 7.6 cm/100 a, 207.5~77.5 cm 段平均沉积速率为 4.0 cm/100 a,总体上呈现加快的趋势^[8]。

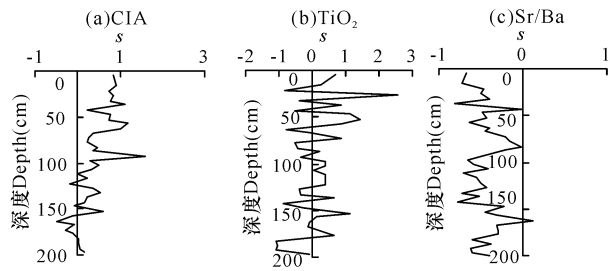


图2 岩芯陆源风化指数与 Sr/Ba 的标准化变量 s 的变化曲线

Fig. 2 Standardized variable s vertical distribution of CIA, TiO_2 and Sr/Ba in sediments core

2.2 物源特征

岩芯处海槽水较深,坡度较缓,等深线轴向与潮流主流向相近,为潮流控制的缓慢沉积地带,海底以细砂和粉砂占优,粘土有所积累,按一般到差分选,自下往上粒级分布曲线从左偏趋向右偏,偏态范围为 $-0.09 \sim 0.00$,峰态趋缓,平均粒径 M_z 为 $5.32 \sim 6.65 \varphi$ 。

重矿物组合为角闪石-赤铁矿-辉石-钛铁矿,偶见绿帘石、锆石、金红石、白钛石和尖晶石。石英、长石、云母含量较为稳定,粘土矿物有所增加,平均含量为 $12\% \sim 19\%$ 。稀土元素 ΣREE 为 $168.90 \times 10^{-6} \sim 214.88 \times 10^{-6}$,平均值低于红河,但明显高于上陆壳。轻稀土元素 (LREE) 与重稀土元素 (HREE) 分异明显,分布模式为右倾式,波动较为平坦,标准化值为 $1.00 \sim 1.40$ 。显示在海洋控制下,岩芯处接受海岸侵蚀相和河流相的供给,海域来沙微弱,属北部湾南部的混合沉积区^[12-13]。检验表明,Pb、Zn 与常量要素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 显著正相关,Cr 则与它们相关系数偏低,而与 K_2O 显著负相关,表明 Cr 还受到氧化-还原亚环境等的影响。元素 Zr、Sc、V、Ga、Ba 与 Pb、Zn 为显著正相关,与 Cr 为正相关。重金属与稀土元素 Ce 等也有较好的正相关性,均表现出重金属的陆源性。

3 岩芯沉积物重金属的垂直积累特征

3.1 重金属含量的垂直变化

Pb 含量为 $20.2 \times 10^{-6} \sim 27.4 \times 10^{-6}$,平均为 23.3×10^{-6} ,Cr 含量为 $54.1 \times 10^{-6} \sim 77.0 \times 10^{-6}$,平均为 63.3×10^{-6} ,Zn 含量为 $73.8 \times 10^{-6} \sim 85.3 \times 10^{-6}$ 。

表1 岩芯重金属含量变化趋势分段拟合方程

Table 1 Linear trend fitness of heavy metal concentration to depths in sediments core

气候阶段 Climatic phases	Pb, $y (\times 10^{-6}), x$ (cm)	Cr, $y (\times 10^{-6}), x$ (cm)	Zn, $y (\times 10^{-6}), x$ (cm)
第二(Second)	$y = -0.0239x + 25.806, R^2 = 0.1880$	$y = -0.042x + 74.187, R^2 = 0.0836$	$y = -0.037x + 80.688, R^2 = 0.1941$
第一(First)	$y = -0.0183x + 25.020, R^2 = 0.2396$	$y = -0.0085x + 57.905, R^2 = 0.0201$	$y = -0.0137x + 79.494, R^2 = 0.0273$

10^{-6} ,平均为 78.4×10^{-6} ,均方差以 Cr 最大。重金属随气候也为分段变化,其标准化变量 s 显示:第一气候阶段,Pb 围绕 y 轴波动,在后期呈上升趋势,Cr 含量偏低,形成一个底部平台,Zn 维持波动,趋向不明显;在第二气候阶段 Pb、Zn 呈现上升趋势,Cr 大幅跃升并基本维持不变(图3)。

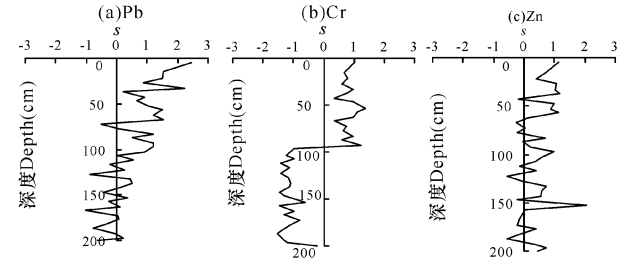


图3 岩芯重金属含量与标准化变量 s 的变化曲线

Fig. 3 Standardized variable s vertical distribution of heavy metal concentration in sediments core

3.2 重金属含量的变化趋势

采用线性最小二乘法分段拟合重金属含量变化,结果显示各气候阶段重金属含量随深度变浅,即随气候演进而升高(负斜率),第二阶段斜率绝对值增大。 R^2 为 $0.0201 \sim 0.2396$,均小于 0.5000 ,显示波动较为剧烈(表1)。

3.3 重金属对气候变化的响应

以 δ 重金属/ δ CIA 表示重金属含量对气候变化的响应程度,结果显示:重金属响应率在正区间居多,比例为 $66\% \sim 84\%$,以 Zn 最高,Pb、Cr 相近,基本为同步响应,多为小幅波动;第二气候阶段波动频繁,重金属含量对气候响应更为敏感。Zn 响应率多为正值,Pb、Cr 响应率有负值出现,说明有滞后情况或其它因素影响(图4)。

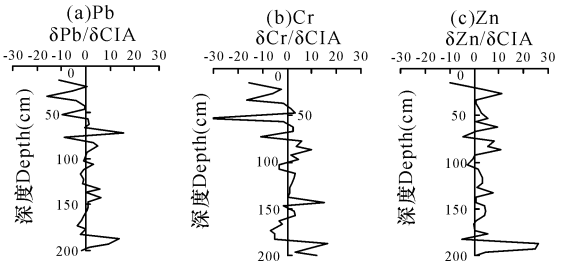


图4 岩芯重金属含量对气候变化响应率的变化曲线

Fig. 4 Response of heavy metal concentration to CIA's variation in sediments core

4 岩芯沉积物粒度与重金属的关系

4.1 粒度含量的垂直变化

作为承载地球化学元素的基质,沉积物颗粒的分布同样反映出气候的变化。粒度序列之中,0 φ 颗粒几乎没有,主要分布在 4~9 φ,含量为 8.86%~20.73%,平均以 7~8 φ 段最高,5 φ 和 9 φ 次之,以粉砂为主。变异系数显示 1~3 φ 段最大,为 0.50~2.91。垂直变化特征为,较粗粒度 4~5 φ 在气候第一阶段大幅波动,基本维持在正区间,3 φ 波动幅度略低一些,以偏粗颗粒为主;气候第二阶段,7~9 φ 粒度进入正区间并稳步上升,并与 3~4 φ 呈共轭反相。颗粒增减对气候变化的响应结果见图 5a 和图 5b。5~6 φ 粒度有过渡性,特征为 3~4 φ 和 7~9 φ;由于粒度有增有减,平均粒径变化不甚明显,粒度参数随气候变化趋向负区间,分选变差,分布右偏,峰态趋缓(图 5c~d)。还可以看出,岩芯自 25 cm 深度以来,但颗粒略有变粗的趋势,显示海岸侵蚀和河流挟沙加强,陆源供给增大。

4.2 沉积物组分的运动形式

岩芯代表性深度的粒度累计概率 P 曲线为两段式和三段式,除极少量跃移质和推移质之外,主要由悬移质组成,粗截点 3~4 φ、细截点 6~7 φ,以细砂和粉砂为主,个别出现少量粘土,中值粒径为 4.50~6.58 φ,概率 P 分布同样体现岩芯下部粒度偏粗。30~25 cm 以上先是有少量粘土,之后仍然以细砂和粉砂为主(图 6)。另有研究报道,北部湾中部海水悬移质多为细砂和粉砂,平均粒径为 3~5 φ,重力分异较明显,垂向上随水深而变粗,表层主要组分为 5~8 φ,底层为 3~5 φ。南部悬浮颗粒中值粒径 2~5 φ。随潮流运动粗、细颗粒先后沉落,沉降速率一般在 1 cm/s 以下而沉积缓慢^[14-15]。可见,悬移质和岩芯主

要粒度有对应关系,岩芯 3~8 φ 含量占 58%~91%,悬移质是岩芯沉积物主要来源。

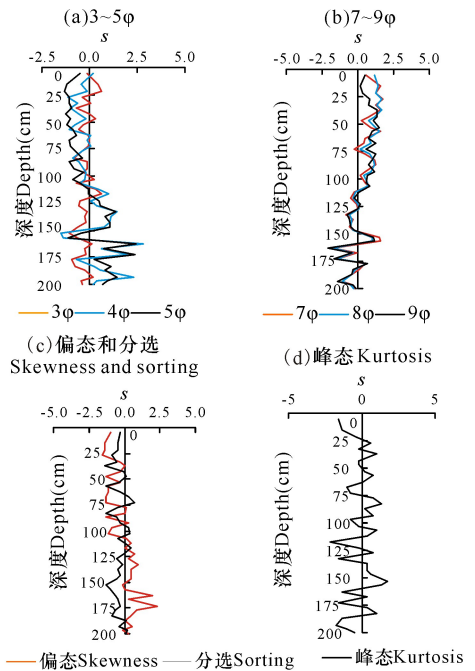


图 5 岩芯粒度含量和粒度参数标准化变量 s 的垂直变化曲线

Fig. 5 Vertically standardized variable s distribution of grain sizes and parameters in sediments core

4.3 重金属含量与粒度含量的同步变化概率

以重金属与 5~9 φ 粒度的垂直梯度乘积 $k_1 \cdot k_2 > 0$ 表示同步变化, $k_1 \cdot k_2 < 0$ 表示异步, $k_1 \cdot k_2 = 0$ 表示无关。同步概率区间频率 f 分布(图 7)显示:没有 0 概率(总有重金属与细颗粒同步变化);0.30~0.60 频率较高(颗粒作用具备交替性和同步性)。3 项重金属同步积累的概率比较低,多是错位积累,其概率为 0.65。

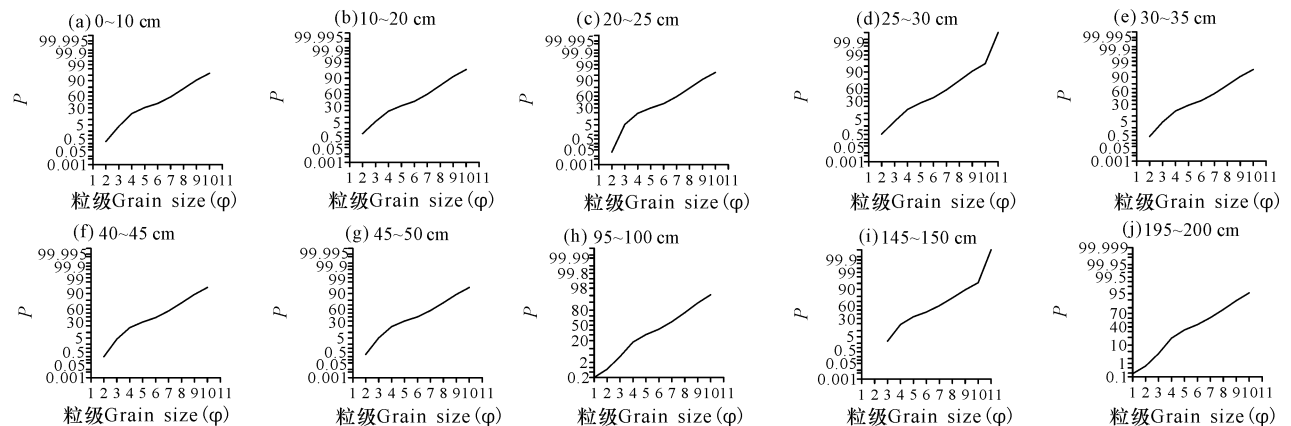


图 6 岩芯代表性层次粒度累计概率 P 曲线

Fig. 6 Curve of grain size accumulative possibility P in typical depths in sediments core

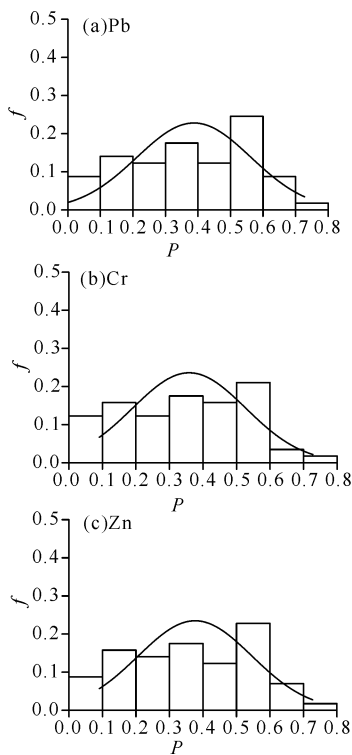


图7 岩芯重金属与粒级含量同步变化概率区间的频率 (f) 分布

Fig. 7 Frequency histogram of synchronous variation of heavy metals and grain size in sediments core

4.4 重金属的吸附粒级

经检验,岩芯 Pb、Zn 与主要粒级 7~9 ϕ 显著正相关,与 2~4 ϕ 则是负相关。受到氧化-还原条件的影响,Cr 只是与 7~9 ϕ 有弱正相关,但同样与 3~4 ϕ 负相关。以除以平均值的无量纲相对含量的线性最小二乘法拟合显示,趋势线斜率 k 值为 $-0.40 \sim 0.75$,明显正响应区间为 7~9 ϕ ,双转折区间依次为 4~5 ϕ 、10 ϕ 。Pb 具有正响应区间更窄、更为集中、 k 值更大的特征,Zn 偏宽,Cr 介于两者之间(图 8a)。Pb、Zn、Cr 对粒度参数响应形态也基本一致,对 中值粒径均为正响应(图 8b)。这种亲细粒级的特性符合粒度控制律^[16]。以上显示湾内悬移质吸附、扩散、再沉积是岩芯重金属积累的重要方式,而 6~9 ϕ 为吸持段。

4.5 重金属对气候变化的响应

根据北部湾北部近岸钻孔取得的更新统陆相地层元素含量分布,自西向东,Pb、Zn、Cr 平均含量依次为 $15.9 \times 10^{-6} \sim 23.2 \times 10^{-6}$, $45.2 \times 10^{-6} \sim 60.7 \times 10^{-6}$, $32.3 \times 10^{-6} \sim 59.8 \times 10^{-6}$,具有含量低的特征,其它地球化学元素也基本如此^[1]。由于气候总体趋向暖湿,降水增加,化学风化加强,径流悬移质浓度加大,元素迁移活跃,加之重金属的亲细颗粒特征,吸附和溶解状态的重金属对海径流输入增加,海

岸侵蚀强度也有加大,导致海洋物质增加。海槽水域广阔,水最深,受潮流影响,水动力较弱,为北部湾的沉积中心,加之发育海湾尺度的逆时针余环流,更有利于海湾沉积物和元素在该处积累^[17]。

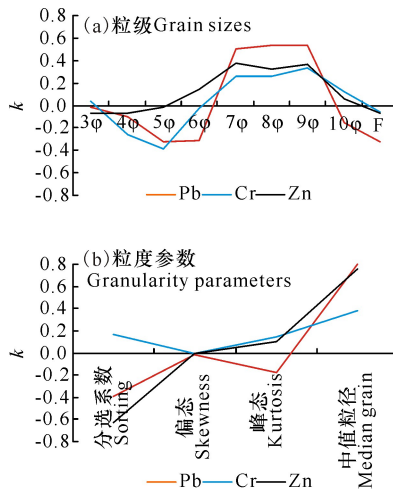


图8 岩芯重金属对粒度参数的响应率 k 分布

Fig. 8 Response of heavy metals to granularity variation in sediments core

5 岩芯沉积物重金属的积累曲线

中全新世之后海槽沉积环境趋稳,沉积物缓慢向上加积,某深度沉积物属当时表层沉积物,之前深度序列则为其背景值的形成基础。因此,借鉴现代过程重金属富集系数的方法,尝试采用一种动态的方法来分析岩芯垂向上重金属的沉积积累特征。

5.1 积累曲线计算方法

利用富集系数公式^[18]计算积累系数: $f_a(i) = \frac{C_m(i)/C_n(i)}{C'_m(i)/C'_n(i)}$,下标 m 表示重金属, n 表示标准化元素, C 表示含量, C' 表示本底值, i 为逐层数。鉴于同步测量的微量元素之中,Sc 元素比较稳定,其相对变幅较低,故取为标准化元素。采用动态计算方法确定 50 cm 以上各层本底值,即自岩芯底部开始,以每 150 cm 长度(30 个样品)作为计算本底值的岩芯长度逐层向上计算。经过异常剔除和分布检验,求得呈对数和算术正态分布的重金属本底值为 $22.80 \times 10^{-6} \sim 77.12 \times 10^{-6}$,标准差为 $\pm 1.41 \times 10^{-6} \sim \pm 4.22 \times 10^{-6}$,与相邻站位有可比性^[18]。

5.2 积累曲线的垂直变化特征

结果显示,50 cm 以来 f_a 为 0.95~1.14,有一定的波动。Pb 积累系数为 0.96~1.14,总体呈现增加趋势且最偏右,与其它两项重金属分化比较区别明显,自第二气候阶段后期 25 cm 以来斜率加大(图 9);Cr、Zn 之积累系数为 0.94~1.06,两曲线有一定

的交织性,显示积累程度相近,并呈现下半段左右波动,上半段为增加趋势的特征,均自 25 cm 深度斜率开始加大,与前述自 25 cm 现代以来陆源增加的特征相对应。再进一步比较 40~0 cm 段和 25~0 cm 段含量变化趋势的相对斜率,Pb 分别为 $3.24 \times 10^{-3}/\text{cm}$ 和 $4.70 \times 10^{-3}/\text{cm}$,Cr 分别为 $1.05 \times 10^{-3}/\text{cm}$ 和 $1.54 \times 10^{-3}/\text{cm}$,Zn 分别为 $0.81 \times 10^{-3}/\text{cm}$ 和 $2.33 \times 10^{-3}/\text{cm}$,同样具备分化和自 25 cm 之后加快的特征,与前述气候变化特征同样相对应。再对比北部湾西北部(防城港口外)岩芯近 100 余年来的积累曲线,Pb、Cr、Zn 含量均表现出增加趋势,Pb 还出现了峰值^[1],可能与人类活动和大气扩散有关。

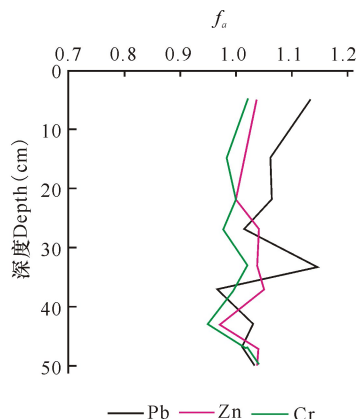


图 9 岩芯重金属自 50 cm 以来积累系数 f_e 分布曲线

Fig. 9 Curve of enrichment index f_e from 50 cm depth of second climatic stage in sediments core

6 结论

(1)北部湾地处海槽的岩芯显示,中全新世以来气候总体上趋向温暖,陆区蚀变增强,细颗粒增加,元素迁移性加强。

(2)岩芯重金属具有陆源性,含量呈现分段波动变化,其含量随深度的变浅(气候的演进)而上升。

(3)岩芯粒级累计频率分布表明沉积物颗粒运动形式以悬移质为主,其主要粒级与悬移质有对应性。重金属的亲细颗粒特征显示吸附再沉积为重金属主要积累方式,吸持粒级为 6~9 ϕ 。50 cm 以来重金属 Pb、Cr、Zn 的 f_e 为 0.95~1.14 波动变化。

(4)晚全新世后期 25 cm 以来,重金属 Pb、Cr、Zn 积累有加快趋势,尤其 Pb 比较明显,可能与人类活动及其大气扩散有关,需要多加关注。

参考文献:

[1] 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报告[R]. 广州:广州海洋地质调查局, 2013.

Guangzhou Marine Geological Survey. Report on the Marine Geological Environment and Geological Hazards Along the Coastal Waters of Guangxi, China[R]. Guangzhou:Guangzhou Marine Geological Survey, 2013.

[2] 广州海洋地质调查局. 华南西部滨海湿地地质调查与生态环境评价[R]. 广州:广州海洋地质调查局, 2014. Guangzhou Marine Geological Survey. Investigation and Assessment on the Wetland Geological and Ecological Environment along Shores of Southern China[R]. Guangzhou:Guangzhou Marine Geological Survey, 2014.

[3] 韦蔓新,何本茂. 北部湾近岸海域表层沉积物中重金属的特征分布及其与环境因子关系的研究[J]. 海洋通报, 1988,7(1):71-75. WEI M X, HE B M. Study on the heavy metal distribution and their relationship with environmental factors in near shore of Beibu Gulf[J]. Marine Science Bulletin, 1988,7(1):71-75.

[4] 夏鹏,孟宪伟,印萍. 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, 26(4):471-477. XIA P, MENG X W, YIN P. Heavy metal pollution and its potential ecological risk in the sediments from the Beihai intertidal zone of Guangxi province[J]. Advance in Marine Science, 2008, 26(4):471-477.

[5] 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, 9(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, 9(3):257-262.

[6] 张荣灿,姜发军,陈宪云,等. 钦州湾近岸海域水质污染状况评价[J]. 广西科学, 2014, 21(4):403-409. ZHANG R C, JIANG F J, CHEN X Y, et al. Assessment of pollution status in Qinzhou Bay coastal waters[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(4):403-409.

[7] 金路,初凤友,赵建如,等. 南海西北部浅海沉积物重金属污染的综合评价[J]. 海洋学研究, 2011, 29(2):24-33. JIN L, CHU F Y, ZHAO J R, et al. An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments of northwestern part of South China Sea[J]. Journal of Marine Science, 2011, 29(2):24-33.

[8] 广州海洋地质调查局. 南海北部湾全新世环境演变与人类活动影响研究成果报告[R]. 广州:广州海洋地质调查局, 2014. Guangzhou Marine Geological Survey. Report on Environmental Evolution and Human Impacts Since Holocene in Beibu Gulf of South China Sea[R]. Guangzhou: Guangzhou Marine Geological Survey, 2014.

[9] 胡耀国,杨少芹,罗健,等. 花岗岩风化壳的不均一性与

- 海岸带的可蚀性研究——以南海北大陆海岸为例[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 199-207.
- HU Y G, YANG S Q, LUO J, et al. Investigation on relationships between heterogeneity of granite weathering rinds and soil's erodibility of continental coastal belt-taking continental coastal belt distributing along northern South China Sea as an example[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 199-207.
- [10] 黎广钊, 梁文, 廖思明, 等. 广西沿海全新世以来气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(3): 37-47.
- LI G Z, LIANG W, LIAO S M, et al. Climatic changes since Holocene along Guangxi coast[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996, 16(3): 37-47.
- [11] 童胜琪, 刘志飞, LE K P, 等. 红河盆地的化学风化作用: 主要微量元素地球化学记录[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(3): 218-225.
- TONG S Q, LIU Z F, LE K P, et al. Chemical weathering in the red river basin: Records of major and trace elemental geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(3): 218-225.
- [12] 窦衍光, 李军, 李炎. 北部湾东部海域表层稀土元素组成及物源指示意义[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 147-157.
- DOU Y G, LI J, LI Y. Rear earth element compositions and provenance implication of surface sediments in the eastern Beibu Gulf[J]. Geochimica, 2012, 41(2): 147-157.
- [13] 姚衍桃, HARFF J, MEYER M, 等. 南海西北部末次冰期以来的古海岸线重建[J]. 中国科学 D 辑, 地球科学, 2009, 39(6): 753-762.
- YAO Y T, HARFF J, MEYER M, et al. Reconstruction of paleocoastlines for the northwestern South China Sea since the last Glacial Maximum[J]. Sci China Ser D- Earth Sci, 2009, 39(6): 753-762.
- [14] 柏秀芳, 龚德骏. 北部湾悬浮颗粒现场剖面测量与粒度分析[J]. 海洋科学, 2008, 32(7): 11-13.
- BAI X F, GONG D J. In-situ profiling of suspended particles in the Beibu Gulf and analysis of grain size[J]. Marine Science, 2008, 32(7): 11-13.
- [15] YU J Q, JIANG J B, GONG D J, et al. Determining suspended sediment concentration and settling velocity from PC-ADP measurement in the Beibu Gulf, China[J]. Journal of Oceanography and Limnology, 2011, 29(3): 691-701.
- [16] 任加国, 武倩倩. 海洋沉积物对重金属吸附特性研究[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 469-472.
- REN J G, WU Q Q. Study on adsorption character of marine sediment on heavy metal[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(4): 469-472.
- [17] 侍茂崇. 北部湾环流研究述评[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 313-323.
- SHI M C. Study comments on circulation in Beibu Gulf[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(4): 313-323.
- [18] 张志峰, 王燕, 韩庚辰, 等. 北部湾沉积物中重金属元素的地球化学特征及物源初探[J]. 海洋学报, 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 Oceanology Sinica, 2013, 35(2): 72-81.

(责任编辑: 尹 闯)