

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.04.11

引用格式: 庞国涛, 杨源祯, 张晓磊, 等. 广西防城港海域沉积物粒度时空变化特征及沉积速率[J]. 中国地质调查, 2023, 10(4): 89–97. (Pang G T, Yang Y Z, Zhang X L, et al. Spatiotemporal variation characteristics and sedimentation rate of sediment grain size in Fangchenggang Sea of Guangxi[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(4): 89–97.)

广西防城港海域沉积物粒度时空变化特征及沉积速率

庞国涛¹, 杨源祯¹, 张晓磊^{1,2}, 谢磊¹, 闫兴国¹, 胡延斌^{1,3}, 曾蛟¹

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000; 2. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 为了解防城港海域沉积演化规律, 对防城港近岸海域垂直海岸线方向上的5个柱状沉积物进行粒度分析和²¹⁰Pb同位素测年, 分别得到5个柱状样的粒度参数变化特征、沉积物类型, 同时计算沉积速率并结合防城港地貌及人类活动分析了物质来源、沉积动力及沉积速率影响因素。结果表明: 柱状样FC13Z、FC16Z及FC12Z在深度60 cm以上层位的粒度参数变化范围相对较小, 表明其所处的沉积环境相对较稳定, 柱状样FC14Z、FC15Z及FC12Z在深度60 cm以下层位的粒度参数变化范围相对较大, 表明其所处的沉积环境相对波动; 沉积物分选性较差–差, 偏态属于近对称–正偏, 峰态很平坦; 研究区柱状沉积物可分为砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥质砂、含砾泥质砂、含砾泥和泥7种类型; 由近岸到前缘沉积物以砂为主逐渐过渡为以泥为主, 沉积速率呈现出逐渐降低的趋势; 沉积物来源主要为河流输入及沿岸侵蚀物, 沉积动力主要来自于潮流和近岸流系; 沉积速率受潮流影响较大。研究结果可为防城港近岸海域沉积环境与地貌演变研究提供参考依据。

关键词: 防城港海域; 粒度参数; 沉积速率; 沉积动力

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2023)04–0089–09

0 引言

近岸海域地理位置特殊, 沉积环境受到海洋和陆地的双重影响。随着人类对近岸海域开发强度的增加, 港口建设、海洋贸易、海洋牧场等活动对近岸海域的生态环境产生了一定的影响。近岸海域的水文动力条件、泥沙运动规律和侵蚀淤积变化是对其进行研究的基本环境要素, 沉积物粒度特征及其分布是反映近岸海域沉积环境的重要参数之一, 沉积物粒径是判断沉积物来源、划分沉积物类型和推演沉积环境的重要指标, 沉积物粒度信息包含了沉积环境、沉积物运移、沉积物净输运趋势等方面的信息, 此外沉积物粒度分布特征

也能反映沉积区的地形、沉积时水动力条件和沉积物搬运过程等^[1–3]。应用放射性核素测年始于20世纪70年代^[4–5], 截至目前, 该方法已相当成熟, 被广泛应用于海洋、湖泊沉积物测年和沉积速率方面的研究中^[6–10]。²¹⁰Pb是²³⁸U核素衰变的中间产物, 在沉积物中普遍存在且化学性质稳定, 测定沉积物中赋存的放射性同位素²¹⁰Pb可以确定相应海域的沉积速率, 从而分析沉积环境等信息。

防城港作为北部湾最重要的港口之一, 对北部湾的经济发展及与东南亚国家贸易起着不可替代的作用。近年来, 防城港经济高速发展, 海洋牧场、码头、港口扩建等工程陆续建设, 人类活动强度加剧, 对海域的沉积环境造成了一定程度的影

收稿日期: 2022–11–07; 修订日期: 2023–03–17。

基金项目: 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心“广西北仑河口—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“广西钦州湾海岸带综合地质调查(编号: DD20191024)”项目联合资助。

第一作者简介: 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。

通信作者简介: 曾蛟(1988—), 男, 工程师, 主要从事分析测试工作。Email: 416892321@qq.com。

响。黎广钊等^[11]对防城湾沉积物类型、水动力条件、沉积物中重矿物类型及微生物进行了研究报道;张亮等^[12]通过对防城港南部海域表层沉积物粒度特征的研究,发现防城港海域沉积物粒度参数与沉积类型具有较好的相关性,并对该海域泥沙运移趋势进行了模拟;许冬等^[13]运用²¹⁰Pb 法测定了北部湾柱状样的现代沉积速率,并对不同水深的沉积速率进行了比较分析;陈刚等^[14]根据防城湾湾顶、湾口和湾外的钻孔数据资料,分析了防城湾不同部位末次冰后期沉积层序类型和分布、沉积过程以及沉积速率。可以看出,前人对防城港海域沉积物粒度特征、泥沙运移及沉积层序等已有一定的研究,取得了一系列成果和认识。然而由于侧重方向不同,对沉积物粒度时空变化特征及沉积速率的研究较少,且精度较低,在沉积物粒度与沉积速率相结合来反演沉积环境变化方面存在欠缺。基于此,本研究拟通过分析防城港海域柱状沉积物的粒度参数特征及其时空分布,结合沉积速率推测的沉积年龄,来分析探讨沉积物的沉积环境和水动力条件等,揭示沉积演化规律,旨在为了解防城港海域的沉积现状、开发和保护提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

研究区位于防城港南部近岸海域(图1),水深10~35 m,西侧为北仑河口—中越海域分界线,东侧与钦州湾相接。研究区属亚热带海洋性季风气候,年平均温度约为22.5℃,年平均降水量约为2 220 mm,主要集中在5—8月。研究海域潮汐属混合潮汐,每月有6~8 d为不正规半日潮,其余为正规全日潮,涨潮历时大于落潮历时,平均潮差约为2.55 m;潮流类型以往复流的全日潮为主,落潮流速大于涨潮流速,潮流方向主要为SN向^[12]。入海河流主要有北仑河、江平江和防城江,其余多为间歇性溪流。其中,防城江年平均径流量为 $1.79 \times 10^9 \text{ m}^3$,年均输沙量为 $23.7 \times 10^4 \text{ t}$ ^[15]。

根据研究区SN向的潮流特征,考虑到不同水深地貌部位的水动力条件、沉积速率也不同,于2021年9月在防城港外浅海区沿垂直海岸线方向并间隔一定距离(5 km),采用震动活塞式柱状取样器进行取样,采样位置见图1。共采集5站位柱状

沉积物样品,取样深度为13~29 m,取样长度均超过1 m。沉积物样品取出后即在船上按照5 cm的间隔分段进行分样,装入聚乙烯袋中冷冻保存直至送样进行粒度测试。为研究海域沉积速率,对分别位于剖面顶端、中部和前缘的FC12Z、FC14Z和FC16Z三个柱状样,分别按照5 cm、16 cm和5 cm的间隔分段进行分样,装入聚乙烯袋中冷冻保存,直至送样进行²¹⁰Pb测试。

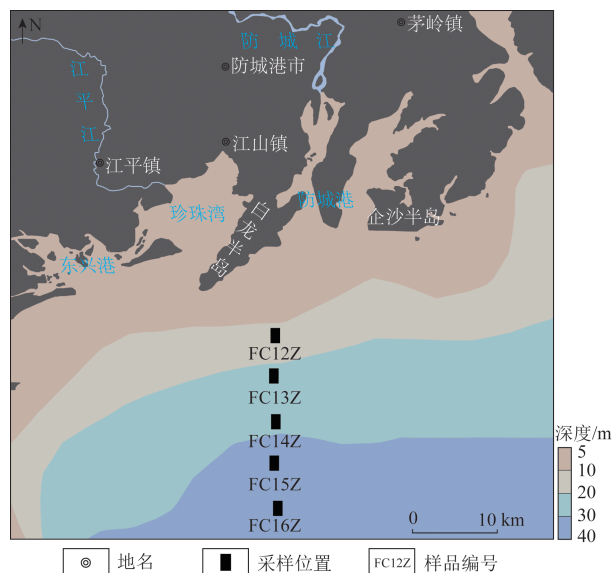


图1 研究区采样位置

Fig. 1 Sampling location in the study area

1.2 分析方法

1.2.1 粒度分析

沉积物粒度分析测试在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。对于粒径均 $<1 \text{ mm}$ 的沉积物样品直接使用MALVERN公司生产的Master-size2000型激光粒度仪测试,而对于含有 $>1 \text{ mm}$ 的沉积物样品则采用筛析法和激光粒度仪联用的综合分析法。测试流程为:取适量解冻后的沉积物样品先烘干称重,加入适量去离子水浸泡,而后用标准筛(孔径 1.0 mm)进行湿筛,筛出的粗颗粒($>1.0 \text{ mm}$)采用筛析法测试;剩余部分($<1.0 \text{ mm}$)烘干混合均匀后,取适量样品放入容器后,依次加入5 ml的过氧化氢(浓度为30%)和5 ml的稀盐酸(浓度为3%),静置24 h以上,以去除沉积物中的生物碳酸盐和有机质;然后加入去离子水进行离心清洗至pH值为中性,清洗后,样品中加入5 ml六偏磷酸钠溶液(浓度为 0.5 mol/L)进行浸泡分散24 h;最后采用激光粒度

分析仪进行测试,测试结果转为 Φ 值。所有样品均进行重复测试,测试误差小于 2%。采用 Folk 和 Ward 公式^[16]进行粒度参数计算,采用粒度参数分级(表 1)进行定性描述。

表 1 研究区沉积物粒度参数分级
Tab.1 Classification of sediment grain size parameters in the study area

参数	分级				
分选系数	[0.35, 0.50)	[0.50, 0.71)	[0.71, 1.00)	[1.00, 2.00)	[2.00, 4.00)
定性描述	分选好	分选较好	分选中等	分选较差	分选差
偏态系数	>1.30	(0.43, 1.30]	(-0.43, 0.43]	(-1.30, -0.43]	≤-1.30
定性描述	极正偏	正偏	近对称	负偏	极负偏
峰态系数	<1.70	[1.70, 2.55)	[2.55, 3.70)	[3.70, 7.40)	≥7.40
定性描述	很平坦	平坦	中等(正态)	尖锐	很尖锐

1.2.2 沉积物测年

沉积物中²¹⁰Pb 测定在自然资源部海洋地质实验检测中心完成。具体测试步骤如下：称取沉积物样品 50 ~ 80 g 放入烘箱,在 100 ℃下恒温静置 24 h;烘干后的样品先称重记录,然后装入测量盒用蜡密封静置 15 d,使²¹⁰Pb 和²²⁶Ra 处于永久衰变平衡体系;最后,装入仪器进行测量。测量仪器为欧洲 Canberra 公司生产的 BE3830 型高纯锗 γ 谱仪和美国 Ortec 公司生产的 GEM8295 型高纯锗 γ 能谱仪,用以测量²¹⁰Pb 和²²⁶Ra。²¹⁰Pb 的比活度由 46.5 KeV 处 γ 射线的谱峰面积计算,²²⁶Ra 的测量射线为 214 Bi 的 609.3 KeV γ 射线,具体测量方法按照土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法^[17]进行。测试结果采用常量初始浓度 (Constant Initial Concentration, CIC) 模式^[18]对柱状沉积物中的²¹⁰Pb 测年结果进行计算。CIC 模式计算公式为

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{A_0}{A_k}, \tag{1}$$

$$S = \frac{Z}{t}. \tag{2}$$

式中： t 为沉积物的沉积时的年龄； A_0 为柱状样沉积物表层²¹⁰Pb 比活度,Bq/kg； A_k 为柱状沉积物深度 k 时²¹⁰Pb 的比活度,Bq/kg； S 为沉积速率,cm/a； Z 为柱状样某一层深度,cm； λ 为²¹⁰Pb 的衰变常数,取值 0.031 14。

2 结果

2.1 沉积物粒度特征分析

不同沉积环境表现出的沉积物粒度参数亦不相同,通过沉积物粒度特征可反演出沉积物堆积过程、输运方向、强度及所处的沉积水动力条件等^[19]。研究海域各柱状样沉积物的平均粒径、分选系数、偏态系数、峰态系数如图 2 所示。

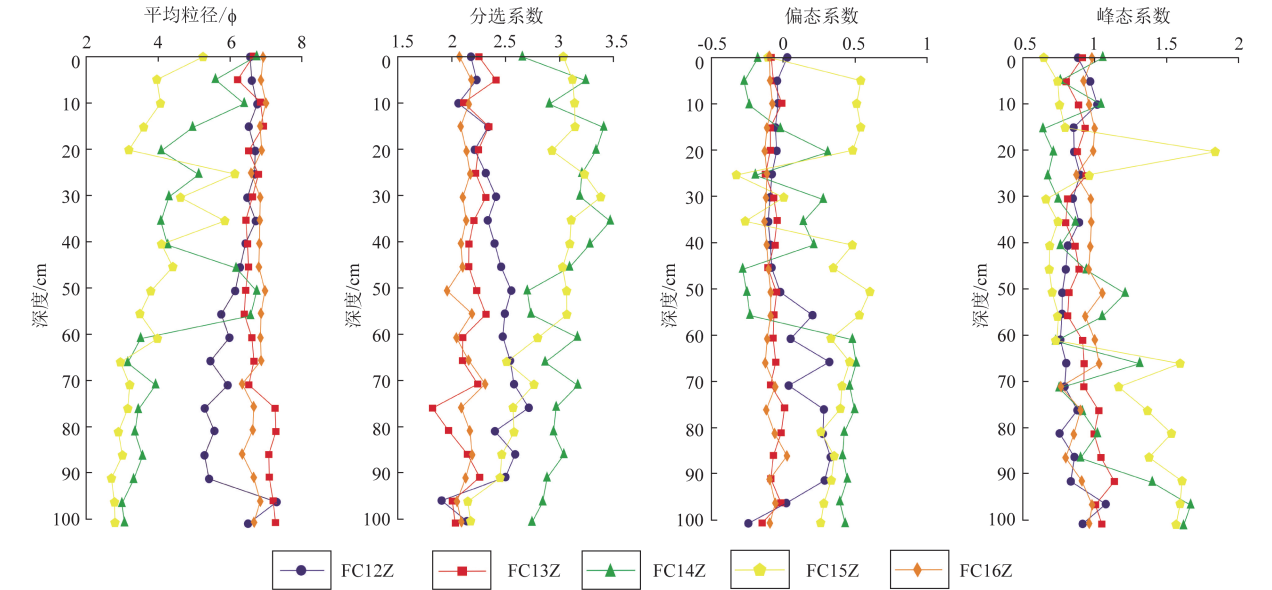


图 2 研究区沉积物粒度参数变化
Fig.2 Variation of sediment grain size parameters in the study area

平均粒径表示沉积物颗粒大小的概况,可通过平均粒径的变化了解沉积环境及物质来源等特征。由图 2 可知:研究海域 FC12Z 平均粒径在深度 60 cm 以上的沉积中变化幅度相对较小,深度 60 ~ 100 cm 的沉积中变化较大,整体变化范围为 5.38 ~ 7.35 Φ (平均值 6.28 Φ); FC13Z 和 FC16Z 平均粒径 Φ 值较大,但平均粒径及变化范围均较小,分别为 6.30 ~ 7.35 Φ (平均值 6.81 Φ) 和 6.42 ~ 7.07 Φ (平均值 6.85 Φ),二者在深度 70 cm 以上的沉积中变化幅度均较小,在深度 70 cm 处出现极小值; FC14Z 和 FC15Z 平均粒径 Φ 值相对较小,但平均粒径及变化范围均较大,分别为 3.10 ~ 6.81 Φ (平均值 4.70 Φ) 和 2.82 ~ 6.23 Φ (平均值 3.97 Φ),沉积物颗粒分布表现为粒径大小交替出现的特征。

沉积物的分选系数表示沉积物颗粒在沉积时大小均匀程度^[19-20],利用分选系数可判断沉积时水环境动力条件和追溯物源方向。由图 2 可知:研究海域 FC12Z、FC13Z 和 FC16Z 分选系数变化范围较小,分别为 1.91 ~ 2.72 (平均值为 2.39)、1.83 ~ 2.43 (平均值为 2.18) 和 1.96 ~ 2.32 (平均值为 2.14); FC14Z 和 FC15Z 分选系数变化范围相对较大,分别为 2.66 ~ 3.47 (平均值为 3.06) 和 2.15 ~ 3.37 (平均值为 2.88)。对照分选系数分级及定性描述(表 1)可以看出,研究海域 5 站位柱状样沉积物分选性属于分选较差—差级别。

偏态系数可以用来判断沉积物粒度频率曲线的对称程度。当偏态系数 = 0 时,表示粒度曲线呈

对呈分布;当偏态系数 < 0 时,沉积物粒度多集中在细端部分,反之则偏向粗粒部分^[19-20]。由图 2 可知:研究海域 FC12Z、FC13Z 和 FC16Z 偏态系数范围分别为 -0.092 ~ 0.334 (平均值为 0.068)、-0.009 ~ 0.023 (平均值为 -0.048) 和 -0.112 ~ 0.041 (平均值为 -0.076),变化范围较小,偏态定性描述近对称分布; FC14Z 在深度 55 cm 以上的沉积中偏态系数范围为 -0.269 ~ 0.313 (平均值为 -0.053),属近对称分布,而深度 55 cm 以下的沉积表现为明显的正偏; FC15Z 偏态系数范围为 -0.310 ~ 0.612 (平均值为 0.322),除少数层位为近对称分布外,其他均表现为正偏,颗粒粒径多分布在粗粒的一侧。

峰态系数是用来衡量沉积物粒度频率曲线的尖锐程度,即粒度分布中部和尾部的展形比^[19-20]。由图 2 可知,研究海域 FC12Z—FC16Z 峰态系数范围分别为 0.75 ~ 1.06 (平均值为 0.85)、0.79 ~ 1.12 (平均值为 0.91)、0.64 ~ 1.64 (平均值为 0.95)、0.64 ~ 1.81 (平均值为 1.03)、0.76 ~ 1.05 (平均值为 0.94),除 FC15Z 的深度 20 cm 处定性描述为平坦外,其他均表现为很平坦。

2.2 沉积物类型与层序

根据 Folk 等^[16]提出的沉积物分类方法,将研究海域柱状沉积物进行投图(图 3)。由图 3 可以看出,研究海域柱状沉积物类型可划分为砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥质砂、含砾泥质砂、含砾泥和泥 7 种类型。

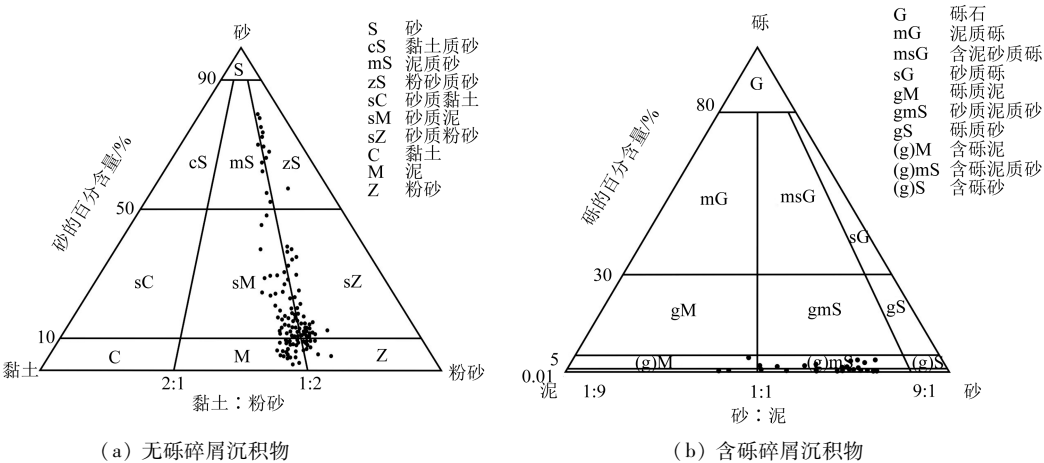


图 3 防城港海域柱状沉积物 Folk 分类

Fig. 3 Folk classification of core sediments in Fangchenggang sea area

防城港海域受控于潮汐、洋流^[21]等的影响,不同海域的沉积水动力环境亦不相同,根据研究海域

5 站位柱状沉积物样品粒度分析结果,绘制沉积物类型分布剖面图(图 4)。

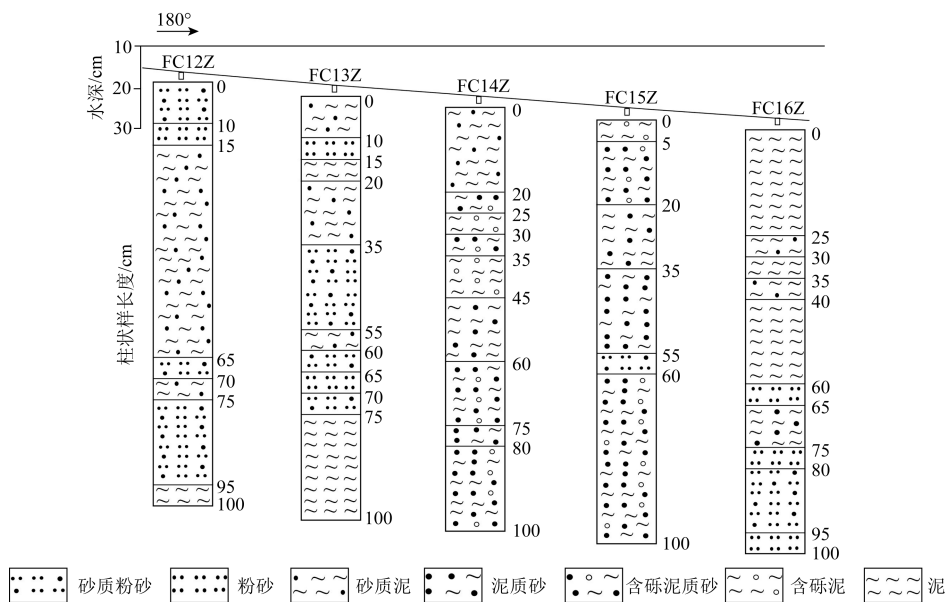


图 4 研究区沉积物类型分布剖面

Fig. 4 Sediment type distribution profiles in the study area

由图 4 可以看出,由近岸 FC12Z 至远离岸线 FC16Z 的方向上沉积物颗粒呈现出细—粗—细的变化。FC14Z 和 FC15Z 粒径较粗,与所处海域发育埋藏古河道^[22-23]以及受越南河流^[12]携带泥沙注入有关。纵向上,不同的历史沉积阶段,各柱状样的沉积组合(韵律)也不相同: FC12Z 柱状样下部以砂为主,中部为砂质泥,上部为砂; FC13Z 柱状样下部为泥,中部以砂为主,上部为砂—泥; FC14Z 柱状样下部和中部主要以含砾泥—砂为主,上部为砂质泥; FC15Z 柱状样下部为含砾泥质砂,中部为泥—砂组合,上部主要为含砾泥质砂; FC16Z 柱状样下部以砂为主,上部沉积物类型比较单一,以泥为主。从柱状

沉积物的沉积组合可以看出: FC13Z 柱状样沉积环境动力早期弱于晚期; FC12Z、FC14Z 和 FC15Z 柱状样所处的海域沉积环境动力相对稳定; FC16Z 柱状样所处的海域早期沉积环境动力明显强于晚期。

2.3 沉积速率

结合研究海域历史水深资料^[15]和 2018 年 5 月中国航海图书出版社出版发行的防城港及附近区域海图^[24],防城港海域等深线位置自 19 世纪初以来未发生明显的变化,所以研究区选取的 3 站位柱状样为连续沉积,选用 CIC 模式计算沉积年龄是合适的。研究海域 3 柱状沉积物²¹⁰Pb 比活度及沉积速率拟合如图 5 所示。

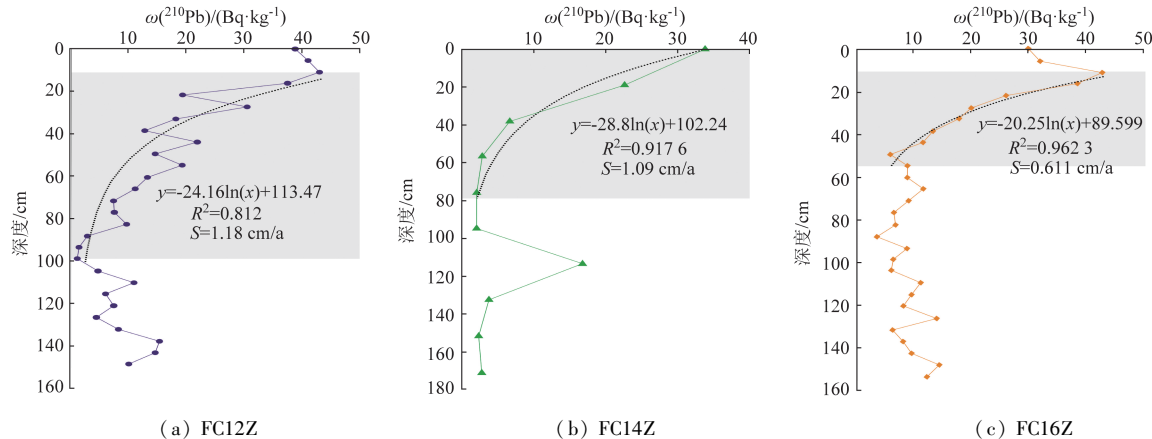


图 5 研究区柱状沉积物²¹⁰Pb 比活度及沉积速率拟合

Fig. 5 Profiles of ²¹⁰Pb and sedimentation rate fitting in core sediments in the study area

FC12Z 站位距离岸线最近,水深 13 m,柱状样长度为 1.57 m。由图 5 可知:该柱状样上层 0 ~ 10 cm 处²¹⁰Pb 比活度低于下层 15 cm 处的²¹⁰Pb 比活度值,推测表层至 10 cm 段为混合段;10 ~ 100 cm 段的²¹⁰Pb 比活度随深度增加不断减少,呈现较好的衰减趋势;100 cm 以下²¹⁰Pb 比活度随着深度的增加波动较大,属于海洋动力事件型分布,推测可能受风暴潮等的影响沉积发生混乱故舍弃。通过计算,FC12Z 柱状沉积物在深度 10 ~ 100 cm 段的平均沉积速率为 1.18 cm/a。

FC14Z 站位位于研究海域中部,取样水深 24 m,柱状样长度 1.76 m,表层至深度 76 cm 段。由图 5 可知:²¹⁰Pb 比活度随着深度的增加呈现出衰减趋势,76 cm 以下层位除去 114 cm 层位的异常值,²¹⁰Pb 比活度平均值为 2.945 Bq/kg,认为其已到²¹⁰Pb 本底值,则表层至 76 cm 处的平均沉积速率为 1.09 cm/a。从²¹⁰Pb 比活度的分布情况及粒度信息来看,该站位的沉积环境相对比较稳定。

FC16Z 站位位于研究海域最南端,取样水深 29 m,柱状样长度 1.5 m。由图 5 可知:该柱状样表层至 5.5 cm 的²¹⁰Pb 比活度,低于 11 cm 处²¹⁰Pb 的比活度,可以认为 0 ~ 5.5 cm 段为混合段;11 ~ 50 cm 段随着深度增加²¹⁰Pb 的比活度分布呈衰减趋势;50 cm 以下层段的沉积物中含有大量的贝类生物物质。由其对²¹⁰Pb 的比活度值影响可以看出,50 cm 以下层位²¹⁰Pb 的比活度分布近似等幅摆动,因此 50 cm 以下层位未纳入计算。11 ~ 50 cm 段的平均沉积速率为 0.611 cm/a。60 cm 以下沉积物粒度明显变粗,60 cm 之上的沉积物粒度组成较稳定,推测该站位后期沉积稳定。

由以上 3 站位的沉积速率可以看出,由近岸到前缘,防城港海域的沉积速率逐渐降低,这与其所处海域的沉积水动力环境及与物源距离密切相关,近岸海域水动力条件相对较强,加之波浪对岸线的侵蚀冲刷及河流泥沙的汇入,多在此沉积,远离岸线的水动力条件相对较弱,且远离物源区域的沉积速率相对较低。

3 讨论

3.1 物质来源及沉积动力

沉积物类型的分布主要受控于沉积物源、海区本底物质、地形地貌以及海水动力流场等因素。首

先,研究海域位于防城港南部的近岸海域,沿岸汇入的河流主要为防城江、江平江、北仑河以及沿岸的溪流,入海河流携带的泥沙受潮流等的影响多在近岸海域堆积。其次,防城港市沿岸人类活动频繁,通过虾塘养殖、围填海、港口建设等一系列活动影响岸线变化促使沿岸侵蚀加剧^[25]。

防城湾被渔万岛分隔成东湾和西湾两部分,呈 Y 形分布,防城江携带泥沙经西湾入海,东湾沉积物主要来自沿岸剥蚀,由于研究海域落潮流速大于涨潮流速,防城湾底质沉积物经潮沟向湾口输送,汇合后向南运移。江平江携带泥沙汇入珍珠湾海域,由于珍珠湾湾口较小,湾内冬夏季余流方向均指向湾外^[26],加之落潮流速较快,珍珠湾沉积物受潮流影响向湾外运移。此外,钦州湾西侧沿岸及企沙半岛沿岸被波浪侵蚀下来的泥沙,受北部湾逆时针环流作用向西南运移^[20],被白龙半岛阻挡后向南运移。北仑河携带泥沙,越南入海河流携带泥沙,以及其近岸剥蚀物在海流影响下也会对研究海域沉积物堆积造成影响。此外,北部湾表层流所携带的物质均会对研究海域的沉积作用产生一定的影响。

沉积动力方面,研究海域为港口近岸海域,主要受海流和波浪的影响。防城港海域的海流主要有潮汐、入海河流等构成,由于入海河流多经过港湾使其流域面积变得宽广,流速减缓,对海流影响甚微,起主导作用的为潮流。防城港海域潮流的运动形式以往复流为主,涨潮最大流速约 0.4 ~ 0.6 m/s,落潮最大可达 0.6 ~ 0.9 m/s^[15],这就为湾内沉积物向外迁移提供了动力。研究海域波浪受季节影响显著,多集中在 6—9 月份的台风季,以风浪为主,常浪向为 NNE 向^[15],这就导致沿岸剥蚀加剧,为防城港海域沉积提供物源。此外,在北部湾还发育有逆时针环流^[20],在防城港近岸还发育有防城湾气旋型环流、珍珠湾余流等^[25],这些都为海底沉积物的运移提供动力。

3.2 沉积速率影响

防城港海域发育有潮间浅滩、潮流沙脊、槽沟、水下岸坡、水下拦门浅滩、海底平原、埋藏古河道以及浅埋基岩^[12,27]等,沉积环境受沿岸河流、海湾泥沙输入量、潮流以及人类工程建设等的影响。研究区布设的柱状剖面位于防城湾和珍珠湾南部,一方面,其湾内沉积物受潮流及近岸余流的影响向南输运,另一方面,港口建设、虾塘养殖等沿岸人类经济

活动加速近岸泥沙的剥蚀,剥蚀下的泥沙在落潮流及近岸余流^[28]的作用下向南运移,随着沉积动力的减弱而沉积。综合以上原因,使得研究海域沉积速率相较于国内近岸的其他海域^[29]处于相对较高的水平。由近岸到前缘,受落潮流的影响逐渐减少,沉积环境趋于稳定,这就导致其沉积速率逐渐降低。

4 结论

(1)防城港近岸海域海底1 m深度内发育砂质粉砂、粉砂、砂质泥、泥质砂、含砾泥质砂、含砾泥和泥7种类型。沉积物粒度参数分析(平均粒径、分选系数、偏态系数、峰态系数)显示:柱状样FC13Z、FC16Z及FC12Z在深度60 cm以上层位的粒度参数变化范围相对较小,柱状样FC14Z、FC15Z及FC12Z在深度60 cm以下层位的粒度参数变化范围相对较大。

(2)经剖面近岸、中段及前缘的柱状样²¹⁰Pb放射性比活度分析表明,研究海域的沉积速率为0.611~1.18 cm/a,且表现出由近岸到前缘沉积速率逐渐降低的趋势。

(3)沉积物来源主要为河流输入及沿岸侵蚀物,沉积动力主要来自于潮流和近岸流系;沉积速率受潮流影响较大。

参考文献(References):

- [1] Duck R W, Rowan J S, Jenkins P A, et al. A multi-method study of bedload provenance and transport pathways in an estuarine channel[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 2001, 26(9): 747–752.
- [2] 徐志伟,汪亚平,李炎,等.多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势[J]. *海洋学报*, 2010, 32(3): 67–78.
Xu Z W, Wang Y P, Li Y, et al. Sediment transport patterns in the eastern Beibu Gulf based on grain-size multivariate statistics and provenance analysis[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(3): 67–78.
- [3] Yuan P, Wang H J, Wu X, et al. Grain-size distribution of surface sediments in the Bohai Sea and the Northern Yellow Sea: sediment supply and hydrodynamics[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(3): 589–600.
- [4] Pennington W, Tutin T G, Cambray R S, et al. Observations on lake sediments using fallout ¹³⁷Cs as a tracer[J]. *Nature*, 1973, 242(5396): 342–346.
- [5] Delaune R D, Patrick W H, Buresh R J, et al. Sedimentation rates determined by ¹³⁷Cs dating in a rapidly accreting salt marsh[J]. *Nature*, 1978, 275(5680): 532–533.
- [6] Karbassi A R, Amirnezhad R. Geochemistry of heavy metals and sedimentation rate in a bay adjacent to the Caspian Sea[J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2004, 1(3): 191–198.
- [7] Benoit G, Rozan T F. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating methods in lakes: A retrospective study[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(4): 455–465.
- [8] Dai J C, Song J M, Li X G, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 656–667.
- [9] Kato Y, Nakatsuka T, Masuzawa T, et al. Behavior of settling particles and sedimentation rate inferred from ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs distributions in Sagami Bay, Japan[J]. *Bulletin of the Society of Sea Water Science Japan*, 2003, 57(3): 150–165.
- [10] Oguri K, Harada N, Tadaï O. Excess ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs concentrations, mass accumulation rates, and sedimentary processes on the Bering Sea continental shelf[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2012, 61–64: 193–204.
- [11] 黎广钊,农华琼,刘敬合.防城湾自然环境与沉积物组成分析[J]. *广西科学院学报*, 1997, 13(4): 1–8.
Li G Z, Nong H Q, Liu J H. Analysis of the natural environment and surface sedimental composition from Fangcheng Bay[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 1997, 13(4): 1–8.
- [12] 张亮,梁开,甘华阳,等.广西防城港海域沉积物特征及输运趋势[J]. *热带地理*, 2014, 34(5): 690–695.
Zhang L, Liang K, Gan H Y, et al. Sediment characteristics and transport trends in the Sea Area of Fangcheng Port, Guangxi[J]. *Tropical Geography*, 2014, 34(5): 690–695.
- [13] 许冬,初凤友,杨海丽,等.北部湾现代沉积速率[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 17–26.
Xu D, Chu F Y, Yang H L, et al. Modern sedimentation rates in the Beibu Gulf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 17–26.
- [14] 陈刚,李从先.广西防城港冰后期沉积层序和沉积作用[J]. *海洋学报*, 1988, 10(2): 198–203.
Chen G, Li C X. Postglacial sedimentary sequence and sedimentation in Fangchenggang, Guangxi[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1988, 10(2): 198–203.
- [15] 中国海湾志编纂委员会.中国海湾志-第十二分册-广西海湾[M].北京:海洋出版社,1993.
Editorial Committee of Chinese Gulf. Chinese Gulf; vol. 12: Guangxi Gulf[M]. Beijing: Ocean Press, 1993.
- [16] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar; a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3–26.
- [17] 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/T11743—2013 土壤中放射性核素的γ能谱分析方法[S].北京:中国标准出版社,2014.

- 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/T11743—2013 Determination of radionuclides in soil by gamma spectrometry[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [18] Appleby P G, Nolan P J, Gifford D W, et al. 210Pb dating by low background gamma counting[J]. *Hydrobiologia*, 1986, 143(1): 21–27.
- [19] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937–968.
- [20] 许冬. 北部湾东部末次冰消期以来的沉积记录及现代沉积格局的形成[D]. 青岛: 中国科学院大学, 2014.
- Xu D. Sedimentary Records Since Last Deglaciation and the Formation of Modern Sedimentary Pattern in Eastern Beibu Gulf[D]. Qingdao: The University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [21] 张爱梅, 陈敏, 甘华阳, 等. 北部湾 SO-50 柱状沉积物地球化学特征及其物源分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 107–117.
- Zhang A M, Chen M, Gan H Y, et al. Geochemical characteristics and sediment provenance of Core SO-50 sediments in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 40(5): 107–117.
- [22] 马胜中, 梁开, 陈太浩. 广西钦州湾浅层埋藏古河道沉积特征[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下册). 呼和浩特: 海洋出版社, 2009: 1225–1229.
- Ma S Z, Liang K, Chen T H. Sedimentary characteristics of shallow buried Paleohe channels in Qinzhou Bay, Guangxi[C]//Proceedings of the 14th Symposium on Oceanographic (Shore) Engineering in China: Part 2. Hohhot: China Ocean Press, 2009: 1225–1229.
- [23] 刘涛, 黎广钊. 北部湾广西沿岸全新世海侵过程的区域差异[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 70–76.
- Liu T, Li G Z. The spatial discrepancy of Holocene transgression in north Beibu Gulf of Guangxi coastline[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(3): 70–76.
- [24] 海军海道测量局. 航海图书目录[M]. 北京: 中国航海图书出版社, 2018.
- Naval Hydrographic Survey Bureau. Catalog of Charts and Publications[M]. Beijing: China Navigation Publications Press, 2018.
- [25] 周相君, 李晓敏, 马毅, 等. 基于遥感的广西防城湾海岸线变迁分析[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 47–55.
- Zhou X J, Li X M, Ma Y, et al. Analysis of shoreline changes in the Fangcheng Bay of Guangxi based on remote sensing technique[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(1): 47–55.
- [26] 陈波, 侍茂崇, 邱绍芳. 广西主要港湾余流特征及其对物质输运的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2003(1): 13–21.
- Chen B, Shi M C, Qiu S F. Characteristics of residual currents and their influence on the material transportation in five main bays of Guangxi coast[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2003(1): 13–21.
- [27] 刘鑫, 马胜中, 陈太浩. 广西防城港近岸海域主要灾害地质因素的分布及特征[J]. *地质学刊*, 2015, 39(4): 641–646.
- Liu X, Ma S Z, Chen T H. Distribution and features of the hazardous geological factors in offshore areas of Fangchenggang City in Guangxi[J]. *Journal of Geology*, 2015, 39(4): 641–646.
- [28] 陈波, 陈宪云, 牙韩争, 等. 防城港湾及其邻近海域潮流和余流特征研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(3): 16–23.
- Chen B, Chen X Y, Ya H Z, et al. Research on the characteristics of tidal and residual current in the Fangchenggang Bay and its adjacent waters[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(3): 16–23.
- [29] 范德江, 杨作升, 郭志刚. 中国陆架²¹⁰Pb 测年应用现状与思考[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 297–302.
- Fan D J, Yang Z S, Guo Z G. Review of ²¹⁰Pb dating in the continental shelf of China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 297–302.

Spatiotemporal variation characteristics and sedimentation rate of sediment grain size in Fangchenggang Sea of Guangxi

PANG Guotao¹, YANG Yuanzhen¹, ZHANG Xiaolei^{1,2}, XIE Lei¹, YAN Xingguo¹, HU Yanbin^{1,3}, ZENG Jiao¹

(1. Yantai Geological Survey Center of Coastal Zone, China Geological Survey, Shandong Yantai 264000, China;

2. College of Marine Earth Sciences, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China; 3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China)

Abstract: Sediment particle size characteristics are important parameters reflecting sedimentary environment. In order to understand the sedimentary evolution law of Fangchenggang Sea area, the authors carried out grain size analysis and ²¹⁰Pb isotope dating on five core sediments in the vertical coastline direction of Fangchenggang coastal waters, and obtained the grain size parameter change characteristics, sediment types and sedimentation rates of the five core sediments respectively. The Fangchenggang landform and human activities, the material source, sedimentation dynamics and sedimentation rate influencing factors were also considered. The results show that the variation range of grain size parameters of FC13Z, FC16Z and FC12Z above 60 cm is relatively small, indicating

a relatively stable sedimentary environment. While, the variation range of grain size parameters of FC14Z, FC15Z and FC12Z below 60 cm is relatively large, indicating a relatively fluctuating sedimentary environment. The sediment sorting is relatively poor to poor, and the skewness is nearly symmetrical positive, with a very flat peak. The core sediments in the study area can be divided into seven types: sandy silt, silty sand, sandy mud, argillaceous sand, pebbly argillaceous sand, pebbly mud and mud. The sediment from the nearshore to the front edge gradually converts from sand dominated to mud dominated, and the sedimentation rate shows a significant weakening trend. The sediment source is mainly from river input and coastal erosion, and the sedimentary power mainly comes from tidal current and nearshore current system. The sedimentation rate is greatly affected by the tidal current. The results of this study would provide some references for the sedimentary environment and geomorphological evolution study in the coastal waters of Fangchenggang Sea.

Keywords: Fangchenggang Sea; grain size parameter; sedimentation rate; sedimentary dynamics

(责任编辑: 刘丹,王晗)