

李诗颖, 林振文, 李出安, 等. 珠江磨刀门河口百年来沉积速率变化与环境变迁——沉积物粒度及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 约束[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 26-34.

LI Shiyong, LIN Zhenwen, LI Chu'an, et al. Variation of deposition rate and evolution of depositional environment in the Modaomen estuary of Pearl River in the past 100 years indicated by grain size and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ [J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 26-34.

珠江磨刀门河口百年来沉积速率变化与环境变迁 ——沉积物粒度及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 约束

李诗颖, 林振文*, 李出安, 阳峰, 罗俊超, 郑思琦, 李雨龙

(广东省海洋地质调查院, 广州 510080)

摘 要:磨刀门作为珠江三角洲河流入海口之一,是研究人类活动对河口岸沉积环境影响的理想区域。然而,由于沉积物年龄难以确定,使得相关研究十分匮乏。因此,本文通过 ^{210}Pb 同位素重建了磨刀门河口浅滩沉积柱的年龄框架,并结合粒度特征和粒度端元分析,讨论了百年来的沉积环境演变及控制机制。结果表明,区域的沉积主要源自西江径流来砂和外海潮流再输入泥沙,受近岸颗粒输入影响。在 20 世纪 70 年代前后,该区域沉积环境发生了显著的变化,磨刀门河口沉积速率由 0.53 cm/a (70 年代前) 突然增加到 1.68 cm/a (70 年代后),且伴随沉积物粒度各组分及参数变异系数增大,粗颗粒物增加,潮流物源输入减少,径流及近岸物源输入增加。这可能与西江输沙量变化和磨刀门区域 1970 年以来发生的围填海等人类活动增强有关。

关键词:珠江三角洲; 近海沉积; 粒度; $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; 现代沉积环境; 沉积速率

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.010

0 引言

河口海岸演变是自然因素与人类活动共同作用的结果。在自然状态下,河口系统会以负反馈的形式适应外界环境的变化,以维持自身的物理和生态系统平衡^[1-2]。随着人为因素的影响日益加深,人类活动极大地改变了河口演变过程,使得河口海岸环境变化更为显著和迅速。在特定的时期与区域,人为因素已经超过自然作用成为影响河口沉积动力和沉积速率的主导因素。20 世纪 60—90 年代,在磨刀门区域实施的滩涂围垦工程、治洪导堤工程导致地形地貌、沉积环境发生显著改变^[3-6],是研

究人类活动影响下河口沉积环境演化的典型代表与热点区域。

磨刀门地区海底地形变化较大,水动力复杂,近岸海域高精度沉积速率的获取一直是个难题。前人通过晚第四系 ^{14}C 年龄估算和历史海图对比法等方法,测算出磨刀门淤积速率为 2.0~3.3 cm/a^[7-8]。近年来, ^{210}Pb 被广泛应用于河口、海湾、陆架、湖泊等区域近百年沉积物的沉积年龄测定^[9-13],同时其含量变化也对研究区域沉积特点和环境演化具有重要意义^[14-15]。此外,粒度参数能够记录到沉积物在沉积搬运过程中的水动力条件变化,在划分近岸底质类型、区分沉积环境以及判别物质来源等方面起着重要的作用^[16-21],从而被广泛应用于河口、湖泊、近海潮滩等区域的环境研究中。

本研究依托“广东省海岸带综合地质调查——横琴新区调查示范”项目,通过分析沉积物的粒度及 ^{210}Pb 沉积物地质年代学研究,得出高精度的测年数据,探讨了近百年磨刀门水域沉积环境变化及人类活动的影响,填补磨刀门外滩水域近百年高精度沉积速率空缺,揭示大规模人类活动前后磨刀

收稿日期: 2022-01-10

资助项目: 广东省地质勘查与城市地质专项([2020]-13、[2023]-19); 广东省促进经济高质量发展(海洋经济发展)海洋六大产业专项(6-2-20)

作者简介: 李诗颖(1993—),女,硕士,助理工程师,主要从事海岸带环境地质方面的研究工作。E-mail: swing9393@163.com

* 通讯作者: 林振文(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事地质勘查与海岸带地质调查工作。E-mail: linzhenwen9704@163.com

门河口沉积环境变化,为横琴新区城市规划及经济发展提供科学依据。

1 研究区域概况

磨刀门河口是珠江主流西江的主要出海口,位于珠江口西侧(图 1A),是珠江三角洲主要泄洪通道。20 世纪 70 年代前,磨刀门是一个水深<5 m 的十字形浅海湾,湾口有大横琴岛、小横琴岛等岛

屿环抱^[3](图 1B)。经填海、围垦、航道导堤整治后,原来的磨刀门浅海湾转变为磨刀门三角洲。整治后的磨刀门出海通道变窄加深,继承了径流型河口的特点,发育江心洲或边滩,磨刀门延伸至横州口外的内陆架,进入一个开阔的受水盆地^[3]。大小横琴岛之间的中心沟也被填埋,双岛连成一体成横琴岛(即横琴新区),横琴岛周围水道为磨刀门水道及洪湾水道(图 1C)。

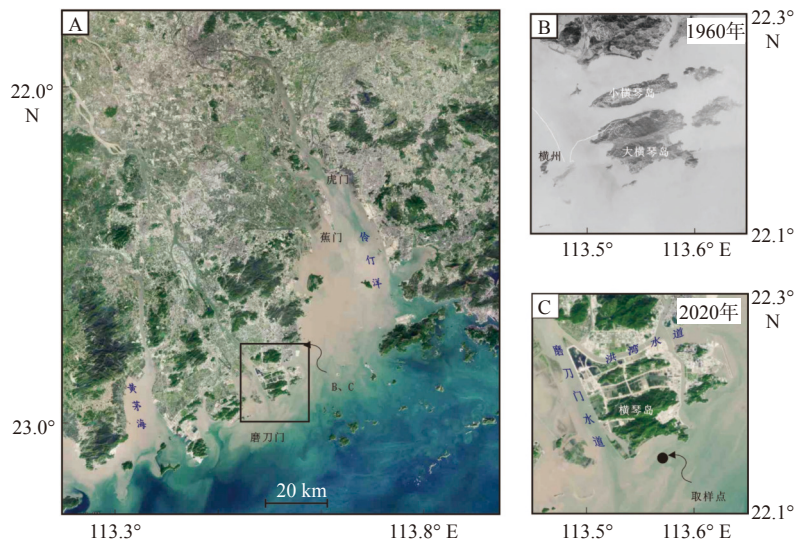


图 1 磨刀门位置图 (A) 及 50 多年来地貌变化遥感图 (B、C)

Fig.1 The location of Modaomen(A) and the geomorphological changes in the past 50 years (B, C)

珠江八大口门之首的磨刀门河口属于径流强潮流弱型河口^[22],入海径流在受西南向沿岸流的影响之下,向偏西方向扩散^[23-24],而影响磨刀口的潮流表现为往复流的特点,越往河道上游,潮流流向受径流、河槽地形作用越强^[23-24]。

现今磨刀门河口区域的海底地形主要受河口沉积作用影响,口门内地形变化较复杂,深度较大,最深处可达 9.6 m;口门外,尤其是东南方向海域海底地形较为平坦,水深较浅,具有浅滩特征。

柱状样顶部 1 cm 为粉砂质黏土,因富集有机质呈灰黑色,1~80 cm 为黄褐色粉砂质黏土,80~170 cm 为黄褐色黏土。

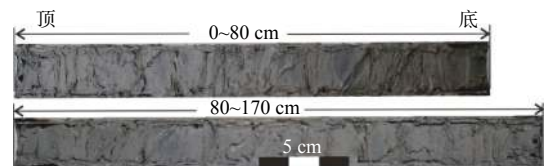


图 2 样品照片

Fig.2 Photos of the sediment core in the Modaomen

2 材料与方法

2.1 样品采集

2020 年 7 月在磨刀门外浅滩约 4 m 水深 (22°03'N、113°32'E)处,用重力取样器(取样管内径 72 mm)采集了 170 cm 的柱状样(HQGCZ03)(图 1C)。该柱状样整体以黄褐色细粒沉积物为主(图 2),含白色生物碎屑,偶见灰褐色泥块或泥层。

2.2 分析和测试

对柱状样 HQGCZ03 按照 2.5 cm 间隔均匀取样进行粒度分析,共计取样 68 个。取适量样品放入烧杯中,分别加入浓度为 30% 的双氧水和体积分数为 36%~38% 的盐酸去除有机质和生物钙质,并水洗至中性。而后加入浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠作为分散剂,静置 24 h 以上,最后上机测试。粒度测试分析采用激光粒度分析法,在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验

室完成。仪器为英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪(测量范围为 0.02~2 000 μm , 重复测量误差<3%)。粒度测试数据计算平均粒径、分选系数、偏态和峰态等粒度参数。沉积物命名采用 Folk(1970)分类方案^[25],按砂、粉砂、黏土组分含量划分。

针对²¹⁰Pb测试,以10 cm间隔进行取样,共计采样17个。随后将样品烘干,去除有机质大块,研磨,称重,装入测试样品盒。²¹⁰Pb测试分析在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成,采用美国ORTEC公司高纯锗低本底伽玛能谱仪(Ortec HP Ge GWL)对样品进行无损、多种核素同时测量。测量时间一般按40 000~80 000 s(按样品计数定)。²¹⁰Pb和²²⁶Ra标准由中国原子能研究院提供,通过能谱仪测出的是总²¹⁰Pb比活度,非补偿²¹⁰Pb(即²¹⁰Pb放射性活度过剩值,²¹⁰Pb_{ex})通过总²¹⁰Pb扣除²²⁶Ra比活度得到。²¹⁰Pb定年模型主要有2种:恒定初始浓度模型(CIC模式)和恒定补给率模型(CRS模式)。前人研究认为在开放潮坪地区,应用CIC模式更为准确^[12-14,26]。因此,本文采用了CIC模式来重建沉积年龄框架和沉积速率。

CIC模式应用的前提条件是沉积物沉积时的初始比活度是恒定的。通过该方法可以直接获得被测样柱的平均沉积速率,沉积速率由²¹⁰Pb_{ex}取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率求出,可以通过以下公式计算:

$$S = \lambda Y / \ln(A_0/A_i)$$

式中: S 为沉积速率,cm/a;

λ 为²¹⁰Pb衰变常数,0.031 14/a;

Y 为深度,cm;

A_0 和 A_i 分别为沉积物表层和深度为 Y 层的²¹⁰Pb_{ex}。

近岸沉积物的粒度特征受到物源变化、水动力变化、季节性变化等影响,频率曲线常呈现不同的峰形态^[27-28],进行粒度端元组分分析,可以有效区分不同物源或者不同的运输机制和路径,对不同沉积动力的粒级组分进行分离提取,从而提高对沉积物的来源与动力条件的识别^[29]。

3 结果

3.1 沉积物粒度特征

柱状样沉积物以粉砂为主,主要类型包括粉砂、

砂质粉砂及泥(图3)。砂、粉砂、黏土平均含量分别为5.50%、66.98%、27.53%(表1),其中砂含量的变异系数最大。中值粒径变化范围为4.81 Φ ~8.26 Φ ,偏态值变化范围为-0.09~0.4,峰态值变化范围为0.73~1.13,分选系数变化范围为1.47~3.05。整体来说柱状样沉积物颗粒较细,除砂组分含量变化较大,其余参数变异系数较小,分选较差到差,偏态值正偏为主,峰态中等至尖锐。

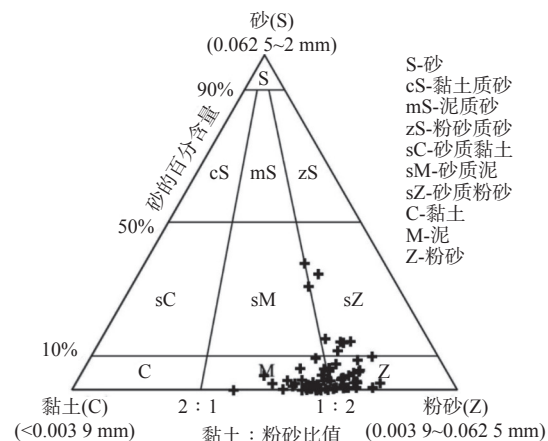


图3 HQGCZ03柱状样Folk分类图

Fig.3 The Folk classification of grain size for the sediment core HQGCZ03

根据粒度组分含量及粒度参数的垂向分布可以将整个柱状样分为2个阶段(表1,图4)。阶段1:80~170 cm,区间内以泥和粉砂为主,颗粒较细,各粒度参数变化范围较小(表1),粒度频率曲线为单峰型,波峰较窄且高,波高约23%。阶段2:0~80 cm区间,颗粒相对变粗,各参数变化范围增大(表1);其中,12.5~17.5 cm为砂质粉砂,砂含量为31.03%~37.88%,是整个柱子砂含量最高的区段,粒度频率曲线为单峰型,波峰变宽变矮,波高约20%。综上,阶段2各组分及粒径参数的变异系数较阶段1大,粒度频率曲线更宽矮(图4B),分选更差,反映0~80 cm阶段粒度变化差异较大。

3.2 ²¹⁰Pb结果

(1) ²¹⁰Pb比活度垂向沉积特征

柱状样HQGCZ03表层沉积物的²¹⁰Pb_{ex}值为67.45 Bq/kg,随着深度的增加呈指数衰减(图5);在80 cm深度数值异常增高,达到66.5 Bq/kg,与表层²¹⁰Pb_{ex}含量相似,随后继续呈指数衰减;直至120 cm处以下沉积物中²¹⁰Pb_{ex}近垂直分布,可近似视为²¹⁰Pb_{ex}达到稳定值。摒除部分异常值,²¹⁰Pb_{ex}整体上随着深度指数状衰减至底部变化稳定,反映了研究海域

表 1 粒度组分及粒度参数计算值

Table 1 Statistical results of grain size compositions and parameters

深度/cm	参数	组分含量/%			中值粒径/ Φ	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态值	峰态值
		砂	粉砂	黏土					
0~80	最大值	37.88	72.96	58.13	8.26	8.35	3.05	0.40	1.12
	最小值	0.00	41.37	17.00	4.81	5.36	1.47	-0.08	0.73
	平均值	6.34	61.78	31.88	6.89	7.03	1.90	0.13	0.97
	标准偏差	9.12	7.75	8.79	0.73	0.67	0.31	0.10	0.09
	变异系数	1.44	0.13	0.28	0.11	0.10	0.17	0.80	0.09
80~170	最大值	37.88	79.01	58.13	8.26	8.35	3.05	0.80	1.13
	最小值	0.00	0.13	0.28	0.11	0.10	0.17	-0.09	0.09
	平均值	2.81	64.91	32.28	7.06	7.19	1.78	0.13	1.01
	标准偏差	3.05	6.69	7.08	0.46	0.41	0.19	0.09	0.06
	变异系数	1.08	0.10	0.22	0.07	0.06	0.11	0.68	0.06
0~170	最大值	37.88	79.01	58.13	8.26	8.35	3.05	0.40	1.13
	最小值	0.00	41.37	17.00	4.81	5.36	1.47	-0.09	0.73
	平均值	4.47	63.44	32.09	6.98	7.11	1.84	0.13	0.99
	标准偏差	6.82	7.32	7.87	0.60	0.55	0.26	0.09	0.08
	变异系数	1.52	0.12	0.25	0.09	0.08	0.14	0.73	0.08

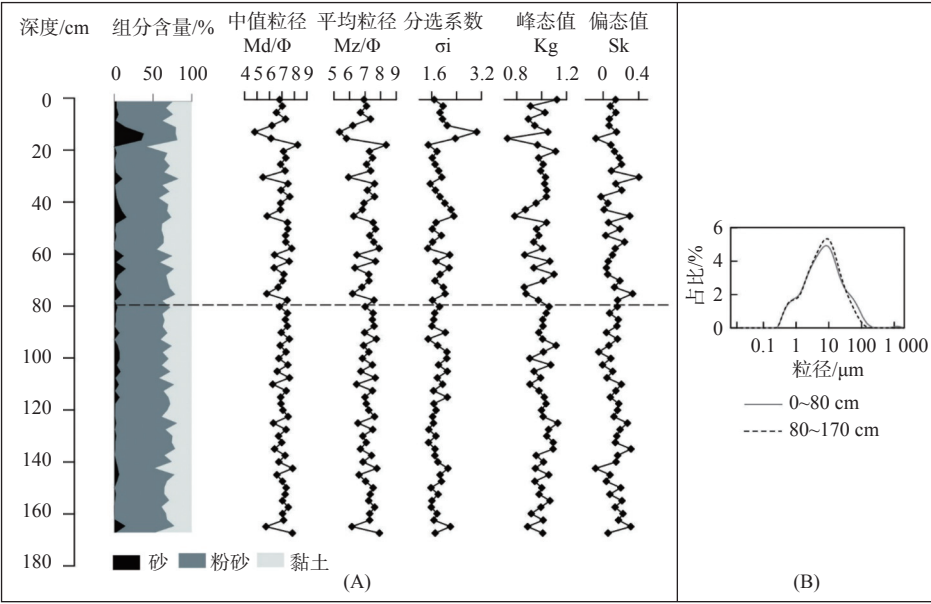


图 4 HQGCZ03 柱状样粒度参数分布图 (A) 及粒度频率曲线图 (B)

Fig.4 Vertical distribution patterns of grain size parameters (A) and grain-size frequency distribution curve (B) of the sediment core HQGCZ03.

沉积环境、物质来源和沉积作用都处于相对稳定的状态。

(2) ²¹⁰Pb 比活度沉积速率计算

HQGC03 柱状样沉积物在 80、120、150 cm 处存在粒度及成分变化, ²¹⁰Pb_{ex} 在柱状样 80 cm 处存在骤高值, 且 ²¹⁰Pb_{ex} 垂向剖面曲线, 可以分为明显的上下两段自然衰变过程(图 5): 在 0~80 cm, 从表层的 67.45 Bq/kg 衰变到 70 cm 的 31.44 Bq/kg; 而在 80 cm 处, 从 70 cm 的 31.44 Bq/kg 突增为 80 cm

的 66.58 Bq/kg, 该点不符合衰变规律, 因此不纳入年龄计算。80 cm 以下则又衰变到 120 cm 深度的 2.77 Bq/kg, 之后达到本底值, 不再发生衰变, 因此 120 cm 以下的 ²¹⁰Pb_{ex} 不再纳入计算。由沉积柱的粒度垂向变化可知, 80 cm 上下两段沉积粒度特征差异明显, 因此, 综合沉积柱的 ²¹⁰Pb_{ex} 和粒度垂向变化特征, 判断以 80 cm 为界上下两段存在沉积速率差异。

将柱状样在 80 cm 处将 ²¹⁰Pb_{ex} 分成两段, 分别

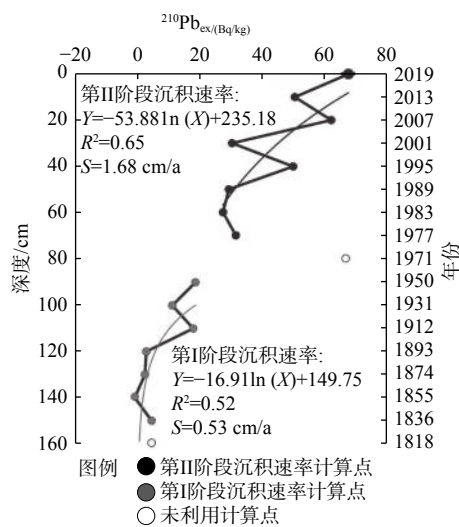


图5 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 放射性比活度垂向分布及沉积速率计算

Fig.5 The vertical distribution of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ value and calculation of deposition rate

代入公式, 比活度和深度进行指数拟合后, 计算获得柱状样第 I 阶段沉积速率为 0.53 cm/a, 对应年份为 1971—1893 年, 第 II 阶段的沉积速率为 1.68 cm/a, 对应年份为 2019—1971 年。

3.3 端元数量和特征

基于 Analysize-Masters 的粒度端元分析程序,

对柱状样样品粒度数据进行端元分析^[29-30], 并在此基础上, 确定磨刀口东侧浅滩的沉积粒度端元。在最优端元确定过程中体现粒度数据集和端元总体相关度的线性相关系数应 >0.9 , 以达到最优拟合效果; 体现粒度曲线与端元拟合形状误差的角度偏差值应越小越好, 当角度偏差 $<5^\circ$, 满足端元曲线形状拟合要求, 同时体现各个端元独立性的端元相关度应尽量的小, 端元相关度大说明端元之间分布重合, 存在过度拟合情况, 在分析中满足以上拟合原则基础上, 尽量选择少的端元数量^[31-34]。

通过综合比较端元分析结果, 在选择 4 个端元时, 角度偏差均值 $<5^\circ$ (图 6A), 端元之间无相关性, 可解释样本整体变化 98%。因此, 将该柱状样沉积物粒度分解为 4 个端元较为合理, 即 EM1、EM2、EM3 和 EM4 (图 6b)。EM1 端元平均粒径为 $3.6 \mu\text{m}$, 占比 36.91%, 主要粒度组分为黏土和粉砂; EM2 端元平均粒径为 $11.2 \mu\text{m}$, 占比 39.33%, 主要粒度组分为粉砂, 黏土次之; EM3 端元显示有 2 个峰值, 分别为 8.1 和 $91.8 \mu\text{m}$, 占比 6.45%, 粒度组分以粉砂和砂为主; EM4 端元平均粒径为 $40.8 \mu\text{m}$, 占比 17.30%, 主要粒度组分为粉砂, 黏土和砂含量较少 (表 2)。

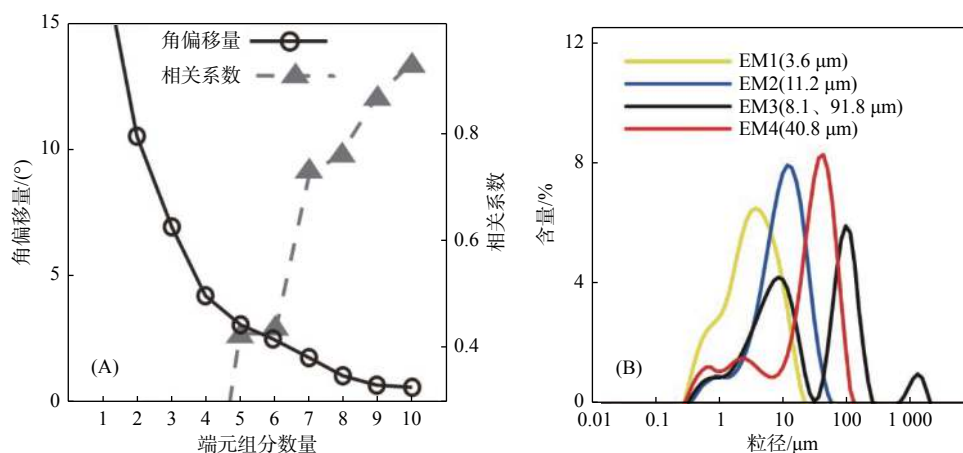


图6 端元数量限定因素及分离结果

Fig.6 Limiting factors to the number of end members and decomposition results

表 2 端元相对含量及平均粒径统计结果

Table 2 Statistical results of end-members abundance and mean size

	EM1	EM2	EM3	EM4
黏土/%	58.81	17.86	19.50	19.58
粉砂/%	41.19	82.11	43.36	69.12
砂/%	0.00	0.03	37.14	11.30
平均值/%	36.91	39.33	6.45	17.30
端元平均粒径/ μm	3.59	11.20	—	40.80

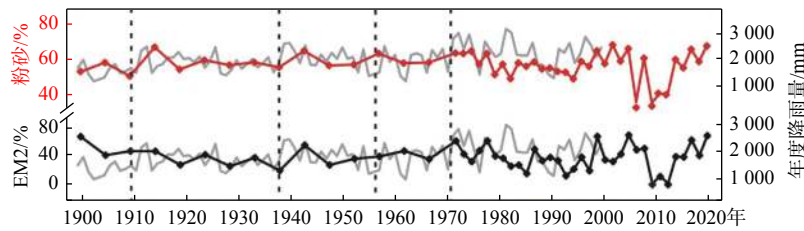
4 讨论

4.1 沉积物粒度影响因素分析

磨刀门近岸区域受到径流、潮流、西南方向的沿岸流以及浅海波浪作用^[6,35],水动力条件复杂。HQGCZ03 沉积物主要输入源是 EM2、EM1 及 EM4 端元,平均相对含量分别为 39.33%、36.91% 和 17.30%,结合前人关于磨刀门区域沉积物来源分析,认为 EM2、EM1 及 EM4 端元组分应来源于西江径流来砂、潮汐来砂及近岸来源。

EM2 端元粒径值为 $11.2\ \mu\text{m}$,粉砂占比 82.11%,其组分分布特征符合径流沉积的粒度特征(图 6)^[36]。西江径流来砂主要受河流悬移质泥沙影响,磨刀门年平均悬移质输沙量 $2341\times 10^4\ \text{t}$,其中 80%~90% 是黏土和粉砂^[37-38],并且越近口门,悬移质粒径越

细。悬移质泥沙在洪季被大量带往拦门沙外,较粗的部分(床沙质)直接沉降在坝后内海区和拦门沙外缘^[39],即磨刀门河口浅滩沉积较粗的河流悬移质泥沙。此外,研究认为年内降水分配、降水强度的变化会对河流输沙量变化起到一定的作用^[38,40],将 EM2 端元含量和粉砂含量与西江输沙量、区域年度降水量对比(图 7)发现:1910—1938 年间快速上升后缓慢下降,1938—1957 年间快速上升后慢速下降,而 1957—1971 年间降水量波动较大,而粉砂和 EM2 端元数值点较少,难以对比变化趋势,但整体上保持同一水平,因此,可以认为 1971 年以前降水量与 EM2 端元含量、粉砂含量的变化趋势是较为一致的。而 1971 年后随着人类活动增强,自然降水对水土流失影响降低,加之人类活动导致的近岸输入增多,以致 EM2 端元含量占比较 1971 年前低(图 7),与降水量变化相关性较差。综上所述,EM2 端元含量的变化符合径流特征,推测 EM2 端元代表西江径流输入,是主要输入来源之一。



澳门地区年度降水量数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)

图 7 澳门地区年度降水量变化与 HQGCZ03 柱状样粒度指标对比

Fig.7 Comparison between annual precipitation changes and columnar particle size indicators of the Core HQGCZ03 in Macao

而 EM1 端元平均相对含量为 36.91%, 占比仅次于 EM2 端元,主要组成成分为黏土和粉砂,颗粒较 EM2 端元细,反映其所受水动力条件较弱。磨刀门口外海区域由于径流动力减弱,沉积了洪季河流和沿岸流携带的丰富的细粒悬移质泥沙,但这些物质并不会永远停留在此,随着枯季的到来、径流量的减小和咸潮入侵,河口动力平衡带内移,沉积在外海的细颗粒物会在涨潮时被潮流掀动而悬浮,并随着潮流向陆搬运和沉积^[36,39]。因此,EM1 端元可能来自搬运到外海的细颗粒物,包括沿岸流所携带的长距离运输在外海沉积下来的细粒悬浮物质,在枯季时候涨潮时被再次扰动重新向陆搬运和沉积。

EM4 端元砂含量占 11.3%,粗颗粒含量较 EM2 和 EM1 端元多,峰态较窄,分选差,反映其搬运距离较短或沉积后受后期改造较小。磨刀门河口与

一般的河优型河口以及潮优型河口不同,不但径流作用强,波浪动力也较强^[39],在磨刀门口及附近岸线,波浪作用可带走近岸碎屑物质,而粗颗粒的近岸沉积不利于被运输,容易在近岸浅滩处沉积。因此,EM4 端元很有可能对应波浪作用所携带的近岸沉积组成,EM4 端元占比较少,反映该区域受到近岸粗颗粒输入较径流和潮流输入少。

通过讨论 EM2、EM1 和 EM4 端元形成的地质背景,可以有效地获得磨刀门河口浅滩区域的沉积控制因素:主要由西江径流来砂和外海潮流再输入泥沙控制,受近岸颗粒输入影响。

4.2 自然沉积之下的沉积物粒度及低沉积速率特征

1971 年前磨刀门海区是未经围垦、自然沉积下的河口湾区域,80 cm 以下的沉积物各项粒度组

分及粒度参数变异系数较小、平均粒径较细、分选较差。自然沉积下的磨刀门地貌,各区域水深较大,其轮廓类似河口湾^[41-43],取样处位于小横琴岛以南浅滩,西江径流、涨潮流和西向沿岸流在此汇合,接受着磨刀门的径流来沙和海域来沙。由于该时期水深较深,离河口较远,受径流影响相对较弱,磨刀门门口浅滩处的水动力条件变化主导为径流、潮流以及波浪作用,柱状样的粒度特征符合地貌水动力条件,反映 1970 年之前水动力条件相对较弱且变化较为稳定。

同时,柱状样的²¹⁰Pb_{ex}测年结果显示,自然沉积下磨刀门外浅滩具有较附近河口低的沉积速率。珠江口及其邻近海域中的 14 个沉积柱样的²¹⁰Pb 测年结果显示,河口由近及远沉积速率分别是 7.25、5.36、3.26、3.03、1.58 cm/a^[5,43],越远离河口则沉积速率越低。前人用历史海图分析对比法算出磨刀门平均沉积速率约为 2.5 cm/a^[7-8],而本柱状样的²¹⁰Pb_{ex}测年结果显示 1971 年前沉积速率为 0.53 cm/a,比磨刀门处平均沉积速率还要低得多。结合柱状样的采样位置特征及西江中上游水文站近 60 年来的监测数据(图 8),1970 年前西江输沙量低于近 50 年来的平均输沙量水平,低的输沙量直接影响磨刀门河口区域的沉积量和沉积速率。而柱状样位于磨刀门河口湾外,径流作用至此减弱,主要沉积动力以潮流和沿岸流为主,水动力条件较弱^[5,43]。因此,低的沉积输入及较弱的水动力条件促成了磨刀门外浅滩较低的沉积速率。

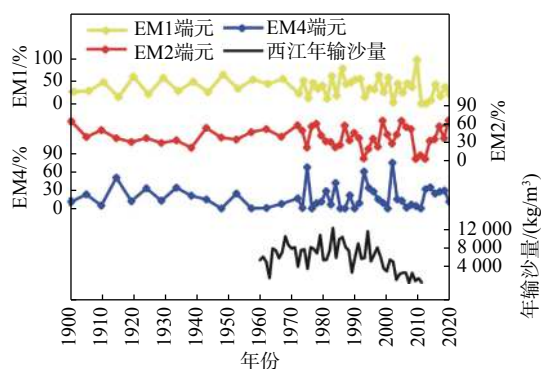


图 8 HQGCZ03 沉积物粒度指标与西江年输沙量

Fig.8 Interannual variation of grain size indicators of the Core HQGCZ03 and sediment load of the Xijiang River.

4.3 沉积物粒度及沉积速率变化对人类活动的响应

1971 年至今的沉积区段,即 80 cm 以上的沉积物,其粒度组分和参数发生明显变化:颗粒平均粒径逐渐变粗,各组分含量、偏态值、峰态值、分选系

数的变异系数增大(表 1),代表近源沉积的 EM4 端元以及砂粒含量也在 1971 年后明显增加(图 8)。结合磨刀门河口变迁历史资料,20 世纪 60 年代后磨刀门经过多次有计划的大规模围垦,1969—1972 年大小横琴两岛相连形成目前的一个面积约 51.6 km² 岛屿,1984 年启动的磨刀门河口综合整治工程将门口位置向海推进约 10 km,河口地貌特征及水动力条件发生明显改变,口门区大片水域围垦成陆,再加上 90 年代完成的航道整合和联围筑闸,使得磨刀门出海口处主流集中、流速增大、水流挟沙能力提高,导致河道逐渐向窄向深趋势发展^[44-45]。来自径流悬移质物质增多和磨刀门处水土流失的颗粒增加,使得磨刀门河口浅滩区近岸颗粒输入增加,颗粒沉积变粗、分选变差,各参数变异系数增大,砂含量与 EM2 端元在 1971 年持续增强(图 8)。

因此,自 1971 年以后磨刀门区域人类活动增强后,该区的地貌变化导致径流动力增大,潮汐动力减弱,同时人类活动带来了大量的近岸颗粒,导致磨刀门外东侧浅滩沉积颗粒变粗,各组分及粒度参数的变异系数增大,砂含量增加,EM2 和 EM4 端元增大(图 8)。

而对比 1971 年前 0.53 cm/a 的沉积速率,1971 年后沉积速率增大至 1.68 cm/a。河口区域沉积主要受人类活动影响较大,围垦和采砂活动导致近岸沙土松散,容易被流水冲洗,EM4 端元的增大也反映人类活动导致的物质来源增加。此外,西江中上游水文站近 60 年来的监测数据显示^[38],1965—1999 年西江输沙量高于平均输沙量水平,约是 1954—1965 年平均输沙量的 1.2 倍。杜以超等^[46]指出 1954—1968 年区间西江(高要站)的年输沙呈减少趋势,1968—1999 年缓慢增加趋势。虽然缺少 1949 年以前的输沙量数据,但可推测在自然地貌环境变化较少的情况下(即 1971 年以前),西江输沙量保持一个低值。而 1971 年后虽输沙量在不断减少,总输沙量应高于 1971 年前的输沙量。在 1971 年后,沿岸流输入对沉积组成的影响渐渐削弱,河流输入成为该沉积区主要的物质来源。因此,随着河流输入量增加及径流作用增强,近岸物源增多,沉积区的沉积速率也急剧增大。

1971 年后的沉积速率驱动因素主要受人类活动影响导致沉积环境变化,引起沉积速率的改变:①自然因素——河流的输沙量增加;②人类活动——1971 年后的大规模围垦填海活动导致磨刀门地貌

产生巨大的变化,柱状样的位置由河口湾外海沉积区转移到河口浅滩高沉积区,填海采砂活动导致横琴地区水域水土流失情况加剧。

5 结论

本文基于磨刀门河口浅滩柱状样的沉积物粒度及 ^{210}Pb 放射性比活度数据,对沉积物粒度变化特征、粒度端元及沉积速率进行分析讨论,得出以下结论。

(1)近百年来,磨刀门浅滩沉积速率发生明显变化,1893—1971年沉积速率为0.53 cm/a,1971—2019年沉积速率增大为1.68 cm/a。

(2)磨刀门河口浅滩区域的沉积主要由西江径流来沙和外海潮流再输入泥沙控制,受近岸颗粒输入影响。

(3)人类活动是导致河口沉积环境变化和沉积速率变化的主因。1971年前的河口湾外浅滩自然沉积区,沉积速率较慢,水动力作用较弱,以径流输入和潮流输入为主;1970年代以来围填海活动等人类活动增强,带来了大量的近岸颗粒,同时沉积区的西江径流动力和输沙量增大,导致磨刀门外东侧浅滩沉积速率增大,水动力作用变强,潮流输入减少,径流输入及近岸波浪作用输入增大。

致谢:感谢广州海洋地质调查局甘华阳博士、杨江平高级工程师对本研究的支持和指导!

参考文献:

- [1] 贾建军,高抒,高建华,等. 珠江口河流输沙、河口沉积与粒度信息之间的联系[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 298-304.
- [2] 陈吉余,陈沈良. 中国河口研究五十年: 回顾与展望[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(6): 81-486.
- [3] 黄镇国,张伟强. 珠江河口磨刀门的整治与地貌演变[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(6): 61-65, 73.
- [4] 贾良文,吕晓莹,程聪,等. 珠江口磨刀门月际尺度地貌演变研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 65-77.
- [5] 刘志勇,潘少明,程功弼,等. 珠江口沉积物 ^{210}Pb 分布特征及环境意义[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 166-175.
- [6] 蒋陈娟,周佳楠,杨清书. 珠江磨刀门河口潮汐动力变化对人类活动的响应[J]. 热带海洋学报, 2020, 39(6): 66-76.
- [7] 张虎男,郭钦华,陈伟光,等. 西江断裂磨刀门段地质近期活动性研究[J]. 华南地震, 1990, 10(1): 15-26.
- [8] 陈耀泰,罗章仁. 珠江口现代沉积速率及其反映的沉积特征[J]. 热带海洋, 1991(2): 57-64.
- [9] APPLEBY P, OLDFIELD F, THOMPSON R, et al. ^{210}Pb dating of annually laminated lake sediments from Finland[J]. Nature, 1979, 280(5): 53-55.
- [10] SMITH J N, WALTON A. Sediment accumulation rates and geochronologies measured in the Saguenay Fjord using the ^{210}Pb dating method[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(2): 225-240.
- [11] CARPENTER R, BENNETT J T, PETERSON M L. ^{210}Pb activities in and fluxes to sediments of the Washington continental slope and shelf[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(7): 1155-1172.
- [12] 康兴伦. 沉积物中 ^{210}Pb 的分析方法研究[J]. 海洋湖沼通报, 1988(2): 49-53.
- [13] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 计年[J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 230-239.
- [14] 林瑞芬,闵育顺,卫克勤,等. 珠江口沉积柱样 ^{210}Pb 法年龄测定结果及其环境地球化学意义[J]. 地球化学, 1998, 27(5): 401-411.
- [15] CORCORAN M, SHERIF M I, SMALLEY C, et al. Accumulation rates, focusing factors, and chronologies from depth profiles of ^{210}Pb and ^{137}Cs in sediments of the Laurentian Great Lakes[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(4): 693-704.
- [16] FLEMMING B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1125-1137.
- [17] 贾建军,高抒,高建华,等. 珠江口河流输沙、河口沉积与粒度信息之间的联系[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(3): 297-304.
- [18] 彭晓彤,周怀阳,叶瑛,等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报, 2012, 22(3): 487-493.
- [19] 王祥东,刘勇,李广雪. 黄河口百米地质钻孔粒度特征[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(4): 1-6.
- [20] 田庆春,石小静,石培宏. 青藏高原腹地湖泊沉积粒度特征及其古环境意义[J]. 盐湖研究, 2021, 29(1): 25-32.
- [21] 王伟,汤世凯,胡艳萍,等. 山东半岛南部丁字湾口外海底沉积物粒度时空变化及影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 70-80.
- [22] 马玉婷,蔡华阳,杨昊,等. 珠江磨刀门河口水位分布演变特征及其对人类活动的响应[J]. 热带海洋学报, 2022, 41(2): 52-64.
- [23] 吕海滨,吴超羽,任杰,等. 四十年来磨刀门河口水动力对地形的响应[J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 20-27.
- [24] 吕海滨,吴超羽,刘斌. 珠江口磨刀门整治前后水动力数值模拟[J]. 海洋科学, 2006, 30(11): 58-63.
- [25] FOLK R L, ANDREWS P B. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [26] 王福,杨彪,田立柱,等. 开放潮坪地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测年CIC和CRS计算模式的选择[J]. 地球科学, 2016, 41(6): 971-981.
- [27] ASHLEY G M. Interpretation of polymodal sediments[J]. *Journal of Geology*, 1978, 86(4): 411-421.
- [28] 安福元,马海州,樊启顺,等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1): 49-56.
- [29] WELTJE G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing

- problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503-549.
- [30] PATERSON G A, HESLOP D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [31] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报(中文版)*, 2006, 28(4): 159-166.
- [32] 赵庆, 郑祥民, 周立旻, 等. 末次冰期东海嵊山岛黄土粒度端元分析及其环境意义[J/OL]. *沉积学报*: 1-18. [2023-06-08]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.085>. (网络首发)
- [33] 方海超, 黄朋, 孙家文, 等. 鸭绿江端元粒度分级样品常量元素控制因素分析及物源识别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 39(3): 72-83.
- [34] 林镇坤, 王爱军, 叶翔. 南流江河口水下三角洲表层沉积物端元分析及其沉积动力环境意义[J]. *沉积学报*, 2019, 37(1): 124-134.
- [35] 王珊珊, 曹志敏, 兰东兆, 等. 珠江口沉积地球化学特征与古环境演化过程[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 261-267.
- [36] 何志刚, 莫文渊, 刘春莲, 等. 从沉积速率和沉积物粒度看冰后期海侵以来珠江三角洲西江大鳌沙的形成[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 331-336.
- [37] 李春初, 田向平, 罗宪林, 等. 西江磨刀门拦门沙的形成演变及口门整治问题[C]//第七届全国海岸工程学术讨论会文集(上), 珠海: 中国水利学会, 1993: 172-181.
- [38] 朱颖洁, 郭纯青, 黄夏坤. 气候变化和人类活动影响下西江梧州站降水径流演变研究[J]. *水文*, 2010, 30(3): 50-55.
- [39] 杨蕾. 珠江磨刀门河口的沉积化学环境研究[D]. 广州: 中山大学, 2006.
- [40] 刘成, 何耘, 刘桢. 河流输沙量变化的主要驱动因素[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(1): 1-7.
- [41] 曾昭璇. 从磨刀门历史地貌学研究看口门整治问题(上)[J]. *人民珠江*, 1982(5): 11-15.
- [42] 刘斌, 吕海滨, 吴超羽, 等. 磨刀门河口在20世纪60至70年代的演变模拟与动力地貌过程分析[J]. *海洋学报(中文版)*, 2014, 36(2): 75-80.
- [43] 赵获能. 珠江河口三角洲近165年演变及对人类活动响应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 1-216.
- [44] 陈晖, 谭超, 黄本胜, 等. 大规模围垦后磨刀门河口沉积环境演变分析[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(3): 64-71.
- [45] 张子昊, 李嘉怡, 刘锋, 等. 西江网河河床演变对人类活动的响应[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(3): 61-66.
- [46] 杜以超, 罗孝文, 王峻, 等. 近70年珠江水沙变化特征及人类活动影响因素分析[J]. *海洋学研究*, 2022, 40(4): 52-64.

Variation of deposition rate and evolution of depositional environment in the Modaomen estuary of Pearl River in the past 100 years indicated by grain size and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

LI Shiying, LIN Zhenwen*, LI Chu'an, YANG Feng, LUO Junchao, ZHENG Siqi, LI Yulong

(Guangdong Marine Geological Survey, Guangzhou 510080, China)

Abstract: As one of the important estuaries of the Pearl River system, Modaomen estuary is an ideal area to study the impact of human activities on the depositional environment of river estuaries. However, due to the difficulty in determining the sedimentary age, the relevant studies are scarce. Therefore, we studied the evolution and control mechanism of depositional environment in the last hundred years and determined the age and deposition rate of a core in Modaomen estuary shoal through ^{210}Pb dating technique in combination of grain size characteristics and grain size end element analysis. Results show that the sediments of the core are mainly from the Xijiang River runoff and the reinput sediment by offshore tidal current, and influenced by the inshore particle input. Besides, the depositional environment in this area have been changed significantly in the 1970s. The deposition rate in Modaomen increased from 0.53 cm/a (before 1970s) to 1.68 cm/a (after 1970s) with increases in the variation coefficient of every grain-size component, coarse grain fraction, and material input from runoff and inshore supply, and with decrease of tidal material input, which is probably related to the change in sediment discharge from Xijiang River and intensified human activities including reclamation in Modaomen since 1970s.

Key words: Pearl River Delta; offshore deposit; grain size; $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; modern depositional environment; deposition rate