

王伟斌, 姚弘毅, 吴昊, 等. 厦门五缘湾及同安湾口表层沉积物粒度端元解析[J]. 渔业研究, 2023, 45(1): 54–63.

厦门五缘湾及同安湾口表层沉积物粒度端元解析

王伟斌, 姚弘毅*, 吴昊, 蔚广鑫

(1. 福建海洋研究所, 福建 厦门 361013;
2. 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 福建 厦门 361102)

摘要: 基于2022年采集的表层沉积物样品, 通过端元分析方法, 对五缘湾及同安湾口的沉积动力环境和泥沙来源进行了研究。结果表明: 表层沉积物粒度端元分析提取到3个单峰端元, 其中EM1端元代表了水深较浅、水动力较弱的沉积环境, 可用于指示河溪入海泥沙以及随涨潮流而来的台湾海峡细颗粒物; EM2端元代表了水动力作用较强、机械分异作用显著的沉积环境, 可反映海岸风化侵蚀陆源碎屑物质; EM3端元代表了受人类活动强烈扰动作用下的沉积动力环境, 指示了同安湾受高集海堤、围垦等人类活动影响发生大范围淤积之前的底砂物质。研究显示, 近期高集海堤开口工程、桥梁修建、航道和港池疏浚及围填海等人类活动已对研究区域沉积环境产生了明显的扰动, 被淤积物覆盖的本底砾质粗砂底质再次出露。

关键词: 表层沉积物; 粒度; 端元; 沉积动力

中图分类号: P736.21 + **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9848(2023)01-0054-10

五缘湾是福建厦门筲筴港-钟宅断裂带因新构造时期的断裂和断块活动而发育形成的断陷浅水海湾^[1]。为兴办盐场、养殖水产等, 厦门在1958年和1979年共修筑了两条海堤, 人为阻碍了五缘湾与外侧同安湾海域的自然水体交换, 导致泥沙淤积、沉积物受污染严重、水体富营养化、赤潮频发、湿地生态系统受损严重^[1-3]。为保护和改善海湾湿地生态环境, 厦门市政府于2005年启动了五缘湾生态修复工程。工程拆除了钟宅海堤, 恢复了五缘湾内外自然水体交换过程, 同时对湾内淤塞的滩涂区域进行了疏浚, 增加了海湾纳潮量。2011年, 为了改善厦门湾水动力条件, 提升海洋环境质量, 厦门市政府开展了高集海堤开口改造工程, 包括海堤拆除及改造工程、海堤两侧海域清淤工程、高崎侧滨海路延

伸段工程和集美侧岸线整治工程, 实现了厦门东海域与西海域间的连通, 增强了东、西两侧海域的水体交换, 改善水质环境, 从而有利于厦门湾西海域污染物外输^[4-5]。这一系列提升改造工程, 势必对五缘湾及同安湾口的水动力环境和沉积动力过程造成影响。

粒度特征是沉积物固有的基本特征, 包含了沉积区域水动力环境、地质历史时期环境演变、物质输运和沉降过程等重要沉积信息^[6-11]。沉积物的粒度分布曲线往往同时存在多个峰, 位置也不尽相同, 其反映了不同输运形式、沉降过程及不同动力组分的叠加^[6-7, 12-13]。Weltje G J等^[14-15]提出了端元分析沉积物粒度数据的模型, 该模型利用动力组分的概念, 将多元叠加的多峰沉积物分解成单峰的沉积动力组分, 在河口^[16-19]、

收稿日期: 2022-10-20

基金项目: 福建省省属公益类科研院所基本科研专项 (2020R1006007; 2020R1006004)

作者简介: 王伟斌 (1982-), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋测绘、地理信息系统及近海地形地貌演变等方面的研究。E-mail: wwb@fjio.net

通信作者: 姚弘毅 (1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事河口海岸动力沉积方面研究。E-mail: yhy@fjio.net

海湾^[20]、近海及陆架区域^[21-27]等海洋环境沉积物粒度分析中得到了广泛应用，在解析沉积动力和物质来源推测方面取得了良好的应用效果。

本文于 2022 年 1 月在五缘湾及同安湾口采集表层沉积物，运用粒度端元分解方法对该区域的粒度数据进行了分析，以期进一步了解五缘湾及同安湾口在人类活动影响下的沉积动力过程。

1 研究区域概况

五缘湾位于厦门本岛东北部湖里区，水域北

侧与同安湾连通，东北侧邻近翔安，东南侧则与金门诸岛隔海相望。研究区域属于亚热带海洋性气候，受季风环流的影响，四季分明，气候温和，空气湿润，雨量充沛。潮汐属正规半日潮，潮差较大，根据厦门海洋站 1907 至 2002 年的观测资料，最高高潮位为 4.51 m，最低低潮位为 -3.33 m，最大潮差为 6.89 m。五缘湾湾口外紧邻翔安航道，通航水深为 11.6 m，水动力较强，实测大潮涨落潮流以往复流性质为主，其主轴方向与岸线、潮沟大致平行。

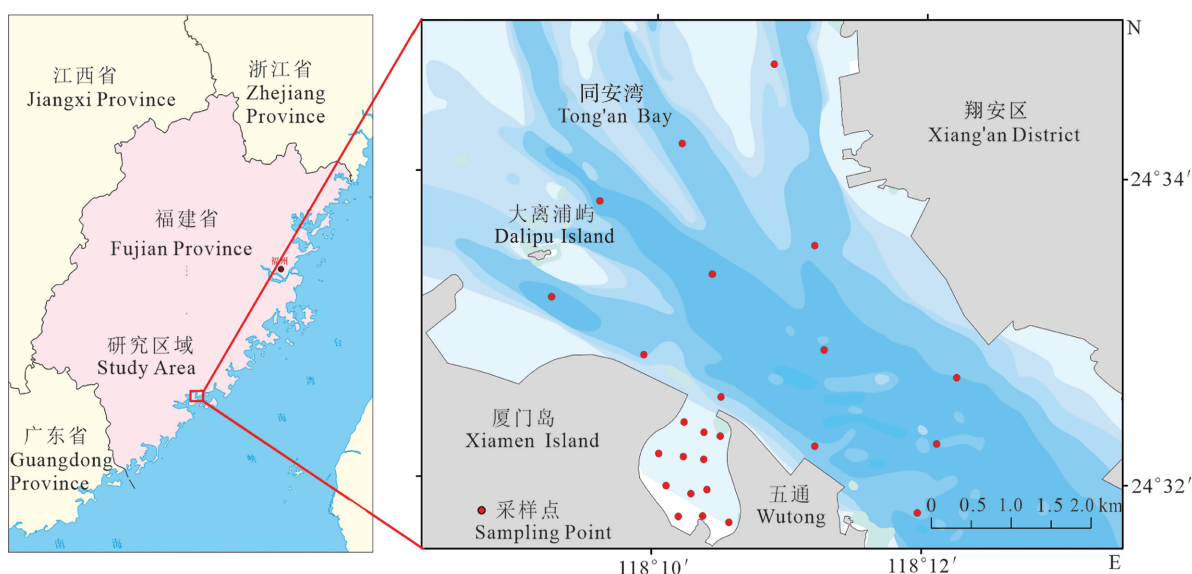


图 1 研究区域及表层沉积物采样点示意图[该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS (2019) 3266号的标准地图制作]

Fig.1 Study area and surface sediment sampling point diagram [The map was based on a standard map numbered GS (2019) 3266 downloaded from the National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation's Standard Map Service website]

2 材料与方法

2.1 样品的采集与粒度分析

如图 1 所示，2022 年 1 月在研究区域内使用蚌式采泥器共采集了 25 个表层沉积物样品，刮取表层 2 cm 厚的沉积物装入样品袋内。沉积物粒度分析采用英国 Malvern 生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪，仪器测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm ，粒径分辨率为 0.001 Φ ，重复测量的相对误差小于 3%，具体分析步骤参照文献 [28 - 30] 中的方法。采用 Folk R L 等^[31]的图解法公式计算沉积物的平均粒径 (M_z)、分选系数

(σ_i)、偏度系数 (SK_i) 和峰度系数 (K_g)；采用 Folk R L 等^[32]的含砾和无砾图解法对沉积物类型进行命名。根据我国现行《海洋调查规范第 8 部分：海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8—2007)^[33]中的划分标准，对海砂粒级进行划分。

2.2 端元分析方法

本文采用 Paterson G A 等^[34]改进的端元分析模型对沉积物粒度数据进行端元分析。在 Matlab 计算平台上运行 AnalySize 计算程序，将沉积物的频率分布数据按照海砂粒级划分标准进行分段后，作为计算的原始输入数值。在计算过

程中,具有对比非参数化方法和参数化方法两种分析方法,但通过对比,发现在使用非参数化方法时,端元呈现多峰分布形态,表明针对本文中的沉积物样品,该方法分解出的端元并非有效的单一物源或沉积动力环境,因此宜采用参数化方法^[20-21,35]。研究表明,Gen. Weibull 分布函数在形状上具有更大的灵活性并能更好地控制偏度,在分析大量数据时更为迅速^[21],故本文选择该函数进行参数化端元分解。计算结果可包含不同端元数的拟合结果以及相应的相关性分析,综合研究区域的水动力环境、物源特征和相关性系数等因素后,可具体判定所使用的端元数量和端元计算结果。

3 结果与分析

3.1 沉积物粒度特征

平均粒径 (M_z) 主要受源区物质的粒度分布和搬运介质的平均动能 2 个因素的影响。在源区一致的情况下,其可作为搬运介质速度的替代性指标,反映搬运营力的平均动能^[36]。图 2a 为研究区域海域平均粒径分布图,从图中可以看出采样区域的表层沉积物平均粒径变化范围为 $0.33 \sim 7.60 \Phi$,其中五缘湾内及大离浦岛东南侧表层沉积物颗粒较细,在 $6.00 \sim 7.60 \Phi$ 之间,而五缘湾口至翔安之间海域表层沉积物平均粒径较粗,在 $0.33 \sim 3.00 \Phi$ 之间。总体上,表层沉积物平均粒径呈现出自五缘湾湾内及近岸向海逐渐增大的趋势,从侧面可以反映出五缘湾内及近岸水域水动力较弱,而作为连接厦门东部海域和同安湾的重要潮汐通道,同时受到两侧地形条件的约束作用,导致五缘湾口至翔安之间海域的水动力较强。

分选系数 (σ_1) 反映了水动力条件对沉积物的分选程度。研究区域内分选系数在 $1.28 \sim 3.38$ 之间,属于分选较差和分选差,其中五缘湾内分选系数在 $1.28 \sim 1.50$ 之间,略好于湾口外的表层沉积物,五缘湾口的分选系数则达到了 3.38 ,分选最差(图 2b)。这表明研究区域内的水动力整体分选作用较弱,沉积过程复杂,多种沉积环境下泥沙相互

混杂,导致粒度分布分散。

偏度系数 (SK_1) 是用来表示沉积物粒度频率曲线对性的参数,实质上反映粒度分布的不对称程度,并表明众数、中位数、平均值的相对位置,用这一参数能反映介质类型、搬运能力的强弱及能量变异情况^[28,36]。研究区域内沉积物偏度系数在 $-0.28 \sim 0.73$ 之间(图 2c),两侧表现为负偏,而中间区域则表现为正偏至极正偏。

峰度系数 (K_g) 是刻画数据在平均粒径两侧集中程度的参数,用以度量粒径分布曲线的峰凸程度^[28,36]。研究区域内沉积物峰度系数在 $-0.66 \sim 3.20$ 之间(图 2d),整体上以平坦至中等为主,其中靠近翔安、五缘湾湾内人工沙滩区域以及五缘湾口的表层沉积物峰度系数较大,表现为很尖锐至非常尖锐,表明该区域的水动力条件较为复杂,环境对沉积物的改造不充分。

3.2 端元分析结果

在确定端元数量时,往往需根据拟合情况和识别难度进行综合考量,原则上端元数量应尽量少,一般采用 $3 \sim 4$ 个端元数较为合适^[20-21,25]。假定研究区域的端元数分别为 $2 \sim 8$,对所有表层沉积物的粒度数据进行端元分析,拟合结果如表 1 所示。从表中可以看出,当端元数为 3 时,拟合结果与实测数据间的平方线性关系 R^2 已经达到了 0.926 ,已能充分代表沉积物和沉积物环境特性。随着端元数的增加, R^2 逐渐增大,至 8 个端元时, R^2 仅增大了 0.043 ,增幅较小。从结果看,端元数越多,拟合组分结果越理想,但是端元数增加至 4 以后,新增加的端元是上一组端元中某些端元的二次拆分细化。例如当端元数为 4 时,与端元数 3 相比,端元 EM2 将会被拆分成 2 个平均粒径相近的砂组分,而事实上,这 2 种组分所对应的可能是相近的环境营造力或泥沙来源。故端元数的增加会模糊端元间物理含义的辨识度,对具体识别造成困难。因此,本文选取 3 个端元 (EM1、EM2、EM3) 对研究区域内的粒度数据进行分解。

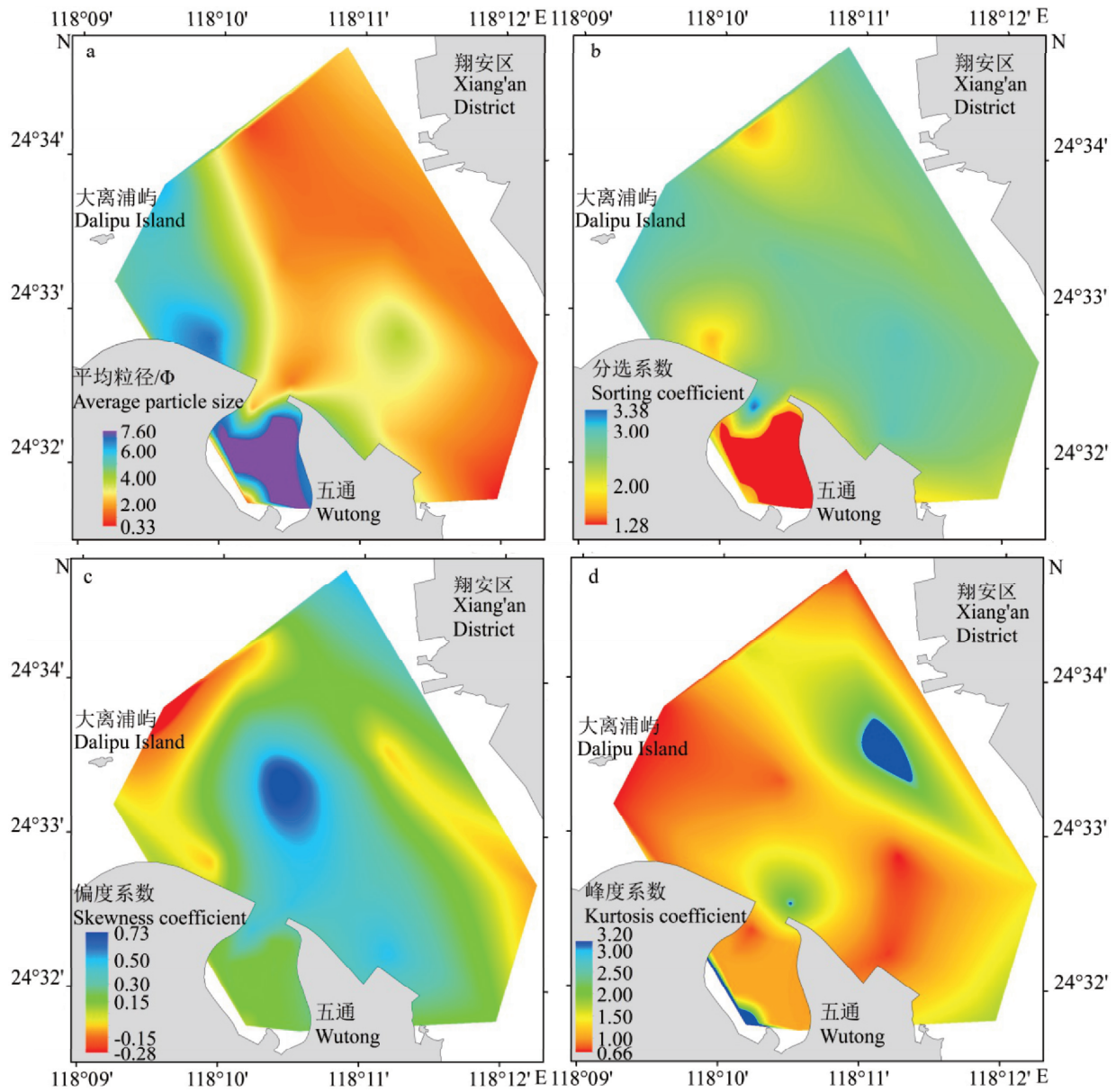


图 2 沉积物粒度参数平面分布图

Fig.2 Plane distribution map of sediment grain size parameters

表 1 端元拟合结果

Tab.1 End – member fitting results

端元数 Number of end elements	最大端元线性相关系数 EM R^2	端元线性相关系数 R^2	角距离 Theta
2	0.036 5	0.853	17.432
3	0.062 1	0.926	12.198
4	0.088 6	0.947	10.337
5	0.048 6	0.955	9.510
6	0.148 0	0.953	9.743
7	0.082 4	0.966	8.240
8	0.432 0	0.969	7.828

3.3 粒度端元曲线和参数特征

3个端元组分的频率分布曲线如图3所示,其中端元EM1为细颗粒组分,其粒度范围主要分布在3~10 Φ 之间,根据《海洋调查规范》(GB/T 12763.8—2007)分类标准^[33],属于粉砂粒级的范围,平均粒径为7.60 Φ ,分选系数为2.45,偏度系数为0.03,峰度系数为0.92;端元EM2为较粗

颗粒组分,其粒度范围主要分布在0~3.47 Φ 之间,属于砂质范围,平均粒径为1.92 Φ ,分选系数为1.92,偏度系数为-0.11,峰度系数为1.14;端元EM3为粗颗粒组分,其粒度范围主要分布在-2.00~2.32 Φ 之间,属于粗砂和砾石范围,平均粒径为-0.07 Φ ,分选系数为2.47,偏度系数为-0.04,峰度系数为0.77。

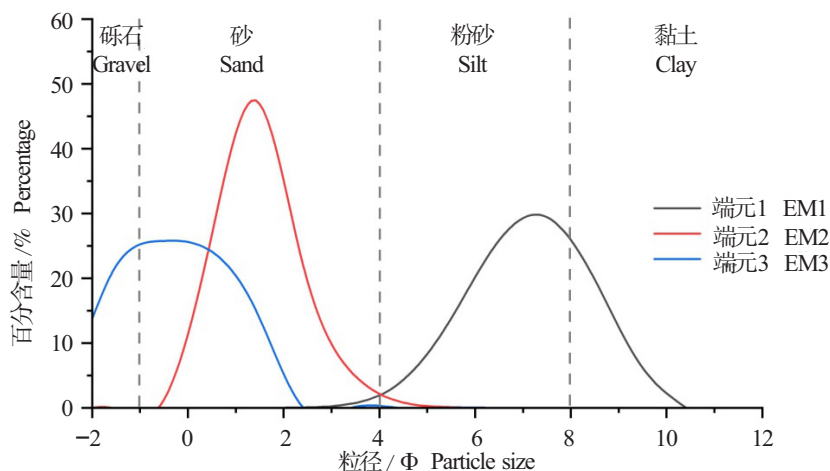


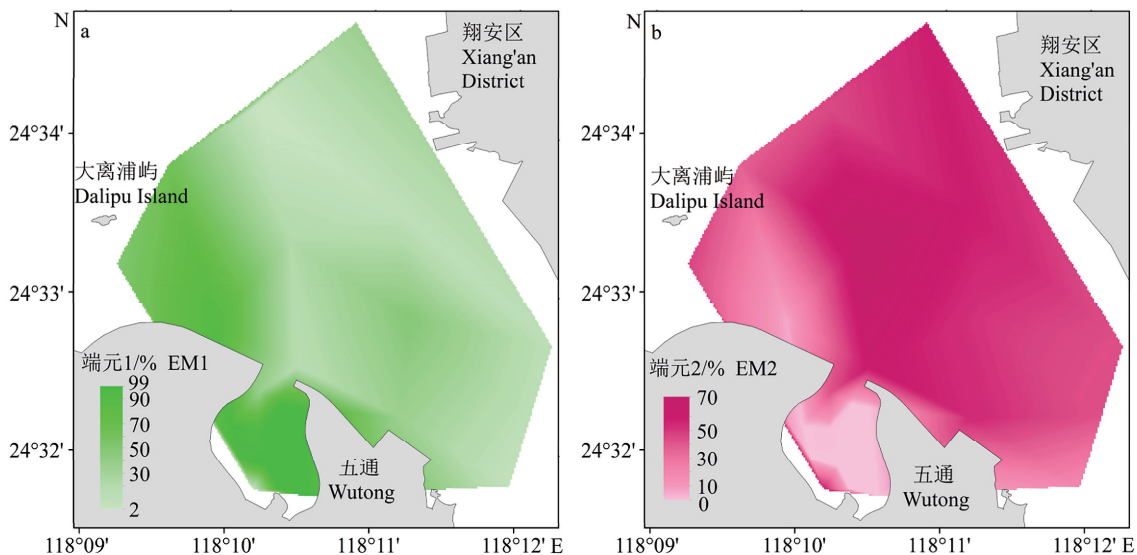
图3 各端元频率分布曲线

Fig.3 Frequency distribution curve of each end-element

3.4 端元空间分布

在端元数为3的条件下,本次采集到的所有样品的3个端元组分的和为100%。通过对各端元组分进行地理空间插值,可以获得各端元在空间上的分布特征(图4)。EM1代表的细颗粒组分在五缘湾内及厦门岛近岸处的浅水区域含量较高,而在五缘湾口至翔安之间的深

水区域含量明显降低。EM2所代表的较粗颗粒组分的分布特征与EM1恰好相反,其在五缘湾内及厦门岛近岸处的浅水区域含量较低,占比均在20%以下,而在同安湾口的深水区域含量较高。EM3所代表的粗颗粒组分在五通至翔安、大离浦屿至翔安之间以及五缘湾口的水域含量相对较高。



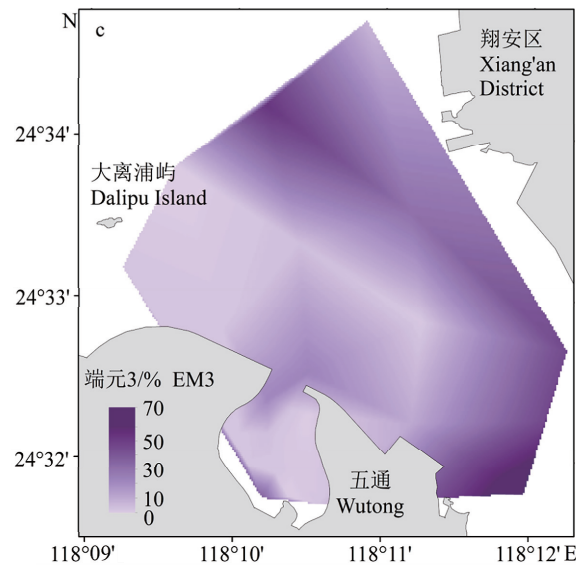


图 4 各端元空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of each end-member

3.5 研究区域潮流特性

2022 年 11 月 5 日至 6 日（农历十月初一至初二，大潮），福建海洋研究所对五缘湾及同安湾口进行了 6 点同步潮流观测。五缘湾及同安湾口潮流受地形因素控制，潮流流向呈现出明显的往复流特性，涨潮流由湾外向同安湾顶及西海域方向流动，落潮流则在同安湾口汇聚后向湾外流动（图 5）；最大涨潮流速和最大落潮流速均出现在 5 号站位，流速均为 97 cm/s

（表 2）；各站位最大流速均出现在表层或 0.2H 层，受海底摩擦阻力影响，流速自表层向底层逐渐减小。除 4 号站位落潮流明显强于涨潮流外，其余站位涨落潮垂线平均流速差值均在 5 cm/s 以下；5 号站和 6 号站的涨潮最大流速大于落潮，涨落潮间流速相差在 20% 以上。整体上可以看出，研究区域内潮流通道内的水动力条件较好，而五缘湾内水动力孱弱，涨潮和落潮平均流速分别仅为 6、14 cm/s。

表 2 研究区域大潮实测涨落潮分层最大流速和垂线平均流速及其流向

Tab.2 The measured maximum velocity and vertical average velocity of spring flood and ebb tides in the study area and their flow directions

Station	分层最大涨潮流		涨潮垂线平均		分层最大落潮流		落潮垂线平均	
	Layered maximum flood current		Vertical average of flood current		Layered maximum ebb current		Vertical average of ebb current	
	流向/° Direction	流速/(cm/s) Velocity	流向/° Direction	流速/(cm/s) Velocity	流向/° Direction	流速/(cm/s) Velocity	流向/° Direction	流速/(cm/s) Velocity
1	340	94	340	46	166	64	169	42
2	359	66	361	32	174	68	177	35
3	301	72	301	41	123	73	121	35
4	366	16	355	6	111	34	112	14
5	340	97	333	55	149	97	152	57
6	355	94	352	52	173	77	173	48

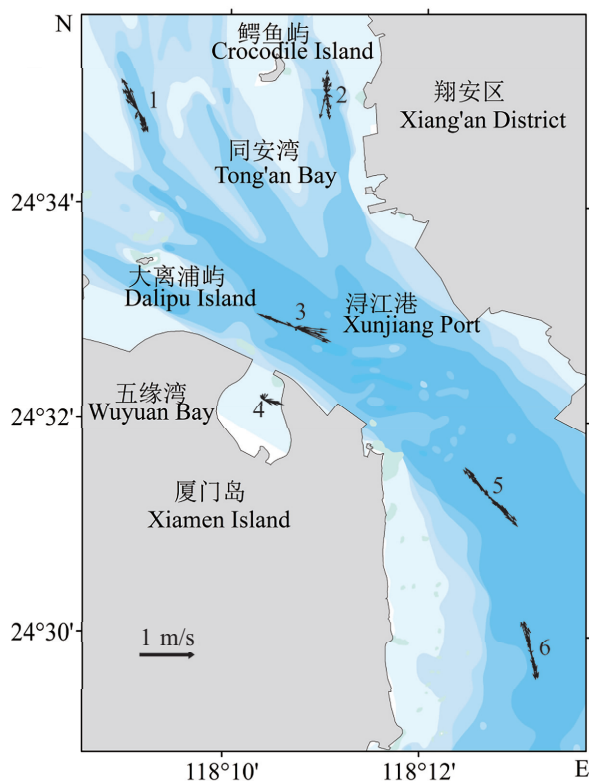


图5 实测大潮垂线平均流矢图

Fig.5 Measured vertical mean flow vector diagram of spring tide

注：图上数字1~6表示站位。

Note: 1~6 on the figure indicated the station position.

4 讨论

4.1 端元反映的沉积动力环境

EM1 端元所代表的细粉砂组分，分选差、频率曲线近对称分布、峰度中，在水深较浅、水动力较弱的五缘湾内含量较高，因此可认为该端元组分代表了水深较浅、水动力较弱的沉积环境。EM2 端元所代表的粗颗粒组分，分选较差、频率分布曲线正偏、峰度尖锐，空间分布与 EM1 组分呈现出明显的反相关性，主要分布在五缘湾外、离岸较远的开阔深水区域，水动力作用强，在潮流的机械分异作用下，只有较粗的颗粒得以沉积下来，表明该端元组分代表了较强的沉积动力环境。EM3 端元则为部分砾石与粗砂混合的颗粒组分，分选差、频率曲线近对称分布、峰度平坦，代表了更为强劲的动力作用环境。从空间分布上不难看出，EM3 端元组分高值区主要分布在研究区域南北两侧，五通至翔

安、大离浦屿至翔安之间以及五缘湾口等水域，这些水域都处在从开阔水域向狭窄水域过渡，区域受到两侧岸线地形的限制，过水断面束窄，水动力作用明显增强；同时，高崎海堤开口工程的施工使厦门东、西海域重新连通，潮通量增加，表现为自东海域向西海域净输水，同安湾口流速增大，从侧面增强了其水动力条件，不利于细颗粒泥沙沉积，只有粗砂和砾石组分得以保留。此外，EM3 端元组分高值区周边分布有在建的翔安大桥、刘五店港区、五缘湾游艇码头航道、刘五店航道、五通-金门航道以及规划建设中的丙洲航道、东坑航道和高通航道等工程（图6），可见该区域受到桥梁修建、航道和港池疏浚及围填海等多种高强度人类活动的影响。

- 丙洲航道 Bingzhou Channel
- 东坑航道 Dongkeng Channel
- 五通-金门航道 Wutong-Jinmen Channel
- 刘五店航道 Liuwudian Channel
- 高通航道 Gaotong Channel

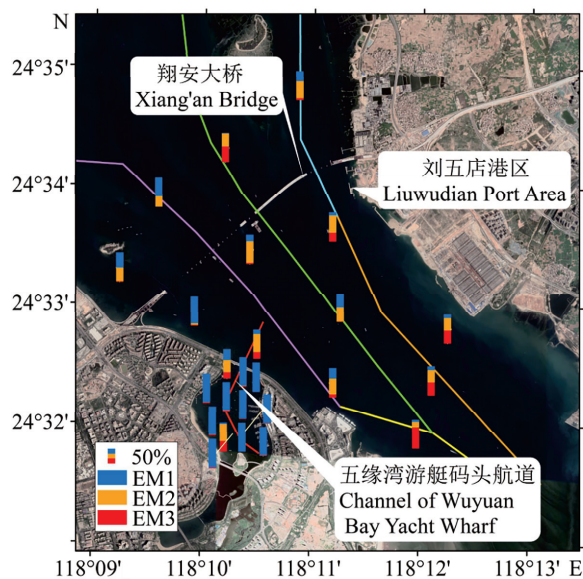


图6 研究区域周边工程情况示意图

Fig.6 Schematic diagram of engineering around study area

4.2 端元反映的泥沙来源

研究区域内泥沙来源主要包括海岸侵蚀陆源碎屑、河溪来沙以及来自台湾海峡的物质等。粒径趋势分析结果表明，同安湾沉积物自湾顶向湾内、再从湾内向湾口输运^[37]，来自台湾海峡的泥沙随涨潮流进入翔安南部和同安湾^[38]，翔安南部海域沉积物输运方向指向同安湾^[39]。诸多来源的泥沙在本区域汇合，通过不同水动力条件

再分配，从而形成复杂的沉积格局，而端元分析就是将不同动力组分和物源属性的混合组分进行剥离的过程。

西溪发源于厦门同安区北部寨尖尾山，由莲花溪、澳溪和汀溪水流相汇而成，在双溪口与发源于厦门市北部汀溪镇西格山的东溪汇合后，向东南流入东咀港并出海进入同安湾。东、西溪每年入海泥沙约 $6 \times 10^4 \text{t}$ ，同安湾周边小溪流的入海泥沙可达 $10 \times 10^4 \text{t}^{[40]}$ ，这些入海泥沙中，粗颗粒大多沉积在下游河道中，细颗粒悬浮泥沙大量进入海湾。随涨潮流进入同安湾的台湾海峡悬沙也以细颗粒泥沙为主，这部分泥沙主要来源于浙闽沿岸流的南下物质、粤东沿岸流随西南季风北上的悬沙以及台湾西部河流中的细颗粒组分^[24,41-42]。现场观测的台湾海峡悬沙的峰值粒径在 $4 \mu\text{m}$ 左右^[24]，与 EM1 端元的平均粒径相近，因此 EM1 端元可较好地指示河溪入海泥沙以及随涨潮流而来的台湾海峡细颗粒物。

厦门湾海域海底沉积物表现出较好的亲陆性，周边基岩风化侵蚀以及风浪导致的海岸侵蚀是其重要的泥沙来源之一^[38,43]。在潮流的机械分异作用下，同安湾海域泥沙自湾口向湾内逐渐变细^[44]。在海湾区域，这部分泥沙往往分布于水域较开阔、流速较大的区域^[20]，与 EM2 组分的空间分布特征和平均粒径较为接近，因此 EM2 端元组分可能代表了海岸风化侵蚀陆源碎屑物质。

2003 至 2008 年的沉积物采样结果表明，同安湾口的沉积物类型均以黏土质粉砂为主^[37-38]，而在高集海堤修建之前，1938 年测制的海图则显示同安湾湾口的原有底质类型为砾质砂和粗砂^[45]。柱状样显示同安湾沉积物在砾质砂和粗砂层上覆盖了一个 $7 \sim 30 \text{cm}$ 的细颗粒沉积层，这是高集海堤建设和多年来的围垦活动导致水动力条件变化而产生的淤积^[43]。而端元分析结果中，EM3 端元恰好可以指示这部分砾质砂和粗砂的原始沉积层。该组分在表层沉积物中的重新出现，并且在个别站位中有着较高的占比，说明了近期的桥梁修建、航道和港池疏浚及围填海等人类活动，尤其是 2011 年高集海堤开口后，研究区域内的水动力条件发生新的变化，对沉积环境已经产生了一定的影响。

5 结论

本文采用粒度端元分析方法，对研究区域内的表层沉积物样品进行了端元拟合，提取了 3 个有效端元组分，通过端元组分和粒度参数的空间分布，综合历史沉积过程、水动力条件和人类活动影响等初步探讨了该区域内的沉积动力环境和泥沙来源，得到了以下结论：

1) 表层沉积物端元分析提取到的 3 个端元基本可以反映出五缘湾及同安湾口海域的沉积动力环境。3 个端元均为单峰，频率分布曲线接近正态分布。EM1 端元主要分布在五缘湾内，代表了水深较浅、水动力较弱的沉积环境；EM2 端元主要分布在同安湾口的深水区域，代表了水动力作用较强、机械分异作用显著的沉积环境；EM3 端元则主要分布在开阔水域与峡道水域的过渡区域，代表了受人类活动强烈扰动作用下的沉积动力环境。

2) EM1 端元可用于指示河溪入海泥沙以及随涨潮流而来的台湾海峡细颗粒物；EM2 端元可代表海岸风化侵蚀陆源碎屑物质；EM3 端元则代表了同安湾受高集海堤、围垦等人类活动影响发生大范围淤积之前的底砂物质。

3) 近年来，研究区域内开发活动频繁，桥梁修建、航道和港池疏浚及围填海等工程对局部的沉积动力环境产生扰动，此外，高集海堤开口工程的建设使厦门东、西海域重新贯通，改善了两侧的水沙交换条件，间接增强了研究区域内的水动力。这两方面的作用叠加后，研究区域的底砂出现粗化现象、原同安湾的砾质粗砂底质再次出露，需加强关注。

参考文献：

- [1] 黄海萍. 滨海湿地生态恢复成效评估研究 [D]. 厦门：国家海洋局第三海洋研究所，2012.
- [2] 黄海萍，陈彬，俞炜炜，等. 厦门五缘湾滨海湿地生态恢复成效评估 [J]. 应用海洋学学报，2015，34 (4)：501-508.
- [3] 杨蕙. 海湾环境整治效果评价指标体系及评价方法的研究 [D]. 厦门：国家海洋局第三海洋研究所，2017.
- [4] 林毅辉，潘伟然，肖征，等. 高集海堤开口后厦门湾潮流特征分析 [J]. 海洋湖沼通报，2020

- (6): 9-17.
- [5] 余小建, 徐啸. 厦门高集海堤开口改造工程潮流泥沙物理模型试验研究 [J]. 台湾海峡, 2012, 31 (4): 571-577.
- [6] Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions [J]. The Journal of Geology, 1976, 84 (4): 405-426.
- [7] Ashley G M. Interpretation of polymodal sediments [J]. The Journal of Geology, 1978, 86 (4): 411-421.
- [8] Reading G H. 沉积环境和相 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [9] 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 等. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成、动力控制及反映的东亚季风演化 [J]. 第四纪研究, 2008, 27 (3): 414-424.
- [10] 李琰, 胡克, 王萍, 等. 大连复州湾底质沉积物粒度特征与沉积环境分析 [J]. 海洋学研究, 2013, 31 (3): 41-48.
- [11] 李琰, 于洪军, 易亮, 等. 渤海南部 Lz908 孔海陆交互沉积的粒度特征及其对沉积环境的指示 [J]. 海洋科学, 2014, 38 (5): 107-113.
- [12] 王忠蕾, 梅西, 郑洪波, 等. 辽东湾北部 JXC-1 孔稀土元素组成与物源判别 [J]. 第四纪研究, 2021, 41 (1): 28-42.
- [13] 黄臻, 王建力, 王勇. 长江三峡巫山第四纪沉积物粒度分布特征 [J]. 热带地理, 2010, 30 (1): 30-33.
- [14] 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.
- [15] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics [J]. Sedimentary Geology, 2003, 162 (1-2): 39-62.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 解锡豪, 曹向明, 李志忠, 等. 闽江口地区不同砂质沉积的粒度端元特征及其环境指示 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2021, 16 (2): 38-46.
- [19] 冉隆江. 鸭绿江河口沉积物粒度分布特征及其对流域变化的响应 [D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [20] 王兆夺, 于东生, 汪卫国, 等. 泉州湾表层沉积物粒度指示的沉积动力端元解析 [J]. 热带地理, 2021, 41 (5): 975-986.
- [21] 刘胜璟, 高建华, 徐笑梅, 等. 浙闽沿岸泥质区沉积物粒度组分对长江入海输沙量减少的响应 [J]. 海洋学报, 2021, 43 (3): 105-115.
- [22] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45 (10): 1515-1523.
- [23] 张晓东, 许淑梅, 翟世奎, 等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26 (2): 25-32.
- [24] 阮美娜, 李炎, 陈一宁, 等. 夏季台湾海峡的悬浮颗粒通道: 现场粒度端元分析的证据 [J]. 科学通报, 2012, 57 (36): 3522-3532.
- [25] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和瓯江为例 [J]. 海洋学报, 2018, 40 (5): 75-89.
- [26] 张存勇, 冯秀丽. 连云港近岸海域沉积物粒度空间分布特征及其分析 [J]. 海洋学报 (中文版), 2009, 31 (4): 120-127.
- [27] 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37 (3): 187-196.
- [28] 姚弘毅, 李九发, 李为华, 等. 近期长江河口北港河道沉积物分布特征 [C] //左其华, 窦希萍. 第十六届中国海洋 (岸) 工程学术讨论会论文集 (下). 北京: 海洋出版社, 2013: 403-408.
- [29] 王兆夺. 泉州湾表层沉积物特征分析 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2015.
- [30] 姚弘毅, 李九发, 戴志军, 等. 长江河口北港河道泥沙特性及河床沙再悬浮研究 [J]. 泥沙研究, 2013 (3): 6-13.
- [31] Folk R L, Word W. Brador rivers bars, a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27 (1): 3-26.
- [32] 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.
- [33] 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. 海洋调查规范 第8部分: 海洋地质地球物理调查: GB/T 12763.8-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [34] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. Geochemistry, 2015,

- 16 (12): 4494 – 4506.
- [35] 李帅, 杨胜利, 梁敏豪, 等. 青藏高原东部黄土粒度分布的端元模型研究 [J]. 地球与环境, 2018, 46 (4): 331 – 338.
- [36] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析 [J]. 环境科学与管理, 2010, 35 (6): 54 – 60.
- [37] 左书华, 韩志远, 赵洪波, 等. 九龙江口 – 厦门湾海域表层沉积物粒度分布特征及其动力响应 [J]. 水利水运工程学报, 2011 (4): 74 – 79.
- [38] 方建勇. 厦门湾海底沉积物分布特征及其物源和沉积环境意义 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2008.
- [39] 刘治帅, 杨旸, 陈坚, 等. 厦门湾及邻近海域沉积物分布特征和沉积速率 [J]. 海洋科学, 2012, 36 (6): 1 – 8.
- [40] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [41] 曹文红. 中晚全新世台湾海峡西侧物源演化及其对洋流的指示 [D]. 上海: 华东师范大学, 2016.
- [42] 王爱军, 陈坚, 叶翔, 等. 台湾海峡西南部海域春季悬浮体及沉积物来源与输运机制 [J]. 海洋学报 (中文版), 2010, 32 (6): 130 – 143.
- [43] 李庆年, 郭允谋. 福建同安湾的泥沙来源及淤积问题 [J]. 台湾海峡, 1984 (1): 59 – 67.
- [44] 刘治帅. 厦门海域沉积物特征、输运趋势及其环境意义 [D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [45] 华东石油学院勘探系基础地质、石油地质教研室. 沉积岩 [M]. 北京: 石油化学工业出版社, 1977.

End – member analysis of surface sediments in Wuyuan Bay and Tong’an Bay mouth of Xiamen, Fujian Province

WANG Weibin, YAO Hongyi^{*}, WU Hao, YU Guangxin

(1. Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen 361102, China)

Abstract: Based on the surface sediment samples collected in 2022, the sedimentary dynamic environment and sediment source of Wuyuan Bay and Tong’an Bay mouth were studied by end – member analysis method. The results showed that three unimodal end – members were extracted using surface sediment grain size end – member analysis. The EM1 components represented the sedimentary environment with shallow water depth and weak hydrodynamic force, which could be used to indicate the sediments entering the sea from the rivers and the fine particulate matters in the Taiwan Strait with the rising tide. EM2 components represented the sedimentary environment with strong hydrodynamic effect and significant mechanical differentiation, and could represent the terrestrial clastic materials eroded by coastal weathering. The EM3 components represented the sedimentary dynamic environment under the disturbance of stronger human activities, and represented the bottom sand material before the large – scale deposition of Tong’an Bay affected by human activities such as Gaoji sea-wall and reclamation. Recently, human activities such as Gaoji sea dyke opening project, bridge construction, channel and harbor dredging and reclamation had disturbed the sedimentary environment of the study area, and the gravelly coarse sand substrate had been exposed.

Key words: surface sediments; granularity; end – member; sedimentary dynamics