



福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素

毕云天, 胡日军, 陈娟娟, 李毅, 伊兆晗, 陈晓磁, 朱龙海, 尹砚军, 刘波

Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing Bay and its nearby sea areas

BI Yuntian, HU Rijun, CHEN Juanjuan, LI Yi, YI Zhaohan, CHEN Xiaoci, ZHU Longhai, YIN Yanjun, and LIU Bo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023010902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素

Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 53-66

夏季南黄海悬浮体粒度分布及其影响因素

Grain size distribution pattern and influencing factors of suspended matters in the Southern Yellow Sea during summer season

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 49-60

福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征

Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 61-73

舟山沈家门海域悬沙输运特征研究

Transportation of suspended sediment in Shenjiamen offshore area of Zhoushan

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 78-86

闽北附近海域悬浮体输运及通量的季节变化

Seasonal variations of suspended sediments in transport and flux in the coastal area of the northern Fujian Province

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(5): 30-40

山东半岛东北部海域悬浮体季节分布及控制因素

Seasonal distribution of suspended sediments in the water northeast to Shandong Peninsula and its controlling factors

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 30-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

毕云天, 胡日军, 陈娟娟, 等. 福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 15-29.

BI Yuntian, HU Rijun, CHEN Juanjuan, et al. Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing Bay and its nearby sea areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 15-29.

福宁湾及附近海域悬沙粒度与影响因素

毕云天¹, 胡日军^{1,2}, 陈娟娟³, 李毅³, 伊兆晗¹, 陈晓磁³, 朱龙海^{1,2}, 尹砚军¹, 刘波¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100

3. 华能霞浦核电有限公司, 宁德 352100

摘要: 基于闽北福宁湾及附近海域冬、夏两季水文泥沙实测数据, 分析了不同时间尺度下悬沙的粒度特征, 探讨了影响悬沙粒度季节差异的主要因素以及悬沙粒度与浓度的关系。结果表明: 正常天气下, 研究区悬沙中值粒径普遍大于 6.5Φ 。悬沙粒度具有“冬细夏粗”的季节分布特征; 受潮动力影响, 悬沙粒度大小潮变化明显; 潮周期内悬沙粒径变化规律不明显。悬沙粒度-标准偏差曲线显示两种主要的敏感粒度分布范围为 $2.8 \sim 3.4 \mu\text{m}$ 和 $21.1 \sim 25.1 \mu\text{m}$ 。悬沙粒度“冬细夏粗”的季节差异主要受底质再悬浮和泥沙来源的影响。冬季悬沙粒径与浓度的相关性不明显, 夏季两者存在显著的线性关系, 悬沙粒径随悬沙浓度的增加而减小, 这种季节差异可能与悬沙来源和混合作用有关。夏季悬沙粒径的粗化可能与细颗粒发生絮凝沉降有关。

关键词: 悬沙粒度; 时空变化; 季节差异; 影响因素; 福宁湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023010902

Suspended sediment grain size and influencing factors in Funing Bay and its nearby sea areas

BI Yuntian¹, HU Rijun^{1,2}, CHEN Juanjuan³, LI Yi³, YI Zhaohan¹, CHEN Xiaoci³, ZHU Longhai^{1,2}, YIN Yanjun¹, LIU Bo¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

3. Huaneng Xiapu Nuclear Power Co., Ltd, Ningde 352100, China

Abstract: Based on the observed hydrological data and sediment in winter and summer in the Funing Bay and its nearby sea areas in the northern Fujian, South China, we analyzed the characteristics of suspended sediment grain size at different time scales, discussed the main factors affecting the seasonal variation of grain size, and revealed the relationship between grain size and concentration. Results show that in normal weather, the median grain size is generally larger than 6.5Φ in the study area. The grain size shows seasonal distribution characteristics: being fine in winter and coarse in summer. Under the influence of tidal power, the grain size changes significantly between spring and neap tides. The variation of grain size in tidal cycle is not obvious. The standard deviation of grain size curve shows that the distribution ranges of two main sensitive grain size are $2.8 \sim 3.4 \mu\text{m}$ and $21.1 \sim 25.1 \mu\text{m}$. The seasonal variation in grain size is mainly affected by sediment resuspension and source supply. Correlation between median grain size and concentration in winter is not obvious, but there is a significant linear relationship between them in summer. With the increase of concentration, the grain size becomes finer. This seasonal variation may be related to the sources and mixing of suspended sediment. The coarsening of grain size in summer may be related to the flocculation settling of fine particles.

Key words: suspended sediment grain size; temporal and spatial variations; seasonal differences; influencing factors; Funing Bay

粒度是悬浮泥沙研究的重要参数, 它与泥沙搬运、沉积等过程关系密切^[1-2]。悬沙粒度特征一直是海岸、河口地区沉积动力研究的重要内容之一, 研究者们主要关注悬沙粒径及组分特征^[3-4]、悬沙粒度

与悬沙锋^[5]、悬沙粒度与浓度的关系^[6]、悬沙粒度与再悬浮^[7-9]、悬沙絮凝体粒径及絮凝沉降速等^[10-13], 认为悬沙粒度变化与泥沙来源、底质再悬浮及水动力环境关系密切, 含沙量和絮凝作用也会对悬沙粒度

资助项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目“霞浦核电海岛厂址开发利用研究”(HNKJ20-H18); 国家自然科学基金项目“山东半岛海湾对泥沙的捕获机制——以威海湾为例”(41776059)

作者简介: 毕云天(1998—), 男, 硕士, 海洋地质工程专业, E-mail: 823194272@qq.com

通讯作者: 胡日军(1980—), 男, 教授, 主要从事海洋沉积动力研究, E-mail: hrj@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-09; 改回日期: 2023-02-20. 文凤英编辑

产生影响。研究悬沙粒度的变化对于分析泥沙再悬浮和沉降作用^[14]、追溯沉积物的来源及其形成过程^[15-16]，理解生物地球化学循环具有重要意义^[17-18]，同时悬沙粒径还是影响絮凝沉降的重要因子^[19]。因此，了解悬沙粒度及其变化是进一步研究泥沙再悬浮、沉降和输运规律的基础。

东海属宽广陆架海，地势平坦，岸线蜿蜒曲折，沿岸发育有长江及众多中小型河流^[20]，为东海提供了丰富的陆源沉积物质供应^[20]。东海陆架沉积物在复杂动力因素(沿岸流、台湾暖流和潮流等)的作用下不断分异，形成了东海内陆架泥质沉积区^[21]，主要分布在60m等深线以浅的浙闽沿岸海域^[22-23]。受地形地貌、水动力条件、物质来源等因素的影响，在浙闽沿岸地区发育了一系列淤泥质海湾，这些淤泥质海湾由于其独特的沉积动力环境吸引了众多学者的关注^[24-28]。

福宁湾属浙闽沿岸典型的淤泥质海湾，沉积物颗粒较细^[29]。受长江及浙闽沿岸众多中小型河流的物源影响，泥沙来源复杂；岸线曲折，岬角突出，岛屿众多，近岸地形多变；近年来海湾开发活动日益加剧，人类活动影响频繁，沉积动力环境复杂。此前对于福宁湾海域沉积动力环境的研究主要集中在潮流场与冲淤特征、表层沉积物粒度组成与分布、悬浮泥沙输运特征等方面^[30-32]，对于悬沙粒度的

研究涉及的内容较少。本文基于2019年12月(冬季)和2020年6月(夏季)在闽北福宁湾及附近海域获得的水文泥沙实测数据，从不同时间尺度分析悬沙粒度特征，探讨影响悬沙粒度季节差异的主要因素以及悬沙粒度与浓度的关系，以加深对浙闽淤泥质海湾沉积动力环境的理解。

1 研究区概况

研究区(26°36'~26°57'N、120°05'~120°31'E)位于福建东北部福宁湾附近海域(图1)，湾内水深不足12m，湾外水深最大不超过30m^[32]。沉积物类型主要为粉砂和黏土质粉砂，中值粒径大于6.5 Φ 。潮汐类型为规则半日潮，以M₂分潮为主，平均潮差大于4m^[33]。湾内潮流往复性明显，涨潮流向多为NWW向，落潮流向多为SEE向，由湾内向湾外潮流的旋转性逐渐加强^[31]。研究区附近无大型河流注入，仅发育有罗汉溪、长溪三河等源短流小的山溪性小河。研究区季风特征明显，冬季盛行强而稳定的偏北风，夏季则以偏南风为主，受季风的影响，冬季波高明显大于夏季^[34]。低温低盐的闽浙沿岸流主要分布在长江口以南的浙闽沿岸，在冬季偏北风期间为一支较强的南向流；夏季偏南风期间，闽浙沿岸流流速很小，甚至消失^[35]。高温高盐的台湾

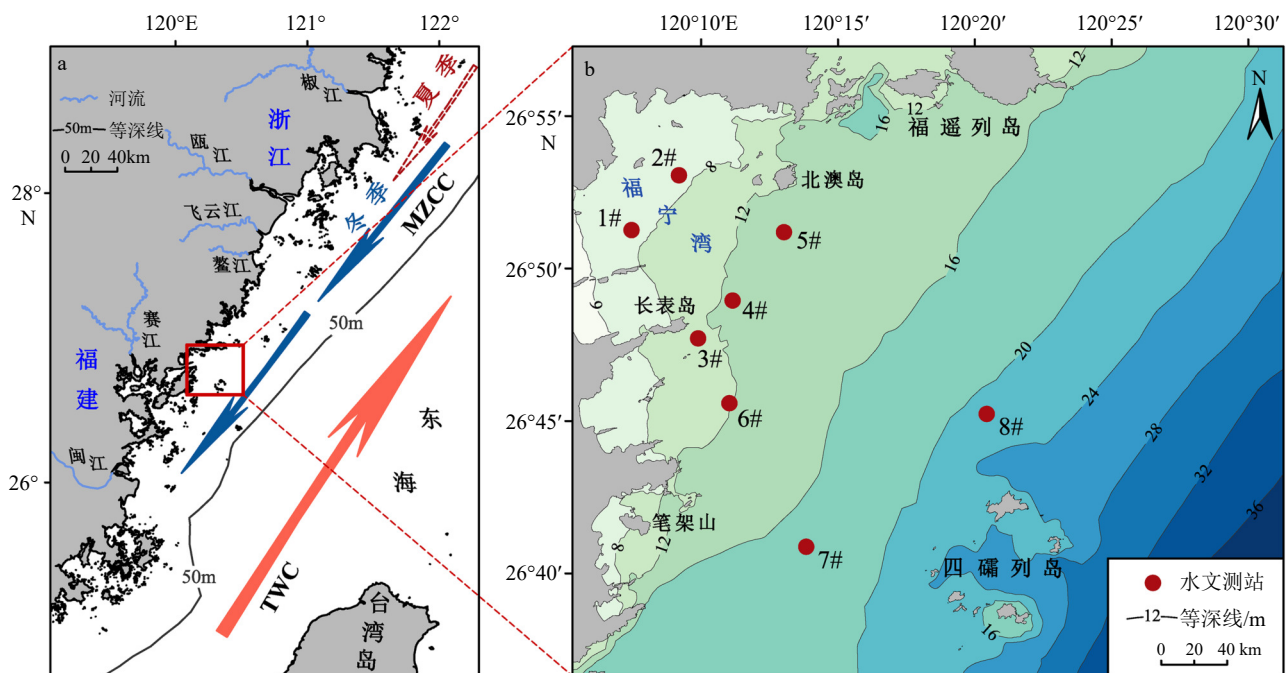


图1 研究区附近流系(a)及调查站位分布(b)

附近流系改自文献[37], MZCC: 闽浙沿岸流, TWC: 台湾暖流。

Fig.1 Distributions of current systems and stations in the study area

Nearby current systems are modified from the reference [37], MZCC: Min-Zhe Coastal Current, TWC: Taiwan Warm Current.

暖流在闽浙沿岸流的东侧海域终年向北流动,位置稳定,年际变化不大^[36]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

浙江省水利河口研究院在闽北福宁湾及附近海域布设了8个同步观测站(图1),分别在冬、夏季大小潮共进行了4次连续26 h的水文泥沙观测(表1),4次观测站位均相同。观测内容包括水深、海流(流速、流向)、含沙量、温度、盐度、悬沙和底质粒度、海面基本气象参数(气温、海况、风速风向)。

水深和海流的观测使用美国RDI公司的剖面流速仪ADCP,观测间隔为30 min,盲区0.5 m,层宽根据水深情况设置成0.25~1.0 m不等,水深直接采用经过吃水改正的ADCP水深。按照6点法(表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H、底层)提取流速、流向数据。

与测流同步使用XCL横式取样器在上述层位采集含沙量水样,每小时(整点)取样一次,每次采水量不少于1 L;水温和盐度的观测使用SST CTD75型温盐深仪,观测时间、观测层位均与含沙量观测同步;另外,在白天潮的4个潮流特征时段(涨急、涨憩、落急、落憩)各取一个悬沙粒度分析样品,取样层位为0.6H层(中下层),单个水样体积为10 L。采用抓斗式取样器在每个调查站位各取一个底质粒度分析样品。

2.2 分析方法

2.2.1 含沙量及粒度测试

含沙量的室内分析采用烘干称重法,具体步骤如下:①烘干烘杯,先将烘杯洗净,放入温度为100~110℃烘箱中烘2 h,后移入干燥器内冷却至室温,再用1/10 000电子天平称重,得到烘杯重。②水样经过48 h沉淀后,抽取部分样品上层清液(一般为涨憩时)进行氯化物分析,根据氯化物浓度决

定是否对样品进行洗盐处理。凡氯化物浓度超过250 mg/L的,均作洗盐处理。③用少量清水将浓缩水样全部冲入烧杯中,加热至无流动水时,移入烘箱,在温度为100~110℃烘箱中烘干,烘干所需时间由试验确定。④烘干后的沙样,及时移入干燥器中冷却至室温,用1/10 000电子天平称重后减去烘杯重,得到每个样品的含沙量。

悬沙及底质粒度测试采用英国Malvern公司的Mastersizer 3000激光粒度仪。测量范围为0.02~2000 μm,中值粒径测量误差不超过1%,实际测量中校正系数、平均粒径、分选系数的内检误差均满足要求。粒度参数采用McManus公式^[38]计算,各个粒度参数评价采用McManus矩值法粒度参数等级表。沉积物命名采用Shepard^[39]分类方法。

2.2.2 水体层化指标

梯度Richardson数^[40](Ri)可以用来判断水体的层化与湍流混合状态,如式(1):

$$Ri = \frac{-g/\rho \cdot \partial\rho/\partial z}{\partial u/\partial z^2 + \partial v/\partial z^2} \quad (1)$$

式中, z 为水深(m), ρ 为水体密度(kg/m^3), u 为流速北分量(m/s), v 为流速东分量(m/s), g 为重力加速度(取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$)。一般认为当 $Ri > 0.25$ 时,水体处于稳定的层化状态,湍流被抑制;当 $Ri < 0.25$ 时,层化效应随着 Ri 减小而减小,流速剪切更容易诱发湍流混合。

2.2.3 悬沙输运通量计算

根据泥沙输运通量公式^[41],分别计算冬、夏两季8个站位26 h(两个潮周期)单宽面积上的潮平均纵向净输沙率 $T_s(\text{g}/\text{s})$,如式(2)、(3):

$$Tr(k) = \int_0^T U_k \cdot C_k \cdot \Delta z_k dt \quad (2)$$

$$T_s = \frac{\sum_{k=1}^6 Tr(k)}{T} \quad (3)$$

式中, $k=1, \dots, 6$,为各层位编号, $U_k(\text{m}/\text{s})$ 为各水层内流速 u 的深度平均值, $C_k(\text{g}/\text{m}^3)$ 为各水层悬沙浓度的深度平均值, $\Delta z_k(\text{m})$ 为各层位高度, T 为潮周期(h), $Tr(k)(\text{g})$ 为潮周期内穿过每一个水层单位宽度面积的净输沙量。

3 结果

3.1 水文泥沙特征

冬季观测期间,研究区平均风速一般不超过

表1 各测次观测时间统计

Table 1 Time statistics of four observations

测次	观测时间
冬季大潮	2019年12月12—13日
冬季小潮	2019年12月17—18日
夏季大潮	2020年6月5—6日
夏季小潮	2020年6月13—14日

6 m/s, 常风向为 NE 向, 以二级海况为主, 波高小于 0.5 m, 属于较平静天气; 夏季观测期间, 研究区平均风速一般不超过 4 m/s, 常风向为 SW 向, 以一级海况为主, 波高小于 0.1 m, 属于平静天气。与冬季相比, 夏季观测期间天气状况较好。

3.1.1 潮流

观测期间潮流流速整体不大(表 2), 冬季研究区平均流速, 大潮期为 0.32 m/s, 小潮期为 0.28 m/s; 夏季研究区平均流速, 大潮期为 0.33 m/s, 小潮期为 0.22 m/s, 流速的季节变化不大, 大小潮差异明显。潮流在湾内较弱, 在湾外较强, 冬、夏季最大流速均出现在湾外 7#站, 分别为 0.74 m/s 和 0.92 m/s。

3.1.2 悬沙浓度

研究区冬季悬沙浓度为 0.020~0.897 kg/m³, 夏季为 0.060 kg/m³~0.178 kg/m³; 各站位垂线平均悬沙浓度, 冬季为 0.060~0.178 kg/m³, 夏季为 0.009~0.032 kg/m³。与冬季同时期相比, 夏季悬沙浓度大幅减少(图 2), 据统计, 各站位冬季大潮悬沙浓度是夏季大潮的 5.6~11.6 倍, 冬季小潮悬沙浓度是夏季小潮的 3.9~13.2 倍。大小潮变化上, 大潮悬沙浓度大于小潮悬沙浓度。

3.1.3 水体层化

本文利用取对数后的梯度 Richardson 数 ($\lg(Ri/0.25)$) 来表征水体层化状态。当 $\lg(Ri/0.25) < 0$, 表明层化较弱, 水体处于湍流混合状态; 当 $\lg(Ri/0.25) > 0$, 表明层化较强, 水体湍流混合受到抑制。本文在冬、夏季大潮期各取典型站位(2#、4#、7#)进行分析, 并给出了 $\lg(Ri/0.25)$ 与悬沙浓度随时间变化的剖面图(图 3)。图 3 显示, 研究区水体层化具有明显的季节差异, 冬季水体垂向混合较强, $\lg(Ri/0.25) > 0$ 的区域仅出现在个别观测时间段的某一层位; 夏季水体层化明显, $\lg(Ri/0.25) > 0$ 的区

表 2 研究区流速特征值

Table 2 Characteristic value of current velocity in the study area

测次	站位	大潮期		小潮期	
		平均流速*	最大流速	平均流速*	最大流速
冬季	1#	0.22	0.60	0.21	0.45
	2#	0.26	0.55	0.21	0.49
	3#	0.37	0.71	0.32	0.55
	4#	0.32	0.60	0.27	0.51
	5#	0.34	0.70	0.28	0.55
	6#	0.33	0.54	0.28	0.54
	7#	0.36	0.74	0.36	0.69
	8#	0.38	0.67	0.34	0.68
夏季	1#	0.23	0.61	0.15	0.35
	2#	0.24	0.66	0.19	0.43
	3#	0.36	0.69	0.20	0.45
	4#	0.31	0.54	0.19	0.33
	5#	0.33	0.75	0.19	0.40
	6#	0.33	0.62	0.21	0.47
	7#	0.44	0.92	0.34	0.75
	8#	0.40	0.83	0.25	0.61

注: *代表垂线平均值。

域由水体表层向下延伸至近底层, 并在潮周期内几乎呈连续分布。

夏季水体受层化结构的影响, 泥沙在垂向上的扩散受到抑制。如图 3 所示, 夏季各站位强层化区 ($\lg(Ri/0.25) > 0$) 基本与悬沙浓度低值区相对应, 0.01 kg/m³ 等值线随着层化边界的变化上下移动, 层化区域内并未观察到悬沙浓度的潮周期变化, 底层泥沙基本不能穿过水体层化边界进入中、上层。

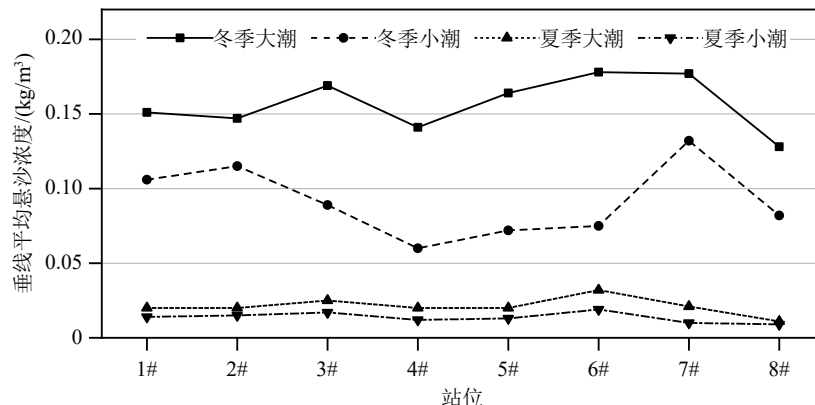


图 2 不同潮周期、不同季节悬沙浓度对比

Fig.2 Comparison of suspended sediment concentration (SSC) in different tides and seasons

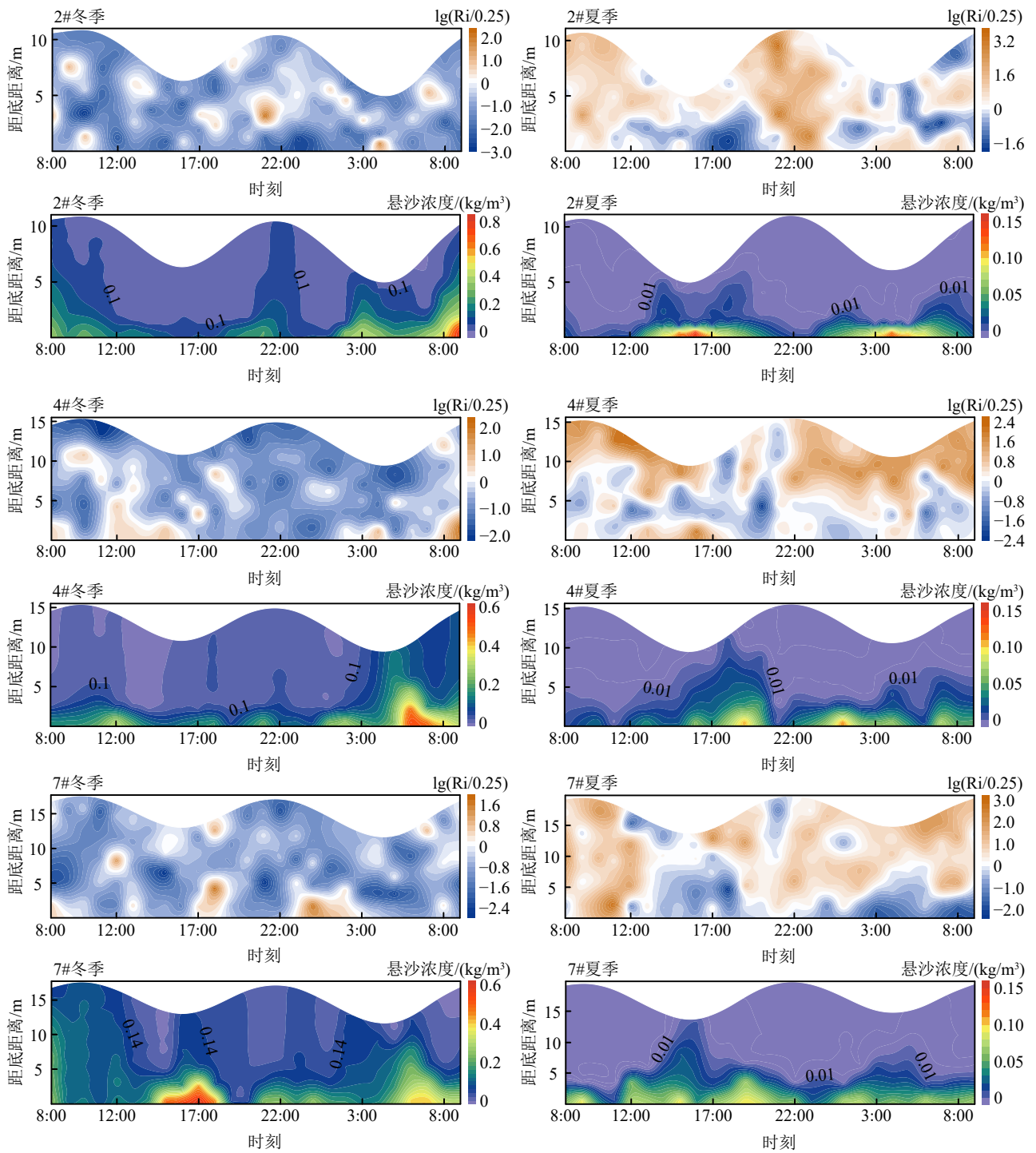


图 3 大潮期 2#、4#、7#站 $\lg(Ri/0.25)$ 与悬沙浓度时间序列
 Fig.3 $\lg(Ri/0.25)$ and SSC time series of 2#, 4# and 7# stations in spring tide

相反, 冬季水体基本不存在层化结构, 悬沙在垂向上的扩散较为充分, 整个剖面上悬沙浓度的潮周期变化显著。

3.2 悬沙粒度特征

3.2.1 悬沙粒度的时空分布

受现场观测条件的限制, 本文所分析的悬沙粒度数据, 均取自水体 $0.6H$ 层(中下层)。粒度分析结

果显示, 正常天气下, 研究区悬沙粒度较细, 中值粒径普遍大于 6.5Φ (表 3)。粒度组成以粉砂为主, 黏土次之, 两者含量之和达 90%, 基本不含砂或砂含量很小, 分选较差一差, 峰态呈很宽平分布, 偏态以近对称为主(表 4)。

(1) 平面分布

悬沙粒径平面分布见表 3, 冬季各站位中值粒径差异较小, 平均中值粒径为 $7.36 \sim 7.53 \Phi$ 。湾内

表3 研究区悬沙中值粒径变化范围

Table 3 Variation range of suspended sediment median grain size in the study area

区域	站位	冬季大潮	冬季小潮	夏季大潮	夏季小潮
湾内	1#	7.45~7.47	7.53~7.62	6.37~7.19	7.06~7.23
	2#	7.28~7.59	7.50~7.56	6.52~7.00	7.17~7.52
湾口	3#	7.39~7.42	7.50~7.65	6.77~6.99	6.83~7.33
	4#	7.39~7.46	7.59~7.70	6.58~6.95	7.01~7.23
	5#	7.28~7.31	7.64~7.74	6.40~6.92	6.51~7.27
	6#	7.31~7.44	7.25~7.51	7.12~7.31	7.34~7.51
湾外	7#	7.32~7.41	7.19~7.53	6.65~6.98	7.16~7.31
	8#	7.09~7.38	7.14~7.62	5.67~6.35	6.83~7.09

表4 悬沙粒度参数

Table 4 Suspended sediment grain size parameters

测次	各组分含量/%			中值粒径/ Φ	平均粒径/ Φ	分选系数	偏态	峰态
	砂	粉砂	黏土					
冬季大潮	1.42	65.95	32.63	7.37	7.45	1.51	0.08	3.43
冬季小潮	1.11	62.31	36.58	7.53	7.63	1.43	0.14	3.34
平均	1.27	64.13	34.61	7.45	7.54	1.47	0.11	3.39
夏季大潮	5.29	72.67	22.04	6.77	6.83	1.68	0.05	3.45
夏季小潮	5.60	64.70	29.69	7.17	7.09	1.81	-0.38	3.73
平均	5.45	68.69	25.87	6.97	6.96	1.75	-0.17	3.59

注：表内数值为研究区站位平均值。

和湾口中值粒径较为接近，平均中值粒径分别为7.48 Φ 和 7.45 Φ ，湾外平均中值粒径为 7.36 Φ ，与湾口和湾内相比略有增大。夏季各站位中值粒径差异较大，平均中值粒径为 6.45~7.31 Φ ，中值粒径最大值出现在湾外 8#站，最小值出现在湾口 6#站。

(2) 季节变化

悬沙粒度季节变化明显(表4)，表现为冬季细、夏季粗的季节分布特征。冬季中值粒径为 7.1~7.7 Φ ，均值为 7.45 Φ 。4~8 Φ (4~63 μm)的粉砂含量最丰富，为 57.2%~71.0%，并且含有一定量 8~12 Φ ($<4\mu\text{m}$)的黏土，为 26.8%~42.6%，砂含量最少，不超过 10%。夏季，中值粒径为 5.7~7.5 Φ ，均值为 6.97 Φ 。粉砂、黏土、砂含量分别为 53.1%~79.2%、12.6%~37.4%、0.8%~20.8%。与夏季相比，冬季悬沙中的黏土含量明显增加，从 25.9% 增加到 34.6%，粉砂和砂含量分别从 68.7% 和 5.5% 减少到 64.1% 和 1.3%。

与夏季相比，冬季悬沙中增加的细粒级部分主要为粒径 $>7\Phi$ ($<8\mu\text{m}$)的极细粉砂和黏土，粒径

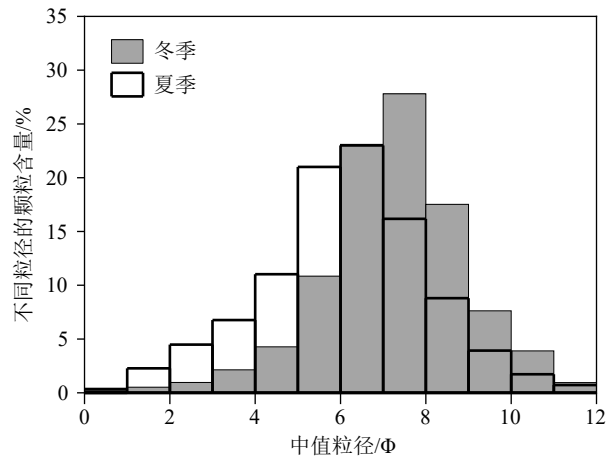


图4 大潮期 8#站悬沙粒径分布

Fig.4 Suspended sediment grain size distribution of 8# station in spring tide

为 6~7 Φ (8~16 μm)的细粉砂含量变化不大，粒径 $<6\Phi$ ($>16\mu\text{m}$)的粒级部分显著减少。从 8#站冬、夏季大潮期悬沙粒径分布来看(图4)，冬季悬沙粒径分布整体向细粒方向移动，悬沙分选变好，峰态变窄。

(3) 大小潮变化

受潮动力变化的影响，大潮悬沙中值粒径明显大于小潮(表4)。冬季大、小潮期间中值粒径均值分别为 7.37 Φ 和 7.53 Φ ，大潮约为小潮的 1.1 倍；夏季大、小潮期间中值粒径均值分别为 6.77 Φ 和 7.17 Φ ，大潮约为小潮的 1.3 倍。冬季大潮期间由于粗颗粒物质的加入，砂、粉砂含量增加，黏土含量相应减少，悬沙粒度变粗，与小潮相比悬沙分选变差，峰态变宽。

夏季则表现出不同的规律，大潮期间粉砂组分增加尤为明显，含量平均增加约为 8%，黏土和砂组分均有不同程度的减少，悬沙粒径分布与小潮相比更为集中，悬沙分选变好，峰态变窄。粉砂组分具有起动流速小、沉降速度大的特征，在潮流和波浪作用下，泥沙运动活跃，易于悬浮和沉降^[42]。夏季大潮期间流速增加明显，水体挟沙力增强，“易悬易沉”的粉砂组分大量进入水体，对含沙量的贡献显著；对于粒径较粗的砂组分，不仅起动需要较高的流速，而且在搬运过程中，由于流速减小也易于沉降，所以很难长时间保持悬浮状态，多数是处于间歇性的悬浮状态；黏土组分的黏聚力强，难以起动，因此悬沙中黏土组分的含量也较少^[5]。

(4) 潮周期变化

由于本文在潮周期尺度上只在白天潮的 4 个特征时段(涨急、涨憩、落急、落憩)获得了悬沙粒度数据，悬沙粒径在时间上精度较低，如果对每个站

位单独分析, 则很难观察到明显的变化规律, 因此, 本文将所有站位作为一个整体分析。

考虑到潮周期内悬沙粒径变化可能与水动力有关, 本文对中值粒径与流速进行相关性分析(图 5), 结果表明, 冬季大、小潮期间, 随着流速的增大, 中值粒径只表现出微弱增大的趋势, 夏季两者的趋势性关系更为复杂。无论冬季还是夏季, 中值粒径与流速的对应关系较为散乱, 两者并没有表现出显著的相关性。悬沙粒径变化与泥沙的再悬浮和沉降过程有关^[43], 流速虽然是重要的影响因素, 但在多数情况下它并不是主导因素^[44]。本次悬沙粒度取样层位位于 $0.6H$ 层, 泥沙从底床向上扩散需要一定的时间, 当流速从极大值开始减小, 但还没有低于再悬浮的临界流速, 泥沙也不会立刻发生沉降, 这可能会造成悬沙粒径的变化滞后于流速变化, 同时, 这一过程还会受到水体混合状态的影响, 较为

复杂的动力过程可能是导致悬沙粒径与流速没有明显相关关系的重要原因。

3.2.2 粒度-标准偏差曲线

从全部样品各粒级含量的粒度-标准偏差曲线可以清楚地看出粒度组成的变化, 其理论研究基于历史上沉积环境变化引起颗粒物的粒度差异, 这种差异在受沉积动力和物质来源显著影响的现代沉积环境中理应存在^[45]。标准偏差大的粒级组分, 其在各样品中的含量变化大, 可以作为指示海洋环境变化的敏感粒级^[46]。

本文对冬、夏季悬沙样品的粒度数据分析后得出粒度-标准偏差曲线(图 6), 可以看出, 冬季粒度-标准偏差曲线呈现明显的双峰分布, 对环境最为敏感的两个高峰值粒级分布范围分别为 $2.8\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 和 $21.1\sim 25.1\ \mu\text{m}$, 其中 $2.8\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 粒级成分为粗黏土, $21.1\sim 25.1\ \mu\text{m}$ 粒级成分为中粉砂。低峰值粒级

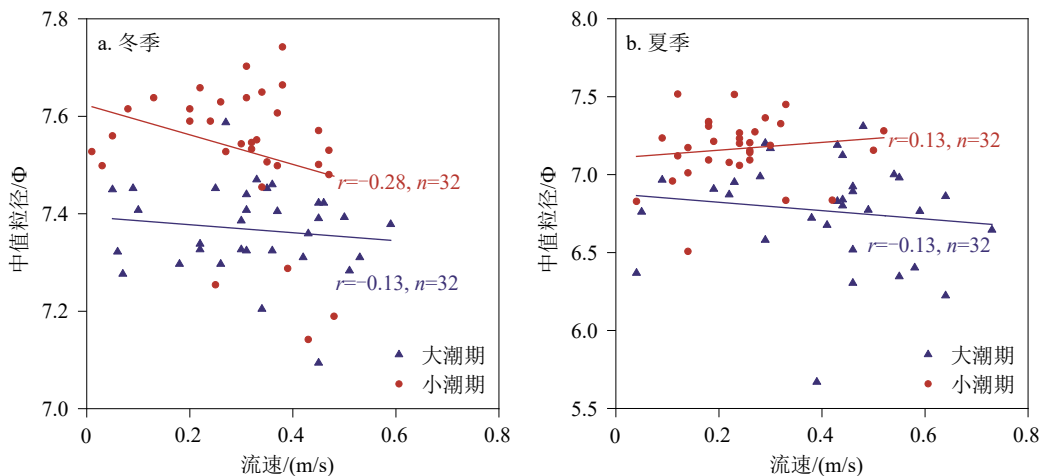


图 5 悬沙中值粒径与流速的相关性

Fig.5 Relationship between suspended sediment median grain size and current velocity

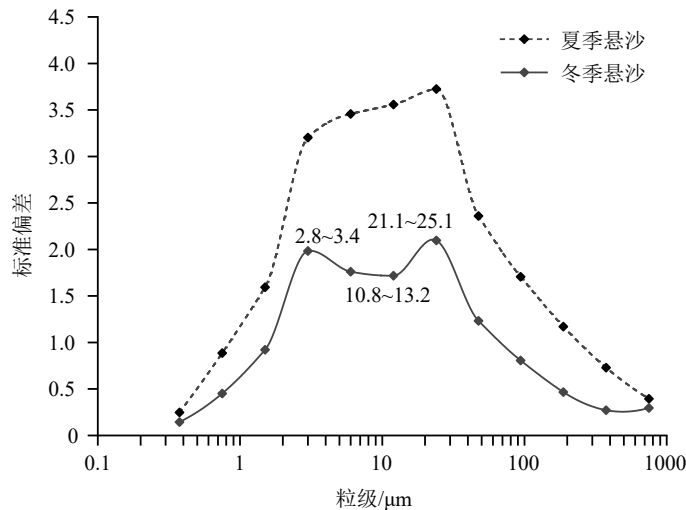


图 6 悬沙的粒度-标准偏差曲线

Fig.6 The standard deviation curve of suspended sediment grain size

分布范围为 $10.8\sim 13.2\ \mu\text{m}$, 对环境的敏感度最差, 粒度成分为细粉砂。这种分布特征与前人在浙闽沿岸泥质沉积区柱状样以及表层沉积物中获得的敏感粒度分布十分接近^[47-48]。与冬季不同的是, 夏季每一粒级的标准偏差都要大于冬季, 粒度-标准偏差曲线虽然变化趋势与冬季基本一致, 但双峰分布特征并不明显, 在细敏感粒度处表现为一个不明显的次峰, 这意味着控制此粒级的海洋环境要素可能发生了变化。

3.3 泥沙输运通量

为探究研究区泥沙净输运趋势, 本文利用同步得到的悬沙浓度和流速剖面计算了两个半日潮周期(26 h)内各站位单宽面积上的潮平均纵向净输沙率。结果表明, 冬季大、小潮期间, 由湾内向湾外净输沙率不断增大(图 7a、图 7b), 湾内 1#、2#站净输沙率较小, 量值均在 $35\ \text{g/s}$ 以下, 方向总体指向近岸; 湾口 3#、4#、5#、6#站净输沙率与湾内相比有明显增大, 量值为 $42.9\sim 137.9\ \text{g/s}$, 大致沿岸由东北指向西南; 湾外 7#、8#站净输沙率最大, 量值均超过

$100\ \text{g/s}$, 方向与湾口站位基本一致。这一特征显示, 冬季研究区悬沙总体输运趋势为由东北向西南, 这与冬季闽浙沿岸流的方向基本一致。薛碧颖等^[21]在闽北近岸海域冬季悬浮体输运通量的研究中也得到了类似的结果, 认为冬季闽浙沿岸流受东北风的驱动, 沿岸向西南方向流动, 使得近岸悬浮体的输运方向总体指向西南。

夏季大、小潮期间, 净输沙率与冬季相比显著减小(图 7c、7d), 各站位量值均在 $10\ \text{g/s}$ 以下, 由湾内向湾外净输沙率逐渐增大, 方向总体由东南指向西北。这与薛碧颖等^[21]在夏季的研究结果存在一定的出入, 这可能与夏季闽浙沿岸流强度减弱有关, 所计算的净输沙率在近岸主要受潮流作用的影响。

4 讨论

4.1 悬沙粒度季节变化的影响因素

研究区悬沙粒度具有冬季细、夏季粗的季节差异, 冬季由于悬沙中细颗粒物(主要指极细粉砂

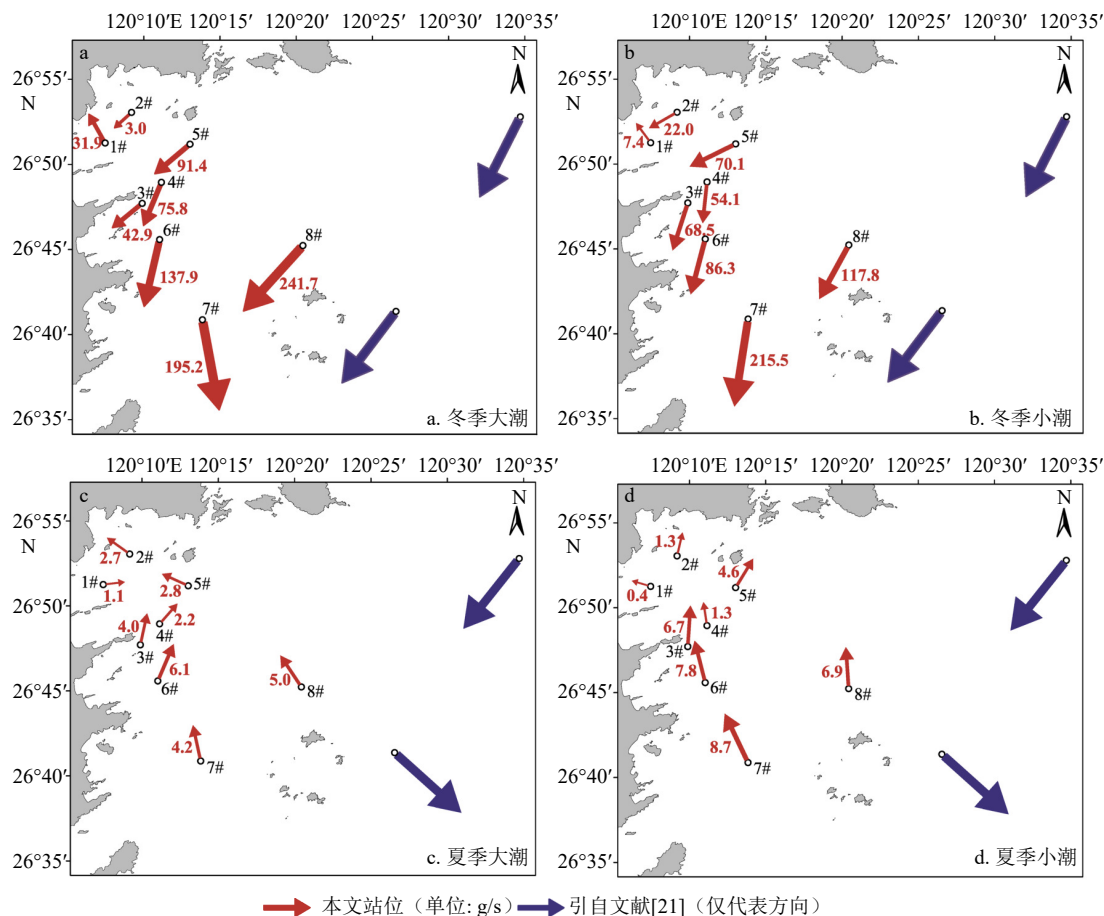


图 7 各站位观测 26 h 悬沙净单宽输运通量

Fig.7 Sediment fluxes at 8 stations based on 26-hour observations

和黏土组分)的相对增加,粒度细于夏季。底质再悬浮和泥沙来源是造成悬沙粒度季节差异的重要因素^[49],本文着重对这两个影响因素进行分析,探讨其对悬沙粒度季节变化的影响。

4.1.1 底质再悬浮

据本文统计,冬季研究区平均流速约为 0.30 m/s,夏季约为 0.28 m/s,潮流动力的季节变化很小。研究区水深较浅,冬季在偏北风的作用下波浪成长迅速,据相关研究统计,福宁湾湾口长表岛附近海域冬季 $H_{1/10}$ 波高平均值约为 1.10 m,夏季约为 0.87 m^[50],冬季波浪动力强于夏季。

研究区沉积物类型以黏土质粉砂为主(表 5),粒度较细,中值粒径均值约为 $7\Phi(16\mu\text{m})$,粒径 $<30\mu\text{m}$ 的黏性泥沙,累计含量占比为 84.6%~94.0%,并含有相当比例的黏土组分($<4\mu\text{m}$),含量普遍超过 25%,属于淤泥质泥沙的范畴^[42, 51]。不同粒径的泥沙在潮流和波浪作用下的起动力遵循 Shields 曲线^[52-53],即当粒径大于 $100\mu\text{m}$ 时,起动力随粒径增大而增大;当粒径小于 $100\mu\text{m}$ 时,由于细颗粒间的黏聚力作用,起动力随粒径减小而增大。由于黏土物质的黏聚力强,其再悬浮需要较强的水动力条件。由本文 3.1.3 节可知,夏季水体普遍存在层化结构,同时在较弱的波浪作用下沉积物再悬浮微弱,研究区平均悬沙浓度低于 0.020 kg/m^3 。冬季水体湍流混合和波浪作用与夏季相比均明显增强,动力增强并克服黏聚力,再悬浮了更多的细颗粒物,悬沙粒度整体变得更细^[54]。

此外,波浪作用深度还与波高呈正相关^[55],冬季更强的波浪可以作用于更深的海床。研究区表层沉积物中值粒径随着水深的增加而减小(表 5),当波浪增强时,其作用深度增大,海底深处粒度更细的沉积物就会悬浮起来,这是冬季悬沙粒度细于夏季的另一个重要原因。

4.1.2 泥沙来源

研究表明,浙闽沿岸诸河、长江以及海岸基岩都是福宁湾附近海域沉积物的潜在物源^[56-57]。福建地区多发育侵蚀型海岸^[58-60],研究区范围内较粗的砂质粉砂和粉砂等沉积物,主要来源于在较强波浪作用下海岸基岩风化产生的粗颗粒物^[50]。福宁湾沿岸还有罗汉溪、长溪三河等源短流少的山溪性小河,以及东冲半岛几条季节性小溪流,流量变化大,每遇洪水季节,有大量泥沙冲入湾内,这些泥沙一般颗粒较粗,以细砂、中砂为多,搬运距离不远,主要在湾顶局部区域堆积。沉积物中的细颗粒物主要为外来输入物质,系长江入海泥沙与浙闽沿

表 5 研究区底质粒度特征

Table 5 Characteristics of sediment grain size in the study area

测次	站位	各组分含量/%			中值粒径/ Φ	沉积物类型
		砂	粉砂	黏土		
冬季	1#	1.50	75.10	23.40	6.78	粉砂
	2#	1.70	73.40	24.90	6.91	黏土质粉砂
	3#	1.30	64.90	33.80	6.64	黏土质粉砂
	4#	6.40	70.30	23.30	6.83	黏土质粉砂
	5#	3.20	67.40	29.40	6.84	黏土质粉砂
	6#	3.50	71.50	25.00	7.31	黏土质粉砂
	7#	2.60	72.40	25.00	7.10	黏土质粉砂
	8#	2.80	66.60	30.60	7.18	黏土质粉砂
夏季	1#	2.10	77.20	20.70	6.62	粉砂
	2#	3.40	72.80	23.80	6.84	黏土质粉砂
	3#	3.30	71.40	25.30	6.75	黏土质粉砂
	4#	6.90	69.00	24.10	6.81	黏土质粉砂
	5#	2.10	69.90	28.00	6.86	黏土质粉砂
	6#	2.30	74.00	23.70	6.93	黏土质粉砂
	7#	2.10	73.90	24.00	7.10	黏土质粉砂
	8#	1.10	69.60	29.30	7.16	黏土质粉砂

岸诸河的泥沙经搬运后在此沉积^[61]。粒级-标准偏差曲线显示,悬沙中对环境最为敏感的两个粒级组分分布范围分别为 $2.8\sim 3.4\mu\text{m}$ 和 $21.1\sim 25.1\mu\text{m}$,这两种主要敏感粒级的出现,应是受上述粗细不同的物质影响,其中粗敏感粒级组分可经落潮流由岸边带入湾内,后经再悬浮进入水体;细敏感粒级组分为黏土,来源于异地河流输入物质(长江与浙闽沿岸诸河沉积物),东海悬浮体“夏储冬输”的季节性输运格局决定了到达本海域异地河流来源物质的输入强度与闽浙沿岸流的强度有关,具有明显的季节性变化^[47, 62]。

闽浙沿岸流是东海内陆架泥沙输运的重要动力^[63-64],起源于长江口一带,主要分布在长江口以南浙闽沿岸 50 m 以浅的海域^[65]。冬季,长江口与杭州湾附近海域受潮流、波浪作用显著,源于洪季就近沉积下来的细颗粒泥沙发生强烈的再悬浮,悬沙浓度急剧升高,部分区域表层悬沙浓度可达 3 kg/m^3 ^[66-67];大量细颗粒泥沙被闽浙沿岸流夹带南下^[68-70],同时,沿岸流在南下过程中还能携带浙闽沿岸诸河沉积物,最远能到达泉州湾附近^[71]。这些泥沙在搬运过程中由于重力分异作用逐渐细化,曾有研究统计,

在杭州湾附近,悬沙中值粒径为 $9.9 \mu\text{m}$,当被搬运到福宁湾北侧的沙埕港附近,悬沙中值粒径已减小至 $3.7 \mu\text{m}$ ^[72],达黏土级范畴,与粒级-标准偏差曲线上的细敏感粒级基本对应,呈现出明显的峰值。夏季,闽浙沿岸流势弱,台湾暖流势强,研究区南部闽江入海的细颗粒物也会随着终年北上的台湾暖流到达研究区附近,但其量值大大减少^[56],在粒级-标准偏差曲线上只呈现出一个不明显的峰值。泥沙净输运通量的计算结果也显示(图7),冬季研究区附近海域悬沙输运总体趋势与闽浙沿岸流方向基本一致,悬沙由东北向西南,由湾外向湾内输运,而在夏季悬沙输运方向转为由东南向西北,输运通量与冬季相比显著减小。

从冬、夏季细粒级组分的级配($<63 \mu\text{m}$)差异来看(图8),冬季总细粒级悬沙中平均有65.7%的 $<8 \mu\text{m}$ 粒级的颗粒,夏季 $<8 \mu\text{m}$ 粒级的颗粒只占总细粒级悬沙量的53.1%,同时冬季含沙量也远高于夏季,因此 $<8 \mu\text{m}$ 粒级的细颗粒较夏季增加非常可观。其中,除本地再悬浮的物质外,闽浙沿岸流向研究区输送的黏土级颗粒($<4 \mu\text{m}$)也占重要组

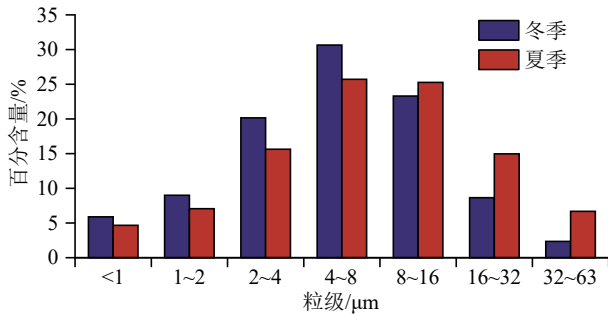


图8 研究区悬沙细粒级部分($<63 \mu\text{m}$)级配

Fig.8 Percentage of fine suspended sediment ($<63 \mu\text{m}$) in the study area

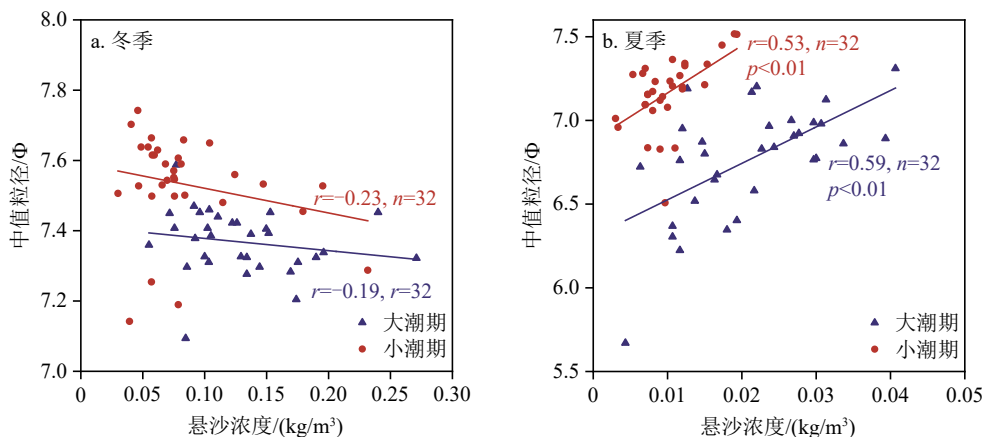


图9 悬沙中值粒径与浓度的相关性

Fig.9 Relationship between suspended sediment median grain size and SSC

成部分,进一步加大了悬沙粒度“冬细夏粗”的季节差异。

4.2 悬沙粒度与浓度的关系

4.2.1 中值粒径与悬沙浓度

就单个站位而言,悬沙粒径和悬沙浓度易受天气状况和波浪等因素的影响,两者趋势性关系不明显,而将多个站位整体分析,两者能表现出较好的相关关系^[73],因此本文将研究区作为一个系统整体进行分析。相关性分析结果显示(图9),夏季大潮期,中值粒径与悬沙浓度在0.99的置信水平上呈显著的线性相关,悬沙粒径随悬沙浓度的增加而减小,小潮期这种线性关系依旧存在。相反,冬季中值粒径与悬沙浓度的相关性较差,随着悬沙浓度的增加,悬沙粒径只呈现出微弱增大的趋势,这种季节差异可能与悬沙来源和混合作用有关^[6]。如前所述,冬季悬沙部分来自较强的底质再悬浮,部分来自闽浙沿岸流向研究区的输送,悬沙粒度组成较为复杂;同时悬沙在垂向上的混合较为剧烈(图3),悬沙浓度在潮周期内的相对变化较大,增加了悬沙粒度组成变化的复杂性,导致中值粒径与悬沙浓度没有显著的相关关系。夏季,由于闽浙沿岸流强度大大减弱,其向研究区的泥沙输送基本中断,水体中的悬沙主要来自本地沉积物的弱再悬浮作用,悬沙粒度组成相对单一;同时夏季悬沙在垂向上的混合较弱(图3),悬沙浓度在潮周期内的相对变化较小,悬沙粒度组成变化相对简单,中值粒径与悬沙浓度存在显著的线性关系。

值得注意的是,夏季无论大小潮,悬沙粒径均随悬沙浓度的减小而增大(图9b)。通常认为,当水动力减小,悬沙以单颗粒的形式发生重力分选沉降

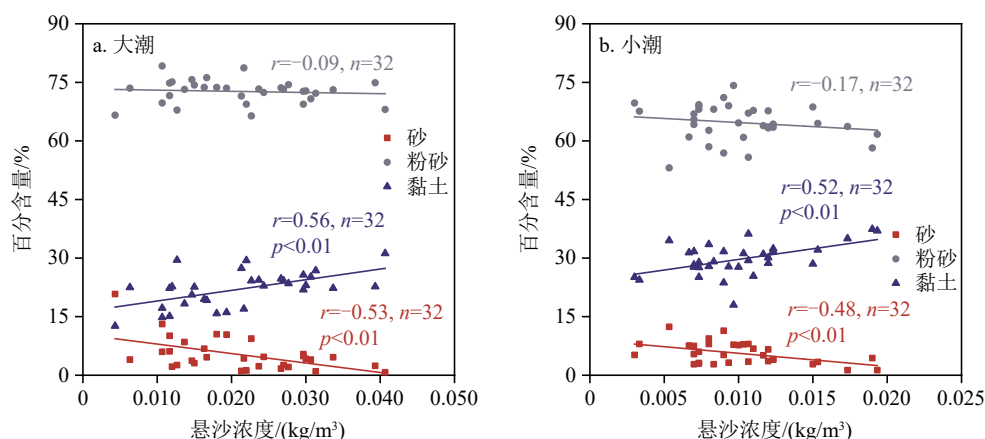


图 10 夏季悬沙各组分与浓度的相关性

Fig.10 Relationship between suspended sediment populations and SSC in summer

时,由于较粗的颗粒首先沉降,悬沙粒径将逐渐减小,以响应动力条件的改变^[74]。相反的是,夏季悬沙中值粒径随着悬沙浓度的减小而增大。研究表明,在以黏性细颗粒($< 30 \mu\text{m}$)为主的悬沙中会发生动水絮凝沉降,且表现为粒径越细,絮凝越强^[75-76]。研究区悬沙中约有 90% 的颗粒集中在 $30 \mu\text{m}$ 以下,当挟沙水流小于某一临界流速时,悬沙发生动水絮凝沉降,与重力分选沉降(以单颗粒的形式由粗到细依次沉降)不同,悬沙中的细颗粒组分相互结合在一起,大小混杂同时落淤^[77]。由于沉降的主体物质是细颗粒,悬沙粒径会随着这些细颗粒的沉降而增大^[78]。

4.2.2 组分与悬沙浓度

悬沙浓度发生变化,悬沙组分必然会发生改变,不同组分对悬沙浓度变化的响应程度也会有所差异。研究区悬沙以粉砂为主,含量高达 70%,对悬沙浓度的贡献度最大,但相关性分析结果表明(图 10),在夏季大潮期,粉砂组分含量与悬沙浓度的相关性较差,粉砂并非是响应悬沙浓度变化的敏感组分;相反,砂和黏土在悬沙中的含量虽然较少,但与悬沙浓度的相关性较好,砂与悬沙浓度在 0.99 的置信水平上呈显著负相关,其含量随着悬沙浓度的减小而增加,而黏土与悬沙浓度在 0.99 的置信水平上呈显著正相关,其含量随着悬沙浓度的减小而减少,这种现象在小潮期依旧存在。黏土组分颗粒较细,絮凝较强,比其他组分更容易结合形成絮凝体而沉降^[76]。当沉降发生时,由于黏土组分作为细颗粒絮凝沉降的重要部分,随着沉降的进行其含量趋于减少。相反,砂组分随着沉降的进行含量却趋于增加,推测砂组分可能并没有参与细颗粒絮凝沉降过程,其含量变化是由悬沙中其他组分含量变化引起的。

5 结论

(1) 正常天气下,研究区悬沙粒度较细,中值粒径普遍大于 6.5Φ 。悬沙粒度具有冬细夏粗的季节分布特征,冬季 $> 7 \Phi$ ($< 8 \mu\text{m}$) 粒级部分与夏季相比增加明显;受潮动力影响,悬沙粒度大小潮变化明显;潮周期内悬沙粒径变化规律不明显。悬沙粒级-标准偏差曲线显示两种主要的敏感粒级分布范围为 $2.8 \sim 3.4 \mu\text{m}$ 和 $21.1 \sim 25.1 \mu\text{m}$ 。

(2) 底质再悬浮和泥沙来源是造成悬沙粒度季节差异的主要原因。冬季较强的波浪和水体垂向混合导致大量细粒沉积物的再悬浮,以及闽浙沿岸流携带的细颗粒泥沙的输入共同造成了研究区悬沙“冬细夏粗”的季节差异。

(3) 冬季悬沙粒径与浓度不存在相关性,夏季两者存在显著的线性关系,悬沙粒径随悬沙浓度的增加而减小,这种季节差异可能与悬沙来源和混合作用有关。夏季悬沙粒径的粗化可能与细颗粒发生絮凝沉降有关。不同组分对悬沙浓度变化的响应程度不同,夏季,黏土组分与悬沙浓度呈显著正相关,砂组分与悬沙浓度呈显著负相关,粉砂组分对悬沙浓度变化的响应最差。

参考文献 (References)

- [1] Walling D E, Moorehead P W. The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: an overview [J]. *Hydrobiologia*, 1989, 176 (1): 125-149.
- [2] 严肃庄, 曹沛奎. 长江口悬浮体的粒度特征 [J]. *上海地质*, 1994 (3): 50-58. [YAN Suzhuang, CAO Peikui. The grain-size characteristics of the suspended matters in the Changjiang Estuary [J]. *Shanghai Geology*, 1994 (3): 50-58.]

- [3] 陈语, 何青, 张迨, 等. 长江口浑浊带枯季悬沙粒度分布特征[J]. 泥沙研究, 2016(1): 24-30. [CHEN Yu, HE Qing, ZHANG Dai, et al. Grain size distribution of suspended sediment in Yangtze River Estuary turbidity maximum in dry season [J]. Journal of Sediment Research, 2016(1): 24-30.]
- [4] Szymczak E, Burska D. Distribution of suspended sediment in the gulf of Gdansk off the Vistula River mouth (Baltic Sea, Poland) [J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2019, 221(1): 012053.
- [5] 曹沛奎, 严肃庄. 长江口悬沙锋及其对物质输移的影响[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 1996(1): 85-94. [CAO Peikui, YAN Suzhuang. Suspended sediments front and its impacts on the materials transport of the Changjiang Estuary [J]. Journal of East China Normal University:Natural Science, 1996(1): 85-94.]
- [6] 王爱军, 汪亚平, 高抒, 等. 长江口枯季悬沙粒度与浓度之间的关系[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 159-167. [WANG Aijun, WANG Yaping, GAO Shu, et al. Relationship between suspended sediment grain size and concentration in the Changjiang Estuary area during dry season [J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 159-167.]
- [7] 李九发, 何青, 张琛. 长江河口拦门沙河床淤积和泥沙再悬浮过程[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(1): 101-109. [LI Jiufa, HE Qing, ZHANG Chen. A study on sediment deposition and resuspension in the mouth bar area of the Changjiang River Estuary [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(1): 101-109.]
- [8] 王飞, 李九发, 李占海, 等. 长江口南槽河道水沙特性及河床沙再悬浮研究[J]. 人民长江, 2014, 45(13): 9-13. [WANG Fei, LI Jiufa, LI Zhanhai, et al. Research on flow and sediment characteristics and bed sediment re-suspension in South Passage of Yangtze River Estuary [J]. Yangtze River, 2014, 45(13): 9-13.]
- [9] Li Z H, Wang Y P, Cheng P, et al. Flood-ebb asymmetry in current velocity and suspended sediment transport in the Changjiang Estuary [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(10): 37-47.
- [10] 张俊儒. 长江口最大浑浊带表层悬浮物浓度及粒径对水体光谱特性影响的研究[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2010. [ZHANG Junru. Research of suspended sediment concentration and size distribution impact on the water spectrum at the maximum turbid zone of Yangtze River Estuary[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2010.]
- [11] Fettweis M, Baeye M, Lee B J, et al. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea) [J]. Geo-Marine Letters, 2012, 32(2): 123-137.
- [12] Bainbridge Z T, Wolanski E, Álvarez-Romero J G, et al. Fine sediment and nutrient dynamics related to particle size and floc formation in a Burdekin River flood plume, Australia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 65(4-9): 236-248.
- [13] 邓智瑞, 何青, 杨清书, 等. 珠江口磨刀门泥沙絮凝特征[J]. 海洋学报, 2015, 37(9): 152-161. [DENG Zhirui, HE Qing, YANG Qingshu, et al. Observations of in situ flocs characteristic in the Modaomen Estuary of the Pearl River [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(9): 152-161.]
- [14] 张存勇. 连云港近岸海域沉积物再悬浮及悬沙动力研究[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2011. [ZHANG Cunyong. Study on sediment resuspension and dynamics in the Lianyungang nearshore area[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2011.]
- [15] 刘红, 何青, Jan Weltje G, 等. 长江入海泥沙的交换和输移过程: 兼论泥质区的“泥库”效应[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 291-304. [LIU Hong, HE Qing, Jan Weltje G, et al. Sediment exchange and transport processes in the Yangtze River Estuary: concurrent discussion on the effects of sediment sink in the muddy area [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 291-304.]
- [16] 杨云平, 张明进, 樊咏阳, 等. 长江河口悬沙颗粒特征变化趋势及成因[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1203-1218. [YANG Yunping, ZHANG Mingjin, FAN Yongyang, et al. Variation trend and causes of suspended sediment characteristic in Yangtze Estuary [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1203-1218.]
- [17] 张凯南, 王珍岩, 王保铎. 2012年春季南海南部不同水团上层海水中悬浮体分布特征及其物源分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(3): 26-36. [ZHANG Kainan, WANG Zhenyan, WANG Baoduo. Distribution characteristics and provenance of suspended matter in upper water of the southern South China Sea during the spring of 2012 [J]. Marine Sciences, 2014, 38(3): 26-36.]
- [18] Skinnelbach K H, Fruergaard M, Andersen T J. Biological effects on flocculation of fine-grained suspended sediment in natural seawater [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 228: 106395.
- [19] 刘启贞. 长江口细颗粒泥沙絮凝主要影响因子及其环境效应研究[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2007. [LIU Qizhen. Study on the flocculation parameters of fine sediments and the environmental effects in the Changjiang Estuary[D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2007.]
- [20] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong. Geology of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987.]
- [21] 薛碧颖, 王厚杰, 张勇, 等. 闽北附近海域悬浮体输运及通量的季节变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(5): 30-40. [XUE Biying, WANG Houjie, ZHANG Yong, et al. Seasonal variations of suspended sediments in transport and flux in the coastal area of the northern Fujian Province [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(5): 30-40.]
- [22] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 705-727. [LI Anchun, ZHANG Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 705-727.]
- [23] 徐方建, 李安春, 黄敬利. 东海陆架浙-闽沿岸泥质沉积研究进展[J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 97-104. [XU Fangjian, LI Anchun, HUANG Jingli. Research progress in the mud deposits along the Zhe-Min coast of the East China Sea continental shelf [J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 97-104.]
- [24] Yang Z S, Lei K, Guo Z G, et al. Effect of a winter storm on sediment transport and resuspension in the distal mud area, the East China Sea [J]. Journal of Coastal Research, 2007, 23(2): 310-318.
- [25] 王凯, 卢昕晖, 施心慧. 东海混浊海域悬沙浓度的三维数值模拟及与观测的比较[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(6): 884-891. [WANG Kai, LU Xinhui, SHI Xinhui. A three-dimensional sediment transport mod-

- el in the offshore area near the Changjiang Estuary: a case study [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(6): 884-891.]
- [26] Bian C W, Mao X Y, Jiang W S, et al. ADV-based estimates of sediment settling velocity on the shelf of the Yellow and East China seas: evidence of marked seasonal and intra-tidal variations [J]. *Geo-Marine Letters*, 2015, 35(1): 53-60.
- [27] 刘世东, 乔璐璐, 李广雪, 等. 东海内陆架悬浮体输运、通量及季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(1): 24-39. [LIU Shidong, QIAO Lulu, LI Guangxue, et al. Transport and flux of suspended sediment and its seasonal variation over the inner shelf of the East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(1): 24-39.]
- [28] 雷栋, 王珍岩, 李文建. 夏季东海陆架不同水团对悬浮体物质组成及粒度分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(4): 740-751. [LEI Dong, WANG Zhenyan, LI Wenjian. Impact of water masses on composition and particle size distribution of suspended particulate matter over the East China Sea shelf in summer [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(4): 740-751.]
- [29] 朱子晨, 胡泽建, 刘建强, 等. 不同悬沙组分对潮流的响应关系研究[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(1): 103-112. [ZHU Zichen, HU Zejian, LIU Jianqiang, et al. Study on the response of suspended sediment with different compositions to tidal current [J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(1): 103-112.]
- [30] 董永发, 曹沛奎. 浙闽淤泥质港湾的沉积特征[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 1996(2): 77-83. [DONG Yongfa, CAO Peikui. Sedimentary characteristics of the muddy bays in the Zhejiang and Fujian provinces [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 1996(2): 77-83.]
- [31] 伊兆晗, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域夏季大潮期悬浮泥沙输运特征及控制因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 53-66. [YI Zhaohan, HU Rijun, LI Yi, et al. Characteristics and controlling factors of suspended sediment transportation in summer spring tide in Funing Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 53-66.]
- [32] 江甘兴. 福建海区的潮汐和潮流[J]. *台湾海峡*, 1992(2): 89-94. [JIANG Ganxing. Tides and tidal currents in Fujian waters [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1992(2): 89-94.]
- [33] 孟令鹏, 胡日军, 李毅, 等. 福宁湾海域冬季大潮期悬浮泥沙输运特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 61-73. [MENG Lingpeng, HU Rijun, LI Yi, et al. Transport characteristics of suspended sediment in Funing Bay during spring tide in winter [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(3): 61-73.]
- [34] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [LI Jiabiao. *Regional Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.]
- [35] Guan B X, Fang G H. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: A review [J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(1): 1-24.
- [36] Yuan D L, Zhu J R, Li C Y, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1-2): 134-149.
- [37] Guan B X. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas [M]//Zhao D, Liang Y B, Zeng C K. *Oceanology of China Seas*. Dordrecht: Springer, 1994: 17-26.
- [38] McManus J. Grain size determination and interpretation [M]//Tucker M. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85.
- [39] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(3): 151-158.
- [40] Trowbridge J H. A simple description of the deepening and structure of a stably stratified flow driven by a surface stress [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, 97(C10): 15529-15543.
- [41] 滕立志. 长江口北港最大浑浊带沉积动力过程对围垦工程自适应机理研究[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2022. [TENG Lizhi. On the mechanism behind the nature behaviour of sediment dynamics within the turbidity maximum zone in Reponse to reclamations in the north channel of Yangtze estuary [D]. Doctor Dissertation of East China Normal University, 2022.]
- [42] 李占海, 高抒, 陈沈良. 江苏大丰滩涂底质与悬沙的粒径组成特征[J]. *泥沙研究*, 2007(3): 30-37. [LI Zhanhai, GAO Shu, CHEN Shenliang. Characteristics of grain size distributions of seabed and suspended sediment over the Dafeng tidal flat of Jiangsu Coast [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(3): 30-37.]
- [43] 李占海, 陈沈良, 张国安. 长江口崇明东滩水域悬沙粒径组成和再悬浮作用特征[J]. *海洋学报*, 2008, 30(6): 154-163. [LI Zhanhai, CHEN Shenliang, ZHANG Guoan. The study on grain-size distribution of suspended sediment and resuspension process on the Chongming east intertidal and subtidal zones in the Changjiang Estuary in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 154-163.]
- [44] 李东义, 徐勇航, 王爱军, 等. 福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析[J]. *沉积学报*, 2015, 33(4): 724-734. [LI Dongyi, XU Yonghang, WANG Aijun, et al. Analysis of surface sediment grain size characteristics and modern sedimentary process in Fujian Anhai Gulf [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 724-734.]
- [45] 苏世兵. 辽东半岛碧流河口潮滩沉积环境特征及其影响因素分析[D]. 辽宁师范大学硕士学位论文, 2022. [SU Shibing. *Sedimentary environment characteristics and influencing factors of tidal flats at Biliu estuary in Liaodong Peninsula* [D]. Master Dissertation of Liaoning Normal University, 2022.]
- [46] 王可, 郑洪波, Prins M, 等. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 1-10. [WANG Ke, ZHENG Hongbo, Prins M, et al. High-resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 1-10.]
- [47] 李云海, 陈坚, 黄财宾, 等. 浙闽沿岸南部泥质沉积中心表层沉积物粒度特征及其季节性差异[J]. *沉积学报*, 2010, 28(1): 150-157. [LI Yunhai, CHEN Jian, HUANG Caibin, et al. Grain-size characteristics of the surface sediments and their seasonal variability in the mud depositor off the southern Zhejiang-Fujian coast [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 150-157.]
- [48] 李军, 高抒, 曾志刚, 等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 499-510. [LI Jun, GAO Shu, ZENG Zhigang, et al. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matters in the Changjiang River Estuary [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 499-510.]

- [49] 郭俊杰, 胡日军, 陈娟娟, 等. 福建福宁湾表层沉积物粒度特征及沉积动力环境分区[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(5): 50-59. [GUO Junjie, HU Rijun, CHEN Juanjuan, et al. Grain size characteristics of surface sediments and subdivisions of dynamic sediment environment in Funing Bay, Fujian province [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(5): 50-59.]
- [50] 杨华. 关于淤泥质海岸与粉沙质海岸界定的探讨[J]. 水道港口, 2008, 29(3): 153-157. [YANG Hua. Study on definition of muddy coast and silty coast [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008, 29(3): 153-157.]
- [51] 曹祖德, 孔令双. 粉沙质海岸泥沙运动特性研究[J]. 海洋学报, 2011, 33(5): 152-162. [CAO Zude, KONG Lingshuang. Sediment problems of harbor on silt-sandy beach [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 33(5): 152-162.]
- [52] Shields A. Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung[D]. Doctor Dissertation of Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau, 1936.
- [53] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1-9. [DOU Guoren. Incipient motion of coarse and fine sediment [J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1-9.]
- [54] Xiong C B, Bian S H, Hu Z J, et al. Characteristics and resuspension-subsidence movement of suspension after storm in Ningjin Shidao sea, China[C]//The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui: The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011: 19-24.
- [55] 刘红, 何青, 王亚, 等. 长江河口悬浮泥沙的混合过程[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1269-1281. [LIU Hong, HE Qing, WANG Ya, et al. Processes of suspended sediment mixture in the Yangtze River estuary [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1269-1281.]
- [56] Bian S H, Hu Z, Liu J Q, et al. Sediment suspension and the dynamic mechanism during storms in the Yellow River Delta [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(1): 3.
- [57] 宁泽, 韩宗珠, 毕世普, 等. 浙闽近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 34-44. [NING Ze, HAN Zongzhu, BI Shipu, et al. Rare earth geochemistry of coastal surficial sediments off Zhejiang and Fujian provinces and its implications for provenance [J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(8): 34-44.]
- [58] 张兴泽, 朱丽东, 胡凯程, 等. 浙闽沿岸泥质滩沉积磁性特征及其物源判别[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 774-786. [ZHANG Xingze, ZHU Lidong, HU Kaicheng, et al. Sedimentary magnetic characteristics and provenance identification of muddy tidal flats along the coast of Zhejiang and Fujian [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(3): 774-786.]
- [59] 徐茂泉, 许文彬, 孙美琴, 等. 福建兴化湾表层沉积物中重矿物组分及其分布特征[J]. 海洋学报: 中文版, 2004, 26(5): 74-82. [XU Maoquan, XU Wenbin, SUN Meiqin, et al. The characteristics of heavy minerals composition and distribution in surface sediment from the Xinghua Bay of Fujian [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(5): 74-82.]
- [60] 杨蕙, 郑斌鑫, 于东生, 等. 福建平海湾外湾表层沉积物粒度特征及冲淤变化[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(2): 233-242. [YANG Hui, ZHENG Binxin, YU Dongsheng, et al. Characteristics of surface sediment grain size and the erosion/deposition evolution in the outer Pinghai Bay, Fujian [J]. Journal of Applied Oceanography, 2017, 36(2): 233-242.]
- [61] 王兆夺, 于东生. 泉州湾表层沉积物粒度与元素地球化学特征分析[J]. 应用海洋学学报, 2015, 34(4): 568-579. [WANG Zhaoduo, YU Dongsheng. Analysis on the grain size and the geochemical characteristics of surface sediments in Quanzhou Bay [J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(4): 568-579.]
- [62] 黄龙, 张志珣, 耿威, 等. 闽浙沿岸东部海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 161-169. [HUANG Long, ZHANG Zhixun, GENG Wei, et al. Grain size of surface sediments in the eastern Min-Zhe coast: an indicator of sedimentary environments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(6): 161-169.]
- [63] 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. [LIU Shengjing, GAO Jianhua, XU Xiaomei, et al. Response of sediment grain size composition of the Zhe-Min coastal mud to the sediment load reduction of the Changjiang River entering the sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2021, 43(3): 105-115.]
- [64] Li Y H, Qiao L, Wang A J, et al. Seasonal variation of water column structure and sediment transport in a mud depo-center off the Zhejiang-Fujian coast in China [J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(6): 679-690.
- [65] 陈瑞瑞. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸输运近期变化的遥感分析[D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2017. [CHEN Ruirui. Remote sensed analysis of the suspended sediment variations from the Yangtze Estuary to Zhejiang-Fujian provincial coastal waters[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2017.]
- [66] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(7): 1123-1134. [ZENG Dingyong, NI Xiaobo, HUANG Daji. Temporal and spatial variability of the Zhe-Min coastal current and the Taiwan Warm current in winter in the southern Zhejiang coastal sea [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2012, 42(7): 1123-1134.]
- [67] 陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 260-266. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, YANG Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 260-266.]
- [68] 陶建峰, 嗣宇, 康彦彦, 等. 杭州湾及甬江口外海域悬沙时空动态研究[C]//窦希萍, 左其华. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 舟山: 海洋出版社, 2017: 370-374. [TAO Jianfeng, KUI Yu, KANG Yanyan, et al. Study on temporal and spatial dynamics of suspended sediment in Hangzhou Bay and the Sea Area outside the Yongjiang Estuary[C]//DOU Xiping, ZUO Qihua. Proceedings of the 18th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium (Part 2). Zhoushan: Ocean Press, 2017: 370-374.]
- [69] 恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全. 利用卫星象片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题[J]. 海洋与湖泊, 1981, 12(5): 391-401. [YUN Caixing, CAI Mengyi, WANG Baoquan. An analysis of the diffusion of suspended sediment discharged from the Changjiang River based on the satellite

- images [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1981, 12(5): 391-401.]
- [70] 蔡爱智. 长江入海泥沙的扩散[J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 78-88. [CAI Aizhi. Diffusion of sediments of the Changjiang River discharging into the sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(1): 78-88.]
- [71] Milliman J D, Chen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1-2): 37-45.
- [72] 周笑笑, 陈秀玲, 范逸飞, 等. 福建近岸罗源湾沉积环境及表层沉积物物质来源探讨[J]. 第四纪研究, 2021, 41(5): 1281-1293. [ZHOU Xiaoxiao, CHEN Xiuling, FAN Yifei, et al. Discussion on the sedimentary environment and provenance of surface sediment in Luoyuan Bay offshore of Fujian province [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1281-1293.]
- [73] 刘苍宇, 郭成涛. 福建沙埕港的沉积特征与泥沙来源研究[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 344-352. [LIU Cangzi, GUO Chengtao. Sedimentary characteristics and sediments source of the Shacheng Bay, Fujian province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(4): 344-352.]
- [74] 张开泉, 刘焕芳. 悬移质分选沉降及其在工程上的应用[J]. 泥沙研究, 1999(5): 31-35. [ZHANG Kaiquan, LIU Huanfang. Sort settling of suspended load and its engineering application [J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(5): 31-35.]
- [75] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983. [QIAN Ning, WAN Zhaohui. *Mechanics of Sediment Transport*[M]. Beijing: Science Press, 1983.]
- [76] 黄建维. 粘性泥沙在静水中沉降特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981(2): 30-41. [HUANG Jianwei. Experimental study of settling properties of cohesive sediment in still water [J]. *Journal of Sediment Research*, 1981(2): 30-41.]
- [77] 黄建东. 几种沉积物粒度参数间的相关关系[J]. 台湾海峡, 1988, 7(3): 72-79. [HUANG Jiandong. Correlative relationships between the grain-size parameters by different authors [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1988, 7(3): 72-79.]
- [78] 蒋国俊. 潮滩悬沙粒度参数的动力沉积学意义[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 90-97. [JIANG Guojun. The dynamic sedimentological meaning of grain-size parameters of tidal flat suspended sediments [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(1): 90-97.]