

张恺云, 梁泓樾, 王璞, 等. 盐水楔河口絮凝体分布规律及控制因素——以珠江磨刀门为例[J]. 海洋学报, 2024, 46(6): 84–97, doi:10.12284/hyxb2024067

Zhang Kaiyun, Liang Hongyue, Wang Pu, et al. Distribution pattern of flocsand and its controlling factors in a saltwater-wedge estuary: A case study of the Modaomen Estuary of the Pearl (Zhujiang) River[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(6): 84–97, doi:10.12284/hyxb2024067

盐水楔河口絮凝体分布规律及控制因素

——以珠江磨刀门为例

张恺云¹, 梁泓樾¹, 王璞¹, 李海威¹, 魏稳¹, 蔡华阳¹, 刘锋^{1,2*}, 朱磊³

(1. 中山大学海洋工程与技术学院河口海岸研究所, 广东 广州 510275; 2. 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛, 2660613; 3. 中山大学海洋科学学院, 广东 广州 510275)

摘要: 细颗粒泥沙絮凝是影响河口泥沙输移扩散的关键过程, 受控于河口复杂动力结构, 其中河口水体层化环境下絮凝体空间分布规律亟待探究。针对该问题, 本文基于 2020 年珠江磨刀门河口枯季大面积走航原型观测数据, 分析磨刀门河口絮凝体时空分布特征, 探究不同动力对其影响作用, 揭示水体层化下絮凝体分布规律。结果表明, 观测期间磨刀门河口絮凝体中值粒径介于 1.87~395.53 μm , 体积浓度介于 20.29~1 495.67 $\mu\text{L/L}$; 垂向上, 中表层水体中值粒径多大于底层, 平面上最大值多位于中心拦门沙和西侧。采用多峰分解方法可将磨刀门河口絮凝体分解为基本颗粒和絮凝核(统称微絮团)、小絮团、大絮团等组分, 大絮团占比最大; 总体来讲, 中表层水体微絮团和小絮团体积浓度小于底层, 底层大絮团体积浓度小于中表层。这与盐水楔河口动力结构密切相关, 强盐度层化抑制絮凝体在各水层间的交换, 导致表层水体大絮团占比远高于中底层, 而底层絮凝体受湍流剪切强度影响, 以解絮为主, 小絮团和微絮团占比高。本研究不仅有助阐明复杂动力结构下细颗粒泥沙絮凝机制, 也能为磨刀门河口拦门沙治理、水沙调控及航道疏浚等提供技术支撑。

关键词: 磨刀门河口; 絮凝体粒级分解; 空间差异; 盐度层化; 水体紊动

中图分类号: P734.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)06-0084-14

1 引言

径流携带来的泥沙多以悬沙形式向海输移扩散, 不仅为河口淤积提供物质来源, 也是污染物与营养盐运动的载体^[1]。在河口复杂动力结构作用下, 泥沙往往会经历起动、悬浮、沉降、再悬浮的循环过程; 在此过程中, 单颗粒泥沙可在物理、化学和生物等作用下发生絮凝, 形成粒径远大于单颗粒泥沙的絮凝体, 这也是河口粘性细颗粒泥沙常见的存在方式^[2-4]。絮

凝过程会改变细颗粒泥沙的平均粒径、密度、沉速等性质, 对泥沙的输运与沉降过程产生显著影响^[5-6]。研究河口絮凝体发育的时空分布及影响因素不仅有助于深化理解河口细颗粒泥沙运动机制, 也能为水沙调控、河口治理、航道建设与维护提供理论依据^[7-8]。

絮凝体特性包括粒径、体积浓度、形状、密度、沉速等^[9-11], 其中, 粒度分布特征是细颗粒黏性泥沙絮凝与解絮相平衡的结果, 反映了细颗粒泥沙发育特征^[12]。河口絮凝体粒径呈多模态分布, 其分布曲线通

收稿日期: 2024-02-09; 修订日期: 2024-05-24。

基金项目: 国家自然科学基金(42076171); 自然资源部海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金(2021COSIMZ002); 国家自然科学基金(42376164); 广东省基础与应用基础研究基金项目区域联合基金-青年项目(2020A1515110367)。

作者简介: 张恺云(2000—), 女, 广东省珠海市人, 主要从事河口海岸过程研究。E-mail: zhangky23@mail2.sysu.edu.cn

* **通信作者:** 刘锋(1986—), 男, 山东省曲阜市人, 副教授, 博士生导师, 主要从事河口海岸过程与工程研究。E-mail: liuf53@mail.sysu.edu.cn

常由多个对数正态分布曲线叠加而成^[13-14]; 据研究表明, 实际河口环境中的絮凝体一般由4个符合正态分布的假想絮凝结构的粒径组合, 包括基本粒子(0~4 μm)、絮凝核(4~20 μm)、小絮团(20~200 μm)和大絮团(>200 μm)^[10,15]。因此, 研究河口絮凝体粒径特征及其空间分布有助于揭示细颗粒泥沙絮凝过程与机制。

在河口环境中, 影响絮凝过程因素有很多, 包括泥沙自身特性、介质因素、水动力因素等^[12,16-17]。其中, 河口动力是控制细颗粒泥沙絮凝的关键因素, 如水体紊动通过影响泥沙颗粒发生碰撞的几率或对颗粒加以剪切力来影响絮凝过程, 且存在临界值, 低于临界值时, 随着紊动剪切增强, 絮凝作用增强, 高于临界值时, 随着紊动剪切增强, 解絮作用增强^[18-19]。此外, 不同类型河口盐淡水混合对絮凝体发育产生不同影响, 其中, 盐水楔河口受径流影响较强, 河口水体高度层化, 纵向上盐水楔发育显著^[20]。Zhang等^[21]通过研究珠江河口絮凝体发育规律发现, 盐度层化导致的密度跃层对絮凝体具有捕集作用, 该区域大絮团(>200 μm)体积浓度最大, 是最佳絮凝区。现有研究在盐度层化对絮凝体发育的影响作用方面已有一定成果, 但盐水楔河口不同粒径絮凝体分布模式研究涉及较少。因此, 亟待开展盐水楔河口絮凝体分布规律及影响因素研究。

针对以上问题, 本文基于2020年珠江磨刀门河口枯季大面积走航原型观测数据, 分析磨刀门河口絮凝体粒径结构组成、时空分布规律, 研究影响絮凝体时空分布的影响因素, 揭示磨刀门盐水楔河口絮凝体

分布模式。本研究不仅有助阐明复杂动力结构下细颗粒泥沙絮凝机制, 也能为磨刀门河口拦门沙治理、水沙调控及航道疏浚等提供技术支撑。

2 研究区域

珠江作为中国径流量第二大的河流, 其支流众多, 主要支流包括西江、北江和东江, 其中西江是珠江径流量与输沙量最大的支流, 其平均年径流量为 $2.17 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 平均年输沙量为 $6.45 \times 10^7 \text{ t}$ ^[22], 占总径流量和输沙量的77%、89%^[23]。磨刀门河口是珠江入海八大口门之一, 同时也是西江最主要的输水输沙通道, 其径流量与输沙量分别约占珠江入海八大口门的28%、33%^[24]。磨刀门河口潮汐类型为不规则半日混合潮, 潮差较小, 位于口门处的三灶站年均潮差约为1.1 m, 多年平均山潮比为5.77^[25]。洪季径流量大, 海洋动力作用影响相对较小; 枯季径流量小, 径潮相互作用相对增强, 但径流对河口仍具有较强影响作用^[26], 河口水体盐度层化程度普遍较强, 盐水楔发育显著。在径潮相互作用下, 径流携带的大量泥沙沉积于磨刀门河口, 在口门外发育拦门沙, 水流主要经东西两侧两汉道进入河口, 形成了典型地貌特征为中央拦门沙、东西两汉道以及东西两侧浅滩^[27](图1)。

3 数据与方法

3.1 数据来源

于2020年11月1日在磨刀门河口开展大面积水文泥沙走航观测, 观测时段如图2a所示(以三灶站为

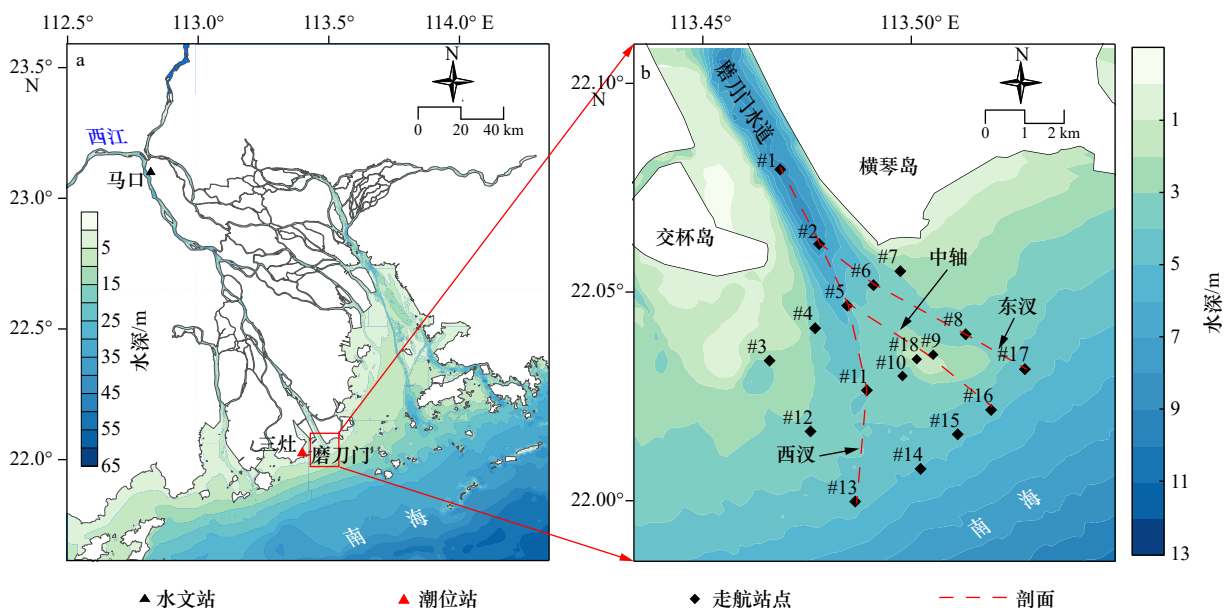


图1 研究区域: 珠江三角洲口(a)和磨刀门河口(b)

Fig. 1 Sketch map of the study area: the Pearl River Estuary (a) and the Modaomen Estuary (b)

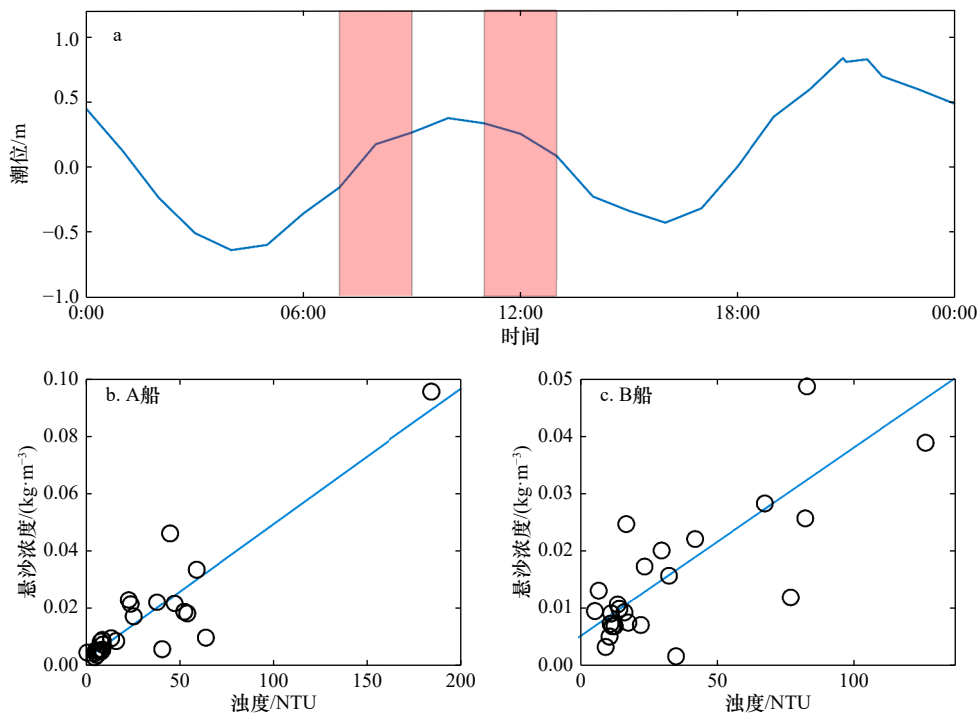


图2 走航观测期间潮位(红色阴影区域表示观测时段)(a), OBS-3A 标定悬沙浓度曲线(A 船(b)和 B 船(c))
Fig. 2 Tidal level of two shipboard investigations (the red shaded areas represent the investigation periods) (a). Calibration curves in order to derive suspended sediment concentration from OBS-3A of ship A (b) and ship B (c)

准), 观测站位位置如图1所示。采用 ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)、OBS-3A (Optical Backscatter Sensor)、LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry) 对各站位水体流速、盐度、浊度、絮凝体粒径进行观测, 并将水体分成表中底3层, 分别采集双份水样, 一份用于悬沙浓度的测定试验, 另一份通过马尔文激光粒度仪测量悬沙的分散粒径。因观测区域较大, 为保证观测时段处于同一潮型, 同时用两条船舶(A 船和 B 船)走航观测。在实验室内, 测定水体中悬沙浓度并对 OBS-3A 所测数据进行标定。采用过滤方法测定悬沙浓度, 主要步骤是先将所采集的水样通过滤纸过滤, 烘干滤纸并称重, 将滤膜上泥沙质量除以过滤水样的体积即可得到所测水样的悬沙浓度; 再将水样的悬沙浓度与对应位置 OBS-3A 所得浊度进行标定。由于观测数据由两条船(A 船和 B 船)取得, 故对两船数据分别标定, 得到浊度与悬沙浓度之间的相关关系(图2b, c), 进而通过浊度数据求得各层悬沙浓度。

3.2 计算方法

3.2.1 絮凝体粒径多峰分解

河口地区絮凝体通常可以分解为4个粒径不同且符合对数正态分布的假想絮凝结构体^[10,15], 其对应粒径范围分别是基本粒子(0~4 μm)、絮凝核(4~20 μm)、小絮团(20~200 μm)和大絮团(200~1 000 μm),

函数表达式如下^[14,28-29]:

$$\frac{dV}{dD} = \sum_{i=1}^4 \frac{\bar{V}_i}{\sqrt{2\pi} \ln(\sigma_i)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(D/\bar{D}_i)}{\ln(\sigma_i)} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中, V 和 D 分别表示 LISST 测得每一粒级的体积浓度和直径; σ_i 、 \bar{D}_i 、 \bar{V}_i 表示多峰分解得到的第 i 级模态 ($i=1, 2, 3, 4$) 特征参数, 分别是几何标准差、几何平均粒径(当符合对数正态分布时, 其值与中值粒径(D_{50})相等)、体积浓度; dV/dD 表示被各粒级范围宽度标准化的体积分数。根据磨刀门河口实测絮凝体粒径分布特征, 本文在多峰分解中将基本粒子、絮凝核、小絮团和大絮团4种组分的中值粒径拟合范围分别设置为 0~4 μm、4~20 μm、20~200 μm、200~1 000 μm。同时, 限制标准差(σ_i)的上限小于3, 以防出现不符合实际过宽的粒径分布。

3.2.2 梯度理查森数 (Ri_g)

前人研究表明梯度理查森数 (Ri_g) 可以反应河口区域水体盐度混合与层化情况, $Ri_g > 0.25$ 表征水体处于层化状态, $Ri_g < 0.25$ 表征水体处于混合状态, 当垂向流速变化梯度远大于水平方向变化梯度时, 其计算公式如下^[30-31]:

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}, \quad (2)$$

式中, u 为水流流速; z 为各层水体距底床高度; 重力加

速度取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; ρ 为海水密度, 有如下计算公式^[32]:

$$\rho = \rho_w (1 + \beta S), \quad (3)$$

式中, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ 为纯水密度; S 为海水盐度; 盐水收缩率 $\beta = 0.00078$ 。

3.2.3 流致底床剪切应力 (τ_c) 和剪切速率 (G)

河口区域水体紊动对絮凝和解絮过程产生显著影响, 因而有必要计算表征水体紊动的参数, 以分析水体紊动对絮凝和解絮过程的影响作用。已有研究表明, 流致底床剪切应力 (τ_c) 和剪切速率 (G) 可表征磨刀门河口水体紊动强弱程度^[16,30]。

流致底床剪切应力 (τ_c) 可由摩阻流速 (u_*) 估算, 其公式如下^[30]:

$$\tau_c = \rho u_*^2, \quad (4)$$

式中, ρ 表示水的密度。对数流速剖面法 (Log-profile Method, LP) 被广泛应用于底剪切应力的计算, 该方法假设垂向上流速符合对数分布^[33]。根据 LP 法 u_* 与近岸流速遵循对数分布, 表达式如下:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (5)$$

式中, u 表示流速, z 表示距底高程, z_0 是 $u = 0$ 时的高程, 表达式如下^[34]:

$$z_0 = \begin{cases} \frac{\nu}{9u_*} & \frac{u_* \Delta}{\nu} < 5, \\ \frac{\Delta}{30} \left[1 - \exp \left(-\frac{u_* \Delta}{27\nu} \right) \right] + \frac{\nu}{9u_*} & 5 \leq \frac{u_* \Delta}{\nu} \leq 70, \\ \frac{\Delta}{30} & \frac{u_* \Delta}{\nu} > 70, \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\frac{u_* \Delta}{\nu}$ 表示雷诺数, Δ 表示尼古拉斯粗糙度, 在无

砾石的床面等于 $2.5D$, D 表示底床沉积物平均粒径, 表达式如下:

$$D = \frac{\sum f \cdot m}{100}, \quad (7)$$

式中, f 表示各粒级的频率, m 表示各粒级的中值粒径。

剪切速率 (G) 可由湍流耗散率 (ε) 计算, 公式如下^[18]:

$$G = \left(\frac{\varepsilon}{\nu} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

其中, 湍流耗散率 (ε) 可由如下公式计算:

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}, \quad (9)$$

式中, ν 表示运动黏度 (根据实际温度计算得到, 此处取 $1.026 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), κ 表示卡门常数 (0.4), z 表示测量点距底床高程。

4 结果

4.1 絮凝体特性时空分布

4.1.1 平面分布

观测期间, 河口落潮期间絮凝体中值粒径介于 $1.87 \sim 395.53 \mu\text{m}$ 之间, 平均值为 $170.80 \mu\text{m}$; 絮凝体体积浓度介于 $20.29 \sim 1495.67 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $278.19 \mu\text{L/L}$ 。从其空间分布来看 (图 3), 表层中值粒径在拦门沙西侧整体上大于东侧, 体积浓度自口门向海呈减小趋势; 中层中值粒径自口门向海呈减小趋势, 体积浓度自口门向海大致呈先增大后减小趋势; 底层中值粒径和体积浓度平面分布特征与中层体积浓度相似, 自口门向海呈先增大, 后减小趋势。涨潮期间, 河口絮凝体中值粒径介于 $1.89 \sim 351.85 \mu\text{m}$

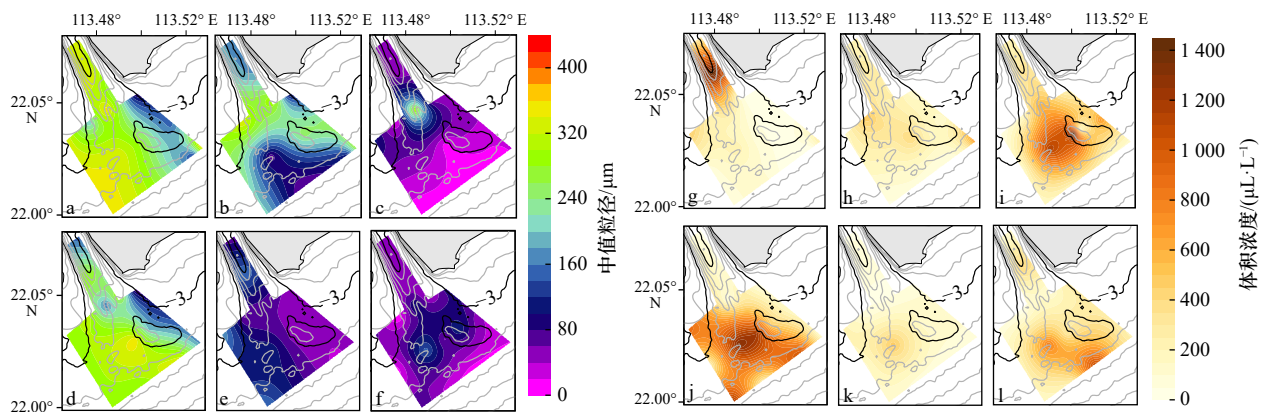


图 3 絮凝体中值粒径和体积浓度平面分布

Fig. 3 Planar distribution of median floc size and volumetric concentration

a-c: 落潮期间表、中、底层中值粒径; d-f: 涨潮期间表、中、底层中值粒径;

g-i: 落潮期间表、中、底层体积浓度; d-f: 涨潮期间表、中、底层体积浓度

a-c: Median floc size in the surface, middle, and bottom layers during the ebb period, respectively; d-f: median floc size in the surface, middle, and bottom layers during the flood period, respectively; g-i: volumetric concentration in the surface, middle, and bottom layers during the ebb period, respectively;

volumetric concentration in the surface, middle, and bottom layers during the flood period, respectively

之间,平均值为 $127.53 \mu\text{m}$; 体积浓度介于 $22.87 \sim 1315.25 \mu\text{L/L}$ 之间,平均值为 $309.99 \mu\text{L/L}$ 。河口表层中值粒径于拦门沙西侧整体上大于东侧,体积浓度整体上东北部小于西南部;中层中值粒径分布特征与表层相似,体积浓度西侧整体上大于东侧;底层中值粒径自口门向海大致呈先增大后减小趋势,体积浓度则恰好相反,自口门向海呈先减小后增大趋势。涨落潮期间底层水体絮凝体中值粒径和体积浓度自口门向海均呈现大-小-大或相反分布格局,说明拦门沙对底层水体絮凝体中值粒径和体积浓度分布特征影响显著,使其高值多出现于拦门沙内坡、坡顶或拦门沙前缘。

4.1.2 轴向分布

为更好分析磨刀门河口絮凝体空间分布,将走航站点划分为中轴(#1、#2、#5、#9、#16)、西汉(#1、#2、

#5、#11、#13)和东汉(#1、#2、#6、#8、#17)3个区域(图1),绘制絮凝体粒径和体积浓度纵剖面,如图4所示。观测涨落潮期间絮凝体中值粒径和体积浓度分布特征大体一致,表现为水体表层、中层中值粒径多大于底层;中层水体体积浓度总体上小于表底层。同时,为反映河口盐度层化状态,计算河口水体梯度理查森数,据前人研究, $Ri_g = 0.25$ 可以作为盐度层化与混合的参数临界值^[35]。为了以零为界划分层化和混合状态,本文通过计算 $\lg(Ri_g/0.25)$ 值反应河口盐度混合与层化状况,其中 $\lg(Ri_g/0.25) > 0$ 表征水体处于层化状态, $\lg(Ri_g/0.25) < 0$ 表征水体处于混合状态。从所选3条断面水体层化状态来看,观测涨落潮期间河口盐度层化现象显著,特别是水体中上层,河口底层水体混合相对较均匀(图5)。

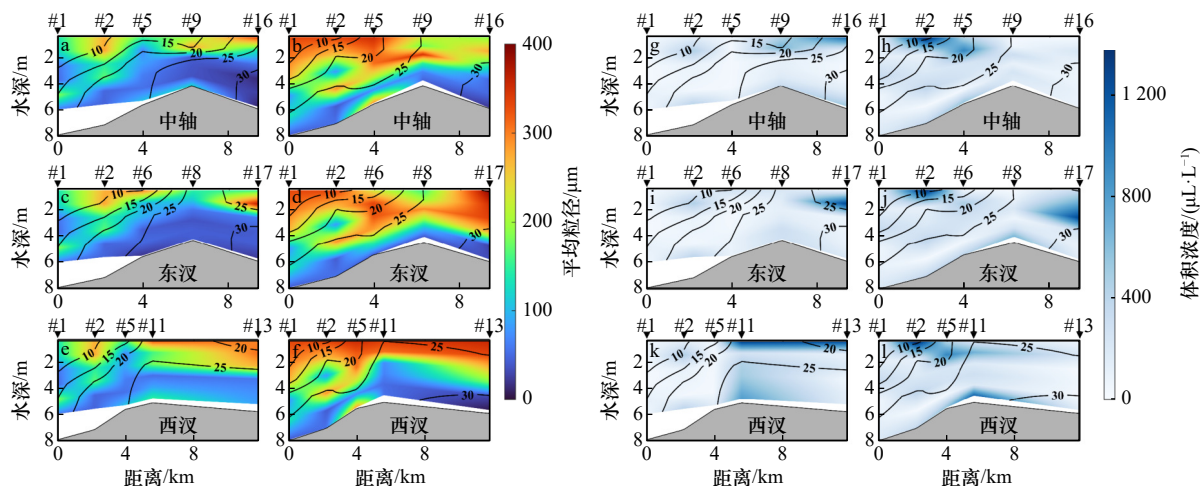


图4 中轴、东汉和西汉絮凝体中值粒径和体积浓度纵剖面

Fig. 4 Longitudinal distribution of median floc size and volumetric concentration along different sections

a, c, e: 涨潮期间中值粒径; b, d, f: 落潮期间中值粒径; g, i, k: 涨潮期间体积浓度; h, j, l: 落潮期间体积浓度, 黑色线为盐度等值线

a, c, e: Median floc size in the central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; b, d, f: median floc size in the central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively; g, i, k: volumetric concentration in the central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; h, j, l: volumetric concentration in the central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively.

The black lines indicate the salinity contour lines

结合图4和图5可知,观测期间盐度层化程度整体较强,对絮凝体特性影响显著,即絮凝体中值粒径和体积浓度垂向变化均较大。同时,水体中上层盐度层化相对底层更强,絮凝体中值粒径和体积浓度垂向变化也主要发生于中上层水体。

4.2 絮凝体粒组时空分布

为分析磨刀门河口不同级配絮凝体空间分布特征,采用多峰分解方法,将絮凝体实测数据分解为4个符合正态分布的假想絮凝结构体,包括基本粒子($0 \sim 4 \mu\text{m}$)、絮凝核($4 \sim 20 \mu\text{m}$)、小絮团($20 \sim 200 \mu\text{m}$)

和大絮团($>200 \mu\text{m}$)。由表1可知,不同级配絮凝体多峰分解结果与实测值相关性均较高,说明本文多峰分解结果可用于分析磨刀门河口絮凝体实际分布情况。从观测期间磨刀门河口絮凝体粒径分解结果来看,水体中大絮团比例最大,各站点占比均值超过60%;小絮团和絮凝核占比相近,各站点占比均值分别为15.91%、16.25%;基本颗粒含量最小,各站点占比均值仅5.21%。在此背景下,本文视基本颗粒与絮凝核合为一个粒级,即微絮团;接下来,将分析微絮团、小絮团、大絮团等3种粒级絮凝体的时空分布特征。

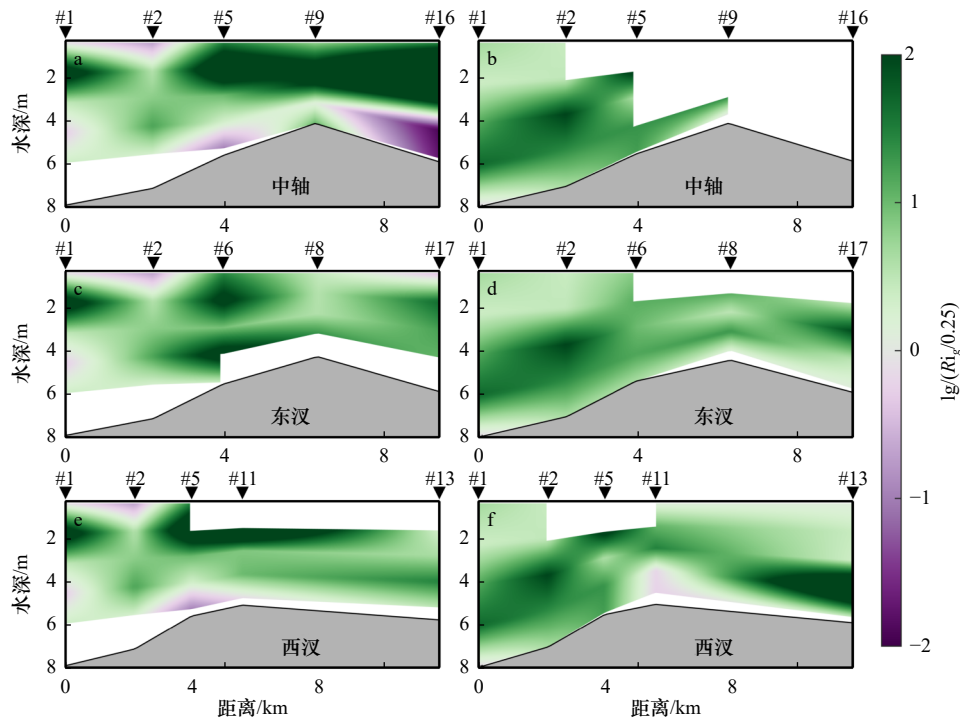


图5 中轴、东汉和西汉水体盐度层化参数纵剖面

Fig. 5 Longitudinal distribution of salinity stratification parameter along different sections

a, c, e: 涨潮; b, d, f: 落潮, 由于部分站点 Ri_g 计算值为负数不能取对数, 部分站点存在缺失值, 图中以空白显示

a, c, e: central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; b, d, f: central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively. Some of the sites have negative Ri_g values that do not have logarithms, so there are missing values at some of the sites, which are shown as blanks in the figure

表1 不同级配絮凝体多峰分解结果与实测结果皮尔逊相关系数平方

Table 1 Square of Pearson correlation coefficient between the decomposition of multimodal floc size distributions and observation of flocs with different size

粒组	微絮团(基本颗粒与絮凝核)	小絮团	大絮团
R^2	0.97	0.74	0.98

4.2.1 不同絮凝体粒组平面分布

观测落潮期间微絮团体积浓度介于 $1.09 \sim 1\ 832.72 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $110.17 \mu\text{L/L}$, 自表层至底层呈先减小后增大趋势(图6); 表层体积浓度最大值出现于口门内, 表层其他区域及中层体积浓度整体较小, 底层水体拦门沙体积浓度整体大于其他区域。小絮团体积浓度介于 $0 \sim 504.54 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $53.27 \mu\text{L/L}$, 自表层至底层逐渐增大(图7)。河口小絮团表层体积浓度整体相对较小; 中层体积浓度西侧整体大于东侧; 底层拦门沙体积浓度整体大于其他区域。大絮团体积浓度自表层至底层呈减小趋势(图8), 其值介于 $0 \sim 821.15 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $137.82 \mu\text{L/L}$, 河口各层体积浓度整体西侧大于东侧。

涨潮期间, 河口表层微絮团体积浓度自表层至底层逐渐增大, 其值介于 $0.45 \sim 1\ 043.60 \mu\text{L/L}$ 之间, 平

均值为 $72.55 \mu\text{L/L}$; 表层体积浓度整体相对较小, 中层整体西侧大于其他区域, 底层拦门沙前缘体积浓度整体大于其他区域。河口小絮团体积浓度自表层至底层逐渐增大, 其值介于 $0 \sim 253.25 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $49.39 \mu\text{L/L}$; 河口表层体积浓度整体相对较小, 中层体积浓度整体西侧大于东侧, 底层体积浓度西侧整体小于东侧。整体上层大絮团体积浓度最大, 中层最小, 其值介于 $0 \sim 1\ 405.06 \mu\text{L/L}$ 之间, 平均值为 $213.93 \mu\text{L/L}$; 河口表层体积浓度整体上拦门沙及西侧大于东侧; 中层和底层体积浓度整体上西侧大于东侧。

4.2.2 不同级配絮凝体垂向分布

观测期间, 中轴、东汉和西汉不同级配絮凝体体积浓度纵剖面如图9~11所示。对微絮团来讲, 底层水体体积浓度多大于中表层。涨潮期间, 体积浓度高值多出现于拦门沙坡顶及前缘底层水体, 最大表底层

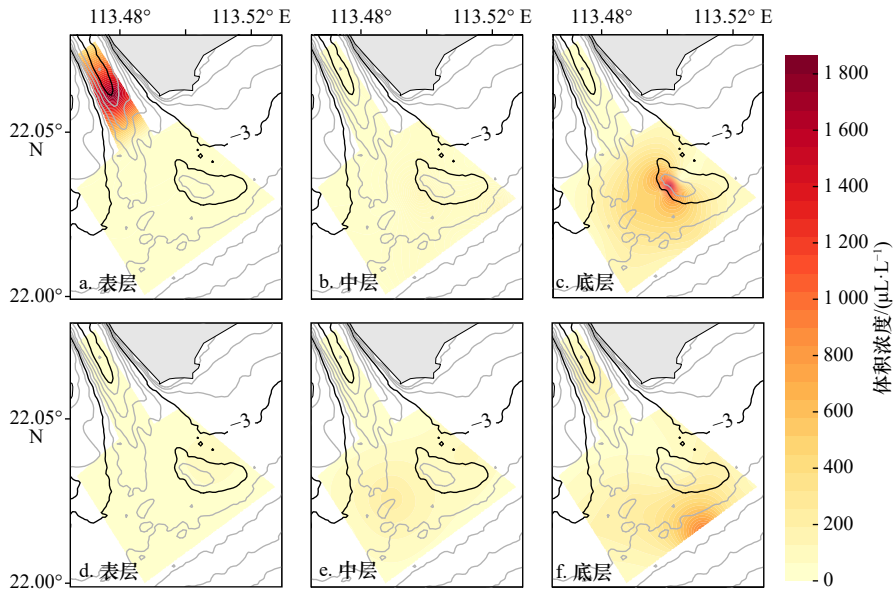


图 6 河口微絮团体积浓度平面分布

Fig. 6 Planar distribution of volumetric concentration of Pico-flocs in the estuary

a-c: 落潮期间表、中、底层; d-f: 涨潮期间表、中、底层

a-c: Surface, middle, and bottom layers during the ebb period, respectively; d-f: surface, middle, and bottom layers during the flood period, respectively

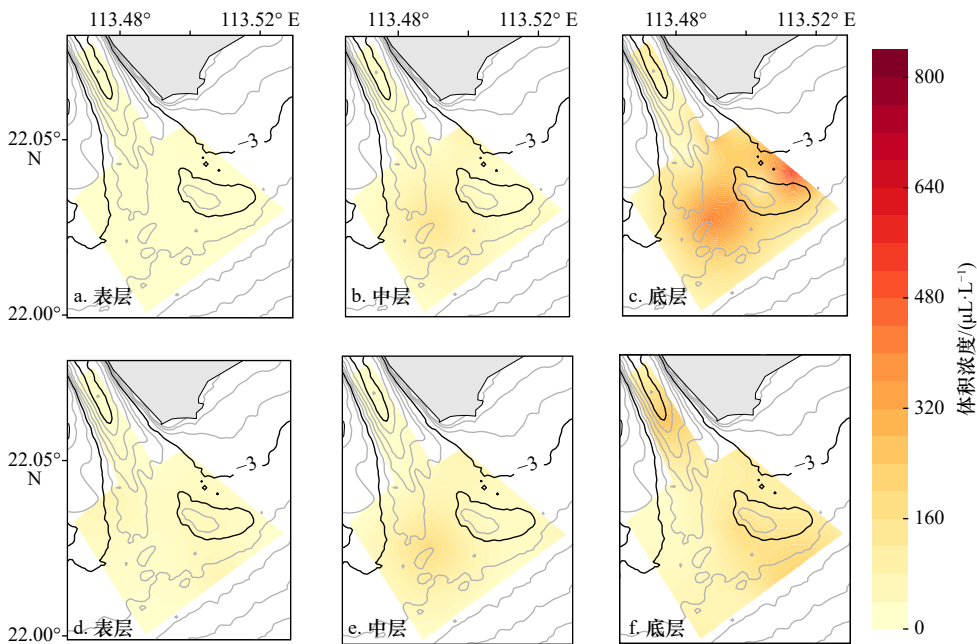


图 7 河口小絮团体积浓度平面分布

Fig. 7 Planar distribution of volumetric concentration of Micro in the estuary

a-c: 落潮期间表、中、底层; d-f: 涨潮期间表、中、底层

a-c: Surface, middle, and bottom layers during the ebb period, respectively; d-f: surface, middle, and bottom layers during the flood period, respectively

体积浓度差约 200 $\mu\text{L/L}$; 落潮期间, 3 个纵剖面除口门内站点#2 表层水体存在一极大值外, 垂向分布特征与涨潮相似, 最大表底层体积浓度差约为 400 $\mu\text{L/L}$ 。

总体上, 中底层水体小絮团体积浓度多大于表层。涨潮期间, 3 个纵剖面小絮团表层水体体积浓度普遍较小, 高值多位于底层及拦门沙坡顶中层水体,

最大表底层体积浓度差约 200 $\mu\text{L/L}$; 落潮期间, 3 个纵剖面自表层至底层体积浓度整体呈增大趋势, 高值多位于拦门沙坡顶底层水体, 最大表底层体积浓度差接近 500 $\mu\text{L/L}$ 。

中表层大絮团体积浓度多大于底层。涨潮期间, 3 个纵剖面大絮团体积浓度自口门内向海整体呈先

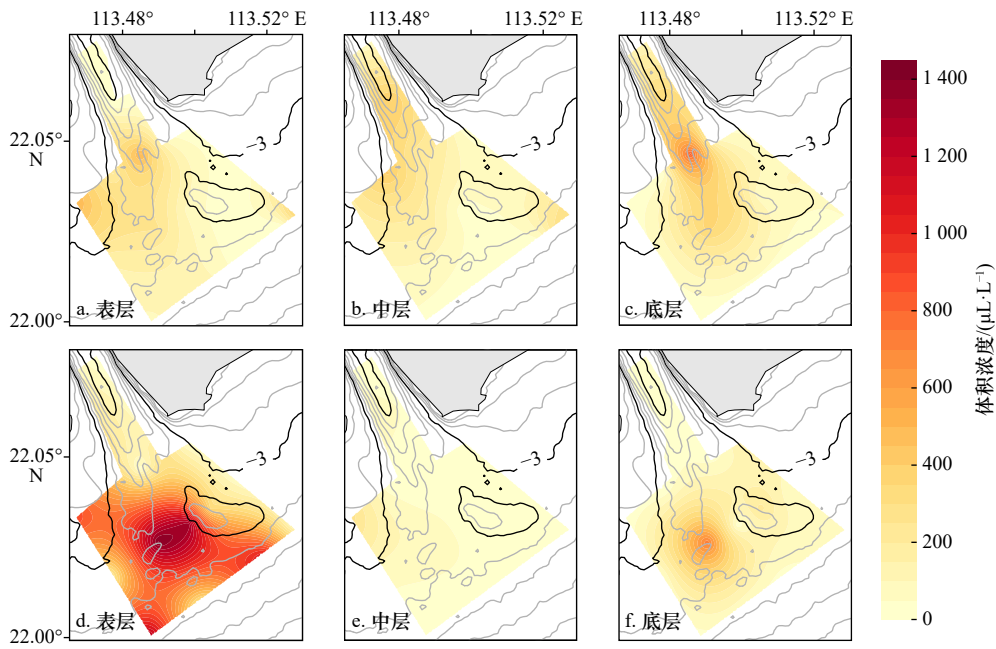


图8 河口大絮团体积浓度平面分布

Fig. 8 Planar distribution of volumetric concentration of Macro in the estuary

a-c: 落潮期间表、中、底层; d-f: 涨潮期间表、中、底层

a-c: Surface, middle, and bottom layers during the ebb period, respectively; d-f: surface, middle, and bottom layers during the flood period, respectively

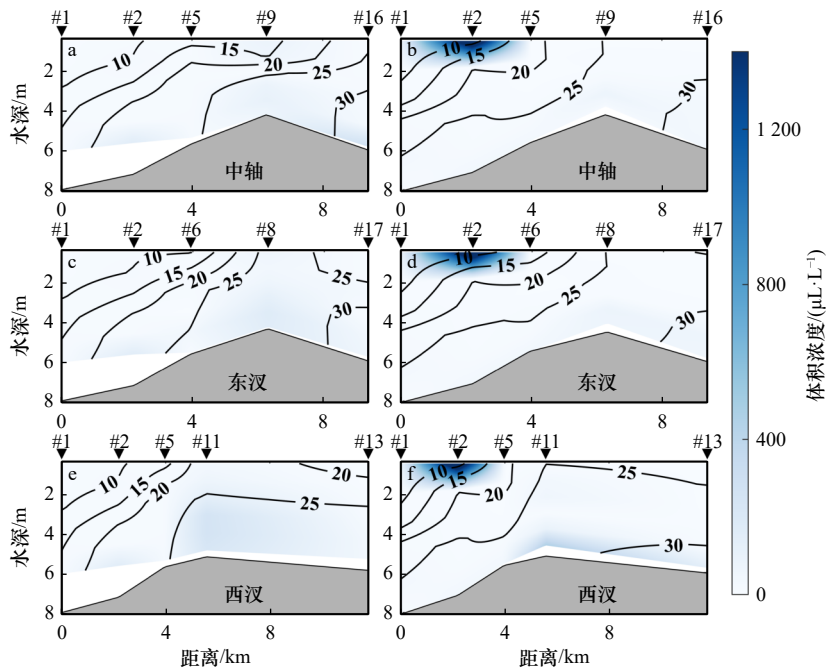


图9 中轴、东汉和西汉微絮团体积浓度纵剖面

Fig. 9 Longitudinal distribution of volumetric concentration of Pico-flocs along different sections

a, c, e: 涨潮; b, d, f: 落潮, 黑色线为盐度等值线

a, c, e: Central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; b, d, f: central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively. The black lines indicate the salinity contour lines

减小,后增大趋势,高值多出现于拦门沙坡顶及前缘表层水体,最大表底层体积浓度差约 1 500 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。落潮期间,3个纵剖面大絮团体积浓度自表层向底层体

积浓度总体呈先减小,后增大趋势,但底层体积浓度多小于表层,高值多位于拦门沙内坡表层及前缘中层,垂向体积浓度差最大约 1 200 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。

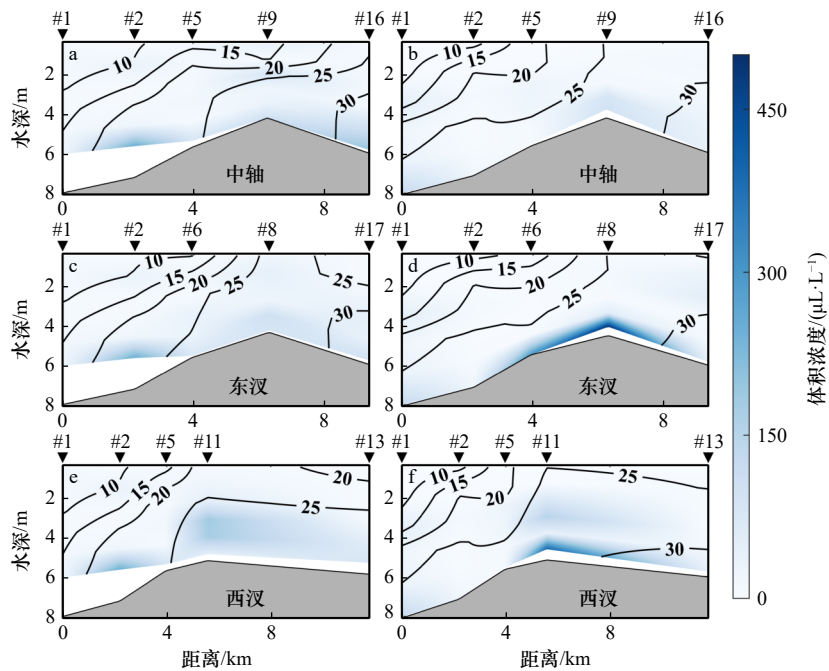


图 10 中轴、东汉和西汉小絮团体积浓度纵剖面

Fig. 10 Longitudinal distribution of volumetric concentration of Micro along different sections

a, c, e: 涨潮; b, d, f: 落潮, 黑色线为盐度等值线

a, c, e: Central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; b, d, f: central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively. The black lines indicate the salinity contourlines

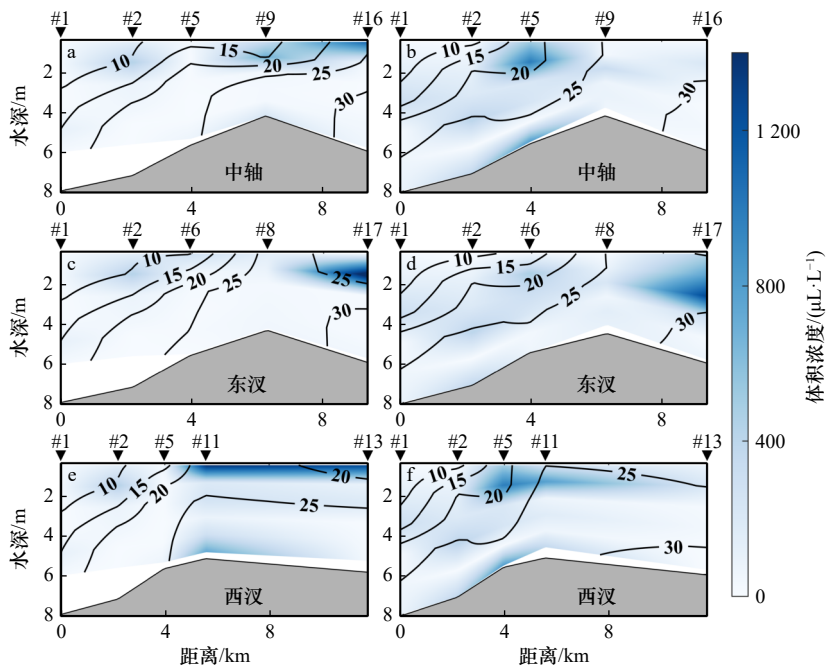


图 11 中轴、东汉和西汉大絮团体积浓度纵剖面

Fig. 11 Longitudinal distribution of volumetric concentration of Macro along different sections

a, c, e: 涨潮; b, d, f: 落潮, 黑色线为盐度等值线

a, c, e: Central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively; b, d, f: central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively. The black lines indicate the salinity contourlines

综合 3 种级配絮凝体垂向分布特征(图 9~11)及盐度层化特征(图 5)可知, 观测期间磨刀门河口盐度

层化程度整体较强, 导致各级配絮凝体体积浓度垂向差异均较大。同时, 盐度层化对不同级配絮凝体垂向

分布产生不同影响, 水体中上层盐度层化程度整体较强, 大絮团主要富集于该区域; 水体中底层层化程度相对较弱, 微絮团和小絮团主要富集于这一区域。

5 讨论

5.1 河口絮凝体捕集效应

在河口区域, 细颗粒泥沙由于受到河口动力结构和地形等因素影响而发生聚集, 即捕集效应。从以上结果来看, 磨刀门盐水楔河口絮凝体捕集效应显著, 且不同级配絮凝体捕集效应存在差异: 垂向上, 微絮团和小絮团总体富集于水体底层, 大絮团总体富集于水体表层与中层; 平面上, 微絮团和小絮团整体富集于拦门沙坡顶及前缘, 大絮团涨潮期间总体上同样富集于拦门沙坡顶及前缘, 落潮期间主要富集于拦门沙内坡及前缘。磨刀门河口絮凝体空间上的聚集差异主要与河口动力结构, 特别是盐度层化和水体紊动有关。接下来, 将重点讨论河口盐度层化和水体紊动对絮凝体的捕集作用。

5.2 河口盐度层化的影响

由第 4.1.2 节可知, 观测期间磨刀门河口盐度层化现象显著, 特别是水体中上层, 河口底层水体混合

相对较均匀。该种水体层化状态对絮凝体垂向分布影响显著, 以涨潮期间站位#16 和落潮期间站位#17 为例。所选站位表层水体粒度分布特征相似(图 12), 主要成分为大絮团, 占比均超过 98%, 中值粒径分别为 338.94 μm 、395.53 μm (图 3)。中层水体两个特征时刻粒度分布特征差异显著: 涨潮期间站位#16 表中层水体 $\lg(Ri_g/0.25)$ 值基本大于 2(图 5), 盐度层化显著, 中层水体絮凝体中值粒径降至 14.91 μm , 微絮团和小絮团占优, 表现出与表层显著差异; 落潮期间站位#17 表层和中层水体 $\lg(Ri_g/0.25)$ 值略大于 0, 水体盐度层化较弱, 其絮凝体粒度特征与表层相似, 大絮团占比为 95%。涨潮期间站位#16 底层水体 $\lg(Ri_g/0.25)$ 值小于 0, 处于弱盐度层化状态, 底层水体粒度分布特征与中层相似, 絮凝体中值粒径为 10.69 μm , 主要成分为微絮团和小絮团。落潮期间站位#17 底层水体 $\lg(Ri_g/0.25)$ 值小于 0 或略大于 0, 也处于弱盐度层化状态, 水体粒度分布曲线为双峰分布, 大絮团和微絮团占优, 占比分别为 42%、34%, 与中层水体絮凝体存在相似特征。由此可见, 强盐度层化抑制絮凝体在各水层间的交换, 对不同级配絮凝体具有捕集作用, 导致表底层水体不同级配絮凝体占比差异显著。

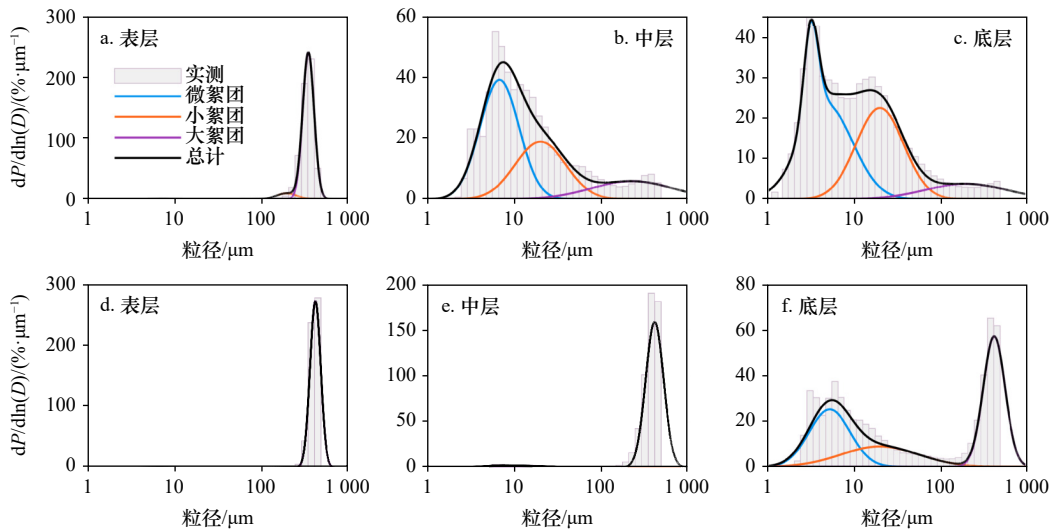


图 12 强盐度层化(a-c)和弱盐度层化(d-f)时刻表、中、底层粒度分布曲线

Fig. 12 FSDs in the surface, middle, and bottom water with strong salinity stratification (a-c) and weak salinity stratification (d-f)

5.3 水体紊动的影响

河口区域絮凝和解絮作用影响絮凝体粒度分布, 而水体紊动可对絮凝-解絮过程产生影响^[36-37]。本文通过计算流致底床剪切应力(τ_c)和剪切速率(G)表征水体紊动强度。平面上, 拦门沙水体紊动较强时, 泥沙再悬浮作用较强, 絮凝体多富集于拦门沙坡顶及前缘。以涨潮期间站点#11 为例, 该站点位于拦门沙坡

顶, τ_c 值高于同一时刻各站点均值(图 13a, b), 底层悬沙浓度也较高(图 13c, d), 微絮团、小絮团和大絮团体积浓度在轴向上均出现高值(图 9~11), 远高于同一纵剖面垂向均值。垂向上, 微絮团、小絮团多富集于水体底层, 而大絮团体积浓度高值多出现于水体中表层, 这与水体紊动由底层向表层减弱有关(图 14)。一方面, 底层水体紊动较强, 易造成絮凝体解絮作用的

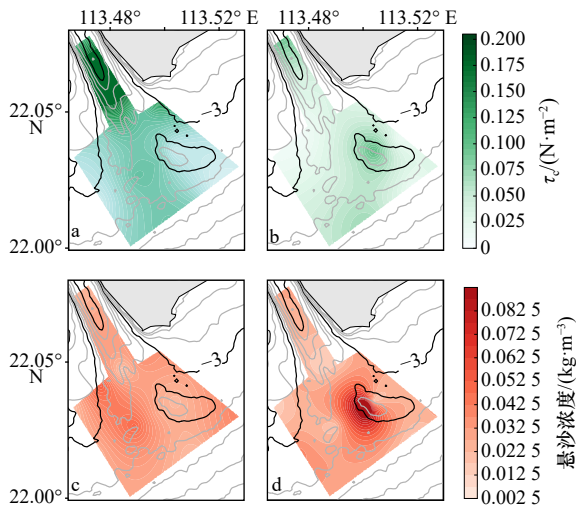


图 13 流致底床剪切应力底层悬沙浓度平面分布
Fig. 13 Planar distribution of current-induced bed shear stress and suspended sediment concentration in the bottom layer

a, b: 涨、落潮底剪应力; c, d: 涨、落潮底层悬沙浓度
a, b: Current-induced bed shear stress during the flood and ebb period; c, d: suspended sediment concentration in the bottom layer during the flood and ebb period

发生,多形成微絮团和小絮团;另一个方面,底层水体紊动较强,垂向混合相对较强,造成絮凝体垂向产生交换。

5.4 絮凝体垂向分布模式

结合观测期间磨刀门河口盐度层化显著,属于盐水楔河口,综合上述分析得到磨刀门盐水楔河口絮凝

体空间分布模式如下(图 15)。盐度层化阻碍絮凝体的垂向扩散,对絮凝体具有捕集作用。磨刀门河口盐度层化程度普遍较强,导致表底层水体不同级配絮凝体占比差异显著。大絮团主要富集于水体表层,而微絮团和小絮团主要富集于水体中层和底层。底层水体紊动较强,对絮凝体解絮作用具有促进作用,故底层水体微絮团和小絮团占优;同时,底层较强的水体紊动使垂向混合增强,导致絮凝体发生垂向交换,中层水体絮凝体主要成分为微絮团和小絮团。

6 结论

本文基于 2020 年枯季磨刀门河口大面积走航水文泥沙原型观测数据,分析絮凝体时空分布特征,探究盐度层化和水体紊动对絮凝体分布的影响作用,主要结论如下:

(1)絮凝体中值粒径介于 1.87~395.53 μm 之间,体积浓度介于 20.29~1 495.67 μL/L 之间,平面上中值粒径最大值多出现于中心拦门沙或西侧,体积浓度高值多出现于拦门沙坡顶和前缘;垂向上,中表层水体中值粒径多大于底层,中层水体体积浓度总体上小于表底层。

(2)采用多峰分解方法将磨刀门河口絮凝体分解为基本颗粒和絮凝核(统称为微絮团)、小絮团、大絮团 4 种组分,大絮团占比最大,各站点占比均值超过

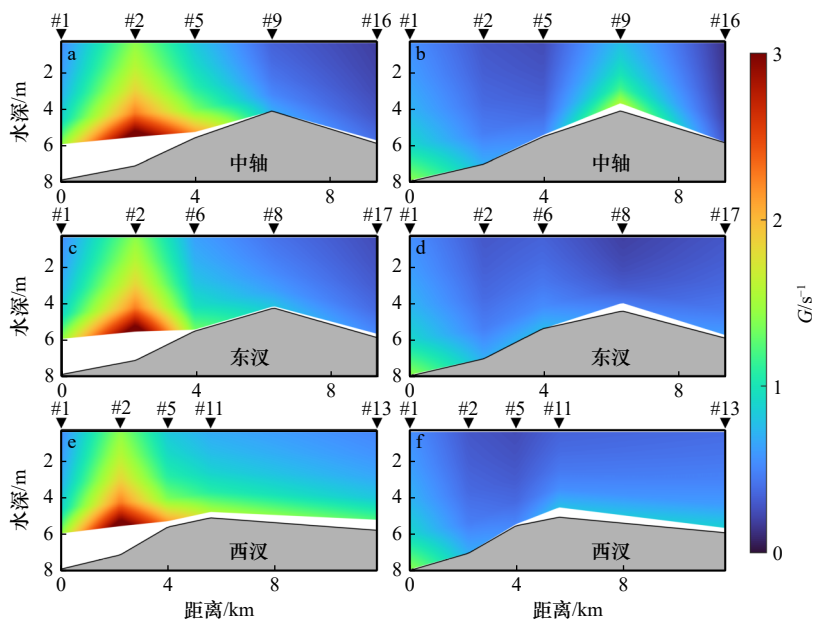


图 14 中轴、东汉和西汉 G 值纵剖面

Fig. 14 Longitudinal distribution of G along different sections

a, c, e: 涨潮; b, d, f: 落潮

a, c, e: Central bar, eastern bar and western bar sections during the flood period, respectively;

b, d, f: central bar, eastern bar and western bar sections during the ebb period, respectively

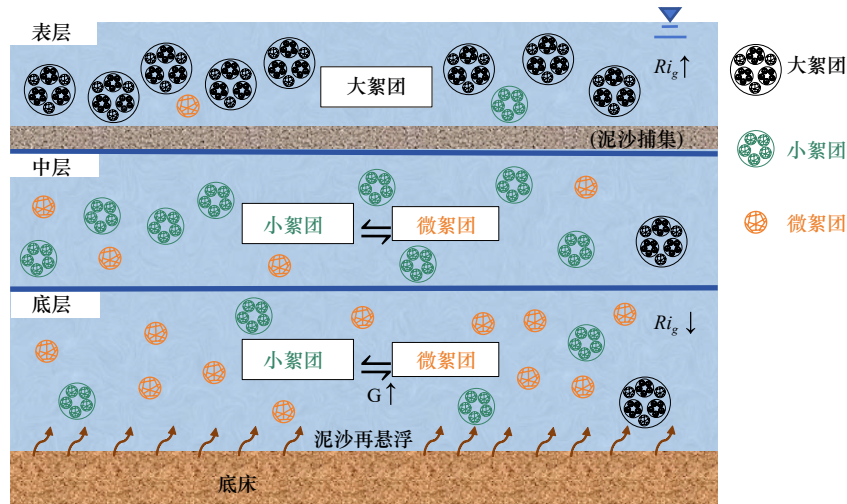


图 15 盐水楔型河口絮凝体垂向分布模式示意

Fig. 15 Sketch of vertical distribution pattern of flocs in saltwater-wedge estuary

60%, 微絮团体积浓度介于 $0.45 \sim 1\ 832.72 \mu\text{L/L}$ 之间, 小絮团体积浓度介于 $0 \sim 504.54 \mu\text{L/L}$ 之间, 大絮团体积浓度介于 $0 \sim 1\ 405.06 \mu\text{L/L}$ 之间。平面上微絮团和小絮团体积浓度高值多出现于拦门沙坡顶及前缘, 涨潮期间大絮团体积浓度高值总体上同样出现于拦门沙坡顶及前缘, 落潮期间主要出现于拦门沙内坡及前缘。垂向上, 中表层水体微絮团和小絮团体积浓度多小于底层, 而底层大絮团体积浓度多小于中表层。

(3) 观测期间磨刀门河口盐度层化显著, 属于盐水楔河口, 强盐度层化抑制絮凝体在各水层间的交换, 对不同级配絮凝体具有捕集作用, 导致表底层水体不同级配絮凝体占比差异显著。底层水体紊动较强, 对絮凝体解絮作用具有促进作用, 故底层水体主要成分为微絮团和小絮团; 同时, 底层较强的水体紊动使垂向混合增强, 导致絮凝体发生垂向交换, 中层水体微絮团和小絮团占优。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 384.
- [2] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3–22.
- [3] Droppo I G, Ongley E D. Flocculation of suspended sediment in rivers of southeastern Canada[J]. Water Research, 1994, 28(8): 1799–1809.
- [4] 朱文武, 李九发, 姚弘毅, 等. 长江河口北槽河道悬沙絮团特性及其影响因素研究 [J]. 海洋学报, 2016, 38(3): 88–97.
Zhu Wenwu, Li Jiufa, Yao Hongyi, et al. Study on sediment floccules and the influence factors in the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(3): 88–97.
- [5] Manning A J, Baugh J V, Spearman J R, et al. Flocculation settling characteristics of mud: sand mixtures[J]. Ocean Dynamics, 2010, 60(2): 237–253.
- [6] 田枫, 欧素英, 杨昊, 等. 伶仃洋河口泥沙絮团特征及影响因素研究 [J]. 海洋学报, 2017, 39(3): 55–67.
Tian Feng, Ou Suying, Yang Hao, et al. Study on the flocs characteristic and dynamics effects in the Lingdingyang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(3): 55–67.
- [7] Guo Chao, He Qing, Guo Leicheng, et al. A study of in-situ sediment flocculation in the turbidity maxima of the Yangtze Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 191: 1–9.
- [8] Li Wenjie, Wang Jie, Yang Shengfa, et al. Determining the existence of the fine sediment flocculation in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 141(2): 05014008.
- [9] Gratiot N, Manning A J. An experimental investigation of floc characteristics in a diffusive turbulent flow[J]. Journal of Coastal Research, 2004, (S41): 105–113.
- [10] Zhang Ying, Ren Jie, Zhang Wenyan. Flocculation under the control of shear, concentration and stratification during tidal cycles[J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124908.
- [11] Liu Jinliang, Liang Junhong, Xu Kehui, et al. Modeling sediment flocculation in langmuir turbulence[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(11): 7883–7907.
- [12] Markussen T N, Andersen T J. Flocculation and floc break-up related to tidally induced turbulent shear in a low-turbidity, microtidal estu-

- ary[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 89: 1–11.
- [13] Mikkelsen O A, Curran K J, Hill P S, et al. Entropy analysis of *in situ* particle size spectra[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72(4): 615–625.
- [14] Lee B J, Fettweis M, Toorman E, et al. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C3): C03014.
- [15] Lee B J, Toorman E, Fettweis M. Multimodal particle size distributions of fine-grained sediments: mathematical modeling and field investigation[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(3): 429–441.
- [16] Huang Jie, Wang Simin, Li Xinran, et al. Effects of shear stress and salinity stratification on floc size distribution during the dry season in the Modaomen Estuary of the Pearl River[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 836927.
- [17] Lasareva E V, Parfenova A M, Romankevich E A, et al. Organic matter and mineral interactions modulate flocculation across arctic river mixing zones[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(6): 1651–1664.
- [18] Dyer K R, Manning A J. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions[J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1/2): 87–95.
- [19] Li Dongyi, Li Yunhai, Xu Yonghang. Observations of distribution and flocculation of suspended particulate matter in the Minjiang River Estuary, China[J]. *Marine Geology*, 2017, 387: 31–44.
- [20] 谢荣耀, 刘锋, 罗向欣, 等. 河控型河口盐度层化对悬沙的捕集机制——以洪季磨刀门河口为例 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(5): 38–49.
Xie Rongyao, Liu Feng, Luo Xiangxin, et al. Sediment trapping mechanism by salinity stratification in a river-dominated estuary: a case study of the Modaomen Estuary in flood season[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(5): 38–49.
- [21] Zhang Ying, Ren Jie, Zhang Wenyan, et al. Importance of salinity-induced stratification on flocculation in tidal estuaries[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126063.
- [22] Liu Feng, Chen Hui, Cai Huayang, et al. Impacts of ENSO on multi-scale variations in sediment discharge from the Pearl River to the South China Sea[J]. *Geomorphology*, 2017, 293: 24–36.
- [23] Liu Feng, Yuan Lirong, Yang Qingshu, et al. Hydrological responses to the combined influence of diverse human activities in the Pearl River delta, China[J]. *CATENA*, 2014, 113: 41–55.
- [24] Tan Chao, Huang Bensheng, Liu Feng, et al. Recent morphological changes of the mouth bar in the Modaomen Estuary of the Pearl River Delta: causes and environmental implications[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 181: 104896.
- [25] Jia Liangwen, Wen Yi, Pan Shunqi, et al. Wave-current interaction in a river and wave dominant estuary: aseasonal contrast[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 52: 151–166.
- [26] 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.
Jia Liangwen, Lü Xiaoying, Cheng Cong, et al. Study on the morphological evolution of the Modaomen Estuary in monthly scale[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(9): 65–77.
- [27] 卢陈, 吴尧, 杨裕桂, 等. 珠江磨刀门河口环流结构动力特征分析 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 9–18.
Lu Chen, Wu Yao, Yang Yugui, et al. Characterizing the circulation flow structure in the Modaomen Estuary of the Zhujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12): 9–18.
- [28] Hussein T, dal Maso M, Petäjä T, et al. Evaluation of an automatic algorithm for fitting the particle number size distributions[J]. *Boreal Environment Research*, 2005, 10(5): 337–355.
- [29] Whitey K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41Suppl: 25–49.
- [30] Li Haiwei, Yang Qingshu, Mo Sihao, et al. Formation of turbidity maximum in the Modaomen Estuary of the Pearl River, China: the roles of mouth bar[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(12): e2022JC018766.
- [31] Stacey M T, Rippeth T P, Nash J D. Turbulence and stratification in estuaries and coastal seas[J]. *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 2011, 2: 9–35.
- [32] Geyer W R, MacCready P. The estuarine circulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 175–197.
- [33] 孙剑雄, 张文祥, 史本伟. 基于潮间带现场数据的底部切应力算法对比 [J]. *海洋学研究*, 2022, 40(1): 21–32.
Sun Jianxiong, Zhang Wenxiang, Shi Benwei, et al. Comparison of methods for calculating bottom shear stress based on intertidal flat field data[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2022, 40(1): 21–32.
- [34] 邹志利. 海岸动力学 (第四版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 94.
Zou Zhili. Coastal hydrodynamics (4th edition)[M]. Beijing: China Communication Press, 2009: 94.
- [35] Miles J W. On the stability of heterogeneous shear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10(4): 496–508.
- [36] Byun J, Son M. On the relationship between turbulent motion and bimodal size distribution of suspended flocs[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106938.
- [37] Guo Chao, He Qing, van Prooijen B C, et al. Investigation of flocculation dynamics under changing hydrodynamic forcing on an intertidal mudflat[J]. *Marine Geology*, 2018, 395: 120–132.

Distribution pattern of flocculation and its controlling factors in a saltwater-wedge estuary: A case study of the Modaomen Estuary of the Pearl (Zhujiang) River

Zhang Kaiyun¹, Liang Hongyue¹, Wang Pu¹, Li Haiwei¹, Wei Wen¹, Cai Huayang¹, Liu Feng^{1,2}, Zhu Lei³

(1. Institute of Estuarine and Coastal Research, School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. School of Marine Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Flocculation of fine sediments is a key process affecting sediment transport and dispersion in estuaries, which is controlled by complex dynamic structure of estuaries, and spatial distribution of flocs in a stratification condition needs to be explored. To solve this problem, in this study, based on the hydrology and sediment cruising observation in the Modaomen Estuary of the Pearl River during the dry season in 2020, spatial and temporal distribution of flocs in the Modaomen Estuary was analyzed, impacts of dynamics factors were investigated, and distribution pattern of flocs in a stratification condition was uncovered. The results show that median floc size in the Modaomen Estuary during the observation period ranged from 1.87 μm to 395.53 μm , and volumetric concentration of flocs ranged from 20.29 $\mu\text{L/L}$ to 1 495.67 $\mu\text{L/L}$. Vertically, median floc size in the middle and surface layers was generally larger than that in the bottom layer. The plane distribution characteristic of the median floc size is that the maximum values generally occurred at the central bar and the west side. Decomposition of multimodal floc size distributions indicates that the flocs in the Modaomen Estuary were composed of primary particles (Pp) and Flocculi (collectively known as Pico-flocs), microflocs (Micro), macroflocs (Macro), among which Macro was dominant. In view of vertical distribution, the volumetric concentration of Pico-flocs and Micro in the bottom layer tended to be larger than that in the surface and middle layers, while volumetric concentration of Macro in the surface and middle layers was generally larger than that in the bottom layer, which is closely related to dynamic structure in the salt water wedge estuary. Strong salinity stratification inhibited the exchange of flocs between different water layers, resulting in a relatively higher percentage of Macro in the surface layer than that in the middle and bottom layers. In the bottom layer flocs were affected by intensity of turbulent shear and deflocculation process was dominant. As a result, the percentage of Pico-flocs and Micro was higher than the surface and middle layers. This study is not only helpful to elucidate the flocculation mechanism of fine sediment under complex dynamics, but also provides technical support for regulation of mouth bar, government of water and sediment, and channel dredging in the Modaomen Estuary.

Key words: the Modaomen Estuary; decomposition of particle size; spatial variation; salinity stratification; turbulence