

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111304

舟山海域悬浮体的特征及输运机制

胡吉连, 杜晓琴

浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022

摘要: 为了明确舟山群岛海域悬浮体的特征和输运机制, 本研究于2018年夏季大潮期间进行了现场观测, 包括温盐深、水动力和悬浮体的剖面观测, 以及海水和海底表层沉积物的采集等。结果发现, 悬浮体在垂向上可分为3种类型: 跃层以上有效密度较高的颗粒絮凝程度低; 跃层以下的颗粒絮凝程度较高; 跃层附近的悬浮体主要为生物颗粒, 有效密度最低。一个全日潮周期内, 超过 $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 的悬浮体向南输运, 受控于夏季陆架环流和潮汐捕捉以及垂向净环流输运的共同作用。因此, 浙闽沿岸流和潮汐的不对称性导致的南向悬浮体输运对浙闽泥质区的演化起积极作用; 而流速和悬浮体的垂向分布不均导致的北向输运, 在一定程度上抑制了这一作用。

关键词: 源-汇过程; 絮凝; 悬浮体输运; 通量分解; 浙闽泥质区

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Characteristics and transport mechanism of suspended particles in offshore area of Zhoushan Islands

HU Jilian, DU Xiaoqin

Zhejiang Ocean University, Marine Science and Technology College, Zhoushan 316022, China

Abstract: The transportation and dispersal of suspended particles play a key role in the deposition and evolution of offshore muddy deposits. In order to reveal the characteristics and transport mechanism of suspended particles in the offshore of Zhoushan Islands, field survey had been carried out during the spring tides in the summer of 2018, which include the observations of temperature, salinity, hydrodynamics, contents of suspended particles, and samples of sea water and seafloor surface sediment, etc. The results show that the suspended particles could be divided into three types: micro-flocs above thermocline with higher effective density formed by low-degree flocculation; larger flocs with lower effective density below thermocline aggregated by high degree of flocculation; and larger biological particles around the thermocline with the lowest effective density. During one diurnal tidal cycle, more than $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ suspended matters were transported southwards, controlled by Stokes drift, tidal pumping and gravitational circulation. In conclusion, the southward transport of suspended particles by continental circulation and tidal asymmetry played a positive role in the evolution of Zhejiang-Fujian muddy system. Nevertheless, the northward transport caused by uneven vertical distribution of velocity and suspended particle weakened the process to certain extent.

Key words: source-sink process; flocculation; suspended particle transport; flux decomposition; Zhejiang-Fujian muddy system

悬浮体是指以悬浮状态存在于水体中的一切颗粒物质, 可分为可燃组分(生物颗粒、各种絮凝体)和非可燃组分(沙泥颗粒、岩石矿物碎屑)两大类^[1]。陆源的悬浮体是河口和陆架上广泛分布的泥质沉积体的主要来源^[2]。作为陆源有机碳的有效载体, 河口和陆架上的细颗粒沉积区也是有机碳的重要储库, 其变化对全球碳循环和气候变化有重要影响^[3]。同时, 悬浮体还吸附大量的营养盐, 通过促进浮游植物大量繁殖间接影响海洋初级生产力, 其循环过程一定程度控制了营养盐的输运, 从而影响海洋生态系统^[2]。因此, 悬浮体的输运、沉积过程研究

对全球物质循环和生态系统动力研究有着重要的启示作用。

长江是世界上著名的河流, 每年向海洋提供约470 Mt的沉积物。其中, 洪季的输沙量约占全年总量的87%, 多数堆积于长江河口及其三角洲系统^[4]。冬季长江口附近的沉积物经再悬浮过程随浙闽沿岸流向南扩散。而携沙的南下沿岸流受到北上的台湾暖流的阻隔在浙闽沿岸形成巨厚的沉积体^[5]。因而, 在东海内陆架造就了世界上典型的源-汇体系。在这一体系中, 沉积物从源到汇的迁移问题是关键。因此, 要认识东海内陆架这一准封闭的沉积

资助项目: 浙江海洋大学项目“浙江泥质区悬浮沉积物的环境动力响应”(11105010217)

作者简介: 胡吉连(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事沉积动力学研究, E-mail: hjlkkxx@163.com

收稿日期: 2019-11-13; 改回日期: 2020-03-06。 文凤英编辑

系统,了解位于长江口和浙闽泥质区之间海域的沉积物输运过程很有必要。

舟山群岛海域地处长江沉积物南下的必经之路,海底地形多变,岛屿间水动力复杂。群岛的存在使得潮流和波浪能量只能通过水道从群岛外向内部海域传播,从而导致了水体挟沙能力在这些区域发生非连续性的变化,进而影响了挟沙力整体的空间分布特性^[6]。风场、陆架环流和冲淡水季节性变化使得舟山群岛海域悬浮泥沙的输运过程更加复杂。海洋环境中,悬浮沉积物在潮汐和陆架环流等动力条件下,通过平流、再悬浮和沉降这3个过程的共同作用,进行水平输运以及海底与水体的物质交换,从而造成沉积物输运和海底冲淤,塑造源-汇的格局^[7]。冬季浙闽沿岸流携带长江沉积物向南的净输运是浙闽泥质区发育的主要机制^[8-10]。然而,人们对于夏季长江沉积物是否在泥质区建造过程中扮演角色的认识并不一致。本文在水文、水动力和悬浮体观测资料的基础上,通过通量机制分解法,探讨夏季大潮期间舟山群岛外侧海域悬浮体的输运特征和影响机制。

1 研究区域和方法

1.1 研究区域

舟山群岛地处长江口,位于杭州湾和东海陆架(<50 m水深)的相交处,岛礁众多,棋布星罗,水深

为5~100 m,走向以东西向和东北、西南向为主^[11]。舟山群岛海域位于长江口泥质区和浙闽泥质区之间,海底表层沉积物多以粉砂为主^[12]。群岛地处副热带季风区,风速风向具有明显的季节变化:冬半年(9月至翌年3月)偏北风占优势;夏半年(4—8月)以偏南风为主。冬季风的驱动下浙闽沿岸流南下,水体浑浊。夏季风的影响下偏北向的台湾暖流盛行。太平洋潮波由东南向西北方向传播,在舟山群岛附近受阻而偏转向西,大致与纬度线平行,在传播过程中,波形和结构也不断发生变化,平均落潮历时长于涨潮历时。舟山海域的潮汐类型以规则半日潮为主,局部为不规则半日混合潮,多年平均潮差为1.9~3.3 m,最大潮差可达3.7~5.0 m^[13]。潮流因受水道、岛屿等的束流作用其流速较大,其流向在群岛范围内的岛屿之间以往复流为主,在较宽阔的水道或水域以旋转流方式存在^[13]。舟山海域受长江径流、浙闽沿岸流、台湾暖流、潮流及地形等因素的综合影响,水动力条件非常复杂^[12]。

1.2 现场观测及实验室分析

于2018年6月29—30日期间,在舟山群岛附近海域的观测站位(29.70°N、122.5°E)进行了27小时的连续观测(图1,观测站位如黑点所示)。观测内容包括水动力(ADCP)、温盐深和悬浮体(LISST)等,不同层位的海水和海底表层沉积物的采集。船载声学多普勒流速剖面仪ADCP,频率为600 kHz,换能器置于水下2 m处,采样频率约为1 Hz,第一

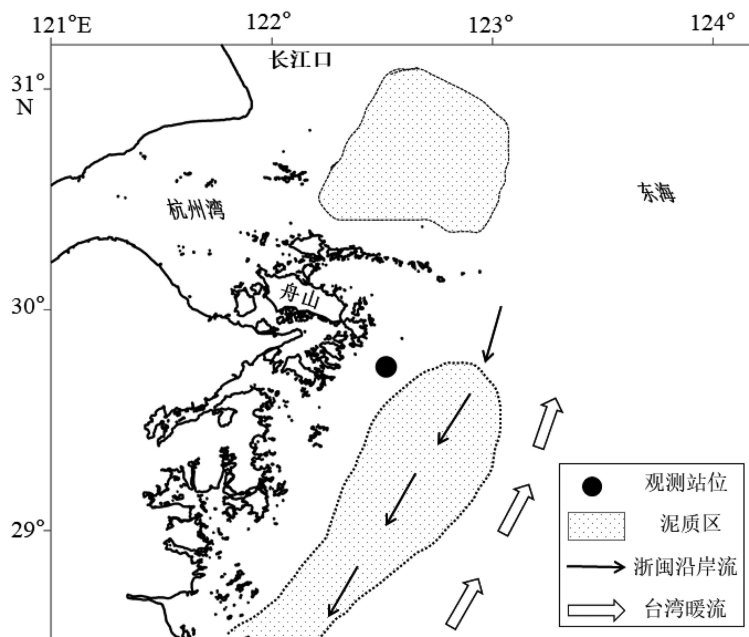


图1 研究区域和观测站位图(据胡日军^[12]绘制)

Fig.1 Map of the study area (black dot represents the observation site)

层观测深度为 3.5 m, 水层单元厚度为 0.5 m, 在底部约有 10% 水深的盲区。现场激光粒度仪 LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissiometry) 是由美国 Sequoia Scientific 公司研制出来的系列产品, 普遍被用来观测悬浮颗粒。LISST-200X 是 LISST 系列产品之一, 它采用激光小角度散射原理来进行悬浮物测量, 通过运用 Mie 散射理论, 从数学上反推出散射数据, 从而可以获得水体悬浮颗粒 36 个不同粒级的体积浓度分布。LISST-200X 每小时进行一次剖面观测, 采样频率为 1 Hz, 分辨率可达 0.1 $\mu\text{L/L}$ 。在表层、5、10 和 20 mbs (meters below sea-surface) 及近底层 (距底约 3 m) 每小时进行一次海水采集, 5 mbs 层水样因为条件限制只在前半段时间采集。另外, 每两小时采集海底表层沉积物。水样过滤实验是在浙江海洋大学遥感实验室进行的, 使用孔径 0.45 μm 的滤膜 (直径 47 mm) 过滤定量的海水样品, 烘干后经电子天平称重获得样品质量, 进而计算得到悬浮体质量浓度。海底表层沉积物的粒度测试在浙江海洋生态环境监测站实验室完成, 粒度参数采用激光粒度仪 (Microtrac S3500) 测定获得。

1.3 研究方法

Dyer^[14] 提出用瞬时流速、瞬时质量浓度和横截面的面积三者的乘积对时间的积分来表示在一个潮周期过程中通过某一横断面的物质通量:

$$Q = \int U \cdot C \cdot A d\Delta t \quad (1)$$

其中 Q 为物质运输通量, U 为流速 (可分解为南北向和东西向流速), C 为质量浓度, A 为断面面积, t 为时间。而通过通量机制分解公式可以计算各个因素或过程对总通量的贡献^[15]。国外学者^[16-19] 不断建立和发展了断面输运的计算公式, 并将其引用到世界各地的河口通量研究中, 探讨了不同环境下不同动力因子对物质输移的贡献大小。国内的学者也在长江河口^[20-21]、苏北辐射沙洲的潮汐水道^[22-25] 以及杭州湾、舟山群岛水道和群岛外海域^[12, 26-27] 等输沙机理研究中运用了此类公式。

根据物质通量计算方法, 流速 U 可分解为垂向平均项 (\bar{U}) 和垂向平均偏差项 (U_v), 其中垂向平均项 (\bar{U}) 又可分解成垂向平均潮平均项 (\bar{U}_0) 和垂向平均潮偏差项 (\bar{U}_t)。表达式为: $U = U_v + \bar{U}_t + \bar{U}_0$ 。同理, 悬浮体质量浓度 C 可分解为: $C = C_v + \bar{C}_t + \bar{C}_0$; 水深可分解为: $H = H_v + \bar{H}_t$ 。根据现场观测的质量浓度和流速数据, 在一个潮周期内的平均悬浮体输

运通量表达式如下^[25]:

$$\begin{aligned} \langle F \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^H U C dz = H_0 \bar{U}_0 \bar{C}_0 + \bar{C}_0 \langle H_t \bar{U}_t \rangle + \\ &\quad \bar{U}_0 \langle H_t \bar{C}_t \rangle + H_0 \langle \bar{C}_t \bar{U}_t \rangle + \\ &\quad \langle H_t \bar{C}_t \bar{U}_t \rangle + H_0 \langle \bar{C}_v \bar{U}_v \rangle + \langle \bar{H}_t \bar{C}_v \bar{U}_v \rangle = \\ &\quad F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 \quad (2) \end{aligned}$$

式中, $\langle \rangle$ 代表垂直方向的平均, 代表潮周期内的平均。第一项 (F_1) 代表非潮汐扩散项, 称为欧拉通量, 而第二项 (F_2) 是潮流相关项, 为斯托克斯漂移。这两项之和表示由余流以及时空平均质量浓度引起的水平扩散通量 (拉格朗日通量)。 F_3 至 F_5 是由涨落潮不对称引起的潮泵效应, 由潮相位差产生的。 $F_6 + F_7$ 是由悬浮体质量浓度和流速的垂向分布不均导致的, 与扩散剪切有关。

悬浮体的有效密度是指去除了海水影响后悬浮体本身的真实密度^[28]。相比其他悬浮体参数, 悬浮体有效密度能更加真实地反映出悬浮体在水体中的物质组成和结构特征。海洋中的悬浮体包括矿物碎屑、生物颗粒等, 前者往往表现出极大的黏滞性, 将生物颗粒、人类纤维等聚合成为较大的絮凝体。这类絮凝体具有与单个颗粒完全不同的物理和行为特征: 体积较大, 密度较轻, 具有较高的沉降速度^[29]。而在水体雷诺数较小时, 絮凝体的粒径和有效密度共同决定其沉降速度。悬浮体的有效密度可表达为质量浓度和体积浓度之比^[30]:

$$\Delta \rho = \rho_f - \rho_w = \frac{C}{VC} \quad (3)$$

式中 ρ_f 为絮凝体密度, ρ_w 为海水密度, VC 为悬浮体的体积浓度。

为了研究海底表层沉积物的再悬浮行为, 根据测定的沉积物粒度和近底部流速, 计算底部切应力。

$$\tau_0 = \rho_w u_*^2 \quad (4)$$

其中, 摩阻流速根据近底层流速采用流速对数剖面模型计算获得:

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

对于粉砂的底床, 粗糙长度 z_0 取 0.2 mm。泥沙起动时的临界切应力可通过 Soulsby 公式计算^[31]:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} \times g (\rho_s - \rho_w) \times d_{50} \quad (6)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2 D_*} + 0.055 \times (1 - \exp^{-0.02 D_*}) \quad (7)$$

其中 θ_{cr} 为临界 Shields 数, ρ_s 为沉积物颗粒的密度 (取 2 650 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), d_{50} 为平均粒径, D_* 为无量纲粒

径,与海水的运动黏滞系数 ν 和泥沙大小有关:

$$D_* = \left[\frac{g(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w \nu^2} \right]^{1/3} d_{50} \quad (8)$$

2 结果和讨论

2.1 水文水动力特征

研究区的水深约为 27 m, 水体层化明显, 整个水体分为上下两层: 上层水体温度较高, 为 22~24 °C; 下层的温度较低, 为 18~20 °C (图 2a)。在两层之间存在一个较强的温跃层, 垂向上的温度梯度可达 1 °C·m⁻¹ (图 2b, 其中品红色等值线对应的值为 0.5 °C·m⁻¹)。温跃层厚度约为 2~5 m, 在距海底 10~20 m 范围内有规律波动, 涨潮时上升, 落潮时下潜, 略滞后于水位变化。跃层上部和下部水体的混合

情况较好, 温度垂向分布较为均匀。跃层以下水体的温度呈现周期性的变动, 在涨潮阶段升高而在落潮阶段降到最低。相对于底部, 上部水体的情况较为复杂, 在涨落潮期间均出现高值。由于 YSI 出现故障, 其观测资料包括盐度数据在此不加以展示。

观测期间, 潮汐不对称性较强: 第一个半日潮的潮差 (3.6 m) 大于第二个 (2.1 m); 两个半日潮的涨潮历时 (分别为 5.17 和 6.33 h) 均小于落潮历时 (分别为 6.67 和 6.85 h); 涨潮流速均大于落潮流速, 最大流速出现在第一个半日潮的涨潮阶段 (图 2c)。流速在垂向上分布极不均匀, 一般来说, 底部较小, 跃层和上部较大, 最大可达 1.2 m·s⁻¹。水流呈顺时针方向旋转, 落平潮时向南, 涨平潮时向北, 上部水体的转向略滞后于底部 (图 2d)。然而, 在第一个半日潮的落潮初期阶段, 跃层流向较其上下层水体滞后约 1 h 且流速达到最小。

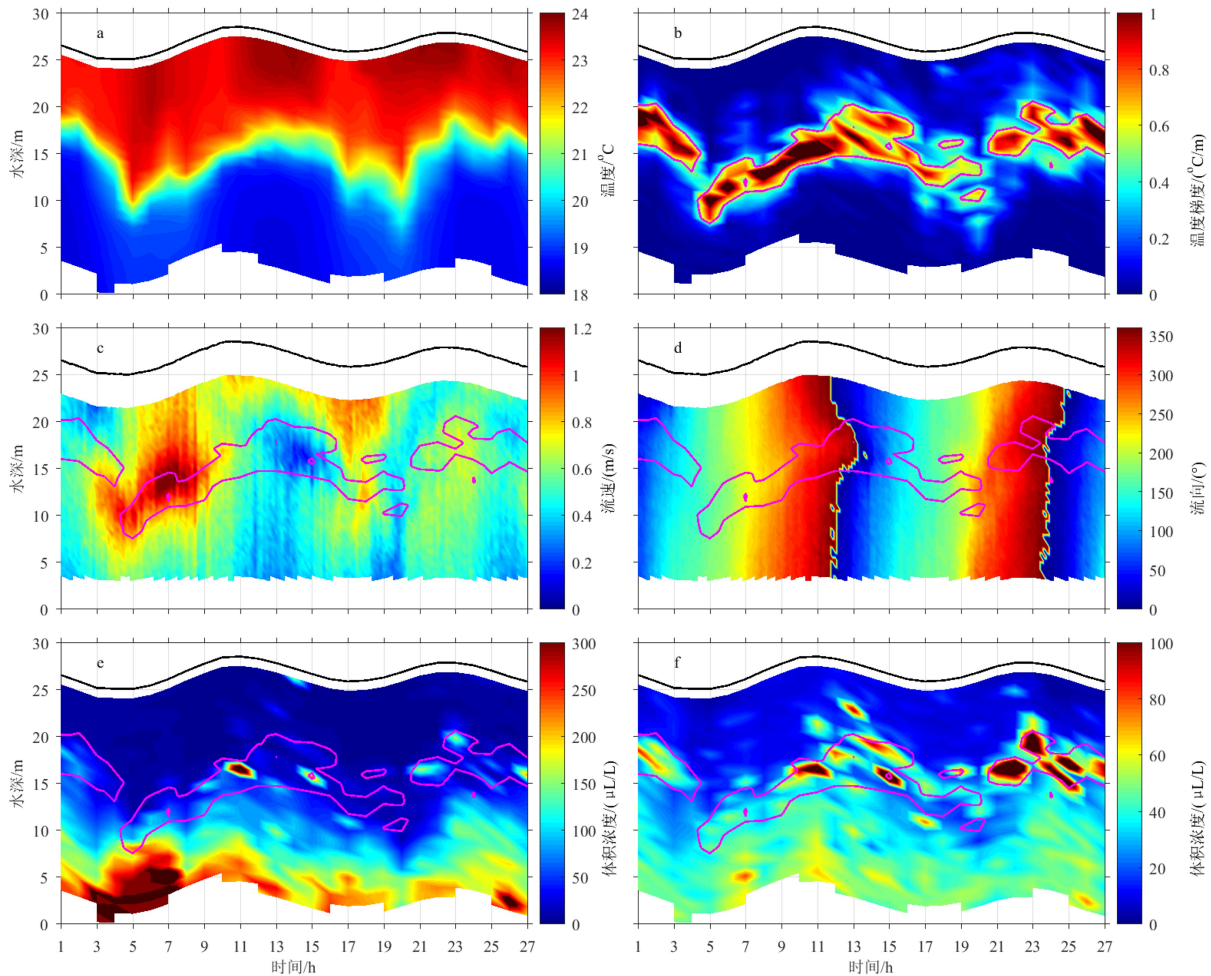


图 2 温度 (a)、温度梯度 (b)、流速 (c)、流向 (d)、悬浮体的体积浓度 (e) 和平均粒径 (f) 剖面分布图 (图 2b-f 中品红色曲线为温度梯度 0.5 °C·m⁻¹ 的等值线)

Fig.2 Contour diagrams of temperature (a), temperature gradient (b), current speed (c) current direction (d), SPM volume concentration (e) and mean grain size (f) (The magenta line in Fig. 2b-f represents the contour line of 0.5 °C·m⁻¹ temperature gradient)

2.2 悬浮体的分布特征

悬浮体在时间和垂向上的分布极不均匀。结合温度跃层的位置, 悬浮颗粒体积浓度的分布呈现如下的特点: 在温跃层以上及跃层附近较低, 在温跃层以下随水深增加逐渐升高, 最高值可达 $400 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2e)。此外, 在跃层附近还存在斑点状的高浓度区。跃层以上的悬浮体平均粒径较小, 一般小于 $20 \mu\text{m}$; 底部水体中悬浮体平均粒径约为 $30\sim 80 \mu\text{m}$; 而跃层附近悬浮体的平均粒径较大, 最大可达 $100 \mu\text{m}$ 以上, 在水层中呈斑块状分布 (图 2f)。对比悬浮体的粒级组成发现: 表层主要由 $2\sim 20 \mu\text{m}$ 的小颗粒和少量的大颗粒组成, 故平均粒径相对较小; 底部分布较广, 为 $20\sim 200 \mu\text{m}$, 平均粒径较大; 而跃层附近多为大于 $100 \mu\text{m}$ 的大颗粒, 导致平均粒径最大 (图 2f 和 3a)。相比较而言, 海底表层沉积物组成以 $4\sim 63 \mu\text{m}$ 的粉砂为主 (占比达 80% 以上), 平均粒径为 $11\sim 16 \mu\text{m}$ (图 3b)。

悬浮体的质量浓度也显示出类似的趋势。观测期间, 跃层及其上部水体的悬浮体质量浓度较低, 多小于 $10 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而底部的质量浓度可达 $20\sim 96 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4a)。通过初步的数据分析可以发现, 平均质量浓度自表层到底部呈现先降低后增加的趋势, 且其垂向梯度随水深而增加 (表 1)。悬浮体质量浓度的离散程度也呈现出与质量浓度相同的趋势, 在近底部达到最大。为了研究海底表层沉积物的再悬浮行为, 计算底部切应力以及 10、63 和 $153 \mu\text{m}$ 粒级颗粒对应的起运临界值 (图 4b)。结果发现, 这 3 个粒级的颗粒在绝大多数时间均可被起运, 这与类似环境的研究结果比较接近^[32-33]。因此, 大潮期间, 研究区的海底表层沉积物几乎均可经再悬浮进入水体, 导致底部悬浮体浓度增大。可以发

现近底层悬浮体高质量浓度与底部切应力峰值对应良好但存在一定的滞后 (如图 4 箭头所示)。此外, 悬浮体质量浓度 (C) 和体积浓度 (VC) 之间存在着显著的线性相关性 (图 5), 因质量浓度的采样精度较低, 据此关系可通过悬浮体的体积浓度估算整个水体的质量浓度分布。

悬浮体根据有效密度与平均粒径的关系在垂向上可分为三种类型: 温跃层上部 (包括表层、5 mbs 和部分 10 mbs, 如红圈所示) 的平均粒径较小, 有效密度跨度较大, 除个别异常高值, 一般为 $7\sim 1750 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; 底部水体 (20 mbs、近底层和部分 10 mbs, 如黑圈所示) 的悬浮体平均粒径为 $30\sim 80 \mu\text{m}$, 有效密度为 $100\sim 400 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 分散性较小; 而跃层附近 (10 mbs, 如绿圈所示) 的悬浮体较大, 有效密度一般小于 $100 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 6)。不难发现, 有效密度和粒径之间存在负相关关系。其他研究结果显示, 悬浮体的有效密度因为絮凝过程会随着粒径的增加而降低^[30, 34-38]: 小的悬浮体由原始碎屑经较低程度的絮凝形成, 具有较高的有效密度^[30, 38]; 大的颗粒因为程度较高的絮凝而含有较高比例的间隙水, 从而具有较低的密度^[39]。杭州湾和舟山群岛海域悬浮沉积物平均粒径为 $7\sim 9 \mu\text{m}$ ^[12], 而海底表层沉积物的平均粒径为 $11\sim 16 \mu\text{m}$ 。因此, 跃层以上的悬浮颗粒平均粒径与碎屑沉积物的大小比较接近, 但有效密度与之相比普遍较低。因此, 上部水体中有效密度相对较高的悬浮体应经较低程度的絮凝形成。底部水体中的悬浮体平均粒径较海底和水体中沉积物大, 有效密度较低, 应为细颗粒沉积物经较高度度的絮凝形成的絮凝体。而且, 随着紊动增强和悬浮体质量浓度升高, 絮凝程度有增加的趋势 (图 4 和图 7 中第 3~10、15~17 小时底部切应力和质量浓度均较高时有效密度降低)。除此之外, 较低密

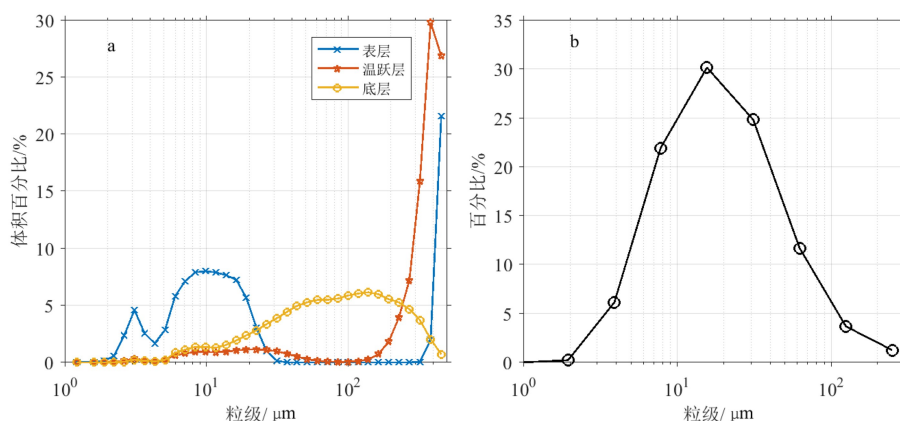


图3 悬浮体 (a) 和海底表层沉积物 (b) 的粒级分布图

Fig.3 Grain-size distribution of suspended particles (a) and seabed surface sediment (b)

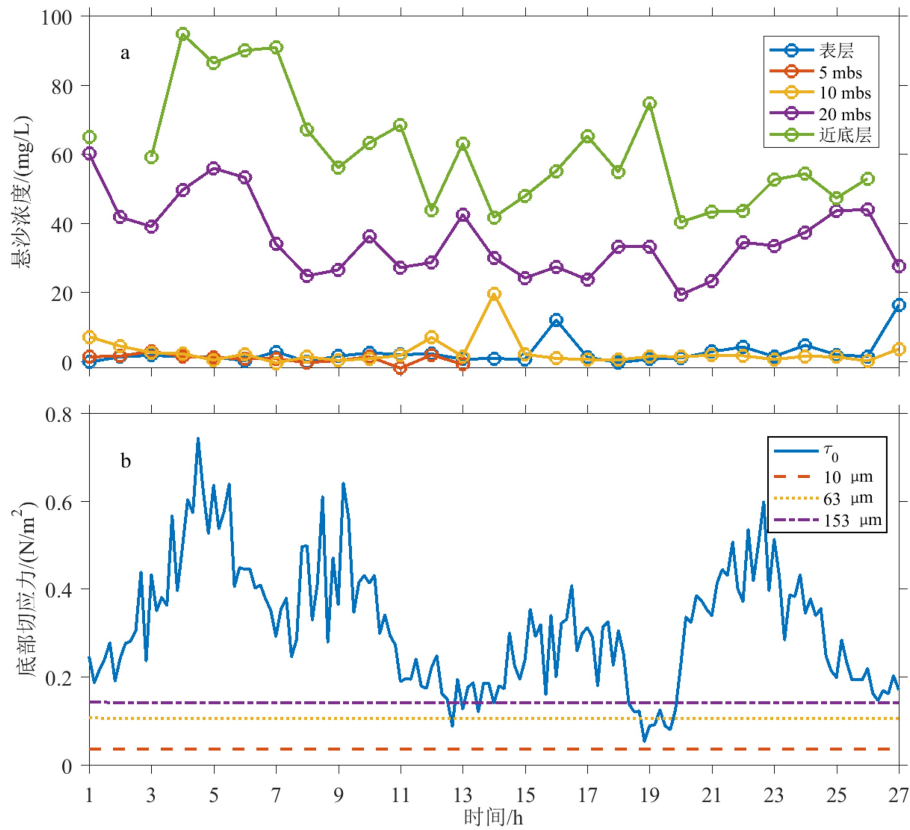


图4 悬浮体质量浓度 (a) 和底部切应力及起动临界值 (b) 随时间序列图

Fig.4 Time series of mass concentration of suspended particles (C) and bottom shear stress and the threshold values of 10, 63 and 153 μm for movement

表1 悬浮体质量浓度的特征值

Table 1 The characteristic values of mass concentration of suspended particles

	平均质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	质量浓度的标准差/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	质量浓度梯度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
表层	2.88	3.62	—
5 mbs	1.55	0.69	-0.26
10 mbs	2.83	3.82	0.26
20 mbs	35.52	10.45	3.27
近底层	61.02	15.73	5.10

度的生物碎屑也会使悬浮体的有效密度降低。跃层附近存在与底部絮凝体大小相当 ($30\sim 80\ \mu\text{m}$) 但有效密度 ($10\sim 100\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 显著降低的悬浮体 (图6), 应为生物颗粒。其他学者也发现跃层附近普遍具有较高的初级生产力^[40-43], 浮游生物富集。此外, 跃层以上有效密度较低的悬浮体, 推测亦受生物碎屑的影响。

2.3 悬浮体的输运特征和机制

对一个潮周期内的各层流速做平均, 发现整个

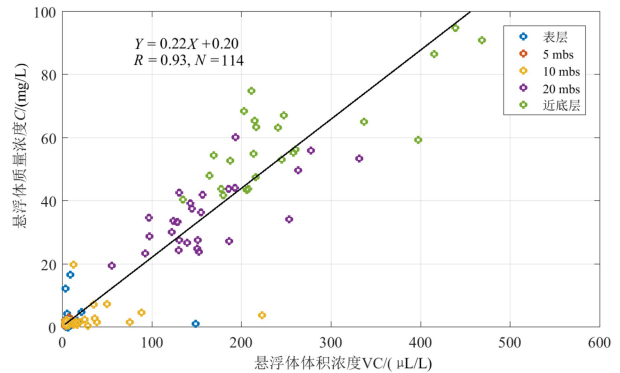


图5 悬浮体的体积浓度 VC 与质量浓度 C 的关系图

Fig.5 C/VC scatter plot of suspended particles

水层的余流具有表、底层流速小而中层大的特点 (可达 $0.15\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。余流在整个水体中的流向并不一致, 大致在西南方向左右摆动: 余流在表层流速较小, 指向西南方向; 随着水深增加, 余流向逆时针方向偏转且保持方向基本不变, 速度增大; 流速在中层达到最大后随着水深增加逐渐降低, 流向沿逆时针方向偏转; 在底部附近余流流速降到最小, 流向又沿顺时针方向偏转 (图8a)。结合悬浮体的垂向分布, 在一个全日潮周期内, 通过单位面积的净

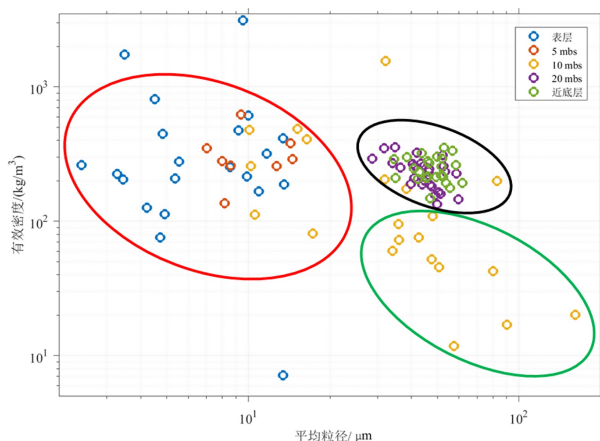


图 6 悬浮体的有效密度与粒径关系图

(红圈对应跃层以上悬浮颗粒, 绿圈对应跃层附近悬浮颗粒, 黑圈对应跃层以下悬浮颗粒)

Fig.6 The relationship between effective density and mean grain size of suspended particles

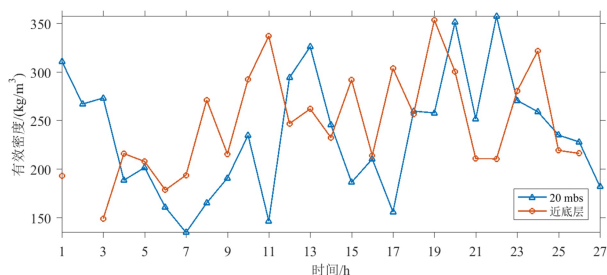


图 7 底部絮凝体的有效密度序列图

Fig.7 Time series of floc effective density in the bottom water

输运量随着深度的增加而增大: 在上部较小, 在中层处稍有增加但方向变动频繁(东-西北-东南), 最后在海水底部达到最大(500 kg·m⁻²), 方向指向南偏西(图 8b-c)。在一个全日潮周期内整个水体内悬浮体的单宽净输运量约为 3 166 kg, 指向西偏南 15.6°

方向。由于观测区域受水动力的冲刷作用, 底部悬浮体浓度增高, 形成远远高于其他水层的底部雾浊层。而跃层的屏障作用, 使得再悬浮的沉积物只在跃层以下水体富集, 跃层以上输运能力不显。跃层附近的悬浮体输运方向多变, 相互抵消, 输运能力也较弱。因此, 一个潮周期过程中超过 3 000 kg 的单宽净输运绝大部分是通过底部雾浊层实现的。而底部水体中悬浮体向偏南方向的输运, 对浙闽泥质区的沉积过程意义重大。

悬浮体输运通量的机制分解结果如表 2 所示, 总输运通量为 0.038 kg·m⁻¹·s⁻¹, 即一个潮周期内的单宽净输运量约为 3 400 kg, 与通量法计算的结果比较接近。其中, 欧拉余流(F_1)引起的悬浮体输运占主导作用, 一个全日潮周期中的输运通量达 0.046 kg·m⁻¹·s⁻¹, 指向西偏南方向。其他主要贡献项包括 F_4 和 F_6 , 前者是潮汐捕捉项, 由再悬浮和沉降作用所致, 输运通量为 0.022 kg·m⁻¹·s⁻¹, 指向东南方向; 后者是垂向的剪切扩散作用, 其值为 0.013 kg·m⁻¹·s⁻¹, 指向正北。这两者的输运方向相反, 相互抵消了一部分后仍指向东南方向。

拉格朗日通量(F_1+F_2 , 两者方向相反, 抵消部分后向南)主导了悬浮体的净输运, 这与其他学者的研究结果一致: 舟山群岛内水道^[44-45]、群岛区^[12, 46]或岛外海域^[12]的沉积物输运机制均以拉格朗日余流输运为主。观测区域位于岛外较开敞海域, 受群岛地形的作用较小, 潮流呈椭圆形, 余流优势相对变小。然而, 陆架环流(浙闽沿岸流、台湾暖流等)的增强, 使得余流输运仍不容小觑。潮汐捕捉项 F_4 是由悬浮体的沉降、海底沉积物的再悬浮滞后引起的, 是研究区除余流输运之外最重要的输运机制。据图 4b 可知, 观测过程中海底表层的粉砂和

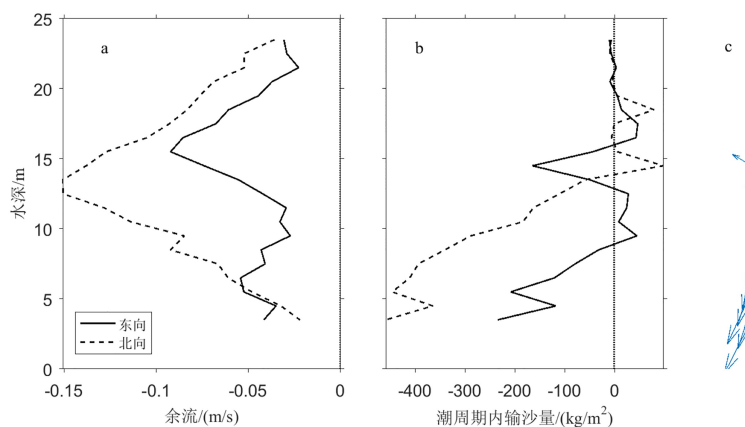


图 8 东西和南北向余流 (a) 和单位面积净输运量 (b) 随水深变化图以及净输运方向示意图 (c)

Fig.8 Residual flow (a) and SPM transport per unit area (b) during a diurnal tide changes with water depth, and schematic diagram of net transport direction (c)

表2 单位宽度悬浮体通量各分量及方向 (正北方向为0°)
Table 2 Tidal-averaged suspended particle flux per width and direction

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	$\sum_{i=1}^7 F_i$
东向通量	-0.020 1	-0.003 5	0.000 1	0.014 9	0.000 0	-0.000 3	0.000 7	-0.008 2
北向通量	-0.041 8	0.007 1	0.000 2	-0.016 0	0.000 8	0.013 3	-0.000 7	-0.037 2
通量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.046 4	0.007 9	0.000 2	0.021 9	0.000 8	0.013 3	0.001 0	0.038 1
输运方向/(°)	206	334	26	137	359	359	135	

沙在大多数时间都可发生再悬浮:在底部切应力增大时,悬浮体浓度迅速增高;底部切应力小于临界值时,浓度降到最低。正是这种周期性变化,引起了沉积物的再悬浮和沉降作用,从而影响了研究区域的物质输运。垂向净环流输运 F_6 是由流速和悬浮体质量浓度的垂向分布不均引起的,与水体层化现象密切相关。因此,本文的研究结果显示了夏季陆架环流和潮汐以及水体层化共同控制了悬浮体的输运过程。偏南向的陆架环流(拉格朗日余流)驱动的拉格朗日通量和潮泵通量造就了南向的沿岸输运,被北向的垂向净环流通量抵消了一部分。可以推测,在冬季风浪作用下水体混合均匀,垂向环流输运减弱,而南向的浙闽沿岸流进一步增强,将导致南向的输运通量显著增加。

舟山海域位于长江沉积物向南输运的通道上,在此处进行的悬浮体通量观测有益于认识沉积物源到汇的过程。对于浙闽泥质区这一巨大沉积体系的研究,长时间多站位的观测是必需的。然而条件的限制,选择在具有代表性的站位进行观测也是认识问题的有效途径。因此,在选取站位进行悬浮体特征和输运过程的研究有利于丰富浙闽泥质区形成和演化的知识体系。冬季,在浙闽沿岸流的带动下,长江冲淡水及其携带的泥沙沿东海内陆架向南输运^[45-46],遇台湾暖流阻碍堆积于浙闽沿岸^[5]。夏季,浙闽沿岸流在西南风作用下北上且携带南部河口入海物质向北推进^[47]。然而,本文通过调查大潮期间的一个全日潮过程,发现夏季也存在南向的沿岸输运。这一南向输运是认识浙闽泥质区从源到汇迁移过程的关键。因此,除潮汐捕捉作用外,夏季的浙闽沿岸流亦可以对泥质区的形成和演化起积极作用。当然,这与观测期间优势风场为北向密切相关。值得指出的是,冬季强沿岸流作用下悬浮体的输运对浙闽泥质区演化的贡献更为重要。

3 结论

(1) 观测区域潮汐不对称性特征显著:第一个

半日潮的潮差大于第二个;涨潮历时小于落潮历时而涨潮流速大于落潮流速。流速在垂向上分布不均,余流在跃层附近达到最大,向上和向下逐渐减小。

(2) 悬浮体按照特征分为三种类型:跃层以上有效密度高的悬浮体絮凝程度较低;底部悬浮体絮凝程度较高,有效密度较低;跃层附近的悬浮体主要为生物颗粒,有效密度最低。

(3) 随着紊动增强和悬浮体质量浓度升高,底部悬浮体的絮凝程度有增加的趋势。

(4) 一个全日潮周期内,受夏季陆架环流和潮汐捕捉以及垂向净环流输运的共同作用,研究区发生了超过 $3\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 的偏南向净输运。其中,浙闽沿岸流和潮汐不对称引起的悬浮体输运向南,流速和悬浮体垂向分布不均导致的输运向北。

致谢: 感谢南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室提供的人力和仪器。感谢浙海科1号的全体船员帮助,感谢参加调查的吴昊、兰庭飞、卢军炯、王寇、张炜、谷海玲等同学的帮助。

参考文献 (References)

- [1] 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等. 南黄海海水中悬浮体的研究[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(2): 101-112. [QIN Yunshan, LI Fan, XU Shanmin, et al. Suspended matter in the South Yellow Sea [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1989, 20(2): 101-112.]
- [2] 高抒. 浅海细颗粒沉积物通量与循环过程[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 22(5): 73-77. [GAO Shu. Fine-grained sediment fluxes and cycling on continental shelves [J]. World Sci-Tech R & D, 2000, 22(5): 73-77.]
- [3] 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 313-327. [SHI Xuefa, HU Limin, QIAO Shuqing, et al. Progress in research of sedimentary organic carbon in the East China Sea: sources, dispersal and sequestration [J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(3): 313-327.]
- [4] 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 depocenter off the southern Zhejiang-Fujian coast [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 150-157.]
- [5] 肖尚斌, 李安春, 刘卫国, 等. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 185-191. [XIAO Shangbin, LI Anchun, LIU Weiguo, et al. Provenance analysis of mud along the Zhe-Min coast [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(2): 185-191.]
- [6] 黄惠明, 王义刚, 王乐乐, 等. 群岛阻滞效应影响舟山群岛水流挟沙力空间变化研究[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 60-67. [HUANG Huiming, WANG Yigang, WANG Lele, et al. Spacial distribution of sediment carrying capacity caused by retarding effect of Zhoushan Archipelago [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 60-67.]
- [7] 于谦, 王韞玮, 高抒. 潮汐与陆架环流作用下的悬沙输运: 江苏新洋港海岸冬季观测结果[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2014(5): 626-635. [YU Qian, WANG Yunwei, GAO Shu. Tide and continental shelf circulation induced suspended sediment transport on the Jiangsu Coast: winter observations out of Xinyanggang [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2014(5): 626-635.]
- [8] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [9] 闵建雄, 丁咚, 李广雪, 等. 利用Landsat卫星影像研究浙闽地区表层悬浮体的分布和迁移[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(2): 44-55. [MIN Jianxiong, DING Dong, LI Guangxue, et al. Distribution and migration pattern of surficial suspended matter in Zhejiang and Fujian mud area detected by Landsat satellite images [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(2): 44-55.]
- [10] 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.]
- [11] 周连成, 李军, 高建华, 等. 长江口与舟山海域柱状沉积物粒度特征对比及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 21-27. [ZHOU Liancheng, LI Jun, GAO Jianhua, et al. Comparison of core sediment grain-size characteristics between Yangtze River Estuary and Zhoushan islands and its significance to sediment source analysis [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 21-27.]
- [12] 胡日军. 舟山群岛海域泥沙运移及动力机制分析[D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2009. [HU Rijun. Sediment transport and dynamic mechanism in the Zhoushan Archipelago sea area[D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2009.]
- [13] 寿玮玮. 舟山群岛附近海域水动力特征及其对物质运输的影响分析[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2009. [SHOU Weiwei. Hydrodynamic characteristics and its impact on mass transport in the Zhoushan Archipelago sea area[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2009.]
- [14] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1974, 2(3): 273-281.
- [15] 吴华林, 沈煊庭, 朱建荣. 河口泥沙通量研究综述[J]. *泥沙研究*, 2001(5): 73-79. [WU Hualin, SHEN Huanting, ZHU Jianrong. Estuarine sediment fluxes: an overview [J]. *Journal of Sediment Research*, 2001(5): 73-79.]
- [16] Hansen D V. Currents and mixing in the Columbia River Estuary[C]//*Ocean Science and Ocean Engineering*. Washington D. C.: Marine Technology Society and American Society of Limnology and Oceanography, 1965: 943-955.
- [17] Fischer H B. Mixing and dispersion in estuaries [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1976, 8(1): 107-133.
- [18] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary [J]. *Estuaries*, 1985, 8(3): 256-269.
- [19] Dyer K R. *Estuarine: A Physical Introduction*[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [20] 吴祥柏, 汪亚平, 潘少明. 长江河口悬沙与盐分输运机制分析[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 8-19. [WU Xiangbai, WANG Yaping, PAN Shaoming. Analysis of the transportation mechanism of suspended sediment and salt in the Changjiang River Estuary [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(4): 8-19.]
- [21] 宋永港, 卢永金, 刘新成. 黄浦江河口水沙输运机制研究[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2016(3): 136-145. [SONG Yonggang, LU Yongjin, LIU Xincheng. Water and sediment transport mechanism in the Huangpu River Estuary, Shanghai [J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2016(3): 136-145.]
- [22] 吴德安, 张忍顺, 严以新, 等. 辐射沙洲东大港潮流水道悬沙输移机制分析[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(2): 216-222. [WU De'an, ZHANG Renshun, YAN Yixin, et al. Mechanism of suspended sediment transport in Dongdagang tidal channel of radial sand ridges [J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2006, 34(2): 216-222.]
- [23] 刘运令, 汪亚平, 吴祥柏, 等. 南黄海苏北近岸西洋水道水沙输运机制分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(11): 120-127. [LIU Yunling, WANG Yaping, WU Xiangbai, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport in the Xiyang Channel along the southwestern Yellow Sea coast [J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(11): 120-127.]
- [24] Yu Q, Wang Y P, Flemming B, et al. Tide-induced suspended sediment transport: Depth-averaged concentrations and horizontal residual fluxes [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 34: 53-63.
- [25] 徐燊, 高建华, 杨旸, 等. 南黄海辐射沙脊群潮汐水道的悬沙输运特征[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 150-162. [XU Can, GAO Jianhua, YANG Yang, et al. Suspended sediment transport patterns in the tidal channels in the southwestern Yellow Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 150-162.]
- [26] 宋立松, 余祈文. 杭州湾悬沙净输移机制探讨[J]. *泥沙研究*, 2003(3): 48-52. [SONG Lisong, YU Qiwen. Preliminary study on suspended sediment transport in the Hangzhou Bay [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(3): 48-52.]
- [27] Hu R J, Wu J Z, Zhu L H, et al. Suspended sediment transport and deposition in the Zhoushan Archipelago sea area [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2009, 8(4): 343-351.
- [28] Turner A, Millward G E. Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002,

- 55 (6): 857-883.
- [29] van Rijn L C. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas [M]. Amsterdam: Aqua Publications, 1993.
- [30] Mikkelsen O A, Pejrup M. In situ particle size spectra and density of particle aggregates in a dredging plume [J]. *Marine Geology*, 2000, 170(3-4): 443-459.
- [31] Soulsby R L. *Dynamics of Marine Sands: a Manual for Practical Applications* [M]. London: Telford, 1997.
- [32] Lee J, Liu J T, Hung C C, et al. River plume induced variability of suspended particle characteristics [J]. *Marine Geology*, 2016, 380: 219-230.
- [33] Liu J T, Hsu R T, Yang R J, et al. A comprehensive sediment dynamics study of a major mud belt system on the inner shelf along an energetic coast [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4229.
- [34] Gibbs R J, Matthews M D, Link D A. The relationship between sphere size and settling velocity [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1971, 41(1): 7-18.
- [35] Gibbs R J. Estuarine flocs: their size, settling velocity and density [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(C2): 3249-3251.
- [36] Geyer W R, Hill P S, Kineke G C. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(7-8): 927-949.
- [37] Wang Y P, Voulgaris G, Li Y, et al. Sediment resuspension, flocculation, and settling in a macrotidal estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(10): 5591-5608.
- [38] Krone C A, Burrows D G, Brown D W, et al. Nitrogen-containing aromatic compounds in sediments from a polluted harbor in Puget Sound [J]. *Environmental Science & Technology*, 1986, 20(11): 1144-1150.
- [39] Droppo I G. Rethinking what constitutes suspended sediment [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(9): 1551-1564.
- [40] Derenbach J B, Astheimer H, Hansen H P, et al. Vertical microscale distribution of phytoplankton in relation to the thermocline [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1979, 1: 187-193.
- [41] Dekshenieks M M, Donaghay P L, Sullivan J M, et al. Temporal and spatial occurrence of thin phytoplankton layers in relation to physical processes [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 223: 61-71.
- [42] Ferland J, Gosselin M, Starr M. Environmental control of summer primary production in the Hudson Bay system: The role of stratification [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 88(3): 385-400.
- [43] Du X Q, Liu J T. Particle dynamics of the surface, intermediate, and benthic nepheloid layers under contrasting conditions of summer monsoon and typhoon winds on the boundary between the Taiwan Strait and East China Sea [J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 156: 130-144.
- [44] 李占海, 高抒, 沈焕庭. 金塘水道的悬沙运输和再悬浮作用特征 [J]. *泥沙研究*, 2006(3): 55-62. [LI Zhanhai, GAO Shu, SHEN Huanting. Processes of suspended sediment transport and resuspension in Jintang Channel [J]. *Journal of Sediment Research*, 2006(3): 55-62.]
- [45] 宋泽坤, 张俊彪, 施伟勇, 等. 杭州湾口门中部水沙运输机制初探——以岱衢洋为例 [J]. *海洋通报*, 2015, 34(3): 267-274. [SONG Zekun, ZHANG Junbiao, SHI Weiyong, et al. Mechanism of water and suspended sediment transport in the middle outlet of the Hangzhou Bay: a case study of Daiquyang Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(3): 267-274.]
- [46] 董超, 陈俊兵, 谢永清, 等. 舟山沈家门海域悬沙运输特征研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(1): 78-86. [DONG Chao, CHEN Junbing, XIE Yongqing, et al. Transportation of suspended sediment in Shenjiamen offshore area of Zhoushan [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2018, 38(1): 78-86.]
- [47] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义 [J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(1): 80-86. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of major elements in the surface sediments from the inner shelf mud area of the East China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(1): 80-86.]