

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.01.005

椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究

刘伟,范代读,涂俊彪,芦军

同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

摘要:通过分析2016年3月椒江河口两个定点站位的潮周期水文泥沙观测数据,研究了椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制。结果表明,河口内侧站位潮流速大于外侧站位值,两站位垂线平均悬沙浓度分别为 $0.3\sim5.8\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $0.3\sim1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 。悬沙通量机制分解表明,内侧站以向海的潮泵输沙效应最显著,对单宽输沙量绝对值贡献率为43.9%,其次是向陆的平流和垂向净环流输沙,综合作用下悬沙向陆净输移 $0.39\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$;外侧站位以向海的平流输沙为主导作用,贡献率为72.6%,悬沙向海净输移 $0.10\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。小波分析和频谱分析表明,含沙量、输沙率及流速三者之间存在不同的响应关系,内侧站输沙率主要受流速的影响,而外侧站位则主要受控于悬沙浓度变化。

关键词:椒江河口;机制分解;潮泵作用;平流输沙;小波分析

中图分类号:X141 文献标识码:A

Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring

LIU Wei, FAN Daidu, TU Junbiao, LU Jun

State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: A detailed study on hydrodynamic characteristics and transportation mechanisms of suspended sediment at two specific sites of the Jiaojiang Estuary were conducted in March, 2017. The data resulted from the observation at anchor stations show that the Jiaojiang Estuary is characterized by a bidirectional field of currents, and the tidal currents at the stations within the river mouth are obviously stronger than that at the sites located outside the river mouth. The depth-mean SSCs at the two stations are $0.3\sim5.8\text{ kg}/\text{m}^3$, and $0.3\sim1.0\text{ kg}/\text{m}^3$, respectively. The results of mechanism decomposition of sediment transport indicate that at the upstream site, the dominant mechanism of transporting suspended sediment is the seaward tidal pumping, which contributes 49.3% of the total absolute sediment flux, followed by the landward advection and the vertical net circulation. As the result, the net suspended sediment transport is $0.39\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ landward. However, the sediments fluxes at the downstream station are dominated by the seaward advection, with 72.6% of contribution, and the net suspended sediment transport is $0.10\text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ seaward. The three-layers wavelet analysis and spectral analysis suggest that there are somewhat coupling response relations between the SSC and the sediment transport rate and flow velocity. The sediment transport rate is dominated by the flow velocity at the outer site of the estuary, and SSCs at the site inside.

Key words: Jiaojiang Estuary; mechanism decomposition method; tidal pumping; advection; wavelet analysis

河口作为河流的尾闾,是连接陆地与海洋的枢纽,处于海陆相互作用界面,在全球物质、能量和信息交换中扮演着重要的角色。河口水流、泥沙作为有机质、营养盐及污染物的载体,在河口地貌、生态系统和港口管理中扮演着重要角色^[1-4],一直是沉积地貌学家、生态学家和港口航道工程学家和管理者关注的热点。悬沙输运机制分析可

为地貌演化、港口航道治理和生态资源研究提供重要的科学依据。

河口悬沙输运与捕集受许多因素的控制,如径流量、潮汐动力、悬沙动力、流体结构、层化和地形^[2,5-7],悬沙在永久沉积前会经历悬浮、沉降、再悬浮、平流输运等循环过程。河口普遍存在某一区域的悬沙浓度显著高于其周围水体中的悬沙浓

资助项目:国家自然科学基金项目“人类活动影响下长江口北支动力地貌演化与沉积地层格架研究”(41776052);科学科技基础性工作专项“典型中小入海河流河口动力沉积地貌与环境本底数据调查”(2013FY112200);中国东盟海上合作基金“长江三角洲与红河三角洲全新世沉积演化对比研究”

作者简介:刘伟(1990—),男,硕士生,主要从事沉积动力学研究,E-mail:9liuwei@tongji.edu.cn

通讯作者:范代读(1972—),男,教授,从事海洋地质研究,E-mail:ddfan@tongji.edu.cn

收稿日期:2017-05-31; **改回日期:**2017-12-20. 周立君编辑

度,这一最大浑浊带的形成与悬沙捕集密切相关。悬沙的捕集可以发生在多种情况下,受到一系列不同物理和生物地球化学过程及其相互作用的影响。Fischer^[8]使用物质通量机制分解法分析了河口输运机制,并认为横向净环流在大多数河口物质输移中是最为重要的。后来 Dyer^[9]对不同河口之间的物质通量进行了对比,指出垂向环流、潮泵作用和再悬浮是物质输运的主要机制。Winterwerp^[10]利用类似方法分析了各个机制对悬沙通量输运的贡献。通量分解方法已被广泛应用于研究悬沙通量模式和河口最大浑浊带形成机制^[11-13]。

通量机制分解法虽然能分析各动力项和其相对贡献,但基本上是对潮周期内悬沙净输移的分析,缺乏对输运过程的细致分析。小波分析是一种分析多尺度信号的方法,同时也是分析非平稳信号的有力工具,它克服了窗口傅里叶变换固定分辨率和缺乏离散正交基的弱点,既可分析信号的近似即概貌,又能分析信号的细节变化特征,具有空间局部化特性^[14]。小波分析通过对时间序列的研究,能清晰地揭示出隐藏在其中的多种细节信息。近年来小波分析逐渐被应用于悬沙输运分析中,探讨潮流场对悬沙输运的贡献^[14,15]。

椒江水系是浙江省第三大河流,属于典型的山溪性河流。1997 年永宁江口门建闸后,椒江河口由灵江、椒江和椒江口三段组成^[16]。灵江为三江村到三江口河段,长约 45km,其下至牛头颈(口门)河段为椒江,长约 12km,口门以外为椒江口和台州湾^[17]。椒江河口径流主要来自灵江,径流量洪枯季变幅大,二者相差可达 1950 余倍。椒江河口的潮波来自西太平洋,台州湾内呈正规半日潮,具有顺时针旋转性质^[18]。但随着口外喇叭形不断向内收敛,受河宽和水深减小、地形摩阻增大等影响,潮波上溯过程中不断变形,形成涨潮历时小于落潮历时的非正规半日浅海潮。椒江河口属强潮河口,最大潮差可达 6.3m,平均潮差约为 4m,潮流垂线平均流速可达 2m/s 以上^[19],是塑造河口河床的主要动力。但近年来人类活动不断增强,使水动力条件不断发生改变^[20]。椒江河口悬沙主要是淤泥质粉砂,中值粒径为 4~9μm,属于粘性颗粒的范围。椒江河口泥沙除一部分来自流域,大部分细颗粒泥沙从海域随潮流进入,并且主要是长江物质^[21]。椒江河口水体非常浑浊,最大浑浊带内浮泥层时常发育,大潮期近底悬沙浓度可超 40kg/m³^[19,22],含沙量如此之高的强潮山溪性河口在我国实属罕见。

椒江河口是强潮高悬沙的山溪性河流河口,其

水动力研究、悬沙絮凝沉降、悬沙时空分布规律是一直受到众多学者的关注。符宁平和毕敖洪^[23]根据大量实测资料分析指出,悬沙运动是椒江河口泥沙运动的主要形式。Dong 和 Wolanski 等^[24]结合实测资料和数值模型分析了椒江河口悬沙来源及含沙量随潮流变化的规律,认为海域泥沙随潮流进入河口是主要来源,口外盐度层化引起的重力环流对悬沙向口内输运有着重要作用,海门处悬沙在潮周期内表现出涨潮阶段只有一个峰值且与最大流速同步,而退潮阶段因再悬浮和平流作用出现两个峰值且滞后于流速极大值出现时刻。夏威夷等^[17]通过将椒江河口分为 3 个不同区段,讨论了径流和潮流相对强弱对悬沙输运的影响,定性分析了含沙量与水位、流速之间的周期性变化特征。Guan 等^[25]采用 2D 数值模型分析了椒江口粘性悬沙的输运过程,模拟结果表明泥沙运动主要受沉降形成的软泥沉积物、悬沙引起的浮力效应、浮泥层对紊流的抑制作用和口外悬沙输入四个因素的控制。目前对椒江河口研究的重点主要集中于最大浑浊带内,但根据实测资料将浑浊带内悬沙输移与外侧悬沙输运结合起来探讨他们之间交换过程的研究还较少。而且利用机制分解法开展相关输运动力机制的研究也很少。本文选取椒江口-台州湾为研究区域,主要基于河口内外侧 2 个站位的 2016 年 3 月枯季的潮周期观测的水文资料,运用通量机制分解法,并结合小波分析法进行论证,对口门附近悬沙输运特征及机制等进行探讨。

1 方法

1.1 野外现场水文数据采集

2016 年 3 月 17—20 日先后在椒江河口 A 站位(小潮,17 日 15:00—18 日 18:00)和 C 站位(小潮,19 日 12:00-20 日 2:00)进行了现场水文定点潮周期观测(图 1)。为了对潮周期水文资料进行补充,17 日在涨潮期间进行了从 E 到 A 的断面观测。主要包括水深、流速、盐度和浊度等水文参数的采集。观测期间,使用双频测深仪记录水深,将 Campbell OBS-3A 和 Idronaut 304plusCTD(采样频率都是 1Hz)固定在不锈钢架上的同一高度,用电动绞车以一定速度(0.3m/s)进行投放。每小时对水体的温度、盐度、浊度等进行剖面观测,在表层、0.2H、0.4H、0.6H、0.8H 和近底层(H 代表水深)停留约

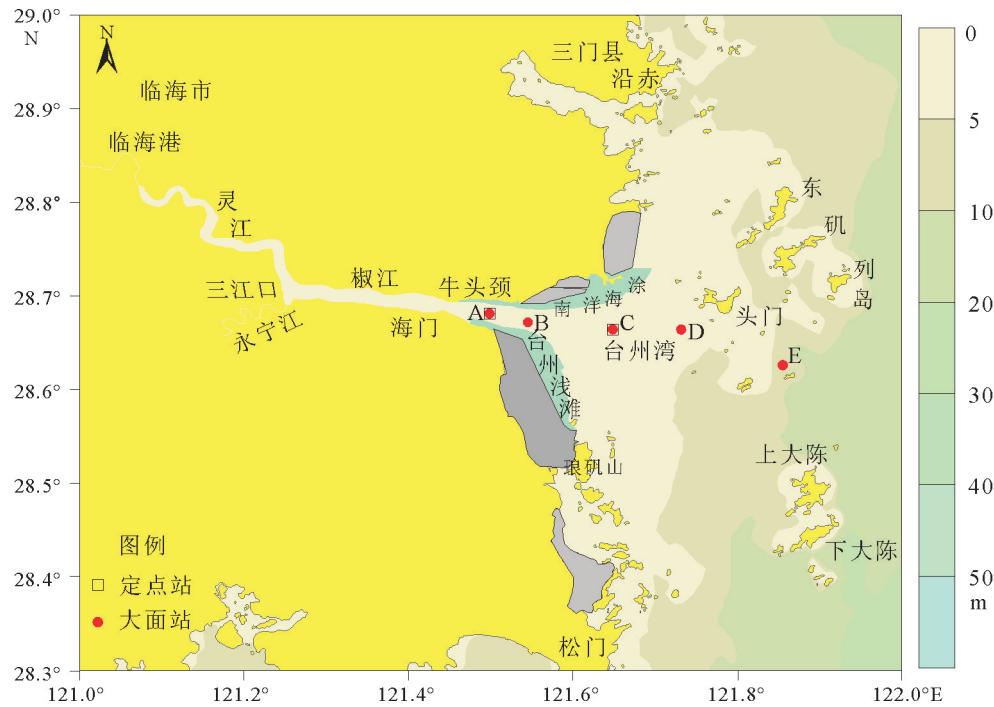


图1 椒江河口湾地形及观测站位(改自文献[22])

Fig.1 Bathymetric map of the Jiaojiang Estuary and observation stations

2min。并在相应层位取一定量的水样,现场用 $0.45\mu\text{m}$ 孔径的滤膜进行抽滤并冷藏,同时记录水样体积,然后在室内进行烘干称重,获得水体悬沙浓度。此外,利用船载声学多普勒流速剖面仪ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler) 600kHz探头向下观测水体剖面的流速、流向,设定单元厚度为0.5m,每分钟采集120呼(采样频率为2Hz)。

1.2 数据分析方法

1.2.1 悬沙通量机制分解

悬沙通量指单位时间内通过与流向垂直的一定面积的悬沙总量,而机制分解法就是探讨各个分量(因素)对总通量的贡献^[15],以及各个分量所表达的内在输移机理。通量机制分解法一直是研究河口悬沙输运过程与机制的重要方法。受地形所影响,在涨、落潮过程中测站的水沙主要沿航道方向作往复运动。因此,本文在进行单宽悬沙通量计算时只考虑纵向输移。根据Dyer^[26]的流速分解方法,瞬时流速 $u(x,z,t)$ 可以分解为垂线平均量(\bar{u})及其偏差项(u')之和,即: $u = \bar{u} + u'$,而垂线平均值 \bar{u} 又可以分解为潮平均量 \bar{u}_0 和潮变化量 \bar{u}_t 之和,即: $\bar{u} = \bar{u}_0 + \bar{u}_t$,因此瞬时流速 $u(x,z,t)$ 可写成

$$u(x,z,t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u' \quad (1)$$

同理,瞬时含沙量 $c(x,z,t)$ 和水深 $h(x,t)$ 也同样可分解为

$$c(x,z,t) = \bar{c}_0 + \bar{c}_t + c' \quad (2)$$

$$h(x,t) = h_0 + h_t \quad (3)$$

单宽潮周期平均输水量为

$$\begin{aligned} \langle Q \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u dz dt = \bar{u}_0 h_0 + \langle h_t \bar{u}_t \rangle \\ &= h_0 (\bar{u}_E + \bar{u}_S) = h_0 \bar{u}_L \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \bar{u}_L 、 \bar{u}_E 、 \bar{u}_S 分别为一维垂线平均拉格朗日、欧拉和斯托克斯余流。拉格朗日余流是指水体在一个或多个潮周期时段内的平均值;欧拉余流是除去周期性天文潮后的非周期性流动,通常由风海流、密度流、径流和潮汐余流等因素导致;斯托克斯余流直接反映水位变化量和潮流变化量的相关性,主要由水波的非线性引起。

根据上述流速、含沙量和水深的分解方法,潮周期平均单宽悬沙输运量为

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h u c dz dt &= h_0 \bar{u}_0 \bar{c}_0 + \langle h_t \bar{u}_t \rangle \bar{c}_0 + \\ &\quad \langle h_t \bar{c}_t \rangle \bar{u}_0 \\ &T1 T2 T3 \\ &+ h_0 \langle \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + \langle h_t \bar{u}_t \bar{c}_t \rangle + h_0 \langle \overline{u'c'} \rangle + \langle h_t \overline{u'c'} \rangle \\ &T4 \quad T5 \quad T6 \quad T7 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为潮周期平均,T为潮周期,上划线表示垂线平均。T1表示欧拉余流引起的悬沙输移项;T2为潮汐与潮流相关项,即斯托克斯漂流输移量;T1+T2组成平流输移,也称为拉格朗日输移项,代表了水体净输移的输沙效应;T3为潮汐与悬沙浓度潮

变化相关项;T₄ 为潮流与悬沙浓度潮变化相关项,主要由沉积物的临界滞后和侵蚀滞后引起的,跟沉积物的再悬浮和沉降有关,也称为潮汐捕集效应;T₅ 为潮汐、潮流和含沙量潮变化相关项,跟这三者的相位差有关;T₃+T₄+T₅ 表示潮泵作用,与水体和底部的泥沙双向交换、相位差有关;T₆ 表示垂线流速变化与悬沙浓度变化相关项,是重力环流的贡献项;T₇ 表示剖面上流速和含沙量的变化量在潮波变形作用下引起的,且 T₆+T₇ 组成垂向净环流输移项,与剪切扩散有关。

上式对应的单宽瞬时悬沙输运率为

$$\int_0^h u c dz = h_0 \bar{u} \bar{c}_0 + h_1 \bar{u}_1 \bar{c}_0 + h_2 \bar{c}_1 \bar{u}_0 + h_3 \bar{u}_1 \bar{c}_1 + h_4 \bar{u}_2 \bar{c}_1 + h_5 \bar{u}_3 \bar{c}_1 + h_6 \bar{u}_4 \bar{c}_1 + h_7 \bar{u}_5 \bar{c}_1 \quad (6)$$

1.2.2 小波分析

本文利用光滑性较好的 dmey 小波对垂线平均流速、悬沙浓度和瞬时输沙率三个变量进行分解。理论上分解可以无限制的进行下去,但事实上分解可以根据不同的目标来选择相应的尺度进行。根据全日潮潮周期的时间长度,本文利用小波分析将上述三个变量进行三层分级向下分解。原始信号 S=a₁+d₁, a₁ 又可以分解成 a₂+d₂, a₂ 可再分解为 a₃+d₃, 所以 S=a₃+d₃+d₂+d₁, a₃ 表征长期变化趋势, 代表信号的低频变化过程; d_i (i=1,2,3) 表征信号的局部部分, 可代表信号的高频变化过程, 其中 i 越小, 频率越大。其分解的组织结构形式如图 2 所示。

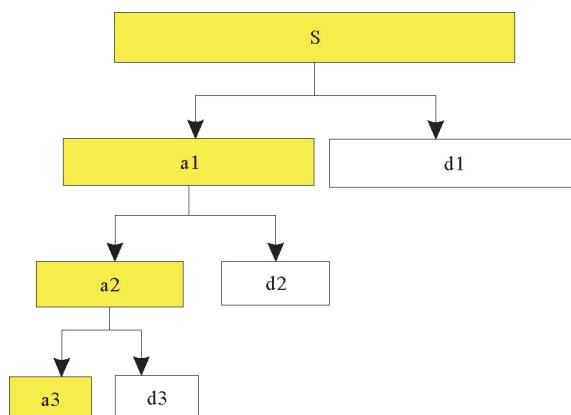


图 2 三尺度分解结构形式图(改自吴德安^[27])

Fig.2 The decomposition structure diagram of three layers

由于粘性颗粒的沉降和再悬浮相对于流速存在滞后效应,以及水平悬沙浓度梯度对悬沙输运的影响,均可使得流速与含沙量之间的相关性减弱^[28], 在一定周期内流速与悬沙浓度呈现出不同的周期和

相位关系。为了更好地探讨流速、悬沙浓度、瞬时输沙率之间的关系,对其大小(忽略其方向)进行小波分析,之后对各分解结果进行归一化的处理

$$x_{i0} = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

式中, x_{i0} 为第 i 个时刻归一化的结果, x_{\min} 、 x_{\max} 分别为所处理分量的时间序列中的最小值和最大值。

2 结果与讨论

2.1 流速、盐度和悬沙浓度的时空分布特征

观测期间,测点 A 的平均水深为 6.5m,潮差为 2.8m;C 的平均水深为 5.6m,潮差为 3.2m。椒江河口潮流受地形边界条件的影响基本以往复流为主,涨落潮主流向与河槽走向基本一致,A 站观测期间涨/落潮流主流向为 281°/99°,C 站涨/落潮流主流向为 283°/110°(表 1)。由于河口向陆变窄,潮波发生变形,A 站位潮流速涨、落潮不对称明显,涨潮流大于落潮流,且落潮时长大于涨潮时长;而 C 站位涨落潮流大小大致相等,呈现出正规半日潮特征,且流速明显小于 C 站位(表 1)。涨急和落急期间,流速出现显著的垂向分层现象,表层流速明显大于近底流速,在涨憩和落憩时刻垂向变化不大,整个剖面上流速均匀分布。有意思的是高流速有时出现在水体中部,形成表底层流速小、中层流速大的现象,与盐度密度跃层位置相对应(图 3)。这种流速垂向结构不对称的现象在其他河口也有出现^[29-31],水体层化增强时,不对称现象更为显著^[32]。

两站位盐度值的最大值均出现在涨平潮。A 站位因位于河口内侧,盐淡水相互作用强烈,盐度为 6.32~23.30PSU,垂向混合较充分,只是在落憩时水体层化现象较明显。而外侧的 C 站位因径流对其影响很小,潮周期内水体充分混合,主要变化范围为 21.63~26.87PSU。

悬沙浓度的分布和变化反映了不同的水动力和边界条件,观测期间两站位的悬沙浓度随涨落潮出现明显的潮周期变化。由于 A 和 C 站位所处地形和水动力环境的不同,悬沙运动行为也表现出明显的差异,A 站位悬沙浓度(最大可达 18kg/m³)远大于 C 站位浓度值(最大为 1.2kg/m³)。潮周期过程中,随着流速的增强,含沙量逐渐增大。涨、落急流时流速较大,近底剪切应力也较大,使悬沙发生再悬浮,而且此时水体混合较均匀,层化抑制作用较弱,湍流混合作用相对较强,使悬浮状态的悬沙易于向上扩散^[33]。最小悬沙浓度通常出现于涨停时刻,可

表1 各站位垂线平均流速特征值统计

Table 1 Statistics of depth mean tidal current velocity at each station

站位	涨潮				落潮			
	平均值(m/s)	最大值(m/s)	流向(°)	历时(h)	平均值(m/s)	最大值(m/s)	流向(°)	历时(h)
A	0.452	0.927	281	5.55	0.365	0.596	99	6.6
C	0.235	0.446	283	6.12	0.254	0.444	110	6.4

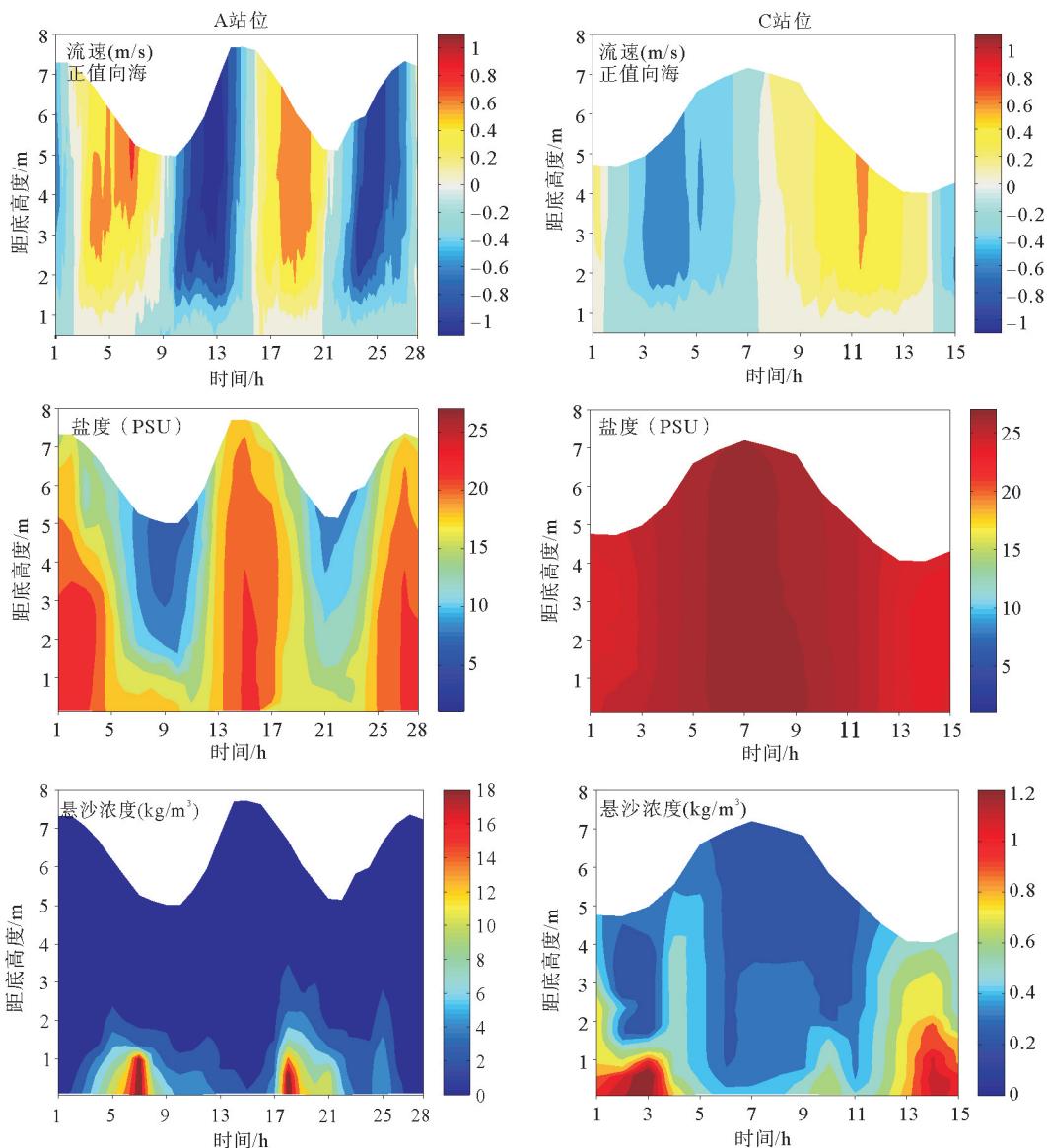


图3 椒江河口A站位(左侧)与C站位(右侧)流速、盐度和悬沙浓度的潮周期变化

Fig.3 Vertical variations in current velocity, suspended sediment concentration and salinity over the tidal cycles at stations A (left) and C (right)

能是因为流速较小有利于悬沙的絮凝从而加速沉降^[34,35],也可因悬沙随涨潮流向上游输移^[17]。A站悬沙浓度峰值一般与流速极大值出现时间较为一致,但落潮期的悬沙浓度明显大于涨潮期,这与流速的涨潮流大于落潮流不对应,可能与枯季径流量小,最大浑浊带核心区上移,导致落潮时能带来更多的

悬沙,即使流速小也能使泥沙发生显著的再悬浮作用。C站落憩或涨潮初期出现高悬沙浓度值,主要受沙源影响所致,涨潮时水流将外海较低的悬沙浓度向内输移,而退潮时水流可将上游或潮滩上高浓度的悬沙输运至此,主要体现出输沙方向对其影响。这种现象在椒江河口其他学者也报道过^[17],在其他

河口也出现类似现象^[34,36]。落潮阶段的高悬沙未完全沉降或仍处于悬浮状态,涨潮初期即使流速很低也可发生较大幅度的再悬浮作用。

2.2 椒江河口湾悬沙输移机制分析

根据实测资料,运用公式(5)对潮周期平均单宽悬沙输运量的各输沙项进行了计算。结果表明各项对悬沙输运率的贡献不同,影响悬沙净输移的主要项有欧拉余流输移项(T1)、斯托克斯漂流输沙项

(T2)、潮流与悬沙浓度潮变化相关项(T4)和垂向重力环流贡献项(T6),具体计算结果和各项对单宽输沙量绝对值的贡献率如图4和表2所示。A站各输沙项值整体比C站明显高,这与A站所处最大浑浊带内和潮流增强有关。A站在整个潮周期内向陆净输移,C站则向海净输运。从表2中还可以看出,A站潮泵效应对悬沙输移的贡献要大于其他贡献项,C站是平流输沙占主导作用。

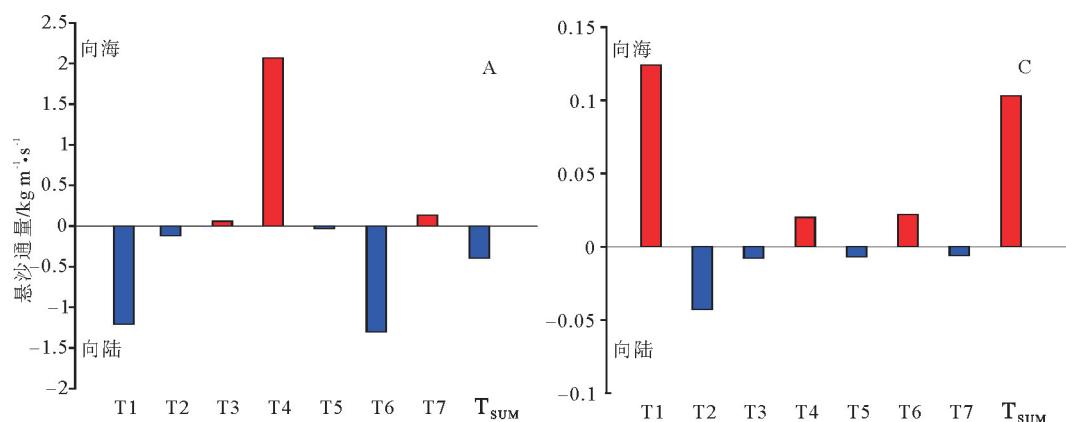


图4 椒江河口A和C站单宽潮周期平均悬沙通量输移分解(正值向海)

Fig.4 Tidally-averaged fluxes per unit width at the observation sites A and C (the positive values denote seaward)

表2 各站观测潮周期期间各输沙项对单宽输沙量
绝对值的贡献率(%)

Table 2 Contributions of different sediment transport
parameters to the magnitude of absolute
sediment transport (%)

时间	站位	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
2016	A	-24.5	-2.3	1.2	42.0	-0.7	-26.5	2.8
2016	C	53.9	-18.7	-3.5	8.7	-3.0	9.6	-2.6

注:正值表示向海输运,负值表示向陆输运。

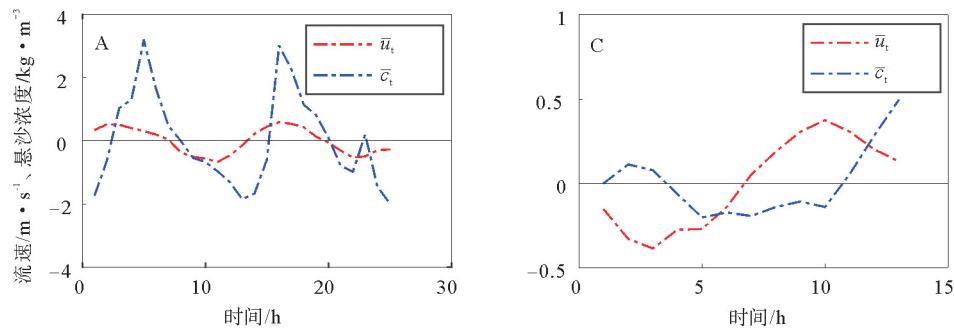
2.2.1 平流输沙项

欧拉余流输移量项(T1)和斯托克斯漂流效应输沙项(T2)构成平流输沙项,其方向由拉格朗日余流的输移方向决定。平流输沙的大小不仅与余流值有关,而且也与潮周期平均含沙量密切相关,张钊等^[15]通过统计指出T1与平均流的相关性强于它与平均悬沙浓度的相关关系。从图4可知,两个站位在整个观测期间T1强度大于T2,T1占绝对优势,这使得平流输沙方向与T1方向相同。A站T1和T2均向陆,两者增强悬沙向陆输移。而C站T1与T2表现出相异方向的悬沙输移,这有利于海陆之间的物质交换,平流的输沙方向向海。由潮汐引起的

斯托克斯漂流效应抑制悬沙向海输运。观测期间,A站平流输沙的强度为-1.321 kg/(m·s),C为0.081 kg/(m·s)。

2.2.2 潮泵效应输沙项

潮泵效应指的是悬沙沉降与再悬浮跟底沙进行双向交换及滞后效应,使得水体悬沙浓度发生涨落潮不对称并与流速存在一定的相位差,致使潮周期内悬沙发生净输移^[11]。各测站的潮汐与含沙量潮变化相关项(T3)和潮流场与悬沙浓度潮变化项(T5)均较小,潮流与悬浮泥沙潮变化引起的潮汐捕集作用(T4)对潮泵效应输沙的贡献占主要。T4的方向取决于流速与含沙量的潮振荡项的乘积,但悬沙浓度的复杂变化是造成T4随潮周期剧烈波动的主要原因^[15]。观测期间,A站大量泥沙被落潮流带向海域,而涨潮期间的再悬浮远小于落潮期,使得落潮阶段的悬沙浓度明显大于潮周期平均含沙量,而涨潮阶段小于潮周期平均悬沙浓度,导致涨落潮阶段的(\bar{c}_t)与(\bar{u}_t)的数值正负一致,使得潮泵作用引起悬沙向海输运(图5)。C站涨落潮观测期间 $\bar{c}_t \bar{u}_t$ 向海陆输沙都有,但整体上向海输沙大于向陆输沙,导致向海净输移。Fischer等^[37]指出悬沙浓度对流速响应的滞后效应对T4也具有重要的影响。

图5 观测期间 \bar{u}_t 与 \bar{c}_t 潮周期内随时间的变化情况(+、- \bar{u}_t 分别代表退潮和涨潮)Fig.5 Temporal Variation of \bar{u}_t and \bar{c}_t in the tidal cycles during the study period(+, - \bar{u}_t denotes ebb and flood, respectively)

2.2.3 垂向净环流输沙项

垂向重力环流贡献项(T6)和流速与含沙量的潮变化相关项(T7)组成河口垂向净环流输沙项。由于垂向各层余流的方向和强度不一致及悬沙浓度垂向上分布不均匀,导致潮周期内各层输沙量在垂向积分后不能相互抵消从而产生净输移。因此其强弱取决于垂向余环流的强度及悬沙垂向分布情况。由图4可以看出,垂向净环流输沙项主要受T6所控制,其输沙强度与垂向余流和悬沙浓度的垂向分布有关。图6为各站位垂向余流结构,各测站的斯托克斯余流都小于欧拉余流。欧拉余流整体上起控制作用,欧拉余流垂向上的变化表征各层潮动力与其他动力对比优势流的输运方向。A站位中层(约0.6H处)的欧拉余流大于表底层,垂向上各层余流

方向一致向陆。C站位余流总体上从表层向底层减小,各层分布方向一致向海。各站斯托克斯余流在垂向上各层大小和方向都变化不大。拉格朗日余流更直观地体现了水体的净输移方向,A站各层余流方向向陆,C站向海。在A站位,垂向净环流对潮周期单宽输沙量也有较为明显的贡献,可达26.5%。

2.2.4 悬沙输移的小波分析

为了研究悬沙输运的内在动力机制,利用小波分析,对A和C站的每小时计算结果的垂向平均流速、垂向平均含沙量和瞬时输沙率作进一步分析,归一化分析结果如图7所示。

可见在低频a3部分,A站含沙量、输沙率与流速有密切的联系,前两者与流速有相似的变化规律,但一般滞后于流速的变化;而在C站悬沙浓度与流速的潮周期变化趋势不一致,输沙率却与流速变化的过程曲线极为相似,说明长周期的悬沙输移主要取决于长周期的流速变化。可能由于A站悬沙浓度高,泥沙絮凝作用强,底部沉降时受阻,造成滞后效应显著。这也可以从d3部分体现出,含沙量与流速出现相位相反的变化,这种相位相反也受沙源供给影响;C站在涨潮阶段三者表现出很好的相关性,但到落潮阶段悬沙浓度与输沙率相似程度仍然很高,但它们开始明显滞后于流速的变化。高频d2部分,A站输沙率与流速变化始终保持同步,而含沙量变化只是在第一个潮周期内滞后于流速与输沙率的变化较明显,在第二个潮周期内三者相似程度极高;C站悬沙输移率与流速仍具有较好的相关性,悬沙浓度涨急后期与流速表现出与相位相反的变化。对于d1部分,A站的悬沙浓度与输沙率两个物理量的潮过程的高频振动波形相似程度都很高,输沙率受浓度影响的变化较明显,流速与其对应关系则差;而C站的三个变化项潮过程相似程度较差,反映出高

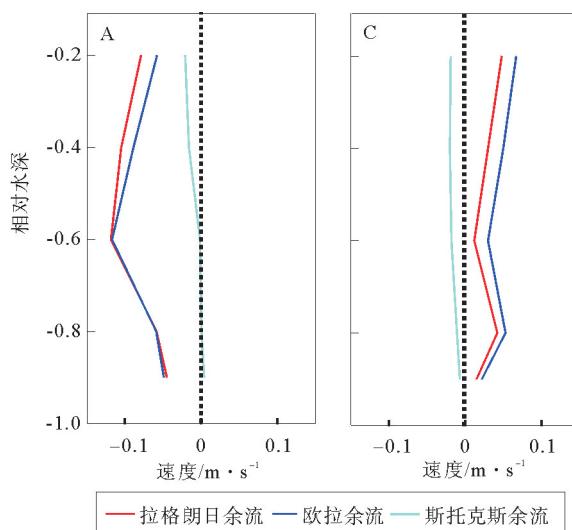


图6 各站观测期间垂向余流结构(正值表示向海,负值向陆)

Fig.6 Vertical profiles of residual currents at the

monitoring sites A and C

(the positive values indicate seaward, and the negative denote landward)

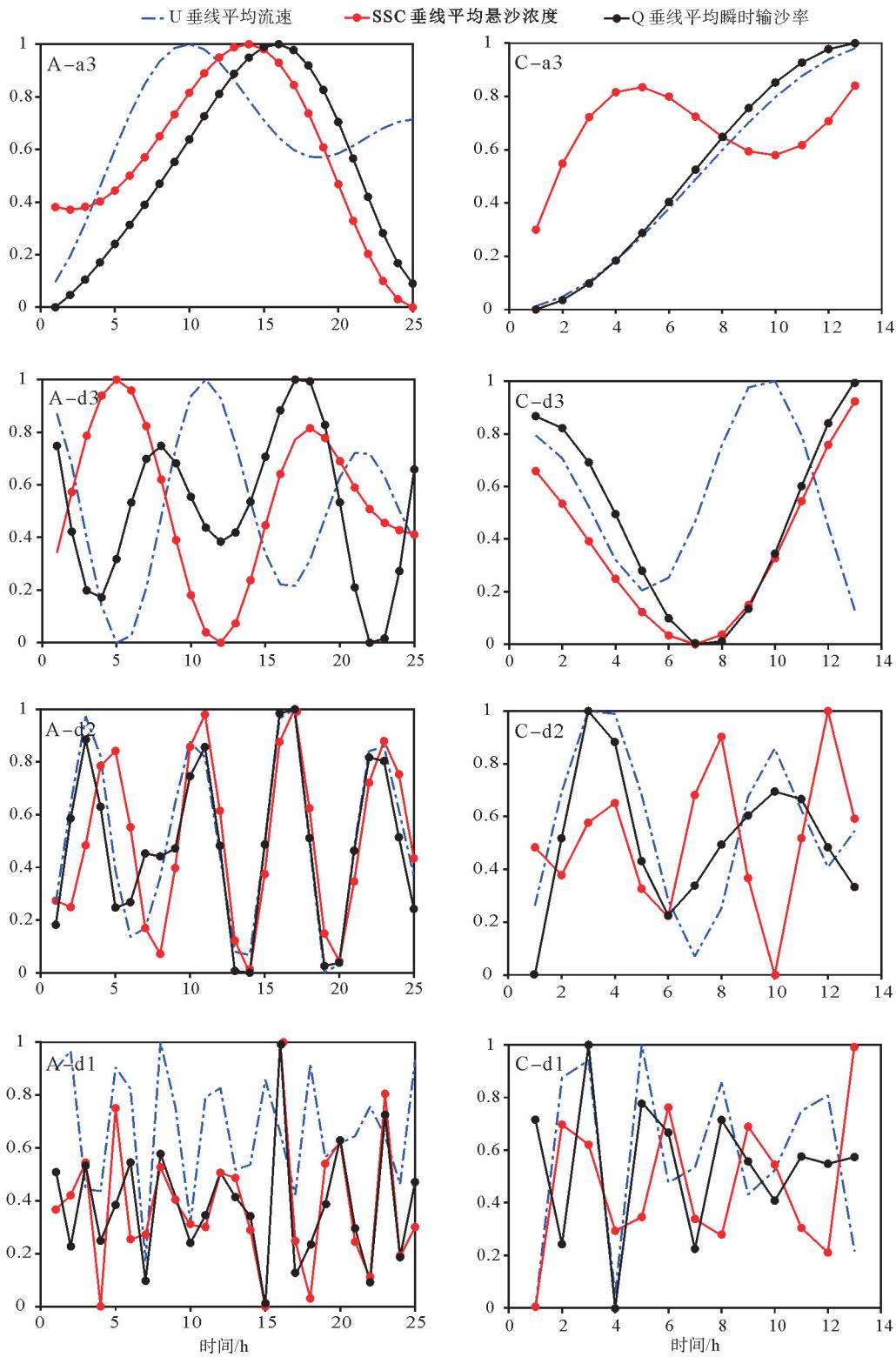


图 7 垂线平均流速、垂线平均悬沙浓度和瞬时输沙率的小波分析结果

Fig.7 The tidal process of the wavelet analysis results about depth-mean current velocity, depth-mean suspended sediment concentration and the instantaneous suspended sediment transport

频变化受多种控制因素的影响,在一定程度上也说明了高频动力在不同地形下的影响程度可能不同。

为了进一步分析潮周期运输的动力特征及其强度,对其频域进行分析,从图 8 的频谱图可以看出,

A 站流速、悬沙浓度的主要周期和次要周期分别约为 6h、12h 和 12h、6h,而输沙率的主要周期约为 6h,说明输沙率主要受流速的影响;而 C 站输沙率与悬沙浓度都表现强度很强的约 12h 周期,流速以

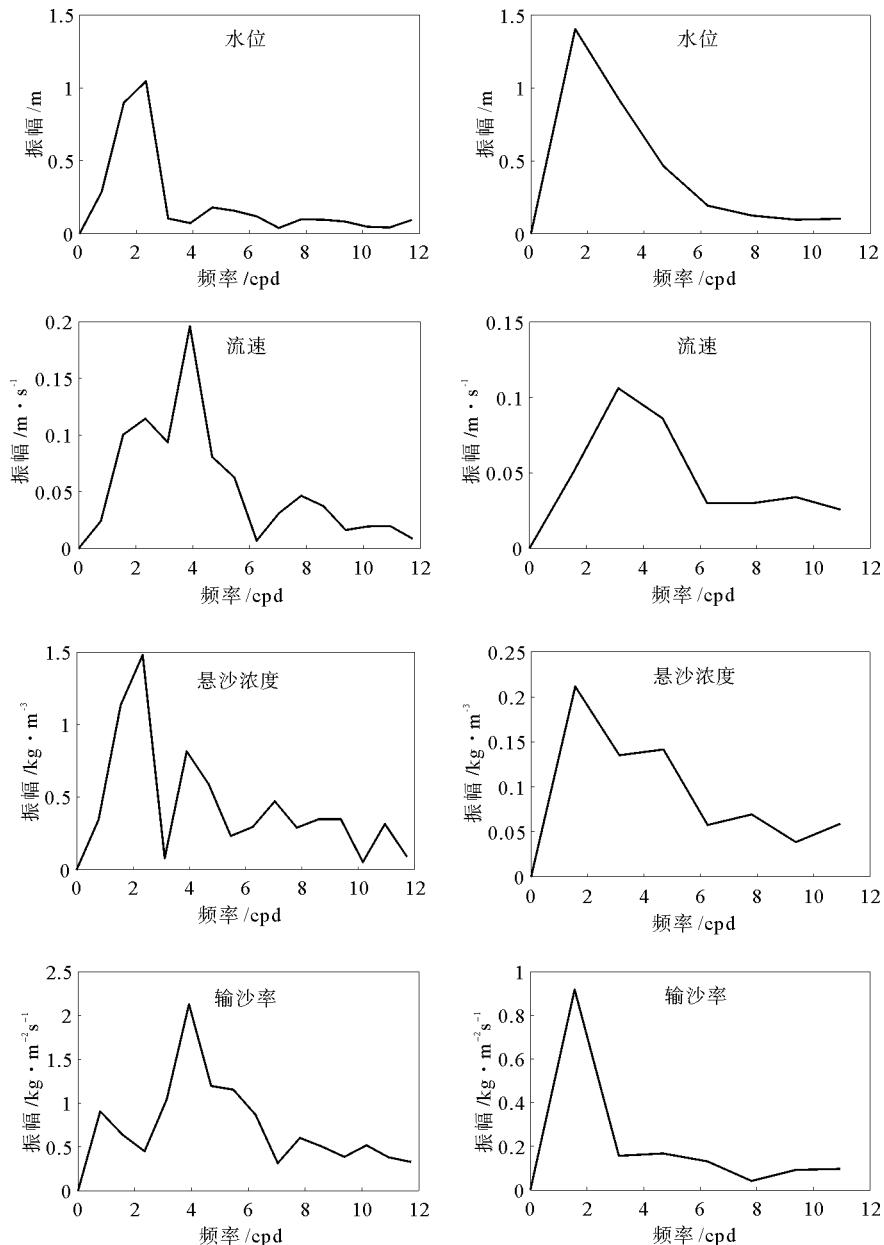


图8 椒江河口 A(左)和 C(右)站位水位、流速、悬沙浓度和输沙率频域图

Fig.8 Spectral analysis of water depth, flow, suspended sediment concentration and sediment transport rate at the Jiaojiang Estuary

8h 构成其主要周期,为混合分潮流,悬沙浓度的变化此时是影响输沙率的重要因素,与前面分析平流占主导作用相吻合,也可以从悬沙浓度潮周期变化中看出,在落憩时悬沙浓度达到最大,这也与水位 12h 的周期变化对应。可见,流速、悬沙浓度、水位三者之间不同的多周期性共同调控着输沙率的周期性,不同地形下控制着不同的输沙规律。

3 结论

(1) 椒江河口口门处主要以往复流为主,内侧 A

站位的流速涨落潮不对称明显,涨潮流大于落潮流,而外侧 C 站位则表现为正规半日潮特征,涨落潮流大致相等。A 站悬沙浓度(最大可达 18kg/m^3)明显大于 C 站(最大为 1.2kg/m^3)。

(2) 悬沙通量机制分解表明,平流输沙和潮泵效应、垂向净环流输沙是影响椒江河口输沙的主要输沙机制。潮泵作用输沙项是 A 站悬沙输运的主导因素,虽然在其作用下该项悬沙输向海,但平流输沙和垂向净环流输沙项是向陆输移,且两者总和超过潮泵项,使得整个潮周期为净向陆输移,总输运量为 $0.393\text{kg/(m \cdot s)}$,促进最大浑浊带的形成。C 站

向海输送的平流输沙项显著大于其他项,对悬沙的输运起主导作用,导致向海净输移 $0.103 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

(3)小波分析显示,长期变化趋势的低频 a3 部分及局部细节高频 d3 部分,含沙量的变化一般滞后于流速的变化,A 站这种滞后效应更显著,输沙率与流速同样表现出类似的变化趋势。高频 d2 部分,A 站三者有很好的对应关系,C 站只有输沙率与流速相一致;到 d1 部分,A 站只有悬沙浓度与输沙率相关性较好,C 站三个物理量运动规律性差。频域分析表明,A 站输沙的主周期约为 6h 和流速主周期相对应,与机制分解法中潮泵输沙占主导作用一致,同样 C 站输沙主要受周期约为 12.4h 的水位变化引起的悬沙浓度变化所控制,这与机制分解得出的长周期的平流作用为主要输沙项相吻合。

参考文献(References)

- [1] De Nijls M A J, Winterwerp J C, Pietrzak J D. On harbour siltation in the fresh-salt water mixing region[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(1): 175-193.
- [2] deNijls M A J, Winterwerp J C, Pietrzak J D. The effects of the internal flow structure on SPM entrapment in the Rotterdam Waterway[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(11): 2357-2380.
- [3] Talke S A, de Swart H E, De Jonge V N. An idealized model and systematic process study of oxygen depletion in highly turbid estuaries[J]. Estuaries and Coasts, 2009, 32(4): 602-620.
- [4] Tu J, Fan D. Flow and turbulence structure in a hypertidal estuary with the world's biggest tidal bore[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017;122:3417-3433.
- [5] Uncles R J, Stephens J A, Harris C. Runoff and tidal influences on the estuarine turbidity maximum of a highly turbid system: the upper Humber and Ouse Estuary, UK[J]. Marine Geology, 2006, 235(1): 213-228.
- [6] Geyer W R. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum[J]. Estuaries and Coasts, 1993, 16(1): 113-125.
- [7] Chernetsky A. Trapping of sediment in tidal estuaries[J]. Repository.Tudelft.nl, 2012;17-89.
- [8] Fischer H. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries[J]. Journal of fluid mechanics, 1972, 53(04): 671-687.
- [9] Dyer K R. The salt balance in stratified estuaries[J]. Estuarine and coastal marine science, 1974, 2(3): 273-281.
- [10] Winterwerp J C. Decomposition of the mass transport in narrow estuaries [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1983, 16(6): 627-638.
- [11] Uncles R J, Elliott R C A, Weston S A. Dispersion of salt and suspended sediment in a partly mixed estuary[J]. Estuaries and Coasts, 1985, 8(3): 256-269.
- [12] deNijls M A J, Winterwerp J C, Pietrzak J D. The effects of the internal flow structure on SPM entrapment in the Rotterdam Waterway[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(11): 2357-2380.
- [13] 沈健,沈焕庭,潘定安,等.长江河口最大浑浊带水沙输运机制分析[J].地理学报,1995,50(5):411-420.[SHEN Jian, SHEN Huanting, PAN Dingan, et al. Analysis of transport mechanism of water and suspended sediment in the turbidity maximum of the Changjiang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 1995,50(5):411-420.]
- [14] Hu G, Wu D, Yan Y. Dynamic Response of the Suspended Sediment Change in the Tidal Channel of Jiangsu Sea Area [C]//Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on. IEEE, 2010: 1-5.
- [15] 张钊,李占海,张国安,等.长江口南槽中段枯季水沙输运特征研究[J].长江流域资源与环境,2016,25(12):1832-1841.[ZHANG Zhao, LI Zhanhai, ZHANG Guoan, et al. Water and Suspended Sediment transports in the middle reach of the South Passage in the Changjiang Estuary during the dry season[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016,25(12):1832-1841.]
- [16] 陈甫源,胡金春,白咸勇,等.江道采砂对椒江河口的影响分析[J].泥沙研究,2008(3):46-53.[CHEN Fuyuan, HU Jin-chun, BAI Xianyong, et al. Effect of evacuating sand on Jiaojiang River estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2008(3):46-53.]
- [17] 夏威夷,赵晓冬,张新周.椒江河口径、潮流变化对含沙量时空分布的影响[J].水利水运工程学报,2016(3):35-45.[XIA Weiyi, ZHAO Xiaodong, ZHANG Xinzhou. Influences of variation in runoff and tide on spatial and temporal distribution of sediment concentration in Jiaojiang River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(3):35-45.]
- [18] 王高阳.台州湾悬沙运动的二维数学模型[D].浙江大学学位论文,2007.[WANG Gaoyang. A 2D Numerical Simulation of Suspended Sediment in the TaizhouBay[D].Zhejiang University, 2007.]
- [19] Guan W B, Kot S C, Wolanski E. 3-D fluid-mud dynamics in the Jiaojiang Estuary, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 65(4): 747-762.
- [20] 郭聪.椒江河口对围海工程的响应[D].浙江大学学位论文,2016.[GUO Cong. Response of Jiaojiang Estuary to Coastal Reclamation[D]. Zhejiang University, 2016.]
- [21] Li B G, Eisma D, Xie Q C, et al. Concentration, clay mineral composition and Coulter counter size distribution of suspended sediment in the turbidity maximum of the Jiaojiang river estuary, Zhejiang, China[J]. Journal of Sea Research, 1999, 42(2): 105-116.
- [22] 谢钦春,李伯根.椒江河口悬沙浓度垂向分布和泥跃层发育[J].海洋学报,1998,20(6):58-69.[XIE Qinchun, LI Bogen. Vertical distributions of suspended matter and lutoclines in the Jiaojiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20 (6):58-69.]
- [23] 符守平,毕敖洪.椒江悬沙运动若干问题的探讨[J].泥沙研

- 究, 1989(3): 51-57. [FU Ningping, BI Aohong. Research on some problems of suspended sediment transport in the Jiaojiang[J]. Journal of Sediment Research, 1989(3):51-57.]
- [24] Dong L, Wolanski E, Li Y. Field and modeling studies of fine sediment dynamics in the extremely turbid Jiaojiang River estuary, China[J]. Journal of Coastal Research, 1997: 995-1003.
- [25] Guan W B, Wolanski E, Dong L X. Cohesive sediment transport in the Jiaojiang River estuary, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 46(6): 861-871.
- [26] Dyer K R. Estuaries—A Physical Introduction[M]. John Wiley, Chichester, UK, 1997:195.
- [27] 吴德安. 江苏辐射沙洲水道潮流及悬沙动力研究[D].南京师范大学学位论文, 2004.[WU Dean. Hydrodynamic studies to the tidal current and suspended sediments in the channels of Jiangsu Radial Sand Ridges[D]. Nanjing Normal University, 2004.]
- [28] Yu Q, Wang Y, Gao J, et al. Turbidity maximum formation in a well-mixed macrotidal estuary: The role of tidal pumping [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(11): 7705-7724.
- [29] Jay D A, Musiak J D. Internal tidal asymmetry in channel flows: Origins and consequences[C]//Mixing in estuaries and coastal seas, Coastal Estuarine Studies, edited by C.Pattiaratchi. 1996: 211-249.
- [30] de Nijs M A J, Pietrzak J D, Winterwerp J C. Advection of the salt wedge and evolution of the internal flow structure in the Rotterdam Waterway[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(1): 3-27.
- [31] 陈景东,汪亚平,史本伟,等. 长江口北港口门海域悬沙输运机制分析[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 45-54. [CHEN Jingdong, WANG Yaping, SHI Benwei, et al. Mechanisms on the suspended sediment transport in the mouth of North Channel of Yangtze River estuary[J]. The Ocean Engineering, 2014, 32(3):45-54.]
- [32] 时钟,陈伟民. 长江口北槽最大浑浊带泥沙过程[J]. 泥沙研究, 2000(1): 28-39. [SHI Zhong, CHEN Weimin. Fine sediment transport in Turbidity Maximum at the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2000(1):28-39.]
- [33] Geyer W R. The importance of suppression of turbulence by stratification on the estuarine turbidity maximum[J]. Estuaries and Coasts, 1993, 16(1): 113-125.
- [34] Winterwerp J C. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(9): 1339-1360.
- [35] Winterwerp J C. Fine sediment transport by tidal asymmetry in the high-concentrated Ems River: indications for a regime shift in response to channel deepening[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(2-3): 203-215.
- [36] Becherer J, Flöser G, Umlauf L, et al. Estuarine circulation versus tidal pumping: Sediment transport in a well-mixed tidal inlet[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(8): 6251-6270.
- [37] Fischer H B, List E J, Koh R C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters Academic Press[J]. New York, 1979: 229-242.