

不同悬沙组分对潮流的响应关系研究

朱子晨, 胡泽建, 刘建强, 张莞君, 张永强, 黄炳智

(自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:通过建立一维水深平均悬沙模型,对典型潮流控制的海湾内不同悬沙组分对潮流的响应关系进行了研究。模型以泥沙的水平输运、再悬浮和沉降为主要物理过程,以 M_2 、 S_2 分潮及余流为主要动力因素,反演了湄洲湾支水道内粉砂、淤泥组分含量的时间序列,采用 2007-08 潮位、潮流、悬沙、底质同步观测资料进行分析和验证。通过三角傅里叶分析,将悬沙的时间序列分解为 12 个主要的谐波分量,模型分解得到的主要傅里叶分量具有 M_2 分潮两倍的角速度与 $1/4$ 日潮周期,该分量粉砂组分振幅 6.1 mg/L ,淤泥组分振幅 1.5 mg/L ;次主要傅里叶分量具有 M_2 分潮的角速度,振幅受水平输沙、余流、 M_2 分潮流共同影响,粉砂组分振幅 4.9 mg/L ,淤泥组分振幅 1.2 mg/L 。由于粉砂组分单位起动能力强、沉降速度高,且淤泥组分由于粘聚力等因素起动条件较高,粉砂组分振幅高于淤泥组分。测站位置余流与涨潮流方向一致,余流致使涨潮过程中粉砂组分含量所占百分比上升,而落潮过程下降,淤泥组分则相反。

关键词:悬浮泥沙; M_2 分潮; S_2 分潮; 傅里叶分析; 粒径组分; 湄洲湾

中图分类号: P731

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)01-0103-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.011

引用格式: ZHU Z C, HU Z J, LIU J Q, 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. 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.

海湾是海洋资源开发利用的重要区域,由于其优良的自然环境和开发条件,海湾地区往往是人口聚集、经济发展的中心区域^[1]。对多数海湾地区而言,由于具有较好的波浪掩护条件,潮流常常是泥沙运动的主要动力因素。而海湾内的泥沙运动,影响着地形地貌及湾内港口、能源工程的运营和维护^[2-3]。悬浮泥沙能够吸附重金属等化学物质,对光具有吸收作用,又对海湾的生态环境具有显著影响^[4]。海水中的悬浮泥沙来源于再悬浮、水平输运等方式,其组成中包含多种粒径成分。由于不同粒径的泥沙,其起动、沉降等特征均不相同,各成分的百分含量在一个潮周期内具有较为明显的变化。王爱军等^[5]2005 年对长江口悬沙粒度与浓度关系的研究显示,特征时段内悬沙中值粒径与浓度存在指数关系;张一乙等^[6]2016 年对长江口悬沙组分对再悬浮过程响应的研究显示,砂质组分是悬沙中对再悬浮过程响应的敏感组分;陈语等^[7]2016 年对长江口浑浊带悬沙粒度分布的研究显示,悬沙粒度的垂向差异在大潮期十分显著,而小潮期粒径垂向梯度较低;徐海和李伯根^[8]2009 年对椒江河口悬沙分选机制研究的结果表明,悬沙粒径分选主要受物质来源、潮流动力作用下底质再悬浮、絮凝沉降三个因素影响。这些研究表明,我国河口、海岸带地区悬沙组成的变化规律受到广泛关注。泥沙组分的运动、变化规律与海洋开发及环境保护息息相关,如某些海域开发后,人工构筑物附近出现的泥化现象等。为探究潮流作用下悬浮泥沙组成成分对动力因素的响应机制,本文采用观测与模型相结合的方法,选择潮差较大、波浪掩护条件较好的湄洲湾罗屿支水道为目标区域,对半日潮周期的时间尺度内悬沙组成的变化特征进行探讨。

收稿日期: 2018-06-04

资助项目: 国家自然科学基金项目——粉砂海岸典型剖面极端海况泥沙运动观测及其动力机制研究(41276084)

作者简介: 朱子晨(1988-),男,助理工程师,硕士,主要从事海岸动力地貌方面研究. E-mail: zhuzichen@fio.org.cn

(李 燕 编辑)

1 研究方法

1.1 水动力观测与泥沙取样分析

湄洲湾位于福建省莆田、泉州两市之间,秀屿站 1978-01—1980-12 潮汐观测显示,该地区平均潮差 5.12 m,最大潮差 7.59 m,潮差较大,且海湾狭长,波浪掩护条件较好。本研究选择在湄洲湾罗屿东南侧支水道设置测站,同步观测水深(潮汐)、潮流、悬沙,测站处水深 9.77 m(以平均海平面计),观测时段为 2007-08-14T19:00—08-15T20:00(大潮期),涵盖 2 个完整的半日潮周期,并对底质取样。研究海域及测站位置见图 1。潮位采用水位计观测,海流、悬沙采用 5 层观测,潮流观测采用 Aanderaa RCM9 型海流计,悬沙使用采水器采集后,在实验室分析,并对涨落潮中间时刻与高低潮时刻 4 个特征时刻的悬沙粒度组成进行分析。

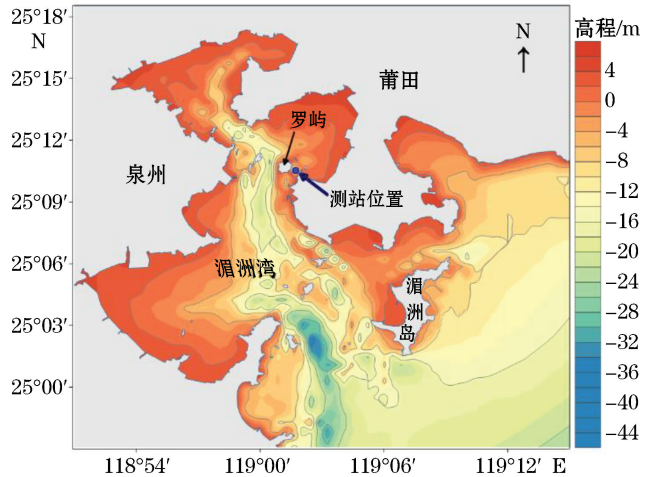


图 1 研究海域及测站位置

Fig.1 Study area and the location of observation site

1.2 一维水深平均悬沙模型

1) 控制方程与假设

湄洲湾以 M_2 , S_2 为主要潮流分量,本次观测时段内 M_2 分潮流占比 59%, S_2 分潮流占比 18%,其他分潮流占比均小于 9%, M_4 分潮流仅占比 4%^①,因此本文模型水动力因素主要考虑 M_2 , S_2 分潮,并进行适当简化。观测期间,测站处潮流流向几乎与水道走向平行,往复流态十分明显,涨潮流向 40° ,落潮流向 217° ,因此,本文使用一维水深平均悬沙控制方程来仿真所观测到的悬沙序列:

$$\frac{\partial \langle c \rangle H}{\partial t} = - \frac{\partial \langle U c \rangle H}{\partial x} + Q_r + Q_d, \quad (1)$$

式中, c 表示悬沙浓度; t 表示时间; H 表示水深; U 表示海流流速,罗屿水道往复流特征显著,近似假设潮流为一维,以涨潮流方向为正; x 为水平距离,正方向与海流方向一致; Q_r 与 Q_d 则分别代表沉积物再悬浮量和沉降量。 $\langle \rangle$ 代表沿水深方向平均。由于研究测站处水动力条件较强,本次观测到的涨急流速达到 68 cm/s,落急流速 73 cm/s,水平扩散项量级远小于水平输沙项,忽略水平扩散项^[9-10]。

式(1)中,平流项采用下列分解式表达:

$$\frac{\partial \langle U c \rangle H}{\partial x} = \frac{\partial \langle U \rangle \langle c \rangle H}{\partial x} + \frac{\partial \langle U_d c_d \rangle H}{\partial x}, \quad (2)$$

式中,下标“d”代表该量与其垂向平均值的差。式(2)中等号右侧第二项代表垂向流速与悬沙浓度剖面特征之间的非线性相互作用,为了对模型进行简化,将该非线性项忽略^[11-12]。最终,平流项可以表示为

$$\frac{\partial \langle U c \rangle H}{\partial x} = \frac{\partial \langle U \rangle \langle c \rangle H}{\partial x} = \langle U \rangle H \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \langle c \rangle \frac{\partial \langle U \rangle H}{\partial x}. \quad (3)$$

式(1)中,再悬浮项由底层海流剪切海床产生,本文采用水深平均模型仿真悬沙变化,因此,为了表达再悬浮项 Q_r 与垂向平均流的关系,采用如下方法计算^[13]:

① 国家海洋局第一海洋研究所. 福建湄洲湾电厂二期扩建工程可行性研究工程海域原型观测专题报告, 2007.

$$Q_r = B \langle U \rangle^2, B = \frac{M\rho C_D}{\tau_{cr}}, \quad (4)$$

式(4)中, M 表示泥沙单位起动量(单位面积、单位时间); ρ 表示海水密度; C_D 表示拖曳系数; τ_{cr} 表示临界起动切应力。假设 M, ρ, C_D, τ_{cr} 均为常数, 因此影响沉积物再悬浮量的参数 B 简化为常数^[14]。

悬沙沉降量与沉降速度成正比, 并受海水底层悬沙和水深的影响, 沉降项采用下式表达^[3,14]:

$$Q_d = \omega_s c_b = D \langle c \rangle H = K_d \omega_s \langle c \rangle H, \quad (5)$$

式中, $D = K_d \omega_s$, ω_s 表示泥沙沉降速度; c_b 表示海水底层悬沙质量浓度。最终, 沉降项由垂向平均悬沙质量浓度、水深、沉降速度和沉降参数 D 表示。根据一维连续方程:

$$\frac{\partial \langle U \rangle H}{\partial x} = -\frac{\partial H}{\partial t}. \quad (6)$$

结合式(6)与式(3), 并将式(1)~(6)合并, 一维垂向平均悬沙模型控制方程表示为

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} = -\langle U \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \frac{B}{H} \langle U \rangle^2 - D \langle c \rangle, \quad (7)$$

式(7)表示, 悬沙质量浓度的时间序列主要受 3 个物理过程控制, 按等式右侧顺序依次是平流项、再悬浮项与沉积项。上述 3 项可使用简谐波表示^[13]。式(7)中, 垂向平均流速、总水深(水深与潮位之和)均可利用观测结果, 通过调和分析表达, 并可将式(7)以三角傅里叶变换的形式表示为

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + D \langle c \rangle = \sum_{i=1} A_i \cos(\omega_i t + \psi_i), \quad (8)$$

式中, A_i, ω_i 与 ψ_i 为各个傅里叶分量的振幅、角速度与初相位。将式(8)对时间积分后, 悬浮泥沙浓度表示为

$$\langle c \rangle = S e^{-Dt} + \sum_{i=1} \frac{A_i}{\sqrt{\omega_i^2 + D^2}} \cos(\omega_i t + \psi_i - \theta_i), \quad (9)$$

式中, $\theta_i = \tan^{-1} \frac{\omega_i}{D}$, S 为积分常数; θ_i 与 ψ_i 共同组成积分式的初相位。当模型运行时间足够长并达到稳定状态后, 等式(9)右侧第一项(指数项)可忽略。湄洲湾海区以 M_2, S_2 为主导潮流成分, 因此, 将垂向平均潮流采用下式表达:

$$\langle U \rangle = u_0 + u_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + u_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (10)$$

式中, u_0 表示余流; u_1, ω_1, φ_1 分别表示 M_2 分潮流的振幅、角速度与初相位; u_2, ω_2, φ_2 分别表示 S_2 分潮流的振幅、角速度与初相位。相比于 u_0 和 u_2 , u_1 在量级上具有绝对优势, 因此做如下变换:

$$\langle U \rangle = u_1 \left[\frac{u_0}{u_1} + \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{u_2}{u_1} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \right], \quad (11)$$

相近地, 水深可采用下式表示:

$$H = h_0 + h_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + h_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2), \quad (12)$$

式中, h_0 为平均水深(以平均海平面计), h_1, ϕ_1 分别为 M_2 分潮的振幅和初相位; h_2, ϕ_2 分别为 S_2 分潮的振幅和初相位。由于测站平均水深是潮位振幅的 4 倍, 因此做如下变换:

$$H = h_0 \left[1 + \frac{h_1}{h_0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{h_2}{h_0} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \right], \quad (13)$$

则式(7)再悬浮项中水深的倒数可表示为

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{h_0 \left[1 + \frac{h_1}{h_0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{h_2}{h_0} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \right]} \approx \frac{1}{h_0} \left[1 - \frac{h_1}{h_0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) - \frac{h_2}{h_0} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \right], \quad (14)$$

式(7)中平流项受悬沙浓度水平梯度控制, 该量十分复杂, 且难以观测, 将该梯度进行简化, 设水平浓度梯度为常数^[3,9,15], 悬沙质量浓度水平梯度表示为

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} = k, \quad (15)$$

结合式(7)、式(9)、式(11)和式(14),并将振幅中包含 $u_0/u_1, u_2/u_1, h_1/h_0$ 与 h_2/h_0 的高阶项(阶数 >1)忽略^[14],最终将悬沙分解为 12 个主要的傅里叶分量,其时间序列可表示为

$$\langle c \rangle = \sum_{i=1}^{12} E_i = \sum_{i=1}^{12} \frac{A_i}{\sqrt{\omega_i^2 + D^2}} \cos(\omega_i t + \psi_i - \theta_i), \quad (16)$$

式中, $\theta_i = \tan^{-1} \frac{\omega_i}{D}$, 各项的相对振幅、角速度与初相位参量如表 1 所示。

表 1 三角傅里叶分量参数

Table 1 Parameters of Fourier components

分量	A_i/u_1^2	ω_i	ψ_i	分量	A_i/u_1^2	ω_i	ψ_i
E1	$-\frac{k\hat{u}_0}{u_1} + \frac{B}{2h_0}$	0	0	E7	$\frac{B}{2h_0}$	$2\omega_1$	$2\varphi_1$
E2	$-\frac{k}{u_1} + \frac{2B\hat{u}_0}{h_0}$	ω_1	φ_1	E8	$-\frac{B\hat{h}_1}{4h_0}$	$3\omega_1$	$2\varphi_1 + \phi_1$
E3	$-\frac{B\hat{h}_1}{2h_0}$	ω_1	ϕ_1	E9	$\frac{B\hat{u}_2}{h_0}$	$\omega_1 + \omega_2$	$\varphi_1 + \varphi_2$
E4	$-\frac{B\hat{h}_1}{4h_0}$	ω_1	$2\varphi_1 - \phi_1$	E10	$\frac{B\hat{u}_2}{h_0}$	$\omega_1 - \omega_2$	$\varphi_1 - \varphi_2$
E5	$-\frac{k\hat{u}_2}{u_1}$	ω_2	φ_2	E11	$-\frac{B\hat{h}_2}{4h_0}$	$2\omega_1 + \omega_2$	$2\varphi_1 + \phi_2$
E6	$-\frac{B\hat{h}_2}{2h_0}$	ω_2	ϕ_2	E12	$-\frac{B\hat{h}_2}{4h_0}$	$2\omega_1 - \omega_2$	$2\varphi_1 - \phi_2$

注: $\hat{u}_0 = \frac{u_0}{u_1}, \hat{u}_2 = \frac{u_2}{u_1}, \hat{h}_1 = \frac{h_1}{h_0}, \hat{h}_2 = \frac{h_2}{h_0}$

各傅里叶分量中(表 1), E1 代表在整个潮周期内悬沙的平均水平,不随时间变化,该分量由 M_2 分潮流与余流共同作用下的水平输沙、 M_2 分潮流剪切海底引起的再悬浮两部分组成,是这 2 个物理过程的叠加; E2 也是 2 个物理过程的叠加,包括 M_2 分潮流作用下的水平输沙、 M_2 分潮流与余流共同作用剪切海底引起的再悬浮; E3, E4 和 E8 三个分量同源,是 M_2 分潮流剪切海底与 M_2 分潮引起的水深变化共同作用产生的再悬浮项,通过三角变换分解为 3 个分量; E5 是 S_2 分潮流作用下的水平输沙项; E6, E11 和 E12 三个分量同源,是 M_2 分潮流剪切海底与 S_2 分潮引起的水深变化共同作用产生的再悬浮项,通过三角变换分解为 3 个分量; E7 分量是由 M_2 分潮流剪切海底产生的再悬浮项,且不受其他动力因素控制; E9, E10 两项同源,是 M_2 分潮流与 S_2 分潮流共同作用剪切海底产生的再悬浮项,通过三角变换分解为 2 个分量,且 E10 分量的角速度为 M_2 与 S_2 分潮角速度之差,具有半月潮周期,说明在 M_2 与 S_2 分潮的共同作用下,悬沙序列能够体现出半月潮周期变化。

2) 参数设置

测站处底质粒径分布见图 2a, 低潮、涨急、高潮、落急四个特征时刻悬沙的粒径组成见图 2b。测站处底质包含淤泥、粉砂与细砂各个成分,最大粒径 2 mm,但悬沙成分仅包含淤泥、粉砂两种成分,最大粒径 0.063 mm。观测结果说明细砂并未起动,因此模型将悬沙分为淤泥、粉砂两种组分进行模拟,以粒径 0.016 mm 代表粉砂,粒径 0.002 mm 代表淤泥组分,悬沙浓度为两者之和。

模型自由参数 B, D, k 与泥沙特性及海水特性等有关,如泥沙临界起动切应力、沉降速度等,由于其难以测定,在同类的模型研究中通常采用观测结果进行率定^[9,16-17]。在率定前,部分参数可根据现有研究成果限定合理的取值范围。

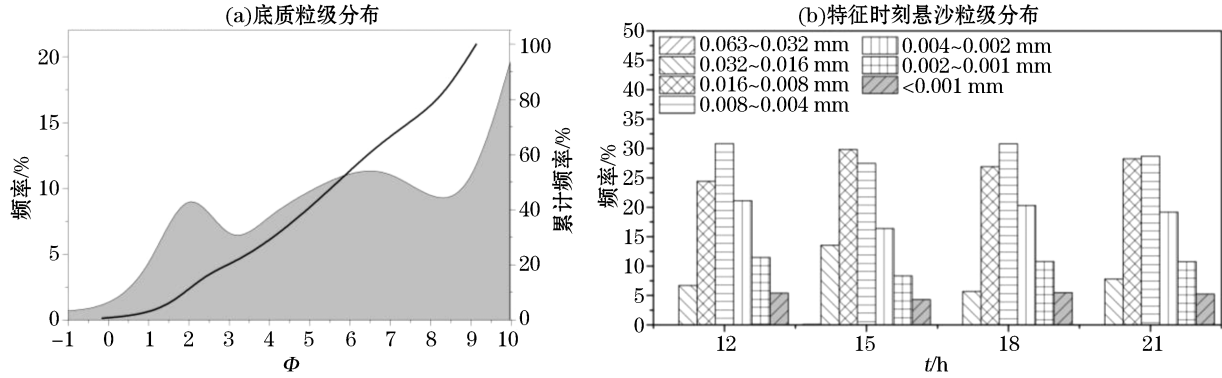


图2 底质与悬沙粒径组成

Fig.2 Grain diameter compositions of sediment and suspension

k 取值范围在 $-2.0 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^4$ ^[14], 本研究取 $k = -1.0 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^4$ 。单位起动量 M 取值范围在 $2.0 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[18], 粉砂组分取 $3.5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 淤泥组分取 $2.48 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。粉砂临界起动切应力 τ_{cr} 在 $0.05 \sim 0.13 \text{ N/m}^2$ ^[19], 本研究取 0.05 N/m^2 ; 淤泥临界起动切应力 τ_{cr} 在 $0.05 \sim 0.2 \text{ N/m}^2$ ^[19-21], 本研究取 $\tau_{cr} = 0.14 \text{ N/m}^2$ 。 C_D 取值 5.0×10^{-3} 。海水密度 ρ 取 1025.0 kg/m^3 。粒径为 0.01 mm 的泥沙沉速大于 0.07 mm/s ^[22], 絮凝体的沉降速度小于 3 mm/s ^[23]。对于各组分沉降速度 w_s , 粉砂组分取 1.06 mm/s ^[19]; 淤泥组分沉降速度在 $0.003 \sim 0.2 \text{ mm/s}$ ^[24], 本文取 0.2 mm/s 。沉降参数 K_d 则较为复杂, 影响因素包括垂向平均悬沙与近底层悬沙之比、水深等, 经过率定, 参数 K_d 粉砂组分取值 1800 , 淤泥组分取值 4680 。由式(5)计算得到, 粉砂组分 $D = 0.195$, 淤泥组分 $D = 0.096$ 。

2 结果与验证

本期观测在大潮期内进行, 观测到的最大潮差 6.32 m , 涨潮过程最大流速 0.68 m/s , 落潮过程最大流速 0.73 m/s , 悬沙质量浓度最高达到 94.5 mg/L , 最低质量浓度 39.3 mg/L 。对应时段内, 经调和计算得到的最大潮差 6.01 m , 涨潮过程最大流速 0.73 m/s , 落潮过程最大流速 0.60 m/s , 模拟得到的最高悬沙质量浓度 81.9 mg/L , 最低质量浓度 42.0 mg/L 。

将计算结果与观测资料比对验证, 水深、潮流及悬沙质量浓度验证结果见图 3a~3c, 粉砂、淤泥组分占比验证见图 3d, 验证结果显示, 计算结果与观测资料基本吻合, 能够反映悬沙质量浓度随时间的变化趋势, 粉砂、淤泥组分随时间变化的计算结果也与观测结果吻合。本文由于对模型进行简化, 潮流仅考虑了 M_2, S_2 两个分量及余流, 因此, 潮汐、潮流计算结果与观测结果存在误差, 且水动力计算误差可传递至悬沙计算, 最终引发悬沙计算误差。除上述原因外, 悬沙计算误差的产生原因还包括: 1) 虽然湄洲湾内波浪掩护条件较好, 但依然受到波浪影响, 因此悬沙的部分高频率的变化特征没有被仿真出来; 2) 测站处底质与悬沙的组成成分复杂, 含有粉砂、淤泥的各个粒径成分, 本文采用 2 种粒径的泥沙来代替成分复杂的混合物, 因此存在计算误差。经准调和计算后, 垂向平均流速及水深近似以式(10)及式(12)表示为

$$\langle U \rangle = 0.060 + 0.571 \cos(28.984 \, 1t + 283) + 0.176 \cos(30t + 341), \quad (18)$$

$$H = 9.77 + 2.27 \cos(28.984 \, 1t + 171) + 1.20 \cos(30t + 229). \quad (19)$$

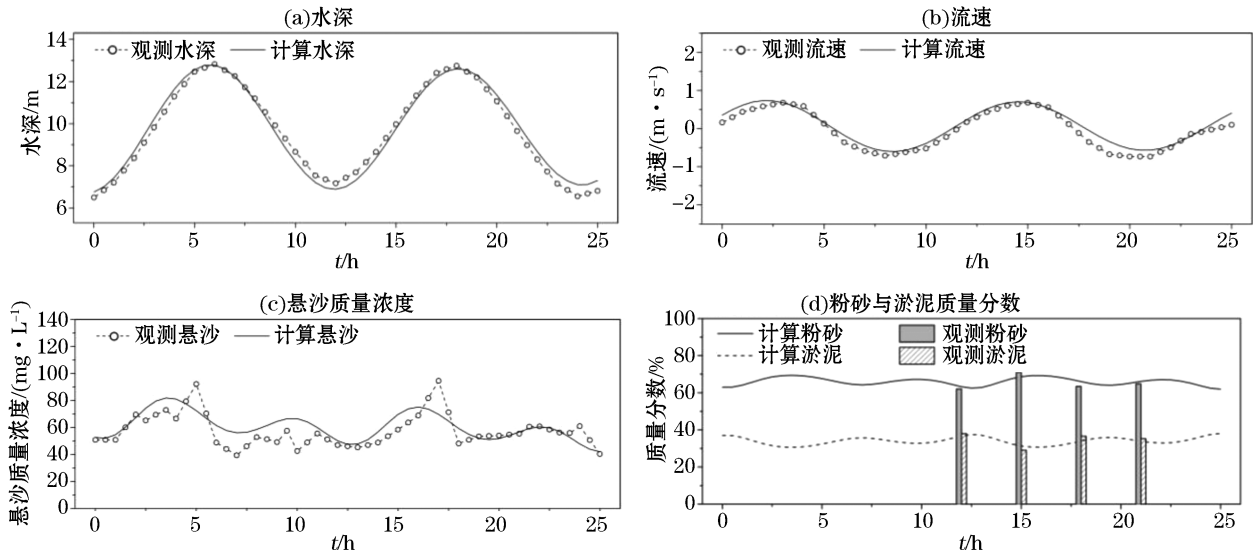


图3 计算结果验证

Fig.3 Validation of model simulations

由于实际悬沙在海水中的运动是三维的,而本文采用一维水深平均模型进行简化,因此模型本身存在误差。观测期间,涨落潮流主流向相差 177° ,在平面上,本文模型简化为一维,这是造成模型从动力方面产生误差的一个方面。另一方面,本文选择垂向平均悬沙浓度作为研究指标,因此忽略了悬沙的垂向结构,没有能够反映海流作用下悬沙的垂向输运和垂向扩散两个物理过程,这会造成模型计算结果与实际观测结果之间存在浓度和相位两方面的误差。从模型验证结果来看,简化模型基本反映了实际情况,说明简化后的模型抓住了主要的物理过程。

3 讨论

3.1 各组分起动、沉降能力比较

图5所示为模型计算得到的粉砂、淤泥组分在悬沙中所占质量分数随潮流变化的过程,由于模型没有考虑波浪作用,剪切作用强弱仅与潮流流速有关,因此对流速取绝对值进行对照分析。在所模拟的2个半日潮周期内,粉砂所占质量分数在 $62.0\% \sim 69.4\%$,淤泥占比在 $30.6\% \sim 38.0\%$;在观测到的4个特征时刻,粉砂占比在 $62\% \sim 71\%$,淤泥占比在 $29\% \sim 38\%$ 。模拟与观测结果均显示,粉砂组分占优势。而底质分

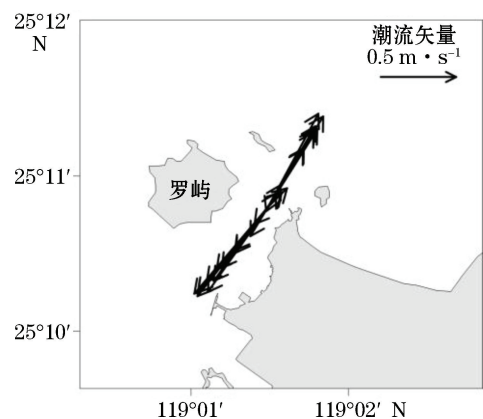


图4 潮流矢量图

Fig.4 Tidal current vectors

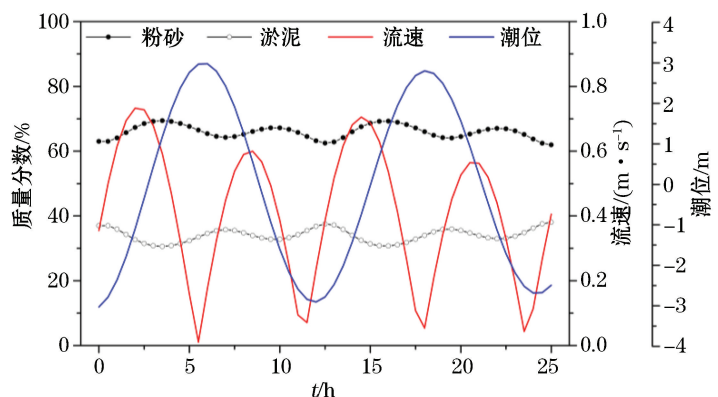


图5 悬沙组分质量分数对潮流的响应

Fig.5 Responses of grain diameter composition to current

析结果显示,细砂占比 21.6%,粉砂占比 40.6%,淤泥占比 37.8%,底质中粉砂与淤泥组分较为接近。从沉降角度考虑,粉砂组分由于粒径较粗,沉降速度高于淤泥。本文模型中沉降参数 D 经率定后,粉砂组分 $D = 0.195$,淤泥组分 $D = 0.096$,粉砂沉降能力明显高于淤泥。粉砂组分在沉降能力明显高于淤泥组分、且在底质中占比与淤泥组分接近的条件下,在悬沙中的占比明显高于淤泥,这说明,粉砂组分的起动能力明显高于淤泥组分,淤泥组分起动条件较高与黏性泥沙黏结力等特性有关^[19]。由于粉砂组分的起动和沉降能力均高于淤泥组分,因此,悬沙中粉砂百分含量的极大值出现在动力条件较强时刻附近,约在涨落急时刻 1.5 h 后,淤泥质量分数的极大值则出现在动力较弱的涨落憩时刻 1.5 h 后,这说明,涨落急或涨落憩等潮流特征时刻所观测到的悬沙组成,并不能代表悬沙组成的极值,但采集到的悬沙样本基本包含了本地悬浮体中各粒径成分。

3.2 悬沙组分傅里叶分量

本文模型分解得到的 12 个傅里叶分量(表 1)中,E1 分量代表悬沙序列的平均水平,不随时间变化;E10 分量的角速度为 M_2 分潮与 S_2 分潮角速度之差,具有半月潮周期,说明在 M_2 与 S_2 分潮共同作用下,悬沙能够表现出大小潮变化趋势,这是因为 M_2 与 S_2 分潮的角速度接近却不重合,但由于本文研究没有观测到完整的半月潮周期,因此主要讨论 E2~E9,E11,E12 分量。

图 6 所示为 M_2 、 S_2 分潮流及余流共同作用下,对粉砂、淤泥两种组分进行傅里叶分析得到的主要谐波分量,结果显示,2 种悬沙组分均以 E7 为主要傅里叶分量,E7 具有 M_2 分潮 2 倍的角速度(表 1),呈 1/4 日潮周期,是在 M_2 分潮流的剪切作用下产生,揭示了半日潮海区在潮流作用下,悬沙呈 1/4 日潮周期的原因。其次,主要傅里叶分量还包括 E2,E9,E3 分量。E2 由水平输沙、余流、 M_2 分潮流共同作用产生,具有与 M_2 分潮相同的角速度及半日潮周期;E9 由 M_2 、 S_2 分潮共同作用产生,角速度为 M_2 、 S_2 分潮角速度之和,具有 1/4 日潮的周期;E3 主要由 M_2 分潮剪切海床产生,具有 M_2 分潮的角速度及半日潮周期。总悬浮泥沙由各分量叠加而成,而上述 4 个主要傅里叶分量分别具有 1/4 日潮周期与半日潮周期,因而悬沙浓度在一个潮周期内呈现出不对称特征,即一个半日潮周期内两次峰值具有明显差异(图 3c),这与观测结果吻合。

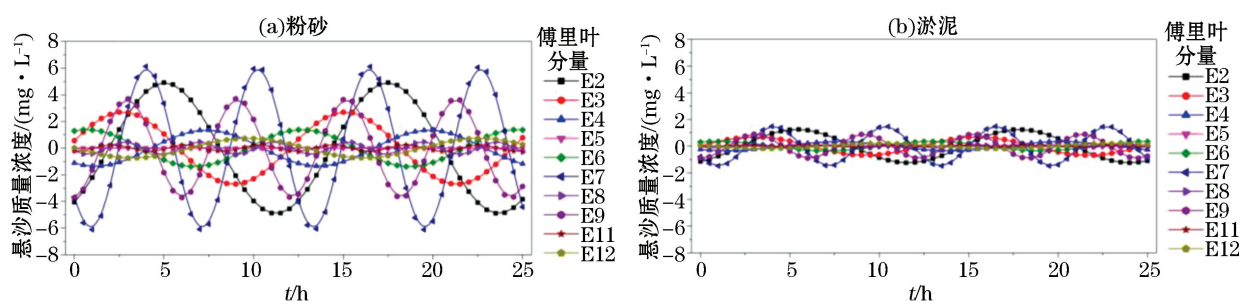


图 6 傅里叶分量的时间序列

Fig.6 Time series of Fourier components

对比图 6a 与图 5b,粉砂组分各分量的振幅均显著高于淤泥组分,这是由于淤泥组分起动和沉降能力均弱于粉砂组分造成的。观测悬沙总质量浓度波动范围在 39~95 mg/L,特征时刻观测到的粉砂组分波动范围在 29~41 mg/L,淤泥组分波动范围在 17~20 mg/L,观测结果也显示,粉砂组分的振幅明显高于淤泥组分。本次模型计算结果显示,总悬沙波动范围在 42~82 mg/L,粉砂组分波动范围在 26~57 mg/L,淤泥组分波动范围在 16~25 mg/L,与观测结果基本吻合,趋势一致。作为主要傅里叶分量,粉砂组分的 E7 分量振幅为 6.1 mg/L,而淤泥组分的 E7 分量振幅为 1.5 mg/L;此外,粉砂组分的 E2,E9,E3 分量振幅分别为 4.9,3.7 和 2.7 mg/L,淤泥组分的 E2,E9,E3 分量振幅分别为 1.2,0.9 和 0.7 mg/L,均说明粉砂组分的波动幅度高于淤泥组分。

3.3 余流对悬沙组分的影响

为讨论余流对海区悬沙组分变化特征的影响,假定其他因素固定,对比真实余流($u_0=0.06\text{ m/s}$,最适率定值)、余流消失($u_0=0$)、余流增强一倍($u_0=0.12\text{ m/s}$)与余流反向($u_0=-0.06\text{ m/s}$)四种情况下悬沙组分百分含量的变化特征,如图7所示。对比结果显示,由于余流方向与涨潮流方向相同,当余流消失时,涨潮过程粉砂组分所占百分比将下降,落潮过程粉砂组分将升高,而淤泥组分则相反,且由于余流对主要半日潮傅里叶分量(E2)的影响,如果余流消失,半日潮周期内悬沙相邻的两个波峰之间的不对称性(涨潮过程波峰高于落潮过程波峰)减弱;当余流增强一倍时,半日潮周期内悬沙相邻波峰之间的不对称性将增强,涨潮过程粉砂组分占比将上升,淤泥组分将下降;当余流反向时,半日潮周期内悬沙相邻波峰之间的不对称性发生反转,变为涨潮过程波峰低于落潮过程波峰,涨潮过程粉砂组分将下降,淤泥组分将提高。

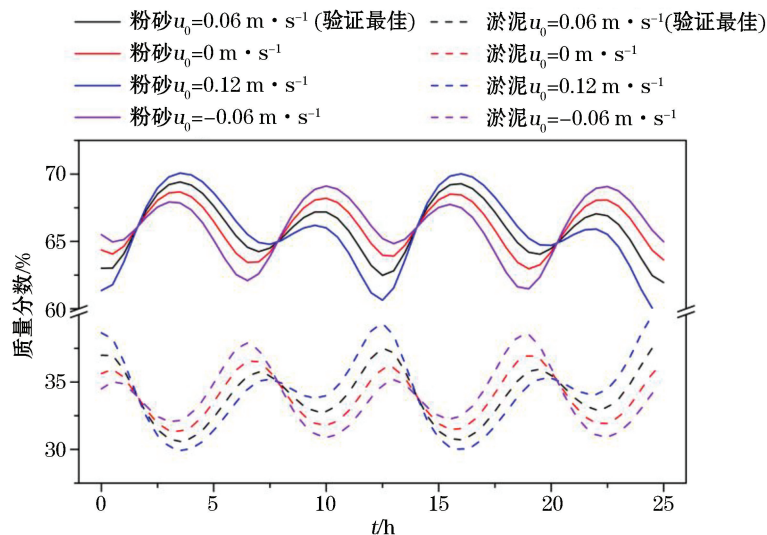


图7 余流对悬沙组分的影响

Fig.7 Influence of residual current on suspended sediment components

4 结 论

以泥沙的起动、沉降和水平输运为主要物理过程,根据所研究海域动力环境,以 M_2 、 S_2 为主要潮汐、潮流分量,建立了一维水深平均悬沙模型,采用傅里叶分析方法,将悬沙时间序列分解为 12 个主要傅里叶分量,模拟了湄洲湾海域 2 个完整半日潮周期内悬沙中粉砂、淤泥两种组分的运动过程。模型能够与水动力、悬沙同步观测吻合,并能仿真出各粒级组分对潮流的响应规律。

模型分解得到的主要傅里叶分量具有 M_2 分潮两倍的角速度与 $1/4$ 日潮周期,该分量粉砂组分振幅 6.1 mg/L ,淤泥组分振幅 1.5 mg/L ;次主要傅里叶分量具有 M_2 分潮的角速度,振幅受水平输沙、余流、 M_2 分潮流共同影响,粉砂组分振幅 4.9 mg/L ,淤泥组分振幅 1.2 mg/L ;振幅第三的分量由 M_2 、 S_2 分潮共同作用产生,角速度为 M_2 、 S_2 分潮角速度之和,具有 $1/4$ 日潮的周期,粉砂组分振幅 3.7 mg/L ,淤泥组分振幅 0.9 mg/L 。观测与模型主要分量均显示,粉砂组分振幅高于淤泥组分,这是由于粉砂组分单位起动能力强、沉降速度高造成的,且淤泥组分由于黏结力等因素,起动条件较高。

本文测站位置余流与涨潮流方向一致,余流的存在致使涨潮过程中粉砂组分含量所占百分比上升,而落潮过程下降,淤泥组分则相反。此外,傅里叶分析说明,具有半日潮周期的傅里叶分量中振幅最大者,其振幅

受余流影响,因此余流影响了半日潮周期内悬沙波峰之间的不对称性,由于余流方向同涨潮流,涨潮时段悬沙波峰高于落潮时段内的波峰。

参考文献(References):

- [1] ZHANG P, HU R, ZHU L, et al. Distributions and contamination assessment of heavy metals in the surface sediments of western Laizhou Bay: Implications for the sources and influencing factors[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 119(1): 429-438.
- [2] DYER K R. Estuaries-a physical introduction[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1997:195.
- [3] PRANDLE D. Tidal characteristics of suspended sediment concentrations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123(4): 341-350.
- [4] TIAN T, MERICO A, SU J, et al. Importance of resuspended sediment dynamics for the phytoplankton spring bloom in a coastal marine ecosystem[J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 62(4): 214-228.
- [5] WANG A J, WANG Y P, GAO S, 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. 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.
- [6] ZHANG Y Y, YANG Y, CHEN J D, et al. Preliminary study of the response of suspended sediment components to resuspension processes in the mouth of the South Channel, Changjiang River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(11): 129-137. 张一乙, 杨旸, 陈景东, 等. 悬沙组分对再悬浮过程响应的初步研究——以长江口南槽口门为例[J]. *海洋科学*, 2016, 40(11): 129-137.
- [7] CHEN Y, HE Q, ZHANG D, 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. 陈语, 何青, 张迺, 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.
- [8] XU H, LI B G. Size distribution of suspended sediment in nucleus band of turbidity maximum of Jiaojiang River Estuary in wet season[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(5): 64-73. 徐海, 李伯根. 椒江河口洪季最大浑浊带核部的悬沙分选机制[J]. *海洋通报*, 2009, 28(5): 64-73.
- [9] BASS S J, ALDRIDGE J N, MCCAVE I N, et al. Phase relationships between fine sediment suspensions and tidal currents in coastal seas [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, 107(C10):1-14.
- [10] STANEV E V, BRINK-SPALINK G, WOLFF J O. Sediment dynamics in tidally dominated environments controlled by transport and turbulence: a case study for the East Frisian Wadden Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C04018):1-20.
- [11] UNCLES R J, STEPHENS J A. Distributions of suspended sediment at high water in a macrotidal estuary[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1989, 94(C10): 14395-14405.
- [12] DRONKERS. Tide-induced residual transport of fine sediment[M]//VAN DE KREEKE J. *Physics of Shallow Bays and estuaries*. Miami: Springer-Verlag, 1984: 228-244.
- [13] CHENG P, WILSON R E. Modeling sediment suspensions in an idealized tidal embayment: importance of tidal asymmetry and settling lag[J]. *Estuaries & Coasts*, 2008, 31(5): 828-842.
- [14] 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(1): 53-63.
- [15] HILL D C, JONES S E, PRANDLE D. Derivation of sediment resuspension rates from acoustic backscatter time-series in tidal waters [J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(1): 19-40.
- [16] ALDRIDGE J N. Optimal fitting of a model to observations of sediment concentrations in the Irish Sea[C]//SPALDING M L, CHENG R T. *Estuarine and coastal modelling proceedings of the 4th international conference*. San Diego, USA: American Society of Civil Engineers, 1996: 417-428.
- [17] JAGO C F, JONES S E. Observation and modelling of the dynamics of benthic fluff resuspended from a sandy bed in the southern North Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(18): 1255-1282.
- [18] AMOS C L, DABORN G R, CHRISTIAN H A, et al. In situ measurements on fine-grained sediments from the Bay of Fundy. *Mar Geol* [J]. *Marine Geology*, 1992, 108(2): 175-196.
- [19] ZHU Z, WANG Y, BIAN S, et al. A method for simulating sediment incipient motion varying with time and space in an ocean model (FVCOM): development and validation[J]. *Journal of Oceanology & Limnology*, 2018, 36(4): 1216-1235..
- [20] WILLIAMSON H, OCKENDEN M. ISIS: an instrument for measuring erosion shear stress in situ[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 1996, 42(42): 1-18.
- [21] LANURU M. Measuring critical erosion shear stress of intertidal sediments with EROMES erosion device[J]. *Fakultas Ilmu Kelautan*

- Dan Periklanan Unhas, 2008, 18(5): 390-397.
- [22] GIBBS R J, MATTHEWS M D, LINK D A. The relationship between sphere size and settling velocity[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1971, 41(1): 7-18.
- [23] HILL P S, MCCAVE I N. Suspended particle transport in benthic boundary layers[M]//BOUDREAU B P. *The benthic boundary layer: transport processes and biogeochemistry*[M]. New York: Oxford University Press, 2001: 78-103.
- [24] FETTWEIS M. Uncertainty of excess density and settling velocity of mud flocs derived from in situ measurements[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 78(2): 426-436.

Study on the Response of Suspended Sediment With Different Compositions to Tidal Current

ZHU Zi-chen, HU Ze-jian, LIU Jian-qiang, ZHANG Wan-jun, ZHANG Yong-qiang, HUANG Bing-zhi
(*First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China*)

Abstract: A one-dimensional depth-averaged suspended sediment concentration (SSC) model was established to study the response of suspended sediment to tidal current in the Meizhou Bay. The model includes major processes such as advection, resuspension, and deposition of the sediment, etc., and hydrodynamic force includes M_2 and S_2 tides. The model was employed to simulate the variation of silt and mud contents in branch of Meizhou Bay, and the tide, current, SSC and sediment measured/ sampled in August, 2007 were used to validate the model results. Time series of both silt and mud SSC were decomposed with Fourier analysis into 12 harmonic components. The first principal Fourier component had twice the angular speed of M_2 tide and demisemi-diurnal period, and its amplitudes of silt and mud were $0.006\ 1\ \text{kg}/\text{m}^3$ and $0.001\ 5\ \text{kg}/\text{m}^3$, respectively. The second principal Fourier component had the same angular speed as M_2 tide, and its amplitude is mainly controlled by the joint effects of advection, M_2 tide and residual current. The amplitudes of second principal Fourier component of silt and mud were $0.004\ 9\ \text{kg}/\text{m}^3$ and $0.001\ 2\ \text{kg}/\text{m}^3$, respectively. The amplitude of silt was larger than that of mud because of the higher incipient ability and settling velocity of silt and the higher incipient requirement of mud due to cohesive force. As the direction of residual current was in accordance with that of flood current, the composition percentage of silt was increased by residual current during flood tide but reduced during ebb tide. The situation for mud was opposite.

Key words: suspended sediment; M_2/S_2 tidal constituent; Fourier analysis; grain diameters composition; Meizhou Bay

Received: June 4, 2018