



河口悬沙浓度变化与多因子响应模式

张心凤

(珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 从河口近岸悬沙浓度的影响因素入手, 在收集现场实测资料的基础上, 对悬沙浓度的变化规律进行分析。通过分析研究, 建立了悬沙浓度变化与多因子响应高精度三维数值模型。以黄茅海水域 1992 年 11 月 15 日—19 日实测水流、泥沙、风等资料为基础, 对模型进行验证。结果表明: 模型能较好地模拟河口水流泥沙运动, 且计算稳定性好、精度较高。水流、泥沙运动验证成果基本能达到规范要求的精度。

关键词: 河口; 悬沙浓度; 多因子; 数值模式

中图分类号: U 617.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0029-08

Mode of response relationship between estuarine suspended sediment concentrations and multi-factors

ZHANG Xin-feng

(Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: From the influential factors of the estuarine and coastal suspended sediment concentration, and based on the field data, the author analyzes the change laws of suspended sediment concentration and establish a three-dimensional high-precision numerical model of suspended sediment concentration change and multi-factor response. On the basis of the measured flow, sediment and wind data of Huangmao waters in Nov. 15-19, 1992, the author verifies the model. The results show that the model can simulate the flow and sediment movement with stable calculation and high precision. The verified results of flow and sediment movement can basically meet the requirements of precision.

Keywords: estuary; suspended sediment concentration; multi-factor; numerical model

河口悬沙浓度的变化对底床冲淤、营养盐和污染物的输送、生物初级生产力、旅游业等具有重要影响, 因而是多学科关注的焦点, 很多学者从不同角度论述过悬沙浓度的变化及其机制。例如, 寒潮和热带风暴所引起的底床泥沙再悬浮^[1]、底部剪切流速和悬沙浓度的关系^[2]、絮凝对悬沙浓度的影响^[3]及流域自然状况和人类活动对河口悬沙浓度变化的影响^[4-8]。从研究区域看, 许多学者^[9-14]对长江口、杭州湾、廉州湾的悬沙分布特征和输移规律做过研究; Ruiz A 等对西班牙 Urdaibai 河口、Tattersall G R 等^[15]对英国的 Tamar 河口、Herman 等对荷兰 Emsy 河口的悬沙浓度在时间上

的分布特征以及输移规律进行了研究, 并建立了相关模型。

但是, 悬沙浓度变化的影响因子极为复杂, 往往因时因地而不同。尤其在河口口门附近, 悬沙浓度的变化同时受到波浪、潮汐、沿岸流、河流来水来沙、咸水和淡水混合引起的絮凝、生物以及工程等多种因素影响, 研究工作尚有待深入。

本文在河口悬沙实测资料分析的基础上, 建立了河口近岸悬沙浓度变化与多因子响应关系的数值模型, 并通过实测资料验证, 达到规范要求的精度。

收稿日期: 2014-06-19

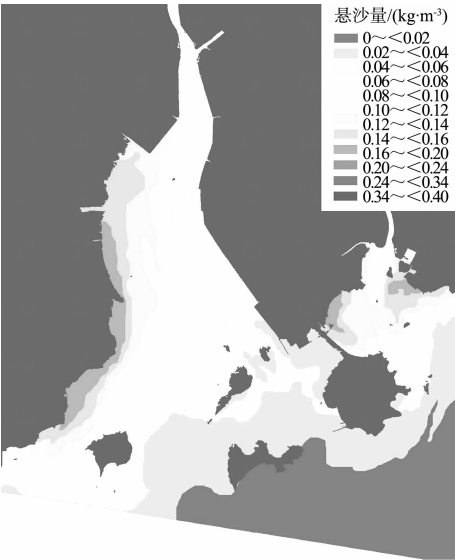
作者简介: 张心凤 (1974—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水动力学、河口治理开发与保护等研究。

1 实测资料分析

在淤泥质河口、海岸地区，黏性细颗粒悬移质泥沙浓度是港口、航道及有关海岸工程普遍关心的问题。由于河口、海岸地区物理过程复杂，悬沙浓度（含沙量）表现为一个随机性很强的变量，不同的水动力环境表现出不同的悬沙浓度变化特征。水体中悬沙浓度的变化是泥沙运动的重要表现形式，悬沙浓度在时空上的变化反映了不同的水动力作用和水深条件下的结果。

1.1 黄茅海水域实测资料及分析

黄茅海水域（图 1），洪季径流量大，潮流作用相对减弱，泥沙随主流下泄，在拦门沙附近，底层受上溯流的顶托，在滞流点附近泥沙汇聚，形成浑浊带，含沙量较高。且洪季多为台风季节，风浪掀沙影响较大，含沙量也相应较高。枯季潮流作用相对加强，下泄泥沙在东南向涨潮流作用下推向西北方向，盐水可入侵至口内以上，泥沙在独崖山、黄茅岛附近汇集，西滩含沙量明显增高。受寒流影响，黄茅海水域含沙量也增加。悬沙浓度受径流影响具有明显的季节变化，一般洪季悬沙浓度高于枯季。口外水域悬沙浓度则呈枯高洪低，这与洪季流域来沙主要在拦门沙及邻近水域沉积、枯季拦门沙河床被再悬浮的泥沙向口外扩散有关。



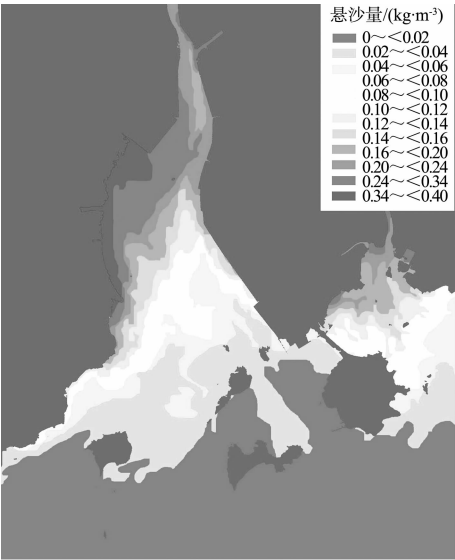
b) 枯季

图 1 黄茅海平均悬沙量分布

通过黄茅海水域 1992 年 7 月 14—20 日（洪季）、1992 年 11 月 15—19 日（枯季）实测泥沙资料分析悬沙变化规律（图 2），统计结果见表 1。

表 1 平均含沙量和流量

测点	洪季		枯季	
	含沙量实测 值/(kg·m ⁻³)	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	含沙量实测 值/(kg·m ⁻³)	平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
官冲	0.201	2 650.36	0.070	525.03
西炮台	0.405	1 457.55	0.095	42.80
黄散 3	0.075		0.090	
黄散 4	0.239		0.114	
黄散 5	0.279		0.168	
黄散 6	0.204		0.132	
黄散 7	0.276		0.185	
黄散 8	0.137		0.143	
高栏 1	0.206		0.136	
高栏 2	0.123		0.127	
高栏 3	0.122		0.152	
荷包 1	0.098		0.138	
荷包 2	0.098		0.16	
荷包 3	0.119		0.153	
大襟 1	0.118		0.214	
大襟 2	0.126		0.135	
大襟 3	0.098		0.144	



a) 洪季

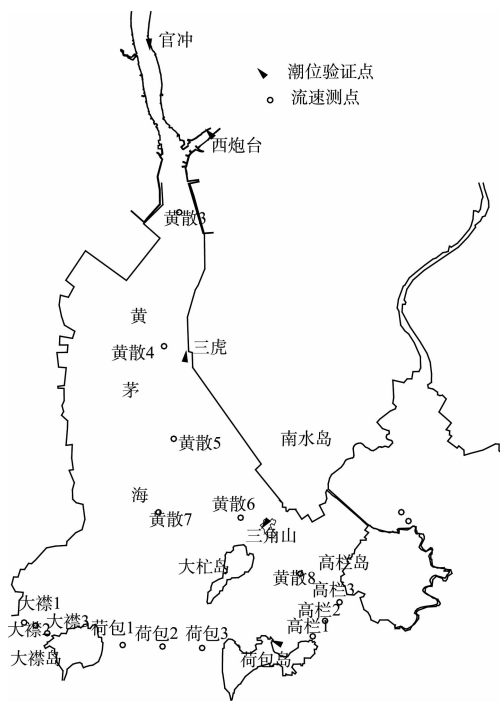


图 2 洪、枯季测点布置

由表 1 可知，在洪季，根据黄冲站的实测资料假设官冲站的所测周期平均含沙量为 0.201 kg/m^3 ，平均流量为 $2\,650.36\text{ m}^3/\text{s}$ ；西炮台站的所测周期平均含沙量为 0.405 kg/m^3 ，平均流量为 $1\,457.55\text{ m}^3/\text{s}$ 。而在枯季，根据黄冲站的实测资料假设官冲站的所测周期平均含沙量为 0.07 kg/m^3 ，平均流量为 $525.03\text{ m}^3/\text{s}$ ；西炮台站的所测周期平均含沙量为 0.095 kg/m^3 ，平均流量为 $42.8\text{ m}^3/\text{s}$ 。表 1 也说明，在枯季，上游来水来沙比洪季明显减小。在湾腰—三角山处（散 4～散 7）一带，洪季平均含沙量大于枯季平均含沙量，说明此段受上游来水来沙的影响较大。但在三角山往外—湾口处（散 8，大襟 v1、v2、v3，荷包 v1、v2、v3，高栏 v1、v2、v3），基本为枯季平均含沙量大于洪季平均含沙量，说明此段以潮流作用为主，主要靠波浪的掀沙作用增大水体的含沙量。

洪季上游来沙多、水温高，盐淡水在口门附近交汇，絮凝作用活跃，促使悬沙加速沉降，从而使上层悬沙浓度减少；枯季上游来水来沙少，潮流作用增强，再悬浮增大，使细颗粒泥沙混和到上层，增大了上层的水体悬沙浓度。总之，悬

沙浓度受上游来水来沙的影响，具有明显的季节变化。一般是洪季悬沙浓度要高于枯季悬沙浓度。口外水域悬沙浓度则呈现枯高洪低，这与洪季流域来沙主要在拦门沙及邻近水域沉积，而枯季拦门沙河床被再悬浮的泥沙向口外扩散有关。在垂向分层上，上层往往是枯季悬沙浓度较洪季大，下层则相反。

1.2 黄茅海湾口—湾顶实际观测资料及分析

根据黄茅海 2003-04-08T18:00—04-19T19:00 大潮和 2003-04-26T13:00—04-27T14:00 小潮含沙量测量资料（图 3），各测点涨落潮期平均含沙量见表 2。

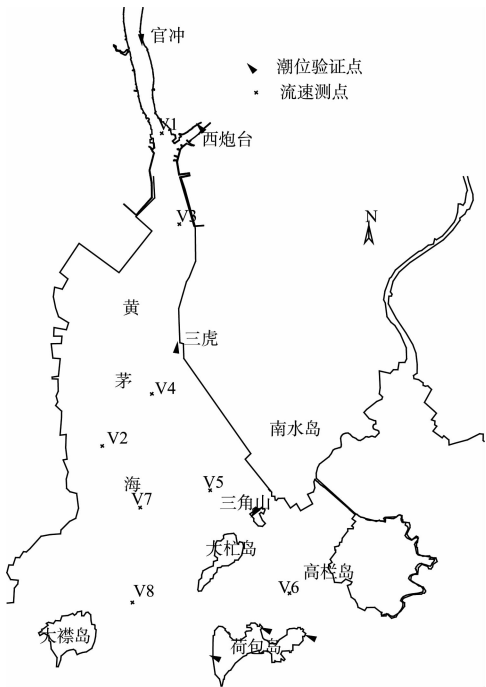


图 3 2003-04 组合测点布置

表 2 2003 年 4 月各垂线涨落潮期平均含沙量 kg/m^3				
垂线号	大潮		小潮	
	涨潮平均	落潮平均	涨潮平均	落潮平均
1 [#]	0.314	0.262	0.066	0.102
3 [#]	0.288	0.190	0.043	0.043
4 [#]	0.328	0.212	0.055	0.047
2 [#]	0.289	0.193	0.106	0.090
5 [#]	0.247	0.144	0.090	0.094
6 [#]	0.095	0.085	0.094	0.102
7 [#]	0.248	0.164	0.064	0.052
8 [#]	0.158	0.120	0.073	0.068

从表 2 可知：大潮时平均含沙量较大，小潮时平均含沙量较小。大潮时，拦门沙附近的 4[#]测点含沙量最高，小潮时，西滩白排附近含沙量高。6[#]和 8[#]航道所测含沙量较小。可见，滩地含沙量一般会大于主槽含沙量。

黄茅海多年观测资料也表明，在空间分布上，最大含沙量主要出现在拦门沙浅滩附近以及东、西边滩上，湾顶含沙量在汛期比湾口大，而在枯季则稍小些。

1.3 渤海湾永定新河河口实际观测资料及分析

根据永定新河河口实际观测资料^[16]，含沙量与风有如下的关系：在有风的情况下，由于波浪的掀泥作用，会使潮流挟带的含沙量剧烈增加。1997 年 5 月的测验是在风浪较大的气候条件下进行的，大潮观测的前 1 d 遇到 8~10 m/s 的大风，最大风速达到 16 m/s，持续约 4 h，观测中测到距河底 1.7 m 范围内有含沙浓度较高的浮泥层，测点含沙量达 29~64 kg/m³，最大达到 77 kg/m³；垂线平均含沙量最大达 29.6 kg/m³，浮泥层随涨、落潮往复流动，涨潮含沙量明显大于落潮含沙量。河口处（63+500 观测站）涨潮含沙量是多年平均值的 17 倍，落潮含沙量是多年平均值的 13 倍。又据文献[17]永定新河 1997 年 5 月 24 日—25 日口内外两侧全潮实测平均含沙量分析，大风过后 2~3 d 内河口滩区仍一片浑浊，且含沙量是平常天气的含沙量的 10~20 倍（表 3）。

表 3 大风天后沿程含沙量

测站	潮段	含沙量/(kg·m ⁻³)	
		第 1 次	第 2 次
0 [#]	涨	127.00	113.00
	落	111.00	120.00
1 [#]	涨	20.60	14.20
	落	12.40	9.70
2 [#]	涨	7.70	3.90
	落	4.90	4.40
4 [#]	涨	0.94	0.73
	落	0.73	0.78

由上述观测资料分析可知，大风过后含沙量增加明显，是平常天气的含沙量的几倍至几十倍。风速越大，含沙量增加越明显。

2 三维悬沙数值模型的建立

2.1 基本方程组

假设海水不可压缩、Boussinesq 近似和静力近似，考虑波浪辐射应力作用，对 z 作 σ 坐标变换，定义 $\sigma = \frac{z-\eta}{D}$ 。经变换后， (x, y, σ) 坐标系中的方程形式为：

连续性方程：

$$\frac{\partial(DU)}{\partial x} + \frac{\partial(DV)}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(UD)}{\partial t} + \frac{\partial(U^2D)}{\partial x} + \frac{\partial(UVD)}{\partial y} + \frac{\partial(UW)}{\partial \sigma} - fDV = \\ -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + A_M D \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) + T_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(VD)}{\partial t} + \frac{\partial(UVD)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2D)}{\partial y} + \frac{\partial(VW)}{\partial \sigma} + fDU = \\ -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + A_M D \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + T_y \end{aligned} \quad (3)$$

悬沙扩散方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(SD)}{\partial t} + \frac{\partial(USD)}{\partial x} + \frac{\partial(VSD)}{\partial y} + \frac{\partial(SW)}{\partial \sigma} = \\ D \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{D} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_z \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \omega \frac{\partial S}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (4)$$

湍动能方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(q^2D)}{\partial t} + \frac{\partial(Uq^2D)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq^2D)}{\partial y} + \frac{\partial(Wq^2)}{\partial \sigma} = \\ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_q}{D} \cdot \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho} \\ K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + A_H D \left[\frac{\partial^2(q^2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(q^2)}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

湍混合长度方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(q^2 l D)}{\partial t} + \frac{\partial(Uq^2 l D)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq^2 l D)}{\partial y} + \frac{\partial(Wq^2 l)}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \cdot \\ \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial(q^2 l)}{\partial \sigma} \right] + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} - \\ \frac{Dq^3}{B_1} \tilde{W} + A_H D \left[\frac{\partial^2(q^2 l)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(q^2 l)}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: U 、 V 、 W 分别为 x 、 y 、 σ 方向的流速分量; S 表示水体含沙浓度; q^2 为湍动能; l 为湍动的长度尺度; η 为潮位; $D = \eta + H$ 为全水深; f 为柯氏参数; g 为重力加速度; ω 为泥沙沉降速度; A_M 、 K_M 为水平、垂向涡黏性系数; D_x 、 D_y 、 D_z 分别为 x 、 y 、 σ 方向的悬沙扩散系数; K_H 为垂向扩散系数; K_q 为湍流动能的垂直扩散系数; t 为时间; T_x 、 T_y 为波浪产生的辐射应力项; $\tilde{W} = 1 + E_2(l/\kappa L)^2$ 为壁面近似函数, κ 为 von Karmen 常数; $\partial \tilde{\rho} / \partial \sigma = \partial \rho / \partial \sigma - c_s^{-2} \partial p / \partial \sigma$, c_s 为声速; 湍流动能和混合长度方程由下列关系闭合:

$$\begin{cases} K_M = lqS_M \\ K_H = lqS_H \\ K_q = 0.2lq \end{cases} \quad (7)$$

稳定性函数 S_M 、 S_H 定义为:

$$\begin{cases} S_H = \frac{0.336}{1 - 34.676G_H} \\ S_M = \frac{0.392 - 3.086G_H}{(1 - 34.676G_H)(1 - 6.127G_H)} \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$G_H = \frac{l^2 g}{q^2 \rho_0} \left(\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W = D \frac{d\sigma}{dt} = w - u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - \\ v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) - \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 波浪模型

采用第3代海浪模式 SWAN 计算出波浪要素, 再耦合入潮流模型中。控制方程采用考虑了流存在情况下成立的波浪作用谱方程, 波浪作用谱 N 是通过将波浪能量谱 E 与相对频率 σ 相除得到的。波作用控制方程在 Cartesian 坐标下表达式为^[16]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (11)$$

式中: θ 是相对波向; c_x 、 c_y 、 c_σ 、 c_θ 分别是 x 、 y 、 σ 、 θ 向的空间传播速度。这几种传播速度的具体表达式用线性波浪理论获得。SWAN 利用有限差分法进行波作用方程离散。模型详细情况参考 SWAN 波浪模型手册^[16]。

2.3 水流中考虑波浪的方式

在水流计算中, 考虑了波浪产生的辐射应力影响、波浪依赖的表面风应力影响、波浪影响下的底部剪切应力。

1) 辐射应力。

以辐射应力的形式考虑了波浪运动产生的动量通量作用。根据文献[18], 辐射应力项由下式计算:

$$\begin{cases} T_x = -\frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ T_y = -\frac{1}{\rho D} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} S_{xx} = S_x \cos^2 \theta - S_y \sin^2 \theta \\ S_{yy} = S_x \sin^2 \theta + S_y \cos^2 \theta \\ S_{xy} = S_{yx} = S_x \sin \theta \cos \theta + S_y \cos \theta \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

式中: θ 为波向与 x 轴之夹角; S_x 、 S_y 分别为沿波向与垂直波向的辐射应力, 由模型计算得出。

2) 表面风应力。

$$\mathbf{T}_a = \rho_a C_D |U_{10}| \mathbf{U}_{10} \quad (14)$$

式中: ρ_a 为空气密度; C_D 为海面拖曳系数; U_{10} 为海表面以上 10 m 处的风速。在考虑波浪的情况下,

$$C_D = [\kappa \ln(10/z_0)]^2 \quad (15)$$

式中: C_D 不仅与风况等相关, 还跟海表面粗糙度有关; 卡门常数 κ 取 0.4。

3) 底部剪切应力。

$$\mathbf{T}_b = \rho_b C_b |U_b| \mathbf{U}_b \quad (16)$$

式中: ρ_b 为海水密度; C_b 为海底拖曳系数; U_b 为底层处的流速。

$$C_b = \max \left[\kappa^2 / \left(\ln \frac{z}{z_{0b}} \right)^2, 0.0025 \right] \quad (17)$$

式中: z_{0b} 为海底粗糙度; z 为近底层网格点与海底的距离。

2.4 边界及初始条件

1) 自由表面边界条件。

在自由表面 $z = \eta(x, y)$, $\sigma = 0$, 满足条件:

$$\begin{cases} \rho \frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \\ q^2 = B_1^{2/3} U_{\tau s}^2 \\ q^2 l = 0 \\ W = 0 \\ \omega S + \frac{D_z}{D} \cdot \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: (τ_{sx}, τ_{sy}) 为表面风应力; $U_{\tau s}$ 为与表面风应力有关的摩阻流速大小。

2) 水体底部边界条件。

在水体底部 $z = -H(x, y)$, $\sigma = -1$, 满足条件:

$$\begin{cases} \rho \frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial \sigma}, \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \\ q^2 = B_1^{2/3} U_{\tau b}^2 \\ q^2 l = 0 \\ W = 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$-\frac{D_z}{D} \cdot \frac{\partial S}{\partial \sigma} - \omega S = \begin{cases} M_e \left(\frac{\tau_b}{\tau_e} - 1 \right) & \tau_b \geq \tau_e \\ 0 & \tau_d < \tau_b < \tau_e \\ \omega S \left(\frac{\tau_b}{\tau_d} - 1 \right) & \tau_b \leq \tau_d \end{cases} \quad (20)$$

式中: (τ_{bx}, τ_{by}) 为底部摩阻切应力; $U_{\tau b}$ 是与底部摩阻切应力有关的摩阻流速大小; τ_d 、 τ_e 、 M_e 分别为泥沙沉降临界切应力、冲刷临界切应力和侵蚀常数。

3) 侧向闭边界条件。

$$\begin{cases} U_n = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial \mathbf{n}} = 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: 下标 n 表示陆地侧边界的法向。

4) 侧向开边界条件。

对水位开边界, 通常用实测的水位资料或者用更大范围数学模型计算的水位值作为强迫水位控制条件, 含沙量开边界用实测资料推求。开边界上的 q^2 及 $q^2 l$ 用忽略对流项的扩散方程计算得到。

5) 初始条件。

水位、流速和悬沙的初值均取一常值或给出其初始场。

3 模式的验证

3.1 模型研究范围、地形资料及网格

模型研究范围: 上游边界取在崖门官冲水文站、虎跳门西炮台水文站及鸡啼门黄金水文站, 下边界取至外海 30 m 等深线。选取的地形资料为黄茅海水域 2003 年实测地形图、磨刀门水域

2003 年实测地形图、鸡啼门水域 1990 年实测的水下地形图及外海现有最新海图。基准面为珠江基准面。模型中水平方向网格为 201×253 个。垂向共分成 5 层, 6 个层面。

3.2 模型输入条件

本文采用 1992-11-15T16:00—11-19T18:00 进行计算。外海开边界潮位采用上川岛、荷包岛、三灶实测资料推求得到, 含沙量取 0; 上游 3 个口门边界均采用实测流量过程及含沙量过程。波浪模型计算中, 取 SE 向 $H_{1/10}$ 为 1.5 m, 波周期 T 取 5.5 s, 与潮流模型耦合中转换成平均波高。模型中各种参数的确定方法如下:

1) A_M 、 D_x 、 D_y 、 D_z 。

水平涡动黏性系数 A_M 根据 Smagorinsky 公式计算得出:

$$A_M = C \Delta x \Delta y \cdot \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2}{2} + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

式中: D_x 、 D_y 为泥沙水平扩散系数, 用欧拉公式确定:

$$\begin{cases} D_x = 5.93 \sqrt{gD} |u| / C \\ D_y = 5.93 \sqrt{gD} |v| / C \end{cases} \quad (23)$$

对细颗粒泥沙, D_z 泥沙垂向扩散系数可近似取为 K_M 。

2) τ_e 、 τ_d 、 M_e 。

$$\tau_e = \rho C_b U_c^2 \quad (24)$$

临界启动流速 U_c 采用窦国仁公式^[19] 计算, $\tau_d = \frac{4}{9} \tau_e$, $M_e = 6.4 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3) ω 。

海水中细颗粒泥沙的沉降速度决定于其絮凝当量的大小。试验表明, 这样的当量粒径一般约为 0.015 ~ 0.03 mm, 其相应沉降速度为 0.01 ~ 0.06 cm/s, 本文取 $\omega = 0.04 \text{ cm/s}$ 。

3.3 验证成果

模型在计算域内进行了验证, 限于篇幅, 给出 2 个有代表性的流速、流向和含沙量验证点: 散点 7 和高栏 V2 的流速 (图 4)、流向 (图 5)、

含沙量验证（图 6）。可以看出，计算得到的潮位、流速、流向、含沙量过程和实测的潮位、流速、流向、含沙量过程无论在量值上还是在相位上总体吻合较好。

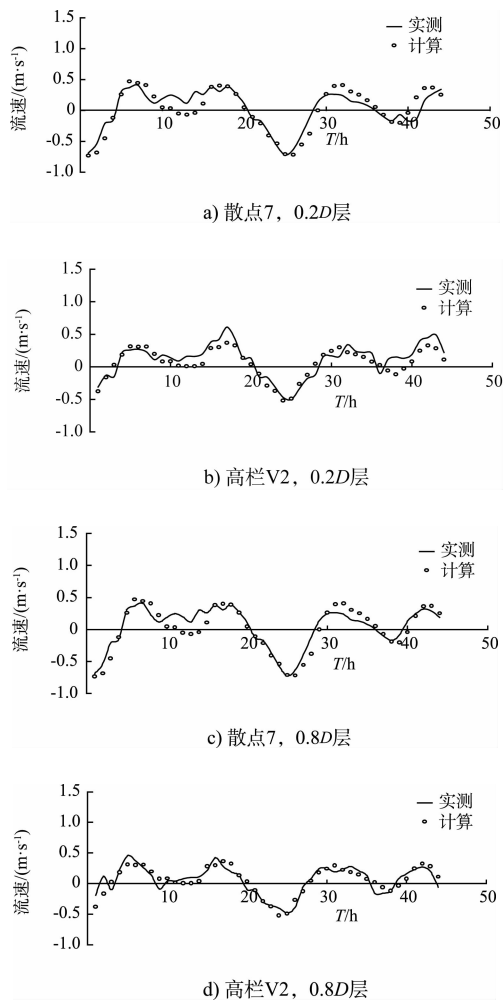


图 4 流速验证

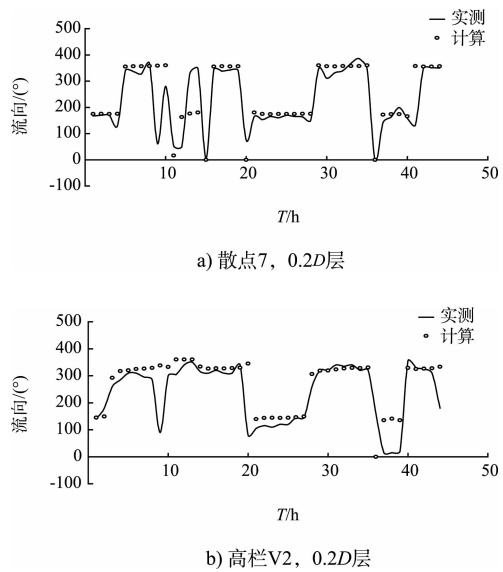


图 5 流向验证

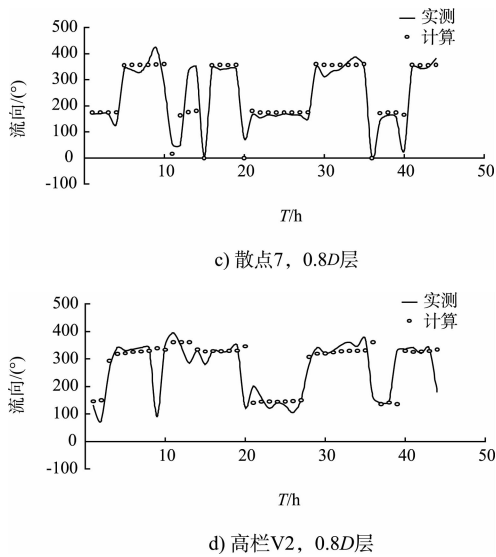


图 6 含沙量验证

4 结语

河口、海岸地区悬沙运动物理过程复杂，不同的水动力环境下，悬沙浓度出现不同的变化特征。悬沙浓度在时空上的变化反映了不同的动力作用和水深条件下的结果。本文根据实测资料，从多方面分析了悬沙浓度的变化规律。并据此建立了悬沙浓度变化与多因子响应高精度三维数值模型。经过实测资料验证，满足规范规定的精度要求，为进一步深入研究提供了科学手段。

参考文献：

[1] Schoellhamer D H. Sediment resuspension mechanisms in Old Tampa Bay, Florida[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(1) : 603-620.

[2] Villard P V, Kostastashuk R. The relation between shear velocity and suspended sediment concentration over dunes: Fraser Estuary, Canada[J]. Marine Geology, 1998, 148: 71-81.

[3] Chen M S, Wartel S, Temmerman S. Seasonal variation of flocc characteristics on tidal flats, the Scheldt estuary[J]. Hydrobiologia, 2005(1-3) : 181-195.

[4] Lindsay P, Balls P W, West J R. Influence of tidal range and river discharge on suspended particulate matter fluxes in the Forth estuary (Scotland) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, 42(1) : 63-82.

[5] Alexandrov Y, Laronne J B, Reid I. Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel northern Negev, Israel [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 53: 73-84.

[6] Siakeu J, Oguchi T, Aoki T, et al. Change in riverine suspended sediment concentration in central Japan in

response to late 20 th century human activities[J]. Catena, 2004, 55(2) : 231-254.

[7] Van der Meulen A, de Kok J M, Wang Z B. Modeling the siltation in the Rotterdam harbour area[C]//OCEANS' 98 Conference Proceedings, 1998: 1 531-1 534.

[8] Wolanski E, Moore K, Spagnol S. Human-induced siltation of the macro-tidal Ord river estuary[J]. Western Australia Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, 53 (5) : 717-732.

[9] 沈焕庭, 李九发, 朱慧芳, 等. 长江河口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究, 1986(1) : 3-15.

[10] 谷国传. 长江口外水域悬沙分布特征[J]. 东海海洋, 1986(1) : 16-24.

[11] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口悬沙浓度变化特征分析[J]. 泥沙研究, 2006(3) : 68-75.

[12] 陈沈良, 谷国传. 杭州湾口悬沙浓度变化与模拟[J]. 泥沙研究, 2000(5) : 45-50.

[13] 郜昂, 赵华云, 杨世伦, 等. 径流、潮流和风浪共同作用下近岸悬沙浓度变化的周期性探讨——以杭州湾和长江口交汇处的南汇嘴为例[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(1) : 44-50.

[14] 梁文, 黎广钊. 廉州湾海域的悬沙分布特征[J]. 海洋地质, 2001(4) : 1-9.

[15] Tattersalla G R, Elliotta A J, Lynnb N M. Suspended sediment concentrations in the Tamar estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003(4) : 679-688.

[16] 梁永立, 邢焕政. 永定新河河口潮流动力及泥沙特征初步分析[J]. 海河水利, 1999(2) : 13-15.

[17] 乐培九. 河床演变与模拟文集[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2000: 216-223.

(本文编辑 武亚庆)

