

淤泥质河口水沙运动数学模型相关问题

雷文韬, 夏军强, 谈广鸣

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为研究淤泥质河口水沙运动规律, 建立了用于模拟淤泥质河口水沙运动的二维数学模型。该模型采用基于无结构三角网格下的有限体积法对方程组进行离散, 结合 Roe-MUSCL 方法及时间方向的预测-校正格式, 使模型在时空方向具有二阶计算精度。模型中分别采用不同方法计算粘性和非粘性泥沙的输移源项, 并引入粘性泥沙的起动流速和冲刷率计算公式。采用已有的概化水槽试验数据对模型进行了初步验证。然后模拟了 1995 年 10 月小潮及大潮期间海河口的潮流运动与泥沙输移过程, 计算得到的潮位、潮流速及含沙量过程与实测过程符合较好, 结果表明模型能够用来模拟淤泥质河口粘性和非粘性泥沙的不平衡输移过程。同时还比较了泥沙输移源项的不同处理方式对计算结果的影响, 计算表明在淤泥质河口水沙运动数学模型中必须同时考虑粘性和非粘性泥沙的输移。

关键词: 淤泥质河口; 二维水沙模型; 有限体积法; 泥沙输移; 粘性泥沙

中图分类号: TV148.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)02-0197-08

淤泥质河口因受潮波变形作用的影响, 涨潮期间被潮流挟带上溯的海域细颗粒泥沙无法在落潮期间被全部带出, 其在口门处淤积从而影响河口的防洪、排涝及航运等。近年来许多研究者采用实测资料分析及数值模拟等方法对淤泥质河口水沙运动规律进行了研究^[1-2]。Kim 等^[1]建立了平面二维水沙数学模型研究在 Keum 河口修建顺坝对泥沙淤积产生的影响, 根据模型计算结果预测了不同工况下的泥沙回淤位置, 但是该模型不能较好地计算泥沙输移量, 也没有针对粘性沙输移采取相应的处理方法。吕平等^[2]通过封闭管道中的泥沙起动试验推导出适用于粘性沙的起动流速公式, 该公式认为粘性沙起动流速与床沙的干容重、粘性颗粒含量及淤积历时等因素相关。

海河口是一个具有中等潮汐强度的典型淤泥质河口。Bai 等^[3]采用基于有限元方法建立的三维水沙数学模型模拟了海河口主槽清淤后的泥沙输移过程, 并评估了不同方案下的清淤效率及泥沙回淤情况。谈广鸣等^[4]采用有限元方法建立了平面二维水沙数学模型, 模拟了海河口潮流作用下的水动力及泥沙输移过程, 但模型中仅考虑了均匀非粘性沙的输移。因此, 在模拟海河口泥沙输移过程时, 需要在数学模型中同时考虑粘性和非粘性沙的输移, 并引入相应的冲淤源项计算方法及适用于粘性沙的起动流速公式等。

本文将基于无结构三角网格下有限体积法的二维水动力学模型与非均匀泥沙不平衡输移及河床冲淤模块耦合, 建立平面二维水沙数学模型用于研究淤泥质河口水沙运动规律。模型中对粘性和非粘性沙的输移源项分别采用不同方法进行计算, 并引入粘性沙的起动流速公式判断泥沙起动状态及粘性沙的冲刷率公式计算其冲刷源项。采用已有的水槽概化试验数据对模型进行初步验证, 最后用该模型模拟海河口的水动力及泥沙输移过程。

1 二维水沙数学模型

1.1 水流控制方程

河口地区水域在满足如静水压力分布、自由水面、垂向加速度较小及床面坡降较小等条件的情况下, 可

收稿日期: 2012-03-14; 网络出版时间: 2013-02-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130202.1645.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079103); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0619)

作者简介: 雷文韬(1986-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事河口泥沙运动等研究。E-mail: leiwt@whu.edu.cn

以采用二维浅水方程来描述其水动力过程。平面二维浅水流动方程可以写成如下守恒形式：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\mathbf{G}}}{\partial y} + \mathbf{S} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{U}$ 为守恒向量 $(h, hu, hv)^T$ ； h 为水深； u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速； t 为时间； $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{G}$ 分别为 x 、 y 方向上的对流项； $\bar{\mathbf{E}}$ 、 $\bar{\mathbf{G}}$ 分别为 x 、 y 方向上的扩散项； $\mathbf{S}$ 为包含底坡项、摩阻项及 Coriolis 力等在内的源项。各项具体的表达式，见 Xia 等^[5]关于溃坝洪水流动过程的模拟研究。

1.2 悬移质泥沙输移方程

在水体含沙量较低的河口地区，二维非均匀悬移质泥沙不平衡输移方程可写成以下形式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(hS_k) + \frac{\partial}{\partial x}(huS_k) + \frac{\partial}{\partial y}(hvS_k) = \frac{\partial}{\partial x}\left(h\varepsilon_s \frac{\partial S_k}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h\varepsilon_s \frac{\partial S_k}{\partial y}\right) + (E_k - D_k) \quad (2)$$

式中 S_k 为第 k 粒径组悬沙含沙量； ε_s 为泥沙紊动扩散系数，在低含沙量水体中其值可取为与水流粘滞系数相等； E_k 、 D_k 分别为泥沙冲刷和淤积源项。在模拟河口地区的泥沙输移时，通常需要同时考虑粘性和非粘性泥沙的输移。对于非粘性沙的冲刷和淤积源项，可采用下式分别计算：

$$E_k = \alpha_{sk} \omega_{sk} S_{*k} \quad D_k = \alpha_{sk} \omega_{sk} S_{*k} \quad (3)$$

式中 α_{sk} 为恢复饱和系数，根据实测资料率定的取值范围一般为 0.1 ~ 1.0； ω_{sk} 为泥沙沉速； S_{*k} 为泥沙分组挟沙力。对于粘性沙的冲刷和淤积源项，可采用 Partheniades-Krone 公式^[6]进行计算，即

$$E_k = \begin{cases} \Delta P_{bk} M_e (\tau/\tau_e - 1) & \tau > \tau_e \\ 0 & \tau \leq \tau_e \end{cases} \quad D_k = \begin{cases} \omega_{sk} S_k (1 - \tau/\tau_d) & \tau < \tau_d \\ 0 & \tau \geq \tau_d \end{cases} \quad (4)$$

式中 τ 为床面切应力； τ_e 、 τ_d 分别为临界冲刷切应力和临界淤积切应力； M_e 为冲刷经验系数； ΔP_{bk} 为床沙级配。根据 Mercier 和 Delhez^[7]的研究，临界冲刷切应力 τ_e 典型取值范围为 0.04 ~ 2.00 N/m²；临界淤积切应力 τ_d 的室内试验测量值、现场试验测量值与模拟值之间出入较大，对于不同研究区域的水沙条件，其取值范围通常为 0.05 ~ 0.30 N/m²；冲刷经验系数 M_e 的典型取值范围为 4×10^{-5} ~ 1.2×10^{-4} kg/(m² · s)。参考 Winterwerp 和 van Kesteren^[8]的研究，在模型中假定粘性沙淤积连续发生且不受临界淤积切应力 τ_d 控制，因此粘性沙的淤积源项可由 $D_k = \omega_{sk} S_k$ 计算。

1.3 河床变形方程

由悬移质泥沙不平衡输移引起的床面变形量可由下式计算：

$$\Delta Z_b = \sum_{k=1}^N \Delta Z_{bk} = \frac{\Delta t}{\rho'} \sum_{k=1}^N (D_k - E_k) \quad (5)$$

式中 ΔZ_b 为计算时间步长 Δt 内总的床沙冲淤厚度； N 为非均匀床沙的粒径组数； ΔZ_{bk} 为床沙分组冲淤厚度； ρ' 为床沙干密度。因此计算时段 l 末单元中心的床面高程可表示为 $Z_b^{l+1} = Z_b^l + \Delta Z_b$ 。

1.4 水流挟沙力计算

通常认为水流挟沙力与水动力及泥沙等因素密切相关。对于河口地区水流挟沙力的计算，可采用国内常用的张瑞瑾水流挟沙力公式^[9]：

$$S_* = K \left(\frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{gh\omega_m} \right)^M \quad (6)$$

式中 g 为重力加速度； K 、 M 分别为挟沙力系数及指数，其中 K 的单位通常取为 kg/m³，史英标等^[10]对钱塘江河口过江隧道河段的河床在洪水时期的冲刷深度研究中将其分别取为 0.07 kg/m³ 及 1； ω_m 为悬沙群体沉速，可采用韩其为^[11]提出的方法进行计算。

对于潮汐河口水流挟沙力计算，也有许多研究者采用如下公式计算^[4,12]：

$$S_* = K \left(\frac{u^2 + v^2}{gh} \right)^M \quad (7)$$

式中 h 、 u 、 v 可取全潮期的平均值用于计算全潮期的平均水流挟沙力，也可取半潮期的平均值用于分别计

算涨潮期及落潮期的平均水流挟沙力。王义刚等^[12]在对淤泥质河口围垦后泥沙回淤的数值计算研究中采用了式(7),并将系数 K 、 M 分别取为 290.0 kg/m^3 及 1.28 。

1.5 模型计算方法

本模型采用无结构三角网格下的有限体积法对控制方程进行离散,并采用单元中心方式将守恒变量存储到单元中心。该算法定义相邻两个单元的公共面为计算界面,算法的关键问题在于计算通过界面的水流及泥沙的对流通量^[13]。根据二维浅水方程的旋转不变性,可将界面通量的计算转换为求解局部一维 Riemann 问题,通过界面的法向通量可采用基于 Roe 近似的 Riemann 解来计算,而结合 MUSCL 法得到的 Roe-MUSCL 方法能够提供较高的计算精度^[14]。因此本模型采用 Roe-MUSCL 方法计算水流对流通量,并引入 minmod 限制器对变量坡度进行限制以确保计算稳定解的正性,使计算格式在空间方向得到二阶计算精度;模型采用预测-校正格式离散时间,使计算格式在时间方向得到二阶计算精度。对于泥沙对流通量,模型采用迎风格式将含沙量与通过界面的水流量直接相乘求得。

二维浅水方程的源项主要包括底坡项和摩阻项。无结构三角网格下的底坡项比较容易处理;对于摩阻项,采用显格式处理会引起数值计算不稳定,因此本模型采用半隐格式处理摩阻项。此外本模型还采用适用于无结构三角网格的干湿处理方法处理界面干湿问题^[14],引入最小水深来判断计算过程中单元的干湿状态。模型在闭边界采用滑移边界条件,即假定闭边界法向流速为0、切向流速不为0;对于开边界则可给定水位过程、流量过程或水位~流量关系。

2 模型验证

采用已有的概化水槽试验数据以及其他模型的计算结果对本模型进行初步验证^[15-17]。该概化水槽试验由 van Rijn^[15]设计,在一个长30 m、宽0.5 m、深0.7 m的水槽中进行床面冲淤试验。水槽中部有一个具有不同边坡(1:3、1:7及1:10)的深槽,整个水槽床面铺有一层厚约0.2 m的细沙,其 $d_{50}=0.16 \text{ mm}$, $d_{90}=0.20 \text{ mm}$ 。试验中给定水槽进口断面的平均流速和水深分别为 0.51 m/s 、 0.39 m 。为了研究深槽及其下游床面的冲淤特性,试验在进口断面补充与所铺床沙级配相同的悬移质和推移质泥沙,相应的输沙率分别为 $0.03 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 和 $0.01 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,而悬移质泥沙的代表沉速约为 0.013 m/s (水温 15°C)。试验在进行一定冲淤历时后测量水槽中河床纵剖面上的垂向变形。

本研究仅模拟其中一组试验,该试验水槽中部为一个长6 m、深0.15 m、边坡1:10的深槽(图1)。将计算区域划分为6544个无结构三角网格,其中深槽段的网格尺寸为0.05 m。由于缺少详细的床沙及来流泥沙级配资料,本模型暂采用均匀悬移质泥沙输移模式模拟水槽内的床面冲淤过程,在模拟时悬移质输沙率取为总输沙率 $0.04 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$,并采用式(6)计算水流挟沙能力。计算中时间步长取为 0.025 s 。根据试验数据率定模型参数,其中将糙率取为 $0.021 \text{ s/m}^{\frac{1}{3}}$;假定深槽上游床面满足冲淤平衡条件,将挟沙力公式中的系数 K 、 M 分别取为 0.0825 kg/m^3 及 0.92 。Guo等^[17]采用该试验数据验证其建立的数学模型时,认为恢复饱和系数 α_{sk} 为一个与水流、泥沙等因素相关的修正系数,通过计算将其在淤积、冲刷时均取为14,本研究结合试验数据的率定结果将其在淤积、冲刷时分别取为13及5.5。

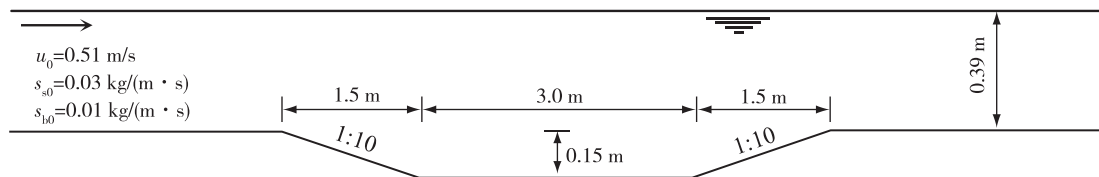


图1 水槽试验段示意

Fig. 1 Sketch of the experiment section in a flume

图2(a)给出了试验7.5 h后深槽处及其上、下游段河床纵剖面的模型计算结果与其他模型的计算结果及

实测结果的对比。可以看出水槽淤积段($x = 1.5 \sim 6.5$ m)的床面高程计算值稍大于实测值;而冲刷段(自 $x = 6.5$ m 下游)床面高程计算值与实测值符合较好,相比另外两个模型较好地模拟了冲刷段的床面变形情况。试验 15 h 后深槽处及其上、下游段河床纵剖面的模型计算结果与其他模型的计算结果及实测结果的对比结果,如图 2(b)所示。结果表明自 $x = 5$ m 下游的床面高程计算值均大于实测值,与另外两个模型的计算结果相比计算值偏大。这可能是由于恢复饱和系数等参数取值不当,使得 7.5 ~ 15 h 期间自 $x = 5$ m 下游深槽段床面淤积过多,而冲刷段冲刷偏少甚至发生回淤;另外,模型假定深槽上游段床面冲淤平衡,导致深槽及下游段床面淤积较实测值偏大。

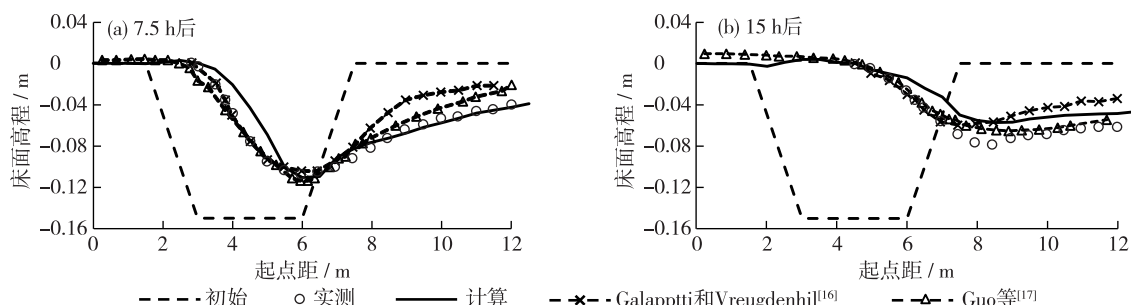


图 2 计算与实测的河床纵剖面比较

Fig. 2 Comparisons between the calculated and observed longitudinal bed profiles

3 模型应用

3.1 计算条件

海河口地处渤海湾西北部,是一个具有中等潮汐强度的典型淤泥质河口,其多年平均海平面为 1.59 m (大沽高程),多年平均潮差为 2.43 m,涨潮期和落潮期平均含沙量分别为 0.48 kg/m^3 和 0.31 kg/m^3 。根据多年地形资料估算,海河口每年 7、8 月间约有 40 万 m^3 泥沙淤积在主槽内,占到该地区年泥沙淤积量的 1/3。海河口泥沙多由淤泥质构成,泥沙颗粒较细。在近河口段边界及地形导致的潮波变形作用影响下,潮流将外海床面上的泥沙挟带上溯并在口门处淤积,使得海河口的泄流能力日益萎缩,直接威胁到上游天津市的防洪及排涝安全。

本文收集了海河口 1995 年 10 月 5 ~ 6 日小潮及 10 月 11 ~ 12 日大潮期间的实测资料(包括潮位、潮流速和含沙量过程等),采用初步验证后的数学模型模拟了海河口的水动力及泥沙输移过程,并与实测资料进行比较。选取海河闸下至外海 -6 m 等深线间的区域作为计算区域,并在计算区域生成 4 838 个无结构三角网格。图 3 给出了模型计算区域的地形、测点位置及网格布置。实测资料表明,海河口水域的床沙中值粒径约为 0.124 mm,模型中采用非均匀沙模型将床面泥沙分为 6 组。根据 van Rijn^[18] 的研究,模型中取 $d = 0.062 \text{ mm}$ 作为划分粘性沙和非粘性沙的标准,将前 3 组粒径较细的划分为粘性泥沙、后 3 组划分为非粘性泥沙。计算中时间步长取为 0.5 s,用于判别干湿界面的最小水深取为 0.2 m。在本研究中,根据实测资料率定模型计算参数。糙率在深槽区域取值范围为 $0.017 \sim 0.023 \text{ s/m}^{1/3}$,河滩区域取值范围为 $0.028 \sim 0.029 \text{ s/m}^{1/3}$,并根据不同的涨落潮状态对其进行适当调整。引入吕平等^[2] 提出的粘性泥沙起动流速公式 $v = 0.283 (\gamma' / \gamma'_i)^{5.5} P_c^{0.516}$ 来判断粘性泥沙的起动状态,其中 P_c 为床沙粘性颗粒含量, γ'_i 、 γ' 分别为初始泥沙干容重及固结一定时间后的泥沙干容重。因本次模拟时间较短,在计算中认为床沙固结干容重不变,且等于初始干容重。采用式(7)计算潮流作用下的水流挟沙力,参照谈广鸣等^[4] 的研究将系数 K 、 M 分别取为 70.6 kg/m^3 及 1.0;恢复饱和系数 α_{sk} 取为常数,淤积及冲刷时均取为 0.5。模型中同时引入 Smerdon 和 Beasley^[19] 提出的临界冲刷切应力公式 $\tau_c = 0.163 P_c^{0.84}$ 判断泥沙的冲刷状态;采用 Tan 等^[20] 提出的冲刷率公式 $E = 0.074 (\gamma' / \gamma'_i)^{-9.25} P_c^{-0.4} \tau$ 计算粘性沙的冲刷源项,在计算中同样取床沙固结后的干容重等于初始干容重。

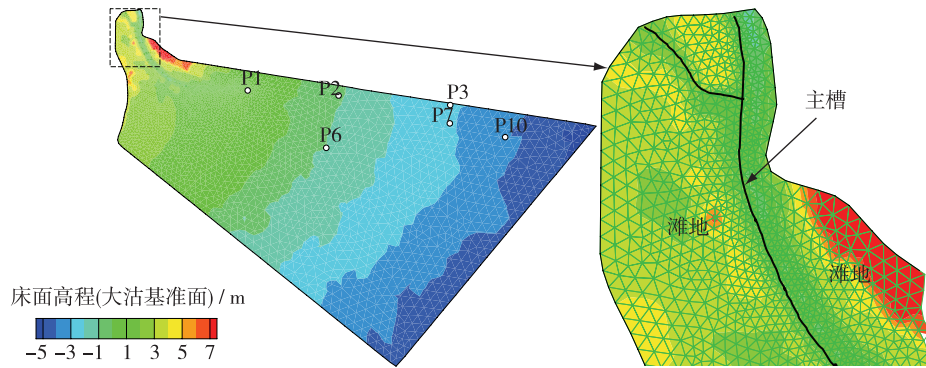


图3 计算区域地形及测站布置示意

Fig. 3 Sketches of the study domain with the bathymetry and locations of observation points

3.2 潮位、流速计算结果

图4给出了测点P2和P7在小潮期间同时考虑粘性沙和非粘性沙输移时计算与实测的潮位及 x 方向潮流速过程。由图4(a)、图4(b)可以看出,潮位计算过程与实测过程符合较好,但测点P7的潮位计算值均小于实测值,这可能是由模型采用的地形数据精度不高引起的。图4(c)、图4(d)所示的 x 方向潮流速计算过程与实测过程符合较好,但在涨急及落急附近潮流速计算值与实测值偏差较大,流速误差产生的原因可能是模型糙率系数取值不当。图5给出了测点P3和P10在大潮期间同时考虑粘性沙和非粘性沙输移时的计算与实测的潮位及 x 方向潮流速过程,可以得到与小潮期相同的结论。

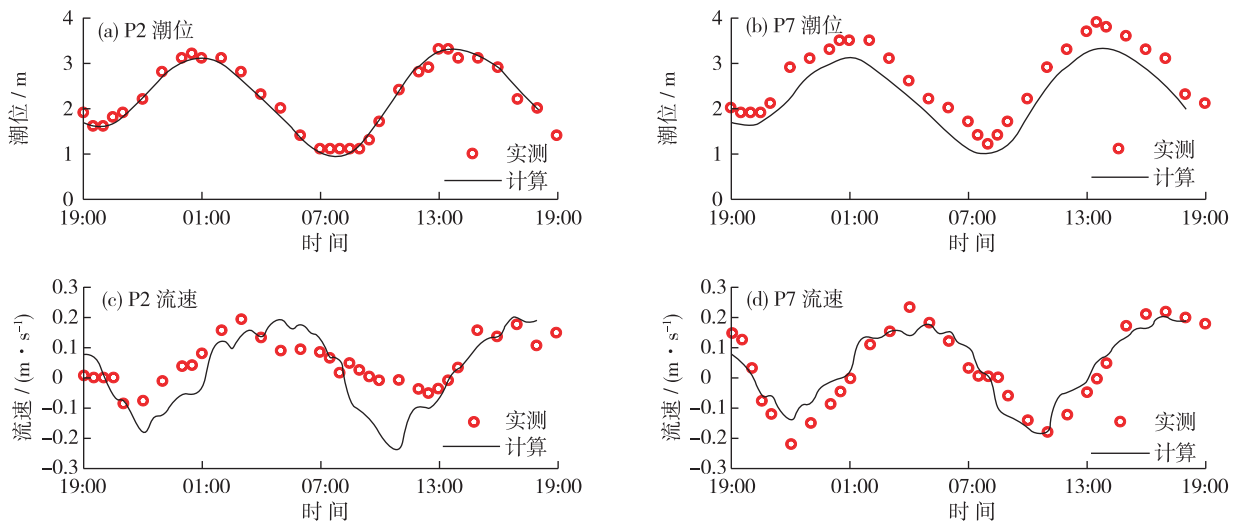


图4 计算与实测的潮位及潮流速过程比较(小潮期)

Fig. 4 Comparisons between the calculated and observed tidal levels and velocities during the neap tidal cycle

3.3 泥沙输移计算结果

本模型采用两种不同方式处理泥沙输移源项,即:①模型中同时考虑粘性沙和非粘性沙输移;②模型中仅考虑非粘性沙输移。将这两种泥沙输移处理方式下含沙量的计算过程与实测过程进行比较,分别选取小潮期测点P1、P2及大潮期测点P6、P7的对比结果,如图6、图7所示。由图6可知,采用方式②得到的含沙量计算值与实测值相差较大,特别是在测点P2出现了与实际情况不符的含沙量极值点。而由图7可以得到与小潮期相同的结论。总体而言,采用方式①得到的含沙量计算过程与实测过程符合较好。因此在淤泥质河口水沙运动数学模型中,需要同时考虑粘性沙和非粘性沙的输移。

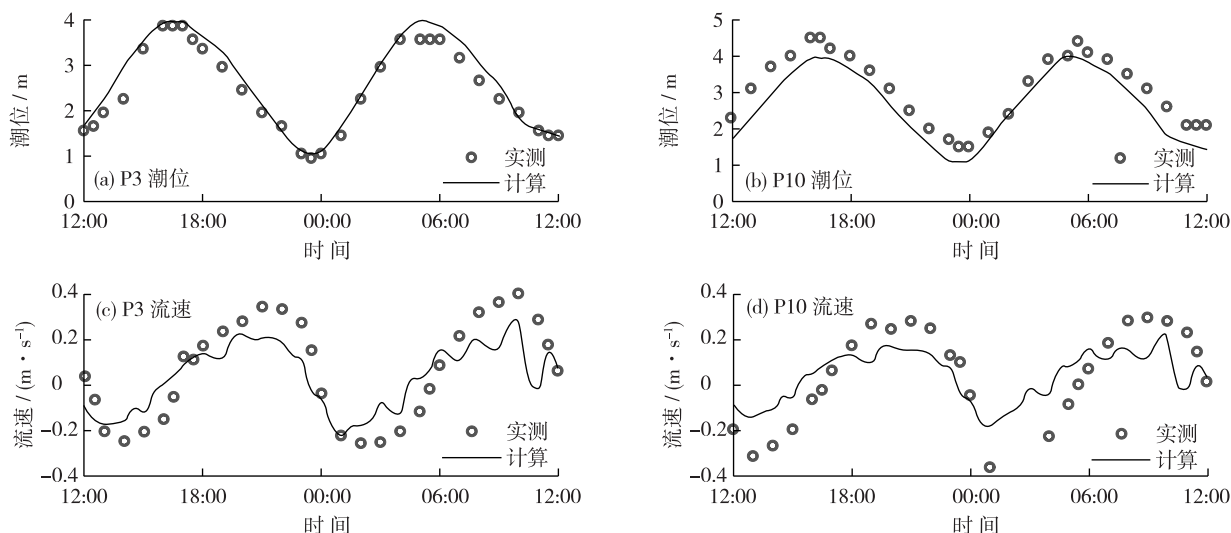


图 5 计算与实测的潮位及潮流速过程比较(大潮期)

Fig. 5 Comparisons between the calculated and observed tidal levels and velocities during the spring tidal cycle

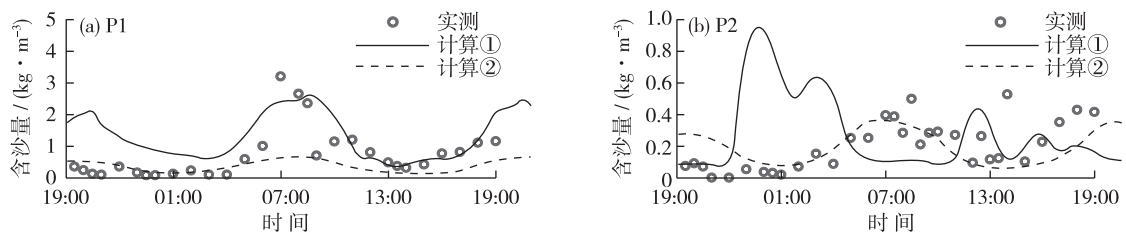


图 6 两种泥沙输移处理方式下含沙量的计算与实测过程比较(小潮期)

Fig. 6 Comparisons between the calculated and observed suspended sediment concentrations during the neap tidal cycle under the two transport mode treatments

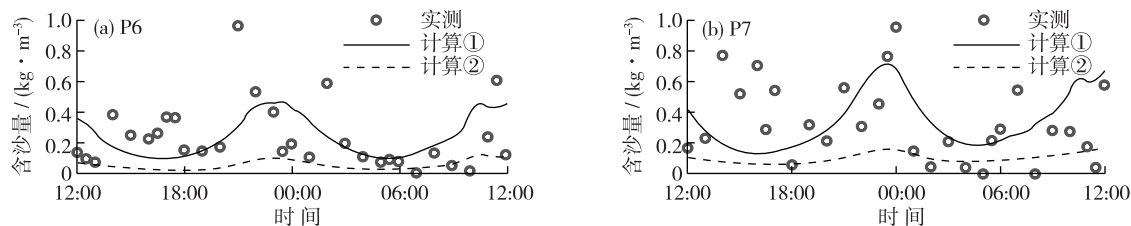


图 7 两种泥沙输移处理方式下含沙量的计算与实测过程比较(大潮期)

Fig. 7 Comparisons between the calculated and observed suspended sediment concentrations during the spring tidal cycle under the two transport mode treatments

4 结 论

为研究淤泥质河口的水沙运动规律,本文建立了基于无结构三角网格下有限体积法的平面二维水沙数学模型。模型能够较好地模拟概化水槽内的泥沙输移及床面冲淤过程;对于海河口的水动力及泥沙输移过程的模拟,潮位计算过程与实测过程符合较好,潮流速计算值在涨急及落急附近与实测值有所偏差,而含沙量计算过程总体上与实测过程符合较好,模型能够用来模拟淤泥质河口粘性沙和非粘性沙的不平衡输移过程;为提高模拟淤泥质河口泥沙输移的计算精度,需要针对粘性沙和非粘性沙分别采用不同的输移源项计算方法。

参考文献:

- [1] KIM T I, CHOI B H, LEE S W. Hydrodynamics and sedimentation induced by large-scale coastal developments in the Keum River Estuary, Korea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(3/4): 515-528.
- [2] 吕平, 谈广鸣, 王军. 粘性泥沙淤后起动流速试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2008(2): 56-58. (LÜ Ping, TAN Guangming, WANG Jun. Study on the incipient motion velocity of cohesive sediment after deposition and consolidation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(2): 56-58. (in Chinese))
- [3] BAI Yuchuan, WANG Zhaoyin, SHEN Huanting. Three-dimensional modelling of sediment transport and the effects of dredging in the Haihe Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 56(1): 175-186.
- [4] 谈广鸣, 赵连军, 韦直林, 等. 海河口平面二维潮流泥沙数学模型研究[J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2005, 20(5): 545-550. (TAN Guangming, ZHAO Lianjun, WEI Zhilin, et al. Research on a 2-D horizontal current and sediment numerical model in the Haihe River estuary[J]. *Journal of Hydrodynamics; Ser A*, 2005, 20(5): 545-550. (in Chinese))
- [5] XIA J Q, LIN B L, FALCONER R A, et al. Modelling dam-break flows over mobile beds using a 2-D coupled approach[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(2): 171-183.
- [6] PARTHENIADES E A. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 1965, 91(HY1): 105-139.
- [7] MERCIER C, DELHEZ E J M. Diagnosis of the sediment transport in the Belgian Coastal Zone[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74(4): 670-683.
- [8] WINTERWERP J C, van KESTEREN W G M. Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment[M]. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2004, 466.
- [9] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 王明甫, 等. 河流泥沙运动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 182-188. (ZHANG Ruijin, XIE Jianheng, WANG Mingfu, et al. River dynamics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1989: 182-188. (in Chinese))
- [10] 史英标, 鲁海燕, 杨元平, 等. 钱塘江河口过江隧道河段极端洪水冲刷深度的预测[J]. *水科学进展*, 2008, 19(5): 685-692. (SHI Yingbiao, LU Haiyan, YANG Yuanping, et al. Prediction of erosion depth under the action of the exceptional flood in the river reach of a tunnel across the Qiantang estuary[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 657-664. (in Chinese))
- [11] 韩其为. 非均匀悬移质不平衡输沙的初步研究[J]. *科学通报*, 1979(17): 804-808. (HAN Qiwei. A study of the non-equilibrium transportation of non-uniform suspended load[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979(17): 804-808. (in Chinese))
- [12] 王义刚, 林祥, 吴中. 河口边滩围垦后淤积计算方法研究[J]. *海洋工程*, 2000, 18(3): 67-81. (WANG Yigang, LIN Xiang, WU Zhong. A method for calculating depositional rate after warping the bank in the silty estuary[J]. *Ocean Engineering*, 2000, 18(3): 67-81. (in Chinese))
- [13] 陈祖华, 赖冠文, 王光谦, 等. 非规则网格下二维浅水流动的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2002, 13(6): 657-664. (CHEN Zuhua, LAI Guanwen, WANG Guangqian, et al. Numerical simulation of 2-D shallow-water flow on irregular grids[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(6): 657-664. (in Chinese))
- [14] 夏军强, 王光谦, 林斌良, 等. 复杂边界及实际地形上溃坝洪水流动过程模拟[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 289-298. (XIA Junqiang, WANG Guangqian, LIN Binliang, et al. Two-dimensional modelling of dam-break floods over actual terrain with complex geometries using a finite volume method[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(3): 289-298. (in Chinese))
- [15] van RIJN L C. Computation of siltation in dredged trenches[R]. The Netherlands: Delft Hydraulics Laboratory, 1980, 1267-V/M 1570.
- [16] GALAPPATTI G, VREUGDENHIL C B. A depth-integrated model for suspended sediment transport[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1985, 23(4): 359-377.
- [17] GUO Qingchao, JIN Yeechung, ASCE A M. Modeling sediment transport using depth-averaged and moment equations[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(12): 1262-1269.
- [18] van RIJN L C. Sediment transport (Part I): Bed load transport[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(10): 1431-1456.
- [19] SMERDON E T, BEASLEY R P. The tractive force theory applied to stability of open channels in cohesive soil[J]. *Agricultural Experimental Stability Research Bulletin*, 1959, 715: 1-36.

- [20] TAN Guangming, JIANG Lei, SHU Caiwen, et al. Experimental study of scour rate in consolidated cohesive sediment[J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2010, 22(1): 51-57.

On related aspects in modeling of hydrodynamic and sediment transport processes in muddy estuaries*

LEI Wentao, XIA Junqiang, TAN Guangming

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A two-dimensional numerical model is presented, which employs a finite volume method based on an unstructured triangular mesh, and uses the Roe-MUSCL scheme and the predictor-corrector procedure for time stepping. In the model, the source terms for the transport of cohesive and non-cohesive sediments are respectively calculated by different methods. Besides, the formulae of incipient velocity and erosion source term for cohesive sediments are both applied. The model is first validated against the available observed data obtained from a flume experiment. It is then applied to simulate the processes of hydrodynamic and sediment transport in the Haihe Estuary. The model predictions generally agreed with the observed data measured during the neap and spring tidal cycles in September 1995, which demonstrates the capability of the model to simulating the transport process of both cohesive and non-cohesive sediment in muddy estuaries. The use of different sediment transport treatments on model simulations is further investigated. The result shows that it is necessary to consider the transport of both cohesive and non-cohesive sediments in muddy estuaries.

Key words: muddy estuary; 2-D numerical model; finite volume method; sediment transport; cohesive sediment

论文优先数字出版说明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年1月起,将在《水科学进展》印刷版期刊出版的定稿论文优先在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51079103).