

文章编号:1001-4179(2012)01-0018-04

感潮河段水沙数学模型研究与应用

董炳江,袁 晶

(长江水利委员会 水文局,湖北 武汉 430010)

摘要:感潮河段的水流和泥沙运动均具有很强的非恒定性,采用有限体积法建立了一套感潮河段平面二维水流泥沙数学模型。模型采用同位网格的 SIMPLEC 法对水流方程进行离散和求解,较全面地考虑了非均匀悬移质及推移质运动,具有较好的普遍适用性。以长江下游口岸直河段和仪征河段为例,分别对模型作了定床和动床计算,计算结果与实测值符合较好,从而证明了模型的可靠性。

关键词:数学模型;泥沙冲淤;长江下游;感潮河段

中图分类号:TV142 文献标志码:A

长江下游有相当长河段属于感潮河段,感潮河段水流不仅受径流的影响还受到潮汐动力的作用。由于潮汐存在周期性变化,在涨潮、落潮更替阶段,流向也随之朝相反的方向改变;流速和流量亦随潮位的不同而变化,因此水动力特征极为复杂。感潮河段泥沙大体来自两个部分:一部分为内陆径流挟运而来的流域泥沙,另一部分为随潮而来的海域泥沙,且泥沙运动与水流运动呈现出复杂的关系,水流、泥沙运动均具有很强的非恒定性,而非恒定输沙也正是未来泥沙科学研究的热点之一^[1]。

随着人们对泥沙输运过程认识的进展和数值计算条件、方法的提高,泥沙数学模型在感潮河段工程中得到广泛的应用,并且日益成为研究水流、泥沙等运动规律的一个强有力的手段,普遍受到人们的重视^[2]。

感潮河段平面二维水沙数学模型主要依据非恒定水动力学、河流泥沙动力学、河床演变等基本方程,根据一定的河道地形和水沙条件,利用现代高速计算机技术和数值求解技术,通过模型的反复试算、率定,从而预测、预报在一定水沙和河道边界条件下的水沙运动和河道冲淤变形,是目前研究感潮河段水动力情况、河势变化预测预报以及工程泥沙问题的主要手段之一。

1 模型建立

1.1 基本方程

笛卡尔坐标下的非恒定流平面二维水沙方程组:
水流连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

水流动量方程(忽略表面风应力及地球自转 Coriolis 力)

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(uuh)}{\partial x} + \frac{\partial(vuh)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \\ &g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \mu_t h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(vvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \\ &g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \mu_t h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

分组悬移质不平衡输沙方程

$$\begin{aligned} &\frac{\partial(hS_{si})}{\partial t} + \frac{\partial(S_{si}uh)}{\partial x} + \frac{\partial(S_{si}vh)}{\partial y} - \\ &\varepsilon_{ts} h \left(\frac{\partial^2 S_{si}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_{si}}{\partial y^2} \right) - \alpha_{si} \omega_i (S_{si} - S_{si}^*) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

收稿日期:2011-10-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB417001);国家自然科学基金项目(506009018)

作者简介:董炳江,男,博士,主要从事河流数值模拟研究。E-mail:dongbingjiang@hotmail.com.

分组推移质不平衡输沙方程

$$\frac{\partial(hS_{bi})}{\partial t} + \frac{\partial(S_{bi}uh)}{\partial x} + \frac{\partial(S_{bi}vh)}{\partial y} - \alpha_{bi}\omega_i(S_{bi} - S_{bi*}) = 0 \quad (5)$$

总河床变形方程

$$\rho_s \frac{\partial z_c}{\partial t} = \sum_i^n \alpha_{bi}\omega_i(S_{bi} - S_{bi*}) + \sum_i^n \alpha_{si}\omega_i(S_{si} - S_{si*}) \quad (6)$$

式中, h 为水深, m ; u, v 分别为 x, y 方向的流速, m/s ; z 为水位, m ; C 为谢才系数; μ_i 为水流紊动粘性系数, $\mu_i = \alpha U_* h$, U_* 为摩阻流速; S_{si} 为第 i 组悬移质垂线平均含沙量; S_{bi*} 为第 i 组悬移质挟沙力; S_{bi} 为第 i 组推移质输沙量折算成全水深的含沙量; S_{bi*} 为第 i 组推移质输沙率折算成全水深的含沙量; α_{si} 为悬移质泥沙恢复饱和系数; α_{bi} 为推移质泥沙沉降概率; ω_i 为泥沙沉降速度, m/s ; ρ_s 为泥沙干密度, kg/m^3 ; z_c 为河床高程。

上述方程(1)~(5)经过曲线坐标系的导链关系转换,最后得到正交曲线坐标下的统一控制方程如式(7),表 1 为统一控制方程的变量。

$$J \frac{\partial(h\theta)}{\partial t} + \frac{\partial(Uh\theta)}{\partial \xi} + \frac{\partial(Vh\theta)}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\alpha \frac{\Gamma_\theta h}{J} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\gamma \frac{\Gamma_\theta h}{J} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) + S_\theta \quad (7)$$

表 1 统一控制方程变量

| 方程 | θ | Γ_θ | S_θ |
|----------|----------|-----------------|--|
| 水流连续方程 | 1 | 0 | 0 |
| u 动量方程 | u | μ_i | $-gh(y_\eta \frac{\partial z}{\partial \xi} - y_\xi \frac{\partial z}{\partial \eta}) - J \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$ |
| v 动量方程 | v | μ_i | $-gh(x_\xi \frac{\partial z}{\partial \eta} - x_\eta \frac{\partial z}{\partial \xi}) - J \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$ |
| 悬移质输沙 | S_{si} | S_{si} | $J\alpha_{si}\omega_i(S_{si} - S_{si*})$ |
| 推移质输沙 | S_{bi} | 0 | $J\alpha_{bi}\omega_i(S_{bi} - S_{bi*})$ |

1.2 计算方法

1.2.1 水流方程数值解法

模型采用同位网格法布置方程变量(u, v, z, s),采用有限体积法离散变量方程,并采用 SIMPLEC 算法求解水位和流速耦合问题。

由于采用同位网格,对于动量方程将出现以下新问题,即动量离散方程无法检测出不合理的压力(水位)场,从而可能使数值计算得出物理上不合理的压力(水位)场^[3]。采用目前在相关文献中应用较广的动量插值(Momentum interpolation)方法进行计算,即在计算界面流速时不单纯采用线性插值,而是采用一种由动量插值与线性插值组合而成的混合插值计算公

式,从而引入相邻两点间的压力差(水位差)。同时为了加强速度与水位之间的耦合关系,模型按照 C. M. Rhie 和 W. L. Chow 的建议采用动量插值公式计算^[4]。

1.2.2 泥沙关键问题处理

悬移质水流挟沙力采用波流共同作用下的窦国仁公式^[5]:

$$S_{s*} = \alpha \frac{\gamma_s \gamma}{(\gamma_s - \gamma)} \frac{n^2 U^3}{h^{4/3} \omega} \quad (8)$$

式中, α 为系数,其值一般取为 0.023; γ 和 γ_s 分别为水、沙容重, kg/m^3 ; ω 为悬移质全沙群降速度, m/s 。

水体中的泥沙有两个来源:一个是由上游随水流而来,另一个是由于水流的紊动扩散作用从床面上扩散上来。因此,悬移质挟沙力级配是一定来水来沙和河床条件的综合结果,它既与床沙级配有关,又与上游来沙级配有关,忽视了任何一方面都将使计算结果出现较大误差。基于这样的认识,本模型分组挟沙力级配采用如下模式:

$$P_{s*i} = \frac{(P_{si}/\omega_i)^\alpha}{\sum (P_{ci}/\omega_i)^\alpha} \quad (9)$$

式中, P_{si} 为第 i 组粒径悬沙级配; P_{ci} 为第 i 组粒径床沙级配; α 为系数,一般 $0 < \alpha < 1$ 。

在均匀流和均匀沙的情况下,推移质的恢复饱和速度快,恢复距离短,一般可视为平衡输沙;当在非均匀流和非均匀沙时,床沙级配沿程不断变化,因而推移质饱和不断遭到破坏,而且推移质与悬移质之间的不等价交换,以及推移质的时空滞后性,导致了推移质的不平衡输沙现象,如本文采用推移质不平衡输沙模式^[6]。

第 i 组粒径推移质输沙率方程^[7]:

$$S_{bi*} = P_{ci} \eta_i \frac{K_s}{C_0^2} \frac{\rho \rho_s}{(\rho + \rho_s)} (U - U_{ei}) \frac{U^2}{g \omega_i} \quad (10)$$

式中, P_{ci} 为第 i 组粒径床沙级配; η_i 为第 i 组粒径推移质泥沙隐蔽系数; U_{ei} 为推移质泥沙临界启动流速, K_s 为床面粗糙程度; C_0 为无量纲舍齐系数。

水流中运动的泥沙与床沙处于不断的交换之中,床沙级配的调整变化对河床的冲淤影响十分显著。当河床冲刷时,河床组成逐渐粗化,水流挟沙力降低,从而使冲刷强度减小;相反,若河床发生冲淤,则床沙细化,水流挟沙力增大,使淤积强度减小。已有的河床调整模式有多种,如吴伟民、李义天模式,还有韦直林模式,本模型采用韩其为的四层床沙级配调整模式^[8]。

2 模型应用

2.1 口岸直河段定床计算

口岸直河段数学模型计算范围上迄五峰山,下至

界河口,模拟河段全长约 64 km,主河道平均宽 1 km。模型网格数为 481 × 101,如图 1 所示,为了比较清晰了解网格状态,图中还绘制了局部区域网格。

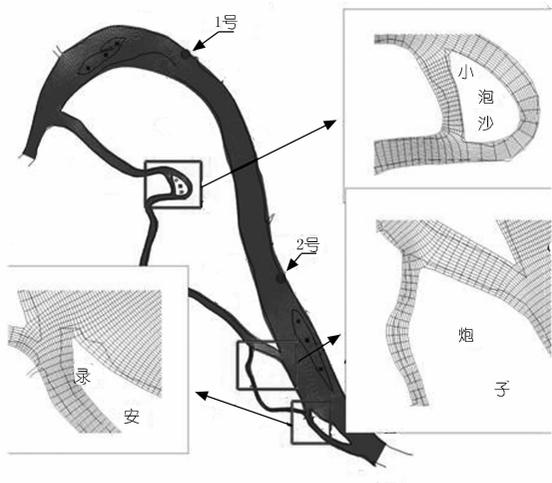


图 1 口岸直河段网格示意

河段的糙率系数为 0.018 6 ~ 0.026 5,水流紊动粘性系数公式中常数取 0.9,采用全隐式计算,计算时间步长取 10 s。计算上边界和下边界都为实测的水位过程。

图 2 ~ 4 给出了 1 号和 2 号站点的水位值、流速值以及流速角度验证图,从图中可见计算值与实测值吻合较好,可看出模型能较好地模拟感潮河段的水流运动过程。

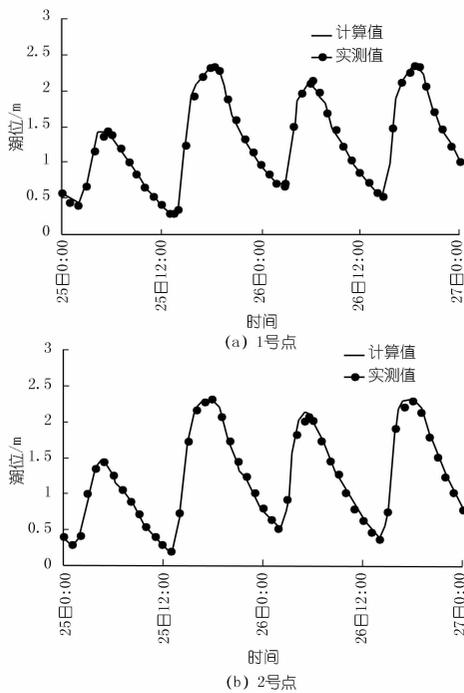


图 2 水位值验证(2006年2月)

2.2 仪征河段动床计算

长江下游仪征河段上迄三江口,下至瓜洲,长约

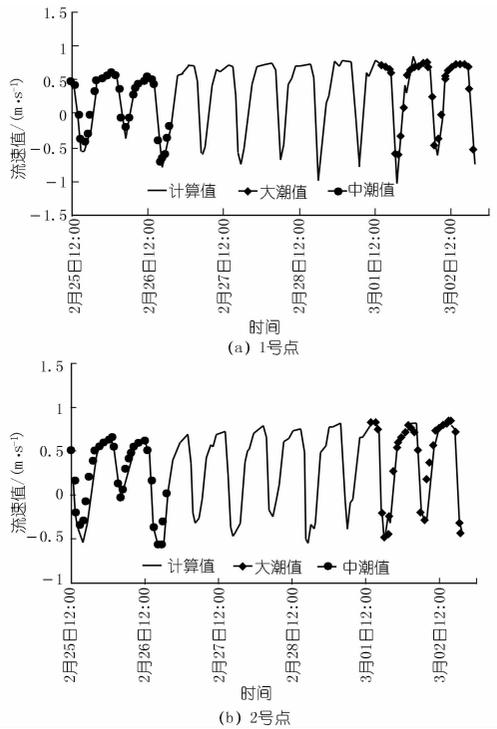


图 3 流速值验证(2006年)

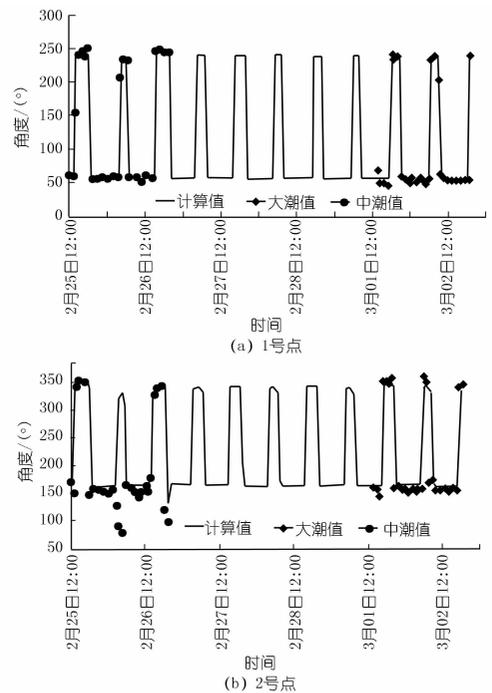


图 4 流速角验证(2006年)

40 km。其中三江口至泗源沟,全长约 15 km,为单一型河道,河道上窄下宽,平均河宽约 1 430 m,河道基本顺直。泗源沟以下被世业洲分为左右两汉,世业洲汉道自泗源沟至瓜洲渡口,长约 25 km,右汉即高资弯道是主汉,为曲率比较小的弯曲河道,平均河宽约 1 450 m;左汉为支汉,呈顺直型,平均河宽约 880 m。

模型计算网格数为 410 × 124,河段糙率系数为

0.017 6 ~ 0.027 5, 计算时间步长取 10 s。水与沙的计算都采用非恒定过程, 计算时用时间步长 Δt 逐步推进, 此种计算方式水沙耦合性较强, 能够比较精确地模拟出水挟带沙→沙改变河床→河床反过来改变流态的全过程。

本文以 2008 ~ 2010 年的实测水沙边界条件和地形资料对区域的河床冲淤进行了验证, 其中上下边界为实测潮位和含沙量过程, 实测值与计算结果分别见图 5, 6。从图中结果可见, 计算区域总体表现为“左冲右淤”的变化规律, 世业洲左汊河道表现为冲刷, 而右汊河道进口有所淤积, 淤积厚度约为 2 m, 右汊下游段表现为冲刷。验证结果在冲淤厚度大小及冲淤分布上均较接近实测资料结果, 证明本模型的实用性和有效性, 可满足感潮河段泥沙模拟的需要。

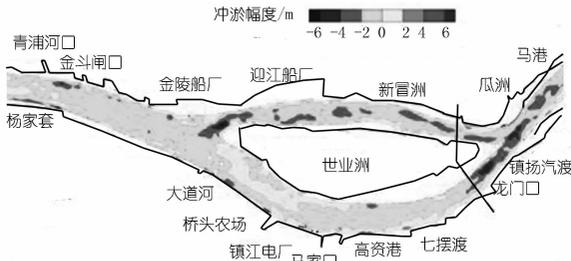


图 5 地形冲淤实测值

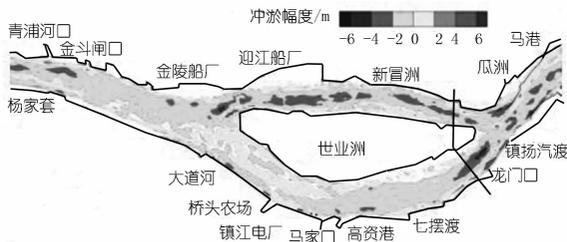


图 6 地形冲淤计算值

3 结论

(1) 本文针对感潮河段流场的复杂性, 建立了感潮河段平面二维水沙模型, 模型较全面地考虑了非均匀悬移质及推移质运动, 应用于天然河道水沙运动模拟时具有较好的普遍适用性。

(2) 为检验模型的可靠性, 本文以长江下游口岸直河段对模型作了定床潮流验证计算, 通过对计算区域内各实测点站位的水位、流速和流向验证, 结果说明该数学模型完全可以用于感潮河段流场的模拟。并用仪征河段对模型作了动床的验证计算, 较好模拟本河段的水流泥沙运动及河床变形情况。

(3) 长江下游感潮河段泥沙运动的规律是十分复杂的, 具非恒定和非均匀性两大特点, 也是泥沙学科急需解决的问题。理论研究不足仍然制约着泥沙数学模型模拟预测精度与技术的提高, 其理论突破还有待于建立更加合理的物理概念, 并加以完善。

参考文献:

- [1] 王兆印, 宋振琪. 欧美泥沙运动研究述评 [C] // 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 中国水利学会泥沙专业委员会编, 北京: 中国建材工业出版社, 1995: 3-27.
- [2] 谢鉴衡. 河流模拟 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993.
- [3] 陶文铨. 计算传热学的近代发展 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] Rhie C M, Chow W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation [J]. AIAA Journal, 1983, 21(11): 1525-1532.
- [5] 窦国仁, 董凤舞, Dou xibing. 潮流和波浪的挟沙能力 [J]. 科学通报. 1995(5): 443-446.
- [6] 乐培九, 朱光玉. 关于推移质不平衡输沙问题 [J]. 水道港口, 1996, 2(6): 1-7.
- [7] 窦国仁, 窦希萍. 波浪作用下泥沙的起动规律 [J]. 中国科学 (E 辑), 2001, 31(2): 566-573.
- [8] 韩其为. 水库淤积 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. (编辑: 李慧)

Research and application of flow and sediment mathematical model in tidal river

DONG Bingjiang, YUAN Jing

(Hydrology Bureau, Changjiang Water Resource Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: Flow and sediment movement in tidal river has strong non-constancy, so the two-dimensional flow and sediment mathematical model for tidal river is established using finite volume method. The non-staggered grids and SIMPLEX method is adopted to discrete the flow equations. The model comprehensively considers the movement of non-uniform suspended sediment and bed load with good general applicability. Taking the Yizheng and Kouanzhi reaches in the downstream of Yangtze River for examples, the calculation is performed in the condition of fixed bed and moving bed using the above model, and the results are in good agreement with the measured values, proving the reliability of the model.

Key words: mathematical model; sediment scouring and deposition; lower Yangtze River; tidal river