

基于半隐欧拉-拉格朗日法盐水入侵数学模型

匡翠萍¹, 黄 静¹, 陈思宇^{1,2}, 刘曙光¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 北卡罗来纳州立大学 土木、结构和环境工程系, 罗利 27606)

摘要: 建立了适合河口复杂边界的二维潮流盐度数学模型。其中, 网格模块是通过多元最小二乘重构的无结构三角网格; 潮流模块基于消除了稳定性条件限制的半隐的欧拉-拉格朗日法, 并用干湿判断法实现动边界的处理; 盐度输运模块采用有限体积法进行离散, 并通过用周围单元平均浓度值重构界面浓度的方法得到与连续性离散方程相协调的二阶对流扩散离散方程。通过纯对流和纯扩散数值测试对模型进行了验证, 结果表明模型能够较好地模拟盐度输运的对流扩散问题, 且具有较高的精度。最后, 将模型应用于长江口盐水入侵的模拟计算, 计算结果表明: 模型计算的潮位、流速和盐度过程与实测资料一致。

关键词: 无结构网格; 欧拉-拉格朗日法; 盐水入侵; 长江口
中图分类号: P343.5 **文献标识码:** A

A Saltwater Intrusion Model Based on Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-volume Method

KUANG Cuiping¹, HUANG Jing¹, CHEN Siyu^{1,2}, LIU Shuguang¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University, Raleigh NC 27606, USA)

Abstract: A 2D numerical model to simulate tidal flow and salinity in complex estuaries is developed. The grid module is designed under unstructured triangular grid with second order accuracy by cell reconstruction using multiple least square methods to remove stability limitations associated with surface gravity wave. The circulation module is based on semi-implicit Eulerian-Lagrangian method and free from CFL condition constraint, and the wetting and drying are addressed by movable boundary techniques. The salinity module is designed in the frame-work of finite-volume method with a second-

order resolution in coordination with the discretized continuity equation, through the cell face concentration reconstructed from surrounding cell averaged by complex interpolation combined with a mono-tonicity criterion. The model has been tested by a pure advection case and a pure diffusion case, which demonstrates that the model has a high accuracy. Finally, this model has been applied to simulating the saline intrusion in the Yangtze (Changjiang) River Estuary and the results show that the simulated tidal levels, velocities and salinities agree well with the measured ones.

Key words: unstructured triangular mesh; Eulerian-Lagrangian method; saline intrusion; Yangtze (Changjiang) River Estuary

河口地区盐水入侵会使河口淡水资源的水质恶化, 从而对两岸人民的生活用水及工农业用水造成严重的影响。数学模型常被用来研究长江口盐水入侵现象。肖成猷等^[1]建立了长江口垂向平均的二维数学模型对北支盐水倒灌过程及其影响范围和影响时间尺度进行了模拟研究。GU 等^[2]运用 Delft3D-FLOW 软件建立了长江口二维潮流盐度数学模型, 利用枯季大潮时北支束窄方案对长江口的盐度进行了计算分析。罗小峰等^[3]通过建立长江口平面二维水流盐度数学模型对 4 种不同水文组合条件下径流和潮流对盐水入侵的影响进行了计算还建立了长江口北槽三维水流盐度数值模型, 研究了盐度梯度引起的斜压项对水流的影响。匡翠萍等^[4-5]通过建立长江口盐水入侵三维数学模型对长江口盐度分层现象的特征进行了计算分析。此外, 还采用了干湿判别法使 ECOMSED 模型实现了动边界的处理, 并在此基础上建立了长江口三维潮流数学模型, 对大潮时长江口的水动力进行了计算模拟。朱建荣等^[6]、马钢峰

收稿日期: 2011-11-10

基金项目: 河北省国土资源厅科技专项(HEBEIGT2006ZT, HEBEIGT2008-2903); 上海市 908 专项(PJ4)

第一作者: 匡翠萍(1966-), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 黄 静(1985-), 女, 博士生, 主要研究方向为海洋环境及地质灾害治理。E-mail: hjk1985cool@126.com

等^[7]基于 ECOM 模型亦分别建立了长江口三维盐度数学模型对长江口盐水入侵进行了模拟研究。

在平面坐标系下,矩形网格的系统数据结构组织简单,适用于各种算法,处理效率高,但不能准确地刻画复杂的几何形状.正交曲线网格虽然能贴合计算区域边界,但无法刻画海岸带离散分布的众多岛屿、潮沟以及工程区域.而无结构网格不仅能很好地拟合边界,而且能控制网格的密度,易进行适应性调整,从而提高了边界模拟的精度。

近年来,许多专家学者基于无结构网格建立了合适的数学模型对河口的水动力和盐水入侵进行了计算研究.王志力等^[8-10]采用无结构网格的有限体积方法对二维河道进行了数值模拟,并在此基础上分别建立了物质输运的高精度数值震荡数学模型和物质输运对流扩散方程离散模式,最后都应用于瓯江河口盐度输运的模拟研究.潘存鸿等^[11-12]在无结构网格下分别建立了求解二维浅水流动方程的具有二阶精度的 KFVS(kinetic flux vector splitting)和谐格式和 Godunov 格式,并分别利用典型算例和钱塘江涌潮对模型进行了计算验证.陈昞睿等^[13]建立了一个无结构三角形网格二维河口海岸水动力数值模式,并将该模式应用于长江口水动力的计算研究。

Casulli 和 Walters^[14]于 2000 年提出了一个基于正交非结构网格的水动力学数值模型——UnTRIM 模型,并得到了应用.例如,SHEN 等^[15]运用 UnTRIM 模型模拟研究了美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay)由飓风伊莎贝尔(Isabel)引起的风暴潮.CHEN 等^[16]基于 UnTRIM 模型建立了二维潮流数学模型,网格模块是通过多元最小二乘法重构的无结构三角网格,潮流模块基于消除了稳定性条件限制的半隐式的欧拉—拉格朗日法,动量方程中流通量对时间的导数项和对流项写成全导数形式,采用拉格朗日法求解,从而避免了 Courant 数限制,并将模型应用到了曹妃甸围垦工程的潮流模拟.LIU 等^[17]基于 UnTRIM 模型建立了一个时变的三维正压水流盐度模型,并将其运用于台湾北部淡水河河口地区盐度的计算分析。

本文在文献^[16]研究的基础上增加盐度输运模块建立了二维潮流盐度数学模型.盐度输运模块采用有限体积法进行离散,通过调整界面通量取值以及用多元最小二乘法重构的浓度分布值代替单元平均浓度值的方法得到了与连续性离散方程相协调的二阶对流扩散离散方程,并且分别通过对流和扩散数值测试对模型进行了验证,最后将该模型成功应

用于模拟长江口的盐水入侵计算。

1 数学模型

1.1 基本方程

二维潮流盐度数学模型的控制方程为沿水深垂向平均的浅水方程.连续性方程为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

式中: η 为水位; t 为时间; \mathbf{q} 为界面流通量, $\mathbf{q} = D\mathbf{U}$, D 为总水深, $D = H + \eta$, H 为水深, \mathbf{U} 为流速, $\mathbf{U} = (\mathbf{u}, \mathbf{v})$, \mathbf{u}, \mathbf{v} 分别为 x 方向和 y 方向的流速.动量方程为

$$\frac{d\mathbf{U}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (D\mathbf{U}\mathbf{U}) = -gD \nabla \eta + D \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U} + \mathbf{F} + \frac{\boldsymbol{\tau}_s - \boldsymbol{\tau}_b}{\rho} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; $\boldsymbol{\Omega}$ 为地转速度; \mathbf{F} 为潮流扩散项; $\boldsymbol{\tau}_s$ 为表面风应力,本文实例计算中未考虑; $\boldsymbol{\tau}_b$ 为底部切应力, $\boldsymbol{\tau}_b = \rho g |\mathbf{U}| \mathbf{U} C^{-2}$, ρ 为盐水密度, C 为谢才系数, $C = \frac{\sqrt{D}}{n}$, n 为曼宁系数.盐度输运方程为

$$\frac{\partial DS}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}S) = \nabla \cdot (K_h D \nabla S) \quad (3)$$

式中: S 为盐度; K_h 为盐度扩散系数.状态方程为

$$\rho = \rho_0 + \lambda S \quad (4)$$

式中: ρ_0 为淡水密度; λ 为常数, $\lambda = 0.75$ 。

1.2 数值方法

1.2.1 方程离散

(1)潮流方程的离散.连续性方程采用半隐有限体积法,动量方程在各单元界面上进行离散,流通量对时间的导数项和对流项写成全导数形式,采用拉格朗日法求解从而避免了 Courant 数限制,底部摩擦项采用隐格式离散,而扩散项、科氏力项等均采用显格式,最终得到的离散方程如下.离散的连续性方程为

$$\delta A_i \frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} + \sum_{f_i} \delta l_{f_i} [(1 - \theta) \mathbf{q}_{f_i}^n + \theta \mathbf{q}_{f_i}^{n+1}] \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (5)$$

式中: δA_i 为单元 i 的面积; η_i^n, η_i^{n+1} 分别为单元 i 在 n 和 $n+1$ 时刻的水位; δl_{f_i} 为界面 f_i 的长度; $\mathbf{q}_{f_i}^n, \mathbf{q}_{f_i}^{n+1}$ 分别为界面 f_i 在 n 和 $n+1$ 时刻的流通量矢量; \mathbf{n} 为界面 f_i 的法向量; θ 为半隐权重因子.离散的动量方程为

$$\frac{\mathbf{q}_{f_i}^{n+1} - \mathbf{q}_{f_i}^n}{\Delta t} = -gD_{f_i}^n [(1 - \theta) \nabla \eta_i^n +$$

$$\theta \nabla \eta_{f_i}^{n+1}] + \mathbf{f}_{f_i} \times \mathbf{q}_{f_i}^n + F(\mathbf{q}_{f_i}) + \frac{[\tau_s]_{f_i}^n}{\rho} - \frac{g|\mathbf{q}_{f_i}^n| |\mathbf{q}_{f_i}^{n+1}|}{(C_{f_i}^n D_{f_i}^n)^2} \quad (6)$$

式中: $D_{f_i}^n$ 为界面 f_i 在 n 时刻的总水深; $\eta_{f_i}^n, \eta_{f_i}^{n+1}$ 分别为界面 f_i 在 n 和 $n+1$ 时刻的水位; \mathbf{f}_{f_i} 为界面 f_i 的摩擦矢量; $C_{f_i}^n$ 为界面 f_i 在 n 时刻的谢才系数。

其中, 离散方程的求解分为显式预估和隐式校正二步求解^[18]; 水位余量方程采用雅可比共轭梯度法求解. 详细的离散过程和求解方法参考文献[16].

(2) 盐度输运方程的离散. 为了使方程既能保证质量守恒的特性, 又能在离散后满足离散极大极小原则, 本模型在离散的守恒形式的对流扩散方程中引入了离散极大极小原则. 根据 Casulli 等^[19] 研究, 若要使守恒形式的对流扩散方程的离散格式满足极大极小原则, 那么它必须与离散的连续性方程协调. 因而, 改写离散的连续性方程如下:

$$\delta A_i D_i^{n+1} = \delta A_i D_i^n - \Delta t \left[\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| - \sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| \right] \quad (7)$$

式中: $\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}$ 为界面 f_i 在 $n+\theta$ 时刻的流量, $\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta} = \delta l_{f_i} D_{f_i}^n [\theta \mathbf{u}_{f_i}^{n+1} + (1-\theta) \mathbf{u}_{f_i}^n]$; S_i^+ 定义水流通过界面流出单元 i ; S_i^- 为流入单元 i .

可见直接离散的守恒形式对流扩散方程与离散的连续性方程界面通量的取值是不协调的, 那么, 为了使守恒形式对流扩散方程的离散形式与离散的连续性方程式协调, 调整界面通量取值可得一阶显式迎风格式下离散的盐度输运方程为

$$\begin{aligned} \delta A_i D_i^{n+1} C_i^{n+1} &= \delta A_i D_i^n C_i^n + \Delta t \sum_{f_i \in S_i^+ \cup S_i^-} (K_{h_i})_{f_i} \cdot \\ &D_{f_i}^n [C_{m(i, f_i)}^n - C_i^n] \delta l_{f_i} - \Delta t \left[\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_i^n - \right. \\ &\left. \sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_{m(i, f_i)}^n \right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: D_i^{n+1} 为单元 i 在 $n+1$ 时刻的总水深; C_i^n, C_i^{n+1} 分别为单元 i 在 n 和 $n+1$ 时刻的盐度; $(K_{h_i})_{f_i}$ 为界面 f_i 的盐度扩散系数; $D_{f_i}^n$ 为界面 f_i 在 n 时刻的总水深; $C_{m(i, f_i)}^n$ 为与单元 i 共边界 f_i 的相邻单元在 n 时刻的盐度. 联立式(7)和式(8)可得

$$\begin{aligned} C_i^{n+1} &= [\delta A_i D_i^n - \Delta t \left(\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| + \right. \\ &\left. \sum_{f_i \in S_i^- \cup S_i^+} (K_{h_i})_{f_i} D_{f_i}^n \right)] C_i^n [\delta A_i D_i^n - \Delta t \cdot \\ &\left(\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| - \sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| \right)]^{-1} + \Delta t \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\left[\sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_{m(i, f_i)}^n + \sum_{f_i \in S_i^- \cup S_i^+} (K_{h_i})_{f_i} \cdot \right. \\ &\left. D_{f_i}^n C_{m(i, f_i)}^n \right] [\delta A_i D_i^n - \\ &\Delta t \left(\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| - \sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| \right)]^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

因为该离散格式采用了有限体积法, 离散方程以界面通量的形式来表示, 该格式仍具有质量守恒的特性, 而且如果时间步长足够小, 式(9)右边实际上是 C_i^n 和 $C_{m(i, f_i)}^n$ 的加权平均值, 而它们的加权系数非负, 且和为 1, 因而满足离散极大极小原则, 格式是稳定的. 该离散方程式对时间步长的要求满足^[20]

$$\Delta t \leq \frac{\delta A_i D_i^n}{2 \sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_i^n + \sum_{f_i \in S_i^+ \cup S_i^-} d_{f_i}^{n+\theta}} \quad (10)$$

式中, $d_{f_i}^{n+\theta} = \max\left(0, D_{f_i}^n - \frac{1}{2} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| \right)$.

由于一阶迎风格式存在较大的数值耗散, 因而精度不高^[21]. 为了提高精度, 可以采用二阶格式, 即采用网格重构的方法在单元内以重构的盐度分布值代替单元平均的盐度值, 即

$$C_{i, f_i}^n = C_i^n + \Phi_i^n (\nabla C)_i^n \cdot \mathbf{r}_{i, f_i} \quad (11)$$

式中: C_{i, f_i}^n 为网格重构后单元 i 在 n 时刻的盐度; Φ_i^n 为通量限制器, $\Phi_i^n |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| \leq 2D_{f_i}^n$; \mathbf{r}_{i, f_i} 为从单元 i 指向与单元 i 共边界 f_i 的相邻单元的向量. 因而通过式(11)可得二阶精度的对流扩散离散方程为

$$\begin{aligned} \delta A_i D_i^{n+1} C_i^{n+1} &= \delta A_i D_i^n C_i^n + \Delta t \cdot \\ &\sum_{f_i \in S_i^+ \cup S_i^-} (K_{h_i})_{f_i} D_{f_i}^n (\nabla C)_i^n \delta l_{f_i} - \Delta t \cdot \\ &\left[\sum_{f_i \in S_i^+} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_{i, f_i}^n - \sum_{f_i \in S_i^-} |\mathbf{Q}_{f_i}^{n+\theta}| C_{m(i, f_i), f_i}^n \right] \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $C_{m(i, f_i), f_i}^n$ 为网格重构后与单元 i 共边界 f_i 的相邻单元在 n 时刻的盐度.

为消除时间步长对潮流模块的限制, 可在盐度输运模块采用子时间步. 每个子时间步的水深通过 n 和 $n+1$ 时刻的水深 D_i^n 和 D_i^{n+1} 由线性插值得, 这样离散的连续性方程在任何子时间步内仍满足.

1.2.2 边界条件

对于入流边界, 假定盐度的输运以对流为主, 需要给出盐度时间变化曲线; 而对于出流边界即盐度传出计算区域, 那么可给定盐度梯度为零的条件.

2 数值测试

盐度输运包含了对流和扩散 2 种不同的重要性, 它们的运输形式完全不同, 因而分别对对流和扩散 2 种输运形式进行测试.

2.1 对流测试:弯曲河道对流

物质在纯对流作用下输运的测试采用了最初由 Casulli 和 Zanolli^[19]设计的 U 形河道试验来测试对流格式的耗散性. 该 U 形河道长 $L=8\ 570\text{ m}$ (其中直线段长 $3\ 440\text{ m}$, 弯曲段外径 560 m , 内径 440 m), 宽 $W=120\text{ m}$, 水深恒定 $D=10\text{ m}$. 该 U 型河道离散成几何尺度为 20 m 的三角形网格, 如图 1 所示.

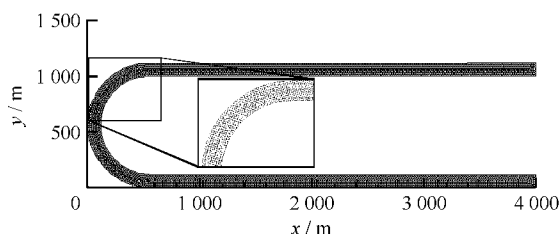


图1 U形河道无结构三角网格

Fig.1 Unstructured triangular mesh in the U-shaped river channel

U 形河道两端给定恒定的水头差, 入流边界给定水位 0.09 m , 出流边界水位为 -0.09 m , 从而驱动一个恒定流, 并设整个渠道的曼宁系数为 0.04 . 为了保证纯对流作用, 计算中设置扩散系数为零. 潮流模块时间步长取 300 s , 而盐度输运模块子时间步长为 30 s . 模拟得水动力稳定后, 在入流边界处连续释放 10 min 浓度 $C=1$ 的示踪剂, 继续模拟到所有示踪剂随对流出河道.

图 2a, 2b 分别显示了一阶和二阶迎风格式下模拟的示踪剂释放 $75, 150$ 和 225 min 后的示踪剂浓度场, 可见一阶迎风格式的耗散性非常强, 经过 75 min 后示踪剂就已经发生了较大的扩散, 产生较大的数值误差, 最大浓度已由原来的 1.0 减小到 0.4 左右, 而二阶迎风格式大幅降低了数值耗散, 经过 U 型弯道后仍能保持较小的数值扩散, 精度相比一阶迎风有了很大提高, 说明二阶格式可以明显减小数值耗散, 但仍有微弱的数值耗散. 文献^[19]认为二阶格式产生的数值耗散可能与网格的扭曲有关.

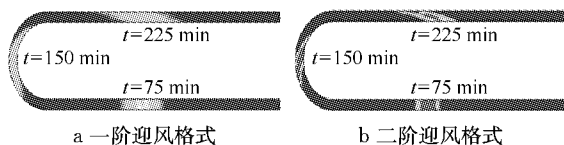


图2 盐度分布

Fig.2 Salinity concentration distribution

2.2 扩散测试:一维盐水入侵

采用一维盐水入侵模型测试物质输运模块中盐度的扩散输运. 一维盐水入侵模型的控制方程为

$$U \frac{\partial S}{\partial x} = A_H \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \quad (13)$$

式中: U 为恒定流流速; S 为盐度; x 为横坐标; A_H 为扩散系数.

其边界条件定义为

$$\begin{cases} S = 0, x = -\infty \\ S = S_0, x \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

通过分析可得其解析解为

$$\begin{cases} S = S_0 \exp\left(\frac{Ux}{A_H}\right) & x \leq 0 \\ S = S_0 & x > 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, S_0 为开边界恒定的盐度.

为了生成一个一维恒定流, 本文采用一个均匀水深 10 m 的 5 km 长、 1 km 宽的矩形河道, 该河道被离散为网格长度为 100 m 的三角形网格. 在上边界和下边界均给定恒定流 $200.0\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 盐度扩散系数取 $10.0\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 而下游开边界盐度 $S_0 = 35.0\text{ ‰}$. 潮流模块时间步长取 60 s , 而盐度输运模块子时间步长为 10 s .

由图 3 可见, 模型能够很好地处理盐水入侵即盐度的扩散输运.

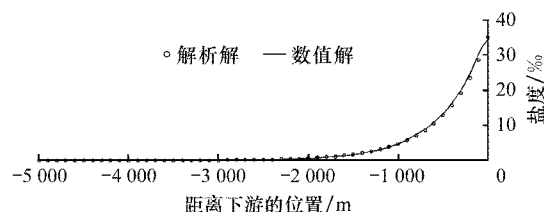


图3 一维盐水入侵模拟结果与解析解的比较

Fig.3 Comparison of simulated salinity and analytical solution

3 长江口盐水入侵的数值模拟

3.1 计算范围及网格

模型计算范围西起江阴, 东至外海 -40 m 等深线, 北至连兴港的北侧, 南至南汇嘴以南, 包括了南北支、南北港和南北槽在内的整个长江口水域. 其中, 东西跨度大约为 278 km , 南北跨度大约为 188 km . 由于长江口具有三级分汊、四口入海的不规则几何边界, 本文采用无结构三角网格拟合岸线. 计算区域共生成 $9\ 202$ 个三角形网格、 $5\ 035$ 个网格节点, 水平空间网格长为 $200 \sim 5\ 200\text{ m}$ (见图 4).

3.2 边界条件以及相关参数选取

模型外海开边界采用潮位过程控制, 由 8 个主要分潮 ($M_2, K_2, S_2, N_2, K_1, P_1, O_1, Q_1$) 的调和常数计算得到, 上边界采用实测潮位过程控制.

上游开边界盐度取零, 外海边界盐度由实测值

插值得到. 初始潮位取上游开边界和外海东边界潮位的平均值, 初始流速和盐度取零. 糙率按水深插值取 $n = 0.01 + 0.01/D$, 盐度紊动扩散系数取 $100 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 潮流模块时间步长取 60 s , 而盐度输运模块子时间步长为 20 s .

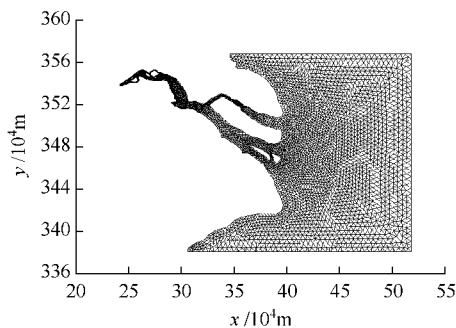


图4 计算区域及网格

Fig.4 Computational domain and grids

3.3 模型的验证

选用2004年5月5日5:00至5月6日11:00的实测潮位、流速和盐度资料^[7,22]对模型进行了验证. 潮位、流速和盐度测站的具体位置如图5所示, 图中 b_g , n_g 和 c_s 分别为北港、南港和北槽中的测站. 图6~8分别列出了部分测站的潮位、流速和盐度的验证结果. 从验证结果看, 潮位的计算值比实测值稍大, 两者之间的平均误差小于 0.1 m ; 流速的平均相对误差小于 5% ; 流向的平均误差小于 4° ; 盐度的平均误差小于 0.12% .

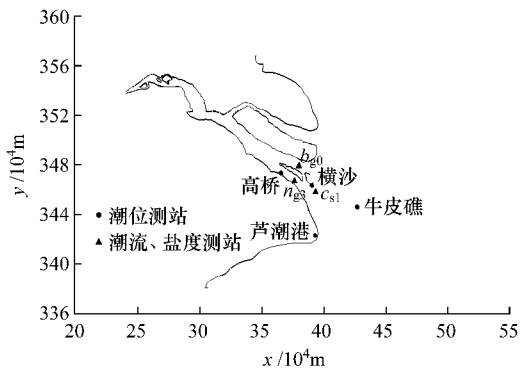


图5 部分测站位置

Fig.5 Locations of part of the observation stations

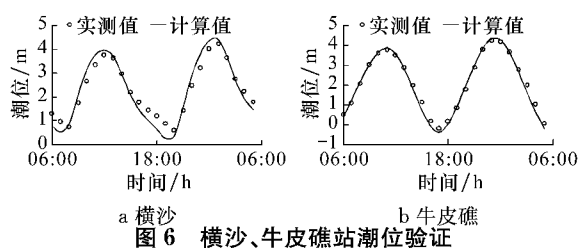


图6 横沙、牛皮礁站潮位验证
Fig.6 Verification of tidal levels at representative tidal gauging station Hengsha and Niupijiao

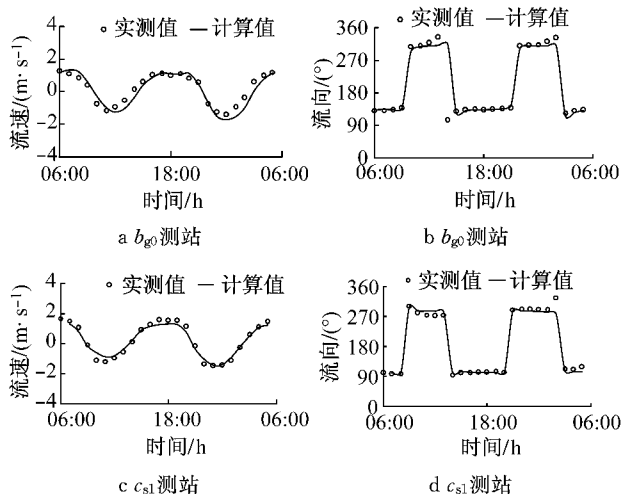


图7 流速、流向验证

Fig.7 Verification of tidal current velocity magnitudes and directions

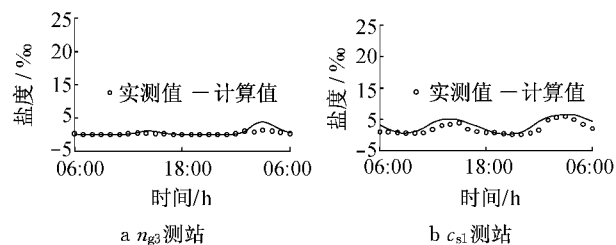


图8 盐度验证

Fig.8 Verification of salinity process

图9为长江口涨落急时刻的流场. 由图可见, 涨潮时, 崇明东滩、横沙东滩、南汇东滩以及九段沙部分滩地被潮水淹没, 落潮时, 它们又露出水面.

图10为长江口涨落憩时刻的盐度场, 整体上看, 模型能够基本反映长江口盐水入侵的实际情况: 盐度随涨潮向上游入侵, 随落潮退向海洋; 北支主要为盐水控制, 而南支为河川径流控制.

4 结论

建立了与连续性方程协调的盐度输运模型, 既满足了守恒性, 在一定时间步长内又不违反离散极大极小原则, 保证了盐度输运模型的稳定性. 同时, 盐度输运模块也采用了网格模块的重构机制, 实现了高精度的数值模拟. 该模型分别采用弯曲河道和矩形河道测试了盐度输运的纯对流作用和纯扩散作用, 验证结果表明该数学模型计算稳定、计算结果精度高. 最后以该模型应用于长江口盐水入侵的模拟计算.

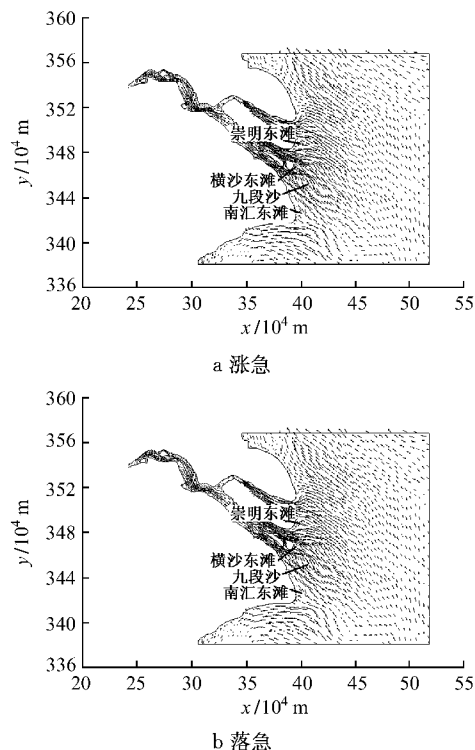


图9 长江口流场

Fig.9 Flow fields of the Yangtze River Estuary

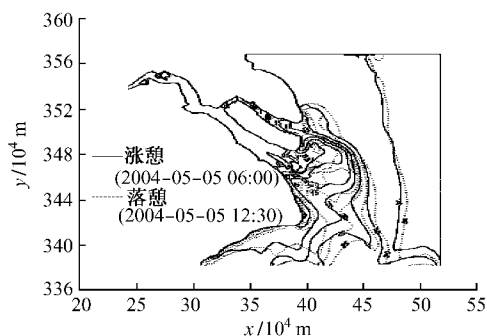


图10 长江口涨落憩时刻盐度分布

Fig. 10 Salinity distributions of the Yangtze River Estuary at the time of flood slack (solid line) and ebb slack (dotted line) respectively

参考文献:

[1] 肖成猷, 朱建荣, 沈焕庭. 长江口北支盐水倒灌的数值模型研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(5): 124.
XIAO Chengyou, ZHU Jianrong, SHEN Huanting. Study on numerical modeling about salt water flow backward in the Changjiang Estuary north branch[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(5): 124.

[2] GU Jie, HUANG Jing, HAN Bing, et al. Numerical study to choose the optimum narrowing schemes for protecting water source in the south branch of the changjiang estuary[C]// 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical

Engineering(ICBBE 2009). Beijing: IEEE Eng in Medicine and Biology Society of USA, 2009: 1-4.

- [3] 罗小峰, 陈志昌. 长江口水流盐度数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2004 (2): 29.
LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Numerical simulation of salinity in Yangtze River Estuary [J]. Hydro Science and Engineering, 2004 (2): 29.
- [4] 匡翠萍. 长江口盐水入侵三维数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1997, 25 (4): 54.
KUANG Cuiping. A 3-D numerical model for saltwater intrusion in the Changjiang Estuary [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1997, 25 (4): 54.
- [5] KUANG Cuiping, SUN Bo, LIU Shuguang, et al. Approach of moving boundary and its application in 3D tidal current simulation of Yangtze River Estuary based on ECOMSED Model [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(4): 78.
- [6] 朱建荣, 朱首贤. ECOM模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(4): 364.
ZHU Jianrong, ZHU Shouxian. Improvement of the ECOM with application to the Yangtze River Estuary, Hangzhou Bay and adjacent waters[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2003, 34(4): 364.
- [7] 马钢峰, 刘曙光, 戚定满. 长江口盐水入侵数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2006, 21 (1): 53.
MA Gangfeng, LIU Shuguang, QI Dingman. Three dimensional hydronamic model of Yangtze River Estuary[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 2006, 21 (1): 53.
- [8] 王志力, 耿艳芬, 金生. 具有复杂计算域和地形的二维浅水流动数值模拟[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 439.
WANG Zhili, GENG Yanfen, JIN Sheng. Numerical modeling of 2D shallow water flow with complicated geometry and topography[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 (4): 439.
- [9] 王志力, 陆永军, 耿艳芬. 基于非结构网格有限体积法的二维高精度物质输运模拟[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 531.
WANG Zhili, LU Yongjun, GENG Yanfen. High resolution two-dimensional numerical model of scalar transport based on unstructured grid finite volume method[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 531.
- [10] 耿艳芬, 王志力, 陆永军. 基于无结构网格单元中心有限体积法的二维对流扩散方程离散[J]. 计算物理, 2009, 26 (1): 17.
GENG Yanfen, WANG Zhili, LU Yongjun. Discretization of two-dimensional advection-diffusion equation with unstructured cell center finite volume method [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2009, 26(1): 17.
- [11] 潘存鸿, 徐昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的KFVS格式[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 858.
PAN Cunhong, XU Kun. Kinetic flux vector splitting scheme for solving 2D shallow water equations with triangular mesh [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 858.
- [12] 潘存鸿. 三角形网格下求解二维浅水方程的和谐Godunov格式[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 204.
PAN Cunhong. Well-balanced Godunov-type scheme for 2D shallow water flow with triangle mesh[J]. Advanced in Water Science, 2007, 18(2): 204.
- [13] 陈昞睿, 朱建荣, 吴辉, 等. 无结构网格二维河口海岸水动力

- 数值模式的建立及其应用[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 31.
- CHEN Bingrui, ZHU Jianrong, WU Hui, et al. An unstructured mesh two-dimensional coastal and estuarine hydrodynamic numerical model and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 31.
- [14] Vincenzo Casulli, Roy A Walters. An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 32: 331.
- [15] SHEN Jian, WANG Harry, Mac Sisson, et al. Storm tide simulation in the Chesapeake Bay using an unstructured grid model[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 68:1.
- [16] CHEN Siyu, KUANG Cuiping, LIU Shuguang, et al. A semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Volume Method for coastal circulation [C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Asian and Pacific Coasts, Singapore: World Scientific, 2009: 244-250.
- [17] LIU Wencheng, CHEN Weiho, CHENG T Ralph, et al. Modelling the impact of wind stress and river discharge on Danshui River plume[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32:1255.
- [18] 柯国益. 河口海岸水沙运动非结构有限体积方法数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 2008.
- KE Guoyi. Numerical simulation study on finite volume method for estuarine and coastal flow and sediment movements on the unstructured grids [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, 2008.
- [19] Vincenzo Casulli, Paola Zanolli. High resolution methods for multidimensional advection-diffusion problems in free-surface hydrodynamics[J]. Ocean Modelling, 2005, 10: 137.
- [20] Greenspan D, Casulli V. Numerical analysis for applied mathematics, science and engineering[M]. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc., 1988.
- [21] LeVeque R J. Numerical methods for conservation laws[M]. Berlin: Birkhauser Verlag, 1992.
- [22] 孙波. 三峡与南水北调工程对长江口盐水楔影响的数值研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2009.
- SUN Bo. Numerical study on the impact of Three Gorges and South-North Water Transfer Project on the saline wedge of the Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.

(上接第 26 页)

对 3 种横廓线模型利用矢量合成方法产生风速时程并与本文的经验公式对比,本文经验公式与矢量合成方法产生的风速比较一致,并指出采用矢量合成方法时对于冲击风到达前、后的风速时程均采用相同的水平横廓线进行模拟并不符合实际情况。

参考文献:

- [1] Hjelmfelt M R. Structure and life circle of microburst outflows observed in Colorado [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27: 900.
- [2] Oseguera R M, Bowles R L. A simple, analytics 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow [R]. Hampton: Langley Research Center, NASA Technical Memorandum 1988.
- [3] Wood G S, Kwok K C S, Motteram N A, et al. Physical and numerical modeling of thunderstorm downbursts [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89: 535.
- [4] Vicroy D D. Assessment of microburst models for downdraft estimation [J]. Journal of Aircraft, 1992, 29: 1043.
- [5] 陈勇, 彭志伟, 楼文娟, 等. 冲击风稳态流场 CFD 模拟及三维风速经验模型研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 428.
- CHEN Yong, PENG Zhiwei, LOU Wenjuan, et al. CFD simulations of steady downbursts and 3D wind velocity empirical models [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 428.
- [6] Holmes J D, Oliver S E. An empirical model of a downburst. Engineering of Structures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 22:1167.
- [7] CHEN Lizhong, Letchford C W. A deterministic-stochastic hybrid model of downbursts and its impact on a cantilevered structure [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 619..
- [8] 潘峰, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 冲击风作用下大跨屋盖多模态随机风致响应研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 26(1):119.
- PAN Feng, SUN Bingnan, LOU Wenjuan, et al. Random wind-induced dynamic response of long-span roof to thunderstorm downburst in the time domain [J]. ACTA Aerodynamic Sinica, 2008, 26(1): 119.
- [9] Chay M T, Alebermani F, Wilson R. Numerical and analytical simulation of downburst wind loads [J]. Engineering Structures, 2006, 28: 240.
- [10] 徐挺, 陈勇, 彭志伟, 等. 雷暴冲击风风洞设计及流场测试[J]. 实验力学, 2009, 24(6):505.
- XU Ting, CHEN Yong, PENG Zhiwei, et al. Wind tunnel design and steady flow field measurement for thunderstorm downburst experiment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(6):505.