

长江河口盐淡水混合的数值模拟计算

郑金海 诸裕良

(河海大学海岸及海洋工程研究所, 南京 210098)

摘 要 建立了河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型, 数学模型中的水平压强梯度分为水位梯度的正压项和密度变化的斜压项, 以反映河口盐淡水混合中的斜压现象。采用欧拉—拉格朗日法离散潮流运动方程中的对流项和盐度扩散方程, 以提高计算稳定性和数值模拟精度。提出盐度边界条件、初始条件以及盐度场计算稳定标准的设置方法。针对长江河口水域的盐淡水混合情况进行模拟计算, 结果反映了部分混合型河口盐度分布特征, 表明所建立的河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型能够较好地模拟长江河口盐淡水混合的时空分布。

关键词 长江河口 盐淡水混合 数学模型 斜压 欧拉—拉格朗日法

引 言

河口是海与河的交汇地区, 因为各河口区海水与河水密度的差异以及潮流与径流相对强弱不同, 河口盐淡水的混合过程亦不同, 大致可以分为高度分层型、部分混合型和充分混合型三种。由于河口盐淡水混合产生的河口异重流不仅影响到河口的泥沙运动特性和水下三角洲的发育, 而且影响到河口地区的水质和水资源联合开发的最优调度问题, 进而影响临河口城市的发展, 因此河口的盐淡水混合问题一直备受海岸工程师的关注。

对于河口盐淡水混合的认识, 大体上始于 20 世纪 50 年代初期, 其中重要的启发来自于早期的河口水力模型试验。此后, 河口盐淡水混合的研究经历了实际资料的观测收集、经验相关分析、半经验半理论方法以及数学模型计算等阶段。经验相关分析和半经验半理论方法的优点在于概念简单直观, 易于掌握; 缺点是只能用于分析河口现状情况, 如果河口地区存在大范围的水流条件变化, 譬如大规模的围垦工程或航道治理工程, 则改变了现有参数间的关系, 因而应用上受到限制^[1]。随着计算机的飞速发展和计算方法的不断改良, 数学模型成为研究河口盐淡水混合重要的工程研究手段之一, 它不仅能够给出河口盐度分布状况, 而且可以预报各种工程措施后不同水动力条件下的可能变化情况。20 世纪 60 年代开始, Stigter, Harleman, Williams 等人开始寻求河口盐淡水混合的数值解法, 浙江省河口海岸研究所、河海大学、华东师范大学以及南京水利科学研究院等单位也先后进行了一些研究。

本文建立了河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型, 并应用于模拟部分混合型河口——长江河口水域的盐淡水混合情况。

收稿日期: 2000-12-07

*基金项目: 河海大学港航学院科学基金

1 数学模型

1.1 控制方程

一般地, 河口水域水下地形复杂, 垂向采用 σ 坐标可以使整个水域具有相同的垂向分层数, 且各层的侧向岸边界不再变化, 给数值计算带来方便。

设海水不可压缩, 采用 Boussinesq 和静压近似, 则 σ 坐标系下三维潮流盐度控制方程组可写为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial x} + f_v + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial E}{\partial y} - f_u + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(A_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma} = -\rho g D \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + \frac{w}{D} \frac{\partial s}{\partial \sigma} = K_h \left(\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{D^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_v \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) \quad (6)$$

式中 x, y, σ ——纵向、横向和垂向坐标; u, v, w —— x, y, σ 方向的雷诺平均流速分量; ρ_0, ρ ——纯水、海水密度; g ——重力加速度; p ——静水压力; s ——含盐度; η ——水位; t ——时间; f ——Coriolis系数, $f = 2\Omega \sin \theta$, Ω ——地转角速度, θ ——纬度; $\alpha = 7.6 \times 10^{-4}$; A_h, A_v ——水流水平及垂向紊动粘性系数; K_h, K_v ——盐度水平及垂向紊动扩散系数。动量方程中水平压强梯度, 分为水位梯度的正压项和密度变化引起的斜压项, 斜压项的表达式为:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{gD}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{D} \left(\sigma' \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \quad (7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial y} = \frac{gD}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{D} \left(\sigma' \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \quad (8)$$

水流的表、底面运动学边界条件为:

$$w(x, y, \sigma, t) \Big|_{\sigma=0} = 0 \quad (9)$$

$$w(x, y, \sigma, t) \Big|_{\sigma=1} = 0 \quad (10)$$

以及表、底面动力学边界条件为:

$$\frac{A_v}{D} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = \frac{\bar{\tau}_a}{\rho} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{A_v}{D} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{\bar{\tau}_b}{\rho} = C_b |\bar{u}_b| \bar{u}_b \quad (12)$$

式中 $\bar{\tau}_a$, $\bar{\tau}_b$ —— 水面风切应力及水底摩擦应力; w —— 底层流速; C_b —— 底摩擦应力拖曳系数。

盐度的表、底面边界条件为:

$$\frac{K_v}{D} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{K_v}{D} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = 0 \quad (14)$$

岸边界条件采用法向流速为 0, 盐度法向导数为 0。水边界条件为已知潮位值及盐度值。水平方向水流紊动粘性系数和盐度紊动扩散系数均取常数, 而垂向紊动粘性系数 A_v 和紊动扩散系数 K_v 则考虑密度的浮力效应。

1.2 数值计算方法

采用过程分裂法^[3]求解三维水流运动方程, 即先用二维模型求解外模式获得一个自由表面及垂向平均流速, 再用三维模型求解内模式获得三维流场。外模式为垂向平均二维水流运动方程组, 通过对方程(1)~(3)垂向积分得到。内模式方程组仍然是方程(1)~(4)。在计算中, 由外模式方程求解水位及平均流速, 并提供给内模式, 由内模式求解各层 u 、 v 、 w , 最后把 η 、 u 、 v 、 w 提供给盐度方程求解各层 s 。

为了提高计算精度及稳定性, 对双步全隐有限差分法用显式迎风差分格式处理对流项的方法^[6]进行改进。将动量方程左边项改为全微分形式 dP/dt , $P = U$ (或 V), 并用欧拉-拉格朗日法离散, 具体做法如下:

设质点 n 时刻从 $(i-a, j-b)$ 经过 t 到达 (i, j) , 则

$$dP/dt = (P_{i,j}^{n+1} - P_{i-a,j-b}^n) / \Delta t \quad (15)$$

式中 $a = U_{i,j}^n \Delta t / \Delta x = l + p$, $b = V_{i,j}^n \Delta t / \Delta y = m + q$, l 、 m 为整数, p 、 q 为小数。 $P_{i-a,j-b}^n$ 通过欧拉-拉格朗日插值公式求得, 令 $FP_{i,j}^n = P_{i-a,j-b}^n$, 那么

$$FP_{i,j}^n = (1-p) \left[(1-q) F_{i-l,j-m}^n + q F_{i-l,j-m-1}^n \right] + p \left[(1-q) F_{i-l-1,j-m}^n + q F_{i-l-1,j-m-1}^n \right] \quad (16)$$

这样改进后的双步全隐有限差分法的差分方程组为:

$$\begin{cases} \eta^* - \eta + \Delta t \frac{\partial x}{\partial x} (DU^{n+1}) + \Delta t \frac{\partial y}{\partial y} (DV) = 0 \\ U^{n+1} + \Delta t g \frac{\partial x}{\partial x} \eta^* - FU - \Delta t \left(fV + \frac{\tau_{yx}}{D\rho} + TR_x + TE_x \right) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} \eta^{n+1} - \eta^n + \Delta t \frac{\delta_y}{\Delta y} (DV^{n+1}) - \Delta t \frac{\delta_y}{\Delta y} (DV) = 0 \\ V^{n+1} + \Delta t g \frac{\delta_y}{\Delta y} \eta^{n+1} - FV + \Delta t \left(fU^{n+1} - \frac{\tau_{xy}}{D\rho} - TR_x - TE_x \right) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 η^n —— 中介水位; δ_x, δ_y —— x 向和 y 向差分算子; TR_x, TR_y —— 紊动项; TE_x, TE_y —— 斜压项。该方程组形成三对角矩阵, 可以用追赶法求解, 利用式(17)沿 x 方向求得 η^n, U^{n+1} , 再由式(18)沿 y 方向求得 η^{n+1}, V^{n+1} 。

内模式动量方程中的水位 η^{n+1} 由外模式提供, 这样内模式只求解流速 $u^{n+1}, v^{n+1}, w^{n+1}$, 把方程左边项改写成全微分 $du/dt, dv/dt$, 同样用欧拉-拉格朗日法离散, 斜压项、水平紊动项用显式离散, 垂向紊动项用隐式离散, 差分方程可写为:

$$u_{i,j,k}^{n+1} = Fu_{i,j,k}^n - \Delta t \delta_x \eta^{n+1} - \Delta t \delta_x E^n + fV^n + A_n (\delta_x u^n + \delta_y v^n) + \frac{1}{D^2} \left[\frac{A_{n+1}^*}{(\Delta\sigma)^2} (u_{i,j,k+1}^{n+1} - u_{i,j,k}^{n+1}) - \frac{A_n^*}{(\Delta\sigma)^2} (u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k-1}^{n+1}) \right] \quad (19)$$

$$v_{i,j,k}^{n+1} = Fv_{i,j,k}^n - \Delta t \delta_y \eta^{n+1} - \Delta t \delta_y E^n - fu^{n+1} + A_n (\delta_x v^n + \delta_y u^n) + \frac{1}{D^2} \left[\frac{A_{n+1}^*}{(\Delta\sigma)^2} (v_{i,j,k+1}^{n+1} - v_{i,j,k}^{n+1}) - \frac{A_n^*}{(\Delta\sigma)^2} (v_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k-1}^{n+1}) \right] \quad (20)$$

式(19)中的斜压项为:

$$\delta_x E^n = \frac{gD}{\rho_0} \left\{ \sum_{k'=k}^k \delta_x \rho_{k'}^n \Delta\sigma - \frac{1}{D} \sum_{k'=k}^k [\delta_x \eta^{n+1} - (kz - k' + 0.5)\Delta\sigma \delta_x D^{n+1}] \cdot \delta_x \rho_{k'}^n \Delta\sigma \right\} \quad (21)$$

式(20)中的 $\delta_y E^n$ 类似于 $\delta_x E^n$; $Fu_{i,j,k}^n, Fv_{i,j,k}^n$ 为欧拉-拉格朗日法算子:

$$Fu_{i,j,k}^n = u_{i-a,j-b,k-c}^n$$

$$Fv_{i,j,k}^n = v_{i-a,j-b,k-c}^n$$

这里 $a = u_{i,j,k}^n \Delta t / \Delta x, b = v_{i,j,k}^n \Delta t / \Delta y, c = w_{i,j,k}^n \Delta t / (D_{i,j} \Delta\sigma)$, n 时刻质点位于 $(i-a, j-b, k-c)$,

$(n+1)$ 时刻质点运动到 (i, j, k) 。 $Fu_{i,j,k}^n, Fv_{i,j,k}^n$ 通过欧拉-拉格朗日法插值求得, 令 $a=l+p,$

$b=m+q$ 和 $c=n+r$, 其中 l, m, n 为整数, p, q, r 为小数, 则

$$Fu_{i,j,k}^n = (1-r) \left\{ (1-p) \left[(1-q) u_{i-l,j-m,k-n}^n + q u_{i-l,j-m-1,k-n}^n \right] + p \left[(1-q) u_{i-l-1,j-m,k-n}^n + q u_{i-l-1,j-m-1,k-n}^n \right] \right\} + r \left\{ (1-p) \left[(1-q) u_{i-l,j-m,k-n-1}^n + q u_{i-l,j-m-1,k-n-1}^n \right] + p \left[(1-q) u_{i-l-1,j-m,k-n-1}^n + q u_{i-l-1,j-m-1,k-n-1}^n \right] \right\} \quad (22)$$

$Fv_{i,j,k}^n$ 的表达式类似于式 (22)。式 (19)、(20) 展开后系数矩阵为三对角矩阵, 用 TDMA 法解三对角方程组, 求得 u^{n+1} 、 v^{n+1} , 将 u^{n+1} 、 v^{n+1} 代入式 (1), 可直接求得垂向流速分量 w^{n+1} 。

同样, 对于盐度扩散方程式 (6) 左边项改写成全微分 ds/dt , 并用欧拉-拉格朗日法离散, 水平紊动扩散项用显式离散, 垂向紊动扩散项用隐式离散, 其差分方程为:

$$S_{i,j,k}^{n+1} = FS_{i,j,k}^n + K_x(\delta_x S^n + \delta_y S^n) + 1/[D^2(\Delta\sigma)^2] \left[K_{x+1/2}^n (S_{i,j,k+1}^{n+1} - S_{i,j,k}^{n+1}) - K_{x-1/2}^n (S_{i,j,k}^{n+1} - S_{i,j,k-1}^{n+1}) \right] \quad (23)$$

其中的 $FS_{i,j,k}^n$ 的表达式类似于式 (22)。同样地, 可用 TDMA 法求解式 (23) 而得到 $S_{i,j,k}^{n+1}$ 。

1.3 定解条件与稳定标准

在河口盐淡水混合的数学模型计算研究中, 初始条件的设置对于计算收敛的快慢有相当大的影响。在模型的计算区域内, 水体的含盐度往往变化很大, 如果初始盐度值均取为一固定值, 那么需要相当长的计算时间才能够获得较为满意的盐度空间分布。韩乃斌等人在长江口南北支二维氯度数学模型计算中指出, 一般要经过相当于原体 7~10 a 的计算才能形成较为满意的从 $0 \sim 20\,000 \times 10^{-6}$ 的氯度空间分布; 如果根据实测资料分区给定初始的氯度空间分布, 经过 12~24 h 的计算就可以得到较为满意的氯度空间分布^[7]。因此, 为了节省调整盐度空间分布的前期计算工作, 根据实测资料分区设定盐度初始值是较好的初始条件设置方法。

目前对于入流边界条件的处理, 在计算中有采用线性外插折扣法、入流等于出流法、强制条件法和扩散指数分布外插法等^[8]。线性外插折扣法容易导致物理意义上的不真实, 如盐度出现负值; 入流等于出流法会使得边界附近的盐度只升不降; 强制条件法带有过多的人为性; 扩散指数分布外插法可以避免入出流转流时计算盐度的不连续, 从而得到合理的分布。本模型采用扩散指数分布外插法, 具体处理办法是, 当已知入流边界的盐度为 s_0 , 则边界上游点的入流值 s^* 采用下式计算:

$$s^* = s_0 \exp \left[-(\ln s_0 + \ln s_d) \left(\frac{L + \Delta x}{L} \right)^2 \right] \quad (24)$$

式中 s_0 ——沿某个方向的盐度最高值; L ——该方向上边界点到浓度最高值点的距离; Δx ——空间网格步长。

在河口盐淡水混合的计算中, 所要求的计算结果应该是整个水域的盐度分布达到稳定时的状况。为了考察计算域内各点盐度的平稳性, 在计算中记录每个网格点上的第 n 个潮流周期的最高盐度值 $s_{i,j,k}^n$ 以及第 $n+1$ 个潮流周期的最高盐度值 $s_{i,j,k}^{n+1}$, 则

$$\Delta s_{i,j,k} = \frac{s_{i,j,k}^{n+1} - s_{i,j,k}^n}{s_{i,j,k}^n} \times 100\% \quad (25)$$

式中 $\Delta s_{i,j,k}$ ——该网格点在相邻两个潮流周期的盐度相对变化率。当整个计算域内各网格

点的盐度相对变化率接近于 0 时, 可以认为计算域的盐度趋于平稳。

2 计算实例

应用所建立的河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型, 计算长江河口盐淡水混合的时空分布。计算区域从上游徐六泾至外海绿华山, 东西间距离达 163.9 km, 南侧水边界为芦潮港至绿华山连线, 北侧水边界至连兴港北侧, 南北间距离为 101.0 km。

为了能够较好地给出上述计算域内盐度的初始条件和边界条件, 首先建立了涵盖长江口与杭州湾的二维潮流盐度数学模型, 计算范围包括 $29^{\circ} 10' N \sim 32^{\circ} 30' N$, $120^{\circ} 30' E \sim 123^{\circ} 10' E$, 空间步长取 $1'$, 时间步长取 $100 s$ 。外海东、北、南水边界潮位过程由东中国海潮波数学模型^[9]提供, 外海东边界盐度取 $30\,000 \times 10^{-6}$ ^[10], 外海北、南边界盐度条件分别根据《江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告》和《浙江省海岛资源调查与研究》的成果^[11,12]插值给出。模型采用 1996 年 9 月 11~22 日的水文测验资料对横沙、九段东、大戢山、余山、洛华、滩浒山、长兴、石洞口、青龙港等站的潮位过程以及 1[#]~8[#] 测点的流速、流向和盐度进行验证, 图 1 给出余山站潮位过程验证图。通过模型的良好验证, 确定长江河口盐淡水混合数学模型的外海盐度边界条件与计算域盐度初始条件。

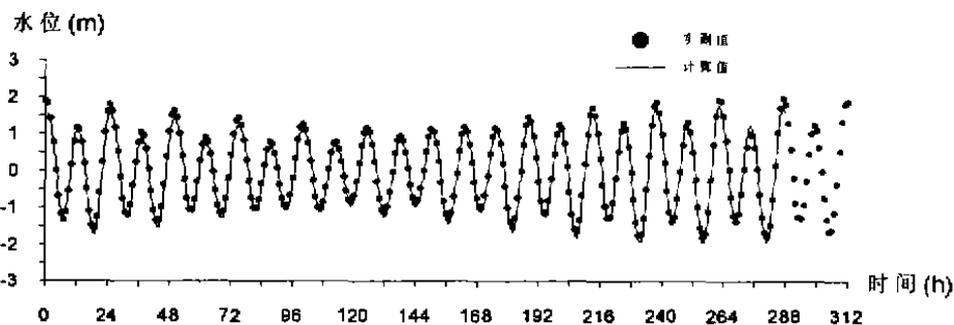


图 1 余山站潮位过程 (1996-09-11~22) 验证图

长江河口盐淡水混合三维数学模型采用变网格技术, Δx 分别为 197.9 m、395.8 m、791.7 m, Δy 分别为 185.3 m、463.3 m、926.6 m, 垂向分六层, 水流计算的时间步长 50 s, 盐度计算的时间步长为 100 s。上游徐六泾潮位边界条件由实测资料提供, 盐度取为 0。初始时刻取在憩流时刻, 初始流速为 0, 初始水位由长江口与杭州湾的二维水流盐度数学模型提供。水平向水流紊动粘性系数根据网格大小取不同的数值, 网格从小到大对应的紊动粘性系数 A_h 分别为 $10 m^2/s$ 、 $50 m^2/s$ 、 $200 m^2/s$, 盐度紊动扩散系数 K_h 分别为 $14 m^2/s$ 、 $71 m^2/s$ 、 $285 m^2/s$, 海底粗糙高度 Z_0 取 0.01 m。

长江河口盐淡水混合三维数值计算所用的实测资料为 1996 年 9 月 13~14 日洪季大潮同步水文测验资料。图 2(a)、图 2(b) 分别给出了北槽测点表、中、底层流速与盐度验证过程图。流速测点的计算值与实测值相吻合, 最大流速绝对值误差平均不超过 10%。盐度

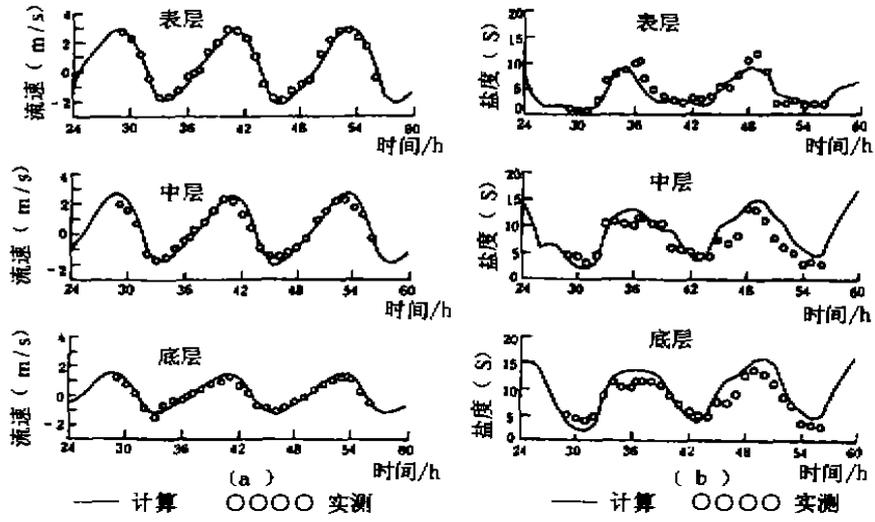


图2 北槽测点流速过程(a)和盐度过程(b)验证图

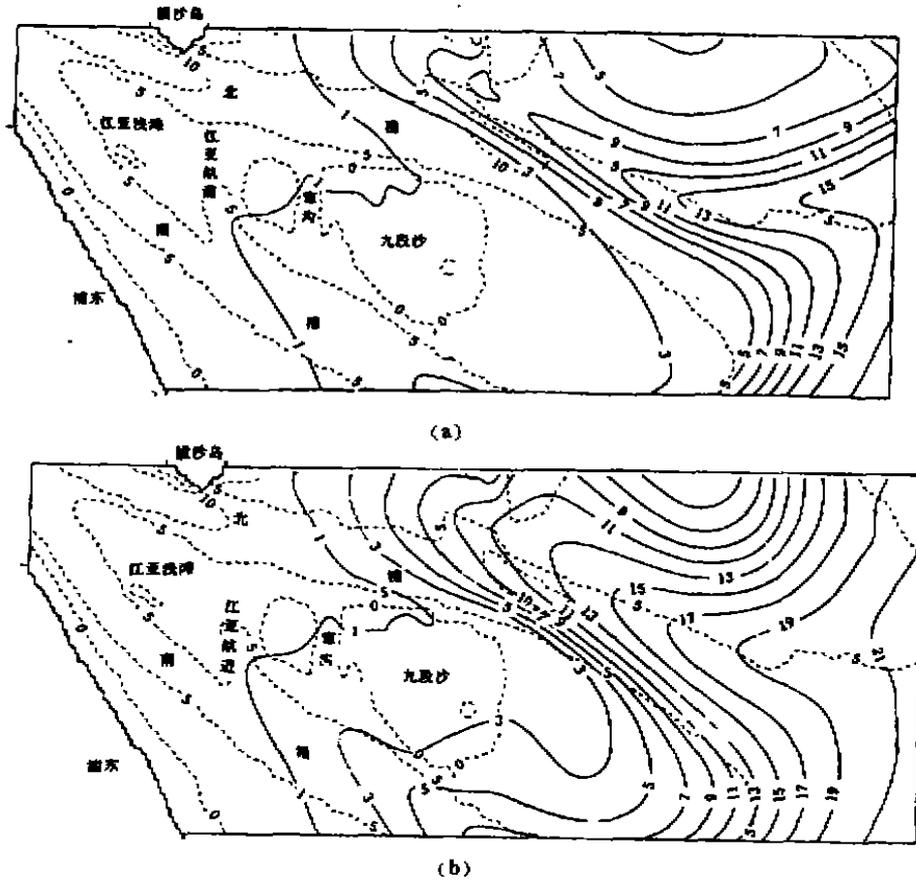


图3 长江口南北槽水域深时表层(a)和底层(b)盐度分布图

的计算值与实测值相比较,其基本趋势相一致,平均误差不超过 25%。

图 3(a)、图 3(b)分别为长江口南北槽水域表层及底层涨憩时盐度分布图,图中实线为等盐度线,虚线为等深线。由图 3 可以看出,上游盐度始终小于下游盐度,表层盐度始终小于底层盐度。由于流速大小分布不同,盐度随潮流扩散较快,北槽咸水入侵强于南槽,深槽盐度要大于浅滩盐度。等盐度线在深槽以楔状伸向上游,轴线基本上与涨潮潮流方向一致。

图 4(a)、图 4(b)分别为长江口北槽水域垂向平均盐度过程与流速过程对比图。结果表明,北槽口外盐度过程与流速过程存在相位差,盐度最大、最小值分别出现在接近涨憩和落憩的时刻。北槽主槽盐度最大、最小值分别出现在接近涨憩和落憩后 2~3 h。

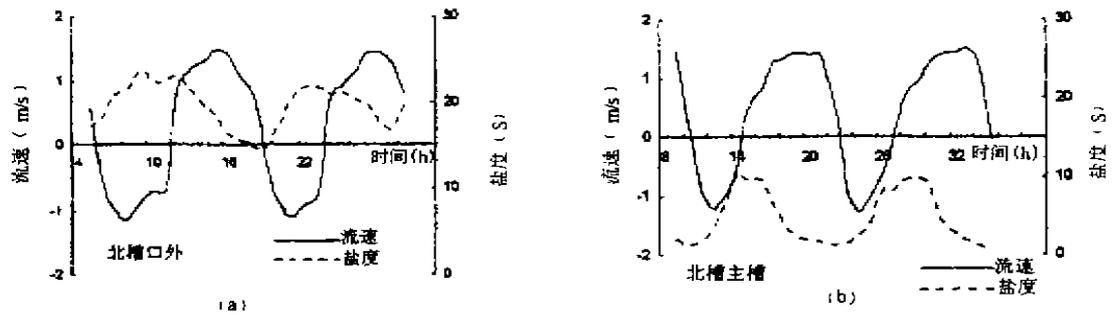


图 4 北槽口外(a)和北槽主槽(b)垂向平均盐度过程与流速过程对比图

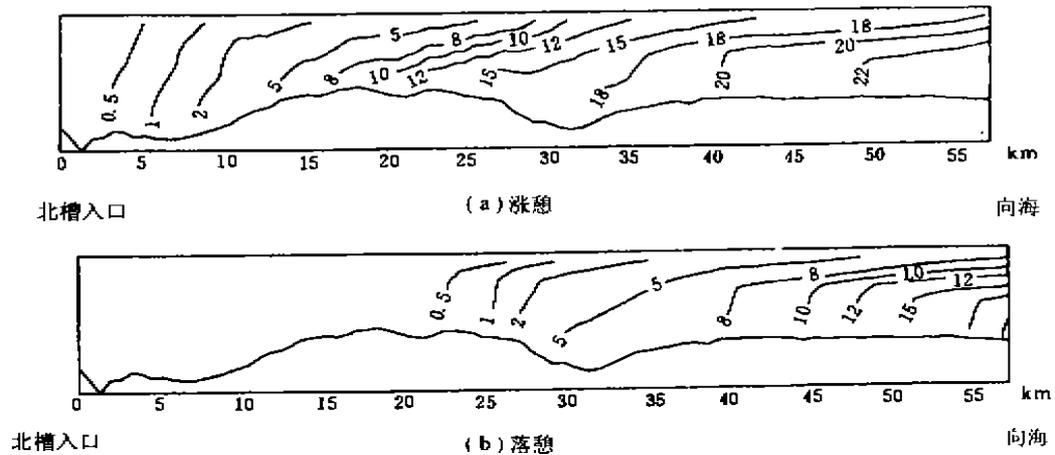


图 5 长江口北槽水域涨憩(a)、落憩(b)盐淡水混合剖面图

图 5(a)、图 5(b)分别为长江口北槽水域涨落憩盐淡水混合区纵剖面图。可以看出,涨潮时混合区向上游推移,涨憩时咸水入侵上移到最远;而落潮时混合区向下游推移,落憩时咸水下移到最远。垂向盐度是渐变的,表层盐度小于底层盐度,盐度等值线出海向陆倾

斜, 呈现部分混合型河口盐淡水混合特性。

3 结 语

建立了河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型, 数学模型中的水平压强梯度分为水位梯度的正压项和密度变化的斜压项, 能够合理反映河口盐淡水混合中的斜压现象。

计算中采用欧拉—拉格朗日法离散潮流和盐度方程中的对流项, 提高了计算稳定性和数值模拟精度。提出盐度边界条件和初始条件应尽量由现场调查资料分区域提供, 以加快计算收敛性并节省盐度场前期调整计算工作; 以计算域内各网格点的相邻两个潮流循环周期内的盐度相对变化率是否接近于 0 为判别盐度场的计算是否稳定的标准。

应用所建立的河口三维非线性斜压潮流盐度数学模型, 较好地模拟了部分混合型河口——长江河口盐淡水混合的时空分布。

参考文献

- 1 韩曾萃. 河口咸水入侵预报的理论与实践. 河口海岸工程, 2000, (2): 1~15
- 2 Alan F B and George L M. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Normans S. Heaps (ed). Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Washington: American Geophysical Union., 1987. 251~274
- 3 Munk W H and Anderson E R. Notes on a theory of thermocline. Journal of Marine Research, 1948, 7(1): 28~39
- 4 Noye J. A three-dimensional tidal model for a shallow gulf. In: Noye J (ed). Numerical Solutions of Partial Differential Equation. Rotterdam: North-Holland, 1982: 1~6
- 5 Simons T J. Verification of numerical models of Lake Ontario, Part I. circulation in spring and early summer. Journal of Physical Oceanography, 1974, (4): 255~269
- 6 严以新, 诸裕良. 黄茅海域及上游河网一、二维联网整体数学模型. 见: 第七届全国海岸工程学术讨论会论文集, 1993, 28~39
- 7 韩乃斌, 蒋星科. 长江口南北支三维盐度数学模型. 海洋工程, 1996, 14(1): 47~54
- 8 张东生. 河口海岸水环境数值模拟中的几个问题. 见: 港口航道海岸及近海工程论文集, 1992. 313~320
- 9 林晖等. 东中国海潮汐系统与海岸演变模拟研究. 北京: 科学出版社, 2000. 52~58
- 10 李春初. 高盐陆架水入侵影响我国河口概况与问题. 海洋科学, 1990, (3): 56~59
- 11 江苏省海岸带和海涂资源综合调查组编. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986, 25~27
- 12 浙江省海岛资源综合调查领导小组编. 浙江省海岛资源综合调查与研究. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1995, 32~36

作者简介: 郑金海, 男, 1972 年出生, 副教授, 1998 年毕业于河海大学, 获工学博士学位。主要从事港口、航道及海岸工程专业的教学与科研工作, 已发表论文 10 余篇。

Numerical Modelling of Fresh and Salt Water Mixing in the Yangtze Estuary

Zheng Jinhai and Zhu Yuliang

Research Institute of Coastal and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098

Abstract A three dimensional nonlinear baroclinic numerical model in estuaries is developed, in which the gradients of the horizontal pressure contain the normal pressure resulted from the gradient of tidal level and the baroclinic pressure due to the gradient of salinity. The Eulerian-Lagrangian method is employed to discretize the convection terms in the momentum equations of tidal motion, as well as the salt diffusion equation. In order to save the computational time, the ways to install the boundary conditions, the initial conditions and the computational stability standard of the salinity fields are presented. Application of the present model to the Yangtze estuary is carried out for modelling the fresh and salt water mixing. Results show the characteristics of saltwater intrusion in the estuary of partially mixed pattern, indicating that the present model is suitable for simulating the fresh and salt water mixing in the Yangtze estuary.

Keywords Yangtze estuary; fresh and salt water mixing; numerical model; baroclinic pressure; Eulerian-Lagrangian method