

长江口斜压诊断模式三维流场数值模拟

龚 政¹, 张长宽², 金 勇³, 张东生²

(1. 水利部太湖流域管理局水利发展研究中心, 上海 200434; 2. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要: 建立了 坐标系下长江口斜压诊断模式三维流场数学模型, 采用 $k-k_l$ 二方程紊流闭合模型求解垂向涡粘系数, 计算域内恒定、非均匀盐度场反映了计算域密度斜压效应。验证结果表明, 斜压诊断模式的模拟成果较切合实际。模型成功复演了长江口水域由往复流向旋转流过渡的流场特性; 潮波从四条汉道传入后在分汉口附近相遇形成多个会潮点, 其位置随着径流的大小、潮汐的强弱、汉道的形态等因素而变化。

关 键 词: 长江口; 斜压诊断模式; 三维流场; 数值模拟

中图分类号: TV131.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)03-0300-08

以往在长江口三维流场数值模拟中常用的做法是建立三维正压模型, 即将计算域内温度、盐度场近似为恒定、均匀的, 因此密度场也是恒定、均匀的, 从而没有考虑盐度的变化以及因密度梯度产生的密度斜压效应。为了考虑计算域内实际存在的温度、盐度场的非恒定性、非均匀性, 即考虑由此产生的密度梯度对流场的斜压效应, 较先进的方法是建立斜压模型。由于一般温度、盐度场比较保守, 其变化的时间尺度远比流场的大, 因此可以将这种温度、盐度场近似为恒定、非均匀的, 称为斜压诊断模式; 若同时考虑到流场、温度场和盐度场之间的时变耦合过程, 称为斜压预报模式。相比正压模式而言, 本文采用的斜压诊断模式可以在一定程度上反映密度斜压效应, 同时, 又比斜压预报模式减小了计算工作量, 因此斜压诊断模式可以用较小的计算工作量取得较高的模拟精度。

1 坐标系下的河口动力学方程组

定义 $\eta = \frac{z}{H} - 1$, $-1 \leq \eta \leq 0$ 。坐标系中的动力学方程为

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x} - fVD + gD \frac{\partial}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} - \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \right] d = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial x} \right] + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} + fUD + gD \frac{\partial}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial y} - \frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} \right] d = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial y} \right] + F_y \quad (3)$$

坐标下的垂向流速 与笛卡儿坐标系下垂向流速 w 的关系为

$$w = U \left[\frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \right] + V \left[\frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \right] + \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \quad (4)$$

式中 (x, y, t) 为自由表面到平均水面的距离; (U, V) 为水平流速矢量 U 在 (x, y) 方向的分量; w 为 坐标系中垂直方向的流速; 自由表面到底床的距离——全水深 $D = \eta + H$, $H(x, y)$ 为平均水面到底床的距离; f 为

收稿日期: 2003-03-06; 修订日期: 2003-06-30

基金项目: 水利部科技创新项目 (CSX2000-57); 教育部科技研究重点项目 (01100)

作者简介: 龚 政(1975-), 男, 江苏张家港人, 工程师, 博士, 主要从事河口、海洋及河网水动力、水环境研究。

E-mail: davidgz@vip.sina.com

(0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08), 由 q 、 l 、 S_M 、 S_H 可以计算得到 K_M 、 K_H 和 K_q 。

3 边界条件

3.1 自由表面、水体底部边界条件

在自由表面 $z = H(x, y)$, $\partial z / \partial t = 0$, 满足条件:

$$\frac{K_M}{D} \left(\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad q^2 = B_1^{2/3} U_s^2 \quad (17)$$

$$q^2 l = 0 \quad \tau_{bx} = \tau_{by} = 0 \quad (18)$$

式中 τ_{sx} 、 τ_{sy} 为表面风应力; U_s 为与表面风应力有关的摩阻流速大小。

在水体底部 $z = -H(x, y)$, $\partial z / \partial t = -1$, 式(17)中以 (τ_{sx}, τ_{sy}) 代替 (τ_{sx}, τ_{sy}) 、以 U_b 代替 U_s 以及式(18)为满足的条件。其中, (τ_{bx}, τ_{by}) 为底部摩阻切应力; U_b 为与底部摩阻切应力有关的摩阻流速大小。

$$\tau_{bx} = \tau_{by} = 0 \quad C_D = C_D |U_b| / U_b \quad (19)$$

式中 C_D 为拖曳力系数, $C_D = \max \left[\frac{2}{\ln^2(z/z_0)}, 0.0025 \right]$, C_D 为卡门常数, 取 0.4; z_0 为海底粗糙度; z 为近底层网格点与海底的距离。

自由表面、水体底部的动力学边界条件见文献[4]。

3.2 侧向闭边界条件

$$U_n = 0 \quad (20)$$

式中 n 表示陆地侧边界的法向。

3.3 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。

4 计算实施

4.1 计算域、地形资料、网格单元

计算域包括三级分汊及四个口门在内, 上游边界取在徐六泾断面, 外海开边界的东边界取在往绿华山方向约 50 km, 北边界在连兴港以北 10 km, 南边界取在芦潮港。计算域东西总长 170 km, 南北总宽 100 km。

采用的地形为长江口 1997 年测图资料, 基准面为上海吴淞基准面。根据资料分析, 长江口区潮波传播方向约为 305°, 为了开边界处理的方便和准确, 在选取坐标轴时尽量让潮波传播方向与东边界正交, 因此模型对坐标轴作了旋转, Y 轴取为 NE18°, X 轴按照右手坐标系与 Y 轴垂直。

模型中水平方向均采用 500 m 的正方形网格。为了提高垂直方向的分辨率, 充分反映表层和近底层边界层, 而又不过度增加计算工作量, 坐标网格点在近水面和近底部呈对数分布布置、其余位置按线性分布布置, 垂向共分成 10 层, 11 个层面, 从表面到底部相对坐标分别为 0.0, -0.1429, -0.2857, -0.4286, -0.5714, -0.7143, -0.8571, -0.9286, -0.9643, -0.9821, -1.0。

4.2 模型参数

本文采用 1998 年 2 月 11 日 0 00~2 月 12 日 0 45 共 24 h 45 min 作为一个基本潮型进行计算。外海开边界潮位采用东中国海潮波模型^[5]推求得到; 上游水位开边界采用徐六泾实测水位过程, 流量边界采用徐六泾实测流量过程。计算域内的恒定非均匀盐度分布采用平面二维盐度模型计算得到的同步盐度场^[6]的时段平均值, 涨憩时盐度分布见图 1, 垂向盐度由表层至底层作微量线性放大。

糙率系数 z_0 ^[7] 定性地反映了底床的糙率高度, 参考黄胜^[8]的研究成果, 模型中分涨潮流和落潮流分别给出 z_0 , 经调试后 z_0 取值分别为 0.2 cm 和 0.1 cm。

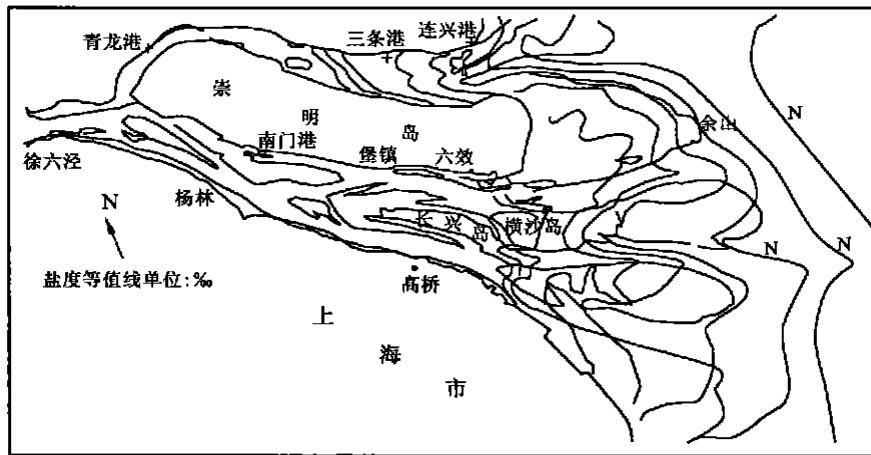


图 1 长江口平面二维涨憩盐度分布图

Fig. 1 2-D flood tide salinity of the Yangtze River estuary

4.3 模型验证

模型在计算域内有代表性的选了 10 个潮位验证点、12 个流速验证点分别进行潮位和流速验证。本文代表性的列出吴淞站和北槽中站潮位验证图(图 2), 4#、9# 在表层的流速、流向验证图(图 3)和 4#、9# 在 - 0.8 层流速、流向验证图(图 4)。可以看出, 计算得到的潮位、流速、流向过程和实测的潮位、流速、流向过程无论在量值上还是在相位上总体吻合较好。

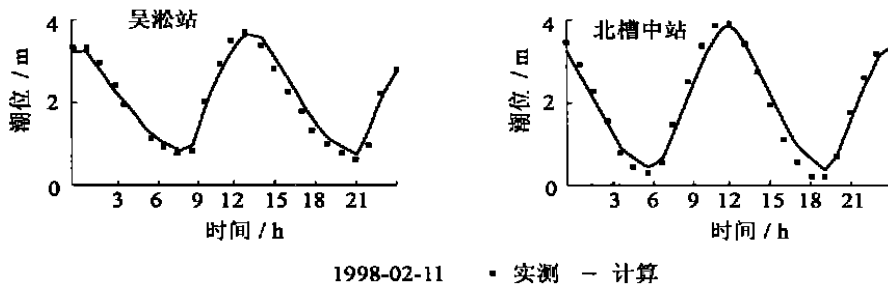


图 2 潮位验证图

Fig. 2 Tide level verification

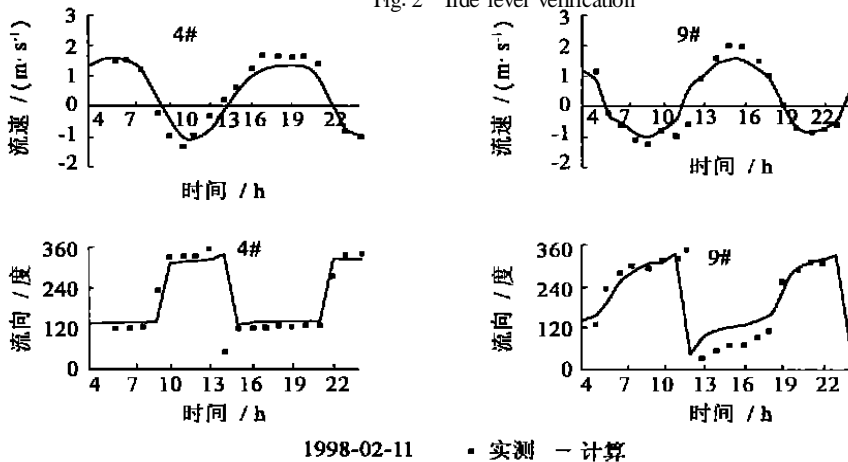


图 3 表层流速、流向验证图

Fig. 3 Velocity and direction verification on surface layer

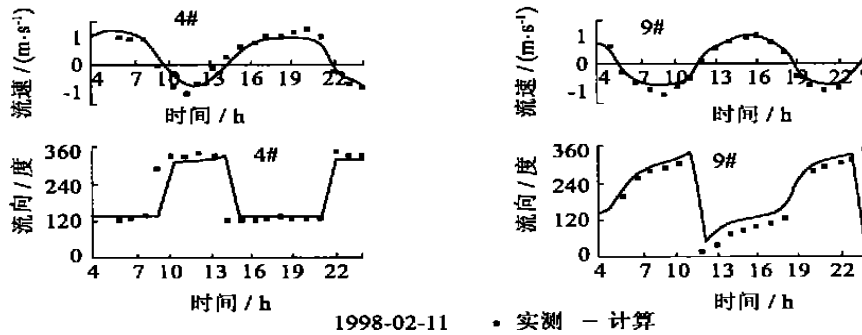


图4 - 0.8层流速、流向验证图

Fig. 4 Velocity and direction verification on - 0.8 layer

4.4 三维垂向平均的全潮流速矢量

图5为长江口垂向平均的全潮流速矢量。长江口地区潮流运动形式在不同的区域分别表现为旋转流与往复流。从上游徐六泾断面至下游横沙岛之间的河段，两侧有固定的河岸边界，表现为典型的往复流，且在深槽中椭圆长轴明显加大；从横沙岛至拦门沙带内的主槽（如北港、北槽、南槽），水深相对较深，且两侧水下沙洲（如崇明浅滩、横沙东滩、九段沙、南汇边滩）的束水效应明显，也表现出较明显的往复流特征，落潮流速一般大于涨潮流速；从拦门沙往东至外海的水域，水深渐深，水面愈加开阔，长江口地处北半球，在科氏力的作用下，潮流基本上作顺时针旋转，潮流运动形式由往复流逐渐向旋转流过渡，到30 m等深线以外基本为旋转流。拦门沙带内的浅滩水域，潮流变化比较复杂，靠近口外的地方受潮流影响较大，以旋转流为主；靠近口内的地方，受航道主流的影响较大，以往复流为主。在横沙浅滩的中部，由于跨槽水流的存在，椭圆长短轴比值很大，且长轴旋转为与主槽成45°角。

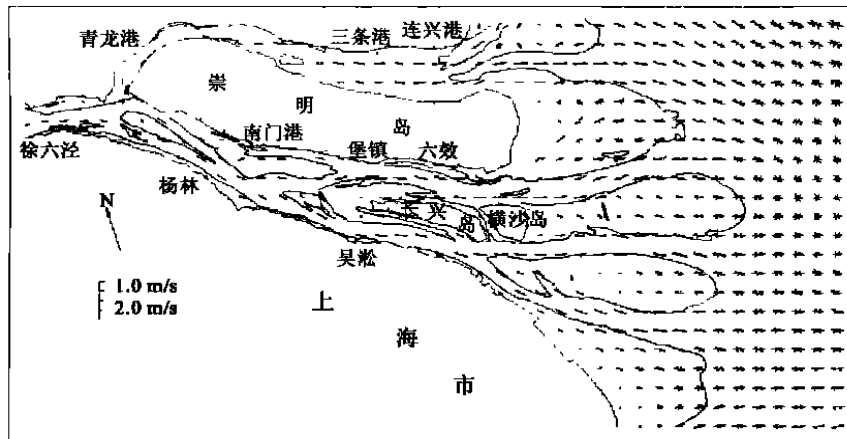


图5 三维垂向平均的全潮流速矢量图

Fig. 5 3-D depth-averaged velocity vector in vertical direction

4.5 长江口流场特征

图6、图7分别为北槽涨急和落急时刻表层的流场图。当北槽涨潮时，外海海水通过四个入海口灌入四支。由于北支河宽沿程减小、水深沿程变浅、且青龙港断面急剧缩窄，北支中形成了比较明显的驻波，青龙港断面附近是其中一个波节点。涨急时(图6)青龙港断面水流辐散，下泄流与沿北支上溯的外海水流在新隆沙下游断面交汇，而青龙港断面另一部分水流则倒灌入南支，汇入徐六泾下泄流并在中央沙断面附近与沿三支(北港、北槽、南槽)上溯的外海水流交汇。随着涨潮流的继续，至涨憩时，沿三支上溯的外海水流已抵达徐六泾断面，其中的一部分水流由南支灌入北支，与北支中上溯的外海水流在青龙港断面交汇，青龙港断面水流辐聚，严重时在此形成涌潮。

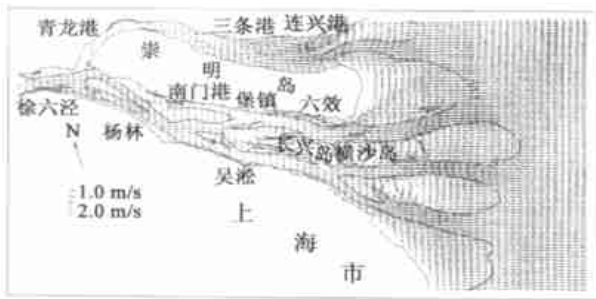


图 6 长江口北槽涨急表层流场图

Fig. 6 Flood tide flow field on surface layer of the north channel of the Yangtze River estuary

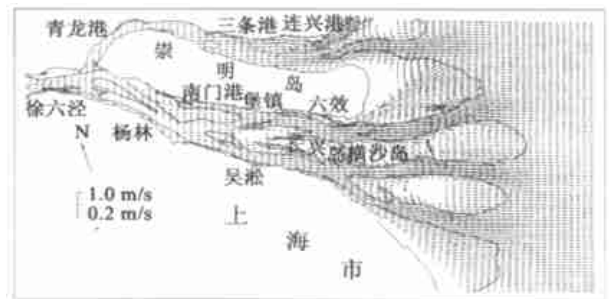


图 7 长江口北槽落急表层流场图

Fig. 7 Ebb tide flow field on surface layer of the north channel of the Yangtze River estuary

北槽落潮时，南、北支水流总体表现为下泄流。落急时(图 7)青龙港断面水流辐散，北支中大部分水流下泄入海，有一部分水流倒灌入南支，并在南北支分叉口水流分为两路，其中一部分为尚存的微弱涨潮流，另一部分下泄流通过三支入海。至落憩时，徐六泾断面的涨潮流已转为落潮流，北支倒灌入南支的水流随南支中落潮流下泄入海。

根据以上分析可看出，长江口作为一个多叉河口，潮波从四条汉道传入，在分叉口附近相遇形成会潮点。本文的数值结果中，南、北支分叉口的会潮点发生在青龙港断面；南、北港分叉口的会潮点在中央沙南、北水道中；南、北槽分叉口的会潮点在北槽中部。当然，会潮点的位置不是固定不变的，它随着径流的大小、潮汐的强弱、汉道的形态等因素时常发生变化。

5 正压与斜压诊断模式流速比较

图 8、图 9 分别为北槽中 7#、南港中 2# 的正压与斜压诊断模式流速比较。图中显示，斜压模型计算的涨潮流比正压的大，落潮流比正压的小，这个结果是合理的。因为，由于外海的盐水入侵所形成的密度比降在涨潮流期间与水面的比降一致，有加大涨潮流速的作用；在落潮流期间与水面比降相反，有减小落潮流速的作用。

7# 涨急时斜压作用使表层流速增大 6 cm/s，近底层流速增大 3 cm/s；落急时斜压作用使表层流速减小 5 cm/s，近底层流速减小 2 cm/s；2# 涨急时斜压作用使表层流速增大 5 cm/s，近底层流速增大 2 cm/s；落急时斜压作用使表层流速减小 7 cm/s，近底层流速减小 2 cm/s。以上结果表明，本文建立的长江口三维斜压诊断模式是合理的，它反映了盐水入侵造成的密度斜压效应引起的流速垂向结构变化。

相对正压模式而言，斜压诊断模式只是略微增加了计算非均匀盐度场下水体密度的工作量，但其要求能基本反映密度斜压效应的恒定非均匀盐度场，在理论上，斜压诊断模式的模拟精度应有所增高。

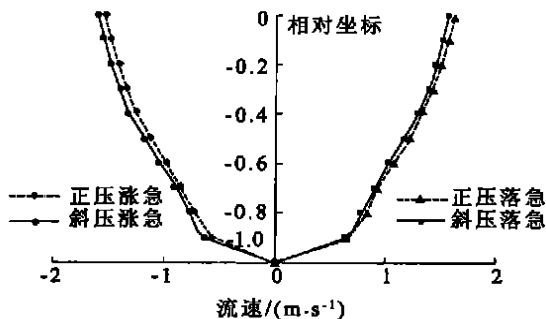


图 8 7# 正压与斜压诊断模式涨、落急流速比较
Fig. 8 Velocity comparison between flood tide and ebb tide of 7#

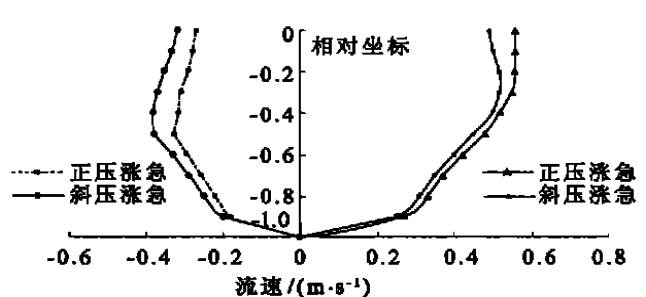


图 9 2# 正压与斜压诊断模式涨、落急流速比较
Fig. 9 Velocity comparison between flood tide and ebb tide of 2#

6 结 语

盐水入侵是河口地区特有的现象, 由此产生的密度梯度对流场有一定的作用。为了更切合实际地反映密度斜压效应, 又不过多的增加计算工作量, 本文建立了 σ 坐标系下斜压诊断模式长江口三维流场数学模型, 采用 k - kl 二方程紊流闭合模型求解垂向涡粘系数。模型成功复演了长江口水域由往复流向旋转流过渡的流场特性; 潮波从四条汉道传入后在分汉口附近相遇形成多个会潮点, 其位置随着径流的大小、潮汐的强弱、汉道的形态等因素而变化。

参考文献:

- [1] Mellor GL, Ezer T, Oey L Y. The pressure gradient conundrum of sigma coordinate ocean models[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1994 (11): 1126 - 1134.
- [2] Mellor GL. An Equation of State for Numerical Models of Oceans and Estuaries[J]. J Atmospheric and Oceanic technology, 1991 (8): 609 - 611.
- [3] Mellor GL, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Rev Geophys Space PHYS, 1982, 20 (4): 851 - 879.
- [4] Gong Zheng. A 3-Dimensional Numerical Model of Haizhou Bay[A]. The 29th IAHR Congress Proceedings[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. 273.
- [5] 张东生, 张君伦. 黄海海底辐射沙洲区的 M_2 潮波[J]. 河海大学学报, 1996, 24(5): 35 - 40.
- [6] 龚 政. 长江口三维斜压流场及盐度场数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2002. 61 - 62.
- [7] Weatherly G, Martin P J. On the structure and dynamics of the ocean bottom boundary layer[J]. J Phys Oceanogr, 1978(8): 557 - 570.
- [8] 黄 胜. 长江口入海航道的选择[M]. 南京: 南京水利科学研究所, 1978. 21.

3-D current numerical model for the Yangtze River estuary with baroclinic-diagnosis mode

GONG Zheng¹, ZHANG Chang-kuan², JIN Yong³, ZHANG Dong-sheng²

(1. Water Resources Development Research Center, Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China; 2. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Designing Institute of Reconnaissance, Shanghai 200434, China)

Abstract: This paper presents a 3-D current numerical model for the Yangtze River estuary with baroclinic-diagnosis mode in vertical σ coordinate system. A vertical eddy-viscosity coefficient is obtained from the advanced k - kl turbulence closure model, and the density baroclinic effects are embodied by the 2-D invariable-uneven salinity field. It shows the results from baroclinic-diagnosis mode well consistent with reality. The transition feature from back and forth current to rotary current is re-acted successfully. In addition, several tidal junction points appear near branch points when tidal wave propagate from four river forks, the position of which change with runoff, tide and topography.

Key words: Yangtze River estuary; baroclinic-diagnosis mode; 3-D current; numerical model