

文章编号: 1674-5566(2010)04-0521-08

长江口盐通量估算的数值模拟研究

范新峰, 刘洪生, 杨红

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306, China)

摘要: 基于三维数值模式 ECOM, 建立了长江口以及近岸海域的水动力耦合盐度数值模式。该模式考虑了移动潮滩边界和深水航道等地形特点。计算结果与实测值比较符合良好, 较好地反映了长江口区域盐度场的时空分布特点。模式模拟长江口盐水入侵的三维特征, 表层盐度较低而底层盐度较高。利用此模式计算了2003年2月枯季大、小潮时期, 在长江口代表性的断面处2个连续潮周期内的盐通量情况。2月1-2日大潮期间北支 SEC01、SEC02断面分别为 3 333 600 t、957 600 t; 崇头 SEC03、SEC04断面分别为 -270 000 t、-71 640 t; 南支 SEC05、SEC06断面分别为 1 364 400 t、1 512 000 t; 2月7-8日小潮期间北支 SEC01、SEC02断面分别为 205 200 t、82 800 t; 崇头 SEC03、SEC04断面分别为 -36 360 t、-12 960 t; 南支 SEC05、SEC06断面分别为 309 600 t、28 800 t。计算结果显示长江口枯季大、小潮期间盐量变化明显, 枯季大潮时期外海向长江口区域输送了巨量的盐分, 盐水直接入侵十分明显。此计算结果可为以后在长江口建立相应的挡咸蓄淡工程方案提供重要的科学依据。

关键词: 盐通量; 长江口; 潮周期; 三维数值模式

中图分类号: TV148 **文献标识码:** A

Salt flux computation and numerical simulation study in the Yangtze River Estuary

FAN Xin-feng LIU Hong-sheng YANG Hong

(College of Marine Sciences Shanghai Ocean University Shanghai 201306, China)

Abstract: A three-dimension numerical model to simulate the distribution of salt with a mobile boundary in the Yangtze River estuary is established in this paper. The model is based on an international three-dimension coastal ocean circulation model (ECOM model). Some complex topography is taken into account including the deep waterway and the artificially enclosed tideland. The computed results match well with the observed ones which imply that the model is capable of describing the temporal and spatial distribution of salt current in the Yangtze River estuary. The model imitates the 3D characteristics of saltwater intrusion: salt in the surface layer is lower and salt in the bottom layer is higher. From measurements during two tidal cycles by this model in February 1-2, 7-8, 2003, the sectional salt fluxes from the North Branch and the South Branch were calculated. The result shows that salt changes obviously during spring-neap tidal cycle. The sea transports a huge amount of salt into Yangtze River estuary during spring tidal cycle. This research provides the necessary data for prediction of saltwater intrusion and a proposed project for avoiding saltwater intrusion in the Yangtze

收稿日期: 2009-10-30

基金项目: 上海市近海海洋综合调查与评价专项 (ST1/ST2; PJ1-2; HD3)

作者简介: 范新峰 (1984-), 男, 硕士研究生, 专业方向为河口动力学。E-mail: xaggyil2@163.com

通讯作者: 刘洪生, Tel: 15692165352; E-mail: hslh@shou.edu.cn

River estuary

Key words salt flux Yangtze River Estuary tidal cycles three-dimension numerical model

长江河口水量丰沛,据大通站多年资料统计,年平均流量为 29 400 m³/s 年径流总量 9 260 亿 m³,为珠江的 3 倍,黄河的 15 倍,黄浦江的 90 多倍。径流量有明显的洪季(5-10 月)、枯季(12-翌年 4 月)变化,洪季占 71.7%,枯季占 28.3%。长江口为中等强度的潮汐河口,位于口门附近的中浚站多年平均潮差 2.65 m,最大潮差 4.61 m,进出长江口的潮量十分可观,洪季大潮达 53 亿 m³,枯季大潮亦有 39 亿 m³。

对于长江口盐水入侵问题曾经引起过不少专家学者的重视[1-9]。由于长江口是多级分汊多口入海的潮汐河口,盐水入侵的时空变化非常复杂,因此很有必要掌握近期南北支断面盐通量状况。前人已对长江口进行大量观测和分析,虽然通过原型观测可以获得宝贵的第一手资料,但是其分析结果的准确性在很大程度上依赖于观测资料的丰富与否,即观测站点布设多少、实测数据量多少。但是在现实中由于原型地域局限性大且观测费用高,所以能获得的观测资料也较为有限,即使是观测到的有限数据也存在很大的片面性,很难全面地反应出长江口盐度场变化情况。另外,原型观测数据的准确性受天气条件、仪器精度等因素的影响也较大。如今随着计算机硬、软件技术的不断完善和应用,三维数值模式作为重要研究手段在河口区域的应用越来越广泛,其很好地弥补了这一缺陷。本文利用三维数值模式,对长江口区域盐度场进行三维数值模拟,并且利用该模式计算得到指定断面潮周期盐通量。如果该模式可行,将有助于掌握长江口区域的盐量变化规律,进而有助于研究分析长江口区域的盐量状况和盐水入侵强度。并且为预测长江口盐水入侵强度和以后在长江口建立相应的挡咸蓄淡工程方案提供重要的科学依据。

1 三维数值模式

1.1 控制方程

在流体不可压缩、Boussinesq 和静力近似下,给出非正交坐标系下河口海岸海洋控制方程组。引入水平正交曲线和垂向 σ 坐标, ξ = ξ(x, y),

η = η(x, y), σ = (Z - ζ) / (H - ζ) 海洋控制方程组是由动量方程、连续方程、温度方程、盐度方程和密度方程组成的:

动量方程:

∂h1 h2 Du1 / ∂t + ∂h2 Du1^2 / ∂ξ + ∂h1 Du1 v1 / ∂η + h1 h2 ∂ωu1 / ∂σ + Du1 (-v1 ∂h2 / ∂ξ + u1 ∂h1 / ∂η - f) = -gDh2 ∂ξ / ∂ξ - (gD^2 h2 / ρ0) ∫ (∂σ / ∂ξ - σ / D ∂D / ∂ξ) dσ + h1 h2 ∂ / ∂σ (Km ∂u1 / ∂σ) + Dh1 h2 Fx (1)

∂h1 h2 Dv1 / ∂t + ∂h2 Du1 v1 / ∂ξ + ∂h1 Dv1^2 / ∂η + h1 h2 ∂ωv1 / ∂σ + Du1 (-u1 ∂h1 / ∂η + v1 ∂h2 / ∂ξ + f) = -gDh1 ∂ξ / ∂η - (gD^2 h1 / ρ0) ∫ (∂σ / ∂η - σ / D ∂D / ∂η) dσ + h1 h2 ∂ / ∂σ (Km ∂v1 / ∂σ) + Dh1 h2 Fy (2)

连续方程:

h1 h2 ∂ξ / ∂t + ∂ / ∂ξ h2 u1 D + ∂ / ∂η h1 v1 D + h1 h2 ∂ω / ∂σ = 0 (3)

温度和盐度输运方程:

h1 h2 ∂θ / ∂t + ∂h2 u1 θD / ∂ξ + ∂h1 v1 θD / ∂η + h1 h2 ∂ωθ / ∂σ = h1 h2 ∂ / ∂σ (Kh ∂θ / ∂σ) + Dh1 h2 Fθ (4)

h1 h2 ∂S / ∂t + ∂h2 u1 SD / ∂ξ + ∂h1 v1 SD / ∂η + h1 h2 ∂ωS / ∂σ = h1 h2 ∂ / ∂σ (Kh ∂S / ∂σ) + Dh1 h2 F_s (5)

密度方程:

ρ_total = ρ_total(θ, S) (6)

式中: θ 为位温, S 为盐度, ρ 为密度, f 为科氏参数, g 为重力加速度, Km 为垂向涡动黏性系数, Kh 为热力垂向涡动摩擦系数[10]。

1.2 模式特点

采用的三维数值模式 ECOM-3i 是在 POM (Princeton Ocean Model)[11] 的基础上发展起来

的,是当今国内外应用较为广泛的河口海岸海洋模式。为了能在研究河口海岸问题时能得到更高的计算精度和局部空间分辨率,网格线则拟合了区域岸线。Chen等^[12]和朱建荣^[13]对它作了一些改进,发展了非正交坐标系下的水平曲线网格。ECOM- τ s特点:差分格式的基本框架为欧拉格式(时间前差、空间中央差),在涡动粘滞系数较小的情况下,尤其在无潮汐混合和层结存在的情况下,模式存在着弱不稳定性。采用预估修正法对模式中科氏力项作半隐式处理,提高了模式的稳定性。基于空间配置 Arakawa C 格式,自由海表面,2.5阶湍流闭合模型求解垂向湍流粘滞和扩散系数^[14-15],水平湍流粘滞和扩散系数基于 Smagorinsky 参数化方法,耦合了完整的热力学方程。

1.3 初始条件和边界条件

流速和水位对外力的响应较快,初始值一般取为零;初始盐度因热力过程反应时间较长,须给出初始的空间分布,初始盐度场由模式计算月份对应的实测资料经客观分析给出。上游边界以通量的形式给出径流量,本文取模式计算月份对应的大通流量,盐度为零。海表面风场由网上下载资料给出(<http://dss.ucar.edu/datasets/ds744.4/data/>),水平经度间隔为 0.5° ,时间间隔为 6 h。长江口外冬季以北风和西北风为主,不考虑海表面蒸发和降雨对盐度的影响。外海开边界水位采用 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1 和 Q1 这 8 个分潮驱动^[16]。

$$\zeta = \zeta_0 + \sum_{i=1}^8 f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_i + u_i) - g_i] \quad (7)$$

式中: ζ 为潮位, ζ_0 为余水位, f 为节点因子, H_i 为振幅, ω_i 为角频率, g_i 为迟角, $V_i + u_i$ 为订正角,它可由具体的年月日求得。

1.4 模式设置

模式计算范围(图 1),包括整个长江口、杭州湾。由于河口地区水流为双向流,而当上游边界以径流量给出的时候只能提供单向流,上游边界应尽可能取得远点。本文将上游边界延伸到江阴以上 155 km ^[17]。模式采用水平曲线网格,水平方向上分为 154×267 个网格。考虑到长江口是主要研究区域,利用水平曲线网格自动生成技术对长江口南北支区域进行网格加密,加密区域网格最小分辨率 100 m 左右;口内其余区域分辨

率 100 m 至 800 m 不等,口外相对比较疏,最大为 10 km 左右。垂向采用 σ 坐标,均匀地分为 5 层,有利于综合考虑径流、潮流、混合、风应力等因素。计算时间步长取 10 s 。

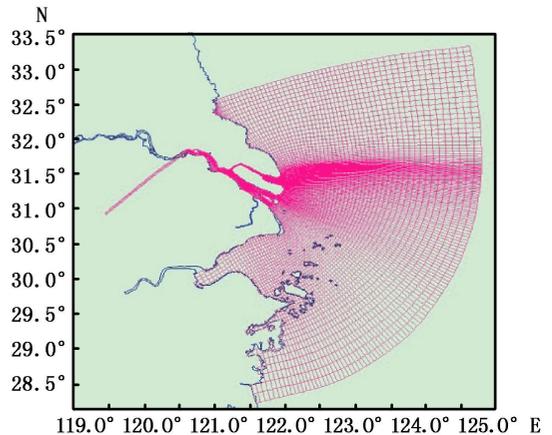


图 1 长江口网格图

Fig 1 Grid of the Yangtze River Estuary

2 结果与分析

2.1 流速、流向、盐度验证

利用 2003 年 2 月的现场观测资料(站点见图 2),对三维数值模式 ECOM- τ s 的计算结果进行验证。上游边界条件由大通实测站的径流量资料给出(图 3)。模式从 2002 年 12 月 1 日开始运行,这是因为盐度的初始场调整需要较长时间。2002 年 12 月长江径流量在 $17\,400 \sim 22\,400 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间,2003 年 1 月 1 日径流量为 $21\,900 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,至月底下降至 $15\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,2 月经流量在 $14\,000 \sim 21\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 之间。计算结果分析从 2003 年 2 月 1 日开始。

2003 年 2 月在长江口区域作一次现场观测,测点共有 4 个(图 2),分别是站点 SC01、SC02、SC03、SC04,对应时间是 2 月 17-18 日和 18-19 日。

站点 SC01 位于北支,验证结果见图 4。涨潮流速大于落潮流速,但涨潮历时明显小于落潮历时,最大涨潮流速约为 1.5 m/s 左右,由于底摩擦的作用,底层流速比表层小。表、中、底盐度都在 $15 \sim 20$ 之间,垂向盐淡水混合均匀,其流速、流向和盐度计算值与观测值相比吻合良好。站点 SC02 位于南支北港,长兴岛上端,验证结果见图 4。涨潮流速小于落潮流速,且涨潮历时明显小

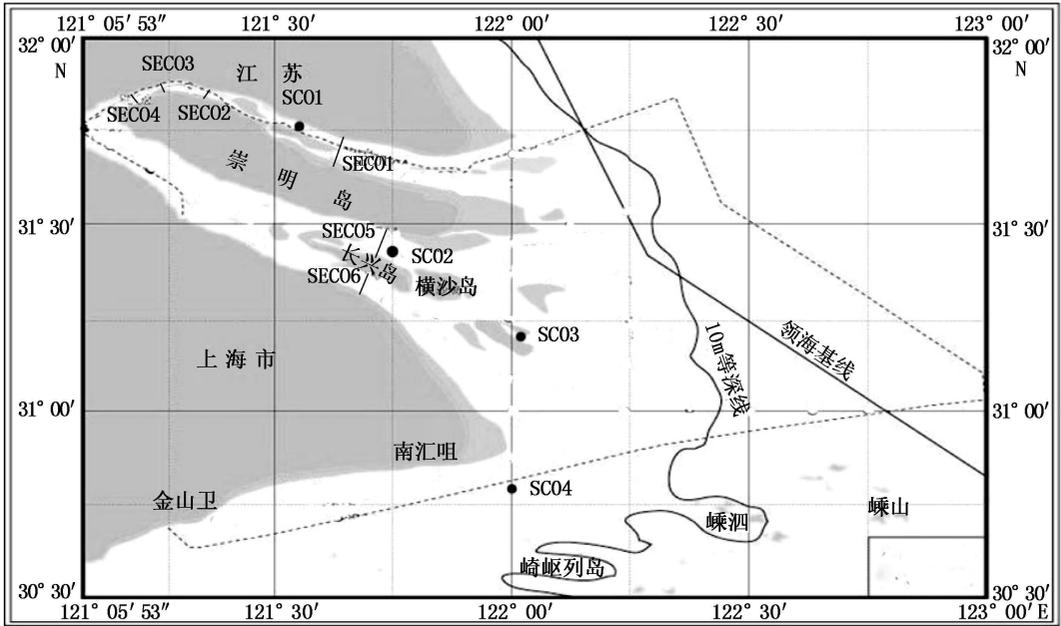


图 2 长江口观测站位和断面布置图

Fig 2 Stations of the Yangtze River Estuary

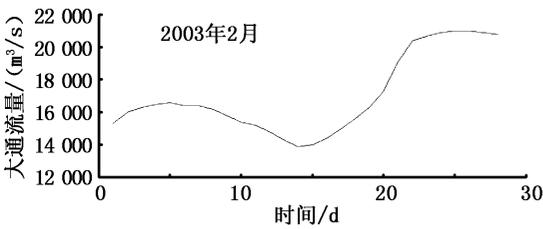


图 3 2003年 2月径流量变化图

Fig 3 Variation chart of runoff in February 2003

于落潮历时, 底层流速小于表层。表、中、底盐度在 0~3 之间波动, 其流速、流向和盐度计算值与观测值相比吻合良好。站点 SC03 位于南支北槽, 验证结果见图 5。涨潮流速小于落潮流速, 且涨潮历时明显小于落潮历时, 底层流速小于表层。表层盐度在 5~15 之间波动, 底层盐度在 11~21 之间, 底层盐度明显大于表层, 存在盐水楔现象, 其流速、流向和盐度计算值与观测值相比吻合良好。站点 SC04 位于南汇边滩下方, 验证结果见图 5。涨、落潮流速较为接近, 落潮历时略大于涨潮历时, 底层流速小于表层。表、中、底盐度在 16~22 之间, 混合较为均匀, 流速、流向和盐度计算值与观测值相比吻合良好。

从总体来说, 模式对 2003 年 2 月观测资料作了较好的验证, 计算值与观测值吻合良好。

2.2 盐度场

本文运用模式模拟了 2003 年 2 月份大小潮时期长江口盐度场 (图 6), 长江口枯水季节, 外海盐水入侵十分明显, 盐度变化的时空分布十分复杂, 北支盐水入侵已到达崇头附近。在该月大潮时期, 南、北港受外海盐水入侵已到达长兴岛中上区域。分析盐度场, 河槽北侧的盐度普遍要高于南侧的。在受到外海盐水直接入侵的水域, 高盐水则被涨潮流带往上游。由于科氏力作用, 河槽中的流路产生分歧, 河槽北侧涨潮流占优势, 由此多形成涨潮槽。所以在河槽的北侧高盐水上溯的距离也比南侧更大, 而南侧受到淡水冲淡作用明显, 因此盐度北侧高而南侧低。底层盐水入侵的强度要高于表层, 大、小潮盐水入侵强度有较大区别。这是由于水体的密度随着含盐量的增加而升高, 在异重流的驱动下, 高盐水沿着底部上溯, 而表层则受到冲淡水作用明显。

2.3 盐通量估算结果

模式对 2003 年 2 月观测资料作了较好的验证, 计算值和观测值吻合良好。说明该三维数值模式计算长江口断面盐通量的可行性。利用该模式计算长江口 2003 年 2 月潮周期盐通量, 表 2 为 2003 年 2 月 1-2 日、7-8 日长江口大、小潮期间,

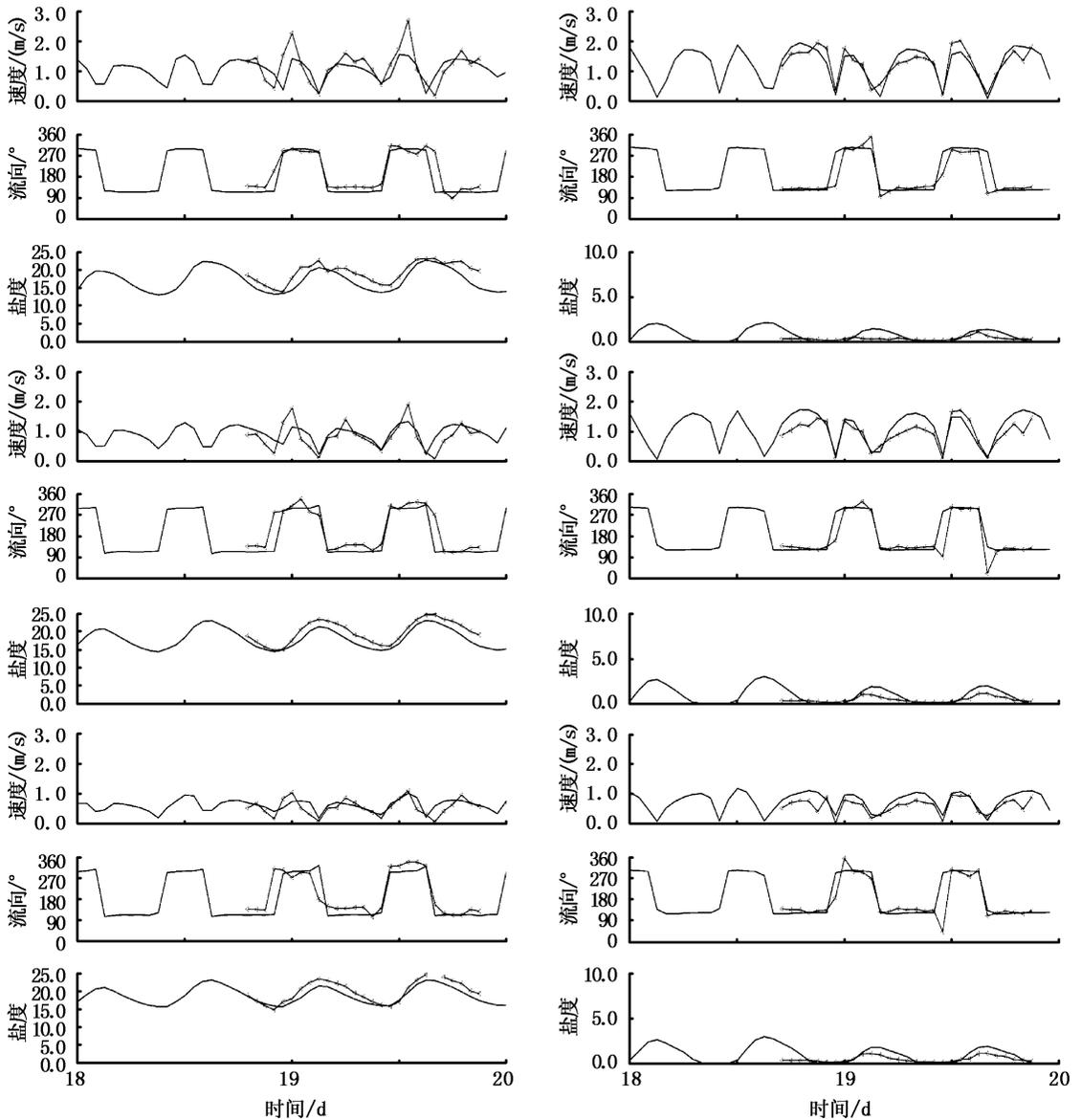


图 4 站点 SC01(左)和站点 SC02(右),表层、中层和底层流速、流向和盐度计算值(实线)和观测值(点划线)的比较

Fig 4 Verification of velocity, direction and salinity in the surface, intermediate and bottom layers

两个连续潮周期内盐通量(河道截面见图 2)。SEC01 位于北支中段,断面盐量相当巨大,SEC02 位于北支上端的青龙港与灵甸港之间,较 SEC01 盐通量有明显减少; SEC03、SEC04 位于崇头,仍有不少盐量进入崇头,大潮期间尤为明显,这势必会对南支造成影响; SEC05 位于北港,长兴岛中段, SEC06 位于南港小九段附近。长江口大潮期间的潮周期断面盐通量明显大于小潮期间的潮周期断面盐通量,且外海向北支输送盐量明显大于南支。这是因为枯水季节,径流量较小,外海盐水入侵明显,而北支上口河道与主槽

基本垂直,进入的径流量极少,加之北支河槽呈明显的喇叭型,加大了潮汐的作用。计算结果显示枯水季节的大潮期间外海向北支输送了巨量的盐分,有必要对北支进行综合整治规划,拟建挡咸蓄淡工程方案。

3 结论

利用基于非正交曲线网格坐标系下的三维数值模式 ECOM_{3si} 建立了一个高分辨率的长江河口水动力耦合盐度数值模式。该模式模拟了长江河

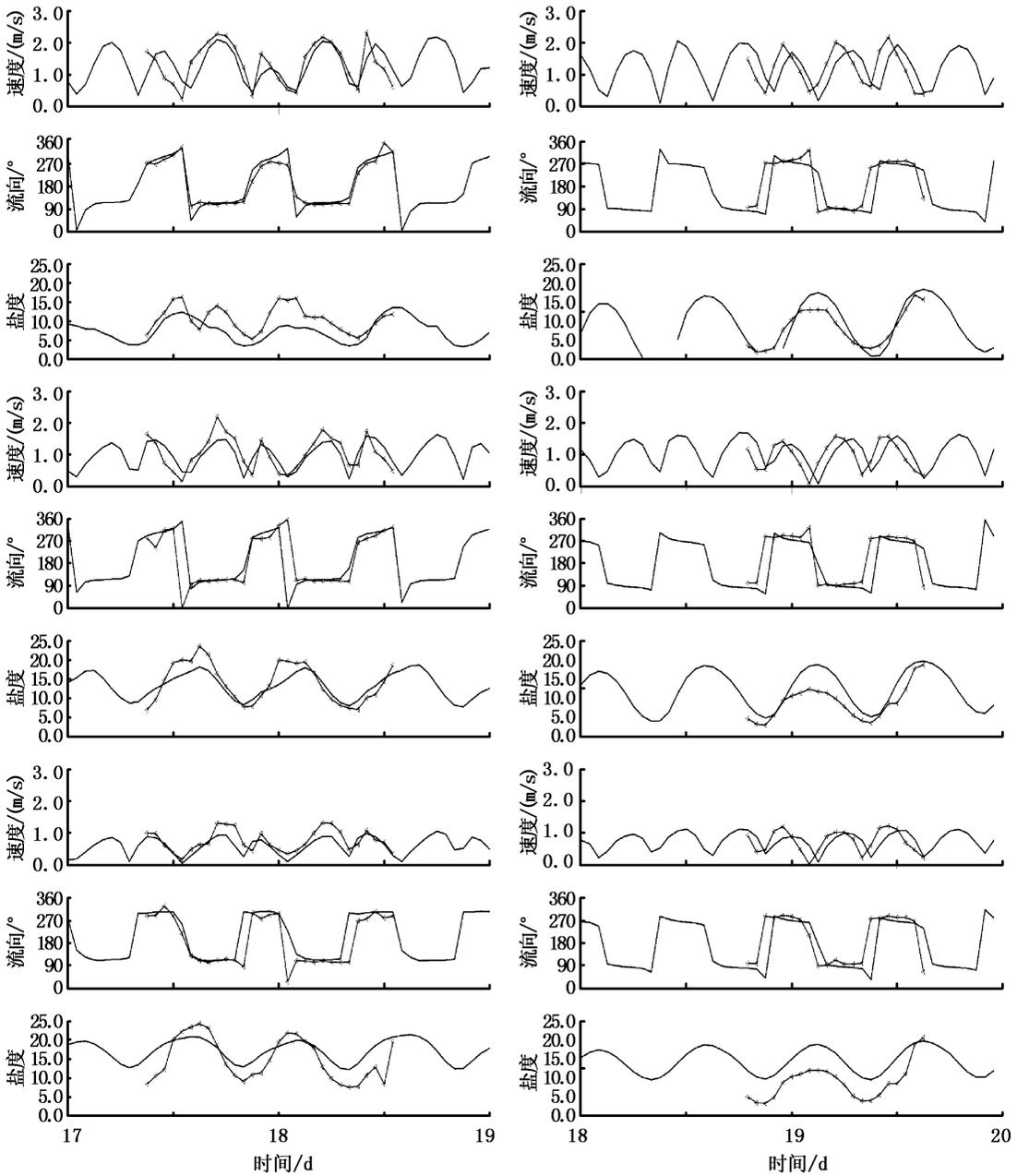


图 5 站点 SC03(左)和站点 SC04(右),表层、中层和底层流速、流向和盐度计算值(实线)和观测值(点划线)的比较

Fig 5 Verification of velocity direction and salinity in the surface intermediate and bottom layers

表 1 2003年 2月长江口现场观测站位及观测时间段

Tab. 1 Surveying stations and date in the Yangtze River Estuary on Feb., 2003

	经度	纬度	观测时间 (h)
SC01	121°34.316'	31°45.601'	2003/02/18 19:00—2003/02/19 21:00 (27h)
SC02	121°44.285'	31°27.156'	2003/02/18 17:00—2003/02/19 19:00 (29h)
SC03	122°03.055'	31°13.256'	2003/02/17 9:00—2003/02/18 13:00 (29h)
SC04	122°00.000'	30°46.100'	2003/02/18 19:00—2003/02/19 15:00 (21h)

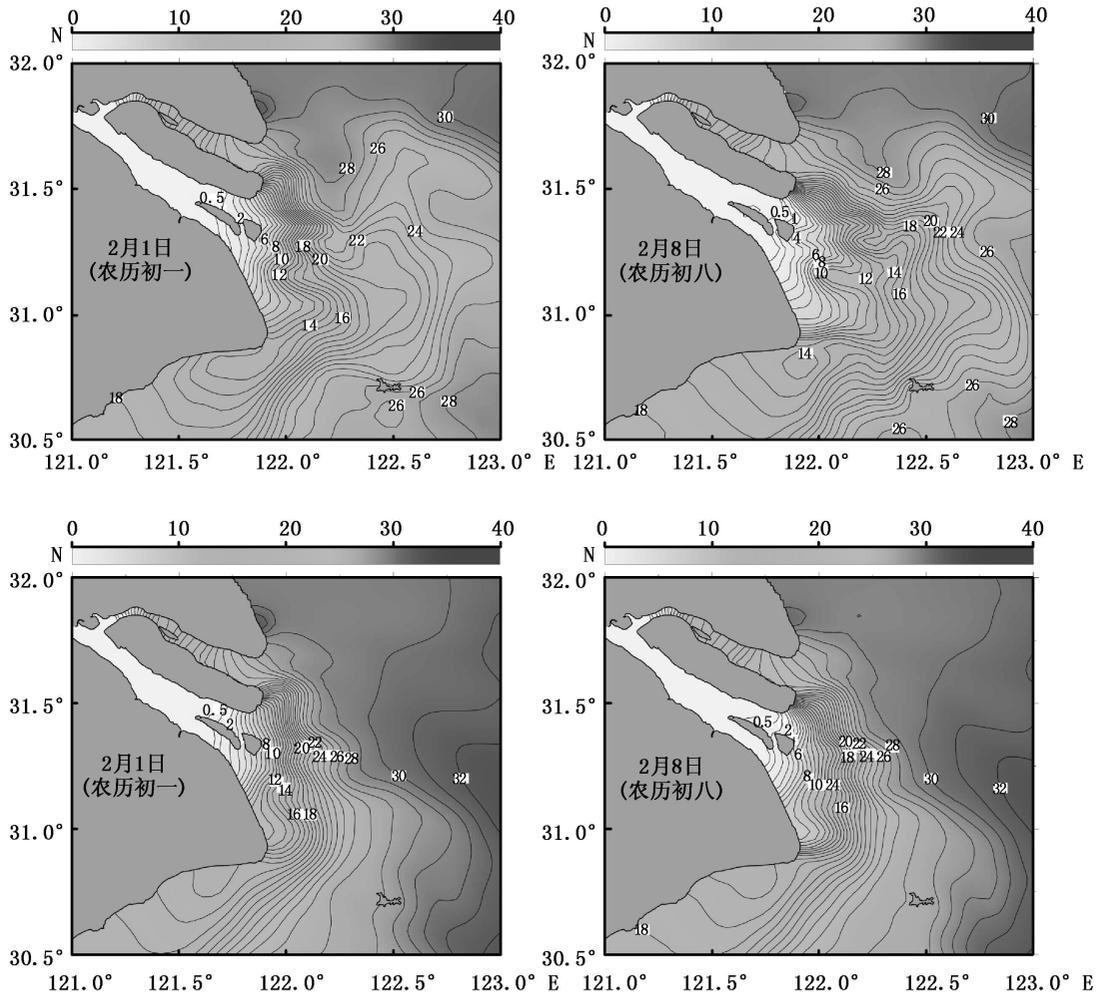


图 6 大小潮时期长江口表层和底层盐度场

Fig 6 Distribution of salinity field in the surface and bottom layers

左上、右上分别表示 2003 年 2 月 1 日 (农历初一)、8 日 (农历初八) 表层盐度场分布;
左下、右下分别表示 2003 年 2 月 1 日 (农历初一)、8 日 (农历初八) 底层盐度场分布。

表 2 潮周期盐通量

Tab 2 Salt fluxes of spring-neap tidal cycle

	北支		崇头		南支	
	SEC01	SEC02	SEC03	SEC04	SEC05	SEC06
大潮 (t)	3 333 600	957 600	-270 000	-71 640	1 364 400	1 512 000
小潮 (t)	205 200	82 800	-36 360	-12 960	309 600	28 800

口盐水入侵的三维特征,表层盐度较低而底层盐度较高。模式能较好地反应盐水入侵的空间分布规律,以及大小潮之间的差别。

三维数值模式验证良好,运用该模式计算可以得到指定断面连续潮周期内盐通量,其断面盐通量情况能较好地反映了长江口的盐量变化情况,可以为以后在长江口拟建挡咸蓄淡工程方案提供重要的科学依据。由于不会受到现场观测

资料的限制,模式所选取的断面及时间段不受限制,能够更为全面地反应长江口盐量变化状况。

该模式虽然基本可靠,但是由于长江口附近海域运动状况变化是复杂多变的,因此在以后利用该模式来模拟长江口流域盐度场时应该视具体情况更改变化计算模式各参数的设置,也包括网格划分和分辨率调节、模式的物理参数、时间步长、初始盐度场等。

参考文献:

- [1] 沈焕庭,茅志昌,谷国传,等.长江口盐水入侵的初步研究—兼谈南水北调[J].人民长江,1980,(3):20-26.
- [2] 韩乃斌.长江口南支河段氯度变化分析[J].水利水运科学院,1983,(1):74-81.
- [3] 顾伟浩.长江口南北槽盐水入侵—兼谈开挖北槽为深水航槽[J].水运工程,1985,(2):1-3.
- [4] 徐建益,袁建忠.长江口南支河段盐水入侵规律的研究[J].水文,1994,83(5):1-6.
- [5] 谷国传,胡西方.长江口外高盐水入侵分析[J].东海海洋,12(3):1-11.
- [6] 肖成猷,沈焕庭.长江口盐水入侵影响因子分析[J].华东师范大学学报:自然科学版,1998,(3):74-80.
- [7] 茅志昌,徐彭令.长江河口咸水入侵规律及淡水资源利用[J].地理学报,2000,55(2):243-250.
- [8] 茅志昌,沈焕庭.长江口北支盐水倒灌南支对青草沙水源地的影响[J].海洋与湖沼,2001,32(1):58-66.
- [9] 沈焕庭.长江河口物质通量[M].北京:海洋出版社,2001:17-21.
- [10] 朱建荣.海洋数值计算方法和数值模式[M].北京:海洋出版社,2003.
- [11] Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers [J]. Atmos Sci 1974, 33: 1791-1896.
- [12] Chen C, Zhu J, Ralph E, et al. Prognostic modeling studies of the Keweenaw Current in Lake Superior. Part I: formation and evolution [J]. J Phys Oceanogr 2001, 31 (2): 379-395.
- [13] 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): 364-388.
- [14] Galperin B, Kantha L H, Hassid S, et al. A quasiequilibrium turbulent energy model for geophysical flows [J]. Atmos Sci 1988, 45: 55-62.
- [15] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in three-dimensional Coastal Models [M]. American Geophysical Union, Coastal and Estuarine Sciences 1987: 1-161.
- [16] 张衡,朱建荣,吴辉.东海黄海渤海8个主要分潮的数值模拟 [J].华东师范大学学报:自然科学版,2005,(3):71-78.
- [17] 吴辉,朱建荣.长江口北支倒灌盐水输送机制分析 [J].海洋学报,2007,29(1):17-24.