

Research on the Salinity Distribution and the Influence of Saltwater Intrusion in Yangtze River

Yuxin Zhu*, Bin Zhou, Junjie Zhao

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering M.O.T., Tianjin, China
Email: zhuyx500@sina.com.cn

Received: Dec. 17th, 2013

Abstract

It applies hydrodynamic Model-SELFE to complete simulation system of 3D current-salinity in Yangtze River. The paper introduces S-Z coordinates in Vertical Hybrid Coordinates, and compares the computational results with measured data, showing that the salinity of North Branch has always been higher than that of South Branch, and the salinity change rates are also more than that of South Branch.

Keywords

Yangtze River; Salinity; Vertical Hybrid Coordinates; Three-Dimensional Numerical Model

盐水入侵对长江口盐度分布及影响研究

朱宇新*, 周 斌, 赵俊杰

交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津, 中国
Email: zhuyx500@sina.com.cn

收稿日期: 2013年12月17日

摘 要

利用SELFE模型建立长江口水动力盐度三维数值模型, 重演了长江口水域潮流过程与盐度分布情况, 文中简要介绍了S-Z混合坐标在垂向上的分层方法, 并对模拟结果进行了验证、分析, 说明在长江口北支盐度始终高于南支, 且北支盐度变化幅度也大于南支。

*通讯作者。

关键词

长江口；盐度；混合坐标系统；三维模型

1. 引言

沿海河口区域的环境问题中以水环境问题最为突出，尤其是受潮汐影响的河流，由于受到多种因素的影响，使得研究更加复杂。长江是我国的第一大河，径流与潮流相互消长非常明显，从而导致了在长江口河口段河槽分汊多变，在口门处具有三级分汊、四口入海的复杂地形。在长江口口门处受到东海前进潮波与黄海旋转潮波的影响，口门处接纳了大量的外海高盐度海水，使得河口区淡水水质受到影响，严重影响城乡居民的供水、工业生产用水及灌溉用水。因此研究口门处盐度分布对河口地区人民的生活用水与工农业用水具有重要意义。

2. 数值模拟方法

本文所使用的 SELFE (Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element)模型[1]，是哥伦比亚环流模型的数值模拟部分，主要用于对河口水动力与盐度进行数值模拟；它采用无结构网格的正压/斜压模式对海洋要素进行求解、计算；SELFE 在算法上采用的是垂向混合坐标下半隐欧拉-拉格朗日有限元方法。

控制方程 Boussinesq 近似下的流体静力学方程式[2]，包括质量守恒(三维、沿水深积分)，动量守恒及温度盐度方程：

$$\nabla \cdot \vec{U} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \vec{U} dz = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{D\vec{U}}{Dt} = A_f - g\nabla\eta + \left(\nu \frac{\partial \vec{U}}{\partial z} \right) \quad (1.3)$$

其中： $A_f = -f\mathbf{K} \times \vec{U} + \alpha g \nabla \hat{\psi} - \frac{1}{\rho_0} \nabla P_A - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \nabla \rho dz + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U})$ 。

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_z \quad (1.4)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho_0 C_p} + F_h \quad (1.5)$$

其中 t ——时间(s)； $\eta(x, y, t)$ ——自由表面高程(m)； $h(x, y)$ ——水深(m)； $\vec{U}(x, y, z, t)$ ——水平流速，流速分量为 (u, v) ，单位 (ms^{-1}) ； w ——垂向流速 (ms^{-1}) ； f ——柯氏力参数 (s^{-1}) ； $\hat{\psi}(\varphi, \lambda)$ ——潮汐势(m)； α ——地球弹性因子 (≈ 0.69) ； $\rho(x, t)$ ——水的密度； $P_A(x, y, t)$ ——大气压强 (Nm^{-2}) ； S, T ——水的盐度与温度(盐度单位 psu，温度单位 $^{\circ}\text{C}$)； ν ——垂向涡粘系数 $(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ ； u ——水平涡粘系数 $(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ ； κ ——垂向温盐紊动扩散系数 $(\text{m}^2\text{s}^{-1})$ ； F_x, F_h ——输运方程的水平扩散项； Q ——太阳辐射吸收率 (Wm^{-2}) ； C_p ——水的比热 $(\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1})$ 。

SELFE 在水平方向上采用无结构化网格，在垂向上使用混合坐标——S 坐标与 Z 坐标相结合。在垂向上，定义平均海平面为 Z 轴的原点，S 坐标层位于 Z 坐标层之上(如图 1 所示)，S 坐标层与 Z 坐标层以

层 为分界面。采用这种坐标有利于在保证垂向分辨率的基础上减少斜压梯度,从而提高盐度的计算精度。

3. 模型及参数的选取

模拟范围如图 2 所示, 区域范围是由长江口的河口段与口外海滨段组成, 包括整个长江口, 东起江阴段洪季潮流界, 西至东经 122°23'的口门外海区, 南边界取自上海南汇边滩处, 北至吕四。

对整个计算区域采用无结构网格进行剖分, 由于口门处是盐水入侵与水动力研究的重点区域, 所以在该处的剖分较为细密。全部计算区域共生成 29,959 个三角形网格, 15,736 个网格结点(如图 3 所示)。水下地形采用 2001 年海军司令部航海保证部海图。

三维垂向上采用混合坐标系统, 共分 12 层, 其中在近底分有 2 层 Z 坐标层, 目的是为了滤去极深地形; Z 坐标与 S 坐标以 $\sigma = 0$ 为分界线, 在 Z 坐标层之上分有 10 层 S 坐标层。

开边界采用水位控制, 上游为 2002 年 9 月大通水文站的实测流量, 外海水位边界资料由东中国海潮波模型提供。在计算过程中不给定盐度初始场, 只给出盐度边界条件, 采用“冷启动”的方法进行模拟; 主要计算参数如表 1 所示。

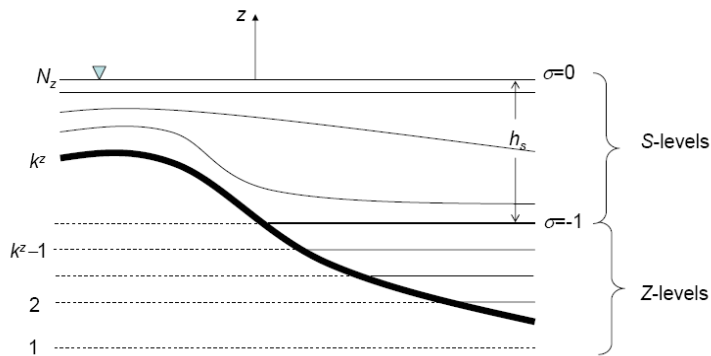


Figure 1. Vertical hybrid coordinates
图 1. 混合坐标示意图

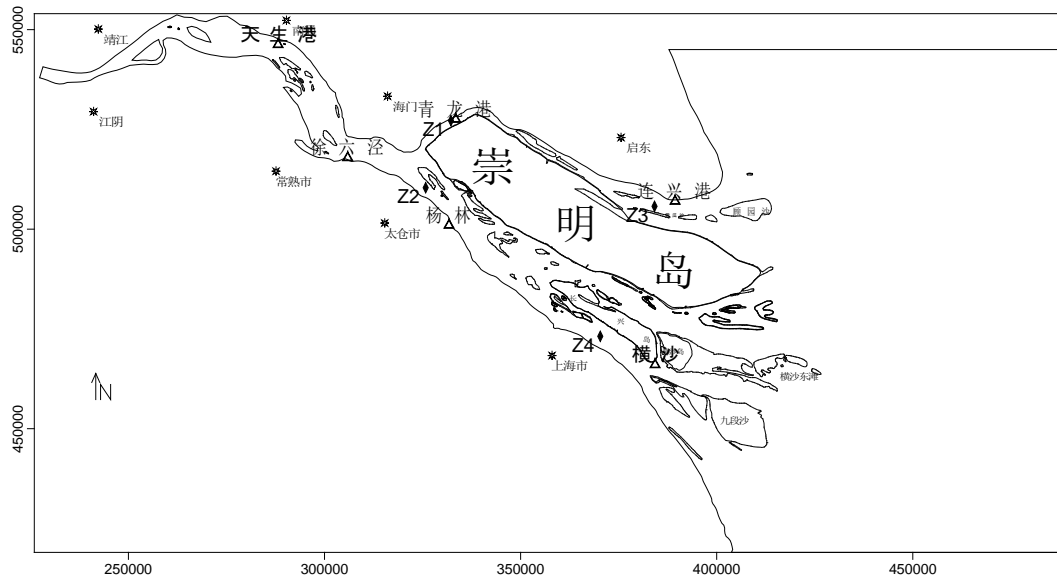


Figure 2. Research domain and verification
图 2. 研究范围及验证站位布置

4. 验证计算及结果分析

4.1. 潮位与流速验证

水文资料采用 2009 年 9 月至 10 月的实测资料。计算中共给出了六个潮位验证点，分别是上游河段处的天生港站、徐六泾站、长江口南支水道中的杨林站、横沙站、长江口北支中的青龙港站和连兴港站。文章中仅给出了青龙港站及横沙站水位验证结果(如图 4、图 5 所示)，从结果可以看出在由于青龙港断面

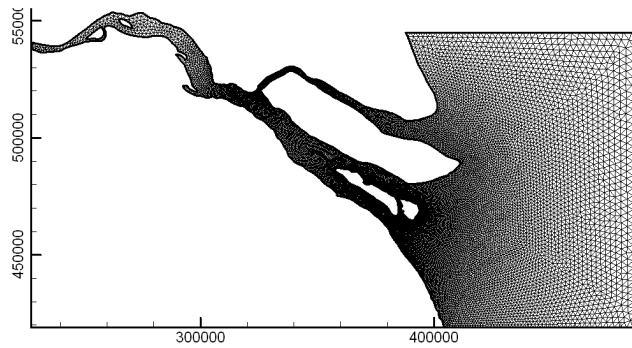


Figure 3. Computational mesh of research domain
图 3. 计算网格示意图

Table 1. Selected coefficient by using mathematical model
表 1. 三维模型参数

参数	拖曳力系数 C_{2D}	Smagorinsky	柯氏力 f	显、隐式结构因子 θ	临界水深(m)
数值	0.025	0.5	1.05×10^{-4}	0.6	0.02

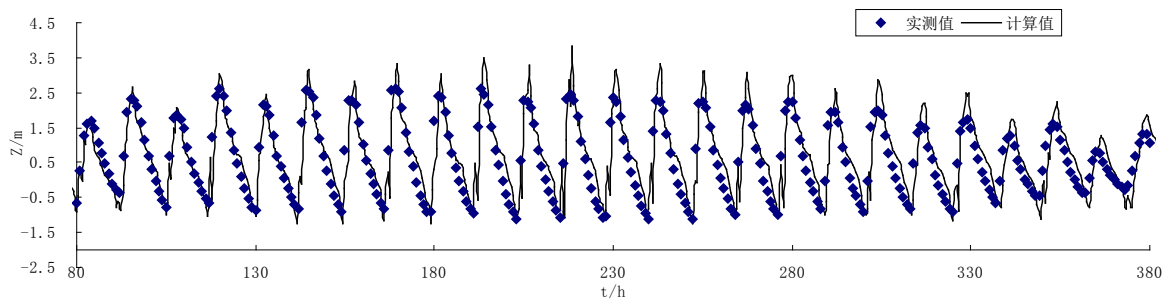


Figure 4. Verification of elevation process of Qinglonggang
图 4. 青龙港站潮位验证

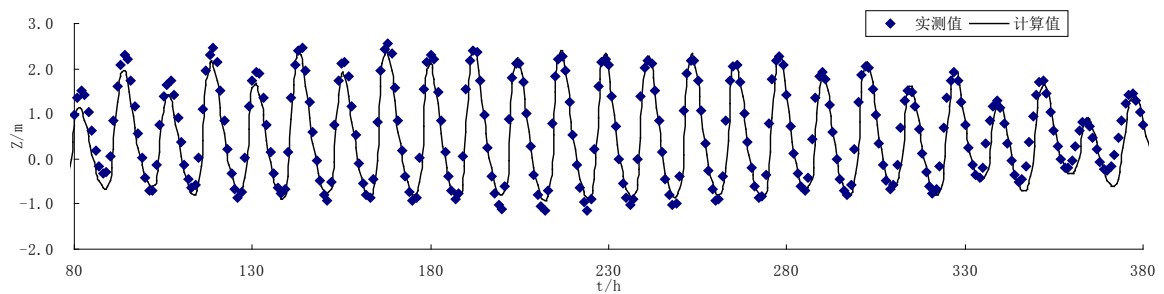


Figure 5. Verification of elevation process of Hengsha
图 5. 横沙站潮位验证

处收缩率最大，河面窄浅，平均宽度只有 2.3 km，深槽最大水深只有 -2 m，水深过浅，阻水作用明显，使得该处槽率难以选取，但从验证的水位结果中不难看出涨潮历时明显小于落潮历时，这与实际情况吻合；在其他各测站处整个潮位过程与实测资料都相当吻合。

4.2. 流速验证及流场特征

选取 Z1、Z2、Z3、Z4 四个测站的实测资料对大中小潮期间的流速、流向进行验证。文中仅给出了青龙港与长兴岛附近两个测站 Z1、Z4 的表层流速、流向验证图。流速的正负代表潮流的涨落，落潮为正值；从验证图中可见，在青龙港附近落潮流占优，涨潮历时明显小于落潮历时，且此处河窄滩浅，流速在此处出现偏差，在图中表现为验证曲线出现抖动现象[3] [4]；测点 Z4 位于长江口南支南港落潮槽中，流速、流向与实测值吻合较好，在表层大潮涨急时刻流速约为 1.5 m/s，落急流速略大于涨急流速，约为 2m/s，落潮历时显著大于涨潮历时，长约 3 小时；(图 6, 7)

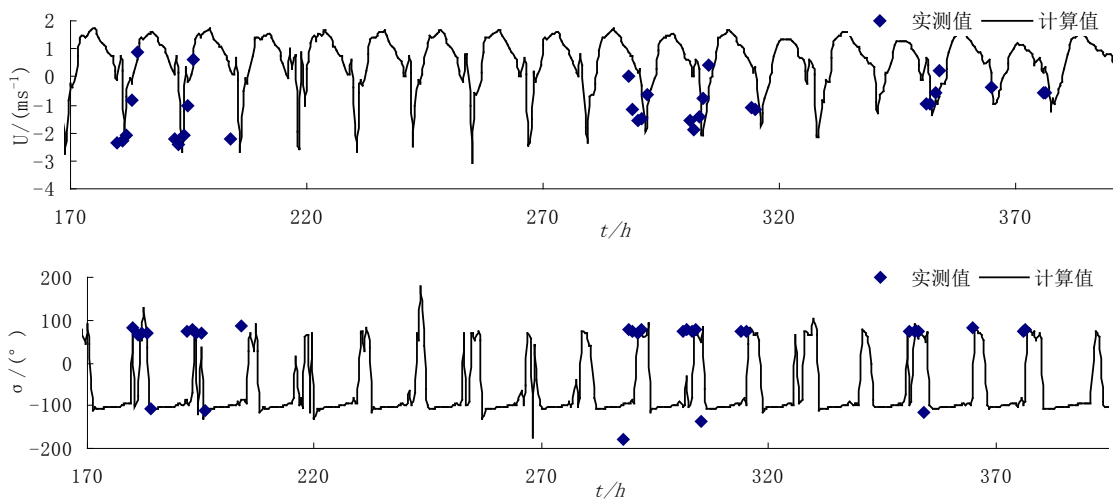


Figure 6. Z1 station velocity magnitude and direction

图 6. Z1 流速、流向验证

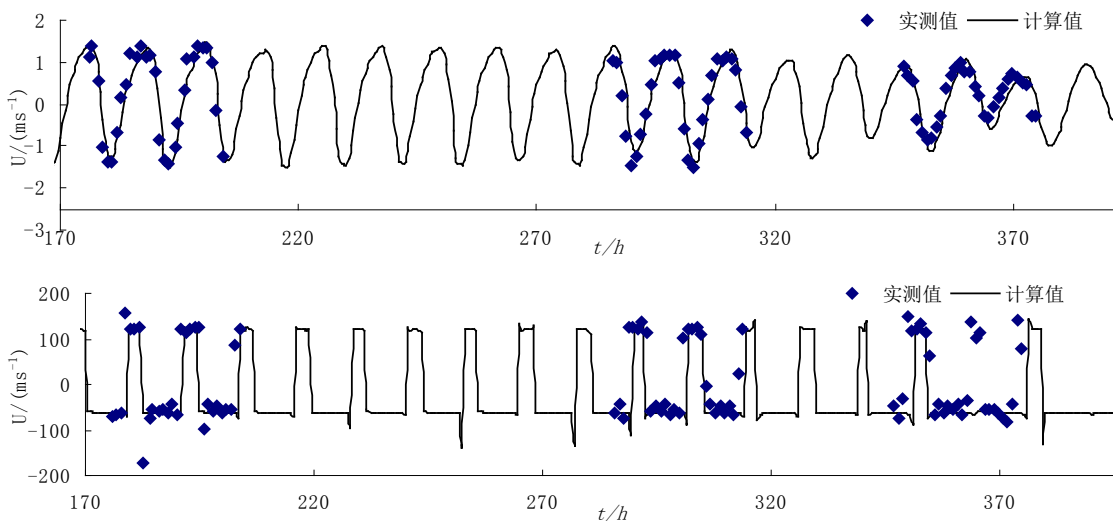


Figure 7. Z4 station velocity magnitude and direction

图 7. Z4 流速、流向验证

4.3. 盐度验证

文中对测站 Z3 与 Z4 的表层盐度进行了验证，其中 Z3 位于北支口门处，此处涨落潮历时相当，盐度随着涨落潮变化也呈周期性变化，盐度过程线与实测资料的相位变化及过程变化基本上一致[5] [6]，从结果分析，可以看出在大潮时由于潮流作用较强，北支中同一测点的盐度变化较大；在南支中由于洪季冲淡水的作用，Z4 测点的含盐度几乎为零，模拟的变化幅度在 0.04‰以下(图 8~11)。

小潮时的验证与大潮相比存在不同之处。由于在大潮期间潮流的作用大于径流的作用，尤其在北支中这种现象更明显，使得北支中同一断面在同一时刻的含盐度相近；而在小潮期间，上游径流作用明显，

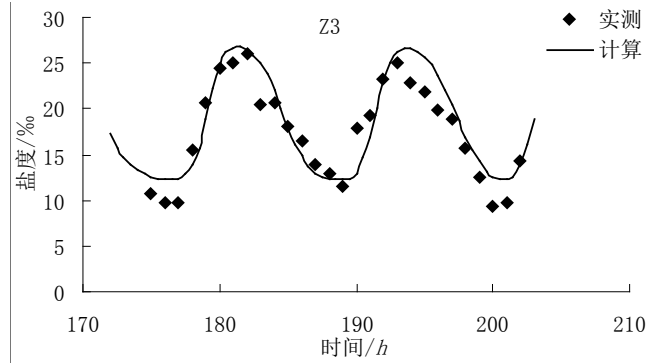


Figure 8. Z3 station salinity of spring tide
图 8. Z3 大潮时盐度验证

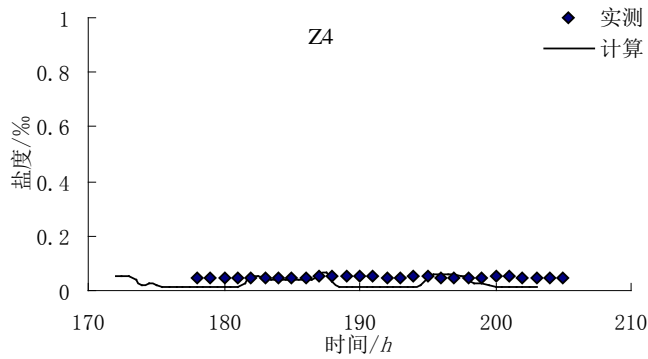


Figure 9. Z4 station salinity of spring tide
图 9. Z4 大潮时盐度验证

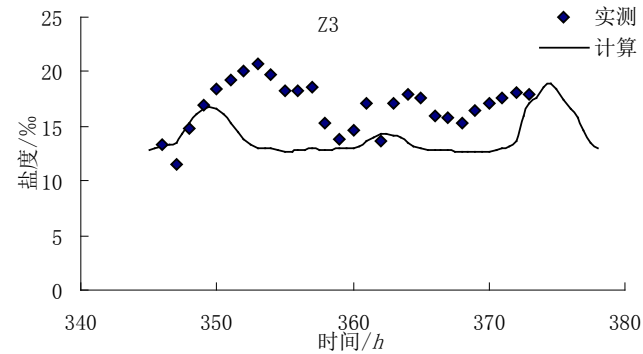


Figure 10. Z3 station salinity of neap tide
图 10. Z3 小潮时盐度验证

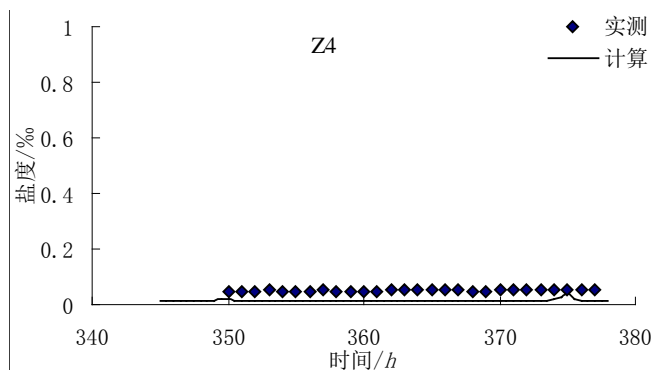


Figure 11. Z4 station salinity of neap tide

图 11. Z4 小潮时盐度验证

冲淡水的影响使得口门处含盐度降低。在计算过程中由于淡水在南北支中分流比存在差异，所以出现小潮时模拟的盐度偏小的现象(图 12)。

由于在整个模拟过程中长江口南支盐度值较小，变化不明显，所以文中对北支测点 Z3 表层与低层的盐度过程进行分析比较，从图中可以看出在长江口北支，由于涨潮流与落潮流历时相差不大，底层盐度波动与表层盐度波动幅度一致，但存在相位差。通过比较发现长江口口外盐度最大值、最小值发生在涨憩前后和落憩前后某一时刻，在涨潮时涨潮流向上，因底部摩擦力的作用，底层流速小于表层流速，海水含盐度在表层比底层大，随着潮流继续上溯，底层海水含盐度慢慢升高，表现为底层含盐度在涨潮时落低于表层；而在落潮过程中，同样由于表层的落潮流大于底层，表层的高盐度海水先于底层的海水下溯，表现为底层含盐度在落潮时高于表层。

4.4. 长江口盐度场分布特征

在长江口北支含盐度远大于南支，且北支入海口的含盐度一直很高，基本保持在 20‰以上，高盐水随着涨潮流上溯到北支上游，在青龙港附近的最高盐度有 0.2‰，虽然模拟的季节为洪季，径流量较大，阻止了北支高盐度海水倒灌南支，但从图中可以看到从南北支分流口仍然有部分极低盐度的海水倒灌，倒灌入南支的海水随着水流，顺着深槽方向向南支下游流出，因此在南支主槽与新桥通道中出现了低盐度的水流，其含盐度在 0.05‰左右；水流继续向下游时由于稀释作用含盐度逐渐减小。

从表层和底层的盐度分布图可以看出，表层与底层的等盐度线分布相似，在北支中由于径流作用不明显，涨、落潮历时相近，所以在同一处盐度的垂向分布基本一致，没有明显的盐水楔现象；在南支下游处，由于底部摩擦力的作用，表层流速比底层流速大，在涨憩时，表层的高盐度等值线比底层的等值线向上游伸的远，而在落憩时则出现相反的情况，在整个过程中表层等盐度线变化幅度大于底层的变化幅度(图 13)。

5. 小结

SELFE 模型在长江口的模拟计算中较好地重演了长江口水域潮流过程及盐度分布情况，其在盐度场分布上有着独特的优势，在垂向上使用混合坐标——S 坐标与 Z 坐标相结合的方法从而保证整个计算区域在浅水与深水处都有较高精度。在整个模拟过程中，由于受到上游冲淡水的影响，海水含盐度从外海向口门处逐渐减小；长江口南北支水道中，在同一断面上北支海水含盐度明显高于南支，且在一个潮周期内北支盐度变化幅度也大于南支的变化；在北支中，同一测点上的盐度在垂向上变化不大，但由于底部摩擦力的作用会使得底部高盐度海水上溯及下泄速度都比表层慢，在盐度垂向分布图中表现出存在相

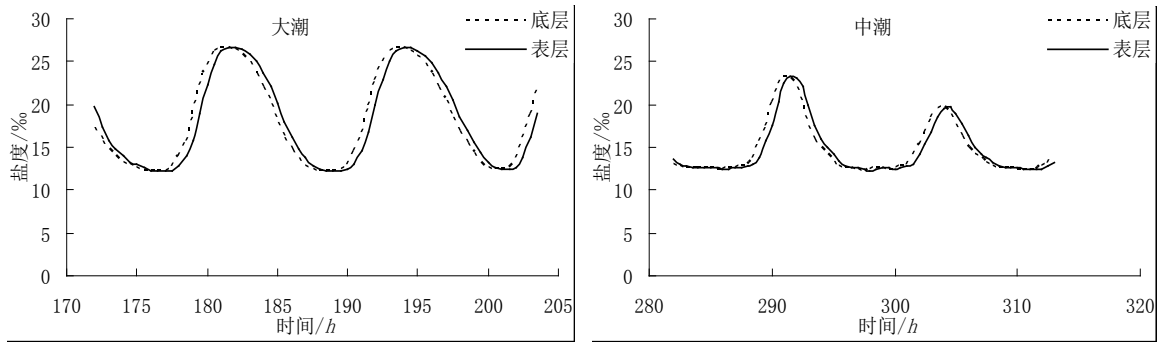


Figure 12. Z3 station comparison results of salinity
图 12. Z3 站点表层与底层盐度比较

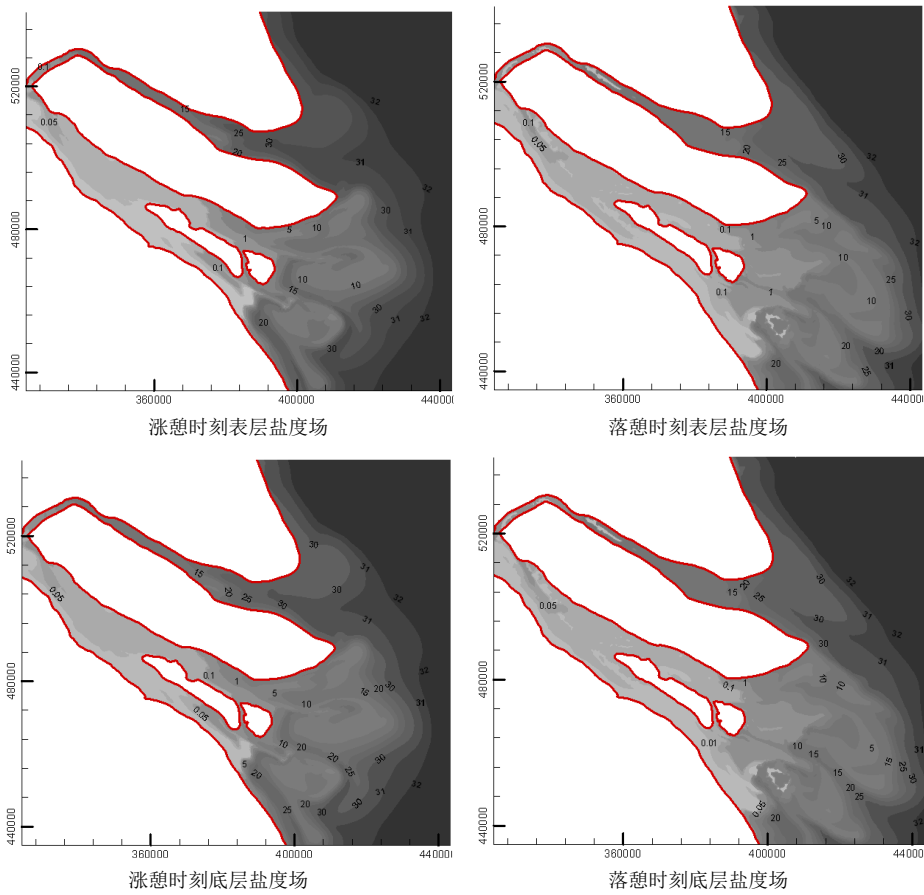


Figure 13. The contour map of surface and bottom layer in Yangtze River
图 13. 表层与底层盐度场分布图

位差，模拟结果与实际情况较为吻合。

另外由于北支受到冲淤以及人类改造活动的影响，河势仍在继续恶化，河槽容积逐减，潮波变形，出现涌潮，潮差增大，落潮分流比减少的趋势还在延续，盐水对南支倒灌现象将会更加严重。尤其在枯水季节大潮时长江径流量小，倒灌水量对南支的影响不容忽视。

盐水入侵危及淡水资源的充分利用，直接影响上海周边区域乃至长三角地区经济的可持续发展，因此，有必要在沿江口门合理布点监测水质，一旦发生盐水入侵时沿江涵闸应及时关闸停止引水。同时要

加强盐水入侵问题的研究，为经济建设服务。

参考文献 (References)

- [1] Ocean Model homepage: <http://stommel.tamu.edu/>
- [2] 张银龙, Baptista, A.M. (2008) SELFE: 半隐式欧拉-拉格朗日有限元大跨度海洋环流模型. *海洋模型*, **21**, 71-96.
- [3] 陶建峰 (2006) 河口、海岸三维斜压水流数值模式研究. 河海大学, 南京.
- [4] 朱建荣 (2003) 海洋数值计算方法和数值模式. 海洋出版社, 北京.
- [5] 郑金海, 褚裕良 (2001) 长江河口盐淡水混合的数值模拟计算. *海洋通报*, **4**, 1-10.
- [6] 罗小峰 (2003) 长江口水流盐度数值模拟. 水利科学研究院, 南京.
- [7] 沈建强 (2007) 长江南支苏州江段盐水入侵问题的研究. 江苏水利.