

连云港港主体港区水交换三维数值模拟

王兴刚¹, 董敏², 熊伟³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
3. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 利用基于有限体积法的三维海洋数值模型 FVCOM, 建立了连云港浅滩海域的三维潮流数值模型和对流扩散模型。运用对流扩散模型, 对连云港港主体港区的保守物浓度进行三维模拟计算, 并对港池的三维水交换特征进行分析。结果表明, 港池口门处的水交换能力最强, 并向港池底部逐渐减小, 港池表、底层水交换能力差别很小, 主体港区的平均滞留时间、半交换时间和冲洗时间分别约为 13、5、84 d。

关键词: 连云港港; 三维数值模拟; 对流-扩散; 水交换; 平均滞留时间

中图分类号: P 731.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0092-08

Three-dimensional numerical simulation of water exchange in main port of Lianyungang port

WANG Xing-gang¹, DONG Min², XIONG Wei³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
3. Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Based on the three-dimensional ocean numerical model (FVCOM) in the theory of finite volume method, we establish the three-dimensional tidal model and convection-diffusion model in shallow waters of Lianyungang. With the advection-diffusion model, we calculate the concentration of the conservative in the main port of Lianyungang port and analyze the three-dimensional water exchange characteristics in the main port. The results show that the water exchange capacity of the entrance is the best and the water exchange capacity decreases from the entrance to the bottom in the main port. Also, the difference of water exchange capacity between the surface and the bottom is very small. The average residence time, semi-exchange time and flushing time of the main port are 13 d, 5 d and 84 d respectively.

Keywords: Lianyungang harbor; 3-D numerical simulation; advection-diffusion; water exchange; average residence time

连云港港位于江苏沿海北部, 属于开敞的淤泥质浅滩水域, 波浪对海域内的泥沙作用明显。为阻挡西北风浪、减小泥沙淤积, 1994 年建成了实体的拦海西大堤。近年来, 连云港港的港口与航道建设规模不断扩大, 在主体港区口门南北侧修建了防波堤, 在西大堤内侧进行围填, 形成新的陆域。这些工程减少了港池内的波浪影响和泥沙回淤、增加了码头岸线资源, 但形成了单口门的港池形式。由于潮汐进出通道只有一个宽度不大的口门, 港池内的水体与外界交换能力变弱,

可能会造成港池水质下降。

水交换能力是评价海湾、港池的重要水动力特性指标, 它与研究区域水体自净化能力和生态环境质量有着密切的联系。充分了解和研究水交换能力, 对于预测、评估海洋工程对海湾、港池水交换能力的影响及预测和防治该区域的污染有着十分重要的意义^[1]。李小宝^[2]利用拉格朗日质点模型, 考虑粒子的随机走动, 研究了渤海湾的水交换能力; 孙英兰等^[3]通过建立三维水动力模型、污染物输运扩散模型, 得到了丁字湾的 COD 浓度分布, 分析

收稿日期: 2014-07-21

作者简介: 王兴刚 (1983—), 男, 博士, 工程师, 从事海岸与近海工程的研究。

了水交换能力, 计算得出该区域的海水交换率和半交换时间。Hung-Chu Hsu^[4]利用垂向平均水流模型和扩散模型, 研究了台湾布袋港扩建工程对好美寮湿地的水交换过程的影响。本文利用 FVCOM 建立连云港海域的三维水动力模型和对流-扩散模型, 进行连云港港主体港区的水交换特征分析。

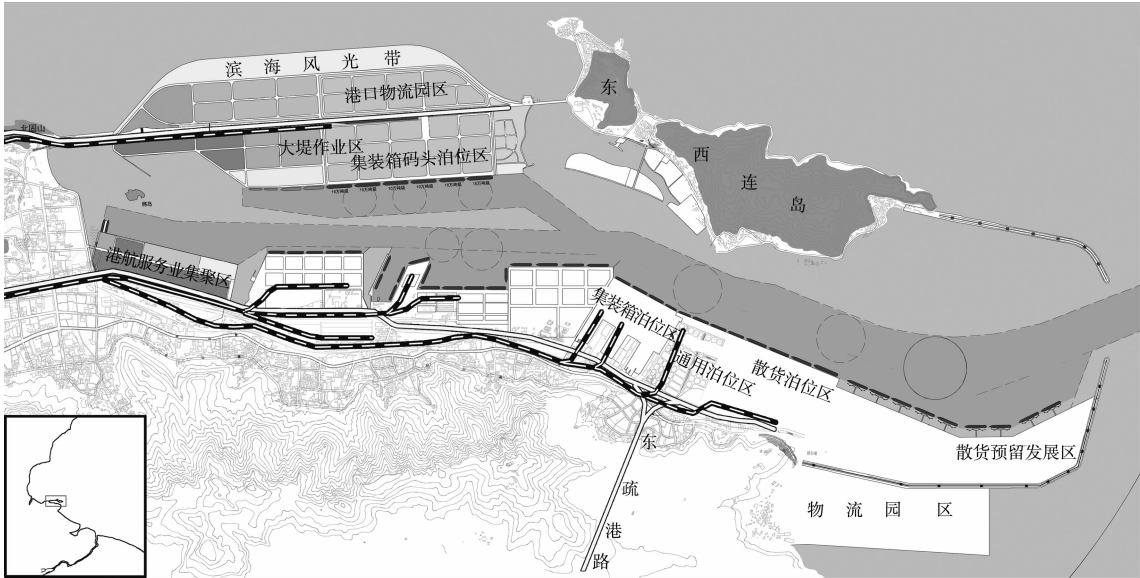


图 1 连云港港主体港区规划

连云港海域水深较浅、滩面宽广, 水下地形坡度约为 1/1 500。连云港海域的潮流主要受南黄海逆时针旋转潮波系统控制, 潮汐指标类型为 0.30, 属正规半日潮。多年平均潮差 3.39 m, 平均涨潮历时 5 h 38 min, 平均落潮历时 6 h 48 min^[5]。连云港港北侧的海州湾及其外围以往复流为主, 潮流主流向为 SW-NE^[6]; 连云港港南翼海域, 从外海向近岸涨潮流的方向变化较大, 由外海的 SW 走向转为 S 向, 在灌河口南部转为沿岸的 SE 向。

2 数学模型及建立

2.1 数学模型

本文选用基于有限体积法的三维海洋模式 FVCOM 来进行港池水交换研究。FVCOM 最初是由 Chen 等^[7]开发的, 并得到多次改进和扩展。近年来, 由于采用三角形网格单元, 能够准确地拟合和描述复杂岸线和近海工程布置, 该模型被广泛应用于河口海岸的环境问题研究^[8-10]。

1 港区概况

连云港港主体港区由马腰港区、庙岭港区、墟沟港区、旗台港区组成。至 2013 年 6 月, 旗台港区围填工程已基本完成, 主体港区口门南北两侧的防波堤均已建成。连云港港主体港区的规划布置见图 1。

三维水动力模型的连续性方程如下:

$$\frac{\partial(uD)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2D)}{\partial x} + \frac{\partial(uvD)}{\partial y} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial \sigma} + \frac{gD^2}{\rho_0} \cdot \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma - f_v D + gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{px} + \tau_{tx}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_m H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_m H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (1)$$
$$\frac{\partial(vD)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2D)}{\partial x} + \frac{\partial(uvD)}{\partial y} + \frac{\partial(v\omega)}{\partial \sigma} + \frac{gD^2}{\rho_0} \cdot \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma - f_u D + gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{py} + \tau_{ty}) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_m H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_m H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \quad (2)$$
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

港池水交换是指港池内的水体通过对流输运和稀释扩散等物理过程与外海域的水体进行相互混合。水交换能力一般采用箱式模型、拉格朗日粒子

追踪法以及对流扩散模式来进行计算。粒子追踪法更适合用于模拟藻类的运动，而常规污染物质在港湾内积累可采用可溶性的示踪剂（对流扩散模式）进行模拟。因此，研究中选用可溶于水的保守物质计算对流扩散过程，分析研究港池的水体交换特征。FVCOM 模型中浓度扩散方程可以表述为：

$$\frac{\partial(SD)}{\partial t} + \frac{\partial(uSD)}{\partial x} + \frac{\partial(vSD)}{\partial y} + \frac{\partial(\omega SD)}{\partial \sigma} = - \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \cdot (K_h \frac{\partial S}{\partial \sigma}) + \frac{\partial}{\partial x} (A_h H \frac{\partial S}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_h H \frac{\partial S}{\partial y}) + S_{source} \quad (4)$$

式中： u 、 v 和 w 分别表示 x 、 y 和 z 方向上的速度分量； $\sigma = (z - \zeta) / D$ 为垂向相对坐标，其值从底部的值 -1 到表面的值 0 之间变化， ζ 代表自由表面， $D = h + \zeta$ 为总水深， h 是平均水位以下的水深值； P 为大气压力， ρ 、 ρ_0 分别为密度与参考密度， g 为万有引力加速度； A_m 为水平涡黏性系数， K_h 为垂向涡黏性系数， A_h 为扩散系数，它们可以由修正的 MY-2.5 湍流闭合子模型计算。

2.2 模型的建立验证

研究中数值模型计算区域和验证点相对位置见图2。东边界至中山河北，北边界至岚山头附近。2012 年 3 月，旗台防波堤工程完工后，对港池内外进

行了现场水文观测。实测资料较为丰富和详实，为三维潮流研究奠定了基础。模型验证结果见图 3、4。由图可知，计算潮位和流速流向分别与实测值符合较好，基本反映了连云港海域的三维潮流特征。

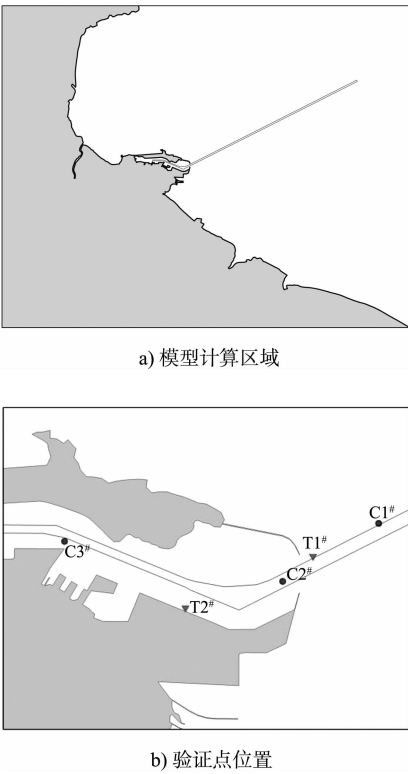


图 2 模型计算区域和验证点位置

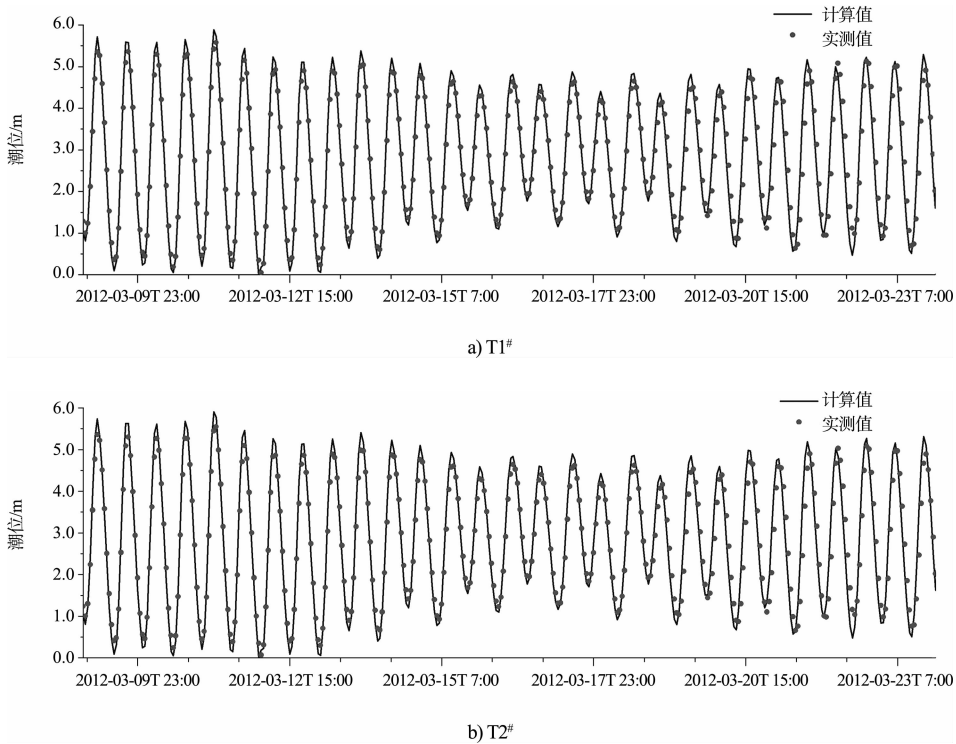


图 3 潮位验证

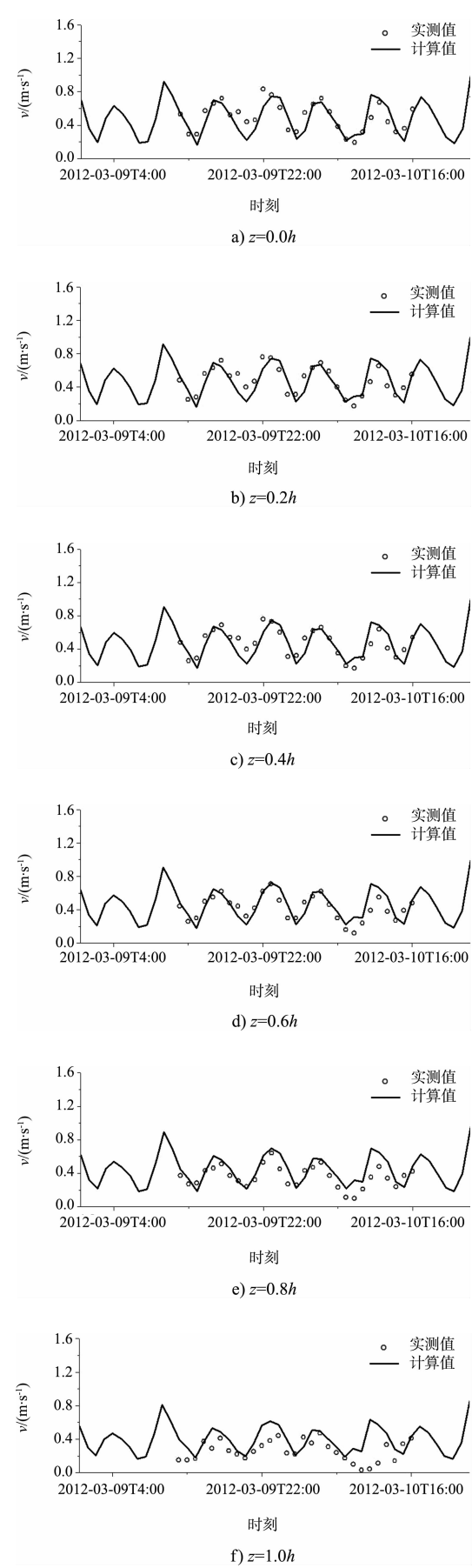


图 4 C1#流速验证

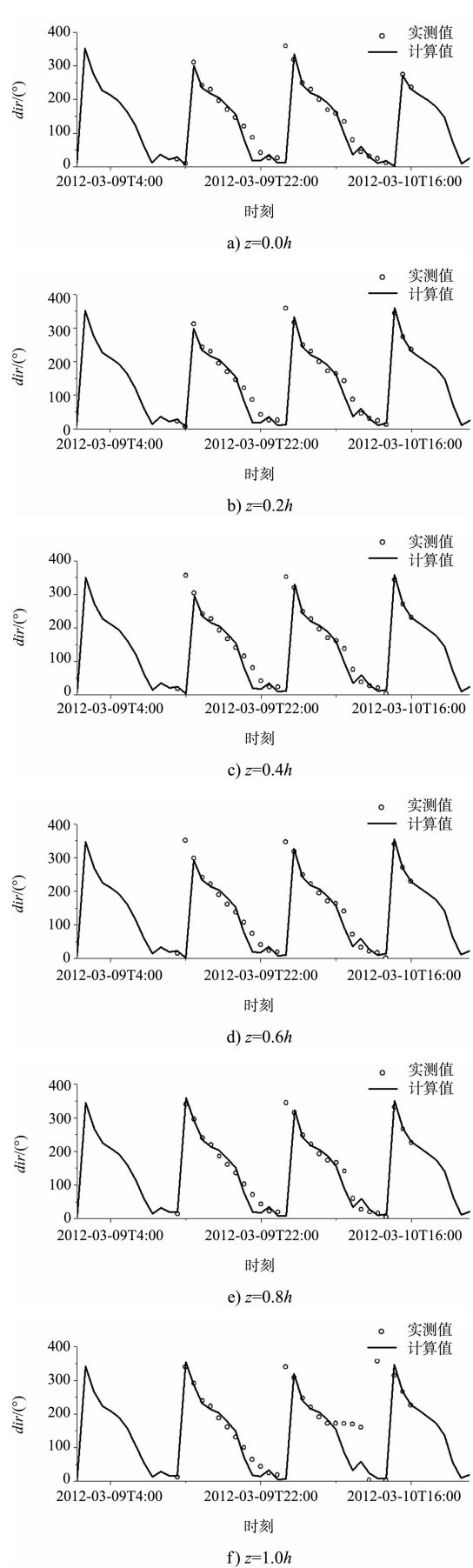


图 5 C1#流向验证

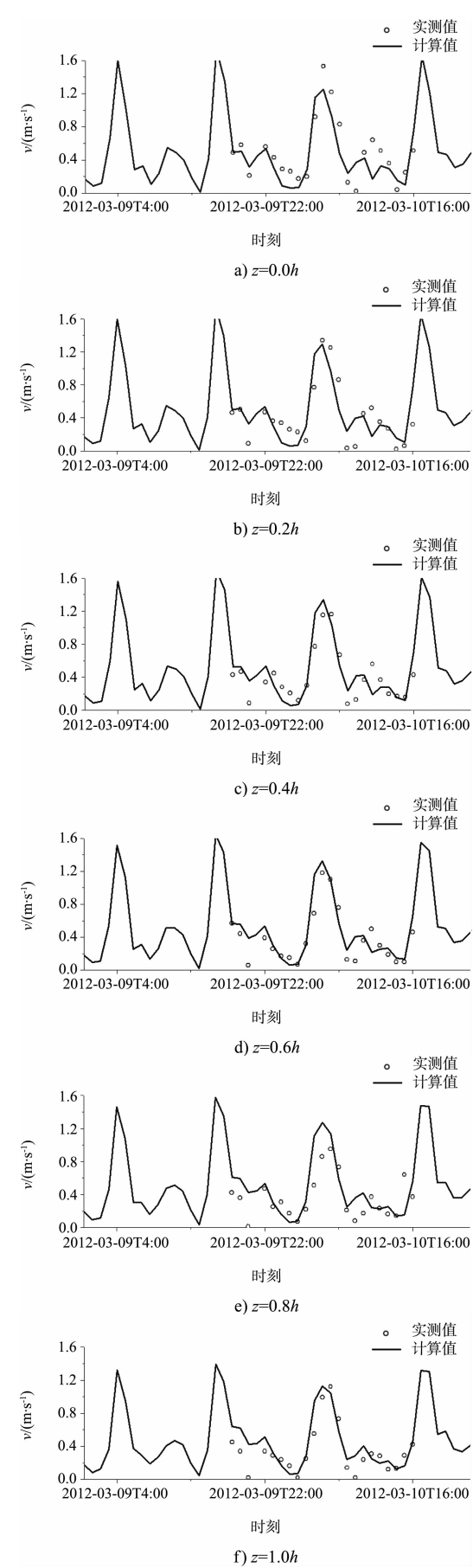


图6 C2#流速验证

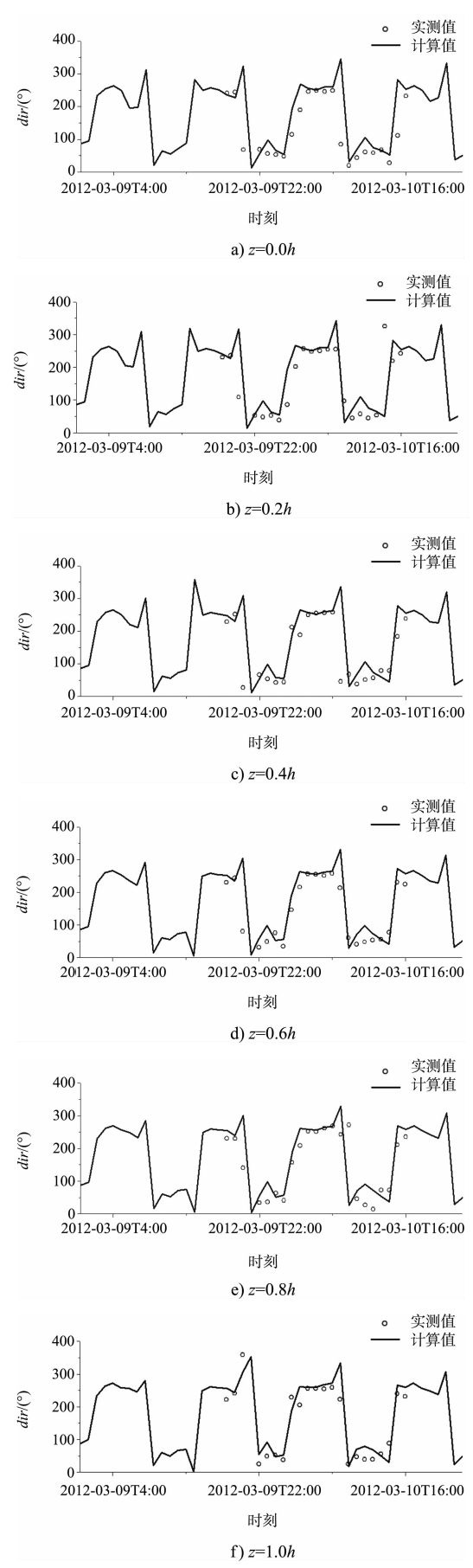


图7 C2#流向验证

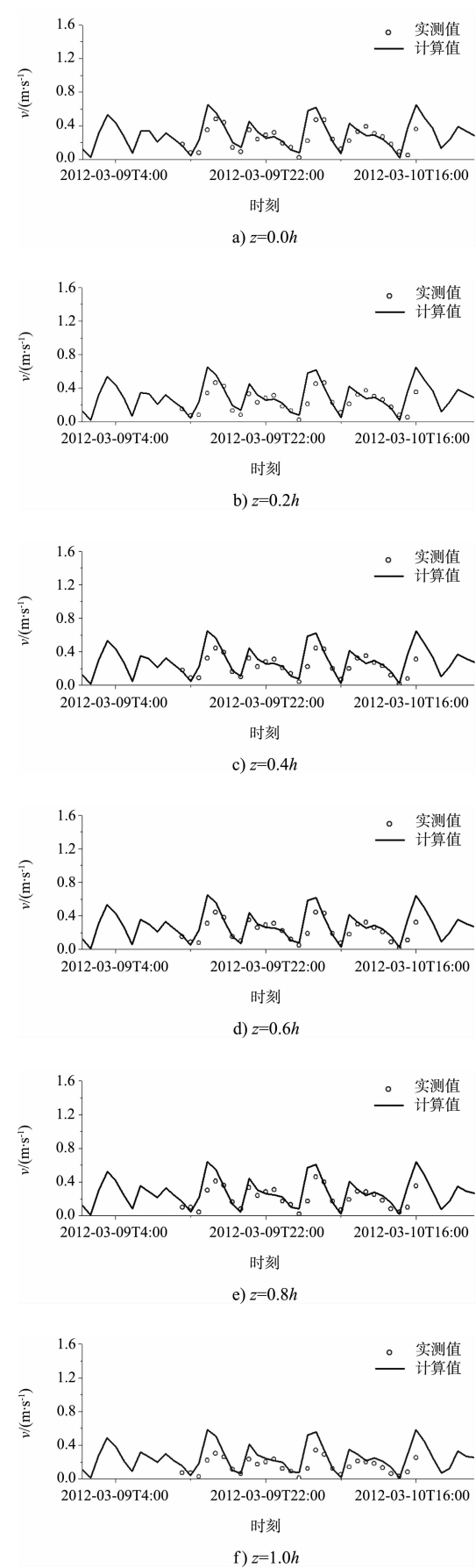


图 8 C3#流速验证

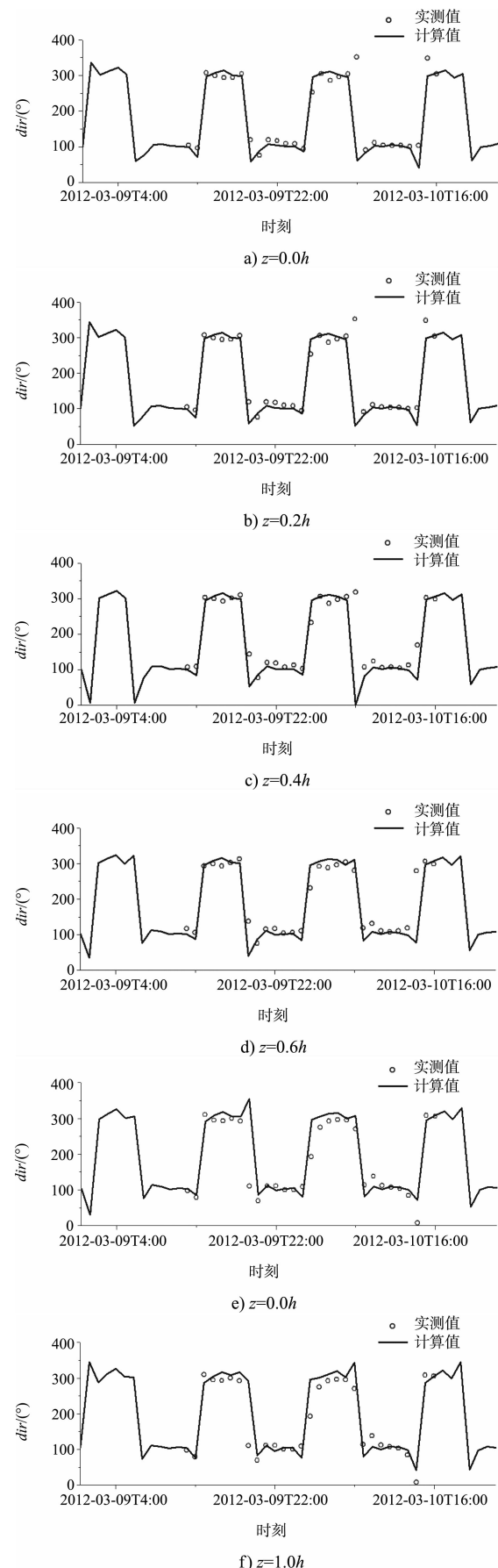


图 9 C3#流向验证

3 三维水交换计算分析

3.1 水交换指标

反映水体输运和交换时间的指标有多种, 如平均滞留时间 (average residence time)、半交换时间 (half-life time)、冲洗时间 (flushing time) 等^[11-13]。根据近期相关研究, 各指标定义如下: 令初始时刻 t_0 研究区域内保守物质的浓度为 C_0 , 之后任何一个时刻 t ($t > t_0$) 仍然留在区域内的保守物质浓度为 $C(t)$ 。相应的保守物质平均滞留时间 θ 可以表述为:

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{C(t)}{C_0} dt \quad (5)$$

当 $C(t) = 50\%$ 时, 对应的时间间隔 $\Delta t = t - t_0$ 为水体的半交换时间; 当 $C(t) = 0\%$ 时, 对应的时间间隔 $\Delta t = t - t_0$ 为水体的冲洗时间。研究港池内潮位验证资料时间较短, 因此采用水体半交换时间的概念来研究。

模型采用主体港区 2013 年的规划布置作为港池岸线, 利用已验证的水动力边界条件、相关参数, 建立了主体港区的对流扩散模型, 进一步进行港池内的水交换计算。以主体港区南北防波堤口门线为界, 在港池内 (浓度边界线内) 均匀布置可溶于水的保守物质, 港池外物质浓度设为 0.0 mg/L , 与水动力相同垂向分为 10 层, 由于缺少温盐资料, 扩散系数采用模型计算, 其中 $HPRNU = VPRNU = 1.0$ 。Liu Zhe 等^[11] 研究表明, 平均滞留时间与初始浓度无关, 保守物质的释放时间差别对平均滞留时间的结果影响仅在 $5\% \sim 10\%$ 。因此, 设置保守物质的初始浓度为 1.0 mg/L , 释放时间选为落潮期间中潮时刻。

3.2 结果分析

基于三维潮流模型的验证, 进行港池内的水体交换计算, 从保守物质浓度释放到模拟结束, 时间共计 84 d。保守物质释放后 10 d 的表、底层浓度分布见图 10。从同一时刻表层和底层的浓度分布趋势来看, 两者的浓度分布差异很小, 说明在潮流作用下, 港池内水体在垂向上混合非常均

匀。另外, 在模拟计算中, 港池顶端的水体浓度降低速度非常缓慢, 保守物释放 30 d 之后, 浓度依然大于 0.45 mg/L , 而港池口门处水体的保守物浓度已小于 0.05 mg/L 。口门和顶端形成如此鲜明的对比, 说明港池内不同区域的水交换存在显著差异。

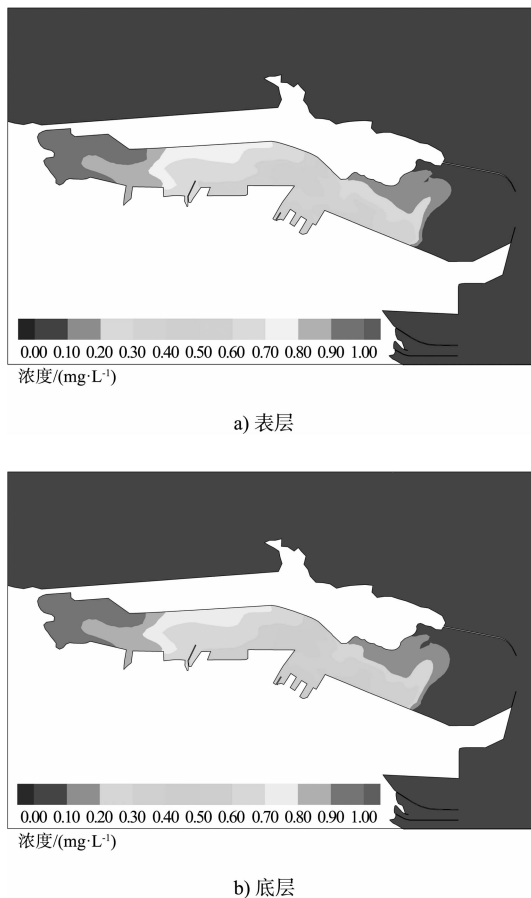


图 10 10 d 后水体保守物质浓度分布

数值模拟计算结束时刻, 港池底部的保守物质浓度小于 0.005 mg/L , 近似为 0, 可以认为该时刻作为港池水全部被置换的结束时刻。根据水交换指标中半交换时间、冲洗时间的定义, 主体港区的半交换时间约为 5 d, 冲洗时间约为 84 d。根据式 (5), 计算主体港区的平均滞留时间约为 13 d。同理, 根据式 (5), 计算每一网格节点上的平均滞留时间, 得出主体港区的平均滞留时间的空间分布 (图 11), 平均滞留时间由港池口门向港底呈现逐渐增大的趋势。港池口门及附近区域的平均滞留时间小于 4 d, 而港底区域大于等于

32 d。旗台防波堤口门是主体港区港池与外海水进行水交换的唯一通道, 因此, 口门区域的水在第一时间被外海水置换, 形成了图 11 所示的平均滞留时间的空间分布。因此, 港池口门与底部的水体交换能力差别较大, 一旦港池底部有污染源, 污染物将很容易聚集, 难以通过水交换快速运输到外海。图 12 显示了港池水体保守物质平均浓度的变化过程, 即港池的水体交换过程。由图 12 可知, 港池水体的平均浓度在 120 h 内减小速度较快, 近似以指数形式递减; 之后平均浓度呈线性递减趋势。

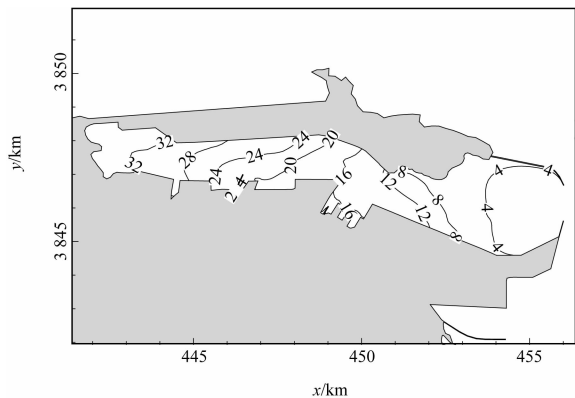


图 11 主体港区平均滞留时间分布 (单位: d)

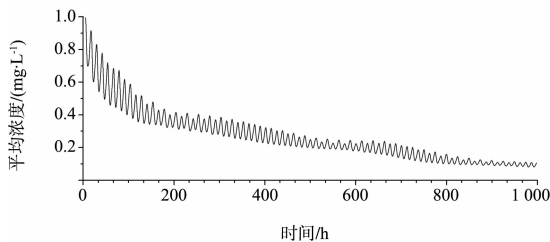


图 12 港池水体交换过程

4 结论

1) 港内水体在垂向上混合较为均匀, 表底层浓度分布差异很小; 港池口门处水动力条件最好, 其水交换能力最强, 水交换能力从港池口门向港池底部逐渐减小。

2) 主体港区的平均滞留时间、半交换时间和冲洗时间分别约为 13、5、84 d。

参考文献:

- [1] 陈少峰. 天津港港池水交换与生态堤岸设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [2] 李小宝. 大型海湾水交换高效计算方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 孙英兰, 张越美. 丁字湾物质输运及水交换能力研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 1-6.
- [4] Hsu Hung-Chu, Liou Jiing-Yih, Huang Hsiang-Yu. Hydrodynamic Modeling of Water Exchange in Haomeiliao Wetland, Jiayi Taiwan[C]. Japan: Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, 2009.
- [5] 张玮, 王国超, 刘燃, 等. 环抱式港池水体交换与改善措施研究[J]. 水运工程, 2013(4): 37-41.
- [6] 黄卫明, 王维华, 章卫胜. 连云港附近海域潮汐与潮流特征分析[J]. 浙江水利科技, 2012(3): 1-5.
- [7] Chen C S, Liu H D, Beardsley R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Atmos Ocean Tech, 2003, 20: 159-186.
- [8] Shore J A. Modelling the circulation and exchange of Kingston Basin and Lake Ontario with FVCOM[J]. Ocean Model, 2009, 30: 106-114.
- [9] Guo Y K, Zhang J S, Zhang L X, et al. Computational investigation of typhoon-induced storm surge in Hangzhou Bay, China[J]. Estuar Coast Shelf Science, 2009, 85: 530-536.
- [10] Wang J H, Shen Y M. Modelling oil spills transportation in seas based on unstructured grid, finite-volume, wave-ocean model[J]. Ocean Model, 2010, 35: 332-344.
- [11] Liu Zhe, Wei Hao, Liu Guangshan. Simulation of water exchange in Jiaozhou Bay by average residence time approach[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61: 25-35.
- [12] Yuan D, Lin B, Falconer R A. A modelling study of residence time in a macro-tidal estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71: 401-411.
- [13] 彭辉, 姚炎明, 刘莲. 象山港水交换特性研究[J]. 海洋学研究, 2012, 30(4): 1-12.

(本文编辑 武亚庆)