

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.003

连云港近岸海域污染物输移规律

韩龙喜^{1,2,3}, 易路³, 刘军英³, 霍非³, 谢俊锴³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
3. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究连云港近岸海域污染物随潮流运动的输移和浓度增量的变化规律, 以连云港徐圩新区新设污水处理厂远期入海排污口尾水排放为研究案例, 采用非稳态浅水方程和垂向平均的二维对流扩散方程建立连云港近岸海域水动力及水质耦合模型, 应用有限体积法在无结构三角形网格对方程离散求解, 模型开边界所需大、小潮潮位过程由 TPXO 海潮模型生成, 计算结果表明: 二维数值模型可较好地模拟不同水文条件下计算区域内的水动力流场和污染物的输移轨迹, 其浓度增量与排放量成正比, 与水体流速、水量成反比, 小潮落憩时刻污染物浓度增量相对最大。

关键词: 近岸海域; 污染物输移; 二维数值模拟; 连云港

中图分类号: X55 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2011)03-0248-06

在污染物随水体运动输移规律研究工作中, 数值模型较物理模型更加适用高效, 因此备受行内学者青睐。污染物随水体输移的数值模拟一般包括水动力模拟和水质模拟两部分^[1], 前者通过对水流运动的控制方程(偏微分方程)进行数值离散求近似解的方法模拟水体流动, 后者定量描述污染物在水体中迁移、转化及衰减的过程。尽管实际水流运动具有三维性, 但对浅水海域、河口和海湾等宽浅型区域, 因水流水平方向运动强度远大于其垂直方向运动强度, 区域水平比尺远大于其垂直比尺, 故二维浅水方程和二维对流扩散方程可较好地描述宽浅型区域的水体流动和污染物输运过程。目前, 近岸海域二维数值模拟已覆盖四大洋的各边缘海区, 获得了广泛的研究。本文以连云港徐圩新区污水处理厂尾水排放为背景, 采用二维数值模拟对连云港近岸海域水体流动和污染物对流扩散进行研究。

1 研究区域

如图 1 所示, 徐圩港区建成后, 连云港近岸海域岸线走向复杂化, 根据徐圩新区 1 号、2 号新建污水处理厂拟设排污口位置及所获得的近岸海域水下地形资料, 确定计算区域并对岸线作合理概化^[2], 应用二维浅水方程和二维对流扩散方程模拟大、小潮两种典型水动力条件下 COD_{Mn} 和无机氮的输移范围, 分析总结连云港近岸海域污染物输移的影响因子和变化移规律。1 号、2 号入海排污口尾水排放量分别为 10 万 t/d 和 35 万 t/d。

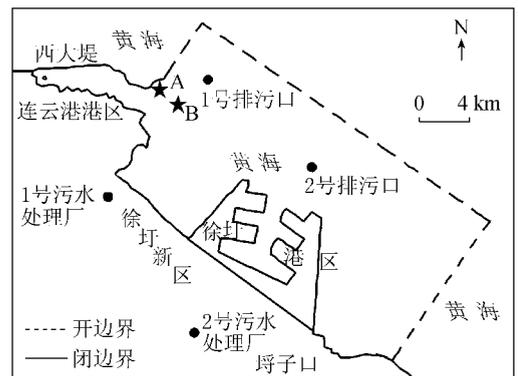


图 1 模拟区域

Fig. 1 Simulated area

2 数学模型

2.1 二维浅水方程

在满足水体垂直方向流速近似均匀分布、水体不可压缩、水压接近静压分布和底坡变化不大等假设条件下, 二维浅水方程可由沿垂直水深方向积分并取平均的 N-S 方程获得^[3], 方程组由连续方程和动量方程组成, 表示如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hs \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s s \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s s \quad (3)$$

其中 $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$ $h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$ $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$ $T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$ $T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$

式中: x, y ——空间水平坐标; u, v —— x, y 轴向流速; \bar{u}, \bar{v} —— x, y 轴向垂线平均流速; t ——时间变量; h ——总水深, $h = d + \eta$, d 为静水深, η 为潮位; f ——柯氏力频率参数, $f = 2\Omega \sin \varphi$, φ 为当地纬度, Ω 为地球自转频率, $\Omega = 2\pi/86184$; g ——重力加速度; ρ_0 ——水流参考密度; ρ ——水流密度; A ——水平运动黏性系数; u_s, v_s ——源项排放速度在 x, y 方向上的流速分量; s ——源项排放量; τ_{sx}, τ_{sy} ——沿 x, y 方向的风应力; τ_{bx}, τ_{by} ——沿 x, y 方向的底摩擦应力。

2.2 二维对流扩散方程

污染物在水体中的迁移、扩散和衰减过程可由垂向平均的二维对流扩散方程描述^[4], 方程如下:

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_C + hC_s s \quad (4)$$

其中 $h\bar{C} = \int_{-d}^{\eta} C dz$ $F_C = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C$

式中: D_h ——水平扩散系数; C ——物质浓度; \bar{C} ——沿水深平均的物质浓度; C_s ——源项浓度。

3 模型求解

首先耦合二维浅水运动方程和二维对流扩散方程, 统一写成通用形式:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F} = \mathbf{S} \quad (5)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_I - \mathbf{F}_V \quad (6)$$

其中 $\mathbf{U} = (h, h\bar{u}, h\bar{v})^T$

$$\mathbf{F}_{Ix} = \left(h\bar{u}, h\bar{u}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2), h\bar{u}\bar{v} \right)^T \quad \mathbf{F}_{Iy} = \left(h\bar{v}, h\bar{u}\bar{v}, h\bar{v}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \right)^T$$

$$\mathbf{F}_{Vx} = \left(0, hA \left(2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right), hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \right)^T \quad \mathbf{F}_{Vy} = \left(0, hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), hA \left(2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \right)^T$$

$$\mathbf{S} = \left(0, g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + f\bar{v}h - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + hu_s, g\eta \frac{\partial d}{\partial y} - f\bar{u}h - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + hv_s \right)^T$$

式中: \mathbf{U} ——守恒变量; \mathbf{F}_I ——非黏性通量; \mathbf{F}_V ——黏性通量。

其次确定模拟区域并采用网格中心格式(CC格式)对其进行无结构三角形网格划分, 最后离散耦合方程, 结合初始条件和边界条件迭代求解^[5]。

3.1 初始条件

采用冷启动计算方式, 初始流速分量、初始水位、COD_{Mn}、无机氮初始浓度均取为零。

3.2 水动力边界条件

闭边界采用不可入边界条件, 即水流的法向速度为零; 开边界采用 TPXO 海潮模型生成开边界所需潮位过程。

TPXO 是由美国俄勒冈大学的 Egbert 等基于 TOPEX/POSEIDON 海洋卫星高度计资料研发的海洋潮汐模型^[6-7]。此模型采用反演法同化, 具有可以在浅水区域用潮波动力模型进行补插的优点^[8]。作为现有全球著名海潮模型之一^[9], TPXO 海潮模型在当今海洋水文预测与潮汐参数分析等研究工作中起到了积极的推动作用^[10-11]。

采用 TPXO 海潮模型, 取 $m_2, s_2, m_2, k_2, o_1, p_1, q_1, k_1$ 8 个分潮的潮汐参数, 生成模拟开边界上所需潮位数据, 然后结合连云港油码头(A点)和连云港外航道 C0401 站(B点)2004 年 7 月 17 日 12 时至 7 月 18 日 15

时的实测潮位资料,对海潮模型进行微调,最后,使用 TPXO 海潮模型生成模拟区域开边界处实测水文资料当月典型潮次(大、小潮)的潮位数据用作污染物模拟预测时的开边界条件。A、B 两验潮站位置见图 1。

3.3 水质边界条件

闭边界污染物法向通量取零,为在模拟结果中直接显示污染物浓度增量大小,开边界处污染物入流浓度取为零。

3.4 计算参数

水下地形和边界潮位均以连云港理论最低潮位为统一基准面,依据相关文献资料^[12],连云港近岸海域糙率取值范围为 0.020~0.034,经参数率定,糙率取 0.020;水平扩散系数 D_h 在 x, y 方向的取值分别为 $D_{hx} = \alpha_x hu^*$, $D_{hy} = \alpha_y hu^*$,其中摩阻流速 $u^* = \sqrt{ghI}$, α_x, α_y 为经验系数,分别取 4.0 和 6.0^[13]。

3.5 参数率定

模型计算前,利用 TPXO 海潮模型生成覆盖实测资料相应时段的边界条件,进行水动力计算,并从计算结果中提取 A、B 两验证点计算值,与实测值进行对比分析,反复调试糙率等敏感参数,直至数值模拟偏差在允许范围之内^[14]。最终调试结果如图 2 和图 3 所示,误差统计见表 1。

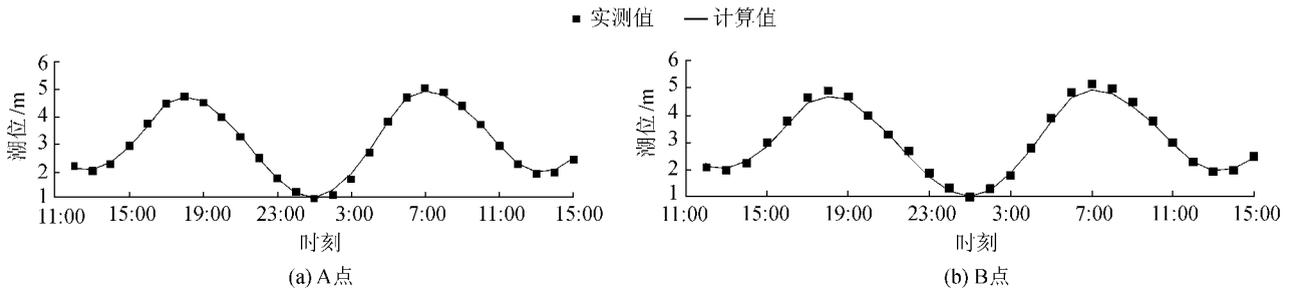


图 2 潮位验证

Fig. 2 Validation of tidal levels

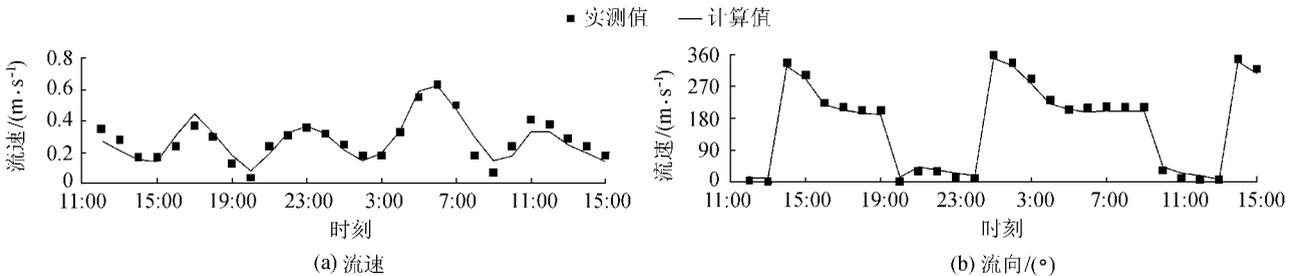


图 3 B 点潮流验证

Fig. 3 Validation of tidal currents at point B

由图 2、图 3 和表 1 可知:A、B 两验证点潮位计算值与实测值吻合较好,基本无相位偏差,A、B 两验证点潮位偏差在允许偏差 ±10 cm 之内;B 点模拟流速过程线与实测流速过程线的形态基本一致,涨潮段平均流速偏差 -0.31%,落潮段平均流速偏差 -1.99%,在允许偏差 ±10% 之内;B 点模拟流向与实际涨落潮流向大体一致,流向偏差在允许偏差 ±15° 范围之内。误差的产生与模拟过程中方程的近似假定、风应力和波浪等因素的忽略有关。参数率定结果表明,基于非恒定二维浅水方程的水动力模型可较好地反映连云港近岸海域的潮流运动,模型所取参数合理。

表 1 实测值与计算值误差统计

Table 1 Values of statistical error between measured and calculated values

统计项目	A 点潮位/m	B 点潮位/m	B 点流速/(m·s ⁻¹)	B 点流向/(°)
误差范围	-0.11~0.18	-0.21~0.09	-0.076~0.075	-13.78~13.43
平均误差	0.02	-0.07	-0.003	-2.17

4 模拟结果分析

采用经率定的参数值,结合 TPXO 海潮模型生成的典型水文条件,模拟连云港近岸海域徐圩港区建成后

的流场及污染物分布情况.

4.1 水动力模拟结果分析

模型计算出连云港近岸海域典型水文条件下的潮流流场, 其中大潮涨急、落急特征时刻的流场如图 4 所示.

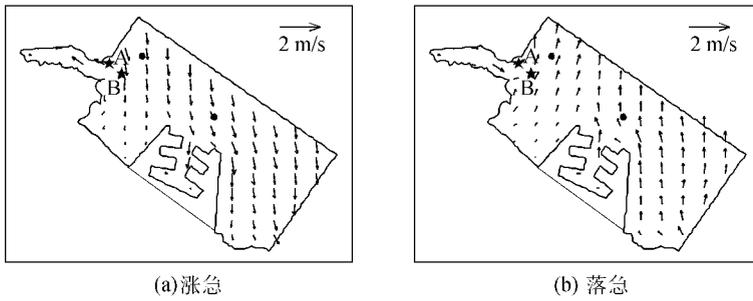


图 4 大潮流场

Fig. 4 Flow fields of spring tides

流场模拟结果表明, 涨急时刻, 水体向岸边涌入, 流速达到涨潮期最大, 潮位继续增加, 区域主要潮流向南流动 (图 4(a)). 落急时刻, 水体向离岸方向远去, 流速达到落潮期最大, 潮位继续降低, 主要潮流向近北方向流动 (图 4(b)). 可见, 受黄海左旋潮波系统控制和近岸地形的影响, 连云港海域主要潮流近似呈 NW-SE 向. 岸线走向的改变使局部水域水流流动异于区域主要潮流. 连云港港区附近潮流方向与主要潮流方向相反, 近似呈 SE-NW 向. 徐圩港区建成后附近水体流向与港区岸线平行, 近似呈南北向. 经计算, 1 号、2 号排污口大潮平均流速分别约为 0.473 m/s 和 0.504 m/s, 小潮时平均流速分别约为 0.301 m/s 和 0.338 m/s.

4.2 水质模拟结果分析

从计算结果中提取出大、小潮水动力条件下污染物最大浓度、平均浓度及涨急和落急时刻的浓度增量预测值, 进行污染物浓度增量对比和输移规律研究分析. 其中 COD_{Mn} 大、小潮水文条件下的分布范围如图 5 所示.

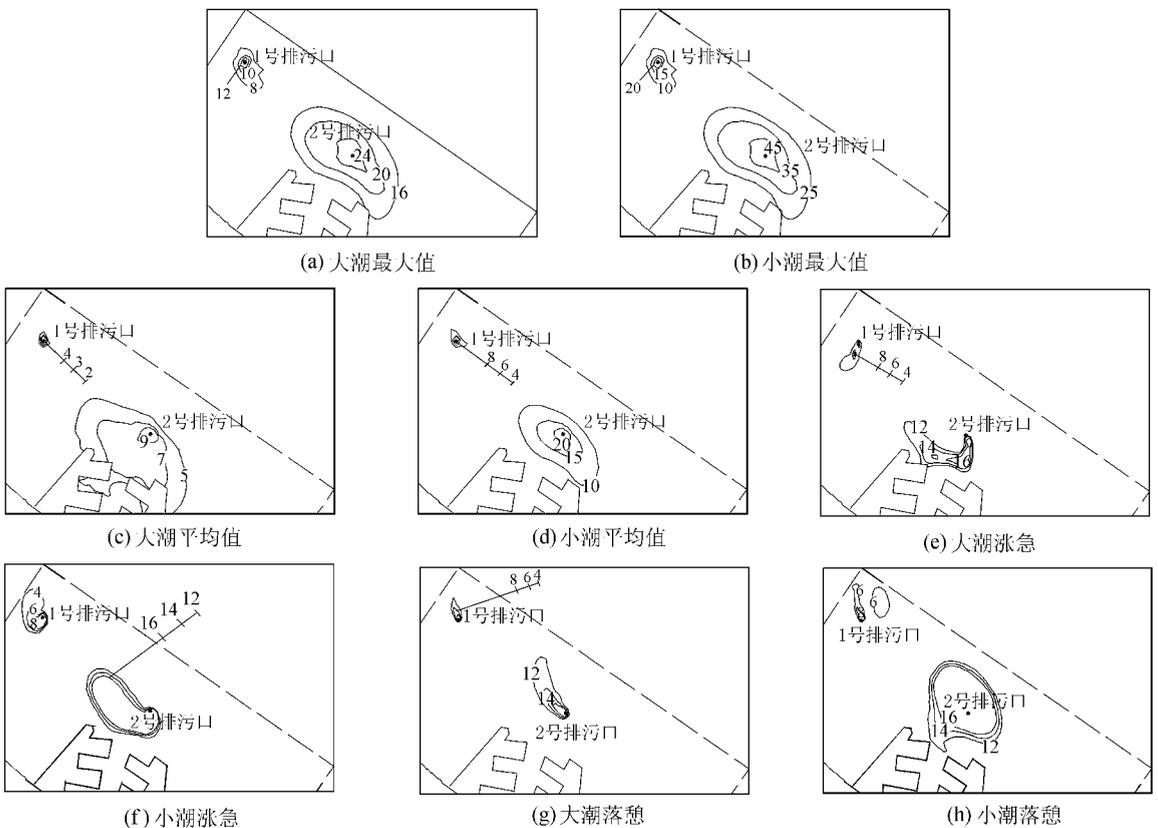


图 5 COD_{Mn} 质量浓度场分布 (单位: $\mu g/L$)

Fig. 5 Concentration fields of COD_{Mn} (unit: $\mu g/L$)

水质模拟结果表明:从欧拉控制体积角度分析,由于潮流运动的往复周期性,1号、2号入海排污口尾水污染物受模拟区域主要潮流运动影响,污染带具有以排放口为中心逆时针旋转的分布特征。涨(落)急时刻,水流速度相对最大,潮流运动剧烈,污染物对流占优,污染范围面积减小,呈狭长带状分布;落(涨)憩时刻,水体流速缓慢,潮流运动平缓,污染物扩散占优,污染范围面积增大,呈块状分布。在水下地形、陆地边界和水流流速的综合影响下,污染带可能被分割成面积大小不同浓度增量各异的多个污染带,并非始终保持连续。可见,近岸海域污染物输移规律与潮流运动、水下地形、陆地边界等因素相关。

等浓度污染物排入水体后,其浓度增量与尾水排放量成正比,故2号排污口浓度增量大于1号排污口浓度增量;污染物浓度增量与附近水体流速、水量成反比,潮流流速越大,污染物紊动扩散能力越强,污染物随潮流迅速扩散,浓度增量越小,故涨憩落憩时刻浓度增量大于涨急落急时刻浓度增量;水量越大,水体对污染物的稀释作用越强,水体的自净能力越高,污染物浓度增量越小,故小潮浓度增量大于大潮浓度增量,落憩时刻浓度增量大于涨憩时刻浓度增量,因此小潮落憩时刻的污染物浓度增量相对最大。

5 结 论

a. 在水文资料匮乏条件下,运用 TPXO 海潮模型生成开边界所需潮位过程,计算结果表明:基于 TPXO 海潮模型的二维数值模拟其精度满足相关技术规程的要求,可较好地模拟近岸海域水动力特征,为近岸海域潮流数值模拟研究开辟了新的实现途径。

b. 近岸海域污染物输移与潮流运动、水下地形和岸线走向密切相关,污染物浓度增量与排放量成正比,与附近水体水量、流速成反比,小潮落憩时刻污染物浓度增量相对最大。基于二维数值模拟的近岸海域污染物输移规律研究可为当地环境部门制定合理的海洋资源保护规划和进行污水海洋处置工程决策提供有力的科技支撑。

c. 采用 Euler 法研究了连云港近岸海域污染物的场分布特征,可采取 Lagrange 法预测排污口污染物质点在受纳水体中的迁移轨迹^[15],进一步了解污染物在近岸海域的输移过程。

参考文献:

- [1] DIMOU K. 3-D hybrid Eulerian-Lagrangian/particle-tracking model for simulation mass transport in coastal water bodies[D]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [2] 耿兆铨,李志永.河口近岸水环境问题数值模拟的若干注记[J].水利水电科技进展,2009,29(6):29-33.(GENG Zhao-quan, LI Zhi-yong. Notes on numerical simulation of water environmental problems in inshore estuar[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6):29-33.(in Chinese))
- [3] 胡四一,谭维炎.无结构网格上二维浅水流动的数值模拟[J].水科学进展,1995,6(1):1-9.(HU Si-yi, TAN Wei-yan. Numerical modeling of two-dimensional shallow water flows on unstructured grid[J]. Advances in Water Science, 1995, 6(1):1-9.(in Chinese))
- [4] 孙培德,楼菊青.环境系统模型及数值模拟[M].北京:中国环境科学出版社,2005:24-26.
- [5] 王立辉,胡四一,龚春生.二维浅水方程的非结构网格数值解[J].水利水运工程学报,2006,38(1):8-13.(WANG Li-hui, HU Si-yi, GONG Chun-sheng. Numerical solution for two-dimensional shallow water equations on unstructured grids[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006, 38(1):8-13.(in Chinese))
- [6] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2):183-204.
- [7] EGBERT G D, BENNETT A, FORMAN M. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse mode[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 99(24):821-852.
- [8] 汪一航,方国洪,魏泽勋,等.基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J].地球科学进展,2010,25(4):353-359.(WANG Yi-hang, FANG Guo-hong, WEI Ze-xun et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4):353-359.(in Chinese))
- [9] 李培良.渤黄东海潮波同化数值模拟和潮能耗散的研究[D].青岛:中国海洋大学,2002.
- [10] 沈春,左军成,张建立,等.太平洋潮波特征比较[J].海洋预报,2008,25(2):42-50.(SHEN Chun, ZUO Jun-cheng, ZHANG Jian-li et al. Comparison of ocean tides in the Pacific Ocean[J]. Marine Forecasts, 2008, 25(2):42-50.(in Chinese))

- [11] 周江存,孙和平.中国及邻区重力合成潮汐参数[J].地震学报,2007,29(6):618-624.(ZHOU Jiang-cun,SUN He-ping.Synthetic tidal parameters for gravity over China and its neighbor area[J].Acta Seismologica Sinica,2007,29(6):618-624.(in Chinese))
- [12] 刘晓东.四叉树网格二维水流及物质输运数学模型[D].南京:河海大学,2002.
- [13] 杨燕.江苏省连云港海州湾水环境容量的研究[D].南京:河海大学,2009.
- [14] JTJ/T233—1998 海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程[S].
- [15] 陶建峰,张长宽.黄海辐射沙脊群海域水环境数值模拟研究[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):472-475.(TAO Jian-feng,ZHANG Chang-kuan.Numerical simulation of water environment for radial sandy ridge area of the Yellow Sea[J].Journal of Hohai University:Natural Sciences,2005,33(4):472-475.(in Chinese))

Transport laws for pollutants in coastal area of Lianyungang City

HAN Long-xi^{1,2,3}, YI Lu³, LIU Jun-ying³, HUO Fei³, XIE Jun-e³

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To study the variation laws of transport and concentration increment of pollutants in the coastal area of Lianyungang City under tidal motion, the sewage discharge of two newly-built sewage treatment plants in Xuwei Development Area of Lianyungang City was taken as a study case. A coupled hydrodynamic and water quality numerical model was established based on the unsteady shallow water equations and the vertically averaged 2-D convection-diffusion equations. The finite volume method was employed to discretize and solve the model on unstructured triangular mesh. The tidal levels of neap tides and spring tides on the open boundaries were generated by means of the TPXO tide model. The results indicate that the proposed model can be employed to satisfactorily simulate the hydrodynamic flow fields and the transport loci of pollutants in the coastal area of Lianyungang City under different hydrologic conditions. The concentration increment is proportional to the sewage discharge and inversely proportional to both the flow velocity and the water quantity, and the concentration increment of pollutants at slack of neap tides is relatively the largest.

Key words: coastal area; contaminant transport; 2-D numerical simulation; Lianyungang