

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2013.02.010

长江南通段大型排污口退水影响预测

钱小娟, 肖玉兵, 陈 艳

(江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006)

摘要: 根据长江南通段的水动力、污染物输移特征, 建立了平面二维非稳态水流水质模型, 并利用实测的水文资料进行模型验证。结果表明, 无论是流场的整体形态还是验证点的水位、流速都与实际情况符合较好。以南通市观音山污水处理厂、开发区第一污水处理厂入江整合排污口为研究实例, 预测了该排污口在 90% 保证率下尾水对纳污江段的水环境影响, 旨在为该类型河段的排污口退水影响预测提供技术依据。

关键词: 感潮河段; 水流-水质模型; 有限体积法; 排污口; 退水影响

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2013)02-0048-05

Prediction of influence of large-scale sewage outlet in Nantong reach of Yangtze River

QIAN Xiaojuan, XIAO Yubing, CHEN Yan

(Nantong Branch of Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of
Jiangsu Province, Nantong 226006, China)

Abstract: Based on the characteristics of water flow and pollutant transport in the Nantong reach of the Yangtze River, a two-dimensional unsteady hydrodynamic and water quality coupling model was established. The model was validated using measured hydrological data. The simulation results were satisfactory and the model can predict the variation trend of tidal flow accurately. A case study was conducted at an integrated sewage outlet of the Guanyinshan Sewage Treatment Plant in Nantong City. The designed hydrological condition considered the combination of the low flow at a 90% guarantee rate and the typical courses of spring tide and neap tide. Under these typical hydrological conditions, the influence of the integrated sewage outlet in the Nantong reach of the Yangtze River was simulated. This study provides a technical basis for the prediction of the influences of sewage outlets in similar river reaches.

Key words: tidal reach; hydrodynamic-water quality model; finite volume method; sewage outlet; sewage discharge influence

长江南通段为感潮河段, 受上游地表径流和潮汐的双重影响, 使得水流流场、污染物浓度场的变化较复杂, 该河段的排污口上下游经常形成一定范围的污染带, 因此对该段水流水质的研究只能利用数学模型进行数值模拟^[1-2]。

笔者运用二维非恒定水流水质耦合模型, 对典型水文条件下长江南通段观音山污水处理厂、开发区第一污水处理厂大型尾水入江整合排污口大小潮期间污染物 COD 的浓度场变化规律进行研究, 为该

江段的退水影响预测提供技术依据。

1 水量、水质模型的建立

1.1 控制方程组

长江南通段江面开阔, 水面宽度远远大于其水深, 根据水环境特征选用平面二维数学模型进行数值计算, 描述平面二维水深平均非恒定浅水方程组如下^[3]:

a. 连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$$

b. 动量方程

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huu + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(s_{0x} - s_{fx})$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hvv + gh^2/2)}{\partial y} = gh(s_{0y} - s_{fy})$$

c. 水质输运方程

$$\frac{\partial(h\rho_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\rho_i)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\rho_i)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{ix} h \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{iy} h \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \right) - K h \rho_i + S_i$$

式中： h 为水深； u, v 分别 x, y 向垂线平均水平流速分量； ρ_i 为 i 处污染物质量浓度； g 为重力加速度； s_{0x}, s_{0y} 分别为 x, y 向的河底底坡； s_{fx}, s_{fy} 分别为 x, y 向的摩阻底坡； D_{ix}, D_{iy} 分别为 x, y 向污染物扩散系数； K 为污染物降解系数； S_i 为污染物源汇项。

1.2 初始条件及边界条件

1.2.1 初始条件

初始条件为 $u = u_0, v = v_0, z = z_0$ (z 为水面高程)，

$\rho = \rho_0$ 。

1.2.2 边界条件

流量及水位边界条件：上边界给定为流量过程，下边界给定为水位过程。

浓度场边界条件：入流边界给定污染物浓度过程；出水边界为第二类边界条件，即 $\frac{\partial \rho}{\partial s} = 0$ (s 为流线方向)。

1.3 模型参数的选择

模型参数的选择参照长江南通段的参数率定验证结果，模型糙率取值范围为 $0.018 \sim 0.025$ ^[4]，深槽糙率小于浅滩糙率。COD 降解系数为 $K_{\text{COD}} = 0.2/d$ ^[5]，纵向及横向扩散系数分别取为 $D_{ix} = 60 \text{ m}^2/\text{s}$ ， $D_{iy} = 0.6 \text{ m}^2/\text{s}$ ^[6]。

1.4 模型的建立与验证

模型采用有限体积法离散微分方程进行数值模拟^[7-8]。为了验证模型的可靠性，笔者对长江南通段自 2009 年 9 月 3—5 日大潮和 2009 年 9 月 10—12 日小潮过程进行了模拟。该段属非稳态强潮汐河段，模型的上边界选于天生港附近，下边界选于新江海河口附近，计算区域长约 44 km，概化为 9 152 个网格，9 471 节点，网格单元的边长一般为 120 m，时间步长为 2 s，利用实测潮位资料作为边界条件。

文中分别对大小潮涨急、落急 2 个时刻特征进行水流模拟，大潮模拟流场见图 1，潮位和流速验证分别为图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出：水位率

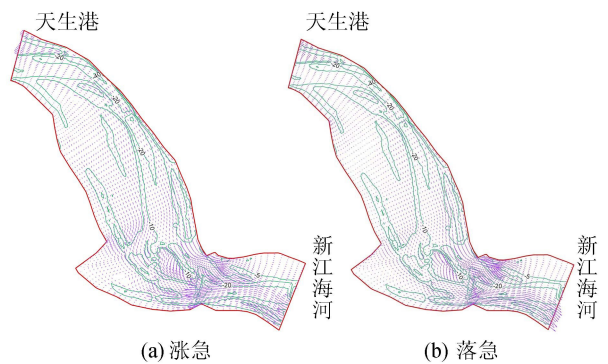
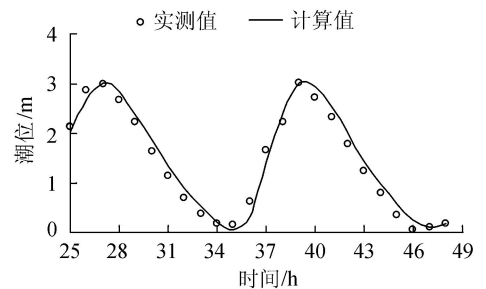
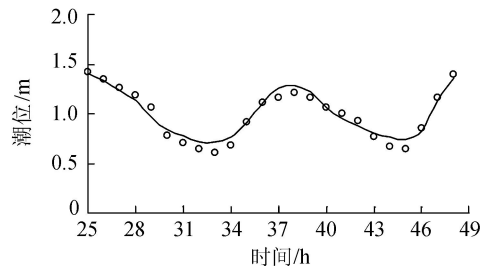


图 1 长江南通段大潮涨、落急流场分布

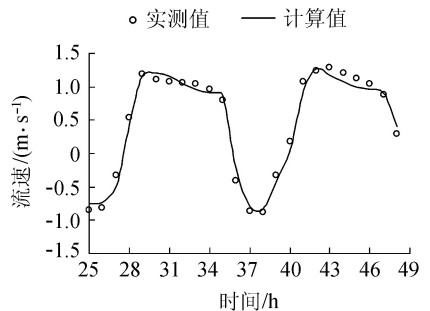


(a) 大潮潮位

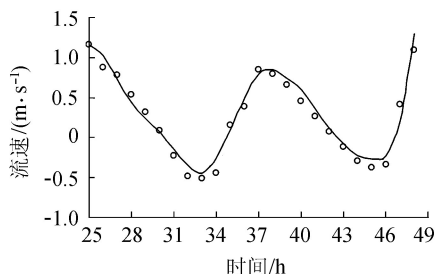


(b) 小潮潮位

图 2 徐六泾潮位验证结果



(a) 大潮流速



(b) 小潮流速

图 3 流速验证结果

用,水流涨落交替出现,呈明显的双向流特征。污染物排入水体后,受到水流的对流和紊动扩散作用,一方面顺着水流方向纵向输送,一方面向四周横向扩散,在排污口附近形成一扩散混合带,该混合带随着流程的增加,经过扩散和自净的共同作用,污染物浓度不断减小。小潮时由于潮汐动力的减弱,河流扩散能力变小,污染物较大潮的时候不易扩散。

预测结果表明,大潮期间整合排污口 COD 质量浓度增量大于 0.5 mg/L 的分布范围约为纵向 3.94 km、横向 660 m; COD 质量浓度增量大于 6 mg/L 的混合区分布范围约为纵向 330 m,横向 120 m。小潮期间 COD 质量浓度增量大于 0.5 mg/L 的分布范围约为纵向 2.97 km,横向 740 m; COD 质量浓度增量大于 6 mg/L 的混合区分布范围约为纵向 760 m,横向 350 m。混合区内 COD 的质量浓度增量叠加本底值后超出了Ⅲ类水质目标。

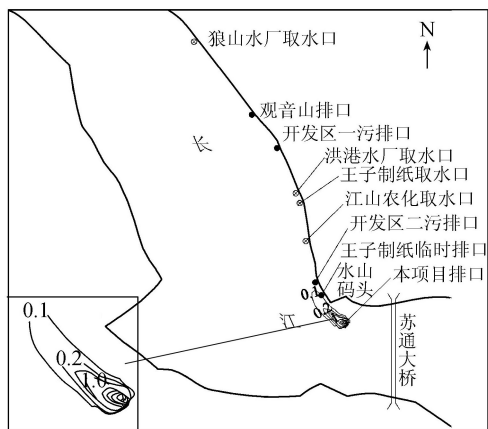
整合排污口距离上游江山农化企业取水口为 5.8 km,距离下游苏通大桥为 3.3 km,正常工况下对江山农化取水口的最大质量浓度增量为 0.03 mg/L,叠加本底值后 COD 质量浓度为 16.03 mg/L,符合Ⅲ类水质目标要求;对苏通大桥的最大质量浓度增量为 0.14 mg/L,叠加本底值后 COD 质量浓度为 12.14 mg/L,符合Ⅱ类水质目标要求。整合排污口搬迁至下游后距离上游老洪港水厂较远,约为 9 km,因此在正常情况下不会对老洪港水厂饮用水水源地的水质造成影响。观音山污水处理厂、开发区第一污水处理厂的排污口从长江南通狼山—老洪港饮用水水源、景观娱乐用水区内整合后搬迁至下游长江南通第二开发区工业用水区,这将有效改善洪港水厂、狼山水厂取水口的水质状况,符合水功能区管理要求,具体见表 1、图 5。

表 1 正常工况下污染因子 COD 质量浓度增量及扩散范围

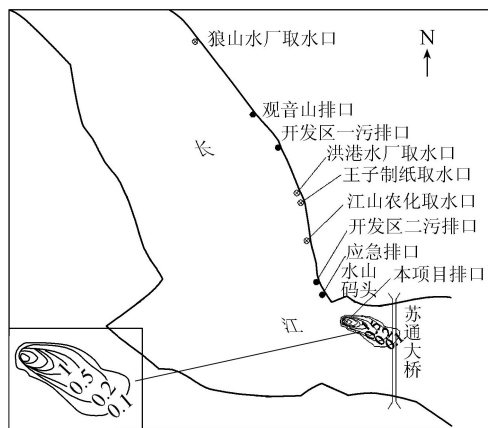
质量浓度 增量值/ (mg · L ⁻¹)	大潮				小潮			
	纵向最大 长度/m		横向最大 宽度/m		纵向最大 长度/m		横向最大 宽度/m	
	上游	下游	上游	下游	上游	下游	上游	下游
0.5	1380	2560	540	660	1250	1720	520	740
1.0	1020	1660	520	540	920	1450	410	620
3.0	420	1010	240	370	610	890	430	440
6.0	190	140	120	120	400	360	350	340

3.4 事故工况时水环境影响分析

预测结果表明,大潮期间整合排污口 COD 质量浓度增量大于 0.5 mg/L 的最大面积为 6.23 km²,具体范围在下游 3.53 km 左右,上游影响至 2.64 km 左右,纵向跨度约 6.17 km,横向影响范围在 1.58 km 以内; COD 质量浓度增量大于 10 mg/L 的高浓度区分布范围:大潮期间最大为 0.95 km²,具体跨度纵



(a) COD大潮涨急扩散分布



(b) COD大潮落急扩散分布

图 5 大潮期间正常排放时 COD 质量浓度增量等值线分布

向约 2.33 km,横向约 540 m。

小潮时 COD 质量浓度增量大于 0.5 mg/L 的最大面积为 4.93 km²,纵向总跨度约 5.45 km,横向影响范围在 1.5 km 以内。小潮时由于水力条件不利于污染物扩散,虽然总的污染物扩散范围小于大潮,但在排口附近形成高浓度污染物中心, COD 质量浓度增量大于 10 mg/L 的高浓度区分布范围:小潮期间最大为 1.18 km²,具体跨度纵向约 2.41 km,横向约 650 m。

事故排放将会导致大量高浓度污水排入长江,从而严重影响排口上下游水环境,破坏水生态系统。因此污水处理厂应加强管理,杜绝事故排放,保证污水处理设施正常运行。

4 结 语

笔者根据长江南通段的水动力、污染物输移特征,建立了平面二维非稳态水流水质耦合模型。模型应用无结构网格剖分计算区域,采用有限体积法及黎曼近似解离散控制方程,将二维模拟转化为求解一系列局部一维问题,从而模拟出计算江段典型水文条件下的水流过程和相应的排污口退水污染物

输运扩散过程。利用实测资料验证结果表明,无论是流场的整体形态,还是验证点的水位、流速都与实际情况符合较好,模型计算精度较高。利用该模型可进一步预测排污口退水对环境影响范围和程度,为排污口设置论证、环境影响评价,提供技术依据。

采用的四边形网格适合于浅水方程的计算,但该网格在河岸附近边界的贴合不是很好,比较理想网格划分方案的是在河道主槽应用四边形网格,在河岸附近用三角形网格拟合边界,因此在今后的计算研究中可考虑采用四边形-三角形混合网格。

参考文献:

[1] 张鸿星,褚君达. 潮汐河口污染带影响因素研究[J]. 水资源保护,2003(5):35-38. (ZHANG Hongxing, ZHU Junda. Factors affecting the pollution belt at tidal estuaries [J]. Water Resources Protection, 2003(5):35-38. (in Chinese))

[2] 张龙江,朱维斌. 长江南通段污染带影响因素研究[J]. 上海环境科学,2003,22(1):36-38,45. (ZHANG Longjiang, ZHU Weibin. Study on affected factors of Nantong Reach of Yangzi River pollution zone [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003,22(1):36-38,45. (in Chinese))

[3] 赵棣华,李褪来,陆家驹. 长江江苏段二维水流水质模拟[J]. 水利学报,2003(6):75-77(ZHAO Dihua, LI Tilai, LU Jiaju. 2-D depth-averaged flow-pollutions model for Jiangsu reaches in Yangtze River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(6):75-77. (in Chinese))

[4] 逢勇,赵棣华,姚琪,等. 长江江苏段区域供水水源地下水

质可达性研究[J]. 水科学进展,2003,14(2):184-188. (PANG Yong, ZHAO Dihua, YAO Qi, et al. Reaching function analysis of water quality in large water supply planning in the Yangtze River in Jiangsu province [J]. Advances In Water Science, 2003,14(2):184-188. (in Chinese))

[5] 傅慧源. 长江干流水域纳污能力及限排总量研究[J]. 人民长江,2008,39(23):40-42. (FU Huiyuan. Study on water environmental capacity and limiting the total amount in the Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2008,39(23):40-42. (in Chinese))

[6] 蒋艳,杨珏,赵棣华,等. 浅水流动有限体积法/Osher 格式的二维水流-水质模拟[J]. 农村生态环境,2002,18(3):30-33. (JIANG Yan, YAN Yu, ZHAO Dihua, et al. Finite volume methods and osher scheme for two-dimensional shallow water flow-pollutant coupled numerical model [J]. Rural Eco-environment, 2002,18(3):30-33. (in Chinese))

[7] 许仁义,逢勇. 闽江干流下游河段纳污能力的研究[J]. 环境科学与技术,2006,29(5):62-64. (XU Renyi, PANG Yong. Receiving ability for pollution into lower reaches of Minjiang River [J]. Environmental Science & Technology, 2006,29(5):62-64. (in Chinese))

[8] 李小虎,韩龙喜,吴云波,等. 潮汐河流排污口设置对水质的影响[J]. 水资源保护,2011,27(6):88-91,96. (LI Xiaohu, HAN Longxi, WU Yunbo, et al. Influence of setup of drain outlet for tidal river on water quality [J]. Water Resources Protection, 2011,27(6):88-91,96. (in Chinese))

(收稿日期:2012-03-06 编辑:高渭文)

(上接第21页)

[9] 韩龙喜,蒋莉华,朱党生. 组合单元水质模型中的边界条件及污染源项反问题[J]. 河海大学学报:自然科学版,2001,29(5):23-26. (HAN Longxi, JIANG Lihua, ZHU Dangsheng. Inverse problem on boundary condition and pollutant source in water quality model of river network [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2001,29(5):23-26. (in Chinese))

[10] 李子. 基于 GST-MQ 配点法的突发水污染事故反演模型研究[D]. 北京:清华大学,2010.

[11] 刘晓东,姚琪,薛红琴,等. 环境水力学反问题研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(6):885-890. (LIU Xiaodong, YAO Qi, XUE Hongqin, et al. Advance in inverse problems of environmental hydraulics [J]. Advances in Water Science, 2009,20(6):885-890. (in

Chinese))

[12] 刘芳. 径向基函数配点法的应用及其误差估计[D]. 苏州:苏州大学,2008.

[13] ROCCA A L, POWER H. A double boundary collocation hermitian approach for the solution of steady state convection-diffusion problems [J]. Computers and Mathematics with Applications,2008,55:1950-1960.

[14] CHEN W, TANAKA M. New insights into boundary-only and domain-type RBF methods [J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation,2000,1(3):145-152.

[15] 魏义坤. 径向基函数插值法解偏微分方程及计算渗流问题[D]. 成都:成都理工大学,2009.

(收稿日期:2012-05-29 编辑:徐娟)