

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.03.013

长江口北支段纳污能力分析

钱小娟, 陈 艳, 顾爱辉

(江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006)

摘要 根据长江口北支水流、水质的特点和实际需要, 建立二维非稳态水流-水质耦合模型, 应用该模型模拟长江口北支的流场和浓度场, 计算 1 000 m 污染带控制长度下长江北支自海门汤加镇至启东灯杆港江段的纳污能力。结果表明, 该江段对 COD 的纳污能力为 3 659 t/a, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的纳污能力为 265 t/a。

关键词 长江口北支; 二维非稳态水流-水质耦合模型; 水域; 纳污能力

中图分类号 X52 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2012)03-0064-04

Analysis of water environmental capacity in North Branch of Yangtze Estuary

QIAN Xiao-juan, CHEN Yan, GU Ai-hui

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

Abstract : Based on the characteristics of the water flow and water quality in the North Branch of the Yangtze Estuary, a two-dimensional unsteady hydrodynamic and water quality coupling model was established. The model was used to simulate the flow field and concentration field in the North Branch of the Yangtze Estuary, and to calculate the water environmental capacity of the river section from Tangjia Town in Haimen to Denggan Port in Qidong, in the North Branch of the Yangtze Estuary, with a pollution zone 1 000 m long. The results show that the water environmental capacity in the studied section is 3 659 t per year for COD, and 265 t per year for $\text{NH}_3\text{-N}$.

Key words : North Branch of Yangtze Estuary; 2-D unsteady hydrodynamic and water quality coupling model; water area; water environmental capacity

长江口在徐六泾以下由崇明岛分隔为南、北两支, 该江段属于强感潮河段, 呈明显潮汐水流的水动力学特征, 水流为典型的往复流。由于水流的往复性, 使得水流流场、污染物浓度场的变化情况复杂。准确定量该水域的纳污能力是管理和保护水功能区的关键, 是科学合理制定水污染控制规划的基础。对水体纳污能力的研究近年发展迅速, 取得了很多研究成果。韩龙喜等^[1-2]提出利用一维水质数学模型数值求解宽深比不大的中小型河道纳污能力, 利用平面二维解析求解宽浅型河道纳污能力。逢勇等^[3]运用二维非稳态水质模型计算了闽江干流下游的纳污能力。本文以长江口北支局部河段为例,

根据其水系特点和实际需要建立了二维非稳态水流-水质耦合模型, 利用该模型计算自海门北支汤加镇至启东灯杆港所在水功能区的纳污能力, 旨在为该区域的水功能区管理和水污染防治提供技术依据。

1 二维非稳态水流-水质耦合模型的建立与验证

1.1 二维非稳态水流-水质耦合数值模拟原理

建立长江口北支段二维非稳态水流水质耦合模型^[4], 使用有限体积法及高性能的 Osher 格式, 逐时段、逐单元计算跨越控制体界面的法向数值通量, 从而模拟出水流过程和相应的污染物扩散过程^[3]。应

用黎曼不变量计算模型边界处的各种通量,并与内部计算格式相同,避免因边界处理不当引起的误差。

1.1.1 二维非稳态水流-水质耦合方程

二维水流方程和对流-扩散方程的守恒形式可表达为

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} + \frac{\partial g(q)}{\partial y} = b(q) \tag{1}$$

其中

$$q = [h, hu, hv, hc]^T$$

$$f(q) = \left[hu, hu^2 + \frac{gh^2}{2}, huw, huc \right]^T$$

$$g(q) = \left[hv, huv, hv^2 + \frac{gh^2}{2}, hvc \right]^T$$

式中: q 为守恒物理量; $f(q)$ 为 x 向通量; $g(q)$ 为 y 向通量; h 为水深; t 为时间; u, v 分别为 x 向和 y 向的垂线平均水平流速分量; c 为污染物(COD 等)浓度; $b(q)$ 为源(或汇)项;

1.1.2 有限体积法的基本方程

定义矩阵 $F(q)=[f(q)+g(q)]^T$ 在任意形状 的单元 Ω 上对式(1)积分,利用散度定理可得到有限体积法的基本公式为

$$\iint_{\Omega} \frac{\partial q}{\partial t} d\omega = - \int_{\Omega} F(q)_n dL + \iint_{\Omega} b(q) d\omega \tag{2}$$

式中: n 为单元边界 $\partial\Omega$ 的外法向单位向量; $d\omega$ 和 dL 为面积分和线积分微元; $F(q)_n$ 为法向通量,表示成为 $F_n(q)=F(q)n$ 。

对于一阶精度离散,在每单元中 q 是以常数近似,因此利用散度定理,方程(2)的中的左项及右边第2项分别可写成 $A \frac{dq}{dt}$ 及 $Ab(q)$ 的形式(A 为单元 Ω 的面积)。这样方程(2)可离散为

$$A \frac{dq}{dt} = - \sum_{j=1}^m F_j(q)L_j + Ab(q) \tag{3}$$

式中: L_j 为单元边 j 的长度;对于 m 边形单元而言,右边第1项可写成 m 项之和,等于被积函数在单元各边上的法向通量 $F_n(q)$ 与该边边长的乘积。设法向 n 和 x 轴的夹角为 Φ (逆时针方向),则有

$$F_n(q) = \cos\Phi f(q) + \sin\Phi g(q) \tag{4}$$

Spekreijse^[9]证明 $f(q)$ 和 $g(q)$ 的旋转不变性,有

$$F_n(q) = \pi(\Phi)^{-1} f(\bar{q}) \tag{5}$$

将(5)代入(4),有限体积法的方程最终可表达为

$$A \frac{dq}{dt} = - \sum_{j=1}^m \pi(\Phi)^{-1} f(\bar{q})L_j + Ab(q) \tag{6}$$

式中: $\bar{q}$ 为 q 在法向上的投影, $\pi(\Phi)$ 为坐标轴旋转角 Φ 的变换矩阵, $\pi(\Phi)^{-1}$ 为逆变换矩阵。由于在单元各边两侧 q (或 $\bar{q}$)值可能不同,出现单元界面上 q (或 $\bar{q}$)值不连续的现象,可通过局部解一维黎

曼问题求得 $f(\bar{q})$ 。

1.2 设定初始条件及边界条件

1.2.1 初始条件

初始时刻计算区域水位取下游边界水位,其流速、浓度增量取0。

1.2.2 边界条件

a. 流量及水位边界条件是: $Q=Q_0, Z=Z_0$;上边界给定为流量过程,下边界给定为水位过程。

b. 浓度场边界条件。入流边界浓度增量取0,出流边界采用第二类边界条件,即浓度增量的法向导数为0。

1.3 选择模型参数

模型参数的选择参照长江江苏段的参数率定验证结果^[5],模型糙率选值范围为0.018~0.025,深槽糙率小于浅滩糙率。水质 COD 的降解系数为0.2/d, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的降解系数为0.18/d^[6],纵向及横向扩散系数分别取为60 m²/s 和0.6 m²/s。

1.4 模型验证

为了验证模型的可靠性,本文对长江海门段自2010年4月大潮和小潮过程进行了模拟。该段属非稳态强潮汐河段,模型的上边界选于海门港附近,下边界选于灯杆港河口附近,计算区域长约47.7 km,概化为10 880个网格,11 253个节点,网格单元的边长一般为120 m,时间步长为4 s,利用实测潮位资料作为边界条件。分别对大小潮涨急、落急2个时刻特征进行水流模拟,大潮模拟流场图见图1,潮位和流速验证图分别为图2和图3。由图2可以看出,水位率定误差小于0.1 m的占80%,仅个别误差超过0.25 m;由图3可以看出,流速验证的误差小于0.1 m/s的占72%,除个别点和时刻外,其平均误差小于20%。验证结果表明,流场空间分布基本合理,潮位过程线及流速验证精度较高,说明该模型能够较好地模拟实际水流情况。

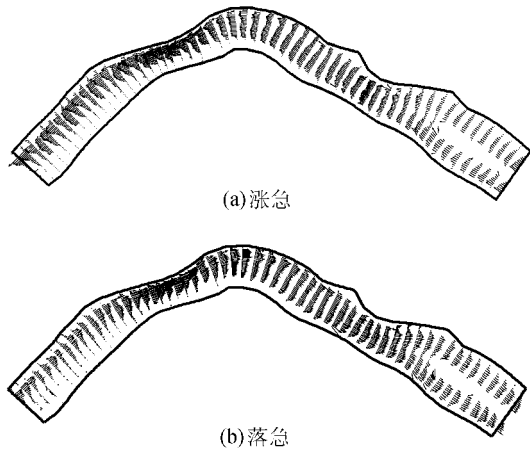


图1 研究江段大潮涨、落急流场分布

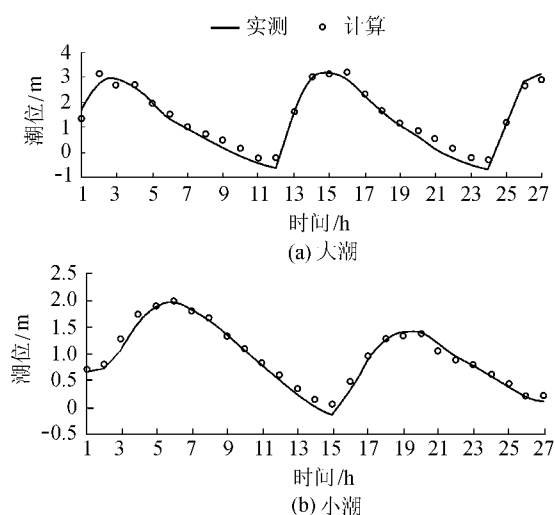


图2 潮位验证结果

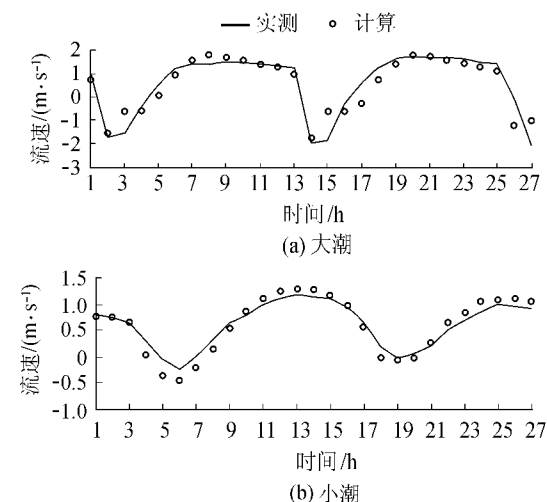


图3 流速验证结果

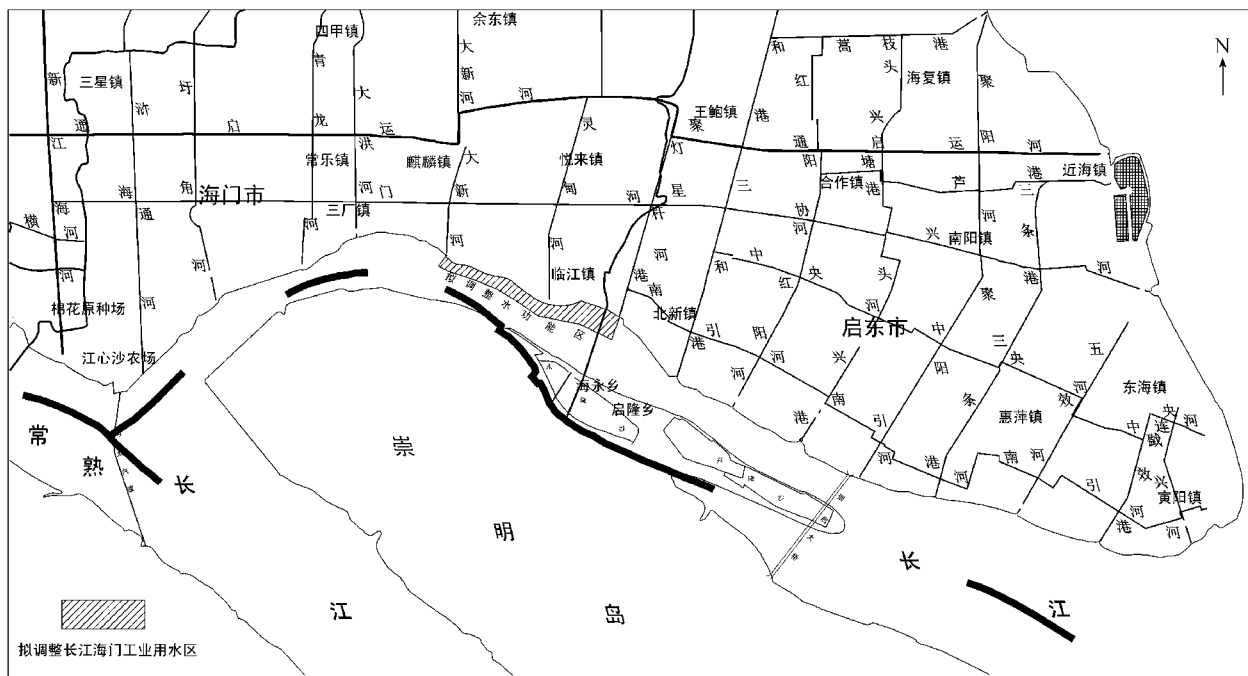


图4 拟调整长江海门工业用水区示意图

2 应用模型计算水域纳污能力

2.1 水域水功能区概况

根据2003年《江苏省地表水(环境)功能区划》,长江口北支自海门汤加镇至启东灯杆港被区划为长江启东自然保护区,2003年该江段的水功能区划是为了与长江口(北支)湿地省级自然保护区相协调。2002年江苏省人民政府批准了启东长江口(北支)湿地省级自然保护区的建设,该湿地保护范围覆盖了启东市的整个长江岸线,总面积477.34 km²。2007年由于上海市与江苏省行政区划的调整以及崇启大桥的开工建设需要,对湿地保护区范围进行了调整,湿地保护区总面积为缩小为214.91 km²,该湿地范围的调整缩小使得原长江启东自然水功能区开发利用限制条件发生了重大改变。另外,根据江苏省沿江开发、江海联动的发展战略,对长江口北支段岸线开发利用规划、港口布局规划、给排水规划先后进行了调整。为了进一步开发利用水资源,海门市拟将北支自海门汤加镇至启东灯杆港江段共12.6 km的水(环境)功能进行调整,将其调整为长江海门工业用水区,拟调整水功能区见图4。

由于原来区划的长江启东自然保护区不可开发利用,因此该江段的纳污能力并未计算,笔者计算了拟调整长江北支自海门汤加镇至启东灯杆港江段的纳污能力,旨在为该区域的水功能区开发利用程度、水功能区管理和水污染防治提供技术依据。

2.2 计算思路

a. 水文设计条件取90%保证率的典型年进行

计算^[7-8],计算背景浓度取现状监测值的平均值。

b. 进行排污口概化,求得概化排污口在 1 000 m 污染带长度下的允许排污量。

c. 取拟调整水功能区 10% 岸线的长度作为排污混合带区域。

d. 以概化排污口允许排污量为基础进行向长江排污产生的纳污能力计算。

2.3 确定典型年及水质监测背景浓度

根据大通水文站多年实测最小月平均流量系列,经频率分析计算得到 90% 保证率的典型年最小月平均流量为 7 870 m³/s。而大通水文站 1979 年 1 月的平均流量为 7 220 m³/s,接近于该流量值,因此确定 1979 年 1 月为典型月。选用下游同步潮位过程作为下边界条件,应用一维水动力学模型进行设计水文条件的计算,得到本项目评价区域上、下边界的水位过程,并以此作为计算区域二维水动力模拟的边界条件。

水质监测背景浓度是根据江苏省水环境监测中心南通分中心自 2005 年 1 月至 2009 年 12 月于青龙港例行监测断面的实测数据来确定的。该断面所在水功能区水质执行Ⅲ类水标准,即 COD 的质量浓度为 20mg/L,NH₃-N 的质量浓度为 1mg/L。监测结果表明,COD 监测的质量浓度范围为 13.2 ~ 16.8 mg/L,NH₃-N 监测的质量浓度范围为 0.59 ~ 0.88 mg/L,COD 和 NH₃-N 的现状平均监测质量浓度分别为 16.0 mg/L 和 0.70 mg/L。

2.4 计算结果

根据区域主要排污口的分布情况,概化灵甸污水处理厂 1 个排污口,利用建立的模型求得污染带长度为 1 000 m 长度下概化排污口的允许排污量,并以此为基础计算长江北支自海门汤加镇至启东灯杆港江段的纳污能力。经计算,概化排污口在 1 000 m 允许污染带长度下,COD 的允许排污量为 2 904 t/a,NH₃-N 的允许排污量为 210 t/a。计算水功能区总长为 12.6 km,10% 岸线长度的排污混合带区域长 1.26 km,那么,由概化排污口 1 000 m 污染带长度下的允许排污量可推算该水功能区对 COD 的纳污能力为 3 659 t/a,对 NH₃-N 的纳污能力为 265 t/a。为了保护拟调整长江海门工业用水区的水质,必须加强对入江污染物的控制和管理,使污染物排放总量严格限制在纳污能力即最大允许排放量之内。

3 结 语

利用二维非稳态水流-水质耦合模型能较好地计算水域纳污能力,但是二维非稳态水流水质耦合模型的计算采用显式格式,对时间步长的要求很严

格,步长较短才能满足计算结果的稳定性,因此计算量较大。如何在不改变模型性能的基础上将模型改为隐式格式,将是今后需要进一步研究的工作。

参考文献:

[1] 韩龙喜,朱党生,蒋莉华.中小型河道纳污能力计算方法研究[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(1):35-38.
[2] 韩龙喜,朱党生,姚琪.宽浅型河道纳污能力计算方法[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(4):72-75.
[3] 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.
[4] 赵棣华,李来,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.
[5] 逢勇.长江江苏段区域供水水源地水质可达性研究[J].水科学进展,2003,14(2):184-188.
[6] 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(12):40-42.
[7] 肖彩,叶闽,杨国胜,金沙,银江水电站对攀枝花花河段纳污能力影响[J].人民长江,2008,39(23):101-105.
[8] 方晓波,张建英,陈英旭,等.基于纳污量的流域水环境管理模式:以金华江流域义务段为例[J].环境科学学报,2008,28(12):2614-2621.
[9] SPEKREIJSE S P. Multigrid solution of the steady Euler equations[M]. Amsterdam: CWI Yrace 46, 1998.

(收稿日期:2011-07-07 编辑:彭桃英)

· 简讯 ·

国际水文科学协会 2013—2022 科学计划
主题研讨会在河海大学举行

2012 年 5 月 11—13 日,国际水文科学协会(IAHS) 2013—2022 科学计划主题战略国际研讨会在河海大学隆重举行。河海大学校长王乘和国际水文科学协会中国国家委员会主席张建云院士参加开幕式并致欢迎词。中科院汪集院士,国际水文科学协会主席戈尔登杨、秘书长克吕斯托福库登耐克、前任秘书长匹艾尔赫伯特等出席开幕式。开幕式由国际水文科学协会副主席任立良主持。来自加拿大、法国、荷兰、意大利、瑞典、澳大利亚、俄罗斯、南非等国,以及我国中国科学院、长江水利委员会、清华大学、北京师范大学、河海大学等单位的相关专家和学者参加了研讨会。

会议研讨了国际水文科学协会主导的未来 10 年水文科学计划的主题、目标、方案,这是协会实施无资料流域水文预报 10 年科学计划之后再次启动的一项新的科学计划,将在 2013 年 7 月瑞典哥德堡召开的国际水文科学大会上发布。会议由国际水文科学协会主办,水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、河海大学水文水资源学院和国际水文科学协会中国国家委员会承办。会议得到了教育部、国家外国专家局“111 计划”水文学及水资源学科创新引智基地项目的资助。

(本刊编辑部供稿)