

受潮汐影响的闸控河网水质的模拟

戴 昱^{1 2} 汪德² 杜迎燕³ 蒋 咏⁴

(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. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098 3. 上海市水文总站, 上海 200232 ;
4. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 210029)

摘要 :以河道法为基础建立水动力学计算模块, 模块集成了产流、汇流模型, 包括了多种闸门运行控制方式的模拟. 以美国国家环保局(EPA)的水质模型(WASP6)为基础建立了考虑水质主要指标 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 和 DO 及点污染源和面污染源的水质计算模块. 该耦合模型水量和水质同时耦联计算, 特别适宜于受潮汐影响的河网水质的模拟. 模型利用上海市青浦、松江区河网实测资料进行了验证, COD_{Cr} 的计算误差在 $-25\% \sim 18\%$ 之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的计算误差在 $-14\% \sim 20\%$ 之间. 考虑到实测数据的误差, 模型水质计算的精度完全满足工程计算精度的要求. 该耦合模型可以用于受潮汐影响的闸控河网水质的模拟.

关键词 河口; 潮汐; 河网; 水质; 耦合模型

中图分类号 :X832 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X(2007)02-0135-05

河口地区的城市和城郊大多存在错综复杂的河网. 河道的严重污染是环境的重大问题, 治理水环境的途径之一是充分利用现有的水利工程, 辅以必要的工程措施和非工程措施, 科学、合理地加大水资源调度的力度, 缩短河道水体的置换周期, 改善水环境. 建立城市河网耦合水力水质模型, 是计算河网水质, 掌握河网水情、水质的时空变化, 控制、改善水环境的重要手段. 耦合模型一般由水力和水质模型 2 部分组成. 已有的水力模型基本上采用结点水位法和三级解法、四级解法^[1-4]. 本文的水力模型采用河道法, 对每条河道迭代求解, 因而只需对河道及每条河道的结点单独编号, 避免了结点水位法中繁琐的河道汇流点的编号过程, 为增减模拟河道提供了方便. 在方程组的求解方面, 采用更为有效的压缩存储形式的列主元消元法代替原有的求解方法, 提高了计算的稳定性. 本文的水力模型还包括产流、汇流模型, 把降雨后的产流、汇流计算和水动力计算集成到一个模型中, 增加了模型的功能, 包括了多种闸门运行控制方式(按时间过程, 内外河水位条件, 单孔、多孔开启闸门等) 的模拟, 可以满足闸控河网地区除涝、引水和水资源调度等运行和控制过程中各种措施的模拟^[5]. 水质模型以美国国家环保局(EPA)的水质模型(WASP6)为基础^[6], 根据上海地区河网的水文、地形、防洪设施、水利工程等特点, 对原模型进行了修改并增加了分区和分河道设定生化参数的功能. 本文的模型水量和水质同时耦联计算, 不同于其他水力水质模型先算水量, 后算水质的解耦算法, 因此特别适宜于受潮汐影响的河网水质的计算. 本文建立的水力水质耦合模型利用上海青浦、松江区河网的水质实测资料进行了验证. 验证结果证明, 该模型可以用于受潮汐影响的闸控河网水质的模拟.

1 耦合模型

1.1 水力模型

基本方程是扩展后的圣维南(Saint-Venant)方程组^[5]

$$\frac{\partial S_{co}(A + A_o)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\alpha S_m Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) + L = 0 \quad (2)$$

式中 : Q ——流量 ; h ——水位 ; A ——有效过水断面面积 ; A_o ——蓄水断面面积 ; S_{co} 、 S_m ——河道蜿蜒系数, 是水位 h 的函数 ; x ——沿主流向的纵向距离 ; t ——时间 ; q ——单宽侧向入流或出流(入流为正, 出流为负);

β ——动量校正系数; g ——重力加速度; S_f ——河道的阻力坡降; L ——侧向流的动量,侧向入流时 $L = qv_x$ (v_x 是侧向入流沿河道流向 x 的速度分量),侧向出流时 $L = qQ/A$,侧向渗流时 $L = 0.5qQ/A$ 。

利用求解效率高的 Newton-Raphson 迭代法求解。方程的基本离散格式是四点加权隐式有限差分格式,离散后得到一组非线性方程组。

在河网计算中,边界条件分成2类:一类是外部边界条件,通常作为输入资料给定;另一类是内部边界条件,通常用相容条件给定。外部边界条件由水位过程线 $h(t)$ 、流量过程线 $Q(t)$ 或水位流量关系曲线 $Q(h)$ 给定。内部边界条件是指位于河道上的坝、闸、桥梁、泵站等水工或交通建筑物和旁侧入流(出流),按建筑物的特点,根据相容条件来计算。

1.2 水质模型^[3-4,6]

水质数学模型中水质指标的变化由2大部分组成,一部分是水流的对流和弥散过程引起的物理过程及边界条件、点污染源和面污染源引起的水体中水质指标的变化,另一部分是由于化学过程和生物转化过程引起的水质指标的变化。

$$\frac{\partial}{\partial t}(AC) = \frac{\partial}{\partial t}\left(-UAC + E_x A \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + A(S_L + S_B) + AS_k \tag{3}$$

式中: x ——河道的纵向坐标; ρ ——水质指标的质量浓度; t ——时间; U ——纵向流速; E_x ——纵向弥散系数; S_L ——点污染源和面污染源; S_B ——边界污染负荷; S_k ——源汇项,化学过程和生物转化过程引起的水质指标的变化; A ——河道横断面面积。

方程的离散采用显式差分格式,对流项差方用 Euler 前差分,弥散项用中心差分,化学过程和生物转化过程由 S_k 项来表示。模型中考虑氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝化氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、无机磷(PO_4)、浮游植物(PHYT)、碳化需氧量(CBOD)、溶解氧(DO)、有机氮(ON)和有机磷(OP)的质量浓度分别用 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 、 ρ_5 、 ρ_6 、 ρ_7 和 ρ_8 表示,与这些水质指标对应的 S_k 项分别可以用相应的方程描述。

单向入流河道断面的边界条件为水质指标的时间过程 $\rho_i(t)$,受潮汐影响的出流断面采用开边界条件。

2 验 证

利用上海青浦、松江区的河网资料对耦合模型进行了验证。本次计算采用2000年4月3~10日青浦、松江区水资源调度的资料并结合1999~2000年上海市水资源普查中有关污染源的资料^[7]。

2.1 计算河网布置

由于青浦、松江区的河网是上海大陆地区河网的一部分,为了简化边界条件的给定和考虑河网河道间水量的交换,计算河网除了青浦、松江区的河网外,还包括了黄浦江、太浦河、大蒸港、苏州河、淀浦河等黄浦江的部分主要支流。计算河网布置见图1。水力计算边界条件为黄浦江上游淀峰站、淀浦河西闸闸上、苏州河上游赵屯站、大蒸港三和站、太浦河金泽站和黄浦江吴淞口水位。水质计算边界条件除黄浦江吴淞口为开边界条件,其余5个边界为水质指标的时间过程 $\rho_i(t)$ 。

2.2 水文资料

水文资料采用2000年4月1日8:00至11日23:00同步实测水位资料。边界水位测点是淀峰站、金泽站、三和站、赵屯站、枫围站、邱移庙站、吴淞口站。4月1~16日上海地区有雨,青浦、松江区有关雨量站的实测资料用于产汇流计算。计算中考虑了淀浦河东闸、华新闻、东大盈闸、朱泖河闸、华田泾闸、油墩港闸、大涨泾闸和蒲汇塘闸在调水期间水闸的运行过程(即实时的闸门开启、关闭的时间过程)。

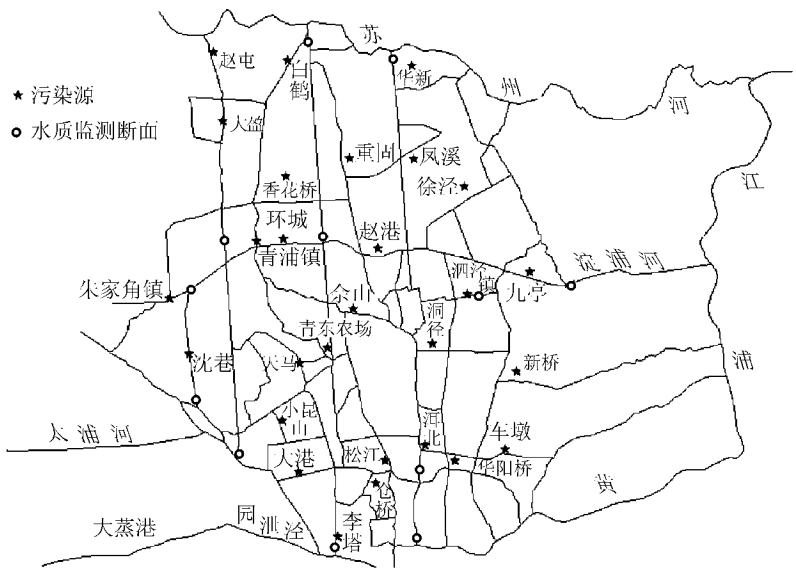


图1 计算河网布置
Fig.1 Computational diagram of river net

2.3 水质断面监测资料

调水过程中共布设 12 个水质监测断面 ,主要水质监测指标为水温 ,COD_{Cr} ,BOD₅ ,NH₃-N ,DO ,水色等 .监测断面的布置见图 1 .

2.4 污染源资料

污染源包括点污染源和面污染源两部分 ,根据调查 ,青浦、松江区主要污染物的日排放为工业排放、企事业单位排放、居民生活用水排放、禽畜排放和地表径流集污 .根据上海水资源普查的资料 ,本模型验证时将青浦、松江区内点源集中成 28 个 ,这些点源分别就近排入相应的河道 .

2.5 水质计算参数

根据已有资料 ,模型只对 NH₃-N ,COD_{Cr} ,BOD₅ 和 DO 进行验算 ,同时不考虑底泥和浮游植物的作用 .水质计算参数的取值^[8]为 :弥散系数 $E_x = 150 \sim 450 \text{ m}^2/\text{d}$,20℃时的耗氧系数 $k_d = 0.15 \sim 0.35 \text{ d}^{-1}$,温度系数 $\Theta_d = 1.05$;CBOD 的半饱和系数 $k_{\text{BOD}} = 0.4 \text{ mg/L}$,20℃时的硝化系数 $k_{12} = 0.09 \sim 0.13 \text{ d}^{-1}$,温度系数 $\Theta_{12} = 1.08$;氨的半饱和系数 $k_{\text{NIT}} = 0.5 \text{ mg/L}$,20℃时的复氧系数 $k_2 = 4.1 \sim 4.7 \text{ d}^{-1}$,温度系数 $\Theta_2 = 1.028$.

2.6 验算结果

- a. 水量计算结果 .淀浦河东闸、华田泾闸和油墩港闸有同步实测资料 ,水位和流量计算结果与实测资料均较吻合 .模型计算流量结果与同步实测资料的比较如图 2 所示 .由图 2 可见 ,计算和实测流量均非常吻合 .
- b. 水质计算结果 .淀浦河南港桥、淀浦河东闸、华田泾水闸 3 个监测断面有 NH₃-N ,BOD₅ 和 COD_{Cr} 的同步实测资料 .模型计算结果与同步实测资料的比较如图 3 ~ 5 所示 .由图可见 ,计算结果与同步实测资料基本

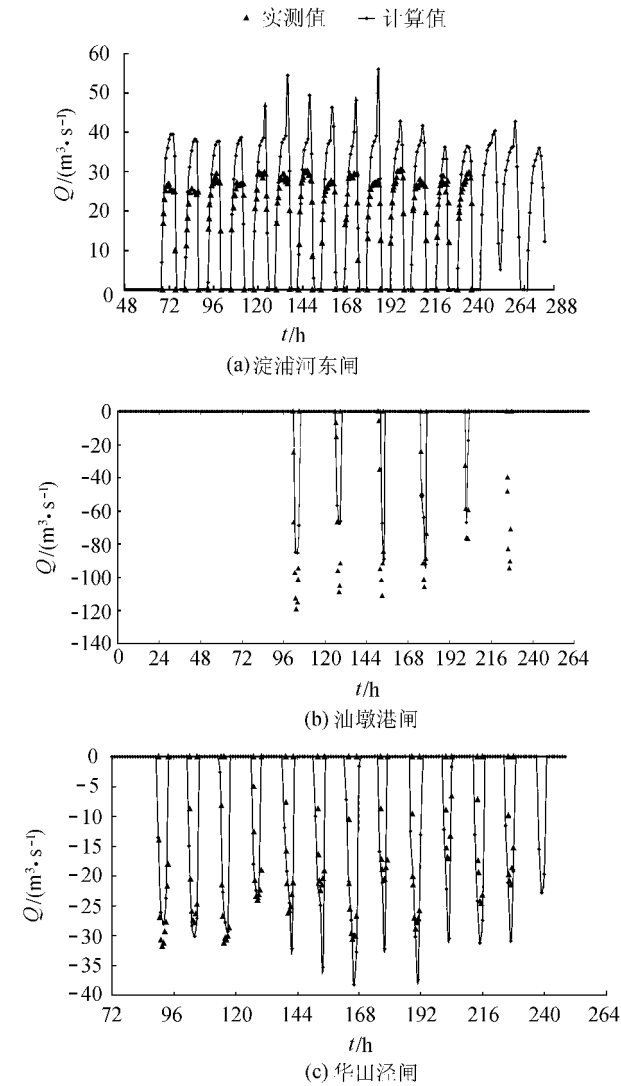


图 2 计算和实测流量的比较

Fig.2 Comparison of measured and computed discharges

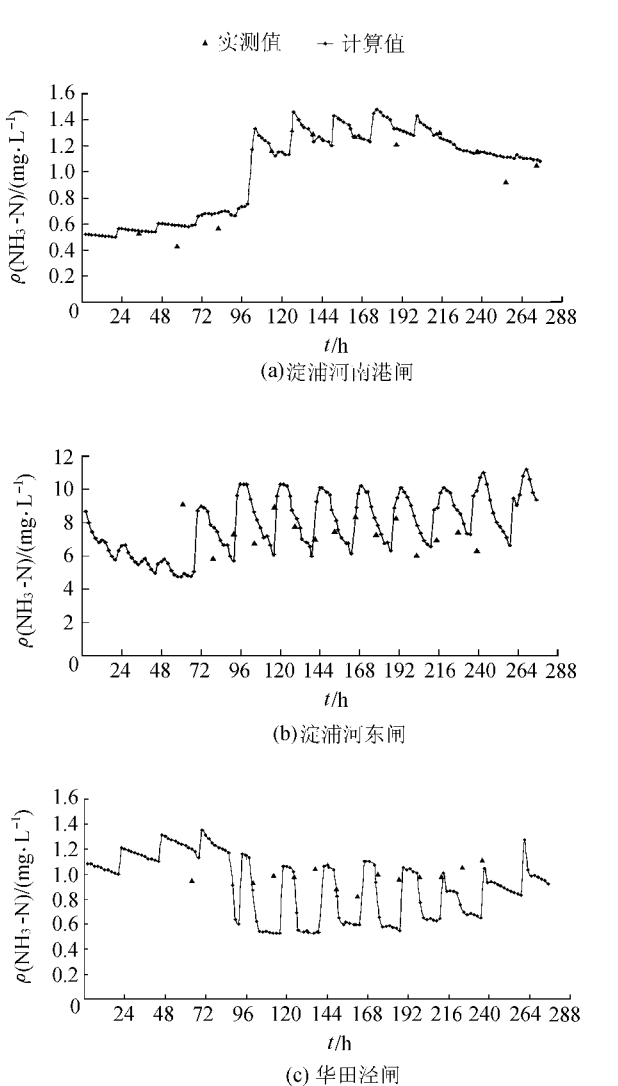


图 3 计算和实测 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的比较

Fig.3 Comparison of measured and computed $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$

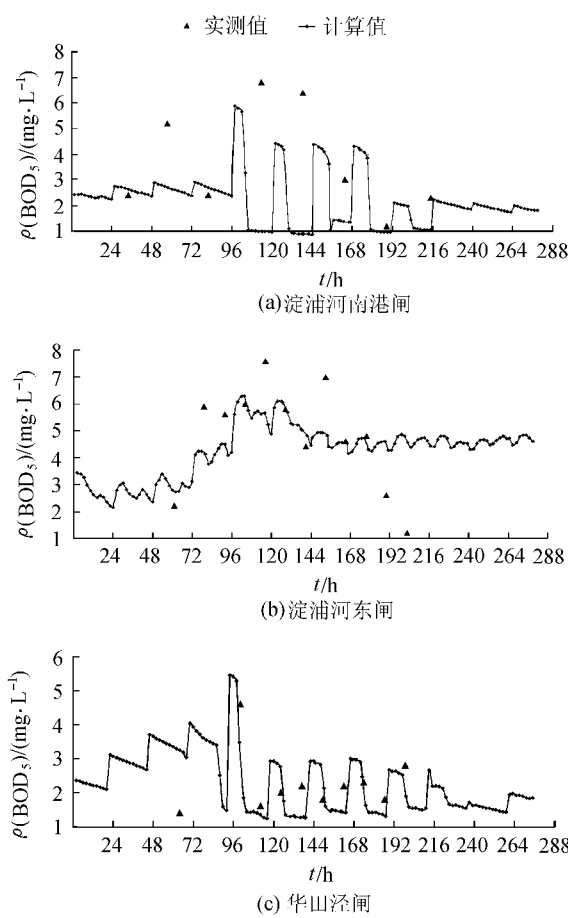


图 4 计算和实测 $\rho(\text{BOD}_5)$ 的比较

Fig.4 Comparison of measured and computed $\rho(\text{BOD}_5)$

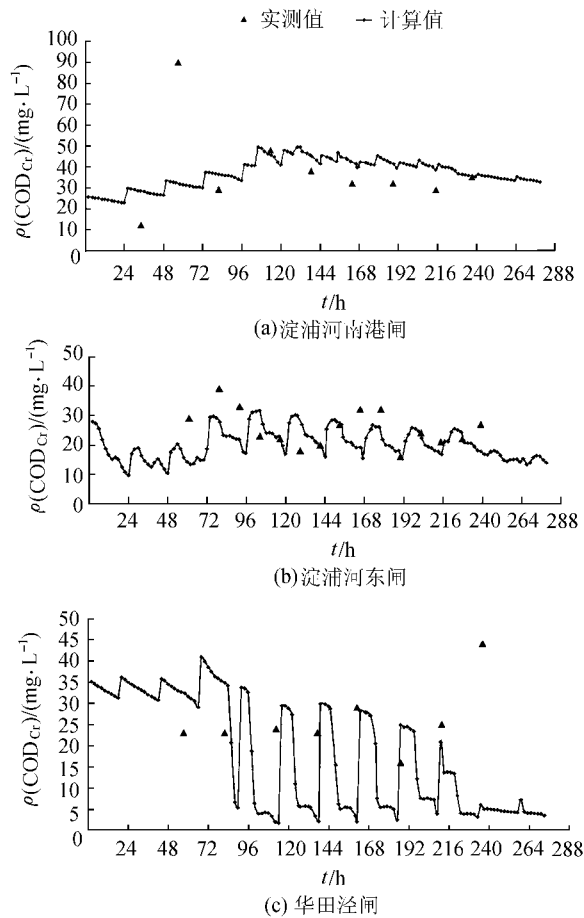


图 5 计算和实测 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 的比较

Fig.5 Comparison of measured and computed $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$

吻合.对比 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 和 COD_{Cr} 的计算结果和流量的计算结果,可以看出,当华田泾水闸引水时水质指标 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 和 COD_{Cr} 减小,水质改善.这证明水质模型的计算是合理的.另外,监测断面淀浦河东闸水质计算结果差异较大,这可能是水质取样紧靠水闸处,水位波动等因素对其产生了一定的影响所致.

3 结 论

本文建立了全面考虑河口地区闸控河网的水力特征和河道水质特征的耦合模型.耦合模型中的水力模型以河道法为基础,能模拟复杂的闸门调控和产流、汇流的过程.水质模型基于氮循环和磷循环机理考虑了氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝化氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、无机磷(PO_4)、浮游植物(PHYT)、碳化需氧量(CBOD)、溶解氧(DO)、有机氮(ON)和有机磷(OP)等水质指标及点污染源和面污染源.经由上海市青浦、松江区河网实测资料的验证, COD_{Cr} 的计算误差在 $-25\% \sim 18\%$ 之间, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的计算误差在 $-14\% \sim 20\%$ 之间.考虑到实测数据的误差,模型水质计算的精度完全满足工程计算精度的要求.本文建立的耦合模型可以用于受潮汐影响的闸控河网水质的模拟.

参考文献:

[1] 杨丽. 非恒定二维耦合水质数值模拟技术研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4): 78-81.
[2] 韩龙喜, 陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 127-130.
[3] 曾思育, 徐一剑, 张天柱. 环状河网水质模型在水污染控制规划中的应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 193-196.
[4] 徐贵泉, 褚君达, 吴祖扬, 等. 感潮河网水环境容量影响因素研究[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 375-380.
[5] WANG De-guan. Simulation of unsteady flow in river networks in Shanghai area[C]//XXIX IAHR Congress Proceedings. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 28-35.

[6] ROBERT B A. The water quality analysis simulation program , wasp5 part a : model documentation[M]. Washington : EPA , 1993 .
[7] 汪松年 , 阮任良 . 上海市水资源普查报告[M]. 上海 : 上海科学技术出版社 , 2001 : 114-124 .
[8] 阮任良 . 上海水环境研究[M]. 北京 : 科学出版社 , 2000 : 65-67 .

Water quality simulation for gate-controlled river net
under influence of tides

DAI Yu^{1 2} , WANG De-guan² , DU Ying-yan³ , JIANG Yong⁴

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

2. College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

3. Shanghai Hydrological General Station , Shanghai 200232 , China ;

4. Water Resources Service Center of Jiangsu Province , Nanjing 210029 , China)

Abstract :The simulation of water quality for gate-controlled river net under influence of tides is an important issue for water environment management in estuarine regions. The river net water quality model consists of two parts , i. e. the modules for hydrodynamic calculation and water quality calculation. In this paper , a hydrodynamic calculation module with the runoff generation and confluence processes taken into account was developed based on the channel method , which could simulate complicated gate operation procedures. Meanwhile , a water quality calculation module was also developed based on the water quality model WASP6 by EPA , in which the main water quality indexes , such as COD_{Cr} , NH₃-N , BOD₅ , and DO , the point sources and the non-point sources were taken into account. With the water quality coupling model , the water quality and water quantities could be calculated simultaneously. The model was verified by the measured data of the river nets of Qingpu and Songjiang Districts of Shanghai City. The calculation errors of COD_{Cr} and NH₃-N of the model were in the ranges of - 25%—18% and - 14%—20% , respectively. The calculation accuracy of the model meets the requirement of practical projects. Therefore , the coupling model can be used for simulation of water quality for river nets under influence of tides.

Key words : estuary ; tide ; river net ; water quality ; coupling model