

# 河网水动力及综合水质模型的研究

张明亮, 沈永明

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

**[摘要]** 采用 Preissmann 4 点隐式差分格式离散一维圣维南方程组, 应用三级联解法求解河网水动力数学模型。基于河道-节点-河道算法的河网水质模型的求解特点, 在 WASP 的水质模型理论上, 建立了河网非稳态水动力综合生态水质数学模型, 考虑了多个污染物变量的耦合计算、变量之间的相互转化和迁移。利用模型对 4 个河网算例进行验证。验证表明, 水位和流量过程计算值与实测值吻合很好, 各水质变量的计算值和实测值也符合较好, 可见模型是合理可靠的, 为河网的水质预测和管理提供了一个较为简便实用的工具。

**[关键词]** Preissmann 格式; 河网; 水动力模型; 综合水质模型; WASP 模型

**[中图分类号]** TV131.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2008)10-0078-06

## 1 前言

河流水质模型是描述河道水体中污染物迁移转化规律的数学模型, 是进行河流水质模拟与水污染控制的有力工具。采用的数学模型是否合理, 直接影响到水质模拟与水污染控制结果的准确性。水质模型的研究已经从点源污染模型转向面源污染模型, 从一般的水质模型转向综合水质生态模型, 并考虑有毒化合物以及河流泥沙问题<sup>[1]</sup>。近几年, 河网水质模型得到长足的发展, 如国外应用较多的美国的 QUAL-2E, WASP6 模型等。QUAL-2E 模型不能很好地反映网状及逆流河网的特点, WASP6 模型同时求解全河网上所有河段(或断面)上的未知数的特点, 其结果是分片很粗, 影响结果的精度<sup>[2]</sup>。国内的李锦绣建立了三峡水库整体一维水质模型, 彭虹建立了河流综合水质模型, 该模型仅仅用于树状河网和单一河道, 对于环状的感潮河网有限制<sup>[1,3]</sup>。储君达、韩龙喜等建立了河网水质模型, 其模型考虑的水质变量不全面, 对各个变量间的迁移转化考虑得不够全面<sup>[4,5]</sup>。

笔者采用三级联解法求解水动力模型, 基于河道-节点-河道算法的河网水质模型的求解特点,

以 WASP 的水质模型理论为基础, 建立了河网非稳态水动力综合水质数学模型, 该模型考虑了多个污染物变量的耦合计算, 考虑变量之间的相互转化和迁移。

## 2 水动力数学模型

### 2.1 基本方程

通常用圣维南方程(Saint-Venant equation)描述一维水流流动的数学模型, 可以写成如下形式:

水流连续方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{Q^2}{A} \right] + gA \left[ \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right] = 0 \quad (2)$$

式中,  $z$  为水位,  $Q$  为过水流量,  $B$  为过水宽度,  $A$  为过水断面面积,  $t$  为时间,  $x$  为距离,  $K$  为流量模数,  $g$  为重力加速度,  $q_t$  为旁侧入流流量<sup>[6]</sup>。

### 2.2 差分格式及差分方程

利用 Preissmann 4 点加权隐式差分格式, 对式(1)和式(2)进行离散, 对差分方程进行线性化处理后可得

**[收稿日期]** 2007-03-13; **修回日期** 2007-05-13

**[基金项目]** “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB403302); 国家自然科学基金重点资助项目(50839001)

**[作者简介]** 张明亮(1976-), 男, 黑龙江海林市人, 博士, 主要从事环境水力学研究

$$a_{1i}\Delta z_{i+1} + b_{1i}\Delta Q_{i+1} + c_{1i}\Delta z_i + d_{1i}\Delta Q_i = e_{1i} \quad (3)$$

$$a_{2i}\Delta z_{i+1} + b_{2i}\Delta Q_{i+1} + c_{2i}\Delta z_i + d_{2i}\Delta Q_i = e_{2i} \quad (4)$$

式中,  $a_{1i}, b_{1i}, c_{1i}, d_{1i}, e_{1i}, a_{2i}, b_{2i}, c_{2i}, d_{2i}, e_{2i}$  为时间步长  $\Delta t$  内河段断面  $A_i$  的差分方程的系数;  $\Delta z_i, \Delta z_{i+1}$  分别为第  $i, i+1$  断面在  $\Delta t$  时间内的水位增量;  $\Delta Q_{i+1}, \Delta Q_i$  分别为第  $i, i+1$  断面在  $\Delta t$  时间内的流量增量。

### 2.3 汇点连接方程

实际上河网和渠网的汇点形式很多, 连接情况也不同, 但总可以找到下面两个条件:

流量守恒条件。进出汇点  $j$  水量与汇点  $j$  实际水量增减相平衡, 表示为

$$\sum_{k=1}^L \Delta Q_{jk}^{n+1} = A_j \frac{dz_j}{dt} - \sum_{k=1}^L Q_{jk}^n \quad (5)$$

$A_j$  为汇点  $j$  处的面积,  $\sum_{k=1}^L Q_{jk}^n$  为连接汇点  $j$  的支流  $n$  时刻的流量之和,  $L$  为汇点支流数。

能量守恒条件。连接汇点  $j$  的各河段断面的水位增量与汇点  $j$  的水位增量相同, 表示为

$$\Delta z_j = \Delta z_k \quad (6)$$

### 2.4 方程的求解

内河道子河段式(3)、式(4)经过递推公式得

$$\Delta Q_i = \alpha_i + \beta_i \Delta z_i + \xi_i \Delta z_m \quad (7)$$

$$\Delta Q_i = \theta_i + \eta_i \Delta z_i + \gamma_i \Delta z_1 \quad (8)$$

$m$  为河道被划分的子河段个数,  $\alpha_i, \beta_i, \xi_i, \theta_i, \eta_i, \gamma_i$  为内河道的追赶系数, 可逐步递推求解。任意单一河道总有 2 个汇点与之相连, 其水位分别与该河段首末断面水位相等, 首末断面流量各有一个追赶方程:

$$\Delta Q_1 = \alpha_1 + \beta_1 \Delta z_1 + \xi_1 \Delta z_m \quad (9)$$

$$\Delta Q_m = \alpha_m + \beta_m \Delta z_m + \xi_m \Delta z_1 \quad (10)$$

外河道通过边界条件建立河网末断面流量和内汇点水位的关系:

$$\Delta Q_i = F_i \Delta z_i + G \quad (11)$$

$$\Delta z_i = H_i \Delta Q_{i+1} + I_i \Delta z_{i+1} + J_i \quad (12)$$

其中,  $H_i, I_i, J_i, F_i, G$  为外河道的追赶系数。每个汇点都有  $(L-1)$  动力连接方程式(6)和一个流量连接方程式(5)。对每个汇点将式(9)、式(10)代入式(5)并与式(6)联立得封闭的各汇点水位为未知量的方程组, 据此可求得每个汇点水位, 代入式(7)、式(8)两方程用消元法解得内河道各断面水位和流量, 运用式(11)、式(12)可求得外河道的水位和流量。

## 3 水质模型

### 3.1 水质方程

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) + S_c - S \quad (13)$$

式中,  $C$  为水质的各变量浓度,  $E_x$  为纵向离散系数,  $S_c$  为输送的物质浓度有关的生化反应项,  $S$  为外部源汇项<sup>[7]</sup>。

### 3.2 水质方程的离散

采用隐式差分格式, 得到离散方程

$$a_i C_{i-1} + b_i C_i + c_i C_{i+1} = e_i \quad (14)$$

充分考虑河网不确定流态的问题, 需要引入调节因子  $f$ , 离散系数为

$$a_i = -E_{xi} \Delta t / \Delta x^2 - (Q/A)_i^n (1+f) \Delta t / 2 \Delta x \quad (15)$$

$$b_i = 1 + E_{xi} 2 \Delta t / \Delta x^2 + (Q/A)_i^n f \Delta t / \Delta x \quad (16)$$

$$c_i = -E_{xi} \Delta t / \Delta x^2 + (Q/A)_i^n (1-f) \Delta t / 2 \Delta x \quad (17)$$

$$e_i = C_i^n + \Delta t (S_c + S) \quad (18)$$

$f = \text{sign}((Q/A)_i^n)$ , 对于首末段面, 离散系数略有不同。每个汇点可以给出物质质量平衡方程:

$$\sum_{k=1}^L (QC)_{kj} = (AC)_j \frac{dz}{dt}$$

$Q_{kj}, C_{kj}$  分别是与汇点  $j$  相连河道  $k$  进出汇点的流量与污染物浓度。辅以边界条件, 可得到包含整个河网汇点浓度的代数方程组, 求得汇点浓度, 根据 4 种不同流向的方程求解各个河道各断面的浓度  $C$ <sup>[3]</sup>。

### 3.3 水质参数的确定

纵向离散系数是随水流条件而定, 采用 Fisher 半经验公式:

$$E_x = 0.011 (Q/A)^2 B^2 / h (ghI)^{1/2}$$

式中,  $I$  为水力坡降,  $B$  为河道宽度,  $h$  为平均水深。

### 3.4 富营养化的动力学模型

模型主要考虑 10 种物质成分, 包括浮游植物 (PHYT)  $C_4$ 、5 日生化需氧量 (C-BOD)  $C_5$ 、有机氮 (ON)  $C_7$ 、氨氮 ( $\text{NH}_3$ )  $C_1$ 、硝氮 ( $\text{NO}_2$ )  $C_2$ 、有机磷 (OP)  $C_8$ 、无机磷 ( $\text{OPO}_4$ )  $C_3$ 、溶解氧 (DO)  $C_6$ 、电导率 ( $\gamma$ )  $C_9$  及温度 ( $T$ )  $C_{10}$ 。具体的各个参数的意义和取值可以参考文献[1, 8], 水体中各成分之间相互作用如图 1 所示。

## 4 计算验证

### 4.1 河道洪水演进算例

2003 年 8 月至 9 月渭河发生了特大洪水, 汹涌的洪水冲毁了农田, 淹没了村庄, 造成了渭河下游严重的洪水灾害。利用渭河下游临潼至陈村河段

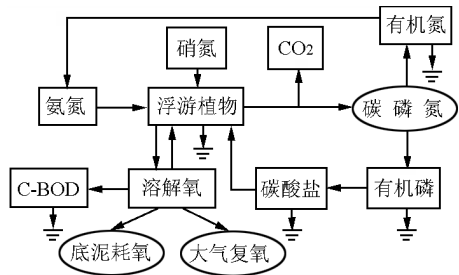


图1 水体各成分之间相互作用图<sup>[8]</sup>  
Fig. 1 State variable interactions

2003年汛期对所建立的模型进行了验证计算。验证河段的上游边界为临潼站2003年汛期的洪水实测流量过程,下游边界为陈村站断面2003年汛期的实测水位过程。图2给出上游临潼站的流量过程线和下游陈村的水位过程线。图3为2003年临潼站水位计算值与实测值比较。图4为华县站流量计算值与实测值比较。从图3、图4可见,水位和流量过程线计算与实测符合较好。

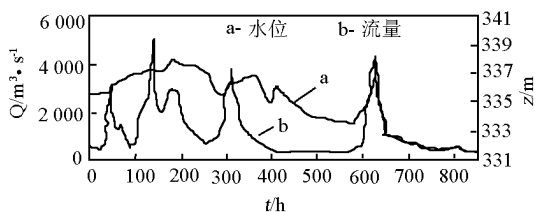


图2 上游边界的流量过程线和下游边界的水位过程线  
Fig. 2 Discharge and water level curves at upstream and downstream boundary

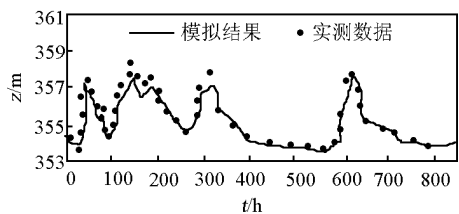


图3 临潼站水位计算值与实测值比较  
Fig. 3 Comparison of water level at Lintong station

#### 4.2 非恒定流环状河网算例

图5给出了计算河网结构图,各渠道的特征参数可参看文献[9]。上游(节点7、节点8)给定恒定入流流量  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , (节点6)给定流量时间变化过程(图6(a))。下游各出口(节点9、节点10)给定恒定的水位5 m。计算结果:图6(b)为河道3首断面

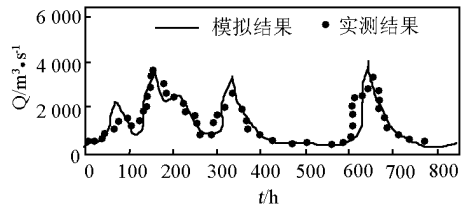


图4 华县站流量计算值与实测值比较  
Fig. 4 Comparison of discharge at Huaxian station

流量对比,图6(c)为河道1末断面流量对比,图6(d)为河道5首断面流量对比,图6(e)、图6(f)为河道9、河道10首断面流量对比。由于边界6的流量逐渐增大,从而使河道1出现倒流的现象,这是符合实际的流动情况。

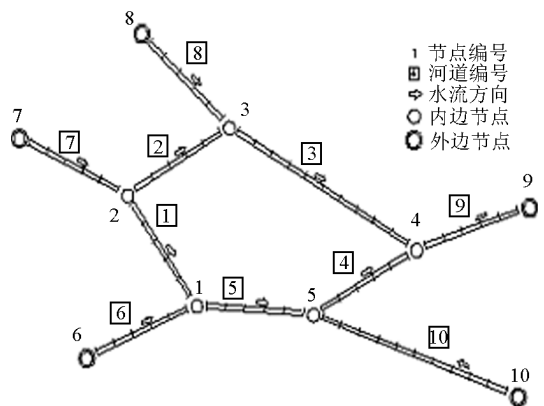


图5 环状渠网结构图  
Fig. 5 Looped canal network

#### 4.3 非恒定流水质模型

图7给出了Spokane River部分河段示意图<sup>[10]</sup>,上游为Coeur d'Alene Lake,下游为Post Falls Dam,模拟的时段是2004年1月1日—2004年10月1日,水动力计算上游边界给定流量过程线,下游给定水位过程线,水质边界上游给定温度、溶解氧、电导率、C-BOD、硝氮、氨氮、藻类等的浓度时间分布。图8是Post Falls Dam站计算流量和实测值对比,图9是Coeur d'Alene Lake站计算水位和实测值对比。通过图8、图9可以看出,水位和流量的计算值和实测值符合很好。从图10可以看出,模型计算的水质结果和实测资料吻合良好,各污染物浓度计算的相对误差除了C-BOD浓度的个别节点较大外,接近50%,其余污染物变量的相对误差均不超过20%,模型具有较高的精度。

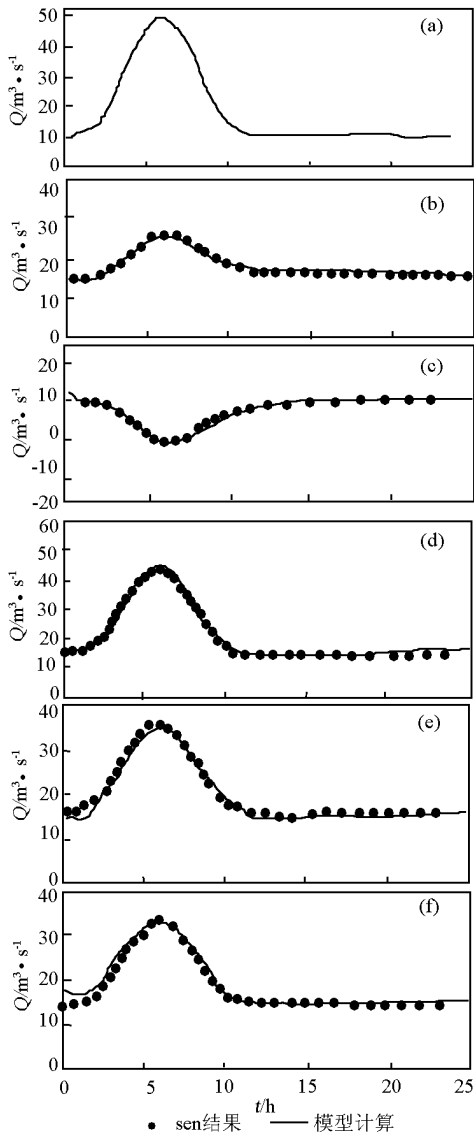


图6 不同断面计算值和实测值对比

Fig. 6 Comparison of discharge in different sections

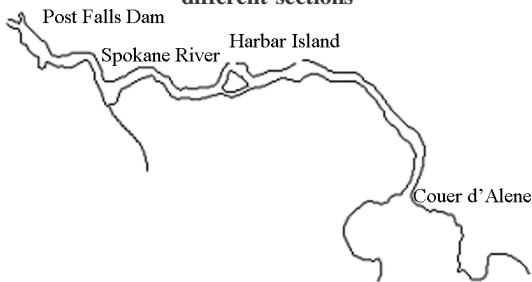


图7 Spokane River 河网示意图

Fig. 7 Structure of the Spokane River network

#### 4.4 感潮河网水质模型

Lower Columbia Slough 河网是美国一个重要的河网之一,如图 11 所示,它在下游连接威拉米特河,是一个典型的感潮河网,它的潮位波动在 0.3 ~ 1 m

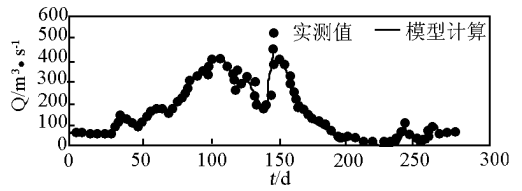


图8 Post Falls Dam 计算流量和实测值对比

Fig. 8 Comparison of discharge at Post Falls Dam

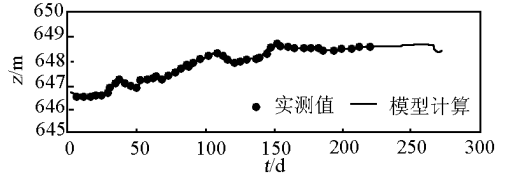


图9 Coeur d'Alene Lake 站计算水位和实测值

Fig. 9 Comparison of water level at Coeur Alene Lake

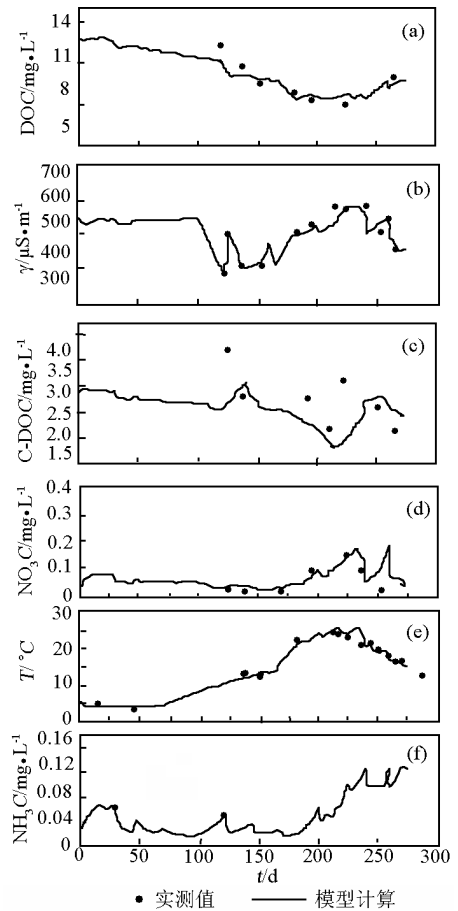


图10 Post Falls Dam 站计算各污染物浓度和实测值对比

Fig. 10 Comparison of constituent concentration at Post Falls Dam

变化<sup>[11]</sup>。为了验证和率定水动力模型的正确性,对 Lower Columbia Slough 河网 1990 年的水动力过程进行模拟,总的模拟时间从 1990 年 1 月 1 日到 1990

年 12 月 31 日共 365 d, 计算时间步长 0.01 d, 该河网的曼宁系数为 0.01 ~ 0.015。各个断面计算的水位、流量和实测值的对比见图 12, 无论是流量还是水位, 计算的结果和实测的结果符合很好, 可见建立的水动力模型是可靠的。随后对 Lower Columbia Slough 河网 1995 年的水质进行模拟, 模拟的变量包括溶解氧、无机磷、硝氮、氨氮、藻类等。

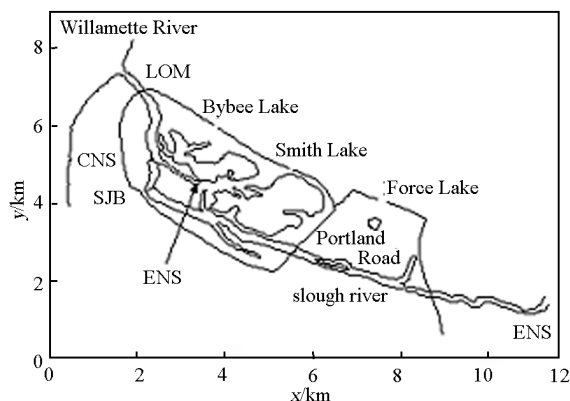


图 11 Lower Columbia Slough River 河网示意图  
Fig. 11 Structure of the Lower Columbia Slough River network

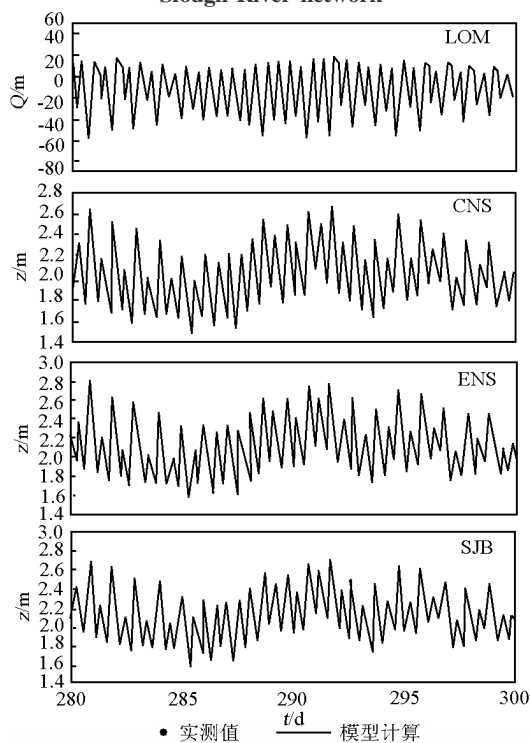


图 12 Slough River 河网计算值和实测值对比  
Fig. 12 Comparison of water level and discharge at selected nodes

对于潮汐河网, 随着潮水的涨退, 排放到河道里的污染物随潮水上下回荡, 从而使潮汐河网的水质呈现较大的非恒定性, 在短时间内, 可以横跨几个水

质级别。用潮平均水质模型虽然可对潮汐河网水质有一个平均意义上的解, 但如果涉及到某处水质达标频率以及水质的变化幅度时, 潮平均水质模型则失去了作用。文章建立的水质模型恰恰可以解决这种水质动态问题。图 13a、图 13b 给出了节点 VNB, NPB 计算的硝氮和实测值比较, 图 13c、图 13d 给出了节点 SJB、VNB 计算的无机磷和实测值比较, 图 13e、图 13f 给出了节点 SJB、VNB 计算的氨氮和实测值比较。图 13 可以看出, 计算和实测的结果吻合得较好, 相对误差不超过 30%。图 14 是计算的溶解氧和实测值比较。该河网由于流向不定, 实际输入河道的污染源数量的非恒定性及水质测量误差是造成水质计算误差的主要原因。

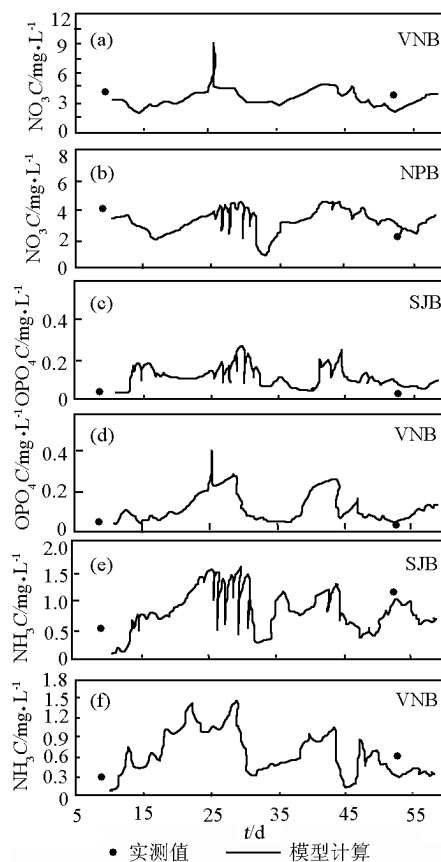


图 13 各污染物的计算值和实测值对比

Fig. 13 Comparison of constituent concentration

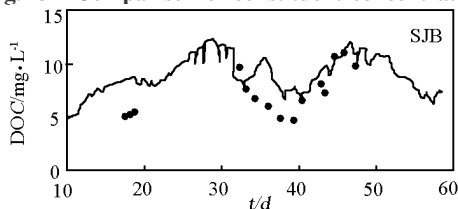


图 14 溶解氧的计算值和实测值对比

Fig. 14 Comparison of DO at SJB section

## 5 结语

基于“河道—节点—河道”算法河网水质模型的求解特点,在 WASP 的水质迁移、转化理论上,建立了一维河网非稳态水动力综合水质模型,该模型考虑了多个污染物变量的耦合计算,考虑变量之间的相互转化和迁移。同时该模型能够反映河网水流的顺逆流动不定和输运物质浓度的非均匀变化过程,不仅可以用于单一河道和树状的河网,还可以用于复杂的环状河网。通过对渭河下游洪水演进、环状河网、Spokane River 河道和感潮 Slough River 河网验证分析,发现计算结果和实测结果吻合很好,可见该模型是合理、可行的,可以对多水质变量影响的水环境问题作出预测。可为河网的水环境预警、水环境规划、管理提供决策和依据,为控制河网水质恶化,改善河网的景观环境提供有效的研究方法。

### 参考文献

- [1] 彭虹,张万顺,夏军,等. 河流综合水质生态数值模型[J]. 武汉大学学报, 2002, 35(4): 56-59
- [2] 郑孝宇,褚君达,朱维斌. 河网非稳态水环境容量研究[J].

水科学进展, 1997, 8(1):25-31

- [3] 李锦秀,廖文根,黄真理. 三峡水库整体一维水质数学模拟研究[J]. 水利学报, 2002, 12: 7-10
- [4] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用[J]. 水利学报, 1992, 7: 30-34
- [5] 韩龙喜,金忠青. 三角联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算[J]. 水利学报, 1998, 7: 30-34
- [6] 白玉川,顾元,荆焕政. 水流泥沙水质数学模型理论及应用[M]. 天津:天津大学出版社, 2005: 115-142
- [7] Xu Zuxin, Liao Zhenliang, Liu Dongsheng. Water quality modeling of Suzhou Creek [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2002, 2(4): 83-90
- [8] Wool T A, Ambrose R B, Martin J L, et al. The Water Quality Analysis Simulation Program [M]. WASP6, User's Manual, US Environmental Protection Agency, Athens, GA, 2003
- [9] Sen D J, Garg N K. Efficient algorithm for gradually varied flows in channel networks [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 180(6): 351-357
- [10] Annear Jr R L, Wells S A, Berger C J. Upper Spokane River Model in Idaho; Boundary Conditions and Model Setup and Calibration for 2001 and 2004 [R]. Technical Report EWR-02-05, Portland State University, Portland, March 2005
- [11] Wells S A. The Columbia Slough [R]. Technical Report EWR-2-97, Portland State University, Portland, March 1997

## Study on hydrodynamic and synthetic water quality model for river networks

Zhang Mingliang, Shen Yongming

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

[Abstract] The Preissmann implicit scheme is used to discrete the one-dimensional Saint-Venant equation and the river-junction-river method is applied to resolve the hydrodynamic mathematical model for river networks. Based on the characteristics of river-junction-river method and the theory of WASP, the synthetic water quality model is set up for river networks, which includes many contamination variables and considers the transform and transplant of the contamination variables. This model is applied to simulate four river networks, the results of elevations and flows agree with the data, the result of contamination variables agree with the measured data. These results show this model is credible and it is a practical tool for forecast and management of water quality in river networks.

[Key words] Preissmann implicit scheme; river networks; hydrodynamic model; water quality model; WASP model