

水网区域的水质模拟预报及污染容量

贾复 徐丰

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文研究了颍塘河震泽段的水质指标(BOD、DO)在水体中的迁移转化规律,建立起模拟颍塘河震泽段的水质数学模型。在以水环境规划为目标的水质数值模拟中,首次结合全面的水文分析及该河段的模型参数估计,给出颍塘河震泽段的水质模拟预报及全年污染容量的计算,作为水质管理规划的定量依据。

关键词 水质模型,水质模型参数,水质数值模拟, BOD, DO, CD。

1 引言

吴江县震泽镇地处苏南经济区,该镇无论是在人口规模,还是农业、乡镇工业的结构和水平以及水资源的使用要求、水环境污染程度等方面,均可视其为苏南经济区内中小城镇的良好代表。而横贯镇区的颍塘河近年来由于乡镇工业的飞速发展,接纳污水大量增加,水体污染日趋严重,为能更好地利用水体污染容量,制定沿岸排污标准,本文以颍塘河震泽段的主要水质指标为模拟对象,在多次水质指标、水文要素及主要污染源的监测基础上,研究了该河段耗氧污染,给出其当前主要污染指标BOD和COD的容量以及2000年的BOD浓度预测。通过对颍塘河震泽段水质模拟预报及污染容量的研究,不但为吴江县震泽镇水质管理规划的制定提供定量的参考,同时,也可为长江下游水网地区中小河流的水质预报及污染容量的研究提供有一定借鉴意义的方法和经验。

2 模型基本方程及其求解

2.1 基本方程

在对实际河流进行水质数学模拟时,应在对所研究河段全面的水质实测分析基础上,给出其模型的基本方程,以便尽可能准确地再现实际河流中的污染物迁移转化规律。本文即是在颍塘河震泽段水文、水质资料分析基础上,考虑到该研究河段所处地势平坦,流量平稳,航运繁忙(排放的污染物

横向混合比一般河流为快),假设干支流交汇处水体瞬时达到完全混合及水量平衡。基于如此假定,将该研究河段视作一维准定常流动。而模型水动力学方程为一维非定常对流扩散形式。其数学表达式如下:

$$A \frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (A D_L \frac{\partial c}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (A \bar{U} C) \pm A "S" \quad (1)$$

式中 A——河流断面面积 (m²)

\bar{U} ——断面平均流速 (m/s)

D_L ——纵向弥散系数 (m²/s)

"S"——源或汇 (mg/L/s)

对于方程中源项S,本文采用的是氧平衡模型中最常见的Streeter-Phelps模型BOD-DO-阶反应式(Thomas修正形式)^[1],其生化降解项及大气复氧项形式如下:

$$S_{BOD} = - (K_1 + K_3) L \quad (2)$$

$$S_{DO} = K_2 (D_s - D) - K_1 L$$

式中 D_s ——饱和溶解氧浓度 (mg/L)

D——溶解氧浓度 (mg/L)

L——生化耗氧浓度 (mg/L)

K_1 ——生化降解率 (1/d)

K_2 ——大气复氧率 (1/d)

K_3 ——BOD沉降再悬浮律 (1/d)

$$\text{边界条件} \begin{cases} L(t, x) |_{x=0} = L_0(t) \\ D(t, x) |_{x=0} = D_0(t) \\ \frac{\partial L}{\partial x} |_{x=1} = \frac{\partial D}{\partial x} |_{x=1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{初始条件} \begin{cases} L(t, x) |_{t=0} = L_1(x) \\ D(t, x) |_{t=0} = D_1(x) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $X=0, l$ 为该河段始末段面坐标, $L_0(t)$ 、 $D_0(t)$ 为河段起始段面处 BOD、DO 浓度值。 $L_1(X)$ 、 $D_1(X)$ 为初始时刻 BOD、DO 沿程浓度分布。

2.2 方程求解

$$\frac{C_i^{n+1} - C_i^n}{\Delta t} = \frac{(AD_L)_{i-1} \cdot C_{i-1}^{n+1} - [(AD_L)_i + (AD_L)_{i-1}] \cdot C_i^{n+1} + (AD_L)_i \cdot C_{i+1}^{n+1}}{V_i \cdot \Delta x} + \frac{Q_{i-1} \cdot C_{i-1}^{n+1} - Q_i \cdot C_i^{n+1} \pm Q_{xi} \cdot C_{xi}}{V_i} \pm S_i^n \quad (5)$$

其中, n, i 分别为时间、空间格数角标。 $V = (A_i + A_{i-1}) \Delta x / 2$ 为两个计算断面间的水体体积。 Q_{xi}, C_{xi} 为第 i 个计算断面前

$$\begin{cases} d_i = -(AD_L)_i \cdot \Delta t / (V_i \cdot \Delta x) - Q_{i-1} \cdot \Delta t / V_i \\ b_i = 1.0 + [(AD_L)_i + (AD_L)_{i-1}] \cdot \Delta t / (V_i \cdot \Delta x) + Q_i \cdot \Delta x / V_i \\ c_i = -(AD_L)_i \cdot \Delta t / (V_i \cdot \Delta x) \\ Z_i = C_i^n + \Delta t \cdot S_i^n + \Delta t \cdot Q_{xi} \cdot C_{xi} / V_i \end{cases} \quad (6)$$

则差分方程 (5) 式可简化下列形式：
 $a_i \cdot C_{i-1}^{n+1} + b_i \cdot C_i^{n+1} + c_i \cdot C_{i+1}^{n+1} = Z_i \quad (7)$

$$\begin{pmatrix} b_1 & c_1 & & & & & \\ a_2 & d_2 & c_2 & & & & \\ & a_3 & b_3 & c_3 & & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & a_{i-1} & b_{i-1} & c_{i-1} \\ & & & & & a_i & d_i \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} C_1^{n+1} \\ C_2^{n+1} \\ C_3^{n+1} \\ \vdots \\ C_{i-1}^{n+1} \\ C_i^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1^* \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_{i-1} \\ Z_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

将数值化的流量平衡方程：

$Q_i = Q_{i-1} + Q_{xi}$ 及初边值条件代入矩阵 (8) 式中, 即可利用三对角矩阵的“追赶法”对其求解, 从而给出基本方程 (1) 式的数值解^[2]。

3 数值模拟

要做到利用数学模拟的方法准确再现河流中的污染物迁移转化规律, 必须解决以下几个问题。

其一, 必须给出模型的正确结构识别及参数估计, 关于颀塘河震泽段水质模型中的参数, 研究估计结果如下^[3];

由于动力学方程 (1) 式无法解析求解, 本文采用的是有限差分的办法实现求解方程 (1) 的, 即利用四点稳式中心差分格式将对流方程 (1) 式差分, 形式如下:

后 $\Delta x / 2$ 区域内的支流或污染源流量及浓度。 Δx 、 Δt 分别为空间和时间计算步长。

设:

式中, $Z_i^* = Z_i + a_0 C_0^{n+1}$

因此, 求解方程 (1) 式则转化为解下述三对角矩阵。

$$\begin{cases} D_L = 16.18 \cdot U \cdot H^{0.838} \\ K_1 = 0.280 \cdot 1.038^{(T-20)} \\ K_2 = 2.516 \cdot U^{0.647} \cdot H^{-1.176} \cdot 1.005^{(T-20)} \\ K_3 = 0.479 \cdot e^{-0.080 \cdot U} - 0.361 \end{cases} \quad (10)$$

式中 U —河流断面平均流速 (m/s)

H —平均水深 (m)

T —水温 ($^{\circ}\text{C}$)

对于模型中饱和溶解氧, 其它文献已有透彻的讨论^[2]。在此引用其结果如下:

$$D_s = (24.89 - 0.426T + 0.00393T^2 - 0.0000133T^3) \cdot P_i / P_0 \quad (11)$$

式中 P_1 ——大气压强 (cm)
 P_0 ——标准大气压 (cm)
 T ——水温 ($^{\circ}\text{C}$)

其二,必须准确把握污染源的排放规律,即给出污染源的确切位置、排放方式以及排放量,而解决的最佳途径是对污染源进行实际监测。本文的数值模拟即是以污染源的实际情况为基础,考查了震泽镇主要工业污染源的位值、排放方式及排放量。而生活污水的排放量则是参考了统计资料给出的(全镇人均每日排污100L,浓度52mg/L),排放方式为线源“半波”型排放,正午为其峰值。

其三,给出所研究河段的水文分析。河流水质数学模型的灵敏度分析表明(见表1),上游来流污染物浓度对于准确模拟河流污染物变化规律影响远大于模型其它输入参数,起始断面的污染物浓度将取决于上游来流的污染物通量及来流流量。由于污染物通量受

上游沿岸的工农业生产及其污染物排放等因素的影响,给出其变化规律是相当困难的。本文采用的是统计实测结果的办法给出起始断面处的污染物通量。而对于来流流量则是通过对该河段的水文分析给出的[4]。

由于直接利用实测流量来计算起始断面浓度,对于以水质数学模拟结果为定量参考的水环境规划有相当危险性。因为水质规划要求在水质数学模拟预报中,水文条件应以枯水期的流量形式(环境设计流量)给出,而要取得枯水期的水质数据又相当困难(需要大量的水文实测及同步的水质指标的实测)。因此,通过一定的水文分析给出所研究河段的环境设计流量及支流水量分配作为水质模拟的水文依据既节省了大量人力物力,又不失为是一种十分可靠而易行的方法。

表1 模型参数灵敏度分析(增量值为20%)

参数名	D_L		K_1		K_2		K_3		D_r		边值			
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	BOD		DO	
增量	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
计算值	7.9	11.9	0.14	0.21	0.14	0.21	0.031	0.047	10.1	15.1	0.9	1.4	8.6	12.8
偏差(%)	0.11	-0.10	3.09	-3.16	-0.54	0.51	5.70	-0.70	-3.75	3.49	-14.6	11.3	-12.5	10.0

4 数值模拟结果讨论

4.1 当前颀塘河震泽段实测BOD-DO的数值模拟

利用当前实测的水文、水质数据对该河段作水质指标BOD-DO的数值模拟。图1、图2是24h沿程BOD、DO浓度曲线(每条曲线间隔8h)。图中各条浓度曲线间融不大(四条DO浓度曲线相重合)。这说明该研究河段的污染源的排放方式不足已影响到以水质数学模拟结果为定量参考的水环境管理规划。数值模拟的结果与实测BOD、DO浓度值相对误差为11%。

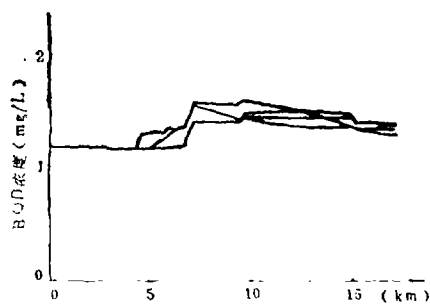


图1当前污染排放及水文条件下BOD沿程分布

4.2 颀塘河震泽段BOD、COD容量

采用震泽镇当前实测的污染源排放数据,对不同月的多年月均流量概率为50%的平水年及概率为90%的枯水年,给出颀塘河

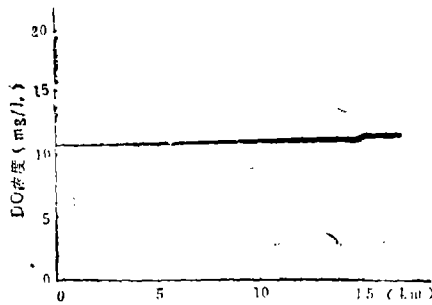


图2 当前污染排放及水文条件下DO浓度沿程分布

震泽段四大断面的BOD数值模拟结果(见图3、图4)。图示曲线表明该研究河段四个干流断面BOD浓度差别小,月际变化大的特点。在震泽镇现有的工农业生产水平及生活排污标准下该河段的污染状态主要受上游来流的水质状况及水文条件(流量)的影响。

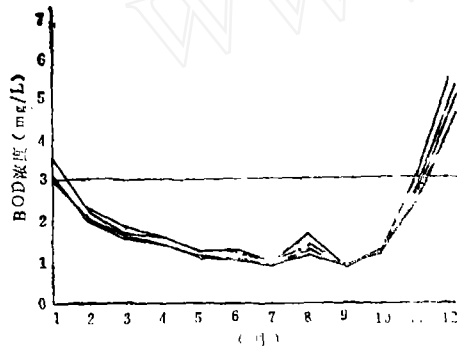


图3 平水年(概率50%)干流四大断面BOD浓度月际变化

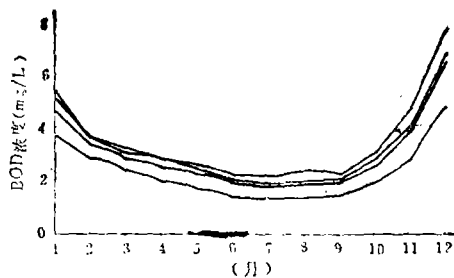


图4 枯水年(概率90%)干流四断面BOD浓度月际变化

以国家地表水五类水质标准为目标,可给出该河段枯水年BOD、COD(由于所研究河段相对较短,可视COD为非降解物质进行模拟计算)容量的月际变化曲线。

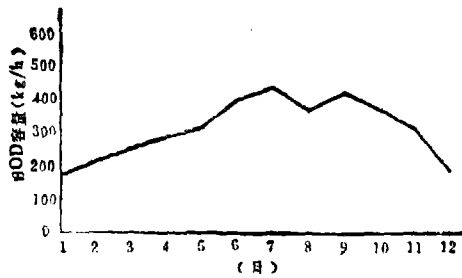


图5 枯水年BOD容量月际变化

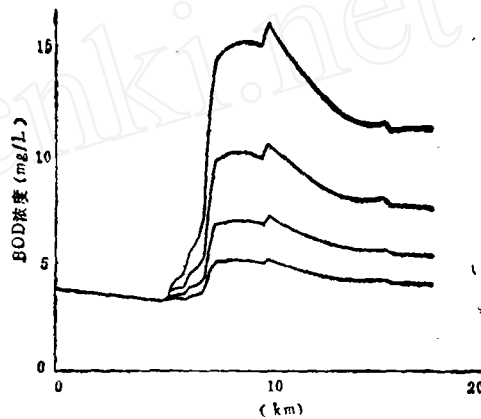


图6 枯水年COD容量的月际变化

4.3 不同工业增长速度下的BOD数值模拟(2000年)

在预测性数值模拟中,假设主要污染源的位置,排放种类及来流的BOD通量与当前实测结果相一致,而震泽镇工业污水排放量与其生产增长成比例增加。水文条件以保证率为90%的枯水流量为准。图7是震泽镇工业生产年增率分别为5%,10%,15%和20%四种发展速度下的BOD沿程分布。可见如按三类水质标准(此标准为该地区2000年水质规划目标),该地区应在适当的污染治理前提下,工业发展速度以低速增长为宜。

5 结论

5.1 通过以上的数值计算可为震泽镇工业发展规划及污染源排放标准的制定提供定量依据,即震泽镇工业发展速度应以低速增长为宜,同时对全镇工业排污应做适当整治

并制定严格的管理条例,而其排放标准可根据全年污染容量变化曲线做适当的季节性调整。

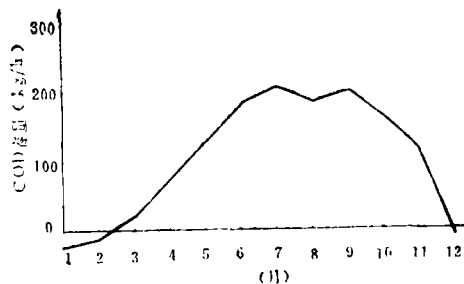


图7 不同工业增长率2000年BOD浓度沿程分布

5.2 以河流的水质管理为目标的污染物迁移自净模拟应有机地结合水文分析工作才能

正确把握住河流的实际水质污染状况,提高水质预测可靠性及精度,而模型的参数估计则是数值模拟再现实际过程必不可少的部分。

参考文献

- [1] Gerald T·Orlob, *Mathematical Modeling of Water Quality, Stream, Lakes, and Reservoirs*, John Wiley & Sons Inc, (1983).
- [2] EPA-OWP-TEX-128, *Simulation of Water Quality in Streams and Canals Theory and Description of the QUAL-1 Mathematical Modding System*, 1971.5
- [3] 徐丰, 城市环境与城市生态, 4(3), 5~9(1991)。
- [4] 聂松媛, 城市环境与城市生态, 4(1), 1~5(1991)。

MODELING AND PREDICTION OF WATER QUALITY AND POLLUTION CAPACITY OF STREAMS IN RIVER NETWORK

Jia Fu Xu Feng

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

Presented in this paper is an investigation on the convection and transformation of water quality index(BOD and COD) in Zhengze segment of Ditan river. The present numerical modeling of water quality is based on the environment hydrology analysis of the investigated river segment and the water quality parameters estimation deduced from practical measurement. The predicted water quality levels in the future can be of value as scientific basis of water management and program.

Key words: Water quality model, Water quality model parameter, Water quality numerical simulation, BOD, DO, COD.