

官厅水库水质模型研究^①

黄国如 芮孝芳

(河海大学水资源水文系 南京 210098)

摘要 根据官厅水库狭长、水浅和水文、水力、水质迁移扩散等特点与河流相似的事实,采用一维 St. Venant 方程组模拟其水流状况;采用完全混合反应器概念模拟其水质变化,两者的藕合就构成了官厅水库的水质模型。该模型在模拟官厅水库 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度时空变化时,精度令人满意,并已用于官厅水库的水质预测和水质管理。

关键词 水质模型 St. Venant 方程组 完全混合反应器 河川型水库

分类号 X 522

官厅水库位于北京市西北,距市区 80km,控制流域面积 42 500km²,主要入库河流有桑干河、洋河和妫水河,坝址以下为永定河(图 1)。近年水库的主要功能是城市供水,因此,保护好官厅水库的水质十分重要,而建立其水质模型则是其中关键性的研究工作。根据水库地形资料,官厅水库的长宽比约为 10 : 1,宽深比约为 200 : 1。可以认为官厅水库基本上是一个狭长、水浅的河川型水库。近些年水库的平均水深一般不超过 10m。有关水文气象资料表明,库区内沿水深方向基本上无分层现象,且水流缓慢、断面流速分布比较均匀,其水文、水力、水质迁移扩散等特点与河流基本相似,可作为一维问题来处理。

进入水体的污染物质,在水流的输运作用下,发生物理的、化学的和生物化学的各种变化,使污染物质的浓度逐步得到稀释。描述这一系列变化过程,必须借助于两类方程式:其一是水流运动方程式,它描述了水体中水流的时空变化规律;其二是水质方程式,它描述了污染物质在水体中迁移、扩散和转化的时空分布情况。对于官厅水库,水流运动拟由一维 St. Venant 方程组描述,水质变化拟由完全混合反应器概念或一维对流扩散方程描述,对它们所组成的方程组联立求解,就可得到官厅水库水质模型。该方程组由三个方程式构成,正好用于求解水位、流量和污染物浓度等三个未知变量。由于进入水体的污染物质一般情况下能完全溶解于水,即随流性很强,以致污染物质的浓度变化对水位和流量不产生什么影响,因此,对水流方程和水质方程可依次分别独立求解,也就是先对水流方程求解,得到水位、流量后,再对水质方程求解,以求得污染物质的浓度,这就大大方便了计算工作。

1 模型的建立

1.1 水流模拟

一维 St. Venant 方程组由连续方程式 (1) 和动力方程式 (2) 构成:

① 收稿日期: 1997-05-08; 修改稿日期: 1997-09-19。

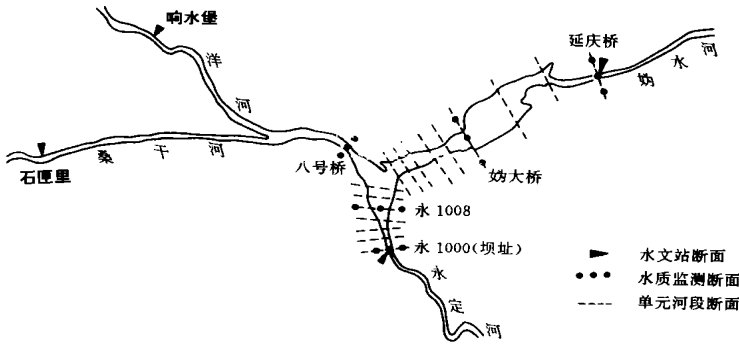


图 1 官厅水库略图

Fig. 1. Scheme of the Guanting Reservoir

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{aQ^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \tag{2}$$

式中 Q 为流量 (m^3/s); Z 为水位 (m); B 为水面宽 (m); q 为单位水体长度内的旁侧入流量 (m^2/s); A 为过水断面面积 (m^2); R 为水力半径 (m); n 为糙率; a 为动量校正系数, 一般情况下可取其为 1.0; g 为重力加速度, 等于 $9.81m/s^2$ 。

若选择 Preissmann 四点线性隐式差分格式使式 (1) 和式 (2) 离散化^[1], 则经化简后可得任一单元河段的差分方程组为

$$\begin{cases} -Q_i^{j+1} + Q_{i+1}^{j+1} + C_i Z_i^{j+1} + C_i Z_{i+1}^{j+1} = D_i \\ E_i Q_i^{j+1} + G_i Q_{i+1}^{j+1} - F_i Z_i^{j+1} + F_i Z_{i+1}^{j+1} = \Psi_i \end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} C_i &= \frac{B_{i+1/2} \Delta x_i}{2\Delta t \theta} \\ D_i &= \frac{q_{i+1/2} \Delta x_i}{\theta} - \frac{(1-\theta)}{\theta} (Q_{i+1}^j - Q_i^j) + C_i (Z_{i+1}^j + Z_i^j) \\ E_i &= \frac{\Delta x_i}{2\theta \Delta t} - \left(\alpha \frac{Q}{A} \right)_i^j + \frac{gn^2 \Delta x_i}{2\theta} \left(\frac{|Q|}{R^{4/3}} \right)_i^j \\ G_i &= \frac{\Delta x_i}{2\theta \Delta t} + \left(\alpha \frac{Q}{A} \right)_i^j + \frac{gn^2 \Delta x_i}{2\theta} \left(\frac{|Q|}{R^{4/3}} \right)_{i+1}^j \\ F_i &= (gA)_{i+1/2}^j \\ \Phi &= \frac{\Delta x_i}{2\theta \Delta t} (Q_{i+1}^j + Q_i^j) - \frac{1-\theta}{\theta} \left[\left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)_{i+1}^j - \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right)_i^j \right] \\ &\quad - \frac{1-\theta}{\theta} (gA)_{i+1/2}^j (Z_{i+1}^j - Z_i^j) \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

以上各式中变量的下标表示断面编号, 上标表示时段数; θ 为差分格式权重; Δx , 为单元河段长; Δt 为时间步长。

由式 (4) 可知, 式 (3) 中的系数 C_i 、 D_i 、 E_i 、 F_i 、 G_i 、 Φ 仅与河槽几何参数、糙率和初始条件有关, 故它是一个线性代数方程组。如果一河道划分成 N 个单元河段, 则根据式 (3) 就可以列出包含 $2(N+1)$ 个未知量的 $2N$ 个方程, 如再加上河道两端的边界条件, 就可构成一个闭合的代数方程组。该闭合的代数方程组的系数矩阵是一个四对角稀疏矩阵, 因此, 可用追赶法进行求解^[1], 从而求得河道各断面流量 Q 和水位 Z 的时间变化过程。

当河道中存在集中入、出流、支流交汇和堰闸控制等内边界条件时, 应用追赶法也是容易处理的^[1]。

1.2 水质模拟

水质模拟采用完全混合反应器概念^[2,3], 实质上就是联立求解水量平衡方程和污染物质量平衡方程。设反应器的容积为 V , 时段 dt 内流入和流出该反应器的流量分别为 Q 和 Q , 则该反应器的水量平衡方程和污染物质量平衡方程分别为

$$Q - Q = \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

和
$$C_n Q - C_n Q - KCV = \frac{d(VC)}{dt} \quad (6)$$

式中 C_n 为反应器入流的污染物浓度 (mg/L); C_n 为反应器出流的污染物浓度 (mg/L); C 为反应器内的污染物浓度 (mg/L); K 为污染物的综合降解系数 (d^{-1})。

按完全混合反应器的概念, 假设污染物质一旦进入反应器, 即得到充分混合, 故 $C = C_n$ 。据此合并式 (5) 和 (6) 得

$$V \frac{dC}{dt} = Q(C_n - C) - KCV \quad (7)$$

式 (7) 是一阶常微分方程, 采取常数变易法可求得其解析解为

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{C_n}{1 + TK} [1 - e^{-(\frac{1}{T} + K)t}] + C_0 e^{-(\frac{1}{T} + K)t} \\ T &= \frac{V}{Q} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 C_0 为初始时刻反应器内污染物浓度 (mg/L); T 为污染物在反应器中推移时间 (d)。

对式 (7) 使用显式差分格式, 可得到下列数值解:

$$C^{j+1} = (C^j F + G) / E \quad (9)$$

其中
$$\left. \begin{aligned} E &= (2 + K\Delta t)(V^j + V^{j+1}) + \Delta t(Q^j + Q^{j+1}) \\ F &= (2 - K\Delta t)(V^j + V^{j+1}) - \Delta t(Q^j + Q^{j+1}) \\ G &= \Delta t(C_n^j + C_n^{j+1})(Q^j + Q^{j+1}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 变量的上标 j 和 $j+1$ 分别表示时段初和时段末; Δt 为时间步长。

将河道划分成若干个单元河段, 令每个单元河段为一完全混合反应器, 则连续应用式 (8) 或式 (9) 就可求得河道各断面的污染物浓度随时间的变化过程。

2 参数率定及验证

2.1 单元河段划分

根据水文、水力学条件大致均一, 并考虑水质监测断面的位置, 将官厅水库自延庆桥至坝

前划分成 15 个单元河段计 16 个断面 (图 1)。

2.2 基本资料

用于计算的资料为 1993~1995 年共 3 年资料, 其中 1993 年和 1994 年资料用于率定模型参数, 1995 年资料用于对模型的验证。

水库的入流过程为延庆桥的流量过程和八号桥的流量过程, 其中延庆桥的流量过程为实测, 八号桥的流量过程由水库水量平衡方程反推求得, 它实际上包括了除妫水河以外的桑干河、洋河和库区周边的入流量。库面降水量用官厅和延庆两雨量站实测雨量的平均值代表, 库面蒸发量用官厅蒸发站水面蒸发资料乘以折算系数求得。

官厅水库库区的水质监测断面为延庆桥、妫大桥、八号桥、永 1008 和永 1000 等 (图 1), 其中延庆桥和八号桥为入库水质监测断面。

2.3 模型参数率定和验证

在水流模拟阶段, 以延庆桥入流过程和坝下出流过程分别作为上、下游边界条件; 八号桥入流过程作为区间集中入流; 库面降水量与蒸发量的差值作为区间分布入流。各断面的初始水位和流量值按实测资料线性内插赋予。计算时间步长取为 10min, 通过调整糙率 n , 使得计算坝上水位与实测坝上水位拟合最优。对 1993 年和 1994 年资料, 当取 $n=0.02$ 时, 则该两年的计算坝上水位与实测坝上水位吻合得很好。将这样求得的 n 值用于 1995 年水流模拟计算, 其计算坝上水位与实测坝上水位也相当吻合 (图 2)。

在水质模拟阶段, 为考虑综合降解系数 K 在空间和时间上的变化, 在空间上将 15 个单元河段合并成 3 段来处理, 这 3 段分别为延庆桥至妫大桥、妫大桥至永 1008 和永 1008 至永 1000。在时间上则按月考虑。延庆桥的污染物浓度过程为上游入库浓度过程, 八号桥的污染物浓度过程为区间集中入库浓度过程。各断面的初始时刻的污染物浓度由实测或线性内插求得。通过调整 K 值, 使得各个断面的计算污染物浓度和与实测污染物浓度拟合最优。对 1993 年和 1994 年资料, 当 K 值为如表 1 所列的数值时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的相对模拟误差小于 30% 的测次占 75%。将表 1 所列 K 值用于 1995 年的水质模拟计算, 结果列于表 2, 由表可见, 相对模拟误差基本上在 30% 以内。

一般而言, 水质模拟精度要低于水流模拟精度, 主要原因有二: 一是实测污染物在浓度以一个测点代替一个断面的平均值; 二是水质取样的随机性较大。

表 1 各河段不同月份的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 K 值

d^{-1}

Table 1. Decay coefficient K of the $\text{NH}_3\text{-N}$ obtained by means of parameter calibration method

河 段	1~3 月	4 月	5~6 月	7~8 月	9~10 月	11~12 月
延庆桥- 妫大桥	0.002	0.010	0.010	0.020	0.002	0.002
妫大桥- 永 1008	0.050	0.070	0.030	0.130	0.120	0.120
永 1008- 永 1000	0.002	0.0020	0.020	0.020	0.010	0.002

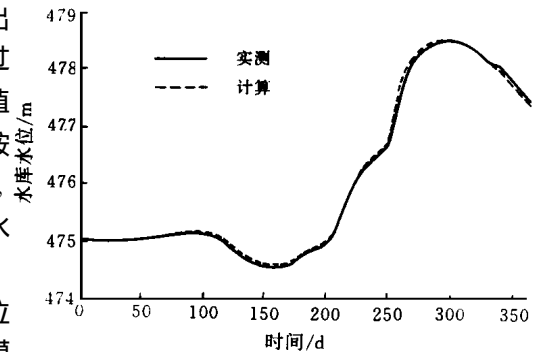


图 2 1995 年计算和实测坝前水位过程线

Fig. 2. Simulated and observed water levels of reservoir in 1995

表 2 1995 年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计算与实测浓度比较 mg/LTable 2. Simulated and observed concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ in 1995

断面	水质指标	月 份	1	2	3	5	7	9	10	11	12
永 1008	$\text{NH}_3\text{-N}$	实测值	1.10	0.75	1.48	0.82	0.60	0.37	0.52	0.49	0.97
		计算值	1.07	0.74	1.48	1.08	0.56	0.32	0.49	0.59	0.97
		相对误差 (%)	-2.7	-1.3	0.0	31.7	-6.7	-13.5	-5.8	20.4	0.0
永 1000	$\text{NH}_3\text{-N}$	实测值	0.94	0.88	0.96	0.69	0.59	0.50	0.46	0.46	0.97
		计算值	0.93	0.91	0.88	0.87	0.62	0.36	0.30	0.43	0.97
		相对误差 (%)	-1.1	3.40	-8.3	26.1	5.10	-28.0	-34.8	-6.5	0.0

3 结 语

本文根据水流模拟和水质模拟相结合的途径所建立的官厅水库水质模型。概念清晰、结构简单、精度良好,可作为官厅水库的水质预测和管理的科学依据。该模型既可根据水库入库的污染物浓度,预测出水库污染物浓度及库区污染物浓度的分布,也可根据要求的出库污染物浓度来控制上游污染物的排放量。本文使用的建模思路对河流和河川型水库具有一定的普遍意义。

致谢:北京市水文总站的赵骏、杨荣华和李爱玲为本文提供了资料,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 芮孝芳. 产汇流理论. 北京: 水利电力出版社, 1995. 92~102
- 2 傅国伟. 河流水质数学模型及其模拟计算. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 67~68
- 3 Robert V T, Mueller J A. Principles of surface water quality modeling and control, Harper & Row, Publishers, Inc. New York. 1987. 173~193

Water Quality Simulation for the Guanting Reservoir

Huang Guoru and Rui Xiaofang

(Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: "Channel" reservoirs whose profiles are characterized as being wide and shallow, do not demonstrate gradation phenomena, so it can be assumed that pollutants entering into "channel" reservoirs mix with water completely. In this paper, the flow simulation model for "channel" reservoirs was developed by solving one-dimensional Saint-Venant equations in Preissman weighted four-points implicit scheme and the water quality simulation model for "channel" reservoirs was developed by solving water quality equations employing the concept of full mixed reactor. The flow/water quality simulation coupled model was used to simulate the water quality situation for "channel" reservoirs. The flow/water quality simulation coupled model is of clear concept, concise structure and was used in the Guanting Reservoir ("Channel" reservoir) to simulate the transaction of $\text{NH}_3\text{-N}$ with satisfied results. This model can be used for environmental impact assessment, water quality prediction and management in the Guanting Reservoir.

Key word: water quality simulation; Saint-Venant equations; full mixed reactor; Guanting reservoir.