

一个河流水质预测预报模型

高 维 真

(华东水利学院环境水利科学研究所)

河流水质污染及其控制管理的研究,是水环境保护的当务之急;在“环保法”已颁布的今天,要科学地执行有关条例尤其不可缺少。

为了弄清河流日常的,或事故的水质污染状况的来龙去脉;为了推求水环境容量,确定水污染物的排放标准,都需要建立河流水质污染预测预报的数学模型,以应用于:

(1) 预测河流的污染状况,为规划与控制水污染和评价水质提供数据。

(2) 预报河流的污染实况,作为水质污染警报、水系管理系统运转调节的科学依据。

(3) 河流污染特性及水环境容量的研究;水质污染现象与过程的基本研究。

(4) 水质监测资料的校核与外延。

(一)

描述河流水质污染的数学物理模型一般包括两方面,即(1)水力过程:如混合现象和输送现象;(2)化学与生化过程:如污染物的衰减(自净),河底积集、底质溶化等。

大家知道,河流一元水质污染模型的基本方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A(X, t)} \frac{\partial}{\partial X} \left[E(X, t) A(X, t) \frac{\partial C}{\partial X} \right] - \frac{1}{A(X, t)} \frac{\partial}{\partial X} [Q(X, t) C] + \sum S(C, X, t) \quad (1)$$

式中 C ——河中污染物某成份的浓度;

A ——河流横断面积;

X ——顺流向的距离;

t ——时间;

E ——分散系数;

Q ——流量;

S ——污水某成份浓度的增减量。

此式可用作任何被输送的污染物(可分解的与不可分解的)一般表达式。当对纵向分散加以忽略时,则式(1)可改为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1}{A(X, t)} \frac{\partial [Q(X, t) C]}{\partial X} + \sum S(C, X, t) \quad (2)$$

如何根据河流污染系统的实际,求解水质模型基本方程,是使水质污染一般表达式能够付诸实用的关键。

为了使解得的水质模型的要素、参数及模型结构简单化,可根据水量与水质的稳定情势,河道地形状况等实际情况,对河流水质污染系统作一些简化,例如在一个较长的污染河段,可根据水量与水质变化特性划分出许多相似小河段,使式(2)中所指的水力条件(Q, A)在小河段顺流向的距离内的变化可以忽略,即在小河段内,河段 Q, A 变化不大,可取河段平均 Q, A 。并假设水质成份增减量 S 只有衰减项 KC 和旁侧入流项 C^* (设为稳定排放),其他项目均予忽略。则当 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ 的情况下,应用差分法,作者推得一个河流水质预测预报模型如下:

(1) 对于一个小河段为:

$$C_{\text{下}} = C_{\text{上}} \left(1 - 0.0116 \frac{KX}{u} + 0.0116 \frac{C^*}{C_{\text{上}} Q} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中, $C_{\text{下}}$ ——为河段下断面某成份输出浓度,以毫克/升计;

$C_{\text{上}}$ ——河段上断面某成份输入浓度,以毫克/升计;

K ——河段某成份衰减(自净)系数,以日⁻¹计;

X ——河段长度,以公里计;

Q ——河段流量,以米³/秒计;

q ——河段旁侧污水流量(或支流流量),以米³/秒计;

u ——河段平均流速,以米/秒计;

C^* ——河段某成份旁侧工矿、城镇排污量,或支流来污量,以公斤/日计;

α ——为稀释系数 $= \frac{Q}{Q+q}$;

0.0116——单位换算系数。

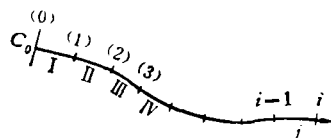


图 1 河流分为连续若干小河段示意图

(2) 对于连续若干小河段:

当有 i 个小河段(见图 1)时为:

$$C_1 = C_0 \left(1 - 0.0116 \frac{K_1 X_1}{u_1} + 0.0116 \frac{C_1^*}{C_0 Q_1} \right) \alpha_1;$$

$$C_2 = C_1 \left(1 - 0.0116 \frac{K_2 X_2}{u_2} + 0.0116 \frac{C_2^*}{C_1 Q_2} \right) \alpha_2;$$

$$C_3 = C_2 \left(1 - 0.0116 \frac{K_3 X_3}{u_3} + 0.0116 \frac{C_3^*}{C_2 Q_3} \right) \alpha_3;$$

⋮

$$C_i = C_{i-1} \left(1 - 0.0116 \frac{K_i X_i}{u_i} + 0.0116 \frac{C_i^*}{C_{i-1} Q_i} \right) \alpha_i$$

$$\therefore C_i = C_0 \left(1 - 0.0116 \frac{K_1 X_1}{u_1} + 0.0116 \frac{C_1^*}{C_0 Q_1} \right) \alpha_1 \times \left(1 - 0.0116 \frac{K_2 X_2}{u_2} + 0.0116 \frac{C_2^*}{C_1 Q_2} \right) \alpha_2$$

$$\times \left(1 - 0.0116 \frac{K_3 X_3}{u_3} + 0.0116 \frac{C_3^*}{C_2 Q_3} \right) \alpha_3 \dots \left(1 - 0.0116 \frac{K_i X_i}{u_i} + 0.0116 \frac{C_i^*}{C_{i-1} Q_i} \right) \alpha_i$$

于是得一递归方程:

$$C_i = C_0 \prod_{j=1}^i \left(1 - 0.0116 \frac{K_j X_j}{u_j} + 0.0116 \frac{C_j^*}{C_{j-1} Q_j} \right) \alpha_j \quad (4)$$

式中 C_i —— i 河段的某成分输出(出口断面)浓度,以毫克/升计;

X_j —— j 河段长度,以公里计, $j=1, 2, 3, \dots, i$;

K_j —— j 河段某成份衰减(自净)系数,以日⁻¹计;

C_{i-1} —— i 河段某成份输入(上断面)浓度, C_0 即为第一河段初始断面浓度,以毫克/升计;

Q_j, q_j ——分别为 j 河段的河流量及旁侧污水流量,或支流流量,以立方米/秒计;

u_j —— j 河段的平均流速,以米/秒计;

C_j^* —— j 河段某成分旁侧工矿、城镇的排污量或支流来污量,以公斤/日计;

α_j —— j 河段稀释系数 $= \frac{Q_j}{Q_j + q_j}$;

0.0116——单位换算系数。

如河段旁侧无工矿城镇排污或支流来污,则(4)式可简化为:

$$C_i = C_0 \prod_{j=1}^i \left(1 - 0.0116 \frac{K_j X_j}{u_j} \right) \quad (5)$$

同理,作者又推得河中溶解氧(DO)沿程变化方程:

$$C'_i = C'_0 \prod_{j=1}^i \left[1 - 0.0116 \frac{X_j (K_j C_{j-1} - K'_j D_{j-1})}{C'_{j-1} u_j} + 0.0116 \frac{C'_j}{C'_{j-1} Q_j} \right] \alpha_j \quad (6)$$

式中, C'_i —— i 河段 DO 输出(出口断面)浓

度,以毫克/升计;

C_{j-1} —— j 河段 DO 输入浓度,以毫克/升计; $j = 1, 2, 3 \dots i$;

K_j —— j 河段耗氧系数,以日⁻¹计;

K'_j —— j 河段复氧系数,以日⁻¹计;

D_{j-1} —— j 河段上断面缺氧量 = 饱和含氧量(C_s)—实际含氧量(C),以毫克/升计;

C_j^* —— j 河段旁侧入流的含氧量,以公斤/日计。

其他符号意义同前。

当式(3) C_F 等于河段某成份水环境质量标准 C_N (毫克/升) 时,即可推得排污点处某成份的河流容量(最大允许纳污量),可称为《河流点容量》 V (公斤/日),其方程如下:

$$V = 86.4 \left(\underbrace{\frac{C_N}{\alpha} - C_{\pm}}_{\text{差值容量}} \right) Q + \underbrace{KC_{\pm} \left(\frac{XQ}{u} \right)}_{\text{同化容量}} \quad (7)$$

V 单位为公斤/日。如果河段中不仅是式(7)表达的仅一个处于河段末端的排污点,而是在河段两旁有多点排污,且全河段某成份水环境质量标准均为 C_N ,则作者推得各点容量总和 ΣV 的方程为(q_i 为旁侧排污流量):

$$\Sigma V = 86.4 Q_0 (C_N - C_{\pm}) + K_0 C_{\pm} Q_0 \frac{\Delta X_0}{u_0} + 86.4 C_N \sum_{i=1}^n q_i + C_N \sum_{i=1}^{n-1} K_i \frac{Q_i \Delta X_i}{u_i} \quad (8)$$

式中, $\Delta X_0 Q_0 u_0$ 为起始断面至第一排污点距离(公里)流量,流速。 $\Delta X_1 Q_1 u_1 \dots \Delta X_n Q_n u_n$ 为第一至 n 个排污点各相邻间距,流量、流速。

于是又可推得在河段两侧均匀密布排污时,河段某污染物成份最大的河流容量,可称为《河段总容量》 V_{Σ} (公斤/日),方程为(Q_0, Q_n 为河段初始与终端流量):

$$V_{\Sigma} = 86.4 (C_N Q_n - C_0 Q_0) + \left(\frac{Q_0 + Q_n}{2} \right) C_N K \frac{x}{u} \quad (9)$$

(3)—(9) 各式结构简单,便于将河流分为许多小河段,有利于开展中小河流水质预

测预报;计算河段允许纳污的容量,确定水污染物的排放标准(符合一元模型时)。

(二)

上述河流水质数学模型,在水质预测预报和河流水质控制计算上的实用算例如下。

设计算河段如图 2 所示,全长 12.5 公里,分为五个小河段,其污染物为酚,第 V 河段相距很近的多个工矿排污口可视为一个集中排放点,且 $\alpha \approx 1$ 。

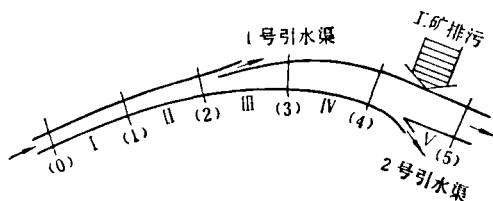


图 2 计算河段概图

(1) 河流水质污染状况的预测:

河段已知参数见表 1。当河段初始断面(0)酚浓度为 0.006 毫克/升时,根据式(4)预测得河段有关断面的酚污染状况如下表(见表 2)。

表 1 河段参数表

河段数	流量 (米 ³ /秒)	流速 (米/秒)	河段长 (公里)	酚衰减系 数(日 ⁻¹)	旁侧排酚 量(公斤/ 日)
I	9.04	0.92	2.5	8	
II	9.04	0.82	2.5	7.7	
III	8.04	0.74	2.5	7.5	
IV	8.04	0.60	2.5	7.2	
V	5.60	0.46	2.5	6.5	4.44

注: 酚衰减系数反映挥发与分解等作用。

表 2 预测酚污染状况表

河段断面号	(0)	(2)	(4)	(5)
酚浓度 (毫克/升)	0.006	0.003	0.001	0.010
输酚量 (公斤/日)	4.686	2.343	0.695	4.838

为了预测严重枯水时的酚污染状况,我

们由水文频率计算推得该河段(0)断面(有水文站)20年一遇的枯水流量(年连续7天最小流量均值)为1.53米³/秒,并得各河段水文参数如下表(见表3)。

表3 20年一遇枯水流量流速数值表

河段数	I	II	III	IV	V
流量 (米 ³ /秒)	1.53	1.53	1.10	1.10	0.8
流速 (米/秒)	0.45	0.41	0.36	0.29	0.23

表4 20年一遇枯水时的酚污染预测值

河段断面号	(0)	(2)	(4)	第V河段 工矿排 酚量	(5)
酚浓度 (毫克/升)	0.334	0.073	0.008		0.059
输酚量 (公斤/日)	44.152	9.650	0.760	4 (公斤/日)	4.100

据表3并假设出现此种枯水时,第V河段旁侧排酚为4公斤/日,则按式(4)预测得严重枯水时(20年一遇)的酚污染预测值如表4。

(2) 水污染物排放标准的计算:

河段状况和参数仍如图2表1。

设上游来酚量仍是0.006毫克/升,初始流量仍为9.04米³/秒。由表2可见,至河段断面(4),酚浓度是0.001毫克/升,相应的输酚量为0.695公斤/日,第(5)断面酚浓度为0.01毫克/升(因有第V河段工矿排酚4.44公斤/日)。如果该河段下断面处(及下游)要求酚的最高浓度不得超过0.005毫克/升时,试求第V河段酚的允许最高排放量?

根据河段污染系统状况,可采用式(7)进行计算,各已知参数如表5($\alpha \approx 1$)。

表5 已知参数值表

C_N	C_4	Q_V	U_V	K_V	X_V
0.005 毫克/升	0.001 毫克/升	5.6 米 ³ /秒	0.46 米/秒	6.5日 ⁻¹	2.5公里

将上述已知参数值代入式(7)得:

$$V = 86.4(0.005 - 0.001)5.6 + 6.5$$

$$\times 0.001 \left(\frac{2.5 \times 5.6}{0.46} \right)$$

$$= 2.11 \text{ 公斤/日。}$$

可见在初始酚浓度为0.006毫克/升,流量为9.04米³/秒时,要保持断面(5)酚浓度在0.005毫克/升时,第V河段工矿排酚要比原来排酚(4.44公斤/日)减少2.33公斤/日(4.44 - 2.11 = 2.33公斤/日需作处理)。

对于水污染物排放标准的计算,一般要求在一定安全流量(一定重现期)下进行计算,算例如下:

设20年一遇初始断面枯水流量(年连续7天最小流量均值) $Q = 1.53$ 米³/秒;又设初始酚浓度 $C_0 = 0.334$ 毫克/升,并已知 $Q_V = 0.80$ 米³/秒; $u_V = 0.23$ 米/秒。

据计算预测得 $C_4 = 0.0084$ 毫克/升;

第(5)断面处水环境质量标准 $C_N = 0.01$ 毫克/升

则由下式可算得第V河段工矿酚的排放标准为:

$$V = 86.4(0.01 - 0.008)0.8 + 6.5$$

$$\times 0.008 \left(\frac{2.5 \times 0.8}{0.23} \right) = 0.59 \text{ 公斤/日}$$

$$\text{酚的总削减量} = 4.44 - 0.59$$

$$= 3.85 \text{ 公斤/日}$$

参 考 文 献

- [1] 华东水利学院环境水利科学研究所, 水源保护工作概述,《水利水电技术(水文副刊)》,1979年第3期。
- [2] 高维真,水文与水污染,《环境科学》1980年第1期。
- [3] 高维真,河流水质预报与规划,《环境科学研究与进展》,科学出版社,1980年。
- [4] Vansteenkiste, G. C. (ed.), Computer Simulation of Water Resources Systems, North-Holland, New York 1975.
- [5] Nemerow, N. L., Scientific Stream Pollution Analysis, McGraw-Hill, New York, 1974.
- [6] Rich, L. G., Environmental Systems Engineering, McGraw-Hill, New York, 1973.