

感潮河流的排污规划与管理模型研究

黄 平 周劲风

(中山大学环境科学系, 广州 510275)

摘要 根据河流水质的差分模型, 推导出一个感潮河流的排污规划与管理模型, 它表现了河段上各排口允排量 P_j 与各排口单独排放时的允排量 Y_j 的关系: $\sum P_j/Y_j=1$ 。文中用实例阐述了该模型的应用与验证情况, 结果显示: 该模型结构简单, 容易计算, 能方便地用于排污规划、管理与实时控制工作中。

关键词 排放口, 允排量, 水质管理。

环境管理中的一个重要手段是给排污口规定允许排污量(简称允排量), 允排量的确定需依赖于水质数学模型的运用及河段控制断面的水质标准。当研究河段只有一个排口时, 计算较简单, 但如存在若干个排口时, 各排口允排量的数值并不唯一, 具有多种组合, 此时要定出一组既能降低污水处理费用, 又能使河流水质满足标准的允排量, 需用数值计算方法求解水质方程, 并反复试算方能确定出来, 因此计算工作量较大。为克服这一缺陷, 本文根据潮汐河流水质差分方程, 推导了一个排污管理模型, 该模型具有简单、方便使用的特点。

1 排污管理模型的推导

描述感潮河道污染物迁移扩散规律的方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \left[gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right] \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} &= \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z \\ &\quad - \frac{g|Q|Q}{AC^2R} \quad (1) \\ \frac{\partial (Ab)}{\partial t} + \frac{\partial (Qb)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(DA \frac{\partial b}{\partial x} \right) - K_1 Ab + M \end{aligned}$$

式(1)中的前两式为水流方程, 第3式为水质方程。式中 Z 为水位; Q 为流量; A 为断面面积; t 、 x 分别为时间与距离; b 为水面宽; C 为谢才系数; R 为水力半径; g 为重力加速度; b 为断面上平均污染物的浓度; D 为扩散系数; K_1 为降解系数; M 为源漏项。

式(1)中水流方程的差分解详见文献[3], 水质方程采用特征显格式离散, 对流项考虑“迎风”处理得:

$$\begin{aligned} b_{j,n+1} &= \frac{A_{j,n}}{A_{j,n+1}} b_{j,n} + \frac{D\Delta t}{A_m(\Delta x_j + \Delta x_{j-1})} \\ &\quad \left[\frac{(A_{j+1,n} + A_{j,n})(b_{j+1,n} - b_{j,n})}{\Delta x_j} - \right. \\ &\quad \left. \frac{(A_{j,n} + A_{j-1,n})(b_{j,n} + b_{j-1,n})}{\Delta x_{j-1}} \right] + \\ &\quad \frac{\Delta t}{A_{j,n+1}} M_{j,n} - \frac{A_{j,n}}{A_{j,n+1}} K_1 \Delta t b_{j,n} - \\ &\quad \frac{\Delta t}{A_{j,n+1}} \begin{cases} [(Qb)_{j,n} - (Qb)_{j-1,n}]/\Delta x_{j-1} & Q > 0 \\ 0 & Q = 0 \\ [(Qb)_{j+1,n} - (Qb)_{j,n}]/\Delta x_j & Q < 0 \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中, 下标 n 表示计算时段的序号; j 表示河道计算断面的序号; Δt 为时间步长; Δx_j 为河道第 $j-1$ 断面至第 j 断面的距离; 其余符号同式(1)。

由式(2)容易推得任一断面的污染物浓度值与各排放口的排放源 W_j 有下列关系:

$$\begin{aligned} b(t) &= \sum_{j=1}^m a_j(t) W_j(t) \quad (3) \\ [M_j(t) &= W_j(t)/(\Delta x_{j-1} + \Delta x_j)/2] \end{aligned}$$

若各排污口的排放源强近似为常数, 则(3)式为

$$b(t) = \sum_{j=1}^m a_j(t) W_j \quad (4)$$

上两式中, $a_j(t)$ 为第 j 个排口对指定断面的影响函数, 其余符号同式(1)。

当水质控制断面规定浓度标准为 b^* 后, 按

允排量的定义,各排口的允排量应满足下式:

$$\sum_{j=1}^m a_j(t_p)P_j \leq b^* \tag{5}$$

式中(P_j 为第 j 个排口的允排量, t_p 为导致 $\sum a_j(t)P_j$ 有最大值的时刻。

如果第 j 个排口单独排污,按允排量的定义,有:

$$a_j(t_j)y_j \leq b^* \tag{6}$$

由于环境管理部门关心的是(5)、(6)两个不等式在取等号时的 P_j 与 Y_j 值,故有:

$$\sum_{j=1}^m \frac{a_j(t_p)P_j}{a_j(t_j)y_j} = 1 \tag{7}$$

式(7)即为不稳定流情形下各排口允排量之间的关系式。在稳定情况下,任一排放源对任一断面的影响是恒定的,即影响函数与时间无关,是一个常数,故式(7)变为:

$$\sum_{j=1}^m \frac{P_j}{y_j} = 1 \tag{8}$$

2 排污管理模型的应用与验证

选择珠江某口门水道(长 19 km)为例。该水

道平均宽度 300 m,平均坡降 0.5%,由上游至下游将河段均分为 19 个小段,共 20 个计算断面(见图 1),水质控制断面的 BOD_5 现状值为 1.2 mg/L,根据 GB3838-88 中 II 类水的要求,该断面允许的 BOD_5 的增值不应超过 1.8 mg/L,即 $b^* = 1.8$ mg/L。

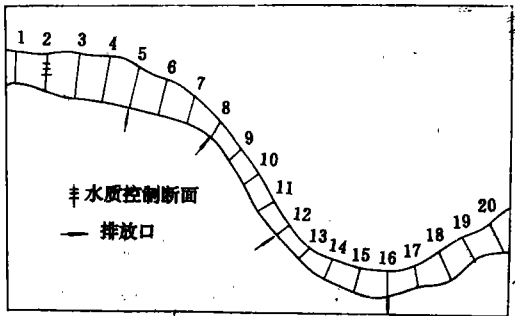


图 1 计算河道的形状与断面

根据应用河段边界断面的给定水位值与式(1)中水流方程的差分解,可将该河道其它计算断面上的水位、流量过程计算出来。水质计算则采用式(2),有关参数确定如下: $\Delta t = 600$ s, BOD_5 的降解系数 $K_1 = 0.3/d$, 扩散系数 D 由模拟比较得到(详见下节讨论)。

表 1 各排口的 y_j 与响应函数特征值

类 别		断面/排口编号				备 注
		5#/#1	8#/#2	12#/#3	16#/#4	
t_j	(时段)	80	85	91	100	时段间隔
$a_j(t_j)$	(s/m ³)	0.007854	0.008357	0.007835	0.005066	为 600 s,
y_j	(g/s)	229	215	230	355	$b^* = 1.8$ mg/L

当利用式(7)对 4 个排污口的允排量进行分配时,应先用式(2)将式(7)中的 y_j 与 $a_j(t)$ 依次确定,步骤为:对第 j 个排口,先任意给定一个排污量 W_j ,用式(2)将 2[#]断面的浓度 $b(t)$ 计算出来,由于是单独排放,故据式(4)得 $b(t) = a_j W_j$,于是 $a_j(t) = b(t)/W_j$,记其最大值为 $a_j(t_j)$,则 $y_j = b^*/a_j(t_j)$,表 1 是各排口 y_j 计算中的一些特征值。至于确定满足式(7)的 P_j 可采用配线法和试算法。

2.1 配线法

由表 1 知,式(7)中的 t_p 值将落在 [80, 100] 的区间内,可用已知函数拟合这段时间的 $a_j(t)$,拟合方程为:

$$a_j(t) = C_{j1} + C_{j2}t + C_{j3}t^2 + C_{j4}t^3 \tag{9}$$

($j = 1, 2, 3, 4$)

式(9)中的系数可根据 $a_j(t)$ 的记录用最小二乘法算得:

$$[C_{j\mu}] = \begin{bmatrix} 8020.5 & -77.77 & -5.191 & 0.2349 \\ 7167.6 & 375.0 & 36.96 & 0.9197 \\ 3645.5 & 842.1 & -53.89 & 1.092 \\ 1388.8 & 466.7 & -18.30 & 0.2115 \end{bmatrix} \times 10^{-6}$$

这样, 2[#]断面的污染物浓度过程为:

$$b(t) = \sum_{j=1}^m [C_{j1} + C_{j2}t + C_{j3}t^2 + C_{j4}t^3]W_j$$

该式对 t 求导, 再解导函数为零的方程, 得:

$$t_P = \left[-2 \sum C_{j3}W_j \pm \sqrt{(2 \sum C_{j3}W_j)^2 - 4 \sum C_{j4}W_j \sum C_{j2}W_j} \right] / (6 \sum C_{j4}W_j) \quad (10)$$

由于 t_P 与 W_j 有关, 故可先给定一组 W_j , 利用式(10)、(9)算出 t_P 与 $a_j(t_P)$ 后, 再计算 $\sum a_j(t_P)W_j/a_j(t_j)/Y_j$, 其值记为 A , 则允排量 $P_j=W_j/A$, 由于 P_j 值同样满足导函数为零的方程, 故 t_P 保持不变, 于是知 P_j 满足式(7), 即:

$$\sum a_j(t_P)P_j/a_j(t_j)/Y_j = \frac{1}{A} \sum a_j(t_P)W_j/a_j(t_j)/Y_j = \frac{1}{A} \cdot A = 1$$

P_j 的正确性可用式(2)验证, 表 2 给出了两组 P_j 的计算与验证情况, 与 $b^*=1.8$ 的误差是由配线时的差异引起。由表 2 知该法确定的 P_j 是可行的。

2.2 试算法

该法的步骤为: 任意给定一组排污量 W_j , 在区间[80, 100]内根据记录的 $a_j(t)$ 值, 逐时段的计算 $\sum a_j(t)W_j/a_j(t_j)/Y_j$, 记其最大值为 A , 即 $A=\sum a_j(t_P)W_j/a_j(t_j)/Y_j$, 再令 $P_j=W_j/A$, 即为满足式(7)的允排量, 表 2 给出两组 P_j 的计算与验证情况。该法验证结果的精度很高, 主要原因是无配线误差, 但该方法不适合手算。

3 分析与讨论

3.1 D 值的选取

表 2 允排量的计算与验证 (g/s)

方法	方案	类别	排 污 口				A 值/验证值	备 注
			1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]		
配 线 法	1	W_j	106.6	160.9	108.2	62.6	1.762/1.803	验证值即为 2 [#] 断面上的浓度值, 由式(2)根据相应的 P_j 值计算得到。
		P_j	60.5	91.3	61.4	35.6		
	2	W_j	75.9	79.1	197.7	162.4	1.925/1.7929	
		P_j	39.4	41.1	102.7	84.3		
试 算 法	1	W_j	166.2	2.7	0.8	14.2	1.757/1.800	
		P_j	219.6	3.5	1.1	18.7		
	2	W_j	197.2	207.2	68.3	95.1	21.29/1.800	
		P_j	78.5	97.3	32.1	44.7		

差分方程(2)中扩散系数 D 的大小对该方程的计算结果有较大的影响, 为正确率定该值, 本文用式(2)模拟稳态情况下的水质变化情况, 并与式(1)中水质方程的稳态解析解相比较, 从而得到结论。

模型输入值为: 河道流量 $Q=320.5\text{ m}^3/\text{s}$, 河道平均流速 $u=0.33\text{ m/s}$, 5[#], 8[#], 12[#]断面

的 BOD₅ 排放强度为 500, 200, 300 g/s, 在式(1)中, 如将排口处的浓度值视为边界值, 则其稳态解为: $b=b_0 e^{K_1 x}$, $b_0=W/Q$ 为排口断面的浓度增值, $S=u/2D(1-\sqrt{1+4K_1 D/u^2})$ 。表 3 是 2 种模型的计算结果, 由表 3 知差分方程中的 D 值对本例的计算值影响较大, 而解析模型中的

表 3 差分解与解析解的比较 (mg/L)

方 法	D 值	断 面											
		4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]	11 [#]	12 [#]	13 [#]	14 [#]	15 [#]
差分解	0	0	1.55	1.54	1.53	2.21	2.10	2.09	2.07	2.96	2.94	2.91	2.88
	10	0.05	1.54	1.53	1.53	2.11	2.09	2.07	2.08	2.95	2.92	2.89	2.86
	50	0.24	1.54	1.53	1.58	2.10	2.08	2.08	2.16	2.94	2.91	2.88	2.85
解析解	0-100	0	1.56	1.54	1.53	2.14	2.11	2.09	2.07	2.98	2.95	2.92	2.89

D 值仅影响小数点后 3 位以上数字, 当差分解的 $D=0$ 时, 其计算结果与解析解最相近。这种现象可用算法理论阐述, 式(2)的特征差分与中心差分(即对流项用中心差分)比较, 相当增多了一项能提高计算稳定性的扩散项($u\Delta t/2$)($\partial^2 b/\partial x^2$)。因此, 式(2)中的 D 值应取较小值, 否则将会导致计算值耗散太甚失真^[1]。

3.2 近似公式的应用

在感潮河流中, 也可以用式(8)近似地代替式(7), 表 4 是在 2 次不相同的潮流过程基础上, 采用随机抽样方法, 均匀地抽取了 300 组满足式(8)的允排量, 并用式(2)进行验证得到的

结果。由表 4 知, 满足式(8)的允排量在 2[#]断面上引起的浓度最大增值恒小于或等于 1.8 mg/L, 这是因为式(8)与(7)相比, 少了 $a_j(t_P)/a_j(t_j)(\leq 1)$ 这一系数的缘故。这种现象为用式(8)算出的允排量提供了安全的保证。

3.3 b^* 对浓度验证值精度的影响

在用配线法将式(7)或式(8)用于感潮河段时, 可得到各排口允排量的近似值, 将这些近似值代入(2)计算, 其在 2[#]断面上引起的浓度最大增值与水质控制标准 b^* 相比, 会有些误差, 其绝对误差(即 b^* 与浓度最大增值之差)在 b^* 值大时将变大, 反之则变小(见表 5), 这种特征为排污

表 4 300 组允排量近似验证结果

流型	河道平均流速 (m/s)	2 [#] 断面的流量与浓度验证情况			单独排放量(g/s)(断面)			
		平均流量(m ³ /s)方差	浓度最大值范围(mg/L)		5 [#]	8 [#]	12 [#]	16 [#]
1	-0.83—0.59	-10.26	150716	1.606—1.80	229	215	230	355
2	-0.34—0.57	6.20	115376	1.578—1.80	210	212	227	365

表 5 b^* 值与浓度验证值的关系

方 法	流 型	b^*	2 [#] 断面浓度 最大值范围	单独排放量(排口)				备 注
				1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	
配线法	1	1.00	0.982—1.006	127	119	128	197	浓度最大值范围所列之值是 300 组允排量近似用式(2)计算后的统计结果
		2.60	2.553—2.616	331	311	332	513	
近似法	2	1.00	0.878—1.000	117	118	126	203	
		2.60	2.277—2.600	303	306	328	527	

量与 2[#]断面的浓度增值是线性关系所致。

4 结 语

(1) 公式(7)精确地描述了动态水流情况下河段各排口允排量间的相互关系, 利用它于感潮河段, 可对排口进行实时控制与管理, 当某个排口由于意外原因, 排污量增加或下降时, 运用式(7)便可很快的确定其它排口需要降低或可增加的排污量, 这样既可保证水质标准, 又可充分利用水环境容量, 同时也保证排污控制与管理的实时性。

(2) 由式(7)知, 在运用前, 需要利用式(2)将各排口在单独排放时的允排量与影响函数确定, 利用式(2)的次数相等于排放口个数; 此后,

便可用式(7)来检验排污方案的合理性, 如在水环境规划中, 存在众多排污方案需要筛选时, 式(7)便愈能体现其简便, 易于计算的优越性。

(3) 式(8)精确地描述了稳定流情形下河段各排口允排量间的关系, 它是式(7)的特殊情况。由表 4 及 5 知, 式(8)可近似地用于感潮河段, 且由其计算得到的允排量具有一定的安全系数, 再加上式(8)比式(7)更加简单, 因此, 更易在基层环保部门中推广应用。

参 考 文 献

- 冯康等编. 数值计算方法. 北京: 国防工业出版社, 1978; 507—517
- [美]李文勋. 水力学中的微分方程及其应用. 上海: 上海科技出版社. 1982; 50—80
- 黄平. 中山大学学报(自然科学)论丛(24). 1991, 10(1); 65

Science, Jilin University, Changchun 130023); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(6), 1995, pp. 40—42

On the basis of some classical value theories, a theory on the functional values of natural resources was discussed in this paper, by building its elementary accounting model, studying the water resource in detail and giving an example. A new point of view was provided for the study on value theories of natural resources, together with a new method for pricing in the course of accounting.

Key words: natural resources functional value, integrated economical loss due to pollution.

Development of a Planning and Management Model for Pollutants Discharge into a Tidal River. Huang Ping and Zhou Jingfeng (Dept. of Environ. Sci., Zhongshan University, Guangzhou 510275); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(6), 1995, pp. 43—46

Based on a differential river water quality model, a planning and management model for pollutants discharge into a tidal river has been derived, which described the relationship between a permissible discharge from each of all outfalls along the river reach, P_i , and its permissible discharge when they were discharging separately, Y_i , as a sum of $P_i/Y_i=1$. Examples were used to present the application and validation of the model. It was concluded that the model was simple in structure, easy to calculate, and convenient to be used in planning, management and real time control for pollutants discharge into a tidal river.

Key words: outfall, permissible discharge, water quality management.

Coordination Planning of Economy and Environment: Comprehensive Planning of Benxi Shiqiaozi Development Zone. Ru Jiang et al. (Center for Environmental Sciences Peking University, Beijing 100871); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(6), 1995, pp. 47—49

To achieve sustainable development, it is essential to address environmental and economic construction in the planning stages. But it is recognized that how to evaluate the coordination of plans becomes the key problem for planning. Using environmental supporting capacity (ESC), this presentation assesses three plans of Benxi Shiqiaozi development zone and chose one plan, which is sounds more practicable and reasonable on the

comprehensive analysis of economic output and the consequent environmental impacts, including the demands for resources and the relevant discharges of pollutants from the economic development.

Key words: coordination development, environmental supporting capacity (ESC), development zone, sustainable development.

Cooperation of Mixed Carriers in a Three Phase Airlift-Loop Reactor. Cai Jian'an et al. (Dept. of Chem. Eng., East China Institute of Metallurgy, Maanshan, Anhui 243002); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(6), 1995, pp. 50—52

Mixed carriers consisting of fine sand grains and coarse coke grains were found to have a good cooperation in a three phase airlift-loop reactor with a side settling zone for wastewater treatment. The treatment of coking industrial wastewater in this reactor indicated that, as compared to a single carrier, the mixed carriers were not easy to lose with effluent and gave a higher COD removal rate [$11 \text{ kg}/(\text{d} \cdot \text{m}^3)$], a better effluent quality (e. g., phenol or cyanide had a concentration of $1/3 - 1/5$ times that in the case of a single carrier), the biomass easy to grow up on the surface of the carriers, and lower energy consumption.

Key words: carrier, airlift, three phase flow, wastewater treatment.

Study on a Straw Feed Treated with Mineral Saccharide. Fan Xiuying and Sun Lianchao et al. (EIA Unit, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085); *Chin. J. Environ. Sci.*, **16**(6), 1995, pp. 53—54

A new straw feed has been developed by using a mineral saccharide, a filtrate left from straw pulping black liquor after recovering lignin and chemicals from it, to treat crop stalks mixed with urea, resulting in an increased utility of crop stalks as domestic animal feed. The mineral saccharide was found to be rich in amino acids, raw proteins, essential elements and saccharides, to comply with the national standards (GB 13078-91) for feed hygiene, and to enable providing a source of nutrients for domestic animal and erecting straw due to its residual alkalinity. The 48 hours dry matter disappearance (DMdp) in the rumen of sheep was used as an indicator of straw availability for animal. Rice straw had a DMdp increased by 40% and a NDF (Neutral Detergent Fiber) reduced by 22.6%, when the straw was