

长江武汉段工业港酚污染带研究

朱发庆 吕斌

(武汉大学环境科学系, 武汉 430072)

文 摘 建立了计算污染带长度、最大宽度及其出现距离的解析模式和给定污染带范围下排污口允许排污量的简便算法。对长江武汉段工业港酚污染带作了应用研究。结果表明, 到2000年该污染带长、宽将分别达到4357.9m和47.1m, 最大污染带宽出现在排污口下游1603.8m处。若将污染带控制在长1000m、宽50m内, 该排污口酚排放量就应控制在49.02 t/a以内。

关键词 长江武汉段, 酚, 污染带, 允许排放量, 模式。

由于入河污水污染物浓度较高, 常在河流排污口附近形成一高浓度混合区。但是这一污染混合区的范围不能太大, 否则可能对河流的各种功能造成损害。国家地面水环境质量标准(GB3838-88)⁽¹⁾就规定: 排污口所在水域形成的混合区, 不得影响鱼类回游通道及邻近功能区水质。因此对排污口形成的污染带进行研究具有重要意义。目前常用二维河流水质模型的数值解法来计算污染带范围和排污控制量, 对环境管理部门应用起来过于麻烦。本文在给定污染带明确概念基础上, 利用常用二维河流水质模型, 首次导出了一个简便易行的污染带范围及在一定范围污染带(同时给定长、宽范围)的要求下排污口污染物控制量的计算方法。

1 污染带概念

一般将污染带定义成断面上污染物浓度值高于同断面上最大浓度5%区域^(2~4)。黄时达等⁽⁵⁾首次将污染带明确定义为“在排污口附近及下游, 水中污染物浓度高于该水体环境功能类别标准的区域”, 但未建立污染带范围及排污口允许排污量的计算方法。吕恩珊⁽⁶⁾在研究长江梅山段的污染带时也采用了类似定义, 并通过二维扩散模型按流带逐步逼近或内插得到污染带宽。

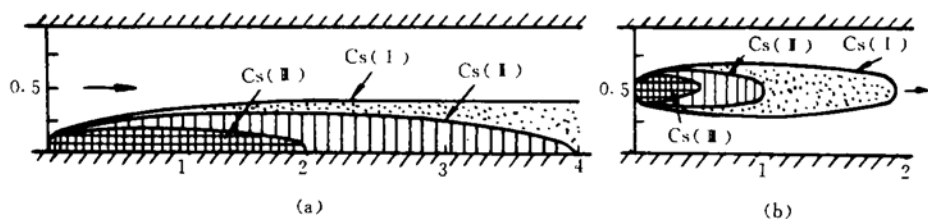
本文进一步将污染带明确为排污口附近水

域某污染物浓度高于该水体环境功能所要求的水质标准的区域, 称为某污染物的污染带。如由酚引起的污染带称作酚污染带。其几何意义见图1。根据二维河流水质模型可以将排污口下游各处水质计算出来, 将浓度相等的各点连接即可得到河流污染物等浓度线。给定河流水质标准 C_s , 则类似地, 可以画出一条 C_s 的等浓度线。相应于I、II、…、V类水质, 可分别绘出 $C_s(I)$ 、 $C_s(II)$ 、…、 $C_s(V)$ 的等浓度线。标准浓度曲线自身(图1b)或与岸边(图1a)相围区域污染物浓度超出该曲线上的污染物浓度, 其余部分则低于该曲线上的污染物浓度, 这一超出曲线上浓度的区域就是污染带。显然, 针对不同污染物或不同水质标准, 污染带就有不同的范围, 因此污染带是一个相对概念, 是针对具体污染物的一定水质标准而言。这样, 污染带的实际意义就更加明确, 有利于河流的水质规划与管理。

2 污染带长度

河流污染带是一个短距离输送问题, 常可忽略污染物化学衰减的影响。当排污口在岸边时, 排污口下游任一点 (x, y) 的浓度按二维河流水质模型可表达为:

收稿日期: 1995-06-14



(a) 岸边排污口

(b) 中央排污口

图 1 河流污染带示意

$$C(x, y) = \frac{\dot{M}}{\bar{u} d \sqrt{\pi E_y x / \bar{u}}} \exp\left(-\frac{\bar{u} y^2}{4 E_y x}\right) \quad (1)$$

式中: $\dot{M}$ ——污染物排放速率(g/s); $\bar{u}$ ——河水平均流速(m/s); d ——河流平均水深(m); E_y ——河流横向扩散系数(m²/s)

当为中央排放($y_0 = w/2$)时,忽略岸边反射作用的浓度公式为⁽⁷⁾:

$$C(x, y) = \frac{\dot{M}}{2\bar{u} d \sqrt{\pi E_y x / \bar{u}}} \exp\left[-\frac{\bar{u} (y - w/2)^2}{4 E_y x}\right] \quad (2)$$

对岸边排放,污染带是由一条等浓度曲线和河岸线围成的狭长水域。其长度为等浓度线与河岸线两交点间的河岸线长度。如设污染带长度为 Lm ,则点(L, O)处的浓度必为 C_s ,即由(1)有:

$$C_s = C(L, O) = \frac{\dot{M}}{\bar{u} d \sqrt{\pi E_y L / \bar{u}}} \quad (3)$$

解得: $L = \frac{\dot{M}^2}{\pi \bar{u} E_y d^2 C_s^2}$

对中央排放,污染带是由等浓度曲线自身围成的狭长区域,其最大长度出现在河中央,类似地有:

$$C_s = C\left(L, \frac{w}{2}\right) = \frac{\dot{M}}{2\bar{u} d \sqrt{\pi E_y L / \bar{u}}}$$

$$\text{解得: } L = \frac{\dot{M}}{4\pi \bar{u} E_y d^2 C_s^2} \quad (4)$$

(3)、(4)式分别为岸边和中央排污口污染带长度模式,可见它们均与污染物排放量的平方成正比,与水质标准浓度的平方成反比。在同等条件下,岸边排污口形成的污染带长度是中央排污口的4倍。

对一条具体的河流, $\pi \bar{u} E_y d^2$ 可视为常数。如已知基础年份的污染带长度 L_{0m} , 污染物排放量为 M_0 , 则对于预测未来年份 t 的污染带长度, 只需预测其污染物排放量 $\dot{M}_t$, 即可得到该年份的污染带长度:

$$L_t = (\dot{M}_t / \dot{M}_0)^2 \cdot L_0 \quad (5)$$

3 污染带宽度及最大宽度出现的距离

污染带不同位置的宽度是不等的。但若能给出生污染带的最大宽度, 则污染带的分布范围也就大致确定了。

设污染带在 x 断面处的宽为 Hm , 则由(1)可写出浓度为 C_s 时的等浓度线公式:

$$C_s = \frac{\dot{M}}{\bar{u} d \sqrt{\pi E_y x / \bar{u}}} \exp\left(-\frac{\bar{u} H^2}{4 E_y x}\right)$$

$$\text{即: } (d C_s \sqrt{\pi E_y \bar{u} / \dot{M}}) \cdot \sqrt{x} = \exp\left[-\frac{\bar{u} H^2}{4 E_y x}\right]$$

两边取对数并化简得:

$$H^2 = -\frac{4 E_y \ln(d C_s \sqrt{\pi E_y \bar{u} / \dot{M}})}{\bar{u}} x - \frac{2 E_y}{\bar{u}} x \ln x \quad (6)$$

这就是岸边排污口下游 x_m 处污染带宽度的计算 最大宽度出现的距离为:

式。令 $a = -E_y \ln(dC_s \sqrt{xu} E_y / \dot{M}) / \bar{u}$,

$b = -2E_y / \bar{u}$ 代入(6)式得:

$$H^2 = ax + bx \ln x$$

两边求导得: $2HH' = a + b(\ln x + 1)$

若污染带存在, 则有 $H > 0$, 故有:

$$H' = [a + b(\ln x + 1)] / 2H$$

令 $H' = 0$, 即可解得当

$$x_m = \exp\left(-\frac{a+b}{b}\right) = \frac{\dot{M}^2}{\pi e \bar{u} E_y d^2 C_s^2} \quad (7)$$

时 H 取得极值:

$$H_m = \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\dot{M}}{\bar{u} d C_s} \quad (8)$$

(7)和(8)分别为岸边排污时污染带最大宽度及其出现距离的计算式。通过类似方法易得中央排放时排污口下游 x_m 处污染带宽为:

$$H^2 = -\frac{16E_y \ln(2dC_s \sqrt{\pi u} E_y / \dot{M}_x)}{\bar{u}} - \frac{8E_y}{\bar{u}} x \ln x \quad (9)$$

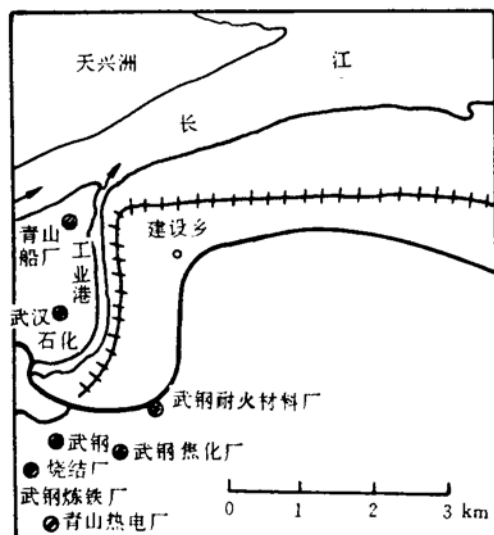


图2 工业港排污口示意

最大宽度为:

$$H_m = \left(\frac{2}{\pi e}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\dot{M}}{\bar{u} d C_s} \quad (10)$$

$$x_m = \frac{\dot{M}^2}{4\pi e \bar{u} E_y d^2 C_s^2} \quad (11)$$

可见, 污染带的最大宽度与污染物排放量成正比。与岸边排污口形成的污染带相比, 中央排污口形成的污染带由于不受岸边的限制而显得宽而短(长度仅为岸边污染带的 $\frac{1}{4}$, 而最大宽度保持不变。参见图1)。若已知基础年份污染带最大宽度为 H_0 , 则预测年 t 的污染带最大宽度为:

$$H_m = (\dot{M}_t / \dot{M}_0) \cdot H_0 \quad (12)$$

4 排污口控制量的计算

污染带范围是由带长和带宽决定的。如污染带控制长度为 L_m , 则由(3)、(4)可分别得到岸边和中央排污口的允许排污量:

$$\dot{M}_t = dC_s \sqrt{\pi \bar{u} E_y L_s} \quad (\text{岸边排污}) \quad (13)$$

$$\text{和 } \dot{M}_t = 2dC_s \sqrt{\pi \bar{u} E_y L_s} \quad (\text{中央排污}) \quad (14)$$

如对污染带宽度尚有规定 $H_m \leq H_s$, 则由(8)或(10)解得:

$$\dot{M}_h = \left(\frac{\pi e}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \bar{u} d H_s C_s \quad (15)$$

$$\text{取 } \dot{M} = \min\{\dot{M}_t, \dot{M}_h\} \quad (16)$$

则 $\dot{M}$ 即为排污口同时考虑污染带长和宽时的最大允许排污量。在这种排放限制下, 污染带范围将被限制在排污口下游长为 L_s 和宽为 H_s 的狭长矩形范围之内。

在实际工作中, 考虑到岸边的摩擦作用, 对岸边排污口的污染带长度有时是以距岸边一定距离 y 来计算的。则此时根据(1)式有:

$$C_s = \frac{\dot{M}}{\bar{u} d \sqrt{\pi E_y L_s / \bar{u}}} \exp\left(-\frac{\bar{u} y^2}{4E_y L_s}\right) \quad (17)$$

其污染带长度 L 需要采用数值解法才能求出。但若给定污染带长为 L_s , 其允许排放量公式仍可由(17)得到:

$$\dot{M}_t = dC_s \sqrt{\pi \bar{u} E_y L_s} \cdot \exp\left[-\bar{u} y^2 / (4E_y L_s)\right] \quad (18)$$

当考虑背景浓度 C_0 的影响时,上述各式中的 C_i 均应改为 $(C_i - C_0)$ 。

5 长江武汉段工业港酚污染带研究

工业港位于长江武汉段下游青山区与建设乡的交界附近,是长江南岸的人造港,北岸有天兴洲(图 2),港口附近江面宽一般在 1000 m 以内,汛期江面拓宽,甚至江水漫过天兴洲后,江面宽可达 3880 m。该港建于 1960 年,接纳武钢、青山船厂、青山热电厂、武汉石油化工厂及部分小型企业的工业废水,是长江武汉段最大的排污口,其中酚排放量约为 49.66 t/a(1990 年),约占全江段的 85%。

为使水质具有较高的保证程度,采用保证率 90% 的最小月平均流量作为计算条件。根据汉口

水文站 1950~1983 年 33 年流量资料进行统计分析,得到长江工业港附近保证率 90% 最小月平均流量为 $5850 \text{ m}^3/\text{s}$,平均流速 0.97 m/s ,河水平均水深为 8 m。又根据累积流量-稀释因素法计算确定工业港附近 90% 水文保证率下的横向扩散参数 $E_y \approx 0.67 \text{ m}^2/\text{s}$ 。取长江武汉段上游断面-沌口断面 1985~1987 年枯水期酚浓度平均值 0.0007 mg/L 作为计算的背景浓度。根据长江武汉段功能区划的结果,工业港附近一带以供水产养殖、航运功能为主,应执行 III 类水质标准,即 $C_i = 0.005 \text{ mg/L}$ 。

在以上条件下,若规定将工业港排污口污染带限制在 $L_s = 1000 \text{ m}$ 、宽 $H_s = 50 \text{ m}$,则由(13)式得:

$$\begin{aligned} \dot{M}_i &= 8 \times (0.005 - 0.0007) \times \sqrt{3.14159 \times 0.97 \times 0.67 \times 1000} \approx 1.55 (\text{g/s}) \\ &\approx 49.02 (\text{t/a}) \end{aligned}$$

由(15)得:

$$\begin{aligned} \dot{M}_s &= \sqrt{3.14159 \times 2.71828/2} \times 0.97 \times 8 \times (0.005 - 0.0007) \times 50 \approx 3.45 (\text{g/s}) \\ &\approx 108.72 (\text{t/a}) \end{aligned}$$

又由(16)得工业港排污口酚的允许排放量为 49.02(t/a)。

根据经济增长并考虑技术进步因素,在经济结构、环境保护投资比例不发生重大变化的

前提下,2000 年工业港酚排放量将达到 102.35t。按(3)式算得 2000 年工业港酚污染带的长度将达到:

$$L = \frac{[102.35 \times 10^6 / (365 \times 24 \times 3600)]^2}{3.14159 \times 0.97 \times 0.67 \times 8^2 \times (0.005 - 0.0007)^2} = 4359.7 (\text{m})$$

又由(8)式得最大宽度为:

$$H_m = \left(\frac{2}{\pi e} \right)^{\left(\frac{1}{2} \right)} \cdot \frac{102.35 \times 10^6 / (365 \times 24 \times 3600)}{0.97 \times 8 \times (0.005 - 0.0007)} \approx 47.1 (\text{m})$$

污染带最大宽度出现的距离为工业港排污口下游:

$$x_m = \frac{[102.35 \times 10^6 / (365 \times 24 \times 3600)]^2}{3.14159 \times 2.71828 \times 0.97 \times 0.67 \times 8^2 \times (0.005 - 0.0007)^2} \approx 1603.8 (\text{m})$$

故要使工业港酚污染带到 2000 年控制在长为 1000 m、宽为 50 m 的范围内,必须将工业港排污口酚的排放量削减 $102.35 - 49.02 = 53.33$ (t/a)。

6 结语

本文提出的污染带长度、最大宽度及其出现距离的解析模式和给定污染带范围下排污口允许排污量的算法具有简便易行的特点,适合

于宽阔河流流速较大时独立排污口污染带范围和控制量、削减量的计算。当同岸分布多个排污量相当的排污口时,若排污口之间相距较远,仍可按上述公式独立进行各排污口污染带的计算;但当相距较近(如小于 1 km)时,两污染带可能连成一片,污染带形状将发生改变,此时最好采用二维河流水质模型的数值解法。

参考文献

- 1 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准(GB3838-88). 北京:中国标准出版社出版,1988
- 2 [美] H. B. 费希尔等著. 内陆及近海水域区的混合. 北

京:水利电力出版社,1987

- 3 赵文谦. 环境水力学. 成都:成都科技大学出版社,1986
- 4 弋鼎哲主编. 环境影响评价指南(上). 杨陵:天则出版社,1989
- 5 黄时达等. 中国环境科学,1991,11(4):306~310
- 6 吕恩珊. 中国环境科学,1992,12(1):29~35
- 7 朱发庆编著. 环境规划. 武汉:武汉大学出版社,1995

作者简介

朱发庆,男,1962年8月生,副教授、环境规划与管理室主任。现从事环境质量模拟及环境评价与环境规划研究与教学工作,已公开出版教材2部,发表学术论文14篇。

Study on phenolic contaminated zone of the Changjiang River in Wuhan

Zhu Faqing and Lu Bin

Department of Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072

Abstract— Water quality models are presented for estimating the range of contaminated zone of a river and the allowable amount of pollutant discharged on the wastewater discharge point in given range of the zone. The models are applied to study the phenolic contaminated zone of the Changjiang River in Wuhan reach. In the year 2000, the zone will be 4357.9 m long and 47.1 m wide. The biggest width of the zone will be located in $x=1603.8$ m. If the zone needs to be controlled within 1000 m long and 50 m wide, the discharge amount of the discharge point should be less than 49.02 t/a.

Key words: the Changjiang River in Wuhan, phenol, contaminated zone, allowable discharge amount, model.