

河流污染混合区的解析计算方法

武周虎¹, 贾洪玉²

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2 山东省环境保护科学研究设计院, 山东 济南 250013)

摘要: 以顺直宽矩形明渠中垂向线源等强度排放物质浓度分布的解析解为基础, 探讨了污染混合区的计算方法, 推导了污染混合区最大长度、最大宽度与相应纵坐标、面积以及最大允许污染负荷的理论计算公式, 进行了污染混合区的算例分析。其结果可以作为河流污染混合区允许范围和最大允许污染负荷的计算依据, 解析计算方法比采用二维水质模型进行污染混合区的计算更加快捷灵活、方便实用。给出了非保守物质污染混合区最大长度的理论计算公式和忽略反应降解作用按保守物质处理的条件: 降解数 $De \leq 0.027$ 。

关键词: 河流; 水污染; 混合区; 污染负荷; 解析方法; 算例分析

中图分类号: X143; X522

文献标识码: A

文章编号: 1001-6791(2009)04-0544-05

河流沿岸地区工业或城镇生活污水经处理达到相应的排放标准(一般高于水环境功能区标准)后, 通过管道或明渠排入河道。污水首先在排污口附近局部区域稀释混合, 其次在水域的宽度与长度方向逐渐扩散。污染混合区是从水环境功能区管理的角度出发, 针对河流排污产生的污染超标区域提出来的概念, 它是指由于排污而引起河流污染物超标水域的影响范围。目前, 对于河流、水库污染混合区范围和最大允许污染负荷的计算主要是采用水质模型来实现, 虽然水质模型具有地形适应性强等特点, 但不能直观地给出污染混合区范围和最大允许污染负荷与各参数之间的函数关系, 给实际应用带来不便^[1-3]。武周虎^[4]从河流一维移流离散方程出发, 通过理论分析给出了移流离散水质模型方程的简化、分类判别条件; 武周虎^[5]采用解析方法对水库倾斜岸坡地形, 从移流扩散方程的简化三维解析解出发, 推导了污染混合区范围以及最大允许污染负荷的理论公式, 为水库排污口污染混合区允许范围和最大允许污染负荷量的确定提供了依据。

本文在恒定连续垂向等强度线源条件下, 从一维流动中横向扩散的移流扩散简化二维方程解析解出发, 通过理论分析和讨论, 给出了顺直宽矩形明渠在中心和岸边排放条件下污染混合区最大长度、最大宽度和面积等理论计算公式及非保守物质计算的讨论。其结果可为污染混合区范围以及最大允许污染负荷提供简便、快捷的理论计算公式, 也可以对水质模型计算和数据的分析归纳起到理论指导作用。

1 解析计算方法

略去纵向扩散项 $\left(E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \ll U \frac{\partial C}{\partial x}\right)$ 的二维移流扩散简化方程 $U \frac{\partial C}{\partial x} = E_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$, 在等强度时间连续垂向线源条件下的解析解^[6]:

$$C(x, y) = \frac{\beta C_0 q}{H \sqrt{4\pi E_y U x}} \exp\left[-\frac{U y^2}{4 E_y x}\right] \quad (1)$$

式中 x 为自排污口沿河流流向的纵坐标; y 为垂直于 x 的横向坐标; q 为排污流量; C_0 为排污浓度; U 为断

收稿日期: 2008-07-07

基金项目: 山东省环境保护局资助项目 (A2006-142)

作者简介: 武周虎(1959-), 男, 陕西岐山人, 教授, 硕士, 主要从事环境水力学与水污染防治研究。

E-mail: wu_zh2008@yahoo.com.cn

面平均流速; H 为平均水深; E_y 为横向扩散系数; β 为边界反射系数, 对于中心排放取 $\beta=1$, 对于岸边排放取 $\beta=2$ 。

根据式(1)污染物断面浓度的正态或半正态分布以及断面浓度最大升高值 C_m 随 $x^{-0.5}$ 减小的特征, 令河流排污引起的允许浓度升高值 C_d 与背景浓度 C_b 叠加等于水环境功能区所执行的浓度标准值 C_s , 即 $C_d + C_b = C_s$, 该等浓度线所包围的区域为污染混合区。由此可以得出, 污染混合区与排污影响浓度和背景浓度有关, 它既反映河流排污引起的污染超标范围大小, 又反映其污染程度^[7]。

为了方便推导, 文中纵、横坐标及公式中变量均采用量纲一。令纵坐标 $x' = \frac{E_y}{UB^2}x$; 横坐标 $y' = \frac{y}{B}$; 排污流量 $q' = \frac{q}{Q} = \frac{q}{UHB}$; 允许浓度升高值 $C'_d = \frac{C_d}{C_0}$ 。则由式(1)可知, 污染混合区外边界等浓度方程为

$$C'_d = \frac{\beta q'}{\sqrt{4\pi x'}} \exp\left[-\frac{y'^2}{4x'}\right] \quad (2)$$

由式(2)得到污染混合区外边界等浓度曲线方程为

$$y' = \sqrt{4x' \ln\left[\frac{C'_d}{\beta q'} \sqrt{4\pi x'}\right]} \quad (3)$$

式中 B 为水面宽度; Q 为河流流量, $Q = UHB$; 其它符号同前。由式(3)可以看出, 污染混合区外边界曲线方程仅与排污流量、允许浓度升高值以及边界反射系数 β 有关。

如令式(3)中 $y' = 0$, 可以得到污染混合区长度的理论计算公式为

$$L'_s = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\beta q'}{C'_d}\right)^2 \quad (4)$$

式(3)两边对 x 求导, 令 $dy'/dx' = 0$, 可以求得污染混合区最大宽度和相应纵坐标的理论计算公式, 推导得到污染混合区最大宽度为

$$b'_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{\beta q'}{C'_d} = \sqrt{\frac{2L'_s}{e}} \quad (5)$$

污染混合区最大宽度相应的纵坐标为

$$L'_c = \frac{L'_s}{e} \quad (6)$$

对式(3)在 $x/[0, L'_s]$ 上求定积分, 可以求得污染混合区的面积 S' 计算公式。考虑关系式(4)和式(5), 推导如下:

$$S' = \int_0^{L'_s} \sqrt{4x' \ln\left[\frac{C'_d}{\beta q'} \sqrt{4\pi x'}\right]} dx' = \sqrt{e} L'_s b'_s \int_0^{L'_s} \sqrt{\frac{x'}{L'_s} \ln\left[\frac{x'}{L'_s}\right]} d\left(\frac{x'}{L'_s}\right) \quad (7)$$

进行变量替换, 令 $x'/L'_s = \zeta$, 进而再令 $\eta = \zeta^{1.5}$, 则有

$$S' = \frac{2}{3} \sqrt{e} L'_s b'_s \int_0^1 \sqrt{\frac{2}{3} \ln\left[\zeta^{-1.5}\right]} d\zeta^{1.5} = \left(\frac{2}{3}\right)^{1.5} \sqrt{e} L'_s b'_s \int_0^1 \sqrt{\ln\left[\frac{1}{\eta}\right]} d\eta \quad (8)$$

由积分表查得 $\int_0^1 \sqrt{\ln(\eta^{-1})} d\eta = \sqrt{\pi}/2$, 代入上式得到类似于椭圆面积的理论计算公式:

$$S' = \left(\frac{2}{3}\right)^{1.5} \frac{\sqrt{\pi e}}{2} L'_s b'_s = 0.7953 L'_s b'_s \quad (9)$$

需要说明的是在中心排放时, 污染混合区的最大宽度为 $2b'_s$ 。由于中心排放与岸边排放 β 值的差别, 中心排放污染混合区长度只有岸边排放污染混合区长度的 $1/4$, 由式(5)可知污染混合区最大宽度又与长度的平方根成正比, 因此中心排放与岸边排放的实际最大宽度相等, 则中心排放污染混合区的面积 $S' = 0.7953 L'_s (2b'_s)$ 是岸边排放面积的 $1/4$ 。

中心排放时, 污染混合区的长度与最大宽度之比为

$$\frac{L'_s}{2b'_s} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{e}{2\pi}} \frac{q'}{C_d} \quad (10)$$

岸边排放时, 污染混合区的长度与最大宽度之比为

$$\frac{L'_s}{b'_s} = \sqrt{\frac{e}{2\pi}} \frac{q'}{C_d} = 4 \left(\frac{L'_s}{2b'_s} \right)_{\text{中心排放}} \quad (11)$$

由此可以看出岸边排放时, 污染混合区在河流流速的作用下拉得更加细长, 这是因为岸边排放时污染物仅在河流靠断面中心一侧产生稀释扩散作用, 污染物浓度降低缓慢。图 1 给出了 $q' = 0.05$ 时, C'_d 为 0.10、0.15 及 0.20 条件下, 中心排放和岸边排放时的污染混合区分布。

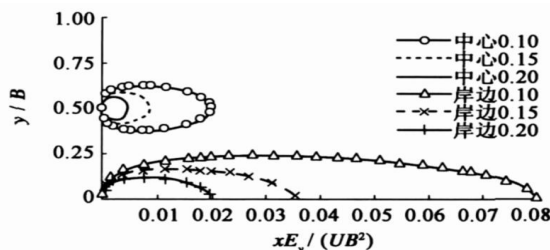


图 1 河流岸边及中心排放污染混合区比较

Fig. 1 Pollutant mixing zone in the outfalls of the bank and the center

$$L_s = \frac{1}{4\pi U E_y} \left(\frac{\beta q C_0}{H C_d} \right)^2 \quad b_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{\beta q C_0}{U H C_d} \quad S = 0.795 3 L_s b_s = 0.015 3 \frac{1}{E_y U^2} \left(\frac{\beta q C_0}{H C_d} \right)^3 \quad (12)$$

在中心排放时, 污染混合区最大宽度为 $2b_s$, 污染混合区面积为 $S = 0.0306 \frac{1}{E_y U^2} \left(\frac{\beta q C_0}{H C_d} \right)^3$ 。

在实际应用中, 对于顺直宽矩形明渠也可以根据平均水深、移流扩散参数、水质目标 C_s 与背景浓度 C_b 之差 C_d 和污染混合区允许长度或宽度或面积, 由式 (12) 反算最大允许污染负荷 $G_0 = q C_{00}$ 。

2 算例分析

污染混合区通常用于水环境功能区管理, 包括对排污口附近允许超标区域的控制和管理。由于污水排放标准与地表水环境质量标准一般都存在较大差异, 所以在允许排放达标污水的水环境功能区的排污口附近及下游一般都不不可避免的存在一个“允许超标区域”, 即污染混合区^[8]。污染混合区的形状和大小取决于排污口位置、排污流量、排污浓度、平均流速、平均水深、横向扩散系数、水环境功能区标准、背景浓度等因素, 另一方面污染混合区又受总量控制目标、功能区敏感目标和综合管理目标等条件的制约。所以, 应根据建设项目环境影响评价结论由水环境功能区管理部门对排污口位置、污染混合区大小给予规定, 使排污行为受到污水排放标准和污染混合区大小的双重约束, 而污染混合区大小又受最大允许污染负荷的直接影响, 因此上述解析计算方法为污染混合区和最大允许污染负荷的计算提供了便利。

已知某顺直宽矩形明渠的水深 $H = 0.5 \text{ m}$, 平均流速

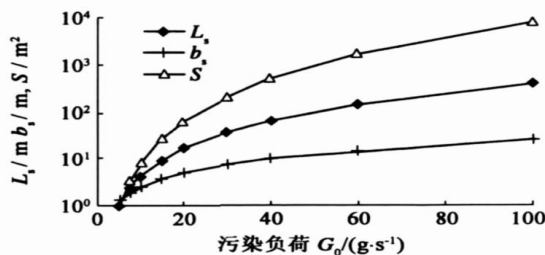


图 2 某顺直宽矩形明渠污染混合区特征尺度曲线

Fig. 2 Character curves of pollutant mixing zone in the open channel

$U = 0.2 \text{ m/s}$, 横向扩散系数 $E_y = 0.4 \text{ m}^2/\text{s}$, 背景浓度 $C_b = 0$, 水环境功能区限制浓度 $C_s = 20 \text{ mg/L}$ 。则岸边排放条件下的污染混合区最大长度、最大宽度及面积与污染负荷 $G_0 = qC_0$ 的变化关系曲线参见图 2。

由式(12)和图 2 可以看出, 从二维移流扩散简化方程的解析解出发得到顺直宽矩形明渠岸边污染混合区最大长度、最大宽度和面积分别与污染负荷 G_0^2 、 G_0 、 G_0^3 成正比的变化规律。

3 讨 论

通过对河流污染混合区解析计算方法的探讨和理论求解, 推导了污染混合区最大长度、最大宽度及相应纵坐标和面积以及最大允许污染负荷的理论计算公式, 进行了污染混合区的算例分析。其结果可以作为顺直宽矩形明渠污染混合区允许范围和最大允许污染负荷的计算依据, 解析计算方法比采用二维水质模型进行污染混合区的计算更加快捷灵活、方便实用。

非保守物质污染混合区最大长度 L_{sf} 的理论计算公式(采用试算法)和近似计算公式分别为

$$L_{sf} = L_s \exp\left(-\frac{2KL_{sf}}{U}\right) \quad L_{sf} \approx L_s \exp\left(-\frac{2KL_s}{U}\right) \quad (13)$$

式中 L_s 为保守物质的污染混合区最大长度; K 为反应降解系数; U 为断面平均流速。

由于物质输移扩散在污染混合区所经历的时间 T_s 较短, 当降解数 $D_e = KL_s/U = KT_s \leq 0.027$ 时, $0.95L_s \leq L_{sf} \leq L_s$, 可以忽略反应降解作用按保守物质计算污染混合区范围。在实际应用中, 按保守物质处理对环境管理偏于安全, 所以在污染混合区计算中, 污染物的反应降解作用一般可以忽略不计。

从水环境容量管理的角度, 定义污染负荷 G'_0 :

$$G'_0 = \frac{q'}{C_d} = \frac{q}{Q} \frac{C_0}{C_s - C_b} = \frac{qC_0}{QC_s - QC_b} = \frac{G_0}{G_s - G_b} = \frac{G_0}{G_d} \quad (14)$$

式中 G_s 为水环境容量, $[\text{M/T}]$, $G_s = QC_s$; G_b 为环境背景负荷, $[\text{M/T}]$, 负荷量纲下同, $G_b = QC_b$; G_d 为最大允许污染负荷, $G_d = QC_d = QC_s - QC_b = G_s - G_b$; G_0 为污染负荷, $G_0 = qC_0$; 其它符号同前。

在式(14)中必要时应考虑河流上、下游水环境容量与总负荷的优化分配方案, 此时水环境功能区要求满足 $G'_0 \leq 1$, 当污染负荷等于最大允许污染负荷时 $G'_0 = 1$ 。本文所采用浓度分布的解析解在中心排放时未考虑两岸反射、在岸边排放时未考虑对岸反射, 计算表明在上述条件下将出现浓度的最大相对误差, 其值小于允许浓度升高值 C_d 的 8%。

4 结 论

(1) 以顺直宽矩形明渠中垂向线源等强度排放物质浓度分布的解析解为基础, 推导了中心和岸边排放条件下污染混合区最大长度、最大宽度和面积等理论计算公式。表明污染混合区最大长度、最大宽度和面积分别与污染负荷 G_0^2 、 G_0 、 G_0^3 成正比的变化规律。

(2) 在实际应用中, 对于顺直宽矩形明渠按照本文给出污染混合区的理论计算公式, 可以根据最大允许污染负荷计算污染混合区范围; 也可以根据污染混合区允许长度或宽度或面积反算最大允许污染负荷。

(3) 给出了非保守物质污染混合区最大长度的理论计算公式和忽略反应降解作用按保守物质处理的条件: 降解数 $D_e \leq 0.027$ 。

参考文献:

- [1] 黄真理, 李玉, 陈永灿, 等. 三峡水库水质预测和环境容量计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 433-438. (HUANG Zhen li, LI Yu liang, CHEN Yong can, et al. Water quality prediction and water environmental carrying capacity calculation for Three Gorges reservoir[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2006: 433-438. (in Chinese))

- [2] 廖文根, 李锦秀, 彭静. 水体纳污能力量化问题探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003(3): 211-215. (LIAO Wen gen, LI Jin xiu, PENG Jing. Discussion on quantification of pollutant carrying capacity[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003(3): 211-215. (in Chinese))
- [3] 周丰, 刘永, 黄凯, 等. 流域水环境功能区划及其技术关键[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 216-222. (ZHOU Feng, LIU Yong, HUANG Kai, et al. Water environmental function zoning at watershed scale and its key problems[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 216-222. (in Chinese))
- [4] 武周虎. 河流移流离散水质模型的简化和分类判别条件分析[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 27-32. (WU Zhou hu. Discriminative condition of simplification and classification for applying advection dispersion model for calculating water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 27-32. (in Chinese))
- [5] 武周虎. 水库倾斜岸坡地形污染混合区的三维解析计算方法[J]. 科技导报, 2008, 26(18): 30-34. (WU Zhou hu. 3-D analytic computational method of pollutant mixing zone for reservoir with incline bank[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(18): 30-34. (in Chinese))
- [6] 格拉夫, 阿廷拉卡. 河川水力学[M]. 赵文谦, 万兆惠, 译. 成都: 成都科技大学出版社, 1997: 437-446. (WALTER H G, ALTHAKAR M S. Hydraulique fluviale[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1997: 437-446. (in Chinese))
- [7] GUYMER L. Solute mixing from river outfalls during over bank flood conditions[C] // Proceeding of the International Symposium on Environmental Hydraulics. HongKong: University of Hong Kong Press, 1991: 447-452.
- [8] HUANG Zhen li, CHEN Yong can, LI Yi liang, et al. The contents, methods and progresses of water pollution control of the Tree Gorges on the Yangtze River[C] // Proceedings of the Second International Symposium on Environmental Hydraulics. HongKong: University of Hong Kong Press. 1998: 447-452.

Analytic method for pollutant mixing zone in rivers^{*}

WU Zhou hu¹, JIA Hong yu²

(1 Institute of Environmental Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2 Shandong Provincial Scientific Research and Design Institute of Environmental Protection, Jinan 250013, China)

Abstract: On the basis of the theoretical solution to the concentration distribution under the conditions of the invariableness continuous plumb line source in the straight width rectangle of the river, this paper discusses the analytic method of the pollutant mixing zone in rivers, and deduces the largest length of the pollution mixing zone, the largest width and its corresponding formula of longitudinal coordinate, the area and the largest allowable pollutant load. The example analysis of the pollutant mixing zone is conducted. The result indicates that the analytic method can be used for the analytic gist of the outfall's pollutant mixing zone in the allowable range and the largest allowable pollutant load, and the theoretical calculation is faster, more flexible, more convenient and more practicable than the 2D water quality model used for the calculation of the pollutant mixing zone. The paper gives the largest length calculation formula of the non conservative substances pollutant mixing zone and the condition, neglecting the reaction and the decay effect and dealing with it based on the conservative substance. The formula of the decay number (D_e) is as follows: $D_e \leq 0.027$.

Key words: rivers; water pollution; mixing zone; pollutant loads; analytic method; example analysis

^{*} The study is financially supported by the Foundation of Environmental Protection Bureau of Shandong Province (No. A2006 142).