

室内模拟试验确定河流纵向扩散系数研究

梁秀娟¹, 肖长来¹, 梁煦枫², 盛洪勋³, 刘耀莹³, 张文静¹

(1. 吉林大学环境与资源学院, 吉林 长春 130026; 2. 长安大学环境与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 吉林市水资源管理办公室, 吉林 吉林 132000)

摘要 采用几何相似原理, 在不同流量、流速条件下, 以室内模拟试验求得纵向扩散系数, 所得结果与同条件下现场分析计算的结果基本上一致, 与国内外相近条件和经验计算值接近。室内模拟试验法不仅克服野外条件下示踪剂投放和测试条件的不便, 还能够更好地研究不同水动力条件下污染物的扩散运移规律。

关键词 纵向扩散系数; 室内模拟试验; 物理模型; 数学模型; 模拟条件; 试验方法

中图分类号: X522, TV131.65 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2006)05-0032-04

Determination of longitudinal dispersion coefficient of rivers through laboratory experiment

LIANG Xiu-juan¹, XIAO Chang-lai¹, LIANG Xu-feng², SHENG Hong-xun³, LIU Yao-ying³, ZHANG Wen-jing¹

(1. College of Environment and Resource, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Environmental Science and Engineering College, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Water Resource Management Office of Jilin City, Jilin 132000, China)

Abstract A new method to compute longitudinal dispersion coefficient of river through laboratory experiment was proposed in this paper. The principle of geometric similarity was adopted in the experiment with different discharges and velocities, and then the corresponding longitudinal dispersion coefficient was calculated. The result is almost the same as that calculated from the field analysis under the same conditions, and approaches the empirical calculation values under the similar conditions at home and abroad. This method not only overcomes the inconvenience of tracer injection and test conditions, but also can be used to study the diffusion and movement laws of the pollutants under different hydrodynamic conditions.

Key words longitudinal dispersion coefficient; laboratory experiment; physical model; mathematical model; simulation conditions; experiment method

纵向扩散系数是非常重要的水质参数, 其计算结果的准确与否直接关系到河流水质预测预报成果的可靠性^[1]。目前, 确定河流纵向扩散系数的主要方法有经验公式法和示踪试验法^[2]。经验公式法中, Taylor 和 Fischer 根据不同的试验和计算方法得出不同的计算公式, 但由于经验公式的推导是在一定的条件下试验完成的, 其结果是一个范围值, 其准确性难以判定。示踪试验法分为野外示踪试验和室内示踪试验, 野外示踪试验方法计算结果准确可靠, 但河流示踪试验受示踪剂的投放、取样等条件的限制, 并

不是在所有的条件下都能够完成。室内示踪试验多用于分析扩散系数与水文特征值的关系等。本文利用相似原理, 将河流的水文特征值按一定的比例缩小, 在室内进行模拟示踪试验, 从而求得河流纵向扩散系数的方法是一种新的尝试。试验结果表明, 室内模拟试验的计算结果较经验公式法准确可靠, 又不受示踪剂投放等条件的限制, 可以通过不同流量、流速的室内模拟试验, 计算河流相应条件下的纵向扩散系数, 能够更好地研究不同水动力条件下污染物的扩散运移规律。

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20010406, 20020401)

作者简介: 梁秀娟(1964—), 女, 吉林公主岭人, 副教授, 博士研究生, 从事水文水资源教学和研究工作。E-mail: lax64@126.com

1 模拟试验设置

1.1 几何模型的模拟计算

采用几何相似原理^[3],将试验河段断面的几何形状按一定比例缩小,使室内的模拟试验槽与天然河流条件的几何形状相类似。由于一般河流的宽深比都较大,所以河流断面的长、宽度和深度可采用不同比例系数。比例系数分别确定后,水力坡度可依据几何模型中长、深比例系数计算,糙率由河岸和河底的物质组成确定,其组成按条件适当选用中细砂、细砂、粉细砂和黏性土。

排污口物理模型的比例系数与河流的物理模型的比例系数计算方法相同。

1.2 水文特征值的计算

室内模拟试验所需的水文特征值包括流量和流速,为使室内模拟试验的流量、流速与模拟河段的流量、流速有可比性,按确定的比例系数,用曼宁公式计算河流与室内模拟试验的流量比例系数

$$\lambda_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{\frac{1}{n} I_p^{1/2} R_p^{2/3} A_p}{\frac{1}{n} I_m^{1/2} R_m^{2/3} A_m} \quad (1)$$

河水流速与模拟流速的比例系数

$$\lambda_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{\frac{1}{n} I_p^{1/2} R_p^{2/3}}{\frac{1}{n} I_m^{1/2} R_m^{2/3}} \quad (2)$$

式中: Q_p 为河水实际流量, m^3/s ; Q_m 为室内模拟试验的流量, L/min ; I_p 为河流的水面比降; A_p 为河流断面面积, m^2 ; R_p 为河流水力半径, m ; I_m 为模拟的水面比降; A_m 为模拟的断面面积, m^2 ; R_m 为模拟的水力半径, m ; V_p 为实际流速, m/s ; V_m 为模拟流速, m/min ; n 为糙率。

污水流量、流速比例系数的计算方法与河流流量、流速的比例系数计算方法相同。

2 模拟试验模型

2.1 物理概念模型

为方便计算和准确反映模拟河段的纵向扩散系数,模拟试验的物理概念模型应与实际河段的物理概念模型相同,模拟河段的污水排放方式为时间连续源排放,岸边排放,浮射流等,其水流特征是紊流状态。

2.2 数学模型的确定

数学模型^[2]是以河流紊动方程为基础的对流扩散方程

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} =$$

$$D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + S \quad (3)$$

式中: C 为污染物质量浓度, mg/L ; t 为污染物排放时间; s ; x 为河流纵向(平行水流方向)坐标; y 为河流垂向(平行于水深方向)坐标; z 为河流横向(垂直水流方向)坐标; u 为河流在 x 方向的流速, m/s ; v 为河流在 y 方向的流速, m/s ; w 为河流在 z 方向的流速, m/s ; D 为扩散系数, m^2/s ; S 为补充或沉淀的量。

数学模型需根据不同的物理概念模型,选择初始条件推导、变换和计算。

3 室内模拟试验方法

室内模拟试验的具体操作可分以下几个步骤:
①根据模拟河段断面确定几何模型的比例系数,设立室内模拟试验槽。
②计算河流某一流量、流速相对应的室内模拟试验的流量、流速。
③确定排污口的位置、污染物的排污方式、排放过程以及污染物种类,试验的污水采取实际污水样。
④设定取样断面的位置、分布距离、取样时间、取样数量。
⑤进行模拟试验和水质分析、计算纵向扩散系数。
⑥对纵向扩散系数的计算结果进行讨论、分析和验证。

4 室内模拟试验

4.1 自然条件

第二松花江位于吉林省东部地区,模拟试验江段位于吉林市下游哈达湾车站附近,为由铁合金厂排污口向下游的800m江段。该段江面开阔,宽约200~300m,水深3~4m,宽深比较大,江水湍急。枯水期流量150 m^3/s ,流速0.36 m/s ,平水期流量230 m^3/s ,流速0.51 m/s ,丰水期流量400 m^3/s ,流速0.75 m/s 。江岸地势较平坦,高出江面3~5m,江底为第四系冲积的砂、卵砾石。

吉林市铁合金厂排污口位于第二松花江的左岸,污水几乎垂直于江水流向注入江水中,平均流速为0.53 m/s ,流量为0.556 m^3/s 。污水中悬浮物含量较多,随着水流的变化在岸边(左岸)或江底沉积,以粉砂、细砂颗粒为主,含少量粘粒。

4.2 模拟试验

室内模拟试验物理模型基本与模拟河段物理条件相似。根据实际情况,模拟试验的水平比例为1:1000,垂直比例为1:100。模拟试验水槽长3m,宽40cm,以中细砂在水槽中作为模拟试验的江底和两岸。

在水槽排污口向对岸共布置3个取样纵断面,相当于实际江面中距离左岸45m、105m、165m,每个纵断面上布置4个取样点,相当于实际距离的50m、

150 m、350 m、650 m 模拟试验取样位置及断面分布见图 1。

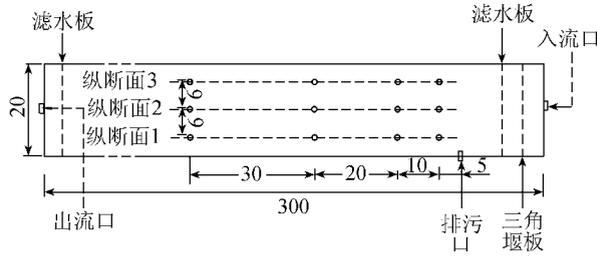


图 1 模拟试验取样位置及断面分布图

模拟试验取样的时间间隔分别为 10 min、20 min、40 min、60 min，每次模拟试验时间共计 130 min，取水样 48 组。分析项目为：pH 值、DO、电导率 (EC)、BOD、COD 和 NH_4^+ 6 项，利用水中的 COD、BOD、 NH_4^+ 的分析成果计算纵向扩散系数。

污水自水槽一侧浮射流连续排放。

模拟试验的流量、流速、江宽、水深等参数的计算结果见表 1。

表 1 模拟试验江水流量流速计算结果

水体	$Q_p / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$V_p / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_m / (\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	$V_m / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	B_m / cm	h_m / cm
江水	230	0.51	5.39	1.18	20.24	3.44
污水	0.556	0.53	0.34	0.52		

注： B_m 为模拟江宽； h_m 为模拟江深。

为确保模拟试验的精度，可多次重复进行。本试验即进行了多次试验，剔除试验中的不合理结果，然后对多次试验值进行分析整理。

4.3 数学模型的确定

模拟试验为模拟河流扩散试验，水流携带污染物前进，既有对流作用，又有扩散作用，所以在计算纵向扩散系数时同时考虑扩散和对流作用。污水从排污口排出，基本上是连续排放，假定污水的浓度、流量不随时间变化，则单位时间的排放量恒定。由于施放的污染源是连续的，所以采用时间连续源对流扩散数学模型来计算纵向扩散系数 E 。由于河流的宽度达 200 多 m，河流的宽深比较大，所以不考虑边界反射作用。

数学模型如下

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} + S & 0 < t < \infty, 0 < x < \infty \\ C|_{t=0} = 0 & 0 \leq x < \infty \\ C|_{x=0} = C_0 & 0 < t < \infty \end{cases}$$

式中： S 为由于降解而损失的量； D_x 为纵向扩散系数。本次试验利用现场实际测试数据，采用 Streeter-Phelps (S-P) 模型，确定了有关参数，经计算求得综合衰减率 0.78。但由于模拟试验中水流在实验槽内流动的时间较短，降解的量极少，在扩散系数的计算

中认为 S 基本为 0。则上述数学模型通过拉普拉斯变换

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left[\frac{x - ut}{2\sqrt{D_x t}} \right] + \exp \left[\frac{-ux}{D_x} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{x + ut}{2\sqrt{D_x t}} \right] \right\}$$

标准的正态分布为

$$\Phi(u) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

当 $x \gg 1$ 时

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{x - ut}{2\sqrt{D_x t}} \right]$$

$$\frac{C}{C_0} = 1 - N \left[\frac{x - ut}{2\sqrt{D_x t}} \right]$$

利用标准正态分布图解法求解纵向扩散系数。即根据试验资料，当 $x = x_0$ 时，用不同的污染物浓度监测资料绘制成 $\frac{C}{C_0} \sim t$ 曲线，见图 2。当 $\left[\frac{x_0 - ut}{2\sqrt{D_x t}} \right] = 1$ 时， $C/C_0 = 0.16$ ，由图 2 知 $C/C_0 = 0.16$ 时所对应的 $t_{0.16}$ 的值；当 $\left[\frac{x_0 - ut}{2\sqrt{D_x t}} \right] = -1$ 时， $C/C_0 = 0.84$ ，查图 2 可得 $t_{0.84}$ 的值，则

$$D_x = \frac{1}{8} \left[\frac{(x_0 - ut_{0.84})}{\sqrt{t_{0.84}}} - \frac{(x_0 - ut_{0.16})}{\sqrt{t_{0.16}}} \right]^2$$

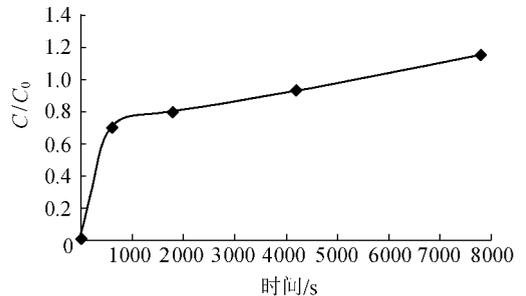


图 2 纵向扩散系数计算曲线 (NH_4^+)

在计算中发现，纵向扩散系数与污染物质有一定的关系，不同污染物的纵向扩散系数虽有一定差别，但相差不大。产生此差别的原因是污水中污染物浓度及其理化性质不同造成的。通过综合分析，确定该江段的纵向扩散系数 $D_x = 79.148 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

4.4 试验合理性分析

a. 试验条件的合理性。模拟试验采用时间连续源投放方式使模拟试验与铁合金厂排污口的实际排污形式一致。流量、流速和结构以实际条件为基础，流量和流速的控制，采用定水头下口瓶和进水口用三角堰控制流量，采用控制水力坡度和水头高度的方法控制流速。模拟槽底以混合的中粗砂为主，基本与第二松花江的江底比较接近。水动力条件基本以紊流为主，雷诺数 Re 介于 1400 ~ 3000，基本符合模拟江水水动力条件，可以认为试验条件是合理的。

b. 试验结果的合理性分析。为对室内模拟试

验的合理性进行分析,在模拟河段取样测试,对其结果进行分析,发现江水中污染物浓度的分布特征为:从排污口向下,污染物的浓度逐渐变小,靠近排污口一侧污染物浓度较高,向另一侧浓度逐渐降低(图3),说明污染物浓度在纵向上的分布规律为随着距离的增加污染物浓度逐渐降低,而影响范围逐渐加宽。经过一段距离以后,完全与江水混合。室内模拟试验中污染物的分布与其在野外的实际分布特征基本一致,都表现为向下游浓度逐渐减小,由排污口一侧向对岸浓度逐渐降低的特点(图4)。

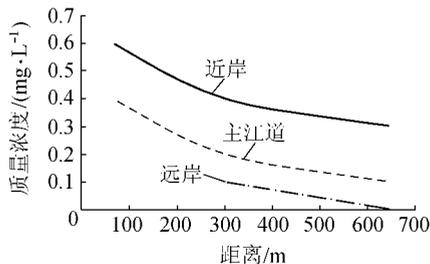


图3 模拟江段 NH_4^+ 纵向分布曲线

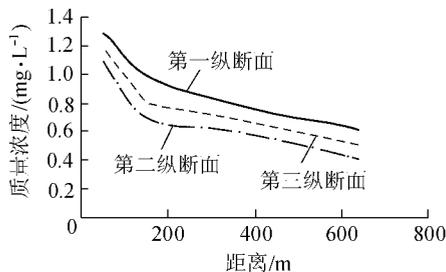


图4 模拟试验 NH_4^+ 纵向分布曲线

c. 模拟试验计算结果与经验值的对比。将模拟试验的计算结果与经验值及国内外已有河流的纵向扩散系数结果进行对比。

利用 Taylor 经验公式和 Fischer 经验公式计算纵向扩散系数。Taylor 经验公式

$$D_x = ahu^* \quad u^* = \sqrt{ghI}$$

式中: a 为经验系数; h 为河流水深, m ; u^* 为摩阻流速; g 为重力加速度, m^2/s ; I 为水力梯度。

Fischer 经验公式为

$$D_x = 0.011 \frac{u^2 b^2}{hu^*}$$

式中: u 为断面平均流速, m/s ; b 为河宽, m 。

Taylor 公式计算结果 D_x 为 $78.45 \sim 292.15 m^2/s$;

Fischer 公式计算结果 D_x 为 $91.89 m^2/s$ 。

国内外已有的不同河流的纵向扩散系数见表2。

由计算结果和表2可见,模拟试验计算的纵向扩散系数、与经验公式估算值和国内外已有的纵向扩散系数值接近。

总之,通过以上分析可见,利用室内模拟试验确

定纵向扩散系数的方法是合理的和可行的,其结果是正确的。

表2 不同河流扩散系数统计^[2,4,8]

河流	流速/($m \cdot s^{-1}$)	河深/m	河宽/m	$D_x/(m^2 \cdot s^{-1})$
黑龙江	1.80	4.25	700.0	71.10
太子河	0.37	0.61	108.1	9.19
黄河孟津段				40.00
Wind/Bightor	0.34	1.10	59.0	42.00
Comit	0.82	2.47	34.0	65.00
Clinch	0.86	2.13	59.4	53.90
Red river	0.61	1.62	253.6	143.80
Red river	0.45	3.66	152.4	227.60
Susquen-hanna	0.39	1.35	202.7	92.90
Sabine	0.58	2.04	104.0	315.90
Sabine, LA	1.06	2.32	160.3	308.90
Yadkin	0.43	2.35	70.0	111.00
Coruna		16.00	3100.0	50.00
Vigo		21.00	4800.0	50.00

5 结论

a. 根据水力学的几何相似原理计算室内模拟试验的几何模型和水文特征值,模拟试验的物理概念模型与实际河流物理概念模型一致。

b. 通过合理性分析可知,室内模拟试验的计算结果是正确的。利用室内模拟试验确定纵向扩散系数的方法是可行的。

利用室内模拟试验确定纵向扩散系数毕竟是一个新的尝试,其中还存在许多技术问题,尚需进一步研究、完善和补充。

参考文献:

- [1] 肖翔群, 连煜, 胡国华, 等. 黄河孟津段扩散系数的确定[J]. 水资源保护, 1996(1): 38-40.
- [2] 张书农. 环境水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988: 1-190.
- [3] 李家星, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001: 127-239, 304-325.
- [4] 郝醒华, 温清, 李景凤. 黑龙江水体二维弥散系数计算方法初探[J]. 环境科学与技术, 1994(1): 13-16.
- [5] SEYED M, KASHEFIPOUR R A. Falconer, longitudinal dispersion coefficients in natural channels[J]. Water Research, 2002(36): 1596-1608.
- [6] MAZUMDER B S, DALAL D C. Contaminant dispersion from an elevated time-dependent source[J]. Journal of Computation and Mathematics, 2000, 126: 185-205.
- [7] GOMEZ-GESTEIRA M, MONTERO P. A two-dimensional particle tracking model for pollution dispersion in A Coruna and Viga Rias (NW Spain)[J]. Oceanologica ACTA, 1999(22): 167-177.
- [8] 吴时强, 彭友文. 水流弥散方程中弥散系数的研究[J]. 电力环境保护, 1997, 13(4): 33-41.

(收稿日期: 2005-06-25 编辑: 高渭文)