

天然河流纵向离散系数确定方法的研究进展

顾莉¹, 华祖林²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学环境科学与工程学院浅水湖泊综合治理与综合开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要 对天然河流纵向离散系数的确定方法进行综述, 详细分析了理论公式、示踪试验、经验公式这 3 种方法的研究现状和发展趋势。讨论了基于断面流速分布的理论公式的适用范围以及国内外学者对该公式使用的拓展, 阐述了利用现场示踪试验数据计算纵向离散系数的矩量法、演算法、直线图解法和多种优化方法, 并分析了它们各自的优缺点, 列举了一些具有代表性的经验公式。探讨了弯道和死水区对天然河流纵向离散系数的影响, 阐述了针对传统一维纵向离散方程的缺点提出的一些其他模型, 并提出了天然河流纵向离散系数研究中一些有待深入研究的问题。

关键词 河流纵向离散系数; 天然河流; 弯道; 死水区

中图分类号: TV133 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2007)02-0085-05

Advances in determination of longitudinal dispersion coefficient of natural rivers//GU Li¹, HUA Zu-lin²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Educations of College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : A review was made of the methods for determination of the longitudinal dispersion coefficient of natural rivers, with emphasis placed on the current situation and development trends of the following methods, i. e. the theoretical method, the tracer experiment, and the empirical formulas. The applicability of the theoretical formula based on the velocity profile and its further development by the researches at home and abroad were discussed; some methods for calculation of the longitudinal dispersion coefficient by means of tracer experimental data, including the moment method, routing method, linear graphical method, and optimization methods, were expounded and their advantages and disadvantages were analyzed; some typical empirical formulas were summarized. Moreover, the influences of bends and dead zones on the longitudinal dispersion coefficient were investigated, and some modified models to avoid the disadvantages of the conventional 1-D advection-dispersion equation were also discussed. Finally, some problems for further research on the longitudinal dispersion coefficient of natural river were put forward.

Key words : longitudinal dispersion coefficient of river; natural rivers; bend; dead zone

河流的纵向离散系数是河流纵向混合特性的重要反映和体现, 其在构造水系水质模型、评价水体输运扩散能力以及确定水环境容量中至关重要, 该系数的准确确定, 对水污染突发事件(如松花江重大水污染事件)中污染带输移过程的正确预测起着非常重要的作用。纵向离散系数与河流的水力条件、断面特征和河道形态等众多因素有关, 目前确定纵向离散系数的方法很多, 有理论公式、示踪试验、经验公式等方法。本文对天然河流纵向离散系数的确定方法进行综述, 同时讨论弯道和死水区对天然河流纵向离散系数的影响, 阐述针对传统离散方程的缺点提出的其他模型, 并提出天然河流纵向离散系数

研究中一些有待深入研究的问题。

1 纵向离散系数的确定方法

1.1 理论公式

1953 年 Taylor 首先提出剪切流的离散理论。对于天然河道, Fischer 等^[1]指出其离散系数主要是由于纵向流速在横向不均匀分布造成的, 并导出了计算河流纵向离散系数的里程碑式的表达式:

$$K_x = - \frac{1}{A} \int_0^W u' h(y) \int_0^y \frac{1}{\epsilon_r h(y)} \int_0^y u' h(y) dy dy dy \tag{1}$$

式中: A 为河流断面面积; W 为河流宽度; y 为横向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679019, 50009001); 国家重点实验室开放研究基金资助项目(2005406811); 江苏省社会发展科技计划项目(BS2006095); 江苏“908”专项基金资助项目(JS-908-02-06)

作者简介: 顾莉(1981—), 女, 江苏盱眙人, 博士研究生, 从事环境水力学研究。E-mail: guli101@163.com
水利水电科技进展 2007 2(2) Tel: 025-83786335 E-mail: jz@hhu.edu.cn http://hkb.hhu.edu.cn · 85 ·

坐标 y' 为断面平均流速的偏离值 ϵ_t 为横向混合系数 $h(y)$ 为水深。

若已知水深和纵向流速的横向分布资料,可由式(1)计算河流纵向离散系数。但在实际应用中取得流速分布资料比较困难。后来许多研究者尝试给出河流纵向流速的横向分布公式,并代入式(1)推导出离散系数表达式。最早是 Sooky^[2]在1969年给出的三角形断面的横向速度分布公式:

$$\hat{u} = u + \frac{u_* \left[0.5 - \ln \frac{h_{\max}}{h} \right]}{\kappa} \quad (2)$$

其中
$$h = \begin{cases} h_{\max} y / w_1 & 0 \leq y \leq w_1 \\ h_{\max} (W - y) / w_2 & w_1 \leq y \leq W \end{cases}$$

式中 $\hat{u}$ 为深度平均的纵向流速; u_* 为摩阻流速; κ 为卡门常数; $h_{\max}$ 为断面上最大水深; w_1 和 w_2 分别为左岸和右岸到峰值流速处的距离; W 为河宽。Sooky 把式(2)代入式(1)求出了纵向离散系数。

Bogle^[3]利用美国 Sacramento River 和 Old River 实测数据,给出了用四次多项式函数表达的横向流速的经验公式:

$$\hat{u} = u(A_q + B_q \bar{y}^2 + C_q \bar{y}^4) \quad (3)$$

其中
$$\begin{aligned} \bar{y} &= 2y/W + 1 \\ B_q &= 5A_q - 7.5 \\ C_q &= -7A_q + 7.5 \end{aligned}$$

式中 A_q, B_q, C_q 为系数,随着 A_q 取值的不同可以拟合出矩形断面或棱柱形断面的不同流速。

此外 Seo 等^[4]提出了四次多项式和指数函数乘积形式的公式; Deng 等^[5]给出了用幂函数表达的速度横向分布经验公式; Seo 等^[6]给出了用 β 函数表达的经验公式。他们将各自的经验公式代入式(1),推导出不同的纵向离散系数表达式。

邓志强等^[7]不仅把速度横向分布公式,还把水深和横向混合系数的公式代入式(1),推导出相应的离散系数的表达式。陈永灿等^[8]基于最大信息熵原理,提出了一种确定梯形断面纵向流速分布的公式,建立了纵向离散系数的计算公式。

式(1)适用于断面沿程不变的流动,但可近似使用在天然顺直河道上,在式(1)基础上推导出的各类表达式均是如此。所以,要确定一条天然河流的纵向离散系数,需要根据河道断面形状相近的原则对天然河流进行分段计算。

1.2 示踪试验

对天然河流进行示踪试验,根据示踪试验的实测数据计算离散系数是最直接、可靠的方法。根据示踪试验数据计算河流纵向离散系数的方法很多。

Einstein 首先提出了矩量法。该方法中用到的

空间浓度过程线不易测量,因此 Taylor 和 Fischer 等利用“冻结云团假设”得出基于时间浓度过程线的矩量法。矩量法包括单站法和双站法,这两种方法均要计算时间浓度分布的方差。方差对于远离平均停留时间处的浓度值赋予了很大权重,而这些时刻浓度值极低,常常测不准,而且天然河道示踪试验得到的浓度分布往往有一个“长尾巴”,所以很难得到一个有意义的方差,这使得矩量法的误差较大。

Fischer 等^[1]把上游断面的浓度过程线视作下游断面的连续源投放过程,用试算的方法求出最适当的纵向离散系数。该方法不要计算浓度过程线的方差,消除了矩量法的缺点,成果较为可靠。但其在假定上存在一些问题,且采用了“冻结云团假设”,理论上不严密。周克钊等^[9-10]通过严格的公式推导,发现演算法中将上游断面浓度视作源是有问题的,且提出了改进演算法。

Chatwin 等^[11]将一维纵向离散方程在瞬时源条件下的解析解进行改写,得到一个直线方程。将试验数据代入方程绘图,由直线的斜率和截距可求出平均流速 u 和纵向离散系数 K_x 。郭建青等^[12]通过数学推导得到另一种形式的直线方程,采用与 Chatwin 相同的作图法求出了 u 和 K_x 。直线图解法不能克服初始段的影响,且确定直线的斜率和截距时存在一定的主观因素。因此,该方法一般只用来预测 u 和 K_x 。郭建青等^[13]在直线图解法的基础上提出相关系数极值法,其全部计算过程可以程序化,避免了图算过程,从而消除了主观因素的影响。

周克钊^[9]利用非线性逼近法求解沱江的纵向离散系数。张江山^[14]提出了单纯形加速法,并利用福建沙溪口水电站库区沙溪青州段的现场示踪试验数据验证该方法是可信的。

郭建青等^[15]用改进模拟退火法分析河流水团示踪试验数据,该方法收敛速度快,且参数计算结果准确。张娟娟等^[16]应用快速模拟退火算法确定河流纵向离散系数,并指出该方法求解精度高、省时高效、无需求导。郭建青等^[17]提出了抛物方程近似拟和法,此法对试验数据组数的要求不高,简单易行,甚至可以手算。

Chatwin、郭建青、周克钊、张江山等人的方法只需要一个断面的时间浓度过程数据或部分数据,无法克服初始段的影响。Singh 等^[18]提出一种利用两个断面浓度时间过程数据推求离散系数的新方法,该方法不采用“冻结云团假设”,只要求一维纵向离散方程成立,所求出的离散系数准确性较高。

1.3 经验公式

虽然示踪试验是确定河流纵向离散系数最可靠

的方法,但是一次试验需投入的人力、物力太大,不可能在每一条河流上都进行示踪试验。因此,当缺乏断面流速资料及没有现场示踪试验数据时,经验公式作为粗略估算发挥着一定的作用。

根据 Taylor 理论,纵向离散系数的一般表达式为 $K_x = \alpha hu_*$,其中 α 为系数。Fischer^[1]通过收集一系列不同实验室和天然河道的纵向离散系数值,发现系数 α 的变化范围比较大,通常在 140 ~ 500 之间,但美国密西西比河的系数 α 高达 7 500。纵向离散系数在不同河流条件下的变化范围很大,即使在同一河流的不同河段也有较大差异,难以找到统一的表达式。对于特定的研究河段,必须根据河道自身的特点,建立合适的纵向离散系数估算公式。

确定河流纵向离散系数的经验公式很多,将这些经验公式表达为一般形式,即

$$K_x = a \left(\frac{W}{h} \right)^b \left(\frac{u}{u_*} \right)^c hu_* = \alpha hu_* \quad (4)$$

式中: α 为系数; W 为河宽; h 为水深; u 为断面平均流速。常数 a 、 b 、 c 需要根据不同河道的特点进行率定。具有代表性的经验公式的系数表达式列于表 1。

表 1 代表性经验公式的系数表达式

研究者	系数 α
Mcquivey 等 ^[19]	$\alpha = \frac{0.058}{J} \frac{u}{u_*}$
Fischer 等 ^[1]	$\alpha = 0.011 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$
Liu ^[20]	$\alpha = 0.18 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0.5}$
Iwasa 等 ^[21]	$\alpha = 2.0 \left(\frac{W}{h} \right)^{1.5}$
Seo 等 ^[22]	$\alpha = 5.915 \left(\frac{W}{h} \right)^{0.62} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{1.428}$
Koussis 等 ^[23]	$\alpha = 0.6 \left(\frac{W}{h} \right)^2$
李锦秀等 ^[24]	$\alpha = 0.007 \left(\frac{W}{h} \right)^{2.1} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0.7}$
邓志强等 ^[7]	$\alpha = \frac{0.043}{8\varepsilon_{i0}} \left(\frac{W}{h} \right)^2 \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$ $\varepsilon_{i0} = 0.145 + \left(\frac{1}{3520} \right) \left(\frac{u}{u_*} \right) \left(\frac{W}{h} \right)^{1.38}$
Kashefipour 等 ^[25]	① $\alpha = 10.612 \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$ ② $\alpha = \left[7.428 + 1.775 \left(\frac{W}{h} \right)^{0.62} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0.572} \right] \left(\frac{u}{u_*} \right)^2$

表 1 列出的经验公式均有一定的适用性,没有一个普遍意义上对任何河道都合适的经验公式。当选择经验公式时,最好选择与所需计算河流特征比较相近的河流推导出的经验公式。

天然河流中可能有弯道、沙洲、边穴、池塘、砂沟、桥墩、人工护岸等不规则性因素存在,它们都会

影响河流纵向离散系数^[1,26]。下面就弯道和死水区对河流纵向离散系数的影响作一介绍。

2 弯道的纵向离散

弯道中纵向离散系数不仅具有顺直河流的全部影响因素,还有两个显著的特点:①弯道产生横向环流,促使污染物质横向散开,增大了横向混合系数,使得离散系数减小。②弯道断面上的流速分布比顺直河段更加不均匀,偏差流速增大,离散系数也随着增大。一般而言,弯道流速不均对离散系数增大的效应大于横向环流减小离散系数的效应,所以通常河流弯曲使离散系数增大。

Fischer^[1]提出一个判断式(1)在弯曲河段中适用性的参数 γ , $\gamma = \frac{B^2/\varepsilon_t}{u/L}$,其中 B 为断面最大流速线到最远边岸的距离, ε_t 为横向混合系数, u 为断面平均流速, L 为弯道的平均长度。 $\gamma < 25$ 时河弯转向对于离散系数没有产生很大影响,可用式(1)求纵向离散系数;反之,当 $\gamma > 25$ 时就必须考虑弯道的影响,不宜用式(1)计算,一般需要实地测定。

Fukuoka 等^[27]在实验室研究了由 13 个交替方向的弯道所组成的矩形明渠中的纵向离散过程。通过试验和实际河流资料的分析,得到河流弯曲段的纵向离散系数大于相应顺直河段的离散系数,而达到断面均匀混合所需的距离减小了的结论。Fukuoka 等对示踪试验数据进行回归分析,给出了矩形规则蜿蜒河段的纵向离散系数的经验公式:

$$\begin{cases} \frac{K_x}{hu_*} = 1.0 \left(\frac{W r_C^3}{L^2 h^2} \right)^{0.86} \\ \frac{K_x}{Ru_*} = 0.80 \left(\frac{r_C^2}{Lh} \right)^{1.4} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{K_x}{hu} = \alpha_1 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \quad (6)$$

或 $\frac{K_x}{hu} = \alpha_2 \frac{L}{h} \quad (7)$

或 $\frac{K_x}{hu} = \alpha_3 \left(\frac{W r_C}{h^2} \right)^2 \quad (8)$

式中: K_x 为纵向离散系数; r_C 为弯道半径; u_* 为主流方向切应力流速; α_1 、 α_2 、 α_3 为比例系数,与断面流速分布及弯曲形状有关; W 为河宽; L 为弯道长度; u 为河流平均流速; R 为水力半径; h 为水深。

叶志成^[28]、侯克复等^[29]在实验室弯曲河流物理模型中用氯化钠进行示踪试验,获得大量的试验数据,并推导出了弯曲河流纵向离散系数的准数关系式:

$$\frac{K_x}{hu_*} = 0.0179 \left(\frac{r_C}{h} \right)^{1.34} \left(\frac{u}{u_*} \right)^{0.98} \quad (9)$$

式中 $\frac{r_c}{W}$ 值为 4 左右, 宽深比小于 20 时用式(9)估算河流纵向离散系数将取得较好的效果。

Guymet^[30] 在实验室内研究了大尺寸蜿蜒河段的离散。他对断面形状沿程不变化的梯形断面和断面形状沿程变化的不规则断面的河段分别进行了试验, 并给出了纵向离散系数的大小。结果表明, 梯形断面河段的浓度-时间过程线呈高斯正态分布, 不规则断面河段的浓度-时间过程线呈偏态分布, 并且这种断面沿程变化的特性使纵向离散系数增大 150% 以上。

槐文信等^[31] 从纵向分散与拉格朗日型的湍流扩散相比拟的角度出发, 得到了蜿蜒型河道纵向分散系数的公式形式, 利用天然河道和室内人工规则及不规则断面形式的蜿蜒河道资料来确定公式中的参数, 得到经验公式:

$$\frac{K_x}{hu} = 0.05 \left(\frac{W}{h} \right)^2 \quad (10)$$

或
$$\frac{K_x}{hu} = \alpha_2 \frac{L}{h} \quad (11)$$

当 $\frac{L}{h} \leq 10$, $\alpha_2 = 0.03$; 当 $\frac{L}{h} > 10$, $\alpha_2 = 0.05$ 。式(10)和式(11)在工程实际中比较有用。

3 存在死水区的河道纵向离散

天然河流中常常有各种死水区, 如河床上的洼区、河岸的凹凸处、丁坝等建筑物附近水域。河道中的污染物在主流挟带下经过死水区时, 死水区能把一部分污染物滞留下来, 当污染物主体随流下移后, 死水区中的污染物又会慢慢释放出来^[1, 26, 32]。Thackston, Schnelle 和 Fischer 等在研究天然河流纵向离散时曾经尝试考虑死水区对污染物的滞留作用, 认为这种滞留作用是现场示踪试验测出的浓度-时间曲线偏态分布的最佳解释。Valentine 在槽底用样条形成死水区进行试验, 结果表明死水区存在加大了初始段的长度, 引起了“尾巴”的发生, 并增大了离散系数^[1, 26]。

Thackston, Schnelle, Pedersen, Nordin, Troutman, Seo, Maxwell 均认为考虑死水区影响时, 应采用死水区模型。死水区模型预测的浓度曲线与现场实测数据的拟合程度比一维离散模型好^[33]。假设死水区中污染物是完全混合的, 主流区与死水区存在物质交换, 死水区模型可用下面的方程组表示:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + U_f \frac{\partial C_f}{\partial x} = K_f \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2} + \epsilon T^{-1} (C_s - C_f) \quad (12)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = T^{-1} (C_f - C_s) \quad (13)$$

式中: C_f 为主流区的污染物浓度; U_f 为主流区断面平均流速; K_f 为主流区纵向离散系数; C_s 为死水区污染物浓度; ϵ 为死水区与主流区的面积比; T 为污染物在死水区中滞留的时间。

该模型中主流区的离散系数比一维离散方程中的小, 模型能够较好地拟合出现场实测数据, 但由于所需确定的参数较多, 以至于实际应用中受到限制。

4 其他模型

传统的一维纵向离散方程要求空间浓度分布的方差随时间的增长率为线性变化, 该关系在天然河流中往往不成立, 传统方程还假设浓度分布曲线为 Gauss 正态分布, 但示踪试验的浓度分布曲线一般都是偏态的^[9]。由于传统一维纵向离散方程的这些缺陷, 许多研究者提出了其他模型。

Liu 等修正了一维纵向离散模型, 采用依赖于时间的纵向离散系数。他们将一维纵向离散模型与 Peasion III 型曲线结合起来, 可以反映出时间-浓度过程线的偏态分布^[9]。

周克钊提出了“时空虚拟源模型”, 保持一维离散方程形式不变, 但边界条件不同, 此时空虚拟的纵向离散系数不一定与传统一维纵向离散模型中的相同^[9]。用该模型计算出的浓度-时间过程线能够完美地刻画出实测时间-浓度过程线的较大偏态(即“长尾巴”)

1996 年李兰^[34] 提出可以同时求解浓度场 $C(x, t)$ 和离散系数 $K_x(x)$ 的反问题模型, 并用时域算法求解了此模型。1998 年李兰^[35] 又提出水质反问题模型的频域算法, 并给出应用计算实例。反问题模型求出的 $K_x(x)$ 准确地反映了天然河流纵向离散系数的空间分布特性, 而且同时求出浓度场, 该方法必将在水环境保护中有广阔的应用前景。

5 结语

对于天然河流的纵向离散系数, 经验公式计算方便、容易, 但局限性大, 可用于离散系数的估算。选择经验公式时, 最好选择与所需计算河流特征比较相近的河流推导出的经验公式。相对而言, 示踪试验得到的离散值比其他方法得到的更为精确和可靠, 可准确反映出河流自身的离散特性。在一维离散方程基础上推导出的理论公式, 受到方程本身适用性的限制, 适用于较为顺直均匀的河道^[36]。

天然河流的各种不规则性导致河流纵向离散复杂多变, 这些不规则性对离散系数的影响过程还不清楚。除了弯道和死水区这两个问题外, 还可进一步研究沙洲、滩沱、丁坝、护岸和桥墩对离散系数的影响。

另外,河道的不同平面形状的影响也可以考虑。

虽然传统的一维纵向离散方程本身存在许多局限性,但因其具备参数少和简便等优点,所以该方程是目前应用最为广泛的。为了真实地反映天然河流的纵向混合过程,人们提出了各种修正模型,如“死水区”模型、Liu 和 Cheng 修正模型、时空虚拟源模型等,但这些模型因为参数过多或使用不方便,没有得到广泛的应用。所以,如何建立一个既能保留传统一维纵向离散方程的优点,又能体现出河流中的实际离散情况的模型,值得进一步研究探讨。

参考文献:

[1] FISCHER H B, LIST E J, KOHR C Y, et al. Mixing in inland and coastal waters[M]. New York: Academic Press, 1979 81-147.

[2] SOOKY A A. Longitudinal dispersion in open channels[J]. J Hydraul Div, ASCE, 1969, 95(4): 1327-1346.

[3] BOGLE G V. Stream velocity profiles and longitudinal dispersion[J]. J Hydraul Eng, 1997, 123(9): 816-820.

[4] SEO I W, GADALRAB M S. Estimation of dispersion coefficient using different forms of lateral velocity distribution[C]//SEO I W, SINGH V P, SONU J H. Hydraulic Modeling: Proceedings of International Conference on Water, Environment, Ecology, Socio-economics, and Health Engineering. Colorado: Water Resources Pubns, 1999 217-226.

[5] DENG Zhi-qiang, SINGH V P, BENGTSSON L. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers[J]. J Hydraul Eng, 2001, 127(11): 919-927.

[6] SEO I W, BAEK K O. Estimation of the longitudinal dispersion coefficient using the velocity profile in natural streams[J]. J Hydraul Eng, 2004, 130(3): 227-236.

[7] 邓志强, 褚君达. 河流纵向分散系数研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 137-142.

[8] 陈永灿, 朱德军. 梯形断面明渠中纵向离散系数研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 511-517.

[9] 周克钊. 天然河流纵向离散系数确定方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 1985.

[10] 周克钊, 余常昭, 张永良. 天然河流纵向离散系数示踪实验计算方法研究[J]. 环境科学学报, 1986, 6(3): 315-325.

[11] CHATWIN P C. On the interpretation of some longitudinal dispersion experiments[J]. J Fluid Mech, 1971, 48: 689-702.

[12] 郭建青, 温季. 示踪试验确定河流纵向弥散系数的直线图解法[J]. 环境科学, 1990, 11(2): 24-27.

[13] 郭建青, 王洪胜, 李云峰. 确定河流纵向离散系数的相关系数极值法[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 387-391.

[14] 张江山. 示踪实验确定河流纵向离散系数的单纯形加速法[J]. 环境科学, 1994, 15(4): 66-68.

[15] 郭建青, 李彦, 王洪胜, 等. 利用改进 SA 算法估计河流水质参数的仿真实验[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12):

1750-1762.

[16] 张娟娟, 万伟锋. 确定河流纵向离散系数的快速 SA 法[J]. 地下水, 2005, 27(5): 396-398.

[17] 郭建青, 李彦, 王洪胜, 等. 确定河流水质参数的抛物方程近似拟和法[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 11-13.

[18] SINGH S K, BECK M B. Dispersion coefficient of streams from tracer experiment data[J]. J Environ Eng, 2003, 129(6): 539-546.

[19] MCQUIVEY R S, KEEFER T N. Simple method for predicting dispersion in stream[J]. J Envir Engrg Div, ASCE, 1974, 100(4): 997-1011.

[20] LIU H. Predicting dispersion coefficient of stream[J]. J Envir Engrg Div, ASCE, 1977, 103(1): 59-69.

[21] IWASA Y, AYA S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows[C]//LEE J H W. Environmental Hydraulics. Rotterdam: Balkema A A Pub, 1991 505-510.

[22] SEO I W, CHEONG T S. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams[J]. J Hydraul Eng, 1998, 124(1): 25-31.

[23] KOUSSIS A D, RODRIGUEZ-MIRASOL J. Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams[J]. J Hydraul Eng, 1998, 124(3): 317-320.

[24] 李锦秀, 黄真理, 吕平毓. 三峡库区江段纵向离散系数研究[J]. 水利学报, 2000(8): 84-87.

[25] KASHEFIPOUR S M, FALCONER R A. Longitudinal dispersion coefficients in natural channels[J]. Water Research, 2002, 36: 1596-1608.

[26] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992: 176-186.

[27] FUKUOKA S, SAYRE W W. Longitudinal dispersion in sinuous channels[J]. J of Hydraulics Div, 1973, 99(HY1): 195-217.

[28] 叶志成. 弯曲河流中纵向混合过程的研究[J]. 华东工学院学报, 1985, 34(增刊): 289-299.

[29] 侯克复, 叶志成, 慕金波. 弯曲河流纵向混合系数的室内试验研究[J]. 环境科学研究, 1992, 5(1): 6-11.

[30] GUYMER I. Longitudinal dispersion in sinuous channel with changes in shape[J]. J Hydraul Eng, 1998, 124(1): 33-40.

[31] 槐文信, 徐孝平. 蜿蜒河道中纵向分散系数的水力估测[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(4): 9-12.

[32] RUTHERFORD J C. River mixing[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1994: 175-282.

[33] SEO I W, CHEONG T S. Moment-based calculation of parameters for the storage zone model for river dispersion[J]. J Hydraul Eng, 2001, 127(6): 453-465.

[34] 李兰, 王力. 一维对流离散方程反问题的数值解法与应用[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(6): 158-162.

[35] 李兰. 水质反问题模型的时域频域算法[J]. 水科学进展, 1998, 9(3): 218-223.

[36] 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: 2006-06-27 编辑: 高建群)