

专论综述

污 染 物 在 河 流 中 的 混 合 过 程

张 晓 健

(清华大学环境工程教研组)

前 言

研究污染物在河流中的混合过程,主要是为了进行河流污染事故预报,预测污水排放口附近污染带的混合情况,探讨混合对整个迁移过程的影响等问题。

本文所讨论的污染物的物理特性是:在水中能够均匀地分散开;浮力中性;不产生凝聚、沉积和挥发。河流中大多数污染物都处于溶解状态、胶体状态或可忽略沉速的悬浮状态。因此,这些污染物质点(含有污染物的微小水团)的动力学特性与河流中水质点的特性完全相同,对于研究混合问题,无需考虑该污染物的化学性质,可以把它看作是某种溶质或被标记的水质点。

鉴于国内关于污染物在河流中的混合过程所做的研究和已发表的文献甚少,为促进对问题的了解和研究,本文介绍了过去二十多年来国外的主要研究成果。由于篇幅所限,有关的理论论述和各公式的推导过程一概略去。

扩 散 和 离 散

扩散(diffusion)和离散(dispersion)是关于混合过程的两个重要概念。

扩散是指由于流体中分子或质点的随机运动所产生的分散现象,包括分子扩散和湍流扩散。分子扩散服从费克定律。按照Taylor 1921年提出的质点连续运动扩散理论,当流体质点的湍流瞬时脉动速度为稳定

的随机函数时,湍流扩散也可以用费克型公式来表示。河流中的流动都是湍流,湍流扩散作用远大于分子扩散作用,分子扩散可忽略不计。

离散是由于流速分布不均匀而产生的分散现象,可用图1来解释。由于底部切应力的影响,竖向上流速分布如图所示。对于在 $x=0$ 处的初始瞬时面源,经过一个单位时间,原在 $x=0$ 平面的流体质点移到了速度分布线处,溶质也就沿纵向分散开了。如果随实际流速前进来观察各点处的浓度变化,只能看到湍流扩散的作用;而随竖向平均流速前进来观察竖向平均浓度的变化,则出现了离散现象。

河流中的流动和污染物浓度分布都是三维的,只要用某种空间平均(平均流速、平均浓度)来表示混合过程,就会在方程中出现离散项。例如,对河流横断面进行平均,就有断面平均质量通量:

$$J_{\text{—维纵向离散}} = \overline{u'c'} \quad (1)$$

式中, $\overline{\quad}$ 表示断面平均; $'$ 表示与断面平均值相比的偏离量; J 是通过按平均流速前进的截面的平均质量通量; u 是河水纵向流速; c 是污染物浓度。对竖向进行平均,就有竖向平均的质量通量:

$$J_{\text{纵向离散}} = \langle u'c' \rangle, J_{\text{横向离散}} = \langle w'c' \rangle \quad (2)$$

式中, $\langle \quad \rangle$ 表示竖向平均; $'$ 表示与竖向平均值相比的偏离量; w 是流速的横向速度分量。

Batchelor^[1]把Taylor关于湍流扩散的质点连续运动扩散理论推广到离散过程。按照

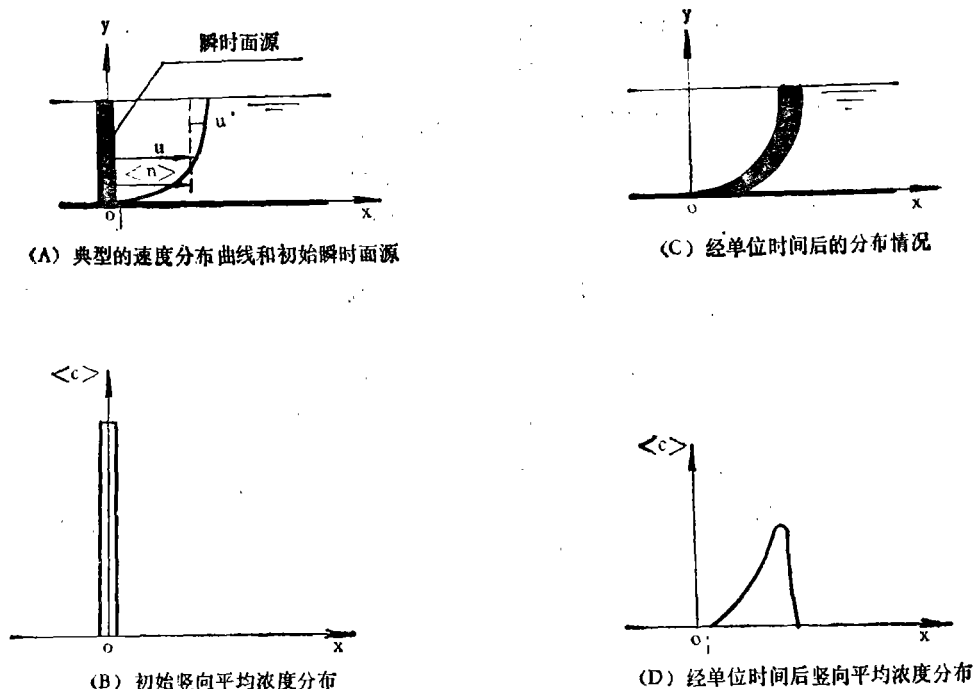


图 1 纵向离散现象示意图

他的推论,只要在任意纵向位置上,水流的各种统计特性完全相同,流体质点的速度是稳定的随机函数,则连续运动扩散理论仍成立;当点源释放的混合时间较长以后,离散引起的各质量通量可以用费克型公式表示:

$$J_{\text{一维纵向离散}} = -D_L \frac{\partial \bar{c}}{\partial \xi} \quad (3)$$

$$J_{\text{纵向离散}} = -D_y \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial \xi},$$

$$J_{\text{横向离散}} = -D_z \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \quad (4)$$

式中, \$D_L\$、\$D_x\$、\$D_z\$ 分别是一维纵向、纵向、横向离散系数; \$\xi\$ 是以断面平均流速(式 3)或竖向平均流速(式 4)前进的动坐标系的纵向坐标。

Taylor 分别于 1953 年考虑了层流^[2], 1954 年考虑了湍流^[3]这两种条件下直圆管中溶质的纵向混合问题,首先提出了纵向离散的概念。他指出,流动横断面上流速和浓度分布的不均匀性大大加速了溶质的纵向混合,而垂直于纵向流动方向的扩散作用使断

面上浓度分布趋于均匀,又将减弱纵向混合,这一对作用的结合称为纵向离散,它控制了纵向混合过程,当两者作用处于动态平衡时,其特性可用一个常数——纵向离散系数——来表示。由此,他解析求解了圆管中的纵向离散系数。1959 年 Elder^[3] 把 Taylor 对圆管的求解方法应用到二维明渠,1967 年 Fischer^[4] 把 Taylor 和 Elder 的方法进一步推广到天然河流。

混合过程的基本方程

三维对流扩散方程

计算河流中任意点处某种污染物的浓度,可以使用三维对流扩散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (\mathbf{\epsilon} \cdot \nabla c) + r + S \quad (5)$$

式中, \$\mathbf{V}\$ 是流速矢量; \$\mathbf{\epsilon}\$ 是二阶湍流扩散张量; \$r\$ 是反应项; \$S\$ 是源与汇项,它表示除反应外对污染物的其它产生和去除作用。按照普兰特混合长理论,在特定的坐标系中(直河

段用笛卡儿坐标系^[5], 弯曲河段用自然坐标系^[6], 二阶湍流扩散张量的主轴方向与坐标面基本垂直, 因此上式的另一表达形式(笛卡儿坐标系中)为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + r + S \quad (6) \end{aligned}$$

式中, x 、 y 、 z 分别是纵向、竖向、横向坐标; ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 分别是纵向、竖向、横向湍流扩散系数; v 是流速的竖向速度分量。

然而, 如果不论混合情况和所求问题如何, 就直接求解三维对流扩散方程, 既带来许多困难(要求知道三维诸点处的流速和湍流扩散系数, 计算太复杂等), 实际上也无必要(得出的许多浓度结果无实用价值), 所以在实际问题中很少直接求解三维方程。下面给出对三维方程进行简化得出的在特定问题下计算污染物浓度的求解方程。

二维横向混合方程

当污染物(污水)排入河流后, 开始的竖向混合阶段很短, 一般无需单独考虑; 而横向混合阶段较长, 特别是对于较大的河流, 需要很长的距离污染物才横向充分分布在河流断面上, 在此之前沿岸边形成一条污染带, 长度可达数公里, 甚至数十公里。预测此阶段的横向混合过程, 对于规划城市和工业布局, 设置排水口和取水口, 有着极为重要的意义。二维横向混合方程就是为了解决横向混合问题所提出的, 它的表达形式有三种:

第一种适用于较直的河段。对笛卡儿坐标系中的三维扩散方程取竖向平均, 就得到:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \langle u \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \langle w \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \\ &= \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h E_x \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} \right) \right. \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(h E_z \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \right) \right] + \langle r \rangle + \langle S \rangle \quad (7)$$

式中 h 是局部水深。对于纵向均匀的直河段, $\langle w \rangle = 0$ 。

第二种适用于弯曲河段。它采用按照河流地形和流动情况设立的自然坐标系, 其纵坐标面应尽可能地按竖向平均流速矢量的方向排布, 方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \frac{v_x}{m_x} \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} + \frac{v_z}{m_z} \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \\ &= \frac{1}{m_x m_z h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_z}{m_x} h E_x \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} \right) \right. \\ &+ \left. \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x}{m_z} h E_z \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial z} \right) \right] \\ &+ \langle r \rangle + \langle S \rangle \quad (8) \end{aligned}$$

式中, v_x 、 v_z 分别是流速在自然坐标系中的纵向、横向速度分量, 如果纵坐标面严格按照竖向平均流速矢量的方向排布, 则 $v_z = 0$; m_x 和 m_z 是自然坐标系的度量系数。

第三种多用于无支流流入的弯曲河段内污染物连续排入河流后的横向混合过程。它是在自然坐标系的基础上, 用横向累积流量:

$$q_c = \int_{z_L}^z m_z h v_x dz \quad (9)$$

代替了横向距离 z 而得到的, 上式中 z_L 是河流左岸的 z 坐标, 混合方程为^[7]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \frac{v_x}{m_x} \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x} \\ &= \frac{v_x}{m_x} \frac{\partial}{\partial q_c} \left(m_x h^2 v_x E_z \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial q_c} \right) \\ &+ \langle r \rangle + \langle S \rangle \quad (10) \end{aligned}$$

在上面各方程中, E_x 、 E_z 分别是纵向、横向混合系数:

$$E_x = D_x + \langle \epsilon_x \rangle, \quad E_z = D_z + \langle \epsilon_z \rangle \quad (11)$$

由式可看出, 混合系数是由两部分组成的, 实际上是一种“离散-扩散系数”。由于过去对横向混合的机理认识不清楚, 因此在定义和名称上比较混乱, 例如在一些文献中, 把 E_x 称为纵向离散系数, 把 E_z 称为横向湍流扩

散系数, 为了避免混乱, 在本文中都将作为混合系数。

关于这三种形式, 前两种中各含有两个对流项, 而第三种仅含有一个对流项, 并且求解域从平面地形不规则域变成 $X-q_c$ 平面的矩形带域, 便于计算和表达。另外, 在第二种中, 因河流弯曲处流速分布的纵向不均匀性和横向对流输运作用, 污染带沿河流纵方向横向摆动, 不好表示; 而在第三种表达形式中, q_c 本身包括了这些因素, 易于表示污染带的横向摆动, 因此, 第三种形式较前两种为好。

一维纵向离散方程

当从较大的范围来讨论混合过程时, 如河流污染事故预报, 河流规划等问题, 主要关心的是断面平均浓度沿河流纵向的变化情况, 即一维纵向问题。

对三维对流扩散方程进行断面平均, 并引入离散的概念, 就得到一维纵向离散方程:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \bar{r} + \bar{S} \quad (12)$$

式中: $\bar{u}$ 是河流断面平均流速。

按照 Batchelor 所推广的 Taylor 质点连续运动扩散理论, 当混合时间很长, 断面平均浓度分布的方差随时间线性增长时, 式 3 即式 12 才成立。因此, 对于质量守恒物质在 $x=0$ 处的初始瞬时点源污染, 如直接使用式 (12) 进行求解, 所得的浓度分布是:

$$\bar{c} = \frac{M}{A \sqrt{4\pi D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{u}t)^2}{4D_L t} \right] \quad (13)$$

式中: M 是点源污染的污染物排放质量; A 是河流横断面面积。尽管在早期此式曾广泛地用于河流污染问题, 然而从理论上讲, 此式并不成立, 最多只能算是近似的结果。Fischer^[8] 提出, 直观上看式 (12) 成立的条件是污染物充分分布在整个横断面上, 并且偏离浓度远小于断面平均浓度。由试验他还得到从点源释放点到可以使用一维方程的距离

为^[4]:

$$L = 1.8 \frac{l_E^2 \bar{u}}{H u_r} \quad (14)$$

式中: l_E 是特性横向混合长度, 如是河边排放, l_E 等于河宽 w , 如是河中心排放, 可取 $l_E = w/2$; H 是平均水深; u_r 是河流的平均摩擦速度。许多研究后来都证明了式 (13) 基本准确。对于大河, 此长度可达几十公里, 在能够使用一维纵向离散方程之前, 必须先用二维横向混合方程来求解。

特性混合参数

由上述各方程可看出, 对混合过程的研究主要在于确定河流的各特性混合参数: ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 、 E_x 、 E_z 和 D_L , 一旦各特性混合参数、污染物的初始分布、以及河流的水力条件和边界条件都已确定之后, 对混合过程的进一步研究就成为纯数学求解问题了。

竖向湍流扩散系数

使用对数速度分布和雷诺相似律, 可得出二维明渠中竖向湍流扩散系数的分布^[3]:

$$\epsilon_y = \kappa H u_r \cdot \frac{y}{H} \left(1 - \frac{y}{H} \right) \quad (15)$$

式中: κ 是卡门常数, 一般取 $\kappa = 0.4$ 。此理论关系已被试验所证实, ϵ_y 的竖向平均值是 ($\kappa = 0.4$):

$$\langle \epsilon_y \rangle = 0.067 H u_r \quad (16)$$

天然河流的宽深比都很大, 对纵向流速的竖向分布形式(是指分布形式, 而不是指数值大小), 两岸的影响远小于河底的影响, 纵向流速的竖向分布形式与二维明渠中的形式相似, 因此可以认为式 (16) 对天然河流仍适用, 只是 H 要改为局部水深 h 。

纵向湍流扩散作用远小于纵向离散作用, 无需单独对其进行研究。横向湍流扩散系数的讨论见后。

横向混合系数

因为河流中的流动不是各向同性湍流,无法从 ϵ_y 的分布规律推算 ϵ_z ; 又因为流动总含有二次流(河流拐弯时产生的第一类二次流或直河段中非圆形截面产生的第二类二次流),横向速度分量 w 不为零,总有 D_x 存在,所以试验测到的总是 E_x 的值,无法分清哪些是二次流的离散作用,哪些是湍流扩散作用,很难研究横向混合系数。

Elder^[3] 在实验室的矩形断面明渠中进行了示踪试验,所发表的结果是:

$$E_x = 0.23Hu_c \quad (17)$$

(此结果实际上应是 $E_x = 0.16Hu_c$)。根据许多研究工作者后来发表的试验结果 ($E_x/Hu_c = 0.16-0.24$), Fischer^[4] 指出,对于直河段可以不考虑其它因素, $E_x = 0.23Hu_c$ 。因为 E_x 仅同 Hu_c 有关,而 Hu_c 反映了湍流流动的特性,所以此式表示横向混合过程是一种横向湍流扩散过程,横向离散不重要;因此在许多文献中,把 E_x 叫作平均横向湍流扩散系数。这些早期的研究,虽然结果的数值大小基本正确,但机理解释是错误的。

1977 年 Lau 和 Krishnappan^[9] 通过一系列系统的试验,证明在矩形断面直明渠中第二类二次流是影响横向混合过程的主要因素, E_x 还与宽深比有关。尽管这是对矩形断面直明渠得出的结论,但它证实了横向混合的确是一种离散-扩散过程,从而大大加深了人们对横向混合过程的认识。

在天然河流的拐弯河段中,由于第一类二次流的强度远大于直明渠中的第二类二次流的强度,增加了横向离散作用,使 E_x 增大。例如,在密苏里河的一个拐弯中曾测得 $E_x = 0.6Hu_c$ 。到目前为止,尚未得出可以实用的计算弯曲河段中 E_x 的理论公式。

纵向混合系数

对于纵向混合系数的研究,首先是从二

维流动开始的。对于二维流动和混合,纵向混合过程就相当于一维纵向混合过程。

Taylor^[1] 1954 年对圆管中的湍流流动解析求解了纵向混合系数:

$$E_x = 10.06r_0u_c + 0.05r_0u_c = 10.1r_0u_c \quad (18)$$

式中: r_0 是圆管半径;第一项 $10.06r_0u_c$ 是纵向离散系数 D_x ;第二项 $0.05r_0u_c$ 是按各向同性湍流假设得出的平均纵向湍流扩散系数。

Elder^[3] 使用 Taylor 的方法,解析求解了二维明渠中的纵向混合系数。他所做的假设的实际含义是,在稳定态浓度分布下,竖向向上速度差和偏离浓度的增强纵向混合的作用与竖向湍流扩散减弱纵向混合的反作用之间建立了动态平衡关系,使偏离浓度分布沿纵向保持不变(平均浓度还是可变的)。在此假设下,解析得到根据流速分布和竖向湍流扩散系数分布来推算纵向离散系数的基本公式:

$$D_x = -\frac{1}{H} \int_0^H u' \int_0^y \frac{1}{\epsilon_y} \int_0^y u' dy dy dy \quad (19)$$

代入对数速度分布和按照雷诺相似律得到的 ϵ_y 分布,得:

$$D_x = \frac{0.404}{\kappa^3} Hu_c \quad (20)$$

即

$$E_x = \frac{0.404}{\kappa^3} Hu_c + \frac{\kappa}{6} Hu_c \quad (21)$$

式中第二项是根据各向同性湍流假设得到的 $\langle \epsilon_x \rangle$ 。取 $\kappa = 0.41$, 有:

$$E_x = 5.86Hu_c + 0.068Hu_c = 5.93Hu_c \quad (22)$$

其中纵向离散系数占了绝大部分,纵向湍流扩散作用并不重要,因此无需认真探讨所做的各向同性湍流假设的真实性。对于 Elder 的解析结果,许多研究工作者进行了广泛的示踪试验,也曾使用其它流速分布来推算 D_x , 结果表明 Elder 的结论基本正确,在渠底相对光滑的情况下,无量纲纵向混合系数 $\alpha_x = E_x/Hu_c$ 最小为六,最大也就是十左右。

天然河流中纵向流速的竖向分布形式与

二维明渠相似, 所以 Elder 的理论结果直接推论于天然河流就是:

$$E_x = \alpha_x h u_r \quad (23)$$

可取 $\alpha_x = 6$ 。由于河流中二维横向混合方程提出较晚, 而且在连续排放污染的情况下, E_x 所起的作用较小, 有时可完全忽略, 所以对天然河流中 E_x 分布规律研究较少。

一维纵向离散系数

按照一维纵向离散方程的推导, 式(12)中的 D_L 本应包括所有可以产生一维纵向混合的因素, 只是因为一维纵向离散作用远大于其它的纵向混合作用, 习惯上把它简称为一维纵向离散系数。

在 Taylor 对圆管、Elder 对二维明渠解析求解了纵向离散系数之后, 六十年代初期人们曾认为, 既然天然河流的断面形状是在断面无限宽的二维明渠和断面轴对称的圆管之间的某种中间形式, 则天然河流中的无量纲一维纵向离散系数 $\alpha_L = D_L / H u_r$ 应在 5.9 至 10.1 之间, 直观上看, 应更接近于二维明渠的数值。然而天然河流中实测到的一维纵向离散系数要远大于二维问题的理论结果, α_L 一般为几十、几百, 有的可达数千。这是因为天然河流的宽深比都很大, 一般大于十, 纵向流速在横向上的变化远大于在竖向上的变化, 所以对于天然河流的一维纵向离散, 其控制因素应是横向上流速之间的差别。由此, Fischer^[4] 得出了预定纵向均匀直河段中一维纵向离散系数的公式:

$$D_L = -\frac{1}{A} \int_0^{H'} q' \int_0^z \frac{1}{h E_x} \int_0^z q' d_z d_z d_z \quad (24)$$

式中 q' 是单宽偏离流量:

$$q' = q - \bar{u}h \quad (25)$$

q 是单宽流量。Fischer 的这个结果与 Elder 的计算式(式 19)在形式上完全相同, 只是 Elder 考虑的是竖向上的速度差, 为二维侧面问题; Fischer 的公式用于天然河流, 主要的因素是横向上的流速差, 竖向上速度差的离

散作用忽略不计, 为二维平面问题, 把式(19)中的 D_x 、 y 、 H 、 u' 和 E_x 分别改成 D_L 、 z 、 A 、 q' 和 $h E_x$, 就得到式(24)。

选择所研究河段的典型河流断面, 实测所需数据: u_r (确定 E_x 用)、河床形状和断面流速分布。把式(24)写成求和的形式^[10]:

$$D_L = -\frac{1}{A} \sum_{k=2}^n q'_k \Delta z \left[\sum_{i=2}^k \frac{\Delta z}{h_i E_{xi}} \cdot \left(\sum_{j=1}^{i-1} q'_j \Delta z \right) \right] \quad (26)$$

代入实测数据, 就得到该河段的 D_L 值。此法较准确地反映了河流流速分布和断面形状对一维纵向离散的影响, 在纵向基本均匀的直河段中, 预定 D_L 值的误差一般在 30% 之内。

式(24)的推导过程中要求流速与断面上偏离浓度分布存在着动态平衡关系。当河流进入拐弯后, 河床形状和流速分布都不同于前面的直河段, 建立新的平衡需要一定的时间。因此, 对于尚未建立平衡河水就已通过的急剧拐弯的河段, 不能使用式(24)。对于弯曲较平缓, 拐弯较长的河段, 式(24)仍成立。

河床的小尺度不规则形状, 如河床断面形状沿纵向的细微变化、滞水区等, 也影响着一维纵向离散过程。但有关的研究表明, 只要这种不规则形状是沿河流纵向随机分布的, 当河段足够长时, 水流质点的速度仍是稳定的随机函数, 纵向离散符合费克型扩散过程。Hays^[11] 考虑到滞水区对污染物的滞留和缓慢释放作用, 曾提出过滞水区模型, 因为该模型的参数估值工作很难进行, 计算也很繁琐, 所以在天然河流中很少实际使用。

示踪试验测定一维纵向离散系数

目前尚无在天然河流中测定 E_x 的简单有效的示踪测定方法; 另外, E_x 的作用不太重要, 很少进行研究; 因此示踪试验主要用于测定天然河流中 D_L 的大小。

在早期的研究中, 因为没有认识到在点源释放的初始阶段一维纵向离散方程不成

立,关于 D_L 的示踪计算方法曾非常混乱。为了排除这一初始阶段的影响,目前在天然河流的示踪试验中多采用矩改变量法^[8]。

使用矩改变量法的步骤是,瞬时加入点源示踪物,在一维纵向离散方程成立的河段内的上下游分别设置两个测站,量测示踪物的浓度时间曲线,然后用下式计算两个测站之间河段的 D_L :

$$D_L = \frac{\bar{u}^2}{2} \cdot \frac{\Delta \sigma_t^2}{\Delta t} = \frac{\bar{u}^2}{2} \cdot \frac{\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1} \quad (27)$$

式中 $\sigma_{t_1}^2$ 和 $\sigma_{t_2}^2$ 分别是上下游所测浓度时间分布的方差:

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{+\infty} \bar{c} t^2 dt}{\int_0^{+\infty} \bar{c} dt} - \left(\frac{\int_0^{+\infty} \bar{c} t dt}{\int_0^{+\infty} \bar{c} dt} \right)^2 \quad (28)$$

$\bar{t}_1$ 和 $\bar{t}_2$ 分别是示踪物通过上下游测站的实际平均通过时间:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{+\infty} \bar{c} t dt}{\int_0^{+\infty} \bar{c} dt} \quad (29)$$

因为远离 $\bar{t}$ 时刻所测浓度的准确性对方差的影响很大,而这些浓度相对较低,往往测不准,所以用矩改变量法计算的 D_L 的误差有时较大。在理论研究的对照实验中,为得到较准确的 D_L ,往往采用另一种计算方法——推算法^[10]。

推算法的基础是一维纵向离散方程的积分解。在此方法中,上游测站得到的浓度关系被用作初始条件来推算下游测站的浓度, D_L 先用估计值,然后不断修正,直到推算的与实测的下游浓度曲线达到最佳配合,由此得出该河段的实测 D_L 。此法的缺点是计算较繁琐。

示踪试验结果是该河段混合特性的表现体现,无需深入探讨混合过程,这是它的优点;然而也是它的最大的缺点,即由于搞不清混合过程本身的机理,当河流流动状态明显不同于示踪试验时(如枯水期、平水期、丰水

期等),原示踪结果也就无意义了。

混合在污染物迁移过程中的作用

对于瞬时源释放污染物的迁移过程,一维纵向混合起着重要的作用,特别是在污染事故发生时,污染物出现突然,且浓度较高,河流中原有微生物无法立即适应,除个别极易进行反应的污染物,反应作用往往不明显,迁移过程受混合控制。因此,一维纵向混合问题主要是河流污染事故预报。

对于连续源稳定排放污染物,一维纵向离散作用不重要。例如在河流的 BOD-DO 系统中,解析结果和实测数据都表明,对于稳态浓度分布,一维纵向离散作用完全可以忽略,迁移过程是反应和复氧控制。

对于连续源非稳定排放污染物,一维纵向离散的作用是降低波动幅度,波动幅度较大时,一维纵向离散所起的作用才比较重要。例如,当 BOD 排放负荷呈正弦波形式波动时,考虑一维纵向离散与不考虑相比,所算浓度的相对振幅近似按下式^[12]:

$$1 - 4\pi^2 \frac{D_L}{\bar{u}^2 T_p} \cdot \frac{x}{\bar{u} T_p} \quad (30)$$

降低,式中 T_p 是周期。如 $D_L/\bar{u}^2 T_p = 0.0025$ (取 $\bar{u} = 0.5$ 米/秒, $D_L = 54$ 米²/秒, $T_p = 1$ 天),在距排放点以流速 $\bar{u}$ 流动了五天的距离处,考虑一维纵向离散作用的 BOD 和 DO 浓度的振幅只有不考虑时的一半大。

对于排放点附近的污染带,由于所讨论的区域较小,污染物在其中停留时间很短,一般只有几十分钟到几小时,反应作用不明显,混合过程起控制作用。

结 束 语

对于污染物在河流中的混合过程,纯理论研究开始于五十年代,六十年代得到了很大的发展,七十年代继续深入研究,在二十多年中已获得了许多研究成果。

到目前为止,对纵向比较均匀的河段,无

需进行示踪试验, 仅仅根据河流的流动状况就可以预定出该河段的各特性混合参数. 预定的实际意义很大, 它可以避免耗时费力的示踪试验及试验对天然河流的人为污染, 充分利用水利部门的河流水文测量结果; 又能在污染事故突然发生时, 对尚缺乏混合过程实测数据的河流做出基本可靠的污染事故预报.

然而, 对纵向极不均匀的河段中的混合过程, 因为河床和流动状态极为复杂, 目前尚处于定性描述阶段. 定量表示这些复杂的影响因素就是现阶段及今后一个时期的研究重点, 例如, 河流急剧拐弯处的一维纵向离散过程; 河床纵向及横向的不规则性对各特性混合参数的影响; 第一类二次流和第二类二次流对混合过程的影响; 等等. 这一切又都取决于河流水力学和流体力学的发展. 譬如, 随着河流单宽流量分布与河床断面形状关系的经验公式的准确性的提高, 就可以用此关系推算的单宽偏离流量代入预定公式直解求出 D_L , 河流深度可以用回声测深仪测定, 比用流速仪测量整个河流横断面上的流速分布要简单得多, 因此这种方法将减少很多测定工作量.

参 考 文 献

[1] Taylor, G. I., The Dispersion of Matter in

- Turbulent Flow Through a Pipe, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 223, p. 446, 1954.
- [2] Taylor, G. I., Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly Through a Tube, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 219, p. 186, 1953.
- [3] Elder, J. W., *Journal of Fluid Mechanics*, 5, Part 4, 544 (1959).
- [4] Fischer, H. B., *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 93, No. HY6, 187 (1967).
- [5] Dagan, G., *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 95, No. HY5, 1699 (1969).
- [6] Yotsukura, N., and Sayre, W. W., *Water Resources Research*, 12(4), 695 (1976).
- [7] Harden, T. O., and Shen, H. T., *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 105, No. HY4, 393 (1979).
- [8] Fischer, H. B., *Air and Water Pollution*, 10, Nos. 6—7, 443 (1966).
- [9] Lau, Y. L., and Krishnappan, B. G., *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 103, No. HY10, 1173 (1977).
- [10] Fischer, H. B., *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, 94, No. SA5, 927 (1968).
- [11] Hays, J. R., "Mass Transport Mechanisms in Open Channel Flow", Ph. D. thesis. Vanderbilt University, Nashville, Tenn., 1966.
- [12] Li, W. H., "Effects of Dispersion on DO-Sag in Uniform Flow," *Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE*, 98, No. SA1, 169, (1972).

生态系统模拟技术在环境科学研究中的应用简介

杨 居 荣 林 大 任

(北京师范大学地理系)

概 述

生态系统模拟技术迄今尚无一致名称,

如微宇宙(microcosm)、人工生态系统(artificial ecosystem)、模拟生态系统(model ecosystem)、实验在态系统(experimental ecosystem)、室内