

污染物在水环境中迁移扩散的基本理论

——新学科发展综述之二

李克锋 赵文谦

(四川联合大学,成都,610065)

摘要 本文介绍污染物进入环境水体后,在受纳水体中扩散运输的主要方式及对每一种方式进行分析和计算的基本原理,对射流的基本理论作了简要介绍,并对国内外的研究情况进行了小结。

关键词 污染物 扩散运输 射流 基本原理

1 引言

当污染物进入环境水体后,将使受纳水体受到污染,同时污水自身也被稀释。为了充分利用水体的稀释自净能力,同时也为了有效地保护水资源,就必须对水体中物质的迁移运行规律进行定量描述。环境水力学正是研究物质在水环境中迁移扩散的基本规律及其应用的新兴交叉学科。

污染物进入环境水体后,将随环境水体一起运动,被输送到排污口的下游。与此同时,由于浓度梯度的存在及环境水体和紊动,污染物还将以分子扩散的紊动扩散的形式沿垂向、横向及纵向扩展。如果污水与受纳水体存在较大的密度差,还将因为对流扩散而在垂向发生物质的迁移。当按照时均流的断面平均流速来计算物质的扩散量时,因为在断面上均匀分布的平均流速与实际流速之间的差异将会导致计算出的扩散量不相等,从而产生离散。一般而言,物质在水体中迁移运行的主要方式有分子扩散、紊动扩散、随流输移、离散及对流扩散等。以下介绍的是水环境中物质的扩散和离散进行定量计算的基本原

理和射流的基本理论。

2 污染物的扩散

污染物进入受纳水体后,由于浓度梯度的存在和水体的紊动,将发生分子扩散和紊动扩散。

2.1 分子扩散

分子扩散是由于分子的随机运动而引起的污染物位置的迁移。分子扩散遵循 Fick 扩散定律,即单位时间内,通过单位面积的扩散物质与溶质浓度在该面法向的梯度成正比,

$$q = -D_m \alpha / \alpha x_i \quad (1)$$

式中 q 为正交于 x_i 方向的单位面积的扩散物质输移率, D_m 为扩散系数。

根据质量守恒原理,导出分子扩散的扩散方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中 c 为扩散物质的浓度, D_x 、 D_y 、 D_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的扩散系数。

如果环境水体为层流态,则物质的迁移方式只有随流迁移和分子扩散,此时移流扩散方程可表示为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

式中 U_x, U_y, U_z 为环境水体流速的三个分量,其符号意义同前。

分子扩散的量级很小,由于环境问题中的水体一般都是大尺度的,因此分子扩散本身并没有直接的重要意义,可以忽略不计,但环境中的物质分散问题大多可以按分子扩散进行类比。

2.2 紊动扩散

紊动扩散是由于环境水体的紊动作用而引起的物质的扩散。根据方程(3),将瞬时量分解为时均量和脉动量,导出紊流的移流扩散方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} = & -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{U'_x c'}) \\ & -\frac{\partial}{\partial y} (\overline{U'_y c'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{U'_z c'}) + D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

式中 c, c' 分别为时均浓度和脉动浓度, U_x, U_y, U_z 为时均流速, U'_x, U'_y, U'_z 为脉动流速, $-\frac{\partial}{\partial x} (\overline{U'_x c'})$, $-\frac{\partial}{\partial y} (\overline{U'_y c'})$, $-\frac{\partial}{\partial z} (\overline{U'_z c'})$ 是由脉动引起的紊动扩散项,一般将其按分子扩散类比以建立紊动扩散的模式,即:

$$\left. \begin{aligned} \overline{U'_x c'} &= -E_x \partial c / \partial x \\ \overline{U'_y c'} &= -E_y \partial c / \partial y \\ \overline{U'_z c'} &= -E'_z \partial c / \partial z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 E_x, E_y, E_z 为紊动扩散系数。把(5)代入(4)中可得紊流的移流扩散方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + U_x \frac{\partial c}{\partial x} + U_y \frac{\partial c}{\partial y} + U_z \frac{\partial c}{\partial z} = & \frac{\partial}{\partial x} (E_x \frac{\partial c}{\partial x}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (E_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (E_z \frac{\partial c}{\partial z}) \\ & + D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

3 剪切流离散

由于流体的粘性及固体边壁的摩擦阻力

的影响,使得过水断面上流速分布不均匀,即存在流速梯度。如果直接用断面上各点的流速来计算断面的扩散通量和浓度分布,则所得到的值即代表了该断面上的扩散通量及浓度。但是,在实际应用中,常常用断面平均流速来计算物质的扩散量,这样就会因为实际流速不均匀分布与断面平均流速均匀分布的差异而引起真实的扩散量与按平均流速计算的扩散量不相等,两者之间的差值即称为剪切流离散。由此可见,离散不是一种物理扩散,而是由于空间平均处理而导致的附加扩散。

根据质量守恒原理,并引入一维非恒定流连续方程,得出一维纵向离散方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} [A (\langle \hat{U} \hat{c} \rangle + \langle \overline{U' c'} \rangle)] \quad (7)$$

式中 v, c 分别为断面平均流速和断面平均浓度, U', c' 分别为脉动流速和脉动浓度, \hat{U}, \hat{c} 分别为时均流速、时均浓度与其断面平均值的差值,“ $\langle \rangle$ ”表示取断面平均值。

同样地,将离散量 $\langle \hat{U}, \hat{c} \rangle$ 、紊动扩散量 $\langle \overline{U' c'} \rangle$ 按分子扩散的 Fick 定律进行类比

$$\langle \hat{U} \hat{c} \rangle = -E_l \partial c / \partial x \quad (8)$$

$$\langle \overline{U' c'} \rangle = -E_x \partial c / \partial x \quad (9)$$

$$\text{得: } \frac{\partial c}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} [A (E_l + E_x) \frac{\partial c}{\partial x}] \quad (10)$$

式中 E_l 为离散系数。

比较方程(3)、(6)、(10),不难看出它们具有相同的形式,只是方程中的系数所代表的物理意义不同。一般而言,分子扩散系数很小,分子扩散可以忽略不计,紊动扩散系数虽然比分子扩散系数大好几个量级,但与离散系数相比,后者往往还要大好几个量级,因此,在很多情况下,紊动扩散都可以略去不计。

由于方程(3)、(6)、(10)具有相同的形式,求解方法完全相同。对移流扩散方程,只在无限空间静止流体或均匀紊流中才能求得

瞬时排放和连续排放的点源、线源和面源的解析解,对于较复杂的情况,一般只能作近似分析或数值计算。根据受纳水域的性质,其中扩散、混合及输运过程各有特点,据此采用适当的分析计算方法。

以上由移流扩散方程和 Fick 型扩散模型类比得到的整套理论和方法常称为 Fick 型离散模型或 Taylor 离散模型,是目前应用最广泛的。但由于它还有若干缺点,所以也有人作改进的研究,提出其它模式,如箱式模型、多质点随机游动模型和拉格朗日传输模型等。

4 射流理论

射流理论是环境水力学的重要组成部分。污水通过管道或渠槽泄入河流、湖泊和海湾等大水体中,在出口附近区域的运动属于射流性质,且大都为紊动射流。

按照射流的原动力,可将射流分为羽流、动量射流和浮射流。射流水体在进入环境水体后,将出现流速间断面,从而产生卷吸现象。由于卷吸作用,射流水体将带动周围水体一起运动,同时射流的边缘部分流速也将降低。从喷口边界起向内外扩展的紊动掺混部分称为紊流边界层混合区;中心部分未受掺混影响,保持原出口流速,称为核心区。从出口至核心区末端的部分称为射流的初始段;紊动充分发展以后的部分称为射流的主体段;主体段与初始段之间有一过渡段,由于其较短,分析中为简化起见常忽略这一段。

4.1 紊动射流的一般特性

4.1.1 纵向流速分布具有相似性 根据实测资料,在主体段和初始段的边界层混合区,无量纲纵向流速沿无因次横向距离的分布基本上是一致的。

4.1.2 射流边界混合层沿直线扩展 实验观测表明,射流的厚度是线性扩展的,只是主体段和初始段的扩展率略有不同。

4.1.3 等密度自由射流沿纵向动量守恒

自由紊动射流周围环境水体的压强服从静压分布,实测资料表明,射流内部的压强与静压分布略有差别,但差值不大,一般分析都按静压分布处理,从而得出沿纵向动量守恒。

4.2 射流研究的一般方法

均质紊动射流在无限空间静止同种流体中的运动理论,经过 70 多年的研究,已较成熟,包括扩大到流动环境和有限空间中的射流,国外已有综结的论著。对浮射流的研究是近 20 多年来的一个重要方向。由于具体情况比较复杂,对射流的研究大致有以下三种方法:

4.2.1 动量积分法 这种方法是将流体的质量守恒、动量守恒和污染物质的含量守恒等基本方程写成积分形式,采用射流断面上速度分布、密度分布和污染物浓度分布等各自存在相似性的假定,以及射流侧边卷吸能力的假定,根据实验资料确定分布的模式和卷吸函数来进行分析计算。

4.2.2 数值求解法 这一方法是应用紊流边界层微分方程,对雷诺应力采用某种紊流模型,如较早采用的 Prandtl 混合长模型及近年来采用的 $k-\epsilon$ 双方程模型、代数应力模型、雷诺应力模型等,构成封闭系统,然后采用数值方法对模型方程组进行求解。

4.2.3 量纲分析法 这种方法是根据量纲分析的原理,结合系统实验资料来整理出实用的经验计算式,对于复杂的难以进行理论分析计算的问题,这一方法仍是一种常用的行之有效的途径。

近 20 多年来,对射流理论的研究取得了大量的成果,有些理论分析还得到了实验资料的检验。总的看来,对于静止深水中的自由紊动射流包括浮射流和羽流的运动,成果较为成熟。即使在线性分层环境中,浮射流的浮升高度的实际问题,也有可供实用估算的方法,这些都可用于预估排污口近区的初始稀释度。至于流动水体中的射流,虽有不少研

究,但尚无一致系统的结论。对于浅水情况,由于流态复杂,已进行了流态稳定性及速度场和温度场的研究,但也未取得全面系统的一致成果。对于往复流动中的射流运动,研究则相对少一些。

5 结束语

环境水力学是建立不久的一门新兴学科,其内容体系仍在发展中,内容的深度和广度都在不断扩充。

由于污染物的扩散与输移是与环境水体的运动规律紧密联系在一起,因此环境水力学的基础理论在很多方面是与水力学一致的,并且随着数学模型的进一步完善和计算

机技术的进步,对流体及物质运动的规律将会有更深刻的认识,数值方法将克服现有经验方法的局限性,摒弃许多粗略的近似,并以其低成本和灵活的适用性越来越显示其优越性,为工程实践所采用。

(待续)

参考文献

- 1 赵文谦.《环境水力学》,成都科技大学出版社,1986年
- 2 余常昭等.《水环境中污染物扩散输移原理与水质模型》,中国环境科学出版社,1989年
- 3 [美]H. B. 费希尔著,清华大学水力学教研组译.《内陆及近海水域中的混合》,水利电力出版社,1987年
- 4 赵文谦.环境水力学发展的回顾与展望.中国科学基金,1992年2期.

(收稿日期:19930506)

电力部发出《关于调整水电工程设计阶段的通知》

1993年12月22日,电力工业部以电计[1993]567号文颁发了《关于调整水电工程设计阶段的通知》

《通知》指出,改革开放以来,我国水电建设体制发生了很大变化,而目前水电设计阶段的划分与国家基本建设项目审批程序不协调,其次是水电招标设计无必要的工作周期。为适应招标合同管理体制的需要,并与国家基本建设项目审批程序相协调,缩短设计周期,加快水电事业的发展,经与国家有关综合部门协商,特对水电工程设计阶段的划分作出调整。

《通知》规定,调整之后的水电工程设计阶段变为四个阶段:

1. 增加预可行性研究报告阶段。

在江河流域综合利用规划及河流(或河段)水电规划选定的开发方案的基础上,根据国家与地区电力发展规划的要求,编制水电工程预可行性研究报告。预可行性研究报告经主管部门审批后,即可编报项目建议书。

2. 将原有可行性和初步设计两阶段合并,统称为可行性研究报告阶段,取消原初步设计阶段。

加深原有可行性研究报告深度,使其达到原有初步设计编制规程的要求。并以《水利水电工程初步设计报告编制规程》(DL5021-93)为准编制可行性研究报告。在可行性研究报告审批后,可向国家编报可行性研究报告(即原设计任

务书)。

坝址和开发方式的选择是做好可行性研究报告的基础。对于装机容量1000MW及其以上的工程或一部分涉及面较广的重大项目,根据工程地质条件复杂程度和外部条件,可在可行性研究报告中间提出选坝报告,由审查单位组织有关部门或专家讨论认定后,再全面开展可行性研究报告。

3. 招标设计阶段

暂按原技术设计要求进行勘测设计工作,在此基础上编制招标文件。招标文件分三类:主体工程、永久设备和业主委托的其它工程的招标文件。

4. 施工详图阶段。

配合工程进展编制施工详图。

《通知》要求在进行上述设计阶段调整后,各设计单位要加强内部审核把关制度,提高设计产品质量。

该《通知》自发文之日起执行。对于已完成可行性研究报告的项目仍按原设计阶段划分执行,在可行性研究报告审批后,可编报项目建议书;在初步设计报告审批后,可向国家编报可行性研究报告。

《通知》还一并颁发了《水电工程预可行性研究报告编制暂行规定(试行)》。

(摘自《水能技术经济动态》1994年第6期)