

环境水力学理论 在河流、水库环境问题中的应用

——新学科发展综述之三

李克锋 赵文谦

(四川联合大学,成都,610065)

提 要 本文简要介绍了环境水力学理论在河流污染带计算、河流水质模拟、水库水质模拟、石油污染预报及热污染预报方面的应用,着眼于介绍基本方法及已经取得的进展。环境水力学正处于高速发展的时期,一方面计算流体力学等相关学科的发展将促使环境水力学有一个大的发展,另一方面随着工程实际中重大技术问题的解决,环境水力学理论也将上一个新台阶。

关键词 环境水力学 理论 水环境污染与防治 模拟 应用

环境水力学是在随着水环境污染与防治中,对水力学问题的不断研究和解决而逐步形成的。因此,这门学科从出现开始,就与实际应用不可分割。正是由于水环境污染问题的日益严重促进了环境水力学的形成和发展。同时环境水力学的发展又为水污染的治理提供了新的理论基础,促进了水污染控制、规划、管理方法及治理技术的进步。

1 河流污染带计算

污水排入河流后,在河流中可能形成明显的污染带。污染带计算的目的是确定污染带内的浓度分布、污染带宽度以及达到全断面均匀混合所需的距离。

1.1 污染带浓度分布

若将污水排放视为恒定时间连续点源,并假定污水排入河流后,很快在垂向上达到均匀混合,则其在平面上的浓度分布公式为:

$$C(x,z) = \frac{M}{\bar{u}h\sqrt{4\pi E_x x/u}} \exp\left(-\frac{\bar{u}z^2}{4E_x x}\right) \quad (1)$$

式中 M 为单位时间污染物的排放量, h 为水深, \bar{u} 为河流断面平均流速, x 为沿水流方向的距离, z 是沿河宽方向至源点的距离, E_x 为横向扩散系数。

若考虑岸边反射,并引入无量纲坐标,则浓度分布公式为:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{\sqrt{4\pi x'}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ \exp[-(z' - 2n - z'_0)^2/4x'] + \exp[-(z' - 2n + z'_0)^2/4x'] \} \quad (2)$$

式中 x' 、 z' 、 z'_0 分别为无量纲纵向、横向及点源坐标, C_0 为起始断面平均浓度。

1.2 污染带宽度

污染带宽度是指某一横断面上污染带两个边界点间的距离,一般情况下,认为浓度为同一断面上最大浓度的5%的点为边界点。

根据上述定义及污染带的浓度分布,可以求出中心排放时污染带的宽度为:

$$b = 6.92 \sqrt{E_x x/u} \quad (3)$$

1.3 达到全断面均匀混合的距离

当断面上最大浓度和最小浓度之差不超过5%时,即认为污水已在全断面均匀混合。

对于中心排放,达到全断面均匀混合的距离 L_m 为:

$$L_m = 0.1\bar{u}B^2/E_x \quad (4)$$

对于岸边排放, L_m 则为:

$$L_m = 0.4\bar{u}B^2/E_x \quad (5)$$

式中 B 为河宽。

以上都是针对污水排放可视为恒定时间连续点源,如果污水排放方式不能视为这一情况,则应根据特定的排放方式,采用相应的公式进行求解。

1.4 分区模型和紊流模型

污水排入河流的主要方式有岸边排放、河底排放及表面排放等,在这些排放方式中,污水可能是有动量的,也可能与受纳水体存在密度差,但基本上都属于紊动射流。由于污水的排放方式及其物理特性对其稀释扩散规律有直接的影响,人们对射流进行了深入的研究。在过去很长一段时间里,人们采用分区概念,根据水体运动的特点,将受纳水域分为近区和远区。所谓近区是指排污口附近的局部地区,这一区域内对流、扩散掺混作用大,水力因素、浓度梯度变化剧烈。近区之外的区域则称为远区,远区的水流结构基本不受射流动量的影响,污染物的浓度梯度较小。分区的目的是为了简化射流的求解,迄今为止,对近、远区分别采用积分模型和扩散模型。积分模型是在假定断面上的流速、浓度分布分别存在相似性及射流边缘的卷吸率的基础上,根据流体的质量守恒、动量守恒和污染物含量守恒原理,对不同断面进行积分,以确定流速及污染物浓度分布。根据对实测资料的分析,一般都假定流速和浓度分布为正态分布。扩散模型假定浓度场对流场没有影响,因此一般先求解流场,在此基础上求解污染物浓度方程,而且往往将方程中的紊动扩散系数视为常数。不言而喻,分区模型的假定会带来较大的误差,并且近、远区在衔接上也存在许多困难。近 20 年来,随着计算机技术的突飞猛进,紊流数学模型在射流研究中的应用有了长足的进步,目前已从最初的混合长度模型发展到较高阶的紊流模型如 $k-\epsilon$ 模型、代数应力模型等,有的甚至采用了雷诺应力模型。由于将水体的流场与污染物的浓度场耦合求解,根据流场各点的紊动特性确定污染物的紊动输运系数,直接求解流体的控

制微分方程组和污染物的对流扩散方程,这样就可以不分区,对全域由同一组控制方程进行数值求解。目前,紊流数学模型在环境水力学中的应用方兴未艾,有关这方面的研究成果屡见报端。

2 河流水质模拟

河流水质模拟的目的是对水质参数在河流中的变化规律进行分析和预测,水质模拟的工具是水质数学模型,它是水体的水质要素在各种因素作用下随时间和空间变化关系的数学描述。

现有的水质数学模型考虑的主要水质参数有:溶解氧(DO)、水温、生化需氧量(BOD)、藻类-叶绿素 a 、氮、亚硝酸氮、硝酸氮、正磷酸盐、大肠杆菌、重金属、无机保守物质等。对以上水质参数,模型的基本方程可概括为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + S \quad (6)$$

式中 C 为污染物浓度, u 为水体平均流速, E_x 为纵向离散系数, S 为源或汇。

方程(6)对于任意水质参数都是适用的,方程中的源或汇项用于描述污染物的生物化学反应和污染物间的相互作用规律。对不同的水质参数,源或汇项的具体表达式不同。

应当指出,上面介绍的只是最简单的水质模型。正如射流研究的进展一样,河流水质模型近 20 年来也得益于计算流体力学理论的发展和计算技术的进步。目前已能精细地模拟三维流动的时均流动参量的分布和污染物时均浓度的分布,对污染物的生物化学反应规律也有了比较全面、系统的认识。

3 水库水温、水质模拟

在河流上筑坝以后,将在坝前形成巨大的蓄水体,常导致水温和水质重新分布,如水

库水体出现温度分层、密度分层等。水库水质模拟的目的就是要对库水体的水温、水质分布进行预测。由于水温对其它水质指标起一定的控制作用,有关水库水温的研究成果相对较多。

最初对水库水温分布进行预测采用经验公式。这种方法是在综合大量实测资料的基础上,假定水温沿垂向的分布规律,通过估算某一时段的库表、库底水温,得出垂向水温分布。这种方法具有简单实用的优点,也能满足某些实际应用的需要,但不能反映短时段内水温的变化,因而其应用也受到限制。

数学模型在水库水温研究中的应用自50年代以来有了很大的发展。迄今为止,数学模型大致可以分为扩散模型、混合模型及其它模型三种类型。

扩散模型的基础是水库由一组混合均匀的水平等温层组成,因而需要满足以下3个条件:1. 水库水质要素在纵、横向变化很小,可忽略;2. 入流的全部参量及要素在同一水平层相同;3. 预测出的垂向水温分布是坝前或水库最深处的垂线水温,根据热量守恒原理,可导出控制水温的微分方程式;而根据质量守恒原理及对水库入、出流流量及流速分布的假定,可得出水库内部的流速分布。数值求解控制水温的微分方程即得出水温沿垂向的分布。对于二、三维扩散模型,从70年代开始,国外在水库水温预测中即已采用,其中垂向平均的二维模型已相当成熟;横向平均的二维模型也已提出,但实用尚少;三维模型在大型水库的研究中已开始应用。

混合模型是从能量的观点出发,以紊流动能和势能的转化来计算水库水温的变化。扩散模型和混合模型以外的模型统称其它模型,如混掺对流模型,从能量的观点出发将风混合与热对流合二为一,并与热量平衡方程相结合以求解水库水温分布。该模型集中了扩散模型和混合模型的优点。限于篇幅,不拟在此详细介绍每一种水温模型。

水库与河流相比,两个最突出的水质问题就是富营养化和下层水体厌氧状态的发生,因此研究较多的是水库的溶解氧模型及富营养化模型。70年代初期,就有针对分层型水库的水质预测模型被提出,模型研究的水质参数有:DO、BOD、水温、浮游动植物、氮、磷、悬移质泥沙和可溶性固体等,自此以后,考虑因素更全面更详细的水库水质模型相继问世。这些模型在实际工程中得到了应用,效果较好,但所提出的模型多为一维模型,只研究水质参数的垂向变化,近年来,二维数学模型在水库水质预测中也已被采用。

4 石油污染预报

随着石油及石油化工工业的迅速发展,河流及海洋的石油污染日趋严重。目前,石油污染已成为水环境污染的主要问题之一,已引起国内外的普遍关注。

早期的研究主要侧重于海上事故溢油后,油膜漂移、扩展运动规律,以预报油污染波及的范围。在假定海面平静或者假定流场均匀、风场恒定均匀的情况下,根据对油膜的受力分析,得出了事故溢油后海面油膜尺度随时间增长的计算公式。这方面的成果很多,但预报结果与实际偏离较大。国内自80年代开始对事故溢油进行研究。在事故溢油数学模型方面,发展了考虑非恒定流场,非恒定非均匀风场及离散因素在内的油膜扩展漂移模型,用Lagrange方法跟踪油膜上的标记质点,可预报出油膜漂移过程中的不规则形状及其发展过程,预报结果与国外现场观测资料吻合较好。

石油污染的危害不仅表现在漂浮于水面的初期,当随着时间的推移石油扩散至水面以下,其处理更加困难,经过水中物理化学作用所生成的产物比石油本身的毒性更重。目前在石油向水下扩散的研究方面,已根据二相流理论导出了油滴或含油废水的扩散方

程,并给出了一维及二维情况下的解析解;对三维非恒定流中石油的扩散进行了数值模拟;对油水的混合采用基于二相流理论的双流体模型进行了数值模拟;对石油向水下扩散的规律进行了实验研究,掌握了一些十分宝贵的实测资料。

5 热污染预报

大型热、核电厂常向天然水域排放大量温度高于天然水温的热水,使得热污染成为当今世界一大环境问题。热污染预报与水库水温预测有某些相似之处,但由于水体的热量收入主要来自排放的热水,使其求解具有特殊性。热水不同于一般污染物质,由于冷、热水温差的存在,两种水体密度不同,常形成温差异重流。

国内从 50 年代末期开始,结合电站冷却水排放问题进行过大量温差异重流的实验和理论分析研究。80 年代以后,由于热污染问题更加突出,对热污染的研究更加受到重视。在温差异重流的物理模型试验方面,已积累了较为丰富的经验,目前物理模型对于远区信息可以做出较为准确的预报结果。在数学模型方面,近年来已有较大的进展,采用高阶紊流模型进行热污染数值预报的成果报导屡见不鲜。目前数学模型已能较为精细地预报出排放口近区的流场与温度场。但遗憾的是,由于缺乏精细的模型实验资料的检验,数学

模型目前普遍存在缺乏实验验证的缺陷。

6 结束语

环境水力学作为一门独立的学科的历史虽然不长,但其在水环境问题中的应用可以说已是硕果累累。限于篇幅,不可能对其在每个方面的应用都在此予以介绍;对于文中涉及到的部分,也没有罗列繁复的公式,而是着眼于介绍解决问题的基本方法和已经取得的进展。

环境水力学目前正处于高速发展时期,在计算流体力学及相关学科的新的发展往往促进环境水力学发展上一个新台阶。水污染的治理与防治的任务还很重,很多实际问题还没有找到有效的解决途径,这就要求环境水力学工作者在今后的工作中密切注视工程中的实际问题,在解决实际问题的同时,推动环境水力学向更新、更高层次发展。(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 倪浩清等. 紊流数学模型在环境预测中的研究及其展望. 水利学报, 1986 年第 5 期
- 3 陈惠泉、吴江航. 我国电厂冷却水研究的回顾和展望. 水利水电科技进展, 1980 年第 2 期
- 4 沈晋等编著. 环境水文学. 安徽科技出版社, 1992 年
- 5 赵文谦、武周虎. 海面瞬时溢油油膜扩展范围的确定. 成都科技大学学报, 1988 年第 5 期

(收稿日期:19940609)

~~~~~  
(上接第 39 页)

## Engineering Hydrology of Xiluodu Waterpower Station

Xin Zhongli      Lu Zhenqian

(Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Research Institute)

**Abstract** Analysis and Calculation method and main design achievements of engineering hydrology of Xiluodu Waterpower Station are briefly presented. Analysis and calculation of design flood involves various aspects of engineering hydrology, will be emphasized here.

**Key Words** Xiluodu Waterpower Station, engineering hydrology, calculation method, design achievements.