

扩散作用对静水湖泊水质浓度空间分布的影响

陈丽娜 韩龙喜

(河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 根据水域开阔的中小型浅水湖泊的水动力特征,建立了加入扩散项的湖泊移流模式,分析了污染物对流输移、降解作用、扩散作用对污染物浓度空间分布的影响。研究发现:在静风条件下,对流输移、降解作用是湖泊水质浓度空间分布的主要影响因素,扩散作用对湖泊水质浓度空间分布的影响居次要地位。但当排污流量较小且污染物浓度较高时,扩散作用对预测结果有一定的影响。在进行湖泊水质空间分布精确预测时,应综合考虑对流输移、降解及扩散作用等因素的综合影响。

关键词 湖泊 水质 扩散作用 移流模式

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2008)01-0020-03

Influence of diffusion on spatial distribution of water quality concentration in stagnant lake

CHEN Li-na , HAN Long-xi

(College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract According to the hydrodynamic characteristics of wide shallow lakes of middle and small scale , a drifting mode coupled with diffusion item was established and used to analyze the effect of the convective transportation , degradation and diffusion of the pollutants on their distribution . It shows that under the windless condition , the convective transportation and degradation are the major factors affecting the spatial distribution of contaminant concentration , while the diffusion is the minor one . But the diffusion contribution has certain effects on the prediction results when the sewage discharge is small and the pollutant concentration is high . The effects of the convective transportation , degradation and diffusion should be considered comprehensively in the prediction of spatial distribution of water quality of lakes .

Key words lake ; water quality ; diffusion effect ; shifting pattern

近年来,随着经济的飞速发展和城市化进程的加快,中小型湖泊的水环境不断恶化,湖泊的水环境治理刻不容缓。对入湖污染物进行总量控制是合理、有效利用水资源和指导水环境治理的关键,而湖泊水质的模拟又是其中的一个重要技术手段,不仅能为湖泊水环境目标的管理和污染物的总量控制提供关键参数,而且是湖泊水环境容量计算的关键技术,湖泊水质模拟的精度将直接影响湖泊水环境容量的预测结果。目前,湖泊水质的主要模拟方法有解析公式法和数值分析法。其中解析公式法不仅可以精确方便地模拟空间点的水质污染情况,同时还

能较好地反映由于支流及排污口加入而引起的水质浓度变化情况^[1],所以实践中通常采用湖泊移流模式研究分析静水湖泊水质浓度空间分布特征。然而,此模式仅考虑了湖泊中污染物质的对流输移与自身降解作用,而忽略了扩散作用对浓度分布的影响。但事实上,污染物质进入水体后,在湖水的对流输移、紊动扩散和污染物自身的衰减转化协同作用的过程中得到稀释和降解,因此扩散作用直接影响了该模式对水质污染程度的预测精度。但至今未有关于扩散作用对水质预测结果精度影响的定量分析的研究报道。本文就此问题,在移流模式基础上加

入了扩散项,分析扩散作用对静水湖泊水质浓度空间分布的影响。

1 常用移流模式

在静风条件下,中小型湖泊水动力特征主要与吞吐流(湖泊与出入流间的水量交换)有关,考虑湖水的对流输移和自然降解作用,前人提出了预测湖泊入口水域污染物浓度空间分布的湖泊移流模式^[2]

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial C}{\partial r} &= -kC \\ C|_{r=0} &= C_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

解析解为

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{k\varphi hr^2}{2q}\right) \quad (2)$$

式中: q 为排污口(或河流)入湖污水量, m^3/s ; φ 为污染物在湖水中的扩散角(弧度,如排污口在平直的湖岸, $\varphi = \pi$); h 为污染物扩散区平均湖水深, m ; r 为预测点至距排污口距离, m ; u 为湖水沿径向的流速, m/s ; k 为污染物衰减系数, $1/\text{d}$; C_0 为排污口入湖污染物质量浓度, mg/L ; C 为 r 处污染物质量浓度, mg/L 。

该模式较精确地模拟了各空间点的污染物浓度分布情况,但它是在假定污染物沿水域呈扇形分布的条件下,单方面考虑污水引起的对流输移和污染物自身的降解作用而得到的稳态模型。然而湖泊中污染物浓度是沿程递减的,各断面之间存在较明显的浓度梯度,所以理论上必然存在扩散作用。

2 考虑扩散作用的湖泊移流模式

2.1 基本方程

为进一步分析扩散作用对静水湖泊水质浓度空间分布的影响,本文在原有湖泊移流模式的基础上,综合考虑湖水的对流输移、自然降解和扩散作用,建立了计入扩散效应的湖泊移流模式。

考虑扩散作用的湖泊移流模式的基本方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(E - \frac{q}{\varphi h}\right) \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + E \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - kC \quad (3)$$

式中: E 为湖泊紊动扩散系数, m^2/s 。

2.2 求解方法

2.2.1 网格划分

污染源排入湖泊后,在入湖口附近的区域属于射流性质,呈辐射状,所以采用极坐标将二维问题转化为一维问题求解。时间步长 Δt 、空间步长 Δr 和湖泊的一些参数依具体的湖泊特性和实际工程精度的要求由计算者输入;网格的数量 n 由模拟区域的长度 L 与空间步长 Δr 的比值得出 $n = L/\Delta r + 1$ 。取

Δr 为定值进行网格划分,如图 1 所示。

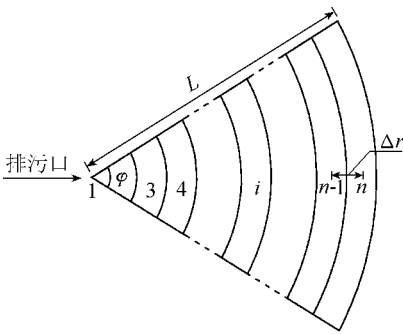


图 1 网格划分示意图

2.2.2 水力计算定解条件

忽略河湖水量交换及湖面气象因素(如气压、风速等)的影响,根据水力学中流量计算的基本概念,反求湖水沿径向流速

$$u = q/(\varphi rh)$$

2.2.3 水质模拟定解条件

a. 初始条件。本文应用非稳态二维水质模型,分析和研究稳态下扩散对水环境容量计算的影响,初始条件对计算无本质性影响,只与逼近稳态所需的时间有关,所以初始值可以任意给定或缺省为零。

b. 边界条件。对于入流边界,给定边界条件为

$$C(r, t) = C_0$$

对于出流边界,给定第一类边界条件为

$$\partial C(r, t)/\partial n = \text{常数}$$

c. 参数选取。谢才系数根据糙率由谢才公式计算。湖泊紊流扩散系数选用 Elder 公式进行求解

$$E = \alpha hu^*$$

式中 α 为经验参数; u^* 为摩阻流速。

2.2.4 控制方程的离散

在模型的离散和构造计算格式时,一般要考虑以下几个原则^[3]:①守恒性,满足水量守恒和污染物质守恒;②逆风性,水流方程的解具有特征的构造,信息沿特征线传播,逆风性是其固有的物理性质;③计算的稳定性;④精度要高。同时在离散方程时还要尽量使方程的离散格式、算法简单。以上原则中,守恒性是最基本的原则,因此本文采用了守恒性较好的有限控制体积法控制方程的离散。对于模拟区域内任意节点 i 的控制体质量平衡如图 2 所示。

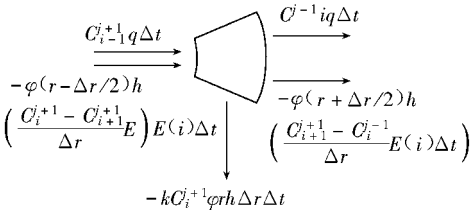


图 2 模拟区域内任意节点 i 的控制体质量平衡示意图

各单元体经整理后得通式：

$$\begin{aligned} \alpha_i C_{i-1}^{j+1} + \beta_i C_i^{j+1} + \gamma_i C_{i+1}^{j+1} &= \delta_i \\ \beta_i &= \frac{\varphi r \Delta r h}{\Delta t} + q + \frac{\varphi(r - \Delta r) h E(i)}{\Delta r} + \\ &\quad \frac{\varphi(r + \Delta r) h E(i)}{\Delta r} + k \varphi r h \Delta r \\ \alpha_i &= - \left(q + \frac{\varphi(r - \Delta r) h E(i)}{\Delta r} \right) \\ \gamma_i &= - \frac{\varphi(r + \Delta r) h E(i)}{\Delta r} \\ \delta_i &= \frac{\varphi r \Delta r h}{\Delta t} C_i^j \quad (i = 3 \sim n-1) \end{aligned}$$

2.2.5 方程的求解

有限体积法离散后的方程中,系数和等号右边只含常数和在 t_j 时的已知污染物浓度值,故可以用 Thomas 算法(搜索法)^[4]来解方程。

令

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\gamma_2}{\beta_2} & R_i &= \frac{\gamma_i}{(\beta_i - \alpha_i R_{i-1})} \\ (i &= 3 \sim n-1) \\ P_2 &= \frac{\delta_2}{\beta_2} & P_i &= \frac{\delta_i - \alpha_i P_{i-1}}{\beta_i - \alpha_i R_{i-1}} \\ (i &= 3 \sim n-1) \\ P_n &= \frac{\delta_n - \alpha_n P_{n-1}}{\beta_n - \alpha_n R_{n-1}} \end{aligned}$$

则有 $C_n^{j+1} = P_n$ $C_i^{j+1} = P_i - R_i C_{i+1}^{j+1}$
($i = n-1 \sim 2$)

这样就可算出($j+1$)时刻静水湖泊污染物浓度的空间分布。

3 扩散作用对污染物浓度空间分布的影响

静水湖泊中污染物浓度的空间分布除了受入湖污水量、入湖污染物浓度和湖泊自身衰减作用的影响外,还受到湖水紊动扩散作用的影响,下文将引入案例工况,对原有移流模式和计入扩散效应的移流模式进行数值求解,定量分析扩散作用对污染物浓度空间分布的影响。

3.1 案例参数

某一水深为 5 m 的中型浅水湖泊,湖岸有一排污口,扩散对污染物转化、输移的影响参数取值见表 1。现要模拟达到稳态时距排污口 500 m 内污染物浓度的空间分布情况。

表 1 分析算例参数取值

污染源条件		湖泊水质和水动力条件				计算条件	
入湖污水量 $q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	φ	入湖污水质量浓度 $C/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	糙率 n	降解系数 $k/(\text{d}^{-1})$	平均水深 h/m	长度 L/m	时间步长 $\Delta t/\text{h}$
20000	1.05	100	0.03	0.1	5	500	0.5

3.2 扩散作用对预测结果的影响分析

紊动扩散是指由污染物浓度梯度所引起的污染物在水体中的分散现象^[5]。不考虑湖水的紊动扩散将导致湖泊中空间各点的浓度值相对升高,影响湖泊水环境容量的计算结果的精确性,进而使入湖污染物总量控制的合理性和经济性受到影响。模拟结果显示,在静风情况下,忽略扩散作用对湖泊中污染物浓度的空间分布有一定的影响。最大相对误差约在 2.2% 左右,最大绝对误差值约为 1.2 mg/L,参见图 3。

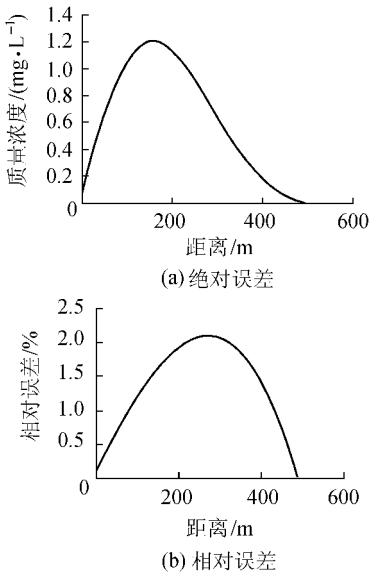


图 3 两模式数值解误差沿程变化

4 结 论

对于静水湖泊,由于其水域相对开阔,流速缓慢,扩散作用对湖泊水质浓度空间分布有一定影响。虽然,与自然降解作用和对流输移作用相比,扩散作用对污染物的转化、输移影响居次要地位,但当排污流量较小、污染物浓度较高时,应综合考虑对流输移、自然降解和紊动扩散等的协同作用对湖泊水质浓度空间分布的影响。

参考文献：

[1] 朱发庆.非规则湖岸湖泊水质扩散模式[J].上海环境科学,1996,15(12):18-20.
[2] 方子云.水资源保护工作手册[M].南京:河海大学出版社,1988.
[3] 李义天,赵明登,曹志芳.河道平面二维水沙数学模型[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
[4] 谢永明.环境水质模型概论[M].北京:中国科学技术出版社,1996.
[5] 傅国伟.环境工程手册——环境规划卷[M].北京:高等教育出版社,2003.

(收稿日期 2007-10-24 编辑:傅伟群)