

南洞庭湖污染物质迁移扩散与混合规律的研究

卜 跃 先

(湖南省洞庭湖环境保护监测站)

摘 要

本文采用二维水质数学模型,研究南洞庭湖污染物质迁移扩散与混合的运动规律。运用无量纲分析方法,解决了洞庭湖污染带的几个计算问题。

关键词: 洞庭湖 污染带 无量纲。

前 言

关于污染物质在水体中的迁移扩散和混合的规律,国内外已有很多报导。

南洞庭湖,全年有9—10个月的时间为一洪道型湖泊。因此,可以将其作为天然河流,研究污染物在湖水中扩散和混合的规律。

本研究从水动力学角度出发,探索湖水的稀释自净规律,为洞庭湖水环境监测最优化提供依据,对湖泊环境研究也具有一定的应用价值。

一、水质数学模型

如果水体是流动的,根据素动扩散定律和质量守恒定律,河流中污染物的三维移流素动扩散方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u}_x \frac{\partial c}{\partial x} + \bar{u}_y \frac{\partial c}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: $c = f(x, y, z, t)$ ——污染带中坐标为 (x, y, z) 的点在时刻 t 的污染物浓度(毫克/升)。

x, y, z ——纵、垂、横坐标(米)

$\bar{u}_x, \bar{u}_y$ ——纵、垂、向流速(米/秒)

E_x, E_z ——纵、横向扩散速度(米²/秒)

t ——时间(秒)。 D ——分子扩散系数。

污水进入河流,经过初始稀释阶段之后,由于河床很浅,污水很快在垂直方向上完全混合,浓度分布比较均匀,可以采用二维数学模型来反映水体中污染物随时空变化的规律。

1990年2月12日收到初稿,1990年5月18日收到修改稿。

设浓度分布场为恒定 $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$, 忽略分子扩散及 $\bar{u}_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y}$ 与 $\frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)$ 诸项, 并以 $\bar{u}$ 代替 $\bar{u}_x$, 则简化后的方程为:

$$\bar{u} \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (2)$$

模型中的横向扩散速度 E_z 可表达为:

$$E_z = \alpha_z \cdot h \cdot u^* \quad (3)$$

$$u^* = \sqrt{g \cdot h \cdot I} \quad (4)$$

式(4)中: u^* ——剪切流速(米/秒)

g ——重力加速度(9.8米/秒²)

I ——水面比降

在天然河道中, 弯道不超过60°的河道 α_z 一般在0.52—0.65之间, 这里, 南洞庭湖的河道 α_z 选取为0.60, 因此,

$$E_z = 0.60 \cdot h \cdot u^*$$

为了反映天然河流横断面上污染物随流速的不规则变化, 将横向坐标改用无量纲累计流量坐标来计算, 那么, 式(2)变为:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = K \frac{\partial^2 c}{\partial p^2} \quad (5)$$

式中: K ——横向扩散系数(1/米)。

p ——无量纲横向累计流量坐标。

$$K = \frac{E_z}{Q_R^2} \int_0^1 h^2 u dp \quad (6)$$

式中: Q_R ——全断面流量(米³/秒)

h ——河段平均水深(米)

$\bar{u}$ ——横向平均流速

设岸边投放为时间连续源, 式(5)的定解为:

$$c(p, x) = c_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{p}{\sqrt{4Kx}} \right) \quad (7)$$

$$\text{或: } c(p, x) = c_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{p}{\sqrt{4Kx}} \right) \right] \quad (8)$$

c_0 ——恒定时间连续源投放浓度(毫克/升)。

式(7)中, 未知数有 p 、 K 。所以, 建模的关键是确定累积流量坐标 p 和横向扩散系数 K 。由于各地河流的水文条件不同, 为了正确估算, 我们通过现场测验, 然后用水质数学模型计算污染物浓度分布, 解决污染物到达对面以及在全断面上均匀混合所经过的纵向距离, 从而可以确定采样点、采样断面的位置。

二、模型的应用研究

(一)南洞庭湖的水文概况

研究的区域位于南洞庭湖的东南湖西侧(如图1),全长10公里,湖水的主要来源是沅水、澧水、长江水,下游的资水有时也逆流而上。沅江市的工业废水和生活污水的很大部分在该区域持续排入湖中。

根据南洞庭湖几个水文站近十几年来的水文数据分析,以下游沅江水文站水位28.50米作为设计水位。1986年1月22日,对该区进行了实测,断面布设在沅江纸厂排污口下游400米处,其基本情况如表1。

经过全断面的流量 $Q_R = 219 \text{米}^3/\text{秒}$,河流比降 I 为 6.4×10^{-5} 。



图1 南洞庭湖岸边带地理形势图

(二)参数的确定

(1) 无量纲累计流量坐标 p 的计算

横向坐标 Z (米)	0	3.0	28.0	53.0	78.0	103.0	118.0	121.0
水深 h (米)	0	0.70	5.0	6.2	6.3	5.1	2.3	0
分条编号	1	2	3	4	5	6	7	
各条平均流速(米/秒)	0.091	0.25	0.38	0.42	0.44	0.32	0.13	
各条面积(米 ²)	1.05	71.3	140	158	143	55.5	3.45	

$$p = \frac{q_c}{Q_R} \quad (9)$$

q_c ——横断面上任意点从河岸处算起的累计单宽流量(米³/秒)。

$$q_c = \int_0^z h \bar{u} dz \quad (10)$$

$$Q_R = \bar{h} \cdot B \cdot \bar{u} \quad (11)$$

式(11)中: $\bar{h}$ ——断面平均水深(米)

B ——河宽(米)

利用曼宁公式计算 $\bar{u}$:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (12)$$

在同一断面上,假定 $\frac{1}{n} \cdot I^{1/2}$ (n 为糙率)为常数,

$$\text{则: } p = \int_0^z \frac{1}{B} \left(\frac{h}{\bar{h}} \right)^{1.67} dz \quad (13)$$

事先绘制出水深沿横断面变化曲线,在此基础上再作出 $\left(\frac{h}{h_0}\right)^{1.67}$ 沿横向分布,利用数值积分可求出 p 沿横向分布。

比较方便的是作成 $p \sim Z/B$ 的关系曲线,如图2。

(2) 扩散系数 K 的计算

根据张书农教授的研究^[10],公式为:

$$K = \frac{E_x}{\theta_R^2} \int_0^1 h^2 u dp \quad (4)$$

$$= \frac{E_x}{\theta_R^2} \cdot \frac{h^{2.67}}{h^{0.67}} \cdot V \quad (14)$$

V ——断面平均流速(米/秒)

经过计算: $E_x = 0.16 \text{ 米}^2/\text{秒}$

$$K = 3.22 \times 10^{-5} (\text{米}^2/\text{秒})$$

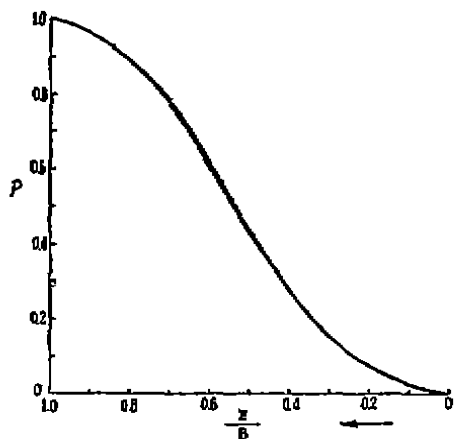


图2 $P \sim Z/B$ 关系曲线图

(三) 应用

建立了水质数学模型,确定了各参数,就可以应用它对南洞庭湖的水质进行评价和预测。为了优化水环境监测工作,尽量减少样品数,节省人力物力,需要寻找代表性的采样点,寻找断面污染物的代表性浓度。这样,采样断面必须设在污染物与湖水混合均匀的位置。采用该模型计算南洞庭湖对于岸边连续排放的废水到达对岸以及在全断面上混合均匀所经过的纵向距离。

(1) 达到对岸的距离

在一般情况下,当边远点的浓度为同一断面上最大浓度的5%时,即认为该点位于污染带的边缘。对于岸边排放,断面上最大浓度点在排放岸。其浓度分布公式为:

$$c(p, x) = c_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{p}{\sqrt{4Kx}}\right) \quad (5)$$

令 $p=0$ 时即为最大浓度,令 $p=1$ 时即为达到对岸时的浓度。当 $\frac{c(1, x)}{c(0, x)} = 0.05$ 时的距离 x 即为达到对岸所需的距离 L_B 。

$$\frac{c(1, x)}{c(0, x)} = \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{4KL_B}}\right)}{1} = 0.05$$

由上式解出: $L_B = 4035 (\text{米})$

(2) 达到全断面均匀混合的距离

污染物扩散到全河宽,还需要再经过一段纵向距离才能达到在横断面上均匀混合。之后,污染物的扩散主要为纵方向的(一维)。

一般恒定时间连续点源在二维平面上移流扩散的浓度分布函数为:

$$c(x, z, t) = \frac{\dot{M}}{u h \sqrt{4\pi E_x \cdot x \sqrt{u}}} \cdot \exp\left(-\frac{uz^2}{4E_x x}\right) \quad (15)$$

$\dot{M}$ ——单位时间进入线源的物质质量。

考虑两岸边界的反射, 采用无量纲纵横坐标和无量纲相对浓度来表达:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{4\pi x'}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \{ \exp[-(z' - 2n - z_0')^2 / 4x'] + \exp[-(z' - 2n + z_0')^2 / 4x'] \} \quad (16)$$

z' 、 x' 、 z_0' ——无量纲横坐标、纵坐标、点源坐标。

c_0 ——起始全断面平均浓度(毫克/升)

在断面上, 污染物的最大浓度和最小浓度之差不超过 5 % 时, 在实用上就认为已经均匀混合。当无量纲纵向坐标 $x' = 0.1$ 时, 所相时应的距离是断面上均匀混合所需要的距离 L_m , 对于岸边排放:

$$L_m = 0.4 \cdot \frac{uB^2}{E_x}$$

经过计算: $L_m = 14019$ (米)

三、结 论

(一)南洞庭湖湖水的混合程度较高, 在主要污染源之下 15000 米左右, 污染物就可在全断面上均匀混合。所以, 为了最优控制重大污染源对水质的影响, 环境监测断面必须设在下游距废水排放点至少 15 公里处。

(二)本文定量地分析了南洞庭湖稀释自净的程度。由于该区域居洞庭湖中心, 湖床比降较小, 流速相对平缓, 湖床地质是由疏松的沙质组成, 而且涨洪季节, 湖面广阔, 容量大。因此, 就全湖全年水平而言, 其稀释能力可能要比研究的结果大些。

(三)通过采用无量纲分析方法, 解决了关于南洞庭湖污染带的几个计算问题, 可供环境监测工作参考。

本工作中引用了我站谭建强、曾雁湘、刘靖涛等同志主持完成的“洞庭湖局部水域水质保护研究”课题中的部分资料, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Fischer H. B., et al, Mixing in Inland and coastal Waters, Academic Press, U. S. A., 1979.
- [2] Elder J. W. Journal of Fluid Mechanics. No. 5, 1959.
- [3] Rinaldi, S. et al., Modeling and Control of River Quality. C. N. R., Milano. Italy, 1979.
- [4] Loucks D. P. et al, Water Resources Systems Analysis, 1981.
- [5] Holley E. R., Abraham G., Some Aspects of Analyzing Transverse Diffusion in Riverse, J. of Hydr. Res. IAHR, 1972.2.
- [6] Yotsukura, Sayre W. W., Transverse Mixing in Natural Channels, J. of Water Resource Research. Vol. 11, 1975.
- [7] Fukuoka S., Sayre W. W., Longitudinal Dispersion in Sinuous Channel, J. of Hydr. Div., Proc. ASCE, No. 1, 1973.
- [8] Beltaos S., Transverse Mixing Tests in Natural Stream, J. of Hydr. Div., Proc. ASCE, No. 12, 1981.
- [9] Fischer H. B., Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing Open-Channel Flow, Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 5, 1973.
- [10] 张书农, 天然河道横向扩散系数的研究, 水利学报, 1983年第12期。

MIXING AND DISPERSION OF POLLUTANTS IN SOUTH DONGTING LAKE

Bu Yuexian

(Institute of environmental protection of Dongting Lake, Hunan)

Abstract

Mixing and dispersion of pollutants in South Dongting Lake was studied with a two-dimensional mathematical model for water quality. With the application of non-dimensional analysis, computations were performed for the polluted areas in the lake.

Key words: Dongting lake, polluted area, non-dimensional analysis