

弯曲性分叉河道中污染物扩散性的初步研究

江 帆¹, 陈维平¹, 陈 敏², 李元元¹

(1. 华南理工大学机械工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省环境保护局, 广东 广州 510630)

摘要 : 弯曲性分叉河道中水流特征复杂, 对污染物扩散有很大影响。为了定量分析其水流特征对污染物扩散的影响, 采用有限元方法求解弯曲性分叉河道中的污染物扩散数学模型, 研究其中污染物扩散的状况。主要针对河道回流、绕流对污染物扩散的影响进行了详细数值模拟计算, 并分别给出了可视化结果及平均的扩散距离。计算结果表明, 边界层稍微减弱污染物的扩散, 弯道分离使污染物扩散呈现多向扩散, 而回流和绕流尾迹区使污染物很难扩散, 从而有利于泄漏污染物的收集和集中治理。

关键词 : 河流污染; 弯曲性分叉河道; 污染物扩散; 数学模型; 有限元

中图分类号 : X12 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-693X(2006)04-0030-03

Primary study on diffusion of contaminants in meandering furcated rivers

JIANG Fan¹, CHEN Wei-ping¹, CHEN Min², LI Yuan-yuan¹

(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Environmental Protection Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510630, China)

Abstract : The flow characteristics in meandering furcated rivers are complicated and have great influence on the diffusion of contaminants. In order to analyze the influence quantitatively, the mathematical model for diffusion of contaminants was solved by finite element method. The influences of circumfluence and back flow on the diffusion of contaminants were simulated and calculated in detail, and the visual result and averaged diffusion distance were obtained. The results include that the boundary layer can alleviate the diffusion a little, the separation of the bends make the contaminants diffuse in multi-direction, and contaminants are difficult to diffuse in circumfluence and wake of back, which are good for the collection and concentrated control of contaminants.

Key words : river pollution; meandering furcated river; diffusion of contaminants; numerical model; finite element method

弯曲性分叉河道的复杂地形和河势使得水流特征也相应地变得复杂, 产生弯道边界层分离、环流、绕流等, 这些水流特征对污染物扩散有着重要的影响。本文采用有限元方法对弯道有岛河道中污染物的扩散进行分析, 着重计算环流、绕流三种水流特征对污染物扩散的影响, 给出定量的分析结果, 为河道污染治理、泄漏控制及排污口的方案设计等环境工程提供参考。

1 弯曲性分叉河道污染物扩散数学模型

弯曲性分叉河道污染物扩散数学模型包括水动力学方程和污染物输移方程^[1-2]。

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (hU)}{\partial x} + \frac{\partial (hV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

基金项目: 广东省科技攻关计划资助项目(2003C34504, 2005A30402001)

作者简介: 江帆(1974—), 男(土家族), 湖南慈利人, 博士研究生, 研究方向为水环境数值模拟及其治理装备, E-mail: jiangfan330@163.com

$$\begin{cases} \frac{\partial(hU)}{\partial t} + \frac{\partial(hUU)}{\partial x} + \frac{\partial(hUV)}{\partial y} = \\ -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + \frac{1}{\rho}(\tau_x^s - \tau_x^b) + fVh + \\ \frac{1}{\rho} \left[2 \frac{\partial}{\partial x} \left(h\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} h\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \\ \frac{\partial(hV)}{\partial t} + \frac{\partial(hUV)}{\partial x} + \frac{\partial(hVV)}{\partial y} = \\ -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} + \frac{1}{\rho}(\tau_y^s - \tau_y^b) - fUh + \\ \frac{1}{\rho} \left[2 \frac{\partial}{\partial y} \left(h\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} h\mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

污染物输移方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HUC) + \frac{\partial}{\partial y}(HVC) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中： h 为水深； U, V 为沿水深平均的流速， $U = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{h+z_b} u dz$ ， $V = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{h+z_b} v dz$ ； x, y 分别为河流方向和河宽方向的坐标； t 为时间； g 为重力加速度； z_b 为河底高程； f 为科氏力系数； ρ 为水的密度； μ 为动力黏度系数； τ_x^s, τ_y^s 分别为表面风应力在 x, y 方向上的分量； τ_x^b, τ_y^b 分别为流体应力在 x, y 方向上的分量； H 为相对参考面的水深； C 为污染物的浓度； D_x, D_y 分别为沿河流方向和河宽方向的扩散系数，根据文献 [2] 中公式计算。

2 计算模型及离散

模拟计算中弯曲性分叉河道的概况：河段由西向东，中间为半径约 5 km 的弯段，转折处河中有一个高程为 30 m（黄海水平面）左右的小洲（洲长约 7 km，宽约 2 km）将河道分成左右两汊，河段总长约 20 km。河段平滩河宽约 1 400 m，最宽处约 3 200 m（位于洲处），最窄处约 1 000 m，平滩水位下的平均水深约 11 m。河段内端部有一水文站，该站多年平均流量为 11 370 m³/s^[3]。其地形图如图 1 所示。

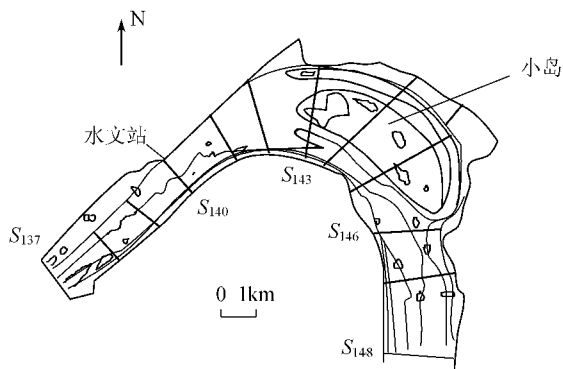


图 1 计算区域地形

因为有限元方法可以求解复杂的初、边值的微分方程，且能适应河道复杂的边界离散，故本文采用有限元方法对弯曲性分叉河道污染物扩散数学模型进行求解。有限元数值模拟中，网格划分是关键的一步。为了保证计算精度，采用四边形网格离散计算区域，划分有限元网格的要求为^[2,4-7]：①网格的四个角的任一角度不小于 10°；②网格的长宽比不应大于 10；③网格的 z 坐标或河底高程值尽量位于同一平面上；④相邻网格的面积的变化不应超过 50%。因为河水流动属于紊流，离散时岸边网格划分得密一些，以使计算真实。整个计算区域网格离散如图 2 所示，共 11 026 个单元，11 897 个结点。

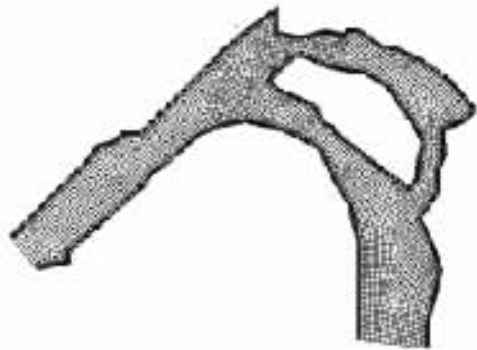


图 2 计算区域网格

计算中的边界条件：河岸和岛边界的流速为 0，入口水流非均匀，其平均流速为 0.834 m/s，出口压力假定为 0。物性参数为：水的密度为 998.2 kg/m³，动力黏度为 1.005 × 10⁻³ Pa·s，计算中泄漏有毒液体为 HCl（30% 浓度），密度为 1 149.3 kg/m³，动力黏度为 1.7 × 10⁻³ Pa·s。各种工况的计算时间保持相同。

3 计算结果分析

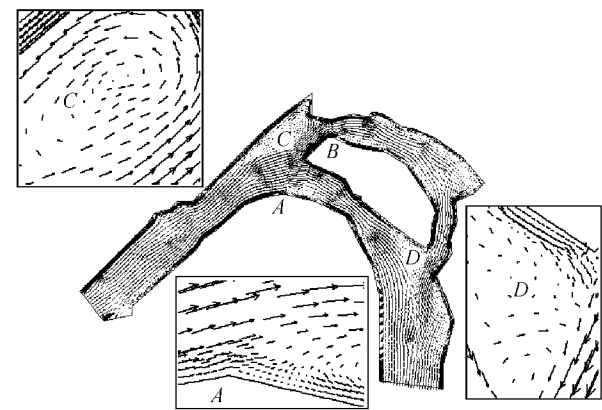
3.1 弯曲性分叉河道水流动特征

经过有限元模拟计算，计算区域的流场如图 3 所示。从流场的箭标矢量可以看出复杂河道中的水流速度场非常复杂。河岸边界由于流体黏性和河岸壁的作用，使水流流动缓慢。从图 3 中 A、B 点的水流流动看出，水流碰到扩散型的弯道时，水流中近岸边的部分继续沿岸壁流动，而远离岸边的部分在惯性的作用下继续沿原来的速度矢量方向流动，所以产生流动分离。当水流碰到河道中的小岛时，与之冲撞，其中一部分水流返回，在图 3 中 C 处形成环形流动，即回流。而当水流绕过小岛后，在 D 处形成流动非常复杂的绕流，从其尾迹区局部放大图看到，其流动矢量极不规则。

3.2 边界层对污染物扩散的影响

由图 3 可见近河道岸边水流速度梯度很大，影响污染物的扩散。由图 4(a) 可见，当污染物在岸边

泄漏时,边界作用使得污染扩散浓度从岸壁往中心呈梯度增加。对比河道中心污染物扩散(图4(b)所示),污染物的扩散要慢一些,如在同等计算参数下,岸边扩散距离为1082.46 m,河道中心扩散距离为1197.73 m,明显看到,岸边污染物扩散距离比河道中心污染物扩散距离短。在弯道处,由于边界层的作用,水流在转弯处出现流动分离现象,如图4(c)所示,流动分离使污染物扩散也出现分离,即扩散向前方和侧向扩散。



A、B—流动分离,C—回流,D—绕流尾迹

图3 计算区域流场矢量图

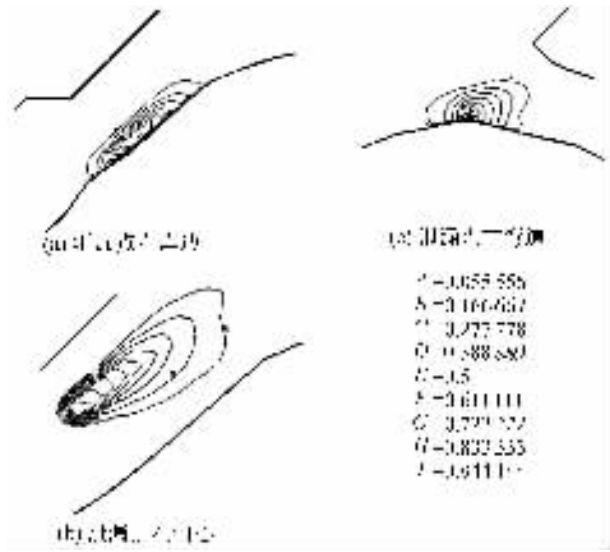


图4 边界层对扩散的影响

3.3 回流对污染物扩散的影响

从图3中C处可见,水流在碰到水中小岛或其他大型障碍物时会出现回流。为了考察回流对污染物扩散的影响,计算了污染物在回流中心和回流边缘泄漏这两种状态下的污染物扩散情况,如图5所示。由图5可见,污染物处于回流中心时,很难扩散出去,计算得出扩散距离仅有52.37 m。当污染物处于回流边缘时,扩散态势加剧,扩散方向也有侧向方向,计算得扩散距离为493.65 m。对比污染物在岸边和河心扩散情况看出,污染物在回流中扩散很慢。

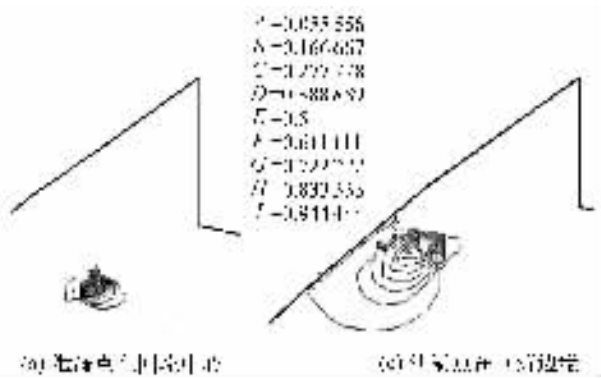


图5 回流对污染物扩散的影响

3.4 绕流尾迹区对污染物扩散的影响

图1中的河道中的小岛是一个复杂形状的钝体,从图3中D处的流动状况看出,水流绕形状复杂的洲岛在合流处形成绕流区域,其流动状况较绕圆柱体形成的涡列流动复杂,这类复杂的流动对污染物的扩散有很大的影响。由图6可见,污染物在绕流区扩散也非常缓慢,一般以泄漏点为中心缓缓向四周扩散,计算得到扩散距离为102.73 m。

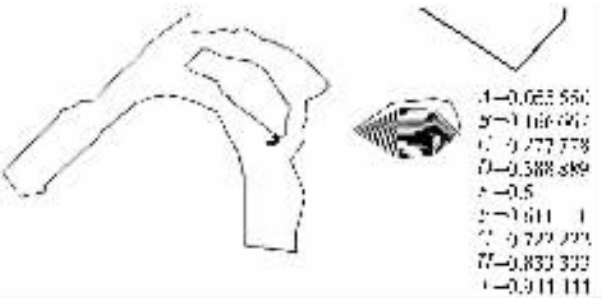


图6 绕流区污染物扩散浓度分布(右边是局部放大图)

4 结论

本文采用有限元方法,对弯曲性分叉河道的不同水流特征对污染物扩散的影响进行了计算分析,得到如下结论:

- a. 污染物在弯道分离处回流和绕流的水流特征的作用下,呈现出不同的扩散态势,其中在岸边扩散有减缓的趋势,在弯道分离处污染物扩散呈现多向性,而在回流状态下和绕流尾迹区,污染物扩散缓慢,有利于污染物的收集和集中治理。
- b. 有限元方法是定量分析污染物在复杂河道中不同水流特征作用下扩散状态的有效方法,而且,由于能以任意四边形离散计算区域,使得这种数值模拟方法能适应边界复杂的河流数值计算,计算精度高。

参考文献:

[1]白玉川,杨建民,黄本胜.二维水沙数学模型在复杂河道治理中的应用[J].水利学报,2003,26(9):25-30.

(下转第52页)

$L_4^* = 0.661, L_5^* = 0.515$ 。因此 ,五大湖水环境质量的优劣排序为 :青海湖 > 巢湖 > 滇池 > 武汉东湖 > 杭州西湖。

五大湖水环境质量对应的级别可按湖泊水质评价标准建立分块隶属度矩阵

$$R' = [R_s \quad R_j]_{m \times (s+j)} \tag{12}$$

式中 : R' 为分块矩阵 ; s 为水质级别数。

R_s 与 R_j 仍由式 (3)(4)求得 ,则

$$R' = \begin{bmatrix} 1 & 0.995 & 0.967 & 0.834 & 0 & 0.804 & 0.842 & 0.971 & 0.956 & 0.971 \\ 1 & 0.990 & 0.937 & 0.740 & 0 & 0.622 & 0.607 & 0.951 & 0.772 & 0.628 \\ 1 & 0.321 & 0.061 & 0.010 & 0 & 0.005 & 0.006 & 0.118 & 0.002 & 0.009 \\ 1 & 0.991 & 0.937 & 0.742 & 0 & 0.402 & 0.568 & 0.956 & 0.640 & 0.954 \end{bmatrix}$$

根据式 (9)(10)(11) 计算湖泊水质标准级别与五大湖的相对接近度(表 1)

表 1 湖泊水质标准级别与五大湖的相对接近度

待评价方案	湖泊水质标准级别					五大湖				
	I	II	III	IV	V	杭州西湖	武汉东湖	青海湖	巢湖	滇池
相对接近度	1	0.720	0.635	0.556	0	0.469	0.504	0.653	0.561	0.586

以湖泊水质标准级别的下限作为判别标准 ,可得五大湖富营养化程度级别。将文献 [2-3,5] 对五大湖水环境质量的综合评价结果进行比较 ,见表 2。

表 2 五大湖水环境质量的综合评价结果对比

评价方法	杭州西湖	武汉东湖	青海湖	巢湖	滇池
TOPSISFS	V	V	III	IV	IV
模糊神经网络	V	IV	III	IV	IV
PP 模型	V	V	III	IV	IV
MODMIIM	V	V	III	IV	IV

由表 2 可以看出 ,TOPSISFS 的评价结果与 PP 模型和 MODMIIM 的评价结果完全相同 ,与模糊神经网络方法相比仅有武汉东湖不同 ,但 TOPSISFS 的计算过程比其他方法要简单许多。

3 结 论

a. 将 TOPSISFS 应用于五大湖水环境质量的综合评价中 ,不仅给出了五大湖水环境质量的优劣排序 ,还通过对水环境质量评价标准的相对接近度与水环境检测点的相对接近度的比较 ,给出了五大湖富营养化程度的级别 ,所得结果科学、合理 ,具有可比性 ,与文献 [2] 的结果比较 ,仅武汉东湖有区别 ,与文献 [3,5] 的结果相同。

b. 基于模糊集合的逼近理想解法 ,不仅反映了水环境质量富营养化程度和水环境质量优与劣的客观模糊性 ,而且具有明确的物理概念 ,比文献 [2-3 ,

5] 简单易行、计算方便。

c. TOPSISFS 是多目标决策的一种新途径 ,不仅可应用于水环境质量的综合评价 ,也可应用于其他多目标的决策问题 ,如水资源承载能力评价。

参考文献 :

[1] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京 :国防工业出版社 ,1998.

[2] 胡明星 ,郭达志. 湖泊水质富营养化评价的模糊神经网络方法[J]. 环境科学研究 ,1998 ,11(4) :40-42.

[3] 金菊良 ,魏一鸣 ,丁晶 ,等. 水质综合评价的投影寻踪模型[J]. 环境科学学报 ,2001 ,21(4) :431-434.

[4] 陈武 ,李凡修 ,梅平 ,等. 应用多目标决策-理想点法评价水环境质量[J]. 环境工程 ,2002 ,20(3) :64-65.

[5] 杨晓华 ,杨志峰 ,酆建强 ,等. 水环境质量综合评价的多目标决策-理想区间法[J]. 水科学进展 ,2004 ,15(2) :202-205.

[6] 曾光明 ,杨春平. 环境系统灰色理论与方法[M]. 北京 :中国科学技术出版社 ,1994.

[7] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识 ,2002 ,32(4) :572-574.

[8] 崔振才 ,郭林华 ,田文苓 ,等. 水资源系统模糊优化多维动态规划模型与应用[J]. 水科学进展 ,2000 ,11(2) :186-193.

(收稿日期 :2005-08-18 编辑 :傅伟群)

(上接第 32 页)

[2] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践[M]. 北京 :中国环境科学出版社 ,2003 :284-386.

[3] 张细兵 ,董耀华 ,殷瑞兰. 河道平面二维水沙数学模型的有限元方法[J]. 泥沙研究 ,2002(6) :60-65.

[4] CHEN Z. A finite element method for the quantum hydrodynamic model for semiconductor devices[J]. Computers Math Applic ,1996 ,32(7) :17-26.

[5] ANDREW M S ,HOWARD S W ,PAUL G W. Calibration and sensitivity analysis of a river water quality model under unsteady flow conditions[J]. Journal of Hydrology ,2003 ,277 :214-229.

[6] JIANG F ,CHEN W P ,ZHAO H D ,et al. Numerical simulation of water environment pollution induced by the leakage of noxious liquid substance in bulk[C].//State Key Lab Prevention and Control of Explosion Disasters , School of Mechano-Electronics Engineering , Beijing Institute of Technology. Process in safety science and technology IV . Beijing :Science Press ,2004 :1280-1285.

[7] CHAU K W ,JIANG Y W. Simulation of transboundary pollutant transport action in the Pearl River delta[J]. Chemosphere ,2003 ,52 :615-621.

(收稿日期 :2005-01-06 编辑 :徐 娟)