

突发性水污染扩散模型及其在GIS平台中的可视化

吴迪军^{1,2} 黄全义^{2,3} 孙海燕² 宋玉刚²

(1 中铁大桥勘测设计院有限公司,武汉市汉阳大道34号,430050)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

(3 清华大学公共安全研究中心,北京市海淀区清华园,100084)

摘要:提出了一种适用于河流突发性水污染应急处理的工程化模型,采用四点隐式差分格式进行模型的数值求解,并在ArcGIS平台上实现了污染计算结果的实时动态可视化。最后,通过实验验证了该模型在公共安全应急平台中应用的有效性和合理性。

关键词:突发性水污染事故;数学模拟;地理信息系统(GIS);可视化

中图法分类号:P208

突发性水污染扩散模拟是水污染事故应急处置中的重要环节和手段,主要由模型、算法及模拟结果可视化3大部分组成。国内外关于水污染模拟方面的研究和应用,主要集中在水质的生物化学分析、水质保护、农业及水污染控制等静态的、微观的水环境分析与水污染防治规划方面^[1-4]。这些研究强调模拟的精细度,通常采用完整形式的水质模型,模型结构较复杂、参数较多。近年来,国内学者对应急处置中突发性水污染事故模拟进行了积极探索^[5-10],但由于起步较晚,很多问题还有待于进一步研究。在模拟结果的可视化方面,传统方法是运用污染浓度分布图^[11]的形式表达,它是一种静态的图形化方法,直观度不强,不适合于应急处置。国内外学者将GIS技术应用于水污染模拟结果的可视化^[5,9,10,12-15],取得了一些进展。

在突发性水污染事故的应急处置中,要求模拟计算速度快、效率高,模拟结果的图形显示直观,便于应急分析和决策,但计算精度要求不是很高。针对应急处置的需求特点,本文提出了一种河流突发性水污染事故的简化模型,采用有限差分方法中的四点隐式差分格式进行数值求解。同时,将模拟结果在ArcGIS平台上进行实时动态

可视化。

1 突发性水污染扩散模型及其算法

目前,可以用于突发性污染事故预警预报的数学模型主要是一维和二维模型,三维模型因其计算工作量太大,难以用于实际的预警预报^[6]。本文选用经过简化处理的一维污染扩散模型,并采用差分方法进行数值求解。

1.1 突发性水污染扩散的基本控制方程

污染物在全断面混合后,其迁移转化过程可用一维模型来描述,基本控制方程为:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A(D_x + E_x) \frac{\partial C}{\partial x} \right] - KAC + \frac{A}{h} S_r + S \quad (1)$$

式中, C 为污染物质的断面平均浓度; U 为断面平均流速; A 为过水断面面积; h 为断面平均水深; D_x 为湍流扩散系数; E_x 为纵向扩散系数; K 为污染物降解系数; S_r 为河床底泥释放污染物的速率; S 为单位时间内、单位河长上的污染物排放量。

式(1)适合于沿河各断面的断面面积是变化

的河段,即非均匀河段。方程左端第一项为污染物浓度随时间的变化项;左端第二项是污染物浓度的平流扩散项。实践证明,水的纵向(x 方向)流速是引起污染物浓度变化的主要参数,因此,河流各断面的污染物浓度变化主要由这一项引起。右端第一项为纵向弥散和湍流扩散联合作用项;右端第二项为污染物降解项;右端第三项为河床底泥释放污染物的增加项;右端第四项是其他污染源排放增加项。

1.2 模型的简化

实际上,污染物运动的边界、浓度分布及其运动过程在实际应急处置过程中能引起较大关注。因此,对突发性水污染事故的预测预警模型,可以根据河床地形、水流状态、污染物状况及工程实际应用的需要作相应的简化,得到实用型的工程化模型,以满足应急模拟中快速、实时的特殊要求。

在式(1)中,不考虑湍流扩散、河床底泥释放污染物以及沿河其他污染物排放的影响,水污染模型的基本方程变为:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = AE \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - AKC \quad (2)$$

1.3 模型求解

采用有限差分方法中的四点隐式差分格式对式(2)进行数值求解,将式(2)写成差分格式^[12]:

$$\frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} + U \frac{C_i^j - C_{i-1}^j}{\Delta x} = E \frac{C_{i+1}^{j+1} - 2C_i^{j+1} + C_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} - \frac{1}{2}K(C_i^{j+1} + C_{i-1}^j) \quad (3)$$

整理得:

$$\alpha_i C_{i+1}^{j+1} + \beta_i C_i^{j+1} + \gamma_i C_{i-1}^{j+1} = \delta_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, $\alpha_i = -\frac{E}{\Delta x^2}$; $\beta_i = \frac{1}{\Delta t} + \frac{2E}{\Delta x^2} + \frac{K}{2}$; $\gamma = \gamma_i = -\frac{E}{\Delta x^2}$; $\delta_i = C_i^j \left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{U}{\Delta x} \right) + C_{i-1}^j \left(\frac{U}{\Delta x} - \frac{K}{2} \right)$ 。再结合边界条件,就可以求解式(4)。

当 $i=1$ 时,把上游边界条件 C_0^{j+1} 代入式(4),得:

$$\beta_1 C_1^{j+1} + \gamma_1 C_2^{j+1} = \delta_1 - \alpha_1 C_0^{j+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

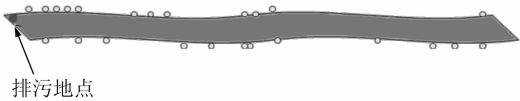


图1 原始河道边界点分布图
Fig.1 Original Riverway Boundary Point Distribution

当 $i=n$ 时,用传递边界作为下游边界条件 C_{n+1}^{j+1} ,并设 $\frac{\partial C}{\partial t}$ 为常数,则有:

$$C_{n+1}^{j+1} = 2C_n^{j+1} - C_{n-1}^{j+1} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),即得第 n 个方程为:

$$(\alpha_n - \gamma_n)C_{n-1}^{j+1} + (\beta_n + 2\gamma_n)C_n^{j+1} = \delta_n \quad (7)$$

由式(4)、式(5)和式(7)构成一维河流水污染模型的数值方程组。它是一种典型的“三对角线”方程组,可以采用标准的追赶法进行求解。

2 突发性水污染扩散模型在应急平台中的应用

本文提出的突发性水污染扩散与分析模型可广泛应用于各种应急处理系统中。通过对某河段的实例模拟和显示,验证本文所提出的模型及算法的有效性。

2.1 河道数据预处理

河道数据是指河道两岸岸线的空间坐标数据。实测的河道数据中,河岸线坐标点的分布通常是不均匀的,而在应急处理中为了方便模拟计算,一般采用相等的空间步长,因此,需要对河道进行均匀划分。考虑到实际污染事故的污染泄漏点的位置是随机的、可变的,为了便于计算处理,从泄漏点开始平均划分河道,生成自泄漏点起的均匀的模拟断面,并提取各断面端点的坐标数据。

某河段长度约 30.5 km,平均河宽为 60 m,平均水深为 3 m,水流量为 2 000 m³/s。设污染物为硫酸二甲酯,污染物排放强度为 300 kg/h,连续排放 3 h,模拟 72 h 的污染物运移扩散过程。将模拟河道均匀划分成 650 个计算断面(依河流岸线的复杂程度,复杂度越高断面数越多)。图 1 为原始河道边界点分布图,图 2 为经过均匀划分处理之后的河道边界点分布图。图中, (X_l, Y_l) 为某断面与左岸交点的坐标; (X_r, Y_r) 为该断面与右岸交点的坐标; (X_m, Y_m) 为该断面与河流中线交点的坐标; (X_{ll}, Y_{ll}) 为下一断面与左岸交点的坐标; (X_{rr}, Y_{rr}) 为下一断面与右岸交点的坐标。

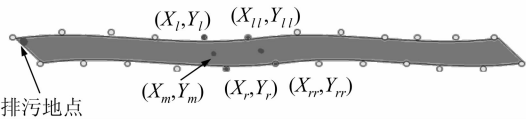


图2 处理后河道边界点分布图
Fig.2 Post-processed Riverway Boundary Point Distribution

2.2 模拟计算

采用式(5)表示的简化模型进行模拟计算,应用四点隐式差分格式对方程进行求解。计算前需输入的主要参数有污染点源坐标、河流流向、污染物排放强度、排放时间、模拟时间、污染物降解系数 K 、纵向分散系数 E 及河道数据。模拟计算后输出 T (时间标号)、 G (空间网格标号或距离)、 (X_i, Y_i) 、 (X_r, Y_r) 、 D_k (污染物浓度值, mg/m^3) 等信息。

2.3 模拟结果的可视化

模拟计算的结果中包括了不同时刻、不同位

置的污染物浓度,利用 GIS 技术根据污染物浓度值的大小以颜色的深浅动态显示各时刻的污染物扩散运移过程。模拟过程为:① 顺序读取模拟计算输出数据文件中标记有时间、浓度信息的点位数据,生成污染面;② 用 ArcGIS Engine 提供的方法将污染面制成地图元素 Element;③ 将 Element 集合添加到地图图面并不断刷新地图。

参照污染物种类和污染浓度分级标准,本文将污染物浓度划分为 4 个级别,不同浓度以不同颜色表示。模拟效果图如图 3~5 所示。

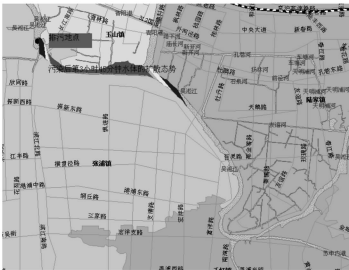


图 3 污染开始 3 h 45 min 后的模拟效果图
Fig. 3 Simulation Map After 3 h 45 min's Pollution



图 4 污染开始 9 h 后的模拟效果图
Fig. 4 Simulation Map After 9 h's Pollution



图 5 污染开始 21 h 后的模拟效果图
Fig. 5 Simulation Map After 21 h's Pollution

3 结 语

针对突发性水污染事故应急处置快速、实时性的要求和特点,本文采用经过适当简化的一维水污染扩散模型对河流水污染事故进行模拟,能快速、实时和比较准确地模拟污染物在河流中的运动迁移过程。将模拟计算结果输入 ArcGIS 平台环境中,实现了污染物扩散随时间和空间变化的实时动态可视化,能科学、有效和方便地辅助应急处理的决策指挥。

由于时间有限,本文研究尚存在一些不足,如水污染模型与水力计算模型、GIS 的集成,GIS 平台上实时查询和显示各时刻、各断面处的污染浓度等信息的功能的实现等,都有待于下一步的继续研究。

参 考 文 献

[1] Parkb K, Kuo A Y, Neilson B J. A Numerical Model Study of Hypoxia in the Tidal Rappahannock River of Chesapeake Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1996, 42: 563-581

[2] Whelan M J, Ganddlfi C, Bischetti G B. A Simple Stochastic Model of Point Source Solute Transport in Rivers Based on Gauging Station Data with Impli-

cations for Sampling Requirements[J]. Wat Res, 1999, 33(14): 3 171-3 181

[3] Zeng Guangming, Yuan X Z, Yin Y Y, et al. A Two-dimensional Water-quality Model for a Winding and Topographically Complicated River[J]. Journal of Environmental Management, 2001, 61: 113-121

[4] Haag I. A Basic Water Quality Model for the River Neckar; Part 1-model Development, Parameter Sensitivity and Identifiability, Calibration and Validation[J]. Acta Hydrochim Hydrobiol, 2006, 34: 549-559

[5] 丁贤荣,徐健,姚琪,等. GIS 与数模集成的水污染突发事故时空模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(2): 203-206

[6] 何进朝. 突发性水污染事故预警应急系统研究[D]. 成都: 四川大学,2005

[7] 朱国林,雷孝平,陆凤桐. 大连湾易溶保守液体化学品污染扩散的数值计算[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(1): 74-78

[8] 侯国祥,郑文波,时闽,等. 一种河流中突发污染事故的模拟模型[J]. 环境科学与技术,2003, 26(1): 9-10

[9] Lenza M A, Luzio M D. River Run an Interactive GIS and Dynamic Graphing Website for Decision Support and Exploratory Data Analysis of Water

Quality Parameters of the Lower Cape Fear River [J]. European Journal of Agronomy, 1997, 18(6): 513-520

[10] Foster J A, Mcdonald A T. Assessing Pollution Risks to Water Supply Intakes Using Grographical Information Systems (GIS) [J]. Environmental Modelling & Software, 2000, 15(3):225-234

[11] 段德宏,王根霞,王 萍. 一维稳态河流水质的计算机模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 54-56

[12] 张行南,耿庆斋,逢勇. 水质模型与地理信息系统的集成研究[J]. 水力学报, 2004(1): 90-94

[13] 方琼,唐仲华. 环境模拟与组件 GIS 的集成策略 [J]. 江苏环境科技, 2005, 18(增): 117-121

[14] 张艳军,彭虹,肖彩,等. 汉江武汉段水质预警预报系统研究与应用[J]. 青海环境, 2005, 15(4): 155-157

[15] Paliwal R, Sharma P, Kansal A. Water Quality Modelling of the River Yamuna (India) Using QUAL2E-UNCAS [J]. Journal of Environmental Management, 2007, 83(2):131-144

第一作者简介:吴迪军,教授级高级工程师,博士,主要从事工程测量应用技术、地理信息系统工程及公共安全应急科学与技术等方面的研究。
E-mail:wudi01@163.com

A Water Pollution Diffusion Model on Emergency Response and Its Visualization in a GIS Platform

WU Dijun^{1,2} HUANG Quanyi^{2,3} SUN Haiyan² SONG Yugang²

(1 China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd. , 34 Hanyang Road, Wuhan 430050, China)
(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China
(3 Center for Public Safety Research, Tsinghua University, Tsinghua Park, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: We proposed a practical model for water pollution accidents. The four-point implicit difference scheme was used to discretize the governing equations. Then a geographical information system (GIS) was employed to realize the real-time dynamic visualization of pollution simulating results on the ArcGIS platform. Finally, we employed the model in the public safety emergency platform with an example. The model shows simplicity, easy realization, high computing speed, high efficiency and good stability, and provides an effective assistant tool and decision-making foundation for water pollution accident emergency disposal with the intuitive and dynamic visualization of pollution information.

Key words: water pollution accidents; mathematical simulation; GIS; visualization

About the first author: WU Dijun, professor, Ph.D. He is engaged in application research of engineering survey and GIS in the science and technology of public safety emergency.
E-mail: wudi01@163.com

下期主要内容预告

- ▶ 利用拓扑关系模型自动检测居民地的变化类型 潘 励,等
- ▶ 基于 k 阶数据场的城镇土地定级模型 韩元利,等
- ▶ 基于多层次事件的三维房产动态表示 朱 庆,等
- ▶ 无人驾驶飞艇低空遥感影像的几何处理 张永军
- ▶ 震后松弛过程的粘弹性模型在 1997 年 Mw7.6 玛尼地震中的应用研究 许才军,等