

文章编号: 1006-4710(2013)01-0013-07

基于 Multi-Agent 的流域突发水污染扩散模拟

解建仓¹, 李维乾¹, 李建勋², 汪妮¹, 姜仁贵¹

(1. 西安理工大学 水资源研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对流域突发水污染事件的复杂性和不确定性, 及其应急平台对未来污染状况获取的快速性, 基于复杂性理论中的 Agent 建模思想建立水污染扩散模型。根据流域的二维空间数据, 将其划分为多个三角形面元, 用面元代表水质 Agent, 形成包含多个水质 Agent 的三角形格网系统, 然后对污染物在水质 Agent 之间的扩散现象进行描述, 提取水质 Agent 中的污染物“属性”, 并利用其对外界的“感知”能力和表现出的行为特征刻画水质 Agent, 构建出基于水质 Agent 的流域突发水污染物扩散模型。将此模型应用于松花江流域的突发水污染事件中, 结果表明所建模型结构合理, 能有效模拟出流域突发水污染事件。

关键词: 水污染; 扩散模拟; 复杂性理论; Multi-Agent; 三角形面元; 松花江流域

中图分类号: TP3, X32 **文献标志码:** A

The Sudden Water Pollution Diffusion Simulation of the River Basin Based on Multi-Agent

XIE Jiancang¹, LI Weiqian¹, LI Jianxun², WANG Ni¹, JIANG Rengui¹

(1. Water Resources Research Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Faculty of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: With an aim at the complexity and uncertainty of river basin water pollution incidents, and the quickness of emergency platform for future pollution condition, a water pollution diffusion model is set up based on Multi-Agent in complexity theory. The model is divided into many triangle area elements in terms of the 2-D space data, and the area element is used to represent water quality Agent, whereby the triangle grid system including many Water Agents. And then the diffusion phenomenon of pollutants among Water Agent is described, and the pollutant “attributes” among Water Agent are extracted. The “perception” ability and the displayed behavior features of Water Agent are used to carve Water Agent and to build water pollution diffusion model based on Water Agent river basin accidents. This model is applied to the sudden water pollution incidents in the Songhua river basin, whereby indicating that the built model is rational in structure and able to simulate the river basin water pollution incident effectively.

Key words: water pollution; diffusion and simulation; complexity theory; Multi-Agent; triangle area element; Songhua River Basin

近年来, 流域突发水污染事件频发。如 2005 年的中石油吉化公司双苯厂发生爆炸, 污染物大量泄漏造成松花江水体严重污染。2010 年 7 月, 松花江

又遭遇噩运, 吉林省永吉县因特大暴雨造成山洪暴发, 致使该县一化工厂的部分化学原料桶被洪水冲入松花江, 造成水体污染。由于流域受到污染后除

收稿日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079120, 51109177, 51109175); 公益性行业科研专项基金资助项目(201001011); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(10XJCZH002); 陕西省教育厅科学研究计划基金资助项目(12JK0481); 西安理工大学优秀博士学位论文研究基金资助项目(106-211105)。

作者简介: 解建仓, 男, 教授, 博导, 研究方向为水资源及水利信息化。E-mail: jexie@xaut.edu.cn。李维乾, 男, 博士生, 研究方向为智能决策系统、3S 应用、水利信息化。E-mail: wqli@foxmail.com。

严重影响流域沿岸及下游居民的日常生活和生命财产、制约着社会经济的发展外,还会威胁生态系统,影响社会稳定,更有严重者会影响到下游邻国的饮水安全,引起一些跨界法律纠纷。因此有必要重点对流域突发事件污染物运移的规律进行研究,进一步为突发水污染应急平台的建立奠定基础。

关于流域水污染扩散模拟的研究,文献[1]~[4]根据水动力学和污染物在水体中扩散的特性,建立了结构化、确定的、具体的数学模型,对模型求解并掌握污染物运移规律,采用可视化技术模拟了污染物运移过程。虽然模型可对污染物运移过程进行有效模拟,但其需要率定的参数众多,计算工作量太大,且三维数值模型方程求解难度非常大;再加上水污染事件具有动态性、复杂性和非线性等特点^[5]。因此这种传统的数值或物理模型在水污染突发应急平台上的应用受到一定限制。

在处理复杂性水污染事件上,文献[6]~[9]根据水体中污染物扩散迁移表现出的复杂时空特性,利用元胞自动机技术通过元胞空间和元胞状态,考虑了风向、风速、流向、流速等影响因子,建立了污染带扩散漂移的规则,并利用此规则对元胞状态进行了更新,从而构建了污染带扩散迁移模型,最后预报并动态模拟了水体污染带的扩散漂移过程。虽然元胞自动机水污染模型通过描述水体污染物个体行为及其相互之间的关系和作用刻画了整个水体污染带的运移过程,但元胞自动机在水污染模拟中的应用还存在以下问题:①水体中的污染物受水流影响而发生运动变化,而元胞自动机水污染模型中元胞是不可移动的;②每一个携带污染物的水体都会根据当前自身所处的位置、流速、所含污染物的浓度值来“决定”自身的行为规则,从而携带污染物的水体表现出智能性,但元胞自动机水污染模型中的各个元胞遵循着相同的元胞规则。

用于解决复杂系统问题的 Agent 技术是伴随着计算机技术和人工智能技术发展起来的一项计算模型和框架技术,它能把一个复杂系统看作是一个由多主体交互协作组成的复杂适应系统,从而可将复杂系统的建模分解为对行为主体的建模。其在解决复杂性问题时具有以下优点:对复杂水污染系统的自然描述能力;对复杂水污染微观扩散行为良好的描述能力;对水污染“主动”行为的仿真;仿真的动态性和高度灵活性;模型的重用性。尽管已有文献将 Agent 技术应用于水污染领域^[10],但是其利用 Agent 技术构建的是水污染环境决策支持系统,与本文所要构建的模型存在一定差异。综上所述,本

文根据水质 Agent 与元胞自动机水污染模型在流域空间划分方面具有相似的思想和对复杂性问题的研究能力,摒弃元胞水污染模型中的元胞不可移动、遵循相同的元胞演化规则等不足之处,在划分流域水质 Agent 三角形格网系统的基础上,利用水质 Agent 具有的动态性、智能性特点,构建基于水质 Agent 的流域突发水污染物扩散模型。

1 基于 Multi-Agent 的水污染扩散模型

Multi-Agent 系统是由多个 Agent 组成的集合, Agent 一般都有一个或多个特征值,并能够修改自身的特征值; Agent 之间能够进行交互,通过与其他 Agent 的交互,使得系统整体演进、演化并涌现出宏观的规律,特别适用于“自底向上”的一种演化行为。由于客观世界的多样性及复杂性,基于 Agent 模型的构建已应用于污水控制、社会经济、交通运输、应急管理等多个领域^[11-14],并取得了一定的研究成果。因此,本文建立基于水质 Agent 的流域突发水污染扩散模型。

1.1 三角形面元分割

根据流域的二维空间坐标数据,按照固定的间隔将流域划分为多个相互连接的三角形格网系统。每个三角形格网即为一个三角面元,代表着每一个水质 Agent,其作为流域污染物的载体,这样便形成一个多水质 Agent 的面元网格,如图 1 所示。

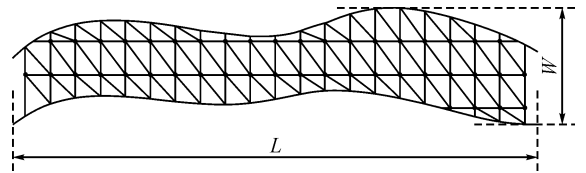


图 1 多水质 Agent 三角形面元网格

Fig. 1 The triangle area element grid

对长度为 L 、宽度为 W 的规则矩形流域来讲,设单位分割距离长度为 l ,则流域被分割后共有 $\lceil 2L \times W/l^2 \rceil$ 个三角面元,实际上由于流域边界并不规则,因此,多水质 Agent 的面元网格中的 Agent 数将远小于 $\lceil 2L \times W/l^2 \rceil$ 。对不规则流域分割时,按照河道的不同地形、水流速度及方向等特性将流域分割为多段,然后对每一分段进行上述三角形面元分割,分割过程中,流域边界处可能会被划分为小块不规则形状,当其面积小于三角形面元的一半面积时,则不再进行三角划分,重复此划分过程,直至结束。记划分后的三角形面元为 $a_{i,j}$ ($i \leq \lceil L/l \rceil; j \leq \lceil W/l \rceil$),则每个三角形面元的面积为 $l^2/2$ 。需要说明的是,对不规则流域来讲, W 为流域最宽处的

宽度。

1.2 污染物扩散描述

流域突发污染事件发生后,在流域上游地区会形成一个污染源,此污染源在有限时间内将污染物排放至河道中,为简化问题研究的复杂度,本文只考虑影响较大的一类污染物因子。当污染物进入河道内,三角形水质 Agent 会携带一定量的污染物,且污染物会因在相邻水质 Agent 所含污染物浓度值不同而相互之间进行扩散,且污染物从浓度高的水质单元扩散至浓度低的单元,再加上污染物漂移受流水因素的影响,其污染物在相邻水质 Agent 之间的扩散过程可用图 2 表示。

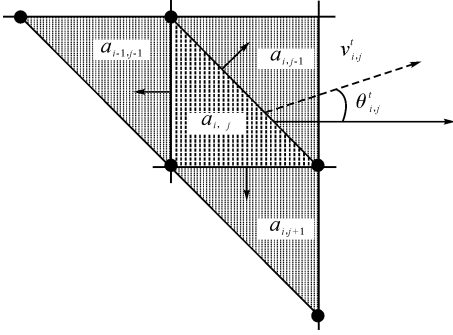


图 2 污染物扩散描述

Fig. 2 Description of water pollution diffusion

图 2 中, t 时刻,流域水流的方向从 $F \rightarrow T$, $F \in [i-1, i, i+1]$, $T \in [j-1, j, j+1]$, $a_{i,j}$ 为三角形面元, $v'_{i,j}$ 为 t 时刻面元 $a_{i,j}$ 的流速, $\theta'_{i,j}$ 表示 t 时刻水流方向与河道前行方向的夹角。

设在 t 时刻,水质三角形面元 $a_{i,j}$ 所含的污染物浓度为 $\rho'_{i,j}$,经过一个单位间隔时间 Δt 后, $a_{i,j}$ 与其周围的三个面元之间进行污染物扩散,到 $t + \Delta t$ 时刻, $a_{i,j}$ 的污染物浓度值变为 $\rho'^{t+1}_{i,j}$,此污染扩散过程一直进行,直到所研究区域的三角形面元及其周围的所有面元均被污染,且面元所含污染物达到一个水质达标值 ρ_{std} 时,则认为扩散结束。除水质污染物因浓度差异进行扩散外,由于受到流域水流的影响,污染物会沿着水流的方向在水质 Agent 之间发生污染物漂移行为,因此,参考文献[6]中描述,在一个单位间隔时间 Δt 后, $a_{i,j}$ 所含的污染物浓度变化关系可表达为式(1)。

$$\begin{aligned} \rho'^{t+1}_{i,j} = & \rho'_{i,j} + k_1 [(\rho'_{i,j} - \rho'_{i-1,j-1}) + \\ & (\rho'_{i,j} - \rho'_{i,j-1}) + (\rho'_{i,j} - \rho'_{i,j+1})] + \\ & k_2 [\rho'_{i,j} - \rho'_{F,T}] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, k_1 为水质 Agent 因所含污染物浓度差异引起污染物扩散的系数, k_2 为流速作用引起污染物漂移的系数,两者取值可参考文献[6]。本文通过多次

仿真实验,对 k_1 和 k_2 的值进行修正,即修正后 $k_1 = 0.20$, $k_2 = k_1 \omega$, $\omega = v'_{i,j}/v_{max}$, $v_{max} = \max(v'_{i,j})$, $\forall i, j$ 。需要说明的是:若 $a_{i,j}$ 所含污染物与其周围所含污染物的浓度值相当,则认为污染物不会在局部范围内扩散。

因为河流边界与河岸相连处的污染物扩散现象与河流中污染物的扩散现象不一致,所以本文需要对河流边界处扩散现象进一步分析。为简化文中模型,本文采用的是在河流边界处沿河岸向外扩展形成由多个水质 Agent 组成的虚拟带状 Agent 的方法来研究河流边界处污染物浓度值的变化。因此,河流边界处水质 Agent 污染物浓度值的变化仍可采用式(1)来计算。但此时河流中的污染物不会向边界外的水质 Agent 中进行扩散,河流边界外 Agent 携带的污染物浓度值为 0,且边界外的水质 Agent 具有不可移动性。

另外,由于污染物在流域中的排放量较大,因此,可认为污染物在流域中的降解量较小,且水中悬浮物对污染物的吸附解析作用也较小。这些减少的污染物量均可忽略不计。

1.3 水质 Agent 模型结构

通过对流域中污染物在水质 Agent 之间的扩散行为的描述,可知每个水质 Agent 为流域模型中最基本的单位,它通过“感知”邻近水质 Agent 所含污染物的浓度值及流域中水的流速,自动、及时、快速地在固定流域区域内按照一定的规则调整自身行为,并与周围水质 Agent 中所含的污染物进行扩散“交换”和向前漂移,同时在水流的作用下,发生平移行为。

为此,本文根据 Agent 的反应性、自治性、移动性等特点^[12],设计水质 WaterAgent。其“属性”有:位置编号 Location,即 Agent 在流域中的空间位置,用坐标 (i, j) 表示;污染物浓度值 Concentration,即水质 Agent 所含的污染物浓度值,单位为 mg/L;流速 FlowRate,即水质 Agent 的流动速度。它对外界的“感知”可描述为:①对流域区域范围大小的测量,即自身的活动范围必须在流域的范围内;②对相邻水质 Agent 的坐标位置及包含污染物浓度的“测量”;③获取自身所处位置水的流速。然后,水质 WaterAgent 根据自身“属性”及对外界环境的“感知”能力,做出同邻近水质 Agent 之间的污染物扩散“交换”、漂移及平移行为。

另外,建立流域空间的 RiverAgent 和测量断面的 SectionAgent,这两个 Agent 分别和 WaterAgent 进行交互,其关系模型结构见图 3。

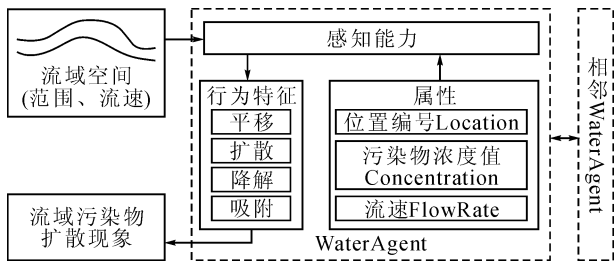


图3 WaterAgent的模型结构

Fig. 3 The structure of WaterAgent model

设在流域有限的研究区域内,所有水质 WaterAgent 均为此 Agent 模型结构,若污染物持续排放,经过一段时间,根据流域中检测断面 SectionAgent 可模拟到污染物浓度值,此过程所有 WaterAgent 会根据流域空间 RiverAgent 的特性将自己约束在一个限定的范围内。由于水的流动性,会有一些 WaterAgent 脱离出研究区域,出现“死亡”现象,同时有一些新的水质 Agent“诞生”出来进入到研究领域。在研究区域内,所有有“生命”的 WaterAgent 会因其周围水质 Agent 所含的污染物的不同而进行“交互”,同时,原来位置在面元网格中编号为 (i, j) 的水质体,经过一个单位时间后,会随着水流平移至新的位置 (i', j') ,新旧位置之间的关系可表述为:

$$i' = i + \lceil [(v'_{i,j} \cos \theta'_{i,j}) \Delta t] / L \rceil$$

$$j' = j + \lceil [(v'_{i,j} \sin \theta'_{i,j}) \Delta t] / L \rceil$$

若 $i' > \lceil L / L \rceil$,则认为此水质 Agent 已经“死亡”,同时原来位置编号 $i \leq \lceil [(v'_{i,j} \cos \theta'_{i,j}) \Delta t] / L \rceil$, $j \leq \lceil [(v'_{i,j} \sin \theta'_{i,j}) \Delta t] / L \rceil$ 的水质 Agent 会被新“诞生”出来的水质所代替。

本文采用 Java 语言对模型进行仿真,主要包含三个 Agent 类(WaterAgent、RiverAgent、SectionAgent)和两个基本类(FlowRate、Location),它们之间的关系见图4。其中污染物扩散的模拟过程主要由前三个 Agent 类来实现,其主要方法的含义见表1。

表1 Agent类主要方法含义

Tab. 1 The main method meaning of Agent Class

类	方法	含义
RiverAgent	setFlowRate	设置流域中各单元点的流速
RiverAgent	setIntervalLength	设置单位分割距离的长度
RiverAgent	setIntervalWidth	计算分割后 Location 位置的宽度
SectionAgent	setWaterAgent	更新断面处包含的 WaterAgent
WaterAgent	die	设置 Agent 离开研究区域,即“死亡”
WaterAgent	getConcentration	获得 Location 处的浓度值
WaterAgent	getFlowRate	获得 Location 处的流速
WaterAgent	getLocation	测量自身所处位置
WaterAgent	measure	测量自身的活动范围
WaterAgent	move	自身在流域中进行移动
WaterAgent	step	设置观察的间隔时间

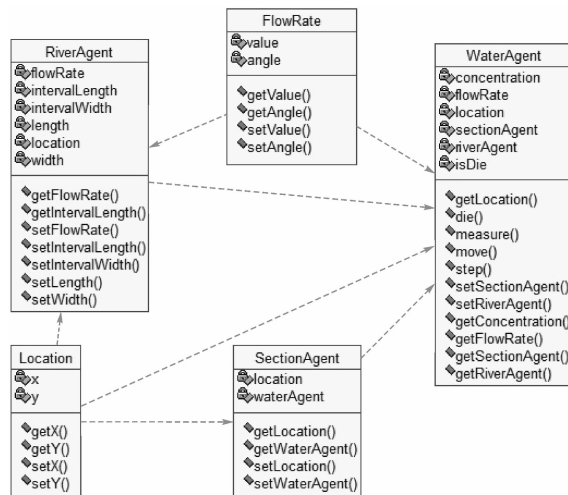


图4 水污染扩散模型的主要类图

Fig. 4 The main Class diagram of water pollution diffusion model

在模型开始计算前,需要确定三个初始条件。
 ①边界确定。由于河流中污染物和河流边界处的污染物扩散现象不相同,因此需要对河流边界处及边界外的水质 WaterAgent 进行编号,并设置其携带污染物的浓度值以及相邻 WaterAgent 之间的扩散系数和漂移系数。
 ②间隔时间设置。由于水质 WaterAgent 之间为等间隔距离,所以模拟观察时间 step 的设置会影响污染物的扩散速度以及模型模拟的准确度。本文则根据实际河流的流速来反复模拟计算和验证,最终确定一个最接近实际观测结果的 step 值。
 ③数据预处理。污染事件发生后,污染物从污染点连续或间隔地排放至河流中,在模型验证、模拟和实际预测的时候,需要先将污染物数据转化为一个单位时间 step 内的数据,并且污染物在污染源处分布的数据要符合污染物进入河流后经过一个单位时间的扩散运移后数据分布的规律。

2 流域突发水污染运移扩散模拟

2.1 事件概况

本文以2005年松花江水污染事件为例进行模拟研究。松花江是黑龙江最大的支流,是我国七大流域之一,全长1900 km,流域面积54.56万 km²,超过珠江流域面积。松花江有南北两源:北源嫩江发源于大兴安岭伊勒呼里山;南源第二松花江是松花江的正源,发源于长白山的白头山。松花江沿岸城市主要有哈尔滨、佳木斯、齐齐哈尔、牡丹江、吉林等。2005年11月13日下午1时45分,中石油吉化公司双苯厂发生爆炸,污染物大量泄漏造成松花江水体严重污染。污染水体沿江北上进入黑龙江省,

给沿岸各城市的工业生产和人民生活造成重大影响。11月24日上午10时30分,污染水带正式进入哈尔滨市,污染水带长135 km,其中污染物超标5倍以上的重度污染带达到80 km,自11月20日7时松花江黑龙江省境内第一个监测断面肇源断面硝基苯超标开始,至12月19日20时同江监测断面硝基苯浓度值达标,污染带在松花江黑龙江省江段历时30天。

2.2 模型应用

由于文中模型主要以一种污染物因子为研究对象,且污染事件发生后,进入流域严重超标的污染物主要为硝基苯,因此本文对硝基苯在流域中扩散传播行为进行模拟,研究区域选择松花江干流的哈尔滨和佳木斯两个监测断面,以哈尔滨为初始研究断面,下游佳木斯为待模拟断面,两站之间相距444 km,河道宽度为500~2 000 m,流速为0.6~2.5 m/s^[15]。

11月13日污染事件发生后,11月24日污染水体到达哈尔滨,至11月26日离开,其断面的硝基苯浓度变化值见图5,因此,本文主要从污染物到达哈尔滨断面开始对研究河段进行模拟计算。首先对河网进行三角分割,以50 m的间隔距离(即 $l=50$ m)为单位进行分割,分割后形成28万左右个三角形格网。然后以每个三角形格网为一个水质 Agent,对哈尔滨至佳木斯两断面之间的所有水质 Agent 进行模拟计算,直到污染带离开模拟区域后则结束模拟。

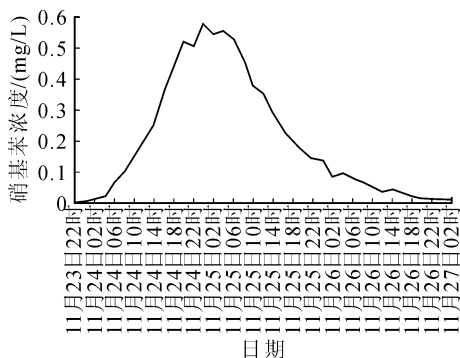


图5 哈尔滨硝基苯浓度实测值

Fig. 5 The measured values of nitrobenzene concentration at Harbin section

污染模拟开始后,考虑到河道分割后形成的三角形格网数量较大,给运算带来困难,因此,在实际研究中,以本次污染事件产生的污染带80 km为研究河长,即最大形成7万个三角形格网,以这些水质 Agent 为研究对象,并获取每个水质 Agent 的“属性”值,包含其位置、浓度和流速,其中位置编号从(1,1)开始,到(M,N)结束, $M=8\ 800$, $N=60$;考虑

污染事件发生在冬季,河流流速相对较低,且上游水库有大量不规则放水,因此,设定流速为0.8 m/s,同时,假定流域中流速的方向和河道的前进方向一致,即夹角 $\theta'_{i,j}=0^\circ$;单位时间 $\Delta t=2$ h;浓度为本文要模拟的对象。污染物扩散结束后,检测区域的浓度值是否达标,可参照国标《地表水环境质量标准》中的集中式生活饮用水地表水源地特定项目限值^[16],即认定水质浓度值 $\rho_{\text{std}} \leq 0.017$ mg/L为达标值。图6为下游佳木斯断面的硝基苯浓度的实测值和模拟值。

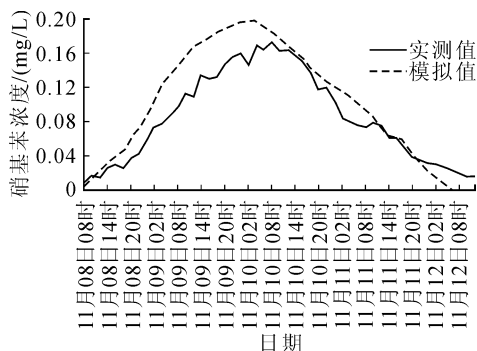


图6 佳木斯硝基苯浓度实测值与模拟值

Fig. 6 The measured values and simulated values of nitrobenzene concentration at Jiamusi section

从图6可以看出,佳木斯断面模拟的最大硝基苯浓度值出现在11月10日02时,比实测硝基苯最大值出现的时刻11月10日08时提前了近6个小时,并且最大的硝基苯浓度值为0.199 mg/L,比实测最大值0.173 mg/L高0.026 mg/L。最大值提前出现的原因可能是模型模拟时采用的是河道的平均流速,而此流速值概化了河道中流速的差异性,所以硝基苯浓度峰值较实测值提前;浓度值比实际值高的原因可能是图2污染物扩散描述仅考虑了水质 WaterAgent 中的污染物在其相邻的三个方向上的扩散,没有将其污染物的影响范围扩大至多个相邻的水质 WaterAgent,从而引起每个水质 WaterAgent 携带的污染物的浓度值较实测值大。尽管模拟存在这些问题,但由于河道复杂、河流较长、流速不一,且污染物浓度峰值误差仅为9.25%,所以仍可认为本文所建模型具有较好的模拟效果。

2.3 结果分析

为进一步研究并分析本模型,采用两个方案分别对研究区域进行模拟计算:方案一,河段分割;方案二,改变水质 Agent 大小。

第一种方案,将哈尔滨至佳木斯河段按照流速分割为两段,上段为哈尔滨至依兰,河长333 km,宽度500~2 000 m,流速为0.6~1.4 m/s;下段为依兰

至佳木斯,长度为111 km,宽度为500~800 m,流速为1.5~2.5 m/s。第二种方案,对研究河段不进行分段,而改变水质 Agent 的大小,即将原来单位分割距离 $l=50$ m 缩小20%至 $l=40$ m,以此距离对研究区域进行分割,分割后形成44万个左右的水质 Agent,位置编号从(1,1)开始,到(M' , N')结束, $M'=11\ 000$, $N'=75$ 。然后分别采用这两个方案对研究区域重新进行模拟计算,并与原方案和实测值进行对比,模拟过程及对比结果见图7。

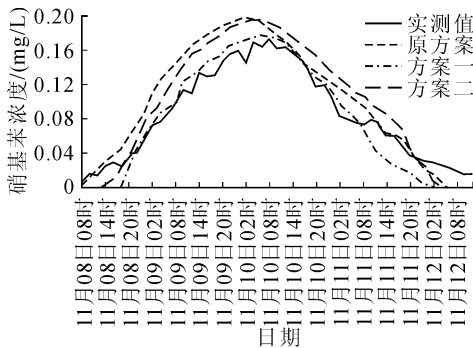


图7 佳木斯硝基苯浓度实测值与原方案、方案一及方案二模拟值

Fig.7 The measured values and three kinds of schemes simulated values of nitrobenzene concentration at Jiamusi section

从图7可以看出,①进行分段计算后,佳木斯断面硝基苯最大值出现的时刻由原来的11月10日08时提前至11月10日06时,离实测最大浓度值出现时刻相隔2个小时,且浓度为0.178 mg/L,比实测最大值0.173 mg/L高0.005 mg/L,其相对误差为2.89%,较原方案相对误差9.25%降低了6.36个百分点,说明将河段分段进行计算可以提高污染物的模拟精度。由于河道的分割是按照河道所处的地貌状况和流速将河流进行了分段,不仅降低了河流网格分割的误差,而且将原方案流速均一化的处理方式用各子河段的平均流速来替换,因此其模拟精度较原来的模型结果有所提高。②对研究河道不分段,改变单位分割距离的值,与原方案相比,除污染物到达时间和最高浓度到达时间有所差异外,水质浓度值还有所改变,当水质 Agent 分割单位较小时,水质浓度值与实测值相差变小,反之则变大,为此,应尽量缩小 Agent 的大小,但是当 Agent 太小时,会产生大量的水质 Agent,此时将增加模型的计算时间,所以应根据计算机性能合理调整 Agent 的大小。

3 结语

针对突发水污染事件中污染物扩散漂移对决策

者进行正确决策的重要性,污染物在流域中扩散漂移的复杂性和不确定性,以及污染物扩散漂移数值模型的计算难度,本文基于 Agent 构建水污染扩散模型。将河流根据空间信息划分为多个三角形网格,以每个三角形网格为一个水质 Agent,然后分析每个水质 Agent 与其周围 Agent 之间污染物的扩散,提取水质 Agent 的属性,利用 Agent 自身对外界环境的“感知”能力,对自身行为进行决策,做出一系列扩散、推动、平移行为,模拟污染物扩散、漂移现象。最后将其应用于松花江水污染模拟事件中,结果显示本文所建模型具有良好的模拟和应用效果,较传统模型有以下创新之处:①用水污染微观世界的行为描述了宏观自然界的污染物扩散现象;②通过携带污染物的水质 Agent 的属性及其相互之间的关系表现出了水质 Agent 的“主动”行为;③通过操作者和水质 Agent 之间的交互使得模型的应用具有高度的灵活性,同时模型仿真过程动态性较强;④利用计算机仿真 Agent 技术对水污染现象进行了研究,在拓展计算机仿真 Agent 技术应用方向的同时,还为水污染扩散现象提供了一条有效的预测和模拟途径。虽然本文模型有以上创新之处,但还存在以下问题有待进一步研究和突破:①本模型只进行了数值计算,没有进行相应的空间模拟,因此应在进一步的研究工作中,结合区间位置信息,以增强基于本模型的直观性,提高决策者的决策能力;②降低水质 Agent 的大小,会提高模型的准确性,但同时增加了整个模型的计算工作量,再加上对空间信息的处理,会使得模型难以快速模拟出预测效果,因此,应提高模型的计算力,增强其整体模拟效果,以辅助管理者快速、正确地做出决策。

参考文献:

- [1] 吴迪军,黄全义,孙海燕,等. 突发性水污染扩散模型及其在 GIS 平台中的可视化[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(2): 131-134.
Wu Dijun, Huang Quanyi, Sun Haiyan, et al. A water pollution diffusion model on emergency response and its visualization in a GIS platform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(2):131-134.
- [2] 吴迪军,陈建国,黄全义,等. 水污染扩散的二维数值模拟及其可视化[J]. 武汉大学学报:工学版,2009,42(3):296-300.
Wu Dijun, Chen Jianguo, Huang Quanyi, et al. Two-dimension numerical simulation of water pollution diffusion and its visualization[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009,42(3): 296-300.

- [3] 丁贤荣,徐健,姚琪,等. GIS 与数模集成的水污染突发事件时空模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):203-206.
Ding Xianrong, Xu Jian, Yao Qi, et al. GIS and numerical model integrated for space-time simulation of sudden water pollution[J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2003, 31(2):203-206.
- [4] 李志勤. 水库水动力学特性及污染物运动研究与应用[D]. 成都:四川大学,2005.
Li Zhiqin. Study on hydrodynamic characteristics and transportation of pollutants in reservoir[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [5] 张波. 基于 GIS 的水污染事故水质模拟系统动力学模型研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010.
- [6] Ioannis K. A model for the prediction of oil slick movement and spreading using cellular automata[J]. Environment International, 1997, 23(6):839-850.
- [7] 宋鸿均. 三维细胞自动机之研究——以海洋油污染扩散为例[D]. 台湾:国立中山大学,2005.
Song Hongjun. A study of three-dimension cellular automata oil spill transport as an example[D]. Taiwan: National Sun Yat-Sen University, 2005.
- [8] 王璐,谢能刚,李锐,等. 基于元胞自动机的水体污染带扩散漂移仿真[J]. 水利学报,2009,40(4):481-485.
Wang Lu, Xie Nenggang, Li Rui, et al. Simulation of drift-diffusion of water pollution zone based on cellular automata[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(4):481-485.
- [9] 李燕. 基于 CA 的水体瞬时点源污染物扩散漂移模拟分析研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
Li Yan. The study of simulation analysis on instantaneous point-source water pollutants drift-diffusion based on CA[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [10] 郭莲英. 基于 Agent 的城市河流水环境智能决策支持系统关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.
Guo Lianying. The key technique study of urweidss based on Agent[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [11] 吴国玺,张泊平,胡子义. 基于 Immune Agent 的城市水污染控制决策系统[J]. 计算机工程,2009,35(10):179-181.
Wu Guoxi, Zhang Boping, Hu Ziyi. Decision system for urban water pollution control based on Immune Agent[J]. Computer Engineering, 2009, 35(10):179-181.
- [12] 方美琪,张树人. 复杂系统建模与仿真[M]. 第二版. 北京:中国人民大学出版社,2011.
- [13] 潘明阳,严飞,谢海燕. 基于智能体与元胞自动机的智能交通仿真[J]. 交通运输工程学报,2006,6(2):70-74.
Pan Mingyang, Yan Fei, Xie Haiyan. Intelligent traffic simulation based on agent and cellular automata[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2):70-74.
- [14] 沈洋,罗正军. 灾害气候下交通枢纽滞留旅客转移模型仿真[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(1):35-40.
Shen Yang, Luo Zhengjun. Model simulation of stranded passengers transfer among transport hubs in disastrous climate[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(1):35-40.
- [15] 佚名. 松花江航道地理位置及地势特征[EB/OL]. <http://www.hljhd.cn/hdwh/shjhd.htm>, 2012-03-10.
- [16] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

(责任编辑 王卫勋)