

基于SD-GIS的突发水污染事故水质时空模拟

张波¹ 王桥² 孙强¹ 李顺¹

(1 国家环境保护部信息中心,北京市朝阳区育慧南路1号,100029)

(2 南京师范大学地理科学学院,南京市文苑路1号,210046)

摘要:将一维河流水质系统动力学模型用于水质模拟,建立了系统动力学(SD)和GIS关联的概念框架,并基于组件式GIS和SD模型开发了水污染事故水质模拟实验系统。以2005年11月发生的松花江水污染事故为例,对特征污染物硝基苯浓度的时空变化进行了动态仿真模拟。结果显示,通过建立SD和GIS的关联,能够实现水污染事故中污染物的时空分布模拟,以及基于模型参数的模型调控与情景分析,为突发水污染事故应急方案的优选提供科学、可行的依据。

关键词:系统动力学;地理信息系统;水污染事故;时空模拟

中图分类号:P208

动态复杂系统由于空间元素间的相互作用以及系统结构和功能随时间的变化而变化,往往难以理解和模拟^[1]。传统的建模方法通常是分别考虑空间和时间的变化,而不是同时兼顾二者。为了更好地对动态复杂系统进行模拟,需要考虑到系统行为随时间的变化是由其空间状态的变化导致的,因此,对动态复杂系统的模拟需要同时兼顾时间和空间的变化。在水污染事故应急过程中,管理部门迫切需要了解污染带的迁移状况以及污染物浓度在时间、空间两个维度上的变化,以便采取有效的应急措施。因此,针对水污染事故的水质模拟问题建立具有时空模拟能力的水质模型,模拟污染物随时间、空间的浓度变化,帮助决策者在二维空间上有效地掌控事故的发展变化趋势,则显得非常重要^[3]。

1 SD与GIS的关联与集成

系统动力学(system dynamics,SD)通过分析系统内部各组成部分之间动态、复杂的相互关系和交互作用,建立系统仿真模型,描述与解释系统的外在行为,寻求解决问题的正确途径,特别适合于研究复杂系统的结构、功能与动态行为之间的

关系^[3]。水污染事故水质模拟问题的动态性、复杂性、非线性等特点正是SD的优势所在,能够将其用于解决水污染事故中的水质模拟、预测以及模型调控等问题^[2]。

1.1 SD和GIS的关联需求

SD模型在时间尺度上模拟系统的动态行为是有效的,但却很难描述和模拟系统的空间要素及其状态,模拟结果仅仅通过图表等简单的形式表现,可视化程度低^[6];GIS能够有效地管理、查询、表达、分析和处理静态的与地理空间分布有关的信息,但却难以描述和模拟具有时间概念的复杂的动态行为及其过程,不能展示空间对象的动态特征^[5]。考虑到SD在描述时间过程方面的优势及其具有的有限的空间模拟能力,以及GIS具有的空间建模的能力但对时态模拟的不足,将二者关联起来,能够丰富和扩展两种分析技术的现有功能,即GIS能够增强SD模拟数据的空间可视化能力,并揭示隐藏的空间关系;同时,SD模型可以扩展GIS的空间分析功能,实现系统行为的动态模拟及趋势预测。在以空间分析为特色的GIS技术环境下融入时间动态模拟的SD模型,能够进行复杂系统的动态模拟和预测分析,使GIS和SD的现有功能得到扩展和延伸^[5,6]。

收稿日期:2009-01-17。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40701140)。

1.2 SD 和 GIS 关联的概念框架

SD 和 GIS 的关联包括数据关联和语义关联两方面: 数据关联。数据和信息在 SD 和 GIS 之间的双向流通和交换基于动态数据交换,通过 Excel 实现(图 1)。首先由 GIS 通过 Excel 向 SD 模型提供空间信息,SD 模型通过动态模拟在时间上确定空间特征的变化;然后通过 Excel 将其传递给 GIS,建立 SD 和 GIS 的数据关联,就能够在时间和空间两个方面对数据进行分析 and 处理^[6]。

语义关联。将同一个数据、变量在 SD 和 GIS 中的不同表现形式进行关联和对照,通过在 GIS 中进行计算域的空间离散以及在 SD 中用数组的形式表示状态变量来实现。如果空间动态模拟对象是线状地物(如单线河流),需要将研究对象分段(将河流均匀划分为数段),SD 中的状态变量以一维数组的形式表示,一维数组的每个元素对应着每个小段的状态变量值。如果模拟对象是面状地物(如面状湖泊),需要将研究对象进行网格划分,SD 中的状态变量以二维数组的形式表示,二维数组的元素分别对应每个网格的状态变量值。通过建立 SD 和 GIS 的关联,运行 SD 模型,计算每段(或网格)上的 SD 状态变量值,然后经过动态数据交换,将每段(或网格)的状态变量值在 GIS 中进行显示、分析和计算^[2]。

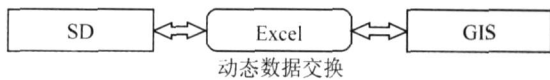


图 1 SD 与 GIS 的数据关联

Fig.1 Data Integration of SD and GIS

1.3 组件式 GIS 与 SD 模型的集成实现

组件式 GIS 与 SD 模型的集成是 SD 与 GIS 关联的概念框架下的技术实现方法之一。组件式 GIS 与 SD 的嵌入式软件开发包不依赖于特定的开发语言,能够在一个通用的开发环境(如 Visual Studio 2005)中实现 GIS 功能,同时集成了 SD 模型的组件对象以及其他辅助控件。在通用开发环境下,GIS 与 SD 无需经过 Excel 进行数据传递,直接通过程序语言将 SD 模型的计算结果动态更新 GIS 中地理对象的相关属性,并基于更新后的属性值,在 GIS 中进行实时显示和分析。

集成开发环境负责调用组件 GIS 提供的控件以及 SD 模型计算的结果,并实现与数据库的交互;GIS 控件负责空间数据的管理和模型运算结果的空间可视化表达。利用 SD 软件提供的 SD K 开发包,通过模型 DLL 调用 SD 模型,接受系统提供的输入数据,进行模型计算,模拟结果以

表格、曲线或者通过 GIS 控件以专题地图的形式由集成开发环境调用显示^[7],如图 2 所示。

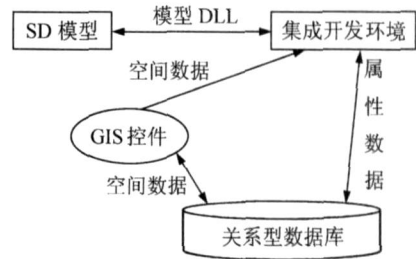


图 2 组件 GIS 与 SD 模型的集成框架

Fig.2 Integration Framework of ComGIS and SD Model

2 水污染事故水质模拟的案例研究

2.1 研究背景及概况

2005 年 11 月 13 日,位于吉林省境内松花江段的吉林石化公司双苯厂发生爆炸事故,造成了硝基苯、苯、苯胺等污染物流入松花江,产生的污染带长达 80 km,对水体造成了污染。污染带顺松花江干流向下迁移,在同江附近汇入黑龙江。由于事故发生在冬季,河流均已进入冰冻期,流量较小。研究区域选择松花江干流哈尔滨苏家屯断面至桦川断面之间的河段,其中选择 5 个监测数据较为齐全的断面(分别为苏家屯、巴彦港、依兰达连河、佳木斯和桦川断面,见图 3)作为研究断面。初始断面为苏家屯断面,断面之间的距离及监测数据的时段见表 1。

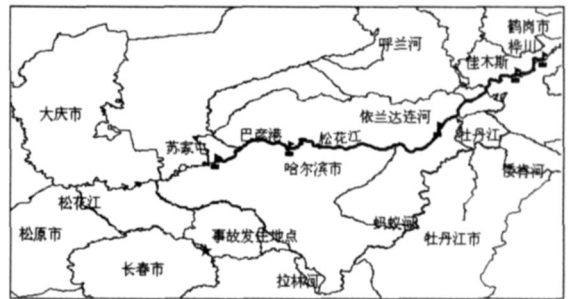


图 3 研究断面的分布

Fig.3 Distribution of Study Sections

表 1 研究断面的信息

Tab.1 Information of Research Section

编号	断面名称	距初始断面的 距离/km	监测数据的时段 /月-日-时刻
1	苏家屯	0	11-23-21:00 ~ 11-27-8:00
2	巴彦港	120	11-27-6:00 ~ 12-2-8:00
3	依兰达连河	330	12-2-20:00 ~ 12-9-20:00
4	佳木斯	440	12-7-20:00 ~ 12-12-18:00
5	桦川	480	12-9-12:00 ~ 12-14-6:00

2.2 水质时空模拟实验系统开发

本研究基于组件 GIS 技术、SD 的嵌入式软

件开发包和 API 应用程序接口技术,开发了水污染事故水质时空模拟的实验系统,实现了组件式 GIS 与 SD 模型的集成。实验系统采用 Microsoft Visual Studio 2005 作为系统集成的开发环境,SD 软件采用 STELLA9.0 及其提供的 SDK 开发包 isee.NET Framework, GIS 组件采用国产 SuperMap Object 5 在 Windows 系统环境下开发。

图 4 为实验系统的主界面。该界面主要由地图显示主窗口、水质模拟界面、工作空间管理器、图例管理器以及菜单和工具栏等组成。地图显示主窗口作为地图显示区,显示研究区域及断面的空间分布;水质模拟界面主要用于模型参数调整、SD 模型的运行以及模拟结果的图表显示,它主要由水质模型的参数选择区、模拟计算次数显示区、模型计算结果的表格显示区、按钮区组成。在水质模型的参数选择区,四个参数 u 、 k 、 E 、 dx 都可以通过下拉列表框方便地进行参数选择;模拟计算次数显示区主要显示模型计算运行的次数和每次模拟计算时间的步长数;模型计算结果的表格显示区通过一个 Grid 控件显示不同断面 ($C[1]$ 、 $C[2]$ 、 $C[3]$ 等) 的模型计算结果,即硝基苯浓度值随时间的变化;按钮区由两个按钮组成,可以选择单步运行和直接运行两种方式。

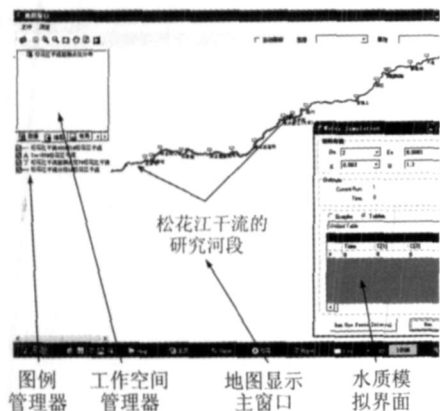


图 4 实验系统的主界面

Fig. 4 Main Interface of Experimental System

2.3 模型应用

1) 污染物的时空分布预测

通过 SD 模型模拟预测污染物浓度随时间的变化,同时在 GIS 中显示浓度变化的空间分布情况,能够实现污染物的时空分布预测。如决策者希望知道污染带迁移 20 h 后所处的位置及其浓度分布,在水质模拟界面中选择“单步运行”开始模拟,在模型运行到第 20 步(模拟的时间步长为 1 h)时,暂停模型,即得到污染带迁移 20 h 后的空间分布专题图。

2) 特定断面污染物浓度随时间变化的预测

水污染事故应急过程中,需要预测某些重要断面的污染物浓度随时间的变化。如大来断面距离初始断面约 385 km,由于线状河流被离散化为数段,通过选择 SD 模型状态变量中表示该段河流的元素(如果离散化后的每段河流长度为 0.5 km,则 $C[771]$ 表示该断面的污染物浓度),能够实现该断面污染物的浓度预测(图 5)。

3) 污染物浓度变化趋势分析

水污染事故中,除了需要对某些断面的浓度进行预测外,量化地确定污染物迁移转化的趋势同样具有重要意义。在某些实时监测数据缺乏的情况下,此时的 SD 模型可能无法对污染物浓度进行准确的定量模拟,但模型依然可以模拟污染物迁移转化的整体行为和变化趋势。图 6 显示了流速 u 减小 50% 时,某断面污染物浓度随时间的变化曲线(曲线 1 和 2 分别为 u 调整前后的模拟曲线)。从图 6 可以看出,随着流速的减小,污染物高峰通过该断面的时间滞后大约 200 h,并且峰值浓度下降大约 50%。

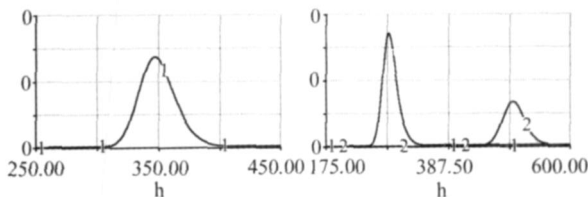


图 5 大来断面的污染物浓度随时间的变化

Fig. 5 Pollutant Concentration Changes with Time at Dalai Section

图 6 参数 u 调整前后的污染物浓度趋势变化

Fig. 6 Change Tendency of Pollutant Concentration of Parameter u

4) 模型调控与情景分析

SD 的特点决定使用者可以通过对模型的调控考察河流系统对各因素或参数的灵敏度和系统的稳定性,并且能够根据各种需要和可能作出多方案的模拟和比较,以获得不同参数或策略因素输入时系统动态变化的行为和趋势。本文基于两种不同的情景对模拟结果进行比较^[2]。

情景 1 将依兰达连河至桦川断面之间的 u 提高 10%,即由 1.25 km/h 提高到 1.375 km/h,同时将 k 减少 50%,即由 0.003 h^{-1} 减少到 0.0015 h^{-1} 。由图 7(a) 可见,桦川断面硝基苯峰值出现的时间由第 427 h 减少到第 421 h,即污染物的峰值提前 6 h 到达桦川断面,峰值浓度增加了大约 12%。在实际情况下, u 的增大可以考虑通过增加水库放水量来实现;如果气温降低,所引发的硝基苯挥发、化学反应等减弱,将会导致 k 的降低。

情景 2 将依兰达连河至桦川断面之间的 u 减少 10%, 即由 1.25 km/h 减少到 1.125 km/h, 同时将 k 提高 50%, 即由 0.003 h^{-1} 提高到 0.0045 h^{-1} 。由图 7(b) 可见, 桦川断面硝基苯峰值出现的时间由第 427 h 增加到第 433 h, 即污染物的峰值拖后 6 h 到达桦川断面, 峰值浓度降低了大约 15%。在实际情况下, u 的降低可以考虑通过水库蓄水减少水量来实现; 而如果气温提高, 所引发的硝基苯挥发、化学反应等的加强将会导致 k 的提高。

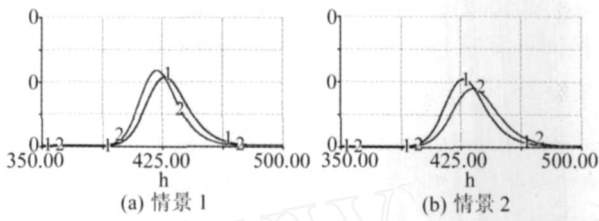


图 7 不同情景模拟的结果

Fig. 7 Simulated Results of Different Scenarios

3 结 语

将 SD 应用于水污染事故的水质模拟, 构建一维水质模拟的 SD 模型, 以松花江水污染事故的实际案例证明了 SD 用于构建水质模型的可行性; 并通过建立 GIS 与 SD 的数据关联和语义关联, 能够展现水污染事故中污染物在时间及空间上的动态变化趋势; 通过组件式 GIS 与 SD 的嵌

入式软件开发包实现 SD 和 GIS 的集成, 能够模拟复杂系统的基于时间和空间的动态变化过程, 为水污染事故应急方案的优选提供科学、可行的依据。

参 考 文 献

- [1] Ahmad S, Simonovic S P. Spatial System Dynamics: New Approach for Simulation of Water Resources Systems [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18(4): 331-340
- [2] 张波. 基于 GIS 的水污染事故水质模拟系统动力学模型研究与应用[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007
- [3] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [4] 裴相斌, 赵冬至. 基于 GIS-SD 的大连湾水污染时空模拟与调控策略研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 118-124
- [5] 余洁. GIS 支持下区域社会经济发展与环境响应动态模拟 SD 的方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002
- [6] Ahmad S, Simonovic S P. Modeling Dynamic Processes in Space and Time—A Spatial System Dynamics Approach[C]. World Water and Environmental Resources Congress, ASCE, Reston, 2001
- [7] 郑泽梅, 夏斌, 张俊岭. GIS 与水质模型集成研究与实践[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(增刊): 10-11

第一作者简介: 张波, 高级工程师。现从事环境 GIS 的研究。
E-mail: zhangbo @zhhb. gov. cn

Spatio-temporal Simulation of Water Quality Based on SD-GIS Accidental Water Pollution

ZHANG Bo¹ WANG Qiao² SUN Qiang¹ LI Shun¹

(1 Information Center, Ministry of Environmental Protection, 1 South Yuhui Road, Chaoyang District, Beijing 100029, China)

(2 School of Geographical Science, Nanjing Normal University, 1 Wenyuan Road, Nanjing 210046, China)

Abstract: One-dimensional river quality system dynamics model is applied to the water quality simulation and conceptual GIS-SD frame is constructed. Based on ComGIS and system dynamics model, the experimental system of water quality simulation in water pollution accident was developed. The Songhua River water pollution accident was taken as an example. The spatio-temporal change of nitrobenzene concentration is dynamically simulated. The results show that the simulation of spatio-temporal distribution of pollutant in water pollution accident, model regulation, scenario analysis can be realized.

Key words: system dynamics; GIS; water pollution accident; spatio-temporal simulation

About the first author: ZHANG Bo, senior engineer, majors in environmental GIS.

E-mail: zhangbo @zhhb. gov. cn