

数字地球下的复杂水污染运移仿真框架^①

李建勋¹, 高 阳¹, 李维乾², 严栋飞¹

¹(西安理工大学 经济与管理学院, 西安 710048)

²(西安工程大学 计算机科学学院, 西安 710048)

摘要: 针对水污染运移模拟仿真表现能力不足的问题, 运用复杂性理论和数字地球技术, 实施水污染事件数据资源的汇集, 开展干流河道的多尺度拆分, 建立水质复杂 Agent 及其特征属性、行为模式, 并引入高性能计算机技术提高运移演算效率, 基于数字地球形成一个融合水质模型且具有丰富展现力的水污染运移仿真框架. 实验表明: 该框架增强了污染物运移过程的空间表征能力, 为污染物运移仿真模拟和情景分析提供了一体化平台.

关键词: 数字地球; 复杂性理论; 水污染运移; 模拟仿真

Water Pollution Transport Complex Framework Based on the Digital Earth

LI Jian-Xun¹, GAO Yang¹, LI WEI-Qian², YAN Dong-Fei¹

¹(College of Economic and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

²(Computer Science School, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: According to the problem of insufficient performance ability for water pollution transport simulation, by adopting to the digital earth technology and complexity theory, the data resources of water pollution event was integrated. The trunk stream of watercourse was decomposed into multi-scale resolution. A water quality complex agent was established with characteristics and behavior patterns. And the efficiency of the migration of calculus was improved by introducing of high-performance computer technology. Then a water pollution transport simulation framework was constructed based-on the digital earth technology which merging together the water quality model and having high expressive force. Results show that this framework has enhanced the ability of spatial representation of pollutant transport process, and provided an integrated platform for pollutant transport simulation and scenario analysis.

Key words: digital earth; the complexity theory; water pollution transport; simulation

水污染作为我国四大水问题之一, 严重制约着国民经济的发展和社会的进步, 2005 年全国共发生突发环境事件 1406 起, 其中水污染事件 693 起, 占到总数的 49.3%, 而仅在 2006 年上半年, 国家环保总局接报的突发环境事件 86 起, 其中水污染事件 52 起, 占总数的 60.5%, 且在 2007~2013 年大致呈递增趋势. 频发的水污染事件给水资源开发利用以及人们的生产生活带来了严重影响^[1],

为了真实反映水污染过程, 对污染事件的处置和分析提供水质模型、信息资源和可视化工具支持, 学

者们开展了大量研究. 早在 1925 年, Streeter 和 Phelps 就推导出了 S-P 水质模型^[2], 其后随机水质模型^[3]以及非线性水质模型等^[4]发展十分迅速, 金明^[5]、Hercules^[6]、李如忠^[7]和曾光明^[8]等还分别提出了随机微分方法、有限单元法、模糊逻辑方法、灰色理论方法, 也具有一定的代表性. 为了更清晰的展示污染物在水体中运移过程, 欧美国家研制了一系列可用于水污染运移仿真的系统软件, 其中以丹麦水资源及水环境研究所的 MIKE 系列软件^[9], 荷兰 Delft 水力研究所开发的 SOBEK 软件以及美国国家环保局环境研究所

^① 基金项目:“十二五”国家水体污染控制与治理重大专项课题(2012ZX07201-006);国家自然科学基金(51109177)

收稿时间:2014-03-18;收到修改稿时间:2014-04-15

的 WASP 软件^[10]、QUAL 软件^[11]为代表. 基于此类平台, 王庆改^[12]利用 MIKE 软件建立了汉江中下游突发性水污染事件的动态模拟与相关参数的定量预报; 刘震^[13]则将 SOBEK 软件应用到黄河突发性水污染事件的支流污染团入黄时间、过程和总量的推算上. 与此同时, 学者们更加重视了水污染过程的模拟仿真: 张行南^[14]等人基于 GIS 平台通过对一维河流的概化和二维水域的格网化处理, 采用浓度场形式进行了可视化表达; 徐丙立^[15]还基于集成水污染扩散模型和可视化技术初步开展了污染时空扩散过程的模拟仿真; 庄巍^[16]则实现了河势贴体河道二维正交格网的自动生成, 解决了二维水体的空间格网离散问题; 王璐^[17]则建立了基于元胞自动机原理的水体污染带扩散和漂移的时空模型; 另外, 翟俊^[18]等还针对三峡库区突发性水污染事故, 采用 ArcGIS Engine 组件库和 DLL 动态连接库构建了水质模型库, 实现了多种水质模型的无缝衔接.

近年来, 随着计算机技术的发展和水质污染模拟仿真研究的深入, 水污染模拟仿真模型和方法都取得了长足的进步和有价值的成果, 掌握了水污染过程的基本规律, 丰富了水污染事件和水质模拟研究的思路, 特别是利用 GIS 和 Agent 技术实现水污染过程的可视化, 提高了水质模型的实用性, 也为基于数字地球的水污染事件模拟仿真提供了部分参考. 然而随着水污染事件表现及水质模拟研究的深入, 水质模型理想化程度过高难以贴合实际过程、高精度仿真算法计算力不足、缺乏融合地形地貌的丰富表现平台等问题, 业已成为阻碍水污染事件分析处置工作的重要原因. 为此, 本文从系统的体系结构入手, 按照顶层设计的思想, 基于高性能计算、Agent、复杂性理论和数字地球技术, 面向水污染事件中干流河道的污染物运移建立一个仿真模拟框架, 并采用 SOA 进行实现, 为水污染运移仿真提供了一个可融合水质模型且具有丰富展现力的系统平台, 从而有效解决现有模型方法的可视化效果的瓶颈问题, 可为各流域、行政机构的水污染事件响应和处置提供决策辅助和信息支撑, 进而减少水污染过程带来的经济损失, 降低污染物对水资源的影响.

1 水资源运移仿真框架体系结构

为了解决水污染运移仿真过程中的表现力、计算

力、服务力等问题, 本文将复杂性理论、数字地球、高性能计算以及 Agent 多智能体技术引入到水污染运移仿真框架体系中, 采用复杂性理论探讨在局部规则下如何产生宏观、有序的组织与行为^[19], 通过微观行为的涌现揭示污染物运移的构成原因和内在规律; 利用数字地球技术所容纳的 GPS、遥感影像、数字高程等数据资源, 为水污染事件集成化展示提供系统化解决方案; 通过高性能计算技术无缝的集成各种科学计算资源, 并把它们转化成一种可靠的、标准的、经济的计算能力, 为水质模型的演化计算提供强大的计算力资源; 基于 Agent 多智能体技术则通过具有自主性、反应性、适应性等特征的行为方式自律地对水污染过程做出表达, 完善水质模型来表征污染物的运移行为. 在这些关键技术的支撑下, 按照“数据深度集成、模型实用可行、处理高效可靠、展现丰富直观”的基本原则, 本文建立的水污染运移仿真框架如图 1 所示, 其划分为数据资源汇集、水质复杂 Agent 建模、运移仿真效率提升和可视化仿真平台四大部分.

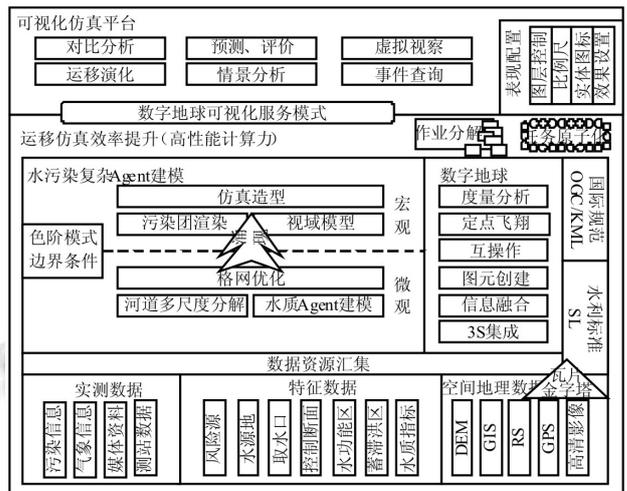


图 1 水污染运移仿真框架

1.1 数据资源汇集

考虑到数据信息资源对描述水污染的运移过程的重要性, 在水污染运移仿真框架中, 采用复杂性理论开展数据资源分析, 建立包括数据集中和数据映射两个数据汇集能力的系统集成中间件, 有效集成实测数据、特征数据、空间地理数据, 解决数据的分布式存储和数据的异构问题. 数据集中利用触发器将重点核心数据一致性的复制到数据中心, 而对于数据量大的低访问率数据资源, 则采用数据映射方式, 在数据中心建立对元数据的描述, 存储数据的访问链接, 仅当

有访问需求时才通过链接从原始的物理位置调取数据资源。在数据集成的同时,基于多元融合、过程信息描述、复杂信息关联技术,对信息内容组织格式和表现形式进行定义、标记、描述、识别、验证和解释,明确其上的可行操作域,建立公共词汇集,对信息内容及其集合进行过滤、析取、链接、合并、集成和重组,使得信息内容规则化、有序化、集成化,符合数据的组织、管理和高效获取的需求,形成灵活开放的信息结构,以便于实现数据资源的指向、确认、检索和传递。通过数据资源汇集,可将污染信息、气象信息、媒体资料、测站数据等实测信息有效汇集到数据中心,并能够提供对风险源、水源地、取水口、控制断面、水功能区、蓄滞洪区、水质指标等特征数据的检索与调用,亦可对 3S 数据资源进行融合,通过瓦片金字塔方式对 GIS、RS、GPS、DEM 数据资源以及高清晰影像资源进行存储和管理,为数字地球平台上的水污染运移仿真提供基础信息资源。

1.2 水质复杂 Agent 建模

水质复杂 Agent 建模以微元化剖分思想为主导,开展污染物的复杂性分析,集结自净系数、沉降能力、挥发能力等相关特征属性,在给定尺度阈值下将整个干流河道分解为三角格网,三角格网在细化后支持不同分辨率下的仿真应用(以便于和数字地球相对接),并基于 DEM 数据从面元向三维立体延伸后建立水质体积微元,每个水质体积微元通过构建水质复杂 Agent 模型(WQCA: Water Quality Complex Agent)表示。WQCA 在具有标识、浓度、流速和深度属性的同时还拥有面元和行为特征,分别用于描述 WQCA 渲染平面和污染物行为。WQCA 行为集合包括吸附行为、自净行为、沉降行为、挥发行为、平推行为、扩散行为、演化行为,分别对污染物浓度的变换产生一定影响。吸附行为在河道岸边所引起的污染物减少量为 $\frac{Lh}{\cos \theta} \int_0^L cf(q) dq$, 自净作用产生的污染物减少量为 $\sum_{t \in T} R * sh$, 沉降行为带来的污染物沉降量约为 $\Delta t u S \int_0^{A_{tu}} c(h) dh$, 挥发行为引起的污染物减少量则为 $S \times F_z$, 平推行为和扩散行为所引起的污染物浓度变化分别为 $-\Delta t Sh v \partial c / \partial \vec{v}$ 和 $\Delta t Sh \sum_j E_j (\partial^2 c / \partial j^2)$ 。其中 Δt 为时间间隔, L 、 θ 为三角格网与河道岸相接部分长度及夹角, h 、 c 、

v 为 WQCA 的高度、浓度和流速, \vec{v} 为 v 的矢量方向, S_v 为 \vec{v} 方向的横截面积, r 为自净能力系数, R 表示区域隔断图, F_z 为挥发通量, j 可取 x 、 y 、 z 三个方向量。演化行为则在经过 Δt 时间 WQCA 的浓度、流速以及边界条件等要素发生了变化后,对河道剖分和体积微元重新执行划分操作,将相同属性值且相邻的 WQCA 合并且根据其边界再次剖分,而对达到水质标准的 WQCA 进行剔除,以避免不必要的渲染。藉此,可将水质体积微元在物理上、化学上和生物上的变化加入到 WQCA 的行为中,从而通过多尺度下微观行为的动态自主运动以及大量离散污染物微元的动态演化,在宏观视域下涌现出污染物的运移态势,在宏观模型下呈现出模拟仿真效果,进一步获得更加逼近水污染事件实际的演化场景。

1.3 运移仿真效率提升

为完成模拟仿真的需要,整个干流河段将被划分成格网结构模型,这种微分后的 WQCA 行为运算和仿真模拟效果的渲染需要较大的耗时,如果在 Δt 时段内的计算演化占时过多,将导致所形成的运移过程图像的帧幅表现不流畅。为此参考文献[20],在水污染运移仿真框架中引入高性能计算技术,将粗粒度的计算操作划分为更小的作业原子,建立一个个独立的面向污染物分析、处理逻辑的算法单元,采作业拆分和原子化处理方法来增强系统吞吐效率,结合作业的负载和资源情况,动态安排模拟仿真算法运行策略,实现面向异构平台的自治优化。在实现上,首先建立原子 $A=(IP, OP, F_{Action}, P)$, 入参 IP 和出参 OP 均通过原子参数类型 K 来构建, K 由集合 $\{AP_i\}$ 给定; $AP_i=(ID_{AP}^i, F_{store}^i, F_{access}^i, F_{Serialize}^i, F_{Deserialize}^i)$ 是参数基本类型,它规范原子参数的类型、数量以及存储、访问、序列化方法; F_{Action} 为入参数到出参的消息映射; $P=\{ID_A, N_{ExpireTime}, N_{MaxErrorNum}, N_{TimeCost}\}$ 为原子属性值集。然后把污染物运移行为进行原子化拆分,基于 DAG(Directed Acyclic Graph)建立由原子搭建作业图,根据其模型的不同分别采用不同的优化算法在计算力调度中心进行注册。其后,对参与计算力资源共享的节点分别部署节点客户端软件,在节点客户端中提供节点计算力、存储量、负载大小的提取,支持任务提交、任务执行、负载均衡。最后按照作业流的拓扑结构计算原子前提集 P_A 和并行集 Q_A , 优先调度关键路径上的原子执行,将执行结果 $F_{Serialize}$ 后返回到调度中心,

通过调度中心对动态作业关键路径的分析和控制来调度计算资源,继续执行该作业的轮询调度工作,直到所有原子均已被执行成功则作业执行结束,其结果将通过 $F_{Deserialize}$ 后向水污染仿真作业的提交者进行反馈.藉此,充分利用计算力资源为水污染运移仿真服务,提高水利业务应用的灵活性和高效性.

1.4 可视化仿真平台

为了提高水污染运移仿真模拟效果的直观性,在遵循 OGC/KML、水利标准的基础上,借助中间件技术,集成来自不同层面的事件信息、污染物信息资源,形成可用于水污染事件分析、标示的仿真数据综合库,其包括水文站点、调控措施、控制断面、排污口、水源地、污染物分类、蓄滞洪区、水功能区等信息.同时以数字地球为基础,构造可视化图元及 RDF 描述用于标示水源地、污染源、控制断面等关键信息,依靠数据关联来融合水污染事件相关信息资源,进而采用组件化开发方法汇集河道、行政区划、地标、公路、铁路、水文测站等资源.在地形地貌要素的附加问题上,通过瓦片金字塔 tile-pyramid 接口建立空间数据服务,搭建 GIS/WebGIS 环境为事件提供水利空间要素信息,紧密联系水污染事件专题属性数据和空间直观位置,从而依据 RS 影像、GPS 和数字高程实现空间定位并构造地形地貌环境,从而基于 attach 方法将水质复杂 Agent 所涌现的色阶效果贴附到数字地球表面,增强污染物运移过程的空间表征能力,为水污染事件表现与应用提供一个以数字地球为基础的模拟仿真平台,在数字地球的互操作 interoperate、度量分析 measurement、模拟仿真 simulation、可视化表现 visualization 接口的支持下,形成一个集成本、图像、视频、空间数据为一体的水污染事件多媒体展示环境,封装对媒体资源的展示,提供对比分析、预测评价、虚拟视察、运移演化、情景模拟、事件查询、实体标示等接口服务,解决以往水污染事件展示过程中信息集成不足、展现力不够等问题.另外,在该平台内部可依靠高性能计算力开展数据处理工作,将进一步缓解模拟仿真过程中在耗时上的压力,提高多情景模拟、多方案对比、决策分析的速度,并为其它动态污染事件信息的介入预留接口.

2 仿真系统开发与应用

为了验证本文方法的实用性,我们在 SOA 体系结

构下,建立了一个水污染运移仿真模拟系统,如图 2 所示,采用中间件技术实现了水污染相关数据的集成,搭建了基于高性能计算 Grid 的计算力资源调度环境,形成了以数字地球为基础的污染物运移展示平台,在松花江流域对其干流河道进行了剖分,建立了格网结构和对应的水质复杂 Agent,并进行 Agent 吸附行为、自净行为、沉降行为、挥发行为、平推行为、扩散行为、演化行为的建模,结合遗传算法形成了单个 WQCA 的浓度、流场求解方法,开展了计算力优化调度,为水污染事件的点位标示、污染事件信息展示、污染物运移仿真、情景方案分析等提供一个空间信息一体化环境.



图2 水污染运移框架系统实现效果图

情景分析以突发石油污染事件为研究对象,污染源经纬度为124.3066°、45.5418°,污染带长约11.2公里,污染物流经吉林、黑龙江两省,行程450公里.在水污染运移仿真中,河流基础浓度为0mg/L,每隔2小时进行一次推演,帧幅播放将实际的12小时压缩为1秒进行呈现.仿真时,将整个松花江干流河道剖分为42.17万个三角格网,在对边界格网处理后总计获得水质体积微元43.68万个.为了提高演算效率,在实验中构建了一个3台IBM System x3400塔式双核服务器为中心的高性能计算环境,并接入9个节点PC,网格节点之间采用100M网络互联,在计算节点无负载情况下采用遗传算法组件进行行为演算,将计算结果在整个河道上进行渲染后,融合地形地貌数据,贴附到数字地球上展示,如图3所示(污染物途径水手营子、连三坑、刘圆子、腰窝子的连续4个帧幅),可见色阶表现的平滑度较高,运移过程渐变符合污染物变化机理,且能够通过不同时间点的动画及地貌丰富直观的加以表现,实现了整个干流河道中水污染运移过程仿真模拟.经

过我们在松花江流域、渭河流域等进行实验的结果表明,本文所建立的水污染运移仿真框架能够有效的汇集多方数据资源,具有更为逼真的仿真效果和有效的演算能力.相比传统方法,其实现了干流河道的全过程污染物运移模拟,支持地形地貌与污染带的融合,且能够集成复杂系统建模成果和数字地球服务接口,具有良好的交互式操作环境,可有效的辅助行政管理决策分析工作.



图3 情景模拟过程中污染物运移的四个帧幅

3 总结

本文基于复杂性理论,综合采用数字地球、高性能计算、Agent 多智能体等技术,汇集多方数据资源,建立了干流河道的多尺度模型及其三角面元所对应的水质复杂 Agent,给出了 WQCA 的属性特征与行为方法,并基于高性能计算技术提高了水污染运移仿真演算效率,通过数字地球平台上仿真模拟环境的建立,增强了污染物运移过程的空间表征能力,解决了以往水污染事件展示过程中信息集成不足、展现力不够等问题.下一步的工作任务是:①优化计算力调度方法,增强对污染物渲染的并行化,提升仿真模拟效率;②在其它流域开展情景分析,进一步提高系统的实用性;③将水污染运移仿真与突发水污染事件的处置相结合,提供决策支持服务.

参考文献

- 1 诸晓华.六合区水环境调度预案与突发性水污染事件管理预案研究[硕士学位论文].扬州:扬州大学,2008.
- 2 汪家权,陈众,武君.河流水质模型及其发展趋势.安徽师范大学学报,2004,27(3):242-247.
- 3 Loucks DP, Lynn WR. Probabilistic models for predicting stream quality. Water Resources Research, 1996, (3): 593-605.
- 4 Huang P, Chen XC. The mathematical modeling of water quality under uncertainty in a tideway. Proc. of International Symposium on Environmental Hydraulics. Hong Kong. 1991. 1-8.
- 5 金明.一维稳态河流水质的随机微分方程模型.水利学报,1991,(2):19-25.
- 6 Mpimpas H, Anagnostopoulos P, Ganoulis J. Modelling of water pollution in the Thermaikos Gulf with fuzzy parameters. Ecological Modelling, 2001, 142: 91-104.
- 7 李如忠,王超,汪家权.基于未确知信息的河流水质模拟预测研究.水科学进展,2004,15(1):36-40.
- 8 曾光明,黄国和.环境科学与工程中的不确定性理论与方法.长沙:湖南大学出版社,2002.
- 9 DHI Water and Environment. MIKE 21 User's guide and technical reference. DHI Water and Environment, 2004.
- 10 US EPA. WASP 4: a hydrodynamic and water quality model: model theory, user's manual and programmer's guide. US EPA/600/1039,1998: 3-87.
- 11 谢永明.环境水质模型概论.北京:中国科学技术出版社,1996.1-56.
- 12 王庆改,赵晓宏,吴文军,杨木水,等.汉江中下游突发性水污染事故污染物运移扩散模型.水科学进展,2008,19(4): 500-504.
- 13 刘震,孙熙,周毅.SOBEK 在突发性水污染事件中的应用.水资源保护,2008,24(2):61-64.
- 14 张行南,耿庆斋,逢勇.水质模型与地理信息系统的集成研究.水利学报,2004(1):90-94.
- 15 徐丙立,林琿,龚建华,臧永强.扬州市区京杭大运河水污染可视化模拟研究.系统仿真学报,2009,21(12):3653-3660.
- 16 庄巍,逢勇,吕俊.河流二维水质模型与地理信息系统的集成研究.水利学报,2007,(10):552-558.
- 17 王璐,谢能刚,李锐,宋崇智.基于元胞自动机的水体污染扩散漂移仿真.水利学报,2009,40(4):481-485.
- 18 翟俊,何强,肖海文,万杰,等.三峡流域一体化水污染应急管理系统开发及应用.土木建筑与环境工程,2010,32(2): 128-133.
- 19 吴枝喜.复杂网络及其上的进化博弈研究[博士学位论文].兰州:兰州大学,2007.
- 20 李建勋,解建仓,陈田庆,陈小龙.计算网格下的高性能 MODIS 蒸散发反演研究.西安交通大学学报,2010,44: 36-41.