

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.023

流域突发水污染云溯源体系构建与应用

彭虹¹,周文婷¹,张万顺²,夏函²,张潇²,王浩³

(1. 武汉大学水利水电学院,湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430079;
3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为快速实现流域突发水污染追溯,构建基于云边端协同架构的流域云溯源体系。将云端的全流域二维水动力水质预报结果与终端的水质监测数据进行实时过程对比,实现事故识别。边缘端在事故预警后进行事故区域多污染情景的水质快速模拟,形成基于源-质响应的情景数据库,通过对比分析监测信息和污染情景模拟序列的过程拟合度,确定污染源筛查范围。将该方法应用于长江重庆段突发水污染溯源研究,结果表明:在一定的污染情景下,排污企业 A、B 对下游监测断面 1 类污染过程的纳什效率系数分别为 0.91 和 0.87,对 2 类污染过程的纳什效率系数分别为 0.84 和 0.95,表明企业 A、B 均为可能的事故源,且造成 1 类污染过程的源头更可能是企业 A,造成 2 类污染过程的源头更可能是企业 B。

关键词:突发水污染;水污染溯源;云边端协同架构;水动力水质预报;源-质响应;情景数据库

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0176-06

Construction and application of cloud traceability system for sudden water pollution in River Basin//PENG Hong¹, ZHOU Wenting¹, ZHANG Wanshun², XIA Han², ZHANG Xiao², WANG Hao³ (1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to quickly realize the traceability of sudden water pollution in river basin, a cloud source identification system in river basin based on the cloud-edge-terminal collaboration architecture was constructed. By comparing the two-dimensional hydrodynamic water quality prediction results of the whole basin in the cloud with the water quality monitoring data of the terminal in real-time, sudden water pollution accidents could be identified. After the accident warning, rapid water quality simulation of multi pollution scenario in accident area was conducted at the edge end to form a scenario database based on source-quality response. By comparing and analyzing the process fitting degree of monitoring information and pollution scenario simulation sequence, the scope of pollution source screening was determined. The method was applied to the source identification of sudden water pollution in Chongqing section of the Yangtze River. The results show that under a certain pollution scenario, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of pollutant discharge enterprises A and B for class 1 pollution process of downstream monitoring section are 0.91 and 0.87 respectively, and for class 2 pollution process are 0.84 and 0.95 respectively. It indicates that enterprises A and B are possible accident sources, and the source of class 1 pollution process is more likely to be enterprise A, and the source of class 2 pollution process is more likely to be enterprise B.

Key words: sudden water pollution; water pollution source identification; cloud-edge-terminal collaboration architecture; hydrodynamic water quality prediction; source-quality response; scenario database

据统计,2006—2019 年国内突发水污染事件共计 1 100 余起^[1],平均每 3 天发生一起,水污染情势严峻年份突发事件超过 100 起。经济活动强度高的地区水污染事件发生概率较大^[2],频繁的突发水污

染事件造成了巨大的社会影响和经济损失,严重威胁着流域水环境与水生态系统安全。对于易观测的事故类型,如由工厂爆炸、船舶侧翻等引起的突发水污染,其事故点位明确;而对于发生在偏远地区的、

基金项目:国家自然科学基金(41877531)

作者简介:彭虹(1966—),女,教授,博士,主要从事流域水环境水生态评价与保护研究。E-mail: hongpeng@whu.edu.cn

不易观察的甚至有意隐瞒的突发水污染事件,包括管道泄漏、废水偷排、降雨冲刷地表等原因引起的事故,均具有发生地点不确切的特点,处置这类突发水污染事件的首要工作就是明确事故源位置及源的释放规律^[3]。

由于流域内水系纵横交错,水体动力学特征复杂多变,同类污染物在不同排放点进入水体后,随着水力条件的扩散迁移和水质转化,在水体某处会有“异源同效”现象,即不同位置、不同排放强度的污染源对其下游河道或湖库的同一水质监测断面造成的污染贡献相近,这种现象给突发水污染事件溯源带来很大的不确定性。采取多种方法快速锁定污染源一直是国内外水环境保护领域研究的热点,当前突发水污染溯源研究主要针对局部河段,且多集中于河流尺度的一维模拟,多采用确定性方法与不确定性方法^[4-5]。确定性方法从水污染迁移转化的机理入手,引入优化算法来追溯事故源头^[6],如基于相关系数优化推导一维河道单点源追溯的反演算法^[7],根据数据库反向推算进行污染物溯源案例研究^[8]等;不确定性方法主要采用概率统计与分布预测^[9-11],依赖随机变量的分布,但其物理意义并不明确,且计算量呈几何级数增长,如结合贝叶斯推理的马尔科夫链蒙特卡罗方法^[12-13]提高了污染源反问题的识别效果,微分进化蒙特卡罗方法也被用于二维的河流瞬时污染源追溯研究^[14]。此外,也有学者以一维水动力水质计算为基础,构建推求逆向污染源位置的耦合概率密度函数^[15],通过构建预案库提出基于粒子群和知识图谱分析的水污染溯源方法^[16],以及通过建立基于流域要素空间关系的系统模型,将溯源问题转化为空间搜索问题^[17]。

快速响应是保障突发水污染事件高效处置的关键,随着云计算在水利、环境等领域的快速应用,模型计算速度有望提高到百倍以上^[18],在流域陆面单元发生污染经降雨冲刷进入水体和在水体不明位置发生污染事件的溯源模拟也得以实现。本文基于流域环境模拟云平台架构^[19],提出以自然流域为单元的源-质响应研究方法,进行流域尺度下事故区域的多情景突发水污染快速模拟,打破现阶段事故源头追溯的唯一性限制,识别可能对监测断面造成相似污染过程的多个“异源”,划定事故源的筛查范围,以期应急部门提高突发污染处置效率提供科学指导。

1 流域突发水污染云溯源体系构建

针对研究范围大、时间模拟步长和空间模拟单元细化的流域尺度突发水污染系统溯源,应该建设

一种可容纳大体量信息、数据与模型协同高效的全新计算框架。本文基于流域突发水污染的云溯源体系,以自然流域为单元,同时考虑陆面与水体的污染迁移转化过程,分别进行陆面非点源模型与河道内水动力水质模型模拟,在水文水质信息联网监测的基础上,利用云端的实时计算模式和边缘端的高效响应能力,实现模型的分布式高效计算与数据的协调传输。

1.1 云边终协同溯源架构

引入终端实时监测、边缘节点分流和云端统筹计算的云边终协同计算技术,各司其职,从突发水污染追踪溯源的流域性和高效性出发,建设基于源-质响应的云溯源架构,如图1所示。

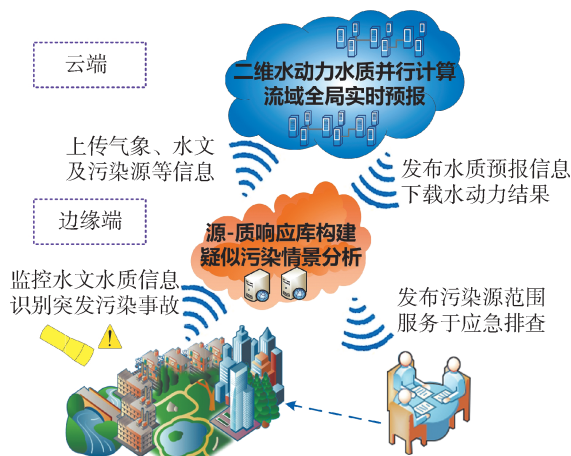


图1 云边终协同溯源架构

Fig.1 Cloud-edge-terminal collaboration architecture of source identification

a. 终端实时监测。自2012年国家水资源监控能力建设等重点项目启动以来,水利信息化建设等工作快速开展,大部分重要监测断面均实现了信息实时采集和自动传输,如水文、水质自动站的监测频率已分别达5次/min、4次/h,监测数据上报及时,数据质量维护较好,已基本形成水利信息化基础网络体系。为全面及时捕捉水环境质量信息,充分发挥水利信息化的优势,利用流域范围内的终端监控设备,包括但不限于在固定污染源、移动污染源、水质监测站、水文监测站和气象监测站设置的无线传感监测仪器,实时采集、传输监测点的降水、地形、水位、流量、流速、含沙量和污染物浓度等数据;在生态环境监测部门布设人工接口终端,定期统计污染源与监测站的编号、名称、位置坐标、监测要素、监测频次、影响范围、负责人和联系方式等信息;对于水中优先控制污染物等非连续的人工监测数据,以及突发污染事故时密集连续应急监测数据,也由人工接口终端负责汇总与上传。

b. 边缘节点分流。组建分布式边缘端服务接口,边缘节点按需部署在每个末级支流流域的水利、生态环境、国土资源等不同部门,按各部门业务需求构建计算中心,利用云端信息并结合终端数据,提供区域或部门的个性化服务。在突发预警方面,边缘节点实现其所在支流流域的终端水文、水质、污染源等数据集总与各项业务逻辑处理,负责驱动流域非点源模型进行陆面的产流产污计算,得出非点源模拟结果,同时整合由终端采集的点源信息,构建污染源数据库。对点源进行污染物的不同排放情景设置,形成污染排放情景模拟方案集,排放浓度以污染源正常排放值和重大事故排放值为边界等距设置,划定出正常排放与不同等级的事故排放情景,其中重大事故指短时间内污染源存储的所有潜在风险化学品均排出或水处理设施完全故障时的污染物排放浓度。

c. 云端统筹计算。云端通过搭建服务器集群或租赁云计算环境构建,在云端布置流域水动力水质模型的高性能算法。并行计算的负载均衡借助任务管理节点控制,实现流域全局的水体水动力水质实时模拟预报。基于部署的云边协同溯源架构,按照从信息上传到任务下达的两个步骤,实现突发水污染的溯源模拟。信息上传过程包括:终端根据实时监测的水质数据确定安全阈值,并进行突变分析,将分析结果和水文水质数据实时联网传输至边缘端,供边缘端通过质控中心复核;在边缘端分析实时水文条件、确定污染源常规排放信息,上传至云端。任务下达过程包括:将云端的水动力水质实时预报结果发布至边缘端,在边缘端对比云端报送的水质模拟序列与终端的水质监控数据,进行突发污染事故判定与预警;得到预警后,边缘端进行疑似污染源范围分析,传输至终端。以上终端、边缘端和云端之间的信息传递和任务协同,借由消息中间件以数据驱动模型的方式实现,通过聚合传输方式降低数据传输时间的额外开销。

1.2 流域溯源模型

流域水环境问题表象在水里,症结在岸上。立足于流域“水-陆”一体化视野,统筹兼顾上下游水网与左右岸陆面,同时精准刻画研究区域内河网水动力水质和陆面非点源污染过程,建立流域溯源模型是水污染溯源的必然趋势。通过统一陆面单元和水域网格的空间计算体系,将非点源模拟结果作为水动力水质模型的前置驱动条件,建立平台接口实现模型自主驱动与数据主动对接,即可趋于同步地实现陆面非点源模型与河道水动力水质模型的底层耦合。

流域不同地理单元的景观类型存在差异,其水循环和污染物质的迁移过程也复杂多变,陆面产流产污机制有所不同,故而非点源模型的选用要根据研究区域特点因地制宜。如当前国际上被广泛使用的开源模型 SWAT(soil and water assessment tool)是当前农业面源污染应用和再开发的热点模型,暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)更适合精细量化城市区域的降雨径流过程。

河道水动力水质模型的建模区域应当覆盖流域内全部干流及支流,根据研究区域内河道监测资料、高精度 DEM 及遥感影像资料,生成河网水系的精细化地形。突发污染物进入河流后,其迁移转化作用受水动力条件影响很大,污染物质沿程纵向的迁移扩散速度较快,横向次之,往往形成狭长的羽状污染带,更适合二维水动力水质耦合模型模拟^[20]。模型按秒设置时间步长,基本方程包括连续方程、动量方程和污染物迁移扩散方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = q \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial x} - gu \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + \xi_x \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z}{\partial y} - gv \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} + \xi_y \nabla^2 v \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\rho_i}{\partial t} + \frac{\partial hu\rho_i}{\partial x} + \frac{\partial hv\rho_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x h \frac{\partial \rho_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y h \frac{\partial \rho_i}{\partial y} \right) + hS_i \quad (3)$$

式中: h 为微小水体的水深,m; t 为时间,s; u 、 v 分别为 x 、 y 方向流速,m/s; q 为单位流程、单位宽度上从旁侧流入微小水体的流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$; z 为水位,m; g 为重力加速度, m/s^2 ; C 为谢才系数, $\text{m}^{0.5}/\text{s}$; ξ_x 、 ξ_y 分别为 x 、 y 方向的涡动黏滞系数, m^2/s ; ρ_i 为污染物 i 的质量浓度, mg/L ; E_x 、 E_y 分别为污染物在 x 、 y 方向的综合扩散系数, m^2/s ; S_i 为污染物 i 的源漏项, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{s})$ 。

除常规污染物的迁移转化模拟外,本方法还面向水中优控污染物的溯源需求,系统考虑包括化学品、油类、金属及放射性4大类,共计126种的特征污染物,在边缘端集成了相应的模型数据库与模型参数预置库。模型参数会随水动力等条件改变而变化,对水质模拟结果有很大影响,可以依据云溯源系统同化的大量在线水质监测数据来反复校正水质模拟结果,实现参数在线实时率定^[21],准确反映突发水污染进行时刻的污染迁移转化规律,降低参数静态设置带来的模拟误差。

1.3 源-质响应模拟技术

“异源同效”的水污染现象表明,突发污染事故源头排放情景存在非唯一性。为尽量把对监测断面造成污染的排污主体做到应查尽查、不重不漏,利用云端实时水动力模拟结果,通过在边缘端多污染排放情景下的快速水质模拟,基于源-质响应方法解析事故区域内固定污染源、移动污染源等各排污主体对监测断面水质变化过程的影响规律,进行溯源响应追查。突发污染事件的源-质响应模拟流程如图2所示。

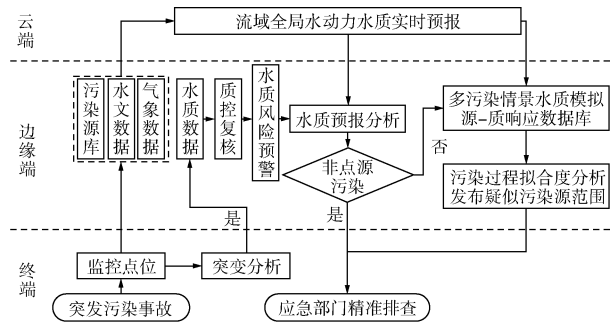


图2 突发污染事件的源-质响应模拟流程

Fig.2 Source-quality response simulation process of sudden pollution events

源-质模拟指对事故区域内水体,进行实时水动力条件下多污染排放情景的水质模拟,溯源追查指根据超标水质类型、实时水质监控数据及其与源-质响应情景数据库的对比分析,得到拟合效果最好的疑似污染排放过程情景,逐步缩小包括非点源、固定点源和移动点源等在内的污染源筛查范围。

a. 全域水质云端实时预报。整合流域终端水文、气象、污染源、水利设施调控等数据,云端每日定时驱动全流域水动力水质模型计算,得到全流域范围河道内任一点水位、流量、流速及水质的模拟与预报结果。

b. 突发污染事件类型判定。首先,在终端根据日常监测与系统模拟值,建立该区间的水质安全阈值。其次,边缘端通过分析云端上传数据,当本次预报峰值与建立的安全阈值出现较大误差,但过程拟合度较好时,发出非点源事故预警;若与安全阈值和过程拟合度都出现较大误差时,则发出点源(含移动源)突发事故预警。

c. 源-质响应情景数据库建立。排除事故源为非点源后,在边缘端进行多情景的点源事故模拟。下载云端实时水动力计算结果,作为事故区域模拟的水动力边界条件,在边缘端进行污染源多情景排放的水质模拟,得到污染物浓度模拟序列,形成事故区域源-质响应情景数据库。

d. 突发污染事件范围确定。采用分析河道断面污染过程拟合度的方法,确定突发事件范围。在边缘端调取源-质响应库中各排放情景下的污染物浓度模拟序列,以监测过程和模拟过程的峰现时间为匹配点,采用纳什效率系数,检验每种情景模拟序列与实际监控序列的相关性,进行污染过程拟合度分析。纳什效率系数越接近于1,该模拟情景拟合效果越好,说明该情景污染过程对应的点位发生污染事件的可能性越大。根据事故区域的研究要求,确定可接受的纳什效率系数下限值,本研究取0.8,提取不低于该值的疑似情景并传输相应污染源范围至终端发布,辅助应急部门进行实地排查。

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (\rho_{mt} - \rho_{st})^2}{\sum_{t=1}^T (\rho_{mt} - \bar{\rho}_m)^2} \tag{4}$$

式中: E_{NS} 为纳什效率系数; ρ_{mt} 为时刻 t 监控点的水质浓度监测值,mg/L; ρ_{st} 为时刻 t 监控点的水质浓度模拟值,mg/L; $\bar{\rho}_m$ 为全部时刻 T 监控点水质浓度监测值的总平均,mg/L。

2 流域突发水污染云溯源体系应用

建立三峡库区水动力学水质二维模型,以COD、TN和TP这3种可溶性可降解的水质指标为代表,进行模型验证。根据长江水利委员会水文局和重庆市生态环境局提供的资料,长江寸滩断面流量为3830 m³/s,嘉陵江入汇流量为368 m³/s,采用同期统计的排污负荷,率定的河段糙率和各污染物综合降解系数取值范围为0.028~0.035 d⁻¹、0.01~0.1 d⁻¹,对比磁器口、大溪沟、望龙门、寸滩4个验证断面的污染物质量浓度实测值,得到水质验证结果如表1所示。COD、TN和TP模拟结果的相

表1 模型水质验证结果

Table 1 Model water quality verification results

断面	ρ_{COD}			ρ_{TN}			ρ_{TP}		
	实测值/ (mg·L ⁻¹)	模拟值/ (mg·L ⁻¹)	相对误差/%	实测值/ (mg·L ⁻¹)	模拟值/ (mg·L ⁻¹)	相对误差/%	实测值/ (mg·L ⁻¹)	模拟值/ (mg·L ⁻¹)	相对误差/%
磁器口	5.00	4.50	-10.00	2.03	1.80	-11.33	0.06	0.05	-16.67
大溪沟	5.62	6.30	12.10	1.70	1.80	5.88	0.06	0.07	16.67
望龙门	5.00	5.50	10.00	2.03	2.50	23.15	0.06	0.07	16.67
寸滩	6.04	5.80	-3.97	1.55	1.60	3.23	0.07	0.06	-14.29

对误差基本小于 20%,水质模拟值与实测值吻合较好,表明云溯源体系应用的二维水动力水质模型精度较高,能准确反映研究区域内污染物浓度的变化规律。本系统同时建立 126 种特征污染物的模型及参数库,在突发事件发生时可以直接采用。

以三峡库区龙溪河入汇口干流和龙溪河支流上两个存在同种污染事故风险的企业 A、B 为例,进行突发水污染云溯源方法的应用分析,如图 3 所示,分别模拟这两个污染源在事故排放情景下对下游断面造成的污染,通过对比实时的污染物浓度监测过程,实现疑似事故源头和排放强度识别,以缩小应急部门追溯污染源的筛查范围。

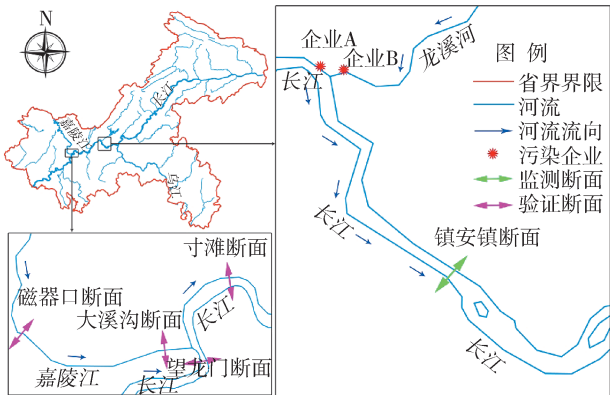


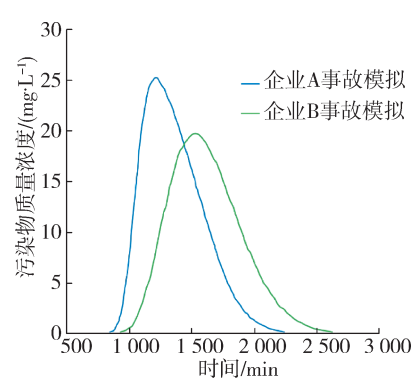
图 3 研究区域
Fig. 3 Research area

在距离企业 A、B 分别约 14.5 km、15 km 的下游标记镇安镇监测断面,根据突发水污染事故的一般特点,设计该断面产生数据库在录可溶性可降解污染物 M 的 1 类和 2 类两次突发污染过程,作为溯源案例分析的水质监测数据,如图 4 所示。选择水文条件比较稳定的平水期进行研究河段的水动力水质模拟,无降水时不产生陆面冲刷的非点源污染,长寿江段平均来流流量为 7 200 m³/s,龙溪河平均入汇流量为 48.7 m³/s,设计突发事故均为企业 A 或 B 的污染物 M 泄漏,模拟污染发生后下游镇安镇监测断面的水质浓度过程。控制污染物在短时间内全部排放,设置污染排放情景如表 2 所示。

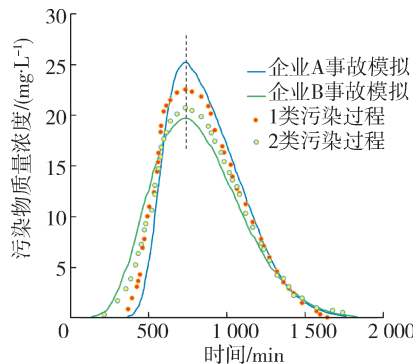
表 2 事故情景设计

Table 2 Accident scenario design

情景编号	事故源	污染负荷/t
1	企业 A	500
2	企业 A	1 000
3	企业 A	1 500
4	企业 A	2 000
5	企业 B	500
6	企业 B	1 000
7	企业 B	1 500
8	企业 B	2 000



(a) 事故情景下污染物质量浓度模拟过程



(b) 事故模拟过程与监测数据的拟合

图 4 镇安镇断面污染浓度过程

Fig. 4 Pollution concentration process
of Zhenanzhen Section

镇安镇断面 1 类污染过程持续约 1 280 min,污染物质量浓度峰值达到 22.56 mg/L;2 类污染过程持续约 1 530 min,峰值达到 20.76 mg/L。对比各个事故情景模拟结果,以峰现过程为匹配点,分别以企业 A、B 为代表的情景 2、6 在镇安镇断面的污染模拟过程拟合度较高,纳什效率系数均大于 0.8,模拟浓度峰值分别为 25.21 mg/L、19.67 mg/L,对 1 类污染过程峰值的相对误差分别为 11.75%、-12.81%,对 2 类污染过程峰值的相对误差分别为 21.44%、-5.25%。长寿段干流流速较龙溪河更大,干流企业 A 发生事故后约 800 min 污染团运移至镇安镇断面,约 1 200 min 时断面浓度达到最大值,2 200 min 后污染团离开镇安镇断面,污染影响持续时间约 1 400 min;支流企业 B 发生事故后约 950 min 镇安镇断面水体浓度开始增加,在 1 550 min 时达到峰值,2 600 min 后断面污染浓度降至 0 mg/L,污染影响持续时间约为 1 600 min。

对于 1 类污染过程,企业 A、B 事故情景的纳什效率系数分别为 0.91、0.87;对于 2 类污染过程,该值分别为 0.84、0.95。企业 A、B 均有可能为这两次突发污染的事故源头,1 类污染过程与企业 A 排污模拟的拟合度更高,则 A 企业排污可能性更大;2 类污染过程与企业 B 排污模拟的拟合度更高,则判定

B企业排污可能性更大。污染过程拟合度高的事故企业,对监测断面的污染影响持续时间也更接近实际,是事故源头的可能性更大。最终的污染源准确定位,还需要工作人员根据模拟结果在一定目标范围内进行实地排查。

3 结 语

基于云溯源体系在云端实现流域全局的水动力水质实时预报,完成实时水动力条件下边缘端对事故区域内多污染情景的水质快速模拟,识别多个可能对监测断面造成污染的事故源头,确定溯源筛查范围。在架构层面,借助云边协同优势提升大体量数据的传输、存储与计算效率,基于流域水文水质监控网络,能够主动识别突发水污染事故并实现高效追溯;在模拟层面,采用二维水动力水质模型,模拟流域尺度的水体水质状况,并在长江重庆段进行应用分析,纳什效率系数大于0.8的污染情景都可能是事故源,且纳什效率系数越高,该情景相应的污染源可能性就越大。

参考文献:

- [1] 肖筱瑜. 2012—2017年国内重大突发环境事件统计分析[J]. 广州化工, 2018, 46(15): 134-136. (XIAO Xiaoyu. Statistical review of major environmental accidents at home in the period from 2012 to 2017[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(15): 134-136. (in Chinese))
- [2] 许静,王永桂,陈岩,等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4566-4575. (XU Jing, WANG Yonggui, CHEN Yan, et al. Spatial distribution and temporal variation of sudden water pollution incidents in China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(12): 4566-4575. (in Chinese))
- [3] 王忠慧,贡力,康春涛,等. 基于BAS算法的河渠突发水污染溯源[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 87-92. (WANG Zhonghui, GONG Li, KANG Chuntao, et al. Sudden river water contamination source identification based on BAS algorithm[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 87-92. (in Chinese))
- [4] WU W, REN J, ZHOU X, et al. Identification of source information for sudden water pollution incidents in rivers and lakes based on variable-fidelity surrogate-DREAM optimization[J]. Environmental Modelling and Software, 2020, 133(6): 104811.
- [5] WANG J, ZHAO J, LEI X, et al. New approach for point pollution source identification in rivers based on the backward probability method [J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 759-774.
- [6] AYYAZ M T. A hybrid simulation; optimization approach for solving the areal groundwater pollution source identification problems [J]. Journal of Hydrology, 2016, 538: 161-176.
- [7] 陈媛华,王鹏,姜继平,等. 基于相关系数优化法的河流突发污染源项识别[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1802-1807. (CHEN Yuanhua, WANG Peng, JIANG Jiping, et al. Contaminant point source identification of rivers chemical spills based on correlation coefficients optimization method [J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1802-1807. (in Chinese))
- [8] 陈正侠,丁一,毛旭辉,等. 基于水环境模型和数据库的潮汐河网突发水污染事件溯源[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1170-1178. (CHEN Zhengxia, DING Yi, MAO Xuhui, et al. Source identification of accidental water pollution in a tidal river network based on a water environment model and database [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(11): 1170-1178. (in Chinese))
- [9] CHAKRABORTY A, PRAKASH O. Identification of clandestine groundwater pollution source locations and their release flux history [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 626(1): 012003.
- [10] WEI G, CHI Z, YU L, et al. Source identification of sudden contamination based on the parameter uncertainty analysis [J]. Journal of Hydroinformatics, 2016, 18(6): 919-927.
- [11] WEI P C, JIA Y. Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method [J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(4): 397-410.
- [12] 朱嵩,毛根海,刘国华,等. 改进的MCMC方法及其应用[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1019-1023. (ZHU Song, MAO Genhai, LIU Guohua, et al. Improved MCMC method and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 1019-1023. (in Chinese))
- [13] 朱嵩,刘国华,王立忠,等. 水动力-水质耦合模型污染源识别的贝叶斯方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(5): 30-35. (ZHU Song, LIU Guohua, WANG Lizhong, et al. A bayesian approach for the identification of pollution source in water quality model coupled with hydrodynamics [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(5): 30-35. (in Chinese))
- [14] 杨海东,肖宜,王卓民,等. 突发性水污染事件溯源方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 122-129. (YANG Haidong, XIAO Yi, WANG Zhuomin, et al. On source identification method for sudden water pollution accidents [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 122-129. (in Chinese))