DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.025

滨江典型区突发水污染事件溯源及响应方法

宋为威[1,2],逄 勇[1,2]

(1.河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2.河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要:针对城市内河突发水污染事件频发引起水资源及经济的巨大损失,提出了Hartree闭环河湖水质预警法,通过事件发生、溯源追踪、预警排查、预测分析、应急处理及恢复原状的处置流程,采取监测预警、水质巡测、河长App、模型预测、紧急抢修及警报解除的措施,提出了基于水污染溯源的快速响应及事故处理方法。以南京金川河水系为例,研究了水污染突发事件后污染物的溯源、响应及事故处理的流程,基于耦合模型计算,通过有无Hartree闭环河湖水质预警法和不同调水量浓度场对比,得到调水量与水质超标时长的相关关系,从方法效用上提高了处理该类事件的效率。

关键词:滨江典型区;水污染溯源;Hartree闭环河湖水质预警法;河长App;系统效用;金川河

中图分类号:TV122 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-6933(2022)04-0182-07

Traceability and response method of sudden water pollution events in typical riverside areas // SONG Weiwei[1,2], PANG Yong[1,2] (1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*; 2. *College of Environment, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: In view of the huge losses of water resources and economy caused by the frequent occurrence of sudden water pollution events in urban rivers, Hartree closed-loop river and lake water quality early warning method is proposed. Through the disposal process of incident occurrence, traceability, early warning and investigation, prediction and analysis, emergency treatment and restoration, and implementing the measures of monitoring and early warning, water quality inspection, river chief App, model prediction, emergency repair and alarm relief, a fast response and accident handling method based on water pollution traceability is proposed. Taking the Jinchuan River system in Nanjing as an example, the process of pollutant tracing, response and accident treatment after water pollution emergencies is studied. Based on the calculation of the coupling model, the correlation between the quantity of water transferred and the duration of water quality exceeding the standard is obtained through the comparison of the concentration fields of different water transferred quantities with or without using the Hartree closed-loop river and lake water quality early warning method. The efficiency of handling such events is improved from the perspective of method utility.

Key words: typical riverside area; water pollution traceability; Hartree closed-loop river and lake water quality early warning method; river chief App; system utility; the Jinchuan River

滨江典型区指自然与人类对水环境特征影响较为明显的大河支流流域及通过引调水与支流产生关联的河湖水系流域,包含了直接和间接影响的区域。滨江典型区应具有如下特征:①自然与人类均会对其产生影响;②位于经济发达地区;③具备人工调控功能;④具有河网和内陆湖库。水体的污染归根结底还是区域的污染物排放,是在人类和自然影响下产生的水质恶化。长江的水质恶化离不开滨江水体和区域的共同作用,研究长江滨江典型区的水环境演变机理及调控措施,能够从最基础的源头上控制和调节支流对流域水体的污染。

在环境突发事件中,水污染突发事件占据50%

基金项目:国家自然科学基金(52100175,52170158,51879070,52000100);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208-003,2018ZX07208-005,2018ZX07208-007);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:宋为威(1991—),男,博士,主要从事生态水利学研究。E-mail:weiweisong@hhu.edu.cn

通信作者:逄勇(1958—),男,教授,博士,主要从事水环境规划与保护研究。E-mail:ypang@hhu.edu.cn

以上,且每年的重特大突发事件几乎均为水污染突发事件[1]。据统计,我国长江、黄河、珠江、松花江流域为水污染突发事件的集中地,其中长江流域所涉及地区最为广泛,其流经青藏川滇至苏沪等 11 个省份,沿途 700 余条支流蜿蜒曲折,覆盖蔓延至甘、黔、陕、桂、闽、粤、浙、豫 8 个省份[2-4]。通过分析 2010 年以来的水污染突发事件,发现长江流域是水污染突发事件的高频区,也是重大水污染事件的集中地。水污染突发事件不仅会破坏水生态系统,也会造成水危机和经济损失,甚至影响社会生活的稳定或者对人的生命安全造成影响。掌握污染来源是监督和问责的工作基础,对提高监管部门对水环境突发事件处理的能力,从源头控制和消除水污染有重要意义。研究滨江典型区水污染突发事件的溯源响应机制,从方法体系上对水污染突发事件的溯源提出新的构想,对滨江水环境保护具有重要意义。

突发的水污染事件具有不确定性,处置的首要任务是找出污染源[5]。研究污染物在河湖中的迁移转化规律,并根据监测的污染物浓度变化过程推测水污染事件发生的强度、位置、时间,从而进一步实现污染事件的重构,这是水污染溯源研究的主要内容[6]。国内外关于水污染溯源问题的研究目前处于探索和发展阶段[7-8],早期的水污染溯源主要围绕地下水研究[9-13],常采用最小二乘法、试错法、正则化方法、线性规划法、水化学法[14]及同位素法等方法识别污染源位置、强度及发生时间,稳定性不好且具有一定的局限性[15]。随着人工智能的发展,出现了 Bayesian 算法[16]、蒙特卡罗算法[17]、AFSA 算法[18]、BAS 算法[2]、神经网络算法、遗传算法、拟牛顿法[19]等方法及水质指纹、荧光指纹[20]等技术应用于水污染追溯研究中的参数识别、污染源项识别。智能算法开发日渐成熟后应用于具体污染物溯源和参数的优化,各类方法的计算精度均能满足当前需求。现阶段,河长制等政策的实施,对水污染溯源提出了新的要求,不仅溯源方法要准确,还需要结合当前政策和工程应对问题、解决问题,推动从事件发生到事件结束、从管理到治理一体化。传统的方法在响应水污染事件的效率上难以达到系统集成智慧决策一体化需求。随着长江大保护的推进,对滨江典型区域开展水陆空一体化实时大系统预警,大大提高了水污染事件的响应和处理效率。本文以滨江典型区金川河河网为例,开展基于水污染突发事件溯源的监测体系建设及快速响应方法研究。

1 研究区概况

金川河全长 37.78 km,流域面积 59.32 km^2,是流经南京主城北部的长江支流,主要流经南京市鼓楼区、玄武区及栖霞区[21]。金川河主要分为内金川河和外金川河,内金川河长 9 317 m,分为主流、中支、北支、东支、西支及老主流,外金川河汇水面积为 5.27 km^2。金川河水系主要功能是受纳生活污水和沿岸地表径流,为南京市主城区内的第二大水系,其与玄武湖相连通,下游通过宝塔桥汇入长江。金川河流域总补水量 25 万~30 万 t/d,例行监测点位有 27 个(图 1),其中补水外秦淮河 3 万 t/d,内金川河支流 2 万 t/d,大树根闸 8 万~10 万 t/d,和平门闸 2 万 t/d,南十里长沟 7 万 t/d,外金川河1 万 t/d。金川河水系目前在 14 个排污设施上建设 14 个视频监控,将与 7 个自动监测站形成监测与监控相结合的监视体系。金川河流域水系 11 条支流分布 11 座泵站和 12 座水闸。

图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of study area

2 研究方法

2.1 模型方程

对金川河一维模型采用基于流量 Q、水位 h 交替网格的 6 点 Abbott 和 Ionescu 隐式有限差分法[22-23]求解,对玄武湖二维模型采用三角网格的有限体积法[24-25]求解。依据连接处的动量守恒原理,采用标准连接的方式进行一二维耦合[26]。一维水动力学模型是研究某一流域内河道的非连续性水流运动规律的模型,模拟结果可以对河道水流运动的基本特征进行描述,模型的基本原理是对圣维南(Saint-Venant)方程组的求解。二维水动力模型是基于三向不可压缩和雷诺值均布的 Navier-Stokes 方程,服从 Boussinesq 假定和静水压假定。一维模型连续性方程、动量方程、对流扩散方程分别为

$$\frac{\partial Q}{\partial x}+\frac{\partial A_1}{\partial t}=q \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\alpha\frac{Q^2}{A_1}\right)}{\partial x}+gA_1\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{gQ|Q|}{C^2A_1R}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial A_1\rho}{\partial t}+\frac{\partial Q\rho}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial x}\left(A_1 D\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)=-A_1 K\rho+\rho_2 q \quad (3)$$

式中：A_1 为过流面积；x 为空间坐标；t 为时间坐标；g 为重力加速度；q 为污染源流量；C 为谢才系数；R 为水力半径；α 为纵向速度分布系数；ρ 为污染物质量浓度；D 为扩散系数；K 为线性衰减系数；ρ_2 为源/汇质量浓度。

二维模型连续方程、动量方程、水质输移方程分别为

$$\frac{\partial h_1\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h_1}{\partial t}+\frac{\partial h_1\bar{v}}{\partial y}=h_1 S \quad (4)$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial h_1\bar{u}^2}{\partial x}+\dfrac{\partial h_1\bar{u}}{\partial t}+\dfrac{\partial h_1\bar{v}\,\bar{u}}{\partial y}=f\bar{v}h_1+\dfrac{\tau_{sx}}{\rho_0}+\dfrac{\partial}{\partial x}(h_1T_{xx})+\\ \dfrac{\partial}{\partial y}(h_1T_{xy})+h_1u_sS-gh_1\dfrac{\partial\eta}{\partial x}-\dfrac{h_1}{\rho_0}\dfrac{\partial P_a}{\partial x}-\dfrac{gh_1^2}{2\rho_0}\dfrac{\partial\rho}{\partial x}-\\ \dfrac{\tau_{bx}}{\rho_0}-\dfrac{1}{\rho_0}\left(\dfrac{\partial s_{xx}}{\partial x}+\dfrac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right)\\ \dfrac{\partial h_1\bar{v}\,\bar{u}}{\partial x}+\dfrac{\partial h_1\bar{v}}{\partial t}+\dfrac{\partial h_1\bar{v}^2}{\partial y}=-f\bar{u}h_1+\dfrac{\tau_{sy}}{\rho_0}+\dfrac{\partial}{\partial x}(h_1T_{xy})+\\ \dfrac{\partial}{\partial y}(h_1T_{yy})+h_1v_sS-gh_1\dfrac{\partial\eta}{\partial y}-\dfrac{h_1}{\rho_0}\dfrac{\partial P_a}{\partial y}-\dfrac{gh_1^2}{2\rho_0}\dfrac{\partial\rho}{\partial y}-\\ \dfrac{\tau_{by}}{\rho_0}-\dfrac{1}{\rho_0}\left(\dfrac{\partial s_{yx}}{\partial x}+\dfrac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right)\end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\partial\rho_i}{\partial t}+u\frac{\partial\rho_i}{\partial x}+v\frac{\partial\rho_i}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial\rho_i}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E_y\frac{\partial\rho_i}{\partial y}\right)+K_i\rho_i+S_i \quad (6)$$

其中 $$T_{xx}=2A\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}$$

$$T_{xy}=A\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}+\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)\qquad T_{yy}=2A\frac{\partial\bar{v}}{\partial y}$$

式中：x、y 为笛卡尔坐标系；h_1为总水深，$h_1=\eta+d$，其中 η 为水位，d 为静水深；f 为哥氏力系数，$f=2\omega\sin\varphi$，其中 ω 为地球自转角速度，φ 为纬度；u、v 分别为 x 和 y 方向上的速度分量；τ_{sx}、τ_{sy}、τ_{bx}、τ_{by}分别为表面和底部剪应力在 x、y 方向上的分量；P_a 为压强；s_{xx}、s_{xy}、s_{yy}为辐射应力分量；ρ_0为水的密度；S 为源项；u_s、v_s为源项在 x 和 y 方向的流速；$\bar{u}$、$\bar{v}$ 为在水深方向的平均流速，$h\bar{u}=\int_{-d}^{\eta}u\mathrm{d}z$，$h\bar{v}=\int_{-d}^{\eta}v\mathrm{d}z$；$T_{xx}$、$T_{xy}$、$T_{yy}$分别为黏滞阻力、紊流摩擦阻力和差动平流摩擦阻力；$\rho_i$为污染物 i 的质量浓度；u、v 分别为 x、y 方向上的流速分量；E_x、E_y分别为 x、y 方向上的扩散系数；K_i为污染物 i 降解系数；S_i为污染物 i 底泥释放项。

2.2 参数率定验证

通过模型试算最终确定糙率为 0.030 ~ 0.035，水动力率定验证的点位为金川门，其中 7 月数据用于率定，8 月数据用于验证。根据金川河水系污染物来源及水环境的特征，其主要的水质超标因子为 COD、NH_3-N、TP。采用 2018 年 7 月自动监测站点水质资料进行模型参数率定，1—15 日为率定时间，其他日期为验证时间，率定得到的 COD、NH_3-N和 TP 降解系数分别为 0.09 ~ 0.11 d^{-1}、0.08 ~ 0.10 d^{-1} 和 0.06 ~ 0.08 d^{-1}。经过率定、验证，得到水量模型和水质模型的计算值与实测值误差均在 20% 以内，结果吻合较好，该模型可应用于金川河水动力及水质模拟。

2.3 蒙特卡罗溯源反演算法

基于蒙特卡罗溯源的反演计算主要包括获得污染源先验分布、构造似然函数和后验概率密度函数以及溯源结果抽样[27]。

a. 获得污染源先验分布。污染源参数的上下限用上下限区间均匀分布表示，则

$$P(A)=\prod_i P(A_i) \quad (7)$$

其中 $$P(A_i)=\begin{cases}1/(y_i-x_i) & x_i\leqslant A_i\leqslant y_i\\ 0 & \text{其他}\end{cases}$$

式中：$P(A)$ 为污染源参数 A 的先验分布，可近似成均匀分布；x_i、y_i分别为参数上下限，溯源期间根据参数的上下限确定。

b. 构造似然函数和后验概率密度函数以及溯源结果抽样。基于蒙特卡罗法溯源反演算法，似然函数为观测数据与模型参数的拟合程度，根据贝叶斯定理，有

$$P(A|B)=\frac{P(B|A)\cdot P(A)}{P(B)}\propto P(B|A)\cdot P(A) \quad (8)$$

式中：$P(B|A)$为污染源参数 A、监测数据为 B 的概率，为似然概率；$P(A|B)$为在得到监测数据 B 后，污染物参数 A 的概率分布。在得知污染源参数 A 后验分布后，对参数 A 进行测算，进而实现对污染源排口坐标位置的反演计算。似然概率 $P(B|A)$反映了监测值 $B=\{B_i|i=1,2,\cdots,N\}$和同时刻该点处模型模拟值 $T=\{T_i|i=1,2,\cdots,N\}$的偏差。误差大小为 $\varepsilon_i=B_i-T_i(M,a,b,t|A)$，其中 $T_i(M,a,b,t|A)$为污染物排放量，通过模型计算坐标(a,b)及排放时间 t 后的污染物浓度。设定误差服从标准差正态分布，则似然函数为

$$P(B|A)=\prod_{i=1}^{N}P(B|A_i)\propto\frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^N}\cdot\exp\left\{-\sum_{i=1}^{N}\frac{[B_i-T_i(M,a,b,t|A)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (9)$$

通过贝叶斯公式对参数 A 的求解，将溯源问题转换成求 A 的后验概率密度函数的数学问题：

$$P(A|B)=\frac{P(B|A)\cdot P(A)}{P(B)}\propto\frac{P(A)}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^N}\cdot \exp\left\{-\sum_{i=1}^{N}\frac{[B_i-T_i(M,a,b,t|A)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (10)$$

当得到先验分布 $P(A)$，通过监测值 B，利用蒙特卡罗法对 A 取值范围内按照先验分布进行抽样，当模型模拟值 T 接近监测值 B 时参数组保留，经过迭代得到的抽样结果即为污染源关键信息的概率分布。

2.4 Hartree 闭环河湖水质预警法

Hartree 闭环河湖水质预警法示意图见图 2。当水污染突发事件发生后，河网水质自动监测站的监测数值超出水质目标，监测站将警报信息及时发送到河长 App 供管理部门决策。同时启动移动水质监测系统，在发出警报的自动监测站位置向上游沿河监测水质并传回计算，通过模型实时计算，结合蒙特卡罗法的河流污染源反演算法循环修正模型参数[28]直至到达排放点（溯源追踪），将排放点位及水质浓度值发送河长 App 供管理部门及时检修（预警排查）。同时启动模型计算，根据排放位置的上下游水质，估算污染物排放量及排放浓度，并根据污染物排放量预测出可能的河道污染物到达时间和污染物浓度，为下游及时做好防范工作做准备（预测分析）。根据管理部门启动的应急预案，组织相关部门应急抢修，确保突发事件能够应急处置完成。当污染带完全排出河道后，河道水质重新恢复原状。

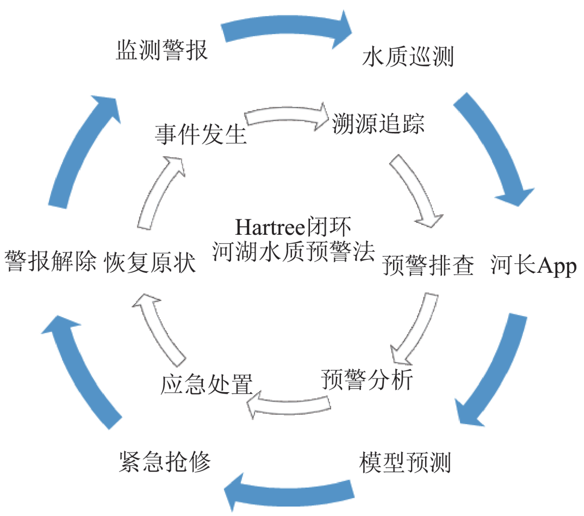


图 2　Hartree 闭环河湖水质预警法示意图

Fig. 2　Schematic diagram of Hartree closed-loop river and lake water quality warning method

3　模拟结果与分析

3.1　溯源及响应流程

以金川河为研究区域，运用 Hartree 闭环河湖水质预警法，基于水环境数学耦合模型模拟水污染突发事件的预警、响应及处置过程。某日 5:00，金川河泵站 2 号水质自动监测站 NH_3-N 质量浓度超过河流水质标准 2 mg/L，发出水质超标警报并将信息发送至监测管理平台。平台启动溯源程序并将溯源指令和预警位置等信息发送至水上待命的水质巡测系统，巡测船按照位置信息高速驶向 2 号监测站，同时开启水质实时监测系统沿河向上游进行溯源。基于水环境数学模型和蒙特卡罗法循环演变推算修正参数至排放点，停船并开启监控视频系统和水下暗管探测系统，确定污水排放源头。根据沿河监控视频、巡测系统监控视频及暗管探测系统监测结果，初步判断为内金川河主流南瑞路蔡家桥污水管网破裂，有约 1 m^3/s 的污水入河，水质巡测系统溯源共耗时 10 min。水质巡测系统将位置及判定结果反馈至平台，平台再通过河长 App 通知水务、环保等相关部门，并组织人员赶往现场察看，共耗时 20 min。调集维修机械及抢修完成至停止污水排放，共耗时 1 h。溯源后通过玄武湖开启大树根闸进行应急调水，按照 8 万 t/d 标准进行释污。同时，水质巡测系统开启 ADCP 监测河流断面形状、流速及流量等信息。根据河流地形、水动力及水质监测信息构建精细化预测模型，启动模型进行计算，得出事故排口流量约为 1 m^3/s，按照预判抢修时间预测并在平台演示污染物扩散对下游的影响范围及时间。9:00 触发 3 号站（外金川河水关桥断面）警报，13:30 触发 4 号站（外金川河宝塔桥断面）警报，17:00全河恢复常态，不再警报。至此，全河水质恢复原状，除人工抢修环节，其他环节均为平台自动化实现。

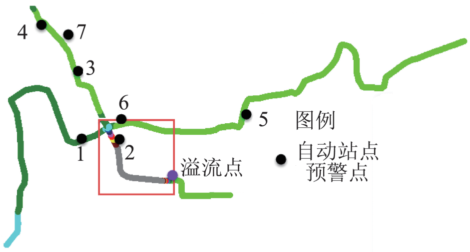
金川河水污染突发事件溯源及响应演练构想见图 3。

3.2　溯源及响应系统效用

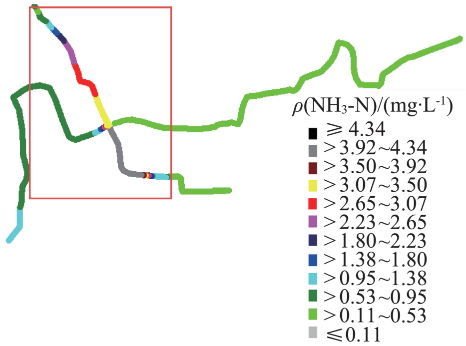
通过金川河突发水污染事件的案例研究，运用了水环境数学模型，计算了金川河在污染过程中水质（NH_3-N）变化情况，图 4 为金川河模拟水质预警法实施前后对比。由图 4 可见，在发现突发事件的时间上实施水质预警法的监测系统能够做到立即监测和立即发现，完成溯源只需要 30 min，包括 10 min 的溯源时间和 20 min 的奔赴现场时间。而没有水质预警法、依靠人为巡河可能需要 6 h。由图 4(a)可见，实施水质预警法的溯源完成时其污染带只有内金川河，而未实施水质预警法的溯源完成时

图 3　金川河水污染突发事件溯源及响应演练

Fig. 3　Exercise of traceability and response of water pollution emergencies in Jinchuan River



(a) 系统预警污染带



(b) 无系统预警污染带

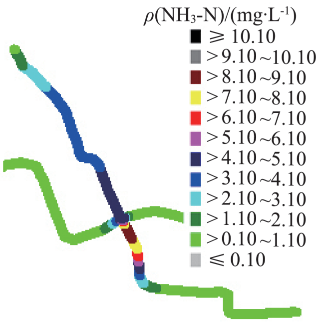
图 4　金川河水质预警法实施前后对比

Fig. 4　Comparison before and after implementation of Jinchuan River system platform

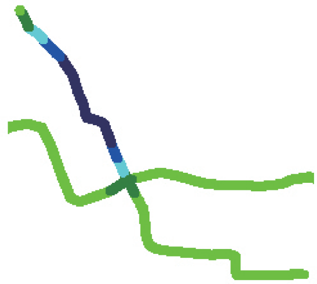
其污染带已经分布于全河。由图 4(b)可见,在处置完成后的情况下,2 号点位的持续警报时长为5.5 h,3 号点位持续警报时长为 4 h,4 号点位警报时长为 3.5 h。而对于未实施水质预警法的监测系统的 2 号点位持续超标时长为 11 h,3 号点位持续超标时长为 9 h,4 号点位持续超标时长为 9 h。可见,实施水质预警法的监测系统处理的金川河水体污染带在河道上仅持续 16.5 h,而未实施水质预警法、依靠人工巡河发现污染带持续时长为 23 h。本案例实施水质预警法情况下,1 m^3/s 污水持续排放时长为5 h,而未实施水质预警法情况下的污水持续排放时长为 11 h。自动监测站的分布密度影响及时预警的速度,若污水排放点紧挨着 2 号站点,其污染物刚刚排放即被监测到,其排放时长仅为抢修时长 1.5 h。若污水从 18:00 点开始排放或者在无人发现的隐蔽地点,对于传统人工巡河,发现污水排放少则 12 h、多则 48 h 或若干天,持续的污染物排放会对水体造成不可逆转的破坏。

3.3　基于耦合模型不同调水量应对风险事故的研究

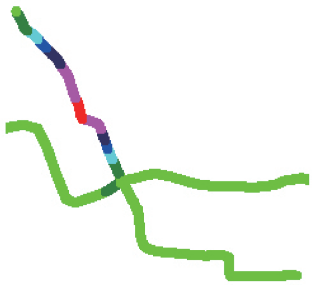
针对水污染突发事故的发生,运用溯源及应急响应机制相对于传统方法能够更加快速有效解决事故问题,其中水环境数学模型是风险事故预测的重要环节,合理的应急调水对于风险事故的流域性整体控制至关重要。根据玄武湖-金川河耦合模型,分别对发生事故时无调水、调水 0.5 m^3/s、1.0 m^3/s、1.5 m^3/s、2.0 m^3/s、2.5 m^3/s、3.0 m^3/s、3.5 m^3/s、4.0 m^3/s进行模拟分析(以 NH_3-N 为例),结果表明在事故发生后调水量越大污染带到达边界的时间越短,到达时间分别为 17 h、16.5 h、15 h、14 h、13 h、12.5 h、11 h、10.6 h 和 10.5 h,调水量越大在河中污染带扩散范围越小,但是其污染带污染物浓度越大(图 5)。



(a) 无调水,17 h



(b) 调水 2.0 m^3/s,13 h



(c) 调水 4.0 m^3/s,10.5 h

图 5　不同调水量情况下到达边界时的污染带

Fig. 5　Pollution zone when reaching boundary under different water diversion condtions

根据耦合模型计算,得到不同调水量下在流域下游入江口处的水质变化过程,表明调水时间越长水体恢复时间越短,其中无调水情况所持续时间最长,调水量 4 m^3/s 持续时间最短,可见处理风险事故的调水量越大越好。对超标时长与调水量进行相关关系拟合,得到超标时长与调水量在研究区间内呈指数关系(图 6),可见超标时长随调水量的增加呈指数关系逐渐递减,拟合度较高。

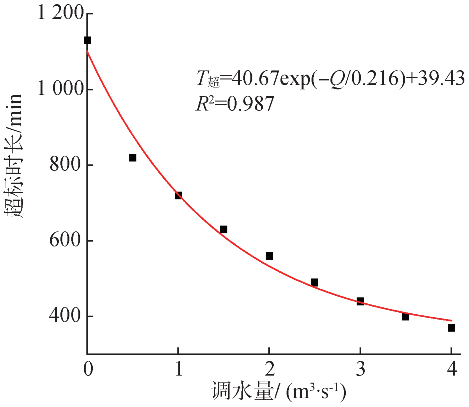


图 6　水质超标时长与调水量相关关系

Fig. 6　Correlation between duration of water quality exceeding standard and quantity of water transferred

4　结　语

本文提出了基于河湖耦合模型的水污染突发事件溯源及快速响应方法——Hartree 闭环河湖水质预警法,以金川河为例进行了监测和布点研究,模拟了实时监测河流水质反馈监管平台响应并处置水污染事件的过程。当水污染突发事件发生后及时将水质反馈平台后,通过平台发布指令使得水质实时巡测系统及时进行移动水质监测和溯源。通过事件发生、溯源追踪、预警排查、预测分析、应急处理及恢复原状的处置流程,采取监测预警、水质巡测、河长App、模型预测、紧急抢修及警报解除的措施进行水污染突发事件处理。基于模型模拟的河湖水利工程的智慧调度,能够科学指导水污染事件的应急调水,快速减小生态风险和供水危机,提高流域水污染应急管理能力。从方法效用上提高了处理该类事件的效率,为自动化水环境监管提供了实际有效的方法。

参考文献:

[1] 周颖. 水污染突发事件应急能力评价及协同治理对策研究:以长江流域为例[D]. 焦作:河南理工大学,2019.

[2] 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. Tracing source of sudden water pollution in rivers and canals based on BAS algorithm[J]. Water Resources Protection,2020,36(5):87-92. (in Chinese))

[3] 蓝志峰,肖桂荣. 基于流域要素空间关系的水污染溯源研究[J]. 水资源保护,2019,35(1):56-62. (LAN Zhifeng, XIAO Guirong. Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 56-62. (in Chinese))

[4] 唐新玥,唐德善,常文倩,等. 基于云模型的区域河长制考核评价模型[J]. 水资源保护,2019,35(1):41-46. (TANG Xinyue, TANG Deshan, CHANG Wenqian, et al. Evaluation model of regional river chief system based on cloud model [J]. Water Resources Protection,2019,35(1):41-46. (in Chinese))

[5] 王家彪,雷晓辉,廖卫红,等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源[J]. 水利学报,2015,46(11):1280-1289. (WANG Jiabiao, LEI Xiaohui, LIAO Weihong, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(11):1280-1289. (in Chinese))

[6] 程伟平,廖锡健. 基于逆向概率密度函数的一维污染源排放重构[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,2011,26(4):460-469. (CHENG Weiping, LIAO Xijian. Recovering the release history of contaminant based on backward probability density function for the one-dimensional convection diffusion equation[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(4): 460-469. (in Chinese))

[7] 刘晓东,姚琪,薛红琴,等. 环境水力学反问题研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(6):885-93. (LIU Xiaodong, YAO Qi, XUE Hongqin, et al. Advance in inverse problems of environmental hydraulics [J]. Advances in Water Science,2009,20(6):885-893. (in Chinese))

[8] 朱剑. 基于移动平台的水域突发污染溯源研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[9] KARR C L, YAKUSHIN I, NICOLOSI K. Solving inverse initial-value, boundary-value problems via genetic algorithm [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2000, 13(6): 625-633.

[10] ALAPATI S, KABALA Z J. Recovering the release history of a groundwater contaminant using a non-linear least-squares method [J]. 2000, 14(6): 1003-1016.

[11] GORELICK S M, EVANS B, REMSON I. Identifying sources of groundwater pollution: an optimization approach [J]. Water Resources Research, 1983, 19(3): 779-790.

[12] HADAMARD J, MORSE P M. Lectures on Cauchy's problem in linear partial differential equations [J].

Physics Today, 2009, 6(8): 65-89.
[13] SIDAURUK P, CHENG A H D, OUAZAR D. Ground water contaminant source and transport parameter identification by correlation coefficient optimization [J]. Ground Water, 2010, 36(2): 208-214.
[14] 胡成, 王彤, 苏丹, 等. 水环境中污染物的源解析方法及其应用[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 57-62. (HU Cheng , WANG Tong, SU Dan, et al. Methods for source apportionment of contaminates and their application in aquatic environment [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 57-62. (in Chinese))
[15] 孟志龙, 杨永刚, 秦作栋, 等. 汾河下游流域水体硝酸盐污染过程同位素示踪[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1066-1072. (MENG Zhilong, YANG Yonggang, QIN Zuodong, et al. Isotopic tracing for nitrate pollution process of water body in the lower reaches of Fenhe River [J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1066-1072. (in Chinese))
[16] 张丰帆. 基于 Bayesian 推理的河流突发水污染溯源模型构建与案例应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
[17] 孙策. 基于 CA-MCMC 方法的河流突发水污染溯源研究[D].济南:山东大学,2020.
[18] 李欣欣, 王宁, 姜秋俚, 等. 基于改进 AFSA 算法的河流突发水污染溯源[J].计算机系统应用,2020,29(7):139-144. (LI Xinxin, WANG Ning, JIANG Qiuli, et al. Traceability method of sudden river water pollution based on improved AFSA algorithm [J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(7): 139-144. (in Chinese))
[19] 王迎彬, 王勇, 王典洪. 基于拟牛顿法的二维水污染扩散源溯源定位[J].水电能源科学,2019,37(11):54-57. (WANG Yingbin, WANG Yong, WANG Dianhong. Tracing the origin of two-dimensional water pollution diffusion source based on quasi-newton method[J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (11): 54-57. (in Chinese))
[20] 位梦姣. 基于水化学特征和荧光指纹的污染物源解析方法研究及其应用[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
[21] 俞欣,金哲,韩琳.南京市城市河道污染特征及长效整治研究[J].中国资源综合利用,2021,39(1):62-65. (YU Xin, JIN Zhe, HAN Lin. Pollution characteristics and long-term governance of urban river management in Nanjing[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021,39(1):62-65. (in Chinese))
[22] 许益新,李一平,罗育池,等.引水改善平原感潮河网水质效果评估[J].水资源保护,2019, 35(6): 124-130. (XU Yixin, LI Yiping, LUO Yuchi, et al. Effect evaluation of water diversion to water quality improve in plain tidal river network [J]. Water Resources Protection, 2019,35(6):124-130. (in Chinese))
[23] 陈庆江,丁瑞,赵海.平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J].水利水电科技进展,2020,40(3):8-13.(CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3):8-13.(in Chinese))
[24] 张鹏,逄勇,石成春,等.闽江下游水质变化趋势分析[J].水资源保护,2018,34(1):64-69.(ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 64-69. (in Chinese))
[25] 李一平,施媛媛,姜龙,等.地表水环境数学模型研究进展[J].水资源保护,2019,35(4):1-8.(LI Yiping, SHI Yuanyuan, JIANG Long, et al. Advances in surface water environment numerical models [J]. Water Resources Protection, 2019,35(4):1-8. (in Chinese))
[26] 栾震宇,金秋,赵思远,等.基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J].水资源保护, 2021, 37(2): 81-88.(LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):81-88. (in Chinese))
[27] 黄平捷,骆旭伟,侯迪波, 等. 一种河流点源突发污染事故溯源方法:CN105956664B[P]. 2019-02-19.
[28] 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))

(收稿日期:2021-04-09 编辑:王芳)