

基于环境流体动力学模型的荆江突发污染物数值模拟研究

李金瑞 陈立斌

长江大学资源与环境学院

DOI:10.12238/jpm.v3i6.5012

[摘要] 突发性水污染会对水体造成紧迫性危害,针对突发污染物进行模拟研究,可为未来面对突发性水污染提供参考。本文以荆江为目标河段,分析了近十年的水文数据,通过环境流体动力学模型建立了研究区的水动力水质模型,对典型水文特征下荆江突发污染物时空变化特征进行数值模拟,研究得出了下游长江荆州取水点断面的氰化物污染物浓度随时间的变化规律,可为突发污染事件提供参考依据。

[关键词] 环境流体动力学模型; 突发水污染; 荆江; 数值模拟

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A

Jingjiang based on the environmental fluid dynamics model Numerical Simulation of Burst Pollutants

Jinrui Li Libin Chen

School of Resources and Environment, Yangtze University

[Abstract] Sudden water pollution will cause urgent harm to water bodies. Simulation research on sudden pollutants can provide a reference for future sudden water pollution. This paper takes the Jingjiang River as the target reach, analyzes the hydrological data of the past ten years, and establishes the hydrodynamic water quality model of the study area through the environmental fluid dynamics model. The study obtained the variation law of cyanide pollutant concentration with time in the section of Jingzhou water intake point in the lower reaches of the Yangtze River, which can provide a reference for sudden pollution incidents.

[Key words] Environmental fluid dynamics model; Sudden water pollution; Jingjiang River; Numerical simulation;

引言

荆江存在着污染物泄露的风险,为对突发水污染事件进行预测与防治,加强对长江流域水环境的保护,本文通过基于环境流体动力学模型的数值模拟的方法进行研究,模拟不同的水位与水流量条件下氰化物污染物在水体中的迁移扩散规律,分析污染物的前锋迁移及衰减规律,得到污染物到达下游重要目标区域的峰值浓度、停留时间等。为突发水污染事件的应急处理方案提供合理的科学依据。

1 研究背景及研究内容

1.1 研究区概述

荆江全长360公里,上荆江河道微曲,河势稳定,下荆江水流速较快,河道蜿蜒曲折。荆江作为沿岸城镇的饮用水、灌溉用水、渔业用水的主要水源地,沿线涉及大大小小20多个固定取水口,发挥着重要的供水作用^[1]。荆江作为沿岸区域的一个重要纳污河段,流域内分布着30多个排污口,对污染物的稀释、降解、转化发挥着重要的作用。

1.2 国内外研究进展

突发水污染事件是由自然或人为原因引起的污染物泄露,导致大量有毒有害污染物进入水体,进而破坏水环境质量,影响用水安全的突发性事故,具有偶发,危害严重,难以处理等特点^[2]。目前针对突发水污染事件的国内外研究重点主要包括水污染事故风险识别、水污染事故仿真模拟、水污染事故的快速预测三个方面。张维新等人对重大突发环境污染事故提出了一种模糊评价的方法;Lincheva Stilyana等人利用指标分析的方法,对Iskar河流中的重金属突发污染事件进行风险评估;张波等人研发了水污染事故的水质模拟系统,对突发污染物硝基苯的时空变化特征进行仿真模拟。

1.3 研究意义与方法

处理突发水污染事件需获得实时监测数据并进行分析评价,存在评价预测周期长的问题。为解决上述问题,本文选取环境流体动力学模型对荆江进行突发水污染事件模拟,同时利用实测数据对数值模拟的结果进行验证,两者相互结合,能展现更为准确的污染物时空变化特征,保证预测的时效性与准确性。

环境流体动力学模型是一款综合环境流体动力学软件,可

以对河流、水库、湖泊等地表水水体进行水动力、污染物质扩散、水质变化等过程进行模拟^[3]。本文研究了包括径流量、流速、水位等水文特征的荆江典型水文特征分析; 搜集研究区域水文、地形、气象等数据资料, 利用实测逐日出库流量和实测逐日坝前水位作为边界条件, 建立水动力模型, 采用水域内水文站的全年实测水位数据对模型进行验证; 对突发水污染事件进行数值模拟, 采用水域内水文站的全年实测水位数据对模型进行验证^[4]。模拟污染物在江面上的浓度分布以及不同水位与流量条件下氰化物污染物在水体中的迁移扩散规律, 得到污染物在江面上的浓度分布情况以及时空变化特征。从而对突发水污染事件的影响进行预测预警分析并给出合理的防治建议。

2 环境流体动力学模型构建

2.1 实验数据

本文搜集了荆江的地形数据, 同时选取了十年间荆州市沙市站的逐日水位、流量监测数据。除此之外, 本文选取氰化物作为突发污染物, 考虑到其在水体中的降解情况, 确定氰化物的降解系数为0.76。

2.2 河网概化

数值模拟的离散化是流体力学计算研究中的必要手段, 河网概化是将主干道河流划分为一个个网格, 视作由多个微元组成, 进而用有限差分法对环境流体动力学模型中的控制方程进行计算求解^[5]。荆江水体流域地形复杂多变, 河道边界蜿蜒曲折, 为了减小边界不规则而带来的离散误差, 本文采用准确度更高的正交化网格对河道曲折部分进行更为密集的网格划分。确定网格类型后, 需选取合适的网格大小进行计算, 过大的网格会造成较大的计算误差, 无法反映空间分异效果, 导致模拟结果的准确性降低, 过小的网格会增加计算时间, 影响模型运算的收敛性、稳定性。

2.3 初始设置

河道地形图采用环境流体动力学模型自带模块进行网格剖分, 将河流概化后导入地形文件, 对水底高程进行插值, 对应分配到每一个网格中。通过设定初始水位, 考虑到流量和水位在实际情况中的变化情况, 共设置3种不同的水位流量条件作为初始条件进行模拟, 模拟过程中的其他时间流域内均无新的氰化物污染物输入^[6]。水动力模型的边界条件主要包括流量边界和水位边界两个方面, 上游考虑入库流量, 下游考虑水位边界, 在水动力模拟结果的基础上建立水质模型, 模拟计算不同流量水位条件下污染物的扩散情况以及时空分布规律, 并对水质模型进行率定, 验证可以满足使用要求。

2.4 模型结果

模型主要参数取值详见表1, 研究数据表明近十年的最大流量为40000m³/s、平均流量为12000m³/s、最小流量为4730m³/s, 在3种不同的流量及其对应水位条件下, 氰化物到达监测断面的时间分别为0.07d、0.13d、0.2d; 监测断面处的氰化物的峰值浓度分别为0.35mg/L、0.65mg/L、0.48mg/L; 污染物浓度超标持续时间分别为0.07d、0.27d、0.68d。

结果表明三种情景下, 氰化物仅沿左岸向河流中部进行扩散, 右岸均未受到污染; 在流量更大的情境下, 监测断面处氰化物到达的时间更短、超标时间更短, 流域内受氰化物影响面积更小; 监测断面的氰化物峰值浓度与流量之间呈非线性关系。

表1 模型主要参数取值

参数	描述	单位	取值
ΔT	时间步长	s	3
Z_0	底部粗糙高度	m	0.03
AHO	水平动能或物质扩散系数	m ² /s	1
AHD	无量纲水平扩散系数	无量纲	0.02

3 突发污染物模拟情景

3.1 模拟设定

研究假定上游断面发生突发性氰化物污染事故, 大量氰化物直接进入水体, 分析突发污染物的前锋迁移及衰减规律, 得到污染物到达下游重要目标区域浓度的时空分布规律、峰值浓度、停留时间等。

3.2 设定分析

选取氰化物为突发污染物, 视为纯物质, 氰化物流量10m³/s, 设置5000kg污染物的泄露量, 对应氰化物浓度为277.78mg/L, 结合实际情况考虑, 将突发污染物泄露的位置选取在上游魏宏码头, 分析下游左岸荆州市取水口处氰化物的时空分布规律以及氰化物浓度的削减情况。

氰化物属于有致命毒性的化学物质, 通常运用特定车辆在陆地上进行运输或者利用船只在江面上进行运输, 结合实际情况, 将情景设定为运载氰化物的货物船只在荆江左岸魏宏码头处发生泄露事故, 导致氰化物瞬时泄露, 对荆江造成突发水污染, 在每个选取情景的00:00时刻发生泄露。由于不同的季节对应的流量与水位不同, 污染物的时空分布特征也会不同, 因此为得到更为准确全面的模拟结果, 此次研究根据综合考虑流量的最大值、最小值、平均值流量值, 选取的模拟情景如表2。

表2 工况设定参数

	污染物总量 (kg)	污染物流量 (m ³ /s)	污染物掉落时间 (h)	污染物浓度 (mg/L)	泄露位置	流量 (m ³ /s)	水位 (m)	选取原因
情景 1	5000	10	0.5	277.78	魏宏码头	40000	42.09	最大流量
情景 2	5000	10	0.5	277.78	魏宏码头	12000	34.50	平均流量
情景 3	5000	10	0.5	277.78	魏宏码头	4730	31.06	最小流量

在工况参数确定的过程中, 结合实际情况, 选取了具有代表性的流量水位数据, 根据最大流量40000m³/s、平均流量12000m³/s、最小流量4730m³/s及其对应的水位, 使得选取的情景在具有代表性的同时, 保证数据的合理性。根据工况设定的情况, 模拟得到了不同水位、流量条件下, 污染物在目标流域内的

迁移扩散规律和时空分布情况, 污染物浓度超标时间以及峰值浓度。

3. 3模拟结果分析

根据地表水II类水质标准, 氰化物的安全浓度不得高于0.05mg/L。根据3种不同水文条件模拟得到了每种情景对应0.1d、0.2d、0.5d、0.7d、1d污染物的分布情况、监测断面氰化物浓度变化、响应时间、持续时间等, 具体结果如下。

情景1中, 氰化物在40000m³/s的流量条件下扩散范围较小, 方向仅沿左岸扩散, 在0.1d时受影响面积较大, 氰化物浓度较高, 在0.2d时流域内以及监测断面处氰化物浓度有所降低, 受污染范围变小, 0.5d后流域内以及监测断面处未检测到氰化物污染, 污染物的扩散以及浓度的衰减速度最快。在最大流量40000m³/s的条件下, 下游监测断面氰化物的响应时间为0.07d; 监测断面处的氰化物的在0.1d时到达峰值浓度0.35mg/L; 污染物浓度超标持续时间为0.07d; 0.1d后氰化物浓度开始逐步降低, 0.13d后监测断面水质达到地表水II类氰化物浓度要求, 小于0.05mg/L, 在0.14d后监测断面处氰化物浓度降低为0, 突发氰化物对监测断面的污染影响结束。

情景2中, 选取平均流量12000m³/s, 对应水位34.50m, 氰化物在12000m³/s的流量条件下, 0.1d时扩散面积较大, 氰化物污染主要分布在河流左岸和河流中部, 0.2d时氰化物沿左岸向下游迁移扩散, 上游受氰化物污染的流域面积减小, 0.5d时流域氰化物浓度大幅度降低, 仅左岸部分区域受到氰化物污染, 且浓度较低。0.7d后仅有极少沿左岸的流域受到低浓度氰化物污染, 且低于0.05mg/L, 达到地表水II类氰化物浓度标准要求。在平均流量12000m³/s的条件下, 下游监测断面氰化物的响应时间为0.13d; 监测断面处的氰化物的在0.18d时到达峰值浓度0.65mg/L; 污染物浓度超标持续时间为0.27d; 0.18d后氰化物浓度开始逐步降低, 0.37d后监测断面水质达到地表水II类氰化物浓度要求, 小于0.05mg/L, 在0.45d后监测断面处氰化物浓度降低为0, 突发氰化物对监测断面的污染影响结束。

情景3中, 选取最小流量4730m³/s, 对应水位31.06m。氰化物在最小流量4730m³/s的条件下, 0.1d时氰化物污染, 仅分布在河段上游的左岸和河流中间位置, 受污染区域面积较大; 0.2d时氰化物沿左岸向下游扩散, 污染面积有所增大, 整个流域内氰化物浓度处于较高水平; 0.5d时上游受污染区域面积减小, 上游左岸以及下游河段中部氰化物浓度呈下降趋势; 0.7d时受污染区域面积进一步减小, 氰化物浓度进一步降低, 受影响区域仍集中在左岸; 1.0d时受污染区域面积大幅度减小, 氰化物浓度明显降低,

仅有中游少部分区域的氰化物浓度处于较高水平。在最低流量4730m³/s的条件下, 下游监测断面氰化物的响应时间为0.2d; 监测断面处的氰化物的在0.28d时到达峰值浓度0.48mg/L; 污染物浓度超标持续时间为0.68d; 0.28d后氰化物浓度开始逐步降低, 0.78d后监测断面水质达到地表水II类氰化物浓度要求, 小于0.05mg/L, 在0.88d后监测断面处氰化物浓度降低为0, 突发氰化物对监测断面的污染影响结束。

4 结论与展望

本文借鉴了河道型突发水污染事故的数值模拟研究方法, 将环境流体力学的模型应用到荆江的突发水污染事件的模拟中, 构建了研究区域的水动力模型、氰化物扩散模型, 主要分析了3种典型水文条件下突发氰化物的时空分布规律, 以及监测断面污染物浓度的变化情况, 分析上述结果可知, 荆江在流量较大的时期污染物扩散速度更快, 受影响区域面积更小。荆江上游左岸发生污染物泄露后, 仅河流左岸和中间部分会受到影响, 右岸未受到污染。荆江上游左岸发生污染物泄露后, 下游左岸取水口监测断面受到的影响与流量大小有关, 流量越大, 下游断面响应时间越短, 受污染时间越短。本文根据研究结果, 提出了如下建议, 控制或限制危险物品运输车辆或船只的通行, 从源头上控制突发水污染事件发生的概率; 加强岸边排污口的管理, 坚持达标排放。建立突发水污染事件的预警系统; 建立后备水源地或增设不同位置的取水口, 保障城市的供水安全。

本文的研究取得了一定的成果, 但是由于本文的研究流域地形复杂, 仅建立了荆江的二维水动力模型, 在垂直方向上仅分为一层进行研究, 存在一些方面的不足。后续可进一步研究三维尺度下污染物的扩散情况以及时空分布规律。

[参考文献]

- [1]李翀, 李玮, 周睿萌. 长江大保护战略下科技支撑长江生态环境治理的几点思考[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(02): 356-360.
- [2]武万国. 湘江长株潭河段突发重金属水污染事故模拟研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(10): 63-65+67.
- [3]张笑南. 郑州龙湖突发水污染事件污染物扩散特征及处置对策研究[D]. 城市: 吉林大学, 2014.
- [4]冯罗杰. 变化环境下荆江-洞庭湖水系水动力响应机制及物质输运规律研究[D]. 城市: 中南民族大学, 2019.
- [5]舒长莉. 河道型水源地突发水污染事故模拟研究[D]. 城市: 江西师范大学, 2019.
- [6]宋礼波, 窦明, 姚保垒. 突发重金属水污染事故环境风险评估模型研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(05): 69-72.