

齐于顺,刘仁志,张启月,等.长江干流铜陵段突发水污染情景模拟分析[J].环境工程技术学报,2022,12(2):607-614.

QI Y S,LIU R Z,ZHANG Q Y,et al.Scenario simulation analysis of abrupt water pollution in Tongling section of the mainstream of the Yangtze River[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 607-614.

长江干流铜陵段突发水污染情景模拟分析

齐于顺¹,刘仁志^{1*},张启月¹,崔保山¹,郭忠²,王飞²,方丽²,方陵²

1.北京师范大学环境学院

2.铜陵市生态环境局

摘要 突发水环境事件情景模拟分析对风险防控与应急处置至关重要。在对铜陵市沿江化工企业风险物质泄漏情景分析的基础上,采用 MIKE21 二维水动力-水质耦合模型对长江干流铜陵段突发水污染事故进行了模拟。模型验证结果表明,构建的水动力模型满足精度要求。对某化工企业储罐 3 种泄漏情景下的模拟结果表明:同一水文期,风险物质对下游敏感受体的污染程度和污染时间主要与泄漏总量有关,储罐完全泄漏情景对下游敏感受体影响最大,其最大污染峰团浓度高于罐体 20% 管径破裂和罐体 100% 管径破裂泄漏情景 2~3 个数量级;不同水文期,泄漏物质在丰水期到达下游敏感受体的时间最短,储罐完全泄漏时风险物质到达下游三水厂取水口用时 75 min,而在平水期和枯水期分别为 103 和 111 min,同时影响时间更长、浓度更高,下游五水厂取水口和铜陵市出境断面在平水期和枯水期先后有 2 次污染峰团到达。

关键词 突发水污染事故; MIKE21; 水质模拟; 化工企业; 风险物质

中图分类号: X522 文章编号: 1674-991X(2022)02-0607-08 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210662

Scenario simulation analysis of abrupt water pollution in Tongling section of the mainstream of the Yangtze River

QI Yushun¹, LIU Renzhi^{1*}, ZHANG Qiyue¹, CUI Baoshan¹,

GUO Zhong², WANG Fei², FANG Li², FANG Ling²

1.School of Environment, Beijing Normal University

2.Tongling Ecological Environment Bureau

Abstract Scenario simulation analysis of abrupt water pollution is important for risk prevention and control and emergency response. Based on the analysis of risky substance leakage scenarios of chemical enterprises, MIKE21, a two-dimensional hydrodynamic-water quality coupling model, was used to simulate the abrupt water pollution accident in the Tongling section of the mainstream of the Yangtze River. The model verification showed the constructed hydrodynamic model could meet the accuracy requirements. The simulation results of three different leakage scenarios for one chemical company's storage tank showed that: in the same hydrological period, the pollution degree and time of risky substances to downstream sensitive receptors were mainly related to the total amount of leakage, and it had the most serious impact on downstream sensitive receptors when the storage tank was leaked entirely, and the maximum pollution peak was 2~3 orders of magnitude higher than 20% and 100% pipe diameter leakage. In different hydrological periods, risk substances took the shortest time to get to downstream sensitive receptors in the wet period, and it took 75 min for the risky material to reach the water intake of the Third Water Plant when the storage tank was leaked completely; but it took 103 min and 111 min during the normal and dry periods, respectively, and the impact time was longer and the concentration was higher. And there were two pollution peaks successively at the water intake of the downstream plant and the outbound section of the city in the normal and dry periods.

Key words sudden water pollution accident; MIKE21 model; water quality simulation; chemical enterprise; risk substance

收稿日期:2021-11-11

基金项目:铜陵市长江生态环境保护修复驻点跟踪研究项目(2020CGSF134);国家自然科学基金项目(52170186)

作者简介:齐于顺(1998—),男,硕士研究生,主要从事环境风险管理研究,202021180054@mail.bnu.edu.cn

* 责任作者:刘仁志(1974—),男,副教授,主要从事区域环境承载力、环境风险、环境评价规划与管理研究,liurenzhi@bnu.edu.cn

突发环境事件是指由于污染物排放或自然灾害、生产安全事故等因素,导致有毒有害物质大量进入环境介质,突然造成或可能造成环境质量下降,危及公众身体健康和财产安全,需要采取紧急措施予以应对的事件^[1]。与其他普通污染事件不同的是,突发环境事件具有随机性、复杂性、高强度、高风险的特点^[2],会在短时间内造成周边环境污染物超标,甚至会造成长期影响^[3]。其中,突发水环境事件最易发生,李旭等^[4]对 2011—2017 年突发环境污染事件的受体类型进行统计发现,水是主要污染受体,占比高达 85.59%。长江沿岸城市“化工围江”、上下游排污口与取水口交错分布等布局性风险突出,导致长江水环境风险形势不容乐观^[5-6]。此外,由于长江水体流动性强的特点,突发水环境事件的影响范围更大,响应时间更短,如果不能及时妥善处置,短时间内可能导致饮用水水源地污染、水域生态环境破坏,甚至造成跨界污染,产生极大的不良社会影响^[7-8]。目前突发水环境事件仍是影响供水和人民安全的重要威胁因素^[9-10]。因此,有必要通过多种方式提前做好突发水环境事件的预测预警与应急准备,有效防范突发水污染事故,降低突发水环境风险^[11]。

水环境模型可对水环境系统及其内部发生的复杂过程进行定量化描述^[12],模拟污染物在一定时间和空间范围内的迁移转化过程,计算污染物到达下游环境敏感目标的时间、污染团的历经时间和污染物的浓度分布等^[13],有助于帮助应急管理人员了解事故可能的发展趋势并做出合理的处置。常用的河流水质模型主要有 EFDC、WASP、QUAL2E、QUAL2K、MIKE、BASINS、SWAT 等^[13-17]。其中,丹麦水力研究所开发的平面二维模型 MIKE21,因用户界面友好,具有多种计算网格、模块供用户选择,且有强大的前、后处理功能,被广泛用于河流^[18-19]、湖泊^[20-21]、水库^[22]、海湾^[23]等水质模拟。如袁玥等^[18]应用 MIKE21 模型对长江蕲春段非正常排污情况进行了模拟,舒长莉等^[24]应用 MIKE21 模型对赣江南昌段突发污染事故进行了模拟,均实现了对污染影响后果的量化表达。为贯彻落实习近平总书记“不搞大开发,共抓大保护”的重要指示精神,着力解决长江水环境、水生态、水风险突出问题^[25],为长江经济带高质量发展提供保证^[26],笔者以长江生态环境保护修复驻点跟踪研究工作为基础,利用 MIKE21 构建长江干流铜陵段突发水污染事故水动力-水质耦合模型,考虑了多种可能的泄漏情景,并对不同水文期进行模拟分析,实现对突发水污染事故的动态模拟,以期为长江干流铜陵段水域突发水污染事故风险防范、预测预警和应急处置提供参考。

1 研究区概况

铜陵市位于安徽省中南部、长江下游(117°04'E~118°09'E, 30°38'N~31°09'N),是长江经济带重要节点城市。长江干流铜陵段全长 142.6 km,过境的长江水资源丰富,是铜陵市主要供水来源,最小日平均流量为 10 700 m³/s,最大日平均流量为 68 400 m³/s,年平均流量为 29 250 m³/s(2019 年),水量年内变化显著。研究河段内环境敏感目标包括铜陵市淡水豚国家级自然保护区和 3 处集中式生活饮用水水源地(铜陵市水厂、新三水厂和第五水厂)。淡水豚国家级自然保护区范围上始铜陵市枞阳县老洲镇,下至铜陵市义安区金牛渡,全长 58 km,其中核心区、缓冲区和实验区面积分别为 9 534、6 360、15 624 hm²^[27]。横港扫把沟地区紧临长江,是铜陵市最早的工业聚集区之一,由于历史原因,该区域功能布局不合理,工业用地与居住用地混杂,多家企业距长江直线距离不足 1 km。目前该区域仍存留多家风险企业,也没有成立工业园区管委会,这给下游集中式饮用水水源地、淡水豚国家级自然保护区以及长江水体水质安全带来重大威胁。研究区概况如图 1 所示。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区水文数据采用 2019 年大通水文站实测逐日流量数据和横港、荻港 2 个水位站实测逐日水位数据;地形文件为 1:25 000 实测水下地形数据;风险企业、饮用水水源保护区和淡水豚保护区等相关资料由铜陵市生态环境局提供。

2.2 MIKE21 模型基本原理

长江铜陵段江面宽度远大于深度,且不存在明显分层现象,因此采用二维水动力模型可以满足研究需要^[28]。选取 MIKE21 Flow Model FM 模型进行模拟,二维水动力模型基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程,并服从于 Boussinesq 假定和静水压力的假定,水动力控制方程组(浅水方程)为^[24,29-31]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & \\ f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - & \\ \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S & \end{aligned} \quad (2)$$

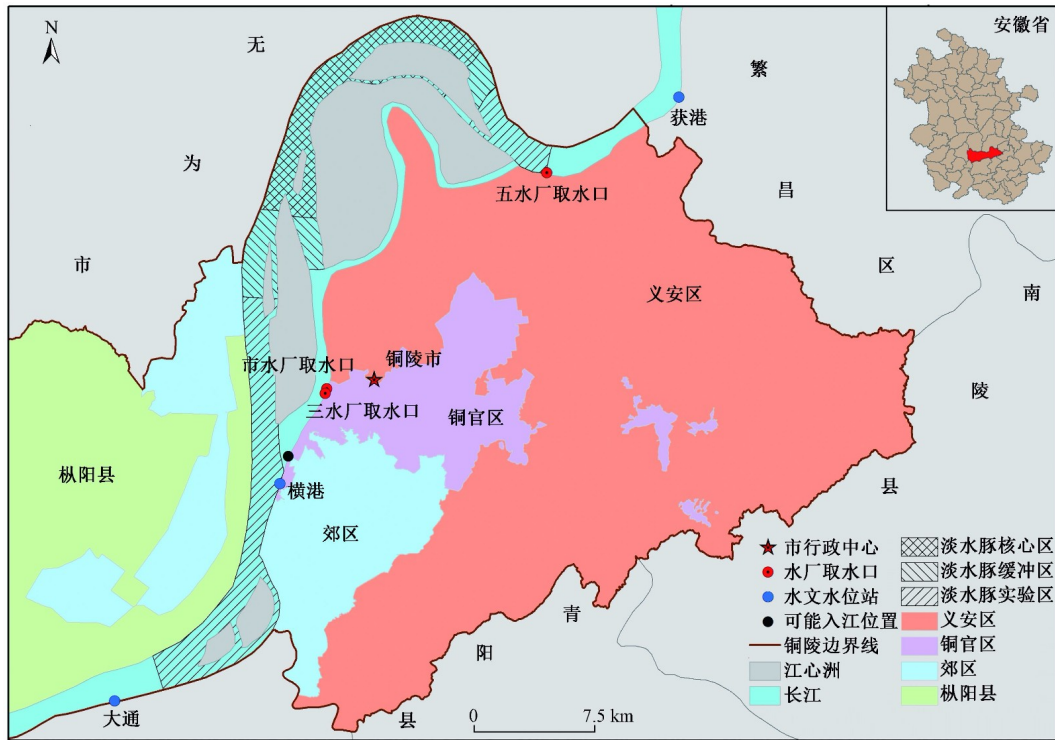


图 1 研究区概况

Fig.1 Schematic map of the study area

$$\frac{\partial h \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h \bar{u} \bar{v}}{\partial x} = -f \bar{u} h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + h v_s S$$

式中: t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标; η 为水位, m; d 为静止水深, m; h 为总水深, $h = d + \eta$, m; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的速度分量; f 为哥氏力系数, $f = 2\omega \sin\varphi$, 其中 ω 为地球自转角速度, φ 为当地纬度; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; ρ 和 ρ_0 分别为水体和参考水的密度, kg/m^3 ; P_a 为大气压力, Pa; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 分别为 x 轴的法线方向、 y 轴的法线方向、 xy 表面上的切线方向和 yx 表面上的切线方向的辐射应力分量; A_x 、 A_y 为应力分项; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为黏滞切应力分量; S 为源汇项; u_s 、 v_s 为源项水流流速, m/s; \bar{u} 、 \bar{v} 为沿水深平均的流速; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为水面风应力在 x 、 y 方向上的分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 为河床(海底)底部应力的分量。

\bar{u} 、 \bar{v} 计算公式如下:

$$h \bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, h \bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

水质模块建立于二维空间下的输移扩散方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - P + S \quad (5)$$

式中: C 为各典型污染物浓度; D_x 、 D_y 为各典型污染物在 x 、 y 上的扩散系数; P 为各典型污染物降解项。

MIKE21 模型采用有限体积法对计算区域进行空间离散, 将该连续统一体细分为若干个不重叠的三角形或四边形单元。模型计算的时间和精度取决于计算数值方法所使用的求解格式精度, 浅水方程的时间积分和输移扩散方程基于半隐格式求解, 相应平流项采用显式格式求解, 垂直对流项采用全隐格式求解。受显式格式稳定性的限制, 为保持模型计算的稳定性, 模型中时间步长的设定必须保证 CFL(Courant-Friedrich Levy) 数小于 1。浅水方程和输移扩散方程在笛卡尔坐标上的 CFL 分别定义为:

$$CFL_{HD} = \left(\sqrt{gh} + |u| \right) \frac{\Delta t}{\Delta x} + \left(\sqrt{gh} + |v| \right) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (6)$$

$$CFL_{AD} = |u| \frac{\Delta t}{\Delta x} + |v| \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (7)$$

式中: Δx 和 Δy 为 x 、 y 方向的特征长度; Δt 为时间间距。 Δx 和 Δy 近似于三角形网格的最小边长, 水深和流速值为三角形网格中心的取值。

2.3 模型建立与验证

利用 MIKE21 建立水动力-水质耦合模型, 模型构建流程如图 2 所示。基于铜陵市水利工程图和实测水下地形数据, 利用 ArcMap 与 AutoCAD 软件提取生成长江铜陵段水陆边界线(Land_xyz 文件), 并

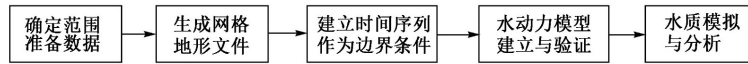


图 2 模型构建流程

Fig.2 Model construction flowchart

读取相应水深散点数据(Water. xyz 文件)。在 Mesh Generator 中导入水陆边界线(Land. xyz 文件)并进行光滑处理,采用非结构三角网格对河道地形进行处理,然后生成网格;插入地形水深散点数据(Water. xyz 文件)并进行地形插值后导出 mesh 文件(图 3),计算区域共有 10 896 个三角网格,6 886 个网格节点。模型上边界采用 2019 年大通水文站逐日流量时间序列,下边界采用 2019 年荻港水位站逐日水位时间序列。选择 Flow Model FM 建立水动力-水质耦合模型,经过多次调试后选择合适参数;将模拟时长设为 24~30 h,时间步长选择 60 s;为保证模型稳定运行,设置 CFL 为 0.8,最大时间步长为 60 s;干水深(h_{dry})为 0.005 m,淹没水深(h_{flood})为 0.05 m,湿水深(h_{wet})为 0.1 m;底床摩擦力采用曼宁系数,取值 $32\text{ m}^{1/3}/\text{s}$;初始水位根据不同水文期选择模拟对应开始日期水位值;其他参数采用推荐或默认值。在对流扩散模块,添加需要模拟的风险物质硫酸,从更安全的角度考虑预测结果,将硫酸降解系数设为 0^[32];并在源汇项中添加风险物质初始浓度和泄漏流量等相关数据。

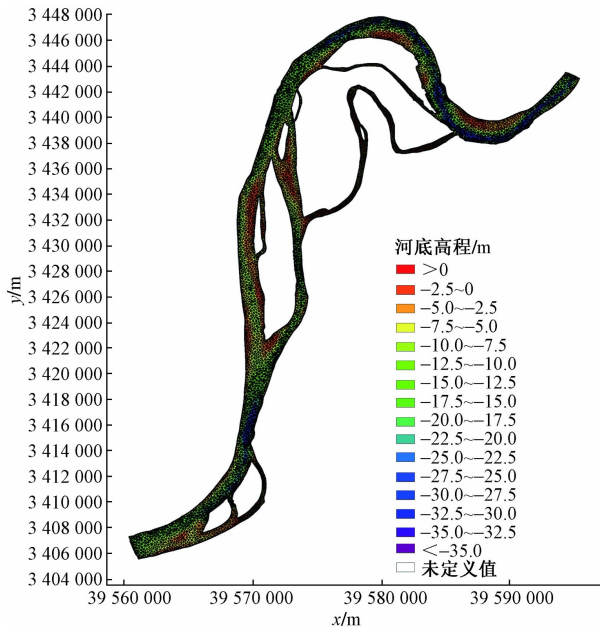


图 3 水动力模型网格地形高程

Fig.3 Grid terrain elevation of hydrodynamic model

因长江铜陵段水文情势变化显著,有明显的丰、平、枯水文情势节律性变化,且枯水期部分时间段水位站处于不工作状态。故对丰、平、枯水文时期部

分时间段进行模拟,并选取 2019 年横港水位站逐日水位数据进行验证,将实测水位数据与模拟水位数据进行对比。经对照发现(图 4),模拟水位与实际水位数值相差不大,平均相对误差为 2.4%,曲线趋势基本相似,波峰与波峰相对,波谷与波谷相对。模拟值与实测值吻合性良好,可作为水质模块的水动力基础。

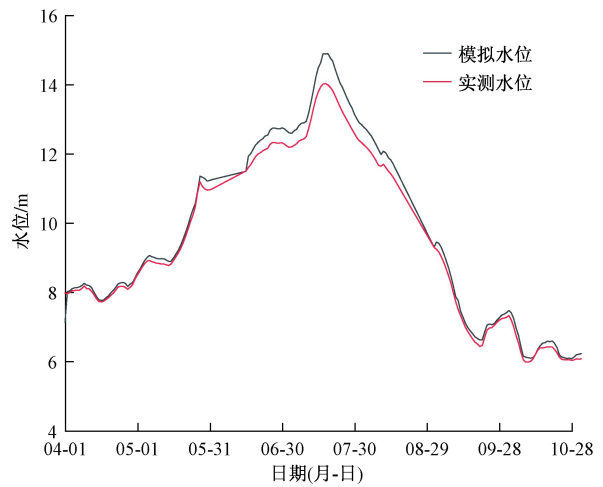


图 4 横港水位站 2019 年模拟水位与实测水位

Fig.4 Simulated and measured water level of Henggang water-level station in 2019

2.4 泄漏情景设定与水质模拟

横港扫把沟地区多家风险企业的储罐内存在大量风险物质,给下游集中式饮用水水源地、淡水豚国家级自然保护区以及长江水体水质带来巨大安全隐患。针对某化工企业硫酸储罐,设定 3 种泄漏情景,分别为罐体 20% 管径破裂、罐体 100% 管径破裂和储罐完全泄漏,泄漏时间均设为 10 min。在丰水期、平水期和枯水期对 3 种泄漏情景分别进行模拟,具体泄漏时间分别设定为 7 月 10 日、4 月 16 日和 10 月 12 日的 06:00。所设定的泄漏情景如表 1 所示。

表 1 3 种设定泄漏情景

Table 1 Three supposed leakage situations

水文期	泄漏情景	泄漏时间/min
丰水期/平水期/枯水期	情景A: 罐体20%管径破裂	10
	情景B: 罐体100%管径破裂	10
	情景C: 储罐完全泄漏	10

硫酸罐体 20% 管径和 100% 管径破裂时泄漏速率用伯努利方程^[33]计算(液体在泄漏口没有急骤蒸发),公式如下:

$$Q_L = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(P_1 - P_0)}{\rho} + 2gh} \quad (8)$$

式中: Q_L 为液体泄漏速率, kg/s; P_1 为容器内介质压力, Pa; P_0 为环境压力, Pa; ρ 为泄漏液体密度, kg/m³; h 为裂口之上液位高度, m; C_d 为液体泄漏系数, 取 0.62; A 为裂口面积, m²。

根据实地调研, 判断突发泄漏情况下的可能入江位置如图 1 所示, 将不同泄漏情景下计算得到的泄漏流量-时间序列等相关数据输入构建的水动力-水质耦合模型, 可得到不同水文期的风险物质迁移扩散分布结果。

3 结果与讨论

采用 MIKE21 水动力-水质耦合模型对 3 种泄漏情景在丰水期、平水期和枯水期的风险物质迁移扩散情况分别进行了模拟, 定量化表达出风险物质到达下游环境敏感目标的时间、最大污染峰团浓度和污染持续时间等。泄漏硫酸对长江水质的影响可通过对水体 pH 的影响来反映^[32], GB 3838—2002《地表水环境质量标准》规定地表水 I 类~V 类水域水体 pH 为 6~9, 当 pH 为 6 时, 通过计算得到对应硫酸的浓度为 0.049 mg/L, 即硫酸浓度大于 0.049 mg/L 时会对下游各风险受体和长江水质造成影响。通过水质模型模拟结果可得到储罐泄漏后各时间节点的浓度, 进而预测和判断影响程度。下面针对同一水文期不同泄漏情景和同一泄漏情景在不同水文期的水质模拟结果进行说明。

3.1 不同泄漏情景下水质模拟结果

以 3 种不同泄漏情景在丰水期模拟结果为例进行说明, 模拟结果如图 5~图 7 所示。3 种泄漏情景下最大污染峰团到达下游敏感受体所需时间相同, 到达三水厂取水口、市水厂取水口、淡水豚核心区、五水厂取水口和市出境断面的时间分别为 89、93、332、677、751 min, 这是由于同一时间段的水动力结果相同。但在储罐完全泄漏情景下, 风险物质到达下游敏感受体时间稍早于其他 2 种泄漏情景, 风险物质完全流敏感受体时间稍晚于其他 2 种泄漏情景, 即影响时间更长。此外, 该情景下最大污染峰团浓度也明显高于其他 2 种泄漏情景下 2~3 个数量级。在三水厂取水口处, 20% 管径破裂时最大污染峰团浓度为 1.891 mg/L, 100% 管径破裂时最大污染

峰团浓度为 47.273 mg/L, 储罐完全泄漏时最大污染峰团浓度为 1 381.39 mg/L, 这是由于不同泄漏情景下风险物质泄漏总量不同。随着时间的延长, 风险物质被稀释, 到达下游各敏感受体时的最大污染峰团浓度会逐渐降低。在 3 种不同泄漏情景下, 风险物质到达市出境断面时的最大污染峰团浓度分别为 0.090 5、2.262 4 和 66.123 4 mg/L, 均超过 0.049 mg/L 的标准要求, 会造成不同程度的跨界污染。淡水豚核心区保护区范围最大, 其受影响持续时间也最长, 分别为 251、313、343 min。

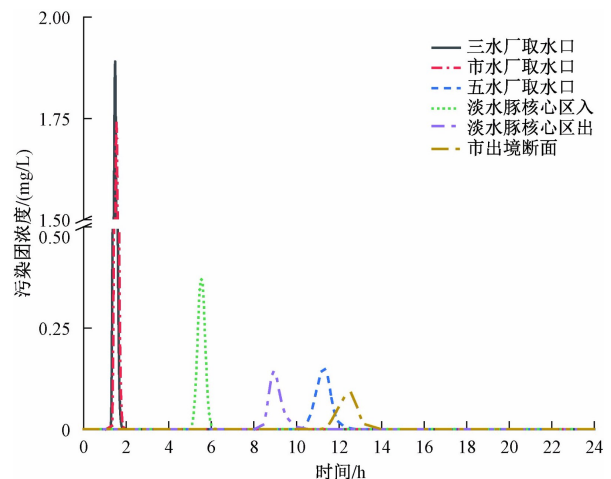


图 5 丰水期罐体 20% 管径破裂时水质模拟结果

Fig.5 Simulation results of water quality when 20% pipe diameter of tank breaks in wet period

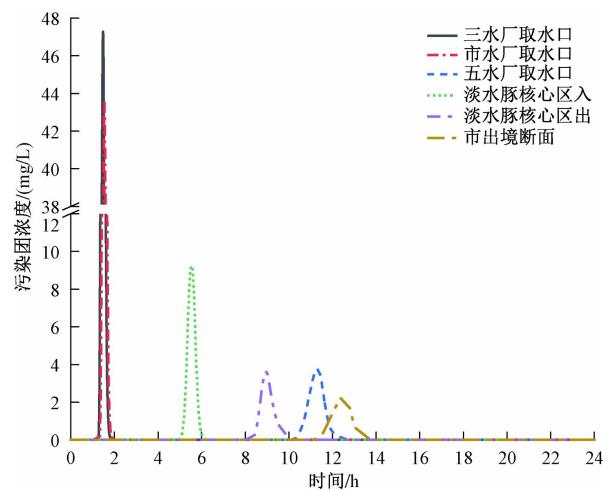


图 6 丰水期罐体 100% 管径破裂时水质模拟结果

Fig.6 Simulation results of water quality when 100% pipe diameter of tank breaks in wet period

3.2 不同水文期泄漏水质模拟结果

以不同水文期储罐完全泄漏情景的模拟结果为例进行说明, 模拟结果如图 7~图 9 所示。根据模拟结果可知, 丰水期风险物质到达下游敏感受体时间最短, 其中风险物质到达三水厂取水口仅用 75 min,

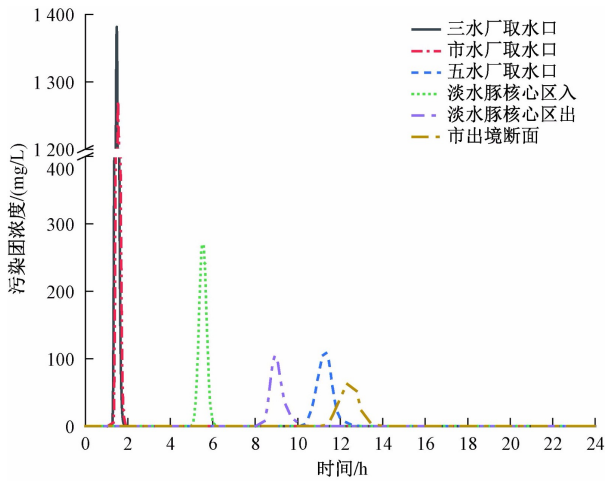


图 7 丰水期储罐完全泄露时水质模拟结果

Fig.7 Water quality simulation results when the tank breaks completely in wet period

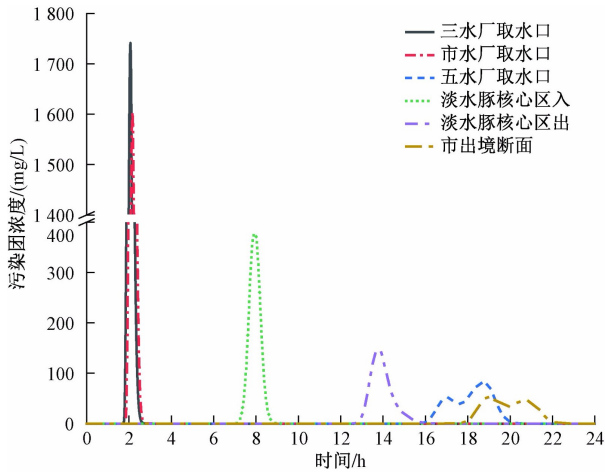


图 8 平水期储罐完全泄露时水质模拟结果

Fig.8 Water quality simulation results when the tank breaks completely in normal period

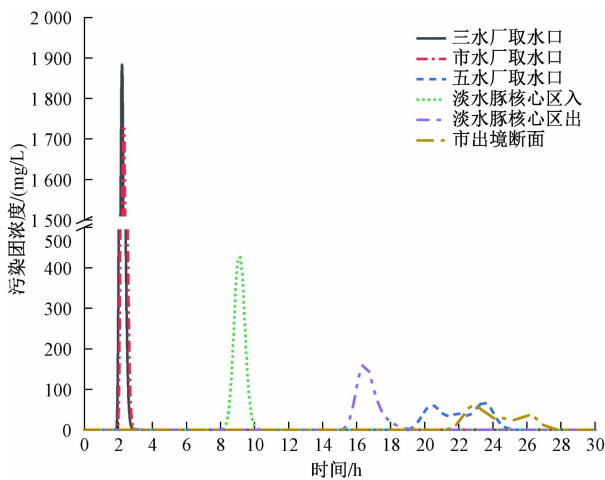


图 9 枯水期储罐完全泄露时水质模拟结果

Fig.9 Water quality simulation results when the tank breaks completely in dry period

影响持续时间为 43 min。相较于丰水期,平水期和

枯水期的流速更小,风险物质需更长时间到达下游敏感受体,如平水期、枯水期风险物质到达三水厂取水口的时间分别为 103 和 111 min。但在平水期和枯水期,风险物质对敏感受体的影响持续时间会更长,其对三水厂取水口的影响持续时间分别为 65 和 72 min。同时因流量更小,风险物质在市水厂取水口、三水厂取水口和淡水豚核心区的最大污染峰团浓度会更高,枯水期的浓度分别为 1 883、1 736 和 426 mg/L。而到达下游更远的五水厂取水口时,丰水期、平水期、枯水期浓度依次降低,其主要原因可能是停留时间较长,风险物质被稀释^[24]。平水期和枯水期,在五水厂取水口、市出境断面处会先后出现 2 次污染峰团,这是由于江心洲两侧水体流速相差较大,部分风险物质随右侧支流先行到达敏感受体,随后左侧支流中的风险物质再次到达敏感受体。

综上,风险物质对下游风险受体的影响程度与泄漏总量和水文期密切相关,所得结论与长江其他段类似研究^[29,31]相同。同一水文期,风险物质泄漏总量越大,对下游敏感受体的影响时间越长,污染团浓度也越高。泄漏风险物质在平水期和枯水期时,对受体的影响时间更长;在丰水期时,到达受体的时间更短,即应急反应时间更少。

4 结论

(1)利用 MIKE21 水动力-水质耦合模型,对长江铜陵段某化工企业储罐内风险物质在不同水文期、3 种不同泄漏情景下的突发水污染事故进行了模拟,所建立的水动力模型模拟水位结果与实测结果吻合性良好,曲线趋势基本相似,表明模型选取参数较为合理,可作为水质模块的水动力基础。

(2)在设定的 3 种不同泄漏情景下,储罐完全泄漏时因其泄漏总量大,导致风险物质浓度最高,影响时间最长。在不同水文期的模拟结果显示,丰水期风险物质到达下游敏感受体的时间最短,留给应急人员处置时间也最少;平水期和枯水期风险物质的最大污染峰团浓度会更高,影响时间会更长,且在五水厂取水口和市出境断面处先后有 2 次污染峰团到达。

(3)本研究基于 MIKE21 构建了适用于长江干流铜陵段的水动力-水质模型,通过对风险企业内多种风险物质在不同水文情势和泄漏情景下的模拟分析,可建立当地的模拟预测预警资料库,为突发水污染事故的预测预警、应急处置提供决策参考。结合本次模拟结果,因风险物质在丰水期到达受体时间更短,平水期和枯水期对受体影响时间更长,当接到突发水环境事件报告时,在丰水期应立即采取措施

保护风险受体,在平水期和枯水期则首先对泄漏风险源进行控制,从而减少影响时长。此外,有必要通过加强日常环境安全检查等措施,及时发现并整改问题,从而有效降低对水环境的影响程度。后续研究还需采集更为丰富的水文数据、水质监测数据等,不断进行完善以进一步提高模型模拟的准确性。

参考文献

- [1] 国家突发环境事件应急预案[EB/OL]. (2019-12-27)[2021-10-17]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/hjyj/yjzb/201912/t20191227_751708.shtml.
- [2] 宋永会,袁鹏,彭剑峰,等.突发环境事件风险源识别与监控技术创新进展:(I)环境风险源识别技术与应用[J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(5): 347-352.
- SONG Y H, YUAN P, PENG J F, et al. Technological innovation progress of risk sources identification and monitoring of sudden environmental pollution accidents: (I) risk sources identification technologies and applications[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5(5): 347-352.
- [3] 陈成健.突发环境事件应急与管理研究[J]. *资源节约与环保*, 2018(7): 122.
- [4] 李旭,吕佳佩,裴莹莹,等.国内突发环境事件特征分析[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(2): 401-408.
- LI X, LÜ J P, PEI Y Y, et al. Analysis of the characteristics of environmental emergencies in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(2): 401-408.
- [5] 李海生,王丽婧,张泽乾,等.长江生态环境协同治理的理论思考与实践[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 409-417.
- LI H S, WANG L J, ZHANG Z Q, et al. Theoretical thought and practice of eco-environment synergistic management in the Yangtze River[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(3): 409-417.
- [6] 刘录三,黄国鲜,王璠,等.长江流域水生态环境安全主要问题、形势与对策[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1081-1090.
- LIU L S, HUANG G X, WANG F, et al. Main problems, situation and countermeasures of water eco-environment security in the Yangtze River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1081-1090.
- [7] 陈思莉,黄大伟,张政科,等.流域突发水污染事件应急处置工程削污技术[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(7): 2233-2238.
- CHEN S L, HUANG D W, ZHANG Z K, et al. Pollution reduction technologies for emergent water pollution disposal in river basins[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, 15(7): 2233-2238.
- [8] 李春晖,田雨桐,赵彦伟,等.突发水污染风险评价与应急对策研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1161-1167.
- LI C H, TIAN Y T, ZHAO Y W, et al. Research progress on risk assessment and emergency countermeasures of sudden water pollution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1161-1167.
- [9] PAN F H, WANG Y B, ZHANG X X. Emergency measure of soft isolation controlling pollution diffusion response to sudden water pollution accidents[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2019, 80(7): 1238-1248.
- [10] CHENG T J, WANG P P, LU Q Y. Risk scenario prediction for sudden water pollution accidents based on Bayesian networks[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2018, 9(5): 1165-1177.
- [11] 张珂,刘仁志,张志娇,等.流域突发性水污染事故风险评价方法及其应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(4): 675-684.
- ZHANG K, LIU R Z, ZHANG Z J, et al. A method of environmental risk assessment for abrupt water pollution accidents in river basin[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(4): 675-684.
- [12] 朱瑶,梁志伟,李伟,等.流域水环境污染模型及其应用研究综述[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 3012-3018.
- ZHU Y, LIANG Z W, LI W, et al. Watershed water environment pollution models and their applications: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(10): 3012-3018.
- [13] 李林子,钱瑜,张玉超.基于EFDC和WASP模型的突发水污染事故影响的预测预警[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(8): 1010-1016.
- LI L Z, QIAN Y, ZHANG Y C. Forecasting and warning the accidental water pollution effect based on the EFDC and WASP[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8): 1010-1016.
- [14] ZHENG H Z, LEI X H, SHANG Y Z, et al. Sudden water pollution accidents and reservoir emergency operations: impact analysis at Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(6): 787-803.
- [15] 周华.河流综合水质模型QUAL2K应用研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2010, 8(1): 71-75.
- ZHOU H. Application research of a comprehensive river water quality model QUAL2K[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2010, 8(1): 71-75.
- [16] 郭晓明,乔明.MIKE21模型在排污口地表水影响预测方面的应用[J]. *四川环境*, 2021, 40(3): 117-123.
- GUO X M, QIAO M. Application of MIKE21 model in prediction of environmental impact of sewage outlet on surface water[J]. *Sichuan Environment*, 2021, 40(3): 117-123.
- [17] 王晓青,李哲.SWAT与MIKE21耦合模型及其在澎溪河流域的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(3): 426-432.
- WANG X Q, LI Z. SWAT and MIKE21 coupled models and their application in the Pengxi Watershed[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(3): 426-432.
- [18] 袁玥,师懿,程胜高.基于二维动态水质模型的长江蕲春段水污染扩散分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 212-217.
- YUAN Y, SHI Y, CHENG S G. Analysis of water pollution dispersion at Qichun section of the Yangtze River based on the 2-D dynamic water quality model[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(1): 212-217.

- [19] WU D A, SHAO Y C, PAN J X. Study on activities and concentration of saline group in the south branch in Yangtze River Estuary[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 1085-1094.
- [20] 宫雪亮, 孙蓉, 芦昌兴, 等. 基于MIKE21的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 70-76.
GONG X L, SUN R, LU C X, et al. Research on the water quality and quantity response based on MIKE21 in the upper-reach lakes of Nansi Lake[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(1): 70-76.
- [21] ZHU C J, LIANG Q, YAN F, et al. Reduction of waste water in Erhai Lake based on MIKE21 hydrodynamic and water quality model[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 958506.
- [22] XU M J, YU L, ZHAO Y W, et al. The simulation of shallow reservoir eutrophication based on MIKE21: a case study of Douhe Reservoir in North China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1975-1988.
- [23] 常颺, 张琼海, 姜宇, 等. 基于MIKE21模型的人海排污口对澳门近岸海域水质影响分析[J]. *人民珠江*, 2021, 42(3): 70-80.
CHANG Z, ZHANG Q H, JIANG Y, et al. Analysis of the impact of sewage outfall on the water quality of coastal waters of Macao based on MIKE21 model[J]. *Pearl River*, 2021, 42(3): 70-80.
- [24] 舒长莉, 李林, 冯韬. 基于MIKE21的河道饮用水源地突发污染事故模拟: 以赣江南昌段为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(3): 73-77.
SHU C L, LI L, FENG T. Simulation of emergent water pollution accident in river-type drinking water sources based on MIKE21: case of Nanchang reach of Ganjiang River[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(3): 73-77.
- [25] 张铃松, 丁文慧, 孟凡生, 等. 长江生态环境保护修复咸宁市驻点跟踪研究分析[J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(5): 48-50.
ZHANG L S, DING W H, MENG F S, et al. Research and analysis of stationary tracking in Xianning City of Yangtze River ecological environment protection and remediation[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(5): 48-50.
- [26] 王金南, 孙宏亮, 续衍雪, 等. 关于“十四五”长江流域水生态环境保护的思考[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1075-1080.
WANG J N, SUN H L, XU Y X, et al. Water eco-environment protection framework in the Yangtze River Basin during the 14th Five-Year Plan Period[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1075-1080.
- [27] 张西斌. 铜陵淡水豚国家级自然保护区长江段物种资源现状调查研究[J]. *现代农业科技*, 2017(11): 227-229.
- [28] WARREN I R, BACH H K. MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas[J]. *Environmental Software*, 1992, 7(4): 229-240.
- [29] 王青青, 吴昊, 王腊春, 等. 突发污染事故对水源地的影响研究: 以长江南京段为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(12): 1557-1563.
WANG Q Q, WU H, WANG L C, et al. Study on the impact of sudden pollution on water resources: a case study of Nanjing section of Yangtze River[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(12): 1557-1563.
- [30] 刘晨辉, 刘思颺, 李丹, 等. 基于MIKE21模型的长江中环排污口水质影响分析[J]. *中国农村水利水电*, 2020(1): 72-76.
LIU C H, LIU S S, LI D, et al. An analysis of the impact of Zhonghuan sewage outlet on water quality of the Yangtze River based on MIKE21 model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(1): 72-76.
- [31] 龙天渝, 屈瑶. 长江重庆主城区段突发水污染事故模拟研究[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(10): 90-103.
LONG T Y, QU Y. Simulation of an emergent water pollution accident in the portion of the Yangtze River running through the main urban areas of Chongqing[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(10): 90-103.
- [32] 刘晓东. 长江下游水域码头硫酸泄漏事故风险评价[J]. *水资源保护*, 2009, 25(3): 76-79.
LIU X D. Risk assessment of vitriol leakage accident at wharf in downriver reach of Yangtze River[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(3): 76-79.
- [33] 生态环境部. 建设项目环境风险评价技术导则: HJ 169—2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019. ◇