

# 张家口安固里河汛期突发水污染事故预测模拟研究

赵昕怡<sup>1</sup> 李鑫洋<sup>1</sup> 翟爱丰<sup>1,3</sup> 吴辉<sup>2</sup> 苏永军<sup>1,3</sup>

1 河北水利电力学院, 河北沧州, 061000;

2 河北省水利工程局集团有限公司, 河北石家庄, 050000;

3 河北省滨海湿地水资源配置与生态保护技术创新中心, 河北沧州, 061000;

**摘要:** 在当今时代中, 我国经济水平呈现高速发展趋势并且城市化进程不断加快。突发性水污染事故使得河流水体受到污染, 进而破坏水质环境。本研究以张家口内陆河流域为研究区, 构建了适用于研究区域的瞬时二维水质模型, 以氨氮为主要污染物, 对研究区域的汛期做出污染事故模拟, 得出关于研究区域内的时间浓度分布与空间位置分布的模拟结果。结果表明, 汛期时河流流速较大, 污染团扩散速度快; 事故初期, 污染物迁移主要为横向扩散, 之后为纵向扩散。研究可以为类似流域的突发水污染事故处理提供方法参考和数据基础。

**关键字:** 水污染事故; 水质模型; 张家口; 安固里河; 氨氮

**DOI:** 10.69979/3060-8767.25.09.026

## 引言

张家口安固里河地处坝上地区, 属于典型的半干旱大陆性气候, 降水稀少, 蒸发强烈, 水资源相对匮乏, 生态环境较为脆弱, 对当地的生态系统和居民生活至关重要, 但近几十年来水资源过度开采导致了河道断流、水质污染等问题。邢再亮通过水污染指标与污染途径分析指出了张家口地区水资源的重要性<sup>[1]</sup>。然而由于该流域长期受到工农业生产和人类活动的影响, 水环境污染问题较为突出。一旦发生突发性的水污染事故, 将对当地的生态环境、经济发展和社会稳定造成严重影响。李艳采用 MIKE11 水动力—水质耦合模型, 对太子河流域本溪段突发水污染事件进行模拟<sup>[2]</sup>。Zhang 等采用了区间瞬变污染分布模型来应用于凤凰山饮用水水源地, 得出了水污染事故研究的关键点是污染物扩散和空间分布的预测, 通过该文献了解到模型的预测的准确性在不断提高<sup>[3]</sup>。张晨璐为了实现河流水质的细粒度检测建立

了流扩散方程的水质预测模型, 具有较高的精度<sup>[4]</sup>。丁涛等人使用 MATLAB 软件对浙江省某河流上游的污染物扩散情况以及影响程度进行模拟, 证明了 MATLAB 软件对模拟下游各断面的水质情况的可行性<sup>[5]</sup>。何川采用改进的混沌蚁群算法对水质模型进行参数反演优化, 进行对比分析参数优化前后水质模型预测精度, 研究成果对于河流水质模型预测精度的改善具有参考价值<sup>[6]</sup>。因此, 通过加强流域突发性水污染事故的模拟预测分析, 对制定流域污染控制措施和生态保护具有指导意义<sup>[7]</sup>。

## 1 模型构建与验证

### 1.1 二维水质模型构建

模型的选择考虑多项因素如空间维数、时间尺度、污染负荷、河段范围等, 基于二维水质模型逐步建立突发性水污染事故模型, 本研究选取瞬时点源二维水质模型。其模型方程为式(1)。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_x \frac{\partial c}{\partial x} + u_y \frac{\partial c}{\partial y} + u_z \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - K_c \quad (1)$$

其中,  $c$  为污染物浓度 (mg/L);  $t$  为污染时间 (s);  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  分别为  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的扩散系数 ( $m^2/s$ );  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  为在  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向水流流动速度 (m/s);  $K_c$  为污染物降解速率 ( $d^{-1}$ )。

张家口安固里河属于内流河流域, 其流域河流长度远远大于深度, 深度较小, 则可以认为在深度方向上是

均匀的, 在污染物扩散方向上, 只需考虑  $x$  方向与  $y$  方向的扩散, 忽略  $z$  方向的扩散, 及为零, 选取研究区流域的一片较小区域, 污染物在扩散到岸边时, 会经受到岸边的反射作用, 该作用类似于镜面反射一般, 使得污染物浓度出现峰值, 使污染加重, 该情况下应选取岸边限制的瞬时点源模型, 根据上述内容选取只考虑一次反

射的瞬时点源水质模型，同时考虑研究区本底浓度，瞬时点源二维水质模型为式（2）。

$$c(x, y, t) = c_0 + \frac{M}{4\pi ht\sqrt{D_x D_y}} \exp(-Kt) \left\{ \exp\left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(y-u_y t)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(2b+y-u_y t)^2}{4D_y t}\right] + \exp\left[-\frac{(x-u_x t)^2}{4D_x t} - \frac{(2(B-b)+y-u_y t)^2}{4D_y t}\right] \right\} \quad (2)$$

污染物的初始质量计算按方程（3）计算。

$$M = Q_i C_i \quad (3)$$

其中， $c(x, y, t)$ 为研究区坐标位置为 $(x, y)$ 点 $t$ 时刻的污染物浓度（mg/L）； $M$ 为污染物质量（g）； $Q_i$ 为瞬时排放污染物的排放流量体积（m<sup>3</sup>）； $C_i$ 为某污染物的密度（g/m<sup>3</sup>）； $h$ 为水深（m）； $B$ 为河宽（m）； $b$ 为事故排放源和岸边之间的距离（m）； $K$ 为污染物综合衰减系数； $C_0$ 污染物本底浓度值（mg/L）； $t$ 为污染事故发生时间（s）。

## 1.2 模型验证

对于横向扩散系数的计算，本研究采用Elder经验公式<sup>[8]</sup>：

$$D_x = 5.93h\sqrt{ghi} \quad (4)$$

对于纵向扩散系数的计算，本研究采用经验公式：

$$D_y = \alpha h\sqrt{ghi} \quad (5)$$

其中， $\alpha$ 为经验常数（0.1-0.2）； $g$ 为重力加速度恒定（m/s<sup>2</sup>）； $i$ 为水力坡度。

以2022年为代表年，通过比较模拟数据与实测数据之间的误差，由图1可知，经验常数 $\alpha$ 取0.16时，最小误差3%，平均误差为6%，使得模拟数据结果与实测数据结果的误差控制在10%以内，符合误差要求，满足环境模型验证常规阈值，该模型适用于非极端水期且拟合度较高，具备流域内氨氮污染模拟的可靠性。

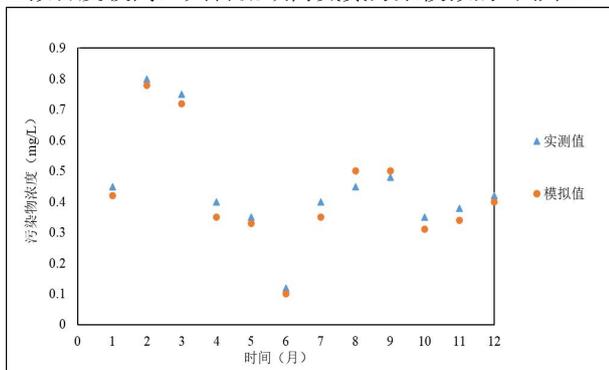


图1. 模拟值与实测值对比图

Fig 1. Comparison of calculated values and measured

values of pollutant concentration

## 2 突发性水污染事故模拟预测

### 2.1 模拟方案的拟定

汛期时，安固里河平均水深为3m，河宽为50m。本次突发水污染事故污染源位置设定位于流域上游的一瞬时点源，假设有农业生产基地向张家口安固里河释放1t的氨氮污染物质，将释放点处坐标设置为原点(0,0)，且污染源排放点与岸边距离 $b=10m$ 。汛期河流流速 $u_x$ 取0.12m/s，水力坡度 $i$ 取0.003，由于纵向（垂直河流方向）流速远小于横向（沿河流方向）流速所以纵向流速可以忽略不计，即 $u_y=0$ 。张家口内陆河流域研究区内，以《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中II类水为标准，当模拟污染物氨氮浓度小于0.5mg/L时，此时水质认为达标。

### 2.2 浓度时间分析

表1为汛期突发性水污染事故中的污染物特征值，该表展示了氨氮污染物的最高浓度点，随时间推移，最高浓度点的位置向下游推移。该表格记录了从突发性水污染事故爆发到1757min（29.28小时）内氨氮最高浓度值的变化情况。可知，在事故发生1min时，最高浓度点的浓度为509.148mg/L，此时该点距离事发地污染物距离为7m。经过77min后，在78min时污染物最高浓度下降到12.495mg/L，此时距离事发地距离为562m，污染物浓度下降了496.653mg/L，降幅为97.54%，表明了污染发生初期污染物快速稀释扩散。此时污染源的浓度小于0.5mg/L到达II类水标准，最高点浓度点向下游持续移动，污染团向下游扩散并远离污染源。1min时污染带长度为187m，宽度为26m，78min时污染带长度为1072m，宽度为50m，在短时间污染带尺寸增大幅度较大，污染物扩散速度较快。在事故发生100min时，污染物浓度最高值为9.809 mg/L，距离事发地污染物距

离为 720m, 在事故发生 252min 时, 污染物浓度最高值为 3.912mg/L, 距离事发地污染物距离为 1814m, 此时距离污染源 1000m 处的位置浓度值小于 0.5mg/L, 此时该位置到达 II 类实质。在 252min 后, 污染物最高点浓度值下降趋势较为平缓, 下降幅度越来越小。在事故发生 403min 时, 污染物浓度最高值为 2.426mg/L, 距离事发地污染物距离为 2902m。在事故发生 500min 时, 污染物浓度最高值为 1.942mg/L, 距离事发地污染物距离为 3600m。在事故发生 700min 时, 污染物浓度最高值为 1.367 mg/L, 距离事发地污染物距离为 5040m。在事故发生 1000min 时, 污染物浓度最高值为 0.934 mg/L, 距离事发地污染物距离为 7200m。在事故发生 1500min 时, 污染物浓度最高值为 0.598mg/L, 距离事发地污染物距离为 10800m。500-700min 这一时段内, 污染物最高浓度点下降十分微小, 在 200min 内下降幅度很小, 污染物扩散减慢, 下降速度后期趋于平稳符合污染物扩散后期受环境容量限制的规律。在事故发生 1757min 时, 污染物浓度最高值为 0.499mg/L, 距离事发地污染物距离

为 12650m, 此时整个研究区的水质都小于 0.5mg/L, 总体水质到达 II 类水标准, 此时模拟结束, 在 1min 至 1757min, 最高点浓度值由 509.148mg/L 下降至 0.499 mg/L, 经历 29.28 小时, 整个研究区域水质达标。

表 1. 汛期污染事故中污染物的特征值

Table 1. Characteristic values of pollutants in water pollution accidents during flood season

距离事发时间 (min)	最高浓度点的浓度 (mg/L)	最高浓度点与事发地距离 (m)
1	509.140	7
20	43.926	144
78	12.49	562
100	9.809	720
252	3.912	1814
403	2.426	2902
500	1.942	3600
600	1.367	5040
1000	0.934	7200
1500	0.598	10800
1757	0.499	12650

### 2.3 浓度空间分析

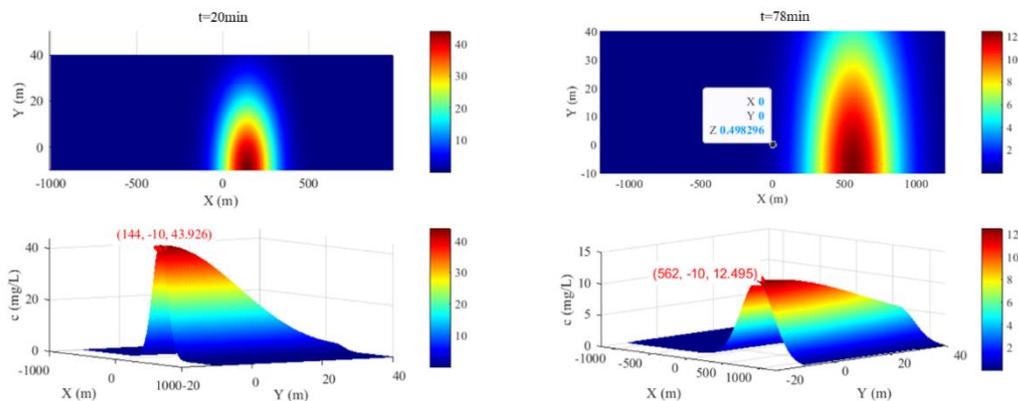


图 2. 污染源浓度空间分布变化图

Fig 2. Changes in concentration spatial distribution of pollution source

由图 2 分析可得, 20min 时的污染物最大浓度值为 43.926 mg/L, 此时最大污染物浓度值位置距离污染源的下游 144 米的岸边位置。此时刻污染带长度为 673 m, 宽度为 50 m。78min 时, 在三维空间变化图中找到最大浓度值 12.495 mg/L, 污染团高污染区域集中在中心区域, 向外围区域衰减。污染物浓度最大值位置为距离污染源 562m 处的岸边位置, 此时污染团已经迁移至下游区域, 78min 时污染带长度为 1072m, 宽度为 50m, 相较于 1min 的污染带, 长度增加了 885m, 宽度增加了 24m,

污染带长度增长速度为 11.49m/min 大于污染团迁移速度 7.21m/min, 污染团的扩散速度较快, 而宽度增长速度仅为 0.31m/min, 宽度增长速度较小, 污染团的横向扩散速度远大于纵向的扩散速度, 因为河岸的宽度远小于河流的长度, 且河流宽度较为狭窄, 这一因素可能使得河流会发生造成二次的纵向污染。根据峰值位置与污染带长度, 在第 78min 时污染源位置的污染物浓度到达本底浓度, 即污染源处污染物浓度为 0.498 mg/L, 到达 II 类水标准。污染源从突发性水污染事故开始到第

78min, 随着时间推移, 污染团迁移向污染源下游移动,

远离污染源位置。

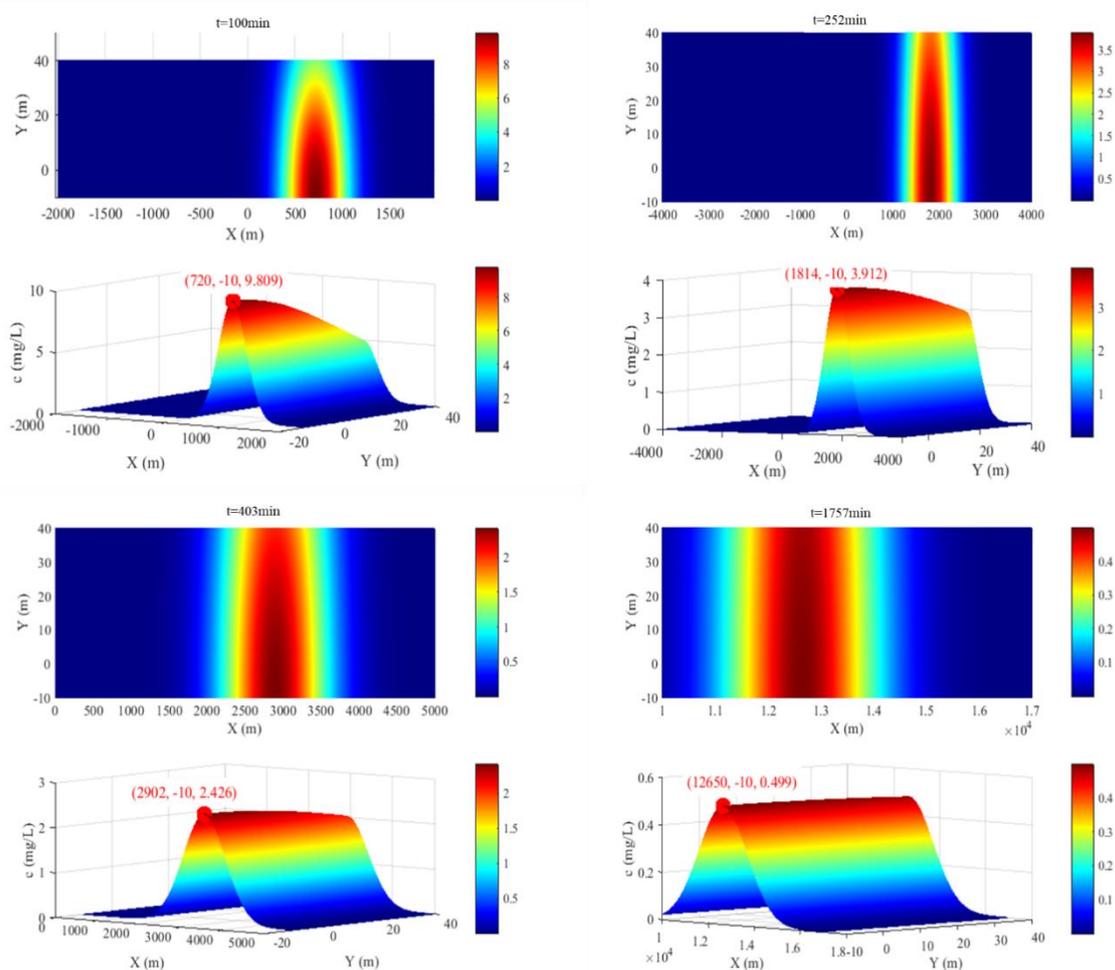


图 3. 污染区浓度空间分布变化图

Fig 3. Changes in concentration spatial distribution of pollution zone

据图 3 分析可知, 污染事故发生 100min 后, 氨氮污染物的浓度最高值发生在距离污染源 720m 处, 氨氮污染物峰值浓度为 9.809mg/L, 远超地表水 III 类标准, 该峰值点位置位于岸边位置。污染带长为 1139m, 宽度为 50m, 相较于 78min 时的污染带长度增加了 67m, 宽度不变, 污染带呈现出狭长带状, 横向扩散远远大于纵向扩散, 符合高流速的扩散机制。此时刻污染带已经逐渐扩散开来, 污染带宽度到达河流宽度, 纵向扩散已达到饱和, 污染物触及河流两岸, 横向扩散仍在继续进行, 横向扩散大于纵向扩散。此时刻峰值位置的污染物浓度较大, 且该位置位于岸边处, 容易生成岸边堆积效应, 对水生生物可能造成急性死亡, 破坏水体环境。

污染事故发生 252min 后, 氨氮污染物的浓度最高值发生在距离污染源 1814m 处, 氨氮污染物峰值浓度为 3.912mg/L, 超过 IV 类标准, 该峰值点位置位于岸边位

置。污染带长为 1622m, 宽度为 50m, 长度增加了 483m, 宽度不变, 污染带呈长条形, 横向扩散远远大于纵向扩散, 符合高流速的扩散机制, 此时刻的污染带宽度已经到达河面宽度形成了全断面污染, 且潜在扩散风险区范围较大。污染团从源头迁移至 1814m 耗时 252min, 平均迁移速率 0.119m/s, 约等于汛期水流流速。在第 252min 时, 距离污染源 700m 处的岸边位置的污染物浓度, 已经小于 0.5mg/L 到达 II 类水质标准, 污染团由于扩散作用以及水体自净作用, 伴随着时间的推移, 当污染团核心区域已经远离 700m 位置处, 污染物核心抵达 1814m 位置。

污染事故发生 403min 后, 氨氮污染物的浓度最高值发生在距离污染源 2902m 处, 氨氮污染物峰值浓度为 2.426mg/L, 超过 V 类标准, 该峰值点位置位于岸边位置。污染带长为 1798m, 宽度为 50m, 长度增加了 176m,

宽度已经达到河面宽度,相较于252min污染带宽度没有变化,水污染形成了全断面污染。污染带呈长条形,横向扩散远远大于纵向扩散,目前潜在扩散风险区范围较大,需警惕潜在扩散风险。

污染团从源头迁移至2902m耗时403min,平均迁移速率1.2m/s。污染带长度扩散速度较慢,可能由于水流平缓或污染物沉降。核心污染区域为岸边2902m位置处,需重点治理。而在第78min时,污染带宽度已经达到河面宽度,纵向扩散已经达到极限,使得岸边污染物浓度过大,会形成河流岸边的富集机制,威胁岸边的脆弱生态敏感区域,此时需对岸边富集区域进行及时清除污染物。同时在403min时,距离污染源2000m处的岸边位置,污染物浓度为0.49mg/L,该位置处的水质到达II类水质,此时污染团向下游移动,污染团核心区到2902m处,之后时间内开始影响下游区域,需警惕下游水域的水污染问题。

污染事故发生1757min后,氨氮污染物的浓度最高值发生在距离污染源12650m处,氨氮污染物峰值浓度为0.499mg/L,达到地表水II类水质标准,但相较于1500min时的浓度进一步下降,降幅为16.55%,该峰值点位置位于岸边位置。此时刻污染团已经消失,整个研究区域的水质均达到II类水质标准。

### 3 结论和展望

事故爆发初期,汛期水污染事故具有爆发快、峰值高、横向扩散强的三重特性,在污染团的扩散过程中,横向扩散(沿河流方向)占实际扩散的主导,由于污染带宽度到达河面宽度使得进一步纵向扩散受到阻碍,发生岸边的富集效应,使岸边的污染物浓度过高,破坏岸边生态系统,考虑到汛期时河流流速较大,污染团扩散速度快,整个污染带随时间逐步向下迁移,同时由于污染物降解作用和水体稀释作用,整个污染带浓度逐渐降低。针对下游岸边核心污染区域,建议采用吸附措施,降低污染物浓度<sup>[9]</sup>,在污染边界处设置拦截围堰,防止污染物向下游扩散,同时做好生态评估,保护区域内水生物的生命安全。

本研究为突发性水污染事故的应急处理提供了高效的技术支撑和理论参考,对保障水生态安全减少经济社会损失、公众利益具有重要意义。随着人工智能的兴起,突发性水污染事故的模拟预测在未来的发展中可以注重加强模型技术创新,实现多尺度耦合模型以及利用

人工智能驱动算法,提高多技术融合应用的程度,将监测设备与物联网相连接,提高监测时效性,积极建立跨区域协同机制,开发区块链链接技术,建立数据共享平台,确保数据的共享性以及准确性。

### 参考文献

- [1]邢再亮,董国文,盛超宾.张家口首都水源涵养功能区蔚县矿区地下水污染现状及对策分析[J].中国金属通报,2023,(09):182-184
- [2]李艳,秦泽,杨光,等.河流突发水污染事件峰值模拟及预警研究[J].环境保护与循环经济,2024,44(2):65-69.
- [3]Zhang X.Y., Zhu Q.D., Zhai A.F., et al. Development of interval transient pollution distribution model and its application in the Fenghuangshan drinking water source[J]. Ecological Modelling, 2022, 471, 110037.
- [4]张晨璐,宋金玲,康燕等.基于对流扩散方程的水质预测模型研究[J].工业用水与废水,2024,55(1):54-59.
- [5]丁涛,顾妍平,王淑英,等.基于Matlab软件的突发事故水质解析模型与应用[J].安全与环境学报,2012,12(01):111-113.
- [6]何川.基于改进混沌蚁群算法的大凌河水质模型参数反演优化[J].水利技术监督,2025,(01):195-199.
- [7]Letensie T H, Maurice O N, John K M, et al. Application of Water Quality Model QUAL2K to Model the Dispersion of Pollutants in River Ndaru, Kenya[J]. Computational Water, Energy, and Environmental Engineering, 2014, 3(4): 162-169.
- [8]翟爱丰.基于饮用水源地水质安全保障的三峡水库调度方案研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [9]李华松.突发性水污染应急处理方法探讨[J].生态与资源,2024(1):0023-0025.

作者简介:赵昕怡(2006.02-),女,汉,本科生在读,河北水利电力学院,土木工程专业,研究方向:水环境。

通讯作者:翟爱丰(1989-),男,讲师,主要从事水环境生态及水质水量等方面研究。

基金项目:河北省水利工程局集团有限公司科技计划项目(2024-08-CX-005)。