

基于 MIKE21 的危化品泄漏水环境影响预测

袁梦楠*, 赵琦琦, 赵 阳

(华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046)

摘 要 随着我国突发性水污染事故的发生频次逐渐增高, 严重威胁到了国民经济和社会的稳定发展。本文以危险品运输可能性较大的硝基苯(难降解)和柴油(不溶于水污染物)为例, 对高速公路大桥发生危险品运输事故导致的污染物扩散进行模拟计算, 得到各种情况下危化品随水流输移扩散的扩散面积、路径和影响范围。分析了风险事故对大桥下游某水库及其饮用水取水口附近水质的影响程度及时间, 旨在为水库风险事故污染防范和应急处置提供参考。

关键词 MIKE21; 危化品泄漏; 突发性水污染事故; 水环境影响预测

中图分类号: TQ08

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2023)05-0001-03

当前, 高速公路货物运输已成为我国危险品运输中的一种主要途径, 而危险品运输车辆若在敏感路段发生事故, 特别是当危险品运输车辆跨越敏感水体出现翻车事故时, 车辆坠入水中导致危险品泄漏而污染水环境, 进而会对下游饮用水水环境及人群健康产生危害^[1]。因为突发性和不确定性, 水源地突发污染事故可迅速地造成水环境污染、停水和中毒等问题, 导致严重经济损失并对群众健康造成威胁, 同时对社会稳定造成不利影响^[2-5]。近年来, 我国突发性水污染事故的发生频次逐渐增高, 严重威胁了国民经济和社会的稳定发展^[6-7]。水库作为供水灌溉的主要来源, 关系到生态安全和人类健康。因此在水库的规划及管理过程中, 亟需对突发性水污染事故进行模拟研究, 以针对不同污染源扩散输移规律构建预警应急体系, 从而最大限度地降低事故危害, 保障区域的健康发展。MIKE21 作为一款二维水动力软件, 由丹麦水动力研究所研发, 被广泛应用于河道, 河口以及海湾和近岸的突发性水污染模拟中^[8]。张月婷^[9]利用 MIKE21 对漳泽水库突发柴油、硝基苯和氰化物泄漏进行了数值模拟并得出不同工况下污染物的扩散规律。杨晨^[10]等通过 MIKE21 模拟了汾河水库突然水污染事故时二甲苯的扩散规律。段驰^[11]等通过 MIKE21 对港口溢油事故的前已扩散规律进行了模拟。

本研究依据中国南方某水库的水系背景, 以水动力模型为基础, 分别耦合对流扩散模型及溢油模型, 建立突发性水污染事故风险分析模型。以危险品运输可能性较大的硝基苯(难降解)和柴油(不溶于水污

染物)为例对高速公路跨江大桥发生危险品运输事故导致的污染物扩散进行模拟计算, 分析了污染物的时空变化规律、污染影响范围和程度, 直观展现风险事故对水库及其饮用水取水口附近水质的影响程度及时间, 为水库风险事故污染防范和应急处置提供参考。

1 研究区域

研究区域位于中国南方某水库, 是一座以灌溉和供水为主, 兼有发电、防洪等综合效益的水利工程。本次模拟水库上游约 3.5km 处的某高速公路跨江大桥突发危化品运输事故导致污染物发生扩散。模拟区域为该跨江大桥上游 1km 至该水库大坝范围内的水域。

2 计算模型

2.1 二维水动力模型

2.1.1 基本方程

采用二维水动力模型, 建立一个平面二维水流基本运动方程。通过有限差分原理对所建立的基本运动方程进行时间和空间离散。传输模型计算则基于二维水动力计算的水流结果。其控制方程为^[12]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} - f v + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2 H} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} - f u + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2 H} = 0 \quad (3)$$

式中: h , H 为水深 (m); u , v 分别为 x , y 方向的流速分量 (m/s); f 为柯氏力系数; t 为时间 (s);

*本文通讯作者, E-mail: ymengnan1223@163.com.

g 为重力加速度 (m/s^2)。

2.1.2 风险条件设定

结合区域实际情况,事故发生地点选择在大桥中段。槽罐车设定为 40m^3 ,假设泄露时间按 100min 计算,按最不利情况 100% 容量的化学品泄露和较安全情况 30% 化学品泄露入水两种情况计算,泄露方式为瞬时性液态泄露,泄露时间 100min ,不考虑污染物的降解。

2.1.3 参数设定和率定

采用二位水动力模型,三角网格最小允许角度 26° ,河底糙率参数用曼宁系数,取值 $0.05\text{m}^{1/3}/\text{s}$ 。

干湿边界:在模型建立中参数采用干水深 $h_{dry}=0.005\text{m}$,淹没水深 $h_{flood}=0.05$,湿水深度 $h_{wet}=0.01$ 。

模拟时间:步长 60s ,步长数 144 ,时间段 24h 。

初始条件:设为水面高程 850m ,水平和垂直流速均为 0 。

边界条件:上下游均采用水位边界。

根据现场的流速数据,对模拟值及实测值进行分析验证,发现流速模拟值与实测值的相对误差较小,表明模型设置参数能用于本次研究模型计算。

在最不利因素条件下,水库河道的流场、水深变化不大;除了个别对整体流场影响不大的跳、回流情况,河流主体流速在 $0.01\sim 0.1\text{m/s}$ 间波动。

2.2 对流扩散模型

在二维水动力模型的基础上,建立对流扩散模型。采用的对流扩散模式^[13]:

$$\frac{\partial(c)}{\partial t} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (4)$$

式中: c 为某一时刻某一深度的平均浓度 (mg/L); u 为 x 方向速率 (m/s); v 为 y 方向速率 (m/s); D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数。

2.3 溢油模型

在二维水动力模型的基础上,建立溢油事故情况下的数值模型。通过对油膜在水体中的扩展、紊动扩散、传输等状态的模拟,提供油膜随时间变化的位置、表面积和厚度等的变化。

控制方程为^[14]:

$$\text{扩展: } \left(\frac{dA_{oil}}{dt}\right) = K_a A_{oil}^{1/3} \left(\frac{V_{oil}}{A_{oil}}\right)^{4/3} \quad (5)$$

式中: A_{oil} 为油膜面积 (m^2); V_{oil} 为油膜体积 (m^3); K_a 为扩散系数。

$$\text{漂移: } U_{tot} = c_w(Z)U_w + U_s \quad (6)$$

式中: U_w 为风速(水面上 10m 处, m/s); U_s 为流速 (m/s); c_w 为漂移系数。

$$\text{紊动扩散: } S_a = [R]_{-1}^1 \sqrt{6D_a \Delta t_p} \quad (7)$$

式中: $[R]_{-1}^1$ 为随机数 (-1 到 1); D_a 为扩散系数; Δt_p 为扩散时间。

3 结果与分析

3.1 高浓度硝基苯泄露水环境影响预测结果与分析

针对不同水位和风荷载情况,对装有硝基苯的大型槽罐车 (40m^3) 罐体完全泄露 (100% 泄露) 的最不利情况和低水位无风情况下的 30% 容积的硝基苯泄露进行计算,经数值模型预测高浓度硝基苯随时间扩散的扩散面积,最大扩散距离及到达取水口的最短时间。

根据预测结果可知,泄露风险事故发生后,高浓度硝基苯主体沿四周开始扩散, 40m^3 的大型槽罐车 100% 泄露情况下,事故发生仅仅 10min 后,库区水中硝基苯即出现超标,最高浓度区域超标 50 倍。即使在 30% 容积的硝基苯泄露情况下,事故发生 10min , 泄露点附近水域硝基苯浓度已超过标准 20 倍,库区水中硝基苯全面超标所需时间也不足 1 小时^[15]。计算结果显示,高水位情况下污染物的扩散速率和扩散范围最大, 0.5h 后向下游最大扩散距离为 465.3m , 1h 后为 654.56m , 2h 后为 1.015km , 3h 为 1.297km , 8h 后为 3.308km , 此时污染物扩散范围已经非常逼近坝址,由于坝址下游约 2.5km 即有取水口,如果响应稍微滞后,硝基苯极易扩散至下游取水口而导致严重威胁。对比无风和有风情景下污染物扩散结果可以看出,针对此次模拟的 48t 硝基苯泄露事故,对于扩散范围,风荷载对污染物扩散的影响不显著。在高水位情况下,污染物的扩散面积和扩散速率均较大,在事故发生大约 8 小时后扩散范围基本趋于稳定,且此时污染物扩散范围逼近大坝。

3.2 柴油泄露水环境影响预测结果与分析

在二维水动力模型的基础上,通过 MIKE21 的溢油模块,分析溢油事故对水库及其饮用水取水口附近水质的影响程度及时间,为水库应对突发性溢油污染事故提供技术支持。研究中假设运载柴油的车辆在跨江大桥上突发事故致使柴油进入水体造成污染,通过对油膜在水体中的扩展、紊动扩散和漂移等状态的模拟,提供油膜随时间变化的扩散距离、表面积和厚度的变化。柴油的密度为 835kg/m^3 ,考虑油罐车的最大容积为 40m^3 。本次预测按照最不利情况 100% 的柴油泄露和 30% 柴油泄露入水两种情况进行计算。泄露时间设定为 100min ,溢油类型为固定点源瞬时溢油,污染物短时间降解能力假设为零。其中情景 7 为 30% 柴油泄露入水。

根据预测结果,柴油泄露风险事故发生后,油膜主体沿四周开始扩散,扩散面积逐渐变大。短时间内

油膜在水中的主要行为以扩展及漂移为主,油膜厚度随时间推移逐渐增加。模拟的几种情景中,油膜厚度大体维持在 $8\mu\text{m}\sim 88\mu\text{m}$ 之间,事故发生大约 30min 后油膜最大厚度便稳定在 $88\mu\text{m}$ 左右,厚度 $88\mu\text{m}$ 及以上油膜的面积随着时间越来越大。情景 7 由于溢油总量只有前 6 种情景的 30%,厚度 $88\mu\text{m}$ 以上油膜的面积相较于前 6 种情景有明显减小。油膜扩散范围也逐渐增加并逐渐向下游漂移,整体看,高水位情况下由于流速更大,油膜的漂移速率也更快,0.5h 后油膜向下游最大扩散距离为 325.5m,1h 后为 475.8m,3h 后为 880.9m,8h 后油膜向下游最大扩散距离达 1.76km,12h 可向下游扩散至距离事故点 2.64km 处,此时油膜已经十分逼近大坝位置。情景 7 的数据显示,溢油量的减少对油膜覆盖范围有小幅影响,油膜厚度在溢油量减少后变化不显著,风场对溢油油粒子的表面积影响比较显著,顺风且中等风速情况下,油粒子表面积相较于无风情况逐渐显著增加,风场对油膜扩散范围的形状有一定影响,而其对油膜厚度影响不显著。

4 结论

本研究以水动力模型为基础,分别耦合对流扩散模型及溢油模型,建立某水库附近高速公路大桥突发性水污染事故风险分析模型。以硝基苯和柴油为例对水库附近高速公路大桥发生危化品运输事故导致的污染物扩散进行模拟计算,得到各种情况下危化品的扩散趋势及对水库及其饮用水取水口的影响程度,得出以下结论和应对措施:

1. 依据模拟计算定量预测结果,大容量硝基苯槽罐车事故必须坚决杜绝,小容量槽罐车的硝基苯容量也在 10 吨以上,其泄漏事故亦极具威胁性。硝基苯泄漏事故一旦发生,大型槽罐车 100% 容量泄漏情况下,10min 之内水中硝基苯浓度迅速上升并超标,30% 容量泄漏情况下,水中硝基苯浓度也会在 1 小时内迅速上升并超标,应急响应时间极短。因此,建议严禁装载硝基苯的槽罐车从大桥通行。而万一事故风险未能避免,第一道应急拦截的位置建议设置在大桥下游方向 0.5 公里处,应急响应时间 30min,同时须在库岸靠近大桥下游方向 0.5 公里范围内设置有针对性的危化品应急物资储备室。

2. 由于溢油事故发生后 1h 油膜即可漂移到大桥下游方向约 0.5 公里处,故第一道围油栏建议设置在大桥下游方向 0.5 公里处;第二道围油栏建议设置在大桥下游方向 1 公里处。对于柴油泄漏事故,偏宽松的应急响应时间为 3h,偏保守的应急响应时间为 1h。另外,在大桥下游方向 1-2 公里范围内应设置应急物资储备室,

应急物资储备室中建议配置沙袋、吸油材料、吸油机等。

3. 建议定期对库区和事故污染段的水环境进行监测和分析,同时视情况实施一些必要的措施(如公告、拦截、打捞和化学处理等),及时告知下游各自来水厂、相关地方政府等相关主体,并对水源取水口水质污染情况进行密切监控。必要的时候需要启动备用供水水源或城镇罐车应急供水等替代供水方案。

参考文献:

- [1] 曹建,施式亮,鲁义,等.2013-2018 年罐车公路运输危化品事故分析[J].中国安全科学学报,2020,30(02):119-126.
- [2] 张勇,徐启新,杨凯,等.城市水源地突发性水污染事件研究述评[J].环境污染治理技术与设备,2006(12):1-4.
- [3] 李静,吕永龙,贺桂珍,等.我国突发性环境污染事故时空格局及影响研究[J].环境科学,2008(09):2684-2688.
- [4] 张菊,周祖昊,李旺琦,等.应对突发性水污染事件的水动力与水质模型[J].人民黄河,2013,35(11):44-47.
- [5] 张羽,张勇,杨凯.基于时间特征指数的水源地突发性污染事件应急评估方法研究[J].安全与环境学报,2005(05):82-85.
- [6] 吉立,刘晶,李志威,等.2011-2015 年我国水污染事件及原因分析[J].生态与农村环境学报,2017,33(09):775-782.
- [7] 张楚天,杨勇,杨中华,等.江河突发性水污染事故动态模拟与预警——以长江武汉段为例[J].长江流域资源与环境,2013,22(10):1363-1368.
- [8] 钟波,石磊,陈贤祎.Mike21 软件在航道水流模拟中的应用[J].中国高新技术企业,2010(01):49-50.
- [9] 张月婷.漳泽水库突发性污染事件模拟与应急管理研究[D].太原:太原理工大学,2019.
- [10] 杨晨,徐明德,郭媛.基于 MIKE21 的汾河水库突发环境事件数值模拟[J/OL].灌溉排水学报,2017,36(11):115-121.
- [11] 段驰,宁灏,丁志斌,等.基于 MIKE21 的三都港溢油风险研究[J].中国水运(下半月),2023,23(01):47-49.
- [12] 郑双金,李洁,陆豫.基于 MIKE 21 的风险事故对水源保护区的影响预测及措施[J/OL].西部交通科技,2017(06):124-128.
- [13] 喻婷,陈晓群,苗滕.举水干流水功能区纳污能力计算研究[J].节水灌溉,2019(09):62-66,73.
- [14] 余薇薇,余钧波,孙尉哲,等.嘉陵江井口段突发性溢油事故影响预测及分析[J/OL].安全与环境学报,2022-11-07:1-9.
- [15] 国家环保总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 3838-2002,地表水环境质量标准[S].2022.