

基于 EFDC 模型的汤河水库污染物质 扩散模拟

李亚峰,伍建伯,程 浩

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 模拟水库区域可能发生的累积性污染物质及突发风险事故泄露的污染物质在水中的扩散,预防水源地危险事件发生,保证居民饮水安全。方法 基于汤河水库已有数据及实测水文水质数据建立 EFDC 模型,并对汤河水库的水体状态进行动态模拟,验证模型的可行性。基于 EFDC 模型建立库区水动力水质模型,分析针对性模拟污染物在典型年的扩散情况。结果 对 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 进行 6 个月模拟,丰水年对出水水质影响较大,会造成出库水水质超过地表水 II 类标准;枯水年对出水水质影响较小,6 个月后 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质距离水库出水口分别为 6 960 m 和 7 600 m;平水年 6 个月后 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质距离水库出水口分别为 1 700 m 和 3 850 m。对污染物质泄漏情况模拟,事故发生 0.25 d 污染物扩线极快,在 2 d 后迁移速度逐渐下降,5 d 后污染物迁移 600 m,当突发性风险事故发生后 94 d 时,扩散至水库出水口,但出水口最高污染物质质量浓度低于 0.000 3 mg/L。结论 建立的 EFDC 模型对污染物质可以进行有效地模拟,扩散的污染物质会长期影响水库水质,因此需及时对污染物质进行处理,避免对城市供水产生影响。

关键词 EFDC 模型;汤河水库;突发风险事故;污染物扩散

中图分类号 TU99;X824;X52

文献标志码 A

Simulation of Pollutant Diffusion in Tanghe Reservoir Based on EFDC Model

LI Yafeng, WU Jianbo, CHENG Hao

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to ensure the safety of drinking water sources, the possible cumulative pollutants and the pollutants leaked by sudden risk accidents in the reservoir area was simulated. Tanghe reservoir in Liaoning province as sample, an EFDC model was established based on the existing data of Tanghe reservoir and the measured hydrological and water quality data. The water

收稿日期:2021-05-23

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601001)

作者简介:李亚峰(1960—),男,教授,博士,主要从事污水处理及水环境污染治理等方面研究。

environment of the Tanghe reservoir was simulated and the model was verified. Based on the EFDC model, a hydrodynamic water quality model was established to simulate the pollutant diffusion in a typical year. The diffusion process of TP and $\text{NH}_3\text{-N}$ was simulated for 6 months. The results showed that the influence of high flow water year on the effluent quality was more obvious. It will cause the outlet water quality of reservoir to exceed the class II standard of surface water. In low flow year, the point of TP and $\text{NH}_3\text{-N}$ exceeding class II water quality are 6 960 m and 7 600 m away from the reservoir outlet after 6 months, and in normal flow year, are 1 700 m and 3850m. The diffusion process of pollutants leakage caused by sudden risk accidents in high flow year in reservoir was simulated. The results showed that the pollutant line expansion is fast in 0.25 days after the accident, and the migration speed gradually decreases in 2 days. The pollutant migration is 600 m in 5 days. After the sudden risk accident 94 days, the contamination spread to the reservoir outlet, but the maximum concentration at the outlet is less than 0.000 3 mg / L. The EFDC model can simulate the pollutant diffusion effectively. The diffused pollutant will affect the water quality of the reservoir for a long time, so it is necessary to treat the pollutant in time to avoid the influence on the urban water supply.

Key words: EFDC model; Tanghe reservoir; sudden risk accident; pollutant diffusion

水是人类生产生活过程中的重要物质,预防水源地危险事件发生,才能保护水生态环境,保证居民饮水安全。据统计,2012—2017 年国内突发性水环境风险事件共发生 561 起^[1]。在风险事故中大量有害物质进入水体,对水环境影响极大。水库作为水源保护地是城市居民饮用水安全的重要保障,同时更是水环境安全管理的重要环节。贾海峰等^[2]假定污染事故,并基于 EFDC 模型完成情景分析,计算柴河水库纳污负荷。杨倩^[3]应用 EFDC 模型模拟密云水库水环境,并证明应用该模型对模拟突发性水环境风险事件具有可行性。杨志峰等^[4]基于 EFDC 模型探究丹江口水库富营养化风险,并对藻类的潜在危害进行预测。J. M. Ahn 等^[5]根据 EFDC 模型模拟韩国城津河受盐分侵入影响,为生活及生产用水安全提供保障。

笔者以汤河水库为研究对象,基于 EFDC 模型建立库区水动力水质模型,模拟污染物对汤河水库的影响。以氨氮、总磷作为模拟指标,判断常规污染物在进入水库区域后的污染情况。模拟突发性风险事故造成污染对水库地区的影响,预测污染物扩散情况,研究成果可以为汤河水库发生污染

事故后的应急处理提供科学依据。

1 汤河水库水源地概况

汤河水库是辽宁中部地区重要的水源地之一,承担着辽阳、鞍山两市 120 余万人的供水。水库总容量 7.23 亿 m^3 ,多年调节水量 2.46 亿 m^3 ,库区面积 5 334 hm^2 ,包含取水筑物、大坝、水电站等构筑物^[6]。汤河水库入库河主要包括二道河、下达河及兰河。笔者在汤河水库中共设置 6 个监测点位,分别位于水库坝前;水库中心;东、西叉头及东、西叉头中部地区。具体位置如图 1 所示。



图 1 汤河水库地形及监测断面分布图

Fig. 1 Topography and monitoring section distribution map of Tanghe Reservoir

2 汤河水库水环境模型建立及验证

2.1 汤河水库网格划分

水体边界存在的不规则边界会导致划分的网格时出现锯齿网格,影响模拟精度,通常采用坐标拟合法将锯齿网格转化为规则图形,提升模拟精度。研究区域网格划分的正交性和平滑性也会影响模拟结果,正常情况下研究区域网格划分的节点夹角余弦值小于0.02,在边界处可适当增加;平滑性受长宽比影响应在1~2^[7]。

笔者选择汤河水库及上游18 km处的3条支流作为研究区域。基于Delft3D软件中的Grid模块对研究区域进行划分,依据要求共划分网格1 771个(见图2),横向网格分辨率分别为36.0~347.9 m、纵向网格分辨率为24.2~324.8 m,正交性及平滑性较好(见图3)

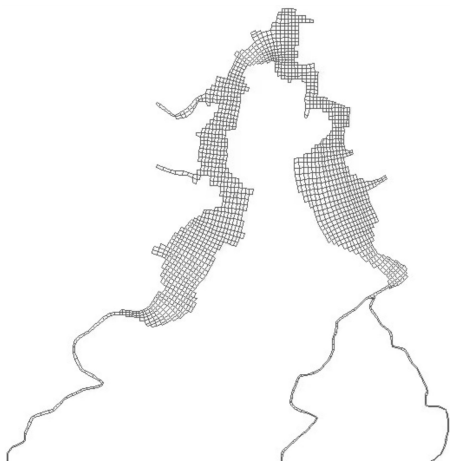
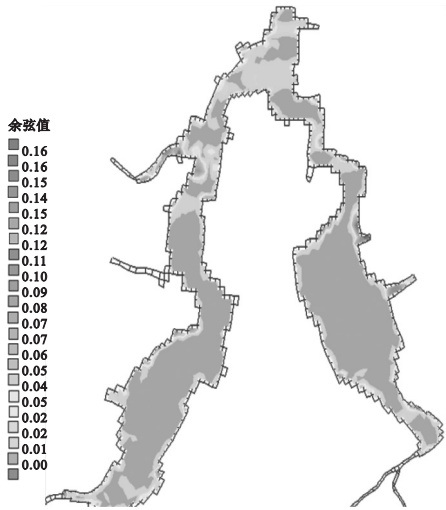


图2 汤河水库区域网格划分

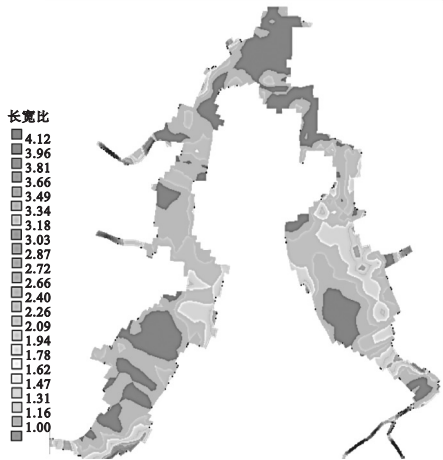
Fig.2 Regional grid generation of Tanghe Reservoir

2.2 水动力模型率定及验证

基于汤河水库2009~2016年水文资料,设定汤河水库水动力模型边界条件,并设定初始模拟水位为107.42 m,流速为0 m/s。汤河水库底部糙率取值为0.025^[8-9]。为保障模型稳定运行,防止负水深影响模拟结果,将时间步长设定为5 s。模拟时间为



(a)正交性验证



(b)平滑性验证

图3 网格划分结果验证

Fig.3 Verification of meshing

2009-01-01~2016-12-31,去除统计数据不足日期共计2 911 d。为防止初期模拟效果不佳,对模型进行预热,使其在2009-01-01前保持稳定运行状态。模拟结果如图4所示。

由图4(a)可知,库容在水位85~112.5 m时拟合效果极好,在该范围外时有一定误差,但水文资料显示汤河水库水位在模拟期间内均低于112.5 m,且高于85 m,所以拟合效果较好。图4(b)可知,水位模拟结果与实际趋势相符,且误差均低于5%,因此证明模型运行正常,且模拟效果较好。

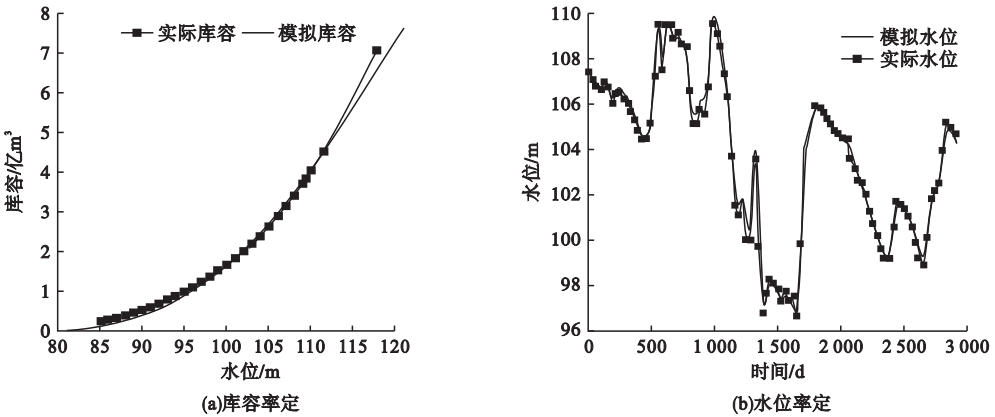


图4 实际与模拟对比图

Fig. 4 Comparison of actual and simulation value

2.3 水质模型率定及验证

水质模型边界条件,由于入库水质数据缺乏,仅选择 2016 年部分数据作为水质条件构建水质模型。水质模型率定及验证的变量包括氨氮及总磷,初始质量浓度选择库区年均浓度,预热稳定后再进行模拟,为使得水质模拟可以快速达到稳定状态,设置初始水质为库区

年均浓度。考虑到水体有自净功能,总磷及氨氮的降解过程应满足一级动力学模型^[10]。

由于坝前、水库中部及水库东、西叉头中部的监测点位的水龄长,且部分数据短缺的,为保证模拟效果,仅选用西叉头和东叉头两个距入库点较近的监测点位进行水质参数的率定(见图 5)。

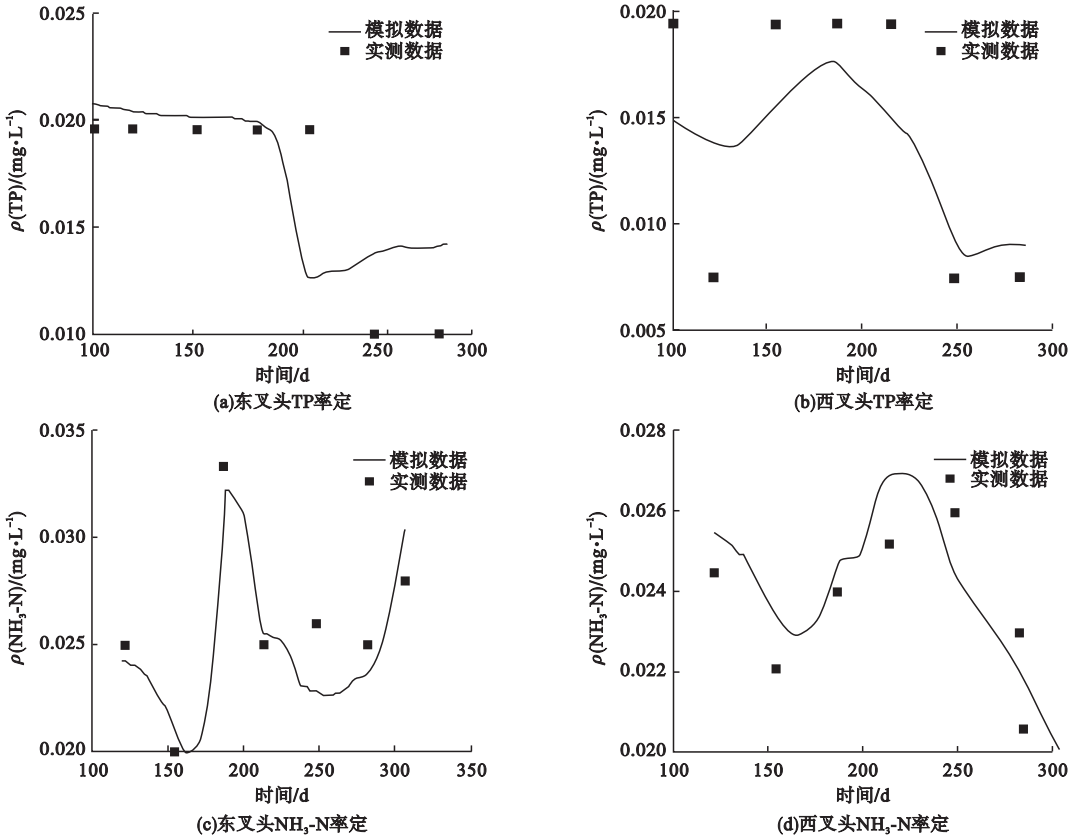


图5 实测与模拟 NH₃-N 与 TP 对比图

Fig. 5 Comparison of measured data and simulated value of NH₃-N and TP

受检测条件限制,TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的检出质量浓度分别为 0.01 mg/L 和 0.025 mg/L,检测结果较低,误差较小,因此率定过程应以趋势判断为主。从图 5 可知,预测结果与实际变化趋势基本相似,确定 TP 衰减系数为 0.001 d^{-1} , $\text{NH}_3\text{-N}$ 的衰减系数为 0.003 d^{-1} ,与其他北方水库研究结果相似^[11],因此模型模拟结果可以有效反映实际水质情况。

3 污染物扩散及质量浓度变化模拟分析

3.1 典型年水质状况模拟分析

水库地区水体流速较低,易造成营养物质的累积,在富营养化方面,笔者主要模拟水库进水过程中氮磷超标情况。由于二道河和下达河是直接入库,当入库水质发生污染时难以防控;兰河是由隧道引入汤河水库,可通过关闭隧道控制污染。所以笔者仅模拟二道河和下达河在最不利条件下的丰水年、平水年及枯水年 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度变化。

模型设置流量边界为各典型年的平均流量,水质边界设为典型年最不利 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的质量浓度。具体模型边界条件如表 1 所示。

采用表 1 的边界条件,模拟 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的在不同典型年下的质量浓度变化情况,模

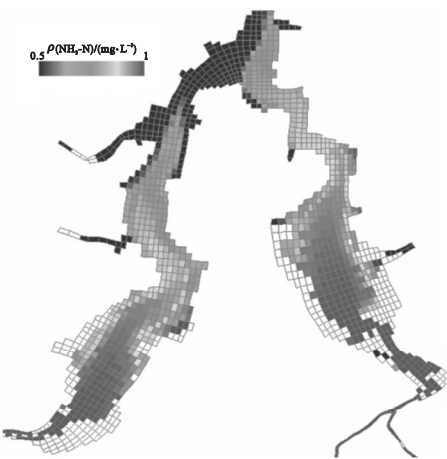
表 1 入库河流边界条件

Table 1 Boundary conditions of inflow river				
入库河	不同水期	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{TP})$ / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
二道河	枯水年	1.49	1.00	0.20
	平水年	4.51	1.00	0.20
	丰水年	10.37	1.00	0.26
下达河	枯水年	1.00	1.00	0.20
	平水年	3.97	1.00	0.20
	丰水年	7.23	1.00	0.24

拟时长设为 6 个月,模拟结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 经 6 个月的扩散后丰水年所受影响最大,出水口处 TP 质量浓度为 0.12 mg/L、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度为 0.59 mg/L,超过Ⅱ类水质标准。平水年东部库区受到污染影响,TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质距离水库出水口分别为 1 700 m 和 3 850 m。枯水年影响较小,但依旧超过Ⅱ类水质标准,TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质离水库出水口分别为 6 960 m 和 7 600 m。

由此看出,当入库水受到污染时,水质超标问题会较长一段时间存在于水库中,同时丰水年受影响最大,为避免污染物质超标影响出库水质,需要及时控制污染物质扩散,降低污染物质影响。



(a)丰水年 $\text{NH}_3\text{-N}$



(b)丰水年TP

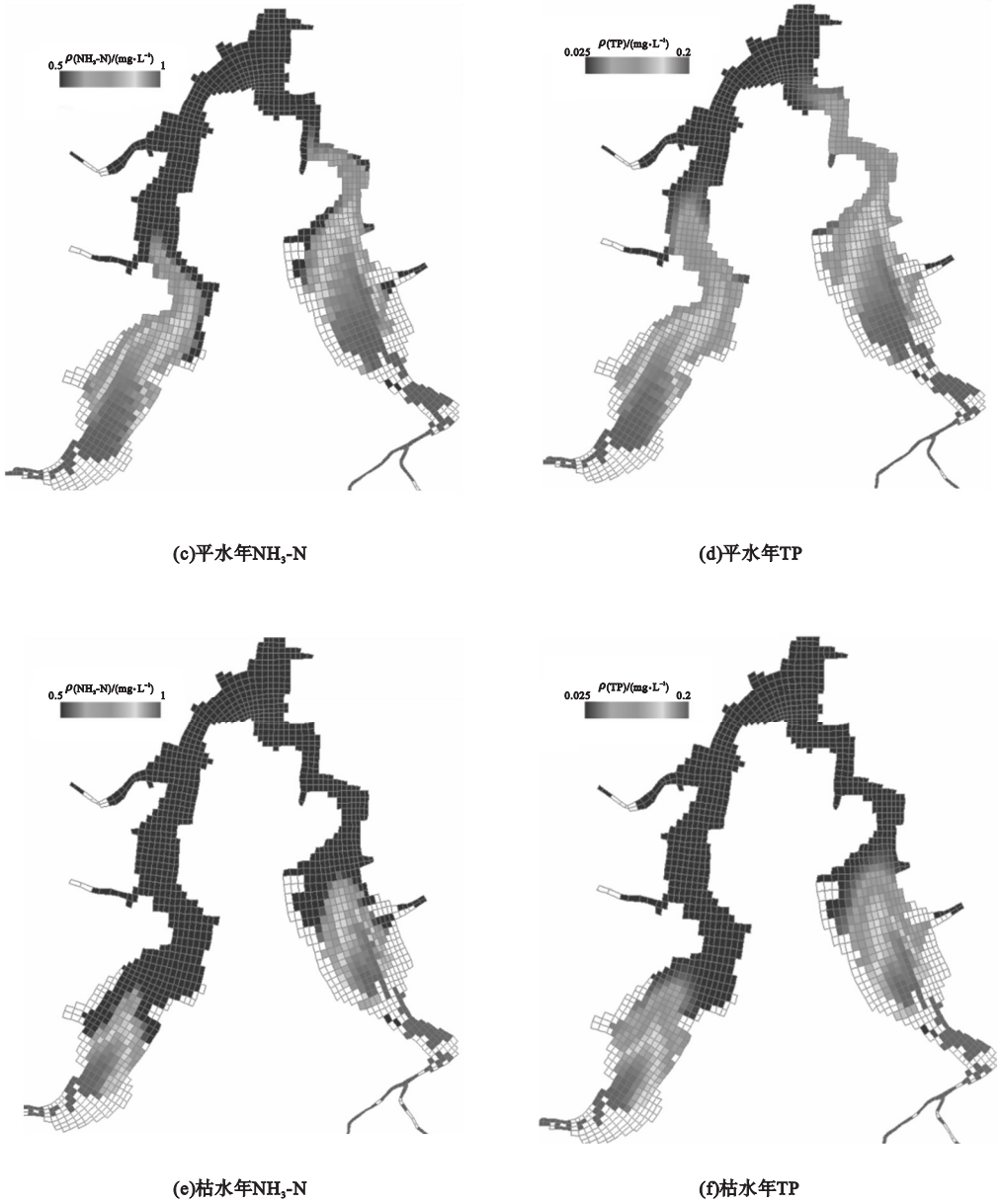


图6 典型年 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 质量浓度分布图

Fig. 6 The concentration of $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP in typical years

3.2 突发风险事故影响

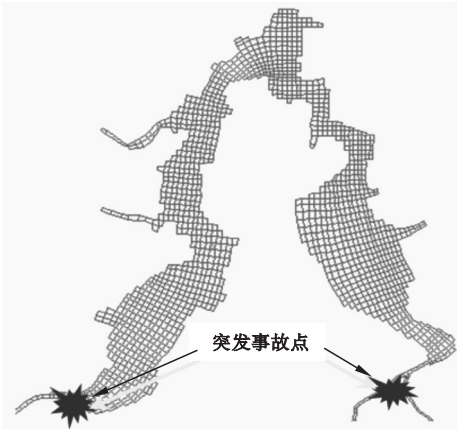
丰水年受到影响最大,因此当在丰水年时发生突发性风险事故时造成的影响也会随之增强,所以笔者将丰水年条件作为最不利条件,模拟突发性交通事故造成的影响。以S316 草鞍线公路通过下达河及二道河两入库支流的桥梁作为事故发生地,具体地点如图7所示。



(a)下达河事故发生点



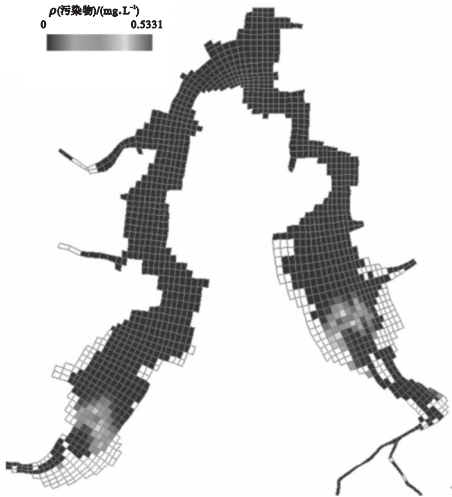
(b)二道河事故发生点



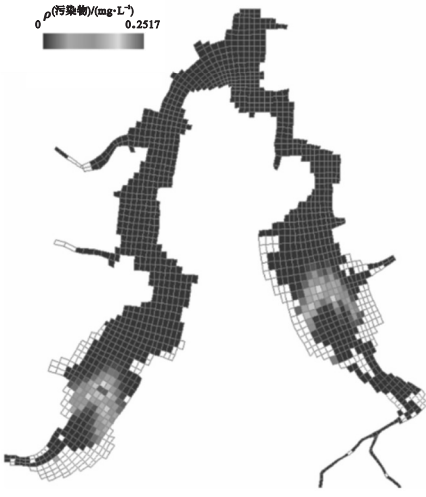
(c)事故点位置示意图

图 7 突发性水污染事故点位图

Fig. 7 The map of sudden water pollution accident points



(a)2 d后



(b)5 d后

图 8 特征污染物迁移过程

Fig. 8 Migration process of characteristic pollutants

(2)对 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 扩散情况进行 6 个月模拟,实测值与模拟值趋势相近。丰水年

设定污染物质为 10 t 保守污染物,入库流量设为 $2\text{ m}^3/\text{s}$, 污染物质量浓度设置为 100 mg/L , 泄漏持续 2 h。基于设置后的 EFDC 模型模拟事故发生后的污染扩散情况见图 8。

从图 8 可以看出,事故发生初期,物质扩散速度较快,在 2 d 后迁移速度逐渐下降,5 d后污染物迁移 600 m,当突发性风险事故发生 94 d 时,污染物扩散至出水口,并对水质影响持续 360 d 左右,但出库水质最高污染质量浓度低于 0.0003 mg/L 。因此应在事故发生后的 5 d 内及时处理污染物质造成的影响,并在 94 d 内彻底处理水体中的污染物质,避免对城市供水产生影响。

4 结 论

(1)建立 EFDC 模型模拟汤河水库的水环境,并对污染物质扩散情况进行模拟。采用 2009 ~ 2016 年水文数据对水动力模型进行验证。基于 2016 年水质数据对水质动力模型进行模拟验证,EFDC 模型可有效模拟汤河水库的环境状态。

对出水水质影响较大,会造成出库水水质超过地表水 II 类标准;枯水年对出水水质影响

较小,6个月后TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质距离水库出水口分别为6 960 m和7 600 m;平水年6个月后TP和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 超标水质距离水库出水口分别为1 700 m和3 850 m。

(3)模拟汤河水库丰水年突发性风险事故发生后造成污染物质泄漏,预测污染物质在水库中的扩散,定量给出出水口受污染的时间。事故发生0.25 d污染物扩散极快,在2 d后迁移速度逐渐下降,5 d后污染物迁移600 m,当突发性风险事故发生94 d时,扩散至水库出水口,但最高污染物质量浓度低于0.000 3 mg/L。

参考文献

- [1] 肖筱瑜. 2012—2017年国内重大突发环境事件统计分析[J]. 广州化工, 2018, 46(15): 134—136.
(XIAO Xiaoyu. Statistical analysis of major environmental accidents at home in the period from 2012 to 2017 [J]. Guangzhou chemical industry, 2018, 46(15): 134—136.)
- [2] 贾海峰, 郭羽. 基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 555—561.
(JIA Haifeng, GUO Yu. Calculation of allowable pollution loads for lakes and reservoir based on bi-directional algorithm and its case study [J]. Environmental science, 2014, 35(2): 555—561.)
- [3] 杨倩. 基于EFDC的密云水库水环境及应急处理模型研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
(YANG Qian. Water environment dynamics simulation research and emergency water pollution incidents based on EFDC-miyun reservoir as an example [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.)
- [4] CHEN L, YANG Z, LIU H. Assessing the eutrophication risk of the Danjiangkou Reservoir based on the EFDC model [J]. Ecological engineering, 2016, 96: 117—127.
- [5] AHN J M, LEE K, LYU S. Effect of Changes in Watershed Runoff Characteristics on Salinity Intrusion in Estuary Using EFDC [J]. KSCE journal of civil engineering, 2020, 24(1): 87—98.

- [6] 武瞰, 李延东, 于宁, 等. 汤河水库富营养化评价及风险预警[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(10): 54—58.
(WU Jian, LI Yandong, YU Ning, et al. Eutrophication assessment and risk early warning of Tanghe reservoir [J]. Environmental protection and circular economy, 2018, 38(10): 54—58.)
- [7] 廖庚强. 基于Delft3D的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
(LIAO gengqiang. Research on the hydrodynamic and sediment numerical simulation of Liuhe based on Delft3D [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.)
- [8] 李大鸣, 卜世龙, 顾利军. 基于MIKE21模型的洋河水库水质模拟[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(3): 1094—1100.
(LI Daming, BU Shilong, GU Lijun. Simulated water quality test and examination of Yanghe reservoir (Hebei) based on the Mike21 model [J]. Journal of safety and environment, 2018, 18(3): 1094—1100.)
- [9] 潘俊, 冷特, 常玉辉, 等. 平原型水库地表水—地下水交互带特性研究: 以石佛寺水库工程为例[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1116—1121.
(PAN Jun, LENG Te, CHANG Yuhui, et al. Research on characteristics of hyporheic zone between plain reservoir surface water and groundwater: take Shifosi reservoir engineering as an example [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(6): 1116—1121.)
- [10] 刘江, 陈国鼎, 曾继军, 等. 基于MIKE对流扩散和生态耦合模型的鸭子荡水库水质模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 118—122.
(LIU Jiang, CHEN Guoding, ZENG Jijun, et al. Water quality simulation of Yazidang reservoir based on Ecolab in Mike software [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2018, 16(1): 118—122.)
- [11] 蒋卫威, 鱼京善, 中村恭志. 基于TITech-WARW的官厅水库三维水质模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(3): 381—388.
(JIANG Weiwei, YU Jingshan, NAKAMURA Gongzhi. 3D numerical simulation of water quality in Beijing guanting reservoir by a TITech-WARM model [J]. Journal of Beijing normal university (natural science), 2019, 55(3): 381—388.)

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)