

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.017

南水北调中线京石段突发性水污染事故 污染物运移扩散研究

王兴伟¹, 陈家军¹, 郑海亮²

(1. 北京师范大学环境学院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 基于 MIKE11 模型的水动力模块、对流扩散模块建立了南水北调中线京石段的水质模拟模型, 通过对模型的率定和验证, 表明该模型具有较理想的模拟效果。在此基础上构建模拟段突发性水污染事故污染物运移扩散模型, 模拟了典型跨渠公路桥上发生危险货物运输倾翻事故后污染团的迁移扩散过程, 以及污染团到达下一个分水口和退水闸的时间和浓度, 旨在为制定京石段干渠突发性水环境污染事故应急方案提供依据。

关键词: 南水北调中线; 京石段; 突发性水污染; 危险货物; 运输事故; 污染物运移扩散模型; 水质模拟模型; 模型率定; 模型验证

中图分类号: TV122 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)06-0103-06

Research on pollutant migration and diffusion in sudden water pollution accident in Beijing-Shijiazhuang Section of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project

WANG Xingwei¹, CHEN Jiajun¹, ZHENG Hailiang²

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the Hydrodynamic model of MIKE11, the water quality simulation model in the Beijing-Shijiazhuang Section of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project was established. The coefficients calibration and model verification indicated that the established model had a good simulation result. Based on that, models of pollutant migration and diffusion during sudden water pollution accident were established. The model simulated the migration and diffusion of pollutant in the open channel of the Middle Route after dangerous goods transportation accident on the bridge happening. Furthermore, the arrival time and concentration of pollutant in the next turnouts and water discharge gate were also simulated. The obtained results could provide scientific and useful information for emergency plan of sudden water pollution in the Beijing-Shijiazhuang Section of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfer Project; Beijing-Shijiazhuang Section; sudden water pollution; dangerous goods; transportation accident; pollutant migration and diffusion model; water quality simulation model; model calibration; model testify

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAC12AB02); 国家自然科学基金(11005119)

作者简介: 王兴伟(1986—), 男, 博士, 主要研究方向为水质模拟及风险分析。E-mail: wangxingwei0812@gmail.com

通信作者: 陈家军, 教授。E-mail: chenjiacun@bnu.edu.cn

南水北调中线总干渠输水线路较长,沿线自然社会经济条件复杂,工程运行将受到很多不确定性因素的影响,如气候、洪水、地震、滑坡、建筑物损害、人为失误和交通事故等^[1]。因此,对总干渠各种不确定性因素带来的风险进行分析和预警预报已成为目前工程管理的热点和难点。已有研究对南水北调中线工程河北段的环境风险进行了分析,认为地表水污染风险、大气沉降污染风险、地下水渗透污染风险和突发性环境污染事故风险是影响总干渠水质安全的潜在环境风险,而突发水污染事故风险对总干渠水质造成的危害比其他类型的环境风险更为严重^[2],因为总干渠输水工程沿线的控制建筑物和交叉建筑物众多,出现交通事故的隐患较大,一旦载有污染物质的车辆翻入干渠形成突发性水污染事故,将严重危及总干渠水质安全^[3-4]。

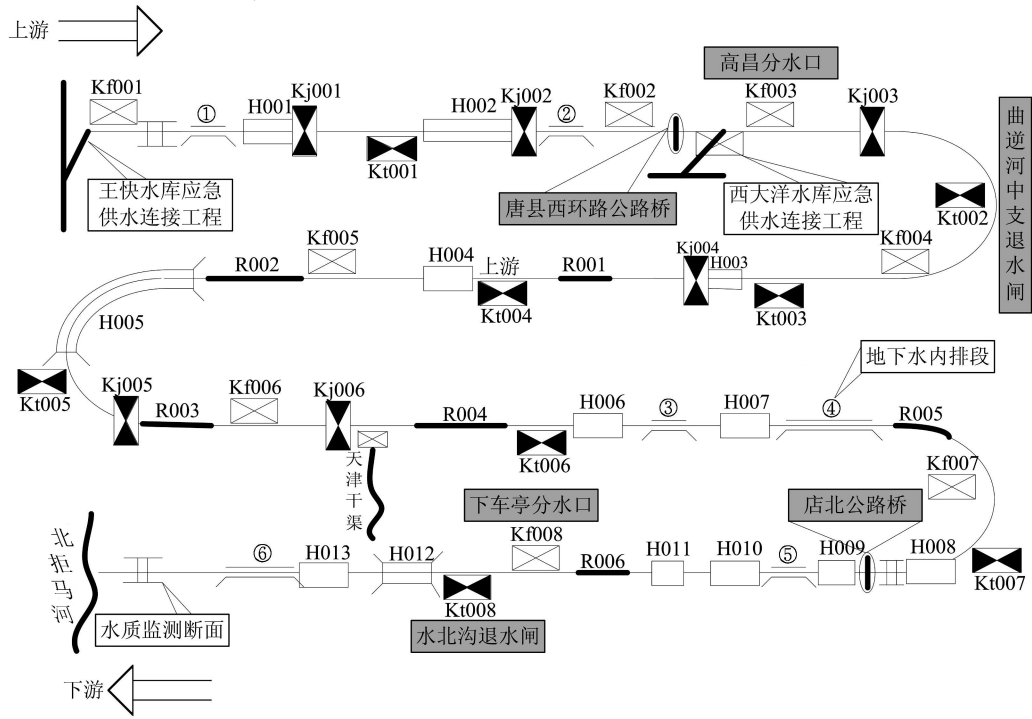
水污染事故发生突然,污染危害较大,难以控制^[5]。研究水污染事故的关键,在于研究事故发生后,水流的特性以及污染物在水体中的输移扩散过程^[6-7]。在突发水污染事故污染物迁移模拟预测方面,国内外学者针对不同的地表水体、不同种类污染物等进行了诸多模型研究。如 Galabov 等^[8]采用数值模型 MOTHY 评估了石油泄漏事故对布尔加斯港口水环境风险的影响,并确定了危险区域和其出现的条件;Manel 等^[9]通过数学模型模拟并分析了西班牙 Barcelona 港在近岸潮流的影响下发生水污染事故后不同水域受影响的程度;张晨等^[10-11]运用数

值模型对引黄济津河道和于桥水库下游渠道段在突发水污染事件下的水动力和水质模拟进行了分析;房彦梅等^[12]利用一维水力学和水质数值模型方法对南水北调中线工程典型渠段突发性水污染事故应急控制策略进行模拟分析。上述研究都针对突发性污染事故情况下污染物在水体中的输移扩散过程,但已有关于南水北调工程的风险研究多针对交叉建筑物的失效及防洪风险分析^[13-14],针对南水北调总干渠跨渠桥梁上危险货物运输发生倾翻事故从而而引发干渠突发水污染事故的相关模拟分析很少。

本文以南水北调中线工程京石段为例,针对该段跨渠桥梁上危险货物运输事故风险,建立了南水北调中线京石段干渠突发性水污染事故的污染物输移扩散模型,应用 MIKE 水质模型软件对污染物在干渠内的污染扩散情况进行模拟。对突发事件的影响范围、程度、时间做出定量预报,揭示突发事件发生后,节制闸未参与调控情况下的污染物输移扩散规律,为京石段干渠突发性水环境污染事故的应急方案的优选提供依据。

1 模拟段介绍

选定的模拟段从河北省保定市曲阳县孟良河至河北省保定市涿州市北拒马渠段,全长 157 km,总水头 10.172 m,该渠段含有中线干渠所有的水工构筑物类型,以及地下水内排段(即地下水水位高于渠底段及地下水水位高于设计水位段),具有很强的代表性。沿途分水口、闸门及水工构筑物见图 1。



Kf—分水口;Kj—节制闸;Kt—退水闸;H—倒虹吸;R—隧洞;①~⑥—地下水内排段

图 1 京石段干渠模拟段沿线各构筑物示意图

选取两座典型跨渠桥梁唐县西环路桥(一级桥梁)和店北公路桥(二级桥梁),距离模拟起始地段分别为26070 m和121972 m。这两座典型跨渠桥梁所跨干渠段的水力参数见表1。本研究针对两座典型跨渠桥梁危险货物运输事故风险,模拟风险事故情况下污染物迁移状况,以及污染团到达跨渠桥梁下高昌分水口(距离模拟起始段29994 m)和下车亭分水口(距离模拟起始段126344 m)及曲逆河中支退水闸(距离模拟起始段41367 m)和水北沟退水闸(距离模拟起始段144546 m)的时间及浓度。

表1 典型公路桥所跨干渠段的水力参数

公路桥名称	过水断面面积 A/m^2	底宽 B/m	边坡系数 m	流速 $u/(m \cdot s^{-1})$
唐县西环路桥	78	18.5	2.5	1.282
店北公路桥	45	7.5	2.5	2.222

对于跨渠桥梁上危险货物运输事故导致的干渠突发水污染而言,事故泄漏的污染物浓度较大,瞬时排入河流中的量也较多,对事故后果的估算主要关心泄漏后不同时段内被污染渠道的长度及污染物的浓度变化情况。在运用 MIKE 11 水质模型模拟跨渠桥梁上危险货物运输事故情景下污染扩散情况前,需建立水动力模型及对流扩散模型。

2 水动力模型的建立

对于模拟段,因为干渠深度和宽度相对于模拟段的长度较小,则干渠内水的流动可以看成一维流动。MIKE 11 水动力模型(HD)是一维水动力模型,主要用于洪水预报及调度措施、河渠/灌溉系统的设计调度及河口风暴潮的研究。应用 MIKE 11 HD 模块模拟京石段干渠的水位和流量,水动力的模拟结果可作为后续对流扩散模拟的基础。

a. 水动力模型的数据文件。MIKE 11 水动力模型主要包括的数据文件有:河网文件(.nwk11)、断面文件(.xns11)、边界条件(.bnd11)、模型参数文件(.hd11)。所有断面数据均来自设计资料,边界条件采用模拟段上游流量、下游水位边界,将收集到的2009年的实测数据输入到边界文件中。

b. 水动力模型的率定。水动力模型的率定主要是调整河床糙率,率定年为2009年,河床糙率初始值取0.015(设计值)。由率定结果可以得出,糙率为0.012时,监测断面的实测流量值和模拟值比较吻合。

c. 水动力模型的验证,采用2009年率定的模型结果,用2010年的数据做进一步的模型验证,模拟的流量与水位均与实测值比较吻合,误差均控制在15%以内。因此HD模型总体上符合要求,可以

作为后续水质模型的基础。

3 对流扩散模型建立

MIKE 11 的对流扩散模型(AD)是一种均相混合模型,用来模拟均相中污染物的运移过程。对于突发性水污染事故,由于污染物的浓度较大,瞬间排入干渠的污染物质较多,如考虑排入干渠的污染物质量相比于干渠流量小得多,则 MIKE 11 的对流扩散模型可以满足模拟污染物的运移过程要求,实现突发性水污染事故的场景分析。MIKE 11 AD 采用的一维河流水质模型基本方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) - K\rho \quad (1)$$

式中: ρ 为模拟物质的质量浓度; u 为河流平均流速; E_x 为对流扩散系数; K 为模拟物质的一级衰减系数; x 为空间坐标; t 为时间坐标。

对流扩散模型是在水动力模型的基础上建立的,在水动力模型边界的基础上加上突发性污染物泄漏的一个时间序列作为内部边界,其他边界处该污染物的浓度设置为0。本研究揭示事故发生后节制闸未参与调控情况下的污染物输移扩散规律。

在突发水污染事故研究中,研究对象大多是难降解的有机有毒物质,且研究要求在短时间内得知污染物的浓度分散情况,因此污染物的对流扩散对污染物的迁移起着重要作用。由于实际条件限制,无法进行实际测算,对流扩散系数 E 须借助于经验公式或者理论分析的方法来确定。朱德军^[15]针对京石明渠段的突发水污染事故进行了模拟分析,并采用回归方法得到了对称梯形断面明渠中纵向离散系数 E 的计算公式如下:

$$E = \frac{0.073M^{-2.559}\beta_i^{1.524}B^2\bar{u}^2}{\alpha h v_*} \quad (2)$$

式中: M 为突发污染物泄漏量, g ; β_i 为反映侧壁对流速分布影响的主要参数, β_i 越大,侧壁对断面流速分布的影响越大,反之亦然; B 为干渠底宽, m ; \bar{u} 为渠道平均流速, m/s ; α 为粗糙系数,取0.015; h 为渠道中水深, m ; v_* 为渠道剪切流速, m/s 。对流扩散系数 E 取值范围为15~20 m^2/s 。

4 污染物运移过程动态模拟

根据《国家危险废物名录》、GB 18218—2000《重大危险源辨识》、GB 50844—85《职业性接触毒物危害程度分级》的相关规定,本研究以有毒有害物质氰化钠为泄漏物质来分析事故危害后果。由南水北调中线工程总干渠供水水质要求可知,干渠内水质应执行GB 3838—2002《地表水环境质量标准》

Ⅱ类标准,按地表水Ⅱ类标准保护,因此达到水质标准要求要求的氰化钠质量浓度应不大于0.005 mg/L。

据相关研究,唐县西环路桥和店北公路桥发生危险货物运输车辆事故的概率分别为 3.25×10^{-4} 和 8.64×10^{-6} ,事故发生的概率风险很小,但并不为零,表明危险货物在跨渠桥梁上运输对干渠水体的安全威胁仍然存在^[16],因此,有必要对跨渠桥梁上危险货物运输事故导致的干渠突发性水污染进行模拟分析,从而为京石段干渠突发性水环境污染事故应急预案的制定提供科学、可行的依据。

本研究假定一辆装有氰化钠的储罐货车在京石段跨渠桥梁上发生翻车事故,并造成罐内的氰化钠泄入干渠。在0.5 h时间里共有9 t污染物流到干渠,该污染物的质量浓度为1000 mg/L(流量为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$)。

4.1 唐县西环路桥突发性危险货物运输事故动态模拟

4.1.1 污染团的迁移扩散模拟

图2显示了唐县西环路桥突发性危险货物运输事故发生后各断面最大污染物质量浓度分布情况。由图2可知,在唐县西环路桥发生突发性危险货物运输事故后,在断面26.4 km处(即唐县西环路桥下游330 m处),最大污染物质量浓度为1.03 mg/L,之后随着污染物不断地被稀释扩散,污染物质量浓度在下游各断面呈下降趋势,在断面146.7 km处(即唐县西环路桥下游120.7 km处)污染物质量浓度已下降为0.004 mg/L,低于氰化钠Ⅱ类水质标准要求,这说明当唐县西环路桥发生突发性危险货物运输事故后,如若不进行任何应急措施,由于水量的稀释扩散作用,在其下游120 km处,污染物质量浓度依然能达到Ⅱ类水质标准要求。

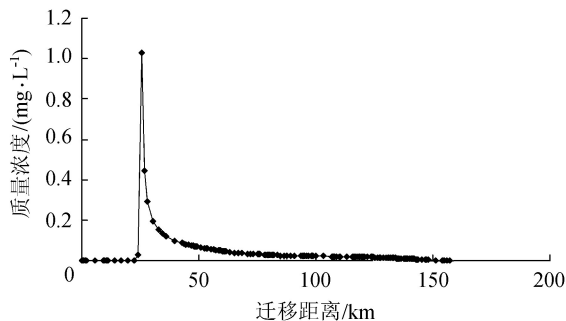


图2 事故发生后各断面最大污染物质量浓度分布情况(唐县西环路桥情景)

从污染物运移时间上来看,在唐县西环路桥发生突发性危险货物运输事故,1 h后,污染物质量浓度达到最大,为1.03 mg/L,此后随着时间的推移,污染物质量浓度逐渐下降;30 h后,污染峰迁移至断面28.5 km处,最大污染物质量浓度为0.29 mg/L,相比事故刚发生时的最大污染物质量浓度下降了

71.8%;59 h后,污染峰迁移至断面31 km处,最大污染物质量浓度为0.19 mg/L,相比事故刚发生后最大污染物质量浓度下降了81.6%,但此时污染物质量浓度仍远远大于0.005 mg/L,水质污染严重。

4.1.2 高昌分水口断面污染物质量浓度变化

图3为唐县西环路桥突发性危险货物运输事故发生后高昌分水口断面污染物质量浓度变化情况。从图3中可以看出,在事故发生后37.2 h,污染物已经迁移到此断面处,质量浓度为0.001 mg/L,而在40.8 h后,污染物质量浓度已经增大到0.006 mg/L,此时污染物质量浓度已经超过氰化钠Ⅱ类标准,表明此时水质已被污染。在110.4 h后,该分水口断面处污染物质量浓度达到最大值0.134 mg/L,此时水质被严重污染,此后由于稀释扩散降解作用,污染物质量浓度在逐渐降低,在328.8 h后,污染物质量浓度降到0.004 mg/L,已经低于氰化钠Ⅱ类标准,表明此时水质已恢复正常。由模拟结果可知,在事故发生后40.8 ~ 328.8 h时间段内,由高昌分水口分水(分水流量 $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$)的水质已被污染(氰化钠质量浓度已经超过GB3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅱ类标准),对此段时间内由该分水口所分的水量应采取适当的措施处理后,方可进行使用。

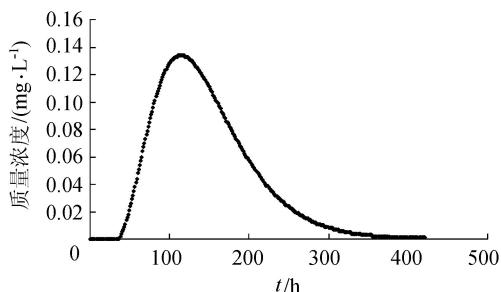


图3 高昌分水口断面污染物质量浓度变化情况

4.1.3 曲逆河中支退水闸断面污染物浓度变化

图4为唐县西环路桥突发性危险货物运输事故发生后曲逆河中支退水闸断面污染物质量浓度变化情况。从图4中可以看出,事故发生后96 h,污染物已经迁移到此断面处,质量浓度为0.001 mg/L,而在109.2 h,污染物质量浓度已经增大到0.005 mg/L,已经超过氰化钠Ⅱ类标准,表明此时水质已被污染。

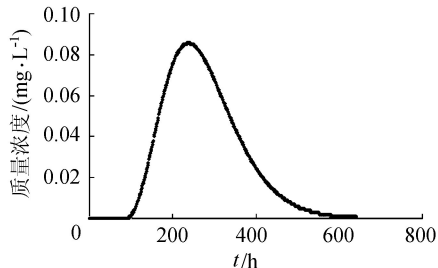


图4 曲逆河中支退水闸断面污染物质量浓度变化情况

事故发生后 235.2 h,该分水口断面处污染物质量浓度达到最大值 0.086 mg/L,此时水质被严重污染。此后由于稀释扩散降解作用,污染物质量浓度逐渐降低,事故发生后 517.2 h 时,污染物质量浓度降到 0.004 mg/L,已经低于氰化钠 II 类标准,此时水质已恢复正常。由模拟结果可知,事故发生后 109.2 ~ 517.2 h 时间段内,曲逆河中支退水闸断面处水质已被污染,氰化钠质量浓度已经超过 GB3838—2002《地表水环境质量标准》II 类标准,此时需开启退水闸,将受污染水排出。

4.2 店北公路桥突发性危险货物运输事故动态模拟

4.2.1 污染团的迁移扩散模拟

图 5 显示了店北公路桥突发性危险货物运输事故发生后各断面最大污染物质量浓度分布情况。由图 5 可知,在唐县西环路桥突发性危险货物运输事故发生后,污染物质量浓度在断面 122.136 km 处(即店北公路桥下游 164 m 处)为 1.17 mg/L,之后随着污染物不断地被稀释扩散,最大污染物质量浓度在下游各断面呈现下降趋势,在断面 157 km 处(即店北公路桥下游 34 km 处),模拟段终点位置,最大污染物质量浓度下降为 0.024 mg/L,但仍高于氰化钠 II 类水质标准要求。

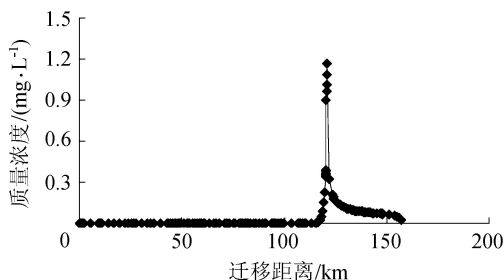


图 5 事故发生后各断面最大污染物质量浓度分布情况(店北公路桥情景)

从污染物运移时间上来看,在事故发生后 1 h 污染物质量浓度达到最大,为 1.17 mg/L,此后随着污染物不断地被稀释扩散,污染物质量浓度在逐渐降低。45 h 后,污染峰迁移至断面 124.592 km 处,最大污染物质量浓度为 0.21 mg/L,相比事故发生后下降了 82.1%;在 122 h 后,污染峰迁移至断面 127.472 m 处,最大污染物质量浓度为 0.15 mg/L,相比事故发生后下降了 87.2%,但此时污染物浓度仍远远大于 0.005 mg/L,水质污染严重。

4.2.2 下车亭分水口断面污染物质量浓度变化情况

图 6 为店北公路桥突发性危险货物运输事故发生后下车亭分水口断面污染物质量浓度变化情况。从图 6 可以看出,事故发生后 154.8 h,污染物已经迁移到此断面处,质量浓度为 0.001 mg/L,而在 202.8 h 时污染物质量浓度已经增大到 0.005 mg/L,

超过氰化钠 II 类标准,表明此时水质已被污染。476.4 h 时,该分水口断面处污染物质量浓度达到最大值 0.082 mg/L,此时水质被严重污染,此后由于稀释扩散降解作用,污染物质量浓度在逐渐降低,事故发生后 1185.6 h 时,污染物质量浓度降到 0.004 mg/L,已经低于氰化钠 II 类标准,表明此时水质已恢复正常。由模拟结果可知,在事故发生后 202.8 ~ 1185.6 h 时间段内,由下车亭分水口(分水量:3.0 m³/s)分水水质已被污染(氰化钠质量浓度已经超过 GB3838—2002《地表水环境质量标准》II 类标准),对此段时间内由该分水口所分的水量,应采取适当的措施处理方可进行使用。

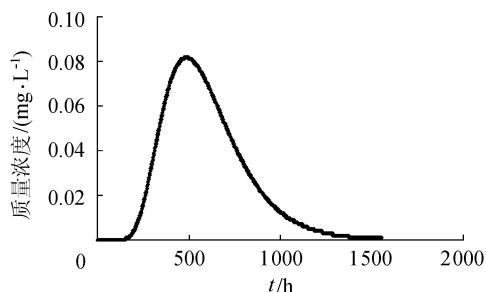


图 6 下车亭分水口断面污染物质量浓度变化情况

4.2.3 水北沟退水闸断面污染物质量浓度变化情况

图 7 为店北公路桥突发性危险货物运输事故发生后水北沟退水闸断面污染物质量浓度变化情况。从图 7 可以看出,事故发生后 214.8 h,污染物已经迁移到此断面处,质量浓度为 0.001 mg/L,而在 276 h 时,污染物质量浓度已经增大到 0.005 mg/L,已经超过氰化钠 II 类标准,表明此时水质已被污染。在 588 h 时,该分水口断面处污染物质量浓度达到 0.073 mg/L,此时水质被严重污染。此后由于稀释扩散降解作用,污染物质量浓度逐渐降低,在 1347.6 h 时,污染物质量浓度降到 0.004 mg/L,已经低于氰化钠 II 类标准,表明此时水质已恢复正常。由模拟结果可知,在事故发生后 276 ~ 1347.6 h 时间段内,水北沟退水闸断面处水质已被污染(氰化钠质量浓度已经超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》II 类标准),此时需开启退水闸,将受污

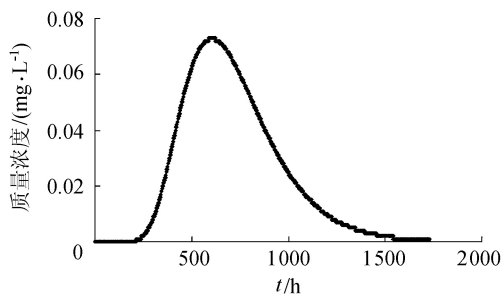


图 7 水北沟退水闸断面污染物质量浓度变化情况

染水排出。

5 结 语

建立了基于突发性水污染事故的南水北调中线京石段污染物运移扩散模型,应用 MIKE 11 的水动力模块和对流扩散模块模拟了典型跨渠公路桥唐县西环路桥和店北公路桥发生危险货物运输倾翻事故后污染物运移扩散过程。采用本研究建立的模型,可模拟污染团的运移、扩散过程,预报倾翻事故发生后,污染团达到下一个分水口及退水闸的时间及质量浓度,结合 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,对污染物进行调控,通过开启退水闸,将污染物进行外排处理,可保证供水水质安全。本研究可为京石段干渠突发性水环境污染事故应急方案的优选提供依据。

参考文献:

- [1] 刘勇,刘建民,张建设.长距离输水工程风险分析研究[J].水利水电技术,2005(4):114-116. (LIU Yong, LIU Jianmin, ZHANG Jianshe. Risk analysis on long-distance water diversion project[J]. Water Resource and Hydropower Engineering, 2005(4):114-116. (in Chinese))
- [2] 任仲宇,陈鸿汉,刘国华.南水北调中线干渠水污染途径分析研究[J].环境保护,2008,6(6):65-67. (REN Zhongyu, CHEN Honghan, LIU Guohua. Analysis research on the water pollution pathway of the Middle Route South-to-North Water Transfer Project [J]. Environmental Protection, 2008, 6(6):65-67. (in Chinese))
- [3] 王世猛,万宝春,王伟,等.南水北调中线河北段水源保护区环境保护对策研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(2):21-23. (WANG Shimeng, WAN Baochun, WANG Wei, et al. A countermeasure study on watershed protection Area of Hebei Section in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(2):21-23. (in Chinese))
- [4] 王世猛,万宝春,王路光,等.南水北调中线河北段水质保护环境风险分析研究[J].南水北调与水利科技,2009,7(6):123-125. (WANG Shimeng, WAN Baochun, WANG Luguang, et al. Analysis on environmental risk of Hebei Section's water quality protection in the Middle Route of the South-to-North Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6):123-125. (in Chinese))
- [5] 崔伟中,刘晨.松花江和沱江等重大水污染事件的反思[J].水资源保护,2006,22(1):1-4. (CUI Weizhong, LIU Chen. Consideration on severe sudden accidents of water contamination in Songhuajiang River and Tuojiang River[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(1):1-4.

(in Chinese))

- [6] 韩晓刚,黄延林.我国突发性水污染事件统计分析[J].水资源保护,2010,26(1):84-90. (HAN Xiaogang, HUANG Yanlin. Statistical analysis of sudden water pollution accidents[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1):84-90. (in Chinese))
- [7] 余廉,刘云山,吴国斌.水污染突发事件:演化模型与应急管理[J].长江流域资源与环境,2011,20(8):1004-1009. (YU Lian, LIU Yunshan, WU Guobin. Water pollution emergency incidents: evolutionary model and emergency management[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(8):1004-1009. (in Chinese))
- [8] GALABOV V, KORTCHEVA A, MARINSKI J. Simulation of oil pollution accidents in the Bay of Burgas, using hydrodynamic model [J]. SGEM Conference Proceedings, 2012, 3:993-1000.
- [9] GRIFOLL M, JORDA G, ESPINO M, et al. A management system for accidental water pollution risk in a harbour: the Barcelona case study [J]. Journal of Marine Systems, 2011, 88(1):60-73.
- [10] 张晨.长距离调水工程水质安全研究与应用[D].天津:天津大学,2008.
- [11] 高学平,张晨,张亚,等.引黄济津河道水质数值模拟与预测[J].水动力学研究与进展(A辑),2007,22(1):36-43. (GAO Xueping, ZHANG Chen, ZHANG Ya, et al. Numerical simulation and prediction of water quality for water supply from Yellow River to Tianjin [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser A), 2007, 22(1):36-43. (in Chinese))
- [12] 房彦梅,张大伟,雷晓辉,等.南水北调中线干渠突发性水污染事故应急控制策略[J].南水北调与水利科技,2014,12(2):133-136. (FANG Yanmei, ZHANG Dawei, LEI Xiaohui, et al. Emergency control strategy for sudden water pollution accident in the main channel of Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2):133-136. (in Chinese))
- [13] 幸红,潘运方.突发性水污染应急措施有关机制研究[J].人民珠江,2007(4):35-39. (XING Hong, PAN Yunfang. Study of emergent water pollution accident responding mechanism [J]. Pearl River, 2007(4):35-39. (in Chinese))
- [14] 陆曦,梅凯.突发性水污染事故的应急处理[J].中国给水排水,2007,23(8):14-18. (LU Xi, MEI Kai. Emergency treatment of sudden of water pollution accident [J]. China Water & Waste water, 2007, 23(8):14-18. (in Chinese))
- [15] 朱德军.南水北调中线明渠段事故污染特性模拟方法研究[D].北京:清华大学,2007:18-28.
- [16] 马芳冰.南水北调中线工程京石段危险货物运输事故风险分析与预警预报[D].北京:北京师范大学,2013.

(收稿日期:2015-01-08 编辑:彭桃英)