



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.016

骆菲菲, 曹慧哲, 郑彤, 等. 明渠突发水污染导流退水工况的模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 102-105. LUO Fei fei, CAO Hui zhe, ZHENG Tong, et al. Simulation of diversion and recession flow for sudden water pollution accidents in open channel[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 102-105. (in Chinese)

明渠突发水污染导流退水工况的模拟

骆菲菲, 曹慧哲, 郑彤, 李彪, 王鹏

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150090)

摘要: 我国是一个水污染事故多发的国家, 在南水北调工程全面通水前, 需要提前针对可能发生的突发水污染事故开展研究。通过利用 SMS 水动力学软件, 以中线某段为例, 模拟分析明渠中水的流动状态及突发水污染时污染物的扩散过程; 并在此基础上分析采用设置导流坝配合退水渠进行污染团导流的应急处置效果。以期为渠道管理和污染事故处理提供理论和技术支持。

关键词: 数值模拟; 导流; 退水渠; 污染物扩散

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0102-04

Simulation of diversion and recession flow for sudden water pollution accidents in open channel

LUO Fei fei, CAO Hui zhe, ZHENG Tong, LI Biao, WANG Peng

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: China is a country with water pollution accidents occurring frequently. Before full completion of the South to North Water Diversion project, we need to research the sudden water pollution accident that may occur in advance. Using the hydrodynamic software SMS, the flow state in open channel and the pollutants diffusion process were simulated when sudden water pollution occurred in a typical segment of the middle route main channel. Based on that, the emergency disposal effect with the use of setting the diversion dam and escape canal was analyzed. It provides technical support for channel management and pollution accident treatment.

Key words: numerical simulation; diversion; escape canal; pollutant diffusion

作为世界上迄今为止最大规模的调水工程, 南水北调工程将在缓解南北水资源供需矛盾中发挥重要作用^[1-2]。在逐渐完工的中线明渠段中, 控制建筑物和交叉建筑物众多, 一旦出现突发性水污染事故, 将严重影响输水渠道水质安全^[3-4]。目前, 对于突发水污染事故应急处置的研究主要集中在预警系统的开发、污染物的物理

化学处理方法的改进等方面^[5-7], 甚少从限制水体中水流特性的角度研究污染物的应急处置方法。本文采用水动力学软件 SMS^[8] (其全称为 Surface Water Modeling System) 利用其 RMA2 和 RMA4 模块, 通过模拟设置导流坝前后渠道中污染物的扩散过程, 分析导流退水对污染团扩散的限制效果, 为突发水污染事故应急处置方案的研究提供更多的思路。

收稿日期: 2015-05-08 修回日期: 2015-12-10 网络出版时间: 2015-12-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151215.1525.002.html>

基金项目: 国家科技重大专项课题(2012ZX07205-005)

Fund: Major National Science and Technology Projects(2012ZX07205-005)

作者简介: 骆菲菲(1988-), 女, 山东人, 主要从事环境流体力学研究。E-mail: fayeluo@163.com

通讯作者: 曹慧哲(1974-), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事瞬变流、管网水力工况分析、环境流体力学, 添加剂减阻等研究工作。E-mail: caohz@hit.edu.cn

1 模型的建立

污染物进入水体后,首先与周围水体混掺而扩散。当污染源的动量或者浮力作用逐渐消失、完成垂向扩散过程后,污染物质将随水流运动,并由于紊动而继续横向扩散。当扩展至全河(渠)宽,并且断面完全混合后,将沿纵向继续随流离散^[9]。

中线干渠宽深比较大,虽然垂向扩散会很快完成。但是,从污染物进入水体,到横向扩散作用与纵向离散作用达到平衡,是一个相当缓慢的过程。为了准确模拟水污染事故发生后,流场和浓度场的发展规律,故采用平面的二维数值模型^[10-11]。

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi v_a^2 \cos \phi - 2hv \omega \sin \phi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \xi v_a^2 \sin \phi - 2hv \omega \sin \phi = 0 \quad (3)$$

水质基本方程:

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right) = 0 \quad (4)$$

2 模拟结果与分析

收集京石段明渠相关资料建立两个模型。一为原始渠道模型,即模型 A。另一为设置导流坝、开启退水闸后的渠道模型,即模型 B。渠段模型全长 2.44 km,坡度是 1:20 000,渠道断面底宽 18.5 m,边坡比为 2.5,渠道糙率为 0.015。退水渠长 0.7 km,入口宽 6 m。当突发水污染事故后,利用不过水材料在渠道中设置导流坝。由于渠道模型较短,流速较小,设置导流坝后,壅水情况不明显,故而不考虑导流坝的设置高度。本文将设计流量和水深作为边界条件,利用 SMS 的 RMA2 模块,计算两模型渠道的流场分布,并在此基础上,利用 RMA4 模块,模拟模型中游某点处突发水污染时,污染物的迁移扩散过程^[12]。在模拟的过程中,仅考虑设置导流坝前后对污染团扩散过程的影响。



图 1 渠道俯视图

Fig. 1 Vertical view of the channel

2.1 原始渠道模型(模型 A)模拟结果

2.1.1 模型 A 的流场模拟结果

RMA2 是 SMS 软件最重要、最基本的模块,主要用于计算平面二维具有自由表面流场的水位、水深及平面流速等^[13],是以 N-S 方程为基础、以伽辽金有限元为基本求解方法的二维沿水深平均的水动力数值计算模型^[14]。给定上边界流量 75 m³/s,下边界水位为 63.8 m,渠底糙率 0.015,紊动黏性系数为 20。

经过计算,干渠流速分布范围为 0.3~0.8 m/s,下游流速最高可达 0.6 m/s。明渠是典型的重力流,渠道的坡降变化将影响流速大小的变化。模拟的结果也验证了这一点,上游断面上各处流速基本保持一致,当水流至下游断面时,由于途中高程变化不一致,使得下游断面上各处流速变化趋势明显不一致。各点流速变化趋势与高程差的变化趋势保持一致,即地势下降较快的位置,局部流速增幅较大,反之,则较小。

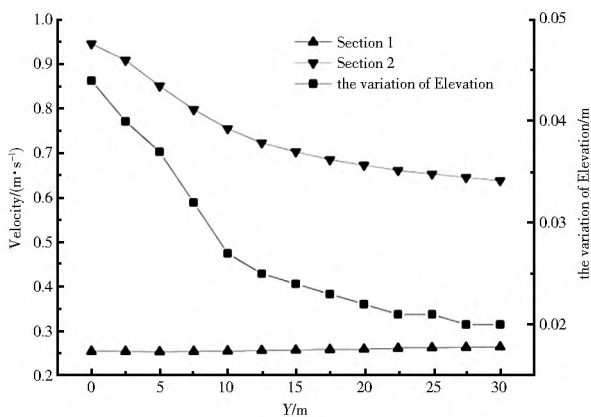


图 2 断面各点流速和高程差的变化

Fig. 2 Velocity and variation of elevation

2.1.2 模型 A 的污染物浓度场模拟结果

RMA4 模型是美国陆军工程兵团河道试验站在 RMA2 平面二维有限元水动力学模型的基础上开发的平面二维有限元法污染物输移数值模型,一般试用于污染物浓度在垂直方向充分混合的情

况^[15]。假设于渠道中游某点突然发生污染物的泄漏事故,总泄露量约为 2.5 kg,泄漏曲线为 $y = 150\exp(-4.5t)$,浓度单位为 mg/L。时间步长取 0.06 h,计算总时长为 3 h。经过 RMA4 模块的计算,得到不同时刻下污染物的扩散情况见图 3。

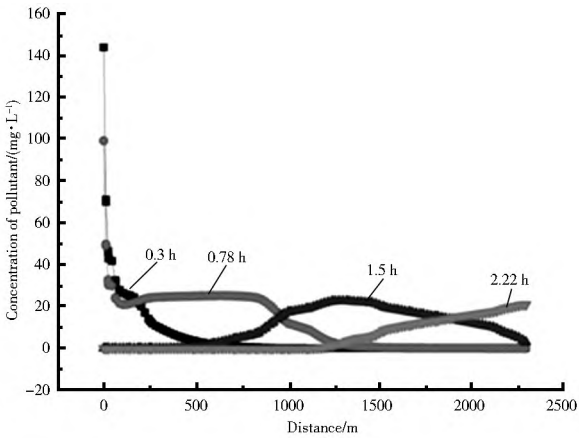


图 3 不同时刻下模型 A 污染物沿程扩散

Fig. 3 Pollutant diffusion along the way at different time

2.2 设置导流坝、开启退水渠后的渠道(模型 B)模拟结果

2.2.1 模型 B 的流场模拟结果

由计算结果可知,设置导流坝、开启退水渠后,坝前流速范围为 0.4~0.6 m/s,坝后流速迅速减到 0.2 m/s 以下。其中,坝下过流断面上平均流速为 0.246 m/s,而模型 A 中同一位置处渠道过流断面上平均流速为 0.19 m/s。但由于设置导流坝后,干渠过流断面急剧减小,流量仅为 6.15 m³/s,为设置前的 21.2%。

2.2.2 模型 B 的污染物浓度场模拟结果

在相同的泄露位置和泄露曲线下,计算模型 B 的污染物扩散结果得到图 4。

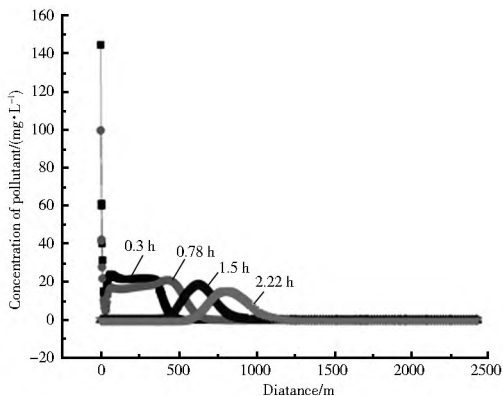


图 4 不同时刻下模型 B 污染物沿程扩散

Fig. 4 Pollutant diffusion along the way at different time

可以发现同一时刻下设置导流坝的渠道下游中污染物扩散的面积较小,污染物扩散速度较慢。由图 6 可知,当污染物与水体在渠道断面上完全混合后,污染物沿纵向扩散时在渠道断面上将均

匀分布。则在污染物均匀分布的前提下,应急处置中可直接根据流量分配的比例,计算出模拟结果中约有 78.8% 的污染物经退水渠排出,排出总量为 1.97 kg。

2.3 模型 A 与模型 B 的比较

2.3.1 两模型污染物浓度随时间变化的比较

取导流坝所在位置为一观测断面,由其污染物浓度变化图(图 5)知此处两模型中浓度变化曲线一致,峰值相差不大。而在下游末端断面处,模型 B 中污染物浓度为 0(图 6),即经过退水后,干渠中的污染物浓度可以通过稀释,降解等过程自行降低。

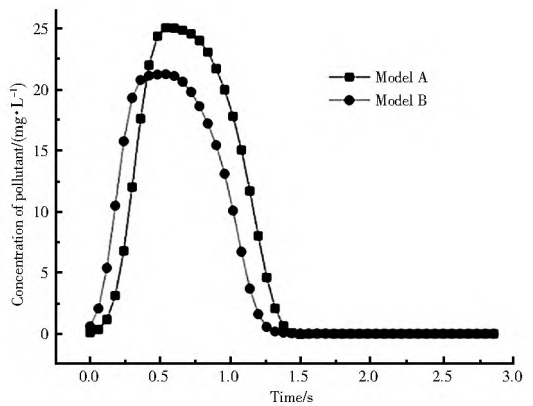


图 5 导流坝处断面污染物浓度变化

Fig. 5 Curves for pollutant concentration of diversion section

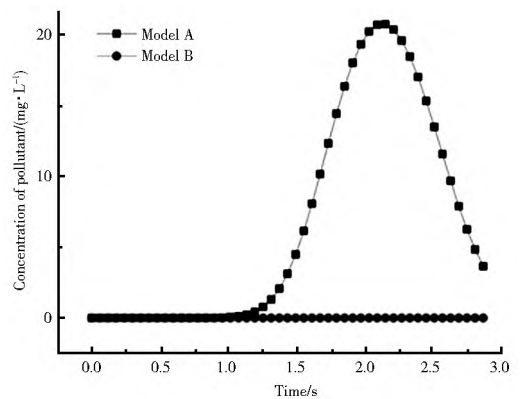


图 6 下游末端断面污染物浓度变化

Fig. 6 Curves for pollutant concentration of downstream section

2.3.2 两模型干渠中污染物浓度沿程变化的比较

比较同一时刻下模型 A 与模型 B 的污染物沿程扩散图(图 7、图 8),能够发现:(1)模型 B 污染物的峰值要小于模型 A,沿程同一地点处污染物浓度也要小于模型 A;(2)模型 B 中峰值出现的时间比模型 A 有推迟,这说明模型 B 中污染物扩散较慢,即保护了干渠下游的水质安全,降低了突发污染事故造成的损失。

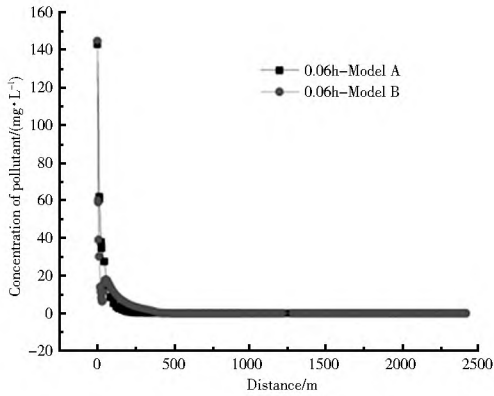


图7 0.06 h 模型污染物浓度变化

Fig. 7 Curves for pollutant concentration at 0.06 hour

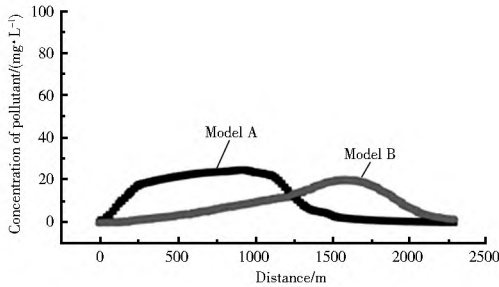


图8 1.02 h 模型污染物浓度变化

Fig. 8 Curves for pollutant concentration at 1.02 hour

3 结论

可以利用 SMS 软件, 针对渠道突发污染事故, 通过模拟污染物的变化来分析设置导流坝结合退水闸退水的应急处置措施的实施效果。经过模拟计算发现, 设置导流坝后, 坝后的干渠污染物浓度大幅减少, 沿程扩散的速度也有明显减缓。本文的模拟结果对突发水污染事故时, 应急处置方案的设定具有一定的参考价值, 并对相关方案的可操作性评价具有指导意义。

参考文献 (References):

[1] 王亮东. 跨流域长距离调水工程建设管理体制模拟研究[J]. 价值工程, 2005, 24(12): 25-27. (WANG Liangdong. Study of construction management system model for an inter-basin long distance water transfer projects[J]. Value Engineering, 2005, 24(12): 25-27. (in Chinese))

[2] 刘婵玉. 突发水污染事故下明渠输水工程应急调控研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. (LIU Chan-yu. Study on emergency control for sudden water pollution accidents in the open channel water conveyance projects[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese))

[3] 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. (ZHU De-jun. Study on numerical methods for water pollution accidents in the middle route open channel of the South to North Water Transfer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese))

[4] 曾光明, 卓利, 钟政林, 等. 突发性水环境风险评价模型事故泄

漏行为的模拟分析[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 403-406. (ZENG Guang-ming, ZHUO Li, ZHONG Zheng-Lin, et al. Assessment model about the accident water environment risk modeling of the toxicant accident leakage[J]. China Environmental Science, 1998, 18(5): 403-406. (in Chinese))

[5] 李青云, 赵良元, 林莉, 等. 突发性水污染事故应急处理技术研究进展[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4): 6-11. (LI Qing-yun, ZHAO Liang-yuan, LIN Li et al., Review of emergency treatment technologies for sudden water pollution accidents[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(4): 6-11. (in Chinese))

[6] 赵龙舫. 河流突发性水污染事件实时预警方法研究及系统实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (ZHAO Long-fang. Research on real time early warning methods and system of rivers accidental water pollution events[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))

[7] 冯运超. 水源水质突发性污染应急处理方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008. (FENG Yun-chao. Study on emergency treatment of source water by sudden polluted accident[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese))

[8] 张明进, 张华庆. SMS 水动力学软件[J]. 水道港口, 2006, 27(1): 57-59. (ZHANG Ming-jin, ZHANG Hua-qing. Hydrodynamic software SMS[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(1): 57-59. (in Chinese))

[9] 姜福厚. 基于随机扩散过程的污染物迁移研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. (JIANG Fu-hou. Research on pollutant migration based on random diffusion process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese))

[10] 黄留芳, 刘臣辉, 范海燕. 基于 SMS 软件的不同类型湖泊水质特征分析[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(5): 37-40. (HUANG Liu-fang, LIU Chen-hui, FAN Hai-yan. Water quality analysis of different types of lakes based on SMS[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(5): 37-40. (in Chinese))

[11] 黄卡. SMS 模型在长洲水利枢纽下游水流模拟中的应用研究[J]. 红水河, 2010, 29(3): 24-28. (HUANG Ka. Application of surface water model system to simulation of the River Downstream Changzhou Hydraulic complex[J]. HongShui River, 2010, 29(3): 24-28. (in Chinese))

[12] 马莉, 桂和荣, 曹彭强. 河流污染二维水质模型研究及 RMA4 模型概述[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1): 102-108. (MA Li, GUI He-rong, CAO Peng-qiang. Study on integration of 2D water quality models and review of RMA4 model[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2011, 35(1): 102-108. (in Chinese))

[13] 陈春燕, 汤子扬, 张丽萍. SMS 软件 RMA2 模块固边界的处理研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 68-70. (CHEN Chun-yan, TANG Zi-yang, ZHANG Li-ping. Research on internal boundary condition in RMA2 module of SMS software[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(5): 68-70. (in Chinese))

[14] 李艳红. 南四湖富营养化评价及水质数值模拟研究[D]. 济南: 济南大学, 2010. (LI Yan-hong. Study on eutrophic evaluation and numerical simulation of water quality in Nansihu Lake[D]. Jinan: University of Jinan, 2010. (in Chinese))

[15] 骆辉煌. RMA2 和 RMA4 在五里湖调水模拟中的开发应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005. (LUO Hui-huang. Application study of RMA2 and RMA4 in the water diversion simulation of Wulihu Lake[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005. (in Chinese))