

# 南水北调中线干渠突发水污染事故应急控制策略

房彦梅<sup>1</sup>, 张大伟<sup>2</sup>, 雷晓辉<sup>2</sup>, 吴辉明<sup>2</sup>, 桑国庆<sup>3</sup>

(1. 北京市南水北调工程建设管理中心, 北京 100038;  
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 济南大学, 济南 250012)

**摘要:**以南水北调中线工程典型渠段为例,建立了突发水污染事故工况的中线一维圣维南方程和水质数值模型。在考虑污染物的传播速度、渠道水位变幅和水位波动等限制条件下,提出水污染事故下各闸门的应急控制策略,制定闸门的关闭规则,模拟分析不同控制策略下渠道退水量、稳定时间、水位变幅、水质等参数的变化情况,确定保证明渠运行安全的水污染事故应急闸控方案,为中线工程应急预案的建立提供参考。

**关键词:**南水北调中线;突发水污染;应急控制;仿真

**中图分类号:**TV 877;TV 68 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-1683(2014)02-0133-04

## Emergency Control Strategy for Sudden Water Pollution Accident in the Main Channel of Middle Route of South to North Water Diversion Project

FANG Yan mei<sup>1</sup>, ZHANG Da wei<sup>2</sup>, LEI Xiao hui<sup>2</sup>, WU Hui ming<sup>2</sup>, SANG Guo qing<sup>3</sup>

(1. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Project of Beijing, Beijing 100038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Ji nan University, Ji nan 250012, China)

**Abstract:** A one dimensional hydraulic and water quality model was developed to simulate the sudden water pollution accident in the main channel of Middle Route of South to North Water Diversion Project. In consideration of the migration velocity of pollutants and water level variations in the channel, the emergency control strategy of each gate was proposed under the conditions of sudden water pollution accident, the gate closing rules were established, the variations of channel depletion rate, stabilization time, water level fluctuation, and water quality were simulated, and then the control scheme of emergency gate was determined to ensure safe operation of channel under sudden water pollution accident. The results can provide reference for the development of emergency strategy in the Middle Route of South to North Water Diversion Project.

**Key words:** Middle Route of South to North Water Diversion Project; sudden water pollution; emergency control; simulation

南水北调中线总干渠输水工程沿线的控制建筑物和交叉建筑物众多,一旦发生突发性水污染事件且处置不当,不仅不能有效控制污染物的输移和扩散,还可能会引发渠道内水位的骤升、骤降,甚至使渠道破坏。因此,必须提出可行的水污染闸门应急控制策略<sup>[1-9]</sup>,制定闸门的关闭规则,在保证输水安全的基础上,寻求最有效、经济、快速的水污染应急控制方案。

针对明渠输水工程突发污染事件应急控制,国内外学者开展了一系列研究。高学平<sup>[7]</sup>等建立了引黄济津河道水位数值模拟与预测模型,能较好地分析与预测引黄济津河道的

水质状况;朱德军<sup>[8]</sup>针对南水北调中线典型明渠段事故,采用一维模型模拟研究了闸前定水位控制运行方式下的非恒定流场和浓度场,推导出渠道中扰动的传播速度,比较了恒定流和非恒定流中污染物的输移规律;练继建等<sup>[9-10]</sup>针对复杂输水工程的水力控制及事故情况下的水力过渡过程进行了研究;张晨等<sup>[11-12]</sup>运用数值模型对引黄济津河道和于桥水库下游渠道段进行了突发水污染事件下的水动力和水质模拟。

本文以南水北调中线工程典型渠段为例,拟建立水污染事故工况的中线一维水力学和水质数值模型,并综合考虑污染物的传播速度、渠道水位变幅和水位波动等限制条件,对

收稿日期:2014-01-08 修回日期:2014-03-02 网络出版时间:2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目:“十二五”水专项(2012ZX07205-005);水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026;201101024;201301001;20131102);“十二五”国家科技支撑计划(2013BAB05B05);环保部公益基金项目(2013467042);国家重点基础研究发展计划“973计划”(2013CB036406)

作者简介:房彦梅(1966-),女,河北沧州人,高级工程师,硕士,主要从事水利工程管理等方面的研究。E-mail:271495290@qq.com

两类控制策略下的渠道的水力响应情况和水质控制效果进行仿真模拟,分析渠道退水量、稳定时间、水位变幅、污染物扩散范围等参数的变化情况,以确定最优控制方案。

## 1 数学模型

### 1.1 明渠输水水力学数值模型

(1) Saint Venant 方程。对于长距离输水渠道一般采用描述一维非恒定流的 Saint Venant 方程组。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{A} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{2A^2} \right) + g \frac{\partial Z}{\partial x} + g(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

式中:  $x$  为空间(m);  $t$  为时间(s);  $A$  为过流面积( $m^2$ );  $Q$  为流量( $m^3/s$ );  $Z$  为水位(m);  $g$  为重力加速度( $m/s^2$ );  $q$  为单位长度渠道上的侧向入流流量( $m^3/s$ );  $\alpha$  为动量修正系数;  $S_0$  为渠道底坡; 为水力坡度,  $S_f$  可以根据流量模数计算确定:

$$S_f = \frac{Q|Q|}{K^2} \quad (3)$$

式中:  $K$  为流量模数。

(2) 内边界条件处理。内边界条件是指河道的几何形状的不连续或水力特性的不连续点,主要包括分水口边界、倒虹吸边界、节制闸边界。水流经过内边界时的流态非常复杂,很难用一维模型详细模拟,圣维南方程组不再适用,必须根据其水力特性做特殊的处理。内部边界条件通常包含两个相容条件:<sup>1</sup> 流量连续性条件;<sup>0</sup> 能量守恒条件。

(3) 模型求解。一维圣维南方程组采用收敛快、稳定性好的 Preissmann 隐格式进行离散,过闸流量方程作为耦合条件处理,应急工况下的初始条件为正常调度模型中恒定流模型的计算结果,边界条件设定为保持上下游水位不变,采用两重迭代的方式使模型精度达到要求。非恒定流方程组和节制闸过闸流量方程分别单独离散求解,通过迭代试算节制闸过闸流量,使其既满足水方程又满足过闸流量方程,从而使系统达到平衡,求得模型的解。

### 1.2 明渠输水水质数值模型

基于均衡域的离散格式,仍然符合一维水质控制方程形式,水质变量采用如下基本方程<sup>5</sup>:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC + S \quad (4)$$

该方程是从斯特里特-菲尔普斯建立的稳态条件下的一维河流水质模型扩展而来。根据非稳态的一维迁移转化基本方程,源汇项采用一级反应动力学,即:  $S = -KC$ 。

## 2 渠池发生突发污染事件闸门应急控制策略及仿真

当某一渠池发生突发水污染事故后,一般应通过节制闸应急控制,将水污染封闭在污染区段,然后进行后续处理;如果污染渠段有合适退水闸,且退水路径可行,则可在关闭节制闸同时,选择同时开启退水闸,及时将污染水体排出干渠。因此,本文分别提出不启用退水闸和启用退水闸两种控制策略。

### 2.1 不启用退水闸时闸门控制策略

事故渠池、事故渠池上游渠池和事故渠池下游渠池闸门控制规则如下。事故渠池:事故渠池的上、下游闸门依次紧

急关闭;事故渠池上游:闸门操作与事故渠池上游闸门保持一致;事故渠池下游渠池:采用蓄量控制方式调节闸门,使稳定后闸前水位基本达到设计水位。

节制闸控制时间需满足两个约束条件:(1)各闸门关闭历时  $t_{变}$ , 应保证各渠池水位变幅满足限制条件。(2)下游节制闸完全关闭时间应早于污染物传播到该节制闸闸前的时间  $t_{污}$ 。为防止下游闸前水位快速雍高,下游端闸门开始关闭的时刻应滞后于上游端闸门开始关闭的时刻。假定上、下游闸门关闭时间相同,且过闸流量变化过程均为线性关系,见图 1。

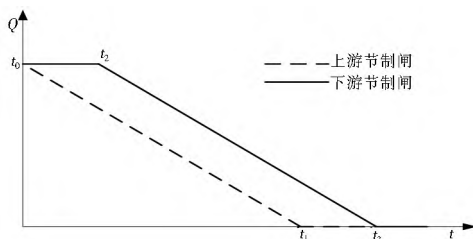


图 1 突发污染事件的渠池过闸流量

Fig. 1 Water discharge through gate under the conditions of sudden pollution event

图 1 中,  $t_0$  为突发污染事件发生的时间,也是上游节制闸的开始关闭时间,  $t_1$  为上游节制闸关闭的完成时间;  $t_2$  为下游节制闸开始关闭时间;  $t_3$  为下游节制闸完全关闭的时间,它是由污染物传播到下游节制闸所需时间和渠道允许水位变幅限制决定的,  $t_3 = \text{Min}(t_{变}, t_{污})$ , 且  $t_3 - t_1 = t_2 - t_0$ 。  $Q$  为当前时刻渠池的流量。上下游闸门关闭过程中渠池内蓄量变化为:

$$\Delta V = \frac{(t_2 + t_3 - t_1 - t_0) \times Q}{2} \quad (5)$$

式中:  $\Delta V$  为渠池当前时刻流量的蓄水量与零流量时的蓄水量(结合事故渠段超高确定)之差。

### 2.2 启用退水闸时闸门控制策略

(1) 事故渠段:上游闸门立刻开始关闭,当过闸流量小于或等于退水闸设计过闸流量时,保持闸门开度不变,退水闸开始开启,同时下游节制闸开始关闭。(2) 事故渠池上段:各闸门操作与事故渠池的上游闸门保持一致。(3) 事故渠段下游:采用蓄量控制方式调节闸门,使稳定后闸前水位基本达到设计水位。

假定下游端节制闸的流量过程,渠段退水闸流量过程和下游端节制闸的流量过程均为线性函数,退水闸流量过程与下游节制流量变化过程同步,即  $t_2 = t_4, t_5 = t_3$ , 见图 2。而渠池下游流量过程与退水闸流量过程的叠加见图 3。

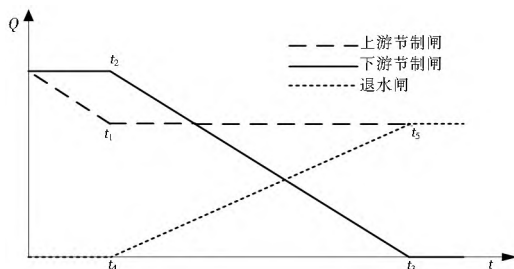


图 2 突发污染事件的渠池过闸流量过程

Fig. 2 Water discharge process through gate under the conditions of sudden pollution event

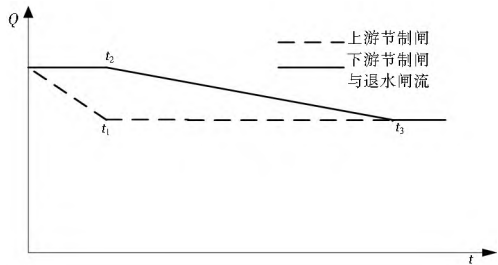


图3 渠池流量过程

Fig. 3 Water discharge process

上下游闸门关闭过程中渠池内蓄量变化为:

$$\Delta V = \frac{(t_2 + t_3 - t_1)(Q_0 - Q_1)}{2} \quad (6)$$

式中:  $\Delta V$  为渠池在  $t_3$  时刻的蓄水量与初始蓄水量之差, 蓄水量通过推求水面线求出;  $t_3 = \text{Min}(t_{\text{变}}, t_{\text{污}})$ ;  $Q_1$  为  $t_3$  时刻的流量,  $Q_0$  为正常运行的初始流量。

### 3 应急控制仿真结果及分析

选取南水北调中线总干渠从陶岔渠首(0+000)至十二里河涵洞式渡槽(97+584)6个渠池作为研究对象。该段共有7个节制闸, 依次为陶岔渠首节制闸、刁河节制闸、湍河节制闸、严陵河节制闸、西赵河节制闸、淇河节制闸、十二里河节制闸。假定刁河节制闸—湍河节制闸之间渠池(第二个渠池)为突发污染事件发生地点。以不可降解物质作为模拟对象, 即污染物不会随时间降解, 只能稀释或者被退水闸排出。分别对启用退水闸和不启用退水闸两种控制策略进行仿真模拟, 计算稳定时间、污染物扩散范围、水位变幅等参数, 分析两种控制策略下水力响应过程和水质控制效果, 最终确定最优应急控制策略。

#### 3.1 不启用退水闸时模拟仿真结果

初始时刻渠池稳定供水, 供水流量为  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ , 根据不启用退水闸策略, 7个闸门的开度变化情况、紧急关闭下闸前后水位变化情况、最终污染物控制范围的模拟结果分别见图4至图7。

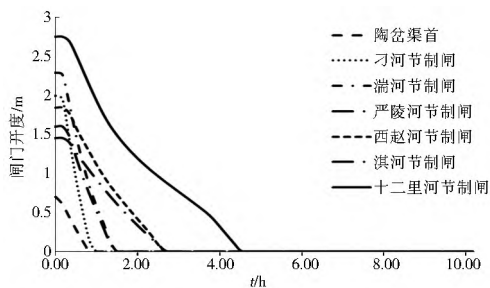


图4 节制闸开度变化过程

Fig. 4 The variation process of sluice opening

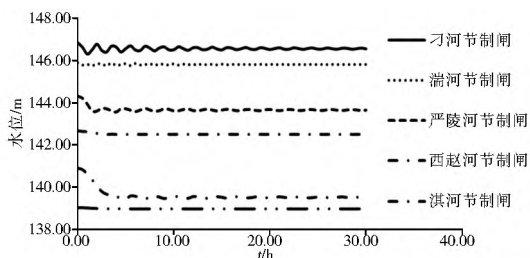


图5 闸后水位变化过程

Fig. 5 The variation process of water level downstream of the gate

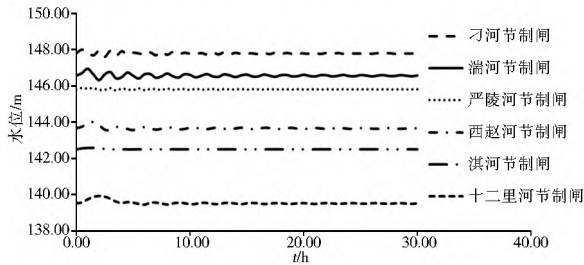


图6 闸前水位变化过程

Fig. 6 The variation process of water level upstream of the gate

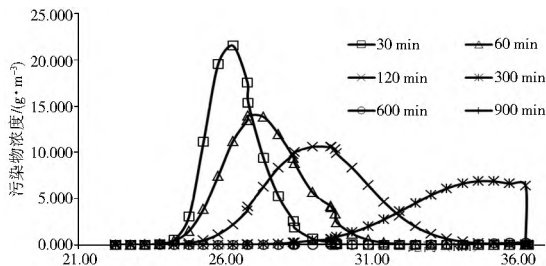


图7 不同时刻污染物的分布情况

Fig. 7 Distribution of pollutants at different time

由以上计算结果可知: (1) 渠池调节过程中, 闸前水位最大波动为  $0.34 \text{ m}$ , 最终稳定最大误差为  $0.02 \text{ m}$ , 闸后水位最大变幅为  $0.15 \text{ m/h}$  小于渠道允许变幅水位; (2) 最终污染物的范围为  $22.28 \text{ km}$  到  $33.65 \text{ km}$ , 污染物被全部截留在突发污染的渠池( $14+605, 36+433$ )内, 没有对下游造成水质污染影响。

#### 3.2 启用退水闸时仿真模拟结果

根据启用退水闸策略, 7个闸门的开度变化情况、紧急关闭下闸前后水位变化情况、最终污染物控制范围的模拟结果分别见图8至图11。

由以上计算结果可知: (1) 渠池调节过程中, 闸前水位最大波动为  $0.24 \text{ m}$ , 最终稳定最大误差为  $0.02 \text{ m}$ , 闸后水位最大变幅为  $0.21 \text{ m/h}$ ; (2) 污染物污染最大的范围为  $22.4 \text{ km}$

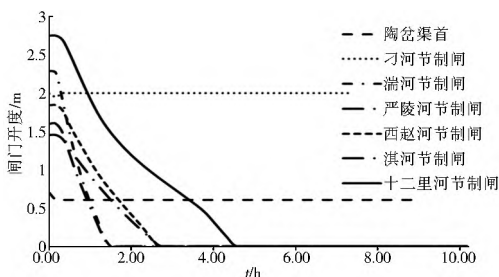


图8 节制闸开度变化过程

Fig. 8 The variation process of sluice opening

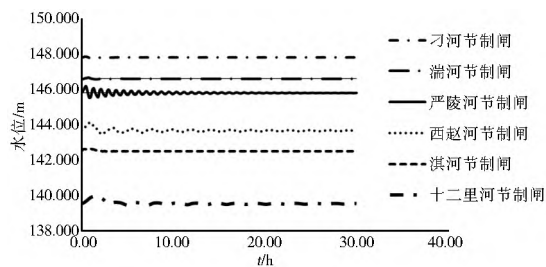


图9 闸后水位变化过程

Fig. 9 The variation process of water level downstream of the gate

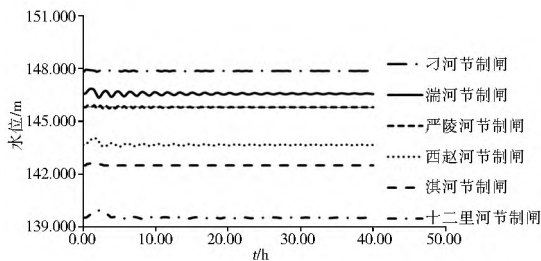


图 10 闸前水位变化过程

Fig. 10 The variation process of water level upstream of the gate

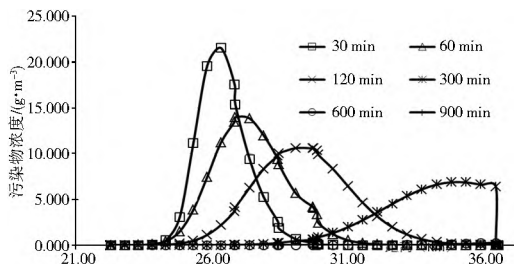


图 11 不同时刻污染物的分布情况

Fig. 11 Distribution of pollutants at different time

到 36 km, 污染物全部截留在突发污染的渠池内 (14+ 605, 36+ 433), 从发生水污染时刻起 900 分钟后, 污染被全部置换排出, 之后就可以恢复正常通水。

## 4 结论

本文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, 得出如下结论。

(1) 采用不启用退水闸策略时, 事故渠段上下游节制闸均以一定规则关闭。节制闸前初始时刻水位震荡较大, 但随时间推移, 震荡逐渐衰减。此种策略可有效地控制污染物, 并且在调控过程中无弃水。

(2) 采用启用退水闸策略时, 上游节制闸通过调节与退水闸流量保持一致, 下游节制闸以一定规则关闭。节制闸前壅水幅度明显小于不启用退水闸的情况, 污染物可控制在事故渠池, 且可以通过退水闸逐步排出。

(3) 两种控制方式均可在保证输水安全的基础上, 实现对突发水污染事故的有效控制, 且各具优点。在实际调度中可结合污染物种类、处理方式、退水路径是否可行等因素选择合理的应急控制策略和方案。

### 参考文献 (References):

[1] 阮新建, 袁宏源, 王长德. 灌溉明渠自动控制设计方法研究[J]. 水利学报, 2004, 35(8): 21-25. (RU AN Xinjian, YUAN Hongyuan, WANG Changde. Design of Irrigation Canal Automatic Control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(8): 21-25. (in Chinese))

[2] 姚雄, 王长德, 李长菁. 基于控制蓄量的渠系运行控制方式[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 733-738. (YAO Xiong, WANG Changde, LI Changjing. Operation Mode of Serial Canal System Based on Water Volume Control Method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 733-738. (in Chinese))

[3] 崔巍, 陈文学, 姚雄, 等. 大型输水明渠运行控制模式研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(5): 6-10. (CUI Wei, CHEN Wexue, YAO Xiong, et al. Research on Canal Control of Large Scale Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(5): 6-10. (in Chinese))

[4] 崔巍, 陈文学, 姚雄. 明渠调水工程水位-流量串级反馈控制研究[J]. 武汉大学学报工学版, 2009, 42(6): 764-768. (CUI Wei, CHEN Wexue, YAO Xiong. Research on Water Level and Flow Cascade Control of Canal[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(6): 764-768. (in Chinese))

[5] 方神光, 吴保生, 傅旭东. 南水北调中线干渠闸门调度运行方式探讨[J]. 水力发电学报, 2008, 27(5): 93-97. (FANG Shengguang, WU Baosheng, FU Xudong. Gate Operation in the Middle Route of the South to North Water Diversion Channel[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(5): 93-97. (in Chinese))

[6] Litrico X. Test of Auto Tuned Automatic Downstream Controller on Gignac Canal[A]. Second USCID Conference on SCADA and Related Technologies for Irrigation Systems Modernization[C]. Denver, 2007. 6: 105-114.

[7] 高学平, 张晨, 张雅, 等. 引黄济津河道水质数值模拟与预报[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 1(1): 36-43. (GAO Xueping, ZHANG Chen, ZHANG Ya. Numerical Simulation and Prediction of Water Quality for Water Supply from Yellow River to Tianjin[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2007, 1(1): 36-43. (in Chinese))

[8] 朱德军. 南水北调中线明渠段事故污染特征模拟方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. (ZHU Dejun. 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))

[9] 穆祥鹏, 练继建, 刘瀚和. 复杂输水系统水力过渡的数值方法比较及适用性分析[J]. 天津大学学报, 2008, 41(5): 515-521. (MU Xiangpeng, LIAN Jijian, LIU Hanhe. Comparison and Applicability Analysis of Numerical Methods for Transient of Complex Water Diversion System[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(5): 515-521. (in Chinese))

[10] 练继建, 郑政, 李琳, 等. 多孔并联分段低压输水系统的水力特性和控制[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 950-957. (LIAN Jijian, ZHENG Zheng, LI Lin, et al. Hydraulic Characteristics and Control Approach of Stepped Low Pressurized Water Diversion System with Parallel Multiholes in Regulation Tanks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 950-957. (in Chinese))

[11] 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. (ZHANG Chen. Study on the Security of Water Quality and Application for Long Distance Water Diversion Project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))

[12] 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))