

文章编号:1001-4179(2015)05-0088-05

# 梯级泵站渠段水污染事故仿真及应急调度研究

——以南水北调东线工程为例

桑国庆<sup>1</sup>, 魏泽彪<sup>2</sup>, 薛霞<sup>3</sup>, 官庆翔<sup>3</sup>, 闫飞<sup>4</sup>

(1. 济南大学 资源与环境学院, 山东 济南 250012; 2. 深圳市水务规划设计院, 广东 深圳 518001; 3. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061; 4. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 山东 济南 250013)

**摘要:**以南水北调东线工程两湖段梯级泵站为研究对象,开展了突发水污染事故仿真模拟及闸、泵应急调度控制研究。利用突发水污染事故工况的梯级泵站输水一维水动力学和水质数值模型,探讨了污染物输移转化规律,预测其对水质的影响;针对污染物的传播速度、渠道水位变幅等限制条件,提出水污染事故下泵站及退水闸应急控制模式;在此基础上制定泵站和退水闸控制规则和方案,模拟分析不同控制方案下污染团扩散范围、渠道水位变幅、泄水量等参数变化情况,最终优选出最优泵站、闸门联合调度控制方案控制水污染事故,同时保证泵站及渠道的运行安全。研究成果可为东线梯级泵站工程突发水污染事故应急控制提供技术参考。

**关键词:**梯级泵站; 输水渠段; 突发水污染事故; 应急控制; 南水北调东线工程

中图分类号: TV69

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.021

南水北调东线东平湖以南工程采用13级泵站逐级提水,利用现有河道和湖泊输水,输水干线与沿途河流、湖泊连通构成了复杂水网。2013年12月东线工程完工并进入运行期,虽然在干线工程建设的同时实施了截污导流工程,采取了多项治污措施,但由于干线利用现有河道输水(未封闭),区域内的水环境不确定因素复杂,渠线周边仍然存在多种类型的水污染风险源,一旦发生突发水污染事故,如应急控制不当,不仅可能造成污染水体扩散,输水中断,还可能造成渠道内水位的骤升、骤降,使泵站、渠道受到破坏。由于梯级泵站输水工程中泵站是主要控制节点,在应急调度等方面与常规自流型渠道输水工程(闸控)调度有所不同。为有效应对突发水污染事故,保证输水水质以及控制过程中泵站、渠道运行安全,必须提出可行的梯级泵站应急控制模式<sup>[1-6]</sup>,制定泵站和节制闸控制规则,寻求最有效、经济、快速的突发水污染事故应急控制方案。

目前,国内外输水工程突发污染事件应急控制研究多集中于自流型明渠,对于梯级泵站工程突发水污染事故应急控制研究较少。高学平等建立了引黄济津

河道水位数值模拟与预测模型,多次对模型进行调试并将调试结果与实测结果进行对比,表明该模型能较好地预测引黄济津河道的水质状况,同时,根据污染物浓度的峰值情况,分析了污染物的运输移动、扩散及降解转化规律<sup>[7]</sup>。朱德军利用一维模型对南水北调中线典型明渠段事故处置过程,以及闸前定水位控制运行方式下的非恒定流场和浓度场进行了模拟研究,推导出渠道中水流扰动的传播速度,比较了恒定流和非恒定流中污染物的输移规律<sup>[8]</sup>。练继建等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<sup>[9-10]</sup>。张晨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、水质模拟和验证<sup>[11-12]</sup>。

本文以南水北调东线两湖段梯级泵站工程为例,建立突发水污染事故工况下梯级泵站输水一维水力学、水质数值模拟模型,考虑污染团的传播速度、渠道水位变幅等限制条件,提出了渠段内和外排控制两种应急控制模式,分别制定闸、泵控制规则和方案,并对两类控制方案下渠道的水力响应情况和水质控制效果进行仿真模拟,分析污染团扩散范围、水位变幅、渠道

收稿日期:2014-12-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51409119);中国博士后基金(2013M540990);“十二五”水专项(2012ZX07205-005)

作者简介:桑国庆,男,讲师,博士后,主要从事梯级泵站输水仿真及优化运行等方面的研究。E-mail:sanguoqing@163.com

退水量等参数的变化情况,确定最优闸、泵联合应急调度控制方案,可为南水北调东线梯级泵站工程突发水污染事故处理提供技术参考。

## 1 梯级泵站输水水动力学及水质模型

为研究突发水污染事故下梯级泵站输水应急控制问题,首先需建立一维水动力学和水质仿真模型,并在水力模型中嵌入控制模块,形成水质应急调度控制模拟平台。该平台可对污染物在水体中的输移、转化进行精确预测,对各种应急控制模式和方案进行仿真模拟,结合模拟结果给出最优控制模式和方案。

### 1.1 梯级泵站输水水力学数值模型

#### 1.1.1 Saint-Venant 方程

长距离输水渠道水力计算通常采用一维非恒定流的 Saint-Venant 方程组,方程组由连续性方程和动量方程组成

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

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

式中,  $x$  为空间坐标,  $m$ ;  $t$  为时间坐标,  $s$ ;  $A$  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,  $m^2/s$ ;  $\alpha$  为动量修正系数;  $S_0$  为渠道底坡坡度;  $S_f$  为水力坡度。

#### 1.1.2 边界条件及求解

所谓的内边界条件是指河道的几何形状不连续或水力特性不连续的点,例如渠道中的水工建筑物,水流经过这些建筑物时的流态非常复杂,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:① 能量守恒条件;② 流量连续性条件。输水渠道中内边界主要包括泵站边界、倒虹吸边界、节制闸边界。

该次研究采用收敛快、稳定性好的 Preissmann 隐格式对一维圣维南方程组进行离散,采用追赶法进行迭代求解;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,边界条件为假设上、下游水位保持不变。将泵站机组扬程-流量-角度方程和过闸水位流量过程作为耦合条件处理,分别单独离散求解,通过迭代试算节制闸、泵流量,使其既满足水流方程又满足泵站、节制闸流量方程,从而使系统达到平衡,求得模型的解。

## 1.2 梯级泵站输水水质数值模型

基于均衡域的离散格式也符合一维水质控制方程,水质变量基本控制方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC + S \quad (3)$$

式中,  $C$  为污染物浓度;  $u$  为水流流速,  $E$ 、 $K$ 、 $C$ 、 $S$  为系数。该方程是从斯特里特-菲尔普斯建立的稳态条件下一维河流水质模型扩展而来的。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方程,即  $S = -KC$ 。

## 2 突发污染事件下泵站应急控制模式和规则

梯级渠段内发生水污染事故后,通常情况下,该渠段应立刻停止供水,关闭上、下游端泵站和渠段内所有分水口,将污染源控制在渠段内并进行封闭处理,即梯级渠段内控制模式;如输水任务较为紧急,渠段内有退水闸且外围泄水条件允许,则可通过退水闸将污水排到外围区域处理,即外排控制模式。两种控制模式的控制规则和约束条件如下。

### 2.1 渠段内控制规则

这种控制模式下事故渠段内上、下游渠段的泵站控制规则为:① 事故渠段。事故渠段内上、下游端泵站依次紧急关闭,直至完全关机。② 事故渠段上游渠段。各级泵站自上而下关闭或降低流量,以最终满足各区间分水流量,达到上游梯级渠段流量平衡为止,保证事故渠道上游渠段的供水和分水。③ 事故渠段下游渠段。各级泵站自上而下逐级关闭,停止供水和分水。

泵站应急控制过程中应满足以下约束条件:① 各泵站关闭历时  $t_g$  应使各自渠段内的水位变幅控制在限制范围内,且要考虑泵站内各机组的实际情况。② 事故渠段下游端泵站完全关闭时间应早于污染物传到的时间。此外,为防止下游泵前水位快速壅高,下游端泵站开始关机的时间可滞后于上游端泵站开始关机的时间。

为便于说明和计算,假定上、下游泵站关机时间相同,且泵站流量变化过程均为线性关系,见图1,阴影面积为事故渠段内蓄量变化。图1中,  $t_0$  为突发污染事件发生时刻,也是上游泵站的关闭时刻;  $t_1$  为上游泵站完全关机时刻;  $t_2$  为下游泵站开始关机时刻;  $t_3$  为下游泵站完全关机的时刻,  $t_3$  由污染物传播到下游泵站所需时间和渠道允许水位变幅限制决定:  $t_3 = \min(t_g, t_c)$ , 且  $t_3 - t_1 = t_2 - t_0$ ;  $Q_0$  为初始时刻上、下游泵站流量。

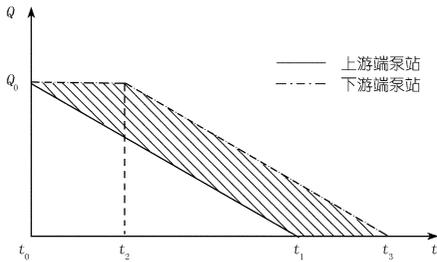


图1 事故渠段内上、下游端泵站流量控制规则(线性)

## 2.2 外排控制规则

外排控制模式下,事故渠段内,上、下游渠段的泵站控制规则为:① 事故梯级渠段内。上游端泵站立刻通过变角或关停机组的方式,逐步调整流量至退水闸设计过闸流量,下游端泵站逐步关机。退水闸同时开启至相应开度,调整流量至设计流量。② 事故渠段上游渠段。各级泵站自上而下降低流量,以最终满足各区间分水流量、事故渠段上游泵站流量,达到上游梯级流量平衡为止,保证事故渠道上游渠段的供水和分水。③ 事故渠段下游渠段。各级泵站自上而下逐级关闭,停止供水和分水。

泵站、退水闸应急控制过程中应满足以下约束条件:① 各泵站关闭历时  $t_g$  应使各渠段内水位变幅控制在限制范围内。② 事故渠段下游泵站完全关闭时间应早于污染物传播到该泵站的时间  $t_c$ 。③ 退水闸全部开启时间应早于污染物传播到该节制闸的时间  $t_c$ 。

为便于说明和计算,假定事故渠段内上游泵站、退水闸和下游泵站流量变化均为线性函数,且退水闸与下游泵站流量同步调整,调整后两者流量相同,事故渠段上、下游端泵站及退水闸控制过程见图2。图中,  $t_2$  为下游泵站开始关闭时刻,  $t_4$  为退水闸开始开启时刻,  $t_2 = t_4$ ;  $t_3$  为下游泵站完全关闭时刻,  $t_5$  为退水闸完全开启时刻,  $t_3 = t_5$ ,  $t_3 = \min(t_g, t_c)$ ;  $Q_0$  为上、下游泵站初始流量,  $Q_1$  为上游泵站、退水闸最终流量。事故渠段内槽蓄量变化(阴影部分)见图3。

## 3 梯级泵站应急控制仿真及分析

选取南水北调东线山东段两湖段梯级泵站为研究对象(以下简称两湖段)。该段上、下游分别为南四湖和骆马湖,其间利用原有的梁济运河和柳长河输水,设计输水流量  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。梯级内包括3级泵站,依次为长沟泵站、邓楼泵站和八里湾泵站,3个泵站将渠段分为湖口-长沟段、长沟-邓楼段和邓楼-八里湾段。湖口-长沟段在桩号  $0+000 \sim 11+000$  段设计底宽为  $160 \text{ m}$ ,在桩号  $11+000$  至长沟泵站范围内设计底宽为  $66 \text{ m}$ ,河底高程  $28.7 \text{ m}$ ,边坡  $1:3 \sim 1:4$ ;长沟泵站-邓

楼泵站段,设计河底高程  $30.8 \text{ m}$ ,底宽  $45 \text{ m}$ ,边坡  $1:2.5 \sim 1:4$ ;邓楼-八里湾段设计河底高程  $33.2 \text{ m}$ ,底宽  $45 \text{ m}$ ,边坡  $1:3$ 。由于两湖段周边为济宁煤化工原料产地,煤化工原料通过水路和陆运(两湖段工程沿线)向南方运输,因此,沿线存在由于翻车、船舶泄漏事故导致煤化工原料入河的风险。

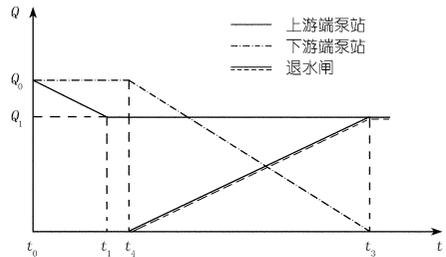


图2 事故渠段内上下游泵站和泄水闸流量控制过程(线性)

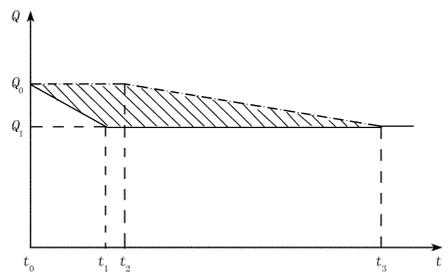


图3 事故渠段内蓄量变化

首先建立两湖段梯级泵站输水一维水动力学模型,采用2014年5~6月实际运行水位、流量数据进行模型参数率定,在此基础上再建立水质仿真模型。在对两湖段突发水污染事故风险进行分析的基础上,设定高风险事故工况如下:邓楼和长沟泵站之间彭营公路桥(桩号  $35+000$ )处,运输化工原料甲醇的罐车发生翻车并泄漏入干渠,罐内甲醇浓度为  $791 \text{ g/L}$ (甲醇密度为  $0.791 \text{ g/mL}$ ),泄漏事件持续  $1 \text{ min}$ ,泄漏流量为  $12.64 \text{ L/s}$ ,总泄漏量约为  $600 \text{ kg}$ ;依据参考相关文献[12]水质模型中扩散系数取  $5 \text{ m}^2/\text{s}$ ;初始时刻两湖段3座泵站处于流量平衡状态,输水流量为  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。利用建立的水动力和水质模型对渠段内控和外排两种控制方案进行仿真模拟,计算污染团扩散范围和水位变幅等参数,分析两种控制方案下水力响应过程和污染团控制效果,最终结合实际情况确定最优应急控制方案。

### 3.1 不控制工况下水质仿真结果

水污染事故发生后,在两湖段各泵站不控制情况下,利用建立的梯级泵站输水水力学、水质模型进行仿真模拟,分析了污染团在河道中的扩散情况,见图4。

分析计算结果可知,在泵站不控制工况下,污染团将不断向下游输移扩散,污染浓度峰值沿程变小,污染

团范围逐步扩大。

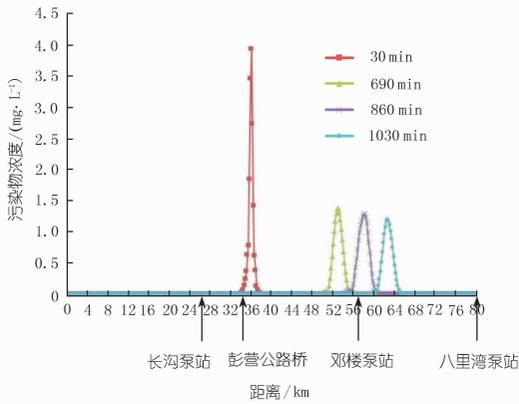


图 4 不同时刻污染团变化范围

(1) 污染事故发生 860 min 后,污染团峰值到达邓楼泵站,峰值浓度为 1.288 mg/L,污染团范围为 53.2 ~ 61.2 km,长度 8 km,污染水体蓄量为 185 万 m<sup>3</sup>;

(2) 1 480 min 后,污染团到达八里湾泵站,峰值浓度为 1.037 mg/L,污染团范围为 70.5 ~ 79.2 km,长度 8.7 km,污染水体蓄量为 194 万 m<sup>3</sup>。

### 3.2 渠段内控制方案水质仿真结果

根据渠段内控制方案,长沟、邓楼泵站依次关闭。利用建立的梯级泵站输水水力学、水质模型模拟分析的泵站前、后和事故渠段内水位变化情况和不同时刻污染团变化范围见图 5,6。

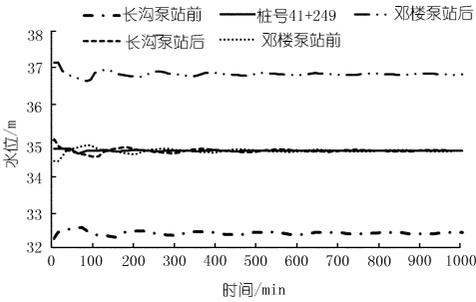


图 5 长沟、邓楼泵前后及事故渠段水位变化过程

由以上计算分析结果可知:① 长沟泵站前、后水位最大波动分别为 0.304 m 和 0.490 m,邓楼泵站前、后水位最大波动分别为 0.444 m 和 0.397 m,长沟 - 邓楼段渠道中部(桩号 41 + 219)水位最大变幅为 0.143 m,小于渠道允许变幅水位;② 邓楼、长沟泵站依次关闭后,污染团继续向前推移扩散,速度和峰值逐渐变小,污染团范围逐渐扩大。1 500 min 时,污染团范围为 32.6 ~ 39.8 km,长度 7.2 km,峰值浓度为 1.129 mg/L,污染水体总量为 160 万 m<sup>3</sup>。污染物被全部截留在事故渠段。

### 3.3 外排控制方案水质仿真结果

根据外排控制规则制定的泵站和退水闸控制方案为:开启邓楼退水闸,调低长沟泵站流量,直至与退水闸流量保持一致,关闭邓楼泵站。利用建立的梯级泵站水力学、水质模型模拟分析的泵站前、后及渠段水位变化情况和不同时刻污染团范围见图 7,图 8。

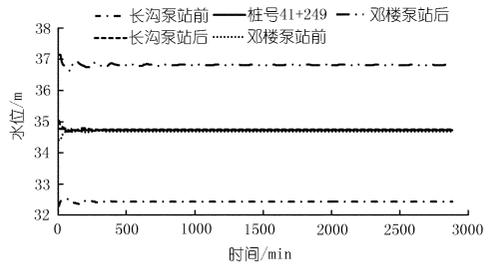


图 7 长沟、邓楼泵前后及渠段水位变化过程

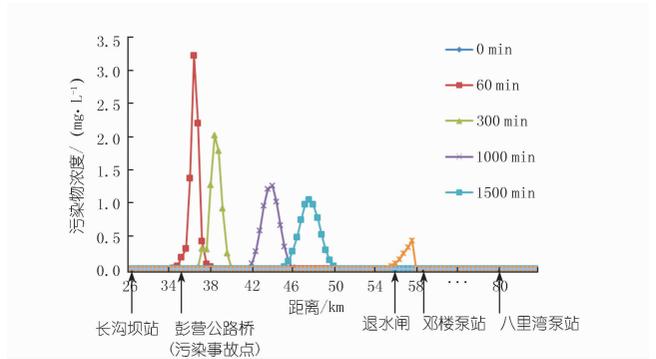


图 8 不同时刻污染团变化范围

由以上计算分析结果可知:① 长沟泵站前、后水位最大波动分别为 0.235 m 和 0.368 m,邓楼泵站前、后水位最大波动分别为 0.342 m 和 0.503 m,长沟 - 邓楼渠段中部(桩号 41 + 219)水位最大变幅为 0.095 m,小于渠道允许变幅水位。② 污染团在长沟 - 邓楼渠段内输移扩散,且上游持续来水逐渐将渠段内污染水体置换出。2 370 min 时,污染团前端到达邓楼退水闸,此时污染团范围 50.2 ~ 57.9 km,最大峰值为 0.838 mg/L;3 600 min 时,污染水体被全部置换排出,

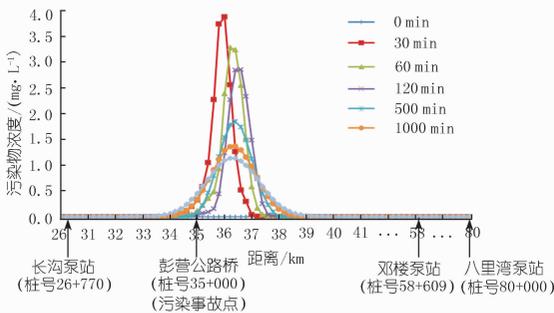


图 6 不同时刻污染团变化范围

总置换水体为  $645.33 \text{ m}^3$ 。

## 4 结 论

(1) 采用渠段内控制方案时,事故渠段上、下游泵站均以一定规则关闭,泵站前池、出水池水位出现震荡,初始震荡较大,随时间慢慢衰减,水位变幅始终在允许范围内。该方案可将污染团封闭在事故渠段,有效控制污染团扩散范围,调控过程中无弃水。

(2) 采用外排控制方案时,调整(小)上游泵站流量逐渐调小,直至与退水闸流量一致,下游泵站以一定规则关闭,其间水位变幅控制在允许范围内。该方案首先将污染物团封闭在事故渠段,然后上游泵站来水可将污染水体通过退水闸排出。

(3) 两种应急控制模式都可对污染水体进行有效控制,并保证泵站和渠道的运行安全。渠段内控制模式可快速将污染团封闭在事故渠段内,待后期以物理、化学方式处理;外排模式可通过选取排水路径,利用上游持续来水将污染水体置换排出,极大缩短了渠段内处置时间,可快速恢复正常供水。实际应急调度中,可结合初始运行工况、污染事故特征、周边滞纳水域等情况选择合适的应急控制策略和方案。

本文为便于描述和计算,对上、下游泵站流量变化过程和渠段退水闸流量过程进行了线性假定,实际控制应用中,对泵站和退水闸的控制并不一定要求满足上述假定,只需满足相应控制规则和约束条件即可。

## 参 考 文 献:

- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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.
- [6] Litrico X. Test of Auto-Tuned Automatic Downstream Controller on Gignac Canal[C]//Second USCID Conference on SCADA and Related Technologies for Irrigation Systems Modernization. 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测[J].水动力学研究与进展,2007,1(1):36-43.
- [8] 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.
- [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.
- [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.
- [11] 张晨.长距离调水工程水质安全研究与应用[D].天津:天津大学建筑工程学院,2008.
- [12] 郑鹏海,离建青.确定河流横向扩散系数的线性回归法[J].水电能源科学,1999,17(3):17-19.

(编辑:常汉生)

## Study on emergency simulation and control of water pollution accident in canal section of cascade pumping station: case of East Route Project of South to North Water Diversion

SANG Guoqing<sup>1</sup>, WEI Zebiao<sup>2</sup>, XUE Xia<sup>3</sup>, GUAN Qingshuo<sup>3</sup>, YAN Fei<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environmental Sciences, University of Jinan, Jinan 250012, China; 2. Shenzhen Water Planning & Design Institute, Shenzhen 518001, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 4. East Route Project of South to North Water Diversion in Shandong Limited Liability Company, Jinan 250013, China)

**Abstract:** Taking the typical canal section in East Route Project of South to North Water Diversion as an example, the simulation of the sudden water pollution accident and the emergency control of the sluices and pumping stations are researched. By using the one-dimensional hydraulic and water quality model in canal, the transport and transformation laws of pollutant are discussed and its influence on water quality is predicted. Aiming at the conditions of water level variation and the propagation speed laws of pollutants, the pollutant control mode of pumping stations and exit sluices are researched. On this basis, the controlling regulations and schemes for pumping station and exit sluice are determined and the diffusion range, the water level vibration scope and the water release amount under different controlling schemes are simulated. The optimum co-operation scheme of sluices and pump stations is suggested and the safety of the canal is ensured.

**Key words:** cascade pump station; water diversion canal section; sudden water pollution accident; emergency treatment; East Route Project of South to North Water Diversion