

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0034

杨星, 崔巍, 穆祥鹏, 等. 南水北调中线总干渠0级水污染应急处水力调控方案研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 21-28. YANG X, CUI W, MU X P, et al. Study on hydraulic regulation of level 0 emergency water pollution in Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 21-28. (in Chinese)

南水北调中线总干渠0级水污染应急处 水力调控方案研究

杨星¹, 崔巍¹, 穆祥鹏¹, 国洁²

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 河北科技大学, 石家庄 050018)

摘要:长距离输水工程输水量大、闸门群和分水口群众多、控制要求高,在突发水污染事件下要求保障输水过程稳定、应急处高效。研究了南水北调中线总干渠0级水污染的应急处水力调控方案,提出了0级水污染的应急处策略,确定了基于分水口水力特性的水力调控单元划分方法和应急处水力调控方式。以京石段为例,提出了采用不同分水口群等容积运行规则的3种应急调控方案,并利用建立的一维水动力水质耦合模型,模拟了不同应急调控方案下的水流运动和典型污染物的输移过程。研究表明,三种应急控制方案均能在不弃水、不显著影响上下游运行的条件下,通过利用渠道自身调蓄能力或发挥分水口的调控作用,实现应急调控目标。

关键词:南水北调中线; 突发水污染; 应急处; 等容积运行规则; 分水口

中图分类号: TV213; X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0021-08

Study on hydraulic regulation of level 0 emergency water pollution in Middle Route of South to North Water Transfer Project

YANG Xing¹, CUI Wei¹, MU Xiangpeng¹, GUO Jie²

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Long distance water transfer projects have large carrying capacity, numerous control gate groups and offtake groups, and put high requirements on controlling. In the event of a water pollution incident, it is essential to ensure the stability of the water transfer process and to handle the emergency efficiently. In this paper we studied the hydraulic control schemes of level 0 water pollution in the main channel of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project. We put forward the emergency handling strategy of level 0 water pollution, and determined a division method of hydraulic control units based on the hydraulic characteristics of the offtakes. Taking Jing shi section as an example, we proposed three emergency control schemes, and established a coupled model of one dimensional hydraulics and water quality to simulate the flow of water and the transport of typical pollutants under different control schemes. The research showed that the three emergency control schemes could all achieve the emergency control objectives by using the channel's own storage capacity or exercising the control function of the offtakes without abandoning the water or significantly influencing the operation of the upper and lower reaches.

Key words: Middle Route of South to North Water Transfer Project; sudden water pollution; emergency handling; constant volume operation rules; offtake

收稿日期: 2017-10-14 修回日期: 2018-01-29 网络出版时间: 2018-02-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180207.1631.002.html>

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07108-001-04); 国家自然科学基金项目(51579251); 中国国家留学基金(201609110043); 2017年河北省社会科学基金项目(HB17SH024)

Funds: Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2017ZX07108-001-04); National Natural Science Foundation of China(51579251); China National Scholarship Fund(201609110043); 2017 Hebei Provincial Social Science Fund Research Project(HB17SH024)

作者简介: 杨星(1992), 男, 甘肃平凉人, 主要从事长距离输水工程水力控制方面的研究。E-mail: 1933445059@qq.com

通讯作者: 崔巍(1979), 男, 河南焦作人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事明渠水力学与河流生态修复研究。E-mail: joylife@126.com

1 研究背景

长距离输水是为解决水资源时空分布不均或资源性短缺而采取的水资源优化配置工程措施。近年来,国家大力推进“四横三纵”主体工程建设,南水北调工程作为迄今为止世界上最大的调水工程,东线、中线、西线三条线路的年调水总规模约448亿 m^3 ,可以基本缓解北方严重缺水的危急局面。

南水北调中线输水工程总干渠全长1276 km,其源头是湖北省十堰市的丹江口水库,由陶岔渠首取水,途经河南、河北、天津和北京四个省,终点位于北京市团城湖。由于中线工程南北跨度大,沿线分布有大量化工厂、桥梁,这对要保证“一渠清水北送”的水质安全目标带来了很大的考验。

南水北调中线干线工程水污染事件分为4个级别^[1]:Ⅲ级(特别重大水污染事件)、Ⅱ级(重大水污染事件)、Ⅰ级(较大水污染事件)和Ⅳ级(一般水污染事件)。其中,凡水体水质类别出现GB 3838-2002标准中Ⅳ类的水污染事件或跨县(区)界的水污染事件均界定为Ⅰ级(较大水污染事件)。据调查,中线工程运行历史上曾发生突发水污染事件,但均为Ⅳ级,规模较小,工作人员应对及时,未造成重大的影响。南水北调中线工程线路长、规模大、控制节点多、运行要求高,研究突发水污染事件下,如何通过正确的应急调度策略来应对水污染事件,形成一套高效的风险防御体系尤为重要。这也是南水北调中线工程运行成败的关键所在。

针对明渠输水工程突发水污染事件的应急调控,国内学者已进行了一系列的研究。黄会勇^[2]等人提出了突发重大事故下应急调度方案,按照“两害相权取其轻”的原则,可不考虑渠池运行约束条件,紧急关闭闸门,并根据需要开启退水闸。练继建^[3]等人分析了不同闭闸调控方式和闭闸时间条件下渠段水流运动和污染物输移扩散规律,提出突发水污染事件下,应采取同步闭闸调控方式,闭闸调控时间应超过2倍渠段水流传播时间。房彦梅^[4]等人针对南水北调中线渠首段,模拟了突发水污染事件下应急处理模式,包括不开启退水闸将污染物拦截在事故渠段等待后续处理和启用退水闸将污染水体外排两种方案。桑国庆^[5]等人针对南水北调东线工程,研究了突发重大水污染时将污染水源拦截在渠池内进行物理化学处理和开启退水闸进行污水外排两种方案。

上述研究主要针对南水北调工程Ⅲ级和Ⅱ级突发水污染,针对Ⅰ级水污染事件的相关研究还很少。Ⅲ级和Ⅱ级水污染事件的特点是污染物浓度高,危

害大,必须中断供水,同时采取应急处置措施以拦截、吸附污染物,甚至退水外排,见效快但处置成本高。相对而言,Ⅰ级水污染虽然程度相对较轻,但水力调控的要求很高,应急调控要求工程输水不得中断、退水闸尽量不启用,其应急策略和方法与Ⅲ级和Ⅱ级水污染明显不同。南水北调中线工程为采用闸前常水位方式运行的自动化渠道,闸门群和分水口群数量众多,渠道允许水位变幅小,控制要求高。目前已有一些通过水力调控应对突发水质污染事件的研究成果,但提出的应急调控策略还难以完全满足中线干渠这样庞大规模的复杂输水工程的应急调控要求。

本文针对南水北调中线干渠Ⅰ级水污染事件,开展应急处置水力调控方法研究,确定水力调控单元的划分方法,给出应急处置的水力调控方式。通过发挥分水口群和闸门群的水力调控作用,充分利用渠道调蓄能力,维持渠道蓄量的动态平衡和水位稳定,实现水污染应急处置目标。

2 数学模型

南水北调中线总干渠长宽比较大,可近似采用明渠一维水动力水质耦合模型开展模拟研究,在满足计算精度要求的同时,还可显著提高计算速度。

2.1 一维水动力模型

一维 St. Venant 方程组由连续性方程和动量方程组成^[6,7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为空间坐标(m); t 为时间坐标(s); A 为过水面积(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出流量(m^3/s); n 为糙率系数; R 为水力半径(m)。

2.2 一维水质模型

一维水质模型控制方程可表述为^[8]:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} = - \frac{\partial(QC)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) - kAC + S \quad (2)$$

其中: C 为污染物的断面平均浓度(g/m^3); E_x 为纵向离散系数(m^2/s); k 为污染物降解速率系数($1/\text{s}$); S 为其它源汇项;其它同式(1)。等式右端四项分别表示对流、离散、降解及旁侧入流污染。

3 南水北调中线突发Ⅰ级水污染应急处置水力调控方案

3.1 Ⅰ级水污染应急处置策略

在不中断渠道供水,不启用退水闸的基本原则

下,本研究提出的南水北调中线突发0级水污染应对处置策略如下:以沿线分水口规模为重要因素,划分污染物水力调控单元,确定适当的应急调控范围。通过顺序关闭沿线分水口群,适时规避污染物对受水区的影响。结合分水口群与闸门群的联合运用,充分利用渠道自身的调蓄作用,维持流量和蓄量的动态平衡,控制渠道水位波动在安全范围内。综合水力调控和其他污染物处置手段,使污染物浓度在水力调控单元内达到水质标准。

3.2 水力调控单元的划定

开展长距离河道或渠道水质模拟分析,通常需要分段划定计算单元。张晓^[9]等人基于一维稳态条件下的水质模型,以排污口、取水口或支流入口为控制断面将功能区划分为若干河段,建立分段求和模型来计算河流纳污能力,提高了纳污能力计算结果的科学性和合理性。

对于南水北调中线工程,针对水污染应急调控划定水力调控单元,有助于合理限定污染物的输移范围,减少污染事件和应急响应的影响范围,提高水力调控的效率、保障工程输水效益。水力调控单元的划分除了与工程水力特性相关外,还受工程布置、组织管理等多方面因素影响。本研究主要考虑水力特性因素,提出基于分水口规模的水力调控单元划分方法。

分水口是实施工程供水计划的主要结构,减少水污染对其运行的影响,是应急调控的主要目标之一。分水口规模越大,其权重越大。如果以大规模分水口为单元节点,通过水力调控或其他手段,使污染物在到达大规模分水口前符合水质标准,可保障大规模分水口的正常供水,有效减小水污染事件的影响。对于水力调控单元内分水规模较小的分水口,在应急调控期间可适时关闭,规避污染风险。

从渠道衬砌安全角度考虑,渠道水位波动的控制速率一般以0.15 m/h和0.3 m/d为限制。穆祥鹏^[10-14]等人对分水口扰动下渠道水力特性的敏感性研究表明,当分水口分水流量1 h之内变化约25 m³/s时,最初1 h的渠道水位波动速率接近0.15 m/h。因此,本研究以分水设计流量大于25 m³/s的分水口为划定点,将中线干渠划分为若干个污染物水力调控单元。

3.3 应急调控渠道运行方式

以往研究表明分水口群不同运用方式对南水北调中线总干渠水力特性有显著影响^[15]。在闸门操作历时方面,分水口群顺序运用时节制闸操作历时最短,同步运用方式次之,逆序运用方式最长;在水力过渡时间方面,分水口群同步运用方式最短,顺序

运用方式次之,逆序运用方式最长;在闸前水位偏差方面三种分水口群运用方式基本一致。对于水污染事件而言,污染物随水流向下游输移,对于各分水口的影响是自上而下的。在水力调控单元内,为了规避污染风险,分水口的关闭顺序应该是自上而下、顺序关闭;同样地,在污染源被截断后,水质改善也是自上而下,分水口的恢复也应该采取顺序方式。综合考量,应急处置过程中分水口群采取顺序运用方式。

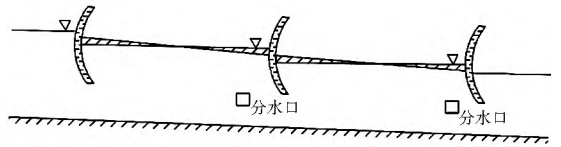


图1 等容积运行示意图

Fig. 1 Constant volume operation method

闸前常水位是南水北调中线总干渠正常输水期间使用的运行方式,但其蓄量变化与自然趋势相反,导致水力响应与恢复特性较差^[16-20]。因此本研究提出应急条件下采用更为高效的等容积运行方式,应用于整个水力控制单元的应急调控。等容积运行方式通过保持每段渠池闸门出流量和入流量一致来实现。等容积控制较闸前常水位和闸后常水位控制反应迅速,而水位变幅仅是其他两种控制方式水位变幅的一半。对于等容积运行方式所需要的较高的渠道衬砌,南水北调中线具有相应于加大流量的超高,在设计流量80%以下,都可以采用等容积控制。

进行等容积控制时,维持渠池分水口分流和下游闸门出流与上游闸门入流相等,表述如式(3),则分水口流量大小改变时,渠池下游闸门出流相应改变。

$$Q_{in} = Q_{out} + q_{out} \quad (3)$$

式中: Q_{in} 为渠池上游闸门流量(m³/s); Q_{out} 为渠池下游闸门流量(m³/s); q_{out} 为渠池分水口流量(m³/s)。

对于水力调控单元,上游边界闸门过流控制按式(4)计算,其余节制闸过流控制按式(5)计算。

$$\begin{cases} Q_i^t = Q_i^{t-1} + \Delta Q \\ Q_i^{t+1} = Q_i^t - \Delta Q \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - q_{out,i} \text{ 或 } Q_{i+1} = Q_i - \sum_1^j q_{out,j} \quad (5)$$

式中: Q_i^{t-1} 为初始状态上游边界闸门入流(m³/s); Q_i^t 为控制过程中上游边界闸门入流(m³/s); Q_i^{t+1} 为控制结束后上游边界闸门入流(m³/s); ΔQ 是需要调整的流量变化量(m³/s); N 为调控单元内节制闸总数,包括入流节制闸和出流节制闸; Q_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 为 i 节制闸过闸流量(m³/s); $q_{out,i}$ ($i = 1, 2, \dots, N-1$) 为 i 渠池总分水流量(m³/s)。

4 南水北调京石段突发 0 级水污染应急处置仿真研究

4.1 京石段渠道概况

本研究以南水北调中线干渠京石段为研究对象。京石段起点为古运河节制闸(桩号 969+104), 终点为

河北省段渠道终点(桩号 1196+167), 渠段全长 227.298 km, 是中线总干渠最下游的一段渠道工程。京石段由节制闸分隔成 13 座渠池, 沿程包括 12 个分水口, 16 个倒虹吸, 3 座渡槽, 暗渠、隧洞、桥梁及排水建筑物若干^[21], 如图 2 所示。为了表述方便, 将 13 座渠池从上游到下游依次编号 1 号- 13 号。

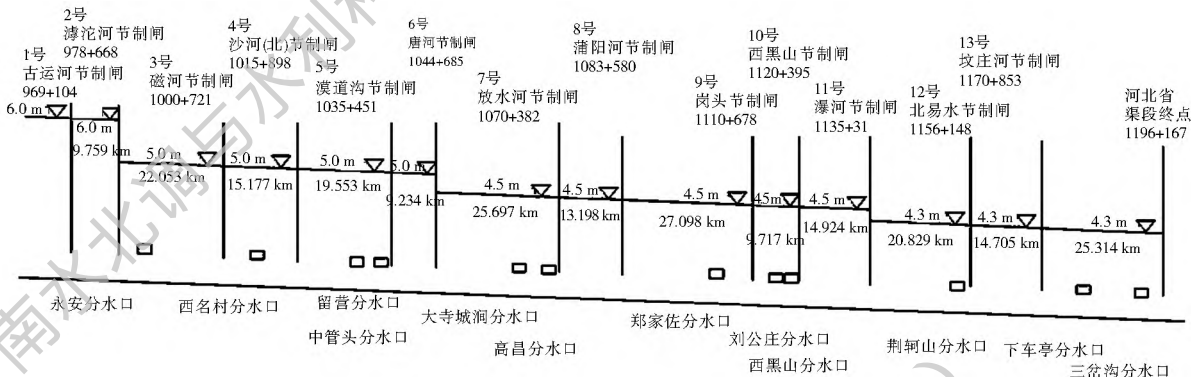


图 2 南水北调中线京石段渠段示意图

Fig. 2 Schematic of Jing shi section of South to North water transfer project

4.2 污染物及相关参数

挥发酚在化工原料、合成纤维、塑料、合成橡胶、医药、农药、染料和炼油等工业中有着重要用途, 需求量庞大, 多用货车运载, 被列入南水北调中线工程 388 种典型潜在污染物之一^[22]。根据地表水环境质量标准, 挥发酚在饮用水中的限制浓度仅为 0.002 mg/L, 要求十分严格^[23]。因此, 本研究选取挥发酚中最常见的苯酚作为典型污染物。苯酚在 65℃ 以下微溶于水, 其自身较为稳定。根据李守德^[24]等人的研究成果, 本文确定在南水北调中线突发水污染中苯酚降解系数为 0.207/d。

4.2.1 纵向离散系数的确定

纵向离散系数一般采用 Fischer 于 1975 年提出的公式来近似地估算:

$$E_x = 0.011u^2b^2/hu^* \quad (6)$$

式中: E_x 表示纵向离散系数(m^2/s); u 表示水面平均流速(m/s); b 表示渠道平均宽度(m); h 表示渠道平均水深(m); u^* 为渠道剪切流速(m/s), 其计算公式为 $u^* = \sqrt{ghJ}$, 其中 g 表示重力加速度(m/s^2); J 为水力坡度。

褚君达^[25] (1994) 在 Fischer 理论公式的基础上, 得到了 E_x 动态变化的简化表达式:

$$E_x = \alpha_e D \theta^2 q \cdot \Delta t \quad (7)$$

式中: q 是断面平均单宽流量(m^3/s); $\theta = b/h$ 是宽深比; $D = c/\sqrt{g}$ 是无量纲谢才系数, c 是谢才系数($\sqrt{m/s}$), $\alpha_e = 0.01$ 。

简化之后的纵向离散公式, 其因变量由流速转化为单宽流量, 方便通过控制流量来进行水力控制。

4.2.2 污染物初始浓度的确定

金士博^[8] 等人在解关于河流的一维污染物迁移方程的有限差分法中提出, 在实际情况下, 通常涉及污染物质量与水体中初始污染浓度的换算。在不考虑离散的情况($E_x = 0$) 下, C_0 与 m 之间的关系表述为:

$$m = C_0 Q \cdot \Delta t \quad (8)$$

式中: m 为污染物泄漏质量(g); C_0 为泄漏造成的污染物初始浓度(g/m^3); Q 为泄漏点渠道流量(m^3/s); Δt 为泄漏过程持续时间(s)。

如果考虑离散, 产生相同的 C_0 需要更多的污染物质量, 这是因为离散会引起较高度度的稀释。但在较短的时间内, 对于小的 k 和 E_x , 取 $k \rightarrow 0, E_x \rightarrow 0$ 的极限, 则式(8)仍旧成立。

4.3 水力调控单元划分

如 3.2 节所述, 以分水设计流量大于 25 m^3/s 的分水口为控制单元划分点, 则京石段水力调控单元划分见表 1。

4.4 应急处置水力调控仿真

控制段 1 桩号 979+815 处点源污染初始浓度为 0.135 mg/L, 远远超过中线水质要求标准, 危害严重。按照 3.1 节制定的应急控制策略, 本文设计了 3 种应急调控方案, 分别进行污染物运移仿真模拟。

表 1 京石段水质目标控制段划分

Tab. 1 The subsections for water quality control of Jing shi section

分水口	总桩号	设计分水流量	控制段	
田庄分水口	969+ 011	65	控制段 1	
永安分水口	982+ 613	5		
西名村分水口	1006+ 243	2		
留营分水口	1029+ 516	2		
中管头分水口	1034+ 770	20		
大寺城涧分水口	1060+ 120	2		
高昌分水口	1069+ 120	3		
塔坡分水口	1078+ 320	1		
郑家佐分水口	1103+ 136	12		
刘庄分水口	1116+ 380	0.5		
西黑山分水口	1120+ 520	60		
荆柯山分水口	1155+ 170	2		
下车亭分水口	1179+ 467	3		控制段 2
三岔沟分水口	1194+ 486	11		

4.4.1 方案一

闸门群维持不动,顺序操作分水口规避污染物。在此应急控制方案下,分水口分水工况见图3。在污染到达某个分水口之前,以0.5 m³/min的速度关闭该分水口;在污染团经过该分水口后,以0.5 m³/min的速度开启该分水口,分水流量恢复原状。

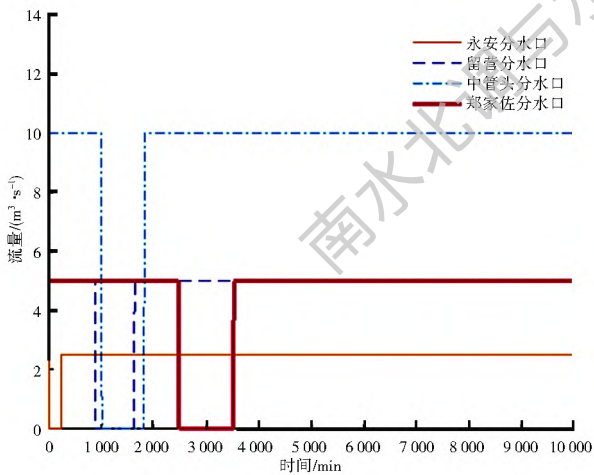


图 3 各分水口分水流量变化
Fig. 3 Flowrate of each offtake

仿真结果(见图4)显示:整个控制段水位最大涨幅0.3 m,西黑山上游节制闸闸前水位均能在较长时间内恢复到事故发生前状态;整个控制段上游水位受影响较小;重新开启分水口之后,分水口所在渠池下游闸前水位均开始回落并能恢复原状,但西黑山及下游节制闸闸前水位回落速度非常慢,原因是渠道在上游分水口停止分水期间累积了一定的水

量,后期调控时需考虑该状况。

京石段各渠池蓄量变化如图5,其中控制段蓄量变化最大的渠池分别为4号渠池和8号渠池,蓄量变化分别为23万 m³和23.6万 m³,原因是分水流量较大的分水口位于这两个渠池。

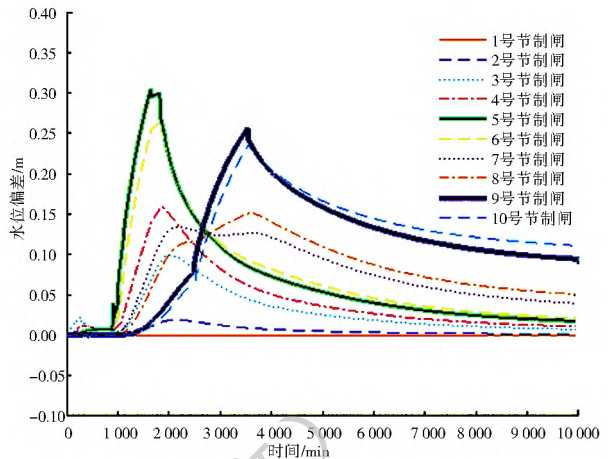


图 4 各节制闸闸前水位偏差变化
Fig. 4 Deviation of water level at each gate

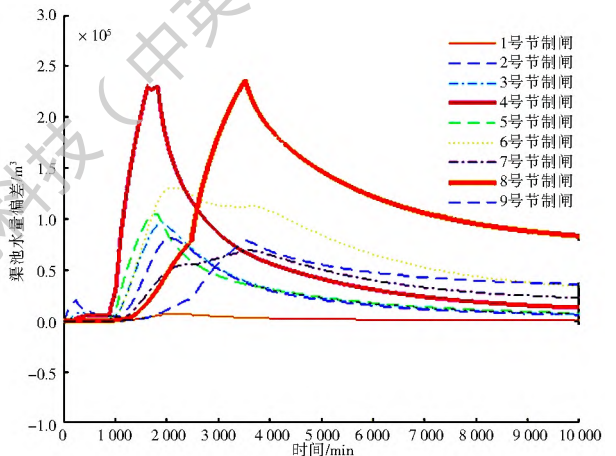


图 5 各渠池蓄量偏差变化
Fig. 5 Deviation of volume of each canal

4.4.2 方案二

闸门群维持不动,顺序操作分水口规避污染物并维持渠道蓄量平衡。蓄量平衡通过在重新开启分水口后,在原分水流量的基础之上,弥补水口关闭期间欠分的水量来实现。在此应急控制方案下,分水口分水工况见图6。污染物流经分水口时,关闭分水口;污染物流过之后,适当提高分水流量并维持一段时间,以弥补水口关闭期间欠分的水量,然后恢复原状。

该方案下闸前水位降幅主要跟分水口加大分流的流量大小和持续时间相关,通过延长分水口流量恢复期的持续时间,水位降幅能够符合限制运行标准。计算公式如式(9):

$$\begin{cases} \Delta V = q_{out1} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 = \frac{\Delta V}{\Delta q_{out}} \\ q_{out2} = q_{out1} + \Delta q_{out} \end{cases} \quad (9)$$

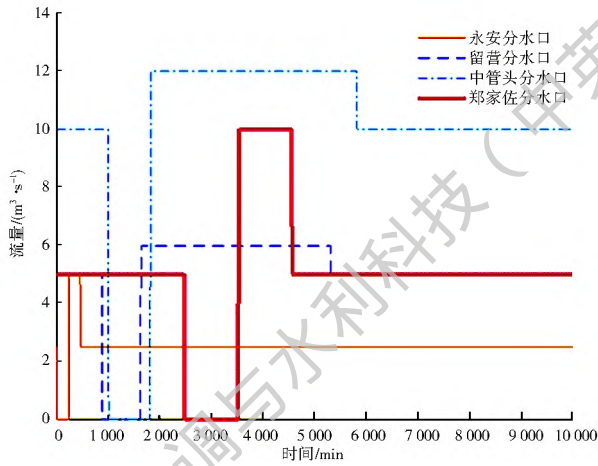


图 6 各分水口分水流量变化

Fig. 6 Flowrate of each offtake

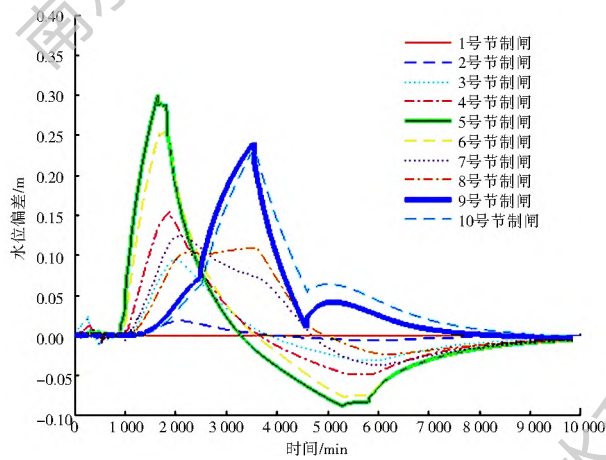


图 7 各节制闸闸前水位偏差变化

Fig. 7 Deviation of water level at each gate

式中: ΔV 为分水口关闭期间欠分的水量 (m^3); q_{out1} 为污物流经前的分水口流量 (m^3/s); Δt_1 为分水口关闭持续时间 (s); Δq_{out} 为弥补分水口欠分水量需要增加的流量 (m^3/s); Δt_2 为弥补时段历时 (s); q_{out2} 为弥补时段的分水口流量 (m^3/s)。

仿真结果(见图 7)显示:虽然 5 号节制闸的最大水位变化为 0.388 m,但由于变化时间较长,24 h 最大水位变化为 0.284 m,符合 0.3 m/d 的限制。

京石段各渠池蓄量变化见图 8,其中控制段蓄量变化最大的渠池仍然为 4 号渠池和 8 号渠池,蓄量最大变化分别为 29.23 万 m^3 和 20.73 万 m^3 。

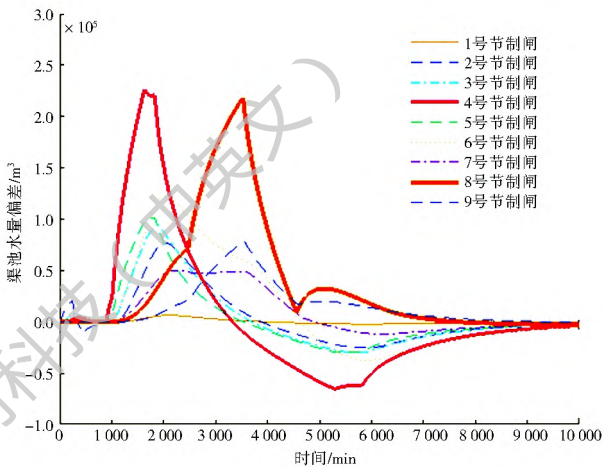


图 8 各渠池蓄量偏差变化

Fig. 8 Deviation of volume at each canal

4.4.3 方案三

水力调控单元采用等容积控制,分水口分水工况按 4.4.1 节设置,则事故段闸门过流匹配见表 2。如需要增大或减小调控单元流量来进一步提高削减污染物浓度的能力,则只需要在表 2 的

基础上根据式(4)和式(5)增加或减小所需的流量变化量。

经过等容积控制,事故控制段上游方向和下游方向受影响均很小,控制段最大闸前水位波动不超过 0.15 m/h 和 0.3 m/d 的限制。

表 2 水力调控单元各闸门过闸流量

Tab. 2 Flowrate at each gate of hydraulic control units

时间分段/min		各闸门过闸流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)									
起始	结束	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号
1	16	110	110	107.5	107.5	92.5	92.5	92.5	92.5	87.5	60
17	235	110	110	110	110	95	95	95	95	90	60
236	892	110	110	107.5	107.5	92.5	92.5	92.5	92.5	87.5	60
893	1 016	110	110	107.5	107.5	97.5	97.5	97.5	97.5	92.5	60
1 017	1 629	110	110	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	107.5	102.5	60
1 630	1 813	110	110	107.5	107.5	102.5	102.5	102.5	102.5	97.5	60
1 814	2 479	110	110	107.5	107.5	92.5	92.5	92.5	92.5	87.5	60
2 480	3 519	110	110	107.5	107.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	60
3 520	5 000	110	110	107.5	107.5	92.5	92.5	92.5	92.5	87.5	60

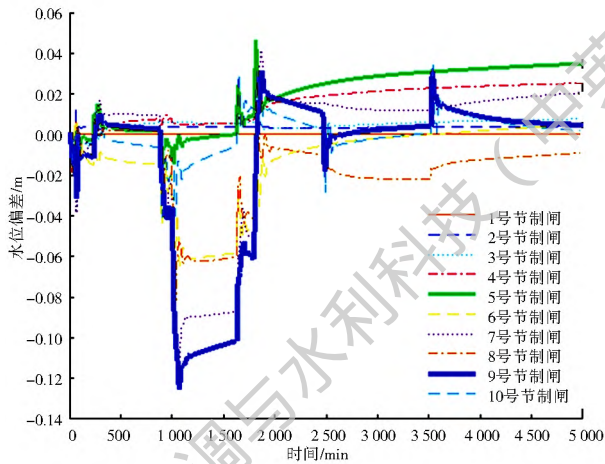


图9 各节制闸前水位偏差变化
Fig. 9 Deviation of water level at each gate

4.5 讨论

三种应急控制方案下,西黑山分水口处水质目标均得以实现(图10),但对比发现:

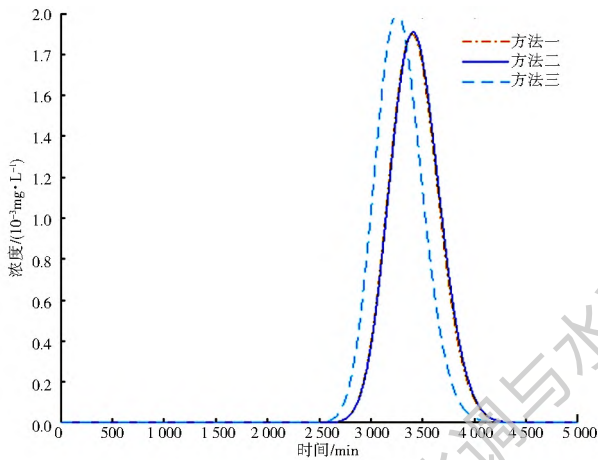


图10 不同控制下西黑山分水口处实时污染物峰值浓度
Fig. 10 The peak concentration of pollutants in Xiheishan offtake under different control schemes

方案一最为简单,但缺点是增加了渠道蓄量,导致水位有所升高,后期调度时需要考虑该蓄量。方案一是基于自身调蓄能力的方案,可作为应急调控的权宜之计。

方案二在方案一的基础上进一步考虑了渠道蓄量平衡,通过操作分水口群,将关闭分水口期间累积的水量在渠道内消化,最终维持原有水位不变。方案二较方案一充分发挥了分水口的调蓄作用,能够取得更好的调控品质,同时未显著影响调控单元上游和下游的运行。方案二通过弥补欠分水量来实现渠道蓄量平衡,受分水口过流能力和水位下降限幅制约,可能需要较长的持续时间。

方案三主要发挥节制闸群的调节作用,将等容控制下各分水口关闭期间累积的水量依次传递到调控单元末,并经由较大规模分水口分出,同样未显

著影响调控单元上游和下游的运行。方案三较方案二适应性和灵活性更强。

综上分析,各方案的优缺点和适用条件各异,但相较于传统的启用退水闸或紧急关闭闸门等方案,各方案均不需要弃水,不会引发水位的大幅波动,对调控单元上下游的运行影响也很小。

需要说明的是,本研究中水力调控手段主要用于调节流量和蓄量平衡,其在增强污染物削减方面的作用有待研究。应急调控中,水力调控通常还需要结合其它物理化学手段,共同发挥作用。

参考文献(References):

- [1] Q/NSBDZX G015- 2014,南水北调中线干线工程水污染事件应急预案[S]. (Q/NSBDZX G015- 2014, Emergency Plan of Water Pollution Incident in Middle Route of South to North Water Diversion Project[S]. (in Chinese))
- [2] 黄会勇,毛文耀,范杰,等.南水北调中线一期工程输水调度方案研究[J]. 人民长江, 2010, 41(16): 8-13. (HUANG H Y, MAO W Y, FAN J, et al. Study of water conveyance schemes of phase I works of Middle route project of S-N Water Diversion[J]. Yangtze River. 2010, 41(16): 8-13. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2010.16.005.
- [3] 练继建,王旭,刘婵玉,等.长距离明渠输水工程突发水污染事件的应急调控[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(1): 44-50. (LIAN J J, WANG X, LIU C Y, et al. Emergency regulation for sudden water pollution accidents of open channel in long distance water transfer project[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology). 2013, 46(1): 44-50. (in Chinese))
- [4] 房彦梅,张大伟,雷晓辉,等.南水北调中线干渠突发水污染事故应急控制策略[J]. 南水北调与水利科技, 2014(2): 133-136. (FANG Y M, ZHANG D W, LEI X H, 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(2): 133-136. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.02.031.
- [5] 桑国庆,魏泽彪,薛霞,等.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[J]. 人民长江, 2015(5): 88-92. (SANG G Q, WEI Z B, XUE X, et al. 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[J]. Yangtze River. 2015(5): 88-92. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.021.
- [6] 李炜.水力计算手册(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006, 377-380. (LI W. Hydraulic Calculation Directory [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2006, 377-380. (in Chinese))
- [7] 范杰,王长德,管光华,等.渠道非恒定流水力学响应研究[J]. 水科学进展, 2006, 7(1): 55-60. (FAN J, WANG C D, GUAN

- G H, et al. Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel[J]. *Advances in Water science*, 2006, 7(1): 55-60. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2006. 01. 009.
- [8] 金士博, 杨汝均. 解关于河流的一维污染物迁移方程的有限差分法[J]. *环境科学*, 1981(1): 27-32. (WANG S B, YANG R J. Finite difference method for one dimensional pollutant transport equation of rivers[J]. *Environmental Science*. 1981(1): 27-32. (in Chinese) DOI: 10. 13227/j. hjkx. 1981. 01. 007.
- [9] 张晓, 罗军刚, 解建仓. 考虑取水口和支流的河流纳污能力计算模型研究与应用[J]. *水利学报*, 2017, 48(3): 317-324. (ZHANG X, LUO J G, XIE J C. Study on the calculation model of river environment capacity considering water intake and tributary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(3): 317-324. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20160270.
- [10] 穆祥鹏, 郭晓晨, 陈文学, 等. 基于分水口扰动的渠道非恒定流水力响应的敏感性研究[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(4): 96-101. (MU X P, GUO X C, CHEN W X, et al. Study on the hydraulic response sensitivity of unsteady flow in a conveyance channel to flow diversion[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010, 29(4): 96-101. (in Chinese))
- [11] RENAULT D, HEMAKUMARA H M. Irrigation offtake sensitivity[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1999, 125(3): 131-136. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9437(1999)125:3(131).
- [12] RENAULT D. Offtake sensitivity, operation effectiveness, and performance of irrigation system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1999, 125(3): 137-147. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9437(1999)125:3(137).
- [13] RENAULT D. Operational sensitivity of irrigation structures[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(3): 157-162. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:3(157).
- [14] RENAULT D. Aggregated hydraulic sensitivity indicators for irrigation system behavior[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, (43): 151-171. DOI: 10. 1016/S0378-3774(99)00059-1.
- [15] 崔巍, 李斯胜, 陈文学, 等. 南水北调中线分水口群不同运用方式对总干渠水力控制特性的影响[J]. *水利学报*, 2011, 42(11): 1316-1321. (CUI W, LI S S, CHEN W X, et al. Effect of offtakes operation schemes on hydraulic control performances of Main Canal in Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1316-1321. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 11. 020.
- [16] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏, 等. 明渠运行前馈控制改进蓄量补偿算法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(3): 12-17. (CUI W, CHEN W X, MU X P, et al. Revised volume compensation algorithm for feedforward control of canal[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(3): 12-17. (in Chinese) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2011. 03. 007.
- [17] BUYALSKI C P, FALVEY H T, ROGERS D S. Canal systems automation manual volume N[M]. Denver Colo: US Bureau of Reclamation, 1991.
- [18] E BAUTISTA, A J CLEMMENS. Volume compensation method for routing irrigation canal demand changes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(6): 494-503. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:6(494).
- [19] LITRICO X, MALATERRE P O, BAUME J P, et al. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(1): 27-37. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(27).
- [20] SCHURMANS J. Control of water levels in open channels[D]. Netherlands: Delft University of Technol, 1997, 101.
- [21] 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 W, CHEN W X, YAO X, 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) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 05. 002.
- [22] 张惠. 南水北调中线干线工程水污染处置应急技术手册[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2014. (ZHANG H. Emergency handbook for water pollution disposal of Middle Route of South to North Water Diversion Project[R]. Wuhan: Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Limited Liability Company, 2014. (in Chinese))
- [23] GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. (GB3838-2002, Environment quality standards for surface water[S]. (in Chinese))
- [24] 李守德, 李勇, 蒋勇. 南水北调中线突发典型水污染事故特征和应对措施研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2012. (LI S D, LI Y, JIANG Y. Report on the characteristics and countermeasures of typical water pollution accidents in the Middle Route of South to North Water Diversion Project[R]. Nanjing: Hohai University, 2012. (in Chinese))
- [25] 褚君达. 河网对流输移问题的求解及应用[J]. *水利学报*, 1994(10): 14-23. (CHU J D. Solution and application of convection transport problem for river network[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994(10): 14-23. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 1994. 10. 002.