

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0117

陈铭瑞, 靳燕国, 刘爽, 等. 明渠突发水污染事故段及下游应急调控[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1188-1196. CHEN M R, JIN Y G, LIU S, et al. Sudden water pollution accident section and downstream emergency control of open channel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1188-1196. (in Chinese)

明渠突发水污染事故段及下游应急调控

陈铭瑞¹, 靳燕国², 刘爽², 张召³, 雷晓辉^{1,3}, 朱杰⁴

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038;
3. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038; 4. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 针对明渠突发水污染事件应急调控的需求, 对突发水污染事件事故段及下游段的应急调控策略进行研究。应急调控的决策包括: 通过污染物特征参数量化方法分析污染物的扩散过程, 划分事故段及事故段下游; 针对事故段, 通过量化方法计算出整个应急事故的持续时间; 针对事故下游段, 采用优化分区的方法, 识别出不利渠池, 关闭不利渠池下游节制闸, 从而达到延长整个事故下游段的供水时间的效果。以中线工程洹河节制闸-古运河节制闸段模拟发生应急事故为例, 研究成果如下: 采用污染物特征参数量化方法识别出事故段为洹河节制闸-淳沱河节制闸, 事故段下游为淳沱河节制闸-岗头隧洞节制闸。事故段应急事件持续时间为 7.9 h; 事故段下游通过优化分区的方法识别出两个不利渠池, 延长不利渠池供水时间 6.13 d 和 5.61 d。

关键词: 突发水污染; 应急调控; 污染物特征参数; 优化分区; 供水时间

中图分类号: TV68 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



突发水污染事件的定义为突然发生的、由人为或者自然因素等引起大量污染物进入水体事件^[1], 可导致水体恶化、危及供水安全、造成环境破坏等恶劣的社会影响^[2]。南水北调中线总干渠作为重要的输水渠道, 沿线拥有众多控制建筑物和交叉建筑物。一旦发生突发水污染事故且处理不当, 会引发渠池的水位陡升或者陡降, 破坏河渠的衬砌, 危及下游供水安全。所以, 必须提出切实、可行的应急调控策略应对突发水污染事故^[3-5]。

对此问题, 部分学者^[6-8] 已开展了一系列研究。Tang 等^[9] 通过 MIKE 11 对南水北调中线工程水污染事故进行模拟, 分析污染物的扩散规律。齐于顺等^[10] 采用 MIKE 21 模型对长江干流铜陵段突发水污染事件进行模拟, 通过对污染物扩散规律的总结, 得出突发水污染事件时应采取的应急决策。黄会勇等^[11] 提出面对突发水污染事件应急调度的方案

应以尽快将污染水体排除渠道为准测, 可以暂不考虑渠道水位变化的约束, 打开退水闸以退水闸按设计流量进行紧急退水。练继建等^[12] 利用数值模拟的方法分析不同闸门调控的条件下污染物的扩散规律, 提出了南水北调中线工程突发水污染事件的应急调控方案。穆祥鹏等^[13] 针对突发水污染事件下复杂输水系统的水力过渡过程进行研究。房彦梅等^[14] 针对南水北调中线工程, 通过模拟污染物的传播速度、渠道水位变幅及波动, 提出水污染事件中各闸门的应急控制策略。聂艳华等^[15] 针对南水北调中线工程, 面对水污染应急事故提出加大事故段上游目标水位的方法, 充分利用渠池自身的调蓄量, 提高应急调度的安全经济性。树锦等^[16] 利用一维非恒定模型分析事故工况下渠道的水力响应过程, 生成事故段节制闸的应急调控方案。

目前虽然已有一些学者^[17] 利用节制闸应急调

收稿日期: 2022-05-17 修回日期: 2022-09-23 网络出版时间: 2022-11-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221121.2220.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3200905)

作者简介: 陈铭瑞(1997—), 男, 安徽合肥人, 主要从事河流流体力学研究。E-mail: 1304171745@qq.com

通信作者: 雷晓辉(1974—), 男, 陕西渭南人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事明渠调度及水力控制等研究。E-mail: lxx@iwhr.com

控和对污染物扩散规律分析,面向突发水污染事件取得一定成果,但已有成果针对事故段及事故段上游的应急调控研究较多,对事故段下游研究较少^[18],故本文针对明渠调水工程突发水污染事件事故段的快速响应及事故段下游供水方式进行研究,提出污染物扩散量化方法和优化分区两种方法,实现对突发水污染事故的应急处置。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

南水北调中线工程从汉江中上游的丹江口水库引水一路北上,途经河南省和河北省,沟通海河、黄河、淮河和长江四大流域^[19],自流输水将引江水送至北京团城湖和天津市外环河^[20]。工程全长 1432 km,沿线共布置 61 座节制闸、95 座分水口、1 座泵站以及众多的倒虹吸、渡槽、无压涵洞等众多类型建筑物^[21-23]。本次研究的区域选择为南水北调中线工程洹河节制闸-岗头隧洞节制闸段,共有 10 个节制闸、12 个分水口、8 个退水口。研究区域见图 1。



图 1 研究区位置

Fig. 1 Schematic map of the location of the study area

1.2 研究方法

当事故段突发水污染事件时,为防止事故段的污染物外泄,势必关闭事故段下游闸门。但由于中线工程是闸群串联体系,事故段下游闸门关闭时间若大于污染物扩散的时间,将导致污染物转移到下一个渠池中造成污染物的外泄。所以了解污染物的扩散规律和扩散范围可对下游节制闸的调控提

供信息支撑。

本节通过提出污染物扩散量化方法对突发水污染事件的污染物扩散过程及范围进行精确刻画,根据扩散范围划分突发水污染事件的事故段及事故段下游;划分完成后,再通过恒定流模型及优化分区的方法识别不利渠池,划分供水分区,保障事故段下游的供水安全,完成事故段下游的应急调控。

1.2.1 污染物扩散量化方法

污染物进入水体以后,一般需要经历 3 个阶段^[24],分别是射流核心区、扩散区以及离散区。本文主要考虑污染物分布均匀化且不考虑降解作用(即离散区),选取污染物纵向长度、污染物峰值输移距离和污染物峰值含量作为突发水污染的特征参数,通过计算污染物纵向长度和污染物峰值输移距离从而确定污染物扩散的范围。

污染物含量可以通过下式进行表达:

$$C(x,t) = C_0 \frac{v}{\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x-vt)^2}{4D_L t}\right) \quad (1)$$

式中: $C(x,t)$ 为沿线 x 处在 t 时刻的污染物质量浓度,mg/L; C_0 为 $x=0$ 处瞬时投放污染源质量浓度,mg/L, $C_0 = M/Q$; M 为瞬时投放的污染物总量,g; Q 为河水流量, m^3/s ; A 为河流断面面积, m^2 ; D_L 为弥散系数, m^2/s ; x 为输移距投放点的距离,m。

从式(1)可知,污染物质量浓度呈正态分布,根据正态分布特性,当 $x=vt$ 时,污染物质量浓度取最大值,对于低流速的渠道来说,污染物质量浓度输移的距离为

$$D = 60vT \quad (2)$$

式中: D 为污染物质量浓度输移的距离,m; v 为断面平均流速,m/s; T 为传播时间,s。

污染物含量也呈正态分布;根据正态分布的特性,定义弥散宽度为 $m\sigma$ (m 为常数)。根据已知的示踪发确定离散系数的思路:

$$D_L = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma^2}{\partial t} \quad (3)$$

对式(3)进行积分得到污染物纵向拉伸速度为

$$v = \frac{m\sigma}{t} = a\sqrt{2D_L}^{0.5} t^{-0.5} \quad (4)$$

式中: $a = m/2$ 。

对式(4)进行积分得到污染物扩散的纵向距离:

$$W = \int_0^T v dt = 2a\sqrt{2D_L}^{0.5} T^{0.5} \quad (5)$$

根据龙岩^[25]对公式(5)的量化过程可知:

$$W = \left[12 + \ln\left(\frac{M}{10}\right) \right] \sqrt{2D_L T}^{0.455} \quad (6)$$

$$D_L = m \times 0.011 \frac{v^2 B^2}{h \sqrt{ghJ}} \quad (7)$$

式中: W 表示污染物扩散的距离, m ; M 、 D_L 表示含义同上; m 通常取 1; B 、 h 分别表示渠道的平均宽度和平均水深, m ; J 为水力梯度; v 为渠道平均流速, 采用 $v = Q/A$, m^3/s ; T 为污染物传播的时间, s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

污染物含量的分布特征由上文可知, 通过公式(2)、(6)可计算出污染物前沿距污染源的

$$X = D + \frac{W}{2} \quad (8)$$

式中: X 表示为污染物前沿距污染源的

距离, m ; D 、 W 含义同上。当完成对污染物扩散的分析后, 需要使用退水口将污染物快速的排出渠池确保水质的安全。在实际的工程中, 开启退水口需要一定时间, 且鉴于退水口尺寸的区别, 概化退水口开启时间较为困难, 所以本文采用梁建奎等^[26]提出的污染物前锋达到退水口前 500 m 处开启退水口的方法。默认污染物的扩散形式为均匀扩散, 故污染物在扩散过程中体积为

$$V = B \times h \times W \quad (9)$$

式中: V 为污染物在扩散过程中的水体积, m^3 ; B 为渠道宽度, m ; h 为渠道水深, m 。

计算出污染物扩散的体积后, 通过退水口进行退水(默认为设计流量), 从而可以计算出整个污染事件退水时间。退水时间计算公式为

$$t = V/q \quad (10)$$

式中: t 为退水持续时间, s ; q 为退水口的设计流量, m^3/s 。

1.2.2 构建恒定流模型

本次研究区域被 8 个节制闸划分成 7 个渠池, 每一个渠池水面线受设计水深和当前的流量影响, 同时受相邻渠池间的耦合影响^[27]。在推求渠池蓄量时, 认为每一个渠池的水面线为恒定的, 则对每一个渠池进行恒定流计算。

恒定渐变流的基本微分方程为

$$\frac{dE_s}{ds} = i - J \quad (11)$$

式中: $E_s = h \cos \theta + \frac{\alpha v^2}{2g}$ 为断面比能; h 为渠道水深, m ; θ 为渠道与水平线夹角, ($^\circ$); α 为动能修正系数; v 为断面平均流速, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; i 为渠池底坡坡度; 水力坡度 $J = \frac{v^2}{C^2 R}$; C 为谢才系数, $m^{1/2}/s$; R 为水力半径, m 。

对公式(11)进行积分:

$$E_{sd} - E_{su} = \int_0^1 (i - J) ds = \Delta s \cdot (i - \bar{J}) \quad (12)$$

公式(12)可表述为有限差分的形式:

$$E_{sd} = E_{su} + \Delta s (i - \bar{J}) \quad (13)$$

其中: E_{sd} 为欲求断面的断面比能; E_{su} 为已知断面的断面比能; Δs 为两个断面之间的间距; \bar{J} 为两个断面之间的水力坡度的平均值。

以已知断面为控制断面, 可根据公式(13)推求欲知断面。连续推求则水面线便可确定。

1.2.3 优化分区方法

明渠调水工程正常输水状态通常采用局部分区(图 2)的方法对下游城市进行供水。局部分区的供水方法是指将当前渠池上游节制闸与下游邻近第一个分水口的节制闸作为一个供水分区, 当前渠池的水量仅仅供给当前渠池或邻近下游分水口。

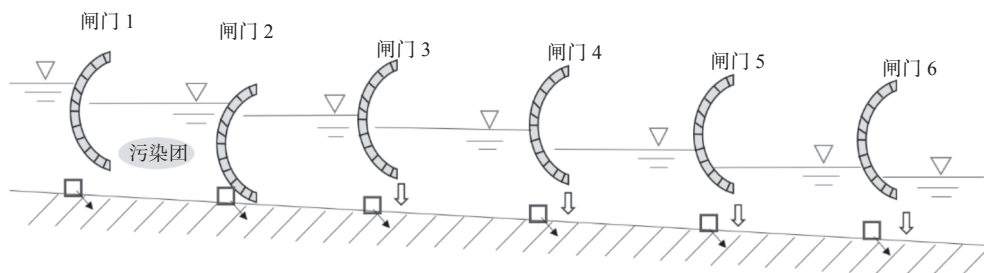


图 2 局部分区方法

Fig. 2 Local partition method

明渠调水工程沿线重要城市需水需求较大, 所对应分水口的分水流量也较大, 采用局部分区的供水方式时, 将导致重要渠池较其他渠池的供水时间

较短, 为此提出一种优化分区的方法, 用于延长重要渠池的供水时间。这种分区方法主要通过渠池分区的供水时间来反映渠池的分水情况, 当累加渠

池的分水时间为最小值时,则说明累加的最后一个渠池分水量较大,称这个渠池为不利渠池。不利渠池因为分水量较大,无法向下游继续供水,倘若继续往下游供水,会加剧渠池的分水情况,导致渠池分水时间变少,所以关闭下游闸门,将最大程度地延长不利渠池的供水时间。一般情况下不利渠池和重要渠池可以认为是相同的。

优化分区(图3)供水方法首先运用水动力模型计算研究区段中每一个渠池的蓄量,利用公式(14)计算当前渠池向下游依次累加后的供水时间。再通过公式(15)找出不利渠池。然后关闭不利渠池下游的节制闸,将不利渠池及以上所有的渠池当作一

个供水分区,不利渠池的下一个渠池将作为新的第一个渠池,重复以上的工作,重新识别不利渠池,直至识别出不利渠池为最后一个渠池则说明这个优化分区工作完成。

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{V_1}{Q_1} \\ T_{1+2} = \frac{V_1 + V_2}{Q_1 + Q_2} \\ \dots\dots \\ T_{1+2+\dots+N} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{\sum_{Q=1}^N Q_i} \end{array} \right. \quad (14)$$

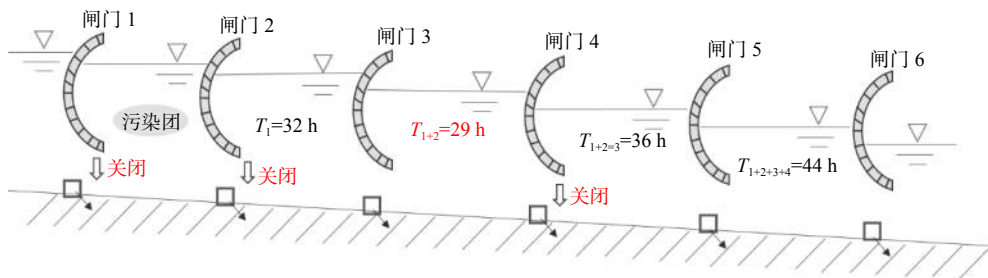


图3 优化分区方法

Fig. 3 Optimized partition method

式中: T_1 为第一个渠池供水时间, s; T_{1+2} 为第一个渠池和第二个渠池累加后供水时间, s; $T_{1+2+\dots+N}$ 为第一个渠池依次累加至第 N 个渠池后供水时间, s; V_1 为第一个渠池蓄量, m^3 ; Q_1 为第一个渠池分水量, m^3/s 。

$$T_{1+2+\dots+m} = \min\{T_1, T_{1+2}, \dots, T_{1+2+\dots+m}, \dots, T_{1+2+\dots+m+\dots+N}\} \quad (15)$$

式中: T_1 为第一个渠池供水时间, s; T_{1+2} 为第一个渠池和第二个渠池累加后供水时间, s; $T_{1+2+\dots+N}$ 为第一个渠池依次累加至第 N 个渠池后供水时间, s; m 表示第 m 个渠池为不利渠池。

假设识别出 N 个不利渠池,那么采用优化分区的方法并将划分出 $N+1$ 个分区,将这 N 个不利渠池采用优化分区的方法和局部分区的方法对同一个不利渠池的供水时间进行比较,从而得到优化分区较局部分区对同一个不利渠池供水时间的对比结果。

2 案例分析

对于渠池突发水污染事件,将受污染渠池和未受污染渠池划分为事故段和事故段下游,事故段通过分析污染物的扩散距离从而确定节制闸和退水口的调控策略,将污染物以最快时间排出输水渠道;

对事故段下游基于优化分区的方法划分供水单元,延长不利渠池的供水时间。

本文选择洮河节制闸(桩号 949+602)-岗头隧洞进口节制闸(桩号 1112+139)作为研究渠段,模拟突发水污染事件发生的位置在洮河节制闸-古运河节制闸(Pool 1)内,桩号为 953+515 处,污染物为总量为 1 t,底宽为 22.5 m,边坡系数为 2.5,设计水深 6 m,渠池底坡坡度 0.00005,曼宁糙率为设计值 0.015,离散系数按照实验的估计值为 3.43 m^2/s ,流量工况选取渠首 350 m^3/s ,渠道分水口的分水流量参照实时监测信息。

2.1 事故段应急调控

中线日常调度过程中,闸门关闭的时间与渠池的运行安全紧密相关,但是在应急调度中,闸门将按照 0.4 m/min 的速度进行关闭,不考虑 0.15 m/h、0.3 m/d 的水位约束,所以具体的关闭时间与闸门的实时的开度密切相关,闸门的开度适配与选取的流量工况具体信息见表 1。

由表 1 可知,通过闸门的原始开度与闸门应急状态下的关闭速度,可以推求出关闭 Pool 1 下游闸门的时间约为 5 min,再将计算出的闸门关闭时间

代入公式(2)、(6)、(8)即可计算出在闸门完全关闭时间内,污染物峰值的扩散距离约为 0.3 km,污染物扩散的纵向距离约为 0.825 km,污染物前锋扩散的距离约为 1.13 km,远远小于污染源距下游节制

闸的距离,但是由于 Pool 1 并没有退水口,所以结合两个方面,事故段为 Pool 1 和 Pool 2,关闭 Pool 2 下游节制闸(滹沱河节制闸),并且保证 Pool 1 下游节制闸(古运河节制闸)完全开启。

表 1 研究渠池基本参数

Tab. 1 Basic parameters of canal pool

渠池号	渠池长度/km	底宽/m	边坡系数	渠池底坡坡度/ 10^{-4}	开度/m	渠道流速/ $(m\cdot s^{-1})$	水深/m	下游流量/ $(m^3\cdot s^{-1})$	分水流量/ $(m^3\cdot s^{-1})$
Pool 1	23.78	22.5	2.25	5.00	2.02	1.03	4.50	141.21	16.21
Pool 2	9.73	22.2	2.00	5.00	1.57	1.26	4.50	121.32	0
Pool 3	12.05	20.4	1.00	9.78	2.34	1.02	4.21	121.32	0.82
Pool 4	15.19	20.4	2.00	3.92	2.20	1.02	4.19	120.50	0.17
Pool 5	19.54	20.6	2.75	6.13	2.13	0.86	4.19	120.33	7.16
Pool 6	9.23	18.9	1.00	5.37	2.57	0.85	4.21	113.17	0
Pool 7	25.72	18.7	2.00	5.13	2.78	0.97	4.17	113.17	2.79
Pool 8	13.18	23.0	2.50	5.00	1.77	1.32	3.90	110.38	6.28

由上文和图 4 可知,由于 Pool 1 下游节制闸完全开启,则 Pool 1 和 Pool 2 形成了一个新的渠池,通过桩号计算出污染源距滹沱河退水口前 500 m 距离为 24.29 km,利用公式(9)计算出污染物扩散过程

中的水体积约为 242.6 万 m^3 ,最后采用公式(10)计算出污染物全部退出渠池的时间约为 7.9 h,具体信息见表 2。据此,事故段应急调控完成。

表 2 事故段调控结果

Tab. 2 Control results of accident section

节制闸名称	污染源桩号	退水口桩号	退水口前 500 m 桩号	退水口设计流量/ $(m^3\cdot s^{-1})$	扩散水体积/万 m^3	节制闸调控策略	退水时间/h
洹河节制闸 (946+602)						不变	
古运河节制闸 (970+379)	953+515	977+801	977+301	85	242.6	完全开启	7.9
滹沱河节制闸 (980+116)						关闭	

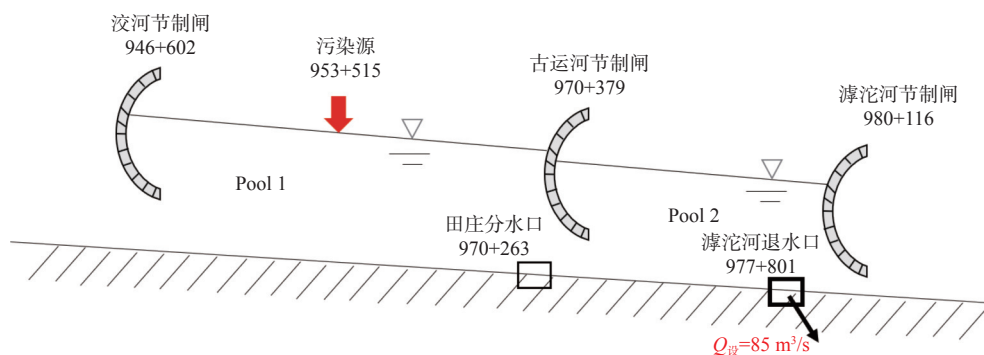


图 4 事故段基本信息

Fig. 4 Basic information of accident section.

2.2 事故段下游应急调控

事故段突发水污染,事故段最后一个节制闸必然关闭,则事故段下游以自身蓄量为供水水源持续供水。如若事故段发生极端水污染事件,节制闸关

闭时间较长,事故段下游分水量较大的渠池供水安全则难以保证,对此基于优化分区的方法,识别出事故段下游所有的不利渠池,将不利渠池的闸门关闭,使得不利渠池对下游供水影响降为最小,从而

延长下游渠池的供水时间。

对于事故段下游,首先运用恒定流模型计算出事故段下游所有渠池的蓄量,具体渠池蓄量见表3。根据表3的信息,并利用公式(14)、(15),试算得到

事故段下游渠池的不利的渠池,并可计算得到按照优化分区方法下的不利渠池供水时间。与此同时,按照局部分区的方法,计算每一个渠池的供水时间,并针对不利渠池对两种方法的供水时间进行比较。

表3 事故段下游渠池蓄量

Tab. 3 Volume of downstream canal pool in accident section

序号	渠道名称	蓄量/万m ³	分水流量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	滹沱河-磁河	294.34	0.82
2	磁河-沙河(北)	172.19	0.17
3	沙河(北)-唐河	250.50	7.16
4	唐河-放水河	133.58	0
5	放水河-蒲阳河	291.33	2.79
6	蒲阳河-岗头隧洞	153.51	3.28

通过表4、5的试算结果可知,对于事故段下游不利渠池分别为沙河(北)-唐河、蒲阳河-岗头隧洞两个渠池。所以按照优化分区的方法可以将事故

段下游分成滹沱河-唐河、唐河-岗头隧洞两个大的渠池。按照1.2.3局部分区的方法计算事故段下游每个渠池的供水时间。

表4 第一次试算结果展示

Tab. 4 Results of the first trial calculation

序号	渠池名称	蓄量/万m ³	分水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	供水时间/d
1	滹沱河-磁河	294.34	0.82	41.55
2	滹沱河-沙河(北)	466.53	0.99	54.54
3	滹沱河-唐河	717.03	8.15	10.18
4	滹沱河-放水河	600.11	8.15	12.08
5	滹沱河-蒲阳河	891.44	10.94	12.08
6	滹沱河-岗头隧洞	1044.95	14.22	10.54

表5 第二次试算结果

Tab. 5 Results of the second trial calculation

序号	渠池名称	蓄量/万m ³	分水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	供水时间/d
1	唐河-放水河	133.58	0	-
2	唐河-蒲阳河	291.33	2.79	17.63
3	唐河-岗头隧洞	578.42	2.82	11.03

由表6可知,按照局部分区的方法每个渠池的供水时间,那么对比两种方法在不利渠池的供水时间可以发现,使用优化分区的供水方法识别出沙河(北)-唐河为不利渠池,其供水时间为10.18 d,但是采用局部分区供水方法计算出沙河(北)-唐河的下游供水时间为4.05 d,延长此渠池约6.13 d的时间;通过优化分区的方法识别出第二个不利渠池为蒲阳河-岗头隧洞,供水时间为11.03 d,但是采用局部分区供水方法计算出蒲阳河-岗头隧洞供水时间为5.42 d,优化分区方法相较于局部分区方法延长渠池供水时间约为5.61 d。计算结果见图5所示(图中

滹沱河-磁河、磁河-沙河(北)、沙河(北)-唐河、唐河-蒲阳河和蒲阳河-岗头隧洞分别对应着Pool 1至5)。

表6 局部分区供水时间

Tab. 6 Local partition of water supplying time

序号	渠池名称	蓄量/万m ³	分水流量/(m ³ ·s ⁻¹)	供水时间/d
1	滹沱河-磁河	294.34	0.82	41.55
2	磁河-沙河(北)	172.19	0.17	117.23
3	沙河(北)-唐河	250.50	7.16	4.05
4	唐河-蒲阳河	424.91	2.79	17.63
5	蒲阳河-岗头隧洞	153.51	3.28	5.42

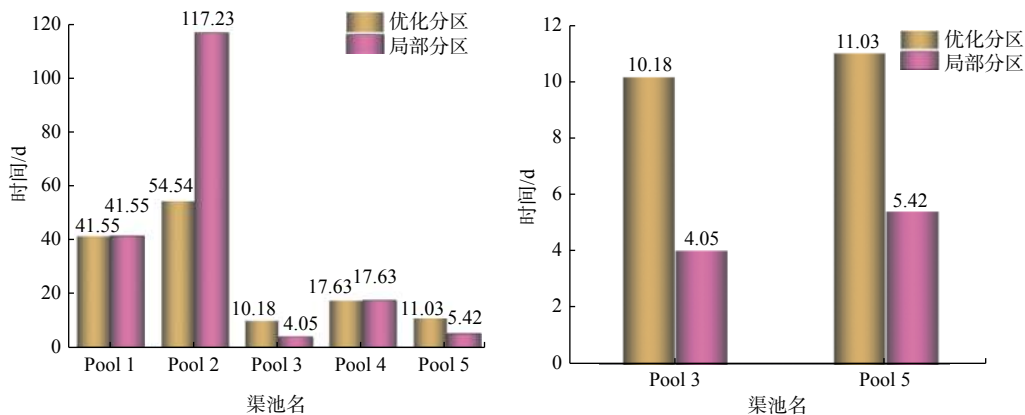


图 5 两种分区方法供水时间及不利渠池供水时间

Fig. 5 Water supply time of the two zoning methods and water supply time of the most unfavorable channel pool

3 结论

本文以渠池工程安全为前提,研究南水北调中线总干渠洩河-古运河段突发水污染事件。针对事故段提出污染物特征值量化方法,快速划分事故段和事故段下游,实现对事故段节制闸的快速调控;针对事故段下游,提出了优化分区方法,相较于传统的局部分区的方法可以明显地延长不利渠池的供水时间。

针对事故段,提出了基于污染物特征值量化方法,通过污染物输移距离、污染物带宽、污染物扩散前锋扩散距离 3 个特征值,概化污染物的扩散过程,生成事故段节制闸的调控策略,从而快速划分事故段和事故段下游,实现突发水污染事故的快速调控。

针对事故段下游,提出了优化分区方法,通过对事故段下游供水时间的试算,识别出不利渠池 [沙河(北)-唐河、蒲阳河-岗头隧洞],并使用局部分区方法计算不利渠池的供水时间,将两种方法的供水时间进行对比,发现优化分区可以延长不利渠池的供水时间分别为 6.13 d、5.61 d。

参考文献 (References):

- [1] YANG H, SHAO D, LIU B, et al. Multi-point source identification of sudden water pollution accidents in surface waters based on differential evolution and Metropolis-Hasting Markov Chain Monte Carlo[J]. *Stock Environ Res Risk Assess*, 2015, 30(2): 1-16. DOI: 10.1007/s00477-015-1191-5.
- [2] HU J, CHU J, LIU J, et al. Risk identification of sudden water pollution on fuzzy fault tree in Beibu Gulf economic zone[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2413-2419. DOI: 10.1016/j.proenv.2011.09.375.
- [3] 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. (RUAN X J, YUAN H Y, WANG C D. Design of irrigation canal automatic control[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(8): 21-25. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2004.08.004.
- [4] 姚雄, 王长德, 李长菁. 基于控制蓄量德渠系运行控制方式[J]. *水利学报*, 2008, 39(6): 733-738. (YAO X, WANG C D, LI C J. Operation model of serial canal system based on water volume control method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(6): 733-738. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.06.015.
- [5] 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.
- [6] MANNINA G, VIBIANI G. A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in river[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(2): 288-299. DOI: 10.2166/wst.2010.285.
- [7] MANNINA G, VIBIANI G. Receiving water quality assessment: Comparison between simplified and detailed integrated urban modelling approaches[J]. *Water Science and Technology*, 2010, 62(10): 2301-2312. DOI: 10.2166/wst.2010.404.
- [8] FAN F M, FLEISCHMANN A S, COLLISCHONN W, et al. Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 64: 58-71. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.11.012.
- [9] TANG C H, YI Y J, et al. Water pollution risk simulation and prediction in the main canal of the South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydrolo-*

- gy, 2014, 519: 2111-2120. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2014.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.010).
- [10] 齐于顺,刘仁志,张启月,等.长江干流铜陵段突发水污染情景模拟分析[J].*环境工程技术学报*,2022,12(2):607-614.(QI Y S,LIU R Z,ZHANG Q Y,et al.Scenario simulation analysis of abrupt water pollution in Tongling section of the mainstream of the Yangtze River[J].*Journal of Environmental Engineering Technology*,2022,12(2):607-614.(in Chinese))DOI:[10.12153/j.issn.1674-991X.20210662](https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210662).
- [11] 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.(HANG H Y,MAO W Y,F J,et al.Study on water dispatching scheme of the first phase of middle route of South-to-North Water Transfer Project[J].*Yangtze River*,2010,41(16):8-13.(in Chinese))DOI:[10.16232/j.cnki.1001-4179.2010.16.005](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2010.16.005).
- [12] 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*,2013,46(1):44-50.(LIAN J J,WANG X,LIU C Y,et al.Emergency regulation and control of sudden water pollution in long distance open channel water conveyance project[J].*Journal of Tianjin University*,2013,46(1):44-50.(in Chinese))
- [13] 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 X P,LIAN J J,LIU H H.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))DOI:[10.3969/j.issn.0493-2137.2008.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.0493-2137.2008.05.002).
- [14] 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*,2014,12(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*,2014,12(2):133-136.(in Chinese))DOI:[10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.031](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.031).
- [15] 聂艳华,黄国兵,崔旭,等.南水北调中线工程应急调度目标水位研究[J].*南水北调与水利科技*,2017,15(4):198-202.(NIE Y H,HUANG G B,CUI X,et al.Research on the target water level in emergency dispatch of the South-to-North Water Transfer Project[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2017,15(4):198-202.(in Chinese))DOI:[10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.032](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.032).
- [16] 树锦,袁健.大型输水渠道事故工况的水力响应及应急调度[J].*南水北调与水利科技*,2012,10(5):161-165.(SHU J,YUAN J.Hydraulic response and emergency dispatch under abnormal operation modes of large-scale water diversion channel[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2012,10(5):161-165.(in Chinese))DOI:[10.3724/SP.J.1201.2012.05161](https://doi.org/10.3724/SP.J.1201.2012.05161).
- [17] 王浩,雷晓辉,尚毅梓.南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J].*南水北调与水利科技*,2017,15(2):1-8.(WANG H,LEI X H,SHANG Y Z.Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the middle route of South-to-North Water Transfer Project[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2017,15(2):1-8.(in Chinese))DOI:[10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001).
- [18] 杨星,崔巍,穆祥鹏,等.南水北调中线总干渠Ⅲ级水污染应急处置水力调控方案研究[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 III 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))DOI:[10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0034](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0034).
- [19] 王浩,王建华.中国水资源与可持续发展[J].*中国科学院院刊*,2012,27(3):352-358,331.(WANG H,WANG J H.Sustainable utilization of China's water resources[J].*Bulletin of Chinese Academy of Sciences*,2012,27(3):352-358,331.(in Chinese))DOI:[10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.014).
- [20] 蒋云钟,赵红莉,董延军,等.南水北调中线水资源调度关键技术研究[J].*南水北调与水利科技*,2007(4):1-5.(JIANG Y Z,ZHAO H L,DONG Y J,et al.Key technology research of water resources operation for middle route Project of South-to-North Water Diversion Project[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2007(4):1-5.(in Chinese))DOI:[10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.04.005](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.04.005).
- [21] 王颀.“南水北调”的工程学意义[J].*河南水利与南水北调*,2016(8):27-28,49.(WANG D.The engineering significance of "South-to-North Water Diversion"[J].*Henan Water Conservancy and South-to-North Water Transfer*,2016(8):27-28,49.(in Chinese))
- [22] 陈翔,雷晓辉,蒋云钟,等.南水北调中线决策会商与应急响应系统设计研究[J].*水利信息化*,2015(2):5-9.(CHEN X,LEI X H,JIANG Y Z,et al.Design and implementation of decision-support and emergency response system for middle route Project of South-to-North Water Diversion Project[J].*Water Resources Informatization*,2015(2):5-9.(in Chi-

- nese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-9405.2015.02.002.
- [23] 钟名军, 李兰, 张俐, 等. 数字水环境管理系统和数字水质预警预报系统集成[J]. *中国农村水利水电*, 2005(12): 20-22. (ZHONG M J, LI L, ZHANG L, et al. Integration of digital water environment management system and digital water quality warning and forecast system[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005(12): 20-22. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2005.12.008.
- [24] 龙岩, 徐国宾, 马超. 同、异步闭闸调控下污染物的输移扩散特征[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 709-714. (LONG Y, XU G B, MA C. Pollutant transport rules under synchronous control and asynchronous control[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2): 709-714. (in Chinese)) DOI: 10.12030/j.cjee.201509162.
- [25] 龙岩. 长距离输水工程突发水污染事件应急调控决策体系研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (LONG Y. Emergency control decision system for sudden water pollution accidents in long distance water transfer projects[D]. Tianjing: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [26] 梁建奎, 龙岩, 郭爽. 南水北调中线突发水污染应急调控策略研究[J]. *海河水利*, 2021(6): 33-36. (LIANG J K, LONG Y, GUO S. Research on the emergency control strategy of water pollution emergencies in the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Haihe Water Resources*, 2021(6): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7328.2021.06.008.
- [27] 孔令仲, 王浩, 雷晓辉, 等. 基于线性预测控制算法的明渠实时控制研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 326-334. (KONG L Z, WANG H, LEI X H, et al. Research on real-time control of open canal based on linear predictive control method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(3): 326-334. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190505.

Sudden water pollution accident section and downstream emergency control of open channel

CHEN Mingrui¹, JIN Yanguo², LIU Shuang², ZHANG Zhao³, LEI Xiaohui^{1,3}, ZHU Jie⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Construction Administration Bureau of South-to-North Water Transfer Middle Route Project, Beijing 100038, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The middle route of the South-to-North Water Transfer Project is an important source of water for Henan, Hebei, Tianjin, and Beijing, directly benefiting 60 million people. However, water pollution occur frequently in recent years, which not only bring immeasurable impact on the environment but also threaten social and economic development, causing people to worry about the water safety of the open channel water transfer project.

Accorded to the demand for emergency regulation and control of sudden water pollution in an open channel, the emergency regulation and control strategies of the accident section and downstream of the accident section are studied. The decision-making of emergency control includes: analyzing the diffusion process of pollutants by a quantitative method of pollutant characteristic parameters, dividing the accident section and downstream of the accident section, and calculating the duration of the whole emergency incident by quantitative method for the accident section. Given the downstream of the accident section, the method of optimizing partition is adopted to identify the unfavorable channel pool and close the control gate downstream of the unfavorable channel pool, and to extend the water supply time of the whole downstream of the accident section.

Taking the Xiaohe River control gate - Guyun River as an example, the research results are as follows: Utilizing quantization of pollutant characteristic parameters, the accident section is identified as the Xiaohe River control gate - Hutuo River control gate, Hutuo River control gate - Gangtuo Tunnel control gate downstream of the accident section. The duration of the emergency in the accident section was 7.9 h. Downstream of the accident section, two unfavorable drainage pools were identified by optimizing the zoning method, and the water supply time of unfavorable drainage pools was extended 6.13 d and 5.61 d.

Key words: sudden water pollution; emergency control; pollutant characteristic parameter; optimized partition; water supplying time