

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0087

刘孟凯,关惠,黄明海.封冻期渠系运行方式[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):195-201. LIU M K, GUAN H, HUANG M H. Operation mode of canal system in freezing period[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 195-201. (in Chinese)

## 封冻期渠系运行方式

刘孟凯<sup>1</sup>,关惠<sup>1</sup>,黄明海<sup>2</sup>

(1. 武汉科技大学 管理学院,武汉 430081;2. 长江科学院,武汉 430010)

**摘要:**为研究系运行方式与冰塞二者之间的关系,以流速、傅汝德数、水位偏差等参数作为指标,在常规运行方式选择方面,认为上游常水位运行造成的冰塞风险最小,下游常水位运行在封冻时闸门调控及时,等体积运行方式中庸;封冻渠池在封冻时,该渠池运行方式由下游常水位切换为等体积,造成渠系的水位偏差、水力响应过程中的最大流速与傅汝德数等指标均较始终保持下游常水位小,模拟工况下的上游水位偏差减小近50%,最大流速降低约6.5%,表明运行方式切换更有利于维持渠系在封冻时的稳定和减小冰塞风险。因此,推荐封冻渠池在封冻时由下游常水位切换至等体积运行。

**关键词:**调水工程;冰期输水;运行方式;冰塞;风险防控

中图分类号:TV91 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Operation mode of canal system in freezing period

LIU Mengkai<sup>1</sup>, GUAN Hui<sup>1</sup>, HUANG Minghai<sup>2</sup>

(1. School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;  
2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In order to study the relationship between the operation mode of the system and the ice jam, the parameters such as flow rate, Froude number, and water level deviation are taken as indexes. In terms of the selection of conventional operation mode, it is considered that the risk of ice jam caused by the operation of the upstream constant water level is the least, the adjustment and control of the gate during the operation of the downstream constant water level is timely, and the equal volume operation mode is moderate. When the frozen canal pool is frozen, the operation mode of the canal pool is changed from the downstream constant water level to the equal volume, resulting in the water level deviation of the canal system. The maximum velocity and the Froude number in the hydraulic response process are smaller than those in the downstream constant water level. The water level deviation in the upstream under simulated conditions decreases by nearly 50% and the maximum velocity decreases by approximately 6.5%, respectively. This indicates that switching operation mode is more conducive to maintaining the stability of the canal system during freezing and reducing the risk of an ice jam. Therefore, it is recommended that the frozen canal pool be switched from the downstream constant water level to the equal volume operation during the frozen period.

**Key words:** water diversion project; ice age water transport; operation mode; ice jam; risk prevention and control

收稿日期:2019-08-04 修回日期:2019-12-20 网络出版时间:2020-01-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20200109.1240.002.html>

基金项目:国家自然科学基金(51779196;51309015)

作者简介:刘孟凯(1984—),男,河北沧州人,副教授,博士,主要从事工程管理研究。E-mail:mengkailiu@wust.edu.cn

南水北调中线工程总干渠长 1 432 km(含天津段干渠 155 km), 全程由南至北自流, 由 64 座节制闸控制, 渠系通水后的运行管理将采用中央集中自动化控制模式<sup>[1]</sup>。冰塞风险是工程冬季运行面临的重要风险, 威胁工程安全和沿线居民生命财产安全。黄国兵等<sup>[2]</sup>通过原型观测发现南水北调中线工程某节制闸前于 2016 年 1 月 23 日发生严重冰塞, 冰塞体厚度 1.5~2.3 m, 范围为该节制闸至其上游渡槽出口, 长度约为 900 m。

冰塞是指封冻冰盖下面, 大量冰花堆积, 堵塞了部分水道断面, 造成上游水位壅高的现象<sup>[3]</sup>。可以看出, 冰塞是由于上游来冰花在冰盖前沿下潜后在适当的水力条件下不断堆积形成的, 下潜冰花是冰塞体的冰量来源, 可以说控制了冰花下潜量, 即可控制冰塞体是否产生及规模大小。

国内外相关学者非常关注冰块下潜临界指标, 目前常采用的是流速和傅汝德数指标。当指标值小于第一临界指标时, 封冻形式为平封; 当指标介于第一和第二临界指标之间时, 封冻形式为立封; 当指标大于第二临界指标时, 封冻范围停止增长, 来冰下潜形成冰塞。对于冰塞形成的临界条件, Kivisild<sup>[4]</sup>认为临界傅汝德数在 0.06~0.1 变化, 孙肇初<sup>[5]</sup>认为临界傅汝德数近似为 0.09; 在渠道冰期运行安全方面, 陈文学等<sup>[6]</sup>将渠道内水流流速不超过 0.6 m/s 作为冰期输水的水力控制指标之一, 段文刚等<sup>[7]</sup>通过原型观测总结渠池上游控制断面平均流速  $V \leq 0.40$  m/s, 下游控制断面平均流速  $V \leq 0.35$  m/s, 上游控制断面  $Fr \leq 0.065$ , 下游  $Fr \leq 0.055$ 。

无论流速指标还是傅汝德数指标的大小均跟渠道输水流量和运行水位有关。在恒定流量下, 只和运行水位有关。影响渠系水位的因素为渠系运行方式, 渠道常用运行方式包括下游常水位、等体积和上游常水位<sup>[8]</sup>, 3 种运行方式的控制点分别为控制点 1、控制点 2 和控制点 3, 见图 1。整体而言, 3 种运行方式下的渠道水深均呈现自上游至下游逐渐增大的趋势, 断面流速与傅汝德数均呈现自上游至下游逐渐减小的趋势。因此, 在渠系冬季运行时, 控制渠池上游水力指标小于冰塞产生临界条件可减小冰塞形成风险。

在渠系冰期输水运行控制方面, 颜炳池<sup>[9-10]</sup>、郭新蕾等<sup>[11]</sup>分别通过原型观测、数值模拟对南水北调中线冰情(水温、结冰范围、封冻过程和水位波动)进行了预测分析; 徐冬梅等<sup>[12]</sup>在总结冰期运行工作经验的基础上, 提出了冰期输水调度策略; 黄国兵等<sup>[2]</sup>、刘建军等<sup>[13]</sup>总结了长距离输水渠道冰情生消

演变的基本规律, 并提出了防护措施; 穆祥鹏等<sup>[14-16]</sup>利用渠系冰期输水运行控制模型, 揭示了在控制器作用下的中线冰期输水特性; 杨开林等<sup>[17]</sup>研究了开河特点及冰凌灾害控制方法, 提出了在明渠中形成稳定初始冰盖的临界水力条件; 赵新等<sup>[18-20]</sup>重点研究了输水工程冰期输水能力和冰害防控措施; 刘孟凯等<sup>[1, 21-22]</sup>对不同冰情阶段的渠系水力响应进行了分析, 并提出了减小水力响应幅度的方法。

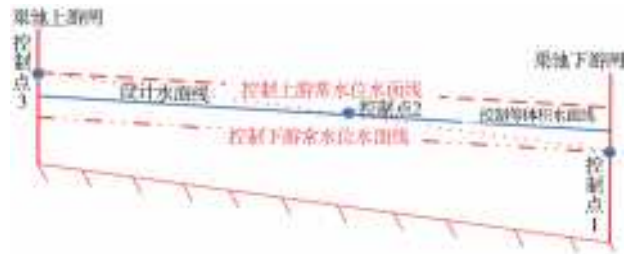


图 1 运行方式示意图

Fig. 1 Sketch of operation mode

相关冰期输水研究主要基于下游常水位运行开展。以南水北调中线工程总干渠京石段为研究对象, 在分析运行方式对冰塞形成临界水力条件影响的基础上, 探讨封冻期渠系冰期输水运行方式切换造成的渠系水力响应特性, 通过选择更有利于维持封冻期水面稳定和冰盖完整性的渠系运行方式, 达到降低冰塞冰坝形成可能性的目的。

## 1 运行方式对比

### 1.1 数学模型

将渠系看成为由闸门分隔而成的多个渠池组成, 每个渠池由上游闸、下游闸和两者之间渠道组成, 见图 2, 其中,  $Q_{out}$  和  $Q_{down}$  均为已知的取水流量计划。稳定输水状态下, 相关变量存在如式(1)和(2)的关系<sup>[23]</sup>。

$$Q_u(i) = Q_d(i) + Q_{out}(i) \quad (1)$$

$$Q_d(i) = Q_u(i+1) \quad (2)$$

模型采用明渠非恒定流方程模拟渠系在形成浮动冰盖和明渠流状态下的水力响应, 控制方程<sup>[21]</sup>如下: 连续方程为

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

动量方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left( gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial x} = q(v_\phi - u) + \frac{BQ^2}{A^2} \left( s + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_h \right) - \frac{gQ^2}{AC^2R} \quad (4)$$

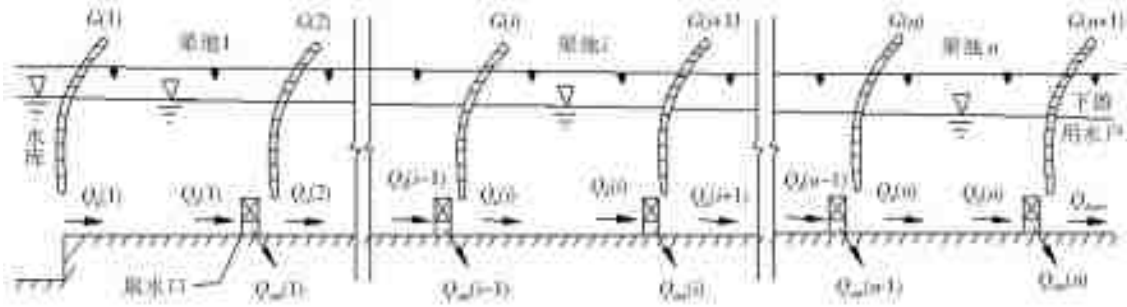
式中:  $Z$  为水位, m;  $h$  为水深, m;  $Q$  为流量,  $m^3/s$ ;  $B$  为水面宽, m;  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $C$  为谢才系

数;  $t$  和  $x$  分别为时间变量和空间变量;  $q$  为区间入流量,  $m^3/s$ ;  $v_q$  为侧向入流在水流方向的平均流速,  $m/s$ , 常忽略不计;  $u$  为水流沿轴线方向的流速,  $m/s$ ;  $S$  为渠道底坡;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $R$  为水力半径,  $m$ 。

对于棱柱形渠道

$$\frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_h = 0$$

当渠道内形成浮动冰盖, 有冰盖部分的渠道湿周和糙率均包含冰盖的影响<sup>[24]</sup>。求解时以每个渠道上游闸和下游闸过闸流量为双边界条件, 采用 Pressman 四点隐式差分求解。



注:  $G(i), i=1, 2, 3, \dots, n$  为闸门编号,  $Q_{down}$  为渠系下游末端需水流量,  $Q_d$  为渠道下游闸的过闸流量,  $Q_i$  为渠道上游闸的过闸流量,  $Q_{out}$  为渠道内总的取水流量。

图 2 渠系概化示意图

Fig. 2 Sketch of the controlled canal system

本文模型在渠系应对封冻时, 采用增量式 PI 控制器, 由控制断面处的实时水位波动, 通过反馈环节产生该渠道上游端节制闸的闸门流量调节时段增量<sup>[23]</sup>为

$$\Delta Q = K_p (Y_T - Y_F) + K_i \int_0^t (Y_T - Y_F) dt \quad (5)$$

式中:  $Y_F$  为实时水位;  $Y_T$  为目标水位;  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分系数。

本模型框架见图 3, 其中考虑研究背景工程具有借助寒潮而在夜间快速形成大范围封冻的特征, 且假设流冰对非恒定流过程影响可以忽略, 因此, 模型不考虑流冰过程模拟, 仅用于模拟部分范围内快速形成冰盖的渠系水力响应情况。

### 1.2 模拟基本条件

采用的模拟渠系为南水北调中线工程总干渠京石段, 起点为石家庄古运河节制闸, 终点为河北省段渠道终点, 输水线路长 227.4 km, 见图 4。



图 3 模型思路

Fig. 3 Model calculation process

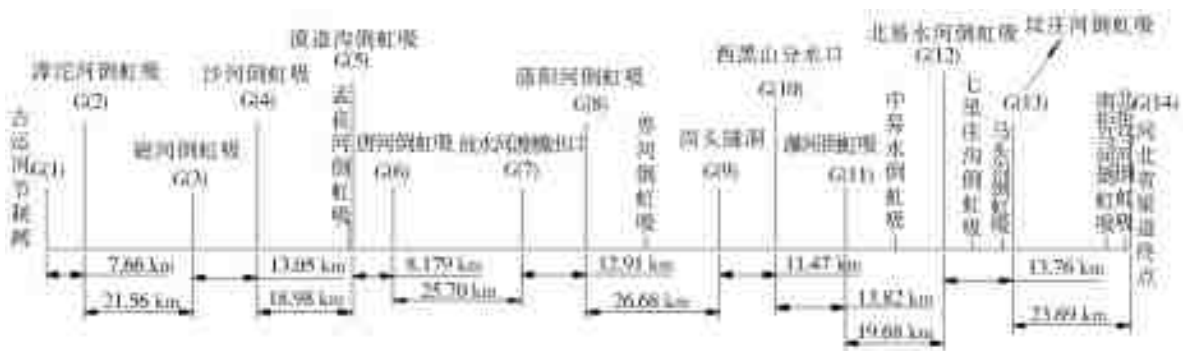


图 4 京石段示意图

Fig. 4 Sketch map of Beijing-Shijiazhuang section

本文模拟分析所采用的京石段各渠池过闸流量分配见表 1。

表 1 过闸流量目标状态

Tab. 1 Target state of over-gate flow

闸门编号	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13
过闸流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	50	50	50	50	30	30	30	30	20	20	20	20

## 2 运行方式水力条件对比

### 2.1 运行方式对封冻形式判定指标影响

假定渠系在同一输水流量状态下,分别采取下

游常水位、等体积和上游常水位,控制点均为控制断面设计水位,各渠池最大流速和傅汝德数指标见图 5。可见,同一渠池在 3 种运行方式作用下,其流速和傅汝德数 2 个指标随着运行方式选择下游常水位、等体积和上游常水位而不断减小,其中,下游常水位运行方式下,部分渠池流速和傅汝德数指标均超过临界指标,渠道将面临冰塞风险,威胁输水安全。因此,对于 3 种运行方式,若采用上游常水位,流速指标最小,形成冰塞的风险最小,然后依次为等体积和下游常水位。

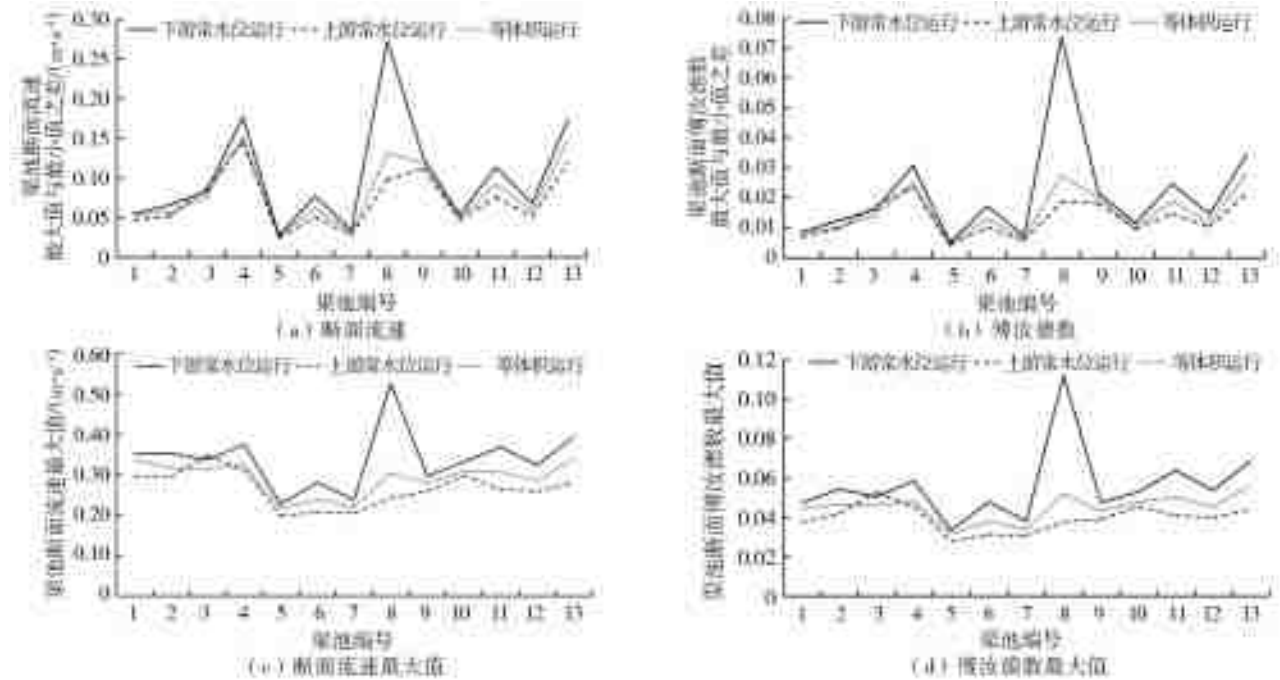


图 5 运行方式对封冻指标影响

Fig. 5 Effect of operation made on frozen index

### 2.2 运行方式对渠系响应及时性影响

南水北调中线工程总干渠由南至北整体布局,下游渠池往往先于上游渠池开始流冰和封冻,渠道封冻或产生冰塞会对附近断面产生水力影响,这个影响会随水波引起更远断面的水力响应。

根据图 6 的渠系运行控制思路,对于 3 种运行方式而言,若采用下游常水位,渠池下游端封冻引起的水力响应会早于其他 2 种运行方式传输给传感器,上游闸门会及时做出响应平稳水流、保持输水流量。

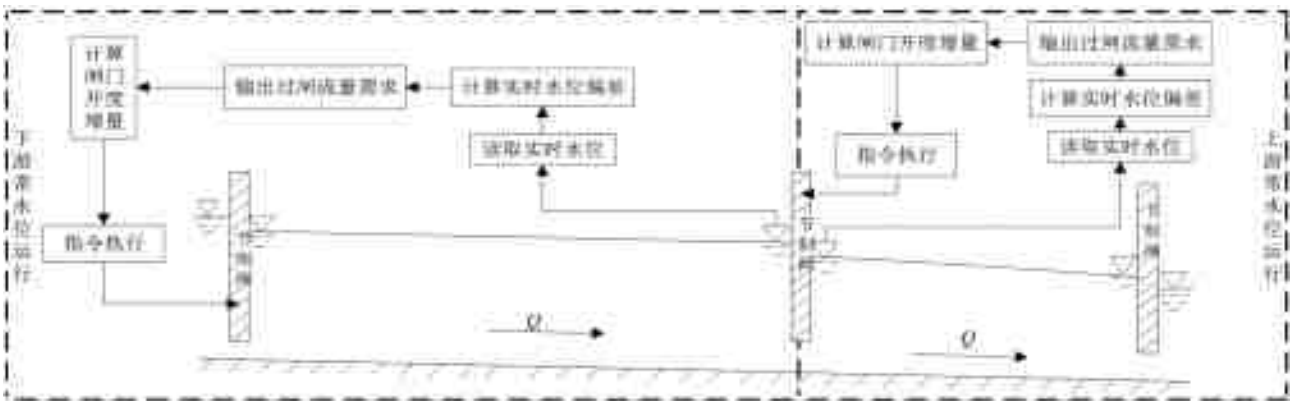


图 6 渠系运行控制思路

Fig. 6 Thoughts on operation control of canal system

以京石段第 13 渠池下游于模拟开始第 1 h 后形成长 11 km、厚 2 cm 的冰盖为例,模拟得到京石段 13 个节制闸首次操作时间见图 7,下游常水位较上游常水位因封冻造成的渠系响应更为及时,13 号闸门首次响应时间分别为 1.25 h 和 1.75 h,这样差异在封冻上游渠池不断放大。因此,从响应及时性而言,下游常水位最优,等体积、上游常水位依次次之。

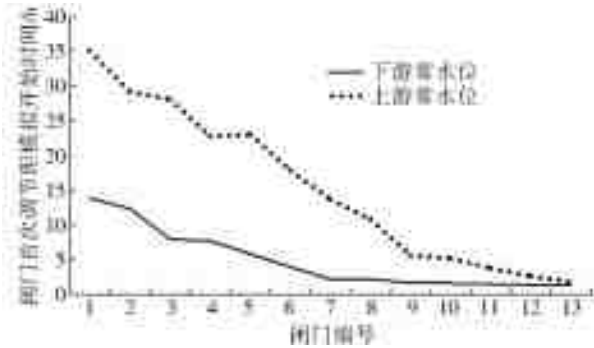


图 7 闸门首次响应时间  
Fig. 7 First response time of gate

通过上述分析可知:选择上游常水位运行时,流速较小,有利于减小出现冰塞的风险,但水力响应的反应速度较慢,水力波动大,不利于各分水口的稳定取水及渠道及建筑物的安全;选择下游常水位运行时,能对流量变化做出快速响应,但流速指标与傅汝德数指标大,输水安全存在隐患;等体积运行方式较为中庸。

### 3 封冻期运行方式切换分析

基于渠系不同运行方式对冰期输水具有上述影响,考虑南水北调中线总干渠按下游常水位运行状态设计与运行,本文仅将下游常水位和等体积纳入冰期输水考虑范围。本节分析封冻时,封冻渠池由下游常水位切换为等体积运行状态对渠系水力响应及冰塞防控影响,探讨运行方式切换的可行性,其中要求非封冻渠池仍保持初始运行方式不变。本部分未考虑冰盖的形成过程和水位波动可能造成的已有冰盖破碎可能性,而是从运行方式角度,以水位波动

最小为运行方式选取指标,认为水位波动更小,对减小冰塞形成和冰盖破坏可能性有利。

模拟工况设定为渠池 13 在模拟开始 1 h 后短时间内形成覆盖整个渠池水面、厚 2 cm 的冰盖,且新生冰盖糙率在模拟时段始终为 0.015,与渠道糙率相同;PI 控制器参数  $K_p$  取 0,  $K_i$  取 0.4;封冻前的渠系 13 个渠池的运行方式均为下游常水位,但第 13 渠池封冻后,仅该渠池考虑下游常水位和等体积两种运行方式切换。

#### 3.1 稳定状态对比

在封冻瞬间切换该渠池运行状态为等体积后的稳定水位、流速、傅汝德数见图 8、9,可见:封冻条件下,若采用下游常水位运行,即不切换运行方式,渠池为了维持原有的目标输水流量,必然造成渠池上游闸后水位抬升约 20 cm,抬升值随输水流量、冰盖糙率、冰盖厚度增大而增大;若在封冻时刻,切换封冻渠池为等体积运行方式时,渠池水位较不切换时整体下降,渠池上游降低 8 cm,渠池下游降低 12 cm;因渠池切换运行方式,稳定状态后的渠池流速和傅汝德数均较不切换大,但无论是否切换运行方式,封冻后的流速和傅汝德数均较封冻前减小。对于部分渠池封冻,也存在上述规律。可见,从稳定状态考虑,封冻对渠池冰塞防控有利,且下游常水位较等体积运行方式有利。

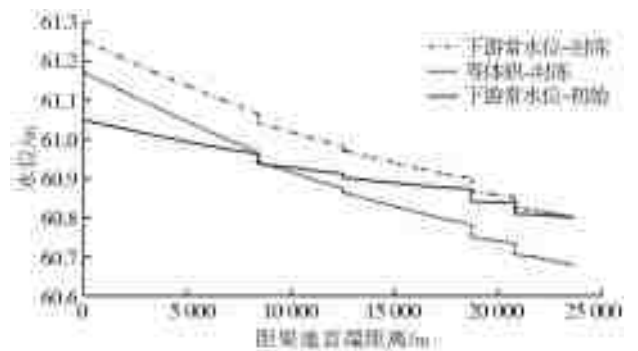


图 8 封冻造成的稳定水位对比  
Fig. 8 Contrast of stable water level caused by freezing

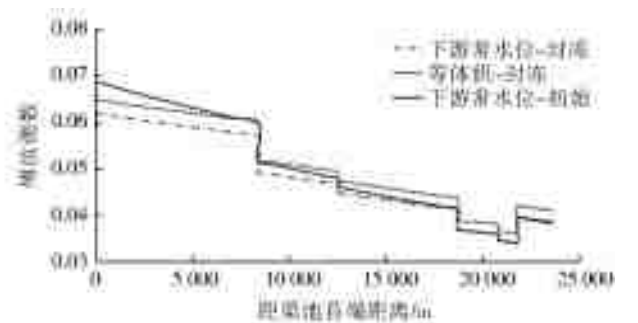
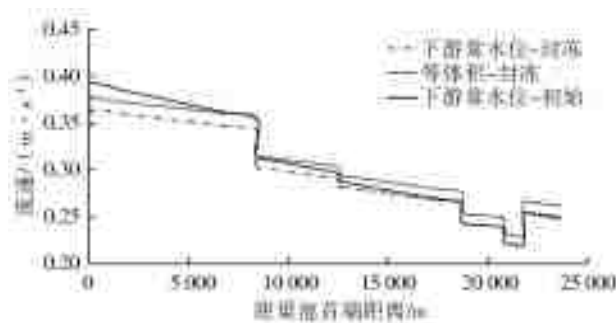


图 9 封冻造成的稳定阶段水力指标对比

Fig. 9 Hydraulic index contrast in stable stage caused by freezing

### 3.2 水力过程对比

在封冻阶段,渠系继续保持下游常水位运行方式和切换为等体积运行方式对应的水力响应过程模拟结果见图 10、11,其中水位偏差是指模拟实时水位偏离初始稳定水位,正值表示水位上升,负值表示水位降低。结果显示:下游常水位运行造成渠池 13 水位波动最大,封冻对上游渠池影响逐渐减小,对渠池 1 水力响应无影响,渠池 13 上游最大水位偏差约为 23 cm,下游水位最大偏差约为 -9 cm;封冻渠池及时切换为等体积时,渠池 13 最大水位偏差降低为

12 cm,下游水位最大偏差约 -12 cm,但较下游常水位 -9 cm 偏离较小,且封冻对上游其他渠池的影响也较下游常水位小;从流速角度,渠池 13 各断面在水位波动过程中,等体积运行方式造成的断面最大流速较下游常水位小,见图 12,若采用下游常水位,在渠池 13 封冻过程中,渠池上游约 8 km 范围均超过 0.4 m/s 控制条件,而采用等体积则未出现该现象。因此,考虑冰塞容易形成于渠池封冻过程中,渠池封冻时切换为等体积对冰塞风险防控非常有利。

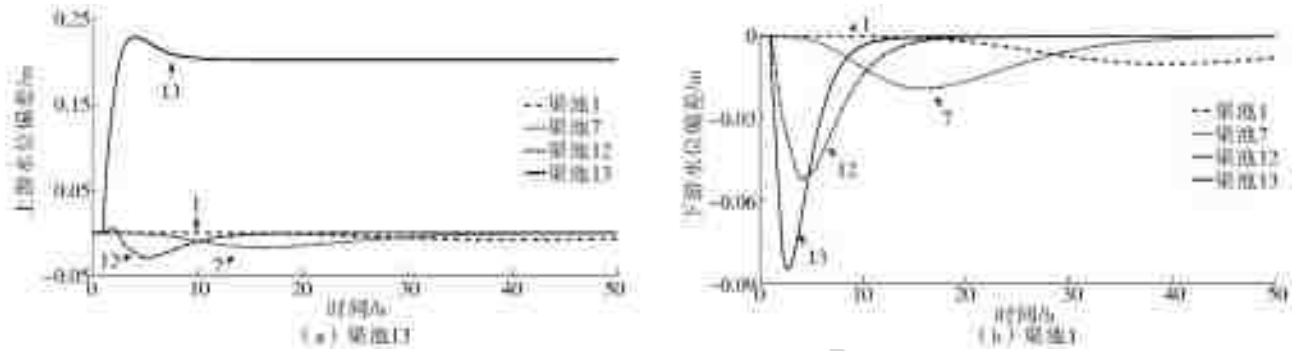


图 10 下游常水位运行结果

Fig. 10 Operation results of downstream constant water level

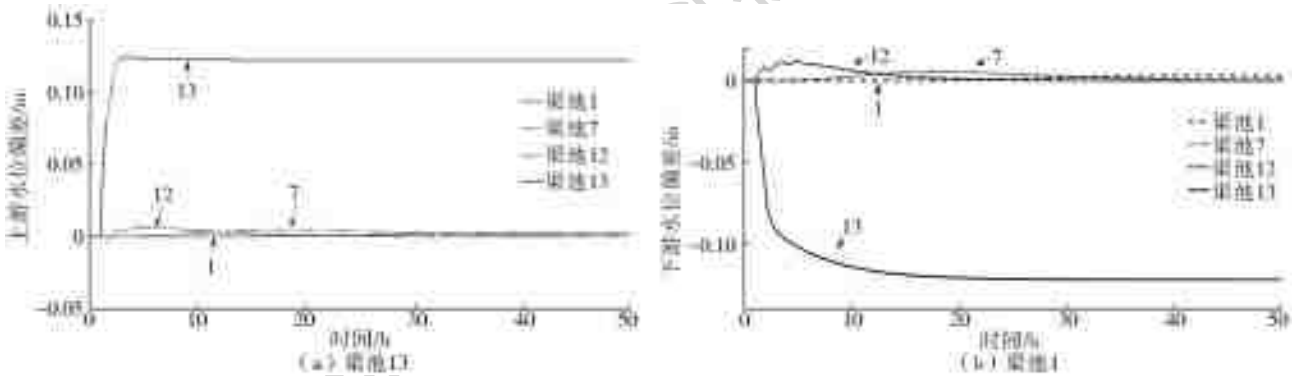


图 11 切换为等体积运行结果

Fig. 11 Equal volume operation result

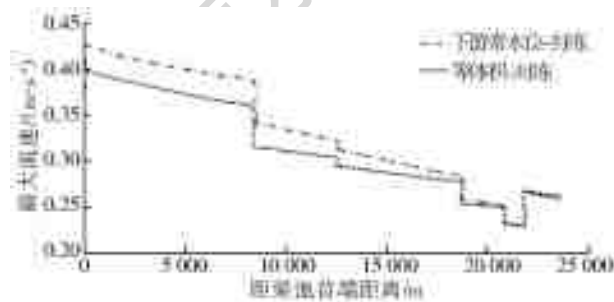


图 12 水力响应过程中各断面最大流速

Fig. 12 Maximum flow velocity of each section in the process of hydraulic response

同运行方式对冰塞风险防控的影响和将封冻渠池运行方式由下游常水位切换为等体积运行时对冰塞风险防控的影响,结果表明:常规运行方式选用等体积运行方式可综合考虑降低冰塞风险和封冻期间闸门调控及时性;若常规运行方式为下游常水位,可在封冻渠池封冻时,将该渠池运行方式切换为等体积,可有效降低因封冻造成的水位偏差和水力响应过程中的最大流速,对冰塞风险防控更为有利。

#### 参考文献:

[1] 刘孟凯,邢领航,黄明海,等.长距离渠系融冰期自动化控制模式研究[J].水利学报,2013,44(9):1080-1086. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2013.09.017.  
 [2] 黄国兵,杨金波,段文刚.典型长距离调水工程冬季冰

### 4 结论

本文采用数值模拟方法,以南水北调中线工程总干渠京石段为例,探讨了在常规运行阶段选用不

- 凌危害调查及分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 144-149. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2019. 0020.
- [3] SL 59—2015. 河流冰情观测规范[S].
- [4] KIVISILD H R. Hydrodynamic analysis of ice floods [C]//Proc. , 8th IAHR Congress, Delft, The Netherlands, 1959.
- [5] 孙肇初. 中国寒冷地区水力学的近代发展[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1990, 13(4): 97-105.
- [6] 陈文学, 刘之平, 吴一红, 等. 南水北调中线工程运行特性及控制方式研究[J]. 南水北调与水利科技 2009, 7(6): 8-12, 41. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 003.
- [7] 段文刚, 黄国兵, 杨金波, 等. 长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 96-104. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 06. 017.
- [8] 美国内务部垦务局. 现代灌区自动化管理技术实用手册[M]. 高占义, 谢崇宝, 程先军, 译. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 颜炳池. 南水北调(中线)冰期输水冰情分析[J]. 河南水利与南水北调, 2014(11): 51-52.
- [10] 颜丙池. 南水北调冰期输水原型观测与研究[J]. 河北水利水电技术, 2002(2): 41-42. DOI: 10. 19733/j. cnki. 1672-9900. 2002. 02. 034.
- [11] 郭新蕾, 杨开林, 付辉, 等. 南水北调中线工程冬季输水冰情的数值模拟[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1268-1276. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 11. 007.
- [12] 徐冬梅, 辛悦, 王文川, 等. 南水北调中线京石段冰期输水规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 168-172. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2015. 01. 038.
- [13] 刘建军, 滕丽娟, 刘嘉伟. 南水北调中线干渠冰期输水冰情分析及冰害防治措施[J]. 水科学与工程学报, 2015(3): 26-28. DOI: 10. 19733/j. cnki. 1672-9900. 2015. 03. 010.
- [14] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 长距离输水渠道冰期运行控制研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 8-13. DOI: 10. 3969/ j. issn. 1672-1683. 2010. 01. 003.
- [15] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线工程冰期输水特性研究[J]. 水利学报, 2011, 42(11): 1295-1301. DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2011. 11. 019.
- [16] 穆祥鹏, 陈文学, 崔巍, 等. 南水北调中线干渠冰期输水能力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 118-122. DOI: 10. 3969/ j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 028.
- [17] 杨开林, 王涛, 郭新蕾, 等. 南水北调中线冰期输水安全调度分析[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(2): 1-4, 8. DOI: 10. 3724/ SP. J. 1201. 2011. 02001.
- [18] 赵新. 大型输水工程冰期输水能力与冰害防治控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. DOI: 10. 7666/d. D285926.
- [19] 赵新, 张雅卓, 王旭. 融冰期加厚冰盖糙率物理模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 4-6, 26. DOI: 10. 3724/ SP. J. 1201. 2012. 03004.
- [20] 赵新, 张雅卓, 王旭. 加厚冰盖渗流对渠道输水能力的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 7-9, 13. DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2012. 04007.
- [21] LIU M K, FENG X B, WANG C D, et al. Regulating a long-distance canal system with floating ice cover in the winter[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2015, 29(1): 4014009. 1-4014009. 22.
- [22] 刘孟凯, 冯晓波, 王长德. 2 步法改善长距离渠系结冰盖期的水力响应[J]. 华中科技大学学报(自然科学版). 2011, 39(7): 99-103. DOI: 10. 13245/j. hust. 2011. 07. 023.
- [23] 刘孟凯, 莫庸, 杨佳, 等. 暴雨条件下的长距离渠系水力响应特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 151-157. DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180023.
- [24] 魏良琰, 黄继忠. 冰盖流阻力与综合 Manning 糙率[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4): 1-8. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-8844. 2002. 04. 001.