

陈维江, 左丽, 黄明海, 等. 南水北调中线工程总干渠冬季大流量输水水温调控措施[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1064-1071, 1079. CHEN W J, ZUO L, HUANG M H, et al. Control measures of water temperature of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project main channel with large discharge in winter[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1064-1071, 1079. (in Chinese)

# 南水北调中线工程总干渠冬季大流量输水 水温调控措施

陈维江<sup>1</sup>, 左丽<sup>1</sup>, 黄明海<sup>2</sup>, 吴永妍<sup>3</sup>, 高森<sup>4</sup>

(1. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036; 2. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430010; 4. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100036)

**摘要:** 为保障南水北调中线工程冬季输水安全, 利用建立的总干渠全线一维水温模型, 针对 350、280、210 和 150 m<sup>3</sup>/s 这 4 种不同输水流量方案, 模拟分析各方案在强冷冬、冷冬、平冬和暖冬等典型冬季气象条件下总干渠冬季输水保温效果, 在此基础上提出总干渠冬季无冰盖大流量输水水温调控措施。结果表明: 针对不同典型冬季气象条件, 在有限条件下采取无冰盖大流量输水调度运行方式, 可不同程度缩短输水流动时长、减少沿程水体热量损失, 从而达到保温效果; 在各典型冬季年份气象条件下, 随着总干渠输水流量增大, 沿程水温比降相应减缓, 明渠末端水温相应提升; 在冬季气象条件适宜情况下, 总干渠冬季采取无冰盖大流量输水水温调控措施, 既有利于减小水温降幅, 同时也可有效解决冬季输水能力受限问题; 建议根据总干渠中短期气温预报和水温预测情况, 在冷冬、平冬和暖冬等典型冬季气象条件下尽可能采取较大输水流量输水模式, 在强冷冬气象条件下可分时段、分渠段采用无冰盖大流量输水模式。

**关键词:** 南水北调中线工程; 无冰盖输水; 大流量; 保温措施; 数值模拟

**中图分类号:** TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2023.0103

南水北调中线工程总干渠在冬季冰盖输水调度方式下的输水能力受限, 是制约南水北调中线工程充分发挥国家水网骨干工程效益的关键影响因素之一。在保障总干渠冬季输水安全前提下, 在更长的时段和渠段范围采用无冰盖大流量输水调度方式, 是提升总干渠冬季输水能力和充分发挥输水效益的重要措施, 其中通过大流量输水调控总干渠全线渠道水温, 减缓总干渠冬季输水水温降低、保障渠道不出现冰害, 是实现无冰盖大流量输水调度的关键技术瓶颈之一。

高寒地区长距离明渠冬季输水调度方式主要有无冰盖输水(即输冰输水)、冰盖输水<sup>[1]</sup>, 目前大型输水工程多采用冰盖输水运行方式。北美和北欧河流、俄罗斯几大运河, 以及我国的南水北调、京密引水、引黄济青、引黄济津等工程在冬季均采用冰盖

下输水方式<sup>[2]</sup>。张志学<sup>[3]</sup>针对新疆某小型引水工程, 在明渠冬季运行出现结冰的情况下, 通过分析输冰输水和冰盖输水两种主要输水方式的适用性, 合理选择明渠冬季输水方式, 保证明渠冬季安全可靠运行。穆祥鹏等<sup>[4]</sup>认为通过热力学控制技术抑制或减少冰花的生成, 是实现我国北方高纬度地区某大型长距离输水工程冰期无冰盖输水的关键。席燕林<sup>[5]</sup>通过大量工程资料收集和类似工程经验分析, 指出输冰输水运行是长距离明渠引水式电站冬季运行的一种主要方式, 目前在运行的工程大部分都采取这种方式, 但实际运行中的控制难度很大。

渠道水温是长距离明渠冬季输水调度方式选择的重要依据, 目前在长距离输水明渠水温特性方面已有大量研究。杨开林等<sup>[6]</sup>认为南水北调中线工程明渠水温的变化取决于水体与大气和渠床的热交

收稿日期: 2023-09-28 修回日期: 2023-11-21 网络出版时间: 2023-12-01

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20231201.0922.004>

作者简介: 陈维江(1974—), 男, 山东莒县人, 高级工程师, 博士, 主要从事南水北调工程科技管理研究。E-mail: [chenweijiang@nsbd.cn](mailto:chenweijiang@nsbd.cn)

通信作者: 黄明海(1978—), 男, 江西湖口人, 正高级工程师, 主要从事环境与生态水力学研究。E-mail: [hmh\\_hk@126.com](mailto:hmh_hk@126.com)

换;穆祥鹏等<sup>[4]</sup>研究了出库水温、输水流量等对高纬度地区渠道冰期输水的影响,结果表明:水库取水温度越高,渠道水体的最低温度就越高,但是随着水体向下游的输运对最低温度的提升作用逐渐减弱,加大输水流量对于提升输水沿线的最低水温有一定作用。刘德仁等<sup>[7-8]</sup>针对我国北方寒冷地区某无压输水渡槽、暗渠等工程,通过室内环境箱中的比例模型试验,指出渡槽、暗渠等输水工程内水温降低主要与流速、环境温度及进水口水温有关;陈武等<sup>[9]</sup>研究表明有效控制水体在渡槽内的运行时间,可以减小水温降低幅度;朱明远等<sup>[10]</sup>认为在气温条件不变的情况下,新疆某渠道冬季输水流速越大,水温变化速率越慢,并且流速的增大会改变过水断面温度场的分布。

渠道水温调控是保障长距离明渠冬季输水无冰盖输水的重要前提。目前在通过调度措施调控长渠段水温等方面研究较少,在局部渠段或过水建筑物的水温调控增温和保温措施等方面研究较多,主要包括抽水融冰、渠道加盖保温、渡槽渠壁贴保温材料和水体及渠基加热增温技术等。抽水融冰运行方式采用抽取地下高温水提高渠道水温和消融渠道输水冰凌,郑铁刚等<sup>[11]</sup>、吴素杰等<sup>[12-13]</sup>、熊慧等<sup>[14]</sup>、朱苗苗等<sup>[15]</sup>、赵梦蕾等<sup>[16]</sup>以新疆红山嘴电站引水渠道为研究对象,通过数值模拟和室外水槽试验开展了系列研究,表明高温水注入渠道后,各段范围受外界条件控制,渠道水温沿程衰减曲线呈幂函数分布。朱发昇等<sup>[17]</sup>结合以往寒区引水渠道冬季实际运行经验及研究成果,认为封闭结构能有效阻止水体的热散失,使其沿程水温的降温幅度得到有效控制。甘肃省引洮一期供水工程隧道占比较大,而由于其埋深深,对所经水体有保温和增温效果,使得整个冬季输水过程更加安全。穆祥鹏等<sup>[4]</sup>根据传热学理论对输水渠道加设保温盖板后的渠道水体失温过程进行理论分析和一维数值模拟分析,论证渠道冬季加设保温盖板输水的可行性。孟晓栋等<sup>[18]</sup>以北疆某渠道为例,研究表明阳光板加盖结构具有良好的增温保温效果,可有效延缓渠水结冰,延长寒区渠道冬季供水时长。王志等<sup>[19]</sup>针对庄浪河长大渡槽冬季输水,研究表明渡槽槽身粘贴保温板可以很大程度减小热量损失和水温下降。李纲等<sup>[20]</sup>结合青海省盘道灌区无压输水渠道(渡槽)工程,提出了适当增大渠道输水流量或流速和渡槽加装聚氨酯保温板的建议。巩正玺<sup>[21]</sup>为确保冬季输水期

槽内不结冰,提出了引洮供水一期工程总干渠槽身外保温系统工程设计方案。哈仙<sup>[22]</sup>针对新疆地区长距离输水渠道的室内试验结果表明,电缆加热技术对于预防渠道冻结效果良好,采取加热措施后可明显延迟冰盖的形成时间。杨建明<sup>[23]</sup>认为冬季渠道输水运行,对渠道内水体加热融冰在技术上是可行的,但是成本太高,不宜采用,但对渠道闸槽等局部水体加温是可行的。

由于南水北调中线工程(以下简称“中线工程”)总干渠线路长、输水流量大、沿线分水口多、输水建筑物多,通过改变渠首(水库)来流水温、沿线气象条件、工程布置等因素调控渠道水温基本不现实,而采取长渠段加盖保温和抽取高温地下水、风光电能给渠道水体加热增温等措施经济成本巨大,且调控效果有限。为此,本论文提出总干渠采取大流量输水调控渠道冬季输水水温的措施,利用建立的总干渠全线一维水温模型,模拟分析不同输水流量方案在典型冬季气象条件下总干渠冬季输水水温调控效果,在此基础上提出总干渠冬季输水水温调控措施建议。

## 1 中线工程冬季输水运行概况

### 1.1 研究区域概况

中线工程总干渠全长 1 432 km,其中:陶岔渠首至北拒马河为明渠段,线路总长 1 197 km;北京段线路全长 80 km;天津干线全长 155 km。总干渠输水方式以明渠为主,局部管涵,各类控制建筑物种类多,包括节制闸、退水闸、分水口门和控制闸。多年平均调水量 95 亿  $m^3$ ,陶岔渠首设计流量 350  $m^3/s$ ,加大流量 420  $m^3/s$ ;穿黄隧洞设计流量 265  $m^3/s$ ,加大流量 320  $m^3/s$ ;岗头隧洞节制闸设计流量 125  $m^3/s$ ,加大流量 150  $m^3/s$ ;明渠末端北拒马河节制闸设计流量 50  $m^3/s$ ,加大流量 60  $m^3/s$ 。中线工程于 2014 年 12 月全线正式通水。

中线工程总干渠明渠段南北跨越北纬  $32^{\circ}40' \sim 39^{\circ}30'$  近  $7^{\circ}$  的纬度,由暖温带流向半寒冷地区,沿线冬季气温由南至北逐渐降低。在冬季输水运行过程中,沿线向河南、河北、天津和北京供水,输水流量逐渐减小。由于沿线流量减小和从低纬度到高纬度气温降低而导致渠道水温下降,在一定的输水流量和寒冷气候条件下,渠道输水水温可能降至  $0^{\circ}C$  而出现流冰、冰盖甚至冰塞等冰情,从而导致渠道输水能力降低和输水安全风险<sup>[24]</sup>。

## 1.2 调度规程相关规定

根据《南水北调中线干线工程输水调度暂行规定(试行)》,总干渠冰期输水调度相关规定如下:

调度渠段范围:安阳以北段,具体为汤河节制闸(不含)至北京惠南庄泵站的渠段范围。

调度时间范围:开始时间为每年 12 月 1 日,实际输水调度中,北京、保定、石家庄、邢台、安阳处于总干渠沿线的气象站预报连续 3 日日均气温低于 0℃,冰情范围内的渠段进入冰期输水;冰期输水结束时间为次年 2 月底。

调度运行方式:总干渠在冰期采用冰盖下输水的方式,冰盖的生成方式为平封,一般采用闸前常水位控制方式。为提高冰期输水能力,冰期输水宜采用高水位运行,一般采用各节制闸闸前设计水位,可按节制闸闸前水流弗劳德数不超过 0.06 确定各渠段冰期最大输水能力。在此条件下,安阳节制闸和北拒马河节制闸的冬季输水流量分别为 61.43 和 22.97 m<sup>3</sup>/s,占设计输水流量的 26% 和 46%。

## 1.3 总干渠全线通水以来 8 个冬季冰情

表 1 给出了中线工程全线通水以来 8 个冬季输水流量、气温、水温等统计结果,其中,陶岔闸流量、最低水温分别代表各冬季年份渠首来流平均流量和最低水温,保定站最低气温代表各冬季年份总干渠冰情渠段最低气温,岗头闸最低水温代表冰情渠段代表闸站最低水温。由表 1 可知:总干渠渠首陶岔闸输水流量由 2014—2015 年冬季的 59 m<sup>3</sup>/s 逐年增大至 2021—2022 年冬季的 210 m<sup>3</sup>/s,已达到设计输水流量的 60%,陶岔闸最低水温在 6.7~11.0℃波动;以保定站为代表的气象站最低气温最低为 2020—2021 年冬季的-22.0℃,次之为 2015—2016 年冬季的-18.3℃,最高为 2021—2022 年冬季的-10.5℃;以岗头闸为代表的节制闸最低水温,在 2015—2016 年冬季、2020—2021 年冬季和 2014—2015 年冬季水温接近 0℃,最高为 2021—2022 年冬季的 1.0℃;出现 0℃水温的渠段范围,2015—2016 年冬季最大(299 km),2020—2021 年冬季次之,2021—2022 年冬季和 2016—2017 年冬季全线水温均在 0℃以上。

表 1 总干渠 8 个冬季输水运行特征参数  
Tab. 1 The operating characteristic parameters of main canals in 8 winters

冬季年度	特征参数				
	陶岔闸流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	陶岔闸最低水温/℃	保定站最低气温/℃	岗头闸最低水温/℃	水温 0℃ 渠段长度/km
2014—2015	59	11.0	-11.9	0.08	86.0
2015—2016	83	6.7	-18.3	0	299.0
2016—2017	89	8.2	-15.0	0.33	0
2017—2018	143	8.6	-17.3	0.17	40.0
2018—2019	168	7.9	-18.1	0.28	40.0
2019—2020	173	10.4	-15.5	0.72	76.0
2020—2021	175	8.8	-22.0	0.03	126.0
2021—2022	210	9.5	-10.5	1.00	0

注:陶岔闸流量为 1 月平均值。

为便于分析渠道水温与影响因素之间关系,图 1 给出了代表闸站水温与渠首来流流量和水温、代表气象站气温等参数的无量纲参数关系曲线,图 1 中陶岔流量无量纲参数为各冬季年份平均流量与 8 个冬季中平均流量最大值的比值,陶岔闸、岗头闸最低水温无量纲参数分别为各冬季年份最低水温与 8 个冬季中最低水温最高值的比值,保定站最低气温无量纲参数为各冬季年份最低气温与 8 个冬季中最低气温最低值差值后与该最低值的比值。由图 1 可知:闸站最低水温受最低气温影响最为显著,随渠

首来流流量逐年增大呈趋势性增高,受渠首来流最低水温影响。其中:2015—2016 年冬季出现最严重冰情主要受第二最低气温、渠首最低来流水温、第二小来流流量影响;2020—2021 年冬在输水流量较大、渠首来流水温居中的情况下出现第二严重冰情,主要受极端最低气温影响;2014—2015 年冬季虽然渠首来流水温最高、气温最高,但仍出现第三严重冰情,关键在于来流流量非常小、流速慢、流动时长大,导致冬季输水过程中与沿程冷空气热交换热量损失大,从而沿程水温降幅较大。



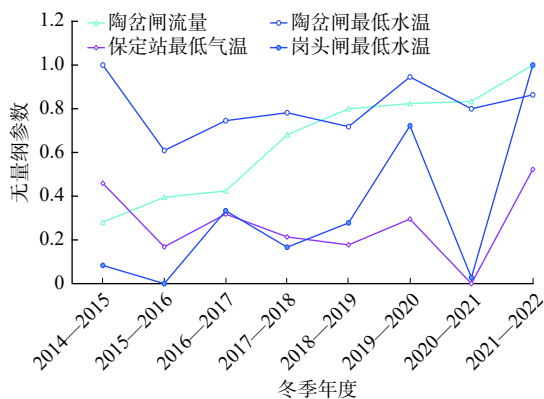


图1 冬季水温与流量、气温无量纲关系曲线

Fig. 1 Dimensionless relationship curves of water temperature with discharge and air temperature

## 2 研究方法

### 2.1 保温优化调度思路的提出

根据上述分析可知,中线总干渠冬季输水水温和冰情与渠首来流水温、流量和沿线冬季气象条件密切相关。目前总干渠冬季输水调度规程规定:在汤河节制闸至北京惠南庄泵站的渠段范围,每个冬季12月1日至次年2月底采用冰盖下输水的方式,冬季最大输水流量相比设计流量大幅减小,在较小流量情况下,输水流动时间长,与沿程冷空气热交换热量损失多。根据中线总干渠不同输水流量下全线流动时长(水龄)计算结果(图2),在闸前设计水位控制方式下,冬季输水流量由 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 提升至 $350\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水龄可从23 d减少到15 d。

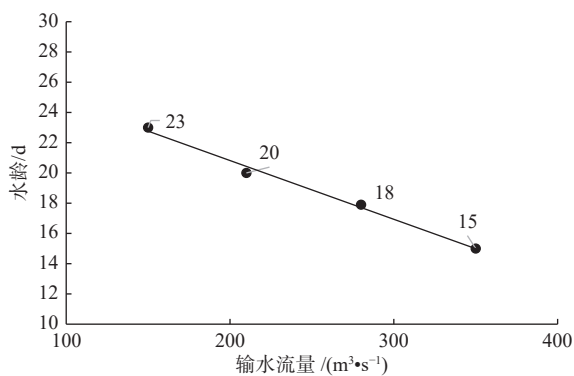


图2 水龄与输水流量的关系

Fig. 2 Relationship between water flow age and discharge

冰盖下输水是目前中线干渠在安阳以北区域的冰期输水方式,为防止顺流而下的浮冰下潜而引发冰塞,通过节制闸将渠道流速和弗劳德数限制在一定范围内,使水流在冰盖下输送,虽然保障了冰期渠道的安全,但也限制了冰期渠道的输水能力,制约了中线工程的输水效益发挥。基于总干渠历年

冬输水运行情况,在渠首来流水温和沿线冬季气象条件无法调控的情况下,通过气象预报和水温预测分析,采用无冰盖输水方式增大冬季输水流量、加快流速、缩短流动时长,以减小总干渠输水水温降低幅度,可为总干渠冬季输水能力提升提供有效措施。

### 2.2 研究工况设计

#### 2.2.1 典型冬季气象条件

参照《暖冬等级》(GB/T 21983—2008)和文献[25],根据总干渠沿线南阳、宝丰、郑州、新乡、安阳、邢台、石家庄、保定8个气象站1951—2020年70个冬季(12月1日至次年2月28日)气温特征分析,选择1968—1969年、2012—2013年、2005—2006年和2016—2017年4个典型冬季气象年份,分别代表强冷冬、冷冬、平冬和暖冬年份。图3给出了保定站4个典型冬季气象年份日均气温变化过程曲线。

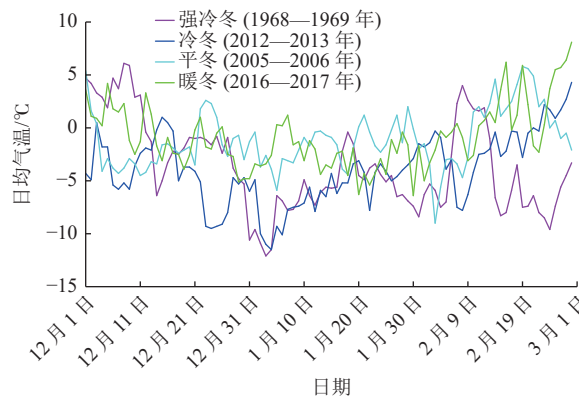


图3 保定站4个典型冬季气象年份日均气温变化过程曲线

Fig. 3 Curves of daily mean temperature at Baoding station in 4 typical winter meteorological years

#### 2.2.2 输水流量方案

输水流量方案共设置350、280、210和 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 4种。其中: $350\text{ m}^3/\text{s}$ 输水流量方案为总干渠设计流量方案;280、210和 $150\text{ m}^3/\text{s}$ 输水方案分别为设计流量的70%、60%和43%。各渠池水位按照节制闸闸前设计水位控制。

组合4个典型冬季年份气象条件和4种输水流量方案,共16种研究工况。

### 2.3 总干渠全线一维水温模型简介

利用建立的总干渠全线一维水温模型,针对不同输水流量的调度运行方案,模拟分析不同方案在典型冬季气象条件下总干渠冬季输水减小水温降幅的效果。

控制方程。根据中线工程总干渠结构布置和运行方式,采用圣维南方程组描述总干渠一维非恒定水流;水温变化过程通过一维水温方程描述。

水力学模型控制方程式为

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial Z}{\partial x} - g \frac{n^2 Q |Q|}{R^{4/3} A} \quad (2)$$

式中:  $A$  为过水断面面积,  $m^2$ ;  $Q$  为断面流量,  $m^3/s$ ;  $t$  为时间,  $s$ ;  $x$  为距离,  $m$ ;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $Z$  为断面水位,  $m$ ;  $n$  为糙率;  $R$  为水力半径,  $m$ 。

一维水温方程式为

$$\frac{\partial AT}{\partial t} + \frac{\partial (QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AE \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B\phi}{\rho c_p} \quad (3)$$

式中:  $T$  为断面平均水温,  $^{\circ}C$ ;  $E$  为热扩散系数,  $m^2/s$ ;  $B$  为水面宽度,  $m$ ;  $\phi$  为水体与环境单位面积的热交换率,  $W/m^2$ ;  $\rho$  为水的密度,  $kg/m^3$ ;  $c_p$  为水的定压比热容,  $J/(kg \cdot ^{\circ}C)$ 。

水气热量交换。模型中水体与空气热量交换计算考虑水气界面热传导、对流、水面蒸发耗热、太阳短波辐射等。

求解方法。模型中圣维南方程组求解采用 preissmann 四点隐式差分进行离散求解, 水温控制方程采用特征线法进行方程离散求解, 通过设置时间步长和断面间距来保证离散格式的求解稳定性。

模拟范围与网格划分。从渠首陶岔闸至北拒马河闸渠段(总长 1 198 km); 根据总干渠渠道和过水建筑物断面变化情况, 共划分 1 712 个控制断面, 其中包括节制闸 61 个, 网格步长 10~500 m。计算时间步长取 30 s。

边界条件。各渠段闸前水位和过闸流量通过调节节制闸开度进行控制, 渠首陶岔来流水温过程通过丹江口水库水温模型模拟相应典型冬季年份的陶岔取水口水温获取, 气象边界条件取总干渠沿线 8 个气象站数据, 包括气温、风速、风向、湿度、日照时数等, 气象边界条件以水面热交换形式纳入入热通量计算公式中<sup>[7]</sup>。

模型参数率定。影响总干渠水流特性和水温的因素较多, 主要有过水断面几何形态、入流出流条件、气象条件等, 模型中影响水流和水温的参数主要包括糙率、水表面太阳辐射吸收系数和纯水中太阳辐射消光系数等。相关参数通过总干渠实测水位、流量和水温数据进行率定。

模型验证。针对总干渠全线一维水温模型, 采用实测数据进行验证(图 4), 结果表明各断面水温平均误差小于 0.3  $^{\circ}C$ , 最大误差约 1.0  $^{\circ}C$ , 其中最低水温过程与实测结果非常接近<sup>[26]</sup>。

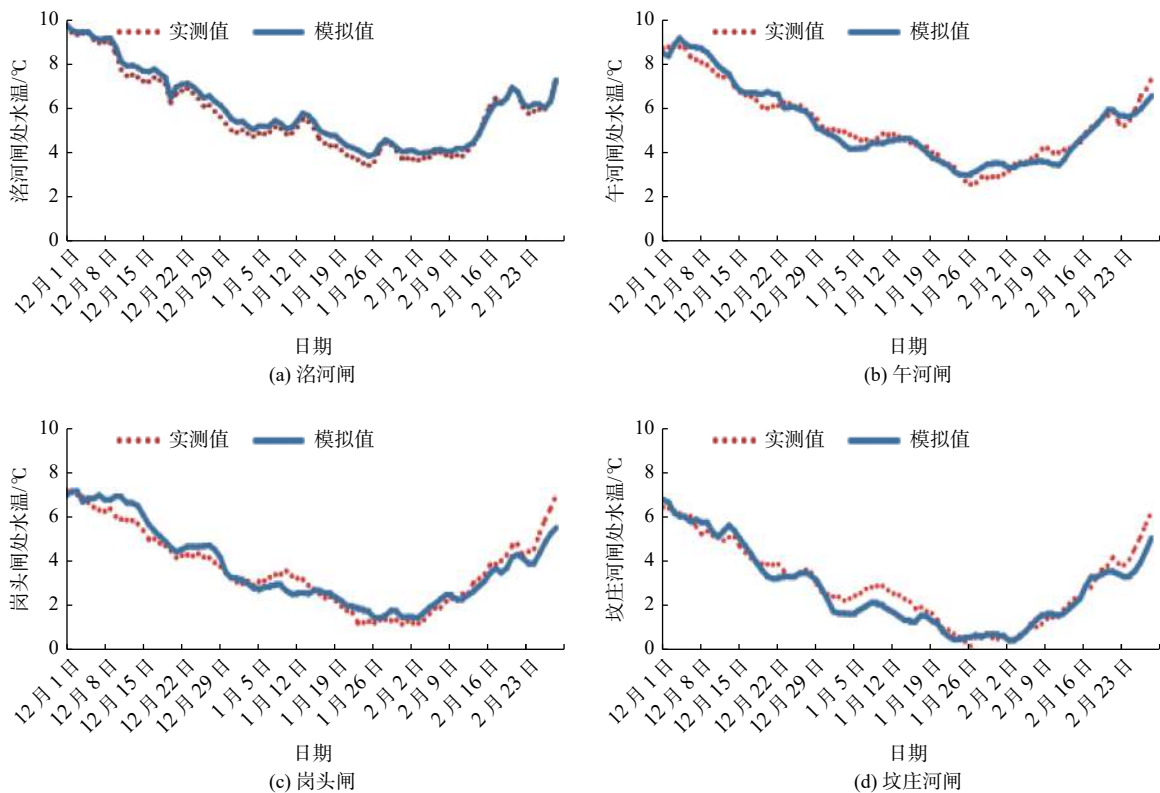


图 4 一维水温模型水温模拟结果验证

Fig. 4 Verification of water temperature simulation results of mathematical model

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 不同研究工况的保温效果分析

根据总干渠不同研究工况的水温计算结果,图5给出了各典型冬季年份气象条件下不同输水流量方案的沿程最低水温分布曲线,表2统计了不同输水流量对水温影响的特征参数,图6和图7分别给出了各典型冬季不同输水流量情况下总干渠最低水温比降和北拒马河闸最低水温柱状图。从以上

数据分析可知:

典型冬季年份气象条件下不同输水流量方案的总干渠最低水位总体呈沿程逐渐降低趋势。

在同一典型冬季年份气象条件下,随着总干渠输水流量增大,沿程最低水温比降相应减小,北拒马河闸最低水温相应提高;在相同输水流量情况下,不同冬季年份气象条件下的沿程最低水温比降关系不显著。

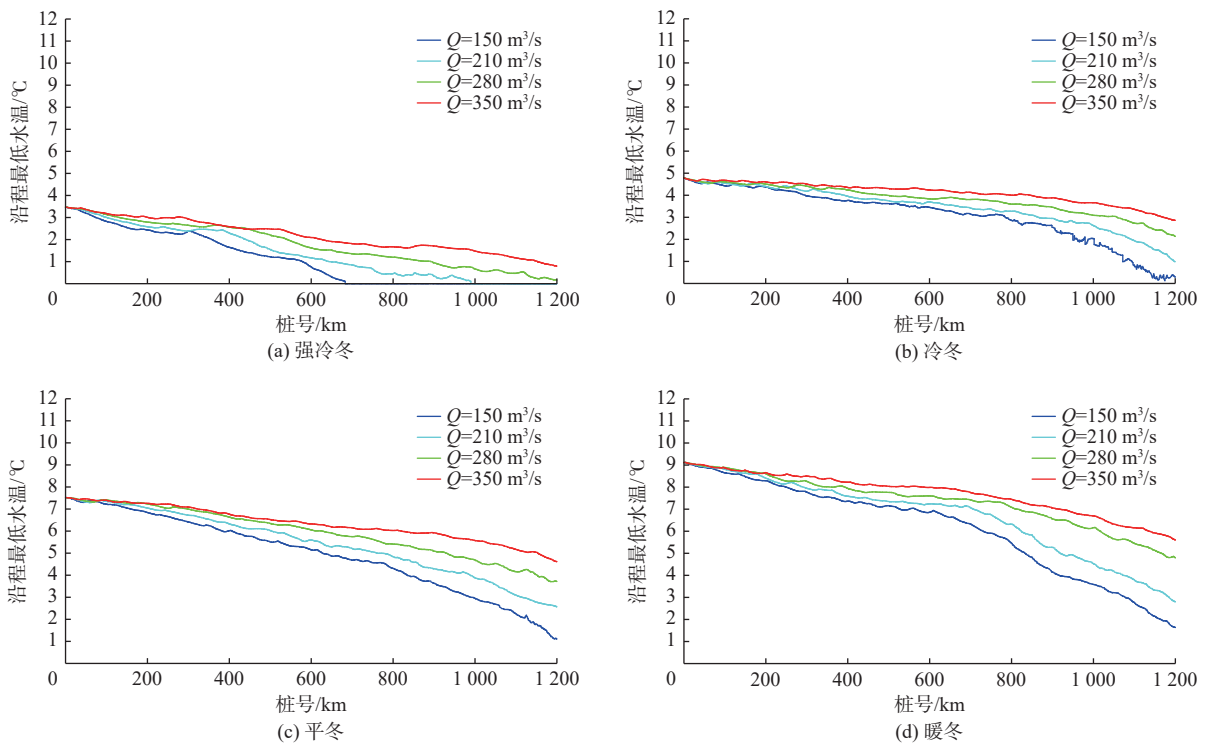


图5 各典型冬季年份气象条件下不同输水流量方案的沿程最低水温分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of lowest water temperatures of different water flow schemes along the main channel in typical winter meteorological years

表2 不同输水流量对水温影响的特征参数统计

Tab. 2 Statistics of characteristic parameters of influence of water discharge on water temperature

典型冬季	北拒马河闸最低水温/°C				总干渠沿程最低水温比降[°C·(100 km) <sup>-1</sup> ]			
	150 m <sup>3</sup> /s	210 m <sup>3</sup> /s	280 m <sup>3</sup> /s	350 m <sup>3</sup> /s	150 m <sup>3</sup> /s	210 m <sup>3</sup> /s	280 m <sup>3</sup> /s	350 m <sup>3</sup> /s
强冷冬 (1968—1969年)	0	0	0.16	0.80	0.50	0.35	0.28	0.22
冷冬 (2012—2013年)	0.12	0.99	2.13	2.86	0.39	0.32	0.22	0.16
平冬 (2005—2006年)	1.11	2.57	3.70	4.62	0.53	0.41	0.32	0.24
暖冬 (2016—2017年)	1.64	2.80	4.80	5.61	0.62	0.53	0.36	0.29

在强冷冬、冷冬、平冬、暖冬年份气象条件下,输水流量从 150 m<sup>3</sup>/s 增大至 350 m<sup>3</sup>/s 时,总干渠沿

程最低水温比降由 0.39~0.62 °C/(100 km) 减小至 0.16~0.29 °C/(100 km), 分别减小了 0.28、0.23、0.29

和  $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ km})$ 。

在强冷冬情况下,输水流量由  $150\text{ m}^3/\text{s}$  提升至  $210\text{ m}^3/\text{s}$  时,总干渠  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  水温渠段长度由  $500\text{ km}$  缩短至  $200\text{ km}$ ,输水流量提升至  $280\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $350\text{ m}^3/\text{s}$  时,总干渠明渠段末端水温达到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上;冷冬、平冬和暖冬,输水流量从  $150\text{ m}^3/\text{s}$  提升至  $350\text{ m}^3/\text{s}$  时,总干渠明渠段末端水温分别由  $0.12$ 、 $1.11$  和  $1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  提升至  $2.86$ 、 $4.62$  和  $5.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低水温分别提升了  $0.80$ 、 $2.74$ 、 $3.51$  和  $3.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

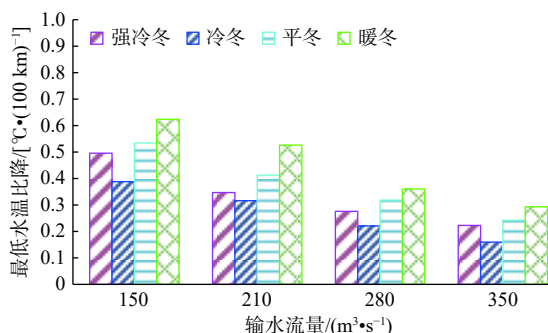


图 6 各典型冬季不同输水流量情况下总干渠最低水温比降

Fig. 6 The lowest water temperature drop of the main channel under different water flows in typical winter conditions

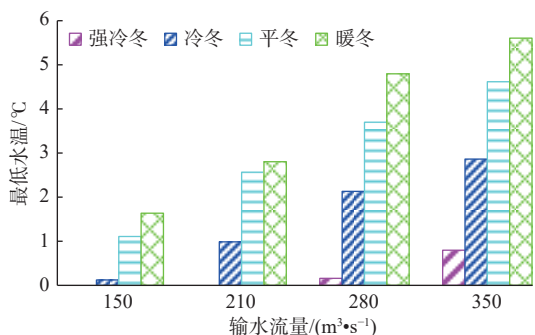


图 7 各典型冬季不同输水流量情况下北拒马河闸最低水温

Fig. 7 The lowest water temperatures of the Beijuma River sluice under different water conveyance flows in typical winter conditions

### 3.2 总干渠冬季输水水温调控措施建议

鉴于增大冬季输水流量有利于缓解总干渠水温降低情况,且总干渠有提升冬季输水能力的需求,建议在冷冬、平冬和暖冬等典型冬季气象条件下,总干渠冬季尽可能采取无冰盖大流量输水运行方式,在强冷冬气象条件下分渠段、分时段采取无冰盖大流量输水运行方式。

若需总干渠全线不出现冰情,基于本研究模拟计算结果,建议针对以下情形采取相应水温调控措施:

在强冷冬气象条件下,建议采取输水流量大于  $350\text{ m}^3/\text{s}$  的方案,总干渠全线最低水温可保持在  $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

以上;输水流量小于  $350\text{ m}^3/\text{s}$  时,建议采取分渠段无冰盖大流量输水方式,其中按最低水温大于  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  的渠段划分;输水流量为  $150$ 、 $210$  和  $280\text{ m}^3/\text{s}$  时,可采取无冰盖大流量输水方式的渠段范围分别为总干渠上游  $500$ 、 $700$  和  $900\text{ km}$  渠段。

在冷冬气象条件下,建议采取输水流量大于  $210\text{ m}^3/\text{s}$  的方案,总干渠全线最低水温可保持在  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

在平冬和暖冬气象条件下,建议采取输水流量大于  $150\text{ m}^3/\text{s}$  的方案,总干渠全线最低水温分别在  $1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上。

由于中线工程总干渠沿线气象预报的不确定性和全线水温预测模拟精度有限,总干渠冬季输水采取上述无冰盖大流量输水措施时,可能存在一定冰情风险,建议制定调度方案时留有一定安全裕量和做好应对相关风险的应急预案。

## 4 结论

在各典型冬季年份气象条件下,随着总干渠输水流量增大、流动时长的缩短,冬季输水过程中与沿程冷空气热交换热量损失越少,水温比降相应越小,总干渠明渠段末端水温也越高。

在冬季气象条件适宜情况下,总干渠冬季采取无冰盖大流量输水水温调控措施,既可减小总干渠渠道沿线水温比降,也有利于提升总干渠冬季输水能力。

鉴于冬季大流量输水有利于缓解总干渠水温降低情况,建议根据总干渠中短期气温预报和水温预测情况,在冷冬、平冬和暖冬等典型冬季气象条件下尽可能采取较大输水流量,在强冷冬气象条件下可分渠段采用无冰盖大流量输水模式。

### 参考文献:

- [1] 刘国强. 长距离明渠冬季安全输水模式和措施探讨[J]. 人民珠江, 2015, 36(4): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.2015.04.031.
- [2] 穆祥鹏, 曹平, 陈文学, 等. 冰期宽浅式渠道无冰盖输水技术及冰水二相流水力调控影响因素研究综述[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 132-136.
- [3] 张志学. 明渠冬季输水可行性分析: 基于新疆某小型引水工程[J]. 水利科技与经济, 2013, 19(8): 65-66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2013.08.026.



- [4] 穆祥鹏,陈文学,郭晓晨,等.高纬度地区渠道无冰盖输水的冰情控制研究[J].*水利学报*,2013(9):1071-1079. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.09.016.
- [5] 席燕林.寒冷地区电站长距离输水明渠冬季运行方式探讨[J].*水利水电技术*,2015,46(12):85-89. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.12.021.
- [6] 杨开林.冰期明渠水温模型[J].*水利学报*,2022,53(1):20-30. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210483.
- [7] 刘德仁,赖远明,张东,等.寒冷地区无压输水暗渠运行模型试验研究[J].*冰川冻土*,2011,33(6):1323-1329.
- [8] 刘德仁,杨成.寒冷地区无压输水渡槽冬季运行模型试验研究[J].*兰州交通大学学报*,2013,32(4):56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2013.04.014.
- [9] 陈武,刘德仁,董元宏,等.寒区封闭引水渡槽中水温变化预测分析[J].*农业工程学报*,2012,28(4):69-75. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.011.
- [10] 朱明远,宋剑鹏,吴艳,等.基于Fluent的冬季渠道水温数值模拟分析[J].*中国水运(下半月)*,2017,17(6):108-110,115.
- [11] 郑铁刚,宗全利,孙双科,等.高寒区抽水融冰渠道水温沿程衰减规律:以红山嘴水电站为例[J].*水科学进展*,2018,29(5):667-676. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.05.007.
- [12] 吴素杰,宗全利,郑铁刚,等.高寒区引水渠道抽水融冰水温变化过程模拟[J].*农业工程学报*,2016,32(14):89-96. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.14.013.
- [13] 吴素杰,宗全利,郑铁刚,等.高寒区多口融冰井引水渠道水温变化三维模拟及井群优化布置[J].*农业工程学报*,2017,33(14):130-137. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.14.018.
- [14] 熊慧,吴素杰,胡璇,等.寒区引水渠道抽水融冰过程的数值模拟分析[J].*石河子大学学报(自然科学版)*,2017,35(2):259-264. DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2017.02.022.
- [15] 朱苗苗,刘焕芳,宗全利,等.高寒区引水渠道水温变化规律的试验研究[J].*石河子大学学报(自然科学版)*,2015,33(2):239-243. DOI: 10.13880/j.cnki.65-1174/n.2015.02.021.
- [16] 赵梦蕾,宗全利,刘贞姬,等.引水渠道抽水融冰水温沿程变化规律试验研究[J].*中国农村水利水电*,2015(8):189-195,198. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2015.08.048.
- [17] 朱发昇,陈武,张东,等.引洮一期供水工程冬季安全输水运行技术措施研究[J].*水利规划与设计*,2013(2):1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2013.02.001.
- [18] 孟晓栋,谭志翔,张学东,等.基于Comsol的寒区渠道加盖保温数值分析研究[J].*甘肃水利水电技术*,2021,57(5):11-15,25. DOI: 10.19645/j.issn2095-0144.2021.05.004.
- [19] 王志,李文.冬季输水期渡槽附保温板水温研究[J].*甘肃水利水电技术*,2019,55(5):25-28. DOI: 10.19645/j.issn2095-0144.2019.05.007.
- [20] 李纲,方忠鹏.青藏高原渠道(渡槽)冬季供水防冻保温的可行性分析[J].*水利技术监督*,2019(6):73-79,91. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2019.06.022.
- [21] 巩正玺.引洮工程总干渠渡槽槽身外保温系统设计与施工技术要求[J].*水利规划与设计*,2014(7):76-79. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2014.07.024.
- [22] 哈仙.新疆地区长距离输水渠道冬季防冻结技术试验研究[J].*水利技术监督*,2023(1):270-272. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1305.2023.01.065.
- [23] 杨建明.新疆某干渠冬季运行管理及冰凌应对措施探析[J].*陕西水利*,2015(2):174-175. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9000.2015.02.084.
- [24] 黄国兵,聂艳华,段文刚.南水北调中线工程主要水力学问题研究[J].*长江科学院院报*,2014,31(10):34-42. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.10.006.
- [25] 刘孟凯,杨佳,黄明海.南水北调中线总干渠沿线地区冬季气温特征分析[J].*人民长江*,2020,51(7):93-99. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.016.
- [26] 戴盼伟,郝泽嘉,黄明海,等.南水北调中线冬季水温分布规律数值模拟研究[J].*水利科学与寒区工程*,2021,4(3):1-9. DOI: 10.3969/j.issn.2096-5419.2021.03.002.

(下转第 1079 页)



complex operating conditions due to the variety of hydraulic structures. The method of investigation and research is adopted to investigate the current construction status of digital twins in large-scale water transfer projects such as the Zhejiang East Water Transfers Project, the Qiandao Lake Water Distribution Project, and the East Route of the South-to-North Water Transfers Project. Based on the characteristics of each project, the characteristics of their digital twin construction are analyzed, and the experience of digital twin construction in the above-mentioned large-scale water diversion projects is summarized. On this basis, the requirements for the construction of digital twins in the subsequent projects of the South-to-North Water Transfers Project were analyzed, and several suggestions for the construction of digital twins in the South-to-North Water Transfers Project were proposed, providing reference for the subsequent construction of digital twins in the South-to-North Water Transfers Project.

**Key words:** water diversion project; digital twins; South-to-North Water Transfers Project; data backplane; model library; knowledge engine

(上接第 1071 页)

## Control measures of water temperature of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project main channel with large discharge in winter

CHEN Weijiang<sup>1</sup>, ZUO Li<sup>1</sup>, HUANG Minghai<sup>2</sup>, WU Yongyan<sup>3</sup>, GAO Sen<sup>4</sup>

( 1. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430010, China; 4. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100036, China )

**Abstract:** On the premise of ensuring the safety of water delivery in winter, it is an important measure to adopt non-ice-covered large discharge water delivery mode to enhance the main canal water conveyance capacity of the South-to-North Water Transfers Project in winter, the thermal insulation of canal water conveyance is one of the key technical bottlenecks to ensure the operation of non-ice-covered water conveyance of main canal.

Based on the analysis of the water temperature and ice condition in the 8 winters since the water supply of the whole line under the current regulation of the Middle Route project, the operation method of non-ice-covered large-flow water conveyance is put forward to realize water conveyance and heat preservation in winter, aiming at four kinds of dispatching operation schemes of different water flow, such as 350, 280, 210 and 150 m<sup>3</sup>/s, simulation analysis of each scheme of water transfer in strong cold winter, cold winter, flat winter and warm winter weather conditions such as the winter heat preservation effect of the main canal. On this basis, a proposal for optimal operation of non-ice-covered water conveyance and thermal insulation of main canal in winter is proposed.

The results of numerical simulation show that: according to different typical winter weather conditions, the non-ice-covered large-flow water transfer operation mode is adopted under limited conditions, it can shorten the flow time of water conveyance and reduce the heat loss of water body, thus achieving the effect of heat preservation, the water temperature at the end of the open channel is also higher than that at the end of the open channel, at the same time, it can also effectively solve the problem of limited water conveyance capacity in winter.

Based on the short-term air temperature forecast and water temperature forecast in the main canal, it is suggested that water transfer operation mode with larger water discharge should be adopted as far as possible under the typical winter weather conditions such as cold winter, flat winter and warm winter, and under the strong cold winter weather conditions, non-ice-cap large flow water conveyance model can be used in time and channel sections.

**Key words:** Middle Route of South-to-North Water Transfers Project; water delivery without ice covered; large discharge; thermal insulation measure; numerical simulation