

穆祥鹏, 张哲琦, 包娟, 等. 基于外调水入渠的冰期渠道水力热力协同调控方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1089-1097. MU X P, ZHANG Z Q, BAO J, et al. Hydraulic-thermal synergistic control method of channel during ice period based on external water transfer into the channel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1089-1097. (in Chinese)

基于外调水入渠的冰期渠道水力热力协同调控方法

穆祥鹏¹, 张哲琦¹, 包娟¹, 陈文学¹, 陈晓楠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. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100036)

摘要: 为破解高纬度地区长距离渠道冬季冰盖下输水能力不足的问题, 以一个梯形断面尺寸一定的渠道模型为例, 利用数值模拟方法, 分析气温、入渠水温、输水流量等热力和水力因子对冬季渠道水温沿程衰减的影响规律, 并采用多元拟合的方法提出适合该断面尺寸渠道的不冻长度公式。分析两种离线水库补水模式对渠道水体的温控效果及补水流量、气温、补水水温对补水间距的影响, 并将不冻长度公式用于补水间距的计算。研究表明: 在接近冰点的渠道断面, 通过外调水入渠, 能够延长渠道不冻长度, 可在一定输水距离范围内避免渠道结冰, 从而解决长距离输水渠道冰期输水能力不足的问题。研究成果对长距离输水渠道冰害防治和冰期输水能力提升具有一定参考价值。

关键词: 冬季输水; 不冻长度; 水温; 补水模式; 调水工程

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0106

我国水资源时空分布呈现夏多冬少、南多北少的特点^[1], 长距离输水工程是解决水资源时空分布不均的最有效、最直接手段。在我国北方高纬度地区, 冬季负积温大, 渠道水体会出现不同程度的冰情。冰盖下输水是长距离输水渠道最为常用的冬季输水方式。通过水力调控, 在水面形成稳定冰盖, 水体在冰盖下输运, 冰盖下的水体通过冰盖与大气进行热交换, 冰水交界面的水体会发生相变成为冰晶体, 使冰盖厚度增加, 冰盖下水体的水内冰生成量和生成速率均大为降低, 从而实现冰期安全输水。金思凡等^[2]利用一维冰情演变模型, 研究了水力和热力因素对冰塞风险概率的影响, 总结了冰期输水的安全运行方式。穆祥鹏等^[3]研究了冰凌在拦冰索前的稳定性判别条件, 提出了防止浮冰在拦冰索前下潜的弗劳德数判据。刘孟凯等^[4]对于封冻渠系各运行方式进行数值模拟, 研究了不同工况下冰塞风险最低的运行方式。黄国兵等^[5]根据输水工程冬季实际运行过程中发生的冰凌影响事件, 提出了相应

的解决措施, 保证输水工程平稳运行。但是为了使渠道能够顺利形成冰盖, 且避免顺流而下的流冰不在下游冰盖前缘或拦冰索前下潜而诱发冰塞, 需要通过节制闸将渠道流速和弗劳德数限制在一定范围内(通常要求 $v < 0.4$ m/s, $Fr < 0.06$)^[6], 虽然保障了渠道的安全运行, 但也限制了渠道的冰期输水能力, 冰期输水安全控制流量基本为设计流量的 31.56% ~ 47.64%^[6], 制约了中线工程的输水效益发挥。

尽管人们希望能够通过提高气象和冰情预报精度、提高水力调控效率和质量来缩短冰期输水的渠段范围和时长, 但是在冰盖下输水模式下, 渠道的冰期输水能力已难以再得到实质性的提升。基于热力学原理, 在渠段沿线采用抽取外水入渠的方式, 提高渠水温度, 减少渠道冰凌的产生, 使冰盖下输水转为冰水二相流甚至是无冰输水, 可以从根本上解决冰期输水能力降低的问题。目前抽取地下水入渠实现无冰输水已经在我国西北地区的部分电站得到成功应用, 如新疆红山嘴梯级水电站、青海

收稿日期: 2023-07-17 修回日期: 2023-10-20 网络出版时间: 2023-11-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231128.0917.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20316); 水利青年科技英才资助项目

作者简介: 穆祥鹏(1979—), 男(回族), 天津人, 正高级工程师, 博士, 博士生导师, 主要从事冰水力学、生态水力学研究。E-mail: swood2002@163.com

通信作者: 陈晓楠(1979—), 男, 河北沙河人, 正高级工程师, 博士, 主要从事输水调度、水文水资源研究。E-mail: chenxiaonan@nsbd.cn

省香加水电站和牛板筋水电站等^[7-8]。通过在电站引水渠沿线每隔一定距离布置一座泵站,将温度较高的地下水抽入渠中,使得渠水温度始终高于冰点,实现了冬季无冰输水,不仅提高了冰期输水能力,也省去了排冰耗水,且降低了冰期管理难度,显著提高了电站效益。“外调水”既可以是输水渠道沿线的地下水,也可以利用沿线离线水库中的深层水,为实现长距离输水工程冬季无冰输水提供了思路。但是目前通过外调水入渠进行冰期水力热力协同调控的技术只在几十公里的电站引水渠上得到了应用,且入渠流量及水温、泵站间隔的确定尚无普适性的理论成果,也缺乏有效的理论方法,仍以估算和经验为主。外调水入渠的冰期调控方法如何应用于几百公里的长距离输水工程,其可行性如何尚无定论。针对长距离调水工程,研究外调水入渠的冰期输水能力提升技术,具有重要的社会意义和经济价值。

基于热平衡原理和传热学相关理论,前人对河流和渠道的热平衡过程开展了较为充分的研究。波达波夫^[9]根据热量平衡原理,对引水渠道水体热量损失值进行计算。Shen 等^[10]通过对大气-冰盖-水-河床系统的传热分析,对圣劳伦斯河段的水温衰减、冰盖生成过程及开河时间进行了数值模拟。杨开林^[11]构建了非线性化和线性化的明渠水温模型,通过算例分析了两者的适用条件。前人的研究主要集中于自然条件下河渠水温变化及冰凌生消演变的模拟与分析等方面,通过分别计算太阳短波辐射、大气长波辐射以及对流、蒸发传热过程,可以对水-气的传热过程进行较为准确的计算。

在以上研究基础上,出于防冰的考虑,人们也开展了一系列渠道保温、增温的热力调控技术研究。工程界通常用“不冻长度”(渠道水温大于 0℃ 的渠段长度称为不冻长度)这一指标来反映渠道水体的失热率和无冰保障长度。例如:宗全利等^[12]研究了影响不冻长度的因素,提出了不冻长度公式,并与其他不冻长度公式进行了对比;郑铁刚等^[13]根据入渠井水和上游渠水的热流量比研究水温衰减变化规律,并考虑了气温对控制长度的影响,但是影响渠道水温的因素众多,目前尚没有可确定渠道不冻长度的普适性成果。唐伟^[14]研究了地下水水温对渠道水温的影响,在此基础上确定了抽水井群的布置方式,并模拟验证了抽水回灌方式的可行性;穆祥鹏等^[15]对架设保温盖板渠道的热量交换过程

进行计算,同时研究了隧洞输水时地温对水体温度的影响,论证了新疆北部地区长距离保温输水的可行性;戴盼伟等^[16]基于南水北调中线一维水温模型,研究了不同流量下冷冬、平冬和暖冬的温降情况;殷心盼等^[17]考虑利用调蓄水库底层温水为干渠渠水增温,模拟了不同掺混比和入渠角度对干渠水温的影响;李程喜等^[18]建立了基于气温链的冬季水温回归预测模型,并根据实测资料对模型参数进行率定和检验;郭佳雯等^[19]基于太阳辐射模型,模拟不同渠道宽深比和渠道走向对渠道水温增加的影响;靳芮琰^[20]通过 COMSOL 三维仿真以及模型实验,研究了在渠道旁铺设发热电缆除冰的可行性;穆祥鹏等^[21]针对宽浅断面渠道冬季输水问题进行输冰能力研究,综合考虑气温、渠首水温和输水流量等因素,提出了冰水二相流输水调控措施。尽管前人在渠水保温、增温及冰水二相流水力调控方面均开展了一定的探索,但是系统性和普适性的研究成果仍十分缺乏。冰盖下输水仍是高纬度地区长距离输水渠道在冬季的主要运行方式,冰期输水能力降低、极端寒潮引起的冰害依旧是困扰冰期输水的难点问题,因此开展外调水入渠的冰期水力热力协同调控技术研究是十分必要和重要的。

本文以一个梯形断面尺寸一定的渠道工程为例,通过数值模拟方法分析影响冰期渠道水温的敏感因素,在此基础上通过多元拟合得到该渠道不冻长度公式,研究外调水入渠以增加渠道水体热量而消除冰情的水力热力协同调控方法。这对提高渠道冬季输水能力、消除渠道冰灾冰害、降低冰期运行管理难度均具有一定的参考和借鉴价值。

1 一维明渠非恒定流水温数学模型

通过在长距离输水渠道沿线每隔一定距离调取水入渠,可以保持渠水温度沿程始终处于冰点以上,能够实现冬季无冰输水,从而从根本上解决冰期输水能力降低的问题。本文重点研究外调水入渠的水温调控效果和敏感影响因素,以渠道水温保持在冰点以上为调控目标,需要建立一维明渠非恒定流水温数学模型,不涉及冰凌生消演变过程。

1.1 一维明渠非恒定流模型

长距离输水渠道通过圣维南方程组(Saint-Venant)来描述渠道水流,其控制方程组^[22]公式为

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

$$\frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(1 - \frac{BQ^2}{gA^3}\right) \frac{\partial y}{\partial x} + S_f - S_0 = 0$$

式中: t 为时间, s; x 为距离, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; A 为渠道的过水断面面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; B 为渠宽, m; y 为渠道水深, m; S_f 为能量坡度; S_0 为渠道底坡。变量符号下同。

一维明渠非恒定流模型采用 Preissmann 四点隐格式求解。

1.2 一维明渠水温模型

与渠道水面的热交换量相比, 水体和渠床的热交换量相对较少, 通常可忽略不计, 因此水温变化的热损失值主要是渠道水体和外界大气的热交换量 S , 可表示为

$$S = h_{wa}(T_w - T_a) \quad (2)$$

式中: h_{wa} 为水体和外界大气的热交换系数, 在我国华北地区可取 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ^[23]; T_w 为水体温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为气温, $^{\circ}\text{C}$ 。

水体和外界的热交换过程导致的水温变化可以用热量守恒的一维对流-扩散方程表示。渠道水流通常为紊流状态, 考虑充分掺混的情况, 其水温方程^[24]形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p A T_w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p Q T_w) = \frac{\partial}{\partial x} \left(A E_x \rho c_p \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + B S \quad (3)$$

式中: c_p 为水的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$; E_x 为纵向扩散系数, m^2/s ; ρ 为水的密度, kg/m^3 。纵向扩散项一般不考虑。

一维明渠水温模型属于对流扩散方程, 采用 Wendroff 隐格式求解。

2 渠道水温沿程衰减规律及不冻长度

利用公式(1)~(3), 可以模拟冬季渠道的水温时空变化, 从而研究外部热力和水力因素对渠道水温演变和渠道不冻长度的影响特性。气温和渠首水温是影响渠道不冻长度的最直接热力因素; 对于尺寸一定的梯形断面渠道, 渠道输水流量则是影响不冻长度的关键水力因素: 输水流量越大, 水体蕴含的热量越多, 流速也越高, 有利于不冻长度的延长; 但流量越大, 水深越大, 水面越宽, 水体向大气传热越快。对于过水断面形状一定的渠道工程, 上述 3 个热力、水力影响因素对不冻长度的定量影响关系, 可以通过一维明渠非恒定流水温数学模型来研究。

2.1 模型渠道概况

根据南水北调中线工程京石段中游附近的输水渠道规模, 构建了一个单渠池数学模型, 渠道全长 60 km, 渠道首端为闸门边界, 闸前水深保持恒定 (4.5 m), 渠末为泵站, 假设泵站的抽水流量保持恒定。渠道横断面为梯形断面, 渠道的工程参数见表 1, 渠首闸门的具体参数见表 2。为方便分析渠道水温对于上述热力因子、水力因子的敏感性, 渠道模型沿线不设分水口。在模拟冰期水温的时空变化过程中, 渠首闸门的开度始终保持初始开度不变, 渠道输水流量保持恒定。

表 1 渠道参数

Tab. 1 Channel parameters

渠池号	桩号范围	底宽/m	边坡系数	渠道纵坡	糙率	设计流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1	0+050~59+950	14.5	2.25	1/20 000	0.015	85

表 2 闸门参数

Tab. 2 Gate parameters

桩号	闸门宽度/m	闸孔数	闸门轴高/m	闸门圆弧半径/m	闸前水深/m
0+000	7.0	2	5.5	6.8	4.5

2.2 气温的影响

利用渠道数学模型分析气温对渠道水温的影响特性。渠道输水流量取其设计值, 即 $85 \text{ m}^3/\text{s}$ 。假设渠首水温恒定为 $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 并假设渠道沿线在计算初始时刻的水温均等于渠首水温。外界气温采用单

一恒定值(即各工况分别采用不同的恒定气温条件计算, 分别取 -2.5 、 -5.0 、 -7.5 、 -10.0 、 -12.5 和 $-15.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 分析不同气温条件下渠道沿程水温衰减规律。

计算表明: 当气温分别取 -2.5 、 -5.0 、 -7.5 、 -10.0 、 -12.5 和 $-15.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 渠道水温沿程衰减率分别为 $0.005 1$ 、 $0.009 4$ 、 $0.013 9$ 、 $0.018 4$ 、 $0.022 8$ 和 $0.027 3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$; 渠道不冻长度分别为 98.0 、 53.0 、 35.9 、 27.2 、 21.9 和 18.3 km 。由计算结果可知, 当气温小于水温时, 渠道水温沿程下降, 且外界气温越低, 水-气温差越大, 渠道水温沿程下降速率越快, 渠道的不冻长度越短。图 1 为在不同气温条件下的渠

道水温沿程衰减率和不冻长度,根据图 1 可拟合得到该模型渠道在上述流量工况下的不冻长度与外界气温的关系 [式(4)],可知不冻长度 L_0 与 $(-T_a)$ 呈反比关系。

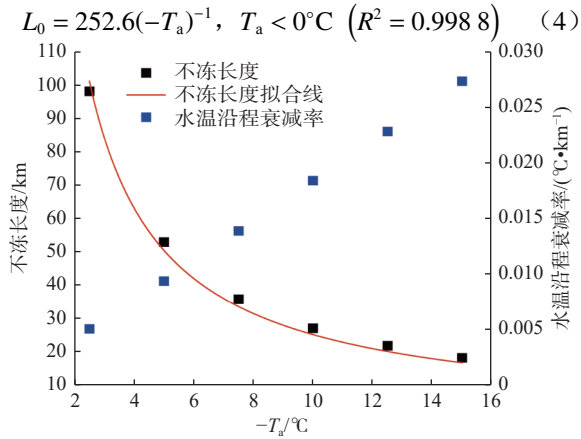


图 1 不冻长度与气温的关系
Fig. 1 Relationship between unfrozen length and air temperature

2.3 渠首水温的影响

除了气温,渠首水温也是影响渠道不冻长度的关键热力因素,在分析渠首水温对渠道冰期输水的热力影响时仍假设渠道输水流量为 $85 \text{ m}^3/\text{s}$,气温采用单一值 $-15.0 \text{ }^\circ\text{C}$,假设渠道沿线在计算初始时刻的水温均等于渠首水温。

计算表明:当渠首水温分别为 0.50 、 0.75 、 1.00 、 1.25 和 $1.50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,水温沿程下降速率分别为 0.0273 、 0.0276 、 0.0279 、 0.0281 和 $0.0283 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,渠道不冻长度分别为 18.3 、 27.2 、 35.9 、 44.5 和 53.0 km 。图 2 为不同渠首水温条件下的渠道水温沿程衰减率和不冻长度。由计算结果可知,渠首水温越高,渠道水温沿程下降速率越大,但差别微小。渠首水温对渠道不冻长度影响显著,渠首水温越高,渠道水体蕴含热能越多,不冻长度越长。根据图 2 可以拟合得到不冻长度与渠首水温的关系,如公式(5)所示,可知不冻长度与渠首水温呈反比关系。

$$L_0 = 35.66T_0, T_0 > 0^\circ\text{C} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (5)$$

式中: T_0 为渠首水温, $^\circ\text{C}$ 。

2.4 输水流量的影响

本节分析输水流量对渠道水温沿程衰减的影响。计算时设定渠首水温为 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒定值,渠道沿线在计算初始时刻的水温均等于渠首水温,气温为 $-15.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒定值。计算表明,当渠道输水流量分别为 17.0 、 34.0 、 51.0 、 68.0 和 $85.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,水温沿程衰减率分别为 0.0336 、 0.0192 、 0.0140 、 0.0112 和 $0.0094 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$,

渠道不冻长度分别为 14.9 、 26.0 、 35.7 、 44.6 和 53.0 km 。不同输水流量下的渠道水温沿程衰减率和不冻长度见图 3。结果表明,对于梯形断面尺寸和底坡一定的渠道工程,输水流量越大,渠道水温沿程衰减率越小,渠道的不冻长度越长。尽管输水流量增加,渠道水深增加、水面变宽,单位长度渠道水体向大气的传热量增加,但是流量增加使得水体所蕴含的总热能增加,同时渠道流速增大,这些延长渠道不冻长度的因素起着主导作用。根据图 3 可以拟合得到不冻长度与输水流量的关系式为

$$L_0 = 0.67Q \quad (R^2 = 0.9935) \quad (6)$$

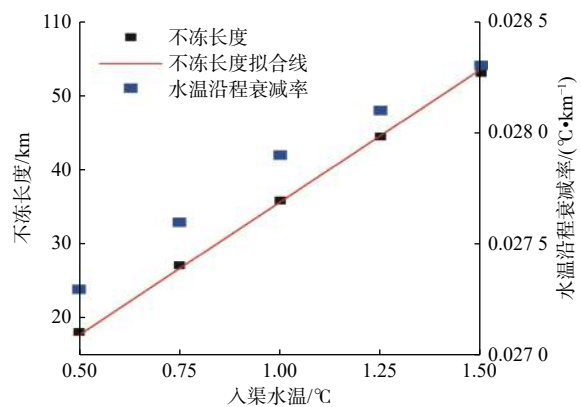


图 2 不冻长度与渠首水温的关系
Fig. 2 Relationship between unfrozen length and headwater temperature

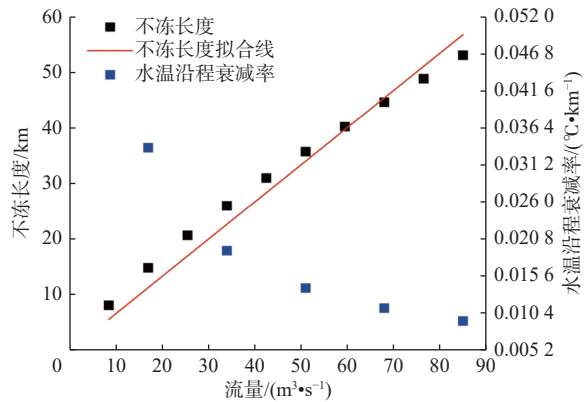


图 3 不冻长度与输水流量的关系
Fig. 3 Relationship between unfrozen length and water flow rate

2.5 不冻长度公式

由 2.2 至 2.4 节分析可知,对于梯形断面尺寸一定的渠道工程,其不冻长度受气温、渠首水温、输水流量等热力和水力因素影响。不冻长度与输水流量 Q 和水库入渠水温 T_0 成正比,与负气温的绝对值 $-T_a$ 成反比。针对本研究所设定的模型渠道,综合考虑不冻长度与上述 3 个影响因素之间的关系,基于第 2.2 至 2.4 节的模拟数据,利用 Python 开源的科

学计算库 NumPy 和 SciPy 将以上水力和热力影响因素进行多元拟合,得到该渠道的不冻长度计算公式为

$$L_0 = 5.5902 \frac{QT_0}{-T_a} + 1.0789 \quad (R^2 = 0.9991) \quad (7)$$

利用公式(7),可以针对 2.1 节设定的渠池,分析其在某输水流量、气温和渠首水温条件下的渠道不冻长度。虽然公式(7)仅适用于 2.1 节所设定的断面和底坡的渠池,仍难有较好的普适性,但是对不冻长度分析方法尚有一定借鉴意义。

3 外调水入渠的水力热力协同调控

为了从根本上解决长距离输水工程冬季冰害防治的问题,在上述研究的基础上进一步丰富一维明渠非恒定流水温模型,加入外调水入渠模块,研究沿途离线水库补水条件下冬季渠道的水温特性。进一步评估不同补水方案下的渠道水温控制效果,探索基于外调水入渠的水力热力协同调控方法,实现高纬度地区渠道冬季无冰输水。本研究主要针对两种“外部水库-渠道”耦联运行方式:常规补水模式,即单向抽取水库深层水体注入渠道以提升渠道水温;循环补水模式,即抽取水库深层水体注入渠道的同时,在补水点的上游侧也抽取等量的渠道低温水注入水库,使得渠道流量和地下水蓄量维持不变。

在一维渠道水温计算中,假设外调水和渠道内水体能快速充分地在补水断面混合,则渠道补水断面的混合水温 t_h 可采用公式简化计算:

常规补水模式计算公式为

$$t_h = \frac{Q_0 T + q t_w}{Q_0 + q} \quad (8)$$

循环补水模式计算公式为

$$t_h = \frac{(Q_0 - q) T + q t_w}{Q_0} \quad (9)$$

式中: Q_0 为原渠道流量, m^3/s ; T 为原渠道水温, $^{\circ}C$; q 为外调水流量, m^3/s ; t_w 为外调水的水温, $^{\circ}C$ 。

由式(8)和式(9)可知,由于循环补水模式实现了部分渠道低温水和外调温度较高的水的置换,所以循环补水模式获得的混合水温比常规补水模式高,但是混合后的流量不变,小于常规补水模式。

在循环补水模式下,为了确保渠道回补离线水库的低温水不影响离线水库补给渠道的水温,取水口和回补排水口的布置方式可参照火核电厂重叠式的取排水方式,即离线水库的取水口和回补出水口布置在同一垂线上,取水口布置在下部,回补出

水口布置在上部。由于水库具备较大的容积和水深,利用水库水体温度分层的现象,下层热取,表层冷回。

3.1 不同补水流量下的渠道水体温控效果

通过在渠道工程沿线设置补水点,引外部温度较高的水入渠,理论上可以实现冬季无冰输水。但是补水间隔设置太短会造成泵站建设过密、投入费用大;补水间隔设置太长,渠水在未到达下一个补水点时水温就低于冰点温度,出现结冰,影响渠道正常输水。利用一维明渠非恒定流水温模型公式(1)~(3),可以分析不同“水库-渠道”耦联调度方式、不同补水流量对渠道水温的提升效果,可确定适宜的补水间距及补水流量。

模拟条件。以 2.1 节的模型渠道为研究对象,渠道输水流量采用 $85 m^3/s$,渠首水温为 $0.5^{\circ}C$,气温取 $-15^{\circ}C$ 。为留有一定的控制余幅,严防冰害的发生,研究时以渠道断面水温大于 $0.1^{\circ}C$ 为控制条件,在渠道水温降至 $0.1^{\circ}C$ 的断面进行补水,假定外调水的温度为 $4^{\circ}C$ 。各工况下补水流量分别占原输水流量的 10% ($8.50 m^3/s$)、15% ($12.75 m^3/s$)、20% ($17.00 m^3/s$)、25% ($21.25 m^3/s$)、30% ($25.50 m^3/s$)。

补水间距分析。通过计算可以获得补水间距与 q/Q_0 (补水流量与输水流量的比值)之间的关系,见图 4。由图 4 可知,补水流量越大,补水后渠道水温上升越多,补水点设置间距越大。以循环补水模式为例,在渠道水温降至 $0.1^{\circ}C$ 的断面设置补水点,补水流量由占输水流量 10% 提升至 30% 时,补水间距可由 14.2 km 提升至 41.5 km。

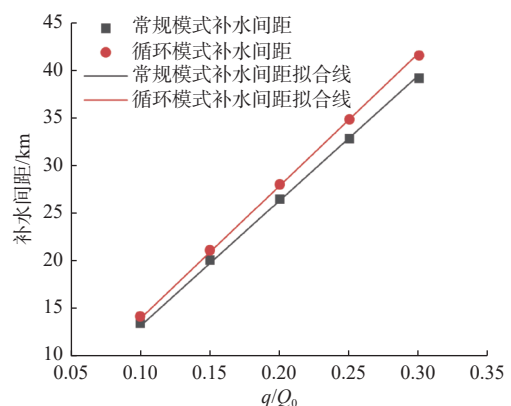


图 4 补水间隔与补水流量与输水流量的比值(q/Q_0)的关系
Fig. 4 The relationship between the recharge interval and the ratio of the recharge flow rate to the delivery flow rate (q/Q_0)

根据图 4 可分别拟合得到在 2 种补水模式下补水间距与 q/Q_0 的关系式:

常规补水模式关系式为

$$L = 131.53q/Q_0 \quad (R^2 = 0.9999) \quad (10)$$

循环补水模式关系式为

$$L = 139.27q/Q_0 \quad (R^2 = 0.9999) \quad (11)$$

式中: L 为渠道补水间隔, km; q 为外调水流量, m^3/s ; Q_0 为原渠道流量, m^3/s 。

3.2 不同外界气温下的渠道水体温控效果

模拟条件。分析不同气温环境下的补水温控效果仍以 2.1 节的模型渠道为例, 渠首水温、补水水温仍分别取 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $4.0\text{ }^\circ\text{C}$, 断面补水流量占输水流量的 10% ($8.50\text{ }m^3/s$)。各计算工况下的气温分别采用不同的恒定值: -5 、 -10 、 -15 、 -20 和 $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

最大补水间距分析。以循环补水模式为例, 计算可知当气温分别为 -10 、 -15 、 -20 、 -25 和 $-30\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 补水间距分别为 21.1、14.2、10.7、8.6 和 7.2 km。补水最大间距与 $(T-T_a)/(t-T)$ 的关系见图 5。根据图 5 可以分别拟合得到 2 种补水模式下最大补水间距与 $(T-T_a)/(t-T)$ 的关系式[式(12)、(13)]。由式(12)、(13)可知补水点间距与 $(T-T_a)/(t-T)$ 成反比, 即在原渠水温度一定的情况下, 气温越低、补水水温越低, 补水间距越小。

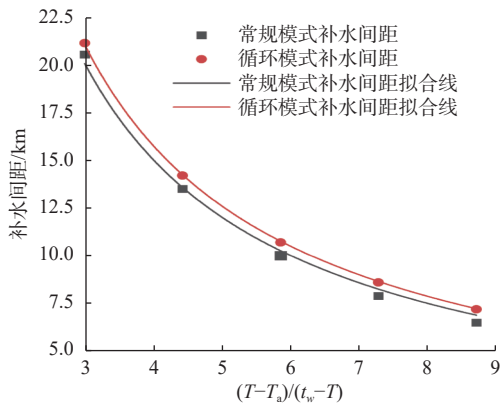


图 5 补水间距与 $(T-T_a)/(t_w-T)$ 的关系

Fig. 5 Relationship between recharge spacing and $(T-T_a)/(t_w-T)$

常规补水模式:

$$L = 60.11 \left(\frac{T-T_a}{t_w-T} \right)^{-1} \quad (R^2 = 0.9954) \quad (12)$$

循环补水模式:

$$L = 63.04 \left(\frac{T-T_a}{t_w-T} \right)^{-1} \quad (R^2 = 0.9999) \quad (13)$$

式中: T_a 为外界大气温度, $^\circ\text{C}$; T 为原渠道水温, $^\circ\text{C}$; t_w 为外调水的水温, $^\circ\text{C}$ 。

3.3 两种补水模式的渠道温控效果比较

在常规补水模式下, 由于离线水库向渠道单向

补水, 因此在无沿途分水的情况下, 越往下游渠道内流量越大。如果沿途向渠道补水的流量和补水温度保持不变, 则越向下游的补水点补水后渠内水流升温效果越差。以渠首输水流量 $85\text{ }m^3/s$ 、单点补水流量 $8.5\text{ }m^3/s$ 、外界气温为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 为例, 60 km 的渠道需要沿途设置 4 个补水点。受沿途补水的影响, 渠道流量从渠首的 $85\text{ }m^3/s$ 阶梯性增加到渠道末端的 $119\text{ }m^3/s$, 各补水点补水后混合水温分别为 0.455 、 0.425 、 0.400 和 $0.379\text{ }^\circ\text{C}$, 升温效果逐级降低。但是相邻补水点间距近乎相等, 自上游到下游分别为 13.6 、 13.5 和 13.6 km 。由 2.4 节的分析可知, 尽管随着渠道流量的增加, 补水后的断面温升效果下降, 但是输水流量越大, 水体所储热能也越多、流速增加, 水温沿程衰减率降低, 因此沿途渠道不冻长度并未发生明显改变。

在循环补水模式下, 渠道输水流量始终保持不变, 故各补水点补水后升温效果相同, 补水间隔也相同。以渠首输水流量 $85\text{ }m^3/s$ 、单点补水流量 $8.5\text{ }m^3/s$ 、外界气温为 $-15\text{ }^\circ\text{C}$ 为例, 渠道需要设置 4 个补水点, 各补水点补水后混合水温均为 $0.49\text{ }^\circ\text{C}$, 补水点间距均为 14.2 km 。

比较不同补水模式下的不冻长度拟合公式(10)~(13), 在气温、输水流量、补水流量及渠首水温、补水水温均相同的情况下, 循环补水模式下的不冻长度比常规补水模式下增加 $4.9\% \sim 5.9\%$, 需设置的补水点少。而且循环补水模式下, 渠道输水流量和离线水库的蓄量能保持基本稳定, 有助于沿途补水资源的可持续利用。

3.4 不冻长度公式在补水间距估算中的应用

利用 2.5 节通过多元拟合得到的不冻长度公式(7)计算模型渠道的补水间距, 与 3.1 节、3.2 节通过数值模拟得到的补水间距进行对比。

由于 3.1 节、3.2 节在分析补水间距时以渠道断面水温大于 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 为补水控制条件, 所以公式(7)中渠首水温由补水后混合水温减去 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 富余水温计算。将补水间距计算值与一维明渠水温模拟结果进行比较, 结果见图 6。从图 6 可以看出, 不冻长度公式计算值与数值模拟值吻合较好, 误差在 $-0.05\% \sim 6.30\%$ 范围内, 表明通过本研究的分析方法获取不冻长度计算公式, 再根据气象条件、输水任务和补水条件来确定渠道补水间隔是可行的。

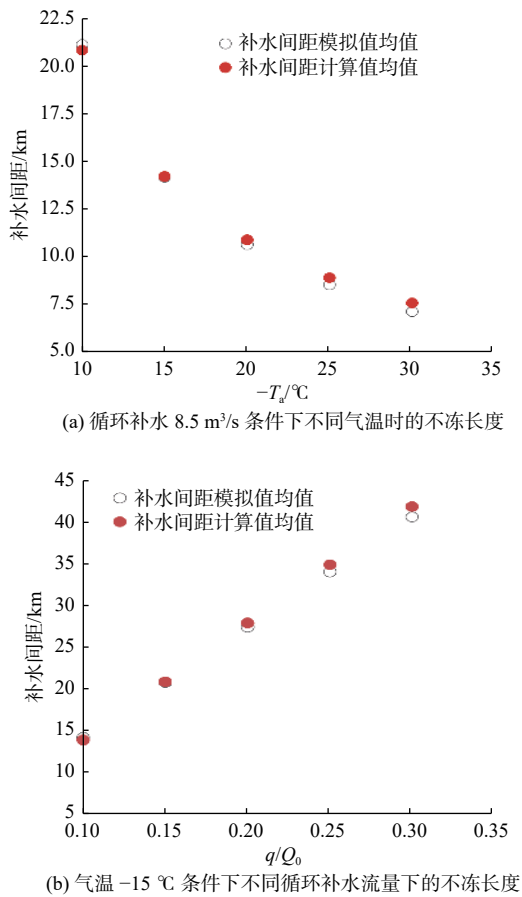


图 6 补水间距计算值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and simulated values of recharge spacing

4 结论

针对冰盖下输水方式严重影响冰期渠道输水能力的问题,利用数值模拟的方法研究外调水入渠的冰期渠道水力热力协同调控方法。以一个梯形断面尺寸一定的单渠池工程为例,分析气温、渠首水温 and 输水流量对渠道沿程水温衰减的影响。综合上述水力、热力因素对渠水温度的影响特性,提出该渠道的不冻长度计算公式,在此基础上研究了2种渠道补水模式(常规补水模式、循环补水模式)的渠道温控效果。主要结论如下:

冰期渠道水温沿程下降,对于梯形断面尺寸一定的渠道工程,渠道不冻长度与输水流量和渠首水温成正比,与负气温绝对值成反比。将以上水力和热力影响因子进行多元拟合,得到对应渠道的不冻长度经验公式。

在接近冰点的渠道断面,通过外调水入渠,能够延长渠道不冻长度,可在一定输水距离范围内避免渠道结冰。

分析了常规补水和循环补水2种补水模式下的最大补水间距与补水流量、气温、补水水温的关系。补水流量越大、补水水温越高、外界气温越高,补水点设置间距越大。根据一维渠道水温数值模拟结果,得到了补水最大间距与补水流量、渠水与大气温差、渠水与补水温差之间的拟合关系式。

从不冻长度来看,在气温、输水流量、补水流量及渠首水温、补水水温均相同的情况下,循环补水模式下的不冻长度比常规补水模式略长。循环补水模式下,渠道输水流量和外部水库的蓄量能保持基本稳定,有助于沿途离线水库补水资源的可持续利用,但循环补水模式需要补、取水点成对设置,加大了水流的复杂程度,增加了调度难度。在实际工程中,对于补水方案需进行技术经济综合比选。

本研究是在渠道断面形状尺寸、底坡等工程参数一定的条件下开展的气温、流量、渠首水温等外部影响因素的研究工作,而渠道底坡、底宽、边坡系数等工程参数也会对渠水的热交换产生重要影响,本研究尚未涉及。建议今后开展相关研究,使渠道不冻长度的研究成果更具普适性。

外调水入渠的水力热力协同调控方法为消减高纬度地区冬季渠道冰情、实现无冰输水提供了一种新的思路和方法。南水北调中线工程冰情状况最严重的河北省境内,拥有较为丰富的地热能资源。河北省全省可采地热能资源总量相当于211亿t标准煤,但目前地热年可开采量仅相当于1138.2万t标准煤^[25-26],地热能开发利用潜力巨大。利用好地热能资源,在工程沿线建设地下水库,并利用好沿线离线水库,可实现河北段渠道无冰运行,对于充分发挥南水北调等高纬度地区跨流域调水工程效益、保障国家水资源安全具有重要意义。

参考文献:

- [1] 宋先松,石培基,金蓉. 中国水资源空间分布不均引发的供需矛盾分析[J]. 干旱区研究, 2005(2): 162-166. DOI: 10.13866/j.azr.2005.02.005.
- [2] 金思凡,初京刚,李昱,等. 南水北调中线京石段冬季调度策略[J]. 南水北调与水利科技(中英文)2021, 19(2): 365-377. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0039 DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0039.
- [3] 穆祥鹏,陈文学,刘爽,等. 南水北调中线干渠冰期控

- 冰索水力控制条件研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(2): 90-97. DOI: 10.13244/j.cnki.ji-whr.2018.02.002.
- [4] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0087.
- [5] 黄国兵, 杨金波, 段文刚. 典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(1): 144-149. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0020.
- [6] 李景刚, 陈晓楠, 卢明龙, 等. 南水北调中线干线冰期输水动态调度初探[J]. *中国水利*, 2023, 956(2): 30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.02.010.
- [7] 陆英, 杨民才. 青海省小水电站冬季运行的几种有效措施[J]. *人民黄河*, 1993(1): 48-49.
- [8] 邓朝彬, 刘柏年. 香加水电站引水渠冬季注水升温运行发电实践经验介绍[J]. *农田水利与小水电*, 1987(7): 43-45.
- [9] 波达波夫. 引水道式农村水电站的冰冻问题 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1959.
- [10] SHEN H T, CHIANG L A. Simulation of growth and decay of river ice cover[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(7): 958-971. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:7(958).
- [11] 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.
- [12] 宗全利, 郑铁刚, 吴素杰, 等. 高寒区引水渠道抽水融冰不冻长度计算模型及应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(10): 99-106. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.012.
- [13] 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.
- [14] 唐伟. 循环利用地热能冰期输水技术研究 [D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [15] 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, 44(9): 1071-1079. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.09.016.
- [16] 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.
- [17] 殷心盼, 管光华. 非等温明渠交汇流的水力-水温特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(5): 157-165, 171. DOI: 10.12396/znsd.222574.
- [18] 李程喜, 段文刚, 马啸, 等. 南水北调中线工程京石段冬季水温回归预测模型[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 352-361. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0036.
- [19] 郭佳雯, 蒲迅赤, 黄瑞仙. 渠道走向及几何尺寸对灌溉水增温的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 137-144. DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2019019.
- [20] 靳芮揆. 长距离冬季输水渠道电热防冰冻模型试验研究 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2021.
- [21] 穆祥鹏, 陈云飞, 吴艳, 等. 冰水二相流渠道流冰输移演变规律及其安全运行措施研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(5): 144-151. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0136.
- [22] SHEN H T, YAPA P D. Computer simulation of ice cover formation in the Upper St. Lawrence River [C]// Proc. of 3th Workshop on Hydraulics of River Ice. Fredericton, Canada, 1984: 227-246.
- [23] 杨开林, 刘之平, 李桂芬, 等. 河道冰塞的模拟[J]. *水利水电技术*, 2002, 33(10): 40-47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2002.10.013.
- [24] LAL A M W, SHEN H T. A mathematical model for river ice processes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1991, 117(7): 851-867. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:7(851).
- [25] 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 等. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 2017, 44(6): 1074-1085. DOI: 10.12029/gc20170603.
- [26] 河北省自然资源厅(海洋局). 河北省自然资源厅关于印发《河北省地热资源勘查开发“十四五”规划》的通知: 冀自然资发[2022]38号[EB/OL]. <http://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gongk/gkml/zcwj/zcfkg/zck/10794581499551051776.html>, 2022-11-21/2023-07-16.

Hydraulic-thermal synergistic control method of channel during ice period based on external water transfer into the channel

MU Xiangpeng¹, ZHANG Zheqi¹, BAO Juan¹, CHEN Wenxue¹, CHEN Xiaonan²

(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. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: With the large negative cumulative temperature of China's northern latitude in winter, the ice conditions occurring in the channel are prone to develop into ice disasters such as ice jams and ice dams. For the consideration of disaster mitigation, water transmission in the channel during the ice period is often operated by controlling the flow velocity and Fr value, using the mode of water transmission under ice cover, i.e., forming a stable ice cover, changing the heat exchange between water and the outside. However, this method of water conveyance reduces the water flow and restricts the engineering benefits. In the mode of water transmission under the ice cover, it is difficult to get a substantial increase in the way of water transmission capacity based on improving the accuracy of meteorological and ice forecasting, improving the efficiency and quality of hydraulic regulation to shorten the range and length of the channel section of the water transmission during the ice period. Therefore, the channel project with a certain size of trapezoidal section as an example was taken and the sensitive factors affecting the channel water temperature in the ice period was analyzed through a numerical simulation method. On this basis, the formula for the unfrozen length of the channel is obtained through multivariate fitting and researches the hydraulic-thermal synergistic regulation method of transferring water externally into the channel to eliminate the ice condition by increasing the heat of the channel water.

According to the established ice-period water transfer model, a 60-km-long channel was simulated. The influence laws of winter air temperature, headwater temperature, and water delivery flow on the along-range attenuation of channel water temperature were analyzed, and the unfrozen length formula of the channel was obtained by the multivariate fitting, the temperature control effect of two offline recharge modes of reservoirs on the channel water body was analyzed, the influence of recharge flow, air temperature and recharge water temperature on the maximal recharge interval was analyzed, and the unfrozen length formula was used to calculate the maximal recharge spacing.

From the simulation results, it can be seen that: the channel water temperature decreases along the course during the ice period, and the unfrozen length is proportional to the water flow (Q) and the water temperature in the inlet channel (T_0), and inversely proportional to the absolute value of the negative temperature ($-T_a$). The maximum spacing of recharge water in the two modes of recharge conventional water replenishment and cyclic recharge is related to the recharge flow rate, the air temperature and recharge water temperature, and the larger the recharge flow rate, the higher the outside air temperature, the higher the recharge water temperature, the larger the spacing between the recharge point settings. According to the numerical simulation results, the relationship equations between the maximum spacing of recharge and the ratio of recharge flow rate, the temperature difference between the channel water and the atmosphere, and the temperature difference between the channel water and the recharge water were obtained. From the point of view of unfrozen length, under the same meteorological conditions, water delivery conditions, recharge flow rate, and thermal conditions, the unfrozen length in the recirculating recharge mode increases by about 4.9% to 5.9% compared with the conventional recharge mode, and fewer recharge points need to be set up. The calculated values of the unfrozen length formula are in good agreement with the numerical simulation value.

By transferring water externally into the channel, the unfrozen length of the channel can be extended, and the channel can avoid freezing within a certain water transmission distance, thus avoiding ice-covered water transmission, which can solve the bottleneck problem of insufficient water transmission capacity of the long-distance water transmission channel in the ice period.

Key words: winter water delivery; unfrozen length; water temperature; recharge pattern; water transfer project