

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. LI C X, DUAN W G, MA X, et al. Regression model of water temperature in winter for the Beijing-Shijiazhuang Section of middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 352-361. (in Chinese)

# 南水北调中线工程京石段冬季水温回归预测模型

李程喜<sup>1</sup>, 段文刚<sup>1</sup>, 马啸<sup>2</sup>, 黄明海<sup>1</sup>

(1. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

**摘要:** 为解决南水北调中线工程冰期输水能力受限问题, 根据输水明渠线性、单向流动的特点, 建立基于初始断面水温-沿程气温链的冬季水温回归预测模型, 根据 2018—2021 年冰期的水温气象资料, 模拟分析中线工程京石段水温变化过程, 并用 2017—2018 年度冰期的实测数据进行检验。结果表明: 回归模型的拟合优度 ( $R^2$ ) 值最小为 0.957, 最大为 0.991; 各组模型检验的确定性系数 (DC) 值均能达到 0.90; 预见期从 1 日至 5 日, 均方根误差 (RMSE) 值分别为 0.05、0.11、0.15、0.14、0.22; 平均绝对误差 (MAE) 值分别为 0.17、0.25、0.28、0.28、0.37, 均随预见期递增, 符合模型的残差累积规律。模型选择的水温变量  $T_{w_{n,t}}$  和气温变量  $T_{a_{n,t}}$  对被解释变量  $T_{w_{(n+1),j+1}}$  具有较好解释性, 预测值和观测值的拟合度优良。

**关键词:** 南水北调中线; 水温; 预测; 冰情; 回归模型

**中图分类号:** TV211.1:P332      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0036

针对南水北调中线工程京石段冰期输水问题, 国内目前已开展了部分研究。郭新蕾等<sup>[1]</sup>通过冰情发展过程模拟, 提出冷冬、平冬和暖冬气温条件下, 应分别关注中线工程黄水河节制闸以北、七里河节制闸以北、京石段等渠段。赵嘉诚等<sup>[2]</sup>通过对京石段 2008 年临时通水期间冰情的分析, 从时间上对京石段冰期过程进行划分, 总结了防冰措施的实际使用效果。徐冬梅等<sup>[3]</sup>分析了京石段应急通水以来的 4 次完整调水过程, 将冰期调水划分为达成目标水位、流冰、冰盖形成、冰盖下输水、融冰 5 个阶段, 总结了各个阶段的冰期调度规律。李芬等<sup>[4]</sup>运用模糊评价理论在空间上将京石段按照冰害风险等级分为 5 级, 提出西黑山—瀑河倒虹吸段及坟庄河节制闸—南拒马河段的相对风险最大。金思凡等<sup>[5]</sup>以水力子模型、热力子模型、冰冻子模型为核心, 建立了坟庄河节制闸—南拒马河渠段的冰情演变模型, 阐述了水深、流速、负积温、气温降幅等多因素对冰塞风险的影响。

水温预报模型是冰情预报中最重要的子模型, 水气热交换是河渠水体冬季失热的主要原因, 占水体热循环的 90% 以上<sup>[6]</sup>。杨开林<sup>[7-9]</sup>通过分析水体热交换过程, 提出水体与大气的线性化和非线性化热交换模型, 详细研究了水体热交换净热通量的组成及影响因素等问题, 为水温预测模型提供了理论基础支撑; 王涛等<sup>[10-11]</sup>提出气温是影响预报结果的直接因素, 也是相关性最强的因子。水温变化直接反应了水体和周围环境的热交换结果, 可以作为冰情初生和发展的判定依据。严增才等<sup>[12]</sup>给出流冰花产生的临界条件为断面平均水温在 0.3 °C 以下, 断面平均水温降至 0 °C 可形成动态冰盖; 段文刚等<sup>[13]</sup>提出冰盖形成的临界条件为最低气温低于 -10 °C; 温世亿等<sup>[14]</sup>提出流冰花产生的临界条件为断面平均水温在 1 °C 以下; Lal 等<sup>[15]</sup>提出的 RICE 模型就直接用表面水温和垂向水深平均水温作为冰情预测的判定因素, 现有的冰情预测模型大多以水温配合气象及水力学参数进行判定。

收稿日期: 2022-08-19      修回日期: 2023-01-30      网络出版时间: 2023-02-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230206.1805.005.html>

基金项目: 南水北调中线冬季输水能力提升关键技术研究项目 (CKSK2019707/SL); 南水北调中线干线工程冰期输水冰情原型观测项目 (CKSK2020168/SL)

作者简介: 李程喜(1995—), 男, 四川内江人, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 453583678@qq.com

通信作者: 段文刚(1972—), 男, 河南南召人, 正高级工程师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: ckydwg@163.com

为研究河渠水温变化规律,基于不同的理论支撑,已建立了大量的水温模型,主要分为统计参数模型和一维数值模型。戴盼伟等<sup>[16]</sup>建立了南水北调中线干渠一维水温数值模型,模拟分析了不同流量工况下总干渠冬季水温沿程变化规律。程曦等<sup>[17]</sup>基于2016—2019年度的冬季原型观测资料,研究了水温的时空分布规律,提出南水北调中线全线和京石段的水温沿程变化率;段亚飞等<sup>[18]</sup>通过概化河渠水面热交换动态过程,提出了能响应气象条件实时变化的动态水温快速计算方法,分析了水温对气象因素的敏感性,但其背景为热带地区,对寒区的适用性还有待验证;韦耀国等<sup>[19]</sup>基于BP神经网络建立了南水北调中线水温预报模型,完成了对多种水温影响因子的综合分析,模型考虑了断面水温的时间变化,但未能体现出水体在空间上顺序流动的特点;赵海镜等<sup>[20]</sup>基于回归分析方法建立了水温预测模型WTI,该模型机制简洁计算方便,但其所选

参数的物理机制相对模糊,预测站点间相对独立,未能将各个预测断面串联成一个整体。

本研究基于南水北调中线工程历年冰期输水原型观测数据,根据输水明渠线性、单向流动的特点,提出初始断面水温-沿程气温链的计算模型,通过回归分析建立多断面迭代的水温预测模型。

## 1 模型渠段水温冰情分析

### 1.1 京石段概况

京石段位于总干渠末端,是冰情最严重、冰害风险最大的渠段。北拒马河暗渠进口至团城湖的暗涵和PCCP管道输水的79.8 km渠段在研究冰情时一般不考虑,以北拒马河暗渠进口节制闸作为京石段终点,起点没有统一的说法,一般以古运河<sup>[2,4,21]</sup>、磁河节制闸<sup>[3]</sup>、沙河(北)倒虹吸<sup>[1]</sup>为起点,或仅指其中部分渠段<sup>[5]</sup>。本研究中京石段指滹沱河倒虹吸(K 980+263)至北拒马河暗渠进口节制闸(K 1197+773)217.5 km的渠段,见图1。

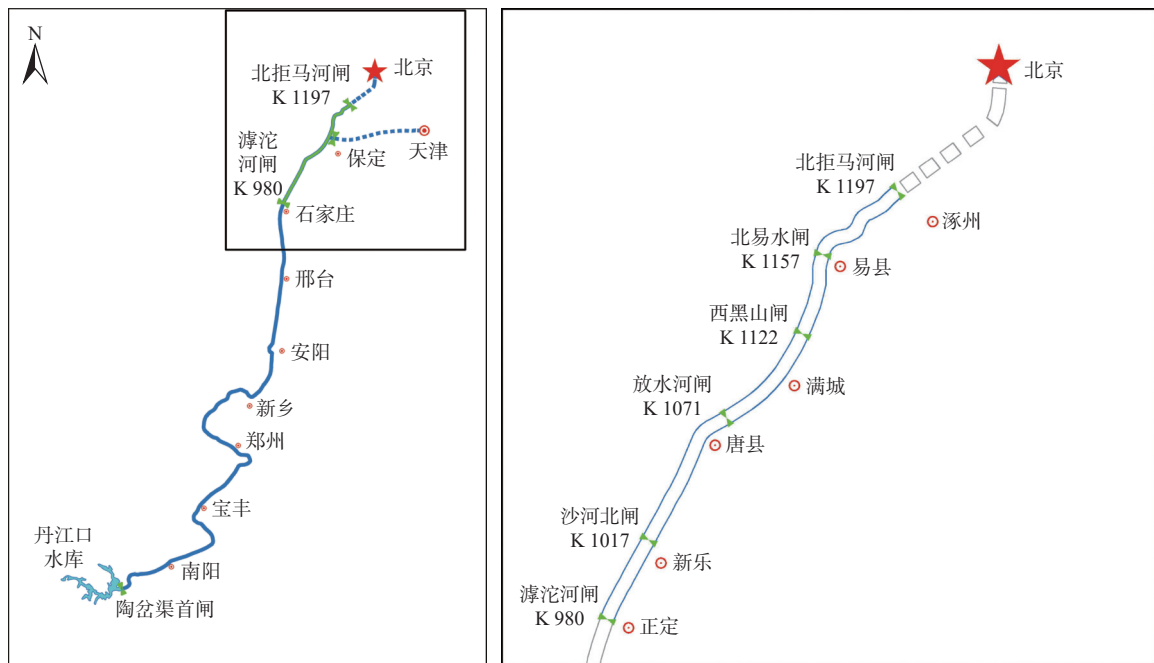


图1 南水北调中线工程京石段

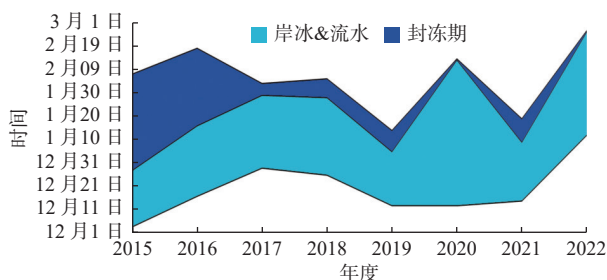
Fig. 1 Beijing-Shijiazhuang section of middle route of South-to-North Water Transfer Project

### 1.2 冰情时间分布特征

选择总干渠末端北拒马河渠段为研究对象,统计历年不同冰情过程,见图2。特别说明:2019—2020年度冰期北拒马河渠段为静水封冻,未予统计;冰盖消融后的残余岸冰期未予统计。

除2014—2015年度总干渠第一次全线通水,前期流量较小冰期开始的时间较早外,大部分在12月

中旬才开始有冰情出现。从整个历时来看,结冰期仅占到整个冰期调度时长(12月1日—次年3月1日)的51%,岸冰和稀疏流冰对输水调度基本不造成影响,冰盖封冻期占整个冰期输水调度时间的14%。冰期输水调度范围为安阳河节制闸以北渠段,北拒马河渠段是冰期历时最长的渠段,北拒马河以南渠段的冰期历时逐渐减小。



注: 2019-2020 年度冰期北拒马渠段为静水, 该年度冰盖不予统计。

图 2 北拒马河闸历年冰情过程

Fig. 2 Duration and proportion of ice conditions in the North Juma River section over the years

南水北调冬季水温由南向北下降, 沿线各闸站都有水温监测的仪器。水温是作为冰情预报的良好判定条件, 冰情预报模型通常要以水温预报作为前提。当总干渠水温预报达到一定精度时, 可以考虑采用动态的冰期输水调度模式, 压缩冰期输水调度时间, 增大总干渠冬季过水流量。

### 1.3 水温对冰情影响关系

统计总干渠全线通水以来, 不同冰情初生当日的日最低气温和日平均水温, 见图 3, 蓝色圈内为垂直边坡处的岸冰数据。根据原型观测, 边坡系数小的断面水渠交界处的水体流速较大, 更难生成岸冰。黄色圈内为 2021 年 1 月 7 日极端寒潮来袭时, 流冰和冰盖生成当日的水气温度, 日最低气温明显偏低。除去垂直边坡处的点, 可以看出岸冰、流冰、冰盖初生当日的平均水温具有相对明显的分界, 因此以水温作为冰情生成和发展的判断条件是可行的。

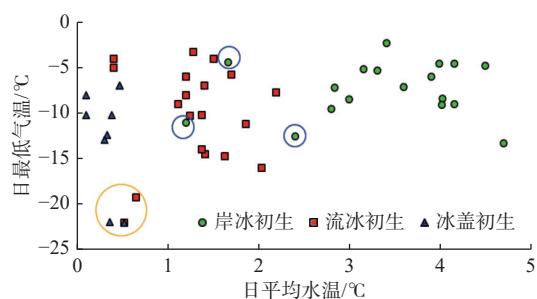


图 3 历年冰情初生当日的日最低气温水和日平均水温统计

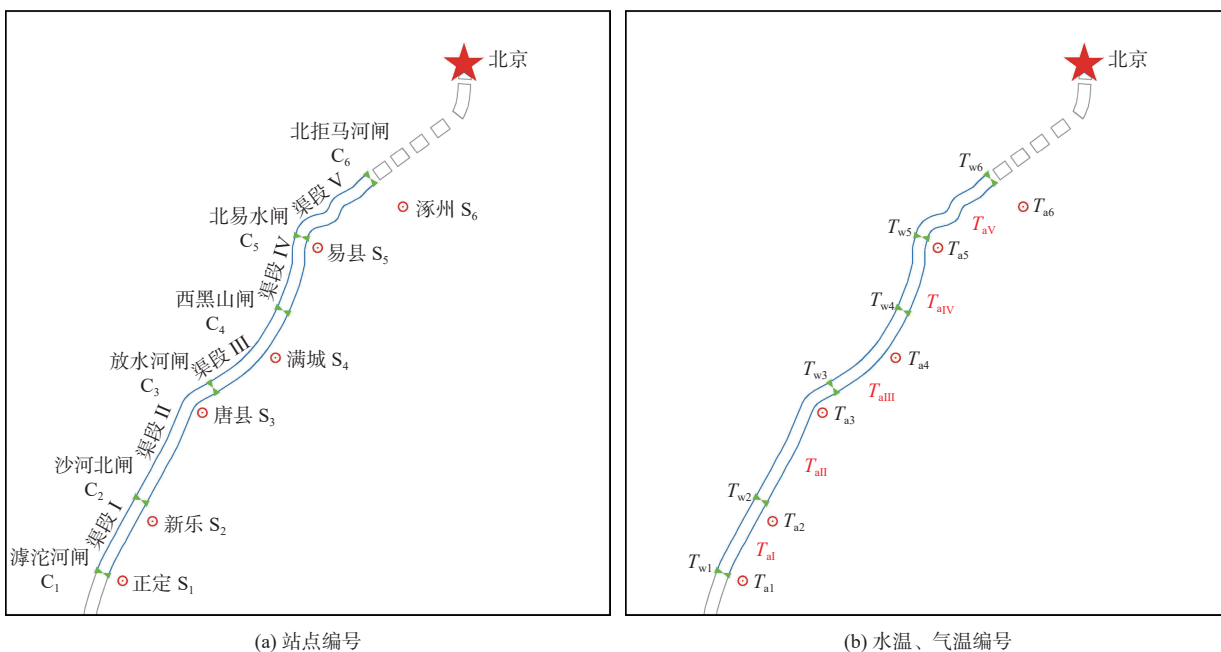
Fig. 3 Air & water temperature on the day of various ice appearing

## 2 水温回归模型构建

### 2.1 模型概况

模型以滹沱河节制闸( $C_1$ )为起点, 设沙河(北)节制闸( $C_2$ )、放水河节制闸( $C_3$ )、西黑山节制闸( $C_4$ )、北易水节制闸( $C_5$ )、北拒马河节制闸( $C_6$ )等 6 个水温预测控制断面; 对应的气象站分别为正定站( $S_1$ )、新乐站( $S_2$ )、唐县站( $S_3$ )、满城站( $S_4$ )、易县站( $S_5$ )、涿州站( $S_6$ ); 6 个控制断面将整个 217.5 km 的渠段分割为 5 个渠段,  $C_1$ — $C_2$ 命名为渠段 I,  $C_2$ — $C_3$ 命名为渠段 II,  $C_3$ — $C_4$ 命名为渠段 III,  $C_4$ — $C_5$ 命名为渠段 IV,  $C_5$ — $C_6$ 命名为渠段 V, 见图 4(a)。

将水体从 $C_1$ 流到 $C_6$ 所经过的时间作为一个预测周期, 水体流经 $C_1$ 的时间为 $t_1$ , 流经 $C_2$ 的时间为 $t_2$ , 后经过各水温预测控制断面的时间分别为 $t_3$ 、 $t_4$ 、 $t_5$ , 最终到达总干渠明渠末端的北拒马河节制闸 $C_6$ 的时间为 $t_6$ 。



(a) 站点编号

(b) 水温、气温编号

图 4 各站点气温、水温编号

Fig. 4 Air temperature and water temperature number of each station

将C<sub>1</sub>断面在t<sub>1</sub>时刻的水温记为T<sub>w1,1</sub>, C<sub>2</sub>断面在t<sub>2</sub>时刻的水温记为T<sub>w2,2</sub>, 其后依次为T<sub>w3,3</sub>、T<sub>w4,4</sub>、T<sub>w5,5</sub>、T<sub>w6,6</sub>。将S<sub>1</sub>气象站在t<sub>1</sub>时刻的气温记为T<sub>a1,1</sub>, S<sub>2</sub>气象站在t<sub>2</sub>时刻的气温记为T<sub>a2,2</sub>, 其后依次为T<sub>a3,3</sub>、T<sub>a4,4</sub>、T<sub>a5,5</sub>、T<sub>a6,6</sub>, 见图4(b)。

以研究渠段各节制闸的冰期安全输水流量、控制水位和渠道自身的断面形状为计算依据, 计算得到各渠池的平均流速, 进而求得以滹沱河节制闸为起点水体流经各个水温预测断面的时间, 见表1。

表1 水体流经各控制断面的时间  
Tab. 1 Schedule of water through each control section

控制断面	编号	桩号	距离/km	时间	时间/h	时间/d	安全输水流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	控制水位/m
滹沱河	C <sub>1</sub>	980+263	0	t <sub>1</sub>	0	0	55.17	74.99
沙河北	C <sub>2</sub>	1017+430	37	t <sub>2</sub>	22	0.9	52.08	72.57
放水河	C <sub>3</sub>	1071+911	92	t <sub>3</sub>	53	2.2	50.52	69.44
西黑山	C <sub>4</sub>	1121+955	142	t <sub>4</sub>	78	3.2	47.64	65.28
北易水	C <sub>5</sub>	1157+690	177	t <sub>5</sub>	99	4.1	28.08	62.84
北拒马河	C <sub>6</sub>	1197+773	218	t <sub>6</sub>	118	4.9	22.97	60.30

为方便模型计算, 将水体流经各渠段的时间都简化为1 d, 气温代表值使用各气象站的日最低气温计算:

$$T_{a_n,1} = \frac{T_{a_{n,\min,1}} + T_{a_{n+1,\min,2}}}{2} \quad (1)$$

式中: T<sub>a<sub>n</sub></sub>为渠段I第n日的气温代表值, °C; T<sub>a<sub>n</sub>,min,1</sub>为S<sub>1</sub>气象站第n日的日最低气温, °C; T<sub>a<sub>n+1</sub>,min,2</sub>为S<sub>2</sub>气象站第n+1日的日最低气温, °C。

T<sub>a<sub>n</sub>,II</sub>、T<sub>a<sub>n</sub>,III</sub>、T<sub>a<sub>n</sub>,IV</sub>、T<sub>a<sub>n</sub>,V</sub>的定义同T<sub>a<sub>n</sub></sub>。

## 2.2 回归模型参数分析

开敞的输水明渠水体的流动失热过程, 可以用一维对流扩散方程来表征其热力守恒的规律, 计算公式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c A T_w) + \frac{\partial}{\partial x}(Q \rho c T_w) = \frac{\partial}{\partial x} \left( A E_x \rho c \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) - \delta B \varnothing_n \quad (2)$$

式中: t为时间, s; ρ为水体的密度, kg/m<sup>3</sup>; c为水的比热, J/(kg·°C); A为渠道断面面积, m<sup>2</sup>; T<sub>w</sub>为水温, °C; x为沿河距离, m; Q为河道流量, m<sup>3</sup>/s; E<sub>x</sub>为热扩散率, m<sup>2</sup>/s; B为渠道宽, m; ϕ<sub>n</sub>为水面净热通量, W/m<sup>2</sup>; δ为修正系数。

冰期输水期间渠道的流量变化并不显著, 不考虑流量的变化, 那么式(2)可以简化为

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) - \frac{\delta \varnothing_n}{\rho c D} \quad (3)$$

式中: u为平均流速, m/s; D为等效水深, m。

冰期输水运行期间, 渠道流速基本在0.4 m/s以上, 相比水体对流项对水温的影响, 水体扩散项基

本可以忽略不计<sup>[18]</sup>, 式(3)可以改写为

$$\frac{dT_w}{dt} = -\frac{\delta \varnothing_n}{\rho c D} \quad (4)$$

式(4)可以变形为

$$\rho c D dT_w = -\delta \varnothing_n dt \quad (5)$$

等式两边同时乘上单位长度渠道表面换热面积B', 式(5)可以变形为

$$\rho c D B' dT_w = -\delta \varnothing_n B' dt \quad (6)$$

$$\rho D B' = m \quad (7)$$

式中: m为单位长度河流包含水体的质量, kg; B'为单位长度渠道表面换热面积, m<sup>2</sup>。

式(6)可以变形为

$$m c dT_w = -\delta \varnothing_n B' dt \quad (8)$$

如图5所示, 假设一质量为m的单位长度水体, 由t<sub>1</sub>时刻开始, 经过(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>)时间, 从C<sub>1</sub>断面运动到C<sub>2</sub>断面时, 水温由T<sub>w1,1</sub>降低到T<sub>w2,2</sub>。

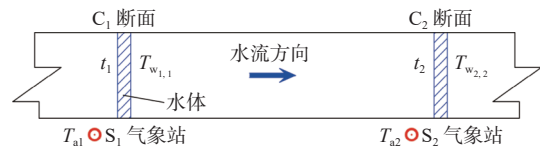


图5 水体流动失温过程

Fig. 5 Temperature loss process of water flow

对式(8)从t<sub>1</sub>到t<sub>2</sub>积分, 如下式:

$$\int_{t_1}^{t_2} m c dT_w = \int_{t_1}^{t_2} -\delta \varnothing_n B' dt \quad (9)$$

式(9)左侧可以变形为

$$m c \int_{t_1}^{t_2} dT_w = m c (T_{w2,2} - T_{w1,1}) = m c \Delta T_w \quad (10)$$

式(9)可以变形为

$$\Delta T_w = -\frac{\delta B'}{mc} \int_{t_1}^{t_2} \phi_n dt \quad (11)$$

由上式可以看出,水体从C<sub>1</sub>断面运动到C<sub>2</sub>断面的过程中,水温的变化ΔT<sub>w</sub>主要取决于水体的净热通量φ<sub>n</sub>随时间的变化过程。

由于水体换热的过程十分复杂,影响因素繁多,要想通过传热学理论解析出φ<sub>n</sub>的数学表达式十分困难。Ashton<sup>[22]</sup>提出了描述河湖与大气的热交换的线性化模型,河湖与大气的净热通量公式为

$$\phi_n = h_{sa}(T_w - T_a) \quad (12)$$

式中: h<sub>sa</sub>为能量交换系数, W/(m<sup>2</sup>·℃); T<sub>w</sub>为水温,℃; T<sub>a</sub>为气温,℃。

取T<sub>w</sub>为T<sub>w<sub>1,1</sub></sub>,取T<sub>a</sub>为T<sub>a<sub>1,1</sub></sub>

$$\phi_n = h_{sa}(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}}) \quad (13)$$

$$\Delta T_w = -\frac{\delta B'}{mc} \int_{t_1}^{t_2} h_{sa}(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}}) dt \quad (14)$$

假设h<sub>sa</sub>在研究渠段内保持不变, T<sub>w<sub>1,1</sub></sub>和T<sub>a<sub>1,1</sub></sub>在t<sub>2</sub>时段内为一定值:

$$\Delta T_w = -\frac{\delta B'}{mc} h_{sa}(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}}) \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (15)$$

$$\Delta T_w = -\frac{\delta B'}{mc} h_{sa}(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}})(t_2 - t_1) \quad (16)$$

令Δt = t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>,

$$\Delta T_w = -\frac{\delta B'}{mc} h_{sa}(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}})\Delta t \quad (17)$$

假设h<sub>sa</sub>在研究渠段内保持不变,在忽略流速和流量变化的情况下,Δt为一定值,令 $-\frac{\delta B'}{mc} h_{sa} \Delta t = k_1$ ,则有

$$\Delta T_w = k_1(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}}) \quad (18)$$

取水温差值ΔT<sub>w</sub>为C<sub>1</sub>断面t<sub>1</sub>时刻水温T<sub>w<sub>1,1</sub></sub>和C<sub>2</sub>断面t<sub>2</sub>时刻水温T<sub>w<sub>2,2</sub></sub>之差,即

$$\Delta T_w = T_{w_{2,2}} - T_{w_{1,1}} \quad (19)$$

得到

$$T_{w_{2,2}} - T_{w_{1,1}} = k_1(T_{w_{1,1}} - T_{a_{1,1}}) \quad (20)$$

$$T_{w_{2,2}} = (1 + k_1)T_{w_{1,1}} - k_1T_{a_{1,1}} \quad (21)$$

由于该公式的推导过程对水温影响因子进行了简化假设,同时考虑风速、地温、降水等其他因子对水温的影响,引入水温修正因子c<sub>1</sub>,则

$$T_{w_{2,2}} = (1 + k_1)T_{w_{1,1}} - k_1T_{a_{1,1}} + c_1 \quad (22)$$

同理可得:

$$T_{w_{3,3}} = (1 + k_2)T_{w_{2,2}} - k_2T_{a_{2,2}} + c_2 \quad (23)$$

$$T_{w_{4,4}} = (1 + k_3)T_{w_{3,3}} - k_3T_{a_{3,3}} + c_3 \quad (24)$$

$$T_{w_{5,5}} = (1 + k_4)T_{w_{4,4}} - k_4T_{a_{4,4}} + c_4 \quad (25)$$

$$T_{w_{6,6}} = (1 + k_5)T_{w_{5,5}} - k_5T_{a_{5,5}} + c_5 \quad (26)$$

由公式T<sub>w<sub>2,2</sub></sub> = (1 + k<sub>1</sub>)T<sub>w<sub>1,1</sub></sub> - k<sub>1</sub>T<sub>a<sub>1,1</sub></sub> + c<sub>1</sub>, 假设参数:

a<sub>1</sub> = 1 + k<sub>1</sub>, b<sub>1</sub> = -k<sub>1</sub>; a<sub>2</sub> = 1 + k<sub>2</sub>, b<sub>2</sub> = -k<sub>2</sub>; a<sub>3</sub> = 1 + k<sub>3</sub>, b<sub>3</sub> = -k<sub>3</sub>; a<sub>4</sub> = 1 + k<sub>4</sub>, b<sub>4</sub> = -k<sub>4</sub>; a<sub>5</sub> = 1 + k<sub>5</sub>, b<sub>5</sub> = -k<sub>5</sub>。可以建立参数模型

$$M_{12} : T_{w_{2,2}} = a_1 T_{w_{1,1}} + b_1 T_{a_{1,1}} + c_1 \quad (27)$$

$$M_{23} : T_{w_{3,3}} = a_2 T_{w_{2,2}} + b_2 T_{a_{2,2}} + c_2 \quad (28)$$

$$M_{34} : T_{w_{4,4}} = a_3 T_{w_{3,3}} + b_3 T_{a_{3,3}} + c_3 \quad (29)$$

$$M_{45} : T_{w_{5,5}} = a_4 T_{w_{4,4}} + b_4 T_{a_{4,4}} + c_4 \quad (30)$$

$$M_{56} : T_{w_{6,6}} = a_5 T_{w_{5,5}} + b_5 T_{a_{5,5}} + c_5 \quad (31)$$

### 2.3 回归模型参数计算

选择 2018—2019 年、2019—2020 年和 2020—2021 年度的冰期输水数据作为基础数据,通过二元线性回归分析,计算得到 a<sub>1</sub> ~ a<sub>5</sub>、b<sub>1</sub> ~ b<sub>5</sub>、c<sub>1</sub> ~ c<sub>5</sub> 共 15 个参数,利用统计学方法对其进行统计检验,建立水温回归预测模型。利用此模型对 2017—2018 年度冰期输水的水温过程进行预测,并将预测值与观测值进行对比分析,验证模型的精度。

2020 年度惠南庄泵站检修,北易水和滹沱河 2019—2020 年度冰期的流量明显低于往年,由于模型假设单个闸站冰期输水流量基本保持不变,所以分析计算 M<sub>45</sub> 和 M<sub>56</sub> 时,用 2016—2017 年度冰期输水的数据代替 2019—2020 年度数据。

每个冰期输水年度从 12 月 1 日到次年的 2 月 28 日,共计 90 日依次排序,提取 C<sub>i</sub> 第 n 日最低水温 T<sub>w<sub>n,i</sub></sub> 和 C<sub>i+1</sub> 断面第 n+1 日最低水温 T<sub>w<sub>(n+1),i+1</sub></sub>, S<sub>i</sub> 气象站第 n 日最低气温 T<sub>a<sub>n,i</sub></sub> 和 S<sub>i+1</sub> 气象站第 n+1 日最低气温 T<sub>a<sub>(n+1),i+1</sub></sub>,但是由于 T<sub>a<sub>n,i</sub></sub> 和 T<sub>a<sub>(n+1),i+1</sub></sub> 之间具有较强的相关性,同时使用 T<sub>a<sub>n,i</sub></sub> 和 T<sub>a<sub>(n+1),i+1</sub></sub> 进行回归分析,不易满足多元线性回归模型的各解释变量之间线性无关的基本假设,所以取二者的均值 T<sub>a<sub>n,x</sub></sub> 作为气温代表值参与回归分析, T<sub>a</sub> 代表气温, x=i 代表渠段,用罗马数字 I~V 表示, n 代表时间段。 T<sub>w<sub>n,i</sub></sub>、 T<sub>w<sub>(n+1),i+1</sub></sub>、 T<sub>a<sub>n,x</sub></sub> 为一组观测样本,其线性回归模型表达式为

$$T_{w_{(n+1),i+1}} = a_i T_{w_{n,i}} + b_i T_{a_{n,x}} + c_i + \varepsilon \quad (32)$$

式中: T<sub>w<sub>(n+1),i+1</sub></sub> 为 C<sub>i+1</sub> 断面第 n+1 日最低水温,℃; T<sub>w<sub>n,i</sub></sub> 为 C<sub>i</sub> 断面第 n 日最低水温,℃; T<sub>a<sub>n,x</sub></sub> 为第 x 渠段气温代表值 [式(1)],℃; a<sub>i</sub>、 b<sub>i</sub>、 c<sub>i</sub> 为参数; ε 为随机误差,℃。

经过回归分析,各模型的分析计算结果见表 2,并对计算结果进行拟合优度(R<sup>2</sup>)、显著性(P 值)、多重共线性(VIF)检验。

表 2 回归模型参数回归分析计算结果  
Tab. 2 Calculation results of regression analysis

模型编号	冰期年度	模型参数估计			$R^2$	P值		VIF
		$\hat{a}_i$	$\hat{b}_i$	$\hat{c}_i$		$T_w$	$T_a$	
M <sub>12</sub>	2018—2019、2019—2020、2020—2021	0.920	0.076	0.415	0.991	<0.001	<0.001	1.345
M <sub>23</sub>	2018—2019、2019—2020、2020—2021	0.899	0.101	0.785	0.981	<0.001	<0.001	1.409
M <sub>34</sub>	2018—2019、2019—2020、2020—2021	0.883	0.095	0.158	0.957	<0.001	<0.001	1.459
M <sub>45</sub>	2016—2017、2018—2019、2020—2021	0.877	0.078	0.578	0.981	<0.001	<0.001	1.354
M <sub>56</sub>	2016—2017、2018—2019、2020—2021	0.926	0.072	0.248	0.976	<0.001	<0.001	1.337

按照参数假设:

$$a_i + b_i = (1 + k_i) + (-k_i) = 1 \quad (33)$$

由回归分析结果计算得:

$$\hat{a}_1 + \hat{b}_1 = 0.920 + 0.076 = 0.996 \quad (34)$$

$$\hat{a}_2 + \hat{b}_2 = 0.899 + 0.101 = 1.000 \quad (35)$$

$$\hat{a}_3 + \hat{b}_3 = 0.883 + 0.095 = 0.978 \quad (36)$$

$$\hat{a}_4 + \hat{b}_4 = 0.877 + 0.078 = 0.955 \quad (37)$$

$$\hat{a}_5 + \hat{b}_5 = 0.926 + 0.072 = 0.998 \quad (38)$$

5组参数的计算结果基本符合参数建立时的假设,证明理论推导和参数选择的合理性。

### 2.4 模型串联

以C<sub>6</sub>北拒马河断面作为预测断面,将M<sub>45</sub>和M<sub>56</sub>

串联在一起可以得到模型M<sub>46</sub>,将M<sub>34</sub>、M<sub>45</sub>、M<sub>56</sub>串联在一起可以得到模型M<sub>36</sub>,将M<sub>23</sub>、M<sub>34</sub>、M<sub>45</sub>、M<sub>56</sub>串联在一起可以得到模型M<sub>26</sub>,将M<sub>12</sub>、M<sub>23</sub>、M<sub>34</sub>、M<sub>45</sub>、M<sub>56</sub>串联在一起可以得到模型M<sub>16</sub>,见图6。经计算得到1~5 d 预见期的模型分别为

$$M_{56} : T_{w_{6,6}} = 0.926T_{w_{5,5}} + 0.072T_{a_{5,V}} + 0.248 \quad (39)$$

$$M_{46} : T_{w_{6,6}} = 0.812T_{w_{4,4}} + 0.072T_{a_{4,IV}} + 0.072T_{a_{5,V}} + 0.783 \quad (40)$$

$$M_{36} : T_{w_{6,6}} = 0.717T_{w_{3,3}} + 0.077T_{a_{3,III}} + 0.072T_{a_{4,IV}} + 0.072T_{a_{5,V}} + 0.912 \quad (41)$$

$$M_{26} : T_{w_{6,6}} = 0.645T_{w_{2,2}} + 0.072T_{a_{2,II}} + 0.077T_{a_{3,III}} + 0.072T_{a_{4,IV}} + 0.072T_{a_{5,V}} + 1.474 \quad (42)$$

$$M_{16} : T_{w_{6,6}} = 0.593T_{w_{1,1}} + 0.049T_{a_{1,I}} + 0.072T_{a_{2,II}} + 0.077T_{a_{3,III}} + 0.072T_{a_{4,IV}} + 0.072T_{a_{5,V}} + 1.742 \quad (43)$$

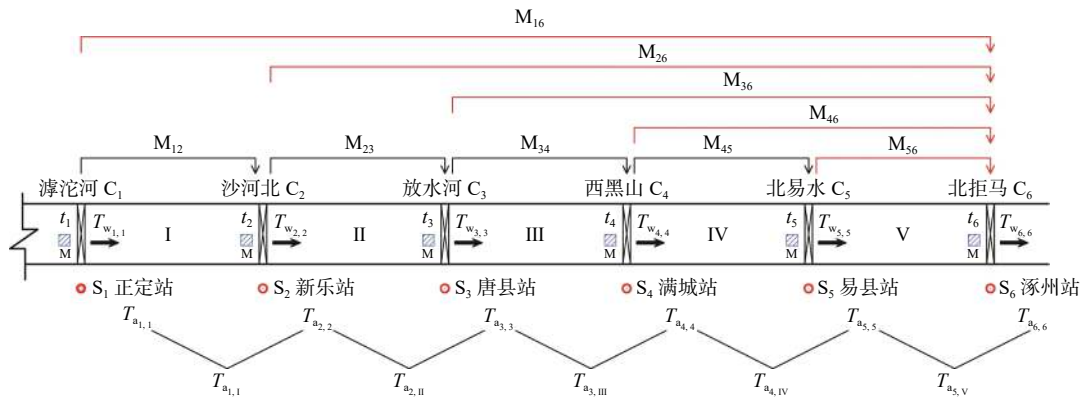


图 6 水温模型串联

Fig. 6 Series connection of water temperature models

## 3 模型预测结果检验

### 3.1 评价标准与参数计算

使用2017—2018年度冰期的水温和气温实测数据,对各个模型进行预测。将预测值与实测值进行拟合度比较,并进行残差分析。参考GB/T 22482—

2008 水文预报规范<sup>[23]</sup>的精度评定标准,用确定性系数DC来判别水温预报的精确程度,使用均方根误差(RMSE)、残差标准差( $\sigma$ )、平均绝对误差(MAE)、最大残差( $e_{max}$ )对模型预测成果进行综合评价。各评价指标计算结果见表3。

表 3 回归模型预测结果评价指标  
Tab. 3 Evaluation index of prediction results of regression model

模型编号	预见期/d	冰期年度	预测年度	DC	RMSE	MAE	$\hat{\sigma}$	$e_{\max}$
M <sub>56</sub>	1	2016—2017、2018—2019、2020—2021	2018	0.98	0.05	0.17	0.21	0.60
M <sub>46</sub>	2	2018—2019、2016—2017、2020—2021	2018	0.96	0.11	0.25	0.32	0.70
M <sub>36</sub>	3	2018—2019、2016—2017、2020—2021	2018	0.94	0.15	0.28	0.40	1.05
M <sub>26</sub>	4	2018—2019、2016—2017、2020—2021	2018	0.94	0.14	0.28	0.38	1.10
M <sub>16</sub>	5	2018—2019、2016—2017、2020—2021	2018	0.90	0.22	0.37	0.46	1.36

### 3.2 预测结果

各组模型对 2017—2018 年度冰期北拒马河节

制闸日最低水温预测值与实测值进行对比见图 7,

各组模型残差分布见图 8。

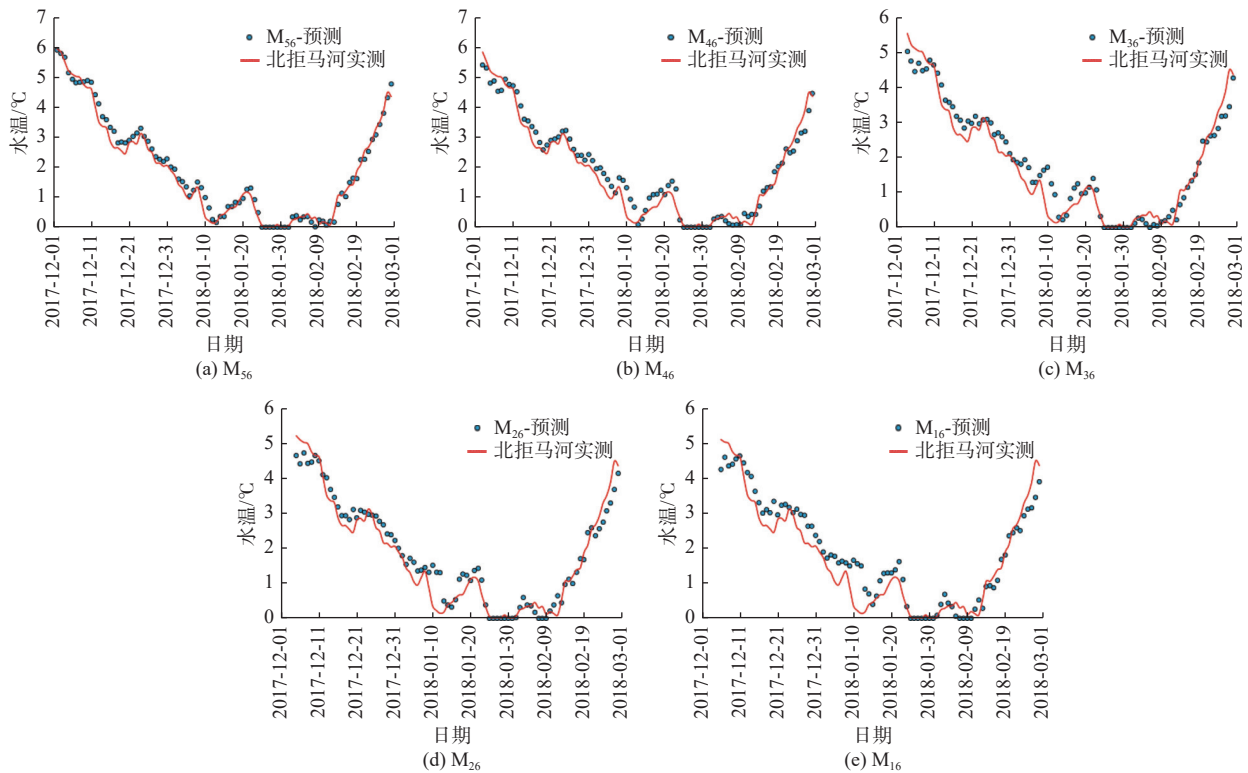


图 7 预测值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between predicted value and measured value

### 4 分析与讨论

该水温模型为统计模型,模型建立时假设各渠段水动力学因素基本保持不变,在选用数据时也规避了 2020 年北易水和北拒马河两闸站流量较小的情况,如果流量、流速和水位等主要水动力学因素发生较大变化,模型将产生较大的误差。

模型建立的数据来自 2016—2020 年的冰期,模型参数在时间和空间上都具有特定限制范围,若将模型用于非冰期的水温预测,由于水体传热过程相

关参数的变化较大,将产生较大的误差。若是将其用于其他工程,相关模型参数应重新计算。

回归分析检验值较好(表 2),但水气温度都是时间序列数,不可避免存在一定的自相关。各组模型 DC 值均能达到 0.90,参照 GB/T 22482—2008 水文预报规范其精度皆能评定为甲级,说明各模型的预测值与观测值的拟合程度较高;RMSE、MAE、 $\hat{\sigma}$  和  $e_{\max}$  值基本随预见期的增长都呈现递增趋势,预测值与实测值之间的偏差逐渐增大,残差的分布也越来越离散,符合模型的残差自然累积规律;M<sub>36</sub>和

$M_{26}$ 两者预测的精确度差距很小,除最大残差 $e_{\max}$ 以外, $M_{26}$ 比 $M_{36}$ 的结果还要好(表3),这是时间因素的计算简化所致, $M_{26}$ 的实际时间刚好是4 d,而 $M_{36}$ 的

实际时间为2.7 d(表1),与 $M_{36}$ 计算简化值3 d有0.3 d的差值,必然对模型的精确度造成一定的影响。

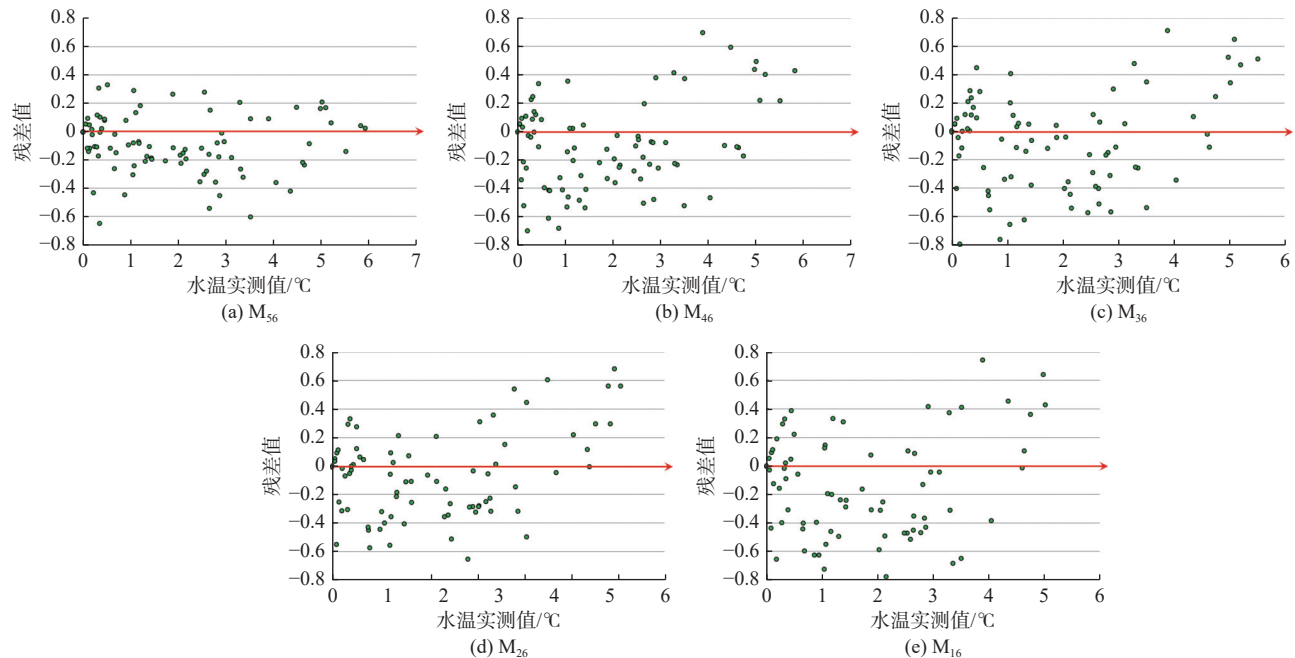


图8 残差分布

Fig. 8 Residual distribution

由于模型空间范围限定为京石段,水温预见期最大为5 d,如需更长的预报时长可以考虑将模型向上游拓展,直至陶岔渠首闸。理论上可以得到最长约24 d以内的水温预报时长。南水北调工程冰期输水原型观测还在不断进行数字化和智能化升级,后期所得到的基础数据资料必将越来越翔实,未来可以考虑将数据进一步精细化,在模型中加入水力学参数,有望建立小时级的水温预报模型。

## 5 结论

对历年冰情时空分布的分析,以明渠最北端的北拒马河渠段为例,冰期仅占整个冰期调度时长的51%,岸冰和稀疏流冰对整个中线总干渠的调度基本不造成影响,冰盖封冻占整个冰期输水调度时间14%,现有冰期输水调度模式具有很大的优化空间。

回归模型 $R^2$ 的值最小为0.957,模型选择的变量 $T_{w_{n,i}}$ 和 $T_{a_{n,i}}$ 对水温变化的解释性较好; $\hat{a}_i + \hat{b}_i$ 的值都接近1,符合模型假设;用2017—2018年度冰期的数据对模型进行检测,各组模型确定性系数DC值均能达到0.90,残差随预见期递增,符合模型的残差累

积规律,预测值和实测值的拟合度较好。这说明基于初始断面水温-沿程气温链的计算方法适用于长距离输水明渠冬季水温回归预测。

## 参考文献:

- [1] 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: 10.3969/j.issn.1672-9900.2006.01.003.
- [2] 赵嘉诚,韩黎明,王术国.浅议南水北调中线京石段工程冰期输水技术[J].南水北调与水利科技,2009,7(5):37-39. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.05.009.
- [3] 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.
- [4] 李芬,李昱,李敏,等.基于模糊评价模型的南水北调中线冰害风险空间分布[J].南水北调与水利科技,2017,15(1):132-137. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.01.022.
- [5] 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.nsb-dqk.slx-b.2021.0039.
- [6] 郭新蕾, 王涛, 付辉, 等. 河渠冰水力学研究进展和趋势[J]. *力学学报*, 2021, 53(3): 655-671. DOI: 10.6052/0459-1879-20-407.
- [7] 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.slx-b.20210483.
- [8] 杨开林. 冰期河湖与大气的热交换模型[J]. *水利学报*, 2021, 52(5): 556-564, 577. DOI: 10.13243/j.cnki.slx-b.20200550.
- [9] 杨开林. 水冰雪反照率参数化通用模型[J]. *水利水运工程学报*, 2020(4): 1-9. DOI: 10.12170/20200428003.
- [10] 王涛, 杨开林. 神经网络算法在南水北调冰期输水中的应用[J]. *水利学报*, 2009, 40(11): 1403-1408. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.11.020.
- [11] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 模糊理论和神经网络预报河流冰期水温的比较研究[J]. *水利学报*, 2013, 44(7): 842-847. DOI: 10.13243/j.cnki.slx-b.2013.07.005.
- [12] 严增才, 吴新玲. 南水北调中线工程冰期输水原型观测与冰情分析[J]. *河北水利*, 2008, 154(4): 28-29. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7700.2008.04.016.
- [13] 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.nsb-dqk.2016.06.017.
- [14] 温世亿, 杨金波, 段文刚, 等. 南水北调中线2014—2015年度冬季冰情原型观测[J]. *人民长江*, 2015, 46(22): 99-102. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.023.
- [15] LAI W.A.M, SHEN H T A mathematical model for river ice processes[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 117(7): 851-867. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1991)117:7(851).
- [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] 程曦, 李楠楠, 张欢. 南水北调中线冬季渠道水温变化规律研究[C]//中国水利学会2019学术年会论文集: 第五分册: 中国水利水电出版社, 2019: 665-670. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.097488.
- [18] 段亚飞, 赵懿珺, 纪平, 等. 响应实时气象条件变化的河渠水温快速计算[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(3): 119-126. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.03.018.
- [19] 韦耀国, 赵海镜, 杨国华, 等. 神经网络在南水北调中线冬季水温预测中的应用[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(S2): 335-338. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.S2.074.
- [20] 赵海镜, 高林, 杨国华, 等. 南水北调中线冰情预测模型研究[C]//中国水利学会2019学术年会论文集: 第五分册: 中国水利水电出版社, 2019: 620-628. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.097482.
- [21] 马宝祥, 赵军涛, 魏艳秀. 南水北调中线京石段渠道倒虹吸拦冰索设计[J]. *水科学与工程学报*, 2006(1): 6-7. DOI: 10.19733/j.cnki.1672-9900.2006.01.003.
- [22] ASHTON G D. *River and lake ice engineering* [M]. Littleton, Colorado, USA: Water Resources Publications, 1986.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. *水文预报规范 GB/T 22482—2008* [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

## Regression model of water temperature in winter for the Beijing-Shijiazhuang Section of middle route of South-to-North Water Transfer Project

LI Chengxi<sup>1</sup>, DUAN Wengang<sup>1</sup>, MA Xiao<sup>2</sup>, HUANG Minghai<sup>1</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430102, China; 2. Construction Administration Bureau of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As a strategic infrastructure project to solve the uneven distribution of water resources in China, the middle route of South-to-North Water Transfer Project was increasingly dependent in Beijing, Tianjin and other water receiving areas due to its good quality and stable water supply. In winter, the water temperature of the open channel gradually decreased with the air temperature, and there was ice in the canal north of Anyang. When the

water temperature dropped below 0.5 °C, a large number of ice crystals began to form. In order to prevent ice jam, the safe water delivery flow under the ice sheet was only 31.6% ~ 47.6% of the design flow. There was a huge contradiction between the increasing water demand in north China and the declining water delivery capacity of the project in ice period. Ice condition prediction was an important means to solve the safe operation of water conveyance in the ice period of the project, meet the control requirements of water level and flow under various complex operating conditions, and ensure the safe and efficient operation of the middle route of South-to-North Water Transfer Project. Water temperature prediction model was the most important sub model in ice condition prediction. The occurrence and evolution process of ice condition was closely related to water temperature factors.

According to the characteristics of linear, unidirectional and sequential flow in open channel, a calculation model based on initial section water temperature along the temperature chain was established. Based on the data of meteorological and water temperature during the ice period in 2019, 2020 and 2021, five groups of 15 regression parameter models of water temperature prediction in the prediction period of 1 - 5 days in the 217.5 km canal section from Hutuo River Siphon outlet sluice (K 980 + 263) to the North Juma River culvert inlet sluice (K 1197 + 773) at the northernmost end of the main canal were established.

Based on the analysis and sorting of the field measurement data of water transmission in winter since the first water supply of the whole line of the project, according to the statistical data of North Juma River canal segment from 2015 to 2022, the freezing of ice carapace only accounted for 14% of the whole ice period. The minimum value of  $R^2$  in regression models was 0.957 and the maximum value was 0.991. Using the data of 2018 for prediction test, the DC values of each group of model test could reach 0.90. Taking the North Juma River station as the prediction section, the RMSE values of 1 - 5 day forecast period were 0.05, 0.11, 0.15, 0.14 and 0.22 respectively, and the MAE values were 0.17, 0.25, 0.28, 0.28 and 0.37 respectively, which increased regularly with the growth of the forecast period.

The water transmission dispatching mode in winter had a lot of room to optimize. Water temperature could be used as the judgment basis for the initiation and development of ice condition. Water temperature  $T_{w_{n,i}}$  and air temperature  $T_{a_{n,x}}$  had a good interpretation to the water temperature  $T_{w_{(n+1),j+1}}$ , and the predicted value and the observed value was matched well. The method to establish the model had a certain practical value.

**Key words:** middle route of South-to-North Water Transfer; water temperature; prediction; ice condition; regression model