

南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究

练继建^{1,2}, 杨德明^{1,2}, 赵新^{1,2}

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 针对南水北调中线工程冬季输水冰情的安全运行问题, 以南水北调中线工程河北段为研究对象, 以热平衡理论为出发点推导出目标单元渠段的整体总热量变化公式; 采用单因素局部分析法选出风险评价指标, 基于概率论构建了风险评价指标之间的联合概率密度函数, 将气象事件发生概率、热量变化率与冰情风险等级一一对应, 从而对渠道冰情进行风险评估。对2021年1月6—8日南水北调中线工程河北段输水渠道冰情风险分析结果表明: 在整个热交换过程中, 短波辐射、蒸发和对流热交换是影响热量变化的主要因素, 且夜间渠道的热量散失明显大于白天, 加大了夜间发生冰情的风险; 沙河节制闸—渠末段虽然与其他渠段风险等级一样, 但其单位面积热量损失明显高于其他渠段, 接近于极高风险, 应加强对该渠段的实时监测并做好冰情防护。

关键词: 冬季输水; 冰情风险; 热平衡理论; 概率分析; 联合概率密度函数; 南水北调中线工程
中图分类号: TV698 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)01-0063-08

Study on risk of sudden ice conditions in winter for Middle Route of South-to-North Water Diversion Project// LIAN Jijian^{1,2}, YANG Deming^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problem of ice conditions in winter for the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, taking the Hebei section of the project as the research object, the formula of overall total heat variation of canal sections of the target unit was derived through the theory of heat balance. The single factor local analysis method was used to select the evaluation index. Then, based on the idea of probability theory, the joint density function between evaluation indexes was built, and the probability of meteorological events, change rate of total heat change, the risk level of ice conditions was correlated, so as to carry out the risk assessment of ice conditions in channels. The risk analysis results of ice conditions in Hebei section of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project from January 6th to 8th in 2021 show that, in the whole process of heat exchange, the short-wave radiation, evaporation and convection are the main factors, and the heat loss in the channel at nights is significantly greater than that in the daytime, which increases the risk of sudden ice conditions at nights. In addition, although the risk level of Shahe gate-terminal section is the same as that of other sections, its heat loss per unit area is obviously higher than that of other sections, and it is close to extremely high risk. In practice, real-time monitoring should be strengthened and relevant protection measures should be taken for this section.

Key words: water conveyance in winter; risk of ice conditions; theory of heat balance; probability analysis; joint probability density function; Middle Route of South-to-North Water Diversion Project

南水北调中线工程受冬季寒冷天气的影响, 渠道经常会发生不同程度的冰情^[1-4], 从而改变渠道的水力条件, 造成水工建筑物等设施损坏, 不仅严重威胁工程冬季输水的运行安全, 还会造成巨大的经济损失。冰情分为多个阶段, 其中初期是冰情演变的基础, 尤为重要。本文研究的冰情风险指渠道刚开始的产冰阶段(即冰期初期阶段, 不是冰塞冰坝等

冰害形成阶段)的冰情风险, 该阶段由于受外界气象条件的影响, 具有较强的随机性和不确定性, 为渠道冰情的风险评估带来了极大挑战。《全国气象发展“十四五”规划》中提出“建立健全以气象灾害预警信息为先导的全社会快速响应和高效联动机制”的方针, 因此, 通过气象数据对输水渠道进行冰情风险研究具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金(51909186, U20A20316)
作者简介: 练继建(1965—), 男, 教授, 博士, 主要从事水利水电工程安全与优化应用研究。E-mail: jilian@tju.edu.cn
通信作者: 赵新(1984—), 男, 讲师, 博士, 主要从事水动力学研究。E-mail: jolson@tju.edu.cn

对冰情的演变过程已有大量研究。例如:Shen^[5]提出了双层冰输运数学模型对表面冰和浮冰进行数值模拟;Wang等^[6]基于二次成核和絮凝等多个过程,开发了水的过冷过程演变模型和水内冰演变模型;宗全利等^[7]根据热平衡理论,综合考虑水力、热力、气候等条件,推导得到渠道不冻长度的计算公式;唐伟^[8]通过地下水抽灌的地热能利用方式,结合热平衡理论对输水渠道无冰盖输水的可行性进行了分析;穆祥鹏等^[1]根据传热学理论,对铺设保温盖板的输水渠道水体进行了数学模拟。由上述研究可以看出,热平衡过程直接影响着冰的形成和演变。

对输水工程冬季输水潜在风险的研究主要在风险因素识别^[9-12]和风险评价方法^[11-16]两个方面开展。姜蓓蕾等^[17-18]利用层次分析法构建评价指标体系,并采用模糊综合评价法对南水北调东线工程和中线工程某段进行了风险评价。胡丹等^[19]构建了直觉模糊集理论评价模型,采用TOPSIS法对输水渠道进行综合评价并计算了相应的风险等级。刘勇等^[20]针对长距离输水工程的特点,考虑风险的预测、可控和转移等,构建了多维功效函数对工程单元进行风险识别。现有的输水风险评价关注点主要集中在输水建筑物上,缺乏输水渠道冰情过程的风险评价,也忽视了采用概率理论对风险因素进行宏观分析。概率分析可以较为直接地描述风险因素之间的内在联系,已得到广泛应用^[21-24]。刘强等^[25]针对寒区公路的风吹雪灾害问题,利用概率论思想,构建联合密度函数进行脆弱性评估,并在此基础上建立风险评估体系进行风险分析。吴柳萍等^[26]基于信息扩散理论,建立了福建省森林病虫害风险概率模型,对森林病虫害发生的风险范围进行了评估。王磊等^[24]构建了暴雨-潮位联合分布模型分析深圳市风险概率,从而定量揭示了极端降水与潮位遭遇风险的内在规律。

本文以渠道热平衡理论为基础,对评价指标进行概率分析,从多角度对冬季输水冰情进行风险评估,以为输水工程安全运行和防灾减灾工作提供参考。

1 研究方法与研究数据

1.1 研究方法

针对输水工程冬季输水冰情风险,以热平衡理论为出发点,计算出整个冰情的形成与演变过程中各部分热交换量,推导出目标单元渠段的整体总热量变化计算公式,并从中找出宏观风险性评价指标;基于冰情风险评价指标与风险发生结果相对应的原则,通过总热量变化率(每米渠道单位水面面积的

总热量变化)和风险评价指标的联合概率函数求出冰情的风险等级;根据风险等级对南水北调中线工程(河北段)进行风险评估,分析该渠段的热量变化规律和风险等级分布。

1.2 研究数据

以南水北调中线工程河北段为研究区域,将其分为安阳节制闸—铭河节制闸、铭河节制闸—午河节制闸、午河节制闸—沙河节制闸和沙河节制闸—渠末4段,工程位置如图1所示。气象数据采用2000—2018年邯郸、保定、邢台、石家庄4个城市的气温、风速和太阳总辐射数据,来源于国家气象科学数据中心和国家青藏高原科学数据中心。地图矢量数据和栅格数据来源于地理空间数据云和国家地理信息系统网。

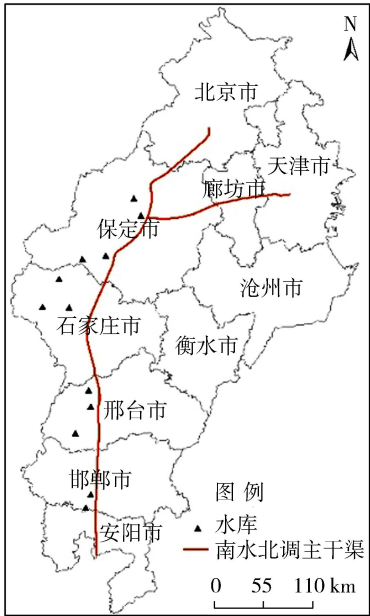


图1 南水北调中线工程河北段工程位置示意图

2 热平衡理论计算

对于没有封冻的输水渠道,不考虑水体与渠壁和渠床的交换以及外界特殊天气变化(降雨、下雪等),只考虑水面的热交换和水流的动力增热,其中水面的热交换包括短波辐射、净长波辐射、蒸发散热和对流散热。根据热平衡理论,单元渠段的总热量变化可表示为

$$W_{\text{总}} = W_{\text{水}} + W_{\text{热交换}} + W_{\text{动力}} = W_{\text{水}} + W_{\text{短波}} - W_{\text{长波}} - W_{\text{蒸发}} - W_{\text{对流}} + W_{\text{动力}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{总}}$ 为水体总的热量变化,kJ; $W_{\text{水}}$ 为水体因水温而产生的自身热量,kJ; $W_{\text{热交换}}$ 为水面的总热交换,kJ; $W_{\text{动力}}$ 为水流的动力增热,kJ; $W_{\text{短波}}$ 、 $W_{\text{长波}}$ 、 $W_{\text{蒸发}}$ 、 $W_{\text{对流}}$ 分别为水体的短波辐射热量、净长波辐射热量、蒸发散热和对流散热,kJ。

当输水渠道在冬季运行时,假设整个渠道恒定运行且初始沿程水温近似为 0℃,即认为 $W_{\text{水}}=0\text{ kJ}$,同时可以忽视水力因素(较小的流量、水位变化等)对水体热量变化的影响,则式(1)可表达为

$$\begin{aligned} W_{\text{总}} &= W_{\text{短波}} - W_{\text{长波}} - W_{\text{蒸发}} - W_{\text{对流}} + W_{\text{动力}} = \\ DL\sigma_{\text{总}} &= DL(\sigma_{\text{短波}} - \sigma_{\text{长波}} - \sigma_{\text{蒸发}} - \sigma_{\text{对流}} + \sigma_{\text{动力}}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{短波}} &= (1 - \varphi)(1 - 0.65 C^2) R_{\text{s}} \\ \sigma_{\text{长波}} &= 0.97\alpha[\varepsilon_{\text{a}}(273 + T_{\text{a}})^4 - (273 + T_{\text{w}})^4] \\ \sigma_{\text{动力}} &= \frac{Hm\rho v}{j} \\ \sigma_{\text{蒸发}} &= f(v_{\text{w}})(e_{\text{s}} - e_{\text{a}}) \\ \sigma_{\text{对流}} &= 0.47f(v_{\text{w}})(T_{\text{w}} - T_{\text{a}}) \end{aligned}$$

式中: D 为单元渠段宽度,m; L 为单元渠段长度,m; $\sigma_{\text{总}}$ 为总热量变化率, kJ/m^2 ; $\sigma_{\text{短波}}$ 、 $\sigma_{\text{长波}}$ 、 $\sigma_{\text{蒸发}}$ 、 $\sigma_{\text{对流}}$ 、 $\sigma_{\text{动力}}$ 分别为短波辐射、净长波辐射、蒸发散热、对流散热和水流的动力增热各自引起的热量变化率, kJ/m^2 ; φ 为水面反射率; C 为云层覆盖率; R_{s} 为太阳总辐射, kJ/m^2 ; α 为 Stefan-Boltzman 常数,取为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε_{a} 为大气的发射率; T_{a} 为气温,℃; T_{w} 为水面温度,℃; H 为渠道水深,m; m 为渠道纵坡; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; v 为渠道流速, m/s ; j 为热功当量,取为 $102 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{kJ}$; $f(v_{\text{w}})$ 为风函数, v_{w} 为风速, m/s ,当垂向混合且热负荷较小时, $f(v_{\text{w}})=9.2+0.46 v_{\text{w}}^2$; e_{s} 、 e_{a} 为饱和水汽压与空气中实际水汽压,Pa, $(e_{\text{s}}-e_{\text{a}})$ 为饱和蒸汽压力差。

此外,一个长距离输水渠道一般由多个单元输水渠段组成,则整个输水渠道的总热交换量可由各单元输水渠段的总热交换量求和得出。当各单元输水渠段总热量变化为正值时,则整个单元渠道基本不会产生水内冰和流冰,从而保证整个输水渠道安全运行。

3 风险评估

3.1 评价指标选取

输水渠道出现冰情是多方面原因造成的,既与渠道自身的工程特性和水流的运行状态等因素密切相关,同时也受到外界天气环境的影响。而当渠道在某一恒定流工况无冰运行时,其水力条件基本没有发生改变,而外界环境变化是造成渠道出现大量水内冰和流冰而产生冰情的主要原因。结合式(2)及实际工程运行资料,可知气温 T_{a} 、风速 v_{w} 、太阳总辐射 R_{s} 3个气象参数是影响热量变化的关键评价指标,也是渠道冰情风险主要致灾因子。

本文采用单因素局部分析法^[27-28],依据式(3)

分析判断气温、风速、太阳总辐射3个参数在热量变化计算公式中的敏感性,结果如表1所示。

$$S_r = \left| \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)/\sigma_1}{(P_2 - P_1)/P_1} \right| \quad (3)$$

式中: S_r 为参数的敏感性指标; P_1 、 P_2 分别为参数变化前后的取值; σ_1 、 σ_2 分别为采用 P_1 、 P_2 计算得到的热量变化率。其中 S_r 绝对值越小,敏感程度越小,代表着该参数对计算结果的影响程度越小。

表1 3个参数的敏感性分析结果

参数	S_r			
	$\delta=-25\%$	$\delta=+25\%$	$\delta=+50\%$	$\delta=+100\%$
气温	6.03	6.05	6.05	6.04
风速	2.85	2.68	2.29	1.87
太阳总辐射	0.77	0.77	0.77	0.77

注: δ 为以 $R_{\text{s}}=566.4\text{ kJ/m}^2$ 、 $T_{\text{a}}=-10.6^\circ\text{C}$ 、 $v_{\text{w}}=2.4\text{ m/s}$ 为初值的参数变化幅度。

从表1可以看出,3个参数的敏感性按照从大到小顺序排列为气温、风速、太阳总辐射,由此得出太阳总辐射对渠道热量变化影响最小。同时还发现太阳总辐射的 S_r 不会随太阳总辐射值变化而改变,这是因为太阳总辐射与热量变化呈线性关系;而气温的 S_r 变化较小,风速的 S_r 会随着风速的增大而减小,说明风速变化越大,对热量变化的影响越小。

3.2 概率风险分析

通过概率分析初步计算致灾因子同时发生的事件概率,再利用式(2)求出总热量变化率从而进一步判断渠道冰情风险等级。考虑到气象数据在时间和空间上的有效性和连续性,选取2000—2018年每年的11月到次年2月的日数据作为总体样本,然后根据样本数据绘制出风险评价指标的经验分布曲线和相应的概率密度直方图,通过二者相互匹配拟合出风险评价指标的概率密度函数。南水北调中线工程河北段主要途经邯郸、邢台、石家庄、保定4个城市,分别对其气温、风速和太阳总辐射数据的概率密度曲线进行拟合。以邢台为例,其气温、风速和太阳总辐射经验分布曲线和概率密度直方图如图2和图3所示,利用 Spass 数学分析软件对经验分布曲线和概率密度直方图进行拟合,方差检验结果表明,气温和风速的概率密度曲线呈一阶指数形式,因此采用 Gauss 函数作为拟合曲线的表达形式,4个城市的拟合表达式及其拟合度如表2所示。

由于季节影响,12月太阳总辐射值小于11月和1月的辐射值,通过预处理和方差分析发现其概率密度曲线呈多峰形态,由多个一阶指数组成。以邢台为例,其概率密度曲线由两个 Gauss 一阶指数函数叠加组成,如式(4)所示;其余3个城市叠加函数过多,不在此赘述。

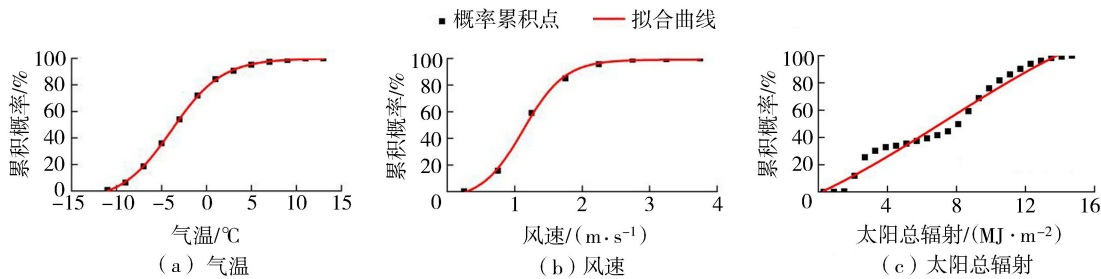


图2 邢台市气温、风速和太阳总辐射经验分布曲线

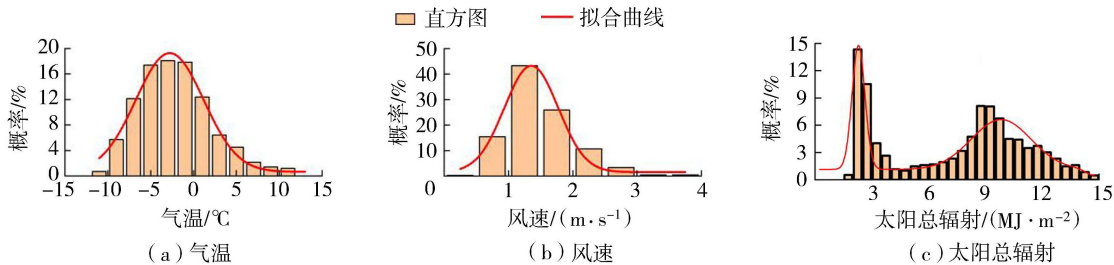


图3 邢台市气温、风速和太阳总辐射概率密度直方图

表2 4个城市气温和风速的概率密度函数及其拟合度

城市	气温概率密度函数	气温拟合度	风速概率密度函数	风速拟合度
邯郸	$F(T_a) = 0.49 + 16.2e^{-2\left(\frac{T_a + 35.63}{91.62}\right)^2}$	0.97	$F(v_w) = 0.74 + 26.48e^{-2\left(\frac{v_w - 15.65}{13.76}\right)^2}$	0.96
邢台	$F(T_a) = 0.66 + 18.64e^{-2\left(\frac{T_a + 27.82}{79.08}\right)^2}$	0.98	$F(v_w) = 1.45 + 29e^{-2\left(\frac{v_w - 16.56}{91.62}\right)^2}$	0.94
石家庄	$F(T_a) = 0.69 + 19.19e^{-2\left(\frac{T_a + 34.35}{75.31}\right)^2}$	0.98	$F(v_w) = 1.71 + 41.32e^{-2\left(\frac{v_w - 12}{8.54}\right)^2}$	0.97
保定	$F(T_a) = -0.34 + 14.1e^{-2\left(\frac{T_a + 61.05}{120.85}\right)^2}$	0.94	$F(v_w) = 1.58 + 41.72e^{-2\left(\frac{v_w - 13.54}{8.36}\right)^2}$	0.97

注: $F(T_a)$ 、 $F(v_w)$ 为气温和风速的概率密度函数。

$$F(R_s) = F(R_s)_1 + F(R_s)_2 = 2.29 + 13.65e^{-2\left(\frac{R_s - 2290.86}{678.95}\right)^2} + 5.48e^{-2\left(\frac{R_s - 9823.34}{3164.47}\right)^2} \quad (4)$$

式中: $F(R_s)$ 为太阳总辐射的总概率密度函数; $F(R_s)_1$ 、 $F(R_s)_2$ 为太阳总辐射的子概率密度函数。

在求得气温、风速、太阳总辐射 3 个评价指标的概率密度函数后,基于指标之间的相关性,利用其复相关系数构造联合概率密度函数^[29-30],并利用积事件的发生概率来代表 3 个评价指标在不同强度下同时发生的可能性:

$$F(T_a, v_w, R_s) = \frac{F(T_a)F(v_w)F(R_s)}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (5)$$

式中: $F(T_a, v_w, R_s)$ 为气温、风速、太阳总辐射 3 个评价指标不同强度下同时发生的联合概率密度函数; r 为风速、太阳总辐射对气温的复相关系数。通过数据的线性回归计算,得出邯郸、邢台、石家庄、保定 4 个城市风速、太阳总辐射对气温的复相关系数分别为 0.388、0.429、0.475 和 0.243,同时相对应的 ANOVA 方差分析回归系数分别为 0、0、0 和 0.028,均小于显著性水平 0.05,表明分析的线性模型是成

立的。

对于渠道冰情风险,总热量变化率与冰情的风险等级呈负相关关系,一般情况下总热量变化率越小,代表着其冰情的风险等级越高,风险性越大。图 4 为 4 个城市气温、风速、太阳总辐射 3 个评价指标共 9638 个工况组合计算得到的总热量变化率概率曲线。依据 GB/T 27921—2011《风险管理 风险评估技术》,按照等级划分标准将总热量变化率划分为 5 个等级: $>7750 \text{ kJ/m}^2$ 为极低风险, $>2000 \sim 7750 \text{ kJ/m}^2$ 为低风险, $>-1000 \sim 2000 \text{ kJ/m}^2$ 为较高风险, $>-10500 \sim -1000 \text{ kJ/m}^2$ 为高风险, $\leq -10500 \text{ kJ/m}^2$ 为极高风险,与冰情风险等级相对应。

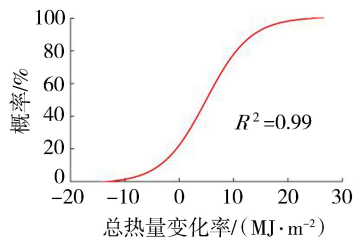


图4 输水渠道总热量变化率概率曲线

为了更好地将气象事件发生的可能性与风险性

相关联,根据 9 638 个工况组合绘制出不同渠段的总热量变化率-概率散点图,并对散点进行了曲线拟合,如图 5 所示。通过对该拟合曲线进行积分,可以求出不同渠段不同风险等级发生的概率,如表 3 所示。从表 3 可以看出风险等级为极高和高的发生概率很小,以风险等级为低和较高的发生概率为主。

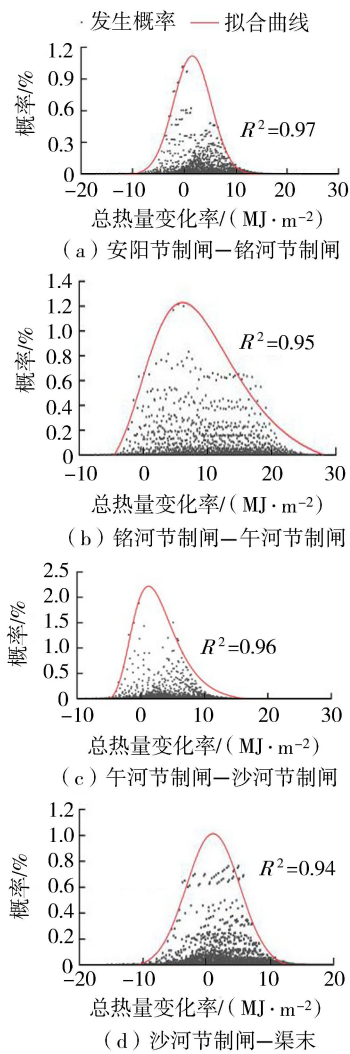


图 5 4 个渠段总热量变化率-概率散点图及其拟合曲线

表 3 4 个渠段不同冰情风险等级发生概率

渠段	不同冰情风险等级发生概率/%				
	极低	低	较高	高	极高
安阳节制闸—铭河节制闸	4.7	51.7	35.5	7.9	0.3
铭河节制闸—午河节制闸	50.3	38.4	10.0	1.3	0.0
午河节制闸—沙河节制闸	10.2	54.5	33.2	2.1	0.0
沙河节制闸—渠末	5.6	45.1	35.7	13.1	0.6

考虑气温、风速和太阳总辐射 3 个评价指标发生概率与冰情风险的内在联系,将 3 个评价指标也按照工程标准进行风险等级划分(表 4),并分析 4 个渠段处在极高和高风险冰情情况下,气温、风速和太阳总辐射 3 个评价指标所属的风险等级,结果如表 5 所示。从表 5 可以看出当渠道处在极高和高风险冰情时,气温和太阳总辐射都处在高风险以上,而风速

则处在较高风险以上。结合表 1 的敏感性分析结果,可能是因为风速变化越大,对热量变化的影响越小,而气温对于渠道冰情演变一直具有较大影响。

表 4 3 个评价指标的风险等级划分

风险等级	气温/℃	风速/(m · s ⁻¹)	太阳总辐射/(MJ · m ⁻²)
极低	>11.2	≤0.56	>12.50
低	>4.9 ~ 11.2	>0.56 ~ 1.96	>10.05 ~ 12.50
较高	>-1.4 ~ 4.9	>1.96 ~ 3.08	>9.45 ~ 10.05
高	>-6.3 ~ -1.4	>3.08 ~ 4.06	>8.10 ~ 9.45
极高	≤-6.3	>4.06	≤8.10

表 5 4 个渠段在极高和高风险冰情下 3 个评价指标的风险等级

渠段	评价指标风险等级		
	气温	风速	太阳总辐射
安阳节制闸—铭河节制闸	极高、高	较高及以上	极高
铭河节制闸—午河节制闸	极高、高	较高及以上	极高
午河节制闸—沙河节制闸	极高、高	极高、高	极高、高
沙河节制闸—渠末	极高	较高及以上	极高、高

4 实例分析

以 2021 年 1 月 6—8 日气象条件为基础,对南水北调中线工程河北段的冬季输水进行初步的风险分析。

4.1 整体风险分析

表 6 为 4 个渠段热量变化率及冰情风险等级计算结果。从表 6 可以看出,3 天中 4 个渠段的总热量变化率都是负值,说明渠段水体一直在散失热量,有发生冰情的潜在风险。沙河节制闸—渠末段的热量变化率最大,远大于其他 3 个渠段,说明该渠段的冰情风险最大。在整个热交换过程中,动力增热和净长波辐射占比很小,几乎可以忽略不计,而短波辐射、蒸发散热和对流散热明显占据主导地位,是影响热量变化的主要因素。

根据实际监测结果,1 月 6 日前渠道无流冰现象,自 7 日开始渠道出现表面流冰层,产生冰情,这可能是由于渠道受“拉尼娜”寒流影响发生强降温,渠道水体热量散失严重所致。从表 6 可以看出,6、7 日 4 个渠段的冰情风险等级基本都为高风险,而到了 8 日随着天气回暖,冰情风险等级也随之变小。但是,6 日和 8 日沙河节制闸—渠末段的总热量变化率明显高于其他渠段,以致风险等级为极高和高,其风险性高于其他渠段,因此应加强对该段的实时监测,采取相关冰情防护措施。

根据式(5)计算得出这 3 天的气象条件联合发生概率很小,这既体现了极端天气发生的可能性较小,又间接验证了表 3 中极高和高风险发生概率所占比例最小这一结论。结合表 5,可得出各评价指

表 6 4 个渠段热量变化率和风险分析结果

单位:kJ/m²

日期	渠段	$\sigma_{\text{短波}}$	$\sigma_{\text{长波}}$	$\sigma_{\text{动力}}$	$\sigma_{\text{蒸发}}$	$\sigma_{\text{对流}}$	$\sigma_{\text{总}}$	风险等级
01-06	安阳节制闸—铭河节制闸	+1227.13	-9.33	+126.68	-1 218.26	-5 418.00	-5 291.80	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1766.49	-9.37	+90.89	-1 521.35	-6 842.82	-6 516.16	高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1430.01	-9.52	+93.95	-1 330.63	-6 253.96	-6 070.14	高
	沙河节制闸—渠末	+1374.16	-10.82	+58.55	-1 626.69	-10 440.58	-10 645.38	极高
01-07	安阳节制闸—铭河节制闸	+1265.53	-9.33	+126.68	-1 008.69	-4 485.96	-4 111.78	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1 822.55	-9.64	+90.89	-989.10	-4 798.74	-3 884.04	高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1 458.28	-8.80	+93.95	-1 166.52	-4 362.53	-3 985.62	高
	沙河节制闸—渠末	+1 430.01	-9.94	+58.55	-918.13	-4 825.63	-4 265.14	高
01-08	安阳节制闸—铭河节制闸	+1 288.14	-7.32	+126.68	-989.10	-1 749.54	-1 331.13	高
	铭河节制闸—午河节制闸	+1 878.60	-7.16	+90.89	-1 029.02	-1 612.13	-678.82	较高
	午河节制闸—沙河节制闸	+1 514.13	-7.16	+93.95	-952.14	-1 491.68	-842.90	较高
	沙河节制闸—渠末	+1 401.75	-8.91	+58.55	-989.10	-3 848.99	-3 386.70	高

注:“+”代表吸收热量,“-”代表散失热量。

标风险等级与冰情风险等级的对应关系如表 7 所示。从表 7 可以看出 7 日各渠段气温和风速的风险等级基本属于较高风险以上,而太阳总辐射都属于极高风险。在太阳总辐射风险等级不变的情况下,虽然风速风险等级波动较大,但是各渠段的冰情风险等级都属于高风险,这也证明了气温影响冰情风险程度远超其他两个评价指标,与表 1 和表 7 结果一致。

表 7 评价指标和冰情风险等级的对应关系

日期	渠段	气温风险等级	风速风险等级	辐射风险等级	冰情风险等级
01-06	安阳节制闸—铭河节制闸	极高	高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	极高	极高	极高	高
	午河节制闸—沙河节制闸	极高	高	极高	高
	沙河节制闸—渠末	极高	极高	极高	极高
01-07	安阳节制闸—铭河节制闸	极高	较高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	极高	极高	极高	高
	午河节制闸—沙河节制闸	极高	高	极高	高
	沙河节制闸—渠末	极高	较高	极高	高
01-08	安阳节制闸—铭河节制闸	高	较高	极高	高
	铭河节制闸—午河节制闸	高	较高	极高	较高
	午河节制闸—沙河节制闸	高	较高	极高	较高
	沙河节制闸—渠末	极高	较高	极高	高

由此可见,冬季平均气温越低、风速越大、太阳总辐射越小,则渠道水体散失热量也就越多,而冰情的风险等级也就越来越高,对渠道运行造成的危害也就越大。此外,通过对渠道风险分析可知,即使气温、风速和太阳总辐射 3 个评价指标中某个指标处于低风险等级,但渠道仍有发生高风险冰情的可能性,因此在实际管理中应时刻密切关注气象条件的动态变化。

4.2 热交换的时程变化分析

图 6 为 4 个渠段热交换量的时程变化曲线。从图 6(a)可以看出冬季辐射热交换量基本在白天,光照时间在 9~10 h 之间,在 1:00 左右达到热交换量最大值。由于这 3 天的气温和辐射变化幅度不大,因此短波辐射和净长波辐射的热交换量近似周期性

变化,如图 6(a)(b)所示。从图 6(c)可以看出蒸发散热变化趋势与风速日过程变化曲线相似,这是因为蒸发热交换量为风速函数。同时,从图 6(c)(d)还可以发现夜间蒸发和对流热交换量较大,且没有辐射热交换,因此夜间渠道热量散失严重,极易出现流冰。为了进一步了解热交换量过程变化,绘制出各渠道总热交换量时程变化曲线和累积总热交换量时程变化曲线,如图 7 所示。

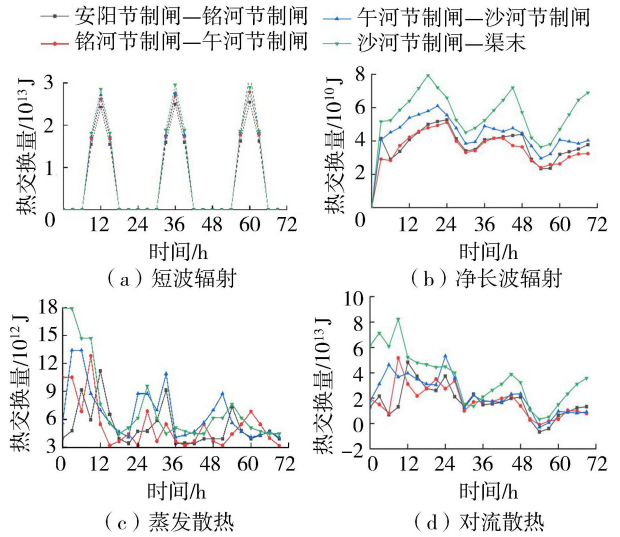


图 6 4 个渠段热交换量的时程变化曲线

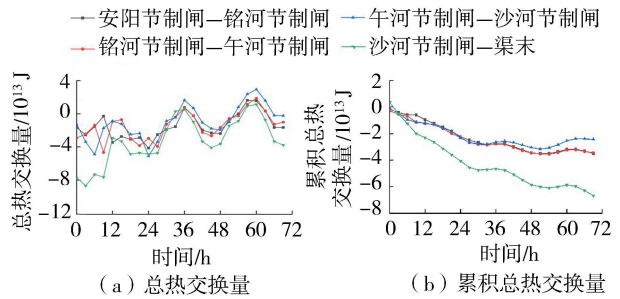


图 7 4 个渠段总热交换量和累积总热交换量时程变化曲线

从图 7(a)可以看出,由于这 3 天天气条件逐渐变好,因此各渠段总热交换量时程变化趋势是波动向上的。同时可以看出中午和夜间是曲线的峰值,

热交换量达到极值。由图 7(b)可见,各渠段的累积总热交换量是逐渐变大的,这是因为在这 3 天总热交换量基本是负值,安阳节制闸—铭河节制闸、铭河节制闸—午河节制闸和午河节制闸—沙河节制闸这 3 段的累积总热交换量差别不大。对比图 7(a)(b),随着 8 日天气条件相对变好,热交换量由散失变为吸收,因此图 7 曲线的末端出现短暂的上升趋势。可见,在这 3 天中各渠段的冰情风险持续增大,必要时需采取相应的措施进行防护。

综上所述,气象条件是造成输水渠道冰情风险的主要因素,直接影响冰情风险等级。当冷空气来临时,各渠段冰情风险的可能性比平时要高;而沙河节制闸—渠末段发生冰情的敏感性和风险性比其他渠段要高,因此在正常防护过程中,应加大对沙河节制闸—渠末段的监测,并加强该渠段的防冰措施,以有效降低冰情风险。

5 结 语

通过对南水北调中线工程河北段冬季输水的冰情风险研究,发现短波辐射、蒸发散热和对流散热是影响热量变化的主要因素。在对冰情风险进行概率分析和风险评价时,不仅可以判断当下气象事件发生的可能性,而且还可以迅速识别出冰情的风险等级,并分析出气象事件发生概率与冰情风险等级的内在联系,从而为今后工程的冰情防治提供科学的决策依据。同时,针对实际输水工程,冰情风险评估是一个相对动态的过程,会随着运行工况和气象情况变化而变化。因此,面对动态化的风险评估,如何能够更迅速准确量化和测评冰情风险是今后需要深入研究的课题。

参考文献:

[1] 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. (MU Xiangpeng, CHEN Wenxue, GUO Xiaochen, et al. Study on long-distance water transfer channel with thermal insulation cover in winter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9):1071-1079. (in Chinese))

[2] 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. (LIU Mengkai, XING Linghang, HUANG Minghai, et al. An automatic operation mode for the long distance canal system in ice melting period [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(9):1080-1086. (in Chinese))

[3] 耿雷华,姜蓓蕾,付开文,等. 南水北调东线工程输水系统运行风险研究[J]. 人民黄河,2012,34(1):92-95. (GENG Leihua, JIANG Beilei, FU Kaiwen, et al. Risk analysis and assessment of the water conveyance system

operation in the East Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Yellow River, 2012, 34 (1) : 92-95. (in Chinese))

[4] 樊霖,茅泽育,齐文彪,等. 伊丹河输水河道封冻期冰情演变数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2017,37(6):14-18. (FAN Lin, MAO Zeyu, QI Wenbiao, et al. Numerical simulation of river-ice processes in a water-transfer river of Yidan River during freezing period [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6):14-18. (in Chinese))

[5] SHEN H T. Mathematical modeling of river ice processes [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62(1):3-13.

[6] WANG Shuangming, DOERING J C. Numerical simulation of supercooling process and frazil ice evolution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(10):889-897.

[7] 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. (ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, WU Sujie, et al. Calculated model and application of ice-free length of diversion channel for pumping well water to melt ice at high altitude and cold regions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10):99-106. (in Chinese))

[8] 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.

[9] 蒋水华,黄中发,甘小艳,等. 堤防工程设计-施工-运营全过程风险评估与管理框架[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2):42-49. (JIANG Shuihua, HUANG Zhongfa, GAN Xiaoyan, et al. Risk assessment and management framework for dike engineering during whole process of design-construction-operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2):42-49. (in Chinese))

[10] 梁圣辰,张健,贺蔚,等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2):170-175. (LIANG Shengchen, ZHANG Jian, HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long-distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2):170-175. (in Chinese))

[11] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2):28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):28-35. (in Chinese))

[12] 张社荣,尚超,王超. 基于 IAHP 扩展 TOPSIS 法引水隧洞实时风险识别[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4):15-20. (ZHANG Sherong, SHANG Chao, WANG Chao. Real-time safety risk identification of water diversion

- tunnel based on IAHP and extended TOPSIS methods[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 15-20. (in Chinese))
- [13] 郭金,顾冲时,何菁. 基于组合赋权二维云模型的堤防工程风险评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(6): 117-122. (GUO Jin, GU Chongshi, HE Jing. Risk assessment for levee engineering based on a two-dimensional cloud model with combination weighting[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(6): 117-122. (in Chinese))
- [14] 吉莉. 基于 FMEA 的南水北调中线输水干渠运行风险预警研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.
- [15] 吴岚. 基于突变理论的凌汛灾害风险评价与灾情评估[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [16] 练继建, 郑杨, 司春棣. 输水建筑物安全运行的模糊综合评价[J]. 水利水电技术, 2007, 38(3): 62-64. (LIAN Jijian, ZHENG Yang, SI Chundi. Fuzzy comprehensive evaluation on safe operation of water conveyance structures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(3): 62-64. (in Chinese))
- [17] 姜蓓蕾, 刘恒, 耿雷华, 等. 层次分解法在南水北调东线工程风险因子识别中的运用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(3): 65-67. (JIANG Beilei, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Application of hierarchic decomposition approach to identification of risk factors for East Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(3): 65-67. (in Chinese))
- [18] LIU Mengkai, DONG Xiaoxia, GUO Hui. Risk assessment of ice dams for water diversion projects based on fuzzy fault trees[J]. Applied Water Science, 2021, 11(2): 11-23.
- [19] 胡丹, 郑良, 李硕, 等. 南水北调中线明渠工程运行风险评价方法研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 98-101. (HU Dan, ZHENG Liang, LI Shuo, et al. Study on the risk evaluation method for the open channel operation in the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 98-101. (in Chinese))
- [20] 刘勇, 刘建民, 张建设. 长距离输水工程风险分析研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(4): 114-116. (LIU Yong, LIU Jianmin, ZHANG Jianshe. Risk analysis on long-distance water diversion project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(4): 114-116. (in Chinese))
- [21] 白涛, 李磊, 黄强, 等. 西江流域压咸风险调度及其时空传递规律研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(10): 71-80. (BAI Tao, LI Lei, HUANG Qiang, et al. Risk operation of inhibiting salt tide invasion and its space-time transmission in Xijiang Watershed [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(10): 71-80. (in Chinese))
- [22] 陈艳秋, 袁子鹏, 盛永, 等. 基于概率分析的暴雨事件快速评估模型[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(5): 62-65. (CHEN Yanqiu, YUAN Zipeng, SHENG Yong, et al. A rapid assessment model of torrential rain event based on probability analysis [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(5): 62-65. (in Chinese))
- [23] JAMSHIDI A, YAZDANI-CHAMZINI A, YAKHCHALI S H, et al. Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1): 197-208.
- [24] 王磊之, 崔婷婷, 李笑天, 等. 降水变化条件下沿海地区暴雨-潮位遭遇联合风险[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 110-116. (WANG Leizhi, CUI Tingting, LI Xiaotian, et al. Joint risks of rainstorm and tidal level under varying precipitation conditions in coastal areas [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 110-116. (in Chinese))
- [25] 刘强, 汤爱平. 基于概率分析的公路系统灾害风险研究[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1268-1274. (LIU Qiang, TANG Aiping. Highway system disaster risk based on probability analysis [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1268-1274. (in Chinese))
- [26] 吴柳萍, 纪志荣, 连素兰, 等. 福建省森林病虫害发生风险的概率分析[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(1): 95-101. (WU Liuping, JI Zhirong, LIAN Sulan, et al. Probability analysis of forest pests occurring risk in Fujian Province [J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(1): 95-101. (in Chinese))
- [27] 陈伏龙, 张鑫厚, 冯平, 等. 基于非一致融雪洪水的水库漫坝模糊风险分析[J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 22-32. (CHEN Fulong, ZHANG Xinhou, FENG Ping, et al. Fuzzy risk analysis of dam overtopping under inconsistent snowmelt floods [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(12): 22-32. (in Chinese))
- [28] LI Huimin, JI Li, LI Feng, et al. Operational safety risk assessment for the water channels of the South-to-North Water Diversion Project based on TODIM-FMEA [J]. Complexity, 2020, 3: 6691764.
- [29] 吴延徽, 吴毅, 侯再红, 等. 合肥地区大气风速风向联合概率密度函数研究[J]. 大气与环境光学学报, 2012, 7(5): 327-332. (WU Yanhui, WU Yi, HOU Zaihong, et al. Joint probability density function varying with wind speed and direction in Hefei area [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2012, 7(5): 327-332. (in Chinese))
- [30] 蒯文慧, 宋松柏. 基于混合 Copula 函数的洪水联合概率计算方法[J]. 水力发电学报, 2021, 40(12): 40-51. (LIN Wenhui, SONG Songbai. Calculation method of joint probability for flood based on mixed Copula function [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(12): 40-51. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-05-07 编辑: 熊水斌)