

陈晓楠, 李天毅, 郭新蕾, 等. 基于标准化温度指数的南水北调中线工程沿线地区冷暖冬评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 810-820. CHEN X N, LI T Y, GUO X L, et al. Assessing winter temperature grade in typical areas along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project using standardized temperature index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 810-820. (in Chinese)

基于标准化温度指数的 南水北调中线工程沿线地区冷暖冬评估

陈晓楠¹, 李天毅¹, 郭新蕾², 李景刚¹

(1. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038;
2. 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)

摘要: 选择南水北调中线工程沿线邯郸、正定、涿州为代表地区, 利用 1979—2021 年冬季逐日气温数据, 分析各代表区气温序列统计频率分布与理论概率分布的拟合情况, 提出标准化温度指数(standardized temperature index, STI), 并据此建立新的冬季冷暖量化评估模型。结果表明: STI 方法与国标法的冬季冷暖评估结果基本一致, 但在各代表区强冷冬和强暖冬划定上, STI 评估得出的年份数量均少于国标法; 各代表区以 1 月份气温计算得出的冷暖等级阈值对应的气温值均明显低于按整个冬季 3 个月计算结果。工程所在纬度越高, 冬季冷暖等级阈值对应的气温值越低; 根据 STI 评估结果, 邯郸、正定、涿州发生强冷冬概率分别为 7.14%、9.52% 和 4.76%, 发生弱冷冬及以上的概率分别为 38.09%、40.48% 和 38.09%, 发生平冬的概率分别为 21.43%、28.57% 和 21.43%, 发生弱暖冬及以上的概率分别为 40.48%、30.95% 和 40.48%, 发生强暖冬的概率分别为 4.76%、7.14% 和 2.38%。研究成果与基于正态分布的国标法相比, 考虑了气温序列的偏态性概率分布特征, 对相对冷暖的判别更科学, 有推广应用价值。

关键词: 南水北调中线; 标准化温度指数; 冰期输水; 冬季冷暖评估

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdk.2024.0081

南水北调中线工程自丹江口水库引水, 自流向河南、河北、北京、天津供水, 全长 1 432 km, 由南向北跨越北纬 33°~40°, 水流由亚热带流向暖温带。工程以人工明渠为主, 只有 80 km 的北京段暗涵和 155 km 的天津干线为地下工程。冬季受寒冷天气影响, 总干渠北部渠段, 特别是河北段工程可能产生不同程度的冰情^[1]。南水北调中线一期工程自 2014 年 12 月通水, 截至 2023 年 11 月已经历了 9 次冰期输水运行, 冰期河北境内渠道出现过冰盖、流冰等多种冰情现象, 其中 2015—2016 年冬季多渠池的冰塞对安全输水影响最为严重。目前, 南水北调水已成为沿线大中城市的重要水源, 冰期输水能力成为工程效益发挥的关键卡口。如何在保障工程运行安全的前提下, 提升总干渠冰期输水能力,

是亟需研究的问题。

不同渠段冰凌生消过程与沿线地区冬季气温密切相关, 科学精准评估工程沿线地区冷暖冬年是分析冬季冷暖程度对总干渠冰情影响的基础, 对明确总干渠冰情生消演变规律, 进而提升冰期输水能力具有重要意义。目前, 冬季冷暖年评估主要采用国标法《冷冬等级》^[2]、《暖冬等级》^[3]。段文刚等^[4]基于南水北调中线沿线 8 座气象站 1951—2021 年冬季日平均气温和日最低气温数据, 提出了气温链法评价冷暖冬等级, 并对比研究了国标法、一月平均气温法和气温链法的有效性; 练继建等^[5]基于热平衡理论, 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, 对南水北调中线工程河北段渠道冰情进行了风险评估; 韦耀国等^[6]和李程喜等^[7]

收稿日期: 2024-03-20 修回日期: 2024-07-09 网络出版时间: 2024-08-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240801.1608.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202500); 水利部水利青年科技英才资助项目(JHYC202207)

作者简介: 陈晓楠(1979—), 男, 河北沙河人, 正高级工程师, 博士, 主要从事输水调度运行管理相关方面的研究。E-mail: chenxiaonan@nsbd.cn

通信作者: 李天毅(1996—), 男, 河北广宗人, 助理工程师, 主要从事输水调度运行管理相关方面的研究。E-mail: litianyi@nsbd.cn

通过分析气温、负积温等影响因子,建立了南水北调中线水温预测模型,并进行了预测应用;严增才等^[8]、段文刚等^[9]和温世亿等^[10]探究了南水北调中线总干渠气温、水温和冰情之间的关系,初步确定了初生岸冰、流冰、冰盖等冰情产生的临界气温及水温;段文刚等^[11]分析了冬季明渠出现的冰情现象,为优化冬季输水运行调度和冰情预报提供了科学依据;李程喜等^[12]对南水北调中线冰情演变水温与气温阈值进行了研究;穆祥鹏等^[13]和郭新蕾等^[14]通过数值模拟预测的方法分析了南水北调渠道冰期特性;杨开林^[15-17]通过建立相关模型,分析了明渠、隧洞及渡槽水温的影响因素;段文刚等^[9]分析了气温、水温等因素对中线工程冰期的影响,确定了冰盖生成的驱动因子。

本文认为各地冷暖冬年是个相对概念,因此冷暖量化评估指标和模型需反映气温高低的相对程度和重现频次。大量实践表明,自然界很多现象特性具有偏态性,利用偏态分布进行研究比正态分布效果更贴近实际。例如径流分析,通过历史数据基于P-III偏态分布研究年径流量的理论概率分布,进而判别丰、平、枯水文年。此外,在与冷暖评估类似的旱涝评估方面,标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)^[18]和标准化降水蒸散指数(standard precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[19]评估方法也取得较好应用效果,获得国内外广泛采用^[20-23]。这些方法均利用降水或者气温的时间序列计算该因子的概率分布,并通过标准化转化获取各评估等级的阈值。基于此,本文借鉴SPI和SPEI旱涝评估指标方法,选择南水北调中线总干渠途经河北省的邯郸、正定和涿州等3个气象站为代表,利用1979—2021年冬季逐日气温数据,提出标准化温度指数概念,建立新的冷暖冬年评估模型,并与国标法进行对比分析,为中线沿线冰期冷暖冬年的判别提供新参考。

1 研究区概况

根据南水北调中线工程初步设计,冬季冰清影响范围为安阳河倒虹吸出口以北渠段,长约480km,基本处于河北境内,涉及安阳河节制闸、穿漳河节制闸、牯牛河节制闸等26个节制闸,这些闸站所处区域的气象条件和水力条件差别较大。南水北调中线工程自2014年12月全线通水,截至2023年11月已经历了9次冰期输水运行。根据实际冬季

运行情况,发生流冰、冰盖的范围一般在保定地区的岗头节制闸以北渠段,长度约80km。2015—2016年冬季发生寒潮,总干渠发生冰情范围超过380km,向南延伸至邯郸附近。根据总干渠实际冰情一般发生的范围,按照国家气象台站与闸站位置相近、变化一致的原则,基于气温影响程度的不同由南至北选取邯郸、正定、涿州作为代表区,进行冬季冷暖评估研究,详见图1。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

所用资料来自于国家气象科学数据中心,选取邯郸、正定、涿州气象站1979—2021年共42个冬季(12月至次年2月)地面观测的逐日平均气温。

2.2 研究方法

2.2.1 国标法

根据国家标准《暖冬等级》(GB/T 21983—2020)和《冷冬等级》(GB/T 33675—2017)进行冬季气温等级评价,将冬季平均气温定义为上年12月份至当年2月份的平均气温,如2019—2020年冬季,简称为2020年冬季,气温表示2019年12月份至2020年2月份的平均气温,依此类推。

表1给出了国标法冬季气温划分指标和等级,分为强暖冬、弱暖冬、平冬、弱冷冬、强冷冬5个等级。假定冬季气温序列服从正态分布,按三位法划分偏冷、偏暖和平冬出现的概率,其概率均为33.3%,进而得到偏暖、偏冷的边界阈值分别为 0.43σ 和 -0.43σ 。鉴于一般情况概率10%属于低概率,国标法对发生强暖冬和强冷冬的概率均取10%,弱暖冬和弱冷冬的概率则均约为23.3%,相应得到强暖冬、强冷冬的边界阈值分别为 1.29σ 和 -1.29σ 。

气候平均值计算公式为

$$\bar{T} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} T_i \quad (1)$$

式中: \bar{T} 为冬季平均气温的气候平均值,℃; i 为年份序号; T_i 为某一目标年的冬季平均气温,℃。根据国家标准《暖冬等级》(GB/T 21983—2020)和《冷冬等级》(GB/T 33675—2017),目标年气候平均值、标准差采用目标年最近的上一个整30年计算,如目标年为2011年至2020年时,气候平均值选取年代为1981年至2010年,依此类推。

标准差计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{29} \sum_{i=1}^{30} (T_i - \bar{T})^2} \quad (2)$$

式中: σ 为冬季平均气温标准差, $^{\circ}\text{C}$ 。

距平计算公式为

$$\Delta T = T_i - \bar{T} \quad (3)$$

式中: ΔT 为某一目标年冬季气温距平, $^{\circ}\text{C}$ 。

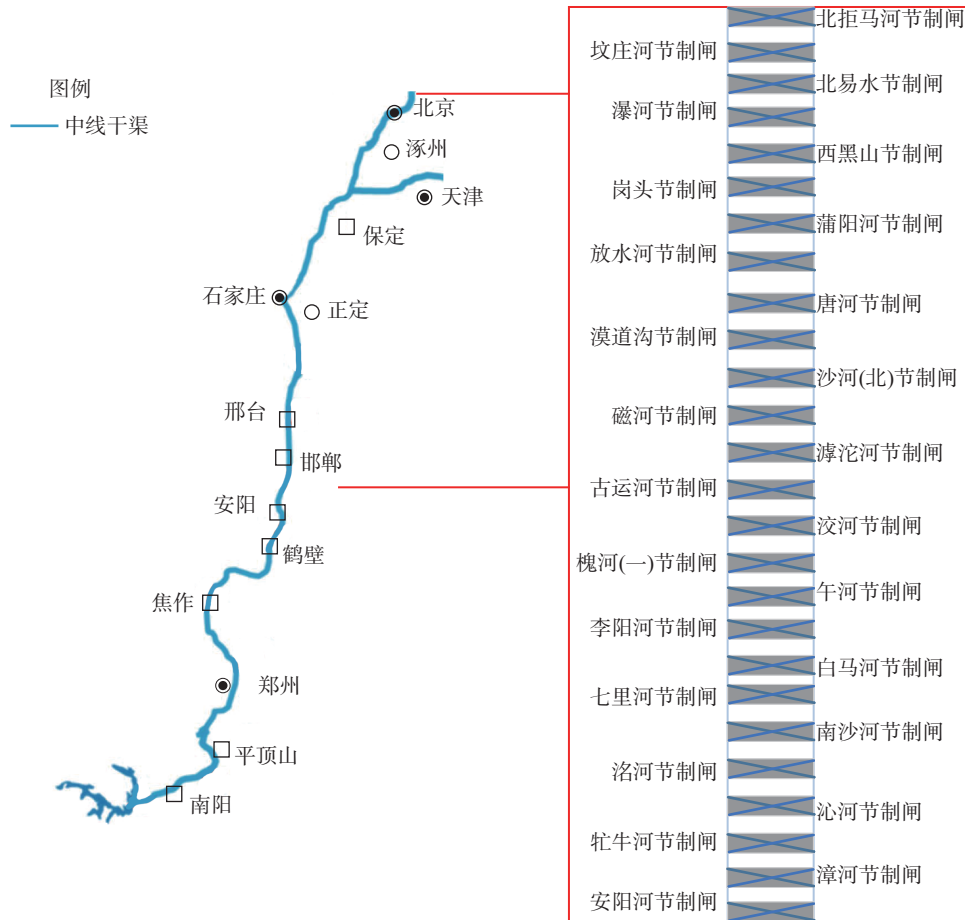


图 1 南水北调中线工程冰期输水范围

Fig. 1 The water transmission range during the glacial period of the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project

表 1 国标法冬季气温等级划分

Tab. 1 Classification of winter temperature levels according to the national standard method

序号	等级名称	等级指标
1	强暖冬	$\Delta T \geq 1.29\sigma$
2	弱暖冬	$0.43\sigma \leq \Delta T < 1.29\sigma$
3	平冬	$0.43\sigma < \Delta T < -0.43\sigma$
4	弱冷冬	$-1.29\sigma < \Delta T \leq -0.43\sigma$
5	强冷冬	$\Delta T \leq -1.29\sigma$

2.2.2 标准化温度指数法

标准化温度指数 (standardized temperature index, STI) 法参照了具有多时间尺度特征的标准化降水指数 (SPI 法) 与在 SPI 基础上考虑蒸散发影响的标准化降水指数 (SPEI 法), 通过考虑温度对冬季冷暖程度的影响, 假定气温的理论分布符合对数逻辑概率分布, 运用数学方法将温度的累计频率分布转换为

在空间和时间上具有可比性的标准化单位, 最后计算 STI。STI 具有无量纲、标准化的特点, 能够比较不同地区、不同时段温度水平, 可较好地反映冬季冷暖等级。本文采用 STI 作为冬季冷暖程度的表征, 主要计算步骤如下:

假设某一时段的平均气温为 X_i , 采用三参数的 Log-logistic 分布对 X_i 进行拟合用来描述事件概率, 得到概率密度函数 $f(x)$, 具体形式^[24] 为:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{2} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{2} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (4)$$

式中: α 、 β 、 γ 分别为尺度参数、形状参数、位置参数, 此三参数可以采用线性矩 (L-moment) 方法拟合获得。

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (6)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (7)$$

$$\omega_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^s \left(1 - \frac{i-0.35}{n}\right) X_i \quad (8)$$

式中: ω_s 为概率距离权重, $s=0, 1, 2$; i 为平均气温序列 X 按升序排列($X_1 \leq X_2, \dots, \leq X_n$)的序数。 $\Gamma(\beta)$ 为关于 β 的 Gamma 函数。由此可以得到给定时间尺度的累计概率如下:

$$F(x) = \int_0^x f(t)dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{X-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (9)$$

对累计概率密度进行正态标准化处理, 定义 $P = 1 - F(x)$:

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时, 概率加权矩 w 为

$$w = \sqrt{-2 \ln P} \quad (10)$$

$$STI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (11)$$

当累积概率 $P > 0.5$ 时, 概率加权矩(w)为

$$w = \sqrt{-2 \ln(1 - P)} \quad (12)$$

$$STI = -\left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}\right) \quad (13)$$

式(11)和(13)中: $c_0=2.515\ 517$, $c_1=0.802\ 853$, $c_2=0.010\ 328$, $d_1=1.432\ 788$, $d_2=0.189\ 269$, $d_3=0.001\ 308$ 。

STI用于评价冬季寒冷程度, STI值越小表示寒冷程度越严重。参考SPI和SPEI旱涝等级划分原则, 表2给出了STI法冬季冷暖划分等级和相应阈值。

表2 STI法冬季冷暖等级划分

Tab. 2 Classification of winter temperature levels using the STI method

序号	等级名称	STI值
1	强暖冬	[1.5, +∞)
2	弱暖冬	[0.5, 1.5)
3	平冬	(-0.5, 0.5)
4	弱冷冬	(-1.5, -0.5]
5	强冷冬	(-∞, -1.5]

3 结果与分析

3.1 STI方法分析

3.1.1 拟合效果验证

通过42 a的历史实测数据, 根据公式(9)至(13)计算得到各代表站点的气温统计频率分布以及理论概率分布的各参数。对比统计频率和理论概率的拟合情况, 以验证理论线型选择的效果。除了利用各站点历年冬季3个月的气温序列, 还选取了历年最冷月份1月的气温序列进行分析。图2给出了

各测站历年冬季(3个月)平均气温及1月平均气温的STI法理论概率分布及统计频率分布情况。可以看出, STI法理论概率和统计频率的分布吻合良好。表3和表4给出了各测站STI理论概率与统计频率之间的拟合效果。结果表明: 整体上, 各测站STI方法计算所得理论概率与统计频率拟合程度高, 相对偏差(RB)最大的为7.09%, 决定系数(R^2)在0.99左右, 均方根误差(RMSE)最大的为0.06℃; 空间方面, 邯郸站STI法计算所得理论概率与统计频率拟合最好, 其次是正定站, 涿州站相对前两站点拟合效果偏弱; 时间方面, 各测站1月拟合结果均优于各测站冬季(3个月)拟合结果。

上述结果表明, 通过42 a历史冬季气温数据进行计算, 并利用相对偏差(RB)、决定系数(R^2)及均方根误差(RMSE)对STI方法所得的温度理论概率分布与统计频率分布拟合效果进行分析验证, 理论概率分布与统计频率分布保持了很好的一致性, 证明了邯郸、正定、涿州这3站气温的理论分布符合对数逻辑概率分布这一假设合理性。

3.1.2 等级阈值分析

3.1.2.1 阈值确定的合理性分析

冷暖是一个相对的概念, 冷暖冬划分的原理是根据温度的概率分布情况确定阈值, 把发生概率较大的范围确定正常, 而概率相对低的范围确定为强冷或强暖。例如, 国标法假定气温理论上服从正态分布, 按33.3%概率对应的范围确定为正常范围, 即平冬的阈值, 按10%较小概率对应的分位数确定为强冷冬、强暖冬阈值。然而, 大量实践表明, 自然界很多现象更贴近偏态分布, 例如, 水文中常利用P-III偏态分布对洪水、径流等进行统计分析。根据对中线总干渠沿线气象代表站点气温规律的分析, 以及参考SPEI旱涝指数在实践中广泛应用的效果, 气温分布符合Log-logistic这种偏态分布的特性显著。因此, 基于Log-logistic分布并经过正态标准化处理后得到的STI冷暖程度评估方法是合理的。

旱涝评估阈值的确定原则与冷暖评估的原理相同, 均基于评估因子的概率分布进行划分。国标《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017)对SPI和SPEI的干旱等级划分无旱、轻旱、中旱、重旱、特旱共5个等级, 并分别以-0.5, -1.0, -1.5, -2.0作为边界阈值。国标《冷冬等级》由于只划分了平冬、弱冷冬、强冷冬共3个等级。本文参考SPEI和SPI阈值的设定, 将“轻”“中”等级合并为“弱”等级, “重”“特”等级合并为“强”等级, 边界阈值分别取为-0.5和-1.5, 暖冬阈值按同样原理设定。

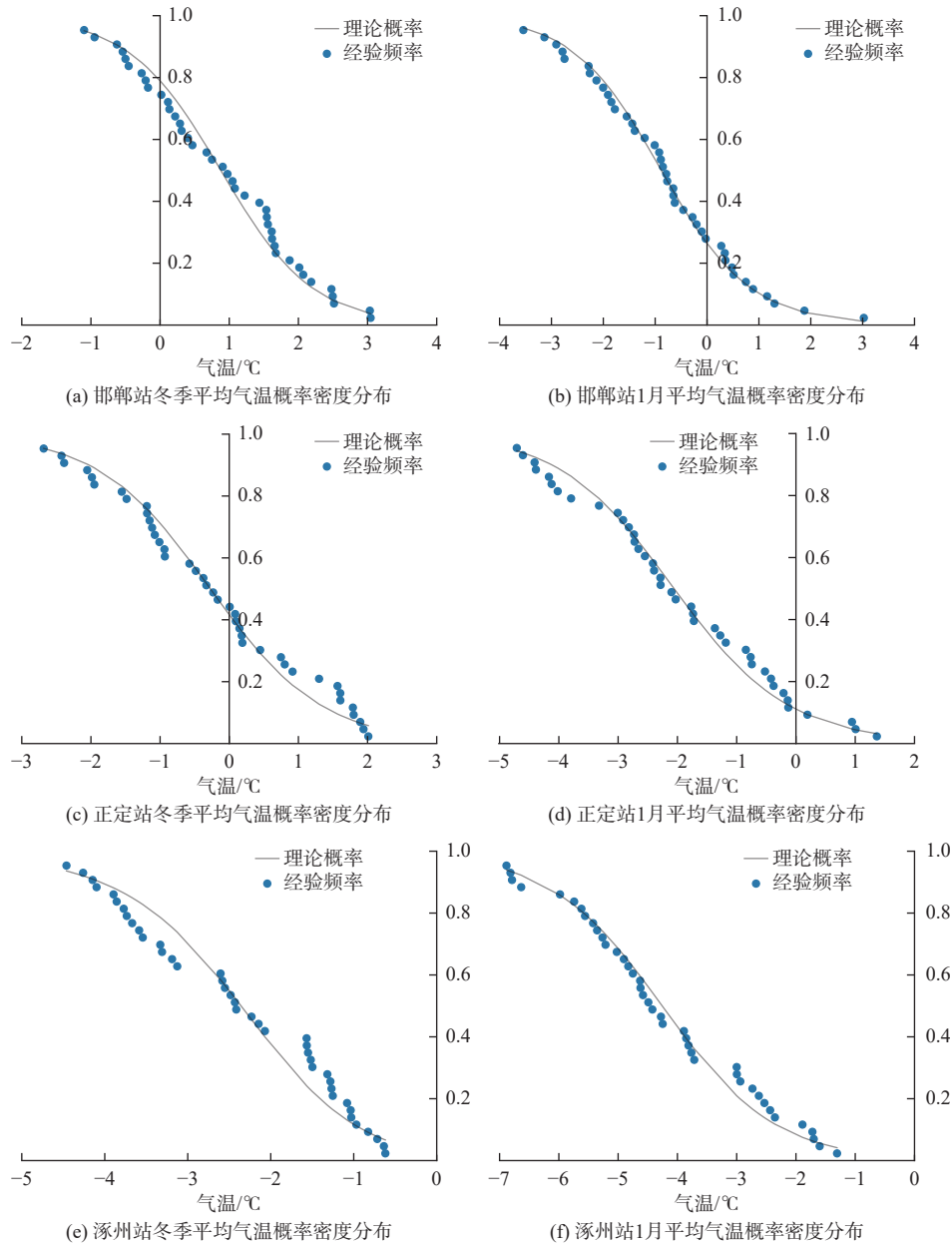


图 2 各测站冬季及 1 月平均气温分布拟合效果

Fig. 2 Fitting effect of winter and January average temperature distribution at each measuring station

表 3 各测站冬季平均气温 STI 理论概率与统计频率拟合分析

Tab. 3 Theoretical probability and statistical frequency fitting analysis of winter average temperature STI at each measurement station

站点	RB/%	R^2	RMSE/°C
邯郸	4.77	0.99	0.04
正定	7.01	0.99	0.04
涿州	7.09	0.98	0.06

根据上述原则, STI 法确定的各冷暖等级对应的概率分别为: 强暖冬 7%、弱暖冬 24%、平冬 38%、弱冷冬 24%、强冷冬 7%。对比国标法确定的强暖冬 10%、弱暖冬 23.3%、平冬 33.3%、弱冷冬 23.3%、强冷冬 10%, STI 法对确定强冷、强暖等级对应的概

率更小一些, 更体现“强”等级概念的相对小概率特性。

表 4 各测站 1 月平均气温 STI 理论概率与统计频率拟合分析

Tab. 4 Theoretical probability and statistical frequency fitting analysis of January average temperature STI at each measurement station

站点	RB/%	R^2	RMSE/°C
邯郸	4.25	0.99	0.02
正定	4.79	0.99	0.03
涿州	5.27	0.99	0.03

3.1.2.2 等级阈值对应温度区间分析

利用实测气温数据时间序列反演得出各测站的理论概率分布的参数后, 可根据冷暖等级划分的阈值计算得出对应的标准正态分布的概率, 进而反算

出各阈值基于 Log-logistic 分布的相应的温度值。值得注意的是,各站点的温度序列发生变化,反演得到的理论概率分布的参数也会不同,但随着数据完备,计算值将趋于稳定。本文基于 1979 年 12 月至 2021 年 2 月的 42 组冬季气温数据和 1 月气温数据进行计算。

表 5 给出了 STI 法各测站基于冬季平均气温和 1 月平均气温,计算得到 5 个等级评价结果阈值对应的温度区间,结果表明:空间方面,各测站纬度越高,其冷暖冬等级的温度阈值越低;时间方面,采用 1 月气温序列计算的等级阈值明显低于采用整个冬季气温计算的结果。

表 5 各测站冬季冷暖等级阈值对应温度区间

Tab. 5 The temperature range corresponding to the winter cold and warm level threshold of each measuring station 单位: °C

等级名称	邯郸气温		正定气温		涿州气温	
	冬季	1月	冬季	1月	冬季	1月
强暖冬	[2.6, +∞)	[1.4, +∞)	[1.9, +∞)	[0.6, +∞)	[-0.6, +∞)	[-1.8, +∞)
弱暖冬	[1.4, 2.6)	[-0.2, 1.4)	[0.4, 1.9)	[-1.3, 0.6)	[-1.8, -0.6)	[-3.5, -1.8)
平冬	(0.3, 1.4)	(-1.6, -0.2)	(-0.9, 0.4)	(-2.9, -1.3)	(-2.9, -1.8)	(-5.0, -3.5)
弱冷冬	(-0.9, 0.3]	(-3.1, -1.6]	(-2.4, -0.9]	(-4.5, -2.9]	(-4.4, -2.9]	(-6.8, -5.0]
强冷冬	(-∞, -0.9]	(-∞, -3.1]	(-∞, -2.4]	(-∞, -4.5]	(-∞, -4.4]	(-∞, -6.8]

3.2 STI 评估结果

3.2.1 冬季气温时空规律及等级评估

根据邯郸、正定、涿州这 3 个站点的历年冬季气温资料,通过计算比较气温极大值、极小值、均值等特征值,分析气温由南向北的变化规律以及各站点年际间变化特点。表 6 给出了沿线 3 个气象站历年冬季气温特征值。结果显示:①南水北调中线工程沿线气温呈现南高北低、逐渐下降的规律,12 月平均气温、1 月平均气温、2 月平均气温和冬季平均气温长系列均值沿程下降速率分别为 0.81、0.82、0.76、0.79 °C/(100 km)。②最低极小值均出现在涿州站,12 月平均气温极小值为 -5.6 °C(涿州站 2012 年),1 月平均气温极小值为 -8.4 °C(涿州站 2000 年),2 月平均气温极小值为 -3.6 °C(涿州站 2005 年),冬季平均气温极小值为 -5.0 °C(涿州站 2013 年)。

图 3 给出了各测站冬季平均气温对比,揭示了冬季气温总体呈波动上升的趋势,其中,2000 年后,邯郸站和正定站气温基本接近且变化趋势一致,除个别年份(如 2013 年)温度出现骤降,整体温度上升趋势明显。

在气温时空变化规律的认识上,利用新建立的 STI 方法对代表地区的冬季冷暖等级进行评估,并与国标法的评估结果开展对比分析。不同方法计算的冷暖冬年出现频率详见表 7。

图 4 给出了国标法和 STI 法对邯郸站、正定站、涿州站的冬季平均气温等级分布。总体上,两种方法对冷暖冬年的评价结果基本一致,对于强冷(暖)冬等级判别略有差异。

表 6 各站历年冬季气温特征值

Tab. 6 Winter temperature characteristic values of each station over the years 单位: °C

特征参数	极值和均值	各气象站历年冬季气温特征值		
		邯郸站	正定站	涿州站
12月平均气温	极小值	-1.9(1984)	-3.8(1985)	-5.6(2012)
	极大值	3.1(2016)	2.1(2016)	0.1(1998)
	均值	0.9	-0.1	-2.4
1月平均气温	极小值	-4.0(2000)	-4.8(2000)	-8.4(2000)
	极大值	3.0(2002)	1.4(2002)	-1.3(2002)
	均值	-0.9	-2.0	-4.3
2月平均气温	极小值	-1.3(2005)	-2.3(1984)	-3.6(2005)
	极大值	7.3(2021)	6.5(2021)	2.6(2007)
	均值	2.7	1.5	-0.4
冬季平均气温	极小值	-1.3(2013)	-2.7(1985)	-5.0(2013)
	极大值	3.0(2002)	2.0(2004)	-0.6(1999)
	均值	0.9	-0.3	-2.4

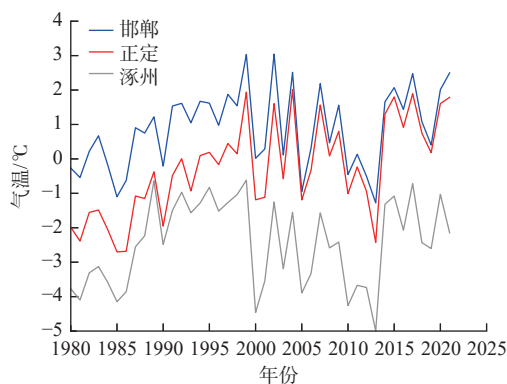
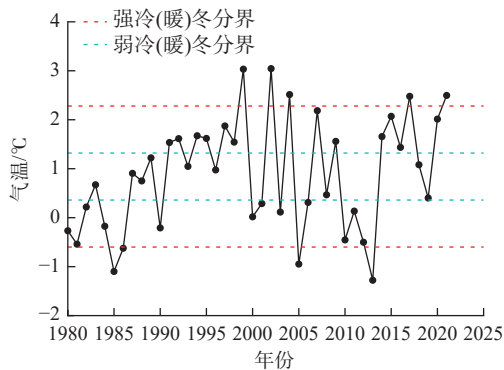


图 3 各测站冬季平均气温序列对比

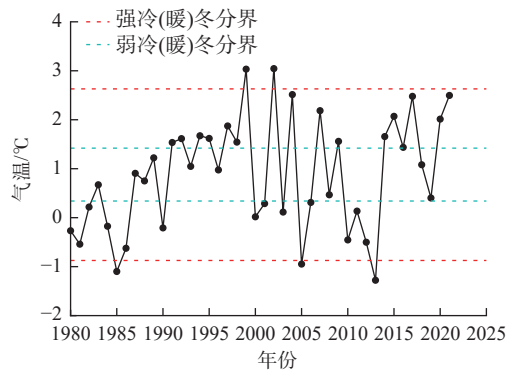
Fig. 3 Comparison of winter average temperature sequences at various stations

表 7 各站冬季冷暖等级频率分布表
Tab. 7 Frequency distribution table of winter heating and cooling levels at each station %

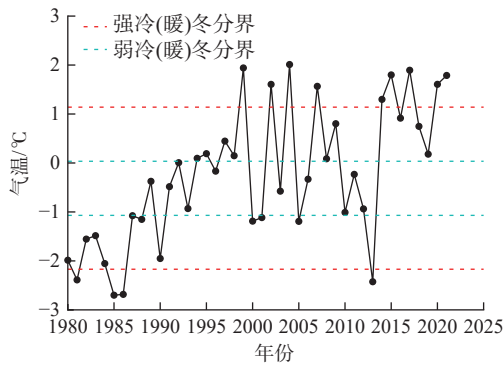
等级名称	邯郸		正定		涿州	
	国标法	STI法	国标法	STI法	国标法	STI法
强暖冬	11.90	4.76	21.43	7.14	9.52	2.38
弱暖冬	28.57	35.71	21.43	23.81	30.95	38.10
平冬	21.43	21.43	23.81	28.57	21.43	21.43
弱冷冬	28.57	30.95	23.81	30.95	26.19	33.33
强冷冬	9.52	7.14	9.52	9.52	11.90	4.76



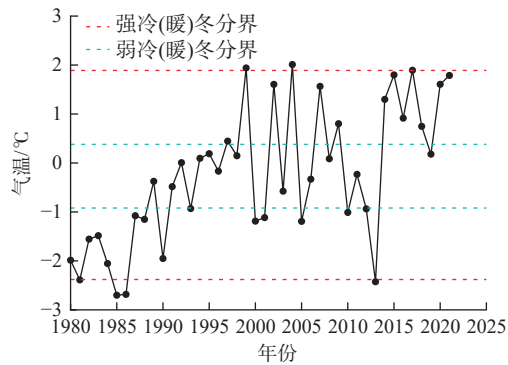
(a) 国标法邯郸站冬季平均气温



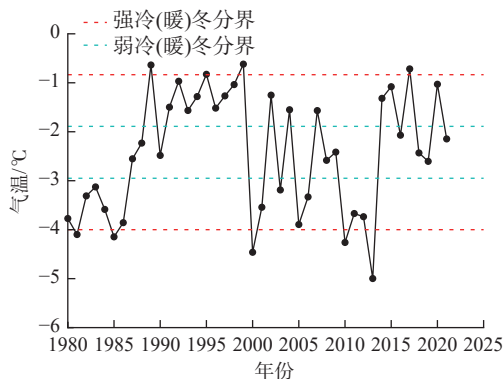
(b) STI法邯郸站冬季平均气温



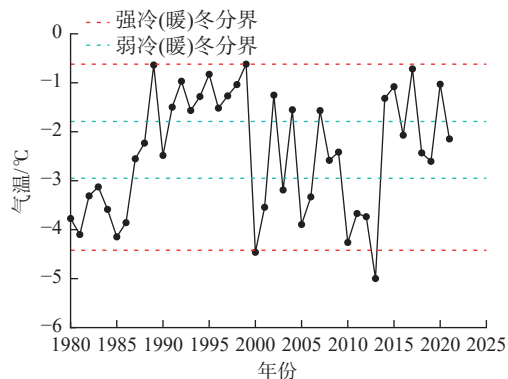
(c) 国标法正定站冬季平均气温



(d) STI法正定站冬季平均气温



(e) 国标法涿州站冬季平均气温



(f) STI法涿州站冬季平均气温

图 4 国标法与 STI 法冬季冷暖等级评价结果

Fig. 4 Evaluation results of winter cooling and heating levels using national standard method and STI method

结果表明, STI 方法与国标法的冬季冷暖评估结果基本一致,但在各代表区强冷冬和强暖冬划定上, STI 评估得出的年份数量均少于国标法。这是

由于国标法基于正态分布,按 33.3% 概率对应的范围确定为平冬的阈值,按 10% 较小概率对应的分位数确定为强冷冬、强暖冬阈值,而随着近年来冬季

气温的持续升高,国标法对于冷暖冬判别的阈值也相应受到影响;相比之下,STI方法考虑了气温的偏态性概率分布,基于历史重现期来划定冬季等级,对冬季冷暖的判别更科学。

3.2.2 冬季等级与冰情关系探究

中线工程自2014年12月全线通水以来,每年冬季开展冰情原型观测,积累了一定的冰情数据,重点是冰盖形成演变的情况,主要包括出现冰盖开

始时间(初封日期)、冰盖消融完毕时间(解冻日期)、存在冰盖历时(封冻历时)、形成冰盖最大长度(封冻渠长)以及冰盖最大厚度等。选取地理位置相对靠北、冰情特征较明显的涿州站,利用国标法和STI法分别对冬季各月和整个冬季进行冷暖评估对比并分析冷暖程度和冰情的关系。计算分析结果详见表8和表9。

表8 涿州站不同时间尺度冬季冷暖等级评估结果

Tab. 8 Evaluation results of winter cold and warm levels at different time scales at Zhuozhou

年份	前一年12月		当年1月		当年2月		整个冬季	
	国标法	STI法	国标法	STI法	国标法	STI法	国标法	STI法
2015—2016	弱暖冬	弱暖冬	弱冷冬	弱冷冬	弱暖冬	弱暖冬	平冬	平冬
2016—2017	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	强暖冬	弱暖冬
2017—2018	弱暖冬	弱暖冬	平冬	平冬	平冬	平冬	平冬	平冬
2018—2019	弱冷冬	弱冷冬	弱暖冬	弱暖冬	平冬	平冬	平冬	平冬
2019—2020	弱暖冬	平冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬	弱暖冬
2020—2021	弱冷冬	弱冷冬	平冬	平冬	强暖冬	强暖冬	平冬	平冬

表9 涿州站历年冰期情况统计表

Tab. 9 Statistics of ice ages over the years at Zhuozhou

年份	封冻范围	封冻渠长/km	封冻历时/d	初封日期	解冻日期	最大冰厚/cm
2015—2016	七里河倒虹吸下游	360	27	2016-01-14	2016-02-15	28
2016—2017	西市隧洞下游	<5	10	2017-01-27	2017-01-31	5
2017—2018	西黑山节制闸下游	<5	7	2018-01-26	2018-02-02	5
2018—2019	瀑河倒虹吸下游	<5	9	2019-01-03	2019-01-11	4
2019—2020	瀑河倒虹吸下游	<1		无封冻		<2
2020—2021	岗头隧洞下游	83	10	2021-01-07	2021-01-16	16

通过表8可以看出,通水以来,除2016—2017年国标法评估结果为强暖冬、STI法评估结果为弱暖冬,2019年12月国标法评估结果为弱暖冬、STI法评估结果为平冬外,2种方法对涿州站评估的各项结果完全相同。这与通水以来这几年冬季平均气温较为稳定,年际气温变化不大有关。

结合表9历年冰情来看,总体上,近几年属于偏暖形势,历年的冰情整体较乐观,除2015—2016年外,其他年份封冻历时很短,甚至未形成冰盖,冰的厚度也不大,这与冷暖评价中大多年份都为平冬,少数年份为暖冬的结果一致,证明了冷暖冬的评估结果一定程度上可反映出冰情整体情况。但同时也可看出,2016—2017年整个冬季均为暖冬,却出现了冰情。这是由于:一方面,虽然整体上冬季气温不低,但过程中短时间出现了较严重的寒潮,从

而发生较重的冰情,且冰情历时较短,于冬季整体评价及月度评价结果影响不大;另一方面,冰情发生机制复杂,不仅与气温相关,还与入渠的水温、输水流量大小、控制水位的高低、沿线天气情况等相关。上述结果表明,两种方法的冬季冷暖评估结果与冬季整体情况有趋势上的反映,与冰情之间有一定相关关系。当评价结果为冷冬时,冰情出现的可能性大,而当评价结果为暖冬却出现冰情时,则更多需要考虑局部短期寒潮的影响。

通过上述分析来看,国标法与STI方法的原理、思想类似,2种方法本质区别在于国标法假定气温理论分布属于正态分布,而STI方法则假定气温理论分布属于偏态分布。对比国标法与STI方法对邯郸、正定、涿州这3站冬季冷暖评价结果,同时结合实际冰情探索冷暖评估结果与冰情之间的关系,结

果表明,两种方法均能够反映整体冬季气温的变化趋势:国标法基于正态分布计算,方法简便,物理意义清晰;而 STI 方法基于历史重现期来划定冬季冷暖等级,考虑了气温的偏态性,且从拟合效果上来看,与实测数据贴近,证明了“所选 3 站的气温理论分布属于偏态分布”这一假设成立,对冬季冷暖的判别考虑更加科学。为了提高 STI 方法的准确性,为中线工程冰期输水提供参考,气温数据还需进一步积累补充,并不断验证此方法对中线沿线其他站点的适用性;此外,鉴于短期局部寒潮给渠道带来的冰情影响,可以考虑利用长时间尺度与局部动态小尺度相结合的方法,及时识别出短期寒潮、强降温过程,为冰期输水调度安全提供保障。

4 结论

为科学量化评估南水北调中线途径区域冬季的冷暖程度,本文基于自然界大量现象具有偏态分布的特征,参考用于旱涝评估的 SPEI 和 SPI 方法原理,构建了考虑温度对冬季冷暖程度影响的标准化温度指数 STI 方法,并分析确定了强暖冬、弱暖冬、平冬、弱冷冬和强冷冬划分的临界阈值,可支撑地区冬季冷暖强弱的判别。

选择南水北调中线途经的邯郸、正定、涿州为典型研究区域,基于各站 42 年冬季气温数据,计算了气温频率分布与 STI 理论概率分布的拟合效果,决定系数 R^2 基本上达到 0.99,理论概率分布与统计频率分布保持了很好的一致性,证明了邯郸、正定、涿州这 3 站气温的理论分布符合对数逻辑概率分布这一假设的合理性。

基于 STI 法计算得到了各区域冷暖冬发生的频率规律。邯郸、正定、涿州发生强冷冬概率分别为 7.14%、9.52% 和 4.76%,发生弱冷冬及以上的概率分别为 38.09%、40.48% 和 38.09%,发生平冬的概率分别为 21.43%、28.57% 和 21.43%,发生弱暖冬及以上的概率分别为 40.48%、30.95% 和 40.48%,发生强暖冬的概率分别为 4.76%、7.14% 和 2.38%。

对比国标法、STI 法对中线总干渠沿线典型区域冬季冷暖的评估结果,两种方法计算的冷暖冬年基本一致,但在强冷冬和强暖冬划分上,STI 法所得频次少于国标法,与基于正态分布的国标法相比,STI 法考虑了气温序列的偏态性概率分布特征,对相对冷暖的判别更科学,有推广应用的价值。同时中线历年实际冰情原型观测情况表明,区域冷暖一

定程度上可反映出冰情整体情况,但冰情发生机制复杂,不仅与气温相关,还与入渠的水温、输水流量大小、控制水位的高低、沿线天气情况等相关。

参考文献:

- [1] 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(2):30-33. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2023.02.010.
- [2] 国家市场监督管理总局,国家标准化委员会.暖冬等级:GB/T 21983—2020[S].北京:中国标准出版社.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国标准化委员会.冷冬等级:GB/T 33675—2017[S].北京:中国标准出版社.
- [4] 段文刚,郝泽嘉.基于气温链的南水北调中线工程冬季气温等级评价[J].*长江科学院院报*,2022,39(9):1-8. DOI: 10.11988/ck-yyb.20220187.
- [5] 练继建,杨德明,赵新.南水北调中线工程冬季输水冰情风险研究[J].*水利水电科技进展*,2023,43(1):63-70. DOI: 10.3880/j.is-sn.1006-7647.2023.01.010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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(4):28-29. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7700.2008.04.016.
- [9] 段文刚,郝泽嘉,杨金波,等.南水北调中线工程 2014—2022 年冬季水温与冰盖观测分析[J].*水利学报*,2023,54(9):1025-1037. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20221018.
- [10] 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(22):99-102. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.22.023.
- [11] 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.nsbdkq.2016.06.017.
- [12] 李程喜,段文刚,卢明龙,等.南水北调中线冰情演变水温与气温阈值研究[J].*水利科学与寒区工程*,

- 2022, 5(2): 4-8. DOI: [10.3969/j.issn.2096-5419.2022.02.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-5419.2022.02.003).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210483).
- [16] 杨开林. 输水隧洞水温模型 [J]. 水利学报, 2023, 54(4): 405-413. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220602](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220602).
- [17] 杨开林. 渡槽水体的热交换及水温和含冰率的时空变化 [J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1317-1327. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20220182](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20220182).
- [18] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration of time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
- [19] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index.[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718. DOI: [10.1175/2009JCLI2909.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1).
- [20] 李军, 吴旭树, 王兆礼, 等. 基于新型综合干旱指数的珠江流域未来干旱变化特征研究 [J]. 水利学报, 2021, 52(4): 486-497. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200320](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200320).
- [21] CHEN H, SUN J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430-5447. DOI: [10.1175/JCLI-D-14-00707.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00707.1).
- [22] YU M, LI Q, HAYES M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951–2010?[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 34(3): 545-558. DOI:[10.1002/joc.3701](https://doi.org/10.1002/joc.3701).
- [23] 王学风, 路洁, 曹永强. 辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1514-1524. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20200426](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20200426).
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社.

Assessing winter temperature grade in typical areas along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project using standardized temperature index

CHEN Xiaonan¹, LI Tianyi¹, GUO Xinlei², LI Jinggang¹

(1. China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: A large north-south area with self-flowing water transportation was spanned by the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project. During the winter water transportation process, the water temperature is affected by weather, which can lead to ice conditions in the Hebei section of the channel. Therefore, scientific and quantitative evaluation of winter temperature in the areas along the Project is an important basis for analyzing the occurrence and evolution of ice conditions in the main canal.

In this study, Handan, Zhengding, and Zhuozhou were used as representative regions, and the fitting of statistical frequency distribution and theoretical probability distribution was analyzed using daily winter temperature data from 1979 to 2021. Additionally, a new quantitative evaluation model for winter temperature was proposed based on the standardized temperature index method.

The results showed that: (1) The standardized temperature index method's evaluation of cold and warm conditions in winter was generally consistent with the national standard method. However, fewer years for delineating strong cold winters and warm winters in each representative area was evaluated by the standardized temperature index method compared to the national standard method. (2) The temperature values corresponding to

cold and warm level thresholds, calculated based on January temperature in each representative area, were significantly lower than those calculated based on the entire three months of winter. The temperature value decreased as the representative area moves farther north. (3) According to the evaluation of standardized temperature index method, the probabilities of strong cold winter occurrence in Handan, Zhengding, and Zhuozhou were 7.14%, 9.52%, and 4.76%, respectively. The probabilities of weak cold winter and above occurrence are 38.09%, 40.48%, and 38.09%, respectively. The probabilities of normal winter were 21.43%, 28.57% and 21.43%, the probabilities of weak warm winter and above occurrence were 40.48%, 30.95% and 40.48, respectively, and the probabilities of strong warm winter were 4.76%, 7.14% and 2.38%, respectively.

Compared to the national standard method based on the normal distribution, the characterization of skewed probability distribution of temperature series was considered through these results, making it more scientifically sound in distinguishing relative temperature conditions and more valuable for promotion and application.

Key words: Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; standardized temperature index; ice-affected water diversion; winter temperature evaluation



摄影|曲帅超