

周中元, 王涛, 陈玉壮, 等. 南水北调中线工程沿线寒潮及区域极端低温时空变化规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1098-1108. ZHOU Z Y, WANG T, CHEN Y Z, et al. Spatiotemporal variations of cold waves and regional extreme low temperature along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1098-1108. (in Chinese)

南水北调中线工程沿线寒潮及区域极端低温 时空变化规律

周中元¹, 王涛¹, 陈玉壮¹, 孙亚翡¹, 路锦枝^{1,2}

(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. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:为掌握南水北调中线工程沿线寒潮及区域极端低温时空变化规律, 基于南水北调中线工程陶岔渠首至北拒马河暗渠沿线 40 km 宽度范围内的 56 个气象站点 1960—2020 年日最低、最高气温数据资料, 分析 5 个极端气候指数时空变化规律, 另外计算 9 个典型气象站 1960—2020 年寒潮发生频次, 采用 Sen 斜率估计方法进一步分析其变化趋势。结果表明: 9 个典型气象站中, 1960—2020 年 7 个气象站寒潮发生频次总体呈减少趋势; 2 个气象站寒潮发生频次总体呈下降趋势, 但 2000 年以来呈现明显增多的异常趋势; 邢台以北区域随纬度升高寒潮呈增多趋势。对于极端气候指数 1960—2020 年 9 个气象站每年度日最低气温的最小值总体均呈现上升趋势, 但 1990 年以来保定站呈现不升反降的异常趋势, 邢台、石家庄两站也基本不再上升, 处于上升停滞状态; 霜冻日数(每年度日最低气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 的天数)、冰冻日数(每年度日最高气温 $<0^{\circ}\text{C}$ 的天数)、冷夜(最低气温 $<10\%$ 分位值的天数)等极端气候指数总体呈现不同的下降趋势, 但邢台以北等站点也呈现不降反升或者下降停滞的异常状态。从空间变化趋势上来看, 各气候指数相互之间未呈现整体上一致性的变化规律, 冰冻日数沿南水北调中线从南到北下降速率总体呈加快趋势。

关键词:寒潮; 极端气候指数; 防凌减灾; 冬季输水; 气候变化; 南水北调中线工程

中图分类号: TV68; TV875 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0107

全球气候环境变化是人类目前面临的最大挑战之一, 由于大气中温室气体的增加, 全球平均地表温度不断升高, 在 2017 年达到比工业化前期(参考时期 1850—1900 年)高 1°C 的水平^[1-2]。自 20 世纪 50 年代以来, 我国地表年平均气温呈显著上升趋势, 升温速率为 $0.26^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$, 高于全球同期平均水平^[3]。在全球变暖的同时, 越来越多的证据表明极端气候事件的发生率也在急剧增加, 在过去几十年出现了严重高温、洪水、干旱、极端低温等极端天气^[4-6]。对于极端低温事件, 在全球变暖的背景下, 大部分地区的低温日数呈明显减少趋势, 极端低温事件频次总体也呈减弱趋势, 但区域极端低温事件仍具有偶发性和破坏力强的特点。2000 年以来, 特别是

2008 年以来区域性极端低温事件的发生频率和强度有所增强, 持续时间长、影响范围广的极端低温事件频繁发生^[7-9]。例如: 2008 年 1 月 10 日—2 月 25 日, 我国南方地区出现历史罕见的大范围低温、雨雪及冰冻灾害^[10]; 2016 年 1 月我国爆发强寒潮天气, 全国多地气温急剧降低, 出现极端低温天气^[11]; 2021 年 1 月保定站出现 -22°C 的历史低温。

气温是影响河渠冰凌变化的主要因素, 寒潮、区域极端低温等冷空气过程常常会造成气温大幅波动, 对长距离冬季输水产生不利影响^[12-14]。例如: 1976 年及 1981 年冬季北京市京密引水渠受冷空气影响发生冰塞, 渠道被迫停止输水^[15]; 2015—2016 年冬季, 受极端寒潮影响南水北调中线工程七里河

收稿日期: 2023-08-22 修回日期: 2023-10-30 网络出版时间: 2023-11-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231127.1725.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202501); 国家自然科学基金项目(51979291; 52009144); 中国水科院科研专项项目(HY0145B032021)

作者简介: 周中元(1999—), 男, 山东临沂人, 主要从事河冰水动力学研究。E-mail: zhongyuan123ab@163.com

通信作者: 王涛(1975—), 女, 河南南阳人, 正高级工程师, 博士, 主要从事河冰水动力学及冰情预报研究。E-mail: wangtao@iwahr.com

节制闸后发生封冻形成冰盖,出现多处冰塞;2021年1月受寒潮等低温冷空气影响,山东省胶东调水工程烟台段明渠全线结冰,部分渠段形成冰塞,导致渠道水位壅高并溢出^[16]。南水北调中线工程总干渠从陶岔渠首至北拒马河节制闸,全长近1200 km,跨越7个纬度,由温和区跨越到寒冷区,黄河以北渠段受寒潮、区域极端低温等冷空气影响常常会产生冰凌问题,影响冬季输水运行^[17-18]。王春青等^[19]通过分析寒潮天气与凌情之间的关系,发现寒潮对于河道首次封河具有重要影响;段文刚等^[20]通过分析南水北调中线工程总干渠8个冬季的冰情观测资料发现,寒潮是影响渠道冰盖生成的关键驱动因子,在8个冬季中出现的3次强寒潮,均促成了冰盖的生成及发展,由此可知寒潮等低温天气对于河渠冰情发展以及冬季输水安全具有重要影响。

部分学者对南水北调中线工程沿线低温天气进行了初步研究:王涛等^[21]分析了南水北调中线工程沿线4个气象站50年(1957—2006年)气温变化规律,发现沿线凌汛期平均气温有逐年升高趋势,新乡及其以北地区冬季气温处于零下的时间较长。段文刚等^[20]通过分析中线工程沿线8个气象站1951—2021冬季日平均气温以及日最低气温变化规律,发现总干渠由南向北气温呈逐级下降趋势,下降速率为 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/(100\text{ km})$;沿线冬季气温总体呈上升趋势,升温速率为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$;另外发现保定站最近年份偏冷,对于促进中线工程冰盖形成具有重要贡献。刘孟凯^[22]基于中线工程沿线8个气象站点1968—2017年的逐日气温资料对沿线地区冬季平均气温、南北地区寒潮同步性、连续低温天数等特征进行了系统分析,发现沿线各气象站冬季平均气温呈升温趋势,同步冷冬和同步暖冬比例为43%,冷冬的同步发生可能造成冰情范围扩大并加剧。

综上所述,寒潮及区域极端低温等低温天气是影响河渠冰情发展以及冬季输水的重要因素,了解南水北调中线沿线低温天气变化规律对于渠道冰凌灾害防御、冬季输水调度等问题具有重要意义。目前关于南水北调中线工程沿线低温气候变化的相关分析并不全面,为此本文基于南水北调中线陶岔渠首至北拒马河暗渠沿线60年的气象观测数据,系统总结分析沿线寒潮和极端气候指数的时空变化规律,以期以南水北调中线工程冬季防凌减灾、输水调度提供理论支撑。

1 研究区概况

南水北调中线工程跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域,总干渠全长1432 km,总水头小于100 m,全程自流,以明渠输水为主,设有众多的节制闸、分水口、渡槽、倒虹吸、隧洞等水工建筑物^[23-24]。总干渠由南向北跨越北纬 33° 至 40° ,水流从低纬度向高纬度流动,沿程气温不断降低,在冬季运行时黄河以北700 km的渠段受寒冷气温影响将会产生不同程度的冰凌问题,为防止冰塞发生,冬季输水流量一般控制为设计流量的30%~50%^[25-27]。本文主要选取南水北调中线陶岔渠首至北拒马河节制闸作为研究渠段,另外选取该渠段两侧各40 km宽度范围作为极端气候空间分析区域。

2 数据与方法

2.1 研究数据

研究所用数据主要为日最低、最高气温观测数据,来源于中国气象数据网。经过数据质量筛选后,选取南水北调中线丹江口水库至北拒马河节制闸沿线两侧各40 km范围内共56个气象站点的气温数据作为本研究的基础数据,数据记录长度为1960年1月—2020年12月。南水北调中线工程由南到北跨越多个纬度,南北跨度大,在进行气候变化分析时应选择足够数量的气象站数据作为基础资料,经过对比南水北调中线工程不同宽度范围内的气象站点,发现40 km范围内的气象站适量且相对分布均匀,能够满足气象数据的充分性和空间覆盖性要求,因此最终以南水北调中线工程沿线两侧各40 km范围内的气象站作为选取标准。需要指出的是获取的数据缺失2016年12月数据,该月数据是利用2015年12月及2017年12月的数据进行插值后得到的。研究时间为11月、12月、1月和2月共4个月份;每年度定义为当年的11月、12月以及次年的1月、2月。相距较近的气象站往往具有相同的气候变化特征,选择部分具有代表性的气象站进行详细的气候变化分析是合适的,因此在参考其他文献^[28]的基础上选取南水北调中线工程沿线分布相对均匀的9个气象站作为典型气象站进行寒潮以及极端气候指数分析,分别为南阳、宝丰、郑州、新乡、安阳、邢台、石家庄、保定以及房山。其中56个气象站点的气温数据主要用来分析5种极端气候指数变化趋势空间分布特征,9个典型气象站的气温数据则是为了进一步分析5种极端气候指数以及寒潮

在 1960—2020 年的具体演变趋势及发生频次。

2.2 研究方法

依据中华人民共和国国家标准《寒潮等级》(GB/T 21987—2017), 计算南水北调中线工程沿线 9 个典型气象站历年寒潮发生次数。寒潮为高纬度的冷空气大规模地向中、低纬度侵袭, 造成剧烈降温的天气活动, 《寒潮等级》中规定为使某地的日最低气温 24 h 内降温幅度 $\geq 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 或 48 h 内降温幅度 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 或 72 h 内降温幅度 $\geq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且使该地日最低气温 $\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷空气活动^[29]。

区域极端低温与寒潮具有一定区别, 其持续时间更长影响范围广, 造成的灾害更加严重。区域极端低温的发生一般都伴随有寒潮的发生, 但寒潮的发生并不一定会引发区域极端低温事件。极端气候指数是衡量区域极端气候的重要标准, 选取世界气象组织气候委员会推荐使用的极端气候指数中的 5 个极端冷气候指数进行南水北调中线工程沿线极端低温气候分析, 具体指数及定义见表 1。

表 1 极端气候指数
Tab. 1 Climate extremes index

极端气候指数	名称	定义
TNn	日最低气温的极低值/ $^{\circ}\text{C}$	每年度日最低气温的最小值
FD0	霜冻日数/d	每年度日最低气温 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数
ID0	冰冻日数/d	每年度日最高气温 $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的天数
TX10p	冷昼/d	最高气温 $< 10\%$ 分位值的天数
TN10p	冷夜/d	最低气温 $< 10\%$ 分位值的天数

采用 Sen 斜率估计^[30]方法分析南水北调中线沿线寒潮以及极端气候长期变化趋势。Sen 斜率估计是一种非参数估计法, 广泛应用于气温、降雨等各气候要素的长期变化趋势分析, 公式为

$$S_{ij} = m\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为 Sen 斜率; m 为中位数函数; x_i 和 x_j 分别为第 i 、第 j 时刻的序列数据。

3 结果与讨论

3.1 寒潮发生频次分析

统计分析南水北调中线沿线 9 个气象站各月寒潮发生次数, 见图 1。从 9 个气象站总体来看, 寒潮主要发生在 1 月和 12 月, 然后依次为 2 月和 11 月。1 月份发生寒潮最多的站点为保定站, 1960—2020 年共发生 30 次; 12 月发生寒潮最多的站点为宝丰

站, 为 26 次; 邢台以北区域, 寒潮主要发生在 1 月份, 特别是保定高频次的寒潮极易产生冰凌问题, 增加冬季输水风险。9 个气象站中发生寒潮次数最多的站点为宝丰和房山站, 虽然宝丰站地理位置靠南, 但寒潮却频繁发生。9 站沿纬度方向从南到北, 寒潮发生次数并无明显规律, 这说明寒潮的发生并非受纬度单一因素影响, 还存在其他影响因素, 但是发现邢台以北区域从南到北各气象站寒潮发生次数逐渐增多, 见图 2。

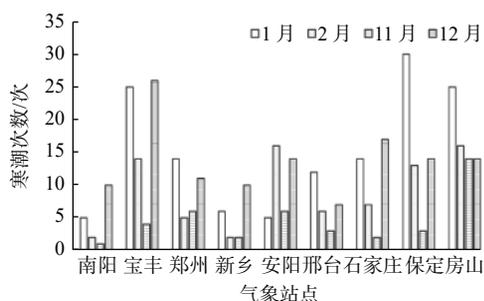


图 1 沿线 9 个气象站各月寒潮次数

Fig. 1 The number of cold waves in each month at 9 meteorological stations along the line

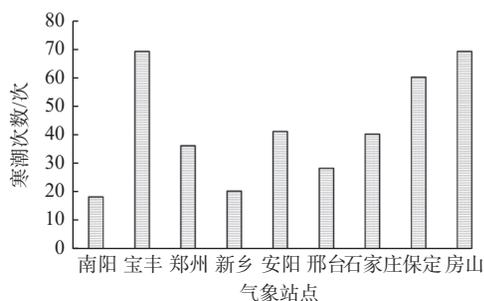


图 2 沿线 9 个气象站寒潮发生总次数

Fig. 2 The total number of cold waves at 9 meteorological stations along the line

分析沿线 9 个气象站点 1960—2020 年各站寒潮变化趋势, 见图 3。1960—2020 年 9 个气象站中有 7 个气象站寒潮发生次数总体呈减少趋势。南阳、安阳 2 个气象站寒潮呈增多趋势, 虽然南阳寒潮发生次数呈增多趋势, 但是主要发生在 20 世纪 80 年代, 21 世纪以来寒潮发生次数较少。安阳站 21 世纪以来寒潮频发, 2008/2009 年度发生 4 次寒潮, 打破 21 世纪前每年度最高 2 次的记录。保定站寒潮发生次数总体呈下降趋势, 但近 10 年以来寒潮发生次数明显增多, 2016/2017 年度发生寒潮的次数达到 6 次, 打破历史最高 4 次的记录。南水北调中线工程沿线 9 个典型气象站中多数站点每年度寒潮发生次数呈减少趋势, 但是自 2000 年以来安阳站以及

保定站寒潮发生次数明显增多,2个气象站均位于黄河以北,高频次的寒潮发生将会对南水北调中线工程凌情发展产生重要影响,因此在南水北调中线工程冬季运行调度中应多关注这2个站的寒潮信息。

南水北调中线工程沿线区域在20世纪80年代至90年代初经历了一定的气候要素突变,例如刘孟凯^[22]基于南水北调中线工程总干渠沿线8个气象站1968—2017年逐日气温数据分析了南水北调中线冬季气温变化趋势,发现沿线各气象站冬季气温在20世纪90年代初期以前发生了明显的气温突变,

推荐将90年代作为划分沿线气温突变的节点。因此,以20世纪90年代为节点将整个研究期划分为突变前期(1960—1989年)和突变后期(1990—2019年),分别计算2个时期寒潮发生次数并进行对比分析,具体结果见表2。对比突变前期和突变后期各气象站寒潮发生次数发现:9个气象站中8个气象站寒潮发生次数呈减少趋势,仅安阳1个气象站呈增多趋势;邢台、郑州、石家庄以及房山等气象站寒潮发生次数下降明显,下降率均超过60%;保定、宝丰2个气象站寒潮发生次数下降较为缓慢,下降率均低于20%。

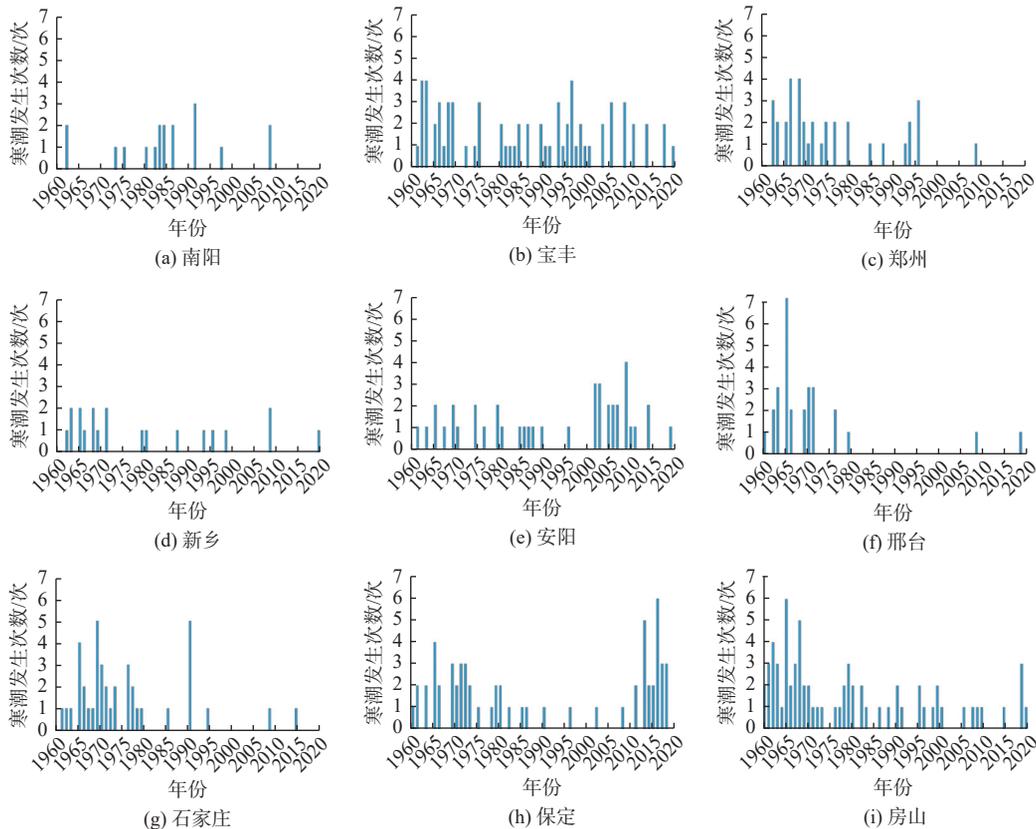


图3 沿线9个气象站寒潮发生次数变化趋势

Fig. 3 The trend of the occurrence of cold waves at 9 meteorological stations along the line

表2 沿线9个气象站不同时期寒潮发生次数

Tab. 2 The number of cold waves at different times at 9 meteorological stations along the line

项目	房山	保定	石家庄	邢台	安阳	新乡	郑州	宝丰	南阳	9站合计	
寒潮发生次数/次	1960—1989年	50	33	32	26	19	14	29	37	12	252
	1990—2019年	19	27	8	2	22	6	7	32	6	129
变化率/%	-62.0	-18.2	-75.0	-92.3	15.8	-57.1	-75.9	-13.5	-50.0	-48.8	

此外,将整个研究期以每10a一个周期划分为6个时段,分别统计计算每个时段内各气象站寒潮发生的总次数,结果见图4。由图4可知20世纪90

年代前寒潮发生次数呈现明显下降趋势,90年代之后寒潮发生次数不再继续下降,呈现较为平稳的状态。

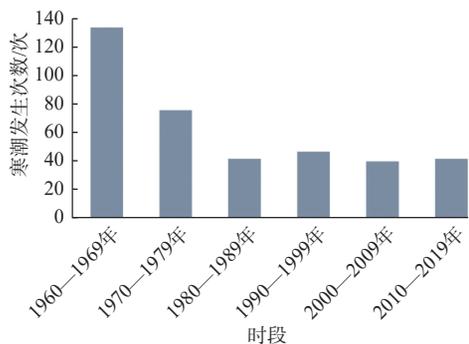


图 4 不同阶段沿线 9 个气象站寒潮发生总次数

Fig. 4 The total number of cold waves at 9 meteorological stations along the line at different stages

3.2 极端气候指数时空变化规律分析

选取日最低气温的极低值(TNn)、霜冻日数(FD0)、冰冻日数(ID0)、冷昼(TX10p)和冷夜(Tn10p)这 5 种极端气候指数来分析南水北调中线工程沿线区域极端气候时空变化规律,采用 Sen 斜率估计的方法计算各气候指数的变化趋势率,结果见表 3。

表 3 南水北调中线工程沿线 9 个气象站气候指数变化趋势率

Tab. 3 Climate index change tendency rate of 9 meteorological stations along the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project

站点	TX10p/ ($d \cdot a^{-1}$)	TNn/ ($^{\circ}C \cdot a^{-1}$)	TN10p/ ($d \cdot a^{-1}$)	ID0/ ($d \cdot a^{-1}$)	FD0/ ($d \cdot a^{-1}$)
南阳	-0.041	0.038*	-0.205*	-0.022	-0.552*
宝丰	-0.051	0.043*	-0.124*	-0.021	-0.364*
郑州	-0.089*	0.086*	-0.279*	-0.051	-0.649*
新乡	-0.070*	0.043*	-0.265*	-0.018	-0.515*
安阳	-0.031	0.050*	-0.194*	-0.040	-0.463*
邢台	-0.019	0.126*	-0.383*	-0.025	-0.667*
石家庄	-0.065*	0.108*	-0.336*	-0.071	-0.456*
保定	-0.072*	0.045*	-0.174*	-0.144*	-0.283*
房山	-0.078*	0.068*	-0.195*	-0.162*	-0.270*

注: 标有*号的数据表示通过 0.05 的显著性检验。

对于 TNn 气候指数, 9 个气象站点均呈现上升趋势(图 5), 并且 9 个站的结果均通过了 0.05 的显著性检验。南阳、宝丰、新乡、安阳、保定上升趋势较为缓慢, 上升速率 $\leq 0.5^{\circ}C/(10 a)$; 郑州、邢台和石家庄上升趋势较快, 上升速率为 $0.86 \sim 1.26^{\circ}C/(10 a)$ 。虽然邢台、石家庄两地上升速率最大, 但是由图 5 可以发现, 1990 年以来两地的 TNn 并没有发生较为明显的变化, 这说明两站每年的日最低气温值维持较平稳的态势。保定站 TNn 的变化趋势与其他站点不同, 1990 年之前呈现上升趋势, 1990 年之后出现明显的下降趋势, 而其他 8 个站 1990 年之后

TNn 呈现上升或者平稳的变化趋势。随着全球气候变暖, 大部分区域都呈现升温的趋势, 而保定站每年日最低气温极低值却表现出明显的降温趋势, 这种反常的气候变化趋势会对南水北调中线工程冬季输水产生不利影响。

对于 FD0 气候指数, 9 个气象站均呈现明显下降趋势(图 6), 并通过 0.05 的显著性检验, 下降趋势率为 $-2.7 \sim -6.7 d/(10 a)$, 保定、房山站下降较为缓慢, 郑州、邢台站下降速度较快。保定站 2000 年以来呈现不降反升的独特趋势, 说明每年度日最低气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数存在增加趋势。

对于 ID0 气候指数各站点也都呈现下降的趋势(图 7), 但下降趋势并不显著, 9 个站中只有保定、房山 2 个站通过 0.05 的显著性检验, 即只有 2 个站表现出较为明显的下降趋势。保定、房山每年度日最高气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数下降速率分别为 $1.44 d/(10 a)$ 、 $1.62 d/(10 a)$ 。

对于 TX10p 气候指数 9 个站均呈现下降趋势(图 8), 其中, 5 个站通过 0.05 的显著性检验, 9 个站下降范围在 $0.19 \sim 0.89 d/(10 a)$, 郑州、新乡、保定、房山等下降较快, 邢台、安阳、南阳等下降速率较慢。TN10p 气候指数 9 个站也均呈现下降趋势, 并且 9 个站均通过 0.05 的显著性检验(图 9), 部分站点自 2000 年以来也呈现下降停滞或上升的趋势。

基于南水北调中线工程沿线 56 个气象站点的气温数据, 通过 Sen 斜率估计以及反距离权重空间插值分析 5 种极端气候指数变化趋势空间分布特征, 见图 10。对于 TNn 气候指数, 所有区域总体都呈现上升的趋势, 郑州附近区域、安阳至石家庄沿线区域升温最为明显, 每年度日最低气温的最小值升温速率最高可达 $1.25^{\circ}C/(10 a)$ 。FD0 气候指数大部分区域呈现下降的趋势, 说明大部分区域每年度日最低气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数呈减小趋势: 郑州至邢台沿线区域下降速率最快, 最高可达 $8.5 d/(10 a)$; 邢台以北区域下降速率较慢, 甚至部分区域呈现上升的趋势。ID0 气候指数全线都呈现下降的趋势, 每年度日最高气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数以 $0 \sim 3.7 d/(10 a)$ 的速率减少, 沿南水北调中线工程从南到北下降速率呈加快趋势, 特别是石家庄以北区域下降速率较快。与 ID0 变化速率相比, FD0 的变化速率更为明显, 例如 ID0 最高的下降速率仅为 $3.7 d/(10 a)$, 但 FD0 最高下降速率可达 $8.5 d/(10 a)$, 这说明每年度日最低气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数与每年度日最高气温 $< 0^{\circ}C$ 的天数相比受气候变化影响更为明显。对于 TX10p 气候

指数所有区域都呈现下降趋势,每年度最高气温 <10% 分位值的天数以 0.1~1.7 d/(10 a) 的速率下降,石家庄以北区域、郑州至新乡沿线区域下降速率较快,南阳以南区域、邢台附近区域下降趋势最为缓慢。石家庄至房山沿线区域虽然也呈现升温趋势,

但是升温速率较为缓慢。TN10p 气候指数多数区域呈现下降趋势:最高下降速率可达 3.8 d/(10 a),郑州至石家庄沿线区域下降速率较为明显;南阳、宝丰以及石家庄北部区域下降速率较慢,甚至部分区域呈现 0.8 d/(10 a) 的上升趋势。

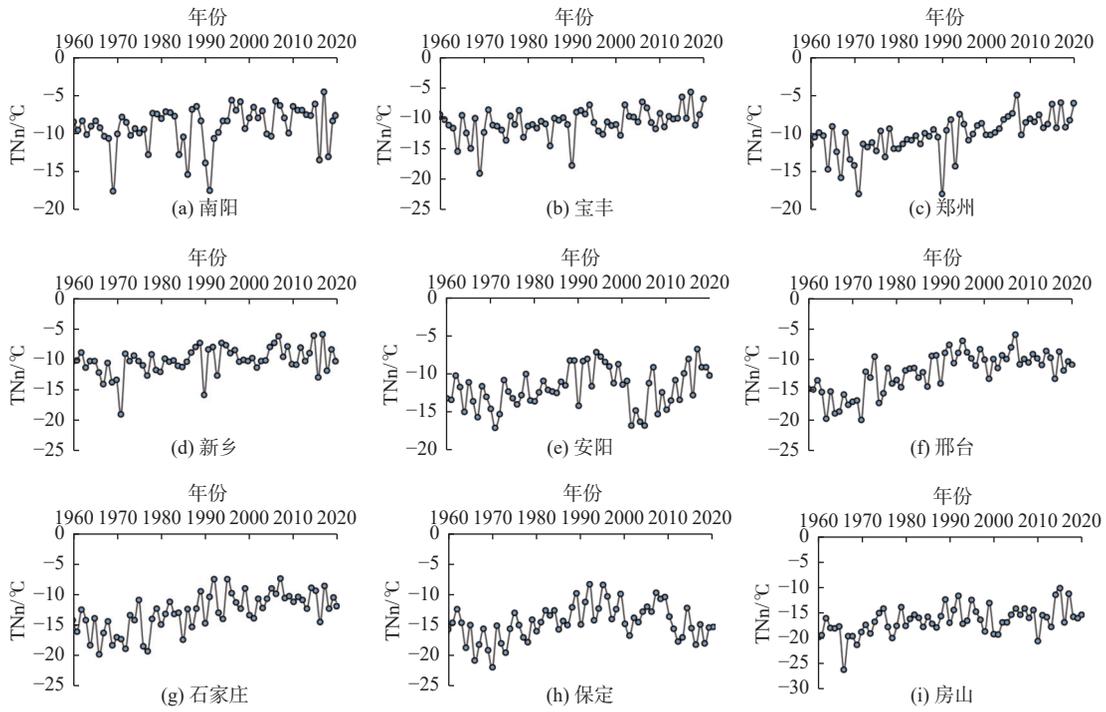


图5 沿线9个气象站 TNn 变化趋势

Fig. 5 TNn change trend of 9 meteorological stations along the line

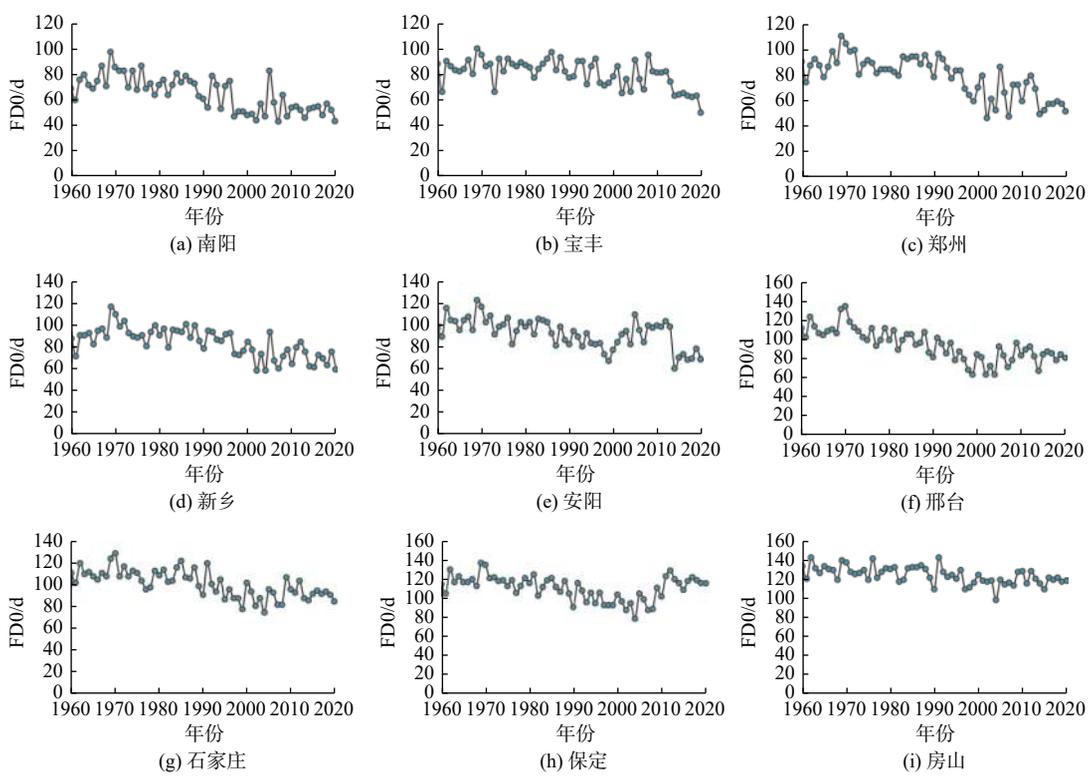


图6 沿线9个气象站 FD0 变化趋势

Fig. 6 FD0 change trend of 9 meteorological stations along the line

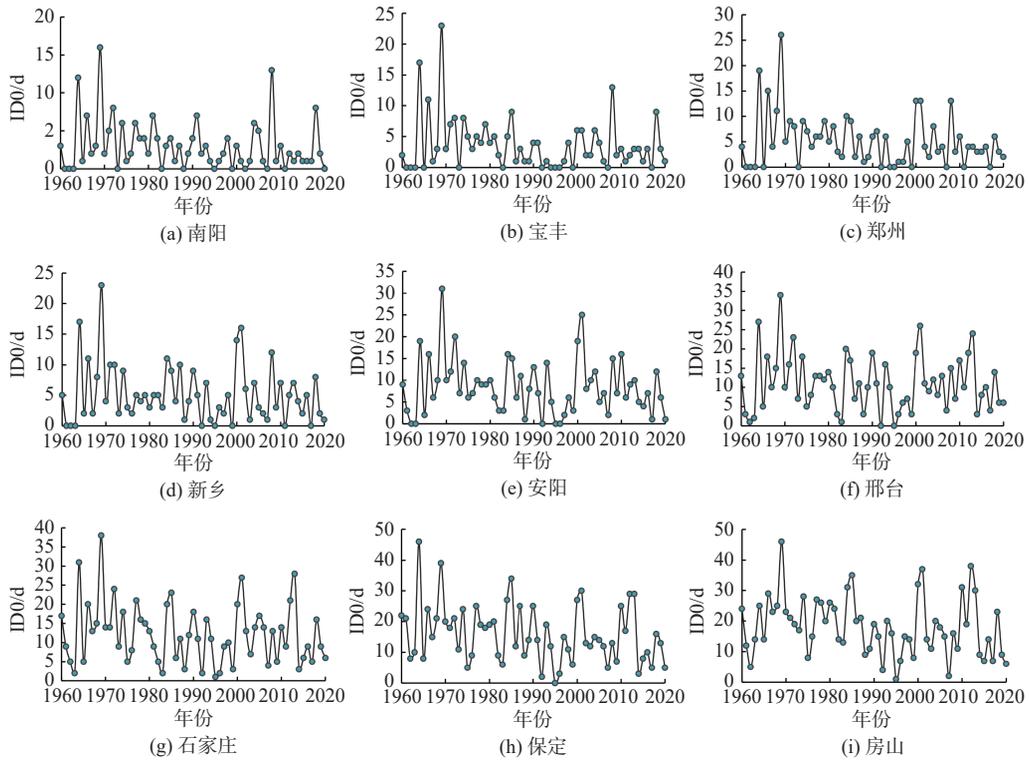


图 7 沿线 9 个站 ID0 变化趋势

Fig. 7 ID0 change trend of 9 meteorological stations along the line

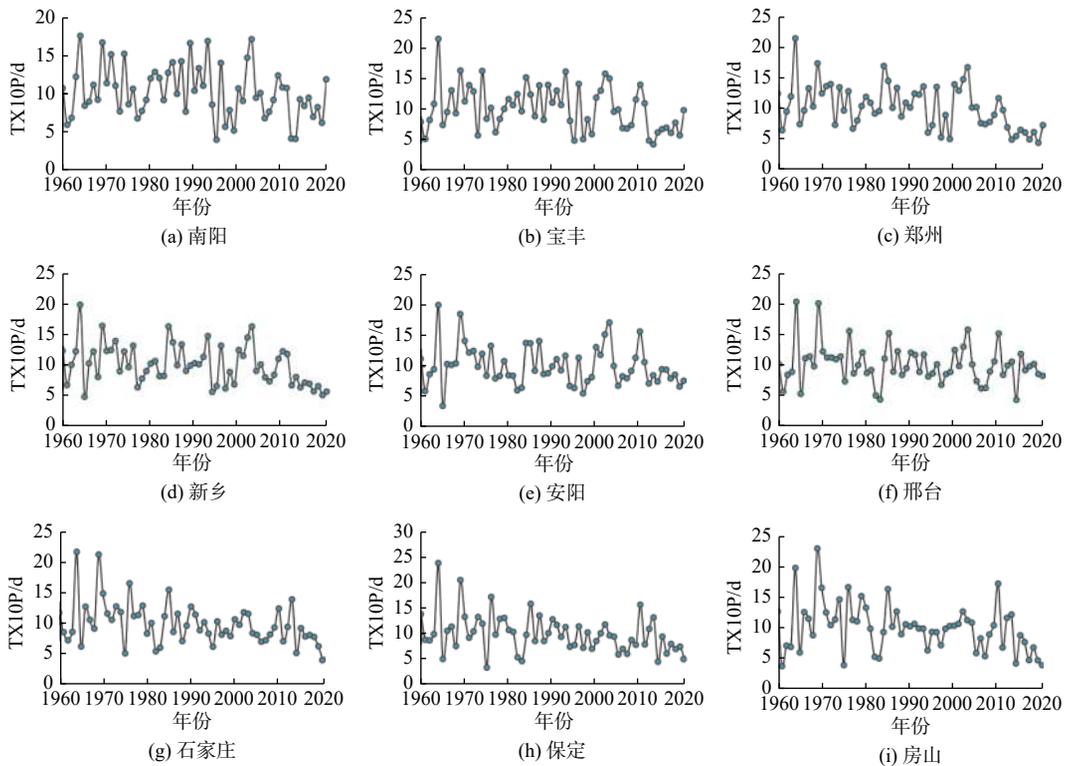


图 8 沿线 9 个站 TX10p 变化趋势

Fig. 8 TX10p change trend of 9 meteorological stations along the line

南水北调中线工程输水渠道沿线经过众多大小城市, 由于城市发展和人类活动的影响, 城市内部的气温往往会高于郊区, 形成城市热岛效应, 这将会对南水北调中线工程冬季输水产生一定影响。

金凯等^[31]分析了华北地区城市热岛对城区气温变化的影响, 结果表明近 30 年来城市化的发展进一步促进了城区的升温, 城市化增温贡献率为 23%。下韬等^[32]分析了石家庄市的城市热岛效应, 发现石家

庄年平均气温热岛强度为 0.9 ℃,4 个季节中冬季气温热岛强度最强为 1.3 ℃。当寒潮和区域极端低温发生时,城区段气温相对较高,当中线工程渠道经

过城区段时水体与大气的热交换速率减慢,从而减缓水体失热,在一定程度上减弱寒潮及区域极端低温对南水北调中线工程冬季输水的影响。

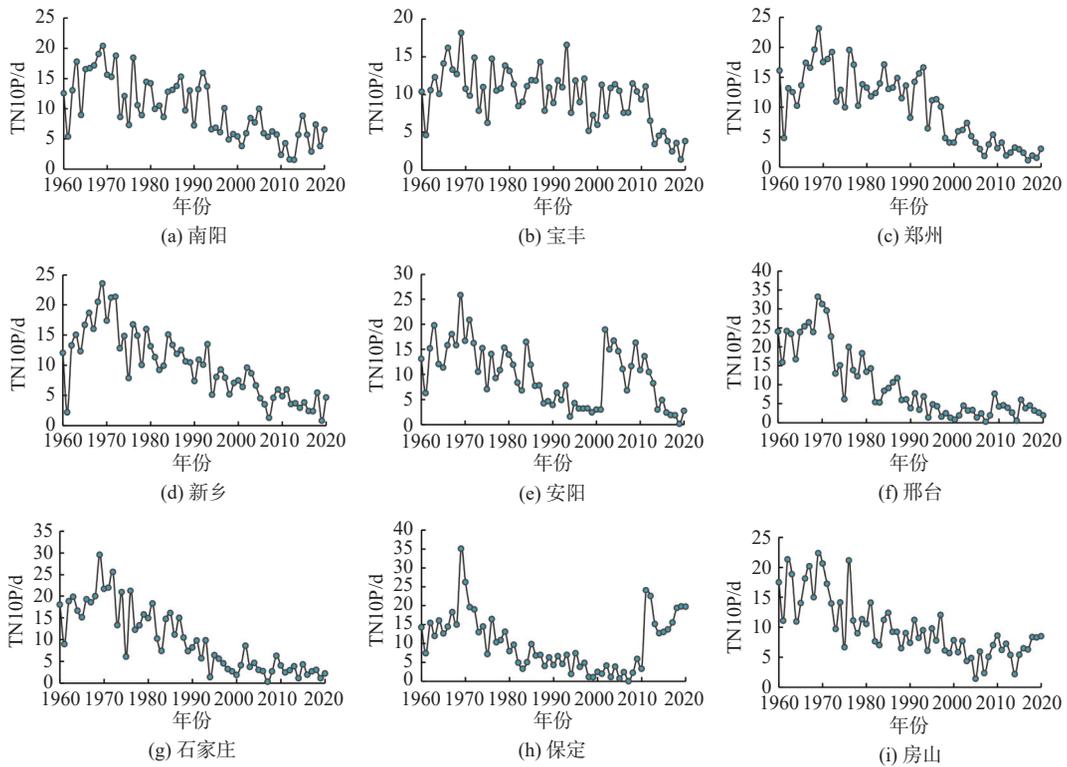
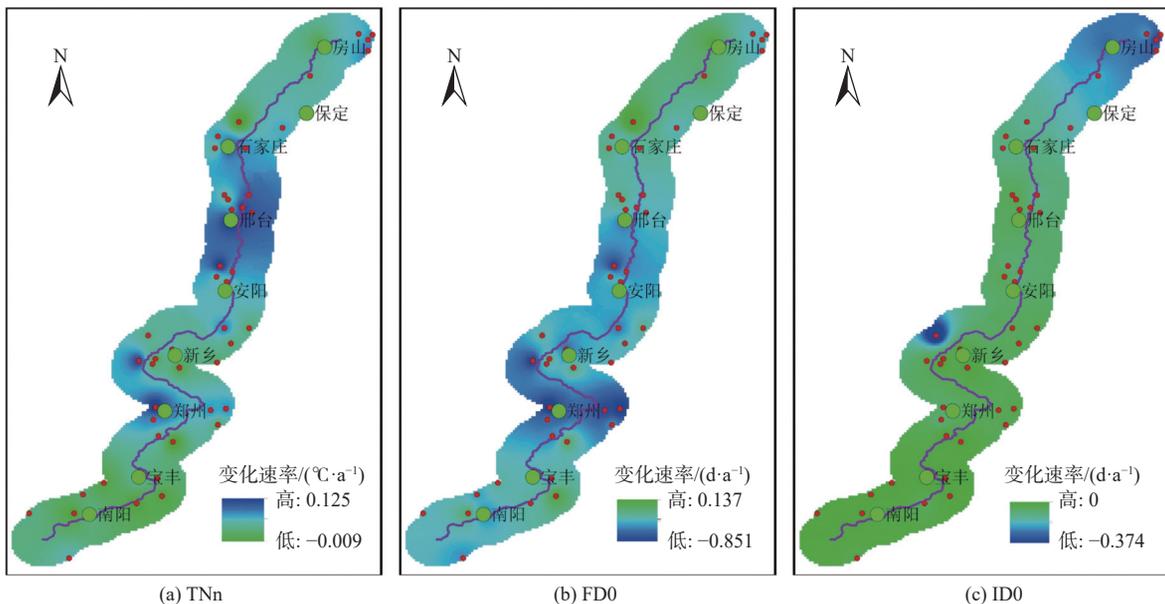


图 9 沿线 9 个站 TN10p 变化趋势

Fig. 9 TN10P change trend of 9 meteorological stations along the line

随着全球气候环境变化,干旱、洪水、高温以及严寒等极端天气也随之变得更加频繁,20 世纪 90 年代末以来全球气候变暖速度减缓,极端寒冷事件发生次数呈增多趋势,破纪录的寒潮、区域极端低温时有发生^[33]。2016 年 1 月南水北调中线便遭遇强寒潮,2021 年 1 月保定站出现 -22 ℃ 的历史低温;

1960—2020 年南水北调中线工程沿线各气象站点寒潮及区域极端低温发生频次总体呈现出减少的趋势,但 2000 年以来部分区域呈现出减少停滞甚至增加的趋势。在较暖的气候环境下,破纪录的极端低温出现可能会带来更大的灾害损失。



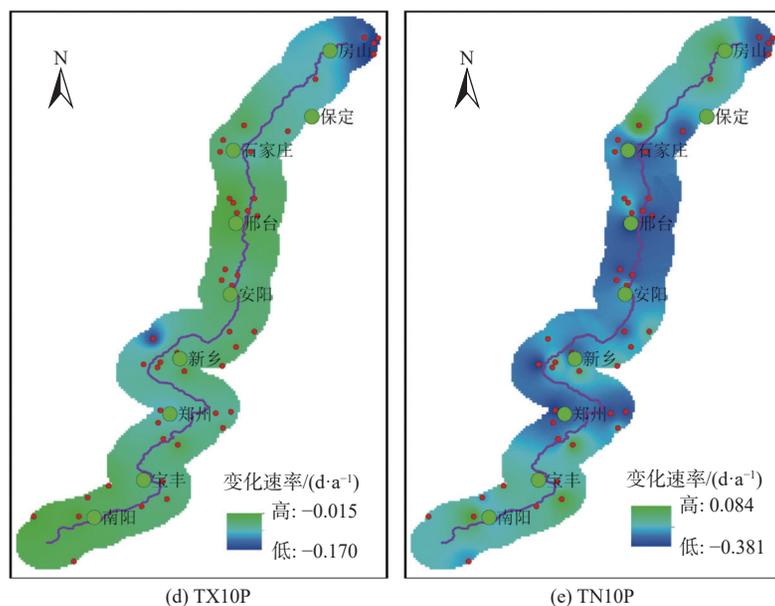


图 10 5 种极端气候指数变化趋势空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of 5 extreme climate index trends

4 结论

寒潮、区域极端低温等冷空气过程是影响南水北调中线工程冰情发展以及冬季输水运行调度的重要因素,为此基于沿线 56 个气象站点的日最低、最高气温数据,分析了沿线寒潮以及 5 个极端气候指数的时空变化规律,主要结论如下:

1960—2020 年南水北调中线工程沿线 9 个典型气象站中有 7 个气象站寒潮发生频次呈减少趋势,2 个气象站呈增多趋势。

1990 年左右各气象站每年度寒潮发生频次呈现一定的突变,1990 年之前各气象站寒潮发生频次呈现明显下降趋势,1990 年之后呈现较为平稳的状态,甚至部分气象站呈现不降反升的异常趋势。

近 60 年期间极端冷气候总体呈现减缓趋势;日最低气温的极低值总体呈现升温趋势,升温速率为 0.38~1.26 °C/(10 a);霜冻日数、冰冻日数、冷夜等极端气候指数总体均呈现不同的下降趋势,其中霜冻日数下降速率较快,最快可达 6.7 d/(10 a);自 1990 年以来部分区域极端冷气候呈现减缓停滞或者加剧的趋势。

由于低温天气引起的冰凌问题是限制南水北调中线工程冬季输水的重要因素,寒潮、区域极端低温等低温天气总体减缓趋势有利于冬季输水能力的提升,但部分区域低温天气自 1990 年以来呈现明显加剧的趋势,这种独特现象值得注意。未来冬季输水调度中仍然要考虑并防范极端低温天气的发

生,以免对冬季输水产生不利影响。

参考文献:

- [1] HOEGH-GULDBERGO, JACOB D, TAYLOR M, et al. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C [J]. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw6974. DOI: 10.1126/science.aaw6974.
- [2] BISKABORN B K, SMITH S L, NOETZLI J, et al. Permafrost is warming at a global scale [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- [3] 张建云. 气候变化对国家水安全的影响及减缓适应策略 [J]. *中国水利*, 2022(15): 3-5, 14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2022.15.004.
- [4] GRANT P R. Evolution, climate change, and extreme events [J]. *Science*, 2017, 357(6350): 451-452. DOI: 10.1126/science.aao2067.
- [5] STOTT P. How climate change affects extreme weather events [J]. *Science*, 2016, 352(6293): 1517-1518. DOI: 10.1126/science.aaf7271.
- [6] ZHOU S, YU B, ZHANG Y. Global concurrent climate extremes exacerbated by anthropogenic climate change [J]. *Science Advances*, 2023, 9(10): eabo1638. DOI: 10.1126/sciadv.abo1638.
- [7] CHRISTIANSEN B, ALVAREZ-CASTRO C, CHRISTIDIS N, et al. Was the cold European winter of 2009/10 modified by anthropogenic climate change? An attribution study [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(9): 3387-3410. DOI: 10.1175/jcli-d-17-0589.1.

- [8] 王安乾, 苏布达, 王艳君, 等. 全球升温1.5℃与2.0℃情景下中国极端低温事件变化与耕地暴露度研究[J]. *气象学报*, 2017, 75(3): 415-428. DOI: 10.11676/qxxb2017.029.
- [9] GUAN X, GAO Z, HUANG J, et al. Speeding extreme cold events under global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(8): 084012. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8110.
- [10] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. *气象学报*, 2008(5): 808-825. DOI: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014.
- [11] 陶亦为, 代刊, 董全. 2016年1月寒潮天气过程极端性分析及集合预报检验[J]. *气象*, 2017, 43(10): 1176-1185. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.002.
- [12] 刘静, 张利娜, 靳莉君. 黄河内蒙古河段凌汛期寒潮特征及天气分型[J]. *人民黄河*, 2022, 44(12): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2022.12.004.
- [13] 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.
- [14] 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.nsbdqk.2023.0036.
- [15] 高霏生, 靳国厚. 中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2003(2): 82-87. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2003.02.014.
- [16] 吕明道. 极端寒潮天气下胶东调水工程烟台段明渠冰期输水研究[J]. *四川水利*, 2023, 44(1): 28-30, 34.
- [17] 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.
- [18] 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.nsbdqk.2021.0039.
- [19] 王春青, MYNETT A E, 张勇, 等. 黄河流域寒潮天气与凌情关系分析[J]. *水文*, 2012, 32(5): 48-52, 6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2012.05.009.
- [20] 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/ckyyb.20220187.
- [21] 王涛, 杨开林, 乔青松, 等. 南水北调中线冬期输水气温研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(3): 14-17. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.03.004.
- [22] 刘孟凯. 长距离输水渠系冰塞冰坝风险防控机制与技术研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2021.
- [23] 陈浩, 靖争, 倪智伟, 等. 基于主成分-聚类分析的南水北调中线干渠水质时空分异规律[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(7): 36-44. DOI: 10.11988/ckyyb.20210272.
- [24] 王维强, 韩晓东, 桂建业, 等. 南水北调中线干线水体特征指标筛查与动态分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 65-75. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0008.
- [25] 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: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.11.007.
- [26] 韦耀国, 温世亿, 杨金波. 南水北调中线工程典型冷冬年冰情分析及防控措施[J]. *中国水利*, 2019(10): 33-35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2019.10.017.
- [27] 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.
- [28] 刘孟凯, 杨佳, 黄明海. 南水北调中线总干渠沿线地区冬季气温特征分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(7): 93-99. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.016.
- [29] 中国气象局. 寒潮等级: GB/T 21987—2017[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [30] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- [31] 金凯, 王飞, 夏磊, 等. 华北地区均一化地面气温序列中的城市化影响检测[J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 180-187. DOI: 10.7515/JEE201503006.
- [32] 卞韬, 任国玉, 刘思廷, 等. 石家庄城市热岛效应: 从冠层、表层到土壤深层[J]. *气候与环境研究*, 2023, 28(4): 409-419. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22089.
- [33] JOHNSON N C, XIE S, KOSAKA Y, et al. Increasing occurrence of cold and warm extremes during the recent global warming slowdown[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1724. DOI: 10.1038/s41467-018-04040-y.

Spatiotemporal variations of cold waves and regional extreme low temperature along the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

ZHOU Zhongyuan¹, WANG Tao¹, CHEN Yuzhuang¹, SUN Yafei¹, LU Jinzhi^{1,2}

(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. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In cold regions, such as high latitudes during winter, rivers and water conveyance channels often experience the phenomenon of freezing under low temperature conditions. During the initial stage of freezing and the subsequent melting stage, ice floes are prone to get stuck in the channels, forming ice jams and dams, which obstruct the flow of water and raise the water level in the channels, thus adversely affecting winter water transfer. Cold waves and extreme low temperatures in the region often cause significant temperature fluctuations, which are the main factors influencing changes in the ice conditions of rivers and channels. The Middle Route of South-to-North Water Transfers Project (MRSWTP) spans multiple latitudes, and the areas north of the Yellow River are affected by ice conditions to varying degrees every year during winter operations. Therefore, analyzing the spatiotemporal variations of cold waves and regional extreme low temperatures along the MRSWTP is of great significance for ice disaster prevention, winter water transportation scheduling, and other related issues.

Based on the daily minimum and maximum air temperature data of meteorological stations within a width of 40 km along the route from the head of Taocha Drainage Canal to the Beijuma Culvert of the MRSWTP from 1960 to 2020, the occurrences of cold waves and five extreme cold climate indices were calculated. The Sen's slope estimator method was employed to analyze their trends. Additionally, the spatial variations of the five extreme climate indices were analyzed using the inverse distance weighting spatial interpolation method based on temperature data from 56 meteorological stations.

The results show that among the nine typical weather stations selected, the frequency of cold waves in seven weather stations decreased from 1960 to 2020. The frequency of cold waves in Anyang and Baoding stations showed a downward trend, but since 2000, the number of cold waves has increased significantly. January has the highest frequency of cold waves occurrences, followed by December, February, and November. The regions north of Xingtai show an increasing trend in cold waves occurrence with rising latitudes. As for the extreme climate indices, the minimum value of the annual minimum temperature at the nine meteorological stations generally exhibits an increasing trend from 1960 to 2020. However, since 1990, Baoding station has shown an abnormal trend of not increasing but rather decreasing, while Xingtai and Shijiazhuang stations have remained in a state of stagnation without further increase. The other four extreme climate indices, including frost days (the number of days with a daily minimum temperature below 0 °C) and freeze days (the number of days with a daily maximum temperature below 0 °C), generally exhibit different decreasing trends, but some stations show abnormal trends of not decreasing but instead increasing or stagnating. Moreover, it is found that the decline rate of the number of days with a daily minimum temperature below 0 °C is faster compared to the decline rate of the number of days with a daily maximum temperature below 0 °C, indicating a more significant impact of climate change. There is no consistent trend detected among the various climate indices in terms of spatial changes. For freeze days, the decline rate along the MRSWTP from south to north shows an accelerating trend.

Under the overall trend of global climate warming, the frequencies of cold waves and extreme low-temperature weather along most regions of the MRSWTP have been slowing down, but there have been obvious intensifications observed in some regions since the 21st century. The winter water conveyance flow rate of the project will be further increased to meet the water demands for production, living, and ecology in northern cities. In future winter high-flow water conveyance plans, the impacts of severe cold waves and extreme low temperatures on winter water conveyance should be considered to reduce the risk of ice disasters.

Key words: cold wave; extreme climate index; anti-icing and disaster mitigation; winter water transportation; climate change; Middle Route of South-to-North Water Transfers Project