

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2024.01.01

1960—2020年南水北调区域极端气象要素变化分析

张金萍^{1,2}, 段德润¹, 李杜白¹, 李学淳¹, 苏少辉¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 南水北调工程会引起所涉区域极端气候发生变化,同时极端气候事件对调水工程运行也存在影响。研究以1960—2020年气象观测数据为基础构建极端气象要素指标体系,采用变化范围法(RVA)与集对分析法(SPA)对南水北调影响区极端气象要素的改变程度进行量化计算,揭示了经济发展、气候变化与南水北调工程影响下区域极端气象要素的演变规律。结果表明:在经济发展与气候变化影响下,1960—2020年南水北调影响区极端气象要素指标综合改变度总体为上升趋势,并出现了明显的区域差异性,中线地区极端气候改变度显著大于东线,而两线水源区变化程度低于输水区和受水区;调水前后对比分析表明,工程调水对中线的影晌大于东线,且受水区极端气象要素变化程度更为明显;对极端气象要素分析发现,极端蒸发受气候变化与经济发展影响显著,极端气温受调水工程影响变化较大,极端降水受外界扰动变化不明显。

关键词: 极端气象要素; 变化范围法; 集对分析法; 综合改变度; 南水北调工程

中图分类号:TV68

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2024)01-0001-08

Extreme meteorological element changes in the South-to-North Water Diversion Project area from 1960 – 2020

ZHANG Jinping^{1,2}, DUAN Derun¹, LI Dubai¹, LI Xuechun¹, SU Shaohui¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The South-to-North Water Diversion Project (SNWDP) causes changes in the extreme climate of the area involved, and in turn the extreme climatic events will also impact the operation of the water diversion project. The study constructs an extreme meteorological element index system based on the meteorological observation data from 1960 to 2020. It quantifies the change degree of extreme meteorological elements in the area affected by the South-to-North Water Diversion Project using the range of variability approach (RVA) and the set-pair analysis (SPA) method, which reveals the evolution patterns of regional extreme meteorological elements under the impacts of economic development, climate change and the South-to-North Water Diversion Project. The results show that under the influence of economic development and climate change, the comprehensive change degree of extreme meteorological element indices in the South-to-North Water Diversion influence area from 1960 to 2020 exhibited an upward trend in a whole with obvious regional differences. The change degree of extreme climate in the central line area was significantly larger than that in the eastern line area, while the changes in water source area of the two lines were smaller compared with those in the transmission area and the receiving area. A comparative analysis before and after the water diversion shows that the impact of the project on the central line was greater than that on the eastern line, and the changes of extreme meteorological elements in the receiving area were more significant. Analysis of extreme meteorological elements reveals that extreme evaporation was significantly affected by climate change and economic development, extreme temperature was greatly

收稿日期:2023-07-13; 修回日期:2023-11-28

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200205); 2021年度河南省面上基金项目(212300410404); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A15); 2022年度“教授团队助力企业创新驱动发展专项”(JSZLQY2022076)

作者简介:张金萍(1979—),河南沁阳人,女,博士,教授,博士生导师,研究方向为水资源开发利用与管理。

affected by the impact of the water diversion project, whereas the extreme precipitation was not sensitive to the external perturbations.

Key words: extreme meteorological element; range of variability approach (RVA); set-pair analysis (SPA); comprehensive change degree; the South-to-North Water Diversion Project

1 研究背景

南水北调工程作为规模最大的跨流域调水工程,是中国水网体系的主要骨架,其调度运行与水安全深刻影响着国家水资源的合理配置与调控^[1]。然而,随着全球气候变暖形势日益凸显,极端气候事件愈加频发和增强,使得堤坝库群工程原生脆弱性受到激发^[2],给水利工程建设运行带来极大风险和诸多挑战^[3-6]。另一方面,南水北调工程中频繁且大规模的引调水过程也可能改变局部气候效应,影响区域降水结构,导致更加极端的强降雨情况^[7-8]。这种变化对防洪基础设施在洪水中的管理和维护造成威胁,将进一步影响调水工程的运行^[9]。

鉴于重大调水工程区域极端气候变化认识的重要性,一些学者基于极端降水或极端气温指数,对不同水资源区域极端气候时空变化特征进行了分析^[10-12];而尚丽君等^[13]、曾慧琪等^[14]则将极端降水、气温与大尺度气候因子相结合,从流域极端气候风险评估方面作了深入研究。这些研究者大多只对降水和气温等极端气候因子进行了探讨,很少涉及到其他气象要素的极端性研究。韩晖等^[15]在2013年首次提出了蒸发量、日照时数等气象要素极值变量,而Kumar等^[16]则将相对湿度、风速等作为极端气象要素,但他们考虑的不够系统与全面。蒸发是联结地表水量平衡与能量平衡的纽带,潜在蒸散发是反映当地水热条件、决定干湿状况的重要因素,其变化趋势对区域水文循环至关重要,因此在研究气象要素极值变化的过程中应将二者作为考虑因素^[17-18]。而干旱指标同样是反映区域水资源条件的直接因素,对于南水北调的可调水量具有直接影响,孙鹏等^[19]认为综合考虑不同干旱指标将促进了解干旱发生的机理及过程。

为此,本文基于世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)提出的极端降水和极端气温指数^[20],结合蒸发与潜在蒸散发极值指标以及相关干旱指标,构建极端气象要素指标体系,利用变化范围法(range of variability approach, RVA)与集对分析法(set-pair analysis, SPA)分析了1960—2020年南水北调影响区极端气象要素综合变化情况,揭示了研究区极端气候在空间上的差异性,为科学地认识南水

北调工程区域极端气候变化提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

研究区包含南水北调东线一期工程(以下称东线工程)与中线工程总体影响范围。东线工程于2013年11月全线通水,通过扬州市江都水利枢纽自长江干流下游提水,沿京杭大运河向北输水,途径江苏、山东、河北三省,向黄淮海平原东部和胶东地区提供生产生活用水,输水路线长约1 156 km。中线工程于2014年12月正式通水运行,自丹江口水库引水,跨长江、黄河、淮河、海河四大流域,为河南、河北、北京、天津等4省(市)供水,输水路线长约1 277 km,供水范围总面积达 $15.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

南水北调东线与中线工程的水源区、输水区和受水区是根据工程调水沿线城市与受水城市的行政边界进行划分的(如图1所示),地形地貌复杂多样,以丘陵、平原为主,地势西高东低。研究区属于温带季风气候区,整体位于暖温带、半湿润地区,多年平均气温约为 $14 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量在800~1 200 mm之间,区内日最低温在过去60年间上升了 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,日最高温上升了 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,年极端强降水量增加,导致干旱风险程度与洪涝灾害概率提升。

2.2 数据来源

研究所需地面站点气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)——中国地面气候资料日值数据集(V3.0),包含站点1960—2020年降水、气温、蒸发等逐日气象数据。潜在蒸散发数据来源于中国工程科技知识中心(<http://geo.ckcest.cn/>)——全球 0.5° 逐月潜在蒸散发数据集,包含站点1960—2017年逐月潜在蒸散发数据。自校准帕默尔干旱指数(self-calibrating Palmer drought severity index, scPDSI)与标准化降水蒸发指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)数据均来源于世界气象组织公共网站(<http://climexp.knmi.nl/>),标准化降水指数(SPI-1)则由降水量 Γ 分布概率经正态标准化得到。本文所选取数据均经过质量控制,其中空白缺测值通过插值法进行合理的插补延长。

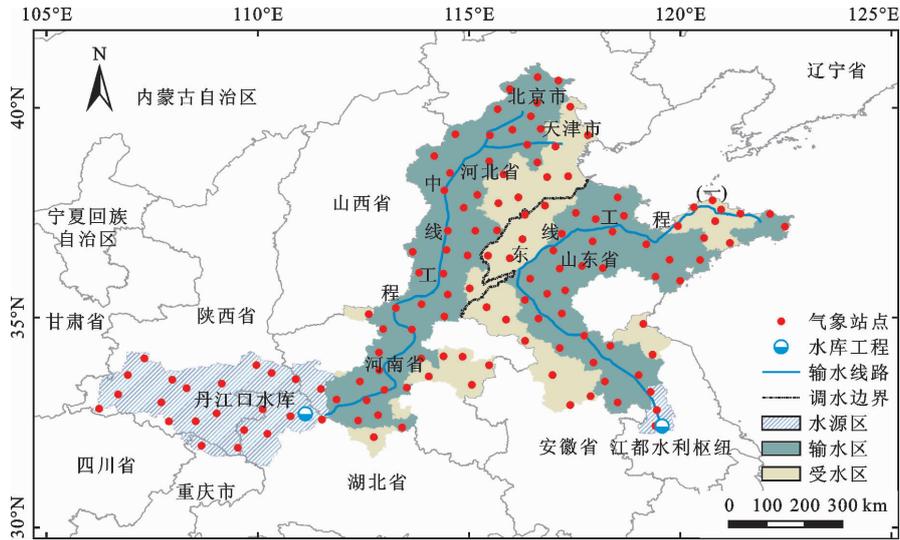


图 1 南水北调区域图

2.3 研究方法

2.3.1 研究思路 本文研究思路(技术路线)如图 2 所示,主要包含极端气象要素指标体系构建与指标综合改变度计算两个部分。

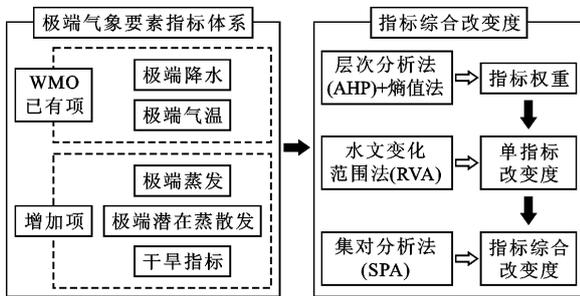


图 2 研究思路(技术路线)

(1)极端气象要素指标体系构建:在 WMO 已有的 16 个极端气温与 11 个极端降水核心指标的基础上,再增加 9 个蒸发极值指标、9 个潜在蒸散发极值指标和 5 个干旱指标进行综合,以此构成极端气象要素指标体系。

(2)指标综合改变度计算:首先利用主观层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)与客观熵值法相结合计算指标综合权重;其次,根据河流水文 RVA 法计算思路^[21],分析人类干扰前后极端气象要素单指标改变程度;最后,将极端气象要素指标体系与指标 RVA 改变度组成集对,利用 SPA 法计算指标综合改变度。

2.3.2 极端气象要素指标体系构建 构建了研究区的极端气象要素指标体系如表 1~5 所示(其中表 1、2 是 WMO 已有指标)。将极端气象要素指数分为 4 种类型^[22],第 1 类为基于观测数据或固定阈

值的指数,简称绝对指数;第 2 类为基于相对(浮动)阈值的指数,简称相对指数;第 3 类为年内气象要素某特征变量的极大(小)值,简称极值指数;第 4 类为其他指数,包含持续指数与范围指数。考虑到潜在蒸散发阈值不存在统一标准,不设定绝对指数,而干旱指标属于综合指标,仅定义其绝对指数与其他指数类型。

表 1 极端气温指标

| 分类 | 指标 | 名称 | 定义 |
|------|-------|---------|--|
| 绝对指数 | FD0 | 霜冻日数 | 每年 $T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数 |
| | ID0 | 冰冻日数 | 每年 $T_{\max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数 |
| | SU25 | 夏日日数 | 每年 $T_{\max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数 |
| | TR20 | 热夜日数 | 每年 $T_{\min} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数 |
| | TX10p | 冷昼日数 | $T_{\max} < 10^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| 相对指数 | TN10p | 冷夜日数 | $T_{\min} < 10^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | TX90p | 暖昼日数 | $T_{\max} > 90^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | TN90p | 暖夜日数 | $T_{\min} > 90^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | TXn | 日最高温极小值 | 年内 T_{\max} 的最小值 |
| | TNn | 日最低温极小值 | 年内 T_{\min} 的最小值 |
| 极值指数 | TXx | 日最高温极大值 | 年内 T_{\max} 的最大值 |
| | TNx | 日最低温极大值 | 年内 T_{\min} 的最大值 |
| | DTR | 气温日较差 | 年内 T_{\max} 与 T_{\min} 差值 |
| 其他指数 | GSL | 作物生长期 | 每年首次连续 $6\text{ d} > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与首次连续 $6\text{ d} < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的日数 |
| | CSDI | 冷持续日数 | 每年 T_{\min} 至少连续 $6\text{ d} < 10^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | WSDI | 暖持续日数 | 每年 T_{\max} 至少连续 $6\text{ d} > 90^{\text{th}}$ 分位值的日数 |

表2 极端降水指标

| 分类 | 指标 | 名称 | 定义 |
|----------|----------|--------------|-------------------------------------|
| 绝对 指数 | R10 | 10 mm 降水日数 | 每年 $prcp \geq 10$ mm 的日数 |
| | R20 | 20 mm 降水日数 | 每年 $prcp \geq 20$ mm 的日数 |
| | R25 | 25 mm 降水日数 | 每年 $prcp \geq 25$ mm 的日数 |
| 相对 指数 | PRCP-TOT | 年有效降水量 | 每年 $prcp \geq 1$ mm 的年累计降水量 |
| | R95p | 极端降水量 | 每年 $prcp > 95^{\text{th}}$ 分位值的总降水量 |
| | R99p | 极端强降水量 | 每年 $prcp > 99^{\text{th}}$ 分位值的总降水量 |
| 极值 指数 | Rx1day | 日最大降水量 | 年内 1 d 最大降水量 |
| | Rx5day | 连续 5 d 最大降水量 | 年内连续 5 d 最大降水量 |
| 其他 指数 | CDD | 持续干燥日数 | 年内 $prcp$ 持续 < 1 mm 的最大日数 |
| | CWD | 持续湿润日数 | 年内 $prcp$ 持续 1 mm 的最大日数 |
| | SDII | 普通日降水强度 | 年内有效降水量与降水日数的比值 |

表3 极端蒸发指标

| 分类 | 指标 | 名称 | 定义 |
|----------|--------|--------------|----------------------------------|
| 绝对 指数 | E2.5 | 2.5 mm 蒸发日数 | 每年 $E \geq 2.5$ mm 的日数 |
| | E5 | 5.0 mm 蒸发日数 | 每年 $E \geq 5.0$ mm 的日数 |
| | EPTOT | 年有效蒸发量 | 每年 $E \geq 1$ mm 的年累计蒸发量 |
| 相对 指数 | E10p | 低蒸发日数 | 每年 $E < 10^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | E90p | 高蒸发日数 | 每年 $E > 90^{\text{th}}$ 分位值的日数 |
| | E99pT | 极端强蒸发量 | 每年 $E > 99^{\text{th}}$ 分位值的总蒸发量 |
| 极值 指数 | Ex1day | 日最大蒸发量 | 年内 1 d 最大蒸发量 |
| | Ex5day | 连续 5 d 最大蒸发量 | 年内连续 5 d 最大蒸发量 |
| 其他 指数 | CED | 持续蒸发日数 | 年内 E 持续 $\geq prcp$ 的最大日数 |

2.3.3 指标综合改变度计算

(1) 指标赋权。指标数据经归一化处理后,采用 AHP 法和熵值法对指标体系中的各指标进行组合赋权,由于研究区地理空间跨度较大,东线与中线工程分属不同流域及行政区,因此分别计算各区域的指标权重。

表4 极端潜在蒸散发指标

| 分类 | 指标 | 名称 | 定义 |
|----------|-------|------------|---|
| 相对 指数 | ET25p | 弱蒸散发量 | 每年 $ET < 25^{\text{th}}$ 分位值的总蒸散发量 |
| | ET75p | 强蒸散发量 | 每年 $ET > 75^{\text{th}}$ 分位值的总蒸散发量 |
| 极值 指数 | ETx | 蒸散发极大值 | 年内 ET 的最大值 |
| | ETn | 蒸散发极小值 | 年内 ET 的最小值 |
| | DETR | 蒸散发极值差 | 年内 ET_{max} 与 ET_{min} 差值 |
| 其他 指数 | ETxMR | 蒸散发极大值平均占比 | 每年 ET_{max} 与年均值的比值 |
| | ETnMR | 蒸散发极小值平均占比 | 每年 ET_{min} 与年均值的比值 |
| | ETxR | 蒸散发极大值比 | 每年 ET_{max} 与多年序列 max 的比值 |
| | ETnR | 蒸散发极小值比 | 每年 ET_{min} 与多年序列 min 的比值 |

表5 干旱指标

| 分类 | 指标 | 名称 | 定义 |
|----------|--------|------------|----------------|
| 绝对 指数 | SPI | 标准化降水指数 | |
| | SPEI | 标准化降水蒸发指数 | |
| | scPDSI | 自校准帕默尔干旱指数 | |
| 其他 指数 | r | 干旱指数 | 年蒸发能力与年降雨量的比值 |
| | PETII | R 指数 | 年降雨量与年潜在蒸发量的比值 |

(2) 基于 RVA 法的指标改变度计算。采用经验公式 Bonsal 法计算指标 RVA 阈值上下限,以 75% 和 25% 的发生概率表示,计算方法如式(1):

$$P = \frac{(n - 0.31)}{(S + 0.38)} \quad (1)$$

式中: P 为某变量的百分位值; n 为某变量按升序排列的序号; S 为某变量记录的总个数。

另外,单一指标改变度参照 IHA 水文改变度公式(2)进行计算:

$$D_i = \frac{(N_i - N_e)}{N_e} \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_i 表示第 i 个指标的改变度; N_i 为第 i 个指标在影响期仍落于 RVA 阈值范围内的年数; N_e 指影响期若仍为改变前状态下应在 RVA 阈值范围内的

年数;其中, $N_e = r \cdot N_T$, r 为基准期指标落于 RVA 范围内的比例(取 0.5), N_T 为影响期的总年数。当 $0\% \leq D_i < 33\%$ 时, 指标无变化或发生低度改变, 以 L 表示; 当 $33\% \leq D_i < 67\%$ 时, 指标发生中度改变, 以 M 表示; $67\% \leq D_i \leq 100\%$ 时, 指标发生高度改变, 以 H 表示。

(3) 基于 SPA 法的综合指标改变度计算。集对分析(SPA)法通过集对联系度将两个集合的同一度、差异度和对立度相结合, 以此来整体反映两个集合之间的关系^[23], 计算方法如式(3):

$$\mu = a + bi + cj \quad (3)$$

式中: μ 为集对联系度, 取值范围为 $[-1, 1]$; a, b, c 分别为两个集合的同一度、差异度和对立度; i 为差异性系数, 取值范围为 $[-1, 1]$; j 为对立性系数, 一般取 -1 。

将极端气象要素指标体系与指标 RVA 改变度视为具有联系性的两个集合, 构成集对 (X, Y) , 其中极端气象指标体系看作集合 X , 指标改变度看作集合 Y , 指标赋权后构成的指标体系与指标改变度的联系性即为指标体系的综合改变程度。结合指标改变程度大小, 对两个集合作特性分析: 假设在 t 时段, L_i 个指标的改变程度为低(L), 表明同一性高, 同一度为 L_i 指标权重总和, 即 $a(t)$; M_i 个指标的改变程度为中(M), 差异度为 M_i 个指标权重总和, 即 $b(t)$; H_i 个指标的改变程度为高(H), 表明对立性

高, 对立度为 H_i 指标权重总和, 即 $c(t)$, 因此指标体系综合改变度计算式为:

$$\mu_{\text{综合}} = a(t) + b(t)i + c(t)j = \sum_{k=1}^{L_i} w_k(t) + \sum_{k=L_i+1}^{L_i+M_i} w_k(t)i + \sum_{k=L_i+M_i+1}^N w_k(t)j \quad (4)$$

式中: $\mu_{\text{综合}}$ 表示指标体系综合改变度; a, b, c 含义同上; $i = 0, j = -1$; w_k 为指标权重; N 为指标总个数, 由此确定的 $\mu_{\text{综合}}$ 取值范围为 $[-1, 1]$ 。将综合改变度值归一化处理至 $[0, 1]$ 范围内, 当 $0\% \leq \mu_{\text{综合}} < 33\%$ 时, 表示低度改变; $33\% \leq \mu_{\text{综合}} < 67\%$ 时, 表示中度改变; $67\% \leq \mu_{\text{综合}} \leq 100\%$ 时, 表示高度改变。

3 结果与分析

3.1 经济发展与气候变化下的极端气象要素变化

为研究经济发展与气候变化对区域极端气象要素的影响, 根据我国经济发展阶段特点, 将 1960—2020 年划分为四个时段: 1960—1979 年受人类活动干扰较小, 该时期设立为基准期 I; 1980—1999 年为经济初步发展时期, 设定为影响期 I; 经济快速发展时期(东线为 2000—2013 年, 中线为 2000—2014 年)为影响期 II; 经济较发达时期(东线为 2014—2020 年, 中线为 2015—2020 年)为影响期 III。基于基准期 I 的各影响期极端气象要素综合改变度结果如图 3 所示。

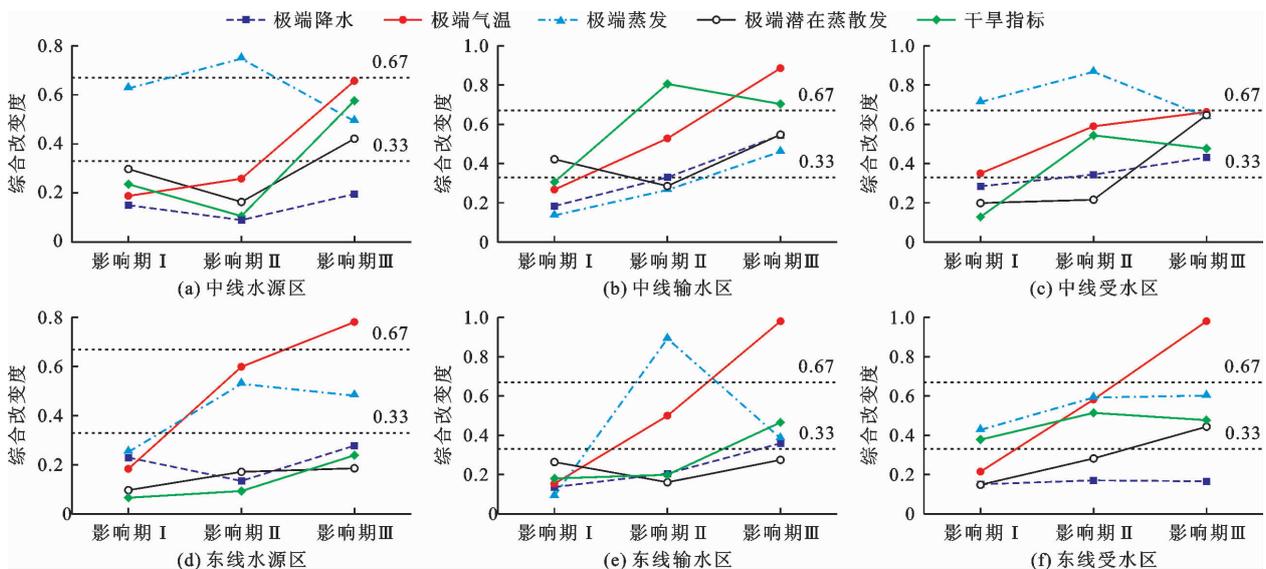


图 3 基于基准期 I 的极端气象要素指标综合改变度

由图 3 可以看出, 在经济发展与气候变化影响下, 极端气象要素改变度大致呈上升趋势, 其中影响期 I 相对于基准期 I 整体属于低度改变, 影响期 II

整体属于中度改变, 影响期 III 同属于中度改变, 但相比影响期 II 其综合改变度显著提高。

(1) 影响期 I 为经济发展初期, 人类活动干扰

较小,此时中线工程极端气象要素综合改变度高于东线,其中中线极端蒸发与极端潜在蒸散发平均改变度相比东线分别高 88.46% 和 82.35%。同时,两线工程区域极端气象要素改变度整体均表现为:受水区 > 水源区 > 输水区。另一方面,在极端气象要素中,影响区极端蒸发变化程度最大,整体为 0.38,在中线受水区和水源区分别达到 0.71 和 0.63,而极端降水和干旱指标的变化较小。

(2)影响期 II 为经济快速发展时期,人类活动的干扰强度上升,此时中线极端降水、极端潜在蒸散发与干旱指标的变化程度高于东线,极端气温与极端蒸发则与之相反,同时两线分区极端气象要素整体表现为:受水区 > 输水区 > 水源区。另一方面,极端蒸发的整体变化程度仍为最大(0.65),在中线受水区和东线输水区其改变度分别达到 0.88 和 0.89,而极端降水整体变化程度最小(0.21),仅为极端蒸发的 32.31%。

(3)影响期 III 为经济较发达时期,南水北调工程已建成通水,人类活动对自然环境的影响进一步加大,除极端气温外,极端气象要素整体变化情况为中线 > 东线,且受水区与输水区极端气象要素改变度明显高于水源区。此时,极端气温整体改变度最大(0.82),相比影响期 II 变化程度上升了 60.78%,在中、东线平均改变度分别达到 0.73 和 0.91。这表明在叠加了调水工程影响后极端气温受影响程度明显增加,极端蒸发改变度明显下降,而干旱指标在

受水区改变度有所减少,表明调入水量对区域干旱程度变化存在一定影响。

3.2 南水北调工程调水后的极端气象要素变化

东线工程自 2013 年底全线通水,中线工程自 2014 年全线通水。可假设影响期 II 与影响期 III 气候环境接近,以调水前影响期 II 为基准期,分析调水后在影响期 III 内南水北调区域极端气象要素改变度情况,以此来衡量南水北调工程调水后的极端气候变化程度,结果如图 4。

由图 4 可知,南水北调工程调水后,区域极端气象要素相较于调水前总体呈中度改变,东线极端气温平均变化程度相比中线高 37.69%,而中线极端降水、极端蒸发、极端潜在蒸散发和干旱指标平均变化程度分别高出东线 148.84%、65.54%、54.64% 和 8.45%;同时,两线受水区在极端气温与极端蒸发的变化程度上相比输水区与水源区更为显著,而其他极端气象要素在不同影响区综合改变程度各异,其中中线受水区的极端气象要素平均改变度相比东线高 27.71%。就极端气象要素而言,影响区极端蒸发平均变化程度最大(0.65),其后依次为极端气温(0.52)、干旱指标(0.49)、极端潜在蒸散发(0.41),极端降水最小(0.25)。值得注意的是,干旱指标在各区域改变程度相差较小,而极端蒸发在中线受水区(0.87)和东线输水区(0.25)变化程度差异最为显著,这表明南水北调工程调水对区域极端气候的影响具有显著的空间差异性。

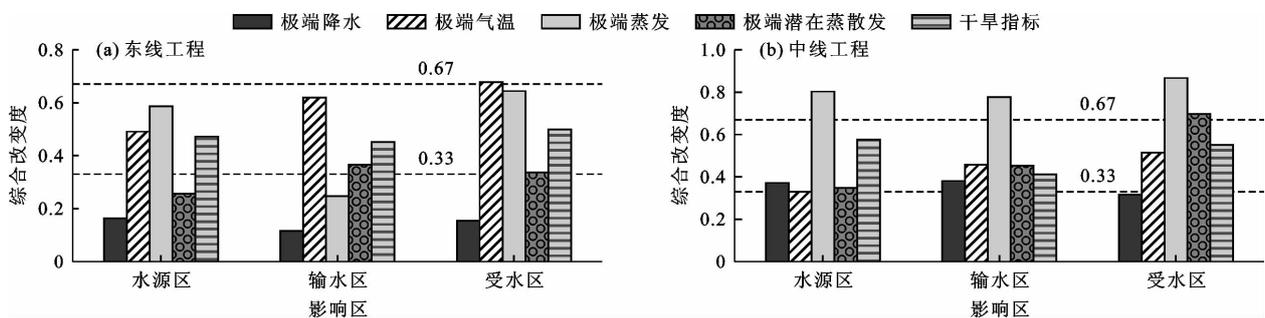


图 4 南水北调工程调水后的极端气象要素指标综合改变度

4 讨论

极端气候变化的不确定性会对区域水文循环造成影响,而区间水量变化会给国家水网布局和调控带来诸多挑战^[24]。本研究结果表明南水北调地区极端气温综合改变程度变化显著,而极端降水在各时期改变度均保持稳定状态,这与毛喜玲等^[25]关于极端气温和极端降水事件变化趋势的研究结果基本

一致。同时,研究中发现极端蒸发前中期改变度变化与极端气温呈正相关关系,符合 Rocha 等^[26]关于气温是影响水面蒸发率的重要变量的结论,说明在气候变暖背景下极端气温的显著变化使得极端蒸发要素发生了一定改变。其中,中线水源区(陕南地区)和中线受水区(京津冀豫地区)在影响期 I 时极端蒸发改变度异常显著,则可能与该年代的特殊气候因素有关^[27]。

AR6 报告^[28]指出人为影响是极端气温变化的主要驱动力,而南水北调工程的大规模水量调度在一定程度上也是局地气候变化的不确定性因素。前中期未调水时,受水区相比水源区和输水区极端气候变化程度大,这也许是当地干旱缺水的气候条件所引起的。自南水北调工程通水后(影响期Ⅲ),各地区极端气温与极端蒸发变化程度相比其他气象要素更为显著,吴光伟等^[29]研究发现大尺度大气环流与地形因素可能是造成类似情况的潜在因子。此外,受水区极端蒸发与干旱指标也发生了明显变化,这表明调入水量对于区域极端气候与干旱环境存在一定影响,如谢正辉等^[30]认为流域外水量的输入对于受水区有轻微增湿作用,也引起了相应的降温效应。同时,中线地区的各极端气象要素相比东线整体变化程度更高,其成因可能也与两线地区气候环境差异以及中线全年调水且调水规模远远超过东线地区相关。

本文除极端气温和极端降水要素以外,还针对蒸发、潜在蒸散发等要素的极端程度以及干旱指标的变化进行了研究,通过极端气象要素各指标的综合改变度代替常规的指标分析,以减少各指标之间的相互影响。本研究探讨了调水工程引起区域极端气候变化的可能性,一定程度上丰富了调水区域气象要素极值体系的研究成果。然而,随着气候变暖和社会经济发展,区域极端气候变化将更加复杂,因此气候变化与人类活动对极端气候演变的具体影响程度如何,还有待进一步研究。

5 结 论

本文采用RVA法计算指标改变度,并引入集对分析的概念计算指标体系综合改变度,对南水北调影响区1960—2020年各时期与调水前后极端气象要素综合改变程度进行分析,得出结论如下:

(1) 社会经济发展时期,南水北调影响区域极端气象要素变化程度整体为上升趋势,而极端蒸发与干旱指标在部分区域改变度则表现为先升后降的趋势,且不同影响期中线地区多数极端气象要素改变度均大于东线,同时水源区变化程度低于输水区和受水区。

(2) 南水北调工程调水后的极端气象要素变化具有显著的空间差异性。中线地区极端气象要素整体改变度明显高于东线,其中极端蒸发改变度的空间差异性最为显著,而干旱改变度差异性最小,同时两线受水区极端气象要素平均变化程度相比其水源

区和输水区明显较高。

(3) 不同极端气象要素改变程度具有显著差异性。以自然状态为基准期时,极端蒸发在影响期Ⅰ、Ⅱ整体改变度最大,分别为0.38、0.65,影响期Ⅲ时,极端气温改变度最大(0.82),极端降水在各影响期变化程度均为最小;以调水前为基准,工程调水后极端蒸发改变度最大(0.65),其次为极端气温(0.52),极端降水改变度最小(0.25)。

参考文献:

- [1] CHEN Yiliang, TIAN Lide. Canal surface evaporation along the China's South-to-North Water Diversion quantified by water isotopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146388.
- [2] 傅蜀燕,黄海燕,欧正峰. 极端气候环境下水利工程恢复力评价指标体系建立[J]. *中国水利*, 2017(6): 18-19+21.
- [3] 周兴波,杨子儒,杜效鹄,等. 极端气候下堤坝库群工程安全与应急管理的思考[J]. *水力发电*, 2023, 49(5): 4-9.
- [4] 陈长奇,毛媛媛,张明,等. 江苏省沂沭泗流域2019年台风“利奇马”洪涝灾害探讨[J]. *江苏水利*, 2020(7): 24-27.
- [5] 伊德尔呼,乌尼尔,曲学斌,等. 2021年7月17日内蒙古呼伦贝尔市暴雨洪涝防灾减灾服务效益分析评价[J]. *农业灾害研究*, 2022, 12(4): 150-152+155.
- [6] 彭振华,胡鑫,孔蕊,等. 长江上游干旱事件预估及其对水力发电影响研究[J/OL]. *气象科学*, 2023: 1-10. [2024-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20230531.1619.002.html>.
- [7] DAVOLIO S, VERCELLINO M, MIGLIETTA M M, et al. The influence of an atmospheric river on a heavy precipitation event over the western Alps[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2023, 39: 100542.
- [8] CUI Hao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. Dynamics and potential synchronization of regional precipitation concentration and drought - flood abrupt alternation under the influence of reservoir climate[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 42: 101147.
- [9] WU Yanjuan, JI Hongxia, WEN Jiahong, et al. The characteristics of regional heavy precipitation events over eastern monsoon China during 1960 - 2013[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 414-427.
- [10] 时延锋,李福孟,王志峰,等. 1961—2020年沂蒙山区极端降水时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(5): 17-26.
- [11] 李振中,许民,宋轩宇. 基于气象站的澜沧江上游极端气温与极端降水变化特征研究[J]. *中低纬山地气象*, 2023, 47(1): 38-47.

- [12] 李志刚, 姜嘉慧, 史冲. 1960—2020年河南省极端降水时空演变特征[J/OL]. 华北水利水电大学学报(自然科学版): 1-11 [2024-01-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20230828.1504.002.html>.
- [13] 尚丽君, 廖花妹, 涂浙, 等. 鄱阳湖流域1960—2018年极端气温变化及其与大气环流的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(1): 160-171.
- [14] 曾慧琪, 滕顺林, 邵蒙, 等. 近60年三峡库区极端降水变化及其与环流指数遥相关分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(5): 1-9.
- [15] 韩晖, 李耀辉. 气象极值变化及其导致的农业气象灾害趋势分析——以甘肃省为例[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 999-1006.
- [16] KUMAR D, GAUTAM Y P, KUMAR V, et al. Statistical analysis of extreme value of meteorological elements observed for the last 31 years (1989 - 2019) at Narora site [J]. Radiation Protection and Environment, 2021, 44(3&4): 123-130.
- [17] 叶林媛, 鲁汉, 秦淑静, 等. 长江流域1960—2019年蒸发皿蒸发和实际蒸散发演变规律[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 718-729.
- [18] 石欣荣, 余敦先, 夏军, 等. 1960—2019年三北地区潜在蒸散发的变化及归因[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(10): 973-984.
- [19] 孙鹏, 肖名忠, 张强, 等. 水文气象极值事件研究进展[J]. 武汉大学学报(理学版), 2018, 64(1): 28-36.
- [20] KARL T R, NICHOLLS N, GHAZI A. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary [J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 3-7.
- [21] 张金萍, 张鑫, 肖宏林. 水文综合改变度动态评估模型构建与应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 22-25 + 5.
- [22] 香薇, 程志刚, 周波涛, 等. 1975—2016年秦巴山区极端气温事件的空间差异性分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(4): 362-370.
- [23] 张金萍, 肖宏林, 张鑫. 水库运行对径流-泥沙关系的影响分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 17-20 + 50.
- [24] 夏军, 陈进, 余敦先, 等. 变化环境下中国现代水网建设的机遇与挑战[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1608-1617.
- [25] 毛喜玲, 殷淑燕, 刘海红. 近61a晋陕豫地区极端气候变化及其对农业生产的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 71-79.
- [26] ROCHA S M G, MOLINAS E, RODRIGUES I S, et al. Assessment of total evaporation rates and its surface distribution by tridimensional modelling and remote sensing [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116846.
- [27] 刘峰. 河北省中东部平原区水面蒸发量变化特征分析[J]. 地下水, 2023, 45(4): 256-257.
- [28] 周波涛, 钱进. IPCC AR6报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [29] 吴光伟, 常允新, 王庆兵, 等. 近55年来山东省极端气温事件时空分布特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(2): 19-32.
- [30] 谢正辉, 陈思, 秦佩华, 等. 人类用水活动的气候反馈及其对陆地水循环的影响研究——进展与挑战[J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 801-813.