

DOI: 10.20103/j.stxb.202410152504

门宝辉, 李国娇, 吕行, 伍兴涛, 庞金凤. 京津冀旱涝急转事件特征分析及风险评估. 生态学报, 2025, 45(11): 5351-5362.

Men B H, Li G J, Lü X, Wu X T, Pang J F. Characterization and risk assessment of drought-flood abrupt alternation in Beijing-Tianjin-Hebei region of China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5351-5362.

京津冀旱涝急转事件特征分析及风险评估

门宝辉*, 李国娇, 吕行, 伍兴涛, 庞金凤

华北电力大学 水利与水电工程学院, 北京 102206

摘要:近年来随着气温升高,旱涝急转事件在全球范围内发展迅速,京津冀作为我国第三大城市群及重要粮食产地,受旱涝急转影响尤其突出,刻画其时空特征并进行灾害风险评估对事件防控具有重要意义。基于水文时空演变研究方法与灾害风险体系,结合旋转经验正交函数(EOF)、基尼系数等方法,刻画了旱涝急转事件的特征,分析了演变趋势,评估了风险程度。结果表明:(1)旱涝急转事件强度在历史时期多时间尺度下均呈现出显著上升趋势,区域受旱涝急转事件威胁增加。(2)旱涝急转事件呈夏、秋高,春、冬低的季节变化特征,年内事件热点区域由西部向东部转移。(3)旱涝急转灾害风险在石家庄市和沧州市较高,在太行-燕山山脉一带较低,总体呈北高南低、东高西低的空间分布特征,其中,旱转涝的灾害风险高于涝转旱的灾害风险。(4)旱涝急转灾害各要素及风险分布处于比较均衡-相对均衡状态,但均存在少数人口承受异常高值的现象。研究明晰了京津冀地区旱涝急转事件的发展规律,为旱涝急转灾害预防及风险规避提供了参考。

关键词:旱涝急转事件;京津冀;灾害风险评估;基尼系数;Mann-kedall 趋势检验

Characterization and risk assessment of drought-flood abrupt alternation in Beijing-Tianjin-Hebei region of China

MEN Baohui*, LI Guojiao, LÜ Xing, WU Xingtao, PANG Jinfeng

College of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract: In recent years, there has been a notable increase in the frequency of drought-flood abrupt alteration events at the global scale, coinciding with a rise in temperature. The Beijing-Tianjin-Hebei region, the third largest urban agglomeration and an important food production area in China, is particularly susceptible to the impacts of drought-flood abrupt alternation events. It is of great significance to characterize the spatial and temporal features of the event and assess the risk of disaster in order to prevent and control the event. In this paper, we employ a hydrological spatio-temporal evolution research method and disaster risk system, in conjunction with the Rotated Empirical Orthogonal Function (EOF) method, Gini coefficient, and other analytical techniques, a complete system for analyzing the characteristics of rapid transition from drought to flood events and assessing their disaster risks was constructed and applied to the Beijing-Tianjin-Hebei region. The characteristics of rapid transition from drought to flood events in the Beijing-Tianjin-Hebei region were depicted, the evolution trend of such events was analyzed, and the risk level of rapid transition from drought to flood events was evaluated, providing a scientific basis for the high-quality development of the region and the prevention of rapid transition from drought to flood disasters. The findings indicate that: (1) The intensity of drought-flood abrupt alternation events exhibits a notable upward trajectory across multiple temporal scales in the historical period, underscoring the heightened risk of drought and flood emergencies in the Beijing-Tianjin-Hebei region. (2) The seasonal distribution of drought-flood abrupt alternation events

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0401406);企业委托项目—基于双碳目标的水安全评估及水光风储多能互补优化调度研究(2023-145)

收稿日期:2024-10-15; **网络出版日期:**2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: menbh@ncepu.edu.cn

exhibits a high level during the summer and autumn months and a low level during the spring and winter. Additionally, the geographic focus of these events has shifted from the west to the east over the course of the year. (3) The risk of drought-flood abrupt alternation is higher in Shijiazhuang City and Cangzhou City, and lower along the Taihang-Yanshan Mountain Range. The overall spatial distribution characteristics of this phenomenon are as follows: high in the north and low in the south, and high in the east and low in the west. Among them, the disaster risk associated with the transition from drought to flood is greater than that from flood to drought. (4) The distribution of the elements and risks of drought-flood abrupt alternation is relatively balanced, although some populations experience abnormally high values. This study elucidates the development pattern of drought-flood abrupt alternation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, thereby providing a reference for drought-flood abrupt alternation disaster prevention and risk avoidance.

Key Words: drought-flood abrupt alternation events; Beijing-Tianjin-Hebei region; disaster risk assessment; Gini coefficient; MK trend test

干旱和洪涝因其影响范围广、发生频率高、持续时间长,历来是对人类社会和生态系统影响最严重的极端事件之一^[1]。当多种极端事件同时发生时,形成的复合极端事件对人类社会和生态系统的影响更加严重^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告^[3]指出,自1950年来,人类活动的加剧很可能增加了复合极端事件的发生频率。旱涝急转是复合极端事件的一种典型,其对人类健康、经济发展和生态安全的影响远大于单一的干旱或洪涝事件^[4]。

目前,旱涝急转事件的识别主要通过分析降水^[5]或径流^[6]序列实现,进一步通过构建旱涝急转指数定量反映事件的强度。吴志伟等^[7]在分析长江中下游夏季旱涝急转特征时定义了长周期旱涝急转指数(Long-cycle Drought-Flood Abrupt Alternation Index, LDFAI)。闪丽洁等^[8]进一步考虑旱涝急转事件前后旱涝程度与急转快慢程度,构建了改进的日尺度旱涝急转指数,对长江中下游流域旱涝急转事件演变趋势展开研究,并指出拉尼娜现象对旱涝急转事件具有先兆作用。此外,标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI),标准化径流指数(Standardized Runoff Index, SRI)等气象或水文干旱指数也被广泛用于旱涝急转事件的判定^[6,9]。涂新军等^[10]基于干旱指数提出了一种改进的标准化旱涝急转指数,并使其分级与常规旱涝分级在阈值设置上一致,推进了旱涝评估体系的统一。

极端事件造成的负面影响不仅仅取决于事件的严重程度,还和自然环境和受灾主体相关,因此在灾害评估过程中要综合考虑自然因素和社会因素。史培军^[11]提出的区域灾害系统理论认为灾害由致灾因子、孕灾环境和承灾体三要素构成。张强等^[12]基于三要素的灾害评估体系刻画了我国南方的干旱灾害风险特征并提出了防控政策。程朋根等^[13]结合随机森林算法从致涝因子、孕涝因子和承涝因子角度分析了南昌市的洪涝灾害风险。近年来,越来越多学者将区域的防灾减灾能力纳入灾害体系作为灾害风险评估的一部分^[14-16]。夏军等^[17]指出随着生产力水平的提高及大规模水网水利工程的建设,在干旱强度与历史期相近的情况下长江流域的抗旱能力显著提高。吴东丽等^[18]基于致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力四要素的灾害体系对华北地区冬小麦干旱风险展开评估并进行风险区划。

极端事件的发生显著增加人类疾病和死亡风险,影响人类正常生活和社会经济发展。旱涝急转事件中水分盈亏急剧转变,对农作物尤其是水稻的正常生长发育影响极大^[19-20]。2022年夏季长江多地在汛期遭受严重旱情,出现了“汛期反枯”的罕见现象,导致长江流域发生了严重的旱涝急转灾害,造成了巨大的人员及经济损失^[21]。京津冀是我国北方最大的城市群及重要的粮食产地,人口众多、经济发达、农业密集。近年来,气候变暖导致全球水循环及分配模式改变,干旱和洪涝事件愈发频繁^[22],进一步提高了旱涝急转事件的频率和严重程度。在这一背景下,京津冀地区遭受的旱涝灾害风险显著提升。然而,以往对旱涝灾害的研究多单独考虑干旱或洪涝事件,缺乏对旱涝急转事件的灾害风险分析,京津冀地区受旱涝急转事件威胁程度尚不明晰,有待于进一步研究。

鉴于此,本文基于水文时空演变研究方法与灾害风险体系,结合旋转经验正交函数(EOF)、基尼系数等方法,构建了一套完整的旱涝急转事件特征分析及灾害风险评估体系,并将其运用于京津冀地区。研究明晰了旱涝急转事件演变态势,评价了灾害风险程度及特征,为区域高质量发展及旱涝急转灾害预防提供了科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 区域概况

京津冀地区位于 $36^{\circ}02'—42^{\circ}35'N$, $113^{\circ}05'—119^{\circ}55'E$ (图 1), 是我国第三大城市群, 区域面积 21.6 万 km^2 , 人口 11307.4 万, 2023 年区域生产总值达 10.4 万亿元。另外京津冀地区还是中国重要的粮食产地, 河北是中国 13 个粮食主产区之一。研究区地形总体上北高南低、西高东低, 海拔由西北部的燕山-太行山山地逐步向西南部降低, 加上大气环流及海洋气团的共同影响, 导致局地气候变化复杂, 降水时空分布不均, 差异明显, 旱涝灾害时常发生, 严重影响正常的人类生活、经济发展和农业生产。

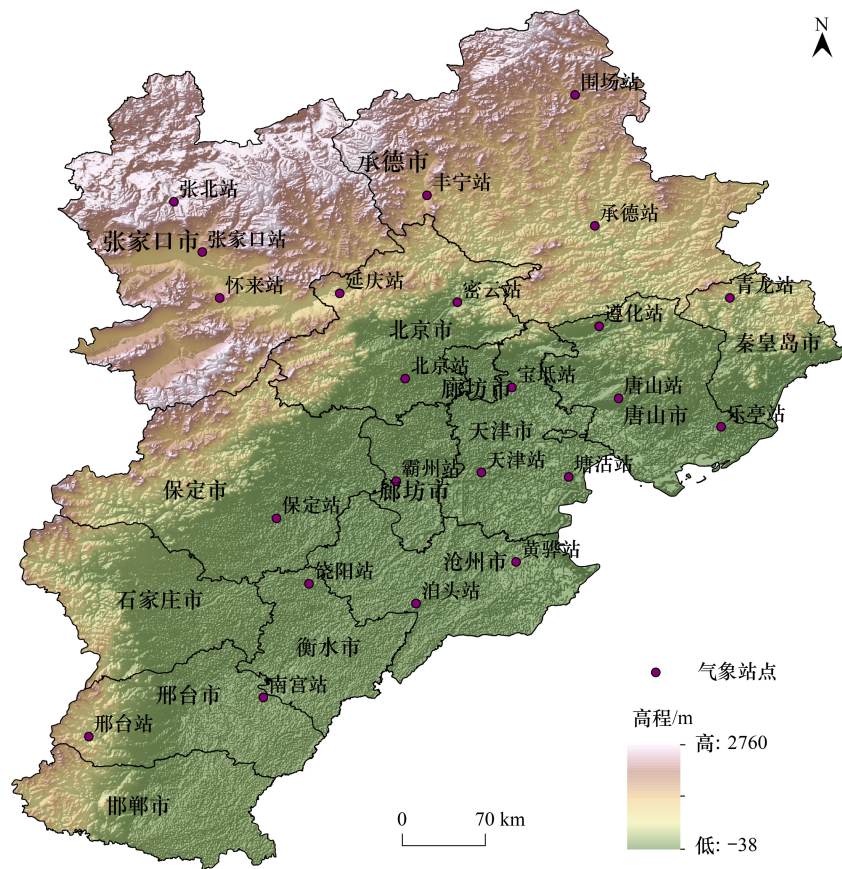


图 1 研究区域及气象站点分布图

Fig.1 Distribution of study area and meteorological stations

1.2 数据来源

本文采用的 1960—2019 年站点逐日降雨数据来自国家气象科学数据中心 (<https://data.cma.cn>), 共包括 23 个气象站点, 各气象站点分布如图 1 所示。数字高程模型 (DEM) 数据来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>)。土地利用、国内生产总值 (GDP) 及归一化植被指数 (NDVI) 数据来自中科院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn>)。人口密度数据来自全球人口数据集 (<https://hub.worldpop.org>)。道路路网数据来自开放街道地图 (<https://openmaptiles.org>), 并基于道路路网数据采用欧氏距离法计算距道路距离的栅格数

据。为统一研究数据的空间尺度,选用适用性广泛且考虑空间自相关性的克里金插值法将以上数据插值至 1 km 空间分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 旱涝急转事件定义

旱涝急转事件定义为相邻月份间干旱与洪涝的突变^[4],采用标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)识别干旱与洪涝,当 $SPI \geq 0.5$ 时识别为洪涝月, $SPI \leq -0.5$ 时识别为干旱月,SPI 具体计算参考文献^[23]。根据旱涝急转事件中干旱与洪涝事件发生的先后顺序,可将事件细分为旱转涝及涝转旱事件^[24]。

本文采用涂新军等^[10]提出的改进旱涝急转评估指数(Standardized Drought-Wetness Abrupt Alternation Index, SDWAI)量化事件强度,SDWAI 较传统的旱涝急转指数降低了事件错漏判率,且加入了非对称旱涝急转情形的权重,对事件强度的刻画更加全面。SDWAI 的计算式为:

$$SDWAI = \frac{SPI_{i+1} - SPI_i}{2} \left(1 + \frac{|SPI_{i+1} + SPI_i|}{S_a} \right) \tag{1}$$

式中,SDWAI 为旱涝急转事件强度指数, SPI_i 与 SPI_{i+1} 为 i 月与 $i+1$ 月的 SPI 值,需满足 $SPI_i \times SPI_{i+1} < 0 \cap |SPI_i| > 0.5 \cap |SPI_{i+1}| > 0.5$, S_a 为 SPI 序列的绝对距,即:

$$S_a = \max(SPI_i) - \min(SPI_i) \quad i = 1 \cdots n \tag{2}$$

根据式(1)计算结果,当 $SDWAI < 0$ 时,识别为一次涝转旱事件;当 $SDWAI > 0$ 时,识别为一次旱转涝事件,SDWAI 的绝对值越大,代表事件的强度越高。旱涝急转事件的强度等级划分见表 1^[10]。

表 1 旱涝急转事件强度等级划分

Table 1 Classification of drought and flood intensity of sudden events

等级 Grade	旱转涝 Drought to floods	涝转旱 Floods to drought	等级 Grade	旱转涝 Drought to floods	涝转旱 Floods to drought
轻度 Mild	(-1.0, -0.5]	[0.5, 1.0)	重度 Severe	(-2.0, -1.5]	[1.5, 2.0)
中度 Moderate	(-1.5, -1.0]	[1.0, 1.5)	极度 Extreme	(-∞, -2.0]	[2.0, +∞)

1.3.2 旋转经验正交函数

经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)目前已被广泛使用于气候学领域^[25-27],其可将气候要素中的时空特征分解为时间系数和空间模态的线性组合。旋转经验正交函数(Rotated Empirical Orthogonal Function, REOF)在 EOF 的基础上对特征向量进行极大方差正交旋转,使分解出的空间模态具有更加集中的高载荷区域,从而简化空间结构并突出局部区域特征^[28-29]。具体计算见参考文献^[30]。

1.3.3 旱涝急转灾害风险评估指标体系及方法

从灾害发生过程的机理出发,旱涝急转灾害的组成要素概括为“四性”,即致灾因子的危险性(Hazard, H),承灾体的暴露性(Exposure, E),孕灾环境的脆弱性(Vulnerability, V),以及防灾能力的可靠性(Reliability, RE)^[14]。致灾因子危险性指形成旱涝急转灾害的自然变异因素及其异常程度,也是旱涝急转灾害风险中最活跃的要素,直接控制着旱涝急转灾害的分布格局,SDWAI 指数能综合反映旱涝急转事件频率及强度,因此本文以历史期的月均 SDWAI 作为旱涝急转灾害危险性的评价指标;承灾体暴露性指经济、社会和自然等系统受旱涝急转灾害的威胁程度,由于旱涝急转事件对人类健康和粮食生产具有显著影响,本文以人口密度和耕地密度作为旱涝急转灾害暴露性的综合评价指标;孕灾环境脆弱性指环境对灾害的脆弱程度,更高的脆弱性会导致在同等灾害强度下环境受到的损害增加,本文选取 DEM 及 NDVI 作为旱涝急转灾害脆弱性的综合评价指标,海拔和植被覆盖度会改变土壤的持水能力,从而影响环境对旱涝急转灾害的抵御能力;防灾能力可靠性指承灾体遭受旱涝急转灾害时的抵抗能力和恢复能力,当旱涝急转灾害发生时,更高的社会经济发展水平和更完善的基础道路设施能提高受灾地区的救灾能力和响应速度,从而减小承灾体遭受的损失,本文以 GDP 和距道路距离作为可靠性的综合评价指标。考虑旱转涝与涝转旱事件的致灾风险不同,分别计

算两个事件的灾害风险,将旱转涝灾害风险与涝转旱灾害风险叠加即为旱涝急转灾害风险。根据京津冀地区实际情况并结合层次分析法确定指标权重,本文建立的旱转涝和涝转旱灾害风险评估体系及各指标权重见表2。涝转旱灾害风险评估体系中致灾因子危险性中 SDWAI 选取小于 0 的序列,即只包含涝转旱事件;同理,旱转涝灾害风险评估体系中致灾因子危险性中 SDWAI 为大于 0 的序列,只包含旱转涝事件。

表 2 旱涝急转灾害风险评估体系及各指标权重

Table 2 Risk assessment system for drought and flood disasters and the weights of each index

涝转旱灾害风险指数 Flood to drought disaster risk index			旱转涝灾害风险指数 Drought to flood disaster risk index		
一级指标 Level 1 indicators	二级指标 Level 2 indicators	权重 Weight	一级指标 Level 1 indicators	二级指标 Level 2 indicators	权重 Weight
致灾因子危险性 Hazard of causative factors (H)	SDWAI	0.35	H	SDWAI	0.31
承灾体暴露性 Exposure to disaster-bearing bodies (E)	人口密度	0.12	E	人口密度	0.09
	耕地密度	0.07		耕地密度	0.10
孕灾环境脆弱性 Vulnerability to disaster-stricken environments (V)	DEM	0.03	V	DEM	0.08
	NDVI	0.06		NDVI	0.09
防灾能力可靠性	GDP	0.27	RE	GDP	0.22
Disaster preparedness and reliability (RE)	距道路距离	0.10		距道路距离	0.11

SDWAI: 标准化旱涝急转指数 Standardized drought-wetness abrupt alternation index; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; GDP: 国内生产总值 Gross domestic product

由于旱涝急转灾害风险评估中各要素量纲不同会对评价结果带来的影响,因此需对二级指标进行归一化处理,其计算式为:

$$y_i = 0.5 + 0.5 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式中, y_i 为指标归一化后值, x_i 为指标实际值, $x_{\min}$ 为指标序列的最小值, $x_{\max}$ 为指标序列的最大值。

各指标归一化之后,旱涝急转灾害风险中各要素的计算式为:

$$X = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (4)$$

式中, X 为风险要素, w_i 为指标权重。

参考旱灾风险综合指标表达形式,本文旱涝急转灾害风险指数的计算式为:

$$R = 100 \frac{H \times E \times V}{RE} \quad (5)$$

式中, R 为旱涝急转灾害风险指数, H 为危险性要素, E 为暴露性要素, V 为脆弱性要素, RE 为可靠性要素。

1.3.4 基尼系数

基尼系数最初在经济学领域中用于反映居民的收入差距,已有学者将其引入水文领域用于分析水资源负载、水土匹配和用水效益等指标在不同研究对象间的差距^[31-32],展现出良好的适用性。本文进一步将其用于分析旱涝急转灾害风险各要素与综合指标的均衡性,参考张建华^[33]基于微分的计算思路,基尼系数的计算式为:

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} z_i + 1 \right) \quad (6)$$

式中, G 为基尼系数, z_i 为将计算指标从小到大排序后第 i 组的累计和与总量的百分比, n 表示指标的总组数。

基尼系数取值范围为 0—1,越接近 0 代表越均衡,反之越接近 1 代表差距越大。基尼系数等级划分见表 3^[34]。

表 3 基尼系数等级划分

Table 3 Gini coefficient grading

基尼系数 Gini coefficient	均衡状况 Equilibrium	基尼系数 Gini coefficient	均衡状况 Equilibrium
[0, 0.2)	绝对均衡	[0.4, 0.5)	一般失衡
[0.2, 0.3)	比较均衡	[0.5, 1]	严重失衡
[0.3, 0.4)	相对均衡		

2 结果与分析

2.1 旱涝急转事件基本特征分析

2.1.1 旱涝急转事件演变趋势

根据站点降雨数据识别旱涝急转事件并计算其 SDWAI 绝对值,采用泰森多边形法获取各站点控制面积并以此计算研究区的平均月、季和年尺度 SDWAI 时间序列,其中季尺度和年尺度 SDWAI 根据月平均 SDWAI 计算得到,结果如图 2 所示。

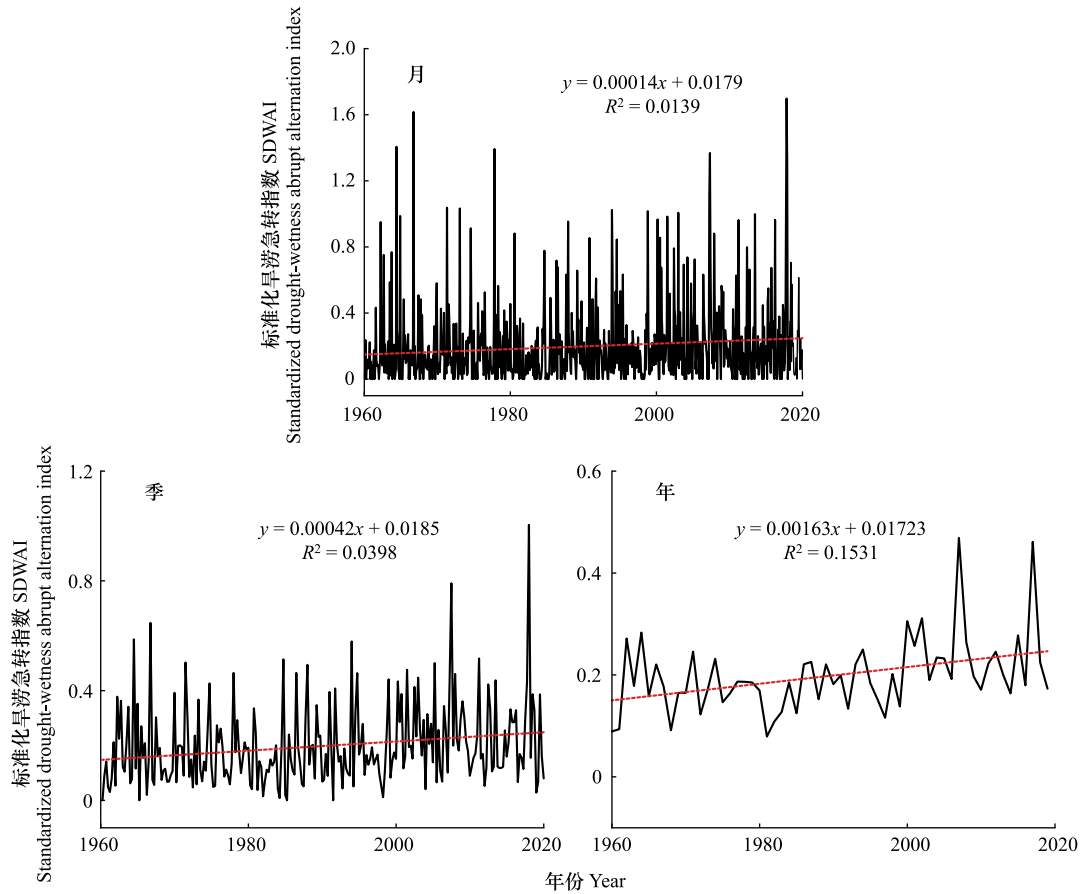


图 2 京津冀 SDWAI 绝对值序列多时间尺度特征

Fig.2 Multi-time scale characteristics of the Beijing-Tianjin-Hebei SDWAI absolute value series

SDWAI: 标准化旱涝急转指数 Standardized drought-wetness abrupt alternation index

图 2 中 SDWAI 绝对值序列在不同时间尺度下呈波动上升趋势,波动幅度各异。月尺度下旱涝急转事件受短期降水扰动明显,SDWAI 绝对值序列随干旱湿润的交替表现出剧烈波动;季尺度 SDWAI 绝对值序列波动周期较月尺度变长,强度减弱;年尺度 SDWAI 绝对值序列表征旱涝急转事件的年际变化特征,其波动周期较其他时间尺度更长,总体趋势更明显。

进一步采用最小二乘法对各时间尺度下 SDWAI 绝对值序列进行拟合,并结合 MK 趋势检验法^[35]评价变化的显著性。结果显示月、季和年尺度下 SDWAI 绝对值序列的增长趋势随时间尺度增加而上升趋势明显,尤其在年尺度的上升趋势更显著。另外,三者均在 0.05 显著性水平下的 MK 趋势检验中表现出显著性, P 值分别为 0.0015、0.0019 和 0.002,这表明京津冀地区的旱涝急转事件在各时间尺度下均存在显著的加剧,区域受旱涝急转事件的威胁增加。

2.1.2 旱涝急转事件季节分布

为进一步明晰旱涝急转事件的年内分布,识别旱涝急转事件高发季节及热点地区。本文采用反距离权重法对季节尺度的 SDWAI 绝对值进行插值分析,结果如图 3 所示。

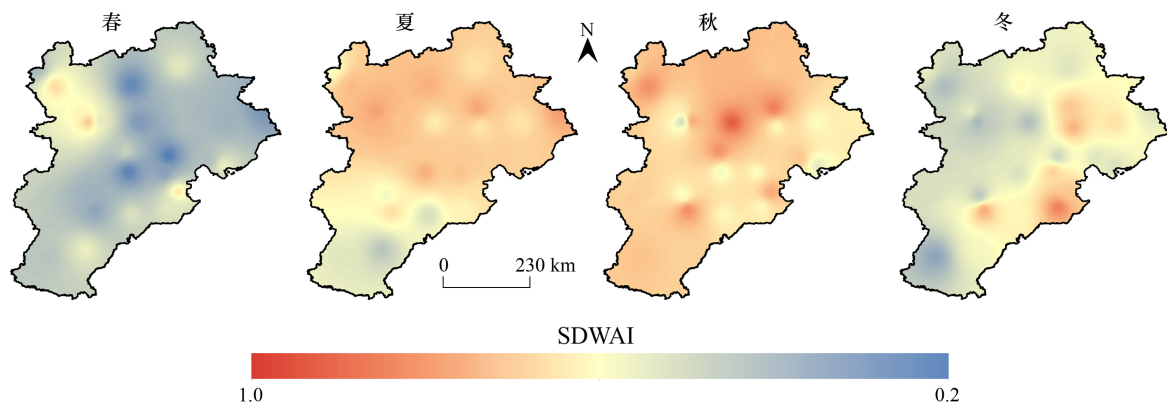


图 3 京津冀 SDWAI 绝对值年内分布特征

Fig.3 Intra-year distribution characteristics of SDWAI absolute values in Beijing-Tianjin-Hebei region

由图 3 可知,研究区年内 SDWAI 绝对值分布严重不均,夏、秋季分布较高,平均值分别为 0.66、0.68;春、冬季分布较低,平均值分别为 0.45、0.57。SDWAI 绝对值热点区域也随季节不同呈现出差异,春季时热点区域在区域西北部;夏季向东部延伸;秋季进一步延伸至区域南部并在多地出现较高分布;冬季收缩并主要集中在区域东部。

由此可见,京津冀地区的旱涝急转事件在年内从春季到秋季不断加剧,在秋季达到最强后冬季迅速减弱。旱涝急转事件热点区域则从春季开始由区域西部不断向东部移动,在秋季到达区域中部,并在多地出现高值,最终在冬季削弱并移动至东部。

2.1.3 基于 REOF 的空间分布特征

采用 REOF 法对研究区内 23 个站点的月尺度 SDWAI 序列进行旋转正交分解,前 5 个空间模态及基于 REOF 的分区结果如图 4 所示,以此结果分析京津冀地区旱涝急转事件的空间分布特征。

由图 4 可知,在每个模态中仅有一小块区域 SDWAI 呈现高载荷分布,其余区域的空间模态值则较低,这表明高载荷区域的 SDWAI 的变化规律具有一致性,并呈现出以高载荷区域为中心的空间分布特征。第一特征向量(EOF1)的方差贡献率最大,为 13.1%,高载荷区位于区域南部,涵盖邢台、邯郸、石家庄及衡水市;第二特征向量(EOF2)的方差贡献率为 12.9%,高载荷区位于区域北部,主要包括秦皇岛及承德市;第三特征向量(EOF3)的方差贡献率为 10.0%,高载荷区位于区域东部,涵盖唐山、天津及廊坊市;第四特征向量(EOF4)的方差贡献率为 9.6%,高载荷区位于区域西部,涵盖张家口、保定及北京市;第五特征向量(EOF5)的方差贡献率为 7.9%,高载荷区位于区域北部,主要包括张家口及承德市。各模态高载荷区域叠加基本覆盖京津冀全域,且累计方差贡献率达到 53.5%,可以较好地代表区域月尺度 SDWAI 的空间分布特征,因此以前 5 个特征向量的高载荷区为中心对研究区域进行划分,结果如图 REOF 分区所示。REOF 空间载荷聚类显示的旱涝急转事件所具有的 5 个分类区划,主要受到地区复杂地形的影响,沿海、内陆及山区地形间区

划明显,同时与区域处于的典型温带半湿润半干旱大陆性气候的反馈作用有关。

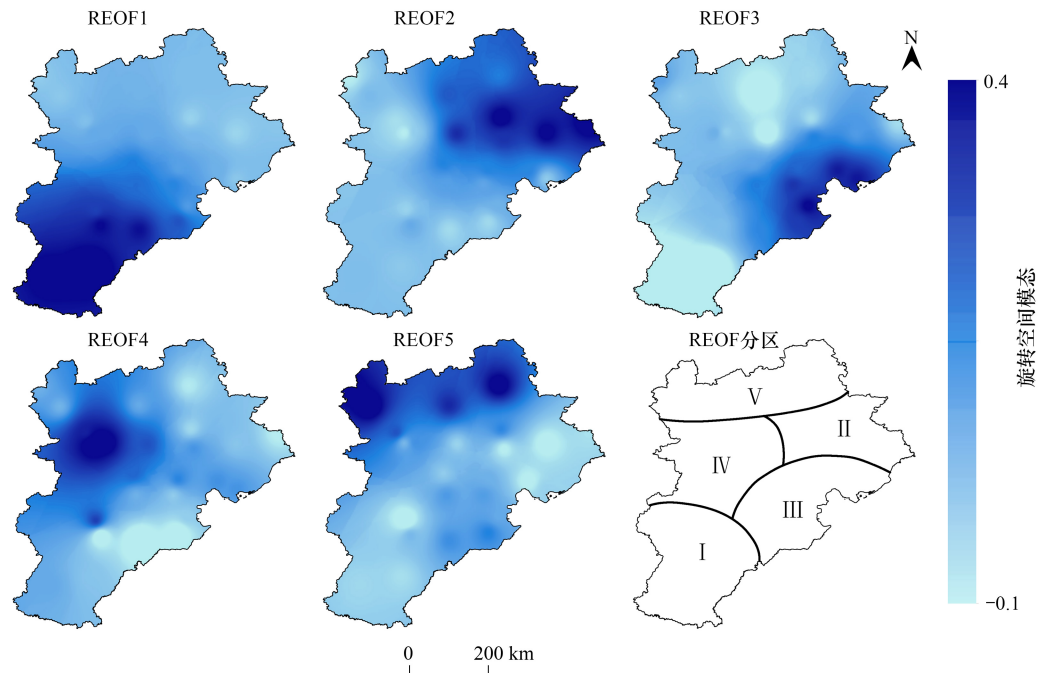


图 4 基于 REOF 的京津冀月尺度 SDWAI 模态分区

Fig.4 Beijing-Tianjin-Hebei month-scale SDWAI modal partitioning based on REOF
REOF;旋转经验正交函数

2.2 旱涝急转灾害风险评估

2.2.1 灾害风险要素分析

根据式(4)计算研究区涝转旱和旱转涝灾害风险的危险性、暴露性、脆弱性及可靠性,涝转旱及早转涝灾害风险要素分布结果分别如图 5 和图 6 所示。

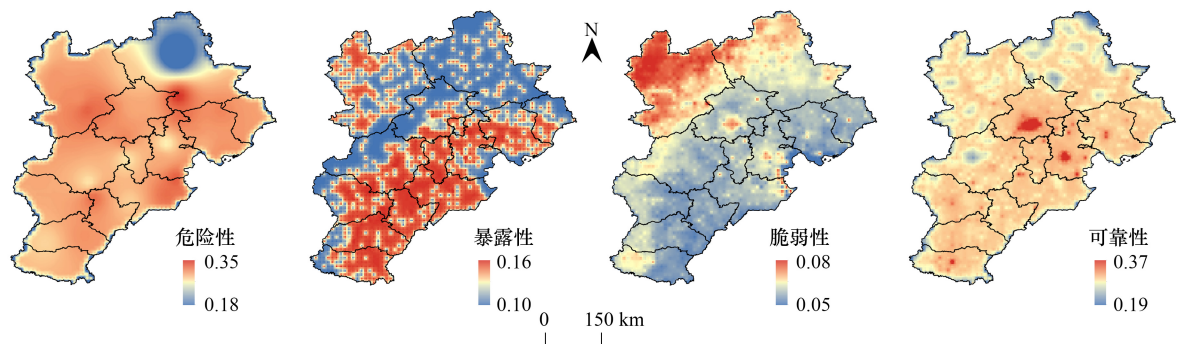


图 5 京津冀涝转旱灾害风险要素分布

Fig.5 Distribution of flood-to-drought and risk factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region

由致灾因子的危险性分布图可知,京津冀地区涝转旱灾害危险性整体高于旱转涝灾害的危险性,表明该地区在历史时期发生涝转旱事件的频率及剧烈程度高于旱转涝事件。京津冀地区涝转旱灾害危险性除承德市较低外,其余地区分布较为均匀,表明承德市历史时期涝转旱事件的频率及剧烈程度较低,受灾风险低于其他地区。旱转涝灾害危险性呈现西北和东南高、西南和东北低的空间分布特征,其中张家口和沧州危险性要素分布最高,承德、天津和北京部分地区危险性要素分布较高,表明上述地区在历史期发生了更加剧烈的旱转

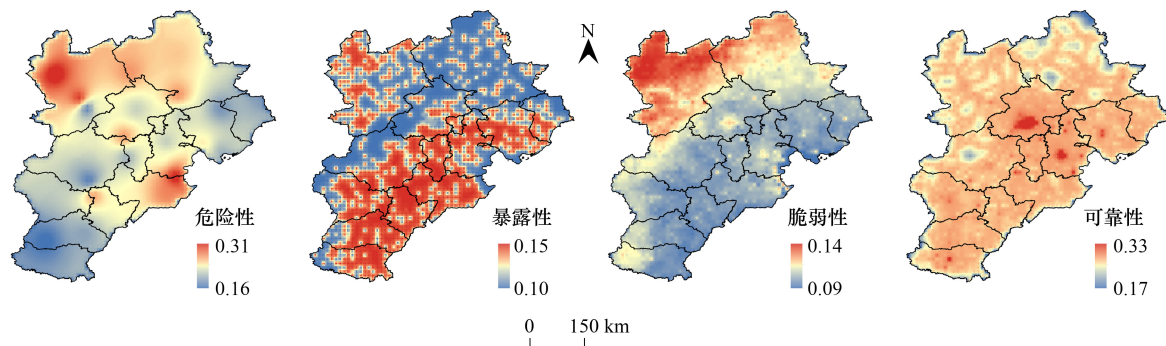


图6 京津冀旱转涝灾害风险要素分布

Fig.6 Distribution of drought-to-flood risk factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region

涝事件,更有可能遭受旱转涝灾害带来的损失。邯郸、邢台和秦皇岛等地危险性要素分布较低,表明历史期旱转涝事件的剧烈程度较低,受灾风险低于其他地区。

由承灾体暴露性分布图可知,京津冀地区涝转旱灾害暴露性与旱转涝灾害暴露性均呈现南高北低、东高西低的空间分布特征,造成这一分布特征的主要原因是耕地分布不均,京津冀地区的耕地主要集中于太行山以东、燕山以南的华北平原上,导致该区域耕地受旱涝急转灾害的威胁程度高于其他地区。此外,北京、天津等城市也表现出承灾体暴露性要素的小范围集中分布,这是由于上述区域人口密度较高,导致人类更有可能暴露于旱涝急转事件的影响下。涝转旱灾害暴露性略高于旱转涝灾害的暴露性,主要原因是洪涝对人类的威胁大于干旱,而旱转涝事件由于前期干旱,河道水库蓄水偏少,蓄洪能力强,后期涝灾会减轻,因此涝转旱事件对于人类的威胁大于旱转涝事件。

由孕灾环境脆弱性分布图可知,京津冀地区涝转旱灾害脆弱性与旱转涝灾害脆弱性在西北部的张家口市大部分地区呈现出高分布,主要因为该地处于山区且主要土地利用类型为旱地,海拔高、植被覆盖度低,导致旱涝急转灾害脆弱性。另外,在北京、天津等城市也有小范围的高分布,这主要是由于密集的城镇用地抢占了绿地空间,降低了植被覆盖率,导致其相比周边海拔相同的区域具有更高的脆弱性。旱转涝灾害脆弱性高于涝转旱灾害的脆弱性,主要由于涝转旱事件前期洪涝,河道水库蓄水多,抗旱能力强,后期旱灾会减轻,因此涝转旱事件对植被的生长状况受影响程度低于旱转涝事件。

由防灾能力可靠性分布图可知,京津冀地区涝转旱和旱转涝的防灾可靠性总体上呈东南高西北低的空间分布特征,其中北京、天津等大型城市的可靠性明显较其他区域更高,这是由于这些地区的社会经济及路网交通更发达,因此具备更好的救灾减损能力,可在灾害发生后有效降低承灾体受到的损失。由于旱转涝灾害中涝灾会因前期的旱灾有所缓解,因此防灾救灾能力对于涝转旱灾害风险更为重要,导致涝转旱灾害防灾能力可靠性高于旱转涝灾害的防灾能力可靠性。

2.2.2 灾害风险综合指标分析

综合考虑旱涝急转灾害的根据式(5)计算得到旱涝急转灾害风险综合指标的结果如图7所示。

由图7可知,京津冀地区涝转旱灾害风险综合评价指标低于旱转涝灾害风险的综合评价指标,主要由于旱转涝灾害的防灾可靠性较低、脆弱性较高导致的。涝转旱灾害风险指标最高的地区为张家口市,沧州市中也有部分高风险值分布;旱转涝灾害风险指标在张家口市分布最高,沧州市次之,其余地区灾害风险指标较低。综合考虑涝转旱和旱转涝的灾害风险得到旱涝急转灾害风险综合指标的空间分布。京津冀地区旱涝急转灾害风险综合指标空间分布不均,总体上呈现出北高南低、东高西低的空间格局。其中研究区西北部张家口市的风险指标分布最高,表明其遭受旱涝急转灾害的威胁及可能损害最大。造成这一结果的原因是该地区历史期旱涝急转事件强度较高,同时海拔高,耕地分布较广,社会经济及交通路网发展水平在研究区内较差,

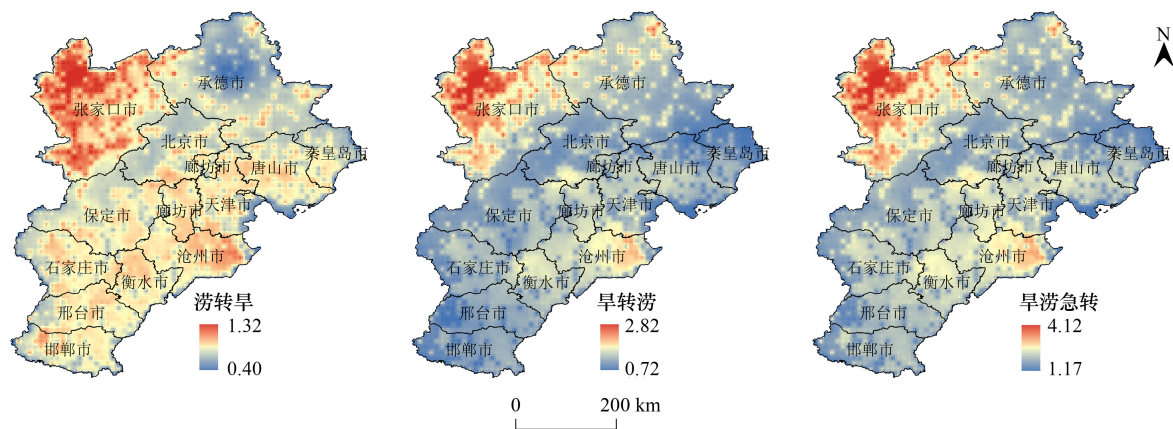


图7 京津冀旱涝急转灾害风险综合评价指标分布

Fig.7 Distribution of comprehensive assessment indicators of drought and flood disaster risk in Beijing-Tianjin-Hebei region

这些因素使张家口市的旱涝急转灾害危险性、暴露性及脆弱性较高,而可靠性较低,综合导致其在京津冀各城市中承受的旱涝急转灾害风险最大。同样出现风险指标高分布的还有研究区东部的沧州市,结合图5和图6可知其在灾害危险性、暴露性及脆弱性方面分布较高。研究区西部及中部沿太行-燕山山脉走向呈现出一条明显的旱涝急转灾害低风险分布带。除了这一带本身遭受的旱涝急转事件强度不高,灾害危险性较低外,山区人类活动少、耕地稀疏也从减少承灾体暴露性方面在一定程度上降低了灾害综合风险。

对于旱涝急转灾害风险较高的地区,可考虑从降低灾害风险脆弱性和提高防灾可靠性方面改善。具体来说,施行植树造林,退耕还林等措施可提高土壤的持水能力,使土地在遭遇旱涝急转时具备一定的缓冲和调节能力,而提升道路建设水平能加快灾害发生后的救灾响应速度,减小灾后损失。

2.2.3 灾害风险均衡性分析

为定量分析京津冀地区旱涝急转灾害各要素及风险指标的均衡性,采用基尼系数刻画旱涝急转灾害危险性、暴露性、脆弱性、可靠性及风险综合指标的分布差距,结果如图8所示。

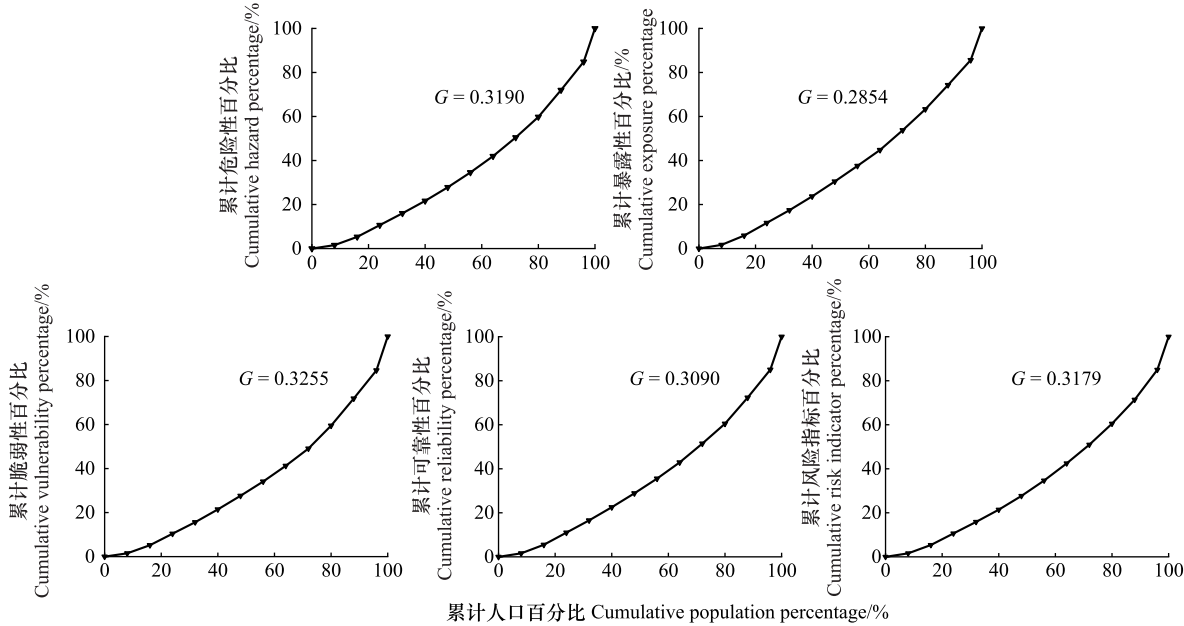


图8 人口与各指标累计曲线及其基尼系数(G)

Fig.8 Cumulative curves of population and each index and their Gini coefficients (G)

由图 8 可知,在灾害风险的“四性”中,旱涝急转灾害暴露性的基尼系数值最低,为 0.2854,按照等级划分标准属于比较均衡水平。这表明灾害暴露性在区域内的分布差距最小,均衡性最高,一定程度上反映出京津冀地区的人口及耕地分布较为平均。灾害脆弱性的基尼系数最高,为 0.3255,表明其分布均衡性最低。危险性及可靠性基尼系数值分别为 0.3190 及 0.3090,与脆弱性均属于相对均衡区间,对比暴露性分布差距偏大。旱涝急转灾害风险综合指标的基尼系数为 0.3179,表明旱涝急转风险分布相对合理,但仍有较大提升空间。值得注意的是,5 条曲线整体较为平滑,但均在末端表现出一段斜率迅速增长的分段,这表明有少部分人口承受了异常高的指标值,从而降低了整体的均衡性。

3 结论

(1) 京津冀历史期旱涝急转事件强度在月、季和年尺度下均呈现出显著上升趋势,其上升趋势随时间尺度的增加而增加,波动幅度随时间尺度的增加而减小。

(2) 京津冀旱涝急转事件年内时空分布不均,事件强度由春季到秋季不断上升,秋季到冬季下降,事件热点区域则由西部逐渐向东部移动。

(3) 京津冀旱涝急转灾害风险呈现北高南低、东高西低的空间分布特征,西北部张家口市及东部沧州市风险较高,西南部至中部的太行-燕山山脉一带风险较低。其中,旱转涝事件的灾害风险高于涝转旱事件的灾害风险,两个事件的灾害风险均在张家口市和沧州市较高。

(4) 京津冀旱涝急转灾害各项要素及综合风险指标处于比较均衡-相对均衡区间,整体上分布较为合理,但存在少部分人承受异常高值的现象。

参考文献 (References):

- [1] 王浩,赵钢铁,田雨,陈泽聪,郑炎辉,陈晓宏. 考虑时间变化的洪涝灾害损失评估. 水利学报, 2024, 55(2): 127-136.
- [2] Zscheischler J, Martius O, Westra S, Bevacqua E, Raymond C, Horton R M, van den Hurk B, AghaKouchak A, Jézéquel A, Mahecha M D, Maraun D, Ramos A M, Ridder N N, Thiery W, Vignotto E. A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1: 333-347.
- [3] Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, Mukherji A, Thorne P, Trisos C, Romero J, Aldunce P, Barrett K, Blanco G, Cheung W, Connors S L, Denton F, Diongue-Niang A, Dodman D, Garschagen M, Geden O, Hayward B, Jones C, Jotzo F, Krug T, Lasco R, Lee Y Y, Masson-Delmotte V, Meinshausen M, Mintenbeck K, Mokssit A, Otto F, Pathak M, Pirani A, Poloczanska E, Pörtner H, Revi A, Roberts D, Roy J, Ruane A, Skea J, Shukla P, Slade R, Slangen A, Sokona Y, Sörensson A, Tignor M, van Vuuren D V, Wei Y M, Winkler H, Zhai P, Zommers Z, Hourcade J, Johnson F X, Pachauri S, Simpson N, Singh C, Thomas A, Totin E, Alegría A, Armour K, Bednar-Friedl B, Blok K, Cissé G, Dentener F, Eriksen S, Fischer E, Garner G, Guivarch C, Haasnoot M, Hansen G, Hauser M, Hawkins E, Hermans T, Kopp R, Leprince-Ringuet N, Lewis J, Ley D, Ludden C, Niamir L, Nicholls Z R J, Some S, Szopa S, Trewin B, van der Wijst K I, Winter G, Witting M, Birt A, Ha M. IPCC, 2023: climate change 2023: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, H. lee and J. romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023: 1-34.
- [4] 乔宇,徐伟,孟晨娜,赵丹丹. 旱涝急转事件研究: 进展与挑战. 灾害学, 2023, 38(3): 131-138.
- [5] Shi W Z, Huang S Z, Liu D F, Huang Q, Han Z M, Leng G Y, Wang H, Liang H, Li P, Wei X T. Drought-flood abrupt alternation dynamics and their potential driving forces in a changing environment. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126179.
- [6] 赵英,陈华,杨家伟,许崇育,陈杰. 基于 SWAP 和 SRI 的汉江流域旱涝急转时空特征分析. 人民长江, 2020, 51(4): 94-99, 151.
- [7] 吴志伟,李建平,何金海,江志红. 大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转. 科学通报, 2006, 51(14): 1717-1724.
- [8] 闪丽洁,张利平,张艳军,余敦先,夏军. 长江中下游流域旱涝急转事件特征分析及其与 ENSO 的关系. 地理学报, 2018, 73(1): 25-40.
- [9] Li X H, Zhang Q, Ye X C. Dry/wet conditions monitoring based on TRMM rainfall data and its reliability validation over Poyang lake basin, China. *Water*, 2013, 5(4): 1848-1864.
- [10] 涂新军,庞万宁,陈晓宏,林凯荣,刘智勇. 传统旱涝急转评估指数的局限和改进. 水科学进展, 2022, 33(4): 592-601.
- [11] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 8-19.
- [12] 张强,姚玉璧,王莺,王素萍,王劲松,杨金虎,王静,李忆平,尚军林,李文举. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策. 生态学报, 2017, 37(21): 7206-7218.

- [13] 程朋根, 黄毅, 郭福生, 周万蓬, 吴静. 基于多源数据的城市洪涝灾害风险评估. 灾害学, 2022, 37(3): 69-76.
- [14] 张强, 韩兰英, 张立阳, 王劲松. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80-91.
- [15] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 何思源, 李禾尧, 焦雯珺. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建. 生态学报, 2019, 39(22): 8232-8244.
- [16] 温家洪, 史忠超, 李丽, 赵璐娜, 石勇, 朱赞, 颜建平. 自然灾害综合风险普查成果应用: 理论基础与框架体系——以上海市为例. 灾害学, 2024, 39(02): 1-5.
- [17] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153.
- [18] 吴东丽, 王春乙, 薛红喜, 张雪芬. 华北地区冬小麦干旱风险区划. 生态学报, 2011, 31(3): 760-769.
- [19] 漆栋良, 朱建强. 旱涝急转对玉米叶片衰老特性和产量的影响. 农业工程学报, 2024, 40(5): 141-147.
- [20] 高芸, 胡铁松, 袁宏伟, 杨继伟. 淮北平原旱涝急转条件下水稻减产规律分析. 农业工程学报, 2017, 33(21): 128-136.
- [21] 许继军, 周涛. 长江流域 2022 “汛期反枯” 现象警示与对策. 中国水利, 2023(11): 12-14, 19.
- [22] 王刚, 肖伟华, 路献品, 刘少华. 气候变化对旱涝事件影响研究进展. 灾害学, 2014, 29(2): 142-148.
- [23] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 张晓煜, 王明田, 代姝玮, 马洁华. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [24] 孟长青, 董子娇, 王远坤, 张余庆. 长江流域旱涝急转变特征及其社会经济暴露度. 水力发电学报, 2024, 43(4): 34-49.
- [25] 刘赛艳, 张以弛, 胡嘉玮, 解阳阳. 基于 EOF 的淮河流域潜在蒸散发时空演变特征研究. 水土保持研究, 2023, 30(6): 264-273.
- [26] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [27] 夏志明, 廖凯涛, 郭利平, 陈秀龙, 刘翠平, 焦玉章, 曹建祖. 基于 EOF 和 MK 趋势分析的赣江流域降水时空分布格局. 水土保持研究, 2023, 30(5): 223-233, 249.
- [28] 陈仕豪, 门宝辉, 庞金凤, 张腾, 王红瑞. 黄河流域非平稳气象干旱特征的重构及时空演变规律. 水力发电学报, 2024, 43(7): 1-13.
- [29] 庞金凤, 门宝辉. 嫩江流域生态干旱影响因素及其时空演变格局. 生态学报, 2024, 44(13): 5646-5657.
- [30] 陈子桑. 珠江流域干旱时空变化的经验诊断分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2020, 59(4): 33-42.
- [31] 杨亚锋, 巩书鑫, 王红瑞, 赵自阳, 杨博. 水资源空间均衡评估模型构建及应用. 水科学进展, 2021, 32(1): 33-44.
- [32] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 崔毅, 吴成国. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2018, 39(1): 1-9.
- [33] 张建华. 一种简便易用的基尼系数计算方法. 山西农业大学学报: 社会科学版, 2007, 6(3): 275-278, 283.
- [34] 魏豪杉, 王红瑞, 郝鹏鑫, 周利超, 李永坤, 刘昌明. 基于水资源空间均衡的四水四定调控模型构建与应用——I: 模型. 水资源保护, 2024: 1-12. (2024-03-08). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240306.1154.002.html>.
- [35] 门宝辉, 孙述海. 水文随机分析. 北京: 科学出版社, 2022.