

滹沱河流域极端降水的时空演变特征及驱动力分析

安鑫^{1,2,3}, 李紫妍^{1,2}, 周帅^{1,2}, 赵家艺^{1,2}, 姚利云⁴, 田济扬⁵

(1.河北工程大学水利水电学院,河北 邯郸 056038; 2.河北省智慧水利重点实验室,河北 邯郸 056038; 3.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古自治区 呼和浩特 010018; 4.河北省水文勘测研究中心,河北 石家庄 050031; 5.中国水利水电科学研究院,北京 100038)

摘要:【目的】极端降水极易引发流域性洪涝灾害,开展极端降水特征及其驱动力研究,可为应对极端事件提供理论支撑。【方法】以滹沱河流域为例,选取 10 项极端降水指标、8 种遥相关因子以及 2 种本地气象因子,综合运用 Mann-Kendall 趋势检验、累积距平检验、反距离权重插值与偏相关分析等方法,综合辨识了极端降水时空动态演变的趋势性和突变性特征,并定量解析了极端降水事件的直接和间接驱动因素。【结果】10 项极端降水指标中 9 项均于 20 世纪 90 年代中后期发生突变,仅最大降水量指标于 80 年代初期发生突变。空间上,多数指标的变化情况均呈现“东高西低”的分布格局;时间上,多数气象站点呈递增趋势。直接影响极端降水的本地气象因子为降水,在遥相关因子对极端降水的直接影响中,北大西洋年代际振荡的贡献占比高达 60%,大洋洲尼诺指数占比为 20%。北极涛动与北大西洋涛动占比均为 10%。此外,遥相关因子也可通过影响本地气象因子而间接影响极端降水,其占主导作用的为北极涛动和北大西洋年代际振荡。【结论】北大西洋年代际振荡等遥相关因子通过直接及间接途径共同主导了滹沱河流域极端降水的变化,研究成果可为区域防灾减灾策略的制定提供关键科学依据。

关键词:极端降水;时空演变;本地气象因子;遥相关因子;滹沱河流域

中图分类号:TV213

文献标志码:A

近年来,全球气候变暖加剧了水循环过程,极端降水事件在局地呈现增多、增强的趋势,严重威胁着人类社会的可持续发展^[1]。袁宇锋等^[2]对中国极端天气气候事件进行分析,并指出自 2010 年以来因极端降水引发的洪涝事件位居国内十大自然灾害之首。2024 年,我国共出现 42 次区域性暴雨事件,较往年偏多 4 次,且北方地区尤为明显^[3]。中国气象局 2024 年发布的气候公报中明确指出:极端降水事件频发不仅加剧了洪涝灾害的发生风险^[4],且对水资源分配、农业生产和城市排涝等提出了更高要求。因此,在全球气候持续变暖背景下,系统性开展极端降水时空演变规律及其驱动力研究,将能够更好地服务于区域气候演变、防灾减灾政策的制定和实施、极端降水的预测与应对,从而保障区域社会经济可持续发展。

国内外专家学者针对极端降水事件开展了大量研究^[5-6]。纵观国内外研究发现,多数学者选择中国气象局推荐的极端降水指标用以表征极端降水

事件,继而分析其时空动态、演变趋势及其对气候变化的响应机理。刘慧媛等^[7]选取 9 种极端降水指标探究了海河流域 1961—2018 年极端降水事件,并发现流域极端降水指数呈减少趋势。褚健婷等^[8]采用 Mann-Kendall 趋势分析、Z 检验等方法分析了海河流域降水的时空变化特征,并指出 2007 年之前春季降水量略有增加,其余时段均呈减少趋势。李佳等^[9]分析海河流域极端降水事件的时空变化特征,并发现历史时期极端降水指标均呈增加趋势,而未来时期进一步增加。同时,国内外学者研究发现极端降水的影响因素涉及气候因子、流域/区域自然地理条件和人类活动等^[10-12],且不同区域或同一区域不同时期极端降水的主要驱动因子不尽相同。例如,KANG X P 等^[13]和马梦阳等^[14]基于极值理论,分析发现遥相关因子是导致中国极端降水发生的主导因子。邹磊等^[15]以海河流域为例,探究了大气异常因子和太阳黑子对极端降水的影响,并指出二者均有一定影响。纵观过往研究发现,学者们均指

收稿日期/Received:2025-07-29

修回日期/Revised:2025-10-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFC3082200);国家自然科学基金项目(52509012);河北省自然科学基金项目(E2024402052);河北省水利科技计划项目(HBSL2025-19,HBSL2025-47)。

第一作者:安鑫(2002—),男,硕士研究生,从事水文学及水资源方面的研究。E-mail:2377513749@qq.com。

通信作者:李紫妍(1994—),女,博士、讲师,从事水资源系统工程方面的研究。E-mail:liziyan94@163.com。

数大气环流因子对中国极端降水有显著影响,但未进一步系统量化其对极端降水的作用途径(即,直接和间接影响)和主要驱动力^[16]。

滹沱河流域地处华北平原,作为海河流域子牙河系两大支流之一,流域内人口密集、经济发达,是京津冀协同发展的核心区域之一,在中国政治经济中有着重要的战略地位。同时,由于太行山对东南气流抬升作用显著,流域降水量偏丰,暴雨洪水事件频发,且山势陡峻,洪涝灾害风险较大^[17]。

因此,本文以暴雨频发的滹沱河流域为研究对象,基于10种极端降水指标、2种本地气象因子和8种遥相关因子分析流域极端降水的时空演变规律,定量解析流域极端降水的直接或间接驱动力。研究成果有助于滹沱河流域极端气候事件的预测与应对,为海河流域水安全保障体系的构建以及京津

冀地区协同高质量发展的实现提供理论依据和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滹沱河流域(图1)地处华北平原,该流域发源于山西省繁峙县横涧乡桥儿沟村,流经山西、河北两省,最终在河北省献县老河口与滏阳河汇合而形成子牙河,最终注入渤海。其干流全长587 km,流域面积约为2.73万平方公里。该流域涵盖盆地、山区、丘陵、平原四种地貌单元,呈现“西高东低”的地势特征;并且该流域地处温带大陆性季风气候区,多年平均降水量475.4 mm,6—9月为汛期,7、8月降雨占比突出,呈现春季干旱、夏季降雨集中、秋季凉爽、冬季干燥的气候特点。

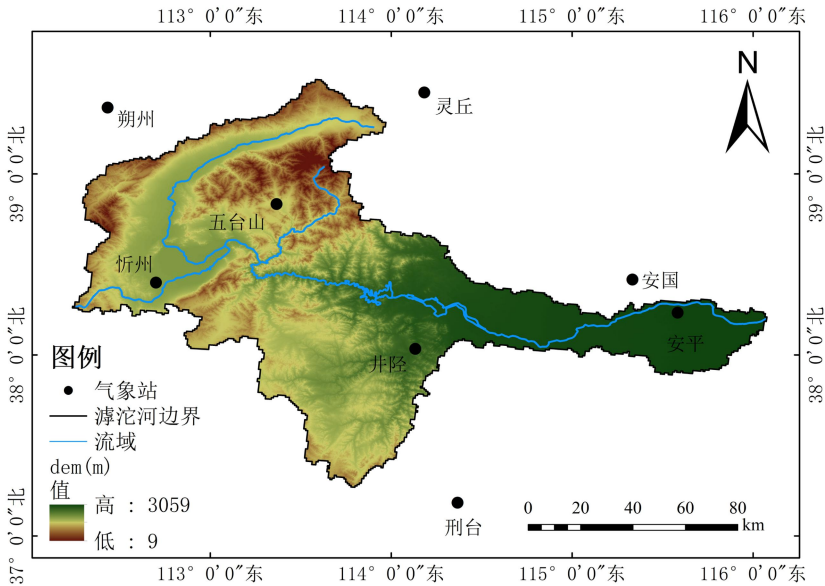


图1 研究区概况图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源

采用滹沱河流域内及周边共八个气象站1965—2019年的逐日气象要素(即,降水量、平均气温、最低气温、最高气温、相对湿度、日照时数、风速和平均气压)资料,来源于中国气象科学数据和国家气象信息中心,后续潜在蒸散发量通过彭曼公式计算^[18]。同时,选取了8个国际公认的关键气候遥相关因子,其覆盖“极地-中高纬环流”、“太平洋/大西洋”等,并且与华北地区极端降水的年际—年代际变化密切相关。北极涛动(AO)、太平洋十年涛动(PDO)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北大西洋涛动(NAO)、太平洋北美型(PNA)、北大西洋年代际振荡(AO)、南方涛动指数(SOI)和大洋洲尼诺指数(ONI)的数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)

气候预测中心(CPC);美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境信息中心(NCEI);美国国家海洋和大气管理局(NOAA)物理科学实验室(PSL);美国国家大气研究中心(NCAR)等机构^[19]。

1.3 研究方法

1.3.1 极端降水指标选取

世界气象组织气候委员会、世界气候研究计划及海洋气象学联合技术委员会联合成立的气候变化检测和指标专家组(ETCCDI)确定了27个具有代表性和全球适用性的极端气候指标^[4]。本文充分考虑流域气候特征,基于流域内及周边8个气象站点1965—2019年日降水数据,构建了10种极端降水指标,各指标相关定义及属性详见表1。

表 1 极端降水指标
Tab.1 Extreme precipitation indices

指标名称	缩写	定义	单位	指标性质
日最大降水量	AM1X	年内日最大降水量	mm	降水量及降水强度指数
5 日最大降水量	AM5X	年内连续 5 日最大降水量	mm	
湿日降水总量	PRCPTOT	日降水量 > 1 mm 的累积降水量	mm	
降水强度	SDII	年湿日(日降水量≥1.0 mm)降水总量与湿日数之比	mm/d	
强降水总量	R95p	日降水量 > 95% 分位值的年累积降水量	mm	相对指数
特强降水总量	R99p	日降水量 > 99% 分位值的年累积降水量	mm	
连续干期	CDD	日降水量 < 1mm 的最大持续日数	d	持续性指数
持续湿期	CWD	日降水量 > 1mm 的最大持续日数	d	
大雨日数	R25	日降水量≥25mm 的日数	d	绝对指数
暴雨日数	R50	日降水量≥50mm 的日数	d	

1.3.2 时空演变特征分析

Mann-Kendall(M-K)趋势检验^[20-22]是一种常用的非参数统计检验方法,它的优点是在分析气象时间序列数据的趋势变化时,无需假定数据服从特定的概率分布。当Z值为正且通过显著性检验时,说明气象要素呈现出上升趋势;反之,若Z值为负且通过显著性检验,则表明气象要素呈现出下降趋势。通常通过标准正态统计量Z的绝对值是否大于等于1.64、1.96(分别对应90%、95%置信度)来判断其变化趋势是否显著。计算公式如下所示:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_k - x_i) > 0 \\ 0 & (x_k - x_i) = 0 \\ -1 & (x_k - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t(t-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:S为时间序列中上升与下降趋势的差异总和;Var(S)为S的方差; x_k 和 x_i 为时间序列中的第k个和第i个样本;n为时间序列中的样本个数;t为序列中出现重复数据的次数。Z为正值时表示上升趋势,Z为负值时表示下降趋势。

累积距平检验法^[23]是将被检测序列的n个时刻的累积距平值算出,并绘制其过程线,当且仅当其变化趋势发生改变,且存在极值时,该点即为被检测序

列的突变点。对于序列x,某时刻t的累积距平可表示为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: $\hat{x}_t$ 时间t时刻的估计值, x_i 表示时间序列中第i个观测值, $\hat{x}$ 表示观测值的均值。

反距离权重插值^[24-25](Inverse Distance Weighted,简称IDW)是一种常用的空间插值方法,它基于离目标位置越近的采样点具有更大的影响力的原理。该方法主要用于将离散分布的气象站点观测数据,通过数学模型推算为连续的空间分布数据。计算公式如下所示:

$$Z = \frac{\sum (w_i * z_i)}{\sum w_i} \quad (6)$$

式中: z_i 是第i个采样点的属性值, w_i 是第i个采样点的权重。

1.3.3 驱动力分析

Pearson相关分析^[26-27]是统计学家卡尔·皮尔森所设计的一种计量指标,它能够分析变量之间的线性关系,一般用字母r表示。公式如下:

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X]\text{Var}[Y]}} \quad (7)$$

式中:Cov(X,Y)表示X,Y的协方差;Var[X]和Var[Y]分别表示X和Y的方差。

偏相关分析^[28-29]是指当两个变量同时与第三个变量相关时,将第三个变量的影响剔除,只分析另外两个变量之间相关程度的过程,判定指标是相关系数的r值。偏相关分析相对于相关分析的优点是,偏相关不仅仅衡量两组变量间的关联性,还能够排除第三个(或多个)控制变量的干扰,反映两个变量

之间的净相关性。公式如下:

$$r_{ij,z} = \frac{r_{ij} - r_{iz}r_{jz}}{\sqrt{(1-r_{iz}^2)(1-r_{jz}^2)}} \quad (8)$$

$$r_{ij,l_1l_2\ldots l_g} = \frac{r_{ij,l_1l_2\ldots l_{g-1}} - r_{il_g,l_1l_2\ldots l_{g-1}}r_{jl_g,l_1l_2\ldots l_{g-1}}}{\sqrt{(1-r_{il_g,l_1l_2\ldots l_{g-1}}^2)(1-r_{jl_g,l_1l_2\ldots l_{g-1}}^2)}} \quad (9)$$

式中: r_{ij} 是变量 x_i 与 x_j 的简单相关系数, r_{ih} 是变量 x_i 与

x_h 的简单相关系数, r_{jh} 是变量 x_j 与 x_h 的简单相关系数。右边均为 $g-1$ 阶的偏相关系数。

2 结果与分析

2.1 极端降水事件的时程演变规律分析

基于10种极端降水指标,采用累积距平检验法辨识了滹沱河流域极端降水时空动态演变的突变性和趋势性特征,结果如图2所示。

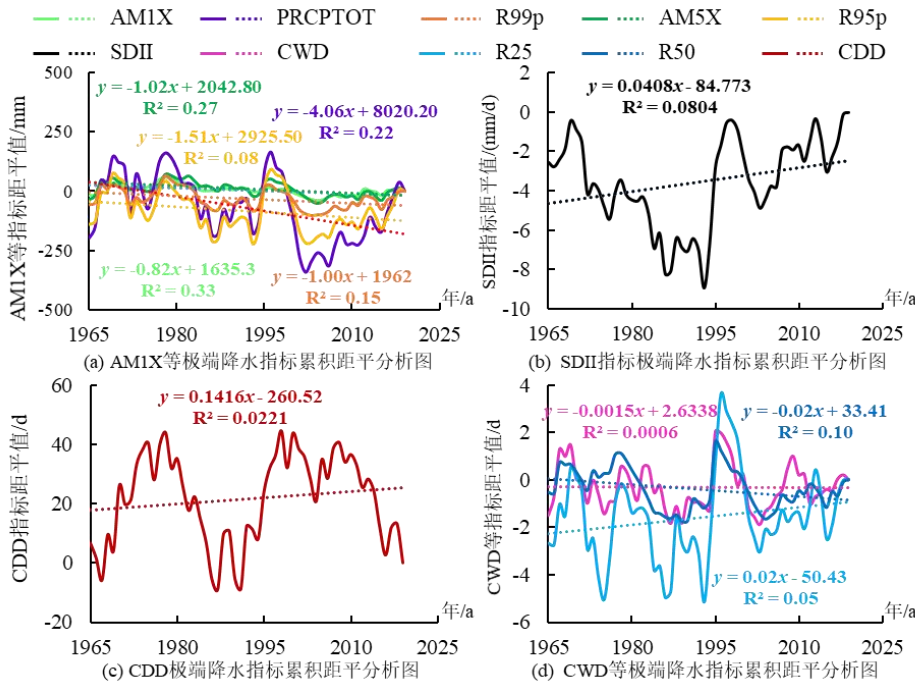


图2 各极端降水指标累积距平曲线分析图(注:实线为累积距平值线,虚线为线性趋势线)

Fig.2 Analysis chart of cumulative anomalies of various extreme precipitation Indices (note: the solid line represents the cumulative anomaly line, and the dashed line represents the linear trend line)

由图2可知:各极端降水指标的突变年份较多,整体上相对而言,AM5X、CDD、CWD、PRCPTOT、SDII、R25、R50、R95p、R99p指标均于90s中后期左右发生突变,而AM1X指标于80s初期左右发生突变。同时,相对于长期均值,CDD、SDII、R25均呈现上升趋势,其中CDD的上升趋势最大;其余7种极端降水指标均呈现下降趋势,其中PRCPTOT下降趋势最大,表明近些年来降水总量持续减少。大多极端降水指标约在1980—1993、1996—2005年间总体呈现减少趋势,并在1995年左右出现最大值,2005年左右出现

最小值。同时,除CDD以外其余极端降水指标均约在2005年后呈现增长趋势。此外,1993年左右AM1X、AM5X、SDII出现极低值表明流域极端降水的风险偏低,1995年中后期CWD、PRCPTOT、R25、R50达到极小值表明滹沱河流域降水量偏少,干旱的可能性会增加。

2.2 极端降水事件的空间分布格局识别

图3和图4分别展示了滹沱河流域极端降水指标的空间分布格局和趋势特征。

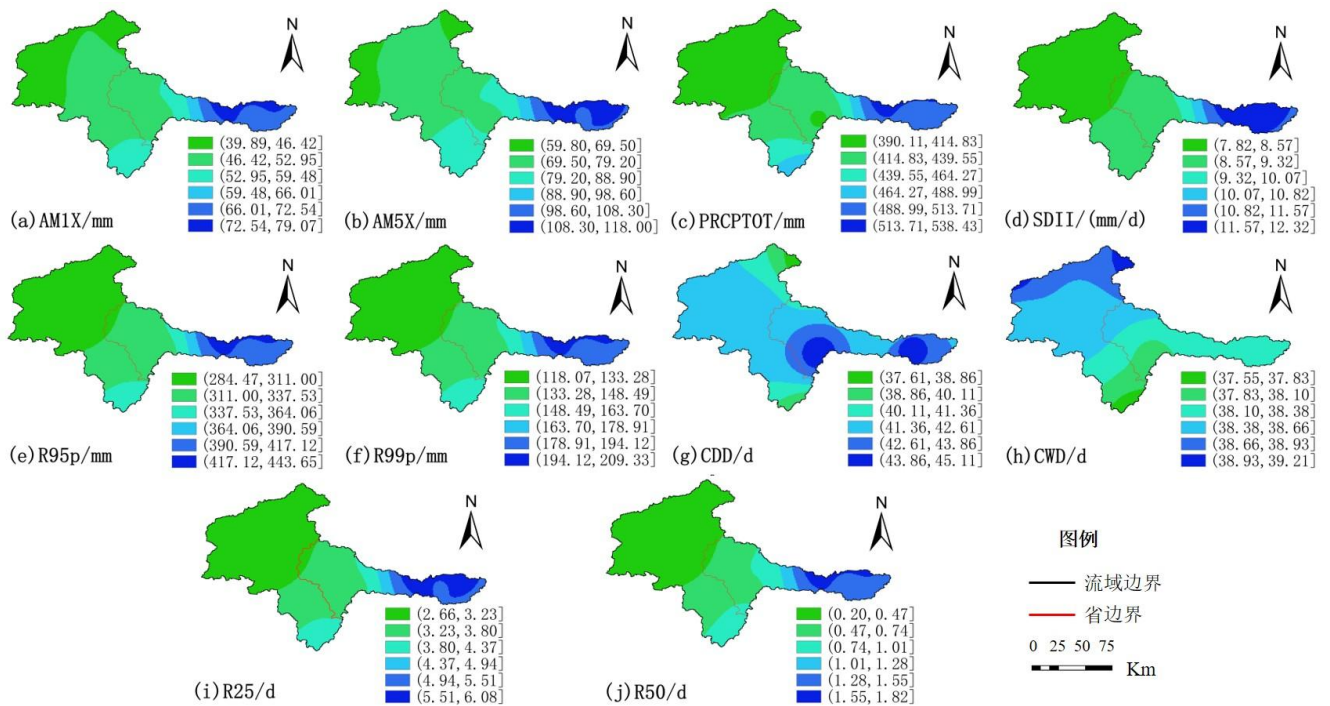


图3 极端降水指标空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of extreme precipitation indices

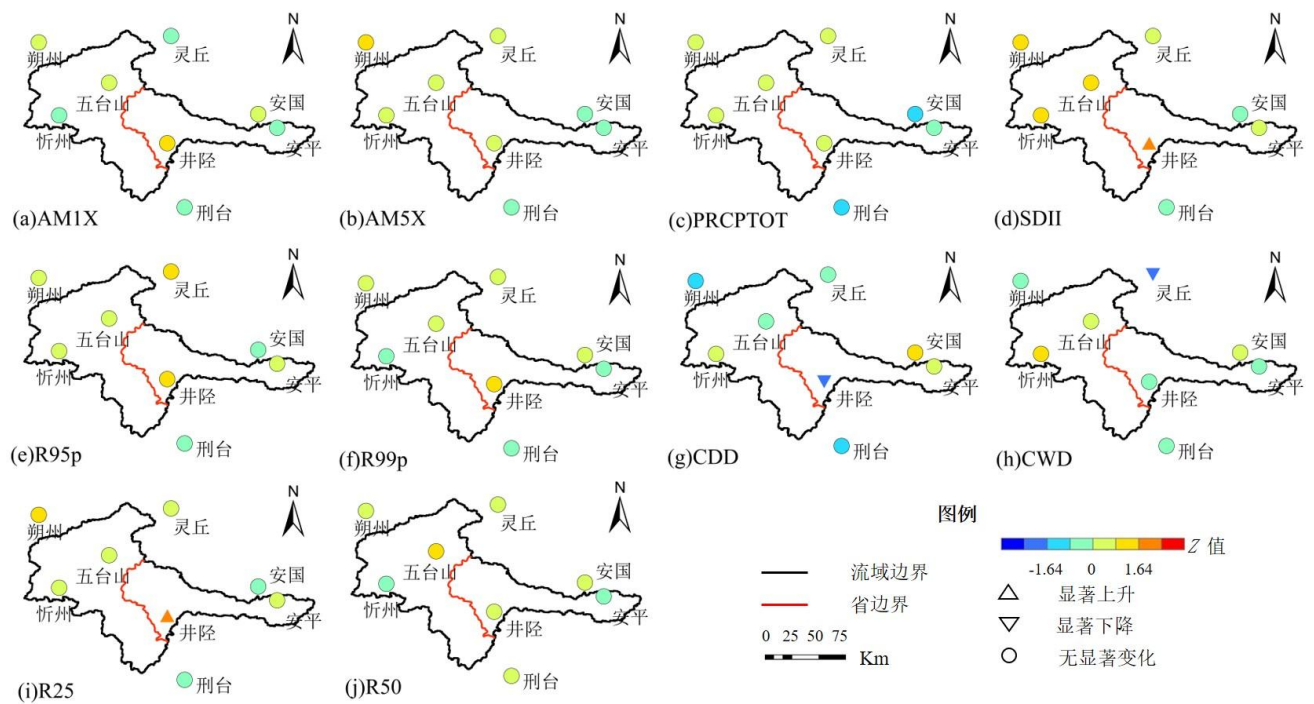


图4 极端降水指标空间趋势特征

Fig.4 Spatial trend characteristics of extreme precipitation indices

图3结果显示:(1)极端降水指标存在明显的地带性分布特征,且整体呈现出东高西低的空间分布格局,表明在空间尺度上东部地区发生极端降水事件的概率要大于西部地区;(2)持续性指数CDD高值区(>43天)主要集中分布于安平、井陉一带,且自刑台、灵丘向东递增,揭示了东部干旱持续日数更长,干旱风险更加严峻;(3)在西部与西北部地带,CWD

与CDD呈正相关关系(即连续干旱日少、连续降水日多),但刑台及东部地带连续降水日(37-39天)与干旱日数规律相反,体现了干湿事件在空间上的耦合特征;(4)年最大1日降水量及降水强度指数(AM1X、AM5X、PRCPTOT)结果整体表现出,流域东部年均最大连续1天/5天降水量分别可达79.07mm、118mm左右,PRCPTOT(湿日降水总量)

达538.43mm左右,且由东向西递减,其最大值与最小值差异显著(如AM5X差值达60mm),这表明流域东部为极端降水的高频、高发区;(5)R25(日降水量 $\geq 25\text{mm}$ 日数)最大值为6天,而R50($\geq 50\text{mm}$ 日数)仅为2天左右,且均呈东高西低的空间分布格局,其与SDII(降水强度指数)的空间格局一致,即流域东部湿日降水更为集中、极端性更强。

图4结果显示:(1)基于站点视角,该流域的上升趋势要大于下降趋势,其中超过75%的站点SDII和R95p呈上升趋势,并且SDII中有一个站点呈显著上升趋势;(2)全流域中CDD和CWD呈上升趋势站点

占37.5%,呈显著下降趋势在两个指标中分别占1个,表明近些年来持续性干旱和持续性降水的极端情况有做减少;(3)其他极端降水指标呈现上升趋势的站点占比情况如下:AM1X占50%,AM5X、PRCPTOT、R99p均占62.5%,表明该流域这些极端降水事件的发生在逐渐递增。

2.3 极端降水事件的直接和间接驱动力量化评估

2.3.1 直接驱动因子分析

通过Pearson和偏相关方法计算得到各极端降水指标与本地气象因子的相关系数,并以相关性最大原则遴选最适的相关系数,结果见表2。

表 2 极端降水指标与本地气象因子的相关性分析结果

Tab.2 Results of correlation analysis between extreme precipitation indices and local meteorological factors

极端降水指标	年均降水	潜在蒸散发
AM1X	0.661***	0.206
AM5X	0.760***	0.263
PRCPTOT	1.000***	-0.491***
SDII	0.769***	-0.337*
R95p	0.959***	-0.436***
R99p	0.824***	-0.312*
CDD	0.170	0.084
CWD	0.719***	-0.278*
R25	0.830***	-0.365**
R50	0.665***	-0.197

注:* $P<0.05$ 、** $P<0.01$ 和*** $P<0.001$ 分别代表变量间存在显著相关性、极显著相关性和非常显著相关性。

由表2可知:选取的10种极端降水指标发生变化的主要驱动力均为降水要素,且除CDD指标外,其余9种极端降水指标均通过了95%置信水平($P<0.05$)显著性检验,这表明该9种极端降水指标变化与降水量均呈显著的正相关关系,且降水事件的

增大将促进极端暴雨事件发生风险,从而增加了极端降水事件发生的概率。同理,通过Pearson和偏相关方法计算得到各极端降水指标与遥相关因子的相关关系,详细结果见表3。

表 3 极端降水指标与遥相关因子的相关性分析结果

Tab.3 Results of correlation analysis between extreme precipitation indices and teleconnection factors

极端降水指标	AO	ENSO	AMO	NAO	ONI	PDO	PNA	SOI
AM1X	0.096	-0.127	0.207	-0.151	-0.156	-0.168	-0.036	-0.136
AM5X	-0.049	-0.152	0.213	-0.079	-0.171	-0.085	-0.157	-0.156
PRCPTOT	0.078	-0.083	0.186	-0.031	-0.109	0.078	0.046	0.091
SDII	-0.115	0.143	0.258	-0.162	-0.213	-0.032	0.154	-0.202
R95p	-0.031	0.105	0.215	-0.09	-0.144	0.07	0.081	-0.087
R99p	-0.023	-0.141	0.257	-0.118	-0.179	-0.111	0.083	0.123
CDD	-0.151	-0.18	-0.076	-0.222	-0.176	0.053	0.215	0.126
CWD	0.174	0.081	0.113	0.15	-0.085	0.084	-0.046	-0.025
R25	-0.106	0.118	0.162	-0.086	-0.167	0.027	0.078	-0.125
R50	0.052	0.155	0.119	-0.055	-0.21	-0.135	0.059	-0.168

表3结果显示,10种极端降水指标下,AM1X、AM5X、PRCPTOT、SDII、R95p、R99p、CDD、CWD、R25、R50主导因子分别为:AMO(0.207)、AMO(0.213)、AMO(0.186)、AMO(0.258)、AMO(0.215)、AMO(0.257)、NAO(-0.222)、AO(0.174)、ONI(-0.167)、ONI(-0.210)。该结果表明,在涉及的八种遥相关因子中,大西洋年代际振荡(AMO)与极端降水事件的相关性最为显著,是驱动此类极端降水事件发生的主要遥相关因子。该结论进一步印证了AMO对我国“南早北涝”降水格局的重要影响。当AMO处于暖相位时,北大西洋海表温度偏高,从而促使华北地区降水增多,并可能显著增加了包括滹沱河流域在内的华北地区极端降水事件的发生概率。

表 4 本地气象因子与遥相关因子 Pearson 相关系数

Tab.4 Pearson correlation coefficients between local meteorological factors and teleconnection factors								
气象因子	AO	ENSO	AMO	NAO	ONI	PDO	PNA	SOI
降水	0.063	-0.085	0.181	-0.032	-0.109	-0.039	0.039	0.094
潜在蒸散发	-0.260	0.116	-0.295*	-0.054	0.179	-0.045	-0.176	-0.112

注:* $P<0.05$ 、** $P<0.01$ 和*** $P<0.001$ 分别代表变量间存在显著相关性、极显著相关性和非常显著相关性。

同理,基于偏相关分析探究了本地气象因子与遥相关因子的相关关系,结果见表5。由表5可知:降水的主导驱动力因子为AMO(0.127),潜在蒸散发的主导驱动力因子为AO(-0.320)和AMO(-0.237),其中AO通过了 $p<0.05$ 显著性检验,说明AO对潜在蒸散发呈负相关性,表明AO上升会导致潜在蒸散发减

2.3.2 间接驱动因子分析

基于Pearson相关分析方法探究了本地气象因子与遥相关因子的相关关系,结果见表4。由表4可知:降水和蒸发因子作为水循环过程的重要因子,其主要驱动力却不相同,其中降水的主导驱动力因子为AMO(0.181),潜在蒸散发的主导驱动力因子为AMO(-0.295),且均通过了95%置信水平($P<0.05$)显著性检验。AMO对潜在蒸散发表现出显著的负效应,即AMO增强会导致潜在蒸散发显著减少。这一现象可归因于AMO增暖期间向大气中注入大量水汽,从而降低饱和水汽压差(VPD);同时伴随云量增加,削弱太阳辐射。这两个过程共同抑制了蒸发,其作用远超过AMO本身升温可能带来的微弱促进蒸发效应。

少。这可能归因于AO正位相带来的稳定环流和水汽输送,会使滹沱河流域层状云、阴天频次增加,反射和散射太阳短波辐射,导致到达流域地表的净辐射量减少,从而减小了日照强度,地表能量输入不足,进一步降低了水分子的蒸发活性,间接抑制潜在蒸散发。

表 5 本地气象因子与遥相关因子偏相关系数

Tab.5 Partial correlation coefficients between local meteorological factors and teleconnection factors								
气象因子	AO	ENSO	AMO	NAO	ONI	PDO	PNA	SOI
降水	0.082	0.068	0.127	-0.025	-0.082	0.075	-0.023	-0.008
潜在蒸散发	-0.320*	-0.24	-0.237	0.066	0.281	-0.255	-0.053	0.046

注:* $P<0.05$ 、** $P<0.01$ 和*** $P<0.001$ 分别代表变量间存在显著相关性、极显著相关性和非常显著相关性。

2.3.3 驱动力分析

基于前文分析结果,本小节以相关性最大原则,

采用“自上而下”识别框架揭示了滹沱河流域极端降水事件的主要驱动力,结果如图5所示。

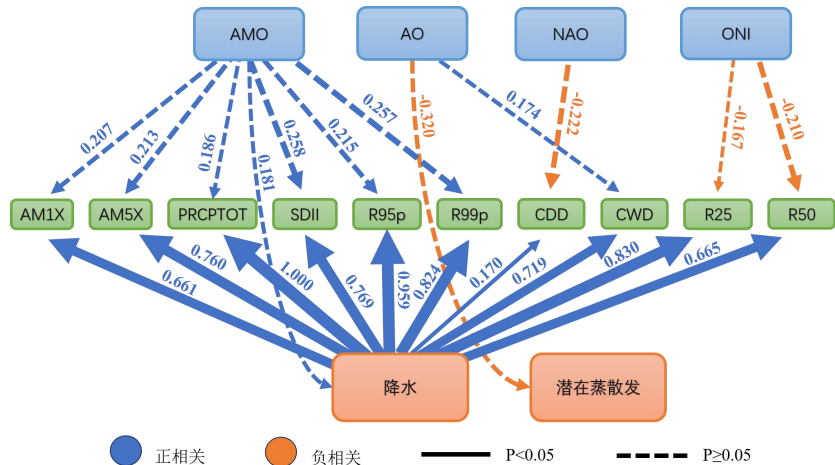


图5 滹沱河流域极端降水的主要驱动力分析结果

Fig.5 Results of analysis on the main driving forces of extreme precipitation in the Hutuo River Basin

研究发现,降水因子是导致10种极端降水指标时空变化的主要本地气象因子。同时,遥相关因子AMO对极端降水指标的直接主导作用高达60%以上,而AO因子对潜在蒸散发呈负相关。虽然潜在蒸散发量会进一步影响极端降水,但其对极端降水指标变化相对降水而言均呈次要作用。AMO可能通过大气环流与水汽输送,直接影响降水的形成,并对极端降水指标起关键作用。AO与AMO均对潜在蒸散发影响显著,且前者通过了 $P<0.05$ 的显著性检验(见表4-表5)。同时,二者通过影响能量与动力条件,直接调控潜在蒸散发的变化,从而控制了水分循环的“耗水端”,即从水循环过程来看,降水是极端降水的直接物质来源,而潜在蒸散发则构成了间接耗水背景,后者需经多环节转化且易受干扰,因此其对极端降水的最终影响弱于前者。综上,建议采取以下措施应对极端降水事件:(1)加固上游水库、提升调蓄能力;(2)在太行山区建设坡面截水沟和鱼鳞坑,以减轻地形导致的山洪风险;(3)恢复流域内湿地与植被,增强水土保持功能;(4)完善跨区域协同防控机制,推进京津冀极端降水联防联控体系建设。

3 结论

本文以滹沱河流域为例,采用Mann-Kendall趋势检验、累积距平检验、反距离权重插值、偏相关分析等方法,综合辨识了极端降水时空动态演变趋势性和突变性特征,定量解析了极端降水事件的直接和间接驱动力。得到的重要结论如下:

1)时程上,多数极端降水指标于20世纪90年代中后期达到最大值,在20世纪90年代左右达到最小值,且其突变年份集中分布于20世纪80年代和21世纪初;空间上,极端降水指标存在明显的地带性分布特征,且整体呈现出东高西低的空间分布格局,持续性指数CDD高值区(>43 天)主要集中分布于安平、井陉一带,且自邢台、灵丘向东递增,揭示了东部干旱持续日数更长,干旱风险更加严峻。

2)滹沱河流域年平均降水对极端降水指标的直接影响高达100%,且流域降水量递增;同时,直接影响极端降水的主导本地气象因子为降水,遥相关因子的直接影响中AMO的贡献比重高达60%、ONI占比为20%、AO与NAO占比均为10%;此外,遥相关因子也可通过影响本地气象因子而间接影响极端降水,其占主导作用的为AO和AMO。

3)本文很好的揭示了大气环流因子对流域极端降水的影响,限于篇幅,未来将通过耦合

Mann-Kendall和R/S方法进一步预测未来极端气候因子的趋势变化特征,以期能为流域防洪减灾提供(指标)支撑。

参考文献

- [1] EASTERLING D R, MEEHL G A, PARMESAN C, et al. Climate extremes: observations, modeling, and impacts[J]. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [2] 袁宇峰, 廖圳, 周佰铨, 等. 全球气候变暖加剧背景下中国高影响区域性极端事件及归因研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2025, 21(1): 44-55. [YUAN Y F, LIAO Z, ZHOU B Q, et al. Research progress on high-impact regional extreme events and attribution in China under the background of global warming[J]. *Research Progress on Climate Change*, 2025, 21(1): 44-55.]
- [3] 齐庆华. 中国东部降水的极端特性及其气候特征分析[J]. *热带气象学报*, 2019, 35(6): 742-755. [QI Q H. Extreme characteristics and climatic characteristics of precipitation in eastern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2019, 35(6): 742-755.]
- [4] DENG P X, ZHANG M Y, HU Q F, et al. Pattern of spatio-temporal variability of extreme precipitation and flood-waterlogging process in Hanjiang River basin[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 276: 106258.
- [5] ZHE Y, YANG Z Y, YAN D H, et al. Historical changes and future projection of extreme precipitation in China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2017, 127(1): 393-407.
- [6] GU X Z, YE L, XIN Q, et al. Extreme Precipitation in China: A Review on Statistical Methods and Applications[J]. *Advances in Water Resources*, 2022, 163: 104144.
- [7] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961~2018年海河流域极端降水时空演变特征[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(12): 1-6. [LIU H Y, ZOU L, XING W L. Temporal and spatial evolution characteristics of extreme precipitation in Haihe River Basin from 1961 to 2018[J]. *Hydroelectric Energy Science*, 2021, 39(12): 1-6.]
- [8] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J]. *地理学报*, 2009, 64(9): 1083-1092. [CHU J T, XIA J, XU C L, et al. Comparative analysis of meteorological and hydrological precipitation data and spatiotemporal variation in Haihe River Basin[J]. *Geographical Journal*, 2009, 64(9): 1083-1092.]

- [9] 李佳,黄领梅,申奥,等.海河流域极端降水时空演变特征及未来趋势分析[J].人民珠江,2025,1-12.[LI J,HUANG L M,SHEN A,et al.Temporal and spatial evolution characteristics and future trend analysis of extreme precipitation in the Haihe River Basin[J].People's Pearl River,2025,1-12.]
- [10] SHI P F,YANG T,XU C Y,et al.How do the multiple large-scale climate oscillations trigger extreme precipitation?[J].Global and Planetary Change,2017,157:48-58.
- [11] CLARKE B,OTTO F,STUART-SMITH R,et al.Extreme weather impacts of climate change:an attribution perspective[J].Environmental Research:Climate,2022,1(1):012001.
- [12] DONG S Y,SUN Y,ZHANG X B.Attributing observed increase in extreme precipitation in China to human influence[J].Environmental Research Letters,2022,17(9):095005.
- [13] KANG X P,MIN R Y,DAI J,et al.The role of teleconnection in the occurrence probability of extreme precipitation over China based on extreme value theory[J].Frontiers in Environmental Science,2022,10:1013636.
- [14] 马梦阳,韩宇平,王庆明,等.海河流域极端降水时空变化规律及其与大气环流的关系[J].水电能源科学,2019,37(6):1-4,74.[MA M Y,HAN Y P,WANG Q M,et al.Temporal and spatial variation of extreme precipitation in Haihe River Basin and its relationship with atmospheric circulation[J].Hydropower Energy Science,2019,37(6):1-4,74.]
- [15] 邹磊,夏军,张印,等.海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J].水资源保护,2021,37(1):53-60.[ZOU L,XIA J,ZHANG Y,et al.Spatio-temporal evolution characteristics and driving forces of precipitation in Haihe River Basin[J].Water Resources Protection,2021,37(1):53-60.]
- [16] DUAN R X,ZHONG L H,HUANG G,et al.Quantitative analysis of the sensitivity and spatial stratified heterogeneity of extreme precipitation across river basins[J].Journal of Hydrology,2024,643:131939.
- [17] 范志宣,赵海燕,任玉欢,等.华北“23·7”强降水对滦河流域的影响评估[J].气候与环境研究,2024,29(4):457-464.[FAN Z X,ZHAO H Y,REN Y H,et al.Impact assessment of North China “23·7” heavy rainfall on the Hutuo River Basin [J].Climatic and Environmental Research,2024,29(4):457-464.]
- [18] 高峥,刘赛艳,解阳阳,等.不同季节潜在蒸散发变化的不确定性特征[J].地理学报,2025,80(7):1757-1770.[GAO Z,LIU S Y,JIE Y Y,et al.The uncertainty characteristics of potential evapotranspiration in different seasons[J].Geographical Journal,2025,80(7):1757-1770.]
- [19] 陈娜,曹震,崔豪,等.三峡库区降水特征及其与大气环流因子的潜在联系[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(6):1-9.[CHEN N,CAO Z,CUI H,et al.Precipitation characteristics in the Three Gorges Reservoir area and its potential relationship with atmospheric circulation factors[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2022,43(6):1-9.]
- [20] 曾春芬,陈钰婕,杨奇,等.长江上游重庆段近20a降水时空变化特征[J].地球环境学报,2024,15(2):342-356.[ZENG C F,CHEN Y J,YANG Q,et al.The temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Chongqing section of the upper reaches of the Yangtze River in the past 20 years[J].Journal of Earth Environment,2024,15(2):342-356.]
- [21] 张昕晗,赵文婷,焦菊英,等.1960—2023年黄土高原极端降水事件时空演变特征[J].干旱区地理,2024:1-18.[ZHANG X H,ZHAO W T,JIAO J Y,et al.Spatial and temporal evolution characteristics of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1960 to 2023[J].Geography of Arid Areas,2024:1-18.]
- [22] 刘福平,杨晨,刘颖.四川省近60年降水时空演变规律[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(2):16-23.[LIU F P,YANG C,LIU Y.Spatio-temporal evolution of precipitation in Sichuan Province in recent 60 years[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2023,44(2):16-23.]
- [23] 刘彦宏,李泽霖,张磊,等.1961—2020年陕南地区极端降水的时空变化特征[J].西北林学院学报,2024,39(6):207-215.[LIU Y H,LI Z L,ZHANG L,et al.Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation in southern Shaanxi from 1961 to 2020[J].Journal of Northwest Forestry University,2024,39(6):207-215.]
- [24] 赵建民.多种插值方法在河北省降水量空间可视化中的应用比较[J].水利科技与经济,2025,31(1):79-83.[ZHAO J M.Comparison of application of various interpolation methods in spatial visualization of precipitation in Hebei Province[J].Water Conservancy Science and Technology and Economy,2025,31(1):79-83.]
- [25] 吴琛,王景才,林慧,等.淮河中上游流域极端气候变化特征及其对干旱的影响[J].水文,2022,42(04):68-75,82.[WU C,WANG J C,LIN H,et al.Characteristics of extreme clim

- ate change and its impact on drought in the middle and upper reaches of Huaihe River Basin [J].Hydrology,2022,42(4):68-75,82.]
- [26] 田晶,郭生练,王俊,等.汉江中下游干流水华关键环境因子识别及阈值分析[J].水资源保护,2022,38(5):196-203.[TIAN J, GUO S L, WANG J, et al. Identification and threshold analysis of key environmental factors of algal blooms in the middle and lower reaches of the Hanjiang River[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 196-203.]
- [27] SILVA R D, LAMB L C, BARBOSA M C. Universality, correlations, and rankings in the Brazilian universities national admission examinations[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 457: 295-306.
- [28] 杨梦娇,赵伟,詹琪琪,等.基于偏相关分析的2003—2020年青藏高原地表温度变化驱动因子量化研究[J].测绘学报, 2024, 53(5): 848-859. [YANG M J, ZHAO W, ZHAN Q Q, et al. Quantitative study on the driving factors of land surface temperature change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2003 to 2020 based on partial correlation analysis[J]. Surveying and Mapping, 2024, 53(5): 848-859.]
- [29] ROSS C A, ALI G, SPENCE C, et al. Comparison of event-specific rainfall-runoff responses and their controls in contrasting geographic areas[J]. Hydrological Processes, 2019, 33(14): 1961-1979.

Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics and Driving Forces of Extreme Precipitation in the Hutuo River Basin

AN Xin^{1,2,3}, LI Ziyang^{1,2}, ZHOU Shuai^{1,2}, ZHAO Jiayi^{1,2}, YAO Liyun⁴, TIAN Jiyang⁵

(1.College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2.Hebei Key Laboratory of Smart Water Conservancy, Handan 056038, China; 3.College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 4.Hebei Hydrological Survey and Research Center, Shijiazhuang 050031, China; 5.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: **【Objective】** Extreme precipitation is highly prone to triggering basin-wide flood disasters. Conducting research on the characteristics of extreme precipitation and its driving forces can provide theoretical support for responding to extreme events. **【Method】** Therefore, taking the Hutuo River Basin as a case study, this paper selected 10 extreme precipitation indices, 8 teleconnection factors, and 2 local meteorological factors. By applying methods such as the Mann-Kendall trend test, cumulative anomaly test, inverse distance weighting interpolation, and partial correlation analysis, it comprehensively identified the temporal and spatial dynamic evolution trends and abrupt changes in extreme precipitation and quantitatively analyzed their direct/indirect driving forces. **【Result】** Among the ten extreme precipitation indices, nine exhibited abrupt changes in the mid-to-late 1990s, while only the maximum precipitation index showed an abrupt change in the early 1980s. Spatially, the variations in most indices were characterized by a distinct east-high, west-low gradient, while a majority of meteorological stations recorded a significant increasing trend temporally. The principal meteorological factor directly governing extreme precipitation was identified as precipitation itself. Regarding the direct influences of teleconnection factors, the North Atlantic Oscillation constituted the most substantial contribution at 60%, followed by the Australian Nino Index (20%), with both the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation each accounting for 10%. Furthermore, teleconnection factors demonstrated capacity to indirectly modulate extreme precipitation through their effects on local meteorological factors, wherein the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation emerged as predominant regulators. **【Conclusion】** Teleconnection factors such as the North Atlantic Oscillation collectively dominate extreme precipitation changes in the Hutuo River Basin through both direct and indirect pathways. The findings from this study can provide critical guidance for the development of regional disaster prevention and mitigation strategies.

Keywords: Extreme precipitation; Temporal and spatial evolution; Local meteorological factors; Teleconnection factors; Hutuo River Basin