

引用格式: 贺山峰, 陈超冰, 李铮, 等. 黄河中上游极端降水特征及其对区域气候变化的敏感性[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 524–537. [He S F, Chen C B, Li Z, et al. Characteristics of extreme precipitation and its sensitivity to regional climate change in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 524–537.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.07

黄河中上游极端降水特征及其对区域气候变化的敏感性

贺山峰¹, 陈超冰¹, 李 铮¹, 冯爱青², 闫军辉³, 吴绍洪⁴

(1. 曲阜师范大学地理与旅游学院, 日照 276800; 2. 国家气候中心, 北京 100081;

3. 信阳师范大学地理科学学院, 信阳 464000; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:【目的】明晰气候变化背景下极端降水事件的区域性特征及变化趋势, 对于保障资源环境安全和防灾减灾具有重要意义。【方法】基于1961—2020年气象观测数据, 应用线性趋势、M-K检验、小波分析和相关分析等方法, 分前期(1961—1990年)和后期(1991—2020年)揭示了黄河中上游极端降水事件的时空分异特征及其对区域气候变化的敏感性。【结果】①除持续干旱日数连续减少, 其他极端降水指数均先下降后上升, 趋势反转主要发生在1990年代, 并且在后期, 日降水强度、极端降水量和暴雨日数的上升速率分别为0.43 mm/(d·10a)、13.98 mm/10a和0.06 d/10a, 趋势均达到显著水平($p < 0.05$)。②全时段内研究区西南部较为湿润、河套平原最为干旱, 极端强降水呈现东南多、西部少的空间格局。在后期, 黄河上游地区暖湿化趋势逐渐增强, 中游地区极端强降水的发生频率和强度显著增加。③近60年研究区年均气温上升约1.5℃, 升温速率逐渐加快, 年降水量先降后升且后期上升趋势达到极显著水平($p < 0.01$), 气候整体上从前期的暖干化向后期的暖湿化转变, 尤以黄河上游地区更为明显。极端降水事件变化与区域年均气温表现出较弱的线性对应关系, 但对年降水量变化具有较强的敏感性, 除持续干旱日数与年降水量呈弱负相关外, 其他极端降水指数与年降水量呈极显著的正相关关系。【结论】极端降水在前期和后期的变化趋势和幅度远大于全时段的变化。1990年代以来, 黄河上游暖湿化趋势明显, 中游地区极端强降水事件显著增加, 未来需重点关注极端降水可能引发的洪涝灾害。

关键词: 极端降水; 时空分异特征; 气候变化; 敏感性; Mann-Kendall检验; 小波分析; 黄河中上游

DOI: 10.18402/resci.2024.03.07

1 引言

极端天气气候事件频发给人类生命财产安全和经济社会可持续发展带来巨大威胁, 而当前全球面临的气候变化会改变极端事件的发生频率、强度、持续时间和影响范围^[1,2], 使得极端事件的时空特征更加复杂多变。IPCC第六次评估报告(AR6)以更多证据和更高信度指出, 气候变化已经影响全球各地的极端天气气候事件, 持续增温很可能会引发更加频繁和严重的极端事件^[3]。2022年6月, 生

态环境部等17部门联合发布的《国家适应气候变化战略2035》中强调, 未来一段时间全球变暖趋势仍将持续, 极端天气气候事件发生频次和强度预计将继续增加, 气候变化影响和风险的广度深度也会进一步扩大。

由极端降水导致的水旱灾害给人类生活 and 经济发展造成了严重的影响和损失。分析极端降水事件时空特征和演变规律, 以及极端降水事件与气候变化之间的关系越来越受到重视, 国内外学者开

收稿日期: 2023-10-18; 修订日期: 2024-01-11

基金项目: 山东省泰山学者青年专家计划项目(tsqn202103065); 中国科学院战略性先导专项(XDA19040304); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J068)。

作者简介: 贺山峰, 男, 山东日照人, 博士, 教授, 主要研究方向为环境演变与灾害风险。E-mail: heshanfeng@163.com

通讯作者: 吴绍洪, 男, 广东潮州人, 博士, 研究员, 主要研究方向为综合自然地理、气候变化影响与适应。E-mail: wush@igsnrr.ac.cn

2024年3月

展了大量相关研究^[4-8],但对于极端降水事件与气候变化之间的响应关系尚存在争议^[9,10]。理论上,数据资料和研究时段越长,分析结果愈加科学可信,但从长时间尺度准确估计全球降水对温度变化的敏感性还存在一定困难^[11]。全球变暖并非全球一直变暖或各地区一致变暖,不同时期、不同区域的增温幅度差异很大,同一区域、不同时间段的气温变化速率可能相差很大甚至变化趋势相反,而极端降水事件的变化也会随气温变化呈现时空分异性特征。因此,一方面需要分析全球气候变暖对大尺度极端降水格局的影响,另一方面也要在不同时空尺度上刻画极端降水对气温变化的差异化响应^[12]。中国是气候变化的敏感区,升温速率高于同期全球平均水平,年降水量总体呈增加趋势,但降水变化区域间差异明显^[13,14]。孙建奇等^[11]研究发现,中国地区降水和极端降水随冬季增温的增加幅度明显高于全球平均水平,且极端降水的增幅要高于非极端降水的增幅。并且在区域变化特征上,中国西北部、东部和华南地区极端降水发生率在年际尺度上呈显著上升趋势,在中部和东北部则呈显著下降趋势^[15,16]。IPCC AR6也指出,在区域尺度上强降水事件的发生频次整体随全球增暖幅度增加而加速增大,同时强降水事件的强度变化也与变暖幅度近乎成正向线性关系^[3,17]。因此,在区域尺度上分析极端降水事件的时空特征及其对气候变化的敏感性更为可行且更具有实际意义。

黄河流域是中华文明最主要的发源地,在中国生态安全建设和经济社会发展战略中具有重要地位^[18]。“黄河宁、天下平”,治理黄河历来是治国安邦的大事。然而近年来,黄河流域水患不断,尤其是2021年,河南省、陕西省、山西省和山东省接连发生严重的洪涝灾害,均由极端降水导致。中共中央、国务院2021年印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中指出:黄河流域最大的威胁是洪水…气候变化和极端天气引发超标准洪水的风险依然存在…要准确把握黄河流域气候变化演变趋势以及洪涝等灾害规律^[19]。相关研究表明,黄河流域年极端降水整体呈增加趋势,但存在着明显的区域差异^[20-23],同时流域的干湿变化倾向也存在较大的不确定性^[24-28],这可能是由于研究的空间尺度和时间尺度不同,无法确定干湿变化的空间范围和趋势变化的拐点,因此有必要应用更长时间序列的观

测数据精细化分析这种变化的时空特征及其与全球变暖的关系^[29]。此外,已有研究主要围绕黄河流域及其子流域极端降水事件的总体时序变化和空间差异进行分析,但多以研究期和研究区作为一个整体来开展分析,对于极端降水事件在研究期内更为详细的时空分异特征,以及极端降水在不同的研究时段和局地范围内对气候变化的敏感性分析却较为缺乏。

黄河中上游横跨青藏高原、内蒙古高原和黄土高原,地形地貌复杂多样,又受到东亚季风和高原季风的共同影响,气候条件具有一定的独特性,并且该区域对气候变化和极端事件影响具有高风险的脆弱性生态特征。伴随着全球气候变化,极端降水的复杂性和不稳定性在增加,黄河中上游地区极端降水对于气候变化响应的敏感性程度尚需进一步明确。因此,本文利用黄河中上游逐日气温和降水观测数据,分前后两个时段分析1961—2020年极端降水事件的时空变化特征,进而探讨不同时段内极端降水对区域气候变化的敏感性,以期为提高对该地区极端降水事件变化的认知,加强气候变化背景下水旱灾害的风险防范提供科学依据。

2 研究区概况、数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

黄河中上游地势西高东低,平均海拔2124 m,上游和中游地区多年平均气温分别为6.1、10.8℃,平均降水量分别为350.4、511.1 mm,大部分地区位于400 mm等降水量线以西以北,气候干旱少雨,且年内降水分配极不均衡,6—9月降水量约占全年的70%(图1)。黄河中上游拥有黄河天然生态廊道和三江源、祁连山、若尔盖、秦岭、贺兰山等多个高原生态功能区,肩负着重要的水土资源保持和生态屏障服务功能,在地理区位上对黄河下游及华中、华南地区影响很大,但同时该区域也是中国高风险的生态脆弱区^[30]和水土流失最严重的地区。黄河源头至内蒙古河口镇属黄河上游,位于中国西北地区东部,自然环境复杂,水资源短缺、生态本底差、资源环境承载能力弱。黄河中游是从河口镇至河南省桃花峪,大部分为黄土高原,沟壑纵横、支流众多、土壤抗蚀性差,是黄河流域的主要暴雨区和黄河下游洪水的主要来源区。

2.2 数据来源

长时间日降水序列可为研究气候变化下极端降

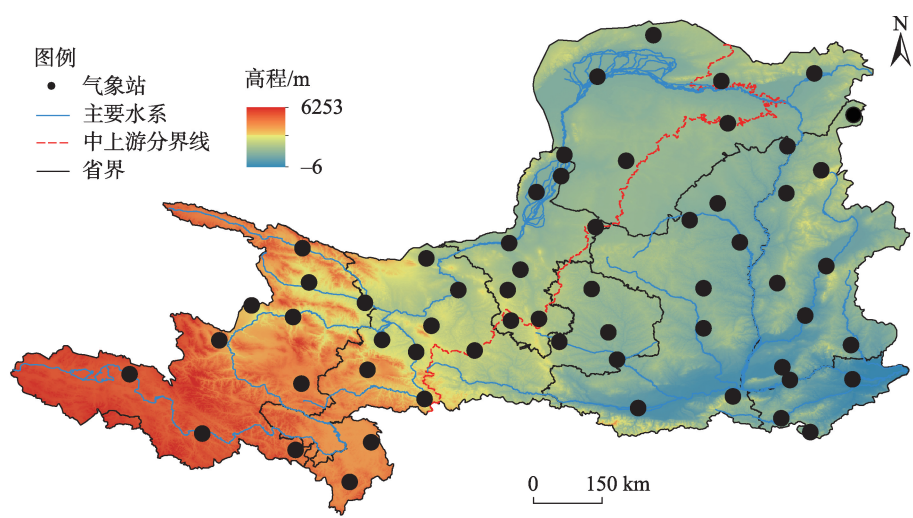


图1 黄河中上游气象站点分布图

Figure 1 Distribution of meteorological stations in the upper and middle Yellow River Basin

水事件变化提供更详细的信息。本文使用的气象观测数据为国家气象科学数据中心整理的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),该数据集经过了严格的质量控制和均一化订正处理,能够真实反映出气候自然变化趋势。共收集整理了黄河中上游地区108个气象站点1961—2020年期间的日平均气温和日降水数据,为保证气象观测资料的连续性以及数据分析结果在时间变化上对比的准确性,剔除迁站或累计缺测超过60天的站点,最终筛选出59个气象站。其中,黄河上游气象站点有30个,中游地区气象站点有29个,较为均匀地分布在研究区域(图1)。

DEM数据下载自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),流域图下载自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),黄河上、中游边界来源于国家冰冻圈沙漠数据中心(<http://www.ncdc.ac.cn>)。中国气候增暖主要始于20世纪80年代后期至90年

代^[31],为精细化对比分析极端降水和气象要素在不同时间尺度上的变化趋势和变化速率,同时根据国际气象组织(WMO)对标准气候平均值统计周期的规定,本文将1961—2020年进一步划等分为两个时段:1961—1990年(下文称“前期”)和1991—2020年(下文称“后期”)。

2.3 研究方法

2.3.1 极端降水指数定义

本文参考相关研究选取了5个由气候变化检测与指数专家组(ETCCDI)定义的极端降水指数^[32],同时考虑到致灾降水的强度和中国国情,增加了中国气象局规定的暴雨日数作为第6个极端降水指数,所选极端降水指数及定义见表1。其中,持续干旱日数和持续湿润日数属于持续时间类极端降水指数,用来反映研究区整体的干湿特征,而日降水强度、最大5日降水量、极端降水量和暴雨日数属于强度类极端降水指数,用于表征引发洪涝的强降水变化。

表1 极端降水指数定义

Table 1 Definition of extreme precipitation index

指数类型	极端降水指数名称	英文缩写	定义	单位
持续时间类	持续干旱日数	CDD	日降水量<1 mm的最长持续日数	d
	持续湿润日数	CWD	日降水量≥1 mm的最长持续日数	d
降水强度类	日降水强度	SDII	年总降水量/降水日数	mm/d
	最大5日降水量	R5	年内最大的连续5日降水总量	mm
	极端降水量	R95	年内日降水量>1961—1990年降水序列95%分位值的总降水量	mm
	暴雨日数	R50	年内日降水量≥50 mm的日数	d

2024年3月

2.3.2 趋势与突变分析

Mann-Kendall 检验法因其对异常值不敏感,常应用于气象数据连续时间序列的变化趋势检验和突变点分析^[33]。

(1) Mann-Kendall 趋势检验

对于长度为 n ($n=60/30/30$, 分别对应 1961—2020 年、1961—1990 年和 1991—2020 年) 的气象数据序列 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 的计算公式如下:

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

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), i < j \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数; S 表示定义检验统计量; 当 $n > 10$ 时, Z 表示趋势变化显著性的统计值。 Z 值的正、负分别表示时间序列呈上升、下降趋势, Z 的绝对值大于 1.96、2.58, 表示变化趋势分别达到 0.05、0.01 的显著和极显著水平。本文应用此方法检测气象指标在全时段、前期和后期的变化趋势是否显著。

(2) Mann-Kendall 突变检验

气象数据时间序列突变检验的计算公式如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (4)$$

$$E(S_k) = k \left(k - \frac{1}{4} \right) \quad (5)$$

$$\text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (6)$$

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (7)$$

式中: r_i 是由时间序列 x_i 构造的一秩序列, r_i 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的累积数; S_k 表示由秩序列 r_i 计算得到统计量; 当时间序列具有独立性时, $E(S_k)$ 和 $\text{Var}(S_k)$ 表示均值和方差; UF_k 表示由 S_k 标准化计算得的一条曲线; UB_k 表示将该方法用于反向样本序列计算得到的统计量, 构成另一条曲线, 绘制 UF_k 和 UB_k 曲线图。如果这两条曲线出现交点, 且交点介于临界线之间, 则交点对应的时刻即为突变开始时间。 $UF_k > 0$, 说明序列呈上升趋势, 反之呈下降趋势。统计量超出

临界值时, 表示趋势变化显著。本文应用此方法确定各气象指标在 1961—2020 年间的突变年份。

2.3.3 小波分析

小波分析是信号 $f(t)$ 与被缩放和平移的小波函数 $\varphi(t)$ 之积在信号存在的整个期间里求和的结果。本文利用 Morlet 小波变换系数的模、位相和实部分析黄河中上游近 60 年极端降水指数的周期特征, 采用公式 (8) 计算时间序列 $f(l\Delta t)$ ($l=1, 2, \dots, N$) 的小波变换, 运用 Morlet 小波公式 (9)^[34] 计算小波变换系数, 用公式 (10) 计算小波方差。

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t \sum_{l=1}^N f(l\Delta t) \cdot \bar{\varphi}\left(\frac{l\Delta t - b}{a}\right) \quad (8)$$

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \sum_{l=1}^N f(l) \cdot e^{mct} e^{-t^2/2} \quad (9)$$

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (10)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; $\text{Var}(a)$ 为时间域上关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分即为小波方差; $\bar{\varphi}$ 为 $\varphi(t)$ 为复共轭函数; a 为尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为时间因子, 反映时间平移; m 为虚数; N 为样本容量; t 为时间; Δt 为取样时间间隔; 常数 $c = 6.2$ 。

此外, 本文采用一元线性回归方程量化极端降水指数和基本气候要素的变化速率, 利用皮尔逊相关系数分析各极端降水指数与气候要素之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 极端降水事件时空分异特征

3.1.1 极端降水事件时间序列变化

对全时段、前期和后期黄河中上游地区极端降水指数的时序变化、趋势检验和周期变化的综合分析发现:

(1) 各极端降水指数在全时段趋势变化不大, 但在前期和后期的变化趋势及变化幅度差异却很大 (图 2)。在 1961—2020 年间, 黄河中上游、黄河上游和黄河中游各极端降水指数变化表现出高度一致性, 虽然在全时段无明显变化趋势, 但分前后两个时段对比来看却存在明显差异。具体而言, 持续干旱日数在前后两个时段均呈下降趋势, 其余 5 个指数在两个时段则都出现了变化趋势的反转, 即在前期呈下降趋势而在后期则呈上升趋势。其中, 日降水强度在前后两个时段的变化趋势差异最大, 其

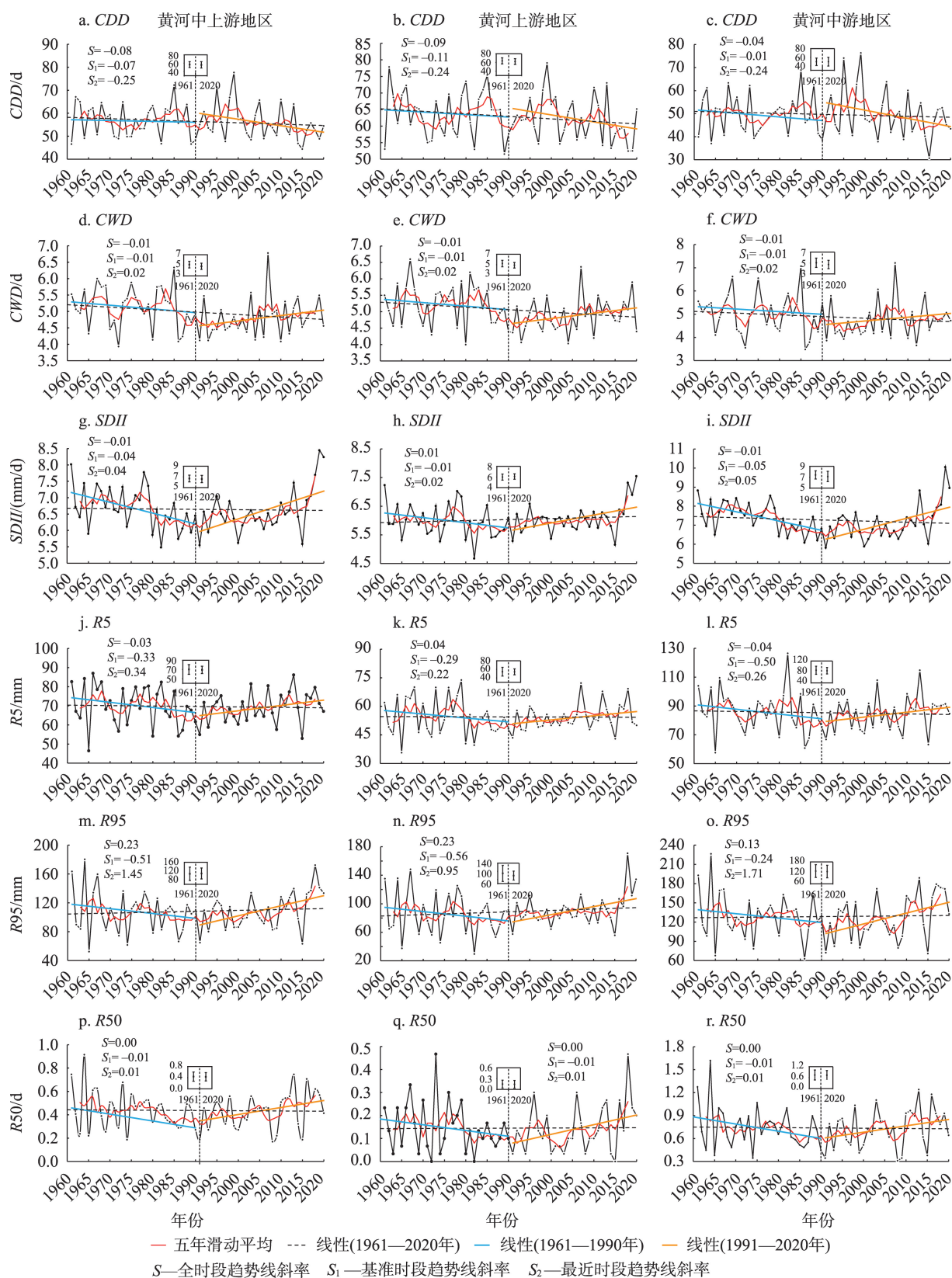


图2 1961—2020年黄河中上游极端降水指数时间序列变化

Figure 2 Temporal variation of extreme precipitation index in the upper and middle Yellow River Basin, 1961–2020

注:图中小框为前后两个时段各极端降水指数的均值和标准差。

2024年3月

在前期下降趋势达到极显著水平($p<0.01$),而在后期上升趋势显著($p<0.05$),极端降水量和暴雨日数在后期的上升趋势也都达到了显著水平。

(2)研究区干旱程度在全时段逐渐减弱,湿润程度有所增强,这种暖湿化趋势尤其在后期更加明显(图2a-2f)。作为2个可表征区域干湿程度的指标,持续干旱日数和持续湿润日数在前期同为下降趋势,下降速率分别为 $-0.38\text{ d}/10\text{a}$ 和 $-0.11\text{ d}/10\text{a}$,持续干旱日数比持续湿润日数减少更快一些,持续干旱日数更是在1972年和2009年发生了两次明显减少突变(表2)。在后期,持续干旱日数的下降速率进一步加快,而持续湿润日数则由前期的微弱下降转变为后期明显的上升趋势,且上游和中游地区持续湿润日数的增加速率基本相同。这表明在后期,伴随着区域增温黄河中上游地区正在加速暖湿化。

(3)后期黄河中上游地区极端强降水事件显著增多增强(图2g-2r)。在1961—2020年间,对于容易引发洪涝灾害的4个极端强降水指数,日降水强度、最大5日降水量、极端降水量和暴雨日数均呈现出先下降后上升的变化趋势。4个指数在后期的增加速率分别为 $0.43\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 、 $2.79\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $13.98\text{ mm}/10\text{a}$ 和 $0.06\text{ d}/10\text{a}$,其中日降水强度、极端降水量和暴雨日数的上升趋势达到了显著性水平,且最大5日降水量、极端降水量和暴雨日数在21世纪10年代都发生了增加突变(表2),并且日降水强度、最大5日降水量和极端降水量在黄河中游的增加速率均大于上游地区。可见在后期,研究区尤其是黄河中游地区,极端强降水事件的发生频率明显增加、强度明显增大,这也从致灾因子视角解释了近些年来黄河中下游频繁发生暴雨洪涝灾害的原因。

(4)极端降水指数周期变化特征明显(图3)。黄河中上游、黄河上游和黄河中游极端降水的周期变化具有同步性,除极端降水量在44a的特征时间尺度上以27a为第一主周期振荡外,其余极端降水指数在大于50a的特征时间尺度均存在着35~37a的第一主周期,各指数整个研究时段经历了少—多—少—多—少的循环交替,近3a大多处于由正值向负值的过渡期。不同的极端降水指数还有次要变化周期,在较小年代际尺度的周期振荡方面,随时间尺度减小,变化周期缩短、振荡强度变弱,极端降水量和暴雨日数在4a和12a特征时间尺度上存在较明显振荡,对应周期分别为3a和9a左右,而在8a特征时间尺度上,平均变化周期为6a左右,均贯穿整个研究时段。

3.1.2 极端降水事件空间格局及变化

利用ArcGIS分析3个时段黄河中上游地区极端降水指数的空间格局及其变化(图4),发现各极端降水指数呈现出明显的空间分异特征,具体表现为:

(1)研究区北部较干燥、南部较湿润(图4a、4d)。通过整个研究时段持续干旱日数和持续湿润日数来分析区域干湿程度可知,黄河中上游南部地区持续干旱日数少、持续湿润日数多,而北部刚好与之相反,这与研究区平均年降水量空间分布基本保持一致。位于黄河中上游西北部的河套地区最为干燥,是持续干旱日数的高值区和持续湿润日数的低值区,持续湿润日数的高值区集中位于研究区西南部青海、甘肃和四川三省交界处,而持续干旱日数的低值区面积更广,主要分布在黄河中上游南部。

(2)黄河中上游地区极端强降水总体上呈东部多西部少的格局(图4g、4j、4m、4p)。日降水强度超过 $8.0\text{ mm}/\text{d}$ 的高值区主要分布在河套地区东部,榆

表2 1961—2020年极端降水指数变化趋势的Mann-Kendall检验

Table 2 Mann-Kendall trend test of extreme precipitation index, 1961—2020

极端降水指数	1961—2020年		1961—1990年		1991—2020年		突变年份
	Z值	趋势	Z值	趋势	Z值	趋势	
持续干旱日数	-1.24	↓	-0.48	↓	-1.64	↓	1972、2009
持续湿润日数	-1.67	↓	-0.96	↓	1.66	↑	1962、1977
日降水强度	-0.84	↓	-2.64**	↓	2.57*	↑	1962
最大5日降水量	-0.34	↓	-1.39	↓	1.68	↑	1967、2012
极端降水量	1.05	↑	-0.79	↓	2.71**	↑	2016
暴雨日数	0.20	↑	-1.57	↓	2.12*	↑	2016

注: ↑表示上升趋势, ↓表示下降趋势; *、**分别表示通过置信度95%、99%的显著性检验。

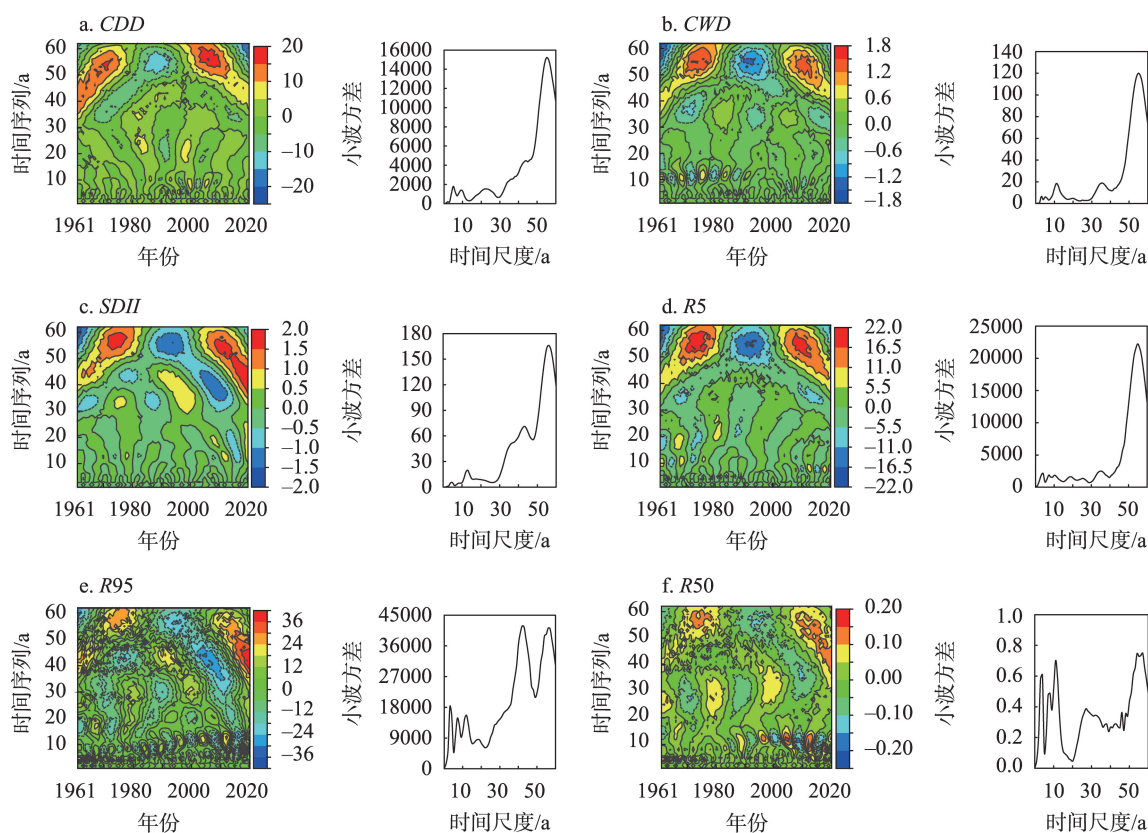


图3 1961—2020年极端降水指数的小波系数实部分布

Figure 3 Real part of wavelet coefficients and wavelet variance of extreme precipitation index, 1961–2020

林市南部和沁水及伊洛盆地,最大5日降水量、极端降水量和暴雨日数的高值区主要位于研究区的东南部,向西、向北逐渐降低,可见研究区东南部是暴雨洪涝相对高发的区域。值得注意的是,虽然研究区西南部三省交界处是黄河中上游最为湿润的地区(持续湿润日数高值区),但其极端强降水指数却不高,而且还是暴雨日数的低值区,说明这里全年的降水日数较多,降水强度却不大。

(3)对比前后两个时段,黄河中上游地区干湿变化空间分异明显(图4b、4c、4e、4f)。相对于前期,后期持续干旱日数大于80天的面积比例由3.3%增加到7.0%,集中分布在研究区西北部的银川—河套地区,同时小于45天面积比例亦由14.6%增加到19.5%,主要分布在黑河—白河流域、伊洛盆地和关中盆地及周边地区。持续湿润日数呈上升趋势的站点数量由前期的26个增加到后期的41个,其中显著增加的区域主要位于天桥泉域地区。

(4)后期研究区域尤其是黄河中游地区极端强降水整体上明显增加(图4h、4i、4k、4l、4n、4o、4q、

4r)。相比前期,日降水强度、最大5日降水量和极端降水量在后期整体表现出较为明显的增加趋势,尤其是位于黄河上游南部和中游地区的站点增加幅度更加显著。暴雨日数在鄂尔多斯东区黄土高原闭流区和渭北黄土高原区中部表现为较明显的增加趋势,在研究区东南部高值区面积则略有缩小。极端强降水时空分配不均态势的加剧,意味着未来黄河中上游地区发生洪涝及水土流失等灾害的风险在增大。

3.2 极端降水事件对区域气候变化的敏感性

温度和降水是表征气候变化最基本的要素,选取年均气温和年降水量两个指标来反映黄河中上游气候变化的基本情况,并进一步分时段、分区域探讨极端降水事件对研究区气候变化的敏感性。

3.2.1 研究区近60年气候变化概况

如图5a所示,1961—2020年间黄河中上游地区年均气温的平均值为7.5℃,最高值为2016年的8.9℃,最低值为1967年的6.2℃。研究区近10年(2011—2020年)年均气温较1961—1970年上升了

2024年3月

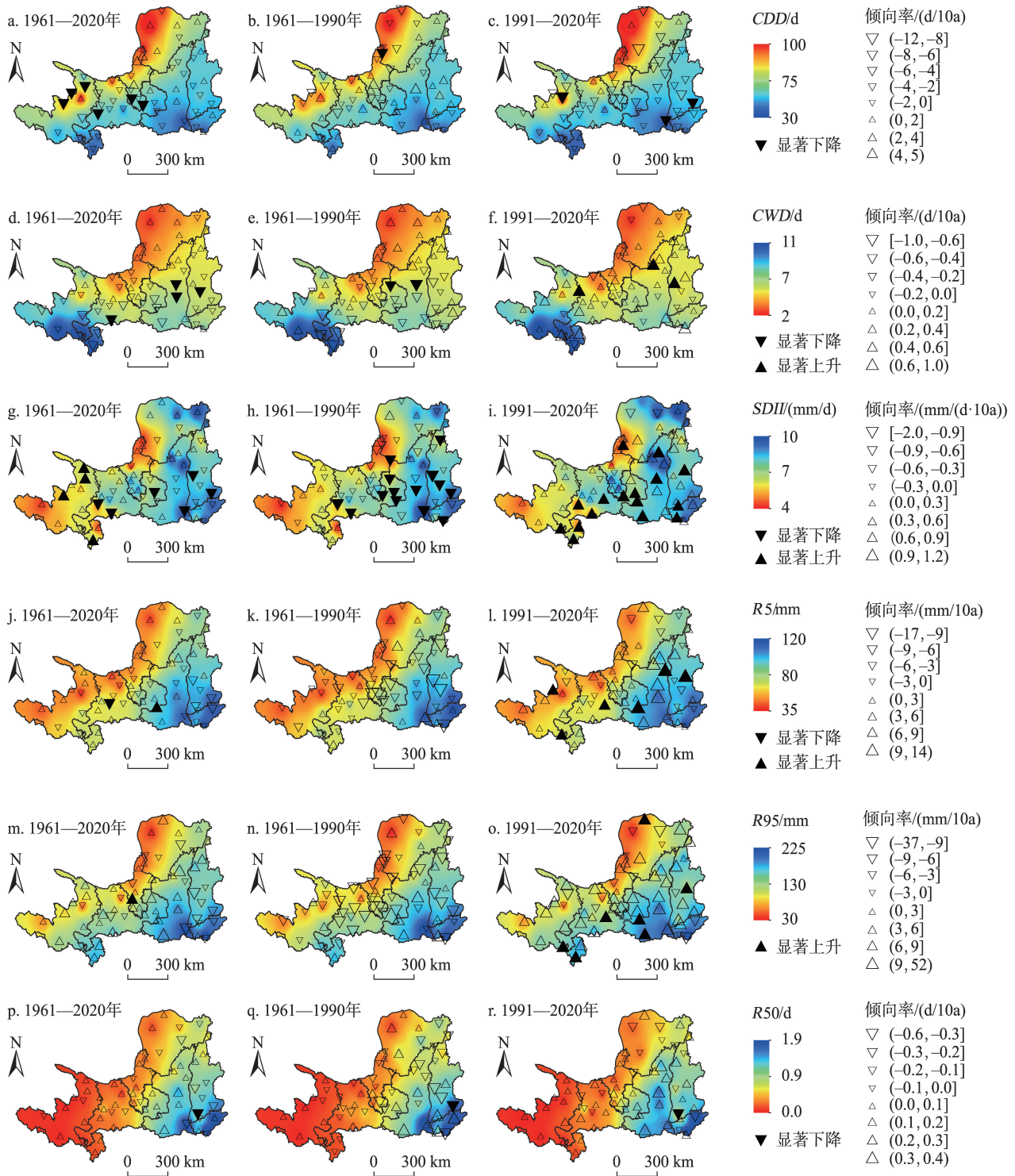


图4 1961—2020年黄河中上游极端降水指数空间格局变化

Figure 4 Spatial variation of extreme precipitation index in the upper and middle Yellow River Basin, 1961–2020

1.5 °C, 升温速率约为 0.33 °C/10a, 上升趋势显著。虽然年均气温在前后两个时段变化趋势均为上升, 但升温速率和显著性程度却存在差异。在前期黄河中上游地区升温较为平缓, 速率为 0.12 °C/10a, 未

通过显著性检验, 而在后期, 年均气温的升温速率增加到 0.38 °C/10a, 是前期的 3 倍多, 趋势达到了极显著水平, 表明黄河中上游地区气温上升在逐渐加快, 不同时间段上气候变暖速率存在着明显差异。

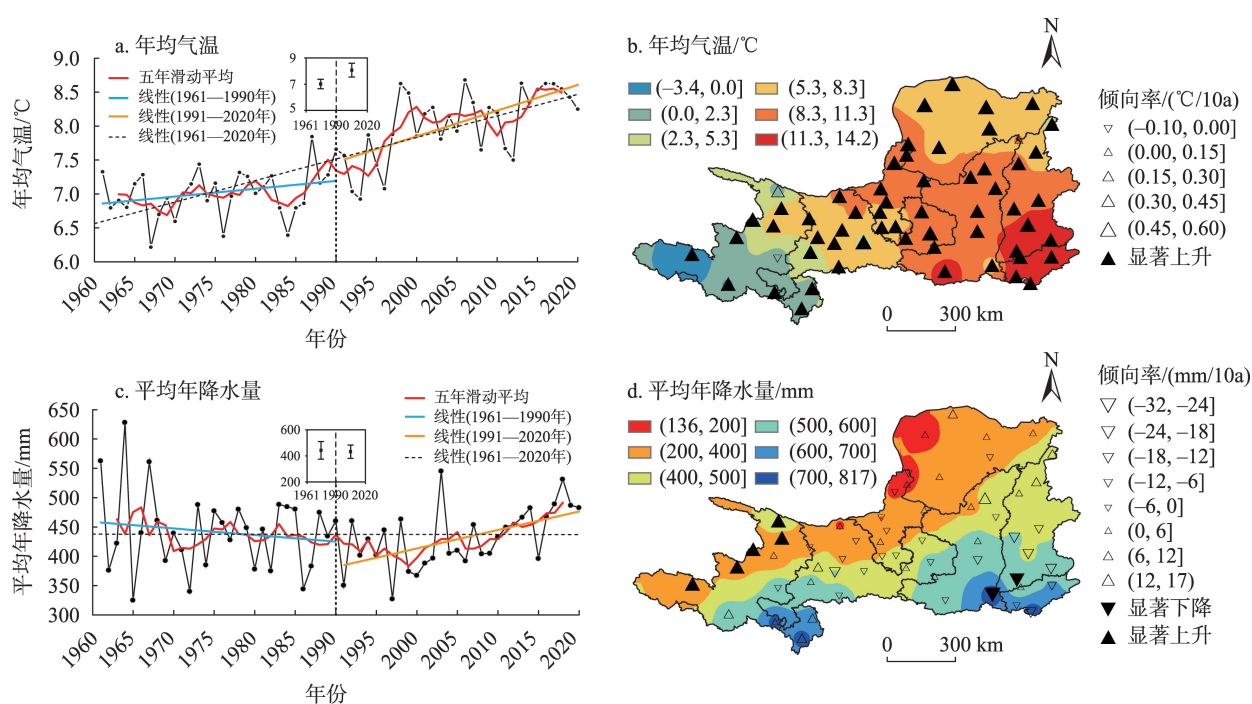


图5 1961—2020年黄河中上游地区年均气温和年降水量时空格局变化

Figure 5 Spatiotemporal variation of annual average temperature and annual precipitation in the upper and middle Yellow River Basin, 1961–2020

注:图中小框为前后两个时段年均气温的均值和标准差。

另外,受海拔和纬度的影响,黄河中上游地区的年均气温空间上主要呈现东南部较高、向西向北逐渐降低的格局(图5b),年均气温值在 $-3.4\sim 14.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。60年间黄河中上游地区有58个站点(98.3%)的年均气温是升高的,其中56个站点(94.9%)的升温趋势达到了显著性水平,仅有位于青海省的河南站年均气温微弱下降。前后两个时段对比发现,升温超过 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的区域主要位于鄂尔多斯高原中东部地区,而三门峡至花园口地区年均气温变化不大,这说明黄河中上游地区年均气温变化存在着时空分异。

与年均气温变化不同,黄河中上游地区平均年降水量在整个研究时段呈微弱上升趋势,总体上变化并不明显(图5c),区域多年降水量平均值为 437.3 mm ,最大值和最小值分别为1964年的 628.3 mm 和1965年的 325.1 mm ,可见降水量的年际间变化非常大。平均年降水量在前后两个时段变化趋势相反,在前期缓慢下降,后期则快速上升,速率分别是 $-11.25\text{ mm}/10\text{a}$ 和 $31.54\text{ mm}/10\text{a}$,并且在后期的上升趋势达到了极显著水平。在空间上,黄河中上游地区平均年降水量呈南部高、北部低的分布格局

(图5d)。近60年有30个站(50.8%)为上升趋势,其中5个站(8.5%)达到显著性水平,均位于黄河上游西段;有29个站(49.2%)为下降趋势,其中2个站(3.4%)达到显著性水平,集中分布于黄河中游南部。而在后期,年降水量呈上升趋势的站点数量增加到55个(93.2%),达到显著性水平为22个(37.3%)。相较前期,后期黄河中游三门峡地区平均年降水量有所减少,而上游地区主要表现为增加,其中龙羊峡以上流域年降水量增加达 50.0 mm 。由此可见,从整个研究期来看,黄河上游地区平均年降水量的增幅要高于黄河中游地区,在后期,伴随着升温速率加快,研究区年降水量整体快速增加。

3.2.2 极端降水指数与区域气候变化的相关性

如表3所示,不同极端降水指数在不同的时空范围上对于区域气候变化的敏感性程度有较大差异。从研究区整体来看,持续干旱日数在3个时段与年均气温和平均年降水量均呈负相关性。其他极端降水指数在全时段和前期与年均气温呈弱负相关性,未达到显著性程度,但在后期,这些极端降水指数与年均气温均转为正相关关系,且随着研究

2024年3月

表3 黄河中上游极端降水指数与年均气温和年降水量的相关性

Table 3 Correlation between extreme precipitation index and annual average temperature and annual precipitation in the upper and middle Yellow River Basin

区域	指数	全时段		前期		后期	
		年均气温	年降水量	年均气温	年降水量	年均气温	年降水量
黄河中上游	持续干旱日数	-0.10	-0.13	-0.22	-0.12	-0.01	-0.16
	持续湿润日数	-0.24	0.55**	-0.30	0.59**	0.11	0.50**
	日降水强度	-0.02	0.68**	-0.17	0.70**	0.30	0.68**
	最大5日降水量	-0.04	0.69**	-0.12	0.68**	0.12	0.72**
	极端降水量	-0.07	0.88**	-0.12	0.93**	0.24	0.82**
	暴雨日数	-0.08	0.72**	-0.02	0.76**	0.31	0.66**
黄河上游	持续干旱日数	-0.16	-0.19	-0.26	-0.15	-0.01	-0.24
	持续湿润日数	-0.29*	0.47**	-0.36	0.57**	0.06	0.38*
	日降水强度	0.08	0.79**	-0.23	0.81**	0.21	0.77**
	最大5日降水量	-0.07	0.71**	-0.27	0.76**	0.08	0.63**
	极端降水量	0.06	0.91**	-0.27	0.94**	0.17	0.87**
	暴雨日数	-0.01	0.64**	-0.27	0.72**	0.20	0.55**
黄河中游	持续干旱日数	0.01	-0.15	-0.11	-0.08	0.08	-0.22
	持续湿润日数	-0.17	0.51**	-0.20	0.49**	0.10	0.50**
	日降水强度	-0.02	0.58**	0.06	0.57**	0.27	0.59**
	最大5日降水量	-0.01	0.61**	0.01	0.54**	0.09	0.72**
	极端降水量	0.03	0.83**	-0.01	0.89**	0.15	0.77**
	暴雨日数	0.09	0.69**	0.06	0.73**	0.22	0.65**

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

区升温速率的加快,相关系数的绝对值普遍有所增大。导致这种现象的原因可能是,对于中高纬度地区来说,年均气温上升只有积累到一定程度后,升温对降水(包括极端降水)的增强效应才开始显现,同时这也说明了气温对降水的影响并非简单的线性关系。强度类极端降水指数对年降水量变化的敏感性程度明显高于持续时间类指数,而持续时间类极端降水指数中,持续湿润日数对年降水量的敏感性程度又明显高于持续干旱日数。除持续干旱日数外,其他极端降水指数在各个时段与平均年降水量均具有正相关关系,且相关性都达到了极显著水平,按相关系数大小排序依次为极端降水量>暴雨日数>最大5日降水量>日降水强度>持续湿润日数,其中极端降水量在各时段与平均年降水量的相关系数最高,均超过了0.80。可见,极端降水指数与年降水量具有良好的相关性,极端降水的增加(减少)可以较好地反映年降水量的增加(减少)。

分区域来看,仅黄河上游地区的持续湿润日数与气温的相关性在全时段达到显著水平,其与年均

气温变化呈负相关关系。同时我们发现在前期,黄河上游各极端降水指数与年均气温和年降水量相关系数的绝对值普遍大于中游地区,说明上游地区极端降水事件对区域气候变化更为敏感。这主要是由于黄河上游的高大地形对东亚季风具有阻隔作用,使得上游地区极端降水变化较中游地区更容易受局地升温的影响。中游地区日降水强度、最大5日降水量和暴雨日数等极端强降水指数在前后两个时段与年均气温变化趋势一致性较强,且在后期随着升温速率加快,相关系数也在增大,这在一定程度上验证了强降水事件的发生频率和强度随变暖幅度加快,整体成线性增大的关系。

综上分析可知,对于气温和降水量这两个气候基本要素,黄河中上游各极端降水指数对平均年降水量的敏感性程度更强。相关系数大小和显著性结果表明,极端降水事件尤其是极端强降水事件与年降水量的变化趋势表现出高度一致性,未来逐渐变湿的气候条件,将加剧黄河中上游地区极端强降水事件的发生。

4 讨论与结论

4.1 讨论

近些年来,对于西北地区的暖湿问题被广泛讨论^[29,35,36]。作为对全球气候变化响应最为敏感的区域之一,黄河中上游地区的升温速率($0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)要高于全球和中国的平均水平^[37],年降水量变化率则低于中国平均水平,这与肖风劲等^[38]的研究结论相同。本文发现,从全时段来看,整个研究区整体的极端降水和平均年降水量均呈微弱的年际变化趋势,其中黄河上游地区平均年降水量总体以增加为主,中游地区则有一定程度减少,呈现出“上游湿、中游干”的变化格局,这与《第三次气候变化国家评估报告》结论较为一致^[31]。考虑到快速增温带来的蒸发量加大,上游地区的变湿程度会被大大削弱。但如果分前后时段来看,黄河中上游地区平均年降水量先降后升,转折点始于1990年左右,在后期研究区年降水量显著增加,这也验证了施雅风等对于西北地区由暖干向暖湿转型变化的判断^[39],趋势反转前后极端降水和年降水量的年际间和年代际周期振荡幅度远超全时段的变化幅度。可见,伴随区域气温升高,降水具有明显的时空变化特征,我们不仅要关注降水的长期趋势,还要考虑降水在时间和空间上的微观变化。

极端天气事件因其高影响性和高致灾性,一直是气候变化研究和关注的重点^[40,41]。在气候变暖背景下,温度升高对水循环的影响除体现年降水量变化外,还体现在对水循环的强度和频率方面,水循环在时空尺度上具有更强的非均匀性^[42],因此极端降水反映气候变化的一个敏感因子,而极端降水对区域气候变化的敏感性则更为复杂。有研究表明,中纬度部分地区在气温相对较低时,极端降水会随气温升高而增加,而当气温高于一定数值时则又表现出下降趋势^[43-45]。本文发现黄河中上游极端降水变化却表现出相反规律,即在前期,当研究区升温不显著且年均气温低于 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,年降水量和极端降水随着气温变化主要表现为下降趋势,但在后期,随着升温趋势显著,研究区年均气温高于 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,年降水量和极端降水显著增加。可见,气温对极端降水的影响并非瞬时响应,而存在一定的能量累积和发展的过程。气候变暖过程对区域极端降水事件变化的作用非常复杂,并非简单的线性

关系,升温对极端降水事件的具体影响机制目前尚不明确,有待进一步深入研究。此外,黄河中上游地区后期极端强降水事件趋多趋强,特别是中游地区面临着较为严重的洪旱灾害风险的双重威胁,未来需加强黄河中下游极端降水相关灾害的预防与应对研究。

需要指出的是,本文仅从年均气温和年降水量两个要素分析了不同极端降水事件对于区域气候变化的敏感性程度,存在一定的局限性。此外,极端降水事件变化的归因以及气候变化对极端降水的影响机理研究还有待深入,未来可从人类活动、大气环流等角度进一步揭示其对极端降水事件的影响。

4.2 结论

开展气候变化背景下黄河流域极端降水研究,是加强该地区水土保持和生态治理、保障黄河长治久安的前提,也是防范和化解该区域生态和经济社会安全风险的现实需要。本文基于1961—2020年气象观测资料,分前后两个时段分析了黄河中上游极端降水事件的变化特征及其对区域气候变化的敏感性。得出以下主要结论:

(1)1961—2020年,除持续干旱日数呈持续下降趋势外,其他极端降水指数均为先下降后上升。黄河中上游整体上干旱程度有所减弱,尤其是在后期随区域增温加速暖湿化,极端降水事件快速增多增强,日降水强度、极端降水量和暴雨日数等强降水指数增加速率分别为 $0.43\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 、 $13.98\text{ mm}/10\text{a}$ 和 $0.06\text{ d}/10\text{a}$,上升趋势均达到了显著水平。各极端降水指数存在着明显的周期性变化,极端降水量主要以27a为主周期振荡,其他极端降水指数第一主周期约为35~37a,极端降水量和暴雨日数分别存在3a、9a次要周期和6a的共同周期振荡。

(2)从极端降水空间格局上看,河套地区最为干燥,川、甘、青三省交界处的持续湿润日数值最高,极端强降水事件总体呈东部多西部少的分布格局。在后期,黄河上游地区暖湿化明显增强,上游南部和中游地区极端强降水事件显著增加,极端降水事件时空分配不均态势整体有所加剧。

(3)黄河中上游地区年均气温持续显著上升,平均年降水量时空分异特征明显,在前期有所下降,而后期的上升趋势达到极显著水平。不同极端

2024年3月

降水事件对于区域气候变化的敏感性有所差异,各极端降水指数(除持续干旱日数)与平均年降水量呈显著的正相关关系,而与年均气温的相关性则较弱,仅全时段黄河上游的持续湿润日数对升温呈显著负相关,极端强降水指数对年降水量变化具有更高的敏感性。

参考文献(References):

- [1] IPCC SREX. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation[M]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [2] 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Qin D H, Zhang J Y, Shan C C, et al. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disaster[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [3] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press (In Press), 2021.
- [4] Lenderink G, Meijgaard E V. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes[J]. Nature Geoscience, 2008, 1: 511–514.
- [5] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes[J]. Nature Climate Change, 2012, DOI: 10.1038/NCLIMATE1452.
- [6] Sun S, Shi P J, Zhang Q, et al. Evolution of future precipitation extremes: Viewpoint of climate change classification[J]. International Journal of Climatology, 2022, DOI: 10.1002/joc.7298.
- [7] Jiang Y Y, Zhu Z W, Li J, et al. Changes of mean and extreme precipitation and their relationship in Northern Hemisphere land monsoon domain under global warming[J]. International Journal of Climatology, 2023, DOI: 10.1002/joc.8159.
- [8] 吕锦心, 刘昌明, 梁康, 等. 基于水资源分区的黄河流域极端降水时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 261–273. [Lv J X, Liu C M, Liang K, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation in the Yellow River Basin based on water resources regionalization[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 261–273.]
- [9] Lambert F H, Stine A R, Krakauer N Y, et al. How much will precipitation increase with global warming?[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(21): 193–194.
- [10] Salzmann M. Global warming without global mean precipitation increase?[J]. Science Advances, 2016, DOI: 10.1126/sciadv.1501572.
- [11] 孙建奇, 敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 674–679. [Sun J Q, Ao J. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 674–679.]
- [12] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165–174. [Kong F, Shi P J, Fang J, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 165–174.]
- [13] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2022. [The Committee of the Fourth National Assessment Report on Climate Change. The Fourth National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2022.]
- [14] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2022)[M]. 北京: 科学出版社, 2022. [Climate Change Center, China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2022[M]. Beijing: Science Press, 2022.]
- [15] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 718–730. [Gu X H, Zhang Q, Kong D D. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 718–730.]
- [16] Zhang A, Zhao X Y. Changes of precipitation pattern in China: 1961–2010[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 148: 1005–1019.
- [17] 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. [Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713–718.]
- [18] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431–2436. [Lu D D, Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431–2436.]
- [19] 中共中央、国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[N]. 人民日报, 2021–10–9(1). [The Communist Party of China Central Committee and the State Council. Outline of the Yellow River Basin's ecological protection and high-quality development plan[N]. People's Daily, 2021–10–9 (1).]
- [20] 贺振, 贺俊平. 1960年至2012年黄河流域极端降水时空变化[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 490–501. [He Z, He J P. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in the Yellow River Basin from 1960 to 2012[J]. Resources Science, 2014, 36(3): 490–501.]
- [21] Gao T, Wang H L. Trends in precipitation extremes over the Yellow River Basin in North China: Changing properties and causes[J]. Hydrological Processes, 2017, DOI: 10.1002/hyp.11192.
- [22] Zhao Y, Xu X D, Huang W B, et al. Trends in observed mean and extreme precipitation within the Yellow River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, DOI: 10.1007/s00704-018-2568-4.
- [23] 慎璐璐, 杨艳芬, 吴晶, 等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 231–242. [Shen L L, Yang Y

- F, Wu J, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 231–242.]
- [24] She D X, Xia J, Song J Y, et al. Spatio-temporal variation and statistical characteristic of extreme dry spell in Yellow River Basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112: 201–213.
- [25] 刘宇峰, 原志华, 李文正, 等. 1961–2013年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析[J]. 地理研究, 2014, 36(2): 345–360. [Liu Y F, Yuan Z H, Li W Z, et al. Extreme and persistent analysis of drought–flood variation in the Loess Plateau during 1961–2013[J]. Geographical Research, 2014, 36(2): 345–360.]
- [26] Zhang Y, Xia J, She D X. Spatiotemporal variation and statistical characteristic of extreme precipitation in the middle reaches of the Yellow River Basin during 1960–2013[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 135(15): 1–18.
- [27] 张卓群, 冯冬发, 侯宇恒. 基于 Copula 函数的黄河流域干旱特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(1): 66–72. [Zhang Z Q, Feng D F, Hou Y H. Study on drought characteristics in Yellow River Basin based on Copula function[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(1): 66–72.]
- [28] 周旗, 张海宁, 任源鑫. 1961–2016年渭河流域极端降水事件研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 833–841. [Zhou Q, Zhang H N, Ren Y X. Extreme precipitation events in the Weihe River Basin from 1961 to 2016[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(5): 833–841.]
- [29] 丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2023, 38(6): 551–562. [Ding Y H, Liu Y J, Xu Y, et al. Regional responses to global climate change: Progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming–wetting in Northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(6): 551–562.]
- [30] 李恩平. 生态文明开辟黄河中上游流域经济地理新空间[J]. 中国发展观察, 2020, (Z8): 17–18. [Li E P. Ecological civilization opens up new space of economic geography in the upper and middle Yellow River Basin[J]. China Development Observation, 2020, (Z8): 17–18.]
- [31] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [The Committee of the Third National Assessment Report on Climate Change. The Third National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [32] Peterson T C, Manton M J. Monitoring changes in climate extremes: A tale of international collaboration[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, DOI: 10.1175/2008BAMS2501.1.
- [33] 黄嘉佑, 李庆祥. 气象数据统计分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015. [Huang J Y, Li Q X. Statistical Analysis Method of Meteorological Data[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015.]
- [34] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002, (4): 515–520. [Wang W S, Ding J, Xiang H L. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology[J]. Advances in Water Science, 2002, (4): 515–520.]
- [35] 李明, 孙洪泉, 苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180–1194. [Li M, Sun H Q, Su Z C. Research progress in dry/wet climate variation in Northwest China[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1180–1194.]
- [36] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980–989. [Wang C H, Zhang S N, Zhang F M, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980–989.]
- [37] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2021. [Climate Change Center, China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2021[M]. Beijing: Science Press, 2021.]
- [38] 肖风劲, 徐雨晴, 黄大鹏, 等. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 10–14. [Xiao F J, Xu Y Q, Huang D P, et al. Impact of climate change on ecological security of the Yellow River Basin and its adaptation countermeasures[J]. Yellow River, 2021, 43(1): 10–14.]
- [39] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, (3): 219–226. [Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm–dry to warm–humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, (3): 219–226.]
- [40] Newman R, Noy I. The global costs of extreme weather that are attributable to climate change[J]. Nature Communications, 2023, DOI:10.1038/s41467-023-41888-1.
- [41] 孙钰衡, 张辰光, 刘翼泽, 等. 1970–2019年河南省气温变化特征及其对 ENSO 事件的响应[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(4): 528–534. [Sun Y H, Zhang C G, Liu Y Z, et al. Characteristics of temperature change and its response to ENSO events in Henan Province during 1970–2019[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(4): 528–534.]
- [42] Madakumbura G D, Thackeray C W, Norris J, et al. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets[J]. Nature Communications, 2021, DOI:10.1038/s41467-021-24262-x.
- [43] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419: 224–232.
- [44] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. Science, 2008, 321(5895): 1481–1484.
- [45] Utsumi N, Seto S, Kanae S, et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation?[J]. Geophysical Research Letters, 2011, DOI: 10.1029/2011GL048426.

Characteristics of extreme precipitation and its sensitivity to regional climate change in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin

HE Shanfeng¹, CHEN Chaobing¹, LI Zheng¹, FENG Aiqing², YAN Junhui³, WU Shaohong⁴

(1. School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao 276800, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China; 3. College of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Clarifying the regional characteristics and variation trends of extreme precipitation events has great significance for ecological security and disaster mitigation under climate change. [Methods] Based on the observation data from 1961-2020, linear trend analysis, M-K test, Morlet wavelet analysis, and correlation analysis were used to analyze the spatiotemporal variation of extreme precipitation events and their sensitivity to climate change from previous period (1961-1990) and recent period (1991-2020) across the upper and middle Yellow River Basin. [Results] (1) Most extreme precipitation indices decreased first and then increased around the 1990s, except the continuously decreasing consecutive dry days (*CDD*). In the recent period, average daily rainfall intensity (*SDII*), rainfall on very wet days (*R95*), and rainstorm days (*R50*) significantly rose at 0.43 mm/(d·10a), 13.98 mm/10a, and 0.06 d/10a respectively ($p < 0.05$). (2) In the whole period, the southwestern part of the study region was relatively wet while the Yellow River bend area was the driest, and the extreme heavy precipitation presented more in the southeast and less in the west. In the recent period, the wetting trend in the upper Yellow River Basin gradually increased, and the frequency and intensity of extreme heavy precipitation in the middle Yellow River Basin increased significantly. (3) The average annual temperature in the upper and middle Yellow River Basin rose by about 1.5 °C with the acceleration of the warming rate during the past 60 years. The annual precipitation first decreased and then increased, and the upward trend in the recent period reached the extremely significant level ($p < 0.01$). The climate of the study region was transforming from warm-dry to warm-wet, especially in the upper part of the basin. Extreme precipitation was more sensitive to the annual precipitation amount than average temperature and had significant positive correlations, except for *CDD*. [Conclusion] The trends and magnitudes of variation of extreme precipitation events in the previous period and the recent period were much larger than that in the whole period. Since the 1990s, distinct warm-wet trend appeared in the upper reaches, while extreme heavy precipitation events increased significantly in the middle Yellow River Basin, requiring special attention to future floods.

Key words: extreme precipitation; spatiotemporal variations; climate change; sensitivity; Mann-Kendall test; wavelet analysis; the upper and middle reaches of the Yellow River Basin