

近 60 年山西省极端降水时空变化特征

董伯纲¹, 于 洋^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083)

摘要: 气候变化背景下,极端降水事件发生频率与强度的增加直接影响区域生态安全,分析极端降水时空变化特征对于区域风险评估具有重要意义。基于山西省 1960—2019 年 22 个气象站点的逐日降水数据,选取 12 个极端降水指数,采用线性趋势分析、Mann-Kendall 趋势检验与突变分析、Morlet 小波分析和反距离权重插值等方法,对山西省近 60 年极端降水的时空变化特征进行研究。结果表明:(1)山西省整体呈干旱化趋势,降雨日数(R1MM)下降趋势显著;(2)部分极端降水指数在 20 世纪 70 年代前后发生突变,突变后呈显著下降趋势;(3)极端降水变化存在约 17 年的主要周期,部分极端降水指数还存在 7~8,4~5 年的周期变化;(4)山西省西南部整体呈干旱化趋势,西北部极端降水事件趋于增加。研究结果将为山西省极端降水事件的响应对策实施提供依据。

关键词: 极端降水事件; 极端降水指数; 山西省; 时空变化特征

中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0135-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.019

Tempo-spatial Variation Characteristics of Extreme Precipitation in Shanxi Province in Recent 60 Years

DONG Bogang¹, YU Yang^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Under the background of climate change, the increase of the frequency and intensity of extreme precipitation events directly affects regional ecological security. Analyzing the tempo-spatial variation characteristics of extreme precipitation is of great significance for regional risk assessment. Based on the daily precipitation data of 22 meteorological stations in Shanxi Province from 1960 to 2019, 12 extreme precipitation indices were selected, the tempo-spatial variation characteristics of extreme precipitation in Shanxi Province during past 60 years were studied by using the methods of linear trend analysis, Mann-Kendall trend test, mutation analysis, Morlet wavelet analysis and Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation. The results showed that: (1) A trend of drought was detected in Shanxi Province, and the number of rainfall days (R1MM) exhibited a significant downward trend. (2) Some extreme precipitation indices experienced a mutation around the 1970s, meanwhile, a significantly downward trend was detected after the mutation. (3) The variation of extreme precipitation had the main cycle of about 17 years, some indices had periodic changes around 7~8 years or 4~5 years. (4) The southwestern part of Shanxi Province showed a trend of drought, while the extreme precipitation events in northwestern part showed an increasing trend. The results of this study provided references for the implementation of countermeasures in response to extreme precipitation events in Shanxi Province.

Keywords: extreme precipitation events; extreme precipitation index; Shanxi Province; tempo-spatial variation characteristics

受全球气候变化影响,全球和区域尺度水循环日益加剧^[1],极端降水事件的发生频率与强度显著增加,影响范围更加广泛^[2-3]。极端降水事件会引发干旱、洪涝、山洪、泥石流等自然灾害,对人类社会和经济的发展产生严重影响与威胁^[4],目前极端降水的时空变化特征已成为气候变化相关研究中的热点问题^[5]。

收稿日期:2021-08-06
资助项目:中央高校基本科研业务费专项(2021ZY51);国家自然科学基金项目(42177310)
第一作者:董伯纲(1999—),男,硕士研究生,主要从事气候变化与生态系统服务研究。E-mail: zihuan181dbg@bjfu.edu.cn
通信作者:于洋(1985—),男,副教授,硕士生导师,主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail: theodoreyy@gmail.com

近年来我国极端降水事件整体趋强^[6],长期变化具有明显的区域性。国内学者以我国不同地区为研究对象,开展了从地域^[7]、流域^[8]到省域^[9]范围的多尺度研究,整体结果显示,西北和长江以南地区的极端降水事件趋于增加,而东北、华北和西南部分地区趋于减少^[10-11]。其中,大尺度范围的研究成果具有较高的相似性,但由于极端降水指标、降水资料类型、时间序列长度和研究方法的不同,小尺度区域极端降水变化特征的研究结论仍有一定差异性。

山西省是我国的农业大省,近年来气候呈现暖干化趋势^[12],降水减少趋势显著高于全国水平^[13],干旱发生概率有所上升^[14],对当地生产生活造成了一定影响^[15]。省内部分地区植被稀少,水土流失严重,生态环境脆弱^[16],对于极端气候事件较为敏感。已有部分学者以山西省作为研究范围对极端降水变化开展了研究。曹永旺等^[17]研究发现,山西省的降水强度(SDII)和持续干旱指数(CDD)有所增加,其显著变化发生在 20 世纪 70 年代;任健美等^[18]研究认为,极端降水日数有微弱下降趋势,而暴雨日数呈明显下降趋势;李智才等^[19]指出,汛期极端降水的特征和次数有所增加;王咏梅等^[20]研究表明,趋于减少的极端强降水事件存在年际气候振荡。上述研究大多采用降水资料的百分位阈值来确定极端降水指数,缺乏相对统一性,且针对极端降水时空变化的综合分析较少。为了能够全面了解山西省极端降水的时空变化特征,本文采用 12 个应用广泛的极端降水指数,基于山西省 22 个气象站点的降水日值数据,分析近 60 年来山西省极端降水的变化趋势、突变情况、周期波动以及趋势变化的空间差异,并探讨极端降水事件可能带来的风险,以期为当地应对干旱、洪涝等灾害以及合理开展农业生产活动提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省地处我国华北西部的黄土高原地区,全省面积约 $1.56\times10^5\text{ km}^2$ 。地势东北高、西南低,地貌以山地和丘陵为主,全省大部分地区海拔高于 1 500 m。气候类型属于温带大陆性季风气候,四季分明、雨热同期,全省各地年均气温 8~14 ℃,年均降水量 400~650 mm,降水主要集中在 6—8 月^[21]。受地形和海陆位置影响,山西省从西北部向东南部的气候类型主要由半干旱气候过渡到半湿润气候,是气候变化的敏感区域^[12]。

1.2 数据来源

研究使用数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)的地面日值观测数据集。根据资料连续性、完整性和最长时间段等原则,

剔除缺失数据较多的气象台站,最终选取了山西省 22 个气象站点 1960—2019 年的降水日值数据,站点分布见图 1。所有降水数据均使用 RCLimDex 软件进行了严格质量控制。

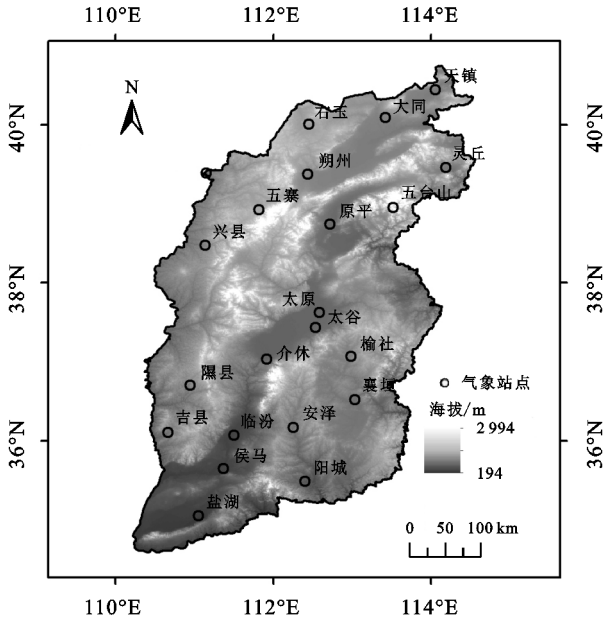


图 1 山西省气象站点空间分布

1.3 研究方法

极端降水指数选取世界气象组织(world meteorological organization, WMO)推荐的 12 个极端降水指数(表 1),这些指数能够反映极端降水在不同方面的特征,各站点的逐年极端降水指数值使用 RCLimDex 软件计算得出。采用线性趋势分析法^[8]和 Mann-Kendall(M-K)非参数检验法^[22]检测分析极端降水时间序列的变化趋势,采用 M-K 突变检验^[22]检测极端降水的突变情况,利用 Morlet 小波分析法检测极端降水的周期变化规律,基于反距离权重(inverse distance weighted, IDW)插值方法分析极端降水趋势变化的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 极端降水指数时间序列趋势分析

利用山西省 22 个气象站点的逐年极端降水指数均值建立极端降水指数时间序列,其多年均值及线性趋势分析结果见表 2。持续指数中,持续干日指数(CDD)整体呈上升趋势,持续湿日指数(CWD)呈下降趋势,其倾向率分别为 0.059, -0.106 天/10 a。绝对指数中,所有极端降水指数整体均呈下降趋势,降水日数(R1MM)、中雨日数(R10MM)、大雨日数(R25MM)和暴雨日数(R50MM)的倾向率分别为 -1.440, -0.284, -0.056, -0.022 天/10 a,其中, R1MM 的下降趋势显著($P<0.05$)。相对指数中,强降水量(R95P)和极强降水量(R99P)均呈下降趋势,倾向率分别为 -2.892, -1.321 mm/10 a。强度指数中,最大 1 天降水量(RX1DAY)、

最大 5 天降水量 (RX5DAY) 和湿日降水量 (PRCP-TOT) 呈下降趋势, 倾向率分别为 -0.710 , -1.442 , $-10.065\text{ mm}/10\text{ a}$, 降水强度 (SDII) 呈上升趋势, 其倾向率为 $0.052\text{ mm}/(\text{天} \cdot 10\text{ a})$ 。

表 1 极端降水指数名称及定义

指数类型	指数缩写	指数名称	定义	单位
持续指数	CDD	持续干旱日数	日降水量 $<1\text{ mm}$ 的最大持续日数	天
	CWD	持续湿润日数	日降水量 $\geq 1\text{ mm}$ 的最大持续日数	天
	R1MM	降水日数	年降水日数 (日降水量 $\geq 1\text{ mm}$)	天
绝对指数	R10MM	中雨日数	日降水量 $\geq 10\text{ mm}$ 天数	天
	R25MM	大雨日数	日降水量 $\geq 25\text{ mm}$ 天数	天
	R50MM	暴雨日数	日降水量 $\geq 50\text{ mm}$ 天数	天
相对指数	R95P	强降水量	日降水量超过 (1960—2019 年) 95% 分位数的降水总量	mm
	R99P	极强降水量	日降水量超过 (1960—2019 年) 99% 分位数的降水总量	mm
强度指数	RX1DAY	最大 1 天降水量	全年日降水量最大值	mm
	RX5DAY	最大 5 天降水量	全年连续 5 日降水量最大值	mm
	SDII	降水强度	年降水量/年降水日数 (日降水量 $\geq 1\text{ mm}$)	$\text{mm} \cdot \text{天}^{-1}$
	PRCPTOT	湿日降水量	全年日降水量总和 (日降水量 $\geq 1\text{ mm}$)	mm

22 个站点极端降水指数趋势分析结果见表 3, 52.4%~95.2% 的站点极端降水指数无明显变化趋势, 除 CDD 和 SDII 中各有 1 个站点的极端降水指数呈显著上升趋势外, 其余极端降水指数中均有 1 个或多个站点呈现出显著下降的趋势。在所有站点的 12 个极端降水指数中, 呈显著下降趋势的数量 (32 个) 远多于显著上升趋势的数量 (2 个), 且未出现同一极端降水指数中既有显著上升又有显著下降趋势的站点的现象。

表 2 山西省 1960—2019 年极端降水指数趋势分析结果

指标	时间序列	倾向率/ ($\text{天} \cdot 10\text{ a}^{-1}$)	P 值
	均值		
CDD/d	67.717	0.059	0.919
CWD/d	4.669	-0.106	0.076
R1MM/d	54.564	-1.440	0.015
R10MM/d	14.677	-0.284	0.178
R25MM/d	3.739	-0.056	0.707
R50MM/d	0.639	-0.022	0.448
R95P/mm	119.303	-2.892	0.536
R99P/mm	37.983	-1.321	0.355
RX1DAY/mm	53.011	-0.710	0.326
RX5DAY/mm	83.901	-1.442	0.254
SDII/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	8.593	0.052	0.448
PRCPTOT/mm	470.635	-10.065	0.127

2.2 极端降水指数突变分析

根据山西省 22 个气象站点的逐年极端降水指数均值进行 M-K 突变检验。由图 2 可知, 在 1960—2019 年间, CDD、SDII、R25MM、R95P 和 RX5DAY 的 UF 曲线在 0 附近波动且未超过置信线, 表明持续干旱日数、降水强度、大雨日数、强降水量和最大 5 天降水量在 60 年间变化趋势不显著且不存在突变特征。CWD 的 UF 曲线基本处在 0 以下, 1976 年与

UB 曲线相交且交点位于置信线之间, 2000 年前后超过置信线, 表明持续湿润日数总体呈下降趋势, 并在 1976 年突变后明显下降。R10MM、R50MM、R99P、RX1DAY 和 PRCPTOT 的 UF 与 UB 曲线分别相交于 1979 年、1975 年、1971 年、1969 年、1977 年, 交点均位于置信线间, UF 曲线在相交前基本位于 0 以上、相交后位于 0 以下且在个别时段超过置信线, 说明中雨日数、暴雨日数、极强降水量、最大 1 天降水量和湿日降水量有短暂的明显下降趋势, 这些极端降水指数在 20 世纪 70 年代前后发生显著突变。R1MM 的 UF 与 UB 曲线相交于 1979 年, 交点位于置信线间, 相交后 UF 曲线始终位于 0 以下且长时间超过置信线, 说明降水日数的突变开始时间为 1979 年, 在突变后有持续的显著下降趋势。

表 3 山西省 1960—2019 年极端降水指数变化趋势

极端降水指数	显著增加	无明显变化	显著减少
CDD	1	21	0
CWD	0	19	3
R1MM	0	12	10
R10MM	0	16	6
R25MM	0	21	1
R50MM	0	21	1
R95P	0	21	1
R99P	0	21	1
RX1DAY	0	18	4
RX5DAY	0	21	1
SDII	1	21	0
PRCPTOT	0	18	4

2.3 极端降水指数周期分析

逐年极端降水指数均值小波分析结果见图 3。整体而言, 各极端降水指数均主要存在时间尺度为 24~28 年时间尺度的振荡, 周期约为 17 年, 在整个时域经历多→

少→多→少→多→少→多的循环交替,近 5 年均处在偏大期。不同指数存在不同的次要变化周期,在较小年代际尺度的周期振荡方面,R50MM 与 PRCPTOT 存在 22~23 年时间尺度的振荡,其对应周期分别约为 13.5,13 年,其中,R50MM 的振荡在 1980 年前更明显,PRCPTOT 的振荡信号贯穿整个时域。CDD 与 CWD 存在 16~18 年时间尺度的振荡,对应周期分别为 11,9.5 年,其中,CWD 的振荡仅存在于 1990 年前,CDD 的振荡信号贯穿整个时域。R1MM、R10MM、R25MM、R95P、

RX1DAY、RX5DAY、SDII 和 PRCPTOT 均存在 12~13 年时间尺度的振荡特征,对应周期分别约为 7,7.5,7.5,7,7.5,7,8,7.5 年,其中 R95P、RX1DAY 和 RX5DAY 的周期振荡在 1980 年后更为明显,其他指数的振荡信号贯穿整个时域。在更小的年际尺度上,R50MM、R99P 存在 7~8 年时间尺度的振荡,周期分别为 4.5,5 年,均贯穿整个时域。其他极端降水指数虽然也存在更小年际尺度的振荡,但其振荡信号相比于年代际尺度的振动信号较弱。

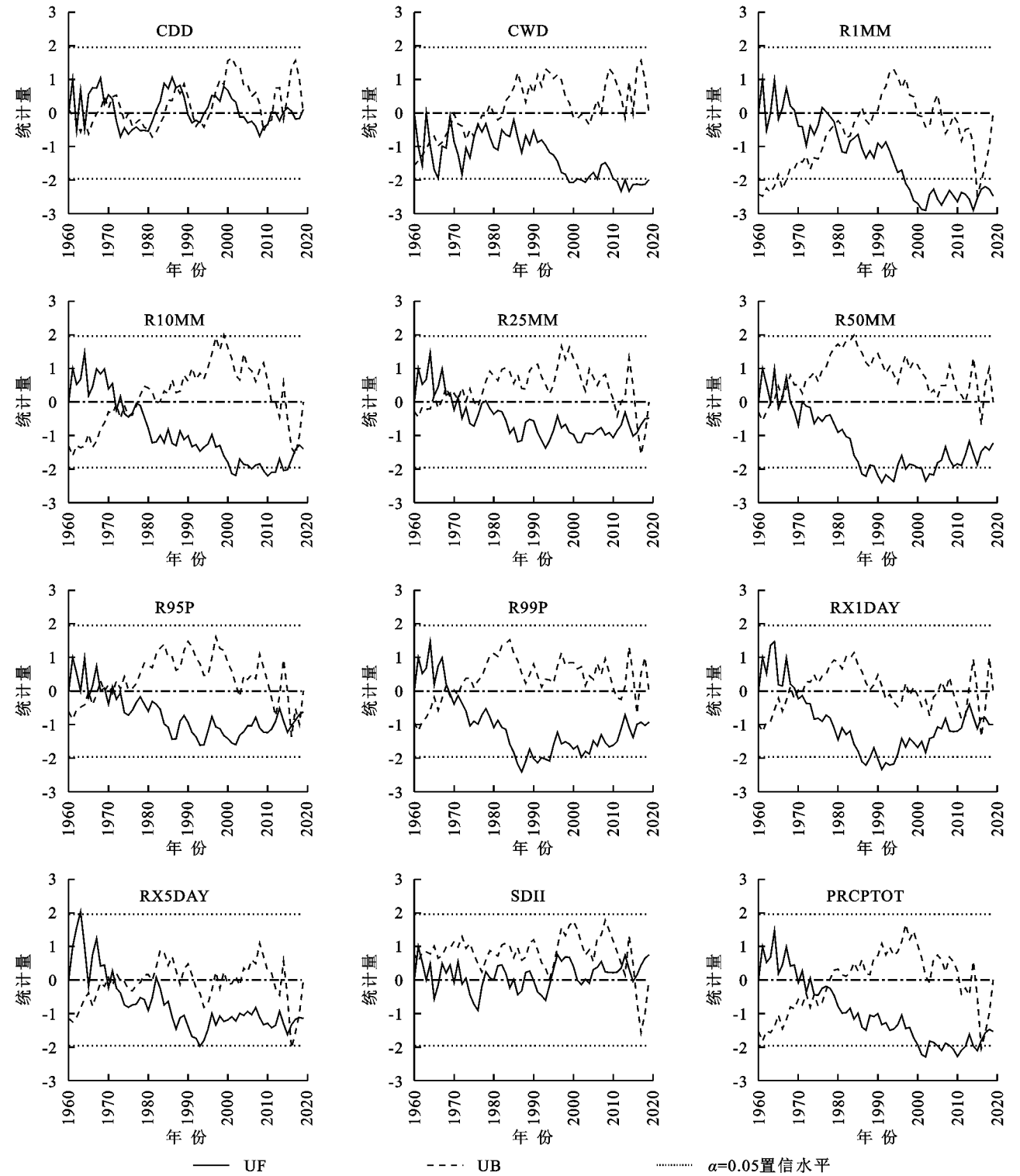


图 2 山西省 1960—2019 年极端降水指数 M-K 突变检验

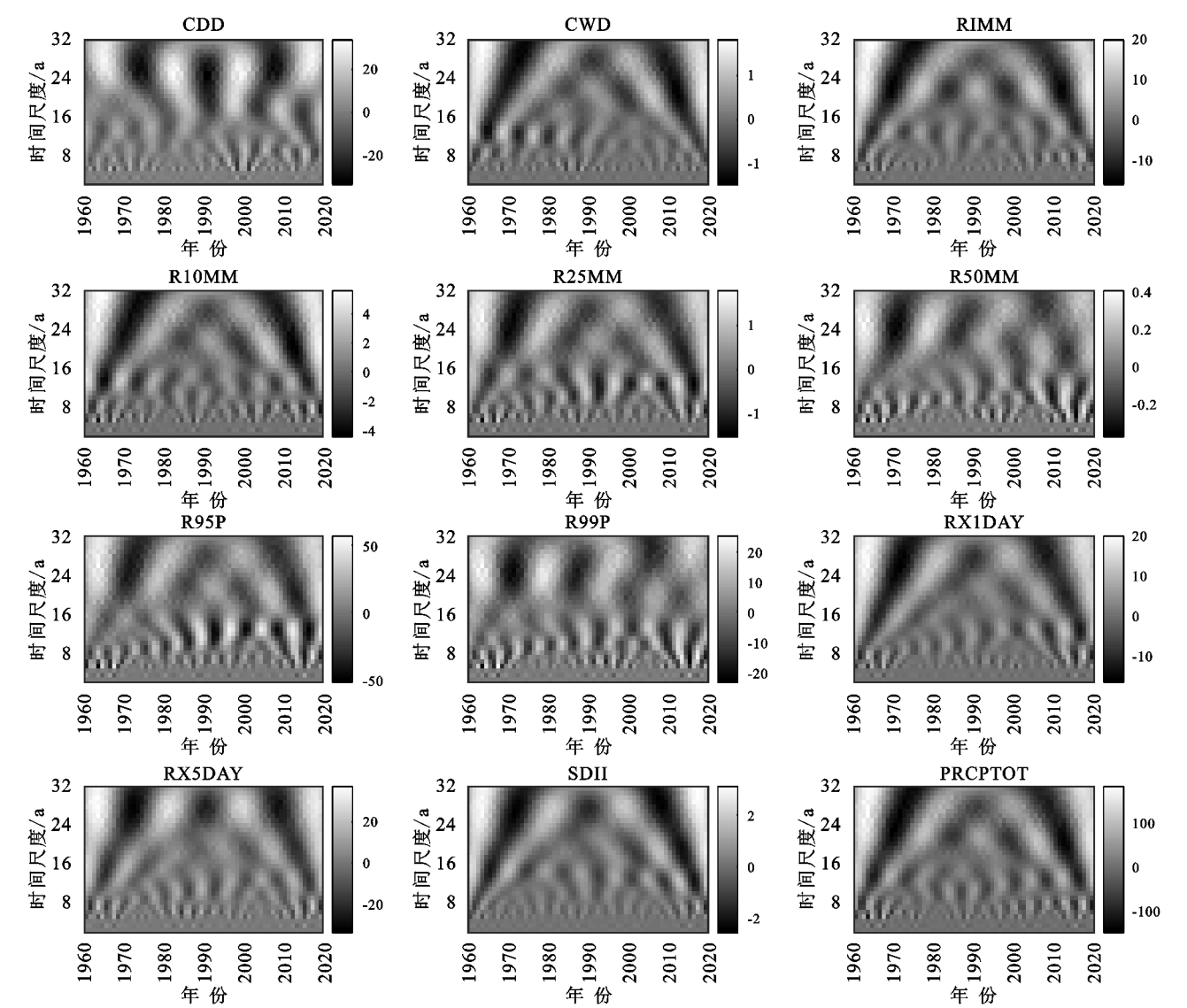


图 3 山西省 1960—2019 年极端降水指数小波系数实部分布

2.4 极端降水指数变化趋势空间差异

利用反距离权重插值方法获得 1960—2019 年 22 个气象站点 12 个极端降水指数变化倾向率的连续空间分布(图 4)。整体来看,除 CWD 外山西省南部地区绝大多数的极端降水指数均呈现下降趋势,特别是西南部地区的下降趋势最为强烈,表明山西省南部的极端降水事件整体趋于减少。RIMM、R25MM、R50MM、R95P、R99P、RX1DAY 和 RX5DAY 在山西省东北部整体呈现下降趋势,表明该区域的极端降水事件可能趋于减少。R10MM、R25MM、R50MM、R95P、RX5DAY、SDII 和 PRCPTOT 在西北部均整体呈现上升趋势,说明山西省西北部的极端降水事件可能趋于增加。

除五寨站外,所有站点的 R1MM 均呈下降趋势,这与全省整体 R1MM 下降趋势显著的结果相符。在极端降水指数的变化趋势空间分布图中,R1MM、R10MM 和 PRCPTOT 均出现以五台山站为中心的极低值区,对应指数倾向率分别为 -6.94 、 -1.48 天/10 a

和 -41.03 mm/10 a,说明五台山地区的极端降水指数的下降趋势高于全省水平,可能是由于该地区海拔较高、气候类型特殊所导致。

3 讨论

基于气象资料和极端降水指数开展区域尺度极端降水时空变化特征分析,能够为准确预测极端降水事件并开展区域生态管理提供科学依据。

山西省近 60 年极端降水指数时间序列趋势和突变分析结果显示,除 CDD 和 SDII 呈上升趋势外,其余极端降水指数均呈现下降趋势,且在 20 世纪 70 年代前后发生突变。这表明,山西省极端降水事件整体趋于减少,研究结果与王咏梅等^[20]的研究结论一致,也与华北地区极端降水的变化趋势吻合^[7]。SDII 整体呈上升趋势可能与 R1MM 的显著减少有关,而 CDD 的上升趋势则表明,在极端降水事件减少的同时干旱事件趋于增加。

在周期变化方面,多数极端降水指数存在较为同步的震荡周期,其中,年代际变化的周期约为 17 年,

年代变化的时间约为 7~8 年,前期研究^[23]结果显示,山西省降水存在 6~7 年的年际振荡和 16 年的年代际周期振荡,这也与本文的研究结果相近。在研究

时段内,极端降水经历了多→少→多→少→多→少→多共 7 个交替变化,周期振动明显,极端降水与降水的周期变化特征可能与东亚夏季风的强弱活动有关。

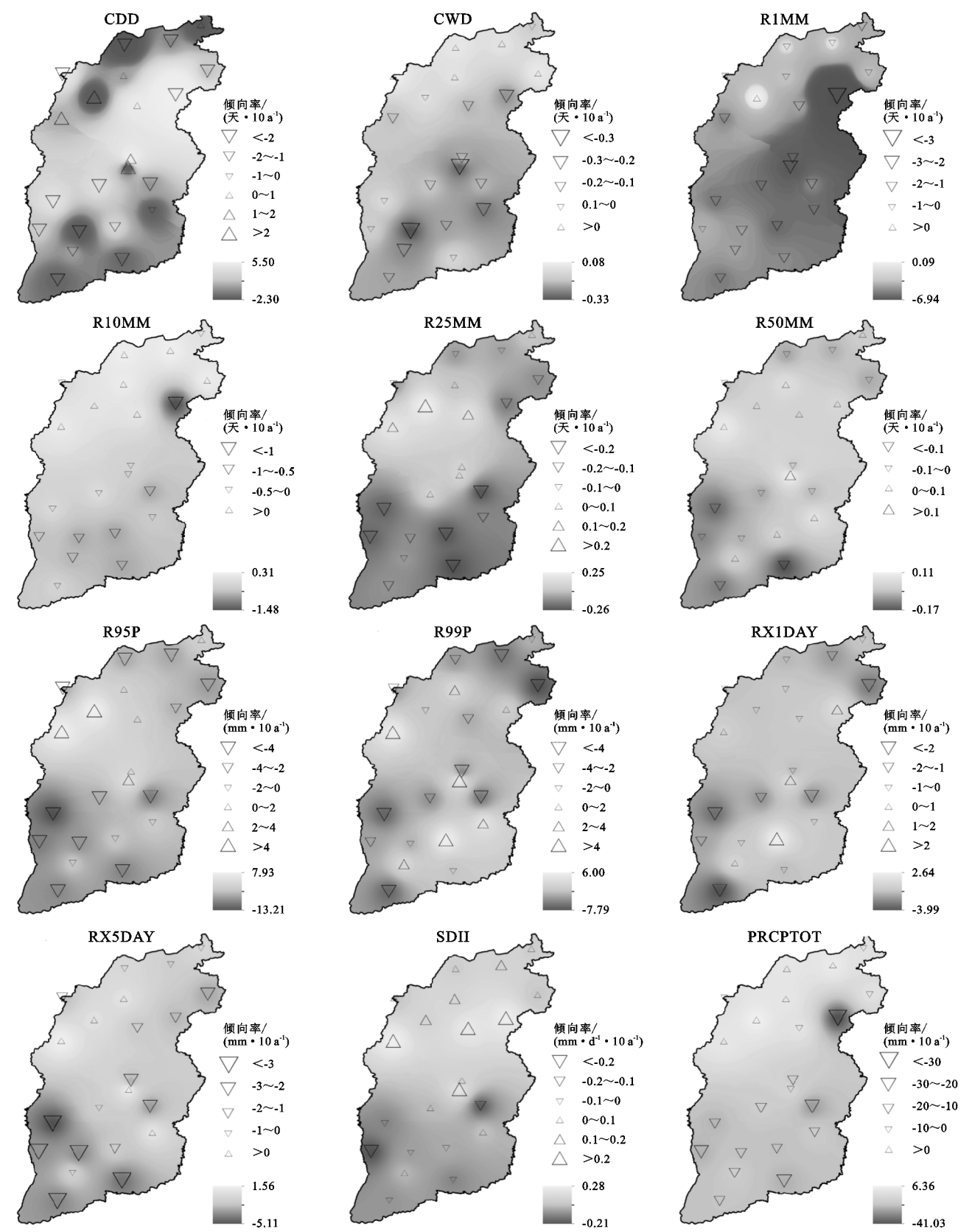


图 4 山西省 1960—2019 年极端降水指数空间差异

在极端降水变化空间差异方面,总体上山西省西南部地区极端降水指数下降趋势强烈,而西北部地区

的大部分极端降水指数呈微弱上升趋势。该结果与任健美等^[18]的发现略有差异,可能是由于极端降水

指标和定义方式的不同所导致。本文使用的极端降水指标更为全面,且在全国研究中的应用更为广泛,一定程度上更有利于在不同研究之间进行对比^[24]。

本文仅对近 60 年的极端降水变化特征进行分析,极端降水指数在不同时期的显著增加或减少,在经过处理后可能会相互抵消,导致总体变化趋势不显著,今后还需要重点对发生突变后的变化趋势开展更为精细的分析。此外,极端降水的空间分异对于地形地貌较为敏感,本文中使用的空间插值方法并未考虑地形因素的影响,因此,在地形复杂区域可能存在误差^[25],仍有待改进。

随着极端降水事件的逐渐减少以及持续干旱日数的微弱增加,未来山西省特别是其西南部地区存在潜在干旱风险。对于生态建设和开展农业生产活动而言,干旱可能导致植被与农作物生长发育受到抑制甚至死亡,对当地经济发展造成不利影响,因此,未来需要加强对植被干旱响应的研究。同时,干旱风险以及气候变暖也可能导致森林火灾发生风险增加,需加强区域森林防火工作。近年来的干旱事件已经对山西省的农业生产活动造成了严重经济损失^[15],极端降水变化特征与发生规律的相关研究将有助于相关部门采取更有效的措施应对气候变化带来的影响。

4 结 论

(1)山西省极端降水事件整体趋于减少,呈现干旱化趋势。除 CDD 和 SDII 呈上升趋势,其余极端降水指数均呈下降趋势,其中 R1MM 下降趋势显著。

(2)极端降水事件的突变减少整体发生在 20 世纪 70 年代前后。除 CDD、SDII、R25MM、R95P 和 RX5DAY 指数突变特征不明显外,其余极端降水在突变后下降趋势显著。

(3)极端降水事件的变化主要存在约 17 年的周期波动,且近 5 年均处在偏大期。部分指数还存在 7~8、4~5 年的周期变化。

(4)各极端降水指数变化趋势空间分布存在较大差异。山西省西南部地区整体呈干旱化趋势,西北部地区的极端降水事件趋于增加,五台山站的部分指数出现极端低值。

参考文献:

[1] Overland J E, Wang M. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. *Tellus Series A-dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(1): 1-9.

[2] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.

[3] Sun Q H, Zhang X B, Zwiers F W, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipita-

tion[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(1): 243-258.

[4] 徐宗学,刘琳,杨晓静.极端气候事件与旱涝灾害研究回顾与展望[J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(1): 66-74.

[5] 李双双,杨赛霓,刘宪锋.1960—2013 年秦岭—淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素[J]. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 354-363.

[6] 钱维宏,符娟兰,张玮玮,等.近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 673-684.

[7] 栗忠魁,胡卓玮,魏铎,等.1951—2013 年华北地区极端降水事件的变化[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4): 773-783.

[8] 贺振,贺俊.1960 年—2012 年黄河流域极端降水时空变化[J]. *资源科学*, 2014, 36(3): 490-501.

[9] 李胜利,巩在武,石振彬.近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 120-127.

[10] 龙妍妍,范广洲,段炼,等.中国近 54 年来夏季极端降水事件特征研究[J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(4): 429-438.

[11] 翟盘茂,王萃萃,李威.极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148.

[12] 张丽花,延军平,刘栋杉.山西气候变化特征与旱涝灾害趋势判断[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(5): 120-125.

[13] 李芬,张建新,张荣.1958—2013 年山西降水时空分布[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1301-1311.

[14] 戎晓庆,庞奖励,韩军青.山西省 1958—2012 年旱涝灾害分布趋势及气候背景研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(9): 97-102.

[15] 张玮玮,李芬,茅彧.2019 年山西省主要气候事件及其对农业的影响[J]. *现代农业科技*, 2021(4): 178-180.

[16] 王改玲,王青梓,石生新.晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 1-5.

[17] 曹永旺,延军平.1961—2013 年山西省极端气候事件时空演变特征[J]. *资源科学*, 2015, 37(10): 2086-2098.

[18] 任健美,李盈盈,尤莉,等.近 53 年山西极端温度和降水变化趋势分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(2): 120-126.

[19] 李智才,宋燕,丁德平.山西省主汛期极端降水变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 433-442.

[20] 王咏梅,张红雨,郭雪,等.山西省近 48 年高温和强降水极端事件变化特征[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 289-295.

[21] 袁瑞强,龙西亭,王鹏,等.山西省降水量时空变化及预测[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 651-663.

[22] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版.北京:气象出版社, 2007.

[23] 张国宏,郭慕萍,赵海英.近 45 年山西省降水变化特征[J]. *干旱区研究*, 2008, 25(6): 858-862.

[24] 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等.近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(3): 155-161.

[25] 何红艳,郭志华,肖文发.降水空间插值技术的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1187-1191.