

丁敏,李妍,孟洁,等.1980—2020 年山西省极端降水特征[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(3):78–86.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.03.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 1980—2020 年山西省极端降水特征

丁 敏,李 妍\*,孟 洁,韩琛惠,高 珍,牛 云

(山西省气象服务中心,山西 太原 030002)

**摘 要:**基于 1980—2020 年山西省 109 个气象观测站点的逐日降水资料,选取 WMO 提供的 10 个极端降水指数,利用气候倾向率、相关分析、因子分析、R/S 预测等方法,对山西省极端降水进行时空分布研究。结果表明:(1)从时间尺度来看,山西省极端降水的强度和极值都明显增加,连续干旱日数和连续湿日日数呈下降趋势,其余指数均表现出不同程度的增加,其中年总降水量增加幅度最明显;从空间尺度来看,年总降水量、降水强度、降水频率、极值均呈现西北向东南增多趋势,空间差异较明显;从各站点的空间分布来看,北部和中部地区的极端事件增幅最为显著,北部地区的连续干旱日数以增加趋势为主,连续湿日日数气候倾向率存在显著的空间差异,中部地区站点呈现出明显的增加趋势,而南部和北部地区则主要呈现减少趋势;(2)极端降水指数(除干旱日数外)与年总降水量都有很强的相关关系,强降水量和极强降水量对年总降水量的贡献值呈现出增加趋势;采用因子分析方法提取极端降水事件的公共因子,3 个公共因子的方差贡献率累计达到了 87%,反映了极端降水强度和降水量指数对极端降水的影响较为显著,利用 R/S 分析法得到年总降水量、中雨日数、大雨日数、最大 5 日降水量未来呈现弱减少趋势,而干旱日数仍为减少趋势,连续湿日日数为持续弱增加趋势。总体看来,山西省极端降水近年来呈现出增加趋势,空间分布有明显差异。

**关键词:**极端降水指数;因子分析;R/S 预测方法

**中图分类号:**P426.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-0799(2024)03-0078-09

极端天气和极端气候两种极端情况发生时的事件统称为极端事件,通常表现为天气异常或气候异常值的出现<sup>[1-2]</sup>。近年来全球变暖日益明显,极端降水事件被认为是全球变暖的主要表现之一,在全球范围内引起了广泛关注<sup>[3-5]</sup>,同时极端降水给人类的生产生活带来了不容忽视的影响<sup>[6-7]</sup>。极端降水事件发生的频率和强度会在一定程度上影响农作物生长,甚至会造成毁灭性影响。其次,极端降水事件的

发生还可能引发洪水、山体滑坡、泥石流等自然灾害,会给社会经济发展和人民生活带来负面影响。这些自然灾害还可能导致土地破坏、道路中断、农田损失等问题,对农业生产、交通运输、基础设施建设等领域都会带来不利影响<sup>[8-9]</sup>。因此,近年来,对极端降水的研究已成为气候变化中的热点问题。

国内外的一些学者在极端降水方面做了许多研究工作<sup>[10-17]</sup>。近年来,全球范围内的极端降水事件呈现出不断增加趋势<sup>[18]</sup>,并且不同地区之间存在显著差异<sup>[19-21]</sup>,国外学者 Goswami 等<sup>[22]</sup>经过研究指出在发生极端降水事件的同时,降水也明显增加,这可能与全球变暖有关,随着全球变暖,极端降水发生的概率在变大。Alexander 等<sup>[23]</sup>研究了全球极端气候的变化,发现 20 世纪以来全球昼夜温差逐渐减小,年极端降水量逐渐增加,同时也指出一些地区(北半球中高纬

收稿日期:2022-08-01;修回日期:2023-11-22

基金项目:山西省气象局面上课题(SXKMSQH20226313);山西省气象局自筹项目(FWZX003)

作者简介:丁敏(1994—),女,助理工程师,主要从事气候变化及气象服务研究。E-mail:827830023@qq.com

通信作者:李妍(1991—),女,工程师,主要从事气候变化及专业气象服务。E-mail:liyan\_lyl@sina.cn

度地区)总平均降水量的趋势表现为下降时,极端降水出现的概率在增加。中国发生极端降水事件的情况与全球基本一致,也存在着区域差异<sup>[20-21]</sup>。程诗悦等<sup>[23]</sup>研究表明我国南方地区发生极端降水事件的可能性逐渐增加,但一些北方地区(华北、东北和西北东部等大部分地区)极端降水事件发生的可能性逐渐减小。任正果等<sup>[7]</sup>研究发现中国的南方地区在靠近西北方向时发生极端降水事件较少,呈现干旱趋势,东南方向发生的极端降水事件在增多,呈现湿润化趋势。卢珊等<sup>[24]</sup>发现在黄土高原夏季降水整体下降的背景下,极端降水占比在将近 70% 的站点表现出增长趋势,总体上降水呈现出东多西少的分布特征。

山西位于中国的中纬度地区,处于华北西部,地形较为复杂。由于秋季冷暖空气交汇频繁,这种气候条件容易引发极端降水事件。2021 年 10 月山西省发生的极端强降水天气,造成全省 175.71 万人受灾,199.47 hm<sup>2</sup> 农作物受灾,1.7 万余房屋倒塌,给人民生活带来很大影响。近年来已有不少学者对山西省的极端降水情况进行了研究,董伯纲等<sup>[25]</sup>研究认为 1960—2019 年山西省南部整体的干旱程度呈现增加趋势,西北部极端降水事件发生的概率呈现增加的趋势。李芬等<sup>[26]</sup>研究认为 1958—2013 年山西年降水量呈下降趋势。任健美等<sup>[27]</sup>研究认为 1958—2010 年极端降水日数有弱下降趋势,极端降水概率东部山区最大,中部盆地最小。关于山西省的研究起始时间大多较早,且进入 21 世纪以来山西省降水呈现出新的特点,灾害频发。因此,有必要利用最新的站点资料对近年来山西省极端降水情况进行研究。上述研究对于极端降水指标的计算大多采用百分位法,指数单一。为了全面反映山西省极端降水情况,本文基于山西省 109 个国家站 1980—2020 年的逐日降水站点数据,采用世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐的 10 个极端降水指数,并运用气候倾向率、相关分析、因子分析和 R/S 预测等方法,对山西省极端降水事件的时空分布进行了研究。旨在为山西省的气候变化、生态环境保护、防灾减灾和气象服务工作提供科学依据,同时为当地政府制定农业结构调整政策、充分开发利用气候资源、发展地方经济和防灾减灾提供科学依据。

## 1 研究资料和方法

### 1.1 资料选取

本文所用数据来源于山西省气象信息中心,选取山西省 109 个国家站 1980 年 1 月 1 日—2020 年 12 月 31 日逐日降水站点资料(图 1),为保证数据的一致性和连续性,对所有数据进行质量控制,用插值方法修正缺失值。

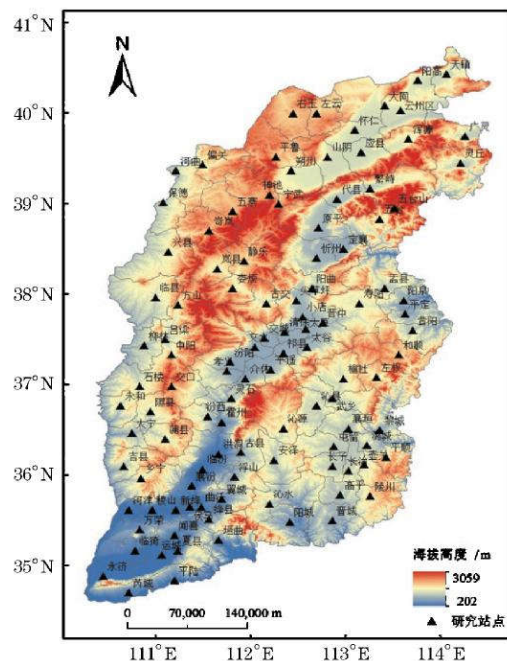


图 1 山西省气象站点分布  
(审图号为晋 S(2022)005 号)

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 极端降水指数

选取具体名称及定义见表 1。指数可分为 3 大类,第一类为极端降水强度指数,第二类为极端降水量指数,第三类是极端降水日数指数。极端降水强度指数包含降水强度(SDII);极端降水量指数包含年总降水量(PRCPTOT)、最大 1 日降水量(RX1day)、最大 5 日降水量(RX5day)、强降水量(R95p)、极强降水量(R99p);极端降水日数指数包括中雨日数(R10mm)、大雨日数(R25mm)、连续干旱日数(CDD)、连续湿日日数(CWD)。

各站点的逐年极端降水指数使用 R 语言开发的 RClimDex 软件计算得到,采用线性趋势分析和克里金插值的方法分别对极端降水时间和空间进行分析,选取 SPSS 因子分析法<sup>[28]</sup>分析影响极端降水指数的因子,并利用相关分析分析极端降水指数与年总降水量的关系,此外,还运用 R/S 预测分析方法计算 Hurst 指数,以预测研究区未来极端降水指数的变化情况。通过分析,可以揭示导致极端降水事件发生的主要因素,并预测未来的极端降水趋势。

表 1 极端降水指数定义

| 名称           | 简称      | 定义                               |
|--------------|---------|----------------------------------|
| 年总降水量/mm     | PRCPTOT | 每年全部雨(雪)日降水量之和                   |
| 最大 1 日降水量/mm | RX1day  | 每月最大 1 日降水量                      |
| 最大 5 日降水量/mm | RX5day  | 每月连续 5 日最大降水量                    |
| 强降水量/mm      | R95p    | 日降水量大于基准期内第 95% 分位值的总降水量         |
| 极强降水量/mm     | R99p    | 日降水量大于基准期内第 99% 分位值的总降水量         |
| 降水强度/mm/d    | SDII    | 日降水量 $\geq 1.0$ mm 的总降水量与降水日数的比值 |
| 中雨日数/d       | R10mm   | 日降水量 $\geq 10$ mm 的日数            |
| 大雨日数/d       | R25mm   | 日降水量 $\geq 25$ mm 的日数            |
| 连续干旱日数/d     | CDD     | 日降水量 $\leq 1.0$ mm 的最大连续日数       |
| 连续湿日日数/d     | CWD     | 日降水量 $\geq 1.0$ mm 的最大连续日数       |

## 1.2.2 Hurst 指数分析法

Hurst 指数分析法是由英国科学家 Hurst 在 1951 年提出的非参数检验方法,近年来 Hurst 指数分析法在许多领域得以广泛应用,效果较好<sup>[29]</sup>。

其基本原理和方法如下:

取一时间序列 $\{\varphi(t), t=1, 2, \dots, n\}$ ,定义其均值序列为:

$$\varphi_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \varphi(t), \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

用  $D(t, \tau)$  表示累积离差:

$$D(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} [\varphi(t) - \varphi_i], \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

用  $R(\tau)$  定义序列极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} D(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} D(t, \tau), \quad \tau=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

用  $S(\tau)$  定义序列极准差:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\varphi(t) - \varphi_t]^2} \quad (4)$$

作比值定义:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (m\tau)^H \quad (5)$$

式中:  $m$  为常数,若式(5)成立,则说明原时间序列存在 Hurst 现象,并称  $H$  为 Hurst 指数值。对式(5)两边同时取对数得:

$$\log \frac{R(\tau)}{S(\tau)} = H \cdot \log m + H \cdot \log \tau \quad (6)$$

$H$  值由式(6)中线性回归的斜率值确定,根据  $H$  值的大小判断时间序列  $\varphi(t)$  是否具有持续性:

(1)  $0 < H < 0.5$ , 表明该时间序列表现出反持续性,即未来的变化与过去趋势相反,  $H$  值越接近 0, 反持续性越显著;

(2)  $0.5 < H < 1$ , 表明该时间序列表现出持续性,即未来的变化与过去趋势相同,  $H$  值越接近 1, 持续性越显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 极端降水指数时间序列变化

1980—2020 年山西省年总降水量和降水强度时间序列如图 2。连续干旱日数 CDD 和连续湿日日数 CWD 呈下降趋势,气候倾向率分别为  $-0.215$ 、 $-0.001$  d/10 a。其余 8 个指数均表现出不同程度的增加。其中,年总降水量的增加幅度最明显( $P < 0.01$ ),为  $1.167$  d/10 a,其次是强降水量( $0.753$  d/10 a)、极强降水量( $0.517$  d/10 a)和最大 1 日降水量( $0.517$  d/10 a),这些指数的增加均通过了 0.01 的显著性水平检验。1980—2020 年,山西省极端降水强度和极值都有明显增加的趋势。

距平值是某一年降水指数与多年平均值的差异,累积距平值是将每年的距平值进行累加,用来观察极端降水指数的年际变化。计算方法是先得出时间序列数据每年的距平值后,进行累加,得到累积距平序列,根据距平有正有负的特点,当累积距平持续增大时,表明该时段内极端降水指数持续为正;当累积距平持续不变,表明该时段内距平持续为零即保持不变;当累积距平持续减小时,表明该时段内距平

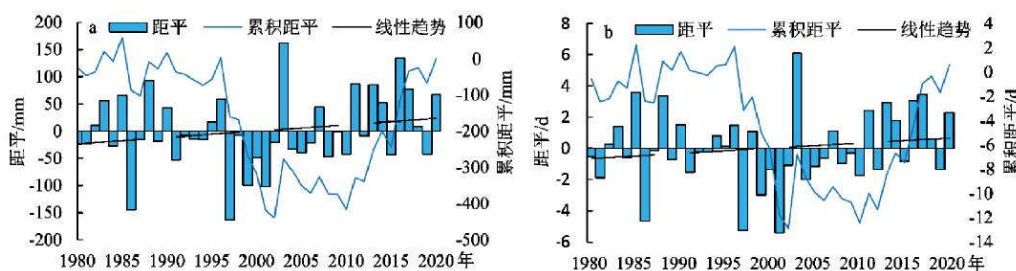


图 2 1980—2020 年山西省极端降水指数时间变化序列

(a 为年总降水量, b 为降水强度)

持续为负,此方法能直观而准确地确定极端降水指数的年际变化。由极端降水指数的累积距平曲线可知,山西省年总降水量和中雨日数的年代际降水变化趋势相似,2010年由偏少期转为偏多期,2015年之后增加趋势逐渐明显(图2a,2b)。降水强度和大雨日数在2015年之前波动较大,近5a呈明显增长趋势,山西省极端降水强度和大雨日数近几年有明显增加的趋势。强降水量和极强降水量在20世纪90年代之前有波动,自2010年开始呈稳步增长,并且增加幅度较为一致,这说明山西省的极端降水强度和极值近年来不断上升。最大1日降水量和最大5日降水量2015年开始呈现出增加趋势,1980—2014年呈波动状态,其中,最大1日降水量偏多年份较多,最大5日降水量偏少年份较多。连续干旱日数CDD和连续湿日日数CWD在1980—2011年波动较大,之后一直处于小范围波动,表明山西省极端降水连续干(湿)日没有呈现出更长持续时间的趋势,但降水时间却逐渐向集中的趋势发展。

## 2.2 极端降水指数空间分布

图3为1980—2020年山西省极端降水指数空

间变化。山西省东南部为年总降水量的高值区,最大值达617 mm,主要分布在山西省晋城和长治;低值区位于北部,主要集中在朔州和大同,最低值为369 mm(图3a)。站点的降水强度在7~10 mm/d,大值区主要集中在晋城和长治,低值区分布在北部(图3b)。极强降水量的大值区多分布在晋城、长治、忻州东部以及大同东南部大部分地区,强降水量在忻州东部和大同东南部,范围比极强降水量的小,但高值区比极强降水量大,可达145 mm(图3c、3d)。大部分站点的中雨日数在11~20 d,大雨日数在3~8 d,南部地区最多(图3e、3f)。最大1日降水量在50 mm以上、最大5日降水量在90 mm以上的大值区均位于东南部。连续湿日日数CWD均位于3~5 d,南部地区湿日日数最多,各地干旱日数在49~88 d,北部和中部地区干旱日数较多。除连续干旱日数外,其余指数均呈现出从东南向西北递减的规律。

## 2.3 极端降水指数变化趋势空间分布

从山西省10个极端降水指数1980—2020年的气候倾向率空间分布(图4)可知,山西省大部分地区年总降水量呈现出微弱增加趋势,占总站数的

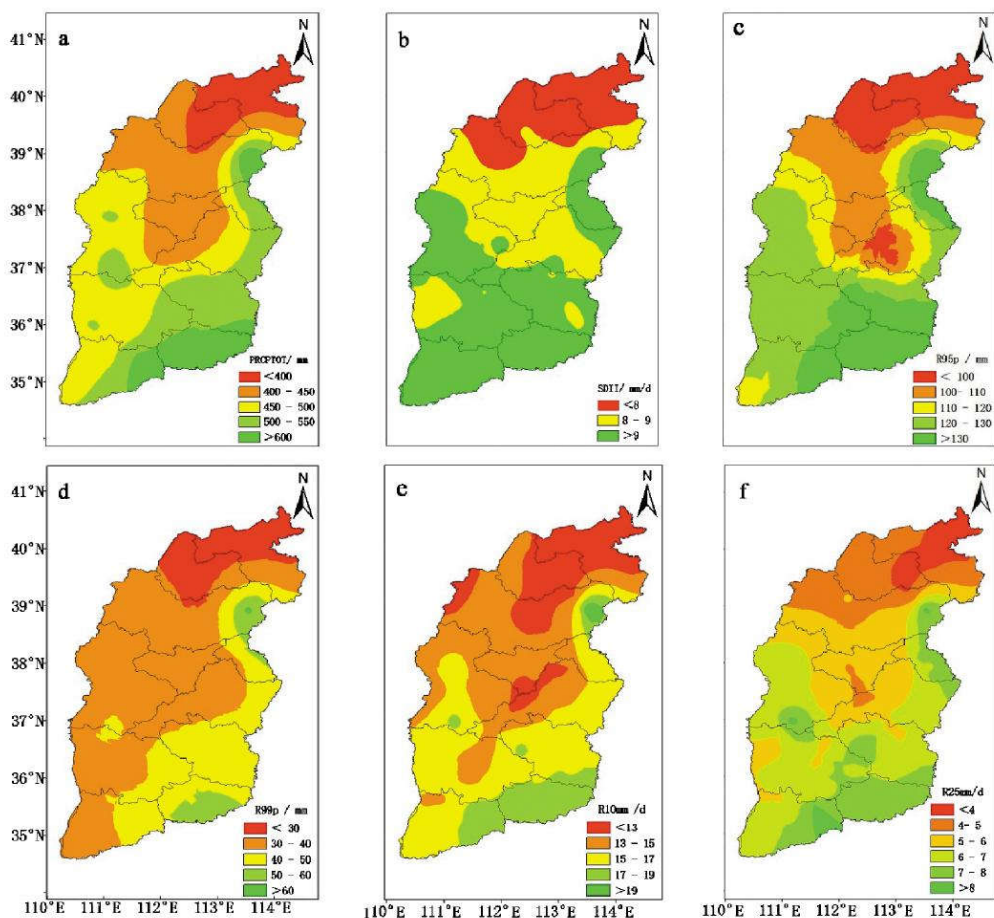


图3 1980—2020年山西省极端降水指数空间分布

(a 为年降水量,b 为降水强度,c 为强降水量,d 为极强降水量,e 为中雨日数,f 为大雨日数)

80%，其中增加趋势最明显的地区（占总站数的12%）主要集中在西北部，倾向率为 $0.4\sim 0.6\text{ mm}/10\text{ a}$ （图4a）。大部分站点的降水强度表现为增加趋势，占总站数的80%，增加大值区在北部和中部地区，且通过了0.01的显著性检验，南部地区表现为微弱增加甚至减少趋势（图4b）。山西省强降水量R95p中，49%的站点表现为增加，气候倾向率为 $-1.4\sim 0.8\text{ mm}/10\text{ a}$ ，极强降水量R99p只有16%的站点通过0.01的显著性检验，大部分站点表现出微弱的增加，两者增加趋势较大区域均位于山西省中部地区，北部部分站点强降水量表现为增加，南部大部分地区表现为减少（图4c、4d）。山西大部分地区中雨日数和大雨日数均呈增加趋势，分别有44%和67%的站点通过了0.01的显著性检验，主要分布在中部和北部，南部表现出减少和微弱的增加（图4e、4f）。最大1日降水量和最大5日降水量分别有44%和37%的站点通过0.01的显著性检验，最大1日降

水量的变化趋势（ $-2.5\sim 2.7\text{ mm}/10\text{ a}$ ）明显大于最大5日降水量（ $-1.0\sim 0.7\text{ mm}/10\text{ a}$ ），呈现增加趋势的站点大多数位于中部，南部大多表现为减少。连续湿日日数增加和减少的地区各占一半，有47%的站点通过0.01的显著性检验，主要位于中部；干旱日数主要以减少为主，占总站数的80%，主要分布在中部和南部，北部部分站点表现为增加趋势。

## 2.4 影响极端降水指数的因子

利用SPSS因子分析法分析影响极端降水指数的因子，SPSS因子分析的主要任务是通过主成分分析方法对原变量进行浓缩，将原变量中的信息综合成几个少数的因子，即把多个指数影响因子归类为较少的几种，并计算各因子的初始特征值及方差贡献率（表2），根据累计方差贡献率达到87%选取了3个公共因子。第1个公共因子方差贡献率最大，为62.366%，属于最重要的影响因子，该因子在极强降水量、最大1日降水量、强降水量、最大5日降水量、

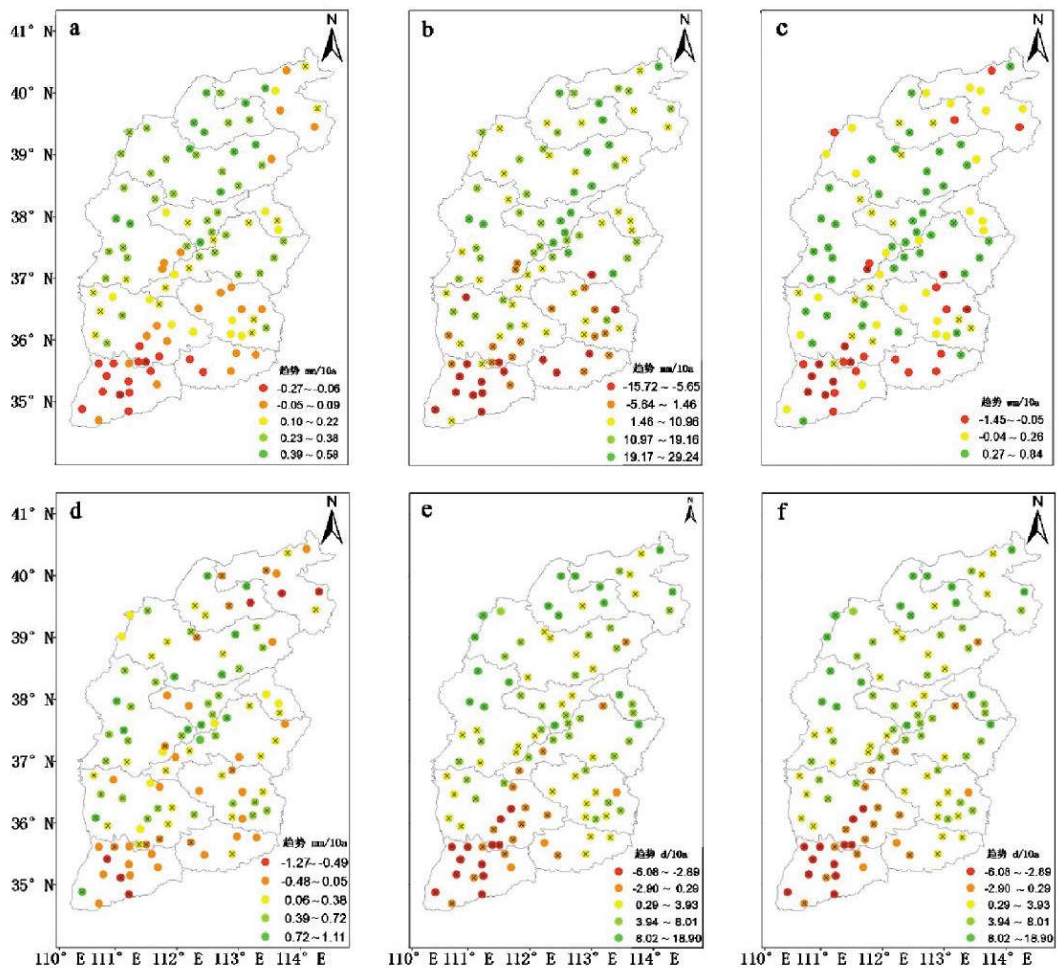


图4 1980—2020年山西省极端降水指数的气候倾向率空间分布

（a为年降水量，b为降水强度，c为强降水量，d为极强降水量，e为中雨日数，f为大雨日数，x表示通过0.01的显著性检验）

降水强度 5 项指标的公共因子载荷系数较高,分别为 0.97、0.96、0.84、0.79 和 0.69。表明极端降水事件与极端降水量和降水强度之间存在着很强的相关性。第 2 个公共因子的方差贡献率为 15.66%,该因子对总体方差的解释程度较高;与中雨日数、大雨日数、年总降水量和连续湿日日数 4 个指标相关较好,相关系数依次为 0.91、0.89、0.85 和 0.72,表明极端降水日数指数和总降水量指数对极端降水事件的影响较大。第 3 个公共因子方差贡献率为 9.86%,其中与干旱日数的相关系数为 0.97,反映了极端降水事件虽呈增多、增强趋势,但同时也受到了干旱的影响,这与 Song X D<sup>[30]</sup>等的研究相一致。

## 2.5 极端降水指数与年总降水量的关系

通过分析 1980—2020 年各极端降水指数之间

表 2 极端降水事件因子分析

| 极端降水指数  | 影响因子  |       |       |
|---------|-------|-------|-------|
|         | 1     | 2     | 3     |
| R99p    | 0.97  | 0.12  | —     |
| RX1day  | 0.96  | 0.12  | —     |
| R95p    | 0.84  | 0.50  | —     |
| RX5day  | 0.79  | 0.45  | —     |
| SDII    | 0.69  | 0.56  | 0.17  |
| R10mm   | 0.24  | 0.91  | —     |
| R25mm   | 0.38  | 0.89  | —     |
| PRCPTOT | 0.40  | 0.85  | -0.10 |
| CWD     | —     | 0.73  | -0.19 |
| CDD     | —     | -0.15 | 0.97  |
| 初始特征值   | 3.33  | 1.79  | 0.50  |
| 方差百分比%  | 62.37 | 15.66 | 9.86  |

的相关系数(表 3)可知,中雨日数和大雨日数与年总降水量相关性较高( $r>0.90$ ),且都通过了 0.01 的显著性检验;降水强度和强降水量与年总降水量的相关系数通过了 0.05 的显著性检验,除连续干旱日数外,其余指数之间相关性较好,其中最大 1 日降水量和极强降水量相关性最好,相关系数达到 0.98 ( $P<0.01$ )。进一步分析强降水量和极强降水量的 2 种极端降水量指数对年总降水量的贡献值(此处贡献值为极端降水指数强降水量和极强降水量每年降水量占总降水量的比重)(图 5),得到贡献比例分别为 25%和 8%,并呈现一定的增加趋势,1980—2020 年极端降水事件在整体降水模式中起着越来越重要的作用。

## 2.6 极端降水的未来变化趋势

利用 R/S 分析方法计算 Hurst 指数预测研究区未来的极端降水指数变化情况(图 6),干旱日数、连续湿日日数的 Hurst 指数 $>0.5$ ,表明时间序列具有长期相关性的特征,即过程具有持续性。说明未来的变化趋势与过去的变化趋势具有一致性,极端降水事件的影响在未来可能会延续并保持相似的趋势。强降水量、极强降水量、最大 1 日降水量和降水强度的 Hurst 指数为 0.5,说明此类极端降水指数的时间序列是随机和不相关的,即现在不会影响未来,未来和之前的变化趋势无关。年总降水量、中雨日数、大雨日数、最大 5 日降水量的 Hurst 指数 $<0.5$ ,表明其时间序列的反持续性,预示未来将呈现减少趋势,并且其反持续性不是很强。综上,年总降水量、中雨日数、大雨日数、最大 5 日降水量未来呈现弱减少趋势;干旱日数 CDD 过去为减少趋势,未来持续为减少趋势;连续湿日日数 CWD 过去呈现增加趋势,预计未

表 3 各极端降水指数之间的相关分析系数

| 指数      | PRCPTOT | SDII   | RX1day | RX5day | R95p   | R99p  | R10mm  | R25mm | CDD   |
|---------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|
| PRCPTOT | 1.00    |        |        |        |        |       |        |       |       |
| SDII    | 0.65*   | 1.00   |        |        |        |       |        |       |       |
| RX1day  | 0.54    | 0.65*  | 1.00   |        |        |       |        |       |       |
| RX5day  | 0.65    | 0.77** | 0.80** | 1.00   |        |       |        |       |       |
| R95p    | 0.76*   | 0.88** | 0.84** | 0.85** | 1.00   |       |        |       |       |
| R99p    | 0.52    | 0.68*  | 0.98** | 0.81** | 0.86** | 1.00  |        |       |       |
| R10mm   | 0.96**  | 0.63   | 0.37   | 0.56   | 0.63   | 0.35  | 1.00   |       |       |
| R25mm   | 0.90**  | 0.82** | 0.44   | 0.67*  | 0.80** | 0.45  | 0.89** | 1.00  |       |
| CDD     | -0.23   | -0.02  | -0.12  | -0.16  | -0.08  | -0.11 | -0.25  | -0.14 | 1.00  |
| CWD     | 0.56    | 0.35   | 0.18   | 0.52   | 0.35   | 0.20  | 0.54   | 0.56  | -0.19 |

注:\* 和 \*\* 分别表示通过 0.05 和 0.01 的显著性水平。

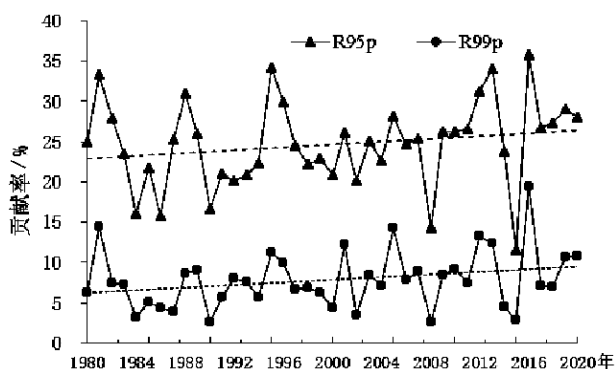


图5 强降水量和极强降水量对  
年总降水量的贡献比例

来将保持增加趋势,不过增加趋势的持续性相对较弱,即虽然未来可能会出现增加趋势,但增加趋势不会持续稳定。

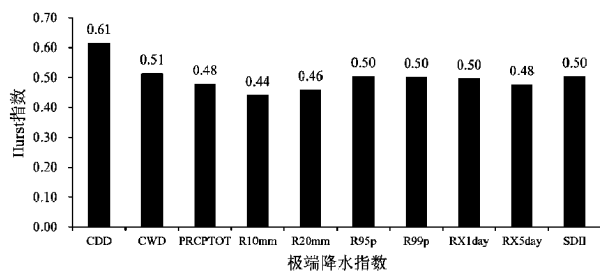


图6 极端降水事件变化的 Hurst 指数

### 3 结论

基于山西省 109 个国家气象站逐日降水资料,借助 10 个极端降水指数,分析 1980—2020 年山西省极端降水的时空变化特征,得出以下结论:

(1)时间尺度上,1980—2020 年山西省 10 个极端降水指数的年际变化中连续干旱日数 CDD 和连续湿日日数 CWD 呈下降趋势,其余均表现出不同程度的增加,年总降水量增加幅度最明显,总体上 1980—2020 年山西省极端降水的强度和极值都有明显增加。空间尺度上,山西省年总降水量、降水强度、降水频率、极值均有从西北向东南逐渐增多的趋势,空间差异较明显。

(2)山西省大部分站点除干旱日数 CDD 呈减少趋势,其余指数均呈现出增加的趋势,站点的显著增加主要集中在山西省中部和北部部分地区;北部地区的干旱日数 CDD 以增加趋势为主,连续湿日日数 CWD 空间差异较大,位于中部地区的站点显著增加,南北部地区以减少趋势为主。

(3)各极端降水指数(除干旱日数 CDD 外)与年总降水量都有很强的相关性,强降水量和极强降水

量对年总降水量的贡献值呈增加趋势。采用因子分析方法提取,共提取出 3 个公共因子,并且方差贡献率累计达到了 87%。极端降水强度和降水量指数对极端降水影响较大;利用 R/S 分析方法得到年总降水量、中雨日数、大雨日数、最大 5 日降水量未来呈现弱减少趋势,干旱日数 CDD 为减少趋势,连续湿日日数 CWD 为持续弱增加趋势。

山西省 1980—2020 年极端降水指数,除连续干旱日数 CDD 和连续湿日日数 CWD 呈下降趋势外,其余指数均呈现增加趋势,表明山西省极端降水事件趋于增加。这与王咏梅<sup>[31]</sup>、董伯纲<sup>[25]</sup>等的研究结果不一致,可能与资料年份不一致有关。本文选取的起始时间为 1980 年,王咏梅<sup>[31]</sup>、董伯纲<sup>[25]</sup>等均从 1960 年开始,可以得到 20 世纪 60—70 年代降水相比于 80 年代之后较多,故得到 1960 年开始到现在极端降水减少而 1980 年到现在极端降水有增加趋势。

在研究山西省空间分布时,不同区域的降水差别较大,本文在利用站点插值时选取了克里金插值方法,没有考虑地形的影响,可能会使结果存在误差,在以后研究时应该排除地形影响因素对降水的影响,需要寻找一种方法来避免地形对插值的影响。近年来极端降水在山西北部和中部分逐渐增加、南部地区逐渐减少,山西省在未来几年有极端降水增加的趋势,对于洪涝灾害需做出一定的防范,虽然南部地区极端降水呈现减少趋势,但是降水仍强于北部,对山西省南部的防范仍然不能忽视。

### 参考文献:

- [1] BROWN P, BRADLEY R, KEIMIG F. Changes in extreme climate indices for the northeastern United States, 1870–2005[J]. J. Clim., 2010, 23(24): 6555–6572.
- [2] SREX I. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [3] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D5): 1–65.
- [4] BENISTON M, STEPHENSON D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. Clim. Change, 2007, 81(1): 71–95.
- [5] LI J, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. Changing spatiotemporal patterns of extreme precipitation regimes in China during 2071–2100 based on Earth system models[J]. J. Geophys. Res., 2013, 118(19): 12537–12555.

- [6] DONAT M G, PETERSON T C, BRUNET M, et al. Changes in extreme temperature and precipitation in the Arab region: Long-term trends and variability related to ENSO and NAO[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 581–592.
- [7] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2011年中国南方地区极端降水事件变化[J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 640–649.
- [8] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴—2005[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [9] Zhang Q, Sun P, Singh V P, et al. Spatial-temporal precipitation changes (1956–2000) and their implications for agriculture in China[J]. *Glob Planet Change*, 2012, 82(3): 86–95.
- [10] 尹占娥, 田鹏飞, 迟潇潇. 基于情景的 1951—2011 年中国极端降水风险评估[J]. *地理学报*, 2018, 73(3): 405–413.
- [11] FISCHER E M, KNUTTI R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes[J]. *Nat Clim Chang*, 2015, 5(6): 560–564.
- [12] IPCC. Summary for policymakers. climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. part a: global and sectoral aspects[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [13] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近 50 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200–1210.
- [14] 顾西辉, 张强, 张生. 1961—2010 年中国农业洪旱灾害时空特征、成因及影响[J]. *地理科学*, 2016, 36(3): 439–447.
- [15] ZAREKARIZI M, RANA A, MORADKHANI H. Precipitation extremes and their relation to climatic indices in the Pacific Northwest USA[J]. *Clim Dyn*, 2018, 50(11): 4519–4537.
- [16] 王俊超, 彭涛, 王清. 乌江流域极端降水时空分布特征及重现期分析[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(3): 267–275.
- [17] 郭广芬, 杜良敏, 肖莺, 等. 长江流域夏季极端降水时空分布特征[J]. *干旱气象*, 2021, 39(2): 235–243.
- [18] GROISMAN P Y, KARL T R, EASTERLING D R, et al. Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change[J]. *Clim Change*, 1999, 42(1): 243–283.
- [19] 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.
- [20] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(6): 744–751.
- [21] 高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 577–589.
- [22] GOSWAMI B N, VENUGOPAL V, SENGUPTA D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. *Science*, 2006, 314(5804): 1442–1445.
- [23] 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.
- [24] 卢珊, 胡泽勇, 付春伟, 等. 黄土高原夏季极端降水及其成因分析[J]. *高原气象*, 2022, 41(1): 241–254.
- [25] 董伯纲, 于洋. 近 60 年山西省极端降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 36(1): 135–141.
- [26] 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.
- [27] 任建美, 李盈盈, 尤莉, 等. 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.
- [28] 赵一飞, 邹欣庆, 许鑫王豪. 珠江流域极端降水事件及其与大气环流之间的关系[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9): 2528–2537.
- [29] 李菲, 张明军, 李小飞, 等. 1962—2011 年宁夏极端降水的时空演变研究[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(5): 171–180.
- [30] SONG X D, SONG Y, CHEN Y Y. Secular trend of global drought since 1950[J]. *Environ Res Lett*, 2020, 15(9): 094073.
- [31] 王咏梅, 张红雨, 郭雪, 等. 山西省近 48 a 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.

## Extreme Precipitation Characteristics in Shanxi Province during 1980–2020

DING Min, LI Yan, MENG Jie, HAN Chenhui, GAO Zhen, NIU Yun  
(Shanxi Meteorological Service Center, Taiyuan 030002, China)

**Abstract** Based on the daily precipitation data from 109 meteorological observation stations in Shanxi Province from 1980 to 2020, ten extreme precipitation indices were selected. The spatial and temporal distribution of an extreme precipitation in Shanxi Province was investigated, by using the methods of the climatic tendency rate, correlation analysis, factor analysis and R/S prediction methods. The results show that: (1) From a temporal perspective, the intensity and extremes of extreme precipitation in Shanxi Province have significantly increased. The number of consecutive dry days and consecutive wet days has decreased, while other indices have shown varying degrees of increasing, with the annual total precipitation showing the most significant increase. From the perspective of spatial scale, the annual total precipitation, precipitation intensity, precipitation frequency, and extreme values were all not distributed homogeneously, gradually increasing from northwest to southeast. Additionally, the extreme events in the northern and central regions show the most significant increase in extreme events. The number of consecutive dry days in the northern region is increasing, while there is significant spatial difference in the climate trend rate of consecutive wet days. The central region has shown a significant increase, while the trend in the northern and southern regions is mainly decreasing. (2) Extreme precipitation indices (except for the number of consecutive dry days) show a strong correlation with the annual total precipitation. The contribution of heavy precipitation and very heavy precipitation to the annual total precipitation shows an increasing trend. The cumulative contribution rate of the variance of the three common factors reached 87%, reflecting the significant influence of extreme precipitation intensity and precipitation index on extreme precipitation. The R/S analysis method shows a weak decreasing trend in the future for the annual total precipitation, rainy days, heavy rain days, and maximum 5-day precipitation, while the number of drought days continues to decrease and the consecutive wet days show a weak increasing trend. Overall, extreme precipitation in Shanxi province has shown an increasing trend in recent years with significant spatial differences.

**Key words** extreme precipitation indices; factor analysis; R/S prediction method