

文章编号: 2096-1618 (2022) 04-0456-08

# 四川盆地极端降水事件时空变化特征及未来趋势分析

刘子堂, 李谢辉, 杨静坤

(成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**为减少极端降水事件对四川盆地造成的损失,利用 1970–2019 年四川盆地内 14 个气象站点的逐日降水资料,通过选用和计算 9 个极端降水指数,对这些指数进行线性回归分析、Mann-Kendall 趋势检验、滑动 T 检验、小波分析、地理因子相关分析和 R/S 预测等,对四川盆地近 50 年来极端降水事件的时空变化特征和未来趋势进行分析。结果表明:(1)近 50 年来盆地内的降水趋势主要是以大雨和暴雨日数的增加为主,中雨日数虽有下降但变化很小,降水频率和降水强度呈现东多西少的空间分布,但从强降水量来看,西部部分地区的强降水量更大;(2)盆地内的极端降水事件呈现增加趋势,6 个极端降水指数存在突变年,其突变主要发生在 20 世纪 80 年代和 21 世纪的 10 年代前后,盆地内极端降水指数的显著周期约为 2~7 年;(3)极端降水指数与地理因子有关,自东向西,自北向南,海拔高度越高,极端降水指数变化越大;(4)在未来时期,四川盆地的降水量总体在减少,但极端降水和降水强度在增加。

**关键词:**应用气象学;极端气候;极端降水指数;时空变化特征;Hurst 指数;四川盆地

**中图分类号:**P426.62

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2022.04.015

## 0 引言

近年来,许多研究都表明全球气温正处于升高的过程中。秦大河等<sup>[1]</sup>在 IPCC AR5 第一工作组报告的亮点结论中曾指出,自 1800–2012 年以来全球气温已升高 0.85 °C,1951–2012 年全球平均地表升温速率 (0.12 °C/10 a,变化范围 (0.08 ~ 0.14) °C/10 a) 几乎是 1880 年以来升温速率的两倍。在全球变暖的背景下,极端气候事件的发生变得更加频繁,给经济和人民生命财产安全造成了严重影响。IPCC AR6 评估认为,人为影响特别是温室气体排放可能是全球尺度陆地强降水增强的主要驱动力。在大陆尺度上,人为影响对北美、欧洲和亚洲强降水变强具有贡献(高信度),而随着全球变暖加剧,强降水事件很可能变得更强、更频繁<sup>[2]</sup>。气候的急剧变化导致中国的极端降水事件不断频发,危害范围广,损失程度大。如 2019 年 6 月 15 日,贵州省黔西南州出现暴雨洪涝灾情,共造成 28038 人受灾,紧急转移分散安置 120 人,造成直接经济损失 1789 万元,其中农业损失 683 万元,基础设施损失 1045 万元,家庭财产损失 61 万元<sup>[3]</sup>。又如 2021 年 7 月 17–24 日河南省遭遇强降水,郑州单小时雨量突破历史极值,全省大部分地区出现暴雨、大暴雨,城市出现严重内涝,对社会和人民生活产生了极为不利的影响,造成了严重的经济损失。

国内外许多学者针对极端降水事件进行了大量相关研究。目前从全球的尺度来看,有研究表明全球变

暖导致了世界范围内大部分地区的极端降水指数有比较明显的增加趋势<sup>[4]</sup>。区域尺度上,北美<sup>[5]</sup>、非洲西部<sup>[6]</sup>、欧洲<sup>[7]</sup>和亚太地区<sup>[8]</sup>的相关研究也表明,其各区域的变化与全球尺度极端降水的变化趋势相同,都呈现出不同程度的增加趋势。对中国的研究发现,极端降水事件的发生由于受地形、经纬度等诸多因素的影响会因区域的不同而呈现出不同的变化趋势。如横断山区北部级极端降水事件的频率和强度均低于山区南部<sup>[9]</sup>;在黄土高原地区,极端降水指数变化不大,与多年平均值接近,在空间分布上全区的变化较一致<sup>[10]</sup>。

四川盆地是中国重要的人口密集区和农业区,也是成渝地区双城经济圈的重要区域。近年来,盆地内极端降水事件频发,典型事件如 2006 年的特大旱情,2009 年冬至 2011 年的严重持续干旱,2018 年的绵阳洪水,2020 年的乐山大洪水,这些与降水有关的极端降水事件都对四川省的国民经济和社会发展产生了重大影响。因此,选取和计算由 WMO 推荐的 9 个极端降水指数,首先对四川盆地 1970–2019 年的 9 个极端降水指数进行时空变化特征分析,然后分别采用 Mann-Kendall、滑动 T 检验和小波分析进行突变和周期特征分析,并对极端降水指数与地理因子的关系进行讨论,最后利用 Hurst 指数对四川盆地的未来降水趋势进行预测分析。其研究结果能为中国西部川渝经济区在应对气候变暖背景下的防旱减洪措施的制定提供重要的科学依据。

## 1 研究区概况

四川盆地 (26°03'N ~ 34°19'N, 97°21'E ~ 108°33'E)

收稿日期: 2021-07-15

基金项目: 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究基金资助项目 (2019QZKK0105); 四川省科技计划资助项目 (2021YJ0025); 2021 年省级大学生创新创业训练计划资助项目 (S202110621045)

位于中国西南地区,地处青藏高原东部,长江上游地带,主要包括了四川省中东部和重庆大部分地区。境内属于中亚热带湿润气候区,由于地形整体比较封闭,北部存在高大山脉秦岭,阻挡了冷空气的进入,冬季盆地内的气温高于同纬度其他地区。盆地内部常年多雾且湿气较重,阴雨天气较多,且日照时数和太阳辐射均为全国较低值<sup>[11]</sup>。图 1 是研究区的地理位置和海拔高度图。

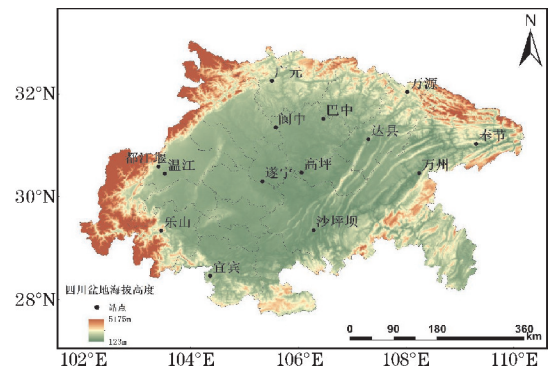


图 1 研究区气象站点分布和海拔高度

2 数据资料与研究方法

2.1 数据来源

采用的数据是中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的四川盆地内均匀分布的 14 个气象站点(图 1)1970–2019 年的逐日降水数据。对该数据采用内部一致性检查、气候界限值检查、台站极值检查 3 种质量控制方法,并对个别缺失数据进行插补处理,保证修正后的数据的科学性、准确性和连续性。

2.2 极端降水指数

采用世界气象组织 WMO 推荐的 9 个表征极端气候变化的降水指数来进行分析,具体见表 1。

表 1 所选的 9 个极端降水指数的定义

序号	指数名称/单位	缩写	定义
1	持续干期/d	CDD	日降水量<1mm 的最大持续日数
2	持续湿期/d	CWD	日降水量≥1 mm 的最大持续日数
3	中雨及以上日数/d	R10	年内日降水量≥10 mm 天数
4	大雨及以上日数/d	R20	年内日降水量≥20 mm 天数
5	暴雨及以上日数/d	R50	年内日降水量≥50 mm 天数
6	强降水量/mm	R95p	日降水量超过 95% 分位数的降水总量
7	极强降水量/mm	R99p	日降水量超过 99% 分位数的降水总量
8	降水强度/(mm/d)	SDII	年降水量/年降水日数(日降水量≥1 mm)
9	湿日降水量/mm	PRCPTOT	日降水量≥1 mm 的年累计降水量

2.3 研究方法

首先对 9 个极端降水指数进行线性回归和空间分析,得到近 50 年来各极端降水指数的时空变化特征,然后采用 Mann-Kendall 趋势检验、滑动 T 检验、小波分析、地理因子的相关分析和 R/S 预测,对四川盆地近 50 年的突变、周期和未来变化趋势进行研究,主要采用的研究方法如下:

(1)线性倾向估计法

线性倾向估计法是建立四川盆地内站点的平均极端降水指数与时间的一元线性回归方程,为

$$y_i=a+bx_i \quad (i=1,2,3,\cdots,n)$$

其中, $y_i$  为平均极端降水指数, $a$  为常数, $b$  为一元线性回归系数, $x_i$  为 50 年内的具体年份, $n$  为时间序列长度,当  $b>0$  时表示  $y_i$  随时间序列呈现上升趋势, $b<0$  时表示  $y_i$  随时间序列呈现下降趋势。

(2)Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall(M-K)趋势检验法是一种非参数检验的方法,不需要样本数据遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,相对于其他突变检验效果较好<sup>[12]</sup>。

对具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ ,构造一个秩序列:

$$s_k=\sum_{i=1}^k r_i \quad r_i=\begin{cases} 1, & x_i>x_j \\ 0, & x_i\leq x_j \end{cases} \quad j=1,2,\cdots,i$$

定义秩相关的检验统计量:

$$UF_k=\frac{s_k-E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad k=1,2,\cdots,n$$

$$E(s_k)=\frac{n(n+1)}{4} \cdot \text{Var}(s_k)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

其中, $UF_k$  为标准正态分布。若按时间序列  $x$  逆序再重复过程可得到  $UB_k$ ;画出曲线图,分析两条曲线和临界线(0.05 显著水平下的临界值为  $\pm 1.96$ ),若  $UF$  或  $UB$  统计值大于 0,则表明该变量呈现上升趋势,反之则是下降趋势;若  $UF$  和  $UB$  统计值曲线相交,且交点在临界线内,则交点对应的年份是突变年<sup>[13]</sup>。

(3)滑动 T 检验

滑动 T 检验是 t 检验的一种变形,一般用来检验突变,其基本思想是:把一气候序列中两段子序列均值有无显著差异看为来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验,如果两段子序列的均值差异超过一定的显著性水平,则可以认为均值发生质变,有突变发生<sup>[12]</sup>。统计量  $t$  为

$$t=\frac{\bar{x}_a-\bar{x}_b}{\sqrt{\frac{1}{n_a}+\frac{1}{n_b}}}$$
$$s=\sqrt{\frac{n_a s_a^2+n_b s_b^2}{n_a+n_b-2}}$$

其中,  $n_a, n_b$  为变量的子序列容量;  $\bar{x}_a, \bar{x}_b$  对应其均值,  $s_a^2, s_b^2$  为对应的方差。通过对照  $t$  分布临界值表, 当自由度遵从  $v = n_a + n_b - 2$  时, 可得  $t_{1-\alpha/2}$ ; 当  $|t| > t_{1-\alpha/2}$  时, 序列有突变发生;  $t > 0$  时增加突变, 反之则减少突变。

#### (4) 小波分析

设函数  $\varphi(t)$  为一平方可积函数,  $\varphi(t) \in L^2(R)$ ,  $R$  为任意实数, 若进行傅里叶变换,  $\psi(\omega)$  满足容许条件:

$$\int_R \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty$$

则  $\varphi(t)$  称为一个基本小波或小波母函数, 将小波函数  $\varphi(t)$  进行伸缩和平移, 得到连续小波  $\varphi_{a,\tau}(t)$ :

$$\varphi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad a, \tau \in R, a > 0$$

对于任意函数  $f(t) \in L^2(R)$  的连续小波变化为

$$W_f(a, \tau) = \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt$$

其中,  $a$  是尺度因子,  $\tau$  为平移因子,  $W_f(a, \tau)$  称为小波系数。因为 Morlet 小波在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 而在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率, 这些优点对于研究降水的周期变化特征非常有利<sup>[14]</sup>, 因此本文采用 Morlet 小波函数, 其形式如下:

$$\psi(t) = e^{i\omega t} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

所出的图能反映出气象要素时间序列中所包含各种周期的波动及其强弱随周期变化的特性, 可以通过图找出其主要作用的周期<sup>[15]</sup>。

#### (5) Hurst 指数的估计方法 (R/S 分析法)

Hurst 指数法是由英国科学家 Hurst 在 1951 年提出的非参数检验方法, 近年来在气候预测方面有诸多应用<sup>[16]</sup>。可以采取 R/S (重标极差) 法来测定 Hurst 指数, 其计算方法如下。

选择一时间序列  $\{\xi(t)\}$ ,  $t = 1, 2, \dots, n$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$  定义均值系列:

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

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (\xi(t) - y(\tau)) \quad 1 \leq t \leq \tau$$

极差:

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

标准差:

$$S(\tau) = \left[ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - y(\tau))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots, n$$

Hurst 总结并建立了如下的关系:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (C\tau)^H \quad (C \text{ 为常数})$$

用最小二乘法拟合得到  $H(0 < H < 1)$ , 对于不同大小的 Hurst 指数存在以下几种情况:

(1)  $0 < H < 0.5$ , 未来气候变化趋势与过去气候变化趋势相反;

(2)  $H = 0.5$ , 未来气候变化趋势和过去气候变化趋势无关;

(3)  $0.5 < H < 1$ , 未来气候变化趋势与过去气候变化趋势一致。

### 3 极端降水指数时空变化特征

#### 3.1 时间变化趋势

图 2 为四川盆地内 9 个极端降水指数在 1970–2019 年随时间变化的线性趋势结果。

结果表明, 持续干期 CDD (0.463 d/10 a) 呈现上升趋势, 持续湿期 CWD (0.095 d/10 a) 呈现下降趋势; 降雨日数中, 除中雨及以上日数 R10 (0.001 d/10 a) 有轻微下降外, 其余大雨、暴雨及以上日数 R20 (0.047/10 a) 和 R50 (0.004 d/10 a) 均呈上升趋势; 强降水量 R95p (1.978 mm/10 a)、极强降水量 R99p (1.479 mm/10 a)、湿日降水量 PRCPTOT (2.388 mm/10 a) 呈下降趋势, 而降水强度 SDII 以 0.09 mm/(d · 10 a) 呈现上升趋势。即在干日日数日渐增加的时期, 降水强度在增加, 大雨和暴雨日数也在增加, 说明单次的降水强度在增加。近 50 年来盆地内降水的趋势主要以大雨和暴雨日数的增加为主, 中雨日数虽有下降但变化很小。由于这 9 个极端降水指数的变化趋势均未通过 0.05 的显著性水平检验, 故得到的结果还有待进一步分析。

#### 3.2 空间分布特征

图 3 为四川盆地近 50 年 9 个极端降水指数的空间分布情况。可以看出, 持续干期 CDD (图 3a) 在四川盆地北部相对南部出现的更频繁, 日数更多, 而持续湿期 CWD (图 3b) 在四川盆地西部相对中东部出现的日数更多, 更频繁。就降水日数 R10、R20、R50 (图 3c、图 3d、图 3e), 降水强度 SDII (图 3h) 和湿日降水量 PRCPTOT (图 3i) 来看, 都是四川盆地东部明显多于西部, 但强降水量 R95p (图 3f) 和极强降水量 R99p (图 3g) 则是盆地西部多于中东部地区。总体而言, 四川盆地的降水频率和降水强度呈现东多西少的空间分布, 但从强降水量来看, 西部部分地区 (如都江堰和乐山) 的强降水量更大。

#### 3.3 突变特征

为减少单一突变方法检验的不准确性, 研究主要采用两种方法对近 50 年的突变特征进行互相检验。图 4~5 分别是利用 M-K 突变检验和步长为 5 的滑动 T 检验对 9 个极端降水指数的检验结果。表 2 为两种方法检验的综合判断结果。



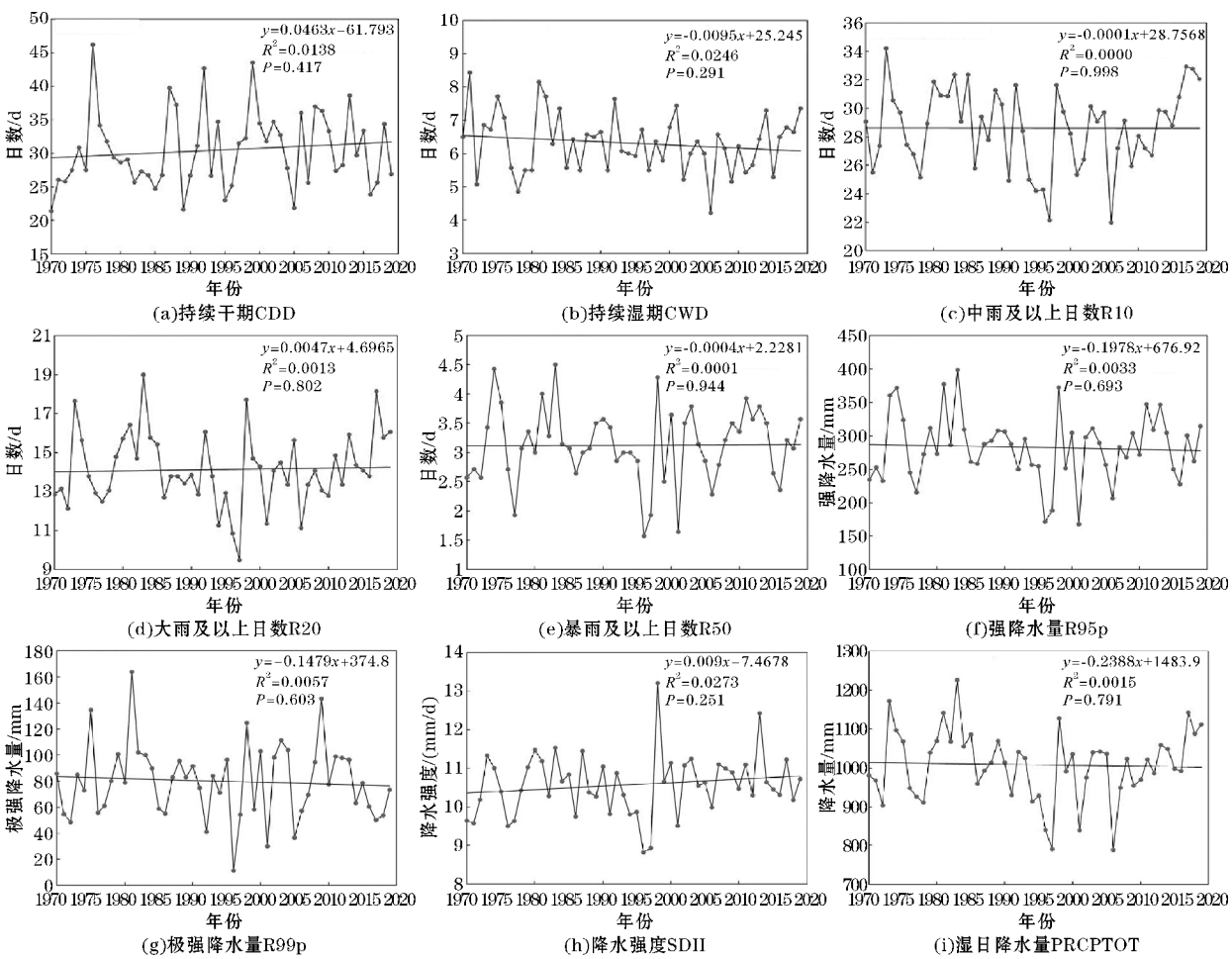


图2 四川盆地1970–2019年9个极端降水指数的年际变化趋势

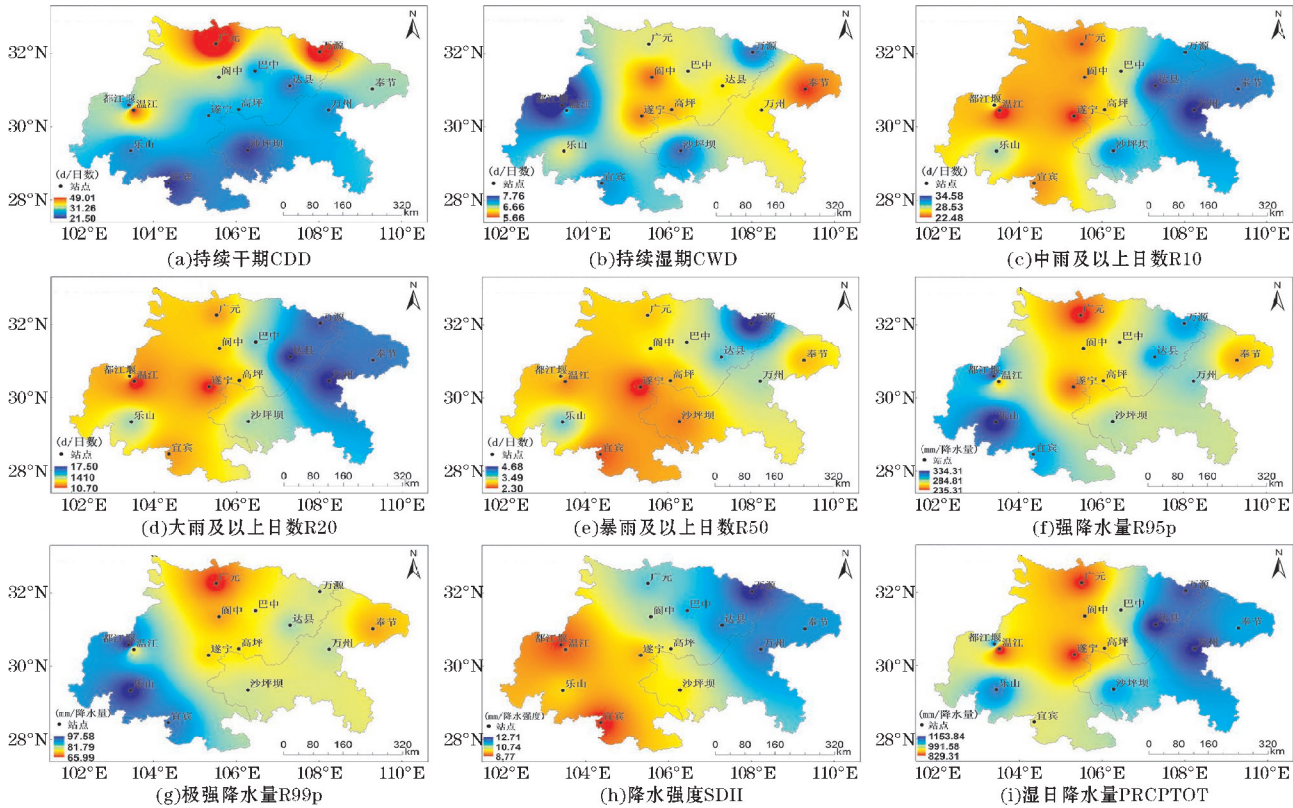


图3 四川盆地1970–2019年9个极端降水指数的空间分布

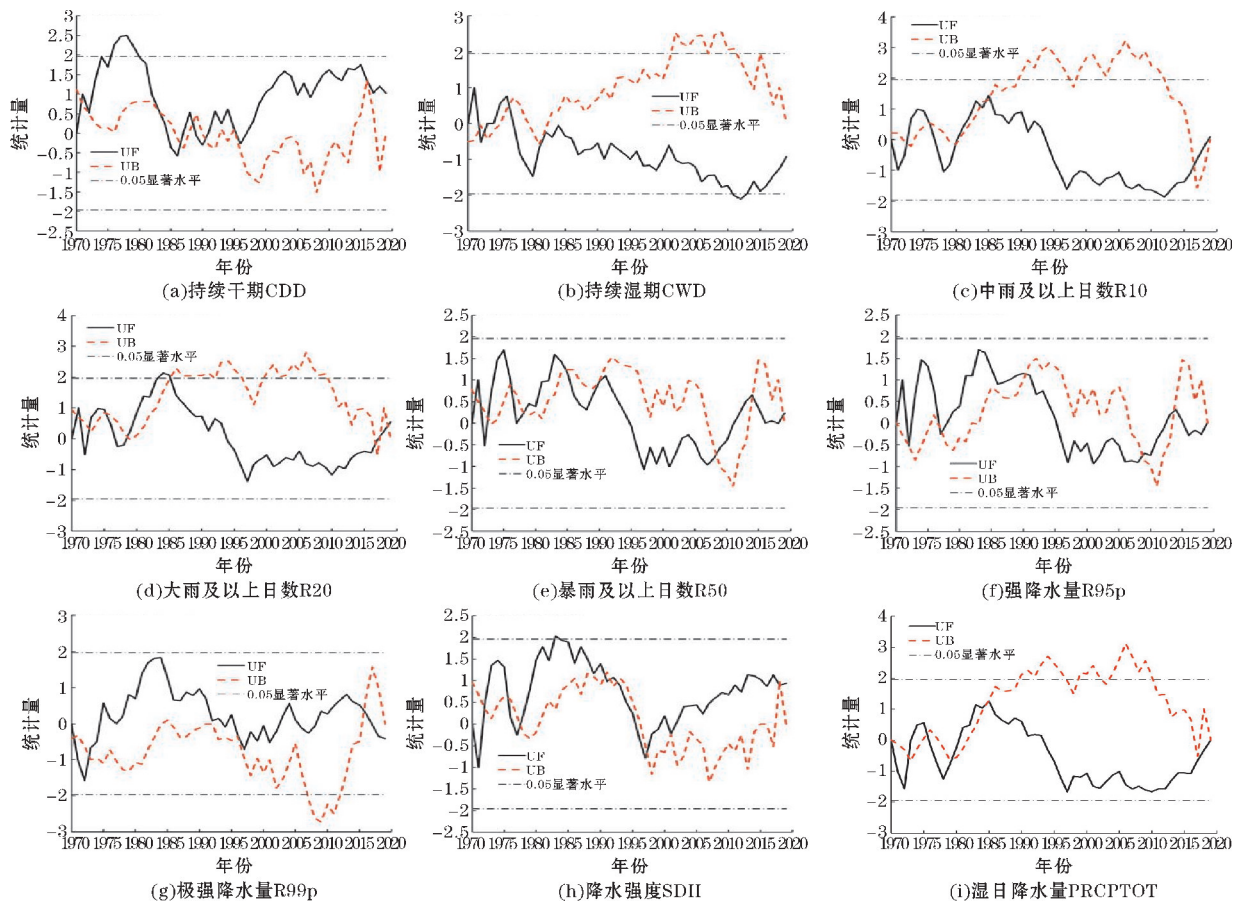


图 4 四川盆地 1970—2019 年 9 个极端降水指数的 M-K 突变检验

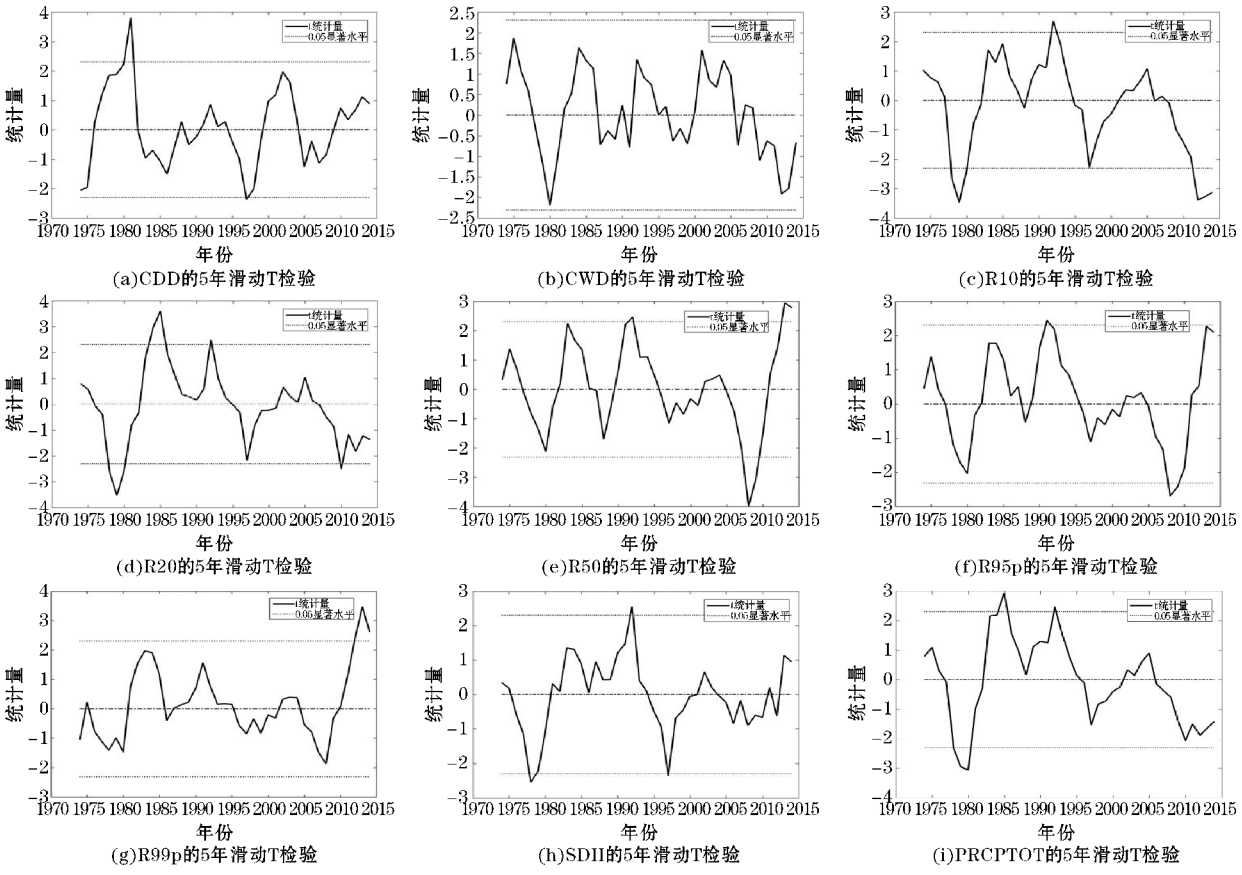


图 5 四川盆地 1970—2019 年 9 个极端降水指数的滑动 T 检验

表 2 四川盆地近 50 年 9 个极端降水指数的 M-K 和滑动 T 检验结果

极端降水指数		M-K 突变检验	滑动 T 检验	突变年
CDD	1971、1972、1983、1986、1989、1991、1995、1996、2016		1981、1997	无
CWD	1972、1973、1977、1981、1982		无	无
R10	1972、1976、1980、1984、1985、2017、2019		1978–1980、1992、2012 ~ 2014	1980
R20	1971、1973、1975、1980、1985、2017 ~ 2019		1978–1980、1984、1985、1992、2010	1985
R50	1971 ~ 1973、1976、1978、1985、1990、2009、2014、2019		1992、2008、2009、2013、2014	2009、2014
R95p	1972、1977、1991、2009、2014		1991、2008、2009	1991、2009
R99p	1970、1973、1996、2016		2012、2013、2014	无
SDII	1972、1976、1978、1991、1992、1998、2018		1978、1992、1997	1978、1992
PRCPTOT	1973、1975、1980、1985		1978–1980、1985、1992	1980、1985

限于篇幅,以其中的降水强度 SDII 为例进行分析,由图 4(h)可以看出 UF 和 UB 有多个交点,M-K 方法检测到 1972 年、1976 年、1978 年、1991 年、1992 年、1998 年、2018 年共 7 个突变年。综合分析可以发现自 1978 年开始,UF 都处于上升趋势,直至 1983 年前后超过了 0.05 的显著性水平检验值,并在这年显著性上升,对应滑动 T 检验(图 5h)的结果与之吻合,说明在 1978 年确实发生了突变,变化趋势二者对应。在之后的年份中,M-K 突变检验的图中 UF 和 UB 又有多次重合相交,其年份均发生了突变,但综合滑动 T 检验结果验证后发现 SDII 指数只有 1978 年和 1992 年为真实的突变年。对 9 个极端降水指数的综合分析表明(表 2),四川盆地内的极端降水事件呈现增加趋势,R10、R20、R50、R95p、SDII 和 PRCPTOT 都存在突变年,其突变主要发生在 20 世纪 80 年代和 21 世纪的 10 年代前后。

3.4 周期特征

对 9 个极端降水指数分别利用 Morlet 小波函数进行小波分析,限于篇幅,在此仅列出具有大多数相同主周期的极端降水指数 SDII 的小波分析图。图 6(a)为 SDII 的小波能量谱,图 6(b)为用红噪声对检验分析的结果图。可以看出,图 6(a)中 SDII 的显著性年际变化周期为 5 ~ 7 年和 0 ~ 7 年,周期变化的集中影响范围在 1970–1980 年和 1981–2010 年。图 6(b)中 SDII 通过显著性检验的周期为 2 ~ 6 年。同理,对其余 8 个极端降水指数都做类似小波周期变化分析,综合结果表明,四川盆地极端降水指数的显著周期约为 2 ~ 7 年。

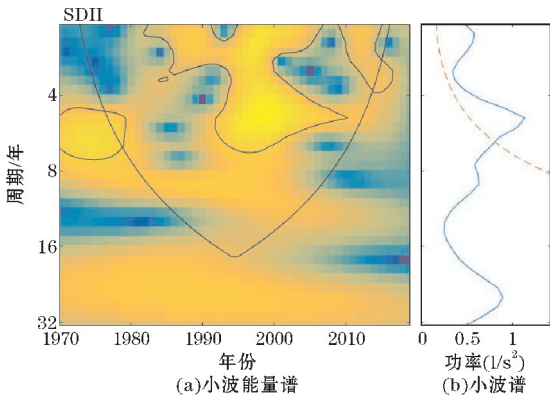


图 6 四川盆地 1970–2019 年极端降水指数 SDII 小波分析图

3.5 极端降水指数与地理因子的关系

为具体了解极端降水指数与地理因子的关系,表 3 列出了 9 个极端降水指数与经纬度、海拔高度之间的相关系数。9 个指数中,只有 CDD 和 R10 未通过与纬度的 0.05 显著性水平检验,其余指数均通过了显著性水平检验。

表 3 极端降水指数与地理因子的相关性分析

极端降水指数	经度	纬度	海拔高度
CDD	0.059 **	0.703	0.451 **
CWD	-0.425 **	-0.189 **	0.478 **
R10	0.692 **	0.065	-0.212 **
R20	0.759 **	0.241 **	-0.137 **
R50	0.396 **	0.465 **	0.165 **
R95p	-0.217 **	-0.387 **	0.149 **
R99p	-0.475 **	-0.594 **	0.196 **
SDII	0.859 **	0.678 **	-0.114 **
PRCPTOT	0.470 **	-0.065 **	-0.062 **

注: \*\* 代表  $P < 0.01$ , 通过了  $\alpha = 0.01$  的显著性水平检验。

可以看出,9 个指数中,CDD、R10、R20、R50、SDII、PRCPTOT 这 6 个指数与经度呈正相关,3 个指数 CWD、R95p、R99p 与经度呈负相关,相关系数最高的指数是 SDII,为 0.859;R20、R50、SDII 这 3 个指数与纬度呈正相关,4 个指数 CWD、R95p、R99p、PRCPTOT 与纬度呈负相关,相关系数最高的指数是 SDII,为 0.678;5 个指数 CDD、CWD、R50、R95p、R99p 与海拔高度呈正相关,其余 4 个指数 R10、R20、SDII、PRCPTOT 与海拔高度呈负相关,相关系数最高的指数是 CWD,为 0.478。综合分析结果表明,四川盆地内的极端降水指数与经纬度、海拔高度有相关性,其变化主要与经度呈正相关,自西向东随经度的增加而增大;主要与纬度呈负相关,随纬度从南向北递减;与海拔高度呈正相关,随海拔高度的升高而增加,即经度越大(自东向西),纬度越低(自北向南),海拔高度越高,极端降水指数值变化越大。



4 极端降水指数的未来变化趋势

由于用 R/S 分析法得到的 Hurst 指数可以衡量一个时间序列的统计相关性,并对长期记忆过程进行分

析。因此为探讨四川盆地极端降水指数的未来变化趋势,分别计算 9 个极端降水指数的 Hurst 指数,结果如表 4 所示,主要通过过去趋势变化和 Hurst 指数对未来极端降水指数的总体变化趋势进行预测。

表 4 9 个极端降水指数的 Hurst 指数

极端降水指数	CDD	CWD	R10	R20	R50	R95p	R99p	SDII	PRCPTOT
过去趋势	+	-	-	+	+	-	-	+	-
Hurst 指数	0.416	0.473	0.510	0.566	0.421	0.465	0.454	0.541	0.525
未来趋势	-	+	-	+	-	+	+	+	-

注:“+”表示增加趋势,“-”表示降低趋势。

可以看出,CDD、CWD、R50、R95P 和 R99p 的 Hurst 指数都小于 0.5,则时间序列是反持久性的或逆状态持续性的,很有可能是记忆的转弱和反转的开始,即未来的变化趋势会呈现出与过去相反的趋势变化。表明在未来时期,持续干期将减少,持续湿期将增加,暴雨及以上日数、强降水和极强降水量都将增加。R10、R20、SDII 和 PRCPTOT 的 Hurst 指数都大于 0.5,反映了序列中隐藏的长期趋势,即长期记忆强,具有正效应,继续保持现有趋势的可能性强。表明在未来时期,中雨及以上日数继续减少,大雨及以上日数继续增加,降水强度继续增加,但湿日降水量继续减少。总体来说,四川盆地的降水量总体在减少,但极端降水和降水强度在增加。

5 结论与讨论

基于中国气象数据网提供的四川盆地 1970–2019 年 14 个气象站点的逐日降水数据,从世界气象组织推荐的极端气候指数中选取了 9 个极端降水指数,通过利用线性回归分析、Mann-Kendall 趋势检验、滑动 T 检验、小波分析、地理因子的相关分析和 R/S 预测等,对四川盆地近 50 年来极端降水事件的时空变化特征和未来趋势进行了分析。主要得到以下一些结论:

- (1)近 50 年来盆地内降水的趋势主要以大雨和暴雨日数的增加为主,中雨日数虽有下降但变化很小。盆地内的极端降水事件呈现增加趋势,R10、R20、R50、R95p、SDII 和 PRCPTOT 都存在突变年,其突变主要发生在 20 世纪 80 年代和 21 世纪的 10 年代前后。盆地内极端降水指数的显著周期约为 2~7 年。
- (2)四川盆地的降水频率和降水强度呈现东多西少的空间分布,从强降水量来看,西部部分地区的强降水量更大。极端降水指数的变化主要与经度呈正相关,与纬度呈负相关,与海拔高度呈正相关,即经度越大,纬度越低,海拔高度越高,极端降水指数值变化越大。

- (3)Hurst 指数分析表明,在未来时期,持续干期将减少,持续湿期将增加,暴雨及以上日数、强降水和极强降水量都将增加;中雨及以上日数继续减少,大雨及以上日数继续增加,降水强度继续增加,但湿日降水量继续减少。即四川盆地的降水量在未来时期总体在减少,但极端降水和降水强度在增加。
- 总之,近 50 年来四川盆地极端降水指数的线性趋势表明总降水量呈下降趋势,但大雨和暴雨日数在增加,中雨日数虽有下降但变化很小。由于分析的 9 个极端降水指数的变化趋势均未通过 0.05 的显著性水平检验,故此结论还有待进一步分析。在将本文的结论与张顺谦等<sup>[17]</sup>、孙晨等<sup>[18]</sup>、罗玉等<sup>[19]</sup>对四川省极端降水的相关研究进行对比后发现,本文得到的关于极端降水事件在近 50 年的时空整体变化趋势与他们的结论基本一致,由于研究区所选范围的不同,所选时间研究尺度和极端降水指数的不同,所以在时空变化的范围幅度值上有所差异。本文还结合两种方法对突变特征、周期和未来趋势进行了研究,相比其他的类似分析更加全面和细致。由于影响极端降水事件的原因众多而且复杂,本文仅对极端降水指数和地理因子的相关性进行了讨论,这还不够全面,未来还可进一步从自然和人为两大因素中挑选主要因子进行更全面的分析。

参考文献:

[1] 秦大河,Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):1–6.

[2] 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):167.

[3] 李阳. 黔西南州夏季暴雨天气特征分析及对农业生产的影响[J]. 农业与技术,2021,41(17):103–105.

[4] Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al.

- Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111, D05109.
- [5] Pita-Diaz O, Ortega-Gaucin D. Analysis of Anomalies and Trends of Climate Change Indices in Zacatecas, Mexico[J]. *Climate*, 2020, 8(4):55.
- [6] Arona D, Adeline B, Richard W, et al. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6):065020.
- [7] Sanchez E, Gallardo C, Gaertner M A, et al. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach [J]. *Global & Planetary Change*, 2004, 44(1/4):163–180.
- [8] Jiang R, Xie J, Zhao Y, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in Shaanxi province under climate change [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 130:831–845.
- [9] 卞耀劲, 孙鹏, 张强, 等. 横断山区极端气候变化的时空格局[J/OL]. *水利水电技术(中英文)*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.tv.20210415.1338.004.html>, 2021-05-21.
- [10] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6):1456–1466.
- [11] 刘劲龙. 四川盆地极端气温和降水研究[D]. 重庆:西南大学, 2013.
- [12] 于灏, 周筠珺, 李倩, 等. 基于 CMIP5 模式对四川盆地湿季降水与极端降水的研究[J]. *高原气象*, 2020, 39(1):68–79.
- [13] 丁之勇, 鲁瑞洁, 刘畅, 等. 环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(3):281–292.
- [14] 张愿章, 段永康, 郭春梅, 等. 河南省 1951–2012 年降水量的 Morlet 小波分析[J]. *人民黄河*, 2015, 37(10):25–28.
- [15] 吴利华, 彭汐, 马月伟, 等. 1951–2016 年昆明极端气温和降水事件的变化特征[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1):91–104.
- [16] 张国存, 查良松. 南京近 50 年来气候变化及未来趋势分析[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(6):580–584.
- [17] 张顺谦, 马振峰. 1961–2009 年四川极端强降水变化趋势与周期性分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11):1918–1929.
- [18] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近 44a 四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1):119–126.
- [19] 罗玉, 马振峰, 陈超, 等. 四川省盛夏极端降水变化特征及与高原夏季风的关系[J]. *干旱气象*, 2018, 36(5):733–742.

## Analysis on Spatiotemporal Change Characteristics and Future Trends of Extreme Precipitation Events in Sichuan Basin

LIU Zitang, LI Xiehui, YANG Jingkun

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to reduce the losses caused by extreme precipitation events in Sichuan Basin, this paper mainly used the daily precipitation data of 14 meteorological stations in Sichuan Basin from 1970 to 2019. Nine extreme precipitation indices were selected and calculated, and these indexes were analyzed by linear regression analysis, Mann-Kendall trend test, sliding T test, wavelet analysis, correlation analysis with geographical factors and R/S prediction. The temporal and spatial variation characteristics and future trends of extreme precipitation events in Sichuan Basin in recent 50 years were analyzed. The results show that: (1) The trend of precipitation in the basin in the past 50 years was mainly based on the increase of the number of heavy rain and rainstorm days. Although the number of moderate rain days had declined, the change was very small. The spatial distribution of precipitation frequency and intensity was more in the east and less in the west, but from the perspective of heavy precipitation, the amount of heavy precipitation in some parts of the west was greater; (2) The extreme precipitation events in the basin show an increasing trend, and the six extreme precipitation indexes have mutation years, which mainly occurred in the 1980s and the decade of the 21st century; The significant period of extreme precipitation index in the basin is about 2–7 years; (3) The extreme precipitation index is related to geographic factors. From east to west and from north to south, the higher the altitude, the greater the change of extreme precipitation index; (4) In the future, the precipitation in Sichuan Basin will decrease, but the extreme precipitation and precipitation intensity will increase.

**Keywords:** applied meteorology; extreme climate; extreme precipitation index; spatiotemporal change characteristics; Hurst index; Sichuan Basin