

Spatial and Temporal Variation of Extreme Precipitation Indices in Sichuan Province from 1971 to 2018

Zhen Wang

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: wangzh_cuit@163.com

Received: Jul. 8th, 2019; accepted: Jul. 22nd, 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

Daily precipitation data sets of 35 meteorological stations in Sichuan Province from 1971 to 2018 were used to calculate extreme precipitation indexes. Linear trend estimation method, Mann-Kendall test, moving *t*-Test Technique and inverse distance weight interpolation method were used to study the spatial-temporal change characteristics, mutation characteristics and influencing factors of extreme precipitation indexes in Sichuan Province. The conclusions are as follows: 1) From 1971 to 2018, there was no significant change in the time series of extreme precipitation indexes in Sichuan Province, and only the SDII index has shown a significant upward trend. 2) The mutations of PRCPTOT, R20, R50, RX5day and SDII occurred in the 1980s to the 1990s, and the mutations of R50 and R95p also occurred in 2009, and the mutations of R99p were concentrated in 2004. 3) According to the spatial variation characteristics, the continuous rainless days and the increase of extreme precipitation in the western Sichuan plateau and the southwestern Sichuan are prone to extreme precipitation events. The increasing of continued dry period and the decreasing of annual precipitation make the Central and Southern Sichuan Basin tend to be arid, the risk of flood disasters in the eastern part of the basin is relatively high. 4) From the perspective of influencing factors, longitude and altitude have a greater impact on the extreme precipitation indexes than latitude. With the increase of longitude from west to east and the decrease of altitude from west to east, the extreme precipitation indexes have an increasing trend. 5) Most indexes (except CDD and RX1day) are highly correlated with annual precipitation, among which the indexes that have a great influence on annual precipitation are R95p, R10 and R20.

Keywords

Extreme Precipitation, Sichuan Province, Spatial-Temporal Variation

1971~2018年四川省极端降水指数时空变化特征

王 真

摘要

为了研究四川省极端降水指数的时空变化、突变特征和影响因素, 利用1971~2018年四川省35个气象站点的逐日降水资料, 采用线性倾向估计法、Mann-Kendall检验法、滑动 t 检验和反距离加权插值(IDW插值)方法研究, 得出如下结论: 1) 1971~2018年四川极端降水指数时间序列变化不显著, 只有降水强度SDII呈显著上升趋势。2) 年总降水量PRCPTOT、大雨日数R20、暴雨日数R50、5日最大降水量RX5day和降水强度SDII的突变集中发生在20世纪80~90年代, 暴雨日数R50和强降水量R95p在2009年也发生突变, 特强降水量R99p突变年份集中在2004年。3) 川西高原、川西南地区持续无雨日和极端降水量增加; 盆地中部和南部持续干期增加和年降水量减少使得此区域趋于干旱化, 盆地东部发生洪涝灾害风险较大。4) 经度和海拔高度影响因素对极端降水指标影响较大, 随着经度自西向东增加, 海拔自西向东降低, 极端降水指数具有增加的趋势。5) 除持续干期CDD和1日最大降水量RX1day, 其余指数和年总降水量有较大相关性, 其中对年降水量影响较大的指数为强降水量R95p、中雨日数R10和大雨日数R20。

关键词

极端降水, 四川省, 时空变化

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球变暖的大背景下, 气候环境发生剧烈的变化。温度升高使得地面蒸发量加大, 大气湿度增加导致降水量增多, 改变局地降水格局[1], 区域极端降雨的趋势日益加剧[2], 极端降水事件的发生频率增大[3] [4], 由于极端天气造成的损失随着时间的推移而稳步增长[5] [6], 对自然和社会造成了严重的影响[7]。

随着气候变暖不断加剧, 自20世纪80年代以来, 我国各区域的降水强度普遍增加, 区域极端降水事件发生趋于频繁[8], 引起国内学者的广泛关注。目前的研究思路主要是通过极端降水指数的时间序列变化、突变特征和空间分布对区域极端降水事件进行分析。由于极端降水事件分布有很强的区域性差异, 目前的研究分析涵盖了松辽流域[9]、京津冀地区[10]、鲁中地区[11]、江淮流域[12]、华北地区[13]等地区, 深入研究我国极端降水事件分布和发展趋势。

四川省位于中国西南地区, 地形地貌较为复杂, 极端降水事件频发。近年来许多学者对西南地区的极端降水进行研究。陈海山等[14]研究中国近50年不同区域极端降水事件变化特征的季节性差异, 分析得出西南地区极端降水事件发生频次较高, 年极端降水事件从长期来看有减少趋势。罗玉等[15]研究1961~2015年四川省156个气象台站的汛期极端降水指数时空变化特征发现55年间汛期的极端降水指数在大部分地区呈现增加趋势且有明显周期变化。王昊等[16]研究1971~2013年西南地区雨季极端降水指

数变化趋势的时空变化和变化特征,发现高海拔地区变得更加湿润,低海拔地区发生洪涝及干旱风险较大。已有的文献研究侧重于对西南地区 and 四川省雨季极端降水事件研究,四川省各个区域年际分析和 2015 年来四川省极端降水指数的研究较少。现有文献研究选取的极端降水指标较少,无法更整体和全面地反映,本文将选取全部极端降水指数对 1971~2018 年四川省极端降水状况及发展趋势做出详细的分析。

本文利用 1971~2018 年四川省 35 个地面观测站逐日气象观测资料,采用线性倾向估计法、Mann-Kendall 法、反距离权重插值等方法对四川省极端降水事件进行研究,利用最新的时次资料数据,更新 2015 年后对四川省极端降水事件的研究分析,为四川省从自然和社会角度出发,如何更好地适应变化中的气候以及如何应对极端降水事件提供了决策依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据来源与质量控制

本文所用数据由中国气象数据网(<https://data.cma.cn>)提供。此次研究中选取数据为 1971~2018 年四川省 35 个地面站(如图 1 所示)的逐日降水量资料,通过了极值检验,时间一致性检验和均一化检验,严格控制数据质量。运用 RCLimDex 软件运行质量控制模块,自动识别离群值和不合理值,保证观测时段的连续性,进一步把控数据质量。

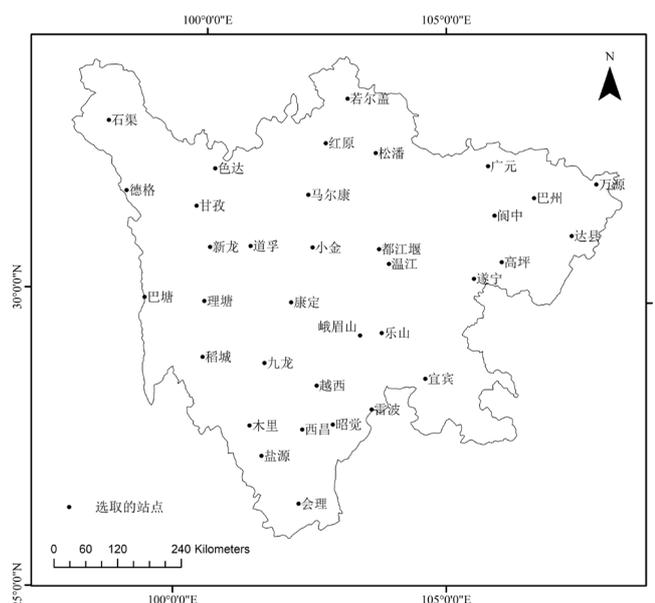


Figure 1. Selection of 35 meteorological stations in Sichuan Province

图 1. 选取四川省 35 个气象站点

2.2. 极端降水指标选取

本文采用的极端降水指标根据由世界气象卫生组织(World Meteorological Organization)气候委员会等组织成立了气候变化检测指标专家组(Expert Team on Climate Change and Indices)参与制定的 27 个极端指数[17],选取其中 11 个极端降水指数(表 1)。基于暴雨的定义为 24 小时降水量大于等于 50 mm 的强降水天气,本文将 11 个极端指数中自定义指数 Rnn 确定为 R50,用于分析暴雨日数的变化趋势。基于 R 语言 RCLimDex 1.0 软件计算极端降水指数,定义平均极端降水指数为全部站点极端降水指数的平均值。

Table 1. Definition of extreme precipitation indices
表 1. 极端降水指数定义

分类	代码	指数名称	指数定义	单位
绝对指数	R10	中雨日数	日降水量≥10 mm 的日数	d
	R20	大雨日数	日降水量≥20 mm 的日数	d
	R50	暴雨日数	日降水量≥50 mm 的日数	d
相对指数	R95p	强降水量	日降水量>95%分位值的年累计降水量	mm
	R99p	特强降水量	日降水量>99%分位值的年累计降水量	mm
持续指数	CDD	持续干期	日降水量<1 mm 的最大持续日数	d
	CWD	持续湿期	日降水量>1 mm 的最大持续日数	d
	PRCPTOT	年总降水量	日降水量>1 mm 的年累计降水量	mm
	RX1day	1 日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
强度指数	RX5day	5 日最大降水量	每月连续 5 日最大降水量	mm
	SDII	降水强度	年总降水量与日降水量≥1.0 mm 日数的比值	mm/d

2.3. 研究方法

线性倾向估计法：采用一元线性回归，建立时间序列与平均极端降水指数回归方程，如：

$$y_i = b_0 + bx_i (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中 y_i 为年平均极端指数大小， x_i 为对应年平均极端指数对应的年份， b 为回归系数， $b > 0$ 表明时间序列变化呈上升趋势， $b < 0$ 表明时间序列变化呈下降趋势。通过计算出指数的线性倾向率并进行相关系数的显著性检验[18]，从而分析极端降水指标年际变化趋势，得出极端降水指数的时间序列变化。

Mann-Kendall 法：Mann-Kendall 法[19]用于检验突变。Mann-Kendall 法检验作为非参数检验方法，不需要样本遵循一定的分布，同时可以减少异常值的干扰检验，明确突变开始时间，对突变区域有一定的指示作用。设原始时间序列为 x_1, x_2, \dots, x_n ，构造秩相关序列 S_k ：

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i$$

在时间序列独立的前提下，定义秩相关检验统计量：

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

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

其中设 $UF_1 = 0$ ， $E(s_k)$ 、 $\sqrt{Var(s_k)}$ 代表秩序列得到 s_k 均值和标准差。 UF_k 系列满足标准正态分布，在给定显著性水平 α 下，通过标准正态分布表得出的相应的临界值 $U_{1-\alpha/2}$ ，若 $|UF_k| > U_{1-\alpha/2}$ ，表示变化趋势明显， $UF_k > 0$ 有增加趋势， $UF_k < 0$ 有减小趋势。用同一时间序列的逆序列 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$ 重复上述步骤，设 $UB_k = -UF_k (k = n, n-1, \dots, 1)$ ， $UB_1 = 0$ 得到 UB_k 系列，把 UF_k 和 UB_k 系列两条曲线和 $\pm U_{1-\alpha/2}$ 一起绘制在

一张图上, UF_k 和 UB_k 系列出现交点且在给定的显著性水平范围之间, 交点对应的的时间就是突变开始的时间。

滑动 t 检验法: 滑动 t 检验法[20]用检验两组随机变量样本均值的是否存在显著性差异来判断是否发生突变, 将长度为滑动步长的两组子序列均值看作两组变量的总体均值。若两组子序列的均值差异超过一定的显著性水平, 则说明两组变量产生突变。

在时间序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 自定义起始点和滑动步长, 两组变量的子序列容量分别是 n_A 和 n_B , 对应的均值和方差分为 \bar{x}_A 和 \bar{x}_B 、 s_A^2 和 s_B^2 , 统计量为 t :

$$t = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}} \quad \text{其中 } s = \sqrt{\frac{n_A s_A^2 + n_B s_B^2}{n_A + n_B - 2}}$$

通过对照 t 分布临界值表, 自由度遵从 $\nu = n_A + n_B - 2$ 时, 得出 $t_{1-\alpha/2}$ 。当 $|t| > t_{1-\alpha/2}$ 时, 则认定在该起始点前后, 两组数据均值产生显著性差异, 即产生了突变。 $t > 0$ 发生了增加突变, $t < 0$ 发生了减小突变。

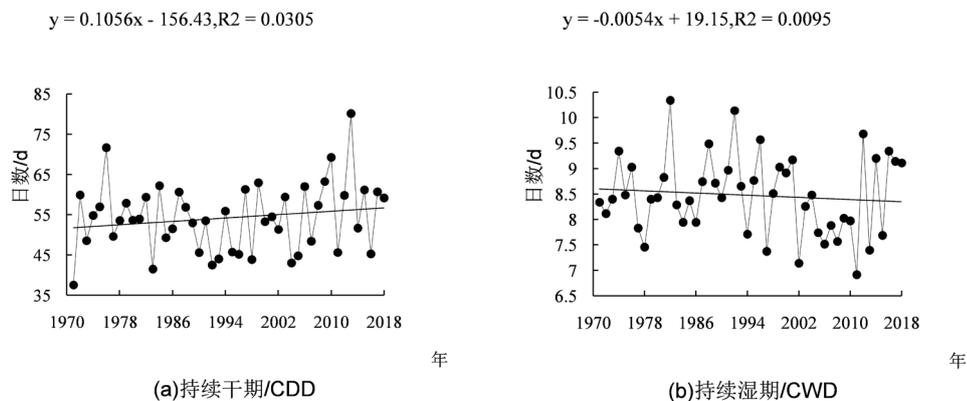
反距离加权插值: 本文通过在 ArcGIS 10.2.2 环境下, 对各个站点各个极端降水指数的大小和线性倾向率进行反距离加权插值(Inverse Distance Weighting), 进而得出四川省极端降水指标空间分布图和极端降水指数线性变化趋势空间分布图。分析极端降水指数的空间格局及其变化趋势特征。

3. 结果与分析

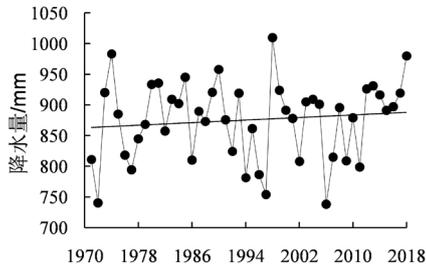
3.1. 四川省极端降水指数时间序列变化趋势

图 2 为四川省 11 个极端降水指数在 1971~2018 年间的变化过程和各个指数的变化趋势。只有降水强度 SDII 通过 $\alpha = 0.05$ 水平的显著性检验, 说明 SDII 在 48 年间变化趋势显著。除了持续湿期 CWD (图 2(b)) 以 $0.054 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率, 呈现出较缓慢的下降趋势, 其余指数均呈现不同速率的上升趋势。持续干期 CDD 以 $1.056 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升, CWD 以 $0.054 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率下降, 说明 1971~2018 年四川省整体持续干旱的日数增加, 持续湿润的日数减少, 全省气候变化有向干旱化发展趋势, 与罗玉等对西南地区雨季极端降水指标分析结论保持一致[15]。

年总降水量 PRCPTOT (图 2(c)) 以 $5.276 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 速率上升, 在 1971~2018 年间四川省总体降水量有所增加, 在持续干旱日数增加的同时, 侧面表现了单次降水过程的降水强度在增加, 与 SDII 以 $0.126 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升表现一致。中雨日数 R10、大雨日数 R20、暴雨日数 R50 分别以 $0.246 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.132 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.016 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率上升, 从绝对指数中的三个指数变化趋势可以看出, 中雨日数的增长速率最大, 暴雨无明显增长速率, 在研究的时段内, 四川省降雨类型以的中雨增长为主。

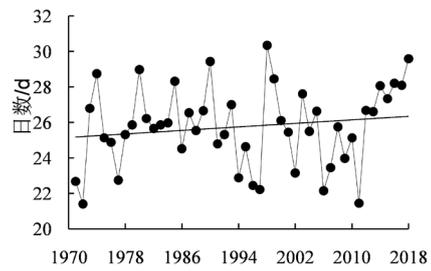


$$y = 0.5276x - 176.97, R^2 = 0.0133$$



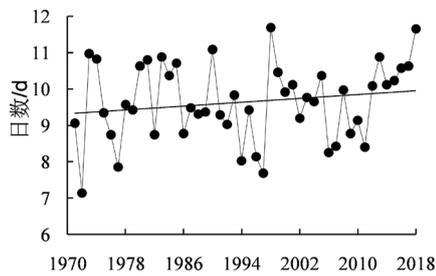
(c)年总降水量/PRCPTOT

$$y = 0.0246x - 23.275, R^2 = 0.0238$$



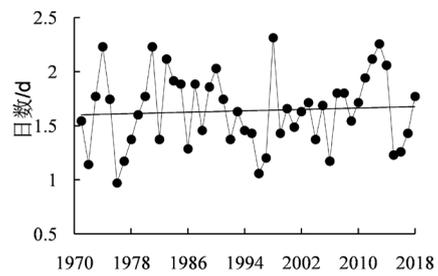
(d)中雨日数/R10

$$y = 0.0132x - 16.592, R^2 = 0.0302$$



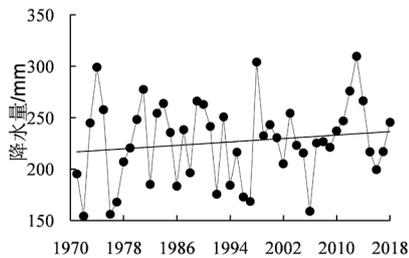
(e)大雨日数/R20

$$y = 0.0016x - 1.5638, R^2 = 0.0044$$



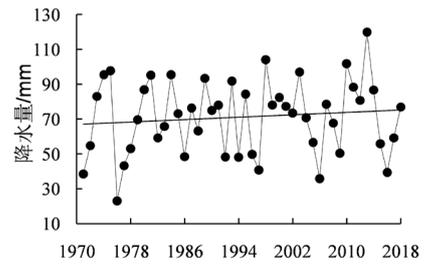
(f)暴雨日数/R50

$$y = 0.4173x - 605.6, R^2 = 0.0226$$



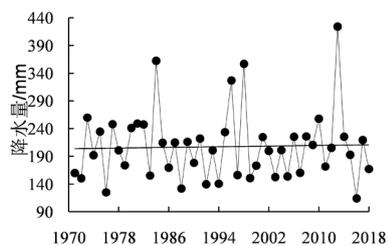
(g)强降水量/R95p

$$y = 0.1731x - 274.21, R^2 = 0.013$$



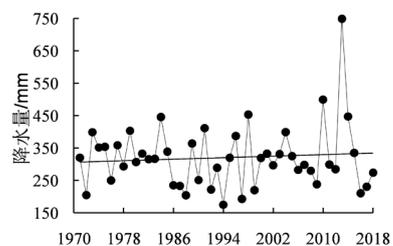
(h)特强降水量/R99p

$$y = 0.1507x - 93.136, R^2 = 0.0011$$



(i)1日最大降水量/RX1day

$$y = 0.5898x - 855.86, R^2 = 0.0071$$



(j)5日最大降水量/RX5day

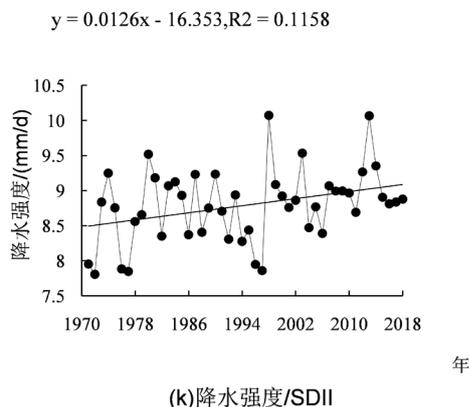


Figure 2. The change process and linear trend of extreme precipitation index in Sichuan Province during 1971-2018
图 2. 1971~2018 年四川省极端降水指数的变化过程及其线性趋势

相对指数中的强降水量 R95p 和特强降水量 R99p 均保持上升的趋势, 分别以 $4.173 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $1.731 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率增加, 表征强度指数的 1 日最大降水量 RX1day、5 日最大降水量 RX5day 和 SDII 分别以 $5.898 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$, $1.507 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.126 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率增加, 其中 SDII 通过 0.05 显著性检验, 以上极端降水指数的时间序列变化说明在 1971~2018 年四川省的整体降水量和强度在不断增加, 随着全省平均持续干旱的日数增加, 降水过程更加集中, 干湿季更加明显, 更容易由于极端降水事件而引发干旱、洪涝、泥石流、山体滑坡等自然灾害。

3.2. 四川省极端降水指数时间序列突变特征

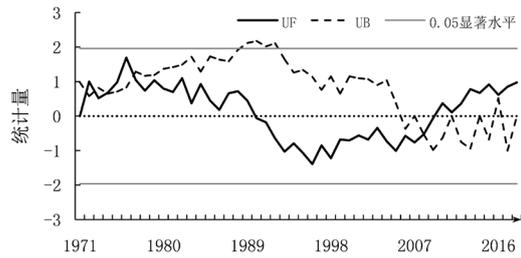
为了检验在 1971~2018 年四川省气候状态是否稳定是否发生气候突变, 本文通过运用 1971~2018 年四川省 35 个气象站点的平均极端降水指数, 采用 Mann-Kendall 检验法和 t 检验的方法对四川省的极端降水指数时间变化序列进行非线性检验(如图 3 所示), 检验结果如下。

持续指数突变特征如下: 图 3(a) CDD 可见, UF 曲线从 20 世纪 90 年代初到 21 世纪初在 0 刻度线以下, 指数呈现减少的趋势, 自 2010 年后开始增长。UF 曲线与 UB 曲线相交于 1977、2008、2011, 通过滑动 t 检验, 不具有明显突变点。图 3(b) CWD 在 1973~2005 年在 95%置信区间内大部分呈现增加趋势, 个别年份有所减少, 自 2005 后有减小趋势。结合 UF、UB 两条曲线交点和滑动 t 检验, 无显著突变年份。图 3(c) PRCPTOT 自 20 世纪 90 年代末开始, UF 曲线保持在 95%置信区间内, 在 0 刻度线附近波动, 无明显的增加减少趋势。根据图像显示, UF 和 UB 两条曲线交点较多, 通过滑动 t 检验, 在 1979 年和 1991 年发生突变。

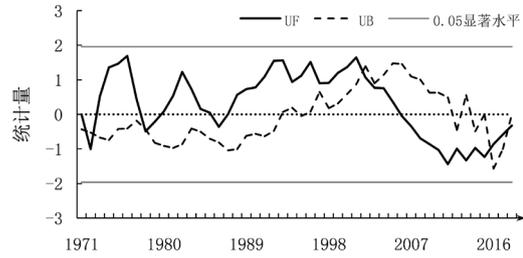
绝对指数整体上呈现出不同程度的增加趋势。图 3(d) R10 在 2007~2013 年间呈现减少趋势, 在 1971~2018 年其余时段内均呈现增加趋势, 20 世纪 80~90 年代个别年份增加趋势显著。经滑动 t 检验不具备明显突变年份。图 3(e) R20 在 1979~1993 年、2000~2006 年呈现增加趋势, 其余年份对应大雨日数有减小的趋势。通过滑动 t 检验, 突变年份为 1979 年。由图 3(f)可知, R50 在 1976~1979、2006~2012 和 2007 年前后出现减少趋势, 20 世纪 80~90 年代和 2009 年后均为增加趋势, 通过滑动 t 检验, 突变的年份有 1979、1991 和 2009 年。

相对指数变化以增加趋势为主。图 3(g) R95p 在 1971~2018 年间, 除了个别年份之外, 整体呈现增加趋势。UF 和 UB 曲线有多个交点, 其中只有 2009 年通过滑动 t 检验, t 值为 -3.21, R95p 在 2009 年发生了减小突变。图 3(h) R99p 的时间序列突变特征与 R95p 相似, 除了 2009 年和 1997 年 UFk 为负值之外, 其余年份 UFk 均为正值, 大部分年份呈现增加的趋势。经过滑动 t 检验, R99p 在 2004 年发生了增加突变。

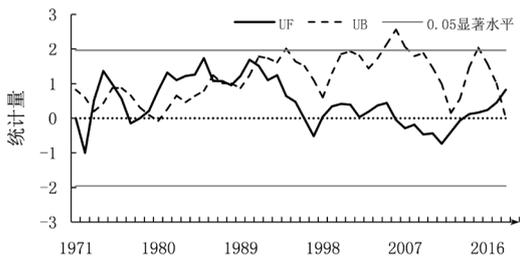
强度指数变化特征如下：**图 3(i)** RX1day 从 20 世纪 90 年代起，UF 曲线在 95%置信区间内围绕 0 刻度线上下波动，波动范围不大，无明显的增减趋势。UF 和 UB 曲线在两条 0.05 水平临界线之内有多个交点，但通过滑动 t 检验无明显突变点。**图 3(j)** RX5day 在 20 世纪 90 年代之前呈现增加趋势，在 20 世纪 90 年代之后呈现减小趋势。通过滑动 t 检验，在 1985 年发生增加突变。**图 3(k)** SDII 除个别年份之外，均表现出增加趋势，在 2014、2015、2016 年有明显增加趋势。通过滑动 t 检验，突变年份为 1979 年和 1997 年。滑动 t 检验结果如表 2 所示。



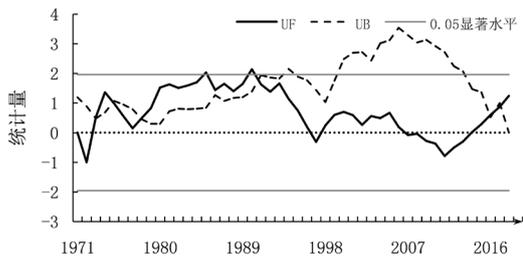
(a)持续干期CDD



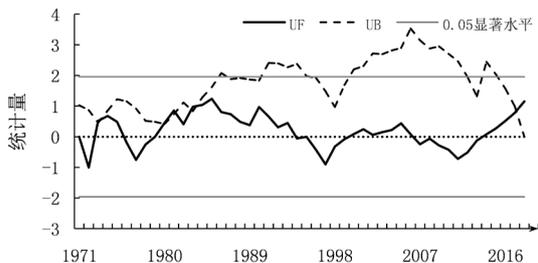
(b)持续湿期CWD



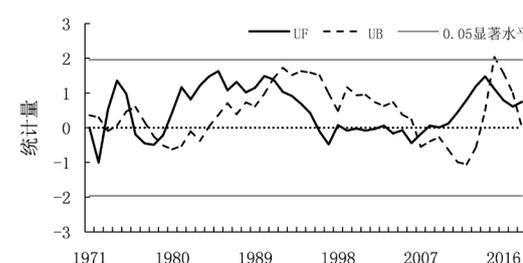
(c)年总降水量PRCPTOT



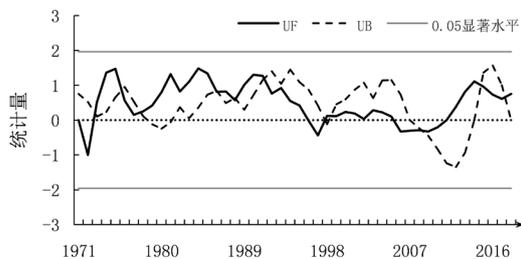
(d)中雨日数R10



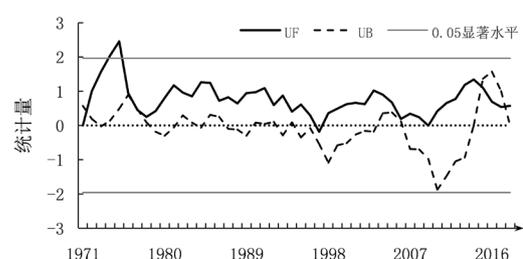
(e)大雨日数R20



(f)暴雨日数R50



(g)强降水量R95p



(h)特强降水量R99p

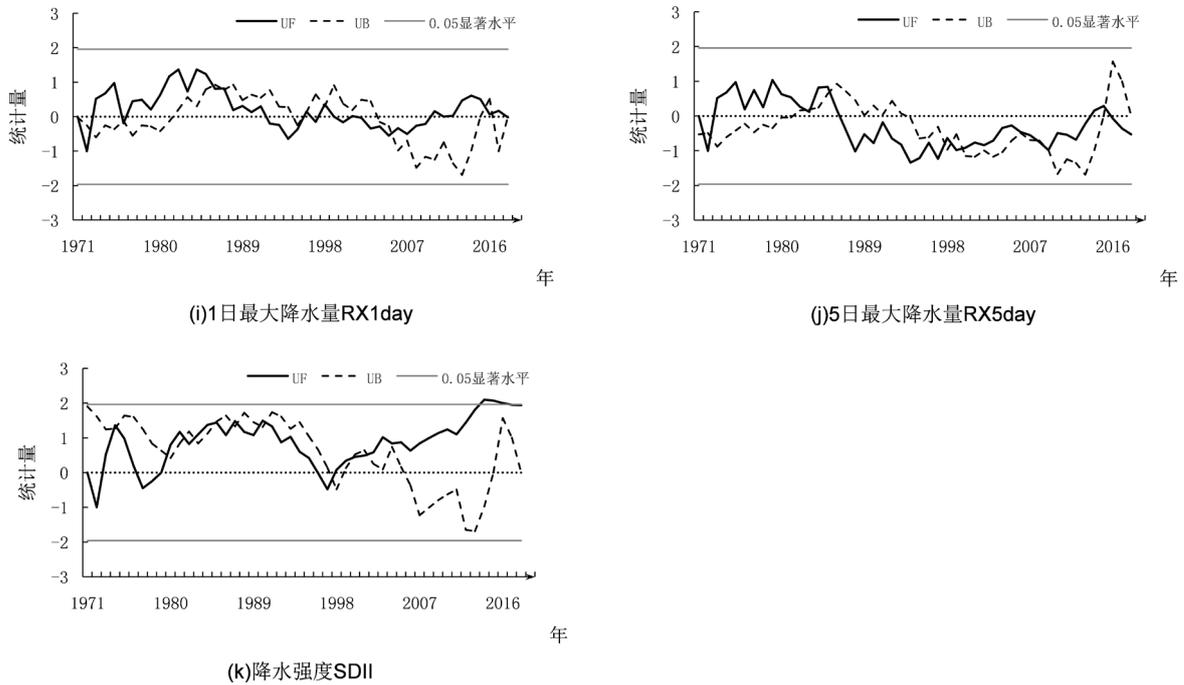


Figure 3. Mann-Kendall test of extreme precipitation indices in Sichuan Province during 1971-2018

图 3. Mann-Kendall 方法检验 1971~2018 年四川省极端降水指数时间序列

Table 2. Mutation years of moving *t*-test technique of extreme precipitation indices

表 2. 滑动 *t* 检验各极端指数突变年份

指数	持续干期 CDD	持续湿期 CWD	年总降水量 PRCPTOT	中雨日数 R10	大雨日数 R20	暴雨日数 R50
突变年份	-	-	1979、1991	-	1979	1979、1991、2009
指数	强降水量 R95p	特强降水量 R99p	1日最大降水量 RX1day	5日最大降水量 RX5day	降水强度 SDII	
突变年份	2009	2004	-	1985	1979、1997	

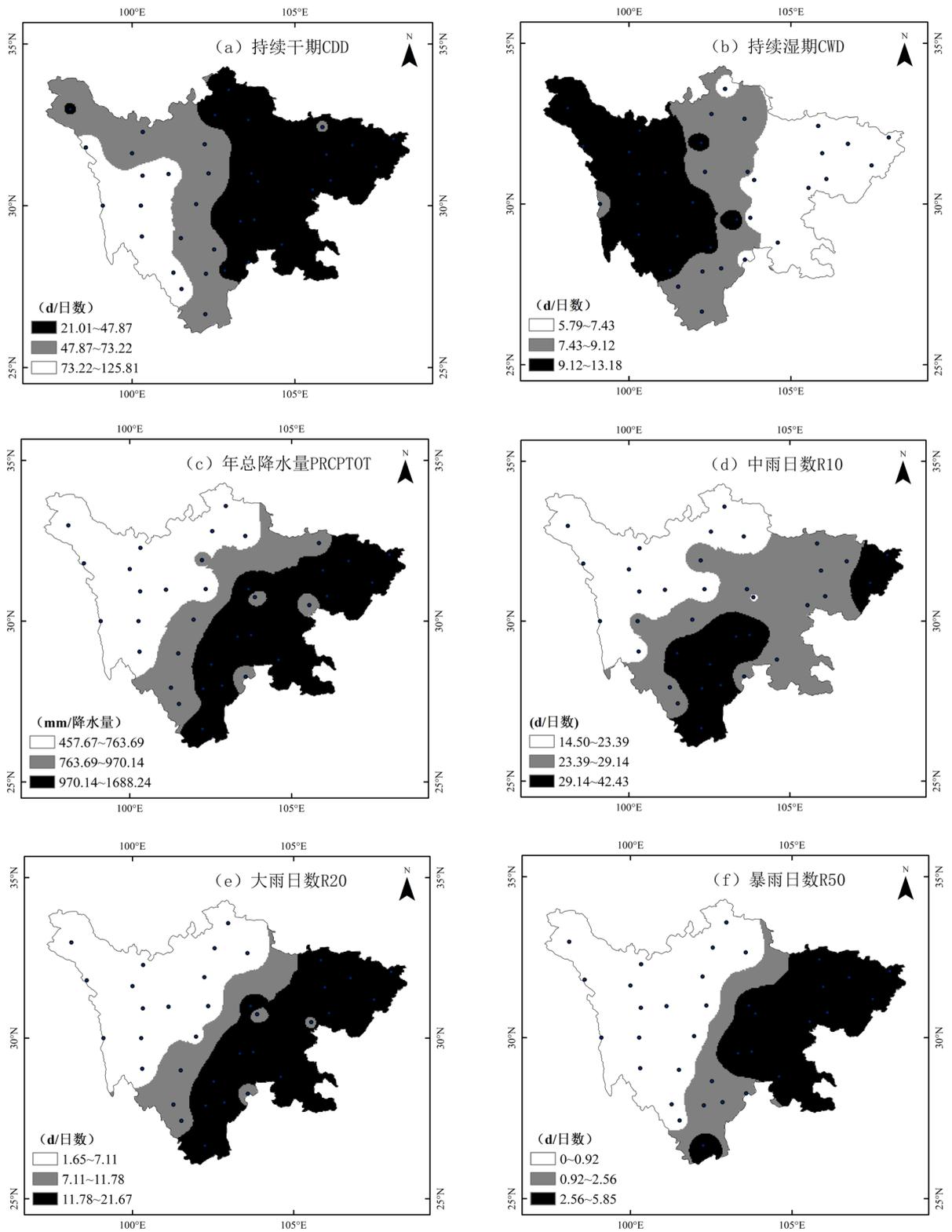
纵观所有极端降水指标的变化可以看出，PRCPTOT、R20、R50、RX5day 和 SDII 的突变发生在 20 世纪 80~90 年代，其中 R50 和 R95p 和 R99p 突变年份集中在 2004 年和 2009 年。PRCPTOT 突变年份之一为 1991 年，与次旺顿珠[21]等(2019)研究四川省强降水分布特征，检验突变结果相近。从图 2 四川省极端降水指数随时间变化趋势可以看出，除 CWD 呈现较弱的减小趋势以外，其余极端降水指数均呈现增加趋势。

结合以上指数的突变情况可以看出，自 2008 年起最近十年内，CWD 呈现下降趋势，CDD、R50、R95p、R99p 和 SDII 均呈现上升趋势，其中降水强度 SDII 上升趋势显著。结果表明 1971~2018 年四川省极端降水量和降水强度有增强的趋势，干旱化趋势增强，极端降水事件发生的频率有增高趋势。

3.3. 四川省极端降水指数空间分布

从图 4 极端降水指数的空间分布可以看出，除 CWD 和 CDD 外，其余 9 个指数(PRCPTOT、R10、R20、R50、R95p、R99p、RX1day、RX5day、SDII)在空间分布上基本一致，即从四川省西北至东南，上述 9 个极端降水指数逐渐增加，四川西北部的降水量、降水日数和降水强度要小于四川省东南部的降水量、降水日数和降水强度。CDD 和 CWD 在空间分布上变化一致，即在四川省自东向西，CDD 和 CWD

逐渐增加。表明自东向西，气候的干湿期分界更加明显，由于西部较东部地区的降水量、降水日数和降水强度较小，西部较东部更趋于干旱化。



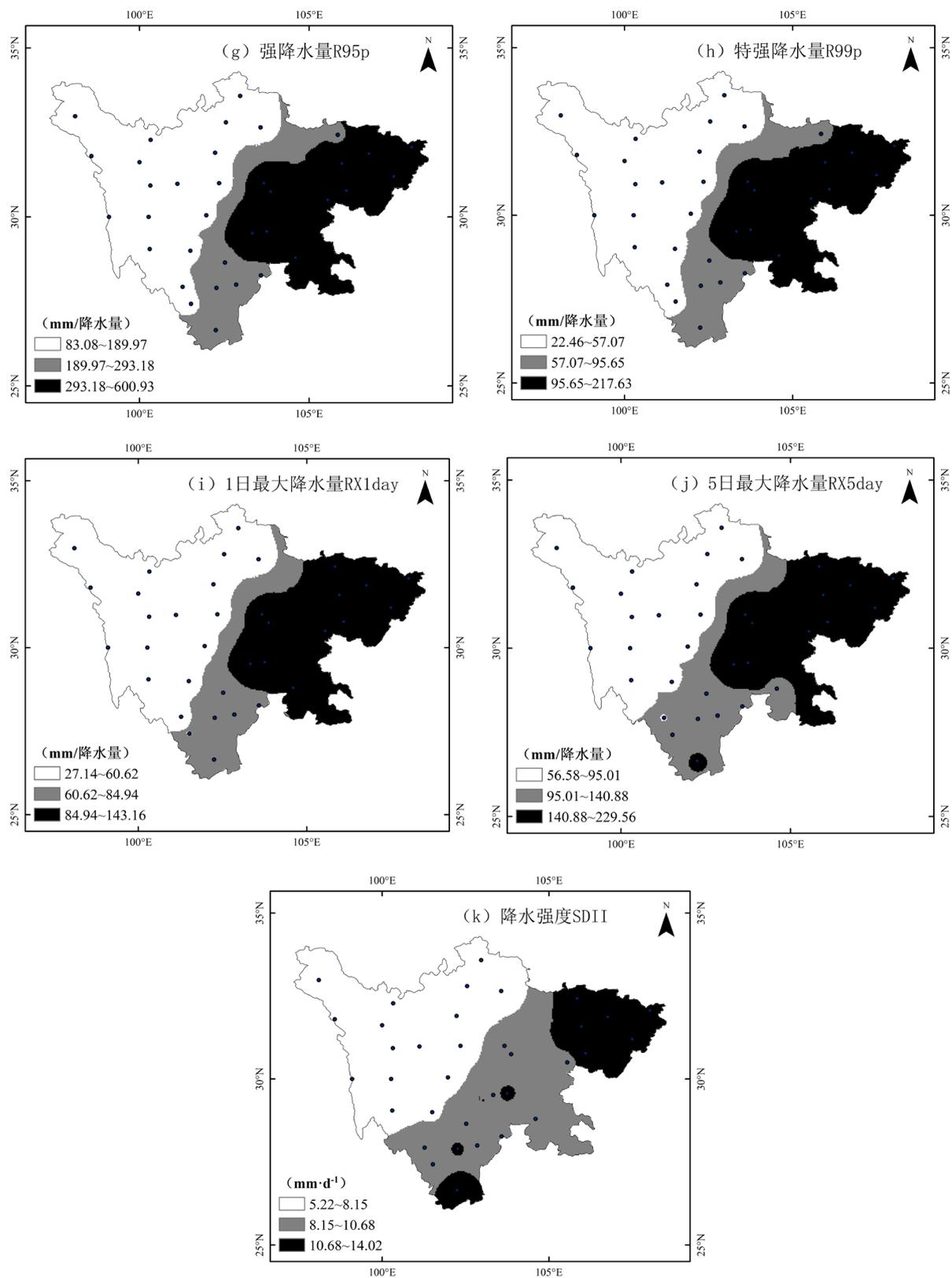
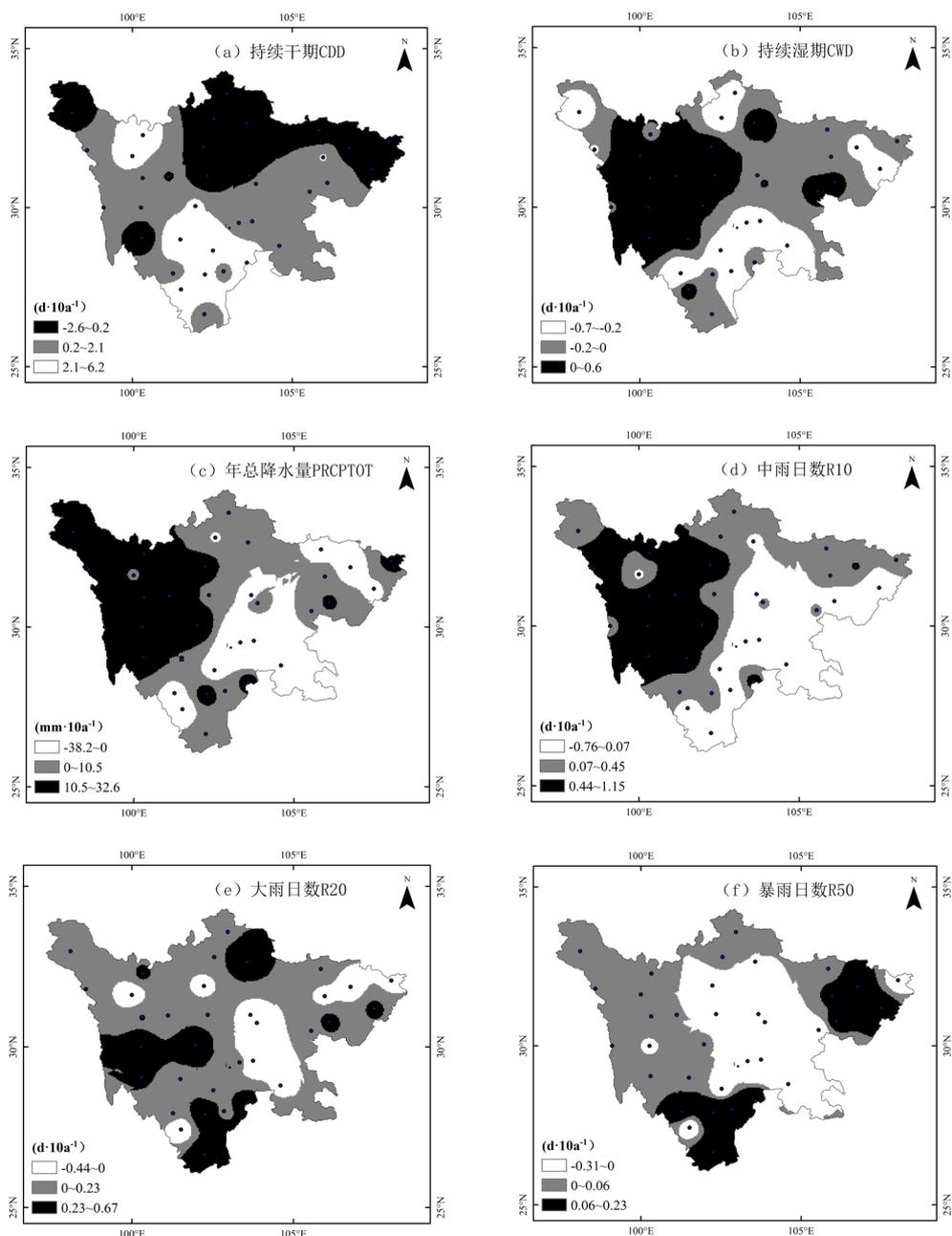


Figure 4. Spatial distribution of extreme precipitation indices during in Sichuan Province from 1971 to 2018
图 4. 1971~2018 年四川省极端降水指数的空间分布

3.4. 四川省极端降水指数线性变化趋势空间分布

持续指数线性来看：CDD 在四川盆地北部和川西高原北部呈现减小趋势，其余大部分区域呈增加趋势，最大上升幅度为 $6.221 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。CDD 趋于增加的站点占 68.57%，有 11.43% 的站点通过 0.05 显著性检验，在空间分布上变化趋势由南向北逐渐递减。CWD 呈现增加趋势的地区集中在川西高原，四川盆地大部分地区持续湿润时间趋于减小，盆地南部和川西南山地和川北部分区域减幅较大。图 5(c) PRCPTOT 在川西高原趋于增加，主要分布在康定、理塘等地，最大增幅为 $32.63 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。盆地南部 PRCPTOT 呈下降趋势，减幅较大。最大减幅为 $38.12 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ，PRCPTOT 趋于增加的站点占 68.57%，14.29% 站点通过 0.05 显著性检验。



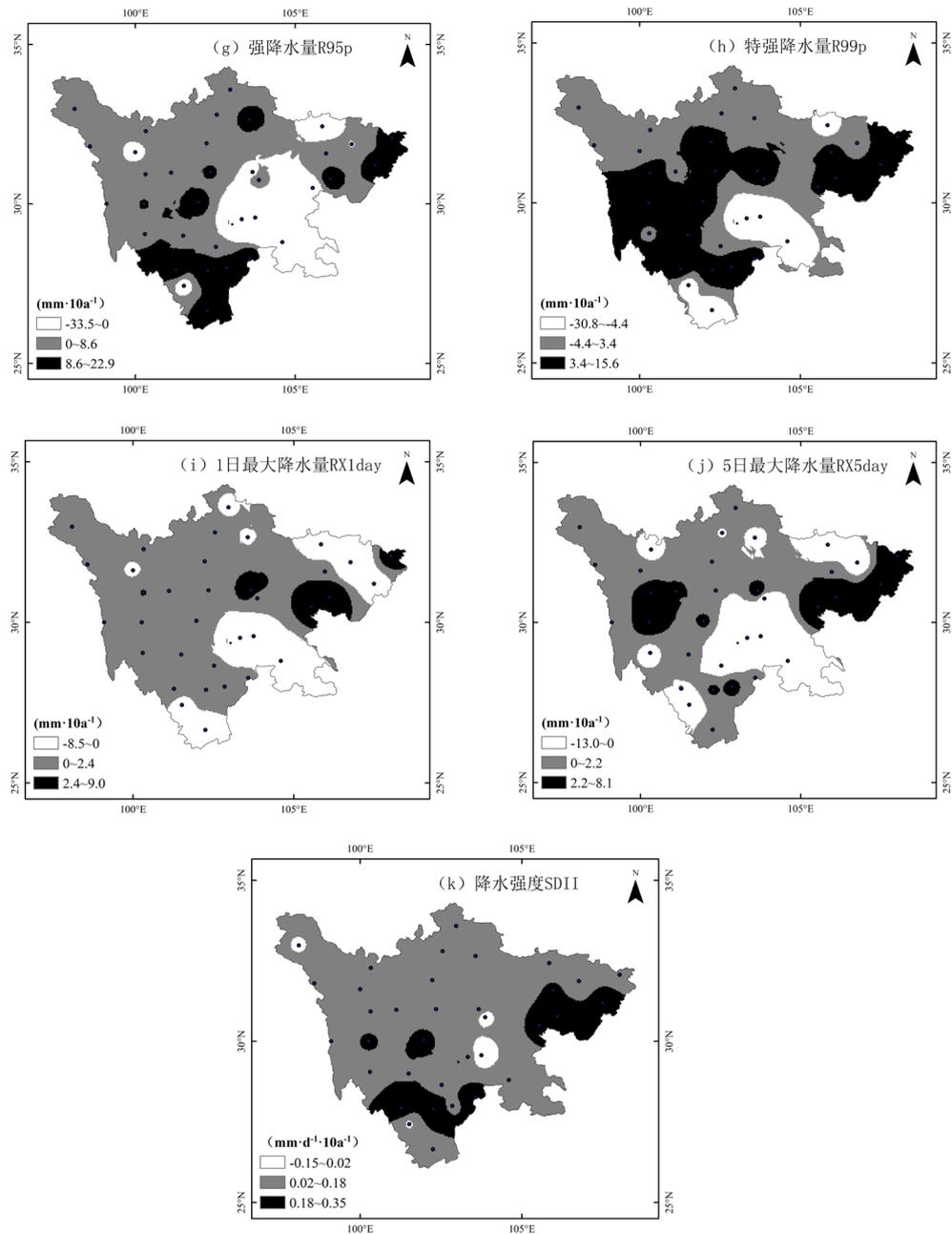


Figure 5. Mann-Kendall test of extreme precipitation indices in Sichuan province during 1971-2018
图 5. Mann-Kendall 方法检验 1971~2018 年四川省极端降水指数时间序列

从绝对指数线性来看，R10 在川西高原中雨日数趋于增加，增幅较大。川北和川东站点以及雷波站点附近呈现增加趋势，在四川盆地的中部、盆地南部和川西南山地中雨日数呈减小趋势，在空间分布上变化趋势由西向东依次递减。R20 在川西高原南部、川西南地区和四川盆地西北部增幅较大，R20 减少趋势集中在盆地东北部和盆地中部。R50 在川西南山地和盆地东北部暴雨日数趋于增加，增幅较大，盆地中部暴雨日数呈减小趋势。

从相对指数线性来看，R95p 在川西南山地和盆地东北、西北少部分地区强降水量趋于增加，盆地中部和南部呈减小趋势，R95p 趋于增加的站点占 74.29%，有 11.43% 站点通过 0.05 显著性检验。R99p 在

四川盆地、川西南山地和川西高原部分地区呈增加趋势，最大增幅为 $15.60 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ，集中在万源、西昌等地。减小趋势集中在盆地南部和川南地区。最大减幅为 $30.83 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ，集中在峨眉山、乐山一带。R99p 趋于增加的站点占 74.29%，17.14% 站点通过 0.05 显著性检验。

从强度指数来看，RX1day 和 RX5day 线性变化趋势相近，即在川西高原和四川盆地中部、东部呈增加趋势，集中在万源、西昌等地。在盆地南部、东北部部分区域呈减小趋势，集中在峨眉山、乐山一带，从整体趋势来看，自西向东趋势逐渐减小。RX1day 有 17.14% 站点通过 0.05 显著性检验。SDII 在全省绝大部分区域呈现增加趋势，只在温江和都江堰呈减少趋势，减幅较小。SDII 趋于增加的站点占 94.29%，17.14% 站点通过 0.05 显著性检验。

综上，川西高原地区降水量、降水日数和降水强度较小，但表示极端降水事件的 R20、R50、R95p、R99p、RX1day、RX5day 以及 SDII 线性变化呈现上升趋势，干湿期界限更加分明和极端降水量和降水强度增强导致极端降水事件发生频率增加。在盆地的中部和南部 PRCPTOT、R10、相对指数和强度指数有减小趋势，CDD 呈现增加趋势，持续无雨日增多，盆地中部和南部趋于干旱化。在盆地东部降水较为充沛，CDD 和 CWD 呈减少趋势，R50、R99p 和 SDII 增幅较大，极端降水量增加。川西南地区 CDD 呈增加趋势，R95p、R99p、R20、R50、SDII 增幅较大，极端降水事件发生频率增加。

3.5. 极端降水指数与经度、纬度和海拔之间的关系

从表 3 可以看出，大部分的指数相关系数较高。图中只有 R10 和 R20 两个指数与纬度的相关性分析中通过显著性检验，11 个指数与经度和海拔相关性分析中均通过显著性检验，表明四川省极端降水指数与经度和海拔的相关程度高于纬度。其中有两个指数(CDD、CWD)与经度呈负相关，与海拔呈正相关。其余 9 个指数与经度呈正相关，与海拔呈负相关。随着经度自西向东增加，海拔自西向东降低，极端降水指数具有增加的趋势。

Table 3. Coefficient of correlation between extreme precipitation indices and longitude or latitude or altitude during 1971-2018

表 3. 1971~2018 年四川省极端降水指数与经度、纬度和海拔相关系数

	CDD	CWD	PRCPTOT	R10	R20	R50
经度	-0.68**	-0.75**	0.66**	0.48**	0.71**	0.78**
纬度	-0.22	0.12	-0.29	-0.50**	-0.41*	-0.08
海拔	0.56**	0.81**	-0.58**	-0.40*	-0.71**	-0.76**
	R95p	R99p	RX1day	RX5day	SDII	
经度	0.70**	0.67**	0.78**	0.75**	0.79**	
纬度	-0.16	-0.14	-0.11	-0.12	-0.30	
海拔	-0.68**	-0.66**	-0.80**	-0.75**	-0.80**	

注：*代表通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验，**代表通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。

3.6. 极端降水指数与年总降水量之间关系

表 4 为四川省极端降水指数与年总降水量之间的关系，从图中可以看出有 9 个极端指数与年总降水量呈正相关，其中有 7 个指标的正相关系数通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验，2 个指标通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验，相关程度较高，通过本文研究选用的 11 个极端降水指数来对四川省降水总体情况做出判断，随着极端降水指数的增加或者减小对四川省降水量的增加或减少做出预估。其中 R10、R20 和 R95p 与 PRCPTOT 的

相关程度较高,这三个指数对年总降水量影响较大。孙惠惠[22]等研究 1963~2015 年长江流域极端降水指数特征也指出,在四川中东部极端降水量对年总降水量贡献较大。

Table 4. Coefficient of correlation between extreme precipitation indices and annual precipitation during 1971-2018
表 4. 1971~2018 年四川省极端降水指数与年降水量相关系数

	CDD	CWD	R10	R20	R50
PRCPTOT	-0.04	0.33*	0.93**	0.93**	0.69**
	R95p	R99p	RX1day	RX5day	SDII
PRCPTOT	0.82**	0.65**	0.27	0.35*	0.76**

注: *代表通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验, **代表通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

在气候变暖加剧当下,对区域极端降水研究有利于我们更好掌握气候变化规律,适时对气候变化做出调整。本文通过运用 1971~2018 年四川省 35 个站点逐日降水观测资料,选取 11 个极端降水指数,对 48 a 四川省极端降水的时空变化、突变特征以及极端指数与经纬度、海拔高度和年降水量之间的相关性进行研究,得出如下结论:

- 1) 四川省极端降水变化趋势不显著。CWD 变化呈略微下降趋势,其余 10 个指数变化均呈上升趋势,特别是 SDII 呈明显上升趋势,表明 48 a 四川省极端降水强度有显著增加趋势。
- 2) PRCPTOT、R20、R50、RX5day 和 SDII 的突变发生在 20 世纪 80~90 年代,其中 R50、R95p 和 R99p 突变年份集中在 2004 年和 2009 年。自 2008 年起近 10 年内,CWD 呈现下降趋势,CDD、R50、R95p、R99p 和 SDII 均呈现上升趋势,其中 SDII 上升趋势明显。表明 1971~2018 年四川省持续无雨日增加,极端降水量和降水强度不断增强,易发生极端降水事件。
- 3) 川西高原和川西南地区持续干期的增加使气候趋于干旱化,同时极端降水量和降水强度增加也导致该区域易发生极端降水事件。在盆地的中部和南部年降水量和极端降水量减少,持续干期增加使得气候趋于干旱化。盆地东部降水量多,强度大,极端降水量增加使得该地区易发生洪涝灾害。
- 4) 经度因素和海拔高度因素对四川省极端降水指数变化影响超过纬度因素,随着经度自西向东增加,海拔自西向东降低,极端降水指数具有增加的趋势。
- 5) 除 CDD 和 RX1day 外,其余指数均和年总降水量有较大相关性,其中对年总降水量影响较大的指数为 R95p、R10 和 R20。

4.2. 讨论

本文对 1971~2018 年四川省极端降水分析得出的结论。和前人对四川省极端降水强度研究结论基本相一致,但也存在一定的差异性,与选取的研究时段、采用的研究方法和选用的站点位置有关。文章得出的结论也与对西南地区雨季极端降水事件研究结论相近,主要差异存在于研究时段和研究区域不同导致的。从物理机制上看,在全球变暖背景下,地表蒸发量增加,大气湿度增加导致大气循环加剧,影响大气环流,导致区域降水格局发生变化,降水量增多从而导致极端降水事件趋于增强。由于极端气候变化的影响机制较为复杂,更深层次的探究有待进一步进行。

参考文献

- [1] Trenberth, K.E. (1998) Atmospheric Moisture Residence Times and Cycling: Implications for Rainfall Rates and Climate Change. *Climatic Change*, **39**, 667-694. <https://doi.org/10.1023/A:1005319109110>
- [2] Goswami, B. (2006) Increasing Trend of Extreme Rain Events over India in a Warming Environment. *Science*, **314**, 1442-1445. <https://doi.org/10.1126/science.1132027>
- [3] Xue, X., Wang, T., Guo, J., Yang, Y.-H., Peng, F. and Liu, L.-C. (2012) Impact of Global Warming on Drought in China. *Sciences in Cold and Arid Regions*, **4**, 201-210. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1226.2012.00201>
- [4] Walsh, K. and Pittock, A.B. (1998) Potential Changes in Tropical Storms, Hurricanes, and Extreme Rainfall Events as a Result of Climate Change. *Climatic Change*, **39**, 199-213.
- [5] Stanley, C., Pielke Jr., R.A., Changnon, D., Sylves, R.T. and Pulwarty, R. (2000) Human Factors Explain the Increased Losses from Weather and Climate Extremes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **81**, 437-437. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0437:HFETIL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0437:HFETIL>2.3.CO;2)
- [6] Landman, W. (2010) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *South African Geographical Journal*, **92**, 86-87. <https://doi.org/10.1080/03736245.2010.480842>
- [7] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 20(10): 1066-1075.
- [8] 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.
- [9] 袁祝香, 杨雪艳, 刘玉汐, 纪玲玲, 饶维平. 松辽流域 1961-2017 年极端降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 199-203+212.
- [10] 苗正伟, 李娜, 路梅, 徐利岗. 1961-2017 年京津冀地区极端降水事件变化特征[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 34-44.
- [11] 环海军. 鲁中地区极端降水变化特征[C]//中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S24 青年论坛. 中国气象学会. 2018.
- [12] 吴晶璐, 惠品宏, 刘建勇, 汤剑平. 江淮流域极端降水时空变化特征: 站点观测和再分析的对比[J]. 大气科学学报, 2019, 42(2): 207-220.
- [13] 栗忠魁, 胡卓玮, 魏铎, 肖敏. 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.
- [14] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50a 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.
- [15] 罗玉, 陈超, 马振峰, 刘佳, 李小兰, 杨蓉. 1961-2015 年四川省汛期极端降水指数时空变化研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(9): 133-141.
- [16] 王昊, 姜超, 王鹤松, 孙建新. 中国西南部区域雨季极端降水指数时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(1): 1-14.
- [17] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63+84.
- [18] 南英子. 简单线性相关与回归分析中各种检验及其相互关系的探讨[J]. 统计与决策, 2011(2): 26-28.
- [19] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报, 2016, 32(6): 47-50.
- [20] 石萍, 张运鑫, 田水娥. 邯郸市观台站年降水序列变化趋势及突变分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 66-68+72.
- [21] 次旺顿珠, 白玛多吉, 罗桑丹增. 四川省强降水分布及变化特征研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(4): 224-230.
- [22] 孙惠惠, 章新平, 罗紫东, 尚程鹏, 贺新光, 饶志国. 近 53a 来长江流域极端降水指数特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1879-1890.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-1724，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojns@hanspub.org