

Analysis of the Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Rainfall in Sichuan

Na Chang, Hongke Cai

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 1602338897@qq.com

Received: Aug. 15th, 2020; accepted: Aug. 18th, 2020; published: Aug. 25th, 2020

Abstract

In order to study the characteristics of heavy precipitation in Sichuan, according to the definition of heavy precipitation in Sichuan, the daily precipitation data from 1980 to 2018 were used to analyze the temporal and spatial characteristics of heavy precipitation, the number of heavy precipitations, and the intensity of heavy precipitation. The results show that: 1) The multi-year average annual heavy rainfall in Sichuan shows the distribution pattern of less west and more east; the number of heavy rainfall in Sichuan is distributed in a belt from southwest to northeast, from southwest to northeast there is a pattern of "less-more-less" distribution. The seasonal distribution of heavy rainfall is extremely uneven. Both the large-value center of heavy rainfall and the high-frequency center of heavy rainfall gradually move eastward with seasonal changes; the intensity of heavy rainfall has a distribution characteristic of gradually increasing from west to east. 2) The spatial performance of the average monthly heavy precipitation in Sichuan is presented as: the first mode has the distribution characteristics of "more east and less west", the second mode shows the distribution characteristics of heavy rainfall in northwestern Sichuan and less consistent heavy rainfall in other regions, the third mode presents a "- + -" pattern from north to south, and the fourth mode presents a "+ -" pattern from west to east. 3) The frequency of extreme summer precipitation events in Sichuan fluctuated in the 1990s, showing an obvious downward trend in inter-annual changes; the number of extreme summer precipitation in Sichuan from 1980 to 2018 has a quasi-period of about 2.2 years; the sudden change in the frequency of extreme summer precipitation events in Sichuan occurred in 1981, 1985 and 1991.

Keywords

Sichuan, Heavy Precipitation, Spatial and Temporal Distribution

四川地区强降水时空特征分析

常 娜, 蔡宏珂

成都信息工程大学, 四川 成都
Email: 1602338897@qq.com

收稿日期: 2020年8月15日; 录用日期: 2020年8月18日; 发布日期: 2020年8月25日

摘要

为研究四川地区强降水特征, 根据四川地区强降水的定义, 利用1980~2018年的逐日降水资料分别对强降水量、强降水次数和强降水强度的时空特征进行分析, 结果表明: 1) 四川地区多年年平均强降水量表现为西少东多的分布规律; 四川地区强降水次数呈西南-东北带状分布, 自西南向东北呈“少-多-少”分布规律; 四川地区强降水的季节分配极不均匀, 强降水量大值中心和强降水高频中心都随着季节变化逐渐东移; 强降水强度有自西向东逐渐增大的分布特征; 2) 四川地区多年逐月平均强降水量空间表现为: 第一模态具有“东多西少”的分布特征, 第二模态表现出四川西北部强降水量偏多, 其余地区强降水量一致性偏小的分布特征, 第三模态自北向南呈现“- + -”的格局, 第四模态自西向东表现出“+ -”的格局; 3) 四川地区逐年夏季极端降水事件频数在20世纪90年代呈现波动变化, 在年际变化上总体呈明显的下降趋势; 四川地区1980~2018年夏季极端降水次数存在约2.2年的准周期; 四川地区逐年夏季极端降水事件频数突变发生在1981、1985年和1991年。

关键词

四川地区, 强降水, 时空分布

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

大气中的液态水或固态水在重力的作用下, 克服空气阻力, 从高空降落到地面的现象称为降水[1]。降水是水循环过程中最基本的环节, 是地表径流的本源, 是地下水的主要补给来源, 也是清洁水的最终来源, 而降水在时空分布上的不均匀是引起洪涝和旱灾的直接原因[1], 所以降水是连接天气、气候和水循环等很多方面的关键物理过程, 是关系到国计民生的最重要的气象要素之一。IPCC 第五次评估报告指出, 近百年来全球气候变暖毋庸置疑, 气温升高使得大气中可承载的最大水汽含量增多, 造成水循环明显加快, 降水的时空分布特征也随之发生了很大变化, 高纬度和一些中纬度地区降水量呈显著增加的趋势, 以至于全球范围内频繁发生极端降水事件[2] [3] [4]。

本文的研究区域为我国四川地区。四川盆地是年降雨量比较充沛的地区, 四川盆地内的降水对其下游长江的水位及三峡工程的建设等有很大的影响, 由于每年的降雨量在空间和时间上分配并不均匀, 盆地内常会有降雨过强导致的暴雨天气, 给盆地带来洪涝、泥石流、山地滑坡等严重灾害, 给农业、交通、建筑等带来重大影响[5]。

就四川地区强降水分布特征的研究而言, 四川地区的极端降水值、极端降水强度以及极端降水频数都在增多[6]。张顺谦表明: 近50年来四川区域性暴雨日数、暴雨次数和极端降水日数呈略微减少的趋势, 极端降水强度、极端降水量占年降水量的比例呈微弱增加的趋势, 但极为不显著, 与我国极端降水趋多趋强的变化特征不一致[7]。胡豪然等利用四川盆地1961~2006年降水资料表明在汛期该地区极端降水事件发生频次的分布与降水量分布的差异比较大, 自西向东有阶梯状递减趋势, 汛期内极端降水事件发生的频次除了在重庆东部区和四川盆地西部区分别呈较弱的增长和减少趋势以外, 在其余各区的线性趋势都较为明显[8]。

进一步了解全球变暖背景下四川地区强降水的时空变化特征, 不仅对认识该地区气候背景状况和该地水资源分布有重要作用, 而且对于提高四川短期气候预测能力具有借鉴意义。

2. 数据和方法

2.1. 数据

本文使用的是四川省 1980~2018 年的欧洲中期数值预报中心(ECMWF) ERA5 降水再分析数据, 气象要素包括平均总降水率、总降水量、平均降雪率、降雪量等。在本文中, 只使用总降水量这一个要素来分析四川地区强降水的时空变化特征。时间分辨率: 小时(h); 时间跨度: 1980~2018。

2.2. 方法

2.2.1. 降水强度的定义

四川有些地区的年最大降雨量不能够达到气象部门规定的暴雨标准, 如果以 50 mm 日降水量来定义极端降水事件的绝对阈值, 那么有些地区将是空白区并且无法分析该地区极端降水事件。基于这种影响, 赵衍斌[9]采用非参数法(百分位法)在研究中给出了四川地区强降水的定义: 根据每个测站的日降水量, 定义不同地区强降水事件的阈值, 并按从小到大的顺序对 1980~2019 年的日降水量资料(降水量大于 0)进行排序, 并将某站点降水量的 95%的数值定义为强降水事件的阈值, 并且当该站的日降水量超过该站的强降雨阈值时, 就称该日发生了极端降水事件。

根据强降水事件发生的次数, 对四川地区的强降水强度进行定义:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^t sr_i}{t \cdot 10} (i=1, 2, 3, \dots, t) \quad (1)$$

其中 S 代表强降水强度, t 代表某一年强降水事件发生的次数, sr 代表该年强降水逐日降水量[9]。

2.2.2. Mann-Kendall 检验

Mann 和 Kendall 首先提出了 Mann-Kendall 突变检验的原理并发展了这一方法, 它是一种非参数检验方法, 也称为无分布检验, 一开始仅仅用来检测已知序列的变化趋势, 后来经过在实践中不断的完善和改进, 形成了一种检验序列突变的方法[10]。Mann-Kendall 突变检验方法的优势是样本无需遵从确定的分布, 就能够大致确定变化趋势的起始位置。

Mann-Kendall 突变检验的计算方法参照《现代气候统计诊断与预测技术》[11]:

若原始时间序列为 y_1, y_2, \dots, y_n , 且 m_i 表示的是第 i 个样本 y_i 大于 y_j 的累计数 ($1 \leq j \leq i$), 则有:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i (2 \leq k \leq n) \quad (2)$$

假设原始的时间序列随机独立, 那么 d_k 的均值和方差为:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{var}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (4)$$

将(2)、(3)、(4)式标准化:

$$Uf_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{\text{var}(d_k)}} \quad (5)$$

经过上述计算得到正向样本序列的统计量 UF , 再利用类似计算, 得到反向样本序列的统计量 UF , 得到正、反向样本序列的统计量 UF 和 UB 之后, 在所给定的显著性水平下(本文给定显著性水平 $\alpha = 0.05$), 分别画出 UF 和 UB 曲线, 然后利用两者曲线的变化来分析研究中物理量样本的变化趋势。若所得到的曲线图上 $UF > 0$ 那么表明所检测序列呈现上升趋势, $UF < 0$ 则表明所检测序列呈现下降趋势, 当 $U = 0$ 时, 则所检测序列变化持平, 且如果 UF 值超过临界线, 那么可以判断为所检测序列变化显著上升或者显著下降, 如果 UF 和 UB 的交点出现在临界值之间, 那么 UF 与 UB 交点所在位置对应的时刻就是突变发生的时刻。

2.2.3. 其他方法

本文用到的其它方法有: 1) 通过设立统计阈值, 挑选出具有统计意义的极端降水事件, 利用区域平均方法获得降水量的空间分布、降水频次的空间分布以及降水强度的空间分布; 2) 采用经验正交函数 (EOF) 分析方法来获得主要空间变化模态, 来提供降水变化的主要空间特征; 3) 采用线性回归来计算降水次数的长期变化趋势; 4) 采用功率谱方法获得降水次数的主要变化周期及演变规律。

3. 四川地区强降水时空分布特征

3.1. 四川地区强降水空间分布特征

3.1.1. 阈值

图 1 为 1980~2018 年来四川地区极端降水量的阈值分布图。分析图 1 可以发现, 四川地区强降水的阈值分布自西向东逐渐增大, 自南向北逐渐增大, 整体表现为西小东大、南小北大的特征。由于四川地区西高东低的特殊地形影响, 川西高原的阿坝、甘孜等地阈值在 20 mm 以下, 普遍偏低; 四川盆地以及盆地以东地区阈值在 20 mm 以上, 普遍较高; 广元、巴中、南充、广安、达州一带, 成都、雅安一带以及西昌、攀枝花一带是四川盆地及以东地区主要存在的 3 个阈值的大值中心, 强降水阈值均可达到 30 mm 以上, 可以看出四川不同地区的强降水阈值差异明显, 阈值最大差值可以达到 20 mm。

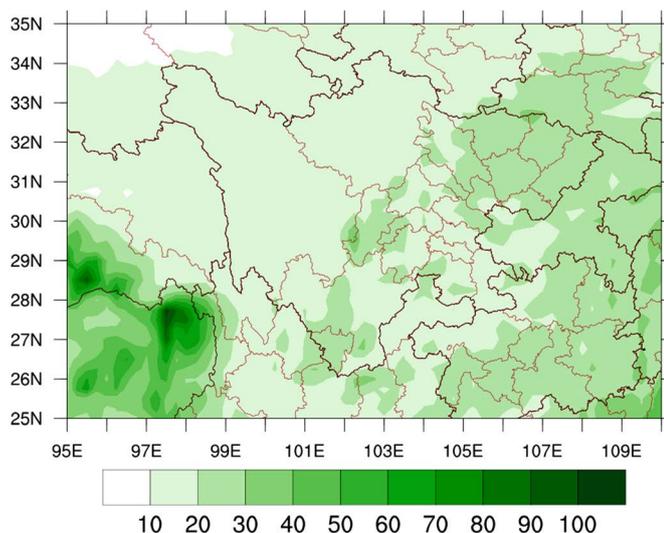


Figure 1. Threshold distribution map of extreme precipitation in Sichuan

图 1. 四川地区极端降水量的阈值分布图

3.1.2. 强降水量的空间分布

图 2 为 1980~2018 年来四川地区季节平均强降水量空间分布图。可以看出四川地区强降水量自西向东月平均降雨量逐渐增多, 川西高原的阿坝、甘孜等地四季降水都最少的地方, 四川西部和西南地区四

季降水比较多。春季, 整个四川地区降水大致呈西南-东北带状分布, 自西向东呈“少-多-少”分布规律, 大部分地区强降水量不超过 120 mm, 也出现了凉山、雅安、广安三个强降雨量大值中心, 凉山、雅安等地局部降水量可达 120 mm 以上, 广安局部降水量高达 160 mm 以上。夏季, 整个四川地区降水依旧大致呈西南-东北带状分布, 与春季有所不同的是, 夏季强降水自西向东呈“少-多”分布规律, 而且夏季强降雨量的大值中心相对于春季而言逐渐东移, 移到四川中东部德阳、广元等地, 四川西部地区强降水量基本不超过 200 mm, 德阳局部降水量可达 500 mm 以上, 广安局部降水量高达 600 mm 以上。秋季, 整个四川地区降水分布比较散, 自西向东呈“多-少-多”分布规律, 降雨量整体减少, 大部分地区强降水量不超过 80 mm, 最大值中心移到四川东北部广元东北边缘地区, 出现了凉山、广元两个强降雨量大值中心, 凉山局部降水量可达 120 mm 以上, 广安局部降水量高达 240 mm 以上。冬季, 没有强降雨的发生。

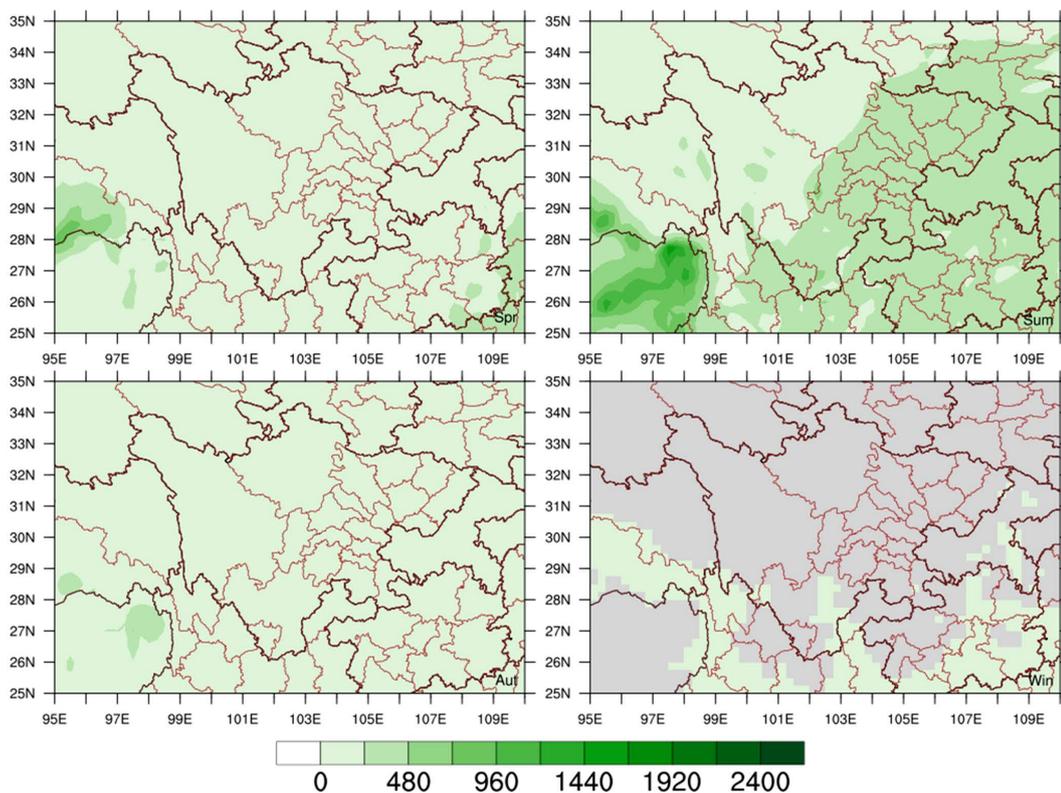


Figure 2. Spatial distribution map of seasonal average heavy precipitation in Sichuan from 1980 to 2018
图 2. 1980~2018 年来四川地区季节平均强降水量空间分布图

图 3 为 1980~2018 年来四川地区年平均强降水量空间分布图。可以看出 1980~2018 年四川地区多年年平均强降水量总体上表现为西少东多的趋势, 即自西向东年平均强降雨量逐渐增多。而且存在明显的区域变化特征, 在各地分布差异很大, 多年年平均强降水量最小值 162.533 mm, 最大值为 2323.33 mm。阿坝和甘孜等地多年年平均强降水量较少, 尤其是甘孜西北部地区, 多年年平均强降水量值接近最小值 162.533 mm, 除此之外凉山西北部和东北部地区多年年平均强降水量也较少, 在 200~300 mm 之间。广元、巴中和达州北部等地多年年平均强降水量较多, 多年年平均强降水量值达到 700~800 mm 之间, 其中广元和巴中交界处的北部达到四川境内多年年平均强降水量的最大值, 另外, 在雅安和甘孜的交界处以及凉山南部局部也有多年年平均强降水量大值中心, 多年年平均强降水量在 600 mm 以上。

将图3与图1进行对比,可以发现四川地区极端降水量阈值的与四川地区多年平均强降水量的分布趋势基本上是保持一致的,阈值低的地区,极端降水事件的多年平均强降水量也较低,反之也成立。

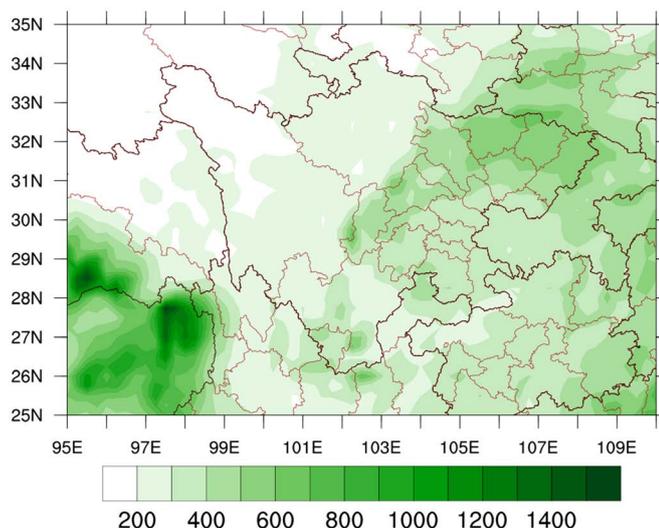


Figure 3. Spatial distribution map of annual average heavy precipitation in Sichuan from 1980 to 2018
图3. 1980~2018年来四川地区年平均强降水量空间分布图

3.1.3. 强降水发生频率的空间分布

图4为1980~2018年间四川地区各个季节累计强降水次数。可以看出四川地区强降水次数的分布存在明显的区域变化特征,各个季节都有不同的趋势。春季,整个四川地区强降水次数大致呈西南-东北带状分布,自西向东呈“少-多-少”分布规律,即自西到东强降水次数先增大后减少,大部分地区强降水次数不超过10次,出现了阿坝、甘孜、凉山一带为主轴的强降水次数大值中心,甘孜、凉山等地局部强降水次数可达10次以上,广安局部强降水次数高达15次以上。夏季,整个四川地区降水依旧大致呈西南-东北带状分布,与春季有所不同的是,夏季强降水分布规律与春季相反,自西向东呈“多-少-多”分布规律,即自西到东强降水次数先减少后增多,也可以说是夏季强降水次数的大值中心相对于春季而言逐渐东移,移到四川东部,这样夏季四川地区强降水次数有两个大值中心,一个大值中心位于甘孜西部地区,强降水次数可达44次以上,另一个大值中心位于巴中、广元、绵阳、德阳、南充、遂宁、成都、资阳、眉山、雅安、宜宾、内江、乐山以及泸州等地,强降水次数达到44次以上。秋季,整个四川地区强降水分布比较散,自西向东呈“多-少-多”分布规律,强降水次数整体减少,大部分地区强降水次数18次,强降水次数最大值中心移到四川东部和阿坝北部,出现了阿坝、广元两个强降雨次数大值中心,阿坝局部强降水次数可达22次以上,广安局部强降水次数可达18次以上。冬季,没有强降水的发生。

图5为1980~2018年间四川地区累计强降水次数。可以看出1980~2018年四川地区39年累计强降水次数在各地区分布差异很大,整个四川地区强降水次数大致呈西南-东北带状分布,自西向东呈“少-多-少”分布规律,即自西到东强降水次数先增大后减少,多年累计强降水量次数最多为713次,最少为488次。大部分地区强降水次数都在60次以上,出现了阿坝、甘孜北部为中心、甘孜中部为中心、攀枝花为中心以及绵阳、德阳为四个强降水次数大值中心即强降水高频区,绵阳、德阳强降水高频区、甘孜中部降水高频区强降水次数可达61次以上,阿坝、甘孜北部强降水高频区、攀枝花强降水高频区强降水次数可达62次以上;凉山东北部、乐山、阿坝南部局部地区形成了强降水低频区,强降水次数在57次以下;其余地区强降水次数在58~60次之间。

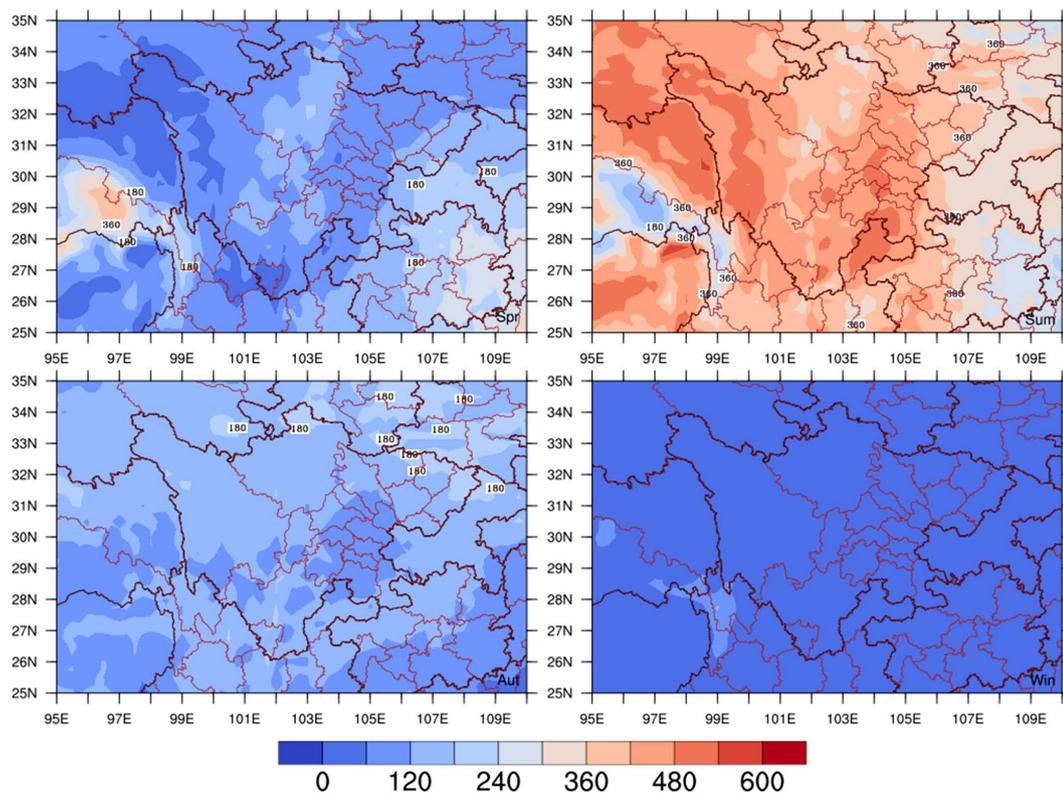


Figure 4. The cumulative number of heavy precipitation in each season in Sichuan from 1980 to 2018
图 4. 1980~2018 年间四川地区各个季节累计强降水次数

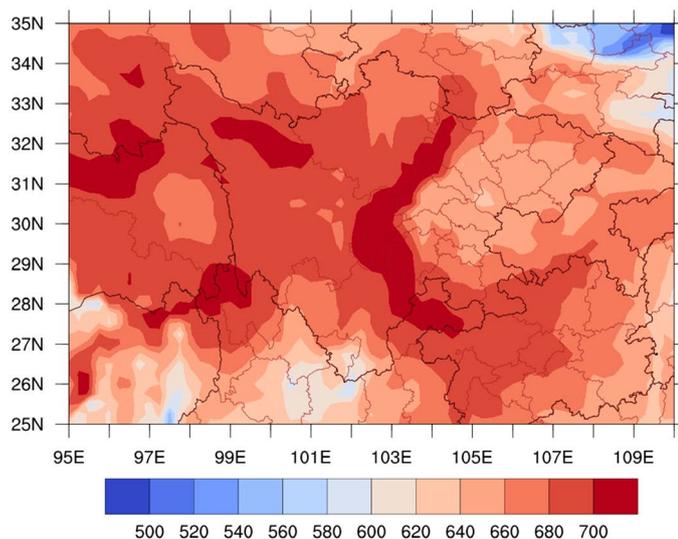


Figure 5. The cumulative number of heavy precipitation in Sichuan from 1980 to 2018
图 5. 1980~2018 年间四川地区累计强降水次数

将图 5 和图 1 进行对比, 可以发现极端降水发生次数同极端降水阈值的分布情况并不一致, 阈值大的地区, 其强降水发生次数未必就少, 反之亦然, 二者之间并无必然的联系。进一步对比发现, 极端降水发生次数较多的以阿坝、甘孜北部为中心、甘孜中部地区为中心、攀枝花为中心以及绵阳、德阳为中心的四个强降水高频区的极端降水阈值都较小。

3.1.4. 强降水降水强度的空间分布

图 6 为 1980~2018 年四川地区强降水强度的空间分布图。可以看出海拔较高的地区比如川西高原等地, 强降水强度较弱, 而海拔较低的川东平原, 强降水强度较强, 即四川地区强降水强度空间分布主要表现为自西向东逐渐增大的趋势, 这种趋势与四川地区西高东低的地形存在一致性。四川地区强降水强度最大值和最小值差值较大, 四川地区强降水强度存在三个强度高值中心, 雅安南部与阿坝的交界处有一高值中心, 强度高达 175 mm/d, 达州有一高值中心, 强度可达 150 mm/d, 凉山有一高值中心, 强度高达 150 mm/d; 四川地区强降水强度存在三个强度低值中心, 内江和甘孜南部分别有一个低值中心, 强度分别为低于 75 mm/d、50 mm/d, 甘孜北部和阿坝北部则有一个强度低值带, 强降水强度基本在 50 mm/d 以下, 四川地区强降水强度最小值为 28.089 mm/d。

将图 6 与图 1 进行对比, 可以发现四川地区极端降水量阈值的分布与强降水强度的分布趋势基本一致, 阈值低的地区, 强降水强度也较低, 反之亦成立。将图 6 与图 3 进行对比, 可以发现四川地区年平均强降水量的分布与强降水强度的分布趋势基本一致, 年平均强降水量少的地区, 强降水强度也较低, 反之亦成立。对于强降水事件, 阈值越低、强降水量愈少, 强降水事件强度越小, 反之亦成立。

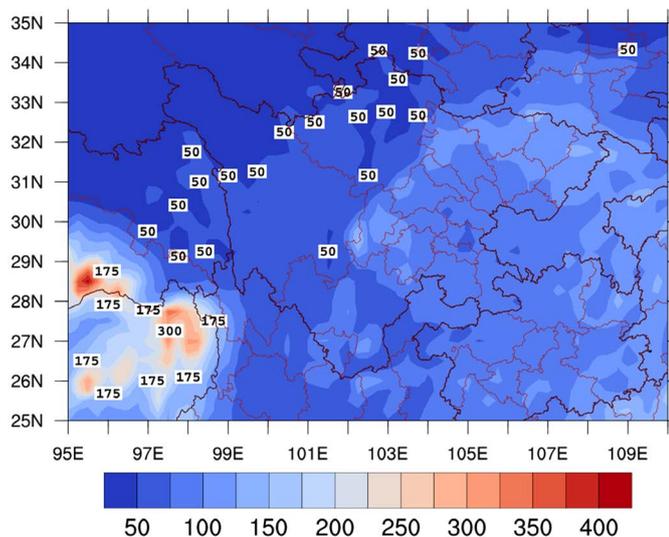


Figure 6. Spatial distribution map of heavy precipitation intensity in Sichuan from 1980 to 2018

图 6. 1980~2018 年四川地区强降水强度的空间分布图

3.1.5. 主要空间变化模态分析

图 7 给出了四川地区多年逐月平均强降水量的 EOF 前四个模态的空间分布特征, 来获得主要空间变化模态, 且分离出显著的主要模态, 以此来提供降水变化的主要空间特征。第一模态的特征向量占方差总贡献的 58.147%, 是四川地区多年逐月平均强降水量的最主要分布型。四川西部大部分地区均为负值, 负值中心位于甘孜、阿坝和凉山北部地区, 中心值比较集中, 正值中心在四川西北部地区, 主要分布在广元、南充、达州等地, 中心值为 0.03~0.04 之间。四川地区多年逐月平均强降水量空间分布的第一类型具有多年逐月平均强降水量“东多西少”的分布特征。第二模态占方差总贡献的 23.0249%, 也是一个较重要的分布型。较大的正值区出现在四川西部大部分地区, 正值中心广元、南充、巴中等地的中心值大于 0.06, 负值中心在四川南部的凉山地区。四川地区多年逐月平均强降水量空间分布的第二类型主要表现出四川西北部强降水量偏多, 其余地区强降水量一致性偏小的分布特征。第三模态占方差总贡献的 11.6517%。正值区出现在甘孜、阿坝大部分地区以及凉山、攀枝花等地, 正值中心中心值大于 0.03, 负

值中心在巴中、南充、达州等地。四川地区多年逐月平均强降水量空间分布的第三类型从四川西北到东南主要表现出“- → + → -”的格局。第四模态占方差总贡献的 6.42744%。正值区出现在绵阳、德阳、成都等地的部分区域, 正值中心中心值大于 0.05, 负值中心在四川西北部广元、南充、绵阳等地。四川地区多年逐月平均强降水量空间分布的第四类型从四川西部到东部主要表现出“+ → -”的格局。

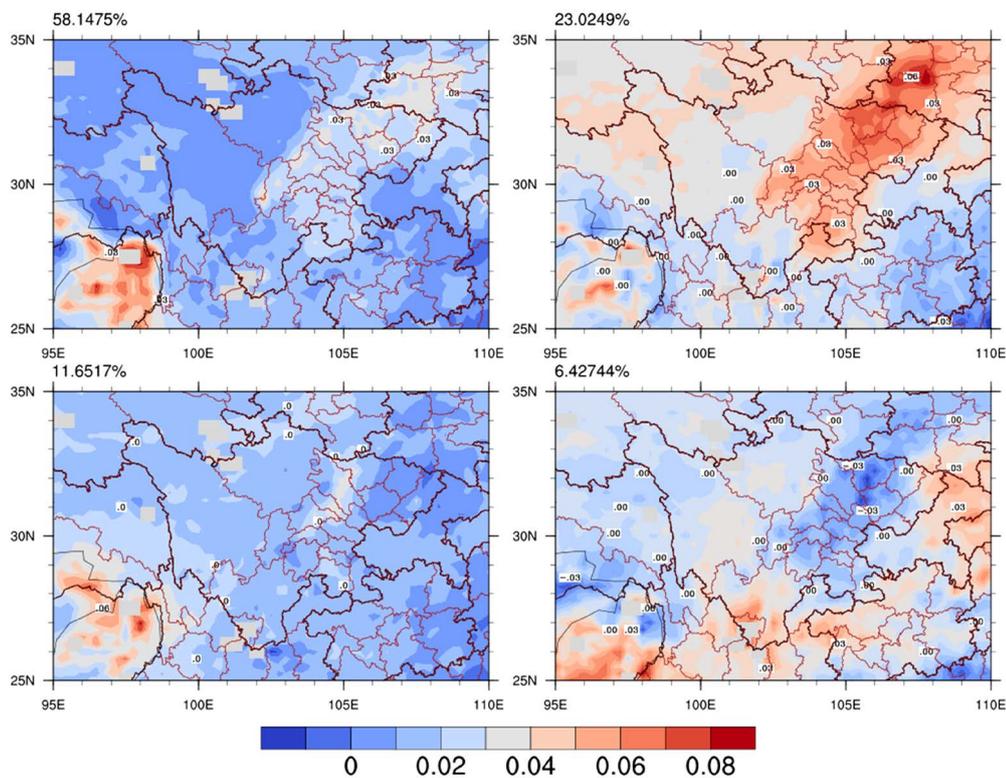


Figure 7. Spatial distribution of EOF based on monthly average heavy precipitation in Sichuan for many years
图 7. 基于四川地区多年逐月平均强降水量的 EOF 空间分布

3.2. 四川地区强降水时间分布特征

3.2.1. 极端降水事件发生次数的年际变化

图 8 给出了逐年夏季极端降水事件频数时间序列及其拟合的折线图来分析强降水的长期变化趋势。从图中可以看出, 1998 年夏季四川地区极端降水事件发生的次数最多, 2006 年夏季四川地区极端降水事件发生的次数最少, 且近 39 年来总体呈明显的下降趋势, 这种倾斜倾向通过了信度为 90% 的显著性检验。从年际变化来看, 20 世纪 90 年代以前四川地区极夏季端降水事件发生的次数变化趋势基本平稳, 从 1993 年以后开始呈波动变化。

3.2.2. 极端降水事件发生次数的周期特征

图 9 给出了四川地区逐年夏季极端降水事件频数功率谱分布来分析四川地区夏季强降水的主要变化周期及演变规律。可以看出四川地区夏季极端降水的功率谱年际变化存在明显的 2.2 年、3.5 年和 13 年峰值, 但只有 2.2 年的峰值通过了 95% 的显著性检验, 而其他峰值没有通过显著性检验, 说明其很可能是由随机性因素所引起的, 而并非真正的波动周期。综上所述, 四川地区 39 年夏季极端降水存在约 2.2 年的准周期。

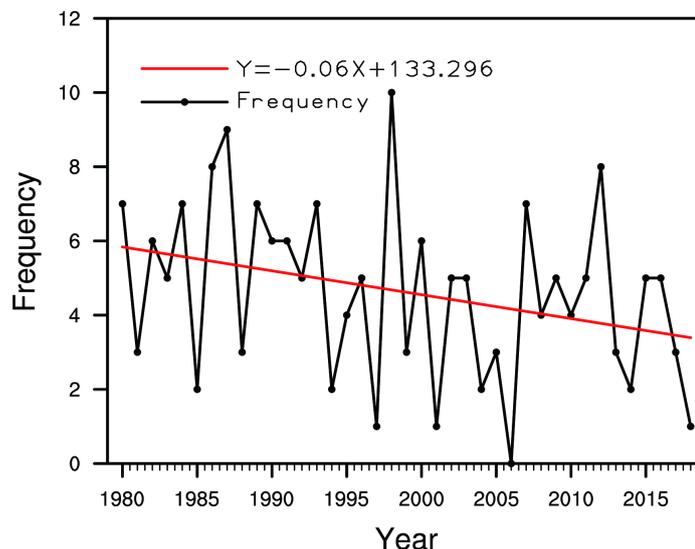


Figure 8. The time series and fitting of the frequency of summer extreme rainfall events in Sichuan
图 8. 四川地区逐年夏季极端降水事件频数时间序列及其拟合

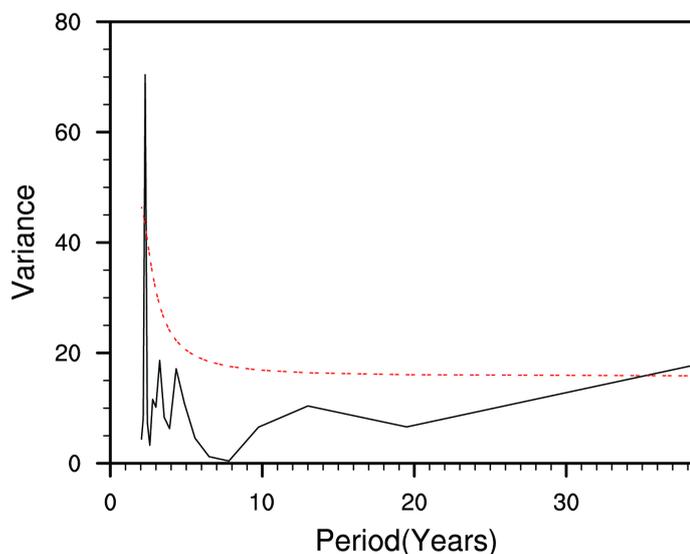


Figure 9. Frequency power spectrum of extreme summer precipitation events in Sichuan
图 9. 四川地区逐年夏季极端降水事件频数功率谱

3.2.3. 极端降水事件发生次数的突变年份

利用 1980 年到 2018 年间四川地区逐年夏季极端降水事件频数时间序列进行 M-K 显著性检验对其气候态的突变点进行分析。从图 10 中曲线的变化可以看出, 四川地区逐年夏季极端降水事件频数的变化整体表现为 20 世纪 90 年代呈现先上升后下降的波动变化, 但这种短暂的振荡现象并无显著趋势, 在 21 世纪初, 四川地区逐年夏季极端降水事件频数开始呈现出稳定下降的趋势, 并在 2003 年达到了 0.05 的显著性水平, 在其后有一个较为显著的突变区域, UF 和 UB 的交点表示四川地区逐年夏季极端降水事件频数突变的年份在 1981、1985 年与 1991 年, 由于交点同时位于虚线之间, 表明两次突变都通过了 0.05 显著性水平检验。综上可知, 近 39 年来四川地区逐年夏季极端降水事件频数突变发生在 1981、1985 年和 1991 年。

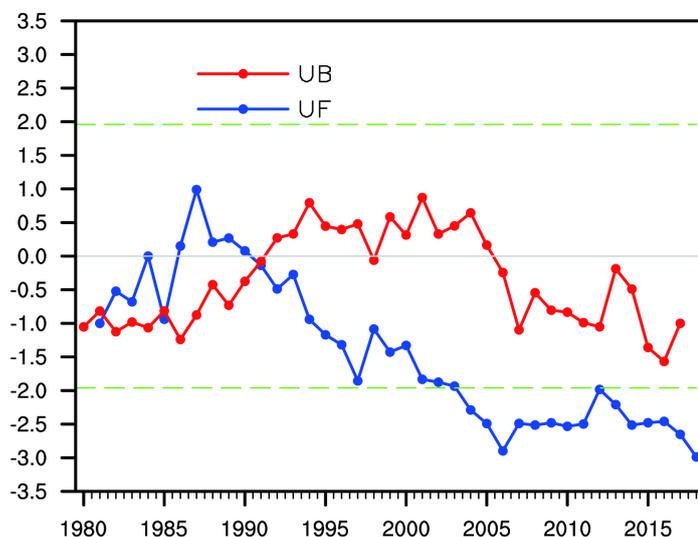


Figure 10. MK statistics of the frequency of extreme summer precipitation events in Sichuan
图 10. 四川地区逐年夏季极端降水事件频数 MK 统计量

4. 结论

通过对 1980~2018 近 39 年来四川地区强降水时空特征分析, 主要得出以下几点结论:

- 1) 四川地区强降水的阈值整体表现为西小东大、南小北大的趋势, 存在明显的区域变化特征。
- 2) 四川不同地区的多年年平均强降水量总体上表现为西少东多的趋势; 四川地区 39 年累计强降水次数自东向西呈“少-多-少”分布规律; 四川地区强降水强度空间分布自西向东逐渐增大, 这种趋势与四川地区西高东低的地形存在一致性。
- 3) 四川地区强降水量和强降水次数在各个季节都有不同的趋势, 降水主要集中于雨季, 强降水量大值中心和强降水高频区都会随着季节变化逐渐东移。
- 4) 四川地区极端降水量阈值的分布与四川地区多年平均强降水量的分布、强降水强度的分布趋势基本一致, 阈值低的地区, 极端降水事件的多年平均强降水量也较低, 强降水强度也较低, 反之也成立。四川地区极端降水量阈值的分布与极端降水发生次数的分布情况并不一致, 阈值大的地区, 其强降水发生次数未必就少, 反之亦然, 二者之间并无必然的联系。
- 5) 四川地区多年逐月平均强降水量空间表现为: 第一模态具有多年逐月平均强降水量“东多西少”的分布特征, 第二模态主要表现出四川西北部强降水量偏多, 其余地区强降水量一致性偏小的分布特征。第三模态自北向南呈现“- → + → -”, 第四模态从四川西部到东部主要表现出“+ → -”的格局。
- 6) 四川地区逐年夏季极端降水事件频数的变化整体表现为 20 世纪 90 年代呈现波动变化, 在年际变化上总体呈明显的下降趋势; 四川地区 1980~2018 年夏季极端降水次数存在约 2.2 年的准周期; 四川地区逐年夏季极端降水事件频数突变发生在 1981、1985 年和 1991 年。

参考文献

- [1] 缪启龙. 现代气候学[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] IPCC (2007) Climate Change 2007—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Allan, R.P. and Soden, B.J. (2008) Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, 321, 1481-1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>

-
- [4] Goswami, B.N., Venugopal, V., Sengupta, D., *et al.* (2006) Increasing Trend of Extreme Rain Events over India in a Warming Environment. *Science*, **314**, 1442-1445. <https://doi.org/10.1126/science.1132027>
- [5] 邵远坤, 沈桐立, 游泳, 康岚, 彭冬莲, 彭备芳. 四川盆地近 40 年来的降水特征分析[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2005, 27(6): 749-752.
- [6] 潘晓华, 翟盘茂. 近五十年中国极端温度和降水事件变化规律的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2002.
- [7] 张顺谦, 马振峰. 1961~2009 年四川强降水变化的时空特征[J]. 安徽农业科学, 2012, 39(23): 14202-14207.
- [8] 胡豪然, 毛晓亮, 梁玲. 近 50 年四川盆地汛期极端降水事件的时空演变[J]. 地理学报, 2009, 64(3): 278-288.
- [9] 赵衍斌, 肖天贵. 四川地区强降水的时空分布特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(1): 94-101.
- [10] Hamed, K.H. and Rao, A.R. (1998) A Modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*, **24**, Article ID: 182196.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.