

渠江流域降水时空分布特征

孟泽坤, 王彬

(北京林业大学水土保持学院, 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

摘要: 基于 1961—2020 年渠江流域 13 个气象站点降水数据, 运用累积距平、Mann-Kendall 检验、小波分析和 Kriging 插值等方法研究分析了流域降水量及暴雨事件的时空分布特征。结果表明: 渠江流域 60 年年均降水量 1 126.17 mm, 年降水量整体呈缓慢上升趋势, 降水倾向率为 6.9 mm/10 a。年降水量波动剧烈, 存在 27 年、15 年的周期性变化。年均降水量呈现由西部向东北部递增的趋势, 降水量高值区位于流域东北部万源地区, 低值区位于西部巴中地区。年降水量倾向率呈现由西北部向东南部递增的趋势, 东部及南部降水倾向率为 10~15 mm/10 a。渠江流域降水呈季节性变化, 春季、秋季降水量呈下降趋势, 夏季、冬季降水量呈上升趋势。5 年滑动平均数据表明, 夏季降水倾向率为 16.9 mm/10 a, 秋季降水倾向率为 -7.7 mm/10 a。季节降水量波动明显, 突变点较多, 春、夏、秋季突变点主要集中于 1961—1980 年和 2010—2020 年间, 冬季突变点集中于 1985—2005 年间。渠江流域春、夏、秋、冬四季降水倾向率最高值分别位于流域南部、东北部、东南部和西部。渠江流域汛期暴雨年均日数为 4.28 日, 暴雨日数整体呈上升趋势, 60 年内暴雨日数以 0.21 d/10 a 的速率增加。汛期暴雨日数年际波动明显, 1965 年、1983 年、1984 年呈显著增加趋势。汛期暴雨日数存在 14 年、21 年的周期性变化。渠江流域多年平均暴雨日数呈现由西南部向东北部递增的趋势, 流域南部达川地区的上升趋势最快, 较流域整体上升趋势高 0.15 d/10 a。

关键词: 降水量; 暴雨日数; 周期性变化; 时空分布特征变化; 渠江流域

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0209-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.027

Spatio-temporal Heterogeneity of Precipitation Variations in Qujiang Basin

MENG Zekun, WANG Bin

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Three-gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Beijing 100083)

Abstract: Based on the precipitation data of 13 meteorological stations in Qujiang Basin from 1961 to 2020, this study used cumulative anomaly, Mann-Kendall test, wavelet analysis, and Kriging interpolation methods to analyze spatio-temporal characteristics of precipitation and extreme events variations. The results showed that the 60-year average annual precipitation was 1 126.17 mm in the Qujiang basin, giving a slow upward trend with a tendency rate of 6.9 mm/10 a. The annual precipitation fluctuated violently, with cyclical changes of 27 a and 15 a. The average annual precipitation increased from the west to the northeast. The area with high precipitation was located in the Wanyuan area in the northeast of the basin, while the area with low precipitation in the western Bazhong area. The annual precipitation tendency rate increased from the northwest to the southeast, and the precipitation tendency rate in the east and south was 10~15 mm/10 a. Precipitation in the Qujiang Basin changed seasonally, with a downward trend in spring and autumn, and an upward trend in summer and winter. The 5-year sliding average indicated that the summer tendency rate was 16.9 mm/10 a, but -7.7 mm/10 a for the autumn. Seasonal precipitation fluctuated significantly with many mutation points. The mutation points in spring, summer and autumn were mainly concentrated in 1961—1980 and 2010—2020, and the mutation points in winter concentrated in 1985—2005. The highest precipitation tendency rates in spring, summer, autumn, and winter were in the south, northeast, southeast and west of the basin respectively. Heavy rainstorm days in the Qujiang basin during the flood season averaged 4.28 days per year, showing an upward trend with a rate of 0.21 d/10 a in the studied 60 years. During the flood

收稿日期: 2021-08-14

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505501); 重庆市科技兴林项目(渝林科研 2020-10)

第一作者: 孟泽坤(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 1052149897@qq.com

通信作者: 王彬(1983—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wangbin1836@bjfu.edu.cn

season, it fluctuated significantly, and there was a significant increase tendency in 1965, 1983 and 1984. Heavy rainstorm days in the flood season had the periodic changes of 14 a and 21 a. The multi-year average of heavy rainstorm days showed an increasing trend from the southwest to the northeast. The upward trend in the southern part of the basin-Dachuan area was the fastest, which was 0.15 d/10 a higher than the average upward trend of the whole basin.

Keywords: precipitation; heavy rainstorm days; periodical change; spatio-temporal variations; Qujiang Basin

近年来,在全球气候变化背景下,降水时空分布更加不均匀,极端天气事件明显增多^[1-2],旱涝灾害频发,针对降雨时空变异性的研究逐渐成为研究热点^[3]。我国位于欧亚大陆东部,东临西太平洋,海陆热力差异明显,季风气候是主要的气候特征之一,降水等气象要素存在明显的时空变异性。渠江流域是长江上游水系含沙量最大的河流——嘉陵江左岸的最大支流,流域降水量受季风的影响表现出明显的季节性差异,同时受地形、地貌、土壤、地质等条件的影响,该流域气象水文要素空间特征差异大^[4],水土流失严重,径流含沙量高。近年来,渠江流域洪水灾害频发。2011年“9·18”暴雨洪灾中,渠江流域发生了历史上最大洪水,经济损失高达141亿元。2021年7月,强降雨导致渠江流域部分中小河流发生超警戒超保证洪水,渠江干流三汇站洪峰流量接近历史峰值,人民生命财产安全受到严重威胁。此外,长江流域中三峡水系、洞庭湖水系、鄱阳湖水系等34条河流形势也非常严峻。因此,针对渠江流域降水及暴雨事件的时空分布特征的研究是极有必要的。

现有研究^[5]表明,嘉陵江流域降水量整体呈下降趋势,但支流渠江流域变化趋势与其相反。嘉陵江流域年降水量存在35年和21年的周期性变化^[6],各季节降雨量存在很大的差异,夏季和冬季降水量增加,春季降水量呈微弱减少趋势,秋季降水量显著减少^[7]。渠江流域位于嘉陵江流域东南部,年均降水量较大,夏季降水量增加趋势最显著^[8]。此外,杜华明等^[7]对嘉陵江流域的研究表明,年平均暴雨日数与年平均降水量存在显著正相关关系,相关系数为0.84 ($p < 0.01$),年平均降水量的多少是影响年平均暴雨出现日数的重要因素;罗玉等^[9]研究发现,2005年开始四川盆地的极端日降水事件明显增多;符艳红等^[10]研究指出,嘉陵江流域东南部——渠江流域降水日数最多;袁梦等^[11]对渠江流域1970—2012年降水资料分析研究得出,渠江流域汛期降水量增大,暴雨频率增加,降水趋于极端的结论。

现有的研究多是对嘉陵江流域进行整体的研究,针对渠江流域的深入研究较少,且渠江流域位于嘉陵江流域东部,受季风影响更为明显,其降水量在时间和空间上的表现与嘉陵江整体趋势存在差异。因此,

本文从年、季节2个尺度对渠江流域的降水量进行时空分布特征研究,以期揭示渠江流域降水时空分异规律,并对渠江流域汛期暴雨事件的时空分布特征进行了研究,为该地区乃至长江流域季风气候区防范全球气候变化影响下的洪涝灾害提供理论依据。

1 流域概况

渠江是长江支流嘉陵江左岸最大的支流,流经四川、陕西、重庆。流域地跨东经106°28′—109°00′,北纬30°00′—32°48′,面积3.7万km²。渠江流域地势北部高南部低,海拔178~2669m。土壤类型以棕壤、黄棕壤、紫色土为主^[4]。渠江流域属于亚热带湿润季风气候,气候温和、雨量充沛,平均降水量变化于785.65~1737.01mm。受季风性气候的影响,流域降水量年内分布不均,多集中在5—9月,约占全年降水量的63%。

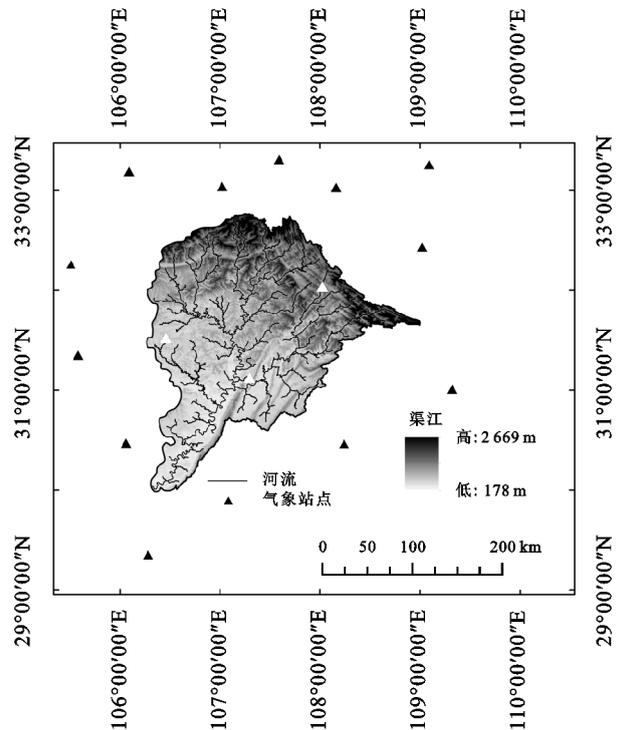


图1 研究区域及气象站点分布位置

2 材料与方法

2.1 数据资料

本研究收集整理渠江流域内部及外缘共13个基本站点的气象数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。其中,流域内部气象站点3

个,外缘补充站点 10 个(表 1)。达川站、巴中站、万源站、高坪站、阆中站、广元站 6 个站点数据资料为 1961—2020 年逐日降雨量,万州站、沙坪坝站、安康站、石泉站、汉中站、略阳站、佛坪站 7 个站点数据资料为 1961—2020 年逐月降雨量。

本文根据气象统计法划分各季节,春、夏、秋、冬 4 个季节分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月至翌年 2 月。文中的汛期均指各年 5—9 月。本文将一日内 24 h 累计降水量 ≥ 50 mm 记为 1 个暴雨日^[12]。

表 1 气象站基本情况

站点名称	所处位置	经度	纬度	海拔/m
达川站	流域内部	107°30'E	31°12'N	344
巴中站	流域内部	106°46'E	31°52'N	419
万源站	流域内部	108°02'E	32°04'N	675
高坪站	流域外部	106°06'E	30°47'N	311
阆中站	流域外部	105°58'E	31°35'N	385
广元站	流域外部	105°51'E	32°26'N	513
万州站	流域外部	108°24'E	30°46'N	188
沙坪坝站	流域外部	106°28'E	29°35'N	259
安康站	流域外部	109°02'E	32°43'N	291
石泉站	流域外部	108°16'E	33°03'N	485
汉中站	流域外部	107°02'E	33°04'N	510
略阳站	流域外部	106°09'E	33°19'N	797
佛坪站	流域外部	107°59'E	33°31'N	827

2.2 分析方法

2.2.1 降水倾向率 流域降水的倾向率采用一次线性方程式表示^[13]:

$$Y = st + y \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:Y 为降水量(mm);t 为时间(a);y 为常数项;s 为线性趋势的斜率。

2.2.2 Kriging 空间插值法 采用较其他传统方法更为可靠和精确的 Kriging 空间插值法^[14-17],依据协方差函数进行空间建模和插值,基于区域样本点的实测数据,根据待估点邻域样本点的空间位置关系,对待估点进行无偏最优估计。本研究采用普通克里金法,选用球面模型作为变异函数理论模型,对降雨数据进行插值计算。

$$P(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i P(x_i) \quad (2)$$

式中:P(x₀)为x₀点处雨量估计值(mm);P(x_i)为站点 i 的实测雨量(mm);ω_i为站点 i 的权重;n 为雨量站数量。

2.2.3 累积距平法 距平是指某时段要素值与同一时段该要素平均值的差值,距平值可以直观地反映出序列的变化情况^[18]。当累积距平曲线呈上升趋势时,表示序列距平值增加,序列呈增加趋势;当累积距平曲线呈下降趋势时,表示序列距平值减小,序列呈下降趋势。对于时间序列 x,累积距平可表示为:

$$LP = \sum_{k=0}^n (x_k - \bar{x}) \quad (3)$$

式中:k 为年份;x_i为 k 年降雨量(mm); \bar{x} 为 n 年平均降雨量(mm),n 为年数。

2.2.4 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 方法是一种非参数统计检验方法,可用于不符合正态分布特征的时间序列数据的长期趋势分析。该方法计算过程简单,检测范围宽,干扰度小,应用范围广,具体计算方法见参考文献[19]。

2.2.4 Wavelet 分析 小波(Wavelet)分析是在傅里叶(Fourier)分析基础上发展而来的^[20-22]。本文使用 Morlet 小波函数对序列的变化趋势进行分析。

$$\varphi(t) = e^{ct - \frac{t^2}{2}} \quad (4)$$

式中:c 为常数;e 为虚数;t 为时间(a)。

对于时间序列,其连续小波变换为:

$$W_f(g, h) = |g|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-h}{g}\right)} dt \quad (5)$$

式中: $\overline{\varphi(t)}$ 为 $\varphi(t)$ 的复共轭函数;W_f(g, h)为小波变换系数;g 为尺度参数;h 为平移量。本文选择小波函数类型 cmor(1~1.5),取样周期为 1,最大尺度为 32。

为了判断序列的主要周期,进行小波方差计算,即将小波系数的平方值在 h 域积分,其计算公式为:

$$W_f(g) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(g, h)|^2 dh \quad (6)$$

小波方差随 g 的变化过程即为小波方差图,对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度,曲线最高点所对应的时间尺度为第 1 主周期。

3 结果与分析

3.1 年尺度降雨量时空分布特征

3.1.1 年尺度降雨时间变化特征 渠江流域近 60 年平均降水量为 1 126.17 mm,年均降水量为 785.65~1 737.01 mm,年降水量最大值与最小值分别出现在 1983 年和 2001 年。流域年降水量整体呈增加趋势,趋势方程为 y = 0.69x - 251.38,年降水量以 6.9 mm/10 a 的速率增加,60 年增长量为 41.40 mm,增加趋势不显著。滑动平均处理后,年降水量增加趋势减弱,倾向率为 3.3 mm/10 a,60 年增长量为 19.8 mm(图 2)。1980—1985 年渠江流域年降水量呈大幅增加趋势,1992—2003 年,年降水量呈大幅减少趋势,其他年代波动趋势较缓,这与段文明等^[8]对嘉陵江 1960—2009 年降水量的研究结论一致。近 60 年渠江流域年降水量波动趋势明显,年降水量距平值呈正负值交替变化,降水偏多年 28 年,偏少年 32 年,整体呈上升趋势。

对渠江流域年降水量进行 M—K 突变检验,UF、UB 均在 U_{0.05} 水平线内,年际变化趋势不明显

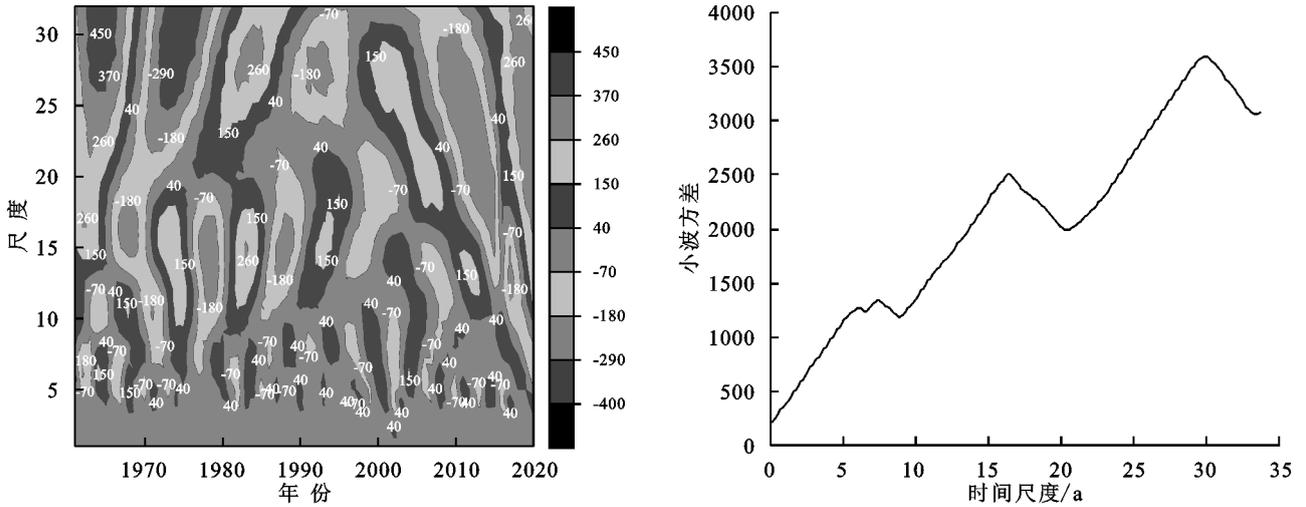


图 4 降水量 Morlet 小波变换实部时频分布与小波方差

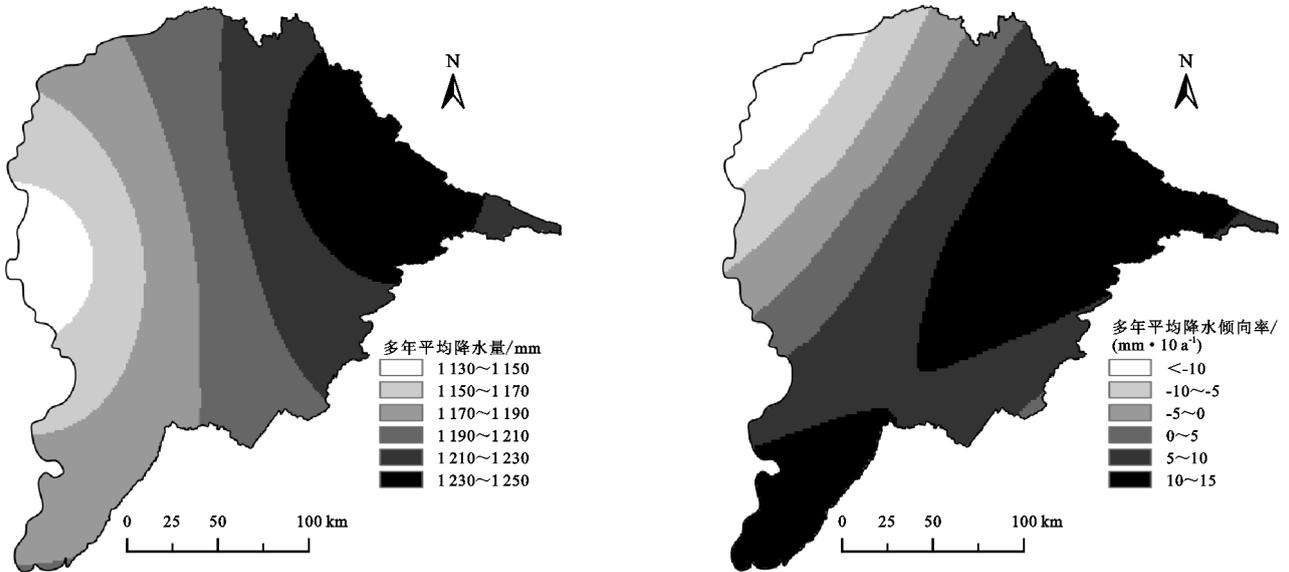


图 5 60 年平均降水量与年降水量倾向率分布

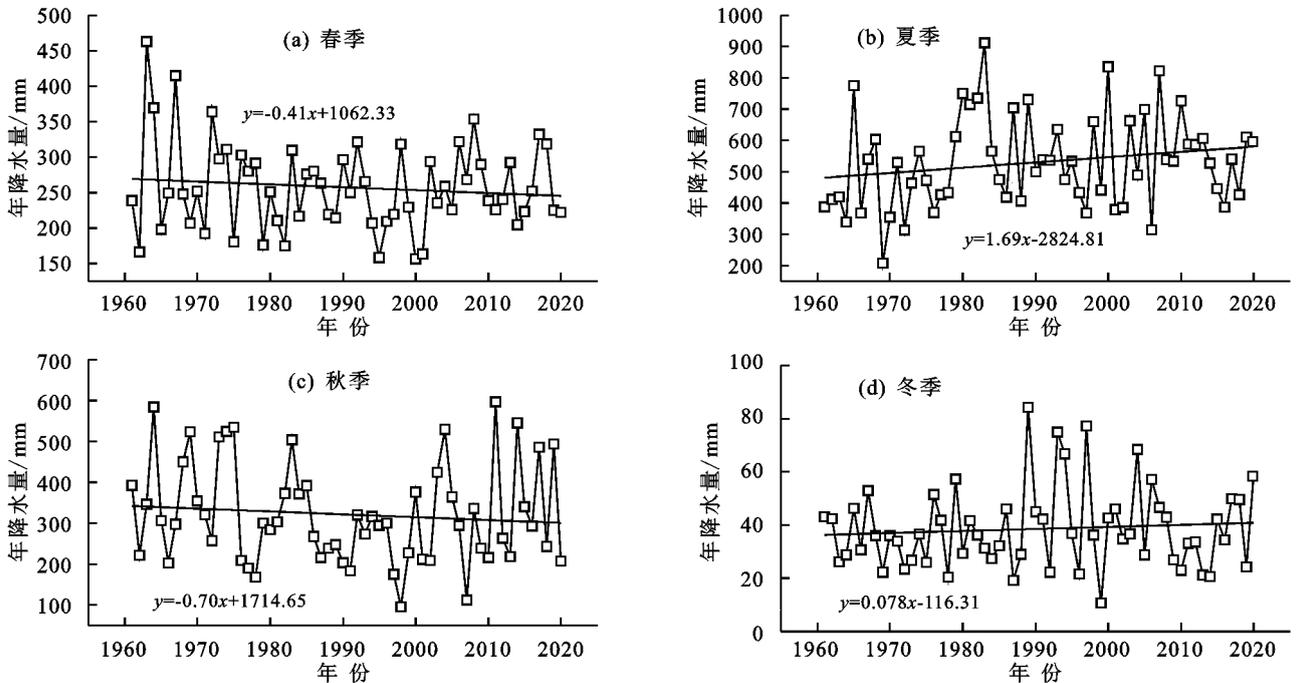


图 6 各季节降水量年际变化

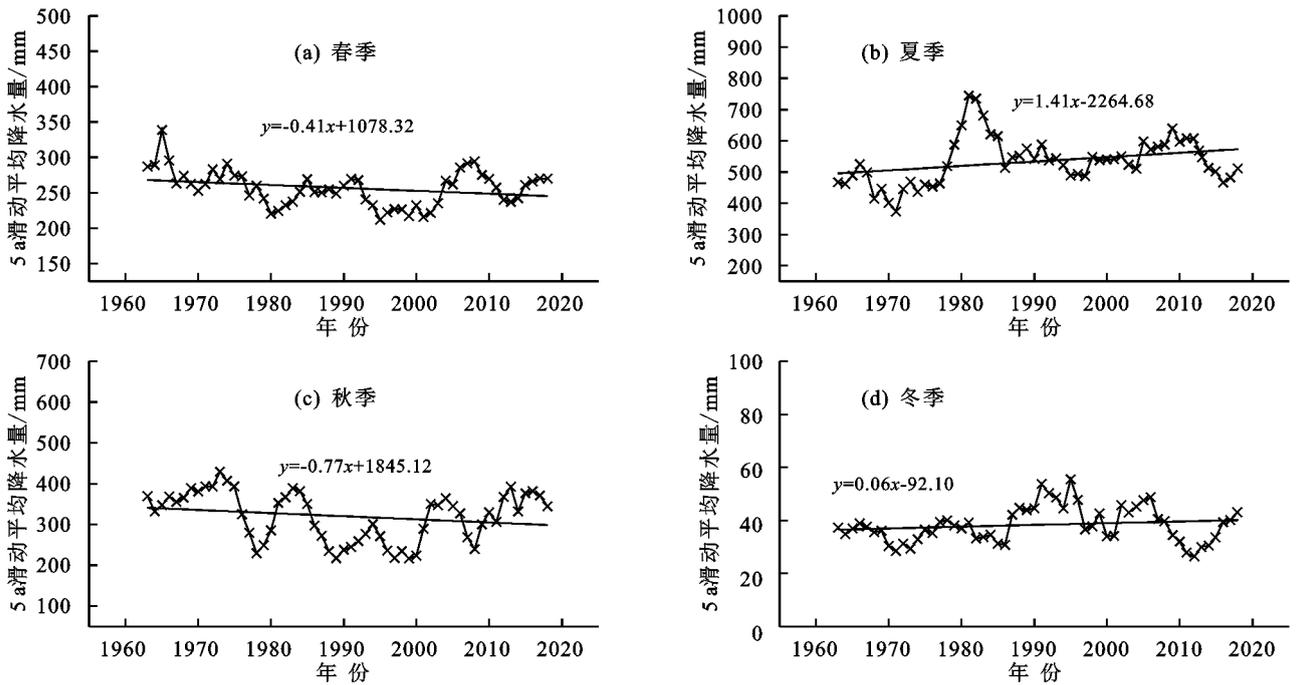


图 7 5 年滑动平均处理后季节降水量变化趋势

渠江流域春季降水量在 1961—1979 年间呈上升趋势,1980 后主要呈下降趋势(图 8),UF、UB 均在 $U_{0.05}$ 水平线内,年际变化趋势不明显。1975—2005 年间,无突变点,突变点集中在 1961—1975 年和近 15 年间。夏季降水量除 1970 年、1972 年和 1973 年外,皆呈上升趋势,1982—1997 年、2010—2015 年上升趋势尤为显著($p < 0.05$),1961—1970 年突变点较多,但近 15 年仅有 2016 年发生了突变。渠江流域秋季降水量在 1977—2010

年区间内呈下降趋势,1997—2003 年,下降趋势最为显著($p < 0.05$),突变发生情况同春季相似。冬季降水量在上世纪 90 年代前主要呈下降趋势,90 年代后主要呈上升趋势。上世纪 90 年代由于西太平洋副热带高压的增强^[10],渠江流域的年降水量整体呈减少趋势,但由于流域处于亚热带季风气候区,季节间差异较大,各季节降水量趋势各异。出现春季和秋季降水量减少,夏季和冬季降水增加的现象。

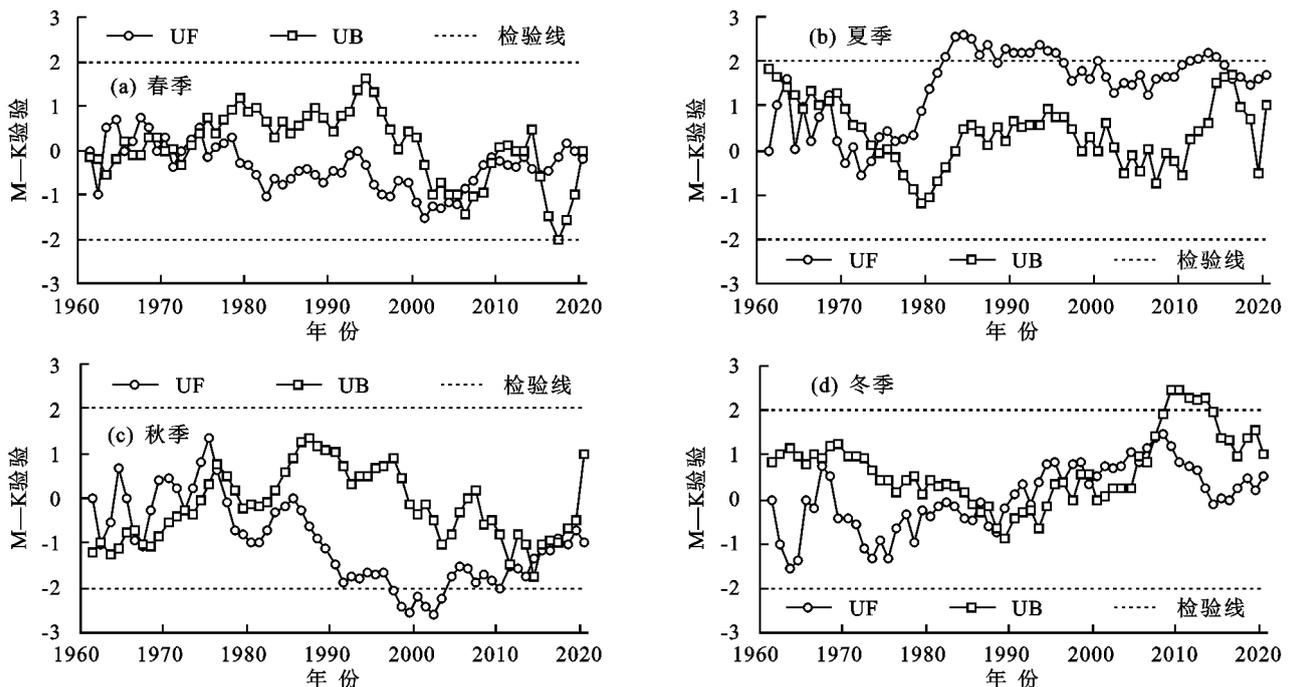


图 8 1961—2020 年各季节降水量 M-K 检验

3.2.2 不同季节降水量的空间分布特征 渠江流域各季节多年平均降水量差别较大,存在明显的空间差异。春季多年平均降水量呈现由西北部向东南部递

增的趋势(图 9),流域东南部达川地区降水量为 305~320 mm,西部巴中地区春季多年平均降水量为 230~260 mm。流域东部受季风影响大,夏季、秋季降水量相对较

高,两季多年平均降水量的空间分布情况相似,都呈由流域北部向流域南部递减的趋势。夏季、秋季多年平均降雨量最低值均出现在流域南部达川地区,夏季降水量为 515~530 mm,秋季降水量为 310~320 mm。流域东北部万源地区夏季和秋季降水量最多,夏季降水量在 600 mm 左右,秋季降水量在 350 mm 左右。

冬季多年平均降水量呈由东北部向南部递增的趋势,平均降水量为 38.35 mm,南部达川地区雨量较多,高于平均水平 14.73%~25.16%。春季和冬季,渠江流域受季风的影响较小,雨量高值区由海拔较高的流域东北部向海拔较低的流域南部移动,形成春、冬季与夏、秋季降水量相异的分布格局。

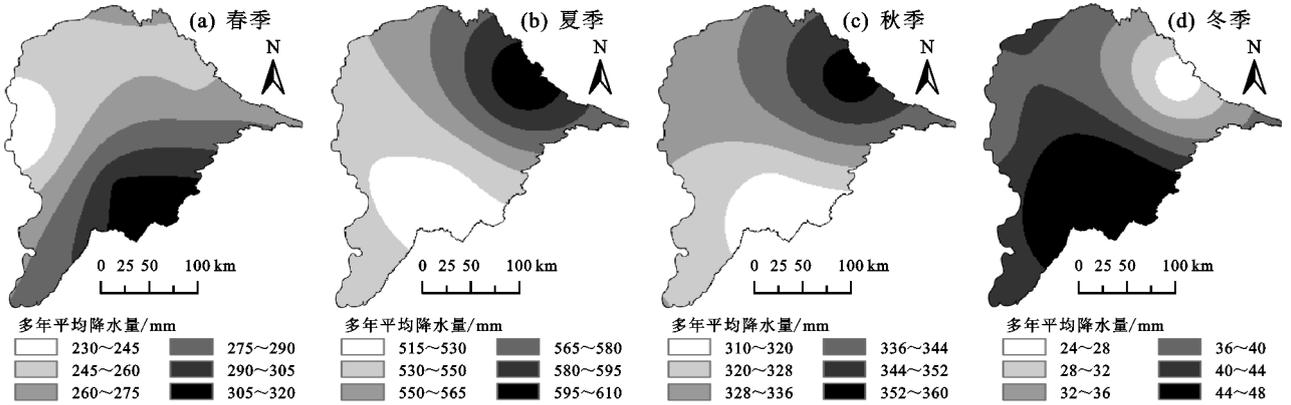


图 9 1961—2020 年各季节多年平均降水量分布

渠江流域春季降水倾向率整体呈下降趋势,流域东部下降趋势最快(图 10),降水倾向率在 -7.5~-5.5 mm/10 a,流域东部 60 年降水量减少 33~45 mm。夏季降水量呈上升趋势,倾向率的空间分布情况与降水量的分布情况相似,流域北部上升趋势最显著,降水倾向率在 18~23 mm/10 a,60 年降水量增加 108~138 mm。秋季降水整体呈下降趋势,降

水倾向率以巴中地区为负值中心和达川地区为正值中心辐射分布。流域西部巴中地区降水倾向率 -17.5~-14 mm/10 a,60 年降水量减少 84~105 mm,东南部达川地区秋季降水量以 0~3.5 mm/10 a 的趋势缓慢增加。冬季降水量整体上升趋势在 0.3~1.5 mm/10 a,增长趋势缓慢,流域东南部达川地区上升趋势最缓。

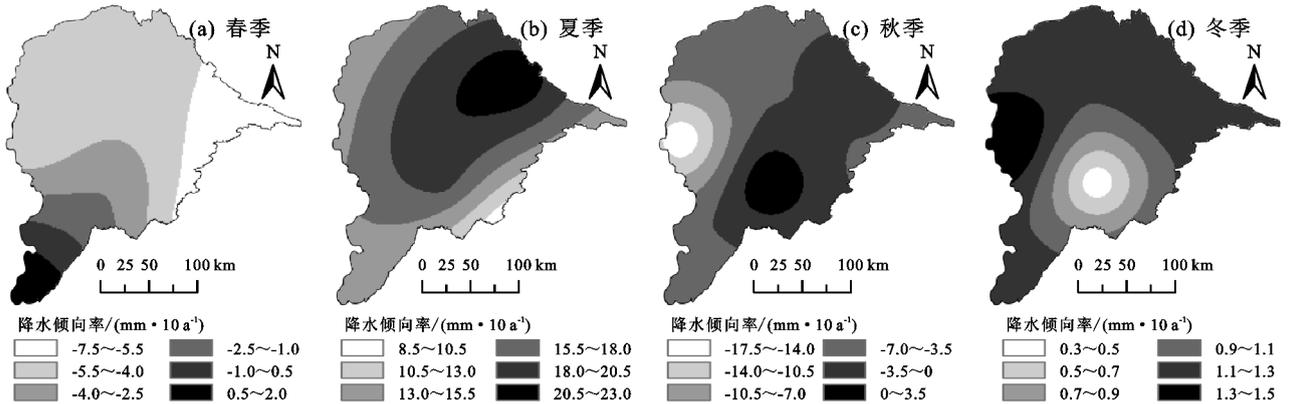


图 10 60 年季节降水倾向率分布

3.3 汛期暴雨事件时空分布特征

3.3.1 暴雨天数年际变化特征 60 年间,渠江流域汛期暴雨日数平均为 4.28 日,暴雨日数介于 1.05~8.49 天。暴雨日数整体呈增加趋势,暴雨日数以 0.21 d/10 a 的速率增加,增加趋势不显著。滑动平均处理后,暴雨日数的增加趋势稍有减弱,倾向率为 0.17 d/10 a(图 11)。

1961—2020 年渠江流域汛期暴雨日数波动明显,其中 1961 年暴雨日数最少为 1.05 天,1983 年暴雨日数达到 60 年最大值 8.49 天。1961—2010 年,暴

雨日数累积距平值为负值,2002 年后累积距平值上升趋势,在 -2~3 浮动。其中,1979—1985 年、2003—2015 年暴雨日数明显偏多,这与袁梦等^[11]所得 2003—2012 年渠江流域暴雨发生频率及汛期最大雨强增大的结论相匹配。

渠江流域汛期暴雨日数年际变化呈不显著的缓慢上升趋势(图 12)。汛期暴雨日数增加的趋势与渠江流域夏季降水量增加相匹配,同时与嘉陵江流域的变化趋势一致。1965 年、1983 年和 1984 年暴雨日数有增加趋势,2014 年有减少趋势($p < 0.05$)。2002—

2020 年,暴雨日数有持续上升趋势。在 $U_{0.05}$ 的置信区间内,UF、UB 2 条曲线交点较多,分别为 1962 年、1970 年、1971 年、1972 年、1977 年、1988 年和 1996 年,渠江暴雨日数存在多个突变点,波动剧烈。

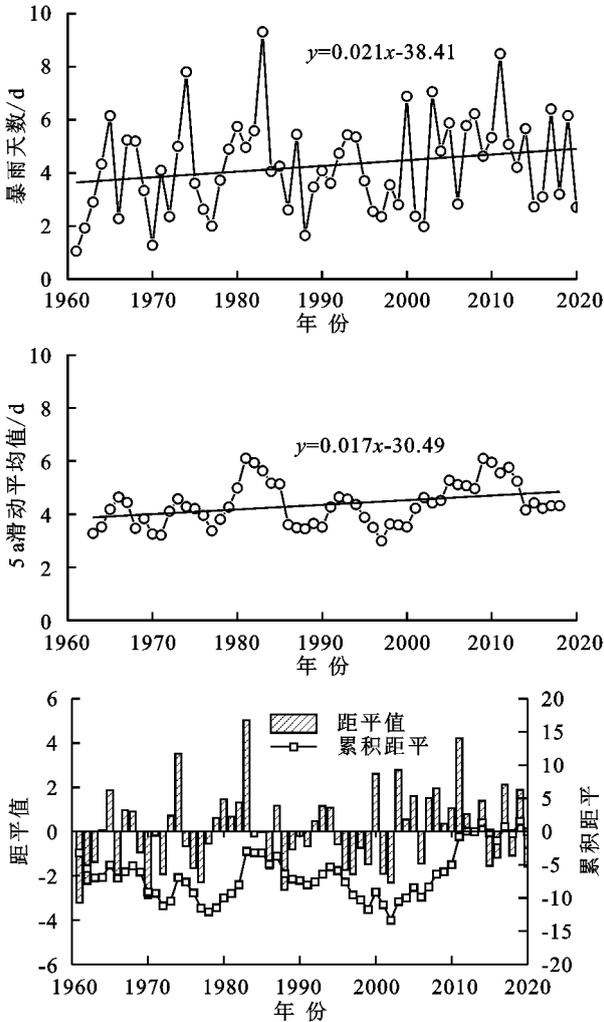


图 11 1961—2020 年汛期暴雨日数年际变化与暴雨日数距平变化

1961—2020 年渠江流域汛期暴雨日数有明显的周期性变化并存在多个振荡中心(图 13),主振荡周期分别是 14 年、21 年和 7 年,振荡周期与年降水量

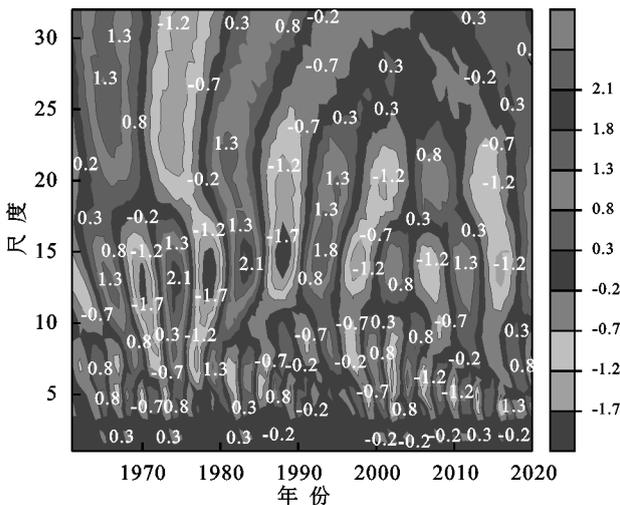


图 13 1961—2020 年汛期暴雨日数小波实部与小波方差

变化相似。小波方差在 14 年左右达到最大值,14 年是其第 1 主周期。在 14 年尺度上,暴雨日数呈现“偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”14 次波动变化。21 年尺度上,暴雨日数呈现“偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”9 次交替变化。

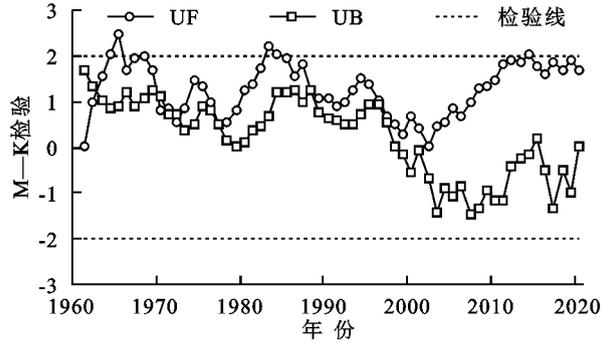
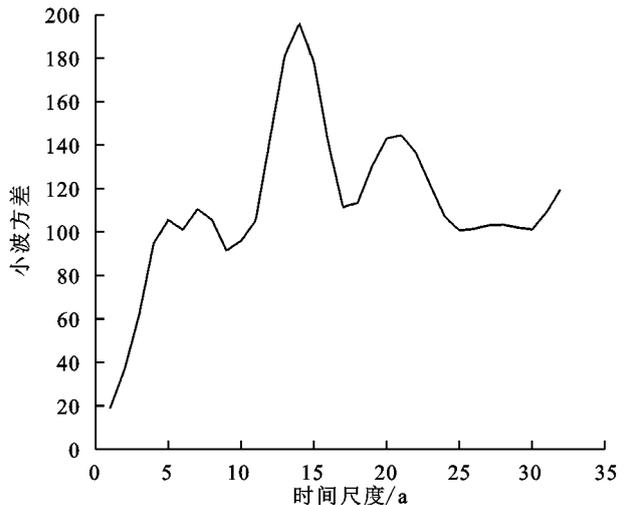


图 12 1961—2020 年汛期暴雨日数 M-K 检验

3.3.2 暴雨日数空间分布特征 渠江流域多年平均暴雨日数呈由西南部向东北部递增的趋势(图 14),该趋势与夏季降水量分布趋势相似。暴雨日数最大值位在东北部万源地区,多年平均暴雨日数在 4.7~4.9 天。暴雨日数最小值位于流域南部达川地区,多年平均暴雨日数在 3.7~3.9 天。

渠江流域内部站点汛期暴雨日数均呈上升趋势,外缘站点广元站呈缓慢下降趋势,趋势不显著。呈上升趋势的地区中,流域南部达川地区的上升趋势最快为 0.36 d/10 a,高于流域整体上升趋势 0.15 d/10 a,其他地区上升趋势由快到慢分别是流域西部巴中地区、流域东北部万源地区、流域外西南部高坪地区、流域外西部阆中地区。渠江流域暴雨发生频率整体呈上升趋势,南部、西部低海拔地区的趋势较为明显。虽东北部上升趋势较缓,但是暴雨的主要集中区域,洪涝灾害的防范工作仍需加强。



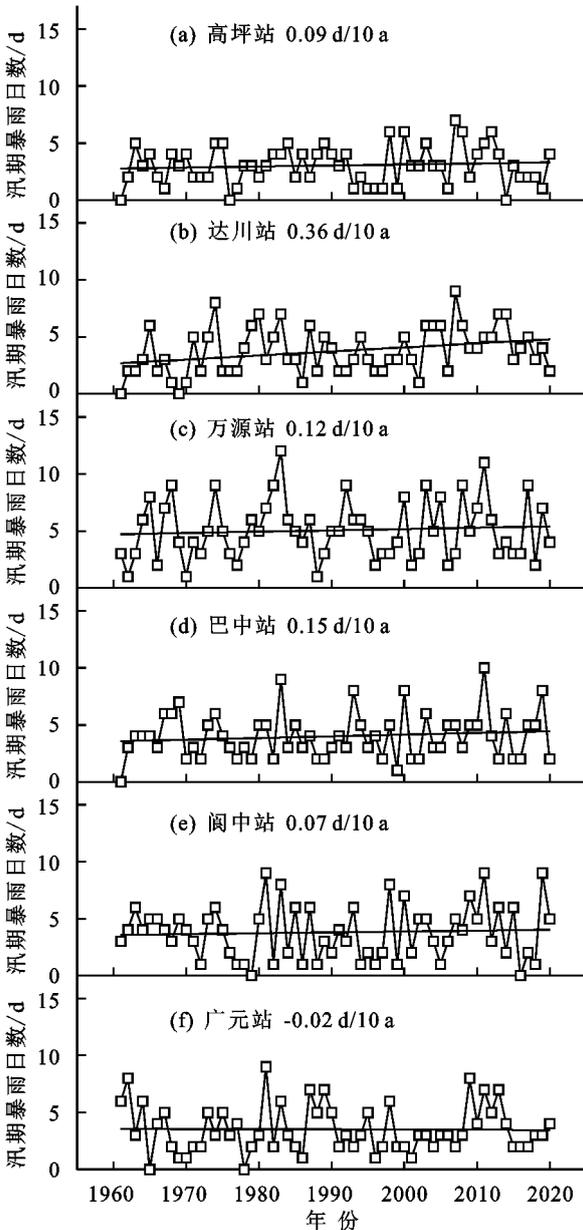
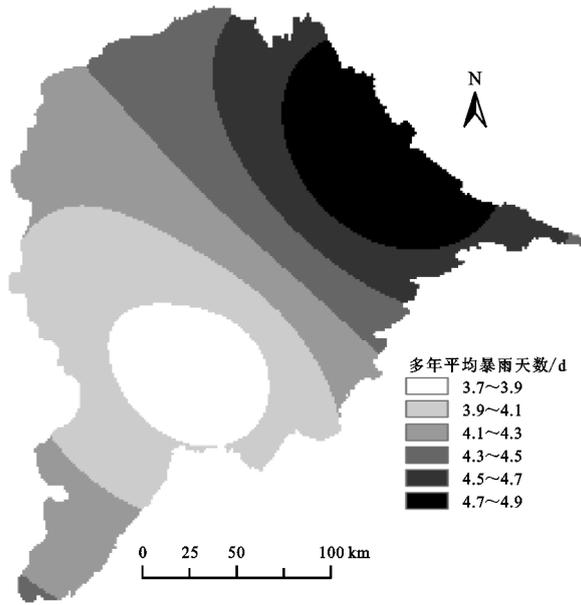


图 14 渠江流域多年平均汛期暴雨日数分布与流域各气象站点汛期暴雨日数变化趋势

4 结论

(1)渠江流域 60 年年均降水量为 1 126.17 mm, 年降水量整体呈缓慢上升趋势, 降水倾向率为 6.9 mm/10 a, 流域年降水量波动剧烈, 存在 27 年、15 年的周期性变化。渠江流域多年平均降水量呈由西部向东北部递增的趋势, 降水量高值区位于流域东北部万源地区, 低值区位于西部巴中地区。年降水量倾向率呈由西北部向东南部递增的趋势, 东部及南部降水倾向率为 10~15 mm/10 a。

(2)渠江流域降水呈季节性变化, 春季、秋季降水量呈下降趋势, 夏季、冬季降水量呈上升趋势。5 年滑动平均表明, 夏季倾向率为 16.9 mm/10 a, 秋季降水倾向率为 -7.7 mm/10 a。4 个季节降水量波动明显, 突变点较多, 春、夏、秋季突变点主要集中于 1961—1980 年和 2010—2020 年间, 冬季突变点集中于 1985—2005 年间。渠江流域春、夏、秋、冬四季降水倾向率最高值分别位于流域南部、东北部、东南部、西部。

(3)渠江流域年均汛期暴雨日数为 4.28 天, 暴雨日数整体呈增加趋势, 增加速率为 0.21 d/10 a。渠江流域汛期暴雨日数波动明显, 1965 年、1983 年、1984 年有显著增加趋势。汛期暴雨日数有明显的周期性变化, 并存在 14 年、21 年多个振荡中心。渠江流域多年平均暴雨日数呈由西南部向东北部递增的趋势, 流域南部达川地区的上升趋势最快, 高于流域整体上升趋势 0.15 d/10 a。

参考文献:

- [1] 崔红艳. 北极海冰变化对北半球气候影响研究[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis contribution of working group one to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013:1-1552.
- [3] 李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [4] 孟铨铨. 嘉陵江流域径流时空变化特征及其驱动因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [5] 曾小凡, 叶磊, 翟建青, 等. 嘉陵江流域极端降水变化及其对水文过程影响的初步研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(增刊 1): 159-164.
- [6] 白桦, 穆兴民, 高鹏, 等. 嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 102-106.
- [7] 杜华明, 延军平, 杨登兴, 等. 嘉陵江流域降水变化及早涝多时间尺度分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 836-845.
- [8] 段文明, 穆兴民, 王飞, 等. 嘉陵江流域降雨侵蚀力时空

- 变化分析[J].水土保持通报,2012,32(5):182-185.
- [9] 罗玉,陈超,马振峰,等.四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因[J].西南大学学报(自然科学版),2019,41(5):128-138.
- [10] 符艳红,谢世友,高洁.基于 Mann—kendall 法的嘉陵江流域降水量时空分布规律[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(6):132-139.
- [11] 袁梦,马力.渠江流域汛期强降水时空分布特征[J].高原山地气象研究,2014,34(1):15-21.
- [12] 卢丽.北京市清河流域极端降水及防汛预警指标研究[D].北京:中国农业大学,2017.
- [13] 梅静,王建,何亮,等.川西甘孜州 1961—2015 年气温和降水时空变化特征研究[J].山地学报,2019,37(2):161-172.
- [14] Wang W T, Yin S, Xie Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J].Catena,2016,141:56-65.
- [15] 马俊明,齐实,程柏涵,等.云南省红河下游暴雨特征分析:以河口县为例[J].中国水土保持科学,2018,16(6):99-107.
- [16] 张铁钢.丹江中游小流域水—沙—养分输移过程研究[D].西安:西安理工大学,2016.
- [17] 程甜甜,张兴刚,李亦然,等.鲁中南山丘区坡面产流产沙与降雨关系[J].水土保持学报,2017,31(1):12-16.
- [18] 焦玮,朱仲元,宋小园,等.近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):12-19.
- [19] 唐建.基于 MK 检验的天山山区近 55 年降水特征分析[J].甘肃水利水电技术,2019,55(1):5-8.
- [20] Anish K W, Kizhur S, Rajasekharaiah S. Climatic periodicities recorded in lake sediment magnetic susceptibility data: Further evidence for solar forcing on Indian summer monsoon[J].Geoscience Frontiers,2017,8(6):1349-1355.
- [21] 桑燕芳,王中根,刘昌明.小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J].地理科学进展,2013,32(9):1413-1422.
- [22] 苏布达,姜彤,任国玉,等.长江流域 1960—2004 年极端强降水时空变化趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):9-14.
- [23] 王润科,杨磊,叶青.陇南嘉陵江流域年降水量空间结构的趋势面分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2013,34(6):86-91.
- (上接第 208 页)
- [33] Nie T, Dong G T, Jiang X H, et al. Spatio-temporal changes and driving forces of vegetation coverage on the Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Remote Sensing,2021,13(4):613-630.
- [34] Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J].Acta Geographica Sinica,2017,72(1):161-173.
- [35] 李世东,翟洪波.世界林业生态工程对比研究[J].生态学报,2002,22(11):1976-1982.
- [36] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999[J].International Journal Of Biometeorology,2001,45(4):184-190.
- [37] 郭力宇,郭昭,王涛,等.陕北黄土高原植被动态变化及其对气候因子的响应[J].西安科技大学学报,2019,39(2):317-326.
- [38] 李世东.中国退耕还林发展阶段研究[J].世界林业研究,2003(1):36-41.
- [39] Sun W Y, Mu X M, Song X Y, et al. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming[J].Atmospheric Research,2016,168:33-48.
- [40] 刘梦云,常庆瑞,安韶山,等.土地利用方式对土壤团聚体及微团聚体的影响[J].中国农学通报,2005,21(11):247-250.
- [41] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):23-31.
- [42] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019-1022.