

刘毅,孙俊,周国兵,等.2020.近45 a重庆暴雨气候变化特征分析[J].暴雨灾害,39(3):306-311

Liu Yi, Sun Jun, Zhou Guobin, et al. 2020. Analysis of climate change characteristic of rainstorm in Chongqing in recent 45 years[J]. Torrential Rain and Disasters, 39(3):306-311

近45 a重庆暴雨气候变化特征分析

刘毅¹, 孙俊², 周国兵¹, 王欢¹, 林建³

(1. 重庆市气象台, 重庆 401147; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;
3. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要:基于重庆市34个观测站1971—2015年的日雨量资料,运用线性趋势分析、Mann-Kendall检验和小波分析等统计诊断方法,分析了重庆市近45 a暴雨日数、强度和贡献率的气候特征及变化。结果表明,近45 a来,重庆地区年平均暴雨日数的地理分布总体呈现从山地向平原递减的趋势,最大值出现在重庆地区东部,两个中心分别位于开州(5.0 d)和西阳(3.9 d),最小值出现在石柱、江津和綦江(2.2 d)。重庆暴雨日数变化趋势不明显,但有明显的年际和年代际变化。重庆地区年平均和夏季暴雨强度均在增加,重庆地区年和夏季暴雨贡献率均显著增加。

关键词:暴雨;气候特征;重庆;Mann-Kendall检验;小波分析

中图分类号:P467

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.012

Analysis of climate change characteristic of rainstorm in Chongqing in recent 45 years

LIU Yi¹, SUN Jun², ZHOU Guobin¹, WANG Huan¹, LIN Jian³

(1. Chongqing meteorological Observatory, Chongqing 401147; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Heavy Rain, Drought and Flood Disasters in Plateau and Basin, Chengdu 610072; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract: Based on the daily rainfall data of 34 observational stations in Chongqing from 1971 to 2015, the climatological characteristics and changes of rainstorm days, intensity and contribution rate in Chongqing in recent 45 years are analyzed by using statistical diagnosis methods such as linear trend analysis, Mann-Kendall test and wavelet analysis. The results show that in the past 45 years, the geographical distribution of annual average rainstorm days in Chongqing shows a decreasing trend from mountain to plain. The maximum appears in the eastern part of Chongqing, and the two centers are located in Kaizhou (5.0 d) and Youyang (3.9 d), respectively. The minimum values appeared in Shizhu, Jiangjin and Qijiang (2.2 d). The variational trend of rainstorm days in Chongqing is not obvious, but it has obvious interannual and interdecadal variation. The annual average and summer rainstorm intensity are increasing in Chongqing. The contribution rate of annual and summer rainstorm in Chongqing increased significantly.

Key words: rainstorm; climatic characteristics; Chongqing; Mann-Kendall inspection; wavelet analysis

引言

中国位于东亚地区,受东亚夏季风和复杂地形的影响,暴雨频发。暴雨常带来严重洪水,造成很重大的经济损失,许多研究表明暴雨是我国的主要天气灾害。近年来,许多学者对我国暴雨气候变化进行了广泛研究,并取得了大量成果(鲍名和黄荣辉,2006)。针对西南地区的暴雨,也有大量的研究,如李芸和穆文彬

(2014)指出西南地区极端暴雨降水事件各个指标均呈现增加的变化趋势,突变主要发生在1986年前后,且年均暴雨频次和暴雨量空间上呈现由西北向东南增加的趋势。吕忠东等(2010)根据四川东部地区4个代表站1961—2007年的4—10月逐日的雨量资料,利用泊松分布模型分析了该地区暴雨的概率特征。李强等(2017)指出不同开始时间强降水事件的强度与频次和降水量具有一致性的日变化特征,呈现单峰型结构,且

收稿日期:2019-06-07;定稿日期:2020-02-20

资助项目:重庆市气象局智能预报预测创新团队项目(ZHCXTD-201803);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室重点专项(2018-重点-11)

第一作者:刘毅,主要从事灾害性天气预报研究。E-mail: 269239974@qq.com

通信作者:周国兵,主要从事天气预报和环境气象预报研究。E-mail:zhou-gb@163.com

夜间强降水事件特征表现明显。唐永兰等(2011)利用 Grapes-meso 数值模式和 LAPS 中尺度局地分析资料,对 2008 年 7 月一次西南涡暴雨过程做数值模拟,结果表明暴雨发生在以系统性上升运动为背景的高湿区中,由于中、小尺度重力波垂直运动而产生中尺度对流性(雨团)降水。王腾等(2017)指出近 36 a 昌都市降水量、暴雨量、暴雨日数空间分布一致,总体呈北多南少分布,暴雨强度呈西弱南强分布,且暴雨日数存在准 7 a、准 12 a、准 22 a 三个变化周期,时间域上无明显突变。

重庆是中国最年轻的直辖市和国家中心城市,也是“一带一路”和长江经济带的交汇点。暴雨是重庆地区主要的气象灾害,经常导致滑坡、城市内涝、农田内涝等次生灾害,例如,2007 年 7 月 17 日重庆遭遇了一场百年不遇的大暴雨,重庆主城区及其周边地区遭受了严重洪灾,造成重大损失(王中等,2008;唐钱奎等,2008;陈伟斌等,2009),因此分析重庆暴雨天气和气候特征具有重要意义。刘毅等(2016,2017)、张虹等(2017)、李晶等(2018)对重庆地区暴雨进行了一些研究,然而大多侧重于个例分析研究或灾害评估,从气候角度系统地研究重庆地区暴雨日数、强度和贡献率特征的相对较少。由于重庆主汛期在 5—9 月,其中造成较大影响的暴雨主要发生在夏季的 6—8 月,因而有必要分析重庆地区年度、夏季的暴雨日数、强度、贡献率气候特征,以期为该地区暴雨短期气候预测、暴雨影响评估等提供科学依据。

1 资料与方法

图 1 给出重庆地区国家基本气象站的地理分布及地形图。重庆地区轮廓形似“人”字,北、东、南面均为山区,北部有大巴山,东南部为武陵山,长江自西南向东北横贯过境,重庆属中亚热带湿润季风气候。

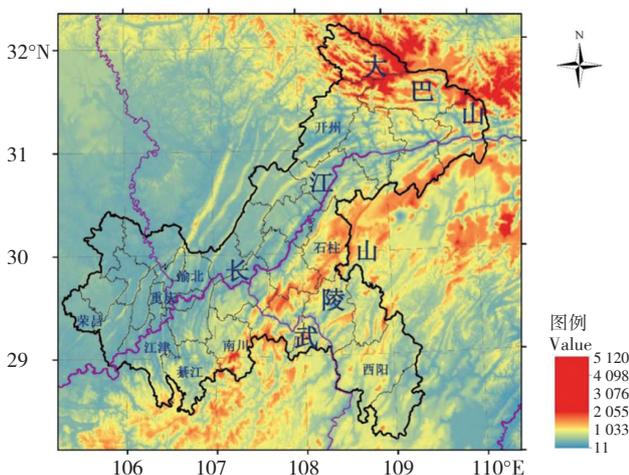


图 1 重庆地区国家基本气象站的空间分布(阴影表示地形,单位:m)

Fig.1 Spatial distribution of national basic meteorological stations in Chongqing (Shadow indicates terrain, unit: m).

本文所用资料是重庆 34 个国家气象观测站逐日雨量资料。由于重庆 20 世纪 60 年代资料完整性较差,为了统一,选取 1971 年以来的完整性相对较好的资料,资料时段为 1971 年 1 月—2015 年 12 月。暴雨日数定义为日雨量大于等于 50.0 mm 的日数,大暴雨日数定义为日雨量大于等于 100.0 mm 的日数。暴雨以上雨量是指日雨量大于等于 50 mm 的雨量之和,平均暴雨强度定义为暴雨以上雨量与暴雨日的比率,暴雨贡献率是暴雨以上雨量与同期总雨量的比率。暴雨日数、暴雨以上雨量、平均暴雨强度和暴雨贡献率分别形成年和夏季(6—8 月)两个序列。

使用线性趋势分析(施能等,1995)、Mann-Kendall 检验和小波分析(魏风英等,2007)等方法,分析近 45 a 来重庆地区暴雨日数的空间分布以及暴雨日数、强度和贡献率的演变特征。

2 暴雨日数的空间分布

图 2 为 1971—2015 年重庆年平均暴雨日数和大暴雨日数的空间分布图。从图 2a 可见,重庆年平均暴雨日数在 2.2~5.0 d,年平均暴雨日数最大值和最小值相差 2.8 d;年平均暴雨日数大值区位于大巴山、武陵山附近,有两个大值中心,一个位于渝东北的开州,年平均暴雨日数为 5.0 d,另一个位于渝东南的酉阳,年平均暴雨日数为 3.9 d。暴雨日数小(低)值区位于重庆中部和西部,有两个小(低)值中心,一个位于石柱,年平均暴雨日数为 2.2 d,另一个位于江津和綦江附近,年平均暴雨日数为 2.2 d。总体上,重庆年平均暴雨日数呈现从东部山区向西部平原递减的趋势,东部山区尤其是东北部大巴山迎风坡一带的开州附近年平均暴雨日数明显偏多,这可能与开州处于大巴山迎风坡的喇叭口地形附近有一定关系。从重庆近 45 a 平均大暴雨日数空间分布图(图 2b)可见,重庆年平均大暴雨日数在 0.1~0.6 d 之间。大巴山、武陵山区及重庆西部部分地区为年平均大暴雨日数大值区,共有四个大值中心,第一个位于荣昌,年平均大暴雨日数为 0.6 d,第二个位于渝北,年平均大暴雨日数为 0.6 d,第三个位于开州,年平均大暴雨日数为 0.5 d,第四个位于酉阳,年平均大暴雨日数为 0.4 d。中部和西部偏南地区为年平均大暴雨日数小(低)值区,有两个小(低)值中心,一个位于南川,年平均大暴雨日数 0.1 d,一个位于石柱,年平均大暴雨日数为 0.1 d。

3 暴雨日数时间变化特征

3.1 年际、年代际变化及其突变分析

图 3 为重庆年平均暴雨日数、年平均雨量及夏季

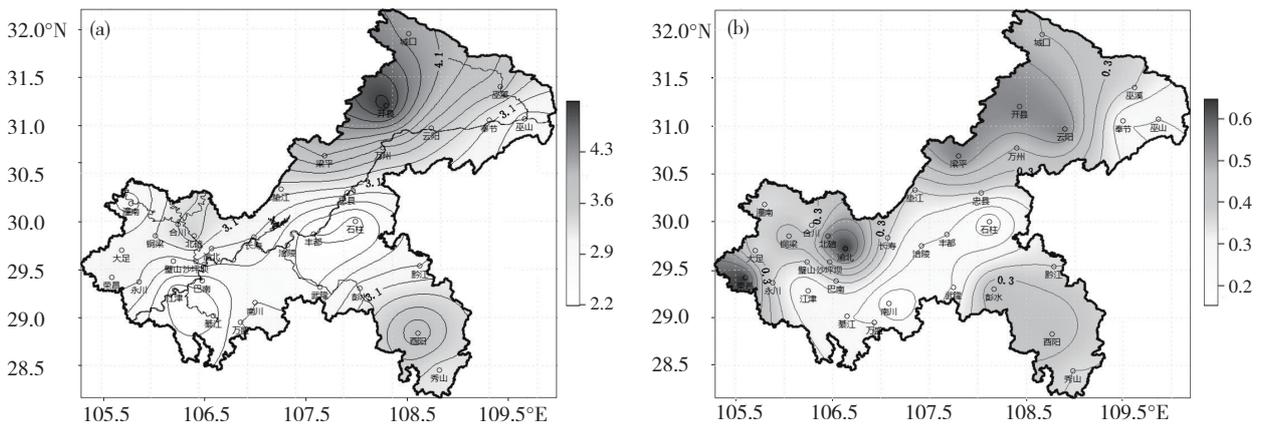


图2 1971—2015年重庆年平均暴雨日数(a)和大暴雨日数(b)的空间分布(单位: d)

Fig.2 Spatial distribution of annual averages of (a) rainstorm days and (b) heavy rainstorm days in Chongqing from 1971 to 2015 (unit: d).

平均暴雨日数时间演变图。从图3a可见,近45 a重庆年平均暴雨日数为3.0 d,1998年最多(5.6 d),2001年最少(1.2 d)。近45 a来,年暴雨日数的变化趋势不明显。从多项式曲线看,重庆年平均暴雨日数的年代际波动变化特征不明显,2000—2010年处于少暴雨时段,2011年以来处于多暴雨阶段,这与重庆平均年雨

量的年代波动(图3b)很相似。2011年以来重庆平均年雨量呈微弱的增加趋势(图3b),这与任国玉等(2005)指出的1951年以来全国平均年雨量变化趋势不明显的结论相一致。夏季暴雨日数为微弱的增加趋势(图3c),夏季平均暴雨日数为2 d,1998年最多(3.9 d),2006年最少(0.6 d)。从多项式曲线看,重庆夏季暴雨日数存在较明显的年代际变化特征,在20世纪70年代中期到20世纪80年代前期以及90年代后期到2005年处于多暴雨时段,1998年暴雨日数最多(3.9 d),1982年暴雨日数次之(3.5 d),其余处于少暴雨时段,2006年为1971年以来最少,仅为0.6 d。重庆夏季暴雨日数占全年总暴雨日数的65.8%。年度、夏季暴雨日数增加速率均通过0.05显著性水平检验,增加趋势较明显。

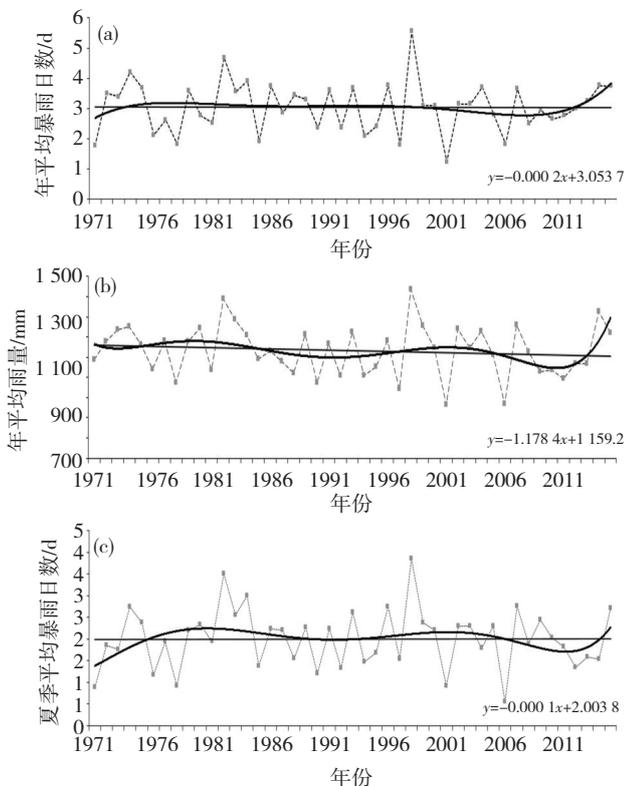


图3 1971—2015年重庆年平均暴雨日数(a,单位:d)、年平均雨量(b,单位:mm)和夏季平均暴雨日数(c,单位:d)的年际变化(实线表示线性趋势,曲线表示多项式拟合)

Fig.3 Interannual variability of (a) annual average rainstorm days (unit: d), (b) annual average rainfall (unit: mm) and (c) summer average rainstorm days (unit: d) in Chongqing from 1971 to 2015 (Solid line indicates the linear trend, and the curve indicates the polynomial fit).

为了考察重庆暴雨日数是否存在由一种相对稳定的气候状态到另一种气候状态的变化,对其进行了突变分析。李红梅等(2008)指出,由于当前突变测试方法的局限性,在多年尺度波动序列检测方面仍然有一些难度,检测结果中对应的两个序列的交集不一定表示突变的存在。因此,从更严格的条件出发,本文认为在检测结果中只出现一个交点,且该交点在Mann-Kendall检验的显著水平范围内,那么对应于该交点的时间被认为是突变时间。

图4为近45 a重庆区域平均的年和夏季暴雨日数Mann-Kendall 验结果图,可见,重庆年度暴雨日数(图4a)在Mann-Kendall统计曲线中多次出现交叉点,所以认为重庆年度暴雨日数未发生年代际突变,而重庆夏季暴雨日数(图4b)年代际突变发生在21世纪10年代初期(Mann-Kendall统计曲线在2011年相交)。

3.2 暴雨日数的周期分析

小波变换方法是一种时频分析方法,它继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想,同时又克服了窗

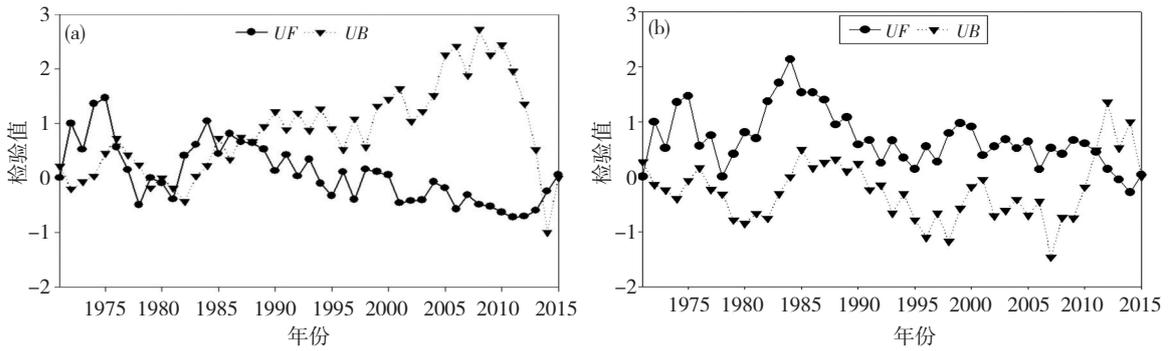


图4 1971—2015年重庆区域平均的年(a)和夏季(b)暴雨日数Mann-Kendall检验

Fig.4 Mann-Kendall tests of (a) annual and (b) summer rainstorm days in Chongqing from 1971 to 2015.

口大小不随频率变化等缺点,能够提供一个随频率改变的“时间-频率”窗口,是进行信号时频分析和处理的理想工具。本文利用墨西哥小波分析方法对重庆地区1971—2015年的年和夏季暴雨日数进行了分析,得到了不同时间尺度上的演变特征(图5),从中可见,重庆暴雨日数有明显的年际、年代际变化。年暴雨日数在20世纪70年代、80年代初、90年代和21世纪10年代后期具有2~3 a的准周期变化,最强信号出现在

20世纪70年代。年代际变化是6~8 a的准周期,最强的信号出现20世纪70年代、20世纪80年代初和2000年左右。重庆夏季暴雨日数从20世纪80年代末至90年代初有2~3 a的准周期变化,从20世纪70年代至80年代初、20世纪90年代末至21世纪初有6~8 a的准周期演变,最强的信号出现在20世纪90年代末到21世纪初。综上可知,重庆暴雨日数在年和夏季均有明显的年际和年代际变化。

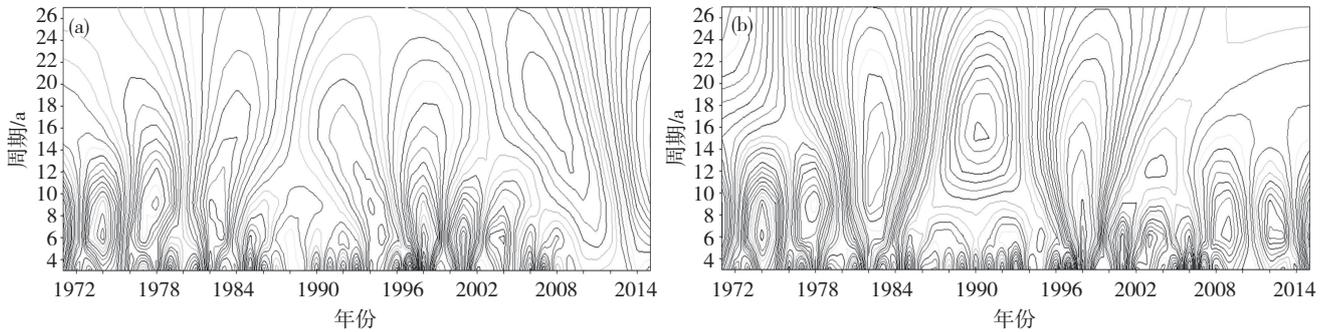


图5 1971—2015年重庆年(a)和夏季(b)暴雨日数的小波分析图

Fig.5 Wavelet analysis maps of (a) annual and (b) summer rainstorm days in Chongqing from 1971 to 2015.

4 平均暴雨强度的变化特征

平均暴雨强度表示单位时间(日)内的雨量大小,它反映在较长时间尺度上(月、季、年及以上)强降水的集中程度。图6为重庆年和夏季平均暴雨强度的年际变化图,从图6a可见,1971—2015年,重庆年平均暴雨强度为 $72.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最大暴雨强度出现在2009年,距平达 $2.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,第二大暴雨强度出现在1982年,距平为 $2.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最小暴雨强度发生在2001年,距平为 $-1.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,第二小暴雨强度出现在1973年,距平为 $-1.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。近45 a来年平均暴雨强度距平以 $0.22 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a} \cdot \text{d})^{-1}$ 的速率增加(趋势系数为0.29,通过0.05显著性水平检验),说明增加趋势明显。从多项式曲线来看,年平均暴雨强度在20世纪70年代末、80年代初和2006年后更强,高于多年平均值,特别是2006

年以来,暴雨强度显著增加,而20世纪80年代末和90年代强度较弱,低于多年平均水平。从图6b可见,重庆夏季平均暴雨强度为 $73.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。夏季暴雨主要是锋面降水和夏季风降水,降水最大强度出现在1982年,距平达 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,这与1982年重庆的特大暴雨为有气象记录以来最强相对应,第二大暴雨强度出现在2009年,距平为 $1.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,最小暴雨强度发生在1973年,距平为 $-1.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,第二小暴雨强度出现在1988年,距平为 $-1.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。近45 a来,重庆夏季平均暴雨强度距平以 $0.27 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a} \cdot \text{d})^{-1}$ 的速率增加(趋势系数为0.36,通过0.05显著性水平检验),说明增加趋势明显。从多项式曲线看,夏季平均暴雨强度年际波动明显,20世纪70年代后期、80年代前期及2006年以后强度偏强,高于多年平均值,特别是2006年以来,夏季暴雨强度增加明显,而20世纪80

年代后期、90年代强度偏弱,低于多年平均值。特别是2006年以来,夏季暴雨强度增加明显,而在20世纪70年代前期、90年代则低于平均值,这与年平均暴雨强度的趋势是一致的。

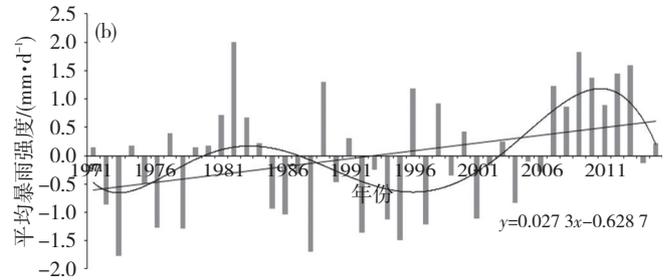
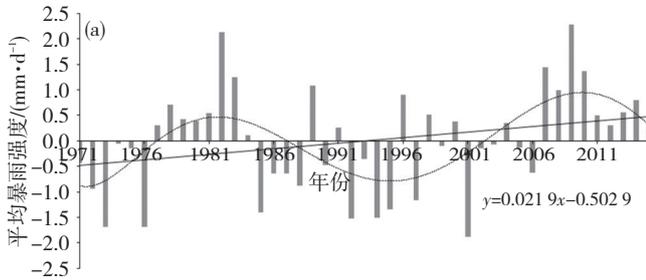


图6 1971—2015年重庆年(a)和夏季(b)平均暴雨强度年际变化(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, 实柱体表示距平, 线表示线性趋势, 曲线表示多项式拟合)

Fig.6 Interannual variations of (a) annual and (b) summer average rainstorm intensity in Chongqing from 1971 to 2015 (unit: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$, cylinders represent the anomalies, solid line indicates the linear trend, and curve indicates the polynomial fit).

5 暴雨贡献率的变化特征

暴雨贡献率反映了暴雨在同期总雨量中所占的比重,图7a给出重庆34个站年平均暴雨贡献率的逐年演变,从中可见,1971—2015年,重庆年平均暴雨贡献率为19.3%,即约20%的重庆年雨量是由暴雨贡献的。最大暴雨贡献率出现在1998年,达28.9%,最小暴雨贡献率发生在2001年,为9.2%。近45 a来年平均暴雨贡献率以 $0.45/(10\text{ a})$ 的速率显著增加,增加趋势较明显,说明暴雨对年总雨量的贡献呈增多的趋势。从多项式曲线看,20世纪70年代后期、80年代及2008年以来高于多年平均值;20世纪90年代到2008年低于多年平均值,1998年暴雨贡献率增加明显。重庆年平均的暴雨以上雨量序列与年雨量序列的相关系数为0.86,表明重庆暴雨以上雨量的变化与年总雨量的变化非常相似,暴雨日与雨量有明显的正相关,雨季暴雨较多;另一方面,在雨量较少的年份,暴雨通常较少。重庆夏季平均暴雨以上降水序列与同

以上分析表明,重庆平均年和夏季的暴雨强度均呈现较明显的增加趋势,对近45 a重庆平均年、夏季暴雨强度距平进行Mann-Kendall突变分析(图略)可知,在近45 a均没有突变发生。

期总降水量的相关系数为0.88,说明重庆汛期暴雨以上雨量与汛期降水总量关系比较密切。刘海文和丁一汇(2010)指出华北大雨的贡献率最大,几乎接近降水总量的1/3。可见暴雨对重庆、华北的最大降水贡献率是不一样的。图7b为重庆34站夏季平均暴雨贡献率的逐年变化,从中可见,重庆夏季平均暴雨贡献率为29.8%,即重庆夏季降水中有近3成是由暴雨产生。最大暴雨贡献率出现在1982年,达43.8%;最小暴雨贡献率发生在1978年,为16.1%,这与1978年降水为1971年以来降水最少相一致,说明重庆年总雨量与夏季暴雨雨量密切相关。近45 a来,夏季暴雨贡献率以 $0.69\cdot(10\text{ d})^{-1}$ 的速率增加,增加趋势明显。从多项式曲线看,夏季暴雨贡献率20世纪90年代后期到2006年以前低于多年平均值,2006年以来高于多年平均值。

以上分析表明,重庆平均年、夏季暴雨贡献率均增加明显,但是夏季暴雨贡献率的增加趋势明显大于年平均暴雨贡献率的增加趋势。对近45 a重庆平均年、夏

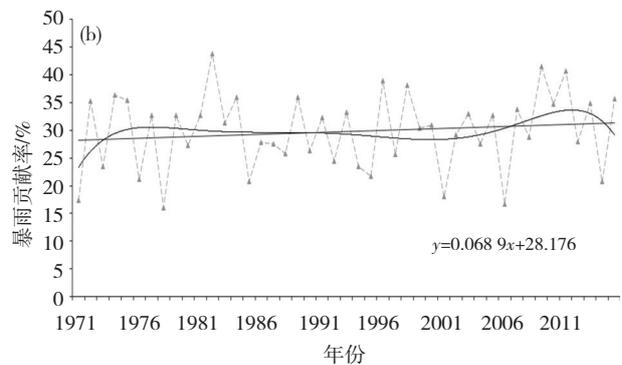
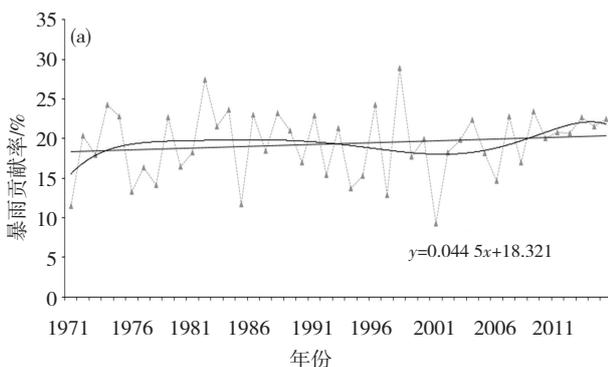


图7 1971—2015年重庆年(a)和夏季(b)暴雨贡献率年际变化图(单位:%, 实线表示线性趋势, 曲线表示多项式拟合)

Fig.7 Interannual variations of (a) annual and (b) summer rainstorm contribution rate in Chongqing from 1971 to 2015 (unit: %, solid line represents the linear trend, and curve represents the polynomial fitting).

季暴雨贡献率进行 Mann-Kendall 突变分析(图略)可知未有突变发生。

6 结论与讨论

基于重庆市 34 个站 1971—2015 年的日雨量资料,研究了暴雨日数、强度和贡献率的变化特征。得出以下结论:

(1) 1971—2015 年重庆平均年和夏季暴雨日数存在明显差异,暴雨日数总体呈从山区向平原递减的趋势,大值出现在重庆东部,最多与最少相差 2.8 d。

(2) 1971—2015 年重庆平均暴雨日数为 3.0 d,其中夏季占 2.0 d。夏季暴雨日数占全年暴雨总日数的 65.8%,年及夏季暴雨日数没有年代际突变,重庆年暴雨日数和夏季暴雨日数分别存在 2~3 a 和 6~8 a 两个准周期。

(3) 重庆平均年、夏季暴雨强度均呈较明显增加趋势,在近 45 a 均没有突变发生。

(4) 重庆多年平均暴雨贡献率为 19.3%,近 45 a 来年、夏季暴雨贡献率增加趋势明显,且没有发生年代际突变。

本文仅从气候角度对近 45 a 来重庆的暴雨日数、暴雨强度和暴雨贡献率进行了初步分析,重庆的年和夏季暴雨强度呈显著上升趋势,是否与全球变暖背景下极端降水事件的增加有关?开州和酉阳均为重庆年暴雨日的高值区,是否与迎风坡的强制抬升有关?以上问题有待进一步分析讨论。

参考文献:

鲍名,黄荣辉.2006.近 40 年我国暴雨的年代际变化特征[J].地球科学进展,30(6):1057-1067

- 陈伟斌,肖天贵,谌芸.2009.重庆“7.17”暴雨过程的波包分布及传播特征[J].暴雨灾害,28(2):126-130
- 李红梅,周天军,宇如聪.2008.近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J].大气科学,32(2):358-370
- 李晶,陈贵川,王欢,等.2018.重庆暴雨面积估测技术应用[J].沙漠与绿洲气象,12(3):70-75
- 李强,邓承之,张勇,等.2017.1980—2012 年 5—9 月川渝盆地小时强降水特征研究[J].气象,43(9):1 073-1080
- 李芸,穆文彬.2014.西南地区暴雨时空分布特征分析[J].黑龙江大学学报,5(2):37-42
- 刘海文,丁一汇.2010.华北汛期日降水特性的变化分析[J].大气科学,34(1):12-22
- 刘毅,廖芷仪,张亚萍,等.2017.重庆地区“5.30”暴雨过程的数值模拟及诊断分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),42(9):32-39
- 刘毅,庞玥,陈鹏,等.2016.重庆西部区域性阻塞型暴雨浅析[J].中国农学通报,32(27):149-155
- 吕忠东,邹阳,李一波.2010.基于泊松分布的川东暴雨概率特征分析[J].成都信息工程学院学报,25(5):531-535
- 任国玉,郭军,徐铭志,等.2005.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,63(6):942-956
- 施能,陈家其,屠其璞.1995.中国近 100 年四个年代际的气候变化特征[J].气象学报,53(4):431-439
- 唐钱奎,朱克云,张杰,等.2008.重庆一次特大暴雨过程的中尺度数值模拟与诊断分析[J].云南大学学报(自然科学版),30(S2):302-310
- 唐永兰,辜旭赞,张兵.不同初值和降水方案对一次西南涡暴雨过程的中尺度模拟与分析[J].暴雨灾害,2011,30(4):335-342
- 王腾,孙晓光,李白萍.2017.昌都市近 36a 暴雨气候特征分析[J].暴雨灾害,36(1):75-80
- 王中,白莹莹,杜钦,等.2008.一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析[J].气象,34(12):63-71
- 魏风英.2007.现代气候统计诊断预测技术[M].北京:气象出版社(第二版),23-71
- 张虹,刘毅,庞玥,等.2017.台风背景下重庆暴雨的环境场对比分析[J].中国农学通报,33(1):111-119

(责任编辑 唐永兰)