李刚, 李崇银, 周文, 等. 2020. 西南地区春季及其各月降水的气候特征分析 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 575-587. LI Gang, LI Chongyin, ZHOU Wen, et al. 2020. Climatic Characteristics of Rainfall over Southwest China during Spring and Spring Months [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 575-587. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19074

西南地区春季及其各月降水的气候特征分析

李刚1 李崇银^{2,3} 周文⁴ 闻斌¹

1 中国人民解放军 61741 部队,北京 100094

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029 3 国防科技大学气象海洋学院,南京 211101

4 香港城市大学能源与环境学院佳达亚太气候影响中心,香港 999077

摘 要利用1951~2017年我国西南地区26个台站的降水观测资料,本文研究了该地区春季及其各月降水的基本气候特征。结果表明:5月是春季我国西南地区降水最多的月份,其占春季总降水的55.3%,此外,5月降水年际变化强度最大;西南地区春季及其各月降水均具有显著的年代际变化特征,5月降水在春季降水的年代际变化特征中占据主导地位;在年代际突变特征方面,西南地区春季降水存在显著的年代际突变特征,其在1970年代后期发生了减少突变,而在1990年代中后期发生了增加突变;在变化趋势方面,春季西南区域平均降水的变化趋势不明显,但从空间上看,西南地区东部表现出显著增多的趋势,而西部则表现出显著减少的趋势;在周期方面,西南地区春季及其4~5月降水均具有显著的年际和年代际变化周期,需要说明的是,3月降水没有明显的年代际变化周期,总体上看,5月降水在春季降水周期变化中占据主导地位。 关键词 西南地区 春季 降水 气候特征

文章编号 1006-9585(2020)06-0575-13 中图分类号 P458 文献标识码 A **doi:**10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19074

Climatic Characteristics of Rainfall over Southwest China during Spring and Spring Months

LI Gang¹, LI Chongyin^{2, 3}, ZHOU Wen⁴, and WEN Bin¹

1 Unit No. 61741 of PLA, Beijing 100094

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

4 Guy Carpenter Asia–Pacific Climate Impact Center, School of Energy and Environment, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077

Abstract Using observed rainfall data from 26 stations in Southwest China for the period 1951–2017, in this study, we investigated the climatic characteristics of rainfall over Southwest China during spring (March–April–May) and each spring month. The rainfall in May was found to account for 55.3% of the total spring rainfall over Southwest China and to have the most significant interannual variations of the spring months. The spring rainfall over Southwest China also shows clear interdecadal variations, which are dominated by the interdecadal variations of the May rainfall. Significant

收稿日期 2019-03-16; 网络预出版日期 2020-01-22

通讯作者 周文, E-mail: wenzhou@cityu.edu.hk

作者简介 李刚,男,1983年出生,博士,工程师,主要从事天气及气候变化研究。E-mail: ligang.1983@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41675062、41575097

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41675062 and 41575097)

abrupt interdecadal changes (AIDCs) also occur in the spring rainfall, with increased AIDCs having occurred in the middle and the later 1990s after a period of decreased IDACs in the later 1970s. Although the time series of spring rainfall over Southwest China exhibits an insignificant linear trend, the eastern part of Southwest China shows a clear decreasing trend in terms of area, and the western part of Southwest China shows a significant increasing trend. Lastly, the spring rainfall over Southwest China shows significant interannual and interdecadal periodicities, which are also present in the April and May rainfalls. We note that no interdecadal periodicity is evident for March rainfall. In general, the interannual and interdecadal periodicities of spring rainfall are dominated by the variations of May rainfall.

Keywords Southwest China, Spring, Rainfall, Climatic characteristics

1 引言

我国西南地区位于青藏高原东部,属于低纬高 原地区,地势西北高东南低,是我国地形最复杂的 地区之一(图1)(Tao et al., 2013)。此外,该地 区受西南季风影响,季风气候显著(李崇银, 2000; 丁一汇等, 2013)。值得注意的是,在复杂地形和 季风环流的共同作用下,西南地区降水量空间分布 不均匀,且有明显的干湿季之分,干季(11月至 次年4月)降水量约占全年的15%,湿季(5~ 10月)约占85%(段旭等, 2000)。降水时空的显 著差异导致西南地区极易出现洪涝和干旱等灾害, 这严重影响了该地区社会经济发展和人民生产生活 (宋杰等, 2011;杨辉等, 2012)。因此,认识和研 究我国西南地区降水变化特征具有十分重要的意义。

由于西南地区降水主要出现在雨季,因此以往 对西南降水的研究主要集中在这一季节。晏红明等 (2013)指出西南地区多年平均的雨季开始日期 为5月第3候,结束日期为10月第3候;索马里 和孟加拉湾越赤道气流的强弱对雨季开始日期和雨 量大小有显著影响(白慧和高辉,2017)。在时空 分布方面(张武龙等,2014),西南地区雨季第一 模态为全区一致型,在20世纪90年代初具有 2~4年周期;第二模态为经向偶极型,具有准4 年周期;第三模态为纬向偶极型,具有2~4年周 期。此外,西南地区夏季具有显著的旱涝急转特征 (孙小婷等,2017),1961~1970年夏季旱转涝年 偏多,1971~1980年夏季涝转旱年较多,1981~ 2000年旱转涝与涝转旱年相当;21世初以来涝转 旱年偏多。

虽然降水主要集中在雨季,但春季是西南地区 干季向雨季转换的过渡季节,对农业生产来讲"一 年四季在于春",其降水对农业生产具有重要影响, 春旱会严重影响农作物的产量。近些年来,我国西 南地区春季干旱灾害时有发生。这些灾害具有持续 时间长、影响范围广等特征,给社会经济发展和人 民生产生活等带来了巨大损失。要想减少春季降水 变化导致的社会经济损失, 就必须充分了解西南地 区春季降水的气候特征,制定合理的防灾减灾政策。 事实上,一些气象学家对西南地区春季降水的主模 态及相关海气影响因子已经进行了一定的研究(夏 阳等, 2016; Li et al., 2018), 这些研究指出西南地 区春季降水的主模态为全区一致型, 前期青藏高原 加热场和同期北大西洋中高纬海温对西南地区春季 降水的一致变化具有显著影响,但这些研究对西南 地区春季降水基本气候特征(例如:降水的年际和 年代际变化特征、变化趋势和周期等)的认识还不 充分,并且目前针对西南地区春季降水基本气候特 征的研究相对偏少。在此基础上,本文采用 1951~2017年的降水实况资料,对西南地区春季 及其各月的基本气候特征进行了详细分析,以期为 西南地区春季降水趋势的预测和防灾减灾政策的制 定提供一定的参考作用。

2 资料与方法

2.1 资料来源

西南地区是指中国南部偏西的地区,本文根据 行政区划选取的西南地区主要包括四川、贵州、云 南和重庆等三省一市,其范围大约位于(21°N~ 35°N,97°E~110°E)(晏红明等,2013)。降水 资料为中国气象局发布的全国160个观测站点的逐 月降水资料,其中西南地区有26个观测站点,所 选取的站点位置如图1所示。所用资料的时间长度 为1951~2017年,共计67年。文中的春季指的 是3~5月。

2.2 分析方法

(1)线性趋势分析。采用 Mann-Kendall
 (MK)非参数秩次统计检验方法来研究降水变化
 趋势(Mann, 1945; Kendall, 1975; Gilbert, 1987)。



图 1 本文使用的我国西南地区 26 个台站(黑点)。阴影为地形 海拔高度(单位: m)

Fig. 1 Distribution of the 26 stations over Southwest China (black dots). The shaded area indicates the topography (m)

在用 MK 检验进行趋势分析时,假设 H_0 表示时间 序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,它由n个独立且服从随机分布的 样本组成,备择假设 H_1 是双边检验,对于所有的 $i, j \le n$,且 $i \ne j$, $x_i n x_j$ 的分布是不同的。检验的统 计变量S计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i),$$
(1)

其中,

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & (x_j - x_i) > 0\\ 0, & (x_j - x_i) = 0\\ -1, & (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$
(2)

S服从正态分布,均值为0,方差为

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} e_i(e_i-1)(2e_i+5)}{18}, \quad (3)$$

其中, m为结点数, e_i为第i个结点的长度。当 n > 10时, 序列趋势Z_c通过以下公式计算得到:

$$Z_{\rm c} = \begin{cases} \frac{S-1}{[\operatorname{Var}(S)]^{1/2}}, & S > 0\\ 0, & S = 0\\ \frac{S+1}{[\operatorname{Var}(S)]^{1/2}}, & S < 0 \end{cases}$$
(4)

Z_c服从标准正态分布,当Z_c>0时,序列有上升趋势,当Z_c<0时,序列有下降趋势。考虑到正态分布的对称性,给出置信水平 α ,当Z_c>Z_{1-a/2}或Z_c<Z_{a/2}时,趋势通过显著性检验,拒绝原假设,即变化趋势显著。

(2)年代际突变分析。肖栋和李建平(2007) 在比较了均值突变检验方法的基础上,重新解释了 滑动*t*检验方法,并对该方法进行了正态分布的偏 斜检验、有效自由度的订正和错误发现率的订正。 滑动*t*检验方法可以用来检验一个时间序列中某一 时间尺度的多次突变。因此,本文该方法来检测我 国西南地区春季及其各月降水的年代际突变特征, 本文所采用的突变检测的时间尺度为*n*₁=*n*₂=10年。 本文所关注的突变为年代际均值突变,简称年代际 突变。突变年份是指两个均值状态之间的过渡年份, 其意义为突变年份之前的平均值与之后的平均值存 在显著差异(即通过置信度检验)。具体的方法描 述和概念请参考文献(Xiao and Li, 2007)。

(3)小波分析。小波分析在时域和频域上均 具有很好的局部性质,它不仅能够诊断出时间序列 周期变化的局部特征,还能够揭示出各周期随时间 的变化规律(Torrence and Compo, 1998)。

3 结果分析

3.1 降水量气候特征概况

首先,我们分析西南地区降水量的气候概况。 图 2 给出的是 1951~2017 年我国西南地区 26 站平 均的春季及其各月逐年降水量时间序列,表 1 给出 的是基于图 2 统计的平均降水量、最大和最小降水 量及其相应年份。结合图 2a 和表 1,我们可知在 过去的 67 年间西南地区春季年平均降水量为 69.1 mm,最大降水量为 95.5 mm,最小降水量为 47.6 mm,最大降水量是最小降水量的 2 倍;另一 方面,从 3 月到 5 月,西南地区的平均、最大和最 小降水量均明显逐月变大,而且各月最大降水量均 为最小降水量的 2 倍以上,这主要是因为随着西南 季风的增强,其带来的孟加拉湾水汽愈来愈多(Li et al., 2013),从而导致西南地区降水从 3 月到 5 月逐渐增多,而且 5 月是春季降水最多的月份,占 春季降水量的 55.3%。

从 1951~2017 年我国西南地区春季及其各月 降水的气候态空间分布可看出(图 3),对春季来



图 2 1951~2017 年我国西南地区 26 站平均的逐年(a) 春季、(b) 3 月、(c) 4 月和(d) 5 月的降水量时间序列(单位: mm)。绿色线 表示平均值, 红色线表示线性趋势

Fig. 2 Time series of 26-station-averaged rainfall over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017. The green lines indicate the climatology and the red lines the linear trend

表 1 1951~2017年我国西南地区春季及其各月降水统 计值

Table 1Rainfall statistics for Southwest China in springand the spring months during 1951–2017

	平均降水量/mm	最大降水量/mm	最小降水量/mm
春季	69.1	95.5(2004年)	47.6(1979年)
3月	31.8	56.5(1994年)	10.2 (2014年)
4月	60.7	92.3 (2016年)	34.7(1960年)
5月	115.0	173.8 (2002年)	68.3(1979年)

说(图 3a),以105°E作为分界线,分界线以东 地区的降水从东向西逐渐递减;分界线以西地区的 降水呈现出"南少北多"的分布特征,即四川地区 的降水要多于云南地区,降水极大值中心位于四川 盆地西部,而极小值中心主要位于云南北部和四川 南部交界处(Li et al., 2018)。此外,3月(图 3b)、 4月(图 3c)和5月(图 3d)的降水空间分布趋 势基本与春季的大体一致,但降水量呈显著增大的 趋势。以上分析表明西南地区春季降水空间分布不 均匀,具有一定的局地特征。

3.2 降水量年际变化特征

表 2 给出的是西南地区春季各月降水的标准差, 从表中可看出,西南地区 3 月到 5 月的降水标准差 是逐渐增大的,特别值得注意的是 5 月的降水标准 差是 3 月的 2 倍以上,这表明该地区降水年际变化 强度从 3 月到 5 月的是显著逐渐增大的。

图 4 给出的是 1951~2017 年我国西南地区春季及其各月降水的标准差空间分布。根据春季降水标准差的分布(图 4a),我们可看出标准差大值区主要位于 105°E 以东地区、云南南部、云南西北部和四川西部交界处以及四川北部,表明这些地区的降水年际变化强度偏大(Li et al., 2018)。需要

表 2 1951~2017 年我国西南地区春季各月降水标准差 Table 2 Standard deviations of rainfall over Southwest China in spring months

	降水标准差/mm		
3月	10.5		
4月	14.2		
5月	24.2		



图 3 1951~2017 年我国西南地区(a) 春季以及(b) 3 月、(c) 4 月和(d) 5 月的降水量气候态空间分布(单位: mm) Fig. 3 Spatial distribution of rainfall climatology (mm) over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017

指出的是,四川地区的标准差要小于云南地区,说 明虽然前者的降水量多一些,但其年际变化强度 却比后者小。3月(图4b)、4月(图4c)和5月 (图4d)的降水标准差空间分布趋势在一定程度 上呈现出与春季相似的分布特征,但标准差越来越 大,表明年际变化强度越来越强。

以上分析表明,我国西南地区春季及其各月降 水具有明显的年际变化特征,年际变化强度从3月 到5月是逐渐增大的,而且空间分布不均匀,具有 一定的局地特征。

3.3 降水量年代际变化特征

在这一部分,我们将着重分析该地区降水量的 年代际变化特征。为了揭示年代际变化特征,图 5 给出的是 1951~2017 年西南地区春季及其各月的 标准化降水时间序列及其9年滑动平均。从图5a 可看出,西南地区春季降水具有显著的年代际变化 特征:1950年代中后期至1960年代末为降水偏少 期,整个1970年代基本为降水偏多期,而1970年 代末至1990年代中后期又转为降水偏少期,1990 年代后期至2000年代后期为降水偏多期。对3月 西南地区降水来说(图5b),1950年代后期至 1980年代后期基本为降水偏少期,而1980年代末 至2000年代后期基本为降水偏多期,由此可知, 3月降水具有显著的年代际转折特征。4月(图5c) 和5月(图5d)降水的年代际变化特征在2000年 代中期以前呈现出一定的相似性:1950年代中后 期至1960年代中后期以及1980年代初至1990年 代后期基本处于降水偏少期,1960年代末至1970



图 4 1951~2017 年我国西南地区 (a) 春季以及 (b) 3 月、(c) 4 月和 (d) 5 月的降水量标准差空间分布 (单位: mm) Fig. 4 Spatial distributions of standard deviations of rainfall (mm) over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951-2017

年代后期以及 1990 年代后期至 2000 年代中后期基本处于降水偏多期。

从以上结果可看出,西南地区春季及其各月降 水均具有显著的年代际变化特征。结合表3,可以 看到5月降水和春季降水在年代际时间尺度上具有 最显著的相关关系(相关系数高达0.95,通过 99%信度检验),因此,我们可以认为5月降水 在西南地区春季降水年代际变化特征中占据主导 地位。

前面我们主要分析了西南地区春季降水的年代 际变化特征,结果表明春季降水具有一定的年代际

表 3 1951~2017 年我国西南地区春季及其春季各月之间 降水量 9 年滑动平均时间序列的相关系数

Table 3Correlation coefficients for the 9-year-runningrainfall indices over southwest China between spring andspring months

	相关系数				
	春季	3月	4月	5月	
春季	1	-	-	-	
3月	0.21	1	-	-	
4月	0.77^{*}	-0.29	1	-	
5月	0.95**	0.1	0.67^{*}	1	

**、*分别表示通过99%、95%信度检验;有效自由度的计算请参考 Bretherton et al. (1999)。



图 5 1951~2017年我国西南地区 26 站平均的逐年(a) 春季及(b) 3 月、(c) 4 月和(d) 5 月的标准化降水量时间序列(蓝色线)及其 9 年滑动平均(红色线)

Fig. 5 Normalized time series of 26-station-averaged rainfall (blue line) and its 9-year-running mean (red line) over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017

转折特征。需要指出的是,我们并不清楚这些年代 际转折点是否存在突变。为了揭示降水的突变情况, 我们接着采用滑动 t 检验方法对降水时间序列进行 分析。

图 6 给出的是基于滑动 t 检验确定突变点之后 的时间序列(红色线)。从图 6a 中可看出,我国 西南地区春季降水在1970年代末(1978~1979年) 发生了减少突变,而在1990年代中后期(1996~ 1997年)发生了增加突变,1979~1996年的平均 值比1951~1978年的平均值减少了5.9 mm(通过 95%信度检验),1997~2017年的平均值比 1979~1996年的平均值增加了6.7 mm(通过95% 信度检验);西南地区3月的降水在1980年代末 (1988~1989年)年发生了增加突变(图 6b), 1989~2017年的平均值比1951~1988年的平均值 增加了4.9 mm(通过95%信度检验);到4月 (图 6c),西南地区降水在1970年代后期 (1977~1978年)发生了减少突变,在1990年代 中后期(1996~1997年)发生了增加突变,1978~ 1996年的平均值比 1951~1977年的平均值减少了 10 mm (通过 95% 信度检验), 1997~2017年的 平均值比 1978~1996年的平均值增加了 11 mm (通过 95% 信度检验)。需要说明的是,虽然西 南地区 5 月降水存在一定的年代际变化特征 (图 5d), 但从图 6d 可看出,该地区降水没有发生突变。

为了清楚看出西南地区春季降水在年代际突变前后的空间分布差异,我们对突变年份前后的时段做合成差分析。从合成差空间分布来看,1970年代末(图 7a),西南大部分地区发生了春季降水减少突变,其中降水减少显著的区域位于贵州、重庆东南部和四川东北部部分地区,其中贵州东北部和重庆东南部地区的降水最大减少幅度在 24 mm以上;1990年代中后期(图 7b),西南绝大部分地区发生了春季降水增加突变,降水增加显著的区域主要位于重庆东南部、贵州东北部、云南西部和四川西南部部分地区,其中重庆东南部和云南南部的降水最大增加幅度在 18 mm 以上。对 3 月来说,1988年前后(图 7c),西南大部分地区发生春季



图 6 1951~2017 年我国西南地区 26 站平均的逐年(a) 春季及(b) 3 月、(c) 4 月和(d) 5 月的降水量时间序列(蓝线)及分段平均(红线)(单位: mm)。分段平均的分界点是置信度为 95% 的均值突变年份

Fig. 6 Time series of 26-station-averaged rainfall (blue line) and its abrupt interdecadal changes (red line) over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017. The episode averages are divided by the abrupt interdecadal changes significant at the 95% confidence level

降水增加突变,降水增加显著的区域主要位于重庆 西南部、贵州、云南东部和南部以及四川南部和西 南部,其中贵州东南部的降水最大增加幅度在18 mm 以上。到4月(图7d),1977年前后,西南大部 分地区发生了春季降水减少突变,降水减少显著的 区域位于贵州、重庆东南部和四川东北部地区,其 中贵州和重庆南部的降水最大减少幅度在24 mm 以上;在1996年前后(图7e),西南大部分地区 发生了春季降水增加突变,降水增加显著的区域主 要位于四川、重庆西南部、贵州北部和云南南部, 其中云南南部降水的最大增加幅度在18 mm 以上。

3.4 降水趋势分析

为了分析 1951~2017 年该地区春季及各月的 降水演变趋势,我们计算了降水时间序列的线性趋 势系数。图 2 中红色线给出的是 1951~2017 年我 国西南地区春季及其各月的降水量线性趋势。从 图 2a 可看出,西南地区春季降水的趋势系数为 -0.238 mm/10 a,表明春季降水在过去的 67 年间 总体上呈现出减少的变化趋势;3月(图 2b)和4 月(图 2c)的降水趋势系数为正,表明这两个月 的降水呈现出增多趋势,但前者(0.465 mm/10 a) 的增多趋势大于后者(0.219 mm/10 a),而5月的 趋势系数为负(-0.625 mm/10 a)(图 2d),说 明5月降水呈现出减少趋势,总体上看,在过去 的67年间西南地区春季降水从3月到5月呈现出 由增多向减少转变的趋势。但需要指出的是,以上 趋势系数均没有通过信度检验,说明降水变化趋势 并不显著。

我们进一步分析了 1951~2017 年西南地区春 季降水趋势系数的空间分布(图 8)。对春季来说 (图 8a),贵州大部、四川东南部以及云南东部 的降水呈现出显著减少的趋势,贵州西南部的最小 趋势系数在-0.4 mm/10 a 以下,而云南西部和四川 西南部地区的降水则呈现出显著增多的趋势,云南 西部的最大趋势系数在在 0.25 mm/10 a 以上;对 3 月来说(图 8b),贵州东南部和四川西部地区的



图 7 1951~2017 年我国西南地区在各个突变年份前后的降水量合成差值空间分布(单位: mm)(白色线包围区域表示通过 90% 信度检验区域)。(a) 1970 年代末春季;(b) 1990 年代中后期春季;(c) 1988 年前后 3 月;(d) 1977 年前后 4 月;(e) 1996 年前后 4 月 Fig. 7 Composite differences in rainfall over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017. The areas surrounded by white lines and filled with white dots indicate significance exceeding the 90% confidence level based on the Student's *t* test

降水呈现出显著增多的趋势,贵州东南部的最大趋势系数在 0.3 mm/10 a;到 4 月(图 8c),贵州大部的降水呈现出显著减少的趋势,贵州南部的最小

趋势系数在-0.6 mm/10 a 以下,而云南南部和四川 西部地区则呈现出显著增多的趋势,最大趋势系数 在 0.2 mm/10 a 以上;贵州西部、四川东南部和云



图 8 1951~2017 年我国西南地区(a) 春季及(b) 3 月、(c) 4 月和(d) 5 月降水量线性趋势的空间分布(单位: mm/10 a)(白色线包 围区域表示通过 90% 信度检验区域)

Fig. 8 Spatial distribution of linear trends in rainfall over Southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017. The areas surrounded by white lines and filled with white dots indicate significance exceeding the 90% confidence level based on the Student's *t* test

南东部的降水在5月呈现出显著减少的趋势 (图8d),贵州西南部的最小趋势系数在-0.8 mm/10 a 以下,而四川东北部和重庆北部的降水则呈现出显 著增多的趋势,最大趋势系数在0.6 mm/10 a 以上。

以上分析表明,虽然我国西南区域平均春季降 水时间序列的线性趋势不明显,但从空间上看,西 南地区东部(贵州大部、四川东南部以及云南东部) 表现出显著增多的趋势,而西部(云南南部和四川 西部)则表现出显著减少的趋势。此外,对东部而 言,其在3月表现出一定的增多趋势(贵州东部呈 现出显著增多的趋势),但在4、5月表现出显著 减少的趋势。

3.5 降水量变化周期分析

为详细分析西南地区春季及其各月降水变化的 周期特征值,我们对该地区春季及其各月降水的标 准化时间序列进行 Morlet 小波局地功率谱分析。 图 9 给出的是 Morlet 小波局地功率谱分析结果。

西南地区春季降水的小波局地功率谱表明 (图 9a),该地区降水在1950年代至1960年代 前期以及1960年代后期至1970年代初存在显著 的2~3年周期;进一步可看出,从1970年代中期 至1990年代后期,该地区降水的显著周期由3~4 年逐渐转变为7~8年;2000年代中期以前,西南 地区春季降水的显著周期又转为2~3年;进入



图 9 1951~2017 年我国西南地区(a)春季及(b)3月、(c)4月和(d)5月降水时间序列的小波局地功率谱。黑虚线包围区域表示通过 90% 检验区域,白色网格线区域表示受边界影响显著的区域

Fig. 9 Local wavelet power spectrum of rainfall over southwest China in (a) spring, (b) March, (c) April, and (d) May during 1951–2017. The black contours surrounded areas indicate the wavelet spectrum that is significant at the 90% confidence level based on a Monte Carlo approach. The cone of influence is indicated by the cross-hatched regions

2010年代后,降水周期增大增至3~4年。此外, 西南地区春季降水在1960年代后期至2000年代后 期存在显著的20~32年周期,这与夏阳等(2016)的结果相似。

从图 9b 可看出,西南地区 3 月降水在 1960 年 代初以及 1960 年代中后期至 1970 年代初存在显著 的 2~3 年周期;从 1980 年代中期开始,该地区降 水的显著周期逐渐由 2~3 年转为 7~8 年,其中 2~3 年周期出现在 1980 年代至 1990 年代中期, 3~4.5 年周期出现在 2000 年代中后期,而 5~8 年 周期则出现在 2000 年代中期以后。

对 4 月来说(图 9c),该地区降水的显著年际周期主要出现在 1950 年代至 1970 年代中期以及 2000 年代中后期至 2010 年代中期,其中 2~4年周期主要出现在 1950 年代至 1970 年代中期,准 3 年周期主要出现在 2000 年代中后期至 2010 年代中期。此外,该地区降水在 1960 年代后期至 1980 年代中期存在显著的 8~13 年周期,而在

1990年代后期至今存在显著的7~11年周期。

从图 9d 可看出,西南地区 5 月降水在 1950 年 代、1970 年代中期至 1980 年代初以及 2000 年前 后存在显著的 2~4 年周期,在 1980 年代至 1990 年代初存在显著的 5~8 年周期。另外,该地区 5 月降水在 1970 年代后期至 2000 年代前期存在显著 的 20~30 年周期。

通过以上分析可知,5月的降水周期变化在春季降水周期变化中占据主导地位,特别是对于春季降水的 20~30年变化周期,5月降水贡献最大。

4 结论与讨论

本文基于 1951~2017 年我国西南地区 26 个台 站的降水资料,采用 MK 趋势分析方法、滑动t检 验方法和 Morlet 小波分析方法分析了该地区春季 及其各月降水的基本气候特征,得到了以下结论:

(1)5月是春季西南地区降水最多的季节,

占春季总降水的 55.3%。此外,该地区春季及其各 月的降水表现出显著的年际变化特征,而且年际变 化强度从 3 月到 5 月是逐渐增大。西南地区春季及 其各月降水空间分布和变化强度是不均匀的, 3~5 月降水的空间分布及其变化强度与春季存在 一定的相似性。

(2) 西南地区春季及其各月降水均具有显著 的年代际变化特征。春季与4月和5月降水的年代 际变化特征较为一致: 1950年代中后期至 1960年 代中后期以及 1980 年代初至 1990 年代后期基本处 于降水偏少期, 1970年代以及 1990年代后期至 2000年代中后期基本处于降水偏多期:3月降水偏 少期主要为1950年代后期至1980年代中后期,而 偏多期主要为1980年代中后期至2000年代后期。 总体上看,5月降水在西南地区春季降水年代际变 化特征中占据主导地位。进一步分析表明,西南地 区春季及4月降水均在1970年代后期发生了减少 突变,重庆东南部和贵州地区降水减少显著,而它 们在1990年代中后期发生了增加突变,云南南部 地区降水增加显著;3月降水仅在1980年代后期 发生了增加突变,贵州、云南东部以及四川南部等 地区降水增加显著; 5月降水没有发生明显的突变 特征

(3) 虽然我国西南区域平均春季降水时间序 列的线性趋势不明显,但从空间上看,西南地区东 部(贵州大部、四川东南部以及云南东部)表现出 显著增多的趋势,而西部(云南南部和四川西部) 则表现出显著减少的趋势。此外,对西南地区东部 而言,其在3月表现出一定的增多趋势(贵州东部 呈现出显著增多的趋势),但在4、5月表现出显 著减少的趋势。

(4) 西南地区春季及 4~5 月降水均具有显著的 2~4 年变化周期。此外,对4 月降水来说,它 还具有 7~13 年变化周期;而对春季和 5 月降水来 说,两者共同具有显著的 20~30 年变化周期,表 明 5 月降水对西南地区春季降水的 20~30 年周期 变化贡献最大。而 3 月降水仅存在 2~4 年变化 周期。

需要说明的是,Li et al. (2018)指出春季北大 西洋海温对同期我国西南地区降水具有显著影响, 而北大西洋海温具有显著年代际变化特征 (Álvarezgarcía et al., 2008; Jamison and Kravtsov, 2010),它 可能是造成西南地区春季降水的年代际变化的重要 因素;另一方面,而前冬1月的青藏高原加热场亦 与春季西南地区降水存在显著正相关关系(夏阳 等,2016),而冬季青藏高原加热场在过去50年间 表现出明显减弱的趋势(李栋梁,2006;夏阳等, 2016),这可能对春季西南地区降水的减少趋势具 有重要影响。以上提及的可能是西南地区春季降水 气候变化特征的部分原因,我们将在接下来的研究 中重点探讨我国西南地区春季降水变化特征的原因 及与之相关的物理机制,为该地区春季降水预测和 防灾减灾政策的制定提供更多有价值的参考依据和 意见。

参考文献(References)

- Álvarez-García F, Latif M, Biastoch A. 2008. On multidecadal and quasi-decadal North Atlantic variability [J]. J. Climate, 21(14): 3433–3452. doi:10.1175/2007JCL11800.1
- 白慧,高辉. 2017. 索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚的影响 [J]. 大 气 科 学, 41(4): 702-712. Bai Hui, Gao Hui. 2017. Influences of the Somalia Cross-Equatorial Flow on the beginning date of rainy season in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 702-712. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16122
- Bretherton C S, Widmann M, Dymnikov V P, et al. 1999. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field [J]. J. Climate, 12(7): 1990–2009. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<1990: TENOSD>2.0.CO;2
- 段旭, 尤卫红, 郑建萌. 2000. 云南旱涝特征 [J]. 高原气象, 19(1): 84-90. Duan Xu, You Weihong, Zheng Jianmeng. 2000. The drought and flood feature in Yunnan [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19(1): 84-90. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2000.01.011
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及 其未来预测 [J]. 大气科学, 37(2): 253-280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 253-280. doi:10.3878/j.issn.1006-9895
- Gilbert R O. 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 320pp.
- Jamison N, Kravtsov S. 2010. Decadal variations of North Atlantic Sea surface temperature in observations and CMIP3 simulations [J]. J. Climate, 23(17): 4619–4636. doi:10.1175/2010JCLI3598.1
- Kendall M G. 1975. Rank Correlation Methods [M]. 4th ed. London: Charles Griffin
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论 (第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 515 pp. LI Chongyin. 2000. Introduction to Climate Dynamics (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 515 pp.
- 李栋梁. 2006. 青藏高原地面加热场强度变化及其与太阳活动的关系 [J]. 高 压 气 象, 25(6): 975-982. LI Dongliang. 2006. Relationship between variation of strength departure indices of

surface heating fields over Qinghai–Xizang Plateau and sun activation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25(6): 975–982. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.06.001

- Li X Z, Zhou W, Li C Y, et al. 2013. Comparison of the annual cycles of moisture supply over Southwest and Southeast China [J]. J. Climate, 26(24): 10139–10158. doi:10.1175/JCLI-D-13-00057.1
- Li G, Chen J P, Wang X, et al. 2018. Remote impact of North Atlantic sea surface temperature on rainfall in southwestern China during boreal spring [J]. Climate Dyn., 50(1-2): 541-553. doi:10.1007/ s00382-017-3625-x
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3): 245–259. doi:10.2307/1907187
- 宋洁,杨辉,李崇银. 2011. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析 [J]. 大气科学, 35(6): 1009–1019. Song Jie, Yang Hui, Li Chongyin. 2011. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(6): 1009–1019. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.02
- 孙小婷,李清泉,王黎娟. 2017. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常 [J]. 大气科学, 41(6): 1332-1342. Sun Xiaoting, Li Qingquan, Wang Lijuan. 2017. Characteristics of long-cycle abrupt drought-flood alternations in Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(6): 1332-1342. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16282
- Tao Y, Cao J, Hu J M, et al. 2013. A cusp catastrophe model of midlong-term landslide evolution over low latitude highlands of China
 [J]. Geomorphology, 187: 80–85. doi:10.1016/j.geomorph.2012.
 12.036
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79(1): 61–78. doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2

- 夏阳, 万雪丽, 严小冬, 等. 2016. 中国西南地区春季降水的时空变化 及其异常的环流特征 [J]. 气象学报, 74(4): 510-524. Xia Yang, Wan Xueli, Yan Xiaodong, et al. 2016. Variations of spring precipitation over Southwest China and characteristic circulations for precipitation anomalies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(4): 510-524. doi:10.11676/qxxb2016.038
- Xiao D, Li J P. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere-ocean system in the 1970s [J]. J. Geophys. Res., 112(D24): D24S22. doi:10.1029/2007JD008956
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态 [J]. 大气科学, 31(5): 839-854. Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(5): 839-854. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.05.08
- 晏红明,李清泉,孙丞虎,等. 2013. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究 [J]. 大气科学, 37(5): 1111-1128. Yan Hongming, Li Qingquan, Sun Chenghu, et al. 2013. Criterion for determining the onset and end of the rainy season in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(5): 1111-1128. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12118
- 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原 因分析 [J]. 气候与环境研究, 17(3): 315-326. Yang Hui, Song Jie, Yan Hongming, et al. 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(3): 315-326. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10134
- 张武龙,张井勇,范广洲. 2014. 我国西南地区干湿季降水的主模态 分析 [J]. 大气科学, 38(3): 590-602. Zhang Wulong, Zhang Jingyong, Fan Guangzhou. 2014. Dominant modes of dry-and wetseason precipitation in southwestern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(3): 590-602. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13156