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 Gang[1], LI Chongyin[2, 3], ZHOU Wen[4], and WEN Bin[1]

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
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
通讯作者 周文，E-mail: wenzhou@cityu.edu.hk
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)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

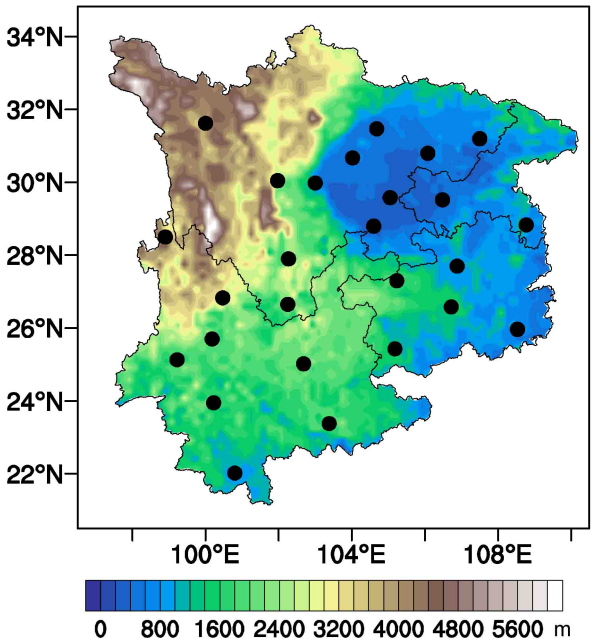

图 1　本文使用的我国西南地区 26 个台站（黑点）。阴影为地形海拔高度（单位：m）

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$(x_1, x_2, \cdots, x_n)$，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$i, j \leqslant n$，且$i \neq j$，x_i和x_j的分布是不同的。检验的统计变量S计算公式如下：

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

其中，

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

S服从正态分布，均值为 0，方差为

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

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：

$$Z_c = \begin{cases} \dfrac{S-1}{[\operatorname{Var}(S)]^{1/2}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{[\operatorname{Var}(S)]^{1/2}}, & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

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$Z_c \geqslant Z_{1-\alpha/2}$或$Z_c < Z_{\alpha/2}$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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

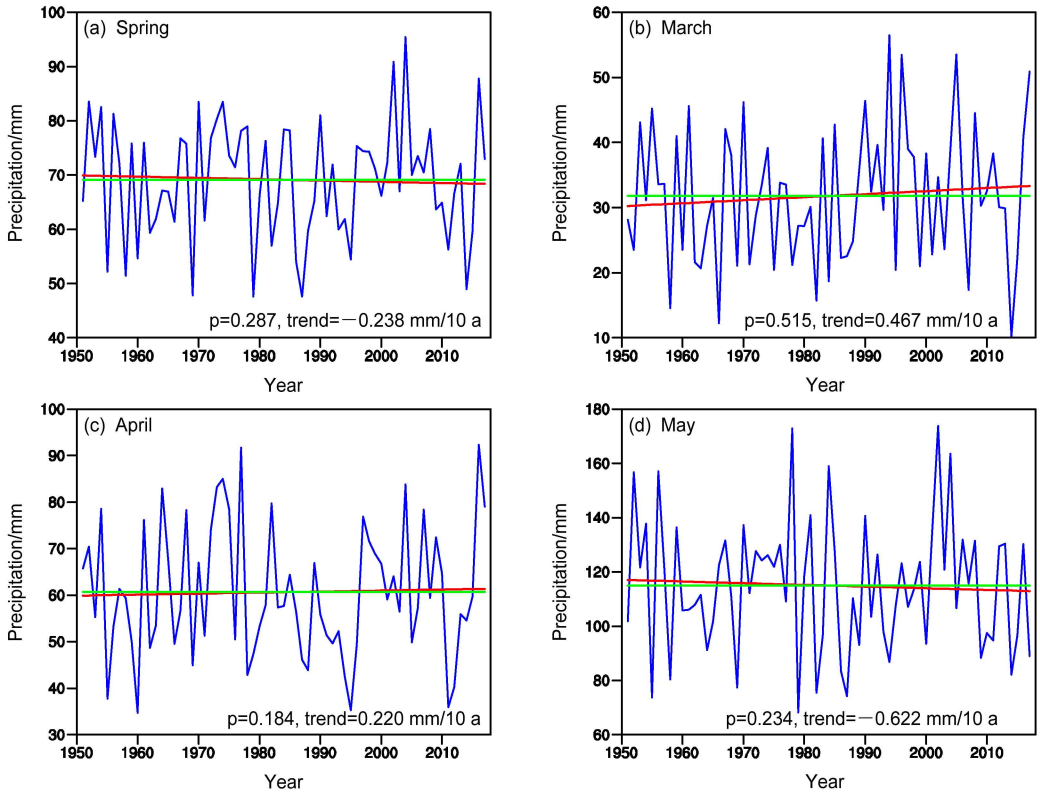

图 2 1951～2017 年我国西南地区 26 站平均的逐年（a）春季、（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月的降水量时间序列（单位：mm）。绿色线表示平均值，红色线表示线性趋势

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 1 Rainfall statistics for Southwest China in spring and 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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

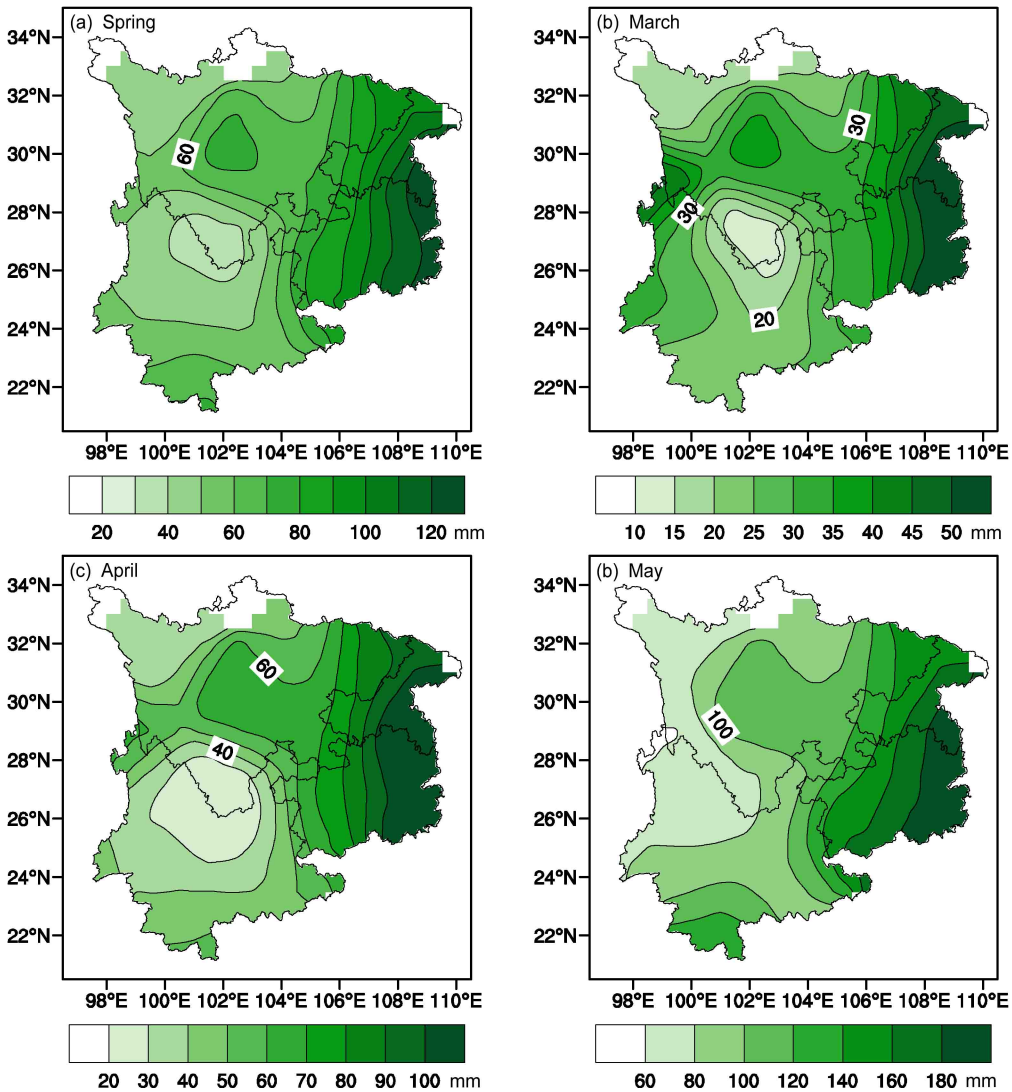

图 3　1951～2017 年我国西南地区（a）春季以及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月的降水量气候态空间分布（单位：mm）

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

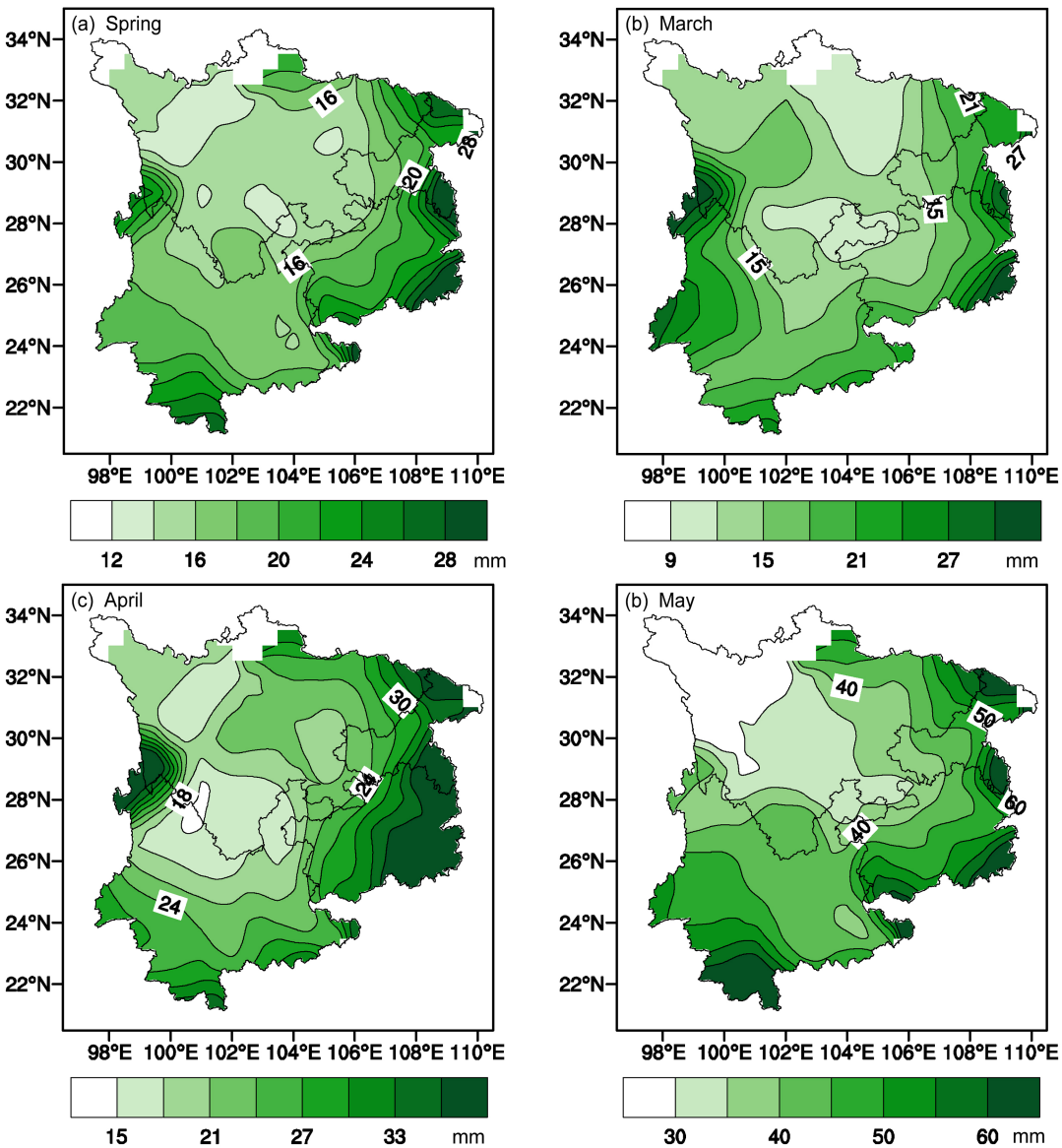

图 4 1951～2017 年我国西南地区（a）春季以及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月的降水量标准差空间分布（单位：mm）

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 3 Correlation coefficients for the 9-year-running rainfall indices over southwest China between spring and spring 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）。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

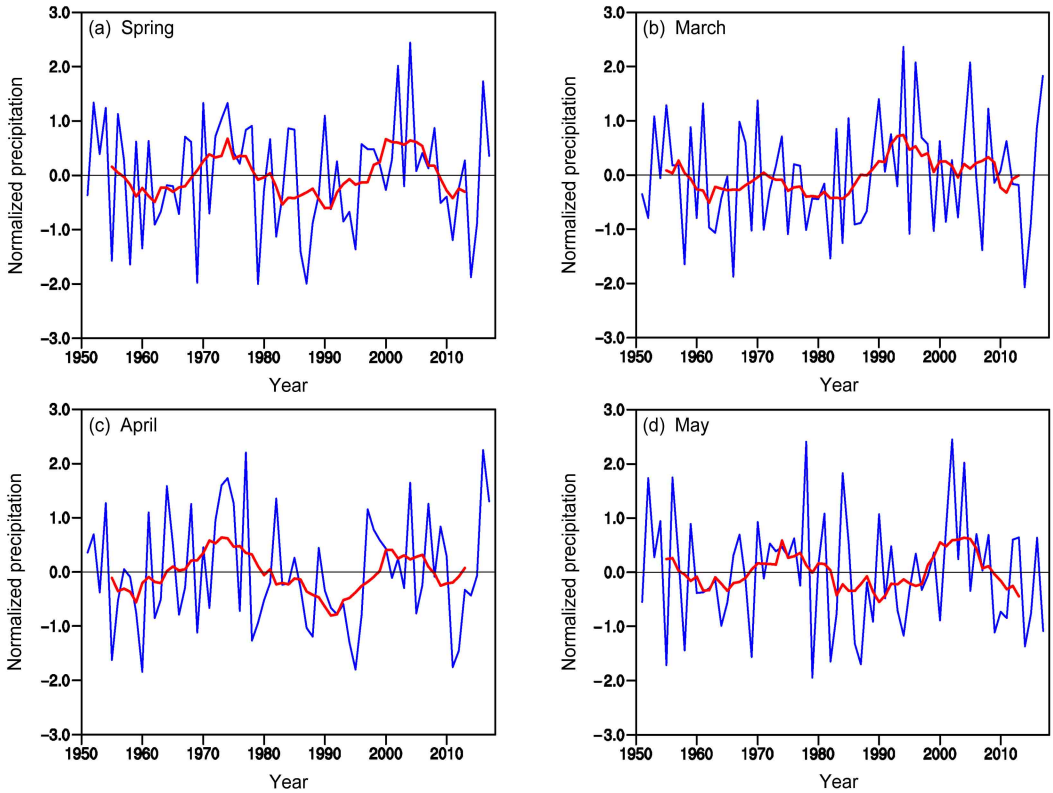

图 5　1951～2017 年我国西南地区 26 站平均的逐年（a）春季及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月的标准化降水量时间序列（蓝色线）及其 9 年滑动平均（红色线）

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

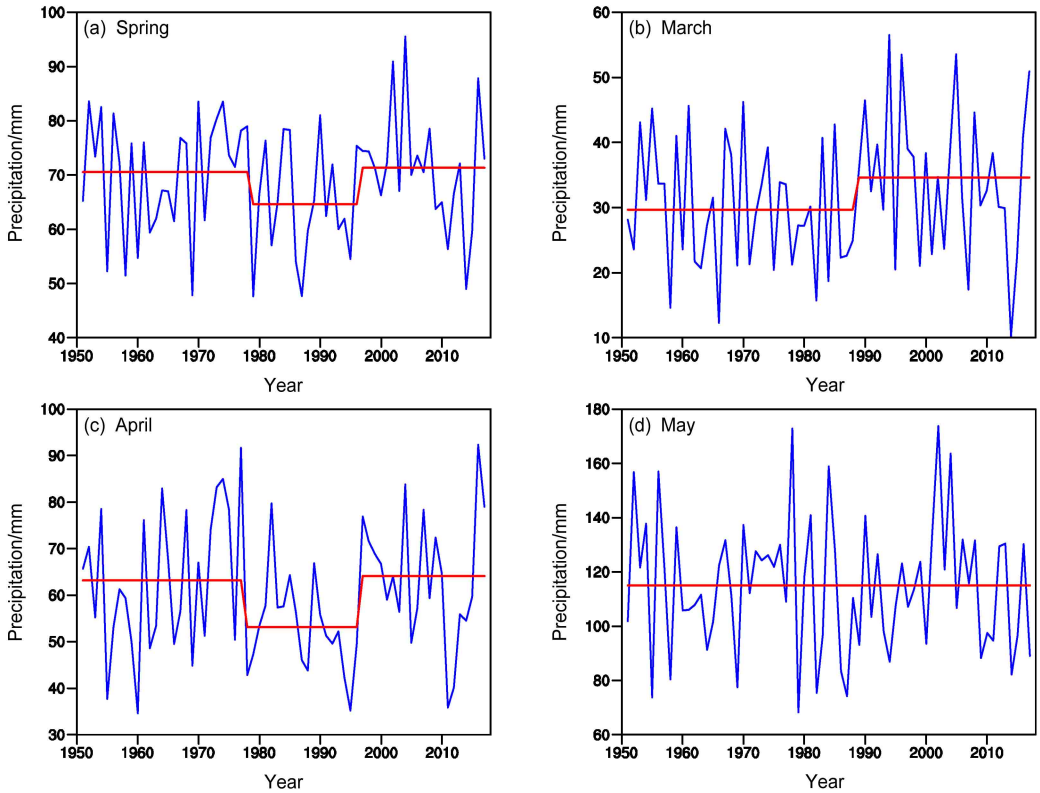

图 6 1951～2017 年我国西南地区 26 站平均的逐年（a）春季及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月的降水量时间序列（蓝线）及分段平均（红线）（单位：mm）。分段平均的分界点是置信度为 95% 的均值突变年份

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

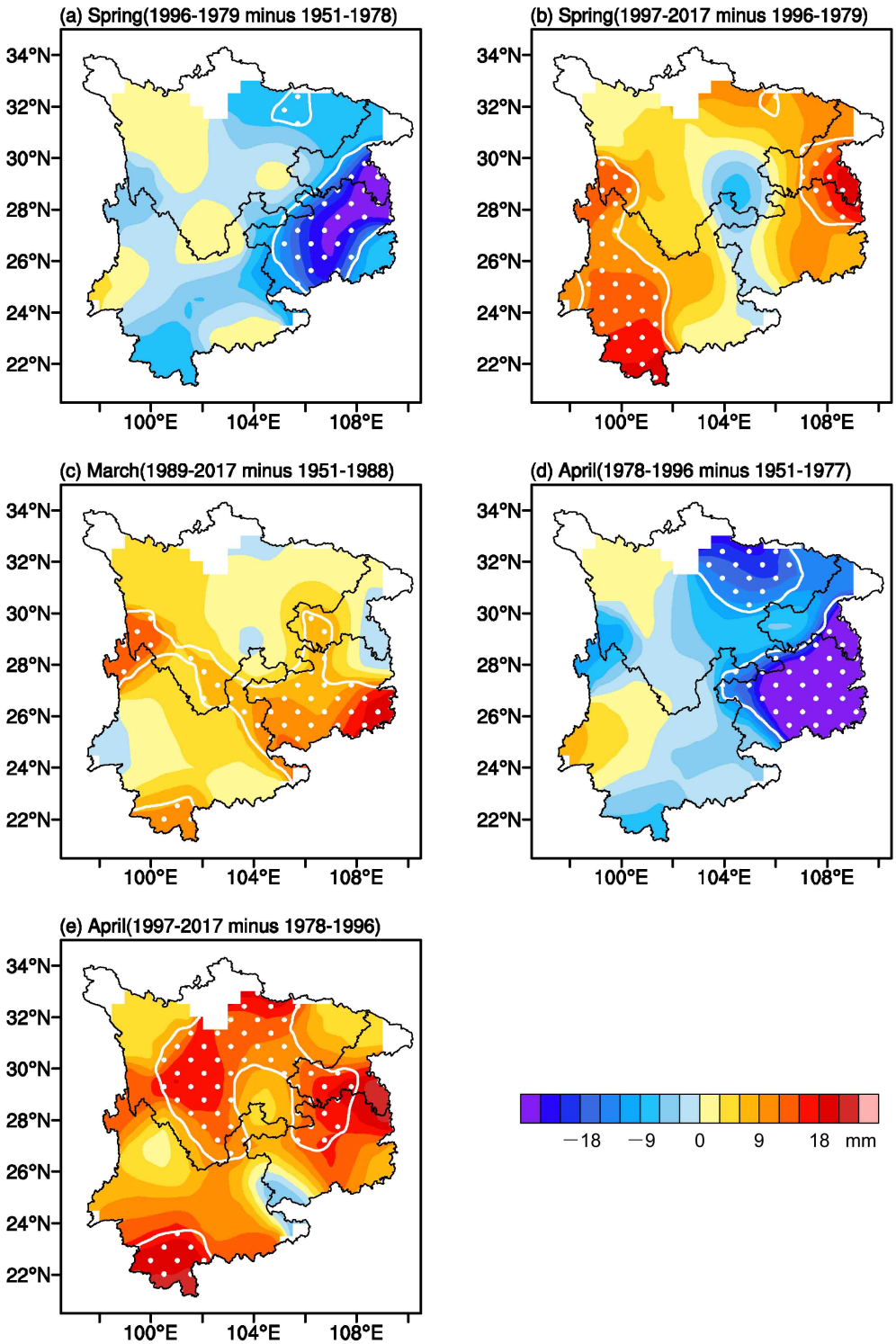

图 7　1951～2017 年我国西南地区在各个突变年份前后的降水量合成差值空间分布（单位：mm）（白色线包围区域表示通过 90% 信度检验区域）。（a）1970 年代末春季；（b）1990 年代中后期春季；（c）1988 年前后 3 月；（d）1977 年前后 4 月；（e）1996 年前后 4 月

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

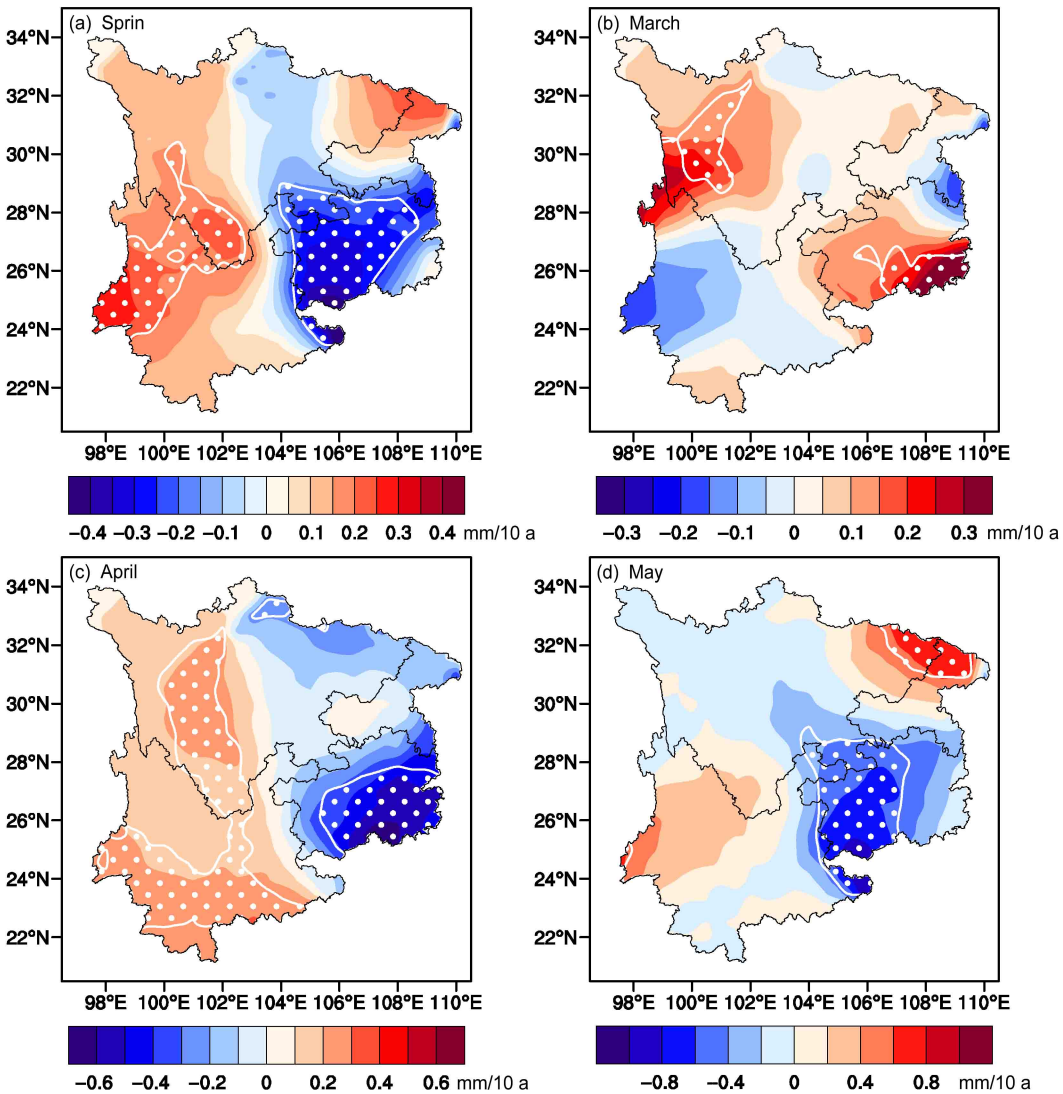

图 8 1951～2017 年我国西南地区（a）春季及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月降水量线性趋势的空间分布（单位：mm/10 a）（白色线包围区域表示通过 90% 信度检验区域）

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

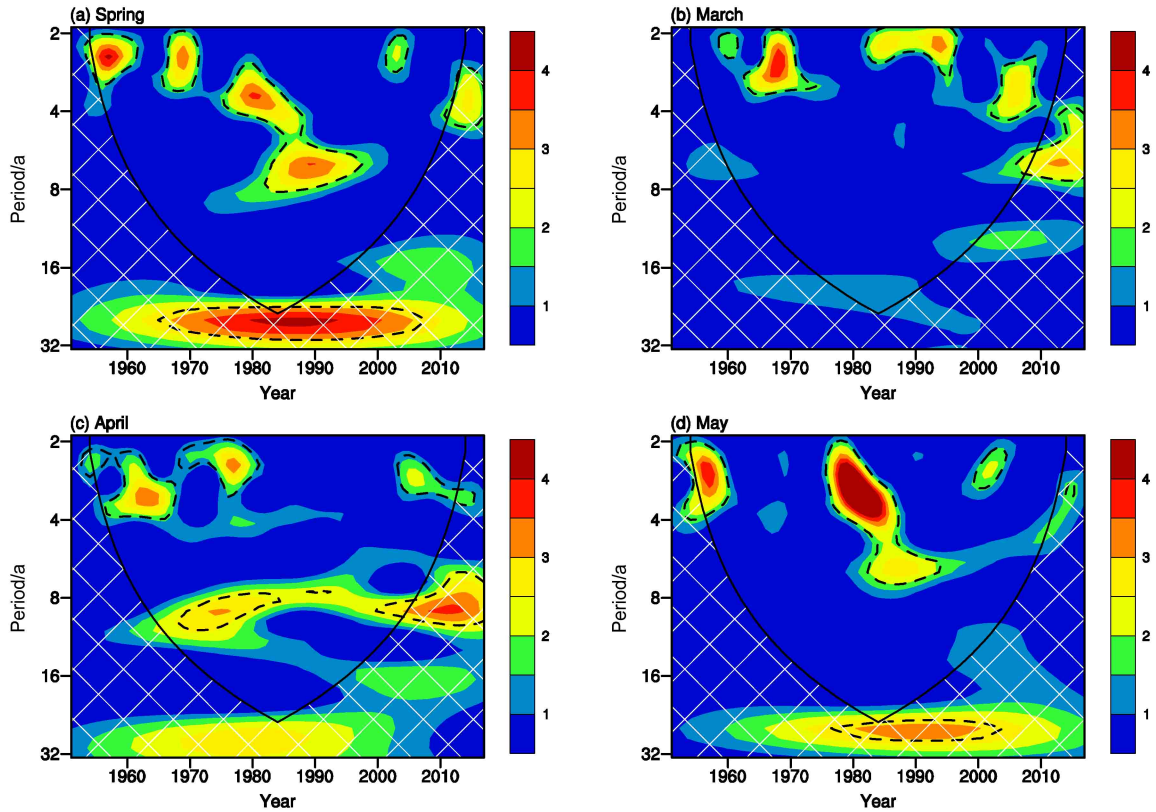

图 9　1951～2017 年我国西南地区（a）春季及（b）3 月、（c）4 月和（d）5 月降水时间序列的小波局地功率谱。黑虚线包围区域表示通过 90% 检验区域，白色网格线区域表示受边界影响显著的区域

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，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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（Álvarez-garcía 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:10.1175/2007JCLI1800.1

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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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 mid-long-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 wet-season 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

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net