

文章编号: 2096-1618(2020)05-0566-07

# 云贵高原雨季降水变化特征

薛媛<sup>1</sup>, 毛文书<sup>1</sup>, 张涵斌<sup>2</sup>, 巩远发<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 北京城市气象研究院, 北京 100089)

**摘要:**为对云贵高原雨季降水的时空变化特征进行分析,利用云贵高原68个站点1962–2017年5–10月逐日降水量资料,并采用一元线性回归、EOF分解以及Morlet小波法等多种方法。研究结果表明:云贵高原雨季平均降水量的空间分布呈西北部向东部和南部递增。EOF分解得到,云贵高原雨季降水分布呈现为全局一致性和东北-西南差异型,降水量逐旬变化呈现单峰型,月降水量整体呈东北向西南递增的分布,高值区位于云贵高原的东南部 and 西南部。近56年来,云贵高原雨季降水量和降水日数呈现波动减少趋势,高原东部的雨季降水量呈现增长趋势。大雨日数呈现减少趋势,暴雨日数呈现增长趋势。雨季降水量存在着28年的显著振荡周期和15年、10年次振荡周期。

**关键词:**大气科学;气象学;云贵高原;雨季降水;EOF;Morlet小波分析法

**中图分类号:**P426.62<sup>+</sup>3

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcui.2020.05.015

## 0 引言

近年来,气候及其变化的成因越来越受到科学界的广泛关注。其中降水是受全球变暖影响较大的气象要素。许多学者对于不同地区的降水进行研究分析<sup>[1–4]</sup>。云贵高原位于中国西南部,为中国四大高原之一,位于100°E~111°E,22°N~30°N,地势西北高东南低,海拔在400~3500 m<sup>[5]</sup>。Qian W等<sup>[4]</sup>研究发现,由于全球变暖,在南北半球亚热带的主要降水区在冬季和夏季陆地上的降水转向更高的强度<sup>[6]</sup>。王艳娇等<sup>[7]</sup>发现,中国西南部各区降水阶段性变化明显,2000年前西南东北部地区降水与西部地区基本呈反向变化。熊光洁等<sup>[8]</sup>研究得到,西南地区近50年夏季降水突变多集中在20世纪70年代、90年代、21世纪初,且都存在一个准14年尺度周期。王学锋等<sup>[9]</sup>发现:云贵高原汛期强降水和极端降水阈值地理分布差异较大,与站点海拔高度显著负相关;汛期降水日数显著减少,降水有集中的趋势。Liu Meixiao等<sup>[10]</sup>发现降水极值的变化趋势在空间上并不均匀。根据之前的研究成果综合来看,云贵高原不同地区降水变化特征各不相同。关于云贵高原雨季降水的研究较少。中国西南地区地形结构复杂,受西南季风的影响,冬干夏湿、干湿季节分明。雨季在5–10月,旱季在11月–次年4月,雨季降水量占全年的80%左右<sup>[11]</sup>。雨季降水的变化是云贵高原的旱涝灾害的形成和持续时间的重要原因<sup>[12]</sup>。因此,分析云贵高原主雨季的降水情况,了解其变化和周期,揭示其长期变化规律,将为云贵高原

雨季降水的短期气候预测提供依据,为该区域的工农业生产管理以及防灾减灾提供科学支撑。

## 1 资料与方法

资料来源于云贵高原的68个国家基本气象站(包括云南省东部、贵州省、广西壮族自治区西北部、重庆南部、四川省南部、湖北省西部和湖南省西部),1962–2017年5–10月的逐日降水资料(20–20时)。站点分布见图1。主要采用线性趋势分析法<sup>[13]</sup>、五点滑动平均法<sup>[14]</sup>、M-K趋势分析法<sup>[15]</sup>、EOF<sup>[16]</sup>以及Morlet小波分析法<sup>[17]</sup>。

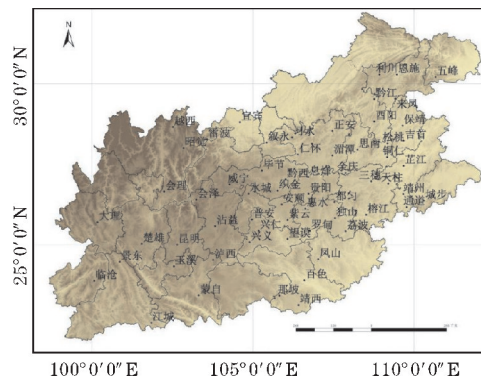


图1 云贵高原68个站点的空间分布

## 2 云贵高原雨季降水空间分布

### 2.1 雨季降水量的空间分布特征

云贵高原雨季降水量空间分布见图2(a),呈现从

收稿日期:2019-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41605082);国家自然科学基金资助项目(41775079)

东部、南部向西北部递减。高海拔地区的降水明显低于低海拔地区。高值中心分别是云南省中部、广西省的西北部以及湖南省、湖北省、重庆三地交界处。降水量分布不均匀主要是由云贵高原所处的西南地区的复杂地形结构和影响云贵高原的季风系统造成的。西南季风带来的暖湿气流沿着山间河谷地吹向内陆,云南省东南部、贵州省西部以及广西省西部的雨季降水平均都在1000 mm以上<sup>[18]</sup>。云贵高原东部受到东南季风的影响,海面上空暖湿气团被带到广西省西南部,降水随着副热带高压的北抬(南退)增加(减少)。高原地形由北向南呈阶梯式下降,湿润气流受到山岭高海拔影响,海拔越高,水汽逐渐减少,降水也减少,云贵高原中部和北部降水相对较少。云贵高原雨季降水量标准差空间分布见图2(b),云贵高原东南部和东北部为相对较大降水量标准差的区域,变率较大,也是雨季平均降水量相对较大的区域。广西省西部以及湖南、湖北和重庆三地交界处,是灾害性旱涝多发地区。云贵

高原雨季降水倾向率空间分布见图2(c),高原东部地区的降水倾向率为正,其余地区降水倾向率均为负。这与谷富研究得到的云贵高原夏季的降水变化的空间分布一致<sup>[19]</sup>。云贵高原的中部地区,即云南省和贵州省的交界处,为雨季降水量减少的最强值区。

在云贵高原雨季期间月平均降水量,见图3。5、6月降水量的空间分布呈现从云贵高原西北部向南部以及东部递增(图3a、b)。云贵高原的降水量逐步增多。7月降水分布呈现从云贵高原的东北向西南递增(图3c)。高值区位于湖南省边界以及贵州省东北部。见(图3c),8月降水空间分布仍表现为从东北向西南递增,高值区位置和7月大致相同(图3d)。9月西北部和西南部降水相对其他地区较多(图3e)。10月降水量由西向东递增(图3f)。整个雨季云贵高原西南边界一直是降水的最高值区,这一结论与闫星光所研究的云贵高原逐月日最大降水量空间分布结论相似<sup>[20]</sup>。

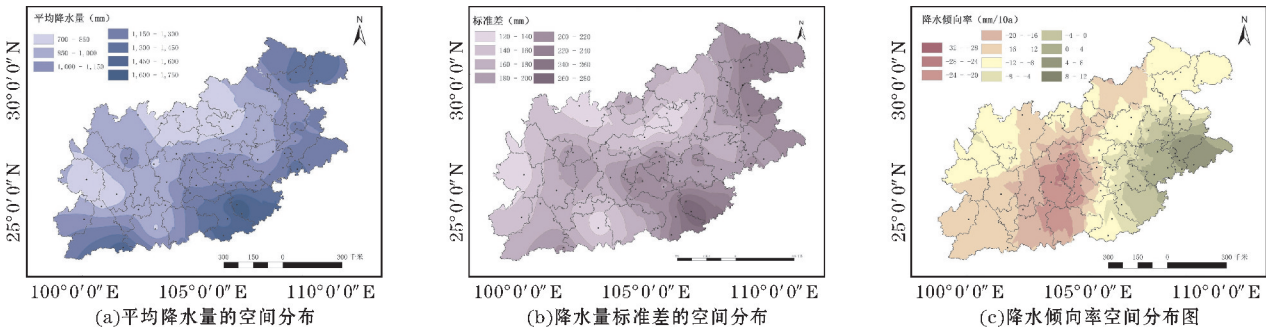


图2 云贵高原雨季季降水量空间分布特征

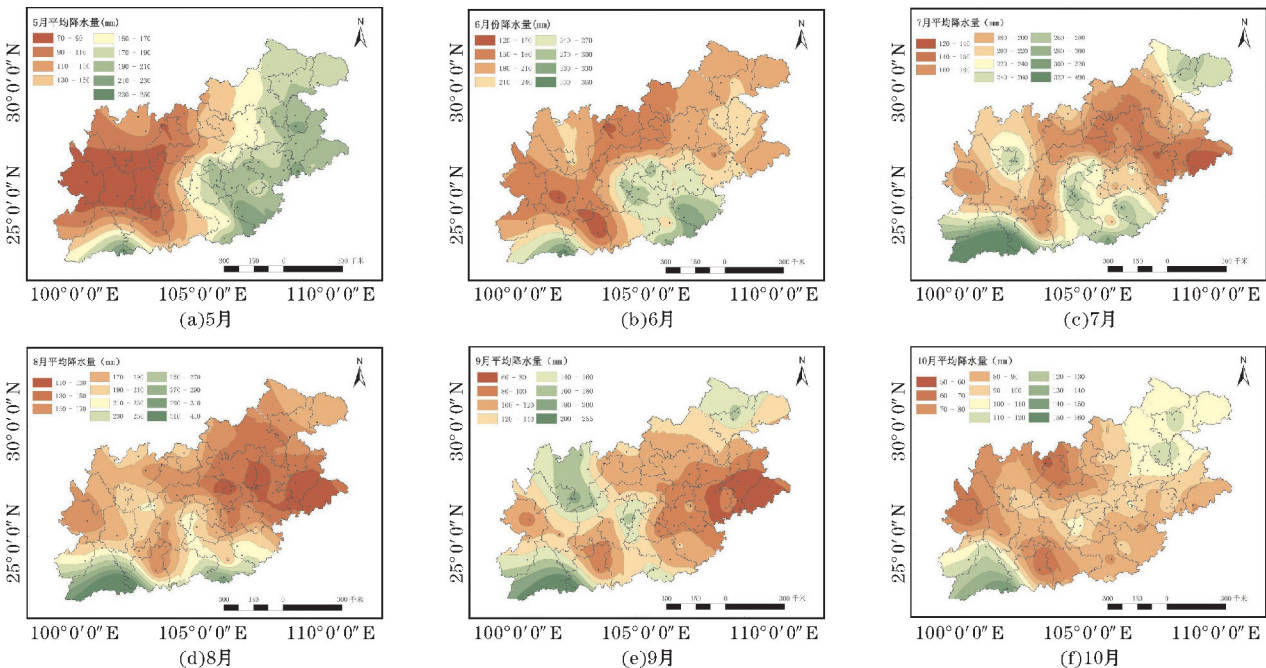


图3 云贵高原雨季月平均降水量空间分布



2.2 雨季降水日数的空间分布

云贵高原雨季降水日数空间分布见图 4(a),云贵高原平均雨季降水日数的高值区位于云贵高原西北部和中部以及西南部地区,与降水量的空间分布图差异较大。结合图 2(a),云贵高原东部雨季降水日数相对较少,但总降水量大,强降水较多。云贵高原雨季大雨日数见图 4(b),以 $25\text{ mm}\leq$ 日降水量 $\leq 50\text{ mm}$ 的降水事件为大雨的统计标准<sup>[21]</sup>,空间分布呈现自南部向北

部递减。雨季平均降水量大的地区平均大雨日数也相对较多。雨季大雨日数多的站点集中在云贵高原的南部、东南部地区。云贵高原雨季暴雨日数见图 4(c),以 $50\text{ mm}\leq$ 日降水量的降水事件为暴雨的统计标准,暴雨日数的空间分布与降水量的空间分布相似,从西部向东部递增。雨季平均暴雨日数大的区域为云贵高原的南部和东部地区。暴雨日数空间分布与夏阳等得到的云贵高原夏季的降水阈值分布中 99% 分位极端日降水事件的降水阈值分布大致一样<sup>[22]</sup>。

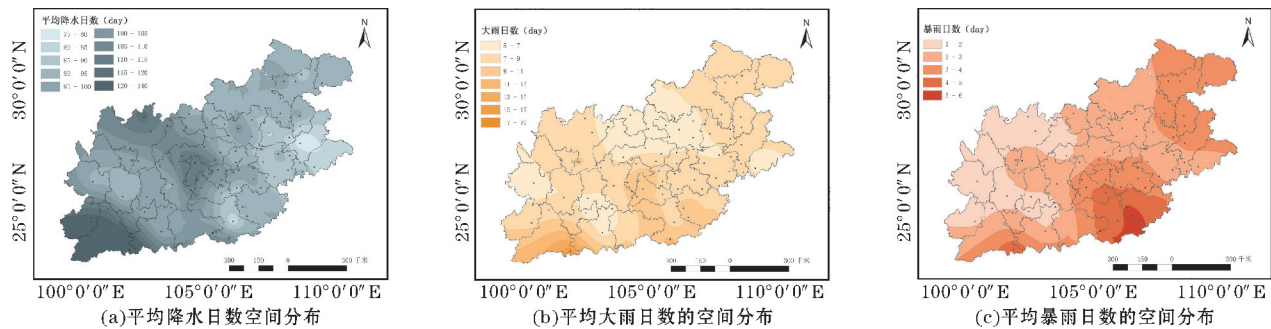


图 4 云贵高原雨季降水日数空间分布特征

2.3 雨季降水量 EOF 分解

利用 EOF 经验正交函数分析法进行时空分解,对云贵高原 1962–2017 年的雨季降水量标准化处理,并进行 North 显著性检验,得到主要的空间模态分布模态。前 5 个特征向量特征值的累积方差贡献率达到 60.75%,云贵高原雨季降水场的收敛性较快,可以较好地反映雨季降水量空间分布特征异常。只有前两个特征根的误差范围不重叠,即通过了 North 显著性检验,具有实际的物理意义。前两个特征值的累计方差贡献率达到 41.78%。

模态 1 的特征向量方差贡献率为 27.64%,与其他模态相比更大。高原主体部分属于亚热带季风气候,主要受西南季风的影响,造成旱、涝趋于一致。模态 1 表示第一雨型–全局一致性,为云贵高原雨季降水的主要空间分布形式,见图 5(a),模态 1 的特征值在空间上表现出一致的相同相位变化,均为正值。在该模态中,降水量分布特征呈现高原整体一致偏多或偏少。高值中心出现在云贵高原的西南部,该区域的降水量的波动程度大。低值中心位于云贵高原的东北部,该区域的降水量波动程度小。模态 2 的特征向量的方差贡献率为 14.14%,也是典型的降水主要空间分布形式。模态 2 表示第二雨型–东北–西南差异型,见图 5(b),分布格局以韭菜坪–苗岭–雪峰山为界,即零

线。特征值从东北向西南递减,呈现了东北–西南的相反位向的变化特征。正值中心为湖北省、湖南省以及重庆东部。负值中心则位于云南省东北部和广西省的西部。在该模态中,云贵高原东北部降水量减少(增多)且云贵高原西南部降水量增多(减少)。

时间系数的符号决定了模态的方向,正号(+)表示与模态同方向,负号(-)表示与模态反方向。模态典型程度取决于其时间系数的绝对值大小。每年时间系数绝对值最大所对应的特征向量作为当年降水空间分布模态。模态 1 占主导地位的降水场有 22 年,占总年数的 39.29%,见图 5(c),模态 1 的时间系数斜率为 -5.9,云贵高原雨季 56 年来呈现递减趋势,即降水量一致偏少为主,有 10 年雨季多雨,有 12 年雨季少雨。而时间系数的正极值出现在 1968 年,为最高值的年份(涝年)。负极值出现在 2011 年,对应雨季降水量最低值(旱年)。模态 2 为主的降水场有 13 年,占总数的 23.21%,见图 5(d),模态 2 的时间系数斜率为 -0.75,云贵高原西南部降水多、东北部降水少的程度加剧。东北部降水多且西南南部降水少的年份为 5 年,西南部降水多且东北部降水少的年份为 7 年。总体来说,时间系数所反映的趋势与特征向量反映的典型降水场基本一致。

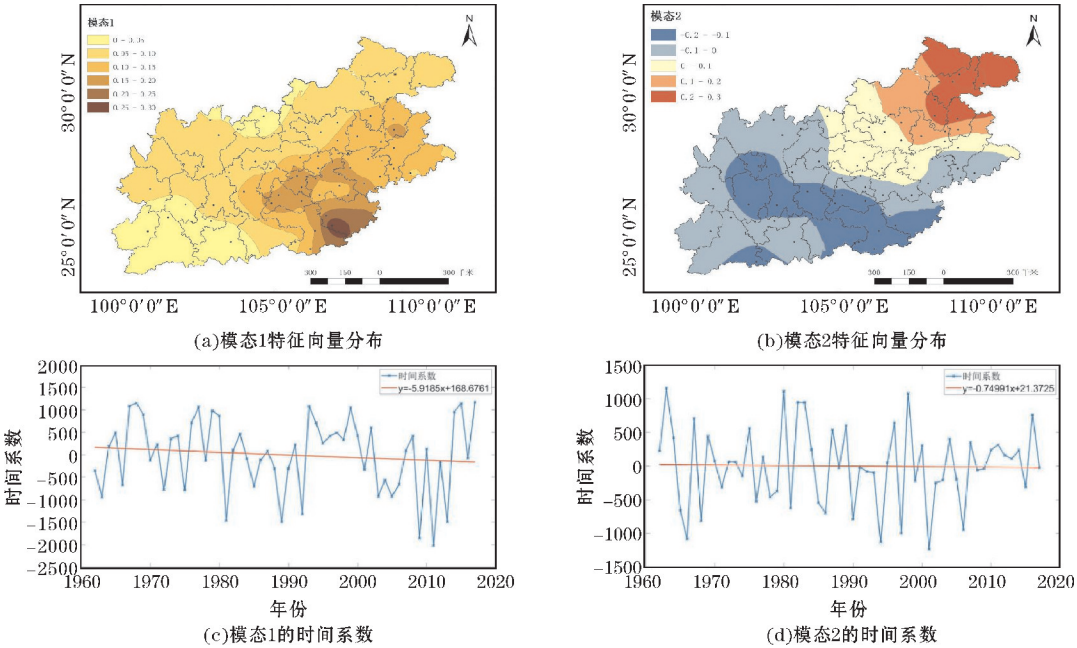


图 5 云贵高原雨季 EOF 分解图

3 雨季降水的时间演变特征

3.1 雨季总降水量的时间演变

云贵高原 56 年来雨季降水量见图 6(a),最高值为 1094.02 mm(1999 年),56 年来雨季降水量的年际波动明显,总体呈现递减趋势,降水倾向率为  $-9.38\text{ mm}/10\text{ a}$ 。M-K 非参数检验法分析,斜率预估为  $-0.68(<0)$ ,呈现减少趋势。但  $z = -0.78 > -1.28$ ,

未通过置信度为 90% 的显著性检验。根据五点滑动平均曲线,云贵高原雨季降水量随年份呈现了一定的周期性变化,在 1971 年、1980 年和 2000 年左右达到波峰。结合图 6(b),根据累积距平的变化曲线,云贵高原雨季降水量总体趋势呈现增加-减少-增加-减少-增加。结合图 6(c)、(d),云贵高原降水在雨季内随时间分布不均匀,呈现单峰型。降水量从 5 月上旬至 6 月下旬逐渐增加,在 6 月下旬达到峰值,之后降雨量逐渐随时间减少。整个雨季各月降水量均在 90 mm 以上,6、7 月达到 200 mm 以上。

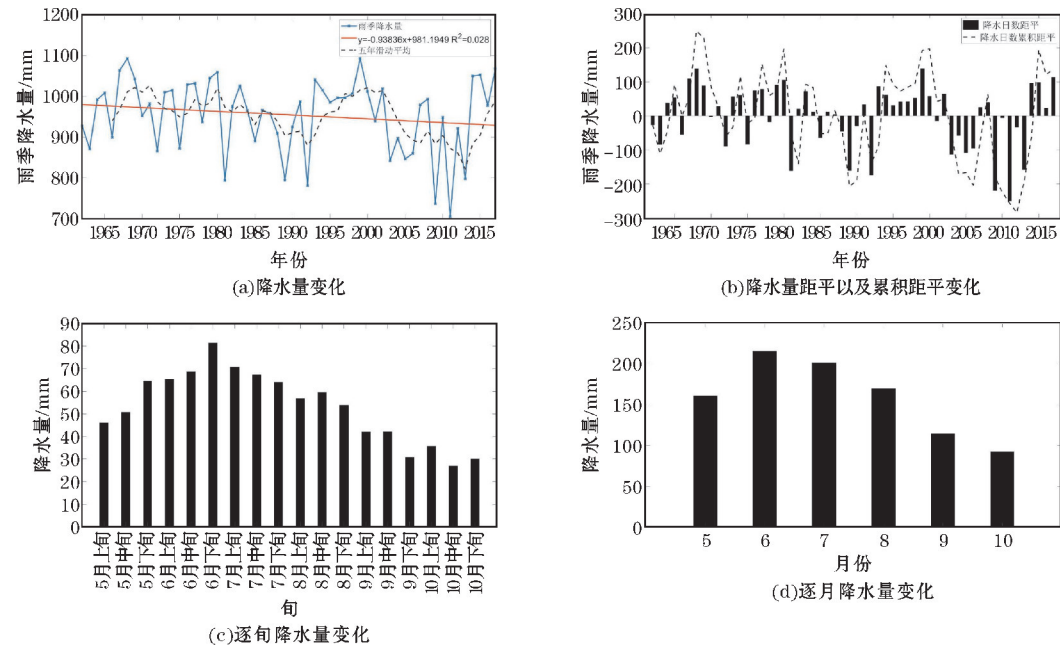


图 6 云贵高原雨季降水量时间演变特征

3.2 雨季降水日数的时间演变

从图 7(a) 知,云贵高原近 56 年来雨季降水日数呈现波动下降趋势,约为 $-3.8\text{ d}/10\text{ a}$ ,表示每 10 年雨季降水日数大约减少 3.8 d。用 M-K 非参数检验法,雨季降水日数的斜率预估为 $-0.38 (<0)$ , $z=-6.06<-2.32$ ,通过置信度为 99% 的显著性检验,雨季降水量的减少趋势呈现显著性。从 5 年滑动平均曲线来看,在 1992–1997 年和 2011–2017 年降雨日数呈现增长趋势,其他年份呈现减少趋势。从图 7(b) 知,云贵高原雨季降水日数在 1980 年之前一直都是波动增长,但之后呈现明显下降趋

势,2010 年之后存在波动上升。降水日数与降水量的相关性为 0.6346,为显著性相关,表明云贵高原地区降水有集中的趋势。在王学峰关于云贵高原汛期研究中也得到了同样的结果<sup>[23]</sup>。从图 7(c) 知,云贵高原雨季大雨日数呈现下降趋势,约为 $2\text{ d}/10\text{ a}$ 。云贵高原雨季大雨日数随着年份的变化呈现一定的周期性变化,大雨日数的 5 年滑动平均与雨季降水量的变化趋势基本一致。从图 7(d) 知,雨季暴雨日数呈现上升趋势,上升率约为 $3\text{ d}/10\text{ a}$ 。暴雨日数的 5 年滑动平均与雨季降水量的 5 年滑动平均在 1976 年之前变化趋势基本一致,在 1977 年之后差异较大。

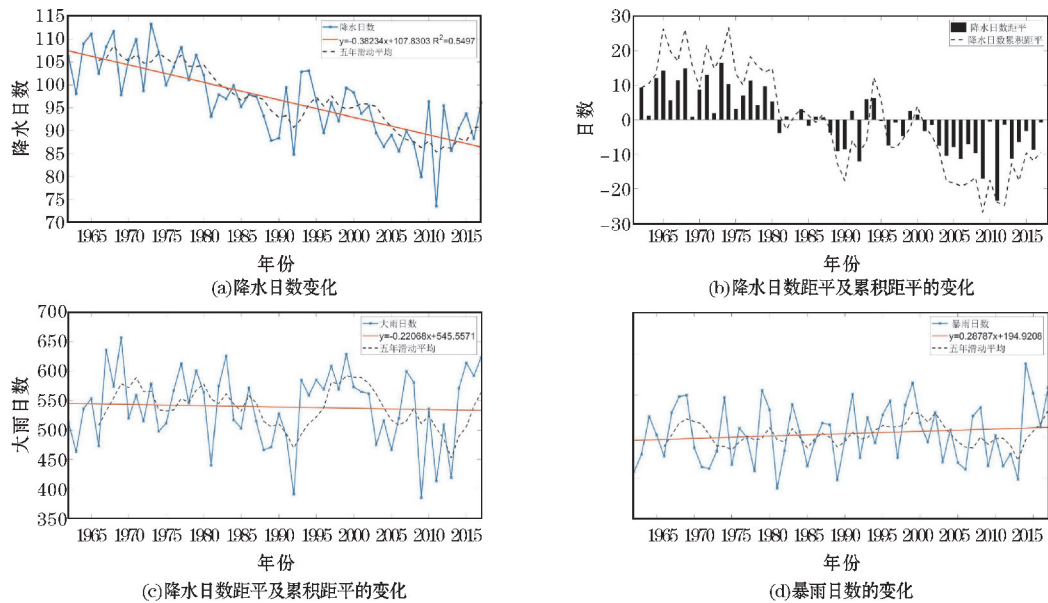


图 7 1962–2017 年云贵高原雨季降水日数时间演变特征

3.3 雨季降水周期特征

采用 Morlet 小波分析法,提取云贵高原 1962–2017 年逐年的雨季降水量距平序列标准化后的小波实数和小波方差法。从图 8(a) 知,云贵高原雨季降水量标准化距平存在着不同尺度的周期振荡信号,序列在时间周期尺度上呈现复杂嵌套结构。14~16 a 和 26~30 a 的周期信号最为明显。在 14~16 a 尺度的周期信号较强且为全时域变化,存在着减少–增多一共 7 个循环,至 21 世纪后期呈现增多趋势。波束系数的最

大值和最小值都存在 26~30 a 的周期里,分别在 1996–2002 年和 2006–2010 年,这一时期云贵高原雨季振荡最强,气候活动变化剧烈。在这个周期里明显存在着减少–增多一共 3 个循环。2017 年后的小波等值线并未完全闭合。其次,年际变化主要表现在 10 a 以下的尺度,在 1970–1995 年存在 4~6 年振荡周期。从图 8(b) 知,存在 4 个峰值,其中小波方差极值最大对应 28 年,表明 28 年的周期振荡是最强的,为云贵高原雨季降水量变化的第一主周期。而较弱的峰对应 5 年和 3 年,则为第二、第三主周期。

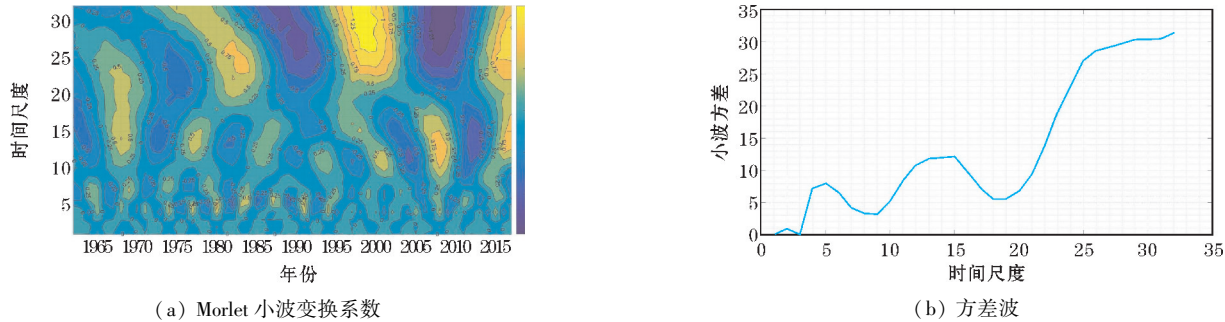


图 8 云贵高原雨季降水量标准化距平小波变化



## 4 结论

(1)从空间分布看,雨季平均降水量的高值中心位于高原东部和东南部。雨季降水日数的高值区位于高原中部和西南部。两者空间分布差异较大。降水量标准差的空间分布呈现东高西低,高原东部地区降水量较多且不稳定。云贵高原的月降水量整体呈东北向西南递增的分布,且高值区位于云贵高原的东南部和西南部。大雨日数分布呈现从北向南递增。暴雨日数分布呈现从西北向东南递增。降水倾向率在贵州东部以及湖南边界为正值中心,56年来该地区的雨季降水量呈现增长趋势。

(2)根据 EOF,模态 1 的特征向量分布呈现了全局一致型,即降水量一致呈现偏多或偏少。模态 2 的特征向量分布呈现东北-西南差异型,即降水量呈现东北多(少)西南少(多)。模态 1 的时间系数呈现减少趋势,即高原雨季降水量一致偏少情况增多。模态 2 的时间系数呈下降趋势,则降水量呈现东北少西南多的情况加剧。

(3)云贵高原雨季降水量逐旬变化呈现单峰型,峰值处于 6 月下旬。1962-2017 年,云贵高原雨季降水量和降水日数呈现波动下降趋势。大雨日数呈现下降趋势,暴雨日数呈现增长。

(4)云贵高原雨季降水量存在不同尺度的周期振荡规律,长周期(28 年)的振荡信号明显强于短周期(15 年,5 年)的振荡信号。到 21 世纪后,周期振荡信号进一步增强,降水量变化起伏增大。

## 参考文献:

- [1] 罗伯良,张超,林浩. 近 40 年湖南省极端强降水气候变化趋势与突变特征[J]. 气象,2008(1): 80-85.
- [2] 丁永健,叶佰生,周文娟. 黑河流域过去 40a 来降水时空分布特征[J]. 冰川冻土,1999(1):42-48.
- [3] 黄玉霞,李栋梁,王宝鉴,等. 西北地区近 40 年年降水异常的时空特征分析[J]. 高原气象,2004(2):245-252.
- [4] Qian W, Lin X. Regional trends in recent precipitation indices in China[J]. Meteorology and Atmospheric Physics,2005,90(3/4):193-207.
- [5] 赵济等. 中国地理[M]. 北京:高等教育出版社,1999:579.
- [6] Xuelei Feng, Chuntao Liu, Feiqin Xie, et al. Precipitation characteristic changes due to global warming in a high - resolution (16 km) ECMWF simulation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,2019,145:718.
- [7] 王艳姣,闫峰. 1960-2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J]. 地理科学进展,2014,33(10):1354-1363.
- [8] 熊光洁,王式功,尚可政,等. 中国西南地区近 50 年夏季降水的气候特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(4):45-52.
- [9] 王学锋,郑小波,黄玮,等. 近 47 年云贵高原汛期强降水和极端降水变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1350-1355.
- [10] Liu M, Xu X, Sun A Y, et al. Is Southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes [J]. Environmental Research Letters, 2014,9(6):064002.
- [11] 钟静,卢涛. 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定[J]. 水土保持通报,2018,38(1):175-186.
- [12] 解明恩,程建刚,范菠. 云南滑坡泥石流灾害的气象成因与监测[J]. 山地学报,2005(5):61-68.
- [13] 施能,陈家其,屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报,1995(4):431-439.
- [14] 张卉,程永明,江渊. 山西省近 49 年降水量变化特征及趋势分析[J]. 中国农学通报,2014,30(8):197-204.
- [15] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备,2008(5):35-40.
- [16] 阮翠冰,林忠,林兆华. 闽东地区年可利用降水资源时空特征分析[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(10).
- [17] 吴建峰,罗娜,张凤太,等. 基于 Morlet 小波分析的云贵高原区春季降水特征研究[J]. 中国农村水利水电,2018(5):123-133.
- [18] 白一凡. 云贵地区乡土民居建筑表皮的生态性研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [19] 谷富. 云贵高原近 55 年气候变化特征及其对树木径向生长的影响[D]. 兰州:兰州大学,2018.
- [20] 闫星光. 基于 GIS 的云贵高原典型地貌区极端

降水时空分布规律研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2018.

[21] 李运刚,胡金明,何大明,等. 1960–2007 年红河流域强降水事件频次和强度变化及其影响[J]. 地理研究,2013,32(1):64–72.

[22] 夏阳. 云贵高原夏季不同等级极端日降水事件的气候特征[A]. 中国气象学会. 第 35 届中国气象学会年会 S3 高原.

[23] 王学锋,郑小波,黄玮,等. 近 47 年云贵高原汛期强降水和极端降水变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1350–1355.

## Characteristics of the Precipitation Changes in the Rainy Season in the Yunnan-Guizhou Plateau

XUE Yuan<sup>1</sup>, MAO Wenshu<sup>1</sup>, ZHANG Hanbin<sup>2</sup>, GONG Yuanfa<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to analyze the Temporal and spatial characteristics of the precipitation in the rainy season in the Yunnan-Guizhou Plateau, we have used the daily average precipitation of 68 stations in the Yunnan-Guizhou Plateau from May to October from 1962 to 2017 and a variety of climate statistical methods such as univariate linear regression, EOF decomposition, Morlet wavelet method and so on. The results show that: The spatial distribution of the average precipitation has an increasing trend during the rainy season in the Yunnan-Guizhou Plateau increases from the northwest to the east and south. According to EOF, the spatial distribution of precipitation has two typical models; the whole region version or Northeast-Southwest difference version. During the rainy season, the monthly variation precipitation of the Yunnan-Guizhou Plateau has a single peak. The distribution of monthly precipitation has been demonstrated to increase from northeast to southwest, the high-value area is located in the southeast and southwest of the Yunnan-Guizhou plateau. In the past 56 years, the overall precipitation and precipitation days shows a decreasing trend of volatility, only the precipitation in the rainy season in the eastern part of the plateau shows an increasing trend. The number of heavy rain days on the Yunnan-Guizhou Plateau shows a decreasing trend, while the number of rainstorm days shows an increasing trend. Precipitation in the rainy season has significant oscillation periods of 28 years and 15-year, 10-year oscillation periods.

**Keywords:** atmospheric science; meteorology; the Yunnan-Guizhou Plateau; rainy season precipitation; EOF; Morlet wavelet analysis