

1961—2017 年贵州降水时空变化特征

李勇^{1,2,3}, 刘秀明^{2,3}, 王世杰^{2,3}, 曹乐^{1,2,3}, 张志才⁴

(1.中国科学院大学, 北京 100049; 2.中国科学院 地球化学研究所
环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 3.中国科学院 普定喀斯特生态系统观测研究站,
贵州 普定 562100; 4.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要:为研究贵州地区降水的时空演变规律,根据贵州省 84 个气象站 1961—2017 年的降水量资料,利用 EOF 和 REOF 方法、Mann-Kendall 检验、Cramer 法、YAMAMOTO 法和滑动 t 检验及 Morlet 小波分析法,对贵州地区 57 年来降水的空间分布、时间系数变化特征和时间序列的趋势性、突变性及周期性进行了分析。结果表明:EOF 方法可以很好地解释降水场的时空分布特征,前 2 个特征向量累计贡献率达 50.08%,揭示了两种典型的分布场,即全局型和东西反向型。分析特征向量所对应的时间系数,贵州省的降水场主要表现为全省多雨、全省少雨、东多西少、东少西多 4 种类型,REOF 可将贵州降水场分为东西部两个区域,通过 Mann-Kendall 检验发现均存在降水减少的突变,并通过 Cramer 法、YAMAMOTO 法和滑动 t 检验对结果进行验证,发现 II 区比 I 区降水突变明显。Morlet 小波分析表明,贵州地区降水存在着显著的 28 a 周期变化。

关键词:降水; EOF 分析法; 时空分异

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0145-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.022

Temporal and Spatial Distribution of Precipitation in Guizhou Province from 1961 to 2017

LI Yong^{1,2,3}, LIU Xiuming^{2,3}, WANG Shijie^{2,3}, CAO Le^{1,2,3}, ZHANG Zhicai⁴

(1.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2.State Key Laboratory of Environmental
Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3.Puding
Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou 562100, China; 4.State Key
Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the temporal and spatial evolution process of precipitation in Guizhou Province, according to the precipitation data of 84 weather stations from 1961 to 2017, we analyzed time series trends, periodicity, mutation and spatial distribution of the precipitation of the Guizhou Province in the recent 57 years, by using the methods of EOF, REOF, Mann-Kendall, Cramer, YAMAMOTO, t checking and Morlet analysis. The results show the EOF method is capable for revealing the spatial and temporal distributions of precipitation field. The accumulated contribution of the first two EOF can reach to 50.08%, and reflect two typical vector distribution fields, which is the whole region pattern and east-west reverse pattern. Analysis of the eigenvector of the corresponding time factor coefficient demonstrates that the precipitation fields of the Guizhou Province mainly exhibit four types, abundant rain in whole province, less rain in whole province, abundant rain in east and less rain in west, less rain in east and abundant rain in west. On the basis of the REOF of rainfall, the Guizhou Province could be divided into two regions, east part and west part. Mutation is found in rainfall trend by Mann-Kendall test. Verification by the methods of Cramer, YAMAMOTO and t checking, indicates that the abrupt change of precipitation in zone II is more obvious than zone t. Morlet wavelet analysis suggests that there is a strong 28-year period of the precipitation in Guizhou Province.

收稿日期:2018-12-08

修回日期:2019-01-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502300);贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648)

第一作者:李勇(1986—),男,山东菏泽人,博士研究生,研究方向为生物地球化学。E-mail: xidaly@qq.com

通信作者:刘秀明(1974—),男,广西桂林人,博士,研究员,主要从事生物地球化学研究。E-mail: liuxiuming@vip.skleg.cn

Keywords: precipitation; method of empirical orthogonal function analysis; spatial and temporal variation

全球气候变暖导致降水量时空分布变化,从而对水资源、生态系统状况和社会经济发展等产生深刻的影响。研究表明全球气候变暖加速了地球系统的水循环,全球总降水量在过去 100 年有增加趋势,极端天气气候事件的发生频率和强度都在增加^[1]。我国地处东亚地区,气候条件复杂,生存环境脆弱多变,环境问题尤为突出。施能等^[2]研究表明中国近 100 年降水量呈减少的趋势。对中国的降水量分区域研究,西南地区强降水增多,降水集中在每年的 4—10 月,降水量分布呈现“东多西少”的特征,贵州省东南部是降水高发区之一^[3]。

贵州位于太平洋季风和印度洋季风交汇影响的边缘地带^[4-5],属亚热带季风湿润型气候。降水的时空变化受到复杂地形和大气环流的共同影响。降水时间主要集中在夏季,降水量达到全年降水量的 48.23%^[6],伍红雨等^[7]研究表明贵州夏季降水具有显著的年际、年代际变化特征,主要周期为 2.8 a 左右。近 50 年贵州地区降水量有下降的趋势,同时极端降水的频率增加^[8]

大气降水是农业用水的主要来源,影响区域水资源变化和旱涝等自然灾害的形成,降水时空分布特征对区域经济发展和农业生产均有着决定性作用。受到气候因素的影响,贵州地区降水时空分布差异较大,贵州喀斯特地区干旱洪涝灾害天气发生频繁^[9-10],常给当地的人民群众以及工农业生产造成不同程度的危害。因此,研究贵州地区降水时空变化特征对于充分利用有利的气象条件,减轻和防御气象灾害,确保本地区人民群众安全以及工业农业建设的顺利进行有着重要的意义。

经验正交函数分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)^[11]是气候特征研究中常用的分析方法,可以对区域内的观测站点进行时空分解,能够准确地分析出降水的空间分布特征。目前,这种方法已广泛应用于气象的分析研究中^[12-15]。但由于方法本身的原因,其对降水时间序列的趋势性、突变性和周期性分析不足。REOF 是在 EOF 分析的基础上做最大正交方差旋转,旋转后可更好地表现地域的差异,同时反映不同地域的相关分布状况。本文根据贵州地区 84 个气象站 1961—2017 年的逐日降水资料,基于 EOF 分析法分析贵州地区降水的空间分布时间系数变化特征。并结合 Mann-Kendall 检验法^[16](下文简称 M-K 检验)、Cramer 法、YAMAMOTO 法和滑动 t 检验及 Morlet 小波分析法^[17],分析贵州地区 57 年来降水时间序列的趋势性、突变性、周期性,较

为全面地描述贵州地区降水的时空变化特征及未来可能的变化趋势,可为该地区的农业生产、旱涝预警以及减灾防灾等方面提供理论支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,境内地势西高东低。地形自西向东逐渐倾斜,西部的海拔高度是 1 200~2 400 m;中部海拔 800~1 200 m;东部最低,海拔在 800 m 以下。省内山脉交错、河谷纵横、地形复杂。

1.2 研究方法

采用 EOF 分析贵州地区降水场空间变化类型, EOF 分析可将区域降水场分解为正交的特征向量和时间函数两部分,将原降水场的变化信息浓缩在前几个模态上,进而通过对空间特征向量和时间系数的估计,来揭示区域降水的时空变化特征;利用旋转经验正交函数分解 REOF^[18],对 EOF 各特征向量场进行方差最大旋转,得到旋转的特征向量,据此划分贵州省年降水量空间分布特征;在此基础上,选择各分区的代表性气象站,采用 M-K 检验、Cramer 法、YAMAMOTO 法和滑动 t 检验相结合分析各分区降水的演变趋势及是否存在突变现象,由于序列长度 N 的选择带有人为性,可能会使计算结果产生漂移,为避免这种情况,选择 2 种不同长度的时间序列。使用 Morlet 小波分析方法分析贵州地区降水的年代际变化、周期变化。EOF 和 REOF 分析, M-K 检验及滑动 t 检验, Morlet 小波分析均通过 MATLAB 平台实现, Cramer 法和 YAMAMOTO 法检验使用 DPS 软件计算。

2 结果及分析

2.1 贵州省多年降水分析

根据贵州省 84 个气象站 1961—2017 年的日降水量实测资料,贵州地区多年平均降水量如图 1 所示。该地区的多年平均降水量西南和东南地区偏多,西北地区偏少。降水量空间分布不均匀。多雨区位于贵州西南部,雨量中心在晴隆、六枝一带以及兴义,是全省年降水量最多的区域。其中,降水量最多的雨量站为晴隆站,其多年平均降水量达 1 509.69 mm,该多雨区的形成原因主要有两个,一是易受到印度季风槽前西南暖湿气流东扩的影响。二是该区域北高南低的倾斜地形对偏南暖湿气流的抬升作用^[19]。多年平均降水量最低位于赫章站,为 844.03 mm,最高值与最低值相差 665.66 mm。

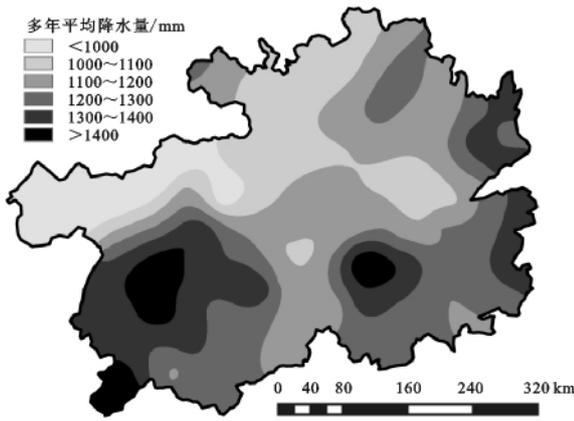


图 1 贵州地区多年平均降水量

2.2 EOF 分析

2.2.1 贵州地区降水空间分型特征 为深入分析贵州地区降水的空间分布特征,对贵州地区 84 个气象站 1961—2017 年的降水进行 EOF 分解,前两个特征根的误差范围不重复通过 North 显著性检验,累积贡献率达 50.08%,基本能反映贵州地区降水量的主要空间分布特征。EOF 分析法中特征向量的空间分布类型如图 2 所示,特征向量的数值大小反映降水量变化的程度,数值正负代表了相对的正反位相。由图 2 可知,前 2 个特征向量分别反映了贵州地区降水空间分布类型的 2 种模式,即全局型和东西反向型。

表 1 特征向量贡献率

序号	EOF			REOF		
	特征值	方差贡献/%	累积方差贡献率/%	特征值	方差贡献/%	累积方差贡献率/%
1	34.64	41.24	41.24	23.38	27.83	27.83
2	7.43	8.84	50.08	18.69	22.25	50.08

由表 1 可知,第一特征向量的方差贡献率为 41.24%,远高于另一模态的贡献率,反映了贵州省降水空间变化的主要特征,为决定性模态。高值区分布在贵州中部的贵阳市白云区、乌当区,贵定县以及黄平县,向周边区域减小。贵州中部为降水高值分布中心,年降水变化率大,丰枯都非常敏感。有研究表明,极端降水对贵州省年降水量贡献较大^[20],卢瑞荆等^[21]研究表明,年暴雨量对年降水量的贡献约为 12%~32%,在贵州中部地区极端降水多发^[22],降水贡献中暴雨的贡献更加明显。而强降水与西太平洋副热带高压面积指数和强度呈正相关,因此有明显的年际和年代际变化特征^[23-24]。特征值在全省呈正值分布,这说明贵州省降水空间分布为全局型分布,即呈现全省全年多雨或少雨的降水分布特征,在大尺度范围内天气系统影响下,全省降水的丰枯变化趋于一致。

第二特征向量的方差贡献率 8.84%,表现出的降水特征呈东西反向分布模式,零等值线在 106°E 附近,为较典型的降水主要空间分布形式。当贵州东部降水较多时,西部地区较少;而东部降水较少时,西部降水较多。正值中心位于贵州西南部的普安和晴隆,负值中心位于贵州东北部沿河和德江。造成这种相反现象与贵州省西高东低的地势有关。以 106°E 为界分东、西两部分,贵州西部平均高海拔高度在 1 626.2 m。东部平均海拔较低,如榕江为 287.4 m。贵州西部地区由于海拔高,受高原大地形的影响很大。东部地区海拔低,受影响的天气系统有差别,造成贵州地区东西部的降水有差异。

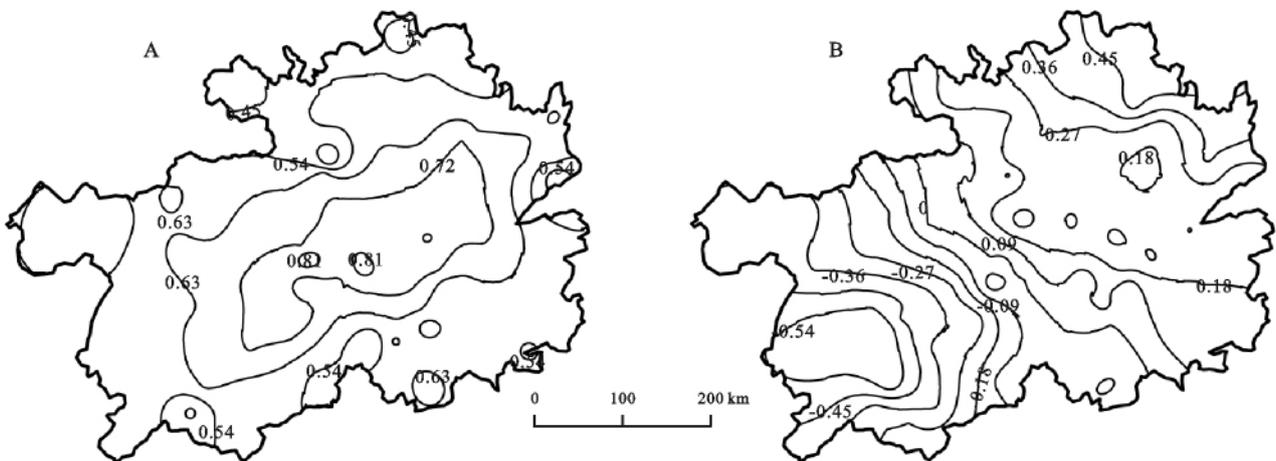


图 2 贵州省降水 EOF 展开前 2 个特征向量分布

2.2.2 EOF 时间系数分析 EOF 时间系数代表对应特征向量空间分布模式的时间变化特征,系数数值的绝对值越大,表示分布形式的典型性越强。时间系数的正负代表场型的分布方向,正值与模态方向相

同,负值相反。根据特征向量所对应的时间系数绝对值大小及符号,可以得出贵州省年降水的时空差异。如图 3 所示,对 57 年来 2 种降水空间分布类型做统计,取 2 个特征向量每年中绝对值最大时间系数作为

当年的降水空间分布形式。得出全省少雨年为 21 a, 全省多雨年为 19 a, 东部减少西部增多的降水分布模式出现 9 a, 东部增多西部减少的降水分布模式出现 8 a。可以看出, 57 年来的降水分布模式, 以第一向量的空间分布方式为主, 数量有 40 a 之多, 占总年数的 70.18%, 且全年少雨的总年数要稍多于多雨总年数, 说明了贵州省年降水总体上有减少的趋势。东西部差异型的降水模式共出现 17 次, 占总年数的 29.82%。这与贡献率所反映的不同模态的典型程度基本一致。

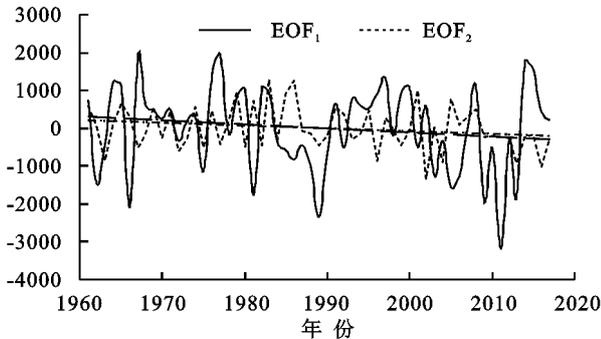


图 3 EOF 分析法中前 2 个特征向量的时间系数

2.3 贵州降水空间分区及时间演变规律分析

2.3.1 多年均值及历史极值的空间分布 为进一步解释贵州省降水量的地域特征, 对通过 North 检验的前 2 个 EOF 特征向量场进行旋转。由表 1 可知, 相比于旋转前, 旋转后各分量的方差贡献进行了重新分配, 两个分量方差贡献更均匀。结合各特征向量空间分布特征和累积方差贡献量, 将贵州省年降水量的空间分布分为 2 个区, 结果见图 4。所分区域基本符合贵州省地形和海拔高度特点。贵州地势西部高, 向北部、东部和南部逐渐减低。第 I 区为贵州东部, 地形多山地丘陵; 第 II 区为西部山区, 多高山大岭, 海拔较高。

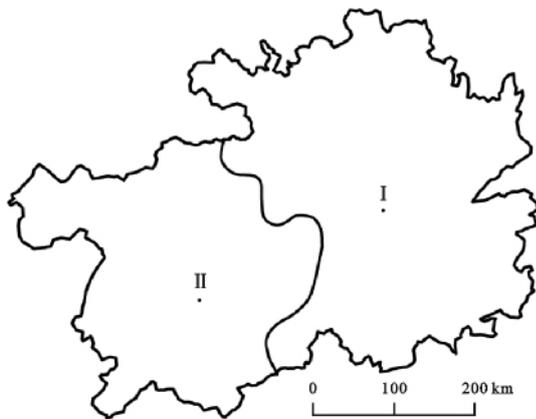


图 4 贵州省降水 REOF 分区

2.3.2 空间分区年降水特征 选取旋转后的特征向量载荷量最大值中心所在的气象站点作为各分区的代表站, I 区和 II 区代表站分别为黄平站和关岭站, 并以此来分析各分区年降水量的时间变化特征。各

站 1961—2017 年的年降水量基本统计特征见表 2。II 区的年降水量均值要大于 I 区; 由极值比、标准差、变异系数可知, II 区的变异要大于 I 区; 对比两个区域的年降水量极值比, II 区高于 I 区; 由线性倾向率可知, I 区和 II 区的年降水量均为减少的趋势, 但决定系数值均较小, 说明年降水量减小的趋势不显著。

表 2 各分区年降水量统计特征

分区	平均值/ mm	极值比	标准差/ mm	变异系数	线性倾向率/ (mm · a ⁻¹)	决定 系数
I	1133.33	1.90	174.37	0.15	-0.98	0.0088
II	1335.90	2.34	247.88	0.19	-1.68	0.013

2.3.3 各空间分区年降水量突变性分析 根据贵州省年降水量进行 REOF 分区后, 运用 M-K 检验法各个分区进行时间序列的趋势分析和突变检验。如图 5 所示, 图中 UF 代表降水的顺序统计曲线, UB 为降水的逆序统计曲线, 并给定显著性水平: $\alpha = 0.05$, 临界线为 ± 1.96 。若 UF 或 UB 值大于 0, 则表明序列呈上升的趋势, 小于 0 则表明呈下降的趋势。当统计曲线超过临界线时, 表明上升或下降趋势显著。如果统计曲线在临界线之间出现交点, 则交点对应的时间点就是突变开始的时间。

通过 M-K 检验可识别不同时期贵州省年降水量变化趋势的细节信息。由 I 区的 M-K 曲线可知, 1978 年以来 UF 曲线持续小于 0, 表明年降水量在该段时间内处于下降的趋势。曲线在 1988—1992 年超过了 95% 显著水平的下临界线, 说明降水序列在该时间段出现下降趋势明显, 根据突变点的判别条件, 可以确定 I 区降水发生突变时间在 1971 年。对 II 区的降水量进行 M-K 检验, 1987 年以来 UF 曲线持续小于 0, 表示年降水量下降, 下降的时间较 I 区晚。曲线在 2013 年超过了 95% 显著水平的下临界线, 说明降水序列在该年出现明显的下降趋势, 而且降水减少是一突变现象, 根据突变点的判别条件, 1997 年为突变年。

对比两个区域的降水量变化, 发现两个区域降水量变化趋势接近, 但是 II 区要比 I 区有几年时间的迟滞。且在 20 世纪 80 年代, 贵州地区降水偏少, 这与先前大范围的降水变化研究结果是一致的^[2]。

为验证 M-K 检验的准确性, 利用 Cramer 法、YAMAMOTO 法和滑动 t 检验在相同的置信水平下变化子序列的长度 ($N = 5, 10$), 对贵州两个分区的降水突变进行检验, 结果见表 3, I 区降水突变年份可能出现在 1990s 初期, 特别是 1991 年; II 区突变年份可能出现在 2000s 初期, 尤其是 2002 年。在置信水平 0.05 下, M-K 检验到 I 区和 II 区的突变年份分别

是 1971 年、1997 年, II 区突变时间与其他方法检测到的结果接近, I 区相比其他方法晚 20 a, 不同方法

检验的结果不同, 说明 I 区降水突变不明显, 而 II 区降水突变发生在 2000 年前后。

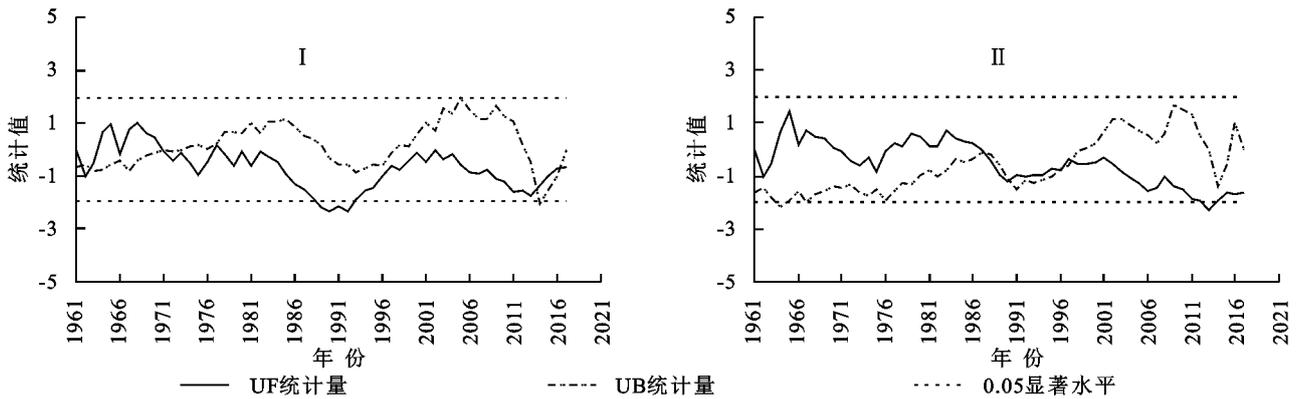


图 5 贵州省年降水 M-K 曲线

表 3 贵州年降水突变的年份分析

分区	方法	年份(N=5)	年份(N=10)
I	Cramer 法	1989*	1990*, 1992*
	滑动 t 检验	1990*, 1991*, 1993**, 1994*	1981*, 1983*, 1991**, 1992*, 1993**, 1994*, 1995*, 2001*, 2003**, 2004*, 2005*
	YAMAMOTO 法	1993*	1991*, 1993*, 2003*
II	Cramer 法	2013*	2011—2014*
	滑动 t 检验	2002**	2001—2004*
	YAMAMOTO 法	2002**	2002*

注: *, ** 分别表示通过 0.05, 0.01 置信度检验。

2.4 多年平均降水量时间序列的周期性分析

采用 Morlet 小波对贵州年降水量进行周期性分析, 结果见图 6—7。通过小波方差确定序列的主周期, 揭示不同时间尺度丰枯变化情况。小波方差可以表示降水时间序列波动能量跟随尺度的变化情况, 根据小波方差公式计算年降水时间序列的各时间尺度对应的小波方差, 由此可确定该地区降水时间序列的主周期, 小波系数实部等值线图可以反映不同时间尺度降水量的周期性变化及其在时间域的分布, 其正值和负值中心密集排布的时间尺度即为该波动序列的特征时间尺度。

图 6 给出了贵州省年降水序列 Morlet 小波变换得到的小波系数的实部等值线, 横坐标为年份, 纵坐标为周期, 图中实线表示降水处于多雨周期, 虚线降水处于少雨周期。由图 6 可知, 降水量存在明显的年际变化, 随着时间尺度的增大(1~32 a), 不同尺度振荡的小波变换部分被分离。观察发现, 贵州省年降水量在 25~28 a 尺度有明显的周期变化。贵州省降水在此时间尺度上经历了 3.5 次丰枯交替循环变化。

小波系数方差图提供了一种确定时间序列主要周期的客观分析方法, 可确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度, 所对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度。由图 7 可知, 贵州地区多年平均降水量的

Morlet 小波方差存在一个明显的峰值, 说明 1961—2017 年贵州地区降水变化存在 28 a 的主周期振荡规律, 反映了贵州地区降水在整个时间尺度内的变化特征。

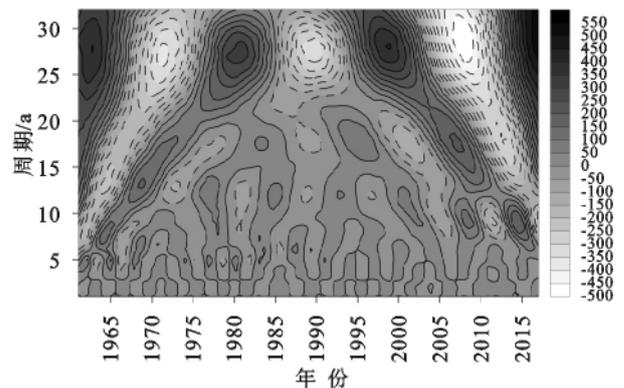


图 6 贵州省年降水 Morlet 小波系数实部等值线

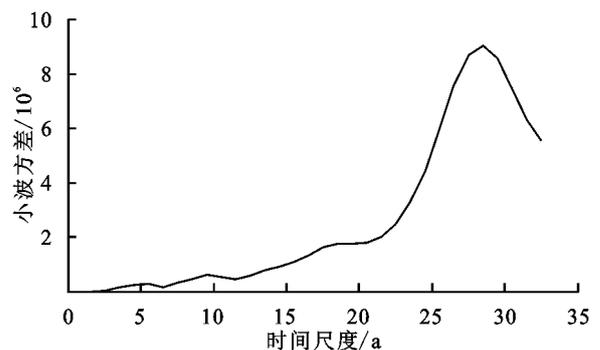


图 7 贵州省年降水 Morlet 小波系数方差

3 结论

(1) 贵州省降水量空间分布不均匀,西南和东南地区偏多,西北地区偏少。年降水量高值和低值相差达 665.66 mm。应用 EOF 方法可以很好地揭示降水场的时空分布特征,且对贵州省而言,前 2 个特征向量揭示了 2 种典型的分布场,其累积贡献率达 50.08%。

(2) 贵州地区多年平均降水量空间分布主要有 2 种类型:全局型和东西反向型,降水分布模式以全省丰(枯)一致型为主。此 2 种空间分布类型的累计方差贡献率达 50.08%,基本反映了贵州地区平均降水量空间分布的主要特征。贵州省年降水量 EOF 时间系数表明,全省降水偏少年份要稍高于降水偏多的年份。

(3) REOF 分析表明,贵州省年降水量的空间分布为 2 个区,各分区代表站年降水量统计特征分析,贵州西部地区(Ⅱ区)年降水量和变异均高于贵州东部(Ⅰ区)。对 2 个区的年降水量进行 M-K 检验,发现降水量均存在下降的趋势,Ⅱ区突变时间与其他方法检测到的结果接近,不同方法检验的Ⅰ区降水突变结果不一致,说明突变不明显。

(4) 贵州地区降水多年变化的阶段性特征十分明显,在整个研究时域内经历了丰枯交替 3.5 个阶段,年降水量具有 28 a 的主周期变化。

本文简要分析了贵州省各区域降水变化的敏感程度和降水的周期转变,为贵州省防汛救灾管理和决策提供科学依据。但还应该对敏感度做进一步定量化的研究工作,同时还要更深入研究各个区域降水变化对生态环境、经济等方面造成的影响,将区域的环境变化研究同区域的可持续发展相结合。

参考文献:

- [1] 王英,曹明奎,陶波,等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究,2006,25(6):1031-1040.
- [2] 施能,陈家其.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.
- [3] 张波,谷晓平,古书鸿.贵州省最大日降雨量时空分布及重现期估算[J].水土保持研究,2017,24(1):167-172.
- [4] 张殿发,王世杰,周德全,等.土地荒漠化的生态地质环境背景及其驱动机制:以贵州省喀斯特山区为例[J].农村生态环境,2002,18(1):6-10.
- [5] 万国江,白占国.论碳酸盐岩侵蚀与环境变化:以黔中地区为例[J].第四纪研究,1998,18(3):279-279.
- [6] 张永雷,许玉凤,宋红庆.1981—2010 年贵州省气温与降水时空变化[J].现代农业科技,2017(23):190-193,196.
- [7] 伍红雨,王谦.近 49 年贵州降水异常的气候特征分析[J].高原气象,2003,22(1):65-70.
- [8] 赵志龙,罗娅,余军林,等.贵州高原 1960—2016 年降水变化特征及重心转移分析[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1432-1442.
- [9] 李永华,徐海明,刘德.2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J].气象学报,2009,67(1):122-132.
- [10] 黄荣辉,刘永,王林,等.2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].大气科学,2012,36(3):443-457.
- [11] Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1901,2(11):559-572.
- [12] 丁裕国.EOF 在大气科学研究中的新进展[J].气象科技,1993(3):10-19.
- [13] Sarkar S, Kafatos M. Interannual variability of vegetation over the Indian Sub-Continent and its relation to the different meteorological parameters [J]. Remote Sensing of Environment, 2004,90(2):268-280.
- [14] Hannachi A, Jolliffe I T, Stephenson D B. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review [J]. International Journal of Climatology, 2007,27(9):1119-1152.
- [15] Obled C, Creutin J D. Some developments in the use of empirical orthogonal functions for mapping meteorological fields [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1986,25(9):1189-1204.
- [16] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [17] 胡增臻,石伟.子波变换在大气科学中的应用研究[J].大气科学,1997,21(1):59-73.
- [18] Richman M B. Rotation of principal components[J]. Journal of Climatology, 1986,6(3):293-335.
- [19] 罗宁,许炳南,文继芬,等.贵州大气降水的时空分布规律研究[J].贵州气象,2006,30(4):3-7.
- [20] 甘文强,李刚,万雪丽.近 57 a 5—9 月贵州极端强降水变化特征[J].干旱气象,2018,36(4):617-623.
- [21] 卢瑞荆,樊兰峰.1961—2008 年贵州暴雨时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,2010,4(3):17-21.
- [22] 韩会庆,张娇艳,苏志华,等.2011—2050 年贵州省极端气候指数时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(2):341-346.
- [23] 王芬,曹杰,李腹广,等.贵州不同等级降水日数气候特征及其与降水量的关系[J].高原气象,2015,34(1):145-154.
- [24] 王芬,张娇艳,谷晓平,等.西太平洋副热带高压不同特征指数与贵州夏季降水的关系[J].暴雨灾害,2017,36(4):348-356.