

贵州省 1960—2019 年不同地貌类型降水时空特征

刘 炜, 焦树林, 李银久, 莫跃爽, 张 洁, 邵雨潇, 冯椰林

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘 要:为了解省域及不同地貌区降水的时空变化,以期为植被恢复和水旱灾害防治提供参考依据,基于 1960—2019 年贵州省逐日降水资料,结合气候倾向率和累积距平法分析不同地貌类型区降水变化的时空特点,利用小波分析分析及 M-K 法检验其周期性和突变性。结果表明:(1) 年降水量以 $-9.25 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$) 速率呈不显著减少趋势;春秋季呈不显著减少趋势,夏冬季呈不显著增加趋势。(2) 六大地貌类型区逐年降水量均呈减少趋势;其中,峰丛洼地型地貌区以溶蚀作用为主,降水最多($1\ 237.9 \text{ mm}/\text{a}$)且以 $-19.30 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.01$) 的下降速率显著下降;溶蚀—侵蚀作用强烈的喀斯特低中山型、峰林谷地型地貌区、侵蚀—剥蚀为主的混合型地貌区年降水量下降趋势均不显著。(3) 四季降水量均存在明显的周期振荡;其中,第一主周期为 28 a;第二主周期除夏季为 15 a 外,其余季节均为 18 a。此外,春秋季降水发生突变的时间为 1984 年,夏季为 2014 年,冬季降水没有发生突变;因此,贵州省近 60 年降水量的下降主要是由于春秋季降水减少引起,且在峰丛洼地型地貌区降水量减少最为显著。未来应注重洼地型地貌区植被恢复工作,以达到涵养水源,减少水土流失,调节气候的目的。

关键词:降水变化;地貌类型;M-K 检验;小波分析;贵州省

中图分类号:P426.61⁺4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0159-13

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Precipitation of Different Geomorphic Types in Guizhou Province from 1960 to 2019

LIU Wei, JIAO Shulin, LI Yinjiu, MO Yueshuang, ZHANG Jie, SHAO Yuxiao, FENG Yelin

(College of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to understand the temporal and spatial changes of precipitation in the province and different geomorphic areas, and to provide reference for vegetation restoration and flood and drought disaster prevention and control, based on the daily precipitation data of Guizhou Province from 1960 to 2019, Combined with climate tendency rate and cumulative anomaly method, the temporal and spatial characteristics of precipitation change in different geomorphic types were analyzed, and the periodicity and mutation were tested by wavelet analysis and M-K method. The results show that: (1) the annual precipitation decreases at the rate of $-9.25 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$); There was no significant decrease in spring and autumn, and no significant increase in summer and winter. (2) the annual precipitation in the six geomorphic areas showed a decreasing trend; Among them, the peak cluster depression type geomorphic area was dominated by dissolution, with the most precipitation ($1\ 237.9 \text{ mm}/\text{a}$) and a significant decline rate of $-19.30 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.01$); The annual precipitation in Karst low and middle mountain type, peak forest valley type and erosion denudation mixed type geomorphic areas with strong dissolution and erosion has no significant downward trend. (3) the precipitation in four seasons has obvious periodic oscillation; The first main period was 28 years; The second main period was 18 years except 15 years in summer. In addition, the time of abrupt change of precipitation in spring and autumn was 1984, and that in summer was 2014, but there was no abrupt change of precipitation in winter; Therefore, the decrease of precipitation in recent 60 years in Guizhou

收稿日期:2020-09-21

修回日期:2020-10-11

资助项目:贵州省国内一流学科建设项目“贵州师范大学地理学”(黔教科研发[2017]85号);黔科合基础[2020]1Y252;贵州省水利厅科技专项经费项目(KT201602)资助

第一作者:刘炜(1995—),女(穿青人),贵州水城人,硕士研究生,研究方向为岩溶水资源与GIS。E-mail:2735346180@qq.com

通信作者:焦树林(1969—),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师,主要从事流域地表过程与环境变化方向工作。E-mail:jiaoshulin@gznu.edu.cn

Province was mainly caused by the decrease of precipitation in spring and autumn, and the decrease was most significant in the peak cluster depression geomorphic area. In the future, we should pay attention to the vegetation restoration in the low-lying landform area, so as to conserve water resources, reduce soil erosion and adjust the climate.

Keywords: precipitation change; geomorphic type; M-K inspection; wavelet analysis; Guizhou Province

全球变暖大背景下,全球及各地降水变化是气候变化里最突出的方面,降水的空间分布和时间变异性往往受气候变化影响而发生改变,进而改变水分循环和水资源时空分布格局。目前,在全球区域范围内对降水的研究主要集中在 3 个方面^[1]: (1) 全球及各地降水量变化及地区性差异。目前所持观点主要是 Sun 等^[2]提出的“全球陆地上干旱的地区降水越来越多,湿润的地区降水越来越来少”的“干变湿,湿变干”的观点;同时 Donat 等^[3]通过观测数据及模型模拟研究结果表明在 21 世纪,若温室气体在未来持续排放,这个趋势将会延续。(2) 全球季风区与非季风区降水变化对比;Wang 等^[4]研究表明 1970s 末以来,全球季风区降水的增加通过季风—干旱共存机制间接导致相邻干旱区降水的减少,干旱区的面积将不断扩张。(3) 极端降水变化;极端降水事件是指降水量或者降水强度的状态严重偏离其平均态,发生的概率通常小于 5% 或者 10%,在统计学意义上属于不易发生的事件。至今为止,关于极端降水的研究主要集中在降水的量、频率和强度 3 个方面。

西南地区位于我国青藏高原以东的川、渝、黔、滇境内,该地分布着众多河流,受季风环流和复杂地理环境的影响,局部强降水发生频繁,是中国降水局部区域差异最大、变化最复杂的地方之一^[5]。近年来,西南地区的降水呈减小趋势,从长期降水趋势看增加了喀斯特地区干旱事件的概率。朱孟等^[6]基于不同的地貌分区探讨了贵州高原降水的空间异质性特征,结果表明贵州省降水总体上呈下降态势;其中非喀斯特地区降水呈微弱的上升趋势,其他喀斯特地区呈下降趋势。程东亚等^[7]研究了地形因素对贵州乌江流域气温与降水的影响,结果表明迎风坡降水较多,通过 GWR 模拟空间影响正负均有,流域上游负影响,中游正影响。李勇等^[8]利用多种方法研究贵州近 56 a 降水空间分布、趋势、突变性及周期性,结果表明将贵州降水场分为东西部两个区域,发现均存在降水突变,降水存在显著的 28 a 周期变化。易志学^[9]以贵州雷山为例,研究了半个世纪以来气温及降水变化与喀斯特地貌溶蚀性的关系,结果表明,逐年降水及平均气温的升高引起了喀斯特地貌溶蚀性潜能的升高。

贵州近 60 a 来降水总体呈减少趋势^[10],但关于特有地貌类型降水分异规律方面的分析较少,分析贵

州省不同地貌区的降水变化,了解不同区域降水变化趋势,以认识贵州省的气候特征、把握气候变化,为喀斯特地区植被恢复、水资源的开发利用等提供参考。

1 研究区概况

贵州省简称黔或贵,地处中国西南内陆地区腹地,东经 103°36′—109°35′,北纬 24°37′—29°13′(图 1),处于云贵高原向东部低山丘陵过渡的斜坡地带,东连湖南,南邻广西,西接云南,北濒四川和重庆;国土面积 17.62 km²,境内地势西高东低,平均海拔在 1 100 m 左右。贵州省是一个喀斯特地貌极为发育的省份,喀斯特地貌类型多样,有高原、山地、丘陵、盆地 4 种地貌类型,缺少平原地貌,地表具有独特的地貌类型、地下具有特殊的地质结构,形成了地表与地下双重储水空间。气候类型属于亚热带湿润季风气候,温暖湿润,因云层常年较多,所以日照少,阴天多,雨季明显,多年平均降雨量在 1 100~1 300 mm,最大降水量接近 1 600 mm,降雨量较为充沛,但时空分布不均^[11]。

2 数据源与方法

2.1 数据来源

降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的 1960—2020 年日值数据集,经过气象站的筛选、异常值处理、采用多元线性内插法并根据附近年份的数据对缺测数据进行插补。最后,通过对降水逐日数据求和来获得月、季、年降水量。根据气象统计法,一般以 1 月份为最冷月,因此,3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—翌年 2 月为冬季;年平均值为当年 12 个月值的算术平均。以贵州省 1 : 100 万综合地貌图为数据源,经过屏幕跟踪矢量化,提取地貌类型并对矢量图进行校正等前期处理,获取地貌类型数据并结合前人研究^[12-15],对地貌类型(图 1A)进行分类并合并成 6 类(图 1B)。

2.2 研究方法

文中主要分析了近 60 a 降水的时空变化特征、周期性及突变性。结合降水倾向率和样条插值法中的张力样条函数^[16-20]对不同时间尺度的降水倾向率进行插值获得空间变化分布特征;结合累积距平法^[21]和滑动平均法及降水距平百分率分析降水的年内变化、年际变化和年代际变化;采用 Morlet 小波分析^[22-23]分析降水的周期

性,并结合 Mann-Kendall 检验法^[24-27]分析降水的突发性。其中,降水距平百分率是指某研究时段的年均降水量与多年平均降水量之差占多年平均降水量之比,用 P_a 表示,是表征某时段降水量较多年平均值偏多或偏少的指标,在气象领域多用来评估因降水异常而引起的

月、季度和年发生的干旱情况。其表达式为:

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \quad (1)$$

式中: P 为某一时段降水量(mm); \bar{P} 为多年平均降水量(mm)。

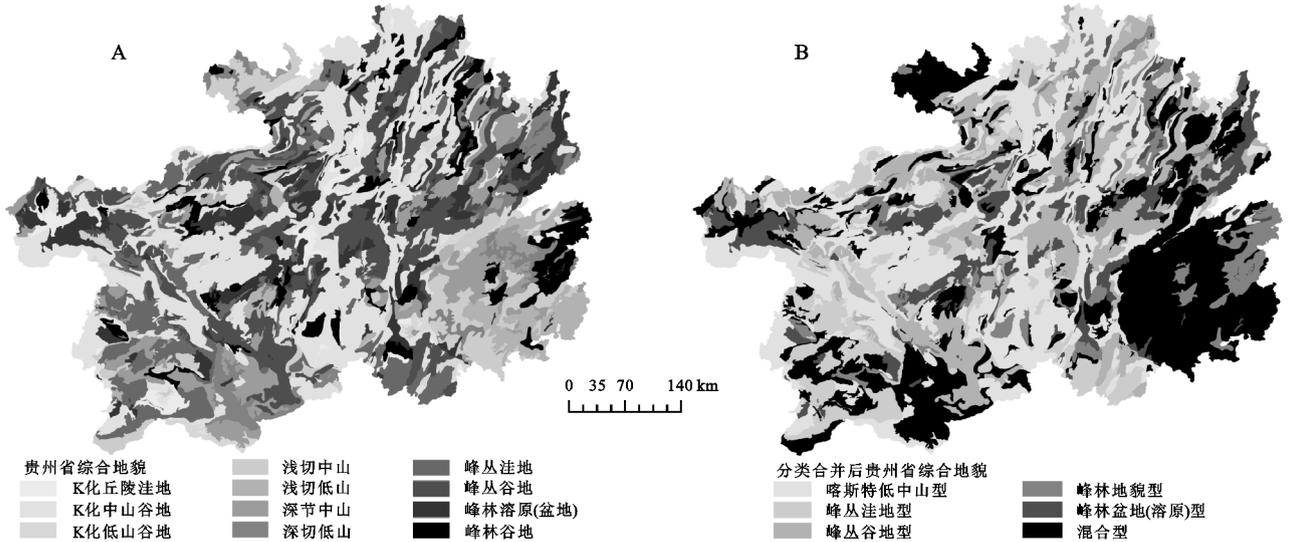


图 1 研究区地貌类型分布概况

在《气象干旱等级》规定的基础上,借鉴前人^[28-31]在喀斯特地区的干旱等级分级的基础,将计算得到的降水距平百分率(P_a)以干旱等级标准中的年尺度划分干旱等级(表 1)。

表 1 降水距平百分率干旱等级划分标准

干旱类型	年尺度	洪涝类型	年尺度
无旱	>-15	无涝	<15
轻旱	-30~-15	轻涝	15-20
中旱	-40~-30	中涝	20-45
重旱	≤-40	重涝	≥45

3 结果与分析

3.1 年内变化特征

结合张力样条函数法对省 31 个气象站点降水倾向率进行插值,在年降水量变化趋势空间分布(图 2A)中可以看出,1960—2019 年,除仁怀、余庆、都匀、黎平、平柱、惠水和榕江站点外,其余气象台站降水的气候倾向率均为负值,说明研究区整个区域存在普遍降水减少的趋势。降水量呈现增加趋势最快的站点主要有仁怀、平柱和榕江,其中平柱降水倾向率最大(30.84 mm/10 a),其次是榕江(20.01 mm/10 a);降水呈减小趋势最快的站点主要有晋安、盘县、安顺和兴仁,其中盘县站点减少最多(-45.72 mm/10 a),其次是晋安(-42.70 mm/10 a)和安顺(-36.45 mm/10 a);降水变化趋势不显著的站点主要是罗甸站点(-0.05 mm/10 a)。从省降水倾向率的空间分布可以看出,从西到东,年降水量逐渐增加;其中六盘水、

安顺及黔西南北部为降水减少的集中区,黔东南为降水增加的集中区;省南部和北部降水呈减少趋势,中部黔南为降水较多的区域。

对省近 60 a 的年内降水量的气候倾向率进行统计(图 2B),结果表明省区域范围内降水量呈增加趋势的月份主要有 1 月、3 月、6 月,趋势率分别为 4.76 mm/10 a,3.59 mm/10 a 和 0.82 mm/10 a,其余月份均呈减小趋势,减少最快的主要是 4 月(-1.66 mm/10 a)和 11 月(-1.30 mm/10 a)。可见,省区域内降水减少主要是由于各月降水减少引起。

3.2 年际变化特征

图 3A 表明,1960—2019 年省多年降水量波动幅度很大,但整体变化趋势不显著,趋势率仅为 -9.25 mm/10 a($p > 0.1$)。近 60 a 来,最小年降水量出现在 2011 年,其年降水量比多年降水量少 349 mm;1966 年、1989 年、2009 年的降水量也较少。年降水量最大值出现在 1967 年,比多年降水量多 211 mm;1976 年、1977 年、2015 年降水也相对较多。期间出现 3 个较明显的波峰,即 1969 年(1 290 mm),1978 年(1 300 mm)和 1995 年(1 282 mm);出现 2 个明显的波谷,1987 年(1 081 mm)和 2011 年(1 027 mm)。

对全省 1960—2019 年的降水距平百分率进行统计(图 3B),结果表明,整体上降水量的年际变化分布并不均匀。降水负距平百分率显著偏大的年份有 1966 年、1981 年、1989 年、2005 年、2009 年、2011 年、2013 年,其中 2011 年降水负距平百分率最大(-29%),属于轻度干旱;此外,1966 年降水距平百分率为 -17%,轻旱,而

1967年降水距平百分率为18%，轻涝，可见1960s降水变化幅度很大，此间1966年发生了轻度干旱，即1966—1967年发生了旱涝交替的自然灾害现象。1984—1990年、2009—2013年出现连续降水偏少的现象，而1967—

1971年、2014—2019年出现连续降水偏多的现象；结合表1，发现近60a来，贵州共发生7次轻度干旱事件，分别为1966年、1981年、1989年、2005年、2009年、2011年、2013年；两次洪涝事件1967年和1977年。

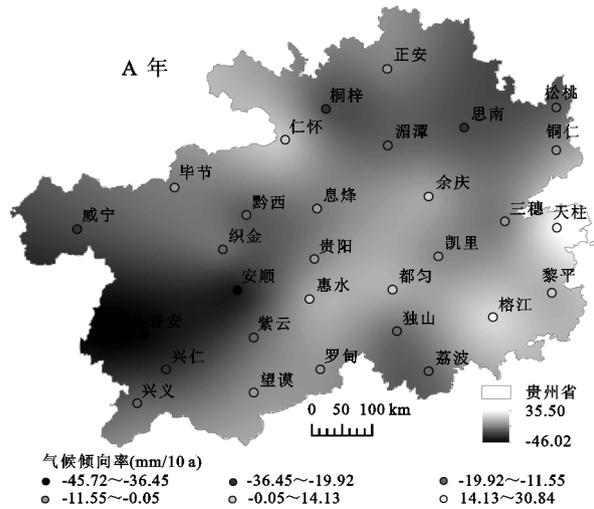


图2 1960—2019年降水倾向率时空分布

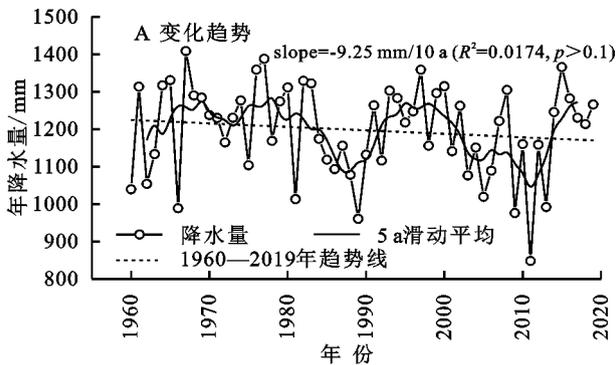


图3 1960—2019年贵州省降水时间变化

3.3 季节时间变化

图4为1960—2019年贵州省季节降水量距平序列变化。总体上省4个季节的逐年降水量在近60a来的变化趋势均不显著，其中春季和秋季降水量呈微弱减少趋势，下降速率为 $-5.41 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$)和 $-6.55 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$)；夏季和冬季降水量呈微弱增加的趋势，上升速率分别为 $1.60 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$)和 $2.07 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$)。此外，春季降水量在2011年达到最低，其数值比近60a来的平均值低129.12 mm；最高值出现在2016年，比多年均值高91.08 mm，可见近60a来春季降水量的波动很大，振幅约为220 mm(图4A)。夏季降水量在1972年达到最低(比平均值低282.88 mm)；而最高值出现在1979年，比平均值高210.47 mm；近60a来夏季降水量振幅约为493 mm。秋季降水量振幅约为296 mm(图4C)；冬季降水量震荡上升(趋势不显著)，极小值降水量为34.94 mm(2009年)，极大值降水量为131.31 mm(2019年)(图4D)。

3.4 季节空间变化

对研究区31个气象站点四季降水量气候倾向率

进行张力样条函数插值，并将站点降水倾向率以不同等级颜色表现出来(图5)。春季降水倾向率中，除仁怀、余庆、都匀、平柱和榕江外，其余站点降水倾向率均为负值，说明1960—2019年近60a来，研究区春季存在普遍的降水减少趋势。其中从图5A中可以看出，负高值变化率以安顺站点($-18.85 \text{ mm}/10 \text{ a}$)为中心，向外降水量呈增加趋势；其次是以松桃站点($-15.29 \text{ mm}/10 \text{ a}$)为负高值中心，向外降水量呈增加趋势；降水量增加趋势最大的站点是榕江($7.00 \text{ mm}/10 \text{ a}$)，其次是余庆($6.18 \text{ mm}/10 \text{ a}$)，表明这两个区域降水增加多。春季降水量形成西南部及东北部降水较少，而东南部降水较丰富的空间分布格局。夏季降水趋势率空间分异较小，有11个气象站点降水趋势率为负值，其余站点均为正值，说明全省范围内，夏季降水整体以增加的趋势为主。其中，负高值以盘县站点为中心($-18.90 \text{ mm}/10 \text{ a}$)，正高值以平柱站点为中心($26.14 \text{ mm}/10 \text{ a}$)。从图5B中可以看出夏季西南部降水呈减少趋势，东部降水呈现增加趋势，地区降水趋势差异不大。

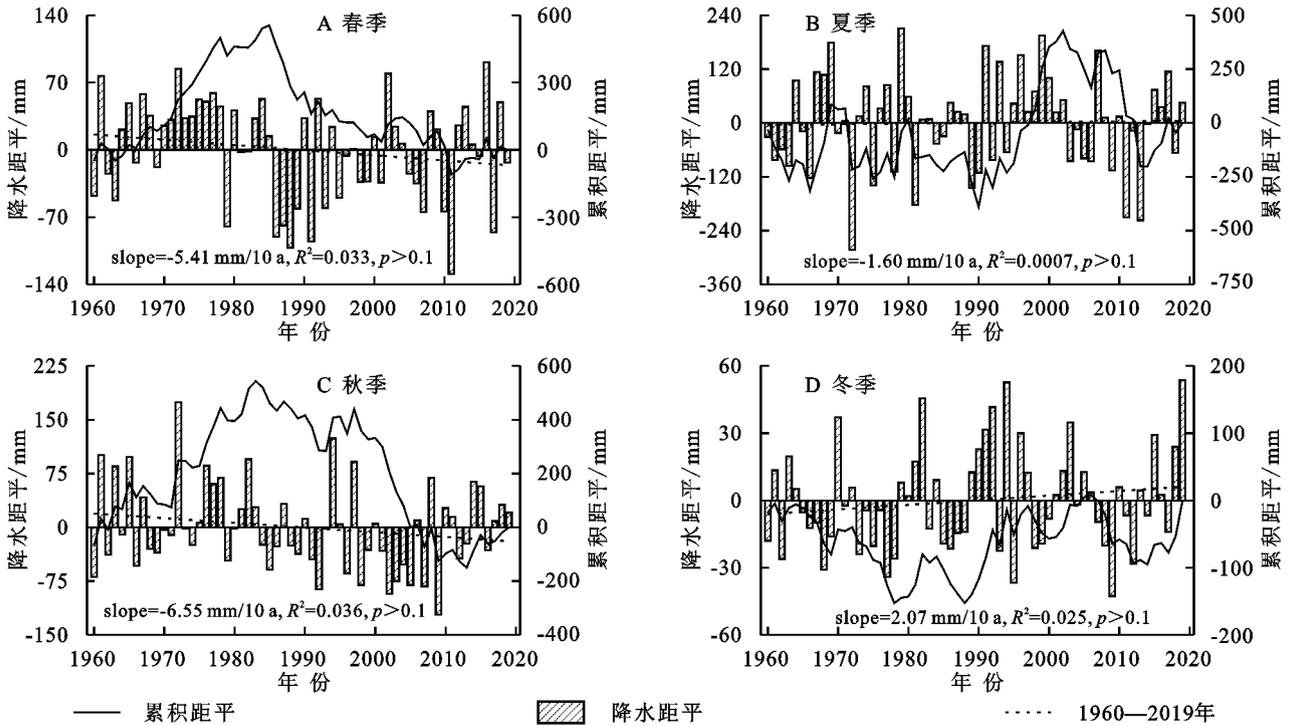


图 4 1960—2019 年贵州省季节降水量距平

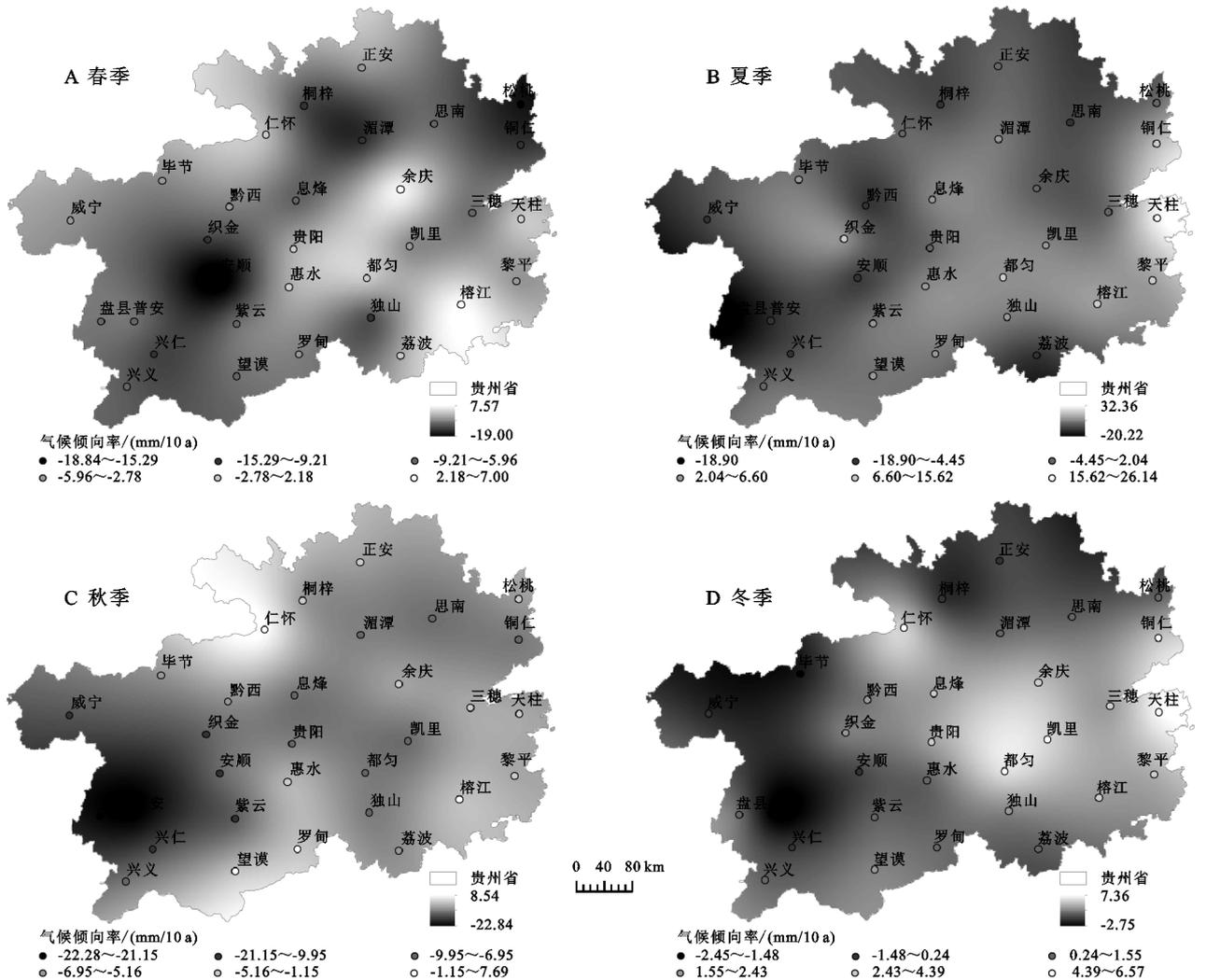


图 5 1960—2019 年贵州省降水倾向率空间变化

秋季气象站点除仁怀、望漠、罗甸和榕江外,其余站点降水倾向率均为负值(图 5C);其中呈增加趋势的站点倾向率最大的为仁怀站点(7.69 mm/10 a),形成以仁怀为中心向外降水逐渐减少的空间分布,其余站点均在 1.00 mm/10 a 以下;呈下降趋势的站点中趋势最大的站点是晋安站点(-22.28 mm/10 a),其次是盘县(-21.15 mm/10 a);从整体分布格局上看,秋季西南部降水少,其余地区较多。冬季除威宁、晋安、桐梓、毕节和兴仁外,其余站点均为正值,说明研究区冬季降水存在普遍的增加趋势,图 5D 中可以看出低值以晋安站点(-2.45 mm/10 a)为中心,向外降水呈逐渐增加的趋势;较为特殊的是冬季省区域范围内还出现以都匀(5.79 mm/10 a)和平柱(6.57 mm/10 a)为高值的降水中心点,向外呈环状延伸递减。

3.5 不同地貌区年际降水变化

喀斯特地貌是由于地下地表水对可溶性岩石进行侵蚀和堆积而成,由于地下地表水作用的时限长短及程度不同,不同时期形成不同的地貌类型;对 1960—2019 年全省区域逐年降水分别进行张力样条函数空间插值,获得面状年降水空间分布。借鉴前人基于不同地貌类型区^[32]对降水变化的影响分析,对贵州省不同地貌成因类型及构成进行统计分析(表 2),并对不同地貌类型区降水量进行统计以了解降水变化趋势(表 3)。从地貌类型特征分区统计结果可知,喀斯特低中山型区域成因以溶蚀—侵蚀类型为主,占比达 81.0%;峰丛谷地型区域以溶蚀为主型居多,占比 81.3%;峰林盆地(溶原)型区域以溶蚀为主型居多,占比 89.0%;峰丛洼地型以溶蚀为主型居多,占比 64.9%;峰林谷地型以溶蚀—侵蚀类型为主,占比 53.6%;混合型地貌区以侵蚀—剥蚀类型为主,占比 64.7%。

从表 3 可知,近 60 a,六大地貌类型区年降水均呈下降趋势。参照中国根据成因、形态组合及发育程度来划分中国岩溶七大型别的依据,从地貌成因类型的角度结合所占百分比来说:(1) 溶蚀作用强烈的地区,地表岩溶形态组合以峰林地形及溶蚀洼地为主要特征;从表 2 可知,以溶蚀作用为主的地貌类型区主要有峰丛谷地型、峰林盆地(溶原)型和峰丛洼地型,从表 3 年降水量统计可以看出,3 种地貌类型中以峰丛洼地型降水最多(1 237.9 mm/a)且以-19.30 mm/10 a($p>0.01$)的下降速率显著下降,峰林盆地(溶原)型地貌区降水量比峰丛谷地型区域多约 27 mm/a。(2) 溶蚀—侵蚀作用强烈的地区,以侵蚀作用形成的地貌为主,从表 2 及表 3 可以看出研究区地貌类型主要有喀斯特低中山型及峰林谷地型;喀斯特低中山型比峰林谷地型地貌区年降水量少约 24 mm/a,且降水倾向率为-12.13 mm/10 a

($p>0.1$),但不显著。此外,降水下降趋势较慢的为峰林谷地型地貌区,下降速率仅为-2.84 mm/10 a($p>0.1$)。(3) 以侵蚀—剥蚀为主的地貌区是混合型,年降水量较多(1 178.7 mm),年降水变化以-3.25 mm/10 a 不显著下降。

表 2 贵州省不同地貌特征分区统计

地貌类型	构成类型	成因类型及占比/%
喀斯特低中山型	K 化中山谷地、K 化低山谷地	F, K ₁ , K ₂ (6.5, 12.5, 81.0)
峰丛谷地型	峰丛谷地	F, K ₁ , K ₂ (0.9, 81.3, 17.8)
峰林盆地(溶原)型	峰林盆地(溶原)	F, K ₁ , K ₂ (0.7, 89.0, 10.3)
峰丛洼地型	峰丛洼地	F, K ₁ , K ₂ (0.9, 64.9, 34.2)
峰林谷地型	峰林谷地	F, K ₁ , K ₂ (31.8, 14.5, 53.6)
混合型	深(浅)切中山、深(浅)切低山、K 化丘陵洼地	F, K ₁ , K ₂ (64.7, 3.6, 31.7)

注:字母 F, K₁, K₂ 分别表示地貌发育的侵蚀—剥蚀类型、溶蚀为主型、溶蚀—侵蚀类型。

表 3 1960—2019 年不同地貌类型年降水趋势及降水量

地貌类型	倾向率/(mm/10 a)	年降水量/(mm · a ⁻¹)
喀斯特低中山	-12.13($p>0.1$)	1167.6
峰丛谷地型	-8.49($p>0.1$)	1118.3
峰林盆地(溶原)型	-10.74($p>0.1$)	1145.0
峰丛洼地型	-19.30($p>0.01$)	1237.9
峰林谷地型	-2.84($p>0.1$)	1191.2
混合型	-3.25($p>0.1$)	1178.7

3.6 不同地貌区四季降水变化

由表 4 可知,1960—2019 年,贵州省区域四季降水在不同的地貌类型差异较大。在 6 种地貌类型中,春季降水变化趋势均为负值;其中峰丛洼地型地貌区降水量以-6.99 mm/10 a($p>0.01$)的下降速率在显著减少,其次是喀斯特低中山地貌区降水最少(-5.79 mm/10 a),但下降速率不显著。与春季相似,秋季降水在 6 个地貌类型区均呈下降趋势,且峰丛洼地地貌区下降趋势明显且最大(-9.23 mm/10 a($p>0.01$)),其次是峰林盆地(溶原)地貌类型区(-7.22 mm/10 a($p>0.1$))和喀斯特低中山(-7.00 mm/10 a($p>0.01$))区域降水呈下降趋势。夏季除峰丛洼地型地貌区降水呈下降趋势外,其余地貌类型区均呈上升趋势,其中以峰林谷地型降水上升趋势率最大(4.96 mm/10 a($p>0.1$)),但显著性均不明显。冬季时,峰丛洼地型地貌区降水也以-0.94 mm/10 a 的速率呈不显著下降趋势,降水增加地貌区中,以混合型地貌区为最大,上升趋势率为 0.93 mm/10 a($p>0.1$)。综合而言,自 1960—2019 年,全省峰丛洼地型地貌区四季降水均呈最快下降趋势,其中春季和秋季下降趋势显著,夏季和冬季下降趋势不显著。其余地貌类型区均有变化,但变化趋势不显著。

表 4 1960—2019 年不同地貌类型季节降水倾向率

mm/10 a

地貌类型	春季	夏季	秋季	冬季
喀斯特低中山	-5.79($p>0.1$)	0.13($p>0.1$)	-7.00($p>0.01$)	-0.50($p>0.1$)
峰丛谷底型	-4.37($p>0.1$)	0.55($p>0.1$)	-5.72($p>0.1$)	-0.10($p>0.1$)
峰林盆地(溶原)型	-5.73($p>0.1$)	0.94($p>0.1$)	-7.22($p>0.1$)	0.32($p>0.1$)
峰丛洼地型	-6.99($p>0.01$)	-2.92($p>0.1$)	-9.23($p>0.01$)	-0.94($p>0.1$)
峰林谷地型	-3.81($p>0.1$)	4.96($p>0.1$)	-5.25($p>0.1$)	0.54($p>0.1$)
混合型	-3.37($p>0.1$)	2.82($p>0.1$)	-4.15($p>0.1$)	0.93($p>0.1$)

从表 4 可知,春季降水在六大地貌区均呈减少趋势,除峰丛洼地减少趋势显著外,其余均不显著。从图 6 可以看出,六大地貌类型区春季降水累积距平值大致呈先上升后波动下降的变化趋势。其中,喀斯特低中山地貌区多年降水均值为 294 mm,在 1985 年达到峰值,累积距平为 575 mm,在 2011 年达到谷值,累积距平为 -107 mm。峰丛谷地型地貌区多年降水均值为 298 mm,在 1978 年达到峰值,累积距平 519 mm,在 2011 年达到谷值,累积距平为 -181 mm。峰林盆地(溶原)型地貌区,多年降水均值为

303 mm,在 1984 年达到峰值,累积距平为 572 mm,2011 年达到谷值,累积距平为 -170 mm。峰丛洼地型地貌区多年降水均值 275 mm,在 1963 年达到谷值,累积距平为 -83 mm,在 1985 年达到峰值,累积距平为 609 mm。峰林谷地型地貌区多年降水均值为 335 mm,在 1984 年达到峰值,累积距平为 486 mm,在 2011 年达到谷值,累积距平为 -144 mm。混合型地貌区多年降水均值为 320 mm,在 1985 年达到峰值,累积距平为 434 mm,在 2011 年达到谷值,累积距平为 -128 mm。

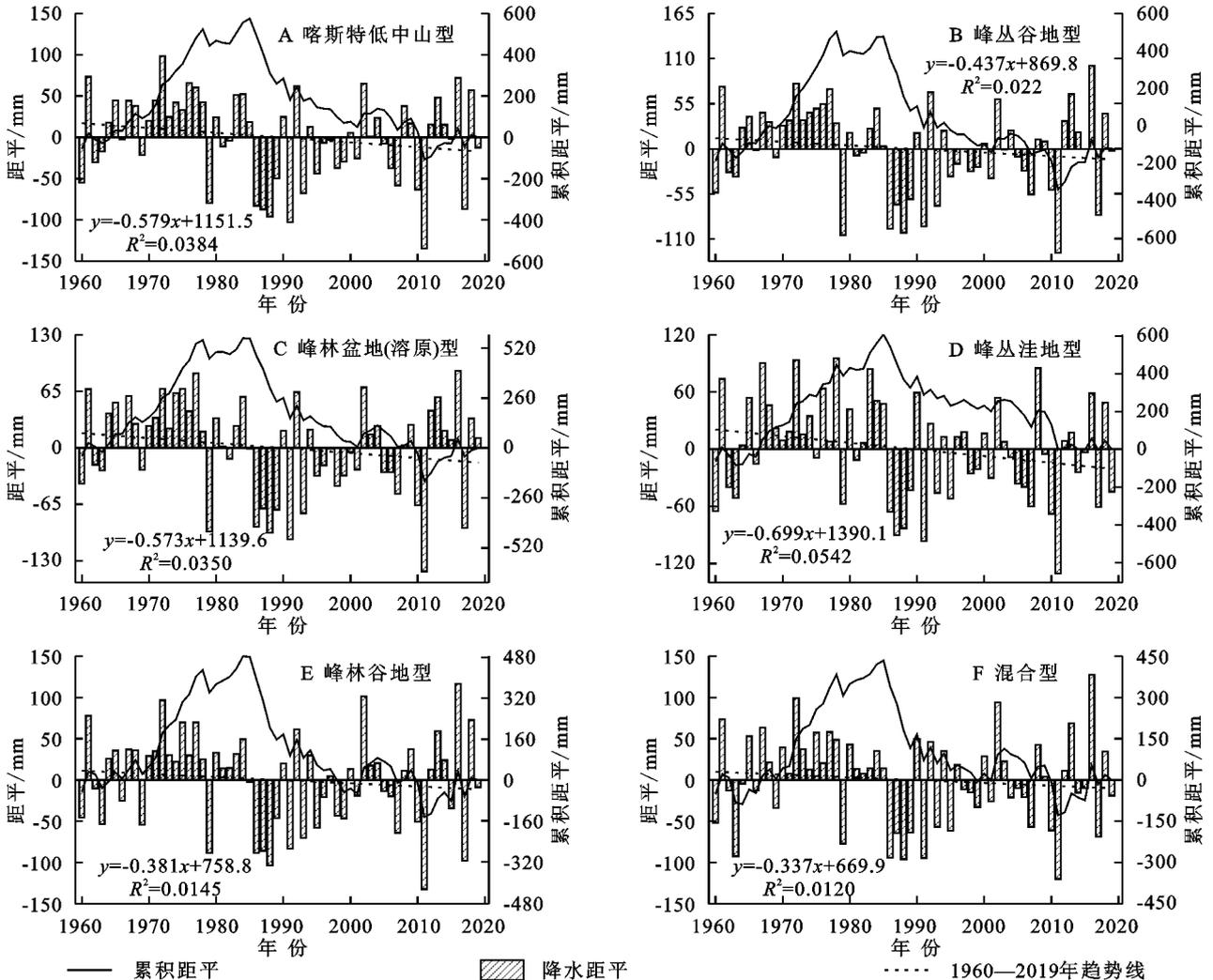


图 6 1960—2019 年贵州省不同地貌类型春季降水距平变化

从表4可知,夏季降水在六大地貌区除峰丛洼地地貌区呈显著减少趋势外,其余地貌区均呈增加趋势。从图7可以看出,六大地貌类型区夏季降水累积距平值大致呈先波动变化后上升的变化趋势。其中,喀斯特低中山地貌区多年降水均值为560 mm,在1990年达到谷值,累积距平为-307 mm,在2002年达到峰值,累积距平为507 mm。峰丛谷地型地貌区多年降水均值为519 mm,在1990年达到谷值,累积距平为-358 mm,在2002年达到峰值,累积距平为488 mm。峰林盆地(溶原)型地貌区多年降水均值为

530 mm,在1990年达到谷值,累积距平为-391 mm,在2002年达到峰值,累积距平为524 mm。峰丛洼地型地貌区多年降水均值为638 mm,在1975年达到谷值,累积距平为-272 mm,在2001年达到峰值,累积距平为617 mm。峰林谷地型地貌区多年累积降水均值为522 mm,在1990年达到谷值,累积距平为-549 mm,在2002年达到峰值,累积距平为269 mm。混合型地貌区多年降水均值为540 mm,在1990年达到谷值,累积距平为-385 mm,在2002年达到峰值,累积距平为290 mm。

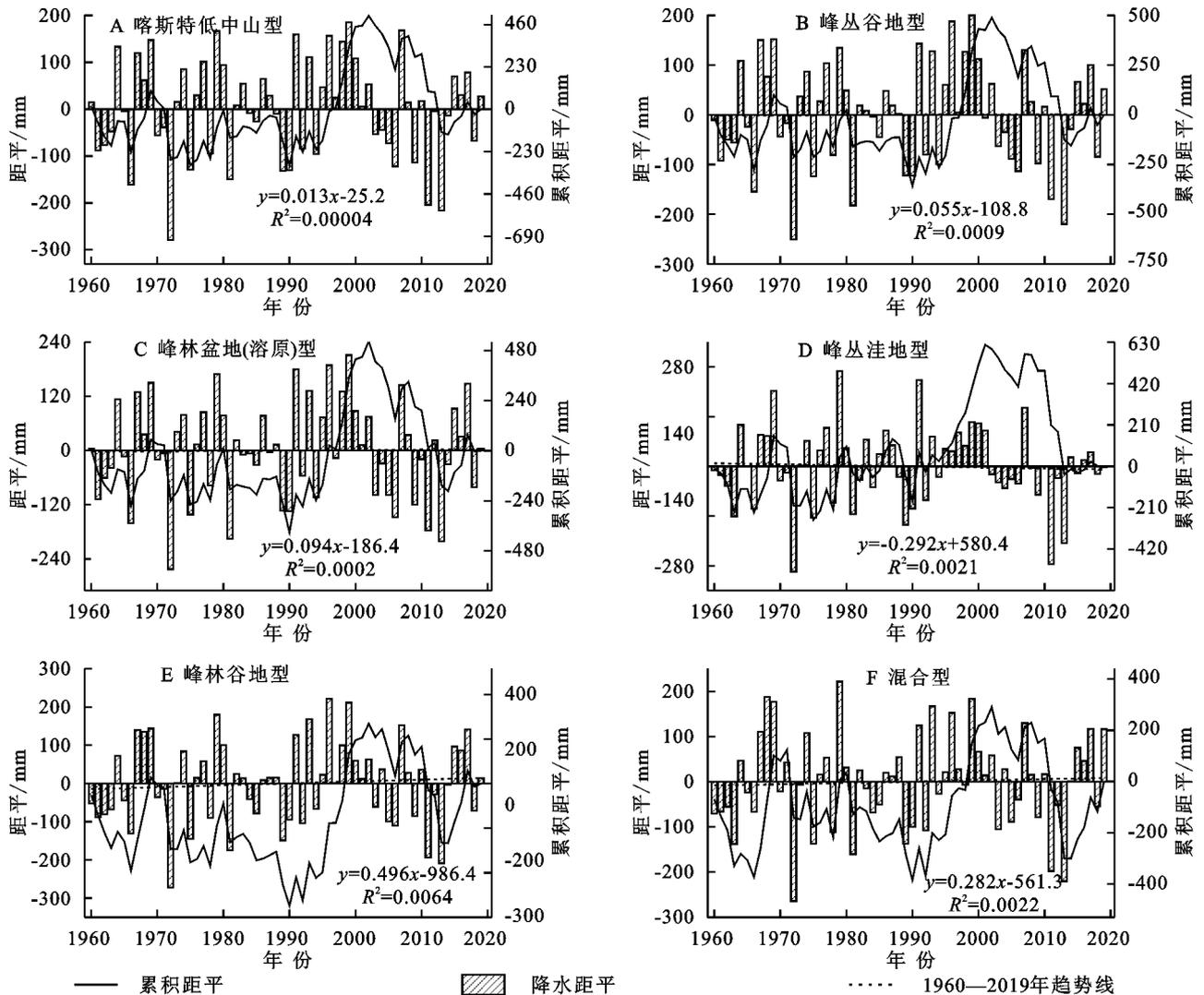


图7 1960—2019年贵州省不同地貌类型夏季降水距平变化

从表4可知,秋季降水在六大地貌区除峰丛洼地地貌区呈显著减少趋势外,其余地貌区均呈不显著减少趋势。从图8可以看出,六大地貌类型区秋季降水累积距平值大致呈先上升后下降的变化趋势。其中,喀斯特低中山型地貌区多年降水均值为248 mm,在1983年达到峰值,累积距平为551 mm,在2013年达到谷值,累积距平为-130 mm。峰丛谷地型地貌区多年降水均值为235 mm,在1983年达到峰值,累积

距平为488 mm,在2013年达到谷值,累积距平为-88 mm。峰林盆地(溶原)型地貌区多年降水均值为241 mm,在1983年达到峰值,累积距平为584 mm,在2009年达到谷值,累积距平为-76 mm。峰丛洼地型地貌区多年降水均值为258 mm,在1983年达到峰值,累积距平为670 mm,在2013年达到谷值,累积距平为-187 mm。峰林谷地型地貌区多年降水均值为245 mm,在1983年达到峰值,累积距平

为 501 mm,在 2009 年达到谷值,累积距平为 -202 mm。混合型地貌区多年降水均值为 234 mm,在

1983 年达到峰值,累积距平为 432 mm,在 2013 年达到谷值,累积距平为 -205 mm。

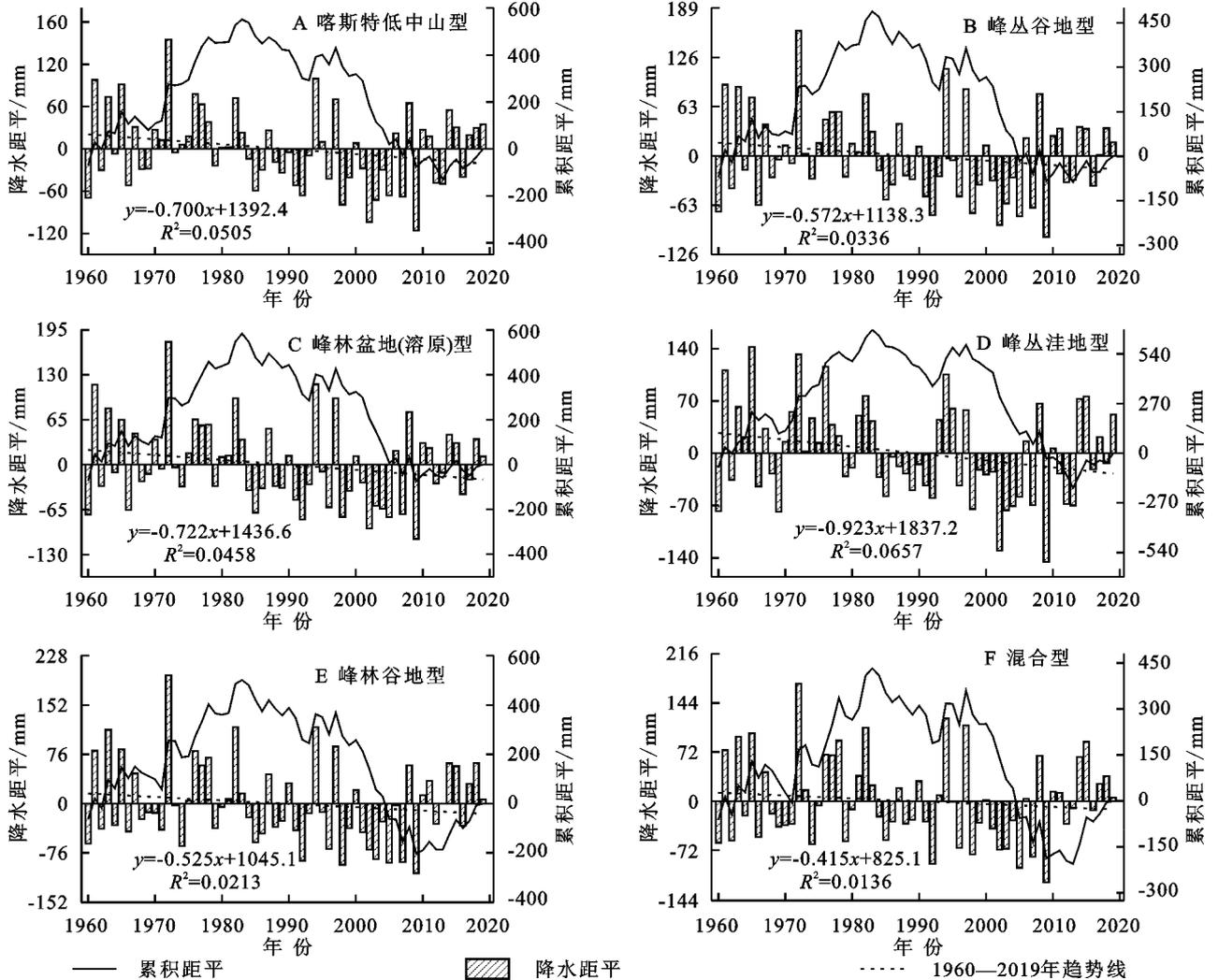


图 8 1960—2019 年贵州省不同地貌类型秋季降水距平变化

从表 4 可知,冬季降水在六大地貌区有增有减,且变化趋势均不显著。从图 9 可以看出,六大地貌类型区冬季降水累积距平值大致呈振荡变化的趋势。其中,喀斯特低中山型地貌区多年降水均值为 68 mm,在 1968 年达到谷值,累积距平为 -75 m,在 1970 年达到峰值,累积距平为 113 mm。峰丛谷地型地貌区多年降水均值为 70 mm,在 1968 年达到谷值,累积距平为 -82 mm,在 1970 年达到峰值,累积距平为 112 mm。峰林盆地(溶原)型地貌区多年降水均值为 75 mm,在 1970 年达到峰值,累积距平为 105 mm,在 2014 年达到谷值,累积距平为 -89 mm。峰丛洼地型地貌区多年降水均值为 70 mm,在 1968 年达到谷值,累积距平为 -67 mm,在 1994 年达到峰值,累积距平为 99 mm。峰林谷地型地貌区多年降水均值为 93 mm,在 1972 年达到峰值,累积距平为 79 mm,在 2014 年达到谷值,累积距平为 101 mm。混合型地貌区多年降水均值为

88 mm,在 1988 年达到谷值,累积距平为 -110 mm,在 1997 年达到峰值,累积距平为 58 mm。

3.7 季节降水周期性

从 1960—2019 年贵州省四季降水周期图可看出近 60 a 四季均有多个正负相位交错的振荡中心,说明季节降水量存在着明显的周期振荡。其中,春季降水量存在 5 个主振荡周期,分别是 28 a,18 a,13 a,9 a 和 5 a。其中,28 a 左右的振荡周期最强(图 10),是春季降水的第一主周期,整个研究时段内振荡最为明显且一直存在,经历了“偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”7 个交替变化;其次,13 a 左右的振荡周期仅在 20 世纪 80—90 年代较为明显,为春季降水的第三周期;9 a 左右的降水周期主要出现在 21 世纪,其余周期变化均不明显。

夏季降水主要存在 28 a,15 a,7 a,4 a 共 4 个周期(图 11)。其中,观察小波方差发现 4 个较明显的

峰值,分别是 28 a 对应的第 1 峰值,15 a 对应的第 2 峰值;其中 28 a 为最强振荡主周期,且经历了“偏

多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”7 个交替变化。

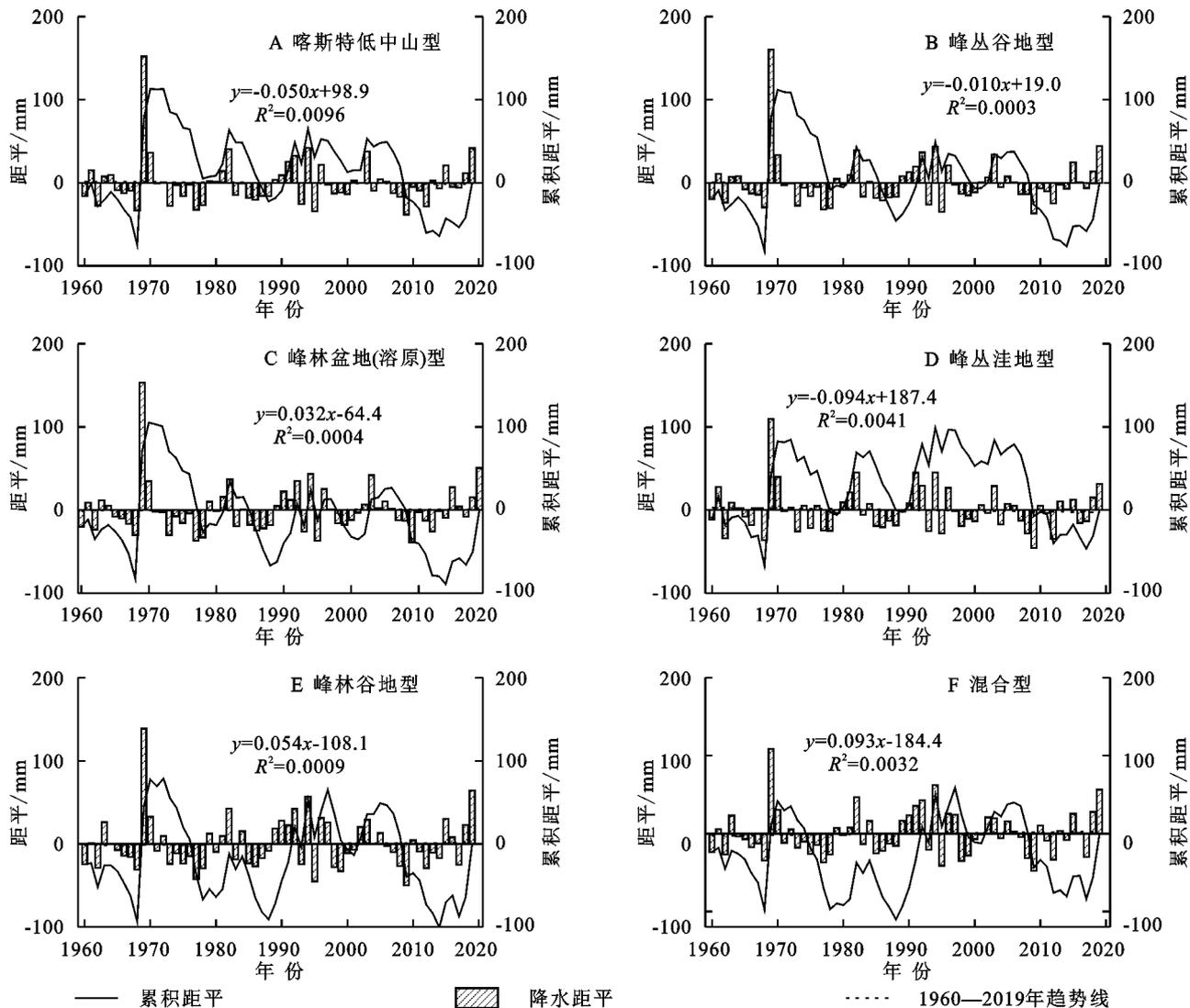


图 9 1960—2019 年贵州省不同地貌类型冬季降水距平变化

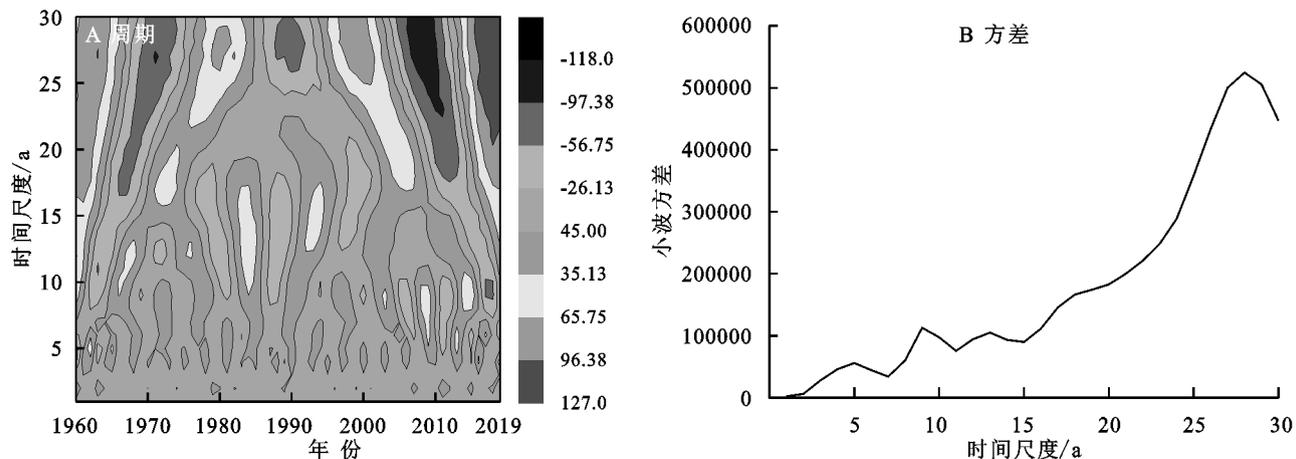


图 10 1960—2019 年贵州省春季降水量变化

1960—2019 年贵州省秋季降水主要存在 28 a, 18 a, 9 a, 5 a 和 3 a 共 5 个周期(图 12)。其中 28 a 的振荡周期最强,是秋季降水的第一主周期,整个研究

时段内振荡最为明显,且经历了“偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”7 个交替变化。

1960—2019 年贵州省冬季降水主要存在 28 a,

18 a, 8 a, 3 a 共 4 个周期(图 13)。其中,以 18 a 的周期振荡最强,为第一主周期,经历了“偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”11 个交替变化。

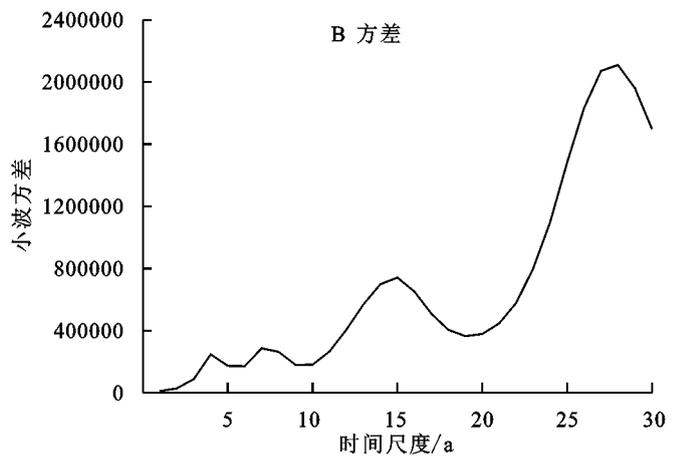
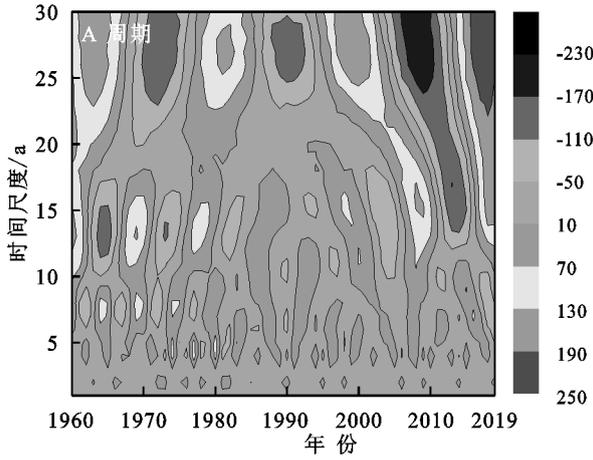


图 11 1960—2019 年贵州省夏季降水量变化

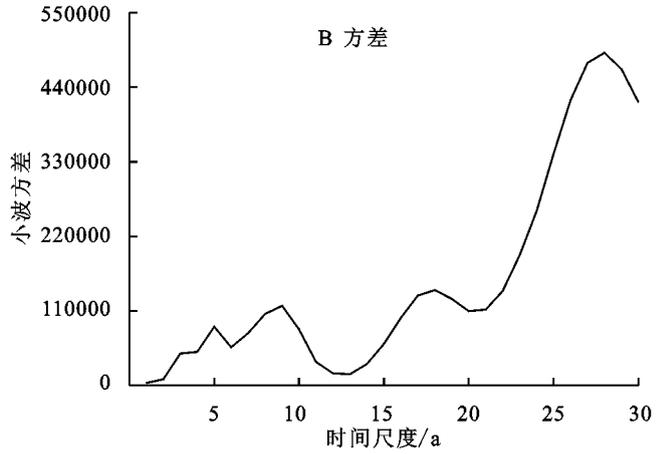
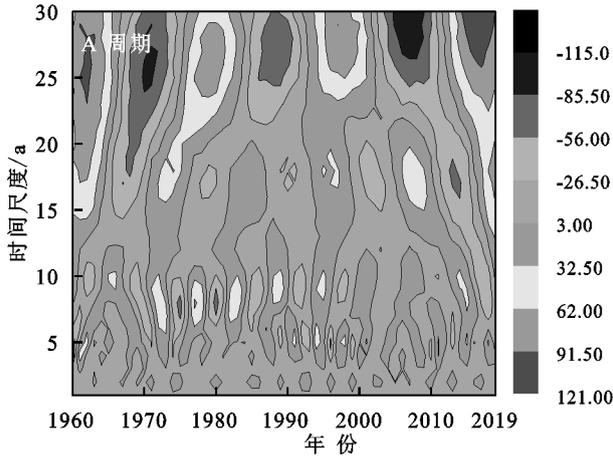


图 12 1960—2019 年贵州省秋季降水量变化

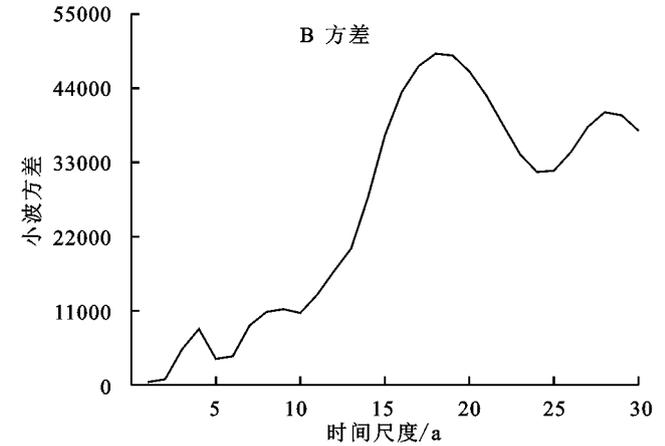
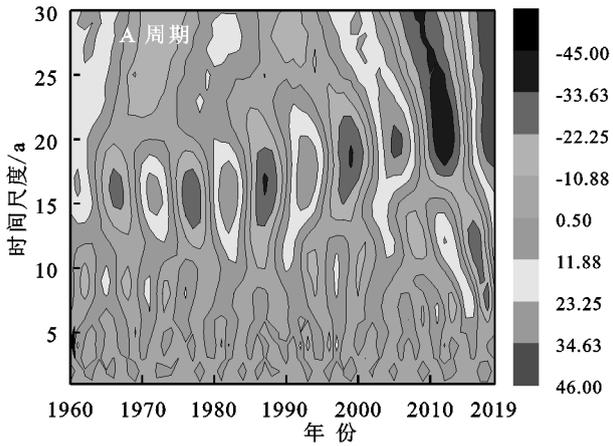


图 13 1960—2019 年贵州省冬季降水量变化

3.8 季节降水突变性

对 1960—2019 年贵州省近 60 a 四季降水时间序列进行 Mann-Kendall 非参数突变检验^[33](图 14); 其中春季降水量的检验统计值 UF_k 与 UB_k 曲线在临界值 ± 1.96 之间于 1984 年附近有一个交点(图 14A); 结合图 4A 可以看出,1984 年附近累积距平达到峰值,且在 1984 年两侧累积距平曲线变化趋势由

多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多—偏少—偏多”11 个交替变化。

上升变为下降,由此可得,春季降水量的时间突变点是 1984 年。夏季降水量在临界值 ± 1.96 两侧交点分别在 1963 年、1966 年、2004 年、2006 年、2007 年、2014 年、2017 年和 2018 年附近; 结合图 4B 知在 2014 年两侧,降水变化趋势由下降变为上升,因此夏季降水量变化趋势时间突变点为 2014 年。秋季降水量的检验统计量 UF_k 与 UB_k 曲线交于 1984 年附

近;结合图 2C 知,1984 年之前降水以上升为主,1984 年之后降水量以下降为主,所以秋季降水量的突变时间为 1984 年。冬季降水量在临界值 ± 1.96 之间交点分别在 1980 年、1982 年、1983 年、1984 年、1987 年、

1997 年、1998 年、2005 年、2014 年、2015 年和 2018 年附近;结合图 4D 知,冬季累积降水距平值波动较大没有显著的增减趋势变化点,因此冬季降水量变化趋势没有发生突变。

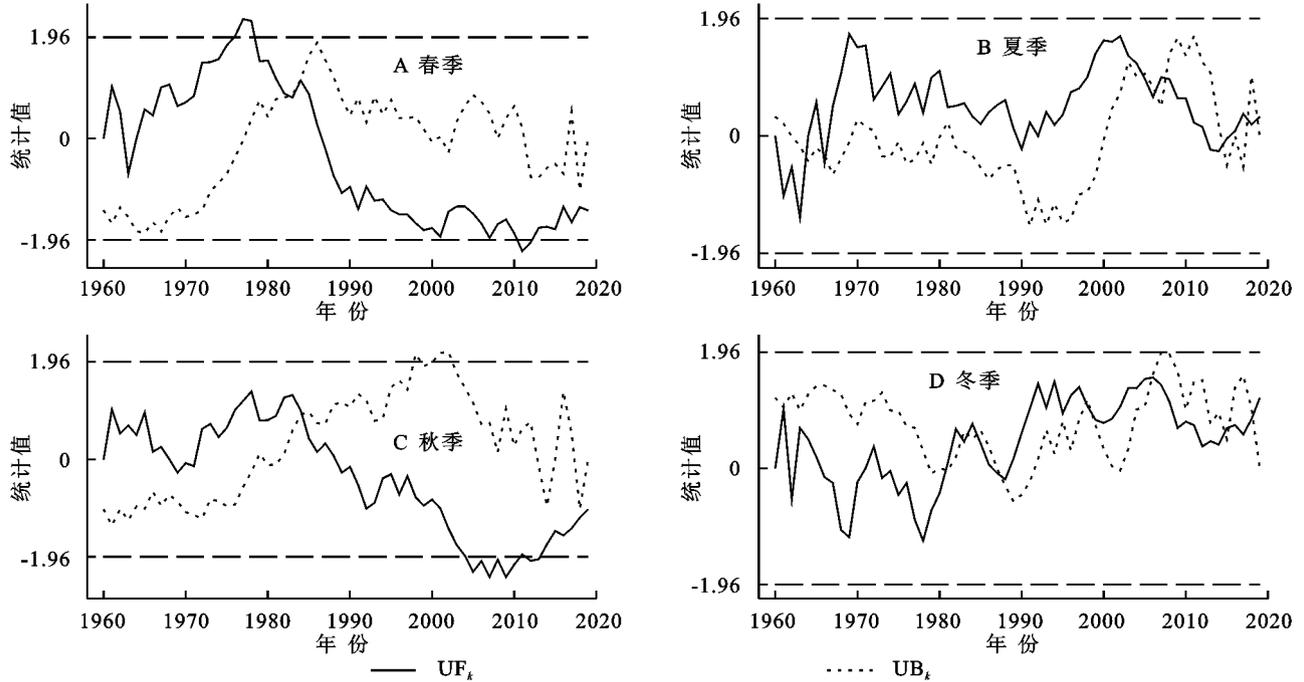


图 14 1960—2019 年贵州省季节降水量突变检验

4 结论

(1) 1960—2019 年,贵州省年降水量呈减少趋势,下降趋势为 $-9.25 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.1$);春季和秋季降水量呈减少趋势;夏季和冬季降水量呈增加的趋势,四季降水变化趋势均不显著。

(2) 近 60 a,共发生 7 次轻度干旱事件,分别为 1966 年、1981 年、1989 年、2005 年、2009 年、2011 年、2013 年,降水量减少的同时,轻度干旱发生间隔减小。

(3) 六大地貌类型区逐年降水量均呈下降趋势。其中,峰丛洼地型地貌区以溶蚀作用为主,降水最多且以 $-19.30 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ($p > 0.01$)的下降速率显著下降;溶蚀—侵蚀作用强烈的地区中喀斯特低中山型比峰林谷地型地貌区年降水量少;混合型地貌区以侵蚀—剥蚀为主,年降水量下降趋势均不显著。

(4) 四季降水量均存在明显的周期振荡;其中,第一主周期为 28 a;第二主周期除夏季为 15 a 外,其余季节均为 18 a。此外,春秋季降水发生突变的时间为 1984 年,夏季为 2014 年,冬季降水没有发生突变。

参考文献:

[1] 宋世凯.全球变暖背景下 1960—2014 年中国降水时空变化特征[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
[2] Sun F, Roderick M L, Farquhar G D. Changes in the

variability of global land precipitation[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(19), L19402, <https://doi.org/10.1029/2012GL053369>.

- [3] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(5): 508-513.
[4] Wang B, Liu J, Kim H J, et al. Recent change of the global monsoon precipitation (1979—2008) [J]. Climate Dynamics, 2012, 39(5): 1123-1135.
[5] 张琪,李跃清.近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J].高原气象,2014,33(2):372-383.
[6] 朱孟,周忠发,蒋翼,等.基于贵州高原地貌分区的降水时空异质性特征[J].水土保持研究,2020,27(3):181-189.
[7] 程东亚,李旭东.贵州乌江流域气温与降水空间分布特征及其地形影响分析[J].水土保持研究,2020,27(2): 246-252.
[8] 李勇,刘秀明,王世杰,等.1961—2017 年贵州降水时空变化特征[J].水土保持研究,2019,26(6):145-150.
[9] 易志学.半世纪来贵州雷山降水及气温特征与喀斯特地貌溶蚀性分析[J].气象科技进展,2019,9(6):61-66.
[10] 彭菊,周秋文,韦小茶,等.贵州省 1960—2014 年降水量时空变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2019, 30(5):148-154.
[11] 张克新,王娟娟,彭娇婷,苏志华.贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J].贵州师范大学学报: 自然科学版,2020,38(2):10-18.

- [12] 焦树林,梁虹.喀斯特地区流域地貌与岩性的统计关系探讨:以贵州省为例[J].中国岩溶,2002,21(2):25-30.
- [13] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.典型喀斯特地貌空间配置的洪水资源化机理:以贵州省为例[J].热带地理,2014,34(2):225-233.
- [14] 安全,贺中华,赵翠薇,等.基于地貌视角的喀斯特流域水系分维估算方法适应性分析[J].国土资源遥感,2019,31(4):104-111.
- [15] 安全,贺中华,赵翠薇,等.黔中喀斯特筑坝流域水系分维估算与地貌发育特征分析[J].水利水电技术,2019,50(4):73-81.
- [16] 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.
- [17] 张梦远,姚瑶.吉林省气温与降水数据空间插值与分布研究[J].吉林农业,2018,30(20):108-110.
- [18] 杨勇.改进的张力样条函数插值法程序及其设计方法[J].水运工程,1992,21(7):4-10.
- [19] 彭彬,周艳莲,高莘,等.气温插值中不同空间插值方法的适用性分析:以江苏省为例[J].地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [20] Johnston K, Ver Hoef J M, Krivoruchko K, et al. Using ArcGIS spatial analyst[M]. Redlands, Ca, Usa: Envi-Ronmental Systems Research Institute Inc.,2001,136-148.
- [21] 王晓利.中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D].山东烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2017.
- [22] 董旭光,顾伟宗,孟祥新,等.山东省近 50 年来降水事件变化特征[J].地理学报,2014,69(5):661-671.
- [23] 刘翔,路亚奇,韩晶,等.陇东地区 1978—2018 年夏季降水变化特征分析[J].河南科学,2020,38(5):810-818.
- [24] 余祝媛,贺中华,梁虹,等.贵州省近 55 年降水量时空变化分析[J].江苏农业科学,2019,47(6):208-215.
- [25] 刘晓迪,宋孝玉,覃琳,等.祁连山北麓牧区植被生长季不同等级降水时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):31-39.
- [26] 香薇.近 42 年秦巴山区极端气候事件的时空变化特征分析[D].成都:成都信息工程大学,2018.
- [27] 莫跃爽,索惠英,焦树林,等.1980—2015 年贵州省不同等级降雨日数时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(3):88-96.
- [28] 程诗悦.横断山地干热河谷龙川江流域降水分布特征研究[D].济南:济南大学,2019.
- [29] 李雪纯,赵君,徐进超.基于降水距平百分率的安徽省近 50 a 干旱时空分布特征分析[J].中国农村水利水电,2018,431(9):138-141,148.
- [30] 曾碧球,解河海.不同时间尺度下的贵州省修文县干旱特征分析[J].甘肃农业科技,2018,56(3):44-48.
- [31] 邓学军,刘建粤,白慧,等.剑河县近 45 a 降水变化特征[J].贵州气象,2006,45(3):9-12.
- [32] 孙伟,刘志红,卢晓宁,等.1951—2016 年四川省不同地貌单元夏季降水的多时间尺度特性分析[J].水土保持研究,2018,25(5):337-342.
- [33] 冯文文,柳凤霞,钱会,等.气候变化背景下武功地区降水特征[J].水土保持研究,2020,27(2):200-205.

(上接第 158 页)

- [14] 姜彤,施雅风.全球变暖、长江水灾与可能损失[J].地球科学进展,2003,18(2):277-284.
- [15] 王乐,杨文发,张录军,等.北极海冰对长江流域主汛期降雨的影响[J].水科学进展,2019,30(5):623-631.
- [16] Jehanzaib M, Shah S A, Yoo J, et al. Investigating the impacts of climate change and human activities on hydrological drought using non-stationary approaches [J]. Journal of Hydrology, 2020,588:125052.
- [17] Song Z, Xia J, She D, et al. The development of a Nonstationary Standardized Precipitation Index using climate covariates: A case study in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2020,588:125115.
- [18] Medeiros E S, de Lima R R, Olinda R A, et al. Space-Time Kriging of Precipitation: Modeling the large-scale variation with model GAMLSS[J]. Water, 2019,11(11):2368.
- [19] 高洁.基于 GAMLSS 模型的水文系列非平稳性研究[J].水力发电,2019,45(7):5-10.
- [20] Stasinopoulos M D, Rigby R A, Heller G Z, et al. Flexible regression and smoothing: using GAMLSS in R[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017,156-199.
- [21] 鲁帆,肖伟华,戴雁宇,宋昕熠.黄河干流年径流量非一致性频率计算[J].水力发电学报,2020,39(12):78-86.
- [22] Liu R, Liu S C, Cicerone R J, et al. Trends of extreme precipitation in eastern China and their possible causes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015,32(8):1027-1037.
- [23] Gao L, Huang J, Chen X, et al. Contributions of natural climate changes and human activities to the trend of extreme precipitation [J]. Atmospheric Research, 2018,205:60-69.