

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.033.

潘杉, 贺中华, 陈莉会, 等. 基于不同时间尺度的贵州省近 50 年气象干旱时空演化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 279-288.

PAN Shan, HE Zhonghua, CHEN Lihui, et al. Spatiotemporal Evolution Characteristics of Meteorological Drought in Guizhou Province in Recent 50 Years Based on Different Time Scales[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 279-288.

# 基于不同时间尺度的贵州省近 50 年 气象干旱时空演化特征

潘杉<sup>1</sup>, 贺中华<sup>1,2,3</sup>, 陈莉会<sup>1</sup>, 王茂强<sup>1</sup>

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州师范大学 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省山地资源与环境遥感应用重点实验室, 贵阳 550001)

**摘 要:** [目的] 基于气候因子分区条件下, 分析贵州省不同区域在不同时间尺度下气象干旱的时空演变特征, 可为干旱监测和预测、抗洪救灾提供理论依据。[方法] 基于贵州省 31 个气象站点 1970—2019 年的逐月降水和气温数据, 利用主成分分析讨论贵州省降水及气温变化特征, 结合 SPEI 指数研究贵州近 50 年气象干旱时空演化规律。[结果] (1) 贵州近 50 年气温变化由东向西逐渐递增, 即西部为气温极端变化和重度变化区、中部和东部为中度变化区、南部和北部边缘为轻度变化区; 贵州省降水变化由西向东逐渐递减, 其中西部为极端变化和重度变化区、中部为重度变化区、东部为轻度变化及正常区; (2) 贵州省近 50 年气象干旱强度中度变化区最大、其次是轻度变化区, 重度变化区最小; 随着年代的递增及时间尺度增大, 气象干旱逐渐增强, 并呈现“峰—谷”交替现象, 其中 1970—1985 年及 1990—2000 年为干旱“低谷”期、1985—1990 年及 2000—2019 年为干旱“峰值”期; (3) 贵州近 50 年逐月干旱频率以中低频为主, 主要发生在贵州东部、南部及北部; 轻度变化与中度变化区 70s 干旱频率最小、变幅最大, 10s 干旱频率最大、变幅次之, 其余年代干旱频率变化相对较小。[结论] 气象干旱具有显著的时间尺度特征, 干旱的时空演化是气候变化、流域地表及人类活动时空耦合的结果。

**关键词:** 时空演化; 气象干旱; SPEI; 贵州省

**中图分类号:** P426.616

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)03-0279-10

## Spatiotemporal Evolution Characteristics of Meteorological Drought in Guizhou Province in Recent 50 Years Based on Different Time Scales

PAN Shan<sup>1</sup>, HE Zhonghua<sup>1,2,3</sup>, CHEN Lihui<sup>1</sup>, WANG Maoqiang<sup>1</sup>

(School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025; 2. National Engineering Technology Research Center for Karst Desertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001; 3. Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment in Guizhou Province, Guiyang 550001)

**Abstract:** [Objective] Based on the climatic factor zoning conditions, the spatiotemporal evolution characteristics of meteorological drought in different regions of Guizhou Province at different time scales are analyzed, providing a theoretical basis for drought monitoring and prediction, flood control and disaster relief. [Method] Based on the monthly precipitation and temperature data of 31 meteorological stations in Guizhou Province from 1970 to 2019, the variation characteristics of precipitation and temperature in Guizhou Province were discussed by principal component analysis, based on SPEI Index, the temporal and spatial evolution of meteorological drought in Guizhou Province in recent 50 years was studied. [Results] (1) The temperature change of Guizhou Province in recent 50 years gradually increased from east to west, that is, the western region was

收稿日期: 2022-04-23

修回日期: 2022-05-07

资助项目: 国家自然科学基金(41612441, 41471023); 贵州省水利厅自然科学基金项目(KT202237); 贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目贵州省自然科学基金项目(黔科合基础—ZK[2023]重点 028)

第一作者: 潘杉(1996—), 女, 贵州德江人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: pan\_shan77@163.com

通信作者: 贺中华(1976—), 男, 贵州兴义人, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail: hezhonghua7621@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

the extreme and severe temperature change region, the central and eastern regions were the moderate temperature change region, and the southern and northern edges were the mild temperature change region. Precipitation variation in Guizhou Province gradually decreased from west to east, with extreme and severe variation in the west, severe variation in the middle, and mild and normal variation in the east. (2) In Guizhou Province, the moderate change area of meteorological drought intensity in recent 50 years was the largest, followed by the mild change area, and the severe change area was the smallest. With the increase of time and time scale, meteorological drought gradually increased, and the phenomenon of ‘peak-valley’ alternated. The period from 1970 to 1985 and 1990 to 2000 were the ‘trough’ period of drought, and the period from 1985 to 1990 and 2000 to 2019 were the ‘peak’ period of drought. (3) In recent 50 years, the monthly drought frequency in Guizhou is mainly medium-low frequency, mainly occurring in the east, south and north of Guizhou; In the areas with mild and moderate changes, the frequency of drought was the smallest and the amplitude was the largest in 70s, and the frequency of drought was the largest and the amplitude was the second in 10s. The variation of drought frequency in the rest years was relatively small. [Conclusion] The study shows that the climate drought has remarkable time-scale characteristics, and the spatial-temporal evolution of drought is the result of the coupling of climate change, watershed surface and human activities.

**Keywords:** Spatiotemporal evolution; meteorological drought; SPEI; Guizhou Province

干旱是指长时期缺乏降水或降水明显短缺的自然灾害现象<sup>[1]</sup>,其具有影响范围最广、发生频率最高、持续时间最长的特点,给社会带来了极大的经济损失,对农业、水资源、生态环境都造成了严重的损害<sup>[2-4]</sup>。但干旱起始与结束较为缓慢,人们难以识别与界定一场干旱的发生,只有灾后评估时才能明确界定,所以较难对干旱进行准确预测;同时干旱具有时空分布动态性,加之受人类活动影响,单纯对干旱定义与研究较为困难,根据水循环过程中不同环节影响对象的不同,一般将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱<sup>[5-7]</sup>,由于受降水亏缺影响,气象干旱是所有干旱类型的起点,农业干旱和水文干旱是过程,社会经济干旱是最终表现形式<sup>[8]</sup>。因此,研究气象干旱形成因素、分布规律、演变过程以及对干旱的监测和预测,对于应对其他干旱研究具有指导意义<sup>[9-11]</sup>。

目前,针对干旱的描述主要是通过干旱指数来实现,大量国内外学者通过标准化降水指数(SPI)、帕默尔指数(PDSI)等<sup>[12-13]</sup>干旱指数对干旱进行量化研究。SPI具有计算简单,可以量化不同时间尺度来体现出不同降水短缺尺度对不同类型水资源的影响,但并未考虑到气温和蒸散发对干旱的影响。2010年,在SPI的基础上,Vicente提出了标准化降水蒸散指数(SPEI),SPEI在计算过程中增加了潜在蒸散量,SPEI既考虑了蒸散量的影响,又具有SPI多时间尺度的特征<sup>[14]</sup>。国内外许多研究已经证实某些地区SPEI比SPI更适用,如史本林等<sup>[15]</sup>使用SPEI来研究河南省干旱特征,发现河南省有3个时期发生了持续干旱,其中春、夏两季干旱最严重,干旱发生强度在豫北和豫西偏东地区最大;曹永强等<sup>[16]</sup>

运用SPEI研究辽宁省玉米生育期时空变化特征,结果表明辽宁省玉米不同生育期不同等级干旱频率整体呈由西北向东南递减的分布特征,其中播种—出苗期不同等级干旱频率最高,且干旱频发区主要在辽西地区;武慧敏等<sup>[17]</sup>研究巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应,结果显示1961—2019年期间,巴音河流域气象干旱与水文干旱呈减缓态势,流域降水增多,有变湿趋势,气象干旱湿润化表现尤为显著。然而,这些研究区域主要集中于非喀斯特地区,鲜有运用SPEI指数针对喀斯特地区干旱变化趋势的研究。

贵州省作为我国典型喀斯特地貌区,气象干旱对其造成的经济损失是极其严重的。因此,本研究以贵州省作为研究区,选取31个气象站点1970—2019年贵州省地面气候资料日值数据集为基础,基于SPEI计算及ArcGIS的空间分析功能,研究不同分区下的干旱强度和干旱频率,并结合主成分分析讨论贵州省50年气象干旱时空演化特征,为喀斯特地区干旱监测和预测、抗旱救灾等提供一定的科学依据,对贵州省的干旱研究具有重大意义。

## 1 研究区概况

贵州地处我国西南地区东南部,东经 $103^{\circ}36'$ — $109^{\circ}35'$ 、北纬 $24^{\circ}37'$ — $29^{\circ}13'$ ,国土面积 $176\,167\text{ km}^2$ ,平均海拔 $1\,100\text{ m}$ (图1);研究区位于亚热带湿润季风区,气候温和湿润、雨量充沛,但降雨时空分布不均匀、75%的降水集中在4—9月,空间呈现由东南向西北递减的趋势。贵州位于云贵高原东部斜坡地带,地势西高东低,自中部向北、东、南三面倾斜,地貌

类型以高原、山地、丘陵和盆地为主,是岩溶地貌发育最为典型区域。全省河流分属于两大流域(长江与珠江流域)<sup>[18]</sup>、包括八大水系(牛栏江横江、乌江、赤水河、北盘江、南盘江、红水河、柳江、沅江),因此省内河流众多、河谷丛横,其中主要河流有乌江水系的三岔河、六冲河和鸭池河,以及南盘江和北盘江等。

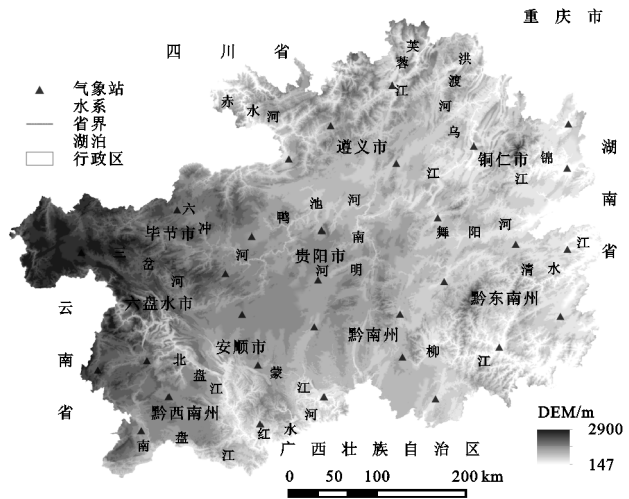


图 1 贵州省主要河流及其气象站点分布

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

气象数据主要来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),从中选取 1970—2019 年贵州省地面气候资料日值数据集,并对 31 个气象站点的逐月气温和降水数据进行统计;DEM 数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>),选取 ASTER GDEM 30 m 数据。在数据处理过程中,对明显错误的值,进行剔除,对于个别站点缺失的个别数据采用均值替换法进行替换<sup>[19]</sup>。研究区 DEM 和气象站点空间分布见图 1。选用 1 月、4 月、7 月、10 月及年均值的气温和降水数据用 SPSS 22.0 进行主成分分析,根据特征值准则,气温提取了一个主成分,降水提取了两个主成分,将得到的主成分进行空间插值。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降雨蒸散指数(SPEI)计算

(1) 潜在蒸散发(PET)计算

PET=16K(10T/I)^m (1)

式中:  $T$  为平均气温;  $I$  为热量指数(年 12 个月指数之和),  $I=\sum_{i=1}^{12} \frac{T_i}{5}^{1.514}$ ;  $K$  为纬度和月份计算的修正系数,  $K=\frac{N}{12} \frac{NDM}{30}$ ,  $NDM$  为一个月的天数,  $N$  为最大日照数;  $m=6.75 \times 10^{-7} / I^3-7.71 \times 10^{-5} / I^2+$

$1.79 \times 10^{-2} I+0.492$ 。

(2) 逐月降雨与逐月潜在蒸散(PET)的差值

$D_i=P_i-PET_i$  (2)

(3) 基于三参数 Log-logistic 函数对降雨、潜在蒸散的模拟,计算概率密度函数的数据序列和给定时间序列的累积概率  $F(x)$ :

f(x)=β/α((x-γ)/α)^(β-1)[1+(x-γ)/α]^(-β-2) (3)

F(x)=[1+(x-γ)/α]^(-β) (4)

式中:  $F(x)$  为累积函数;  $f(x)$  为概率密度函数;  $\alpha$  为尺度参数;  $\beta$  为形状参数;  $\gamma$  为原点参数。

(4) SPEI 计算

SPEI=W-(C0+C1W+C2W^2)/(1+d1W+d2W^2+d3W^3) (5)

W=sqrt(-2ln(P)) (6)

式中: 当  $p \leq 0.5$  时,  $p=F(x)$ ; 当  $p > 0.5$  时,  $p=1-F(x)$ ; 参数  $C_0=2.515517, C_1=0.802853, C_3=0.010328, d_1=1.432788, d_2=0.189269, d_3=0.001308$ <sup>[14]</sup>。气象干旱等级划分参考表 1<sup>[20]</sup>。

表 1 SPEI 干旱等级划分标准

干旱等级	正常	轻度干旱	中度干旱	重度干旱	极端干旱
SPEI 值	$>-0.5$	$(-1.0,-0.5]$	$(-1.5,-1.0]$	$(-2,-1.5]$	$\leq -2.0$

2.2.2 主成分分析 主成分分析就是把原本的多个指标,重新组合成少数几个综合指标的一种统计方法。气象学上经常把 1 月、4 月、7 月、10 月作为冬季、春季、夏季、秋季的代表月份,因此本文基于 1970—2019 年的气温和降水数据,分别计算 1 月、4 月、7 月、10 月、及年均温/年均降雨的变异系数( $C_v$ ),并进行主成分分析、提取特征值大 1 的主成分因素( $Z$ );其中,气温提取 1 个主成分因素( $Z$ )、累积贡献率为 74.06%;降水提取 2 个主成分因素( $Z_1, Z_2$ ),累积贡献率分别为 42.66%, 21.21%。主成分的详细计算过程,请看参考文献 21,提取到的主成分因素可表达为:

Z=0.533x1+0.541x2+0.54x3+0.192x4+0.546x5 (7)

Z1=0.501x1+0.39x2+0.589x3-.0498x4-0.04x5 (8)

Z2=0.281x1-0.152x2+0.016x3+0.161x4+0.932x5 (9)

式中:  $x_1$  为年均温/年降雨量;  $x_2$  为 1 月气温/降水量;  $x_4$  为 4 月气温/降水量;  $x_5$  为 7 月气温/降水量;  $x_6$  为 10 月气温/降水量。根据贵州省气温/降水的  $C_v$  值并结合贵州实际情况,将贵州省气温及降雨变化划分为 5 个区,即:正常(0~0.2)、轻度变化(0.2~

0.4)、中度变化(0.4~0.6)、重度变化(0.6~0.8)以及极端变化(0.8~1);同时利用 ArcGIS 空间样条函数对贵州省气温/降雨分布进行模拟。

2.2.3 干旱频率 干旱频率是指在研究时间序列内气象站干旱发生的频率:

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $P$  表示干旱频率(%); $N$  表示研究时间序列总数; $n$  表示研究时段干旱发生的次数。为了便于描述和理解贵州省干旱发生频率时空演化特征,本文对气象干旱发生频率划分为5个等级:0~20%为极少发生(低频),20%~40%为较少发生(中低频),40%~60%为经常发生(中频),60%~80%为频繁发生(中高频),80%~100%为极频繁发生(高频)<sup>[22]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 贵州省气象特征分析

从图2A可以看出,贵州省气温变化由东向西逐渐递增,即西部为气温极端变化和重度变化区、中部和东部为中度变化区、南部和北部边缘为轻度变化

区。随着全球气候变化,贵州西部和中部极端气温变化最为显著,尤其毕节地区<sup>[23]</sup>;同时,贵州西部的极端变化和重度变化区呈现规律性的递减,这主要原因是气候变化主要受制于地势起伏及海拔的影响。气温主成分累积贡献率虽大于降水,但结合贵州特殊的地形地貌,降水第1主成分因素更能体现出贵州干旱的时空演化特征(图2B,C)。针对贵州省降水变化,第1主成分由西向东逐渐递减,其中西部为极端变化和重度变化区(尤其威宁和盘县一带)、中部为重度变化区、东部为轻度变化及正常区(图2B)。降水变化第2主成分整体呈现东南向西北递减、东北西南条带分布格局(图2C)。其中,东南地区主要为重度变化区、局部为极端变化和中度变化区,西北地区主要是重度变化区、局部地区为重度变化和轻度变化区(图2C)。降水第1主成分累积贡献率远大于第2主成分,以及第2主成分分区结果主要体现出贵州局部地区降水的变化,因此本研究主要基于降水第1主成分分区结果,将贵州降水变化划分为轻度变化区(轻度变化和正常)、中度变化区及重度变化区(重度变化和极端变化)。

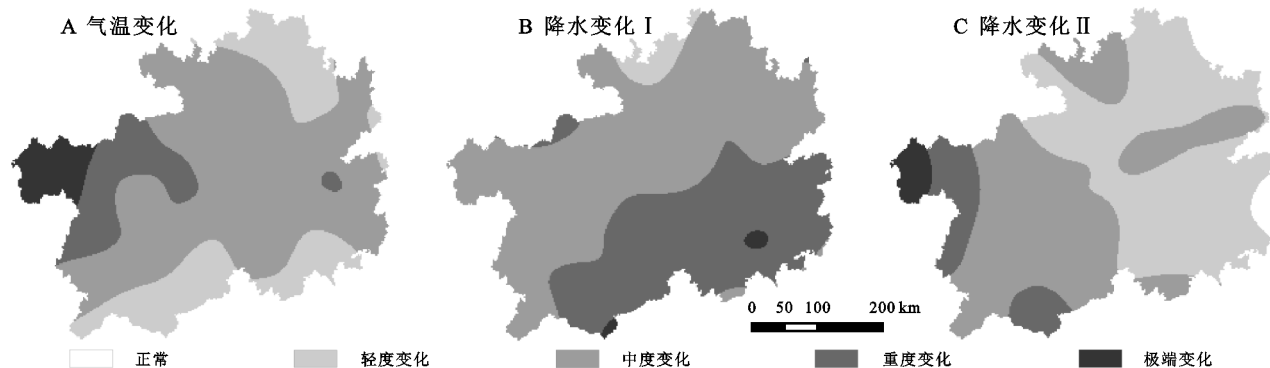


图2 贵州省气温降水分区

#### 3.2 贵州省气象干旱强度空间分布特征

3.2.1 月尺度气象干旱强度空间分布特征 整体而言,贵州省3个变化区(轻度变化区、中度变化区、重度变化区)气象干旱强度中度变化区最大、其次是轻度变化区,重度变化区最小(图3);同时,随着时间尺度递增,3个变化区的气象干旱强度呈现逐渐递减趋势,尤其是1~15个月尺度3个变化区的年内气象干旱变化较大。轻度变化区主要位于贵州省东部,海拔相对较低、夏季气温高,干旱以中度干旱为主,尤其在1个月尺度(SPEI-1)年内干旱强度呈现周期性变化,即5月和6月呈现波峰、2月出现波谷,干旱强度表现为中度干旱;3个月尺度(SPEI-3)呈现两峰(6月和10月)一谷(8月)现象;6个月尺度(SPEI-6)年内干旱强度逐渐递减,且1月、3月、6月呈现波峰,4月、8月、12月出现波谷,9个月尺度(SPEI-9)7月、10月呈现波峰,干旱为

中度等级,以及12个月尺度(SPEI-12)表现为一峰(11月,中度干旱)一谷(5月,轻度干旱)现象。中度变化区主要分布在贵州省中部,干旱主要表现为中度及以上等级;在SPEI-1和SPEI-3气象干旱呈现周期性变化,且6月表现为波峰、2月和9月为波谷,尤其SPEI-3和SPEI-13的6月干旱强度表现为重度等级且向两极逐渐递减;当时间尺度大于10个月(中度干旱),气象干旱梯度较小,即随时间尺度递增干旱变化不显著。重度变化区涉及气象站点(威宁、盘县、望谟)较少,站点海拔高、降雨充沛,气象干旱主要表现为轻度和正常等级;尤其在1~7个月尺度干旱周期性显著,即6月和12月为波峰(轻度干旱),2月和8月为波谷(正常),在25个月和36个月尺度虽表现两个波峰,8~48个月尺度气象干旱程度较轻(SPEI-25, SPEI-36呈现微弱的波峰)、且年内变化较小。



3.2.2 季尺度气象干旱强度空间分布特征 与月尺度相比,3 个变化区季尺度的气象干旱程度逐渐减弱,即轻度变化区主要表现为中度干旱、中度变化区表现为中度和轻度干旱、重度变化区表现为轻度和正常(图 4);随着时间尺度递增,轻度变化区气象干旱表现为“强干旱、弱梯度”的变化趋势,重度变化区表现为“弱干旱、强梯度”,而中度变化区表现为“强干旱、强梯度”。轻度变化区在 1~4 个月时间尺度的春、夏、秋、冬干旱强度呈递减变化趋势,其中,SPEI-1 冬季干旱强度最弱(轻度干旱),SPEI-3 夏、秋季干旱强度最强(中度干旱);总体而言,干旱强度在 1~22 个月时间尺度逐渐递增、22~37 个月尺度达极大值,37~48 个月尺度逐渐递减。中度变化区在 1~5 个月时间尺度的 4 季干旱强度逐渐递减、干旱梯度变化快特征,其中 SPEI-1 的冬季干旱、SPEI-36 的秋季干旱、以及 SPEI-48 春夏季干旱强度最弱,SPEI-1 的春季干旱、SPEI-3 的春夏季干旱、以及 SPEI-6,SPEI-9 和 SPEI-12 的夏季干旱强度最强;总体上,在 SPEI-12 之后随着时间尺度的增加,SPEI 值变化幅度较小。重度变化区域总体上 SPEI 值变化幅度比较小,尤

其是 SPEI-12 之后随着时间尺度的增加,SPEI 值在  $-0.5 \sim -0.4$ ,未达到干旱等级,属于正常范畴;在 1~10 个月尺度夏秋干旱相对较强,尤其 SPEI-3 和 SPEI-6 的夏季干旱强度最大、冬季最小;4 季干旱强度在 10~19 个月尺度基本没变化,19~48 个月尺度呈现微弱变化。这说明时间尺度对 4 季干旱强度影响为中度变化区>轻度变化>重度变化区。

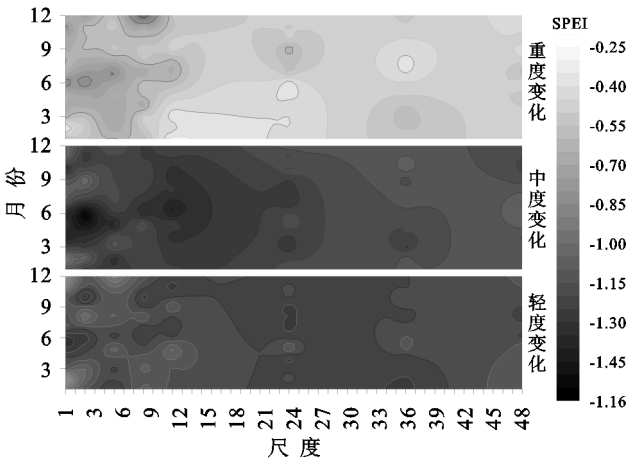


图 3 不同时间尺度的 SPEI 值年内变化特征

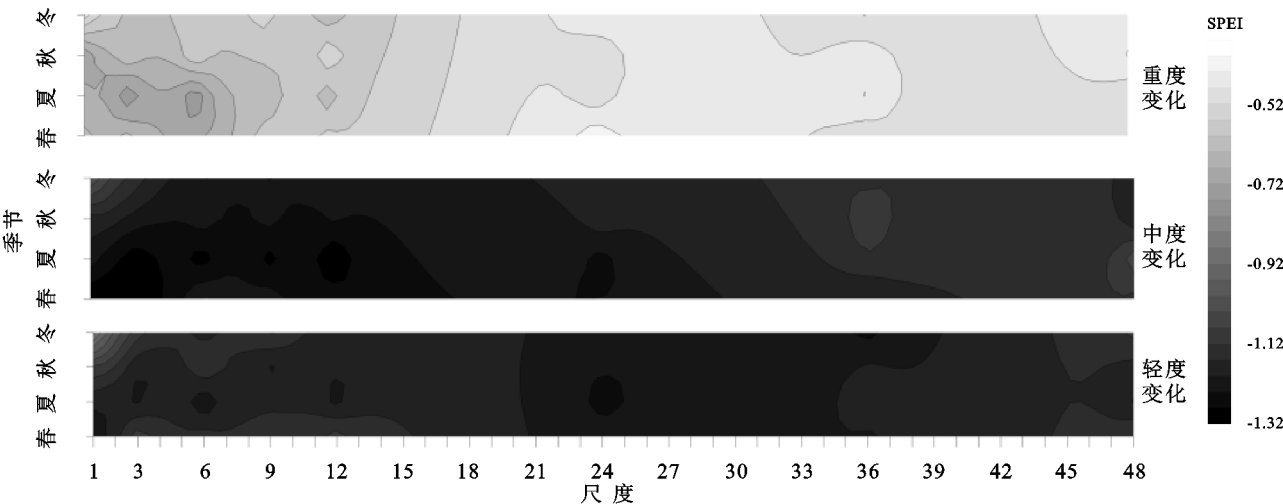


图 4 不同时间尺度的 SPEI 值季节变化特征

3.2.3 年代际尺度气象干旱强度空间分布特征 总体而言,3 个变化区的气象干旱强度随着年代的递增及时间尺度增大而增强,且呈现“峰—谷”交替现象,其中 1970—1985 年及 1990—2000 年干旱强度相对较弱,即干旱“低谷”期、1985—1990 年及 2000—2019 年干旱强度相对较强,即干旱“峰值”期,1~10 个月、20~26 个月、35~40 个月及 45~48 个月尺度干旱强度呈现“波峰”、其余时间尺度呈现“波谷”。这说明气象干旱深受降水、气温等因素影响,在人类活动影响也不容低估。轻度变化区在 1970—1985 年不同时间尺度干旱梯度变化小,干旱强度主要表现为轻度及以下等级,尤其在 1970—1975 年时间尺度大于 30 个月后基本不发生气象干旱,但 1974 年,1978 年在 1~

5 个月尺度干旱程度有所增强;1984—1991 年干旱强度(轻度)相对平稳,仅在 5~10,25,35 及 48 个月尺度干旱强度表现一定的“峰值”;1991—2004 年干旱梯度变化小,以 25 个月尺度为阈值干旱强度可显著划分为轻度及正常两个等级;2004—2019 年干旱强度特别显著,主要表现为中度及以上等级,且随着时间尺度递增干旱强度逐渐增强,尤其 1~10,25,35 个月尺度的 2005 年、2010 年干旱表现为重度及以上等级。与轻度变化区相比,中度变化区干旱强度相对较轻、但干旱梯度变化相对较大,尤其 1985 年、2005 年、2010 年干旱梯度向两极递减,1975—1980 年、1991—2000 年时间尺度大于 25 个月干旱基本未发生(正常);2004—2014 年干旱强度表现为中度及重

度等级,不同时间尺度干旱强度差异也较小、仅在1~10,25,35,48个月尺度表现出“峰值”特征。同理可知,重度变化区干旱强度呈现“峰—谷”交替更加显著、即2004—2019年、1985—1991年、1970—1975年表现为干旱“峰值”期、其余表现为干旱“低谷”期;随

着时间尺度的增加,干旱“峰值”期的干旱强度逐渐增强、干旱“低谷”期的干旱强度无明显变化。总之,气象干旱强度在10s,00s,80s相对较强、在90s,70s相对较弱,这说明时间尺度对干旱强度影响与人类活动强度有密切的关系(图5)。

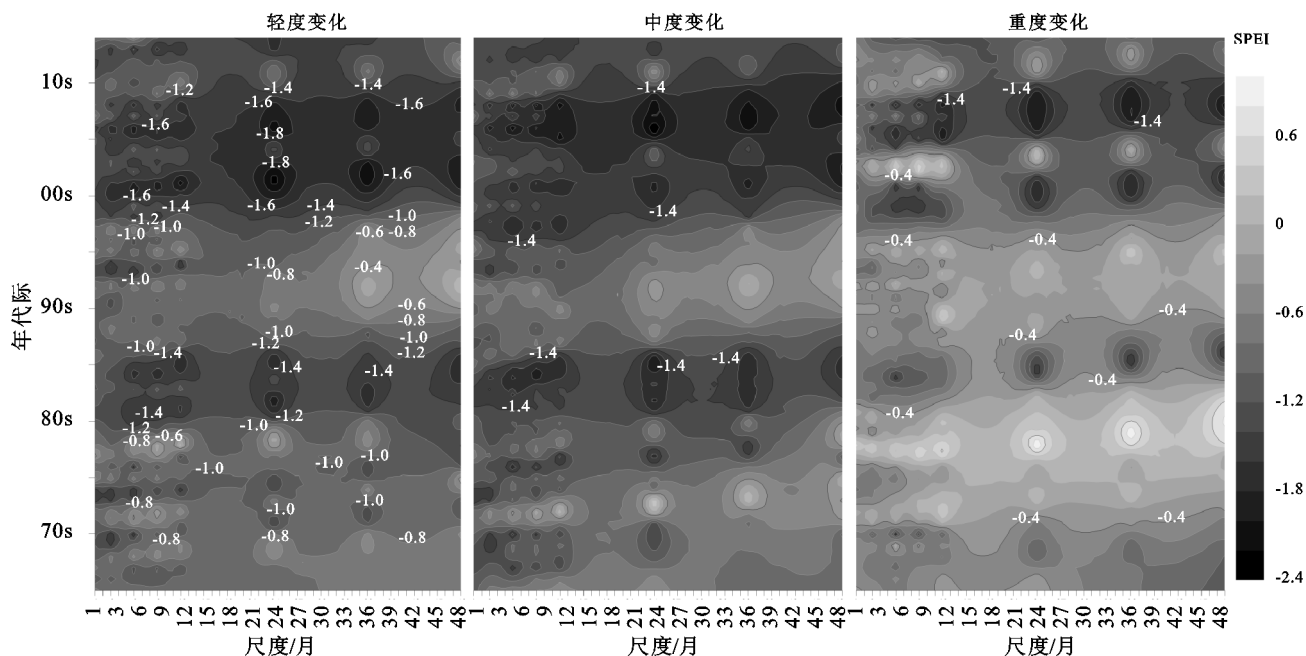


图5 不同时间尺度的SPEI值年代际变化特征

### 3.3 贵州省气象干旱频率时间演化特征

从图6可知,贵州近50a逐月干旱频率以中低频为主,主要发生在贵州省东部、南部及北部,且1—12月不同地区干旱频率具有显著差异。空间分布上,1月、9月、10月、11月的干旱频率呈现东北高西南低分布,且南部干旱频率普遍高于北部,其中荔波、余庆、榕江、铜仁、罗甸以及凯里是干旱频率高发区;2月、8月总体呈现东西分布,尤其黎平、凯里、荔波及铜仁是干旱频率较高区;同理,4月、6月、7月干旱频率呈现为“离散型”分布,干旱频率较高主要集中于桐梓、铜仁、仁怀、兴仁、望谟以及织金等区;3月、5月、12月干旱频率为北部、中部及东南部较高,荔波、余庆、息烽、独山、织金、望谟及铜仁等地为干旱频率高发区。

与月尺度相比,季尺度干旱频率空间分布从东北向西南逐渐递减(图7)。春季干旱频率以中低频为主,呈现东北部高、其余地区低的特点,尤其松桃、正安以及荔波为干旱中频区,盘州和独山为低频区;夏季干旱频率逐渐增加,呈现由东北向西部和北部转移趋势,且紫云和罗甸为干旱低频区、仁怀及湄潭为干旱高频区;秋季干旱频率主要呈现东南高、西北低,习水为干旱低频区、荔波为中频区;冬季干旱频率分布相对离散,干旱频率相对集中区是荔波和铜仁(高频区),以及中度变化区的息烽、凯里、三穗和轻度变化

区的桐梓(低频区)。

70s干旱频率以中低频为主(图7),主要分布于贵州中部、东部以及西南部等地,而低频地区主要集中分布于贵州北部、东南部以及中部零星地区;中低频地区 and 低频地区在80s主要集中分布于东部与西部、10s则相反;90s和00s中低频和低频分布相对零散,尤其其中低频地区在90s主要集中于东北、西北以及东部和南部局部区域,00s集中于东部以及西部局部区域。

图8A表示SPEI不同时间尺度逐月的干旱频率。针对轻度变化区,50年来逐月干旱频率变化为28.56%~36.00%、均值31.91%,其中最低是都匀的12月、最高是仁怀的4月;中度变化区干旱频率变化在29.79%~34.69%,最低出现在贵阳的4月、最高是余庆的1月,均值32.02%,其中12月出现干旱频率异常值(34.00%);同理,重度变化区干旱频率变化是27.08%~39.13%、均值31.79%,其中干旱频率最小值出现在盘县的1月(27.08%)、最大值是望谟的4月。总体而言,重度变化区干旱频率变化最大,其次是轻度变化区,中度区的干旱频率相对较稳定,其中4月干旱频率变化最大。

季尺度干旱频率在1~48个月的变化特征见图8B所示。贵州近50年季尺度干旱频率变化范围为28.99%~34.67%、均值32.2%,其中高频为正安的春季、低频为黎平,独山的冬季出现干旱频率异常值(34.53%);中度

变化区干旱频率变化范围为 30.67%~34.00%、均值为 32.31%，其中仁怀的夏季和荔波的冬季干旱频率相对较高、紫云的夏季相对较低，且夏季干旱频率出现 2 个异常值区，即思南(34.00%)和紫云(30.67%)；同理，重度变化区干旱频率变化范围为 28.28%~36.23%、均值 31.16%，其中低频在望谟的春季，高频在盘县的夏季，望谟的冬季表现干旱频率异常值。总体而言，重度变化区季尺度干旱频率变化最大(尤其春季)，其次为轻度变化区，中度变化区最小。

在年际尺度下(图 8C)，轻度变化、中度变化以及重度变化区干旱频率范围分别为 0~46.67%，3.53%~60.00%，5.00%~61.67%，均值分别为 31.58%，30.99%，31.25%。轻度变化与中度变化区 70s 干旱频率最小、变幅最大，10s 干旱频率最大、变幅次之，其余年代干旱频率变化相对一般，尤其轻度变化区在 80s、90s 和 00s 干旱频率相对集中、变幅最小，中度变化区干旱频率相对离散；重度变化区 80s 干旱频率相对最小、变幅最大，其次是 10s，其余年代干旱频率及变幅最小。

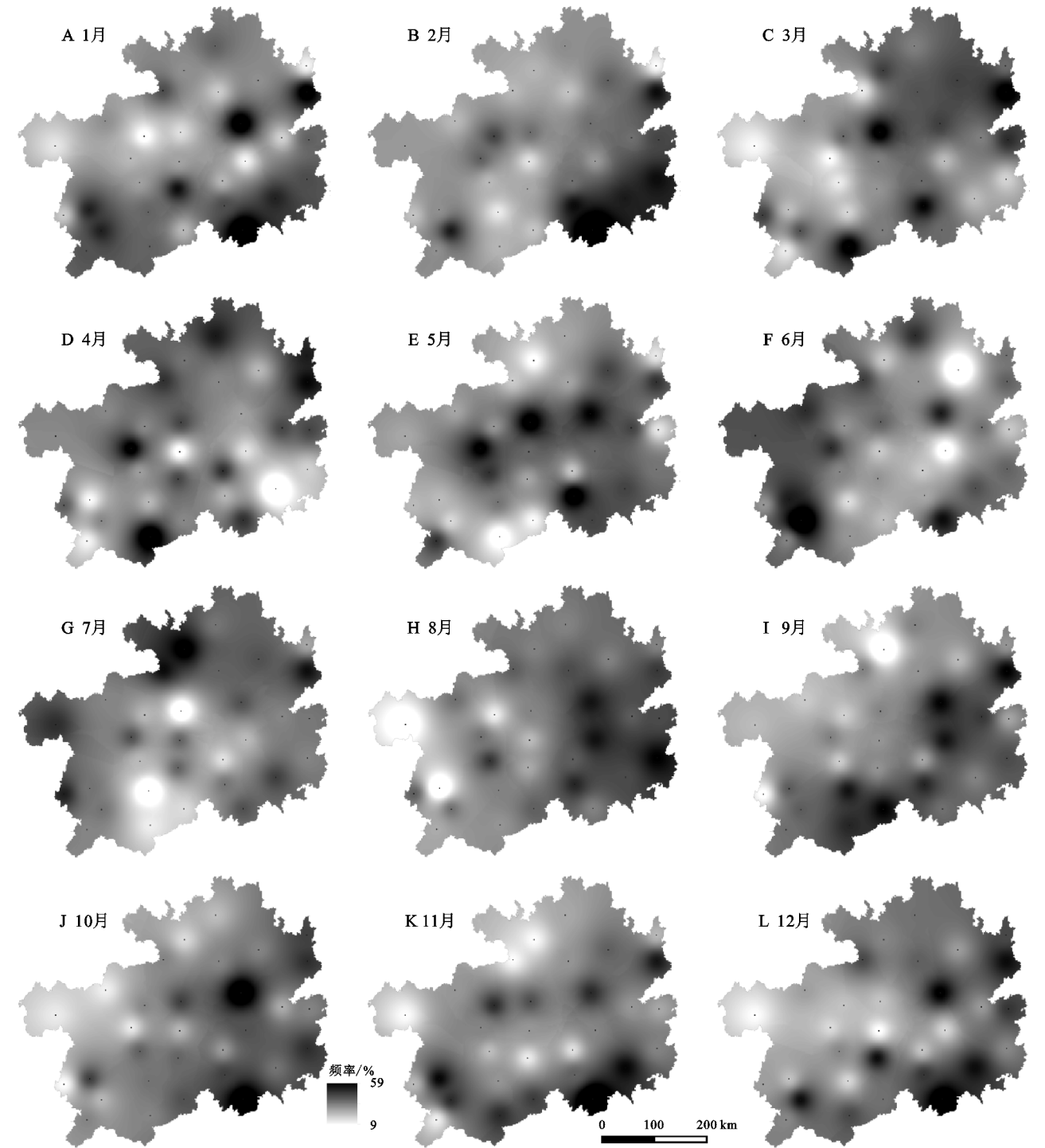


图 6 贵州省各个月份干旱频率变化



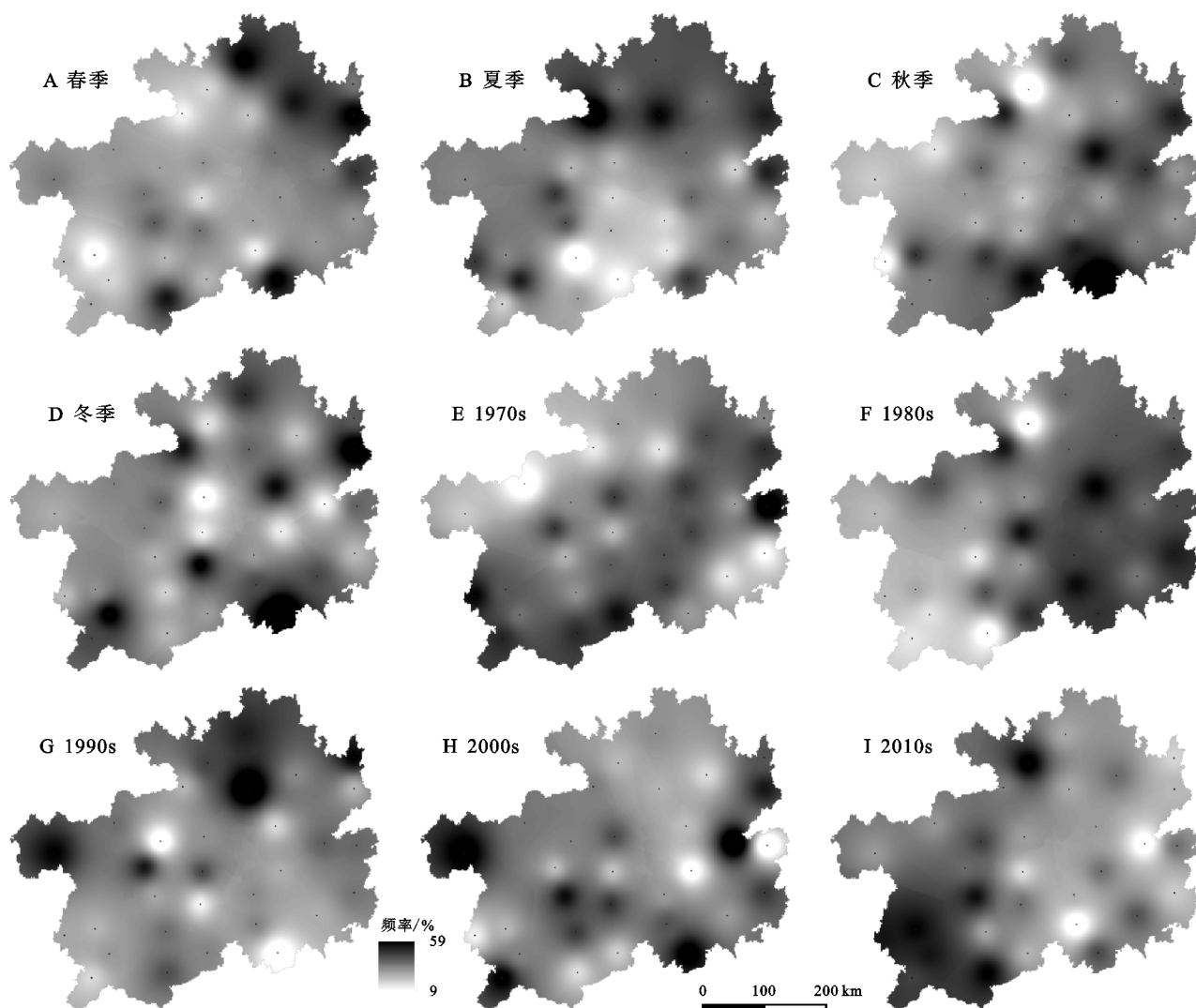


图 7 贵州省季节及年代际干旱频率分布变化

## 4 讨论

降雨和气温是气象干旱主要驱动因素,促使或抑制流域或区域尺度干旱的发生,因此本研究以 1 月、4 月、7 月、10 月、及年均温/年均降雨为基础,分析贵州省 50 年降雨/气温的变异系数( $C_v$ ),探讨降雨/气温的时空变异性。研究表明,贵州省气温变化由东向西逐渐递增,即西部为气温极端变化和重度变化区、中部和东部为中度变化区、南部和北部边缘为轻度变化区;贵州省降雨由西向东逐渐递减,其中西部为极端变化和重度变化区(尤其威宁和盘县一带)、中部为重度变化区、东部为轻度变化及正常区。已有研究表明,20 世纪 90 年代以威宁为中心极端降水频率明显减少,贵州大部分地区是极端降水频发区<sup>[24]</sup>;贵州西北地区降水偏少、尤其毕节、赫章多年平均降水量最小,导致西部地区呈现为极端变化和重度变化区<sup>[25]</sup>。因此,本研究结果与李勇<sup>[25]</sup>基于 EOF 的降水分区结果相似,是属于降水

空间分布特征的全局型模式,降水变化呈现由西向东递减的趋势。这可能是贵州省远离海洋,降雨深受季节性影响,更受地形地貌分布的影响;同时,贵州地处云贵高原东部斜坡第二阶梯、长江与珠江两大流域分水岭的宽缓斜坡地带<sup>[26]</sup>,地势西高东低,导致贵州全年气温变化西部大于中部和东部,以及降雨的年内分配不均,从而影响贵州气象干旱时空分异规律。从月尺度分析,气象干旱强度中度变化区最大、其次是轻度变化区,重度变化区最小,同时随着时间尺度递增,3 个变化区的气象干旱强度呈现逐渐递减趋势;重度变化区干旱频率变化最大,其次是轻度变化区,中度区的干旱频率相对较稳定。从季尺度上轻度变化区主要表现为中度干旱、中度变化区表现为中度和轻度干旱、重度变化区表现为轻度和正常;重度变化区季尺度干旱频率变化最大(尤其春季),其次为轻度变化区,中度变化区最小。随着全球气候的变化、以及人类活动的加剧,贵州省气象干旱强度在 10s,00s,80s



相对较强、在 90s,70s 相对较弱;轻度变化与中度变化区 70s 干旱频率最小、变幅最大,10s 干旱频率最大、变幅次之。这表明气象干旱深受降雨、气温,以及地形地貌分布影响,同时人类活动影响也不容低估。

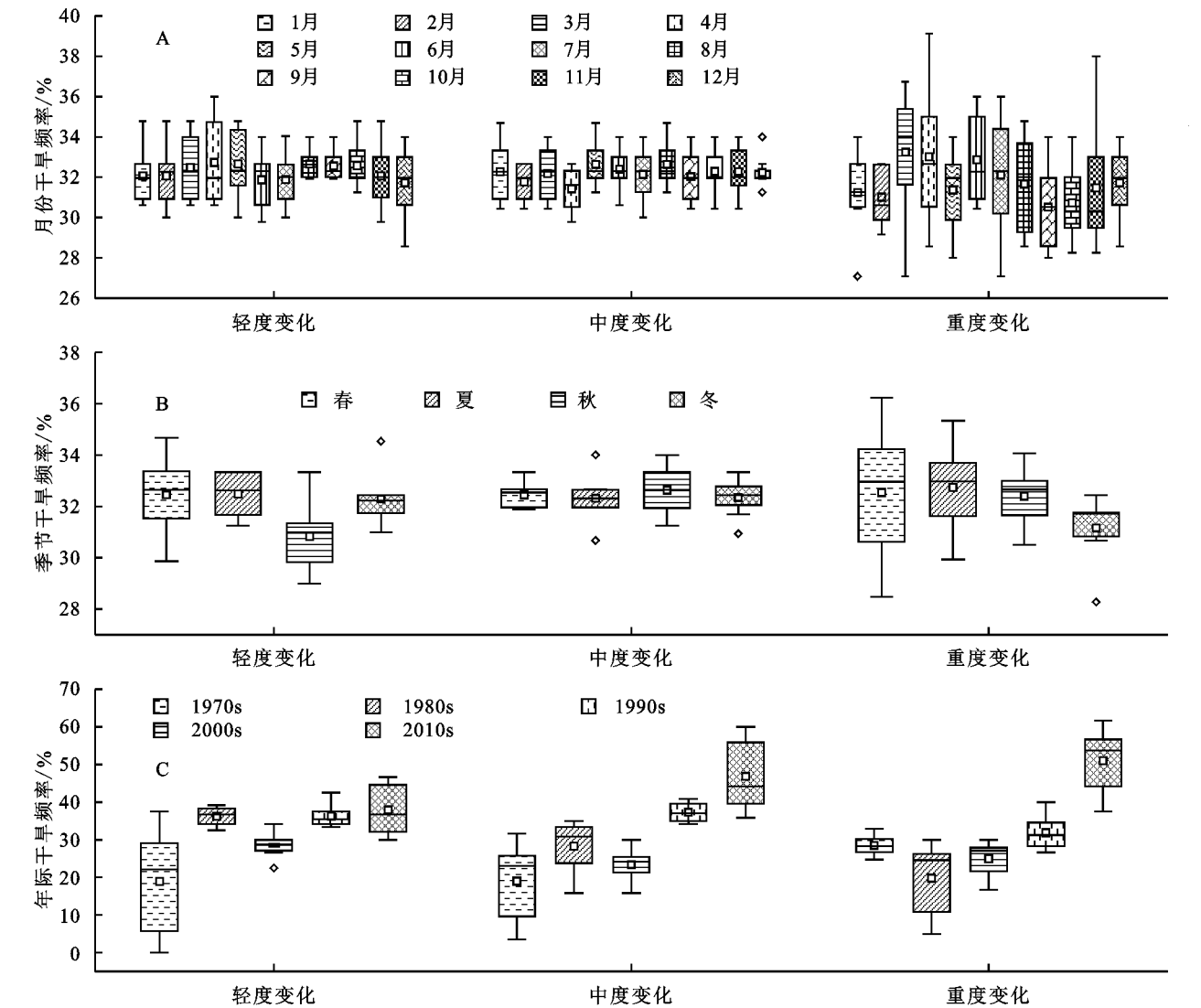


图 8 贵州省 3 个分区不同时间尺度下干旱频率变化

其实气象干旱过程极为复杂、影响因素复杂多样,本研究虽然考虑降水、气温、蒸散发以及持续时间,但未涉及气候其他因素(风速、日照时数、空气湿度等)、流域植被需水定额、以及流域储水能力等因素,因此本研究存在一定的局限性,研究结果缺乏普遍的实用性。因此,本团队下步将综合考虑以上因素,进一步揭示喀斯特地区气象干旱发生及演化机制,为政府的相关规划决策提供参考,丰富极值水文水资源的研究内容。

5 结论

(1) 贵州近 50 年气温变化由东向西逐渐递增,即西部为气温极端变化和重度变化区、中部和东部为中度变化区、南部和北部边缘为轻度变化区;降水变化I由西向东逐渐递减,其中西部为极端变化和重度变化区(尤

其威宁和盘县一带)、中部为重度变化区、东部为轻度变化及正常区;同时,降水变化II也呈现东南向西北递减、东北西南条带分布格局,尤其东南地区为重度变化区、局部为极端变化和中度变化区,西北地区为重度变化区、局部地区为重度变化和轻度变化区。

(2) 贵州省近 50 年气象干旱强度中度变化区最大、其次是轻度变化区,重度变化区最小;随着时间尺度递增,轻度变化区气象干旱表现为“强干旱、弱梯度”的变化趋势,重度变化区表现为“弱干旱、强梯度”,而中度变化区介于两者之间。随着年代的递增及时间尺度增大气象干旱逐渐增强,并呈现“峰—谷”交替现象,其中 1970—1985 年及 1990—2000 年为干旱“低谷”期、1985—1990 年及 2000—2019 年为干旱“峰值”期。

(3) 贵州近 50 年逐月干旱频率以中低频为主,主要发生在贵州东部、南部及北部;重度变化区干旱

频率变化最大,其次是轻度变化区,中度变化区的干旱频率相对较稳定。

#### 参考文献:

- [1] Heim Jr R R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002,83(8):1149-1166.
- [2] Ashok K, Mishra and Vijay P. Singh. A review of drought concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,391(1):202-216.
- [3] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [4] Zhou L, Yang G. Ecological economic problems and development patterns of the Arid Inland River Basin in Northwest China[J]. *Ambio*, 2006:316-318.
- [5] 孙荣强.干旱定义及其指标评述[J]. *灾害学*, 1994(1): 17-21.
- [6] Van Huijgevoort M H J, Van Lanen H A J, Teuling A J, et al. Identification of changes in hydrological drought characteristics from a multi-GCM driven ensemble constrained by observed discharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,512:421-434.
- [7] Van Lanen H A J, Wanders N, Tallaksen L M, et al. Hydrological drought across the world: impact of climate and physical catchment structure[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013,17(5):1715-1732.
- [8] Vrochidou A E K, Tsanis I K, Grillakis M G, et al. The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,476:290-301.
- [9] Caminero L, Génova M, Camarero J. J, et al. Growth responses to climate and drought at the southernmost European limit of Mediterranean *Pinus pinaster* forests[J]. *Dendrochronologia*, 2018,48:20-29.
- [10] Oguntunde P G, Abiodun B J, Lischeid G. Impacts of climate change on hydro-meteorological drought over the Volta Basin, West Africa[J]. *Global and Planetary Change*, 2017,155:121-132.
- [11] Lu H, Wu Y, Li Y, et al. Effects of meteorological droughts on agricultural water resources in southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017,548:419-435.
- [12] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J]. *干旱区地理*, 2007,30(1):61-67.
- [13] 翟禄新,冯起.基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. *自然资源学报*, 2011,26(5):847-857.
- [14] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010,23(7):1696-1718.
- [15] 史本林,朱新玉,胡云川,等.基于 SPEI 指数的近 53 年河南省干旱时空变化特征[J]. *地理研究*, 2015,34(8): 1547-1558.
- [16] 曹永强,李玲慧,路洁,等.基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析[J]. *生态学报*, 2021,41(18):7367-7379.
- [17] 武慧敏,吕爱锋,张文翔.巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022,20(3): 459-467. DOI:10.13476/j. cnki. nsbdqk.2022.0046.
- [18] 戴洪刚,梁虹,黄法苏.喀斯特枯水、干旱、灾害初探:以贵州省为例[J]. *贵州师范大学学报:自然科学版*, 2005, 23(4):32-37.
- [19] 刘世梁,田韞钰,安南南,等.基于逐月标准化降水蒸散指数的多尺度方法分析气候变化对澜沧江流域归一化植被指数的影响[J]. *气候与环境研究*, 2015,20(6): 705-714.
- [20] 任培贵,张勃,张调风,等.基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J]. *水土保持通报*, 2014,34 (1):182-187,192.
- [21] 万新宇,包为民,荆艳东,等.基于主成分分析的洪水相似性研究[J]. *水电能源科学*, 2007(5):36-39.
- [22] He Z, Liang H, Yang C, et al. Temporal-spatial evolution of the hydrologic drought characteristics of the karst drainage basins in South China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018,64:22-30.
- [23] 朱大运,熊康宁,肖华.贵州省极端气温时空变化特征分析[J]. *资源科学*, 2018,40(8):1672-1683.
- [24] 丁文荣.西南地区极端降水的时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2014,23(7):1071-1079.
- [25] 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.
- [26] He Z, Zhao C, Zhou Q, et al. Temporal-spatial evolution of lagged response of runoff to rainfall in Karst drainage basin, Central Guizhou of China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022,147(1):437-449.