

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.011.

吴小飘, 周忠发, 朱孟, 等. 典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 336-347.

WU Xiaopiao, ZHOU Zhongfa, ZHU Meng, et al. Spatiotemporal Characteristics of Drought in Different Geomorphic Types in Typical Karst Cluster Areas[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 336-347.

典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征

吴小飘^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 朱孟^{1,3}, 黄登红^{1,3}, 彭睿文^{1,3}

(1. 贵州师范大学 地理与环境科学学院/喀斯特研究院, 贵阳 550001; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 3. 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001)

摘要:为探究西南典型喀斯特聚集区不同地貌类型干旱时空特征, 研究选取贵州省作为研究区, 基于贵州 19 个气象站点 1951—2020 年的气象数据, 利用 SPI 指数、M-K 突变检验等方法研究贵州近 70 a 降水与气温在不同时间尺度变化规律, 探讨不同地貌分区干旱的年、季时空尺度耦合特征。结果表明: (1) 贵州近 70 a 的年均降水量整体呈缓慢下降趋势、气温呈现上升的趋势。 (2) 不同地貌分区干旱情况差异较显著, 其中非喀斯特和峰丛洼地地貌背景下干旱呈现微弱上升趋势, 其他分区干旱均呈下降趋势。 (3) 各分区在夏、秋季干旱指数均呈减少态势, 冬季干旱指数呈增加态势。除岩溶高原和岩溶断陷盆地外, 春季其他地貌分区旱情均呈加剧趋势。旱情加剧程度最大出现在岩溶槽谷春秋和岩溶断陷盆地夏冬季, 旱情加剧程度最小出现在非喀斯特地区的夏秋季和岩溶高原地区冬春季。 (4) 岩溶槽谷和非喀斯特的 SPI12 均值无明显突变点, 岩溶峡谷的 SPI12 值在 1987 发生突变, 岩溶高原和峰丛洼地分别在 2002 年和 2019 年前后发生显著性跳跃, 岩溶断陷盆地在置信范围内发生三次突变。综上, 研究结果可以为同类型干旱防灾减灾提供一定的参考依据。

关键词: 气象干旱; SPI 指数; 突变检验; 地貌分区; 贵州省

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0336-12

Spatiotemporal Characteristics of Drought in Different Geomorphic Types in Typical Karst Cluster Areas

WU Xiaopiao^{1,2}, ZHOU Zhongfa^{1,2}, ZHU Meng^{1,3}, HUANG Denghong^{1,3}, PENG Ruiwen^{1,3}

(1. Department of Geography and Environment Sciences/Karst Research Institute,

Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation

Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China;

3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal characteristics of drought in different geomorphic types in the typical karst cluster areas in southwest China, Guizhou Province was selected as the study area. Based on the meteorological data of 19 meteorological stations in Guizhou Province from 1951 to 2020, we studied the changes of precipitation and temperature at different time scales in recent 70 years and discussed the coupling characteristics of annual and seasonal spatiotemporal scales of drought in different geomorphic regions through the methods of SPI index, M-K mutation test and so on. The results showed that: (1) the average annual precipitation in Guizhou in recent 70 years showed a slow downward trend, the temperature showed an upward trend; (2) drought conditions differed significantly in different geomorphic subregions; among them, drought under the background of non-karst and peak cluster depression landforms showed a slight upward trend, while drought in other subregions

收稿日期: 2021-10-15

修回日期: 2021-10-30

资助项目: 贵州省高层次创新型人才培养计划(黔科合平台人才(20165674)); 国家自然科学基金地区项目“喀斯特石漠化地区生态资产与区域贫困耦合机制研究”(41661088)

第一作者: 吴小飘(1997—), 女, 贵州安顺人, 在读硕士, 主要研究方向为: 地理信息系统与生态水文遥感。E-mail: 1034306242@qq.com

通信作者: 周忠发(1969—), 男, 贵州遵义人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为: 喀斯特生态环境 GIS 与遥感。E-mail: fa6897@163.com

<http://stbcj.paperonice.org>

showed a downward trend; (3) the drought indexes of all subregions showed a decreasing trend in summer and autumn, while an increasing trend was found in winter; except for the karst plateaus and karst faulted basins, droughts in other geomorphological regions in spring was intensifying; the biggest drought intensification degree occurred in spring and autumn of karst valley and summer and winter of karst tectonic basin; the least drought intensification degree occurred in summer and autumn of non-karst areas and winter and spring of karst plateau areas; (4) the mean values of SPI12 in karst valley areas and non-karst areas had no obvious mutation points; the SPI12 values of karst valley changed abruptly in 1987; the SPI12 values of karst plateaus and peak cluster depressions jumped significantly around 2002 and 2019, respectively; The SPI12 values of karst faulted basins suddenly changed three times within the confidence range. In conclusion, these research results can provide a certain reference for disaster prevention and mitigation of the same type of drought.

Keywords: meteorological drought; SPI index; mutation test; geomorphic zoning; Guizhou Province

干旱作为一种反复出现的极端气候事件,被认为是农业影响最严重的气象灾害之一^[1],剧烈的气候变化和人类对自然的破坏导致我国大部分地区极端干旱事件频发,如 2009—2010 年西南地区出现极端严重干旱和 2011 年黄河中下游春夏干旱^[2]对社会经济发展和生态环境造成了毁灭性的影响。

贵州作为典型的喀斯特地区,岩溶地貌广泛发育,区域性和季节性干旱高发^[3]。已有研究表明,贵州干旱与复杂的地形地貌显著相关^[4];同时,东太平洋的拉尼娜现象、北太平洋以及北大西洋地区的海温异常分布也是引发贵州干旱事件频发的重要原因^[5]。张金凤等^[6]基于 CI 指数对贵州干旱时空规律展开研究,反映出年、季尺度干旱发生频率和周期,龙俐等^[7]利用累积频率,表明订正后的阈值可以较好的反映贵州省的干旱特征,钱莉莉等^[8]基于降水 Z 指数,对贵州省农业干旱发生程度进行识别。陈学凯等^[9]利用 SPEI 干旱指数,从干旱影响范围、干旱周期性等方面系统地分析贵州干旱时空变化规律,熊红福等^[10]基于 2010 年贵州省植被因干旱受损的调查资料探究了极端干旱对贵州省植物的影响,文献^[11-13]从贵州不同地貌分区角度对降水的时空特征进行了探究。

目前,很少有学者从贵州地貌分区角度对贵州干旱的时空分布特征进行探究。因此,本文基于贵州省不同地貌分区,利用 19 个气象站 1951—2020 年的气象数据,以 SPI 指数作为干旱评价指标,通过小波分析、M-K 突变检验等方法探究干旱的时空分布特征、干旱与地貌分区的耦合规律,以为同类型干旱防灾减灾提供一定的参考依据。

1 研究区概况

贵州省位于我国西南部的云贵高原,位于 103°

36'00"—109°35'00"E, 24°37'00"—29°13'00"N, 是世界上最大的喀斯特地貌集中分布区,全省面积 $1.761 \times 10^5 \text{ km}^2$,喀斯特地貌面积占 73.8%^[14]。地势西高东低,地貌分区显著,地形地势复杂。气候类型主要为亚热带季风气候,降雨主要集中于夏季。地形地势和大气环流的共同作用孕育了复杂多样区域性小气候,同时,也导致气候异常、极端天气增多,干旱、冰雹等灾害频发,影响农业安全。全省行政区划、地貌分区、高程及气象站点分布见图 1。

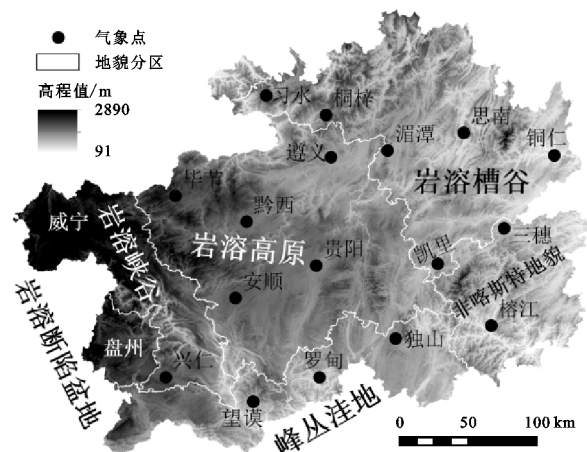


图 1 研究区概况

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文共用到贵州省域 19 个气象台站(表 1)的气象数据,获取于中国气象科学数据服务网(<https://data.cma.cn/>),时间尺度为 1951—2020 年。地貌类型分区数据参考 Tong 等^[15]划分获取,DEM 数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m。

所选站点均经过严格的质量检查和控制,包括气

候极值范围检查、内部一致性检查和时间一致性检查,并筛选数据中的异常值和错误值,个别站点缺失数据采用邻近站点插值方法进行插补,数据可靠性和连续性均能满足研究的需求。

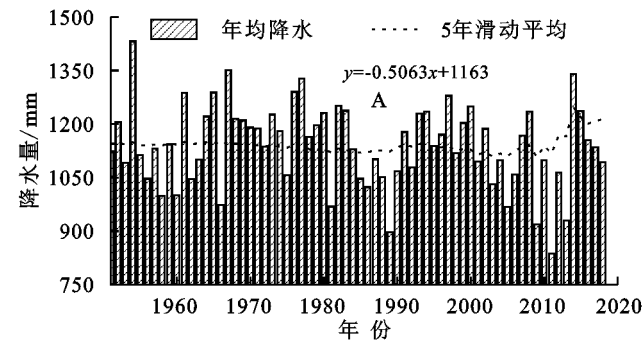
表 1 各气象站点基本信息

站点	ID	纬度/(°)	经度/(°)	海拔/m
榕江	1	25.97	108.53	285.7
三穗	2	26.97	108.67	626.9
独山	3	25.83	107.55	1013.3
罗甸	4	25.43	106.77	440.3
望漠	5	25.18	106.08	566.8
凯里	6	26.60	107.98	720.3
湄潭	7	27.77	107.47	792.2
思南	8	27.95	108.25	416.3
桐梓	9	28.13	106.83	972.0
铜仁	10	27.72	109.18	279.7
习水	11	28.33	106.22	1180.2
盘县	12	25.72	104.47	1800.0
安顺	13	26.25	105.90	1431.1
毕节	14	27.30	105.28	1510.6
贵阳	15	26.58	106.73	1223.8
黔西	16	27.03	106.02	1231.4
遵义	17	27.70	106.88	843.9
威宁	18	26.87	104.28	2237.5
兴仁	19	25.43	105.18	1378.5

2.2 研究方法

(1) 标准化降水指数。标准化降水指数 Standardized Precipitation Index (SPI) 最早由 MCKEE 等^[16]提出,能够一定程度上反映某一时期降水概率,且对干旱较为敏感、计算简单、信息容易获取^[1],适用于计算较长时间序列的降雨数据不同时间尺度的干旱指数。具体计算过程详见相关文献^[17-21]。SPI 等级划分见表 2。

(2) 突变检验。检测气候突变方法众多^[22],但



各有局限,为了减小单一方法检验的结果误差,提高研究结果的可信度和确定性,本文采用曼-肯德尔 (Mann-Kendall) 突变检验法 (M-K 法)、滑动 T 检验、滑动 F 检验、累积距平法、滑动秩检验法和有序聚类法 6 种方法^[23]联合对贵州不同地貌类型 1951—2020 年年均干旱 SPI12 序列的突变特性进行分析,从而获得贵州不同地貌类型的干旱突变特征。

表 2 标准化降水指数 (SPI) 干旱等级划分

干旱等级	类型	SPI
1	无旱	$-0.5 < \text{SPI}$
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPI} \leq -2.0$

3 结果与分析

3.1 全域降水量、气温变化趋势

全域降水量、气温变化是导致干旱的两大主要因素,本文分别对贵州省 70 a 降水和气温以 5 a 为周期滑动平均求其变化趋势(图 2)。贵州省逐年平均降水、5 a 滑动平均降水及变化趋势图显示,1951—2020 年贵州的降水量整体呈缓慢下降的趋势,2020 年出现降水最高值(1 369.73 mm),2011 年出现降水最低值(838.02 mm),1991—2004 年降水的下降趋势较明显,且呈现出一定的周期性特征,2004—2020 年降水滑动平均开始呈现出缓慢增加的趋势。贵州近 70 a 平均气温总体呈上升趋势,年际之间存在着一定的波动,1951—1989 年贵州气温整体较低,其中,1975 年和 1984 年的平均温度异常偏低,1990—2020 年温度整体呈现上升趋势,其中,1998 年、2009 年以及 2015—2020 年温度异常偏高。

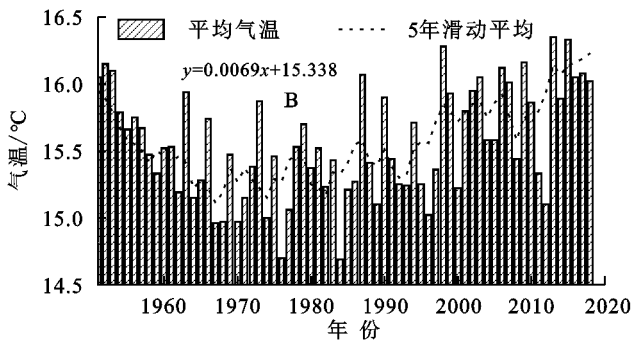


图 2 贵州省近 70 a 降水量和温度变化趋势

3.2 降水、气温距平分析

通过各年份降水量、温度减去降水、温度多年平均值获得降水量、气温距平值(图 3)。贵州近 70 年降水量多年平均值为 1 145.05 mm,1954 年降水量最

大(1 431.78 mm),2011 年降水量最小(838.02 mm),降水量呈升降交替波动趋势,降水量变化呈一定的周期性变化。贵州近 70 年气温多年平均值为 15.56℃,气温最高值出现在 2013 年(16.35℃)、最低值出现在

1984 年(14.69℃),1951—1984 年气温距平曲线呈现出逐步下降,1985—2020 年气温距平曲线呈现出逐

渐上升的趋势,1984 年年均气温最低(14.69℃),2020 年年均气温最高(16.45℃)。

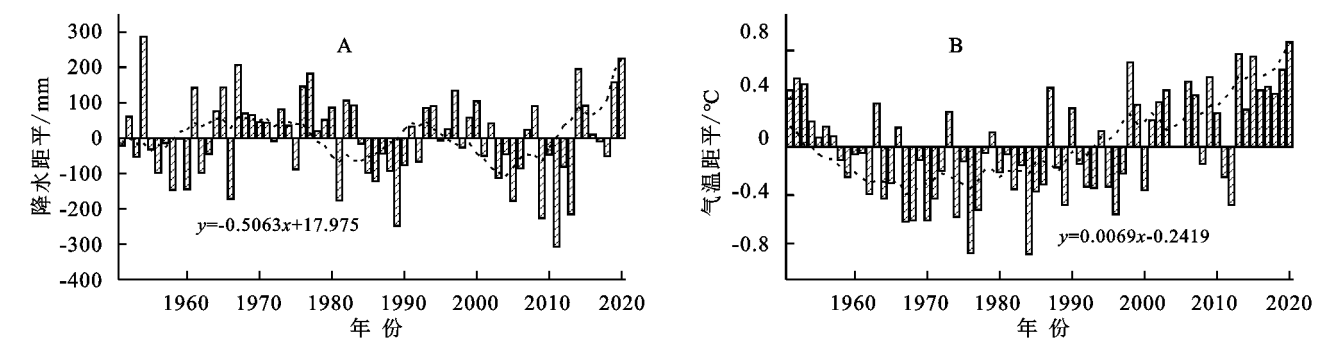


图 3 贵州省年均降水、气温距平变化趋势

3.3 不同地貌分区干旱时序特征

3.3.1 SPI 年际的时域演变特征 选取 12 个月时间尺度的 SPI 分析各地貌区的年际尺度干旱演变特征,统计各分区逐年平均 SPI 值(图 4)。贵州各地貌分区年际 SPI 值都呈现出不同幅度的波动变化,其中非喀斯特和峰丛洼地地区 SPI 曲线斜率为正,两个分区的旱情呈现缓和趋势,二者上升速率表现为:非喀斯特(0.02/10 a) > 峰丛洼地(0.01/10 a)。岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶高原和岩溶断陷盆地的 SPI 斜率为负,值为减量,4 个地貌分区在近 70 a 的旱情整体呈加剧趋势,各地貌分区 SPI 速率绝对值关系为:岩溶断陷盆地(−0.09/10 a) > 岩溶峡谷(−0.07/10 a) > 岩溶高原(−0.03/10 a) > 岩溶槽谷(−0.02/10 a),岩溶断陷盆地旱情加剧趋势最明显。各地貌分区在近 70 a 出现干旱的次数依次为:岩溶槽谷 > 岩溶断陷盆地 > 岩溶峡谷 > 岩溶高原 > 峰丛洼地 > 非喀斯特, SPI 最小值分别出现在 2006 年(SPI = −1.16), 2012 年(SPI = −1.96), 1990 年(SPI = −1.42), 2010 年(SPI = −1.51), 2013 年(SPI = −1.35), 1969 年(SPI = −1.58)。

6 个地貌分区出现干旱的年份进行统计结果显示,岩溶槽谷、岩溶断陷盆地、岩溶峡谷、岩溶高原、峰丛洼地和非喀斯特干旱频率分别为:24.29%, 22.86%, 20.00%, 18.57%, 17.14%, 12.86%。各分区干旱年份大部分集中在 20 世纪 50, 60 年代以及 1986—1991 年、2003—2008 年和 2010—2016 年 3 个时间段, 2010—2013 年, 除非喀斯特地区外, 其他 5 个分区均发生了干旱。

3.3.2 SPI 季节干旱时域演变特征 不同地貌分区的季节干旱时间变化趋势见图 5。春季除岩溶高原和岩溶断陷盆地外其余地貌区 SPI 曲线斜率均为负, 表明干旱呈加剧趋势; 岩溶高原和岩溶断陷盆地 SPI 曲线斜率均为正, 且岩溶高原(0.002 1/a) > 岩溶断陷盆地(0.001 4/a), 表明岩溶高原在春季的旱情加

剧趋势最弱, 在 1991 年出现了历史上少有的春旱, 这与肖进原^[24]在贵州喀斯特高原自然灾害一文中的研究结果相一致。夏秋季节, 各地貌分区的 SPI 曲线值均为负, 旱情均呈加剧趋势, 其中, 旱情加剧趋势最剧烈为岩溶断陷盆地夏季和岩溶槽谷秋季, 夏秋季节非喀斯特地区加剧趋势强度均最小。冬季, 各个地貌分区旱情均得到缓解, 其中, 岩溶断陷盆地最为明显, 峰丛洼地次之, 岩溶高原程度最低, 表现为: 岩溶断陷盆地(0.057/10 a) > 峰丛洼地(0.035/10 a) > 非喀斯特(0.027/10 a) > 岩溶槽谷(0.021/10 a) > 岩溶峡谷(0.013/10 a) > 岩溶高原(0.012/10 a)。其中, 岩溶断陷盆地在 1972 年、2015 年发生了重旱事件(SPI = −1.6)和特旱事件(SPI = −2.2)。

综上, 在春秋季节, 岩溶槽谷干旱加剧程度最为明显, 夏冬季节, 岩溶断陷盆地旱情加剧最明显, 非喀斯特地区的夏季和秋季旱情加剧趋势均最弱, 据资料记载, 1972 年贵州发生百年罕见特大夏旱, 范围波及六大地貌区, 全省 92.8% 以上县市干旱日数在 50 d 以上^[25]。

3.4 不同地貌分区干旱空间特征

3.4.1 年尺度干旱空间特征 各站点年尺度干旱频次空间分布见图 6, 贵州干旱频次总体上表现为东部、西南部和中部地区较高。六大地貌分区的轻旱频次均较高。中旱频次较高的地区分布在岩溶槽谷的西部、岩溶高原的西北部和中部地区、非喀斯特地貌的西南部、峰丛洼地的中部地区、岩溶峡谷的西北部 and 岩溶断陷盆地的西部地区。重旱涉及地区较广, 频次较低, 岩溶槽谷地区的习水、桐梓、思南、铜仁和凯里, 非喀斯特地区的三穗和榕江, 峰丛洼地的独山、罗甸、望谟, 岩溶高原的毕节、黔西、安顺、贵阳, 岩溶峡谷的威宁和兴仁以及岩溶断陷盆地的盘县均出现过重旱, 其中, 盘县和兴仁地区重旱的发生频次相较于其他站点较高。特旱的发生频次最低, 仅存在于在三穗、黔西和罗甸地区。

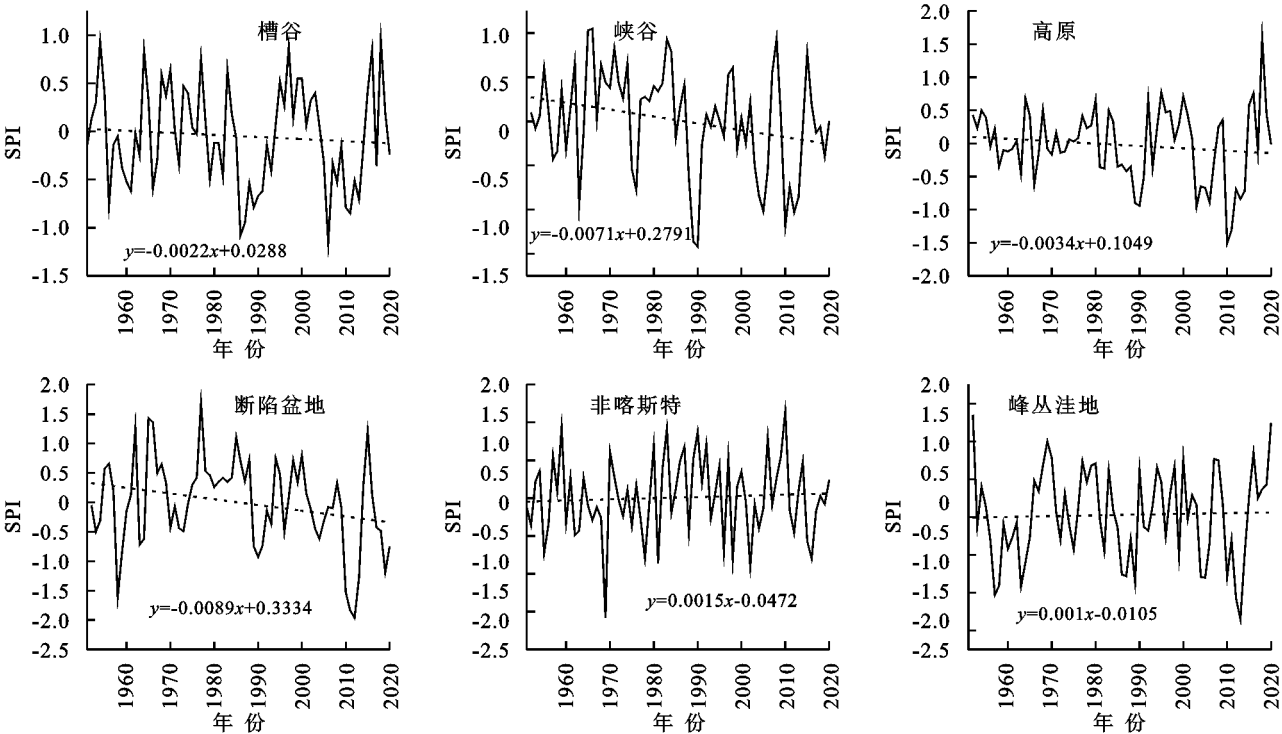


图 4 不同地貌分区年 SPI 指数随时间的变化

3.4.2 季尺度干旱空间分布 季节尺度的干旱空间分布结果显示(图 7),春旱频次较高的区域包括榕江、罗甸、铜仁、毕节和贵阳等,其中铜仁市的干旱频次最高,主要原因可能是铜仁地区岩溶广泛发育,土层薄,涵养水源能力较差。从干旱等级分析,除榕江、罗甸、望谟、桐梓、贵阳、遵义和威宁外,其他站点均出现过重旱,其中,安顺和独山的重旱频次较高。除威宁外其余 18 个站点都曾有过中旱事件发生,其中,盘县、罗甸和榕江属中旱频次高发区。轻旱所有站点均有发生,其中,贵阳地区发生频次最高,其次是铜仁、榕江和毕节地区。

夏季贵州干旱频次普遍偏高。其中,发生频次较高区域包括三穗、罗甸、独山、湄潭、思南、铜仁、盘县、贵阳一带,可能是因为该地区夏季水热分布不均,地形以山地为主,耕地大都高而陡,灌溉难度大,水土流失,极易造成干旱。从干旱等级分析,轻旱频次高发区集中在贵州省的西部、中东部、东南部和东北部,独山、铜仁、安顺是重旱易发区,主要是因为该地区雨季较早过境,盛夏高温少雨则易形成夏旱,且旱情往往比较严重。

秋旱频次较高的地区集中在榕江、思南、罗甸、铜仁和安顺地区。从干旱等级分析,除湄潭、遵义和习水外,研究区各气象站点发生轻旱的频次普遍较高,中旱主要发生在贵州省的东北部,秋季无重旱和特旱事件。

冬旱频次较高的地区分布在桐梓、黔西、毕节、榕江和独山地区。轻旱在各气象站点发生的频次普遍较高,

可能与冬季气候干燥少雨有关,中旱的频次则普遍偏低,重旱仅在盘县、安顺、兴仁和罗甸地区出现。

综上,研究区干旱频次在不同季节的空间分布差异较大,主要是由于降水量时空分布差异所致^[25]。6 个地貌分区中发生轻旱的频次普遍偏高,这可能与贵州本身地形复杂、气候多样、生态脆弱、水土易流失等因素有关。从季节尺度来看,夏季干旱频次最高且特旱、重旱集中,其后依次是春季>秋季>冬季。

3.5 SPI 指数在贵州不同地貌类型的适用性分析

SPI 的适用性分析在全国多个地区均有涉及^[26-29],为探究 SPI 指数在贵州不同地貌类型的适用性,本文使用 1951—2020 年来贵州典型干旱事件与同期 SPI 进行验证(表 3),计算得到的同期 SPI 所表征的干旱事件与实际发生的干旱事件具有较高吻合度,表明 SPI 指数在贵州各地貌类型的干旱监测与分析中具有较好的适用性。

3.7 不同地貌类型干旱突变特征分析

对贵州六大地貌分区 SPI12 值进行 M-K 突变检验(图 8),岩溶槽谷(图 9A)、岩溶高原(图 9C)、非喀斯特(图 9E)和峰丛洼地(图 9F)的 UF 曲线都在 95%置信范围内围绕“0”刻度上下波动,UF(k)曲线值均未超过 0.05 显著水平线,无明显的波动。各地貌类型的 SPI12 的 UF 和 UB 曲线在显著水平线之间均有多个突变点。岩溶槽谷 SPI12 值突变检验的统计量曲线在置信区间内有 7 个交点,分别在 1958 年、1964 年、1968 年、1985 年、1994 年、2000 年和 2019 年。

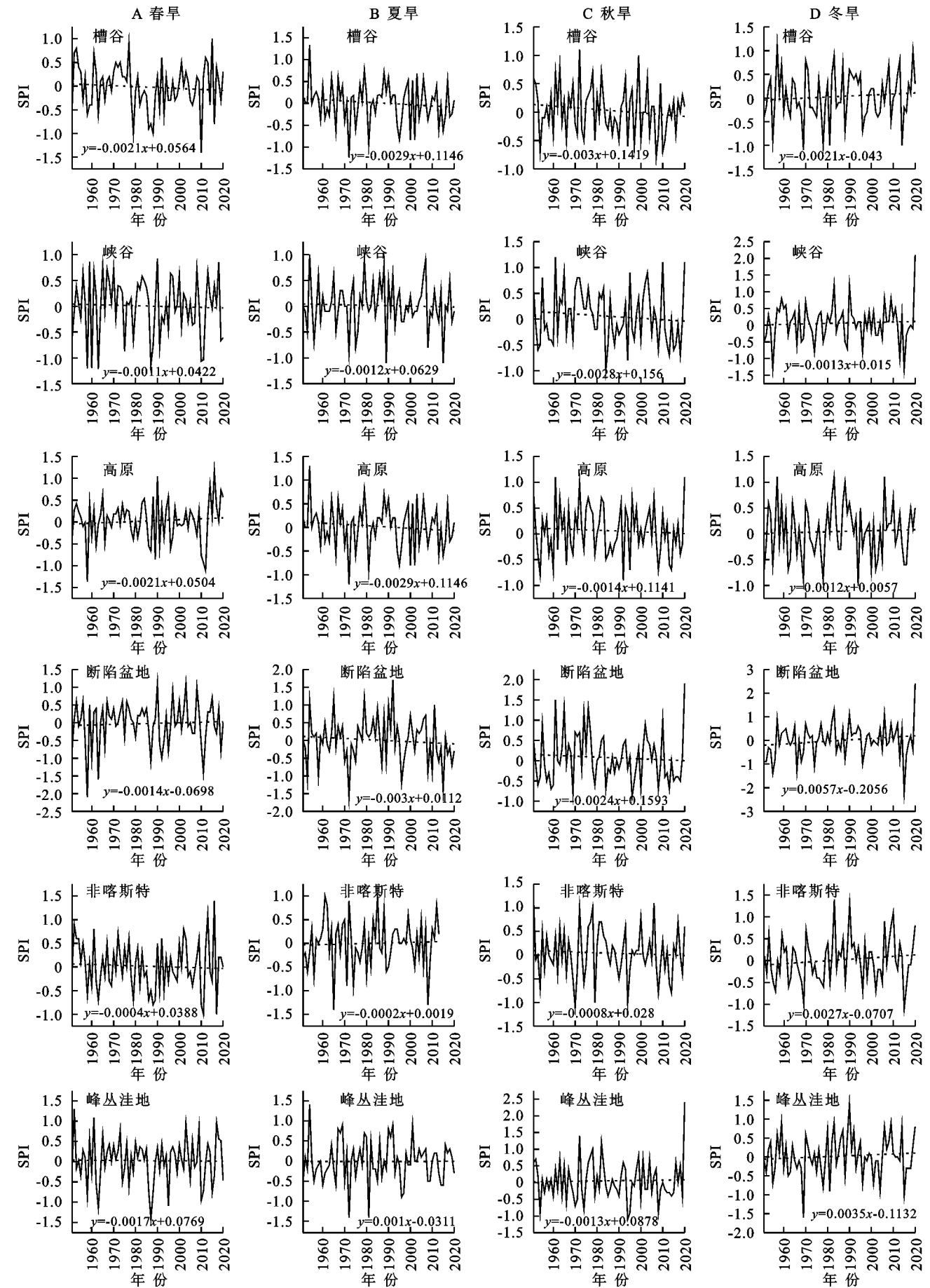


图 5 各地貌分区四季 SPI 指数随时间的变化

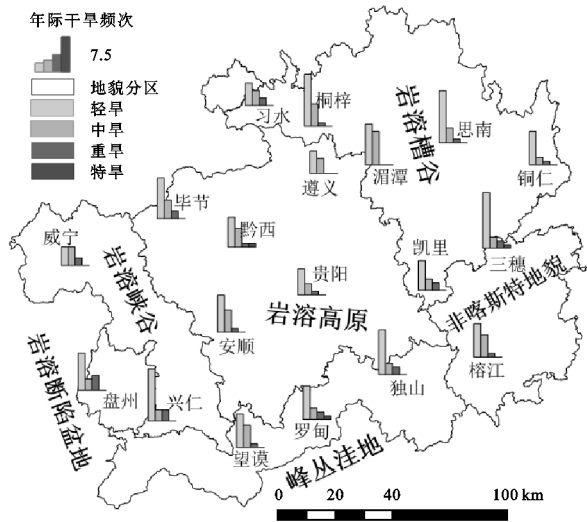


图 6 不同地貌分区各站点年尺度干旱频次空间分布
岩溶峡谷的 SPI12 值在 1987 年前后存在显著跳跃,

其 $UF(k)$ 曲线值在 1971—1975 年以及 1984 年均超过 0.05 显著水平线,且 $UF(k)$ 曲线值为正,表明在此期间岩溶峡谷 SPI 均值总体呈上升趋势,干旱有显著减弱趋势。岩溶高原的 UF 和 UB 曲线在 1955 年出现一个交点以及 1982 年前后出现两个交点。岩溶断陷盆地在 1965—2009 年 $UF(k)$ 曲线值大于“0”刻度,SPI 均值呈现增大—减小—增大—减小的趋势,且在 1986 年前后 UF 曲线超过 0.05 显著水平线,干旱有显著减弱趋势。非喀斯特地区在置信区间内 UF 和 UB 曲线出现多个交点,但 UF 曲线统计值没有超过置信度水平零界线,变化趋势不明显。峰丛洼地的 UF 和 UB 曲线在 1952 年和 1995 年的附近都出现两个交点,且分别 1966 年、1986 年和 2019 年各相交一次。但由于峰丛洼地的 UF 曲线都在临界线($U=0.05$)范围内,SPI12 没有严格意义上的突变点。

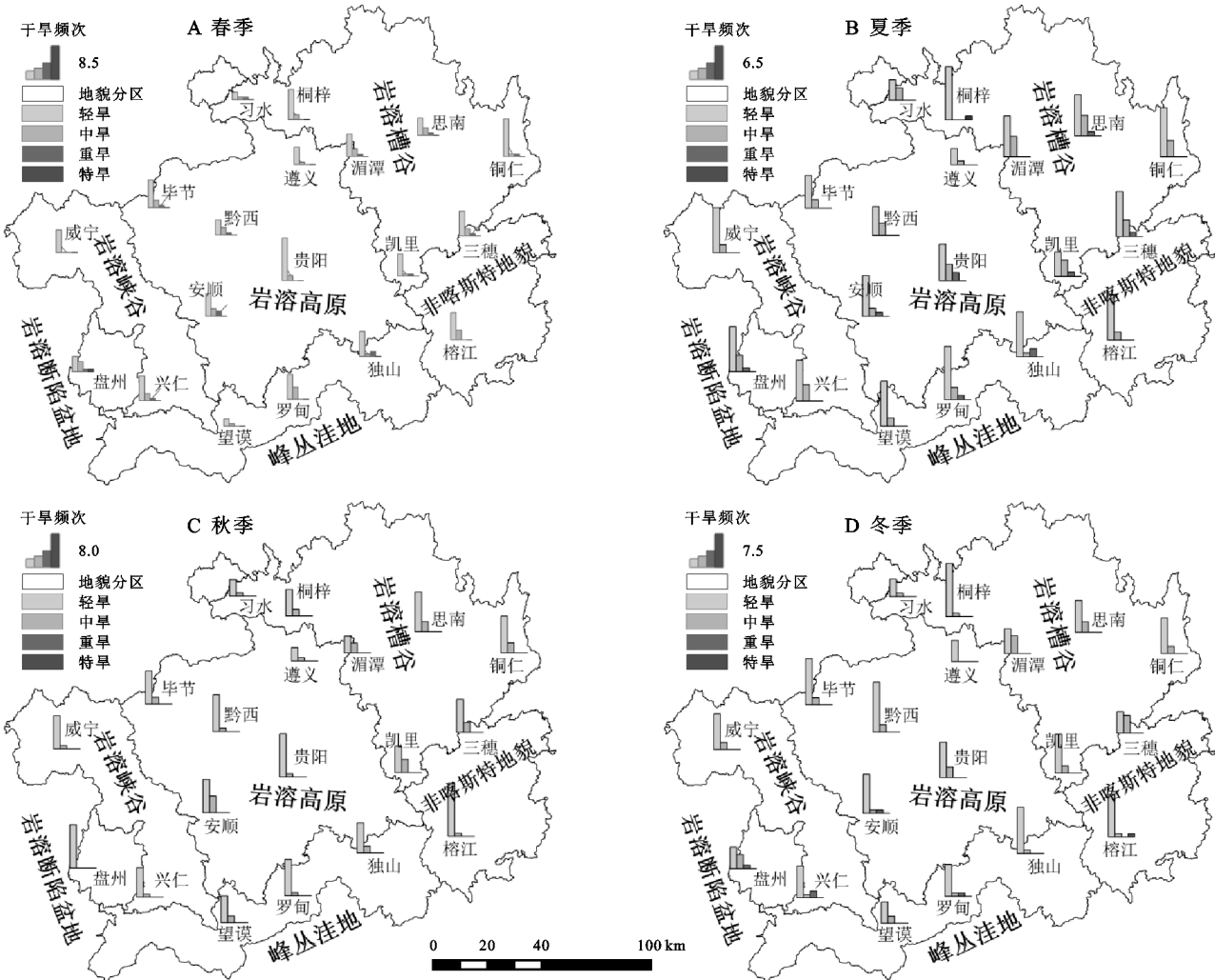


图 7 不同地貌分区站点季尺度干旱频次空间分布

利用均值突变来反映气候基本状况的变化,利用滑动 T-检验法对贵州不同地貌类型的 SPI12 时间序列进行突变分析,绘制曲线图(图 9),并对 M-K 突变检验的突变点进行可信度检验。在 20 世纪 80 年代

中期前,岩溶槽谷的 SPI12 值呈波动上升的趋势,随后出现两次下降—上升的交替,在 1985 年,滑动 T 检验统计值达到最大值,说明此处可能发生了突变,对比之前的 M-K 突变分析结果,岩溶槽谷 SPI12 值

在 1985 年发生了 1 次突变。在 20 世纪 80 年代中期前,岩溶峡谷的 SPI12 值呈波动上升的状态,随后呈下降状态,且在 1987 年统计值达到最大值,对比图 8B 的分析结果,岩溶峡谷的 SPI12 值在 1987 年前后存在显著跳跃,岩溶峡谷 SPI12 值在 1987 年发生了

1 次突变。岩溶高原、岩溶断陷盆地、非喀斯特和峰丛洼地的滑动 T 检验统计值曲线的最高点依次出现在 2002 年、2001 年、1981 年和 2019 年,其中,峰丛洼地在 2019 年发生了 1 次突变,突变年份与 M-K 检验的结果相一致。

表 3 贵州典型干旱事件与同期 SPI 验证比较

起止时间(年-月-一年-月)	跨越季节	标准化降水指数(SPI)
1962-11—1963-04	秋冬春	(3)—1.22,中旱,(2)—1.60,重旱(5)—1.14,中旱
1966-01—1966-03	冬春	(2)—1.29,中旱
1966-06—1966-09	夏秋	(4)—1.44,中旱
1968-12—1969-04	冬春	(1)—1.13,中旱(6)—1.58,重旱(5)—1.03,中旱
1972-06—1972-08	夏	(1)—1.34,中旱(2)—1.55,重旱(6)—1.38,中旱
1973-12—1974-03	冬春	(2)—1.08,中旱
1977-12—1978-04	冬春	(1)—1.03,中旱
1978-12—1979-05	冬春	(1)—1.03,中旱
1986-12—1987-04	冬春	(3)—1.15,中旱(2)—1.2,中旱(5)—1.42,中旱
1988-03—1988-07	冬春	(3)—1.15,中旱(5)—1.07,中旱
1988-10—1989-02	秋冬	(3)—1.07,中旱
1989-04—1989-07	春夏	(4)—1.32,中旱
1992-08—1992-11	夏秋	(2)—1.03,中旱
1995-12—1996-02	冬	(2)—1.23,中旱(3)—1.31,中旱
2003-08—2003-11	夏秋	(4)—1.24,中旱
2007-10—2008-02	秋冬	(5)—1.27,中旱
2009-05—2010-05	春夏秋冬	(3)—1.10,中旱(2)—1.42,中旱(1)—1.43,中旱
2011-02—2011-09	冬春夏秋	(6)—1.03,中旱
2012-10—2013-02	秋冬	(3)—1.31,中旱

注:序号(1—6)分别表示:(1)岩溶槽谷(2)岩溶断陷盆地(3)岩溶峡谷(4)岩溶高原(5)峰丛洼地(6)非喀斯特。

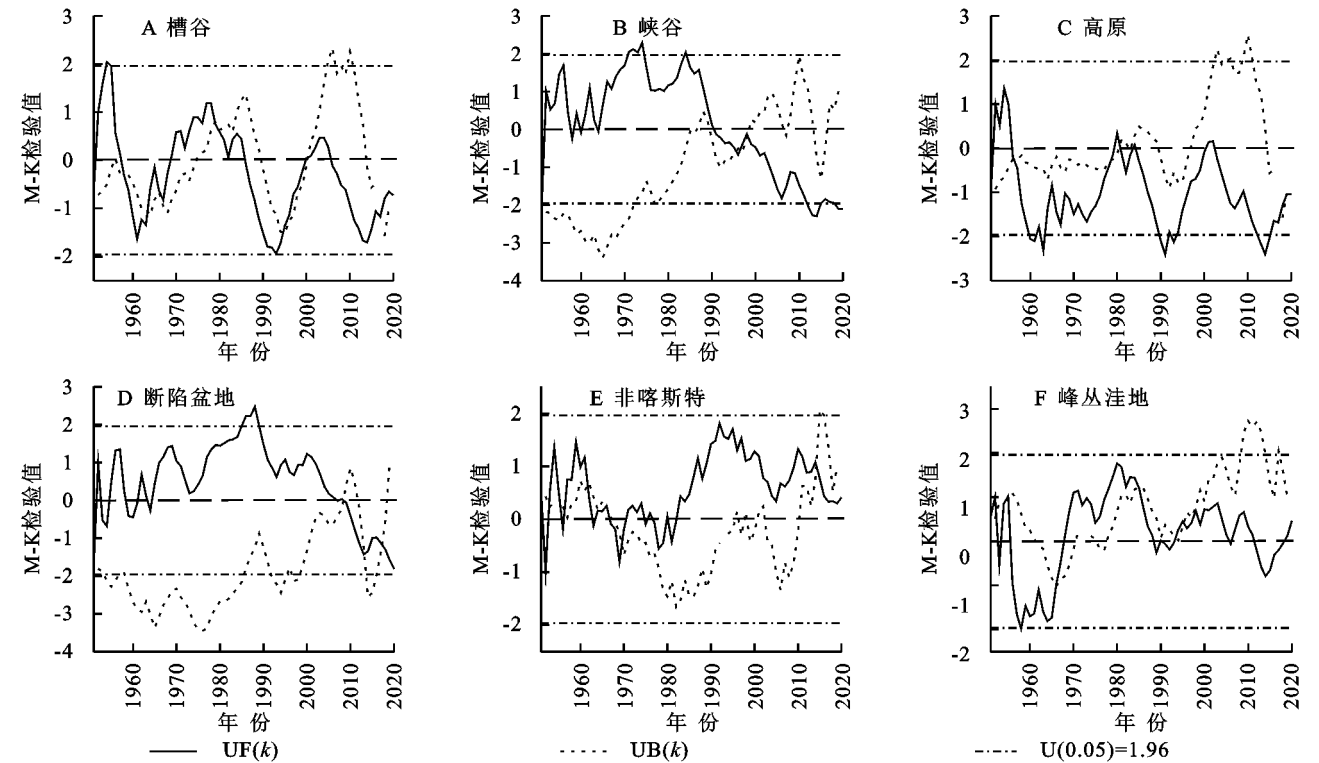


图 8 不同地貌类型 M-K 突变检验曲线

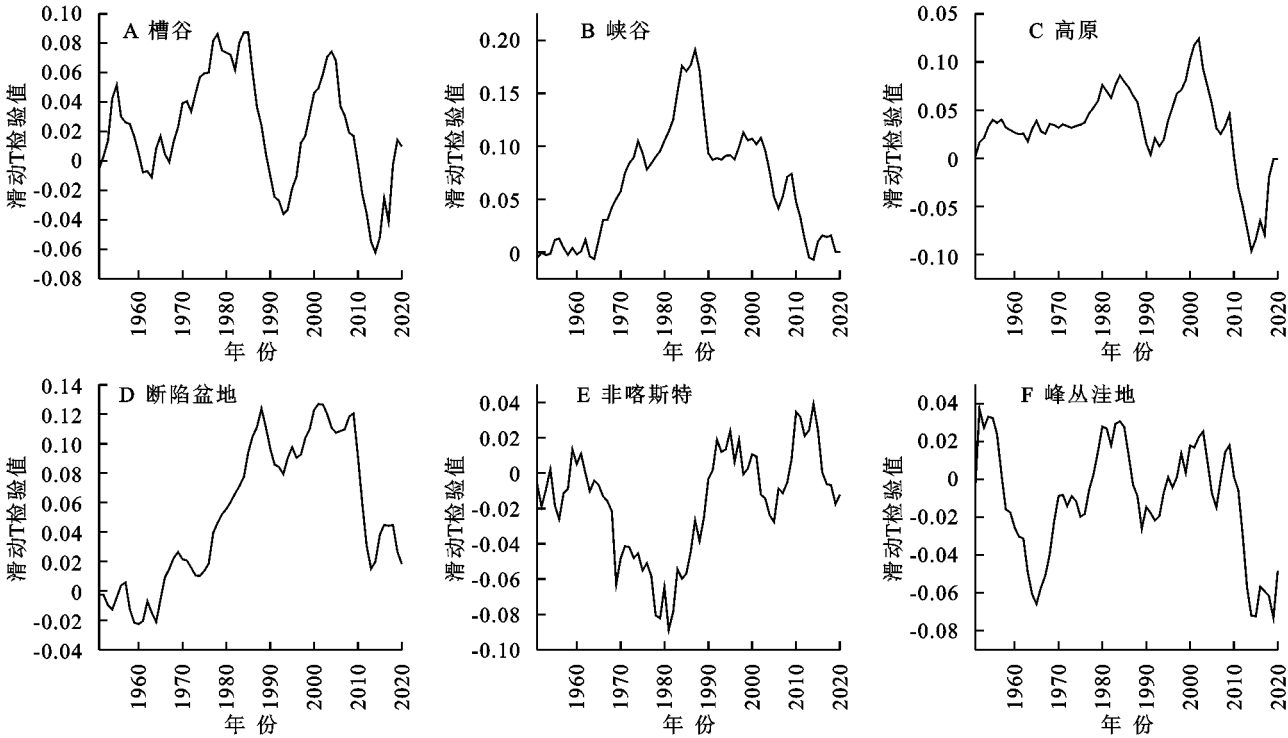


图 9 滑动 T 检验统计量曲线

采用滑动 F 检验方法对不同地貌类型的 SPI12 值序列进行识别检验,当统计值达到最大值的时候,则认为该处存在突变点。累积距平法(图 11)得出结

果与滑动秩和检验法结果(图 13)具有较高的吻合度,但有序聚类法统计的结果(图 12)与其他几种结果的检验结果一致性较差。

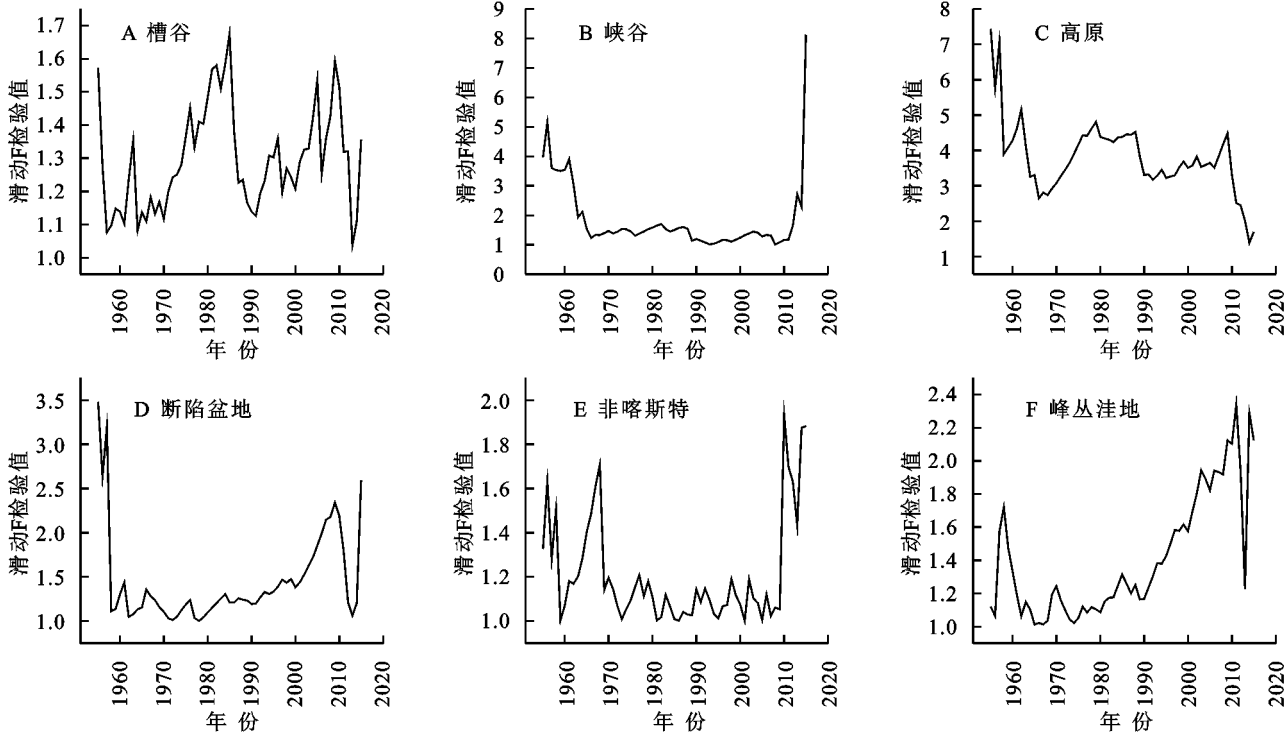


图 10 滑动 F 检验统计量

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过分析以贵州为典型喀斯特聚集区的 70 a 时

间尺度气象资料,从时空两个维度研究了不同喀斯特地貌背景下的干旱发生频率和程度特征。由研究结果显示,降水量的减少和气温的持续升高是导致干旱发生的重要因素之一。贵州近 70 年降水量总体呈下

降趋势,其中 2011 年出现降水量最低值,2009—2013 年贵州在南支槽强度偏弱、孟加拉湾水汽输送偏少以及弱极涡背景下,AO 负异常冷空气路径偏东,降水量骤减^[30],导致期间除部分非喀斯特地区外,其余地貌分区均发生不同程度的干旱。

1998 年、2009 年以及 2015—2020 年温度异常偏高。值得注意的是由于 2009 年降水量偏低,气温偏高,导致该次干旱持续时间最长^[5]。在全球气候日益复杂化,极端天气频发的大背景下,通过长时序干旱特征分析表明喀斯特地区干旱发生频率和程度上均有增强趋势。

贵州 1951—2020 年气温总体呈上升趋势,其中

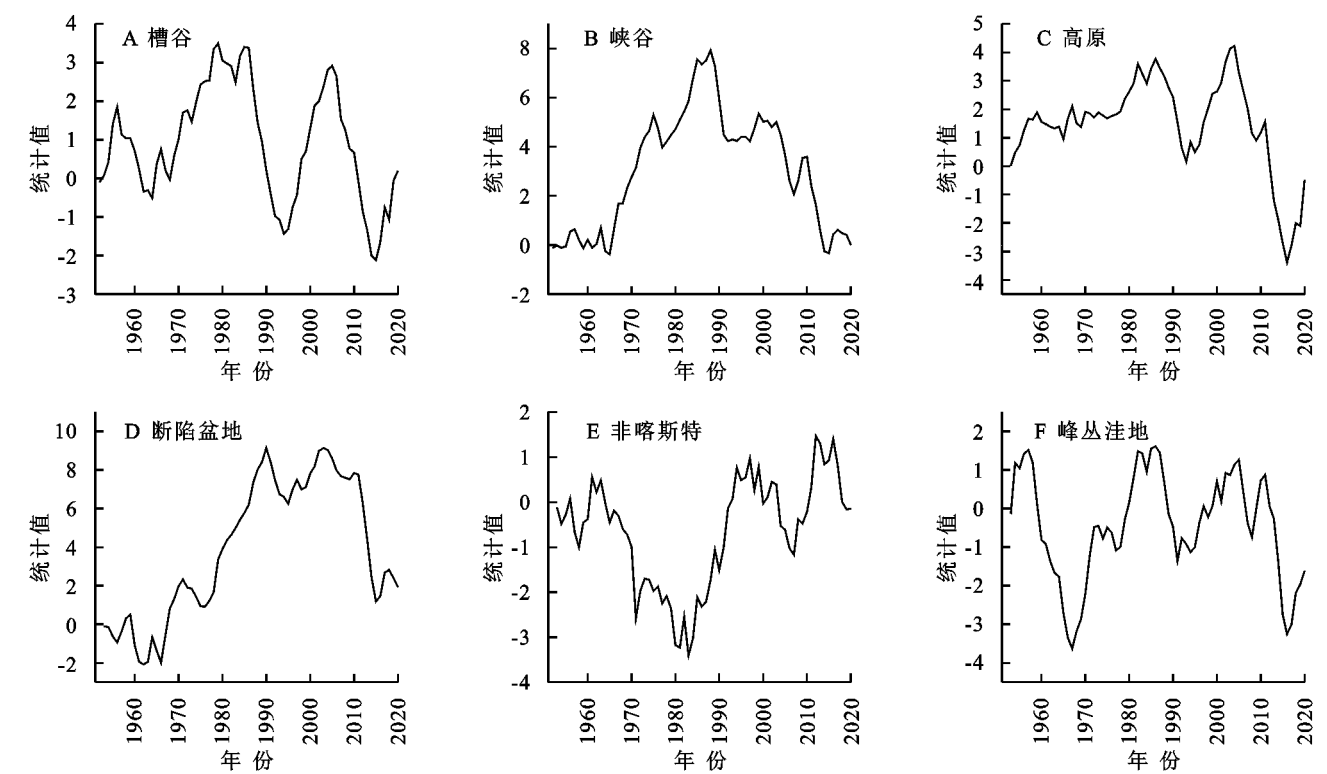


图 11 累计距平检验统计量

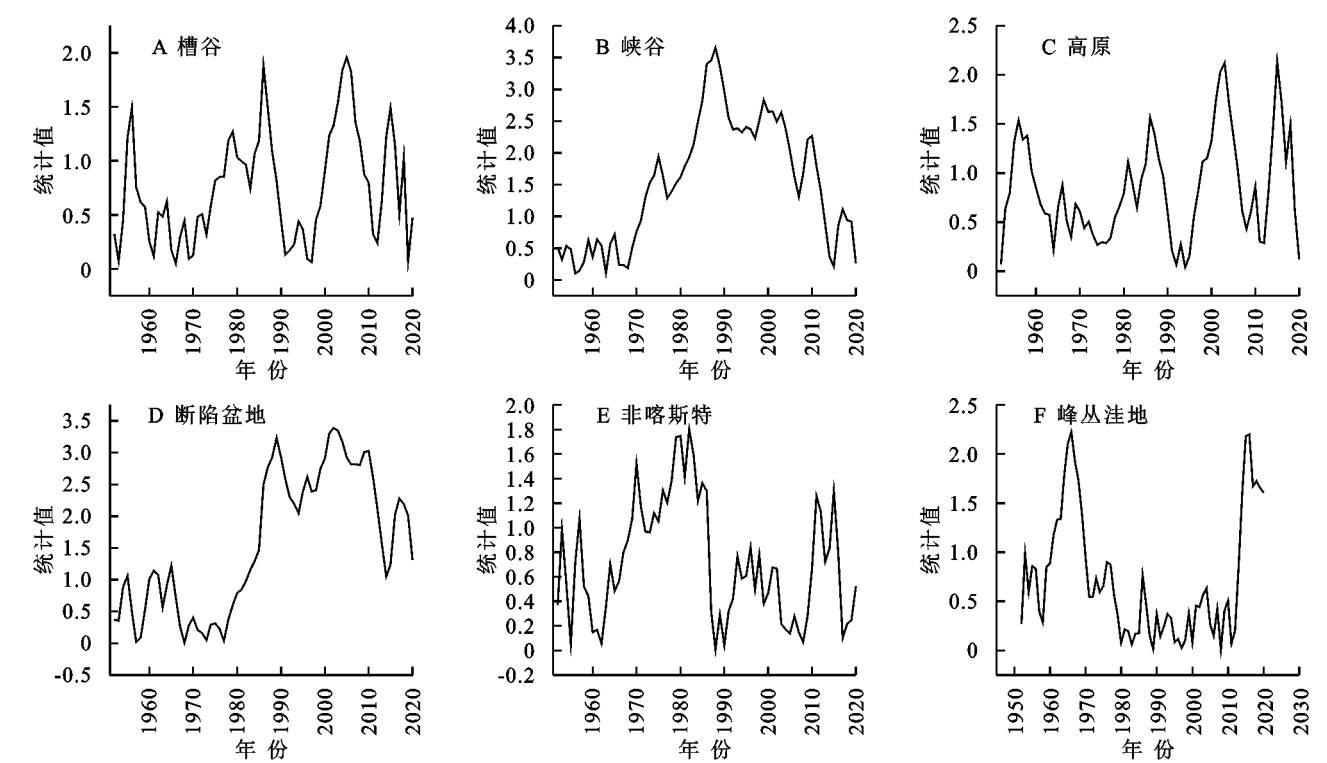


图 12 滑动秩和检验统计

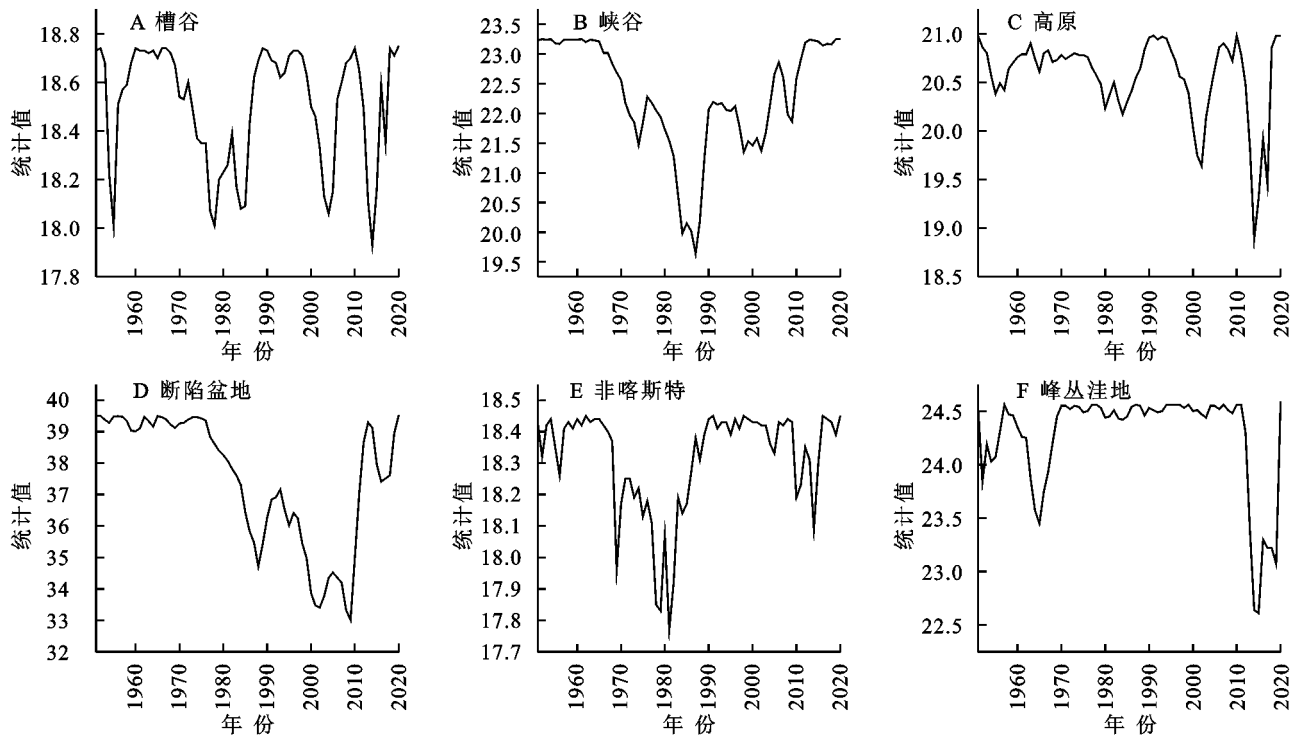


图 13 有序聚类统计

干旱发生频率和程度在不同地貌背景下存在显著的时空差异。从时间尺度上看,贵州夏季干旱频次最高且特旱、重旱集中,其后依次是春季>秋季>冬季,这与王飞等^[31]贵州危害最大的是夏旱,春旱和秋旱次之的研究结果一致,但与毛春艳等^[4]研究结果存在一定的差异,这与本研究加入了气温这一影响因子相关。夏季虽然多雨,但气温高,蒸发量大,导致干旱发生频率随之提高。从空间尺度上看,贵州干旱频次总体上表现为东部、西南部和中部地区较高,各地貌分区近 70 年出现干旱的次数依次为:岩溶槽谷>岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>岩溶高原>峰丛洼地>非喀斯特。贵州近 70 年旱情趋势显示,非喀斯特和峰丛洼地地区旱情呈逐渐减缓趋势,这与该地区多年来采取众多生态恢复措施,植被覆盖得到恢复等因素有关^[32];其余 4 个地貌分区旱情均呈现不同程度的加剧趋势,与李月等^[33]研究结果具有较高的一致性,其中,岩溶断陷盆地旱情加剧趋势最为明显,由于该地区碳酸盐岩层厚度大,分布连续,具有极强的可溶性和透水性,加之广泛纵深分布的地下水网系统,大气降水大量下渗^[34],降水量锐减等^[13]多重因素共同作用所致。综合本研究结果,贵州干旱主要受降水时空分布不均、地形地貌、极端高温等自然因素限制,治理难度较大,未来应从提升干旱承载力角度出发,建立健全水利设施、完善灌溉系统、种植耐旱作物等方面加强自身防灾减灾能力。

该研究主要是从降水量与气温的角度结合 SPI 指数分析贵州不同地貌分区干旱的时空特征,对农作物种植结构、植被状况、灌溉条件和人类活动干预下影响下,干旱事件发生的频率和程度未开展相关工作。下一步研究将会构建完善的干旱影响指标并进行深入探讨,建立响应喀斯特山区农业安全、粮食安全的干旱预测机制与应急措施。

4.2 结论

(1) 贵州各地貌分区在年际尺度出现干旱的频次表现为:岩溶槽谷>岩溶断陷盆地>岩溶峡谷>岩溶高原>峰丛洼地>非喀斯特,非喀斯特和峰丛洼地地区旱情趋势相对稳定,岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶高原和岩溶断陷盆地的旱情有加剧的趋势。

(2) 贵州旱情呈季节性变化。春季除岩溶高原和岩溶断陷盆地外,其余地貌分区的旱情都有加剧趋势,夏秋季节六大分区的干旱指数均减小,表现为干旱化趋势,而冬季则均呈加剧趋势。

(3) 贵州干旱频次呈东高西低,旱情呈东轻西重空间分布特征。具体表现为:岩溶峡谷和岩溶盆地地区干旱频次低,旱情以特旱、重旱为主;岩溶高原地区干旱频次较低,以中旱为主;岩溶槽谷、峰丛洼地和非喀斯特地区,干旱频次高,主要以轻旱为主。

参考文献:

- [1] 宗燕,王艳君,翟建青.海河流域气象干旱时空特征分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(12):198-202.

- [2] Li X, Li Y, Chen A, et al. The impact of the 2009/2010 drought on vegetation growth and terrestrial carbon balance in Southwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269: 239-248.
- [3] 康为民, 罗宇翔, 向红琼, 等. 贵州喀斯特山区的 NDVI-Ts 特征及其干旱监测应用研究[J]. *气象*, 2010, 36(10): 78-83.
- [4] 毛春艳, 戴丽, 杨广斌, 等. 1960—2016 年喀斯特山区干旱时空动态分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(3): 64-72, 79.
- [5] 严小冬, 李扬, 夏阳, 等. 1961—2016 年贵州省持续性干旱特征及成因分析[J]. *中低纬山地气象*, 2019, 43(3): 3-7.
- [6] 张金凤, 冯杰, 何祺胜. 基于 CI 指数的贵州省干旱时空变化规律研究[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(4): 5-8.
- [7] 龙俐, 李霄, 张东海, 等. 贵州省综合气象干旱阈值修订研究[J]. *贵州气象*, 2014, 38(6): 13-15.
- [8] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 37(1): 10-14, 19.
- [9] 陈学凯, 雷宏军, 徐建新, 等. 气候变化背景下贵州省农作物生长期干旱时空变化规律[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(10): 1735-1749.
- [10] 熊红福, 王世杰, 容丽, 等. 极端干旱对贵州省喀斯特地区植物的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1127-1134.
- [11] 刘炜, 焦树林, 李银久, 等. 贵州省 1960—2019 年不同地貌类型降水时空特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 159-171.
- [12] 莫跃爽, 索惠英, 赵宗权, 等. 近 59 年来贵州省不同地貌类型的降水变化特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 46-52.
- [13] 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.
- [14] 赵志成, 熊康宁, 陈浒, 等. 干旱对贵州喀斯特石漠化生态治理区土壤动物的影响[J]. *西南农业学报*, 2011, 24(3): 1167-1172.
- [15] Tong X, Wang K, Yue Y, et al. Quantifying the effectiveness of ecological restoration projects On longterm vegetation dynamics in the karst regions of Southwest China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2017, 54: 105-113.
- [16] McKee T, Doesken N, Kleist. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C] // *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. 1993, 17(22): 179-183.
- [17] 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 气象干旱等级 (GB/T20481-2006)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 12-17.
- [18] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. *干旱气象*, 2017, 35(5): 709-723.
- [19] 王江涛. 基于华北地区气象指数 SPI 干旱时空分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4): 203-207.
- [20] 李常德, 王磊, 李晓霞, 李奇三, 常臻, 马真. 基于 SPI 指数的黄土高原区域旱涝特征分析[J]. *暴雨害*, 2020, 39(5): 524-531.
- [21] 王乐, 訾丽. 基于 SPI 指数的长江上游多尺度旱涝特征分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2022, 32(5): 30-37.
- [22] 张丕远, 葛全胜. 气候突变: 有关概念的介绍及一例分析—我国旱涝灾情的突变[J]. *地理研究*, 1990, 9(2): 92-100.
- [23] 周园园, 师长兴, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1361-1369.
- [24] 肖进原. 贵州喀斯特高原自然灾害分析[J]. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 1996, 14(1): 70-74.
- [25] 罗宁. 中国气象灾害大典: 贵州卷[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [26] 慎东方, 商崇菊, 方小宇, 等. 贵州省干旱历时和干旱烈度的时空特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(7): 138-143.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 69-72.
- [28] 王舒, 肖高翔. 4 种气象干旱指数在新疆的适用性分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(9): 86-92, 100.
- [29] 王荣江, 李谢辉, 周任君, 等. 3 种气象干旱指数在四川省的适用性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 734-744.
- [30] 胡学平, 王式功, 许平平, 等. 2009—2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析[J]. *气象*, 2014, 40(10): 1216-1229.
- [31] 王飞. 贵州干旱特征及预警模型研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2016.
- [32] 闫利会, 周忠发, 黄登红, 等. 基于 Landsat 8 的喀斯特峰丛洼地地貌信息提取[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(28): 182-188.
- [33] 李月, 白晓永, 周运超, 等. 基于 SPEI 的贵州省近 60 年干旱时空特征分析[J]. *中国水土保持*, 2015(7): 57-60.
- [34] 邓晓红, 毕坤. 贵州省喀斯特地貌分布面积及分布特征分析[J]. *贵州地质*, 2004, 21(3): 191-193.