

基于相对湿润指数的贵州省气象干旱时空变化特征研究

游漫¹, 贺中华^{1,2,3}, 张浪¹, 杨铭珂¹, 皮贵宁¹

(1.贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 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:为探究贵州省各区域干旱发生频率、强度及不同等级干旱的时空分布特点,基于贵州省 17 个气象站 1981—2019 年逐日气象数据,利用相对湿润指数,同时结合 Couple 二维分布函数,探讨了干旱强度和干旱频率的联合、条件概率特征,以揭示贵州省气象干旱的时空分布规律。结果表明:(1) 贵州省 1981—2019 年气象干旱强度呈减弱—增强趋势,整体上呈减弱的趋势,干旱频率呈上升趋势。(2) 贵州省年与季尺度发生干旱强度在空间上分布有所不同,季尺度中,冬旱强度最强,秋旱和夏旱次之,春旱强度较弱;(3) 年及冬、春季节干旱频率在空间上呈西高东低的分布格局,夏、秋季节分布较为一致;季尺度中,干旱频率呈冬季最高,春、秋季次之,夏季最低;(4) 在干旱联合特征中,季尺度的联合特征值呈春季>冬季>秋季>夏季,在各季节干旱强度的条件下,各季节干旱频率的条件概率特征值表现为夏季>秋季>冬季>春季。综上,贵州省气象干旱强度逐渐降低,干旱频发,呈春旱高频率、高强度,夏旱低强度、高频率。

关键词:相对湿润指数; 气象干旱; 时空特征; 贵州省

中图分类号:P42

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0255-08

Spatiotemporal Variation Characteristics of Meteorological Drought in Guizhou Province Based on Relative Humidity Index

YOU Man¹, HE Zhonghua^{1,2,3}, ZHANG Lang¹, YANG Mingke¹, PI Guining¹

(1.School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2.National Karst Rocky Desertification Prevention Engineering Technology Research Center, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 3.Guizhou Key Laboratory of Remote Sensing Application of Mountain Resources and Environment, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal distribution characteristics of drought frequency, intensity and in different regions of Guizhou Province, based on the daily meteorological data of 17 meteorological stations in Guizhou Province from 1981 to 2019, the joint and conditional probability characteristics of drought intensity and drought frequency were discussed to reveal the spatial and temporal distribution of meteorological drought in Guizhou Province by using the relative humidity index, and combined with a Couple two-dimensional distribution function. The results show that: (1) from 1981 to 2019, the meteorological drought intensity in Guizhou Province showed a trend of weakening and increasing, and the drought frequency showed the increasing trend; (2) the spatial distribution of annual and seasonal drought intensity in Guizhou Province was different; at the seasonal scale, the winter drought intensity was the strongest, followed by autumn drought and summer drought, and the spring drought intensity was weak; (3) the spatial distribution pattern of drought frequency in year, winter and spring was higher in the west and lower in the east, and the distribution was more consistent in summer and autumn; at the seasonal scale, the drought frequency was the highest in winter, followed by spring and autumn, and the lowest in summer; (4) among the combined characteristics of drought, the combined characteristic values of the seasonal scale decreased in the order: spring>winter>autumn>summer; under the condition of drought intensity in each

收稿日期:2021-07-06

修回日期:2021-07-15

资助项目:国家自然科学基金(u1612441;41471032);贵州省水利厅自然科学基金(KT201402);贵州师范大学 2015 年博士科研启动项目

第一作者:游漫(1995—),女(满族),贵州大方人,在读硕士,研究方向为喀斯特水文水资源与遥感。E-mail:youman95@163.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州兴义人,博士,教授,主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:hezonghua7621@126.com

season, the conditional probability characteristic value of drought frequency in each season deceased in the order: summer>autumn>winter>spring. In conclusion, the intensity of meteorological drought in Guizhou Province gradually decreased, drought occurred frequently, spring drought was high frequency and high intensity, summer drought was low intensity and high frequency.

Keywords: relative humidity index; drought weather; spatiotemporal characteristics; Guizhou Province

干旱是一种随机且反复发生的自然灾害,是世界上最具破坏的自然灾害之一。它通常缓慢发展,即使停止后仍会留下持久的影响^[1]。干旱可以分为 4 类干旱:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[2]。气象干旱是指某时段内,由于蒸发量和降水量的收支不平衡,水分支出大于水分收入而造成水分短缺现象^[3]。其中气象干旱是其他干旱发生的基础,气象干旱的发生也是最直接和最频繁的,一场气象干旱的重大影响可能会随着时间的推移导致其他干旱的发生^[4]。近年来,全球气候变暖背景下与人类活动增强的驱动下,频繁发生的干旱已经成为了全球非常突出的环境问题。中国北方干旱、半干旱地区干旱加重的同时,南方干旱也在不断扩展和加重,干旱现象已经不仅仅是中国北方地区面临的重要自然灾害,旱灾范围已经遍及全国^[5]。

国内外关于气象干旱指数做了大量的研究,由于相对湿润指数(moisture index)综合考虑了降水以及其他需水信息,并可以直观反映区域水分收支盈亏情况^[3]的特点,被国内部分区域应用于干旱研究中。曹兴等^[6]利用相对湿润指数研究发现新疆气温升高,降水减少,气象干旱加剧;曹二佳等^[7]用其研究发现内蒙古中部农牧作物的生长季呈持续变干趋势;祁嘉郁等^[8]用其发现北疆地区干旱强度呈减弱的趋势,且夏旱强度以及中旱、重旱的频率最高;王明田等^[9]利用相对湿润指数作为干旱指标,研究发现我国西南地区干旱强度减弱,且春旱和秋旱有所减轻;张青雯等^[10]利用相对湿润指数研究发现云南省气象干旱呈增强趋势,且冬旱最强、夏旱最弱,同时发现降水、日照时数及相对湿度是相对湿润指数变化的主导因素。以上是相对湿润指数在各个区域的干旱应用研究,且均呈现该指数有助于了解干旱状况的地域特征。虽然影响该指数的气象因子已经有许多学者在不同区域进行研究探讨,但是不同区域主导因子存在差异。由于贵州省属于喀斯特山区,地形破碎起伏大,水土流失快,受季风的影响,降水多,气温高,蒸发量大,日照时间少,相对湿度高,而相对湿润指数主要考虑降水与蒸发等因素。且在贵州应用较少。

因此,本文利用相对湿润指数(MI)为干旱指标,综合考虑降水和蒸散发等因子,以年、季为时间尺度,从干旱发生强度、频率的角度分析贵州省季节性干旱时空演变规律,同时利用二维 Couple 分布函数,计算干旱强度和干旱频率的联合概率及条件概率,分析两个干旱特征变量的关系。根据干旱特征制定相关的抗旱对策,结合干旱资料,农作物生育期,为制定防旱减灾措施提供理论依据。

1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,云贵高原东部,介于东经 103°36′—109°35′,北纬 24°37′—29°13′,是该地区的交通枢纽,地理环境复杂,地势西高东低,山区面积广^[11]。贵州省属于亚热带高原季风性湿润气候,主要气候特点为:(1)降水多,相对湿度大,日照时间少,昼夜温差小,夏季气温高,冬季温和,干湿季分明,年平均气温约 15℃^[12]。(2)常年雨量丰沛,时空分布不均,年均降雨量最多值接近 1 600 mm,最少值约为 850 mm,年降水量 1 000~1 300 mm^[13]。(3)由图 1 可见,年均降水量呈南高北低的分布格局,受季风和大气环流的影响,雨量集中在夏季^[14]。尽管贵州省降水丰富,但由于区域性、季节性降水不均,地表破碎,土层薄弱,蓄水能力弱,年季变化和水分流失较大,容易引发区域和季节性的气象干旱。贵州省多年平均降水图和气象站点分布如图 1—2 所示。

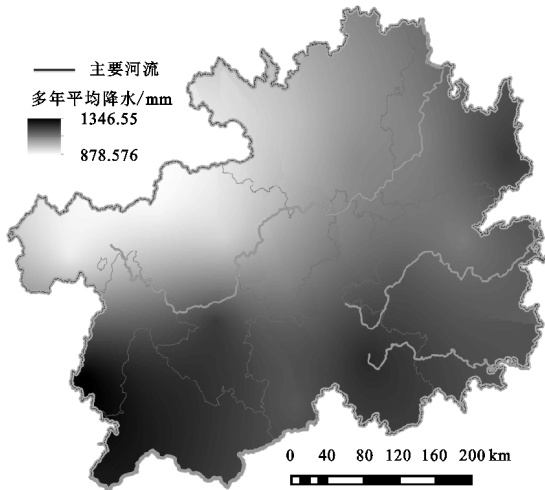


图 1 贵州省多年平均降水

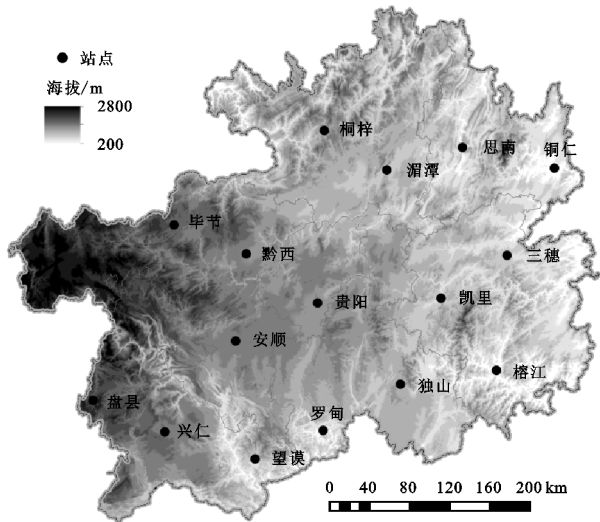


图 2 贵州省气象站点分布

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据来源于“中国数据气象网”(http://data.cma.cn),选取贵州省 1981—2019 年 17 个县市气象站的观测数据,采用逐日常规观测数据,包括降水(mm)、日最高气温、日最低气温、平均风速、日照时数、平均相对湿度等气象要素实测资料。利用 ArcGIS 绘制干旱强度与干旱频率的空间分布图,利用 Origin 软件绘制时间趋势折线图,结合 MATLAB 编程语言,计算干旱强度和干旱频率的联合概率以及条件概率,再利用 Surfer 三维制图软件对研究结果进行可视化,并分析两者的关系特征。

2.2 研究方法

2.2.1 相对湿润指数 相对湿润指数(MI)是某时段内降水量与同时段内可能蒸散量之差再除以该时段内的可能蒸散量,适于评估和监测作物生长的干旱情况,计算公式如下^[15]:

$$M=\frac{P-ET_0}{ET_0}$$
 (1)

式中: P 为某时段内的降水量(mm); ET_0 为某时段的参考作物蒸散量(mm),采用 1998 年联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[16],即:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_a-e_d)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$$
 (2)

式中: Δ 为饱和水气压曲线斜率(kPa/℃); γ 为干湿表常数(kPa/℃); U_2 为距地面出 2 m 的风速(m/s); R_n 为冠层表面净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通

量[MJ/(m²·d)]; T 为日平均气温(℃); e_a 和 e_d 分别为饱和水气压(kPa/℃)和实际水气压(kPa/℃)。

采用国家颁布的《气象干旱等级》中提出的相对湿润指数气象干旱等级划分法,以月为单位,干旱等级和类型见表 1^[15]。

表 1 气象干旱相对湿润指数干旱等级划分

气象干旱等级	气象干旱类型	相对湿润指数
1	无旱	$-0.40 < M$
2	轻旱	$-0.65 < M \leq -0.40$
3	中旱	$-0.80 < M \leq -0.65$
4	重旱	$-0.95 < M \leq -0.80$
5	特旱	$M \leq -0.95$

2.2.2 干旱强度和干旱频率 干旱强度是用来评价干旱的严重程度,干旱强度一般可以由相对湿润指数值来反映,相对湿润指数值越小,表示干旱越严重^[17]。

干旱频率是发生干旱的频繁程度,指实际有干旱发生的年数或季节占总年数或总季节的百分比^[9]。干旱频率分为如下标准:极少发生(0~20%),较少发生(20%~40%),经常发生(40%~60%),频繁发生(60%~80%),极频繁发生(80%~100%)^[18]。

2.2.3 干旱概率 Couple 函数^[19]是一个定义在[0,1]区间上均匀分布的多维联合分布函数,通过连接多个随机变量任意形式的边缘分布构建联合分布。Sklar's 定理:设 x, y 为随机变量,其边缘分布函数为 $F(x)$ 和 $F(y)$, $F(x, y)$ 为变量 x 和 y 的联合分布函数,那么存在唯一的 Couple 函数 C ,使得

$$F(x, y)=C_{\theta}[F_x(x), F_y(y)]$$
 (3)

式中: θ 为待定参数。

二维 Couple 的分布函数的计算公式为:

$$C(u, v)=F[F_1^{-1}(u), F_2^{-1}(v)]$$
 (4)

$$u=F_1(x_1), v=F_2(x_2)$$

式中: u 和 v 分别为单变量的边缘分布函数,其中 u 为干旱强度; v 为干旱频率。

基于 Couple 函数的二元干旱分布函数确定后,容易得到干旱的条件概率分布,主要考虑,给定干旱强度超过某一个阈值时,估计干旱频率发生的概率分布。即指定条件事件 u 发生,事件 v 也发生的概率,条件分布函数可以用如下的通用公式表示^[20]:

$$F(x \mid v)=\frac{\partial C_{x, p \mid v-j}[F(x \mid v-j), F(v_j \mid v-j)]}{\partial F(v_j \mid v-j)}$$
 (5)

式中: v 为一个 n 维的向量; v_j 为 v 中的任意一个变量; v_j 为 v 去除 $v-j$ 后剩余向量; $C_{x, p \mid v-j}$ 为二维条件 Couple 函数。

3 结果与分析

3.1 气象干旱强度时空变化特征

3.1.1 空间演化特征 通过计算各气象站点发生干旱时的 MI 指数平均值可以得到年均及季节干旱强度(图 3)。从图 3A 中得出,贵州省年均及季节干旱强度的空间分布格局呈南高北低,望谟、独山、安顺等地区的干旱强度较高,强度在 $-0.69 \sim -0.65$,为中等程度干旱。总体上贵州省气象干旱强度以轻旱和中旱为主,干旱程度偏低。从季节尺度上看,与其他季节相比,春旱(图 3B)强度较低,空间上呈南高北低、西高东低的空间分布,独山、盘县、威宁和望谟等地区的春季干旱强度较高,强度在 $-0.70 \sim -0.65$,为中等程度的干旱,其中三穗的干旱强度较低,达 -0.45 ,为轻旱。春季平均干旱强度是 -0.60 ,区域干旱强度整体为轻旱。夏旱(图 3C)和春旱强度相差不大,呈自西向东逐渐增强的趋势,空间上呈东高西低的分布,夏旱在独山、榕江、安顺以及铜仁等地区干旱强度较高,干旱强度在 $-0.72 \sim -0.65$,为中旱,其中盘县的干旱强度为 0,表明无明显干旱发生,夏季平均干旱强度是 -0.59 。秋旱(图 3D)较为严重,秋

旱强度达到中旱以上的区域覆盖了贵州省的大部分地区,其中贵州的东北部及西南部的小部分地区的秋旱强度达到轻旱,贵州东北部的湄潭、思南以及西南部毕节的干旱强度在 $-0.64 \sim -0.55$,干旱强度较低,为轻旱,其他区域的干旱强度介于 $-0.72 \sim -0.66$,为中旱,秋季平均干旱强度是 -0.67 ,干旱强度整体达到中旱。冬旱(图 3E)在空间上的分布主要呈现为南高北低,中间低两边高的分布格局特点,东部地区、南部地区以及西部地区干旱强度介于 $-0.72 \sim -0.66$,为中旱,其中威宁、望谟及罗甸干旱强度达到 -0.70 以上,中部地区和北部地区干旱强度介于 $-0.64 \sim -0.58$,内部差异较小,其中干旱强度最低的区域是黔西,干旱强度为 -0.58 ,平均干旱强度是 -0.65 。季尺度结果表明,从平均干旱强度来看,秋旱、冬旱的干旱强度均达到中旱,春旱和夏旱的干旱强度达到轻旱。

以上结果表明,贵州省年、春季、夏季、秋季与冬季的干旱强度在空间上呈现出不同的空间分布格局,主要以轻旱和中旱为主。这是因为贵州省区域性与季节性降水分布不均,地形地貌复杂,坡度大、透水强、排水快、土层薄、土壤蓄水能力弱,地形起伏大,岩溶发育广泛^[12]。

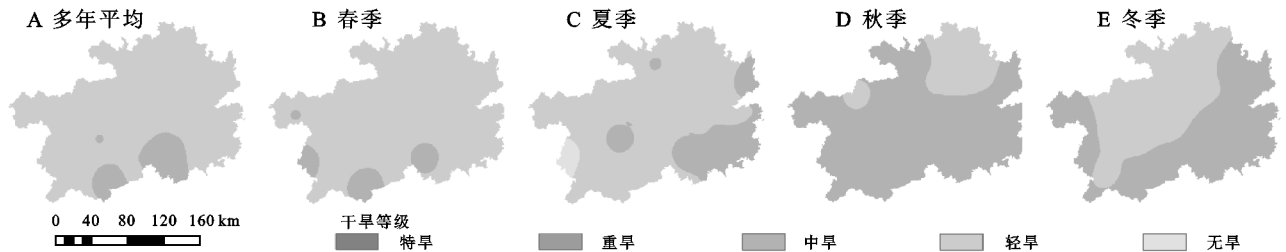


图3 贵州省气象干旱强度空间分布

3.1.2 时间演化特征 分析干旱强度在 1981—2019 年的变化趋势,干旱的平均相对湿润指数值越小,意味着干旱强度越强。如图 4A 所示,1981—2019 年的多年平均干旱强度的变化过程,相对湿润指数呈上升趋势,说明多年平均干旱强度呈下降趋势(倾斜率为 $0.04/10\text{ a}$);从 1981—1994 年,干旱强度呈减弱的趋势,而 1994—2018 年,干旱强度呈波动式的增强趋势。表明贵州省的气象干旱强度在这 39 a 间呈减弱—增强的趋势,但是整体上呈减弱的趋势。春季相对湿润指数(图 4B)整体呈上升趋势(倾斜率为 $0.42/10\text{ a}$),表明春旱强度减弱,以 2002 年为界,从 1981—2002 年,春旱强度呈减弱的趋势,且在 1986 年干旱强度达到最强,2002 年之后,春旱强度是呈增强的趋势,在 2011 年干旱强度达到最强。夏季相对湿润指数(图 4C)呈上升趋势(倾斜率为 $0.07/10\text{ a}$),表明夏旱强度呈减弱趋势,以 1999 年为界,1981—1999 年,夏旱强度呈减弱的趋势,其中 1981 年干旱强度最强,1999—2019 年,夏旱强

度呈增强的趋势,且在 2011 年和 2013 年干旱强度达到最强。秋季相对湿润指数(图 4D)呈上升趋势(倾斜率为 $0.06/10\text{ a}$),表明秋旱强度呈减弱趋势,1981—2009 年,秋旱强度呈增强趋势,2009—2019 年干旱强度呈减弱的趋势,在 2009 年干旱强度达到最强。冬季相对湿润指数(图 4E)呈上升趋势(倾斜率为 $0.03/10\text{ a}$),表明冬旱强度呈减弱趋势。从 1981—2003 年,冬旱强度呈下降趋势,而 2003—2019 年,冬旱强度呈波动式的增强,在 1986 年、1995 年、2009 年干旱强度达到最强。

结果表明,这 39 年来,年、春季、夏季、秋季和冬季干旱强度整体上是呈减弱的趋势,但是在 21 世纪以后,贵州省气象干旱强度是呈增强的趋势。尤其是 2009 年、2011 年和 2013 年气象干旱在这 39 年间表现得较为严重。这是由于 21 世纪以来,受厄尔里诺现象的影响,印度季风衰退,降雨偏少,贵州省干旱历时和干旱烈增强,极端气候加剧,气象干旱加重明显^[12]。

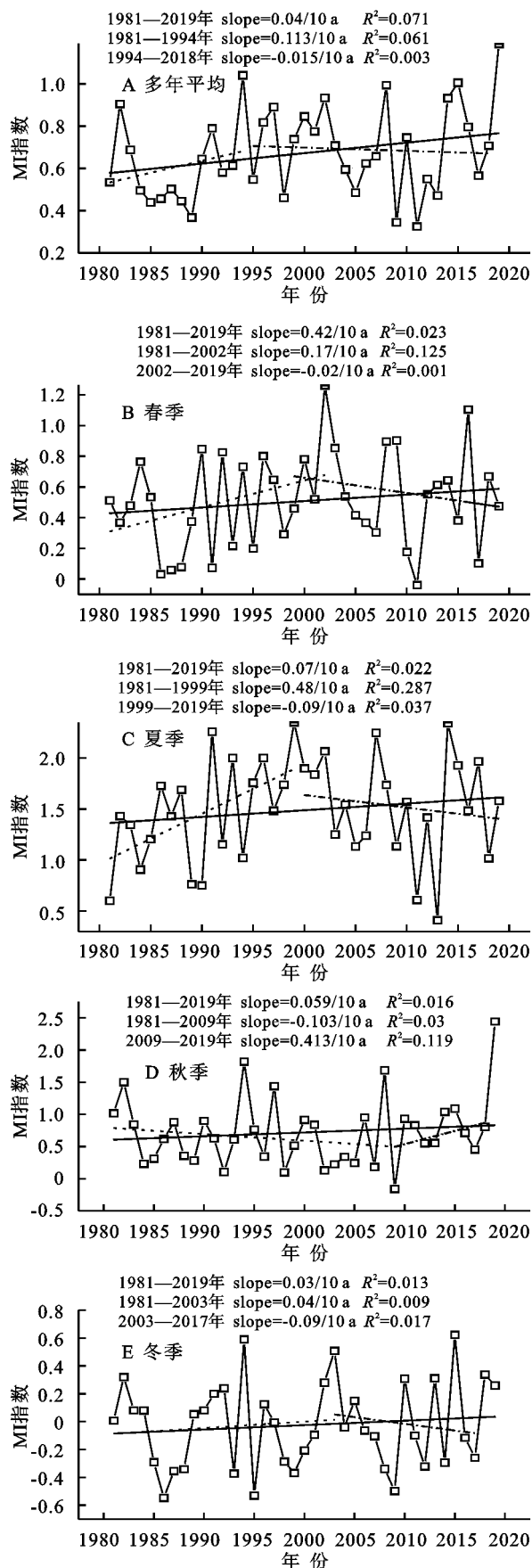


图 4 贵州省气象干旱强度时间变化趋势

3.2 气象干旱频率变化特征

3.2.1 空间分布特征 干旱频率用于评价干旱发生的

频繁程度,即实际有干旱发生的月数与不同季节的月份序列数之比^[3]。年尺度上(图 5A),自 1981—2019 年来,贵州省干旱频率在空间上的变化是自东向西增大,呈西高东低的分布格局,多年来发生干旱的频率在 0~40%,干旱频率平均为 19.6%,是极少发生干旱的。总体来说,贵州省气象干旱频率是低频的。季尺度上,春旱频率(图 5B)的分布格局与多年平均干旱频率分布格局具有相似性,都是呈西高东低的分布格局,春旱频率发生最高的是威宁,为 39%(10 a 三遇)以上,较少发生干旱,春旱频率发生最低的是三穗为 0.8%,百年难得一遇。夏旱(图 5C)发生频率的空间分布最为平均,频率发生在 0~20%,整体上整个贵州省在夏季是极少发生干旱的。秋旱频率(图 5D)呈现南高北低的空间分布格局,干旱频率基本上都发生在 0~20%,秋季干旱频率达到 20%~40%的区域呈零星状分布,秋季最高干旱频率发生在罗甸和榕江,分别为 24%,21%(5 a 一遇)以上,较少发生干旱。冬旱频率(图 5E)呈自东向西干旱频率表现出极少发生、较少发生、经常发生到频繁发生的规律,其中罗甸和威宁的干旱频率达到 60%以上,频繁发生气象干旱,盘县、毕节、桐梓、望漠的干旱频率达到 40%以上,干旱经常发生。

以上结果表明,年尺度与春、冬季尺度的干旱频率均呈西高东低的空间分布,夏、秋季尺度的频率空间分布具有相似性,气象干旱频率较低。这是因为干旱频繁程度与地形因子相关,而贵州省地势呈西高东低,因此贵州省西部较其他区域发生干旱的频率比较高。

3.2.2 时间分布特征 从图 6A 可以得出,1981—2019 年以来,干旱频率在 6.9%(1994 年)~33.3%(2009 年)波动,多年平均的干旱频率呈上升趋势(倾向率为 1.05/10 a),表明贵州省气象干旱在 1981—2019 年呈越来越频繁发生的趋势,但总体来说气象干旱是较少发生的。在 20 世纪 80 年代中后期和 21 世纪初期,干旱频率呈明显的上升趋势,这是因为这一时期,贵州省进入少雨期,极端气候加剧,导致气象干旱发生^[21]。季尺度上,春旱频率(图 6B)在 0(2000 年)~45%(1987 年)波动,春旱频率呈下降趋势(倾向率为 -0.8/10 a),频率在 1987 年(45%)和 2011 年(41%)达到最高。夏旱频率(图 6C)在 0(1982 年)~33%(2011 年)波动,夏旱频率呈上升趋势(倾向率为 0.64/10 a),在 2011 年(33%)夏旱发生的频率最高。秋旱频率(图 6D)在 0(1981 年)~45%(2007 年)波动,秋旱频率是呈波动式的上升趋势(倾向率为 1.65/10 a),且在 2007 年(45%)秋旱发生的频率最高。冬旱频率

(图 6E)在 2%(1994 年)~80%(2009 年)波动,冬旱呈上升趋势(倾斜率为 2.74/10 a),在 2009 年(80%)干旱频率达到最大值,同时在 2012 年(60%)和 2017 年(64%),气象干旱频繁发生。

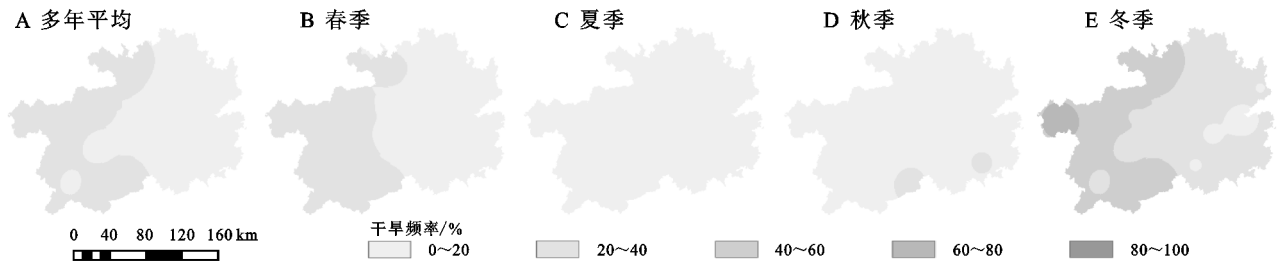


图 5 贵州省气象干旱频率空间分布

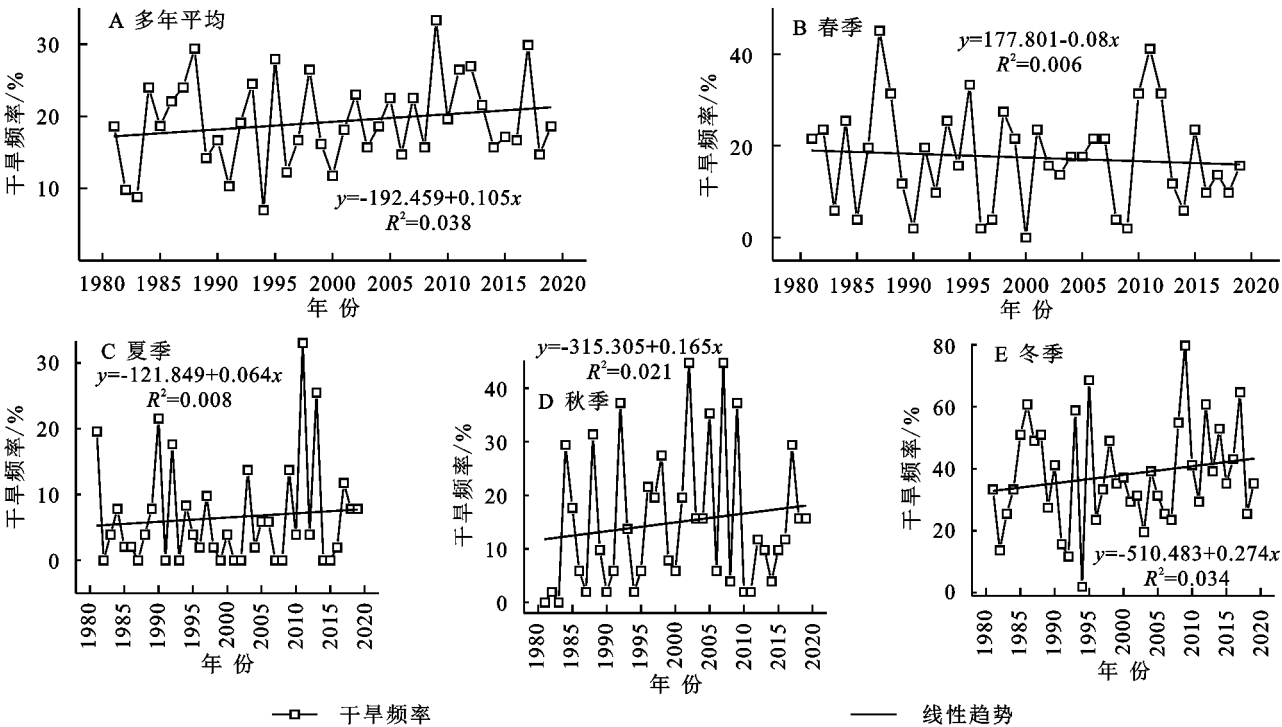


图 6 贵州省气象干旱频率时间变化趋势

以上结果表明,年尺度上,贵州省气象干旱频率呈上升趋势,且干旱较少发生。季尺度上,气象干旱除了春季发生的频率是呈下降趋势的,夏季、秋季和冬季是呈上升趋势,且春季和夏季干旱频率发生最高的年份都是在 2011 年,秋季干旱频率最高发生在 2007 年,冬季干旱频率最高发生在 2009 年。这是因为在 21 世纪以后贵州省干旱历时和干旱烈度增加,干旱程度加剧,干旱频发,尤其是 2009 年、2011 年是近 39 年来较严重的气象干旱年份^[21]。

3.3 干旱频率和干旱强度的概率分析

3.3.1 联合概率分析 以干旱强度和干旱频率作为变量,采用 Couple 函数拟合出二者间的最佳联合分布函数,对贵州省的气象干旱进一步做联合特征分析(图 7)。结果表明,贵州省四季的干旱联合特征总体相似,干旱强度和干旱频率间具有较强的正相关性,在同一干旱频率下,干旱强度边缘分布越趋近于 1,

表明干旱特征联合度越高。在春季尺度下,当干旱强度边缘分布为 0.8~1,干旱频率边缘分布在 0.85~1 时,干旱强度和干旱频率的联合度最高,联合特征极值约为 0.75~0.8,表明此时贵州省频繁发生气象干旱且干旱强度较强。在夏季尺度下,当干旱强度边缘分布为 0.95~1,干旱频率边缘分布为 0.55~0.9,联合特征极值为 0.55~0.6,与春季相比,干旱特征联合度有所减轻。从干旱强度边缘分布和干旱频率边缘分布来看,夏季干旱强度比春季的强,但是干旱频率却比春季的频率低,意味着不是干旱频率越高,干旱强度越强,二者间并非正相关关系,此时贵州省可能发生较低频率气象干旱且干旱强度较强。在秋季尺度下,当干旱强度边缘分布为 0.6~1,干旱频率边缘分布在 0.85~1 时,联合特征极值为 0.6~0.65。在冬季尺度下,当干旱强度边缘分布为 0.9~1,干旱频率边缘分布在 0.85~1 时,联合特征极值为 0.7~0.75。夏、秋季节的干旱联合特征值低于冬、春季节的干旱联

合特征值,表明夏、秋季节的干旱强度和干旱频率变化比冬、春季节的变化小;干旱联合特征值呈春季>冬

季>秋季>夏季,联合特征值越高,发生较高干旱强度和较高干旱频率的气象干旱的概率越高。

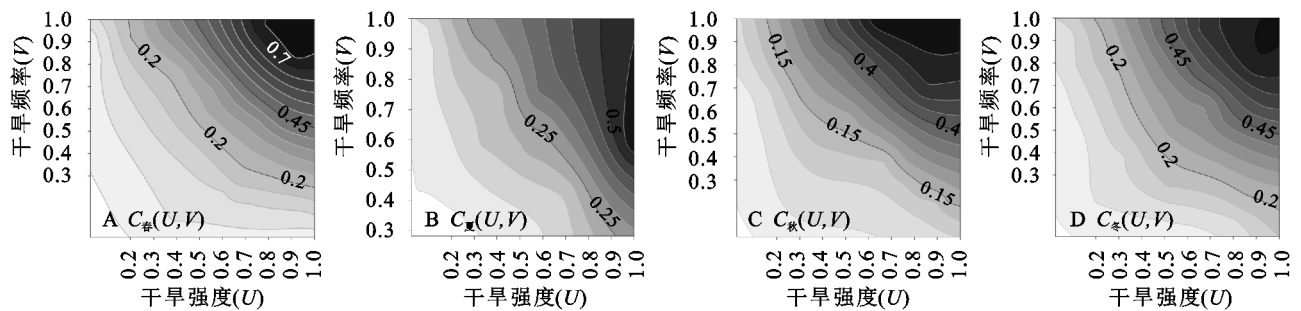


图 7 联合概率分布

3.3.2 条件概率分析 对于二维随机变量干旱强度和干旱频率,可以考虑其中一个随机变量取得固定值的条件下,另一随机变量的概率分布,贵州省气象干旱主要以轻旱与中旱为主,因此研究以各季节干旱强度(轻旱、中旱)为条件,分析各季节尺度下干旱频率的条件概率分布(图 8)。干旱强度和干旱频率存在着较为密切的关系,研究结果表明,贵州省四季的条件概率特征总体相似,条件概率特征值与干旱频率呈正相关,即在同一干旱强度下,干旱频率值越大,发生干旱的概率越大。在春季干旱强度发生条件下,干旱频率发生的条件概率值在 0.025~1;在夏季干旱强度发生条件下,干旱频率发生的条件概率值在 0.125~1;在秋季干旱强度发生条件下,干旱频率发生的条件概率值在 0.051~1;

在冬干旱强度发生条件下,干旱频率发生的概率值在 0.041~1。在不同季节干旱强度下,干旱频率发生的条件概率大体一致,只有略微差距,可见各季节发生的干旱强度对各季节干旱频率发生概率的影响并不大。在各季节干旱强度下,季节干旱频率发生的概率值呈夏季>秋季>冬季>春季,这与干旱联合特征值的排序恰好相反。

由于春季处于夏季即雨季之前,其降水少,作物或植被需水大,容易发生高强度高频率的气象干旱。夏季的降水主要在 6 月、7 月、8 月持续高温,这将容易引起干旱,但由于降水多,发生的干旱以高频率低强度为主。因此,各季节的联合特征值与条件概率值的排序刚好相反。

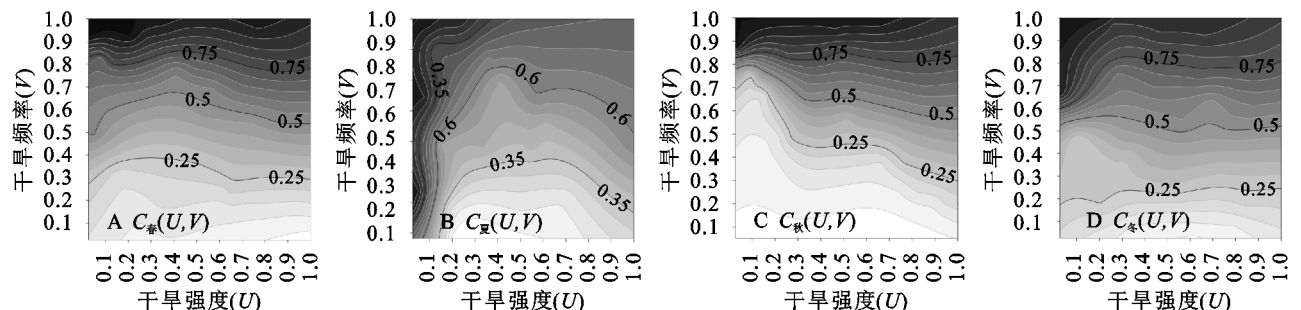


图 8 干旱频率条件概率分布

4 讨论

本文基于 1981—2019 年逐日降水资料计算相对湿润指数对贵州省气象干旱的时空变化进行研究,干旱强度和干旱频率是描述干旱的两个重要特征变量,在研究干旱强度和干旱频率的时空变化特征时,发现贵州省 1981—2019 年的干旱强度整体上的空间变化呈南高北低的分布格局,各季节干旱发生在空间上有所不同,以轻旱和中旱为主;从覆盖面积来看,秋、冬季的中旱强度覆盖范围比春、夏季的覆盖范围大,其中春旱西部和南部部分地区以中旱为主,MI 指数在 -0.65 以上,其他区域以轻旱为主;夏旱中东部地区以中旱为主,较其他地区而言,干旱强度较强;秋

旱除了东北部和北部小部分地区以轻旱为主,其他地区均以中旱为主;中北部地区的冬旱以轻旱为主,其余地区以中旱为主。在这 39 年间,干旱强度是呈减弱—增强的趋势,但整体上呈减弱的趋势。贵州省春、夏、秋、冬 MI 指数(0.42/10 a, 0.07/10 a, 0.06/10 a, 0.03/10 a)呈上升趋势,其中气象干旱以春季升幅最大、冬季升幅最小,即冬旱强度最大、秋旱和夏旱次之、春旱较弱,在 39 年间,2009 年、2011 年、2013 年气象干旱表现得较为严重。这是因为 2000 年以后贵州省降水减少,高温天气较多,持续时间长且烈度大,导致气象干旱发生。贵州省属于亚热带季风性湿润气候区,受热带海洋气团和大陆气团的交替控制,同时青藏高原积雪异常对贵州春旱和夏旱有一定影响^[22],春夏季降水多,降雨强度

大,秋冬季温和少雨,降雨量和降水强度较小。这与李月^[12]和慎东方^[21]等利用 SPEI 指数分析了贵州省干旱呈明显的区域性与季节性,贵州省干旱历时和干旱烈度在 2000 年后呈增强趋势的研究结果基本一致。SPEI 指数和 MI 指数都是同时考虑了降水和蒸散等因素,区别在于 SPEI 指数适用于长时间序列的干旱监测与评估,MI 指数适用于短时间尺度的干旱监测与评估。经过本文研究发现,MI 指数对研究贵州干旱有较好的适用性。

干旱频率呈自西向东逐渐降低的分布格局。贵州省春旱频率(−0.8/10 a)呈下降趋势,夏、秋、冬旱频率(0.64/10 a, 1.65/10 a, 2.74/10 a)均呈上升趋势,且冬季升幅最大,秋季次之。干旱频率发生的高低与地形因子呈显著相关,坡度、地形起伏度、坡面曲率越大,则发生干旱的频率越大,而贵州省地势西高东低,坡度大,地表破碎,土层瘠薄,涵养水源能力弱,透水强排水快,季节性降雨分布不均,秋冬季节降水少,极易发生干旱^[14]。

在干旱联合特征中,4 个季节的联合特征值呈明显的相似性,夏、秋季节的干旱联合度低于冬、春季节的干旱联合度。即冬、春季节同时发生较高强度和较高频率的气象干旱的概率大于夏、秋季节。在干旱频率的条件概率上,4 个季节干旱频率发生的条件概率趋于一致,可见各个季节发生的干旱强度对各季节干旱频率发生概率的影响并不大,干旱特征联合分布的总体情况与条件概率特征分布的总体情况的排序结果相反。

本文仅从气候的角度分析了贵州省季节性气象干旱时空分布特征,而对于气象干旱的研究不仅要考虑气候的变化,还要兼顾地形地貌、人类活动、土壤植被、大气环流以及北太平洋海温等多因素的影响,影响贵州干旱的因素较多,形成机理较为复杂,因此,结合研究区实际情况,针对干旱的监测、评估与区划研究还有待进一步深入^[22]。

5 结论

(1) 贵州省 1981—2019 年相对湿润指数呈增大—减小的趋势,干旱呈减弱—增强的趋势,整体上呈减弱的趋势。贵州各季节干旱强度整体上均呈下降趋势,但春季在 2002 年后干旱呈增强趋势,在 2011 年干旱达到最强;夏季在 1999 年之后干旱呈增强趋势,在 2011 年和 2013 年干旱达到最强;秋季在 2009 年干旱达到最强;冬季在 2003 年后干旱呈增强趋势,且在 2009 年干旱达到最强。冬旱强度最强,秋旱次之,春旱和夏旱稍弱。空间上整体上呈南高北低

的分布格局,春季西部与南部高,且呈零星状分布,东部和北部低的分布格局;夏季呈东高西低的分布格局;秋季呈东北低,其余地方高的分布格局;冬季呈中部、北部地区低,西部、东南部高的分布格局。

(2) 贵州省整体上干旱频率呈上升趋势,各季节上,春季干旱频率呈下降趋势,夏、秋、冬季均呈上升趋势。春旱和夏旱在 2011 年干旱频率达到最高;秋季在 2007 年达到最高;冬季在 2009 年干旱频率达到最高。冬季干旱频率最高,干旱频率最高的地区在威宁,其次在毕节、盘县、望谟、罗甸等西部、西南等地区,再次是在贵阳、安顺、独山、湄潭等中部地区;春旱频率次之,干旱频率最高的地区在桐梓、威宁、盘县、望谟、罗甸等西部地区;夏旱频次与秋旱频次空间分布较为一致,秋旱频次较高的地区分布在榕江、罗甸等南部地区;夏旱频次最低。

(3) 在干旱联合特征中,4 个季节的联合特征值呈春季>冬季>秋季>夏季的规律,在各季节干旱频率的条件概率中,条件概率特征值呈夏季>秋季>冬季>春季的规律。两者的排序恰好相反。

参考文献:

- [1] Buttafuoco G, Caloiero T, Coscarelli R. Analyses of drought events in Calabria (Southern Italy) using standardized precipitation index[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(2): 557-573.
- [2] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon the role of definitions[J]. *Water International*, 1985, 10(3): 111-120.
- [3] 徐羽, 吴艳飞, 徐刚, 等. 基于相对湿润指数的重庆市气象干旱时空分布特征[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2016, 38(4): 96-103.
- [4] Dracup J A, Lee K S, Paulson Jr E G. On the definition of droughts[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(2): 297-302.
- [5] 刘晓云, 李栋梁, 王劲松. 1961—2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 473-483.
- [6] 曹兴, 万瑜, 崔玉玲, 等. 中天山北坡近 30 年相对湿润指数变化趋势分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3): 244-251.
- [7] 曹二佳, 薛羽, 李红瑛, 等. 基于相对湿润指数的蒙中农牧交错带作物生长季干旱时空分析: 以乌兰察布市为例[J]. *中国农村水利水电*, 2019(11): 165-171.
- [8] 祁嘉郁, 巴特尔·巴克. 基于相对湿润度指数的北疆气象干旱时空特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 223-228.
- [9] 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92, 295.

watershed: The case study in the upper Minjiang River of Yangtze River basin [J]. Journal of Hydrology, 2012, 464: 1-11.

[13] 霍雪丽,刘友存,郝永红,等.基于 GPD 模型的黑河出山径流极值变化分析[J].干旱区研究,2014,31(4): 672-681.

[14] 张晓晓,张钰,徐浩杰,等.河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):66-72.

[15] 王昱,连运涛,范严伟,等.黑河流域上游水沙变化特征及成因分析[J].水土保持通报,2018,38(2):1-7.

[16] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.

[17] 高云飞,赵传燕,彭守璋,等.黑河上游天涝池流域草地蒸散发模拟及其敏感性分析[J].中国沙漠,2015,35(5):1338-1345.

[18] Wang Q, Zhao C, Gao C, et al. Effects of environmental variables on seedling-sapling distribution of Qinghai Spruce (*Picea crassifolia*) along altitudinal gradients[J]. Forest Ecology and Management, 2017,384:54-64.

[19] 王方圆.黑河上游天涝池流域径流过程研究[D].兰州:兰州大学,2017.

[20] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:高等教育出版社,2013.

[21] 李秋菊,李占玲,王杰.黑河流域上游径流变化及其归因分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):31-39.

[22] 李云武,崔力超,王冠星.黑河上游八宝河流域径流变化及其对气候变化的响应[J].水文,2019,39(2):39-43.

[23] 李占玲,徐宗学.黑河流域上游山区径流模拟及模型评估[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3): 344-349.

[24] 程建忠,陆志翔,邹松兵,等.黑河干流上中游径流变化及其原因分析[J].冰川冻土,2017,39(1):123-129.

[25] 刘志斌,黄粤,刘铁,等.开都河源区径流变化的气候响应[J].干旱区研究,2020,37(2):418-427.

[26] Han P, Long D, Han Z, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,224:44-59.

[27] 毛亚花,赵传燕,王方圆,等.黑河上游天涝池流域生长季河川径流变化及主控因子分析[J].兰州大学学报:自然科学版,2019,55(4):520-524,532.

[28] 凌红波,徐海量,张青青.新疆克里雅河源流区径流变化与气候因子关系的非线性分析[J].地理研究,2012,31(5):792-802.

[29] 张雪艳,秦翔,吴锦奎,等.祁连山老虎沟流域产汇流特征分析[J].冰川冻土,2017,39(1):140-147.

[30] 崔步礼,李小雁,李岳坦,等.青海湖流域河川径流特征及其对降水的滞后效应[J].中国沙漠,2011,31(1): 247-253.

[31] 罗玉,秦宁生,周斌,等.长江源区沱沱河流域 1961—2011 年径流特征及其对降水的滞后效应[J].水土保持通报,2019,39(2):22-28.



(上接第 262 页)

[10] 张青雯,崔宁博,赵禄山,等.基于相对湿润指数的云南省季节性干旱变化特征[J].干旱地区农业研究,2020,38(4):278-284.

[11] 张克新,王娟娟,彭娇婷,等.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] 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.

[13] 贺中华,陈晓翔,梁虹,等.基于土壤系统结构的喀斯特流域水文干旱分析:以贵州省为例[J].自然资源学报,2013,28(10):1731-1742.

[14] 毛春艳,戴丽,杨广斌,等.1960—2016 年贵州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.

[15] 申双和,张方敏,盛琼.1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.

[16] 张强,邹旭凯,肖风劲,等.气象干旱等级 GB/T20481—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.

[17] 柏庆顺,颜鹏程,蔡迪花,等.近 56 a 中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J].干旱气象,2019,37(5):722-728.

[18] 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.

[19] 任璐.基于 Copula 的汾河上游水文干旱频率的多时间尺度分析[D].太原:太原理工大学,2016.

[20] 胡义明,罗序义,梁忠民,等.基于藤 Copula 多维联合分布的 CMIP5 多模式降雨综合方法研究[J].中国农村水利水电,2021(4):10-15.

[21] 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.

[22] 罗文芳.青藏高原积雪异常与贵州东、西部旱、寒灾害关系的初步分析[J].高原气象,2001,20(3):340-344.