

黔中地区气象水文干旱演变特征及其响应关系

杨铭珂, 贺中华, 任荣仪

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘 要:黔中因其地形地貌特殊,干旱情势复杂,研究其干旱特征以及传播过程,能有效预防干旱延续,为该区域干旱监测和预警提供科学依据。基于黔中地区 1970—2016 年的降水以及径流数据,计算标准化降水指数(SPI)与标准化径流指数(SSD),采用相关分析方法,分析该地区气象水文干旱的演变特征以及两者之间的响应关系。结果表明:(1)不同时间尺度的 SPI 与 SSI 具有不同的时间振荡频率。在较短的时间尺度上干湿交替频繁,而较长的时间尺度可以检测连续的干旱与潮湿时期。(2)近 47 年来,黔中地区干旱化态势增强,干旱发生的频率上升,重度干旱以及极端干旱频率增加明显。(3)该地区气象与水文干旱在不同年代际呈现不同的空间分布特征,气象干旱主要发生在黔中南部、中部和西部等地区。20 世纪水文干旱化态势最明显的地区主要在黔中中部,而 21 世纪最明显的干旱化地区则在黔中西北部。(4)SSI—SPI 相关性显著,不同时间相关系数的变化趋势不一致,并且它们的响应关系呈季节变化,其相关系数为夏季>秋季>冬季>春季,这与黔中地区降水的时空分布不均以及地貌特征有关。综上,黔中地区气象水文干旱日趋严重,极端干旱频发,气象干旱加剧了水文干旱旱情,两者关系密切。

关键词:水文干旱;气象干旱;干旱响应关系;黔中地区

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0264-11

Evolution Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought and Their Response Relations in Central Guizhou

YANG Mingke, HE Zhonghua, REN Rongyi

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

Abstract: Because of its special landform and complex drought situation in central Guizhou, studying characteristics and transmission process of its drought can effectively prevent the continuation of drought, at the same time, it provides a scientific basis for drought monitoring and early warning in this region. Based on the precipitation and runoff data from 1970 to 2016 in central Guizhou, the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Streamflow Index (SSI) were calculated, and correlation analysis was used, the evolution characteristics of meteorological and hydrological drought in this region and the response relationship between the two were analyzed. The results show that: (1) SPI and SSI at different time scales had different time oscillation frequencies; dry and wet alternated frequently on a shorter time scale, while a longer time scale could monitor continuous drought and humid periods; (2) in the past 47 years, the aridification situation and the frequency of droughts in central Guizhou had increased; the frequency of severe and extreme drought had increased significantly; (3) meteorological and hydrological droughts in this area showed different spatial distribution characteristics in different decadal periods; meteorological droughts mainly occurred in the southern, central and western parts of central Guizhou; the most obvious hydrological aridification in the 20th century was mainly in central Guizhou, while the most obvious aridification in the 21st century was in the northwestern part of central Guizhou; (4) the SSI-SPI correlation was significant, the change trend of the correlation coefficient was inconsistent at different times, and their response relationship showed the sea-

收稿日期:2021-01-03

修回日期:2021-02-04

资助项目:国家自然科学基金项目“喀斯特筑坝河流水安全与调控对策”(u1612441),“中国南方喀斯特流域结构的水文干旱驱动机制研究”(41471032)

第一作者:杨铭珂(1994—),女,贵州锦屏人,硕士研究生,主要从事喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:mingke_yang@163.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州兴义人,博士,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:hezonghua7621@126.com

sonal change, and the correlation coefficient followed the order: summer>autumn>winter>spring, which was related to the uneven temporal and spatial distribution of precipitation and the geomorphological characteristics in central Guizhou. In conclusion, meteorological and hydrological drought in central Guizhou is becoming more and more serious, extreme drought occurs frequently, meteorological drought intensifies hydrological drought, and the two are closely related.

Keywords: hydrological drought; meteorological drought; drought response relationship; central Guizhou

在全球气候变暖的大背景下,干旱在经济成本、社会问题以及生态等方面已经发展为最具破坏性、最广泛的主要气候灾害之一,干旱通常被定义为某一时段某地正常水的可用性降低,水分入不支出而引起的灾害现象,可分为水文循环、降水(气象干旱)、土壤水分(农业干旱)、地下水和径流(水文干旱)以及社会经济干旱^[1]。气象干旱强调由不平衡的降水引起水资源匮乏的干旱现象,水文干旱强调地表水与地下水收支不平衡,水分短缺所引起的干旱现象。与此同时,水文干旱被认为是最彻底的干旱事件,是气象干旱的延续,是气象干旱与农业干旱、社会经济干旱之间的纽带。Peters 等^[2]认为水文干旱以干旱为主要驱动力,取决于气象干旱在陆地水文循环中的扩散,受到水文循环性质(降水)的影响。Zhao 等^[3]在研究渭河流域时也发现气象干旱与水文干旱之间具有很强的联系。当水文干旱发生时,很难有足够地时间解决供水短缺的问题,可以利用从气象干旱到水文干旱的传播时间对水文干旱进行预警,Li 等^[4]利用气象干旱提出水文干旱等级预测方法,认为在 2 个月的水文干旱预测,气象干旱序列更好。因此找出气象干旱与水文干旱之间的联系,以及分析它们之间的滞后效应,这对干旱检测以及管理很重要,同时也对干旱的成因机制具有重要意义。

Liu 等^[5]利用三维(纬度、经度以及时间)将气象和水文干旱事件联系起来,发现气象干旱到水文干旱的转变特征为干旱历时增加,响应时间滞后以及干旱严重程度减弱。在从气象干旱到水文干旱的传播时间上,Vicente-Serrano 等^[6]在地中海沿岸的 Aragon 流域进行干旱研究时发现该流域水文干旱比气象干旱滞后 1~4 个月。Li 等^[7]则发现气象干旱向水文干旱的传播时间随季节发生明显变化,并且两者的关系表现出明显的季节性^[8]。也有相关研究认为气象与水文干旱的关系在不同时间尺度上表现不同的特征。López-Moren 等^[9]在埃布罗盆研究水文干旱对不同小流域不同时间尺度的气象干旱的响应关系时,认为两者之间的响应关系是多变的。蒋忆文等^[10]研究黑河上游气象与水文干旱指数时空变化,则发现该地区气象与水文干旱在年尺度上具有较好的一致性,

但在月尺度上因为水文循环过程,通常情况下水文干旱是滞后于气象干旱。Zhou 等^[11]也认为气象和水文干旱变化在季节和月尺度上是不同的,气象干旱对当前和未来一个月的水文干旱有显著影响。Satta 等^[12]则认为每种干旱特征以及两种干旱之间的滞后时间由潜在条件和气候变量的空间变化而不一致。

黔中地区位于贵州中部,其范围涉及长江和珠江流域,并在其研究区内建设有黔中水利枢纽工程,该工程以灌溉和城市供水为主,为黔中地区水资源利用、分配以及管理服务。但黔中地区处于岩溶峰林、岩溶峰丛,保水、蓄水能力弱,水资源也极度短缺,其具有自身的地貌特点以及气候特征。与此同时,随着黔中地区经济发展、农业发展以及人口增长,蓄水需求不断增大,使得人水矛盾突出,极为容易引发干旱事件,这对黔中水利枢纽工程的有效运行提出了巨大的挑战。并且前人研究主要集中在气象干旱特征或者水文气象要素变化等方面,对于该地区的水文干旱以及水文、气象干旱响应关系的分析较少。因此本文将以贵州中部地区为研究区域,基于降水资料和径流资料对黔中地区的气象水文干旱演变特征进行分析,并探求两者之间的响应关系,希望能为黔中地区干旱评估、干旱预报以及为黔中水利枢纽工程的管理等工作提供一定的科学依据。

1 研究区域

黔中地区位于贵州省中部(图 1),介于 25°23′30″—75°5′10″N,104°10′20″—107°2′20″E,本研究拟以解决该地区经济发展用水而建设的重要调水工程——黔中水利工程枢纽为线,东至贵阳,西至关岭,北至威宁,南至镇宁,处于岩溶峰林、岩溶峰丛,岩溶发育并分布较广,透水性强且排泄快,土层较薄且蓄水保水能力差,水资源开发利用难度大。该地区气候属于亚热带季风气候,雨季受季风控制,年降水变率约为 10.4%,多年平均降雨量为 1 002 mm,主要集中在夏季,以 6 月居多,春、冬季少雨,夏季高温多雨,秋季高温少雨。研究区域内的年径流变率约为 21.4%,6—7 月径流丰富,占全年径流量的 40%,而 11 月—次年 4 月为枯水期,尤以 2—3 月最少。特殊的喀斯

特地貌、降水以及径流时空分布不均等特征使得干旱事件在该地区频发。

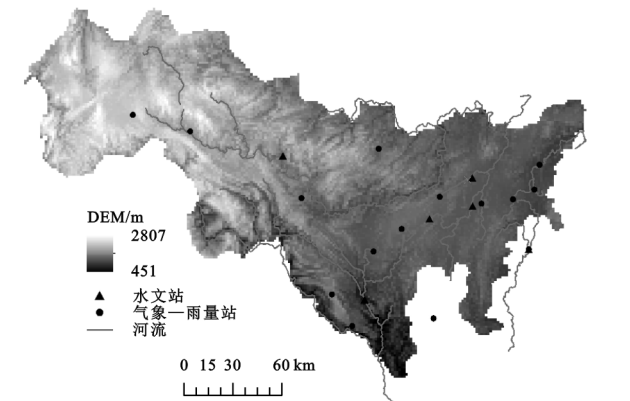


图 1 黔中地区以及气象—雨量站和水文站分布

2 数据与来源

2.1 数据来源

本文收集了贵州黔中地区 1970—2016 年多个气象站以及雨量站的月均降水,同时气象站数据来源于中国气象数据共享服务网站的日值数据集,径流数据选取该地区 1970—2016 年的 6 个水文站点的逐月径流数据(图 1),利用逐月的降水和径流数据对其气象和水文干旱进行分析。

2.2 研究方法

标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)是气象干旱评估常用指标,适用多尺度地对气象干旱进行监测与评估。通常采用 Gamma 分布概率描述降水量的变化,将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[13]。标准化径流指数(Standardized streamflow index, SSI)是水文干旱评估常用指标^[14],径流与降水类似,同样服从偏态分布, Malik^[15]在对印度北阿坎德邦上流进行干旱预测时将径流值替代降水值,使用 Gamma 概率分布模型计算了水文干旱指数,即证明该概率分布模型同样适用于以径流为指标的水文干旱指数计算。并且黔中地区降水量与径流量相关系数达到 0.86 以上,两者相关性明显,同时为了便于对比干旱类型,本文的 SSI 与 SPI 计算方法一致,均采用 gamma 概率分布模型计算,采用降水指标计算得到 SPI,将径流指标代替降水得到 SSI 值。以 SPI 为例,具体计算公式为^[16-18]:

$$G(x)=\frac{1}{\beta^\gamma(\gamma)_0}\int_0^x t^{\gamma-1}e^{-\frac{t}{\beta}}dt \quad x>0 \quad (1)$$

式中: $G(x)$ 由 gamma 分布函数概率积分计算得出,用于拟合站点每个月的降水(径流)频率; x 为月降水量(径流量); γ, β 分别为 gamma 分布函数的形状与

尺度参数^[17]。

$$SPI=-\left(\frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{[(d_3t+d_2)t+d_1]t+1}\right) \quad 0<G(x)\leq 0.5 \quad (2)$$

$$SPI=+\left(\frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{[(d_3t+d_2)t+d_1]t+1}\right) \quad 0.5\leq G(x)\leq 1 \quad (3)$$

式中: $t=\sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$, $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_1=1.432788$, $d_2=0.189269$, $d_3=0.001308$; $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 分别为 gamma 分布函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数^[18]。

本文采用 gamma 概率分布模型计算出月尺度的标准化降水指数(SPI)和标准化径流指数(SS I),并且依据《气象干旱等级 GB/T20481-2006》中的分级标准划分干旱等级(表 1)。

表 1 基于 SPI 与 SSI 的干旱等级划分

等级	类型	SPI 值	SSI 值
1	无旱	$-0.5<SPI$	$-0.5<SSI$
2	轻度干旱	$-1<SPI\leq -0.5$	$-1<SSI\leq -0.5$
3	中度干旱	$-1.5<SPI\leq -1$	$-1.5<SSI\leq -1$
4	重度干旱	$-2<SPI\leq -1.5$	$-2<SSI\leq -1.5$
5	极度干旱	$SPI\leq -2$	$SSI\leq -2$

本文从干旱发生的频率以及干旱发生的强度两个方面评价黔中地区近 47 a 干旱演变特征。以月为单位,为了便于比较不同时期不同等级的干旱发生次数,故以干旱发生的频率作为表征,按不同程度的干旱发生月数计算不同时期的干旱频率^[19]。为了方便描述和理解黔中地区干旱的空间变化特征,将干旱强度按干旱等级划分无旱、轻度干旱、中度干旱、重度干旱以及极端干旱,得到黔中地区不同年代干旱强度空间分布图,以评价不同时期干旱强度的空间格局特征^[20]。

3 结果与分析

3.1 气象干旱时空特征

3.1.1 气象干旱时间演变 以贵州黔中地区的气象以及雨量站 1970—2016 年逐月降水计算该地区月尺度 SPI 值,图 2 选取 1 个月、3 个月、6 个月、9 个月以及 12 个月时间尺度的月 SPI。可以看出,随着时间尺度的增大, SPI 识别的干旱事件减少,但干旱历时增加。1 个月时间尺度的 SPI(SPI_1) 以及 3 个月时间尺度的 SPI(SPI_3)所识别的干旱事件以短历时为主,且 SPI_3 与 SPI_1 相比, SPI_1 反映每个年代际均出现干旱, SPI_3 则识别较长历时的干旱事件,呈

现出一定规律,在图 2B 中,可以发现干旱事件主要集中在 20 世纪 80 年代以及 90 年代、21 世纪 00 年代以及 10 年代,尤其是 2009—2013 年期间,该时期 SPI 值最低且平均干旱历时较长,这说明这一时期黔中地区发生较为严重的干旱事件。而 6 个月、9 个月以及 12 个月时间尺度的 SPI(SPI₆,SPI₉,SPI₁₂)识别的干旱事件以长历时为主,随着时间尺度增加,干旱历时增大,干旱事件减少。在图 2E 中,可以看出黔中地区不同年代际的干旱情况,1970—2016 年 SPI 值共出现了 6 次明显的低峰,依次为 1975 年 7 月—1976 年 5 月,1981 年 7 月—1982 年 4 月,1988 年 11 月—1990 年 5 月,2003 年 6 月—2007 年 5 月,2009 年 9 月—2010 年 11 月以及 2011 年 6 月—2012 年 6 月,2013 年 6 月—2014 年 6 月,其中以 2003—2007 年的干旱历时最长,为 48 个月。分析不同时间尺度的动态特征,发现时间尺度较短时,SPI 具有较高的时间频率振荡,干湿交替频繁,而在较长的时间尺度上,SPI 显示较低的时间频率,从而能够监测持续的干燥和潮湿时段。

图 3 为黔中地区 1,3,6,9 以及 12 个月时间尺度的年均 SPI 值变化趋势,可以看出近 47 年贵州黔中地区 SPI 整体呈现显著的下降趋势,具有明显的干旱化态势。不同时间尺度上 SPI 也呈现不同程度的干旱化特征,且随着时间尺度的增加,黔中地区干旱现象越显著。以 1 个月尺度的 SPI(SPI₁)变化趋势最小,其斜率为 -0.009 ,干旱现象不明显,SPI 最小值出现在 2009 年,其次是 1988 年,依据 SPI₁ 的 5 a 滑动平均趋势线来看,1980—1985 年,SPI 值下降显著,其最低点在 1985 年,1995—2009 年 SPI 再次出现明显地下滑,最低点在 2009 年,即表示黔中地区近 47 年来 2009 年干旱最严重。以 12 个月尺度的 SPI(SPI₁₂)变化趋势最显著,其斜率为 -0.02 ,该时间尺度上,干旱现象显著,SPI 最低点在 2010 年,由 SPI₁₂ 的 5 a 滑动平均趋势来看,SPI 值在 1978—1987 年这段时期发生第一次显著下降的趋势,最低谷为 1986 年,这与 SPI₁ 相比,最低点往后 1 a;SPI 值发生第二次下降且最显著的时段在 1995—2010 年,最低点在 2010 年,表明这段时期干旱态势化显著且 2010 年为气象最干旱的一年。SPI₃,SPI₆ 以及 SPI₉ 下降趋势相近,斜率分别为 0.014 , 0.016 以及 0.018 ,但随着时间尺度增大,SPI 值的 5 a 滑动平均曲线出现的起伏越大。在图 2B 和图 2C 中,可以看出,SPI₃ 和 SPI₆ 的最低值均出现在 2013 年,而 5 a

滑动平均趋势的最低值在 2009 年,这说明 SPI₃ 和 SPI₆ 的干旱化态势整体上虽然显著但比 SPI₉,SPI₁₂ 的干旱化趋势小。

从年代际来看,SPI₁,SPI₃ 以及 SPI₆ 以轻旱为主。与 SPI₉,SPI₁₂ 相比,SPI₆ 出现的干旱事件最多,主要集中在 21 世纪 10 年代;SPI₉ 在 21 世纪 10 年代出现 3 次中度干旱以及 1 次重度干旱;SPI₁₂ 则以中旱为主,各个时间段均出现干旱,以 2010 年 SPI 值为小,为 -1.67 ,属于重度干旱。这说明在 12 个月时间尺度上,黔中地区气象干旱态势愈发严重,干旱事件频繁,干旱程度增大。

图 4 是根据表 1 中 SPI 干旱划分等级,统计近 47 年黔中 15 个气象以及雨量站点每月 SPI 值,得到 1970—2016 年黔中地区干旱事件频率变化图。由图 4 可看出,1970—2016 年黔中地区干旱事件发生的频率明显增加,无旱月由 1970 年的 74.61% 下降到 2010 年的 67.30%,不同程度的干旱月出现不同的涨幅,其中极端干旱事件出现的次数增多,干旱频率增大且 21 世纪的极端干旱发生的频率最高,20 世纪 80 年代后逐年代际增加,其干旱频率由 20 世纪 70 年代的 2.06% 增加至 21 世纪 10 年代的 4.21%,两者相差约 2.7 倍,这说明黔中地区 21 世纪初极端干旱事件发生较为频繁。轻度、中度以及重度干旱事件发生的频率总体上呈增加的趋势,但并不是随着年代际一直增加。轻度干旱在 20 世纪 70 年代的干旱频率为 11.89%,然而在 21 世纪 00 年代,其干旱频率为 17.00%,两者相差约 1.4 倍,但 21 世纪 10 年代出现了下降的趋势。中度干旱最大的干旱频率在 21 世纪 10 年代,为 9.37%,其次是 20 世纪 90 年代,为 9.17%,最小干旱频率在 20 世纪 70 年代,为 7.67%,中度干旱频率总体上随着年代际出现增加—减少—增加的趋势并且涨幅不大。重度干旱频率总体上以增加—减少的趋势变化,其在 20 世纪 70 年代至 21 世纪 00 年代呈增加趋势,涨幅 1.5%,在 21 世纪 10 年代干旱频率下降,但下降幅度不大。由图 4 分析可知,黔中地区近 47 a 气象干旱事件发生的频率增加,其中以重度干旱、极端干旱的频率涨幅最为明显。

3.1.2 气象干旱空间分布 从图 5 中可以看出黔中地区各时段气象干旱强度空间变化特征存在明显差异。黔中地区 1970—2016 年多年平均干旱强度空间分布特征具有明显的差异性(图 5F),干旱以东至西出现强—弱—强—弱的变化特征,并且近 47 年黔中地区的干旱事件以中度干旱为主。

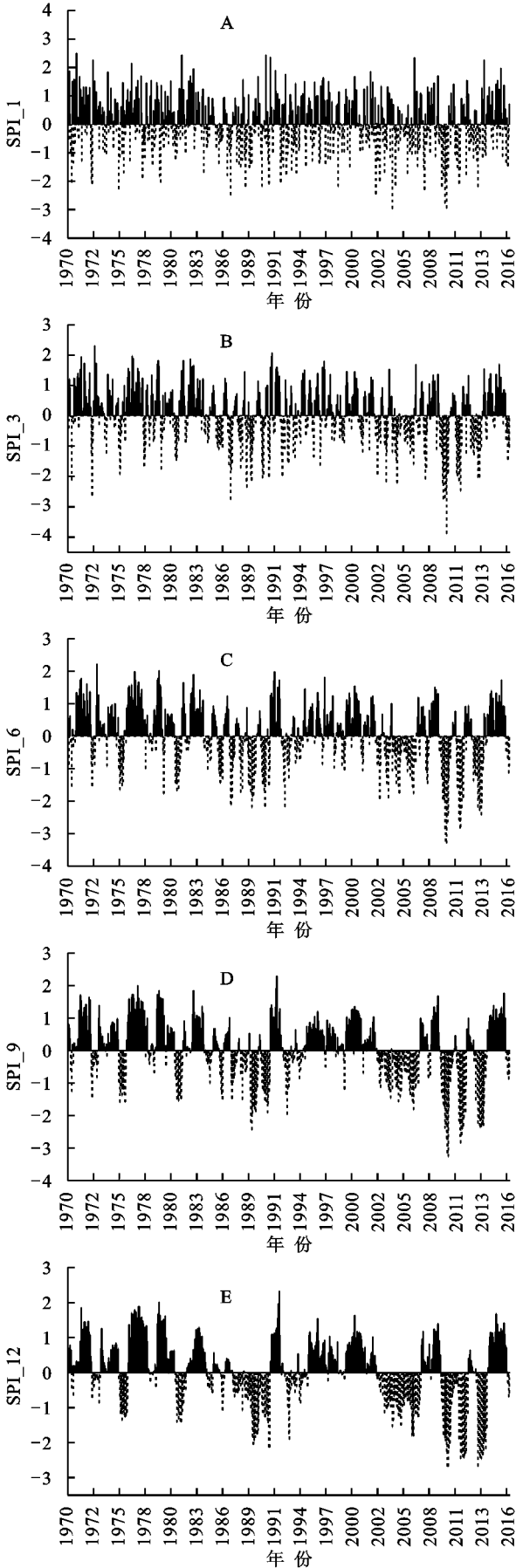


图 2 1970—2016 年黔中地区 1,3,6,9 以及 12 个月 SPI 动态特征

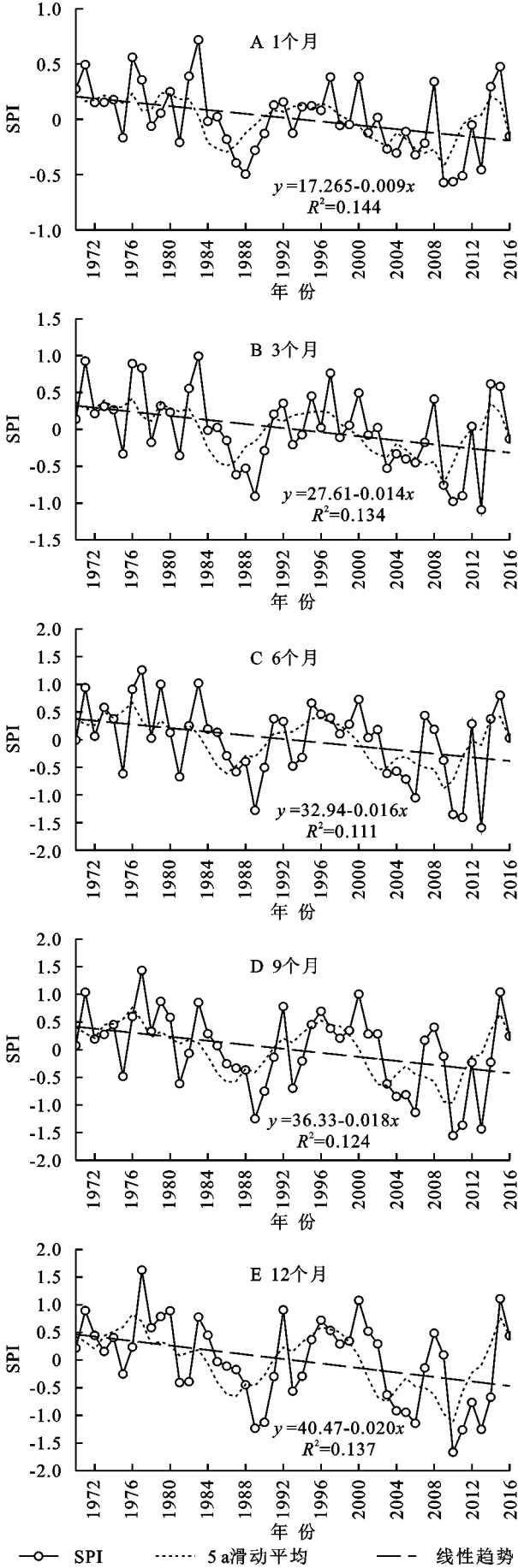


图 3 1970—2016 年黔中地区 SPI 变化特征

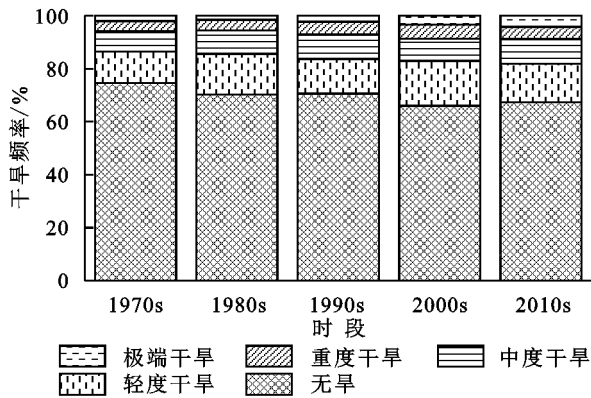


图 4 1970—2016 年黔中地区不同气象干旱等级发生的频率

从年代际上看,发现不同年代际气象干旱空间变化格局不同。在图 5(A,B,C)中可以发现 20 世纪黔中地区干旱主要发生在威宁南部至黔中中部、西部以及南部等一些地区以及贵阳东南部,极端干旱以 20 世纪 70 年代最为显著。而威宁北部、织金西部、清镇、

平坝东北部以及贵阳西北部的干旱化态势较弱,主要以无旱为主。21 世纪干旱空间格局出现与 20 世纪不同的变化特征。21 世纪 00 年代(图 5D),黔中地区以中度干旱为主,其干旱化面积最广,由西北方向至东南方向,干旱呈减弱的变化趋势,贵阳东南部以极端干旱为主。21 世纪 10 年代(图 5E),以西北至西南,黔中干旱化态势呈减弱—增强—减弱的变化趋势,以中度干旱为主,极端干旱分别出现在赫章北部、威宁北部以及贵阳东南部。21 世纪黔中地区干旱化态势较 20 世纪强,干旱化态势面积增加,并且中度干旱化态势面积也呈增加趋势,同时发现贵阳东南部是干旱化态势最显著的地区,而清镇以及贵阳西北部的干旱化态势最小。结合图 5(A—F)分析,发现近 47 a 黔中地区气象干旱在不同年代际呈现不同的空间分布特征,随着年代际的增加,黔中地区干旱化区域面积不断扩大。

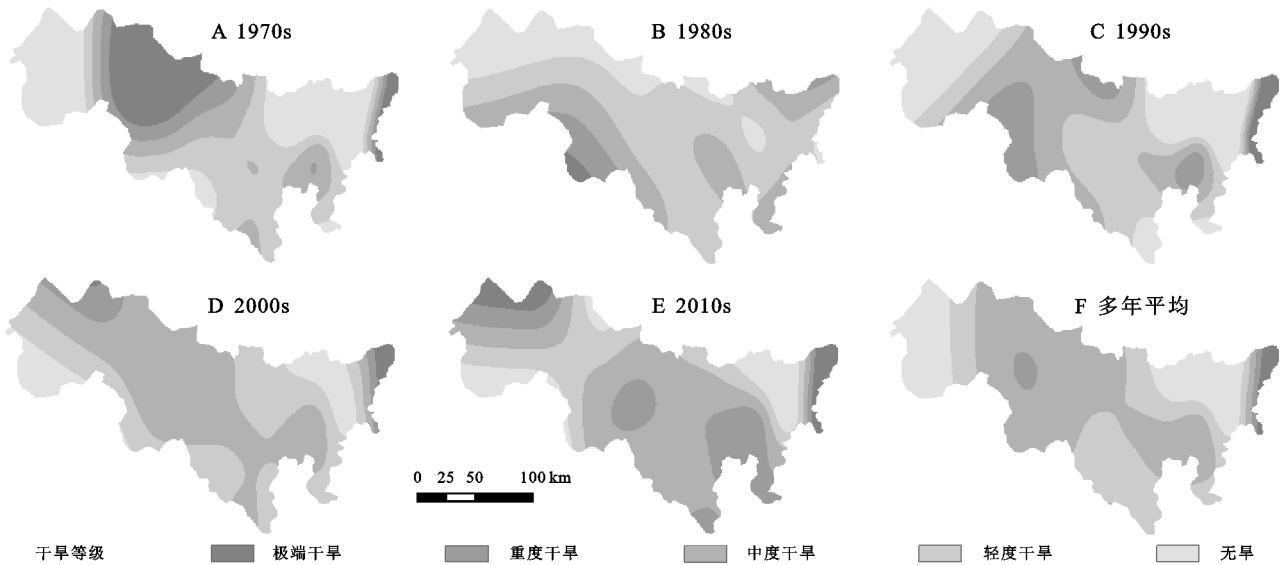


图 5 1970—2016 年黔中地区气象干旱强度的时空分布特征

3.2 水文干旱时空特征

3.2.1 水文干旱时间演变 以贵州黔中地区的水文站 1970—2016 年逐月径流计算月尺度 SSI 值,图 6 选取 1 个月、3 个月、6 个月、9 个月以及 12 个月时间尺度的月 SSI 值。随着时间尺度的增加,SSI 识别的干旱事件越集中,且干旱历时越长。较短的时间尺度如 1 个月时间尺度的 SSI(SSI₁)和 3 个月时间尺度的 SSI(SSI₃)具有较高的时间频率振荡,识别更多的干旱事件,并且以短历时为主,在图 6(A—B)中,不同年代际均出现不同程度的干旱,主要轻旱和中旱为主,不同的是,SSI₃的干旱低峰值明显,所识别的重旱与极旱也多于 SSI₁。较长的时间尺度如 6,9 以及 12 个月时间尺度的 SSI(SSI₆,SSI₉ 以及 SSI₁₂)具有较低的时间频率振荡。在图 6(C,D 和 E)中,看出 SSI₆,SSI₉ 和 SSI₁₂ 识别的干旱事件较

为集中,干旱历时较长,并且随着时间尺度不断增大,重旱以及极旱出现的次数也呈增加趋势,SSI₁₂ 的重度和极端干旱事件多于其他两个时间尺度。依据 SSI₁₂(图 6E)可以看出黔中地区近 47 a 中共出现 7 次明显地干旱值低峰,干湿情况分明,其中以 2005 年 5 月至 2007 年 7 月的干旱历时最长,为 26 个月。

图 7 为黔中地区 1,3,6,9 以及 12 个月时间尺度的 SSI 值变化趋势,由图可以看出随着时间尺度的增大,SSI 下降的趋势越显著,斜率越大,同时 5 a 滑动平均曲线起伏的坡度越大。以 1 个月尺度的 SSI(SSI₁)变化趋势最小,其斜率为-0.007,干旱现象不明显,出现两个明显的 SSI 值低峰,分别在 1989 年以及 2013 年,依据 SSI₁ 的 5 a 滑动平均来看,两次下降趋势分别为 1982—1986 年以及 1996—2008 年,这与 SSI 值曲线最低峰不一致。

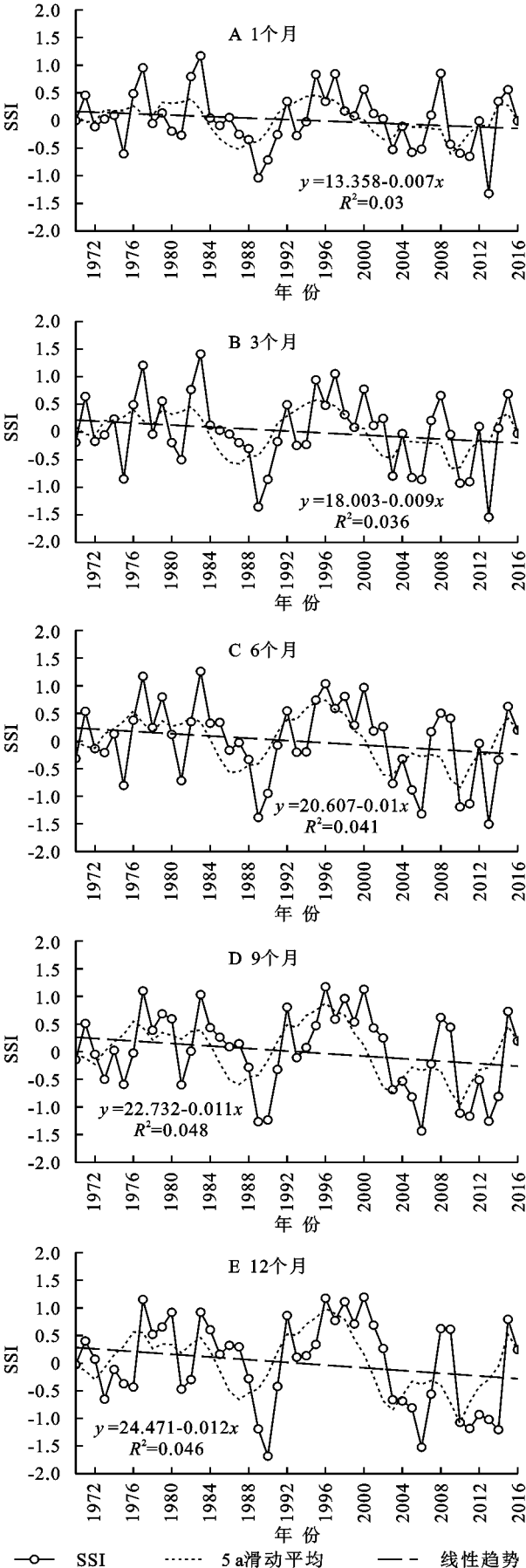


图 6 1970—2016 年黔中地区 1,3,6,9 以及 12 个月 SSI 动态特征

3,6 以及 9 个月时间尺度的 SSI 下降趋势逐渐增强(图 7B,C 和 D),斜率分别为 0.009,0.01,0.011,但不同时间尺度 SSI 的 5 a 滑动平均最低峰也不同,SSI₃ 的两次低峰为 1987 年以及 2009 年,SSI₆ 的为 1986 年以及 2010 年,SSI₉ 的为 1987 年以及 2010 年,这说明不同时间尺度上 SSI 呈现不同程度的干旱化特征。12 个月时间尺度的 SSI 变化趋势最显著(图 7E),其斜率为 0.012,该时间尺度上,SSI 变化曲线与 5 a 滑动平均曲线的起伏明显,SSI 值最低点出现在 1990 年,其次是 2006 年,依据 5 a 滑动平均曲线可以发现,SSI₁₂ 的第一次下降在 1977—1986 年,第二次在 1996—2010 年,这说明 1977 年开始干旱化态势不断加强,在 1990 年达到最低值后,黔中地区干旱态势开始减弱,在 1991 年进入湿润化态势,随后在 1996 年干旱化态势继续加强,至 2006 年达到第 2 个 SSI 值低点,随后干旱化态势虽然减弱,但一直持续,直到 2015 年才转为湿润化态势。

从年代际来看,年均 SSI 值识别的干旱主要集中在 21 世纪 00 年代和 10 年代。SSI₁ 和 SSI₃ 以轻旱为主,SSI₁ 的干旱事件较少,SSI₃ 的干旱事件主要集中在 21 世纪;而 SSI₆,SSI₉ 以及 SSI₁₂ 则以轻旱、中旱为主,SSI₆ 在 20 世纪 80 年代出现一次重旱,SSI₉ 出现的干旱事件最多,SSI₁₂ 在 20 世纪 90 年代以及 21 世纪 00 年代出现重旱,以 1990 年 SSI 值为小,为 -1.68,属于重度干旱。对黔中地区近 47 a 不同时间尺度的 SSI 变化趋势进行分析,发现水文干旱化态势随年代际发生不同变化,总体呈增强—减弱—增强—减弱的变化趋势。

本文根据表 1 干旱划分等级,统计近 47 a 黔中 6 个水文站点每月 SSI 值,按不同等级的干旱发生月数计算不同时期的干旱频率,得到 1970—2016 年黔中地区水文干旱事件频率变化图。黔中地区不同等级的水文干旱发生的频率随着年代际发生不同的变化,无干旱月份的频率出现了减少—增加—减少的趋势,其出现频率以 20 世纪 70 年代 71.25% 下降至 21 世纪 10 年代的 58.13%,这说明黔中地区水文干旱事件随着年代际增加。其中极端干旱月增加的次数明显增多,20 世纪 70 年代发生极端干旱的频率最小,为 0.69%,20 世纪 10 年代发生的频率最大,为 3.57%,两者相差约 2.88%,这说明极端干旱事件在 21 世纪发生较频繁。中度以及重度干旱事件发生的频率在 1970—2016 年也出现了明显的涨幅,两者的变化趋势均为增加—减少—增加。

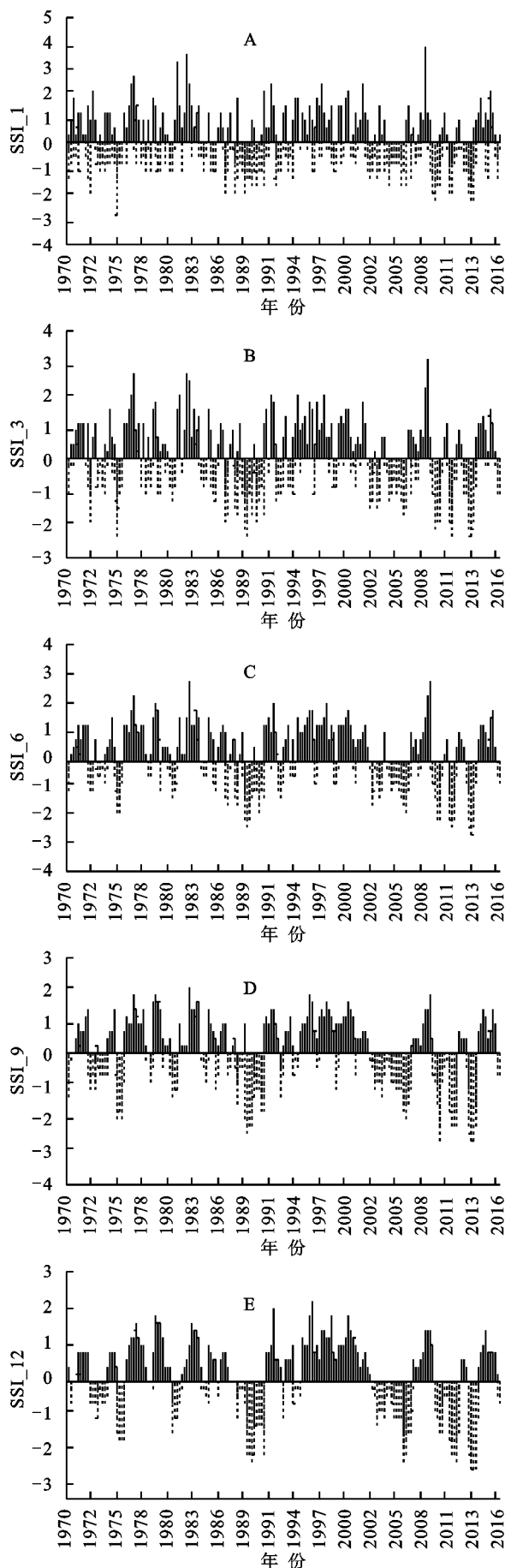


图 7 1970—2016 年黔中地区 SSI 变化特征

发生中度干旱的最大干旱频率出现在 21 世纪 10 年代,为 13.69%,其发生最小的干旱频率在 20 世纪 70 年代,为 7.22%,两者相差 6.47%;21 世纪 10 年代发生重度干旱的频率为 8.13%,20 世纪 70 年代与 90 年代重度干旱频率均为 2.92%,干旱频率的最大值与最小值相差 5.31%。轻度干旱事件发生的频率随着年代际发生增加—减少—增加—减少的变化,其中 20 世纪 80 年代轻度干旱频率为 18.89%,是各年代际最大的,而最小的干旱频率在 20 世纪 90 年代,为 14.44%,两者相差 4.45%。由此可知,黔中地区近 47 a 水文干旱事件发生的频率增加,以中度干旱增加最为显著,重度以及极端干旱事件也出现增加的趋势,并且在年代际间差异较大,而轻度干旱发生频率减少。

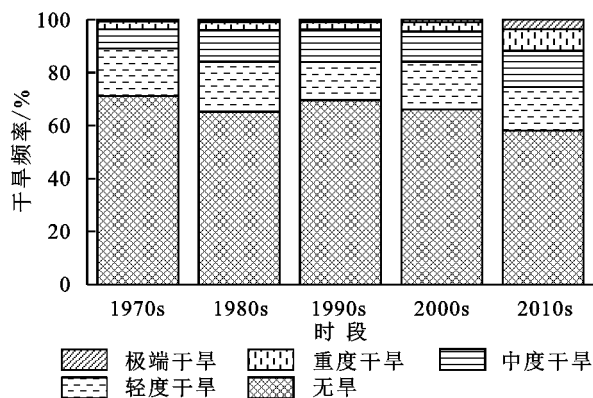


图 8 1970—2016 年黔中地区不同水文干旱等级发生的频率

3.2.2 水文干旱空间分布 图 9 为黔中地区不同年代水文干旱强度空间分布图,以评价不同时期的干旱强度的空间格局特征。黔中地区多年平均水文干旱强度空间格局出现两极分化的特征(图 9F),干旱化态势以东至西呈增加的趋势。

从年代际上看,发现不同年代际水文干旱空间变化格局不同。20 世纪黔中地区干旱化态势随年代际变化呈弱—强的趋势,发生干旱的地区逐渐增多,并且黔中的中南部地区干旱频发,以轻度干旱为主。21 世纪黔中地区水文干旱化态势随着年代际呈增加趋势,以中度干旱为主。21 世纪 00 年代与 10 年代的干旱空间格局存在差异。21 世纪 00 年代(图 9D),黔中地区干旱化态势由东往西呈减弱的趋势,而 21 世纪 10 年代(图 9E)黔中地区干旱化态势由西北至东南呈减弱—增强的变化。黔中地区水文干旱的空间分布特征随年代际发生不同的变化,空间差异性大。最为明显的为 20 世纪与 21 世纪干旱化态势的分布不一致,20 世纪黔中地区干旱化最为明显的地区主要在其中部,而进入 21 世纪,特别是 21 世纪 10 年代,干旱化态势最显著的地区则在该地区西北部,同时 21 世纪的干旱化态势是强于 20 世纪的。

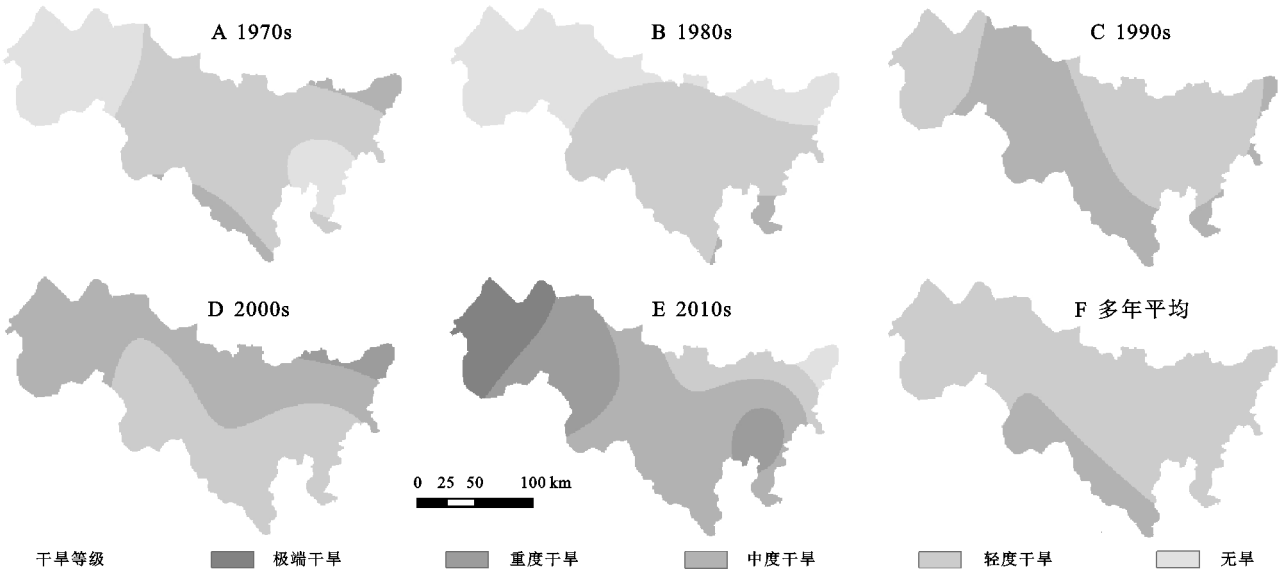


图 9 1970—2016 年黔中地区水文干旱强度的时空分布特征

3.3 水文干旱与气象干旱的关系

从 3.1 与 3.2 可知,黔中地区干旱化态势越发严重,重度和极端干旱发生的频率增加,同时该地区干旱化面积也在增加。气象干旱是干旱发生的开始,而水文干旱则是气象干旱的延续,利用气象干旱有效预测水文干旱发生的前提是找到两种干旱类型之间的关系。所以本文在研究黔中地区干旱演变特征的基础之上继续对该地区水文干旱与气象干旱的关系进行探求。

采用 Pearson 简单相关系数分别对 1~12 个月尺度的 SPI 和 SSI 指数进行相关分析,从整体上看,两者相关系数均通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验,图 10 为年均、1 月、4 月、7 月、10 月的 SPI 与 SSI 月序列的相关分析,以 1 月代表冬季、4 月代表春季、7 月代表夏季以及 10 月代表秋季。由图可以看出,SSI-SPI 之间相关系数变化趋势总体上一致,但不同的月份在不同时间尺度上其相关系数出现明显的差异,具体为:

(1) 由图 10 可知,SPI 与 SSI 之间的相关性随着时间尺度的增加而越密切,在达到某个值时,相关系数会保持一个稳定的水平缓慢地上升,当时间尺度继续增加时,两者的相关系数则会下降。并且不同时间的相关系数变化趋势也不一致。

(2) 1 月以及 4 月 SSI-SPI 的相关系数总体上低于年均相关系数,7 月以及 10 月 SSI-SPI 的相关系数则总体是高于年均相关系数。这说明黔中地区冬春两季水文干旱对气象干旱响应弱于夏秋两季,SSI-SPI 关系的模式随着时间尺度发生季节性变化,不同季节表现出明显的差异。

(3) 1 月 SSI-SPI 关系最佳尺度为 7 个月。在图 10 中,可以发现其相关系数增加速度最快的阶段为

2~7 个月,7 个月时间尺度以后相关性保持稳定地缓慢地上升趋势。4 月 SSI-SPI 相关性的变化趋势弱于其他月份,其最佳尺度为 10 个月。7 月 SSI-SPI 的总体相关系数比年均与其他月份高,但其最佳时间尺度为 3 个月。10 月 SSI-SPI 相关性变化趋势显著,依据相关系数增加的速度来看,10 月 SSI-SPI 相关性最佳时间尺度为 4 个月。

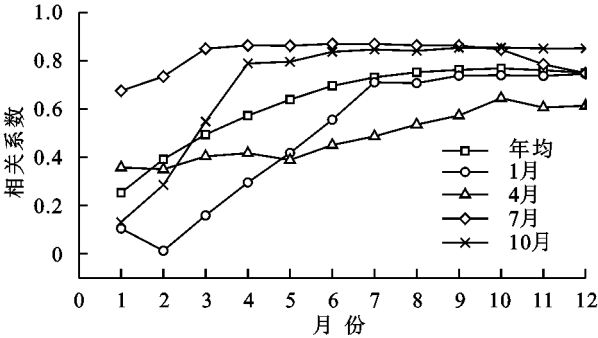


图 10 黔中地区不同时间尺度上 SSI 与 SPI 连续序列之间的相关系数

图 11 为不同时间不同尺度上 SSI-SPI 相关系数的热图。根据年均相关系数的热图变化趋势发现(图 11E),黔中地区的水文干旱普遍滞后于气象干旱 1 个月,例如 SSI_1 与 SPI_2 相关系数大于 SSI_1 与 SPI 其他尺度,依次类推;但 10 个月尺度以后,SSI_11 与 SPI_11,SSI_12 与 SPI_12 的相关系数均大于其他尺度,李运刚^[21]认为水文干旱发生时都会伴随着气象干旱的发生,但气象干旱并不一定会引起水文干旱的发生,这由气象干旱的历时或强度所决定。当气象干旱的历时较短或者强度较小的情况下,水文干旱不一定发生。同理,在多时间尺度例如 12 个月时间尺度上,气象干旱的历时较长以及强度较大,使得水文干旱同时期发生也是有可能的。

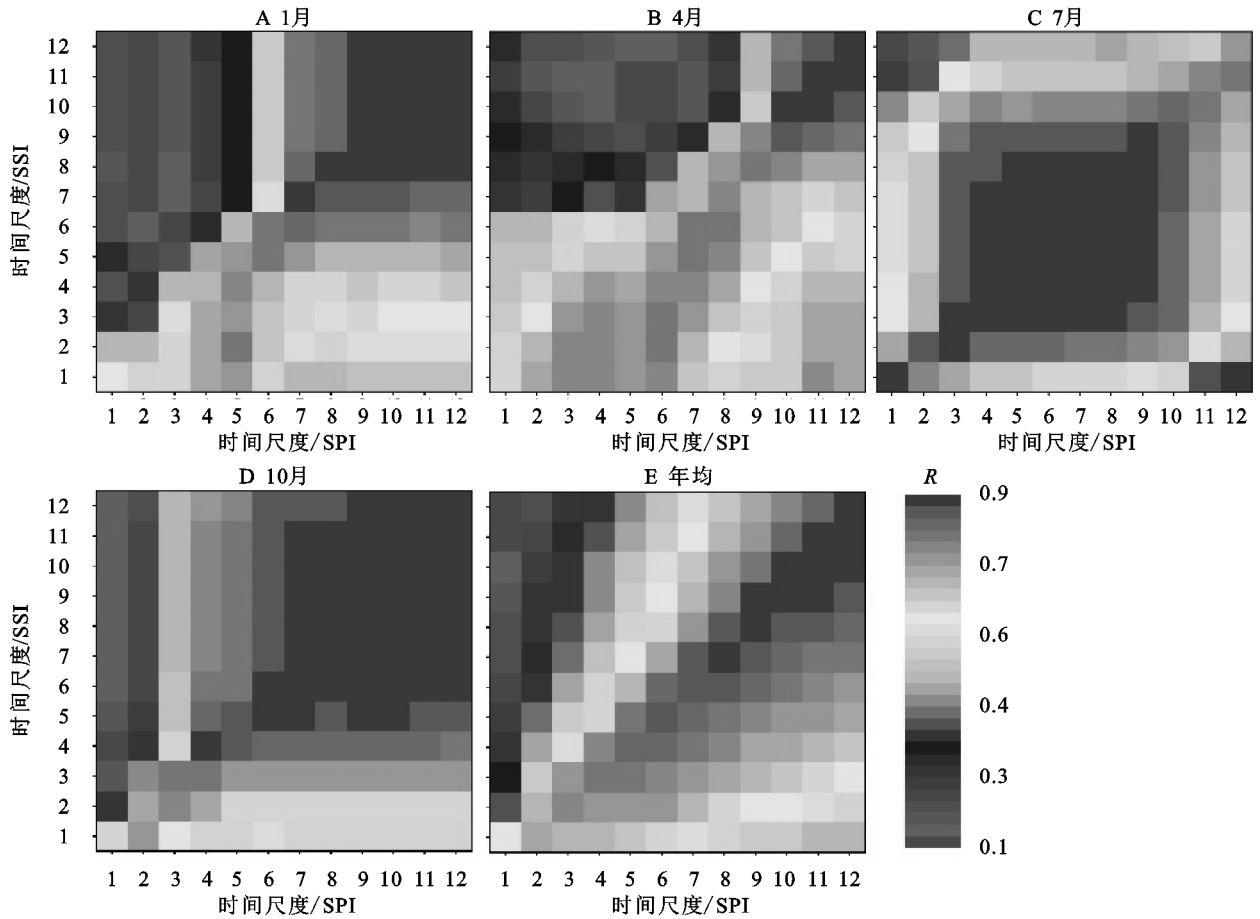


图 11 黔中地区年均、1 月、4 月、7 月以及 10 月 SSI-SPI 相关系数热图

水文干旱与气象干旱之间的相关性在不同季节表现出不同信息。在图 11(A,B,C 和 D),随着季节变化,SSI-SPI 相关性也发生了明显变化,两者的相关性依次减小顺序为夏季>秋季>春季>冬季,最大相关性的时间尺度也发生同质变化,以夏季开始(图 11C),其高相关性主要集中在 3~9 个月时间尺度上;秋季 6~12 个月时间尺度的相关系数较高(图 11D),夏季至秋季,高相关性群推后 3 个月;冬季高相关性主要集中在 8~12 个月(图 11A),秋季至冬季,高相关性群缩小并推后 2 个月;而春季的高相关性群继续缩小(图 11B),相关性最佳的尺度为 3 个月,集中在 10~12 个月时间尺度上,同时相关性大的时间尺度也随着减少。

水文干旱不直接受降雨的影响,其严重程度反映了地区的缺水量,而由降水补充的蓄水量枯竭会对该地区的缺水量产生深远影响^[22],所以由不平衡降水导致的气象干旱与水文干旱有着密切的关系。结合图 10 与图 11 分析,发现不同季节 SSI-SPI 最佳时间尺度与滞后时间是不一致的。1 月最佳时间尺度为 7 个月,其水文干旱滞后于气象干旱 1~4 个月;4 月最佳时间尺度为 10 个月,其水文干旱滞后于气象干旱 1~5 个月;7 月最佳时间尺度为 3 个月,而其水文干

旱滞后于气象干旱 1~3 个月;10 月最佳时间尺度为 4 个月,其水文干旱普遍滞后于气象干旱 1~4 个月。黔中地区地貌类型既包括喀斯特峰林区也包括喀斯特峰丛区^[23],岩溶水系统的特殊性使得该地区的气象水文干旱情况与国内其他地区不同,特别是气象与水文干旱之间的响应关系也因此受到明显的影响。黔中地区夏季 SSI-SPI 相关性最大,其次是秋季,结合该地区降水与地貌特征分析,该地区受到大气环流季节活动的影响,降水时空分布不均,地下河道以及岩溶孔隙等存在使得降水入渗至地下河或者其他岩溶孔隙储存,以及岩溶水补给地表水包括径流等均需要过程以及时间。夏季 7 月、8 月因高温少雨,发生气象干旱时,随着干旱强度增强或干旱历时加长,使得地表水严重缺水,影响作物供水以及生活用水,地下水以及岩溶孔隙水等补给地表水的水量增多以及补给速度加快从而缺水,由此影响流域蓄水量;秋季温度高,降水补给少,地下水以及储存在岩溶孔隙的水等继续补给地表水,由于干旱强度或者干旱历时小于或者短于夏季干旱,秋季 SSI-SPI 相关性仅次于夏季,所以夏、秋两季的 SSI-SPI 最佳时间尺度与滞后时间相差不大。黔中地区冬季雨雪补给虽然量少,但因为温度低,日照时数少,蒸发弱于其他季节,地表缺水量不严

重,地下水补给弱,SSI-SPI 相关系数较低。春季温度开始回升,同时降水补给晚,植物需水增大,蒸发增强,与冬季干旱类似,干旱历时较长以及干旱化面积较小,以较长的时间尺度才能引起水文干旱,所以春冬两季最佳时间尺度与滞后时间相差较大。故 SSI-SPI 相关系数大小为夏季>秋季>春季>冬季。

4 结论

(1) 标准化降水指数(SPI)与标准化径流指数(SSD)不同的时间尺度反映的干旱特征不同,主要为较短时间尺度的干旱指数具有较高的时间频率振荡,能识别更多的干旱事件,而较长的时间尺度上,干旱指数具有较低的时间频率振荡,能够监测持续的干燥和湿润时段。

(2) 1970—2016 年黔中地区气象以及水文干旱强度增强,干旱化趋势随着年代际发生变化,主要以增强趋势为主。并且该地区发生干旱的频率增加,其中 21 世纪以后重度干旱以及极端干旱出现的频率大幅增加。

(3) 黔中地区气象与水文干旱在不同年代际呈现不同的空间分布特征。21 世纪黔中地区气象干旱化态势较 20 世纪强,干旱化态势面积增加,并且贵阳东南部是干旱化态势最显著的地区。20 世纪与 21 世纪的黔中地区水文干旱化态势的分布不一致,20 世纪黔中地区干旱化最为明显的地区主要在其中部,而进入 21 世纪,特别是 21 世纪 10 年代,干旱化态势最显著的地区则在该地区西北部。

(4) 黔中地区气象干旱与水文干旱的关系非常密切,相关系数随着时间尺度增加而增大,但达到最大值后,时间尺度继续增加时,两者的相关系数则会下降,并且不同时间的相关系数变化趋势不一致。同时气象干旱与水文干旱之间的响应关系还呈现出季节性变化,其相关系数大小为夏季>秋季>冬季>春季。

SPI 与 SSI 分别是基于降水和径流计算得来,两者用于分析黔中地区气象与水文干旱的演变过程和空间特征,结合 Pearson 相关分析对 SSI—SPI 之间的关系进行定性分析,而实际干旱情势的定性分析以及气象水文干旱之间的定量关系仍然存在一定的挑战,气象干旱向水文干旱传播的时间受多种因素的影响,仅仅采用相关分析是不够的,并且黔中地区岩溶地貌复杂多样,社会经济发展、农业生产模式以及水资源开发与利用等因素使得对气象水文干旱之间的关系进行分析时需要更深度考虑。未来时期将继续致力于黔中地区不同类型干旱的演变以及响应关系,采用更科学的定量方法并考虑结合气候模式以及

IPCC 未来排放情景对该区域气象水文干旱的响应关系进行模拟和预测。

参考文献:

- [1] Van Loon A F, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. Journal of hydrology, 2015,526:3-14.
- [2] Peters E, Bier G, Van Lanen H A J, et al. Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment[J]. Journal of Hydrology, 2006,321(1/4): 257-275.
- [3] Zhao P, Lü H, Wang W, et al. From meteorological droughts to hydrological droughts: A case study of the Weihe River Basin, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019,12(11):1-13.
- [4] Li J, Zhou S, Hu R. Hydrological drought class transition using SPI and SRI time series by loglinear regression[J]. Water resources management, 2016, 30(2): 669-684.
- [5] Liu Y, Zhu Y, Ren L, et al. Understanding the spatio-temporal links between meteorological and hydrological droughts from a three-dimensional perspective[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(6):3090-3109.
- [6] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: an evaluation of the Standardized Precipitation Index in a mountainous Mediterranean basin[J]. Hydrology and earth system sciences, 2005,9(5):523-533.
- [7] Li Q, He P, He Y, et al. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis[J]. Atmospheric Research, 2020,234:104743.
- [8] Chen X, Li F, Wang Y, et al. Evolution properties between meteorological, agricultural and hydrological droughts and their related driving factors in the Luanhe River basin, China[J]. Hydrology Research, 2019, 50(4): 1096-1119.
- [9] López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Zabalza J, et al. Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin[J]. Journal of hydrology, 2013,477:175-188.
- [10] 蒋忆文,张喜风,杨礼箫,等.黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析[J].资源科学,2014, 36(9):1842-1851.
- [11] Zhou J, Li Q, Wang L, et al. Impact of climate change and land-use on the propagation from meteorological drought to hydrological drought in the eastern Qilian Mountains[J]. Water, 2019,11(8):1602.

- [9] 李忠芳,唐政,李继光,等.长期施肥对辽西褐土区土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J].土壤与作物,2013,2(4):150-156.
- [10] Ghanbarian B, Daigle H. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. Geoderma, 2015,245:98-103.
- [11] Meysam M, Mahmoud S, Mohammad H M, et al. Characterizing spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions[J]. Pedosphere, 2019,29(2):224-234.
- [12] 徐明岗,梁国庆,张夫道,等.中国土壤肥力演变[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006.
- [13] 左小安,赵学勇,赵哈林.沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J].生态环境学报,2009,18(2):643-647.
- [14] 高亚军.陕北农牧交错带土地荒漠化演化机制及土壤质量评价研究[D].陕西省杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [15] 刘勇.黄土高原植被演替过程中植被与土壤养分、水分关系研究进展[J].吉林农业科学,2010,35(5):25-27.
- [16] 苏志珠,刘蓉,梁爱民,等.晋西北沙化土地土壤机械组成与有机质的初步研究[J].水土保持研究,2018,25(6):61-67.
- [17] Abbas A, Mohammad-Reza N, Hassan R, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. Journal of Hydrology, 2011,400(3):305-311.
- [18] 华瑞,徐学选,张少妮,等.不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持学报,2016,30(4):206-209.
- [19] 李忠芳,徐明岗,张会民,等.长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J].应用生态学报,2010,21(5):1264-1269.
- [20] 罗倩,张珍明,向准,等.不同种植年限乌王茶产地土壤物理性质及生长特征[J].西南农业学报,2017,30(12):2746-2750.
- [21] 刘彦伶,李渝,张雅蓉,等.长期氮磷钾肥配施对贵州黄壤玉米产量和土壤养分可持续性的影响[J].应用生态学报,2017,28(11):3581-3588.
- [22] 张卫华,韩霁昌,王欢元,等.砒砂岩对毛乌素沙地风成沙的改良应用研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):122-127.
- [23] Sun Z H, Han J C. Effect of soft rock amendment on soil hydraulic parameters and crop performance in Mu Us Sandy Land, China[J]. Field Crops Research, 2018,222:85-93.
- [24] Dorraji S S, Golchin A, Ahmadi S. The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils[J]. Clean-Soil Air Water, 2015,38(7):584-591.

(上接第274页)

- [12] Sattar M N, Lee J Y, Shin J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea[J]. Water Resources Management, 2019,33(7):2439-2452.
- [13] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology,1993,17(22):179-183.
- [14] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Beguería S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012,17(2):318-332.
- [15] Malik A, Kumar A, Singh R P. Application of heuristic approaches for prediction of hydrological drought using multi-scalar streamflow drought index[J]. Water Resources Management, 2019,33(11):3985-4006.
- [16] 周扬,李宁,吉中会,等.基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J].自然资源学报,2013,28(10):1694-1706.
- [17] Zhou H, Liu Y, Liu Y. An approach to tracking meteorological drought migration[J]. Water Resources Research, 2019,55(4):3266-3284.
- [18] Zhou H, Liu Y. SPI based meteorological drought assessment over a humid basin: Effects of processing schemes[J]. Water, 2016,8(9):373.
- [19] 王东,张勃,安美玲,等.基于 SPEI 的西南地区近 53 a 干旱时空特征分析[J].自然资源学报,2014,29(6):1003-1016.
- [20] 王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估[J].生态学报,2019,39(13):4647-4659.
- [21] 李运刚,何娇楠,李雪.基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J].地理科学进展,2016,35(6):758-767.
- [22] Van Loon A F, Laaha G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics[J]. Journal of hydrology, 2015,526:3-14.
- [23] 李宗发.贵州喀斯特地貌分区[J].贵州地质,2011,28(3):177-181.