

# 区域植被对不同时间尺度气象干旱的响应

## ——以贵州省为例

皮贵宁, 贺中华, 张浪, 杨铭珂, 游漫

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:**为探究贵州省植被生长变化趋势对多时间尺度气象干旱的响应,基于 2001—2020 年的逐月 MODIS-NDVI、EVI 影像和气象数据,利用皮尔森相关系数、slope 趋势性分析等方法,对贵州省 20 a 的植被生长状况及气象干旱时空变化特征进行了分析。结果表明:(1) 贵州省不同时间尺度下的 SPEI 在整体上呈现出缓慢增加趋势,表明干旱程度有所降低;空间分布上干旱化趋势表现在北部的遵义、铜仁及黔西南地区。(2) 贵州省植被生长状况整体呈现出增加趋势,空间分布上的黔东南地区以降低趋势为主,毕节西部地区以增长趋势为主;(3) 贵州省植被生长状况与不同时间尺度的气象干旱呈现出不同程度的正相关性,以贵州省植被在黔西南和北部地区对干旱的响应最强,其次为贵阳和毕节东部;不同的土地利用类型中,草地对 SPEI<sub>3</sub> 的响应最强,其次为耕地和林地;生长季内的不同植被类型对 SPEI<sub>3</sub> 和 SPEI<sub>12</sub> 的响应较强。综上,贵州省植被和气象干旱时空分布特征存在一定的差异性,且不同植被类型对不同时间尺度气象干旱的响应情况也有所差别。

**关键词:**气象干旱; NDVI; EVI; 响应分析

**中图分类号:**P463.22

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)04-0277-08

## Response of Vegetation to Meteorological Drought in Watershed at Different Time Scales —A Case Study of Guizhou Province

PI Guining, HE Zhonghua, ZHANG Lang, YANG Mingke, YOU Man

(School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the response of vegetation growth trend to multi-time scale meteorological drought in Guizhou Province, based on monthly MODIS-NDVI and EVI images and meteorological data from 2001 to 2020, Pearson correlation coefficient, slope trend analysis and other methods were used to analyze the vegetation growth status and spatial and temporal variation characteristics of meteorological drought in Guizhou Province in 20 years. The results show that: (1) the different time scales of SPEI in Guizhou Province showed a trend of slow increase on the whole, indicating that the degree of drought had decreased; the spatial distribution of the aridity trend presented in Zunyi, Tongren and Southwest Guizhou; (2) the overall vegetation growth in Guizhou Province showed a slow increasing trend, but there were differences in spatial distribution; the vegetation growth in southeast Guizhou Province showed a decreasing trend, while that in the west of Bijie City showed an increasing trend; (3) there was a positive correlation between vegetation growth and drought on different time scales in Guizhou Province; the vegetation in southwest and northern Guizhou Province had the strongest response to drought, followed by Guiyang and eastern Bijie; among different land use types, grassland had the strongest response to SPEI<sub>3</sub>, followed by cultivated land and forest land; the response of different vegetation types to SPEI<sub>3</sub> and SPEI<sub>12</sub> was stronger in the growing season. In conclusion, there are some differences in the spatial and temporal distribution characteristics of vegetation and meteorological drought.

收稿日期:2021-07-04

修回日期:2021-07-14

资助项目:国家自然科学基金(41612441; 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:皮贵宁(1995—),女,贵州黔南人,在读硕士,研究方向为喀斯特水文水资源与遥感。E-mail:pgnpink@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:zhonghuahe@gznu.edu.cn

logical drought in Guizhou Province, and different vegetation types have different responses to meteorological drought at different time scales.

**Keywords:** meteorological drought; NDVI; EVI; response analysis

探索陆地植被与气候变化间的相互关系研究已经成为全球动态变化的重要研究内容之一,并在不同的区域研究尺度上取得了重大的突破性成果<sup>[1-3]</sup>。地面植被在陆地生态系统中具有极强的不可替代性,同时也是对于全球气候变化的天然反馈器<sup>[4-6]</sup>,更是人类评判干旱严重程度的重要指标之一。不同的生态系统对于干旱的响应方式并不一致,而陆地生态系统干旱的发生在一定程度上与净初级生产力的减少有着密切的联系,且其具有持续时间长、发生范围广及产生不同程度的滞后效应等特点<sup>[7-8]</sup>。严重的干旱会导致人体免疫力下降、促使生态环境进一步恶化并引发其他自然灾害发生。因此针对于全球干旱区域逐步增长与干旱化程度逐渐加重的现象,干旱化趋势研究成为全球研究的重点与热点,探究植被生长状况对气象干旱的响应也已经成为必不可少的研究项目。

区域范围内发生干旱的程度及变化趋势一般是通过干旱指标进行定量评判的,由气象站点所获得的单一干旱因子如温度、降水等难以全面评判气候的干湿发展状况;因此通过计算潜在蒸散发量等获取标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)对研究区内的气象干旱发生程度及变化趋势进行评价,该指数在继承了帕默尔干旱指数(PDSI)和标准化降水指数(SPI)优点的同时,克服了它们主观性强、适用范围较小以及干旱指标过于单一的缺点,具有更好的应用前景。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)在全球范围内的使用越来越成熟,它也是表征植被生长状况的重要指标之一<sup>[9]</sup>;并且利用 NDVI 进行植被覆盖度计算、土地植被类型提取、生物量定量估算及变化趋势分析等到目前已经发展得十分成熟<sup>[10-12]</sup>。而增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)则在 NDVI 的基础上改进了算法和合成方法<sup>[13-14]</sup>,进一步减少了大气、土壤背景以及像元异常值的影响,并解决了 NDVI 易饱和等<sup>[15-17]</sup>问题。这对于评判植被覆盖率较高的贵州植被变化趋势具有更加合理的客观性。

贵州地处中国西南内陆地区腹地,喀斯特地貌类型纷繁复杂;且自贵州省开始实施退耕还林还草和石漠化治理等工程以来,植被覆盖状况有明显的变化,但大多是与人类活动这一社会因素进行关联性分

析<sup>[18-19]</sup>;缺少与气象等自然因素方面的研究。因此本文选取贵州省作为研究区来探讨植被变化对气象干旱的响应。

## 1 研究区概况

贵州省位于中国西南东部地区,东经 103°36′—109°35′,北纬 24°37′—29°13′,高程为 200~2 800 m,属于亚热带高原季风湿润气候,无严寒酷暑,四季分明且多雨,地貌可分为高原、山地、丘陵和盆地 4 种基本类型,是典型的喀斯特地貌地区。由于地势西高东低以及气候的影响,植被从西至东也呈现不同的分布情况,主要以阔叶林、针叶林、灌丛和灌草丛、沼泽与水生植物和竹林 5 类,都具有明显的亚热带性质。

## 2 数据来源及处理方法

### 2.1 数据来源

本文选取标准化降水蒸散发指数 SPEI 作为监测气象干旱变化趋势的指标,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的 2001—2020 年的贵州省 31 个逐日观测的气象站点数据资料,包括了研究区内的逐日降水和气温、风速、纬度等数据。在对数据进行处理前先对 31 个站点的数据进行完整性和连续性验证,针对缺测的站点数据进行合理的删除和增补。最后将逐日的温度、降水站点数据采用均值法合并为逐月平均数据,并按年月依序排列,将 31 个站点的数据转化为 ASCII 格式的文件以便于后续的 SPEI 计算。

增强型植被指数和归一化植被指数都是可以表征研究区植被生长状况、植被覆盖程度的植被状态指数。这两种数据皆来源于 NASA MODIS 陆地产品根据统计算法开发的 MODIS13Q1 系列数据,数据版本为 V006 的 250 m 全球分辨率的 16 d 合成类植被指数产品。在本研究中的数据时间跨度为 2001—2020 年中各年的 4—10 月,每年 14 期,共 280 期;因为结合贵州省的地理特征及相关研究发现,贵州省内的植被在该时段内呈现出显著的绿色,因此选择每年的该时间段作为研究区的数据进行分析。

由于 NDVI 对叶绿素比较敏感,所以对于各种植被生长状态的监测、植被覆盖程度高低及消除部分辐射误差等方面有着较好的效果;而 EVI 相比于 NDVI 进行了

系统性的整体优化,在植被监测方面提高了对高生物量区域的敏感度,并且通过对植被冠层背景信号的去耦合和大气效应的减少改进了植被监测能力<sup>[17]</sup>。由于 MODIS 的 MOD13Q1 产品是在已有的植被指数的基础上进行数据改良的,所以其同时包含了 NDVI 和 EVI 两种植被产品,对影像进行必要和适当的提取和处理,如批量拼接、重采样、裁剪等。

2.2 数据处理方法

计算 SPEI 的方法分为几个具体步骤<sup>[20-22]</sup>,且计算 SPEI 的过程需要用到许多变量,并依照中国气象局发布的 SPEI 气象干旱等级划分标准<sup>[23]</sup>对气象干旱程度进行划分。其中潜在蒸散发量(PET)是计算 SPEI 过程中的关键一步。虽然计算 PET 的方法很多,但结合前人的经验方法可知 Thornthwaite 方法对于计算 PET 是最适合的,计算原理如下:

$$PET = \begin{cases} 0 & T < 0 \\ 16 \frac{N}{12} \times \frac{NDM}{30} \times \left(\frac{10T}{I}\right)^m & 0 \leq T < 26.5 \\ -415.85 + 32.24T - 0.43T^2 & T \geq 26.5 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$  为逐月平均温度; $N$  为最大日照时数; $NDM$  为逐月的日数; $I$  为年热量指数,是用每年 12 个月的月热量指数求和得到的。

(1) 计算气候水平衡。

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中: $D_i$  为气候水平衡量; $P_i$  为降水量; $PET_i$  为潜在蒸散发量

(2) 建立不同时间尺度下的气候水平衡累积序列。

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad n \geq k \quad (3)$$

式中: $k$  为月时间尺度; $n$  为计算次数。

(3) 采用 log-logistic 概率分布标准化  $D$  序列获得 SPEI 指数序列的概率密度函数(公式 4)以及计算  $D$  序列的概率分布函数(公式 5)。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2} \quad (4)$$

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1} \quad (5)$$

式中: $\alpha$  为尺度系数为尺度系数; $\beta$  为形状系数; $\gamma$  为 origin 参数,以上变量均可通过 L-矩参数估计方法求得。

(4) 对累积概率分布  $F(x)$  进行标准化处理,得出 SPEI 值。

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (6)$$

式中: $W = \sqrt{-2\ln p}$ ,  $p = 1 - F(x)$ ;  $p$  为超过  $D$  值的概率,当  $p \leq 0.5$  时, SPEI 值为公式(6)所得值;当  $p > 0.5$  时, SPEI 值为公式(6)所得值的相反数;式中的其他指数均为常数,分别表示为:

$$d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308, \\ C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328.$$

根据计算出的 SPEI 数值大小对干旱等级进行划分,见表 1。

表 1 SPEI 指数干旱等级划分	
干旱等级	SPEI 值
无干旱	$SPEI > 0$
轻度干旱	$-1 < SPEI \leq 0$
中度干旱	$-1.5 < SPEI \leq -1$
严重干旱	$-2 < SPEI \leq -1.5$
重度干旱	$SPEI \leq -2$

2.3 时空趋势性分析

2.3.1 时空变化趋势 利用一元线性回归模型模拟空间中基于每个像元的植被生长状况在生长季中的变化趋势,斜率用最小二乘法计算,因此通过此方法计算 SPEI, NDVI 及 EVI 的变化斜率值,表达式如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times P_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n P_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (7)$$

式中: $n$  为总月份数; $P_i$  为第  $i$  月的趋势值(如  $P_{NDVI_i}$  就是指第  $i$  月的 NDVI 值)。

2.3.2 相关性分析 通过计算皮尔森积矩相关系数来表征两个变量  $X$  和  $Y$  间的线性相关程度是一种比较常见的线性相关分析方法,所以由此计算 SPEI 与 NDVI, EVI 间的线性相关程度大小,以判断贵州省植被对于不同时间尺度的干旱程度响应情况,计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

式中: $n$  为年数; $\bar{X}, \bar{Y}$  分别为变量  $X$  和变量  $Y$  的均值; $r$  为变量  $X$  和变量  $Y$  间的相关系数值。

3 结果与分析

3.1 贵州省气象干旱时空变化特征

如图 1 所示,不同时间尺度下的 SPEI 值总体上呈现增长趋势,以及在近 20 a 内,贵州省整体上呈现出干旱化趋势减弱、湿润化增强的现象。在整个研究时段内,不同时间尺度(1, 3, 6, 9, 12 个月)的 SPEI 最低值分别出现在 2009 年的  $SPEI_1 (-0.35)$ , 2013 年的  $SPEI_3 (-0.52)$  和  $SPEI_6 (-0.74)$ , 以及 2010 年的

$SPEI_9$  ( $-0.70$ ) 和  $SPEI_{12}$  ( $-0.80$ ), 表明贵州省干旱极低值随着 SPEI 时间尺度的增加而逐渐增长, 且贵州省干旱变化趋势在 2008—2010 年和 2013—2014 年表现出显著的干湿交替现象, 说明贵州省在 2008—2014 年干旱湿润态势显著。在 SPEI 的 5 个不同的时间尺度内, 干旱变化速率最为显著的是  $SPEI_{12}$ , 达到了  $2.78\%/a$ ; 其次是  $SPEI_9$  和  $SPEI_6$  尺度的增长速率, 为  $2.56\%/a$ ,  $2.27\%/a$ ; 变化趋势速率最低的是  $SPEI_1$ , 仅为  $1.09\%/a$ 。因此 5 个不同时间尺度的干旱变化速率依次表现为:  $SPEI_{12} > SPEI_9 > SPEI_6 > SPEI_3 > SPEI_1$ , 表现为随着时间尺度的增加, 贵州省干旱化态势呈现出逐步减弱的趋势。

对贵州省近 20 a 的  $SPEI_1$ ,  $SPEI_3$ ,  $SPEI_6$ ,  $SPEI_9$ ,  $SPEI_{12}$  5 个时间尺度做基于像元的趋势性分析。由图 2 可知, 5 个不同时间尺度下 SPEI 的趋势变化值为负的区域面积比分别为  $19.28\%$ ,  $18.09\%$ ,  $20.17\%$ ,  $24.56\%$ ,  $26.79\%$ , 表现出随着 SPEI 时间尺度的增加, 区域干旱化增加的面积占比越大, 但不同时间尺度下的面积占比差距并不显著, 并且增加趋势面积占比远高于降低的面积占比, 说明贵州省近 20 a 的干旱变化趋势并不明显, 表现为干旱程度降低, 湿润化态势增强的趋势。不同时间尺度的 SPEI 值空间分布大致相似, 以  $SPEI_{12}$  空间分布为例 (图 2E), 干旱变化趋势表现为增加的区域主要分布在贵州省六盘水至兴义大部分地区、毕节部分东部区域、遵义的中东部以及铜仁西部地区, 但干旱增加程度并不显著, 其余地区则表现为干旱化水平降低的趋势。

### 3.2 贵州省植被状况的时空变化特征

由图 3A 可知, 在基于像元的逐年 NDVI 时间变化序列中可看出, 2001—2020 年贵州省 NDVI 值总体上呈现出缓慢的增长趋势, 年平均增速为  $0.32$ , 其中年 NDVI 最大值出现在 2016 年, 为  $0.57$ ; 年 NDVI 最小值出现在 2005 年, 为  $0.46$ ; 多年的平均 NDVI 值为  $0.51$ , 根据植被覆盖程度划分标准<sup>[5]</sup>, 表明贵州省植被生长状况主要以中植被覆盖为主。

从多年平均 NDVI 的线性变化趋势空间分布 (图 4) 可看出, 当 NDVI 的回归系数为正时, 研究区植被变化情况呈现出增长趋势, 面积占比约为  $85.81\%$ , 其中植被显著增加的面积仅占全区域的  $1.31\%$ , 主要分布在贵州省毕节西部与兴义东北部; 不显著增加面积为  $84.50\%$ , 表明研究区内的大部分植被生长速率并不显著。而植被退化面积约占研究区域的  $14.18\%$ , 远低于植被增长的面积占比, 其中显著降低和不显著降低的面积占比各为  $7.94\%$ ,  $6.25\%$ , 集中分布在贵州省的东部和东南部地区, 以凯里中部和黔南北部为主要变化区域。

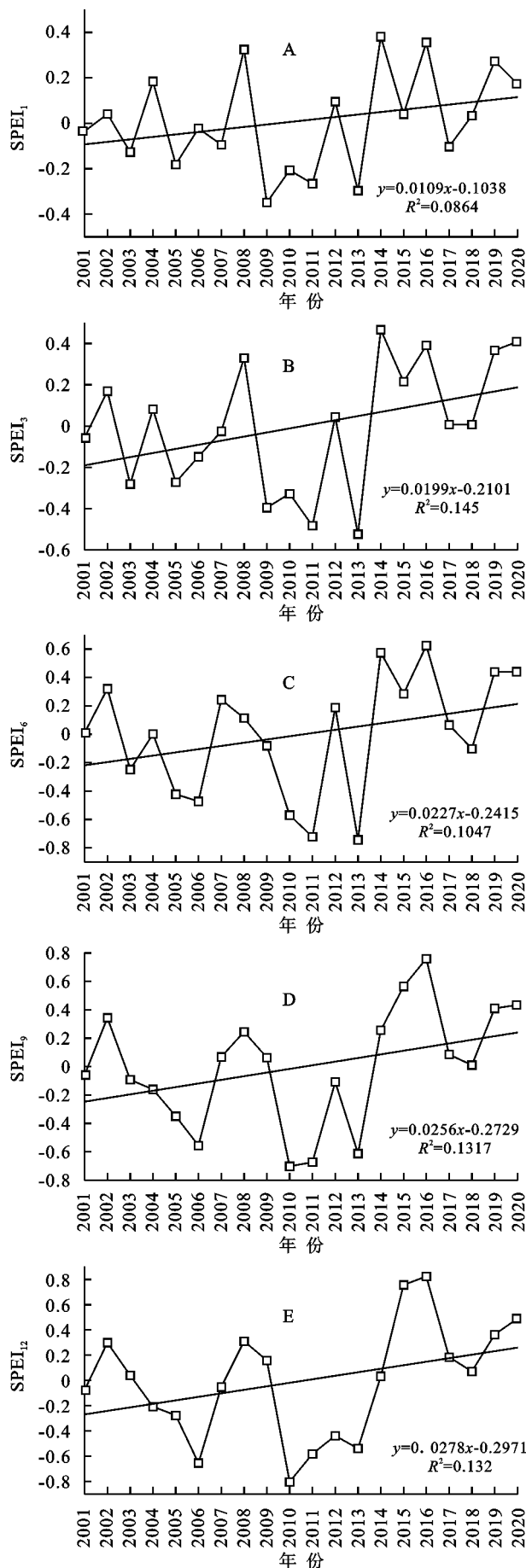


图1 2001—2020年贵州省不同时间尺度下历年 SPEI 均值变化



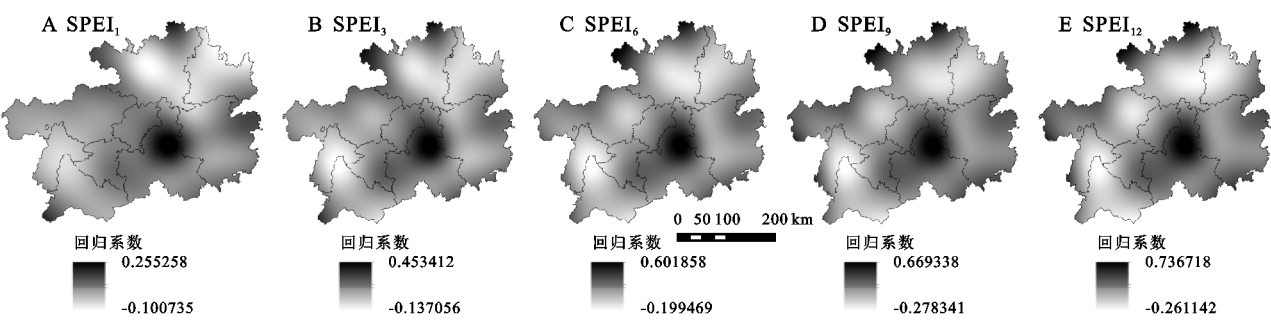


图 2 2001—2020 年贵州省不同时间尺度 SPEI 干旱变化趋势空间分布

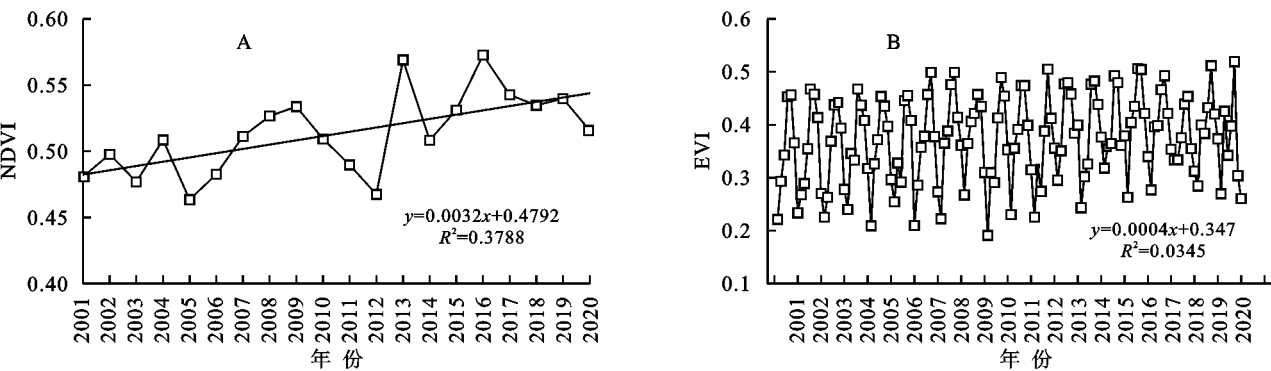


图 3 2001—2020 年贵州省 NDVI 与 EVI 线性年际变化趋势

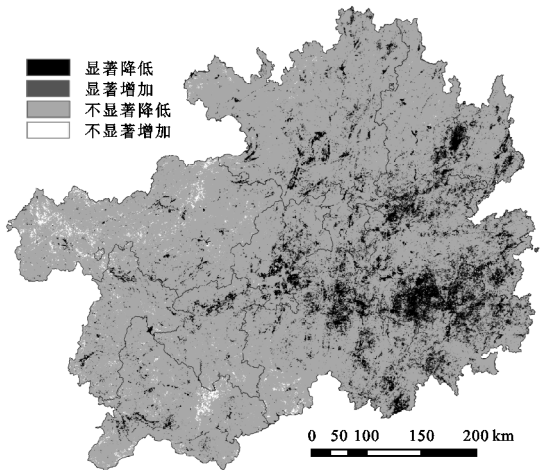


图 4 2001—2020 年贵州省 NDVI 年际变化趋势空间分布

由 2001 年、2010 年、2020 年 3 年的 NDVI 空间分布(图 5)情况可知,贵州省内的植被生长状况在近 20 a 内表现出明显的增加趋势。2001 年,贵州省中低植被覆盖区所占面积约为 30.54%,主要分布于研究区北部和中西部地区,以遵义的东北部和西南部、毕节西南部和东部及贵阳为主要区域;2010 年,贵州省植被生长趋势发生显著变化的区域主要为黔东南地区,由中植被覆盖转变为高植被覆盖区,面积占比由 2001 年的 2.39%增长为 8.05%;2020 年,全省范围内的中低植被覆盖区面积占比降低至 12.65%,但中植被覆盖区由 2001 年的 66.60%增长为 2020 年的 77.22%及高植被覆盖区由 2001 年的 2.39%增长至 2020 年的 9.25%,其中高植被覆盖增长区域以西南和西北部的边缘地区为主,但总体来看东南部的植被

覆盖度仍高于其他地区。

植被的生长状况在生长季内的不同月份有极大的差异性,因此选择 EVI 指数作为判断贵州省的月植被生长状况的指标,并分析其受气象干旱影响所表现出的响应程度。从图 3B 中可看出,2001—2020 年的 EVI 值在整体水平上呈现出缓慢的增长趋势,并与年尺度 NDVI 的变化趋势保持一致性,都明显表现出贵州省植被生长状况在整体上趋向好转状态。由近 20 a 生长季各年同月份的 EVI 指数看,每年 4 月份的 EVI 值最低,其次为 5 月和 10 月;较高的 EVI 值出现在生长季的 7 月和 8 月。这与已有的关于贵州省生长季内各月植被生长状况的研究结果是保持一致的。

3.3 植被对不同时间尺度气象干旱的响应

3.3.1 年植被对 SPEI<sub>12</sub> 的响应 在基于空间像元的基础上,对表征年尺度的 SPEI<sub>12</sub> 和年 NDVI 进行相关性分析。如图 6 所示,贵州省的年植被生长状况与 SPEI<sub>12</sub> 在绝大部分区域内表现出显著的正相关性,面积占比为 77.56%,其中显著正相关和极显著正相关的所占区域面积比为 32.92%,不显著正相关为 44.63%;而在仅占有整个区域面积 22.44%的负相关区域中,极显著负相关和显著负相关区域面积分别为 0.09%,3.31%,不显著负相关区域的占比为 19.22%。以上结果表明,不同区域内植被生长状况对气象干旱的响应存在巨大的差异;除研究区北部的遵义、铜仁大部分地区,以及兴义中部和北部、贵阳南部、毕节东部和都匀东南部的边缘地区外,其余区域范围内的年尺度 SPEI<sub>12</sub> 与年 NDVI 值均表现为正相关关系,但程度不一。

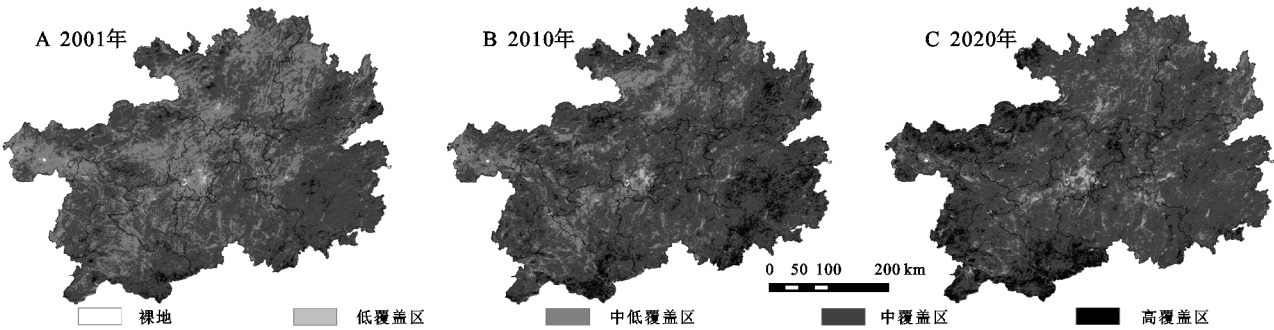


图 5 2001 年、2010 年、2020 年贵州省 NDVI 空间分布

为显著,且对季尺度的干旱响应最强烈。其次,4 月、5 月的 EVI 值与各时间尺度的 SPEI 相关性也比较高,尤其是对于年尺度的  $SPEI_{12}$  响应最强。

表 2 2001—2020 年贵州省各月 EVI 与不同时间尺度 SPEI 相关系数均值

月份	$SPEI_1$	$SPEI_3$	$SPEI_6$	$SPEI_9$	$SPEI_{12}$
4	0.065	0.216	0.281	0.421	0.475 *
5	0.236	0.342	0.318	0.401	0.450 *
6	-0.193	-0.170	-0.071	0.178	0.349
7	0.192	0.138	0.082	0.218	0.311
8	0.459 *	0.559 *	0.543 *	0.461 *	0.355
9	0.002	-0.120	-0.082	-0.182	-0.262
10	0.184	0.142	0.107	0.139	0.133

注: \* 表示通过了 0.05 的显著性检验。

图 7 为 2001—2020 年贵州省不同时间尺度 SPEI 与 8 月份 EVI( $EVI_8$ )的相关分析空间分布。由以上结论可知 8 月份的 EVI 值与不同时间尺度的 SPEI 相关性最强,因此以 8 月份的 EVI 值与 SPEI 的 5 个时间尺度的空间分布为代表可知,EVI 值与  $SPEI_1, 3, 6, 9, 12$  个尺度的正相关区域仍占据研究区的大部分,其面积占比分别为 62.52%,63.86%,63.43%,59.85%,57.87%,呈现出负相关性的区域主要分布在贵州省的西南部地区,以六盘水中东部和北部地区、兴义的北部和西南部边缘地区为主,其次为贵州省北部地区。结果表明,5 个时间尺度 SPEI 与植被 EVI 的相关性空间分布和  $SPEI_{12}$  与 NDVI 的空间分布特征有所差异,但大致空间分布位置仍然保持一定的相似性。

在基于不同土地利用类型的前提下,考虑分析不同植被类型的 EVI 值与不同时间尺度下 SPEI 的相关性(表 3)强弱。总体来看,不同月份下的耕地、林地、草地对  $SPEI_{12}$  的响应是最强的,其次为  $SPEI_3$  和  $SPEI_1$  尺度;区别在于生长季前期(4—7 月)的 EVI 值以对  $SPEI_{12}$  的响应为主,而生长季后期(8—10 月)主要以对  $SPEI_3$  和  $SPEI_1$  的响应为主,表明植被的生长状况在前期主要受到年尺度干旱的影响,后期则主要以受到季尺度和

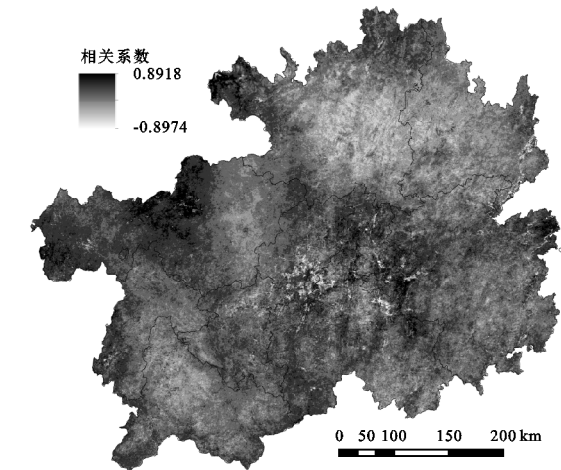


图 6 2001—2020 年贵州省 NDVI 与  $SPEI_{12}$  相关系数

由于贵州省的植被类型多样,因此在基于不同土地利用类型的基础上,利用年 NDVI 统计出研究区草地、耕地、林地、水域、城市建设 5 种不同的土地利用类型,并将其与  $SPEI_{12}$  进行相关性分析。结果显示耕地和草地对气象干旱的响应比较明显,其相关性分别为 0.511,0.498;其次是林地为 0.432。由此可以得出,在贵州省的干旱发展过程中应主要关注草地和耕地对于干旱的响应程度。

3.3.2 月植被状况对多时间尺度 SPEI 的响应 相同植被在生长季内的不同区域和月份的生长状况存在着差异性,因此对于不同时间尺度 SPEI 的响应也同样存在差异。基于历年生长季内的逐月 EVI 值与其对应像元的 5 个时间尺度的 SPEI 进行相关性分析,由得出的贵州省内各月 EVI 指数值与 1,3,6,9,12 个月时间尺度 SPEI 相关系数均值可知(表 2),除 6 月的 EVI 值与  $SPEI_1, SPEI_3, SPEI_6$  共 3 个尺度和 9 月的 EVI 值与  $SPEI_3, SPEI_6, SPEI_9, SPEI_{12}$  这 4 个尺度呈负相关外,其余都表现为正相关关系,并且不同月份的 EVI 相关系数均值随着 SPEI 时间尺度的增加在整体上呈现出微弱的增长趋势。其中 EVI 与不同时间尺度 SPEI 的相关系数均在 8 月份达到最大值,并且与  $SPEI_3$  的相关系数最高( $r=0.559$ ),说明贵州省夏季植被的生长状况受干旱的影响程度最

月尺度的影响为主。具体来看,耕地、林地、草地均在 8 月份达到最大相关系数值( $r_{\text{耕}}=0.553$ ,  $r_{\text{林}}=0.543$ ,  $r_{\text{草}}=0.568$ ),且都是对 SPEI<sub>3</sub> 的响应最强,其中又以与草地的相关系数值最高。

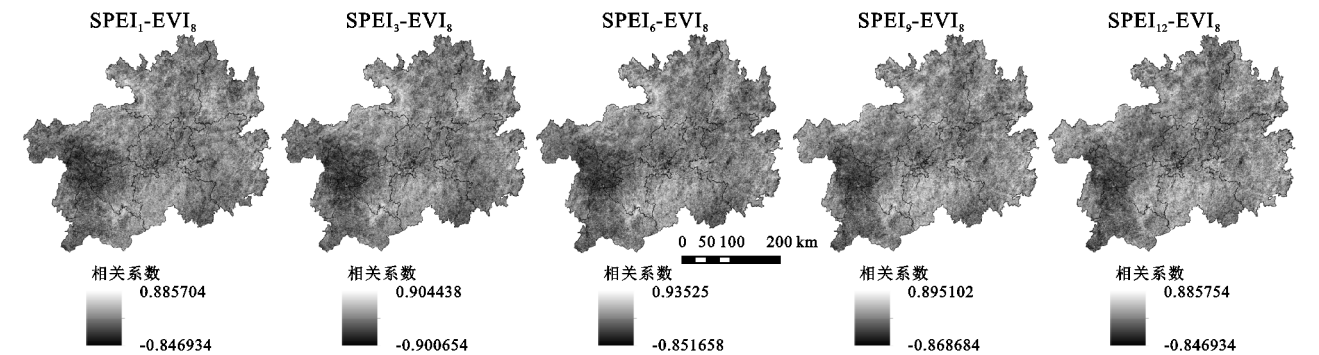


图 7 2001—2020 年贵州省不同时间尺度 SPEI 与 EVI<sub>8</sub> 月的相关分析空间分布

表 3 2001—2020 年贵州省各月不同土地利用类型 EVI 对不同时间尺度 SPEI 最大响应

土地利用类型	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
耕地	12(0.483 <sup>*</sup> )	12(0.490 <sup>*</sup> )	12(0.489 <sup>*</sup> )	12(0.344)	3(0.553 <sup>*</sup> )	12(−0.218)	1(0.225)
林地	12(0.455 <sup>*</sup> )	12(0.414)	12(0.282)	12(0.289)	3(0.543 <sup>*</sup> )	12(−0.284)	1(0.518)
草地	12(0.509 <sup>*</sup> )	12(0.478 <sup>*</sup> )	12(0.357)	12(0.334)	3(0.568 <sup>**</sup> )	12(−0.229)	1(0.204)
水域	12(0.449 <sup>*</sup> )	12(0.532 <sup>*</sup> )	12(0.430)	3(−0.149)	1(0.232)	12(−0.350)	1(0.143)
城市建设用地	12(0.420)	12(0.464 <sup>*</sup> )	12(0.549 <sup>*</sup> )	12(0.114)	6(0.385)	12(−0.286)	1(0.223)

注: \* 表示通过了 0.05 的显著性检验;括号内为最大相关系数值,如耕地 4 月对应的 12(0.483<sup>\*</sup>) 表示 4 月的耕地植被覆盖 EVI 对 SPEI<sub>12</sub> 的响应最强。

4 讨论

本文基于贵州省 MODIS-NDVI 和 EVI 遥感影像数据,采用均值法对其进行分析研究;结果表明贵州省的植被生长状况在 2001—2020 年以来整体上呈现出增长的趋势,此结论与郑有飞<sup>[24]</sup> 和张蓓蓓<sup>[25]</sup> 等的研究结果是一致的。贵州省 NDVI 值由 2001 的 0.48 增加到 2020 年的 0.52,而李威等<sup>[5]</sup> 的研究结果是贵州省 2001 年的平均值为 0.82,与本文的研究结果有所出入,其可能原因是本文采取的是平均值法获取贵州省年 NDVI 值而前人采用的则是最大值合成法获取相关数据,所以不同的研究方法导致了结果具有差异性。

在空间分布上,由于一系列生态工程的实施如“石漠化综合治理”“退耕还林还草”“水土流失防治”等,贵州省境内部分地区植被生长状况得到了极大改善;其中贵州省西部地区、黔西南地区及北部地区等通过退耕还林还草、封山育林及石漠化综合治理等措施的综合整治后,植被覆盖度有了显著的提升,水土流失现象明显好转<sup>[26-27]</sup>;而原有植被覆盖率较高的黔中和黔东南地区由于人类活动和城市化扩张等行为和政策,使原来的高植被覆盖区遭受了一定的破坏,呈现出植被覆盖率降低的趋势,这与刘阳<sup>[18]</sup>、吴跃<sup>[19]</sup> 等的研究结果是一致的。

近 20 a 来,不同时间尺度下的 SPEI 值都呈现出

缓慢增加的趋势,表明贵州省的干旱程度有所减缓,这与以前的研究成果<sup>[28]</sup> 也较为一致。贵州省在生长季内的植被指数 NDVI, EVI 变化对不同时间尺度干旱的响应在总体上是呈现出正相关的,这与已有的研究结果<sup>[28-29]</sup> 也是一致的;但由于他们选择的是整个西南片区,与本文的研究区范围大小及地形有所不同,导致研究结果存在一定的差异性。除此之外,贵州省的不同植被类型对各时间尺度的 SPEI 响应程度在不同的地域范围内有所差异,且贵州省的草地对不同时间尺度下的 SPEI 响应最强,其结果与史晓亮<sup>[30]</sup> 及孔冬冬<sup>[31]</sup> 等的研究结果是相似的,因为草地具有抗旱性较弱的特点,且人工草地及其他活动可加剧土壤水土流失<sup>[32]</sup>。

在本研究中,仅关注了气象干旱中不同植被类型等因素对各时间尺度 SPEI 的响应程度,还未考虑到地形地貌及其他干旱以及人类活动等因素的影响,并且贵州省属于典型的喀斯特地区,地下结构复杂多变,因此考虑基于更多方面的因素在贵州省植被对干旱的响应是下一步需要研究的重点内容。

5 结论

(1) 贵州省自 2001—2020 年以来,基于 5 个不同时间尺度(1 月、3 月、6 月、9 月、12 月)下的 SPEI 在整体上呈现出逐渐增加的趋势,随着时间尺度的增加 SPEI 增长速率越快,最高达到 2.78%/a,总体表现为干旱化态势



减弱而湿润化增加的趋势。分析干旱空间分布特征可知,干旱程度表现为增加区域的是贵州北部,即遵义和铜仁地区,以及黔西南六盘水和兴义地区。

(2) 贵州省 2001—2020 年的植被指数年 NDVI 与生长季内月 EVI 均值都呈现出缓慢增加的趋势。在 2001—2010 年的时间段内植被明显改善区域为贵州省的黔东南地区;在 2010—2020 年内植被改善显著区域为贵州省西南及西北部的边缘区域。

(3) 年 NDVI 与 SPEI<sub>12</sub> 和不同时间尺度下的 SPEI 与生长季内各月份 EVI 的相关性在贵州省内的大部分地区均呈现出不同程度的正相关。从整体来看,贵州省的植被在黔西南和北部地区对干旱的响应最强烈,其次为贵阳和毕节东部地区。年尺度上,响应最强的地区为贵州省遵义中东部和铜仁北部及兴义北部和毕节东部地区,且表现为草地和耕地对干旱的响应程度最大,其次为林地。月尺度上,夏季 8 月份的 EVI 值与 SPEI<sub>3</sub> 的响应最强,其次是 4 月、5 月份的 EVI 值对 SPEI<sub>12</sub> 的响应较强;从空间分布来看,EVI 与不同时间尺度 SPEI 的空间分布特征也与年 NDVI 和 SPEI<sub>12</sub> 的空间特征相似;而在不同的植被类型中,生长季内的 8—10 月为草地对 SPEI<sub>3</sub> 响应最强。

#### 参考文献:

- [1] 王连喜,陈怀亮,李琪,等.植物物候与气候研究进展[J].生态学报,2010,30(2):447-454.
- [2] 黄文琳,张强,孔冬冬,等.1982—2013 年内蒙古地区植被物候对干旱变化的响应[J].生态学报,2019,39(13):4953-4965.
- [3] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等.MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J].自然资源学报,2014,29(10):1802-1812.
- [4] Wang Q, Zhang Q, Zhou W. Grassland coverage changes and analysis of the driving forces in Maqu County [J]. Physics Procedia, 2012,33:1292-1297.
- [5] 李威,李月臣,唐谊娟,等.基于 MODIS-NDVI 的贵州省 2001—2010 年植被覆盖变化分析及分异特征[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2015,32(4):146-151.
- [6] 杨思遥,孟丹,李小娟,等.华北地区 2001—2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应[J].生态学报,2018,38(3):1028-1039.
- [7] 王春林,司建华,赵春彦,等.河西走廊近 57 年来干旱灾害特征时空演化分析[J].高原气象,2019,38(1):196-205.
- [8] 张华,徐存刚,刘浩.2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应[J].地理科学,2020,40(6):1029-1038.
- [9] 张佳华,王长耀.区域归一化植被指数(NDVI)对植被光合作用响应的研究[J].干旱区资源与环境,2003,17(1):91-95.
- [10] 苏俊磊,罗为群,王广哲,等.基于 MODIS-EVI 的广西西江流域植被时空变化特征及其影响因素[J].水土保持研究,2019,26(3):232-238.
- [11] 韩云环,郑子彦,肖宇,等.基于统计年鉴和 MODIS 的中国区域土地利用/覆盖变化特征研究[J].气候与环境研究,2017,22(6):733-746.
- [12] 陈亮,王学雷,杨超,等.2000—2018 年鄂西山区植被 EVI 时空变化特征及其地形效应[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):419-426.
- [13] 王正兴,刘闯.植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J].生态学报,2003,23(5):979-987.
- [14] Pan Y, Li L, Zhang J, et al. Winter wheat area estimation from MODIS-EVI time series data using the Crop Proportion Phenology Index[J]. Remote Sensing of Environment, 2012,119:232-242.
- [15] 王正兴,刘闯,陈文波,等.MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(5):407-410.
- [16] 李红军,郑力,雷玉平,等.基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究[J].地理科学进展,2007,26(1):26-32.
- [17] 李美丽,尹礼昌,张园,等.基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J].生态学报,2021,41(3):1138-1147.
- [18] 刘阳,周忠发,闫利会.2001—2018 年贵州省 NDVI 时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J].水土保持通报,2021,41(1):327-336.
- [19] 吴跃,周忠发,赵馨,等.基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖时空演变研究:以贵州省为例[J].中国岩溶,2020,39(2):196-205.
- [20] Yin L, Feng X, Fu B, et al. Irrigation water consumption of irrigated cropland and its dominant factor in China from 1982 to 2015 [J]. Advances in Water Resources, 2020,143.DOI:10.1016/j.advwatres.2020.103661.
- [21] Yin L, Wang X, Feng X, et al. A Comparison of SSE-Bop-Model-Based Evapotranspiration with Eight Evapotranspiration Products in the Yellow River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2020,12(16). DOI:10.3390/rs12162528.
- [22] 姚俊强,毛炜峰,胡文峰,等.1961—2015 年新疆区域 SPEI 干旱指数数据集[J].中国科学数据:中英文网络版,2019,4(3):112-121.
- [23] 郭燕云,胡琦,傅玮东,等.基于 SPEI 指数的新疆天山草地近 55 a 干旱特征[J].干旱区研究,2019,36(3):670-676.
- [24] 郑有飞,牛鲁燕,吴荣军,等.1982—2003 年贵州省植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].生态学杂志,2009,28(9):1773-1778.



演变特征及格局优化:以七里河区为例[J].经济地理, 2015,35(1):126-133.

[15] 郭晓东,马利邦,张启媛.陇中黄土丘陵区乡村聚落空间分布特征及其基本类型分析:以甘肃省秦安县为例[J].地理科学,2013,33(1):45-51.

[16] 李莺国,石培基,刘春芳,等.黄土丘陵区乡村聚落时空演变特征及格局优化:以七里河区为例[J].经济地理, 2015,35(1):126-133.

[17] 郭晓东,马利邦,张启媛.基于 GIS 的秦安县乡村聚落空间演变特征及其驱动机制研究[J].经济地理,2012, 32(7):56-62.

[18] 马晓蓉,查小春.秦巴山区乡村聚落空间格局演变及影响因子:以陕西宁强县为例[J].山地学报,2020,38(5): 726-739.

[19] 艾丽娅,马勇,陈甫,等.2012—2017 年呼包鄂城市群夜间灯光动态变化特征及其驱动因素分析[J].遥感信息,2021,36(1):77-86.

[20] Arya S, Mount D M, Narayan O. Accounting for boundary effects in nearest-neighbor searching[J]. Discrete & Computational Geometry,1996,16(2):155-176.

[21] 李月连,韦严,黄乐.基于泰森多边形的那坡县农村居民点空间分布特征研究[J].广西城镇建设,2020(8):89-91.

[22] 邓平,王志城.基于 Voronoi 图的农村居民点空间分布特征研究[J].地理空间信息,2015,13(1):125-127.

[23] Duyckaerts C, Godefroy G. Voronoi tessellation to study the numerical density and the spatial distribution of neurones [J]. Journal of Chemical Neuroanatomy, 2000,20(1):83-92.

[24] 张军,顾盼.东北地区乡村聚落空间分布特征及影响因素分析[J].中国农业资源与区划,2019,40(10):110-115.

[25] 游上,江景峰,谢蕴怡.自组织理论视角下乡村民宿聚落“三生”空间的重构优化:以海南省代表性共享农庄为例[J].东南学术,2019(3):71-80.

[26] 杨忍.基于自然主控因子和道路可达性的广东省乡村聚落空间分布特征及影响因素[J].地理学报,2017,72 (10):1859-1871.



(上接第 276 页)

[2] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. Science, 2008,321(5895):1481-1484.

[3] 赵翠平,陈岩,王卫光,等.黄河流域近 50 a 极端降水指数的时空变化[J].人民黄河,2015,37(1):18-22.

[4] 张小明,杨金虎,高伟东,等.甘肃省近 50 a 夏季极端强降水量的气候特征[J].干旱气象,2008,26(2):48-52.

[5] 武金慧,李占斌,沈中原.甘肃省近 50 年降水量及气候变化趋势研究[J].干旱区资源与环境,2008(11):24-29.

[6] 赵一飞,邹欣庆,张勃,等.黄土高原甘肃区降水变化与气候指数关系[J].地理科学,2015,35(10):1325-1332.

[7] 马中华,张勃,王兴梅,等.近 50 a 甘肃省夏季日极端降水频数与强度变化特征[J].干旱区研究,2012,29(2): 296-302.

[8] Zhang J S, Shen X J, Wang B L. Changes in precipitation extremes in Southeastern Tibet, China[J]. Quaternary International, 2015,380/381:49-59.

[9] 王晓宁,岳大鹏,赵景波,等.黑龙江省 1958—2017 年极端降水时空变化与灾害效应[J].水土保持研究,2020, 27(5):138-146.



(上接第 284 页)

[25] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000—2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.

[26] 张依依,陈起伟.典型示范区石漠化治理工程生态效益监测研究:以毕节撒拉溪、关岭花江示范区为例[J].乐山师范学院,2018,33(8):58-67,84.

[27] 杨军昌,吴青芬,李绍练.基于生态足迹的滇桂黔石漠化片区人口与环境:以黔西南州为分析对象[J].生态经济,2019,35(10):136-142,190.

[28] 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.

[29] 程东亚,李旭东,安芬,等.高原山区小流域植被覆盖度演变时空格局[J].贵州师范大学学报:自然科学版, 2020,38(1): 6-13,57.

[30] 史晓亮,吴梦月,丁皓.SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J].农业机械学报,2020,51(12): 184-192.

[31] 孔冬冬,张强,顾西辉,等.植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J].生态学报,2016,36(24): 7908-7918.

[32] 董颖苹,熊康宁,李开忠,等.中国西南喀斯特潮湿气候下干旱胁迫人工牧草地土壤水生态系统服务研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(9):116-122.