

2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响

皮贵宁¹, 贺中华^{1,2,3}, 游漫¹, 张浪¹, 杨铭珂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:以 MODIS-EVI 及同期气候因子及气象干旱指标 SPEI 作为表征植被和气候时空变化特征的指标, 采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数分析和残差分析等方法探究贵州省 2001—2020 年植被生长状况对气候变化及人类活动的响应。结果表明: (1) 2001—2020 年贵州省植被增加的区域面积比为 84.97%, 主要改善区域以贵州省北部和西南部地区为主, 且植被在未来的空间变化趋势上以反持续性增加为主, 占据贵州省总面积的 69.23%。 (2) 贵州省植被与气候因子降水呈正相关关系, 与气温呈负相关关系, 但相关性均较弱, 而区域植被生长状况与 SPEI 间的正相关性大于负相关性。 (3) EVI 与人类活动在贵州省北部、西部及西南部地区主要以积极的改善作用为主, 而在贵阳、遵义及其周边地区则以消极的抑制作用较为突出, 整体上研究区内的人类经济活动与植被 EVI 呈正相关关系。研究结论可为贵州省植被生态保护及其与气候变化、人类活动之间的适宜性研究提供客观的科学理论支撑。

关键词: 植被变化; 气候变化; 人类活动; EVI; SPEI; 贵州省

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2022)04-0160-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.021

Effects of Climate Change and Human Activities on Vegetation Change in Guizhou Province from 2001 to 2020

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

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

Abstract: MODIS-EVI, climate factors and meteorological drought index SPEI were used as the indicators to characterize the spatio-temporal changes of vegetation and climate, Theil-sen Median trend analysis, Mann-Kendall significance test, Hurst index analysis and residual analysis were used to explore the response of vegetation growth to climate change and human activities in Guizhou Province from 2001 to 2020. The results showed that: (1) The regional area ratio of vegetation increase in Guizhou Province from 2001 to 2020 was 84.97%, and the main improvement areas were mainly in the north and southwest of Guizhou Province. In terms of the future spatial change trend, vegetation was mainly in reverse continuous increasing, accounting for 69.23% of the total area of Guizhou Province. (2) There was a positive correlation between vegetation and precipitation and a negative correlation between vegetation and temperature in Guizhou Province, but the correlation was weak. While the positive correlation between regional vegetation growth and SPEI was greater than the negative correlation. (3) In the northern, western and southwestern regions of Guizhou Province, EVI and human activities showed positive improvement, while in Guiyang, Zunyi and its surrounding areas, EVI and human economic activities showed inhibitory effect. On the whole, there was a positive correlation between human economic activities and vegetation EVI in the study area. The conclusion could provide objective scientific theoretical support for the study of vegetation ecological protection and its suitability with climate change and human activities in Guizhou Province.

Keywords: vegetation change; climate change; human activities; EVI; SPEI; Guizhou Province

植被作为地球陆地生态系统中不可或缺的一部分,既是调节全球气候变化、连接生物、大气和土壤等的参与者,同时其生长状况、时空变化形态等也可以反映出地球自然界各生态系统的健康状况^[1-2]。目前,可供使用的植被指数已经极其丰富,其中植被遥感数据在对地面植被的监测和应用中效果最为显著^[3-4];在众多的植被遥感数据中,MODIS-EVI 植被遥感影像在针对高植被覆盖区时,相比较 NDVI 是以植被饱和为条件来降低大气影响这一不稳定因素,其敏感性更强^[5-6],且计算方法更加具有科学性,主要体现为对抗大气干扰和背景杂质时的不敏感优势。Huete 等^[7]和 Crabbe 等^[8]研究表明,NDVI 和 EVI 具有较强的相关性,且 EVI 值一般小于 NDVI 值^[9];王正兴等^[5-6]研究表明,MODIS-EVI 的绝对优势体现在倾向于表达低值部分,且呈现出正态分布,不容易达到饱和状态,这对于探究以中高植被覆盖度为主的贵州省植被时空变化趋势更加具有合理性。

21 世纪以来,气候变化已经成为全球研究的热点和重点;随着全球变暖状况不断加强,以及极端气候事件的频繁发生,气象干旱现象的发生频率和强度也在不断增多,而气象干旱则是导致水文干旱和农业干旱等的本质原因^[10-12]。因此,本文基于研究区气象站点实测数据获取得到表征区域干湿气候变化的有力指标—标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),研究表明,该指数对于监测地区气象干旱发生的强度具有较好的效果;Vicente-Serrano 等^[13]提出,SPEI 在维持 SPI、PDSI 等多种干旱指标对长时间、多空间尺度下的气温和降水具有高敏感度的同时,还考虑到降水和蒸散因子的影响;李伟光等^[14]和 Yang 等^[15]使用气象站点数据计算出 SPEI 指数,并对我国的气象干旱发生强度和变化趋势进行详细分析,我国部分区域的确存在普遍干旱现象,结果与实际情况吻合。

大多学者在对植被覆盖情况的演变研究过程中,主要是针对气候因子的考虑,而忽略人为因素也是影响植被变化趋势的一个重要因子。在探究人类活动对植被生长状况的影响方面,大多常用植被遥感影像和实测数据进行相关分析或基于残差分析方法探究其对植被生长状况变化趋势的影响。如田智慧等^[16]利用 NDVI 及同期气象数据探究结果表明,黄河流域植被得到改善时的人类活动贡献率高于气候变化贡献率;彭凯锋等^[17]基于同样的方法利用 GLASS 植被覆盖产品和气候因子发现,三江源国家公园的降水对植被变化的影响程度远高于人类活动;赵维清等^[18]应用 NDVI 及夜间灯光亮度数据值研究表明,人类经济活动是影响湖北省植被变化的重要驱动力;也有学者^[19-20]利用

GIMMS NDVI 数据研究表明,长江流域植被的改善主要是由于生态恢复工程的实施。

贵州省作为典型的喀斯特区域,喀斯特地质地貌类型丰富多样,生态环境比较脆弱,石漠化状况日益突出^[21]。因此,为改善贵州省生态建设状况,自 2000 年开始实施退耕还林还草生态工程项目,在 2004—2010 年左右先后实行石漠化治理和封山育林等治理项目^[22-23],获得极其显著的效果,而植被的生长状况变化趋势也正是反映一个地区的生态环境改善是否成功的重要标志。在全国气候变化纷繁复杂的前提下,为探究贵州省植被变化规律及其与气候变化和人类活动之间的相关关系,本文采取 Sen 趋势分析和 M—K 检验、Hurst 指数分析和残差分析等方法对其进行定量分析研究,以加强对植被和气候及人类活动三者之间的认识,为下一步开展喀斯特区域生态工程项目提供客观的科学依据。

1 研究区概况

贵州省是中国西南喀斯特地区之一,总面积约 17.62 万 km²,处于东经 103°36′—109°35′,北纬 24°37′—29°13′,海拔介于 130~2 990 m,空气温暖湿润,降水量在不同的季节差异性较为显著,属于典型的亚热带湿润季风气候区。省内植被种类丰富多样,且区域分异性明显,生态环境良好,是全国首批达到国家标准生态文明建设试验区的地区之一。社会经济活动对自然资源环境的影响力也在持续上升,因此实施贵州省生态恢复和保护任务势在必行。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源

于 2021 年 3 月下载来源于 NASA MODIS 陆地产品根据统计算法生成的 MODIS13Q1 系列数据中的 MODIS EVI(enhanced vegetation index,增强型植被指数)作为植被遥感数据,时间跨度为 2001—2020 年的 4—10 月,时间分辨率为 16 天,空间分辨率为 250 m。结合贵州省的实际植被生长状况,采用平均值法获取贵州省每年植被生长季的 EVI 均值影像,并剔除掉影像中的缺测值和空值后,进行拼接、掩膜提取、重投影等处理,得到贵州省 20 年来生长季内共 280 期植被遥感影像。

选取标准化降水蒸散发指数(SPEI)作为判断气象干旱影响程度指标,源数据来源于中国气象科学数据网(<http://cdc.cma.gov.cn>)所提供的 2001—2020 年贵州省 31 个标准化气象站点的逐日观测数据,分别挑选出逐日气温、降水及各站点经纬度等数据,对其连续性进行校验,并对每个气象站点中不符合研究内容的异常和缺测数值进行修订和增补后,采用平均值法获得各站点各年

的逐月均值数据集。将各站点数据按年顺序进行排列后,利用相关算法和软件工具计算出干旱指数 SPEI。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 斜率估算分析和 Mann-Kendall 显著性检验 Sen 趋势分析耦合 M—K 显著性检验是判断具有时间序列数据变化趋势的一种重要手段,与其他趋势分析方法相比,该方法的优势在于不要求数据满足某一类固定分布,不受异常值影响,抗噪性较强,是一种相对比较稳妥的非参数斜率估算方法^[24-25]。利用 Sen 趋势度(β)和 Mann—Kendall 检验分别计算数据变化趋势及构建 Z 统计量。

(1) β 的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}(\frac{x_i - x_j}{i - j}) \tag{1}$$

式中: x_i, x_j 为序列数据。若 $\beta > 0$ 时表示上升趋势; $\beta < 0$ 表示下降趋势,并且运用 Mann—Kendall 方法来进行趋势检验。

(2)Z 统计量计算公式为:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{2}$$

其中,sgn 具体表示为

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中: x_i 为时间序列的第 j 个值; n 为数据序列长度;sgn 为符号函数。研究表明,当 $n \geq 8$ 时, S 基本上服从正态分布,方差表示为:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(i-1)(2i+5)}{18} \tag{4}$$

式中: t_i 为第 i 组的数据点数目。因此标准化统计量 Z 则表示为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \tag{5}$$

2.2.2 Hurst 指数分析 Hurst 指数是表述自然界内长时间存在的自相似性和长期依赖性现象的绝佳方法,目前在气候学、水文学和地质学及经济学等领域具有广泛应用^[26]。本文基于 R/S 重标极差分析方法监测研究区在长时间序列下变量的未来变化趋势。

定义时间序列 $\text{EVI}_i, i = 1, 2, 3, 4, \dots, n, m$ 为任意正整数,则有:

(1)差分序列

$$\Delta \text{EVI}_i = \text{EVI}_i - \text{EVI}_{i-1} \tag{6}$$

(2)均值序列

$$\overline{\Delta \text{EVI}(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta \text{EVI}_i \quad (m = 1, 2, \dots, n) \tag{7}$$

(3)累计离差

$$X(t) = \sum_{i=1}^m (\Delta \text{EVI}_i - \overline{\Delta \text{EVI}(m)}) \quad (1 \leq t \leq m) \tag{8}$$

(4)极差和标准差

$$R(m) = \max_{1 \leq m \leq n} X(t) - \min_{1 \leq m \leq n} X(t) \quad (m = 1, 2, \dots, n) \tag{9}$$

$$S(m) = \&. \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\Delta \text{EVI}_i - \overline{\Delta \text{EVI}(m)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (m = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

最后,Hurst 指数的计算结果为:

$$R(m)/S(m) \cong R/S \tag{11}$$

若 $R/S \propto m^H$,表明在该研究区探究的时间序列内存在 Hurst 变化趋势,并依据 Hurst 指数(H 值)的大小判断贵州省在未来植被 EVI 的持续性走向。一般来说, H 值大致分为 3 种情况:当 $0 < H < 0.5$ 时,表明当前的时间序列具有长期相关性,未来的发展趋势与过去相反,值越小,反持续性越强;当 $H = 0.5$ 时,表明过去的发展对未来变化趋势没有影响,时间序列表现为随机序列;当 $0.5 < H < 1$ 时,表明当前时间序列具有长期依赖性,未来的变化趋势和过去保持高度一致,值越大,持续性越强。

2.2.3 残差分析 本文基于残差分析方法将气候变化和人类活动对植被的生长状况的影响进行分离^[27-28]。此方法计算步骤具体有 3 点:(1)计算植被指数 EVI 预测值(EVI_{CC}),分别以 EVI 和气温、降水为因变量和自变量,计算出三者之间的线性回归模型参数,通过气候因子及模型参数计算得到 EVI 的预测值,该值即表示为气候变化对 EVI 的影响;(2)计算 EVI 实测值与预测值 EVI_{CC} 之间的差值,即 EVE 残差值(EVI_{HA}),用来表示近 20 年来人类活动对植被生长状况的影响程度;(3)通过一元线性回归方法对 20 年的历年残差值进行时空特征变化分析。具体计算过程为:

$$\text{EVI}_{\text{CC}} = a \times \text{Pre} + b \times \text{Tem} + c \tag{12}$$

$$\text{EVI}_{\text{HA}} = \text{EVI}_{\text{OBS}} - \text{EVI}_{\text{CC}} \tag{13}$$

式中: EVI_{CC} 表示回归方程预测值; EVI_{OBS} 表示为遥感影像实际观测值; EVI_{HA} 为残差值; a, b, c 为回归模型参数;Pre 和 Tem 分别表示为植被生长季累计降水量和平均气温。

3 结果与分析

3.1 贵州省植被 EVI 的时空变化趋势

3.1.1 贵州省空间分布特征 从 2001—2020 年贵州省生长季 EVI 均值空间分布(图 1)来看,EVI 值在

总体水平上呈现出比较明显的空间分异性,表现出自西向东逐渐递增趋势,研究区大部分区域以中植被覆盖和中低植被覆盖程度为主。贵州省 EVI 平均植被覆盖值为 0.37,中植被覆盖面积占整个研究区的 75.29%,主要集中分布在贵州省东部非喀斯特区域,以黔东南和黔南为主要地区;中低植被覆盖面积占整个研究区 24.34%,主要分布在以喀斯特区域为主的黔西南西部、六盘水和安顺大部分区域及毕节西部地区;而仅占有整个研究区面积 0.29%的低植被覆盖区域则主要分布在贵阳市周边,这是由于近年来贵阳市经济发展迅速,人口密度大,人类活动频繁而导致植被覆盖程度降低。

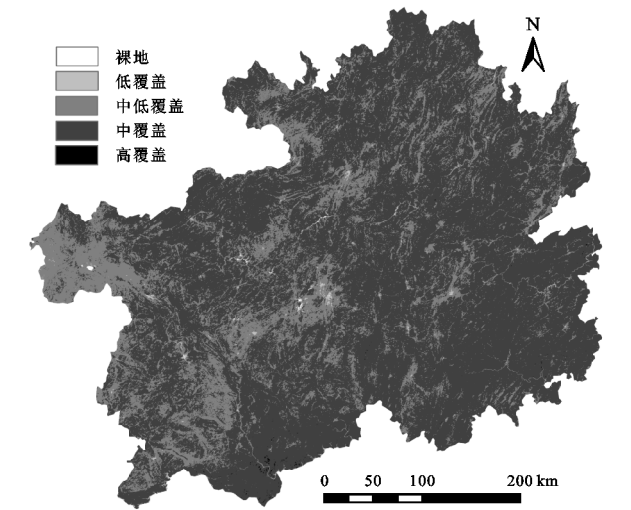


图 1 2001—2020 年贵州省 EVI 均值空间分布

3.1.2 时空变化分布特征 由 2001—2020 年贵州省 EVI 年际变化趋势空间分布(图 2)可知,EVI 变化斜率为正的面积占研究区大部分区域,表明贵州省植被变化趋势以增加为主,最大值可达 $0.015\ 2\ a^{-1}$;其增加面积为 $149\ 608.40\ km^2$,占整个研究区总面积的 84.97%,其中轻微增加和显著增加面积占比分别为 69.03%和 15.94%,主要变化区域为贵州省西南区域及北部和西部地区;EVI 变化斜率为负,表明植被变化趋势表现为降低,其减小面积为 $26\ 470.28\ km^2$,占整个研究区的 15.03%,最小值仅为 $-0.025\ 1\ a^{-1}$,且以轻微降低为主,分布在贵州省的各个区域,其中以贵阳市和遵义市为主要聚集地区,这是由于在近 20 年来两地的经济发展比较迅速,以及大量人口迁移等原因造成。

通过 Hurst 指数分析可知,贵州省 Hurst 指数的均值为 0.43,其植被覆盖变化表现为正向持续性序列($H>0.5$)的面积占比为 19.23%,反向持续性序列($H<0.5$)的面积占比为 80.77%。为了进一步分析贵州省植被覆盖变化在未来的变化趋势,本文对研究区 2001—2020 年的植被变化趋势结果与基于重标极差分析的 Hurst 指数结果进行空间像元的叠加耦合分析。

结果(图 3,表 1)表明,贵州省未来植被变化表现为持续性增加和持续性降低的面积占比分别为 16.09%和 3.14%,反持续性增加和反持续性降低分别占区域总面积的 69.23%和 11.54%,表明贵州省植被覆盖在未来的变化趋势有所转变。从空间结构来看,占比最大的反持续性轻微增加区域(57.07%)均匀地分布在除黔东南的凯里中部和毕节中西部地区外的其他区域,表明贵州省植被增长程度已经进入了逐渐饱和阶段,未来的植被变化可能会出现暂时的停缓状况,值得密切关注。持续性降低主要分布在以贵阳为中心的小部分区域,持续性增加则以西部毕节及黔西南大部分地区为主。

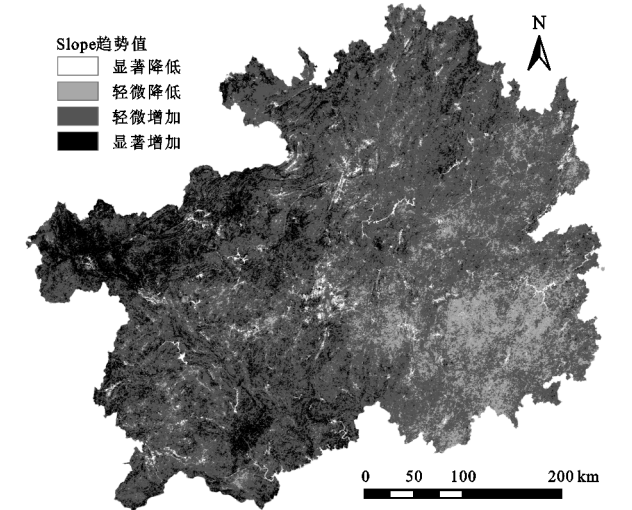


图 2 2001—2020 年贵州省 EVI 年际变化趋势空间分布

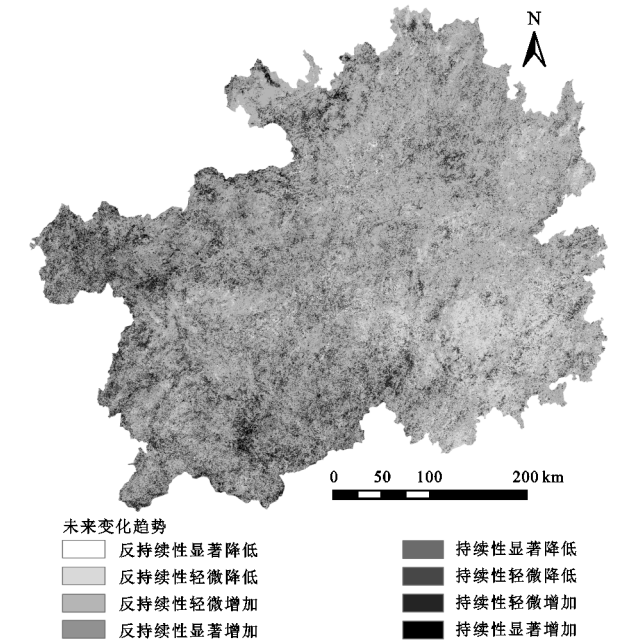


图 3 贵州省植被生长未来变化趋势空间分布

3.1.3 时空变化显著性分析 对贵州省 2001—2020 年生长季 EVI 变化的显著性状况进行逐像元的 Theil—Sen 趋势分析并耦合 Mann—kendall 检验方法(图 4)。结果表明,EVI 变化具有较明显的空间差异性,通过显著性为 0.05 的 M—K 趋势检验面积为

80 246 km², 约占区域总面积的 45.57%。由 Sen 趋势计算的结果并结合贵州省的实际植被变化趋势情况, 将通过 M—K 检验的估算结果划分为 5 种类型(表 2)。研究区以改善为主要变化趋势, 占总面积的 95.66%, 其中轻微改善区域为 77.22%, 显著改善区域为 18.44%, 主要分布于贵州北部遵义、毕节及黔西南等由于近年来大力度的退耕还林还草及石漠化治理而得到极大改善区域。通过 M—K 检验的轻微退化和显著退化区域仅占总面积的 3.02%和 1.34%, 主要分布在贵阳、遵义南部及凯里东北部等人口活动频繁、经济发展较为快速的区域, 但不存在通过检验且呈现出基本不变趋势的区域。

3.2 气候变化对植被 EVI 的影响

3.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)与植被 EVI 相关关系 由于标准化降水蒸散指数的主要数据源为降水和气温因子, 因此对贵州省 2001—2020 年的降水和气温进行变化趋势分析(图 5)可知, 贵州省的

降水、气温因子在 20 年间的变化趋势总体上表现为上升, 降水的斜率略高于气温。贵州省的平均降水量为 98.91 mm, 在 2011 年出现显著的干旱现象, 其全年平均降水量仅为 70.61 mm, 随后呈增长态势。多年气温平均值为 16.20 ℃, 最低气温出现在 2012 年, 为 15.28 ℃; 2020 年则达到最高平均气温, 为 17.96 ℃。

表 1 贵州省植被未来变化趋势类型及面积占比

持续性	变化斜率	未来植被覆盖度变化类型	有效像元个数/个	面积占比/%
$H < 0.5$	$S < -0.005$	反持续性显著降低	7838	0.28
$H < 0.5$	$-0.005 < S < 0$	反持续性轻微降低	315993	11.26
$H < 0.5$	$0 < S < 0.005$	反持续性轻微增加	1601273	57.07
$H < 0.5$	$0.005 < S$	反持续性显著增加	340918	12.15
$H > 0.5$	$S < -0.005$	持续性显著降低	19625	0.70
$H > 0.5$	$-0.005 < S < 0$	持续性轻微降低	68448	2.44
$H > 0.5$	$0 < S < 0.005$	持续性轻微增加	343401	12.24
$H > 0.5$	$0.005 < S$	持续性显著增加	108054	3.85

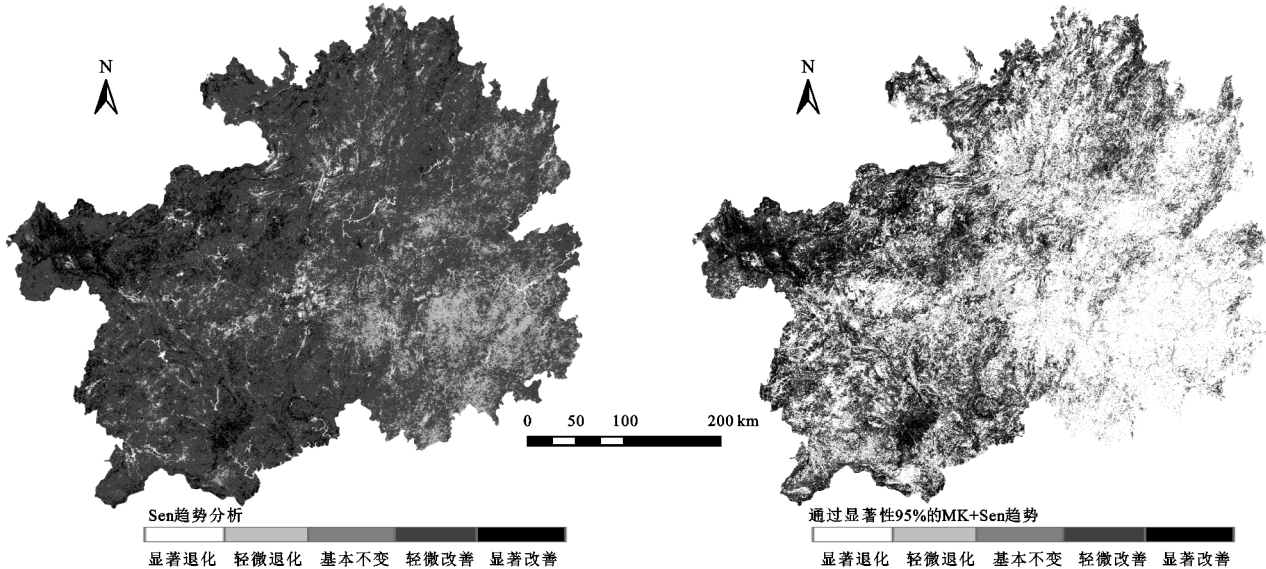


图 4 2001—2020 年贵州省生长季 EVI 均值的 Sen 趋势空间分布

表 2 研究区植被变化趋势类型分级及结果统计

Sen 斜率	>0.006	0.0006~0.006	-0.0006~0.0006	-0.006~-0.0006	<-0.006
影响级别	显著改善	轻微改善	基本不变	轻微退化	显著退化
通过 M-K 检验的植被变化面积占比/%	18.44	77.22	0	3.02	1.34

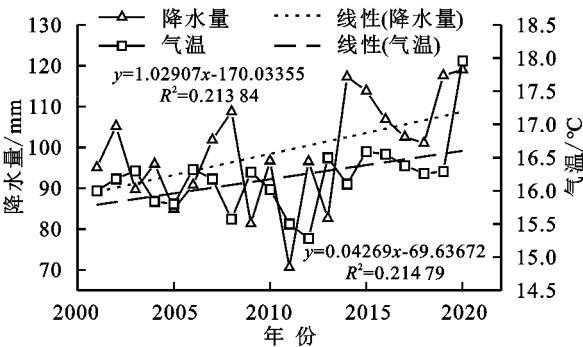


图 5 2001—2020 年贵州省降水、气温年际变化

在基于 2001—2020 年贵州省年尺度 SPEI 的基

础上, 结合年生长季 EVI 进行基于空间像元的 Pearson 相关系数分析(图 6)。结果表明, 贵州省的植被生长状况对气候变化的响应以正相关为主, 约占区域总面积的 73%, 其中极显著正相关仅占有整个研究区域的 2.58%, 显著正相关为 24.44%, 而有 46.05% 的面积表现为不显著正相关, 零散地分布在贵州省的部分区域, 以毕节和凯里的中西部、贵阳东部、都匀北部及遵义西南部的边缘地区为主。而研究区负相关面积占比仅 26.94%, 其中极显著负相关和显著负相关占整个区域的 3.67%, 占区域总面积 23.67% 的不

显著负相关区域则主要分布在遵义的中东部和毕节东部,以及六盘水、兴义和铜仁大部分地区。

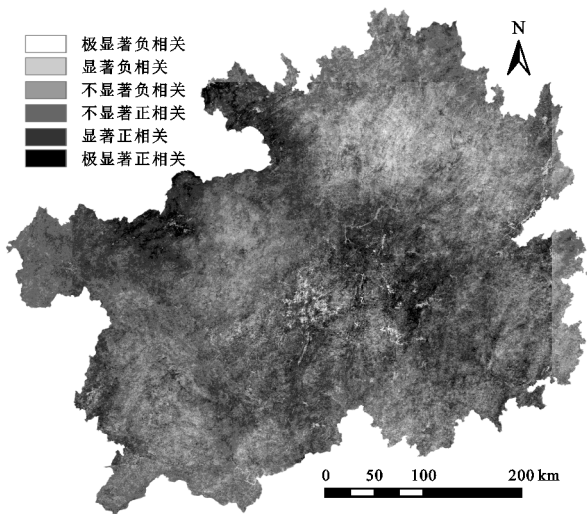


图 6 2001—2020 年贵州省生长季 EVI 与年 SPEI 相关分析空间分布

3.2.2 气候因子对植被 EVI 的影响 在对年尺度的 SPEI 与植被 EVI 进行相关性分析的基础上,进一步对 2001—2020 年贵州省生长季 EVI 与气候因子(降水、气温)之间的偏相关关系进行逐像元分析,并进行显著性检验。统计结果(图 7)显示,降水、气温要素对研究区内植被的变化表现出较明显的空间差异性,生长季 EVI 与降水、气温的偏相关系数均值分别为 0.227 和 -0.131。EVI 与降水的偏相关分析且通过 0.05 显著性检验的面积仅占区域总面积的 8.32%,EVI 与气温的偏相关分析并通过显著性检验的面积占总面积的 9.72%,表明贵州省生长季 EVI 同降水、气温的关系并不紧密。

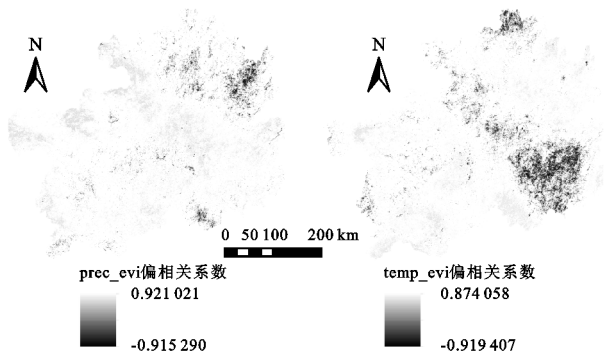


图 7 2001—2020 年生长季 EVI 与年降水、气温偏相关空间分布

从空间上看,EVI 与降水的偏相关系数以正为主,其中以显著正相关占比最大,为 60.28%,主要分布在毕节中部、都匀与贵阳和黔东南交界处,以及遵义的西南部边缘地区。而 EVI 同气温的偏相关系数则以负为主,显著负相关占研究区的面积比最大,为 48.73%,以黔东南州的凯里中部和西南部为主。总体来看,贵州省生长季 EVI 与降水以正相关关系为主,与气温以负相关为

主,两者对研究区植被生长的影响相差不大。由于两者达到 0.05 显著性水平的面积占比较小,可知 2 个气候因子对贵州省植被生长的影响程度并不显著。

3.3 人类活动对植被 EVI 的影响

除气候变化对生长季植被的生长有影响外,人类活动对植被生长的影响 also 具有重要意义。因此研究基于残差分析法探究人类活动对贵州省 EVI 的影响。根据统计分析所得贵州省 EVI 残差值(图 8)可知,2008 年之前,人类活动对植被的影响值为负,对植被生长表现为消极的抑制作用;在 2008—2013 年,人类活动对植被的影响表现为正负相间以及在 2013 年以后主要以积极的促进作用为主,说明人类活动在某种程度上对植被生长具有积极影响。因此,将贵州省植被受人类活动的影响程度大致划分为 5 类,并依据其所占研究区域总面积比例由大到小依次为轻微改善、基本不变、轻微退化、显著改善、显著退化。

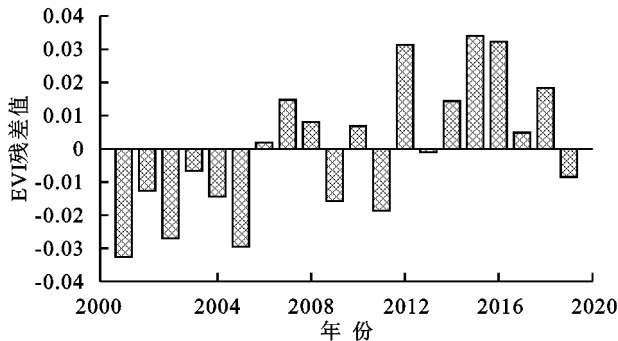


图 8 2001—2020 年贵州省植被 EVI 残差值变化

在空间分布上(图 9)具体表现为:(1)轻微改善所占区域总面积比最大,为 77.84%,占研究区内人类活动对 EVI 起积极促进作用的 96.83%,其次为显著改善区域,占比为 2.55%,主要分布在贵州省遵义北部、毕节,以及西南地区的六盘水、兴义、安顺等地;(2)基本不变的区域占总面积的 12.68%,但其分布范围相对比较集中,主要分布在贵州省黔东南地区和黔南都匀的北部和东南部区域;(3)相较于改善区域面积比而言,轻微退化和显著退化区域所占面积比较小,仅为 6.56%和 0.37%,且分布范围较为分散,均匀散落在整个研究区域,但主要以贵阳、遵义的南部,及都匀和凯里的交界处为集中区域。这主要是由于该区域属于贵州省经济发展较为快速、人口流动性较大的地区,且工业设施完备、城市扩张迅速等原因导致林地转用为居民建设用地、农用地等造成贵州省植被生长状况退化。

4 讨论

贵州省是典型的喀斯特地区,地形地貌较为复杂,因此植被的时空变化特征具有显著的差异性。贵州省 2001—2020 年植被遥感影像 EVI 均值为 0.37,植被的变化趋势以增长为主,空间分布上主要以贵州

省西南区域、北部及西部区域为主,这与刘阳等^[22]和周习会^[23]的研究结果相一致。这是由于自 2001—2020 年以来贵州省陆续开展了“退耕还林还草”“石漠化综合治理”等生态项目工程,使毕节、黔西南州的植被生长状况有极大改善。研究结果表明,贵州省的植被时空变化趋势在未来可能会由于达到过饱和状态而呈现出逐步降低趋势^[29-30],因此对于贵州省植被在未来的变化趋势,及其受何种驱动力因素的影响值得深入探究^[31-32],同时该结论也可作为贵州省在未来实施一系列生态整治工程提供客观的理论依据。

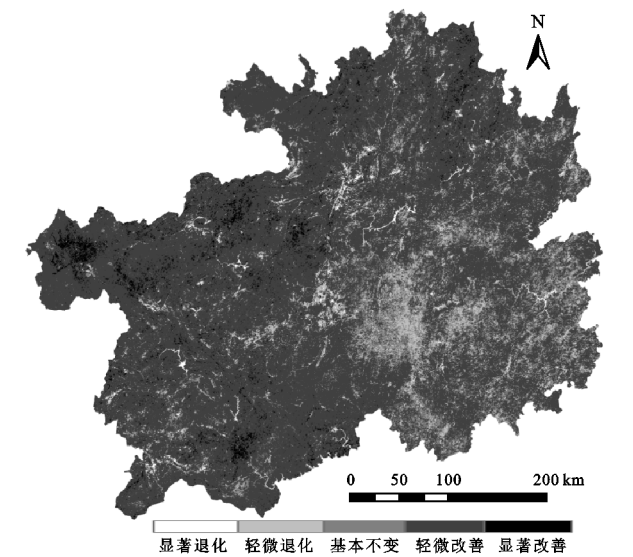


图 9 2001—2020 年贵州省人类活动对生长季植被 EVI 的影响空间分布

经研究^[33]发现,年际尺度上的 SPEI 和 EVI 之间呈现显著的正相关性,但本文所得出的气候因子降水、气温与 EVI 之间相关性的强弱与其他研究^[34]的结论有所差异,原因可能在于本文使用的是 MODIS-EVI 影像,而其他研究者大多使用的是 NDVI 数据,表明贵州省植被生长状况与独立气候因子间的相关性不如气候综合要素对其的影响力强。基于残差分析的人类活动对 EVI 的影响以正面的积极作用为主导,植被改善区域以遵义北部、西部及西南部地区为主,这与实际的研究^[35-36]结果相符,但仍有部分区域由于城市化进程的加速发展而破坏原有植被的生长趋势^[37-38],其中尤以贵阳、遵义周边地区及黔东南部分地区为典型植被退化区。

本文对于探究研究区内的植被时空动态变化对气候变化的响应程度还处于基础阶段,仅考虑降水和气温因子,未考虑其他气候因子与植被生长状况间的相关性和滞后性结果,并且对气象干旱指数 SPEI 的选择也仅为年际尺度,未考虑不同植被类型对不同时间尺度气象干旱指数的响应问题。本文虽探究人类活动对植被的影响程度,但贵州省地形地貌具有较大的特殊性,对于更加精细的人类活动对植被生长的影

响范围和发生强度等还未进行深入分析。因此对于贵州省不同植被类型的生长可能会受到更多其他因子影响的分析是下一步需要探究的重点。

5 结论

(1)近 20 年来,贵州省植被以中植被覆盖为主,占研究区的 79.29%,主要分布在黔南和黔东南地区;在时空变化趋势上,EVI 增加的区域以贵州省北部、西南部地区为主,占研究区总面积的 84.97%;下降的区域主要集中于贵阳市和遵义市及其周边,占总面积的 15.03%;总体上仍以轻微增加占比最大。

(2)经 Sen 趋势分析并通过 M—K 检验的估算结果是以改善为主要变化趋势,显著退化仅占研究区总面积的 1.34%。线性趋势与 Hurst 指数的叠加结果表明,贵州省植被在未来的变化趋势以反持续性增加为主,占研究区总面积 69.23%,在空间分布上占据贵州省大部分区域。

(3)气候因子降水和气温与 EVI 在年际尺度上的偏相关均值分别为 0.227 和 -0.131,分别呈现出显著正相关和显著负相关关系,但通过显著性检验的面积占比较低,总体上 EVI 与气候因子相关性不强;并且 SPEI 与 EVI 的相关关系表明贵州省植被生长状况与气候变化之间的正相关远高于负相关。

(4)人类活动对 EVI 的影响以积极的改善作用为主的区域占研究区总面积的 80.39%,以消极的抑制作用为主的区域占研究区总面积的 6.93%,表明人类社会经济活动对 EVI 以积极促进作用为主。

参考文献:

[1] Zhang Y, Zhang C B, Wang Z Q, et al. Vegetation dynamics and its driving forces from climate change and human activities in the three-river source region, China from 1982 to 2012 [J]. Science of the Total Environment, 2016, 563: 210-220.

[2] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Effect of climate and CO₂ changes on the greening of the Northern Hemisphere over the past two decades [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2006, 33. Doi: 10.1029/2006GL028205.

[3] Piao S, Wang X, Ciais P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006 [J]. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.

[4] 张戈丽,徐兴良,周才平,等.近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J].地理学报,2011,66(1):47-58.

[5] 王正兴,刘闯, Huete A.植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J].生态学报,2003,35(5):979-987.

[6] 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.

- [7] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Ferreira overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [8] Crabbe R A, Dash J, Rodriguez-Galiano V F, et al. Extreme warm temperatures alter forest phenology and productivity in Europe[J]. Science of the Total Environment, 2016, 563: 486-495.
- [9] 孙立双, 马运涛, 毕天平, 等. 辽宁地区不同地表覆盖类型 EVI 和 NDVI 特征[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1024-1029.
- [10] 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.
- [11] Ma B, Zhang B, Jia L G, et al. Conditional distribution selection for SPEI-daily and its revealed meteorological drought characteristics in China from 1961 to 2017[J]. Atmospheric Research, 2020, 246: e105108.
- [12] 魏巍, 王百田, 张克斌. 基于 SPEI 的中亚地区 1901—2015 年干旱时空趋势分析[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 113-121.
- [13] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012, 16(10): 1-27.
- [14] 李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 84-90.
- [15] Yang M J, Yan D H, Yu Y D, Yang Z Y. SPEI-based spatiotemporal analysis of drought in Haihe river basin from 1961 to 2010[J]. Advances in Meteorology, 2016, 2016: e7658015.
- [16] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000—2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 743-751.
- [17] 彭凯锋, 蒋卫国, 侯鹏, 等. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3388-3396.
- [18] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7722-7736.
- [19] Shrestha A, Luo W. Analysis of groundwater nitrate contamination in the Central Valley: Comparison of the geodetector method, principal component analysis and geographically weighted regression[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(10): e297.
- [20] Pang G J, Wang X J, Yang M X. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. Quaternary International, 2017, 444: 87-96.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 周习会. 遵义市水土保持生态文明建设的主要对策与措施[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(1): 207-208.
- [24] 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 等. 1998—2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5100-5108.
- [25] Ali R, Kuriqi A, Abubaker S, et al. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method[J]. Water, 2019, 11(9): e1855.
- [26] Zhu W B, Jia S F, Lu A F, et al. Analyzing and modeling the coverage of vegetation in the Qaidam Basin of China: The role of spatial autocorrelation[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(2): 346-358.
- [27] 严恩萍, 林辉, 党永峰, 等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 5007-5020.
- [28] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [29] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 271-297.
- [30] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系: 基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.
- [31] Park H S, Sohn B J. Recent trends in changes of vegetation over East Asia coupled with temperature and rainfall variations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115: D14101.
- [32] 蔡娅娅, 谭伟. 贵州省 2001—2015 年植被覆盖 NDVI 时空演变及其对 SPEI 的响应[J]. 农业工程, 2019, 9(3): 30-39.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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]. 乐山师范学院学报, 2018, 33(8): 58-67, 84.
- [36] 任荣仪, 贺中华, 夏传花, 等. 贵州省不同地貌类型下植被物候时空变化及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 113-123.
- [37] 陈圣子, 周忠发, 闫利会. 基于网格 GIS 的喀斯特石漠化治理过程中生态系统健康变化诊断: 以贵州花江示范区为例[J]. 中国岩溶, 2015, 34(3): 266-273.
- [38] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5495-5504.