

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

刘阳^{1,2}, 周忠发^{1,2}, 闫利会^{1,3}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院/地理与环境科学学院, 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: [目的] 研究贵州省植被覆盖对气候变化和人类活动的响应程度, 为区域生态环境建设提供理论依据。[方法] 选取 2001—2018 年 MODIS13 A1 影像, 结合气象数据, 利用线性趋势分析、偏相关分析和残差分析等方法, 分析了贵州省 18 年间 NDVI 的时空变化特征, 探究了 NDVI 对气候变化的响应规律以及人类活动对 NDVI 的影响。[结果] ① 2001—2018 年贵州省 NDVI 呈现显著上升趋势, 增长速率为 0.005 3/a, 空间上极显著增加和显著增加区域面积分别占研究区域的 52.80% 和 16.80%。② 2001—2018 年贵州省气候向暖湿方向发展, NDVI 与气温和降水呈正相关关系, 且 NDVI 对气温的敏感性高于降水。③ 月尺度上 NDVI 对气温的响应不存在滞后性, 对降水响应存在一个月滞后性; NDVI 与气候月尺度相关性高于年尺度。④ 人类活动对贵州省植被覆盖作用日益增强, 对 NDVI 贡献度为 72.30%。[结论] 人类活动对 NDVI 的影响大于气候变化, 贵州省植被变化是气候变化和人类活动共同作用的结果。

关键词: NDVI; 气候变化; 滞后性; 人类活动; 贵州省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0327-10

中图分类号: Q948

文献参数: 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.044; Liu Yang, Zhouzhong Fa, Yan Lihui. Spatio-temporal variation in NDVI and its response to climate change and human activities in Guizhou Province during 2001—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 327-336.

Spatio-temporal Variation in NDVI and Its Response to Climate Change and Human Activities in Guizhou Province During 2001—2018

Liu Yang^{1,2}, Zhouzhong Fa^{1,2}, Yan Lihui^{1,3}

(1. Karst Research Institute/Department Geography and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. State Key Laboratory Incubation Base for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China; 3. State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The response of vegetation coverage to climate change and human activities in Guizhou Province was studied to provide important guidance for restoring the regional ecological environment. [Methods] Based on MODIS13 A1 data and meteorological data, the spatio-temporal variation in the normalized difference vegetation index (NDVI) during 2001—2018 in Guizhou Province was analyzed. Moreover, the impact of climate change and human activities on the NDVI was explored with linear trend analysis, partial correlation, and residual methods. [Results] ① The NDVI showed a significant upward trend at a growth rate of 0.005 3 per year in Guizhou Province during 2001—2018. In the space studied, the extremely significant and the significant improvement areas accounted for 52.80% and 16.80% of the study area, respectively.

收稿日期: 2020-08-15

修回日期: 2020-09-26

资助项目: 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); 贵州省科技计划项目“喀斯特洞穴系统碳循环机制研究”(黔科合基础[2020]1Y154); 贵州省高层次创新型人才培养计划“百”层次人才(黔科合平台人才[2016]5674)。

第一作者: 刘阳(1995—), 女(汉族), 山东省淄博市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统与遥感。Email: 718475368@qq.com。

通讯作者: 周忠发(1969—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 教授, 博导, 主要从事喀斯特生态环境 GIS 与遥感。Email: fa6897@163.com。

② The climate showed a process of distinct warming and increasing humidity in Guizhou Province during 2001—2018. The NDVI was positively correlated with temperature and precipitation, and the NDVI was more sensitive to temperature than to precipitation. ③ There was no lag in the response of NDVI changes to temperature on a monthly scale, but there was a one-month lag in the response to precipitation. The correlation between the NDVI and climate change on a monthly scale was higher than that on an annual scale. ④ The effect of human activities on vegetation coverage was increasing in Guizhou Province, and the contribution to the NDVI was 72.30%. [Conclusion] The impact of human activities on the NDVI was greater than that of climate change. The spatio-temporal variation in the NDVI was the result of the combined effects of climate change and human activities in Guizhou Province.

Keywords: normalized difference vegetation index (NDVI); climate change; lag; human activities; Guizhou Province

植被作为陆地生态系统中的重要组成部分,它是联结地球各圈层的纽带,是全球变化研究中的“指示器”^[1]。其变化在生态系统物质循环和能量流动中具有重要作用^[2]。植被的变化研究是全球变化研究的热点问题之一^[3-4],它是反映生态环境的重要指标。气候变化是影响植被分布和变化的主要非生物因素^[5-6],气温和降水可以调节植被的生理作用从而影响植被的生长状况^[7]。在全球气候变暖的背景下,陆地生态系统发生改变,植被的生长状况,包括生长类型和分布等也会发生改变^[8]。植被动态变化表现出植被对气候变化的响应,它是生态环境变化的直接结果^[6]。近年来,植被覆盖的变化也记录着人类活动的烙印,人为对土地利用方式的改变直接影响植被数量和分布格局的改变,植被覆盖变化是气候变化和人类活动共同作用的结果^[9]。因此,研究监测植被覆盖的时空变化规律,确定其与气候变化和人类活动的关系,对调节生态系统和改善生态环境具有重要的作用。

归一化植被指数(NDVI)作为指示植被生长状况的植被指数之一,能够较好地监测植被覆盖的变化^[10-11]。国内外学者利用不同遥感数据源,基于NDVI在不同时空尺度上监测植被覆盖的动态变化以及气候因子对其响应,在非洲^[12]、北美^[13]和中国西北^[14-15]、华北等^[16]地都取得了一系列研究成果,植被覆盖变化对气候响应存在较好的线性关系,在不同的地区对各气候因子表现出不同的敏感性。人类活动对植被变化的影响在三江源^[17]、秦岭等^[18]地区也进行了定量分析,人类活动在短时间尺度内对植被覆盖变化作用较大,植被覆盖变化是人类活动和气候变化叠加的结果,不同人类活动对植被覆盖变化的表现结果存在差异。由此可见,植被覆盖对气候和人类活动的响应较好,但因时因地而异。

贵州省地处中国西南地区,喀斯特发育,生态环境脆弱,石漠化现象严重^[19]。为恢复区域生态,贵州省自2000年以来实施开展了一系列生态治理项目,

植被覆盖是体现当地生态环境质量的重要指标。因此在全球气候变化和生态治理背景下,厘清贵州省植被覆盖变化规律以及气候变化和人类活动对其影响具有重要现实意义。目前已有研究中对贵州省植被覆盖与气候因子相关分析以单一尺度为主^[20-21],且人类活动的影响多为定性描述^[22],造成不能定量分析人类活动对植被覆盖的作用。因此本文以像元为尺度,利用MODIS-NDVI和气象数据,研究在不同时间尺度上气候变化与植被覆盖的关系,定量分析人类活动的影响,探讨气候变化和人类活动对植被覆盖的贡献度,以加深植被—气候—人类活动三者关系的认识,为喀斯特生态修复建设提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南地区,地处 $103^{\circ}36'—109^{\circ}35'E$, $24^{\circ}37'—29^{\circ}13'N$,毗邻四川、重庆、广西、云南和湖南省,全省面积约 $1.76 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图1)。贵州属于亚热带湿润季风气候,年降水量为 $800 \sim 1600 \text{ mm}$,降水季节分配不均,夏季降雨集中,且多以暴雨形式出现,年平均气温为 $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。省内地势西高东低,地形以丘陵和山地为主,平均海拔在 $1\ 100 \text{ m}$ 左右。贵州处在长江和珠江两大水系上游交错地带,属于高原山区,植物种类较丰富,植被类型比较多,其中针叶林是省内分布最广的植被类型,地带性植被为常绿阔叶林。贵州省为首批全国生态文明试验区,2018年底贵州省森林面积达到 $1.00 \times 10^7 \text{ hm}^2$,森林覆盖率为 57% 。贵州省喀斯特地貌发育,面积占全省国土面积的 61.9% ,因此生态环境脆弱且易受到破坏,保护和提高植被覆盖对改善全省生态环境十分重要。

1.2 数据来源及预处理

遥感数据来源于NASA(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)提供的MODIS/Terra卫星遥感产品MOD13A1,空间分辨率为 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$,时间分辨率为 16 d 。数据选取编号为h27 v06的影像,

时间选取为 2001 年 1 月至 2018 年 12 月。每年为 23 景影像,共计 414 景影像数据。用 MODIS Reprojection Tools 工具对 MODIS-NDVI 波段进行提取、投影和格式转换。HDF 文件转换为 TIFF 栅格文件,将 Sin 坐标转换为 WGS 84 地理坐标/Albers Equal Area 投影坐标。利用贵州省行政区划完成裁剪,并采用国际通用的最大合成法(MVC)合成月值数据^[23],年数据采用均值数据。NDVI 值范围为(-1,1),正值表示有植被覆盖,且覆盖度随着数值增大而增加^[24]。

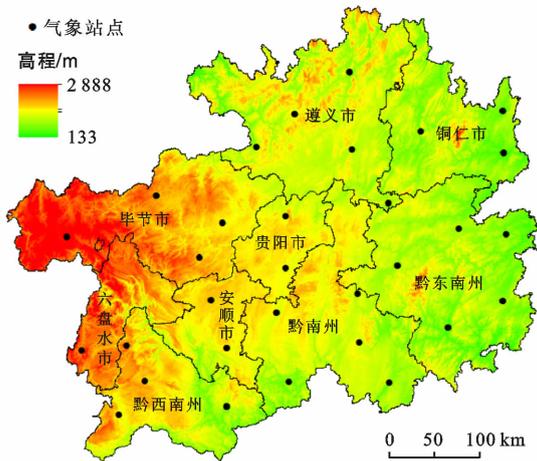


图 1 研究区范围及气象站点分布

气象数据来源于气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>),共包括 31 个气象站点,获取气温和降水的月值和年值数据。利用反距离插值法(IDW)进行空间差值,重采样成与 MODIS-NDVI 数据相同的空间分辨率,并根据贵州省矢量边界进行裁剪。

土地利用分类数据来源于中科院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),利用中国 2000 年和 2018 年土地利用遥感监测数据提取出贵州省 19 a 间未变化土地利用分布图,并合并成耕地、林地、草地和其他用地。

1.3 研究方法

1.3.1 线性趋势分析 时间序列数据利用一元线性回归分析可以逐像元模拟 NDVI 随时间变化的速率^[10]。计算公式为:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times x_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:slope 表示线性趋势斜率; n 为时间序列的长度; x_i 表示第 i 年的 NDVI 值。其中 slope 的值域为 $[-1,1]$,若 $\text{slope} > 0$,则表示相关要素随时间变化呈

现增加趋势;若 $\text{slope} < 0$,则表示相关要素随时间变化呈现减少趋势。

趋势的显著性一般采用 F 检验,显著性检验仅表示变化趋势的置信程度,与变化趋势的速度无关^[3]。计算公式为:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

式中: F 表示统计量; U 表示误差平方和; Q 表示回归平方和; y_i 表示第 i 年 NDVI 的实际值, \hat{y}_i 表示第 i 年的回归值, \bar{y} 表示多年 NDVI 的平均值; n 表示时间序列的长度。根据检验结果,可以将趋势变化分为 6 个等级:极显著增加($\text{slope} > 0, p < 0.01$);极显著减少($\text{slope} < 0, p < 0.01$);显著增加($\text{slope} > 0, 0.01 \leq p < 0.05$);显著减少($\text{slope} < 0, 0.01 \leq p < 0.05$);不显著增加($\text{slope} > 0, p \geq 0.05$);不显著减少($\text{slope} < 0, p \geq 0.05$)。

1.3.2 偏相关分析 简单相关系数可以用来描述两个变量间的相关程度^[25]。计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: r_{xy} 表示 x, y 两要素的简单相关系数; x_i, y_i 分别表示第 i 年 x, y 的实际值; \bar{x}, \bar{y} 分别表示 x, y 多年的平均值; n 为时间序列的长度。 r 的值域为 $[-1,1]$,若 $r > 0$,则表示 x, y 两要素呈正相关,若 $r < 0$,则表示两者呈负相关。

偏相关分析表示两个要素同时与第 3 个要素存在相关性时,剔除第 3 个要素考虑另外两个要素的相关性,可以用偏相关系数表示。计算公式为:

$$R_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)(1-r_{yz}^2)}} \quad (6)$$

式中: R_{xyz} 表示剔除 z 要素后 x, y 的偏相关系数; r_{xy}, r_{xz}, r_{yz} 分别表示要素 x 和要素 y ,要素 x 和要素 z ,要素 y 和要素 z 之间的简单相关系数。 R 值域和表示意义同 r 相同。对相关系数的检验通常采用 t 检验。计算公式为:

$$t = \frac{R_{xyz} \sqrt{n-m-1}}{\sqrt{1-R_{xyz}^2}} \quad (7)$$

式中: t 表示统计量; R_{xyz} 表示要素 x 和要素 y 的偏相关系数; n 表示样本数量; m 表示自变量数量。根据检验结果,可以将偏相关性分为 6 个等级:极显著正相

关($R_{xyz} > 0, p < 0.01$), 极显著负相关($R_{xyz} < 0, p < 0.01$), 显著正相关($R_{xyz} > 0, 0.01 \leq p < 0.05$), 显著负相关($R_{xyz} < 0, 0.01 \leq p < 0.05$), 不显著正相关($R_{xyz} > 0, p \geq 0.05$), 不显著负相关($R_{xyz} < 0, p \geq 0.05$)。

1.3.3 残差分析 残差分析法是建立气候因素和 NDVI 相关性的回归模型, 分离出气候对植被生长的响应部分^[26-27]。在不考虑其他非主要决定因素影响下, 通过模型得到的 NDVI 模拟值与真实值的残差,

是除气候之外的其他因素对植被生长的影响, 可以主要解释为人类活动对植被生长的影响^[17]。计算公式为:

$$\sigma_i = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_i' \quad (8)$$

式中: σ_i 为第 i 年的残差值; NDVI_i 为第 i 年 NDVI 的真实值; NDVI_i' 为基于气候回归模型计算出的模拟值。人类活动和气候变化对植被的贡献度^[28]见表 1。

表 1 2001—2018 年贵州省植被覆盖变化中气候变化和人类活动的贡献度

类型	slope (NDVI _{est})	slope (NDVI _{res})	气候变化的 贡献度/(%)	人类活动的 贡献度/(%)	说明
slope(NDVI _{obs}) > 0	> 0	> 0	$\frac{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{est}})}{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{obs}})} \times 100$	$\frac{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{res}})}{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{obs}})} \times 100$	气候变化和人类活动各自导致植被覆盖增加的贡献度
	> 0	< 0	100	0	气候变化导致植被覆盖增加
	< 0	> 0	0	100	人类活动导致植被覆盖增加
slope(NDVI _{obs}) < 0	< 0	< 0	$\frac{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{est}})}{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{obs}})} \times 100$	$\frac{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{res}})}{\text{slope}(\text{NDVI}_{\text{obs}})} \times 100$	气候变化和人类活动各自导致植被覆盖减少的贡献度
	< 0	> 0	100	0	气候变化导致植被覆盖减少
	> 0	< 0	0	100	人类活动导致植被覆盖减少

注: slope(NDVI_{obs}) 表示真实 NDVI 变化趋势; slope(NDVI_{est}) 表示模拟 NDVI 变化趋势; slope(NDVI_{res}) 表示残差值变化趋势。

2 结果与分析

2.1 NDVI 时空变化分析

2.1.1 NDVI 时间变化特征 利用一元线性回归对贵州省 2001—2018 年 NDVI 均值进行趋势分析(图 2)。NDVI 呈显著增长趋势, 增长速率为 0.005 3/a ($R^2 = 0.608, p < 0.01$)。植被生长大致可以分为 4 个阶段: ①2001—2006 年植被覆盖处在较低水平, 其中 2001 年为 NDVI 最低值 0.54; ②2007—2010 年植被覆盖增加且 NDVI 值稳定在 0.6 附近; ③2011—2012 年植被覆盖明显降低; ④2013—2018 年植被覆盖处在较高水平, 2015 年为 NDVI 最大值 0.64。整体而言, 贵州省 18a 来植被生长状况得到明显改善。

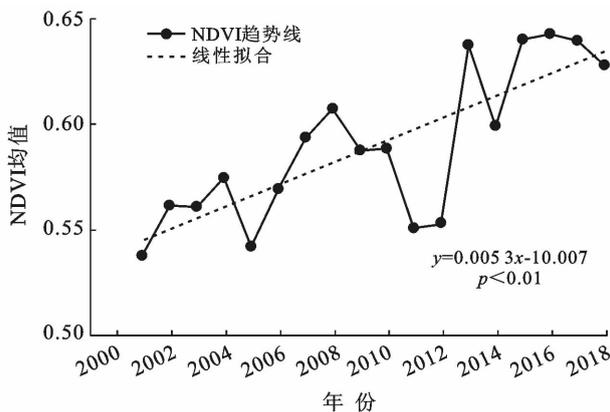


图 2 2001—2018 年贵州省 NDVI 趋势变化

2.1.2 NDVI 空间变化特征 图 3a 为贵州省 2001—2018 年 NDVI 均值空间分布, 植被覆盖表现出“中部西北部低、东南部高”的空间格局。其中高值区集中分布在黔东南州、铜仁市江口县北部、遵义赤水市和黔西南州东南部, 低值区主要分布在毕节市威宁县、贵阳市北部和遵义市红花岗区。可以发现植被覆盖高的区域分布在丘陵, 且多为非喀斯特地区; 植被覆盖低的区域多分布在高原山地和城镇较发达地区。

趋势分析结合 F 检验得到 NDVI 空间变化趋势分布(图 3b 和表 2)。发现 NDVI 增加趋势面积占研究区域的 95.176%, 远大于减少趋势面积(4.824%), 空间上 NDVI 增长趋势明显。植被覆盖增加区域分布在贵州省大部分地区, 其中极显著增加(52.803%)和显著增加(16.803%)主要分布在贵州省西部以及东北部小部分地区, 包括毕节市、六盘水市、安顺市、黔西南州、铜仁市沿河土家族自治县、贵阳市清镇市和修文县、黔南州罗甸县和长顺县。NDVI 减少区域集中分布在黔中和黔东南地区, 包括贵阳市南部、黔东南州雷山县和施秉县、黔南州都匀市、铜仁市江口县、安顺市区和遵义市遵义县。

对比图 3a, 高植被覆盖区 NDVI 增长趋势不明显甚至出现减少趋势, 黔东南州中部表现最为明显, 原因可能是城市建设占用了原生态用地, 破坏了原有植

被;除黔中地区外,低植被覆盖区 NDVI 增长趋势以极显著和显著增加为主,毕节市、安顺市北部和黔西南州表现最为明显,原因可能是该地区原生态环境较

差,水土流失严重,较高的海拔限制了水热条件的分配,不利于植被生长,近年来生态项目的开展使得植被覆盖明显增加。

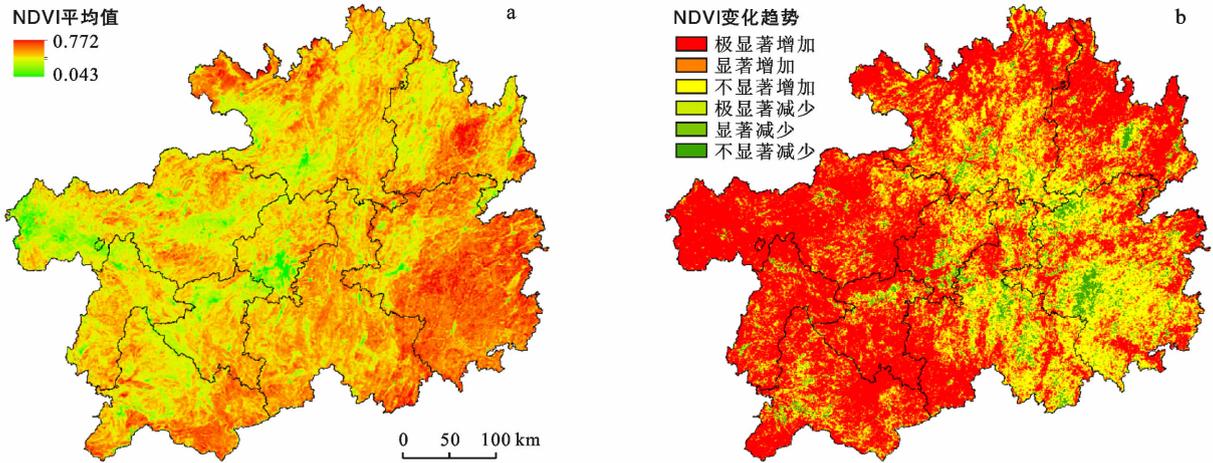


图 3 2001—2018 年贵州省 NDVI 均值以及空间变化趋势

表 2 2001—2018 年贵州省 NDVI 空间变化趋势统计结果

NDVI 变化趋势	像元数量/个	面积/km ²	比例/%
极显著增加	371 872	92 968.00	52.803
显著增加	118 337	29 584.25	16.803
不显著增加	180 078	45 019.50	25.570
极显著减少	3 958	989.50	0.562
显著减少	2 609	652.25	0.371
不显著减少	27 406	6851.50	3.891

2.2 NDVI 对气候变化的响应

2.2.1 年尺度 NDVI 对气候变化的响应 如图 4a 所示,贵州省 2001—2018 年平均气温呈不显著增长趋势,增长速率为 $0.0187\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ($R^2=0.073, p>0.05$),多年平均值为 $16.124\text{ }^{\circ}\text{C}$;年累计降水呈不显著增长趋势,增长速率为 $6.817\text{ mm}/\text{a}$ ($R^2=0.067, p>0.05$),多年平均值为 1161.11 mm 。根据年平均气温和累计降水变化趋势,贵州省气候正在向暖湿方向发展。

为了定量分析 NDVI 与气候的关系,对 NDVI 分别与平均气温和累计降水进行逐像元偏相关分析(图 4b,4c)。NDVI 与气温和降水的偏相关性在空间分布上存在明显差异。NDVI 与气温的偏相关系数范围为 $-0.775\sim 0.934$,均值为 0.402 ,其中正相关面积占研究区域的 96.60% ,以不显著正相关 (57.40%) 为主。其中极显著正相关 (17.22%) 和显著正相关 (21.98%) 主要分布在毕节市东部、遵义市西部、铜仁市思南县、黔南州北部和南部,这些地区年降水量相对少,其对气温的降低作用弱,温度的增加有利于植被生长;负相关(不显著负相关 3.40%) 集

中分布在遵义市正安县、六盘水市盘山县、黔西南州兴义市、贵阳市市区、黔南州和黔东南州交界中部地区,气温抑制植被生长作用不明显。NDVI 与累计降水的偏相关系数范围为 $-0.768\sim 0.914$,均值为 0.231 ,其中正相关面积占研究区域的 83.77% ,同样以不显著正相关 (67.92%) 为主。其中极显著正相关 (5.15%) 和显著正相关 (10.70%) 主要分布在毕节市部分地区,高海拔地区气温降低,降水成为主要影响因素,降水的增加促进植被生长;负相关(不显著负相关 16.23%) 集中分布在遵义市中部、铜仁市中西部和黔南州中南部,这部分地区以林地为主,降水的增多使得该地区辐射降低^[29],限制了植被生长。整体上 NDVI 与气温和降水呈正相关,气温是影响研究区植被生长的关键因素。

2.2.2 月尺度 NDVI 对气候变化的响应 进一步分析月尺度上 NDVI 与气候的关系。植被生长受水热变化影响,同时植物生长对气候的响应存在一定的滞后性^[23]。对贵州省多年逐月 NDVI 值与当月(3—12 月)、前 1 月(2—11 月)与前两月(1—10 月)平均气温和累计降水进行偏相关性分析(图 5),并对偏相关系数和正相关面积进行了统计(表 3)。由图 5 和表 3 可知,NDVI 与当月、前 1 月和前两月的气温和降水偏相关系数范围差别不大,NDVI 与两者相关性均以正相关为主。比较平均偏相关系数,一方面月尺度 NDVI 与气候的相关性高于年尺度,原因可能是气候月变化明显,植被生长对不同月份水热条件的变化敏感;另一方面 NDVI 与当月气温的偏相关系数最大

(0.657),与前 1 月的降水偏相关系数最大(0.594),植被对当月气温和前 1 月降水表现最敏感。从正相关面积及其显著性来看,NDVI 与当月气温显著正相关面积最大,与前 1 月降水显著正相关面积最大,结

合偏相关系数数值大小,说明植被对气温响应没有明显滞后性,对降水存在一个月的滞后性。降水渗透到土壤中供给植被生长需要一定的时间,NDVI 的改变过程相对缓慢^[30],植被对降水存在滞后性。

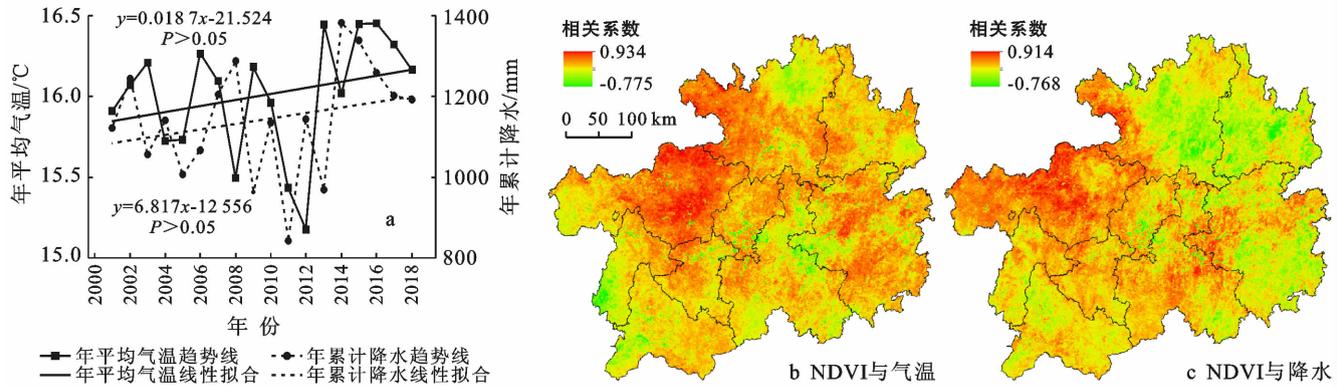


图 4 2001—2018 年贵州省气候变化趋势及年 NDVI 与气候相关性空间分布特征

表 3 2001—2018 年贵州省月尺度 NDVI 与气候相关性统计

统计类型	偏相关系数范围	平均系数	正相关面积占比/%		
			极显著	显著	总面积
NDVI- T_0	-0.797~0.989	0.657	43.35	28.43	97.29
NDVI- T_1	-0.964~0.975	0.161	2.19	5.92	68.05
NDVI- T_2	-0.931~0.955	-0.161	0.14	0.77	30.05
NDVI- P_0	-0.910~0.941	-0.03	0.38	1.82	42.75
NDVI- P_1	-0.905~0.993	0.594	24.13	28.01	97.75
NDVI- P_2	-0.845~0.984	0.492	11.64	24.37	93.98

注: T, P 分别代表气温、降水; T_0, T_1, T_2 分别代表当月气温、前 1 月气温和前两月气温;总面积包括不显著正相关在内。

为了更直观地看出植被滞后性的空间分布,将 NDVI 与当月、前 1 月、前两月的气温和降水偏相关系数进行逐像元比较(仅考虑数值大小),得到滞后空间分布结果(图 5)。研究区域的 85.84%NDVI 表现出对气温没有表现出滞后性(图 5g),61.51%表现为 NDVI 对降水存在一个月滞后性(图 5h),主要分布在毕节市东部、遵义市西部、六盘水市和黔西南州。

2.3 NDVI 对人类活动的响应

除了气候条件外,人类活动也是影响植被覆盖的重要因素。利用残差分析确定人类活动对 NDVI 的影响。考虑到 NDVI 对气候的滞后性,选取同期 NDVI 和气温与前 1 月降水作二元一次回归分析,得到只有气候影响的 NDVI 模拟值,模拟值与真实值之间的残差即为人类活动的影响。

图 6a 为为贵州省 2001—2018 年残差变化趋势,趋势显著增加,增加速率为 0.004/a($R^2=0.682, p<$

0.01)。人类活动对 NDVI 影响大致可以分为 4 个阶段:①2001—2005 年残差值较低,2001 年为最低值 0.006,人类活动对植被覆盖影响较小。②2006—2008 年残差值增加较显著,人类活动对植被覆盖影响增强。③2009—2012 年残差值明显减少,人类活动对植被覆盖影响减弱。④2013—2018 年残差值较大且趋于稳定(除 2014 年外),2013 年为最高值 0.09,人类活动对植被覆盖影响明显。整体来看,自 2001 年以来,人类活动一直有利于植被覆盖增加,且作用一直在增强。

图 6b 为残差空间变化趋势,其中变化趋势为正值面积占研究区域的 87.05%,主要分布在遵义市北部和西部、毕节市、六盘水市、安顺市南部、黔西南州东部和贵阳市北部,这些地区人类活动有利于植被生长,主要表现为生态工程的实施。变化趋势为负值面积占研究区域的 12.95%,主要分布在贵阳市南部、安顺市北部、黔东南州北部和毕节市南部,这主要是由于城市建设导致的植被覆盖减少。可见,人类活动对植被生长作用是双向的,且以促进作用为主。

2.4 气候变化和人类活动对 NDVI 贡献度

比较 NDVI 真实值、模拟值和残差值的趋势变化,得到人类活动和气候变化对 NDVI 的贡献度。整体上人类活动对 NDVI 贡献度为 72.30%,气候贡献度为 27.70%,植被覆盖受到人类活动和气候的共同影响,且以人类活动为主。

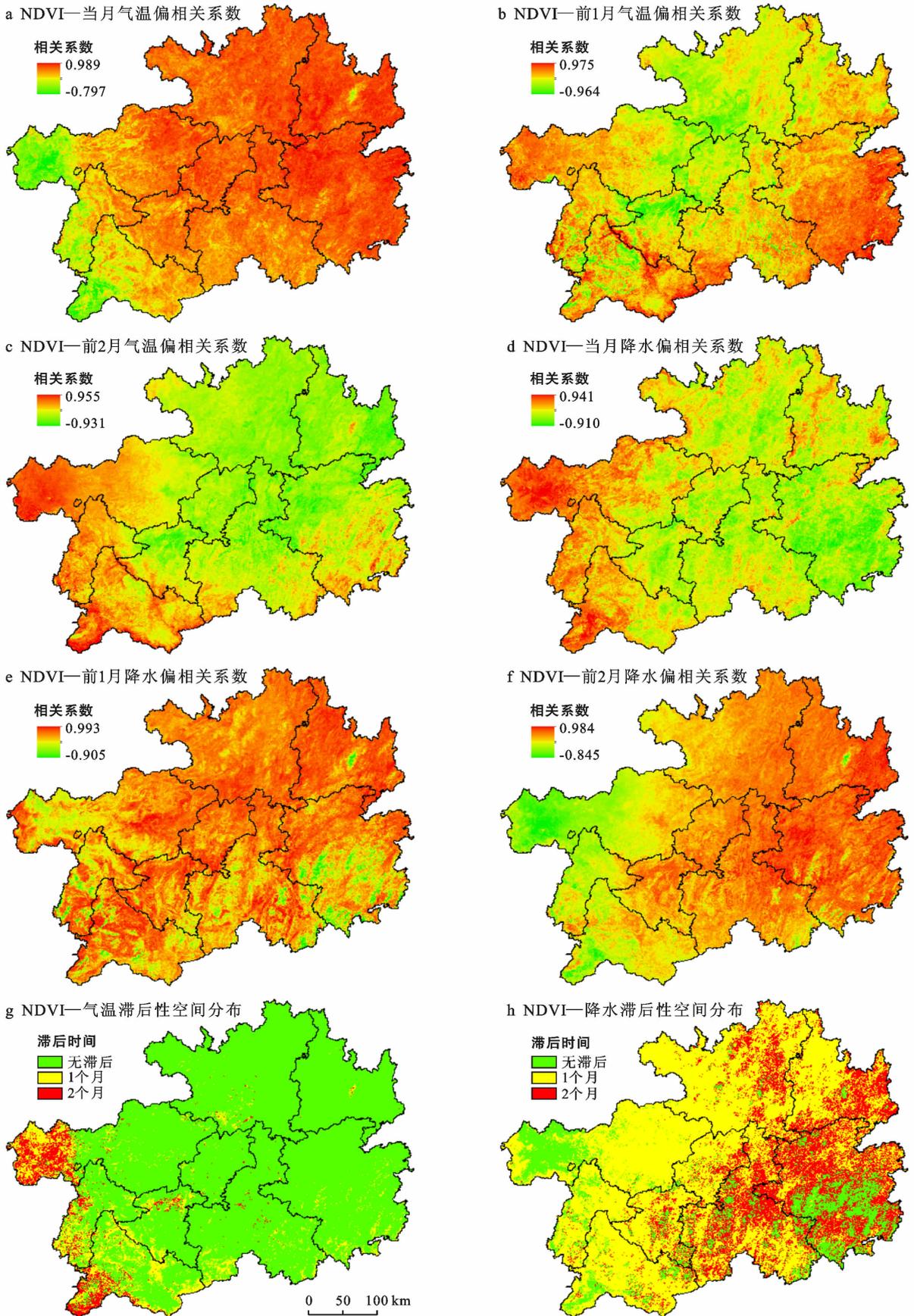


图 5 2001—2018 年贵州省月 NDVI 与气候相关性空间分布及滞后性空间分布特征

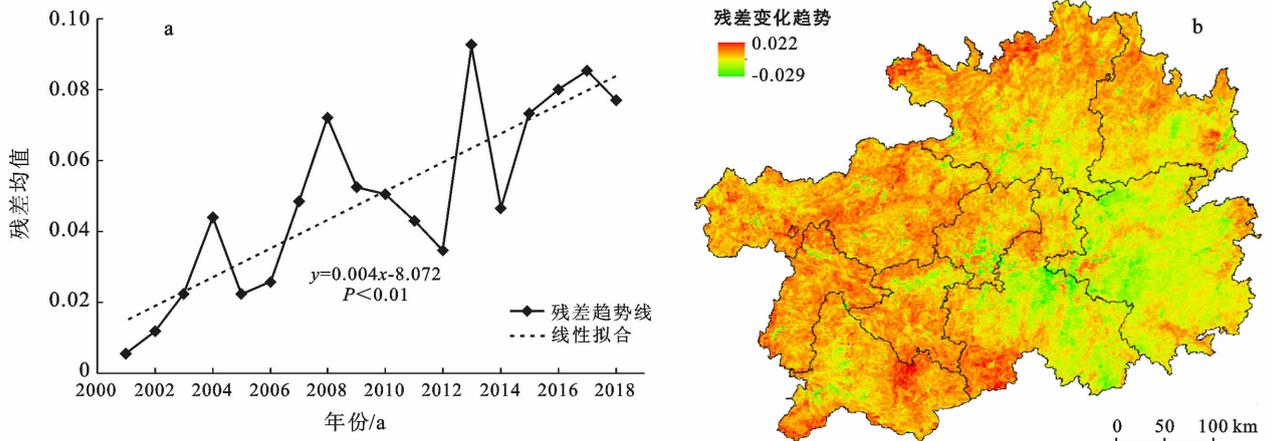


图 6 2001—2018 年贵州省残差时空变化趋势

根据图 3b 中 NDVI 的变化趋势,把人类活动和气候变化对植被覆盖的贡献度进行分类讨论,发现两者对其贡献度在空间上存在差异(图 7)。在 NDVI 增加区域,人类活动的贡献度为 71.07%,其中对极显著增加和显著增加区域贡献度分别为 84.19%和 71.94%,贡献度在 50%以上面积占研究区域的 79.89%,主要分布在黔西南和黔北地区;气候对

NDVI 贡献度为 28.93%,贡献度在 50%以上面积占研究区域的 20.11%,主要分布在黔东南地区。可以发现人类活动对植被覆盖的增加起到了主导作用,高贡献度集中分布在水土流失较严重地区。在 NDVI 减少区域,人类活动对 NDVI 贡献度为 96.63%,气候贡献度为 3.37%,人类活动贡献度在 50%以上面积占研究区域的 97.21%。

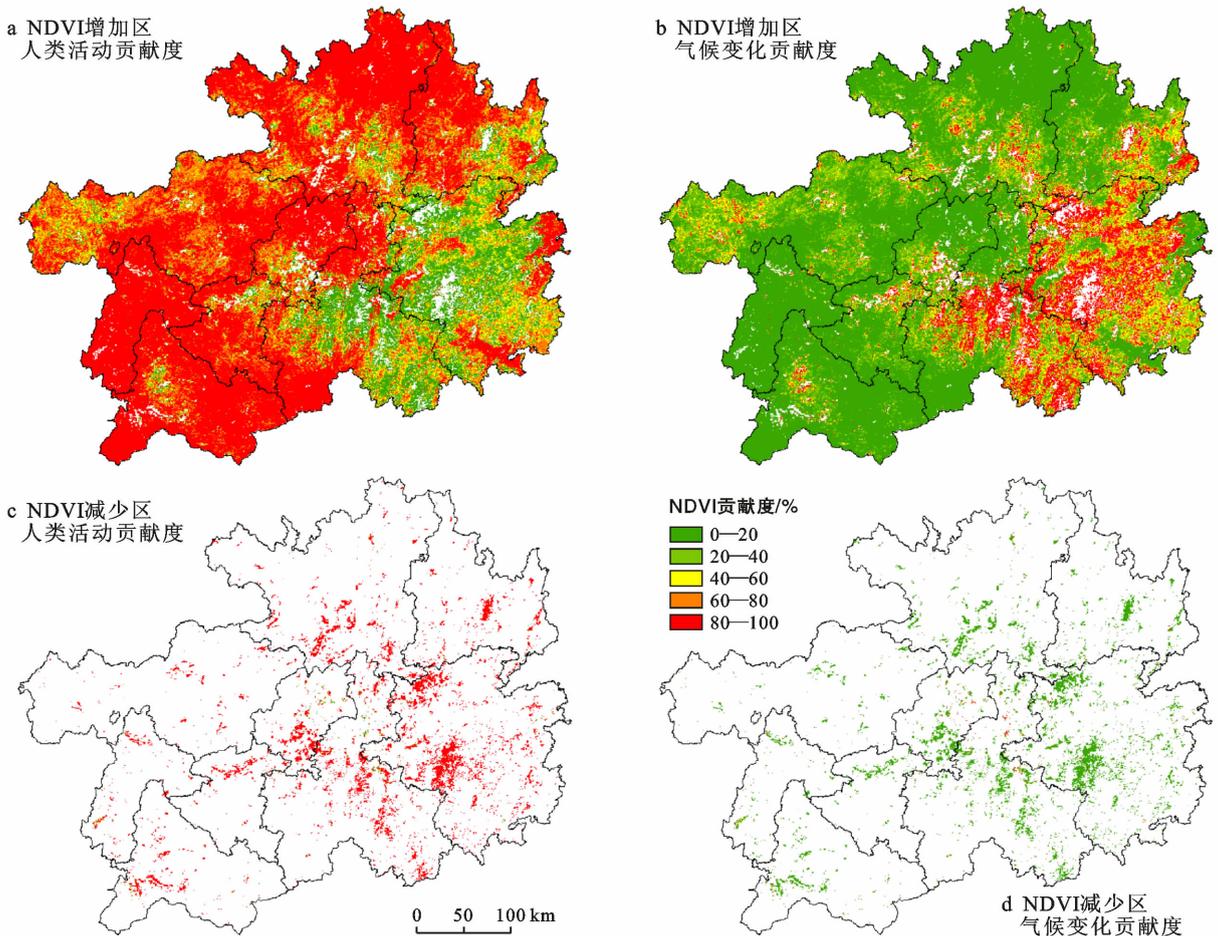


图 7 2001—2018 年贵州省人类活动和气候变化对 NDVI 贡献度空间分布

由于贵州省总体植被退化面积较小,且人类活动对其影响大,所以气候和人类活动对植被覆盖减少区域分异无明显规律,多集中分布在中部和东南部,这主要是由于城市建设造成的植被退化。对比发现人类活动对植被覆盖变化的影响强于气候作用。

3 讨论与结论

3.1 讨论

贵州省 2001—2018 年植被覆盖呈现出“中部西北部低,东南部高”的空间格局,与张继^[31]的研究结果一致。植被覆盖受到土壤、岩性和海拔的影响:非喀斯特地区以碎屑岩为主,且处于较低海拔,有利于植被生长;喀斯特地区多以石灰岩为主,易发生水土流失,成土速度慢,这些自然因素限制了植被生长。本文表明水热条件的改善有利于植被覆盖的增加,且温度对植被生长影响更大,这与郑友飞^[2]研究结果一致。同时,植被覆盖对气候的响应存在一定的滞后性,这可能与研究时间尺度和植被类型对水热响应的长短和阈值大小有关。有研究表明受地形和植被类型的差异,植被覆盖与气候的相关性在空间分布上存在差异^[22]。考虑水热条件的时空分配,因地制宜种植不同类型植被,对增强植被覆盖具有重要意义。因此,研究不同植被类型对水热条件的响应,同时考虑地形等因素的影响将作为下一步研究的内容。

贵州省植被覆盖同样受到人类活动的影响。一方面,自从 2000 年通过开展“退耕还林还草”,“石漠化综合治理”,“水土流失防治”等生态工程以来,贵州省生态恢复取得了一定的效益。根据残差趋势变化,人类活动对植被改善高值区域集中在贵州省西部和东北部,相关研究也表明这些地区植被覆盖明显增加。例如遵义市被列入“长治”工程治理流域,综合治理水土流失,植被覆盖增加,赤水河流域生态环境明显改善^[32];毕节撒拉溪、关岭花江作为典型的石漠化治理示范区,通过封山育林、退耕还林还草等水土流失面积减少,林地面积增加^[33];黔东南州作为贵州省石漠化最为集中成片的地区,进入石漠化综合防治试点县项目后,通过退耕还林、生态补偿等森林覆盖率明显上升^[34]。另一方面,城镇扩张会破坏原有植被覆盖,主要表现在黔中和黔东南地区,这与吴跃^[35]的研究一致,与贵州省的城镇面积不断扩张这一事实相符。本文对人类活动进行了定量研究,但针对不同人类活动对植被生长的作用大小并未涉及,细化人类活动对植被生长的影响值得深入探究。

3.2 结论

本文利用 MODIS-NDVI 时间序列数据,结合 31 个气象站点,利用线性趋势分析、偏相关分析、残差分

析等方法,对贵州省 2001—2018 年植被覆盖时空变化进行了分析,探究气候变化和人类活动对植被覆盖变化的影响,主要得到以下结论:

(1) 贵州省植被覆盖表现出“中部西北部低、东南部高”的空间格局,2001—2018 年 NDVI 增速为 $0.0053/a$ ($p < 0.01$)。空间上植被覆盖增加面积远大于减少面积,其中极显著增加和显著增加面积分别为 52.80% 和 16.80%,生态环境得到不断改善,尤其在生境脆弱地区。

(2) 植被覆盖与气温和降水之间存在相关性。年尺度上 NDVI 与气温和降水均以不显著正相关为主,且气温与 NDVI 的相关性高于降水,贵州省 18 a 间气候向暖湿方向发展,水热条件的改善有利于植被生长;月尺度上 NDVI 与气温和降水的相关性高于年尺度,植被覆盖对气温的响应不存在滞后性,对降水存在一个月滞后性,空间上 61.51% 的区域对降水响应存在一个月滞后性。

(3) 贵州省 2001—2018 年人类活动有利于植被覆盖的增加,增速为 $0.004/a$ ($R^2 = 0.682, p < 0.01$)。人类活动对植被生长的贡献度为 72.30%,气候贡献度为 27.70%。植被生长受到气候和人类活动的共同影响,人类活动起主导作用,植被退化区对人类活动响应更强烈。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [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] 陈效迷,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94.
- [6] 信忠保,许炯心,郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学 D 辑,2007,37(11):1504-1514.
- [7] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2016-2020.
- [8] Parmesan C, Gary Y. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 2003,421(6918):37-42.

- [9] 王强,张勃,戴声佩,等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1302-1308.
- [10] 方健梅,马国青,余新晓,等. 青海湖流域 NDVI 时空变化特征及其与气候之间的关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 105-112.
- [11] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 372-375.
- [12] Munyati C, Mboweni G. Variation in NDVI values with change in spatial resolution for semiarid savanna vegetation: A case study in Northwestern South Africa [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 34(7): 2253-2267.
- [13] Post E, Bhatt U S, Bitz C M, et al. Ecological consequences of sea-ice decline [J]. Science, 2013, 341(6145): 519-524.
- [14] 孙锐,陈少辉,苏红波. 黄土高原不同生态类型 NDVI 时空变化及其对气候变化响应[J]. 地理研究, 2020, 39(5): 1200-1214.
- [15] 郭锐,朱燕君,王介民,等. 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(2): 319-327.
- [16] 阿多,赵文吉,宫兆宁,等. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 576-592.
- [17] 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.
- [18] 邓晨晖,白红英,高山,等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438.
- [19] Wang S J, Zhang D F, Li R L. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain Areas of Guizhou province, southwest China [J]. International Review for Environmental Strategies, 2002, 3(1): 123-135.
- [20] 马士彬,安裕伦,杨广斌. 基于 GIS 的喀斯特区域不同岩性基底植被 NDVI 变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 202-206, 212.
- [21] 田鹏举,徐丹丹,丁立国,等. 基于 MODIS-NDVI 贵州省 2005—2014 年植被时空变化特征分析[J]. 贵州气象, 2017, 41(2): 8-13.
- [22] 陈海喜,钟九生,兰安军,等. 基于地形地貌因子的贵州省 NDVI 时空变化分析[J]. 贵州科学, 2019, 37(2): 36-43.
- [23] 何月,樊高峰,张小伟,等. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4352-4362.
- [24] 崔丹丹,张耀南,陈广庭. 2001—2010 年甘肃省植被覆盖的时空变化[J]. 中国沙漠, 2014, 34(4): 1161-1166.
- [25] 杨玲莉. 2000—2014 年黄河源区植被 NDVI 时空变化特征与气候变化响应分析[D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2016.
- [26] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535-554.
- [27] Geerken R, Ilaiwi M. Assessment of rangeland degradation and development of a strategy for rehabilitation [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 490-504.
- [28] 陈鹏. 1982—2015 年黄土高原植被覆盖变化中气候和人类活动的贡献率研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [29] 张学珍,戴君虎,葛全胜. 1982—2006 年中国东部春季植被变化的区域差异[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 53-61.
- [30] Xiao J, Moody A. Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982—1998 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(11): 2371-2390.
- [31] 张继,周旭,蒋啸,等. 生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1623-1633.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [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(学术版), 2019, 35(10): 136-142, 190.
- [35] 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.

(上接第 316 页)

- [18] 庄大方,刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究[J]. 自然资源学报, 1997, 12(2): 10-16.
- [19] Crowell M, Leatherman S P, Buckley L M K. Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy [J]. Journal of Coastal Research, 1991, 7(3): 839-852.
- [20] 赖冠中,陈文音. 基于自然断点法分析的城乡建设用地整理潜力分区研究: 以汕头市濠江区为例[J]. 广西城镇建设, 2019(12): 123-127.
- [21] 朱高儒,许学工. 填海造陆的环境效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 761-766.
- [22] 刘春琳,孙艺. 填海造陆对天津大沽口海洋环境影响分析研究[J]. 盐科学与化工, 2019, 48(5): 28-32.