

张明祥,廖瑶,于飞,等. 喀斯特石漠化区植被生态质量变化及其驱动因素分析——以贵州为例[J]. 中低纬山地气象,2023,47(5):36-42.

喀斯特石漠化区植被生态质量变化及其驱动因素分析 ——以贵州为例

张明祥¹,廖瑶¹,于飞²,段莹¹,田鹏举¹

(1. 贵州省生态气象和卫星遥感中心,贵州 贵阳 550002;2. 贵州省山地环境气候研究所,贵州 贵阳 550002)

摘要:基于卫星遥感数据和地面气象观测资料,通过权重加权方法构建同时反映植被覆盖和生产能力的综合生态质量指数。利用趋势分析、相关分析和残差分析等方法,对贵州喀斯特石漠化区植被生态质量变化及其驱动因素进行研究。结果表明:(1)2000—2021 年喀斯特石漠化区植被综合生态质量指数呈上升趋势,增速为 0.7 a^{-1} ,石漠化区内除省的西南部、中部和北部局地显著降低外,94.59% 的区域植被生态质量均呈显著上升;(2)植被综合生态质量指数与降水、气温的偏相关系数均以正相关性为主,其中显著正相关区分别占 17.48%、68.79%,与气候因子的复相关系数以正相关分布为主,显著正相关区占 81.79%,石漠化区内气候变化的综合作用有利于植被生态质量的提高;(3)喀斯特石漠化区植被生态质量变化受气候变化和人类活动共同驱动,两者的贡献比例分布为 18.84%、81.16%,人类活动起主导作用,近年来全省实施的生态建设工程对喀斯特石漠化区植被改善具有明显的促进作用。

关键词:植被综合生态质量指数;气候变化;人类活动;石漠化

中图分类号:Q948 **文献标识码:**A

Analysis of Vegetation Ecological Quality Change and Its Driving Factors in Karst Rocky Desertification Area: A Case on Guizhou

ZHANG Mingxiang¹, LIAO Yao¹, YU Fei², DUAN Ying¹, TIAN Pengju¹

(1. Guizhou Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Guiyang 550002, China;

2. Guizhou Institute of Mountain and Environment Climate, Guiyang 550002, China)

Abstract: Based on satellite remote sensing data and ground meteorological observations, a comprehensive ecological quality index reflecting both vegetation coverage and productivity was constructed using a weighted method. This study researched the change and driving factors of vegetation ecological quality in karst rocky desertification area by using trend analysis, correlation analysis and residual analysis. The results show that: (1) the comprehensive ecological quality of vegetation in karst rocky desertification area showed an upward trend from 2000 to 2021, with an upward rate of 0.7 a^{-1} . Except for southwestern, central and northern regions, the ecological quality of vegetation increased significantly in 94.59% of rocky desertification areas. (2) The partial correlation coefficients of vegetation ecological quality index with precipitation and air temperature were mainly positive, and the significant positive correlation areas accounted for 17.48% and 68.79% respectively. The multiple correlation coefficients with climate factors were also mainly positive, and the significant positive correlation area accounted for 81.79%, the comprehensive effect of climate change was beneficial to improve the

收稿日期:2023-02-09

第一作者简介:张明祥(1989—),男,工程师,主要从事生态气象和遥感应用研究,E-mail:1250122751@qq.com。

通讯作者简介:廖瑶(1987—),男,高工,主要从事遥感应用研究,E-mail:3229707088@qq.com。

资助项目:贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 273、黔科合基础-ZK[2021]一般 193);喀斯特石漠化植被生态质量变化对气候因子的响应;中国气象局卫星专项(FY-3(03)-AS-12.13);山地生态气象遥感应用系统;贵州省气象局科研业务登记项目(黔气科登[2022]06-01号);贵州省石漠化区植被生态质量变化及其驱动因素研究。

ecological quality of vegetation in rocky desertification area. (3) The change of vegetation ecological quality in karst rocky desertification area was driven by both climate change and human activities, which contributed 18.84% and 81.16% respectively. Human activities play a dominant role, and ecological construction projects implemented in the province in recent years have significantly promoted vegetation improvement in the karst rocky desertification area.

Key words: comprehensive ecological quality index of vegetation; climate change; human activities; rocky desertification

0 引言

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,对区域的能量循环、气候调节以及水土保持起着枢纽作用,由于对其所处的环境变化十分敏感,因此也被认为是生态环境变化的重要指示器^[1]。植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)能直接反映出植物群落在自然环境条件下的生产能力,是衡量植被固碳能力的关键指标^[2-3]。植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)量化了植被的茂密程度,反映植被的生长态势,是描述植被生态系统的重要基础数据^[4]。目前植被 NPP 和 FVC 已广泛应用于区域植被变化监测与研究之中^[5],但两者只能反映陆地生态系统功能或植被生态质量的一个方面,即生产能力或覆盖能力,而基于植被 NPP 和 FVC 构建的植被综合生态质量指数(下文称植被综合指数),则可较好地反映区域的植被生产能力和覆盖能力^[6]。

国内外学者从不同时空尺度上对植被变化及其影响因素进行探讨,气候变化和人类活动被认为是主要影响因素。曲学斌等^[7]研究表明呼伦贝尔地区生长季植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)与降水普遍呈正相关。是导致1981—1999年北半球中高纬度地区植被活动增强的主要原因。金凯等^[8]认为气候变化和人类活动的共同影响造成了中国植被指数(NDVI)的快速增加和空间差异。刘海等^[9]分析表明气候因素是黄河流域植被变化的主导因素,而人类活动的影响程度在逐渐加深。我国西南地区是世界三大喀斯特地貌连片发育带,地形复杂多变,喀斯特地区的植被变化向来是众多学者关注的热点。徐勇等^[10]研究显示气候变化和人类活动对我国西南地区 NDVI 上升均以促进作用为主,且对于广西丘陵植被生长的促进作用强于其他地貌单元。马炳鑫等^[11]研究指出气候变化对滇黔桂岩溶地区植被 NPP 的影响有明显的空间异质性,不同地带植被 NPP 对气候变化的响应程度相差较大;马士彬等^[12]分析表明在人

类活动强度较高区域(如城镇周边),植被变化受人为作用更加明显,但当人类活动或干扰较少时,气候变化限制植被的变化趋势。盛叶子等^[13]研究认为贵州省农业活动在人类活动的负面影响中有重要作用,城镇化与经济发展对生态环境具有双面影响。肖建勇等^[14]研究发现我国南方喀斯特地区 NDVI 的空间分布受海拔的影响最大,其次是温度、降雨等。

贵州省是我国石漠化土地面积最大、类型最多、程度最深、危害最严重的省份^[15],石漠化一度成为全省最为紧迫的生态环境问题。关于石漠化区植被变化的研究虽然取得一些成果^[16-18],但定量分析植被变化驱动因子的研究还较少。本文采用现有的植被综合指数^[6]来表征植被生态质量,通过对喀斯特石漠化区植被生态质量变化及其驱动因素的定量研究,加强对植被变化与气候变化和人类活动之间相互关系的理解,为石漠化区的综合治理及生态建设提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

贵州地处云贵高原,境内地势西高东低,平均海拔在1100 m左右。属亚热带高原季风气候,受大气环流及地形影响,天气气候在垂直方向差异较大,立体气候明显。省内的岩溶地貌发育非常典型,分布范围广泛,形态类型齐全,是我国西南喀斯特地貌集中成片的中心片区^[18]。

1.2 研究数据

植被生态参数(FVC、NPP)来源于国家气象中心,分别由混合像元分解法^[6]和光能利用率^[19-20]计算模型得到,空间分辨率为1 km × 1 km,时间段为2000—2021年。气象数据来自贵州省84个气象台站,包括同时段的平均气温和降水量等。基于GIS技术将气象资料插值成与生态参数相同空间分辨率的栅格数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 植被综合生态质量指数估算 在不考虑植

被多样性的情况下,利用植被 NPP 和 FVC,采用权重加权的方法构建植被综合指数^[6],计算公式如下:

$$Q = \left(f_1 \times FVC + f_2 \times \frac{NPP}{NPP_m}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中, Q 为年植被综合指数; FVC 、 NPP 分别为年植被覆盖度、植被净初级生产力, f_1 、 f_2 为两者相应的权重系数(由植被类型和区域来确定,取 0.5); NPP_m 为 2000—2021 年喀斯特石漠化区植被 NPP 中的最大值。 f_1 和 f_2 之和为 1。

1.3.2 趋势分析 利用线性回归来分析植生态质量变化趋势^[8],计算公式如下:

$$Slope = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Q_i\right) \left(\sum_{i=1}^n t_i\right)}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i\right)^2} \quad (2)$$

式中, $Slope$ 为植被生态质量变化趋势, $Slope > 0$ 表示植被生态质量呈增加趋势,反之为减少; n 为总年数; t_i 为第 i 年的年份, Q_i 为第 i 年的植被综合指数。计算逐个像元的 $Slope$,并进行 F 检验。

1.3.3 相关分析 偏相关分析在控制其他变量的线性影响下,分析两变量之间的相关性,该方法已被广泛使用^[21],计算公式如下:

$$R_{x_1, x_2, x_3} = \frac{R_{x_1, x_2} - R_{x_1, x_3} \times R_{x_2, x_3}}{\sqrt{(1 - R_{x_1, x_3}^2) \times (1 - R_{x_2, x_3}^2)}} \quad (3)$$

式中, R_{x_1, x_2, x_3} 为控制变量 x_3 ,变量 x_1 和 x_2 的偏相关系数; R_{x_1, x_2} 、 R_{x_1, x_3} 、 R_{x_2, x_3} 分别为变量 x_1 与 x_2 、 x_1 与 x_3 、 x_2 与 x_3 的相关系数。

复相关分析综合考虑多因子的协同作用,用来衡量一个变量 y (预报量)与多个变量($x_1, x_2, \dots$,

x_p)之间的线性关系^[22],因此复相关系数反映了预报量 y 与估计量 $\hat{y}$ 之间的线性相关程度。计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (4)$$

式中, $\bar{y}$ 为变量 y 多年平均值, $\hat{y}$ 为变量 y 的估计(根据多元线性回归方程确定), n 为总年数。对偏相关系数和复相关系数采用 t 检验法进行显著性检验。

1.3.4 残差分析 为定量分析气候变化和人类活动对植被生态质量变化的影响,基于气候因子(降水量和气温),建立植被综合指数(预报量)残差模型;根据历年气候资料,计算预测值(Q_{pre});最后计算植被综合指数原值与预测值之差(Q_{res}),其中 Q_{pre} 、 Q_{res} 分别代表气候变化、人类活动对植被生态质量变化的影响,依次对逐个像元进行计算^[9,18]。公式为:

$$Q_{res} = Q - Q_{pre} \quad (5)$$

$$Q_{pre} = \alpha \times t + \beta \times P + \gamma \quad (6)$$

式中, Q 为植被综合指数原值; P 、 t 分别为插值后的年降水量和平均气温; α 、 β 、 γ 为模型参数。

1.3.5 影响划分 根据计算得到的 Q_{pre} 和 Q_{res} 趋势率($Slope_{pre}$ 和 $Slope_{res}$),表示气候变化和人类活动对石漠化区植被生态质量变化的影响,当 $Slope > 0$,表示促进作用;反之为抑制作用。石漠化区植被生态质量变化的驱动因素影响按照表 1 进行区分,同时计算气候变化和人类活动的相对贡献率^[8-9,23]。

表 1 气候变化和人类活动对植被生态质量变化的影响作用划分

Tab. 1 Influence division of climate change and human activities vegetation ecological quality change

$Slope$	$Slope_{pre}$	$Slope_{res}$	气候变化贡献率	人类活动贡献率	备注
> 0	> 0	> 0	$\frac{ Slope_{pre} }{ Slope_{pre} + Slope_{res} }$	$\frac{ Slope_{res} }{ Slope_{pre} + Slope_{res} }$	气候变化和人类活动共同促进植被改善
	> 0	< 0	100%	0	气候变化导致植被改善
	< 0	> 0	0	100%	人类活动导致植被改善
< 0	< 0	< 0	$\frac{ Slope_{pre} }{ Slope_{pre} + Slope_{res} }$	$\frac{ Slope_{res} }{ Slope_{pre} + Slope_{res} }$	气候变化和人类活动共同促进植被退化
	< 0	> 0	100%	0	气候变化导致植被退化
	> 0	< 0	0	100%	人类活动导致植被退化

2 结果与分析

2.1 植被生态质量时空变化

根据植被综合指数的年际变化(图 1),2000—

2021 年石漠化区植被生态质量整体呈上升趋势,增速为 $0.7 a^{-1}$ 。最高值出现在 2021 年,为 70.9;最低值出现在 2000 年,为 54.6。从空间分布来看(图 2a),石漠化区内植被综合指数的平均值可达 62.3

(表 2),并且南部区域相对高。从各市州来看,黔东南州植被综合指数最高,达到 65.6;黔西南州次之,为 62.8;毕节市最低,为 59.4。

图 2b 为 2000—2021 年喀斯特石漠化区植被综合指数变化趋势的空间分布。由图可见,98.46% 的地区均呈上升趋势,其中显著上升的区域占 94.59% (显著水平 $\alpha = 0.05$)。而石漠化区内植被综合指数呈下降趋势的地区占比很小(1.54%),其中显著下降的区域仅占 0.56%,主要出现在省的西南部、中部和北部。具体而言,石漠化区以毕节地区上升最为显著,达到 0.78 a^{-1} ;其次是安顺市,为 0.76 a^{-1} ;黔东南州最小,为 0.52 a^{-1} (表 2)。后文中植被综合指数变化趋势的显著上升、下降区也称为植被改善、退化区。

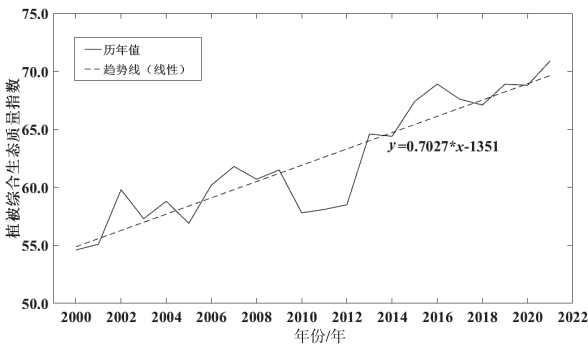


图 1 2000—2021 年贵州喀斯特石漠化区域植被综合指数的年际变化

Fig. 1 Interannual changes of vegetation comprehensive index in karst rocky desertification area of Guizhou from 2000 to 2021

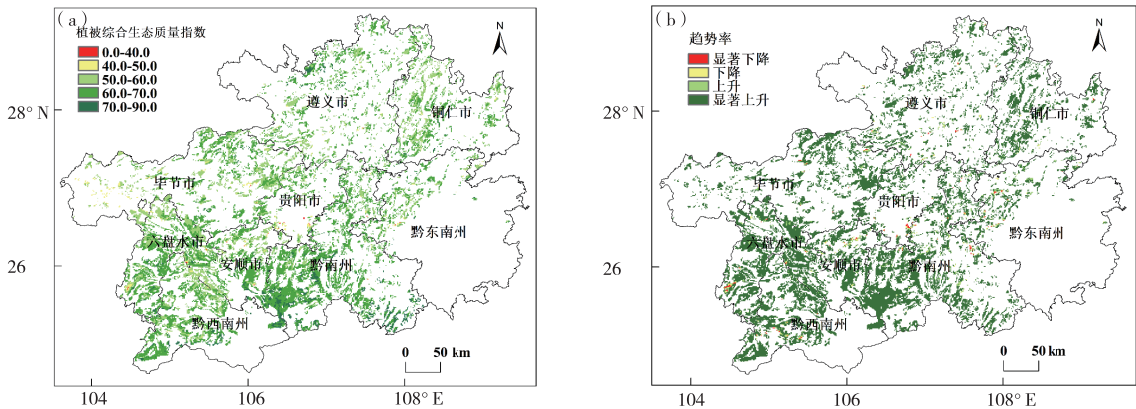


图 2 2000—2021 年贵州喀斯特石漠化区植被综合指数平均值(a)、变化趋势(b)的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of mean vegetation comprehensive index(a) and variation trend (b) in karst rocky desertification area of Guizhou from 2000 to 2021

表 2 贵州喀斯特石漠化区植被综合指数平均值和变化趋势										
Tab. 2	Average value of vegetation comprehensive index in karst rocky desertification area of Guizhou from 2000 to 2021									
	安顺市	毕节市	贵阳市	六盘水市	黔东南州	黔南州	黔西南州	铜仁市	遵义市	全省
2000—2021 年平均值	62.6	59.4	60.2	61.7	61.9	65.6	62.8	60.6	61.6	62.3
趋势率/ a^{-1}	0.76	0.78	0.65	0.73	0.52	0.67	0.73	0.69	0.66	0.70

整体来看,2000—2021 年石漠化区内植被生态质量总体呈明显提升趋势,近 5 a 的植被生态质量有所起伏,但仍然处于历史较高水平。可见,近年来贵州省石漠化区植被生态质量提升明显,生态建设工程如“恢复林草植被”等举措取得显著成效。

2.2 驱动因素分析

2.2.1 偏相关分析 从植被综合指数与降水量偏相关系数的空间分布可以看出(图 3a),石漠化区内主要以正相关性为主,相关系数分布在 $-0.61 \sim 0.87$ 之间,其中 17.48% 的区域为显著正相关,16.09% 为极显著正相关,主要出现在省的西北部、

东部、南部和北部;对比而言,出现显著负相关的地区则占很小比例(0.06%),主要集中在省的西部、中北部局地。在植被综合指数与气温的偏相关系数分布中(图 3b),石漠化区内以正相关系数分布为主,相关系数在 $-0.67 \sim 0.92$ 之间,68.79% 的地区具有显著正相关性(其中 24.27% 区域为显著相关;44.52% 区域为极显著相关),主要分布在省的西北部、西部、南部以及中东部。负相关区域占比则相对很小(其中显著负相关区占比为 0.05%),主要出现在省的西部、中部和东北部局地。

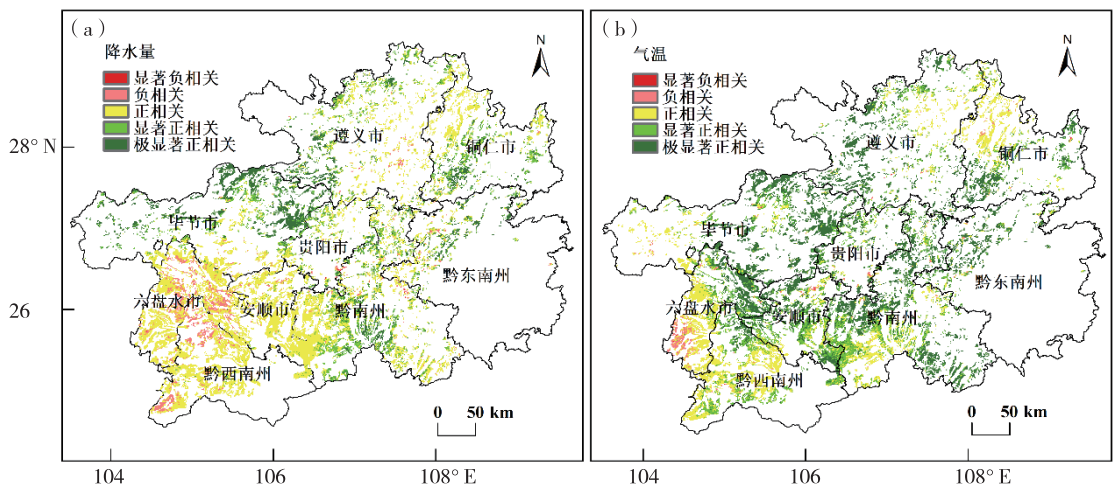


图 3 2000—2021 年贵州喀斯特石漠化区植被综合指数与降水量(a)、气温(b)的偏相关系数分布(显著水平 $\alpha=0.05, 0.01$)
Fig. 3 Distribution of partial correlation coefficients between vegetation comprehensive index and precipitation
(a) and air temperature (b) in karst rocky desertification area of Guizhou from 2000 to 2021

2.2.2 复相关分析 为分析气候变化对植被生态质量变化的综合作用,对植被综合指数与气候因子进行复相关分析。图 4 为 2000—2021 年喀斯特石漠化区植被综合指数与同期降水量、气温的复相关系数分布。由图可见,复相关系数在 $-0.56 \sim 0.90$ 之间,以正相关性分布为主,表明气候变化的综合作用有利于植被生态质量的提高。81.79% 的地区均表现为显著正相关(其中显著正相关区占 21.98%,极显著正相关区占 59.81%),覆盖全省大部分石漠化区。对比而言,显著负相关系数的范围则很小,零散分布在省的西南部、中部地区。

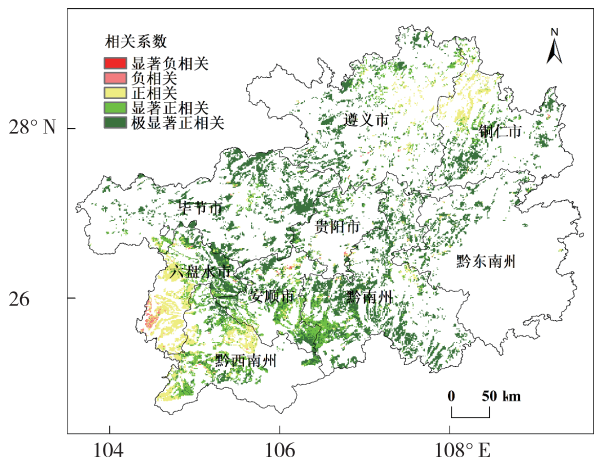


图 4 2000—2021 年贵州喀斯特石漠化区植被综合指数与气候因子的复相关系数分布(显著水平 $\alpha=0.05, 0.01$)
Fig. 4 Distribution of complex correlation coefficients between vegetation comprehensive index and climatic factors in karst rocky desertification area of Guizhou from 2000 to 2021

2.2.3 植被生态质量变化驱动因素分析 由气候

变化和人类活动影响下植被综合指数变化趋势的空间分布来看(图 5),97.19% 的地区为上升趋势,其中显著上升区占 52.78%(显著水平 $\alpha=0.05$),主要集中在省的南部、东部、西北部和北部边缘,气候变化表现促进作用(图 5a);气候变化影响下植被综合指数呈下降趋势的区域则相对较小(其中显著下降区仅占 0.02%),零星出现在省的西南部和南部,气候变化表现抑制作用。从人类活动影响下植被综合指数变化趋势的分布来看(图 5b),97.72% 的地区呈上升趋势,其中显著上升区占 95.61%,基本覆盖全省石漠化区,人类活动表现促进作用;而人类活动表现抑制作用(植被综合指数呈下降趋势)的地区相对很小(2.28%),其中显著下降的地区占 1.36%,零散分布在省的中东部、西部和北部。具体而言(表 3),气候变化影响下植被综合指数的变化趋势以黔东南州最高(0.21 a^{-1});其次为毕节市(0.20 a^{-1});最低为六盘水市(0.07 a^{-1})。而人类活动影响下植被综合指数的变化趋势以六盘水市最高(0.66 a^{-1});其次为安顺市(0.65 a^{-1});最低为黔东南州(0.31 a^{-1})。整体上,气候变化和人类活动对植被综合指数变化的贡献比例分别为 18.84%、81.16%。可见气候变化和人类活动的共同作用,促进或抑制了喀斯特石漠化区植被生态质量的变化。

由前面的结果,石漠化区内植被改善的地区可达 94.59%,植被退化的区域则相对很小,下面主要对植被改善区进行分析。从贵州喀斯特石漠化区植被改善贡献比例的空间分布来看(图 6),97.56% 的地区气候变化对植被改善表现为促进作用,几乎

覆盖石漠化区内的整个植被改善区域(图 6a);而 2.44% 的区域气候变化表现为抑制作用,主要出现在省的西南部、南部和东北部局地。从人类活动对石漠化区植被改善的贡献比例来看(图 6b),人类活

动均体现为促进作用。整体来说,对于石漠化区内的植被改善,气候变化、人类活动平均贡献比例分别为 21.24%、78.76%。可见,2000 年以来人类活动为石漠化区植被改善的主导因素。

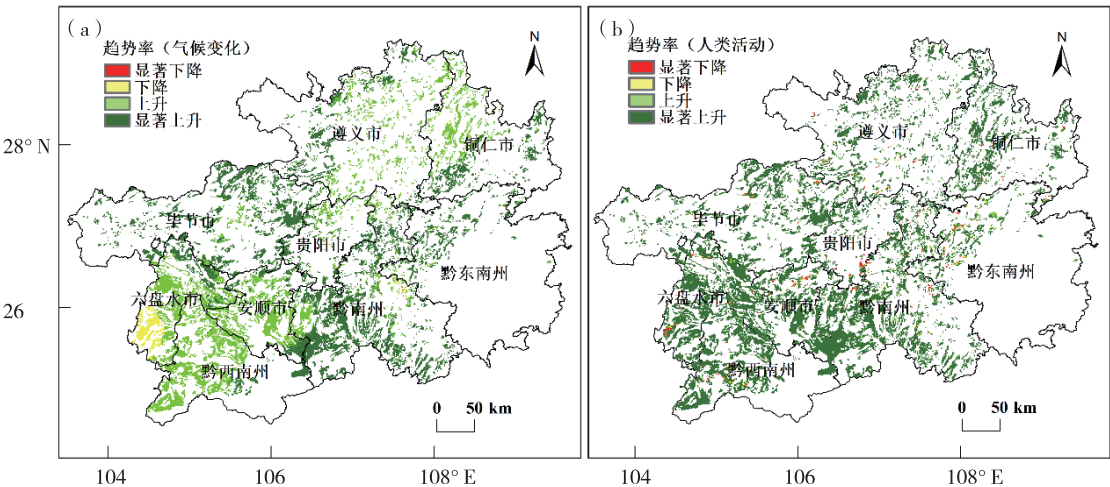


图 5 气候变化(a)和人类活动(b)影响下贵州喀斯特石漠化区植被综合指数变化趋势的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of vegetation comprehensive index variation trend affected by climate change (a) and human activities (b) in karst rocky desertification area of Guizhou

表 3 气候变化和人类活动影响下贵州喀斯特石漠化区植被综合指数变化趋势统计情况
Tab. 3 Statistics of vegetation comprehensive index variation trend affected by climate change and human activities in karst rocky desertification areas of Guizhou

趋势率/a ⁻¹	安顺市	毕节市	贵阳市	六盘水市	黔东南州	黔南州	黔西南州	铜仁市	遵义市	全省
气候变化影响	0.12	0.20	0.15	0.07	0.21	0.19	0.09	0.12	0.12	0.13
人类活动影响	0.65	0.57	0.50	0.66	0.31	0.47	0.64	0.57	0.54	0.56

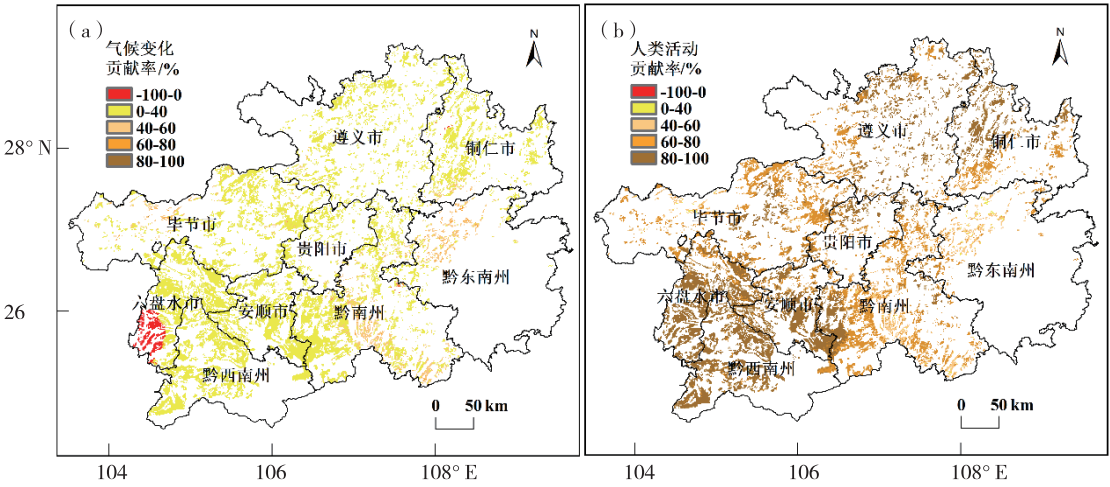


图 6 气候变化(a)和人类活动(b)对贵州喀斯特石漠化区植被改善贡献比例的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of contribution of climate change (a) and human activities (b) to vegetation improvement in karst rocky desertification area of Guizhou

3 结论与讨论

2000 年以来贵州喀斯特石漠化区植被综合指数呈上升趋势,增速为 0.7 a⁻¹。植被综合指数的平

均值空间分布具有异质性,其中南部地区相对较高,而北部、西北部相对较低,从市州来看,以黔南州最高,为 65.6;最低为毕节市(59.4)。植被综合指数与降水量、气温的偏相关系数均以正相关分布

为主,与降水量的偏相关中,17.5%的区域为显著正相关。与气温的显著正相关区占 68.8%。与气候因子的复相关以正相关性为主,81.8%的区域为显著正相关,气候变化的综合作用有利于植被生态质量的提高。石漠化区的植被综合指数受气候变化和人类活动共同影响,两者的贡献比例分别为 18.84%、81.16%。对于石漠化区内的植被改善,人类活动平均贡献比例可达 78.76%,明显高于气候变化(21.24%),可见人类活动是促进植被改善的主导因素。

贵州喀斯特石漠化区内的植被综合指数在 2010—2012 年处于明显低谷,这与 2009—2010 年秋、冬、春季持续干旱以及 2011 年特大夏秋连旱有关^[24-25]。由于土壤水分失衡,植物的光合作用受到影响,加之植被生长对气候变化的响应存在滞后效应^[26],导致植被综合指数下降。本文的研究结果显示人类活动对于石漠化区植被生态质量的提高主要表现为正贡献,这与张继等^[17]指出贵州高原生态建设工程区植被改善最为明显的结论一致。值得注意的是,人类活动也会对植被变化造成负面影响,如城市化进程过快、不合理建设使自然保护地遭到破坏等^[27]。贵州喀斯特地区的自然因素和人地矛盾依然存在,因此坚持长期的“绿色发展”举措尤为关键^[16]。

本文利用的植被综合指数存在一定局限,除了生产和覆盖能力,区域的植被生态质量还涵盖物质和能量的生物化学、水热循环等方面^[28]。卫星遥感数据容易受到云量的影响对结果带来一定的误差,对分析结果开展地面验证有待于进一步的探索。此外,气候因子对植被生态质量变化的影响机制机理仍需更加深入地研究。

参考文献

- [1] 周广胜,张新时. 植被对于气候的反馈作用[J]. 植物学报,1996,38(1):1-7.
- [2] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [3] 张雪萍. 生态学原理[M]. 北京:科学出版社,2011,5:122-123.
- [4] 生态环境部. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估(HJ1172—2021)[S]. 北京:生态环境部自然生态保护司,2014.
- [5] 田鹏举,黄林峰. 贵州植被生态气象遥感监测评估[M]. 贵阳:贵州科技出版社,2021:23-26.
- [6] 钱拴,延昊,吴门新,等. 植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J]. 生态学报,2020,40(18):6573-6583.
- [7] 曲学斌,王彦平,高绍鑫,等. 2000—2020 年呼伦贝尔地区归一化植被指数时空变化及其对气候的响应[J]. 气象与环境学报,2022,38(5):57-63.
- [8] 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.
- [9] 刘海,刘凤,郑粮,等. 气候变化和人类活动对黄河流域植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):143-151.
- [10] 徐勇,黄雯婷,窦世卿,等. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. 环境科学,2022,43(6):3230-3240.
- [11] 马炳鑫,婧娟利,徐勇,等. 2000—2019 年滇黔桂喀斯特区植被 NPP 时空变化及与气候变化的关系研究[J]. 生态环境学报,2021,30(12):2285-2293.
- [12] 马士彬,安裕伦,杨广斌,等. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. 生态环境学报,2016,25(7):1106-1114.
- [13] 盛叶子,曾蒙秀,林德根,等. 2000—2014 年人类活动对贵州省植被净初级生产力的影响[J]. 中国喀斯特,2020,39(1):62-70.
- [14] 肖建勇,王世杰,白晓永,等. 喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J]. 生态学报,2018,38(24):8799-8812.
- [15] 贵州省林业局. 贵州省喀斯特地区石漠化状况公报[R]. 贵阳:贵州省林业局,2017:1-14.
- [16] 田鹏举,吴仕军,徐丹丹,等. 贵州喀斯特石漠化植被时空变化特征研究[J]. 贵州气象,2017,41(2):8-13.
- [17] 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.
- [18] 张明祥,谷晓平,廖留峰,等. 气候变化和人类活动对贵州省石漠化区植被覆盖变化的影响[J]. 地球与环境,2023,51(1):76-86.
- [19] 黄林峰,田鹏举,帅士章,等. 2000—2016 年赤水河流域植被生态质量变化分析[J]. 中低纬山地气象,2018,42(5):20-24.
- [20] 张明祥,田鹏举,谷晓平,等. 贵州乌江流域植被 NPP 的时空分布及其对气候变化的响应[J]. 中低纬山地气象,2022,46(4):34-39.
- [21] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等. 黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J]. 中国环境科学,2021,41(8):3832-3841.
- [22] 黄嘉佑. 气候统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2004:44-46.
- [23] 张心茹,曹茜,季舒平,等. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响[J]. 环境科学学报,2022,42(1):56-69.
- [24] 池再香,杜正静,陈忠明,等. 2009—2010 年贵州秋、冬、春季干旱气象要素与环流特征分析[J]. 高原气象,2012,31(1):176-184.
- [25] 王兴菊,白慧,周文钰,等. 贵州省 2011 年与 2013 年 7—8 月干旱对比分析及对农业的影响[J]. 天津农业科学,2014,20(11):118-124.
- [26] 李丽丽,王大为,韩涛. 2000—2015 年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. 中国沙漠,2018,38(5):1108-1118.
- [27] PIAO S, YIN G, TAN J. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years[J]. Global Biology, 2015,21(4):1601-1609.
- [28] 常杰,葛滢. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2010:47-52.