

气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化相对作用

徐 勇^{1,2}, 黄雯婷², 卢梦缘², 欧昱贤², 张占奕², 李明杰², 郭振东², 马瑞雪²

(1. 桂林理工大学 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541006

2. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘 要:定量厘定气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化的相对作用, 可为揭示喀斯特地貌区植被 NDVI 时空演变特征及其驱动机制提供依据。以 MODIS NDVI、SRTM DEM、基于站点的气象数据为数据源, 建立 Theil-Sen Median 斜率估计、残差分析、相对作用分析等多数学模型, 分析了 2001—2019 年西南喀斯特地貌区气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的相对作用, 揭示植被 NDVI 与降水、气温、相对湿度和日照时数的相关性。结果表明: 研究时段内西南喀斯特地貌区植被 NDVI 总体上呈上升态势, 植被 NDVI 变化趋势呈现明显的空间异质性, 植被 NDVI 增加的区域面积远大于减少的区域面积; 研究区植被改善和植被退化均受人类活动的主导。研究时段内西南喀斯特地貌区植被 NDVI 与降水、气温以及相对湿度整体呈正相关, 相关程度依次递减, 与日照时数呈负相关。综上所述可知, 研究时段内西南喀斯特地貌区植被覆盖呈改善态势, 人类活动可被认为是影响西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化的主要驱动力, 植被 NDVI 与降水、气温、相对湿度和日照时数的相关系数在空间上呈现明显的异质性。

关键词:西南喀斯特地貌区; 植被 NDVI; 气候变化; 人类活动; 相对作用

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)03-0292-08

Vegetation Cover Change and the Relative Role of Climate Change and Human Activities in Southwest Karst Areas

XU Yong^{1,2}, HUANG Wenting², LU Mengyuan², OU Yuxian²,

ZHANG Zhanyi², LI Mingjie², GUO Zhendong², MA Ruixue²

(1. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics,

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. College of Geomatics

and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China)

Abstract: Studying on vegetation cover change and the relative role of climate change and human activities can provide a better understanding for spatiotemporal vegetation variation and the driving mechanism of climate change and human activities to vegetation variation in southwest karst areas, China. Based on the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) normalized difference vegetation index (NDVI) time series, digital elevation model data (DEM), in situ climate data using Theil-Sen Median analysis, Mann-Kendall significance test, relative analysis, and so on, we analyzed the relative role of climate change and human activities on vegetation variation, explored the correlation coefficients between NDVI and climate variables in southwest karst areas, China from 2001 to 2019. The results showed that from 2001 to 2019, the vegetation cover presented an upward trend in southwest karst areas. The spatial pattern of vegetation variation exhibited obvious spatial heterogeneity and the areas with vegetation improvement were greater than the areas with vegetation degradation. Furthermore, the relative role of human activities on vegetation improvement and

收稿日期: 2021-04-16

修回日期: 2021-05-22

资助项目: 广西自然科学基金项目“气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被覆盖变化相对作用研究”(2020GXNSFBA297160); 广西空间信息与测绘重点实验室资助课题(191851016); 桂林理工大学科研启动资助项目(GUTQDJJ2019172); 2021 年大学生创新创业训练计划项目(202110596006, 202110596785)

第一作者: 徐勇(1988—), 男, 湖南省益阳市人, 博士, 讲师, 主要从事气候变化和植被 NDVI 反演的研究。E-mail: yongxu@glut.edu.cn

vegetation degradation was higher than the relative role of climate change on vegetation variation. The vegetation cover was positively and most significantly associated with precipitation, followed by temperature and relative humidity but negatively associated with sunshine duration in southwest karst areas from 2001 to 2019. These results indicated that both the vegetation improvement and vegetation degradation were dominated by human activities, and the correlation coefficient between NDVI and climate variables exhibited significant regional differences in southwest karst areas in the study period.

Keywords: southwest karst areas; NDVI; climate change; human activities; relative role

喀斯特地貌区作为中国四大生态环境敏感区之一,地质构造复杂、地貌类型多变,加上受区域气候和人类活动的双重作用,部分地区生态环境日益恶化,石质荒漠化已经成为制约区域经济发展和生态文明建设的重要因素^[1-3]。因此,在喀斯特地貌区开展生态环境监测及生态质量评价,对推动喀斯特地貌区的生态恢复具有重要现实意义。植被作为生物圈的重要组成部分,可以有效地反映区域的生态状况,对生态环境变化具有良好的指示作用^[4-9]。传统的植被生长监测主要为地面实测法,但该方法通常需要大量的人力物力,且易受时间空间限制,难以进行大尺度植被生长监测。20 世纪以来,得益于遥感产业的蓬勃发展,海量的遥感数据为大面积植被生长监测提供了多源数据支持,遥感监测成为全球和地区生态环境监测的重要手段之一^[10-12]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)常被用来反演植被的覆盖程度,能在不同的时间和空间尺度上反映植被状况,因而被广泛应用于植被覆盖格局时空演变特征研究及植被生长监测中^[13-18]。

近年来,已有许多国内外学者使用遥感技术在不同时空尺度上对植被覆盖动态变化及影响因素方面进行了研究,气候变化作为影响植被生长和空间分异的驱动力受到广泛关注^[19-25]。随着学者对植被覆盖动态变化及其驱动力研究的不断深入,针对西南喀斯特地貌区植被覆盖动态变化及其驱动力方面的研究也取得了一系列成果,肖建勇等^[26]研究表明喀斯特地区植被空间分异受气候变化和人类活动的影响强于非喀斯特地区,丁文荣等^[27]研究发现滇东南喀斯特地貌区植被改善受气候变化和人类活动的双重作用,且表现出较强的地域分布差异。张凯选等^[28],吕妍等^[29],也对西南喀斯特地貌区植被覆盖变化及其成因进行了分析,发现除了气候变化外,植被覆盖还受非气候因子的影响。

在已有研究中,对气候变化的影响研究较多,且主要集中于降水和气温两种气象要素对植被生长的驱动,没有考虑日照时数和相对湿度等气象因子对区

域植被生长状况的影响,在一定程度上降低了研究结果的精度;对人类活动和植被生长之间的响应机制的研究大都停留在定性描述层面,人类活动对喀斯特地貌区植被 NDVI 变化的驱动机制尚不明确,且并未定量厘定各驱动力对植被覆盖变化的影响。因此,本文基于 2001—2019 年 MODIS NDVI 时间序列、SRTM DEM 数据、降水、气温、相对湿度和日照时数时间序列,通过建立 Theil-Sen Median 斜率估计模型、Mann-Kendall 显著性检验模型、残差分析模型和相对作用分析模型等,厘清气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化的影响,进一步明晰西南喀斯特地貌区植被覆盖在气候变化和人类活动驱动下的时空演变机制,研究结果对喀斯特地貌区生态环境评估和保护、资源的合理开发和利用以及石漠化研究和防治具有重要的现实和科学意义。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南部,区域范围在 $20^{\circ}54'—34^{\circ}19'N, 97^{\circ}21'—112^{\circ}04'E$ 。在行政区划上,包含“西南三省一区一市”,即四川省、云南省、贵州省、广西壮族自治区以及重庆市,总面积为 137.63 万 km^2 。研究区内最高海拔为 6 304 m,最低海拔为一 20 m,地势起伏较大(图 1)。研究区内地貌类型复杂,从西部青藏高原向东部丘陵平原地区过渡,喀斯特地貌分布广泛。气候类型主要包括热带季风和亚热带季风气候,大部分地区冬暖夏热,年平均气温在 $-3\sim 24^{\circ}C$,年日照时数在 752.6~3 504.9 h;年均降水量在 340~2 300 mm,自东南向西北递减,雨热同季期,降水充沛,为植被的生长提供了有利条件。此外,该地区经济发展较为缓慢,是“西部大开发战略”的重要发展区域之一。

1.2 数据来源与处理

本研究采用的 NDVI 时间序列来自美国国家航空航天局发布的 MOD13A C6 产品数据集,数据的时间分辨率和空间分辨率分别为 1 月和 1km,本研究采用 2001 年 1 月至 2019 年 12 月逐月 MODIS

NDVI 时间序列,数据集不需要进行大气校正等预处理,发布的产品数据集已经消除了水、云、重气溶胶和云影等对数据带来的偏差。

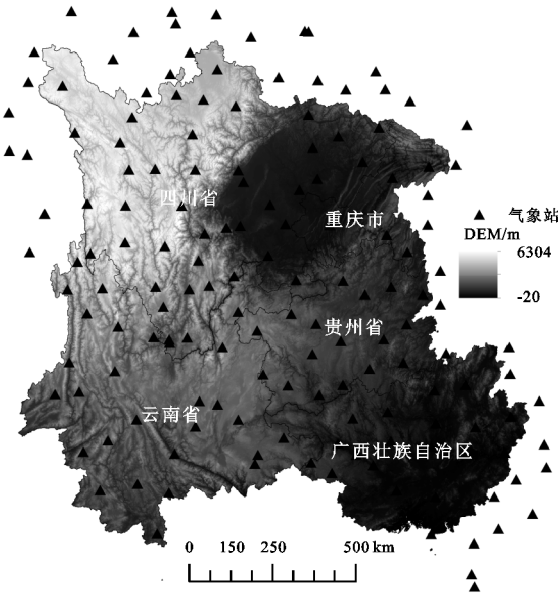


图 1 研究区高程及其气象站点空间分布

气象数据共选取了研究区及其周围 155 个气象站点的逐日气象数据。气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),数据经过严格的精度控制,质量良好。为了减少地理位置信息对气象数据插值精度的影响,选用 ANUSPLIN 插值软件引入 DEM 作为协变量对气象数据进行空间内插,DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,数据的空间分辨率为 1km,投影系统与气象因子数据集一致。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 显著性检验 Theil-Sen Median 斜率估计常用来探究某长时间序列变量随时间的变化态势。本文采用 Theil-Sen Median 斜率估计^[30]探究研究时段内西南喀斯特地貌区植被 NDVI 的变化趋势,揭示其在时间尺度上的变化特征。

Theil-Sen Median 趋势分析计算公式如下:

$$\beta_{NDVI} = \text{Median}\left(\frac{NDVI_j - NDVI_i}{j - i}\right), 1 \leq i < j \leq n$$

(1)

式中: i 和 j 代表年份; $NDVI_i$ 代表在第 i 年的植被 NDVI 值; $NDVI_j$ 代表在第 j 年的植被 NDVI 值; β_{NDVI} 代表研究时段内植被 NDVI 的变化斜率;当 $\beta_{NDVI} > 0$ 时,说明研究时段内植被 NDVI 呈上升趋势,植被覆盖有所改善,当 $\beta_{NDVI} = 0$ 时,说明研究时段内植被 NDVI 保持不变,植被覆盖较为稳定,当 $\beta_{NDVI} < 0$ 时,说明研究时段内植被 NDVI 呈下降趋势,植被覆盖有所退化。

为定性区分研究时段内植被 NDVI 变化趋势,使用 Mann-Kendall 显著性检验法进行判别^[27,30]。对于给定显著性水平 α ,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,代表植被 NDVI 时间序列在给定显著性水平 α 上变化显著,反之,则认为其在给定显著性水平 α 上变化不显著。本文定义变化斜率在给定显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下显著时,为显著变化;在 $\alpha = 0.01$ 下显著时,为极显著变化。

1.3.2 多元线性回归分析和残差分析 植被群落的时空演变受区域气候条件和人类活动强度的共同影响,本研究通过构建多元回归分析模型和残差分析模型,定量厘定气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响^[11,31]。首先,基于研究时段内植被 NDVI 观测值($NDVI_{Obs}$,下同)、降水、气温、相对湿度和日照时数时间序列,构建多元一次线性回归模型,获得单独气候变化影响的植被 NDVI 预测值($NDVI_{Pre}$,下同)时间序列;然后,基于植被 $NDVI_{Obs}$ 与植被 $NDVI_{Pre}$ 时间序列,构建残差分析模型,获得单独人类活动影响的植被 NDVI 残差值($NDVI_{Res}$,下同)时间序列;当 $NDVI_{Pre} > 0$ 时,说明气候变化对植被 NDVI 的上升起到了积极的作用;当 $NDVI_{Pre} = 0$,说明气候变化对植被 NDVI 影响甚微;当 $NDVI_{Pre} < 0$ 时,说明气候变化对植被 NDVI 的上升起到了抑制作用。同理,可得出人类活动对植被 NDVI 变化的影响。

1.3.3 相对作用分析法 本文使用相对作用分析法来定量区分气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的相对作用^[32]。主要思路为:首先,基于植被 $NDVI_{Obs}$ 时间序列,获得 2001—2019 年植被 $NDVI_{Obs}$ 的变化斜率,即 $\beta_{NDVI_{Obs}}$ 。定义 $\beta_{NDVI_{Obs}}$ 大于 0 的区域为植被改善区, $\beta_{NDVI_{Obs}}$ 小于 0 的区域为植被退化区;接下来,计算植被 $NDVI_{Pre}$ 和 $NDVI_{Res}$ 的时间序列的变化斜率即 $\beta_{NDVI_{Pre}}$ 和 $\beta_{NDVI_{Res}}$;最后,基于 $\beta_{NDVI_{Pre}}$ 和 $\beta_{NDVI_{Res}}$ 的取值区间,构建气候变化和人类活动驱动下植被 NDVI 变化的 6 种情境。具体如表 1 所示。

1.3.4 相关分析 基于相关分析法,得到研究区植被生长与气温、降水、相对湿度和日照时数的相关性,探究植被 NDVI 对各气象因子变化的响应程度。具体公式如下^[11]:

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

(7)

式中: R_{xy} 为 x 与 y 之间的相关系数,相关系数大,则代表 x 与 y 存在较强的相关性; n 表示研究时段的总年

数; i 表示第 i 年; \bar{x} 与 \bar{y} 分别为 n 年 x 和 y 的平均值。文通过计算植被 NDVI 与同期及前 1—3 月气象因子相
为揭示植被 NDVI 变化和气候变化的最大响应关系,本关系系数,然后选取 4 个相关系数中的最大值来实现。

表 1 不同情景下气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化作用大小的定量分离方法

参数	$\beta_{\text{NDVI}_{\text{Pre}}}$	$\beta_{\text{NDVI}_{\text{Res}}}$	气候变化的 相对作用[$\times 100\%$]	人类活动的 相对作用[$\times 100\%$]	说明
			$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{Pre}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{Pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{Res}} }$	$\frac{ \Delta \text{NDVI}_{\text{Res}} }{ \Delta \text{NDVI}_{\text{Pre}} + \Delta \text{NDVI}_{\text{Res}} }$	
植被改善	情境 1	>0	>0		气候变化和人类活动共同促进植被覆盖改善,以其各自 NDVI 变化量所占百分比为各自相对作用
	情境 2	>0	<0	1	气候变化综合作用导致植被覆盖改善
	情境 3	<0	>0	1	人类活动综合作用导致植被覆盖改善
植被退化	情境 1	<0	<0		气候变化和人类活动共同促进植被覆盖减少,以其各自 NDVI 变化量所占百分比为各自相对作用
	情境 2	<0	>0	1	气候变化综合作用导致植被覆盖退化
	情境 3	>0	<0	1	人类活动综合作用导致植被覆盖退化

式中: $\Delta \text{NDVI}_{\text{Pre}}$ 是 $t+1$ 时刻气候变化所造成的 NDVI_{Pre} 与 t 时刻 NDVI_{Pre} 的差值; $\Delta \text{NDVI}_{\text{Res}}$ 是 $t+1$ 时刻人类活动所造成的 NDVI_{Res} 与 t 时刻 NDVI_{Res} 的差值。

2 结果与分析

2.1 植被 NDVI 时空演变特征

由图 2 可知,研究时段内研究区植被 NDVI 年平均值在 0.757~0.802 之间,最大值出现在 2018 年,最小值出现在 2001 年。研究区植被 NDVI 整体呈现波动上升趋势,上升速率为 0.002 5/a。由上可知,近 19 a 来,西南喀斯特地貌区植被 NDVI 整体得到改善。但在 2011 年、2014 年、2016 年植被 NDVI 值出现明显下降趋势,其中以 2011 年的下降趋势最为显著。研究区在 2010 年、2013 年、2015 年均遭受了大范围且程度严重的自然灾害,其中 2010 年西南地区出现了近 50 a 来最严重的干旱^[33-34],极端天气等自然灾害的发生,会对植被活动产生负面影响,是导致西南喀斯特地貌区部分年份植被 NDVI 下降的主要原因。

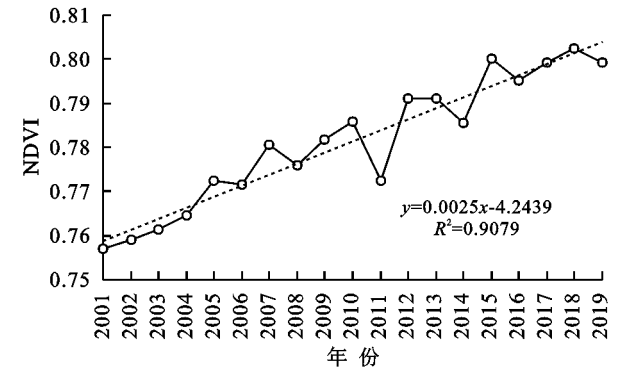


图 2 2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被 NDVI 时间变化特征

尽管西南喀斯特地貌区植被 NDVI 状况总体趋于好转且植被 NDVI 年际差异较小,但植被 NDVI 变化存在明显的空间异质性。由图 3 看出,研究时段区域内植被 NDVI 呈上升态势的区域面积大于呈下

降态势的面积,分别占研究区总面积的 86.25% 和 13.75%,其中,极显著上升($p<0.01$)的区域约占研究区总面积的 35.33%,主要分布在横断山脉以东地区,包括四川东北部、重庆东部、贵州西部和广西中西部等。极显著下降($p<0.01$)和显著下降($p<0.05$)的区域仅占研究区总面积的 1.82%,零星分布在城市中心区和旅游业发达地区。近年来,随着经济的快速发展,在城市扩张、城市基础设施建设、工业化发展和旅游资源开发的综合作用下,以上城市及其周边地区以及各旅游开发区植被覆盖呈下降趋势^[26]。

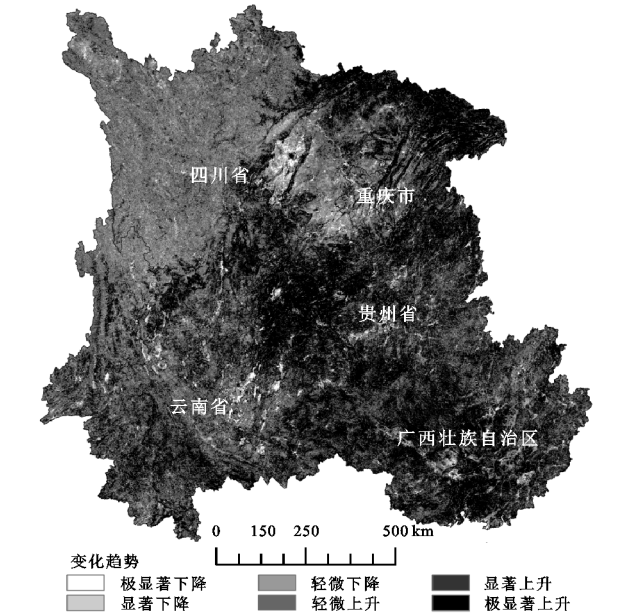


图 3 2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化趋势

2.2 植被改善区气候变化和人类活动的相对作用大小

本文中提到的植被改善区是指 $\beta_{\text{NDVI}_{\text{Obs}}} > 0$ 的区域,人类活动对研究区植被改善区的相对作用略大于气候变化,人类活动对植被改善区的相对作用平均值

为 55.13%，气候变化对植被改善区相对作用平均值为 44.87%（图 4）。2001—2019 年人类活动是研究区植被改善的主要驱动力。

以人类活动为主（相对作用大于 50%）导致植被改善的区域面积占总改善面积的 54.97%，主要分布于四川东南部、重庆南部、贵州北部和中部、广西北部 and 西南部以及云南东南部和西部；而以气候变化为主导导致植被改善的区域占总改善区域的 45.03%，主要分布在云贵川三地接壤处、广西南部、重庆大部分地区以及四川北部。从空间分布格局来看，气候变化和人类活动对研究区植被改善区的相对作用在空间上呈交错格局。植被覆盖呈极显著上升的地区同样受人类活动的主导。

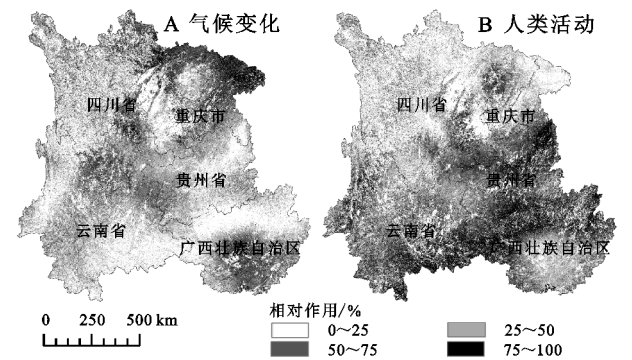


图 4 2001—2019 年西南喀斯特地貌区气候变化和人类活动在植被改善区域的相对作用

2.3 植被退化区气候变化和人类活动的相对作用大小

气候变化和人类活动对西南喀斯特地貌区大部分地区植被生长具有促进作用，但也导致局部植被活力呈下降趋势。与植被改善区相对应，植被退化区是指 $\beta_{NDVI\,Obs} < 0$ 的区域。2001—2019 年人类活动和气候变化对西南喀斯特地貌植被退化区的相对作用分别为 54.57% 和 45.43%（图 5），由此可知，人类活动是引起研究区植被退化的重要驱动力。

气候变化和人类活动共同导致研究区局部地区的植被呈退化趋势，但两者相对作用大小存在较大空间差异。以气候变化为主导导致植被退化的区域面积占总退化面积的 42.96%，主要分布于重庆与四川交汇地区、云南中部、广西东部和中部；以人类活动为主导导致植被退化的区域面积占总退化面积的 57.04%，主要分布在四川中西部、四川和重庆交界处以及贵州中部和云南中部。以人类活动为主导导致研究区植被呈退化的面积占极显著下降与显著下降面积的 50% 以上。

3 讨论

3.1 气候变化影响下植被 NDVI 时空演变特征

在区域和全球尺度上，植被生态系统时空演变特

征及空间分布格局很大程度上受到气候变化的影响。通过多元线性回归法，得到研究区植被 $NDVI_{Pre}$ 时间序列，对西南喀斯特地貌区植被 $NDVI_{Pre}$ 变化趋势作进一步分析，获得气候变化影响下植被 NDVI 空间演变特征，结果见图 6。气候变化影响下，植被 NDVI 呈退化态势的面积远小于植被呈改善态势的面积，植被呈改善态势的区域占 81.06%，其中呈显著上升和极显著上升的区域占 31.90%，主要分布在云贵川三地接壤处、广西中部和南部以及四川和重庆北部。显著下降和极显著下降的区域仅占 2.91%，零散分布于云贵川三省和重庆。

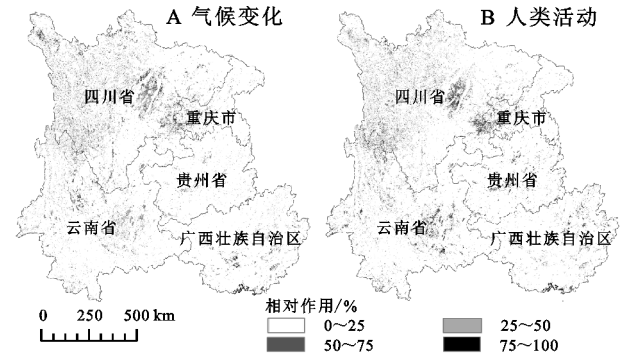


图 5 2001—2019 年西南喀斯特地貌区气候变化和人类活动在植被退化区域的相对作用

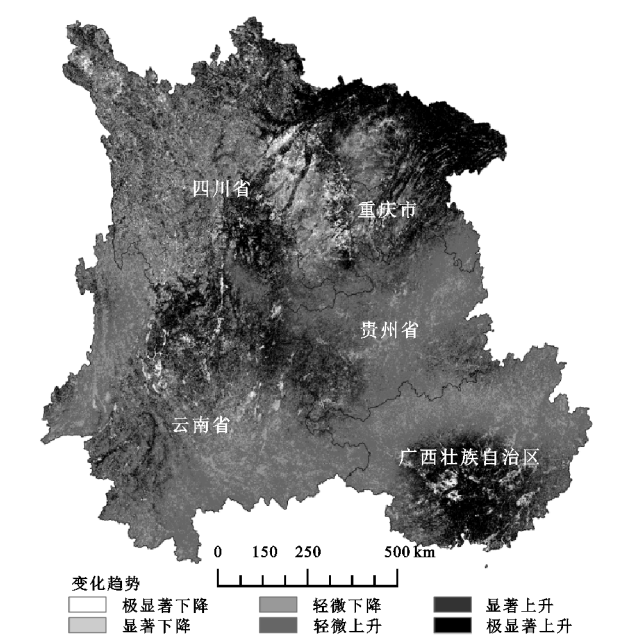


图 6 2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被 NDVI 预测值变化趋势

3.2 植被 NDVI 对气候变化的响应关系

气候变化通过多种气象因子的动态变化和相互作用影响植被的生长。本文通过分析植被 NDVI 与前 0—3 月降水、气温、相对湿度和日照时数的相关系数，然后利用绝对值最大值合成法得到两者之间的最大相关系数，以此得到植被 NDVI 对各气象因子变

化的最大响应,揭示各气象因子对植被 NDVI 变化的驱动。总体上,降水、气温和相对湿度对研究区植被生长具有正向促进作用,而日照时数对研究区植被生长具有负向抑制作用。其中,植被 NDVI 与气温、降水和相对湿度的平均最大相关系数依次降低,分别为 0.174,0.171 和 0.081,与日照时数的平均最大相关系数为-0.046。综上可知,气温、降水和相对湿度能够促进研究区植被的生长,而日照时数抑制了研究区植被的生长。

植被 NDVI 与各气象因子的相关性呈现明显的地域差异。研究区大部分地区植被生长受降水、气温和相对湿度的正向影响,与之相反,研究区大部分地区植被生长受日照时数的负向影响。超过 78% 的区域植被 NDVI 与降水呈正相关关系,其中,通过 $p < 0.05$ 显著性检验的区域占 10.51%,如图 7A 所示,主要分布在重庆北部以及四川东北部。超过 76% 的区域植被 NDVI 与气温呈正相关关系,其中,通过 $p <$

0.05 显著性检验的区域占 13.23%,如图 7B 所示,主要分布在四川北部、重庆北部、云南西南部以及云南、四川、贵州三省交界处。超过 60% 的区域植被 NDVI 与相对湿度呈正相关关系,其中,通过 $p < 0.05$ 显著性检验的区域占 9.10%,如图 7C 所示,主要分布在重庆南部、四川南部、云南南部、贵州北部和广西中南部。超过 58% 的区域植被 NDVI 与日照时数呈负相关关系(图 7D),其中,通过 $p < 0.05$ 显著性检验的区域占 3.37%,主要分布在重庆以及四川、重庆、贵州三省交界处,抑制作用自西向东呈现上升的趋势。

由相关分析结果可知,2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被 NDVI 与降水、气温以及相对湿度整体呈正相关,且与气温的相关性最强,而西南喀斯特地貌区植被 NDVI 与日照时数呈负相关。由上可知,西南喀斯特地区气候变化对植被生长既有正向促进作用,又有负向抑制作用,且影响程度呈明显的空间分异特征。

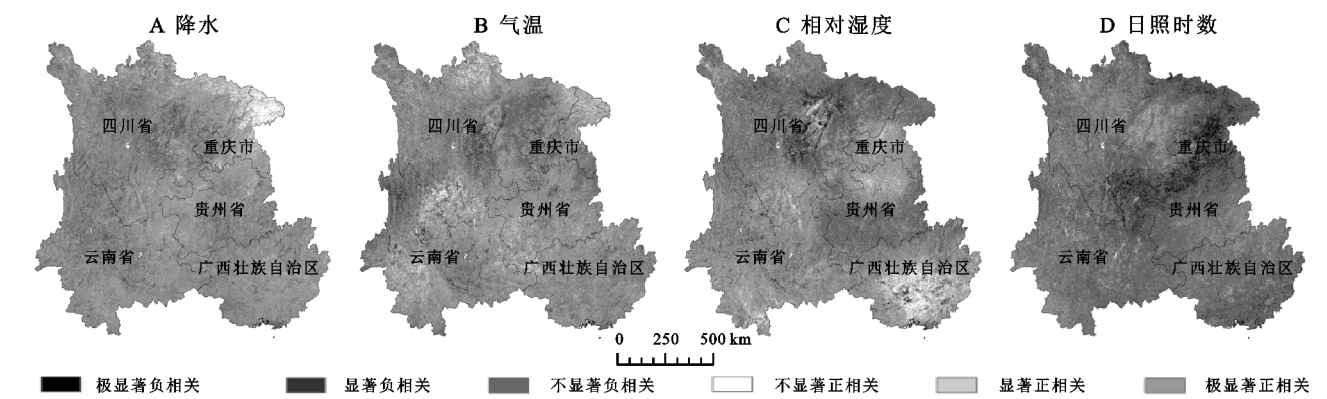


图 7 西南喀斯特地貌区植被 NDVI 与气象因子相关显著性

3.3 人类活动影响下植被 NDVI 时空演变特征

植被生长与气候变化和人类活动有着密不可分的联系。本文利用残差分析得到西南喀斯特地貌区研究时段植被 $NDVI_{Res}$, 并根据时间序列计算得到其变化趋势,得到人类活动影响下的植被变化趋势的空间差异,如图 8 所示。2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被 $NDVI_{Res}$ 的变化趋势表现出明显的空间分异性,呈现出“东南高,西北低”的分布特征。植被 $NDVI_{Res}$ 呈上升趋势和下降趋势的面积分别占 82.86% 和 17.14%。综上所述,区域植被生长受到人类活动正向促进和负向抑制的双重影响,整体上对区域植被生长的正向促进作用占主要地位。

受人类活动的影响,12.45% 的地区植被 NDVI 呈极显著上升,分布在云南东南部、重庆东南部、广西北部以及贵州大部分地区,这一定程度上得益于当地森林保护工程的实施以及自然环境的科学保护^[35-37]。在研究区

内,零散的分布着植被 NDVI 残差变化趋势小于 0 的区域,有约 0.73% 的区域呈现显著下降和极显著下降,大多数分布在城市中心地区以及其周边邻近地区。

3.4 植被 NDVI 对人类活动的响应关系

近 19 a 来,随着西南喀斯特地貌区生态保护的推进,西南喀斯特地貌区各省区植被覆盖度都有不同程度的增加,尤其是进入 21 世纪以来,国家高度重视西南石漠化的防治,把西南喀斯特地貌区的石漠化治理提升到了国家目标高度^[38],一系列生态工程的实施对植被恢复起着至关重要的作用。广西的林业工程和云南的退耕还林工程,不仅改善了区域植被覆盖,同时还大大改善了区域生物群落生存环境^[35,39];西南地区生态林业工程的实施,如天然林资源保护工程和退耕还林工程,在一定程度上增强了土地抵御灾害的能力,有效地降低了区域石漠化程度,提升了区域植被覆盖^[40]。

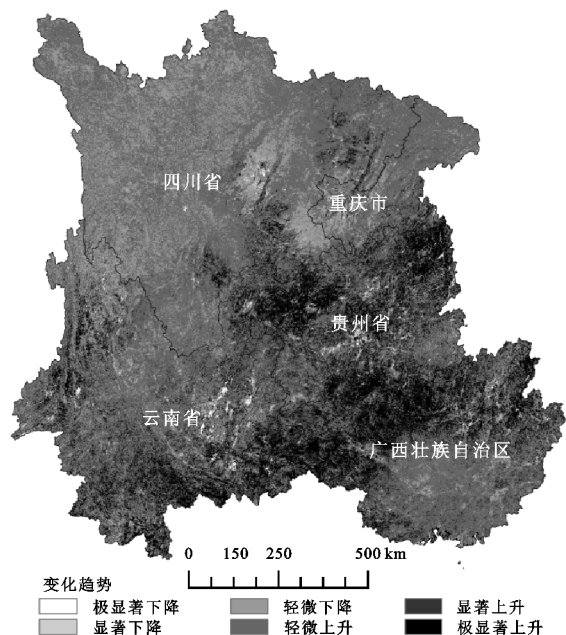


图 8 2001—2019 年西南喀斯特地貌区植被

NDVI 残差值变化趋势

与生态工程的正向促进作用相对,人类社会在快速发展中对资源的不合理利用也是影响区域植被整体覆盖状况的重要原因。例如,四川省西北部畜牧业的快速发展对当地生态环境造成了一定的破坏,致使部分地区植被严重减少^[41],同时,人口密度的不断增长和城市化进程的不断加快,也一定程度上抑制了植被群落的繁衍进程;2002—2019 年,云南省人口比重增长超过 20%,经济增长和城镇人口的不断攀升致使城镇建设用地面积不断扩大,最终导致部分地区植被覆盖呈下降趋势。综上可知,生态林业工程的实施使得植被覆盖整体呈上升态势,但人类在发展经济中的不合理开发对部分地区植被生长的抑制作用同样不可忽略。

4 结论

(1) 研究时段内西南喀斯特地貌区植被 NDVI 整体呈上升态势,且上升态势呈“东南高西北低”的分布格局。植被 NDVI 呈上升趋势的面积远大于呈下降趋势的面积,呈上升趋势的区域主要分布在研究区东南部。

(2) 西南喀斯特地貌区植被改善区和植被退化区受人类活动作用均强于气候变化,其中,人类活动对研究区植被改善和植被退化的相对作用分别为 55.13% 和 54.57%。因此,人类活动被认为是驱动西南喀斯特地貌区植被 NDVI 变化的主导因素。

(3) 植被 NDVI 和气象因子相关性呈现明显的空间异质性。气候变化对研究区植被 NDVI 变化具

有双重影响,研究区植被 NDVI 与降水、气温和相对湿度整体上呈正相关关系,而与日照时数整体上呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.
- [2] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [3] 李建明, 王志刚, 王爱娟, 等. 退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 99-108.
- [4] Chen T, De Jeu R A M, Liu Y Y, et al. Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 330-338.
- [5] Geris J, Tetzlaff D, McDonnell J J, et al. Spatial and temporal patterns of soil water storage and vegetation water use in humid northern catchments[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 486-493.
- [6] Huang S, Huang Q, Leng G, et al. Variations in annual water-energy balance and their correlations with vegetation and soil moisture dynamics: A case study in the Wei River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 515-525.
- [7] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [8] Peng S, Piao S, Ciais P, et al. Asymmetric effects of daytime and night-time warming on Northern Hemisphere vegetation[J]. Nature, 2013, 501(7465): 88-92.
- [9] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [10] Braswell B, Schimel D S, Linder E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability[J]. Science, 1997, 278(5339): 870-873.
- [11] 马瑞雪. 西南地区植被覆盖时空演变特征及其驱动力分析[D]. 桂林理工大学, 2021.
- [12] 徐勇, 奚砚涛, 刘欣婷. 2000—2013 年江苏省植被覆盖度时空变化特征[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 437-444.
- [13] 刘明星, 李长春, 李振海, 等. 基于高光谱遥感与 SAFY 模型的冬小麦地上生物量估算[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 192-202, 220.
- [14] 孙华林, 耿石英, 王小燕, 等. 晚播条件下基于高光谱的小麦叶面积指数估算方法[J]. 光谱学与光谱分析,

- 2019,39(4):1199-1206.
- [15] Chu H, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015[J]. *Sci Total Environ*, 2019,650:2051-2062.
- [16] Gazol A, Camarero J J, Vicente-Serrano S M, et al. Forest resilience to drought varies across biomes[J]. *Global Change Biology*, 2018,24(5):2143-2158.
- [17] Peng J, Li Y, Tian L, et al. Vegetation Dynamics and Associated Driving Forces in Eastern China during 1999-2008 [J]. *Remote Sensing*, 2015,7(10):13641-13663.
- [18] Kong D, Zhang Q, Singh V P, et al. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere(1982-2013)[J]. *Global and Planetary Change*, 2017,148:1-8.
- [19] 奚砚涛,徐勇,刘欣婷.2000—2013 年江苏省不同植被类型 NDVI 时空变化特征[J].*水土保持研究*,2016,23(1):86-91.
- [20] 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.
- [21] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019,29(10):1597-1609.
- [22] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016,176:272-281.
- [23] Zhou W, Gang C, Zhou F, et al. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2015,48:560-569.
- [24] 崔利芳,王伦澈,屈赛,等.气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J].*地球科学*,2020,45(6):1905-1917.
- [25] Lei J, A. J. Peters. A spatial regression procedure for evaluating the relationship between AVHRR-NDVI and climate in the northern Great Plains[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004,25(2):297-311.
- [26] 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.
- [27] 丁文荣.滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素[J].*水土保持研究*,2016,23(6):227-231,237,381.
- [28] 张凯选,范鹏鹏,王军邦,等.西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究[J].*生态环境学报*,2019,28(6):1080-1091.
- [29] 吕妍,张黎,闫慧敏,等.中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J].*生态学报*,2018,38(24):8774-8786.
- [30] 徐勇,黄雯婷,靖娟利,等.京津冀地区植被 NDVI 动态变化及其与气候因子的相关性分析[J].*水土保持通报*,2020,40(5):319-327.
- [31] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].*自然资源学报*,2015,30(1):12-23.
- [32] 许端阳,康相武,刘志丽,等.气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究[J].*中国科学 D 辑:地球科学*,2009,39(4):516-528.
- [33] 黄荣辉,刘永,王林,等.2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析[J].*大气科学*,2012,36(3):443-457.
- [34] 王嘉媛,胡学平,许平平,等.西南地区 2 次秋冬春季持续严重干旱气候成因对比[J].*干旱气象*,2014,33(2):202-212.
- [35] 全永煜.“广西综合林业发展和保护项目”实施成效分析:以昭平县项目为例[J].*绿色科技*,2018(3):129-131.
- [36] 尹俊,蒋龙,徐祖林,等.云南迪庆州天然草原退牧还草工程实施对草原生态及牧区社会经济的影响[J].*草业与畜牧*,2010(11):26-29.
- [37] 李学梅,任志远,张翀.气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J].*地理科学*,2013,33(11):1390-1394.
- [38] 储小院,朱仕荣,林琼,等.我国石漠化防治立法的必要性与可行性探讨[J].*中国水土保持*,2020(6):18-22.
- [39] 尹俊,蒋龙,徐祖林,等.云南迪庆州天然草原退牧还草工程实施对草原生态及牧区社会经济的影响[J].*草业与畜牧*,2010(11):26-29.
- [40] 李学梅,任志远,张翀.气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J].*地理科学*,2013,33(11):1390-1394.
- [41] 郑远昌,李发斌.当代人类活动对自然资源变化的影响:以四川省为例[J].*资源科学*,1997(2):57-61,56.