

基于地理探测器的西南岩溶槽谷区近 20 年 NDVI 变化特征及影响因素

李晓丽, 曹敏, 茆杨

(西南大学地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 植被覆盖度变化及其与驱动因子关系的研究是开展大规模植被恢复效益评估的基础, 而目前对西南槽谷地区植被绿化的时空变化模式及其驱动因素的认识并不明晰, 不利于进一步生态建设。基于 2000—2018 年西南槽谷区 NDVI、气温、降雨、DEM、土地覆被和人口密度数据, 应用线性趋势回归分析和 Hurst 指数分析等方法以及地理探测器模型, 探究了西南槽谷区植被覆盖的时空变化特征和驱动因素, 预测未来变化趋势。结果表明: (1) 近 19 年来 NDVI 范围介于 0.79~0.84, 总体呈波动上升趋势, 岩溶区植被 NDVI (0.003 17/a) 年增长率显著高于非岩溶区 (0.002 60/a)。 (2) Hurst 指数分析结果表明, 西南槽谷区的植被 NDVI 主要以上升趋势为主, 但其中 64.31% 在未来呈现退化趋势, 植被保护形势较为严峻。 (3) 岩溶区植被 NDVI 与温度变化之间存在负相关关系 ($R = -0.040$), 而非岩溶区为正相关关系 ($R = 0.013$)。残差分析结果表明, 人类活动促进 89.60% 的区域植被 NDVI 增长。 (4) 在整个岩溶槽谷地区, 土地覆被类型和气温是影响植被 NDVI 的主要驱动因素, 解释率在 25% 以上, 各因子的交互作用明显高于单因子作用。总体来看, 人类活动对槽谷区植被恢复具有明显的积极影响。

关键词: 归一化植被指数; Hurst 指数; 地理探测器; 岩溶槽谷区

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0038-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.006

Variation Characteristics and Influencing Factors of NDVI in Karst Trough Area of Southwest China in Recent 20 Years Based on Ggeo-detector

LI Xiaoli, CAO Min, MAO Yang

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: The study on the change of vegetation coverage and its relationship with the driving factors is the basis of benefit evaluation on large-scale vegetation restoration, but the spatial-temporal change patterns of vegetation and its driving factors in the southwest karst trough-valley region are still not clear at present, which is not conducive to further ecological construction. This study explored the spatio-temporal characteristics and driving factors of vegetation coverage change based on the data of NDVI, air temperature, rainfall, DEM, land cover and population density in the southwest trough valley area from 2000 to 2018 and to predict the future trends. The methods of linear trend regression analysis and Hurst index analysis as well as the geographic detector model were applied. The results showed that: (1) In recent 19 years, the range of NDVI was 0.785~0.838, which showed a fluctuating upward trend, and the annual growth rate of vegetation NDVI (0.003 17/a) in karst area was significantly higher than that in non-karst area (0.002 60/a). (2) Hurst index analysis showed that the vegetation NDVI in the study area mainly showed an upward trend, but 64.31% of them would show a degradation trend in the future, and the situation of vegetation protection was more severe. (3) There was a negative correlation between NDVI and temperature change ($R = -0.040$) in karst area, but a positive correlation ($R = 0.013$) in non-karst area. The results of residual analysis showed that human activities promoted the NDVI growth of 89.60% of regional vegetation. (4) In the whole karst trough-valley area, land cover type and air temperature were the main driving factors affecting NDVI, the

收稿日期: 2021-06-08

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2019B067, XDJK2020C013); 广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题项目 (202012)

第一作者: 李晓丽 (1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事岩溶水文与环境研究。E-mail: 15588593411@163.com

通信作者: 曹敏 (1987—), 女, 讲师, 主要从事岩溶环境研究。E-mail: caomina@163.com

interpretation rate was over 25%, and the interaction of each factor was obviously higher than that of a single factor. On the whole, human activities had a significant positive impact on the vegetation restoration in the southwest trough valley area.

Keywords: normalized vegetation index; Hurst index; geographic detector; karst trough area

植被覆被状态是陆地生态系统是否良性循环的关键参数之一,植被在保持水土、防治石漠化、改善区域环境、平衡气候变化等方面发挥着重要作用^[1-3],植被覆盖变化也受到自然以及人为因素的双重影响^[4]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是反映地表植被生长状况的重要指标,能够监测长时间尺度区域植被覆被变化,现已在研究地表植被覆盖时空变化中得到广泛应用^[5]。

中国西南地区是世界上碳酸盐岩集中分布区之一,在过去 20 年中,全球有 4% 的植被绿化发生在这个地区^[6]。目前较多学者^[7-13]在西南地区从不同尺度和方法探究了自然以及人为因素对植被覆盖变化的影响。金凯等^[14]研究发现,人类活动对黄土高原中部、华北平原以及中国东北和西南等地近 34 年植被 NDVI 的增长提供超过 80% 的贡献率,肯定人类活动在植被恢复中的作用;Qiao 等^[15]研究发现,中国西南岩溶地貌分布区在喀斯特生态修复工程实施后人为因素对植被绿化贡献率上升到 77%,喀斯特分布区植被显著绿化增长率(8%)高于非喀斯特地区(3.82%);刘志军等^[16]研究发现,云贵高原人类活动密集的城市地区植被 NDVI 在监测期间呈下降趋势,并且石漠化严重地区 NDVI 稳定性差。总之,西南地区植被覆盖变化主要受人类活动以及岩性等因素的影响。地理探测器是一种揭示空间分异特征驱动力的统计学方法,依据地理探测器统计量,探测单因子影响力以及因子间交互作用^[17]。前人基于地理探测器模型定量分析了京津风沙源区植被覆盖度(FVC)^[18]、喀斯特地区植被净初级生产力(NPP)^[19]、中亚植被 NDVI^[20]、草地植被 NDVI^[21]、内蒙古牧业旗县和非牧业旗县植被 NDVI^[22]等区域植被覆盖变化驱动因素,为各区域生态环境治理和防护提供了理论依据。

西南岩溶槽谷区碳酸盐岩集中分布区域石漠化严重^[23],生态环境治理难度大。岩溶植被具有旱生性、石生性和喜钙性的特点,植被覆盖的空间分布受岩溶环境和地形等方面的制约,植被生产力低,恢复速率相对缓慢^[24]。已有的关于西南地区植被覆盖变化及驱动力研究中,主要应用的是趋势分析、偏相关分析以及残差分析方法,难以明确定量判断各个因素对植被覆盖变化的影响,以及缺少对岩溶槽谷区未来

植被覆盖变化趋势的分析。因此基于长时间尺度、高分辨率 NDVI 数据,利用地理探测器方法定量分析西南岩溶槽谷区植被覆盖变化驱动力,应用 Hurst 指数分析方法进一步揭示该区域植被覆盖变化趋势,以为岩溶槽谷区未来生态建设提供科学依据。

1 研究区概况

西南岩溶槽谷区包括黔西北、川东、湘南、鄂西,以及渝东北、渝中、渝东南等地的 130 个县,区域土地总面积 26.58 万 km²,岩溶面积 13.20 万 km²,占区域总面积的 49.80%(图 1)。该区以湿润多雨的亚热带季风气候为主,地貌上表现为条带状山岭与槽谷或长条形洼地相间分布,地质上表现为碳酸盐岩与碎屑岩相间分布,碳酸盐岩主要分布在岩溶槽谷区的东部以及南部地区^[24]。植被类型丰富,主要包括亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、暖性针叶林、竹林、稀树灌草丛草地及高山草甸。

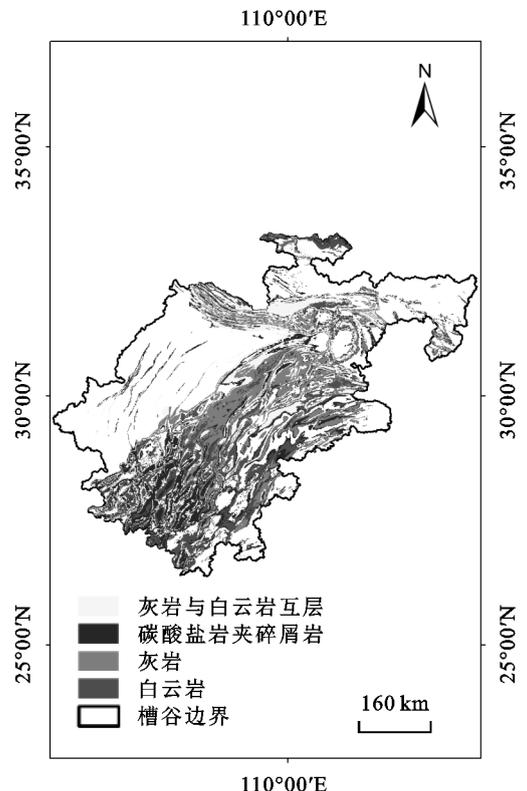


图 1 西南岩溶槽谷区

2 材料与方法

2.1 数据与处理

2.1.1 NDVI 数据 2000—2018 年 MODIS NDVI (MOD13Q1) 数据下载自美国国家航天航空局(NASA),空间分辨率 250 m,时间分辨率为 16 天。

利用 NASA 提供的 MRT 软件对 MDOIS NDVI 数据进行批量拼接、投影转化,最后利用最大值合成法(MVC)得到年 NDVI 数据^[15]。

2.1.2 气象数据 从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/data/>)收集了 2000—2018 年岩溶槽谷区的气象站数据,包括降水和温度 2 个因子,并利用 ANUSPLIN4.4 软件中的薄板平滑样条插值法进行插值后得到 2000—2018 年的年均温度和年均降水量空间分布数据。

2.1.3 土地利用数据 土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率 1 000 m,为了确保数据质量,RES-DC 对该数据集进行了质量控制,土地利用总体精度在 94.3% 以上。

2.1.4 高程数据 高程数据来自中国科学院资源科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 500 m,依据 DEM 数据计算获得坡度以及坡向数据。

2.1.5 人口数据 人口数据来自于中国科学院资源科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),应用 ArcGIS 软件计算获得矢量数据。

2.2 研究方法

2.2.1 NDVI 变化分析 使用一元线性趋势分析、Hurst 指数分析 2000—2018 年的 19 年间岩溶槽谷区 NDVI 的变化趋势及其持续型。一元线性趋势分析对研究区多年 NDVI 变化规律进行研究,趋势结果用多年栅格数值回归方程的斜率(Slope)表示。

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n i \overline{\text{NDVI}}_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \overline{\text{NDVI}}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

回归方程的斜率(Slope)表示 NDVI 的平均时间变化:正斜率(Slope > 0)表示上升趋势,负斜率(Slope < 0)则表示下降趋势^[25]。

Hurst 指数是定量描述变量在时间序列上的长程依赖性^[26-27],本文采用 R/S 分析法来分析 NDVI 的持续特征,以此判断研究期内 NDVI 未来的变化趋势。给定时间序列 $\{ \text{NDVI}_t \} (t=1, 2, 3, \dots, n)$,对于任意正整数 τ ,定义均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \text{NDVI}_i \quad (2)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^t (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}}_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差:

$$R_\tau = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

标准差:

$$S_\tau = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

Hurst 指数:

$$\frac{R_\tau}{S_\tau} = (\alpha \tau)^H \quad (6)$$

当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示 NDVI 具有反持续性;当 $H = 0.5$ 时,表示 NDVI 变化存在随机性;当 $0.5 < H \leq 1$ 时,说明 NDVI 具有持续性,且 H 越接近 1 持续性越强^[28]。

2.2.2 影响因素分析 采用偏相关分析和残差分析对 2000—2018 年 NDVI 变化的影响因素进行分析。偏相关分析是在简单相关分析的基础上,剔除第 3 个变量的影响,只分析另外 2 个变量之间相关程度的方法。采用 F 检验对所有的相关系数进行显著性检验^[29],当 $P \leq 0.05$ 时,表明相关性显著,当 $P > 0.05$ 时,相关性不显著。通过残差分析法可以将人为因素对 NDVI 的影响从自然因素中分离出来,NDVI 受气象因素和人为因素共同作用,NDVI 真实值和 NDVI 预测值的残差即为人为因素对 NDVI 的影响^[30]。

2.2.3 驱动力分析 地理探测器是探测空间分异性并且揭示其驱动因子的一种统计方法^[17],由 4 部分组成,分别是因子探测(7)、交互作用探测、空间分异和因子探测。本文应用因子探测和交互作用探测对西南槽谷区植被 NDVI 的时空分布以及驱动力进行定量分析。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (7)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为植被 NDVI 影响因子的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差;SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差; q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大,表示影响因子对植被 NDVI 的影响力越大。

3 结果与分析

3.1 2000—2018 年植被 NDVI 时空变化格局

3.1.1 时间变化特征 从图 2 可以看出,2000—2018 年典型槽谷区的植被 NDVI 年际变化显示出波动上升的趋势,增长率为 0.002 65/a。在监测的 19 年中,从 2000 年的 0.79 增长到 2018 年的 0.84。从 2000—2018 年,典型槽谷区中有 89.96% 的植被 NDVI 呈上升趋势,而 10.04% 的 NDVI 呈下降趋势。通过显著性检验的研究区中,96.30% 的区域呈现显著上升的趋势,仅有 3.70% 的区域呈现显著下降趋势,西南岩

溶槽谷区呈现明显的绿化趋势($P \leq 0.05$)(图3)。

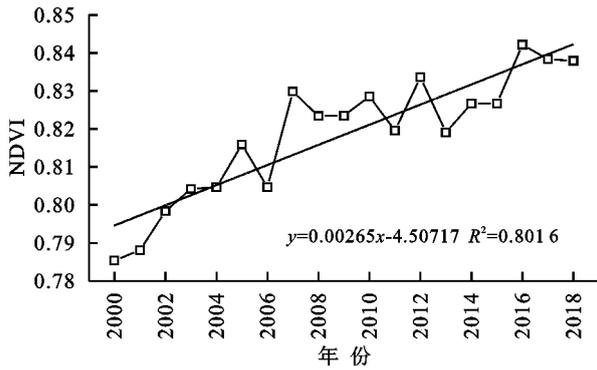


图2 典型岩溶槽谷区植被NDVI的年际变化

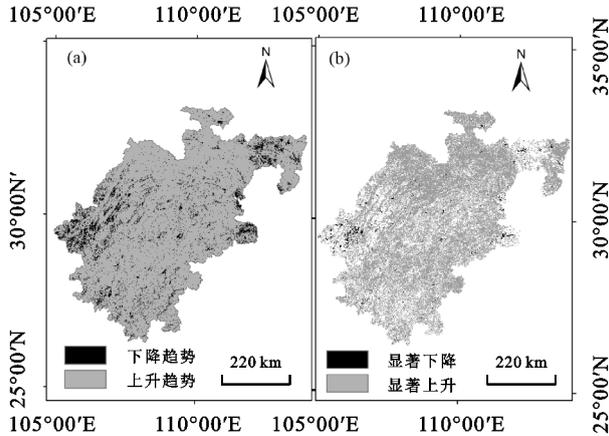


图3 典型槽谷区植被NDVI的变化趋势

3.1.2 空间变化特征 从表1可以看出,在2000—2018年间的不同岩性地区中,植被NDVI变化存在显著差异。岩溶区植被NDVI(0.003 17/a)年增长率显著高于非岩溶区(0.002 60/a),通过显著性检验的岩溶区中仅有1.9%的区域呈现显著的下降趋势,而非岩溶区中有5.6%的区域呈现显著的下降趋势。不同岩性下植被NDVI变化趋势也不同,灰岩与白云岩互层分布地区植被NDVI(0.003 30/a)高于碳酸盐岩夹碎屑岩分布区(0.003 25/a),且高于岩溶区平均增长率(0.003 17/a),而白云岩分布区植被NDVI(0.003 15/a)以及灰岩分布区(0.003 00/a)则低于岩溶区平均增长率。

表1 2000—2018年不同岩性NDVI年变化率和显著趋势变化比例

岩性	增长率	显著上升/%	显著下降/%
槽谷区	0.00289	96.3	3.7
非岩溶区	0.00260	94.4	5.6
岩溶区	0.00317	98.1	1.9
碳酸盐岩夹碎屑岩	0.00325	98.0	2.0
灰岩与白云岩互层	0.00330	98.7	1.3
灰岩	0.00300	98.5	1.5
白云岩	0.00315	97.3	2.7

3.2 2000—2018年植被NDVI持续性分析

对西南岩溶槽谷区NDVI的Hurst指数计算结果表明,反持续性占槽谷区面积的63.40%,持续性占槽谷区面积的29.13%,无相关性区域仅占7.48%,说

明超过90%的地区植被NDVI变化与过去植被NDVI变化具有相关性。

将一元线性分析得到的NDVI变化趋势结果与Hurst指数分析结果叠加分析,进一步揭示槽谷区植被NDVI的未来变化趋势(图4)。槽谷区南部碳酸盐岩夹碎屑岩集中分布区主要呈持续改善以及由退化到改善的趋势,西部川东平行岭谷地区呈现由退化到改善的趋势,西北地区主要呈持续改善的趋势,由改善到退化以及持续退化趋势的区域主要集中在区域北部。2000—2018年西南槽谷区的植被NDVI主要以上升趋势为主,但其中64.31%在未来呈现退化趋势,说明槽谷区植被保护形势较为严峻。

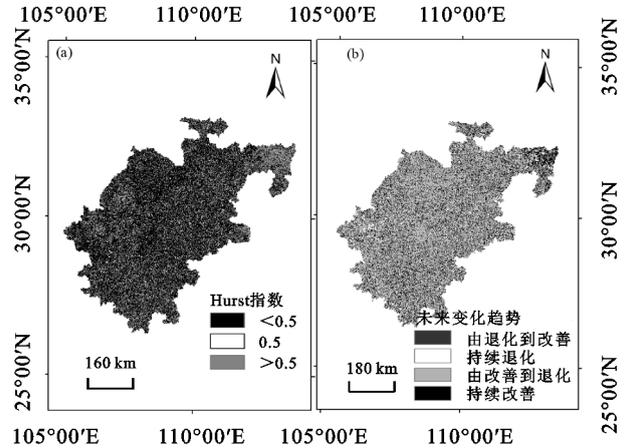


图4 槽谷区植被NDVI未来趋势

3.3 气候变化格局

2000—2018年期间,西南槽谷区年平均气温14.90~17.58℃,多年平均气温为15.91℃,出现较弱的变暖趋势(0.05℃/a)。2018年的平均气温上升到最大值(17.58℃),并且在2006—2018年期间波动较大(图5a)。19年间年平均降水量在995.99~1350.73mm范围内波动,多年平均降水量为1213.54mm,降雨量总体呈上升趋势(1.70mm/a)。空间上,2000—2018年间有99.00%的区域显示出温度增长的趋势,75.00%的区域表现出降水增加趋势(图6)。岩溶区中有99.83%的区域温度表现出增长趋势,44.26%的区域降雨表现出下降趋势,而非岩溶区98.81%的区域温度表现为增长趋势,21.96%的区域表现出下降趋势。

3.4 土地利用变化

2000—2018年间,西南槽谷区草地、耕地以及水域面积分别净损失5120.98,2187.07,905.00km²,而林地和居民用地面积则分别净增加3244.90,3167.43km²。林地增加是西南槽谷区土地利用的主要增长方式,耕地面积损失的75.00%转换到了林地,草地损失的58.89%转换到了林地,水域损失的34.56%转换到了林地。居民用地的增加侵占了大量自然资源,其中包括2637.80km²耕地资源、987.53km²林地资源以及227.46km²草地资源和139.93km²水域资源(表2)。

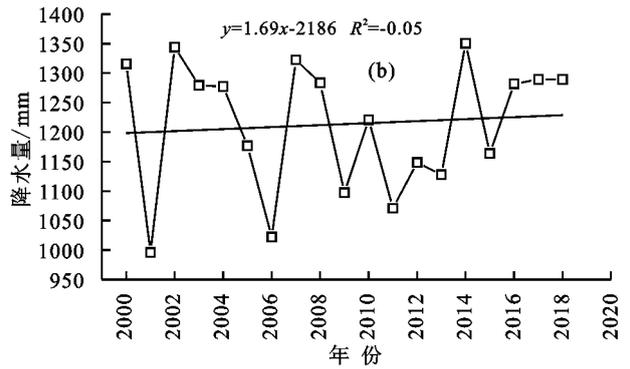
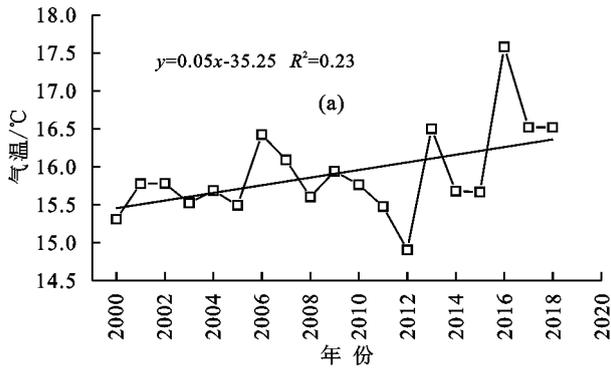


图 5 2000—2018 年年平均气温和降水量的年际变化

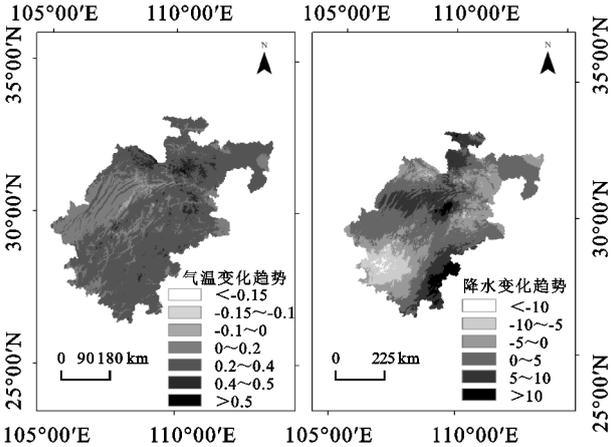


图 6 2000—2018 年年平均气温和降水的年际变化空间格局

表 2 2000—2018 年各土地利用类型面积转移矩阵

土地利用类型	单位: km ²					
	耕地	林地	草地	水域	居民用地	未利用地
耕地	54063.13	27547.60	5238.42	1207.06	2637.80	20.27
林地	26470.21	130213.84	6711.44	1040.70	987.53	5.76
草地	6658.64	10114.83	8953.37	173.63	227.46	1.64
水域	835.66	557.28	67.18	1013.59	139.93	12.41
居民用地	474.18	230.66	35.57	84.79	685.44	2.01
未利用地	25.39	10.171	2.61	12.25	1.92	62.02

4 讨论

4.1 NDVI 对气象因子的响应

采用偏相关分析方法对西南槽谷区 2000—2018 年植被 NDVI 与气候变化之间的关系进行分析,结果表明,从空间分布来看,植被 NDVI 与平均气温表现为负相关关系的区域占槽谷区面积的 52.10%,有 47.90%的区域表现为正相关关系。植被 NDVI 与平均降雨量表现为正相关关系的区域占槽谷区面积的 52.84%,有 47.16%的区域表现为负相关关系(图 7)。总体来看,植被 NDVI 与平均气温以及降雨的相关关系在空间分布上并不一致,气温对槽谷区植被 NDVI 变化影响较大。

气温和降水对槽谷区植被覆盖变化的影响受到研究区岩层分布的影响,在岩溶区和非岩溶区之间存

在明显的相关差异。具体表现为岩溶区植被 NDVI 与温度变化之间存在负相关关系($R = -0.040$),而非岩溶区植被 NDVI 与温度表现为正相关关系($R = 0.023$)(表 3)。岩溶区具有独特的双层空间结构,土壤层薄,蓄水能力弱,气温升高,可能会引起土壤水分的强烈蒸发,从而抑制植被生长^[31-32]。2000—2018 年间,研究区域植被 NDVI 与降水之间具有正相关关系,即降水整体上促进了西南槽谷区的植被生长。复杂的地下空间结构,发达岩溶裂隙和管道,使得降落在地表的水迅速汇入地下河网中^[33],降低了植被对降水的直接利用。因此,岩溶区植被 NDVI 与降水呈现出较弱的负相关关系。

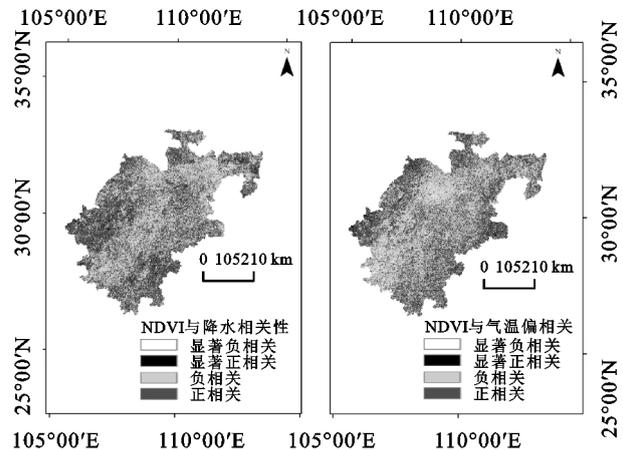


图 7 西南槽谷区 NDVI 与气候的偏相关分析

表 3 2000—2018 年不同岩性地区植被 NDVI 与气温、降水的相关系数

岩性	温度	降水
槽谷区	0.035	0.018
非岩溶区	0.023	0.054
岩溶区	-0.040	-0.017
灰岩	-0.015	-0.018
白云岩	-0.035	-0.025
白云岩与灰岩互层	-0.063	-0.036
碳酸盐岩夹碎屑岩	-0.045	0.008

4.2 人类活动对 NDVI 的影响

应用残差分析法对 2000—2018 年槽谷区人类活动

产生的植被绿化作用进行分析,结果表明,在过去的 19 年里,人类活动对西南槽谷区的植被恢复产生了显著影响(图 8)。89.60%的区域植被 NDVI 呈显著正增长趋势,说明自 1999 年启动的植树造林计划对西南地区的植被恢复起到了显著影响,与 20 年来西南地区林地面积的扩大(3 244.90 km²)具有较好的对应关系。西南槽谷区中仅有 10.40%的区域植被 NDVI 呈负增长趋势,主要集中在城市周边,如重庆市等,这也与西南槽谷区 2000—2018 年居民用地增加相吻合。

岩溶槽谷区 2000—2018 年植被 NDVI 的增长受人类活动影响明显,岩溶区石漠化的成功治理以及整个西南地区的植被恢复工程都有力地促进植被绿化。

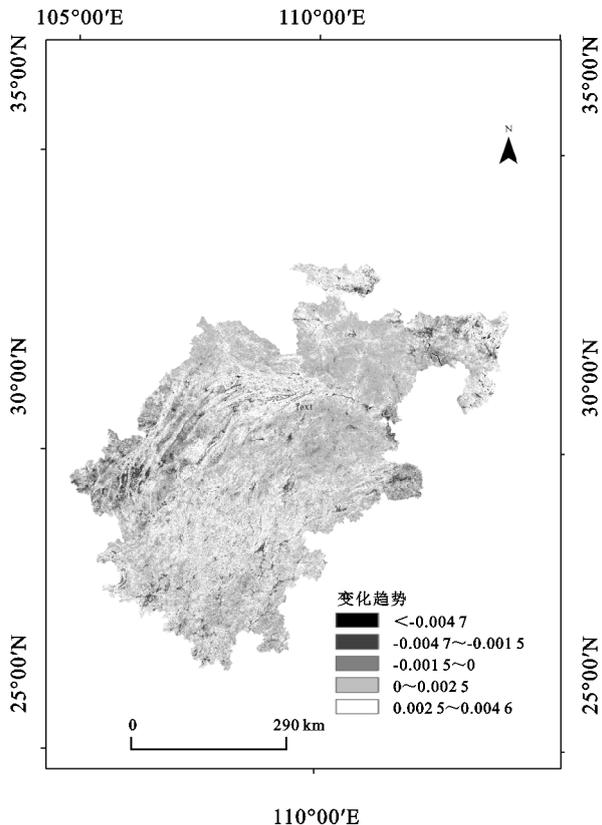


图 8 人类活动对植被 NDVI 的影响

4.3 驱动力分析

4.3.1 探测因子影响力分析 通常认为植被覆盖变化是由自然因素(气温、降水、DEM、坡度、坡向)和人为因素(人口密度、土地利用)共同或单独作用的,因此定量确定气候和人为因素对植被绿化的贡献对于适应策略的制定至关重要。分异及因子探测结果见表 4。各因子对西南槽谷区植被 NDVI 影响程度排序为 LUCC>气温>DEM>坡度>人口>降水量>坡向。LUCC、气温和 DEM 的 q 值最大,分别达到 0.298,0.253 和 0.208,解释率在 20%以上,坡度、人口、降雨量和坡向解释力较小,因此,LUCC、气温和高程是影响西南槽谷区植被覆盖变化的主要因子(图

9)。人为因素中土地利用对植被覆盖变化影响最大,气温则是植被 NDVI 变化解释力最强的自然因素。

表 4 各驱动因子的交互作用探测结果

驱动因子	人口	LUCC	坡向	坡度	降雨	高程	气温
人口	0.0017						
LUCC	0.4206	0.4047					
坡向	0.0036	0.4099	0.0007				
坡度	0.0757	0.4194	0.0769	0.0730			
降雨	0.0950	0.4439	0.1136	0.1401	0.0857		
高程	0.1657	0.4148	0.1670	0.1810	0.2194	0.1637	
气温	0.2598	0.4234	0.2560	0.3098	0.3461	0.4045	0.2547

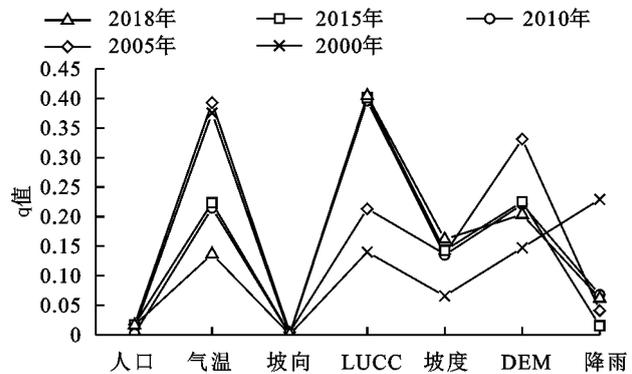


图 9 2000—2018 年西南槽谷区驱动因子 q 值变化

4.3.2 探测因子时间变化 2000—2018 年 LUCC 和坡度的影响力呈增加趋势,气温和 DEM 呈下降趋势,人口、降雨量和坡向因子变化不大。自 2006 年将岩溶槽谷区划为石漠化综合治理区后,开展了退耕还林、营造林、草地治理、耕地治理以及移民搬迁等工程^[24],改变了土地利用状况,因此,LUCC 对植被覆盖的影响力在 2005 年后显著增加,甚至超过了气温因子。岩溶槽谷区水土资源和人口分布不匹配,大量农业活动发生在不适宜耕作的陡坡,坡改梯、封山育林等工程使得坡度对植被 NDVI 的变化影响力增强。

4.3.3 因子交互探测分析 交互探测可以识别不同因子之间的交互作用,评估出 2 个因子共同作用时对植被 NDVI 的影响力是增强、减弱还是相互独立^[18]。由表 6 可知,驱动因子交互作用产生的 q 值均大于单独因子作用的 q 值,表明驱动因子间的交互作用会增加对植被 NDVI 空间分布变化的解释。交互作用解释力较强的是 LUCC、气温与其他驱动因子的协同作用,LUCC 与其余因子的交互作用最强,解释率均在 40%以上,如 $LUCC \cap 降雨 = 0.444$, $LUCC \cap 气温 = 0.423$, $LUCC \cap 高程 = 0.419$;其次是气温与其余因子的交互作用,解释率均在 25%以上,如 $气温 \cap 高程 = 0.405$, $气温 \cap 降雨 = 0.346$, $气温 \cap 坡度 = 0.310$ 。总之,各驱动因子对植被 NDVI 空间分布的影响既不是由单独一方起作用,也不是 2 个方面的简单叠

加,而是相互增强效应,因此应该加强人为干预作用,从而在最大程度上发挥各因子对西南岩溶槽谷区植被恢复的作用。

5 结论

(1)自 2000—2018 年,典型槽谷区的植被 NDVI 年际变化总体呈现出波动上升的趋势,增长率为 0.002 65/a。岩溶区植被 NDVI(0.003 17/a)年增长率显著高于非岩溶区(0.002 60/a),通过显著性检验的岩溶区中仅有 1.9%的区域呈现显著下降的趋势,而非岩溶区中有 5.6%的区域呈现显著下降的趋势,表明西南槽谷区植被 NDVI 的变化特征在空间分布上受到石灰岩分布的直接影响。

(2)应用 Hurst 指数对岩溶槽谷区未来植被覆盖状态变化趋势进行持续性分析,结果表明,超过 90%的地区植被 NDVI 变化与过去植被 NDVI 变化具有相关性,研究区中 64.31%的区域在未来呈现退化趋势,在空间上主要集中分布在岩溶槽谷区北部,植被保护形势较为严峻。

(3)水热组合状况是岩溶槽谷区植被生长的重要影响要素,偏相关分析结果表明,气温和降雨对槽谷区植被覆盖变化的影响受到研究区岩层分布的影响,在岩溶区和非岩溶区之间存在明显的相关差异,对岩溶植被 NDVI 影响显著,而降水对非岩溶区植被 NDVI 影响更明显。残差分析结果表明,在人类活动影响下槽谷区植被 NDVI 明显增长,岩溶区石漠化的成功治理以及整个西南地区的植被恢复工程均有力促进植被绿化。

(4)运用地理探测器进一步定量分析各自然、以及人文因素对槽谷区植被 NDVI 的驱动力,结果表明,LUCC、气温和高程是影响西南槽谷区植被覆盖变化的主要因子。人为因素中土地利用对植被覆盖变化影响最大,气温则是植被 NDVI 变化解释力最强的自然因素。总体来说,人类活动对西南槽谷区植被恢复具有积极影响。

参考文献:

- [1] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [2] 王德炉,朱守谦,黄宝龙.石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究[J].山地农业生物学报,2003,22(3):204-207.
- [3] 张萍,曾信波.植被蓄水保土功能研究[J].山地农业生物学报,1999,18(5):300-304.
- [4] 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,2018,33(3):425-438.
- [5] Piao S P S, Yin G Y G, Tan J G, et al. Detection and

attribution of vegetation greening trend in China over the last 30years[J].Global Change Biology,2015,21(4):1601-1609.

- [6] Brandt M, Yue Y, Wigneron J P, et al. Satellite-observed major greening and 448 biomass increase in South China Karst during recent decade[J].Earth's Future, 2018,6:1017-1028.
- [7] 程东亚,李旭东,杨江州.西南山地流域 NDVI 变化特征及降水敏感性:以贵州沅江流域为例[J].生态学报,2020,40(4):1161-1174.
- [8] 管艳霞,龙晓泳,李维杰.重庆喀斯特地区 NDVI 变化的影响因素[J].西南农业学报,2021,34(1):165-173.
- [9] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2021,32(2):618-628.
- [10] 韦小茶,周秋文,张继,等.1982—2016 年广西 NDVI 时空变化及其影响因素[J].山地学报,2020,38(4):520-531.
- [11] 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.
- [12] 张泽,丘海红,胡宝清.广西西江流域石漠化区植被变化及气候驱动力研究[J].绿色科技,2020(10):130-133.
- [13] 任荣仪,贺中华,梁虹,等.贵州省 NDVI 时空变化及其对温度和降水变化的响应[J].水土保持研究,2021,28(2):118-129.
- [14] 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.
- [15] Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade[J]. Ecological Indicators,2021,121:e107081.
- [16] 刘志军,曾业隆,严兰,等.2001—2014 年云贵高原植被 NDVI 时空变化特征[J].山地农业生物学报,2018,37(1):32-38.
- [17] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [18] 孟琪,武志涛,杜自强,等.基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响:以京津风沙源区为例[J].中国环境科学,2021,41(2):826-836.
- [19] 左丽媛,高江波.基于地理探测器的喀斯特植被 NPP 定量归因[J].生态环境学报,2020,29(4):686-694.
- [20] 王伟,阿里木·赛买提,吉力力·阿不都外力.基于地理探测器模型的中亚 NDVI 时空变化特征及其驱动因子分析[J].国土资源遥感,2019,31(4):32-40.
- [21] 何国兴,韩天虎,柳小妮,等.甘肃省草地植被 NDVI 时空变化特征及驱动因素研究[J].草地学报,2021,29(5):1004-1013.

- Lake[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(14): 2313-2330.
- [20] Zhao G J, Tian P, Mu X M, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 387-398.
- [21] Xin Z B, Yu X X, Li Q Y, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 149-159.
- [22] 罗健, 胡耀国, 荣艳淑, 等. 近 48 年广东省降雨侵蚀力的变化[J]. *热带气象学报*, 2010, 26(4): 499-503.
- [23] Huang J, Zhang J C, Zhang Z X, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity during 1960—2005 in the Yangtze River basin[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2013, 27(2): 337-351.
- [24] 张丽梅, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J]. *生态学报*, 2017, 38(21): 1-11.
- [25] 陈瑞东, 温永福, 高鹏, 等. 极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1-11.
- [26] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. *资源科学*, 2012, 34(6): 1070-1078.
- [27] 李传哲, 王浩, 于福亮, 等. 延河流域水土保持对径流泥沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 1-8.
- [28] 莫明浩, 杨筱筱, 肖胜生, 等. 鄱阳湖五河流域入湖径流泥沙变化特征及影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 197-203.
- [29] 张龙, 汤崇军, 郑海金. 鄱阳湖流域水土保持重点治理一期工程效益后评价研究[J]. *中国水土保持*, 2013(9): 61-64.
- [30] 樊哲文, 黄灵光, 钱海燕, 等. 鄱阳湖流域土地利用变化的土壤侵蚀效应[J]. *资源科学*, 2009, 31(10): 1787-1792.
- [31] 郭国锋, 崔丽娟. 基于遥感技术的鄱阳湖采砂对水体透明度的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 332-339.
- (上接第 44 页)
- [22] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(12): 4963-4975.
- [23] 王正雄, 蒋勇军, 张远喆, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [24] 袁道先, 覃政教. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [25] 李登科, 王钊. 退耕还林后陕西省植被覆盖度变化及其对气候的响应[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 1-10.
- [26] 李双双, 延军平, 万佳. 近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 960-970.
- [27] 刘宪锋, 志远, 志慧, 等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 897-908.
- [28] 刘旻霞, 焦骄, 潘竟虎, 等. 青海省植被净初级生产力 (NPP) 时空格局变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5306-5317.
- [29] 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.
- [30] 李元春, 侯蒙京, 葛静, 等. 甘南和川西北地区草地植被 NDVI 变化及其驱动因素研究[J]. *草地学报*, 2020, 28(6): 1690-1701.
- [31] Chai Z. Soil erosion in karst areas of Guangxi[J]. *Journal of Mountain Research*, 1989, 7(4): 255-260.
- [32] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, land-use, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 15(2): 115-121.
- [33] Zhou Q W, Luo Y, Zhou X, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China: A remote sensing approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 460-470.