

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.038

CSTR: 32310.14.stbxb.2026.05.038

博文静, 崔明, 李嘉豪, 等. 西南喀斯特区植被时空演变特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 68-79.

Bo Wenjing, Cui Ming, Li Jiahao, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of vegetation in karst region of Southwest China and their influencing factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 68-79.

西南喀斯特区植被时空演变特征及其影响因素

博文静^{1,2,3}, 崔明^{1,2,3}, 李嘉豪¹, 周维^{1,2,3}, Brice Sinsin³, 陈新均¹,
徐子涵¹, 刘双艳¹, 范鑫程¹, 刘玉国^{1,2,3}

(1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 河南淅川荒漠生态系统定位观测研究站, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 石漠化治理国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091;

3. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 中贝荒漠化防治联合实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 探究西南喀斯特区植被时空演变特征及气候和人类活动对植被变化的影响, 为石漠化治理提供科学依据。[方法] 采用 Theil-Sen Median 与 Mann-Kendall (MK) 检验分析 2000—2024 年西南喀斯特区及石漠化治理工程试点县与非试点县的植被变化趋势, 结合残差分析, 揭示气候因子与人类活动对植被变化的影响。[结果] 1) 2000—2024 年西南喀斯特区 69.9% 的 NDVI 显著增加, 63.4% 的 NPP 显著提高, 仅有 36.3% 的 LAI 显著改善。说明该区域在植被覆盖上整体表现出“变绿”趋势, 但在植被冠层结构提升上出现明显的滞后性。2) 石漠化综合治理试点县岩溶区的 NDVI、NPP 和 LAI 的年平均值均呈增长趋势, 年增长率分别为 0.002 6、0.005 9 kg/(m²·a) 和 0.051 0, 高于非试点县的 0.002 2 ($p < 0.05$)、0.005 0 和 0.039 0 ($p < 0.05$)。2008—2024 年石漠化综合治理工程启动后, 试点县的 NDVI、NPP 和 LAI 年平均值也高于非试点县。说明石漠化综合治理工程显著提高西南喀斯特区的植被盖度和冠层结构。3) 从人类活动对植被变化的贡献率来看, 2000—2024 年, 植被覆盖和冠层结构改善的区域中人类活动占主导的面积分别为 91.1% 和 89.9%。表明人类活动在西南喀斯特区植被恢复中的重要作用。4) NDVI、NPP 和 LAI 人类活动残差在 2008 年以后均呈由负值逐渐向正值转变的趋势, 表明人类活动对植被恢复的影响由早期的抑制作用逐步转变为促进作用。[结论] 石漠化综合治理工程显著提高西南喀斯特区域植被覆盖度, 但区内仍有 63.7% 的区域植被冠层结构未实现明显改善, 需持续开展高质量石漠化治理, 进一步增强植被生态功能。受城镇扩张影响, 局部区域植被退化态势突出。基于此, 建议将城镇空间管控与林分结构提质相结合, 稳步提升喀斯特地区生态保护与修复工作成效。

关键词: 西南喀斯特区; 石漠化治理工程; 植被恢复; 人类活动

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0068-12

Spatiotemporal Evolution Characteristics of Vegetation in Karst Region of Southwest China and Their Influencing Factors

Bo Wenjing^{1,2,3}, Cui Ming^{1,2,3}, Li Jiahao¹, Zhou Wei^{1,2,3}, Brice Sinsin³, Chen Xinjun¹,

Xu Zihan¹, Liu Shuangyan¹, Fan Xincheng¹, Liu Yuguo^{1,2,3}

(1. Henan Xichuan Karst Ecosystem National Observation and Research Station, Institute of Ecological Protection and Restoration,

Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Key Laboratory of Rocky Desertification Control, National Forestry and

Grassland Administration, Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091,

China; 3. China-Benin Joint Laboratory for Desertification Prevention and Control, Institute of Ecological

Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatiotemporal evolution characteristics of vegetation in

收稿日期: 2026-04-28

修回日期: 2026-05-26

录用日期: 2026-06-09

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-14

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项 (CAFYBB2021MA013); 国家自然科学基金项目 (42371066); 国家重点研发计划项目 (2024YFE0116900)

第一作者: 博文静 (1987—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事生态系统服务研究。E-mail: bowenjing@caf.ac.cn

通信作者: 刘玉国 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事石漠化防治研究。E-mail: liuyuguo@caf.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

the karst region of Southwest China, as well as the effects of climate and human activities on vegetation changes, providing a scientific basis for rocky desertification control. [Methods] Theil-Sen median and MK tests were used to analyze the vegetation change trends in the karst region of Southwest China and in pilot and non-pilot counties of the rocky desertification control project between 2000 and 2024. Combined with residual analysis, the effects of climate factors and human activities on vegetation changes were revealed. [Results] 1) From 2000 to 2024, 69.9% and 63.4% of the karst region in Southwest China experienced significant increases in normalized difference vegetation index (NDVI) and net primary productivity (NPP), respectively, while only 36.3% of the region showed a significant improvement in leaf area index (LAI). This indicated that although the region exhibited an overall "greening" trend in vegetation coverage, there was a pronounced lag in the enhancement of the vegetation canopy structure. 2) In the karst region of rocky desertification pilot counties, the annual mean values of NDVI, NPP, and LAI showed increasing trends, with annual growth rates of 0.002 6, 0.005 9, and 0.051 0, respectively, which were significantly higher than those in non-pilot counties 0.002 2 ($p < 0.05$), 0.005 0, and 0.039 0 ($p < 0.05$). From 2008 to 2024, after the implementation of the rocky desertification control project, the annual mean values of NDVI, NPP, and LAI in pilot counties were significantly higher than those in non-pilot counties. This indicated that the rocky desertification control project significantly improved vegetation coverage and canopy structure in the karst region of Southwest China. 3) In terms of the contribution of human activities to vegetation changes from 2000 to 2024, human activities dominated the improvement of vegetation coverage and canopy structure by 91.1% and 89.9%, respectively. As a result, human activities played an important role in vegetation restoration in the karst region of Southwest China. 4) The residuals of human activities in NDVI, NPP, and LAI showed a trend of gradually changing from negative to positive values since 2008, indicating the impact of human activities on vegetation restoration has gradually shifted from an inhibitory to a promoting effect. [Conclusion] The rocky desertification control project has significantly increased vegetation coverage in the karst region of Southwest China. However, the vegetation canopy structure in 63.7% of the area has not yet significantly improved. This indicates the need for continuous high-quality rocky desertification control to further enhance vegetation ecological functions. A pronounced trend of vegetation degradation is observed in certain areas due to urban expansion. On this basis, it is recommended to combine urban spatial planning and regulation with forest stand structural upgrades to steadily enhance the effectiveness of ecological protection and restoration in the karst region.

Keywords: karst region of Southwest China; rocky desertification control project; vegetation restoration; human activities

Received: 2026-04-28

Revised: 2026-05-26

Accepted: 2026-06-09

Online(www.cnki.net): 2026-07-14

中国西南喀斯特是全球三大喀斯特集中连片分布的地区之一^[1],覆盖我国8个省区,占国土面积5%以上^[2-3]。该区域脆弱的岩溶地质背景,在不合理的人类活动干扰下,极易造成土壤侵蚀、土地退化等问题,制约着西南地区的经济社会发展。中国政府自20世纪末起陆续实施“退耕还林还草”“天然林保护”等重大生态工程^[4]。2008年国家发展改革委组织实施100个县的“石漠化综合治理试点”工程(以下简称“试点工程”)^[5]。2011年,在试点工程的基础上,将石漠化治理范围扩大到200个县。截至2021年,我国石漠化土地面积为722.32万 hm^2 ,年均减少66.62万 hm^2 ^[6]。生态工程的实施有效减缓西南地区石漠化的进程,但在极端气候及人类活动干扰下,该区域的水

土流失等问题依然严峻,可能导致植被覆盖和生态系统生产力的下降^[7]。所以,研究气候变化和人类活动对石漠化治理区植被改善及生态系统生产力的影响具有重要的科学意义,同时也是评估石漠化治理工程成效的重要依据。

植被作为陆地生态系统的核心组成部分,在驱动区域碳水循环、维持地表能量平衡及遏制土壤退化等方面发挥着重要作用^[8]。因此,开展植被动态的长期连续监测,是科学评估区域生态系统健康状况及其演变趋势的重要前提。遥感技术因具有覆盖范围广、时间序列长等优势,已广泛应用于多尺度植被动态监测研究^[9]。在常用遥感指标中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)融

合红光与近红外波段信息,能够有效表征地表绿色,是指示植被覆盖变化的重要指标之一^[10]。叶面积指数(leaf area index, LAI)作为刻画植被冠层结构及生物物理特征的关键参数,可反映冠层垂直结构及其变化特征,在高覆盖植被区域具有更强的适用性^[11]。如 Myneni 等^[12]基于 MODIS 数据构建的全球 LAI 产品,揭示不同气候区植被冠层结构的时空变化特征。生态系统净初级生产力(net primary productivity, NPP)从功能层面反映植被生产能力,是衡量生态系统初级生产力的重要指标。对 NPP 的准确估算对于生态系统管理及陆地碳源-碳汇研究具有重要意义^[13]。洪辛茜等^[14]研究表明,2001—2018 年退耕还林还草等生态工程的实施显著促进西南地区 NPP 增加,是区域碳汇增加的重要驱动因素。

近年来,国内外学者围绕植被动态监测及生态系统生产力评估开展大量研究。基于遥感数据的 NDVI 时间序列分析已广泛应用于喀斯特地区植被覆盖变化及生态环境演变研究。如庄义琳等^[15]分析西南地区断陷盆地植被 NDVI 变化及其驱动因素表明,2001—2016 年研究区 NDVI 变化存在显著空间差异,喀斯特区植被恢复效果优于非喀斯特区,主要受造林面积、海拔及气温等因素影响;Qiao 等^[16]研究表明,2006—2016 年西南喀斯特区的 NDVI 显著改善面积比 2000—2005 年增加 6.95%,高于非喀斯特区 3.82%;Chen 等^[17]研究表明,人类活动与气候变化对西南地区植被 NDVI 变化的相对贡献率分别为 86.00% 和 14.00%,而在西南喀斯特地区则分别为 90.00% 和 10.00%。尽管现有研究已经揭示西南喀斯特区在人类活动主导下,植被呈现显著的变绿趋势,但目前的评估大多依赖 NDVI 等单一的绿色指标,难以反映植被冠层垂直结构及植被生产力的变化^[18]。基于植被覆盖的单一指标评估生态工程的成效,容易忽视生态系统结构和功能的滞后效应,进而造成对石漠化治理工程成效的过高估计或偏差评价。现有西南喀斯特地区石漠化治理成效评估多基于全域尺度的趋势分析,缺乏治理区和非治理区的时空对照,难以反映工程投入对植被改善的实际效应。鉴于此,本文通过引入试点县与非试点县的对照研究,基于人类活动残差变化反映政策及资金投入对生态成效的实际贡献。在植被恢复驱动力方面,目前的研究多基于回归分析及机器学习模型等方法,侧重于分析各因子的影响强度及方向。

本研究采用残差分析,实现人类活动和气候变

化对植被改善及退化的相对贡献率的定量剥离。石漠化综合治理试点工程于 2008 年启动,涉及西南喀斯特区的 100 个县,该区域从 2008 年开始得到中央及地方资金的持续投入,为定量解析工程石漠化恢复成效提供坚实的实证基础。本文集成多源遥感时序数据与空间分析方法,在石漠化治理工程背景下,从地表绿色 NDVI、植被冠层结构 LAI 及植被生产力 NPP 3 个维度出发,系统分析 2000—2024 年西南喀斯特地区植被变化的时空特征及其影响因素。本研究旨在解决 2 个科学问题:1)西南喀斯特区植被覆盖、冠层结构和植被生产力的时空变化是否具有时滞性? 2)石漠化治理试点区和非试点区在植被恢复的主要驱动力上有何差异? 通过多指标协同分析与残差定量评估,系统解析西南喀斯特地区植被演变的驱动机理,为优化喀斯特区生态修复提供科学依据。

1 研究区概况

西南喀斯特区(23°~32°N, 102°~111°E)位于中国西南部,涉及四川、重庆、湖北、湖南、贵州、云南、广西、广东 8 个省区(图 1),总面积为 54 万 km²,是全球规模最大、发育最典型的连续喀斯特地貌单元^[19]。整体地势自西北向东南倾斜,处于青藏高原向东部丘陵平原过渡的斜坡地带。气候条件以亚热带季风气候为主,年平均气温 12~27℃,年降水量 1 000~1 300 mm^[20]。该区域位于长江与珠江流域上游,是重要的水源涵养区。西南喀斯特脆弱的地质背景与不合理的人类活动,导致水土流失与石漠化问题严重^[21]。研究西南喀斯特区石漠化治理下植被时空演变特征对于该区域生态保护与资源管理具有重要的科学意义。

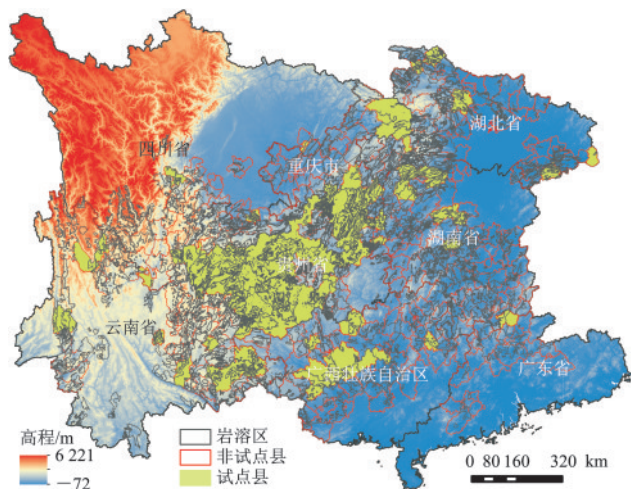


图 1 研究区分布

Fig.1 Distribution of study area

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究使用的数据有自然和社会经济数据,包

括高程、土地利用、气象、植被指数等数据,主要来源于地理空间数据云、国家冰川冻土沙漠科学数据中心和国家青藏高原科学数据中心等(表1)。

表1 基础数据
Table 1 Basic data

数据名称	类型	分辨率/m	数据来源
数字高程数据	栅格	90	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
土地利用数据	栅格	30	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(https://www.ncdc.ac.cn)
降水	栅格	1 000	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)
气温	栅格	1 000	
归一化植被指数(NDVI)	栅格	250	国家地球系统科学数据中心(https://www.geodata.cn/)
叶面积指数(LAI)	栅格	250	
净初级生产力(NPP)	栅格	500	

2.2 研究方法

2.2.1 植被指数变化趋势与显著性检验 为客观揭示研究区植被指数的时空演变特征,本研究采用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检验相结合的方法,对逐像元的长时序植被指数进行计算^[22]。该组合方法具有较强的稳健性,能够有效屏蔽少数异常值对趋势结果的干扰,且不要求数据服从正态分布,被广泛应用于水文、气象及长时序植被生态演变研究中。

1) Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法。通过计算时间序列中所有两两数据对的斜率中位数,以判定植被指数在长时间序列下的整体变化趋势。计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{(X_j - X_i)}{j - i} \right] (2000 \text{ 年} \leq i < j \leq 2024 \text{ 年}) \quad (1)$$

式中: β 为植被指数变化的趋势度; X_i 和 X_j 分别为时间序列中第 i 年和第 j 年的植被指数观测值。当 $\beta > 0$ 时,表明研究时段内该像元的植被指数呈增加趋势;当 $\beta < 0$ 时,呈减少趋势;当 $\beta = 0$ 时,无明显变化。

2) Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计方法,常用于检测时间序列中是否存在单向的上升或下降趋势,用来判断趋势的显著性,它无须样本服从一定正态分布,也不受少数异常值的干扰。计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & X_j - X_i > 0 \\ 0 & X_j - X_i = 0 \\ -1 & X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_i 和 X_j 为像元 i 年和 j 年的植被指数值; n 为时间序列的长度; sgn 为符号函数。

当 $n \geq 10$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,利用其方差 $\text{Var}(S)$ 构建标准化的检验统计量(Z),以进行显著性检验。

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

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

在给定的显著性水平 α 下,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则表示该时间序列变化趋势明显。本文显著性水平 α 取0.05,对应 $Z_{1-\alpha/2}$ 为 ± 1.96 。

3) 趋势演变特征分级

为更直观地表征植被时空动态,本文将 Theil-Sen Median 趋势结果与 MK 检验的显著性结果在空间像元尺度上进行叠加。根据 β 值与 Z 值的组合,将变化趋势划分为5个等级,即 $\beta > 0$ 且 $|Z| > 1.96$,为显著改善; $\beta > 0$ 且 $|Z| \leq 1.96$,为轻微改善; $\beta = 0$,为基本不变; $\beta < 0$ 且 $|Z| \leq 1.96$,为轻微退化; $\beta < 0$ 且 $|Z| > 1.96$,为显著退化。

4) 植被变化与人类活动残差显著性检验

试点县与非试点县人类活动残差采用 Welch's t 检验进行显著性分析,该方法在2组样本之间相互独立,适用于数据量较大可能存在方差不齐的情况。为检验岩溶区试点县与非试点县在不同时期植被指数年平均增长率差异的统计学意义,本研究构建包含交互项的多元线性回归模型进行检验。该模型将时间变量和分组变量共同纳入回归方程,通过检验交互项系数 β_3 的统计学显著性,来判定试点县与非试点县的植被恢复趋势是否存在显著差异。

模型公式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Year} + \beta_2 \times \text{Group} + \beta_3 \times (\text{Year} \times \text{Group}) + \epsilon \quad (6)$$

式中: Y 为各时期植被指数的观测值; β_0 为非试点县的植被指数的平均值; β_1 为非试点县的自然年平均增长率; β_2 为试点县和非试点县的初始差异; β_3 为试点县与非试点县相比的变化量; ϵ 为随机误差项。

2.2.2 气候与人类活动对植被变化的影响 为定量评估人类活动对 NDVI、NPP 和 LAI 变化的贡献, 采用残差趋势分析(residual trend analysis, RESTREND)方法来定量分离气候因子和人类活动对响应变量变化的影响。该方法最早由 Evans 等^[23]提出, 通过建立响应变量与主要气候变量的统计回归模型, 计算实际观测值与模型预测值之间的残差, 再对残差序列进行趋势分析, 以作为衡量人类活动贡献的指标。

1) 构建气候预测模型

将遥感石漠化指数(remote sensing desertification index, RSDI)作为因变量, 年平均气温和总降水量作为自变量, 在 Google Earth Engine(GEE)中建立随机森林(random forest, RF)回归模型, 决策树数量设为 50。该模型用于模拟气候对 RSDI 的影响。本研究采用逐像元尺度的模型模拟, 通过对所有模型 R^2 和 RMSE 的平均值计算, 得出平均 R^2 为 0.80, 平均 RMSE 为 0.016, 可以反映模型总体的可靠性。考虑到气候数据与植被指数的空间尺度差异, 对各栅格数据集进行空间统一化处理, 将其重采样为 1 000 m 的空间分辨率, 并以同一投影坐标系进行空间配准。

2) 人类活动残差计算

利用气象数据及 RF 模型计算预测 RSDI (PRSDI)^[24], 计算公式为:

$$\text{PRSDI} = \text{RF}(\text{pre}, \text{temp}) \quad (7)$$

$$\text{HARSDI} = \text{RSDI} - \text{PRSDI} \quad (8)$$

式中: pre、temp 为年总降水量和平均气温; HARSDI 为实际值 RSDI 与预测值 PRSDI 的残差, 用以反映人类活动对 RSDI 的影响。

3) 气候因子与人类活动贡献率

为量化各因素的贡献, 本研究采用最小二乘法(ordinary least squares, OLS)对实际值 RSDI、预测值 PRSDI 及残差 HARSDI 的时间序列进行趋势分析, 计算像元尺度的变化斜率(β); 并参考 Qiao 等^[16]的方法定义人类活动贡献率(C_{human})和气候因子贡献率(C_{climate})。

$$C_{\text{human}} = \frac{\beta_{\text{HARSDI}}}{\beta_{\text{RSDI}}} \times 100\% \quad (9)$$

$$C_{\text{climate}} = \frac{\beta_{\text{PRSDI}}}{\beta_{\text{RSDI}}} \times 100\% \quad (10)$$

如果 $C_{\text{human}} \leq 0$, 表明气候因子对植被覆盖变化的贡献率为 100%; $C_{\text{climate}} \leq 0$, 表明人类活动对植被覆盖变化的贡献率为 100%。当 $\beta_{\text{RSDI}} > 0$ 且 $C_{\text{human}} > 50\%$ 时, 表明人类活动在植被变化过程中起主导作用; 当 $\beta_{\text{RSDI}} > 0$ 且 $C_{\text{climate}} > 50\%$ 时, 表明气候因子在植被变化过程中起主导作用。本研究基于石漠化综合治理试点工程的开始年份作为转折点, 将研究时段分为 2000—2008 年和 2009—2024 年, 通过计算人类活动和气候因子对植被变化的贡献率, 揭示石漠化治理工程的恢复成效。

3 结果与分析

3.1 西南喀斯特区不同时期植被变化趋势

2000—2024 年西南喀斯特地区 NDVI、LAI 和 NPP 均呈显著增长趋势(图 2)。从地表绿度(表 2)可以看出, NDVI 显著增加的面积占比为 69.9%, 显著减少的面积占比为 1.5%。2009—2024 年 NDVI 显著增加的面积比例(24.2%)高于 2000—2008 年(13.5%)。说明随着石漠化治理工程的实施, 西南喀斯特地区植被覆盖显著增加。从植被冠层结构来看, 2000—2024 年, LAI 显著增加的比例为 36.3%, 显著减少的面积仅占 0.6%。2009—2024 年 LAI 显著增加的面积比例(9.0%)高于 2000—2008 年(7.0%)。说明石漠化治理工程实施后, 该区域叶面积指数显著提升, 植被冠层结构也持续改善。在碳固持能力方面, NPP 呈显著增加的面积占比为 63.4%, 而显著减少的面积占比仅为 2.9%。2009—2024 年 NPP 显著增加的面积比例(33.4%)高于 2000—2008 年(18.5%)。说明石漠化治理工程显著提高西南喀斯特区的植被固碳功能。

3.2 石漠化治理工程的植被时空演变

自“十一五”规划实施以来, 国家通过专项资金在 100 个县开展岩溶地区石漠化综合治理试点工程。2000—2024 年长时序监测表明, 试点县与非试点县的 NDVI、LAI 和 NPP 均表现出显著增长趋势。基于包含交互项的多元线性回归模型的斜率差异性检验, 2000—2024 年试点县 NDVI 的年平均增长率为 0.002 6, 显著高于非试点县 0.002 2($p < 0.05$)。尤其是 2008 年石漠化治理工程启动后, 试点县岩溶区 NDVI 呈现增长趋势, 年平均值逐渐高于非试点县(图 3)。在植被冠层结构方面, 2000 年试点县岩溶区年平均 LAI 仅

为 3.73,显著低于非试点县(4.02)($p<0.05$)。然而,随着石漠化工程的实施,2008—2024 年试点县 LAI 年平均增长率(0.051)高于非试点县(0.039),说明试点县的植被冠层结构明显改善。在碳固持能力方面,2000—2024 年试点县 NPP 的年均增长率约为 0.005 9 kg/($\text{m}^2\cdot\text{a}$),高于非试点县的 0.005 0 kg/($\text{m}^2\cdot\text{a}$),且 2008—

2024 年石漠化治理工程实施后,试点县 NPP 的年增长率为 0.006 2 kg/($\text{m}^2\cdot\text{a}$),高于非试点县的 0.005 7 kg/($\text{m}^2\cdot\text{a}$)。说明试点县的植被恢复有助于提高岩溶区植被的固碳功能。综上可知,石漠化治理工程的实施有助于提高植被覆盖度,改善植被冠层结构,增强植被固碳能力,为岩溶区的生态恢复提供重要的支撑。

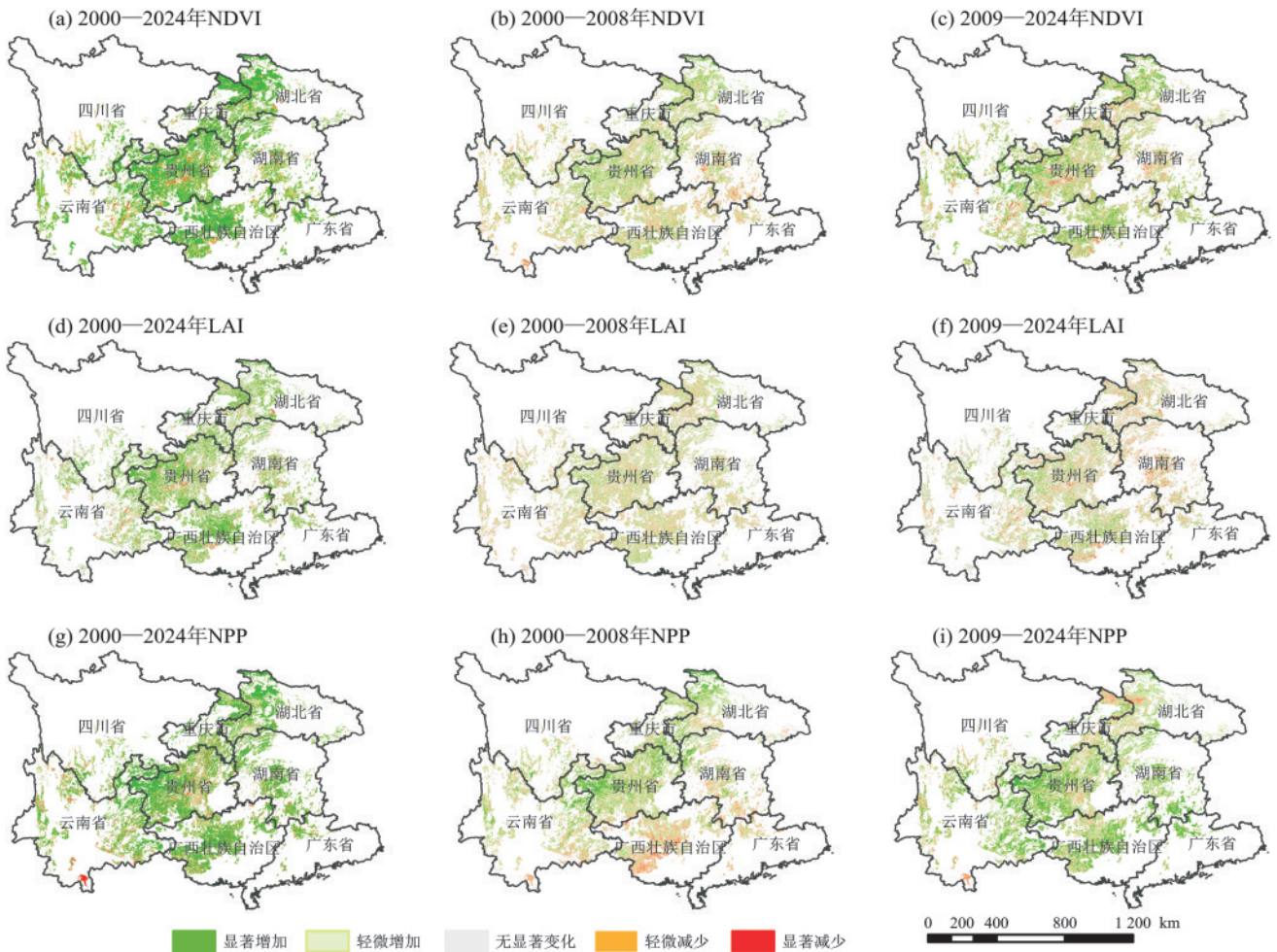


图 2 西南喀斯特区不同时期植被变化趋势
Fig.2 Vegetation change trends for different periods in karst region of Southwest China

表 2 西南喀斯特区植被指标变化面积比例				
Table 2 Area proportions of vegetation index changes in karst region of Southwest China				
变量指标	年份	显著增加面积比例/%	显著减少面积比例/%	无显著变化面积比例/%
NDVI	2000—2024	69.9	1.5	0.01
	2000—2008	13.5	0.8	0.04
	2009—2024	24.2	1.5	0.03
NPP	2000—2024	63.4	2.9	0.005
	2000—2008	18.5	0.9	0.02
	2009—2024	33.4	0.6	0.01
LAI	2000—2024	36.3	0.6	20.60
	2000—2008	7.0	0.8	15.10
	2009—2024	9.0	1.8	27.90

2000—2024 年,试点县与非试点县植被指标均呈现整体改善趋势(图 4)。从地表绿度来看,试点县与非试点县的 NDVI 显著改善的面积比例均超过 60%,而显著退化面积比例均低于 2%,说明岩溶区植被覆盖度的整体提升。然而,试点县 NDVI 显著增加的面积达到 76.0%,比非试点县高 9.2%,表明石漠化治理工程促进岩溶区的地表绿化。从植被冠层结构来看,试点县 LAI 显著改善的面积占比为 42.9%,高于非试点县(33.3%)。说明石漠化治理工程通过增加乔灌木比例,有效提升叶面积指数,实现植被垂直结构的优化。从碳固持能力来看,试点县 NPP 显著增加的面积占比为 69.0%,高于非试点县的 61.6%。表明石漠化治理工程显著增强植被的生产力,提升生态系统的碳汇功能。

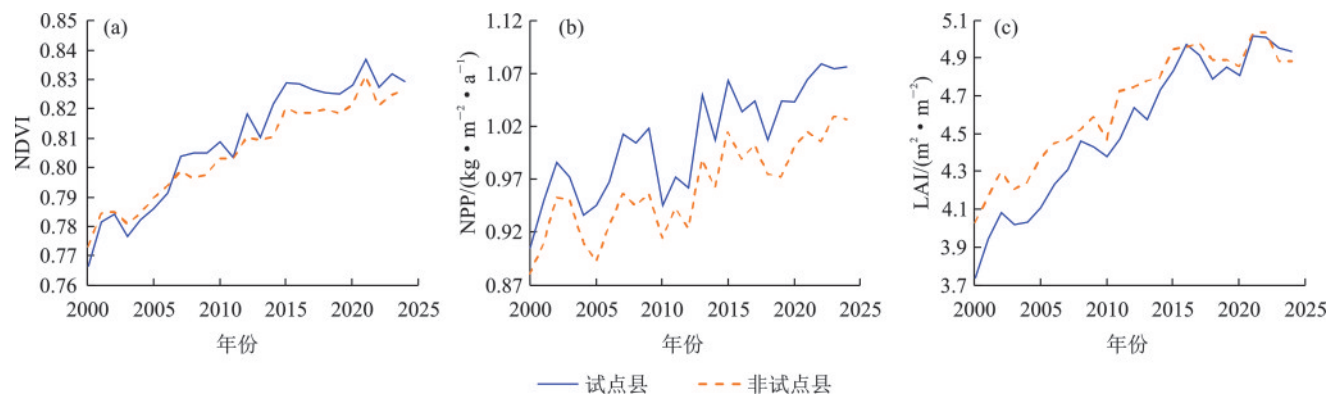


图3 试点县与非试点县岩溶区植被变化趋势

Fig.3 Vegetation change trends in karst region of pilot and non-pilot counties

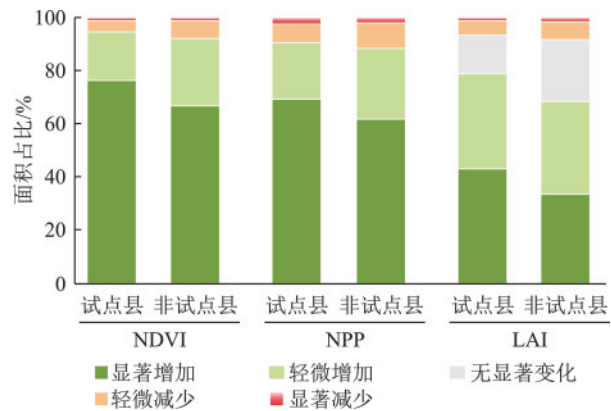


图4 试点县与非试点县岩溶区植被变化面积比例

Fig.4 Area proportions of vegetation changes in karst region of pilot and non-pilot counties

3.3 气候变化和人类活动对西南喀斯特区植被变化的影响

采用残差趋势法分离气候变化和人类活动对植被

变化的贡献,从地表绿度来看,气候因素影响下NDVI显著增加的面积比例占72.5%,显著减少的面积比例占5.1%;人类活动影响下显著增加的面积比例占50.3%,主要分布在湖北的西部、贵州的中西部及广西的西北部地区(图5)。从植被冠层结构来看,气候因素影响下LAI显著增加的面积比例占65.3%,显著减少的面积比例占5.9%;人类活动影响下LAI显著增加的面积比例占34.6%,主要分布在广西的西北部和贵州的中西部地区,显著减少的面积比例仅占0.35%,分布较为分散。从固碳能力来看,气候因素影响下NPP显著增加的面积比例占80.2%,显著减少的面积比例占2.2%;人类活动因素影响下显著增加的面积比例占35.1%,主要分布在广西的西部地区及湖北的北部地区,显著减少的面积比例占1.69%,主要分布在云南南部和贵州中部地区。

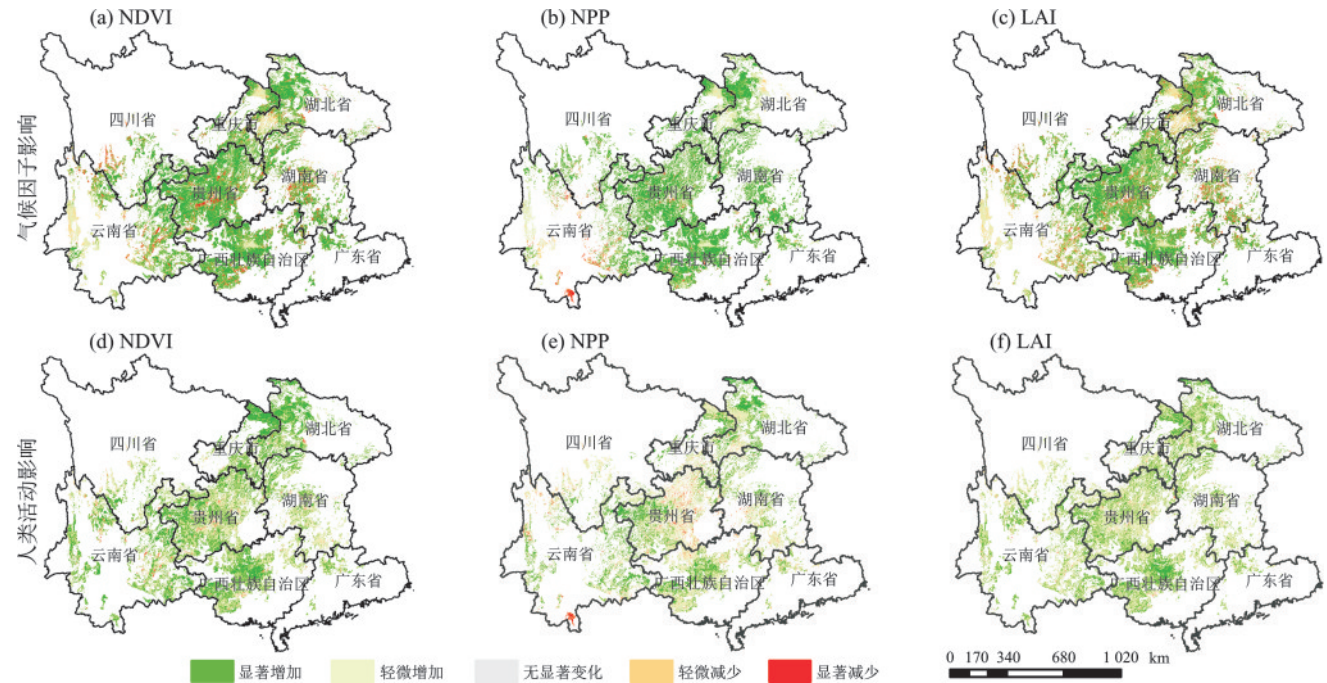


图5 2000—2024年受气候与人类活动影响的岩溶区植被变化趋势

Fig.5 Vegetation change trends in karst region affected by climate and human activities (2000—2024)

从西南喀斯特区气候和人类活动对植被变化的贡献来看,NDVI显著改善区域中91.1%由人类活动主导,主要分布在湖北的东北部、重庆的北部地区及贵州的西部地区,8.9%的区域由气候因素主导;NDVI显著减少区域中89.1%由人类活动主导,10.9%的区域由气候因素主导(图6)。NPP显著改善区域中65.0%由人类活动主导,主要分布在湖北北部

及贵州西部地区,35.0%的区域由气候因素主导;NPP显著减少区域中59.0%由人类活动主导,主要分布在云南的南部地区,0.9%的区域由气候因素主导。LAI显著改善区域中89.9%由人类活动主导,10.1%的区域由气候因素主导;LAI显著减少区域中37.6%由人类活动主导,3.0%的区域由气候因素主导。表明人类活动在西南喀斯特区植被变化中的重要作用。

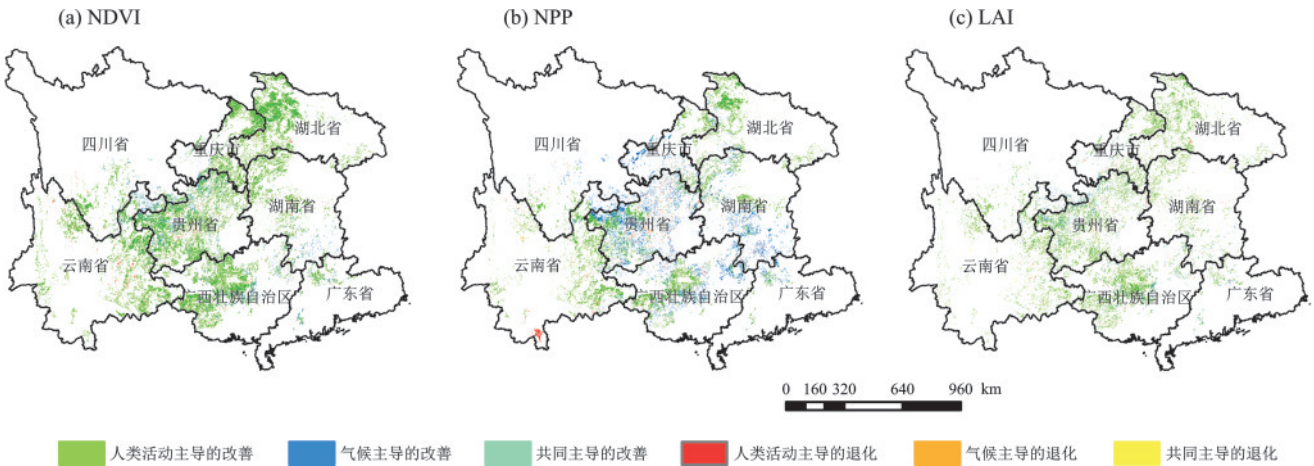


图 6 气候和人类活动对植被变化的贡献分区
Fig.6 Zoning of the contributions of climate and human activities to vegetation change

3.4 人类活动对石漠化恢复工程区植被变化的影响
西南岩溶区石漠化治理植被覆盖度显著增加的区域中,由人类活动主导的NDVI显著增加的面积占试点县岩溶区总面积的53.9%,高于非试点县岩溶区的43.1%;植被生产力显著提升的区域中,由人类活动主导的NPP显著增加的面积占试点县岩溶区总面积的22.7%,高于非试点县岩溶区的16.9%;植被冠层结构显著改善的区域中,由人类活动主导的LAI显著增加的面积占试点县岩溶区总面积的25.4%,高于非试点县岩溶区的17.6%(图7)。说明试点县人类活动主导的植被改善面积占比明显高于非试点

县,石漠化综合治理工程对植被恢复起到较好的促进作用。
植被覆盖度显著降低的区域中,由人类活动主导的NDVI显著降低的面积占非试点县岩溶区总面积的0.6%,高于试点县岩溶区的0.5%;植被冠层结构显著退化的区域中,由人类活动主导的LAI显著降低的面积占非试点县岩溶区总面积的0.3%,高于试点县岩溶区总面积的0.2%(图7)。说明非试点县人类活动主导的NDVI和LAI显著减少面积占比高于试点县,石漠化治理工程有效减少人类活动导致的植被退化。

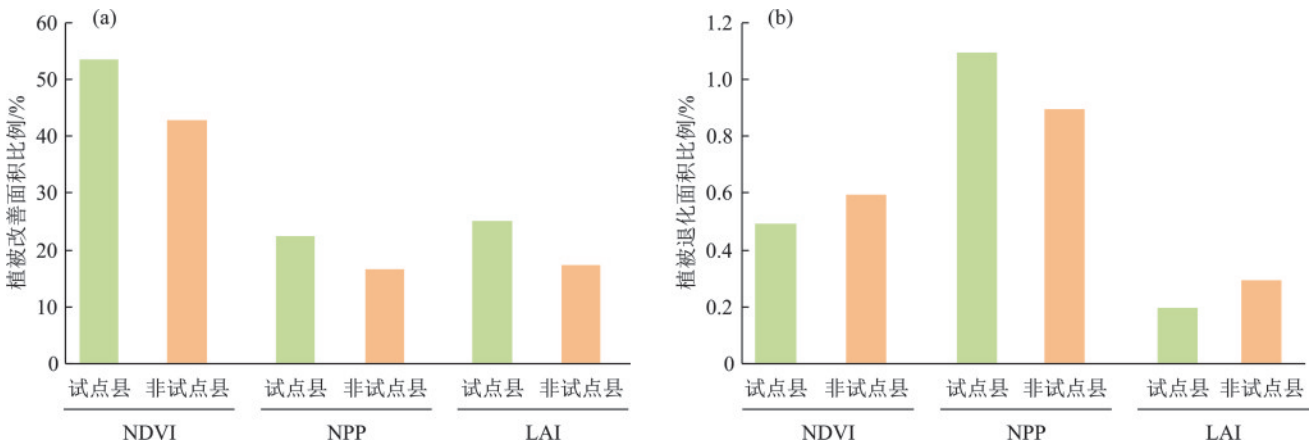


图 7 2000—2024 年石漠化治理试点县与非试点县人类活动主导的植被变化面积比例
Fig.7 Area proportions of human activity-dominated vegetation changes in pilot and non-pilot counties of rocky desertification control (2000—2024)

2000—2024 年 NDVI、NPP 和 LAI 人类活动残差均呈现出由负值逐渐向正值转变的趋势(图 8),表明人类活动对植被恢复的影响由早期的抑制作用逐步转变为促进作用。在试点县与非试点县对比中,

2000—2008 年各植被指标残差整体为负,说明人类活动对植被恢复存在一定干扰作用;2008 年以后,残差逐渐转为正值,尤其在 2010 年后明显升高,表明人类活动开始显著促进植被恢复。

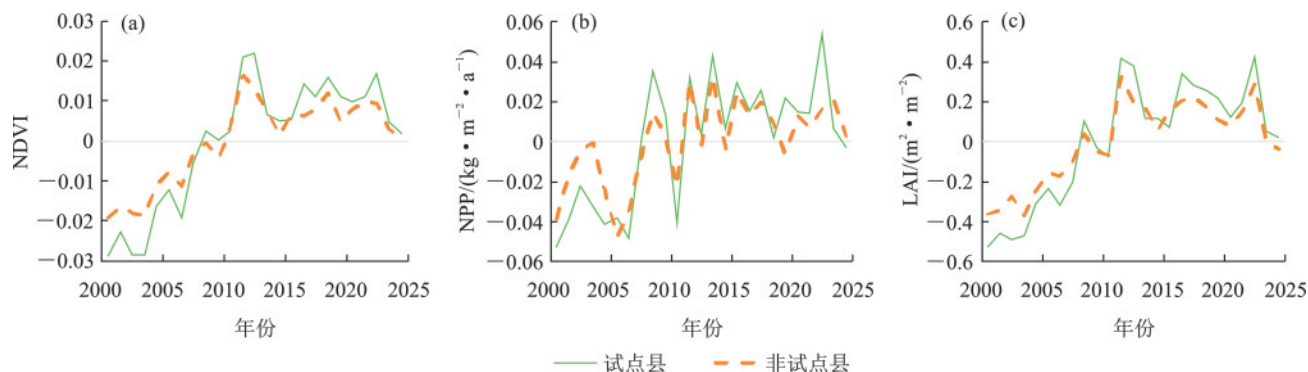


图 8 2000—2024 年人类活动对石漠化治理试点县与非试点县植被变化的残差特征

Fig.8 Residual characteristics of vegetation changes affected by human activities in pilot and non-pilot counties of rocky desertification control project (2000—2024)

整体来看,试点县各指标残差值在恢复后期普遍高于非试点县,且波动幅度更大,说明石漠化治理试点工程在增强人类活动正向作用方面发挥了积极作用。

根据试点县与非试点县人类活动残差的 Welch's t 检验分析结果,NDVI 的人类活动残差在 2000 年和 2006 年均均为负值,且显著低于非试点县($p < 0.05$),但 2012 年、2016 年、2019 年和 2024 年均均为正值,且显著高于非试点县($p < 0.05$),表明石漠化试点工程实施后,人类活动残差正效应显著增强,但 LAI 和 NPP 试点县和非试点县整体差异显著性较低,侧面反映植被冠层结构改善和植被生产力改善的滞后性。综合来看,人类活动在研究期内对石漠化恢复工程区植被变化的影响总体表现为由抑制向促进转变,并在试点县中表现出更强的正向驱动作用,说明石漠化治理工程显著增强人类活动对植被恢复的促进效应。

4 讨论

4.1 西南喀斯特区植被动态的时空演变特征

2000—2024 年西南喀斯特区植被恢复成效显著,植被覆盖率、叶面积指数及植被生产力均有不同程度的增长。从植被覆盖来看,NDVI 显著增加的面积为 69.9%,增长速率最快的区域主要分布在云贵高原乌蒙山脉、横断山脉东侧及广西盆地的中部,增长速率为 0.004 3~0.007 5/a。贵州六盘水、毕节及四川凉山等地,属于石漠化较为严重的区域,随着退耕还林、天然林保护、石漠化治理等生态工程的实施,该地区植被覆盖显著改善^[25]。NDVI 显著增加的区域高度集中在海拔 2 000 m 以下、坡度 $< 7^\circ$ 的平坦地

带。该区域主导的土地利用变化类型为农田转化为森林,占比为 41.6%,其次是灌木和草地转化为森林,占比为 13.5%。低海拔平缓地带具有较高的生态恢复可实施性,驱动该区域植被的恢复。而植被覆盖显著减少的面积仅为 1.54%,主要分布在贵阳的南部、安顺的西部及遵义的南部等地区,该地区位于城镇化的中心边缘,容易受到人类活动影响。该区域高度集中在海拔 800 m 以下,坡度 $< 5^\circ$ 的平坦地带,主导的土地利用变化类型为农田转化为城镇,占比为 51.9%,其次是森林转化为农田,占比为 14.8%,森林转化为城镇,占比为 3.4%。城镇化扩张和农田开垦是抵消生态工程效益,导致局部植被退化的根本原因。从植被冠层结构的变化来看,LAI 显著增加的比例为 36.3%,低于 NDVI(69.9%)。说明西南喀斯特区大部分区域在植被覆盖上表现出“变绿”趋势,但在植被冠层结构提升上出现明显的滞后性。在植被生产力方面,NPP 显著增加的面积占比为 63.4%,与何宏昌等^[19]关于西南喀斯特植被生产力整体趋于改善的研究结论具有较好的一致性。NPP 与 NDVI 在显著增长的空间格局上有较高的一致性,但 NPP 显著减少的面积(2.9%)比例高于 NDVI(1.5%)。NPP 显著减少的区域主要集中在云南南部地区。在频发的极端干旱事件影响下,高温干旱导致气孔关闭并影响水分利用效率,从而导致植被光合速率降低。

4.2 石漠化治理工程对植被恢复的影响

2000—2024 年试点县与非试点县植被指标均呈整体改善趋势,反映西南喀斯特区整体生态环境的提升。本研究选择石漠化综合治理一期工程即 100

个试点县作为研究区,主要基于其石漠化治理的连续性与示范性。自2008年启动以来,试点县获得从“十一五”持续至“十四五”期间的不间断专项资金支持与政策投入,将其作为石漠化治理工程的成效评估研究区,具有较好的代表性。西南喀斯特区部分非试点县在后期也陆续被纳入石漠化治理二期或三期工程范围,所以非试点县的各项植被指数也表现出显著的增长趋势,但相比于试点县植被指数的增长率和改善面积都较低。在地表绿度方面,试点县NDVI的年增长速率(0.002 6)及显著改善面积占比(76.0%)均显著高于非试点县,尤其是2008年试点工程实施后,试点县NDVI均值超过非试点县,反映石漠化治理工程对植被覆盖增长的促进作用。在植被结构的变化方面,试点县2000年平均LAI比非试点县低7.2%,但后期的年增长速率(0.051 0)高于非试点县(0.039 0),说明石漠化治理工程不仅提高植被覆盖度,更通过乔灌木的合理配置优化群落结构^[26]。LAI的提高对于提升冠层的截留能力,增强水土保持和水源涵养功能具有重要作用^[27]。在植被碳固持方面,试点县NPP年平均增长率 $[0.005\ 9\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})]$ 及改善面积占比(69.0%)均高于非试点县,且2008年试点县石漠化治理工程实施后,试点县NPP的年增长率高于非试点县。表明持续的石漠化治理投入不仅增加地表绿度,更通过改善植被冠层结构提高植被质量,从而增强喀斯特区植被生产力与固碳功能^[28],为区域生态恢复提供重要支撑。

4.3 西南喀斯特区植被变化的气候与人类活动的驱动机制

残差分析结果表明,人类活动是影响西南喀斯特区植被恢复的主要因素。尽管气候因素对植被恢复呈现显著促进作用,但在植被显著改善的区域中,人类活动的贡献率远高于气候因素。尤其是在植被覆盖和植被冠层结构方面,NDVI和LAI显著改善区中,90.0%是人类活动主导,说明在生态脆弱的喀斯特地区,自然恢复过程较为缓慢,通过实施人工造林等石漠化恢复工程,能促进植被从覆盖度到冠层垂直结构的改善^[29]。从土地利用转移来看,NDVI人类活动残差显著改善的区域中,农田转为森林的面积比例占总转移面积的41.6%,灌木和草地转变为森林的面积比例占13.5%。而NPP则受气候因素影响更大,显著改善区的35.0%由气候因素主导,人类活动仅占65.0%。NPP作为净初级生产力,植被光合作用对水分和温度的波动比较敏感^[30],如云南南部地

区,在人类活动影响下,植被覆盖度显著提升,但在极端干旱等气候因素影响下,NPP仍出现显著下降趋势,反映喀斯特区生态系统碳汇功能的实现是人类活动与气候因子的共同作用。

西南喀斯特区整体生态环境显著改善,但湖北北部与贵州西部等地区仍存在明显的植被退化区。在这些退化斑块中,人类活动干扰的贡献率约为90.0%。结合土地利用转移分析结果显示,NDVI人类活动残差显著减少的区域中,农田转为城镇的面积比例占总转移面积的54.3%,森林转变为农田的面积比例占13.0%,森林、湿地和草地转变为城镇的面积比例分别为3.5%、1.5%和0.7%。说明该地区的植被退化主要原因是城镇开发及农田开垦,反映出在生态修复进程中,局部地区仍面临着经济开发与生态保护之间的权衡,石漠化治理仍面临严峻挑战。

4.4 研究的不足

本研究对比石漠化治理工程试点县与非试点县的植被恢复差异,但由于国家在启动石漠化治理工程时,优先选定石漠化较为严重的县,所以试点县与非试点县在石漠化治理工程实施前植被本底情况存在差异,下一步的研究可采用变量控制等方法避免此内生性问题。试点县植被恢复也并不意味着政策的有效性,未来的研究应结合当地石漠化治理专项资金、封山育林面积、退耕还林人口补助等实际政策指标,分析政策投入对植被正向恢复的直接驱动作用。

本研究主要采用随机森林算法拟合气候因子对植被恢复的影响,其在处理非线性关系方面具有优势,但对变量间复杂的交互机制定量解析能力相对有限。未来应结合结构方程模型(SEM)等方法,进一步分析地形地貌、土地利用、气候与人类活动等对植被恢复的多路径驱动机制。本研究采用的遥感产品在空间分辨率上存在差异,尽管已经采用重采样技术对数据进行统一处理,但在复杂的喀斯特破碎化地貌下,混合像元效应仍可能导致局部植被信息失真。下一步的研究应结合多尺度野外监测数据与机理模型,进一步提升评估的科学性与精准度。

5 结论

1)西南喀斯特区植被覆盖显著提升。2000—2024年,西南喀斯特区69.9%的NDVI显著增加,但63.7%的区域植被冠层结构尚未得到显著改善。未来需持续开展高质量石漠化治理,增加植被冠层结构复杂性,提高生态系统服务功能。

2)石漠化综合治理工程实施后,试点县的植被显著改善面积及年增长率均高于非试点县。人类活动对植被的影响由负效应转变为正效应,有效遏制人为因素导致的植被退化。

3)城镇开发削弱生态工程的植被恢复成效。结果表明,贵阳、安顺、遵义等城镇中心边缘植被退化明显,建议未来将城镇扩张与生态空间管控相结合,防止在城镇化扩张中出现生态逆向演变。

参考文献:

- [1] 吴风志,王金亮,邓云程,等.1993—2023年西南喀斯特连片石漠化敏感性时空演变及整治区差异[J].生态学报,2026,46(11):5747-5765.
Spatiotemporal evolution of karst rocky desertification sensitivity and differences among remediation areas in the southwest China karst continuous region from 1993 to 2023[J].Acta Ecologica Sinica,2026,46(11):5747-5765.
- [2] 李阳兵,罗光杰,白晓永,等.典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系:案例研究[J].生态学报,2014,34(9):2195-2207.
Li Yangbing, Luo Guangjie, Bai Xiaoyong, et al. The correlations among arable land, settlement and karst rocky desertification-cases study based on typical peak-cluster depression [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9):2195-2207.
- [3] 种国双,海月,郑华,等.中国西南喀斯特石漠化治理现状及对策[J].长江科学院院报,2021,38(11):38-43.
Chong Guoshuang, Hai Yue, Zheng Hua, et al. Current situation and measures of karst rocky desertification control in southwest China[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2021,38(11):38-43.
- [4] 欧阳志云,郑华,岳平.建立我国生态补偿机制的思路与措施[J].生态学报,2013,33(3):686-692.
Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, Yue Ping. Establishment of ecological compensation mechanisms in China: Perspectives and strategies [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3):686-692.
- [5] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.
Wang Kelin, Yue Yuemin, Chen Hongsong, et al. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7432-7440.
- [6] 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.
Lü Yan, Zhang Li, Yan Huimin, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the karst region of Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24):8774-8786.
- [7] Zhang Li, Xiao Jingfeng, Li Jing, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China [J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(4):e045706.
- [8] 赵东升,王珂,崔耀平.植被变化对气候的反馈机制及调节效应[J].生态学报,2023,43(19):7830-7840.
Zhao Dongsheng, Wang Ke, Cui Yaoping. Feedback mechanisms and regulatory effects of vegetation change on climate [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(19):7830-7840.
- [9] 马忠学,崔惠娟,葛全胜.基于植被动态模式预估中国植被净初级生产力变化格局[J].地理学报,2022,77(7):1821-1836.
Ma Zhongxue, Cui Huijuan, Ge Quansheng. Prediction of net primary productivity change pattern in China based on vegetation dynamic models [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7):1821-1836.
- [10] 彭菲菲,汪小钦,余智超,等.长汀县多分辨率植被指数与植被覆盖度遥感监测[J].水土保持学报,2026,40(3):1-12.
Peng Feifei, Wang Xiaoqin, Yu Zhichao, et al. Remote sensing monitoring of multi-resolution vegetation indices and fractional vegetation cover in Changting County [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):1-12.
- [11] 靳华安,李爱农,边金虎,等.西南地区不同山地环境梯度叶面积指数遥感反演[J].遥感技术与应用,2016,31(1):42-50.
Jin Huaan, Li Ainong, Bian Jinhu, et al. Leaf Area Index (LAI) estimation from remotely sensed observations in different topographic gradients over southwestern China [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1):42-50.
- [12] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2):214-231.
- [13] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281(5374):237-240.
- [14] 洪辛茜,黄勇,孙涛.我国西南喀斯特地区2001—2018年植被净初级生产力时空演变[J].生态学报,2021,41(24):9836-9846.
Hong Xinqian, Huang Yong, Sun Tao. Spatiotemporal evolution of vegetation net primary productivity in the

- karst region of southwest China from 2001 to 2018[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9836-9846.
- [15] 庄义琳, 周金星, 吴秀芹, 等. 2001—2016年喀斯特断陷盆地植被变化及其驱动因素[J]. *林业科学*, 2019, 55(9): 177-184.
- Zhuang Yilin, Zhou Jinxing, Wu Xiuqin, et al. Vegetation change and its driving forces in karst faulted basins between 2001 and 2016[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(9): 177-184.
- [16] 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.
- [17] Chen Wei, Bai Shuang, Zhao Haimeng, et al. Spatio-temporal analysis and potential impact factors of vegetation variation in the karst region of Southwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(43): 61258-61273.
- [18] Kooistra L, Berger K, Brede B, et al. Reviews and syntheses: Remotely sensed optical time series for monitoring vegetation productivity[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2023, 21(2): 473-511.
- [19] 何宏昌, 马炳鑫, 靖娟利, 等. 近20年西南喀斯特地区植被NPP时空变化及自然因素地理探测[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(3): 172-178.
- He Hongchang, Ma Bingxin, Jing Juanli, et al. Spatio-temporal changes of NPP and natural factors in the southwestern karst areas from 2000 to 2019[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(3): 172-178.
- [20] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 等. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 680-693.
- Luo Xuling, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Southwest karst area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 680-693.
- [21] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析[J]. *地理研究*, 2003, 22(6): 733-741.
- Lan Anjun, Zhang Baiping, Xiong Kangning, et al. Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou Province[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 733-741.
- [22] Long Yi, Jiang Fugen, Deng Muli, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of eco-environmental quality in the Three-North region of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2023, 15(3): 231-252.
- [23] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [24] Chen A, Yang X C, Guo J, et al. Synthesized remote sensing-based desertification index reveals ecological restoration and its driving forces in the northern sand-prevention belt of China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 131: e108230.
- [25] 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 等. 2000—2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究[J]. *环境科学*, 2023, 44(1): 323-335.
- Xu Yong, Dai Qiangyu, Huang Wenting, et al. Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(1): 323-335.
- [26] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 5798-5808.
- Du Wenpeng, Yan Huimin, Zhen Lin, et al. The experience and practice of desertification control in karst region of southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [27] Liu Qi, Deng Dapeng, Liao Qidi, et al. Analysis on the influence of rainfall characteristics on soil and water loss in rocky desertification region[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2021, 36(4): e77.
- [28] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 等. 峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 67-73.
- Zeng Faming, Wu Zeyan, Zhang Cheng, et al. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 67-73.
- [29] Tong Xiaowei, Brandt M, Yue Yuemin, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst *via* ecological engineering[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [30] Zheng Liang, Wu Hao, Lin Anqi, et al. Climate change weakened the productivity benefits from the forestry ecological engineering projects-induced greening in China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2026, 146: e105052.