

2000~2020年石林县植被NDVI变化特征分析

曾浚恒

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年3月5日; 录用日期: 2026年4月2日; 发布日期: 2026年5月15日

摘要

植被覆盖变化能够反映一个区域的生态环境变化情况, 对喀斯特生态安全与石漠化防控具有重要指示意义。本文基于MODIS NDVI库的云南省石林县2000~2020年植被NDVI变化数据, 采用Theil-Sen趋势分析法与Mann-Kendall检验相结合的方法对研究区石林县植被时空变化趋势进行检验, 并结合Hurst指数预测未来变化趋势。结果表明: (1) NDVI呈显著上升趋势, 年均值由2000年的0.653增至2020年的0.758, 累计增幅16.1%; (2) NDVI空间上具有异质性, 高值区主要集中在东北部的山区, NDVI > 0.60, 占比69.8%, 低值区(8.5%)分布在城镇与石漠化地区; (3) 未来植被以持续改善为主(63.7%), 但仍有9.8%区域存在“由改善转退化”的风险。本研究成果可为区域石漠化治理提供依据。

关键词

植被NDVI, 时空变化, 趋势分析, Hurst指数, 石林县

Analysis of Vegetation NDVI Change Characteristics in Shilin County, Yunnan Province, from 2000 to 2020

Junheng Zeng

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: March 5, 2026; accepted: April 2, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Vegetation cover change reflects the ecological environment changes in a region and has important indicative significance for karst ecological security and rocky desertification control. This paper

uses vegetation NDVI change data from 2000 to 2020 in Shilin County, Yunnan Province, from the MODIS NDVI database. The Theil-Sen trend analysis method combined with the Mann-Kendall test was used to examine the spatiotemporal change trend of vegetation in the study area of Shilin County, and the Hurst index was used to predict future trends. The results showed that: (1) NDVI showed a significant upward trend, with the annual average increasing from 0.653 in 2000 to 0.758 in 2020, a cumulative increase of 16.1%; (2) NDVI exhibited spatial heterogeneity, with high-value areas mainly concentrated in the mountainous areas of the northeast (NDVI > 0.60, accounting for 69.8%), while low-value areas (8.5%) were distributed in urban areas and rocky desertification areas; (3) Future vegetation is expected to continue to improve (63.7%), but 9.8% of the areas still face the risk of “transitioning from improvement to degradation”. The findings of this study can provide a basis for regional rocky desertification control.

Keywords

Vegetation NDVI, Spatiotemporal Variation, Trend Analysis, Hurst Index, Shilin County

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

植被是陆地生态系统的主要组成部分,其生长状况可较好地反映区域生态环境质量及人为的影响[1]。归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index), NDVI 为植被覆盖和生长状况的遥感指数,因其计算复杂度低和具有时间序列较长等优点被研究者广泛地引用。近年来,因全球气候变暖、人类活动等因素,区域植被覆盖变化成为地理学、生态学和资源环境领域的研究热点[2]。

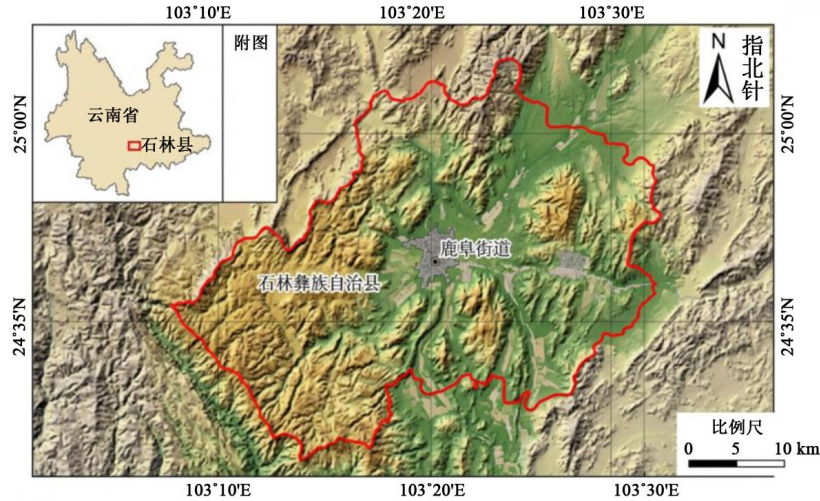
云南省是我国喀斯特地貌分布最为集中、生态环境最为脆弱的地区之一,其长期面临石漠化、水土流失等问题[3]。石林县作为典型的喀斯特县域,生态环境敏感,同时也是国家和云南省石漠化综合治理的重点区域。自 21 世纪以来,随着退耕还林、天然林保护以及石漠化治理等生态工程持续实施,区域植被覆盖状况出现显著变动。目前研究大多聚焦于流域或省域尺度,对典型喀斯特县域长期植被变化的系统梳理相对匮乏,尤其是对未来变化趋势的研究依旧有待加强。

基于此,本文选取石林县作为研究区,利用 2000~2020 年长时间序列 NDVI 数据,从时间变化、空间分布及未来持续性等方面系统分析植被覆盖变化特征,以期为区域生态治理和土地利用优化提供参考。

2. 研究区概况

石林彝族自治县地处云南省的中东部,处在滇中高原东部的边缘。地理位置介于东经 103°11′~103°29′、北纬 24°38′~24°58′区间(如图 1 所示)。全县地形以喀斯特高原和丘陵为主,地势高低起伏明显,岩溶地貌发育十分典型,石漠化难题突出。其气候类型为亚热带高原季风气候,年均气温约 15℃,年均降水量约 900 mm,为植被生长提供了必要的水热基础。

土地利用类型以林地、耕地和草地为主,城镇建设用地主要集中于鹿阜街道等区域。近年来,受旅游开发和城镇化推进影响,人类活动对植被覆盖格局产生了一定扰动,使得区域植被变化呈现出明显的空间差异性[4]。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为昆明 S(2022)002 号的标准地图制作，底图无修改。下同。

Figure 1. Geographical location and topographical map
图 1. 地理位置及地形示意图

3. 数据来源与研究方法

3.1. 数据来源

本文植被数据来源于美国国家航空航天局(NASA)发布的 MODIS NDVI 产品 MOD13Q1, 时间范围为 2000~2020 年, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d [4]。该数据具有时间跨度长、稳定性高的特点, 适用于区域尺度植被变化研究[5]。

研究对 MODIS NDVI 数据进行投影变换处理, 对数据进行格式转换处理, 采用最大值合成方法, 生成年度 NDVI 数据, 以降低云层和大气条件的影响。并按照石林县行政范围对影像进行裁剪, 剔除非植被像元, 建立研究区 NDVI 时间序列数据集, 为下文研究奠定基础。

3.2. 研究方法

(1) 趋势分析方法(Theil-Sen 与 Mann-Kendall)

为定量分析植被 NDVI 变化趋势, 采用 Theil-Sen Median 方法计算 NDVI 变化斜率, 其计算公式为[6]:

$$\text{Slope} = \text{Median} \left(\frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i} \right) \quad (1)$$

其中, NDVI_i 和 NDVI_j 分别表示第 i 年和第 j 年的 NDVI 值。Slope > 0 表示植被改善, Slope < 0 表示退化。在此基础上, 引入 Mann-Kendall 非参数检验方法, 对 NDVI 变化趋势的显著性进行检验, 并结合趋势方向, 将植被变化划分为改善、稳定和退化等类型[7]。

(2) 持续性分析方法(Hurst 指数)

采用重标极差分析法计算 NDVI 时间序列的 Hurst 指数, 其计算公式为:

$$\frac{R(n)}{S(n)} = c \cdot n^H \quad (2)$$

式中, H 为 Hurst 指数。当 $H > 0.5$ 时, 表示 NDVI 变化具有持续性; 当 $H < 0.5$ 时, 表示变化具有反持续性。通过 Hurst 指数判断未来植被变化趋势, 并与趋势分析结果叠加识别不同演变情景[8] [9]。

4. 结果与分析

4.1. 石林县植被 NDVI 时间变化特征

由 2000~2020 年的石林县平均 NDVI(表 1)可知,研究期内植被 NDVI 总体呈现出显著的波动上升趋势,表明区域植被覆盖状况持续改善。从总变化趋势来看,NDVI 变化呈现明显的波动阶段。

Table 1. Characteristics of the annual average NDVI variation in Shilin County from 2000 to 2020

表 1. 2000~2020 年石林县年均 NDVI 变化特征

| 年份 | 年均 NDVI | 变化特征 |
|------|---------|------|
| 2000 | 0.653 | — |
| 2005 | 0.682 | 稳步上升 |
| 2010 | 0.721 | 明显上升 |
| 2015 | 0.742 | 增速放缓 |
| 2020 | 0.758 | 高位稳定 |

石林县 NDVI 上升幅度大,植被恢复迅速,表明其生态环境改善明显,该时段正是退耕还林、石漠化综合治理等生态工程重点实施期间,大量的坡耕地林地化、草地化对区域植被恢复发挥了重要的作用[10]。2010 年以后 NDVI 增幅开始下降且处于高值区,呈现小幅波动上升趋势,说明进入生态治理工程的巩固期后植被覆盖由“快进”转入“慢增”,区域生态系统趋于稳定。

综上所述,通过研究地区时间梯度上的分析,研究区随着研究工作的开展,石林县研究区生态环境逐步好转,植被空间逐步减小,如何使植被质量更优、质量更稳定,是今后一段时期内的重点整治工作。

4.2. 植被 NDVI 空间分布特征

多年平均 NDVI 空间分布及分级统计结果(如图 2、表 2)显示,石林县植被覆盖具有显著的空间异质性,整体上呈现出“山区高、城镇低”的分布格局,高 NDVI 值区主要集中在东北部山区及生态保护区,而中低 NDVI 值区则多分布于城镇建成区、交通沿线及部分石漠化区域。

高覆盖区以林地为主,植被类型相对稳定,受人为影响小,生态系统结构完整,是石林县重要的生态防护屏障。中高覆盖区分布于丘陵区 and 农业活动区,植被以人工林、耕地、草地为主,受自然、农业生产方式影响 NDVI 值较高,局部有波动;低覆盖区集中于城镇建城区和岩溶发育的石漠化地区,土层厚度较薄,基岩裸露或不透水面积较大,植被发展受阻。

该分布格局表明,自然地形因素和人为活动是影响石林县植被覆盖空间分布的主要因素,不同区域在生态治理和土地利用管理中应采取差异化策略。

Table 2. Area proportion of different NDVI levels in Shilin County

表 2. 石林县不同 NDVI 等级面积比例

| NDVI 等级 | NDVI 范围 | 面积比例 (%) | 主要分布区域 |
|---------|-----------|----------|-------------|
| 高覆盖区 | >0.75 | 28.6 | 东北部山区、生态保护区 |
| 中高覆盖区 | 0.60~0.75 | 41.2 | 丘陵区、林地集中区 |
| 中低覆盖区 | 0.40~0.60 | 21.7 | 农业活动区 |
| 低覆盖区 | <0.40 | 8.5 | 城镇建成区、石漠化区 |

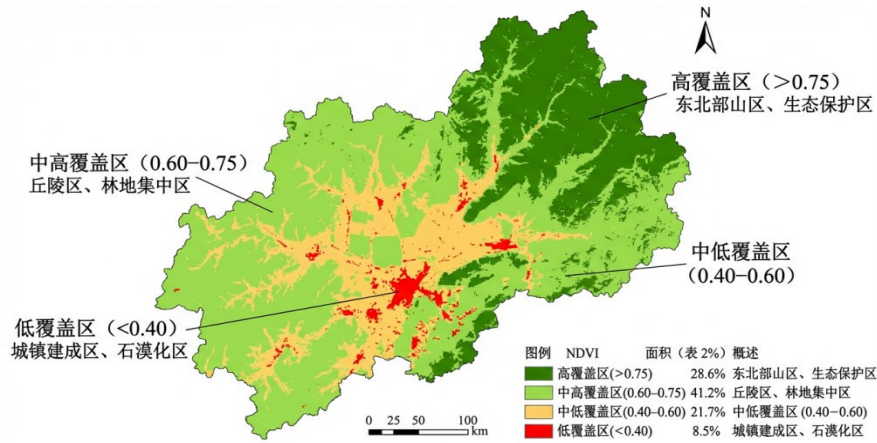


Figure 2. Spatial distribution map of multi-year average NDVI in Shilin County
图 2. 石林县多年平均 NDVI 空间分布图

4.3. 植被 NDVI 变化趋势分析

基于 Theil-Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结果(表 3)，石林县 2000~2020 年植被 NDVI 变化趋势以改善为主，改善区域面积明显大于退化区域，反映出研究期内区域生态环境整体向好。

Table 3. Types and area proportions of NDVI changes in vegetation in Shilin County
表 3. 石林县植被 NDVI 变化趋势类型及面积比例

| 变化类型 | 面积比例(%) | 空间分布特征 |
|------|---------|------------|
| 显著改善 | 39.4 | 山区、退耕还林重点区 |
| 轻微改善 | 34.8 | 农村腹地 |
| 基本稳定 | 15.6 | 林地集中区 |
| 轻微退化 | 7.2 | 城乡结合部 |
| 显著退化 | 3.0 | 城镇建成区 |

显著改善和轻微改善区域主要集中在山区和退耕还林实施较早、力度较大的区域，表明生态工程建设起到了植被恢复作用。基本稳定区域主要分布在植被覆盖度高的林地区域，NDVI 常年保持在高位，变化不大。退化的面积相对较小，集中在城镇扩展区和城乡结合部，建设用地大量向外扩张和人为活动增加，对植被覆盖形成一定的空间挤压。

总体而言，石林县植被总体变化趋势为“整体改善、局部退化”型，生态改善效果明显，但由城镇化引起的局部性生态问题不容忽视。

4.4. 植被变化持续性分析

Hurst 指数分析结果及其与趋势分析的叠加结果(表 4)显示，石林县未来植被变化整体具有较强的持续性特征。持续改善区占据主导地位，表明在现有气候和保护政策持续的前提下，研究区域植被面积大部分地区保持改善趋势；持续退化、改善转退化区相对较少，但具有较高的生态风险。多分布在生态敏感区或城市扩张周边区域，植被基础差，易受气候和人为因素干扰影响，一旦生态管控措施减弱，植被退化风险将显著增加

Table 4. Statistics on the persistence types of NDVI changes in vegetation in Shilin County**表 4.** 石林县植被 NDVI 变化持续性类型统计

| 持续性类型 | 面积比例(%) | 特征说明 |
|-------|---------|----------|
| 持续改善 | 63.7 | 未来延续改善趋势 |
| 持续退化 | 6.5 | 未来延续退化趋势 |
| 改善转退化 | 9.8 | 存在潜在退化风险 |
| 随机变化 | 20.0 | 变化方向不确定 |

随机变化区域则主要出现在土地利用类型频繁转换的区域，植被变化方向不稳定。持续性分析结果也显示未来石林县生态治理的重点应从单纯扩大植被覆盖面积，逐步转向提升植被稳定性和防范潜在退化风险，保持石林县生态系统的良性发展。

5. 研究结论

基于 2000~2020 年 MODIS NDVI 数据，本文采用 Theil-Sen 趋势分析、Mann-Kendall 检验及 Hurst 指数，对云南省石林县植被 NDVI 变化特征进行了系统分析，主要结论如下：

(1) 2000~2020 年石林县植被 NDVI 总体呈显著上升趋势，区域生态环境质量持续改善。

(2) 植被覆盖具有明显的空间分异特征，高值区多分布在山区、生态保护区，低值区多分布在城镇建成区、石漠化区域。

(3) 未来石林县植被变化以持续改善为主，但局部区域需要加强保护、管理，避免出现退化。

参考文献

- [1] 陈棋, 张超, 田湘云, 史小蓉, 张玉薇, 王妍. 云南省 2000-2020 年石漠化时空演变分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 417-426.
- [2] 李加顺, 刘丽. 2000-2020 年云南省植被时空变化及影响因素分析[J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3503-3513.
- [3] 夏凯, 黄义忠. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被时空变化及驱动因素分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(11): 3427-3437.
- [4] Didan, K. (2021) MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- [5] 和彩霞, 靖娟利, 边占新, 窦世卿, 徐勇, 何宏昌. 1982-2015 年西南岩溶区 NDVI 时空变化及未来变化趋势[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43(2): 260-268.
- [6] Anuradha, and Gupta, S. (2024) Assessment of Spatio-Temporal Changes in Land Use and Land Cover—A Case Study of Yamunanagar District (Haryana), India. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, **21**, 161-171. <https://doi.org/10.3233/ajw240083>
- [7] Wang, T., Zhao, M., Gao, Y., Yu, Z. and Zhao, Z. (2023) Analyzing Spatial-Temporal Change of Vegetation Ecological Quality and Its Influencing Factors in Anhui Province, Eastern China Using Multiscale Geographically Weighted Regression. *Applied Sciences*, **13**, Article 6359. <https://doi.org/10.3390/app13116359>
- [8] 李颖, 马双, 徐菀笛, 马霄雪, 刘自颖, 彭飞, 常艺琼. 东北三省干旱时空特征及其对植被覆盖变化的影响[J]. 生态学报, 2026, 46(5): 2701-2723.
- [9] Bojago, E., Tadila, G. and Masha, M. (2025) Monitoring Spatio-Temporal Changes in Land Use, Land Cover, and NDVI Using MODIS Data in Ethiopia's Gambela Region. *Discover Applied Sciences*, **7**, Article No. 1361. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07879-1>
- [10] 鞠洋, 马国忠, 尤宏宇. 大兴安岭地区降水与植被 NDVI 时空变化特征及其耦合协调关系[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(6): 251-260.