

## 多指标协同的典型石漠化区植被动态 遥感监测及治理成效分析

陈志元<sup>1</sup>, 陈国坤<sup>1,2,3</sup>, 胡春田<sup>4</sup>, 李江<sup>5</sup>, 井冯钰雅<sup>1</sup>, 余维燕<sup>1</sup>

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093; 2.云南省定量遥感重点实验室,昆明 650093;

3.云南省山地灾害天空地一体化智慧监测国际联合实验室,昆明 650093; 4.云南大学国际河流与

生态安全研究院,昆明 650500; 5.国家林业和草原局西南调查规划院,昆明 650031)

**摘要:** [目的] 本研究以文山州石漠化重点治理工程区为主要研究对象,旨在通过分析喀斯特石漠化区植被覆盖度、相对裸露度和潜在侵蚀风险等指标的协同变化特征及差异,为治理工程成效评估提供参考。[方法] 基于 2021—2025 年 Sentinel-2 生长季遥感影像,以 2021 年作为遥感监测基线年,计算归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、植被覆盖度(FVC)、归一化差异岩石指数(NDRI)及基于 NDRI 的相对裸露度(BERI);同时构建降雨侵蚀力加权的植被覆盖与管理因子(C)。结合 CHIRPS 降水、ERA5-Land 气温和 6 个月标准化降水指数(SPI6)干旱指数,采用分区统计、显著性检验、工程-非工程变化量之差、基线 FVC 分层和 Pearson 相关分析,开展不同治理工程类型的植被动态遥感监测及治理成效分析。[结果] 1)2021—2025 年,工程区整体 NDVI、EVI 和 FVC 分别提高 5.47%、5.03% 和 8.58%,C 因子下降 58.10%,植被覆盖状况总体改善,潜在侵蚀风险降低;BERI 下降 2.14%,但未达到显著水平,说明相对裸露度变化较植被恢复存在滞后。2)不同治理措施响应幅度存在差异,草原改良区 NDVI 和 FVC 增幅最大,分别为 11.17% 和 19.65%;退化林修复区 BERI 降幅最大,其相对裸露度改善较为明显,各治理措施类型 C 因子均呈下降趋势。3)受气候扰动和年际波动影响,2023 年各分区普遍出现 NDVI、FVC 下降及 BERI、C 因子升高等阶段性波动,其中草原改良区对降水变化最为敏感。4)基线 FVC 分层比较和 Pearson 相关分析表明,不同治理类型的响应幅度也存在差异。在相近初始覆盖条件下,工程区中、高覆盖层 FVC 改善幅度高于非工程区,显示工程区在部分基线条件下具有相对恢复优势;植被覆盖、相对裸露度和潜在侵蚀风险之间具有一定协同变化关系。[结论] 文山州石漠化重点治理工程区总体表现出生态改善的特征,但不同治理类型区的植被恢复程度、BERI 响应强度并不一致。多指标协同监测能够较完整地揭示不同治理措施的差异,为喀斯特石漠化治理成效评估和生态修复措施优化提供参考。

**关键词:** 喀斯特石漠化; 遥感监测; 植被恢复; 相对裸露度; 潜在侵蚀风险; 多指标协同

**中图分类号:** X171.1; TP79

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2026)05-0022-13

## Multi-Indicator Synergistic Monitoring of Vegetation Dynamics and Restoration Effectiveness in Typical Karst Rocky Desertification Regions

Chen Zhiyuan<sup>1</sup>, Chen Guokun<sup>1,2,3</sup>, Hu Chuntian<sup>4</sup>, Li Jiang<sup>5</sup>, Jing Fengyuya<sup>1</sup>, Yu Weiyan<sup>1</sup>

(1.Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2.Yunnan Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing, Kunming 650093, China; 3.Yunnan International Joint

Laboratory for Integrated Sky-Ground Intelligent Monitoring of Mountain Hazards, Kunming 650093, China;

4.Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China;

5.Southwest Survey and Planning Institute of the National Forestry and

Grassland Administration, Kunming 650031, China)

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):2026-08-26

资助项目:云南省科技厅基础研究面上项目(202501AT070326);国家自然科学基金青年科学基金项目(42407096)

第一作者:陈志元(2002—),男,硕士研究生,主要从事遥感图像处理与信息分析研究。E-mail:20252101048@stu.kust.edu.cn

通信作者:陈国坤(1989—),男,博士,硕士生导师,副教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:chengk@radi.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

**Abstract:** [Objective] This study focuses on the key rocky desertification control project areas in Wenshan Prefecture, aiming to analyze the synergistic variation characteristics and differences in vegetation cover, relative bareness, and potential erosion risk in karst rocky desertification regions, thereby providing references for evaluating the effectiveness of ecological restoration projects. [Methods] Based on Sentinel-2 growing-season remote sensing images from 2021 to 2025, with 2021 set as the baseline year, we calculated NDVI, EVI, FVC, NDRI, and NDRI-based BERI. A rainfall erosivity-weighted vegetation cover and management factor ( $C$  factor) was constructed by integrating CHIRPS precipitation data, ERA5-Land temperature data, and the SPI6 drought index. Zonal statistics, significance testing, difference in changes between project and non-project areas, stratified analysis based on baseline FVC, and Pearson correlation analysis were employed to monitor vegetation dynamics and assess restoration effectiveness across different treatment types. [Results] 1) From 2021 to 2025, overall NDVI, EVI, and FVC in the project area increased by 5.47%, 5.03%, and 8.58%, respectively; the  $C$  factor decreased by 58.10%, indicating an overall improvement in vegetation cover and a reduction in potential erosion risk. BERI declined by 2.14%, but not significantly, suggesting that changes in relative bareness lag behind vegetation recovery. 2) Different restoration measures showed varying responses: grassland improvement areas exhibited the largest increases in NDVI (11.17%) and FVC (19.65%); degraded forest restoration areas had the greatest decline in BERI, reflecting notable improvement in relative bareness; all treatment types showed decreasing trends in the  $C$  factor. 3) Influenced by climatic fluctuations and inter-annual variability, NDVI and FVC generally declined in 2023, while BERI and the  $C$  factor increased temporarily; grassland improvement areas were most sensitive to precipitation variations. 4) Stratified comparison by baseline FVC and Pearson correlation analysis revealed differential responses among treatment types: under similar initial coverage conditions, medium and high coverage in the project area improved more than those in non-project areas, indicating relative restoration advantages under certain baseline conditions; vegetation cover, relative bareness, and potential erosion risk displayed significant synergistic variation patterns. [Conclusion] The key rocky desertification control project areas in Wenshan have shown overall ecological improvement, yet vegetation recovery rates and BERI response intensities vary among different treatment zones. Multi-indicator synergistic monitoring provides a relatively comprehensive approach to distinguishing the effects of different restoration measures, offering scientific references for effectiveness evaluation and optimization of ecological restoration strategies in karst rocky desertification regions. **Keywords:** karst rocky desertification; remote sensing monitoring; vegetation restoration; relative bareness; potential erosion risk; multi-indicator synergy

Received: 2026-04-28

Revised: 2026-05-26

Accepted: 2026-06-09

Online(www.cnki.net): 2026-08-26

石漠化是我国西南岩溶区突出的生态退化问题,通常伴随植被退化、土层变薄、岩石裸露增强和土壤侵蚀风险上升,严重制约区域生态安全与可持续发展<sup>[1-6]</sup>。与一般水蚀区相比,喀斯特区受碳酸盐岩出露、土层浅薄、坡面破碎及地下裂隙发育等地质背景制约,土壤侵蚀过程具有明显的地表-地下二元结构特征<sup>[1,7-9]</sup>,石漠化与侵蚀过程之间并非简单线性对应,而是受降雨、坡面条件、岩石裸露、植被覆盖及人类活动共同影响<sup>[1,10-13]</sup>。石漠化监测需快速获取岩石裸露、植被覆盖与土层状况等关键信息,传统调查难以全域覆盖,现多采用遥感与地面结合方式实现快速定量提取<sup>[14]</sup>。

随着退耕还林、封山育林、人工造林和石漠化综合治理等工程持续推进,西南喀斯特区生态恢复与治理

成效评估受到广泛关注。已有研究<sup>[15-22]</sup>表明,生态工程总体上促进西南喀斯特区植被恢复和区域增绿,但其时空格局具有明显异质性,不同地貌单元、不同区域及不同治理方式的响应并不一致。同时,相关研究<sup>[7,10,23-25]</sup>指出,喀斯特区基岩裸露与水土流失关系复杂,岩石裸露度、土壤侵蚀和植被恢复之间存在滞后与错位,单一植被指标难以解释治理工程对石漠化地表结构和侵蚀风险的综合影响。因此,岩溶区石漠化治理成效评价不能只停留在植被增绿层面,还需要同时分析相对裸露度变化和潜在侵蚀风险响应等内容。

相关研究<sup>[4,14,26-28]</sup>对岩溶区石漠化动态监测、生态敏感性和生态质量变化开展分析,但多侧重于石漠化范围的时空演变、生态质量评价或敏感性分区等,对区

域尺度重点治理工程实施后植被恢复、相对裸露度变化与潜在侵蚀风险响应之间关系的关注仍显不足。与此同时,工程区与非工程区通常存在初始覆盖度、地形条件、土壤背景等方面差异,不同植被恢复措施在土壤质量、地表覆盖结构和生态功能响应方面也存在差异<sup>[23-24,28-31]</sup>。若仅依据工程区与非工程区的总体变化进行比较,容易忽略基线条件差异对结果解释的影响。因此,石漠化治理成效评估不仅需要关注整体恢复幅度,还应进一步区分治理类型差异、初始覆盖条件和多指标响应特征。短时间序列内的植被动态易受降雨、气温和干旱事件扰动,若缺乏气候背景约束,可能将年际气候异常造成的阶段性波动误判为治理成效差异。因此,本研究以文山州喀斯特石漠化重点治理工程区及邻近非工程区为研究对象,基于 2021—2025 年 Sentinel-2 生长季遥感影像,并结合同期降水、气温和干旱指数数据,选取 NDVI、EVI、FVC、NDRI、BERI 和土壤侵蚀模型中 C 因子等指标,从植被恢复状况、地表相对裸露变化和潜在侵蚀风险等方面,综合分析工程区整体、不同治理类型及工程-非工程对照单元的生态响应特征。重点探讨 3 个问题:1)在不同基线覆盖条件下,文山州石漠化重点治理工程区植被覆盖度、相对裸露度和潜在侵蚀风险等是否发生协同变化? 2)草原改良、封山育林、人工造林和退化林修复等不同治理措施的生态恢复效果是否存在显著差异? 3)气候异常对各分析单元多指标年际波动有何影响? 研究结果可为喀斯特石漠化治理工程的治理成效评估、治理措施优化配置及生态修复精细化管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

文山州位于云南省东南部,属典型喀斯特山地生态脆弱区,区域内碳酸盐岩分布广泛,地形破碎,土层浅薄,石漠化与水土流失问题具有较强耦合性<sup>[1-2,4,26]</sup>。该区以山地地形为主,土地总面积 3.14 万 km<sup>2</sup>,地势西北高东南低,海拔 1 000~1 800 m<sup>[32]</sup>,既是我国石漠化防治的重要实施区域,也是开展治理成效评估与生态修复响应研究的典型区域。考虑重点治理工程于 2021 年陆续完成,本文监测时期覆盖工程实施后期及建成后的恢复过程,2021 年仅作为遥感监测的相对基线年,不作为严格意义上的工程实施前基准年。

根据不同重点治理工程矢量边界,将研究区划分为 6 类分析单元:工程区整体、草原改良区、封山育林区、人工造林区、退化林修复区和非工程区。其中,工程区整体用于识别重点治理工程总体响应,4 类治理类型用于比较不同措施的恢复成效,非工程区作为邻近对照单元,用于识别工程实施背景下的相对恢复特征。需要说明的是,由于工程区与非工

程区存在初始立地条件等差异,二者比较主要用于揭示空间共现关系和相对响应差异,不作为严格因果推断依据。分析单元空间关系见图 1。

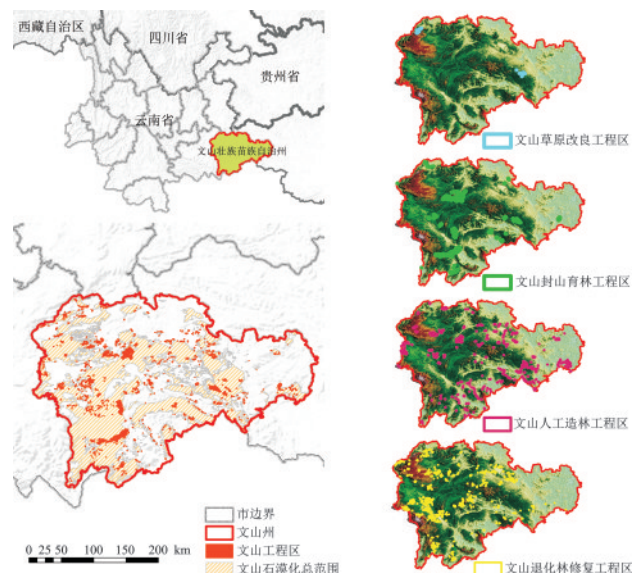


图 1 研究区位置与 4 种石漠化重点治理工程空间分布  
Fig.1 Location of the study area and spatial pattern of four major rocky desertification restoration projects

### 1.2 数据来源与预处理

本文主要采用 2021—2025 年 Sentinel-2 生长季遥感影像作为基础数据。考虑到喀斯特区植被生长和地表裸露特征在生长季更具代表性,选取每年 5—10 月为影像合成时段。基于 Google Earth Engine 平台获取 Sentinel-2 地表反射率产品,并结合云概率数据进行年度生长季中值合成,以提高跨年比较的稳定性。已有研究<sup>[15-18]</sup>表明,多时相遥感数据能够较好揭示喀斯特区植被恢复及治理工程的增绿效应。为分析异常降水年份对生态指标波动的影响,本文引入 CHIRPS 逐月降水、ERA5-Land 逐月气温和 SPI6 干旱指数,识别研究期内降水变化及干旱事件对植被覆盖、相对裸露度和潜在侵蚀风险的影响。具体数据来源与处理方式见表 1。

## 2 研究方法

### 2.1 多指标协同评估方法确定

为系统分析文山州喀斯特石漠化重点治理工程区植被动态及治理成效,本文采用多指标协同的综合评估方法。其中,NDVI、EVI 和 FVC 用于表征植被恢复状况;NDRI 作为裸露地表光谱响应的中间指标,并进一步转换为基于 NDRI 的相对裸露度 (BERI);土壤侵蚀模型中的植被覆盖与管理因子 (C) 用于辅助表征潜在侵蚀风险响应。在此基础上,本文从年际变化、分区差异、工程-非工程对照、基线分层和多指标相关性 5 个层面识别治理工程区的生态响应,见技术路线图 2。

表 1 主要数据源基本信息  
Table 1 Overview of primary datasets used in this study

| 数据名称                     | 时间范围                  | 空间分辨率/类型 | 主要字段或波段                      | 用途与处理方式                                                                           |
|--------------------------|-----------------------|----------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Sentinel-2 SR Harmonized | 2021—2025 年<br>5—10 月 | 10 m     | B2、B3、B4、B8、B11、B12          | 年度生长季中值合成;计算 NDVI、EVI、FVC 和 NDRI,并基于 NDRI 构建 BERI;结合植被类型土壤流失比(SLR)和半月降雨侵蚀力计算 C 因子 |
| 石漠化总范围<br>矢量             | 研究期固定                 | 矢量       | 研究区边界                        | 限定指标计算、空间展示与分区统计范围                                                                |
| CHIRPS 降水<br>数据          | 2021—2025 年<br>逐月     | 0.05°    | 月降水量                         | 统计生长季、暖季和冷季降水量,辅助解释年际气象波动                                                         |
| ERA5-Land 气<br>温数据       | 2021—2025 年<br>逐月     | 0.01°    | 2 m 气温                       | 统计生长季平均气温和气温距平                                                                    |
| 工程区及治理<br>类型矢量           | 研究期固定                 | 矢量       | 工程区整体保护、草原改良、封山育林、人工造林、退化林修复 | 识别不同治理措施的恢复路径和响应强度                                                                |
| 非工程区矢量                   | 研究期固定                 | 矢量       | 邻近非工程区                       | 对照识别工程区相对恢复特征                                                                     |

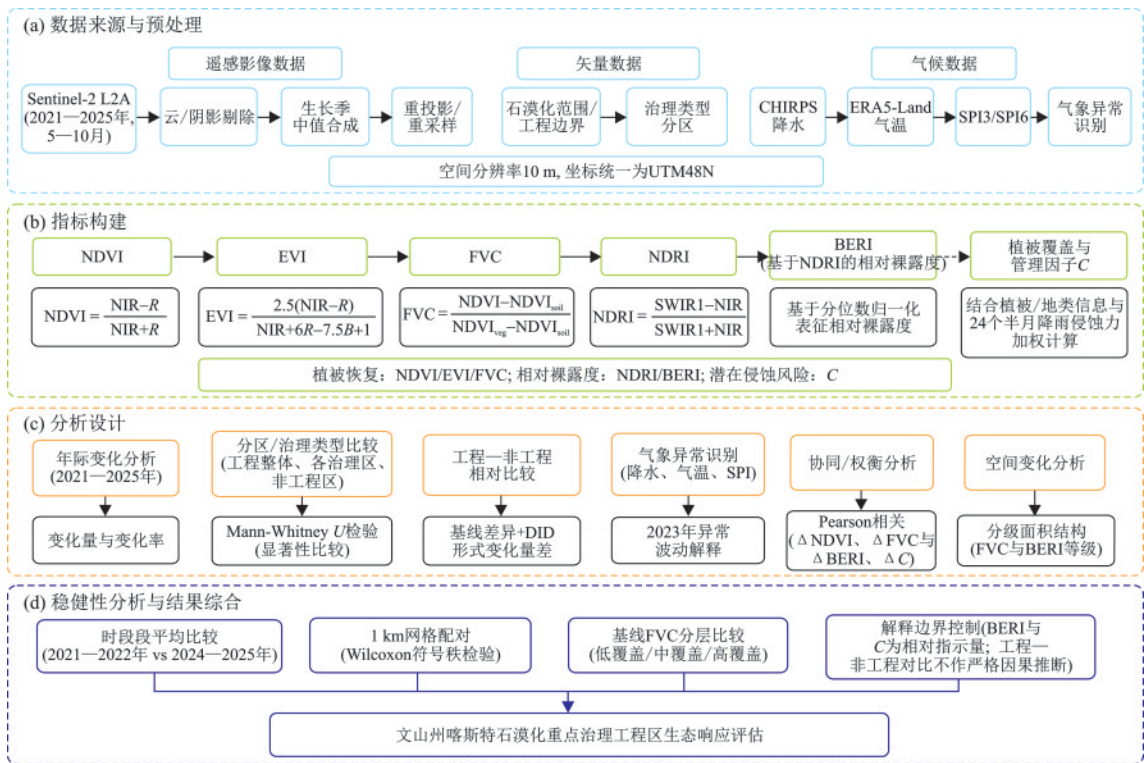


图 2 多指标协同评估技术路线

Fig.2 Methodological framework of the multi-indicator collaborative evaluation

2.2 指标计算方法

2.2.1 归一化植被指数(NDVI) NDVI能够较好地反映植被绿度变化,是识别喀斯特区植被恢复最常用的遥感指标之一<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}$$

(1)

式中: $\rho_{NIR}$ 为近红外波段反射率; $\rho_R$ 为红光波段反射率。

2.2.2 增强型植被指数(EVI) 增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)是一种优化后的遥感植被指数,旨在克服归一化植被指数(NDVI)在高植被覆盖区易饱和及受大气、土壤背景干扰的缺

陷<sup>[33]</sup>。计算公式为:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + 6\rho_R - 7.5\rho_B + 1}$$

(2)

式中: $\rho_B$ 为蓝光波段反射率,其余符号含义同式(1)。为避免异常像元干扰,本文将  $EVI < -1$  或  $EVI > 1$  的像元视为异常值并剔除。

2.2.3 植被覆盖度(FVC) 植被覆盖度是衡量地表植被状况的一个重要指标,是描述生态系统的重要基础数据,也是区域生态系统环境变化的重要指示指标,对水文、生态、区域变化等都具有重要意义。植被覆盖度采用像元二分模型估算<sup>[34]</sup>,计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (3)$$

式中:  $NDVI_{soil}$  为裸土端元;  $NDVI_{veg}$  为纯植被端元。考虑研究区地表类型复杂及年际波动影响, 本文在石漠化总范围内汇集 2021—2025 年全部有效 NDVI 像元, 取其 5% 分位值作为  $NDVI_{soil}$ , 95% 分位值作为  $NDVI_{veg}$ 。当  $FVC < 0$  时赋值为 0, 当  $FVC > 1$  时赋值为 1。

2.2.4 归一化差异岩石指数 (NDRI) 为表征喀斯特区裸露岩土与植被覆盖差异的光谱响应, 本文采用归一化差异岩石指数 (normalized difference rock index, NDRI) 作为相对裸露度识别的中间光谱指标。NDRI 通过短波红外波段与近红外波段的反射率差异反映裸露岩土背景的相对变化, 计算公式<sup>[35]</sup>为:

$$NDRI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (4)$$

式中:  $\rho_{SWIR1}$  为短波红外 1 波段反射率;  $\rho_{NIR}$  为近红外波段反射率。

2.2.5 基于 NDRI 的相对裸露度 (BERI) BERI 为基于 NDRI 归一化构建的相对裸露度指标, 主要用于表征研究区内部裸露岩土光谱响应的相对强弱, 不等同于地面调查意义上的实测裸岩率。为降低不同年份影像分布差异对比较结果的影响, 本文采用统一分位数归一化方法计算 BERI<sup>[14]</sup>:

$$BERI = \frac{NDRI - NDRI_{min}}{NDRI_{max} - NDRI_{min}} \quad (5)$$

式中:  $NDRI_{min}$  和  $NDRI_{max}$  分别为石漠化总范围内 2021—2025 年全部有效 NDRI 像元的 5% 和 95% 分位值。BERI 取值限制为 0~1, 数值越高, 表示裸露岩土光谱响应越强, 相对裸露度越高。需要说明的是, BERI 用于研究区内部相对比较, 不代表地面实测裸岩率或真实裸岩面积比例。

2.2.6 降雨侵蚀力加权的植被覆盖与管理因子 (C) 为更合理表征植被覆盖和治理措施对潜在侵蚀风险的调节作用, 根据研究区治理措施类型和植被覆盖特征, 将植被覆盖类型划分为草地类和本本植被类。其中, 草地类主要对应草原改良区; 木本植被类包括封山育林区、人工造林区、退化林修复区以及乔木、灌木和林灌混合覆盖区, 考虑不同植被类型 (乔木灌木、草地) 同一盖度对土壤侵蚀的抑制作用差异, 结合《区域水土流失动态监测技术规范 (试行)》<sup>[36]</sup>, 确定不同植被类型的 C 因子。

草地类 SLR 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.25 + 0.78845 \times 1.05968^{100FVC_i}} \quad (6)$$

木本植被类 SLR 计算公式为:

$$SLR_i = \frac{1}{1.17647 + 0.86242 \times 1.05905^{100FVC_i}} \quad (7)$$

式中:  $FVC_i$  为第  $i$  个时段的植被覆盖度, 取值为 0~1;  $SLR_i$  为对应时段的土壤流失比。

进一步考虑降雨侵蚀力在年内分配不均的特点, 本文以半月降雨侵蚀力作为权重, 计算降雨侵蚀力加权的植被覆盖与管理因子:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \times SLR_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (8)$$

式中:  $R_i$  为第  $i$  个半月时段的降雨侵蚀力;  $SLR_i$  为该半月时段对应植被覆盖类型和 FVC 条件下的土壤流失比;  $n$  为覆盖的半月次数。C 数值越小, 表示降雨侵蚀力集中发生时段的地表覆盖和生物措施条件越好, 潜在侵蚀风险越低。

### 2.3 指标分级与分区统计

为便于比较不同指标的空间结构差异, NDVI 和 FVC 采用 0.2 等间隔五级分级法, 即 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8 和 0.8~1.0; BERI 采用 <0.2、0.2~0.3、0.3~0.5、0.5~0.7 和  $\geq 0.7$  的 5 级分级方法<sup>[3, 18]</sup>。分别提取工程区整体、草原改良区、封山育林区、人工造林区、退化林修复区和非工程区的均值、标准差、中位数及分级面积占比, 用于识别不同治理类型和对照区的变化特征。

### 2.4 变化量、变化率与多指标相关性分析

为比较研究期内不同指标的变化幅度, 本文以 2021 年作为遥感监测基线年, 以 2025 年作为末期年份, 分别计算各指标的变化量和相对变化率。计算公式为:

$$\Delta X = X_{2025} - X_{2021} \quad (9)$$

$$R_X = \frac{\Delta X}{|X_{2021}|} \times 100\% \quad (10)$$

式中:  $X_{2021}$  和  $X_{2025}$  分别为 2021 年和 2025 年对应指标的分区均值;  $\Delta X$  为指标变化量;  $R_X$  为相对变化率, %。

为描述工程区与非工程区在研究期内的相对变化差异, 进一步计算工程-非工程区变化量之差:

$$\Delta D_X = \Delta X_{project} - \Delta X_{non-project} \quad (11)$$

式中:  $\Delta D_X$  为指标 X 的工程-非工程变化量之差;  $\Delta X_{project}$  和  $\Delta X_{non-project}$  分别为工程区和非工程区 2021—2025 年的变化量。该指标用于描述 2 类区域的相对响应差异, 不作为严格因果效应估计。

为分析植被恢复、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险指示量之间的协同变化关系, 本文基于逐像元变化量计算 Pearson 相关系数。计算公式为:

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \bar{\Delta})(\Delta Y_i - \bar{\Delta})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta X_i - \bar{\Delta})^2 \sum_{i=1}^n (\Delta Y_i - \bar{\Delta})^2}} \quad (12)$$

式中: $r_{XY}$ 为指标 $X$ 与指标 $Y$ 逐像元变化量之间的Pearson相关系数; $\Delta X_i$ 和 $\Delta Y_i$ 分别为第 $i$ 个像元上指标 $X$ 和指标 $Y$ 的变化量; $\bar{\Delta}$ 和 $\bar{\Delta}$ 分别为对应变化量的平均值; $n$ 为参与计算的有效像元数。本文重点分析 $\Delta NDVI$ 、 $\Delta FVC$ 与 $\Delta BERI$ 、 $\Delta C$ 之间的相关关系,用于识别植被恢复、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险指示量变化之间的协同或差异化响应。

## 2.5 气象异常识别、显著性检验与稳健性分析

为识别异常降水年份及水热背景变化对生态指标年际波动的影响,本文统计2021—2025年逐月降水量、逐月平均气温及SPI6干旱指数,并将5—10月定义为生长季。生长季降水量和非生长季降水量分别计算为:

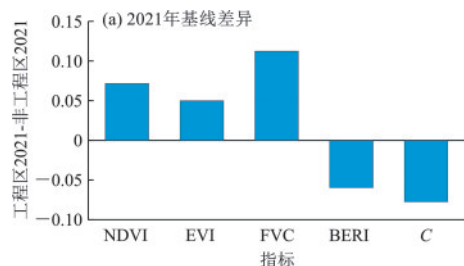
$$P_{gs} = \sum_{m=5}^{10} P_m \quad (13)$$

$$P_{ngs} = \sum_{m=1}^4 P_m + \sum_{m=11}^{12} P_m \quad (14)$$

式中: $P_{gs}$ 为生长季降水量,mm; $P_{ngs}$ 为非生长季降水量,mm; $P_m$ 为第 $m$ 月降水量,mm。生长季和非生长季降水量主要用于表征研究期水分条件差异,SPI6用于识别季节至半年尺度干旱状态。冷暖季降水量主要用于表征年内水热背景差异,辅助解释遥感指标的年际波动。

为检验2021年与2025年各指标分布差异,本文采用Mann-Whitney U检验对各分区像元值进行显著性检验。该方法不要求样本服从正态分布,适用于遥感指标空间分布偏态较明显的情况。

考虑到短时间序列容易受到异常年份和空间异质性的影响,本文进一步开展稳健性分析。具体包括:1)双时段平均比较,将2021—2022年作为基线期,2024—2025年作为末期,比较2个阶段的平均差异;2)1 km网格配对检验,将10 m栅格聚合为1 km网格,在相同空间单元内比较基线期与末期差异,并采用Wilcoxon符号秩检验识别显著性;3)基线FVC



分层比较,依据2021年FVC将样本划分为低覆盖层、中覆盖层和高覆盖层,在相近初始覆盖条件下比较工程区与非工程区变化幅度,以降低初始覆盖差异对工程-非工程对比解释的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 工程区与非工程区多指标变化差异

2021—2025年,工程区与邻近非工程区均呈现植被指标改善和 $C$ 因子下降趋势,但不同指标的变化幅度并不一致(图3)。工程区NDVI、EVI和FVC分别提高5.47%、5.03%和8.58%, $C$ 因子下降58.10%;非工程区NDVI、EVI和FVC分别提高6.73%、5.26%和11.13%, $C$ 因子下降38.20%。从相对变化率看,非工程区FVC增幅高于工程区,而工程区 $C$ 因子降幅更大,说明2类区域在植被覆盖提升和潜在侵蚀风险降低方面并非完全同步。BERI方面,工程区仅下降2.14%,非工程区下降7.10%,表明相对裸露度变化较植被指标更具不确定性,也提示喀斯特区裸露地表光谱响应可能受到地表异质性、混合像元和年际水热条件的共同影响。

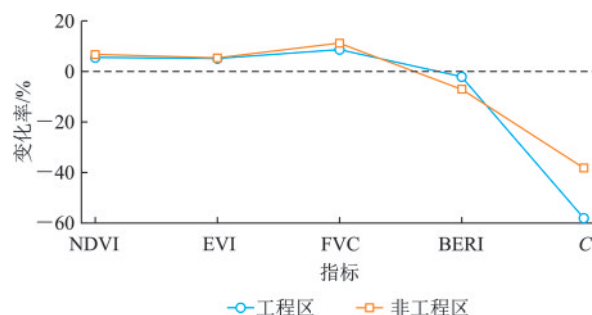
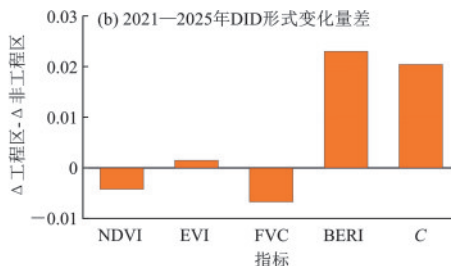


图3 工程区与非工程区多指标相对变化率对比

Fig. 3 Comparison of relative change rates of multiple indicators between project and non-project areas

比较2021年基线状态可以发现,工程区与非工程区在研究初期已存在明显差异(图4)。工程区NDVI、EVI和FVC基线值分别高于非工程区,说明工程区具有较高初始植被覆盖基础;同期工程区BERI和 $C$ 因子分别低于非工程区,表明其初始相对裸露度和潜在侵蚀风险相对较低。



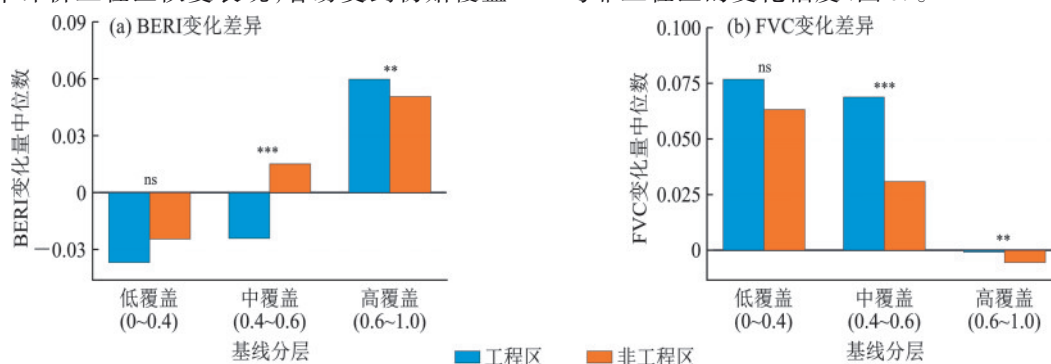
注:BERI为基于NDVI归一化构建的相对裸露度指标; $C$ 为24个半月降雨侵蚀力加权 $C$ 因子;DID形式变化量差=工程区变化量-非工程区变化量,仅用于描述相对响应差异。

图4 工程区与非工程区2021年基线差异及2021—2025年变化量之差

Fig. 4 Baseline disparities in 2021 and net changes in project versus non-project areas during 2021—2025

变化量之差结果显示,工程区 NDVI 和 FVC 变化量略低于非工程区,差值分别为  $-0.004\ 2$  和  $-0.006\ 7$ ; EVI 变化量略高于非工程区,差值为  $0.001\ 5$ 。BERI 和 C 因子的变化量之差分别为  $0.023\ 0$  和  $0.020\ 5$ 。表明工程区与非工程区并非处于相同基线状态,单独依据总体变化率评价工程区恢复表现,容易受到初始覆盖

水平和恢复空间差异的影响。因此,后续比较需要结合基线分层结果判断。为进一步降低初始覆盖条件差异对结果解释的影响,本文以 2021 年 FVC 为基线,将样本划分为低覆盖层( $0\sim0.4$ )、中覆盖层( $0.4\sim0.6$ )和高覆盖层( $0.6\sim1.0$ ),并在各覆盖层内比较工程区与非工程区的变化幅度(图 5)。



注:\*\*表示  $p<0.01$ ;\*\*\*表示  $p<0.001$ ;ns 表示差异不显著。

图 5 基线 FVC 分层下工程区与非工程区 BERI 和 FVC 变化差异

Fig. 5 Variations in BERI and FVC between project and non-project areas under baseline FVC stratification

由图 5 可知,低覆盖层中工程区与非工程区 FVC 改善幅度差异不明显;中覆盖层中,工程区 FVC 改善幅度明显高于非工程区,表明在中等初始覆盖条件下,工程区表现出更强的相对恢复特征;高覆盖层中,2 类区域 FVC 变化幅度均较小,工程区下降幅度低于非工程区。BERI 分层结果与 FVC 并不完全一致:低覆盖层差异不显著,中覆盖层工程区 BERI 下降而非工程区上升,高覆盖层 2 类区域 BERI 均有所增加。该结果表明,植被覆盖改善与相对裸露度降低之间存在一定协同关系,但二者并非在所有基线条件下同步变化。

### 3.2 不同治理类型多指标变化及分级结构特征

不同治理类型的多指标变化幅度存在明显差异(图 6)。从植被指标看,草原改良区增幅最为突出,NDVI、EVI 和 FVC 分别提高  $11.2\%$ 、 $6.9\%$  和  $19.6\%$ ,其中 FVC 增幅明显高于其他治理类型,表明草本植被在研究期内具有较快的覆盖变化特征。人工造林区 NDVI 和 FVC 分别提高  $8.4\%$  和  $14.1\%$ ,退化林修复区分别提高  $7.3\%$  和  $11.9\%$ 。封山育林区 NDVI、EVI 和 FVC 分别提高  $4.2\%$ 、 $5.2\%$  和  $6.3\%$ ,增幅相对较小,可能与其 2021 年基期覆盖水平较高、后续提升空间有限有关。

BERI 变化表现出更强的治理类型差异。退化林修复区 BERI 降幅最大,为  $13.1\%$ ,人工造林区和草原改良区分别下降  $7.6\%$  和  $7.1\%$ 。其中,退化林修复区 BERI 下降幅度明显高于其 FVC 增幅,表明该类型可能不仅表现为植被覆盖增加,也伴随裸露斑块光谱响应减弱。与此不同,封山育林区 BERI 上升

$3.5\%$ ,尽管其 NDVI、EVI 和 FVC 均有所提高,说明该区植被增绿与相对裸露度降低并不同步。此结果提示,BERI 作为基于 NDRI 的相对裸露度,受裸露岩土斑块、林下阴影、地表湿度和混合像元影响较强,不宜直接解释为实测基岩裸露率的同幅度变化。

|       | NDVI    | EVI    | FVC     | BERI     | C        |
|-------|---------|--------|---------|----------|----------|
| 工程区整体 | 5.5***  | 5.0*** | 8.6***  | -2.1**   | -58.1*** |
| 草原改良  | 11.2*** | 6.9*** | 19.6*** | -7.1***  | -59.8*** |
| 封山育林  | 4.2***  | 5.2*** | 6.3***  | 3.5***   | -64.2*** |
| 人工造林  | 8.4***  | 3.0*** | 14.1*** | -7.6***  | -55.2*** |
| 退化林修复 | 7.3***  | 3.0*** | 11.9*** | -13.1*** | -42.9*** |
| 非工程区  | 6.7***  | 5.3*** | 11.1*** | -7.1***  | -38.2*** |

注:\*表示  $p<0.05$ ;\*\*表示  $p<0.01$ ;\*\*\*表示  $p<0.001$ ;ns 表示不显著。

图 6 2021—2025 年不同分析单元各指标变化率及显著性  
Fig. 6 Variation rates and significance of indicators for different analysis units during 2021—2025

C 因子在各治理类型中均显著下降,其中封山育林区、草原改良区、人工造林区、退化林修复区分别下降  $64.2\%$ 、 $59.8\%$ 、 $55.2\%$  和  $42.9\%$ 。表明在降雨侵蚀力加权条件下,不同治理类型的地表覆盖和生物措施改善总体上均表现为潜在侵蚀风险降低。封山育林区虽然 BERI 上升  $3.5\%$ ,但 C 因子下降  $64.2\%$ ,说明该区潜在侵蚀风险指示量的改善主要受植被覆盖状态和降雨时段覆盖条件影响,而相对裸露度变化并未与 C 因子完全一致。由此可见,植被恢复、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险响应在不同治理类型中并非简单同步。

FVC 分级面积结构显示,2021—2025 年各分析单元高覆盖等级面积占比总体提高,低覆盖等级面积占比下降(图7)。其中,草原改良区由中、较高覆盖等级向高覆盖等级转移较为明显,与其FVC增幅19.6%的结果一致;人工造林区和退化林修复区高覆盖等级面积也有所增加,说明其覆盖结构持续改善。封山育林区在2021年已具有较高覆盖基础,2025年仍以高覆盖等级为主,进一步印证其变化更偏向稳定维持而非快速增幅。

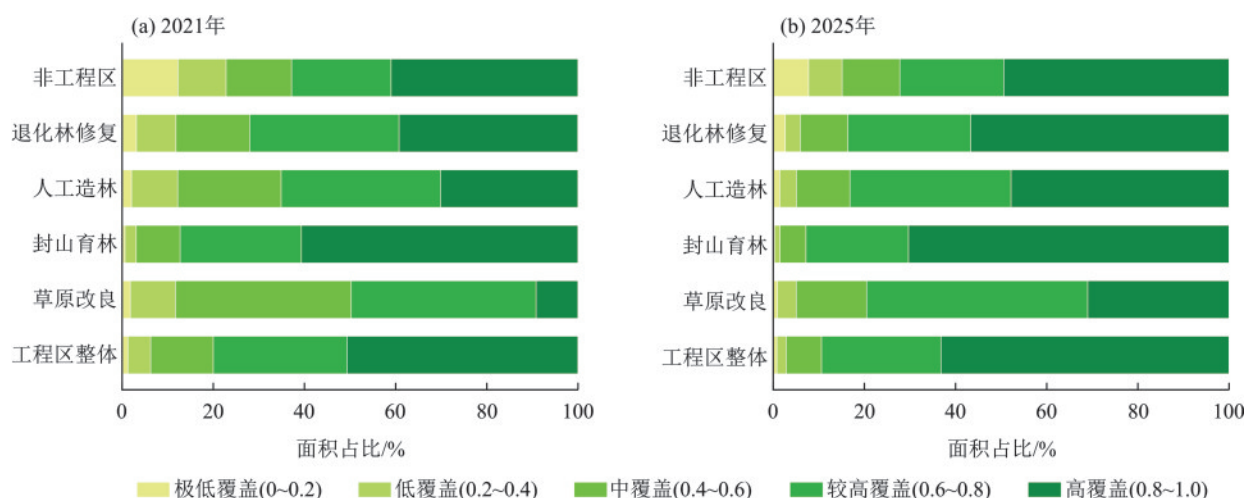


图7 各分析单元FVC分级面积结构变化

Fig. 7 Dynamics of area proportions for FVC grades across different analytical units

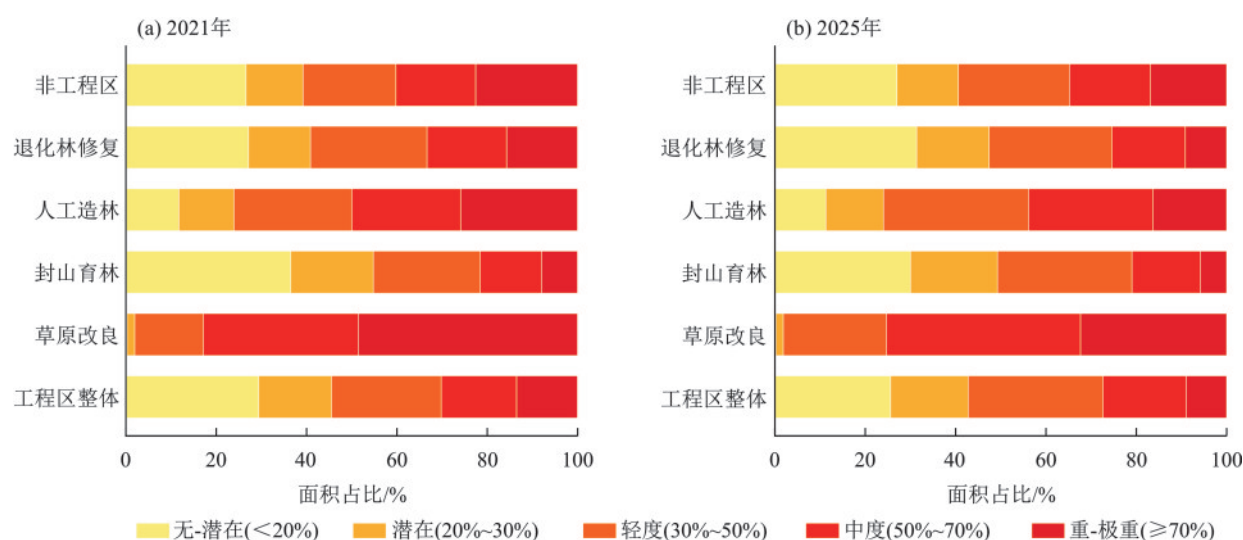


图8 各分析单元BERI分级面积结构变化

Fig. 8 Dynamics of area proportions for different BERI levels across analytical units

### 3.3 气候扰动下的年际波动与恢复差异

2021—2025 年,各分析单元多指标变化并非单调改善,而表现出明显的阶段性波动(图9)。以工程区整体为例,FVC由2022年的0.85降至2023年的0.62,EVI由2022年的0.60降至2023年的0.44;同期BERI由0.27升至0.56,C因子由0.02升至0.07。不同治理类型也呈现相似变化:2022年多数分析单元FVC和

BERI 分级面积结构变化则呈现出更复杂的分区特征(图8)。退化林修复区、人工造林区和草原改良区高相对裸露度等级面积总体有所压缩,与其BERI均值下降结果一致;但封山育林区BERI分级结构变化不如FVC分级结构稳定,说明在高覆盖背景下,局部裸露斑块、林下阴影和混合像元仍可能影响相对裸露度光谱响应。总体来看,不同治理类型均表现出植被覆盖改善和C因子下降,但BERI响应方向和幅度存在差异。

EVI达到阶段性高值,2023年明显下降,2024—2025年再次恢复;BERI和C因子则总体表现为2022年较低、2023年升高、2024—2025年回落。该同步变化说明,2023年的指标异常并非局限于某一治理类型或单一空间单元,而具有较强的区域一致性。

气象异常结果同步解释上述阶段性波动(图10)。2023年研究区生长季降水距平为研究期内最低,SP16

降至 $-1.988$ ,达到重度干旱等级;同时,2023年气温距平约为 $0.6^{\circ}\text{C}$ ,为研究期内最高。降水亏缺、季节尺度干旱和偏高气温叠加,该年植被生长受到明显水热胁迫。结合图9可见,2023年FVC、EVI下降与BERI、C因子升高在时间上与气象干旱过程相对应。因此,2023年的阶段性下降可能与区域性气候扰动对植被覆盖和地表光谱响应的共同影响有关,不宜简单解释为治理措施失效。不同治理类型对2023年干旱扰动的响应幅度存在差异。草原改良区的FVC气象异常年份下降幅度最大,并在降雨提升后快速恢复,表明

草本覆盖对降水亏缺较为敏感。封山育林区2023年FVC仍保持在约 $0.67$ ,高于其他治理类型,且C因子始终处于较低水平,说明高覆盖背景下其年际波动相对较缓。2023年的异常波动在各分析单元中均较为明显,且与同期降水偏少、SPI6降低和气温偏高相吻合。至2024—2025年,植被指标普遍回升,BERI和C因子也相应回落,表明研究期内的阶段性下降与气候扰动密切相关。因而在评价短期治理成效时,需要将端点变化与年际水热条件结合起来,避免将异常年份造成的指标波动简单归因于治理措施本身。

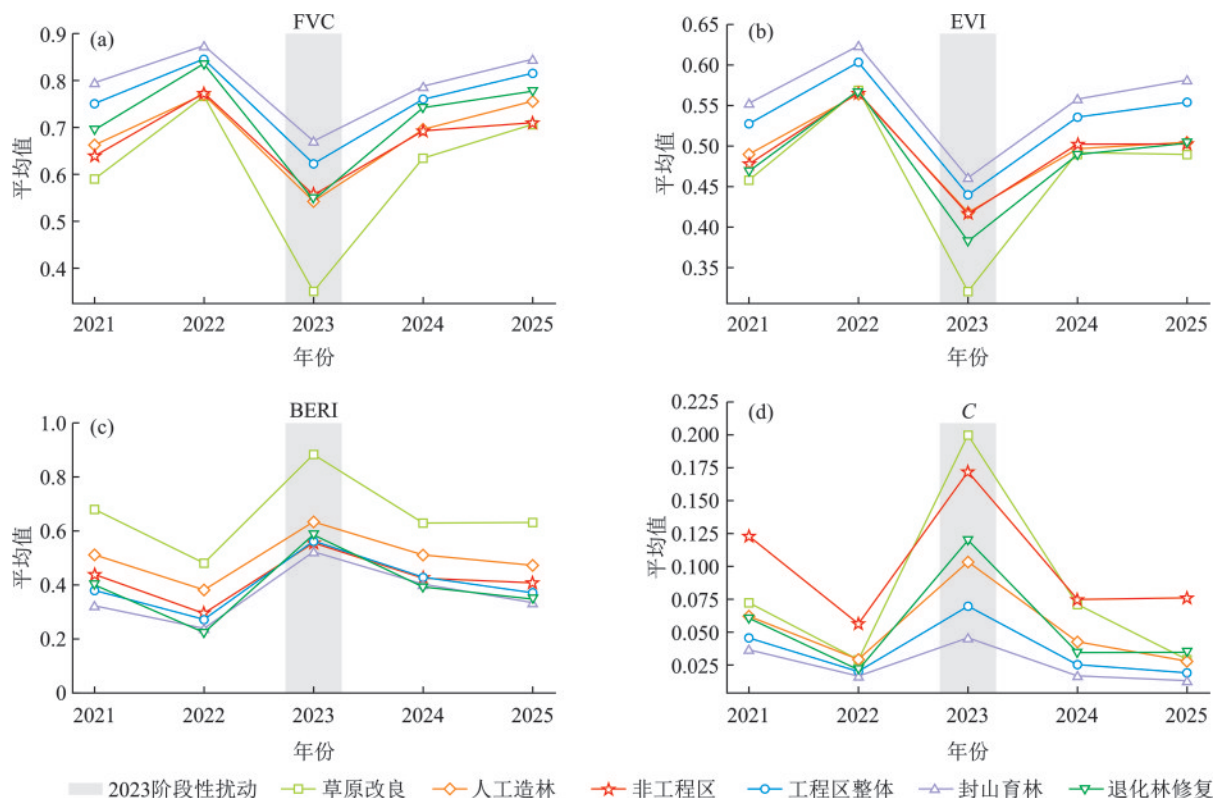


图9 2021—2025年各分析单元多指标年际变化

Fig. 9 Inter-annual variations of multiple indicators across different analytical units from 2021 to 2025

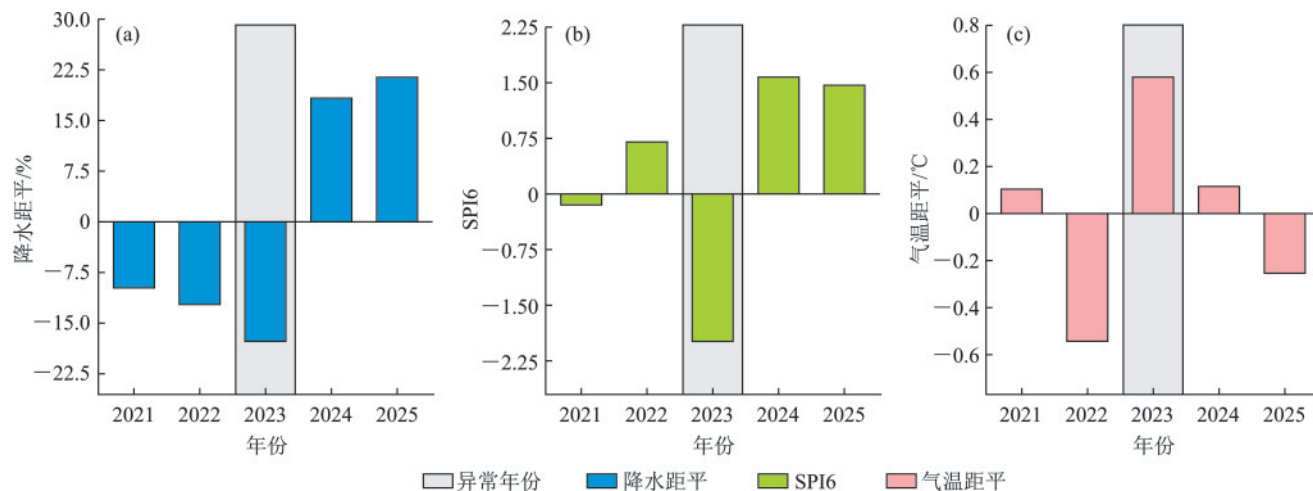


图10 2021—2025年生长季气象异常及干旱指数变化

Fig. 10 Growing-season climate anomalies and aridity index variations from 2021 to 2025

### 3.4 多指标变化相关性分析

多指标变化相关性结果显示,植被指标变化与BERI变化之间存在较强负相关(图11)。其中, $\Delta FVC$ 与 $\Delta BERI$ 的相关系数为 $-0.80$ , $\Delta NDVI$ 与 $\Delta BERI$ 的相关系数为 $-0.78$ ,说明FVC和NDVI增加幅度较大的像元,BERI多表现为下降。表明在研究区尺度上,植被覆盖改善通常伴随相对裸露度降低,但二者并非完全等同,BERI仍可能受裸露岩土斑块、阴影、地表湿度和混合像元等影响。

$\Delta NDVI$ 与 $\Delta C$ 、 $\Delta FVC$ 与 $\Delta C$ 也表现为负相关,相关系数分别为 $-0.73$ 和 $-0.67$ 。由于C因子是在植被类型SLR基础上引入半月降雨侵蚀力权重计算得到,其变化仍与植被覆盖状况密切相关。因此,相关关系主要说明,植被覆盖改善的区域,在降雨侵蚀力加权条件下通常对应较低的潜在侵蚀风险。与BERI相比,C因子更侧重反映植被覆盖条件对侵蚀风险的调节方向,不能将其视为独立于植被覆盖的土壤侵蚀过程观测结果。将NDVI、FVC、BERI和C结合分析,有助于区分植被增绿、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险响应之间的差异。

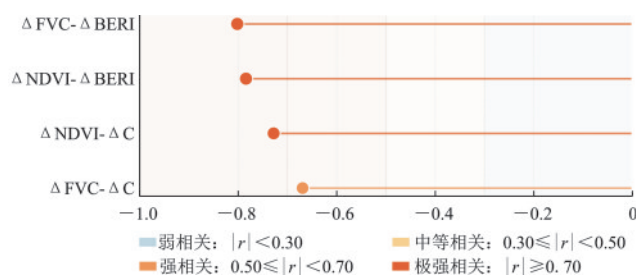


图11 不同指标变化相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of changes among different indicators

## 4 讨论

### 4.1 多指标协同评估的必要性

本文结果显示,文山州石漠化重点治理工程区NDVI、EVI和FVC均有所提高,C因子明显下降,而BERI整体降幅较小且未达到显著水平。在喀斯特石漠化治理区,植被绿度和覆盖度的改善并不一定同步表现为相对裸露度的降低。喀斯特区地表组成复杂,岩石、裸土、灌草、阴影和湿度条件交错分布,石漠化与土壤侵蚀之间也并非简单线性关系。已有研究<sup>[1,5-9,15]</sup>指出,西南喀斯特区存在地表侵蚀与地下漏失并存、岩土界面过程复杂等特征,在石漠化治理成效判读中,植被恢复、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险响应之间可能存在不同步现象。

单一植被指标能够较敏感地反映植被生长状况,但难以充分刻画石漠化治理后地表结构和潜在侵蚀风险的变化。NDVI、EVI和FVC主要反映植被

绿度、活力和覆盖度;BERI用于表征基于NDRI的相对裸露度变化;C因子则在植被类型SLR基础上引入半月降雨侵蚀力权重,用于反映降雨侵蚀力背景下覆盖条件对潜在侵蚀风险的调节方向。3类指标所指向的生态含义不同,联合分析能够减少单一增绿指标对治理成效的过度概括,也有助于识别不同治理类型在覆盖恢复、相对裸露度变化和潜在侵蚀风险响应上的差异。

BERI和C因子均用于表征相对变化。前者反映基于NDRI的相对裸露度光谱响应,不等同于地面实测裸岩率;后者用于指示覆盖条件变化下潜在侵蚀风险的方向性响应,并不代表实际土壤侵蚀量。因此,本文主要将二者用于不同分区和年份之间的相对比较,后续仍需结合高分辨率影像、无人机样方和野外调查进行校验。

### 4.2 不同石漠化治理措施的成效差异

不同治理类型的指标变化存在明显差异,说明石漠化治理后的生态响应受措施类型和初始地表条件共同影响。草原改良区NDVI和FVC增幅较大,可能与草本植被生长周期短、群落郁闭形成较快有关。草本覆盖能够在较短时间内改善地表连续覆盖状况,在生长季遥感影像上更容易表现为植被指数和覆盖度提高。人工造林区和退化林修复区的变化过程则相对复杂,其恢复效果不仅取决于冠层覆盖增加,还与林下植被、枯落物层和地表斑块结构的逐步改善有关,因此短期内植被指标增幅未必最高,但对地表结构稳定和潜在侵蚀风险降低具有持续作用。

BERI在不同治理类型之间的差异进一步反映裸露地表响应的复杂性。退化林修复区BERI降幅较大,说明该区裸露岩土斑块的光谱响应有所减弱,地表破碎化程度可能得到一定改善。人工造林区也表现出植被覆盖提高与BERI下降的同步变化。封山育林区则表现为植被指标提高而BERI未同步下降,可能与其基期覆盖水平较高、裸露斑块空间镶嵌明显及林下阴影、地表湿度变化等因素有关。在高覆盖背景下,局部裸露斑块的变化不一定能够与NDVI、FVC保持一致,不能仅依据BERI短期波动判断封育措施效果。

上述差异表明不同治理措施的生态响应路径并不一致。草原改良更容易在短期内提高地表覆盖度,人工造林和退化林修复则可能在较长时间尺度上改善植被结构和裸露斑块格局。已有研究<sup>[10-11,20,29-30]</sup>表明,不同植被恢复措施对喀斯特区土壤质量、生态功能和侵蚀过程的影响存在差异。因此,石漠化治理成

效评价不应只比较总体增幅,还应结合治理类型、初始覆盖条件和指标响应差异,识别不同措施的恢复路径及其适用条件。

#### 4.3 气候扰动对短期治理成效判读的影响

2023年工程区、非工程区及不同治理类型均出现NDVI、FVC下降,BERI和C因子升高,是研究期内最明显的年际波动。气象结果显示,该年生长季降水偏少,SPI6达到重度干旱等级,同时气温距平偏高。遥感指标变化与水热条件异常在时间上基本对应,说明2023年的阶段性下降具有明显干旱背景。

喀斯特区土层浅薄、岩土界面发育,土壤蓄水能力较弱,植被生长对降水亏缺和高温胁迫较敏感。在这种生态背景下,短期干旱容易造成植被覆盖下降、裸露岩土光谱响应增强,并进一步影响C因子的年际变化。不同治理类型的响应幅度也存在差异:草原改良区覆盖恢复较快,但对降水变化较敏感;封山育林区基期覆盖较高,年际变化相对平缓;人工造林区和退化林修复区在2024年后覆盖恢复较明显。由此可见,在短时间序列内评价治理成效时,特定年份的指标波动不宜简单理解为治理措施失效,而应结合当年的气候异常背景进行判读。同时需考虑工程措施、植被恢复阶段、年际气候条件等因素,否则容易高估或低估某一时期的治理响应。

## 5 结论

1)2021—2025年,文山州石漠化重点治理工程区整体呈植被恢复和潜在侵蚀风险降低的趋势。工程区NDVI、EVI和FVC分别提高5.47%、5.03%和8.58%,C因子下降58.10%,潜在侵蚀风险指示量明显降低。同期BERI下降2.14%,但未达到显著水平,说明相对裸露度变化较植被恢复更为滞后。

2)不同治理类型的生态响应存在明显差异。草原改良区NDVI和FVC增幅最大,分别为11.17%和19.65%,表现出较强的短期覆盖变化特征;退化林修复区BERI降幅最大,表明其相对裸露度改善较为明显。各治理类型C因子均呈下降趋势,说明不同治理措施均在一定程度上降低潜在侵蚀风险。

3)研究期内各指标存在明显年际波动。2023年各分区普遍出现NDVI、FVC下降,BERI和C因子升高;气象数据表明,该年生长季降水偏少、SPI6达到重度干旱等级且气温偏高,说明该阶段性波动具有明显干旱背景。短时间序列下的石漠化治理成效判读应结合年际气候条件,避免仅依据单一年份或端点变化进行评价。

4)Pearson相关分析进一步表明,NDVI、FVC变化与BERI、C变化整体呈负相关,说明植被恢复、相对裸露度降低和潜在侵蚀风险指示量下降之间存在一定协同变化关系。然而,喀斯特石漠化治理成效具有明显的基线依赖性和空间异质性。对重点治理工程恢复成效而言,应避免只依据总体均值或端点变化进行评估,而应结合初始覆盖基础、立地条件差异、治理措施类型和气候变化背景等进行综合分析。

#### 参考文献:

- [1] 何茂林,张玉珊,高家勇,等.喀斯特区土壤侵蚀与石漠化协同演变及交互关系[J].水土保持学报,2023,37(1):140-150.  
He Maolin, Zhang Yushan, Gao Jiayong, et al. Synergistic evolution and interaction of soil erosion and rocky desertification in karst area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 140-150.
- [2] 曹建华,袁道先,童立强.中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J].草业科学,2008,25(9):40-50.  
Cao Jianhua, Yuan Daoxian, Tong Liqiang. Features of Karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China [J]. Pratacultural Science, 2008, 25(9): 40-50.
- [3] 岳跃民,王克林,罗为群,等.人地耦合视角下喀斯特石漠化地区生态系统服务提升[J].生态学报,2024,44(18):8159-8164.  
Yue Yuemin, Wang Kelin, Luo Weiqun, et al. Improving ecosystem services in rocky desertification areas of South China karst from the perspective of coupling human and natural systems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8159-8164.
- [4] 陈爱梅,李慧东,杨娟.基于GIS与RS的文山州石漠化程度变化图谱分析[J].中国水土保持,2024(6):56-59.  
Chen Aimei, Li Huidong, Yang Juan. Images analysis on changes of rocky desertification degree in Wenshan prefecture based on GIS and RS[J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(6): 56-59.
- [5] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.  
Ma Qianhong, Zhang Keli. Progresses and prospects of the research on soil erosion in karst area of southwest China [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33 (11): 1130-1141.
- [6] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.  
Dai Quanhou, Yan Youjin. Research progress of rocky desertification and soil and water loss in Southwest karst

- area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 1-10.
- [7] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- Peng Xudong, Dai Quanhong, Yang Zhi, et al. Sediment yield of surface and underground erosion in the process of rocky desertification of karst area [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1237-1248.
- [8] 陈洪松,冯腾,李成志,等.西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 10-16.
- Chen Hongsong, Feng Teng, Li Chengzhi, et al. Characteristics of soil erosion in the karst regions of southwest China: Research advance and prospective [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 10-16.
- [9] 许胜兵,彭旭东,戴全厚,等.喀斯特高原石漠化区露石岩-土界面与非岩-土界面土壤入渗特性差异[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 136-143.
- Xu Shengbing, Peng Xudong, Dai Quanhong, et al. Differences of soil infiltration characteristics between exposed rock-soil interface and non-rock-soil interface in rocky desertification area of karst plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 136-143.
- [10] 李瑞,盘礼东.岩石裸露与水土流失关系研究现状及石漠化因子研究存在的问题[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 10-15.
- Li Rui, Pan Lidong. Research status of the relationship between rock exposure and soil and water loss and discussion on the existing problems in the research of rocky desertification factors [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 10-15.
- [11] 彭大力,张斌,吴林蓬,等.龙川江流域近20年土壤侵蚀时空变化及驱动因素分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 29-37.
- Peng Dali, Zhang Bin, Wu Linpeng, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of soil erosion in Longchuan River basin in recent 20 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 29-37.
- [12] Pan Lidong, Li Rui, Shu Dongcai, et al. Effects of rainfall and rocky desertification on soil erosion in karst area of Southwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(11): 3118-3130.
- [13] Su Jialei, Liu Meiling, Yang Qin, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of karst rocky desertification in Guangxi, China, under climate change and human activities [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(13): e2294.
- [14] 刘字呈,陈国坤,温庆可,等.基于多特征组合优选与随机森林算法的石漠化信息提取:以云南省昭通市为例[J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(1): 95-105.
- Liu Zicheng, Chen Guokun, Wen Qingke, et al. Extraction of rocky desertification information based on multi-feature combination optimization and random forest algorithm: A case study of Zhaotong city in Yunnan Province [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1): 95-105.
- [15] Qiao Yina, Jiang Yongjun, Zhang Caiyun. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: e107081.
- [16] 章维鑫,曹建华,吴秀芹.基于Landsat影像的石漠化区植被动态监测及治理效益研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 221-229.
- Zhang Weixin, Cao Jianhua, Wu Xiuqin. Dynamic monitoring and control benefits of vegetation in rocky desertification areas based on Landsat images [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(8): 221-229.
- [17] He Yuanhuizi, Wang Li, Niu Zheng, et al. Vegetation recovery and recent degradation in different karst landforms of southwest China over the past two decades using GEE satellite archives [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 68: e101555.
- [18] Pei Jie, Wang Li, Wang Xiaoyue, et al. Time series of Landsat imagery shows vegetation recovery in two fragile karst watersheds in southwest China from 1988 to 2016 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): e2044.
- [19] 吴文贤,李渊,刘子琦.喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 359-367.
- Wu Wenxian, Li Yuan, Liu Ziqi. Characteristics and drivers of spatial and temporal soil erosion in Anshun City, karst region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 359-367.
- [20] 田昌园,张红丽,汪军红,等.近30年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 37-44.
- Tian Changyuan, Zhang Hongli, Wang Junhong, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 37-44.
- [21] 于中原,黄义忠.文山市景观生态安全评价与分区治理[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 338-347.
- Yu Zhongyuan, Huang Yizhong. Evaluation of landscape ecological security and zoning governance in Wenshan City [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39

- (1):338-347.
- [22] 唐霜,朱崇京,高洁,等.复杂地形下西南地区水生生态系统服务时空变化与影响因素分析[J].水土保持学报,2024,38(6):244-252.
- Tang Shuang, Zhu Chongjing, Gao Jie, et al. Spatial-temporal variations and influencing factors of water-related ecosystem services in southwest China under complex terrain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6):244-252.
- [23] 董茜,王根柱,庞丹波,等.喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价[J].林业科学研究,2022,35(3):169-178.
- Dong Qian, Wang Genzhu, Pang Danbo, et al. Soil quality evaluation of different vegetation restoration measures in karst area[J]. Forest Research, 2022, 35(3):169-178.
- [24] 郭红艳,周金星,崔明,等.岩溶峡谷区石漠化对土壤碳排放的影响[J].北京林业大学学报,2014,36(1):26-33.
- Guo Hongyan, Zhou Jinxing, Cui Ming, et al. Influence of karst rocky desertification on soil carbon emissions in karst valley region of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1):26-33.
- [25] Zhang Shiwen, Wang Yan, Wang Xuehua, et al. Ecological quality evolution and its driving factors in Yunnan karst rocky desertification areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24):e16904.
- [26] 李子康,殷晓洁,刘一飞,等.滇东南典型喀斯特山区石漠化时空演变及生态敏感性评价[J].生态环境学报,2024,33(11):1792-1802.
- Li Zikang, Yin Xiaojie, Liu Yifei, et al. Spatio-temporal evolution and ecological sensitivity evaluation of rocky desertification in typical karst mountainous areas of south-east Yunnan Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024, 33(11):1792-1802.
- [27] 马崇玲,彭双云,黄帮梅,等.基于改进稳定映射法的云南省土壤侵蚀强度变化轨迹及其驱动因素[J].水土保持学报,2025,39(1):102-112.
- Ma Dongling, Peng Shuangyun, Huang Bangmei, et al. Analysis of soil erosion intensity change trajectories and their driving factors in Yunnan Province based on an improved stability mapping method[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):102-112.
- [28] Chen Shidie, Wei Xingping, Cai Yunli, et al. Spatiotemporal evolution of rocky desertification and soil erosion in karst area of Chongqing and its driving factors[J]. Catena, 2024, 242:e108108.
- [29] 余新晓,牛健植,徐军亮.山区小流域生态修复研究[J].中国水土保持科学,2004,2(1):4-10.
- Yu Xinxiao, Niu Jianzhi, Xu Junliang. Research on the ecological restoration in mountain watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1):4-10.
- [30] 李慧,魏兴萍,蔡云丽,等.重庆石漠化和非石漠化区植被绿度时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38(3):288-297.
- Li Hui, Wei Xingping, Cai Yunli, et al. Spatial and temporal variation characteristics of vegetation greenness in rocky desertification and non-rocky desertification areas of Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):288-297.
- [31] 王进,刘子琦,鲍恩侯,等.喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):249-256.
- Wang Jin, Liu Ziqi, Bao Enyu, et al. Effects of forest and grass restoration on soil aggregates and its organic carbon in karst rocky desertification areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6):249-256.
- [32] 冯俊鑫,陈国坤,左丽君,等.基于GF-6WV影像和CSLE模型的山区耕地侵蚀定量评价及特征分析[J].农业工程学报,2022,38(21):169-179.
- Feng Junxin, Chen Guokun, Zuo Lijun, et al. Quantitative evaluation and characteristic analysis of cultivated land erosion in mountain area using GF-6 WFV and CSLE model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(21):169-179.
- [33] Jiang Z, Huete A, Didan K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10):3833-3845.
- [34] Gao Lin, Wang Xiaofei, Johnson B A, et al. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 159:364-377.
- [35] Huang Qiuhao, Cai Yunlong. Mapping karst rock in southwest China[J]. Mountain Research and Development, 2009, 29(1):14-20.
- [36] 刘宝元,郭索彦,李智广,等.中国水力侵蚀抽样调查[J].中国水土保持,2013(10):26-34.
- Liu Baoyuan, Guo Suoyan, Li Zhiguang, et al. Sampling survey of water erosion in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10):26-34.