



基于NDVI时序数据的青海省木里煤田植被恢复效果遥感监测

陈磊 殷守强 鞠林雪 刘军省 焦森 张延旭

引用本文:

陈磊, 殷守强, 鞠林雪, 等. 基于NDVI时序数据的青海省木里煤田植被恢复效果遥感监测[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 269–281.

CHEN Lei, YIN Shouqiang, JU Linxue. Remote sensing monitoring of vegetation restoration effect based on NDVI time series data in Muli Coalfield of Qinghai Province[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 269–281.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0481>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

排土场植被覆盖度及地形变化对流域水土流失的影响

Influence of dump vegetation coverage and topographic changes on soil and water loss in drainage basin

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 299–308 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4049b57f-cf06-42da-ab17-3af86b3030c3>

露天矿区植被协同演变多源数据时序分析——以准格尔矿区为例

Time series analysis of multi source data of coordinated evolution of vegetation in open-pit mining area: taking Jungar Mining Area as an example

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 293–302 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/31e92bec-9197-48a1-be2f-5c4be98e391a>

西部黄土高原矿区采煤沉陷多源遥感监测技术进展与展望

Progress and prospects of multi-source remote sensing monitoring technology for coal mining subsidence in mining areas of the western Loess Plateau

煤炭科学技术. 2023, 51(12): 9–26 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1113>

矿山生态环境定量遥感监测与智能分析系统设计与实现

Design and implementation of quantitative remote sensing monitoring and intelligent analysis system for mine ecological environment

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 346–358 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0456>

基于时序遥感的黄土矿区耕地变化动态监测——以大佛寺矿区为例

Dynamic monitoring of cultivated land changes in loess mining areas based on time series remote sensing: a case of Dafosi Mining Area

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 215–223 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6a235888-34e7-4428-8445-d31e0bac040c>

基于无人机遥感的煤矸石山植被分类

Classification of coal gangue pile vegetation based on UAV remote sensing

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 245–259 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0899>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

碳中和科学与工程



移动扫码阅读

陈磊,殷守强,鞠林雪,等. 基于 NDVI 时序数据的青海省木里煤田植被恢复效果遥感监测[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(10): 269–281.

CHEN Lei, YIN Shouqiang, JU Linxue, *et al.* Remote sensing monitoring of vegetation restoration effect based on NDVI time series data in Muli Coalfield of Qinghai Province[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(10): 269–281.

基于 NDVI 时序数据的青海省木里煤田植被恢复效果 遥感监测

陈磊¹, 殷守强², 鞠林雪¹, 刘军省¹, 焦森³, 张延旭⁴

(1. 中国煤炭地质总局中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100013; 2. 河南城建学院测绘与城市空间信息学院, 河南平顶山 467036; 3. 中化地质矿山总局, 北京 100013; 4. 中国矿业大学(北京)煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 青海省木里煤田曾因非法采矿遭受严重生态破坏, 2020 年 8 月起全面启动生态修复工程。基于 2019—2023 年归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)遥感数据, 综合运用时空对比分析、分区统计、趋势分析、变化检测等方法, 重点探究木里煤田全域及其江仓、哆嗦贡玛、聚呼更、弧山 4 个子矿区植被覆盖度的时空分异规律, 精准监测生态修复工程的植被恢复效果; 通过回归分析、残差分析、基于分位数的阈值分类法、对比分析, 从空间和时间 2 个维度解析 NDVI 的影响机制, 定量识别人类活动对 NDVI 影响显著的区域, 明确生态修复工程的净效应与区域差异。结果表明: 全域 NDVI 均值由 0.58 升至 0.62, 年均增长率达 6.9%, 其中聚呼更矿区植被恢复成效最显著, NDVI 均值由 0.38 升至 0.51, 高植被覆盖度(NDVI>0.5)面积比例从 36.7% 增至 54.2%; 相邻年份间 NDVI 显著改善面积呈“先升后降”趋势, 反映修复进程的阶段性特征: 聚呼更、江仓矿区在 2020—2021 年 NDVI 显著提升的面积占比达到峰值, 分别为 26.1% 和 13.1%; 而哆嗦贡玛和弧山矿区在 2021—2022 年达到最大值, 分别为 21.7% 和 10.7%; 影响机制上, 地形对 NDVI 空间分异的解释力大于气候因素; 人类活动对聚呼更矿区和哆嗦贡玛 NDVI 时间变化的正向影响面积比例分别为 25.1% 和 11.6%, 显著高于矿区周边区域(5.0%), 凸显生态修复工程对植被覆盖度提升的主导作用; 上述矿区的显著负向影响比例(4.4%、6.2%、4.5%)与周边区域(5.0%)接近, 说明生态修复工程未额外加剧植被退化。综上所述, 木里煤田生态修复工程显著提升了矿区植被覆盖度, 但存在区域异质性和生态脆弱性; 人类活动的负面影响处于可控范围, 未对生态恢复整体进程构成显著阻碍。木里煤田的生态修复并非一劳永逸, 未来需针对不同矿区制定差异化的动态监测与维护策略, 尤其要重点关注植被覆盖度低与退化较严重的区域, 探究其成因并及时调整修复措施, 并严格管控其他人类活动的负面干扰, 以有效应对潜在的生态退化风险, 持续巩固生态修复成果。研究不仅为矿区植被变化监测与恢复效果评估提供了实用的技术方法, 还为木里煤田以及其他高寒矿区的生态修复提供了可推广的技术范式。

关键词: 木里矿区; NDVI; 植被覆盖度; 生态修复效果; 遥感监测; 趋势分析

中图分类号: X87; P95; K90 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)10-0269-13

Remote sensing monitoring of vegetation restoration effect based on NDVI time series data in Muli Coalfield of Qinghai Province

CHEN Lei¹, YIN Shouqiang², JU Linxue¹, LIU Junsheng¹, JIAO Sen³, ZHANG Yanxu⁴

收稿日期: 2025-04-08 策划编辑: 常琛 责任编辑: 刘雅清 DOI: 10.12438/cst.2025-0481

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题“西部干旱区煤能源基地生态保护与资源综合利用及技术示范”资助项目(2022YFF1303305); 中国煤炭地质总局科技创新资助项目(ZMKJ-2023-GJ02); 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室 2024 年开放基金课题资助项目(SKLCRSM24KFA12)

作者简介: 陈磊(1989—), 男, 河南周口人, 中级工程师, 博士。E-mail: 843846277@qq.com

通讯作者: 殷守强(1991—), 男, 河南濮阳人, 讲师, 博士。E-mail: 284595970@qq.com

(1. Geological Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, China National Administration of coal Geology, Beijing 100013, China; 2. School of Surveying and Urban Spatial Information, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 3. China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100013, China; 4. SKL for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The illegal mining activities in the Muli Coalfield have severely damaged the ecological environment of the Qilian Mountains, which has aroused great concern of the Party Central Committee. This study analyzes the spatiotemporal differentiation patterns of vegetation coverage in the entire Muli Coalfield and its four sub-mining areas (Jiangcang, Duosuo Gongma, Juhugeng, and Hushan) from 2019 to 2023, using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) remote sensing data. By integrating spatial-temporal comparison analysis, zoning statistics, trend analysis, and change detection methods, it evaluates the vegetation restoration outcomes of ecological restoration projects. Through regression analysis, residual analysis, quantile-based threshold classification, and comparison analysis, the study dissects the driving mechanisms of NDVI variations spatially and temporally. It quantitatively identifies regions where human activities exert significant influences on NDVI and clarifies the net effects and regional disparities of ecological restoration interventions. The results show that: The average NDVI across the entire region increased from 0.58 to 0.62, with an annual growth rate of 6.9%. Among all sub-regions, the Juhugeng mining area showed the most significant vegetation restoration effect: its average NDVI rose from 0.38 to 0.51, and the proportion of area with high vegetation coverage ($\text{NDVI} > 0.5$) increased from 36.7% to 54.2%. The area with significant NDVI improvement between consecutive years exhibited a trend of initially increasing and then decreasing: the proportion of areas with significant NDVI increase in the Juhugeng and Jiangcang mining areas peaked during 2020—2021, reaching 26.1% and 13.1% respectively; while the Duosuo Gongma and Hushan mining areas reached their maximum values during 2021—2022, with proportions of 21.7% and 10.7% respectively. In terms of impact mechanisms, topography had stronger explanatory power for the spatial differentiation of NDVI than climatic factors. The proportions of areas where human activities exerted positive impacts on the temporal changes of NDVI in Juhugeng and Duosuo Gongma mining areas were 25.1% and 11.6% respectively, significantly higher than that in the surrounding areas (5.0%), highlighting the dominant role of ecological restoration projects in improving vegetation coverage. The proportions of significant negative impacts in the above-mentioned mining areas (4.4%, 6.2%, 4.5%) were close to that in the surrounding areas (5.0%), indicating that ecological restoration projects did not additionally exacerbate vegetation degradation. In summary, the ecological restoration projects in Muli Coalfield significantly improved vegetation coverage in the mining areas, but there existed regional heterogeneity and ecological vulnerability. The negative impacts of human activities were within a controllable range and did not pose a significant obstacle to the overall process of ecological restoration. The ecological restoration of Muli Coalfield is not a one-time effort. In the future, it is necessary to formulate differentiated dynamic monitoring and maintenance strategies for different mining areas, with special attention to areas with low vegetation coverage and severe degradation. It is essential to explore the causes, adjust restoration measures in a timely manner, and strictly control the negative interference of other human activities to effectively cope with potential risks of ecological degradation and continuously consolidate the achievements of ecological restoration. These research outcomes not only provide practical technical methodologies for monitoring vegetation changes and evaluating restoration effectiveness in mining areas but also offer a replicable technical paradigm for ecological restoration efforts in the Muli Coalfield and other alpine mining regions.

Key words: Muli Coalfield; NDVI; vegetation coverage; ecological restoration effect; remote sensing monitoring; trend analysis

0 引 言

青海省木里煤田是祁连山水源涵养区和生态安全屏障的重要组成部分,生态保护意义重大。然而,长期存在的非法采矿活动造成矿坑遍地、渣山累累、不稳定边坡、高原草甸和湿地消退、冻土和水系湿地破坏、煤炭资源浪费、土地沙化等触目惊心的生态问题,严重破坏了祁连山和黄河上游源头的生态环境,于 2020 年 8 月 4 日被媒体曝光,引起高度关注。有关部门迅速做出反应,全面关停木里矿区内的工矿企业,编制出台《木里矿区以及祁连山南麓青海片区生态环境综合整治三年行动方案》,形成“一坑一策”“一井一策”的修复治理方案,在青海省掀起迄今为

止规模最大的生态保卫战,在 2020—2023 三年时间内组织实施了地貌重塑、冻土层恢复、土壤重构、渣土改良、回填采坑、边坡修整、种草复绿、水系和湿地连通、建(构)筑物拆除等生态整治修复工程,旨在实现山水林田湖草沙一体化修复、人工修复向自然恢复过渡,创新出一条高原高寒地区生态环境修复治理的路子。

木里煤田坐落于高原高寒冻土地带,气候恶劣,生态环境脆弱,过去无序开发活动造成的生态环境问题相互交织,因此生态修复难度较大,而近几年的生态环境综合整治成效更是备受关注。青海省有关部门编制并组织实施《青海木里矿区生态环境监测总体方案(2020—2023)》,健全完善木里矿区“天空

地时”一体化综合监测体系^[1],并于 2023 年编制完成《木里矿区生态环境综合整治评估报告》,旨在为木里矿区生态修复治理工作的效果评估和综合验收提供科学支撑。学者们也从不同角度对近几年木里煤田生态环境进行深入研究。李聪聪等^[2]探索了木里煤田聚乎更矿区生态环境修复监测技术与方法。王佟等^[3]评价了木里煤田聚乎更矿区土壤肥力和重金属污染风险。李凤明等^[4]剖析了木里矿区生态环境受损特征。刘帅等^[5]评估了木里煤田土壤重构的效果。郭俊钰等^[6]和陈峰等^[7]分别研究了从开采前到修复治理后全生命周期木里煤田地表温度和植被生态系统稳定性的演变特征。上述研究有助于深入了解木里煤田生态环境整治修复效果,但 2020 年以后木里矿区植被覆盖度的时空变化特征、“种草复绿”成效以及人类活动对生态环境的影响等方面的研究,尚需进一步深化。

相较于传统的人工实地调查,卫星遥感凭借其成本低、效率高和采集范围广的优势,在生态环境的调查评估与监测中扮演着日益重要的角色^[8]。以往研究反复证实了归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够有效衡量区域植被覆盖度和生态环境状况,已成为遥感调查监测中广泛采用的指标^[9]。贾志峰等^[10]、张心茹等^[11]、张明祥等^[12]、余玉洋等^[13]分析了 NDVI 的时空变化格局,并解析了气候变化和人类活动对植被覆盖度动态变化的影响。陈雪萍等^[14]、李晶等^[15]分析了研究区植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素。毕银丽等^[16]综合分析了 1988—2020 年准格尔矿区 NDVI、地表温度和干旱指数的变化趋势。徐轩等^[17]和方良成等^[18]研究了矿产开发对周边植被 NDVI 的扰动效应。伍超群等^[19]分析了 1990—2016 年木里煤田不同等级 NDVI 的时空变化特征。总体而言,当前研究聚焦于分析 NDVI 长时序数据的线性变化趋势及其背后的驱动机制^[20],对植被覆盖在恢复过程中的动态波动特征关注较少^[21],尤其缺乏针对高寒矿区生态修复工程实施后,基于 NDVI 时序数据定量评估植被恢复成效、揭示修复效果区域差异及生态脆弱性的系统性研究,使得难以精准捕捉高寒矿区生态修复的复杂过程与潜在风险。

鉴于此,本研究综合运用多种遥感监测技术和分析方法,精准评估木里煤田生态修复工程的实施效果,揭示植被恢复的时空动态变化规律及其驱动因素。研究成果不仅为矿区植被变化监测和恢复效果评估提供实用的技术方法,还可为木里煤田以及

其他高寒矿区的生态修复工作提供了可借鉴的技术范式和管理经验。创新点如下:①利用 2019—2023 年高时间分辨率 NDVI 数据,综合运用时空对比分析、分区统计、趋势分析、变化检测等方法,对青海木里煤田植被恢复效果进行遥感监测,精准捕捉植被覆盖动态变化,首次揭示该区域及各子矿区植被恢复的时空分异规律,明确生态修复工程的区域差异。②提出了一种基于 NDVI 时序数据的显著变化检测方法,能够精准识别植被覆盖的年际波动特征,为及时调整生态修复策略提供了科学依据。③从空间和时间 2 个维度全面解析 NDVI 的影响机制。在空间维度上,通过回归分析揭示气候和地形地貌因素对 NDVI 的综合影响;在时间维度上,运用回归分析和残差分析方法,深入探究自然环境与人类活动对 NDVI 变化的复杂交互作用,成功识别人类活动对 NDVI 影响显著的区域,并定量分离生态修复工程的净效应。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

木里煤田位于 98°59'54"E—99°39'36"E, 38°01'22"N—38°12'49"N, 青藏高原东北部,青海省天峻县与刚察县交界处,紧邻祁连山自然保护区,黄河重要支流大通河的发源地,横跨哆嘛贡玛(10.4 km²)、聚呼更(84.5 km²)、弧山(14.1 km²)和江仓(78.5 km²)4 个子矿区,东西宽 50 km,南北宽 15 km,如图 1 所示。木里煤田地处高寒高海拔地区,平均海拔 4 000 m 以上,典型的高原大陆性气候,年降雨量 400~500 mm,集中在 5—9 月;冬季寒冷,夏秋温凉,1 月平均气温 -17.5℃,7 月平均气温 11℃,年平均气温 -0.6℃。多年冻土发育,成壤时间短,植被以高寒沼泽类和高寒草甸类为主,低矮、群落结构简单、生长缓慢,抗干扰能力弱,遭受破坏后恢复困难^[22]。木里矿区生态整治工作于 2020 年 8 月 31 日开始施工,2020 年 12 月底完成第 1 阶段任务目标——矿坑和渣山治理,2021 年 2 月 23 日开始第 2 阶段任务——覆土与种草复绿,2021 年 6 月底之前全面完成土壤重构和种草复绿,2021 年 7 月转入第 3 阶段——生态管护提升和监测评估。

1.2 数据来源及预处理

NDVI^[23]通常用于监测植被覆盖度、生物量和生态环境质量,计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

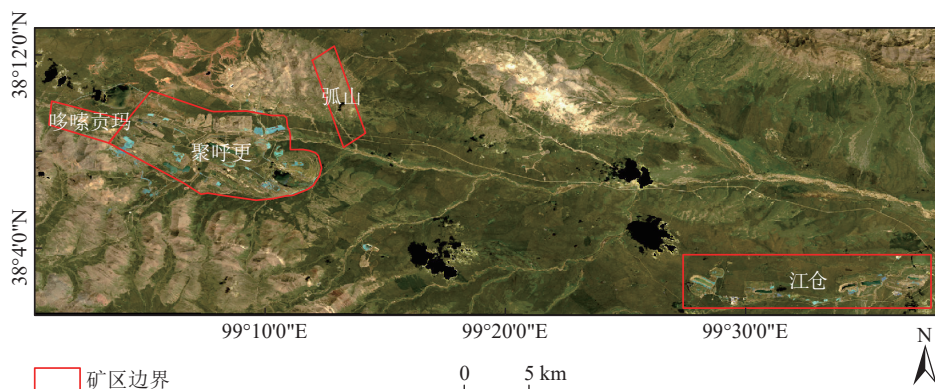


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

式中: ρ_{NIR} 和 ρ_{Red} 分别为近红外波段和红色波段的反射率。NDVI 在 $[-1, 1]$ 的数值范围, 值越大, 表示植被覆盖度越高^[17]。

借助 Google Earth Engine(GEE)遥感云平台(<https://code.earthengine.google.com>), 获取木里煤田 2019—2023 年云量少、画质清的 Sentinel-2(哨兵 2 号)卫星影像, 用于创建年度最大合成 NDVI 影像和夏季真彩色合成影像^[24]。

2019—2023 年生长季(5—9 月)降雨总量数据采用 CHIRPS 数据集, 平均气温来源于欧洲中期天气预报中心第 5 代再分析数据集, 高程信息来源于全球哥白尼数字高程模型(Copernicus DEM)数据, 均从 GEE 平台下载。基于高程数据, 借助 GIS 软件生成坡度数据。

2 研究方法

2.1 NDVI 变化趋势分析

以 2019—2023 逐年最大合成 NDVI 时间序列数据作为因变量, 以年序号作为自变量, 建立一元线性回归方程。运用式(2)计算回归直线的斜率(SLOPE), 借此量化研究期间各栅格上 NDVI 的变化趋势^[25]。

$$\text{SLOPE} = \frac{n \sum_{t=1}^n (t \text{NDVI}_t)}{n \left(\sum_{t=1}^n t^2 \right) - \left(\sum_{t=1}^n t \right)^2} - \frac{\left(\sum_{t=1}^n t \right) \left(\sum_{t=1}^n \text{NDVI}_t \right)}{n \left(\sum_{t=1}^n t^2 \right) - \left(\sum_{t=1}^n t \right)^2} \quad (2)$$

式中: NDVI_t 为第 t 年的 NDVI 值; n 为年数, 在本文设定为 5。采用自然断点法将 SLOPE 的绝对值划分

成高、中、低 3 个区间, 然后根据 SLOPE 的正负号和绝对值大小综合判断 NDVI 的变化趋势。

2.2 相邻年份间 NDVI 显著变化检测

为揭示植被覆盖度随着时间演变的波动特征, 首先计算相邻年份间 NDVI 的差值(ΔNDVI), 然后借鉴 MANCINO 等^[26]提出的方法和以往研究使用分位数识别数据异常值的思路, 定量确定相邻年份间 NDVI 显著变化的阈值, 公式如下:

$$S = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (3)$$

$$D = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (4)$$

式中: Q_1 和 Q_3 分别为 ΔNDVI 数据的下四分位数和上四分位数; S 和 D 分别为相邻年份间 NDVI 显著上升和显著下降的阈值。当某栅格的 $\Delta\text{NDVI} > S$, 表示相邻年份间该栅格的 NDVI 显著上升; 当 $\Delta\text{NDVI} < D$, 表示相邻年份间该栅格的 NDVI 显著下降; 当 $S \geq \Delta\text{NDVI} \geq D$, 表示相邻年份间该栅格的 NDVI 无显著变化。

2.3 NDVI 时空变化的影响因素解析

研究区 2019—2023 年期间 NDVI 的时空变化是自然环境与人类活动共同作用的结果^[27]。其中, 自然环境包括气候(如降水、气温)和地形地貌(如海拔、坡度)等因素, 对植被生长和 NDVI 值产生基础性影响^[28]。人类活动则明确划分为 2 类: ① 生态修复工程, 包括地貌重塑、渣山治理、土壤重构、基质改良、种草复绿、采坑回填、边坡修整、河湖构建及配套灌溉设施建设等系统性工程。这类活动通过系统性改善植被生长的基底环境, 为植被自然恢复与人工培育创造有利条件, 推动 NDVI 呈现抬升的趋势^[29]; ② 其他人类活动, 涵盖残余采矿遗迹(矿坑、机械碾压区、堆煤场、固体废弃物)、放牧与粪肥扰动、新挖损与二次扰动(如临时道路压占)。这些活动虽会显著抑制植被生长潜力, 但对 NDVI 动态变

化的整体影响相对较小。

本研究将从空间和时间 2 个维度解析 NDVI 的影响机制^[12]。

空间维度上,通过回归分析阐释气候和地形地貌因素对 NDVI 空间变化的综合影响机制^[30]。具体而言,以研究区各像元 2023 年的最大合成 NDVI 数据作为因变量,将气候以及地形地貌因素作为自变量,构建了多元线性回归模型,如式(5)所示:

$$\text{NDVI}_i = aP_i + bT_i + cH_i + dS_i + C \quad (5)$$

式中: NDVI_i 、 P_i 、 T_i 、 H_i 和 S_i 分别为第 i 个像元在 2023 年的最大合成 NDVI、生长季降水量、生长季平均气温、高程以及坡度的 Z-Score 标准化值; a 、 b 、 c 、 d 为各项指标对应的回归系数; C 为模型的常数项。

时间维度上,基于历史气象数据和 NDVI 数据,综合运用回归分析和残差分析方法,量化人类活动对 NDVI 时间变化的影响^[31]。具体步骤如下:

首先,以研究区各像元 2020—2023 历年的最大合成 NDVI 数据为因变量,以 2019 年的最大合成 NDVI 数据以及气候因素为自变量,创建多元线性回归模型,如式(6)所示:

$$\text{NDVI}_{ij} = \text{NDVI}_{(i,2019)} + a \frac{P_{ij}}{P_{(i,2019)}} + b \frac{T_{ij}}{T_{(i,2019)}} + C \quad (6)$$

式中: NDVI_{ij} 、 P_{ij} 、 T_{ij} 分别为第 i 个像元在 j 年的最大合成 NDVI、生长季降水量、生长季平均气温; $\text{NDVI}_{(i,2019)}$ 、 $P_{(i,2019)}$ 和 $T_{(i,2019)}$ 分别为 2019 年的对应值,这些基准数据不仅为气象数据的归一化处理提供了必要的支持,还使得模型能够准确反映生态修复工程启动前每个像元的初始状态,从而更精准地预测和解释 NDVI 的变化; a 、 b 为各气象指标对应的回归系数; C 为模型的常数项。

然后,将历年生长季降水、平均气温数据代入式(6),计算气候因素单独影响下的历年 NDVI 期望值。

最后,采用式(7)计算 2020—2023 历年 NDVI 观测值和期望值之差的累积值,以此量化人类活动对植被覆盖度的净影响。

$$\begin{aligned} \text{Residual}(\text{NDVI}_i) &= \sum_{j=2020}^{2023} \text{Residual}(\text{NDVI}_{ij}) \\ &= \sum_{j=2020}^{2023} [\text{Real}(\text{NDVI}_{ij}) - \text{Expected}(\text{NDVI}_{ij})] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\text{Real}(\text{NDVI}_{ij})$ 为第 i 个像元在第 j 年的实际 NDVI 值; $\text{Expected}(\text{NDVI}_{ij})$ 为在仅考虑气候因素影响下,采用式(6)计算得到的第 i 个像元在第 j 年的

NDVI 期望值; $\text{Residual}(\text{NDVI}_{ij})$ 为 $\text{Real}(\text{NDVI}_{ij})$ 与 $\text{Expected}(\text{NDVI}_{ij})$ 之间的差值,反映了人类活动对 NDVI 的净影响; $\text{Residual}(\text{NDVI}_i)$ 为历年 $\text{Residual}(\text{NDVI}_{ij})$ 的累加值,正值暗示人类活动可能对 NDVI 产生正向促进作用,负值则表明人类活动可能对 NDVI 带来负向影响。

鉴于木里煤田 4 个子矿区之外的区域人类活动对 NDVI 的干扰程度相对较低,将矿区周边区域设为“低干扰对照区”,依据矿区周边各像元的 $\text{Residual}(\text{NDVI})$ 数据分布的统计特性来确定阈值,以此识别人类活动对 NDVI 显著影响的区域。具体而言,将矿区周边所有像元的 $\text{Residual}(\text{NDVI})$ 值进行排序,把处于后 5% 位置的 $\text{Residual}(\text{NDVI})$ 值作为判定人类活动显著负向影响与非显著影响的阈值;以排序处于前 5% 位置的 $\text{Residual}(\text{NDVI})$ 值作为判定人类活动显著正向影响与非显著影响的阈值。

进一步将 4 个子矿区图层与 $\text{Residual}(\text{NDVI})$ 图层进行空间叠加,统计矿区内(生态修复工程区)与矿区外(非工程区) 2 类像元中,人类活动对 NDVI 动态变化产生显著正负向影响的面积占比。通过对比分析,区分生态修复工程与其他人类活动的影响,明确生态修复工程的净效应及区域差异。

3 结果分析

3.1 NDVI 时空变化特征分析

3.1.1 生态修复工程的可视化展示

图 2 呈现了木里煤田在 2019、2021、2022 年夏季的遥感影像图,可直观展示生态修复工程的实施效果,并为 NDVI 统计结果提供了地面实况的佐证。从图中可以看出,2019 年存在大量裸露的矿坑和渣山;2021 年,矿坑和渣山得到了平整,同时还出现了草籽播种的痕迹;2022 年,植被覆盖得到显著提升。

3.1.2 NDVI 均值的时空变化特征

为定量分析生态修复前后植被覆盖度的动态变化特征,统计了 2019—2023 年木里煤田全域和各子矿区的 NDVI 均值,见表 1。可以看出,2023 年,4 个子矿区中,只有江仓矿区的 NDVI 均值(0.62)高于全域平均水平(0.61)。2019—2023 年,全域和各子矿区的 NDVI 均值都有所提升,以聚弧更矿区最为明显,从较低基础实现了跨越式提升,但提升幅度先增加后减小。全域、哆嗦贡玛矿区、聚呼更矿区和弧山矿区的 NDVI 在 2019—2022 逐年上升,在 2022—2023 年有所下降。其中,哆嗦贡玛矿区的 NDVI 在 2021—2022 年上升幅度较大;聚呼更矿区的 NDVI

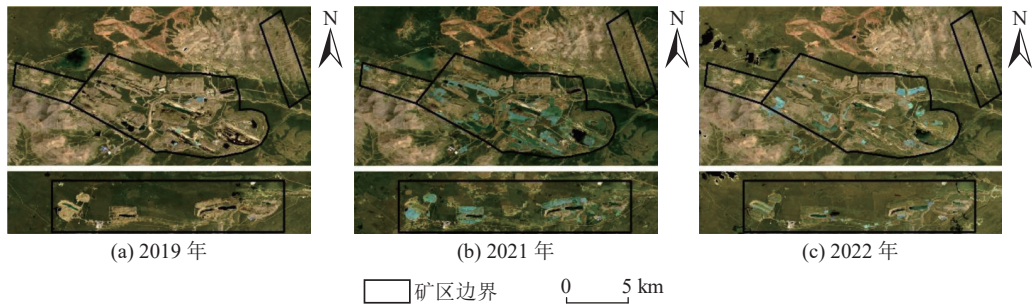


图 2 木里煤田 2019 年、2021 年和 2022 年夏季真彩色合成遥感影像

Fig.2 True color composite remote sensing images of Muli Coalfield in the summer of 2019, 2021, and 2022

表 1 2019—2023 年木里煤田全域和每个矿区的 NDVI 均值
Table 1 Mean NDVI of the entire area and each mining area of Muli Coalfield from 2019 to 2023

年份	NDVI均值				
	全域	哆嗦贡玛矿区	聚呼更矿区	弧山矿区	江仓矿区
2019	0.58	0.51	0.38	0.47	0.57
2020	0.59	0.52	0.42	0.50	0.56
2021	0.61	0.55	0.52	0.51	0.64
2022	0.62	0.63	0.55	0.54	0.62
2023	0.61	0.58	0.51	0.48	0.62

在 2020—2021 年上升幅度较大。相比之下,江仓矿区的 NDVI 在 2020—2021 年大幅上升,此后略有下降。这种差异既与各矿区修复工程的实施节奏有关,也体现了高寒生态系统对环境变化的敏感响应——2022—2023 年的普遍回落,暗示极端气候或修复措施持续性不足可能对植被恢复产生影响。可见,木里煤田的植被恢复取得了显著成效,但未来需通过持续监测与动态调整修复策略,警惕潜在的退

化风险,巩固既有治理成果。

3.1.3 不同等级 NDVI 的时空变化特征

2019—2020 年不同等级 NDVI 在全域和各子矿区的空间分布和面积比例(图 3、图 4)进一步揭示了植被恢复的区域差异。可以看出,2023 年,4 个矿区中,仅江仓矿区植被覆盖度高(NDVI>0.5)的面积比例(82.2%)超过全域平均水平(73.3%)这与其 NDVI 均值长期领先的趋势一致,反映出该区域植被恢复的基础更为扎实。2019—2023 年,全域和各子矿区植被覆盖度高(NDVI>0.5)的面积比例都有所增加,以聚呼更矿区最为明显,印证了该区域生态修复工程对植被覆盖广度的有效拓展。全域、哆嗦贡玛和弧山矿区,尽管植被覆盖度高(NDVI>0.5)的面积比例没有明显变化,但植被覆盖度很高(NDVI>0.75)的面积比例明显增加,表明这些区域的植被恢复正从“量的扩张”转向“质的提升”。而聚呼更和江仓矿区高覆盖面积占比呈现“先快速增长后趋于稳定”的特征,既体现了修复工程在短期内的强效性,也暗示当植被覆盖达到一定水平后,可能受限于高寒地区

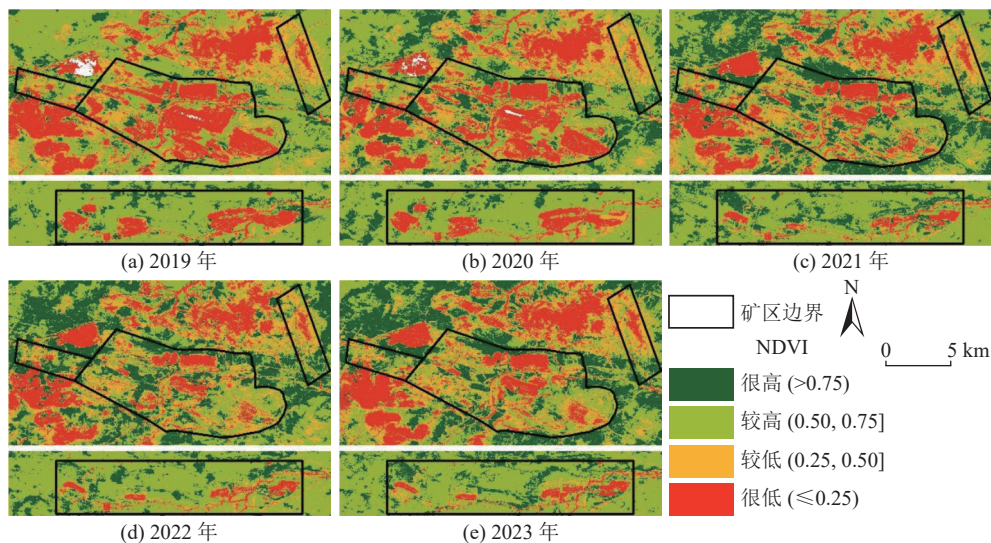


图 3 木里煤田 2019—2023 年逐年最大合成 NDVI 遥感影像

Fig.3 Remote sensing images of the maximum NDVI in Muli Coalfield from 2019 to 2023

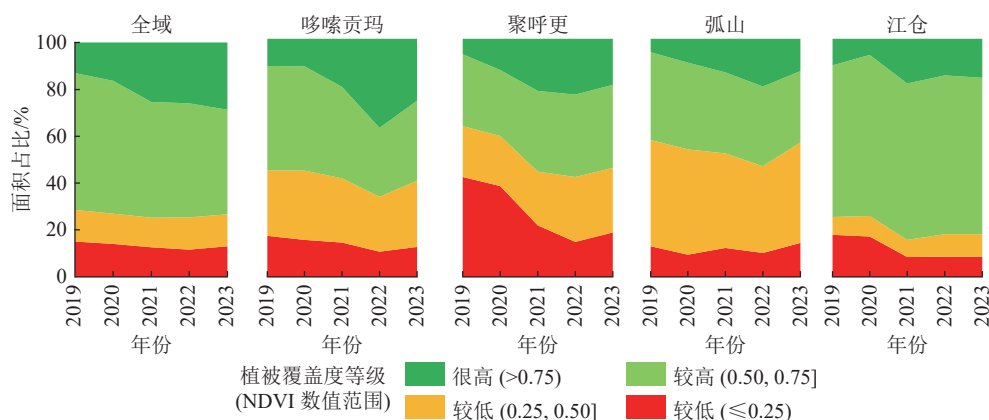


图 4 木里煤田全域和各子矿区不同水平 NDVI 的面积占比

Fig.4 Area proportion of NDVI at every level in the entire area and each mining area of Muli Coalfield

土壤肥力、水分条件等自然瓶颈,进一步提升需要更精细化的修复措施。

3.2 NDVI 总体变化趋势

采用式(1)计算木里煤田全域和各子矿区每个像元上 2019—2023 年 NDVI 的总体变化趋势,然后统计不同变化趋势类型的空间分布和面积占比,如图 5 所示。可以看出,全域和各子矿区 NDVI 明显提升的面积比例(11.9%~46.7%)均显著高于明显下降的面积比例(4.0%~6.5%),这一整体趋势直观印证了生态修复工程对木里煤田植被恢复的主导推动作用。进一步发现,不同子矿区的植被恢复效果存在较大差异:虽然 NDVI 明显下降的面积比例相差不大,但 NDVI 明显上升的面积比例却差异显著。聚呼更、哆嗦贡玛和江仓 3 个子矿区的植被恢复情

况较好, NDVI 明显提升的面积比例高于全域平均水平(19.3%),分别为 46.7%、41.9%、22.3%。这 3 个子矿区 NDVI 大幅提升的面积比例也高于全域平均水平(2.8%),分别为 19.9%、6.4%、9.4%。此外,聚呼更和哆嗦贡玛矿区 NDVI 小幅提升的面积比例明显高于木里煤田全域平均水平(16.5%),分别为 26.8% 和 35.5%。这一差异既与各矿区修复工程的实施强度相关,也与初始生态基础有关。例如,江仓矿区原本植被条件相对较好,生态修复进一步巩固了其恢复成效,这与 FENG 等^[32]发现的“江仓矿区高强度表土重构使 NDVI 5 年增幅达 0.15”结论一致。

3.3 相邻年份间 NDVI 变化趋势

图 6 和图 7 分别展示了相邻年份间 NDVI 不同

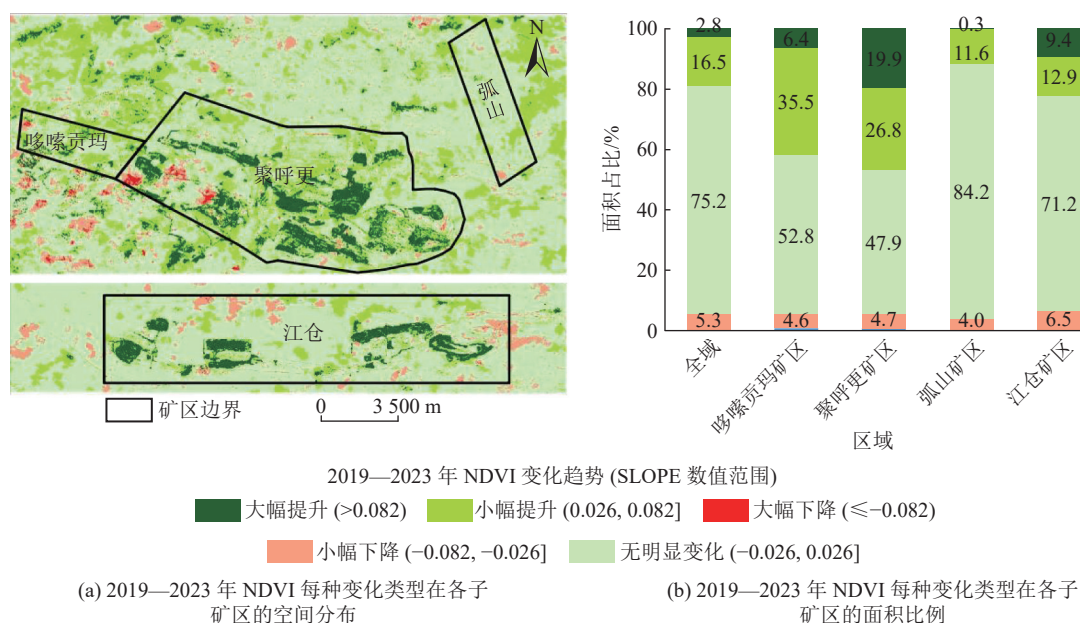


图 5 2019—2023 年 NDVI 每种变化类型在各子矿区的空间分布和面积占比

Fig.5 Spatial distribution and area proportion of each NDVI change type in every mining area from 2019 to 2023

变化类型的空间分布和面积占比,这些动态特征为解析植被恢复的阶段性和规律提供了关键线索。从整体趋势看,相邻年份间 NDVI 显著提升的空间先增多后减少,显著下降的空间先减少后增多,这种波动既反映了生态修复工程的推进节奏,也暗示了植被恢复过程中可能面临的阶段性挑战。具体而言,2020—2021 年或 2021—2022 年成为植被覆盖改善的关键窗口期,NDVI 显著提升的面积达到最高点,

这与木里煤田生态修复工程的集中实施阶段高度吻合——2020 年启动矿坑治理、2021 年推进种草复绿等措施的连续发力,为植被生长创造了有利条件。其中,在聚乎更和江仓矿区,2020—2021 年 NDVI 显著提升的面积占比达到峰值,分别为 26.1% 和 13.1%;而在哆嗦贡玛和弧山矿区,这一比例在 2021—2022 年达到最大,分别为 21.7% 和 10.7%。2022—2023 年,植被覆盖度出现了最大范围的退化,表现为

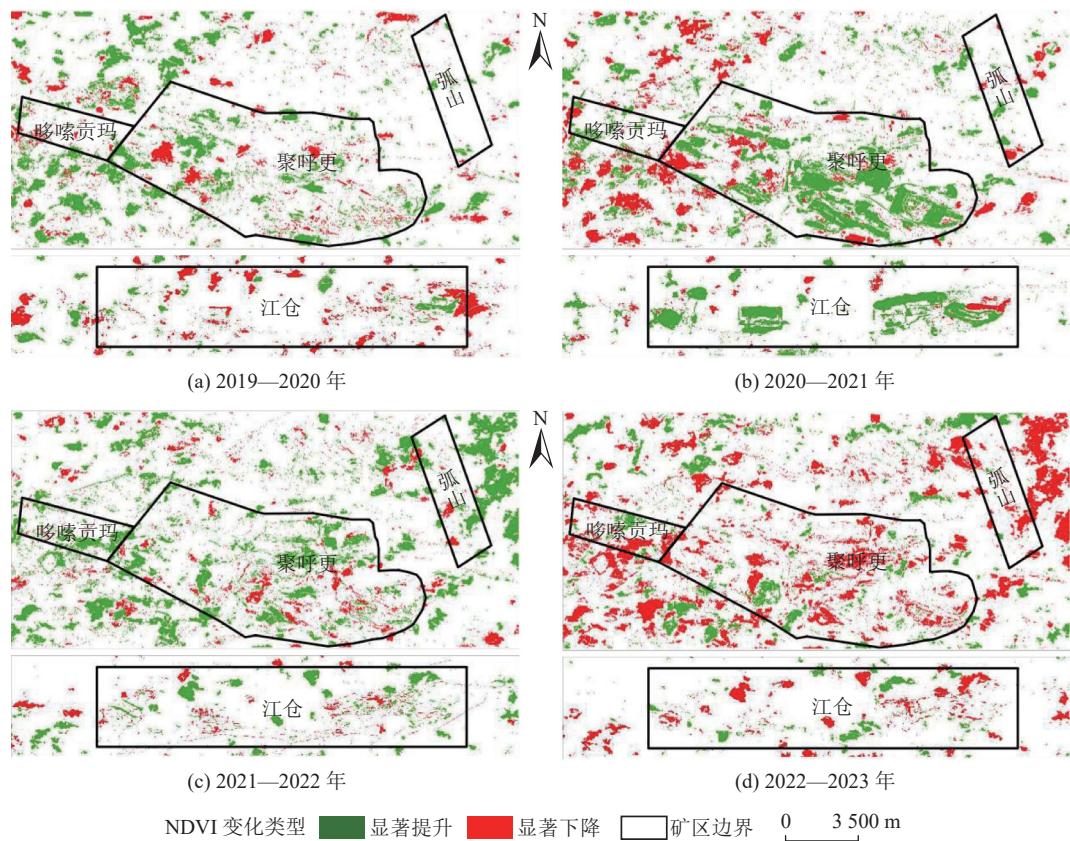


图 6 相邻年份间 NDVI 不同变化类型的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of different NDVI change types between adjacent years

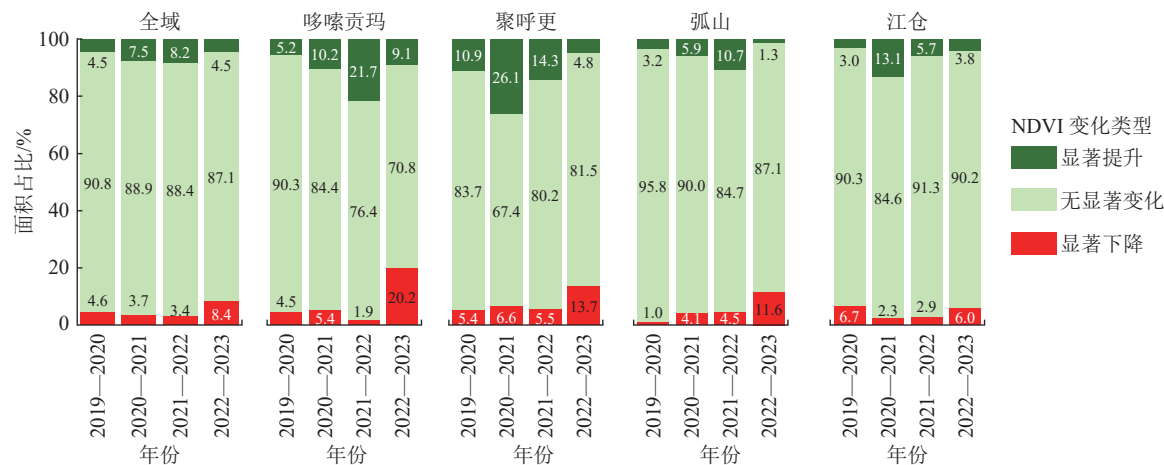


图 7 相邻年份间 NDVI 每种变化类型的面积占比

Fig.7 Area proportion of each NDVI change type between adjacent years

NDVI 显著下降的面积占比达到峰值,在全域、哆嗦贡玛矿区、聚乎更矿区、弧山矿区和江仓矿区分别为 8.4%、20.2%、13.7%、11.5% 和 6.0%。这一现象既可能与当年极端气候事件(如干旱、低温)的影响有关,也反映出高寒矿区生态系统的脆弱性——即便经过修复,植被对环境波动的抵抗能力仍较弱,且修复措施的持续性不足可能加剧这种退化风险。

3.4 自然环境和人类活动对 NDVI 的影响

表 2 显示,空间维度上回归分析模型的整体拟合度 R^2 为 0.634,表明模型可解释约 63.4% 的 NDVI 空间变化,具有一定的解释力,但未达到极高水准,可能因为 NDVI 的空间变异还受到其他因素(如土壤类型、土地利用变化、植被类型等)的影响,而这些因素未被纳入模型中。降水(P_i)的回归系数为 0.134($p<0.05$),对 NDVI 有正向影响,符合生态学常识,因为适量的降水有助于植被生长。气温的回归系数为 0.197($p<0.01$),表明其对 NDVI 的正向影响更为显著,可能因为较高的气温促进了冻土和山地积雪的融化,为植被生长提供了额外的水分。然而,高程(H_i)和坡度(S_i)对 NDVI 均有显著负向影响,系数分别为 $-0.625(p<0.01)$ 和 $-0.243(p<0.01)$ 。高程的增加通常伴随着气候条件的变化(如气温降低、降水模式改变),可能对植被生长产生不利影响。陡峭的坡度可能导致水土流失,减少土壤水分和养分,从而限制植被生长。地形因素(高程和坡度)的回归系数绝对值大于气候因素(降雨和气温),这可能是因为该矿区地形复杂,海拔变化大,导致气候条件垂直变化明显,从而对植被生长产生更显著的影响。此外,模型未纳入其他关键因素,也可能导致地形因素的影响显得更为显著。

表 2 空间维度回归分析模型参数

Table 2 Parameters of regression analysis model in spatial dimension

变量	标准化回归系数	模型拟合度 R^2
P_i	0.134**	0.634
T_i	0.197***	
H_i	-0.625^{***}	
S_i	-0.243^{***}	

注:回归分析模型如式(5)所示;“***”表示 p (显著性水平) <0.01 ;“**”表示 $p<0.05$ 。

表 3 显示,时间维度上回归分析模型的拟合度 R^2 达到 0.791,表明模型能够较好解释 NDVI 的时间变化,为后续精准探究人类活动对 NDVI 时间变化的影响提供了科学依据。2019 年 NDVI($NDVI_{(i,2019)}$)

的回归系数为 0.889($p<0.01$),显示出前期植被状况对当前 NDVI 具有显著的正向影响。生长季降水量(P_{ij})和平均气温(T_{ij})的系数分别为 0.356($p<0.05$)和 0.473($p<0.05$),表明气候因素对 NDVI 有正向促进作用。气温的影响更为显著,可能因为气温升高既直接促进植被生长,又加速积雪和冻土融化,增加土壤水分,间接利于植被生长。相比之下,由于该地区降水偏少且形式多为降雪,降水对 NDVI 的促进作用相对较小。

表 3 时间维度回归分析模型参数

Table 3 Parameters of regression analysis model in temporal dimension

变量	标准化回归系数	模型拟合度 R^2
NDVI _(i,2009)	0.889***	
$\frac{P_{ij}}{P_{(i,2019)}}$	0.356**	0.791
$\frac{T_{ij}}{T_{(i,2019)}}$	0.473**	

注:回归分析模型见式(6);“***”表示 p (显著性水平) <0.01 ;“**”表示 $p<0.05$ 。

综合运用回归分析(式(5))和残差分析(式(6))得到 2019—2023 年木里煤田人类活动对 NDVI 时间变化影响类型的分布情况,如图 8 所示。将矿区周边区域作为对照组,其 NDVI 受到人类活动显著正向和负向影响比例均设置为 5.0%。

结果显示,高达 88.6% 的区域内人类活动对 NDVI 变化的影响不显著,显著负向影响占 5.0%,显著正向影响占 6.4%,表明木里煤田大部分区域 NDVI 变化仍以自然因素主导,人类活动的干预强度有限。

从不同矿区的差异来看,弧山矿区的显著正向和负向影响比例最低,分别为 3.6% 和 2.5%,均低于矿区周边区域和全域平均水平,表明该矿区人类活动对植被覆盖度的干扰较弱,推测该区域生态修复工程实施强度较低、其他人为干扰较少。聚呼更矿区、江仓矿区和哆嗦贡玛矿区的显著正向影响比例分别达 25.1%、11.6%、9.3%,均显著高于矿区周边区域(5%)。这一差异直接印证了生态修复工程是 NDVI 提升的核心动力——上述矿区通过实施植被重建、土壤改良等针对性修复措施,直接促进了植被覆盖度的显著提升,且该作用强度远超自然因素的基础影响。而同期这 3 个矿区的显著负向影响比例与周边区域接近(聚呼更矿区 4.4%、江仓矿区 6.2%、哆嗦贡玛矿区 4.5%),说明采矿遗迹清理不彻底、局部工程扰动等其他人类活动对植被的负面影响未超

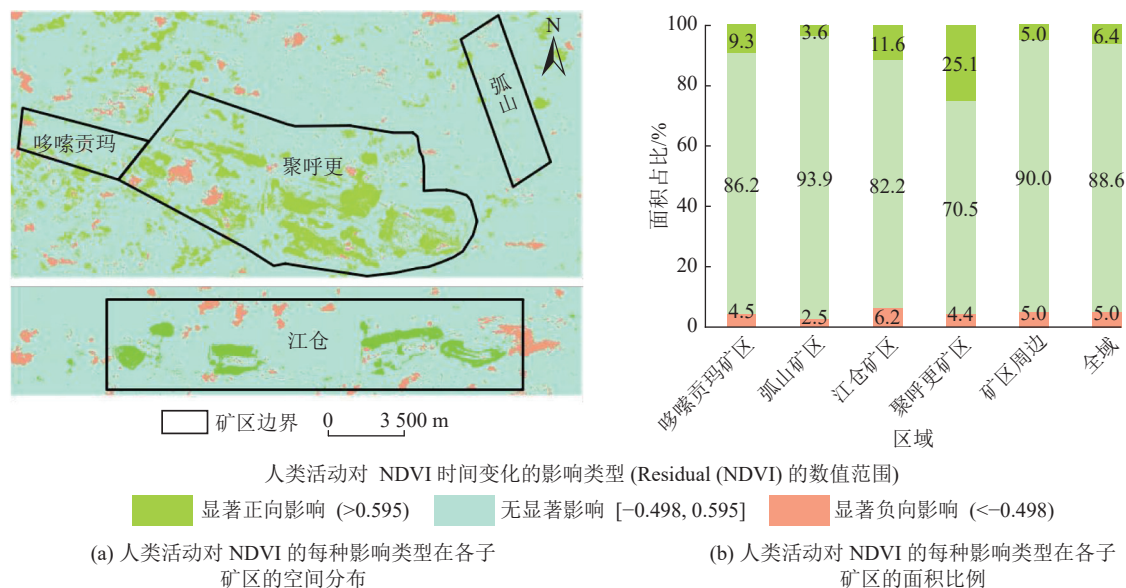


图 8 人类活动对 NDVI 的每种影响类型在各子矿区的空间分布和面积占比

Fig.8 Spatial distribution and area proportion of each type of human impact on NDVI in each mining area

出自然波动范围,生态修复工程在显著提升 NDVI 的同时,并未额外加剧植被退化。

综上,生态修复工程作为一类主动干预的人类活动,是部分矿区植被改善的核心驱动因素,其净效应集中体现为“显著正向”,直接推动了植被覆盖度呈现“提升为主、退化可控”的整体态势;而采矿残留活动、局部工程扰动、放牧等其他人类活动的负面影响目前处于自然生态系统的缓冲范围内,未对区域植被恢复进程构成显著阻碍。

4 结论与讨论

本研究利用 2019—2023 逐年最大合成 NDVI 遥感影像,综合运用趋势分析、变化检测、回归分析和残差分析等方法,定量评估了木里煤田生态修复工程的实施效果,揭示了木里煤田全域及其子矿区植被恢复的时空分异规律及其驱动因素,得出以下主要结论:

1) 2023 年,江仓矿区的植被覆盖状况显著优于其他 3 个子矿区,其植被覆盖度高(NDVI 大于 0.5)的面积比例高达 82.2%,NDVI 均值为 0.62,超过木里煤田全域平均水平(73.3% 和 0.61)。相比之下,哆嗦贡玛、聚呼更和江仓 3 个矿区的植被覆盖度尚存显著的改善潜力,植被覆盖度高(NDVI 大于 0.5)的面积比例分别为 59.6%、54.2%、43.6%,NDVI 均值分别为 0.58、0.51、0.48,低于木里煤田全域平均水平。这种较低的植被覆盖水平表明研究区植被基础薄弱,生态系统自我维持和抵抗干扰的能力较差,存在较高的退化风险。

2) 2019—2023 年,木里煤田全域及各子矿区的 NDVI 均有所提升,但提升幅度先增加后减小。聚呼更矿区的植被恢复成效最显著,NDVI 均值由 0.38 上升到 0.51,植被覆盖度高(NDVI 大于 0.5)的面积比例从 36.7% 增加到 54.2%,NDVI 大幅提升和小幅提升的面积比例分别为 19.9% 和 26.8%。2022—2023 年,在江仓矿区之外的其他 3 个子矿区,NDVI 均值出现下滑,这一波动既可能与气候变化有关,也间接体现了高寒矿区植被恢复过程的不稳定性。

3) 提出了一种新的显著变化检测方法,可精准识别植被覆盖的年际波动特征。相邻年份间 NDVI 显著提升的空间先增多后减少,显著下降的空间先减少后增多。不同矿区生态修复工程见效时间存在差异:在聚呼更和江仓矿区,NDVI 显著提升的面积在 2020—2021 年达到峰值,分别为 26.1% 和 13.1%;在哆嗦贡玛和弧山矿区,NDVI 显著提升的面积在 2021—2022 年达到最高点,分别为 21.7% 和 10.7%。各子矿区 NDVI 显著下降的面积在 2022—2023 年达到峰值。这种恢复过程中的波动体现了生态系统对外部环境的敏感性,间接反映了其脆弱性。

4) 构建了多维度综合分析框架,从空间和时间 2 个维度全面解析了 NDVI 的影响机制,成功分离了生态修复工程的净效应。空间维度上,地形因素(高程和坡度)对 NDVI 的影响超过气候因素,凸显了矿区复杂地形的主导作用。时间维度上,人类活动对 NDVI 的影响在不同矿区存在差异:弧山矿区的影响最弱,显著正向和负向影响比例分别为 3.6% 和 2.5%,这与该区域生态修复工程实施强度较低及其他人为

扰动较少有关;聚呼更矿区的显著正向影响比例最高(25.1%),江仓和哆嗦贡玛矿区分别为 11.6% 和 9.3%,显著高于矿区周边(5.0%)和全域平均水平(6.4%),印证了这些矿区通过地貌重塑、种草复绿等生态修复工程对植被覆盖产生的定向提升作用;同时,上述矿区的显著负向影响比例与周边区域接近,表明残余采矿干扰、放牧扰动等其他人类活动的负面影响未突破自然生态系统的缓冲阈值,未显著超过自然波动范围。

总而言之,在生态修复工程的主导驱动下,木里煤田的聚呼更、江仓等多个矿区植被覆盖度呈现“快速提升—波动调整”的动态变化特征,而残余采矿遗迹、放牧扰动等其他人类活动的负面影响处于可控范围,未对生态恢复整体进程构成显著阻碍。尽管当前植被覆盖度改善成效显著,但仍存在较大提升空间,且面临回落风险。可见,木里煤田的生态修复并非一劳永逸,未来还需针对不同矿区制定差异化的动态监测与维护策略,尤其要重点关注植被覆盖度低或退化较严重的区域,探究其成因并及时调整修复措施,并严格管控其他人类活动的负面干扰,以有效应对潜在的生态退化风险,持续巩固植被恢复成果。为更深入探究木里煤田生态环境的时空变化特征及其背后的驱动机制,建议从以下 6 个方面加强研究。① 通过系统采集更长时间跨度的遥感数据,揭示 NDVI 从煤矿开采前至修复后的长期演化特征,以便更深入理解生态环境在煤矿开采和修复过程中的响应和恢复机制。② 仅依靠 NDVI 单一指标进行监测,难以全面捕捉生态系统的复杂变化。后续研究将结合归一化差值水体指数(NDWI)、归一化差值含水指数(NDMI)、干旱指数、净初级生产力、地表气温、土地覆盖类型及物种多样性等多元数据,整合形成如遥感生态指数等更综合、精准的评估体系^[33],以更系统地反映生态修复成效及潜在风险,提升评估的全面性与科学性。③ 笔者初步识别了木里煤田 NDVI 受到人类活动显著影响的区域。为深入剖析这一影响机制,有必要进一步调研人类活动的具体类型、强度和频率,并探究它们与 NDVI 变化之间的确切关联。例如,监测不同修复模式的植被恢复成效,这将有利于指导难度日益增大的生态修复工作。④ 通过采用本文的遥感监测方法,还可以对木里矿区不同矿坑和矿井之间的植被修复效果进行比较分析,进而提炼出更为丰富的研究成果。⑤ 公开可下载的 DEM 高程数据更新频率低,难以满足分析需求。未来研究拟通过卫星遥感解译和无人机测绘

技术获取高程数据,从而及时捕捉地形变化,并深入分析其对 NDVI 的动态影响^[34]。⑥ 笔者在空间和时间 2 个维度上构建的线性回归模型分别解释了 63.4% 和 79.1% 的 NDVI 变化。后续研究将纳入更多具有空间异质性和动态变化特性的关键变量,并引入随机森林、梯度提升等非线性建模方法,以提高评估模型的可靠性,降低人类活动影响分析的误差。

参考文献(References):

- [1] 欧为友,辛玉春,孙海群,等.木里矿区生态修复监测体系构建与实践[J].*青海草业*,2022,31(2):57-60,34.
OU Weiyou, XIN Yuchun, SUN Haiqun, et al. Construction and practice of forest and grass monitoring system for ecological restoration in Muli mining area[J]. *Qinghai Prataculture*, 2022, 31(2): 57-60, 34.
- [2] 李聪聪,王佟,王辉,等.木里煤田聚呼更矿区生态环境修复监测技术与方法[J].*煤炭学报*,2021,46(5):1451-1462.
LI Congcong, WANG Tong, WANG Hui, et al. Monitoring technology and method of ecological environment rehabilitation and treatment in Jvuhugeng mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1451-1462.
- [3] 王佟,章梅,徐辉,等.青海木里煤田聚呼更矿区土壤肥力及重金属风险评价[J].*煤田地质与勘探*,2022,50(4):113-120.
WANG Tong, ZHANG Mei, XU Hui, et al. Soil fertility and heavy metal risk assessment in Jvuhugeng mining area, Muli Coalfield, Qinghai Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(4): 113-120.
- [4] 李凤明,白国良,韩科明.木里矿区生态环境受损特征及治理方法研究[J].*煤炭工程*,2021,53(10):116-121.
LI Fengming, BAI Guoliang, HAN Keming. Characteristics and treatment methods of ecological environment damage in Muli mining area[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(10): 116-121.
- [5] 刘帅,熊涛,孙浩,等.高原高寒木里矿区生态治理中土壤重构治理效果研究[J].*中国煤炭地质*,2021,33(11):77-80,86.
LIU Shuai, XIONG Tao, SUN Hao, et al. Study on plateau frigid zone muri mining area ecological management soil reconfiguration effect[J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(11): 77-80, 86.
- [6] 郭俊锐,祁元,王宏伟,等.青海木里煤田地表温度变化及其影响因素分析[J].*冰川冻土*,2023,45(3):980-992.
GUO Junyu, QI Yuan, WANG Hongwei, et al. Variation of land surface temperature and its influencing factors in Muli Coalfield, Qinghai Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(3): 980-992.
- [7] 陈峰,杨利亚,冯海波,等.祁连山南麓露天矿区高寒草地植被生态系统稳定性研究:以青海木里-聚呼更矿区为例[J].*安全与环境工程*,2024,31(1):291-300.
CHEN Feng, YANG Liya, FENG Haibo, et al. Stability of the alpine grassland vegetation ecosystem in open-pit mining area at the southern Qilian Mountains: A case study in Muli-Juhugeng mining area, Qinghai Province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2024, 31(1): 291-300.

- [8] YANG L Y, SHI L, LI J, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving forces of ecological environment quality in Northwest China mining area[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 21273.
- [9] ANWER H A, MOHAMED T, HASSAN A. Assessing vegetation dynamics in Al Jazirah, Sudan using NDVI-based remote sensing techniques[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2025, 24(4): 18.
- [10] 贾志峰, 刘鹏程, 刘宇, 等. 气候变化和人类活动对松辽流域植被覆盖的影响[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(1): 1-10.
JIA Zhifeng, LIU Pengcheng, LIU Yu, et al. Effects of climatic change and human activities on vegetation cover in Songliao River Basin[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32(1): 1-10.
- [11] 张心茹, 曹茜, 季舒平, 等. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(1): 56-69.
ZHANG Xinru, CAO Qian, JI Shuping, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamic changes in the Yellow River Delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(1): 56-69.
- [12] 张明祥, 谷晓平, 廖留峰, 等. 气候变化和人类活动对贵州省石漠化区植被覆盖变化的影响[J]. *地球与环境*, 2023, 51(1): 76-86.
ZHANG Mingxiang, GU Xiaoping, LIAO Liufeng, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation cover change in rocky desertification area of Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2023, 51(1): 76-86.
- [13] 余玉洋, 宋丰艺, 张世杰. 2000—2020 年河南省 NDVI 时空变化及其驱动因素定量分析[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(10): 1939-1950.
YU Yuyang, SONG Fengyi, ZHANG Shijie. Quantitative analysis of temporal and spatial changes of NDVI and its driving factors in Henan Province from 2000 to 2020[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(10): 1939-1950.
- [14] 陈雪萍, 赵学勇, 张晶, 等. 基于地理探测器的科尔沁沙地植被 NDVI 时空变化特征及其驱动因素[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(8): 1082-1093.
CHEN Xueping, ZHAO Xueyong, ZHANG Jing, et al. Variation of NDVI spatio-temporal characteristics and its driving factors based on geodetector model in Horqin Sandy Land, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(8): 1082-1093.
- [15] 李晶, 闫星光, 闫萧萧, 等. 基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1439-1450.
LI Jing, YAN Xingguang, YAN Xiaoxiao, et al. Temporal and spatial variation characteristic of vegetation coverage in the Yellow River Basin based on GEE cloud platform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1439-1450.
- [16] 毕银丽, 刘涛. 露天矿区植被协同演变多源数据时序分析: 以准格尔矿区为例[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 293-302.
BI Yinli, LIU Tao. Time series analysis of multi-source data of coordinated evolution of vegetation in open-pit mining area: Taking Jungar Mining Area as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 293-302.
- [17] 徐轩, 李均力, 包安明, 等. 新疆五彩湾矿区开发对荒漠植被的扰动分析[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(12): 1934-1944.
XU Xuan, LI Junli, BAO Anming, et al. Disturbance analysis of desert vegetation under the development of wucaiwai mining area in Xinjiang[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(12): 1934-1944.
- [18] 方良成, 陈永春, 安士凯, 等. 基于 Landsat 时序数据的高潜水位煤矿区植被扰动分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(2): 207-215.
FANG Liangcheng, CHEN Yongchun, AN Shikai, et al. Vegetation disturbance analysis in coal mining area with high ground water level based on Landsat time series NDVI data[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(2): 207-215.
- [19] 伍超群, 张绪冰, 王耀, 等. 基于 Landsat 影像的木里煤田矿区植被覆盖提取及时空变化分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(2): 67-72.
WU Chaoqun, ZHANG Xubing, WANG Yao, et al. Analysis of vegetation coverage extraction and time-space change in Muli Coalfield based on landsat image[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(2): 67-72.
- [20] 雷茜, 胡忠文, 王敬哲, 等. 1985—2015 年中国不同生态系统 NDVI 时空变化及其对气候因子的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(15): 6378-6391.
LEI Qian, HU Zhongwen, WANG Jingzhe, et al. Spatiotemporal dynamics of NDVI in China from 1985 to 2015: Ecosystem variation, regional differences, and response to climatic factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6378-6391.
- [21] 黄春晓, 胡顺石, 黄英. 湖南省 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(3): 114-126.
HUANG Chunxiao, HU Shunshi, HUANG Ying. Analysis on spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of NDVI in Hunan Province[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(3): 114-126.
- [22] 段新伟, 左伟芹, 杨韶昆, 等. 高寒缺氧矿区草原生态恢复探究: 以青海省木里煤田为例[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(2): 156-160.
DUAN Xinwei, ZUO Weiqin, YANG Shaokun, et al. Study on ecological restoration of grassland in alpine and anoxic mining areas: Taking the Muli Coalfield in Qinghai Province as an example[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(2): 156-160.
- [23] 杜华栋, 宁本燕, 拜梦童, 等. 1990—2019 年榆神府矿区不同地貌植被覆盖度变化及驱动力探究[J]. *林业资源管理*, 2021(5): 121-130.
DU Huadong, NING Benyan, BAI Mengtong, et al. Dynamic change of vegetation coverage and its driving forces in different landforms on yushenfu mining area from 1990 to 2019[J]. *Forest Resources Management*, 2021(5): 121-130.
- [24] LIU Y, ZUO R G. Monitoring mining activity and vegetation recovery in rare earth element mining areas[J]. *Mathematical Geosciences*, 2024, 56(4): 811-839.
- [25] 陈春波, 李刚勇. 1981—2020 年昆仑山-阿尔金山草地 NDVI 时空变化及其对气温、降水的响应[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(2): 13-25.

- CHEN Chunbo, LI Gangyong. Temporal and spatial variation of grassland NDVI in Kunlun Mountains, altun mountains and its responses to temperature and precipitation from 1981 through 2020[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(2): 13–25.
- [26] MANCINO G, NOLE A, RIPULLONE F, et al. Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: Assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy[J]. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, 2014, 7(2): 75–84.
- [27] 林丹阳, 黄华国, 杨海涛, 等. 基于多源遥感的植被修复成效监测: 以北京市矿山修复区为例[J]. *遥感技术与应用*, 2025, 40(2): 429–441.
- LIN Danyang, HUANG Huaguo, YANG Haitao, et al. Monitoring of vegetation restoration effectiveness based on multiple-source remote sensing: A case study of Beijing's Mine restoration areas[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2025, 40(2): 429–441.
- [28] 刘慧丽, 陈浩, 董廷旭, 等. 川渝地区 NDVI 动态特征及其对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(16): 6743–6757.
- LIU Huili, CHEN Hao, DONG Tingxu, et al. Variation characteristic of NDVI and its response to climate change in the Sichuan-Chongqing region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(16): 6743–6757.
- [29] 景泓元, 刘志东, 胡保安, 等. 人类活动对山西省不同地表覆盖类型 NDVI 时空变化的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(4): 975–982.
- JING Hongyuan, LIU Zhidong, HU Baoan, et al. Influences of human activities on the spatiotemporal variations of NDVI in different land covers of Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(4): 975–982.
- [30] 谢苗苗, 刘金莹, 陈彬, 等. 生态脆弱区复垦排土场干扰类型划分及影响因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 280–288.
- XIE Miaomiao, LIU Jinying, CHEN Bin, et al. Classification of disturbance types and influencing factors of reclamation dump in ecological fragile area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 280–288.
- [31] 陶文旷, 雷少刚. 半干旱煤炭开采沉陷区植被扰动响应的时间特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(2): 200–206.
- TAO Wenkuang, LEI Shaogang. Temporal characteristics of response of vegetation to disturbance of mining and subsidence in semi-arid coal mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(2): 200–206.
- [32] FENG S H, LI Z W, ZHANG C, et al. Ecological restoration in high-altitude mining areas: Evaluation soil reconstruction and vegetation recovery in the Jiangcang coal mining area on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 12: 1538243.
- [33] HUI J W, BAI Z K, YE B Y, et al. Remote sensing monitoring and evaluation of vegetation restoration in grassland mining areas: A case study of the Shengli mining area in Xilinhot City, China[J]. *Land*, 2021, 10(7): 743.
- [34] WANG Z H, WU S X, LI J L, et al. Surface subsidence and its reclamation of a coal mine locating at the high groundwater table, China[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(12): 13635–13654.