

引用格式: 杨静怡, 李贞演, 都伟新, 等. 陕西省榆林市生态环境质量时空演变及影响因素分析[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(4): 879–890. YANG Jingyi, LI Zhenyan, DU Weixin, *et al.* Spatiotemporal evolution and driving factors of ecological environmental quality in Yulin City, Shaanxi Province[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2026, 43(4): 879–890.

陕西省榆林市生态环境质量时空演变及影响因素分析

杨静怡¹, 李贞演¹, 都伟新², 尹芳¹, 韩云昊¹

(1. 长安大学土地工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区生态环境科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 【目的】系统研究陕西省榆林市生态环境质量的时空演变特征及其驱动机制, 对维护黄土高原生态安全具有重要的理论价值与现实意义。【方法】选取榆林市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年及 2025 年 6 期 Landsat 遥感影像数据, 构建综合遥感生态指数 (I_{IRSE}), 结合 Theil-Sen 趋势、Mann-Kendall 检验、Hurst 指数方法与地理探测器模型, 分析近 25 年来榆林市生态环境质量的时空分布与演变趋势, 并定量评估各驱动因子对生态质量的解释力及其交互作用。【结果】①2000—2025 年, 榆林市生态环境质量由东南向西北递减。 I_{IRSE} 均值上升 0.124, 年均增长率为 1.34%; 良好等级区域面积占比从 6.4% 增加至 17.72%, 极差与较差等级区域明显缩减, 分别下降至 16.76% 和 30.44%。②生态质量变化以低频为主, 频繁变化区域集中于佳县、吴堡县、绥德县等地。空间自相关分析显示: 高-高集聚区面积逐年扩大, 生态空间格局持续优化。③榆林市生态环境整体向好, 但区域差异较大, Hurst 指数表明仅 48.44% 区域具备持续改善潜力, 23.31% 区域面临生态退化风险。 I_{IRSE} 变化主要受自然因子驱动, 降水量、高程是关键影响因子, 土地利用变化和人类活动也会对生态质量产生重要干扰。【结论】2000—2025 年, 榆林市生态环境质量整体呈改善趋势, 空间格局为东南高、西北低。优良等级区域扩张, 低等级区域收缩, 生态格局优化。然而生态质量空间分异, 仍有一定比例区域面临退化风险。驱动机制上以自然因子主导, 叠加人为因素影响。为巩固生态成效, 榆林市应重点加强生态退化高风险区系统修复, 协同推进生态保护和综合治理。图 8 参 42

关键词: 遥感生态指数; Landsat; 生态环境质量评价; Hurst 指数; 地理探测器

中图分类号: X826 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)04-0879-12

Spatiotemporal evolution and driving factors of ecological environmental quality in Yulin City, Shaanxi Province

YANG Jingyi¹, LI Zhenyan¹, DU Weixin², YIN Fang¹, HAN Yunhao¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xinjiang Academy of Ecological and Environmental Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: [Objective] A systematic study of the spatiotemporal evolution and driving mechanisms of ecological environmental quality in Yulin City, Shaanxi Province is of great importance. It has significant theoretical value and practical significance for maintaining ecological security of the Loess Plateau. [Method] 6 periods of Landsat remote sensing imagery (2000, 2005, 2010, 2015, 2020, and 2025) of Yulin City were selected to construct the integrated remote sensing ecological index (I_{IRSE}). Theil-Sen slope estimation, Mann-Kendall test, and Hurst exponent method were employed to systematically analyze the spatial distribution and temporal evolution trends of ecological and environmental quality in Yulin City over the past 25 years.

收稿日期: 2025-09-02; 修回日期: 2026-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42071258); 陕西省重点研发计划项目 (2024SF-YBXM-570); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队项目 (2024RS-CXTD-55)

作者简介: 杨静怡 (ORCID: 0009-0006-0070-5213), 博士研究生, 从事资源环境遥感监测与评价研究。E-mail: jingyiofyang@163.com。通信作者: 尹芳 (ORCID: 0009-0004-6345-4066), 教授, 博士, 从事资源环境遥感监测研究。E-mail: yinf@chd.edu.cn

Furthermore, a parameter-optimized geographical detector model was used to quantitatively assess the explanatory power of different driving factors and their interactive effects on ecological quality. [Result] (1) From 2000 to 2025, the ecological environmental quality in Yulin City decreased from southeast to northwest. The mean I_{IRSE} increased by 0.124, with an average annual growth rate of 1.34%. Areas of good ecological quality increased from 6.4% to 17.72%, while regions of poor and relatively poor quality significantly shrank, falling to 16.76% and 30.44%, respectively. (2) Changes in ecological quality were mainly low-frequency, while areas with frequent changes were concentrated in Jia, Wubu, and Suide County. Spatial autocorrelation analysis showed that the area of high-high clustering expanded year by year, indicating a continuous optimization of the ecological spatial pattern. (3) The ecological environment in Yulin City had generally improved, but regional differences were significant. Hurst index indicated that only 48.44% of the area had the potential for continued improvement, while about 23.31% faced the risk of ecological degradation. Changes in I_{IRSE} were mainly driven by natural factors, with precipitation and elevation as key influences. Land use changes and human activities also played important roles in affecting ecological quality. [Conclusion] From 2000 to 2025, the ecological environmental quality in Yulin City showed an overall improving trend, with a spatial pattern of high values in the southeast and low values in the northwest. Areas of good quality expanded, while low-quality areas shrank, indicating an optimization of ecological pattern. However, spatial differentiation remains, and a certain proportion of the region still faces the risk of degradation. The driving mechanisms are mainly dominated by natural factors, with additional influence from human activities. To consolidate ecological gains, Yulin City should focus on systematic restoration in high-risk degradation areas and promote ecological protection together with comprehensive management. [Ch, 8 fig. 42 ref.]

Key words: remote sensing ecological index; Landsat; ecological environment quality assessment; Hurst exponent; geodetector

生态环境质量是衡量区域生态系统健康状况与可持续发展能力的重要综合指标,其演变过程不仅能反映自然系统的动态响应,还体现出人类活动对环境的综合影响^[1]。在全球气候变化与人类活动不断加剧的背景下,生态系统退化、土地荒漠化、水土流失等生态问题日益突出,严重威胁区域生态安全与社会经济的协调发展。尤其在生态环境脆弱区,精准掌握生态质量的时空演变规律及其驱动机制,对生态治理成效评估、空间格局优化与生态文明建设具有重要意义^[2]。

随着遥感技术在生态环境质量监测中的应用不断深化,基于遥感的生态环境质量评价逐渐从单因子指标(如归一化植被指数、地表温度、湿度、归一化差异裸土指数),向多因子综合模型转变^[3]。遥感生态指数可融合多个生态因子、提取主成分并自动加权,已被广泛用于城市与区域生态监测研究^[4-9]。为克服遥感生态指数(I_{RSE})在不同区域适应性不足、指标代表性有限等问题,多种改进型模型被提出,如引入熵权法的改进型遥感生态指数^[10],结合生物丰度^[11-12]、净初级生产力^[13]、大气污染(如 $PM_{2.5}$)、沙漠化指数(I_D)、盐渍化指数(I_S)等多源数据的综合遥感生态指数(I_{IRSE})^[14-15],以提高评价的科学性与适应性。除生态质量本身的监测外,生态演变的成因解析也逐步受到关注。地理探测器模型作为揭示空间分异性及其驱动因子的统计方法,被广泛应用于生态学、地理学等领域^[16]。通过识别影响因子的解释力与交互作用,该模型可深入揭示生态系统变化背后的自然与人文驱动机制。尤其是参数优化的地理探测器(OPGD),在提升空间分层敏感性和模型解释力方面表现出良好性能^[10-12]。

黄土高原作为中国生态系统最脆弱的区域之一,长期以来受严重的水土流失和土地退化影响,生态建设任务十分艰巨^[1]。榆林市地处黄土高原与毛乌素沙地过渡带,是黄河流域生态保护的重要节点,近年来,榆林市在防沙治沙、植被恢复、水土保持等方面取得成效,生态格局和生态功能不断优化,成为西北地区生态治理的重要示范区^[17-19]。目前,尽管已有研究关注榆林市生态环境质量变化^[20-21],但多采用MODIS(分辨率为500 m)数据,在干旱半干旱背景下,对土地沙化严重的典型区域尚缺乏精细尺度的系统分析^[22]。且目前生态环境质量评价模型在榆林市的应用效果有限,这与榆林市沙漠化与盐渍化问

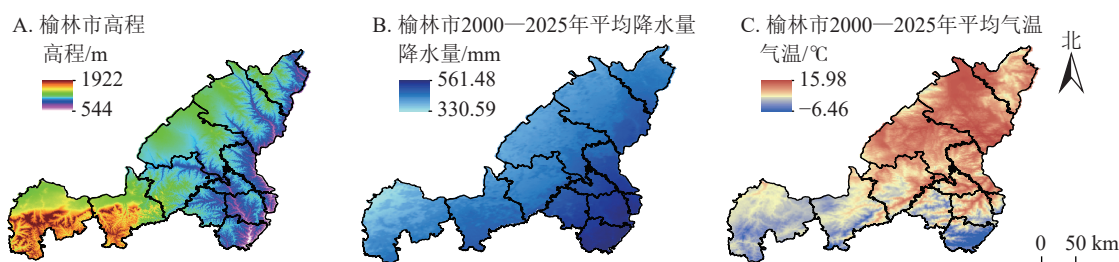
题突出有关。针对类似区域的研究通常单独引入 I_D 与 I_S ，但可能导致评价结果存在一定的局限性。因此，本研究基于 I_{RSE} 融入 I_D 与 I_S ，旨在构建适用于榆林地区干旱、土地退化等典型生态问题的生态环境质量评价模型，实现对区域生态环境质量的综合动态评估。

本研究以陕西省榆林市为研究对象，选取 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年和 2025 年 6 期 Landsat 遥感数据，在 Google Earth Engine (GEE) 平台上基于 I_{RSE} ，引入 I_D 与 I_S ，构建多因子融合的 I_{IRSE} ，结合 Theil-Sen 和 Mann-Kendall 非参数趋势检验与 Hurst 指数分析方法，揭示榆林市生态环境质量的时空演变趋势与未来演化的持续性特征，并采用 OPGD 探讨相关因素对生态环境质量的影响，以期为区域生态环境保护提供理论支撑。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省北部，地处毛乌素沙地与黄土高原交界处，是黄河“几字弯”中心区域和黄河流域生态保护的重要节点城市^[23]。经过 70 余年治理，已实现从“沙进人退”到“绿进沙退”的转变^[24]。全市总面积为 4.29 万 km²，辖 2 区 10 县，地貌以风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区为主，地势西高东低，属半干旱大陆性季风气候，年均气温为 8.0 ℃，年均降水量为 400.0 mm，夏季集中 (图 1)。



基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号，底图边界无修改。

图 1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

1.2 数据来源与预处理

夏季生长季影像可有效捕捉植被旺盛生长时期的生态信息，从而保证生态指标提取的可靠性^[7, 15]，故本研究选取了 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年和 2025 年 6—8 月的 Landsat 影像数据 (Landsat 5 TM 及 Landsat 8 OLI/TIRS)。对影像数据进行辐射定标、大气校正及云遮掩处理，以确保不同时期影像的可比性和一致性。基于多光谱波段计算与提取关键生态因子，构建 I_{IRSE} ，为后续的生态环境质量动态监测与时空演变分析提供数据支撑。

为探究榆林市生态环境质量的主要驱动因素，选取了包括自然与人为因素在内的多类驱动因子。自然因子主要包括年降水量、高程、坡度与气温；人为因子则涵盖人类活动强度、土地利用类型及夜间灯光数据等。考虑到榆林市位于毛乌素沙地边缘这一特殊地理背景，将 $PM_{2.5}$ 作为重要驱动因子纳入分析框架，以更全面评估其生态影响^[15, 23]。降水数据来源于国家气象科学数据中心，高程数据来源于地理空间数据云，土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，夜间灯光数据为 NPP/VIIRS (2012—2023 年)，来源于美国国家海洋和大气管理局国家地球物理数据中心，气温数据来源于国家地球系统科学数据中心。人口密度数据从 WorldPop 数据库获取。对所有数据进行投影转换，统一采用 WGS_1984_UTM_Zone_49N 坐标系，并重采样至 30 m 分辨率，以保证数据的空间匹配性。其中，因数获取年份受限，故选择 2023 年夜间灯光数据、土地利用数据及 2024 年降水量、气温代替 2025 年参与驱动因素分析计算。

1.3 研究方法

1.3.1 综合遥感生态指数 (I_{IRSE}) 构建 I_{RSE} 通常基于绿度、湿度、热度、干度这 4 个重要指标构建^[25-29]，为全面反映陕西省榆林市干旱/半干旱区的生态环境质量特征，在传统 I_{RSE} 框架基础上引入区域敏感性指标，构建 I_{IRSE} 。由于榆林市植被覆盖度低、土壤水分亏缺以及土地退化问题突出，选取绿度指数

(I_{GDV}) 代替归一化植被指数反映植被生长状况与覆盖水平, 采用湿度指数 (W) 表征地表水分状况, 同时引入 I_{D} 刻画荒漠化过程, I_{S} 揭示干旱区土壤盐渍化风险^[21]。 I_{GDV} 、 I_{S} 、 I_{D} 的计算参考文献 [21, 29–30]。

为确保各指标在主成分分析中的权重平衡, 需对 4 个核心生态环境指标进行归一化处理, 将其数值统计至 [0, 1], 以实现量纲一致性^[29]。基于 PCA 提取的第 1 主成分 (P_{C1}) 作为初始综合生态指数 (I_{IRSE0}), 计算公式如下:

$$I_{\text{IRSE0}} = P_{\text{C1}}[f(I_{\text{GDV}}, W, I_{\text{D}}, I_{\text{S}})]。 \quad (1)$$

随后, 将 I_{IRSE0} 进行归一化处理, 使其最终值域稳定在 [0, 1], 得到 I_{IRSE} , 计算公式如下:

$$I_{\text{IRSE}} = \frac{I_{\text{IRSE0}} - I_{\text{IRSE0_min}}}{I_{\text{IRSE0_max}} - I_{\text{IRSE0_min}}}。 \quad (2)$$

在 P_{C1} 的载荷分析中, 若对生态环境质量具有正向指示意义的 I_{GDV} 和 W 在 P_{C1} 中的载荷为负, 而 I_{D} 、 I_{S} 等退化因子载荷为正, 需对 P_{C1} 进行反向处理, 以确保 I_{IRSE} 与生态环境质量水平保持正相关关系^[31]。

1.3.2 人类活动强度指数 (I_{HA}) 构建 构建 I_{HA} 表征人类活动强度, 计算过程如下:

$$I_{\text{HA}} = aL_{\text{NT}} + bD_{\text{P}} + cS_{\text{HAIL}}; \quad (3)$$

$$S_{\text{HAIL}} = S_{\text{CLE}}/S \times 100\%; \quad (4)$$

$$S_{\text{CLE}} = \sum_{i=1}^n (L_i \times C_i)。 \quad (5)$$

式 (3)~式 (5) 中, I_{HA} 为人类活动强度指数, L_{NT} 、 D_{P} 、 S_{HAIL} 为归一化处理后的土地利用数据、人口密度数据和陆地表层人类活动强度数据, S_{CLE} 为建设用地当量面积, S 为区域总面积, L_i 为第 i 种土地类型面积, C_i 为第 i 种土地类型建设用地折算系数, n 为土地类型数量。参考文献 [32–33], a 、 b 、 c 取值分别为 0.3、0.3、0.4, 建设用地、耕地、草地的折算系数分别为 1.000、0.400、0.067, 其余类型设为 0。

1.3.3 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验 Theil-Sen 趋势分析是一种非参数检验方法, 可有效处理数据中小规模离群点和缺失值噪声, 通过估算时间序列中每对点数的斜率, 取其中位数; Mann-Kendall 显著性检验算法的测量值既不受缺失值和异常值干扰, 也无需满足正态分布, 在区域生态环境质量评价中能检验总体趋势的显著性^[29–30, 34–35]。对 2000—2025 年榆林市生态环境质量进行时间序列分析, 将变化趋势分为明显退化、轻微退化、稳定不变、轻微改善、明显改善 5 个等级^[36]。

1.3.4 Hurst 指数 采用重标极差 (R/S) 分析方法计算 I_{IRSE} 的 Hurst 指数 (H), 预测 I_{IRSE} 的变化趋势^[36], $0.5 < H < 1.0$, 表明未来变化趋势与过去一致, 且 H 越接近 1, 变化持续性越强; $0 < H < 0.5$, 意味着未来变化趋势与过去相反, 且 H 越接近 0, 反持续性越明显; $H=0.5$, 表示变化趋势不显著, 变化呈随机性。

1.3.5 地理探测器 该方法适用于揭示地理现象空间分异特征及其驱动机制, 主要包含因子探测、交互探测、生态探测及风险探测 4 个模型^[17]。本研究重点采用因子探测识别 I_{IRSE} 变化的主导因子, 并通过交互探测分析两因子联合作用对 I_{IRSE} 变化的解释力^[31–35]。榆林市被划分为 500 m×500 m 的 172 152 个网格, 利用 ArcGIS 提取各因子至样本点, 并以不同年份的 I_{IRSE} 作为因变量, 采用 OPGD 模型量化各指标对生态环境的影响力水平及交互作用特征。

1.3.6 空间自相关分析 利用 GeoDa 软件对 I_{IRSE} 进行空间自相关分析。通过计算全局莫兰指数来衡量区域整体生态环境质量的空间自相关性, 判断其在空间分布上的集聚或离散特征; 进一步采用局部莫兰指数来度量局部空间依赖程度, 揭示潜在的空间集聚模式, 并识别不同区域生态质量的空间分布差异。计算公式参考文献 [29–30]。

2 结果与分析

2.1 I_{IRSE} 模型适宜性

如图 2 所示: 在第 1 主成分贡献率方面, I_{IRSE} 的贡献率为 57.97%~63.60%, 平均贡献率为 60.88%, 贡献率方差为 2.75%, 表明其贡献率相对稳定。 I_{RSE} 的贡献率为 49.31%~59.77%, 平均贡献率为 54.67%, 贡献率方差为 13.11%, 整体低于 I_{IRSE} 且波动幅度明显更大。量化对比显示: I_{IRSE} 平均贡献率比 I_{RSE} 高 6.21%, 说明 I_{IRSE} 第 1 主成分贡献率优于 I_{RSE} 。第一主成分载荷能够揭示各指标对生态质量的

贡献方向,对生态有积极作用的绿度和湿度指标在 2 种模型中均表现为正值,而荒漠化和盐渍化指标均为负值,符合生态质量评价的理论预期。这表明 I_{IRSE} 在生态环境质量综合评价中的应用具有合理性与优势。

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年和 2025 年的 I_{IRSE} 均值分别为 0.313、0.351、0.414、0.344、0.378 和 0.437,整体呈波动上升趋势。可见,榆林市生态环境质量在此期间持续改善,表现出良好的生态恢复态势。

2.2 I_{IRSE} 的时空变化特征

参考文献 [37] 中基于 I_{RSE} 的生态等级划分标准,将 I_{IRSE} 划分为 5 个等级:极差 (0~0.2)、较差 (0.2~0.4)、中等 (0.4~0.6)、良好 (0.6~0.8)、极好 (0.8~1.0)。由图 3 所示:榆林市生态环境质量在时间维度上稳步提升,在空间分布上则表现出由东南向西北递减的梯度格局。2000—2025 年, I_{IRSE} 年均增长率为 1.34%。其中,生态质量良好区域面积占比从 6.40% 增加至 17.72%;极差区域占比从 30.65% 下降至 16.76%;较差区域占比由 42.18% 减少至 30.44%。受自然与人为因素共同作用,榆林市 I_{IRSE} 及其变化在空间上表现出较大分异。空间上, I_{IRSE} 呈西北低、东南高的梯度分布格局,环境质量良好和极好以上区域占比达 25.07%,主要分布于佳县、吴堡、米脂、绥德、子洲与清涧等县;极差区域主要分布在榆林市西部,毛乌素沙地东南缘,生态基础较弱,尽管治理效果逐步显现,但受限于干旱、降水少等自然条件,仍属低质量区域。整体上,榆林市生态环境质量向好趋势明显,治理成效优良,生态系统逐步恢复。

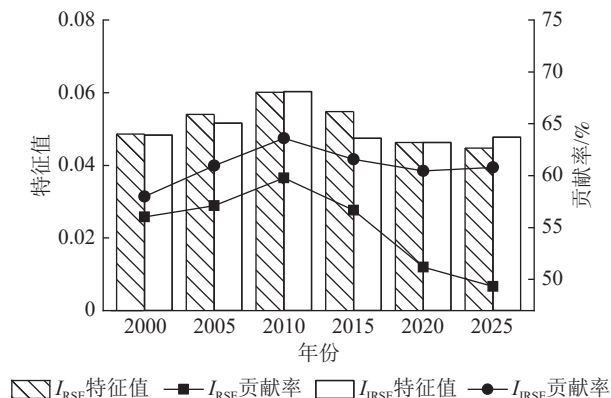
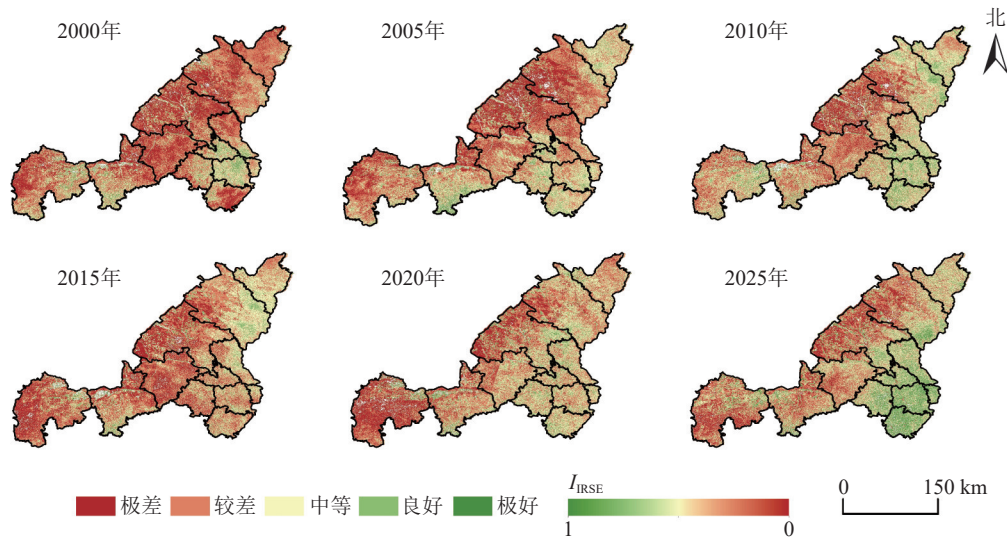


图 2 I_{IRSE} 与 I_{RSE} 比较

Figure 2 Comparison between I_{IRSE} and I_{RSE}



基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号,底图边界无修改。

图 3 2000—2025 年榆林市生态环境质量分布

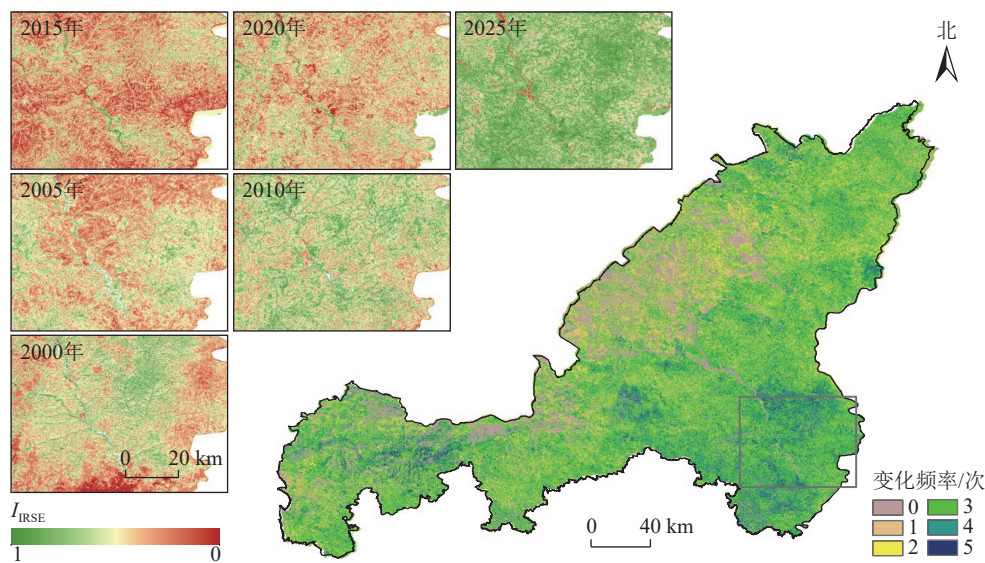
Figure 3 Spatial distribution of I_{IRSE} in Yulin City from 2000 to 2025

2.3 I_{IRSE} 变化频率特征

以 2025 年为基准年,统计像元在各时点的等级转换次数,并划分为 3 类:稳定区 (0 次)、低频区 (1~3 次)、高频区 (4~5 次) [38],得到 I_{IRSE} 变化频率图谱。如图 4 所示:稳定区面积占比为 17.57%,主要集中于西北部的毛乌素沙地和榆阳区建成区;低频转换区占比达 57.61%,广泛分布于中西部干旱半干旱区,受气候限制影响变化频率较低;高频转换区占比为 24.82%,主要位于生态质量改善较大的东南部区域,包括佳县、吴堡、米脂、绥德、子洲、清涧等地。

2.4 空间自相关特征分析

基于 LISA 局部空间自相关分析方法,构建榆林市 2000—2025 年 I_{IRSE} 聚类图,识别出高-高 (H-

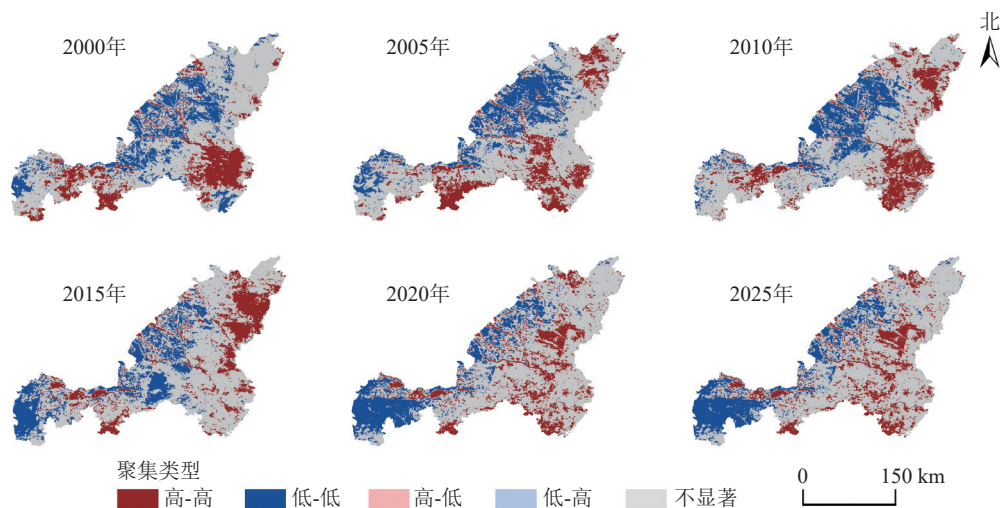


基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号, 底图边界无修改。

图4 2000—2025年榆林市 I_{IRSE} 变化频率图谱

Figure 4 Frequency spectrum of I_{IRSE} changes in the Yulin City from 2000 to 2025

H)、低-低 (L-L)、低-高 (L-H)、高-低 (H-L) 及不显著区 5 类空间结构。如图 5 所示: 榆林市生态环境空间分布呈现明显的集聚特征, 高值与低值区域相对集中, 表明 I_{IRSE} 空间自相关性较强。H-H 集聚区主要分布于吴堡、绥德、清涧等县, 这些区域具有较强的正相关特性, 位于黄土高原沟壑区, 地形起伏较大、降水相对充沛, 植被恢复基础良好, 同时“退耕还林”等生态工程实施力度较强, 使得区域生态质量整体较高并呈现集聚态势; L-L 集聚区主要集中于西部定边、榆阳区、神木等西部能源开采和干旱半干旱区, 这些区域降水稀少, 高程较低, 风蚀、沙化严重, 加之煤炭资源开发和土地利用强度增加, 导致生态环境质量持续处于较低水平。总体来看, L-L 和 H-H 具有明显的集聚特征, 占比较大。L-H 和 H-L 分布零散, 占比相对较小。



基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号, 底图边界无修改。

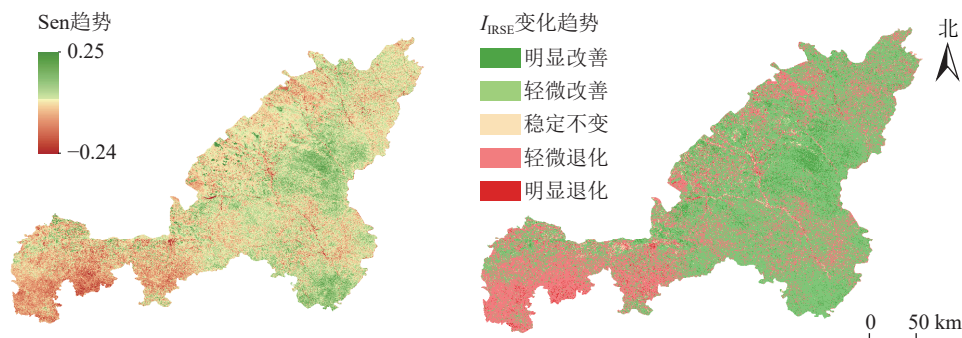
图5 榆林市 2000—2025 年空间关联局部指标聚类图

Figure 5 LISA cluster maps in Yulin City from 2000 to 2025

从时间演变来看, H-H 集聚区面积 2000—2010 年呈持续增长态势, 2010—2020 年有所下降, 2020—2025 年再次增加, 2000—2025 年 H-H 集聚区占比为 17.63%、18.17%、18.73%、17.44%、16.42%、20.74%, 反映出生态环境质量的长期优化趋势。2000—2025 年 L-L 集聚区占比为 19.96%、20.13%、18.35%、19.85%、19.09%、20.79%, 表明生态低质量区域基本不变。

2.5 榆林市生态环境质量变化趋势

采用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验法对 2000—2025 年榆林市 I_{IRSE} 的演变趋势进行定量识别 (图 6)。当趋势值大于 0 时, 表明生态环境质量呈改善趋势; 反之, 则表示生态质量退化。结果显示: 研究期内榆林市整体生态环境质量呈改善态势, 其中明显改善区占 5.41%, 轻微改善区占 59.42%, 轻微退化区占 31.85%, 明显退化区仅占 1.05%。

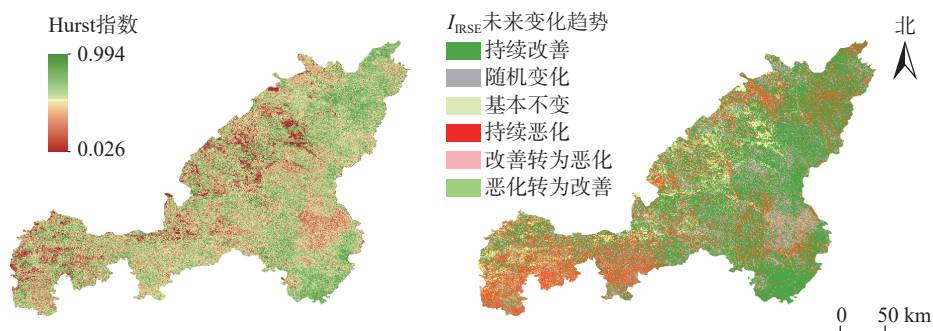


基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号, 底图边界无修改。

图 6 2000—2025 年榆林市 Sen 趋势及 I_{IRSE} 变化趋势

Figure 6 Trend value of Sen and trend of I_{IRSE} in Yulin City from 2000 to 2025

在此基础上, 利用 Hurst 指数对未来生态变化趋势进行预测 (图 7)。结果表明: 持续改善区占比为 48.44%, 23.31% 的区域可能存在退化风险, 10.51% 的区域未来趋势基本稳定, 10.50% 的区域趋势表现不确定。空间上看, 持续改善区主要集中在榆林市中部及东南部的神木市、佳县、子洲县、吴堡县、清涧县等地。



基于陕西测绘地理信息局标准地图服务网站陕S(2024)022号, 底图边界无修改。

图 7 榆林市生态环境质量 Hurst 指数及未来变化趋势

Figure 7 Values of Hurst index and future trends in ecological environment quality in Yulin City

2.6 I_{IRSE} 变化驱动因子探测

在所选的 8 个驱动因子中 (图 8), 自然因子的贡献更大, 其中高程和降水量对 I_{IRSE} 的解释力最高, 榆林地处半干旱区, 降水量直接影响土壤水分供应和植被生长, 是制约区域植被恢复与退化的关键因子。而高程与坡度则间接作用于生态环境质量: 高海拔地区气候湿润, 植被恢复条件较好, 而坡度较大的区域耕作受限, 退耕还林后更容易实现植被恢复, 从而表现出较高的生态质量水平。在人为因素中, 土地利用类型对生态质量变化的影响最为突出, 能源开发和城市扩张导致耕地和建设用地增加, 使区域生态承载力下降。

从时间序列看, 主导因子呈现一定阶段性差异: 2000 年为气温与 $PM_{2.5}$, 2005 年为气温与 $PM_{2.5}$, 2010 年为土地利用类型和 $PM_{2.5}$, 2015 年为人类活动强度与 $PM_{2.5}$, 2020 年为人类活动强度与高程, 2025 年为人类活动强度与 $PM_{2.5}$ 。 $PM_{2.5}$ 在全周期中均表现为最主要解释因子, 榆林市作为国家重要的煤炭和天然气生产基地, 榆林的煤矿开采、煤化工及燃煤电厂排放是 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源。 $PM_{2.5}$ 不仅影响太阳辐射降低光合作用效率, 还会通过大气沉降改变土壤和水体环境, 对区域生态质量产生负面影响。气温在前期与 $PM_{2.5}$ 的交互作用更强, 而 2010 年后土地利用和人类活动等人为因素的作用增强, 说明随着时间的推移, 人为因素对生态质量的改变起着越来越重要的作用。

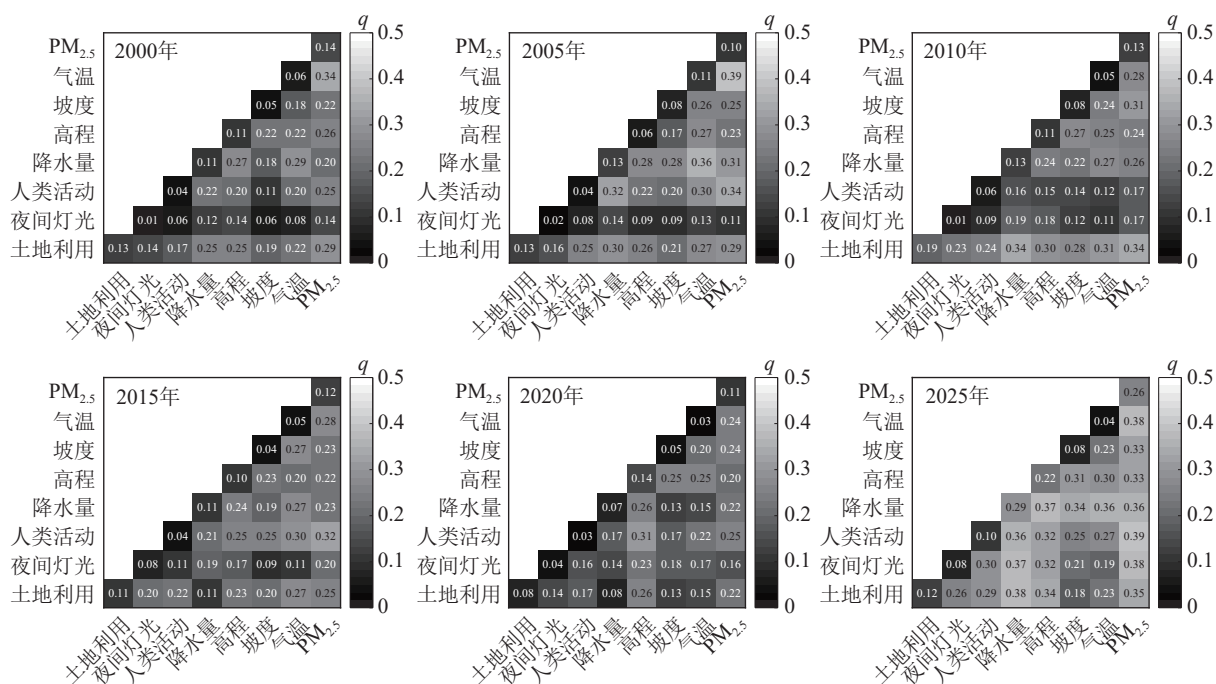


图8 因子交互探测结果

Figure 8 Factor interaction detection results

综合各因子的影响力排序从高到低依次为：降水量、 $PM_{2.5}$ 、高程、土地利用类型、坡度、气温、人类活动强度、夜间灯光，说明自然因子在 I_{IRSE} 演变中发挥主导作用，而社会经济因子则主要通过土地利用变化间接影响生态质量，二者的交互作用可进一步加剧生态环境质量的时空分异。

3 讨论

3.1 榆林市生态环境质量空间分布格局

榆林市地处黄土高原与毛乌素沙地的过渡带，生态环境敏感，其 I_{IRSE} 空间分布格局受自然地理条件与人类活动双重作用影响。基于主成分分析提取的 I_{IRSE} 结果表明：2000—2025 年榆林市生态环境质量在空间上总体呈现“东南优、西北劣”的格局：毛乌素沙地生态脆弱，指数长期偏低，而东南部黄土丘陵沟壑区受益于大规模生态工程实施，生态质量提升。这一空间分异与研究区“黄土丘陵沟壑区-沙地过渡区”的地貌格局及土地利用结构高度相关，与既有研究结论亦基本一致^[39]。

生态质量较优区域主要集中在佳县、米脂县、绥德县、子洲县、清涧县等东南部丘陵沟壑区。该区域气候条件相对湿润，叠加长期水土保持与“山水林田湖草沙”一体化等生态治理工程的实施，形成了生态斑块完整、景观连通性强的良性格局^[40]。相对而言，定边县、神木市、榆阳区等西北部干旱区生态质量较差。该区域沙地分布广泛，降水稀少，土地开发强度大， I_{IRSE} 长期处于较低水平。近年来，毛乌素沙地综合治理取得阶段性成效，西北部低质量生态区范围有所收缩，但整体脆弱性依然突出。 I_{IRSE} 高频转化区主要分布于东南部生态环境质量改善区域，该区为黄土丘陵沟壑区水土流失治理重点区域，生态修复成果与“从峁顶到沟底，层层设防、节节拦蓄”的3道防线模式成效形成空间响应。

3.2 榆林市生态环境质量变化的影响因素

2000—2025 年，榆林市 I_{IRSE} 整体呈波动上升态势，均值由 0.313 提升至 0.437，年均增长率为 1.34%，表明区域生态环境质量持续改善。其改善动力主要来自 2 个方面：一是西北地区自 21 世纪以来气候暖湿化趋势持续增强，对区域生态恢复起到促进作用^[21]；二是大规模生态修复工程的持续实施。分阶段来看，2000—2010 年，得益于榆林市 1999 年启动的退耕还林工程及 2001 年实施的第二阶段“三北”防护林建设， I_{IRSE} 提升较大；2010—2025 年，随着城市化进程加快，资源型经济发展压力加大，土地利用变化频繁，生态改善速度趋缓，但整体仍保持稳定上升态势。尤其是西北部区域 I_{IRSE} 持续升高，与 2000—2022 年毛乌素沙地绿洲化进程相一致，进一步验证了“三北”防护林工程中灌木固沙措施的有效性^[41]。据陕西省荒漠化和沙化监测报告显示：截至 2020 年，榆林沙化土地治理率达 93.24%，

生态质量明显改善。

空间频率分析表明：榆林市约 57.61% 的区域处于低频转换状态，生态系统稳定性较强；而东南部丘陵区呈现高频变化，反映出生态修复与人类开发活动的长期博弈。LISA 空间自相关分析进一步揭示：生态质量的空间集聚性持续增强，其中 H-H 聚集区不断扩展，而 L-L 聚集区基本保持稳定，表明优质生态斑块正在强化。

3.3 不足与展望

本研究仍存在一定的不确定性。首先，选取了 8 个驱动因子来探讨 I_{IRSE} 的变化，但生态系统作为一个复杂耦合系统，其影响因素多元且在不同时间与空间尺度下作用强度差异较大。例如，在城镇建成区，人类活动对生态质量的干扰效应更为突出。为更直观地表征人类活动差异，采用夜间灯光指数作为代理变量^[42]，但其对生态质量的作用机制仍需进一步验证。其次，榆林市作为陕西省重要的能源化工基地，煤炭、石油、天然气等矿产资源丰富。大规模采矿活动在推动经济发展的同时，也导致土地退化、水体污染和大气污染等负外部性，威胁生态系统稳定性与居民健康。然而，如何在定量尺度上准确刻画采矿活动对区域生态质量的影响程度，仍是亟待深入研究的问题。

东南丘陵沟壑区需持续开展水土保持与土地整治工程，巩固治理成效；西北毛乌素沙地则应重点实施退耕还林、草灌混播与固沙封育等措施，构建稳定的防风固沙屏障。同时，应完善以“三北”防护林、退耕还林和矿区修复为核心的生态工程协同机制，明确治理的空间覆盖、技术路径和时序安排，推动治理措施的科学化与长效化。进一步的研究可在更精细化的时空尺度上，综合考虑气候变化、能源开发与政策干预的作用机制，以期资源型城市的绿色转型与区域可持续发展提供更具科学性的决策支持。

4 结论

2000—2025 年，榆林市生态环境质量整体持续改善。 I_{IRSE} 年均增长率为 1.34%，空间格局呈西北低、东南高，整体达中等及以上水平；生态环境质量总体格局主要由降水等自然因子主导，土地利用类型在社会因子中贡献较大，而夜间灯光等人类活动指标影响相对有限；超过 64.83% 的区域呈改善趋势，东南丘陵区提升最大，表明生态修复成效显著。Hurst 指数显示区域整体仍具持续改善潜力。未来应坚持分区治理，重点加强西北沙地与能源开采区生态修复，巩固东南丘陵区水土保持成效。

5 参考文献

- [1] 冯东梅, 夏郡, 张步林. 多尺度视角下基于 MRSEI 的东北地区生态环境质量时空演变及分区分管[J]. *环境科学*, 2026, 47(5): 3203–3223. FENG Dongmei, XIA Jun, ZHANG Bulin, *et al.* Spatial-temporal evolution and zoning management of ecological environment quality in Northeast China based on MRSEI from a multi-scale perspective[J]. *Environmental Science*, 2026, 47(5): 3203–3223. DOI: 10.13227/j.hjxx.202504177.
- [2] 周斯怡, 殷晓洁, 汤瑞权, 等. 长江上游典型石漠化地区生态环境质量评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(4): 783–791. ZHOU Siyi, YIN Xiaojie, TANG Ruiquan, *et al.* Evaluation of eco-environmental quality in typical rocky desertification areas in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, 39(4): 783–791. DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.20210523.
- [3] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853–7862. XU Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853–7862. DOI: 10.5846/stxb201208301223.
- [4] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 91–97, 294. XU Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(7): 91–97, 294. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.07.012.
- [5] 卡吾恰提·白山, 王雪梅, 黄晓宇. 和田市生态环境质量时空演变分析[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(2): 453–462. Kawuqiati Baishan, WANG Xuemei, HUANG Xiaoyu. Analysis of temporal and spatial evolution of ecological environment quality in Hotan City[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(2): 453–462. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.2.028.
- [6] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(3): 943–954.

- WANG Lixia, ZHAO Rui, LIU Zhao, *et al.* Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39**(3): 943–954. DOI: [10.13866/j.azr.2022.03.28](https://doi.org/10.13866/j.azr.2022.03.28).
- [7] 胡盈盈, 罗红霞, 戴声佩, 等. 基于遥感生态指数的海南五指山市生态环境质量评价及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2024, **33**(10): 1624–1633. HU Yingying, LUO Hongxia, DAI Shengpei, *et al.* Evaluation of ecological environment quality and analysis of driving mechanism in Wuzhishan City of Hainan Island based on remote sensing ecological indices[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024, **33**(10): 1624–1633. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.10.014](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.10.014).
- [8] 冉红玲, 向楠, 吕春艳, 等. 基于 RSEI 与 CA-Markov 模型的生态环境质量动态评价及预测——以贵州省铜仁市为例[J]. *环境保护科学*, 2025, **51**(3): 158–167. RAN Hongling, XIANG Nan, LÜ Chunyan, *et al.* Dynamic assessment and prediction of ecological environment quality in Tongren based on RSEI and CA-Markov-taking Tongren, Guizhou Province as an example[J]. *Environmental Protection Science*, 2025, **51**(3): 158–167. DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202405012](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202405012).
- [9] 杨慧敏, 张宇飞, 王德彩. 基于遥感生态指数的焦作市域生态环境质量评价分析[J]. *河南农业大学学报*, 2025, **59**(4): 686–697. YANG Huimin, ZHANG Yufei, WANG Decai. Evaluation and analysis of ecological environment quality in Jiaozuo City based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2025, **59**(4): 686–697. DOI: [10.16445/j.cnki.1000-2340.20241018.001](https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.20241018.001).
- [10] 王芳, 朱欣, 贺星宇, 等. 近 30 年罗山国家级自然保护区生态环境质量的时空演变及归因分析[J/OL]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2024-11-19. <https://doi.org/10.20176/j.cnki.nxdz.000059>. WANG Fang, ZHU Xin, HE Xingyu, *et al.* Spatial and temporal evolution and impact factors analysis of ecological environmental quality in Luoshan Nature Reserve over the past 30 years[J/OL]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2024-11-19. <https://doi.org/10.20176/j.cnki.nxdz.000059>.
- [11] HASAN M M, FERDOUS M T, TALHA M, *et al.* Analyzing ecological environmental quality trends in Dhaka through remote sensing based ecological index (RSEI)[J]. *Land*, 2025, **14**(6): 1258. DOI: [10.3390/land14061258](https://doi.org/10.3390/land14061258).
- [12] 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等. 基于改进遥感生态指数的吐鲁番-哈密地区生态环境质量评价及驱动机制分析[J]. *生态学报*, 2024, **44**(9): 3911–3923. FU Kaixiang, JIA Guodong, YU Xinxiao, *et al.* Evaluation of ecological environment quality and analysis of driving mechanism in Tulufan-Hami region based on improved remote sensing ecological indices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(9): 3911–3923. DOI: [10.20103/j.stxb.202308091712](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202308091712).
- [13] 赵嘉丽, 李兴, 孙冰. 基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2024, **45**(3): 1598–1614. ZHAO Jiali, LI Xing, SUN Bing. Spatial-temporal evolution and driving factors analysis of ecological environment quality in Daihai Basin based on AWRSEI[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(3): 1598–1614. DOI: [10.13227/j.hjlx.202305059](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202305059).
- [14] 张浩斌, 王婉, 宋好婧, 等. 基于改进遥感生态指数的干旱内流区生态质量评价——以阴山北麓塔布河流域为例[J]. *生态学报*, 2024, **44**(2): 523–543. ZHANG Haobin, WANG Wan, SONG Yujing, *et al.* Ecological index evaluation of arid inflow area based on the modified remote sensing ecological index: a case study of Tabu River Basin at the northern foot of the Yin Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(2): 523–543. DOI: [10.20103/j.stxb.202210132910](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202210132910).
- [15] 陈辅国, 郭爱请, 武爱彬, 等. 京津冀城市群城市扩张格局演变及其对生态环境质量的影响[J]. *环境科学*, 2025, **46**(6): 3708–3719. CHEN Fuguo, GUO Aiqing, WU Aibin, *et al.* Evolution of urban expansion pattern and its impact on the quality of the ecological environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(6): 3708–3719. DOI: [10.13227/j.hjlx.202409036](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202409036).
- [16] 赵晓燕, 谈树成, 张素, 等. 基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究[J]. *水土保持学报*, 2024, **38**(5): 151–163. ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, ZHANG Su, *et al.* Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of ecological environment quality in Tuojiang River Basin based on RSEI improved modeling[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, **38**(5): 151–163. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.05.017](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.05.017).
- [17] 邓卓, 李文静, 张豫芳, 等. 天山-帕米尔地区生态安全格局时空演变及其影响因素[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(2): 398–406. DENG Zhuo, LI Wenjing, ZHANG Yufang, *et al.* Spatio-temporal evolution of ecological security pattern and its influencing factors in Tianshan-Pamir region[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(2): 398–406. DOI: [10.11833/j.issn.2095-0756.20220458](https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20220458).

- [18] 费兵强, 吴波, 殷婕, 等. 1964—2020 年毛乌素沙地新垦耕地和弃耕地空间格局变化及其对荒漠化的影响[J]. *干旱区地理*, 2025, **48**(4): 661–672. FEI Bingqiang, WU Bo, YIN Jie, *et al.* Changes in the spatial pattern of newly cultivated and abandoned farmland in the Mu Us Sandy Land from 1964 to 2020 and their impact on desertification[J]. *Arid Land Geography*, 2025, **48**(4): 661–672. DOI: [10.12118/j.issn.1000-6060.2024.390](https://doi.org/10.12118/j.issn.1000-6060.2024.390).
- [19] 张宜松, 曹国良, 张萌. 基于主成分分析法的陕北地区可持续发展对比研究[J]. *环境工程*, 2017, **35**(5): 136–140. ZHANG Yisong, CAO Guoliang, ZHANG Meng. Comparative research on the sustainable development of northern Shaanxi based on the principal component analysis[J]. *Environmental Engineering*, 2017, **35**(5): 136–140. DOI: [10.13205/j.hjgc.201705029](https://doi.org/10.13205/j.hjgc.201705029).
- [20] 冯立, 张鹏飞, 张茂省, 等. 新时期榆林煤矿区生态保护修复与综合治理策略及路径探索[J]. *西北地质*, 2023, **56**(3): 19–29. FENG Li, ZHANG Pengfei, ZHANG Maosheng, *et al.* Strategies and practical paths for ecological restoration and comprehensive management in Yulin coal mining area in the new era[J]. *Northwestern Geology*, 2023, **56**(3): 19–29. DOI: [10.12401/j.nwg.2023087](https://doi.org/10.12401/j.nwg.2023087).
- [21] 王恒恒, 王佳蓉, 侯嘉烨, 等. 基于 SA-RSEI 模型的西北地区生态环境质量时空变化及驱动因素[J]. *生态学杂志*, 2025, **44**(11): 3852–3863. WANG Hengheng, WANG Jiarong, HOU Jiaye, *et al.* Spatiotemporal variations and driving factors of ecological environment quality in the Northwest China based on SA-RSEI model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2025, **44**(11): 3852–3863. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202511.021](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202511.021).
- [22] DU Zeyu, JI Xibin, LIU J, *et al.* Ecological health assessment of Tibetan alpine grasslands in Gannan using remote sensed ecological indicators[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2025, **28**(1): 246–264. DOI: [10.1080/10095020.2024.2311862](https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2311862).
- [23] 张斯源, 樊逸飞, 颜礼, 等. 基于长时序 MODIS 的陕西省近 20 年生态质量时空变化及其驱动力研究[J]. *水土保持学报*, 2023, **37**(2): 111–119, 198. ZHANG Siyuan, FAN Yifei, YAN Li, *et al.* Temporal and spatial variation and driving forces of eco-environmental quality in Shaanxi Province in recent 20 years based on long time series MODIS data[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, **37**(2): 111–119, 198. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.014](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2023.02.014).
- [24] 高荣, 姚巍, 石长春, 等. 近 20 年榆林市沙化与荒漠化土地变化及其驱动因素分析[J]. *陕西林业科技*, 2022, **50**(5): 73–80. GAO Rong, YAO Wei, SHI Changchun, *et al.* Evaluation of sandification and desertification dynamics in the windy and sandy area of Yulin over the past 20 years[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2022, **50**(5): 73–80. DOI: [10.3969/j.issn.1001-2117.2022.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2117.2022.05.016).
- [25] BAIG M H A, ZHANG Lifu, SHUAI Tong, *et al.* Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, **5**(5): 423–431. DOI: [10.1080/2150704X.2014.915434](https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434).
- [26] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(5): 893–903. DOI: [10.1016/j.rse.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007).
- [27] 段四波, 茹晨, 李召良, 等. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展[J]. *遥感学报*, 2021, **25**(8): 1591–1617. DUAN Sibao, RU Chen, LI Zhaoliang, *et al.* Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(8): 1591–1617. DOI: [10.11834/jrs.20211296](https://doi.org/10.11834/jrs.20211296).
- [28] YU Xiaolei, GUO Xulin, WU Zhaocong. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. *Remote Sensing*, 2014, **6**(10): 9829–9852. DOI: [10.3390/rs6109829](https://doi.org/10.3390/rs6109829).
- [29] WANG Shiwei, MA Chao, MA Yingying, *et al.* Monitoring and evaluation of ecological restoration in open-pit coal mine using remote sensing data based on a OM-RSEI model[J]. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 2025, **39**(8): 600–622. DOI: [10.1080/17480930.2025.2458012](https://doi.org/10.1080/17480930.2025.2458012).
- [30] 刘博, 霍润斌, 李利阳, 等. 基于 Albedo-NDVI 特征空间的内蒙古化德县荒漠化时空动态监测[J]. *中国地质*, 2025, **52**(4): 1439–1453. LIU Bo, HUO Runbin, LI Liyang, *et al.* Monitoring the spatio-temporal dynamics of desertification in Huade County, Inner Mongolia based on Albedo-NDVI feature space[J]. *Geology in China*, 2025, **52**(4): 1439–1453. DOI: [10.12029/gc20240606002](https://doi.org/10.12029/gc20240606002).
- [31] 李婷, 李朝奎, 从政, 等. 基于遥感生态指数的大冶矿区生态网络格局构建及优化[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(3): 601–610. LI Ting, LI Chaokui, CONG Zheng, *et al.* Construction and optimization of ecological network pattern in Daye mining area based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(3): 601–610. DOI: [10.12029/gc20240606002](https://doi.org/10.12029/gc20240606002).

- 10.11833/j.issn.2095-0756.20240484.
- [32] 杨华, 徐勇, 王丽佳, 等. 青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素[J]. *生态学报*, 2023, **43**(10): 3995–4009. YANG Hua, XU Yong, WANG Lijia, *et al.* Spatio-temporal variation of human activity intensity and its driving factors on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(10): 3995–4009. DOI: [10.5846/stxb202211183332](https://doi.org/10.5846/stxb202211183332).
- [33] 陈泓瑾, 刘琳, 张正勇, 等. 天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性[J]. *地理学报*, 2022, **77**(5): 1244–1259. CHEN Hongjin, LIU Lin, ZHANG Zhengyong, *et al.* Spatiotemporal correlation between human activity intensity and surface temperature on the north slope of Tianshan Mountains[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(5): 1244–1259. DOI: [10.11821/dlxb202205014](https://doi.org/10.11821/dlxb202205014).
- [34] XU Dong, YANG Feng, YU Le, *et al.* Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **321**: 128948. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.128948](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128948).
- [35] 陈智勇, 吴耀炜, 林港特, 等. 基于遥感生态指数的粤港澳生态环境质量与土地利用变化空间关系[J]. *环境科学*, 2024, **45**(11): 6433–6447. CHEN Zhiyong, WU Yaowei, LIN Gangte, *et al.* Spatial relationship between eco-environment quality and land use change in Guangdong Province-Hong Kong-Macao, China based on remote sensing-based ecological index[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(11): 6433–6447. DOI: [10.13227/j.hjlx.202310211](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202310211).
- [36] 康利刚, 辛存林, 杨羽帆, 等. 甘肃省生态环境质量遥感评价及其驱动因子定量识别[J]. *环境科学*, 2025, **46**(6): 3730–3746. KANG Ligang, XIN Cunlin, YANG Yufan, *et al.* Remote sensing evaluation of ecological environment quality in Gansu Province and quantitative identification of its driving factors[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(6): 3730–3746. DOI: [10.13227/j.hjlx.202406186](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406186).
- [37] HELILI P, ZAN Mei. Coupling coordination development of urbanization and ecological environment in the urban agglomeration on the northern slope of the Tianshan Mountains, China[J]. *Sustainability*, 2023, **15**(5): 4099. DOI: [10.3390/su15054099](https://doi.org/10.3390/su15054099).
- [38] 杨静怡, 李贞演, 尹芳, 等. 关中平原城市群人类活动强度与生境质量的时空关联性[J]. *环境科学*, 2025, **46**(12): 7935–7946. YANG Jingyi, LI Zhenyan, YIN Fang, *et al.* Spatio-temporal correlation between human activity intensity and remote sensing ecological index in the Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(12): 7935–7946. DOI: [10.13227/j.hjlx.202411094](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202411094).
- [39] 王经宇, 杨丽萍, 王美, 等. 陕北黄土高原生态环境质量时空变化监测及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2025, **46**(7): 4522–4533. WANG Jingyu, YANG Liping, WANG Mei, *et al.* Spatio-temporal monitoring and driving factor analysis of eco-environment quality in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(7): 4522–4533. DOI: [10.13227/j.hjlx.202406111](https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202406111).
- [40] 杨亮洁, 张玲玲, 张芳宁, 等. 生态安全格局视角下黄土高原生态网络韧性研究[J]. *生态学报*, 2024, **44**(22): 10471–10485. YANG Liangjie, ZHANG Lingling, ZHANG Fangning, *et al.* A study on the resilience of ecological networks in the Loess Plateau from the perspective of ecological security patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, **44**(22): 10471–10485. DOI: [10.20103/j.stxb.202402240388](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202402240388).
- [41] 曹菲, 周静, 辛雨润, 等. 绿洲化背景下毛乌素沙地植被变化趋势及其驱动力[J]. *生态学报*, 2025, **45**(9): 4431–4445. CAO Fei, ZHOU Jing, XIN Yurun, *et al.* Analysis of vegetation variation and driving mechanism in Mu Us Sandy Land under the background of oasisization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(9): 4431–4445. DOI: [10.20103/j.stxb.202405061007](https://doi.org/10.20103/j.stxb.202405061007).
- [42] 陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J]. *地理科学进展*, 2019, **38**(2): 205–223. CHEN Yingbiao, ZHENG Zihao, WU Zhifeng, *et al.* Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data[J]. *Progress in Geography*, 2019, **38**(2): 205–223. DOI: [10.18306/dlkxjz.2019.02.005](https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2019.02.005).