

基于 RSEI 的秦岭北麓生态环境质量时空演变与驱动因子

李哲丞¹, 唐瑞泽^{*1}, 贺元靖¹, 肖建东¹, 张双成¹, 顾俊凯¹, 杨威¹

1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054

摘要: 为揭示秦岭北麓生态环境变化趋势, 本文基于遥感生态指数 RSEI 模型系统评估 2001—2022 年间西安秦岭北麓生态环境质量, 采用 Sen + Mann-Kendall 显著性检验、Hurst 指数分析生态环境变化显著性及未来动向, 运用地理探测器对该地区生态环境质量变化驱动因子进行了探究。结果表明: RSEI 均值呈现“稳定-波动-攀升”三波段变化, 年均增长 0.00315, 区域生态环境逐步改善; 生态环境质量空间上呈现“南高北低”的特征, 南部中低山区环境质量“显著改善”; 未来秦岭北麓 65.53% 的区域生态环境将持续改善, 年均气温、土地利用类型以及高程是影响秦岭北麓 RSEI 的最主要的驱动因素。地质环境作为本底条件深刻影响生态环境格局, 土地利用类型转变是影响生态环境质量变化的重要因素, 同时实施生态保护工程有效提升了生态质量, 未来气候变化和土地利用模式仍是制约秦岭北麓生态的关键要素。

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数 (RSEI); 驱动因子; 地质环境; 秦岭北麓

中图分类号: X87

收稿日期: 2026-1-23

Spatio-temporal Evolution and Driving Factors of Ecological Environment Quality in the Northern Foothills of the Qinling Mountains Based on RSEI

Li Zhecheng¹, TangRuize^{*1}, He Yuanjing¹, Xiao Jiandong¹, Zhang Shuangcheng¹,
Gu Junkai¹, Yang Wei¹

1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: To reveal the trends in ecological environmental changes in the northern foothills of the Qinling Mountains, this study systematically assessed the ecological environment quality of the Xi'an section of the northern Qinling foothills from 2001 to 2022 based on the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) model. The Sen's slope estimator and Mann-Kendall significance test and the Hurst index were employed to analyze the significance and future trends of ecological environment changes, while the Geodetector was applied to explore the driving factors behind these changes. The results show that RSEI mean values exhibited a tri-phase pattern characterized by "stabilization, fluctuation, and ascent," with an average annual growth rate of 0.00315, reflecting a progressive improvement in the regional ecological environment. Spatially, ecological environment quality demonstrated a distinct "higher in the south, lower in the north" distribution, where the environmental quality in the southern mid-low mountain areas showed "significant enhancement." In the future, 65.53% of the northern foothills of the Qinling Mountains is projected to sustain ecological improvement.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“红层灾变韧性协调防控理论与关键技术”、“红层灾变机理与防控理论”(42293355, 42293350); 中央高校基本科研业务费专项资金资助“秦岭华山花岗岩地质景观深化研究”(300102264917); 国家自然科学基金专项项目“秦岭生态地质环境系统演化与灾害风险管控”(42341101)

第一作者: 李哲丞 (2000-) 男, 博士研究生, 研究方向为地质灾害与生态地质. ORCID: 0009-0008-0249-9550. E-mail: lizhecheng@chd.edu.cn

*通讯作者: 唐瑞泽 (2004-) 男, 研究方向为地学遥感与区域环境变化监测. ORCID: 0009-0006-1666-4399. E-mail: 1322411248@qq.com

Annual average temperature, land use type and elevation were identified as the predominant drivers influencing RSEI variations in this region. The geological environment as the foundational condition, determines the ecological landscape. The transformation of land use types is a significant factor affecting ecological environment quality changes, while the implementation of ecological conservation projects has effectively enhanced it. Future climate change and land use patterns will remain key elements constraining the ecology of the northern foothills of the Qinling Mountains.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index (RSEI); driving factors; geological environment; northern foothills of the Qinling Mountains

生态系统是人与自然和谐共生的基础，良好的生态环境是社会发展的基石(岳奕帆等，2024)，然而城市化进程加快发展的同时对生态环境质量也产生了较大影响(傅楷翔等，2024)。因此，开展生态系统动态监测，构建生态环境监测体系，评估区域环境质量成为保护生态系统的重要手段(徐涵秋，2013；Allen et al,2018;姚国慧等，2023)。秦岭是我国南北分界线，更是关中重要的生态安全屏障，具有调节气候、保持水土等多重作用，在我国自然生态环境中有着举足轻重的地位(申艳军等，2024)。研究秦岭北麓生态环境质量时空变化特征，对保护秦岭生态系统，保障关中城市群的发展具有十分重要的现实意义(马凌和张恒毅，2023)。

遥感生态指数 (Remote Sensing Ecological Index, RSEI) 采用绿度 (NDVI)、湿度 (WET)、干度 (NDBSI) 及热度 (LST) 综合反映区域生态环境质量整体状况的指标。目前基于遥感信息技术获取 RSEI 数据开展分析，在大范围、长时序的研究中得到了广泛的应用(孙欣然等，2025; 张加成等，2025)。杨绘婷和徐涵秋 (2020) 采用 RSEI 系统评估了武夷山国家级自然保护区生态环境质量变化，结果表明生态环境质量的提高源于地方政府的有效政策以及群众的积极保护；李光哲等(2023)构建 RSEI 评价模型并结合地理探测器等方法对长株潭城市群生态环境质量开展研究，揭示该地区自然地理条件是影响生态环境质量最主要因素。王芳等(2023)采用 RSEI 并结合 Mann-Kendall 趋势检验、Sen 倾斜度和 Hurst 指数等分析了 1990—2020 年黄河流域典型生态区生态环境质量变化，预测该地区的未来变化趋势以持续改善为主但仍存恶化的风险；龚循强等(2025)基于 GEE 平台，并利用 Sen + Mann-Kendall 显著检验以及 Hurst 指数评估了环鄱阳湖城市群的生态环境质量以不显著退化为主，且预测未来以改善为主；张音等(2025)创新出改进型遥感生态指数 (MRSEI) 模型并结合地理探测器等方法分析黄河流域生态环境质量空间分异原因，结果显示黄河上游地区生态环境质量主要受高程等地形因素的影响，中下游地区则主要受土地利用类型的影响；熊金婷等(2025)借助 GEE 平台构建改进遥感生态指数(IRSEI)模型并结合采用地理探测器等方法对锡林郭勒盟地区 2001—2021 年生态环境质量进行变化监测和评价分析，表明该地区绿度因子以及盐度因子成为影响该地区生态环境最主要的因素；张京新等 (2025) 采用 RSEI 并结合 Theil-Sen 斜率估计、Hurst 指数和 Mann-Kendall 检验等方法对黄河流域 2001—2021 年生态环境质量进行了评价。综上，对于长时间序列的遥感生态指数分析，综合运用 Mann-Kendall 突变检验法分析显著性，并结合 Theil-Sen 趋势和 Hurst 指数

探讨变化趋势,运用地理探测器对相关驱动因子进行分析,目前得到了广泛的应用(李妍等,2022;张明媚等,2025;朱兴林等,2025)。

近年来,受大西安城市快速扩张的影响,秦岭北麓作为秦岭发展最活跃地带,土地开发和工程建设活动不断增强,局部地区生态系统稳定性受到了严重干扰,生态功能面临着不同程度的压力(张静等,2023)。崔国屹等(2023)采用生态环境质量指数、地统计分析等方法,对秦岭地区40年土地利用变化及生态环境效应进行分析,研究表明土地利用类型的转变是引起生态环境质量变化的主要原因。武文琦等(2023)运用了InVEST模型以探究秦岭生境质量时空变化,指出土地利用程度是降低生态环境质量最大的驱动因子。赵欢欢等(2024)基于DPSIRM和PLUS模型对秦岭北麓生态敏感性开展评估,提出秦岭北麓生态敏感区自身抗干扰能力与距城区距离呈正相关。罗旭等(2025)采用遥感生态指数结合地理探测器等方法探究秦岭地区生态环境质量,表明气温是影响地区RSEI空间分异的最主要因素。目前,针对秦岭北麓地区生态环境质量的系统性综合评估仍较为缺乏,对秦岭北麓时空演变规律及主导驱动因子的研究仍需深化。

本文基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)平台处理数据,采用Theil-Sen趋势分析、Mann-Kendall检验和Hurst指数模型以及地理探测器等方法对秦岭北麓2001—2022年的RSEI数据进行了分析,系统研究该地区生态环境质量时空变化规律,揭示秦岭北麓地区RSEI的变化趋势及其持续性特征,探究影响生态环境变化的驱动因子。本文为全面认识秦岭生态环境演替及其驱动机制、预测秦岭未来生态环境质量趋势提供借鉴。

1 研究区及研究方法

1.1 秦岭北麓研究区概况

为聚焦秦岭北麓经济发展与生态环境变化的研究需求,秦岭北麓研究区指秦岭主脊至渭河的西安辖区段范围,主要包含西安市临潼区、灞桥区、蓝田县、长安区、鄠邑区以及周至县六个区县,位置和范围如图1所示。研究区东西长约200 km,南北跨度约90 km,总面积达9084.1 km²,地势总体南高北低,海拔介于340~3761 m之间,发育有秦岭北缘断裂、临潼-长安断裂、商丹断裂等,受秦岭北缘大断裂影响,研究区内呈现出明显的“盆山构造”特征,南部中低山区与北部山前洪积平原形成明显分界(Yan Lyu等,2025;刘文博等,2025)。研究区属暖温带半湿润季风气候,年均气温约8.7~12.7℃,年降水量为650~800 mm,年均光照时长达2156.5 h(蒋冲等,2013;徐盼盼等,2024;杨如玉等,2025),受地形地貌控制,南部山区受人类干扰较少,植被主要分布为落叶阔叶林以及针叶林,而北部山前洪积平原在长期垦殖下,植被则主要为小麦、玉米等季节性耕作物及果木园林等。2001年以来,秦岭北麓南部山区矿产能源工业控制性发展,北部平原城镇化不断扩张、工业园区快速崛起,秦岭北麓农林旅融合,乡村生态休闲产业井喷,生态保护与治理通过立法和管控不断推进生态修复工程,在促进秦岭北麓经济产业发展和结构调整的同时也在一定程度上影响了地区生态环境质量。

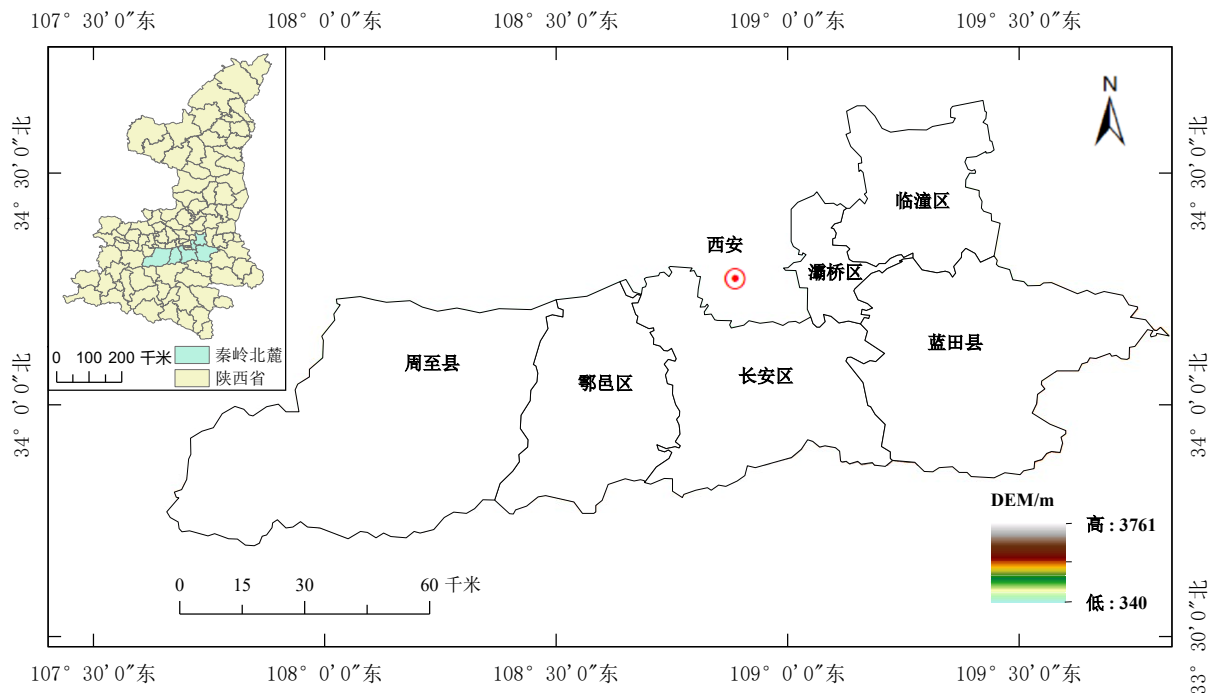


图1 研究区位图

Figure. 1 Regional Location Map of the Study Area

1.2 数据来源与处理

本文选取 GEE 平台中的 MOD09A1、MOD11A2 和 MOD13A1 遥感影像数据，并选择 2001—2022 年 7~9 月的影像数据，分辨率为 500 m。利用 GEE 平台 C Function of Mask (CFMASK) 算法进行云掩膜，并采用归一化差异水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI) 对研究区内的水体进行掩膜处理使湿度指标准确率得到提升(徐涵秋, 2005)。本文所采用的年平均气温、年降雨量数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>)，空间分辨率为 1000 m；数字高程模型 (DEM) 来源于 91 卫图助手，空间分辨率为 30 m，坡度以及坡向数据是采用 ArcGIS 对高程进行计算处理的结果；人口密度数据来源于 LandScan 数据集，空间分辨率为 1000 m；夜间灯光数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>)，空间分辨率为 1000 m；土地利用类型数据为引用数据(Yang and Huang, 2021)，空间分辨率为 30 m。本文中所采用数据坐标系统一为 WGS_1984。

1.3 遥感生态指数(RSEI)

RSEI 是一种基于遥感数据的区域生态质量综合评价指标，该指数通过主成分分析法，即 PCA 法，(Principal Components Analysis)集成四个对生态条件具有直接指示意义的单一参量，分别为绿度 (NDVI)、湿度 (WET)、干度 (NDBSI) 和热度 (LST)。绿度主要反映植被的覆盖程度；湿度为含水情况综合性指标，包含了降水、蒸发以及土壤水分等信息；干度为用来评估生态系统的干旱程度及水分利用效率情况；热度则表示地表温度状况。这四种指标是评判区域生态环境状况的重要依据。PCA 通过对多变量数据进行降维并提取特征，使第一主成分集中原始数据中的绝大部分变异信息，从而有效综合各指标信息。因此，

RSEI 选用 PCA 作为各因子集成的基本方法，以提升评价结果的客观性与综合性。

① 绿度指标

绿度是反映研究区植被覆盖及生长状况的指标，通常通过计算归一化植被指数 NDVI 来表示：

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

式中， NIR 为近红外光波段反射率、 R 为红光波段的反射率。

② 湿度指标

湿度指标用以表征土壤、地表水体等的水分含量，其高低可以很好地反映地区的生态环境质量，本文采用常用的缨帽变换的湿度分量进行表征：

$$WET = 0.2408\rho_{Blue} + 0.3132\rho_{Green} + 0.1147\rho_{Red} + 0.2489\rho_{NIR} - 0.3122\rho_{NIR2} - 0.6416\rho_{SWIR} - 0.5087\rho_{SWIR2} \quad (2)$$

式中， ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{NIR2} 、 ρ_{SWIR} 和 ρ_{SWIR2} 分别为遥感影像的蓝、绿、红光波段以及近红外 1、近红外 2、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率。

③ 干度指标

干度用以反映地表裸土、人工建筑等不透水层的干化程度，是由建筑指数 IBI(Index-based Built-up Index) 以及裸土指数 SI (Soil Index) 合成，计算方法为：

$$IBI = \frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR1}} - \frac{\rho_{NIR1}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR1}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}}}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR1}} + \frac{\rho_{NIR1}}{\rho_{Red} + \rho_{NIR1}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{Green}}} \quad (3)$$

$$SI = \frac{(\rho_{SWIR} + \rho_{Red}) - (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})}{(\rho_{SWIR} + \rho_{Red}) + (\rho_{Blue} + \rho_{NIR})} \quad (4)$$

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2} \quad (5)$$

式中， ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR1} 和 ρ_{SWIR1} 分别为遥感影像中的蓝、绿、红、近红外 1 及短波红外 1 波段的辐射率。

④ 热度指标

热度代表地表温度的高低，本文使用大气校正法反演得到的地表温度(Land Surface Temperature, LST) 表征热度指标，计算公式如下：

$$LST = 0.02 \times DN - 273.15 \quad (6)$$

式中， DN 为像元灰度值。

⑤ RSEI 计算

在归一化和 PCA 后根据绿度与湿度载荷值的正负确定初始 RSEI₀，然后对 RSEI₀ 进行归一化处理，得

到遥感生态指数(罗旭等, 2025)。

$$RSEI_0 = \begin{cases} PC_1(f(NDVI, WET, NDBSI, LST)), & V_{NDVI}, V_{WET} > 0 \\ 1 - PC_1(f(NDVI, WET, NDBSI, LST)), & V_{NDVI}, V_{WET} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0,min}}{RSEI_{0,max} - RSEI_{0,min}} \quad (8)$$

式中, $RSEI_0$ 为初始遥感生态指数, PC_1 为第一主成分; f 为对 4 个指标分别归一化处理; V_{NDVI} 和 V_{WET} 分别为 NDVI 和 WET 的 PC1 特征向量。

⑥ 区域生态状况评价

参考相关研究成果, 本文将生态环境质量等级划分为优、良、中等、较差、差 5 个等级(徐涵秋等, 2013), 各等级 RSEI 范围及生态系统状态如表 1 所示:

表 1 RSEI 等级分类

Table 1 RSEI classification and significance

RSEI 范围	生态等级	生态系统状态
(0.8,1.0]	优	稳定
(0.6,0.8]	良	基本稳定
(0.4,0.6]	中等	较脆弱
(0.2,0.4]	较差	不稳定
[0.0,0.2]	差	崩溃

1.4 Sen + Mann-Kendall 趋势分析

Sen 氏趋势分析是估计趋势斜率的非参数统计方法, Mann-Kendall 检验则能指出趋势的显著性信息。

本文采用 Sen 氏趋势分析并结合 Mann-Kendall 法进行检验。Sen 氏斜率计算公式如下:

$$Q_{RSEI} = \text{mean} \left(\frac{RSEI_j - RSEI_i}{j - i} \right) \quad (9)$$

式中, Q_{RSEI} 为时间序列下数据的变化趋势; mean 为取中值函数; $RSEI_i$ 和 $RSEI_j$ 分别为 i 和 j 时间的 RSEI 值。当 Q_{RSEI} 大于 0 时表示为上升趋势, Q_{RSEI} 小于 0 时表示为下降趋势。

Mann-Kendall 检验统计量 S 的计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) \quad (10)$$

$$\text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) = \begin{cases} +1, & RSEI_j > RSEI_i, \\ 0, & RSEI_j = RSEI_i, \\ -1, & RSEI_j < RSEI_i. \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^p q_k(q_k-1)(2q_k+5) \right] \quad (12)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\text{Var}(S)$ 为方差, n 为数据量, Z 为标准化后的检验统计量。

1.5 Hurst 指数

本研究采用 Hurst 指数表征变化趋势。其中, R/S 分析方法是应用最广泛的一种(Benoit B. Mandelbrot, 1969), 公式如下:

$$\frac{R}{S} = (c \cdot m)^h \quad (14)$$

式中, R 为极差, S 为标准差, c 为常数, m 为任意正整数, h 为 Hurst 指数。极差 $R(m)$ 的计算公式如下:

$$R(m) = \max[X(t, m)] - \min[X(t, m)] \quad (15)$$

式中, $X(t)$ 表示累计离差, 计算公式如下:

$$X(t) = \sum_{i=1}^t \left(\text{RSEI}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{RSEI}_i \right) \quad (16)$$

式中, $1 < t < m$; 标准差 $S(m)$ 的计算公式如下:

$$S(m) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\text{RSEI}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{RSEI}_i \right)^2} \quad (17)$$

Hurst 指数的取值范围在 0~1 之间。当 H 值在 0.5 附近时, 数据缺乏规律性; 当 H 值在 0~0.5 之间时, 数据表现出明显的反持续性; 当 H 在 0.5~1 之间时, 时间序列数据呈现出持续发展的状态(张京新等, 2025)。

1.6 地理探测器

王劲峰和徐成东(2017)提出的地理探测器是一种空间统计分析模型, 适用于探测空间分异性及其影响因素的交互作用程度。其中, 因子探测器用于评估各控制因子对生态环境影响的强度, 其量化指标 q 值越大, 表明该因子对 RSEI 的解释力越强。 q 值的计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (18)$$

式中, q 表示驱动因子对 RSEI 的影响程度; $h = 1, 2, \dots, L$, L 为 RSEI 与自变量的分类数目; N_h 和 N 分别为分级区域与全区域的样本数量; δ_h^2 和 δ^2 则分别对应分级区域与全区域 RSEI 的方差。

交互探测器用于识别不同驱动因子之间是否存在交互作用, 以及该作用对因变量空间分异性的影响方向与强度, 即判断因子交互是否会增强或减弱对因变量空间格局的解释能力。根据 q 值的不同范围, 交互作用可划分为五种类型, 如表 2 所示。

表 1 因子交互探测结果

Table 2 Factor interaction detection results

交互作用	判断模式
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
相互独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

2.结果与分析

2.1 秦岭北麓地区 RSEI 特征

本文选取秦岭北麓地区 2001—2022 年的 RSEI 数据进行统计，以表征近年来该地的生态环境质量的变化情况。采用 PCA 对 RSEI 进行分析，结果如图（2）所示，可以看出第一主成分，即 PC1 的贡献率均在 65%以上，表明了其能充分体现出该地区的生态变化情况。由图（2）可知湿度以及绿度的载荷值为正值，而干度和热度的载荷值为负值，这表明湿度与绿度对 RSEI 呈现出正相关，而干度和热度则与 RSEI 呈现出显著的负相关性。绿度所表征的地区植被覆盖度是地区生态环境的直观体现，直接反映生态的好坏，湿度反映的地表水分含量则能调控植被的生长，间接影响生态环境；而干度以及热度分别表示的干化程度和地表温度两者形成“热源”效应，共同对生态环境质量产生强烈的负向驱动。此外，热度的载荷值相较于干度则更小，说明了热度对于 RSEI 的负效应最大。

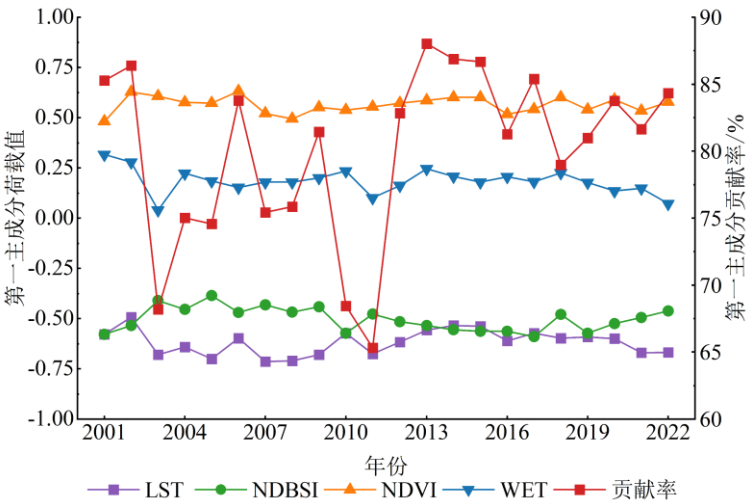


图 2 RSEI 主成分分析图

Figure. 2 Diagram of RSEI principal component analysis

运用公式 7、公式 8 计算 2001—2022 年间秦岭北麓地区在 RSEI 数值，并依据 RSEI 等级分类标准（表 1）对计算结果进行空间表征，选取 3 年为间隔，如图 3 所示。研究区生态环境质量在空间分布上整体呈现“南高北低”，这与南高北低的盆山地貌的自然环境相对应（图 1）。同时南部山地 2004—2007 年间生态质量不断下降，2010 之后生态环境质量明显好转，不断修复，2022 年显著提升；北部区域人口集中，城市乡镇发展迅速，2004 年之后生态环境受到不断冲击，生态质量明显变化自西安向东西两翼不断扩展，

长安区、临潼区、灞桥区、鄠邑区、周至县的生态环境质量由良转为中等或较差，在 2019 年后，北部区域的 RSEI 指数回升，优良级生态环境明显增加，较差等级显著减少，生态得以整体恢复。

对 2001—2022 年秦岭北麓不同等级的 RSEI 占比进行了统计（图 5）。2001—2007 年，秦岭北麓生态环境质量逐渐恶化，优、良等级占比下降显著，占比由 70.05%降至 55.88%，该时期区域生态环境质量等级不断向中等转化。2010 年秦岭北麓生态环境质量得到恢复，优良等级占比达 72.91%。2010 年以后，秦岭北麓生态质量持续改善，优、良等级占比稳步提升且最优等级覆盖区域扩大至 2001 年 1.65 倍，较差等级稳中有降，整体推动秦岭北麓生态环境质量的长效提升。

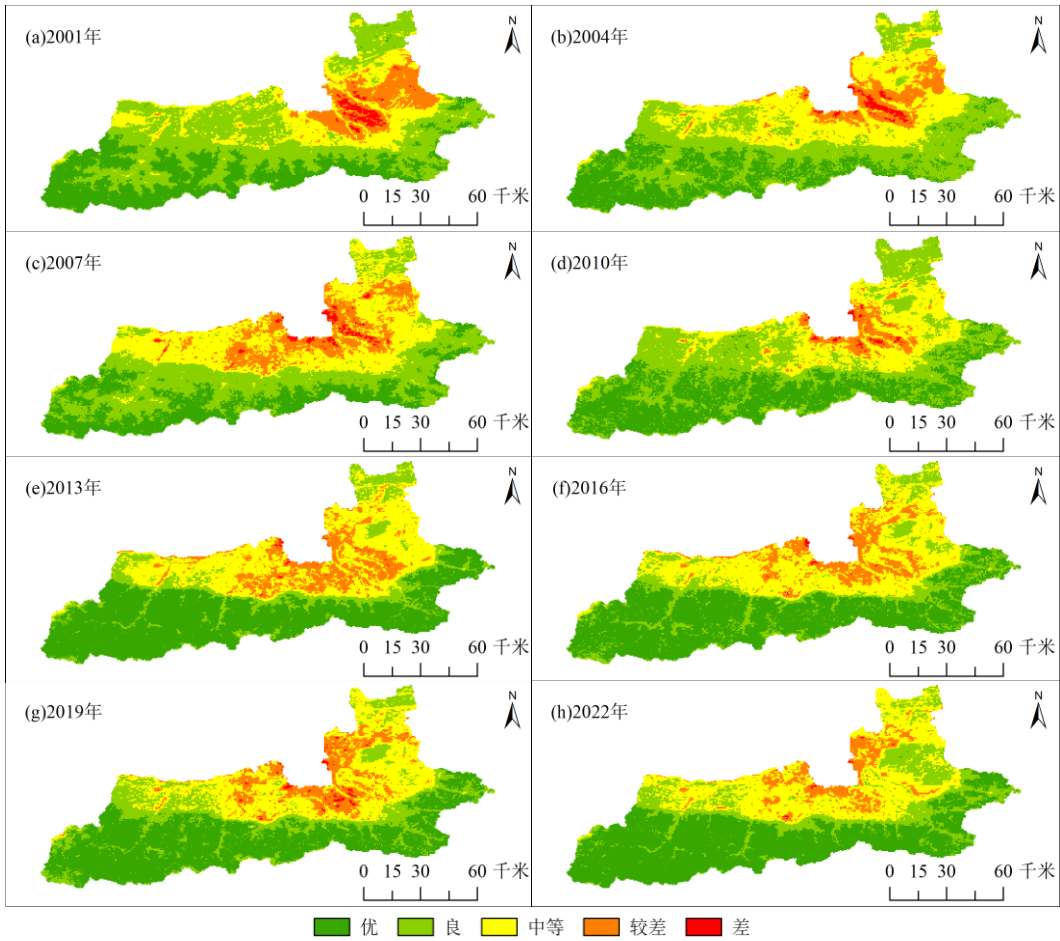


图 3 秦岭北麓 2001—2022 年不同年份 RSEI 空间分布特征

Figure. 3 Diagram of spatial distribution of RSEI in the northern foothills of the Qinling Mountains for different years(2001—2022)

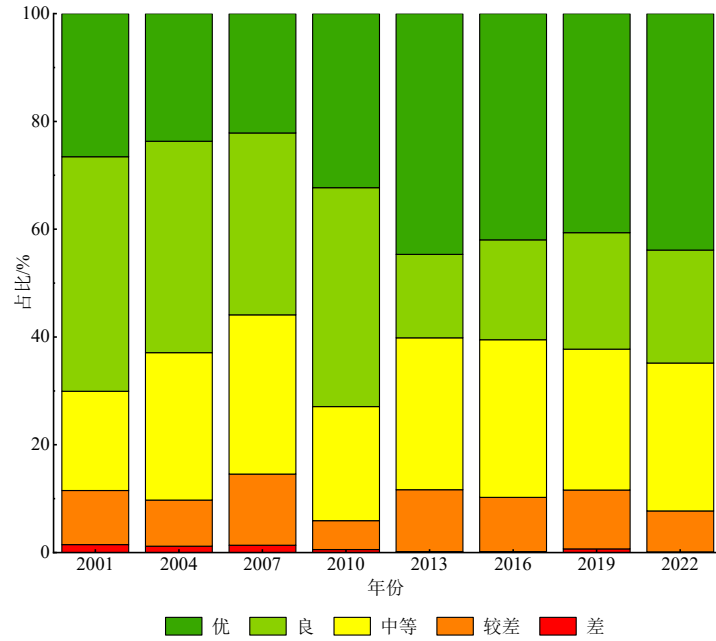


图 4 RSEI 不同等级占比图

Figure. 4 Diagram of percentage of different RSEI grades

均值变化可以看出（图 5），RSEI 均值在 2006 年降至最低，仅有 0.591，在 2021 年 RSEI 达到最大值 0.726。对秦岭北麓地区 2001—2022 年 RSEI 均值进行线性拟合，得到其增长速率达 $0.00315a^{-1}$ 。根据 RSEI 均值曲线特征可以看出，秦岭北麓生态环境质量变化可大致分为基本平稳阶段、强烈波动阶段和波动攀升阶段等三个阶段，在 2001—2004 年期间 RSEI 均值在 0.66 附近小幅波动，极差仅为 0.019，RSEI 相对平稳，秦岭生态系统基本稳定平衡；在 2005—2011 年期间 RSEI 变化均值极差达 0.103，剧烈波动，2006 年达到最低值 0.591，2009 年为 0.617，期间最高值为 2010 年的 0.694，该阶段生态质量整体下滑。在 2012—2022 年期间 RSEI 变化呈波动攀升特征，生态环境质量逐渐恢复，在 2021 年达到最大值 0.726。

在基本平稳阶段，秦岭北麓开发强度有限，生态系统维持动态平衡；而在强烈波动阶段，城镇化和工业化的快速推进导致建设用地扩张、生境退化，尽管退耕还林等生态工程开始显现效益，但开发活动与修复效应的相互交织，生态环境质量提升有限，同时年降雨量以及年均气温在该时期极差分别达 277.61mm、1.55℃，这也加剧了地区 RSEI 的强烈波动；在波动攀升阶段，2012 年以来，在生态文明战略驱动下，“秦岭山水工程”、法治化管控与空间规划等刚性约束大力推动了秦岭北麓生态恢复，促进生态韧性的持续增强，生态环境质量得到逐步提高，达到 2000 年以来历史最高水平(杨如玉等，2025)。

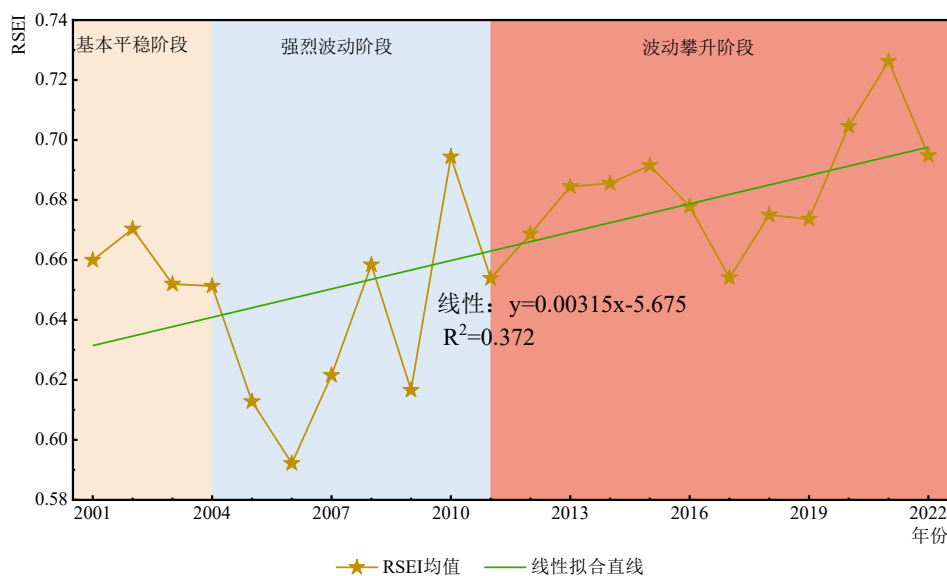


图 5 年度 RSEI 均值及线性拟合图

Figure. 5 Diagram of annual mean RSEI and linear fit

2.2 秦岭北麓地区 RSEI 变化显著性

采用 Sen + Mann-Kendall 方法对秦岭北麓地区 2001 年和 2022 年的生态环境质量进行显著性趋势检验，将显著性变化结果划分为 9 种类型（图 6）（田智慧等，2022），RSEI 各类型显著性变化占比见下表 3。如图 6 所示，22 年来秦岭北麓地区在发展建设的同时，其生态环境质量呈现出南部山岳区显著趋好，北部平原区域显著性大部分呈现不显著降低或不显著提高，局部区域存在明显降低。表 3 显示，RSEI 显著性提高地区占 76.56%，极显著提高区域占比最高，高达 44.72%，以秦岭主脊北侧中低山秦岭生态保护区为主，同时 RSEI 显著性降低的区域占比 18.89%，而明显降低的占比 7.34%，极显著降低的占 3.21%，主要集中在山前冲洪积扇和渭河盆地以南部鄠邑区、长安区，东部灞桥区等人类活动强烈的开发建设地带，人类活动对生态环境质量的变化有着极重要的影响。

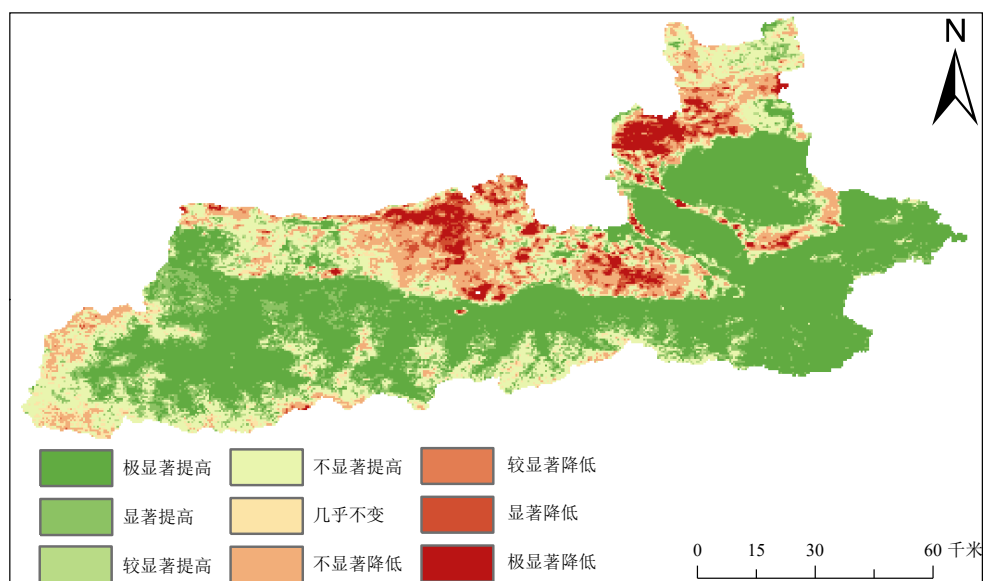


图 6 秦岭北麓 RSEI 变化特征图

Figure. 6 Diagram of RSEI change characteristics in the northern foothills of the Qinling Mountains

表 3 RSEI 变化显著性状况统计

Table 3 RSEI change significance status statistics

QRSEI	Z	变化状况	占比/%
>0.0005	$ Z \geq 2.58$	极显著提高	44.72
	$1.96< Z <2.58$	显著提高	10.14
	$1.65< Z <1.96$	较显著提高	3.84
-0.0005~0.0005	$ Z <1.65$	不显著提高	17.86
		几乎不变	4.55
	$ Z <1.65$	不显著降低	11.55
<-0.0005	$1.65< Z <1.96$	较显著降低	1.53
	$1.96< Z <2.58$	显著降低	2.60
	$ Z \geq 2.58$	极显著降低	3.21

2.3 秦岭北麓地区 RSEI 变化趋势

本文采用 Hurst 指数结合 Sen 氏趋势分析对秦岭北麓地区的 RSEI 变化情况进行了预测（图 7）(田智慧等，2022)，并划分为 6 种趋势类型（表 4）。结果表明，未来该地区整体变化趋势以改善为主，且持续改善的区域面积占比最多，约占 65.53%，分布在南部山区，并与图（6）中生态环境质量提高区域基本相同；未来趋势呈持续恶化区域占比约 13.64%，主要位于鄠邑、长安、灞桥、临潼区的山前平原地带，是目前文化旅游、经济开发等工程活动较活跃区域；而随机变化趋势的地区占比达 15.56%，面积仅次于持续改善区，恶化转为改善趋势的区域约占 5.28%，对此类地区应尽量考虑提升环境质量，恢复生态系统，避免恶化趋势。

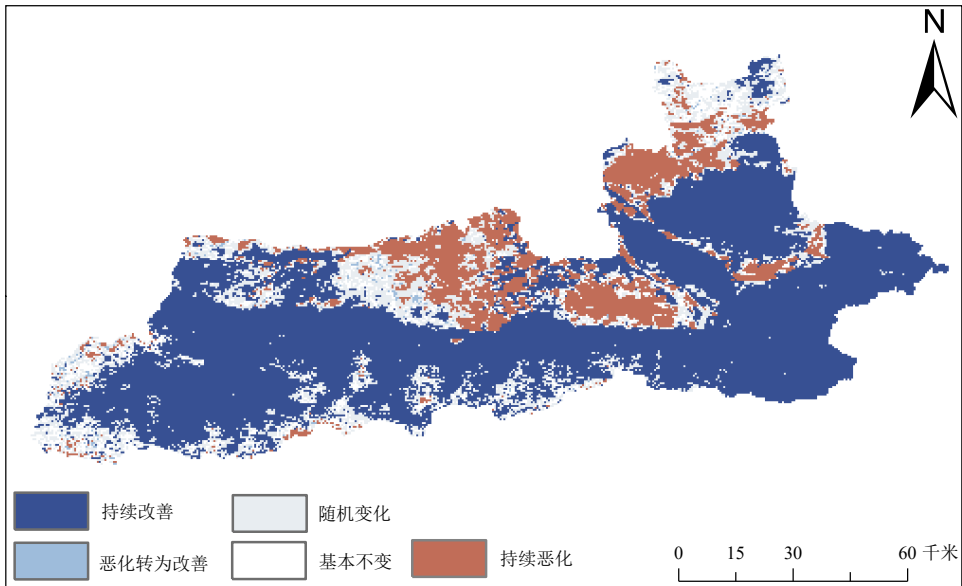


图 7 RSEI 变化趋势分析图

Figure. 7 Trend analysis diagram of RSEI changes

表 4 RSEI 未来变化趋势状况统计

Table 4 Statistics on the future trend of RSEI

QRSEI	H	变化状况	占比/%
-------	---	------	------

> 0.0005	$H \geq 0.55$	持续改善	65.53
<-0.0005 或 >0.0005	$0.45 < H < 0.55$	随机变化	15.56
> 0.0005	$0 < H < 0.45$	改善转为恶化	0
-0.0005~0.0005		基本不变	4.69
< -0.0005	$0 < H < 0.45$	恶化转为改善	0.59
< -0.0005	$H \geq 0.55$	持续恶化	13.63

2.4 秦岭北麓地区 RSEI 空间分异驱动因素

影响 RSEI 空间分异性的因素主要有气候、人文和地形等(罗旭等, 2025)。本文研究选取年降雨量以及年平均气温作为典型气候因子进行分析, 降雨直接影响着生态变化, 气温制约着植被的生长发育; 在人文因素中, 选取了人口密度、土地利用类型以及夜间灯光进行分析, 人口密度是人类活动强度的直接表现, 土地利用类型则体现地区产业结构, 夜间灯光可代表城镇化和经济发展水平; 采用高程、坡度、坡向 3 种地形因子进行分析, 高程是垂直带差异的原因, 坡度影响地表的稳定性, 而坡向决定了阳光辐射量。利用地理探测器分析 8 种重要因子对 RSEI 变化的驱动机制。

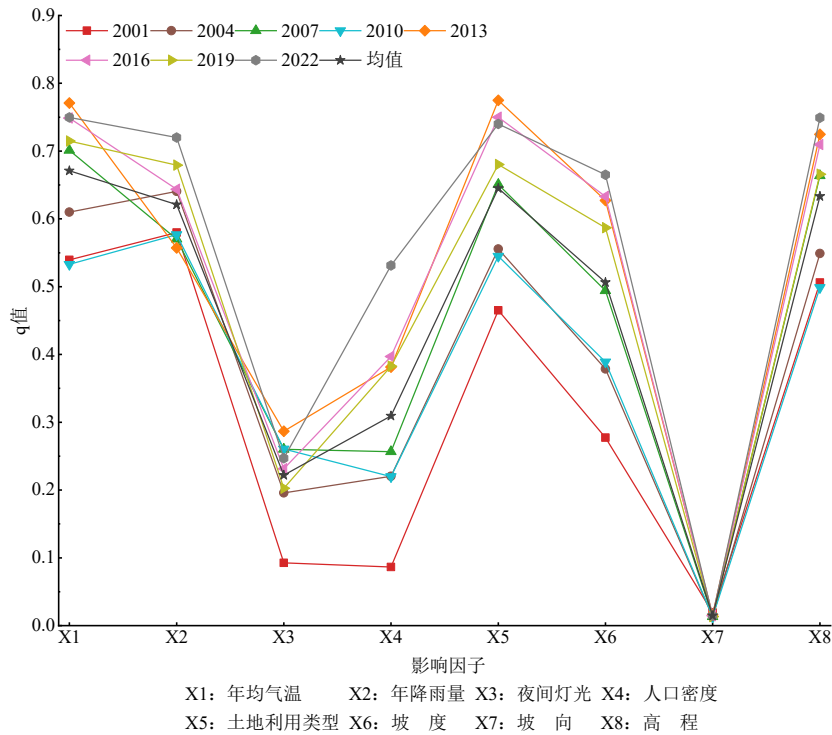


图 8 单一因子探测

Figure. 8 Diagram of single factor detection

单因子探测结果表明, 不同年份中各驱动因子对 RSEI 的影响程度 q 值具有一定差异, 但整体基本稳定 (图 8)。从 q 均值曲线来看, 其单因子影响程度从大到小依次为 $X1 > X5 > X8 > X2 > X6 > X4 > X3 > X7$, 其中 $X1$ 气温因子 ($q_{\text{平均}}=0.671$)、 $X5$ 土地利用类型 ($q_{\text{平均}}=0.645$)、 $X8$ 高程 ($q_{\text{平均}}=0.633$) 和 $X2$ 年降水量 ($q_{\text{平均}}=0.621$) 对 RSEI 影响程度强, $X6$ 坡度 ($q_{\text{平均}}=0.506$), $X4$ 人口密度 ($q_{\text{平均}}=0.309$) 和 $X3$ 夜间灯光 ($q_{\text{平均}}=0.229$) 对于 RSEI 的影响较高, $X7$ 坡向 ($q_{\text{平均}}=0.015$) 对 RSEI 的驱动相对较弱 (图 8)。
 $X1$ 气温因子 q 值在 2013 年、2016 年分别达到 0.7709、0.7487, 且在绝大多数年份对 RSEI 影响程度居于

因子首位，始终强烈影响生态环境质量变化；X5 土地利用类型 q 值自 2001 年 0.465 开始不断增加，2013 年已增至 0.775，充分说明秦岭北麓区域土地资源利用方式快速变化对生态环境质量的显著影响；X8 高程 q 值最高达到 0.749，均值 0.633，X6 坡度 q 值均值 0.506，显示出地形地貌效应明显，盆山不同地质环境单元制约了土地使用，并对 RSEI 影响明显不同；X2 年降水量因子 q 值 0.621，整体维持较强水平，直接带动 NDVI 指数并影响 RSEI。X3 夜间灯光与 X4 人口密度因子在多数年份的 q 值相对较低，表明社会经济活动对 RSEI 的直接解释力较弱，但在人口持续增长与城市扩展背景下，其 q 值呈现出一定增强趋势。

通过地理探测器对 8 个驱动因子进行交互探测分析（图 9），结果表明，在这 22 年间，代表气候的 X1 年均气温、X2 年降水量的交互探测 q 值明显高于其单因子 q 值，表明气候因子联合作用是造成区域生态环境质量产生差异的基础驱动力；表征地貌因子的 X8 高程与其他因子的交互探测值 q 值始终较高，X6 坡度的交互探测 q 值也在 2007 年后也显著增强，表明地质环境是区域生态环境质量分异的本底要素。同时，X5 土地利用类型因子与其他因子之间的交互探测值变化大，在 2013 年之后一直保持强烈的驱动，深刻说明了秦岭北麓土地开发利用对生态环境质量的影响极大。

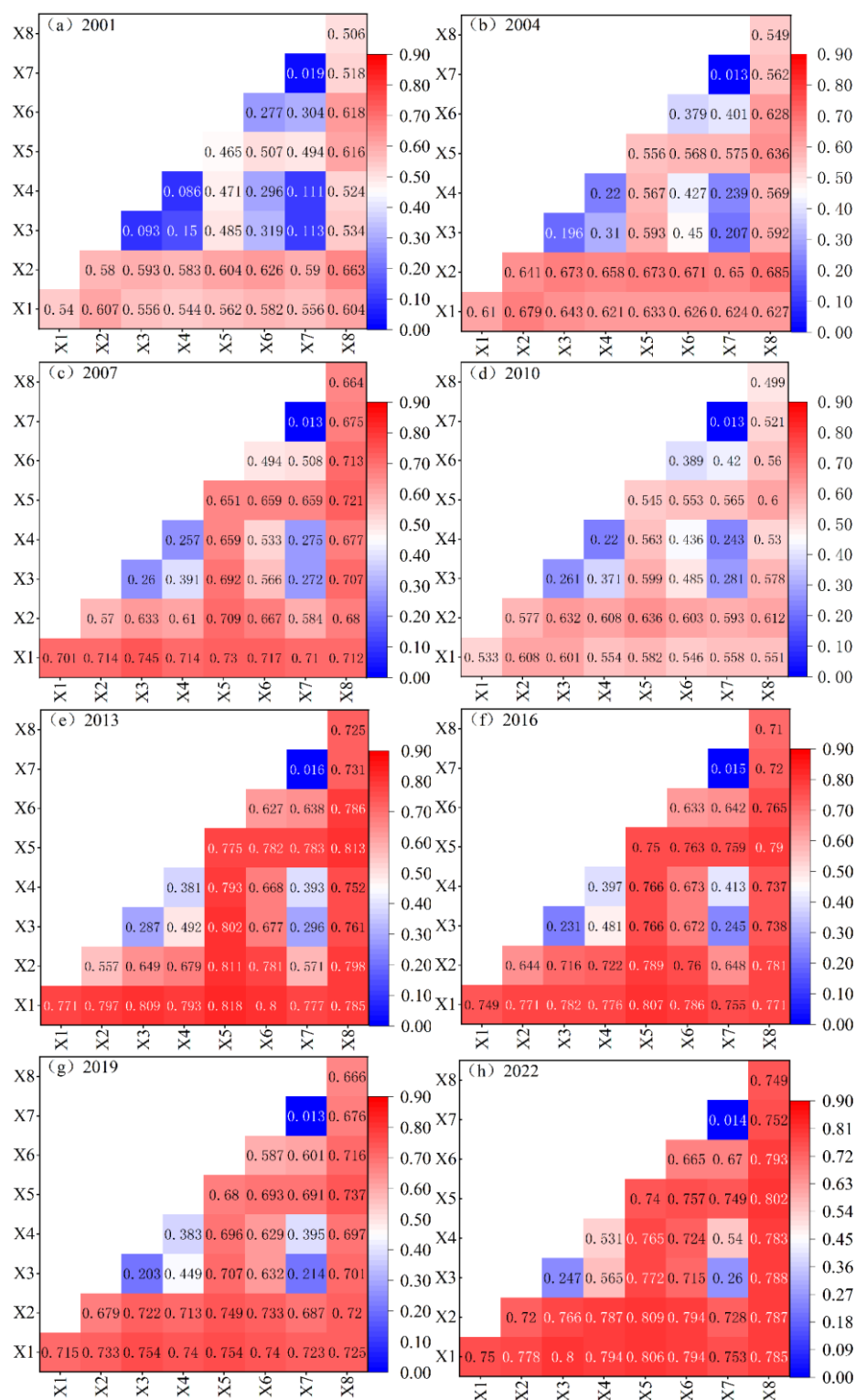


图 9 2001—2022 年秦岭北麓 RSEI 驱动因子交互探测结果

Figure. 9 Diagram of interaction detection of RSEI driving factors in the northern foothills of the Qinling Mountains from 2001 to 2022

3.讨论

2001—2022 年秦岭北麓生态环境质量空间分布呈现“南高北低”显著差异特征，且生态环境质量为显著改善的区域高度集中于南部中低山区。中低山区的地质环境条件使其受人类直接干扰相对较少，且该区

域土地利用类型主要为森林（图 10），具有较高生态价值，生态环境质量因此也较高。此外，人类的保护活动如“秦岭山水工程”等政府主导的持续性修复措施取得了一定的成效，退耕还林、自然保护区建设等政策有力促进森林植被的恢复，修复工程与保护政策叠加实施加快了地区生态环境质量的恢复。而山前平原存在的生态环境“低洼地带”以及占比达 3.21%生态环境质量极显著降低区域，则清晰地表明人类活动如城镇化快速扩张等是导致局部地区生态环境恶化的直接驱动力（表 5）。采用地理探测器对影响 RSEI 空间分异性的原因进行研究结果，同样表明地质环境如高程的起伏以及人类活动引起的土地利用类型的转变是影响秦岭北麓 RSEI 空间差异的核心驱动因素，未来人类活动相关的因子则更具有潜在影响力。

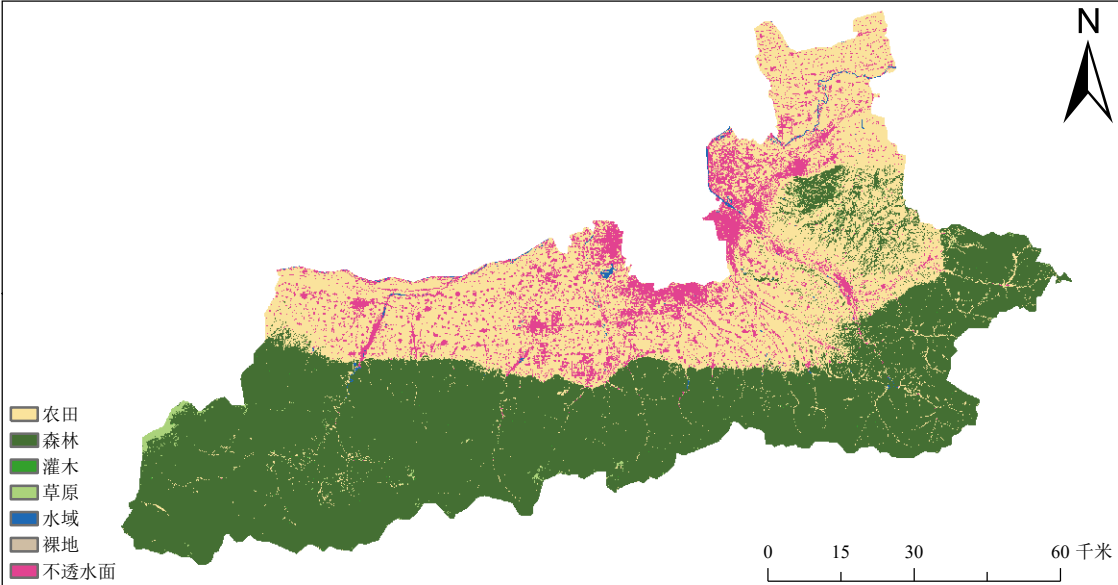


图 10 2022 年秦岭北麓土地利用类型

Figure. 10 Diagram of land use types in the northern foothills of the Qinling Mountains, 2022

根据秦岭北麓地区 2001—2022 年 RSEI 均值数据，该地区的生态环境质量在时间上呈现出“下降-上升”交替波动，总体趋势上升特征（图 5），反映了秦岭北麓开发建设中用地需求扩增与生态保护之间的制衡关系。其原因首先是城市化的扩张影响了地区生态环境质量，21 世纪以来，随着西安市主城区经济快速发展，带动了周边各区县城镇化的快速扩张，城市规模不断扩大，2001—2022 年间该区域不透水面土地类型面积占比增加 5.03%，而农田面积占比降低 7.4%，草原、灌木占比也显著减少，裸土面积占比极少本文不加计算分析（表 5），相应的土地利用类型转变引起了绿度、湿度、干度、热度等一系列变化，从而延伸到整个地区 RSEI 的变化。其次为保护秦岭生态安全，国家及地方政府制定了多项政策法规并实行多项秦岭生态修复工程促进生态环境恢复，这些举措使 2019-2022 年秦岭北麓不透水面仅增加 0.39%，而森林面积占比则增加 0.85%，为秦岭的生态环境提供了保护并且为生态的恢复提供了有力的支持，有效地促进了秦岭北麓生态质量的提高。

表 5 不同年份土地利用类型占比统计

Table 5 Land use type percentage statistics for different years

年份	农田/%	森林/%	不透水面/%	灌木/%	草原/%	水域/%
2001	42.32	51.26	4.07	0.19	2.01	0.15
2004	41.36	51.55	4.95	0.17	1.76	0.20
2007	40.52	52.08	5.58	0.16	1.42	0.24
2010	39.64	52.46	6.25	0.11	1.30	0.25
2013	38.06	52.64	7.58	0.08	1.36	0.28
2016	37.17	53.23	8.16	0.06	1.09	0.28
2019	35.93	54.13	8.71	0.05	0.87	0.31
2022	34.92	54.98	9.10	0.03	0.62	0.34

根据 Hurst 指数预测分析结果和 RSEI 分析(表 4), 秦岭北麓环境未来整体变化以“持续改善”为主, 其中最核心要素土地利用类型的优化调整是直接原因。秦岭地区 2008 年开始实施《陕西省秦岭生态环境保护条例》, 秦岭北麓 RSEI 均值从 2009 年的 0.617 骤升至 2010 年的 0.694, 该项政策的施行对于秦岭北麓生态环境的恢复起到了制度保障作用。2018 年《陕西省秦岭生态环境保护条例》重新修订实施, 2019 年陕西省林业局发布实施《秦岭生态空间治理十大行动》以及 2022 年实施的“秦岭山水工程”等这一系列生态修复工程和秦岭保护政策不仅产生即时效益更会形成未来持续的良性生态循环。本研究所揭示的秦岭北麓生态质量空间分异与趋势变化也可为“秦岭山水工程”的实施提供精准技术支持, 在秦岭北麓生态环境质量较差和差等级以及“持续恶化”区, 应加强生态监测网络布设, 禁止违规建设, 降低人类工程活动干扰, 在生态环境质量优良区, 重点开展林草抚育与水土治理工程, 提高秦岭北麓生态韧性, 增强生态保护功能。在考虑秦岭气候变化和生态脆弱性的同时也要平衡城市化发展对地区生态环境的影响, 严格土地资源的管理和规划, 系统保护生态资源, 持续监测生态环境质量, 依靠法治和技术两把宝剑守护秦岭生态安全。

4.结论

(1) 在空间分布上, 秦岭北麓的地质环境条件深刻影响生态环境格局, 呈现为“南高北低”的显著性差异, 而山前平原地带的生态质量“低洼区”以及南部山区生态环境质量“显著改善”区域则凸显了人类的活动对于生态环境质量的影响。

(2) 秦岭北麓在 2001—2022 年以来全面经济发展, 引起土地利用类型改变和生态环境变化。秦岭北麓 RSEI 呈现三阶段变化特征: 基本平稳阶段(2001—2004 年)、强烈波动阶段(2005—2011 年)以及波动攀升阶段(2012—2022 年), 整体表现为波动增长, 年均增长幅度达 0.00315。

(3) 通过因子探测分析, 高程以及土地利用类型是影响秦岭北麓 RSEI 空间差异的核心驱动因子, 而气候因子的联合作用则对地区生态环境质量存在显著的驱动作用, 未来人类活动有关的因子则更具有潜在影响力。

(4) 在未来的发展趋势上, 秦岭北麓 65.53%的区域生态质量仍将以持续改善为主, 且改善范围与当前 RSEI 高值区高度吻合, 实施“秦岭山水工程”等生态修复工程以及秦岭保护政策法规对生态恢复具有

显著的正向驱动性，未来生态环境的监测评估是保护大秦岭的重要举措。

作者贡献度说明

作者 1: 李哲丞负责研究体系构思与整体工作，整体论文的文字统稿，负责定稿与学术规范审核；作者 2: 唐瑞泽负责论文数据收集和计算分析处理，制图，主要章节的撰写和英文翻译，文献整理等，负责数据验证，参与完成论文初稿的撰写并多次修改；作者 3: 贺元靖参与部分数据收集与整理；作者 4: 肖建东参与部分数据收集；作者 5: 张双成负责指导论文，并进行数据分析与验证；作者 6: 顾俊凯提供研究所需的技术支持；作者 7: 杨威负责项目协调，参与论文修改。

References

- Allen, C., Metternicht, G. and Wiedmann, T., 2018. Initial Progress in Implementing the Sustainable Development Goals (SDGs): a Review of Evidence from Countries. *Sustainability Science*, 13(5): 1453–1467. doi:10.1007/s11625-018-0572-3
- Benoit B. Mandelbrot, J.R.W., 1969. Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurement of Noncyclic Long Run Statistical Dependence. *Water Resources Research*, 5(5): 967-988. doi: 10.1029/WR005i005p00967
- Cui, G.Y., Zhang, Y., Chao, Y., et al., 2023. Land Use Change and Eco-Environmental Effects in Qinling Mountains in Recent 40 Years. *Research of Soil and Water Conservation*, 30(1): 319-326. (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. and Huang, X., 2021. The 30 m Annual Land Cover Dataset and its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8): 3907–3925. doi: 10.5194/essd-13-3907-2021
- Fu, K.X., Jia, G.D., Yu, X.X., et al., 2024. Evaluation of Ecological Environment Quality and Analysis of Driving mechanism in Tulufan-Hami Region Based on Improved Remote Sensing Ecological Indices. *Acta Ecologica Sinica*, 44(09): 3911-3923 (in Chinese with English abstract).
- Gong, X.Q., Deng, J.H., Zhu, Y.F., et al., 2025. Spatial-Temporal Changes and Prediction Analysis of Long-Term Ecological Environment Quality in the Urban Agglomeration Around Poyang Lake Based on GEE. *Environmental Science*, 1-20 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C., Liu, X.L., Cheng, N.N., et al., 2013. Spatial-temporal Variations and Mutations of Sunshine Hours in the Northern and Southern Regions of the Qinling Mountains. *Arid Land Geography*, 36(03): 416-424. doi: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.03.010
- Li, G.Z., Wang, H., Cao, Y.X., et al., 2023. Spatio-Temporal Evolution and Influencing Factors of Ecological Environment Quality in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration. *Remote Sensing for Natural Resources*, 35(4): 244-254 (in Chinese with English abstract). doi:10.6046/zrzyyg.2022371
- Li, Y., Zhang, G.Q., Lin, T., et al., 2022. The Spatiotemporal Changes of Remote Sensing Ecological Index in Towns and the Influencing Factors: A Case Study of Jizhou District, Tianjin. *Acta Ecologica Sinica*, 42(2): 474-486 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D., Cui, Y.J., Peng, J.B., et al., 2025. Study on Mutual Feedback between Small Town Communities and Ecological Communities in the Northern Foothills of Qinling Mountains. *Earth Science*, 1-14 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W.B., Tao, N., Peng, J.B., et al., 2025. Progress of Tectonic Uplift Process in Northern Foothill of Qinling Mountains Based on Constraints of Low-Temperature Thermochronology. *Earth Science*, 50(10): 4155-4176 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X., Wang, L.X., Zhang, J., et al., 2025. Spatio-Temporal Dynamic and Driving Factor Analysis of Ecological Environment Quality in Qinling Mountains. *Environmental Science*, 46(6): 3720-3729 (in Chinese with English abstract).
- Lyu, Y., M.R.X., Wang, Z.P., et al., 2025. A Study on the Genetic Dynamics and Development Characteristics of Granitic

Rock Avalanches in the Northern Qinling Mountains, China. *Journal of Earth Science*,36(2)737-749. doi: 10.1007/s12583-024-0016-1.

- Ma,L.,Zhang,H.Y.,2023. Analysis of NDVI Spatiotemporal Changes in the Northern Foothills of Qinling Mountains from 2010 to 2020: Taking Xi'an City as an Example. *China Resources Comprehensive Utilization*, 41(9): 34-36 (in Chinese with English abstract).
- Shen,Y.J.,Chen,X.,Peng,J.B.,et al.,2024. Background Characteristics of Ecological Geological Environment System in Qinling Mountains and Assumption of Its Theoretical System. *Earth Science*, 49(6): 2103-2119 (in Chinese with English abstract).
- Sun,X.R.,Hu,C.M.,Zhu,C.J.,et al.,2025. Spatiotemporal Evolution and Driving Force Analysis of Ecological Environment Quality in an Industrial Area. *Environmental Science*, 1-20 (in Chinese with English abstract).
- Tian,Z.H.,Ren,Z.G.,Wei,H.T.,2022. Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020. *Environmental Science*, 43(2): 743-751 (in Chinese with English abstract).
- Wang,F.,Li,W.H.,Lin,Y.M.,et al.,2023. Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020. *Environmental Science*, 44(5): 2518-2527 (in Chinese with English abstract).
- Wang,J.F.,Xu,C.D.,2017. Geodetector: Principle and Prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134 (in Chinese with English abstract).
- Wu,W.Q.,Zhao,Y., Tian,H.W.,et al.,2023. Spatio-temporal Variation Characteristics and Driving Mechanism of Habitat Quality of Qinling Mountains in Recent 40 years. *Journal of Earth Environment*, 14(4): 488-504 (in Chinese with English abstract).
- Xiong,J.T.,Zhang,S.L.,Hou,H.P.,et al.,2025. Dynamic Monitoring of Ecological Quality in Xilingol League and Influencing Factors Based on Improved Remote Sensing Ecological Index (IRSEI). *Journal of Northwest Forestry University*, 40(04): 213-222 (in Chinese with English abstract).
- Xu,H.Q.,2005. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). *National Remote Sensing Bulletin*, 9(05): 589-595 (in Chinese with English abstract).
- Xu H.Q.,2013a. Assessment of Ecological Change in Soil Loss Area Using Remote Sensing Technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*,29(7):91-97 (in Chinese with English abstract).
- Xu,H.Q.,2013b. A Remote Sensing Urban Ecological Index and Its Application. *Acta Ecologica Sinica*, 33(24): 7853-7862 (in Chinese with English abstract).
- Xu,P.P.,Shen,Y.J.,Peng,J.B.,et al.,2024. Typed Architecture of Valley Road in Northern Foothills of Qinling Mountains Based on Concept of Ecological-Economic-Social Collaborative Development. *Earth Science*, 49(12): 4564-4575 (in Chinese with English abstract).
- Yang,H.T.,Xu,H.Q.,2020. Assessing Fractional Vegetation Cover and Ecological Status Changes of the Wuyi Mountain National Nature Reserve Based on Remote Sensing Technology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(02): 533-542 (in Chinese with English abstract).
- Yang,R.Y.,Huang,X.Y.,Qin,Y.,et al.,2025. Patterns and Mechanisms of Human-Land-Industry System Mutual Feedback in Villages of the Northern Foothills of Qinling Mountains. *Earth Science*, 1-17 (in Chinese with English abstract).
- Yao,G.H.,Li,H.D.,Wu,J.,et al.,2023. The Coupling Coordination Degree of Ecological Environment and Urbanization in Ecological Civilization Demonstration Area Based on Remote Sensing Ecological Index and Compounded Night Light Index: A Case Study of the Yangtze River Delta. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 39(11): 1386-1398 (in Chinese with English abstract).
- Yue,Y.F.,Zhao,W.Z.,Liu,R.T.,et al.,2024. Spatiotemporal Changes and Driving Mechanisms of Eco-Environmental Quality in the Desert Steppe Zone of Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 44(20): 9067-9080 (in Chinese with English abstract).

- Zhao,H.H.,Liu,J.C.,Guo,Y.J.,et al,2024. Assessing the Ecological Sensitivity of the Northern Foothills of Qinling Mountains Using DPSIRM and PLUS Models. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40(13): 244-252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,J.C.,Gao,F.,Liu,K.,et al.,2025. Spatiotemporal Evolution and Driving Forces Analysis of Habitat Quality in the Qarqan River Basin Based on an Enhanced Remote Sensing Ecological Index. *Environmental Science*, 1-26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,J.X.,Gu,Y.X.,Shen,J.Q.,et al.,2025. Analysis of Spatiotemporal Changes and Driving Factors of Ecological Environment Quality in the Yellow River Basin. *Environmental Science*, 46(2): 956-971 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,J.,Yang,L.P.,Gong,E.J.,et al.,2023. Dynamic Monitoring of Eco-Environmental Quality in Xi'an Based on GEE and Adjusted RSEI. *Acta Ecologica Sinica*, 43(05): 2114-2127 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,M.M.,Li,T.F.,Wang,Y.X.,et al.,2025. Research on the Driving Mechanism and Multi-Scenario Prediction of Land-Use Evolution in Resource-Based Cities: A Case Study of Taiyuan City. *Mining Safety & Environmental Protection*, 52(5): 134-144, 152 (in Chinese with English abstract).
- Zhang,Y.,Sun,C.J.,Liu,G.,et al.,2025. Evaluation of Ecological Environment Quality in the Yellow River Basin Using GEE and Modified Remote Sensing Ecological Index. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 39(11): 103-115 (in Chinese with English abstract).
- Zhu,X.L.,Si,J.H.,Wang,J.D.,et al.,2025. Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Ecological Environment Quality and Driving Force in Taohe River Basin. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 56(01): 74-84 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 崔国屹, 张艳, 晁阳, 等, 2023.秦岭地区近 40 年土地利用变化及其生态环境效应.水土保持研究, 30(1):319-326.
- 傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 等, 2024.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.生态学报, 44(09): 3911-3923.
- 龚循强, 邓居豪, 朱煜峰, 等, 2025.基于 GEE 的环鄱阳湖城市群长时序生态环境质量时空变化及预测分析.环境科学: 1-20.
- 蒋冲, 刘晓磊, 程楠楠, 等, 2013.秦岭南北日照时数时空变化及突变特征.干旱区地理, 36 (03) : 416-424.
- 李光哲, 王浩, 曹银璇, 等, 2023.长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析.自然资源遥感, 35(04): 244-254.
- 李妍, 张国钦, 齐涛, 等, 2022.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究——以天津市蓟州区为例.生态学报, 42(02): 474-486.
- 刘文博, 陶霓, 彭建兵, 等, 2025.基于低温热年代学约束下的秦岭北麓构造抬升过程研究进展.地球科学, 50(10): 4155-4176.
- 罗旭, 王丽霞, 张晶, 等, 2025.秦岭地区生态环境质量时空变化及驱动力分析.环境科学, 46(06): 3720-3729.
- 马凌, 张恒毅, 2023.2010—2020 年秦岭北麓 NDVI 时空变化分析——以西安市为例.中国资源综合利用, 41(09): 34-36.
- 申艳军, 陈兴, 彭建兵, 等, 2024.秦岭生态地质环境系统本底特征及研究体系初步构想.地球科学, 49(06): 2103-2119.
- 孙欣然, 胡春明, 朱长军, 等, 2025.工业区生态环境质量时空演变与驱动力分析.环境科学: 1-20.
- 田智慧, 任祖光, 魏海涛, 2022.2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制.环境科学, 43(02): 743-751.
- 王芳, 李文慧, 林妍敏, 等, 2023.1990~2020 年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析.环境科学, 44(05): 2518-2527.
- 王劲峰, 徐成东, 2017.地理探测器:原理与展望.地理学报, 72(01): 116-134.
- 武文琦, 赵 燕, 田瀚文, 等, 2023.近 40 a 秦岭生境质量时空变化特征及驱动机制.地球环境学报, 14(4):488-504.
- 熊金婷, 张绍良, 侯湖平, 等, 2025.基于改进遥感生态指数(IRSEI)的锡林郭勒盟生态质量动态监测及影响因素分

析.西北林学院学报, 40(04): 213–222.

徐涵秋, 2005.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究.遥感学报, 9(05): 589–595.

徐涵秋, 2013a.水土流失区生态变化的遥感评估.农业工程学报, 29(7): 91–97.

徐涵秋, 2013b.城市遥感生态指数的创建及其应用.生态学报, 33(24): 7853–7862.

徐盼盼, 申艳军, 彭建兵, 等, 2024.基于生态-经济-社会协同发展理念的秦岭北麓峪道类型化架构思考.地球科学, 49(12): 4564–4575.

杨绘婷, 徐涵秋, 2020.基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估.应用生态学报, 31(02): 533–542.

杨如玉, 黄晓燕, 秦玥, 等, 2025.秦岭北麓乡村人-地-业系统互馈模式与机理.地球科学: 1–17.

姚国慧, 李海东, 吴京, 等, 2023.基于遥感生态指数和综合夜间灯光指数的生态文明示范区生态环境与城市化耦合协调度研究: 以长江三角洲为例.生态与农村环境学报, 39(11): 1386–1398.

岳奕帆, 赵文智, 刘任涛, 等, 2024.宁夏荒漠草原带生态环境质量时空变化及其驱动机制.生态学报, 44(20): 9067–9080.

赵欢欢, 刘金成, 郭义军, 等, 2024.基于 DPSIRM 和 PLUS 模型的秦岭北麓生态敏感性评估.农业工程学报, 40(13): 244–252.

张加成, 高凡, 刘坤, 等, 2025.基于改进遥感生态指数的车尔臣河生境质量评价及驱动因素分析.环境科学: 1–26.

张京新, 谷雨鑫, 沈佳琦, 等, 2025.黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析.环境科学, 46(02): 956–971.

张静, 杨丽萍, 贡恩军, 等, 2023.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测.生态学报, 43(05): 2114–2127.

张明媚, 李腾飞, 王一雄, 等, 2025.资源型城市土地利用演变驱动机制及多情景预测研究——以太原市为例.矿业安全与环保, 52(05): 134–144+152.

张音, 孙从建, 刘庚, 等, 2025.基于 GEE 和改进型遥感生态指数的黄河流域生态环境质量评价.干旱区资源与环境, 39(11): 103–115.

朱兴林, 司建华, 王军德, 等, 2025.基于地理探测器的洮河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析.水利水电技术(中英文), 56(01): 74–84.