

基于GEE的辽宁省生态环境质量时空格局及驱动力分析

赵格格

辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2025年9月8日; 录用日期: 2025年10月1日; 发布日期: 2025年10月11日

摘要

生态文明建设关乎中华民族永续发展, 快速高效地开展生态质量监测与评价, 有助于推进生态环境治理体系与能力现代化。辽宁省位于东北地区西南部, 是我国生态保护修复的重点区域。本研究利用遥感生态指数(RSEI)评估了辽宁省2000~2023年生态环境质量的时空演变规律。结果表明: 研究期内全省RSEI均值呈显著上升趋势, 其空间异质性较为明显, 形成“东西优, 中部差”的空间格局。Sen-MK趋势与Hurst指数分析显示, 东部山区未来将持续改善, 而中部城市群部分区域退化风险较高。地理探测器驱动力分析表明, 土地利用类型是主导空间分异的核心因子, 自然与人文因子的交互作用均呈非线性增强效应, 其中土地利用与降水的交互解释力最强。研究成果可为辽宁省统筹生态保护与高质量发展提供科学依据和决策支持。

关键词

遥感生态指数(RSEI), 时空演变, 驱动机制, 地理探测器, 辽宁省

Analysis of the Spatial-Temporal Pattern and Driving Forces of Ecological Environment Quality in Liaoning Province Based on GEE

Gege Zhao

School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: September 8, 2025; accepted: October 1, 2025; published: October 11, 2025

Abstract

The construction of ecological civilization is related to the sustainable development of the Chinese

nation. Rapid and efficient monitoring and evaluation of ecological quality can help promote the modernization of the ecological environment governance system and capacity. Liaoning Province is located in the southwest of Northeast China and is a key area for ecological protection and restoration in China. This study used the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) to evaluate the spatiotemporal evolution of ecological environment quality in Liaoning Province from 2000 to 2023. The results showed that during the research period, the average RSEI of the whole province showed a significant upward trend, and its spatial heterogeneity was quite obvious, forming a spatial pattern of “East West excellence, Central difference”. The Sen MK trend and Hurst index analysis show that the eastern mountainous areas will continue to improve in the future, while some areas of the central urban agglomeration have a higher risk of degradation. The driving force analysis of geographic detectors shows that land use type is the core factor dominant in spatial differentiation, and the interaction between natural and human factors exhibits a nonlinear enhancement effect, with the interaction explanatory power between land use and precipitation being the strongest. The research results can provide scientific basis and decision-making support for the coordinated ecological protection and high-quality development in Liaoning Province.

Keywords

Remote Sensing Ecological Index (RSEI), Spatiotemporal Evolution, Driving Mechanism, Geographic Detector, Liaoning Province

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

生态环境质量演变规律及其驱动机制研究是当前可持续发展领域的核心议题，其本质在于协调人类活动与生态承载能力之间的动态平衡。辽宁省位于中国东北南端，处于温带大陆性季风气候区，生态本底脆弱，对气候变化和人类干扰响应敏感，是研究人地关系相互作用的典型区域[1]。自 20 世纪 80 年代起，随着计算机与 3S 技术的融合，生态环境评价方法逐步从定性描述向多时相、多指标的综合定量模型转变，实现了方法论上的重要跨越[2]。2000 年 Terra 卫星发射升空，NASA 基于 MODIS 数据生产的 16 天合成 NDVI/EVI 产品，极大促进了长时序生态环境分析的发展，凸显了遥感技术在捕捉气候突变对植被动态影响中的优势。例如，Anyamba 等利用 NOAA-AVHRR 遥感数据，通过 NDVI 揭示了 1981~2003 年间萨赫勒地区植被的演变规律[3]；Sánchez 等则结合空间多因素模型与双变量映射，整合水文与社会经济指标，实现了流域健康综合评价与脆弱区识别[4]。我国也于 2006 年出台《生态环境状况评价技术规范(试行)》，首次确立以生物丰度、水网密度、污染负荷等为核心的综合评价指数(EI)，为区域生态质量评估提供了统一标准[5]。2013 年，徐涵秋提出遥感生态指数(RSEI)，通过主成分分析融合绿度、湿度、干度、热度四个指标，突破传统 EI 指数局限，实现了大范围、多时相生态环境的可视化评价与动态模拟[6]。目前，RSEI 已被广泛用于不同尺度的生态监测中，如城市区域的生态驱动力分析[7]、流域生态修复实践等的生态环境实践，显示出良好的适用性。此外，通过对多期 RSEI 影像可实现生态变化的快速识别，而面向特定地理环境的模型优化，如引入土壤盐度因子构建 MRSEI 以增强干旱区生态表征能力[8]，在延河流域改进模型结构并提升水体生态评估精度，进一步拓展了 RSEI 的应用深度与可靠性。近年来，机器学习方法也被应用于 RSEI 与土地利用[9]、气象因子[10]等多源数据的融合分析中，有效提升了对生态演变驱动机制的解释与预测能力。

作为中国北方关键的生态屏障，辽宁省的生态环境质量一直受到广泛关注，本研究在既有成果基础上，依托 GEE 平台处理辽宁省近 24 年遥感数据，采用 Sen-MK 趋势分析、Hurst 指数及最优参数地理探测器等方法，系统地揭示辽宁省 RSEI 的时空分异规律、驱动机制及未来趋势。研究成果旨在为辽宁省生态质量长期演变提供科学支撑，也为区域生态保护政策的制定与实施提供理论依据。

2. 研究区概况及数据来源

2.1. 研究区概况

辽宁省位于中国东北地区南部(38°43'~43°26'N, 118°53'~125°46'E)，全省总面积 14.8 万平方公里，地貌类型多样，地势自东西两侧向中部倾斜，中部为广阔的辽河平原，是重要的商品粮基地和城市化区域。辽东为长白山脉余脉，以山地和丘陵为主，森林覆盖率高，是重要的生态屏障和水源涵养区；辽西则以低山丘陵和黄土台地为主，生态条件较为脆弱，水土流失敏感性较高。辽宁省属温带大陆性季风气候，四季分明，雨热同季，年均气温 6~11℃，年降水量 500~1000 毫米，自东南向西北递减。植被类型以温带针阔混交林、落叶阔叶林和灌草丛为主。作为中国重要的老工业基地，辽宁省城市化水平高，工业集聚明显，近年来，在振兴东北战略推动下，辽宁省持续推进经济转型与生态修复，但仍面临资源开发与生态保护、工业污染与环境治理、城市扩张与生态用地保护等多重压力，其生态环境质量演变及驱动机制研究对区域可持续发展具有重要意义。研究区概况图如下图 1 所示。

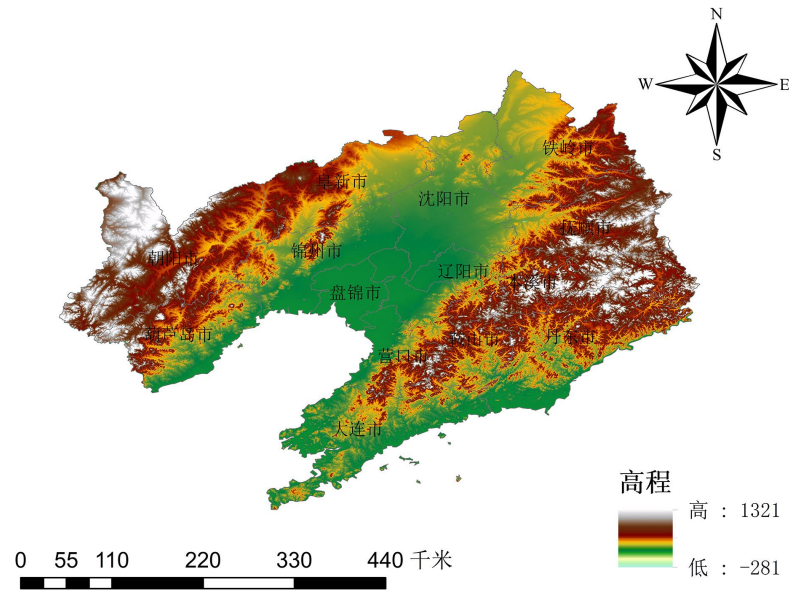


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区概况图

2.2. 数据来源及预处理

本研究的 RSEI 是由绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI)四个生态指标构成，分别由 MOD09A1、MOD11A2 和 MOD13Q1 数据产品计算而得，借助谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)对影像进行裁剪、镶嵌并进行水体掩膜等预处理，用于 RSEI 的计算及分析。访问地址为：<https://code.earthengine.google.com/>，共选用了 2000~2023 年共计 24a 的 6~9 月生长季数据。其次，在充分考虑了驱动因子的代表性、科学性并参考前人研究[4] [11] [12]，本研究选取了自然因素和社会经济因

素两大类作为导致 RSEI 时空变化的驱动因素,用以系统探究自然以及社会经济因素对辽宁省生态环境质量的影响机制。GDP 来自空间分布数据根据发表于 GISScience & Remote Sensing 的论文区计算的详细计算方式可参考具体文献[13],其余详细数据见表 1 所示。

Table 1. Data sources

表 1. 数据来源

数据名称	数据来源	网址	分辨率
行政边界	全国地理信息资源目录服务系统	https://www.webmap.cn/	
DEM	地理空间数据云	https://www.gscloud.cn/	30 m
年均温			
年总降水	国家地球系统科学数据中心	http://www.geodata.cn/main/	1 km
夜间灯光			
PM2.5	国家青藏高原科学数据中心	https://data.tpdc.ac.cn/	1 km
蒸散发			
人口	Landscan	https://landscan.ornl.gov	1 km
土地利用类型	地球系统科学数据	https://zenodo.org/records/12779975	30 m

3. 研究方法

3.1. 遥感生态指数构建

RSEI 是在 EI 指数的基础上构建的一种基于遥感影像的综合生态环境评价方法,具有数据易获取、结果可视化等优势。该方法选取绿度、湿度、热度、干度作为构建 RSEI 的指标,并利用降维的思想,把多指标转化为少数几个,且所含信息互不重复。这种方法在引进多方面变量的同时将复杂因素归结为几个主成分,使问题简单化,同时得到的结果更加科学有效的数据信息。利用第一主成分(PC1)构建 RSEI 公式如下:

$$RSEI_0 = PC1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (1)$$

式中, NDVI 代表绿度, WET 代表湿度, LST 代表热度, NDBSI 代表干度。四个指标详细的计算方式可参考具体文献[6]。

3.1.1. 指标归一化

在完成 RSEI 构建所需的四个生态环境评价指标(NDVI, WET, LST, NDBSI)计算后,为了避免量纲不统一对计算结果造成影响,需要对上述计算的 4 个生态环境评价指标进行归一化,将各个指标的值放在 [0~1]之间,公式如下:

$$NI_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

式中, NI_i 为第 i 个指标归一化后的值; I_i 为第 i 个未归一化的值; $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 分别为第 i 个指标未归一化的最小值和最大值。

3.1.2. RSEI 模型的构建

同样对 $RSEI_0$ 进行归一化处理,最终得到 RSEI 公式如下:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0_min}}{RSEI_{0_max} - RSEI_{0_min}} \tag{3}$$

式中， $RSEI_{0_min}$ 、 $RSEI_{0_max}$ 分别为归一化处理后的 RSEI 的最小值和最大值，使其值在[0, 1]之间，且 RSEI 值越接近 1 表明生态环境质量越好，反之越差。

3.2. 趋势分析及显著性分析

为了揭示辽宁省生态环境质量的时空演变特征及规律，本文采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall (MK)显著性检验相结合的方法。Theil-Sen Median 趋势分析的计算公式：

$$S_{RSEI} = \text{Median}\left(\frac{RSEI_i - RSEI_j}{j - i}\right), (2000 \leq i \leq j \leq 2023) \tag{4}$$

式中，Median()代表取中值， $RSEI_i$ 和 $RSEI_j$ 分别表示第 i 年和第 j 年的 RSEI 值，当 $S_{RSEI} > 0$ 时，表示 RSEI 在研究时间段内呈上升趋势，当 $S_{RSEI} < 0$ 时，表示 RSEI 在研究时间段内呈下降趋势。

为进一步对上述趋势的显著性进行统计检验，本文采用非参数的 Mann-Kendall 显著性检验，其计算公式如下：

$$Z = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) - 1 > 0 \\ 0, & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) = 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(RSEI_j - RSEI_i) - 1 < 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{6}$$

式中， Z 为检验统计量 S 的趋势分析， S 为检验统计量， $\text{Var}(S)$ 为 S 的方差，sgn()为函数符号。本文是在显著水平为 0.005 下进行显著性判断，当 $|z| > 1.96$ 为显著， $|Z| \leq 1.96$ 时为不显著。

Table 2. Sen-MK trend classification
表 2. Sen-MK 趋势分类

S_{RSEI}	Z	趋势类别	趋势特征
$S_{RSEI} > 0$	$2.58 < Z$	4	极显著增加
	$1.96 < Z \leq 2.58$	3	显著增加
	$1.65 < Z \leq 1.96$	2	微显著增加
	$Z \leq 1.65$	1	不显著增加
$S_{RSEI} = 0$	Z	0	无变化
$S_{RSEI} < 0$	$Z \leq 1.65$	-1	不显著减少
	$1.65 < Z \leq 1.96$	-2	微显著减少
	$1.96 < Z \leq 2.58$	-3	显著减少
	$2.58 < Z$	-4	极显著减少

3.3. Hurst 指数

Hurst 指数可以定量描述时间序列的可持续性，揭示了未来变化趋势与过去之间的关系，根据过去的时间序列变化趋势预测未来变化趋势。计算公式如下：

$$\frac{R}{S} = (cm)^H \tag{7}$$

式中， R 为极差， S 为标准差， c 为常数，将观测值分为 n 个子序列 $RSEI_i$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。 m 为任意正整数且 $0 < m < n$ ， H 为 Hurst 指数。

Hurst 指数的范围为[0, 1]。当 $H = 0.5$ 时，表示未来变化趋势与过去无关；当 $0 < H < 0.5$ 时，表示未来变化趋势与过去趋势相反；当 $0.5 < H < 1$ 时，表示未来变化趋势与过去相同； H 值越接近 1 时，时间序列持续性越强，反之越弱。本文利用 Hurst 指数分析 2000~2023 年辽宁省生态环境质量的持续性特征，并与 Sen 趋势结合预测未来辽宁省生态环境质量趋势变化发展。RSEI 变化等级与持续性等级划分标准见表 3。

Table 3. RSEI change level and persistence level classification standards
表 3. RSEI 变化等级与持续性等级划分标准

Sen 斜率	Z	RSEI 趋势特征	Hurst 指数	RSEI 变化持续性
>0.0005	$1.96 < Z$	显著改善	0~0.5	由改善变为未来退化
	$Z \leq 1.96$	不显著改善	0.5~1	持续改善
-0.0005~0.0005	$Z \leq 1.96$	稳定不变	0.5~1	稳定不变
<-0.0005	$Z \leq 1.96$	不显著退化	0~0.5	由退化变为未来改善
	$1.96 < Z$	显著退化	0.5~1	持续退化

3.4. 最优地理探测器

地理探测器是探测变量空间分异性及其揭示背后驱动因子的一种统计学方法[14]，可以分析驱动因子对因变量的解释力和多个变量之间的交互作用，被广泛运用到自然科学、生态环境等众多领域中。本文是通过 R 语言中的 GeoDetector (GD)包来实现模型的运作，在传统方法的基础上增加了参数优化模块，弥补了以往对驱动因子尺度分区效应研究的不足，可以自动实现自变量数据的最优离散化方法的选取与执行，有助提高研究结果的科学性和精准性。相较于传统的地理探测器，不仅提供了更加强大的分析功能以及数据的灵活性，还能显著提高数据处理和可视化的便利性，从而能够进行更有效的地理数据分析。

4. 结果与分析

4.1. RSEI 主成分分析

根据主成分分析结果可知(表 4)，各年份 PC1 的贡献率均超过 70%，多年平均超过 72.16%，表明 PC1 有效整合了 4 个指标大部分信息[15]。此外，NDVI、WET 在 PC1 中载荷值为正值，说明植被覆盖度和湿度对生态环境具有积极影响；LST、NDBSI 在 PC1 中载荷值为负值，表明地表温度升高和裸地、建筑面积增加对生态环境产生负面影响。这一结果符合生态学基本规律，即植被和湿度有助于提升生态质量，而高温和干燥则可能导致生态退化。进一步比较载荷绝对值，WET 和 LST 的绝对值大于 NDVI 和 NDBSI，表明 WET 和 LST 对 RSEI 的影响更为显著。综上，PC1 能合理、客观地整合生态因子信息并反映其生态意义，基于 PC1 构建 RSEI 可有效表征辽宁省生态环境质量。

Table 4. Results of the first principal component analysis and contribution rate for each year
表 4. 各年份第一主成分分析结果及贡献率

年份	生态指标				特征值	贡献度
	NDVI	WET	LST	NDBSI		
2000 年	0.504	0.551	-0.615	-0.255	0.048	72.68%
2001 年	0.511	0.46	-0.598	-0.411	0.062	71.55%
2002 年	0.473	0.49	-0.52	-0.514	0.057	74.00%
2003 年	0.545	0.415	-0.491	-0.536	0.055	77.99%
2004 年	0.441	0.561	-0.523	-0.464	0.044	73.51%
2005 年	0.544	0.48	-0.531	-0.436	0.065	72.28%
2006 年	0.492	0.469	-0.55	-0.484	0.063	73.80%
2007 年	0.602	0.52	-0.49	-0.355	0.057	76.65%
2008 年	0.498	0.496	-0.626	-0.337	0.048	75.02%
2009 年	0.55	0.493	-0.509	-0.44	0.063	77.09%
2010 年	0.591	0.506	-0.494	-0.384	0.052	72.39%
2011 年	0.497	0.442	-0.529	-0.525	0.073	75.81%
2012 年	0.571	0.477	-0.404	-0.529	0.037	72.25%
2013 年	0.521	0.422	-0.465	-0.576	0.054	80.63%
2014 年	0.559	0.501	-0.367	-0.546	0.055	76.57%
2015 年	0.652	0.583	-0.304	-0.375	0.046	77.17%
2016 年	0.489	0.483	-0.459	-0.56	0.047	71.13%
2017 年	0.569	0.475	-0.483	-0.464	0.043	77.17%
2018 年	0.553	0.469	-0.376	-0.574	0.043	78.02%
2019 年	0.531	0.418	-0.467	-0.567	0.067	77.51%
2020 年	0.537	0.55	-0.226	-0.55	0.033	76.91%
2021 年	0.617	0.408	-0.174	-0.646	0.034	75.49%
2022 年	0.529	0.444	-0.554	-0.464	0.053	74.63%
2023 年	0.568	0.449	-0.45	-0.521	0.044	73.63%
均值	0.517	0.462	-0.448	-0.460	0.049	72.16%

4.2. 辽宁省生态环境质量动态变化分析

4.2.1. 辽宁省生态环境质量空间分布格局

根据辽宁省生态环境质量等级空间分布图(图 2)可知,辽宁省 2000~2023 年生态环境质量空间分布格局呈现出明显的时空演变特征,其总体格局可概括为“东西优,中部差”且这一格局在观察期内具有一定的稳定性,但也发生了局部变化。生态环境质量的高值区始终稳定分布于辽东山地丘陵区 and 辽西丘陵山地部分地区。这些区域森林覆盖率高,人类活动干扰相对较弱,是全省重要的生态屏障。相反,中部的辽河平原是全省的经济和人口核心区,涵盖了沈阳、鞍山西部、辽阳、铁岭、盘锦等城市,城市化、工业化程度高,农业活动密集,因此形成了连片的生态环境质量较低值区。在渤海和黄海沿岸,生态环境质量呈现出与海岸线平行的条带状分布特征。大连等部分沿海地区由于城市和港口建设,生态质量等级较低;而部分自然岸线及滨海湿地区域则表现为中等或良好等级。

2000 年至 2023 年间, 辽宁省生态环境质量空间分异显著, 受自然地理本底和经济社会发展格局的双重制约。未来, 区域协调发展、生态保护修复政策的精准实施将是优化全省生态环境空间格局、推动中部地区生态质量改善的关键。

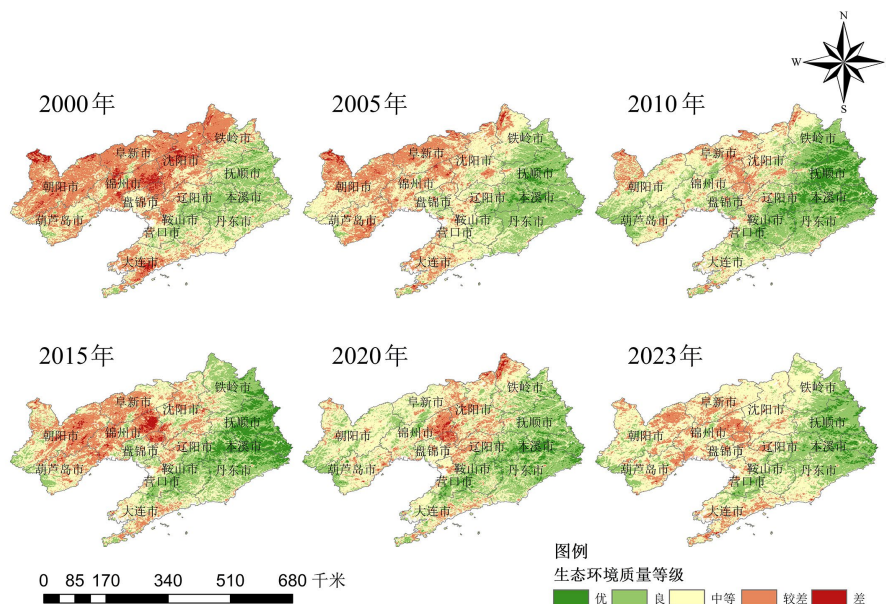


Figure 2. Spatial distribution of ecological environment quality levels from 2000 to 2023
图 2. 2000~2023 各年份生态环境质量等级空间分布图

4.2.2. 辽宁省生态环境质量时间变化特征

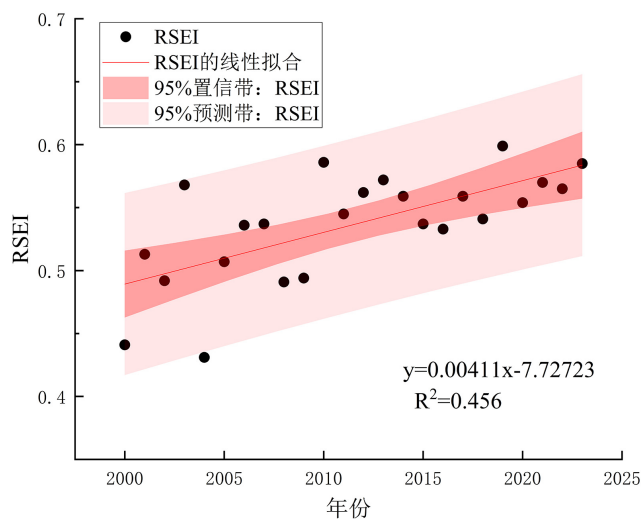


Figure 3. Temporal changes in ecological environment quality in Liaoning Province
图 3. 辽宁省生态环境质量时间变化

通过对 2000~2023 年辽宁省生态环境质量均值进行统计分析, 并基于线性回归模型对其变化趋势进行拟合, 结果如图 3 所示。辽宁省生态环境质量呈现缓慢上升趋势。决定系数 $R^2 = 0.456$, 说明 RSEI 均值在增长的同时存在一定波动性。从图中可以看出, RSEI 均值在研究期内总体介于 0.4 至 0.6 之间, 2004

年最低，为 0.431，2019 年最高，为 0.60。年增长率约为 0.00411，95%置信区间和预测区间显示出生态环境质量变化存在一定不确定性，但整体趋势仍保持向好发展态势。综上，2000~2023 年间，辽宁省生态环境质量总体稳定且呈现逐步改善趋势，但伴随一定程度的年际波动，表明其生态系统在长期演变过程中既具有恢复性，也受短期扰动因素影响。

4.2.3. 辽宁省生态环境趋势演化与未来预测

辽宁省 2000~2023 年 RSEI 变化呈现明显的空间异质性，Sen-MK 趋势(图 4)显示西部地区和城市周边存在显著退化趋势，而东部山区则表现为极显著改善，这一空间分异主要源于人类活动强度与生态保护政策的差异：西部城市化、工业化导致生态压力增大，而东部山区则受益于天然植被保护与生态工程实施。Hurst 指数进一步表明大部分区域($H > 0.5$)具有强持续性，说明现有趋势未来很可能延续，退化区域需优先治理，改善区域则应巩固生态成果。反持续性区域($H < 0.5$)需重点关注突发干扰因素，可能会引发的生态转折风险。

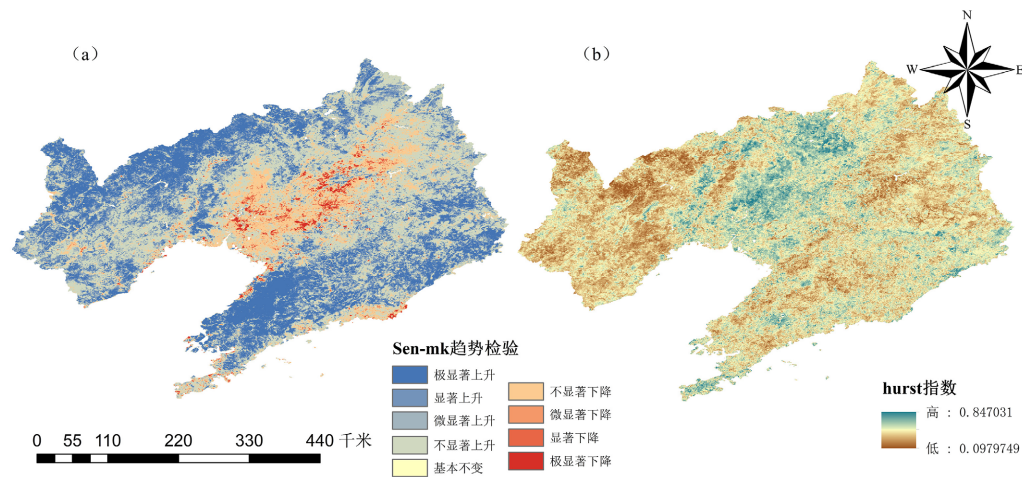


Figure 4. SEN-MK trend and Hurst index of RSEI in Liaoning Province
图 4. 辽宁省 RSEI 的 SEN-MK 趋势及 Hurst 指数图

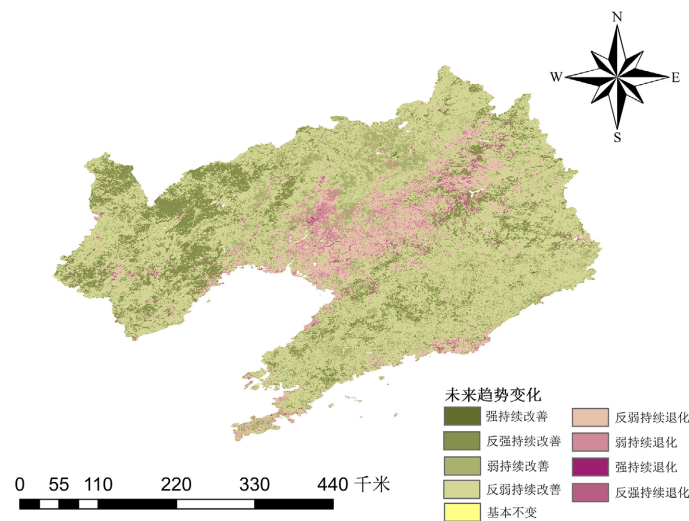


Figure 5. Future trends of RSEI in Liaoning Province
图 5. 辽宁省 RSEI 的未来趋势变化图

根据 Sen-MK 趋势和 Hurst 指数的综合分析算出辽宁省未来变化趋势(图 5), 辽宁省未来 RSEI 变化呈现明显的空间分异特征: 东部山区表现为强持续改善趋势, 这主要得益于该区域天然植被覆盖度高、生态保护政策持续实施以及人类活动干扰较小; 而西部城市群和工矿区域则呈现强持续退化趋势, 原因是城市化扩张、工业污染和土地利用强度大导致生态压力持续累积。反持续改善类型(即未来可能转向退化)主要集中在部分生态本底脆弱区, 暗示这些区域的生态改善可能因气候变化或政策波动而不可维持; 反持续退化类型(即未来可能转向改善)则出现在局部治理试点区域, 反映生态修复措施初步见效但尚未形成稳定趋势。

总体而言, 辽宁省未来生态质量变化呈现“东西优, 中部劣”的格局, 持续性趋势占主导说明历史驱动因素将继续影响未来生态演变, 需针对不同区域类型实施差异化生态管理策略。

4.3. 辽宁省生态环境质量驱动力分析

4.3.1. 驱动力因子构建与分区尺度优化

为了系统探究影响辽宁省生态环境质量空间分异的主要驱动因素, 本文采用最优参数地理探测器方法, 对各因子的分级方法与分级数进行优化选择。研究尝试了自然断点法(natural)、相等间隔分类(equal)、分位数分类(quantile)、几何间断分类(geometric)和标准差分类(sd)共 5 种分类方法, 并在 4~10 个分类等级间进行动态筛选, 以 q 值最大为标准确定各因子的最优分类方案(图 6)。将辽宁省区域划分为 100×100 的空间渔网单元, 实现驱动因子与 RSEI 因变量的匹配。

其中 X1~X8 分别为 DEM、年均温、年总降水、潜在蒸散发、人口密度、夜间灯光、GDP 和 PM2.5, X9 为土地利用类型, 无需再进一步分类。2023 年的优化结果表明, DEM 适用于 9 个区间的几何间断分类, 年均温适用于 10 个区间的标准差分类, 年总降水适用于 9 个区间的标准差分类, 潜在蒸散发适用于 7 个区间的标准差分类, 人口和夜间灯光数据适用于 10 个区间的几何间断分类, GDP 数据适用于 10 个区间的分位数分类, PM2.5 适用于 8 个区间的标准差分类。综上, 采用针对性的最优参数地理探测器方法, 能够更科学地揭示各驱动因子对辽宁省生态环境质量空间分异的实际解释力。在此基础上, 进一步开展单因子探测与交互作用探测, 系统评估自然与社会经济因子对辽宁省生态环境质量空间分异的独立与协同驱动机制。

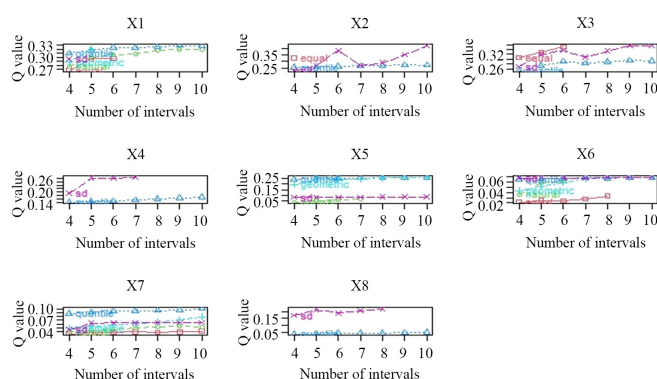


Figure 6. Classification method of optimal geographic detectors in Liaoning Province in 2023

图 6. 2023 年辽宁省最优地理探测器分类方法

4.3.2. 单因子探测分析

根据 2000~2023 年辽宁省 RSEI 单因子探测结果(表 5), 各驱动因子对生态环境质量空间分异的解释力(q 值)存在明显差异, 且随时间呈现动态变化。土地利用类型的解释力最强(年均 $q = 0.401$), 表明土地

利用变化是辽宁省 RSEI 空间分异的主导因素。年总降水和年均温分别位列第二和第三(年均 $q=0.369$ 和 0.290)，说明自然气候因子对生态质量格局也具有重要影响。DEM、PM2.5 和潜在蒸散发属于中等解释力因子(年均 q 值 $0.225\sim0.272$)，反映地形和大气环境的作用较为稳定。社会经济因子中，人口密度、GDP 和夜间灯光的解释力普遍较低(年均 q 值 $0.033\sim0.220$)，表明人类活动因子的独立作用相对有限，但值得注意的是，夜间灯光和 GDP 的 q 值在 2023 年较 2000 年有明显上升，表明城市化与经济活动对生态空间分异的影响正在逐渐增强。从时间变化来看，多数自然因子(如降水、潜在蒸散发)的解释力在近年有所下降，而 PM2.5 和 DEM 等因素在 2020 年显著上升，可能与该时期极端气候事件或污染排放变化有关。整体上，自然因子的驱动作用高于社会经济因子，但人类活动因子的影响力呈上升趋势，说明辽宁省生态环境质量的形成是自然基础与人类活动共同作用的结果。

Table 5. Single factor detection results from 2000 to 2023
表 5. 2000~2023 年单因子探测结果

	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年	均值	排序
DEM	0.230	0.163	0.273	0.234	0.353	0.329	0.225	6
年均温	0.265	0.368	0.312	0.424	0.240	0.423	0.290	3
年总降水	0.458	0.536	0.438	0.484	0.312	0.356	0.369	2
潜在蒸散发	0.337	0.354	0.308	0.378	0.246	0.286	0.272	4
人口密度	0.303	0.253	0.239	0.272	0.218	0.259	0.220	7
夜间灯光	0.005	0.027	0.042	0.029	0.059	0.069	0.033	9
GDP	0.071	0.043	0.074	0.076	0.108	0.100	0.067	8
PM2.5	0.252	0.196	0.315	0.169	0.439	0.220	0.227	5
土地利用类型	0.512	0.439	0.490	0.426	0.486	0.456	0.401	1

4.3.3. 交互作用探测分析

根据 2000~2023 年辽宁省的土地利用类型转移矩阵(表 6)和 RSEI 驱动因子的交互作用探测结果(图 7)，各因子组合对生态环境质量空间分异的解释力(q 值)均表现出明显的双因子增强效应，且交互作用强度普遍高于单因子作用，表明辽宁省生态环境质量的空间分异是自然因素与人类活动复杂耦合的结果。土地利用类型与其他因子的交互作用解释力最为突出，其与年总降水的交互 q 值在所有年份均保持最高(2000 年 0.641 、2015 年 0.612 、2023 年 0.564)，反映出下垫面性质与水分条件的协同效应是驱动生态格局的核心机制。

根据 2000~2023 年土地利用转移矩阵可以看出，农田转为城镇建设用地是这一时期最主要的土地利用类型变化方式。结合生态环境质量图表分析，该类转变所对应的区域恰恰处于生态环境质量较低的水平。因此可以推断，在过去 24 年间，以农田转为城镇建设用地为主导的土地利用变化过程，是造成区域生态环境质量下降的重要原因。交互探测结果表明年总降水与年均温、DEM 与降水也表现出较强的增强作用，说明水热组合和地形 - 气候耦合对生态质量分布具有重要控制意义。人类活动因子中，PM2.5 与土地利用、GDP 与人口密度的交互作用显著，且 2015 年后 q 值呈上升趋势，表明环境污染与经济人口集聚的叠加效应日益增强。值得注意的是，自然因子与人类因子间的交互(如降水 $\cap$ GDP、DEM $\cap$ 夜间灯光)也多表现为非线性增强，凸显人类活动在自然本底上的改造效应进一步放大了生态效应的空间异质性。

在 2000~2023 年间，人类活动相关交互作用的 q 值明显上升，说明社会经济因子对生态质量格局的驱动作用持续强化。这一结果印证了辽宁省生态环境质量演变受自然基础与人类活动共同制约，且协同

效应远大于单因子的独立影响。

Table 6. Land use transition matrix from 2000 to 2023
表 6. 2000~2023 年土地利用转移矩阵

面积(km ²)	农田	森林	灌木	草地	水域	裸地	城镇	湿地
农田	6606.053	249.014	0.039	87.087	46.921	0.341	367.895	0.001
森林	213.708	4794.022	0.106	6.868	0.530	0.021	24.631	0.000
灌木	0.001	0.022	0.012	0.041	0.000	0.014	0.018	0.000
草地	224.607	194.629	0.012	416.084	0.669	0.001	0.871	24.051
水域	18.744	0.894	0.001	0.181	139.695	0.002	0.264	43.333
裸地	1.590	0.010	0.501	0.499	0.007	0.497	2.930	0.000
城镇	5.770	0.120	0.002	0.022	25.558	0.074	1090.544	0.000
湿地	0.009	0.002	0.001	0.001	0.021	0.000	0.000	0.000

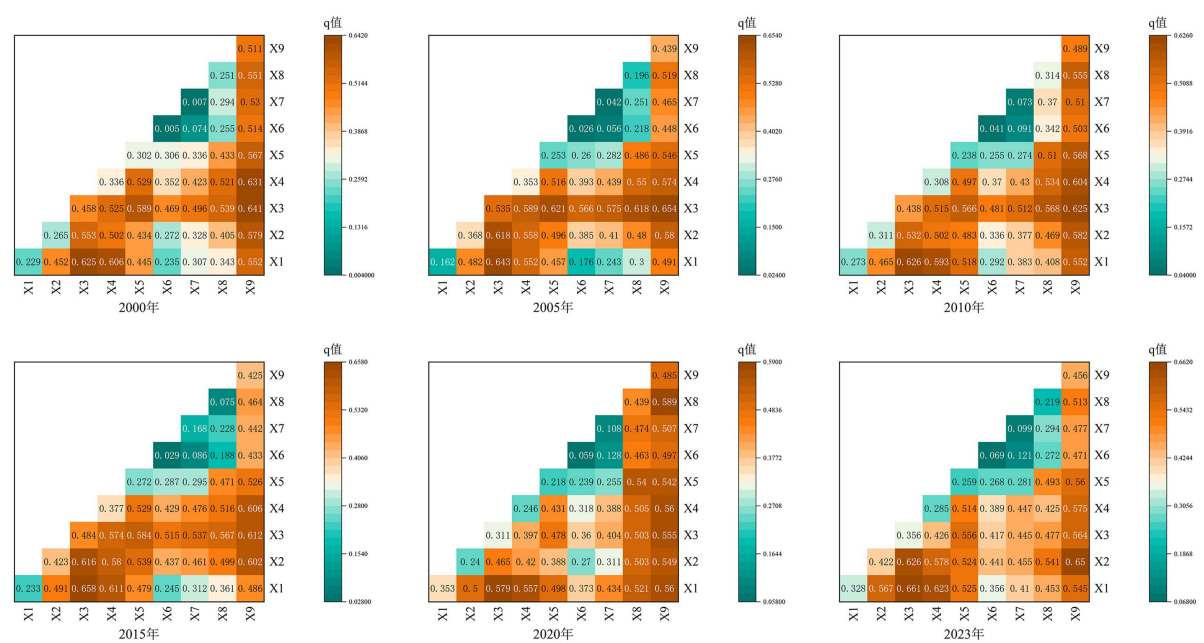


Figure 7. Interaction detection results from 2000 to 2023
图 7. 2000~2023 年交互探测结果

5. 讨论

5.1. 辽宁省生态环境质量时空特征分析

辽宁省生态环境质量在 2000~2023 年间呈现出“东西优，中部差”的空间分布特征，其演变是自然基础与人类活动多重驱动因素共同作用的结果。自然地理条件是生态质量格局形成的基础。辽东山区作为辽宁省的生态屏障，得益于较高的森林覆盖率和相对充沛的降水，RSEI 呈现持续改善趋势，这与该地区的地形起伏和植被保护政策密切相关[16]。研究表明，年总降水与土地利用的交互作用 q 值长期保持在 0.6 以上，说明水热条件与植被类型的耦合对生态质量具有决定性作用，特别是在千山山脉地区，地形雨与森林生态系统的协同效应显著提升了生态质量。此外，潜在蒸散发与气温的交互也显著影响地表生态

过程,辽东湾沿岸地区因蒸散强烈而生态脆弱性较高[17]。人类活动是导致生态质量空间分异及局部退化的关键驱动因素。辽中南城市群地区(沈阳、大连、鞍山等)RSEI 呈现显著下降趋势,这与快速城市化过程中的建设用地扩张直接相关。2000~2023 年间,该地区建成区面积增加了 2.3 倍,导致生态空间被大量占用[18]。PM2.5 浓度高值区与工业聚集区高度吻合,本溪、鞍山等重工业城市周边区域 PM2.5 与土地利用的交互 q 值达 0.55 以上,反映出工业污染与土地利用变化的协同负面影响。值得注意的是,夜间灯光数据与 GDP 的交互作用解释力从 2000 年的 0.007 上升至 2023 年的 0.121,表明经济增长与能源消耗、城市扩张的协同效应对生态环境的压力持续增大[19]。重大生态工程的实施对局部区域生态改善发挥了积极作用。“三北”防护林工程、辽宁省综合治理等项目的推进,使辽西北科尔沁沙地南缘地区的 RSEI 显著提升,林地覆盖率提高了 15.8%。大连、营口等沿海地区的滨海湿地修复工程也使海岸带生态质量得到改善,体现了政策干预的积极效果[20]。因子交互作用分析进一步揭示了驱动机制的时空变化。自然因子与人类活动的非线性增强效应(如降水 $\cap$ GDP、DEM $\cap$ 夜间灯光)表明人类活动在自然本底上的叠加放大作用日益显著。在辽河平原农业区,灌溉农业与气候变化共同影响土壤湿度和盐碱化程度,加剧了生态系统的脆弱性[21];而在工矿集中区,地形条件与污染排放交互导致污染物滞留与生态退化。2015 年后,人类活动相关交互作用的解释力普遍提升,说明社会经济因素对生态环境的影响正逐渐超越自然因子的基础作用。

5.2. 管理建议

基于辽宁省生态环境质量“东西优,中部差”的空间分布特征,建议构建“东部保育、中部防治、北部修复”的分区管控体系:在辽东山区实施最严格的生态保护措施,强化水源涵养和生物多样性功能;在辽中南城市群聚焦产业绿色升级与污染协同治理,严格控制城市无序扩张,增加蓝绿空间以缓解热岛效应;在辽西北地区持续推进防沙治沙和水土保持工程。同时,应强化关键驱动因子调控,通过优化土地利用格局、实施 PM2.5 与臭氧协同控制、保障流域生态用水等措施,切断生态退化传导路径。完善基于 RSEI 改善程度的生态补偿与政绩考核制度,并推动公众参与和社会监督,形成全域生态保护的长效机制,从而实现从被动治理向主动规划、从单一要素管控向系统治理的转变。

5.3. 局限性

本文在构建遥感生态指数(RSEI)时,主要基于绿度、湿度、干度和热度四个核心指标,该模型虽能有效反映区域生态环境的整体状况,但在指标体系的全面性上仍存在一定局限,可能导致对复杂生态系统的解释力度不足。后续研究可系统筛选并引入更多与区域生态环境质量密切相关的指标,构建更综合、更符合实际生态环境状况的增强型 RSEI 模型,从而提升评价结果的准确性与适用性。此外,在驱动力分析过程中,本文采用最优参数地理探测器对各因子的分类方法与分类数目进行了充分优化,显著提高了因子解释力的可靠性。然而,该方法在空间尺度优化方面仍存在一定局限,未能深入探讨不同空间粒度或幅度对探测结果的影响。后续研究可进一步引入多尺度分析框架,尝试在不同栅格尺度或行政区单元下进行地理探测,系统检验驱动因子解释力的尺度效应及稳定性,从而揭示驱动机制随尺度变化的规律,增强研究结论的普适性与空间指导意义。

6. 结论

本研究基于遥感生态指数(RSEI),综合运用 Sen-MK 趋势检验、Hurst 指数、地理探测器等方法,对辽宁省 2000~2023 年生态环境质量的时空演变特征及驱动机制进行了系统分析,主要结论如下:

(1) 辽宁省 RSEI 均值从 2000 年的 0.441 上升至 2023 年的 0.575,整体生态环境质量呈显著改善趋势,但空间分异明显,呈现“东西优,中部差”的格局。辽东山区因植被覆盖度高、人类干扰弱而成为稳

定的生态屏障,生态环境质量持续改善;而辽中南城市群及工矿集中区受高强度人类活动影响,生态环境质量面临较大压力,局部区域出现退化。

(2) Hurst 指数表明大部分区域($H > 0.5$)的变化趋势具有较强的持续性。辽东山区未来将继续保持改善态势,而辽中南城市群的部分地区则面临持续退化的风险,生态保护与修复工作需具有前瞻性和针对性。

(3) 地理探测器结果显示,自然因素是生态格局的基础框架,其中土地利用类型的 q 值均值 0.401,是决定 RSEI 空间分异的最主导因子。年总降水和年均温等气候因子也具有重要解释力。人类活动因子的独立解释力相对较弱,但其影响持续增强,尤其夜间灯光、GDP 等因子的影响力在 2023 年显著上升。因子交互作用探测进一步揭示,土地利用与降水的交互作用最强(q 值多年超 0.6),凸显了自然本底与人类活动耦合放大的协同效应是驱动生态质量空间分异的深层机制。

综上所述,辽宁省生态环境质量的演变是自然基础与人类活动复杂交互的结果,且人类活动的影响强度日益凸显。未来,必须坚持系统治理理念,实施分区分类精准管控,并通过优化国土空间格局、调控关键驱动因子、创新生态补偿与监管机制,方能实现区域生态环境的高水平保护和经济社会的高质量可持续发展。

参考文献

- [1] Zhang, G.Z. 中国农牧交错带 2000-2019 年植被覆盖变化及驱动因素分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2023.
- [2] 徐信. 基于 RSEI 模型的生态环境质量评价及驱动力分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- [3] Anyamba, A. and Tucker, C.J. (2005) Analysis of Sahelian Vegetation Dynamics Using NOAA-AVHRR NDVI Data from 1981-2003. *Journal of Arid Environments*, **63**, 596-614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>
- [4] Sanchez, G.M., Nejadhashemi, A.P., Zhang, Z., Woznicki, S.A., Habron, G., Marquart-Pyatt, S., *et al.* (2014) Development of a Socio-Ecological Environmental Justice Model for Watershed-Based Management. *Journal of Hydrology*, **518**, 162-177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.014>
- [5] 中华人民共和国生态环境部. HJ/T 192-2006 生态环境状况评价技术规范(试行) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [6] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889-897.
- [7] 施智勇, 胡晓婷, 谢慧黎, 等. 基于 RSEI 的生态环境质量评价及驱动力分析——以闽江流域(福州段)为例[J]. 测绘通报, 2023(2): 28-33.
- [8] 汤从沧, 李巧, 陶洪飞, 等. 基于改进遥感生态指数模型的塔里木河流域生态环境质量评价[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4485-4498.
- [9] 任金铜, 周伟, 王杰, 等. 基于 RSEI 和 CLCD 草海国家级自然保护区生态质量变化分析[J]. 西部人居环境学刊, 2025, 40(4): 59-65.
- [10] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1154-1165.
- [11] Doad, A.P., Das, S., Khadse, S.P., Khare, Y.D., Pande, C.B. and Varade, A.M. (2022) An Assessment of Geo-Environmental Quality Using Physical Data and a Geospatial Approach: An Example for a Watershed in Central India. *Environmental Earth Sciences*, **81**, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10480-z>
- [12] Ersi, C., Sudu, B., Song, Z., Bao, Y., Wei, S., Zhang, J., *et al.* (2024) The Potential of NIRvP in Estimating Evapotranspiration. *Remote Sensing of Environment*, **315**, Article 114405. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114405>
- [13] Zhao, N., Liu, Y., Cao, G., Samson, E.L. and Zhang, J. (2017) Forecasting China's GDP at the Pixel Level Using Nighttime Lights Time Series and Population Images. *GIScience & Remote Sensing*, **54**, 407-425. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1276705>
- [14] 冯荣荣, 张凯莉, 韩佳宁, 等. 沔河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 860-871.
- [15] 辛会超, 郭玮, 王贺封. 基于 GEE 和 RSEI 的京津冀地区生态环境质量时序动态评估[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(2): 106-114.

- [16] 王叶红. 自然保护区生态监测地面站建设的前景探析——以辽宁老秃顶子国家级自然保护区为例[J]. 中国林副特产, 2019(4): 79-81.
- [17] 王昊. 西辽宁省 FVC 及植被 NPP 时空动态演变研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [18] 赵红娟. 辽宁省“人口-经济-生态环境”协调发展的研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [19] 牛晓姝, 董继文. 贸易、环境污染与经济增长——基于东北老工业基地振兴的一个内生经济增长模型[J]. 工业技术经济, 2008(4): 89-94.
- [20] 蔡爱军, 马随随. 中国滨海湿地蓝色碳汇研究进展[J]. 湿地科学, 2022, 20(6): 846-851.
- [21] 王本龙. 西辽河平原盐碱地土壤改良策略研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2024.