

基于 GEE 的大连市生态环境质量 时空格局及其驱动力分析

姜俊超^{1,2}, 赵格格^{1,2}, 吕乐婷^{1,2}

(1. 辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029;

2. 辽宁师范大学 大连市农业气象灾害风险防控重点实验室, 辽宁 大连 116029)

摘要: [目的] 揭示大连市生态环境时空变化特征与驱动机制, 为区域生态保护与高质量发展提供科学依据。[方法] 基于 Google Earth Engine(GEE)平台构建大连市遥感生态指数(RSEI), 采用 Sen-MK 趋势分析法揭示 2000—2023 年大连市生态环境质量的时空演变特征, 并结合 Hurst 指数对生态环境质量的未来短期演变趋势进行预测。进一步采用最优参数地理探测器识别其主要驱动因子及其交互作用。[结果] ①2000—2023 年大连市生态环境质量整体呈现波动上升的趋势, 空间上具有显著的异质性, 呈“北优南差、城差郊优”的分布格局。②大连市历史时期的生态环境改善幅度大于退化幅度, 未来短期内仍持续保持改善的趋势, 但局部区域具有趋势反转风险, 需加强生态修复与管控。③单因子探测结果表明, 土地利用类型为影响生态环境质量的主导因子, 高程、坡度次之, 且社会经济因子的驱动作用随时间的推移持续增强; 交互作用探测结果显示, 土地利用与年降水量的交互作用在各个时期均表现为最强驱动组合, 揭示了自然过程与人类活动共同作用下的生态演变机制。[结论] 2000—2023 年大连市的生态环境质量总体改善, 土地利用是其关键驱动因子。未来需加强对市中心及沿海地区的生态格局优化与稳定性维护, 在推进经济建设的同时, 统筹生态环境保护和修复工程, 促进区域经济与生态系统协调发展。

关键词: 生态环境质量; Google Earth Engine (GEE); 遥感生态指数; 最优参数地理探测器; 大连市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0355-11

中图分类号: X821, X171.1

文献参数: 姜俊超, 赵格格, 吕乐婷. 基于 GEE 的大连市生态环境质量时空格局及其驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 355-365. Jiang Junchao, Zhao Gege, Lyu Leting. Spatiotemporal patterns and driving factors of ecological environment quality in Dalian City based on GEE [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 355-365.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.026

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.026

Spatiotemporal patterns and driving factors of ecological environment quality in Dalian City based on GEE

Jiang Junchao^{1,2}, Zhao Gege^{1,2}, Lyu Leting^{1,2}

(1. School of Geographic Sciences, Liaoning Normal University, Dalian,

Liaoning 116029, China; 2. Dalian Key Laboratory of Agro-Meteorological Disaster

Risk Prevention and Control, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: [Objectives] The spatiotemporal variation characteristics and driving mechanisms of ecological environment quality in Dalian City were revealed, in order to provide a scientific basis for regional ecological protection and high-quality development. [Methods] Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, the remote sensing ecological index (RSEI) of Dalian City was constructed. The Sen-MK trend analysis was employed to reveal the spatiotemporal evolution characteristics of ecological environment quality from 2000 to 2023, and the Hurst exponent was used to predict the future short-term evolution trends of ecological environment

收稿日期: 2025-07-19

修回日期: 2025-10-16

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 辽宁省教育厅项目“浑太河流域景观格局对非点源污染的影响机制研究”(LJ212510165028); 辽宁省经济社会发展研究课题(2025slslybkt-029); 辽宁省社会科学规划资助项目(L22AYJ010)

第一作者: 姜俊超(1976—), 女(汉族), 辽宁省丹东市人, 博士, 讲师, 主要从事区域生态安全和可持续发展研究。Email: jiangjunchao@lnnu.edu.cn.

通信作者: 吕乐婷(1984—), 女(满族), 辽宁省大连市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源与水生态评价工作。Email: lvleting@lnnu.edu.cn.

quality. Furthermore, the optimal parameters-based geodetector was employed to identify the main driving factors and their interactions. [Results] ① From 2000 to 2023, the ecological environment quality of Dalian City showed an overall fluctuating upward trend, with significant spatial heterogeneity, showing a distribution pattern of “better in the north and worse in the south; worse in urban areas and better in suburbs”. ② The magnitude of ecological environment improvement in Dalian City during the historical period was greater than that of degradation, and the improving trend was expected to continue in the short term. However, certain local areas were at risk of trend reversal, indicating a need for strengthened ecological restoration and management. ③ The single-factor detection results showed that land use type was the dominant factor affecting ecological environment quality, followed by elevation and slope, and the driving effect of socioeconomic factors continued to increase over time. The interaction detection results showed that the interaction between land use type and annual precipitation was the strongest driving combination across all periods, revealing the ecological evolution mechanisms under the combined action of natural processes and human activities. [Conclusion] From 2000 to 2023, the ecological environment quality of Dalian City generally improved, with land use identified as the key driving factor. In the future, it is necessary to strengthen the optimization and maintain the stability of ecological patterns in urban centers and coastal areas, coordinate ecological environmental protection and restoration projects while promoting economic development, and promote the coordinated development of the regional economy and ecosystem.

Keywords: ecological environment quality; Google Earth Engine (GEE); remote sensing ecological index (RSEI); optimal parameters-based geodetector; Dalian City

生态环境是自然环境与人类活动相互作用的结果,对人类生存和发展的自然及社会环境产生着深远影响。生态环境不仅是人类生产生活的基础,还是可持续发展的保障。城市作为人类活动最强烈,最频繁的地区,其生态环境质量对区域经济可持续发展至关重要。国际社会不断加强环境保护与治理工作,而及时评估生态环境质量的时空变化对于环境保护和实现可持续发展至关重要。2006年,中国环境保护部发布了《生态系统状况评价技术标准》,引入了一个由生物丰度、水网密度、植被覆盖和环境质量指标组成的生态指标(EI),并据此对中国的环境现状和发展趋势进行了年度综合评估。随着遥感技术的快速发展,陆地生态监测方面取得了显著进步,这些进步为区域生态环境质量的评估提供了新的技术基础。近些年来,国内外学者对生态环境质量的研究取得了显著进展,特别是自2013年起,徐涵秋^[1]提出的基于主成分分析的遥感生态指数(RSEI)因其更加客观、全面的结果和较强的适应性而被广泛采纳。RSEI在国内外的应用范围非常广泛。例如,何安良等^[2]利用RSEI对长沙市的城市生态环境进行了评价;崔亚君等^[3]研究了北京市2013—2020年生态环境质量的变化情况;Dirgantara等^[4]基于遥感生态指数对加拉璜区域环境质量进行时空评价。国内外学者在RSEI的计算方法上也进行了改进。例如,葛石冰等^[5]基于Landsat数据和Google Earth Engine平台,构建了天山北坡改进型的生态环境质量时空演变模型(ERSEI);赵嘉丽等^[6]引入盐度

指标构建了遥感生态指数(AWRSEI),以岱海流域为例探讨了其在干旱和半干旱区流域适用性;Halder S等^[7]比较了遥感生态指数(RSEI)和综合生态评价指标(CEEI)两种指标对12个城市中心(UCs)生态状况评价的有效性。RSEI不仅在生态环境监测中应用广泛,还与其他学科相结合。例如,基于夜间灯光数据、人口栅格数据和PM_{2.5}数据构建了遥感综合经济指数(RSCEI),用于反映社会经济发展状况^[8]。综上所述,不同学者利用Sentinel^[9], Landsat^[10]和MODIS^[11]等卫星数据产品对不同尺度范围内的生态环境质量评估,在遥感生态指数的后续分析中运用空间自相关^[12]、变异系数^[13]和Sen-MK^[14]等方法进行时空特征分析,采用线性相关分析^[15]、地理加权回归^[16]、地理探测器^[17]等方法对其驱动因子定量研究的方法都得到了广泛的应用。

辽宁省大连市是东北对外开放的龙头和窗口,城市化加速与人类活动加剧导致其面临热岛效应、水资源短缺,空气污染等环境问题。目前,有学者对大连市生态环境开展了相关研究,取得了较好的成果。例如,肖扬等^[18]通过InVEST模型探究土地利用变化对生态质量的影响。李源等^[19]分析土地利用变化对陆地生态系统服务价值与储碳的影响。韩增林等^[20]基于生态系统服务(食物供给、水源涵养)供需匹配与耦合协调进行生态管理分区并提出对应的管理措施。本文在已有研究的基础上,利用GEE平台监测大连市2000—2023年的生态环境质量,综合采用Theil-Sen趋势分析、Mann-Kendall检验、Hurst指

数及最优参数地理探测器等方法,深入研究大连市的 RSEI,旨在揭示其变化趋势、持续性特征及其驱动机制。结果可为理解大连市生态环境质量的历史演变提供科学依据,也为未来制定有效的环境保护政策和措施提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省大连市(38°43′—40°10′N, 120°58′—123°31′E)是中国北方重要的港口、工业、贸易、金融和旅游城市,东北对外开放的龙头和窗口。大连市地处辽东半岛最南端,东临黄海、西濒渤海,与山东半岛隔海相望。长白山系千山山脉余脉自北向南延伸入海,形成“一脊三阶”丘陵半岛的地理特征和山海相依的滨海风貌。大连市陆域面积约 $1.20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 岸线总长约 2 200 km。冬无严寒,夏无酷暑,四季分明,属具有海洋性特点的暖温带大陆性季风气候,年

平均气温 10.5 °C,年降水量 550~950 mm。市辖区划包括 7 区、2(县级)市和 1 县,总常住人口约 753.9 万,城市化率达到 82.93%。

1.2 数据来源及预处理

本研究收集 2000—2013 年 Landsat 5, 7 TM 和 2014—2023 年 Landsat 8OLI 遥感影像,空间分辨率 30 m,时间分辨率 16 d。考虑到大连市气候特征,选择 5—10 月范围内且云量 < 5%,质量较高的影像,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。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^[21-23],本研究选取了高程、坡度、年均温、年降水量、潜在蒸发量、PM_{2.5}浓度、GDP 总量、人口密度、夜间灯光指数、土地利用类型 10 个因子,用以系统探究自然以及社会经济因素对大连市生态环境质量的影响机制。数据来源及分辨率详见表 1。

表 1 研究数据来源

Table 1 Research data sources

数据名称	数据来源	网址	空间分辨率	时间分辨率
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	静态
年均温				
年总降水				
蒸发	国家地球系统科学数据中心	http://www.geodata.cn/main/	1 km	年度
夜间灯光				
PM _{2.5}	国家青藏高原科学数据中心	https://data.tpdc.ac.cn/	1 km	年度
人口	Landscan	https://landscan.orl.gov	1 km	年度
土地利用类型	地球系统科学数据	https://zenodo.org/records/12779975	30 m	年度
GDP	发表文献数据集计算得出	https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15481603.2016.1276705	1 km	年度

1.3 研究方法

1.3.1 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,该方法选取绿度、湿度、热度、干度作为构建 RSEI 的指标,并利用第一主成分(PC₁)构建 RSEI,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。计算公式为

$$RSEI_0 = PC_1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (1)$$

式中: f 代表主成分分析;PC₁代表第一主成分;NDVI代表绿度;WET代表湿度;LST代表热度;NDBSI代表干度。具体计算公式可参考文献[1]。

在完成 RSEI 构建所需的 4 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,将各个指标的值得放在[0~1],计算公式为

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

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}, I_{max}分别为第 *i* 个指标未归一化的最小值和最大值。并同样对 RSEI₀进行归一化处理,最终得到 RSEI 计算公式:

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0,\min}}{RSEI_{0,\max} - RSEI_{0,\min}} \quad (3)$$

式中： $RSEI_{0_{min}}$ 、 $RSEI_{0_{max}}$ 分别为目标年份归一化处理后的 RSEI 的最小值和最大值，RSEI 的取值范围为 $[0, 1]$ ，RSEI 值越接近 1 表明生态环境质量越好，反之越差。

1.3.2 RSEI 变化特征分析

采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall(MK)显著性检验相结合的方法来揭示大连市生态环境质量的变化特征。并结合 Hurst 持续性分析未来短期大连市生态环境质量的变化。①趋势性分析。Theil-Sen Median 趋势分析^[24]通过计算所有数据点对斜率的中位数，能够有效剔除异常值的干扰，揭示出生态环境质量在长时间尺度上真实、稳定的变化趋势。②显著性检验。Mann-Kendall^[24]检

验能够为非单调、非正态分布的数据提供可靠的显著性检验。Sen-MK 组合方法具有适用范围广，可解释性强的优点，能够有效识别生态环境质量随时间的变化趋势。根据趋势分析及显著性检验结果，将 RSEI 的变化趋势分为 5 类(表 2)。③持续性分析。Hurst 指数^[25]可以定量描述时间序列的可持续性，根据过去的时间序列变化趋势预测未来短期变化趋势。Hurst 指数 H 值的范围为 $[0, 1]$ 。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。RSEI 变化等级与持续性等级划分标准详见表 2。

表 2 遥感生态指数(RSEI)变化等级与持续性等级划分标准

Table 2 Classification criteria for remote sensing ecological index (RSEI) change level and persistence level

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
$-0.0005 \sim 0.0005$	$Z \leq 1.96$	稳定不变	0.5~1	稳定不变
	$Z \leq 1.96$	不显著退化	0~0.5	由退化变为未来改善
< -0.0005	$1.96 < Z$	显著退化	0.5~1	持续退化

注： $|Z|$ 为统计量检验，用于检验趋势的显著性，通过比较 $|Z|$ 值与临界值 1.96 来判断变化的显著性。

1.3.3 最优参数地理探测器

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^[26]，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。最优参数地理探测器则是对地理探测器的改进^[27]，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。本文通过 R 语言中的 GeoDetector(GD)包来实现模型的运作，相较于传统的地理探测器，最优参数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。

2 结果与分析

2.1 RSEI 主成分分析

基于 GEE 平台构建了大连市的遥感生态指数(RSEI)，通过耦合 NDVI，WET，LST 和 NDBSI 这 4 个生态因子反映大连市生态环境质量。根据主成分分析结果可知(表 3)，各年份 PC_1 的贡献率均超过

70%，多年均值为 76.60%。这表明 PC_1 有效整合 4 个指标大部分信息。此外，NDVI，WET 在 PC_1 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 PC_1 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。该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，NDBSI 和 NDVI 的绝对值大于 WET 和 LST，表明 NDBSI 和 NDVI 对 RSEI 的影响更为显著。综上所述， PC_1 能合理、客观地整合生态因子信息并反映其生态意义，基于 PC_1 构建 RSEI 可有效表征大连市生态环境质量。

2.2 大连市生态环境质量时空分布特征

2000—2023 年大连市生态环境质量呈现缓慢上升趋势(图 1)。决定系数 $R^2=0.21467$ ，说明 RSEI 均值在增长的同时存在一定波动性。从图 1 可以看出，RSEI 均值在研究期内总体介于 0.4~0.7，2000 年最低，为 0.437，2021 年最高，为 0.696。年增长率约为 0.00431，95% 置信区间显示出生态环境质量变化存在不确定性，但整体趋势仍保持向好发展态势。

表 3 大连市各年份第一主成分分析结果

Table 3 Analysis results of first principal component for different years in Dalian City

生态指标	第一主成分各指标载荷及贡献率						
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2023年	平均值
NDVI(绿度)	0.479	0.593	0.553	0.494	0.488	0.522	0.521
WET(湿度)	0.465	0.458	0.418	0.524	0.519	0.499	0.481
LST(热度)	-0.471	-0.133	-0.389	-0.41	-0.406	-0.400	-0.368
NDBSI(干度)	-0.616	-0.648	-0.607	-0.559	-0.573	-0.564	-0.595
特征值	0.120	0.108	0.100	0.173	0.166	0.160	0.138
贡献率	71.17	70.90	70.60	84.23	79.85	82.86	76.60

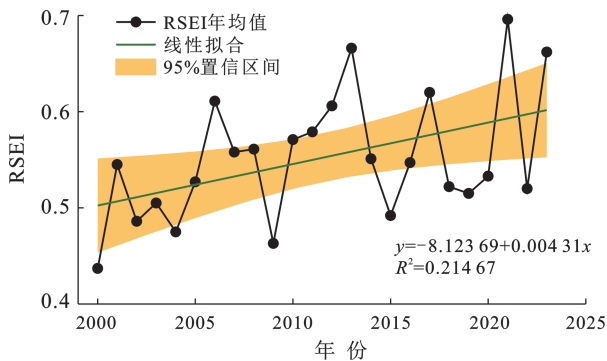


图 1 大连市 2000—2023 年遥感生态指数 (RSEI) 均值变化
Fig.1 Variations in mean remote sensing ecological index (RSEI) in Dalian City from 2000 to 2023

根据《生态环境评价技术规范(HJ 192—2015)》中划分方法,以 0.2 为间隔将大连市 RSEI 划分为 5 个等级,即:优(0.8~1],良(0.6~0.8],中等(0.4~0.6],较差(0.2~0.4]和差[0.0~0.2]。大连市生态环境整体处于中等水平,并呈现出显著的地理差异(图 2)。

2000 年,大连市生态环境质量整体水平偏低,差与较差等级区域面积比例分别为 21.74% 和 26.33%,广泛分布于主城区及沿海区域;优良等级区域面积约为 12.76% 和 15.62%,主要分布在北部丘陵林区。2023 年,生态环境质量恢复明显,良与优等级区域持续扩大,面积比例分别为 43.63% 和 23.12%,相较于 2000 年的面积所占比例共增加了 38.37%。北部山地及森林覆盖区生态质量持续维持在较高水平;差与较差等级区域面积分别约为 11.27% 和 8.87%,相较于 2000 年的面积所占比例共减少了 27.93%,主城区及部分沿海工业区生态质量仍以差和较差等级为主,空间分布零散而分布范围相对稳定。综上所述,大连市的生态环境质量在 24 a 间经历了“整体稳步提升—中期波动—持续恢复”的演化过程,空间格局稳定表现为“北优南差,城差郊优”的典型特征,且城市核心区与北部山区的生态质量差异在长期城市化进程中逐渐拉大。

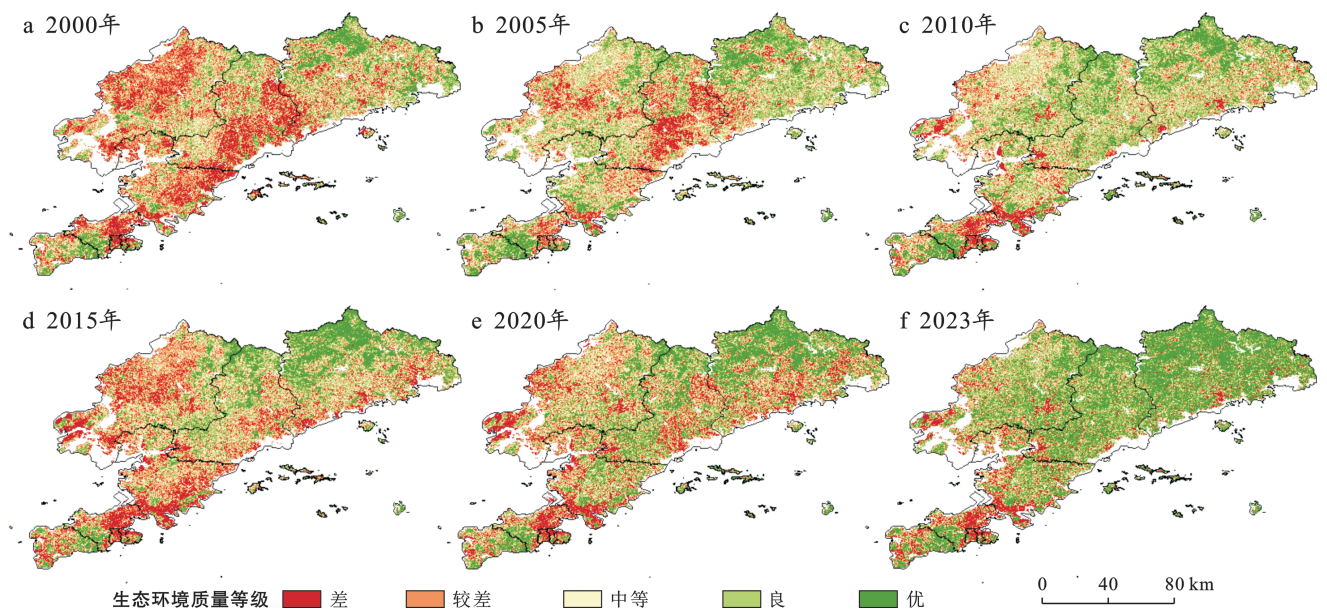


图 2 大连市 2000—2023 年代表年份生态环境质量等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological environment quality levels in Dalian City in representative years from 2000 to 2023

2.3 大连市生态环境趋势演化与未来趋势

为进一步揭示大连市生态环境质量的变化趋势与未来演化特征,本文综合采用Sen-MK趋势分析与Hurst指数方法,对2000—2023年的变化过程与未来趋势进行了系统评估。

(1) 历史变化趋势。Sen-MK趋势分析结果表明,2000—2023年大连市生态环境质量整体呈改善趋势(图3a)。改善区域主要集中于北部山地丘陵地区,形成大面积连续分布;退化区域相对较少,主要分布在沿海地区与城市主城区,呈点状与面状交错格局。改善区域(显著改善与不显著改善合计)面积占比为46.84%;稳定不变区域面积为29.37%;退化区域(显著退化与不显著退化合计)面积为23.79%。整体上,改善区域面积明显大于退化区域,反映出过去20 a内大连市生态环境质量持续恢复与提升。

(2) 变化持续性特征。Hurst指数分析揭示了生态环境质量变化过程中的持续性与稳定性(图3b)。

结果显示,Hurst指数均值为0.44,标准差为0.0815,其中 $Hurst < 0.5$ 区域面积占比为76.25%,表明大部分区域存在反向持续性特征,即未来变化趋势可能与过去不同; $Hurst > 0.5$ 区域面积为23.70%,呈现出一定程度的趋势延续性。整体而言,生态系统表现出一定波动性与不确定性,局部区域具有趋势反转风险,但整体系统韧性较强。

(3) 未来变化趋势。通过Sen-MK与Hurst指数联合分析,对未来短期生态环境质量变化趋势进行分析(图3c)。结果表明,未来大连市生态环境质量仍将以持续改善为主导:其中持续改善区域面积占比为36.74%;未来改善区域面积为17.69%;稳定不变区域面积为29.38%;未来退化区域面积10.10%;持续退化区域面积6.09%。综上所述,改善区域总面积远大于退化区域,表明未来整体生态环境质量仍将延续良性演化态势,但部分退化与波动区域仍需加强生态修复与管控干预。

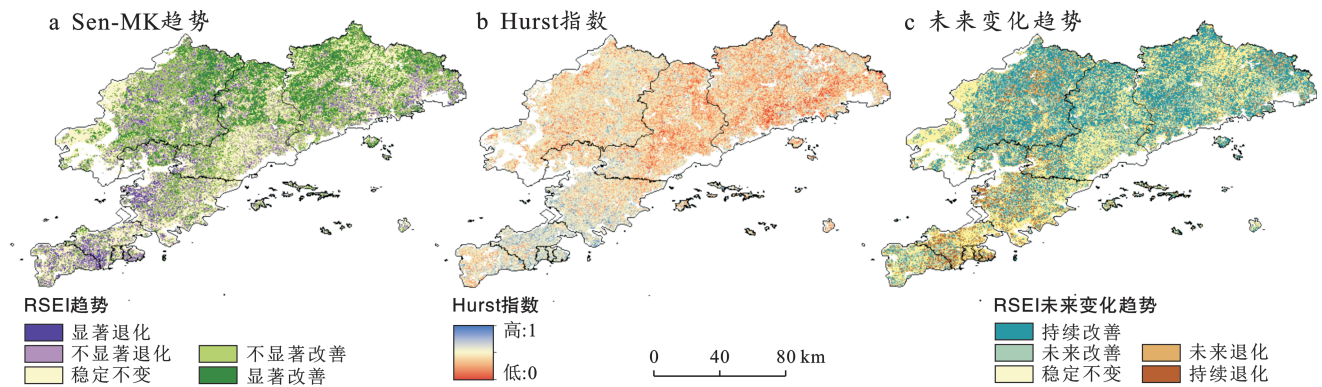


图3 大连市遥感生态指数(RSEI)趋势变化

Fig.3 Changing trends of remote sensing ecological index (RSEI) in Dalian City

2.4 大连市生态环境质量驱动因子分析

2.4.1 分区尺度优化

为了系统探究影响大连市生态环境质量空间分异的主要驱动因素,本研究选取最优参数地理探测器对各因子的分级方法与分级数进行优化选择,尝试包括自然断点法、相等间隔分类、分位数分类与几何间断分类在内的4种分类方法,并在4~10个分类数等级间进行动态筛选,通过 q 值最高为标准确定各因子最适宜的分类方案。结果表明,DEM适用于10个区间的几何间断分类,坡度、气温适用于10个区间的自然断点法分类,人口、GDP和 $PM_{2.5}$ 适用于10个区间的分位数分类,夜间灯光适用于9个区间的分位数分类,降水量、潜在蒸散发适用于8个区间的自然断点法分类。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

子对大连市生态环境质量空间分异的独立与协同驱动机制。

2.4.2 单因子探测分析

地理探测器单因子探测量化各驱动因子对大连市生态环境质量空间分异的解释力(表4),所有驱动因子的 q 值均通过显著性检验($p < 0.001$),表明其对生态环境质量均存在显著影响。其中,土地利用类型对生态环境质量的解释力最强,平均 q 值达到0.415,显示出其在空间分异过程中的主导作用;高程、坡度次之,平均 q 值分别为0.226与0.211,说明地形因子在区域生态系统格局控制中具有重要基础性影响。社会经济因子及气候因子的 q 值相对较低,依次为人口密度、年均温、 $PM_{2.5}$ 浓度、年总降水量、GDP、夜间灯光强度及蒸散发。尽管其单因子解释力较弱,但在一定程度上仍影响局部生态质量分布。

其中,夜间灯光强度与土地利用类型在时间序列上均表现出持续上升趋势:土地利用类型 q 值由 2000 年的 0.333 增长至 2023 年的 0.473;夜间灯光强度 q 值

由 0.016 提升至 0.169,表明随着城市化快速推进,人类活动强度逐渐增强,对生态环境质量的干扰程度日益加重。

表 4 大连市生态环境质量空间分异单因子探测结果

Table 4 Results of single-factor detection on spatial differentiation of ecological environment quality in Dalian City

驱动因子	q 值						均值	排序
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年		
DEM	0.218	0.164	0.183	0.316	0.245	0.138	0.211	3
坡度	0.214	0.232	0.198	0.288	0.281	0.140	0.226	2
年均温	0.155	0.119	0.128	0.258	0.164	0.153	0.163	5
年总降水	0.117	0.089	0.067	0.138	0.049	0.108	0.095	7
蒸散发	0.083	0.127	0.019	0.018	0.014	0.015	0.046	10
人口	0.143	0.171	0.175	0.227	0.194	0.246	0.193	4
GDP	0.038	0.029	0.066	0.144	0.088	0.123	0.081	8
PM _{2.5}	0.188	0.159	0.083	0.145	0.100	0.052	0.121	6
夜间灯光	0.016	0.016	0.067	0.072	0.061	0.169	0.067	9
土地利用类型	0.333	0.352	0.401	0.471	0.460	0.473	0.415	1

2.4.3 交互作用探测分析

基于地理探测器交互探测分析(图 4),大连市生态环境质量的形成与演变并非单一因素所致,而是自然地理条件与人类活动共同叠加驱动的结果。各驱动因子间普遍存在明显的双因子增强效应与非线性增强效应,即两两交互后的联合解释力显著高于各自单独作用。在所有交互因子组合中,土地利用类型(X_{10})与年总降水量(X_4)的交互作用始终为主导性复合驱动因子,在整个研究期内保持最高的 q 值水平,且随时间逐渐提升由 2000 年的 0.416 上升至 2023 年的 0.516。这表明土地利用变化是影响生态环境质量的核心直接因子,而年降水量通过调节植被生长、水文过程等间接放大了土地利用变化的影响效应,二者交互形成区域生态环境质量时空演化的关键控制机制。除土地利用类型与降水外,土地利用类型与社会经济因子的交互驱动效应呈现出明显的逐年增强趋势。其中,土地利用类型与夜间灯光强度($X_{10} \cap X_9$)的联合 q 值从 2000 年的 0.339 快速提升至 2023 年的 0.507,充分反映出快速城市化、人口集聚与人类活动强度不断提升对生态系统格局的深刻干扰效应。相比之下,自然地形因子(如高程、坡度)之间的交互作用解释力较弱,表明其主要控制区域生态空间本底格局,但对动态变化的联合调控能力有限。

3 讨论

3.1 大连市生态环境质量时空特征分析

本研究分析了 2000—2023 年大连市遥感生态指数(RSEI),揭示了该地区生态环境质量的显著改善

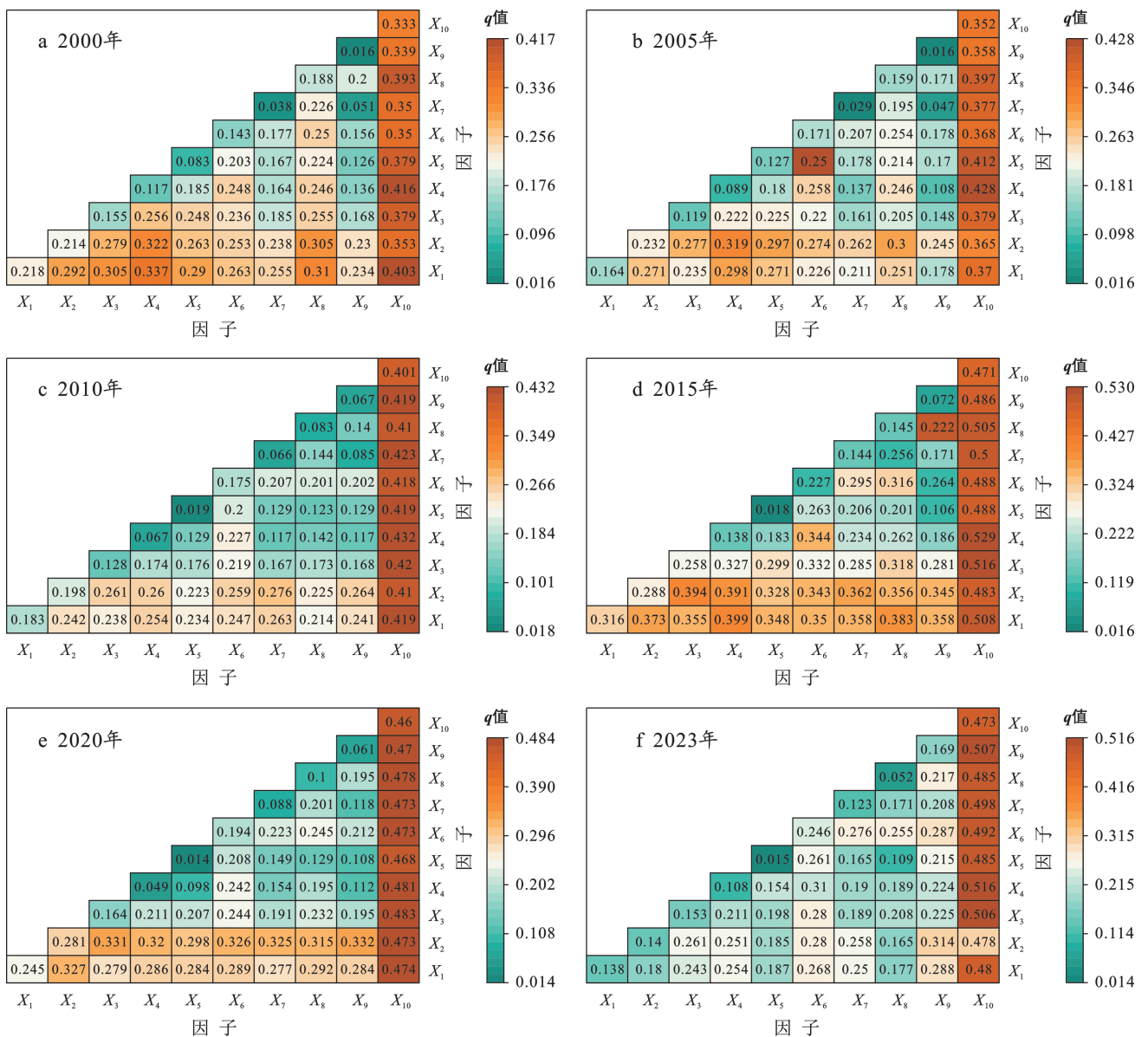
趋势。RSEI 年均值从 0.437 提升至 0.662,良与优等级面积占比从 28.38% 增长至 66.75%,这种改善趋势与我国生态文明建设的政策背景高度吻合。2008 年颁布《大连市环境保护总体规划(2008—2020 年)》实施后,治理重点转向环境治理与植被恢复,北部地区生态逐步改善。后续颁布了《大连市环境总体规划(2012—2020 年)》。进一步明确了空间化环境目标,形成“北优南差,城差郊优”的分布格局。北部丘陵森林区生态优良,而主城区及沿海地区受城市扩张与植被减少影响,生态压力加大,但生态修复和产业结构调整等政策促使生态环境质量改善大于退化。这主要得益于生态修复工程,产业结构的调整,明确生态保护红线,蓝色海湾整治等多项综合性海陆保护修复策略的有效实施。然而,该区域存在反向持续性特征,占比高达 76.25%。这一数据揭示了一个潜在的风险:虽然大连市大部分生态环境质量目前呈现改善态势,但未来仍有可能面临退化风险。因此,未来需要进一步加强生态环境质量的监测和保护,确保生态环境质量能够持续向好发展。

3.2 大连市生态环境质量变化的驱动因子

许多研究^[28]表明土地利用类型是生态环境质量变化的关键因子,本研究也得出相似的结论,在大连市生态环境质量的驱动因素研究中土地利用类型是主导型驱动因子(q 值为 0.415)。由图 5 可知,土地利用类型中,林地对生态质量改善的贡献率达到 80%。《大连市环境保护总体规划(2008—2020 年)》的实施后,北部地区植被覆盖度明显提升,2000—2023 年林地在生态环境质量等级为优的面积增加了 42.86%,

植被覆盖度的提升对生态环境质量具有重要作用；耕地和草地对生态环境质量改善的同样重要，2000—2023年耕地和草地在生态环境质量等级为优的面积增加了43.85%，反映农业集约化管理对生态农田的改善作用^[29]。而城镇建筑用地在生态环境质量等级为差的面积增加0.87%，因此城镇建筑用地则是生态退化的主要原因。驱动因子中，高程和坡度构成大连市基本生态格局，并与海洋气候形成协同效应。北部山区的高程与海洋湿润气流交互形成独特小气候，利于植被生长。坡度在33°~50°范围内生态维持作用最显著，这一发现为山地生态保护提供了更精确的科学依据。相较而言，气候因子如年均温及年

总降水对生态环境质量的影响力较小，这可能与该区域充沛的降水量及海洋调节作用有关。大连市三面环海，海洋对气温、降水的调节作用明显，因此气候因子并未成为限制生态环境质量的主导因子。2000—2023年土地利用与降水的组合始终是最强且最稳定的驱动力，这印证了半湿润区“水—土”耦合是决定大连生态格局演变的核心机制，得益于海洋的调节，大连能够有效缓解全球气候变化下的极端气候事件冲击。与北京^[22]、太原等^[30]内陆城市相比，其生态系统因此展现出更强的抵抗力，更高的恢复力及更小的状态波动，使得生态环境系统稳定性优势显著。



注： X_1 — X_{10} 分别代表DEM,坡度、年均温,年总降水,蒸散发,人口,GDP, $PM_{2.5}$,夜间灯光和土地利用类型。

图4 各驱动因子双因子交互作用对生态环境质量空间分异解释力(q 值)时序变化

Fig.4 Temporal variations in explanatory power (q value) of two-factor interactions among different driving factors on spatial differentiation of ecological environment quality

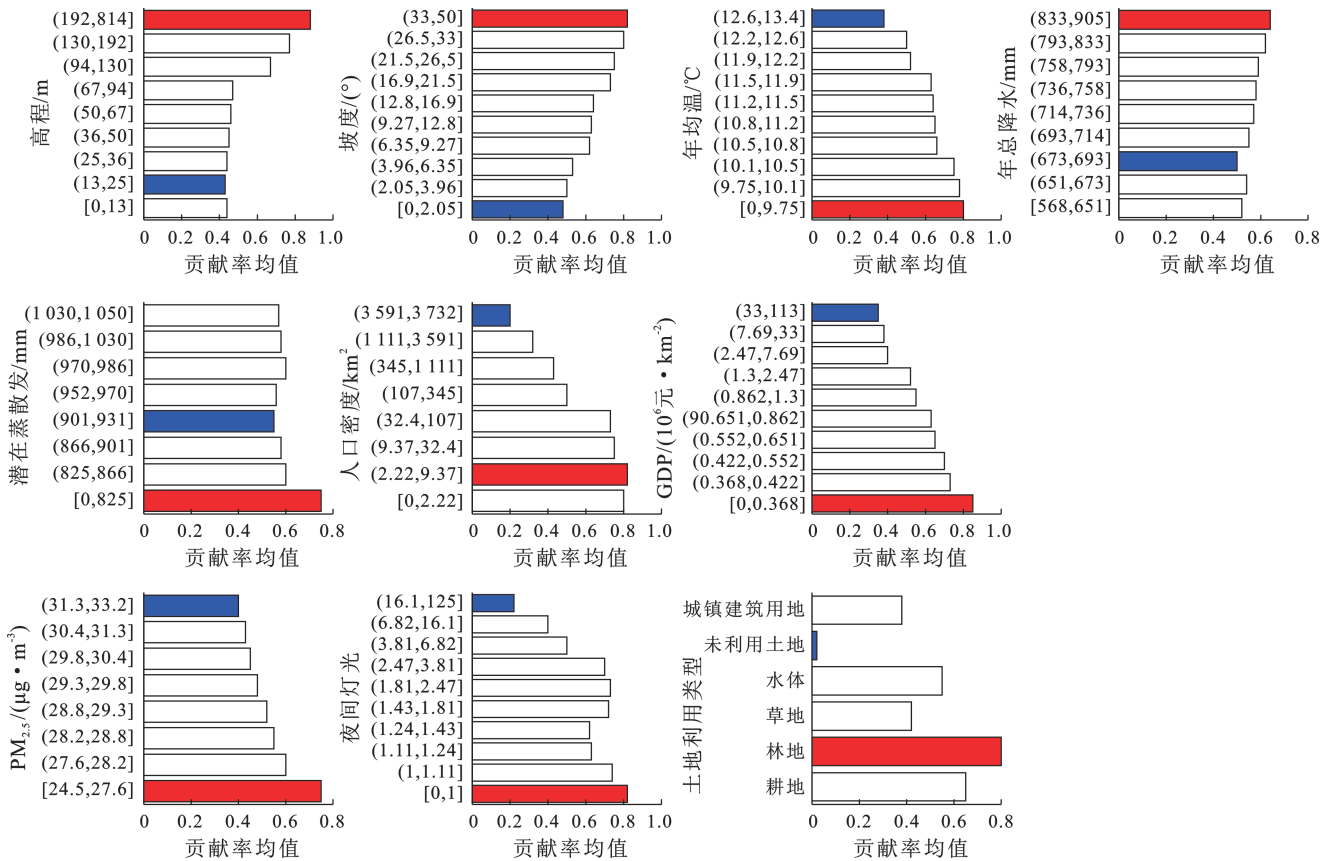


图 5 各驱动因子不同范围内生态环境质量的统计结果

Fig.5 Statistical results of ecological environment quality within different ranges of different driving factors

3.3 管理建议

本研究利用遥感生态指数(RSEI)的时空分布格局、演变趋势及驱动因素,构筑了“时间—空间—驱动”多维生态分区框架,为大连市精细化生态管理提供了创新路径。研究表明,北部区域生态质量优良,植被覆盖度高,应作为维护生态系统结构与功能,增强生态韧性的核心保护区,实施以严格保护为主的管理策略,最大限度减少外界干扰,同时可适度发展生态旅游,实现生态科普、旅游经济与环境保护的融合,提升公众生态意识并促进经济协同发展;市中心区域生态脆弱性突出,受快速城市扩张和高密度人口影响,RSEI值明显偏低,治理需求迫切。建议推进综合治理,重点通过增加公园绿地,构建生态通风廊道,严控工业用地等方式,逐步恢复生态系统健康;沿海地区生态质量波动较大,需加强海域生态格局构建与稳定性维护。为实现“陆海相映,湾岬相连,城绿相生”的可持续发展愿景,大连市还应健全生态环境监测评估体系,完善规划实施保障机制,并开展综合效益跟踪评估,系统支撑全域生态格局优化。

4 结论

(1) 整体来看,2000—2023年大连市生态环境质

量持续改善,RSEI年均值由0.437提升至0.662,良与优等级面积占比由28.38%增长至66.75%。空间上呈现出“北优南差、城差郊优”的典型格局,北部丘陵森林覆盖区生态质量优良,城市主城区及沿海地区生态质量相对较低但逐步改善。

(2) Sen-MK趋势分析表明,生态环境质量改善区域面积占总面积的46.84%,退化区域占23.79%,稳定区域占29.37%。Hurst指数显示大部分区域存在一定趋势反转风险,但整体系统韧性较强。未来预测结果显示,大连市生态环境质量仍将以持续改善为主导,改善区域总面积明显大于退化区域。

(3) 驱动力分析表明,土地利用类型为生态环境质量的主导性因子,高程、坡度次之,而人类活动因素(如夜间灯光、GDP值、人口密度)在持续增强。交互作用探测中,土地利用与年降水的交互作用在多个时期均表现为最强驱动力组合,体现出自然过程与人类活动复合作用下的生态演变机制。

参考文献 (References)

[1] 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.
- [2] 何安良,周江文.基于RSEI模型的长沙市生态环境质量评价[J].江西科学,2021,39(2):256-262.
He Anliang, Zhou Jiangwen. Evaluation of ecological environment quality in Changsha City based on RSEI model [J]. Jiangxi Science, 2021,39(2):256-262.
- [3] 崔亚君,顾娟,王森,等.基于RSEI的北京市生态环境质量分析及验证[J].时空信息学报,2023(3):442-449.
Cui Yajun, Gu Juan, Wang Miao, et al. Analysis and verification of ecological environment quality in Beijing based on RSEI [J]. Journal of Spatio-Temporal Information, 2023(3):442-449.
- [4] Dirgantara S P, Hadibasyir H Z, Kiat U I, et al. Spatio-temporal evaluation of environmental quality of Karawang Regency based on remote sensing ecological index [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2025,1438(1):012024.
- [5] 葛石冰,宋晓君,陈润,等.近30年天山北坡改进型遥感生态指数时空变化及其驱动因素[J].生态与农村环境学报,2024,40(7):865-876.
Ge Shibing, Song Xiaojun, Chen Run, et al. The spatio-temporal changes and driving factors of ERSEI on the northern slope of Tianshan Mountains in the past 30 years [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(7):865-876.
- [6] 赵嘉丽,李兴,孙金容.干旱区流域的改进型遥感生态指数与RSEI的对比分析:以岱海流域为例[C]//南昌:中国环境科学学会2023年科学技术年会论文集,2023:284-292.
Zhao Jiali, Li Xing, Sun Jinrong. Comparative analysis of improved remote sensing ecological index and RSEI in arid region basins: A Case Study of Daihai basin [C]// Proceedings of the 2023 Annual Scientific and Technological Conference of the Chinese Society for Environmental Sciences. Nanchang, China, 2023: 284-292.
- [7] Halder S, Bose S. Comparative study on remote sensing-based indices for urban ecology assessment: A case study of 12 urban centers in the metropolitan area of eastern India [J]. Journal of Earth System Science, 2024, 133(2):100.
- [8] Yang Zhenshan, Liu Yang, Su Huimin, et al. Exploring complex place-based coevolution of ecosystem and human activities: A case study of Qilian Mountain area in China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022,115:103091.
- [9] 王媛.多因素驱动城市生态遥感监测方法研究[D].北京:北京建筑大学,2023.
Wang Yuan. Research on remote sensing monitoring method of urban ecology driven by multiple factors [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [10] 汪士为,吴伟.近31年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J].水土保持研究,2024,31(1):427-439.
Wang Shiwei, Wu Wei. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in Jialing River basin in recent 31 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):427-439.
- [11] 王建,赵牡丹,李健波,等.基于MODIS时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J].山地学报,2021,39(6):830-841.
Wang Jian, Zhao Mudan, Li Jianbo, et al. Dynamic monitoring and driving forces of eco-environmental quality in the Qinba Mountains based on MODIS time-series data [J]. Mountain Research, 2021,39(6):830-841.
- [12] 焦凯,雍新琴,陈凯怿.基于RSEI的徐州市区转型期生态环境质量时空演变分析[J].西南农业学报,2024,37(5):1087-1098.
Jiao Kai, Yong Xinqin, Chen Kaiyi. Spatiotemporal evolution analysis of urban ecological environment quality in Xuzhou City during transition period based on RSEI [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024,37(5):1087-1098.
- [13] 符美玲,周芳成,蔡大鑫,等.2001—2022年海南岛生态环境质量时空变化特征及其对气候变化的响应[J].环境生态学,2025,7(4):1-9.
Fu Meiling, Zhou Fangcheng, Cai Daxin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of ecological environment quality in Hainan Island from 2001 to 2022 and its response to climate change [J]. Environmental Ecology, 2025,7(4):1-9.
- [14] 黄炜宏,徐智新,曾波,等.基于RSEI的福建省生态环境质量变化特征研究[J].人民长江,2024,55(12):107-117.
Huang Weihong, Xu Zhixin, Zeng Bo, et al. Research on characteristics of changes in ecological environment quality of Fujian Province based on RSEI [J]. Yangtze River, 2024,55(12):107-117.
- [15] 苏嘉亮,晏晨然,雷雨,等.陕西省生态环境质量长时段动态监测[J].生态学报,2023(2):554-568.
Su Jialiang, Yan Chenran, Lei Yu, et al. Long time series dynamic monitoring of eco-environmental quality in Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023(2):554-568.
- [16] 呼慧,洪志敏.基于多尺度地理加权回归的黄河流域空气质量影响因素空间效应解析[J].数理统计与管理,2023,42(3):416-426.
Hu Hui, Hong Zhimin. Analyzing spatial effects of influencing factors on air quality in the Yellow River basin

- using multi-scale geographically weighted regression [J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2023,42(3):416-426.
- [17] 高永刚,刘雨婷,徐涵秋.基于Landsat长时间序列影像的城市生态品质时空演变及驱动因素分析[J].*测绘学报*,2025,54(3):510-522.
Gao Yonggang, Liu Yuting, Xu Hanqiu. Analysis of the spatio-temporal evolution and driving factors of urban ecological quality based on long-term Landsat image time series [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2025,54(3):510-522.
- [18] 肖扬,徐港.基于InVEST模型的土地利用变化对生态质量的影响:以2000—2020年大连市为例[J].*吉林建筑大学学报*,2024,41(3):45-51.
Xiao Yang, Xu Gang. The impact of land use change on ecological quality based on InVEST model: A case study of Dalian City from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2024,41(3):45-51.
- [19] 李源,李发祥,梁金水,等.滨海城市土地利用变化对陆地生态系统服务价值与储碳的影响:以辽宁省大连市为例[J].*水土保持通报*,2023,43(5):330-342.
Li Yuan, Li Faxiang, Liang Jinshui, et al. Effects of land use change on terrestrial ecosystem service value and carbon storage: A case study in Dalian City, Liaoning Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):330-342.
- [20] 韩增林,刘澄浩,闫晓露,等.基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区:以大连市为例[J].*生态学报*,2021,41(22):9064-9075.
Han Zenglin, Liu Chenghao, Yan Xiaolu, et al. Coupling coordination and matches in ecosystem services supply-demand for ecological zoning management: A case study of Dalian [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22):9064-9075.
- [21] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.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[J].*生态学报*,2023,43(5):2114-2127.
Zhang Jing, Yang Liping, Gong Enjun, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(5):2114-2127.
- [22] 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.
Xin Huichao, Guo Wei, Wang Hefeng. Time series dynamic assessment of ecological environment quality in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on GEE and RSEI [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2024,39(2):106-114.
- [23] 武旭,王勃砚,任伟,等.2000—2022年黄河流域甘肃段生态环境质量与影响因素[J].*应用生态学报*,2025,36(2):353-364.
Wu Xu, Wang Boyan, Ren Wei, et al. Ecological environment quality and the influencing factors in Gansu section of Yellow River basin during 2000—2022 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025,36(2):353-364.
- [24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*,2013,33(24):7798-7806.
Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. Temporal and spatial changes of vegetation coverage in the Yellow River basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(24):7798-7806.
- [25] 罗旭,王丽霞,张晶,等.秦岭地区生态环境质量时空变化及驱动力分析[J].*环境科学*,2025(6):3720-3729.
Luo Xu, Wang Lixia, Zhang Jing, et al. Spatio-temporal dynamic and driving factor analysis of ecological environment quality in Qinling Mountains [J]. *Environmental Science*, 2025(6):3720-3729.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [27] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020,57(5):593-610.
- [28] 吴健达,张安兵,王贺封,等.矿业城市生态环境质量动态变化及影响因素[J].*西北林学院学报*,2025,40(4):201-212.
Wu Jianda, Zhang Anbing, Wang Hefeng, et al. Dynamic monitoring and influencing factor analysis of ecological environment in mining cities [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025,40(4):201-212.
- [29] Wen Xin, Zhen Lin. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review [J]. *Environmental Development*, 2020,34:100493.
- [30] 刘晋,陈天伟,刘鹏,等.太原城市群生态环境质量监测及驱动力分析[J].*水土保持通报*,2023,43(4):154-161.
Liu Jin, Chen Tianwei, Liu Peng, et al. Monitoring and analyzing driving forces of ecological environmental quality in Taiyuan urban agglomeration [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(4):154-161.