·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

2000—2025年鹤岗市森林生态系统质量时空演变特征及归因分析

祝彦杰[1]，江璟瑜[1,2*]，许谭[1]，贾丽楠[1]，金晟萱[1]，董小琪[1]，闫雪莲[3]，邹歆蕙[3]，乔宇娇[3]
（1. 黑龙江省生态研究所，哈尔滨 150081；2. 黑龙江省生态研究所 森林生态与林业生态工程重点实验室，哈尔滨 150081；
3. 黑龙江细鳞河国家级自然保护区，黑龙江 鹤岗 154100）

摘 要：为探寻资源型城市转型对森林生态系统质量时空演变特征及驱动机制，基于长时序陆地卫星无缝数据集、中分辨率成像光谱仪产品构建生态质量指数（ecosystem quality index，EQI）、Mann-Kendall检验趋势分析法及Hurst指数分析2000—2025年鹤岗市森林EQI的时空变化及未来演化趋势，利用地理探测器模型定量分析自然环境及人为活动对EQI空间分异的驱动作用。结果表明，在空间分布上，EQI呈现显著的“西北高、东南低”分布格局，西北部小兴安岭林区生态质量优良，东南部平原及城镇建设区受人为干扰强烈，质量相对较低；在EQI的变化趋势上，全市64.9%的区域呈改善趋势，主要分布于西北部森林覆盖区及中部生态修复区，并且未来将有52.71%的区域持续改善，而34.49%的退化区域主要集中在城镇扩张边缘；驱动机制分析表明，潜在蒸散发（potential evapotranspiration，PET）是解释EQI空间分异的主导因子（解释力 q=0.548），其次为降水（q=0.429），人类足迹（human footprint product，HFP）是贡献度最高的人为因子（q=0.295）。各因子间交互作用表现为双因子增强与非线性增强，其中PET与$PM_{2.5}$的交互作用解释力最强（q=0.622）。研究结果可为东北老工业基地资源型城市生态修复与可持续发展提供科学依据和决策支持。

关键词：鹤岗市；EQI；时空演变；Hurst指数；地理探测器
中图分类号：S718.55 **文献标识码：**A **DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.005

Spatiotemporal Evolution and Attribution Analysis of Forest Ecosystem Quality in Hegang City from 2000 to 2025

ZHU Yanjie[1], JIANG Jingyu[1,2*], XU Tan[1], JIA Linan[1], JIN Shengxuan[1],
DONG Xiaoqi[1], YAN Xuelian[3], ZOU Xinhui[3], QIAO Yujiao[3]
(1. Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China; 2. Key Laboratory of Forest Ecology and Forestry Ecological Engineering, Heilongjiang Ecology Institute, Harbin 150081, China; 3. Heilongjiang Xilinhe National Nature Reserve, Hegang 154100, China)

Abstract: To investigate the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of forest ecosystem quality during the transformation of resource-exhausted cities, this study selected Hegang City as the research area. Based on long-term seamless Landsat time-series datasets and MODIS products, the ecological quality index (EQI) was constructed. The Sen's slope estimator, Mann-Kendall test, and Hurst exponent were employed to analyze the spatiotemporal changes and future trends of forest EQI in Hegang from 2000 to 2025. Finally, the geographical detector model was used to quantitatively analyze the driving forces of natural and anthropogenic factors on the spatial differentiation of EQI. The results showed that, spatially, the EQI exhibited a significant distribution pattern of "high in the northwest and low in the southeast." The forest areas in the Lesser Khingan Mountains in the northwest showed excellent ecological quality, whereas the southeastern plains and urban built-up areas, subject to intense human disturbance, had relatively

收稿日期：2026-03-24
基金项目：黑龙江省省属科研业务费项目(SCZ2025-01;SCZ2025-03;SCZ2024-07)。
第一作者简介：祝彦杰，硕士，研究员。研究方向为林业遥感与生态监测。E-mail:zyj750109@163.com
***通信作者：**江璟瑜，硕士，研究员。研究方向为林学。E-mail:451317060@qq.com
引文格式：祝彦杰，江璟瑜，许谭，等. 2000—2025年鹤岗市森林生态系统质量时空演变特征及归因分析[J]. 森林工程，2026，42(5)：933-943.
Zhu Yanjie, Jiang Jingyu, Xu Tan, et al. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of forest ecosystem quality in Hegang City from 2000 to 2025[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 933-943.

lower quality. Temporally, 64.9% of the total area showed an improving trend in EQI, mainly concentrated in the northwestern forest-covered zones and central ecological restoration areas. Furthermore, 52.71% of the area is projected to continue improving in the future, while 34.49% of the degraded areas are primarily located along the urban expansion fringes. The driving mechanism analysis revealed that potential evapotranspiration (PET, q=0.548) was the dominant natural factors explaining the spatial heterogeneity of EQI, followed by precipitation (q=0.429), while the human footprint product (HFP, q=0.295) was the most significant anthropogenic driver. The interactions between all factors demonstrated bi-factor enhancement and non-linear enhancement effects, with the interaction between PET and $PM_{2.5}$ showing the strongest explanatory power (q=0.622). These findings can provide a scientific basis and decision-making support for the ecological restoration and sustainable development of resource-exhausted cities in the old industrial base of Northeast China.

Keywords: Hegang City; ecological quality index (EQI); spatiotemporal evolution; Hurst exponent; geographical detector

0 引言

森林生态系统是陆地生态系统的主体，对调节区域气候、涵养水源、保持水土和生物多样性等具有重要作用。随着“东北振兴”战略实施以及国家生态文明建设的开展，资源型城市的生态转型和高质量发展已成为学界关注的热点[1]。鹤岗市作为煤炭资源枯竭型城市，地处小兴安岭向三江平原过渡区，是国家生态安全屏障区组成部分，生态环境正处于高强度开发向修复转型的发展阶段。作为东北老工业基地和重点国有林区，鹤岗市自2000年以来一直是国家“天然林保护”“三北防护林”及后续“退耕还林还湿”等重大生态修复工程的重点实施区[2]，区域生态保护与恢复的政策干预强度持续加大。利用长时序遥感手段对鹤岗市森林生态系统质量的时空演化趋势进行定量分析和定性解释，对于研判生态修复工程效果、夯实北方生态安全屏障具有重要意义和价值[3-4]。

目前，基于遥感技术评价区域生态环境质量的方法有单一指标法和综合指标法。早期研究较多采用归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）[5]、植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）[6]和叶面积指数（leaf area index，LAI）[7]等单一参数来描述生态状况。虽然单一指标物理意义便于获得，但生态系统是一个复杂的、功能多元化的系统，仅通过单一指标难以反映生态系统整体质量和抗干扰能力[8]。为弥补这一不足，生态质量指数（ecosystem quality index，EQI）[9]、遥感生态指数（remote sensing ecological index，RSEI）[10-11]等综合评价体系相继诞生。其中，EQI指数通过集成反映生态系统结构与功能的多源参数，能更立体、客观地揭示区域生态环境的优劣程度，已在区域生态安全评估中得到广泛应用[12-14]。

已有的研究对资源型城市的生态环境进行了富有成效的探索，但仍存在以下局限。首先，在时空尺度上，现有研究多聚焦单一时间断面的静态评价或基于中低分辨率数据的短时序动态监测[15-16]。例如，相关学者用年度土地利用数据分析矿区生态环境的格局演变[17]，或基于中分辨率成像光谱仪（moderate-resolution imaging spectroradiometer，MODIS）等评估近十年的生态修复成效[18]。然而，这种研究范式难以捕捉生态系统在“高强度破坏—政策干预修复—波动中趋稳”这一完整周期内的精细化演变轨迹。特别是对于经历数十年发展历程的老牌工矿城市而言，缺乏基于高分辨率长时序数据的连续轨迹追踪[19]，限制了对其生态系统韧性与恢复力演变规律的深刻理解[20]。其次，在驱动机制解析上，现有归因分析多侧重于定性描述或简单的线性相关回归分析，对多因子交互作用的非线性机制揭示不足[21-22]。尽管许多研究识别了气候变化和人类活动是影响生态质量的关键因素[23]，但往往将二者作为独立变量进行分析，忽略了在特定自然本底约束下，人类活动对生态系统的影响被放大或削弱。特别是对于鹤岗市这类兼具北方重要生态屏障与煤炭资源枯竭双重属性的复合型区域，各驱动因子在不同空间尺度上的主导作用、阈值效应及其复杂的耦合机制尚不清晰[24]，极大地制约了生态修复措施的精准性与空间差异化管理策略的制定。

基于此，运用GEE云计算平台，基于2000—2025年Landsat与MODIS遥感数据构建鹤岗市的长时序森林EQI；采用Sen's slope趋势分析（Sen斜率估计）、Mann-Kendall检验、Hurst指数刻画EQI时空演变形态和未来持续性特征；通过地理探测器模型的因子探测和交互探测器定量揭示影响EQI空间分异的主导因子和交互响应机制，明晰资源型城市转型期生态系统质量演变规律，为区域国土空间生态修复和可持续发展提供依据和决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省东北部（129°40′~132°31′E，47°04′~48°09′N），地处小兴安岭向三江平原过渡的交

接地带，北隔黑龙江，与俄罗斯相望，东南临松花江，与佳木斯市接壤。研究区地貌呈现显著的西北高、东南低空间分异特征，西北部为小兴安岭余脉，以起伏较大的低山丘陵为主，东南部则地势平坦开阔，属于典型的三江平原腹地。该地区属寒温带大陆性季风气候，冬季寒冷、干燥，夏季短暂温暖、雨热同期，水热组合决定了区域植被生境特征。鹤岗市森林资源具有极强的空间异质性，高郁闭度森林主要分布于西北部山区，是区域重要的生态屏障与水源涵养区；东南部平原区由于受农业开垦、城镇扩张和采矿等人为干扰，森林分布稀疏、破碎化斑块。

1.2　数据来源与预处理

1.2.1　生态参数数据

计算 EQI 所需要的生态参数主要通过 GEE 云平台获取。为统一不同卫星传感器的时间分辨率并消除云、阴影等噪声的影响，本研究在提取生态参数时均采用“年际合成”的策略，以获取能代表每年植被最佳生长状态的年尺度数值。

具体而言，LAI 与植被覆盖度（fractional vegetation cover，FVC）的反演基础数据，直接采用了中山大学刘小平教授研发的“中国对地观测数据立方体”30 m 分辨率无缝 Landsat 年合成数据集（the 30-m seamless annual leaf-on Landsat composites）[25]。该数据集基于改进的“最佳可用像素（best available pixel，BAP）”合成算法，已将一年内多次观测的 Landsat 影像整合，提供了一幅代表当年生长季（leaf-on）高质量的无云反射率影像。

总初级生产力（gross primary productivity，GPP）则直接调用 MODIS GPP 数据产品（MOD17A2H）。由于原产品为 8 天合成的时间分辨率，本研究在 GEE 平台中，通过对每年植被生长季内的所有 8 天 GPP 影像进行累加，从而获取与 Landsat 数据时间尺度相匹配的年度 GPP 总量。通过上述步骤，本研究将不同时间分辨率的多源遥感数据统一至年尺度，旨在为后续年度 EQI 的构建奠定基础。

1.2.2　自然环境驱动数据

气象数据（气温、降水）来源于国家青藏高原科学数据中心提供的中国 1 km 分辨率逐月数据集，由气候研究单元（climatic research unit，CRU）和 WorldClim 降尺度生成，并经地面台站校正[26]；土壤数据（土壤温湿度）来源于 GEE 基于 NASA FlDAS 数据集生成的全球月度同化数据；潜在蒸散发（potential evapotranspiration，PET）数据来源于布里斯托大学发布的全球逐小时潜在蒸散发数据集（hPET）[27]；$PM_{2.5}$ 数据来源于国家地球系统科学数据中心提供的中国高分辨率大气污染格网数据集[28]。

1.2.3　社会经济驱动数据

人类足迹（human footprint product，HFP）数据来源于 Mu 等[29]生成的全球年际陆地人类足迹数据集，该数据集成了人口密度、土地利用、夜间灯光和交通路网等人类活动变量，是反映人类活动强度的综合数据；GDP 来源于资源环境科学数据平台提供的中国 GDP 空间分布公里网格数据集[30]；人口密度数据来源于 WorldPop 提供的全球高分辨率人口统计数据集。

为满足长时序分析及地理探测器模型的输入要求，对上述多源数据进行了统一的预处理。首先，利用 ArcGIS 平台将所有栅格数据投影坐标系统一转换为 WGS_1984_UTM_Zone_52N；其次，以鹤岗市行政边界为掩膜对数据进行裁剪，并采用双线性内插法将所有数据的空间分辨率重采样至 30 m，以确保像元大小的一致性；最后，对部分缺失年份的数据采用线性插值法进行补全，最终构建形成 2000—2025 年鹤岗市生态系统质量及其驱动因子的时空数据集。

1.2.4　森林空间分布与类型数据

为探究不同森林类型对生态系统质量的贡献，本研究采用的森林分类空间数据来源于中国科学院空天信息创新研究院发布的全球 30 m 精细地表覆盖动态监测产品（GLC_FCS30）[31]。该数据集包含丰富的森林子类信息。本研究提取该数据集中的阔叶林、针叶林、针阔混交林及稀疏林类别，用于后续不同林分 EQI 统计分析。

2　研究方法

2.1　生态系统质量评估方法

本研究基于《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估》[32]，选取 LAI、FVC 和 GPP 3 个关键指标构建森林生态质量指数（EQI），具体计算步骤如下。

2.1.1　关键生态参数计算

植被覆盖度（FVC，式中记为 F_{VC}）：采用像元二分模型（dimidiate pixel model）进行估算。该模型假设像元信息由纯植被和纯土壤两部分构成，其计算公式为

$$F_{VC}=\frac{N_{DVI}-N_{DVIsoil}}{N_{DVIveg}-N_{DVIsoil}}。\tag{1}$$

式中：N_{DVI} 为像元的归一化植被指数值；$N_{DVIsoil}$ 和 N_{DVIveg} 分别为纯土壤和纯植被像元的 NDVI 值，通常采用研究区 NDVI 频率直方图给定置信区间（5% 和 95%）的累积百分比对应的值来确定。

叶面积指数（LAI，式中记为 L_{AI}）：直接采用在同类植被区（或中高纬度地区）广泛验证并应用成熟的经验

回归模型进行反演[33]。前人研究表明,该公式基于增强型植被指数(enhanced vegetation index,EVI)与实测LAI构建,具有较高的反演精度与适用性,计算公式为

$$L_{AI} = 3.618 \times E_{VI} - 0.118。 \quad (2)$$

总初级生产力(GPP):直接来源于MODIS GPP产品(MOD17A2H),该数据已通过光能利用率模型计算得出,无需额外处理。

2.1.2 指标归一化与EQI构建

为消除各指标量纲差异,首先采用极差标准化法将上述3个指标的数值归一化到[0,1],然后通过等权重平均法计算得到第i年的森林生态质量指数(EQI),计算公式为

$$E_{QIi} = \frac{L_{AIi} + F_{VCi} + G_{PPi}}{3} \times 100。 \quad (3)$$

式中:E_{QIi}为第i年森林生态系统质量指数;L_{AIi}为第i年叶面积指数相对密度;F_{VCi}为第i年植被覆盖度相对密度;G_{PPi}为第i年总初级生产力相对密度[34]。

2.2 EQI变化趋势和持续性分析方法

为揭示研究期内森林EQI的时空演变规律并预测其未来趋势,采用一套成熟的非参数统计方法组合进行分析,主要包括Sen斜率估计、Mann-Kendall显著性检验和Hurst指数分析。

研究首先基于非参数法Sen斜率因子来检测EQI的变化趋势。Sen斜率因子计算公式为[35]

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i。 \quad (4)$$

式中:β为EQI变化趋势;Median为中值函数;x_i、x_j分别为第i年和j年的EQI;当$\beta < 0$,EQI呈下降趋势;当$\beta > 0$,EQI呈上升趋势。

为补充Sen斜率检验,本研究应用Mann-Kendall趋势检验法[36-37],主要用来判断EQI序列的突变点,实现EQI序列的显著性判断,从而分析EQI变化趋势。基于Sen斜率估计值(β)与Mann-Kendall检验统计量(Z)的符号及数值大小,本研究将EQI变化趋势划分为显著增加、不显著增加、稳定不变、不显著减少和显著减少5种类型,具体分级规则见表1。此外,为科学划分EQI时间序列的演变阶段,避免主观等长划分的误差,进一步利用Mann-Kendall突变检验法(计算顺序统计量UF(torward statistic)和逆序统计量UB(backward statistic)统计量序列)。当UF和UB曲线在置信区间内发生相交时,该交点对应的年份即被判定为生态质量发生突变的统计学转折点,以此作为划分非等长演变阶段的定量依据。

Hurst指数(H)判别法是一种基于长期相关性的时间序列分析方法,最初由英国科学家Hurst提出[38]。

表1 鹤岗市2000—2025年EQI变化趋势分类规则

Tab. 1 Classification rules for the EQI trend of Hegang from 2000 to 2025

Sen斜率估计值(β) Sen′s slope (β)	检验统计量(Z) test statistic (Z)	变化趋势 Change trend
>0	>1.96	显著增加 Significantly increased
>0	-1.96~1.96	不显著增加 Not significantly increased
0	—	稳定不变 Stable
<0	-1.96~1.96	不显著减少 Not significantly decreased
<0	<-1.96	显著减少 Significantly decreased

本研究基于R/S方法(R/S)计算2000—2025年的Hurst指数,目的是调查研究区域内EQI的预期变化的可持续性。其基本原理是,设定时间序列,t=1,2,3,…,n为任何给定的正整数,此时平均EQI的序列可以定义为

$$\overline{E}_{QI\tau} = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau} E_{QI(t)} (\tau = 1, 2, \cdots, n)。 \quad (5)$$

偏差公式为

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{t=1}^{\tau} E_{QI(t)} - \overline{E}_{QI\tau} (1 \leqslant t \leqslant \tau)。 \quad (6)$$

序列公式为

$$R(\tau) = X(t,\tau)_{max} - X(t,\tau)_{min} (1 \leqslant t \leqslant \tau) \quad (\tau = 1, 2, \cdots, n)。 \quad (7)$$

标准差公式为

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left(E_{QI(t)} - \overline{E}_{QI\tau}\right)^2} (\tau = 1, 2, \cdots, n)。 \quad (8)$$

式中,τ为样本数量,即时间序列的数量。

$R(\tau)/S(\tau)$的范围为0~1。如果存在H使得$R/S \propto \tau^H$,则表明时间序列$\{EQI_\tau\}$中存在Hurst现象。当H=0.5时,表明EQI序列构成了没有长期相关性的随机波动。相反,当H>0.5时,EQI序列表现出持续性,未来趋势与过去一致。当H<0.5时,未来的趋势预计将与过去的趋势相反。为进一步揭示EQI变化的持续性特征,本研究将EQI变化趋势与Hurst指数进行耦合叠加,依据表2中规则将未来演变趋势划分为持续增加、由增转减、持续减少等5种模式,以实现对未来生态质量演变的预测。

2.3 地理探测器模型

为定量识别影响鹤岗市森林EQI空间格局的关键驱动力,本研究应用地理探测器模型[39]。该方法的核

表 2　鹤岗 EQI 未来演变趋势分类规则

Tab. 2　Classification rules for future EQI trends of Hegang

Sen 斜率估计值 Sen′s slope	Hurst 指数 Hurst exponent	趋势持续性 trend persistence
>0.05	0~0.5	由增转减 shift from increasing to decreasing
>0.05	0.5~1.0	持续增加 continuously increasing
−0.05~0.05	0.5	不确定 uncertain
<−0.05	0~0.5	由减转增 shift from decreasing to increasing
<−0.05	0.5~1.0	持续减少 continuously decreasing

心思想是通过比较子区域方差之和与全区总方差的关系，来判断自变量对因变量空间异质性的贡献程度。与传统线性回归模型不同，地理探测器无需假设变量服从线性关系，能有效探测数值型数据和定性数据。

2.3.1　分异及因子探测

因子探测主要用于量化各探测因子解释 EQI 空间变异的程度，核心指标为解释力（q）。其物理含义为自变量（X）解释了 $100 \times q\%$ 的 Y 因变量的空间分异[35]。公式为

$$q = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}}。\tag{9}$$

$$S_{SW} = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2, S_{ST} = N\sigma^2。\tag{10}$$

式中：S_{SW} 和 S_{ST} 分别为层内方差之和与全区总方差；h 为因子的分层数；N_h 为第 h 层样本数；σ_h^2 为因变量 Y 的方差；σ^2 为因变量 Y 的总方差。q 越大，表明该因子对生态系统质量空间分布的决定力越强。

2.3.2　交互作用探测

生态系统的演变是多种因素交互作用的结果。通过计算 2 个因子叠加后的 q 和单个因子独立作用时的 q，从而检验因子之间是否存在协同增强或拮抗，并重点关注有无“双因子增强”或“非线性增强”，以及自然和人为因素是否存在复合诱导。

3　结果与分析

3.1　EQI 空间变化特征

从空间格局看，2000—2025 年鹤岗市 EQI 呈现“西北高、东南低”的分布特点，西北部及中部广大地区由于小兴安岭余脉森林覆盖较多，EQI 常年较高；东南部平原及城镇建设区受人为干扰较大，EQI 常年较低。从动态趋势可以看出，2000—2022 年空间分布中高值区（E_{QI}>90）呈明显扩张态势，生态屏障功能得到增强；然而，进入 2023—2025 年，原先连续的高值区出现破碎化现象，部分森林边缘地区 EQI 由前期的稳步提升转为显著退化，这种空间分布上的不连续性表明后期生态系统稳定性存在问题。

为进一步探究不同森林类型对区域生态系统质量的贡献，本研究基于 GLC_FCS30 精细地表覆盖产品统计主要森林类型的面积及其 EQI 均值，见图 1。结果表明，鹤岗市森林植被以阔叶林为主，其面积高达 7 603.6 km²，在区域森林构成中占据绝对优势地位。针叶林的面积次之，为 1 630.3 km²，其次是稀疏林，为 3.8 km²，而针阔混交林的面积极小，仅为 0.5 km²。

由图 1 可知，作为优势树种的阔叶林与针叶林的 EQI 均值均处于较高水平，分别为 92.85 和 92.68。为更客观地评价不同林分类型生态质量的空间稳定性，本研究引入变异系数（coefficient of variation，CV）进行测度。结果显示，阔叶林与针叶林 EQI 的 CV 值均较小（分别为 3.6% 和 3.5%），表明这两类林分的生态系统质量不仅整体优良，且内部空间分布极为均质、稳定。这与其主要分布于人为干扰较少的西北部山区、形成了连片生态屏障的宏观格局相一致。值得注意的是，针阔混交林和稀疏林的 EQI 均值显著偏低（分别为 80.04 和 86.39），且 CV 值较大（分别为 12.8% 和 8.3%），表现出较高的空间离散度和不确定性。

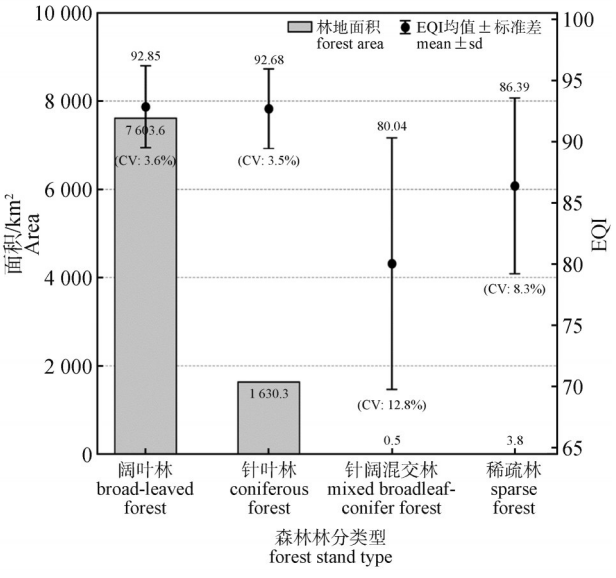


图 1　鹤岗市不同林分类型森林面积与 EQI 统计特征

Fig. 1　Forest area and EQI statistical characteristics of different stand types in Hegang City

这一发现进一步佐证了鹤岗市西北部大面积、连片的优势林分（即阔叶林与针叶林）是维持区域高生态质量的核心，而生态系统质量的低值与不稳定性主要

出现在森林破碎化或类型过渡的边缘区域。

3.2 EQI时间变化特征

时间序列变化显示，鹤岗市EQI在2000—2025年呈现出“波动上升—高位持稳—骤降”3个阶段，见图2(a)。结合Mann-Kendall突变检验确定的统计学转折点，以及局部变化率(slope)的显著差异，本研究打破了机械的等长划分方式，将时间序列科学划分为3个非等长的特征阶段。第一阶段(2000—2018年)，EQI均值从88.76上升至94.07，增幅5.98%，这一显著的改善趋势与同期国家及地方在研究区大规模实施的“天然林保护”“退耕还林”等重大生态修复工程在时间上高度吻合，直观地反映了长期生态保护与恢复政策的积极成效[2]；第二阶段(2018—2022年，突变点后进入平台期)，EQI持续处于92以上的高位；第三阶段(2023—2025年，受极端扰动形成的下降拐点)出现剧烈下滑，均值由2022年的92.18下降至2023年的84.18，一直处于低位运行，线性回归的slope值为-0.096 0，呈整体下降趋势，而较小的R^2(0.062)和不显著的P(0.221)，表明长时序趋势是末期极大跌幅导致的，并不是平滑的线性变化。由图2(b)可知，2023年后数据分布区间明显下移且离散程度较大，低位异常值频出，生态系统在研究末期出现了结构性或扰动性的质量倒退，需关注其生态风险。

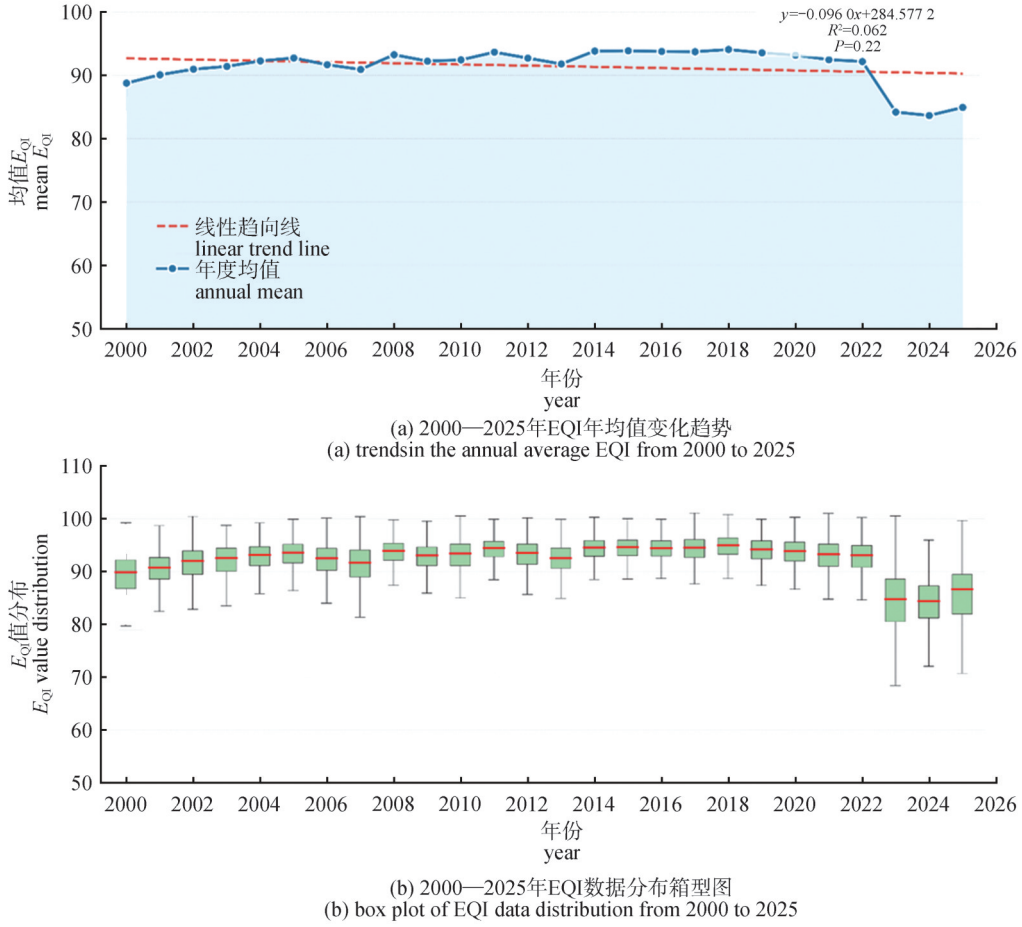


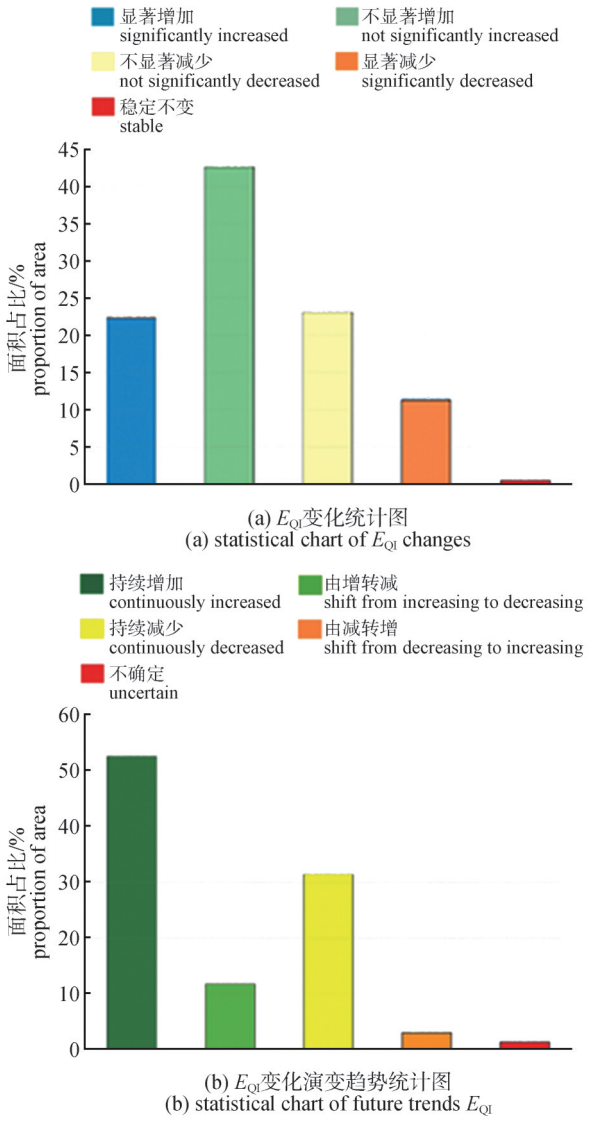
图2 EQI在2000-2025年时间序列特征

Fig. 2 Time-series characteristics of the EQI from 2000 to 2025

通过耦合Sen's slope趋势估计与Mann-Kendall显著性检验，结果显示2000—2025年，鹤岗市EQI呈现增加、下降的变化趋势，见图3(a)。全域范围内EQI增加的区域面积累计占64.9%(其中“显著增加”为22.34%，“不显著增加”为42.56%)，分布在西北部森林覆盖带和中部生态修复区，长期退耕还林封山育林效果显著。EQI降低的区域面积占比34.49%，其中“显著下降”的区域(11.39%)分布在东北部边缘和东南部城镇扩张带，人类活动对局部生境质量影响较大；稳定不变的只占0.61%，研究区地表生态质量处于动态剧烈变化中。

进一步采用Hurst指数判断未来演变趋势，结果表

明,鹤岗市EQI演变具有持续性特征(H>0.5),即未来演变方向与历史趋势相一致;其中,“持续增加”面积占比最大,达到了52.71%,表明西北部森林生态系统质量在未来一段时间内有进一步改善。值得注意的是,“持续减少”面积占比达到31.46%的区域表明了“持续减少”,即目前已经发生退化的部分地区(东南部平原和部分林缘带)在未来仍存在继续恶化的趋势。此外,约有11.71%的区域表现为“由增转减”,远高于“由减转增”(2.91%),说明研究区部分已经改善的生态系统处于脆弱窗口期,存在趋势反转的风险。从整体来看,鹤岗市未来生态保护压力仍较大,可重点关注“持续减少”“由增转减”的斑块,以避免区域生态质量的系统性衰退,见图3(b)。



(a) E_{QI}变化统计图
(a) statistical chart of E_{QI} changes

(b) E_{QI}变化演变趋势统计图
(b) statistical chart of future trends E_{QI}

图3　2000—2025年鹤岗市EQI变化与未来演变

Fig. 3　Changes in Hegang City's EQI from 2000 to 2025 and future trends

3.3　驱动因素分析

3.3.1　因子探测分析

图4(a)为因子探测结果,各驱动因子对EQI空间分异的解释力存在显著差异,总体呈现出“自然环境因子主导,社会经济因子调节”的特征。在探测因子中,潜在蒸散(q=0.548)和降水(q=0.429)的解释力最强。这说明水分循环和水热平衡是影响鹤岗市生态质量空间格局的主要因素。植被生境是小兴安岭生态功能区中重要的部分,植被生境的水分和能量交换十分敏感,PET和降水量(Precipitation)通过控制植被生长环境,直接影响EQI空间分异。土壤温度(q=0.346)、土壤水分(q=0.296)、人类足迹(q=0.295)具有较强的解释力。土壤水热条件决定了高纬度森林和湿地生态系统的生产力水平。人类足迹解释力接近0.3,是人类活动因子的第一位,这说明人类活动综合强度(土地利用转变、交通路网建设等)对生态质量具有重要的影响。气温、GDP和$PM_{2.5}$的解释力适中(q均在0.20~0.22),而人口密度因子的解释力最低(q=0.042),表明其对区域生态质量空间格局的独立贡献非常有限。

3.3.2　因子交互探测分析

图4(b)为交互探测结果,表明EQI驱动机制复杂,任意2个因子交互的解释力远大于单因子独立作用时的解释力,且交互关系表现出双因子增强(Bi)和非线性增强。其中交互q最高的是潜在蒸散发和$PM_{2.5}$(q=0.622),潜在蒸散发和降水(q=0.618)与潜在蒸散发和GDP(q=0.604),说明潜在蒸散发作为核心自然背景,当与大气环境、水分条件或者社会经济活动结合时,对生态质量的影响具有“倍增效应”,潜在蒸散发与降水直接通过改变区域干湿程度决定森林系统的健康水平。

人类活动与自然因子也对EQI存在着共同影响。降水、潜在蒸散发与人类足迹、GDP、人口等社会经济因子交互时,q均大幅提升到0.55~0.60。这说明即使人口密度或经济强度较低的区域,叠加了不利的气候条件时,生态质量也会非常脆弱,而良好的气候背景一定程度上抵消了人类活动的影响。

此外,结果中也存在多组非线性增强关系(如土壤水分与$PM_{2.5}$、GDP与$PM_{2.5}$等),对该类交互作用的解释力远大于单因子的解释力,说明$PM_{2.5}$、社会经济结构在特定自然本底下将对生态质量产生复杂且难以测量的压力。

因此,鹤岗市EQI的空间分异受气候水热条件的根本约束,并受到土壤理化性质与人类活动强度的显著调制。在未来的生态规划中,不仅要关注气候变化带来的自然演变风险,更应重视人类活动因子与自然因子的耦合效应,实现精准施策。

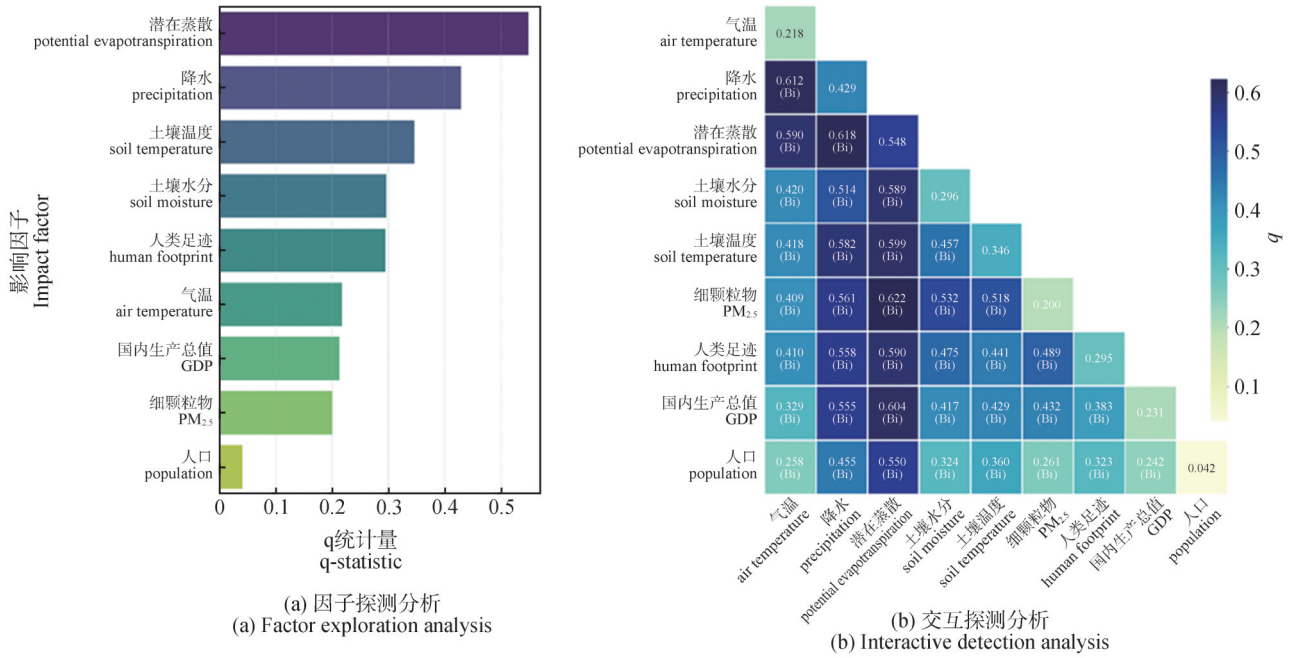


图 4 驱动因素分析

Fig. 4 Analysis of driving factors

4 讨论

4.1 鹤岗市森林 EQI 时空演变特征

本研究发现，2000—2025 年鹤岗市森林 EQI 总体向好，这与近年来国家在东北地区实施的“天保工程”“退耕还林”等重大生态修复工程密不可分，也与许多针对资源型城市生态恢复的研究结果一致[4]。然而，本研究捕捉到 2023 年后的 EQI 出现“结构性下滑”现象，揭示了资源型城市生态系统在长期改善背景下的脆弱性。这一发现区别于多数研究得出的持续改善结论[40]，可能与近年来东北地区频繁遭遇的夏季极端高温干旱事件有关[41]，极端气候对植被生理的胁迫效应，叠加了长期矿业活动遗留的地下水系统破坏，可能放大了生态系统的负面响应。这提示资源型城市的生态修复不仅要关注植被覆盖“量”的恢复，更要重视生态系统功能“质”的提升和气候变化的适应性。

4.2 自然-人文协同驱动机制的复杂性

本研究通过地理探测器揭示了“水热条件主导，人类活动调节”的驱动模式，这与高纬度地区生态系统演变规律的普遍认知相符[42]。“人类足迹”这一综合性人为因子对 EQI 的解释力（q=0.295），显著高于单一的人口密度（q=0.042），这表明影响鹤岗市生态质量的并非人口的简单聚集，而是由城镇化、工业化、交通网络扩张等一系列活动构成的复合压力。此外，研究发现所有因子交互作用均为增强效应，特别是 PET 与 $PM_{2.5}$ 的强交互作用（q=0.622），揭示了在特定的气候背景下，人为污染活动对生态系统的负面影响会被显著放大。这一发现深化了对资源型城市“自然脆弱性”与“人为胁迫”耦合机制的理解，为实施基于自然的解决方案和精细化空间管控提供了科学依据[43]。

4.3 空间格局异质性与生态修复的差异化策略

本研究揭示了鹤岗市森林 EQI 在宏观格局之下的内在结构性差异。结果表明，大面积、连片的阔叶林与针叶林是维持区域高生态质量的基质（Matrix），其 EQI 均值高且内部方差小，构成了生态系统的“稳定核心”。相比之下，面积占比极小但标准差极大的针阔混交林与稀疏林，则精准地识别出了生态系统的“脆弱边缘”。这些区域在景观生态学上通常对应不同斑块（如森林-农田、森林-建设用地）间的交错带，是物质、能量和信息交换最频繁的区域，因而面临着强烈的边缘效应和人为胁迫，构成了生态系统退化的潜在“源区”[44]。

值得注意的是，这些被识别出的生态脆弱区与 Hurst 指数预测的“由增转减”区域在空间上高度耦合，直接印证了格局脆弱性对生态功能不稳定性具有预警作用。这提示未来的生态修复与国土空间规划应摒弃“一刀切”的同质化管理，转向基于空间异质性的差异化、精准化策略[45]。

1）对西北部核心生态屏障区，应以保护优先和最小化干预为导向，重点提升其应对气候变化的生态韧性。

2）对东南部城镇边缘的“持续退化”区，应采取结

构优化与功能重建并重的人工修复措施,如构建生态廊道、增加核心斑块面积,以增强景观连接度。

3)对识别出的“由增转减”的脆弱窗口区,应建立遥感动态监测与预警系统,实施前瞻性预防干预,以避免生态系统状态发生不可逆的负向转变。

5　结论

本研究结合时空趋势分析与地理探测器模型,对2000—2025 年鹤岗市森林生态系统质量进行了综合评估与归因,主要结论如下。

1)整体质量向好,末期波动警示风险。2000—2025 年,鹤岗市森林 EQI 总体呈“波动上升”态势,反映了长期生态保护的成效。但 2023 年后出现的结构性下滑表明,面对极端气候扰动,生态系统的稳定性仍面临挑战。

2)空间分异显著,生态屏障功能突出。森林生态质量空间格局与地形地貌高度吻合,维持“西北优、东南劣”的分布特征,小兴安岭余脉是区域生态安全的核心屏障。

3)未来趋势以持续性为主,局部退化风险犹存。Hurst 指数显示,超过半数区域(52.71%)未来将持续改善,但东南部城镇边缘区存在显著的“持续退化”风险,且部分区域面临“由增转减”的转折压力。

4)自然与人为因子协同驱动,水热条件是主导。驱动力分析显示,潜在蒸散发(q=0.548)与降水(q=0.429)是主导自然因子,人类足迹(q=0.295)是关键人为因子。所有因子交互作用均表现为增强效应,表明在未来的生态规划中,需重点关注气候变化适应性管理与人类活动的精细化管控。

参　考　文　献

[1] 刘毅,寇江泽. 二〇二一年全国生态环境质量明显改善[N]. 人民日报,2022-05-31(014).
Liu Yi, Kou Jiangze. Significant improvement of national ecological environment quality in 2021 [N]. People's Daily, 2022-05-31(014).

[2] 薛建辉,吴永波,方升佐. 退耕还林工程区困难立地植被恢复与生态重建[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2003(6):84-88.
Xue Jianhui, Wu Yongbo, Fang Shengzuo. Vegetation restoration and ecological reconstruction in difficult sites of Grain for Green Program [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2003, 27(6): 84-88.

[3] 侯艳红,甄贞,赵颖慧. 黑龙江省植被生态质量空间分异的驱动力分析[J]. 森林工程,2026,42(2):293-304.
Hou Yanhong, Zhen Zhen, Zhao Yinghui. Analysis of driving forces for spatial differentiation of vegetation ecological quality in Heilongjiang province [J]. Forest Engineering, 2026, 42(2): 293-304.

[4] 马建明,常晓晴,邢艳秋,等. 基于 Landsat TM/OLI 影像的哈尔滨市植被覆盖度与景观格局动态变化分析[J]. 森林工程,2023,39(5):65-73.
Ma Jianming, Chang Xiaoqing, Xing Yanqiu, et al. Analysis of dynamic changes of vegetation coverage and landscape pattern in Harbin based on landsat TM/OLI images [J]. Forest Engineering, 2023, 39(5): 65-73.

[5] Li Y, Cao Z, Long H, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 697-715.

[6] 王淼,刘珮玥,刘博文,等. 区域植被净生产力模型的生态红线实施评估[J]. 测绘科学,2022,47(2):157-165.
Wang Miao, Liu Peiyue, Liu Bowen, et al. Ecological red line implementation evaluation of regional vegetation net productivity model [J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(2): 157-165.

[7] 郑三君,马建民,周星,等. 甘肃省植被叶面积指数时空演变与水热驱动机制[J]. 干旱区研究,2026,43(2):338-349.
Zheng Sanjun, Ma Jianmin, Zhou Xing, et al. Spatiotemporal evolution of the leaf area index and hydrothermal driving mechanisms in Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2026, 43(2): 338-349.

[8] Song R, Wang H, Zhang Y, et al. Conservation outcomes assessment of Sanjiangyuan alpine grassland with MODIS-EVI approach [J]. Biodiversity Science, 2018, 26(2): 149-157.

[9] 杨清可,段学军,王磊,等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学,2018,38(1):97-106.
Yang Qingke, Duan Xuejun, Wang Lei, et al. Land use transformation based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects: a case study in the Yangtze River delta [J]. Geographical Science, 2018, 38(1): 97-106.

[10] 高星,刘泽伟,李晨曦,等. 基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J]. 生态学报,2020,40(20):7113-7122.
Gao Xing, Liu Zewei, Li Chenxi, et al. Land use function transformation in the Xiong'an New Area based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20):

7113-7122.

[11] 董建红,张志斌,笪晓军,等."三生"空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力——以甘肃省为例[J]. 生态学报,2021,41(15):5919-5928.
Dong Jianhong, Zhang Zhibin, Da Xiaojun, et al. Eco-Eco-environmental effects of land use transformation and its driving forces from the perspective of "production-living-ecological" spaces: a case study of Gansu Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 5919-5928.

[12] 张媛,熊晶,於少平,等. 2016—2024年湖北省生态质量时空变化特征及影响因素分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2026,60(2):176-187.
Zhang Yuan, Xiong Jing, Yu Shaoping, et al. Assessing spatio-temporal changes and influential factors of ecological quality in Hubei Province from 2016 to 2024[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2026, 60(20): 176-187.

[13] 汪媛媛,臧协超,贺新星,等. 遥感驱动与多源融合方法的生态质量评价对比研究——以江苏省为例[J]. 自然资源遥感,2026,38(1):184-195.
Wang Yuanyuan, Zang Xiechao, He Xinxing, et al. A comparative study between remote sensing-driven and multi-source fusion methods for ecological quality assessment: a case study in Jiangsu Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2026, 38(1): 184-195.

[14] 许伟伟,臧协超,金洋,等. 基于EQI和地理探测器的江苏省区县生态质量评价与驱动力分析[J]. 环境科学,2025,46(6):3760-3771.
Xu Weiwei, Zang Xiechao, Jin Yang, et al. Assessment and driving force analysis of ecological quality in Jiangsu Province's counties based on EQI and geographic detectors [J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3760-3771.

[15] Zhu S, Zhao Y, Huang J, et al. Analysis of spatial-temporal differentiation and influencing factors of ecosystem services in resource-based cities in semiarid regions[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 871.

[16] Tian Y, Liu B, Hu Y, et al. Spatio-temporal land-use changes and the response in landscape pattern to hemeroby in a resource-based city [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(1): 20.

[17] 李文涛,李岳,徐若鹏,等. 青藏高原草地生态系统质量时空变化特征及归因分析[J]. 环境监控与预警,2025,17(3):97-104.
Li Wentao, Li Yue, Xu Ruopeng, et al. Spatiotemporal variation and attribution analysis of grassland ecosystem quality on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2025, 17(3): 97-104.

[18] Sun C, Li J, Liu Y, et al. Ecological quality assessment and monitoring using a time-series remote sensing-based ecological index (ts-RSEI) [J]. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1423-1443.

[19] Moreno-Mateos D, Alberdi A, Morriën E, et al. The long-term restoration of ecosystem complexity[J]. Nature Ecology & Evolution, 2020, 4: 676-686.

[20] Ye Z, Gong J, Teng W, et al. Climate change and human activities have resulted in substantial alterations to ecosystem quality within the Yarlung Zangbo River basin [J]. Ecological Frontiers, 2025, 45(4): 925-938.

[21] Wu J, Li W, Du H, et al. Nonlinear responses of coupled socioecological systems to land use and climate changes in the Yangtze river basin [J]. Scientific Reports, 2025, 15: 4123.

[22] Guo S, Wu C, Wang Y, et al. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China [J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108603.

[23] Zhang Z, Tong Z, Zhang L, et al. What are the dominant factors and optimal driving threshold for the synergy and tradeoff between ecosystem services, from a nonlinear coupling perspective? [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 422: 138609.

[24] Cai Y, Li X, Zhu P, et al. China Earth Observation Data Cube: The 30-m Seamless Annual Leaf-On Landsat Composites from 1985 to 2023[J]. Journal of Remote Sensing, 2025, 5: 0698.

[25] 彭守璋. 中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2024)[DS]. 国家青藏高原科学数据中心,2019.
Peng Shouzhang. 1-km monthly mean temperature dataset for china (1901—2024) [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019.

[26] 彭守璋. 中国1km分辨率逐月降水量数据集(1901-2024)[DS]. 国家青藏高原科学数据中心,2020.
Peng Shouzhang. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901-2024) [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2020.

[27] Gebrechorkos S H, Peng J, Dyer E, et al. Global high-resolution drought indices for 1981-2022 [J]. Earth Syst Sci Data, 2023, 15: 5449-5466.

[28] Wei J, Li Z, Lyapustin A, et al. First close insight into global daily gapless 1 km PM2. 5 pollution, variability, and health impact[J]. Nature Communications, 2023, 14: 8349.

[29] Mu H W, Li X C, Wen Y N, et al. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018[J]. Scientific Data, 2022, 9: 176.

[30] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集[DS]. 资

源环境科学数据注册与出版系统,2017.
Xu Xinliang. China GDP spatial distribution kilometer grid dataset[DS]. Resource and Environment Science and Data Center,2017.

[31] Zhang X, Liu L, Zhao T, et al. GWL_FCS30: a global 30 m wetland map with a fine classification system using multi-sourced and time-series remote sensing imagery in 2020, Earth Syst. Earth System Science Data, 2023, 15, 265-293.

[32] 中华人民共和国生态环境部. 全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估:HJ 1172—2021[S]. 北京:中国环境出版集团,2021.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specification for investigation and assessment of national ecological status——Ecosystem quality assessment: HJ 1172—2021 [S]. Beijing: China Environmental Press,2021.

[33] Alexandridis T K, Ovakoglou G, Clevers J G P W. Relationship between MODIS EVI and LAI across time and space [J]. Geocarto International,2020,35(13),1385-1399.

[34] 徐若鹏. CO_2浓度变化对青藏高原草地生态系统质量的影响研究[D]. 廊坊:北华航天工业学院,2023.
Xu Ruopeng. The impact of CO_2 concentration change on the quality of grassland ecosystem in the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Langfang: North China Institute of Aerospace Engineering,2023.

[35] Sen P K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association,1968,63(324):1379-1389.

[36] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. London: Charles Griffin,1948.

[37] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica: Journal of the econometric society,1945,13(3): 245-259.

[38] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951,116(1):770-799.

[39] 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.

[40] 张文忠,余建辉. 中国资源型城市转型发展的政策演变与效果分析[J]. 自然资源学报,2023,38(1):22-38.
Zhang Wenzhong, Yu Jianhui. Policy evolution and transformation effect analysis of sustainable development of resource-based cities in China[J]. Journal of Natural Resources,2023,38(1):22-38.

[41] 王宗明,国志兴,宋开山,等. 中国东北地区植被NDVI对气候变化的响应[J]. 生态学杂志,2009,28(6):1041-1048.
Wang Zongming, Guo Zhixing, Song Kaishan, et al. Responses of vegetation NDVI in Northeast China to climate change [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1041-1048.

[42] 国志兴,王宗明,宋开山,等. 1982—2003 年东北林区森林植被NDVI与水热条件的相关分析[J]. 生态学杂志,2007,26(12):1930-1936.
Guo Zhixing, Wang Zongming, Song Kaishan, et al. Correlations between forest vegetation NDVI and water/thermal condition in Northeast China forest regions in 1982-2003 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 1930-1936.

[43] 杨崇曜,王军,张骁,等. 基于自然的解决方案的生态保护修复前沿进展与实践路径研究[J]. 自然资源学报,2024,39(12):2753-2767.
Yang Chongyao, Wang Jun, Zhang Xiao, et al. Research on frontier advances and implementation pathway of ecological conservation and restoration with Nature-based Solutions[J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(12): 2753-2767.

[44] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2007.
Wu Jianguo. Landscape ecology: pattern, process, scale, and hierarchy [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press,2007.

[45] 田锐,郑嘉鑫,宋东阳,等. 基于生态系统服务价值与生态安全格局的国土空间生态修复区域识别——以天津市蓟州区为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2024,60(4):456-465.
Tian Rui, Zheng Jiaxin, Song Dongyang, et al. Identification of ecological restoration of territorial space based on ecosystem service value and ecological security pattern: a case study of Jizhou District, Tianjin City[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2024, 60(4): 456-465.