

# 基于 RSEI 的辽河流域生态环境动态变化、 归因及分区研究

罗清, 张靖, 鲍雅静, 李政海, 许银龙

(大连民族大学 环境与资源学院, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** [目的] 揭示辽河流域生态环境的时空动态变化特征及其驱动机制, 并基于此构建生态管理分区框架, 为区域生态环境保护和可持续发展提供科学支持。[方法] 基于 2000 至 2022 年的遥感生态指数 (remote sensing ecological index, RSEI) 分析辽河流域生态环境质量的时空动态变化趋势, 识别其关键驱动因子, 并结合 RSEI 分布格局、变化趋势及驱动因子, 构建多维度的生态分区框架, 完成辽河流域生态管理分区。[结果] ① 辽河流域生态环境质量呈逐年改善趋势, 空间上表现为“中部差、东西优”的空间分布格局。② 降水是 RSEI 空间分异的主导因素, 其次为土地利用、温度、高程和坡度。③ 基于分区结果, 全流域可划分为生态核心保护区、生态优化区、生态监测区、生态修复区和生态重点治理区, 生态核心保护区集中于流域东部, 生态重点治理区则位于流域中部。[结论] 2000—2022 年辽河流域的生态环境质量不断改善, 降水和土地利用是其主要驱动因子, 未来需加强对生态核心保护区的保护力度, 并将更多资源投入到生态重点治理区。

**关键词:** 生态管理分区; 遥感生态指数; 地理探测器; 辽河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0360-11

中图分类号: X321

**文献参数:** 罗清, 张靖, 鲍雅静, 等. 基于 RSEI 的辽河流域生态环境动态变化、归因及分区研究[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 360-370. Luo Qing, Zhang Jing, Bao Yajing, et al. A study on eco-environmental dynamics, causes, and zoning over Liaohe River basin based on remote sensing ecological index (RSEI) [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 360-370. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.036; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.036.

## A study on eco-environmental dynamics, causes, and zoning over Liaohe River basin based on remote sensing ecological index (RSEI)

Luo Qing, Zhang Jing, Bao Yajing, Li Zhenghai, Xu Yinlong

(College of Environment and Resources, Dalian Minzu University, Dalian, Liaoning 116600, China)

**Abstract:** [Objective] The spatiotemporal dynamics and driving mechanisms of the eco-environment in the Liaohe River basin were revealed, and an ecological management zoning framework was established, so as to provide scientific support for regional ecological environment protection and sustainable development. [Methods] Based on the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) from 2000 to 2022, the spatiotemporal dynamics in eco-environment quality from 2000 to 2022 were analyzed, and its key driving factors were identified. Combined with the spatial distribution pattern, change trend and driving factors of RSEI, a multi-dimensional ecological zoning framework was constructed, and the ecological management zoning of Liaohe River Basin was completed. [Results] ① The eco-environment quality in the Liaohe River Basin improved annually, with a spatial pattern of “poor in the middle, excellent in the east and west.” ② Precipitation was the primary driving factor of RSEI spatial variation, followed by land use, temperature, elevation, and slope.

收稿日期: 2024-09-26

修回日期: 2024-12-24

采用日期: 2024-12-24

资助项目: 国家自然科学基金“氮遗留和刈割影响草原植物功能群替变的能量策略及性状网络构建机制”(32371639); 中央高校基本科研业务费(0919/140193)

第一作者: 罗清(1999—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态环境遥感。Email: ai\_leqiu@stu.dlnu.edu.cn.

通信作者: 张靖(1981—), 男(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 讲师, 主要从事环境遥感监测等方面的研究。Email: zhangjing@dlnu.edu.cn.

③ Based on the zoning results, the entire basin can be divided into core ecological protection areas, ecological optimization areas, ecological monitoring areas, ecological restoration areas, and key ecological management areas. Core ecological protection areas are concentrated in the eastern basin, while key ecological management areas are located in the central basin. [Conclusion] From 2000 to 2022, the eco-environment quality of the Liaohe River basin continuously improved, with precipitation and land use being primary driving factors. In the future, prioritized conservation measures are needed to strengthen the protection of core ecological protection areas and more resources should be allocated to key ecological management areas.

**Keywords:** ecological management zone; remote sensing ecological index; Geo-Detector; Liaohe River basin

近几十年来,由于气候变暖、极端天气事件频发,以及人类对资源和环境的过度开发等,生态系统遭受了前所未有的负面干扰<sup>[1-3]</sup>,导致土地退化、生物多样性下降等问题日益凸显,严重威胁着人类社会的可持续发展<sup>[4]</sup>。为应对这些挑战,实现生态系统保护与绿色高质量发展,需要在全面评估生态环境质量及其影响因素的基础上<sup>[5]</sup>,开展高效的分区管理。即通过生态管理分区,针对性地改善或修复区域生态系统结构,恢复其生态完整性,以实现区域的可持续发展<sup>[6]</sup>。

生态环境评价是实现高效生态管理分区的基础。随着遥感和地学分析技术的发展,生态环境评价方法日益完善<sup>[7]</sup>。当前大尺度生态环境评价方法主要包括两类:①基于气候变化和人类活动建模的 NDVI 时空模型<sup>[8]</sup>;②基于多源数据环境质量指数加权的评价方法<sup>[9]</sup>。在实际应用过程中,前者因依赖单一的 NDVI 指标,难以全面客观地反映出复杂的生态环境状况;而后者由于指标来源多样(如生物丰度、土地退化、植被覆盖等),以及人为加权的引入难以客观准确地监测目标地区环境变化。为克服上述不足,遥感生态指数 RSEI 应运而生。该方法耦合了绿度、湿度、干度和热度 4 个遥感物理指标<sup>[10]</sup>,通过主成分分析法为各指标客观定权,避免了人为选择权重对结果的干扰<sup>[11]</sup>。该方法不仅能对区域生态环境质量进行时空分析,还可以对生态环境演变方向进行模拟与预测,已广泛应用于监测生态环境质量变化<sup>[12]</sup>。近年来,RSEI 已逐渐应用到生态管理分区中,可以有效指导生态系统的保护、恢复、管理及重建。例如,王敏等<sup>[13]</sup>将 RSEI 与 FAI 藻类指数模型相结合,根据两者之间的耦合协调度评价结果将千岛湖库划分为三级生态功能区。徐彩瑶等<sup>[14]</sup>采用 RSEI 作为杭州湾区生态弹性指标,结合其动态变化进行分级区划。然而,现有研究普遍忽视了生态环境时空演变特征和相关驱动因子对分区管理的重要意义,在生态管理分区过程中未被考虑,难以全面反映大尺度下区域的空间异质性和时间变异性。

辽河流域是中国东北地区重要的流域系统,是东

北老工业基地和商品粮基地的重要组成部分,其西北部更是位于农牧交错带生态脆弱区。保护流域的生态环境对维护生物多样性和生态系统稳定,促进地区的宏观调控和可持续发展具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。自 2000 年以来流域内已开展了一系列生态工程,其西部的科尔沁沙地更是生态修复的重点实施区域<sup>[17]</sup>。但由于气候变化、自然资源开发及社会经济发展的多重制约,流域内仍面临着生态系统退化、资源配置不合理、管理模式落后等问题<sup>[18]</sup>。当前流域内长时期、大尺度的生态质量评价的研究仍然较少,生态环境的变化方向及其关键驱动因子的认识仍不充分,无法为生态系统的分区管理提供有效支撑。

为此,本研究采用耦合绿度、湿度、干度和热度 4 个指标的遥感生态指数(RSEI)评价体系,旨在:①分析 2000—2022 年辽河流域生态环境质量分布格局及时空变化趋势。②识别 RSEI 变化的关键驱动因子。③结合 RSEI 的分布格局、变化趋势和驱动因子划分生态管理分区。通过本研究,以期为辽河流域的可持续发展和差异化分区管理提供科学支持和政策参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

辽河流域(117°00′—125°30′ E, 40°30′—45°10′ N)位于中国东北地区西南部,源于河北省,流经内蒙古、吉林、辽宁等地,注入渤海,流域总面积约  $2.19 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。辽河流域大部分地区属温带半湿润半干旱的季风气候,年降水量约为 350~1 000 mm,降水量的 65%集中于每年的 4—9 月;年平均气温 4~9 °C,7 月平均气温最高 20~30 °C,1 月最低平均气温 -10~-18 °C。流域地势大体是自北向南、自东西两侧向中间倾斜,地理概况见图 1。

### 1.2 数据来源

RSEI 指标由绿度(NDVI)、湿度(WET)、热度(LST)和干度(NDBSI)4 个分量组成,分别由 MODIS-MOD13Q1,MOD09A1,MOD09A1 和 MOD11A2 标准

数据产品计算得出,数据下载网址 <https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>,共选用了 2000—2022 年共计 23 a 的 5—9 月的生长季数据,数据见表 1。

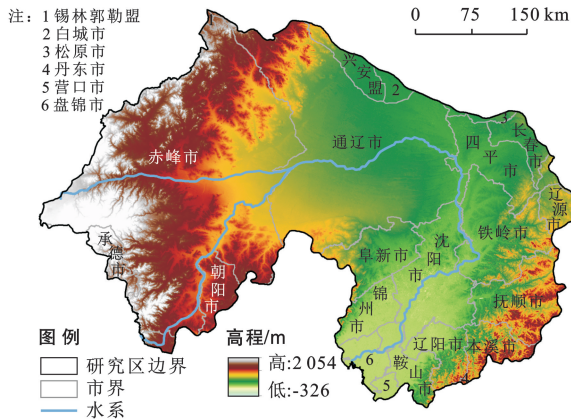


图 1 辽河流域地形图

Fig.1 Topographic map of Liaohe River basin

导致 RSEI 时空变化的驱动因素包括自然因素和人为因素两大类。其中,自然因素包括 DEM、温度、降水,人为因素包括土地利用、人口、GDP、夜间灯光和交通。DEM 来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>);温度、降水、土地利用、GDP 来自

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

式中: $f$  代表主成分分析,NDVI 为归一化植被指数,WET 为湿度指数,LST 为地表温度,NDBSI 为建筑和土壤指数。PC1 为第一主成分。为了便于后续的分析与对比,再将获得的初始  $RSEI_0$  进行归一化处理。

$$RSEI = \frac{(RSEI_0 - RSEI_{0_{min}})}{(RSEI_{0_{max}} - RSEI_{0_{min}})} \quad (2)$$

式中: $RSEI_{0_{min}}$ ,  $RSEI_{0_{max}}$  为目标年份  $RSEI_0$  的最小值和最大值; $RSEI$  为最终的遥感生态指数。

1.3.2 RSEI 变化特征分析 采用趋势性、波动性和持续性表述辽河流域 RSEI 变化特征。

(1) 趋势性分析。采用 Theil-Sen median 法,它是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,该方法对于测量误差和离群数据不敏感<sup>[22]</sup>。分析结果采用 Mann-Kendall(MK)检验,显著水平定为 0.05。根据趋势分析和显著性检验结果,将 RSEI 的变化趋势划分为 5 类,分别为显著改善、轻微改善、稳定不变、轻微恶化和显著恶化。

(2) 波动性分析。采用变异系数(coefficient of variation, CV)来反映辽河流域 RSEI 2000—2022 年的波动趋势,该数值越低,说明波动程度越低。采用自然断点法将波动性分为 4 类,分别为:小波动、较小

国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>);人口数据来自 WorldPop 发布的世界人口密度地图(<https://www.worldpop.org/>);夜间灯光数据来自 DMSP/OLS 的夜间灯光指数(<https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/dmsp.html>);交通数据来自 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>)。

表 1 构建 RSEI 模型的 4 个指标数据

Table 1 Four Index data of constructing RSEI Model

分量指标	产品编号	空间分辨率/m	时间分辨率/d	级别
NDVI	MOD13Q1	250	16	L3
WET	MOD09A1	500	8	L3
NDBSI	MOD09A1	500	8	L3
LST	MOD11A2	1 000	8	L3

### 1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数(RSEI)构建 绿色、湿度、热度和干度是评估生态质量的重要指标,能帮助人们直观感知生态条件的优劣,常被用于评价生态系统的状态<sup>[19]</sup>。因各个指标的量纲不同,故先对其归一化至  $[0, 1]$  范围,再进行主成分分析,最终获得初始  $RSEI_0$ <sup>[20-21]</sup>,其函数表达式为:

波动、较大波动和大波动<sup>[23]</sup>。

(3) 持续性分析。采用 Hurst 指数,其可以用以预测未来趋势的稳定性。根据 Hurst 指数的大小,将 RSEI 分为:强反持续性( $0 < H \leq 0.35$ ),弱反持续性( $0.35 < H \leq 0.5$ ),弱持续性( $0.5 < H \leq 0.65$ )和强持续性( $0.65 < H \leq 1$ )。

1.3.3 地理探测器模型 空间分异性是地理现象的基本特点之一。地理探测器则是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,被广泛用于驱动力分析和因子分析。地理探测器是由王劲峰等<sup>[24]</sup>于 2017 年提出,其包含了 4 个探测器。本文选用了分异及因子探测和风险区探测。分异及因子探测用于探测自然和人为因子对 RSEI 空间分异的解释力度<sup>[25]</sup>,其公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: $L$  为 RSEI 或驱动因子的分层; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别是层  $h$  和全区的 RSEI 值的方差; $q$  表示因子对 RSEI 的解释力度,值域为  $[0, 1]$ ,值越大,解释力度越强。

1.3.4 辽河流域生态管理分区框架的建立 首先,本研究结合构建好的 RSEI 模型,利用地理探测器变异及因子探测筛选出多年平均解释力度大于 0.1 的驱动因子,借助风险区探测对驱动因子子区间赋予 1~6 分,即子区间对应的 RSEI 越大,分值越高;随后,根据不同驱动因子解释力度大小占解释力度总和的比值赋予权重,对不同驱动因子叠加分析,得到

RSEI 适宜性发展图层;然后,结合 2000—2022 年辽河流域 RSEI 的 Theil-Sen Median 趋势、波动性 CV 和可持续性 Hurst 指数,获得辽河流域 23 a 间的变化特征;最后,采用 AHP 层次分析法对 RSEI 的空间分布、RSEI 适宜性发展和 RSEI 变化特征进行赋权,借助地理加权叠加分析,获得辽河流域生态管理分区(流程图见图 2)。

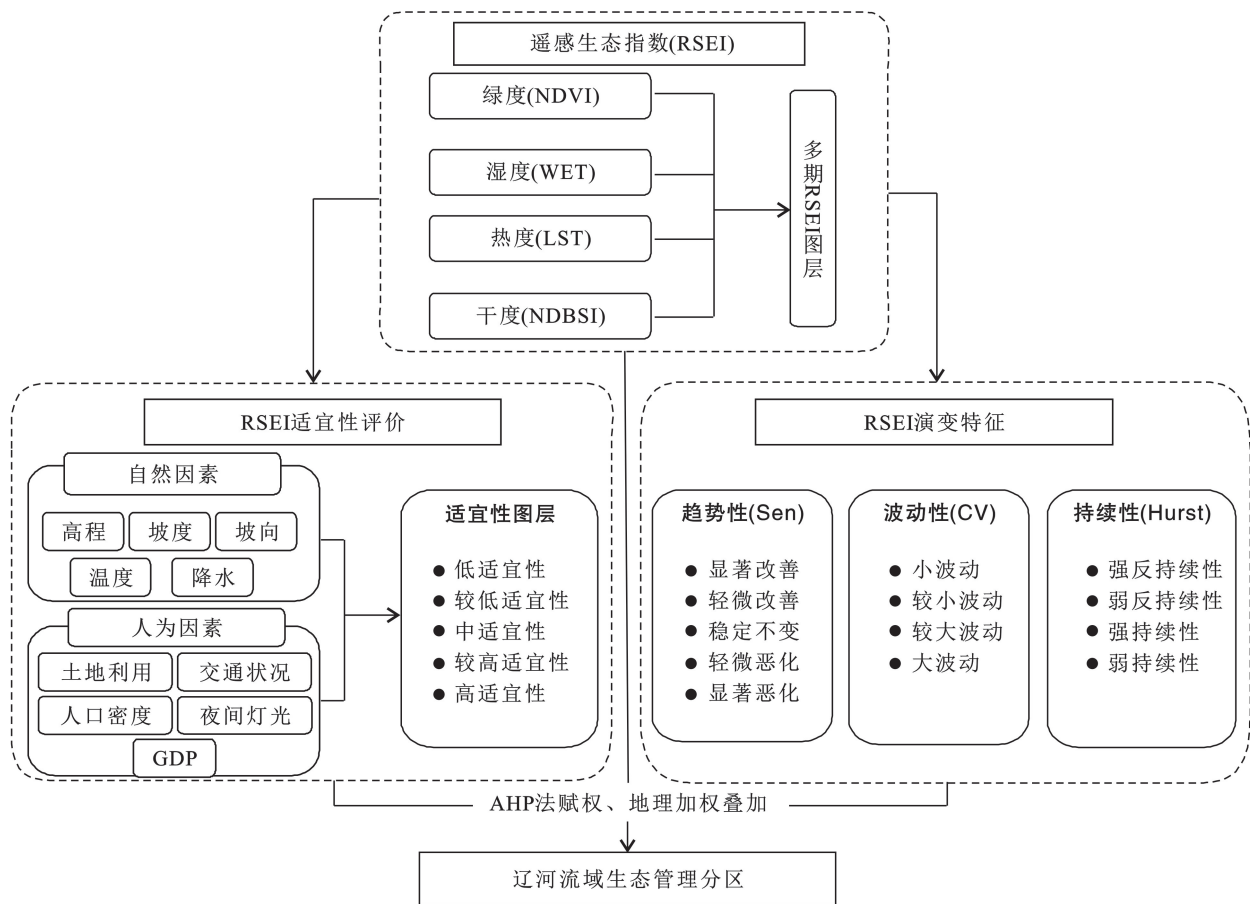


图 2 辽河流域生态管理分区框架建立的流程图

Fig.2 Flow chart of establishing ecological management zoning framework in Liaohe River basin

## 2 结果与分析

### 2.1 RSEI 指数检验

对辽河流域 2000—2022 年逐年的 4 个指标进行主成分分析,获得各个分量的向量值和第一主成分的贡献值。由表 2 可知,绿度(NDVI)和湿度(WET)均为正值,说明 NDVI 和 WET 对辽河流域的 RSEI 有正向影响,而干度(NDBSI)和热度(LST)均为负值,它们对 RSEI 起负向作用,这与实际情况相符。此外,辽河流域所选的几个年份的贡献率均大于 80%,平均值为 86.7%,说明第一主成分 PC1 能够较好地代表研究区域的生态环境质量,可用于构建 RSEI。

表 2 辽河流域不同年份第一主成分向量值和贡献率

Table 2 Vector and contribution rate of PCA<sub>1</sub> in different years in Liaohe River basin

年份	第一主成分(PC <sub>1</sub> )				贡献率/ %
	绿度 (NDVI)	湿度 (WET)	干度 (NDBSI)	热度 (LST)	
2000	0.642	0.377	-0.298	-0.598	88.1
2005	0.582	0.486	-0.129	-0.639	85.8
2010	0.604	0.486	-0.150	-0.614	89.3
2016	0.626	0.485	-0.131	-0.596	88.0
2022	0.591	0.429	-0.316	-0.606	81.8
平均值	0.609	0.453	-0.205	-0.612	86.6

### 2.2 RSEI 时空分布特征

2000—2022 年,辽河流域遥感生态指数(RSEI)整体呈波动上升趋势(图 3)。RSEI 值由 2000 年的

0.43, 2010 年的 0.51, 至 2016 年的 0.53, 2022 年的 0.58, 平均以 0.004/a 的速率提升, 说明研究区内生态环境质量不断改善, 也进一步表明近些年在流域内实施的各项生态工程及政策措施取得了显著成效。其中, 2000—2005 年期间 RSEI 提升最快, 共提升了 0.12。2005—2012 年期间提升平缓, 上下波动较大。而在 2012—2016 年期间 RSEI 出现了下降趋势。

根据《生态环境评价技术规范》(HJ 192—2015) 中划分方法, 以 0.2 为间隔将辽河流域 RSEI 划分为 5 个等级, 即: 差 $[0, 0.2]$ , 较差 $(0.2, 0.4]$ , 中 $(0.4, 0.6]$ , 良 $(0.6, 0.8]$ 和优 $(0.8, 1]$ 。辽河流域 RSEI 表现出明显的空间分布差异(图 4), 呈现出“中部差, 东西优”的分布格局, 且在 23 a 间中部较差的区域生态环境得到了明显提升。从变化面积来看, 2000—2022 年, 流域 RSEI 为良的面积增加最多, 由 2000 年的  $3.98 \times 10^4 \text{ km}^2$  增长至 2022 年的  $8.60 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 面积所占比例共增

加了 21%; RSEI 为较差的面积减少最多, 由  $7.66 \times 10^4 \text{ km}^2$  减少至  $3.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 共减少了  $4.40 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 2000 年流域内大部分区域 RSEI 等级为较差, 而 2022 年流域内大部分区域 RSEI 等级为良。

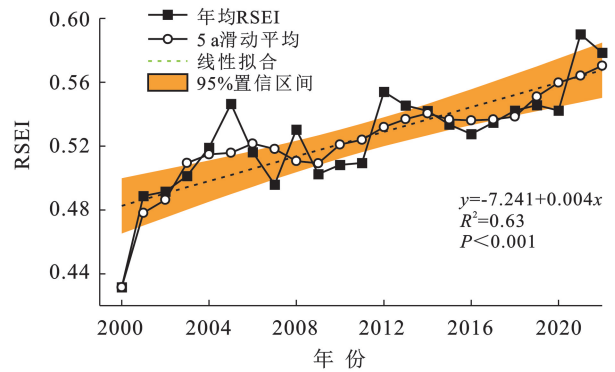


图 3 2000—2022 年辽河流域 RSEI 均值变化趋势

Fig.3 Variation trend of RSEI mean value in Liaohe River basin from 2000 to 2022

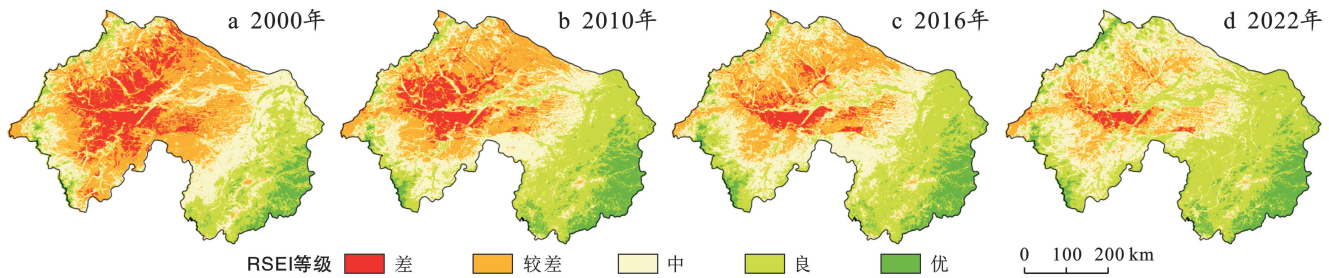


图 4 2000—2022 年辽河流域 RSEI 的等级分布

Fig.4 Grade distribution of RSEI in Liaohe River basin from 2000 to 2022

### 2.3 RSEI 变化趋势及稳定性分析

从 RSEI 变化趋势来看, 除在 2011—2016 年流域西北部和中部偏东南侧出现了较大面积的轻微退化趋势外(图 5b), 各时期生态环境改善的面积均大于生态环境退化的面积(图 5a, 5c, 5d)。2000—2022 年, 辽河流域 RSEI 除东南侧为轻微恶化外, 整

体表现为轻微改善, 面积约为  $1.62 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总流域面积的 73.3%。对比 2000—2010 年和 2000—2022 年两个期间, 显著恶化和显著改善的面积均在减少, 分别减少了  $1.50 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,  $5.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 而轻微改善的面积增加了  $6.98 \times 10^4 \text{ km}^2$  (面积所占比例增加 31.6%)。

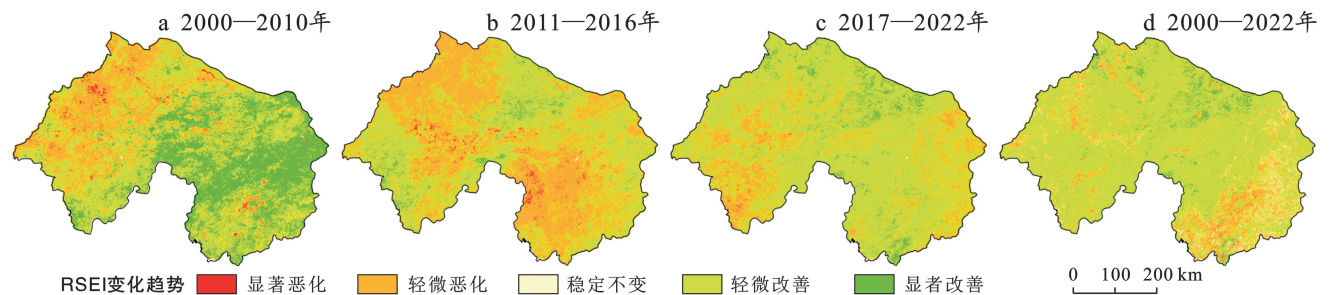


图 5 辽河流域 RSEI 的年际变化趋势

Fig.5 Annual variation trend of RSEI in Liaohe River basin

从 RSEI 波动性来看(图 6a), 23.7% 的流域面积处于小波动等级, 分布在流域东西两侧环境质量较高

的区域; 24.5% 的流域面积属于大波动等级, 分布在流域中部环境较差的区域。结合 RSEI 趋势性和持

续性来看(图 6a—6b),6.6%的区域处于恶化趋势且具有持续性,41.7%处于改善趋势但具有反持续性,这类区域有着较高的生态环境恶化风险。

### 2.4 辽河流域 RSEI 驱动分析与适宜性评价

研究选用 12 个可能影响辽河流域 RSEI 分布

的驱动因子,单因子检测结果见表 3。综合 2000—2022 年辽河流域 RSEI 各个年份的影响因子  $q$  值,解释力度排在前 5 的驱动因子依次为:降水(0.605)、土地利用(0.506)、温度(0.203)、高程(0.142)、坡度(0.133)。

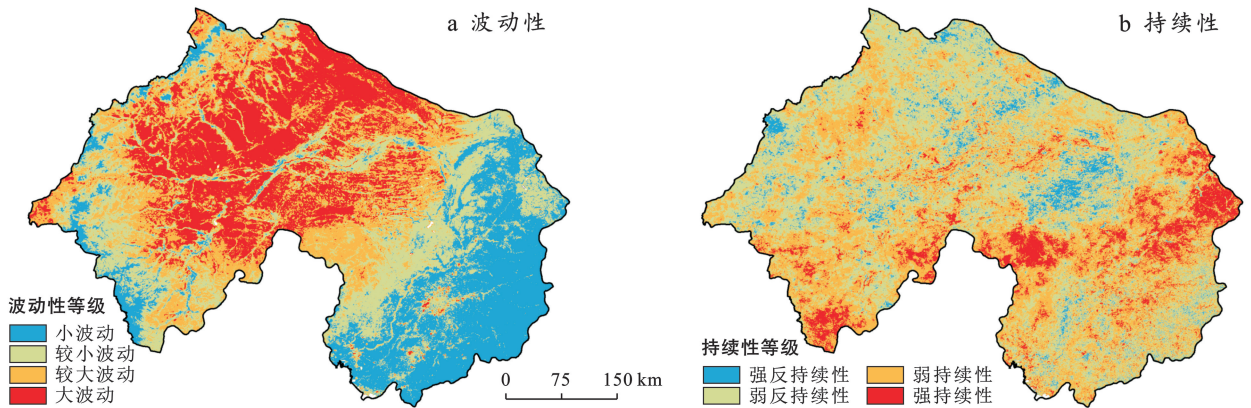


图 6 辽河流域 RSEI 的波动性及持续性

Fig.6 Volatility and persistence of RSEI in Liaohe River basin

表 3 辽河流域单因子探测结果

Table 3 Results of single factor detection in Liaohe River basin

驱动因子	2000 年		2010 年		2016 年		2022 年		2000—2022 年	
	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序	$q$ 值	排序
坡度	0.204	4	0.066	7	0.154	4	0.110	5	0.133	5
坡向	0.019	8	0.029	8	0.001	11	0.003	11	0.013	9
高程	0.146	6	0.218	3	0.087	5	0.118	4	0.142	4
温度	0.414	3	0.101	5	0.166	3	0.130	3	0.203	3
降水	0.701	1	0.634	1	0.635	1	0.450	1	0.605	1
土地利用	0.579	2	0.464	2	0.569	2	0.413	2	0.506	2
人口密度	0.005	12	0.004	10	0.004	9	0.027	8	0.010	10
GDP	0.014	10	0.160	4	0.007	8	0.033	7	0.054	7
夜间灯光	0.180	5	0.068	6	0.007	7	0.044	6	0.075	6
离铁路距离	0.005	11	0.006	9	0.001	12	0.014	9	0.007	12
离高速距离	0.030	7	0.000	12	0.004	10	0.000	12	0.009	11
离干道距离	0.015	9	0.001	11	0.045	6	0.011	10	0.018	8

各驱动因子子区间范围内的 RSEI 值越高,则对应的分值也越高。本研究筛选出解释力度大于 0.1 的驱动因子,根据风险区探测及分区统计结果,分级及赋分见表 4。在流域范围内,RSEI 随着降水量的增加而增大,而与温度存在多个转折点。从土地利用类型来看,林地生态最优,未利用地生态最差。此外,RSEI 随着坡度的增大而增大,而与海拔则呈现出先降低后升高的趋势,以 600~900 m 区间生态状况最差。

根据不同驱动因子的解释力度的比例进行加权叠加(表 4),采用自然断点法,将区域分为低适宜、较低适宜、中适宜、较高适宜和高适宜 5 类(图 7),分别占总流

域面积的 25.4%,18.5%,13.8%,20.6%和 11.7%。高适宜区集中在东南部的抚顺市、本溪市,这类区域海拔高,水热条件好,具有较高的生态发展潜力;而低适宜区集中于赤峰市中部的翁牛特旗、巴林右旗等地,降水较少,土地类型以耕地为主,生态本底相对较差。

### 2.5 辽河流域的生态管理分区及管护策略

基于 RSEI 的分布格局,变化趋势和适宜性评价,采用层次分析法(AHP)分别赋予为 0.33,0.26,0.41 权重,绘制了辽河流域的生态管理区划(图 8)。将流域划分为生态核心保护区、生态优化区、生态监测区、生态修复区和生态重点治理区等 5 个分区,各分区面积的比例及分布特征如下所述。

表 4 辽河流域 RSEI 适宜性评价指标分级赋值与权重

Table 4 Hierarchical assignment and weighting of RSEI suitability evaluation indicators in Liaohe River basin

驱动因子	权重	权重分值及对应区间					
		1	2	3	4	5	6
月平均降水/mm	0.38	[24.34,31.93]	(31.93,51.53]	(51.53,59.67]	(59.67,77.63]	(77.63,88.57]	(88.57,108.29]
土地利用类型	0.32	未利用地	建设用地	水域	草地	耕地	林地
年平均气温/℃	0.13	(7.53,8.18]	(1.99,3.38] (8.18,9.03]	(3.38,4.98] (9.03,10.53]	(6.79,7.53]	(4.68,5.83]	[-1.28,1.99] (5.83,6.79]
海拔高度/m	0.09	(600,900]	(300,600]	(900,1 200]	(1 200,1 500]	[-326,300]	(1 500,2 054]
坡度/(°)	0.08	[0,5]	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,30]	(30,90]

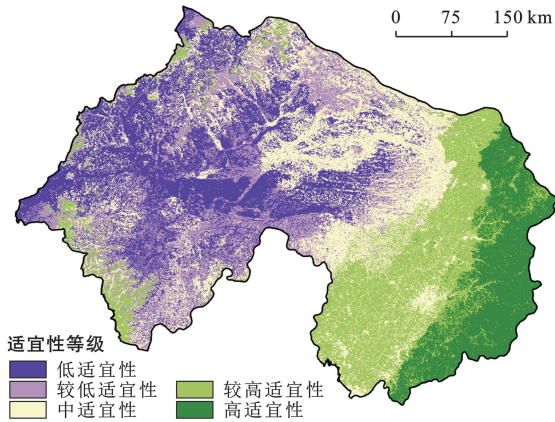


图 7 辽河流域 RSEI 的适宜性评价

Fig.7 Appropriateness evaluation of RSEI in Liaohe River basin

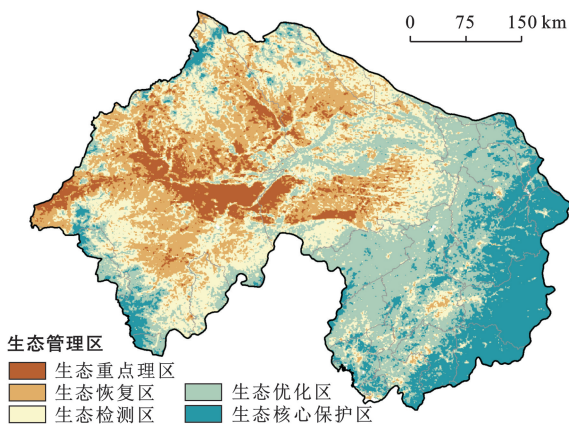


图 8 辽河流域 RSEI 的生态管理区划

Fig.8 Ecological management zoning for RSEI in Liaohe River basin

核心保护区主要分布于流域东部地区,包括四平、辽源、抚顺和本溪等城市,其总面积所占比例为 16.5%,是流域生态安全的基石。这一分区的 RSEI 值普遍较高,适宜性评价结果显示该区域具备良好的生态发展潜力,主要以林地为主,植被覆盖率高,水热条件优越。核心保护区在流域生态安全格局中发挥着重要作用,对水土流失的防控、土壤保持及区域碳汇能力的提升具有重要意义。

优化区面积最大,所占比例约为 29.6%,主要分

布于沈阳、阜新、通辽等地,是生态潜力的挖掘空间。这一分区的生态环境质量较好,但与核心保护区相比,生态系统的稳定性和抗干扰能力相对较弱,植被覆盖率中等,土地利用以耕地和草地为主。优化区的生态服务功能存在提升空间,应通过植被结构优化和土地利用调整进一步改善区域生态功能。

监测区面积所占比例为 25.5%,呈现出较强的空间异质性,分布于流域的不同地带,包括部分城市周边和乡村过渡区,是生态动态变化的重点观察区域。这一分区的 RSEI 值处于中等水平,生态环境质量相对稳定,但部分区域易受到外界干扰(如农业扩张或城市化进程)。监测区在流域生态管理中应被视为环境动态监测的重点区域,以便及时预警潜在的生态退化风险。

修复区面积所占比例为 21.0%,集中于流域的中部和西南部,这些区域以退化耕地和未利用地为主,RSEI 值较低,生态适宜性差,是退化生态系统的目标恢复区域。修复区的土壤侵蚀和沙化问题显著,土地生产力低下,对流域整体生态功能的贡献有限。需要通过退耕还林、封山育林、植被重建等措施加快生态恢复,提升区域生态系统的结构与功能。

重点治理区主要集中在赤峰市和通辽市,面积最小,仅占辽河流域面积的 7.4%,但分布区域的生态问题最为严重,主要集中在赤峰市和通辽市北部的沙化区域,生态压力最大的区域。这些区域多为未利用地,植被稀少,RSEI 值低,沙地扩张趋势明显,不断地侵蚀着周边的耕地、林地,导致土地生产力下降、生态环境恶化,严重影响经济与社会的可持续性发展。治理区的适宜性评价显示,该区域生态恢复难度较大,需要采取综合措施进行治理,包括大规模人工造林、工程固沙、植被恢复等。此外,还可以探索沙地资源的综合开发,例如发展光伏发电或生态产业,以实现生态治理与经济效益双赢。

## 3 讨论

### 3.1 辽河流域生态环境变化

辽河流域位于重工业发达的东北地区,流域内人

口密集、产业发达,曾为全国的经济发展做出巨大贡献,但也因此遗留了不少环境问题<sup>[26]</sup>。自 1997 年以来,辽河开始被列为中国重点治理的“三湖三河”之一,成为“九五”期间乃至 2010 年中国环境保护重点工作目标<sup>[27]</sup>。从 2000 年以来,辽河流域整体的生态环境一直在改善,这一趋势反映了生态工程(如“三北防护林工程”和退耕还林政策)的显著成效,林地和草地的扩张显著提高了植被覆盖率,降低了土地沙化风险。然而,本研究同时发现,东南部城市化密集区域(如沈阳市南部和辽阳市)生态环境呈轻微退化趋势。这与城市扩张、产业活动集中以及资源高强度利用密切相关。城市化对区域生态环境的影响呈现出扩散性和长期性,这为未来的生态恢复工作带来了更高的复杂性和挑战。此外,辽河流域整体的生态环境变化趋势与 Gong Cheng 等<sup>[20]</sup>在黄土高原进行的研究结果具有高度一致性,即生态工程在实施初期通常能带来显著改善,但在中后期可能因资源承载能力的饱和和部分区域管理缺失而出现生态质量退化。这表明,生态工程的长期效益不仅取决于初期投入,还需要后续动态管理机制的支持。

### 3.2 RSEI 指标变化的驱动因子分析

许多研究表明温度和降水是生态系统动态变化

的关键气候因子<sup>[28-29]</sup>,本研究也得到了相似的结论。在辽河流域,降水是主导性驱动因子( $q$  值为 0.605),对植被覆盖和土壤湿度具有直接调节作用。当年降水量增加显著提高了区域 RSEI 值,尤其是在流域中部干旱区域,降水的增加改善了土壤水分条件,促进了植被生长和生态系统稳定性增加、生态质量均得到明显提升。但与其他的研究相比发现温度的影响机制更为复杂,表现为非线性作用(图 9a)。即在 RSEI 较低的区域(如科尔沁沙地西部),高温加剧了蒸散作用,土壤水分流失,进一步导致土地沙化和生态恶化;而在 RSEI 高值区域(如长白山—千山山系一带),温度较低且林地覆盖率高,森林通过蒸腾和小气候调节作用维持了较高的生态环境质量。这均说明降水充足与温度适中共同构成了维持生态系统良性循环的重要条件。

此外,2000—2022 年,辽河流域降水和温度均呈现波动上升趋势(图 9b)。降水的增加为植被恢复提供了有利条件,但其年际间的不均衡性对局部区域的生态改善速度造成了一定限制<sup>[30]</sup>。例如,在降水偏少的年份,中部干旱区域的生态改善明显减缓,表明气候波动对辽河流域生态系统的恢复具有一定的制约性。

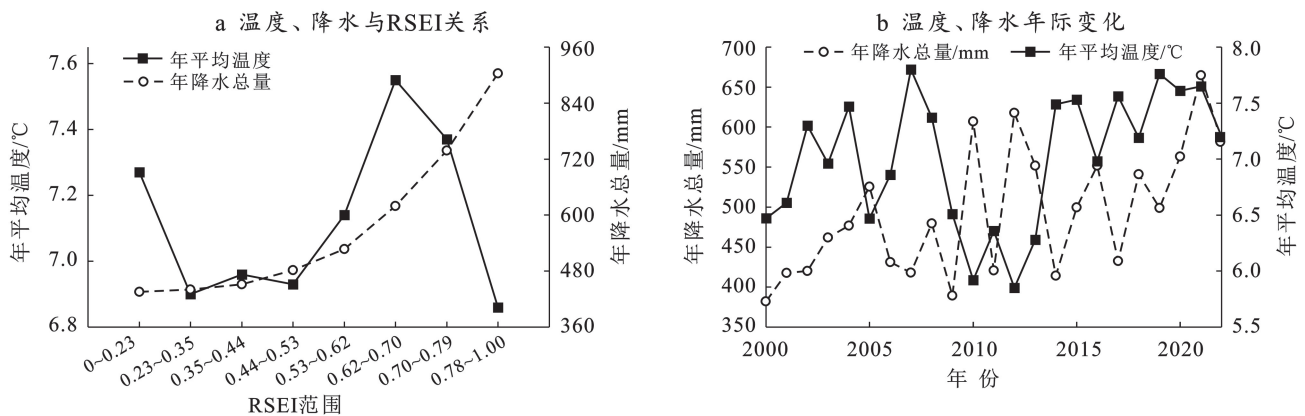


图 9 辽河流域温度、降水变化及与 RSEI 关系

Fig.9 Changes in temperature, precipitation and their relationship with RSEI in Liaohe River basin

综合来看,降水对辽河流域生态环境的改善起到决定性作用,而温度的影响则更多通过与其他因子的协同作用体现。因此,未来的生态恢复工作应聚焦于降水较少、温度较高的气候脆弱区,特别是在中西部沙化区域,通过优化植被结构、增强水资源管理,提升生态系统的韧性和稳定性,以实现流域生态环境的持续改善。

作为人类活动的主要形式,土地利用变化直接影响生态环境质量,与生态系统的结构和功能密切相

关<sup>[31-32]</sup>。自 2000 年以来实施的“三北”防护林工程、“退耕还林还草”等项目<sup>[33]</sup>,极大地改变了辽河流域内土地覆盖。2000—2022 年耕地转化草地、林地面积分别为 12 187.7 和 1 344.5 km<sup>2</sup>,提高了赤峰、通辽等地的植被覆盖程度,显著增强了土壤保蓄能力和生态系统稳定性。从 RSEI 变化来看,不同土地利用类型生态质量均得到了大幅度提升(图 10a)。其中以耕地提升幅度最大,反映农业集约化和可持续管理对农田生态质量改善的关键作用<sup>[34]</sup>。同时,林地在

2000—2022 年的“优”等级 RSEI 面积比例增加了 22%，森林的恢复与林分质量的提高显示出其对生态系统功能的显著贡献。而未利用地的“差”等级 RSEI 面积的比例减少了 15%，表明退化土地的生态恢复取得了显著成效(图 10b)。这些变化表明，土地利用结构的优化显著改善了辽河流域的整体生态环境质

量，特别是对流域中西部沙化区域的治理产生了长期积极影响。未来的生态管理需要持续优化土地利用结构，特别是关注未利用地的生态修复潜力以及林地的扩展效益。同时，应结合生态工程与精准土地管理策略，针对不同分区采取适应性措施，进一步提高土地利用效率和生态系统韧性。

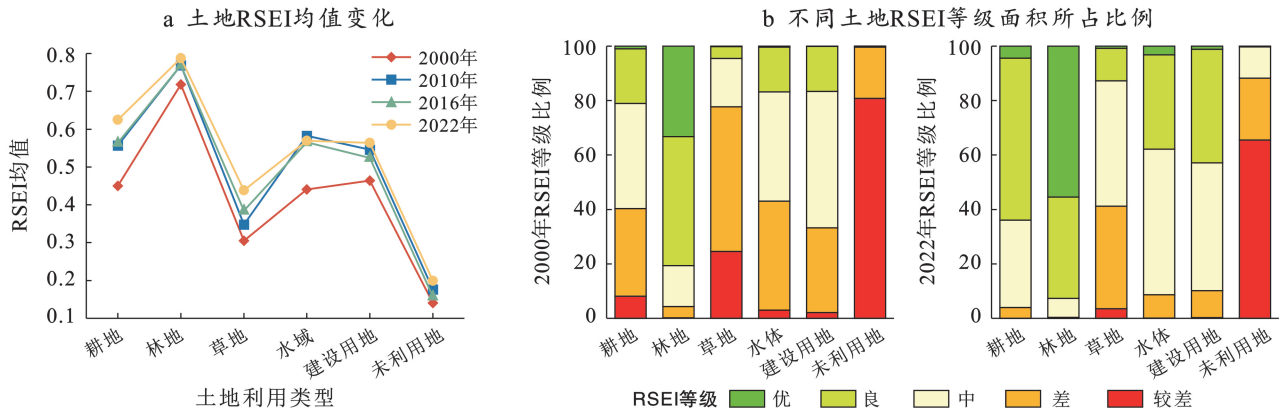


图 10 辽河流域不同土地利用类型的 RSEI 均值及不同等级 RSEI 面积的比例

Fig.10 Mean RSEI and RSEI classes proportion of different land use types in Liaoh River basin

### 3.3 生态管理启示

辽河流域的生态管理需求因区域生态系统的显著空间异质性而高度复杂。传统以生态环境现状为依据的分区规划难以全面反映时空变化特征及其驱动机制的复杂性。为此，本研究结合 RSEI 的空间分布、变化趋势和适宜性评价，构建了“时间—空间—驱动”多维度的生态分区框架，为辽河流域的精细化生态管理提供了新思路。通过分区发现，流域东侧的生态核心保护区植被覆盖度高，生态环境优异，应成为调节生态系统结构和功能的优先区域，增强抗干扰能力。未来管理应以保护为主，防止外界干扰影响区域生态功能。同时，可适度发展生态旅游产业，通过生态科普、旅游经济与环境保护的融合，增强公众生态保护意识并提高区域经济效益。而中部的生态重点治理区是流域生态脆弱性的集中体现。适宜性评价(图 7)显示，该区域因土壤沙化和植被退化，RSEI 值显著偏低，治理需求最为迫切。这类区域应侧重于集约型高效开发，采取综合治理措施，通过人工造林、种草、工程固沙、封山育林等措施，减少沙地扩张，逐步恢复生态系统健康。此外，还需加强监测评估体系建设、健全规划实施保障机制，并进行综合效益评估。

尽管近年来东北地区已经采取了可持续发展战略来改善生态环境，但在实际管理中，单一行政区域的治理难以有效解决跨区域的生态问题。如何打破传统的行政区域，实现流域的统一管理，实现经济增长与生态保护之间的平衡仍然需要深入研究。建议

在流域尺度上建立协同治理机制，例如通过设立跨区域生态治理联合体或流域生态委员会，促进区域间的资源共享与政策协调。

## 4 结论

(1) 辽河流域的生态环境质量整体变好。流域生态环境质量呈上升趋势，由 2000 年的 0.43 上升到 2022 年的 0.58，生态环境较差的中部区域上升得更加显著。其中生态环境质量等级为较差的面积减少 43 981 km<sup>2</sup>，生态等级为良的面积增加 46 322 km<sup>2</sup>。

(2) 导致辽河流域 RSEI 空间分异的关键驱动因子以气候、自然因子为主。各因子解释力度从大到小依次为降水、土地利用、温度、高程、坡度。降水对辽河流域的生态环境有显著的促进作用，而不同的土地利用类型直接影响着生态质量。辽河流域的生态环境以 600~900 m 为分界，先下降后上升，并随着坡度的增大而升高。

(3) 根据 RSEI 的空间分布、变化特征和适宜性评价，可将辽河流域划分为生态核心保护区、生态优化区、生态监测区、生态恢复区和生态重点治理区这 5 类，可为各区域采取差异化管理措施提供决策支持。

### 参考文献 (References)

- [1] Pan Zhenzhen, He Jianhua, Liu Dianfeng, et al. Predicting the joint effects of future climate and land use change on ecosystem health in the middle reaches of the Yangtze

- River economic belt, China [J]. *Applied Geography*, 2020,124:102293.
- [2] Cheng Xian, Chen Liding, Sun Ranhao, et al. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem health in one of the largest basins in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,616:376-385.
- [3] Ren Yating, Zhang Feng, Li Jiapeng, et al. Ecosystem health assessment based on AHP-DPSIR model and impacts of climate change and human disturbances: A case study of Liaohe River basin in Jilin Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,142:109171.
- [4] Luo Zengliang, Zuo Qiting, Shao Quanxi. A new framework for assessing river ecosystem health with consideration of human service demand [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,640:442-453.
- [5] An Min, Xie Ping, He Weijun, et al. Spatiotemporal change of ecologic environment quality and human interaction factors in Three Gorges ecologic economic corridor, based on RSEI [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 141:109090.
- [6] 马元博,翟天林,毕庆生,等.基于需求层次理论和生态系统服务供需的黄河流域生态管理分区[J].*生态学报*, 2024,44(15):6513-6526.
- Ma Yuanbo, Zhai Tianlin, Bi Qingsheng, et al. Ecological management zoning in the Yellow River basin based on hierarchy of needs theory and ecosystem services supply and demand [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(15):6513-6526.
- [7] Jiang Luguang, Liu Ye, Wu Si, et al. Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data [J]. *Ecological Indicators*, 2021,129:107933.
- [8] Xu Yong, Dai Qiangyu, Lu Yungui, et al. Identification of ecologically sensitive zones affected by climate change and anthropogenic activities in Southwest China through a NDVI-based spatial-temporal model [J]. *Ecological Indicators*, 2024,158:111482.
- [9] 沈鸿飞,张军,邱慧珍,等.区域生态环境状况综合评价:以甘肃省庆阳市为例[J].*干旱区资源与环境*, 2011,25(6):13-17.
- Shen Hongfei, Zhang Jun, Qiu Huizhen, et al. Integrated evaluation of eco-environmental status in Qingyang City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011,25(6):13-17.
- [10] 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.
- [11] 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.
- Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(5):889-897.
- [12] 杨惠麟,张存波,赵祺.基于 RSEI 模型的成都市生态环境遥感评价[J].*科学技术创新*, 2024(8):38-41.
- Yang Huilin, Zhang Cunbo, Zhao Qi. Remote sensing evaluation of ecological environment in Chengdu City based on RSEI model [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024(8):38-41.
- [13] 王敏,王佳奇,李俊,等.基于 RSEI 与 FAI 模型的浙江千岛湖乡村岸水协同修复与生态功能区划研究[J].*园林*, 2024,41(6):23-32.
- Wang Min, Wang Jiaqi, Li Jun, et al. Ecological restoration strategy and function zoning of rural area in Qiandao Lake, Zhejiang Province from the perspective of shoreline and water synergy based on RSEI and FAI model [J]. *Landscape Architecture Academic Journal*, 2024,41(6):23-32.
- [14] Xu Caiyao, Li Bowei, Kong Fanbin, et al. Spatial-temporal variation, driving mechanism and management zoning of ecological resilience based on RSEI in a coastal metropolitan area [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158:111447.
- [15] Liao Weihua. Temporal and spatial variations of eco-environment in Association of Southeast Asian Nations from 2000 to 2021 based on information granulation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,373:133890.
- [16] Zhao Chunli, Wang Chenxing, Yan Yan, et al. Ecological security patterns assessment of Liao River basin [J]. *Sustainability*, 2018,10(7):2401.
- [17] Tian Haijing, Cao Chunxiang, Chen Wei, et al. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:276-289.
- [18] Lu Fei, Hu Huifeng, Sun Wenjuan, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018,115(16):4039-4044.
- [19] 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.
- [20] Gong Cheng, Lyu Feinan, Wang Yilei. Spatiotemporal change and drivers of ecosystem quality in the Loess Plateau based on RSEI: A case study of Shanxi, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023,155:111060.
- [21] Li Ning, Wang Jiayao, Qin Fen, et al. The improvement of ecological environment index model RSEI [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020,13(11):403.
- [22] 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. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River basin from 2000 to 2010 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013,33(24):7798-7806.
- [23] 徐勇,郑志威,郭振东,等.2000—2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J].*环境科学*,2022,43(7):3730-3740.  
Xu Yong, Zheng Zhiwei, Guo Zhendong, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022,43(7):3730-3740.
- [24] 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.
- [25] 唐吉喆,徐梦冉,莫宇,等.生态地理分区视角下的辽宁省植被归一化植被指数的时空变化[J].*应用生态学报*,2023,34(12):3271-3278.  
Tang Jizhe, Xu Mengran, Mo Yu, et al. Spatial and temporal variation in normalized difference vegetation index of vegetation in Liaoning Province from the perspective of ecogeographic zoning [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(12):3271-3278.
- [26] 杜鑫,许东,付晓,等.辽河流域辽宁段水环境演变与流域经济发展的关系[J].*生态学报*,2015,35(6):1955-1960.  
Du Xin, Xu Dong, Fu Xiao, et al. An empirical research on the relationship between water environment and economic development in Liaohe River watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(6):1955-1960.
- [27] 郭芬.辽河流域水生态与水环境因子时空变化特征研究[D].北京:中国环境科学研究院,2009.  
Guo Fen. The Study on temporal and spatial variation characters of water ecological and water environmental factors in Liao River basin [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences,2009.
- [28] 王芳,李文慧,林妍敏,等.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[J].*环境科学*,2023,44(5):2518-2527.  
Wang Fang, Li Wenhui, Lin Yanmin, et al. Spatio-temporal pattern and driving force analysis of ecological environmental quality in typical ecological areas of the Yellow River basin from 1990 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023,44(5):2518-2527.
- [29] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 2008,320(5882):1444-1449.
- [30] Cao Dan, Zhang Jiahua, Xun Lan, et al. Spatiotemporal variations of global terrestrial vegetation climate potential productivity under climate change [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,770:145320.
- [31] Liu Xiaoyang, Zhou Wei, Bai Zhongke. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990—2015 [J]. *Ecological Engineering*, 2016,95:447-451.
- [32] Wang B, Chen L, Li L, et al. Ecological response to land use change: A case study from the Chaohu Lake basin, China [J]. *Bulgarian Chemical Communications*, 2017,49:200-206
- [33] 欧阳玲,马会瑶,王宗明,等.基于遥感与地理信息数据的科尔沁沙地生态环境状况动态评价[J].*生态学报*,2022,42(14):5906-5921.  
Ouyang Ling, Ma Huiyao, Wang Zongming, et al. Dynamic evaluation of ecological environment in Horqin sandy land based on remote sensing and geographic information data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(14):5906-5921.
- [34] Wen Xin, Zhen Lin. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review [J]. *Environmental Development*, 2020,34:100493.