

环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301,CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目：海河流域生态环境对气象干旱和人类活动的响应
作者：左仕一，胡支涛，安婧雪，戴自扬，李洁，马燕飞
DOI：10.13227/j.hjkx.202503239
收稿日期：2025-03-20
网络首发日期：2025-06-16
引用格式：左仕一，胡支涛，安婧雪，戴自扬，李洁，马燕飞. 海河流域生态环境对气象干旱和人类活动的响应[J/OL]. 环境科学.
<https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202503239>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

海河流域生态环境对气象干旱和人类活动的响应

左仕一^{1,2,3}, 胡支涛^{1,2,3}, 安婧雪^{1,2,3}, 戴自扬^{1,2,3}, 李洁^{1,2,3}, 马燕飞^{1,2,3*}

(1.河北师范大学地理科学学院,石家庄 050024; 2.河北省环境变化遥感识别技术创新中心,石家庄 050024;
3.河北省环境演变与生态建设省级重点实验室,石家庄 050024)

摘要: 随着气候变化的加剧和生态工程的开展,研究生态环境对气象干旱和人类活动如何响应至关重要。目前相关研究多局限于归一化植被指数(NDVI)和总初级生产力(GPP)等单一要素指标,但是生态环境由诸多要素构成,集合多要素的改进型遥感生态指数(IRSEI)和其他指标有何响应差异,仍然缺少进一步研究。选择海河流域这一典型区域作为研究区,首先使用Sen+Mann-Kendall趋势分析法分析了2001~2020年NDVI、GPP和IRSEI等生态环境评价指标的变化趋势;然后再结合标准化降水蒸散指数(SPEI)等数据,使用Pearson相关性分析和牛顿拉夫逊算法优化后的极端梯度提升(NRBO-XGBoost)模型等方法探讨了不同生态环境评价指标对气象干旱及人类活动的响应。结果表明:①与传统RSEI相比,IRSEI在海河流域具有明显优势,可有效比较年际差异,突出长时序生态环境的变化情况。②NDVI、GPP和IRSEI分别有85.72%、94.32%和78.77%的区域呈现上升趋势,且多分布在流域西部和北部山区以及西北部的高原等地区。③生态环境对各个季节气象干旱的响应具有明显差异。对夏季和冬季气象干旱分别具有最明显的正向和负向响应;对春秋季节气象干旱的响应相对微弱。④人类活动驱动生态环境变化差异显著。人类活动对其的改善程度依次为:草地>森林>灌木>农田>不透水面;其中不透水面呈现出改善与退化并存的特点。研究结果可以为海河流域生态环境保护与可持续发展提供决策参考。

关键词: 改进型遥感生态指数(IRSEI); 海河流域; 生态环境; 气象干旱; 人类活动

DOI:10.13227/j.hjkx.202503239

Ecological Environment of the Haihe River Basin in Response to Meteorological Drought and Human Activities

ZUO Shi-yi^{1,2,3}, HU Zhi-tao^{1,2,3}, AN Jing-xue^{1,2,3}, DAI Zi-yang^{1,2,3}, LI Jie^{1,2,3}, MA Yan-fei^{1,2,3*}

(1. School of Geographic Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Hebei Environmental Change Remote Sensing Identification Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050024, China; 3. Hebei Provincial Key Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: With the intensification of climate change and the implementation of ecological engineering, it is crucial to study how the ecological environment responds to meteorological drought and human activities. Currently, relevant research is largely limited to single-element indicators such as the normalized difference vegetation index (NDVI) and gross primary productivity (GPP). However, the ecological environment consists of multiple elements, and there is still a lack of further research on the response differences between the improved remote sensing ecological index (IRSEI) and other multi-element indices. Therefore, the Haihe River basin, a typical region, has been selected as the study area. First, the Sen+Mann-Kendall trend analysis method was employed to analyze the changing trends of ecological environment assessment indicators such as NDVI, GPP, and IRSEI from 2001 to 2020. Then, combined with data such as the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), Pearson

收稿日期: 2025-03-20; 修订日期: 2025-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701426); 博士(后)科研启动基金项目(L2023B34)

作者简介: 左仕一(2000~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态环境遥感,E-mail:zuoshiyi2023@163.com

*通信作者, E-mail: mayf@hebtu.edu.cn

correlation analysis and NRBO-XGBoost model were used to explore the responses of different ecological environment assessment indices to meteorological drought and human activities. The results indicate: ①Compared to the traditional RSEI, IRSEI has clear advantages in the Haihe River basin, effectively comparing interannual differences and highlighting changes in the ecological environment over long periods. ②NDVI, GPP, and IRSEI show upward trends in 85.72%, 94.32%, and 78.77% of the areas, respectively, with many located in the western and northern mountainous regions of the basin and in the plateaus in the northwest. ③The ecological environment shows significant differences in response to meteorological drought across different seasons, with the most obvious positive and negative responses in summer and winter, respectively; the response to spring and autumn meteorological droughts is relatively weak. ④The impact of human activities on ecological environment changes is significant, with the degree of improvement from human activities ranked as follows: grasslands > forests > shrubs > cropland > impermeable surfaces, where impermeable surfaces exhibit both improvement and degradation characteristics. The research findings can provide decision-making references for the ecological environment protection and sustainable development of the Haihe River basin.

Key words: improved remote sensing ecological index(IRSEI); Haihe River Basin; ecological environment; meteorological drought; human activity

联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出^[1]，随着全球气候日趋变暖，21世纪全球区域干旱频次呈现明显上升趋势，干旱事件强度也将进一步增强，严重制约人类社会的可持续发展。所以，了解生态环境如何响应气象干旱已成为一个关键问题^[2]，这也是基于我国“十四五”规划的生态领域重点研究方向之一。目前诸多学者聚焦 NDVI^[3]、NPP^[4]和 GPP^[2]等单一的生态环境评价指标对气象干旱的响应；部分学者关注多指标对气象干旱的响应差异，如 Zheng 等^[5]重点研究全国不同地区 NDVI 和 GPP 对 SPEI 的响应强度和响应时间差异。而上述研究多局限于反映生态环境部分特征的单一要素指标，如反映植被生长的 NDVI 和反映植被生产力的 GPP 等。

国内外众多学者采取了多种不同的生态环境评价方法。初期关于该领域的研究主要集中在 NDVI^[6]、叶面积指数（LAI）^[7]、增强型植被指数（EVI）^[8]和地表温度（LST）^[9]等单一指标。而生态环境是各要素相互作用的结果，且这些要素指标不可分割。徐涵秋^[10]提出了遥感生态指数（RSEI），该方法集合绿度、湿度、热度和干度等多要素，在国家^[11]、流域^[12~15]、地形区^[16~18]、省份^[19, 20]、城市群^[21, 22]和县域^[23, 24]等不同尺度上得到了广泛的应用。而本文的改进型遥感生态指数（IRSEI）是在基于时间增强的遥感生态指数（tRSEI）^[25]的基础上，绿度分量以核归一化植被指数（kNDVI）代替 NDVI，明显解决了原模型中时序数据可比性不足、模型计算结果的随机性^[26]和部分数据过于饱和等问题。但是集合多要素的 IRSEI 对气象干旱如何响应，和其他单一要素指标有何响应差异，仍然缺少进一步研究。鉴于此，本文研究了由单一要素构成的 NDVI 和 GPP 以及集合多要素的 IRSEI 等不同生态环境评价指标对气象干旱的响应。

诸多学者在研究生态环境对气象干旱的响应时，未考虑人类活动的影响。但是，随着国家对生态文明建设的重视，人类活动特别是生态工程对生态环境的影响不容忽视，然而如何量化人类活动的影响非常关键。Yao 等^[27]采用夜光遥感数据代表人类活动，但是该方法仅适用于城市区域，对于意义重大的生态工程难以体现；郭发苗等^[28]和盛方毓等^[29]采用残差分析法区分人类活动和自然因素，但是这种方法将所有的残差都归因于人类活动的影响，忽略了其他气候因素对植被的作用，这在一定程度上造成了人类活动的影响被高估；Cheng 等^[30]在土地利用类型未变化的区域建立一个随机森林模型，然后对土地利用类型变化的区域进行残差分析来归因气候变化和人为干预的影响，但是在划定训练区时仅考虑土地利用类型，而忽视了其他因素。而本文采用 NRBO-XGBoost 模型，综合多因素划分训练区域，科学分离

气候变化和人类活动对生态环境的影响，以探索不同生态环境评价指标对人类活动的响应。

海河流域是我国重要的工农业生产区，承担着诸多国家重大发展战略，但也是我国水资源短缺和干旱多发的地区之一^[31]。同时，该地区人类活动频繁，太行山绿化工程和京津风沙源治理工程等生态工程大规模开展，都对生态环境产生重要影响^[32,33]。鉴于此，本文选择海河流域这一典型区域作为研究区，运用 Pearson 相关性分析和 NRBO-XGBoost 模型分离贡献度等方法，重点研究了 2001~2020 年 NDVI、GPP 和 IRSEI 等不同生态环境评价指标的变化趋势及其对气象干旱和人类活动的响应，以期为该流域生态环境保护与可持续发展提供理论依据和决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海河流域（35°~43°N, 112°~120°E）位于我国北部，地跨北京市、天津市、河北省、山西省、辽宁省、山东省、河南省和内蒙古自治区，地势总体上西北高东南低，由华北平原、黄土高原、燕山以及太行山等地理单元构成[图 1 (a)]。流域年平均气温 10.61°C，年平均降水量 596mm，且集中于夏季。年平均实际蒸散量约为 470mm，水面蒸发量为 1073mm，易发生气象干旱事件^[31]。土地利用类型多样，主要包括森林、灌木和草地等[图 1 (b)]。海河流域地理位置优越，工农业较为发达，承担着京津冀协同发展和中部崛起等国家重要发展战略。

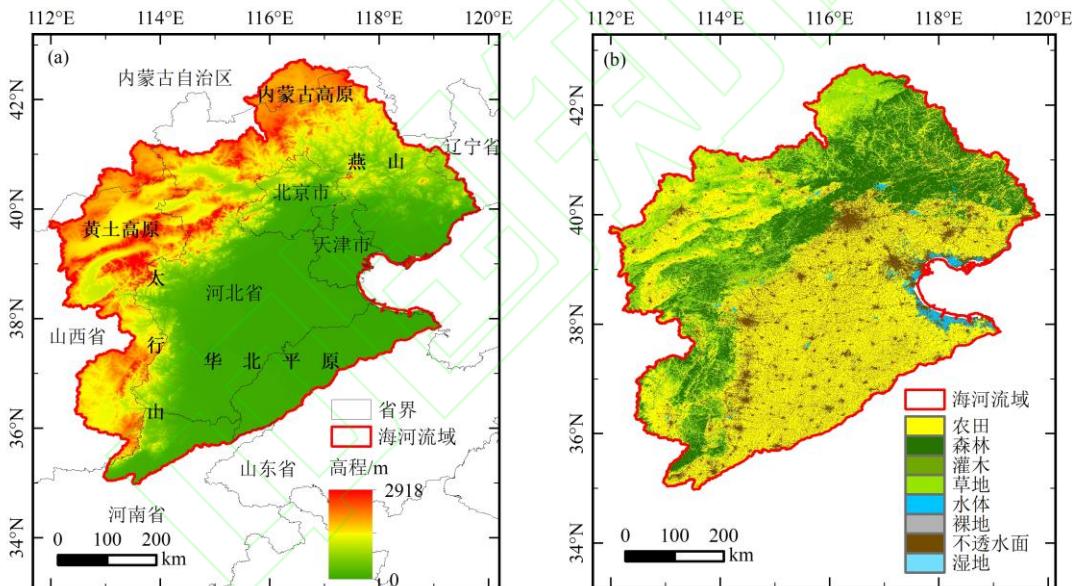


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据来源与处理

本文选用 NDVI、GPP 和 IRSEI 这 3 个生态环境评价指标，NDVI 和 GPP 分别来自于 MOD13A1 和 MOD17A2H，IRSEI 通过 MOD13A1、MOD11A2H 和 MODO9A1 等计算获取，具体见表 1，并将其重采样为 1km。本文获取了 2001~2020 年生长季的 NDVI、GPP 和 IRSEI 数据。由于 GPP 与 NDVI 和 IRSEI 的数值范围不同，故利用最大值最小值归一化的方法将其归一化到[0,1]之间，使其在进行后续计算之前具有相同的数值范围^[5]。另外，由于 GPP 产品缺少部分不透水面的数据，故在后续的分地类讨论中未考虑这一地类。

选用标准化降水蒸散指数（SPEI）数据表征气象干旱，分辨率为 1km。其基于降水和潜在蒸散发计算获取^[34]，其中降水数据使用 GPM IMERG V07 产品，由于其空间分辨率较低，

故运用随机森林回归模型并结合气溶胶厚度（AOD）、气温、DEM 和经纬度等相关解释变量进行空间降尺度，最终得到 1km 的高分辨率降水数据；潜在蒸散发数据来自于中国 1km 分辨率逐月潜在蒸散发数据集（1901~2023 年），具体见表 1。本文获取了 2001~2020 年 4 个季节的 SPEI-3 以及生长季的 SPEI-5 数据。其中季尺度下的 SPEI-3 是由该季度 3 个月，即以前一年 12 月至当年 2 月、当年 3~5 月、6~8 月和 9~11 月的累积降水量和潜在蒸散发量计算得出的 SPEI-3，分别反映冬、春、夏、秋季的干旱状况^[35]。而海河流域生长季为 5~9 月^[36]，生长季尺度下的 SPEI-5 则由 5~9 月的累积降水量和潜在蒸散发量计算得出，可反映生长季的干旱状况。

表 1 本文所需数据简介

Table 1 Overview of data required for this article

数据产品	数据来源	空间分辨率
MOD13A1		500m
MOD17A2H	美国航空航天局 (https://search.earthdata.nasa.gov)	500m
MOD11A2		1km
MOD09A1		500m
GPM IMERG V07 (降水)		0.1°
GEBCO_2023 Grid (DEM)	地球系统科学数据中心 (https://www.gebco.net)	1km
中国 1km 分辨率逐月气温数据集（1901~2023 年）	国家青藏高原科学数据中心	1km
中国 1km 分辨率逐月潜在蒸散发数据集（1901~2023 年）	(https://data.tpdc.ac.cn/product)	1km
Daily 1-km gap-free AOD grids in China,v1 (2000~2020 年)	Zenodo (https://zenodo.org/records)	1km
The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2023 (土地利用类型)		30m

1.3 研究方法

1.3.1 改进型遥感生态指数 (IRSEI)

传统 RSEI 由绿度分量 (NDVI)、湿度分量 (WET)、热度分量 (LST) 以及干度分量 (NDBSI) 构建^[10]。绿度分量和热度分量分别使用 MOD13A1 的 NDVI 及 MOD11A2 的 LST 产品数据。湿度分量和干度分量通过 MOD09A1 计算获取，公式如下：

$$\text{WET} = 0.1147 \times \text{RED} + 0.2489 \times \text{NIR1} + 0.2408 \times \text{BLUE} + 0.3132 \times \text{GREEN} - 0.3122 \times \text{NIR2} - 0.6416 \times \text{SWIR1} - 0.5087 \times \text{SWIR2} \quad (1)$$

$$\text{SI} = \frac{(\text{SWIR1} + \text{RED}) - (\text{NIR} + \text{BLUE})}{(\text{SWIR1} + \text{RED}) + (\text{NIR} + \text{BLUE})} \quad (2)$$

$$\text{IBI} = \frac{\frac{2 \times \text{SWIR1}}{\text{SWIR1} + \text{NIR}} - \left(\frac{\text{NIR}}{\text{NIR} + \text{RED}} + \frac{\text{GREEN}}{\text{GREEN} + \text{SWIR1}} \right)}{\frac{2 \times \text{SWIR1}}{\text{SWIR1} + \text{NIR}} + \left(\frac{\text{NIR}}{\text{NIR} + \text{RED}} + \frac{\text{GREEN}}{\text{GREEN} + \text{SWIR1}} \right)} \quad (3)$$

$$\text{NDBSI} = \frac{(\text{SI} + \text{IBI})}{2} \quad (4)$$

式中，RED、NIR、BLUE、GREEN、NIR2、SWIR1 和 SWIR2 分别表示 MOD09A1 反射率产品的红波段、近红外波段、蓝波段、绿波段、近红外 2 波段、短波红外 1 波段和短波红外 2 波段。另外，由于水体会影响主成分分析，根据归一化水体指数 (MNDWI) 对水体进行掩膜。

为了解决传统 RSEI 中部分数据饱和及时序可比性差^[26]等问题，本文结合有关研究，做出以下调整。

首先，绿度分量选用 kNDVI 代替 NDVI^[37]，计算公式如下：

$$kNDVI = \tanh(NDVI^2) \quad (5)$$

另外，本文借鉴 Wen 等^[25]的研究，调整归一化思路，先分别对这 4 个分量所有年份数据进行标准化处理，而并非传统模型中逐年份归一化，使其介于[0,1]之间：

$$X = x - \mu/\sigma \quad (6)$$

式中， X 为分量标准化之后的结果， μ 为各分量总体数据的平均值， σ 为各分量总体数据的标准差， x 为各分量个体数据。

然后将这 4 个分量进行主成分分析，提取第一主成分（PC1），并将其作为 IRSEI 的信息来源，用 IRSEI₀表示：

$$IRSEI_0 = PC1(X_{kNDVI}, X_{WET}, X_{LST}, X_{NDBSI}) \quad (7)$$

最后同样需对 IRSEI₀进行所有年份数据而非单张影像数据的最大最小值归一化得到 IRSEI，计算公式如下：

$$IRSEI = \frac{IRSEI_0 - IRSEI_{0,\min}}{IRSEI_{0,\max} - IRSEI_{0,\min}} \quad (8)$$

式中，IRSEI为改进型遥感生态指数，其值整体上介于[0,1]之间，越接近 1，说明生态环境越好^[10]。

1.3.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析法

Sen+Mann-Kendall 趋势分析法即采用 Theil-Sen Median 趋势度（Sen 趋势度）分析海河流域生态环境评价指标（NDVI、GPP 和 IRSEI）和 SPEI 的变化趋势，并通过 Mann-Kendall 检验判断其显著性。相较于传统的线性回归分析，该方法可以有效地降低测量误差和减小离群点的影响。

Sen 趋势度的计算公式为^[38]:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (9)$$

式中， x_i 和 x_j 为生态环境评价指标（NDVI、GPP 和 IRSEI）时间序列中第 i 或 j 年生长季的数据，或不同时间尺度 SPEI 数据；Median 表示取中值；当 $\beta > 0$ 时 NDVI、GPP、IRSEI 或 SPEI 呈现上升趋势，当 $\beta < 0$ 时则呈现下降趋势。

用 Mann-Kendall 检验判断 NDVI、GPP 和 IRSEI 变化趋势显著性，具体计算公式参见有关文献^[38]，一般根据 Z 值判断显著性的强弱。如表 2 所示，结合 β 值和 Z 值，将变化趋势分为 4 个等级。

表 2 Sen+Mann-Kendall 趋势分类
Table 2 Sen+Mann-Kendall trend classification

β	Z	趋势分类
$\beta > 0$	$ Z > 1.96$	显著上升
	$ Z \leq 1.96$	不显著上升
$\beta < 0$	$ Z \leq 1.96$	不显著下降
	$ Z > 1.96$	显著下降

1.3.3 Pearson 相关性分析

利用 Pearson 相关性分析计算生态环境评价指标（NDVI、GPP 和 IRSEI）和 SPEI 的相关系数 r ，本文选取 2001~2020 年当年生长季的 SPEI-5、春夏季的 SPEI-3 及前一年秋冬季的 SPEI-3 与当年生长季的生态环境评价指标进行相关系数 r 的计算。计算公式为^[35]：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为多年生长季生态环境评价指标和 SPEI 的平均值; n 为时间序列的长度, $n=20$ 。在给定置信水平 $\alpha=0.01$ 和 $\alpha=0.05$ 下, 根据相关系数检验临界值表, 判断相关系数的显著性, 并将显著性分为极显著、显著和不显著这 3 个等级。

1.3.4 NRBO-XGBoost 模型分离气候变化和人类活动的贡献

采用牛顿拉夫逊算法优化后的极端梯度提升 (NRBO-XGBoost) 回归模型分离气候因素和人类活动对生态环境变化的各自贡献。NRBO 是一种新颖的优化算法^[39], 具有收敛速度快和不容易陷入局部最优等优点。XGBoost 基于梯度提升决策树 (GBDT) 生成, 是一种强大且广泛应用于各类场景的机器学习算法^[40], 其性能对超参数的依赖程度较高, 通过 NRBO 搜索找到最优的超参数组合, 可以有效提高 XGBoost 模型的准确性和泛化能力^[41]。

具体流程如图 2 (b) 所示, 首先, 将海河流域的不透水面^[42]、土地利用类型发生变化的区域^[30]以及 NDVI 变化超过 0.1 的区域^[42]认定为“人类活动干扰区”, 其余则是“基本自然区”[图 2 (a)], 前者的生态环境变化受到气候和人类活动的共同影响, 后者主要受气候变化影响; 其次, 在“基本自然区”中训练 NRBO-XGBoost 模型, 分别建立 NDVI、GPP 和 IRSEI 这 3 个生态环境评价指标的 Sen 趋势度 (因变量) 以及气温、降水和 SPEI 的多年平均值及其 Sen 趋势度和对应的生态环境评价指标多年平均值等 7 个相关因子 (解释变量) 的关系模型^[42]; 最后, 将训练模型应用到整体研究区, 获得整体研究区气候变化驱动下生态环境指标变化趋势 ($slope_{CC}$), 用实际的生态环境评价指标变化趋势 ($slope_{OBS}$) 减去用气候因子预测的生态环境评价指标变化趋势, 即获得人类活动驱动下的的变化趋势 ($slope_{HA}$)^[30]。气候变化 (人类活动) 相对贡献率计算公式如表 3^[43]。

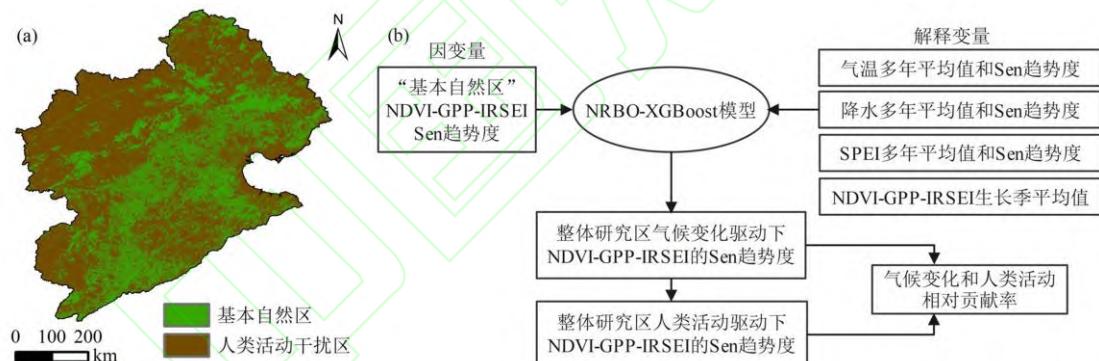


图 2 NRBO-XGBoost 模型训练区划分及其流程示意

Fig. 2 Division of NRBO-XGBoost model training area and its process flow diagram

表 3 气候变化 (人类活动) 相对贡献率

Table 3 Relative contribution rate of climate change (human activities)

$slope_{OBS}$	$slope_{CC}$	$slope_{HA}$	气候变化相对贡献率	人类活动相对贡献率
>0	>0	>0	$slope_{CC}/slope_{OBS}$	$slope_{HA}/slope_{OBS}$
	>0	<0	100	0
	<0	>0	0	100
<0	<0	<0	$slope_{CC}/slope_{OBS}$	$slope_{HA}/slope_{OBS}$
	<0	>0	100	0
	>0	<0	0	100

2 结果与分析

2.1 IRSEI 结果及优势

传统 RSEI 计算方法^[10]在四个分量归一化和 $RSEI_0$ 归一化中，都是利用单张影像的最大最小值进行归一化。归一化对于数据的压缩程度主要取决于数据的最值之差，然而不同年份数据的最值存在差异，数据的压缩程度也会不同，这导致 RSEI 的时序可比性差。而本文在 4 个分量标准化和 $IRSEI_0$ 归一化中过程中均使用了 2001~2020 年全部时序数据而非单张影像数据，有效解决了这一问题。同时，与 NDVI 相比，kNDVI 对植被饱和度、偏差和复杂物候周期表现出更强的抵抗力，并且在时间和空间尺度上表现出更强的抗噪性和稳定性^[44]，本文利用 kNDVI 取代 NDVI，从而避免了低估植被覆盖率高地区的绿度和高估低植被覆盖度地区的绿度，提高了数据的可靠性。

不同于传统 RSEI 每个年份的数据区间(即最小值到最大值的范围)都固定为[0,1]，IRSEI 是将长时间序列整体归一化到[0,1]之间，所以每个年份的数据区间都是不同的，比如图 3 中 2001 年、2010 年和 2020 年这 3 个年份最小值分别为 0.05、0.09 和 0.09，而最大值分别为 0.86、0.93 和 0.96，可有效比较年际差异，突出长时序生态环境的变化情况。

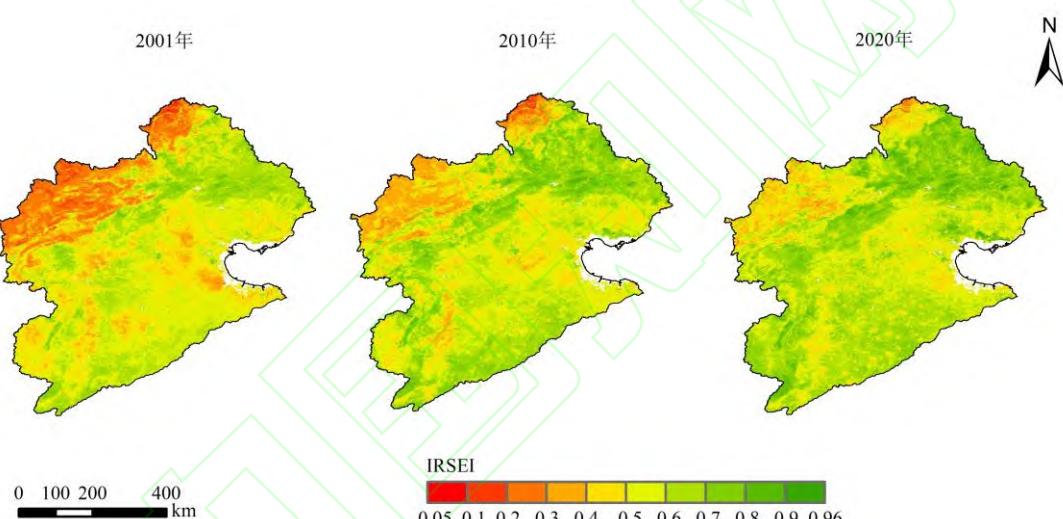


图 3 2001 年、2010 年和 2020 年海河流域 IRSEI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of IRSEI in the Haihe River Basin in 2001, 2010, and 2020

RSEI 与 IRSEI 年均值时序变化可反映模型的稳定性，Zheng^[26]等使用 $RSEI_n$ 均值时间序列来对比分析 $RSEI_n$ 模型的稳定性。RSEI 与 IRSEI 的年均值时序变化如图 4，可以看到 RSEI 时间序列存在异常波动，特别是 2003~2008 年一直呈现波动上升与下降交替趋势，而 IRSEI 时间序列更加平稳，且接近 NDVI 和 GPP 等其他相关的生态环境评价指标平稳上升的变化趋势，与实际情况相符。

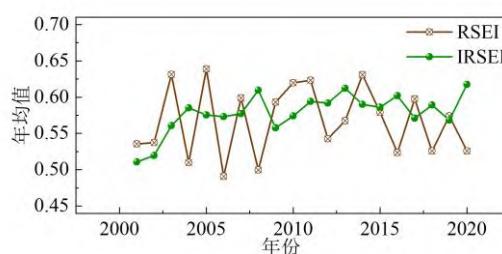


图 4 2001~2020 年 RSEI 和 IRSEI 年均值变化趋势

Fig. 4 Trends in the mean values of RSEI and IRSEI from 2001 to 2020

综上, RSEI 只能表示同一年内的生态环境, 无法准确反映出多年的时序变化情况; 而 IRSEI 的稳定性和时序可比性更强, 更加适合进行长时间序列生态环境变化分析。

2.2 海河流域生态环境评价指标的变化趋势

如图 5 所示, 海河流域的 3 个生态环境评价指标的变化趋势均以上升为主, 尤其是 GPP 上升最为明显。NDVI、GPP 和 IRSEI 分别有 85.72%、94.32% 和 78.77% 的区域呈现上升趋势, 其中分别有 64.47%、74.67% 和 43.85% 区域呈现显著上升趋势, 多分布在流域西部和北部山区以及西北部的黄土高原等地区。呈现下降趋势的像元多分布于城镇化快速发展的地区, 值得注意的是, 北京和石家庄等大中城市的中心城区仍然呈现上升趋势。NDVI、GPP 和 IRSEI 呈增加趋势的面积比例均远高于减少趋势, 表明生态环境整体上呈现改善趋势。

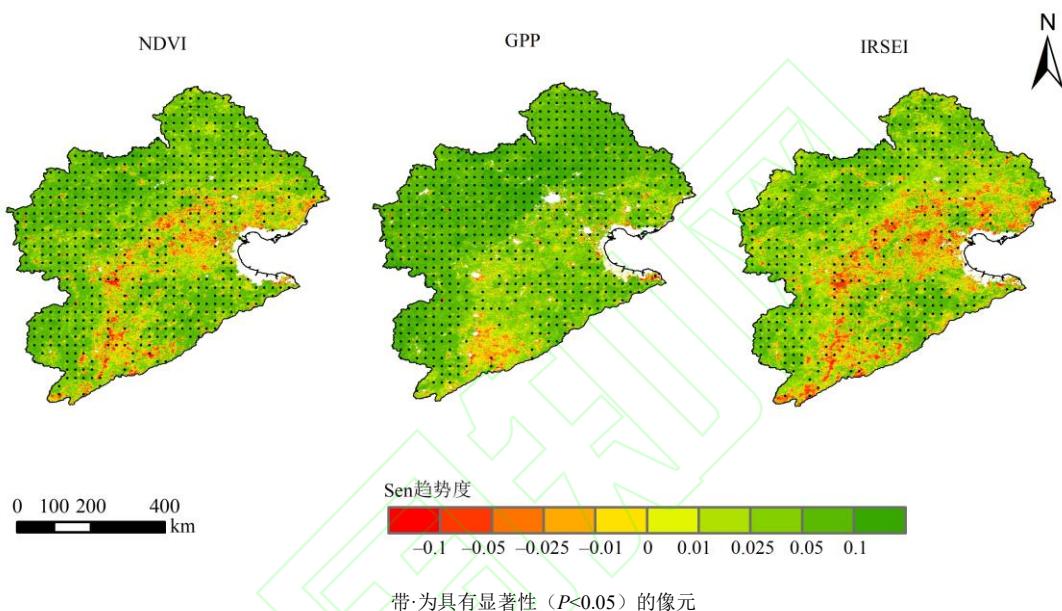


图 5 生态环境评价指标 (NDVI、GPP 和 IRSEI) 变化趋势

Fig. 5 Trends in ecological environment evaluation indicators (NDVI, GPP, and IRSEI)

2.3 海河流域生态环境对气象干旱的响应

如图 6 所示, 海河流域干湿变化具有明显季节分异特征。夏季和生长季 SPEI 分别有 98.16% 和 92.57% 的像元为增长趋势, 即整体呈现湿润化, 仅在流域西南部呈现干旱化; 冬季 SPEI 有 98.44% 的像元呈现下降趋势, 特别是有 57.98% 的像元呈现显著下降趋势, 即整体呈现干旱化, 仅在流域北部呈现湿润化; 春秋季节 SPEI 变化相对较小, 且显著性较差。

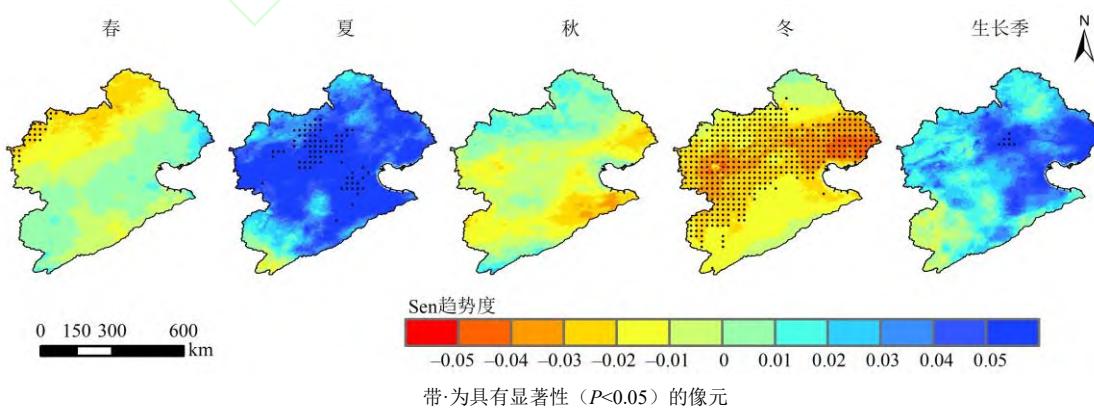


图 6 各季节 SPEI 变化趋势

Fig. 6 Trend of SPEI in different seasons

如图 7 和图 8 所示, 海河流域生态环境评价指标和各季节 SPEI 的相关性存在明显的空间异质性。生态环境评价指标与夏季 SPEI-3 和生长季 SPEI-5 的正相关性最为明显, NDVI、GPP 和 IRSEI 与夏季 SPEI-3 和生长季 SPEI-5 均以正相关为主, 占比均超过 90%, 其中 GPP 显著性最强, 显著和极显著正相关占比超过 60%; 生态环境评价指标与春季 SPEI-3 仍以正相关为主, NDVI、GPP 和 IRSEI 与春季 SPEI-3 的正相关占比分别达到了 66.57%、64.27% 和 77.93%, 除流域西北部的黄土高原和北部的内蒙古高原部分地区以负相关为主外, 均以正相关为主, 特别是农田与春季 SPEI-3 的正相关性高于其他地类; 生态环境评价指标与秋季 SPEI-3 同样以正相关为主, NDVI、GPP 和 IRSEI 与秋季 SPEI-3 的正相关占比分别达到了 69.54%、83.58% 和 74.32%, 但是显著性较差, 显著和极显著正相关占比均在 10%以下; 生态环境评价指标与冬季 SPEI-3 却以负相关为主, NDVI、GPP 和 IRSEI 与冬季 SPEI-3 的正相关占比分别达到了 34.88%、34.50% 和 57.89%, 其中华北平原和北部的内蒙古高原以正相关为主, 其余大部分地区以负相关为主, 特别是西北部的黄土高原和西部太行山区的部分区域出现极显著负相关。

总体而言, 海河流域生态环境评价指标与夏季 SPEI-3 和生长季 SPEI-5 的正相关最显著, 说明生态环境对夏季和生长季气象干旱正响应最显著, 且各地类差异较小; 生态环境评价指标与冬季 SPEI-3 负相关最显著, 说明生态环境对冬季气象干旱负响应最显著, 尤其是森林、灌木和草地等自然植被为主的区域呈现出显著负响应, 但农田和不透水面等受人类影响明显的区域则正负响应并存; 生态环境评价指标与春秋季节 SPEI-3 相关性相对较小, 说明生态环境对春秋季节气象干旱响应敏感性较差, 但仍有一定异质性。

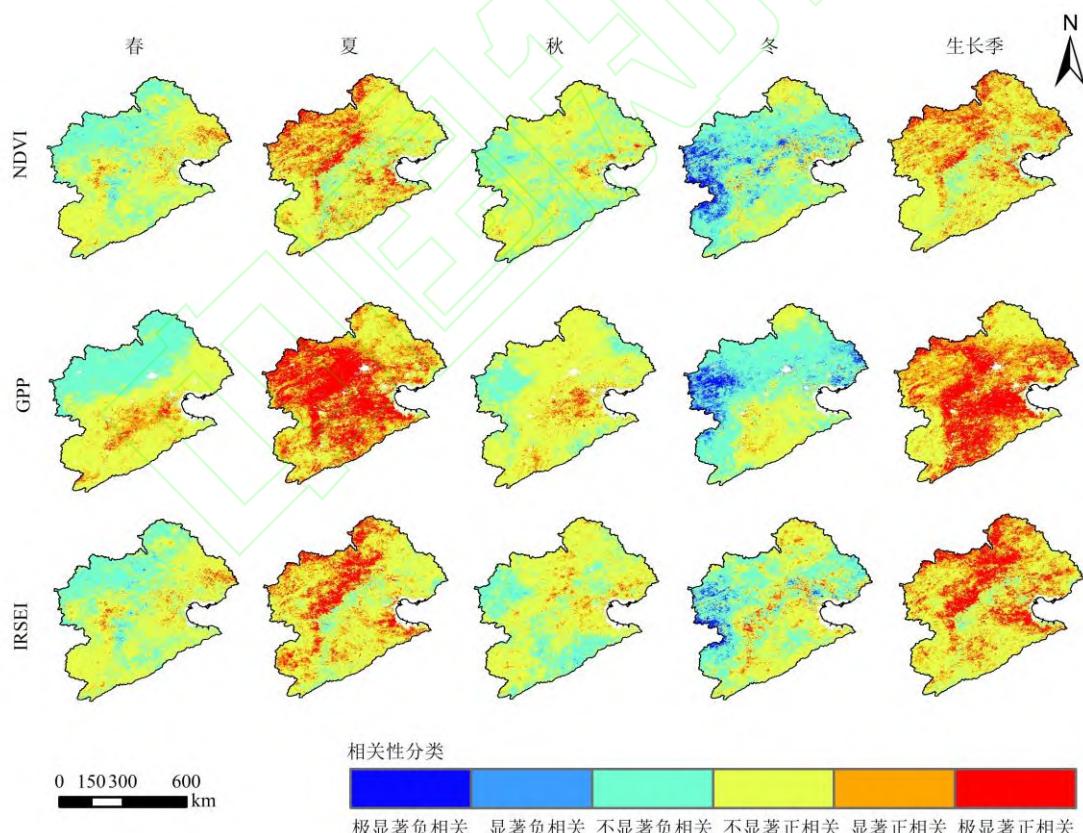


图 7 生态环境评价指标 (NDVI、GPP 和 IRSEI) 与各季节 SPEI 相关性

Fig. 7 Correlation between the ecological and environmental evaluation indexes (NDVI, GPP, and IRSEI) and the SPEI in each season

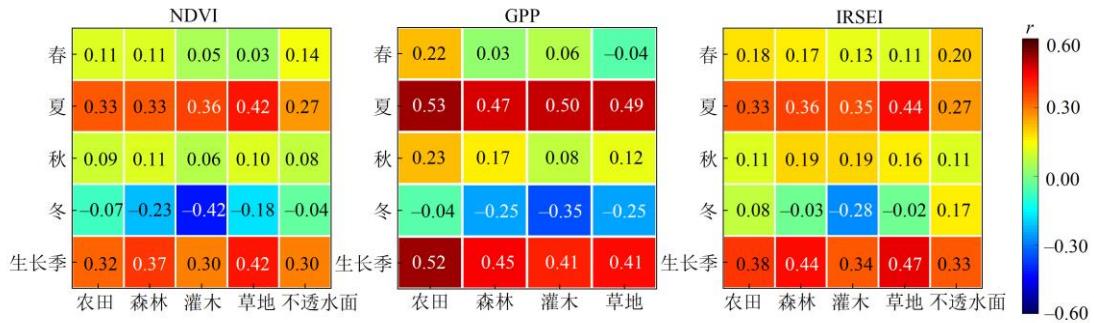
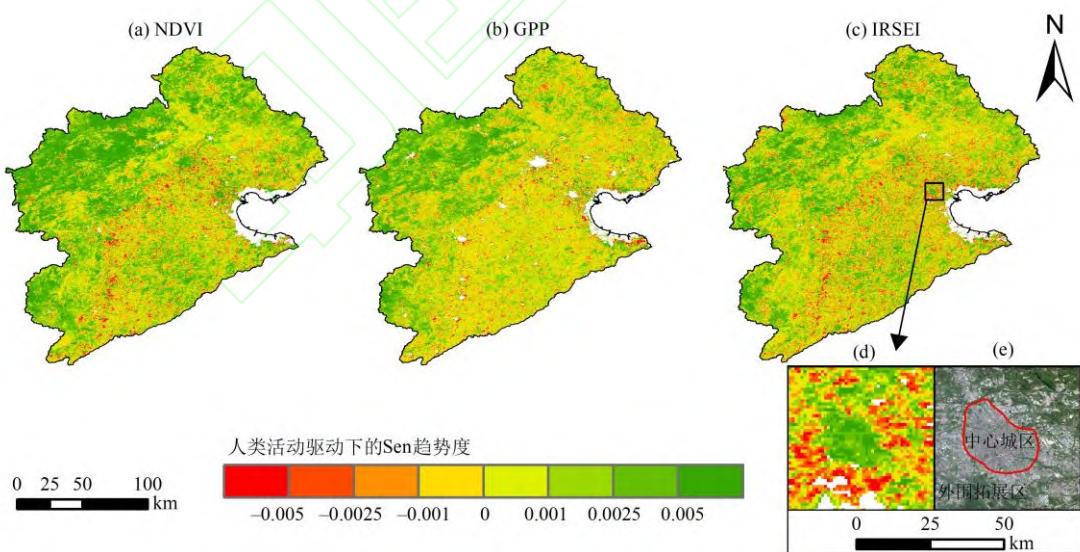


图 8 各地类生态环境评价指标 (NDVI、GPP 和 IRSEI) 和不同季节 SPEI 相关系数 r 平均值矩阵

Fig. 8 Average correlation coefficient matrix r of various types of ecological environment evaluation indicators (NDVI, GPP, and IRSEI) and SPEI in different seasons

2.4 海河流域生态环境对人类活动的响应

通过对比基本自然区生态环境评价指标的实际趋势和 NRBO-XGBoost 模型模拟的生态环境指标变化趋势，发现模型的训练精度较高 ($R^2 > 0.85$)。人类活动对生态环境的影响具有明显的空间异质性。如图 8 和图 9 所示，人类活动驱动下生态环境变化差异显著，森林、灌木和草地均以改善为主，以上各地类 NDVI、GPP 和 IRSEI 的改善面积占比在 68.95%~90.56% 之间，其中草地的改善最明显，NDVI、GPP 和 IRSEI 改善面积占比为分别为 90.56%、83.91% 和 80.93%，特别是在流域西北部的山区和高原最为突出；其次是农田，受人类活动影响差异性强，但同样以改善为主，NDVI、GPP 和 IRSEI 改善面积占比为分别为 73.55%、67.98% 和 67.46%；不透水面呈现改善与退化并存的特点，NDVI 和 IRSEI 改善面积占比为分别为 63.58% 和 56.26%，其中北京、天津和石家庄等大中城市的中心城区以改善为主，而城市拓展区域却以退化为主。如图 8 所示，将天津市局部区域进行放大，并结合同区域 Landsat 影像，可以清晰地看出，在人类活动驱动下，其中心城区 IRSEI 呈现出明显改善的趋势，而中心城区四周的外围拓展区则以退化为主。



(a)~(c) 分别为 NDVI、GPP 和 IRSEI 在人类活动驱动下的 Sen 趋势度，(d) 为天津市局部区域放大图，(e) 为同区域 Landsat 影像

图 9 人类活动驱动下的生态环境变化趋势

Fig. 9 Trends of ecological and environmental changes driven by human activities

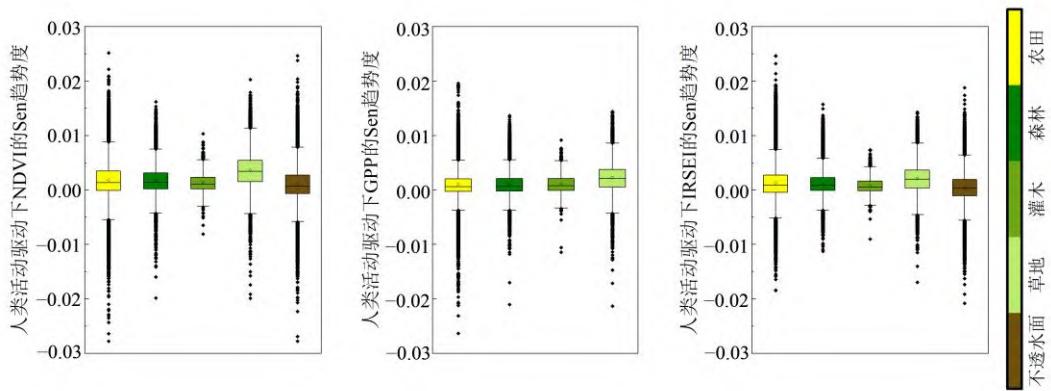


图 10 各地区人类活动驱动下的生态环境变化趋势

Fig. 10 Trends of ecological and environmental changes driven by anthropogenic activities in various regions.

3 讨论

3.1 不同生态环境评价指标对气象干旱的响应共性和差异探讨

海河流域生态环境对夏季和生长季气象干旱正响应最显著，这源于雨热同期条件下水分供给效率对植被生长及光合作用的直接促进作用，而高温季节如果干旱持续一段时间，则易导致潜在蒸散量增加和土壤水资源枯竭，阻碍植被生长和碳合成，进而导致生态环境恶化^[37]；生态环境对冬季气象干旱具有一定海拔依赖性，在流域西部的太行山区和黄土高原等高海拔地区呈现出负响应，因为其受温度等因素影响更明显，更倾向于暖干的气候^[45]，而华北平原则以正响应为主，因为冬季积雪可以补充土壤水分，一定程度上有利于第二年植物的生长；生态环境对春秋季气象干旱响应敏感性相对较低，但华北平原对春季气象干旱仍为正响应，因为该地春旱时常发生，水分成为制约农作物生长的重要因子。

不同生态环境评价指标对气象干旱的响应虽然存在诸多共性，但仍存在一定差异。Pearson 相关性分析的结果表明（图 7 和图 8），总体而言，海河流域生态环境对夏季和生长季气象干旱的响应最为显著，因此集中比较各生态环境评价指标对夏季和生长季气象干旱的响应。Zheng 等^[5]集中研究了全国 NDVI 和 GPP 对气象干旱的响应差异，本文和其在海河流域的结果基本一致，同时还进一步对比了 IRSEI 和二者的差异，发现其响应强度总体上呈现出 GPP>IRSEI>NDVI 的特点。其中 GPP 对夏季和生长季气象干旱的响应最明显，因为 GPP 是植被光合作用的直接结果，可以揭示植被因水分胁迫而发生的生理变化^[5]，所以对干湿变化最为敏感；其次是 IRSEI 和 NDVI，NDVI 通过其表面反射率来测量植被冠层的绿度，其响应机制受限于叶绿素合成与降解的生物化学过程的滞后性，不会立即对水分胁迫的变化做出反应^[5]，所以其对短期干旱的敏感性相对较差；而 IRSEI 反映生态环境整体，生态系统通过多要素协同作用，能在一定程度上缓解气象干旱的冲击，但这种自我调节能力存在一定限制，所以其对 SPEI 的响应介于二者之间。另外，NRBO-XGBoost 分离气候变化和人类活动相对贡献率的结果表明（图 11），总体上气候变化主导着生态环境的变化，这与许丽等^[42]的研究结果基本一致，NDVI、GPP 和 IRSEI 的气候变化相对贡献率平均值分别为 53.50%、71.69% 和 55.67%，同样呈现出 GPP>IRSEI>NDVI 的特点。也就是说，NDVI 受人类活动影响最明显，生态工程或者城镇开发都会直接改变植被覆盖程度，而 GPP 相对受人类活动影响最小，IRSEI 作为一个集合多要素的综合评价指标，受人类活动影响程度介于二者之间，正好与三者对气象干旱的响应强度排序一致，这一定程度上再次解释了不同生态环境评价指标对气象干旱的响应存在差异的原因。上述两种不同的方法，得到的结论基本一致，不仅验证了研究结论的可靠性，更揭示了生态环境响应干旱的多维调控机制。

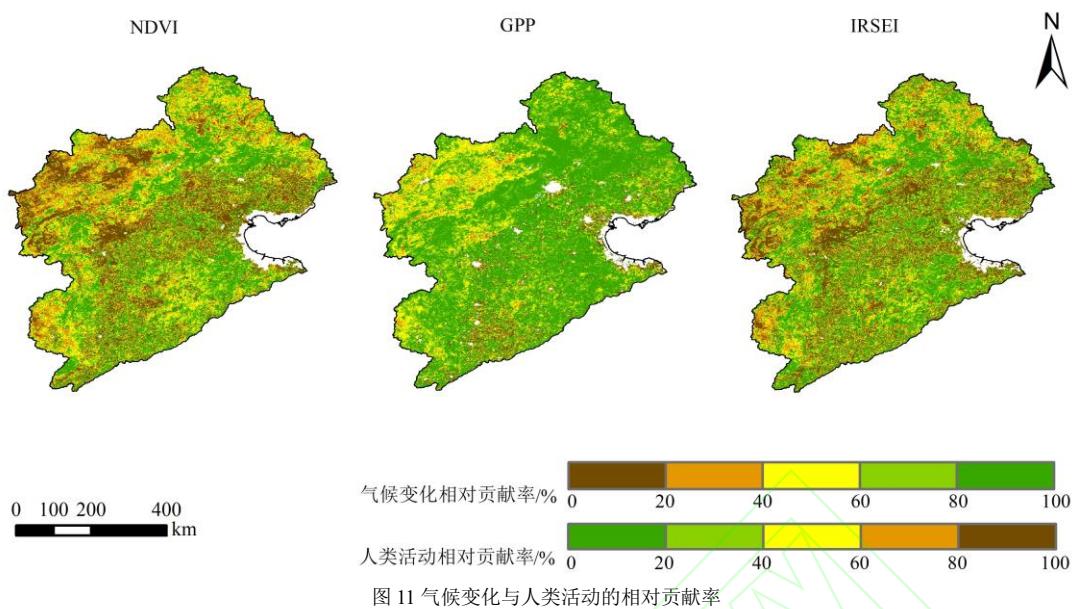


Fig.11 Relative contribution rates of climate change and human activities

3.2 生态环境对人类活动的响应

近 20 多年以来，随着京津风沙源综合治理工程、三北防护林体系建设工程和退耕还林还草工程等生态工程的大规模开展，海河流域生态环境总体上呈现改善趋势^[32, 33]。有趣的是，人类驱动下的海河流域草地生态环境改善程度明显优于森林和灌木（图 10），特别是西北部黄土高原的草地生态恢复明显（图 9），这与许丽等^[42]和赵瑜琦等^[46]的研究结果基本一致。主要是因为当地科学地种植紫花苜蓿和沙打旺等耐旱和抗风沙的先锋物种，增加了草地生态多样性。另外 2003 年开始全面禁牧并实施圈养政策，这为当地生态恢复提供了良好条件^[47]。而太行山和燕山的森林和灌木等生态系统结构相对复杂，往往更依赖于土壤、水分和光照等多种气候因素，大规模造林工程除了改善当地生态环境外，更重要的是发挥其京津冀的生态屏障作用^[48]，推动海河流域整体上的可持续发展。

除生态工程外，城镇化的发展和农业技术的改良等也对生态环境产生了重要影响。城镇的扩张一定程度上会造成植被覆盖面积减少和热岛效应的增强，导致城镇整体上生态环境退化严重，但有趣的是，人类活动驱动下的北京、天津和石家庄等大中城市中心城区生态环境改善明显（图 9），这与城市公园^[49]、环城水系和通风廊道建设^[50]等一系列城市更新措施有关，这些措施推动城市蓝绿空间显著增加和热岛效应有序缓解，生态环境得到改善，但是中小城镇生态环境却几乎没有出现改善，可见城市生态环境保护在不同等级城市之间存在显著的梯度差异，中小城镇的生态环境保护更加值得关注。而科学的灌溉、育种和除虫等精细化农田管理技术促进了农田生态环境的改善^[47]。

3.3 不足与展望

本文重点研究了 NDVI、GPP 和 IRSEI 对气象干旱和人类活动的响应，IRSEI 虽然集合多要素，但是其仅局限于生长季尺度^[51]，而难以精确到月尺度，因此尚未分析生态环境对气象干旱的迟滞和累积效应，这仍值得进一步探究；另外，本文在利用 NRBO-XGBoost 分离气候变化和人类活动的贡献时，仅考虑 SPEI 及其密切相关的气温和降水因素，未来还将考虑纳入土壤水分和太阳辐射等更多相关因子，以更全面地反映气候变化和更精准地分离人类活动的影响。

4 结论

(1) 与传统模型相比，IRSEI 在稳定性和时序可比性方面具有明显优势，可有效比较年际

之间的差异，更准确地反映出海河流域长时序生态环境的变化趋势。

(2) 海河流域 NDVI、GPP 和 IRSEI 等生态环境评价指标有 78.77%~94.32% 的像元呈现上升趋势，即除部分城镇化快速发展地区以外，演变趋势均以上升为主，特别是流域西部和北部多呈现出显著上升。说明海河流域生态环境总体上呈现改善趋势。

(3) 海河流域夏季和生长季以湿润化为主，冬季以干旱化为主，春秋季节变化较小。生态环境对各季节气象干旱的响应具有明显差异：生态环境对夏季和生长季气象干旱正响应最显著，且各土地利用类型差异较小；生态环境对冬季气象干旱负响应最显著，尤其是森林、灌木和草地等自然植被为主的区域呈现出显著负响应，可能对气温等因子更敏感，但农田和不透水面等受人类影响明显的区域则正负响应并存；生态环境对春秋季节气象干旱的响应相对微弱，但仍具有一定异质性。

(4) 人类活动驱动下的生态环境变化差异显著。森林、灌木和草地均以改善为主，其中草地的改善最明显，NDVI、GPP 和 IRSEI 草地改善面积占比分别为 90.56%、83.91% 和 80.93%；其次是农田，受人类活动影响差异性强，但同样以改善为主；不透水面呈现改善与退化并存的特点，其中大中城市的中心城区以改善为主，而大中城市外围拓展区及小城镇以退化为主。

参考文献：

- [1] 高启慧, 秦圆圆, 梁媚聪, 等. IPCC 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J]. 环境保护, 2023, **51**(Z2): 82-84.
- [2] Gao Q H, Qin Y Y, Liang M C, et al. Clnterpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 Synthesis report[J]. Environmental Protection, 2023, **51**(Z2): 82-84.
- [3] Luo M, Zhang S, Li R, et al. Global vegetation productivity has become less sensitive to drought in the first two decades of the 21st century[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, **135**, doi: 10.1016/j.jag.2024.104297
- [4] Qi G, Song J, Li Q, et al. Response of vegetation to multi-timescales drought in the Qinling Mountains of China[J]. Ecological Indicators, 2022, **135**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108539.
- [5] He T, Dai X, Li W, et al. Response of net primary productivity of vegetation to drought: A case study of Qinba Mountainous area, China (2001–2018)[J]. Ecological Indicators, 2023, **149**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110148.
- [6] Zheng L, Lu J, Chen X. Drought offsets the vegetation greenness-induced gross primary productivity from 1982 to 2018 in China[J]. Journal of Hydrology, 2024, **632**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.130881.
- [7] Ren Z, Tian Z, Wei H, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of vegetation in the Yellow River Basin, China during 2000–2020[J]. Ecological Indicators, 2022, **138**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108832.
- [8] Peng J, Jiang H, Liu Q, et al. Human activity vs. climate change: Distinguishing dominant drivers on LAI dynamics in karst region of southwest China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144297.
- [9] Wang G, Peng W, Zhang L, et al. Vegetation EVI changes and response to natural factors and human activities based on geographically and temporally weighted regression[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, **45**, doi: 10.1016/j.gecco.2023.e02531.
- [10] Ma Y, Zhou J, Liu S, et al. Estimation of evapotranspiration using all-weather land surface temperature and variational trends with warming temperatures for the River Source Region in Southwest China[J]. Journal of Hydrology, 2022, **613**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128346.
- [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.
- [12] Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(5): 889-897
- [13] Xin J, Yang J, Yu H, et al. Towards ecological civilization: Spatiotemporal heterogeneity and drivers of ecological quality transitions in China (2001–2020)[J]. Applied Geography, 2024, **173**, doi: 10.1016/j.apgeog.2024.103439.

- [12] Maimaitituersun A, Yang H, Aobulaisan N, *et al.* Assessing subtle changes in arid land river basin ecological quality: A study utilizing the PIE engine platform and RSEI[J]. Ecological Indicators, 2025, **170**, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.113035.
- [13] 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), doi: 10.13227/j.hjkx.202407130.
- Tang C C, Li Q, Tao H F, *et al.* Evaluation of the ecological environment quality in the Tarim River Basin based on the modified remote sensing ecological index model[J]. Environmental Science, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202407130.
- [14] 王丽霞, 张信伟, 赵蕊, 等. 延河流域生态环境质量遥感测评模型改进及其精度分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(11), doi:10.13227/j.hjkx.202409271.
- Wang L X, Zhang X W, Zhao R, *et al.* Improvement and accuracy analysis of remote sensing evaluation model for Yanhe River Basin ecological environment quality[J]. Environmental Science, 2025, **46**(11), doi: 10.13227/j.hjkx.202409271.
- [15] Zhang H, Ma C, Liu P. Dynamic evaluation of the ecological evolution and quality of arid and semi-arid deserts in the Aibugai River Basin based on an improved remote sensing ecological index[J]. Ecological Informatics, 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102727.
- [16] 徐永浩, 张廷斌, 易桂花, 等. 太行山区生态环境质量时空特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(4): 2428-2438.
- Xu Y H, Zhang T B, Yi G H, *et al.* Analysis of the spatiotemporal characteristics and influencing factors of ecological environment quality in the taihang mountain area[J]. Environmental Science, 2025, **46**(4): 2428-2438.
- [17] 王经宇, 杨丽萍, 王美, 等. 陕北黄土高原生态环境质量时空变化监测及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202406111.
- Wang J Y, Yang L P, Wang M, *et al.* Spatio-temporal monitoring and driving factor analysis of eco-environment quality in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Environmental Science, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202406111.
- [18] 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, **46**(6):3720-3729.
- Luo X, Wang L X, Zhang J, *et al.* Spatio-temporal dynamic simulation analysis of ecological environment quality in Qinling Mountains[J]. Environmental Science, 2025, **46**(6):3720-3729.
- [19] Zhang X, Jia W, Lu S, *et al.* Ecological assessment and driver analysis of high vegetation cover areas based on new remote sensing index[J]. Ecological Informatics, 2024, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102786.
- [20] 叶博文, 孙标, 赵云靓, 等. 2000~2022 年内蒙古生境质量时空演变及驱动力分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202407134.
- Ye B W, Sun B, Zhao Y L, *et al.* Spatial-temporal evolution and driving force analysis of habitat quality in Inner Mongolia from 2000 to 2022[J]. Environmental Science, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202407134.
- [21] 杨静怡, 李贞演, 尹芳, 等. 关中平原城市群人类活动强度与生境质量的时空关联性[J]. 环境科学, 2025, **46**(12), doi: 10.13227/j.hjkx.202411094.
- Yang J Y, Li Z Y, Yin F, *et al.* Spatio-temporal correlation between human activity intensity and remote sensing ecological index in the Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2025, **46**(12), doi: 10.13227/j.hjkx.202411094.
- [22] 魏泽锋, 官云兰, 王淑婷, 等.“呼包鄂”城市群生态环境质量时空演变及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202409325.
- Wei Z F, Guan Y L, Wang S T, *et al.* Spatial-temporal evolution and driving factors of ecological quality in the "Hohhot-Baotou Ordos" urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202409325.
- [23] 潘占冬, 王轶夫, 王可月, 等. 基于改进型遥感生态指数的将乐县生态质量评估及驱动分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(10), doi: 10.13227/j.hjkx.202408293.
- Pan Z D, Wang Y F, Wang K Y, *et al.* Ecological quality assessment and driving analysis of Jiangle County based on modified remote sensing ecological index[J]. Environmental Science, 2025, **46**(10), doi: 10.13227/j.hjkx.202408293.
- [24] 侯嘉烨, 李建华, 王佳蓉, 等. 基于 SA-RSEI 模型的盐池县生态质量演变研究[J]. 干旱区研究, 2024, **41**(6): 1045-1058.
- Hou J Y, Li J H, Wang J R, *et al.* The evolution of ecological quality in Yanchi County based on the SA-RSEI model[J]. Arid Zone Research, 2024, **41**(6): 1045-1058.

- [25] Wen C, Long T, He G, *et al.* Temporally enhanced RSEI and nighttime lights reveal long-term ecological changes and effective protection in China's inaugural national parks[J]. Ecological Indicators, 2025, **170**, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112981.
- [26] Zheng Z, Wu Z, Chen Y, *et al.* Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis[J]. Science of The Total Environment, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152595..
- [27] Yao B, Gong X, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variation and GeoDetector analysis of NDVI at the northern foothills of the Yinshan Mountains in Inner Mongolia over the past 40 years[J]. Heliyon, 2024, **10**(20), doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39309.
- [28] 郭发苗, 彭道黎, 苏艳芳, 等. 气候的时滞效应和人为活动对黄土高原植被的影响[J]. 生态学杂志, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250126.1303.024>.
- [29] Guo F M, Peng D L, Su Y F, *et al.* Time-lag effects of climate and anthropogenic activities on vegetation change on the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250126.1303.024>.
- [30] 盛方毓, 高凡, 徐海量, 等. 2000~2022年喀什噶尔河流域植被覆盖度时空变化及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(9), doi: 10.13227/j.hjkx.202407188.
- [31] Sheng F Y, Gao F, Xu H L, *et al.* Analysis of spatial and temporal variation of vegetation cover and its influencing factors in Kashgar River Basin from 2000 to 2022[J]. Environmental Science, 2025, **46**(9), doi: 10.13227/j.hjkx.202407188.
- [32] Cheng M, Wang Z, Wang S, *et al.* Determining the impacts of climate change and human activities on vegetation change on the Chinese Loess Plateau considering human-induced vegetation type change and time-lag effects of climate on vegetation growth[J]. International Journal of Digital Earth, 2024, **17**(1), doi: 10.1080/17538947.2024.2336075.
- [33] Xu S, Li J, Zhang T. Effects of drought on ecosystem evapotranspiration and gross primary productivity in the Haihe River Basin[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2024, **135**, doi: 10.1016/j.pce.2024.103619.
- [34] 王峯, 曹巍, 黄麟. 中国重大生态工程近40年生态成效整合分析[J]. 生态学报, 2024, **44**(7): 2673-2687.
- [35] Wang L, Cao W, Huang L. Integrated analysis of ecological effectiveness of major ecological projects in China over the past 40 years. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(7): 2673-2687.
- [36] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. 地理学报, 2022, **77**(9): 2133-2153.
- [37] Shao Q Q, Liu S C, N J, *et al.* Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000-2019 using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, **77**(9): 2133-2153.
- [38] Vicente-Serrano S, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. Journal of Climate, 2010, **23**(7): 1696-1718.
- [39] 郝岩, 张舰, 李保琦, 等. 2001~2020年中国植被NPP对气象干旱的响应特征[J]. 水电能源科学, 2024, **42**(8): 17-21.
- [40] Hao Y, Zhang J, Li B Q, *et al.* Response characteristics of NPP to meteorological drought in China from 2001 to 2020[J]. Water Resources and Power, 2024, **42**(8): 17-21.
- [41] 黄砾成, 莫兴国. 海河流域生态系统净初级生产力对气象干旱的响应与弹性[J]. 植物生态学报, 2024, **48**(10): 1256-1273.
- [42] Huang L C, Mo X G. Response and resilience of net primary productivity of the Hai River Basin ecosystems under meteorological droughts[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, **48**(10): 1256-1273.
- [43] Qin G, Wang N, Wu Y, *et al.* Spatiotemporal variations in eco-environmental quality and responses to drought and human activities in the middle reaches of the Yellow River basin, China from 1990 to 2022[J]. Ecological Informatics, 2024, **81**, doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102641.
- [44] 杨紫妍, 袁金国, 李卓琳, 等. 水热及下垫面因子影响下的滹沱河流域植被NPP时空演变分析[J]. 环境科学, 2025, **46**(9), doi: 10.13227/j.hjkx.202407059.
- [45] Yang Z Y, Yuan J G, Li Z L, *et al.* Analysis on spatiotemporal evolution of vegetation NPP in Hutuo River Basin under the influence of hydro-thermal factors and underlying surface factors[J]. Environmental Science, 2025, **46**(9), doi: 10.13227/j.hjkx.202407059.
- [46] Sowmya R, Premkumar M, Jangir P. Newton-Raphson-based optimizer: A new population-based metaheuristic algorithm for continuous optimization problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, **128**, doi:

- 10.1016/j.engappai.2023.107532.
- [40] 刘倩, 王兆茹, 胥寒莉, 等. 基于粒子群优化 XGBoost 模型的 PM_{2.5} 浓度反演[J]. 环境科学, 2025, **46**(8), doi: 10.13227/j.hjkx.202407279.
Liu Q, Wang Y R, Xu H L, et al. Inverse modeling of PM_{2.5} concentration using a particle swarm optimization XGBoost model[J]. 环境科学, 2025, **46**(8), doi: 10.13227/j.hjkx.202407279.
- [41] 杨勇, 胡东, 杨童亮, 等. 基于实域粗糙集和 NRBO-XGBoost 的变压器故障诊断[J]. 电子测量技术, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.2175.TN.20250206.1758.077>.
Yang Y, Hu D, Yang T L, et al. Research on transformer fault diagnosis method based on real domain rough set and NRBO-XGBoost[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.2175.TN.20250206.1758.077>
- [42] 许丽, 高光耀, 王晓峰, 等. 气候变化和人类活动对中国北方旱区植被变绿的定量贡献[J]. 生态学报, 2023, **43**(17): 7274-7283.
Xu L, Gao G Y, Wang X F, et al. Quantifying the contributions of climate change and human activities to vegetation greening in the drylands of northern China. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(17): 7274-7283.
- [43] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, **75**(5): 961-974.
Jin K, Wang F, Han J Q, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, **75**(5): 961-974.
- [44] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martinez Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere[J]. Science Advances, 2021, **7**(9), doi: 10.1126/sciadvabc7447.
- [45] 靖娟利, 孙佳荟, 赵婷, 等. 西南地区植被 NPP 对多尺度气象干旱的响应[J]. 水土保持学报, 2024, **38**(3): 335-344.
JING J L, SUN J H, ZHAO T, et al. Response of vegetation NPP to multiscale meteorological drought in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, **38**(3): 335-344.
- [46] 赵瑜琦, 赵鹏云, 许泽海, 等. 2002—2022 年气候变化和人类活动对山西省植被恢复的贡献[J]. 应用生态学报, 2025, **36**(1): 219-226.
Zhao Y Q, Zhao P Y, Xu Z H, et al. Contribution of climate change and human activity to vegetation recovery in Shanxi Province from 2002 to 2022[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, **36**(1): 219-226.
- [47] 刘芃凯, 饶良懿. 海河流域植被变化时空分异及影响因素探测[J]. 环境科学, 2025, **46**(4): 2352-2362.
Liu P K, Rao L Y. Detection of the spatial and temporal differentiation and influencing factors of vegetation changes in the Haihe River Basin[J]. Environmental Science, 2025, **46**(4): 2352-2362.
- [48] 庞娇, 郭欣雨, 李晨阳, 等. 京津冀生态屏障区植被覆盖时空演变驱动力定量解析[J]. 环境科学, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202407062.
Pang J, Guo X Y, Li C Y, et al. Quantitative analysis of the drivers of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Beijing-Tianjin-Hebei ecological barrier area[J]. Environmental Science, 2025, **46**(7), doi: 10.13227/j.hjkx.202407062.
- [49] 刘秀萍, 赵松婷, 李新宇, 等. 北京中心城区公园绿地固碳能力及驱动因素研究[J]. 风景园林, 2025, **32**(1): 32-40.
Liu X P, Zhao S T, Li X Y, et al. Research on carbon sequestration capacity of urban park green space in the central urban area of Beijing and driving factors thereof[J]. Landscape Architecture, 2025, **32**(1): 32-40.
- [50] 方云皓, 顾康康. 城市通风廊道研究综述[J]. 生态学报, 2024, **44**(13): 5444-5458.
Fang Y H, Gu K K. Review of urban ventilation corridor research: characteristics and progress. Acta Ecologica Sinica, 2024, **44**(13): 5444-5458
- [51] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别[J]. 遥感技术与应用, 2022, **37**(1): 1-7.
Xu H Q, Du W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, **37**(1): 1-7.