

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.011 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.011

李晓鹏,李康,贾富贵,等.基于RSEI模型的黄河流域生态演变及驱动力[J].水土保持学报,2026,40(1):451-462.

LI Xiaopeng, LI Kang, JIA Fugui, et al. Ecological evolution and driving forces in Yellow River basin based on RSEI model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):451-462.

基于RSEI模型的黄河流域生态演变及驱动力

李晓鹏¹, 李康¹, 贾富贵¹, 雷双¹, 徐静², 李昱鹏³, 李援农⁴, 胡炜童⁵

(1.兰州财经大学农林经济管理学院,兰州730020; 2.兰州财经大学会计学院,兰州730020; 3.中国农业大学水利与土木工程学院,北京100083; 4.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌712100; 5.兰州财经大学统计与数据科学学院,兰州730020)

摘要: [目的] 为科学评估黄河流域生态环境的动态变化并揭示其驱动机制,旨在系统分析该区域2000—2022年生态环境质量的时空演变特征、预测其未来发展趋势,并探究气温、降水和人类活动对其的影响。[方法] 基于遥感生态指数(RSEI)模型,采用Sen趋势分析、Mann-Kendall(M-K)检验、Hurst指数及其叠加分析方法,对黄河流域2000—2022年生态环境质量变化及其演变趋势进行系统研究,并通过皮尔逊相关性分析探究气温、降水和人类活动强度(HAI)对生态的影响。[结果] 1)2000—2022年黄河流域RSEI年平均值为0.473,生态质量整体处于一般水平。2)黄河流域RSEI值呈波动上升趋势,年增长速率为0.0044,表明黄河流域生态质量整体趋于改善。3)未来72.95%的地区RSEI值呈上升趋势,生态环境将得到进一步提升。4)RSEI和HAI的皮尔逊相关系数平均值为-0.159,整体呈负相关。RSEI与气温和降水的皮尔逊相关系数平均值分别为0.081、0.239,整体呈正相关,但空间分异显著。[结论] 2000—2022年黄河流域生态环境质量整体处于一般水平但呈波动改善趋势,且未来大部分地区将持续改善。自然因素(气温、降水)和人文因素(人类活动强度)对RSEI均有较为显著的影响。

关键词: 黄河流域; 遥感生态指数; 人类活动强度; 皮尔逊相关性分析

中图分类号: X826 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2026)01-0451-12

Ecological Evolution and Driving Forces in Yellow River Basin Based on RSEI Model

LI Xiaopeng¹, LI Kang¹, JIA Fugui¹, LEI Shuang¹, XU Jing², LI Yupeng³, LI Yuannong⁴, HU Weitong⁵

(1.College of Agricultural and Forestry Economic Management, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China; 2.School of Accounting, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China; 3.College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 4.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.College of Statistics and Data Science, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: [Objective] To scientifically evaluate the dynamic changes in the ecological environment of the Yellow River Basin and reveal its driving mechanisms, this study systematically analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of the ecological environment quality in the region from 2000 to 2022, predicts its future development trends, and investigates the impacts of temperature, precipitation, and human activities. [Methods] Based on the remote sensing ecological index (RSEI) model, the ecological environment quality changes and evolution trends in the Yellow River Basin from 2000 to 2022 were examined using Sen's trend analysis, the Mann-Kendall test, the Hurst index, and their integrated analytical methods. Pearson correlation analysis was further used to explore the impacts of temperature, precipitation, and human activity intensity (HAI) on the ecological environment. [Results] 1) Over the past 23 years, the basin exhibited an annual mean RSEI value of 0.473, indicating that the overall ecological quality remained at a moderate level. 2) The RSEI values in the Yellow River

收稿日期:2025-05-19 修回日期:2025-08-29 录用日期:2025-09-16 网络首发日期(www.cnki.net):2025-10-24

资助项目:甘肃省自然科学基金项目(24JRRA1003);甘肃省教育厅青年博士支持项目(2025QB-055);国家自然科学基金项目(21XTJ005)

第一作者:李晓鹏(1981—),女,博士,副教授,主要从事生态环境与区域发展研究。E-mail:lixiaopeng1396@163.com

通信作者:李晓鹏(1981—),女,博士,副教授,主要从事生态环境与区域发展研究。E-mail:lixiaopeng1396@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

Basin exhibited a fluctuating upward trend, with an annual growth rate of 0.004 4, indicating an overall improvement in ecological quality. 3) In the coming period, 72.95% of the region was projected to show increasing RSEI values, suggesting further enhancement of ecological conditions. 4) The mean Pearson correlation coefficient between RSEI and HAI was -0.159 , showing an overall negative correlation. Meanwhile, the mean Pearson correlation coefficients between RSEI and temperature/precipitation were 0.081 and 0.239, respectively, indicating an overall positive correlation, but with significant spatial heterogeneity. [Conclusion] During 2000-2022, the ecological environment quality of the Yellow River Basin generally maintains at a moderate level but showed a fluctuating improvement trend, with most areas expected to continue improving in the future. Both natural factors (temperature and precipitation) and anthropogenic factors (human activity intensity) have significant impacts on the RSEI.

Keywords: Yellow River basin; remote sensing ecological index (RSEI); human activity intensity (HAI); Pearson correlation analysis

Received: 2025-05-19

Revised: 2025-08-29

Accepted: 2025-09-16

Online(www.cnki.net): 2025-10-24

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济带,承载着全国12%的人口和15%的耕地面积^[1]。近年来,国家高度重视黄河流域生态保护和高质量发展^[2-3]。2019年9月,习近平总书记提出“黄河流域生态保护和高质量发展”重大国家战略,强调要“共同抓好大保护,协同推进大治理”^[4]。2021年10月,中共中央、国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》正式发布,明确提出要“加强生态系统保护修复,提升水源涵养能力”^[5]。2023年4月,《中华人民共和国黄河保护法》正式施行,进一步从法律层面强化黄河流域生态环境保护^[6]。该类政策法规的出台凸显了黄河流域生态安全的重要性,同时也对科学研究提出更高要求,亟须建立科学、动态、高效的生态环境监测与评估体系^[7]。

对广域、复杂的生态系统进行长时序监测,传统实地调查方法存在局限,而遥感技术为此提供高效的解决方案^[8]。其中,徐涵秋^[9]提出的遥感生态指数(RSEI),通过整合绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)和热度(LST)等指标,由主成分分析法确定各指标权重,有效避免人为设定的主观性,显著提升评价的客观性^[10-12]。研究人员运用该模型,成功揭示不同尺度下的生态演变规律与驱动机制。如马林等^[13]研究表明,RSEI能很好地反映山东省的生态质量时空特征;汪孝贤等^[14]使用RSEI模型对祁连山国家级自然保护区进行生态环境质量评价,证明祁连山国家级自然保护区近年来生态质量逐步改善;付绍桐等^[15]构建RSEI模型探究黄河流域山西段生态环境的变化,表明RSEI模型在黄河流域山西段具有较好的适用性;DUAN等^[16]运用人类足迹评估方法,研究祁连山自然保护区人类活动强度变化与生态系

统间的相互关系,其研究数据揭示草原生态系统和森林生态系统在该区域受人类干扰程度最为显著;李琪等^[17]基于RSEI模型的研究表明,阿拉善荒漠区的生态改善与飞播造林等生态修复工程密切相关;何天星等^[18]通过构建长三角一体化示范区的RSEI模型,表明长三角地区人口的快速增长对生态质量构成显著的负面压力,而经济的发展并未以牺牲生态环境为代价。

黄河流域地区拥有广阔的土地和丰富的自然资源,但由于复杂的气候条件和特殊的地理环境,其生态环境面临显著风险^[19-20]。已有研究^[21-22]表明,RSEI在黄土高原、黄河三角洲等典型区域的适用性已得到验证,为评估区域生态状况提供有力工具。然而,目前研究仍存在局限,一是驱动力分析多集中于气候因素或单一的人文指标,缺乏对人类活动综合强度的量化评估;二是针对整个黄河流域,系统集成生态系统历史变化、未来趋势预测与综合性人文驱动因素的协同分析尚不充分。本文基于2000—2022年多源遥感数据,构建一个综合夜间灯光、人口密度与土地利用的“人类活动强度指数(HAI)”,以更全面地量化人文因素的综合影响。系统集成RSEI模型、Sen-MK趋势分析、Hurst指数和Sen趋势叠加预测及皮尔逊相关性分析等方法,不仅评估历史与现状,更预测未来趋势,探究其与自然、人文驱动力的复杂关系,以期为新时期黄河流域的差异化生态治理和可持续发展提供更具针对性的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域(32°10'~41°50'N, 95°53'~119°05'E)是我国重要的生态屏障和经济发展带,流经青海、四

川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东 9 个省(自治区),流域面积约 79.5 万 km²(图 1)。该区域地貌类型多样,上游以高原、山地为主,中游为黄土高原,下游为华北平原。气候上,上游属高寒气候,降水较少;中游为半干旱半湿润气候,降水集中且水土流失严重;下游为温带季风气候,降水相对充沛。黄河流域既是重要的水源涵养区,又是我国重要的农业、能源和工业基地,人类活动与生态环境相互作用显著^[23]。近年来,随着气候变化和人类活动加剧,流域生态环境面临诸多挑战,研究其生态时空演变对区域可持续发展具有重要意义。

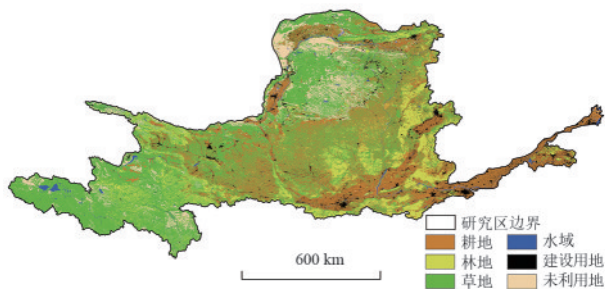


图 1 研究区土地利用

Fig. 1 Land use in the study area

1.2 数据来源

本文使用 RSEI 作为黄河流域生态评价指标,其影像提取及处理均在 Google Earth Engine(GEE)平台中完成。Modis 数据采用 MOD09A1 地表反射率产品,空间分辨率为 500 m;MOD11A2 地表温度产品,空间分辨率为 1 km。MOD13Q1 植被指数产品,空间分辨率为 250 m。气温和降水数据分别来源于 ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY 数据集和 UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY 数据集,其空间分辨率分别

$$IBI = \frac{2 \times \frac{Band6}{Band6 + Band2} - \left(\frac{Band2}{Band2 + Band1} + \frac{Band3}{Band3 + Band6} \right)}{2 \times \frac{Band6}{Band6 + Band2} + \left(\frac{Band2}{Band2 + Band1} + \frac{Band3}{Band3 + Band6} \right)} \quad (4)$$

$$NDBSI = \frac{IBI + BI}{2} \quad (5)$$

热度基于 MOD11A2 地表温度产品(LST),通过昼夜温度差校正消除季节波动影响,其计算公式为:

$$LST = LST_{raw} \times 0.02 - 273.15 \quad (6)$$

为避免指标间量纲差异,对 NDVI、WET、NDBSI 及 LST 进行标准化处理,并利用主成分分析(PCA)提取第 1 主成分作为 RSEI 基准值。最终采用分位数归一化将 RSEI 值域约束至 [0, 1],其计算公式为:

$$RSEI = \frac{PCA_1 - \min(PCA_1)}{\max(PCA_1) - \min(PCA_1)} \quad (7)$$

为 0.1°和 0.05°。夜间灯光亮度数据来源于 GEE 平台 VCM_SLCFG 数据集,空间分辨率为 500 m。土地利用数据来源自资源环境科学数据平台,空间分辨率为 30 m。人口密度数据来源于 WorldPop 全球人口分布栅格,空间分辨率为 1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 RSEI 模型构建 本研究基于 MODIS 传感器数据构建遥感生态指数(RSEI),充分发挥其高时间分辨率与大范围覆盖优势,适用于区域生态质量的动态监测。根据 MODIS 波段特性,选取绿度、湿度、干度及热度 4 个核心指标。

绿度采用 MOD13Q1 植被指数产品中的归一化植被指数(NDVI),通过近红外波段(ρ_{NIR})和红光波段(ρ_{Red})计算,直接表征植被覆盖密度,其计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

湿度基于改进的 MODIS 缨帽变换公式,利用 MOD09A1 地表反射率产品,计算黄河流域湿度 WET,其计算公式为:

$$Wet = 0.1147\rho_1 + 0.2489\rho_2 + 0.2408\rho_3 + 0.3132\rho_4 - 0.3122\rho_5 - 0.6416\rho_6 - 0.5087\rho_7 \quad (2)$$

干度结合改进的建筑指数(ABI)与裸土指数(BI),利用红光(Band 1)、近红光(Band 2)、蓝光(Band 3)及短波红外(Band 6)波段计算干度(NDBSI),其计算公式为:

$$BI = \frac{(Band6 + Band1) - (Band2 + Band3)}{(Band6 + Band1) + (Band2 + Band3)} \quad (3)$$

本文以 RSEI 作为生态质量指标^[24],将黄河流域生态质量分为极差(0~0.2)、较差(>0.2~0.4)、一般(>0.4~0.6)、良好(>0.6~0.8)、极好(>0.8~1)5 个等级。

1.3.2 Sen 趋势分析与 Mann-Kendall 检验 为探究黄河流域生态环境质量时空变化趋势,本研究采用非参数统计方法,Sen 趋势分析与 Mann-Kendall(M-K)检验相结合,以克服数据非正态分布及异常值干扰的影响,适用于量化其变化的强度与显著性。计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \frac{X_k - X_m}{k - m} \quad 1 \leq m < k \leq n \quad (8)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{m=k+1}^n \text{sign}(X_k - X_m) \quad (9)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{T-1}{\sqrt{\sigma^2(T)}} & T > 0 \\ 0 & T = 0 \\ \frac{T+1}{\sqrt{\sigma^2(T)}} & T < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： X_k 和 X_m 分别为第 k 年和第 m 年的RSEI值； n 为时间序列长度。若 $\beta > 0$ ，表明生态环境质量变化趋于改善；若 $\beta < 0$ ，则表明生态环境质量变化趋于退化； $\text{sign}(X_k - X_m)$ 为符号函数，当 $X_k > X_m$ 时取1，当 $X_k = X_m$ 时取0，当 $X_k < X_m$ 时取-1。 $\sigma^2(T)$ 为统计量 T 的方差； n 为时间序列长度。参考文献[25]并结合研究区地理概况，将黄河流域RSEI变化趋势分为9类(表1)。

表1 Sen+M-K变化趋势分类
Table 1 Classification of change trends based on Sen+M-K method

β	Z	变化趋势
$\beta > 0$	$Z > 2.58$	极显著增加
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著增加
	$1.65 < Z \leq 1.96$	微显著增加
	$0 < Z \leq 1.65$	不显著增加
$\beta = 0$	$Z = 0$	无变化
	$-1.65 < Z < 0$	不显著减少
$\beta < 0$	$-1.96 < Z \leq -1.65$	微显著减少
	$-2.58 < Z \leq -1.96$	显著减少
	$Z \leq -2.58$	极显著减少

1.3.3 Hurst指数结合Sen趋势分析 为预测黄河流域生态环境质量的未来演变趋势，本研究引入Hurst指数，分析黄河流域RSEI时间序列的持续性特征，与Sen趋势分析结合，构建生态环境质量趋势预测分类体系。Hurst指数通过衡量时间序列的长期依赖性，可区分生态环境质量变化的持续性或反持续性。其计算公式为：

$$\frac{\Delta R(n)}{L(n)} = Kn^h \quad (11)$$

式中： $\Delta R(n)$ 为极差变化量； $L(n)$ 为子区间长度； K 为常数； h 为Hurst指数。将黄河流域Hurst指数结果与Sen趋势进行耦合^[26]，得到黄河流域RSEI未来演变趋势(表2)。

1.3.4 HAI构建 传统研究多依赖单一土地利用数据或人口密度数据表征人类活动强度，但其难以揭示城镇化进程中人口集聚与经济活动的复合影响。结合柴文雯等^[27]研究，本研究选取夜间灯光指数数据(NTL)、人口密度数据(PD)和土地利用数

据(LU)构建HAI模型。对原始数据进行标准化处理后，将3个指标转化为1 km分辨率，HAI构建公式为：

$$HAI = aNTL + bPD + cLU \quad (12)$$

式中： a 、 b 、 c 分别为标准化处理后的夜间灯光指数NTL、人口密度PD和土地利用类型数据LU的权重系数，参考陈泓瑾等^[28]研究成果并结合研究区现状， a 、 b 、 c 分别取0.3、0.3、0.4。

表2 基于Sen斜率与Hurst指数的生态变化判别矩阵
Table 2 Ecological change discriminant matrix based on Sen's slope and Hurst index

Sen趋势	Hurst指数	
	Hurst > 0.5	Hurst ≤ 0.5
Sen ≥ 0.005	持续改善	反持续改善
Sen < 0.005	无法确定	无法确定
Sen ≤ -0.005	持续退化	反持续退化

1.3.5 皮尔逊相关性 为揭示人类活动强度与生态环境质量的空间关联特征，本研究在栅格单元尺度上构建时序相关性分析模型。

1) HAI与RSEI栅格数据统一至相同坐标系与空间分辨率(1 km × 1 km)，采用双线性插值法完成重采样，确保像元空间一一对应。剔除水体及永久冰川区域，对云覆盖导致的RSEI缺失值，使用相邻年份平均值插补，确保时序连续性。

2) 基于全流域所有有效栅格单元，计算HAI、气温、降水与RSEI的皮尔逊相关系数：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (13)$$

式中： x_i 为第 i 年像元的HAI、气温或降水值； y_i 为对应像元RSEI值； \bar{x} 、 \bar{y} 为研究期内各变量平均值； $n=23$ 为研究年数。

3) 显著性检验：

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (14)$$

式中： t 为统计量； r 为皮尔逊相关系数； n 为样本数； $\sqrt{1-r^2}$ 为调整因子。设置置信水平 $p=0.05$ ，通过 t 统计量检验各栅格单元相关系数的显著性，识别人类活动与生态质量显著相关的空间区域。

2 结果与分析

2.1 黄河流域RSEI时间变化

由图2可知，2000—2022年黄河流域RSEI年均值及各生态等级面积占比的时间变化特征。2000—2022年黄河流域RSEI呈波动上升趋势，上升速率为0.004 4/a，反映出黄河流域生态质量整体趋于改善。黄河流域2000—2022年，RSEI值最高的年份为2018

年, RSEI 为 0.542; RSEI 最低的年份为 2001 年, RSEI 为 0.410; RSEI 多年平均值为 0.473, 表明黄河流域生态质量等级整体为一般。由生态质量各等级面积占比可知, 质量等级为极好、良好和一般的面积占比呈增加态势, 质量等级为较差和极差等级的面积呈减

少态势, 进一步佐证该区域生态环境的逐步提升。其中质量等级为较差和极差面积占比最大的年份为 2001 年, 总面积占比为 53.03%; 质量等级为极好和良好面积占比最大的年份为 2018 年, 总面积占比为 39.17%。

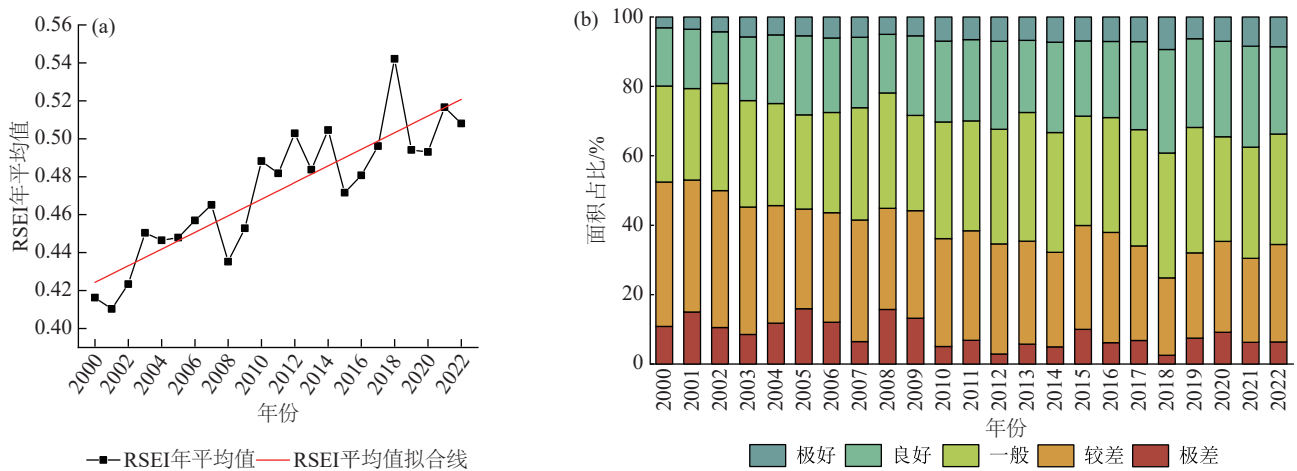


图 2 黄河流域 RSEI 年均值变化及各等级面积占比

Fig. 2 Changes in mean RSEI values and area proportion for each grade in Yellow River basin

2.2 黄河流域 RSEI 空间变化

黄河流域 RSEI 空间分布呈显著的梯度分异特征, 西北侧 RSEI 值较低, 东南侧 RSEI 值较高(图 3)。黄河流域生态质量以较差和一般为主, 其 2000—2022 年年均面积占比分别为 33.5%、31.2%, 良好和极好面积占比分别为 21.64%、6.87%, 极差面积占比最小, 为 6.79%。从行政区划看, 上游甘肃省陇中地区、宁夏回族自治区及内蒙古自治区 RSEI 值多处于极差和较差等级, 生态环境质量受高寒干旱与荒漠化叠加影响显著; 中游的山西省及陕西省 RSEI 等级以一般、良好和极好为主; 下游河南省豫东平原及山东省黄河三角洲则普遍达到一般和良好等级。由图 4 时序对比可知, 黄河流域生态环境质量在 2000—2022 年整体有所提升。内蒙古自治区及宁夏回族自治区极差和较差等级面积显著减少, 陕西、山西及河南地区生态等级为极好的土地面积呈增加态势。

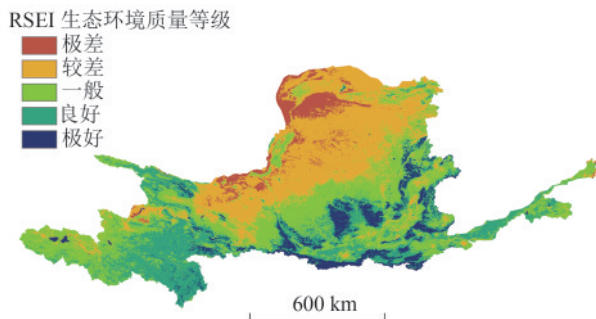


图 3 黄河流域 2000—2022 年多年平均生态环境质量空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of multi-year average ecological environment quality in Yellow River basin from 2000 to 2022

2.3 黄河流域 RSEI 时空变化

基于 Sen 趋势分析与 M-K 显著性检验的耦合分析, 绘制黄河流域 RSEI 变化率的空间分布图(图 5)。由图 5a 可知, 黄河流域 RSEI 的变化率为 $-0.029 \sim 0.027$, 平均值为 0.004, RSEI 值整体呈上升趋势。在空间分布方面, 由图 5b 可知, 黄河流域 RSEI 值极显著减少的区域呈零散分布, 主要集中于流域边缘部分的城镇扩展带与局部生态脆弱区, 如内蒙古河套平原南缘、关中盆地边缘、吕梁山区南段及豫鲁交界处黄河下游干流沿线的城市边缘地带。该类区域面积整体较少, 仅约占黄河流域总面积的 0.83%, 但多位于土地开发强度较高的地区, 生态敏感性较强。而极显著增加的区域主要集中在黄河流域中游及上游部分地区, 具体为中游地区的陕西省、山西省以及上游的甘肃省, 其面积约占黄河流域总面积的 49.92%, 是流域生态改善的主要贡献区, 反映出近年来生态保护与修复措施在黄河流域取得显著成效。

2.4 黄河流域 RSEI 未来趋势

基于 Hurst 指数的时间序列持续性分析发现, 黄河流域 RSEI 的演变趋势呈显著的空间异质性与反向趋势特征(图 6)。由图 6a 可知, Hurst 指数为 0.078~0.942, 平均值为 0.429。其中, 强反持续性 ($H < 0.35$) 区域占比 16.38%, 弱反持续性 ($0.35 \leq H < 0.50$) 区域占比 64.03%, 意味着未来 RSEI 的变化趋势将与过去相反; 而弱持续性 ($0.5 \leq H < 0.60$) 区域与强持续性 ($H \geq 0.6$) 区域占比分别为 16.66%、2.93%, 表明该区域的生态环境质量演变趋势具备长期持续

性。进一步将 Hurst 指数与 Sen 趋势进行叠加分析得到,黄河流域 RSEI 变化的强度和方向。由图 6b 可知,黄河流域 RSEI 未来变化趋势主要以改善为主。其中,持续退化型和反持续改善型(即过去呈改善趋势,但未来存在退化风险的区域)的面积占黄河流域总面积的 21.23%,主要分布在黄河流域中游及上游

部分地区,具体为中游地区的陕西省、山西省及上游的甘肃省、内蒙古自治区;无法确定的面积占黄河流域总面积的 5.82%;反持续退化型(即过去呈退化趋势,但未来可能逆转为改善的区域)和持续改善型占黄河流域总面积的 72.95%,在黄河流域的上、中、下游均有分布。

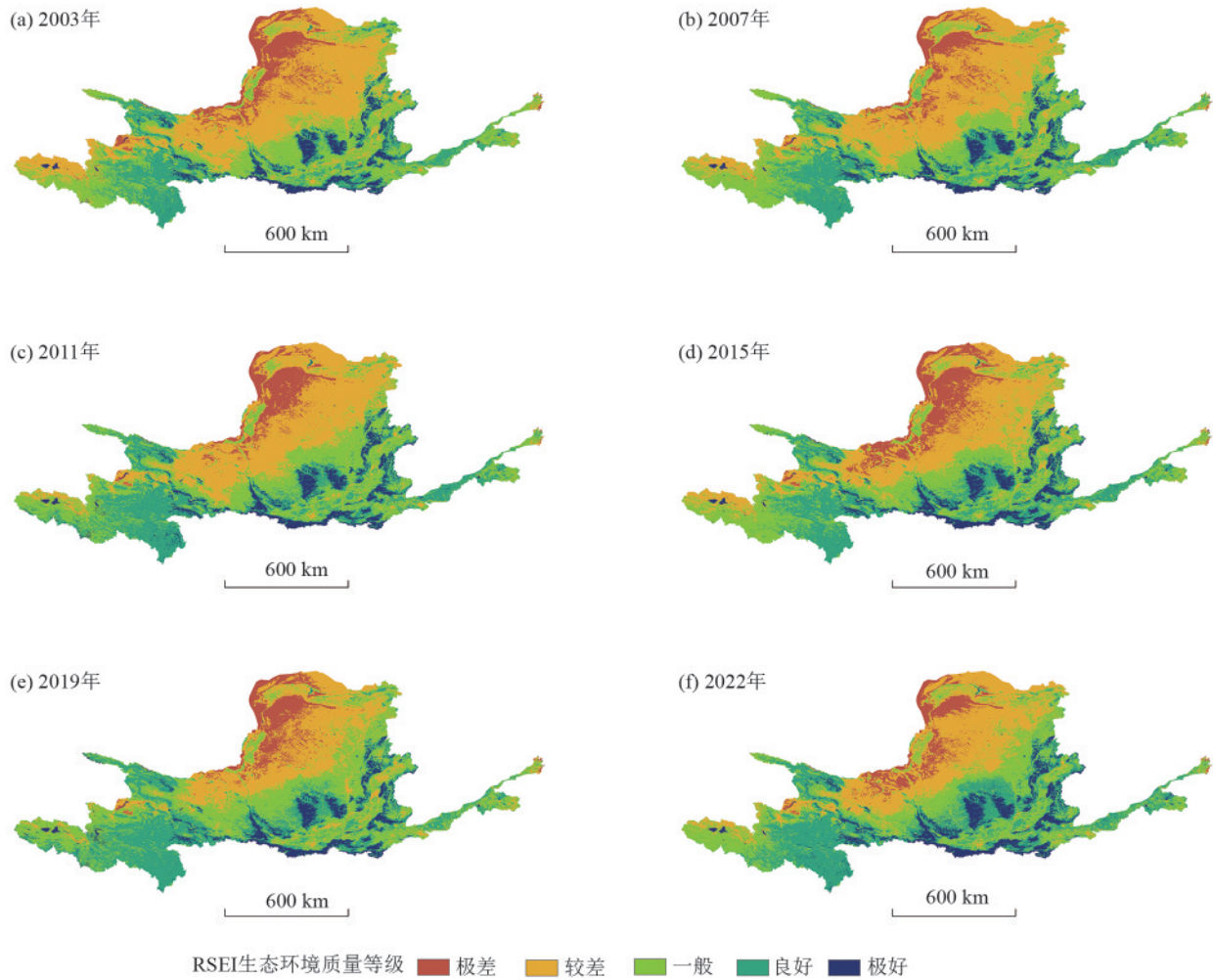


图 4 黄河流域部分年际 RSEI 值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of RSEI values in selected years of Yellow River basin

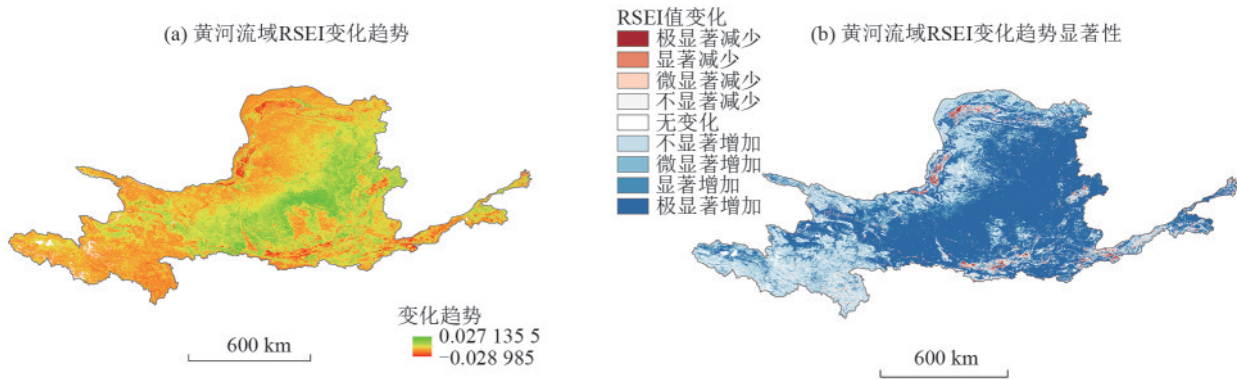


图 5 Sen+M-K 变化趋势

Fig. 5 Change trends identified by Sen+M-K method

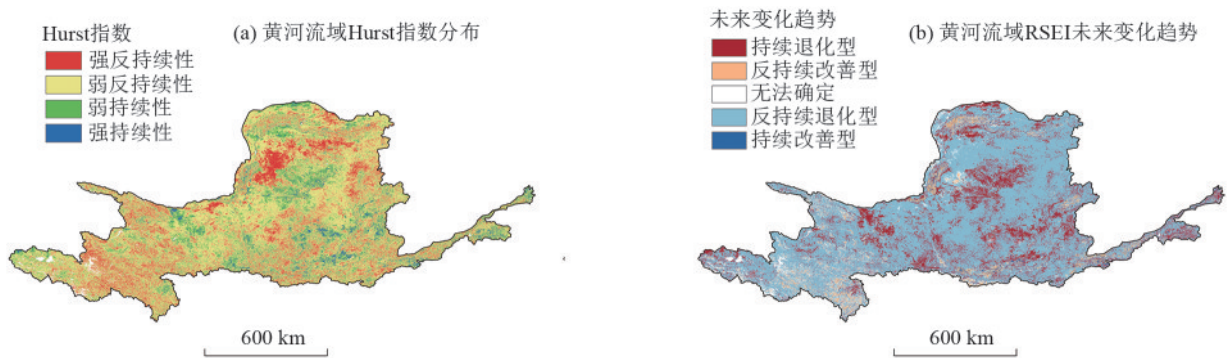


图 6 Hurst 指数及 RSEI 未来演变趋势

Fig. 6 Hurst index and projected future evolution trends of RSEI

2.5 RSEI 时空演变的驱动力

2.5.1 气候因素的驱动作用 为探究黄河流域生态环境质量与主要气象因子间的关系,本文选取气温和降水量与 RSEI 进行相关性分析。通过计算皮尔逊相关系数并进行显著性检验,揭示其空间相关特征与潜在驱动机制。

由图 7a 可知,RSEI 与气温在黄河流域的相关系数为 $-0.924 \sim 0.898$,平均值为 0.081,整体表现为正相关。青海东部、甘肃南部、宁夏北部、内蒙古西部及黄土高原北缘等地多为负相关区域,上述地区普遍海拔较高,生态系统相对脆弱,气温升高往往导致生态质量下降,呈现出“热胁迫”效应。而在流域东部的中下游区域,如山东中部、河南东部及陕西关中平原一带,相关性大多呈正相关,可能受到城市热岛效应与土地利用强度变化的影响。图 7b 进一步揭示 RSEI 与气温相关性的显著区域分布,显著正相关区域的面积约占黄河流域总面积的 9.31%,主要分布在内蒙古河套地区、陕北黄土高原及青藏高原东北缘等生态敏感区;显著负相关区域的面积约占黄河流域总面积的 2.47%,主要分布于城市边缘及黄河流域西部高海拔地区,如山东西部、四川北部和甘肃南部。

由 RSEI 与降水的相关性特征(图 7c)可知,其相关性整体表现为正相关,相关系数为 $-0.876 \sim 0.889$,平均值为 0.239,整体表现为正相关。正相关区域集中在黄河中上游,尤其是甘肃东部、陕西北部及内蒙古中部草原区,表明降水对生态质量的提升具有显著作用。在黄河下游的河南和山东地区,以及宁夏西北部等地区呈负相关,可能与降水时空分布不均、或人为土地改造有关。通过显著性检验可知(图 7d),显著正相关区域广泛分布于黄土高原、陕甘宁交界及河套平原等地,约占研究区总面积的 14.54%。显著负相关区域分布较少,约占研究区总面积的 0.34%,主要集中在黄河流域下游及宁夏回族自治区西北部等地区。

2.5.2 RSEI 指数与 HAI 相关性 基于黄河流域 2000—2022 年 HAI 空间分布(图 8)表明,研究区域内人类活动呈显著的时空扩张特征。时序演变表明,HAI 高值区($HAI > 0.5$)面积占比从 2000 年的 1.37% 增长至 2022 年的 1.92%,空间扩展过程呈面状扩张趋势。2000—2022 年,高值区主要沿西北-东南向交通走廊呈指状延伸,同时,HAI 高值区以省会城市为核心呈面状蔓延,形成跨行政区连片集聚带。黄河流域低值区($HAI \leq 0.5$)呈规模缩减的演变特征,其边界随年份增加逐步向北部山区退缩,其边界与等高线走向趋于一致,表明地理条件对低强度人类活动分布具有约束作用。总体而言,黄河流域人类活动强度空间分异呈现出“高值区沿廊道扩张、低值区受地形阻隔”的人地交互模式,其演变轨迹与区域城镇化进程、基础设施建设及自然地理格局较为耦合。上述 HAI 空间演变特征揭示人类活动扩张强度的空间分布及其地形阻隔,为进一步探究 RSEI 与 HAI 的相关性奠定了基础。

采用皮尔逊相关性分析方法,基于 2000—2022 年黄河流域 RSEI 指数与人类活动强度,系统揭示二者在空间上的关联特征(图 9a)。表明黄河流域 RSEI 与 HAI 的空间相关性呈显著的空间分异特征。正相关区域集中分布于流域上游的生态修复区,包括青海省三江源东部、四川省阿坝州及内蒙古鄂尔多斯市。该区域人类活动以低强度生态保护工程为主,与 RSEI 提升呈协同效应。负相关区域主要分布于中下游城市群及工业化集聚区,如河南省洛阳市、陕西省西安市及山西省晋城市,高强度建设用地扩张与资源开发对生态系统形成显著胁迫。由图 9b 可知,显著负相关区域总面积约占研究区总面积的 9.19%,显著正相关区域总面积约占研究区总面积的 2.72%。显著正相关区域主要集中于黄河流域西南侧及东侧,多为流域生态屏障带;显著负相关区域主要覆盖黄河流域中游核心区,该负相关带东西跨度约 400 km,覆盖晋陕豫三省交界处的能源-农业-工业复合型开发区。

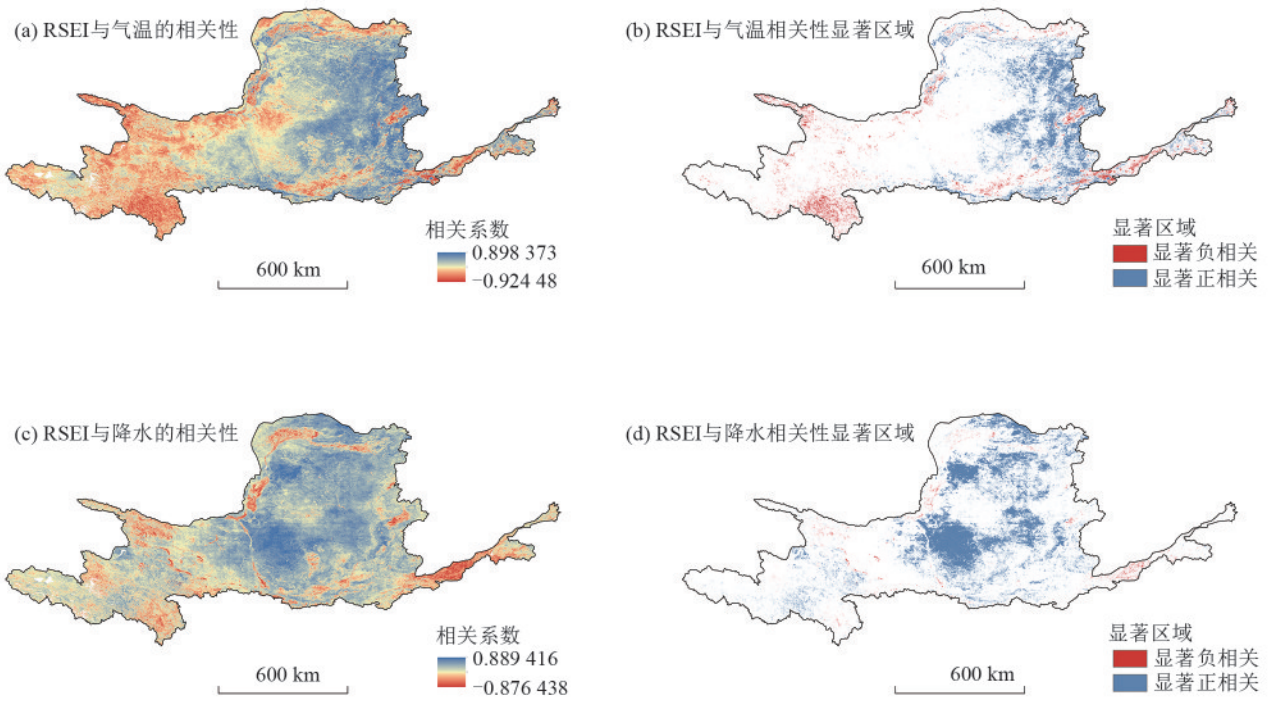


图 7 RSEI与气象因子相关性
 Fig. 7 Correlation between RSEI and meteorological factors

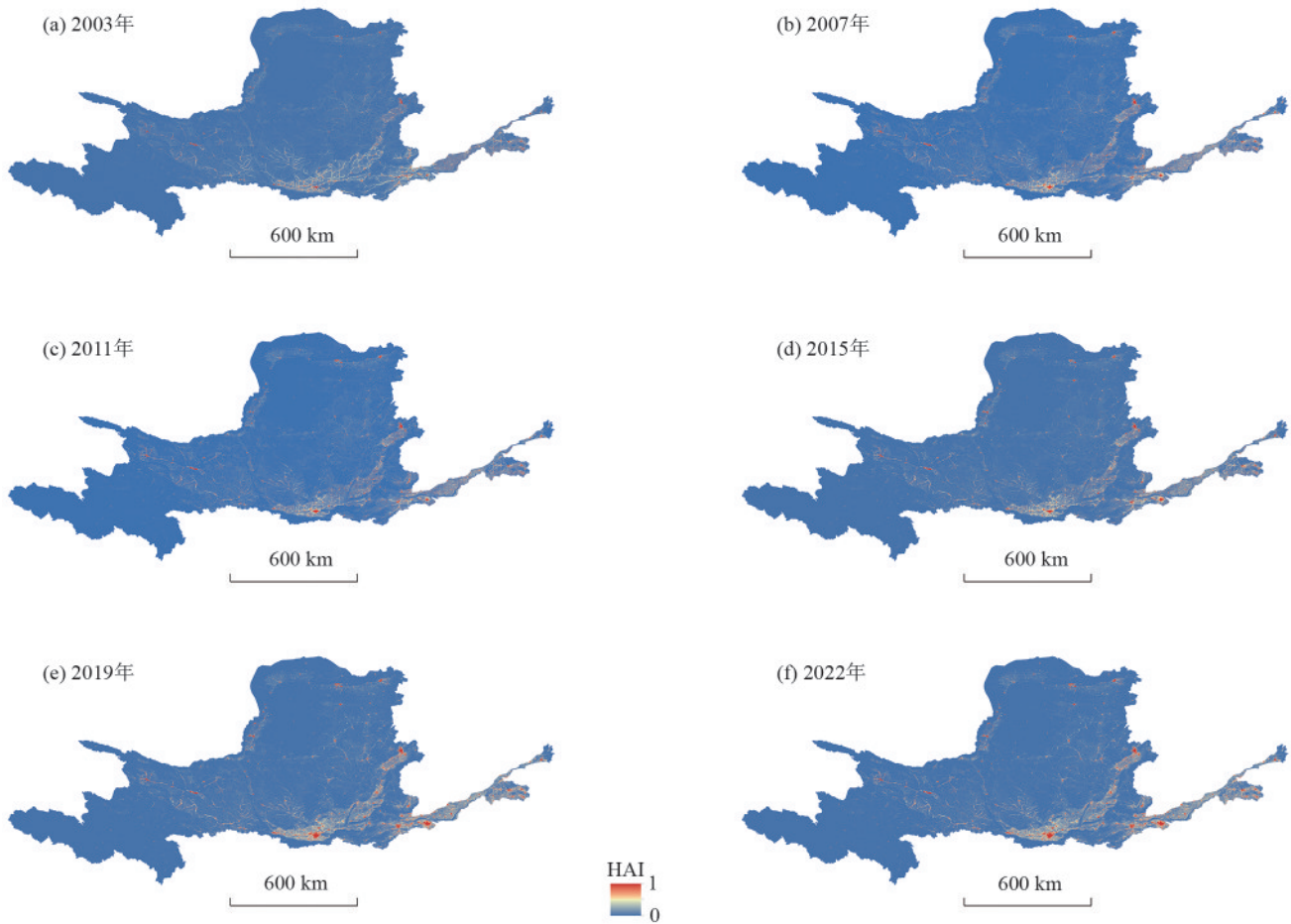


图 8 黄河流域 HAI 空间分布
 Fig. 8 Spatial distribution of HAI in Yellow River basin
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

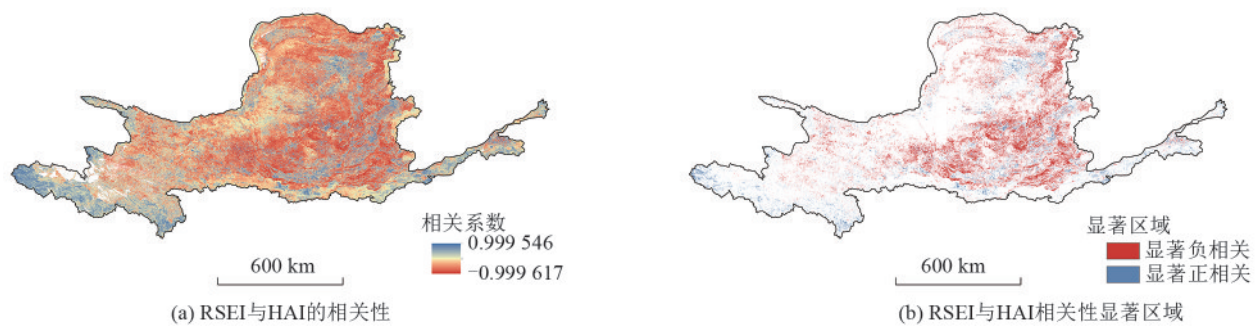


图 9 RSEI 与 HAI 相关性及其显著区域

Fig. 9 Correlation between RSEI and HAI and areas showing significant correlation

3 讨论

3.1 RSEI 变化趋势与空间格局异质性

RSEI 模型融合绿度、湿度、干度与热度 4 类生态因子,具备较高的综合性与敏感性,为黄河流域生态环境的长期监测提供一种高时空分辨率的量化工具。本文基于 RSEI 模型监测黄河流域 2000—2022 年生态质量动态变化,监测结果表明,研究区 RSEI 平均值为 0.473,生态质量整体呈一般水平,与杨泽康等^[29]的研究结果较为一致;黄河流域生态水平呈波动上升趋势,上升速率为 0.004 4/a,与王芳等^[30]的结论较吻合。Hurst 指数叠加 Sen 趋势表明,黄河流域未来 72.95% 的地区生态环境将得到进一步改善,生态系统整体表现出良性的演化惯性,与杜高奇等^[31]的研究结果一致。黄河流域生态环境整体呈改善趋势,但不同区域生态演变趋势存在显著差异。上游地区生态质量受高寒干旱气候和复杂地形影响,改善进程相对缓慢,生态脆弱性依然突出;下游地区则受城市扩张和农业高强度开发影响,生态质量呈明显波动,部分区域甚至呈退化趋势,需加强干预和调控;黄河流域生态质量提升最显著的区域集中在黄土高原等中游地区,该空间格局与我国重大生态工程的布局高度吻合。自 1999 年起,国家在这些地区逐步实施“退耕还林”工程,同时持续推进“三北防护林”体系建设^[32]。本研究的时段覆盖此类政策的核心实施期。已有研究^[33-34]证实,相关工程极大地增加黄土高原的植被覆盖度,有效控制水土流失,是驱动该区域 RSEI 值显著增加的关键因素。

3.2 气象因子及人类活动强度对 RSEI 的驱动机制

本研究的相关性分析结果显示,RSEI 与气象因子整体呈正相关,尤以降水的贡献最为显著,体现出水分供应是限制该区域生态恢复的关键因子。气温对 RSEI 的影响则表现出显著的空间异质性:在青藏高原东北缘等高海拔地区,气温升高可能加剧蒸散和冰川消融,对脆弱的高寒生态系统构成“热胁迫”,导致 RSEI 降低;而在中下游平原地区,适度的温度

增加或在一定程度上延长植被的生长期,表现出积极影响^[35]。人类活动是影响生态系统演变的重要因素。本文综合夜间灯光指数、人口密度和土地利用类型,构建 HAI 模型,结果表明,2000—2022 年黄河流域人类活动强度整体呈增长趋势。RSEI 与 HAI 的皮尔逊相关系数平均值为 -0.159,表明在流域尺度上,人类活动的胁迫效应是主导性的。负相关性在中下游的城市群和工业化密集区尤为显著,高强度的城市扩张和资源开发通过改变土地利用类型、增加不透水地面、破坏原有植被等方式,直接导致生态系统功能的退化。在流域上游的生态修复区(如三江源东部),HAI 与 RSEI 呈显著正相关。表明以生态保育和恢复为目的的低强度人类活动,如退耕还林(草)、草地改良、生态移民等工程,对生态环境质量的提升发挥关键的积极作用,真正实现人与自然的协同发展。此现象表明,人类活动并非总是生态的破坏者,其影响的方向和强度取决于活动的类型和目的^[36]。

3.3 生态治理的政策启示

研究结论对黄河流域综合治理具有多重政策启示:1)上游生态脆弱区应实施分区开发强度管控,优先布局低影响绿色能源项目,限制高海拔地区风电光伏用地规模,同步完善生态补偿机制,通过碳汇交易平衡生态保护与地区民生^[37]。2)中游能矿开发区需强化全生命周期环境监管,将 NDBSI 纳入矿山开发准入与修复评估体系,对干度阈值超限区域执行开发禁令,推动资源型产业绿色转型。3)下游城市群应优化国土空间结构,通过生态廊道规划缓解热岛效应,协同提升绿地连通性与地表降温效能。4)跨区域协同治理需建立“水源涵养-产业反哺”联动机制,依托横向财政转移支付量化生态效益,引导中下游高耗水产业向上游保护区提供补偿^[38]。5)全流域统筹管理应依托《中华人民共和国黄河保护法》,构建动态生态数据的统一监管平台,以破解行政壁垒,实现保护措施的精准确落地。

4 结论

1) 2000—2022年黄河流域RSEI平均值为0.473,生态质量等级整体处于一般水平。该地区RSEI值以0.0044/a的速率增长,表明黄河流域生态质量趋于改善。

2)由Sen趋势分析法和M-K检验可知,黄河流域RSEI值的变化率为 $-0.029\sim 0.027$,平均值为0.004,RSEI值整体呈上升趋势。其中RSEI值极显著增加的区域约占黄河流域总面积的49.92%,极显著减少的区域约占黄河流域总面积的0.83%。Hurst指数叠加Sen趋势分析可知,黄河流域生态未来演变趋势主要以持续改善型为主。其中持续改善型和反持续退化型的面积约占黄河流域总面积的72.95%,持续退化型和反持续改善型的面积约占黄河流域总面积的21.23%。

3)黄河流域RSEI与气温和降水整体呈正相关,RSEI与气温和降水的相关性平均值分别为0.081、0.239。其中RSEI与气温呈显著正相关区域面积和显著负相关区域面积分别约占黄河流域总面积的9.31%和2.47%。RSEI与降水呈显著正相关区域面积和显著负相关区域面积分别约占黄河流域总面积的14.54%和0.34%。

4)黄河流域HAI值在2000—2022年中呈增长趋势,HAI与RSEI呈显著正相关区域面积约占黄河流域总面积的2.72%,主要位于黄河流域上游生态修复区,呈显著负相关区域面积约占黄河流域总面积的9.19%,主要位于黄河流域中下游城市群及工业化集聚区。

参考文献:

- [1] 付乐,迟妍妍,于洋,等.2000—2020年黄河流域土地利用变化特征及影响因素分析[J].生态环境学报,2022,31(10):1927-1938.
FU L, CHI Y Y, YU Y, et al. Characteristics and driving forces of land use change in the Yellow River basin from 2000 to 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(10): 1927-1938.
- [2] 廖美玉,方秀琴,蒋心远,等.黄河流域近40年土地利用/覆被时空变化特征[J].水土保持学报,2024,38(2):165-177.
LIAO M Y, FANG X Q, JIANG X Y, et al. Spatiotemporal characteristics of land use/cover changes in the Yellow River basin over the past 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 165-177.
- [3] CHEN Y, FU B, ZHAO Y, et al. Sustainable development in the Yellow River basin: Issues and strategies [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: e121223.
- [4] 黄承梁,马军远,魏东,等.中国共产党百年黄河流域保护和发展的历程、经验与启示[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):1-9.
HUANG C L, MA J Y, WEI D, et al. History, experience, and enlightenment of CPC's protection and high-quality development of the Yellow River basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(8): 1-9.
- [5] 金凤君.黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J].改革,2019(11):33-39.
JIN F J. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River basin [J]. Reform, 2019(11): 33-39.
- [6] 冯莉.《黄河保护法》实施背景下流域生态环境规制思路与完善对策:基于法律政策文本量化分析[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):190-196.
FENG L. Quantitative analysis on the eco-environmental regulatory system for Yellow River basin and improvement options under the implementation of Yellow River Protection Law [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7): 190-196.
- [7] 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: e102641.
- [8] 王子璇,曹婧森,舒菲娅,等.融合Sentinel-1/2深层特征与支持向量机的湿地制图方法[J].测绘科学,2025,50(1):114-124.
WANG Z X, CAO J M, SHU F Y, et al. Wetland mapping method integrating deep features and SVM using Sentinel-1/2 [J]. Science of Surveying and Mapping, 2025, 50(1): 114-124.
- [9] 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 H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes [J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.
- [10] 赵俊远,高翔,梁静波.基于土地覆被变化的北京市生态环境质量时空分异特征及影响因素[J].水土保持研究,2024,31(3):350-362.
ZHAO J Y, GAO X, LIANG J B. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality in Beijing based on RSEI [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 350-362.
- [11] 张伟,杜培军,郭山川,等.改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J].遥感学报,2023,27(2):299-317.
ZHANG W, DU P J, GUO S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(2): 299-317.

- [12] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于Google Earth Engine的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.
ZHENG Z H, WU Z F, CHEN Y B, et al. Analyzing the ecological environment and urbanization characteristics of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on Google Earth Engine[J].Acta Ecologica Sinica, 2021,41(2):717-729.
- [13] 马林,梁勇,张雅芹,等.基于RSEI的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J].水土保持研究,2024,31(2):389-400.
MA L, LIANG Y, ZHANG Y Q, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality of different land covers in Shandong Province based on RSEI [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):389-400.
- [14] 汪孝贤,张秀霞,李旺平,等.基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价[J].生态与农村环境学报,2023,39(7):853-863.
WANG X X, ZHANG X X, LI W P, et al. Assessment of ecological environment quality in Qilian Mountain national nature reserve based on improved RSEI model[J].Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(7):853-863.
- [15] 付绍桐,贺晨曦,马佳凯,等.不同发展情景下黄河流域山西段生态环境质量[J].应用生态学报,2024,35(5):1337-1346.
FU S T, HE C X, MA J K, et al. Ecological environment quality of the Shanxi section of the Yellow River basin under different development scenarios [J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(5):1337-1346.
- [16] DUAN Q, LUO L, ZHAO W, et al. Mapping and evaluating human pressure changes in the Qilian Mountains[J].Remote Sensing, 2021,13(12):e2400.
- [17] 李琪,党国锋,鱼腾飞,等.基于GEE的干旱区县生态环境质量时空变化及驱动力分析:以阿拉善左旗为例[J].干旱区研究,2025,42(2):360-371.
LI Q, DANG G F, YU T F, et al. Spatial-temporal variation and driving forces analysis of ecological environment quality in arid counties based on GEE: A case study of Alxa Left Banner [J].Arid Zone Research, 2025,42(2):360-371.
- [18] 何天星,田宁,周锐,等.基于GEE和RSEI的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J].生态学杂志,2023,42(2):436-444.
HE T X, TIAN N, ZHOU R, et al. Dynamic assessment of eco-environmental quality in Yangtze River Delta integration demonstration area based on GEE and RSEI [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42 (2) : 436-444.
- [19] MA D, HUANG Q, ZHANG Q, et al. Evaluation of eco-environmental quality and analysis of driving forces in the Yellow River Delta based on improved remote sensing ecological indices [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2024,38(8):3199-3220.
- [20] 田世民,韩冰,赵高磊,等.黄河流域水生态环境变化特征分析[J].人民黄河,2024,46(9):112-119.
TIAN S M, HAN B, ZHAO G L, et al. Analysis of the characteristics of water ecological environment changes in the Yellow River basin [J].Yellow River, 2024,46(9):112-119.
- [21] 李朋轩,王涛,王德应,等.黄河流域生态环境质量对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J].测绘通报,2025(1):59-65.
LI P X, WANG T, WANG D Y, et al. Response of eco-environmental quality to climate change and its relationship with water and sediment changes in the Yellow River basin [J].Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(1):59-65.
- [22] 王远轲,刘浦东,刘建涛,等.基于改进的遥感生态指数的黄河三角洲生态环境质量时空变化分析[J].生态与农村环境学报,2024,40(9):1179-1190.
WANG Y K, LIU P D, LIU J T, et al. Analysis of spatiotemporal changes in ecological environment quality of the Yellow River Delta based on modified remote sensing ecological index [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(9):1179-1190.
- [23] 邵雅静.气候变化和人类活动影响下的生态系统健康时空演变特征及分区管控:以黄河流域为例[D].西安:长安大学,2022.
SHAO Y J. Spatial and temporal evolution characteristics of ecosystem health under the influence of climate change and human activities and zoning management-take the Yellow River Basin as an example [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [24] 赵月,孟丹,丁凤,等.基于GEE云平台的2000—2022年雄安新区生态质量动态评价[J].地球物理学进展,2023,38(5):2023-2036.
ZHAO Y, MENG D, DING F, et al. Dynamic assessment of ecological quality in Xiong'an New Area from 2000 to 2022 based on GEE platform [J]. Progress in Geophysics, 2023,38(5):2023-2036.
- [25] 李晓鹏,李康,雷双,等.基于TVDI的新疆地区干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2025,42(4):589-599.
LI X P, LI K, LEI S, et al. Spatiotemporal variations in drought conditions in Xinjiang based on TVDI [J]. Arid Zone Research, 2025,42(4):589-599.
- [26] 刘智源,李继红.2000—2020年黑龙江省植被时空变化对气候因子响应[J].森林工程,2024,40(1):85-97.
LIU Z Y, LI J H. Responses of temporal and spatial changes of vegetation to climate factors in Heilongjiang Province from 2000 to 2020 [J]. Forest Engineering, 2024,40(1):85-97.

- [27] 柴文雯,贾夏,赵永华,等.黄土高原人类活动强度与植被覆盖的时空关联[J].生态学报,2024,44(15):6708-6721.
CHAI W W, JIA X, ZHAO Y H, et al. Spatio-temporal correlation between human activity intensity and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(15): 6708-6721.
- [28] 陈泓瑾,刘琳,张正勇,等.天山北坡人类活动强度与地表温度的时空关联性[J].地理学报,2022,77(5):1244-1259.
CHEN H J, LIU L, ZHANG Z Y, et al. Spatiotemporal correlation between human activity intensity and surface temperature on the north slope of Tianshan Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(5): 1244-1259.
- [29] 杨泽康,田佳,李万源,等.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J].生态学报,2021,41(19):7627-7636.
YANG Z K, TIAN J, LI W Y, et al. Spatio-temporal pattern and evolution trend of ecological environment quality in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7627-7636.
- [30] 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 F, LI W H, LIN Y M, et al. Spatiotemporal 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.
- [31] 杜高奇,李自强,赵勇,等.基于RSEI的黄河流域生态环境质量监测与驱动因素分析[J].水利水电技术(中英文),2022,53(12):81-93.
DU G Q, LI Z Q, ZHAO Y, et al. RSEI-based analysis on eco-environment quality monitoring and driving factors of Yellow River basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(12): 81-93.
- [32] 刘任涛,程静.黄河“几字弯”的地理界定及主要生态问题[J].应用生态学报,2025,36(2):383-394.
LIU R T, CHENG J. Geographical boundary line of the Yellow River's "Ji Zi Bend" and its main ecological issues [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(2): 383-394.
- [33] 齐容镰,李庆波,任佳,等.“三北”工程地区植被覆盖变化特征及其驱动力分析:以宁夏为例[J].干旱区研究,2024,41(10):1740-1752.
QI R L, LI Q B, REN J, et al. Study on the characteristics of changes in vegetation cover and its driving forces in the Three-North Shelterbelt program regions: Taking Ningxia as example [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(10): 1740-1752.
- [34] 夏凯,黄义忠.三北工程区植被覆盖变化及其对气候变化和人类活动的响应[J].西北林学院学报,2025,40(1):133-143.
XIA K, HUANG Y Z. Vegetation cover change and its response to climate change and human activities in the "three-north" project afforestation program [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(1): 133-143.
- [35] 王谦,关颖慧,刘玉国.不同时间尺度下红河流域植被NDVI对极端气候的响应[J].水土保持学报,2025,39(3):392-402.
WANG Q, GUAN Y H, LIU Y G. Response of vegetation NDVI to extreme climate in the Red River basin at different time scales [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3): 392-402.
- [36] 胥蕊,朱大明,王琳,等.云南省土地利用生态风险与碳储量时空关联分析与预测[J].水土保持学报,2025,39(1):217-228.
XU R, ZHU D M, WANG L, et al. Spatial and temporal correlation analysis and prediction of land use ecological risk and carbon stock in Yunnan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 217-228.
- [37] 郭力,程一凡,朱坤林.黄河流域城市生态效率时空分异特征及其影响机制:基于沿黄34城市的实证[J].生态经济,2023,39(3):101-108.
GUO L, CHENG Y F, ZHU K L. Dynamic and spatial differential characteristics of ecological efficiency of cities in the Yellow River basin and influence mechanism: An empirical study based on 34 Cities along the Yellow River [J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(3): 101-108.
- [38] 何苗,任保平.黄河流域生态保护与高质量发展耦合协调的协同推进机制[J].经济与管理评论,2024,40(1):15-29.
HE M, REN B P. A synergistic mechanism for coupling and coordinating high-quality development and ecological protection in the Yellow River basin [J]. *Review of Economy and Management*, 2024, 40(1): 15-29.