黄河流域河南段生态环境质量时空演变及驱动机制

王冬梅, 杨 健
(黄河水利职业技术大学, 河南 开封 475004)

摘 要: [目的] 揭示2013—2023年黄河流域河南段生态环境质量时空演变规律,识别关键驱动因子,为该区域生态保护与高质量发展提供科学依据。[方法] 基于2013,2017,2020,2023年4期Landsat 8遥感影像,计算遥感生态指数(RSEI),联合绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)与地表温度(LST)4个指标,系统评价研究区生态环境质量。运用地理探测器方法,结合社会经济因子(人口密度、夜间灯光)与自然因子(降水量、气温),定量解析生态环境质量时空分异特征及其驱动机制。[结果] 2013—2023年,研究区生态环境质量整体呈"退化—改善—基本不变"的动态变化趋势;空间上表现为"四周优,中间差"的分布格局,高值区集中于西部和南部山区,低值区分布于中部城市群及东部平原农业区。NDVI为主导影响因子,NDBSI为次要影响因子,各因子交互作用以非线性增强为主。社会经济因子(人口密度、夜间灯光强度)与RSEI呈显著负相关;自然因子中,降水量与RSEI呈正相关,气温与RSEI呈负相关。[结论] 2013—2023年间,黄河流域河南段生态环境质量总体有效改善,RSEI能有效反映该区域生态环境质量的时空变化。

关键词: 黄河流域河南段; 生态环境质量; 遥感生态指数(RSEI); 地理探测器
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0397-10 **中图分类号:** X821, TP79

文献参数: 王冬梅, 杨健.黄河流域河南段生态环境质量时空演变及驱动机制[J].水土保持通报,2026,46(4):397-406. Wang Dongmei, Yang Jian. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of ecological environment quality at Henan section of Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026,46(4):397-406.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.025 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.025**

Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of ecological environment quality at Henan section of Yellow River basin

Wang Dongmei, Yang Jian
(*Yellow River Conservancy Technical University*, *Kaifeng*, *Henan* 475004, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns of ecological environment quality at Henan section of the Yellow River basin from 2013 to 2023 were revealed, and key driving factors were identified, in order to provide a scientific basis for ecological protection and high-quality development in the region. [Methods] Based on Landsat 8 remote sensing images from four periods (2013, 2017, 2020, and 2023), a remote sensing ecological index (RSEI) was calculated by integrating four indicators: greenness (NDVI), wetness (WET), dryness (NDBSI), and land surface temperature (LST), to systematically evaluate the ecological environment quality of the study area. Using the GeoDetector method, combined with socioeconomic factors (population density, nighttime light intensity) and natural factors (precipitation, temperature), the spatiotemporal differentiation characteristics of ecological environment quality and their driving mechanisms were quantitatively analyzed. [Results] From 2013 to 2023, the ecological environment quality in the study area generally exhibited a dynamic trend of "degradation—improvement—relative stabilization." Spatially, it showed a pattern of "superior periphery and inferior center," with high-value areas concentrated in the western and southern mountainous regions and low-

收稿日期:2025-12-04 **修回日期:**2026-02-10 **采用日期:**2026-02-11
资助项目:河南省高等学校重点科研项目"基于深度学习融合多源遥感数据的黄河流域河南段生态环境监测关键技术研究"(25B420011);开封市科技计划项目(2403101)
第一作者:王冬梅(1981—),女(汉族),河南省汝南县人,硕士,副教授,主要从事生态环境遥感等研究。Email:359757232@qq.com。
通信作者:杨健(1987—),男(汉族),河南省商丘市人,博士,讲师,主要从事定量遥感等研究。Email:2023871185@yrctu.edu.cn。

value areas distributed in the central urban agglomerations and eastern plain agricultural zones. NDVI was the dominant influencing factor, and NDBSI was the secondary influencing factor. The interactions among the factors were primarily characterized by nonlinear enhancement. Socioeconomic factors (population density, nighttime light intensity) showed a significant negative correlation with RSEI. Among natural factors, precipitation was positively correlated with RSEI, and temperature was negatively correlated with RSEI. [Conclusion] Over the past decade, the ecological environment quality at Henan section of the Yellow River basin has generally and effectively improved, and RSEI can effectively reflect the spatiotemporal changes in ecological environment quality in this region.

Keywords: Henan section of Yellow River basin; ecological environment quality; remote sensing ecological index; GeoDetector

生态环境质量是人类活动与自然环境共同作用的结果,与人类生存和社会经济发展密切相关[1-3]。遥感作为唯一能够大范围、长时序获取地表生态环境质量数据的技术手段,在生态环境动态监测领域的应用日益广泛,为区域生态评价提供了强有力的数据支持与研究方法。在生态环境评价指标体系方面,遥感生态指数(remote sensing ecological index,RSEI)作为一种有效的评估理论,通过综合绿度、湿度、干度和热度4个关键生态要素,并运用主成分分析法确定各要素权重,以实现对区域生态环境质量的快速、客观评价。该方法自2013年提出以来,在生态环境监测领域得到了广泛应用[4]。现有研究已从典型区域生态演变分析、模型适用性等维度验证了RSEI的科学性与实用性,如刘林甫等[5]利用RSEI模型分析了砒砂岩区的生态环境质量演变特征,为砒砂岩区的生态治理提供了依据。章程焱等[6]基于Google Earth Engine(GEE)平台的MODIS数据,验证了RSEI对长江上游流域生态环境质量的评估能力。因此,RSEI作为一种可以实现区域生态环境质量客观、有效评价的综合方法体系,在生态环境保护和状况评价中具有重要的实践意义。

黄河流域是中国重要的生态屏障和经济发展区域,其生态环境质量的演变规律、驱动机制及保护对策备受学界关注。在黄河流域生态环境遥感监测方面,众多学者开展了深入探索,但现有成果多基于中低分辨率数据对全流域或上游等大范围区段进行研究。如董洁芳等[7]基于MODIS数据和RSEI系统揭示了黄河流域生态环境质量的时空演变特征,而陈芳淼等[8]从自然条件、政策干预及社会经济等多维度探讨了黄河流域生态环境质量变化的影响因素。崔亚婷等[9]则将RSEI应用于黄河上游流域,证实了绿度、湿度、热度和干度对其生态环境质量的显著影响。此外,也有一些学者在黄河局部流域利用RSEI模型对生态环境进行了监测和评估。如祁帅等[10]通过改进RSEI模型,对黄河流域内蒙古段的生态环境质量进行监测。张音等[11]在RSEI基础上耦合气溶胶光学厚度(AOD),对黄河流域山西段进行生态环境评估。综上所述,当前的研究多集中于全流域或上游、内蒙古、山西等区段,而河南省作为黄河流域兼具中下游属性的关键过渡带,其高分辨率、长时序、多驱动因子的生态环境质量综合分析目前不多,迫切需要利用RSEI模型对其生态环境进行研究,这对区域生态环境保护具有重要意义。

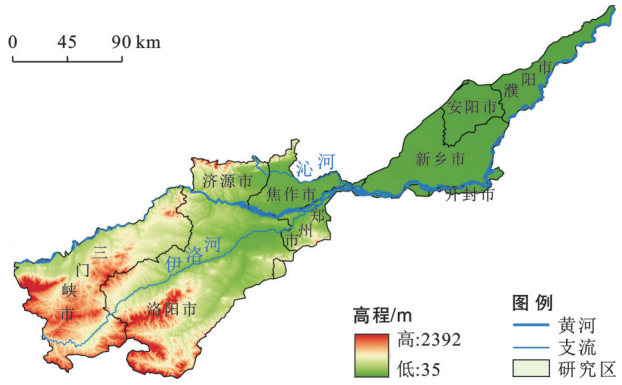
目前,针对黄河流域河南段生态环境质量的监测也有一些研究成果。如李朋轩等[12]将RSEI模型与径流量、输沙量等因素相结合,利用传统的线性回归和相关分析方法,探讨了生态环境质量与径流量、输沙量的关系,但其分析方法和演变的内在驱动力探究亦有待加强。与传统的线性回归等方法不同,本文基于可以被用来探测空间分异性及其驱动因子的地理探测器,深入探究影响生态环境质量演变的机制,并识别其关键驱动因子。据此,本文利用可反映黄河流域生态保护和高质量发展战略实施前后最近10 a的遥感数据,以2013,2017,2020,2023年4期Landsat 8遥感影像,构建RSEI,结合地理探测器方法,引入社会经济与自然因子,系统揭示黄河流域河南段在生态环境质量方面的时空变化规律。最后,定量解析其驱动因素,旨在为该区域和同类地区生态保护和高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黄河流域河南段(34°34′—36°08′N,110°22′—116°07′E)位于中下游过渡带(图1),流域全长约711 km,流域面积约为3.60×10^4 km^2,在河南境内分别流经三门峡、洛阳、济源、焦作、郑州、新乡、开封、濮阳8市[13-14]。研究区属于温带季风气候,四季分明,降水适中;植被覆盖度较高,土壤类型多样,以黄

壤和潮土为主。地势西高东低,由中山、低山、丘陵过渡到平原,水资源丰富,地形地貌多样。



注:基于审图号GS(2024)0650号的标准地图制作。底图无修改。下同。

图 1　黄河流域河南段概况及高程

Fig.1　Overview and elevation at Henan section of Yellow River basin

1.2　数据来源

研究数据主要包括Landsat 8遥感影像、气象数据和社会经济数据。Landsat 8遥感影像源自美国地质调查局官网(https://glovis.usgs.gov)。为减少季节性对生态环境的影响,影像获取时间分别为2013年5月、2017年5月、2020年7月和2023年8月;影像等级为L1T级,云量均低于5%,可以满足研究需要。气象数据从国家气象科学中心网站(https://data.cma.cn/)获取。社会经济数据中人口数量来源于《河南统计年鉴》及相关地级市统计年鉴。夜间灯光数据源自美国国家海洋和大气管理局官网(https://www.fisheries.noaa.gov)。

1.3　研究方法

1.3.1　生态指数因子

(1)绿度指标。NDVI(植被指数)常用于植物生长状况与生态环境监测等方面[15]。该指数不仅具备优异的检测灵敏度,还能准确反映地表空间格局动态演变特征,计算公式为

$$\mathrm{NDVI}=(\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{Red}})/(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{Red}}) \tag{1}$$

(2)湿度指标。WET(湿度指标)由缨帽变换获得,可以反映地表植被和土壤水分信息,计算公式为

$$\begin{aligned}\mathrm{WET}=&C_1\cdot\rho_{\mathrm{Blue}}+C_2\cdot\rho_{\mathrm{Green}}+C_3\cdot\rho_{\mathrm{Red}}+\\&C_4\cdot\rho_{\mathrm{NIR}}+C_5\cdot\rho_{\mathrm{SWIR1}}+C_6\cdot\rho_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned} \tag{2}$$

(3)干度指标。NDBSI(干度指数)主要由建筑指数IBI和裸土指数SI构建,计算公式为

$$\mathrm{IBI}=\left(\frac{2\rho_{\mathrm{SWIR1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}-\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{Red}}}-\frac{\rho_{\mathrm{Green}}}{\rho_{\mathrm{Green}}+\rho_{\mathrm{SWIR1}}}\right)\Bigg/\left(\frac{2\rho_{\mathrm{SWIR1}}}{\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}+\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{Red}}}+\frac{\rho_{\mathrm{Green}}}{\rho_{\mathrm{Green}}+\rho_{\mathrm{SWIR1}}}\right) \tag{3}$$

$$\mathrm{SI}=\frac{(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{Red}})-(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{Blue}})}{(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{Red}})+(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{Blue}})} \tag{4}$$

$$\mathrm{NDBSI}=(\mathrm{IBI}+\mathrm{SI})/2 \tag{5}$$

式(1)—(5)中:ρ_{Blue},ρ_{Green},ρ_{Red},ρ_{NIR},ρ_{SWIR1},ρ_{SWIR2}分别代表地表覆被在蓝(Blue)、绿(Green)、红(Red)、近红外(NIR)、短波红外1(SWIR1)和短波红外2(SWIR2)波段上的光谱反射率。Landsat OLI中$C_1=0.151\,1$,$C_2=0.197\,3$,$C_3=0.323\,8$,$C_4=0.340\,7$,$C_5=-0.711\,7$,$C_6=-0.455\,9$。

(4)热度指标。LST(地表温度)是表征地球物理化学过程以及气候变化和地表能量平衡的重要指标,热度指标可有效反映地表温度变化[16]。基于Landsat 8 Collection 2(C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide计算地表温度LST,计算公式为

$$\begin{aligned}&\mathrm{LST}=K-273.15\\&K=(\mathrm{DN}\times 0.003\,418\,02)+149\end{aligned} \tag{6}$$

式中:DN为像元灰度值;K为开尔文温度;LST为摄氏温度;0.003 418 02为缩放因子;149为偏移量。

1.3.2　RSEI构建

RSEI构建是利用主成分分析(principal component analysis,PCA)方法获取4个指标,对生态环境进行评价。PCA方法是在线性变换的基础上,去除多余数据信息,然后将分析过程中若干变量转换到少数波段中,最终实现数据的有效压缩[17]。为消除4个指标因量纲不统一,对其进行归一化处理,将其统一转换为0~1范围内的无量纲数值,归一化公式为

$$\mathrm{ND}_i=\frac{D_i-D_{\min}}{D_{\max}-D_{min}} \tag{7}$$

式中:D_i为相应的4个指标分量值,$D_{\max}$,$D_{\min}$分别为相应指标分量的最大值和最小值,ND_i为经过归一化处理后的4个指标值。

经过归一化后的4个指标采用协方差矩阵进行PCA,通过对特征光谱空间坐标轴旋转,去掉各指标间相关性,将冗余和相互干扰信息剔除,筛选出少量能表达重要变量信息的第一主成分PC_1,初始值RSEI_0的计算公式为

$$\mathrm{RSEI}_0=1-\left\{\mathrm{PC}_1\left[f(\mathrm{NDVI},\mathrm{Wet},\mathrm{LST},\mathrm{NDBSI})\right]\right\} \tag{8}$$

为了便于指标度量和比较,同样,对RSEI_0进行归一化处理,得到RSEI的计算公式:

$$\mathrm{RSEI}=\frac{\mathrm{RSEI}_0-\mathrm{RSEI}_{\min}}{\mathrm{RSEI}_{\max}-\mathrm{RSEI}_{\min}} \tag{9}$$

式中：$RSEI_{max}$和$RSEI_{min}$分别代表初始RSEI最大值和最小值，RSEI值理论上介于0～1之间。区域生态环境质量越好，其值越接近1，反之则越接近0。

1.3.3 地理探测器

地理探测器作为一种统计方法，可以被用来探测空间分异性及其背后的驱动因子[18-19]。本研究选用单因子探测和交互作用探测。

（1）单因子探测。因子探测器能够探测属性的空间分异性，以及探测某因子多大程度上解释了属性的空间分异[20]。本研究选取NDVI，WET，NDBSI，LST作为区域生态环境的分析指标，据此对研究区域在2013—2023年生态环境质量变化主导因素进行探究，公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{10}$$

式中：q代表该指标对区域生态环境质量的影响力，其中q值理论范围为[0,1]。q值越大，表示该指标对黄河流域生态环境质量的影响越大[21]；h表示因子的分级；N_h和N分别为分级h研究对象的个数和整个研究区对象的个数；$N\sigma^2$表示分级h的方差；σ^2和σ_h^2分别表示整个研究区和分级h的方差；L为选取的指标数量。

（2）交互作用探测。交互作用探测是识别评价指标X_1和X_2共同作用对Y的影响。根据2种指标对Y的q值[$q(X_1)$和$q(X_2)$]、交互q值[$q(X_1\cap X_2)$]和q值之和[$q(X_1)+q(X_2)$]的关系，将交互作用分为5种类型（表1）。

表1 探测因子交互作用类型[22-23]

Table 1 Interaction types of detected factors

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1\cap X_2)<\min\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
单因子非线性减弱	$\min\left[q(X_1),q(X_2)\right]<q(X_1\cap X_2)<\max\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
双因子增强	$q(X_1\cap X_2)>\max\left[q(X_1),q(X_2)\right]$
相互独立	$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$

注：NDVI为绿度；WET为湿度；LST为地表温度；NDBSI为干度；q为影响力；p为显著性。

2 结果与分析

2.1 遥感生态指数主成分分析

对研究区4期的4个指标进行主成分分析，得到不同年份第一主成分载荷与贡献率[24]（表2）。

表2 黄河流域河南段不同年份的第一主成分载荷与贡献率

Table 2 Loadings and contribution rates of first principal component for different years at Henan section of Yellow River basin

年份	第一主成分PC_1				贡献率/%
	NDVI	WET	NDBSI	LST	
2013	0.912	0.075	−0.343	−0.214	70.77
2017	0.668	0.191	−0.529	−0.487	84.98
2020	0.912	0.075	−0.343	−0.214	77.79
2023	0.737	0.237	−0.579	−0.255	86.88
平均值	0.807	0.145	−0.449	−0.293	80.11

从表2可知，对4个指标而言，其中NDVI，WET指标分别与RSEI呈正相关，而NDBSI，LST指标则呈负相关。这表明，NDVI与WET的提升对改善生态环境质量具有积极作用，而NDBSI与LST的增加则会产生抑制作用。NDVI与NDBSI载荷的绝对值大于湿度与热度，表明其对RSEI贡献更大。第一主成分贡献率平均值为80.11%，均超过70%，说明PC_1能够将4个指标主要特征信息进行有效集成。据此可用其代表RSEI。

2.2 生态环境质量时空演变特征

2.2.1 时间变化特征

由图2可知，2013—2023年RSEI均值呈现“下降—上升—基本不变”变化趋势，表明生态环境质量呈现“退化—改善—基本不变”的动态变化过程，也就是说相对于前一期，2017年显著退化，2020年明显改善，2023年基本不变。

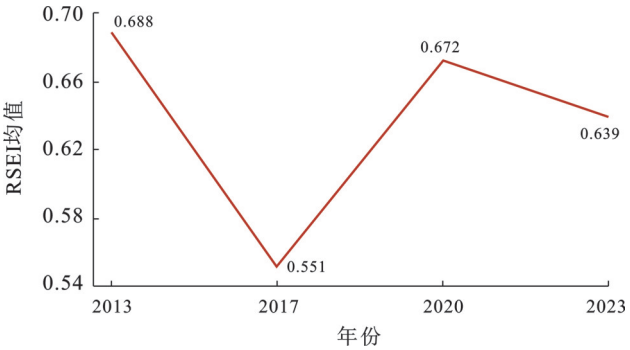


图2 黄河流域河南段域RSEI均值逐年变化

Fig.2 Annual changes in mean RSEI for Henan section of Yellow River basin

将初步得到的遥感生态指数$RSEI_0$进行归一化处理得到最终RSEI值，结果处于[0,1]。依据《生态环境状况评价技术规范》[25]，将生态环境质量分为5级，即差(0,0.2]，较差(0.2,0.4]，中等(0.4,0.6]，良好(0.6,0.8]，优(0.8,1]。统计4期各等级面积和比例（见表3）。

2013—2023年，研究区域RSEI以良好与中等为主（表3）。其中，RSEI等级为“良好”等级面积占比

42.50%～74.19%,变化呈现出“下降—上升—基本不变”;“中等”等级面积占比13.96%～36.18%,变化呈现出“上升—下降—上升”;“较差”等级面积占比0.22%～20.13%,变化呈现出“上升—下降—上升”。此外,“优”和“差”等级面积占比较低。“差”等级占比处于0%～0.14%,“优”等级占比0.88%～9.34%,均呈现波动性下降趋势。综合来看,2013年研究区域“中等”“良好”与“优”等级面积共占比97.26%。2017年、2020年和2023年三者占比分别为79.73%、99.78% 和 97.69%。2023年相比2017年上升了17.96%。可见,自2019年国家提出黄河流域生态保护和高质量发展战略以来,研究区域生态环境质量显著提高,同时,结合2020年“新冠疫情”居家隔离,生态环境质量达到短暂高峰。

表3　黄河流域河南段各生态环境质量等级面积

Table 3　Area of various ecological environment quality grades at Henan section of Yellow River basin

RSEI等级	2013年		2017年		2020年		2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
差	43.48	0.12	50.73	0.14	0	0.00	28.99	0.08
较差	949.32	2.62	7 293.82	20.13	79.71	0.22	808.01	2.23
中等	5 058.21	13.96	13 109.32	36.18	8 225.03	22.70	11 659.97	32.18
良好	26 798.37	73.96	15 399.28	42.50	26 881.71	74.19	23 417.78	64.63
优	3 384.22	9.34	380.45	1.05	1 047.15	2.89	318.85	0.88
总计	36 233.60	100.00	36 233.6	100.00	36 233.60	100.00	36 233.60	100.00

2.2.2　空间变化特征

由图3可知,2013—2023年黄河流域河南段生态环境质量主要呈现“四周优,中间差”的空间分布格局,多年总体处于中等和良好水平。RSEI指数呈现出明显的空间异质性。2013年,中等及以上生态等级区域分布几乎占了全部面积。高值区主要集中在三门峡市东部、洛阳市西南部和郑州市东南部。2017年,较差、中等及良好等级分布比较多。高值区主要分布在三门峡市西部山区。由于森林覆盖率高,植被茂盛,能够有效地保持水土、涵养水源,RSEI值较高。低值区主要分布在洛阳市、郑州市和开封市。由于城市化进程较快,建设用地大量增加,耕地和自然植被被大量占用,生态空间受到挤压。同时,工业污染、交通污染等问题较为突出。2020年,RSEI空间分布发生显著变化,高值区的范围有所扩大,原生态环境质量较低区域,生态环境质量得到明显提升。这与政府近年大力推进生态建设,如贾鲁河综合治理工程、黄河生态廊道建设工程等密不可分。2023年,生态环境质量大多是中等和良好,高值区分布在四周区域,低值区分布在中间区域。

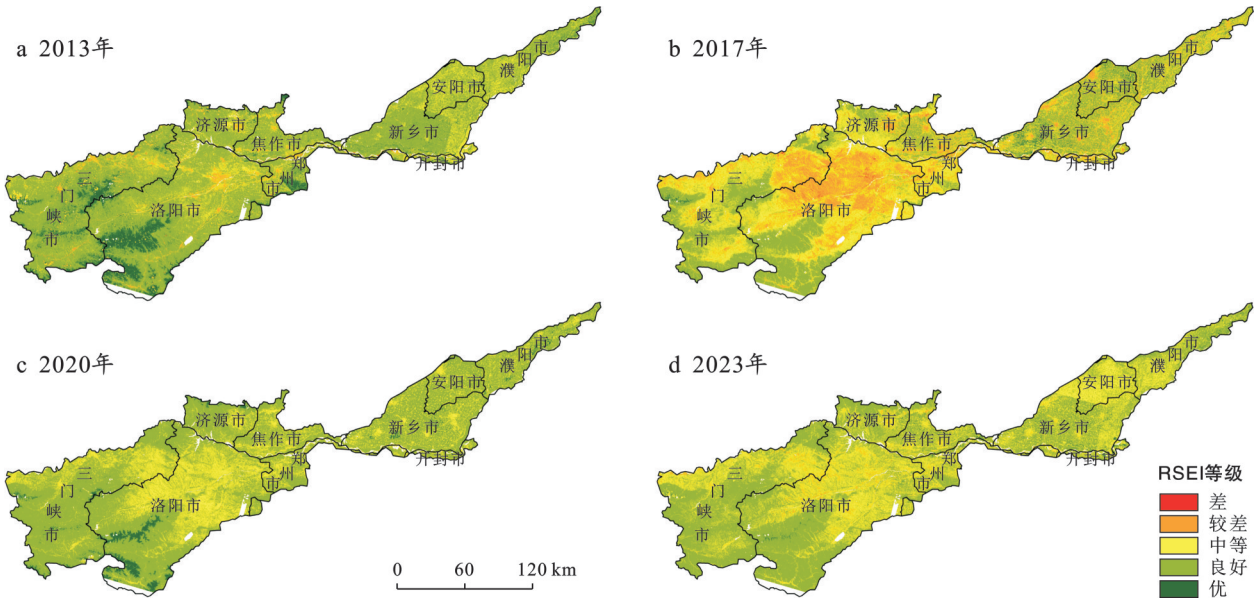


图3　黄河流域河南段RSEI等级分布

Fig.3　Distribution of RSEI grades at Henan section of Yellow River basin

2.3 时空变化特征分析

分析2013—2023年黄河流域河南段的生态环境质量时空变化，将两个年份的生态环境等级进行转移，根据ΔRSEI的变化，将RSEI变化等级分为明显恶化、轻度恶化、不变、轻度改善、明显改善5类，其中：ΔRSEI≤−0.1为明显恶化，−0.1<ΔRSEI≤−0.01为轻度恶化，|ΔRSEI|≤0.01为不变，0.01<ΔRSEI≤0.1为轻度改善，0.1<ΔRSEI为明显改善，得到生态环境等级变化及面积统计结果（表4）和变化等级空间分布状况（图4）。

表4 黄河流域河南段生态环境质量等级变化划分及面积统计

Table 4 Classification of grade change and area statistics of ecological environment quality at Henan section of Yellow River basin

RSEI等级变化	2013—2017年		2017—2020年		2020—2023年		2013—2023年	
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%
明显恶化	109.81	0.32	0.10	0.00	6.66	0.02	25.36	0.07
轻度恶化	19 748.41	57.62	759.99	2.21	7 688.60	22.36	11 717.95	32.34
不 变	12 376.74	36.11	15 991.55	46.41	24 167.32	70.29	21 703.93	59.90
轻度改善	2 033.77	5.94	17 697.75	51.36	2 518.64	7.33	2 775.49	7.66
明显改善	3.85	0.01	8.53	0.02	0.14	0.00	10.87	0.03
总 计	36 233.60	100.00	36 233.60	100.00	36 233.60	100.00	36 233.60	100.00

由表4和图4可知，2013—2023年黄河流域河南段总体生态环境质量呈现“下降—上升—基本不变”的动态变化过程。其中，2013—2017年，轻度改善和明显改善的面积占比5.95%。轻度恶化和明显恶化的面积占比57.94%，生态环境恶化的区域明显高于改善的区域。恶化区域主要分布在中间区域，如洛阳市、郑州市、开封市等。2017—2020年，轻度恶化和明显恶化面积占比共为2.21%，轻度改善和明显改善面积占比为51.38%。这个时间段生态环境改善区域明显高于恶化区域，改善区域主要分布在洛阳、郑州、开封等。2020—2023年，轻度恶化和明显恶化面积占比为22.38%，轻度改善和明显改善面积占比7.33%。不变区域面积最大，占比为70.29%。生态环境恶化区域稍微高于改善区域。

生态环境质量恶化表明生态环境整体功能在下降，抵御各种自然灾害的能力在减弱。反之，生态环境质量改善则表明生态系统质量和生态保护修复力度在提升。这其中既有气候变化等自然因素，也有生态环境建设中人为治理或破坏的因素。总的来说，2013—2023年近10 a间黄河流域河南段生态环境呈现改善趋势，质量等级以不变和轻微改善为主。

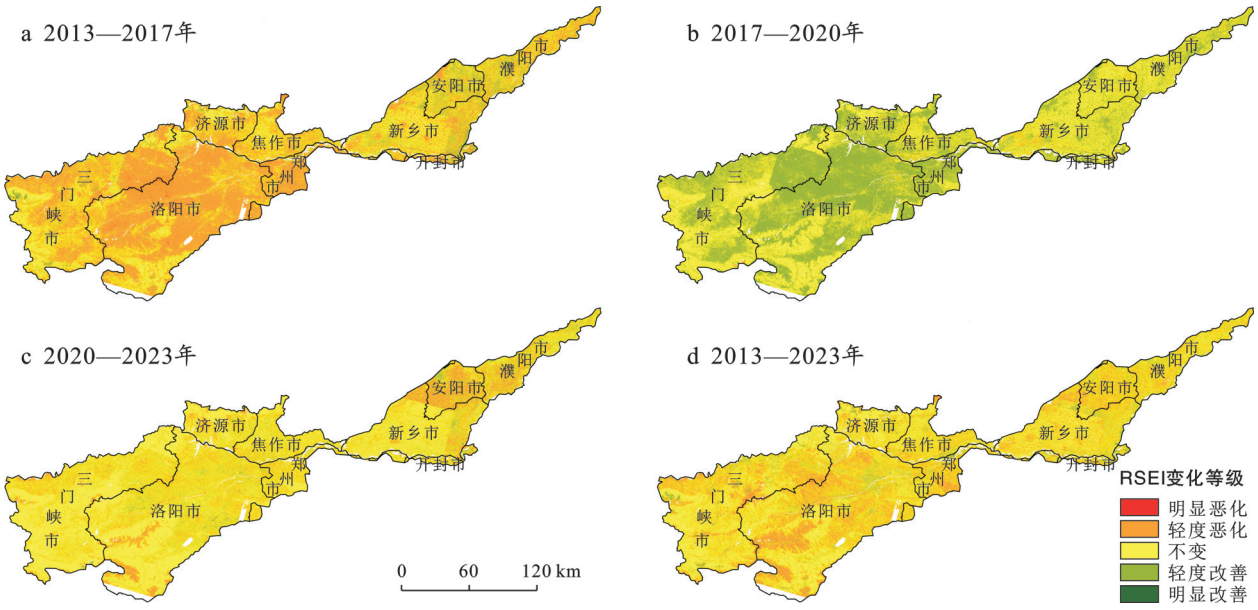


图4 黄河流域河南段RSEI变化等级空间分布

Fig.4 Spatial distribution of RSEI change grades at Henan section of Yellow River basin

2.4　生态环境质量影响因子探测分析

2.4.1　单因子探测分析

采用地理探测器方法深入探究影响黄河流域河南段生态环境质量演变的驱动机制,从而识别出影响该区域生态质量变化的关键驱动因子。具体步骤为:以 RSEI 值为因变量,选取 NDVI, WET, LST 和 NDBSI作为自变量因子,将 2013 年、2017 年、2020 年和 2023 年归一化后的各指标量通过自然断裂法分成 5 类。然后,利用 ArcGIS 软件“创建渔网”工具,基于研究区边界生成规则网格,每个网格单元大小为 10 km×10 km,并制作每年 NDVI, WET, LST, NDBSI 栅格图层,通过重采样将其统一到相同网格系统;使用“提取多值到点”工具获取每个采样点。通过这些点将因变量与自变量匹配,然后进行因子探测分析,得出这 4 个指标因子对 RSEI 的影响力 q 和显著性 p(表 5)。

表 5　黄河流域河南段生态质量驱动因子探测结果

Table 5　Detection results of driving factors of ecological environment quality at Henan section of Yellow River basin

驱动因子	2013 年		2017 年		2020 年		2023 年		q 平均值
	q	p	q	p	q	p	q	p	
NDVI	0.911	0	0.886	0	0.876	0	0.926	0	0.900
WET	0.276	0	0.746	0	0.490	0	0.805	0	0.579
LST	0.255	0	0.666	0	0.619	0	0.489	0	0.507
NDBSI	0.706	0	0.899	0	0.813	0	0.922	0	0.835

由表 5 可知,所选自变量因子均对因变量 RSEI 具有影响,NDVI, WET, LST 和 NDBSI 的 p 值均小于 0.01,p 值通过显著性检验,具有统计学意义。不同驱动因子各年 q 值的变化具有一定波动性。NDVI, WET, LST 和 NDBSI 的 q 平均值分别为 0.900, 0.579, 0.507 和 0.835,对黄河流域河南段生态环境影响的解释力均超过 50%,说明 NDVI, WET, LST 和 NDBSI 均对生态环境质量起到重要作用。从 q 平均值看出,NDVI 的 q 值最大,表明 NDVI 是影响生态环境质量的主导因子,对研究区域生态环境质量的影响最大。NDVI 能够综合衡量区域的植被覆盖度和生长状况,而植被在水土保持、稳定生态系统、调节气候等方面发挥着重要作用,也是生态环境质量的重要影响因素[26]。其次是 NDBSI,q 平均值为 0.835,表明 NDBSI 是次要驱动因子。NDBSI 可以有效监测地表干燥程度与土地退化状态,而与环境干度密切相关的一些因素在很大程度上能够影响生态环境质量,如新型城市化和地表干化、荒漠化的治理等。WET 和 LST 的 q 平均值分别为 0.579 和 0.507。二者分别表征区域水分含量和地表温度,它们也是植被生长发育过程中的影响因子,通过影响植被生长的方式来影响生态环境质量。

2.4.2　交互作用探测分析

对影响因子进行交互作用探测分析,探测结果见图 5。其中:X_1 表示 NDVI;X_2 表示 WET;X_3 表示 LST;X_4 表示 NDBSI。

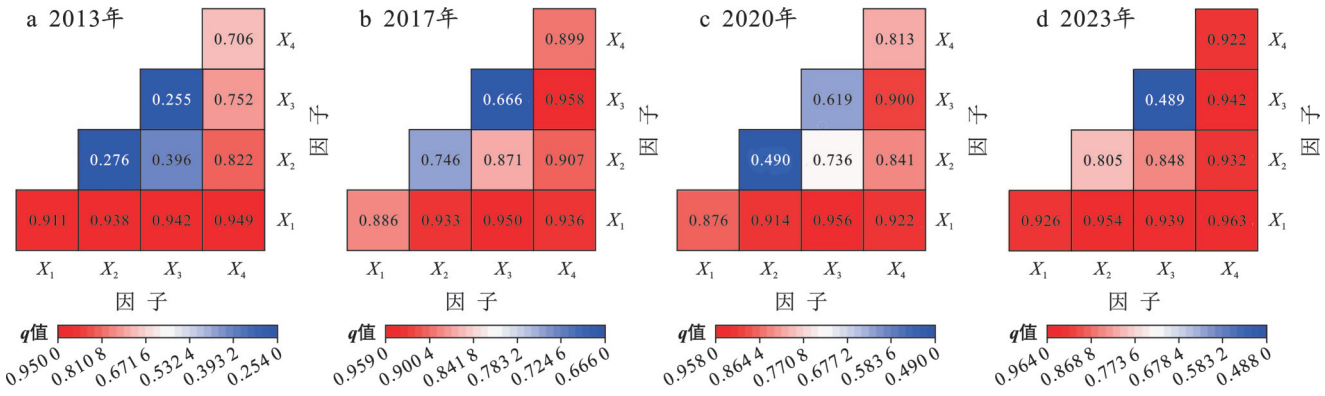


图 5　黄河流域河南段多因子交互作用的探测结果

Fig.5　Interaction detection results of multi-factors at Henan section of Yellow River basin

由图 5 可知,各因子的交互作用均以非线性增强与双因子增强为主,表明任意 2 个影响因子共同作用时的影响力均大于单一影响因子的作用。NDVI 与 NDBSI 的交互值 2013 年和 2023 年均为最

高值；2017 年和 2020 年，分别为 0.936 和 0.922，与最大值 0.950 和 0.956 相差很小；并且 NDVI 与 NDBSI 同 WET 或 LST 之间的交互作用均强于其他组合。这说明这 2 个因子对黄河流域河南段生态环境质量的变化起着关键作用。对比单因子探测结果，WET 或者 LST 与其他因子的交互值得到显著提升，且均表现为非线性增强效果，说明解释力低的单因子与其他因子交互作用下影响力更明显。

2.5 驱动因素分析

2.5.1 社会经济因素

根据 2013—2023 年黄河流域河南段夜间灯光值总和与人口数（图 6）可知，研究区域人口数量呈稳定上升趋势，夜间灯光值总和呈波动性上升趋势。结合 2013—2023 年 RSEI 值呈波动性下降趋势，分析得出，人口的增长和经济的快速发展导致区域内土地类型发生变化，从而对研究区域生态环境质量等级变化有一定影响。人口数量的增长和经济的发展必然会侵占林地、湿地等生态空间，降低生态系统的恢复力和对自然灾害的抵抗力，进而对生态环境质量造成一定影响。

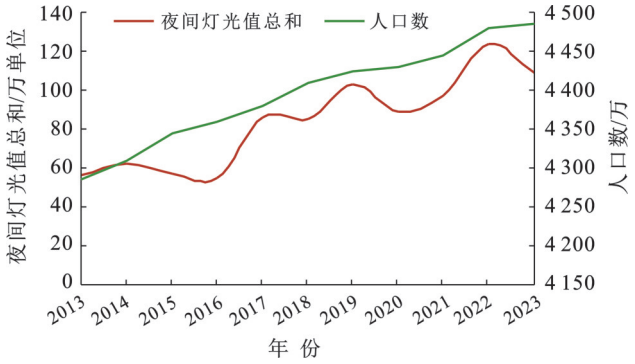


图 6 黄河流域河南段人口数和夜间灯光值总和

Fig.6 Population size and total nighttime light intensity at Henan section of Yellow River basin

2.5.2 自然因素

根据 2013—2023 年黄河流域河南段年均气温和年降水量变化（图 7）可知，研究区年均气温波动范围在 14.6～15.4 ℃之间，年降水量波动范围在 550～775 mm。2013—2017 年，年降水量轻微上升，年均气温上升，RSEI 值呈下降趋势；2017—2020 年，年降水量显著上升，年均气温下降，RSEI 上升；2020—2023 年，年降水量下降，年均气温上升，RSEI 下降。这种变化表明降水丰富的年份，生态环境质量相对较好。充足的降水有利于植被生长和地表水分保持，降水与 RSEI 呈正相关。气温变化通过植被覆盖和土壤健康等影响生态环境质量，气温与 RSEI 呈负相关。

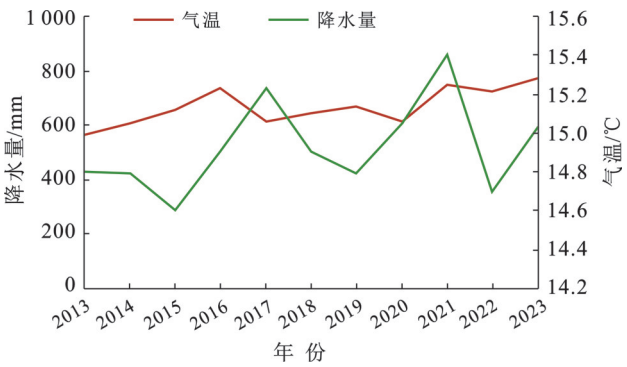


图 7 黄河流域河南段年均气温和年降水量变化

Fig.7 Changes in annual average temperature and annual precipitation at Henan section of Yellow River basin

3 讨 论

本研究运用 RSEI 与地理探测器，揭示了 2013—2023 年黄河流域河南段生态环境质量的时空分异与驱动机制，在方法与机理层面具有一定创新，提升了该区域生态环境质量的综合评估与分析水平。

研究结果证实了“自然-人为”双驱动框架在该区域的适用性。“四周优，中间差”的空间格局与流域整体趋势一致，体现了自然本底与人类活动的空间耦合。NDVI 与 NDBSI 的交互作用呈现“非线性增强”，揭示植被减少与建设用地扩张并非孤立过程，而是通过“植被退化→地表干热化加剧→生境恶化→植被恢复受阻”的负反馈循环相互强化。

引入地理探测器方法，克服了传统分析的局限，清晰量化了因子间（尤其 NDVI 与 NDBSI）的协同增强效应；从时序上捕捉到“新冠疫情”隔离期及黄河流域生态保护和高质量发展战略实施后的生态响应信号，为评估重大事件与政策的生态效应提供了实证案例。

综上所述，黄河流域河南段生态环境质量的维持与提升，需统筹植被恢复、地表保水与城镇集约发展，尤其需要重视关键因子间的协同效应，实施差异化的空间管控与生态修复策略，以促进区域人与自然和谐共生。

本研究仍存在一定局限性。遥感数据分辨率限制了对生物多样性、土壤过程等生态内部机理的深入刻画；驱动因子中未纳入精细化的政策与管理变量，对人为驱动力的解析仍可深化；RSEI 对各类生态系统服务功能的差异表征能力有限。未来研究可融合多源高分辨率数据与社会经济大数据，构建“格局-过程-服务”一体化动态模型，结合机器学习识别生态变化的阈值与恢复路径，并加强生态保护政策实施的精细化成效评估，以支撑流域精准治理。

4　结　论

(1) RSEI适用于黄河流域河南段生态环境质量监测,第一主成分(PC_1)平均贡献率达80.11%,能够有效集成NDVI,WET,NDBSI与LST信息,客观反映生态环境整体状况。

(2) 生态环境质量呈现“四周优,中间差”的空间异质性格局,时序上表现为“退化—改善—基本稳定”的波动过程。其中2020年后质量总体提升,反映出生态保护政策的积极成效。

(3) NDVI是生态质量的主导正向因子,NDBSI为关键负向因子,二者交互作用呈非线性增强,表明植被减少与土地干化过程相互加剧。社会经济因子(人口密度、夜间灯光)与生态环境质量呈显著负相关,自然因子中与降水量呈正相关,与气温呈负相关,体现了人类活动与气候变化的复合驱动效应。

参考文献(References)

[1] Zhou Jianbo, Liu Wanqing. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake basin, China [J]. Sustainability, 2022,14(9):5642.

[2] 汪士为,吴伟.近31年嘉陵江流域生态环境质量时空演变及驱动因子探测[J].水土保持研究,2024,31(1):427-439.
Wang Shiwei, Wu Wei. Spatiotemporal variation of ecological environmental quality and its response to different driving factors in Jialing River basin in recent 31 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):427-439.

[3] 焦晓萌,张兵,高阳,等.利用改进型遥感生态指数的岩溶区生态环境质量评价[J].测绘通报,2024(4):54-60.
Jiao Xiaomeng, Zhang Bing, Gao Yang, et al. Evaluation of eco-environment quality in Karst area using improved remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(4):54-60.

[4] 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.

[5] 刘林甫,盛艳,秦富仓,等.基于RSEI模型的砒砂岩区生态环境质量演变研究[J].水土保持通报,2022,42(1):233-239.
Liu Linfu, Sheng Yan, Qin Fucang, et al. Evolution of ecological environmental quality in feldspathic sandstone area based on RSEI model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):233-239.

[6] 章程焱,杨少康,董晓华,等.基于RSEI指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究[J].水土保持研究,2023,30(1):356-363.
Zhang Chengyan, Yang Shaokang, Dong Xiaohua, et al. Research on spatiotemporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the upper Yangtze River basin based on RSEI index [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):356-363.

[7] 董洁芳,武荣伟,赵艳芬.黄河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析[J].水生态学杂志,2024,45(3):60-69.
Dong Jiefang, Wu Rongwei, Zhao Yanfen. Spatial-temporal evolution and driving force analysis of eco-environmental quality in the Yellow River basin [J]. Journal of Hydroecology, 2024,45(3):60-69.

[8] 陈芳淼,黄慧萍,杨光,等.基于遥感生态指数的黄河流域生态环境质量变化及影响因素分析[J].中国沙漠,2023,43(4):252-262.
Chen Fangmiao, Huang Huiping, Yang Guang, et al. Research on the dynamic change of the ecological environment and its influencing factors in the Yellow River basin based on remote sensing ecological index [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(4):252-262.

[9] 崔亚婷,李嬛,郑龙啸,等.基于RSEI的黄河上游流域生态环境质量变化分析[J].中国沙漠,2023,43(3):107-118.
Cui Yating, Li Huan, Zheng Longxiao, et al. Study of ecological environmental quality changes in the upper Yellow River basin based on remote sensing ecological index [J]. Journal of Desert Research, 2023,43(3):107-118.

[10] 祁帅,袁瑞强,薛宇,等.基于改进遥感生态指数的黄河流域内蒙古段生态环境质量监测及影响因素分析[J].灌溉排水学报,2025,44(10):133-144.
Qi Shuai, Yuan Ruiqiang, Xue Yu, et al. Spatiotemporal dynamics of ecological-environmental quality and its driving factors in the Inner Mongolia section of the Yellow River basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025,44(10):133-144.

[11] 张音,孙从建,刘庚,等.2000—2023年黄河流域山西段生态环境质量时空变化及其驱动因素[J].干旱区地理,2025,48(11):1983-1994.
Zhang Yin, Sun Congjian, Liu Geng, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of ecological environment quality in the Shanxi section of the Yellow River basin from 2000 to 2023 [J]. Arid Land Geography, 2025,48(11):1983-1994.

[12] 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 Pengxuan, Wang Tao, Wang Deying, 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.

[13] 孟娜.科技赋能河南省沿黄地区农业高质量发展的路径[J].乡村科技,2025,16(17):85-89.
Meng Na. Research on the path of technology-empowered high-quality agricultural development in the Yellow River basin of Henan Province [J]. Rural Science and Technology, 2025,16(17):85-89.

[14] 徐艳红,石玉.河南省沿黄八市经济发展与生态保护协同发展策略[J].人民黄河,2022,44(5):10-14.
Xu Yanhong, Shi Yu. Coordinated development strategy of economic development and ecological protection of eight cities along the Yellow River in Henan Province [J]. Yellow River, 2022,44(5):10-14.

[15] 代云豪,管瑶,刘孟琴,等.1990—2020年阿拉尔垦区生态环境质量动态监测与评价[J].水土保持通报,2022,42(2):122-128.
Dai Yunhao, Guan Yao, Liu Mengqin, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment quality in alar reclamation area from 1990 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):122-128.

[16] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM$^+$, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(5):893-903.

[17] 权文婷,张树誉,刘艳,等.基于遥感生态指数的陕西省东庄水库流域生态环境变化监测与评价[J].水土保持通报,2022,42(5):96-104.
Quan Wenting, Zhang Shuyu, Liu Yan, et al. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Dongzhuang Reservoir basin in Shaanxi Province based on remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):96-104.

[18] 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.

[19] 刘甜甜,柳杨,王玉玺,等.河南省生态环境质量的时空演变特征及驱动力分析[J].生态环境学报,2025,34(11):1778-1787.
Liu Tiantian, Liu Yang, Wang Yuxi, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and driving force analysis of ecological environment quality in Henan Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(11):1778-1787.

[20] 徐国良,蔡一阳,万春燕.厦漳泉都市圈"三生"空间转型的碳储量效应及影响因素[J].水土保持通报,2024,44(5):327-336.
Xu Guoliang, Cai Yiyang, Wan Chunyan. Carbon storage effect and influencing factors of productive-living-ecological space transformation in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou metropolitan area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):327-336.

[21] 李青松,张凤太,苏维词,等.长江经济带农业用水绿色效率测度及影响因素分析:基于超效率EBM-Geodetector模型[J].中国农业资源与区划,2022,43(5):40-52.
Li Qingsong, Zhang Fengtai, Su Weici, et al. Measurement of green efficiency of agricultural water in the Yangtze River economic belt and analysis of influencing factors: Based on the super-efficiency EBM-Geodetector model [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022,43(5):40-52.

[22] 杨达.三江源不同生态地理区NDVI时空变化特征与驱动因素分析[D].四川 成都:成都理工大学,2021.
Yang Da. Spatio-temporal variation characteristics and driving factors of NDVI in different eco-geographical regions in three river-headwater [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2021.

[23] 冯文禹.长三角城市发展质量空间分异研究[D].安徽合肥:安徽建筑大学,2022.
Feng Wenyu. Study on spatial differentiation of urban development quality in Yangtze River delta [D]. Hefei, Anhui: Anhui Jianzhu University, 2022.

[24] 奥勇,汪雅,王晓峰,等.2001—2020年间河南省郑州市生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J].自然资源遥感,2025,37(1):102-112.
Ao Yong, Wang Ya, Wang Xiaofeng, et al. Spatiotemporal changes of ecological quality and their driving factors in Zhengzhou City over the last 20 years [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025,37(1):102-112.

[25] 中华人民共和国环境保护部.HJ 192—2015生态环境状况评价技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 192—2015 Technical criterion for ecosystem status evaluation [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.

[26] 赵彦博,赵广举,穆兴民,等.渭河流域植被变化调控输沙的覆盖度阈值[J].水土保持研究,2024,31(6):96-102.
Zhao Yanbo, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Influence and threshold of vegetation change on sediment load in the Weihe River basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):96-102.