黄河乌海段汇水流域生态环境质量变化特征及其驱动力

王思楠[1,2], 徐凯然[1,2], 王福强[3], 吴英杰[1,2], 马小茗[4], 赵建伟[3], 宝 路[3]

(1.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 4.内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: [目的] 探究2001—2024年黄河乌海段汇水流域生态环境质量的时空变化特征、未来趋势及其驱动机制,为该区域制定差异化、精细化的生态保护与修复策略提供科学参考。[方法] 以中国高分辨率生态环境质量数据集(China's high-resolution eco-environmental quality dataset,在RSEI框架基础上集成绿度、湿度、干度、热度及地表覆盖度等多源信息,从多维度综合刻画资源型流域生态状况)中的生态环境质量指数(CHEQ指数),表征研究区生态环境质量,运用趋势分析法、变异系数法、Hurst指数法和最优参数地理探测器(OPGD)等方法,结合遥感数据,对CHEQ的时间演变、空间分异及稳定性进行分析与预测。[结果] 该流域CHEQ指数整体呈显著下降趋势,年际变化率为−0.000 4/a($p<0.05$),并表现出"每5 a先升后降"的周期性特征。空间格局上,生态质量呈西北低,东南高的分异特征;稳定性表现为高低波动并存,以适中波动为主的特征。基于未来趋势预测,66.9%的区域可能向良性发展,但仍有15.0%的区域将持续退化。驱动机制探测显示,人口密度、气候和地形是主要驱动力;因子间存在复杂的协同增强作用,表现为地形与人类活动呈强负向协同,经济与基础设施指标表现出高度交互耦合。[结论] 黄河乌海段汇水流域生态环境质量变化受到自然基底约束与人类活动的复杂耦合驱动。未来的生态保护与修复需针对周期性波动特征和协同驱动机制,制定差异化策略,以促进区域生态环境实现良性发展。

关键词: 生态质量; 地理探测器; 遥感监测; 驱动因子; 黄河乌海段汇水流域

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0447-13 **中图分类号:** P964, X821

文献参数: 王思楠, 徐凯然, 王福强, 等.黄河乌海段汇水流域生态环境质量变化特征及其驱动力[J].水土保持通报,2026,46(3):447-459. Wang Sinan, Xu Kairan, Wang Fuqiang, et al. Characteristics and driving forces of ecological environment quality changes in catchment area of Wuhai section of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):447-459.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.014 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.014**

Characteristics and driving forces of ecological environment quality changes in catchment area of Wuhai section of Yellow River

Wang Sinan[1,2], Xu Kairan[1,2], Wang Fuqiang[3], Wu Yingjie[1,2], Ma Xiaoming[4], Zhao Jianwei[3], Bao Lu[3]

(1.*Institute of Water Resources Science for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*; 2.*Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing*, 100038, *China*; 3.*College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010018, *China*; 4.*Water Resources Research Institute of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia* 010010, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics, future trends, and driving mechanisms of the eco-environment quality in the catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024 were investigated in order to provide a scientific reference for formulating differentiated and refined ecological protection and

收稿日期:2025-09-19 **修回日期:**2025-11-18 **采用日期:**2025-11-25

资助项目:内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目"黄河流域严重缺水地区水资源可持续利用与综合调控技术研究"(2022YFHH0069); 内蒙古自治区"英才兴蒙"工程青年拔尖人才专项培养计划项目; 2022年度内蒙古自治区本级引进高层次人才科研支持项目

第一作者:王思楠(1993—),男(汉族),山西省应县人,博士,工程师,主要从事大范围干旱监测模拟研究。Email:nmgnydx2016@163.com。

通信作者:吴英杰(1982—),男(汉族),内蒙古自治区呼伦贝尔人,博士,高级工程师,主要从事牧区干旱与减灾研究。Email:508188330@qq.com。

restoration strategies for this region. [Methods] The ecological environment quality of the study area was characterized by China's high-resolution eco-environmental quality (CHEQ) index dataset, which integrated multi-source information, including greenness, humidity, dryness, heat, and land cover, on the basis of the remote sensing ecological index (RSEI) framework to comprehensively characterize the ecological status of resource-based watersheds from multiple dimensions. Trend analysis, coefficient of variation, Hurst index, and optimal parameters-based GeoDetector (OPGD) were used in combination with remote sensing data to analyze and predict the temporal evolution, spatial differentiation, and stability of CHEQ index. [Results] The results indicated that CHEQ in the catchment area exhibited an overall periodic fluctuating decline, with an interannual change rate of −0.000 4/a ($p<0.05$), and showed a periodic pattern of 'rising first and then falling every five years'. Spatially, the ecological quality presented a pattern characterized by lower values in the northwest and higher values in the southeast. Stability was characterized by the coexistence of high and low fluctuations, with a high proportion of moderate fluctuations. Based on future trend prediction, 66.9% of the area was likely to develop in a benign direction, while 15.0% of the area was expected to continue to deteriorate. Driving mechanism detection revealed that population density, climate and terrain were the main driving forces. Complex synergistic enhancement effects were found among factors, demonstrating a strong negative synergy between terrain and human activities, while economic and infrastructure indicators exhibited a high degree of interactive coupling. [Conclusion] Changes in the ecological environment quality of the catchment area of Wuhai section of Yellow River are driven by a complex coupling of natural constraints and human activities. Future ecological protection and restoration require differentiated strategies tailored to the cyclical fluctuations and synergistic driving mechanisms to promote the healthy development of the regional ecological environment.

Keywords: ecological quality; GeoDetector; remote sensing monitoring; driving factors; catchment area of Wuhai section of Yellow River

生态环境质量(eco-environment quality, EQ)是衡量区域可持续发展水平的重要指标,尤其在资源开发与生态保护高度交织的区域,更成为实现生态安全与经济发展的关键纽带。黄河流域作为中国重要的生态屏障与能源产业带,其生态环境变化不仅牵动区域发展全局,也对全国生态安全格局具有深远影响。作为黄河上游的重要组成部分,乌海段汇水流域具有典型的"生态脆弱性-资源依赖性-产业集中性"特征,长期面临水资源短缺、土地退化、植被破碎化、生态系统服务能力下降等突出问题。因此,深入探究该流域生态环境质量的时空演变规律及其潜在驱动机制,对于支撑内蒙古自治区生态保护政策制定、优化黄河流域资源开发格局具有重要的科学意义和现实指导价值。

遥感技术的发展为大尺度、长期序列的生态环境监测提供了重要手段。其中,遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)因整合了绿度、湿度、热度与干度4类核心指标[1],在一定程度上能反映生态系统的整体状况,广泛应用于流域、城市群、森林、湖泊等生态敏感区域的质量评估与动态监测[2-5]。RSEI方法虽然广泛应用于生态评估,但其局限性也逐步显现。RSEI主要基于第一主成分提取,难以充分纳入人为活动、土地利用变化等社会过程的影响,尤其在复杂生态系统中可能存在信息损失。Xu Dong等[6]开发的中国高分辨率生态环境质量数据集(China's high-resolution eco-environmental quality dataset, CHEQ),结合MODIS, Landsat等多源卫星数据与中国生态环境部发布的指数体系,能够提供具有较高空间精度和时间稳定性的生态环境质量指数。为避免概念混淆,下文将该数据集中用于表征生态环境质量的指标值统一称为CHEQ指数。一方面,这类数据为生态质量变化趋势的监测提供了可靠数据基础;另一方面,其数据连续性和高覆盖率也为深入探究驱动机制奠定了基础。该数据集已被应用于广东[7]、湖南[8]、甘肃等多个典型区域的生态监测与政策评估中,取得了良好的应用效果。

生态质量变化往往受到多重自然因素(如降水、温度、地形)与社会因素(如土地利用、GDP、人口密度等)协同驱动,且各因素之间可能存在交互增强、非线性响应等复杂机制。传统的主成分分析、灰色关联分析、线性回归等方法虽在一定程度上识别了因子重要性[9],但大多基于单因素、线性假设,难以捕捉生态系统在高维、多尺度情境下的真实驱动路径,存在解释力有限与政策指导性不足的问题[10-11]。地理探测器(GeoDetector, GD)模型作为近年来发展迅速的空间统计方法,在生态与环境研究中受到广泛关注。其核心优势在于通过比较

变量间的空间一致性,评估不同因子对目标变量的解释力,并可进一步揭示变量间的交互增强或抑制作用[12-14]。然而,传统地理探测器(GD)在变量分组与参数设定方面依赖研究者经验判断,易造成解释结果的不确定性与主观性,难以充分捕捉生态系统在高维、多尺度情境下的真实驱动路径[15-17]。近期部分学者提出最优参数地理探测器(optimal parameters-based GeoDetector, OPGD)方法,通过引入数据驱动的最优参数搜索机制,自动确定变量的最优分类方式,使其对解释变量的解释力达到最大化。克服了传统地理探测器参数主观设定的缺陷,显著提升了模型稳定性和可复现性,在城市热岛、土地利用变化等研究中展现出良好的适应性与解析能力。

乌海段作为典型的资源型流域,其生态系统对外部扰动的响应机制更为复杂和敏感。聚焦于这一特定的、高度集中的区域,能够利用高分辨率数据捕捉到煤炭开采强度、工业聚集区分布等微观驱动因素对生态环境质量(CHEQ指数)的影响。因此,本研究基于中国高分辨率生态环境质量数据集的CHEQ指数和最优参数地理探测器(OPGD)模型,以黄河乌海段这一典型资源型脆弱生态区为研究区域,系统地探究2001—2024年生态环境质量的周期性时空演变特征、未来趋势及其复杂驱动机制,综合评估其空间解释力差异。本研究旨在首次实现CHEQ指数长时序监测与OPGD优化解析的结合,在理论上拓展最优地理探测器模型在资源型区域生态研究中的应用边界,并为该区域制定差异化、精细化的生态保护与修复策略提供科学支持和决策参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黄河乌海段汇水流域位于内蒙古自治区,涉及乌海市海勃湾区、乌达区、海南区这3个市辖区,总面积11 590.11 km^2[18]。流域内城镇人口达53万人,同时分布着9个工业聚集区,分别为乌海高新技术产业开发区的海勃湾产业园、乌达产业园、海南产业园及低碳产业园;阿拉善高新技术产业开发区的乌兰布和工业园、巴音敖包工业园及高新技术产业孵化园;鄂尔多斯鄂托克经济开发区的蒙西产业园、棋盘井产业园。气候主要是温带大陆性气候,年均气温为6.1～9.9 ℃,年均降水量为149.7～370.6 mm,年均潜在蒸散发为704.6～964 mm。在水资源短缺和生态环境脆弱的双重约束下,区域内出现3个地下水超采区,乌海市全境被水利部划定为黄河流域水资源超载最严重地区之一。地势整体西高东低,以黄河阶地、剥蚀丘陵和风沙堆积地貌为主,部分地区发育沟谷侵蚀地形。土壤类型以灰钙土、风沙土和盐渍化土壤为主,保水保肥能力弱,易受风蚀、水蚀和盐渍化影响,导致水土流失和土地退化问题较为突出。天然植被以荒漠草原和灌丛为主,沿黄河两岸及农田分布少量防护林和人工林,整体植被覆盖度偏低、生态系统服务功能脆弱,对气候波动和人为扰动高度敏感。此外,城市扩张、工业集中布局和大规模灌溉用水加剧了水资源供需矛盾和土地利用变化,进一步放大了区域生态环境风险。

1.2　数据来源

中国高分辨率生态环境质量数据集结合MODIS, Landsat等多源卫星数据与中国生态环境部发布的指数体系,空间分辨率为1 km。CHEQ指数是精准描绘生态系统变化趋势的关键前提,显著提高了生态质量评价的空间精度与时间稳定性,为大量研究提供长期、高精度的可靠数据基础,填补了中国生态环境质量监测领域的研究空白。在驱动因子选取方面,遵循“生态过程主导-人类扰动显性-数据可获得性”的原则,综合生态学、景观生态学和人地系统耦合理论构建指标体系。对于自然因素,生态环境质量受区域水热条件与下垫面特征制约,选取降水量(precipitation, PRE)、温度(temperature, TEM)、蒸散发(evapotranspiration, ET)、海拔(DEM)和坡度(slope, SL),共5个自然因素。降水、气温等气候要素决定植被生产力和水分循环过程,地形起伏、坡度等地形条件通过影响地表径流汇流路径、土壤侵蚀强度和局地小气候,间接作用于生态系统结构与功能。对于人类活动因素,基于土地利用/覆被变化理论、资源型城市演替理论以及“社会经济活动通过改变土地利用强度和资源消耗水平影响生态环境质量”的认识,选取国内生产总值(gross domestic product, GDP)、人口密度(population density, POP)、人类足迹(human footprint, HF)和夜间灯光数据(nighttime light, NL)(表1)。这些指标能够较好反映人类活动强度、经济发展水平和工业集聚程度。

1.3　研究方法

1.3.1　趋势性分析

Theil-Sen斜率估算结合Mann-Kendall显著性检验可以有效检验趋势变化显著性,规避异常值造成结果偏差的能力较强。本文利用Sen＋Mann Kendall显著性趋势检验法估算2001—2024年黄河乌海段汇水流域CHEQ指数变化趋势,计算公式为[19]

$$\beta = \mathrm{median}\left(\frac{\mathrm{CHEQ}_j - \mathrm{CHEQ}_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

$$(2001 \leqslant i < j \leqslant 2024)$$

式中:β为CHEQ指数变化趋势;CHEQ_j为第j年的

CHEQ指数值；$CHEQ_i$为第i年的CHEQ指数值。当$\beta>0$时，表明CHEQ指数在此时间范围内呈上升趋势；当$\beta=0$时，表明CHEQ指数在此时间范围内维持不变；当$\beta<0$时，表明CHEQ指数在此时间范围内呈下降趋势。根据β的取值情况，变化趋势被划分为3个区间：$\beta>0.001$为增加、$-0.001<\beta<0.001$为基本不变、$\beta<-0.001$为减少。Z为趋势检验的标准化统计量，本文取显著性水平为0.05，当Z的绝对值大于1.65，1.96，2.58时，表示趋势分别通过置信度90%，95%和99%的显著性趋势。表2为显著性检验趋势类别。

表1 研究数据来源信息

Table 1 Information of research data sources

数据类型	驱动因素	分辨率/m	数据来源
生态环境质量	生态环境质量指数(CHEQ指数)	1 000	http://www.geodata.cn/
自然因素	降水量(PRE)/mm	1 000	https://www.geodata.cn/
	温度(TEM)/℃	1 000	https://www.geodata.cn/
	蒸散发(ET)/mm	1 000	https://www.geodata.cn/
	海拔(DEM)/m	250	https://www.gscloud.cn/
	坡度(Slope)/(°)	250	DEM计算
人为因素	国内生产总值(GDP)/(元·km^{-2})	1 000	https://www.resdc.cn/
	人口密度(POP)/(人·km^{-2})	1 000	https://www.resdc.cn/
	人类足迹(HF)	1 000	https://www.x-mol.com
	夜间灯光数据(NL)	1 000	https://www.x-mol.com

表2 黄河乌海段汇水流域CHEQ指数变化趋势划分

Table 2 Classification of CHEQ index variation trends in catchment area of Wuhai section of Yellow River

β值范围	Z值范围	趋势类别
$\beta>0.001$	$2.58<Z$	极显著改善
	$1.96<Z\leqslant2.58$	显著改善
	$1.65<Z\leqslant1.96$	轻微改善
	$Z\leqslant1.65$	不显著改善
$-0.001<\beta<0.001$	—	稳定不变
$\beta<-0.001$	$2.58<Z$	极显著退化
	$1.96<Z\leqslant2.58$	显著退化
	$1.65<Z\leqslant1.96$	轻微退化
	$Z\leqslant1.65$	不显著退化

注：β为CHEQ指数变化趋势；Z为趋势检验的标准化统计量，当$-0.001\leqslant\beta\leqslant0.001$时，CHEQ指数变化趋势判定为稳定不变，不再依据$Z$值划分显著性等级。

1.3.2 变异系数

变异系数反映数据离散程度的绝对值。其数据大小不仅受变量值离散程度的影响，而且还受变量值平均水平大小的影响，计算公式为[20]：

$$C_v=\frac{\sigma}{\mu} \tag{2}$$

式中：C_v为变异系数；σ为CHEQ指数的标准差；μ为CHEQ指数的均值。表3为变异系数分类等级。变异系数用于衡量2001—2024年CHEQ指数在空间上和时间序列上的波动程度。本研究通过逐像元计算变异系数，并参考已有研究对C_v值进行分级，以揭示研究区生态环境质量的稳定性差异[21]。

1.3.3 Hurst指数

Hurst指数是目前广泛应用于水文学，气候学和生态学等领域，定量描述长时间序列数据的持续性，判断其未来变化趋势的有效方法。参考已有研究[22]，Hurst指数取值范围为[0，1]，当0<Hurst指数<0.5时，表明CHEQ指数时间序列具有反持续性，即未来趋势与现在相反；Hurst指数=0.5时，CHEQ指数为随机序列，无法预测未来变化趋势；0.5<Hurst指数<1时，表明CHEQ指数时间序列具有持续性，即未来趋势与现在一致。因此，根据持续性的方向和强度，Hurst指数可以分为以下4类：强反向持续性($0<H<0.35$)、弱反向持续性($0.35<H<0.50$)、弱同向持续性($0.50<H<0.65$)、强同向持续性($0.65<H<1$)。本研究通过将Theil-Sen中值变化趋势与Hurst指数进行叠加分析，划分出未来9种变化趋势类型，用于预测流域生态质量的未来发展方向(表4)。

表3 黄河乌海段汇水流域CHEQ指数变异系数(C_v)分类

Table 3 Classification of CHEQ index variation coefficient (C_v) in catchment area of Wuhai section of Yellow River

波动等级	最低波动	较低波动	适中波动	较高波动	最高波动
C_v值范围	$C_v\leqslant0.05$	$0.05<C_v\leqslant0.09$	$0.09<C_v\leqslant0.18$	$0.18<C_v\leqslant0.38$	$C_v>0.38$

表 4　黄河乌海段汇水流域 CHEQ 指数未来变化趋势划分
Table 4　Classification of future CHEQ index trends in catchment area of Wuhai section of Yellow River

β值范围	Hurst指数	未来变化趋势
$\beta>0.001$	[0,0.35]	反强持续性改善
	[0.35,0.5]	反弱持续性改善
	[0.65,1]	强持续性改善
	[0.5,0.65]	弱持续性改善
$-0.001<\beta<0.001$	0.5	基本不变
$\beta<-0.001$	[0,0.35]	反强持续性退化
	[0.35,0.5]	反弱持续性退化
	[0.65,1]	强持续性退化
	[0.5,0.65]	弱持续性退化

1.3.4　最优参数地理探测器

最优参数地理探测器通过优化空间数据的离散化方法、空间层间断裂数和空间尺度参数提高地理探测器模型的准确性[23]。为了深入探讨影响黄河乌海段汇水流域 CHEQ 指数变化的主要驱动因素,本研究选取 X_1—X_9 共 9 个影响因子,并利用最优地理探测器评估各因子对研究区 CHEQ 指数变化的影响程度。研究区内最优参数地理探测器单因子探测的计算结果、分类方法和分类数目如表 5 所示。

表 5　最优地理探测器单因子探测分类结果
Table 5　Classification results of single-factor detection using optimal parameters-based GeoDetector

因子	解释力	最优分类方法	最优分类数
ET	0.594 4	分位数法	9
PRE	0.538 1	分位数法	10
POP	0.643 1	分位数法	8
Slope	0.442 5	分位数法	10
DEM	0.511 2	分位数法	10
TEM	0.592 3	等间距法	9
GDP	0.295 0	分位数法	9
HF	0.405 6	等间距法	8
NL	0.187 0	分位数法	8

注:各因子含义详见表 1。

在因子离散化过程中,为减少分类主观性和尺度差异引入的偏误,OPGD 模型通过设置多种离散策略与不同分类粒度进行组合优化。所选分类方法包括分位数法、自然断点法(Jenks)、标准差法、几何间断法与等距法,适用于不同类型与分布特征的数据变量。每种分类方法下均尝试 5~10 类的分类粒度设置,以避免过度简化或过度离散所导致的解释力偏差。随后,对各组合下的空间一致性指数(q 值)进行逐一计算与比较,选取能够获得最高 q 值的分类方式与分类数目作为最终的最优参数组合。该过程兼顾变量本身的数值分布特征与模型在空间解释力方面的性能表现,有效提高因子间的可比性与模型输出的稳定性。通过上述优化,OPGD 模型能够以数据驱动的方式选择最具代表性的分类结构,从而增强模型对生态质量变化驱动因子的识别能力。这尤其适用于黄河乌海段汇水流域这种自然因素复杂(地形、气候)与人类活动高度集聚(资源开发、城镇化)并存的区域,有效避免了传统经验分级法对复杂驱动机制解释力的扭曲。

2　结果与分析

2.1　CHEQ 指数的时空变化分析

由图 1 可知,2001—2024 年 CHEQ 指数整体呈周期性显著波动下降趋势,年际变化率为 −0.000 4/a($p<0.05$)。具体而言,CHEQ 指数变化表现为每 5 a 一个波动周期,每个周期均呈先上升后下降趋势。CHEQ 指数在 2008 年达到峰值(0.21),2013 年为谷值(0.16)。总体来看,退化区域面积比例为 73.8%,主要分布于汇水流域中部、东南部。

由图 2—3 可知,研究区 CHEQ 指数总体呈西北低,东南高空间分布格局,黄河及支流段边缘区域 CHEQ 指数处于最高水平(0.48)。在变化趋势上,汇水流域生态环境质量以不显著退化趋势为主,面积比例达 33.00%,主要集中于毛乌素沙地鄂托克旗境内。改善区域总面积比例为 24.85%,其中极显著和不显著改善区域比例分别为 10.40% 和 9.54%,集中分布于黄河取水口处和东南部边缘。这种空间分异与区域自然地理条件和生态修复工程的空间差异高度吻合。

由图 4 可知,2001—2024 年黄河乌海段汇水流域 CHEQ 指数稳定性总体呈高低波动并存,适中波动比例高的空间分布特征。空间变化格局为最低波动区($0\leqslant C_v\leqslant 0.05$)与较低波动区($0.05< C_v\leqslant 0.09$)占汇水流域总面积的 20.20%,生态环境相对稳定,干扰较弱,集中分布于黄河及支流段边缘区域、阿拉善左旗东部、鄂托克旗中南部等地区;适中波动区($0.09< C_v\leqslant 0.18$)面积比例为 67.16%,主要分布于汇水流域腹地及次要支流区域,说明该区域生态系统具有调节能力与稳定性,但对外界干扰仍保持敏感度;较高波动区($0.18< C_v\leqslant 0.38$)与最高波动区($C_v>0.38$)占汇水流域总面积的 12.64%,明显集中于乌海市城区周边、乌达区、海勃湾区、阿拉善左旗东部等工业园区密集地带。

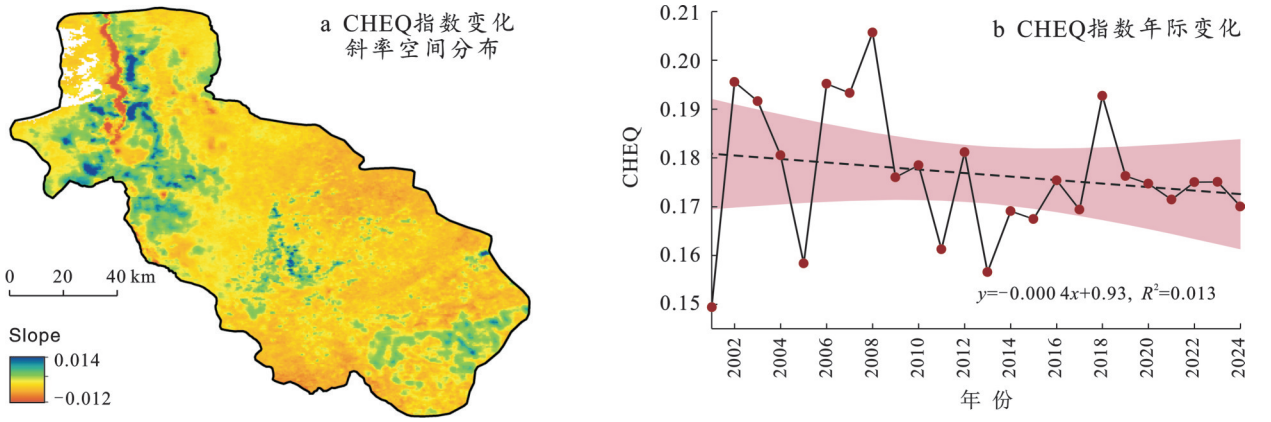

图 1 黄河乌海段汇水流域 2001—2024 年 CHEQ 指数年际变化

Fig.1 Interannual variations in CHEQ index in catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024

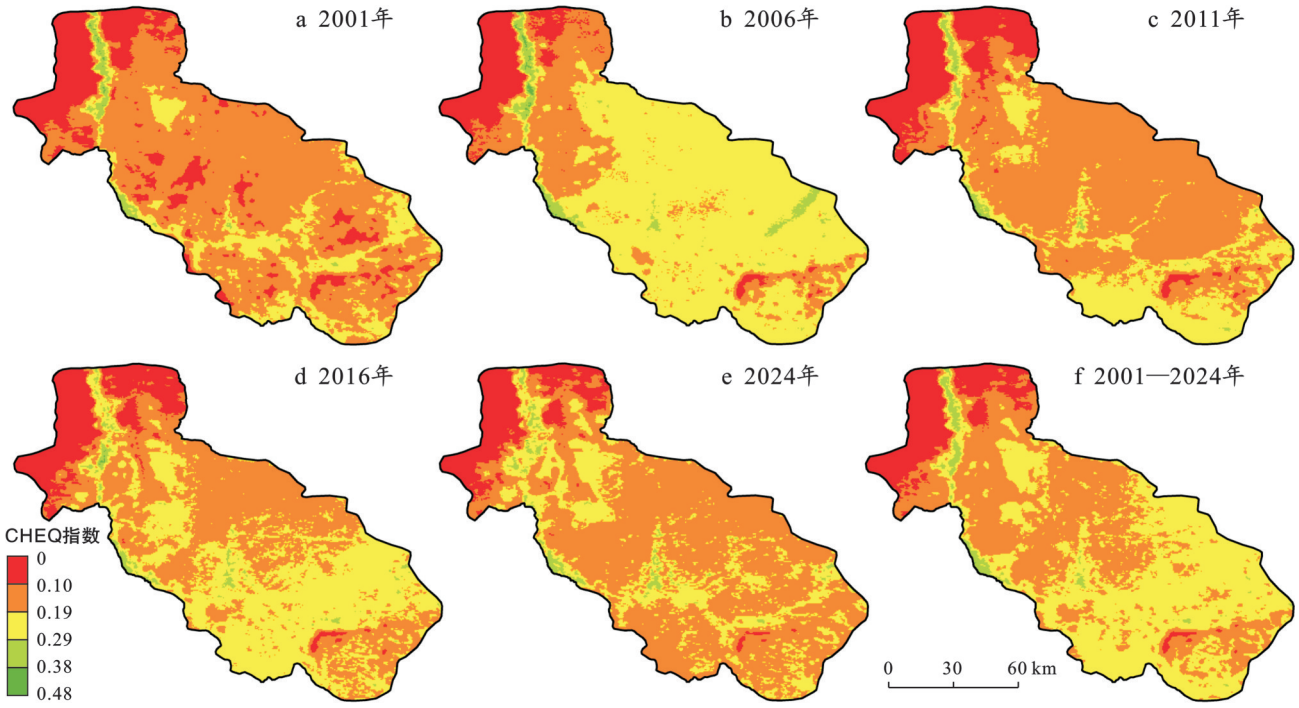

图 2 黄河乌海段汇水流域 2001—2024 年 CHEQ 指数空间分布

Fig.2 Spatial distribution of CHEQ index in catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024

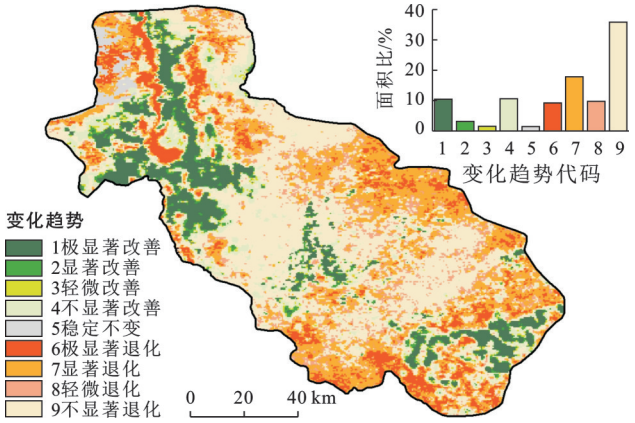

图 3 黄河乌海段汇水流域 2001—2024 年 CHEQ 指数变化趋势

Fig.3 Trends of CHEQ index in catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024

2.2 CHEQ 指数未来变化趋势预测

为进一步分析黄河乌海段汇水流域生态环境质量变化，结合 Theil-Sen Median 趋势分析和 2001—2024 年 Hurst 指数结果得到研究区生态质量状况未来变化趋势。由图 5 可知，黄河乌海段汇水流域 Hurst 指数介于 0.13～0.96，均值为 0.44，汇水流域 Hurst 指数小于 0.5 比例为 74.3%，大于 0.5 比例为 25.7%，说明该汇水流域总体变化具有反向发展特征。未来生态质量状况整体发展态势可能向良性方向发展（比例为 66.9%），其中持续改善区域占 14.8%（弱持续性改善和强持续性改善分别占 11.9% 和 3.3%），过去退化但未来变为改善趋势的区域占 52.1%（反强持续性退化和反弱持续性退化分别占

12.8%和39.2%);持续退化区域占15.0%(强持续性退化占1.2%,弱持续性退化占13.8%),过去有所改善但未来退化区域占18.65%(反强持续性改善占2.9%,反弱持续性改善占18.0%)。持续性改善区域主要分布在河流两侧,呈斑块状或带状分布,这些区域人为活动较少,生态系统恢复能力强。持续退化区域主要分布在乌海市海勃湾区、乌达区、海南区和阿拉善左旗东北部,这些区域高度城镇化、生态系统干扰强烈。过去退化未来改善趋势的区域分布没有明显空间规律,主要分布在鄂托克前旗北部和鄂托克旗中南部,植被覆盖类型为风蚀裸地、低覆盖草地或次生植被区。过去改善未来退化趋势的区域主要位于海南区-海勃湾区农牧交错带、乌兰布和沙漠东缘接触带、鄂托克旗南缘台地-河谷过渡区、鄂托克前旗北部沙漠边缘耕区和主河道两岸部分冲积扇前缘。

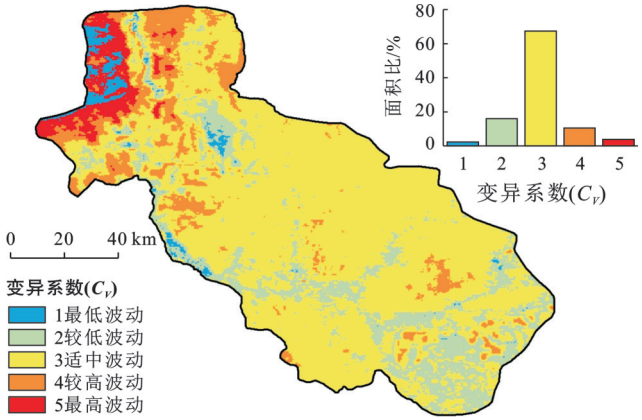

图 4　黄河乌海段汇水流域 2001—2024 年 CHEQ 指数变异程度

Fig.4　Coefficient of variation of CHEQ index in catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024

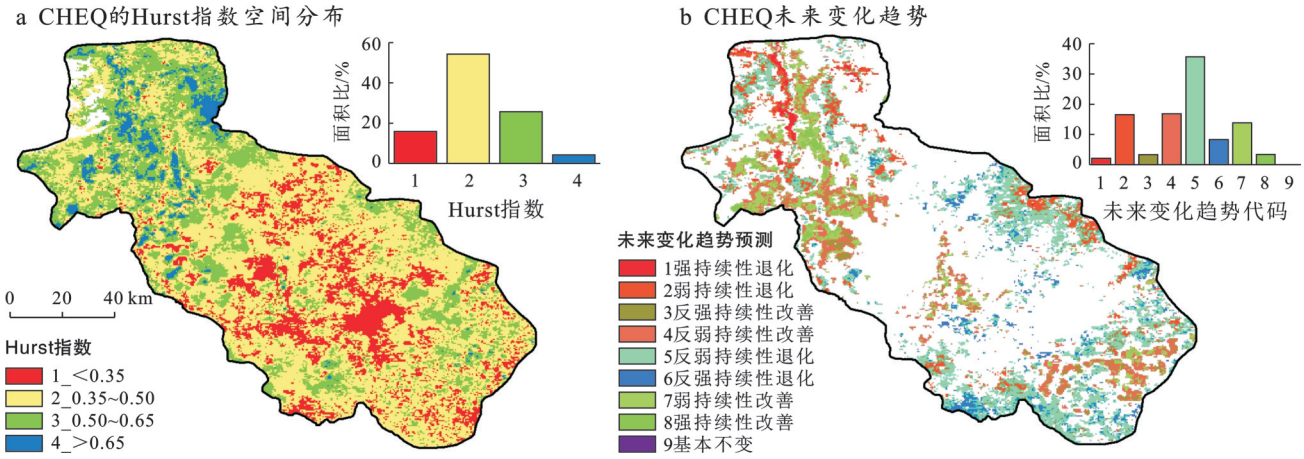

图 5　黄河乌海段汇水流域 2001—2024 年 CHEQ 指数的 Hurst 指数及未来变化趋势

Fig.5　Hurst index and future trends of CHEQ index in catchment area of Wuhai section of Yellow River from 2001 to 2024

2.3　CHEQ 指数驱动因子探测

驱动因子的数据分布特征与因子间的相关性,是进行地理探测器分析的必要前提。理解各因子的分布形态有助于揭示其空间异质性的来源,而分析因子间的相关性则旨在识别驱动因子间的多重共线性问题,这对于后续模型构建和结果解释至关重要。为综合展示各因子分布并探究其相关性,本研究绘制了驱动因子配对图(图6)。图6的对角线为各因子的KDE核密度估计图用于展示其分布形态,非对角线为每两个因子间的散点图用于揭示其相关性。其中TEM,PRE,DEM近似单峰对称,呈近正态;SLOPE与ET多峰,指示地形与下垫面强烈异质性;HF,NL,POP,GDP原始均为强右偏(L型),lg(x+1)变换后(如lgPOP,lgGDP)仍在低值区高度集中,反映人类活动与经济在研究区显著集聚。社会经济因子内部相关极强,lgGDP与logNL几乎线性正相关,lgPOP与二者亦一致,提示多重共线性并共同表征城市化/人类活动强度;自然因子中TEM与DEM显著负相关,HF与lgPOP,lgGDP相关性较高,而PRE与SLOPE等相关较弱。总体上,研究区驱动因子兼具强空间异质与显著共线性。为避免解释偏误,后续采用对共线性较稳健的最优地理探测器模型,评估各因子对CHEQ的影响。

单因子探测结果基于最优参数地理探测器的单因子探测结果(图7),单因子 q 值总体介于0.187 0~0.643 1,其中自然因素因子ET,PRE,SLOPE,DEM,TEM的解释力均大于0.15(0.150 6~0.259 3),整体高于大部分人类活动因子。POP的 q 值为0.189 1,仅次于ET和PRE,表明人口集聚对生态环境质量具有较强的空间解释力,而GDP,HF和NL的单因子解释力相对较低(0.014 5~0.131 3),更多通过与其他因子交互作用发挥影响。影响黄河乌海段

CHEQ指数空间分异的驱动力因素可分为主导驱动力和次要驱动力两类。主导驱动力因子(q≥0.50)包括：人口密度(POP，q=0.64)、蒸散发(ET，q=0.59)、高程(DEM，q=0.51)和气温(TEM，q=0.59)。其中，人口密度对空间分异的解释力最强，是核心人为驱动力。次要驱动力因子(q<0.50)中，人类足迹(HF，q=0.41)和坡度(SL，q=0.44)的解释力相对较高，而夜间灯光(NL，q=0.19)和GDP(q=0.30)的解释力较低。这表明生态环境质量主要受人口、气候和地形条件的约束。

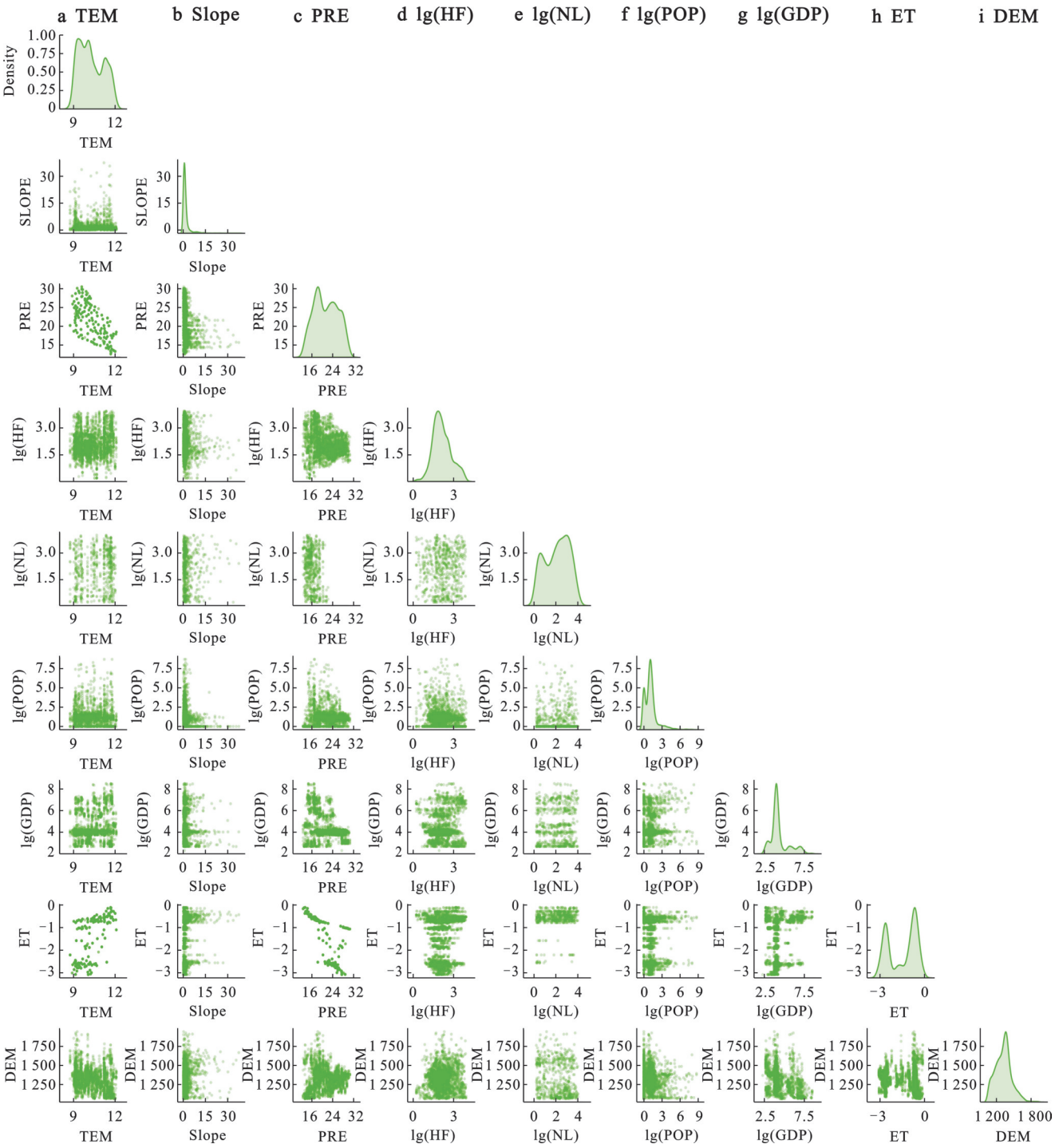

图6 黄河乌海段汇水流域各驱动因子分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of driving factors in catchment area of Wuhai section of Yellow River

黄河乌海段CHEQ指数的空间异质性主要由因子间的协同增强效应主导(图8)。交互解释力最高的组合集中在人类活动系统内部：GDP与NL的交互作用[q(GDP∩NL)=0.912 0]和HF与NL的交互作用[q(HF∩NL)=0.872 3]，表明经济发展与城镇化进程呈现出高度耦合与增强效应。其次，自然因素

中气温(TEM)与高程(DEM)的交互作用解释力较高[q(TEM∩DEM)=0.684 1],揭示了由海拔梯度决定的水热条件是控制CHEQ指数空间分异的主导性自然驱动力。此外,地形因素(Slope)与城镇化(NL)的交互作用[q(Slope∩NL)=0.452 1]也显著引导了人类活动的空间集聚。总体来看,CHEQ指数的空间分异是地形及其衍生的气候梯度严格约束,并引导人类活动系统内部高度耦合的诸要素协同作用的综合结果。

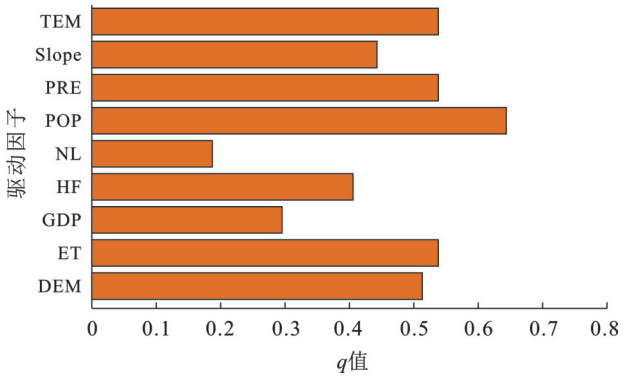

图 7　黄河乌海段汇水流域地理探测器单因子探测结果

Fig.7　Single-factor detection results using geodetector in catchment area of Wuhai section of Yellow River

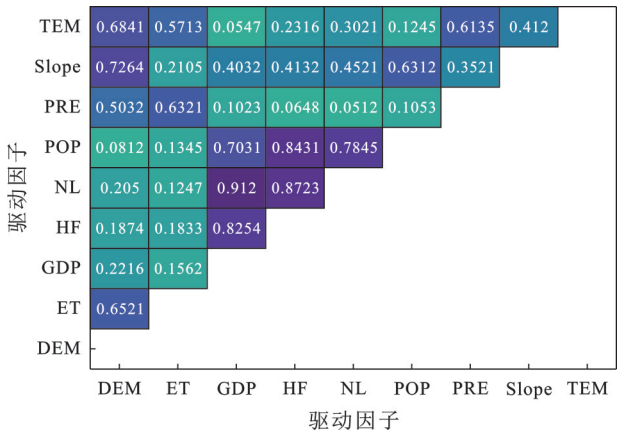

图 8　黄河乌海段汇水流域地理探测器交互探测结果

Fig.8　Interactive detection results using geodetector in catchment area of Wuhai section of Yellow River

3　讨　论

3.1　CHEQ 指数周期性波动与区域政策/经济的关联分析

本研究对黄河乌海段汇水流域CHEQ指数的深入分析,为理解资源型流域生态环境演变机制提供了重要依据,其结果与现有研究既存在共性又展现出独特性。在时空变化特征方面,2001—2024年CHEQ指数呈现周期性波动下降趋势,与鄂尔多斯高原、晋陕蒙接壤区等典型资源型地区的生态退化趋势相呼应[24]。这种波动下降趋势背后,煤炭资源开发引发的土地塌陷、植被破坏以及水资源过度利用等问题是主要诱因。尽管CHEQ指数年际变化率仅为−0.000 4/a,但在0~1标准化指数体系中,这一量级的线性趋势已通过显著性检验,并在73.8%的退化面积和明显的空间集聚背景下,表现为“总体降幅有限但退化范围较广、波动频繁”的演变特征,更适合作为区域生态环境动态监测的长期背景信号,而不是简单的“可以忽略”的数值。本研究发现的“每5 a一个波动周期”这一特征,是该资源型流域生态系统对外部多重扰动敏感性的突出体现。这种周期性波动,不仅受制于煤炭资源开发强度,水资源过度利用等主要人为诱因,更深受区域政策调整与经济发展阶段变迁的共同影响。从政策层面看,国家及地方政府在资源型地区实施的生态保护与修复政策(如“退耕还林还草”“三北防护林建设”)往往具有阶段性目标与资金支持周期(通常以5 a为一个实施评估单元)。这可能导致生态质量在政策推动初期改善显著,随后随着执行强度减弱,出现反弹现象。从经济演变看,资源主导型经济结构中,煤炭、化工等行业周期性波动显著,对生态环境的影响亦呈周期性起伏。因此,CHEQ指数的周期性波动可视为区域政策强度、经济波动及气候异常共同作用的复合结果,反映了资源型流域生态环境对外部扰动的敏感性与恢复滞后性。以煤炭开采为例,大规模的露天开采和地下采掘不仅直接损毁地表植被,还导致地下水位下降,进而引发地表植被退化,削弱生态系统的自我修复能力[25]。这一现象不仅受自然生态过程驱动,更深受区域政策调整与经济发展阶段变迁的共同影响。从政策层面看,自2000年以来,国家及地方政府在资源型地区相继实施一系列生态保护与修复政策,如“退耕还林还草”“京津风沙源治理工程”“三北防护林建设”等。这些政策往往具有阶段性目标与资金支持周期,通常以5 a为一个实施评估单元,这可能导致生态质量在政策推动初期改善显著,而后随着政策执行强度减弱或资金投入减少出现生态反弹现象。经济演变阶段同样对CHEQ指数波动产生重要影响。在流域内,资源主导型经济结构在较长时间内主导区域发展节奏,煤炭、化工、有色金属等行业周期性波动显著,对生态环境影响亦呈周期性起伏。例如,2008年前后国家加大基础设施建设投资,带动资源开发与工业扩张,虽然伴随一定的生态补偿投入,但产业扩张对土地、水资源和生态系统的压力最终导致CHEQ指数再次下滑。因此,可以认为CHEQ指

数的周期性波动是区域政策强度、经济波动及气候异常共同作用的复合结果，反映了资源型流域生态环境对外部扰动的敏感性与恢复滞后性。

3.2 生态环境质量的空间分异格局

在空间分布上，CHEQ指数呈现西北低东南高的格局，这与流域内自然地理条件和人类活动强度的空间分异高度契合。西北部毛乌素沙地地区，由于地处干旱半干旱气候区，降水稀少且土壤质地疏松，植被稀疏，生态系统极为脆弱[26]。在气候变化与人类过度放牧、垦殖的双重作用下，土地沙化、水土流失问题加剧，生态环境持续退化。而东南部靠近黄河及支流区域，凭借较好的水源条件，植被覆盖率较高，且近年来实施的退耕还林还草、湿地保护等生态修复工程成效显著，生态环境得以改善。值得注意的是，城市周边及工业园区密集地带呈现高波动特征，反映出工业化、城镇化进程中高强度的人类活动对生态环境的剧烈干扰。例如乌海市城区及周边区域，工业生产、交通建设和居民生活等活动产生的“三废”排放、土地利用方式转变，导致生态系统稳定性降低，生态环境质量波动剧烈[27-29]。

3.3 生态环境质量的驱动机制及其政策启示

未来趋势预测结果显示，黄河乌海段汇水流域生态质量虽有向良性发展的潜力，但仍面临严峻挑战。持续退化区域集中于高度城镇化地区，这表明城市扩张、工业集聚带来的生态压力短期内难以缓解。而过去退化未来改善区域的分布无明显空间规律，可能与未来生态修复工程的不确定性、气候变化的复杂影响以及土地利用方式的动态调整有关。对于驱动因子，人口密度成为影响CHEQ指数空间分异的首要因素，这意味着人口的集聚程度直接关系到资源消耗强度、土地利用变化幅度和生态干扰程度[30]。气候因子中，降水和气温通过影响植被生长、土壤水分平衡等生态过程，对生态环境产生基底性影响[31]。地形因子则通过塑造不同的微地形和生态位，间接影响人类活动的空间布局和资源开发利用方式[32]。交互探测结果进一步揭示了各因子间的复杂关系，为区域治理提供了精细化依据。OPGD模型精准捕捉到：①地形因子与人类活动（如GDP，NL）呈强负向协同，表明地形通过塑造资源可及性和土地适宜性，严格限制了人类活动的空间拓展，促使人口和产业向自然条件较好的河谷低地集聚。②经济（GDP）与基础设施（NL）指标的高度耦合（q值极高），反映了工业化和城镇化进程在空间上相互促进、协同发展的特点，这在特定区域显著放大了生态足迹。③温度与高程的极强交互作用揭示了由海拔梯度决定的水热条件是控制CHEQ指数空间分异的主导性自然驱动力。这些复杂的交互作用机制，是传统单因素或线性方法难以识别的，证明了OPGD方法在本研究中的不可替代性，也为区域生态保护规划中充分考虑各因子的协同效应提供了科学依据[33-35]。这些复杂的交互作用机制，为区域生态环境治理带来了挑战，未来需在生态保护规划中充分考虑各因子的协同效应，制定差异化、精细化的生态修复策略，实现生态、经济与社会的可持续发展。

3.4 研究局限与未来展望

尽管本研究在多维度、多尺度下探讨了黄河乌海段汇水流域生态质量变化特征及其驱动机制，但仍存在以下局限：首先，采用CHEQ指数作为遥感表征，能够综合反映绿度、湿度、热度和干度等生态状态，但对生物多样性、土壤理化退化和生态过程强度等微观过程的直接刻画有限。未来将引入NDVI，NPP、降水与气温、夜间灯光和人口密度，地表不透水率等开展一致性和稳健性检验，增强结果的可靠性和可解释性。其次，驱动因子的选择虽兼顾自然与人为因素，但对于政策干预强度、产业结构变动等体制性变量的考虑仍不充分，未能全面捕捉人类制度与生态变化之间的深层关联。此外，本研究使用的OPGD为静态模型，难以刻画驱动机制的时序演化与反馈机制。未来研究可引入多时相交互建模技术，更深入刻画生态系统变化的动态驱动过程，并推动遥感、生态模型与政策分析的深度融合。此外，受限于CHEQ指数高分辨率数据集的可用年限（2001—2024年），本研究的时间序列未能涵盖如“退耕还林（草）”工程实施初期等重大的生态事件。虽然确保了数据的精度和可比性，但也限制了对该区域自1970年代以来长周期生态环境演变历史的全面认识。未来研究可引入多时相交互建模技术（如时空贝叶斯网络、因果推理框架等），更深入地刻画生态系统变化的动态驱动过程，并尝试结合历史资料或更早期低分辨率遥感数据进行长时序的补充分析。

4 结 论

2001—2024年黄河乌海段汇水流域CHEQ指数整体呈周期性波动下降趋势，年际变化率为−0.000 4/a。这种周期性波动特征与区域资源型经济波动及生态政策的阶段性实施存在显著的复合关联。空间上，CHEQ指数呈现西北低东南高格局，黄河及支流边缘区域生态质量最优，而工业园区密集地带波动剧烈。基于最优参数地理探测器（OPGD）

的深度解析,本研究揭示了CHEQ指数空间分异的复杂驱动机制。单因子探测表明,人口密度(q=0.64)是影响生态环境质量的核心人为驱动力,气候因子和高程等地形因子作用显著。交互探测进一步揭示了因子间的协同增强效应:地形因子与人类活动呈强负向协同,经济与基础设施指标高度耦合(如GDP∩NL交互解释力达0.912 0),共同决定了CHEQ指数的空间格局。

本研究通过CHEQ指数长时序监测和OPGD优化解析的集成应用,为资源型脆弱生态区的生态环境演变机制提供了新的认识。面向未来,该流域生态保护应在继续推进生态修复工程的基础上,针对持续退化区域(集中在高度城镇化地区),重点采取基于协同驱动机制的差异化策略。建议加强对人口集聚和高耦合经济活动的生态环境监管,并充分考虑地形对人类活动和气候的基底约束,以促进区域生态环境向良性可持续方向发展。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 孙维婕,何璐,于强,等.2010—2020年陕西省神木市生态环境质量时空演变及其驱动因素[J].水土保持通报,2024,44(1):284-292.
Sun Weijie, He Lu, Yu Qiang, et al. Spatial-temporal evolution of ecological environmental quality and driving factors in Shenmu City of Shaanxi Province from 2010 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1):284-292.

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

[4] 叶博文,孙标,史小红,等.2000—2021年锡林郭勒草原生态环境质量变化及其驱动因素[J].水土保持通报,2024,44(1):271-283.
Ye Bowen, Sun Biao, Shi Xiaohong, et al. Quality change and driving factors of grassland ecological environment in Xilingol League from 2000 to 2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):271-283.

[5] 朱兴林,司建华,王军德,等.疏勒河流域生态环境质量评价及驱动机制[J].科学技术与工程,2025,25(25):10964-10973.
Zhu Xinglin, Si Jianhua, Wang Junde, et al. Evaluation of ecological environment quality and driving mechanism in Shule River basin [J]. Science Technology and Engineering, 2025,25(25):10964-10973.

[6] Xu Dong, Yang Feng, Yu Le, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,321:128948.

[7] Liang Lifeng, Song Yuexiang, Shao Zhenfeng, et al. Exploring the causal relationships and pathways between ecological environmental quality and influencing factors: A comprehensive analysis [J]. Ecological Indicators, 2024,165:112192.

[8] 张睿,刘修国,徐栋,等.2001—2019年洞庭湖流域生态环境质量时空变化及其影响因素[J].测绘通报,2023(2):1-8.
Zhang Rui, Liu Xiuguo, Xu Dong, et al. Temporal and spatial changes of eco-environmental quality and its influencing factors in the Dongting Lake basin from 2001 to 2019 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(2):1-8.

[9] 付刚,李俊生,齐月,等.面向城市群的黄河流域生态脆弱性研究[J].环境科学研究,2025,38(1):125-138.
Fu Gang, Li Junsheng, Qi Yue, et al. Research on ecological vulnerability of the Yellow River basin targeting urban agglomerations [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(1):125-138.

[10] 刘健松,蔡音飞,王雅茹,等.黄土高原典型矿区生态脆弱性时空特征与驱动分析[J].水土保持研究,2025,32(4):217-226.
Liu Jiansong, Cai Yinfei, Wang Yaru, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics and driving factors of ecological vulnerability in a typical coal mining area on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(4):217-226.

[11] Lu Fangyuan, Zhang Chen, Cao Haoyu, et al. Assessment of ecological environment quality and their drivers in urban agglomeration based on a novel remote sensing ecological index [J]. Ecological Indicators, 2025,170:113104.

[12] 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 Gaoqi, Li Ziqiang, Zhao Yong, 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.

[13] 郑彩之,边振,桑国庆.基于遥感生态指数的济南市生态环境质量动态监测[J].生态科学,2024,43(5):

175-182.
Zheng Caizhi, Bian Zhen, Sang Guoqing. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Jinan based on remote sensing ecological index [J]. Ecological Science, 2024,43(5):175-182.

[14] 朱兴林,司建华,王军德,等.基于地理探测器的洮河流域生态环境质量时空演变及驱动力分析[J].水利水电技术,2025,56(1):74-84.
Zhu Xinglin, Si Jianhua, Wang Junde, et al. Analysis of spatial and temporal evolution of ecological environment quality and driving force in Taohe River basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1):74-84.

[15] 范毅宁,廖梓龙,龙胤慧,等.内蒙古阴山北麓草原植被净初级生产力变化特征及其气候驱动力[J].水利水电技术,2024,55(8):38-50.
Fan Yining, Liao Zilong, Long Yinhui, et al. Characteristics of vegetation net primary productivity change and its climatic driving forces in the Yinshanbeilu steppe, Inner Mongolia [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(8):38-50.

[16] 李晓健,马林兵.基于参数最优地理探测器的粤东北耕地非农化特征与影响因素研究[J].水土保持通报,2024,44(5):100-112.
Li Xiaojian, Ma Linbing. Characteristics and influencing factors of farmland conversion to non-agricultural uses in northeast Guangdong Province based on optimal parameter geographic detector [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(5):100-112.

[17] 时凯,闫丰,王宗超,等.基于最优参数地理探测器的京津冀植被覆盖演化多元驱动力解析[J].环境科学,2025,46(4):2337-2351.
Shi Kai, Yan Feng, Wang Zongchao, et al. Analysis of multiple drivers of fractional vegetation cover evolution in Beijing, Tianjin, and Hebei based on the optimal parameters geographical detector [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2337-2351.

[18] 田雅楠,刘晓民,刘廷玺,等.黄河乌海段汇水流域水源涵养与景观格局响应关系[J].北京师范大学学报(自然科学版),2025,61(6):924-932.
Tian Yanan, Liu Xiaomin, Liu Tingxi, et al. Response relationship between water conservation and landscape pattern in the Wuhai section catchment of the Yellow River [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2025,61(6):924-932.

[19] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends: Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series [J]. Remote Sensing of Environment, 2012,119:131-147.

[20] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.

[21] 宋心馨,张守志,王淑琪,等.基于PLUS模型的图们江流域生态系统服务价值情景模拟及驱动因素研究[J].水利水电技术,2025,56(3):186-201.
Song Xinxin, Zhang Shouzhi, Wang Shuqi, et al. Research on scenario simulation and driving factors of ecosystem service value in Tumen River basin based on PLUS model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025,56(3):186-201.

[22] Wang Sinan, Wang Wenjun, Wu Yingjie, et al. Effects of a changing climate and anthropogenic impacts on net primary production in Yinshanbeilu, Inner Mongolia, China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023,102:107185.

[23] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. GIScience & Remote Sensing, 2020,57(5):593-610.

[24] 张京新,谷雨鑫,沈佳琦,等.黄河流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J].环境科学,2025,46(2):956-971.
Zhang Jingxin, Gu Yuxin, Shen Jiaqi, et al. Analysis of spatiotemporal changes and driving factors of ecological environment quality in the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2025,46(2):956-971.

[25] 魏之首,关燕宁,蔡丹路,等.基于改进型遥感生态指数的生态系统服务价值评估方法[J].地球信息科学学报,2024,26(7):1763-1778.
Wei Zhishou, Guan Yanning, Cai Danlu, et al. Assessing ecosystem service value with modified remote sensing ecological index [J]. Journal of Geo-Information Science, 2024,26(7):1763-1778.

[26] Zhang Xiaoyong, Jia Weiwei, Lu Shixin, et al. Ecological assessment and driver analysis of high vegetation cover areas based on new remote sensing index [J]. Ecological Informatics, 2024,82:102786.

[27] 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.

[28] Wen Chunhui, Long Tengfei, He Guojin, et al. Temporally enhanced RSEI and nighttime lights reveal long-term ecological changes and effective protection in China's inaugural National Parks [J]. Ecological Indica-

tors, 2025,170:112981.

[29] 武旭,王勃砚,任伟,等.2000—2022年黄河流域甘肃段生态环境质量与影响因素[J].应用生态学报,2025,36(2):353-364.
Wu Xu, Wang Boyan, Ren Wei, et al. Ecological environment quality and the influencing factors in Gansu section of Yellow River basin during 2000—2022 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025,36(2):353-364.

[30] 叶博文,孙标,史小红,等.巴彦淖尔市土地利用变化及其对生态环境质量的影响[J].环境科学,2024,45(12):6899-6909.
Ye Bowen, Sun Biao, Shi Xiaohong, et al. Land use changes and its impact on ecological environment quality in Bayannur City [J]. Environmental Science, 2024,45(12):6899-6909.

[31] 滑永春,孙小添,白澳,等.基于遥感黄河流域内蒙古段十大孔兑生态环境质量监测评价[J].水土保持研究,2022,29(5):199-205.
Hua Yongchun, Sun Xiaotian, Bai Ao, et al. Monitoring and evaluation of ten Kongdui eco-environmental quality changes in Inner Mongolia section of the Yellow River basin based on remote sensing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(5):199-205.

[32] 周玲美,王世航.内蒙古杭锦旗生态环境时空变化的遥感监测与评价[J].应用生态学报,2020,31(6):1999-2006.
Zhou Lingmei, Wang Shihang. Remote sensing monitoring and evaluation of spatial and temporal changes of ecological environment in Hangjin Banner, Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(6):1999-2006.

[33] 朝力格尔,兴安,阿如旱,等.基于改进型遥感生态指数的干旱区生态环境评价:以阴山北麓内蒙古武川县为例[J].应用生态学报,2024,35(7):1907-1914.
Chaoligeer, Xing An, A Ruhan, et al. Assessment of ecological environment in arid region based on the improved remote sensing ecological index: A case study of Wuchuan County, Inner Mongolia at the northern foot of Yin Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(7):1907-1914.

[34] 董海清.乌海能源利民煤矿生态矿山建设研究与实践[J].中国煤炭,2023,49(S1):88-92.
Dong Haiqing. Concrete practice of ecological construction in Limin Coal Mine of Wuhai Energy Group [J]. China Coal, 2023,49(S1):88-92.

[35] 郭山川,汤傲,李效顺,等.融合主被动遥感的乌海矿区土地损伤测度[J].生态与农村环境学报,2018,34(8):678-685.
Guo Shanchuan, Tang Ao, Li Xiaoshun, et al. Measurement of land damage based on active and passive remote sensing in Wuhai mining area [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018,34(8):678-685.

(上接第446页)

[25] Chen Hao, Yang Ni, Song Xuanhua, et al. A novel agricultural drought index based on multi-source remote sensing data and interpretable machine learning [J]. Agricultural Water Management, 2025,308:109303.

[26] Xu Lichang, Ning Shaowei, Xu Xiaoyan, et al. Comparative analysis of machine learning models and explainable AI for agriculture drought prediction: A case study of the Ta-pieh Mountains [J]. Agricultural Water Management, 2024,306:109176.

[27] 方贺,樊高峰,王阔,等.2000—2022年长江三角洲地区植被净初级生产力时空演化特征及驱动因素[J].环境科学,2025,46(9):5788-5799.
Fang He, Fan Gaofeng, Wang Kuo, et al. Spatiotemporal variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in the Yangtze River delta from 2000 to 2022 [J]. Environmental Science, 2025,46(9):5788-5799.

[28] 方贺,王阔,李正泉,等.长江三角洲地区植被生态质量动态变化特征[J].中国环境科学,2025,45(8):4513-4523.
Fang He, Wang Kuo, Li Zhengquan, et al. Dynamic characteristics of vegetation ecological quality in the Yangtze River Delta[J].China Environmental Science, 2025,45(8):4513-4523.

[29] 刘泽群.基于多源数据融合的长三角沿海城市植被净初级生产力估算[D].江苏 南京:南京师范大学,2021.
Liu Zequn. Estimation of vegetation net primary productivity in coastal cities of Yangtze River delta based on multi-source data fusion [D]. Nanjing, Jangsu: Nanjing Normal University, 2021.

[30] 张砚婷,汤弟伟,陶文,等.长三角城市群植被总初级生产力时空变化及其影响因素[J].湖北民族大学学报(自然科学版),2025,43(4):593-600.
Zhang Yanting, Tang Diwei, Tao Wen, et al. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation gross primary productivity in the Yangtze River delta urban agglomeration [J]. Journal of Hubei MinZu University (Natural Sciences Edition), 2025, 43(4): 593-600.