

多源数据视角下黄河流域城市群生态环境与经济高质量发展耦合协调时空演变及驱动机制

崔月艳*, 吕盛梅#

青海民族大学数学与统计学院, 青海 西宁

收稿日期: 2025年12月24日; 录用日期: 2026年2月3日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

黄河流域作为中国重要的生态屏障和经济地带, 面临着区域发展不平衡、生态环境脆弱等挑战。本文旨在探究流域城市群生态与经济系统协同发展关系及其时空演变的驱动机制。基于2011~2023年黄河流域主要城市的面板数据, 综合运用夜光遥感、NDVI植被指数、地形高程等多源空间数据和传统统计数据构建综合评价指标体系, 采用耦合协调度模型、莫兰指数及地理探测器模型进行分析。研究结果表明: (1) 时序上, 黄河流域整体生态经济耦合协调度呈现稳步上升趋势, 但多数城市仍处于濒临失调向勉强协调的过渡阶段。(2) 空间分布上, 耦合协调度呈现下游大于中游大于上游的阶梯状特征, 且全局莫兰指数显示城市协调水平存在显著的正向空间自相关性。(3) 驱动机制上, 地理探测器结果显示, 地方政府财力和经济活力是影响耦合协调度空间分异的主导因素, 人口负荷和自然约束则是重要的自然与社会约束条件。(4) 交互作用探测表明, 任意双因子的交互作用均显著强于单因子作用, 特别是社会经济要素与自然地理条件的协同优化对提升区域整体协调水平具有关键作用。本研究解释了多重约束下黄河流域生态经济协同发展的复杂机制, 能够为制定差异化的区域发展策略提供科学依据。

关键词

黄河流域, 生态保护与高质量发展, 耦合协调度, 时空演变, 多源数据

*第一作者。

#通讯作者。

Spatiotemporal Evolution and Driving Forces of Coupling Coordination between Environment and High-Quality Economic Development in Yellow River Basin City Clusters from a Multi-Source Data

Yueyan Cui*, Shengmei Lyu#

School of Mathematics and Statistics, Qinghai Minzu University, Xining Qinghai

Received: December 24, 2025; accepted: February 3, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

As a vital ecological barrier and economic zone in China, the Yellow River Basin faces challenges including regional development imbalances and ecosystem fragility. This study investigates the synergistic relationship between ecological and economic systems in city cluster within the basin, examining the spatiotemporal evolution and its driving forces. Using panel data from major basin cities (2011~2023), we constructed a comprehensive evaluation index system integrating multi-source data with traditional statistics, including nighttime light remote sensing, NDVI vegetation indices, and terrain elevation. Analyses employed coupling coordination degree models, Moran's I index, and geographic detector models. Key findings indicate: (1) Temporally, the basin's overall eco-economic CCD shows steady improvement, though most cities remain transitional between near-disharmony and basic coordination. (2) Spatially, CCD exhibits a downstream > middle > upstream gradient, with global Moran's I confirming significant positive spatial autocorrelation. (3) Geodetector results identify local fiscal capacity and economic vitality as primary drivers of CCD variation, while population pressure and natural constraints are key limiting factors. (4) Interaction detection reveals that synergistic effects between any two factors consistently exceed their individual impacts. This demonstrates that coordinated optimization of socioeconomic elements and natural geographic conditions is particularly crucial for enhancing regional coordination. Our study elucidates the complex mechanisms driving eco-economic synergy in the Yellow River Basin amid multiple constraints, providing a scientific basis for formulating differentiated regional development strategies.

Keywords

Yellow River Basin, Ecological Conservation and High-Quality Development, Coupling Coordination Degree, Spatiotemporal Evolution, Multi-Source Data

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济发展的重点区域,在国家经济发展与生态安全格局中具有至关重要的战略地位。然而,该流域长期面临着区域发展不平衡与生态环境脆弱的双重挑战。这种不平衡不仅制约了流域整体经济效能的提升,也对区域可持续发展构成了严峻压力。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略,科学评估流域内生态环境保护与经济高质量发展的协同关系,解决两者协同共生的难题已经成为关注的焦点。

城市作为区域经济发展的单元,其经济活动的协同效应对于促进区域一体化发展具有重要意义。黄河流域城市群通过经济与环境的协同发展,有望实现资源优化配置,提升区域整体竞争力。然而,受地理环境、资源禀赋与政策导向等因素影响,城市群内部在发展水平、产业结构与生态承载力方面存在显著异质性。因此,系统研究黄河流域城市间经济协同发展机制,对于推动区域均衡发展及可持续治理具有重要的理论与现实价值。

近年来,对于黄河流域生态环境保护与经济高质量发展的关系,学者们进行了大量有效的探究。当前研究主要围绕黄河流域高质量发展的时空演变、生态保护与经济发展的耦合协调关系以及驱动机制等方面展开。

在高质量发展的时空演变方面,赵煜和毛雪冰[1]通过构建评价指标体系,发现黄河下游地区的高质量发展水平整体优于中上游地区,且空间结构呈现“核心-次边缘-边缘”的分布特征。马海涛和徐植钊[2]的研究也表明黄河流域城市群高质量发展水平存在显著的区域差异,且核心城市的发展水平显著高于外围城市。岳立和薛丹[3]关注绿色发展效率,指出黄河流域绿色发展效率整体水平较低,但具有上升的趋势,且区域差异鲜明,表现出上游最高,下游次之,中游最低的态势。对于生态保护与经济发展的耦合协调关系,许多研究表明两者之间存在着复杂的交互影响。主要表现为黄河流域城市群的经济水平有较大的提升,但是在生态建设方面进程缓慢,两者的耦合度呈现波动上升趋势,且上游城市群的协调度低于中下游[4]-[6]。陈景华等[7]进一步表明,生态保护与经济高质量发展之间存在显著的相互促进关系,且耦合协调水平在空间上呈现明显的分异特征。任保平[8]认为尽管经济、产业发展、生态三者的综合水平总体平稳,但是耦合协同严重失调,总体还未达到协同发展状态。另外,赵建吉[9]研究发现新型城镇化与生态耦合水平呈现下降的趋势。在驱动因素方面,研究者采用多种方法探索。路昌等[10]利用地理探测器的方法进行分析,发现经济结构、科技支出以及粮食产量等因素对黄河中下游城市的高质量发展与生态环境协同效应的影响显著。康艳青等[11]的研究显示,贸易开放程度、经济发展水平、产业结构等多种因素共同作用于耦合协调水平,且作用程度在地区上存在差异。赵敏[12]的研究指出,每万人拥有医生数和人均专利授权量逐渐成为黄河流域高质量发展系统耦合协调的新型驱动因子。此外,王松茂和牛金兰[13]指出经济因素是影响山东半岛城市群生态韧性的主要障碍。对于生态保护与高质量发展面对的难题,研究者提出了相应的建议。杨开忠和董亚宁[14]提出推进经济物质代谢转型、空间重构和创新驱动发展等策略。徐勇和王传胜[15]强调实施生态-移居-城镇化建设工程和发展新兴产业。金凤君[16]建议构建“三区七群”的协调发展格局来推动产业置换与绿色发展,并完善政策体系和考核机制。黄祖宏等[17]提议推动城市群内的产业链分工,打破行政区划限制。王芳[18]等提出黄河“几”字弯城市群要科学定位、优化发展结构。方创琳[19]强调未来城市群应以生态保护为导向,以流域一体化为主线,推进城市群在错位分工中互补协同发展。

基于以上研究,本文试图在以下方面进行拓展与深化:一是构建多源数据的综合评价体系,引入夜光遥感数据以便更加客观反映城市经济活力,并采用植被指数刻画生态;二是加入自然约束指标,充分考虑黄河流域西高东低的地理环境,将地形起伏度作为自然约束指标;三是深入探索驱动机制的交互作用,应用地理探测器模型聚焦于因子交互探测,揭示自然与社会经济要素在流域协同发展中的复杂交互

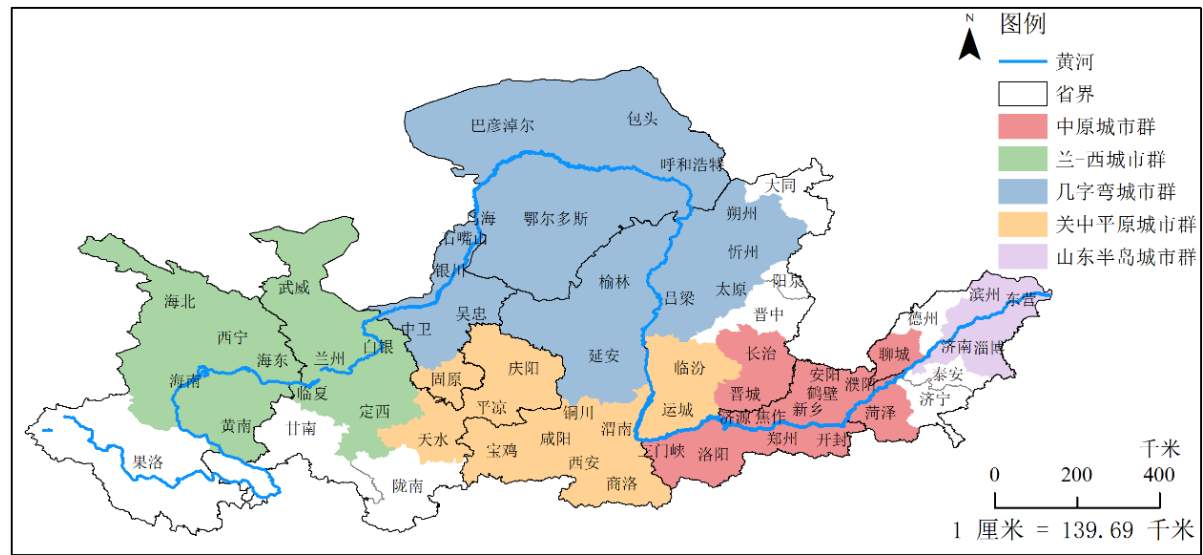
作用机制。四是从城市和城市群两个尺度进行分析, 期待能更全面、精准地揭示黄河流域经济协同发展的空间规律和生态经济互动关系, 为黄河流域生态保护和高质量发展战略的策略实施提供支撑。

2. 研究方法 with 指标体系

2.1. 研究区域

本文以黄河流域为研究区域, 该流域上游多峡谷、湖泊, 且水多沙少, 是主要清水来源区域, 此外人口密度小, 生态环境好, 但经济较为落后; 中游位于黄土高原, 该地水土流失严重, 是黄河泥沙主要来源地; 下游是华北平原, 地势多平坦, 黄河在此段落产生落差, 泥沙淤积在此, 形成“地上悬河”, 且该地以种植作物为主, 人口密集, 总体经济较好。

基于上述黄河流域在自然与社会经济方面的特点, 确定黄河流域的地级市范围以及城市群范围为黄河干流流经的城市以及距离黄河干流较近的城市, 城市群选择国家提出的城市群以及人员流动多、文化相近的城市, 则有兰-西城市群、“几”字弯城市群、关中平原城市群、中原城市群、山东半岛城市群。这五个城市群覆盖了黄河流域上中下游。具体研究区域如下图 1 所示。



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 3185 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Prefecture-level cities and city cluster in the yellow river basin
图 1. 黄河流域地级市和城市群

2.2. 指标体系与数据处理

本文所需要数据为夜光遥感数据、NDVI 植被数据、地形起伏度数据[20]、行政区划数据和社会统计数据。夜光遥感数据采用 Wu 等[21]构建的中国长时间序列 DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 数据进行跨传感器校正、饱和度校正及连续性校正。该数据有效解决了不同传感器间的参数不兼容问题, 其拟合优度在校正后均达到 0.95 以上, 均方根误差显著降低, 能准确反映黄河流域城市经济活动的连续动态变化, 具有极高的数据可靠性和可用性。各地级市的 GDP、人口密度、工业废水排放量、污水处理厂集中处理率等指标数据来源于 2011~2023 年国家统计局和各省统计年鉴。

将 NDVI 植被数据与黄河流域各省市叠加, 并计算各地级市年度植被覆盖率。对缺失数据采用线性插值进行填补, 并对所有指标进行异常值检测。对于地形起伏度数据, 使用分区统计表格, 统计每个地

级市的平均高程值。并将上述计算得到的数据与整理好的面板数据进行对齐。

构建指标体系时，各指标的量纲、数量级和作用方向存在差异，需对原始数据进行标准化处理。考虑到极值法适用范围广，能将正向指标和负向指标变换到[0, 1]区间，实现不同性质指标同度量化，且保留原始数据的相对大小关系和分布规律，为后续熵值法计算权重、构建耦合协调度模型建立数据基础，则选用极值标准化原始数据。根据各指标对经济子系统或生态子系统的发展作用方向，分为正向指标和负向指标。综合实际和理论，人口负荷、环境压力、自然约束进行负向处理，其余指标进行正向处理。

2.3. 方法论

2.3.1. 熵值法权重计算

熵值法基于数据信息客观赋权，能够有效地避免主观判断和偏好带来的偏差，提高评价结果的科学性和可靠性，且对于长时序的面板数据，能够充分利用截面和时间的信息，使得到的权重更能反映指标在整个研究中的综合重要性。且本文旨在揭示黄河流域不同城市生态、经济发展的差异性，熵值法能够准确地捕捉时空上变化显著、对系统演变具有重要驱动作用的指标。

熵值法计算的经济和生态子系统各指标权重如表 1 所示，在经济子系统中，经济规模、消费能力和政府财力占据较大的权重，产业结构占据着最小的权重，这表明经济活力和消费能力以及政府财力能体现一个城市的经济状况，更能体现城市经济现代化水平和可持续发展潜力。但在生态子系统中环境治理占据较高的比重，环境压力占据着最小的比重，这反映环境治理对生态最为重要。

Table 1. Indicator weighting for eco-economic systems

表 1. 生态 - 经济系统的指标权重

系统	一级指标	二级指标	信息熵	效用值	权重
经济子系统	经济规模	GDP	0.9356	0.0644	0.2215
	经济活力	夜光强度	0.9474	0.0526	0.1811
	产业结构	第三产业/GDP	0.9849	0.0151	0.0519
	消费能力	社会消费品零售总额	0.9198	0.0802	0.2761
	政府财力	地方一般公共预算收入	0.9217	0.0783	0.2694
生态子系统	环境状态	植被覆盖率	0.9877	0.0123	0.0957
	环境治理	生活无害化垃圾处理率	0.9969	0.0031	0.0245
		污水处理厂集中处理率	0.9122	0.0878	0.6838
	人口负荷	人口密度	0.9900	0.0100	0.0779
	环境压力	工业废水排放量	0.9952	0.0048	0.0371
	自然约束	平均高程	0.9896	0.0104	0.0810

2.3.2. 耦合协调模型

经济与生态是相互独立，相互交织的复杂系统。为此，引入耦合协调度模型，定量评价经济子系统与生态子系统之间协调发展的状况。耦合协调度模型能揭示系统间的互动关系，反映系统间的相互作用和相互影响的程度；能综合评判协同发展水平，反映系统之间的关联强度以及在发展水平上的协调异质性；能清晰地表示黄河流域各城市群在不同年度所处的协同发展阶段，为区域差异化政策制定提供直观的依据。公式为：

$$C = 2 \sqrt{\frac{U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2}} \quad (1)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (\alpha + \beta = 1, \alpha, \beta > 0) \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

其中, C 为耦合度, 位于 $[0, 1]$ 之间; U_1 、 U_2 分别为经济系统综合评价指数和生态系统综合评价指数; T 为两系统的协调指数; α 、 β 分别为两系统权重, 结合实际对黄河流域的生态和经济重视程度, 本文把生态与经济放在同等重要的位置, 则 α 、 β 都选 0.5; D 为耦合协调度, 位于 $[0, 1]$ 之间, 反映经济与生态子系统协同发展的整体水平, 值越大说明协调水平越高。

2.3.3. 空间自相关

空间自相关能够揭示地理要素属性值在空间上是否存在依赖关系。利用全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数分析黄河流域以及城市群生态经济耦合协调度的空间联系特征, 能够科学判断黄河流域城市群耦合协调度在整体上的空间分布特征; 能够动态监测黄河流域协调发展水平空间变化的趋势, 为理解区域发展的空间非均衡提供统计学证据。

(1) 全局 Moran's I 指数: 用于判断研究区域整体是否存在空间自相关, 计算公式:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (D_i - \bar{D})(D_j - \bar{D})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2} \quad (4)$$

其中, n 为城市数, D_i 、 D_j 分别为城市 i 和城市 j 的耦合协调度, \bar{D} 为某一年的耦合协调度均值; w_{ij} 为空间权重矩阵。全局 Moran's I 的取值范围是 $[-1, 1]$ 。若 $I > 0$, 则表明空间正相关, 呈现出聚集分布; $I < 0$, 表明空间负相关, 呈现离散分布; $I = 0$, 表明空间随机分布。

(2) 局部 Moran's I 指数: 用于识别局部区域可能存在的空间聚集状态。公式为:

$$I_i = \frac{D_i - \bar{D}}{S^2} \sum_{j=1}^m w_{ij} (D_j - \bar{D}) \quad (5)$$

其中, S^2 是样本方差。通过计算的结果, 可将局部的空间联系状态分为四种类型: 高-高聚集、低-低聚集、高-低聚集、低-高聚集。

2.3.4. 地理探测器模型

黄河流域生态经济耦合协调度的空间分异是自然地理约束与社会经济要素共同作用的结果, 背后的驱动机制具有复杂性和非线性的特征。而地理探测器是能够探测空间分异性, 同时揭示背后驱动因子的统计学方法[22]。相比传统的线性回归模型, 地理探测器不需要严格的线性假设条件, 且能够有效地处理分类变量, 还擅长识别出多个因子之间的交互作用。

(1) 因子探测器: 定量的衡量驱动因子对生态经济耦合协调度空间分异的解释力, 用 q 值度量。公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

其中, q 为驱动因子的解释力, 取值为 $[0, 1]$, q 值越大, 表示该因子对生态经济耦合协调度的空间分布的解释能力越强; $h=1, \dots, L$ 为驱动因子的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全部城市的数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 的方差和全部城市生态经济耦合协调度的方差。

(2) 交互探测器: 识别不同驱动因子之间的交互作用对生态经济耦合协调度的影响。即评估指标 i 与指标 j 共同作用时, 是否会增强或者减弱对生态经济耦合协调度的解释能力, 或者这些指标的影响是否相互独立。

3. 结果分析: 协同发展时空格局

3.1. 综合发展水平

根据表 1 的权重分别计算出 2011~2023 年经济系统综合指数和生态系统综合指数, 结果如下图 2 所示。经济系统是显著的上升趋势, 表明在研究期间, 黄河流域整体的经济实力得到了显著提升, 但是经济系统的标准差较大, 且随着时间推移有扩大的趋势, 这表明区域发展存在不平衡的问题。黄河流域跨度大, 上中下游城市间的资源分布、交通密度以及历史文化基础差异极大, 这导致下游城市的经济基础较上游扎实, 而上游、中游地区受到自然地理条件和发展的约束, 经济实力较弱, 且依赖于传统产业, 基于这种差异产生的贫富差距导致区域发展不平衡以及统计上的高标准差。相比于经济系统, 因黄河流域大部分区域干旱少雨、水土流失严重、生态环境脆弱, 这些普遍现象使大部分城市的生态系统综合指数在较低的水平上徘徊, 且国家日益重视生态保护, 使得生态系统维持一个相对稳定的状态, 则城市间的差距没有经济差异那样大, 所以生态系统呈现出稳定的发展状态。但生态系统在 2022 年较往年有所上升, 且标准差也高于往年, 出现该现象的原因是多重因素综合作用的结果, 且在 2023 年回落也说明生态的改善并没有从根源解决, 需要继续努力。基于上述分析可知, 黄河流域的发展呈现出经济系统强势增长, 生态系统勉强维持稳定, 区域差异大的特征。

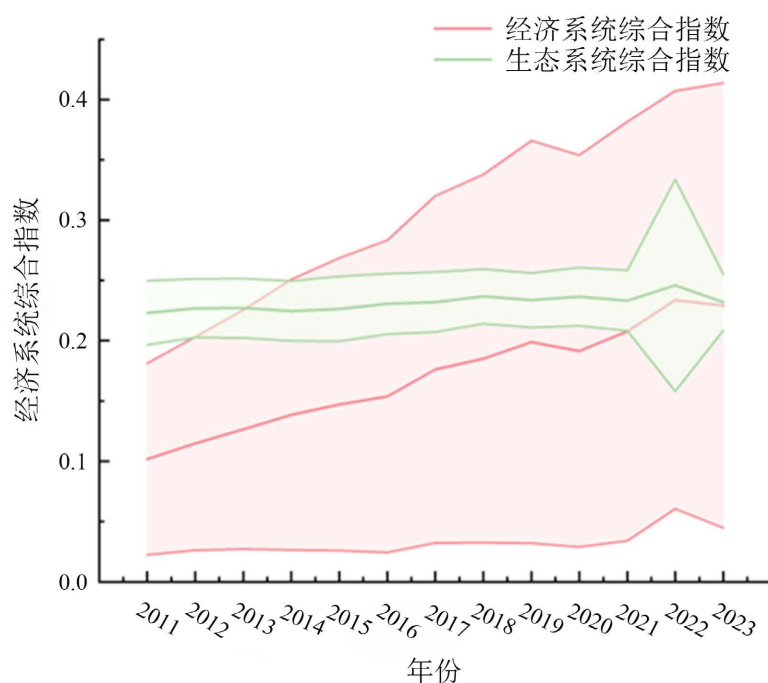


Figure 2. Line chart of the ecological economic system composite index, 2011~2023

图 2. 2011~2023 年生态经济系统综合指数折线图

3.2. 生态 - 经济耦合协调度时空演变

对经济系统与生态系统建立耦合协调模型, 结果如表 2 所示。从 2013-2023 年, 每五年的黄河流域

全域的耦合协调度 D 值均值在持续上升，这表明在过去 10 年里，黄河流域的生态环境与经济发展之间的协调水平在不断改善。虽然 D 值在上升，但到 2023 年仍然处于濒临失调的状态，增长幅度还没有达到使整体协调等级发生改变的阈值。在大部分耦合协调度的划分标准中，0.5 通常是“勉强协调”的起始线。这说明黄河流域的协调发展水平仍处于较低的状态。原因是黄河流域生态脆弱，生态问题多且难以攻克，而修复生态的过程漫长，是一个投入大，见效慢的工程。且黄河流域城市在经济发展上多依赖传统工业与农业，经济发展模式单一，在转向高质量发展的过程中，经济韧性弱，需要放缓经济增长速度。此外，黄河生态保护是必须进行的工程，生态保护需要大量资金投入，并限制经济发展，进而没有更多资金大力保护生态。两个系统处于相互博弈的状态，无法形成良性循环，导致高水平的良性耦合难以形成，从而使 D 值难以提升。

Table 2. Average domain-wide coupling coordination degree D values and evolution of coordination levels

表 2. 全域耦合协调度 D 值均值及协调等级演变

年份	耦合协调度均值	协调等级
2013	0.391804	濒临失调
2018	0.434891	濒临失调
2023	0.457898	濒临失调

从空间角度分析，如表 3 所示，黄河流域生态经济耦合协调度在空间上呈现出显著的区域差异，总体的分布表现为下游大于中游大于上游的阶梯式特征。下游的河南、山东段的城市具有较好的经济基础以及较高的资源配置效率，其经济系统得分较高，能拉动整体耦合协调水平，且山东半岛城市群在 2018 年协调等级跨入“勉强协调”阶段。中游区域面临着产业转型与水土保持的双重压力，协调等级多处于“濒临失调”向“勉强协调”阶段过渡。关中平原城市群从“严重失调”转向“濒临失调”阶段。上游受制于生态保护，以及高海拔的自然地理条件，经济水平相对滞后，耦合协调度普遍较低，多处于“轻度失调”或“濒临失调”状态，兰-西城市群也长期处于“濒临失调”阶段。这种空间分布直观反映了黄河流域上中下游发展阶段和城市功能定位的差异。

Table 3. Mean D -values of coupling coordination in urban agglomerations and coordination levels

表 3. 城市群耦合协调度 D 值均值及协调等级演变

年份	城市群	耦合协调度 D 值均值	协调等级
2013	兰 - 西城市群	0.313849	濒临失调
	“几”字弯城市群	0.401708	濒临失调
	关中平原城市群	0.298294	严重失调
	中原城市群	0.422131	濒临失调
	山东半岛城市群	0.493837	濒临失调
2018	兰 - 西城市群	0.360513	濒临失调
	“几”字弯城市群	0.433047	濒临失调
	关中平原城市群	0.33147	濒临失调
	中原城市群	0.479674	濒临失调
	山东半岛城市群	0.543236	勉强协调

续表

2023	兰 - 西城市群	0.37915	濒临失调
	“几”字弯城市群	0.446338	濒临失调
	关中平原城市群	0.316704	濒临失调
	中原城市群	0.360996	濒临失调
	山东半岛城市群	0.476581	濒临失调

3.3. 空间关联特征

进一步探索黄河流域城市群的生态经济耦合协调度的空间依赖关系, 计算黄河流域全局 Moran's I 指数。见表 4 结果显示, 研究期间每五年的全局 Moran's I 指数均大于 0, 且 P 值均小于 0.05, 通过了 5% 的显著性水平下的空间自相关检验。这些结果表明黄河流域城市的生态经济耦合协调度在空间上并不是随机分布, 而是存在显著的的空间自相关, 呈现出显著的空间聚集特征。从 2013~2023 这 10 年来看, Moran's I 指数在 0.46 到 0.49 之间, 保持在较高的水平, 表明这种空间聚集拥有显著的稳定性。虽然呈现出减弱的趋势, 但整体上表现出的高高聚集, 低低近邻的趋势一直存在, 且流域内部还没有产生高效的跨区域协同模式以打破当前的空间格局。

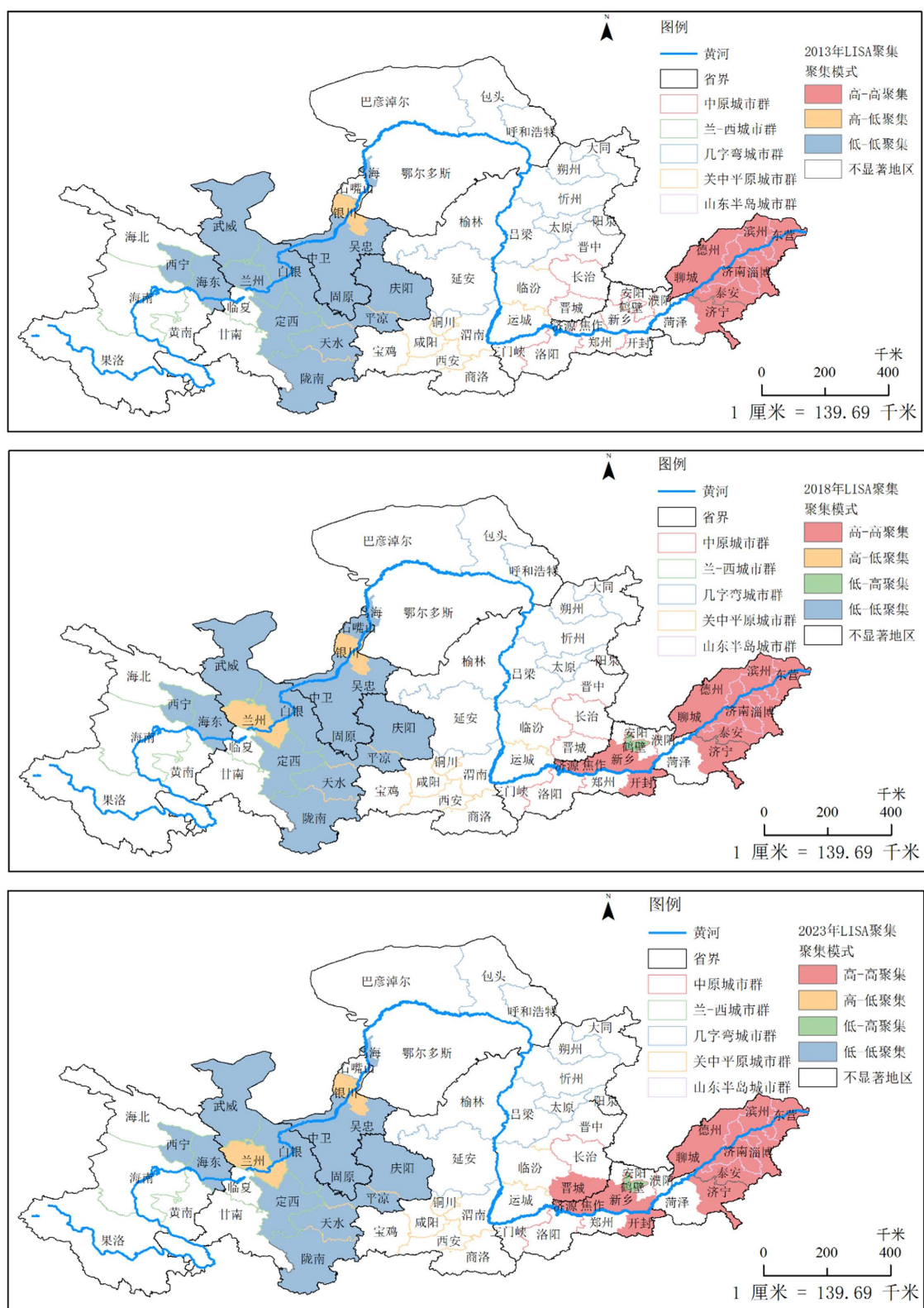
Table 4. Morlan index results for the entire yellow river basin

表 4. 黄河流域全局莫兰指数结果

年份	Moran's I	Z 得分	P 值
2013	0.4905	7.4995	3.20E-14
2018	0.4894	7.5002	3.19E-14
2023	0.4650	7.1495	4.36E-13

从图 3 看出, 黄河流域生态经济耦合协调度的空间分布表现出显著的稳定性和突出的空间分异特点, 整体上呈现出东高西低、两极地区聚集、中间区域过渡的形式。下游以山东半岛城市群为主的区域, 在十年间始终是高 - 高聚集状态, 中原城市群在第二个五年期间主要以北部和东部为主, 形成高 - 高聚集状态。这表明该地区经济发展水平相对较高, 且在生态保护与治理工作上, 取得了较好的效果, 生态系统与经济系统实现相对较高水平的协同发展, 并形成了该区域的正向溢出效应。上游兰 - 西城市群区域形成低 - 低聚集, 这反映出该地区的生态环境相对脆弱, 且经济发展落后, 生态系统与经济系统都处于较低的状态, 形成相互制约的低水平僵局模式。从时间上看, 这种两极分化的状态其实没有发生根源上的变动, 只是在高 - 高聚集和低 - 低聚集区域的边缘城市发生小的改变, 这从侧面说明黄河流域生态经济的协同发展是一个仍需关注和解决的难题。

关中平原与“几”字弯城市群在空间上呈现不显著特征, 主要源于其处于地理过渡区与发展制衡阶段。该区域介于东西部之间, 正值工业化快速发展期, 经济增长产生的生态压力导致二者长期制衡, 未形成稳定的良性互动模式, 从而呈现空间分布的随机性。此外区域内部异质性显著, “几”字弯城市群范围广且跨多省, 依赖资源开采会引发生态负担, 资源碎片化使各区域独立治理。且关中平原城市群受核心城市西安的虹吸效应影响, 强弱分化显著且缺乏空间溢出, 核心与周边在协同发展上的巨大差异阻断了空间连续性。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 3185 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. LISA clustering maps for selected years

图 3. 部分年份 LISA 聚类图

4. 结果分析：驱动机制探测

深入解析影响黄河流域生态经济耦合协调度空间分异的驱动因素，结合表 1 的两系统权重，选取经济活力、产业结构、公共收入、环境状态、人口负荷、自然约束 6 个权重相对较低的因子，先利用自然断点法把上述连续数据分为 5 类，进而采用地理探测器模型进行定量分析。

4.1. 单因子驱动力

地理探测器结果如表 5 所示，各因子对耦合协调度的解释力存在显著差异，呈现出以财政投入为主导，以自然生态为基底的特征。其中政府财力是核心驱动作用，地方一般公共预算是解释力最强的因子。这与黄河流域依赖政府主导的治理模式相关。在下游山东半岛地区，充裕的资金被用于产业结构升级和环境治理，直接推动高水平协调；中上游的兰 - 西城市群等不发达地区，财政转移支付是保持生态修复的关键资金来源。政府财力的空间不均衡直接导致流域耦合协调度的阶梯状分布。经济活力是基础支撑作用，为第二主导因子。且下游地区高强度的经济活力具有显著的溢出效应，能促进资源要素的聚集与优化；而上游地区受限于地形与交通，经济活力呈点状分布，难以形成对生态系统的反向促进效果，从而限制耦合度的提升。自然约束与人口负荷的 q 值长期稳定在 0.45~0.55 之间。上游的高海拔地形不仅限制大规模工业化城镇化的拓展，而且决定生态系统的脆弱本质，这种自然本色对耦合协调度构成硬性的发展瓶颈制约效应。而中游地区人口高负荷与水土流失的双重矛盾使人口因素成为该区域提升协调度的主要阻力。从时间演变看，自然约束的解释力略有上升，这表明在高质量发展阶段，生态本底对经济发展的约束红线持续收紧，且无视生态承载力的盲目扩张已难以持续。同时，环境状态的解释力在 2023 年显著增强，说明随着黄河重大国家战略的实施，植被覆盖等生态指标对区域协调水平的贡献愈加提高。

Table 5. Explained variance q-value for driving factors in selected years

表 5. 部分年份驱动因子解释力 q 值

年份	2013		2018		2023	
	q 值	P 值	q 值	P 值	q 值	P 值
政府财力	0.76609	1.24E-06	0.84770	6.74E-09	0.83947	2.74E-09
经济活力	0.59349	8.44E-06	0.60281	5.31E-06	0.5978	5.99E-07
人口负荷	0.47076	7.81E-05	0.55795	1.87E-06	0.52576	8.21E-06
自然约束	0.46161	1.73E-02	0.48405	1.24E-02	0.47739	1.80E-02
环境状态	0.18124	4.84E-01	0.18289	6.61E-01	0.34199	3.98E-03
产业结构	0.07855	8.32E-01	0.06228	7.78E-01	0.08172	8.45E-01

4.2. 交互驱动机制

交互探测结果进一步揭示了黄河流域生态经济系统复杂的非线性耦合机制。结果如图 4 所示，图中实心表示双因子增强，空心表示非线性增强。该图表现出经济与自然的双重结合与交互结合。交互作用最强的组合是政府财力 × 自然约束，这表明单纯的资金投入或单纯的自然条件都无法完全决定区域发展水平。在地势平坦的下游，财政投入能高效转化为生态治理效能，实现一加一大于二的非线性增强；而在地形复杂的上游，同样的资金投入需克服更高的自然地理成本。这意味着提升上游协调度，必须采取更精准的财政补贴策略以对冲自然约束的负外部性。另外是产业结构的催化效应。尽管产业结构单因子作用不显著，但其与环境状态的交互作用呈现非线性增强。这揭示了具体的提升路径：在“几”字弯区

域,单一调整产业比例效果有限,必须将产业转型与生态修复深度融合,发展生态旅游、林下经济等复合型产业,才能真正激活系统的耦合效应。

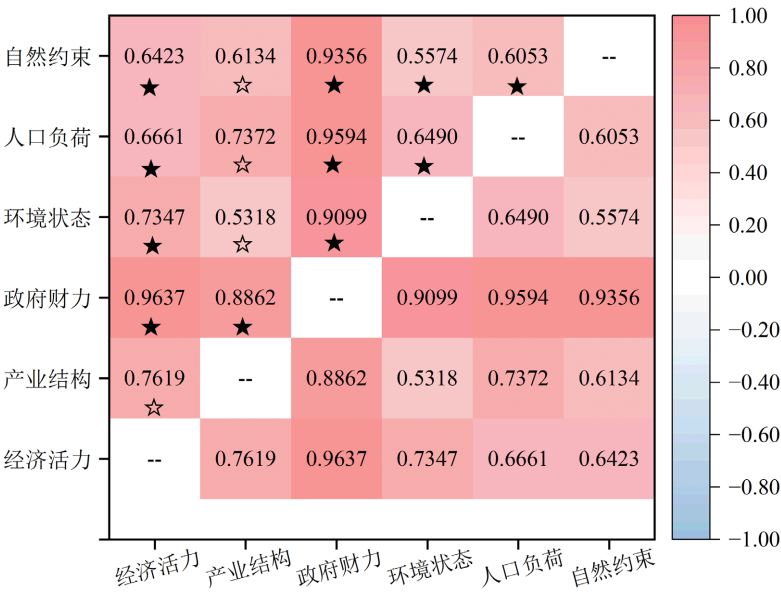


Figure 4. Heatmap of interaction detector results
图 4. 交互探测器结果热力图

5. 讨论与政策建议

5.1. 地理学视角的讨论

黄河流域生态经济耦合协调度整体呈现上升趋势,但水平依旧偏低,大部分城市仍然处于过渡阶段,距离高质量协同发展仍有较大差距。耦合协调度在空间上呈显著的下游高,中间次之,上游低的阶梯状分布,具有较强的正向空间自相关性和稳定的空间聚集特征,且上游低低聚集,下游高高聚集现象鲜明。驱动机制分析表明地方政府财力和经济活力是耦合协调度空间分异的主要经济因子,而自然约束和人口负荷是重要的自然与社会约束条件。基于上述结论,认为黄河流域治理应充分尊重上中下游的自然条件差异和发展阶段差异,结合每一段流域的自然约束,界定与自身相匹配的责任边界与功能定位。

5.2. 差异化政策建议

基于黄河流域不同流域段自然条件、经济发展水平以及两者耦合协调度的差异,摒弃一刀切式的治理思路,实施因地制宜的差异化协同发展策略。

中原城市群和山东半岛城市群及邻近下游地区城市要充分利用自身的经济活力和财政优势,发挥带动作用,优先探索生态保护高效的高质量发展路径。其中,中原城市群充分发挥其交通枢纽优势,在积极承接东部产业转移的同时设定行业环保门槛,加快制造业向绿色化、智能化转型。在保证国家粮食安全的前提下,推动农业现代化,并提高人口与经济的承受力。山东半岛城市群设立其在黄河流域高质量发展中的引导地位,大力发展海洋经济、先进制造业和服务业,强化科技创新能力,为周边城市提供技术溢出支持。同时加强黄河口生态保护以及海陆统筹。“几”字弯和关中平原城市群受自然约束较强,应该在争取更多财政支持的同时,立足自身资源发展的环境承受力,发展出特色的生态产业,不可盲目追求经济建设,从而进行高强度的资源开发。其中“几”字弯城市群要加快推进能源产业的绿色转型升

级, 大力发展清洁能源, 减少对生态环境的破坏。实行严格的矿区生态修复以及荒漠化治理办法, 破解自然资源和环境带来的硬性约束。关中平原城市群进一步强化西安这个中心城市的带动作用, 加快推动都市圈内部的基础设施互通和产业协作进程。大力发展高新技术产业和现代服务业, 并进一步积极加入横向生态补偿政策行列, 积极执行黄河水质监测与保护任务。兰-西城市群受自然约束最强, 且作为黄河流域上游的城市群, 担负着黄河要干净地流往中下游的责任。则应当将生态保护与治理放在首位的同时, 结合当地民族风俗和自身特点发展绿色经济。同时中上游城市要打破行政壁垒, 建立跨区域的生态经济协同机制, 积极签订横向生态补偿机制来打破目前固化的空间聚集模式, 进而实现全流域的协同发展。

参考文献

- [1] 赵煜, 毛雪冰. 黄河流域高质量发展的时空演变趋势及协调性研究[J]. 三峡大学学报(人文社会科学版), 2025, 47(6): 56-63.
- [2] 马海涛, 徐植枋. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J]. 经济地理, 2020, 40(4): 11-18.
- [3] 岳立, 薛丹. 黄河流域沿线城市绿色发展效率时空演变及其影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2274-2284.
- [4] 孙久文, 崔雅琪, 张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1673-1690.
- [5] 张芷若, 肖喜萌. 黄河流域经济高质量发展与生态环境耦合协调的时空演化[J]. 科技和产业, 2024, 24(7): 172-178.
- [6] 王嘉嘉, 张轲. 沿黄城市生态保护与高质量发展耦合协调时空演变分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(2): 16-20.
- [7] 陈景华, 徐金, 刘展豪. 新时代黄河流域生态保护与高质量发展的耦合关系及交互影响[J]. 山东财经大学学报, 2023, 35(3): 36-51.
- [8] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长-产业发展-生态环境的耦合协同关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(2): 119-129.
- [9] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 159-171.
- [10] 路昌, 尚健, 王之语, 等. 黄河流域中下游城市高质量发展与生态系统服务协同效应[J/OL]. 环境科学, 1-17. <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjlx.202506288>, 2025-12-20.
- [11] 康艳青, 刘羽晴, 朱永明. 沿黄城市生态保护与高质量发展的耦合协调性分析与预测[J]. 生态经济, 2022, 38(10): 190-197.
- [12] 赵敏. 黄河流域城市高质量发展系统耦合协调度时空演变及驱动力研究[J]. 统计与信息论坛, 2021, 36(10): 33-40.
- [13] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61.
- [14] 杨开忠, 董亚宁. 黄河流域生态保护和高质量发展制约因素与对策——基于“要素-空间-时间”三维分析框架[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1038-1047.
- [15] 徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 875-883.
- [16] 金凤君. 黄河流域生态保护和高质量发展的协调推进策略[J]. 改革, 2019(11): 33-39.
- [17] 黄祖宏, 黄竞雄, 党安荣. 淮河流域都市圈协同发展与优化对策: 基于夜光遥感的实证分析[J]. 地理科学, 2025, 45(11): 2430-2440.
- [18] 王芳, 郭梦瑶, 牛方曲. “动-静”结合视角下都市圈多层次空间格局研究——以黄河“几”字弯都市圈为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(7): 1243-1255.
- [19] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 1-8.
- [20] 封志明, 唐焰, 杨艳昭, 等. 中国地形起伏度及其与人口分布的相关性[J]. 地理学报, 2007(10): 1073-1082.
- [21] Wu, Y.Z., et al. (2022) Developing Improved Time-Series DMSP-OLS-Like Data (1992-2019) in China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, **60**, 1-14.
- [22] 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.