黄河流域城市群产业生态化时空演变及影响因素

刘 蕊，孙立霞

（青海大学财经学院，西宁 810000）

摘要：以黄河流域七大城市群为研究对象，构建经济发展、产业结构、生态保护等多维指标体系，运用熵值法、耦合协调度模型、空间自相关分析、地理探测器和灰色关联度模型，探讨产业生态化的时空演变及影响因素。结果表明，2013—2023年产业生态化水平总体提升，空间格局呈“东高西低”，高值区集中于中原和山东半岛城市群。经济发展、技术创新、环境规制和产业结构优化是主要驱动力。应因地制宜推进差异化路径，强化创新与协同，促进流域产业绿色转型。

关键词：黄河流域；城市群；产业生态化；熵值法；地理探测器

中图分类号：F124.5；X322 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)06－0193－10

黄河流域是我国重要的生态安全屏障，连接青藏高原、黄土高原与华北平原，是国家区域协调发展格局中的关键纽带。近年来，生态环境约束与产业转型压力日益凸显，政府对黄河流域生态保护与高质量发展高度重视，以生态优先和绿色转型为核心引导流域发展方向，这标志着黄河流域进入以生态优先和绿色转型为核心的新阶段。黄河流域是中国资源型产业最集中、能源消耗最密集、生态环境压力最突出的地区之一，流域经济增长长期主要依赖资源密集型产业和高能耗制造业，导致水资源短缺、污染物排放和生态系统退化问题并存。推动流域产业生态化发展，成为实现流域高质量发展的核心途径。

产业生态化理念源于Frosch和Gallopoulos[1]提出的“工业生态系统”概念，随后、Ehrenfeld和Graedel[2]将其理论体系化，认为产业生态系统应模仿自然生态系统的循环机制，实现能源与物质的闭环流动。早在20世纪90年代，中国学者便将西方产业生态学理论引入国内，并提出了“产业生态化”这一概念[3]。与产业生态学相比，产业生态化不仅可以被看作一种有机循环的产业发展模式，还可以被理解为模拟生物代谢机制的产业生态系统[4]。随着理论体系的完善，有关产业生态化的实证研究逐渐增多。多数学者首先对产业生态化水平的测度进行了系统探索，常用方法包括生态效率测度法[5-7]、耦合协调度法[8-10]与综合评价法[11-14]。为了有效提升产业生态化水平，已有学者开始着手产业生态化的影响因素分析，多位学者采用实证模型，如面板Tobit模型[15]、空间计量模型[16]、地理探测器模型[17]、系统广义矩估计(generalized method of moments，GMM)[18]、静态-动态面板回归模型[19]对影响产业生态化的因素进行多维检验。城市群是黄河流域经济活动最密集、要素流动最活跃的区域单元，是推进生态与产业协同发展的关键空间。基于此，本文以黄河流域七大城市群为研究对象，从时间和空间两个维度探讨黄河流域城市群产业生态化时空演变特征，基于地理探测器模型揭示整个流域产业生态化的影响机制，再通过灰色关联度模型识别具体城市群驱动因素的差异性，以期为流域城市群发展提出合理化建议。

1 研究方法与数据

1.1 研究区概况

黄河流域跨越青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东8个省份。根据《黄河流域生态保护与高质量发展规划纲要》，黄河流域涵盖7个城市群，包括山西中部城市群、呼包鄂榆城市群、兰西城市群、宁夏沿黄城市群4个地区级城市群和山东半岛城市群、中原城市群、关中平原城市群3个区域级城市群。

1.2 指标体系构建

产业生态化是产业绿色可持续发展的高级阶段，其本质是一种产业系统与生态系统深度耦合的

收稿日期：2025-10-10

作者简介：刘蕊（2001—），女，山东济宁人，硕士研究生，研究方向为产业生态化；通信作者孙立霞（1979—），女，青海西宁人，硕士，副教授，研究方向为区域经济发展。

人地关系，体现经济活动对自然环境的响应与调适过程。它以工业生态学理论为基础，遵循经济、社会与生态系统协同演进的原则，通过产业结构优化、技术创新和资源循环利用，实现经济增长与生态保护的统一。

基于这一基本内涵，借鉴相关研究成果[20-24]，遵循系统性、科学性与可操作性原则，从产业系统与生态系统两方面建立准则层，本文构建由经济发展水平、产业结构、发展活力、生态保护水平、资源消耗、污染排放与循环利用 7 个一级指标组成的产业生态化评价指标体系，以系统反映黄河流域城市群产业发展与生态环境之间的耦合协调程度（表 1）。

表 1　黄河流域城市群产业生态化指标体系

准则层	二级指标	具体指标	单位	指标属性
产业系统	经济发展水平	人均 GDP	元/人	+
		GDP 增长率	%	+
		城镇居民人均可支配收入	元/人	+
		人均进出口贸易额	元/人	+
	产业结构	第三产业占 GDP 比例	%	+
		第三产业增加值/第二产业增加值	%	+
		第二、三产业增加值总额	亿元	+
	发展活力	科技支出/GDP	%	+
		教育支出/GDP	%	+
		固定资产投资/GDP	%	+
生态系统	生态保护水平	人均公园绿地面积	m^2/人	+
		建成区绿化覆盖率	%	+
		人均水资源量	km^3/人	+
	资源消耗	夜间灯光	DN	-
		单位 GDP 水耗	m^3/元	-
	污染排放	单位 GDP 工业废水排放量	t/万元	-
		单位 GDP 工业二氧化硫排放量	t/万元	-
		单位 GDP 工业烟粉尘排放量	t/万元	-
	循环利用	一般工业固体废物综合利用率	%	+
		污水处理厂集中处理率	%	+
		生活垃圾无害化处理率	%	+

1.3　研究方法

1.3.1　熵值法

为消除人为赋权的主观偏差，采用熵值法对评价指标进行客观赋权，以确定各指标对产业生态化综合水平的贡献程度。该方法通过衡量指标信息熵反映其变异性，从而计算权重并综合评价黄河流域各城市的产业生态化水平，具有较强的科学性与客观性[25]。

第一步，对指标进行标准化处理。

正向指标标准化：

$$X_{ij}^{*}=\frac{X_{ij}-\min(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})}{\max(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})-\min(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})} \tag{1}$$

负向指标标准化：

$$X_{ij}^{*}=\frac{\max(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})-\min(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})}{\max(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})-\min(X_{1j},X_{2j},\cdots,X_{nj})} \tag{2}$$

式中：$i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$；X_{ij} 为 i 市指标 j 的指标值；X_{ij}^{*} 为 X_{ij} 标准化处理后的指标值；n 为城市个数；m 为指标数。

第二步，计算信息熵与权重。

计算第 j 项指标下第 i 个样本值占比。

$$P_{ij}=\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}X_{ij}} \tag{3}$$

计算各指标的信息熵 e_j。

$$e_j=-K\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln P_{ij} \tag{4}$$

式中：$K=1/\ln n$。

计算权重系数值 w_j。

$$w_j=\frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^{m}(1-e_j)} \tag{5}$$

第三步，计算各准则层得分及综合得分情况。

$$G=\sum_{j=1}^{m1}w_jX_{ij}^{*} \tag{6}$$

$$E=\sum_{j=m1}^{m2}w_jX_{ij}^{*} \tag{7}$$

$$\mathrm{Score}=\sum_{j=1}^{m}w_jX_{ij}^{*} \tag{8}$$

式中：G、E、Score 分别为 i 市的产业经济系统得分、生态环境系统得分和综合得分情况。综合得分取值范围为（0，1），越靠近 1，产业生态化水平越高。

1.3.2　耦合协调度模型

耦合协调度模型用于刻画系统间的交互关系及其协调发展水平。其中，耦合度反映产业经济系统与生态环境系统之间的相互依赖与影响程度，而协调度则衡量二者在互动过程中实现良性发展的程度。通过该模型能够揭示产业生态化过程中经济增长与生态保护之间的动态平衡状态。

$$C=\sqrt{\frac{GE}{\alpha G+\beta E^{2}}} \tag{9}$$

$$T=\alpha G+\beta E \tag{10}$$

$$D=\sqrt{CT} \tag{11}$$

式中：C 为产业系统和生态环境系统耦合度，$0\leqslant C\leqslant 1$，C 越接近于 1 表明系统间耦合度越大，相互作用越强；α、β 为待定系数，考虑到产业和生态两个系统重要性程度基本一致，故取 $\alpha=\beta=0.5$；D 为耦合协调度，

$0 \leqslant D \leqslant 1$，$D$ 越接近于 1 表明系统间越协调。参考张国俊等[5]的做法，将协调程度分为 10 个等级（表 2）。

表 2　耦合协调度等级划分

耦合协调度区间	阶段划分	类型划分
$0<D<0.1$	极度失调衰退阶段	失调衰退型
$0.1 \leqslant D<0.2$	严重失调衰退阶段	
$0.2 \leqslant D<0.3$	中度失调衰退阶段	
$0.3 \leqslant D<0.4$	轻度失调衰退阶段	
$0.4 \leqslant D<0.5$	濒临失调衰退阶段	磨合发展型
$0.5 \leqslant D<0.6$	勉强协调发展阶段	
$0.6 \leqslant D<0.7$	初级协调发展阶段	协调发展型
$0.7 \leqslant D<0.8$	中级协调发展阶段	
$0.8 \leqslant D<0.9$	良好协调发展阶段	优化成熟型
$0.9 \leqslant D<1$	优质协调发展阶段	

1.3.3　探索性空间数据分析法

为深入探讨黄河流域城市群产业生态化水平的空间集聚特征与邻近效应，引入空间自相关分析方法[26]，从地理空间维度探讨各城市间的空间依赖性与异质性，为后续空间机制分析提供支撑。

（1）全局空间自相关。通过全局 Moran's I 衡量总体空间关联程度。

$$\text{Moran's } I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{9}$$

式中：n 为研究单元个数；x_i、x_j 为第 i、j 个城市的产业生态化得分；$\bar{x}$ 为各城市产业生态化水平的平均值；W_{ij} 为空间权重矩阵元素，表示城市 i 与城市 j 之间的空间邻接关系，选用地理经济距离空间权重矩阵。莫兰指数 Moran's I 的取值范围为$[-1,1]$：Moran's $I<0$ 表示空间负相关，要素离散分布；Moran's $I=0$ 表示无显著空间自相关，空间分布随机；Moran's $I>0$ 表示正相关，要素集聚分布。

（2）局部空间自相关。采用局部 Moran's I_i 来进一步识别局部空间集聚情况。

$$\text{Moran's } I_i=\frac{x_i-\bar{x}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(x_j-\bar{x}) \tag{10}$$

式中：Moran's I_i 为城市与其邻近区域在变量 x 上的空间关联程度。正值表明“高-高”或“低-低”集聚，负值则表示“高-低”或“低-高”异质分布，从而揭示各地的空间差异特征。

1.3.4　地理探测器模型

地理探测器（Geodetector）可量化各影响因子对空间格局的解释力，还可以进一步量化交互作用效应，多被用于分析空间分异及其影响因素。基于 R 语言 GD 包的最优参数设置，运用地理探测器模型探讨黄河流域城市群产业生态化水平的主要影响因素及其交互作用结果。

$$q=1-\frac{1}{NS^2}\sum_{i=1}^{m}N_iS_i^2 \tag{11}$$

式中：q 为探测因子 x 的探测值；S^2 为全区指标的方差；N 为研究区单元数；N_i 和 S_i^2 分别为 i（$i=1,2,\cdots,m$）的层样本量和层 i 的方差；$q\in[0,1]$，q 越大表示探测因子对产业生态化时空分布的解释程度越大。

1.3.5　灰色关联度

运用灰色关联度分析来识别不同城市群中各影响因素，从而揭示不同城市群之间影响因素的差异。其基本思路包括以下步骤。

（1）无量纲化处理：为消除各指标量纲和数量级的影响，采用极差标准化方法对原始数据进行归一化处理。

（2）确定参考序列与比较序列：以产业生态化水平为参考序列，其余各影响因素为比较序列，构建关联比较系统。

（3）计算关联系数：采用常用的灰色关联系数计算公式。

$$\xi_i(k)=\frac{\min_i\min_k|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|} \tag{12}$$

式中：$\xi_i(k)$ 为第 i 个影响因素在第 k 年与产业生态化水平之间的关联系数；ρ 为分辨系数，取值为 0.5。

（4）计算灰色关联度：对各指标在全部年份的关联系数取平均，得出灰色关联度值 γ_i，γ_i 越大表示该变量对产业生态化水平的影响越显著。

2　研究对象及数据来源

以黄河流域七大城市群为研究对象，聚焦其产业生态化发展水平及时空演变特征的测度与分析。综合考虑规划范围、流域分布、数据可得性，最终确定 47 个地级市作为研究样本。研究数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》及各省份统计年鉴。能源消耗因地级市数据缺失，研究区域内夜间灯光栅格总值来表示能源消费总量，再除以地区生产总值后获得单位 GDP 能耗[27]。夜间灯光数据使用西南大学施开放副教授及其团队在 Harvard Dataverse 平台上发布了类 DMSP-OLS 中国夜间灯光遥感数据集[28]。部分缺失数据

经政府信息公开获取。研究时段为 2013—2023 年，对少量缺失年份采用线性插值进行补齐。

3　实证分析

3.1　城市群产业生态化水平时空演变特征

根据熵值法计算结果(表 3)，2013—2023 年黄河流域产业生态化水平整体呈上升趋势，体现东高西低的空间演进格局。整体均值由 2013 年的 0.161 8 提升至 2023 年的 0.219 2，10 年间增幅超过 35%，说明流域产业生态化水平显著提升，产业与生态系统协同发展态势逐步显现。

从具体的城市群来看，山东半岛城市群长期处于领先地位，指数由 0.193 4 升至 0.280 6，增长幅度显著，得益于制造业绿色转型和技术创新能力增强。中原城市群由 0.147 3 增至 0.221 4，生态化水平稳中上升，与中部地区节能产业布局和循环经济发展密切相关。关中平原城市群在 2021 年达到峰值 0.231 5 后略有回落，反映产业结构调整期的波动性。山西中部城市群整体平稳，生态化提升主要来自能源清洁化和传统产业改造。上游地区中，呼包鄂榆城市群波动较大，2022 年指数升至 0.262 3 后略有下降，显示资源型区域在绿色转型中面临阶段性阵痛。宁夏沿黄城市群指数长期偏低，由 0.131 9 升至 0.167 9，生态产业体系仍不完善。兰州—西宁城市群稳步提升至 0.204 6，反映清洁能源与生态工业的积极进展。

选取 2013 年、2017 年、2021 年和 2023 年 4 个具有代表性的时间节点，进一步揭示空间分布特征，利用 ArcGIS 自然断点法对产业生态化水平进行空间可视化分析(图 1)。结果显示，黄河流域整体呈现出东部地区高西部地区低、中部地区波动、核心城市引领、边缘城市发展滞后的特征。

从图 1 可以看出下游地区形成了以济南-东营为核心较为稳定的高值集聚区，中原城市群的郑州-洛阳轴线生态化水平持续提升，带动周围城市不断增长；中游地区以西安、太原为核心的高水平逐步稳定，但外围城市仍处较低水平；上游地区表现为零散分布的高值区，整体生态化水平偏低。黄河流域城市群产业生态化水平空间结构形成核心带动周围圈层的格局，高值城市聚集在东部还有中部核心城市，形成“带状扩散、边缘滞后”的分布态势。

3.2　城市群产业生态化耦合协调度时空演变特征

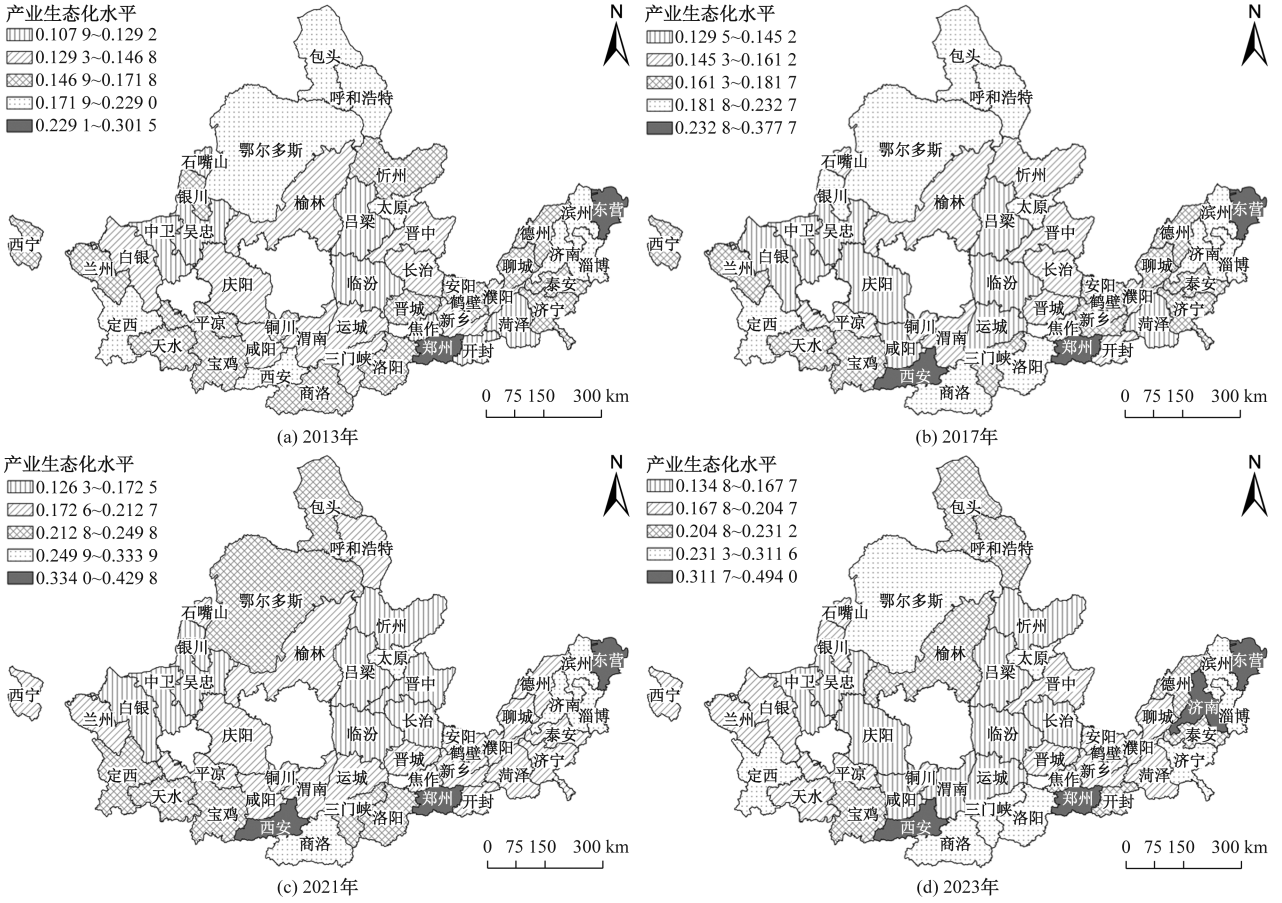
2013—2023 年，黄河流域七大城市群产业系统与生态系统的耦合协调度整体水平偏低，呈现高耦合低协调的特征。如表 4 所示，耦合度整体稳定在 0.90 以上，部分年份兰州—西宁、关中平原等城市群甚至接近 0.99，说明两大系统形成高度关联。但是，从协调度结果来看，尽管多数城市群的协调度均呈缓慢上升趋势，但是整体数值还是处于 0.25～0.35，仅山东半岛、呼包鄂榆等城市群在部分年份略高于 0.34，仍未突破 0.4 的协调临界值，说明系统间融合度存在不足。以 2023 年为例，山东半岛城市群协调度最高，接近“濒临失调衰退阶段”这一阶段的下限，但是宁夏沿黄、山西中部等城市群长期维持在 0.28 左右，提升幅度有限，表明生态系统恢复能力弱、产业绿色转型滞后。

依据耦合协调度阶段划分，将 2013 年、2017 年、2021 年和 2023 年黄河流域产业系统与生态系统的耦合协调水平划分为中度失调[0.2，0.3]、轻度失调(0.3，0.4]和濒临失调(0.4，0.5]三个等级，并利用 ArcGIS 绘制时空分布如图 2 所示，以揭示其时空演变特征。

图 2 中颜色深浅反映协调水平的高低，颜色越深表示系统协调性越强。黄河流域城市群产业系统与生态系统的耦合协调度在研究期内持续提升，由“中度失调”向“轻度失调”乃至“濒临失调”逐步发展。可以看出 2013 年黄河流域多数城市处于中度失调状态，仅太原、西安、郑州、东营等少数城市达到轻度失调及以上。在绿色发展理念深入践行与区域协同机制推进背景下，2023 年已有更多城市进入轻度失调范围，部分核心城市如郑州、西安、太原、三门峡、东营更上升至濒临失调阶段，成为区域产业生态化的关键支撑力量。中游的关中平原与中原城市群协调水平持续领先，西安、郑州通过产业结构优化与生态治理，带动洛阳、渭南、焦作等周

表 3　2013—2023 年黄河流域城市群产业生态化水平

地区	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
山东半岛城市群	0.193 4	0.204 7	0.197 2	0.202 6	0.214 5	0.241 6	0.234 2	0.232 9	0.266 7	0.281 5	0.280 6
中原城市群	0.147 3	0.163 2	0.153 0	0.160 0	0.170 5	0.175 2	0.185 6	0.194 2	0.218 7	0.229 9	0.221 4
关中平原城市群	0.157 0	0.156 3	0.159 8	0.160 7	0.169 9	0.172 3	0.166 9	0.182 7	0.231 5	0.196 9	0.196 6
山西中部城市群	0.154 0	0.154 4	0.160 7	0.157 5	0.169 7	0.182 6	0.178 5	0.183 5	0.188 6	0.190 1	0.199 0
呼包鄂榆城市群	0.189 1	0.210 2	0.197 8	0.115 0	0.194 8	0.205 9	0.194 3	0.192 6	0.214 0	0.262 3	0.237 3
宁夏沿黄城市群	0.131 9	0.154 7	0.141 9	0.145 4	0.156 0	0.162 6	0.165 0	0.161 7	0.167 9	0.177 4	0.167 9
兰州-西宁城市群	0.165 8	0.157 9	0.171 7	0.176 1	0.171 0	0.174 0	0.180 1	0.191 1	0.195 9	0.216 2	0.204 6



审图号：GS(2024)0650号

图 1　黄河流域城市群产业生态化空间演变特征

表 4　黄河流域城市群产业系统和生态系统耦合度和协调度结果

变量	城市群	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年
耦合度	兰州-西宁城市群	0.990 1	0.965 7	0.963 9	0.969 0	0.972 4	0.971 9	0.938 9	0.952 9	0.967 6	0.978 5	0.940 7
	宁夏沿黄城市群	0.983 4	0.980 2	0.972 0	0.962 0	0.948 8	0.943 1	0.929 7	0.950 3	0.961 2	0.980 5	0.953 5
	呼包鄂榆城市群	0.931 7	0.980 4	0.956 2	0.966 2	0.957 4	0.972 2	0.951 0	0.953 2	0.963 2	0.935 0	0.913 3
	山西中部城市群	0.981 9	0.995 6	0.970 1	0.957 2	0.955 4	0.961 8	0.956 2	0.949 8	0.940 9	0.970 8	0.964 0
	关中平原城市群	0.993 0	0.989 3	0.978 6	0.967 6	0.966 1	0.974 1	0.964 6	0.974 9	0.975 5	0.976 4	0.964 9
	中原城市群	0.988 5	0.988 5	0.982 5	0.977 8	0.976 9	0.972 0	0.961 6	0.954 6	0.965 5	0.966 9	0.931 2
	山东半岛城市群	0.960 7	0.967 8	0.956 7	0.936 3	0.918 7	0.928 2	0.909 6	0.908 3	0.919 5	0.919 9	0.893 0
协调度	兰州-西宁城市群	0.285 8	0.275 3	0.286 9	0.291 6	0.287 9	0.290 0	0.289 8	0.301 1	0.307 1	0.324 2	0.309 2
	宁夏沿黄城市群	0.253 9	0.274 7	0.262 3	0.263 9	0.270 8	0.276 2	0.276 5	0.277 0	0.283 9	0.294 5	0.282 5
	呼包鄂榆城市群	0.295 0	0.320 4	0.306 3	0.318 2	0.304 7	0.315 9	0.303 5	0.302 6	0.320 6	0.345 5	0.328 6
	山西中部城市群	0.273 5	0.276 9	0.277 4	0.271 1	0.281 9	0.292 4	0.288 2	0.289 7	0.290 5	0.299 8	0.304 4
	关中平原城市群	0.278 3	0.277 0	0.278 0	0.277 0	0.283 8	0.286 3	0.280 2	0.295 6	0.332 5	0.306 3	0.304 1
	中原城市群	0.268 0	0.282 2	0.271 3	0.276 8	0.285 1	0.288 2	0.294 4	0.300 7	0.320 9	0.329 6	0.317 0
	山东半岛城市群	0.302 2	0.312 4	0.304 7	0.304 8	0.308 9	0.329 1	0.320 1	0.320 2	0.343 9	0.351 5	0.346 6

边城市实现协同提升。下游的山东半岛城市群，包括济南、淄博、东营，协调水平提升显著，逐步成为流域东部产业生态融合的发展高地。上游地区，呼包鄂榆与山西中部城市群表现相对平稳，包头、呼和浩特、鄂尔多斯及太原等城市在资源型产业转型中实现一定程度的生态协同。西北部地区及部分非核心城市，像白银、吴忠、临汾、吕梁等边缘城市协调度提升缓慢，至2023年仍处于中度失调状态，反映这些城市在产业结构优化与生态保护协同发展方面仍存在短板。

3.3　城市群产业生态化空间分异分析

2013—2023年，基于地理经济矩阵，计算的

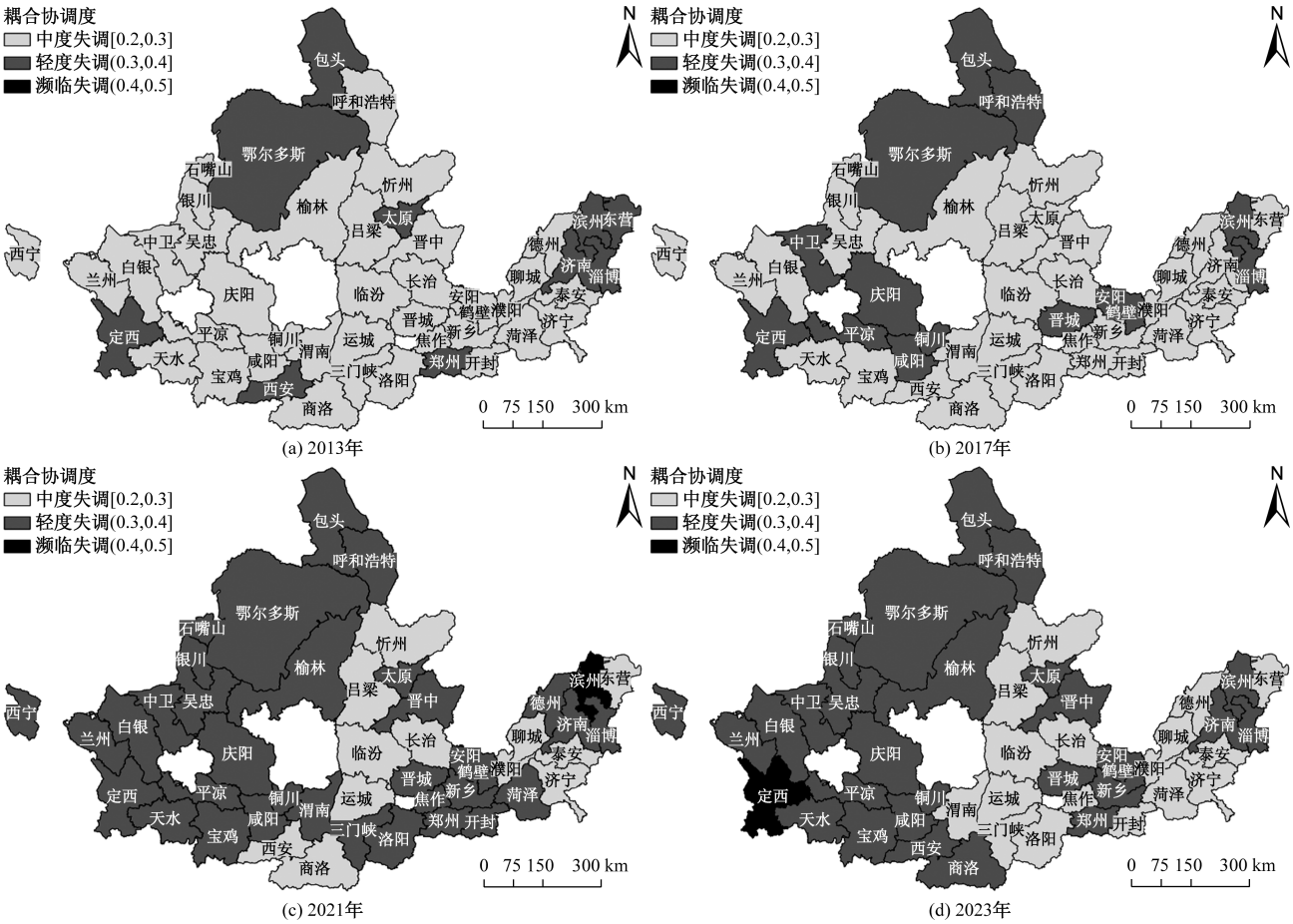
全局莫兰指数表明，黄河流域城市群产业生态化水平具有显著的空间自相关性（表 5），说明该区域在产业生态转型过程中呈现稳定的空间集聚格局。

为深入揭示空间集聚具体结构，进一步测算局部莫兰指数，分析黄河流域城市群产业生态化水平的局部自相关特性，最终获取 2013 年、2017 年、2021 年及 2023 年的 LISA 聚类图。如图 3 所示，从空间分布格局看，高-高（H-H）集聚区域主要分布于黄河下游及中游核心地带，且空间稳定属性较强。山东半岛城市群的济南、淄博、东营长期处于 H-H 集聚区域，展现较强产业基础条件与生态治理成效；中原城市群核心城市郑州同样持续处于 H-H 区域，体现其在流域生态化发展进程中的引领效能。呼和浩特自 2017 年起进入 H-H 类型区间，说明该市绿色制造及清洁能源转型取得明显进展。低-低（L-L）集聚区域主要分布在山西中部（临汾、晋中）、宁夏沿黄地区（中卫）及部分资源型城市，这些区域普遍面临资源约束限制、生态治理投入欠缺及产业结构偏重等现实问题，产业生态化水平相对较低，且与周边城市形成负向关联效应。

3.4　城市群产业生态化影响因素

3.4.1　因子选取

产业生态化水平的形成与演化受多种因素交互作用的影响，既包括经济社会发展的基础条件，也涉及资源环境约束、技术创新能力及制度调控水



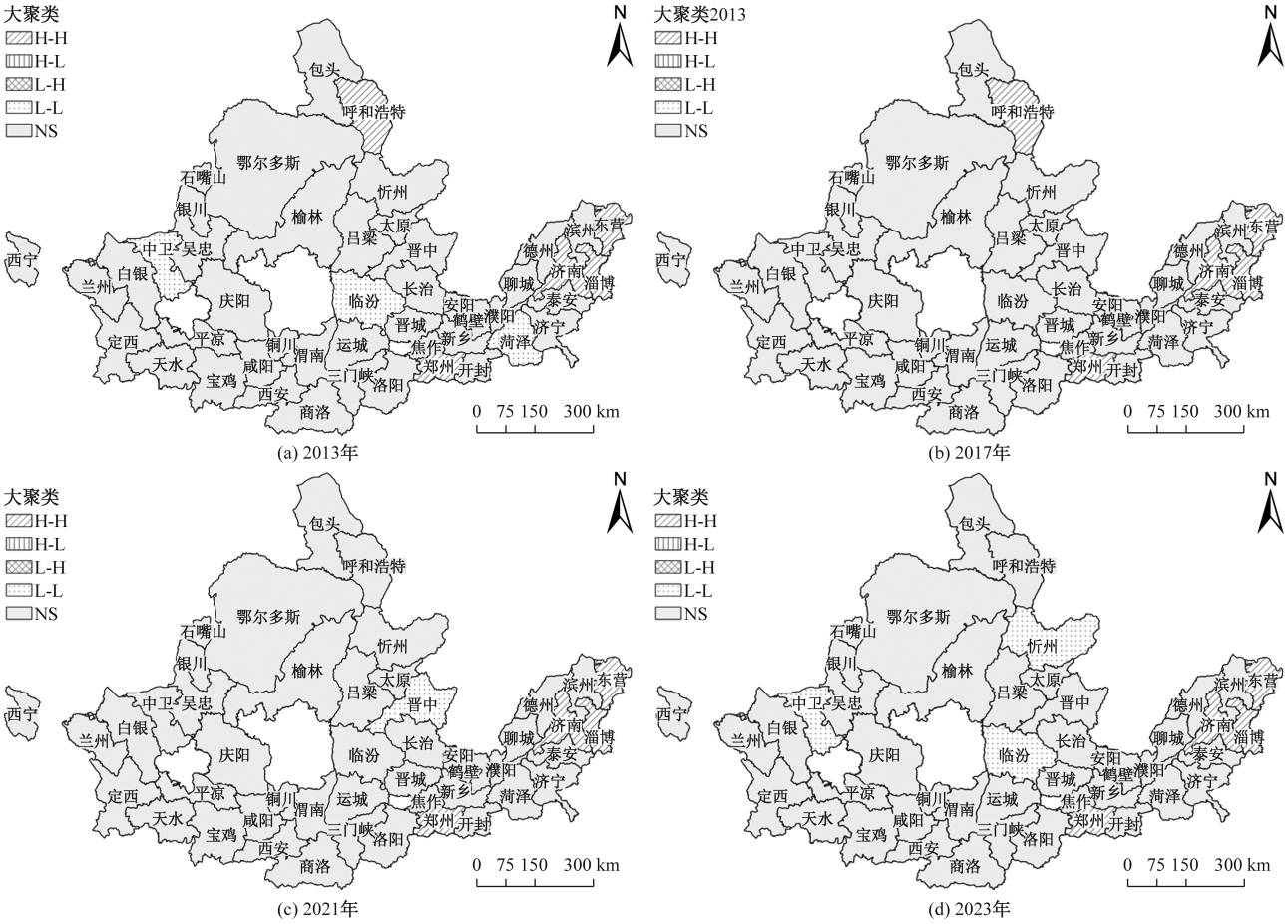
审图号：GS(2024)0650 号

图 2　黄河流域城市群耦合协调度空间演变特征

表 5　2013—2023 年黄河流域城市群产业生态化水平的 Moran's *I*

变量	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
Moran's *I*	0.218***	0.252***	0.228***	0.241***	0.199**	0.234***	0.276***	0.208**	0.164**	0.189**	0.187**
	(2.989)	(3.405)	(3.091)	(3.249)	(2.865)	(3.337)	(3.753)	(2.881)	(2.306)	(2.69)	(2.659)

注：*、**、***分别表示在 10%、5%和 1%的水平上显著；括号内数值为 z 值。



审图号：GS(2024)0650号

图 3　黄河流域城市群产业生态化水平的 LISA 聚类

平等方面。为全面识别黄河流域城市群产业生态化的关键驱动因子，在文献梳理和数据可得性的基础上[29-34]，选取常住人口城镇化率代表城镇化水平(X_1)、人均 GDP 代表经济发展水平(X_2)、环保支出占 GDP 的比重衡量环境规制(X_3)、第三产业增加值占 GDP 比例表示产业结构(X_4)、每万人发明专利授权数代表技术创新(X_5)、地方人均财政支出/(地方人均财政支出＋省本级人均财政支出＋中央人均财政支出)来表征财政分权(X_6)、常住人口与建成区面积的比值衡量人口密度(X_7)、固定资产投资额占 GDP 比例代表政府调控水平(X_8)、金融机构存贷款总额占 GDP 的比例代表金融发展水平(X_9)，探究城市群产业生态化主要影响因素以及不同时间的影响力的异同。

3.4.2　地理探测器因子探测

选取 2013 年与 2023 年两个代表性年份，对 9 个影响因素开展空间解释力分析(表 6)。2013 年有 6 项因素通过显著性检验，影响力依次为 $X_2>X_1>X_5>X_4>X_6>X_9$。其中经济发展水平的 q 为 0.490 5，流域产业生态化初期受经济实力、城市化水平与产业结构优化的共同驱动。2023 年各因素影响力排名调整为 $X_5>X_1>X_2>X_3>X_7>X_8>X_4>X_6>X_9$。技术创新的 q 达 0.526 2，已成为推动产业生态化的首要因素。环境规制解释力由 0.079 0 提升至 0.257 1，并在 2023 年达到显著水平，说明生态政策对产业行为的约束作用不断增强。人口密度与政府调控水平均具显著性，表明人

表 6　2013 年和 2023 年黄河流域城市群产业生态化单因子探测结果

指标	2013 年		2023 年	
	q	P	q	P
城镇化水平(X_1)	0.404 6	0.004 0	0.300 2	0.005 9
经济发展水平(X_2)	0.490 5	0.636 0	0.294 8	0.207 5
环境规制(X_3)	0.079 0	0.202 6	0.257 1	0.001 7
产业结构(X_4)	0.353 7	0.000 6	0.143 3	0.121 4
技术创新(X_5)	0.382 0	0.015 6	0.526 2	0.000 8
财政分权(X_6)	0.338 7	0.002 2	0.142 0	0.463 8
人口密度(X_7)	0.268 4	0.004 1	0.221 2	0.012 0
政府调控水平(X_8)	0.025 4	0.949 9	0.190 6	0.020 6
金融发展水平(X_9)	0.287 6	0.002 5	0.102 1	0.254 9

口集聚与治理能力仍对空间差异具有重要影响。相较之下，经济发展水平、产业结构和财政分权的影响力有所下降，反映经济规模与产业比例的直接作用减弱。

3.4.3　地理探测器交互因子探测

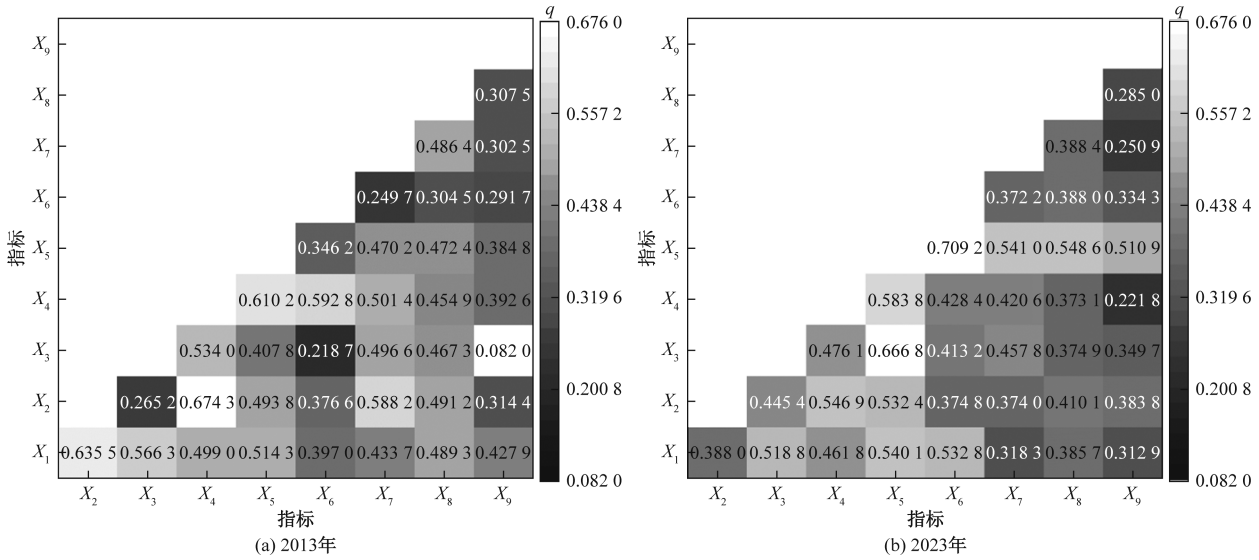
为了更直观地看出不同因子之间的交互作用，利用 Origin 软件绘制了 2013 年和 2023 年交互作用热力图(图 4)。结果显示，双因子交互对黄河流域城市群产业生态化水平的解释力普遍高于单因子作用，呈现显著增强效应，表明各因素并非独立影响，而是共同影响区域生态产业格局。

2013 年，X_2 与 X_1 的交互作用最强，q 为 0.635 5，显著高于单独因子，反映经济增长与城市扩张的协同效应。X_5 与 X_4 的交互 q 为 0.610 2，表明绿色技术与产业优化呈双向促进关系。X_6 与 X_4 的组合 q 为 0.592 8，显示体制机制与产业政策协同对生态转型的重要作用。X_7 与 X_2 的交互 q 为 0.588 2，表明人口集聚与经济基础共同影响生态化空间格局。2023 年，影响因素明显调整，X_5 成为核心因子。其与 X_6 的交互作用最强，q 达 0.709 2，显示科技创新与财政自主性在绿色发展中形成合力。技术创新与环境规制的交互 q 为 0.666 8，体现制度约束与技术赋能的协同效应；与城镇化和政府调控的交互 q 分别为 0.540 1 和 0.548 6，表明科技创新正深度嵌入城镇体系与治理结构。相比之下，经济发展水平与其他因子的交互作用明显减弱，如与城镇化的组合 q 仅为 0.388 0，传统增长驱动逐渐被创新与制度主导的新路径所取代。

3.4.4　灰色关联度结果

基于灰色关联度分析，对黄河流域七大城市群的 9 个影响因子进行分区域比较，结果如表 7 所示。总体上，各城市群的主导驱动力呈显著空间差异，但普遍体现“技术创新与经济发展并重、财政机制与结构优化协同”的特征。

兰州-西宁城市群的产业生态化主要依赖经济发展与科技创新，关联度分别为 0.813 4 和0.802 3，说明经济基础仍是关键支撑，绿色技术的促进作用不断增强，财政分权作用次之。宁夏沿黄城市群以城



(a) 2013年　　(b) 2023年

图 4　2013 年和 2023 年交互因子探测结果

表 7　黄河流域城市群产业生态化灰色关联度结果

指标	兰州-西宁城市群	宁夏沿黄城市群	呼包鄂榆城市群	山西中部城市群	关中平原城市群	中原城市群	山东半岛城市群
X_1	0.752 8	0.816 6	0.672 2	0.837 4	0.660 7	0.804 6	0.753 7
X_2	0.813 4	0.725 5	0.794 3	0.833 7	0.708 3	0.853 5	0.723 3
X_3	0.580 8	0.623 3	0.651 7	0.718 9	0.570 6	0.614 3	0.622 8
X_4	0.547 1	0.679 8	0.756 1	0.559 3	0.613 6	0.707 6	0.773 7
X_5	0.802 3	0.760 4	0.775 2	0.790 4	0.816 6	0.795 1	0.811 7
X_6	0.784 6	0.700 5	0.580 9	0.839 8	0.669 4	0.628 5	0.708 0
X_7	0.504 1	0.691 0	0.650 9	0.472 8	0.551 1	0.532 0	0.516 8
X_8	0.624 3	0.462 3	0.642 6	0.580 9	0.633 9	0.733 2	0.555 2
X_9	0.565 9	0.703 3	0.678 0	0.642 8	0.608 4	0.828 1	0.822 5

镇化为主导,科技创新和经济发展位居其后。呼包鄂榆城市群呈现结构优化与技术创新“双轮驱动”特征,能源型城市正通过产业升级与绿色技术推动生态转型。山西中部城市群的核心动力来自财政分权、经济发展与技术创新,形成“经济-技术-财政”协同格局。关中平原城市群以科技创新为首要驱动力,财政分权和政府调控次之,西安等科技中心在区域生态化中发挥关键作用。中原城市群构建起经济发展、金融支持与技术创新协同体系,市场活力与创新基础突出,绿色制造和服务业比重稳步上升。山东半岛城市群以科技创新和金融发展为核心动力,金融资本与绿色技术深度融合,推动绿色转型走在流域前列,产业结构持续优化。

4　结论与启示

4.1　结论

(1)产业生态化水平整体提升但区域差异显著。2013—2023年,黄河流域产业生态化水平持续提高,呈现“东强西弱、中部提升”的格局。山东半岛与中原城市群发展领先,关中平原和山西中部次之,兰州-西宁与宁夏沿黄整体偏低,区域发展不平衡依然突出。

(2)产业-生态耦合协调度持续改善,空间集聚特征增强。整体上,流域由失调走向协调,部分城市实现良性互动。山东半岛、中原和关中平原协调度较高,而西部地区提升缓慢,仍受资源与环境约束影响。

(3)影响因素动态演变,技术创新成为关键驱动力。早期产业生态化主要受经济发展与城镇化率驱动,近年来技术创新与环境规制作用显著增强,创新驱动已成为产业生态化提升的核心路径。

(4)交互效应显著,多因素协同推动产业生态化转型。技术创新与环境规制、经济发展与城镇化等组合的交互作用最强,表明产业生态化依赖于多要素协同与复合型政策支持。

(5)城市群驱动机制差异明显,需因地施策分类引导。兰州-西宁以经济与创新为主导,山西中部受财政分权与城镇化影响显著,山东半岛突出产业结构优化与金融发展,应结合区域禀赋实施差异化路径。

4.2　启示

(1)强化区域协同与政策支持。依托国家战略,建立跨区域协作平台,推动东部城市群以技术、管理输出带动中西部发展。完善财政转移支付与绿色金融倾斜机制,优先支持生态脆弱、产业基础薄弱地区。

(2)提升产业-生态耦合协调水平。在宁夏沿黄等生态敏感区严格产业准入,推广清洁生产与资源循环利用;在山东半岛和中原城市群建设生态工业园区,打造园区级共生系统;依托遥感与GIS建立耦合协调动态监测体系,实现精细化治理。

(3)强化创新驱动,构建绿色技术体系。在创新基础较强地区设立绿色技术研发与转化平台,推动节能减排与清洁生产技术突破;在西部地区实施“技术引进+孵化”机制;完善绿色专利奖励与税收优惠制度,增强企业创新活力。

(4)构建多元协同治理机制。整合财政、税收、环境与金融政策,形成一体化绿色政策体系。在山西中部探索财政分权与城镇化联动模式,在山东半岛推动创新与结构优化协同。建立空间化决策支持系统,提升政策精准度。

(5)实施差异化引导,推动个性化绿色转型。兰州-西宁重点发展清洁能源产业;山西中部推动绿色财政与城镇基础设施升级;山东半岛要强化绿色制造的同时创新发展金融。建立分类型绩效考核体系,将绿色创新、资源效率与协调水平纳入考核,实行“横向可比、纵向可进”的动态评估,引导各城市群在差异化路径下协同提升。

参考文献

[1] FROSCH R A, GALLOPOULOS N E. Strategies for manufacturing[J]. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.

[2] EHRENFELD J, GERTLER N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg [J]. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1(1): 67-79.

[3] 刘则渊, 代锦. 产业生态化与我国经济的可持续发展道路[J]. 自然辩证法研究, 1994(12): 38-42.

[4] 郭守前. 产业生态化创新的理论与实践[J]. 生态经济, 2002(4): 34-37.

[5] 张国俊, 王珏晗, 庄大昌. 广州市产业生态化时空演变特征及驱动因素[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1070-1086.

[6] 马勇, 刘军. 长江中游城市群产业生态化效率研究[J]. 经济地理, 2015, 35(6): 124-129.

[7] 曾鹏, 韩晓涵. 中国城市群产业生态化及其空间特征[J]. 统计与决策, 2020, 36(8): 51-55.

[8] 郭付友, 佟连军, 刘志刚, 等. 山东省产业生态化时空分异特征与影响因素——基于17地市时空面板数据[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2226-2238.

[9] 孟建伟, 詹惠馨, 林英华. 呼包鄂榆城市群产业生态化评价及影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 328-338.

[10] 张新林, 仇方道, 谭俊涛, 等. 长三角地区产业生态化时空分异特征及转型空间策略性研究[J]. 地理与地理

信息科学，2023，39(5)：114-121.
[11] 秦曼，刘阳，程传周. 中国海洋产业生态化水平综合评价[J]. 中国人口·资源与环境，2018，28(9)：102-111.
[12] 周映伶，罗胤晨，文传浩. 城市产业生态化水平指标体系构建与综合评价[J]. 统计与决策，2021，37(6)：73-77.
[13] 游韵，罗胤晨，李春艳，等. 全域视角下重庆产业生态化空间格局与集聚效应研究——基于38县域数据的实证分析[J]. 长江流域资源与环境，2022，31(11)：2416-2429.
[14] 李慧涛，韩劲，陆刚，等. 太行山区产业生态化水平测度及空间差异——基于产业生态化实现过程的分析[J]. 干旱区资源与环境，2023，37(12)：68-77.
[15] 逯承鹏，刘志良，刘祎平，等. 黄河流域产业生态化时空格局及其影响因素[J]. 生态学杂志，2022，41(7)：1342-1350.
[16] 李扬杰，罗胤晨，刘小双. 长江经济带产业生态化水平的时空演化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境，2025，34(6)：1181-1192.
[17] 狄乾斌，禚元华，陈小龙. 山东半岛城市群产业生态化时空演变与影响因素 [J]. 生态经济，2025，41(6)：80-86.
[18] 程钰，李晓彤，孙艺璇，等. 我国沿海地区产业生态化演变与影响因素[J]. 经济地理，2020，40(9)：133-144.
[19] 孔芳霞，何强，程莉，等. 长江上游地区产业生态化演化特征及驱动因素分析[J]. 河北地质大学学报，2020，43(1)：87-96.
[20] 谢晓艺，石培基，张韦萍，等. 兰西城市群产业生态化时空分异特征及驱动因素分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2022，58(5)：668-677.
[21] 陆根尧，盛龙，唐辰华. 中国产业生态化水平的静态与动态分析——基于省际数据的实证研究[J]. 中国工业经济，2012(3)：147-159.
[22] 刘曙光，王璐，尹鹏，等. 中国地级以上城市产业生态化时空特征及其驱动因素研究[J]. 资源开发与市场，2018，34(11)：1488-1493.
[23] 许彬，马蓝. 黄河中上游地区产业生态化时空演变及驱动因素分析[J]. 青海民族研究，2025，36(1)：143-154.
[24] 谢晓艺，石培基，张韦萍，等. 兰西城市群产业生态化时空分异特征及驱动因素分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2022，58(5)：668-677.
[25] 张媛媛，袁奋强，刘东皇，等. 产业生态化水平的测度及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境，2019，28(10)：2331-2339.
[26] 史宝娟，张立华. 我国产业生态化空间分异及驱动因素分析——基于2005—2019年我国30省份经验数据[J]. 生态经济，2023，39(11)：67-75.
[27] 史丹，李少林. 排污权交易制度与能源利用效率——对地级及以上城市的测度与实证[J]. 中国工业经济，2020(9)：5-23.
[28] WU Y，SHI K F，CHEN Z，et al. An improved time-series DMSP-OLS-like data (1992—2022)[J]. China by Integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing，2022，60：1-14.
[29] 郭付友，佟连军，刘志刚，等. 山东省产业生态化时空分异特征与影响因素——基于17地市时空面板数据[J]. 地理研究，2019，38(9)：2226-2238.
[30] 邵帅，李欣，曹建华，等. 中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J]. 经济研究，2016，51(9)：73-88.
[31] 罗能生，王玉泽. 财政分权、环境规制与区域生态效率——基于动态空间托宾模型的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境，2017，27(4)：110-118.
[32] 韩永辉，黄亮雄，王贤彬. 产业结构优化升级改进生态效率了吗？[J]. 数量经济技术经济研究，2016，33(4)：40-59.
[33] 陈明华，岳海珺，郝云飞，等. 黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J]. 数量经济技术经济研究，2021，38(9)：25-44.
[34] 谭志雄，张阳阳，付佳. 预期的力量：晋升会引致环境污染吗？——基于工具变量法的实证研究[J]. 管理工程学报，2018，32(4)：37-45.

Spatio-temporal Evolution and Influencing Factors of Industrial Ecological Development in Urban Agglomerations of the Yellow River Basin

LIU Rui，SUN Lixia

(School of Economics and Finance，Qinghai University，Xining 810000，China)

Abstract：Selecting seven major urban agglomerations in the Yellow River Basin as the study area，a multidimensional evaluation system was constructed，covering economic development，industrial structure and ecological protection. The entropy method，coupling coordination model，spatial autocorrelation analysis，geographical detector and grey relational analysis were applied to examine the spatio-temporal evolution and influencing factors of industrial eco-development. The results show that from 2013 to 2023，the overall level of industrial eco-development increases steadily，presenting an “east-high，west-low” spatial pattern，with high-value areas concentrated in the Central Plains and Shandong Peninsula agglomerations. Economic development，technological innovation，environmental regulation and industrial restructuring are identified as the main driving forces. It is suggested that differentiated development paths should be promoted according to local conditions，innovation and regional coordination should be strengthened，and the green transformation of the basin’s industrial system should be advanced.

Keywords：Yellow River Basin；urban agglomeration；industrial eco-development；entropy method；geographical detector