

黄河流域产业生态化效率空间分异及驱动因素



霍雨田¹, 逯承鹏^{2,*}

¹ 兰州大学经济学院, 甘肃兰州 730000

² 兰州大学县域经济发展/乡村振兴战略研究院, 甘肃兰州 730000

摘要: 黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略, 产业生态化是在保证经济持续稳定增长的同时保持重要生态系统完整性、资源配置合理性以及兼顾紧密联系区域实际状况的有效路径。本文以黄河流域为研究区域, 产业生态化为研究对象, 讨论产业生态化效率空间差异及导致差异的影响因素, 旨在为地区间的比较分析、各地区自身的发展方向提供参考。本文采用超效率 SBM 模型测算了黄河流域 59 个市州 2001~2020 年产业生态化效率, 利用基于 Driscoll-Kraay 标准误的双固定效应回归模型和地理探测器探究研究区产业生态化效率的空间异质性、驱动因子及其相互作用。结果表明: 1. 在研究区域内产业生态化效率空间分异特征显著, 呈现出以省会城市为高值点向四周递减扩散的空间格局。2. 技术创新、环境管制、产业结构和对外开放均对产业生态化效率的提高具有影响, 且因自身的空间分布影响产业生态化效率的空间分布。3. 各个驱动因子对产业生态化效率及其空间异质性的影响效果并不相同。4. 各因子之间的交互作用对产业生态化效率的影响优于单因子的效果。

关键词: 产业生态化效率; 空间分异; 超效率 SBM 模型; 地理探测器; 黄河流域

DOI: [10.57237/j.earth.2022.01.004](https://doi.org/10.57237/j.earth.2022.01.004)

Spatial-temporal Differentiation and Driving Factors of Industrial Ecological Efficiency in the Yellow River Basin

Yutian Huo¹, Chengpeng Lu^{2,*}

¹School of Economics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

²Institute of County Economic Development and Rural Revitalization Strategy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin are major national strategies, and industrial ecology is an effective way to maintain the integrity of important ecosystems, rational resource allocation and take into account the actual situation of the region while ensuring sustained and stable economic growth. Taking the Yellow River Basin as the research area and industrial ecology as the research object, this paper discusses the spatial differences in industrial ecological efficiency and the influencing factors that lead to them, aiming to provide reference for the comparative analysis of regions and the development direction of each region. In this paper, the industrial ecological efficiency of 59 cities and prefectures in the Yellow River Basin in 2001~2020 was calculated by constructing a super-efficient SBM model. The

*通信作者: 逯承鹏, lcp@lzu.edu.cn

收稿日期: 2022-12-05; 接受日期: 2022-12-29; 在线出版日期: 2023-01-05

<http://www.earthscieng.com>

double fixed effect regression model based on Driscoll-Kraay standard error and geographic detector model were used to explore the spatial heterogeneity and driving factors of industrial ecological efficiency in the study area, and how these driving factors affected the spatial distribution of industrial ecological efficiency. The results show that: 1. The spatial differentiation characteristics of industrial ecological efficiency in the study area are significant, showing a spatial pattern of decreasing diffusion from provincial capital cities as high-value points. 2. Technological innovation, environmental control, industrial structure and opening up all have an impact on the improvement of industrial ecological efficiency, and will affect the spatial distribution of industrial ecological efficiency due to its own spatial distribution. 3. The influence of each driving factor on industrial ecological efficiency and spatial heterogeneity is different. 4. The influence of the interaction between factors on industrial ecological efficiency is better than that of single factor.

Keywords: Industrial Ecological Efficiency; Spatial Differentiation; Super-efficient SBM Model; Geological Detector; Yellow River Basin

1 引言

产业生态化是新时期经济地理学聚焦构建新发展格局背景下创新生产力布局的重大命题[1]。科学认知产业生态化效率时空分异特征及其驱动因子对黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义和实践价值。产业生态化思想源于 1980 年代中后期 Ayres 提出的产业代谢理论[2]和 Frosch 提出的产业生态系统理论[3], 指特定地域空间内产业系统的生态化发展过程, 强调产业系统与自然系统和社会系统之间物质与能量的耦合优化, 协调自然、社会与经济系统之间的可持续发展[4]。黄河流域是中国区域经济的重要板块, 也是重要的能源原材料基地, 经过历史上的长期开发, 在工业化和产业基地建设方面取得了巨大成就, 但也由于资源过度开发和能源重化工产业规模增长过快造成资源环境压力加大、生态环境负担加重等诸多问题, 严重威胁到流域生态安全[5]。因此, 破解产业发展与生态环境的矛盾是有效推进黄河流域生态保护和高质量发展的关键[6], 而产业生态化则是其重要内容和有效途径。学者们围绕这一主题开展了积极探索和研究, 诸如流域内省域、城市及城市群等不同空间尺度的产业生态化水平测度、效应分析、时空特征及其驱动因素研究[7-11], 取得丰富研究成果, 但对于全流域的产业生态化研究依然有待深入, 尤其是考虑到黄河流域所跨省份较多, 区域间经济状况、地理环境各有不同, 探析其产业生态化效率空间分异特征及驱动因子, 并开展流域内区域间的对比分析, 可为黄河流域产业转型升级和高质量发展提供理论和实践指导。

2 研究方法与数据

2.1 研究区域

依据以自然黄河流域为基础并尽可能保持行政区划单元的完整性和考虑区域经济发展与黄河直接关联性原则[12], 以及数据的可获取性原则, 本文选择山东、河南、山西、内蒙古、陕西、宁夏、甘肃和青海 8 省区共计 59 个市州作为研究区域(图 1)。

2.2 产业生态化效率测度指标体系构建

产业生态化是以环境友好为导向, 将产业系统、生态系统和社会系统进行整合优化, 实现经济效益、生态效益和社会效益的协同共进, 具体方式是以节能为标准控制投入要素的使用, 以增产减排为目标增加期望产出的同时减少非期望产出。本文结合研究区实际特点, 从产业和生态环境两个维度选取对应的投入、产出指标, 建立了共计 15 项具体指标的产业生态化效率综合评估指标体系(表 1)。

2.3 研究方法

本文采用 Tone 于 2001 年提出的超效率 SBM 模型[13], 全面科学地测度研究区 59 个市州的产业生态化效率。根据数据特征采用基于 Driscoll-Kraay 标准误的双固定效应回归模型[14], 确定产业生态化效率的影响因素。利用半变异函数和克里金插值法[15], 结合 GIS 空间分析工具, 探究产业生态化效率的空间异质性。最后, 采用地理探测器[16], 探测产业生态化效率驱动因子及其交互作用。

2.4 数据来源

本文研究数据来源于 2002~2021 年《中国城市统计年鉴》和 59 个地级行政单元及其所属省份的统计年鉴和统

计公报。碳排放量数据来源于中国碳核算数据库 (<https://www.ceads.net.cn/>)。绿色发明专利申请量由国家知识产权局 (<https://www.cnipa.gov.cn/>) 的数据整理得到。

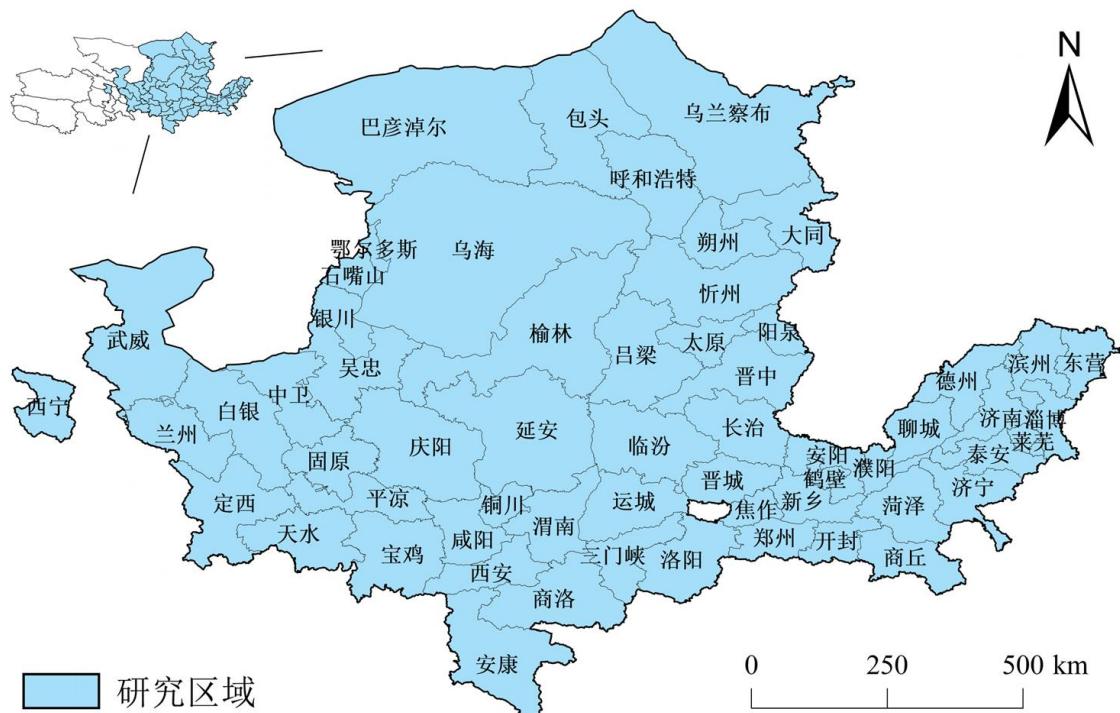


图 1 研究区域

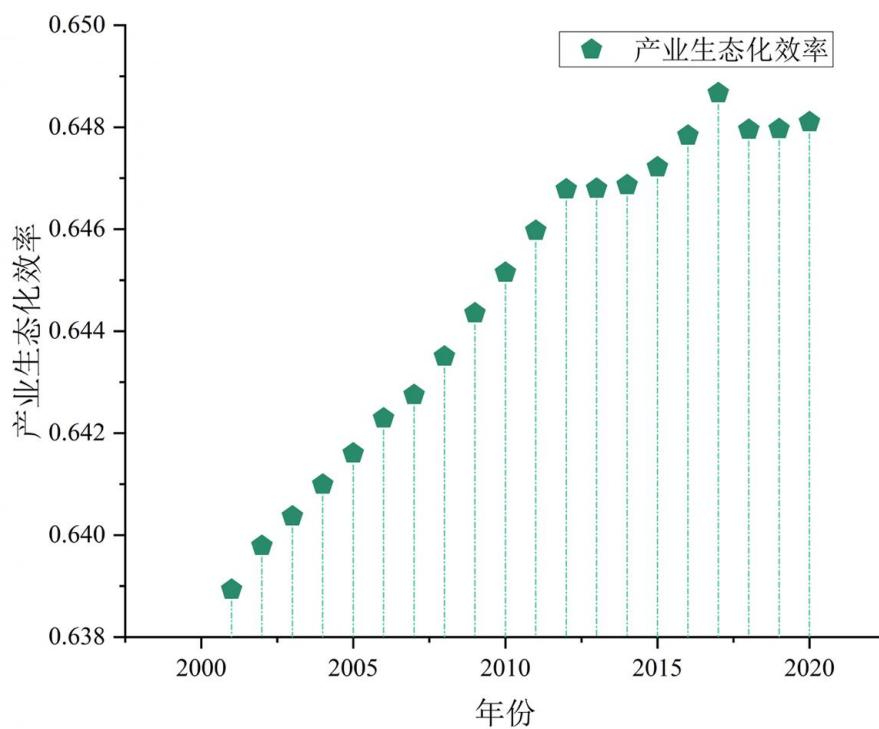


图 2 黄河流域产业生态化效率时序演化特征

表 1 产业生态化效率指标体系

类别	要素	指标	单位
投入要素	资本投入	固定资产投资额	万元
	劳动力投入	全社会就业人数	万人
	水资源投入	万元 GDP 用水量	立方米
	电力投入	万元 GDP 用电量	千瓦时
	化肥使用强度	农业化肥施用量/土地面积	吨/每公顷
	科技投入	科技支出/GDP	%
期望产出	经济产出	人均 GDP	元
		全员劳动生产率	%
		产业规模化水平	亿元
	环境产出	产业结构高级化指数	1
非期望产出	环境产出	pm2.5 年平均浓度年下降率	%
		单位工业增加值废水排放量	吨
		单位工业增加值烟(粉)尘排放量	吨/每亿元
		单位工业增加值二氧化硫排放量	吨/亿元
		碳排放/GDP	百吨/万元

3 黄河流域产业生态化效率时空分异特征

3.1 时序演化特征

根据上述方法和数据计算得到研究区 59 个地级行政单元产业生态化效率, 以其均值代表研究区域的整体水

平。由图 2 可知, 研究期间黄河流域产业生态化效率总体呈现快速增长趋势, 最低值为 2001 年的 0.6389, 最高值为 2017 年的 0.6487。从增长速率上看, 2001 年至 2012 年为快速增长期, 年均增长 0.007; 2013、2014 年产业生态化效率均值稳定在 0.6468 左右; 2015 至 2017 年年均增长速率再次恢复到 0.007; 此后, 产业生态化效率均值虽较 2017 年有所下降, 但仍呈现出缓慢的上升趋势。

3.2 空间分异特征

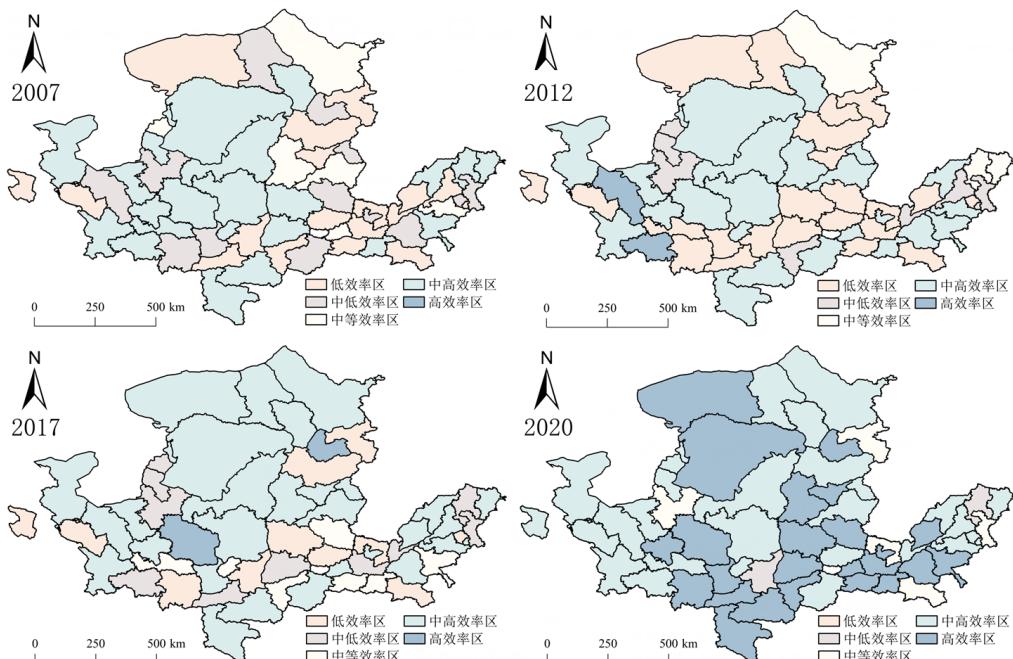


图 3 黄河流域产业生态化效率空间分异格局

选取 2007 年、2012 年、2017 年及 2020 年四个时间节点的数据，利用 GIS 空间可视化工具，采用自然间断分组法将研究区依照产业生态化效率高低的不同划分为高效率区、中高效率区、中等效率区、中低效率区以及低效率区，以探讨其空间分异特征。由图 3 可知，黄河流域产业生态化效率在研究区域内空间差异明显，同一时期水平较高的区域主要以各省会城市为中心铺展成面。

4 黄河流域产业生态化效率空间分异驱动因素

4.1 产业生态化效率驱动因子

借鉴已有研究[4, 17, 18]对产业生态化影响因素的探索，本文选取技术创新、环境管制、产业结构和对外开放四个方面作为表征类型，并将相应的指标作为驱动因子对其进行量化，地理探测器则为每个驱动因子选择了最优分类方式及类别数量（表 2）。通过分析数据特征进一步选取基于 Driscoll-Kraay 标准误的双固定效应回归模型验证所选指标的可靠性（表 3）。由表 3 可知，在研究区域内技术创新对产业生态化效率提升具有促进作用，环境管制和产业结构对产业生态化效率提升具有抑制作用，从整体上对外开放在因果回归中对产业生态化效率的提高作用并不显著。

表 2 影响因素

表征类型	影响因素			分类	
	驱动因子	单位	符号表示	类别数量	分类方式
技术创新	绿色发明专利申请量	件	gti	6	Quantile
环境管制	一般工业固体废弃物综合利用率	%	cu	5	Quantile
	生活垃圾无害化处理率	%	ht	4	Geometric
	污水处理厂集中处理率	%	ct	6	Quantile
产业结构	产业结构泰尔指	1	theil	5	Quantile
对外开放	产业外部依赖度	%	ed	5	Geometric
	实际利用外资	万元	fi	6	Quantile

表 3 回归结果

驱动因子	gti	cu	ht	ct	theil	ed	fi
回归结果	0.00014***	-0.00126*	0.00027	-0.00087*	-0.21501*	-0.00056	0

4.2 产业生态化效率及影响因素的空间分异

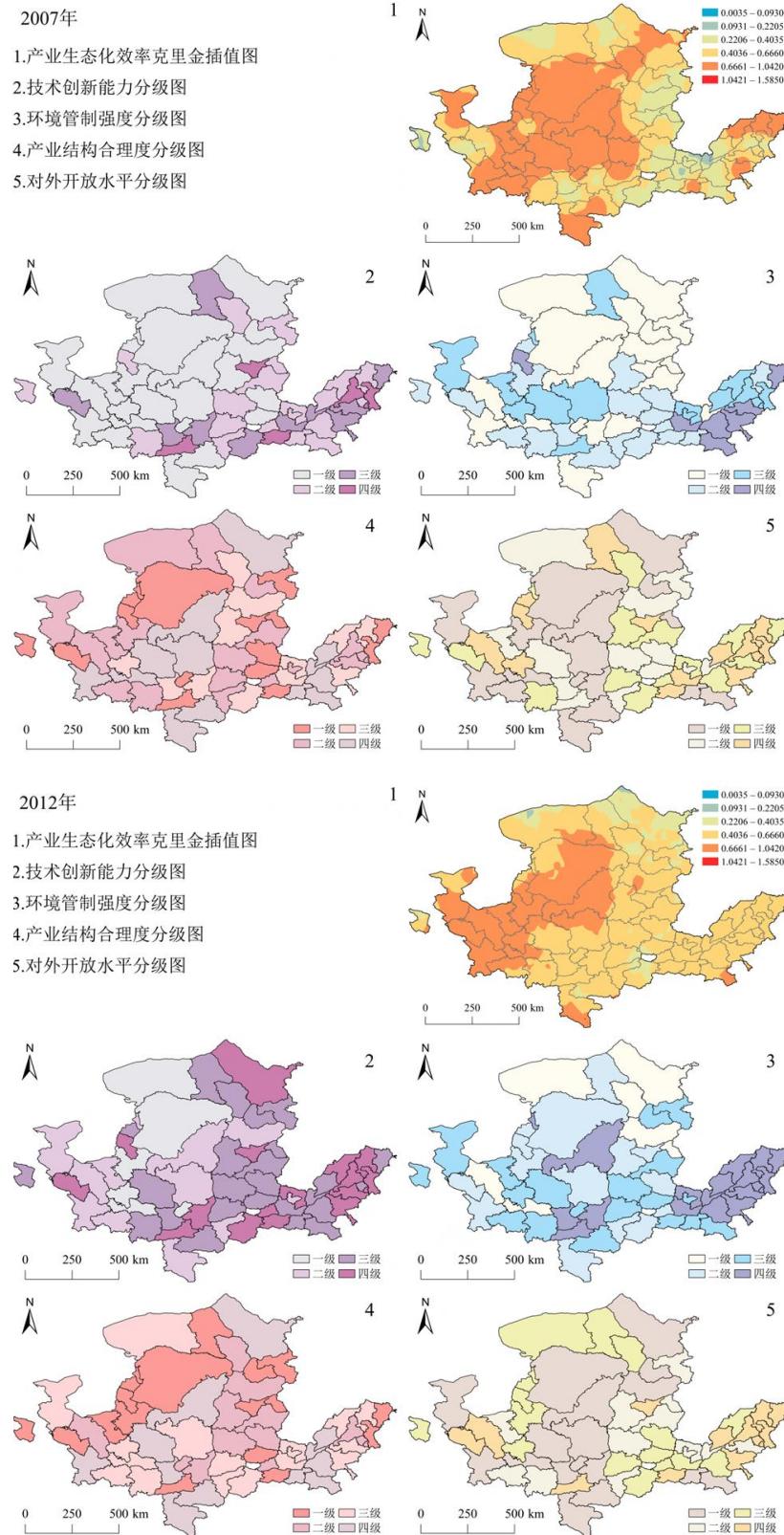
通过计算 2007、2012 和 2017 年研究区域产业生态化效率的半变异函数值确定拟合曲线并绘制 Kriging 插值图（图 4）。在步长既定的情况下，主变程由 2007 年的 1.503 增加到 2017 年的 2.019 意味着产业生态化效率同等级区域的范围不断扩大，偏基台值由 0.1434 下降到 0 的同时块金值由 0 增加到 0.166 说明即使地理位置临近的地区产业生态化效率的差异也在不断增大，研究区域呈现出明显的空间分异性。在图中表现为，同一时间内产业生态化效率等级由甘肃、内蒙古向河南、山东递减，随时间推移各地区等级均有所提高的时空分异与演进特征。

由图 3 可知，从各影响因素的分级情况看，整体上呈现出由东至西，自山东、河南向内蒙古、甘肃等级递减的

分异趋势。技术创新能力表现出明显的由点辐射到面的特征：2007 年，以绿色发明专利申请量表征的技术创新能力等级较高的区域集中在各个省会城市，如西宁、兰州、银川、西安、呼和浩特、太原等。经过 10 年的发展，由点到面，这些城市在自身创新水平提高的同时带动临近地区的等级提高，但中东部城市技术创新等级高于西部城市的情况没有改变；环境管制强度在空间上呈现出一面（山东诸市）两点（西安、兰州）向四周辐射发展的特征：东部地区山东各市及河南东部部分城市的环境管制强度始终较高，中部以西安为核心、西部以兰州为核心带动周边地区环境管制强度的提高；产业结构合理度由产业结构泰尔指数表征，是一项负向指标，其值越高意味着合理度越低，其表现出的特征恰与技术创新能力相反，各省会城市产业结构合理度要低于周边地区且随着时间的发展该要素等级的空间分布情况基本稳定；对外开放水平等级的空间分布则与环境管制强度类似，山东诸市对外开放水平始终较

高, 中西部地区分别以西安、兰州为高值区周边地区以此二地为中心随距离增加等级降低。综上所述, 产业生态化

效率及其影响因素均呈现出不同程度的空间分异性, 且驱动因子各不相同。



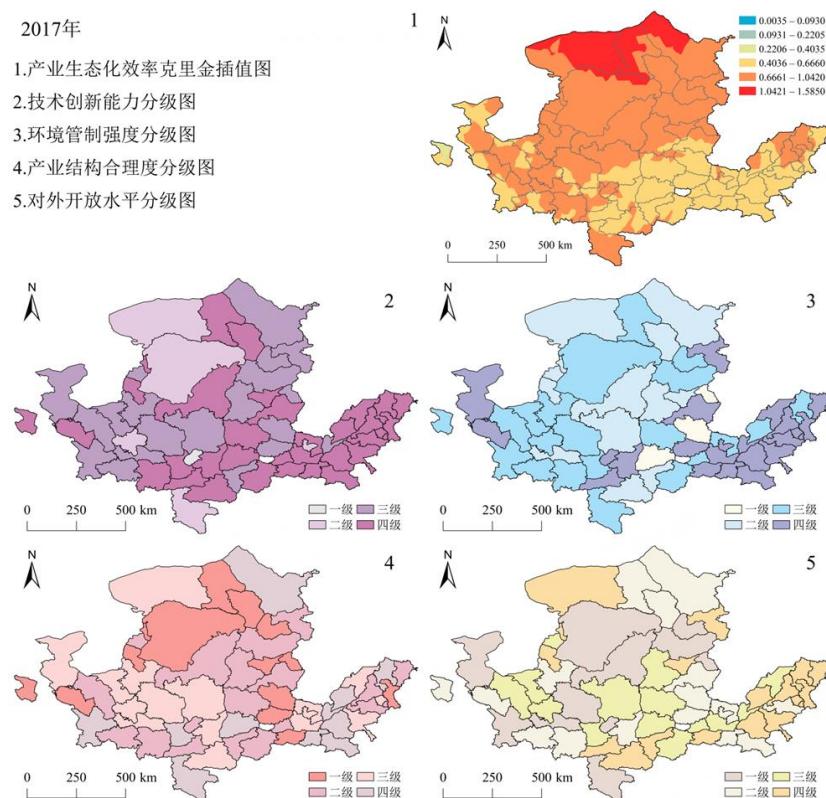


图 4 产业生态化效率 Kriging 插值及影响因子空间分类

4.3 驱动因子探测及其交互作用

为进一步探究各因素如何基于空间分异而影响产业生态化效率的高低,本文选择采用地理探测器对其间关系进行深入挖掘。由表 4 可知,各驱动因子对产业生态化效率均具有显著影响,彼此间存在差异但排名较为稳定且 q 值趋于相同。从横向对比看,绿色发明专利申请量、产业结构泰尔指数、产业外部依赖度、实际利用外资影响更强而环境规制的三个驱动因子的影响作用并不稳定,从纵向时间演进看各因子的影响效果均呈现出递减的趋势。具体而言,实际利用外资是对产业生态化效率影响最大的因素其平均 q 值在 0.12 左右,最高时达到

0.171之后逐渐下降至 0.049 影响排名也从第一跌至第三,绿色发明专利申请量和产业结构泰尔指数的影响次之平均 q 值分别为 0.109 和 0.075。产业外部依赖度对产业生态化效率的影响效果不及前三者但 q 值始终显著。环境管制的三个驱动因子分别反映了对废弃物进行处理的不同水平阶段,在早期对污染处理的重点在工业源头即加工生产过程,故只有污水处理厂集中处理率对产业生态化效率具有较为显著的影响, q 值为 0.055;进入下一期,对工业污染的控制更进一步重点转化为废弃物的再生利用,此时一般工业固体废弃物综合利用率对产业生态化效率具有显著影响, q 值为 0.037。

表 4 因子探测结果

因子	2003~2007		2008~2012		2013~2017	
	q	排序	q	排序	q	排序
绿色发明专利申请量 (GTI)	0.142***	2	0.131***	2	0.053*	2
一般工业固体废弃物综合利用率 (CU)	0.017	--	0.037**	5	0.027	--
生活垃圾无害化处理率 (HT)	0.019	--	0.044	--	0.006	--
污水处理厂集中处理率 (CT)	0.055**	5	0.030	--	0.015	--
产业结构泰尔指数 (THEIL)	0.142***	3	0.111***	3	0.054***	1
产业外部依赖度 (ED)	0.107***	4	0.076***	4	0.044**	4
实际利用外资 (FI)	0.171***	1	0.137***	1	0.049**	3

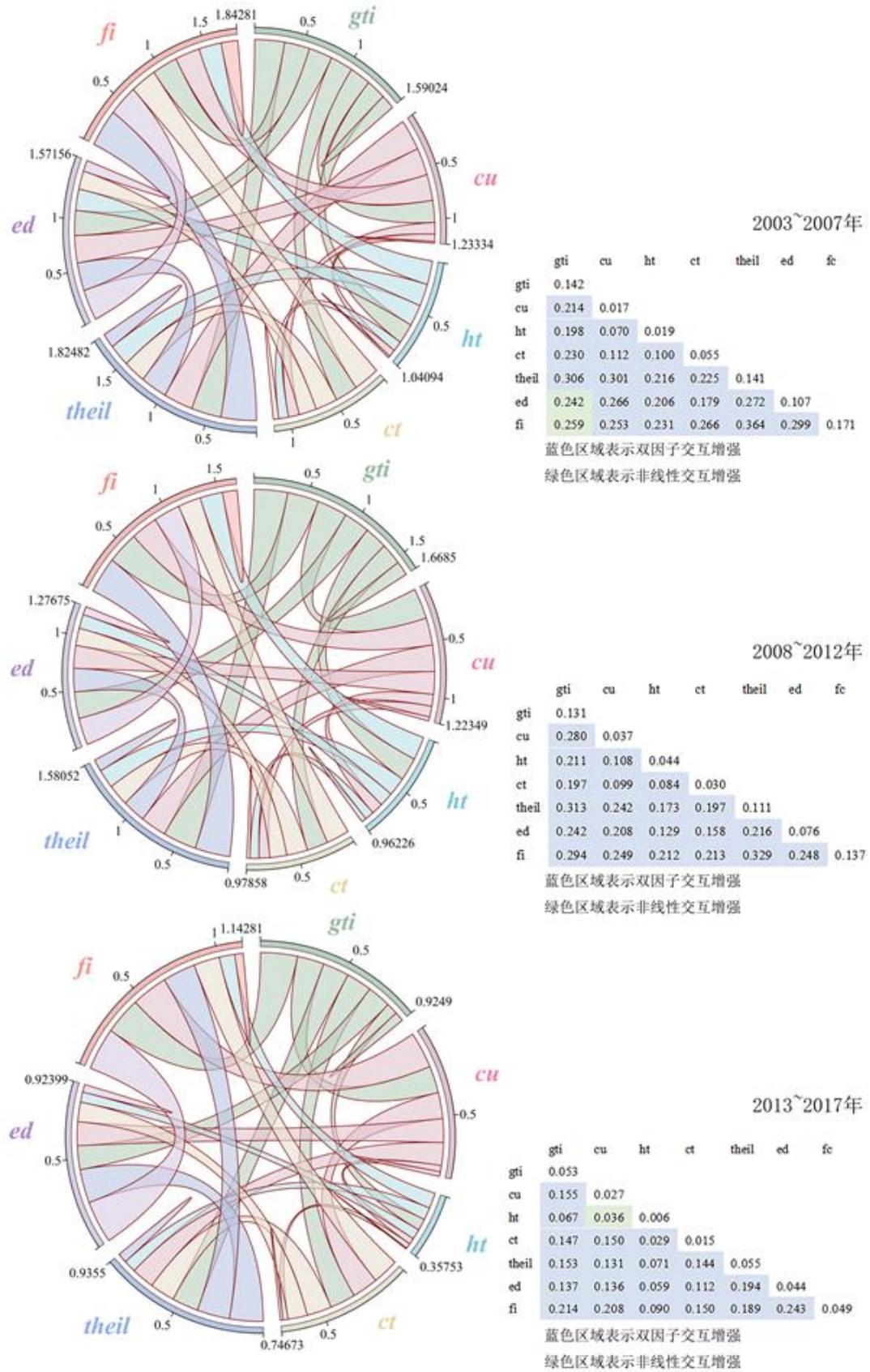


图 5 不同时段因子间交互作用

通过因子探测发现各驱动要素虽然对产业生态化效率均具有显著影响但效果却随着时间的推移而减弱，为了寻找推动产业生态化发展的更有力因素本文进一步探究不同驱动因子发生交互作用时对产业生态化效率影响效果的变动情况，即对各因子进行交互探测。依旧以三个时间段作为样本进行分析，探测结果表明（图 5）：在研究时段内各驱动因子间存在着较为紧密的相关关系并非独立存在，交互作用得到的 q 值相对于个体 q 值均有所提高，表明不同的驱动因子相结合可以对产业生态化效率的提高产生更强的影响效果。具体来看，绿色发明专利申请量与其他因子交互作用的效果具有波动性，在三个时间段依次经历了先增后减的过程，这与技术创新的特性的有关。其他驱动因子彼此间的交互作用则都表现出了明显的随时间减弱的趋势。

5 结论

本研究基于 2001~2020 年黄河流域 59 个地级行政单元的产业、生态发展状况及各驱动因子的面板数据，采用超效率 SBM 模型测算城市的产业生态化效率，采用固定效应模型确定影响因素，Kriging 插值法反映空间分异，最终利用地理探测器探究驱动因子如何影响产业生态化效率的空间分布，得到主要结论如下：

黄河流域各市州产业生态化效率逐年不断提高但增速不同，空间分异显著但相对差异基本稳定，高效率地区零散分布在以各省会城市为中心的局部区域上，尤其以济南-郑州-西安一线，并在未来一段时间内将始终是探索产业生态化效率增长点的突破口。

地理探测器测算结果显示，在选择的七项具体驱动因子中，对黄河流域产业生态化效率空间分布影响最大的是实际利用外资水平，绿色发明专利申请量和产业结构合理度次之、其他因素影响较小。充分利用政策机遇拓宽对外贸易水平，积极引进外资，合理高效利用外部资金、技术、人才输入将是黄河流域产业生态化发展的重要助力。

各驱动因子两两交互，对产业生态化效率表现出双因子增强或非线性增强的解释效果，且解释力在统计上是显著的。在众多的交互作用中，尤其以绿色发明专利申请量与其他驱动因子的交互作用最为有效，科技创新可以渗透进生产生活的方方面面，以绿色观念为核心，加强创新队伍人才培养建设，加快创新成

果向生产力的转化速度在未来一段时期至关重要。

综合上述分析得到以下启示：第一，黄河流域各城市间的产业生态化效率差异显著，各地区应根据自身产业发展状况、资源禀赋特征以及环境现状制定相应的发展策略，同时各省会城市应起到带头引领作用并注重与周边地区的协同合作，以城市群为范围实现联动发展。第二，影响产业生态化效率的因素是多方面的，影响效果也各有不同，要重点关注主导因子对产业生态化效率的影响，并通过合理选择驱动因子组合方式为推进当地产业生态化产生更优效果。本研究较系统地分析了部分影响因素对产业生态化效率空间分异性的解释效果，但仍未覆盖全部影响因素，各因子具体的作用方式也仍待深入挖掘。

参考文献

- [1] 樊杰. 我国经济地理学历史沿革、现状特征与发展策略 [J]. 经济地理, 2021, 41 (10): 10-15.
- [2] Scott Alister, Redclift Michael. Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development: edited by R U Ayres and U E Simonis United Nations University Press, Tokyo, 1994, 376 pp [J]. Global Environmental Change, 1995, 5 (2).
- [3] Frosch Robert A., Gallopolous Nicholas E. Strategies for Manufacturing [J]. Scientific American, 1989, 261 (3).
- [4] 遂承鹏, 刘志良, 刘祎平, 毛锦凰. 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 (07): 1342-1350.
- [5] 金凤君, 马丽, 许堞. 2020. 黄河流域产业发展对生态环境的胁迫诊断与优化路径识别. 资源科学, 42 (1): 127-136.
- [6] 郭付友, 高思齐, 佟连军, 等. 黄河流域绿色发展效率的时空演变特征与影响因素 [J]. 地理研究, 2022, 41 (1): 167-180.
- [7] 王小宁, 魏婉茹. 2018. 青海省产业生态化水平评价研究. 青海师范大学学报 (哲学社会科学版), 40 (4): 10-16.
- [8] 敬艳丽. 2019. 中原经济区背景下的河南省产业生态化发展路径研究. 经济研究导刊, (16): 46-47.
- [9] 郭付友, 佟连军, 刘志刚, 等. 2019. 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. 地理研究, 38 (9): 2226-2238.
- [10] 刘曙光, 王璐, 尹鹏, 等. 2018. 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. 资源开发与市场, 34 (11): 1488-1493.

- [11] 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 (05): 668-677.
- [12] 遂承鹏, 纪薇, 刘志良, 等. 黄河流域甘肃段县域“三生”功能空间时空格局及影响因素识别 [J]. 地理科学, 2022, 42 (4): 579-588.
- [13] Kaoru Tone, Miki Tsutsui. Dynamic DEA: A slacks-based measure approach [J]. Omega, 2009, 38 (3).
- [14] John C. Driscoll, Aart C. Kraay. Consistent Covariance Matrix Estimation with Spatially Dependent Panel Data [J]. The Review of Economics and Statistics, 1998, 80 (4).
- [15] 薛明月, 王成新, 赵金丽, 等. 黄河流域旅游经济空间分异格局及影响因素 [J]. 经济地理, 2020, 40 (04): 19-27.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. 地理学报, 2017, 72 (01): 116-134.
- [17] 周小喜, 段存儒, 武照亮, 等. 工业产业生态化效率演变特征及其驱动因素 [J]. 统计与决策, 2022, 38 (15): 93-97.
- [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 (09): 133-144.