·经济学研究·

DOI:10. 20004/j. cnki. ujn. 2023. 05. 010

黄河流域工业绿色技术创新效率的时空差异与成因识别研究

袁朋伟,董晓庆

(济南大学 商学院,山东 济南 250024)

[摘 要]绿色技术创新是经济高质量发展的主要推动力,准确测算黄河流域工业绿色技术创新效率并把握其区域差异的原因,才能精准有效推动黄河流域工业绿色技术创新效率的协同提升。基于DEA框架中的超效率EBM模型测算黄河流域工业绿色技术创新效率,采用Dagum基尼系数法测度了其区域差异,运用QAP方法深入探究造成其差异的主要原因。研究表明:黄河流域的工业绿色技术创新效率呈现波动上升趋势,并具有区域和省际差异,这种差异呈现出先上升后下降的"倒U型"变化态势。专利申请数量、新产品销售收入、一般工业固体废弃物产生量是造成区域差异的主要原因。在新时代绿色发展和创新驱动引领黄河流域经济社会高质量协调发展的背景下,促进黄河流域的工业绿色技术创新效率的协调提升,具有重要现实意义。

[关键词]工业绿色技术创新效率;EBM模型;Dagum基尼系数;QAP

[中图分类号]F49 [文献标识码]A [文章编号]1671-3842(2023)05-0093-13

一、引言

黄河是中华民族的摇篮,依次流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省份。黄河流域不仅是我国农牧业中心,同时也是重要的能源、化工和制造业基地,人口众多,资源丰富。保护其生态环境和促进其经济社会高质量发展是国家战略的重要组成部分①。虽然党的十八大以来,黄河流域的生态环境和社会经济得到长远的发展,但仍然存在生态资源环境承载能力弱,沿黄各省(自治区)发展不平衡、不充分等问题②。习近平总书记在2019年黄河流域生态保护和高质量发展座谈会的讲话中指出,要统筹推进各项工作,加强协同配合,推动黄河流域高质量发展。为进一步加快黄河战略实施③,2021年10月8日国务院印发的《黄河流域生态保护和高质量发

[基金项目]本文系国家社会科学基金一般项目"竞争性国企创新效率损失及优化对策研究"(项目编号:20BGL047);济南市哲学社会科学重点项目"济南市农村低收入人口返贫动态监测和常态化帮扶机制研究"(项目编号:JNSK22B20)之阶段性研究成果。

[作者简介]袁朋伟,济南大学商学院副教授、硕士生导师;董晓庆(通讯作者),济南大学商学院副教授、硕士生导师。

①李炬霖,李同昇,杨林朋,宋琼,赵孟丽:《2001—2021年黄河流域农业科技园区的时空格局及影响因素》,《地理研究》,2023年第1期。

②任保平,张倩:《黄河流域高质量发展的战略设计及其支撑体系构建》,《改革》,2019年第10期。

③陈明华,王哲,李倩,谢琳霄:《黄河流域高质量发展的不平衡不充分测度及成因》,《当代经济研究》,2022年第9期。

展规划纲要》明确指出:推动清洁生产,坚定走绿色、可持续的高质量发展之路。《"十四五"工业绿色发展规划》进一步提出深入实施绿色制造,加快产业结构优化升级,大力推进工业节能降碳,全面提高资源利用效率,积极推行清洁生产改造,提升绿色低碳技术、绿色产品、服务供给能力,构建工业绿色低碳转型与工业赋能绿色发展相互促进、深度融合的现代化产业格局。因此,在生态与资源约束下应大力发挥绿色科技创新对工业绿色发展的引领作用。在此背景下,研究黄河流域工业绿色技术创新水平,具有十分重要的意义。

绿色技术创新的效率是指在工业领域内绿色技术创新活动中投入与产出的比较关系。它反映了绿色科技资源配置和绿色创新投资资源利用效率的重要指标。然而,目前鲜有文献系统评估黄河流域工业绿色技术效率的发展现状与趋势。那么黄河流域各区域的工业绿色技术创新效率现状如何、区域间差异怎样、动态趋势如何演化?区域差异的成因如何?对上述问题进行深入的分析与讨论,一方面能够更加精准、清晰地揭示黄河流域工业绿色技术创新效率的动态演变和发展趋势,另一方面能够掌握黄河流域工业绿色技术创新效率的区间差异和产生原因,进而为推动黄河流域工业高质量协同发展提供有益参考。

基于此,本研究将使用2008—2020年黄河流域9省份工业绿色技术创新数据,基于EBM模型测算黄河流域的工业绿色技术创新效率,使用Dagum基尼系数法测度工业绿色技术创新效率区域差异,使用QAP方法探究造成其差异的成因。以期为提高黄河流域工业绿色技术创新效率提供理论支持。

二、文献综述

自《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》发布后,黄河流域经济社会发展成为学界研究热点,当前关于黄河流域的研究主要集中在生态保护与可持续发展[①]、水资源利用与经济发展协调[②]、流域高质量发展[③]等方面。其中,黄河高质量发展方面的研究较多,主要集中于黄河流域高质量发展的内涵、路径、政策以及发展水平测度等方面[④],当然,也有部分学者注意到了科技创新或者绿色技术创新对流域高质量发展的重要作用,并进行了相关研究。如刘贝贝等从绿色科技创新的定义和理论基础出发,分析了其对黄河流域高质量发展的重要作用,并提出了相应的实现路径[⑤];燕玉洁与申社芳通过黄河流域省级面板数据证明了绿色技术创新对高质量发展的作用机制[⑥]。沈路和钱丽通过构建黄河流域高质量评价指标体系,并运用一系列方法研究发现,科技创新对流域

①曹炜:《"双碳"目标下的流域生态环境保护规划:理念更新与措施调适》,《中国人口·资源与环境》,2022年第12期;高国力,贾若祥,王继源,窦红涛:《黄河流域生态保护和高质量发展的重要进展、综合评价及主要导向》,《兰州大学学报》(社会科学版),2022年第2期。

②王格芳,李梦程:《黄河流域水资源与区域发展时空耦合研究》,《干旱区资源与环境》,2023第2期。

③汪芳,苗长虹:《系统性、整体性与协同性:黄河流域高质量发展的思维与策略:写在专辑刊发之后的话》,《自然资源学报》,2021年第1期;刘曙光,许玉洁,王嘉奕:《江河流域经济系统开放与可持续发展关系:国际经典案例及对黄河流域高质量发展的启示》,《资源科学》,2020年第3期。

④任保平,巩羽浩:《数字经济助推黄河流域高质量发展的路径与政策》,《经济问题》,2023年第2期。

⑤刘贝贝,左其亭,刁艺璇:《绿色科技创新在黄河流域生态保护和高质量发展中的价值体现及实现路径》,《资源科学》,2021年第2期。

⑥燕玉洁,申社芳:《环境规制对黄河流域经济高质量发展的影响研究——基于绿色技术创新视角》,《当代经济》,2022年第12期。

高质量发展有重要作用，也指出流域内存在科技创新成果转化平台不完善，应该提高科技创新转化效率，特别是注意提升绿色技术创新专利数量[①]，而有关黄河流域工业绿色技术创新效率的实证探讨还较为缺乏。

绿色技术创新是经济高质量发展的主要推动力。Braun和Wield最早提出了绿色技术创新的概念：绿色技术创新是在产品研发生产的全过程中，减少环境污染，降低资源利用率等一系列创新活动的总称[②]。随后，绿色技术创新得到了学界的广泛关注，相关研究可以从研究内容、研究对象和研究方法三个角度分析。概括而言，在研究内容上，主要集中在以下三个方面：第一，针对绿色技术创新内涵及本质的探讨研究[③]；第二，针对绿色技术创新效率测算、影响因素、空间分布、区域差异等方面的研究[④]；第三，针对绿色技术创新效率影响机制及提升路径的研究[⑤]，比如产业集群、政府规制、数字金融等因素对绿色技术创新效率的影响[⑥]。在研究对象及数据选取上，实证对象主要集中在全国层面、东部沿海地区和长江经济带[⑦]，相应的数据选取涉及到国家级和省级区域、行业和企业等各层面的数据，相对来说，对黄河流域的研究较少。在研究方法上，绿色技术创新效率评价方法主要有以随机前沿分析法（Stochastic Frontier Approach，SFA）为主的参数分析法和以数据包络分析方法（Data Envelopment Analysis，DEA）为主的非参数方法。SFA方法在处理测量误差和统计干扰方面具有一定的优势，但其函数形式的选择比较敏感；一旦函数模型的参数设置或分布假设存在一定的误差，将难以准确衡量技术创新的效率，因此应用范围受到一定的限制[⑧]。相比之下，DEA方法不需要建立固定的生产函数和参数权重，也不需要维度的统一，因此，DEA方法更适应于多投入、多产出的复杂系统[⑨]。在用DEA模型对绿色技术创新效率进行评价时，大多学者采用的是径向模型和非径向模型。其中，径向模型容易忽视变量的不同特性，一般要求变量按照相同比例变化；而非径向模型虽然注意到了变量之间的差异，但是容易忽视变量的比例关系，有可能对结果的准确性造成一定影响[⑩]。综合径向和非径向模型的优缺点，Tone和Tsutsui改进出了一种混

①沈路，钱丽：《黄河流域高质量发展水平测度、空间关联及影响因素分析》，《统计与决策》，2022年第13期。

②Braun E.，Wield D.，Regulation as a Means for the Social Control Of Technology，*Technology Analysis&Strategic Management*，Vol. 6，No. 3，1994，pp. 259-272.

③李旭：《绿色创新相关研究的梳理与展望》，《研究与发展管理》，2015年第2期。

④王海杰，李捷，张小波：《黄河流域制造业绿色全要素生产率测评及影响因素研究》，《福建论坛》（人文社会科学版），2021年第10期。

⑤姚孟超，段进军，张仁杰，玄泽源：《中国高技术产业绿色创新效率的空间关联结构与影响机制分析》，《长江流域资源与环境》，2022年第11期；贾建锋，刘伟鹏，赵若男，蒋金鑫：《制度组态视角下绿色技术创新效率提升的多元路径》，http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1288.F.20230307.1021.002.html，2023.03.22.

⑥王洪庆，郝雯雯：《高新技术产业集聚对我国绿色创新效率的影响研究》，《中国软科学》，2022年第8期；康鹏辉，茹少峰：《环境规制的绿色创新双边效应》，《中国人口·资源与环境》，2020年第10期；吕岩威，张帅：《数字金融对绿色创新效率的影响及传导机制研究》，《金融论坛》，2022年第8期。

⑦许学国，周燕妃：《基于三阶段Malmquist-PNN的区域绿色创新效率评价与智能诊断研究》，《科技进步与对策》，2020年第24期；马志强，王琰，苏佳璐：《长三角城市群工业绿色创新效率时空发展特征及动态演变分析》，《科技进步与对策》，2023年第7期。

⑧Zhu L.，Wang Y.，Shang P. et al.，Improvement Path，the Improvement Potential and the Dynamic Evolution of Regional Energy Efficiency in China：Based on an Improved Non-Radial Multidirectional Efficiency Analysis，*Energy Policy*，Vol. 133，p. 110883.

⑨Gaoke L.，Benjamin M. Drakeford，An analysis of financial support，technological progress and energy efficiency：evidence from China，*Green Finance*，Vol. 1，No. 2，2019，pp. 174-187.

⑩杨骞，刘鑫鹏，孙淑惠：《中国科技创新效率的区域差异及其成因识别——基于重大国家区域发展战略》，《科学研究》，2022年第5期。

合模型EBM(Epsilon-based Measure),由于该模型兼具了径向模型和非径向模型的优点,规避了某些缺点,能够更加全面以及准确地对效率值进行测算①。目前EBM模型已在科技效率测算方面得到了广泛运用。

综上,针对黄河流域的研究文献虽然很多,但是从绿色技术创新角度入手研究的文献不多,且大多阐述的是绿色技术创新对黄河流域高质量发展的重要作用,缺乏对黄河流域绿色技术创新效率的测算,特别针对黄河流域的工业领域。黄河流域工业绿色技术创新效率的区域差异,尚未有文献进行系统的研究。关于存在差异的原因分析方面的研究,影响因素分析居多,比如人力资本、对外开放、经济发展、政府补贴等,但对于黄河流域不同区域差异的成因,尚未有文献进行系统的研究,并给出清晰明确的解释。基于此,本文从黄河流域的工业绿色技术创新效率入手,分析其时空演变和差异成因。

三、方法与数据

(一)基于EBM模型的工业绿色技术创新效率测算

在传统的径向DEA模型框架下,测算时要求投入与产出都必须同比例地伸缩,无法包含松弛变量,采用非径向测算为基础的SBM模型,虽然解决了这一问题,但也损失了投入产出目标值和实际值之间的比例约束。为了解决此问题,Tone和Tsutsui改进出了一种混合模型EBM,由于该模型兼具了径向模型和非径向模型的优点,规避了缺点,能够更加全面以及准确地对效率值进行测算。鉴于EBM模型的优势,本文采用EBM模型测算黄河流域工业绿色技术创新效率。

本研究以黄河流域的省份为决策单元(Decision Making Unit,DMU),假设共有N个决策单元,t个时期,每个时期各DMU共有m个投入要素x,n个期望产出和j个非期望产出z,则构造全局超效率EBM模型,如公式(1)所示:

$$\min E^{*}=\frac{\theta-\varepsilon_{x}\left(1/\sum_{m=1}^{M}\omega_{m}^{-}\right)\sum_{m=1}^{M}\omega_{m}^{-}s_{m}^{-}/x_{mk}}{\varphi+\varepsilon_{y}\left(1/\sum_{n=1}^{M}\omega_{n}^{+}\right)\left(1/\sum_{n=1}^{N}\omega_{n}^{+}s_{n}^{+}/y_{nk}\right)+\varepsilon_{z}\left(1/\sum_{b=1}^{B}\omega_{b}^{\times}\right)\left(1/\sum_{b=1}^{B}\omega_{b}^{\times}s_{b}^{x}/z_{bk}\right)}$$

$$s.t.\begin{cases}\sum_{r=1,\neq k}^{N}\lambda_{r}^{t}x_{rm}^{t}+s_{m}^{-}=\theta x_{k}\\ \sum_{r=1,\neq k}^{N}\lambda_{r}^{t}x_{rn}^{t}-s_{n}^{+}=\varphi y_{k}\\ \sum_{r=1,\neq k}^{N}\lambda_{r}^{t}z_{rj}^{t}-s_{b}^{\times}=\varphi z_{k}\\ \lambda,s_{m}^{-},s_{n}^{+},s_{b}^{\times}\geqslant 0\end{cases}\tag{1}$$

式中,E^{*}为最佳效率值。θ为DEA框架中CCR模型中的径向条件效率值。$s(s_{m}^{-},s_{n}^{+},s_{b}^{\times})$为投入指标、期望产出、非期望产出三种指标的松弛变量,$\omega(\omega_{m}^{-},\omega_{n}^{+},\omega_{b}^{\times})$为三种指标的相对权重。$\varepsilon(\varepsilon_{x},\varepsilon_{y},\varepsilon_{z})$代表关键参数,其取值范围为[0,1],表示径向与非径向松弛的组合程度。

(二)基于Dagum基尼系数法的空间差异测度

本文采用Dagum基尼系数法测度黄河流域工业绿色技术创新效率的空间差异性,该方法主要

①Tone K.,Tsutsui M.,An Epsilon-based Measure of Efficiency in DEA-A Third Pole of Technical Efficiency,*European Journal of Operational Research*,Vol. 207,No. 3, 2010,pp. 1554-1563.

通过比较不同地区之间的指标差异来评估地理空间上的不平等程度①，相比于泰尔指数等测度方法，具有测量准确、敏感性强和适用范围广等特点。计算过程如式(2)至式(9)所示。其中，总体基尼系数G表示研究对象的总体差异的大小，其值可进一步拆解为区域内差异贡献G_w与区域间差异贡献G_{gb}。其中，G_{gb}可以进一步地分解为区域间净值差异贡献G_{nb}与超变密度贡献G_t，用来反映测度对象各细分对象的详细状况。一般而言，基尼系数数值的大小反映了区域差异的大小，其值越大，说明区域间差异越大。

$$G=\frac{\sum_{i=1}^{k}\sum_{m=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{r=1}^{n_m}\left|gite_{ij}-gite_{mr}\right|}{2\cdot n^2\cdot\mu} \tag{2}$$

$$G_{ii}=\frac{\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{r=1}^{n_i}\left|gite_{ij}-gite_{ir}\right|}{2\cdot n^2\cdot\mu_i} \tag{3}$$

$$G_{im}=\frac{\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{r=1}^{n_m}\left|gite_{ij}-gite_{mr}\right|}{n_i\cdot n_m\cdot(\mu_i+\mu_m)} \tag{4}$$

$$G_w=\sum_{i=1}^{k}G_{ii}\cdot p_i\cdot s_i \tag{5}$$

$$G_{nb}=\sum_{i=2}^{k}\sum_{m=1}^{i-1}G_{im}\cdot(p_i\cdot s_m+p_m\cdot s_i)\cdot D_{im} \tag{6}$$

$$G_t=\sum_{i=2}^{k}\sum_{m=1}^{i-1}G_{im}\cdot(p_i\cdot s_m+p_m\cdot s_i)\cdot(1-D_{im}) \tag{7}$$

$$p_i=n_i/n;\ s_i=(n_i\cdot\mu_i)/(n\cdot\mu);\ i=1,2,\cdots,k \tag{8}$$

具体的计算过程如下：首先，基于公式(2)来得出总体基尼系数G，用来测度黄河流域全部省域的工业绿色技术创新效率(用$gite$表示)的空间总差异。式中，$gite_{ij}$代表第i个地区中第j个省份的工业绿色技术创新效率值；n为黄河流域的省份数量，取值为9；k为地区数，取值为3；n_i与n_m则表示第i个或m个地区包含的样本数量；μ是各地区的$gite$均值。其次，基于公式(3)、(4)求解第i个地区的区域内基尼系数G_{ii}、第i个和第m个地区的区域间基尼系数G_{im}；最后，基于公式(5)、(6)、(7)进一步计算区域内差异贡献G_w、区域间净值差异贡献G_{nb}、超变密度贡献G_t三个数值。

此外，在公式(6)、(7)中，D_{im}表示第i个地区与第m个地区之间工业绿色技术创新效率$gite$的相互影响程度的度量，其测算过程如公式(9)所示：

$$\begin{aligned}&D_{im}=\frac{d_{im}-P_{im}}{d_{im}+p_{im}},\ d_{im}=\int_0^{\pi}\mathrm{d}F_i(y)\int_0^{\gamma}(y-x)\mathrm{d}F_m(x),\\&P_{im}=\int_0^{\infty}\mathrm{d}F_m(y)\int_0^{y}(y-x)\mathrm{d}F_i(y)\end{aligned} \tag{9}$$

其中，d_{im}表示各地区之间工业绿色技术创新效率$gite$有正向差异的平均水平，即任意两个地区的差值$gite_{ij}-gite_{mr}>0$的样本的算术平均值；而P_{im}则代表了任意两个地区的差值$gite_{ij}-gite_{mr}<0$的样本的算术平均值；F_i、F_m则代表样本中任意两个地区的累积密度分布函数。

(三)基于QAP的差异成因识别方法

黄河流域的工业绿色技术创新效率的区域差异实际上是两两差异的映射集合，是一种“关系数据”。基于此，本文将关系数据的分析范式引入到黄河流域的工业绿色技术创新效率的区域差异研究中，构建社会网络关系数据并利用QAP(Quadratic Assignment Problem，二次指派程序)对造成黄河流域工业绿色技术创新效率的区域差异的主要原因进行辨识。构建如公式(10)所示的计

① Dagum C, A New Approach to the Decomposition of the Gini Income Inequality Ratio, *Empirical Economics*, Vol. 22. No. 4, 1997, pp. 515-531.

量模型:

$$Y = \beta_i X_i + U \tag{10}$$

其中,Y表示黄河流域工业绿色技术创新效率的区域差异矩阵,X_i表示影响工业绿色技术创新效率的因素形成的区域差异矩阵,β_i表示待估系数,U表示残差量。QAP分析主要包括相关分析和回归分析。相关分析主要测算两个差异矩阵之间的相关性的大小;而回归分析主要分析被解释变量差异矩阵与多个解释变量差异矩阵之间的关系。QAP的相关分析和回归分析在计算原理上并没有太大区别,都是通过将关系矩阵转化为长向量,然后对长向量进行普通最小二乘估计,进一步得到相关系数集或回归系数集,然后进行相关的统计检验。值得注意的是,该方法对于变量间的独立性无严格要求,回归结果比采用其他回归方法更加稳健。

(四)指标选取与数据来源

1. 指标选取

按照测量效率的思路,首先是工业绿色技术创新的投入指标。在投入要素中,研发经费和人力资源是进行绿色技术创新活动不可或缺的要素,本文参考王洪庆等人的研究[①],选择R&D人员折合的全时当量、R&D经费内部支出两个指标作为投入要素。另外,考虑到绿色技术创新的能源消耗问题是重要的衡量指标,本文参考黄万华与王梦迪的研究[②],选择以万吨标准煤为单位的工业终端能源消费总量作为能源要素方面的投入要素。其次,确定产出指标。考虑到工业绿色技术创新的目的是统筹工业经济效益与生态效益的平衡,本文将工业绿色技术创新的产出指标分为期望产出与非期望产出两种。其中,创新期望产出主要从新技术产生角度和新技术的经济利益两个方面进行考量,采用专利申请数量与新产品销售收入两个指标进行测度。非期望产出主要为工业企业生产过程中向自然界排放的"废水、废气、废渣",本文参考任耀等的研究方法[③],采用工业废水排放量、工业二氧化硫排放量、一般工业固体废弃物产生量来衡量非期望产出。

2. 数据来源

本文选择黄河流域9个省份2008—2020年工业行业的省份数据为研究对象,各省份的投入与产出指标的数据主要来源于:《中国科技统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《工业企业科技活动统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国统计年鉴》以及黄河流域各省份的统计年鉴。少部分缺失数据采用省份数据与全国数据的比值乘以行业数据估算。

四、黄河流域工业绿色技术创新效率测度及区域差异分析

(一)效率测算

依据上文构建的指标体系,运用Matllab2018a编写程序测算出黄河流域2008—2020年的工业绿色技术创新效率值。根据黄河流域各省份所处流域位置的不同,计算出黄河流域上游地区(青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古)、中游地区(陕西、山西)、下游地区(河南、山东)及黄河流域整体工业绿色技术创新效率值(结果见表1和表2所示)。

①王洪庆,郝雯雯:《高新技术产业集聚对我国绿色创新效率的影响研究》,《中国软科学》,2022年第8期。

②黄万华,王梦迪:《长江经济带制造业绿色技术创新效率测度》,《统计与决策》,2021年第19期。

③任耀,牛冲槐,牛彤,姚西龙:《绿色创新效率的理论模型与实证研究》,《管理世界》,2014年第7期。

表1　黄河流域各省份工业绿色技术创新效率值

省份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	均值
青海	1.000	0.136	0.035	0.019	0.022	0.028	0.020	0.065	0.154	0.360	0.645	0.473	1.000	0.304
四川	0.830	0.357	0.247	0.381	0.431	0.479	0.527	0.547	0.632	0.812	0.734	0.832	1.000	0.601
甘肃	0.835	0.155	0.209	0.273	0.315	0.333	0.333	0.294	0.197	0.312	0.334	0.552	0.802	0.380
宁夏	0.602	0.154	0.149	0.168	0.242	0.330	0.209	0.323	0.236	0.353	0.448	0.435	0.834	0.345
内蒙古	0.905	0.125	0.102	0.122	0.136	0.131	0.117	0.131	0.148	0.266	0.307	0.426	0.503	0.263
陕西	0.701	0.213	0.220	0.234	0.204	0.241	0.252	0.227	0.286	0.407	0.556	0.683	0.798	0.386
山西	0.681	0.135	0.113	0.168	0.182	0.201	0.173	0.181	0.250	0.324	0.407	0.460	0.901	0.321
河南	1.000	0.227	0.208	0.239	0.227	0.358	0.376	0.402	0.449	0.673	0.808	0.770	1.000	0.518
山东	1.000	0.385	0.317	0.398	0.469	0.513	0.552	0.494	0.559	0.734	0.771	0.792	1.000	0.614

表2　黄河流域上、中、下游及整体的工业绿色技术创新效率值

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	均值
上游	0.8343	0.1855	0.1485	0.1927	0.2291	0.2601	0.2413	0.2720	0.2735	0.4206	0.4939	0.5436	0.8278	0.3787
中游	0.6913	0.1742	0.1663	0.2008	0.1933	0.2210	0.2124	0.2041	0.2679	0.3655	0.4816	0.5719	0.8495	0.3538
下游	1.0000	0.3062	0.2623	0.3181	0.3481	0.4356	0.4638	0.4480	0.5040	0.7035	0.7896	0.7809	1.0000	0.5662
整体	0.8394	0.2098	0.1777	0.2224	0.2476	0.2904	0.2843	0.2960	0.3235	0.4712	0.5568	0.6026	0.8709	0.4148

首先，基于整体视角来看，2008—2020年黄河流域的工业绿色技术创新效率呈现波动上升的趋势，这反映出我国支持工业绿色技术创新的相关政策成效显著。然后，从上、中、下游三大区域视角来看，黄河流域工业绿色技术创新效率从高到低依次为“下游、上游、中游”的次序。黄河流域下游工业绿色技术创新效率均值为0.5662，高于黄河流域绿色技术创新效率平均水平0.4148，承担着绿色技术创新“领头羊”的角色；上游地区工业绿色技术创新均值为0.3787，位于中间位置；中游地区工业绿色技术创新效率均值为0.3538，在三大区域中的效率值最低。另外，样本考察期内，三个区域年均增长速度排序为中游（9.25%）、上游（8.67%）、下游（5.54%）；意味着上、中、下游的工业绿色技术创新效率的时序变化特征存在差异：下游地区的工业绿色技术创新效率表现为效率高、增速慢；而中游和上游地区表现为效率低、增速快。造成这种现象的可能原因是经济发展状况、可利用资源及技术水平的差异。黄河流域的下游地区已经形成了工业集聚发展的态势，山东、河南两省人力资源丰富，工业基础良好，近年来发展速度较快，形成了行业科技创新中心，储备了大量技术人才和一批国内外高端人才，形成了创新发展的态势，因而工业绿色技术创新总体水平高于以传统工业为主、创新人才相对匮乏的中上游地区。

从黄河流域的省域视角进行分析，从表1可以看出，2008—2014年各省份的工业绿色技术创新效率呈现波动下降趋势，2015—2020年呈现波动上升趋势。具体来看，样本考察期内山东的绿色技术创新效率均值为0.614，其技术创新水平处于黄河流域的领头位置，四川、河南紧随其后，特别是河南，党的十八大之后对新兴产业和高技术产业进行了政策倾斜和重点支持，在研发人员和研发经费方面的配置和投入方面也超过黄河流域的其他省份。紧接着是陕西、甘肃、宁夏在0.3-0.4之间。最后是内蒙古，其效率值为0.263。以上分析说明黄河流域各省份之间工业绿色技术创新效率存在较大差异，下面对黄河流域的区域差异进行分析。

(二)区域差异分解及来源

本文运用Dagum基尼系数法对2008—2020年经黄河流域的工业创新效率总体差距进行分解,并将其总体差异分解为区域内和区域间差异,具体结果如表3所示。

表3　黄河流域工业绿色技术创新效率的基尼系数及分解

年份	基尼系数	组内基尼系数			组间基尼系数			贡献率(%)		
		上游	中游	下游	上-中	上-下	中-下	G_W	G_{nb}	G_t
2008	0.095	0.084	0.007	0.000	0.117	0.090	0.183	27.37%	67.07%	5.56%
2009	0.229	0.208	0.112	0.129	0.194	0.298	0.275	30.84%	47.50%	21.66%
2010	0.255	0.285	0.162	0.104	0.243	0.297	0.238	34.78%	46.34%	18.88%
2011	0.285	0.363	0.082	0.125	0.277	0.315	0.226	38.37%	35.11%	26.52%
2012	0.297	0.348	0.029	0.174	0.302	0.312	0.286	37.94%	36.41%	25.65%
2013	0.288	0.340	0.045	0.089	0.317	0.287	0.327	35.43%	44.29%	20.28%
2014	0.338	0.408	0.094	0.095	0.336	0.359	0.372	34.93%	45.26%	19.81%
2015	0.297	0.341	0.057	0.051	0.321	0.300	0.374	34.47%	47.99%	17.54%
2016	0.283	0.307	0.034	0.055	0.259	0.362	0.306	30.32%	44.61%	25.07%
2017	0.220	0.217	0.057	0.022	0.174	0.290	0.316	28.83%	56.34%	14.83%
2018	0.185	0.189	0.077	0.012	0.167	0.230	0.242	30.20%	51.77%	18.03%
2019	0.144	0.137	0.098	0.007	0.137	0.195	0.155	29.84%	49.55%	20.62%
2020	0.090	0.115	0.030	0.000	0.089	0.094	0.081	39.40%	40.28%	20.32%

1. 总体差异及分解

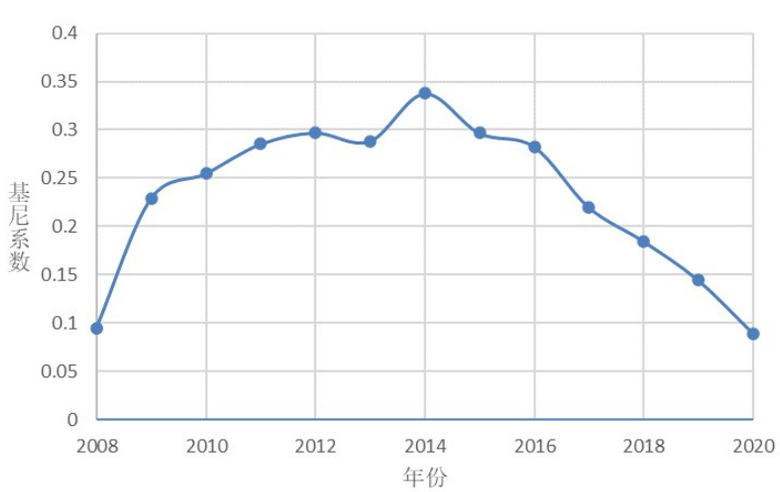


图1　2008—2020年黄河流域工业绿色技术创新效率总体基尼系数

如图1所示,黄河流域工业绿色技术创新效率的总体基尼系数呈现先上升后下降的“倒U型”形态。具体而言,在2008—2014年,呈现波动上升趋势,总体基尼系数从0.095上升至0.338,说明该时期内工业绿色技术创新效率的总体差异不断增大;在2014—2020年,呈现下降趋势,总体基尼系数从0.338下降到0.090,主要原因在于十八大之后这段时间里国家重视绿色创新并逐步实施了

区域协调发展战略，黄河流域的上游和中游地区的工业绿色技术创新效率提升较大，从而缩小了整体的区域差异。从贡献率上看，除了2011年和2012年，上、中、下游之间的差异的贡献率显著高于区域内的省份差异，整个样本期内，三个区域之间的差异对总体差异的贡献率约为47.12%，区域内差异和超变密度平均贡献率为33.29%和19.6%。由此可见，黄河流域不同区域间工业绿色技术创新效率的差异是造成总体差异的主要原因，减少黄河流域上、中、下游的区间差异是解决工业绿色技术创新效率发展空间不均衡的首要问题。

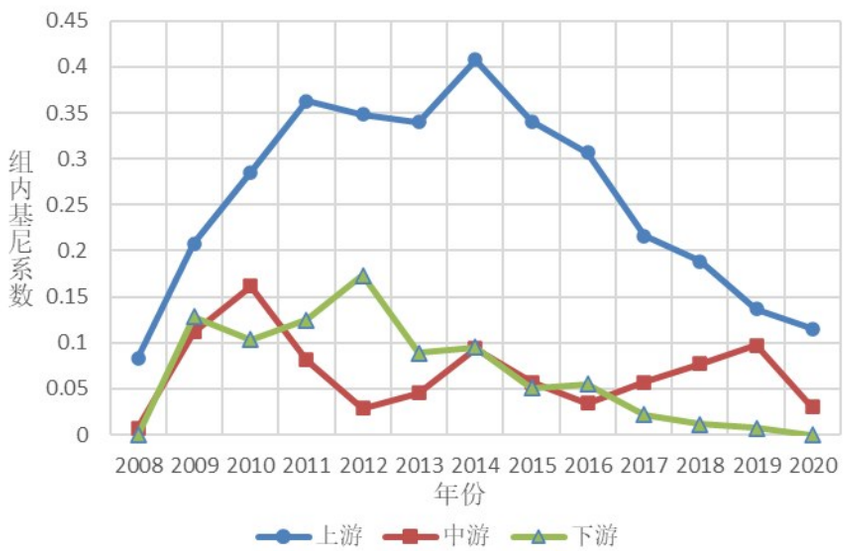


图2　2008—2020年黄河流域工业绿色技术创新效率组内基尼系数

2. 区域内和区域间差异

根据黄河流域工业绿色技术创新效率区域内部差异的分解结果（参见表3和图2），总体上，黄河流域上游地区和下游地区的工业绿色技术创新效率的基尼系数呈现“先上升、后下降”的变化规律，中游地区则呈现波动下降的趋势；上游地区的工业绿色技术创新效率的基尼系数显著大于中游和下游区域。具体而言，整个研究周期内，三个地区的基尼系数均值由高到低依次为上游（0.257）、中游（0.068）、下游（0.066）。由此可见，上游地区的青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古五个省份的工业绿色技术创新效率发展并不平衡，特别是在2008年—2014年，这种不平衡性在逐渐扩大。党的十八之后的相关政策的实施，才扭转了趋势。从区域之间的差异来看（如图3所示），总体上，三个区域之间的差异呈现先上升后下降的趋势；上游和下游、中游和下游之间的差异大于中游和下游之间的差异。

五、黄河流域工业绿色技术创新效率区域差异成因分析

1. 变量说明

黄河流域上、中、下游不同省份之间在工业绿色技术创新投入和产出方面的差异势必对工业绿色技术创新效率的差异产生重大影响。为了分析各指标差异影响效应的大小，本研究将投入、产出指标的差异作为解释变量，将黄河流域的工业绿色技术创新效率的区域差异作为被解释变量，构建QAP模型，分析造成区域差异的主因。在分析过程中，以黄河流域各区域的工业绿色技术

创新效率的差异矩阵为因变量,用IEM表示。在自变量中,R&D人员折合的全时当量的区域差异矩阵用HDM表示;R&D经费内部支出的区域差异矩阵用CDM表示;工业终端能源消费总量的区域差异矩阵用IDM表示;专利申请量的区域差异矩阵用PDM表示;新产品销售收入的区域产业矩阵用NDM表示,工业废水排放量、工业二氧化硫排放量、一般工业固体废弃物产生量的区域差异矩阵分别用WDM、GDM和SDM表示。此外,为消除量纲的影响,对差异矩阵进行了归一化处理。

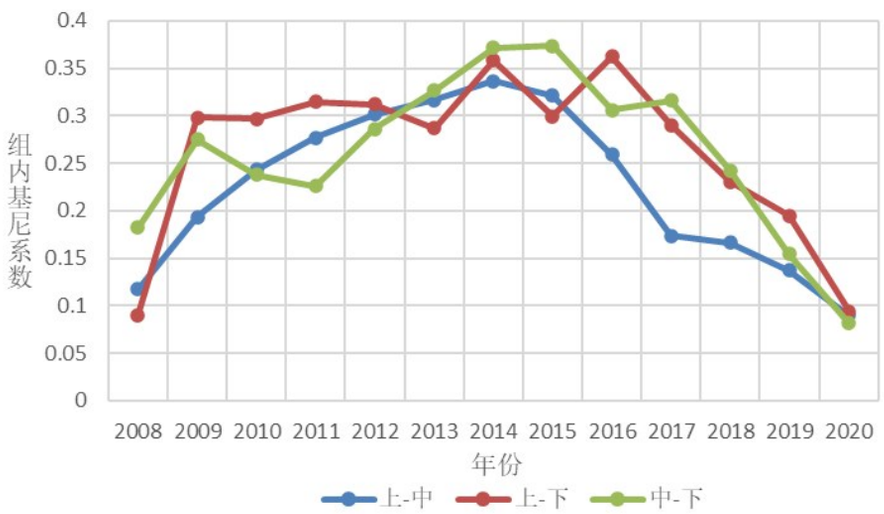


图3　2008—2020年黄河流域工业绿色技术创新效率组间基尼系数

2. QAP相关分析

表4　QAP相关分析

	IEM	HDM	CDM	IDM	PDM	NDM	WDM	GDM	SDM
IEM	1. 000***	0. 143***	0. 176***	0. 097***	0. 29***	0. 326***	−0. 029**	0. 061***	−0. 043
HDM	0. 143***	1. 000***	0. 931***	0. 806***	0. 859***	0. 474***	0. 509***	0. 184***	0. 034
CDM	0. 176***	0. 931***	1. 000***	0. 779***	0. 923***	0. 444***	0. 32***	0. 092***	0. 074
IDM	0. 097***	0. 806***	0. 779***	1. 000***	0. 675***	0. 454***	0. 49***	0. 233***	0. 214***
PDM	0. 29***	0. 859***	0. 923***	0. 675***	1. 000***	0. 389***	0. 216	0. 036	0. 053***
NDM	0. 326***	0. 474***	0. 444***	0. 454***	0. 389***	1. 000***	0. 409***	0. 205***	−0. 042
WDM	−0. 029**	0. 509***	0. 32***	0. 49***	0. 216	0. 409***	1. 000***	0. 566***	−0. 108***
GDM	0. 061***	0. 184***	0. 092*	0. 233***	0. 036	0. 205***	0. 566***	1. 000***	−0. 056***
SDM	0. 043	0. 034	0. 074	0. 214***	0. 053	−0. 042	−0. 108***	−0. 056***	1. 000***

注:***代表p<0.01,**代表p<0.05,*代表p<0.1

如表4所示,QAP相关分析结果发现,工业绿色技术创新效率的区域差异与R&D人员折合的全时当量、R&D经费内部支出、工业终端能源消费总量、专利申请量和新产品销售收入、工业二氧化硫排放量区域差异的相关系数均为正值,均通过了1%显著性水平检验;与工业废水排放量的区域差异负相关,与一般工业固体废弃物产生量的区域差异相关性没有通过显著水平检验。进一步

地，从工业绿色技术创新效率的区域差异的相关系数的大小看，新产品销售收入与专利申请量的区域差异相关性较强，相关系数从大到小依次为：0.326、0.29。工业绿色技术创新效率的区域差异与R&D经费内部支出、R&D人员折合的全时当量与工业二氧化硫排放量的区域差异及相关性较弱，相关系数分别为：0.176、0.143、0.061。上述数据和分析说明，除一般工业固体废弃物产生量的区域差异外，所有的工业绿色技术创新的投入变量和产出变量的区域差异与科技创新效率区域差异之间均显著相关。由于相关关系并不一定代表回归关系，因此，进一步地为了寻找工业绿色技术创新效率的差异的主要原因，本文对研究变量进行QAP回归分析。

3. QAP回归分析

表5　QAP回归结果

模型变量	未标准化系数	标准化系数	P-value	概率1	概率2
HDM	-0.137**	-0.153**	0.035	0.966	0.035
CDM	-0.554***	-0.580***	0.001	1.000	0.001
IDM	-0.012	-0.012	0.419	0.582	0.419
PDM	0.989***	0.856***	0.001	0.001	1.000
NDM	0.611***	0.371***	0.001	0.001	1.000
WDM	-0.167***	-0.177***	0.001	1.000	0.001
GDM	0.129***	0.137***	0.001	0.001	1.000
SDM	-0.040	-0.033	0.186	0.814	0.186
截距项	0.231***	0.000***	0.000	0.000	0.000
Adj. R^2		0.259(0.000)			

注：概率1，概率2分别表示随机置换过程中回归系数大于等于、小于等于最终回归系数的概率。

表5报告了QAP回归结果。根据表5，专利申请数量、新产品销售收入、一般工业固体废弃物产生量的标准化系数为0.856、0.371、0.137，且通过了1%显著性水平检验，这说明减少新产品销售收入、专利申请数量与一般工业固体废弃物产生量的地区差距能够减少工业绿色技术创新效率的区域差异；增强这些指标的空间均衡性能够促进黄河流域的一体化发展。在影响强度上，专利申请数量对工业绿色技术创新效率的区域差异影响强度最大，高于新产品销售收入与一般工业固体废弃物产生量的影响。R&D经费内部支出、R&D人员折合人员全时当量、工业终端能源消费总量与工业废水排放量的区域差异回归系数分别为-0.580、-0.153、-0.012、-0.177；分别通过了1%和5%的显著性水平检验，回归系数为负值意味着减少这些指标的差异并不会减少工业绿色技术创新效率的区域差异。为进一步探索这一现象的原因，本文将这四个变量标准化之后绘制了与工业绿色技术创新效率的散点图。具体如图4所示。

从图4可以看出，R&D经费内部支出、R&D人员折合人员全时当量与工业绿色技术创新效率之间呈现出“倒U型”关系，黄河流域的不同省份分别位于曲线的不同位置，部分省份已率先跨过抛物线的拐点位置，拐点两侧的省份的R&D经费内部支出与R&D人员折合人员全时当量差异较大，出现工业绿色技术创新效率较小的情景。因此，从总体上看。这两个变量在不同省份差距的缩小，并不能缓解黄河流域工业绿色技术创新效率的差异。实际上，绝大多数都处在倒U型拐点左侧，对于这些省份而言，提升R&D经费内部支出与R&D人员折合人员全时的空间均衡能够缩小工

业绿色技术创新效率的区域差异。工业终端能源消费总量和工业废水排放量与工业绿色技术创新效率之间的关系没有呈现出规律性,减少这些指标的差异总体上对工业绿色技术创新效率的区域差异影响不大。

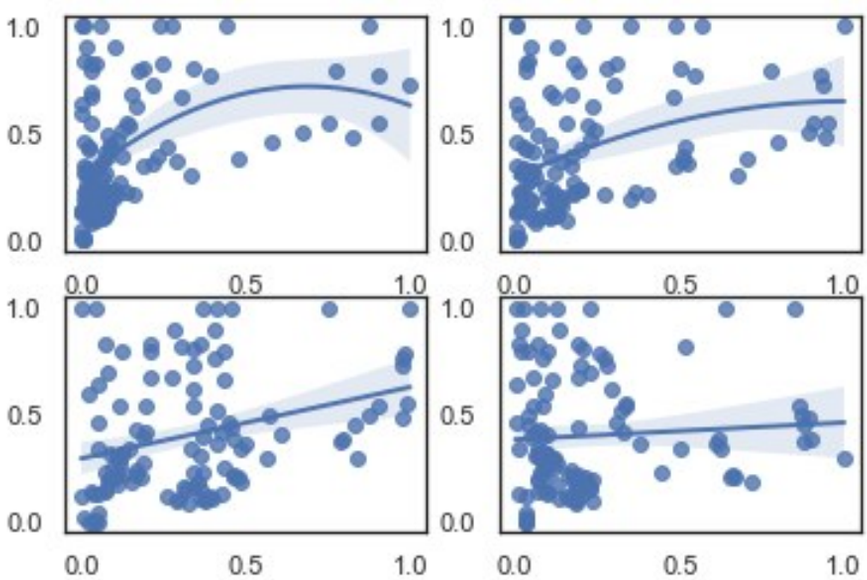


图4　各变量与绿色技术创新效率的拟合曲线

六、研究结论

本文采用超效率EBM模型评价了2008—2020年黄河流域各省份的工业绿色技术创新效率,基于Dagum基尼系数法测度了工业绿色技术创新效率区域差异,进一步地使用QAP回归方法探索了造成黄河流域工业绿色技术创新效率差异的主要原因。主要研究结论如下:第一,从效率测算结果看,样本周期内,黄河流域的工业绿色技术创新效率呈现波动上升趋势,分区域来看,其均值从高到低呈现“下游、上游、中游”的次序;下游的绿色技术创新效率表现为效率虽然高,但增速慢,而中游和上游表现为效率相对较低,但增速快;工业绿色技术创新效率呈现省际差异,山东省的工业绿色技术创新效率最高,处于领先位置。第二,根据Dagum基尼系数法的测算结果,黄河流域工业绿色技术创新效率的总体基尼系数呈现先上升后下降的“倒U型”变化态势;上游和下游、中游和下游之间的差异大于中游和下游之间的差异。在绝大多数年份,区域间差异明显高于区域内差异和超变密度差异,因此,缩小区域间差异是解决黄河流域工业绿色技术创新效率发展不平衡的关键。第三,根据QAP的分析结果,专利申请数量、新产品销售收入、一般工业固体废弃物产生量在黄河流域的工业绿色技术创新效率的区域差异中均起到了重要的影响,增强专利申请数量、新产品销售收入的空间均衡有助于减少黄河流域的工业绿色技术创新效率的区域之间的差异。从总体上看,工业绿色技术创新效率的投入指标对于黄河流域工业绿色技术创新效率的差异影响不大。

基于本文的研究结论,进一步地提出以下三点建议:

其一,坚持绿色发展和创新驱动引领黄河流域经济社会高质量发展。绿色创新是引领经济社

会可持续发展、高质量发展的第一动力。黄河流域需要继续发挥自身的优势，切实实施绿色创新发展战略，强化创新人才队伍建设，进一步提升工业绿色技术创新效率[①]。建立科研机构、高技术企业孵化器、创新基地等，为工业企业提供技术支持和创新资源。践行绿色发展理念，完善环境规制政策，从政策端引导工业经济绿色发展，推广清洁能源、节能减排技术和绿色环保技术。

其二，重视黄河流域产业发展禀赋，坚持因地制宜、精准施策。针对工业绿色技术创新效率偏低的区域，需要对产业结构进行适当调整。对传统高污染行业进行有序调整和绿色化改造，将政府政策与相关资金瞄准于绿色行业，并推动形成地方优势产业。在工业绿色技术创新效率较高的地区，应更加注重工业产业的布局规划，促进传统工业产业向战略性新兴行业转型升级，并加速构建现代化工业产业体系，以实现工业经济的高质量发展。

其三，实现黄河流域工业绿色技术创新效率的协同提升要强化科技创新产出的均衡程度。依托黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略，加大黄河流域各个省份进行绿色技术创新所需资源的投入，形成优势互补的区域之间流动，构建“区域联动、错位发展”的区域技术创新模式，实现创新产出的差异化，构建黄河流域科技成果评价、市场推广和产业化应用体系，达成黄河流域的绿色技术创新效率在提升中协调，在协调中提升的高质量发展目标。

[责任编辑：王文娟]

①郭晗，胡晨园，《黄河流域生态环境保护与工业经济高质量发展：耦合测度与时空演化》，《宁夏社会科学》，2022年第6期。