

绿色发展视角下黄河流域能源利用效率测算与趋势分析

——基于收敛性与空间动态演变研究

张晓昱^{a,b}, 路杭霖^a, 郑鹏飞^c

(郑州大学 a.商学院; b.黄河生态保护与区域协调发展研究院; c.水利与土木工程学院, 郑州 450001)

摘要:在绿色发展与“碳达峰,碳中和”的双背景下,对黄河流域能源利用效率进行测算研究.对于能源利用效率指标体系进行构建,以 GDP 为期望产出,将反映节能减排的二氧化碳排放因素加入非期望产出指标中.基于比值法、DEA-Malmquist 指数、Super-DEA 等方法测算 4 个视角下能源利用效率构建的综合指标,通过主成分评价测算综合能源利用效率.在此基础上研究黄河流域分流域、分时段、分城市群能源利用效率的收敛性,同时结合空间分析建立面板数据模型进一步深入研究.结果表明,黄河流域能源利用效率发展趋于收敛.在绿色发展视角下,促进能源利用效率发展一方面需要城市协同发展,另一方面需要改变环境成本的外部性,加快绿色投入产出体系的完善,以此促进能源利用效率收敛均衡点的正向移动.

关键词:能源利用效率;黄河流域;Super-DEA;收敛性分析;空间分析

中图分类号:F206

文献标志码:A

习近平总书记多次实地考察黄河流域生态保护和经济社会发展情况,强调黄河流域生态保护和高质量发展是重大国家战略.2021 年 10 月,国务院印发了《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,指出黄河流域为全国重要能源基地.改革开放以来,能源为中国经济的高速发展提供了重要动力支持,但能源消耗总量的不断增加与粗放型能源消耗带来的负面效应制约了经济的高质量发展,其中能源消耗是影响现代经济发展与生态保护的重要因素,生态环境是影响经济高质量发展的重要因素^[1].一方面,能源的过度消耗所引发的资源枯竭与环境污染对 21 世纪人类社会的发展造成困扰与阻碍;另一方面,“碳达峰,碳中和”目标的确立与相关工作的展开,为能源利用提供了新的契机.黄河流域的综合治理,尤其是能源的绿色利用,是高质量与可持续发展的需要^[2].在此背景下,研究黄河流域能源利用效率的相关问题,分析能源利用效率的变化与趋势,对黄河流域城市乃至整个国家具有一定的理论与现实意义.

1 文献综述

1.1 能源效率指标体系的研究

各个层次视角的研究表明,国家^[3]、城市、城市群^[4]、企业^[5]等能源利用技术效率在节约能源中具有重要作用.对能源利用效率应综合考量期望产出品与非期望产出品相关指标构建体系.目前学术界在研究测度绿色增长效率、高质量发展,能源利用等多种“绿色”指标时均将污染指标考虑在指标体系的构建范围内.针对能源的利用效率,李霞^[6]在研究各省能源利用效率时,通过构建多指标体系,将环境质量作为负面约束.基于

收稿日期:2022-04-29;修回日期:2022-07-06.

基金项目:河南省教育厅人文社科项目(2021-ZZJH-371);河南科技智库调研课题项目(HNKJZK-2022-03B);郑州大学经济学管理学新兴学科孵化研究基地项目(101/32610168);郑州大学骨干教师培育计划(2021ZDGGJS034).

作者简介:张晓昱(1985—),女,河南商丘人,郑州大学讲师,博士,研究方向为统计与能源计量,E-mail:zhangxiaoyu@zzu.edu.cn.

通信作者:郑鹏飞(1983—),男,河南洛阳人,郑州大学讲师,博士,研究方向为土木水利与交通检测,E-mail:pfzhce15@zzu.edu.cn.

稀疏主成分评价法,喻胜华等^[7]构建了包含能源消耗水平、能源高效利用率、污染排放、污染治理四大维度,共 26 个指标的能源效率评价体系来评价各省能源的利用情况,通过这种方式增强不同地区的能源利用效率情况的可比性和全面性.在节能减排的背景下,对于非期望产出品仅仅考虑污染物、废气、废弃物是不够的.另一方面,刘海英等^[8]基于非径向方向距离函数(Non-radial Directional Distance Function, NDDF)-数据包络分析(DEA)测量各省份能源利用效率,从工业二氧化硫的排放污染角度分析,指出中国工业经济节能与减排污染的目标并不协调一致、发展并不同步.

1.2 能源效率的测算研究

从能源效率测算方法与角度上看,魏楚等^[9]利用经济活动的技术效率作为能源利用效率,未考虑能源在生产过程中的消耗状况;袁晓玲等^[10]将期望产出和非期望产出纳入产出的研究范围,但未考虑 SDF(定向距离函数)框架假设下的期望产出要求与非期望产出等比例变化;李霞^[6]利用 DDF(方向距离函数)允许期望产出与非期望产出按照不同方向变化,更加契合于有动态性的“绿色”指标度量;ZHANG 等^[11]提出允许期望产出与非期望产出不等比例变化的 NDDF-DEA 模型,运用 NDDF 计算效率的方式克服了变量松弛引发偏误的问题,因此被广泛用于绿色发展下效率指标的评价当中,但基于 NDDF 所构建的模型在处理非期望产出指标的方式上存在一定的争议,以 SBM 模型((1)式)为例:

$$\min_{\lambda, s^-, s^+} \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{io}}{1 + \frac{1}{q} \sum_{r=1}^q s_r^+ / y_{ro}}, \quad (1)$$

$$\text{s.t. } x_{io} = \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^-; y_{ro} = \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+; \lambda_j \geq 0, s_i^- \geq 0, s_r^+ \geq 0.$$

其中 $y_{ro} < 0$ 时,为非期望产出,用极小值代替 s_r^+ / y_{ro} ,以此作为惩罚项,但对于极小值的取值范围、针对多种非期望产出转换为极小值时如何体现差异等问题上,暂没有明确定论.同时史丹等^[12]指出基于 DEA 模型测算的曼奎斯特(Malmquist)生产率指数(反映各地区能源效率的变化情况)对不同地区能源效率水平的比较与分析仍有不足.

1.3 黄河流域的相关研究

黄河流域高质量发展战略研究主要集中在生态保护与高质量发展协调推进^[13]、水平测度和时空演变^[14]、城镇化高质量发展^[15]、推动分类发展、协同发展、绿色发展、创新发展和开放发展^[16]、黄河流域地区及区域的协调合作等.城市及区域间的协调涉及多方面,环境层面包括水资源的协调^[17]、水土流失治理^[18].经济层面包括城镇化发展、产业结构协调转型^[19],产业协调发展,资源型城市发展^[20]等.黄河流域的空间资源存在不均衡,在节能减排与环境保护背景下,对能源利用效率的度量是从能源角度分析黄河流域高质量发展的首要工作.

1.4 文献评述与创新点

综上所述,在指标体系的构建过程中,测算的能源利用效率多为包含能源消耗的全要素生产效率,其产出指标仅包含期望产出 GDP;一些污染指标如二氧化硫、废水、废气、PM_{2.5}等包含在非期望产出中作为产出要素处理.但节能减排与减少污染排放非一致协调,这些方式使得非期望产出中仅涵盖污染指标,未将二氧化碳等反映能耗排放指标纳入其中.效率评价假设与方法上,对于效率的评价大都基于 DEA,其研究也包含期望产出与非期望产出,在使用 DDF 及 Malmquist-Luenberger 指数、NDDF 等效率函数的假设框架下,同时遵循生产函数的凸性(VRS)假设^[21],使其对于效率的评价更加准确.但对能源利用效率的评价与测算往往仅包含某一方法或模型的 DEA,大都仅从一个效率角度对能源利用效率评价.

本文基于效率分解的思想,进行了如下创新:(1)在测算能源利用效率时,将反映节能减排的二氧化碳排放因素加入非期望产出指标中,这也是从“碳达峰”角度对指标体系的考量;(2)综合采用 Super-DEA 与 PCA(主成分分析)评价方法,使构建的能源利用效率指标在兼顾“绿色”与“碳排放”的同时,更具对比性和客观性;(3)结合空间分析直观反映能源绿色效率的空间关系,对黄河流域全流域、各分流段、流域覆盖的城市群能源利用效率的收敛均衡状态进行分析,提出“成本-产出均衡”理论.从绿色利用的客观规律出发,对能源

利用效率的收敛均衡状态进行分析,为相关黄河流域能源利用提供数据支撑,对综合提高能源绿色利用、促进高质量发展与节能减排有重要意义。

2 能源利用效率指标体系构建

2.1 总效率层面指标体系构建与数据来源

能源贯穿于具体生产与生活的每一个环节中,因此能源利用效率的评价应兼顾生产性与全面性。在社会技术视角,影响能源利用效率的因素呈现拓扑网状的复杂关系结构。一方面要素之间的替代效应,单纯以能源的投入产出测度效率会引发偏误。另一方面,要素成本价格的变化可能引起技术回弹,而健康的生产效率应当是动态正向发展的。在投入产出视角上,能源的利用同时要充分涵盖多种能源利用所产生的期望产出与非期望产出关系。因此在指标体系构建时,在“碳达峰,碳中和”与节能减排的背景下,非期望产出应包含更全面的指标,如环境污染、碳排放等。为科学衡量能源利用效率,同时兼顾指标发展的动态性,本文基于效率分解的思想,提出 4 个二级效率指标(见表 1),对能源利用效率进行评价。数据来源于《中国能源统计年鉴》,数据范围为 2006—2019 年。为避免 NDDF 下 DEA 分析对非期望产出项的极小值处理产生的偏误和争论,本文将全部非期望产出品效率单独度量,对其权重赋 -1 后,结合主成分分析评价法对能源利用效率进行评价。

表 1 能源利用效率指标体系

Tab. 1 The system of energy use efficiency indexes

一级指标	二级指标	度量方式	正逆指标
能源利用效率	绿色全要素生产率(R_{GTFP})	DEA-Malmquist 指数	正
	能源消耗效率(R_{ECE})	比值	正
	期望产出品效率(R_{EPE})	Super-DEA	正
	非期望产出品效率(R_{UPE})	Super-DEA	逆

2.2 绿色全要素生产率(R_{GTFP})的测度

一般认为,健康生产效率发展应是逐年稳步提高发展,然而考虑到技术进步与产业结构改革过程中,可能产生的要素成本价格变化,使技术进步可能产生回弹效应,有时一个地区的生产效率并不都是正向发展的。另外要素之间存在的替代效应要求在针对某一要素效率测算时不能忽略其拓扑关联结构。 R_{GTFP} 即是生产效率发展变化的相对度量指标,是在考虑生产引发环境污染的同时对生产效率变化指数进行测算。参考胡晓珍等^[22]对 Green-TFP 指数的测算,设定资本、劳动以及各地区的技术要素为投入指标,基于熵值法构建六大污染(工业烟尘、工业废水、工业废气、工业粉尘、二氧化硫、工业固体废弃物)综合指标为非期望产出做倒数处理,将基于消费物价指数(CPI)平减后的 GDP 作为期望产出。以 DEA-Malmquist 模型测算绿色全要素生产率(TFP)指数即为 R_{GTFP} ,计算过程如下,基于上述所构建的指标体系,得到每个决策单元(DMU_{it})的投入:资本存量(K)、能源投入(E)、劳动力(L),非期望产出污染指数(P)和期望产出 GDP(Y_{GDP}),以此构建的投入-产出函数见(2)式。

$$f(K, L, E) = \{(K, L, E, P, G) : \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T z_{it} K_{it} \leq K, \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T z_{it} L_{it} \leq L, \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T z_{it} E_{it} \leq E\}, \text{ s.t. } z_{it} \geq 0. \quad (2)$$

考虑到产出指标中有非期望产出,基于 NDDF 设置如下:

$$\vec{D}(K, L, E, P, Y_{GDP}; V) = \sup\{W'\Phi : (Y_{GDP} + \beta_{GDP}v_{GDP}, P - \beta_P v_P)\}, \text{ s.t. } W'\Phi \in (K - \beta_K v_K, L - \beta_L v_L, E - \beta_E v_E). \quad (3)$$

其中权重向量设置为 $W' = (\omega_K, \omega_L, \omega_E, \omega_P, \omega_{GDP})$,作为反映各对应投入、产出项在 DEA 中的相对重要性。方向向量 $V = (-v_K, -v_L, -v_E, -v_P, v_{GDP})$ 用来反映所设定的投入产出指标的期望方向(一般而言,希望减少投入与非期望产出,故对应为负方向;希望增加期望产出 GDP,故为正),而 $\Phi = (\beta_K, \beta_L, \beta_E, \beta_P, \beta_{GDP})$ 是松弛向量,其能反映某项变量朝最有效发展时所能变化的比例程度。构建 DEA 的目标是在上述投入和产

出及 NDDF 下,可以缩减或扩张的最大程度.依据林伯强等^[23]与孟望生^[24]对于投入即期望产出与非期望产出的加权,本文设定权重为 $W'=(1/9,1/9,1/9,1/3,1/3)$,设 $\Phi^*=(\beta_K^*,\beta_L^*,\beta_E^*,\beta_P^*,\beta_{GDP}^*)$ 为最佳松弛系数,则最有效产出目标为 $Y_{GDP_{it}}+\beta_{GDP_{it}}^*v_{GDP},P_{it}-\beta_{P_{it}}^*v_P$.而当 $\Phi_{it}=0$ 时,表明该 DMU_{it} 有效,当假设各方向向量模长为 1 时,则所测算各 DMU_{it} 的 E_{it} 如(4)式所示:

$$E_{it} = \frac{1}{4} \left(\sum_{U=K,L,E} \frac{(U_{it} - \beta_{U_{it}}^* U_{it}) / (Y_{GDP_{it}} + \beta_{U_{it}}^* Y_{GDP_{it}})}{U_{it} / Y_{GDP_{it}}} \right). \tag{4}$$

基于 E_{it} 可测算针对面板数据的绿色全要素生产率 Malmquist 指数(M),具体如(5)式所示:

$$R_{GTFP_{it+1}} = M_{it+1} = \frac{E_{it+1}}{E_{it}}, \tag{5}$$

由此可计算各城市的全要素生产率的相对变化指数.

2.3 能源消耗效率(R_{ECE})

从能源消耗角度分析,单位能源使用应尽可能产生更多价值才是高效率的能源消耗.因此,定义 R_{ECE} 等于产出价值与消耗能源量的比值.

城市层面能源消耗主要包括液化石油气、天然气与交通碳排放等,考虑到交通数据缺失、难以计量且占比较小,因此,借鉴韩峰等^[25]的方法,针对城市天然气、液化石油气、社会总用电对地区能源消耗测算((6)式).为统一单位,参考《综合能耗计算通则》将能源消耗的单位统一转为万吨标准煤.

$$C_{TEC_{it}} = C_{EC_{it}} + C_{GC_{it}} + C_{LG_{it}}, \tag{6}$$

其中 $C_{TEC_{it}}$ 为城市 i 在 t 期的总能源消耗量, $C_{EC_{it}}, C_{GC_{it}}, C_{LG_{it}}$ 分别代表城市 i 在 t 期的用电量,天然气消耗量,液化石油气消耗量,单位均为万吨标准煤.

结合上述测算,同时考虑物价变动,以 2003 年为基期,可定义 R_{ECE} 为单位平减后 Y_{GDP} 与折算为万吨标准煤单位能源总消耗的比值((7)式).

$$R_{ECE_{it}} = \frac{Y_{GDP_{real_{it}}}}{C_{TEC_{it}}}. \tag{7}$$

2.4 期望产出品效率(R_{EPE})与非期望产出品效率(R_{UPE})

各类能源、资本、劳动的投入,其目的是为了获得期望产出,基于此视角,利用 Super-DEA 模型测算各时空条件下城市的 R_{EPE} .充分考虑生产过程中能源投入结构不同,同时参考道格拉斯生产函数,设定期望产出品效率的投入产出指标体系.

科学地衡量能源利用效率需要兼顾环境、生态等方面.在生产、能源消耗过程中,各类能源和生产要素的投入不仅产出期望品,也会有非期望产出品出现,诸如废水废气、固体颗粒污染物、烟尘等.在“碳达峰,碳中和”的绿色发展背景下,随着碳交易的落实,碳排放也愈发受到重视,因此,将碳排放纳入非期望产出品中.与 R_{EPE} 测算采用相同方法,基于 Super-DEA 模型测算各时空条件下城市的非期望产出品效率(R_{UPE}),见表 2.

表 2 期望产出品效率(R_{EPE})与非期望产出品效率(R_{UPE})指标体系

Tab. 2 Expected productivity efficiency(R_{EPE}) and unwanted productivity efficiency(R_{UPE}) indicator system

投入指标	产出指标	
	期望产出品效率(R_{EPE})	非期望产出品效率(R_{UPE})
固定资产/万元	平减后 GDP/万元	工业烟尘排放量/t
就业人数/万人		废水排放量/kt
天然气消耗/万 m^3		二氧化硫排放量/t
液化气消耗/t		$PM_{2.5}/(\mu g \cdot cm^{-3})$
总用电量/(万 $kW \cdot h^{-1}$)		二氧化碳/t
能源总消耗/万 t 标准煤		

在计算模型上选用 Super-DEA,首先基于上述指标参考“绿色全要素生产率的测度”采用相同方式构建 DEA 模型,设置假设为“边际凸型(VRS)”,另一方面,考虑到基于 DEA 效率计算时若产生很多有效 DMU,

即效率等于 1,将会导致无法比较.因此,这里选用 Super-DEA,在最佳有效生产边际的确定上适度宽松.

3 基于主成分分析的能源利用效率融合测算

上述所测算的 4 个二级效率指标,均具有较高的综合性和独立性,因此本文选用主成分分析评价法对上述效率指标进行降维,以保证能源利用效率测算的独立性、客观性、可比性.

首先将 R_{UPF} 加负权(权数为 -1),选用 Z-Score 的归一化方式对上述 4 个独立的综合效率指标进行量纲化处理.利用主成分分析计算方差贡献率,并以此为权重进行加权求和,得到黄河流域地级市能源绿色利用率得分(S'),如(8)式所示,

$$S' = 0.281 \times P_{CA_1} + 0.25 \times P_{CA_2} + 0.248 \times P_{CA_3} + 0.221 \times P_{CA_4}. \quad (8)$$

其次,考虑到采取 Z-Score 标准化处理后数据的分布为近似标准正态分布,则得分存在负值.为使能源利用效率得分计算更具可比性、方便性,对 Z-Score 标准化后数据 $X \sim N(0, 1)$,选择将 S' 分布区间按照 $S = S' + 1$ 的方式进行平移调整,使得测算得分趋于 $[0, 1]$.该得分同时也是本文所测度的能源利用效率指数,考虑到本文测算效率涉及“绿色”使用理念,其符号设为 R_{EGE} .

4 实证分析

4.1 能源利用效率测度结果

根据上述 Super-DEA-PCA 模型,对黄河流经省份所涵盖地级市的能源利用效率指数(R_{EGE})进行测算.另参考《黄河水文年鉴》等资料,考虑黄河流经四川省西部极小区域,且四川省大部分属于长江流域的情况,计算主要针对除四川省外黄河流域的其余 8 个省份 77 个城市的能源利用效率进行测算,部分结果见表 3.

表 3 黄河流域内各地级市能源利用效率指数测算结果

Tab. 3 The results of measuring the energy use efficiency index of each prefecture-level city in the Yellow River Basin

城市	年份														平均
	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	
嘉峪关市	1.02	1.32	1.23	1.33	1.62	1.20	1.03	1.04	0.83	1.32	0.85	1.53	0.91	1.42	1.19
乌海市	1.02	0.73	1.24	1.44	1.34	1.29	1.16	1.00	1.19	1.11	1.33	1.03	0.98	1.41	1.16
平顶山市	1.07	0.83	1.02	0.91	0.73	0.57	1.25	1.88	1.52	0.88	1.03	1.50	1.45	1.28	1.14
白银市	0.94	0.82	0.86	0.73	1.45	1.46	1.22	0.67	1.25	0.93	1.45	0.91	1.40	1.52	1.11
临汾市	0.88	1.30	1.15	0.86	0.70	1.12	1.39	0.97	1.47	0.93	1.04	1.35	1.33	1.00	1.11
大同市	1.05	1.05	0.90	0.83	1.36	1.21	0.72	1.10	1.29	1.38	1.41	0.88	1.09	1.15	1.10
张掖市	0.91	0.87	1.32	1.05	1.41	0.91	1.19	1.16	0.87	1.33	1.23	1.00	0.82	1.18	1.09
临沂市	1.02	1.12	1.35	1.26	1.13	1.31	1.29	0.99	1.03	0.83	0.84	0.90	0.76	1.42	1.09
泰安市	1.16	1.06	1.42	1.02	0.59	1.28	1.04	1.19	0.94	0.83	0.90	1.24	1.28	1.26	1.09
潍坊市	0.91	1.16	1.08	1.07	1.33	1.26	1.13	0.73	1.13	1.38	1.08	0.71	1.27	0.93	1.08

注:受篇幅限制,仅展示 2006 年到 2019 年能源利用效率均值前 10 的城市.

设 2006—2007 年为样本前期、2012—2013 年为样本中期、2018—2019 年为样本后期,分别计算其能源绿色利用率均值(图 1).可以看出黄河流域各城市的能源利用效率随着时间推移逐渐趋于集中一致,样本各期均值变化不大,其密度峰值对应的效率指数得分大致处于 0.75~1.00.这一结果表明,黄河流域地级市的能源利用效率 R_{EGE} 指数随着时间变化集中于 1 附近.通过参考《黄河卷》《黄河年鉴》等资料,将黄河流域划分上中下游流域,对测算 8 个省份涵盖的城市进行分流域分析.绘制上中下游区域的能源利用效率核密度估计图(图 2),可以看出,上中下游地区的能源利用效率密度峰值均集中在 1 附近,且各流域分布相近,中游地区相较于上游和下游的能源利用效率更加集中,黄河流域各城市的能源利用效率与所处流域关系不大.

4.2 收敛性分析

4.2.1 验证方法

为验证黄河流域各地级市的能源利用效率是否会随着时间推移趋于一致,参考胡晓珍等^[22]研究中国区

域绿色全要素生产率收敛性的方式设定 σ 收敛验证模型,同时参看验证能源消费强度差异性收敛问题时的模型设定方式^[26]设置绝对 β 收敛性验证模型和条件 β 验证模型.通过这 3 种收敛性检验模型分析黄河流域能源绿色利用率变化波动长期内是否会完全消失.

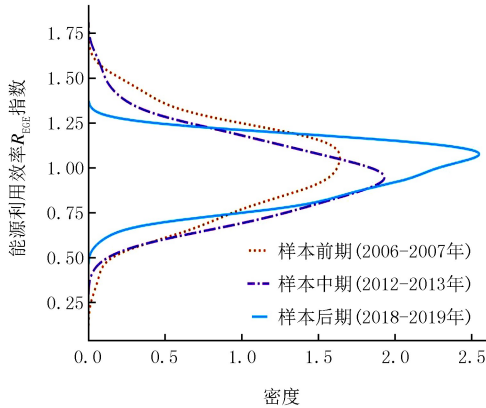


图1 各时段能源利用率 R_{EGE} 指数核密度估计

Fig.1 Estimated kernel density of energy use efficiency R_{EGE} index by time period

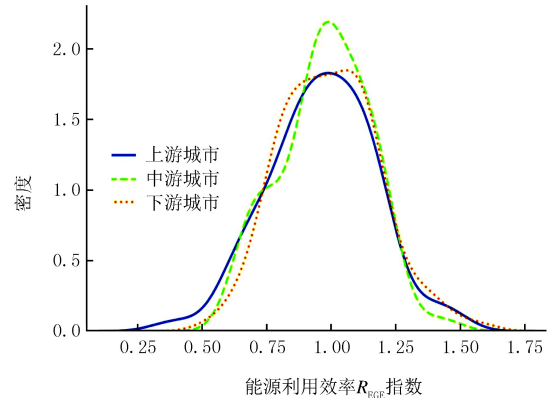


图2 各流域能源利用率 R_{EGE} 指数核密度估计

Fig.2 Estimated kernel density of energy use efficiency R_{EGE} index for each flow section

(1) σ 收敛性验证

通过研究各区域某一变量标准差变化趋势对收敛性进行分析.对黄河流域能源利用率 R_{EGE} 指数的对数值 $\ln R_{EGE}$ 分别就各年测算其标准差,绘制时间序列图(图 3).由图 3 分析发现,黄河流域中游地级市对应 $\ln R_{EGE}$ 的标准差在 2013 年到 2014 年较大,在 2015 年后明显下降.而黄河流域上游、下游规律同全流域相近,全流域 $\ln R_{EGE}$ 的标准差在 2017 年以前呈现“随机游走”,没有明显的收敛;在 2017 年之后 $\ln R_{EGE}$ 的标准差表现出明显的缩小,开始收敛.

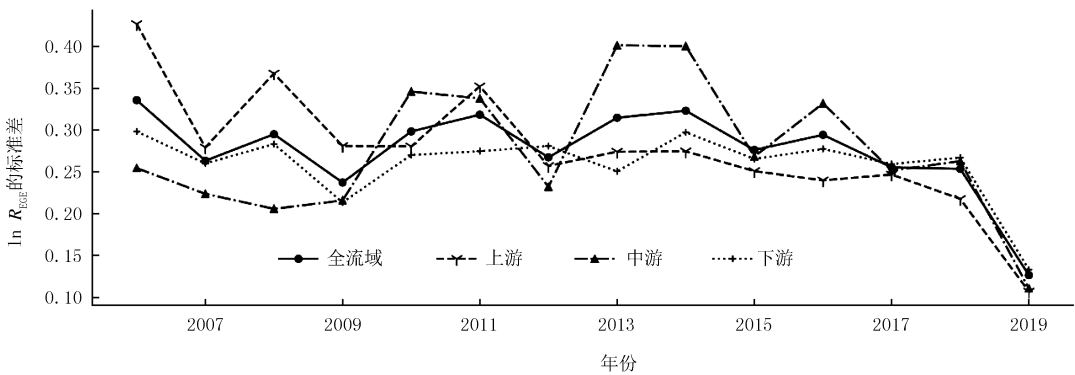


图3 σ 收敛性验证图

Fig.3 σ convergence verification diagram

(2) 绝对 β 收敛性验证

对所测算的 R_{EGE} 面板指数设置如下模型:

$$\Delta \ln R_{EGE_{it}} = \alpha + \beta \ln R_{EGE_{it-1}} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it}, \quad (9)$$

其中 $R_{EGE_{it}}$ 表示所测算的第 i 个城市 t 时期的能源利用率,被解释变量 $\Delta \ln R_{EGE_{it}} = \ln R_{EGE_{it}} - \ln R_{EGE_{it-1}}$, φ_i 是个体固定效应, γ_t 为时间固定效应, ε_{it} 是随机误差项.对面板回归设置固定效应使模型回归结果更可靠.当 β 显著为负时,表明 R_{EGE} 收敛.对模型分流域进行回归,结果如表 4 所示.

首先,分析表 4 中模型(1)、(2)、(3)、(4)发现:黄河流域各分流域及全流域均能源利用率 R_{EGE} 均存在收敛趋势,全流域 $\ln R_{EGE_{it}}$ 对应系数 β 为 -1.086 ,在 1% 的显著性水平上为负;上、中、下游对应 β 为 -1.003 , -1.189 , -1.080 ,均在 1% 的显著水平上为负值.上述结果表明对应区域的 R_{EGE} 指数均收敛,说明黄河全流域省份涵盖城市的能源利用率均存在收敛、集中、稳定的趋势.其次,在以上分析基础上,对表 4 中模型

(1)、(2)、(3)系数 β 的绝对值进行研究可推断 $|\beta|$ 越大,能源利用效率的收敛速度越快.黄河流域中游城市的收敛速度依次大于下游城市、上游城市速度.

表4 各流域段绝对收敛性验证模型回归结果

Tab. 4 Regression results of absolute convergence verification model for each flow segment

变量	(1)上游城市	(2)中游城市	(3)下游城市	(4)全流域
常数项	0.942*** (11.27)	1.240*** (13.09)	1.084*** (15.05)	1.082*** (22.96)
$\ln R_{EGE_{it-1}}$	-1.003*** (-16.02)	-1.189*** (-17.21)	-1.080*** (-20.19)	-1.086*** (-31.30)
双重固定效应	固定	固定	固定	固定
R^2	0.535	0.584	0.516	0.525
Obs	286	273	442	1 001

注:*,**,***分别表示显著性水平为10%,5%,1%;括号里的值为t统计量;Obs是回归样本量,下同.

4.2.2 黄河流域城市群 R_{EGE} 收敛性分析

根据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,参照国务院及相关地区的发展规划,可知沿黄流域省份和城市的高质量发展同时也围绕6大城市群与都市圈,即关中平原城市群、黄河“几”字弯都市圈、兰西城市群、山东半岛城市群、太原城市群和中原城市群.为了研究各城市群城市与无城市群城市的收敛性,参照上述绝对 β 收敛性验证模型分别对城市群城市与无城市群城市进行模型回归(表5).

表5 都市圈与城市群绝对收敛性验证模型回归结果

Tab. 5 Regression results of absolute convergence verification model for metropolitan area and urban agglomeration

变量	(1)关中平原城市群	(2)黄河“几”字弯都市圈	(3)兰西城市群	(4)山东半岛城市群	(5)太原城市群	(6)中原城市群	(7)无城市群城市
常数项	1.041*** (7.55)	1.061*** (7.82)	1.094*** (4.67)	1.188*** (9.54)	1.633*** (5.84)	1.094*** (12.30)	0.983*** (10.20)
$\ln R_{EGE_{it-1}}$	-1.095*** (-10.92)	-1.007*** (-9.73)	-0.940*** (-5.38)	-1.129*** (-12.03)	-1.563*** (-6.29)	-1.127*** (-16.90)	-1.041*** (-14.45)
双重固定效应	固定	固定	固定	固定	固定	固定	固定
R^2	0.553	0.539	0.601	0.573	0.948	0.543	0.568
Obs	130	130	52	156	26	286	221

结果表明:第一,黄河流域涵盖的各大城市群城市与非城市群城市能源利用效率 R_{EGE} 均存在显著收敛趋势.表5中模型(1)~(6)中被解释变量对应系数均在1%水平上为负值,表明各城市群城市的能源利用效率均存在收敛性.同时,对于无城市群城市,其系数为-1.041且同样在1%显著水平上显著,说明黄河流域城市在发展过程中,无论城市是否被“城市群”建设所覆盖,其能源利用效率均存在收敛集中的趋势.第二,地域因素是影响城市能源利用效率 R_{EGE} 的重要因素.表5中各城市群的收敛速度由大到小为:太原城市群(1.563),山东半岛城市群(1.129),中原城市群(1.127),关中平原城市群(1.095),黄河“几”字弯都市圈(1.007),兰西城市群(0.940).通过对比发现,除处在黄河流域上游的城市群黄河“几”字弯都市圈与西北部兰西城市群小于无城市群城市收敛速度外,其余城市群能源利用效率 R_{EGE} 收敛速度均比无城市群城市的收敛速度快,表明地域因素是影响能源利用效率 R_{EGE} 收敛速度的重要因素,其影响程度大于城市群的构建与协调发展.第三,城市群的构建与协调发展在一定程度上能促进能源利用效率 R_{EGE} 的收敛.前已述及除黄河“几”字弯都市圈与兰西城市群,其余城市群城市的能源利用效率的收敛速度均大于无城市群城市的收敛速度,这表明城市群的构建与协调发展更有助于城市能源利用效率收敛至均衡状态.

分析发现,黄河流域涵盖的六大城市群其能源利用效率收敛速度基本与黄河流域分段所呈现的收敛速度(由大小到为中游,下游,上游)特点相同.无论在黄河流域各流域段,还是黄河流域所覆盖的城市群,均表现出了能源利用效率 R_{EGE} 的收敛性.

4.2.3 条件 β 验证法

在绝对 β 收敛性验证模型中,添加被解释变量的滞后一期 $\Delta \ln R_{EGE_{it-1}}$ 为控制变量,将相关投资、外资与经济增长的控制变量添加进绝对 β 收敛模型:

$$\Delta \ln R_{EGE_{it}} = \alpha + \beta_1 \Delta \ln R_{EGE_{it-1}} + \beta_2 \ln R_{EGE_{it-1}} + \Phi X' + \varepsilon_{it}, \quad (10)$$

其中, $X' = (\ln(m_{it}), \ln(s_{it}), \ln(n_{it}))'$, m_{it} 为投资率,假设各地区储蓄均转化为投资,即储蓄越多,投资越多,投资率 m_{it} 为各城市“居民人民币储蓄余额/地区 GDP”。外商投资利用率 s_{it} 为各城市“外商投资利用额/地区 GDP”。 n_{it} 表示经济增长率。若能源利用效率 R_{EGE} 收敛,则对应 β_2 应为负值。考虑到解释变量存在被解释变量的滞后期,解释变量可能存在内生性问题,因此采用 2SLS 和 GMM 进行回归。在参数估计时,选用滞后二期的被解释变量 $\Delta \ln R_{EGE_{it-2}}$ 和其余控制变量 m_{it}, s_{it}, n_{it} 作为 $\Delta \ln R_{EGE_{it-1}}$ 的工具变量进行一阶回归,并使用稳健标准误。结果如表 6 所示。

表 6 条件 β 收敛性验证模型动态面板回归结果

Tab. 6 Dynamic panel regression results of conditional β convergence validation model

变量	2SLS		GMM		
	全流域(1)	上游(2)	中游(3)	下游(4)	全流域(5)
$\Delta \ln R_{EGE_{it-1}}$	0.116** (2.03)	-0.016(-0.15)	0.068(0.65)	0.172** (2.13)	0.116** (2.03)
$\ln R_{EGE_{it-1}}$	-0.977*** (-16.17)	-0.857*** (-7.19)	-0.893*** (-6.94)	-1.069*** (-13.26)	-0.977*** (-16.17)
m_{it}	-0.025(-0.66)	0.024(0.33)	0.055(0.66)	-0.020(-0.17)	-0.025(-0.66)
s_{it}	-0.001(-0.27)	-0.010* (-1.82)	0.003(0.46)	0.006(1.01)	-0.001(-0.27)
n_{it}	0.000 3(0.91)	0.000 2(1.01)	0.000 1(0.08)	0.000 0(0.07)	0.000 3(0.91)
常数项	-0.054(-0.98)	-0.014(-0.14)	-0.175(-1.40)	-0.107(-0.90)	-0.054(-0.98)
R^2	0.432	0.475	0.375	0.469	0.432
Obs	674	139	197	338	674

通过对全流域进行 2SLS 和 GMM 回归(模型(1)和(5))发现,结果无差别,表明并不存在异方差问题影响回归系数的估计,因此对分流域段的回归采用 GMM 回归。表 6 的回归结果表明:第一,能源利用效率 R_{EGE} 具有收敛性。 $\ln R_{EGE_{it-1}}$ 对应的系数均在 1% 显著水平上为负值,表明变量收敛。另一方面,其绝对值相较于绝对 β 收敛验证模型对应值的绝对值,明显减小,表明收敛性受到了其他控制变量的影响。第二,能源利用效率 R_{EGE} 的收敛受到前一期收敛的影响。分析 $\Delta \ln R_{EGE_{it-1}}$ 对应参数的显著性,发现仅有模型(1),(4),(5)的参数显著,显著水平均为 5%。但是从黄河全流域来看, R_{EGE} 的收敛受到前一期收敛的影响,即收敛具有惯性,且该惯性情况在流域下游城市更加明显。第三, R_{EGE} 的收敛并不受经济增长、投资、外资的影响,上中下游对应 m_{it}, s_{it}, n_{it} 参数均不显著。

通过对各流域和时段的能源利用效率 R_{EGE} 核密度曲线与收敛性分析,发现能源利用效率发展趋于向某一均值靠拢,而不是不断增大。这可能是因为在生产过程中,要保障低非期望产出的产出需要投入更多成本,对非期望产出的减少,其成本投入存在边际效应递减。另一方面,能源的利用是为了产出更多价值。基于此,能源的利用效率逐渐向一种“成本-收益”均衡的状态靠拢,以这种方式尽可能在保障经济发展的同时减少非期望产出品如工业污染物、二氧化碳的产出。

5 能源利用效率空间演变分析

为直观反映黄河流域能源利用效率的发展变化特征,基于所测算的能源利用效率,对样本初期(2006—2007 年平均)与样本末期(2018—2019 年平均)进行空间演变变化的分析。基于样本各城市经纬度坐标采用插值法绘制黄河流域城市的能源利用效率热力图,如图 4。考虑到非黄河流域城市样本空白在进行插值时可能产生的影响,在插值计算时采用自然邻点(Natural Neighbors)插值法,仅对局部进行计算,同时为了使区域能源利用效率空间具有可比性,统一采用等高间隔为 0.03 绘制等高线,通过等高线密集程度即可在一定程度上判断空间能源利用效率的差异化程度。

图4中颜色越浅,能源利用效率越高。通过对比分析图4(a,b),可知:(1)随着时间发展,能源利用效率的空间差异得到缓解。相比而言图4(a)中的等高线密度相对更加集中,即能源利用效率的空间差异相对更大,而图4(b)图中等高线相对更加分散,且颜色变化更加平缓。(2)能源利用效率趋于收敛某一中间值。图4(b)中反映黄河流域能源利用效率差异化程度明显减小。这与前文样本的能源利用效率密度曲线分析相照应,样本初期与样本末期的平均值相近,差异程度发生变化。(3)城市群建设在一定

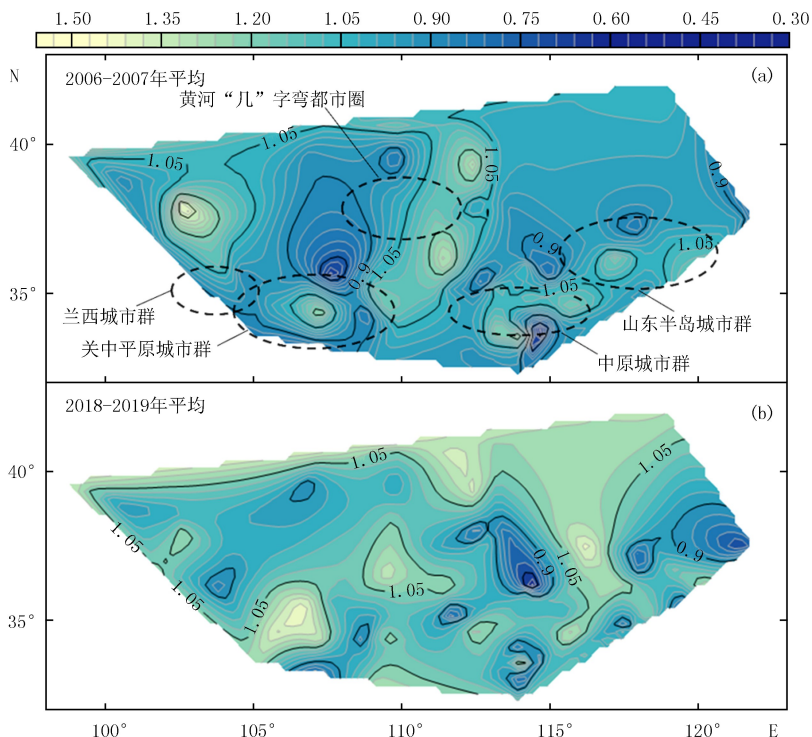


图4 R_{EGE} 空间插值热力图

Fig. 4 R_{EGE} spatial interpolation thermodynamic diagram

一定程度能促进区域能源利用效率的发展收敛。图4(a,b)中所标注城市群的区域,在样本末期更趋于能源利用效率差异减小,分布均匀,即城市群的建设使得空间能源利用效率的格局发生变化。

6 结论

第一,在绿色发展视角下,黄河流域城市的能源利用效率趋于收敛到某一均衡状态。由于环境成本的存在,城市对于能源的绿色利用情况是在权衡收益的情况下寻找近似最优解。即能源利用效率是向某一均衡水平发展。而这一均衡点在2006—2019年间并没有较大变化,可能因为能源利用的环境成本并没有较大变化。虽均衡点没有发生较大变化,但各城市区域的能源利用效率差异仍逐渐减小。

第二,“经济圈”的建设有助于城市能源利用效率向均衡点的收敛,使更多城市朝着能源利用效率的最优解趋近。但这并不表示能源的利用与经济发展逐渐协调,正确的处理能源利用过程中的投入产出价值,是改变均衡点,促进能源利用效率的关键所在。

在上述结论基础上,要促进能源利用效率的发展,需关注两方面,一方面要注重各城市能源利用效率发展与收敛的速度,注意区域协同发展,缩小能源利用效率差异。而“都市圈”、“城市群”的构建能够促进区域的能源绿色效率向均衡水平的发展与收敛。另一方面,加快绿色投入产出分析指标与核算体系,通过建设绿色GDP等体系,改变环境成本,促进能源利用效率均衡点的改善。在经济与成本的驱动下,促进对经济发展质量与结构的重视,以技术创新促进能源的绿色利用,实现经济高质量发展。

参 考 文 献

[1] 魏杰,刘丽娜,马云霞,等.黄河中下游河南省高质量发展与生态环境耦合协调度时空格局研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(2):48-57.

WEI J, LIU L N, MA Y X, et al. Spatial temporal pattern of coupling coordination degree between high quality development and ecological environment in Henan Province in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Sci-

- ence Edition), 2022, 50(2): 48-57.
- [2] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436.
LU D D, SUN D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: a preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436.
- [3] 汪克亮, 杨宝臣, 杨力. 环境约束下的中国全要素能源效率测度及其收敛性[J]. 管理学报, 2012, 9(7): 1071-1077.
WANG K L, YANG B C, YANG L. The measurement and convergence of China's total-factor energy efficiency under the environmental constraints[J]. Chinese Journal of Management, 2012, 9(7): 1071-1077.
- [4] 吴巧生, 李慧. 长江中游城市群能源效率评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(12): 140-146.
WU Q S, LI H. Study on energy efficiency in the middle reaches of the Yangtze River City group[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(12): 140-146.
- [5] 陈钊, 陈乔伊. 中国企业能源利用效率: 异质性、影响因素及政策含义[J]. 中国工业经济, 2019(12): 78-95.
CHEN Z, CHEN Q Y. Energy efficiency of Chinese firms: heterogeneity, influencing factors and policy implications[J]. China Industrial Economics, 2019(12): 78-95.
- [6] 李霞. 我国能源综合利用效率评价指标体系及应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
LI X. The efficiency of energy utilization evaluation index system and applied research of China[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [7] 喻胜华, 王婷婷. 基于稀疏主成分的能源利用效率综合评价及影响因素分析[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2021, 35(5): 60-68.
YU S H, WANG T T. A comprehensive evaluation of energy utilization efficiency and analysis of influencing factors based on sparse principal components[J]. Journal of Hunan University (Social Sciences), 2021, 35(5): 60-68.
- [8] 刘海英, 钟莹. 中国工业节能与减排效率一致性及其影响因素: 基于 NDDF-面板 Tobit 两步法的实证研究[J]. 数量经济研究, 2019(1): 67-81.
LIU H Y, ZHONG Y. Consistency and influencing factors of industrial energy efficiency and emission reduction efficiency in China: an empirical study based on NDDF-panel Tobit two-step method[J]. The Journal of Quantitative Economics, 2019(1): 67-81.
- [9] 魏楚, 沈满洪. 能源效率及其影响因素: 基于 DEA 的实证分析[J]. 管理世界, 2007(8): 66-76.
WEI C, SHEN M H. Energy efficiency and its influencing factors: An empirical analysis based on DEA[J]. Management World, 2007(8): 66-76.
- [10] 袁晓玲, 张宝山, 杨万平. 基于环境污染的中国全要素能源效率研究[J]. 中国工业经济, 2009(2): 76-86.
YUAN X L, ZHANG B S, YANG W P. The total factor energy efficiency measurement of China based on environmental pollution[J]. China Industrial Economics, 2009(2): 76-86.
- [11] ZHANG N, CHOI Y. Total-factor carbon emission performance of fossil fuel power plants in China: a metafrontier non-radial Malmquist index analysis[J]. Energy Economics, 2013, 40: 549-559.
- [12] 史丹, 吴利学, 傅晓霞, 等. 中国能源效率地区差异及其成因研究: 基于随机前沿生产函数的方差分解[J]. 管理世界, 2008(2): 35-43.
SHI D, WU L X, FU X X, et al. A study of regional differences in energy efficiency and their causes in China: a variance decomposition based on stochastic frontier production function[J]. Management World, 2008(2): 35-43.
- [13] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J]. 改革, 2019(11): 33-39.
JIN F J. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019(11): 33-39.
- [14] 徐辉, 师诺, 武玲玲, 等. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 115-126.
XU H, SHI N, WU L L, et al. High-quality development level and its spatiotemporal changes in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115-126.
- [15] 任保平, 巩羽浩. 黄河流域城镇化与高质量发展的耦合研究[J]. 经济问题, 2022(3): 1-12.
REN B P, GONG Y H. Study on the coupling of urbanization and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. On Economic Problems, 2022(3): 1-12.
- [16] 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[J]. 改革, 2019(10): 26-34.
REN B P, ZHANG Q. The strategic design and supporting system construction of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Reform, 2019(10): 26-34.
- [17] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 29-36.
JIA S F, LIANG Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.
- [18] 马国霞, 石敏俊, 李玫. 中国水土流失经济损失的货币化评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(1): 162-168.
MA G X, SHI M J, LI M. Economical cost evaluation of ecological environment degradation in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(1): 162-168.

- [19] 邓祥征,杨开忠,单菁菁,等.黄河流域城市群与产业转型发展[J].自然资源学报,2021,36(2):273-289.
DENG X Z, YANG K Z, SHAN J J, et al. Urban agglomeration and industrial transformation and development in the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 273-289.
- [20] 张国兴,王涵,闫磊超.基于绿色发展效率的黄河流域资源型城市转型发展研究[J].区域经济评论,2021(5):138-144.
ZHANG G X, WANG H, YAN L C. Study on the economic transformation path of resource-based cities in the Yellow River Basin based on green development efficiency [J]. Regional Economic Review, 2021(5): 138-144.
- [21] 师博,沈坤荣.政府干预、经济集聚与能源效率[J].管理世界,2013(10):6-18.
SHI B, SHEN K R. The government intervention, the economic agglomeration and the energy efficiency [J]. Management World, 2013(10): 6-18.
- [22] 胡晓珍,杨龙.中国区域绿色全要素生产率增长差异及收敛分析[J].财经研究,2011,37(4):123-134.
HU X Z, YANG L. Analysis of growth differences and convergence of regional green TFP in China [J]. Journal of Finance and Economics, 2011, 37(4): 123-134.
- [23] 林伯强,谭睿鹏.中国经济集聚与绿色经济效率[J].经济研究,2019,54(2):119-132.
LIN B Q, TAN R P. Economic agglomeration and green economy efficiency in China [J]. Economic Research Journal, 2019, 54(2): 119-132.
- [24] 孟望生.黄河流域地级市经济绿色增长效率的测度[J].统计与决策,2022,38(1):113-117.
MENG W S. Measurement of economic green growth efficiency of prefecture-level cities in the Yellow River Basin [J]. Statistics & Decision, 2022, 38(1): 113-117.
- [25] 韩峰,谢锐.生产性服务业集聚降低碳排放了吗?:对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J].数量经济技术经济研究,2017,34(3):40-58.
HAN F, XIE R. Does the agglomeration of producer services reduce carbon emissions? [J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2017, 34(3): 40-58.
- [26] 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.
YUE L, XUE D. Spatiotemporal change of urban green development efficiency in the Yellow River Basin and influencing factors [J]. Resources Science, 2020, 42(12): 2274-2284.

Measurement and trend of energy use efficiency in Yellow River Basin from the perspective of green development: based on convergence and spatial dynamic evolution study

Zhang Xiaoyu^{a,b}, Lu Hanglin^a, Zheng Pengfei^c

(a. Business School; b. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development;
c. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the dual context of green development and "carbon peaking and carbon neutral", this paper measures the energy use efficiency of the Yellow River Basin. For the construction of the energy green utilization efficiency index system, GDP is taken as the expected output, and the carbon dioxide emission factor reflecting energy saving and emission reduction is added into the non-expected output index. The comprehensive index of energy use efficiency is constructed based on ratio method, DEA-Malmquist index, Super-DEA and other methods from four perspectives, and the comprehensive energy use efficiency is measured by principal component evaluation. On this basis, the convergence of energy use efficiency is studied in different basins, different periods and different urban agglomerations of the Yellow River Basin, and a panel data model is established based on spatial analysis for further research. The results show that the development of energy efficiency tends to converge in the Yellow River Basin. From the perspective of green development, promoting the development of energy use efficiency requires the coordinated development of cities on the one hand, and on the other hand it needs to change the externalities of environmental costs to accelerate the improvement of green input-output system, so as to promote the positive movement of convergence equilibrium point of energy use efficiency.

Keywords: energy use efficiency; Yellow River Basin; Super-DEA; convergence analysis; spatial analysis