

中国省域绿色经济效率时空演变与影响因素异质性分析

董福贵, 刘佳美*, 李婉莹

(华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 在环境恶化的压力下,绿色经济发展成为各国解决经济与环境问题的有效途径,科学评估绿色经济效率对实现可持续发展具有重要意义. 首先基于2011~2022年中国30个省域的面板数据,使用超效率SBM模型对省域绿色经济效率进行了评估;其次利用核密度估计和泰尔指数等方法研究了中国省域绿色经济效率的时空演变特征;最后采用时空地理加权回归模型分析了影响因素的省级异质性问题. 结果表明,中国整体绿色经济效率呈上升趋势但数值较低,且存在多级分化向两极分化转变的现象,空间上呈现连片区块分布,东西差异显著;经济发展对绿色经济效率的影响最大,经济发展、人口密度和财政支出对省域绿色经济效率的正向影响更加明显,贸易开放、能源强度和環境規制的負向影响更加明显.

关键词: 绿色经济效率; 超效率SBM模型; 时空地理加权回归(GTWR); 影响因素; 异质性

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2025)08-4792-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202406055

Analysis of Spatio-temporal Evolution of Green Economy Efficiency and Heterogeneity of Influencing Factors in Chinese Provinces

DONG Fu-gui, LIU Jia-mei*, LI Wan-ying

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Under the pressure of environmental deterioration, green economic development has become an effective way for countries to solve economic and environmental problems, and scientific assessment of green economic efficiency is important to realize sustainable development. In this study, based on the panel data of 30 Chinese provinces from 2011 to 2022, we first used the super efficiency SBM model to assess the green economic efficiency of each province. Then, we analyzed the spatial and temporal evolutionary characteristics of the green economic efficiency by using methods such as kernel density estimation and Theil index. Finally, we used the geographically and temporally weighted regression model to analyze the issue of provincial-level heterogeneity of the influencing factors. The results of the study showed that China's overall green economy efficiency demonstrated an upward trend but with low values, and a shift was observed from multilevel differentiation to polarization. Spatially, it showed a contiguous block distribution with notable east-west differences. Economic development had the greatest impact on green economic efficiency, and the positive impacts of economic development, population density, and financial expenditure on green economic efficiency were more obvious, while the negative impacts of trade openness, energy intensity, and environmental regulation were more obvious.

Key words: green economy efficiency; super efficiency SBM model; geographically and temporally weighted regression (GTWR); influencing factors; heterogeneity

在近年来严峻的资源环境形势下,推动绿色发展成为经济转型的重要方向.从2007年十七大首次提出生态文明建设,2015年十八届五中全会全面阐述绿色发展;到十九大提出大力推进生态文明建设,全面贯彻城市绿色发展理念^[1];再到2020年,“十四五”规划纲要提出构建生态文明体系,推动经济社会发展全面绿色转型,建设美丽中国,以上都是对提升经济增长质量、转变经济发展方式、推动经济绿色转型的要求,由此可见,绿色发展已成为经济发展的新常态.在此背景下,科学评估绿色经济效率(green economy efficiency, GEE),分析经济增长、资源节约和污染减排协调发展中的问题,对践行绿色发展理念、实现经济社会可持续发展具有重要意义.通过探索省域层面的影响因素异质性,可以更好地理解绿色经济发展的复杂性和动态性,从而为制定更加精准的绿色经济发展政策提供科学依据.

绿色经济效率的相关研究主要集中在绿色经济

效率评价、时空演变和影响因素这3个方面,研究对象主要为中国省域、城市、重要城市群和流域等.

对绿色经济效率进行评价的方法主要分为参数方法和非参数方法.随机前沿分析(stochastic frontier analysis, SFA)方法是最常用的参数方法,如范建双等^[2]和白洁等^[3]采用SFA法分别对我国30个省域和长江经济带107个地级市的绿色经济效率进行测度, Tsionas等^[4]采用分位数随机前沿评估了美国各州的生态效率.然而以SFA为代表的参数方法对于具体生产函数的形式和分布具有严格的假设,致使参数方法的适用范围受到较大限制.因此数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)相关方法得到广泛应用^[5,6], Ding等^[7]和 Geng等^[8]分别采用SBM和超效

收稿日期: 2024-06-05; 修订日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(19BJY074);北京市社会科学基金项目(21JJB012)

作者简介: 董福贵(1974-),男,博士,教授,主要研究方向为能源管理理论与方法, E-mail: dfg@yeah.net

* 通信作者, E-mail: 2422350549@qq.com

率SBM模型测算GEE.相比于简单的DEA,SBM关注到非期望产出,超效率SBM则进一步关注到效率前沿面个体的比较.

对GEE结果的呈现,部分学者结合核密度估计^[9]、泰尔指数^[10]和基尼系数^[11]等方法刻画区域绿色经济效率的时空演化特征.Yang等^[12]采用基尼系数描述长江沿江省域GEE空间平衡程度,发现11省域在16项指标上差异较大且年际变化较弱、波动幅度小.蔺鹏等^[13]采用三维核密度刻画中国八大城市群整体GEE的动态分布演进,发现各城市群GEE呈现波动上升态势,空间差异趋于缩小.

对绿色经济效率影响因素的研究,目前有大量学者从数字经济^[14~16]、绿色金融^[17]、技术创新^[18]、经济或金融集聚^[19~21]、环境监管^[22,23]和绿色信用监管制度^[24]等角度探究,其主流方法可以分为非空间计量方法和空间计量方法.非空间计量方法以Tobit模型为代表,如Shuai等^[25]利用Tobit模型探究环境规制对GEE的非线性影响.然而越来越多的学者发现非空间计量方法忽略了GEE分布的空间关联,具有一定的误差,因此以空间滞后模型、空间误差模型和空间杜宾模型为代表的空间计量方法逐渐得到广泛运用^[26,27].在对GEE影响因素进行分析时,异质性问题逐渐引起学者们的关注,有学者在计量结果的基础上进一步探索不同区域的异质性问题,如韩雅清等^[28]运用动态面板GMM分别对中国东中西部进行回归以探究数字金融对不同区域GEE的影响异质性,夏梁凯等^[29]采用Tobit模型对环渤海、长三角和泛珠三角三大地区海洋GEE的五大影响因素进行异质性检验.此外,也有部分学者运用分位数回归、地理探测器和地理加权回归等方法进行探索,陈明华等^[30]借助方差分解和分位数回归从内源与外源双角度分析黄河流域城市GEE差异的驱动因素,辛龙等^[31]采用地理探测器模型揭示2007~2017年中国东部、中部和西部省域GEE驱动力的空间异质性.

综上所述,许多学者对GEE进行了研究,但是针对影响因素异质性的研究仍不充分,目前大多聚焦于宏观区域层面,且对影响因素时空异质性的研究较少.鉴于此,本文将从以下几个角度展开研究:首先,利用2011~2022年中国30个省域的面板数据,采用超效率SBM模型评估GEE;其后,利用核密度估计和泰尔指数等方法探究中国省域GEE的时空演变特征;最后,采用时空地理加权回归(geographically and temporally weighted regression, GTWR)模型分析影响因素在省级尺度下的异质性问题,刻画其时间演变和空间差异.

1 材料与方法

1.1 研究方法

本文基于2011~2022年中国30省域的面板数据,采用超效率SBM模型评估GEE,并利用核密度估计和泰尔指数等方法研究了中国省域GEE的时空演变特征,最后采用GTWR模型分析了影响因素的省级异质性问题.

1.1.1 超效率SBM

DEA模型通过投入产出得到决策单元(DMU)的相对效率值,是一种测算效率的非参数方法.但传统DEA无法对多个有效DMU进行排序,且DEA模型均是基于径向方法,未考虑投入产出的松弛性.基于此,Tone提出了超效率SBM模型,能够很好地解决DEA模型的局限性,超效率SBM模型中的效率值可以大于1,当多个DMU的效率均有效时,可以进行有效排序;超效率SBM模型采用非径向方法测算相对效率,解决了由于径向选择的不同产生偏差的问题,因此本文选择超效率SBM模型测算效率.

假设有 n 个决策单元(decision making unit, DMU),每个DMU有 m 项投入, r_1 项期望产出, r_2 项非期望产出,第 j 个决策单元为DMU _{j} ,DMU _{j} 的投入向量为 $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$,产出向量包括期望产出向量 $Y_j^g = (y_{1j}^g, y_{2j}^g, \dots, y_{r_1j}^g)^T$ 和非期望产出向量 $Y_j^b = (y_{1j}^b, y_{2j}^b, \dots, y_{r_2j}^b)^T$,模型见公式(1)所示.

$$\min \rho = \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{s=1}^{r_1} \bar{y}_{sk}^g + \sum_{q=1}^{r_2} \bar{y}_{qk}^b \right)} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \bar{x} \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j; \bar{y}^g \leq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{sj}^g \lambda_j; \bar{y}^b \geq \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{qj}^b \lambda_j \\ \lambda_j \geq 0, \bar{x} \geq x_k, \bar{y}^g \leq y_k^g, \bar{y}^b \geq y_k^b \\ i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \\ s = 1, 2, \dots, r_1; q = 1, 2, \dots, r_2 \end{cases}$$

式中, λ_j 和 ρ 为第 j 个DMU的系数和绿色经济效率,效率的取值可以大于1.

1.1.2 核密度估计

核密度估计用于刻画变量的动态演进,根据变量分布的直方图使用连续平滑的曲线来估计随机变量的密度.假设随机变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的密度函数为 $f(x)$,在点 x 处的概率密度可以由式(2)来进行估计.

$$f(x) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (2)$$

式中, N 为样本个数, h 为带宽, $K()$ 为核函数, X_i 为样

本的观测值, x 为样本均值. 在具体估计中, 本文采用常用的高斯核函数来刻画 GEE 的动态演进, 如式(3)所示.

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (3)$$

1.1.3 泰尔指数

泰尔指数最初由 Theil 在 1967 年提出^[32], 用于测量国家间的收入差距, 现普遍用于各个领域. 泰尔指数能够分解为区域间差异和区域内部差异, 不仅能够体现各区域的差异程度, 还能反映区域间差异和区域内部差异对总差异的贡献程度. 其计算公式如下:

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{u} \ln \frac{Z_i}{u} = T_w + T_b \quad (4)$$

$$T_w = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{n} \frac{u_k}{u} T_k \quad (5)$$

$$T_b = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{n} \frac{u_k}{u} \ln \frac{u_k}{u} \quad (6)$$

式中, n 为省域数量, m 为组数, Z_i 为各省域绿色经济效率值, n_k 和 u_k 为第 k 组省域个数和绿色经济效率均值, T 为整体泰尔指数, T_k 、 T_w 和 T_b 分别为第 k 组的泰尔指数、区域内部差异和区域间差异.

1.1.4 GTWR 模型

时空地理加权回归 (GTWR) 模型是在地理加权回归 (GWR) 模型的基础上引入时间效应^[33], 同时考虑了时间地理位置和空间地理位置的变化, 能够有效解决时空非平稳性, 具体模型如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^n \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

$$\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i) = [X^T W(u_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y \quad (8)$$

式中, Y_i 为观测值, (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个省域的时空坐标, $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为回归常数, $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为回归系数, ε_i 为残差, $W(u_i, v_i, t_i)$ 为时空权重矩阵, $\hat{\beta}(u_i, v_i, t_i)$ 为回归系数的估计值. W 采用高斯距离函数, 省域 i 和省域 j 之间的距离为:

$$d_{ij} = \sqrt{\lambda[(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu(t_i - t_j)^2} \quad (9)$$

式中, λ 和 μ 为空间和时间距离的比例因子.

1.2 变量选取与数据来源

在超效率 SBM 模型中, 本文选取资本存量、年末就业人数、能源消费量、建成区面积和用水量为投入指标, 选取地区生产总值为期望产出指标, 选取工业废水排放量、工业 SO₂ 排放量、工业烟粉尘排放量和工业固体废弃物产生量为非期望产出指标; 此外考虑到中国国内实现“双碳”目标的实际背景, 将 CO₂ 排放量也作为非期望产出指标. 受限于数据的可获取

性和可用性, 本文使用的数据涵盖了 2011~2022 年中国 30 个省域的数据 (中国香港、澳门、台湾和西藏资料暂缺), 并参考国家统计局的标准将我国划分为东中西和东北这 4 个地区.

对于资本存量的估算, 本文借鉴 Goldsmith 提出的永续盘存法^[34]对各地区年度资本存量进行估算, 计算公式为:

$$K_{i,t} = (1 - \rho) K_{i,t-1} + I_{i,t} \quad (10)$$

式中, $K_{i,t}$ 为地区 i 第 t 年的资本存量, ρ 为折旧率, $I_{i,t}$ 为地区 i 第 t 年的新增固定资产投资. 折旧率参考文献^[35]的做法, 设定为 10.96%. 本文以 2010 年为基期进行折算, 形成最终资本存量数据.

年末就业人数和能源消费总量数据来源于国泰安数据库, 建成区面积、用水量和地区生产总值 (GDP) 数据来源于研究年份的中国统计年鉴, GDP 同样折算为以 2010 年为基期的实际 GDP, 工业废水排放量、工业 SO₂ 排放量、工业烟粉尘排放量和工业固体废弃物产生量数据来源于 EPS 数据库, CO₂ 排放量数据来源于 MEIC 数据库.

对于影响因素的选取, 在参考以往文献的基础上, 考虑指标适用性和数据可得性, 将经济发展^[36]、城市化^[37]、产业结构^[38]、研发投入^[39,40]、贸易开放^[41]、人口密度^[42]、财政支出^[43]、能源强度^[44]和环境规制^[45,46]纳入模型, 如表 1 所示. 所有变量的原始数据均来源于研究年份的中国统计年鉴、中国能源统计年鉴、中国环境统计年鉴和 EPS 数据库.

表 1 影响因素变量的定义

变量	定义
经济发展	人均地区生产总值
城市化	人口城镇化率
产业结构	第二产业增加值占 GDP 比例
研发投入	R&D 投入强度
贸易开放	进出口总额与 GDP 之比
人口密度	地区总人口与面积之比
财政支出	一般财政支出占 GDP 比例
能源强度	能源消费与 GDP 之比
环境规制	工业污染治理完成投资额占工业增加值的比例

2 结果与讨论

2.1 省域绿色经济效率演变分析

2.1.1 基于超效率 SBM 的 GEE 计算

本文以资本存量、年末就业人数、能源消费量、建成区面积和用水量为投入指标, 以地区生产总值为期望产出指标, 以工业废水排放量、工业 SO₂ 排放量、工业烟粉尘排放量、工业固体废弃物产生量和 CO₂ 排放量为非期望产出指标, 依据超效率 SBM 模型

计算得到 2011~2022 年中国 30 省域的 GEE,结果如表 2 所示。

从历年效率来看,多数省域 GEE 呈稳步上升趋势;广东的效率在 2011 年大于 1,但在 2012~2017 年间出现下降趋势,近年来有所上升,新疆同样在 2017 年之前呈现下降趋势。上海、天津和北京的平均效率最高,分别在 2013 年、2014 年和 2021 年达到效率前沿,GEE 开始高于 1,并且近年来一直保持在效率前沿,其中北京在 2022 年达到全局最高效率 1.042。宁夏和新疆的平均效率最低,至 2022 年,效率仅有 0.189 和 0.182,且研究期内平均效率低于 0.2。2020

年,受疫情影响,部分省域出现效率降低,其中湖北因为疫情最为严重,停工停产对经济造成较大影响,效率下降幅度较大,浙江、河南、内蒙古、云南和青海也表现出微弱下降。

此外,省域效率差异十分明显,从历年效率来看,上海、天津和北京是效率最高的 3 个城市,历年效率基本在 0.5 以上,但除广东外的其余省域的最高效率均未达到 0.5,最低时只有 0.143。从平均效率来看,仅有上海、天津、北京和广东这四省域的平均效率高 于 0.5,并且处于[0.3,0.5]区间的省域也仅有 6 个,其余省域的平均效率均在 0.3 以下。

表 2 2011~2022 年 GEE 变化
Table 2 GEE changes from 2011 to 2022

省域	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	均值	排名
上海	0.508	0.627	1.001	1.001	1.002	1.001	1.001	0.892	1.003	0.862	1.009	1.013	0.910	1
天津	0.382	0.415	0.466	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.002	1.008	1.002	1.021	0.858	2
北京	0.499	0.494	0.447	0.463	0.489	0.512	0.566	0.625	0.675	0.721	1.002	1.042	0.628	3
广东	1.003	0.920	0.832	0.615	0.567	0.467	0.364	0.376	0.386	0.389	0.406	0.411	0.561	4
浙江	0.299	0.313	0.326	0.342	0.356	0.372	0.385	0.403	0.422	0.420	0.443	0.448	0.377	5
福建	0.283	0.296	0.312	0.322	0.335	0.354	0.372	0.394	0.423	0.433	0.452	0.452	0.369	6
江苏	0.271	0.287	0.304	0.319	0.337	0.354	0.371	0.390	0.410	0.425	0.470	0.481	0.368	7
山东	0.256	0.269	0.289	0.302	0.313	0.329	0.349	0.364	0.375	0.384	0.418	0.429	0.340	8
湖南	0.226	0.239	0.257	0.270	0.288	0.302	0.316	0.328	0.352	0.361	0.381	0.394	0.310	9
重庆	0.216	0.235	0.257	0.267	0.287	0.304	0.319	0.326	0.337	0.357	0.374	0.380	0.305	10
河北	0.229	0.240	0.252	0.261	0.267	0.276	0.291	0.306	0.325	0.334	0.358	0.374	0.293	11
陕西	0.239	0.252	0.268	0.279	0.281	0.292	0.294	0.307	0.319	0.321	0.325	0.328	0.292	12
内蒙古	0.214	0.229	0.241	0.255	0.271	0.289	0.299	0.311	0.325	0.319	0.329	0.329	0.284	13
河南	0.220	0.228	0.242	0.255	0.264	0.280	0.293	0.308	0.323	0.321	0.334	0.331	0.283	14
江西	0.223	0.235	0.244	0.255	0.263	0.272	0.284	0.296	0.308	0.309	0.325	0.331	0.279	15
湖北	0.223	0.232	0.245	0.254	0.265	0.277	0.287	0.295	0.304	0.290	0.316	0.319	0.276	16
四川	0.219	0.232	0.243	0.249	0.262	0.263	0.271	0.283	0.295	0.314	0.327	0.329	0.274	17
辽宁	0.197	0.211	0.228	0.236	0.247	0.240	0.256	0.272	0.287	0.289	0.311	0.320	0.258	18
安徽	0.212	0.220	0.227	0.235	0.241	0.250	0.261	0.272	0.279	0.287	0.302	0.303	0.257	19
山西	0.200	0.206	0.217	0.220	0.221	0.226	0.242	0.259	0.270	0.278	0.303	0.314	0.246	20
吉林	0.172	0.187	0.202	0.212	0.231	0.250	0.260	0.268	0.277	0.283	0.305	0.301	0.246	21
海南	0.222	0.219	0.220	0.221	0.222	0.234	0.240	0.237	0.247	0.254	0.274	0.274	0.239	22
黑龙江	0.193	0.199	0.207	0.210	0.220	0.230	0.241	0.252	0.266	0.267	0.281	0.290	0.238	23
广西	0.171	0.180	0.193	0.204	0.212	0.221	0.231	0.242	0.251	0.254	0.264	0.262	0.224	24
云南	0.183	0.188	0.195	0.197	0.199	0.203	0.213	0.223	0.230	0.228	0.241	0.243	0.212	25
贵州	0.217	0.209	0.205	0.204	0.205	0.207	0.205	0.208	0.215	0.219	0.224	0.222	0.212	26
甘肃	0.182	0.189	0.193	0.193	0.195	0.199	0.203	0.213	0.226	0.230	0.241	0.247	0.209	27
青海	0.194	0.199	0.187	0.189	0.184	0.188	0.201	0.209	0.214	0.210	0.214	0.220	0.201	28
新疆	0.187	0.178	0.169	0.165	0.163	0.166	0.165	0.170	0.173	0.173	0.179	0.182	0.173	29
宁夏	0.143	0.146	0.147	0.145	0.145	0.150	0.153	0.158	0.166	0.170	0.181	0.189	0.158	30

2.1.2 时间序列演变特征

为了直观展现 2011~2022 年我国省域 GEE 的动态变化,绘制了 2011 年、2015 年、2019 年和 2022 年的 GEE 核密度曲线,如图 1 所示。

分析可知,GEE 核密度曲线呈现如下特征:第一,整体上,4a 的核密度曲线呈不规则偏态特征,低效率占

比较大。第二,2011 年、2015 年和 2019 年的核密度曲线为多峰形态,表明 GEE 有一定的梯度,呈多级分化现象;而 2022 年则为双峰形态,GEE 呈现多峰至双峰的转变,表明各省域 GEE 呈现由多极分化向两极分化转变的态势。第三,曲线主峰中心位置明显右移,总体效率呈上升的特征,说明我国近年来坚持“绿水青山就是

金山银山”的发展理念,重视生态环境、进行生态文明建设的发展举措得到一定成效;主峰形态由尖峰变为宽峰且峰值降低,说明效率较低省域的分布由密集变为均衡,省域间差异程度变大、集聚程度减小。

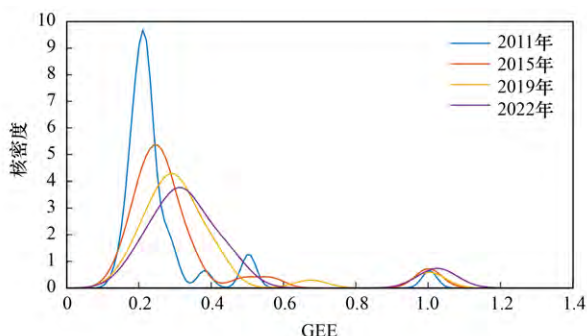


图1 核密度曲线

Fig. 1 Kernel density curve

为了进一步呈现区域 GEE 变化的时间序列特征,基于区域平均值数据绘制 GEE 均值年度变化折线图。由图 2 可知,2011~2022 年全国平均 GEE 和分区域 GEE 均呈现平稳上升趋势,全国 GEE 均值在 2011 年至 2022 年间由 0.266 上升至 0.393。具体来说,区域 GEE 呈现东部>中部>东北>西部的状态,其中,东部地区有明显的领先优势,平均 GEE 由 0.395 上升至 0.595,说明东部经济较发达的省域在环境治理与经济转型发展方面取得较好成效,对我国绿色经济发展具有引领作用。中部地区平均 GEE 低于东部地区,但高于西部和东北地区,除 2020 年外,以一定的速率稳步上升。东北地区在研究初期效率较低,可能是由于黑龙江和吉林等以重化工资源密集型产业为主的老工业基地经历东北振兴与产业转型,还未能形成稳定的经济发展与环境保护协调机制。西部地区平均 GEE 呈现逐年上升趋势,但总体效率较低且上升幅度较小,经济发展与环境保护未能实现有效协调,具有较大提升空间。

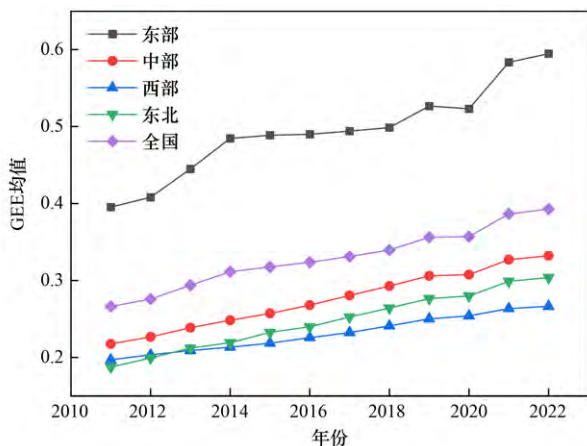


图2 GEE 均值变化折线图

Fig. 2 Line graph of change in GEE mean value

2.1.3 空间分布变化特征

为了可视化 2011~2022 年中国各省域 GEE 空间分布的变化,利用 ArcGIS 10.8 软件对 2011 年、2015 年、2019 年和 2022 年中国 GEE 空间格局进行渲染。此外,参考自然断点法分类结果划分了 5 个效率层次,以避免因层次划分不同导致的效率梯队差异。

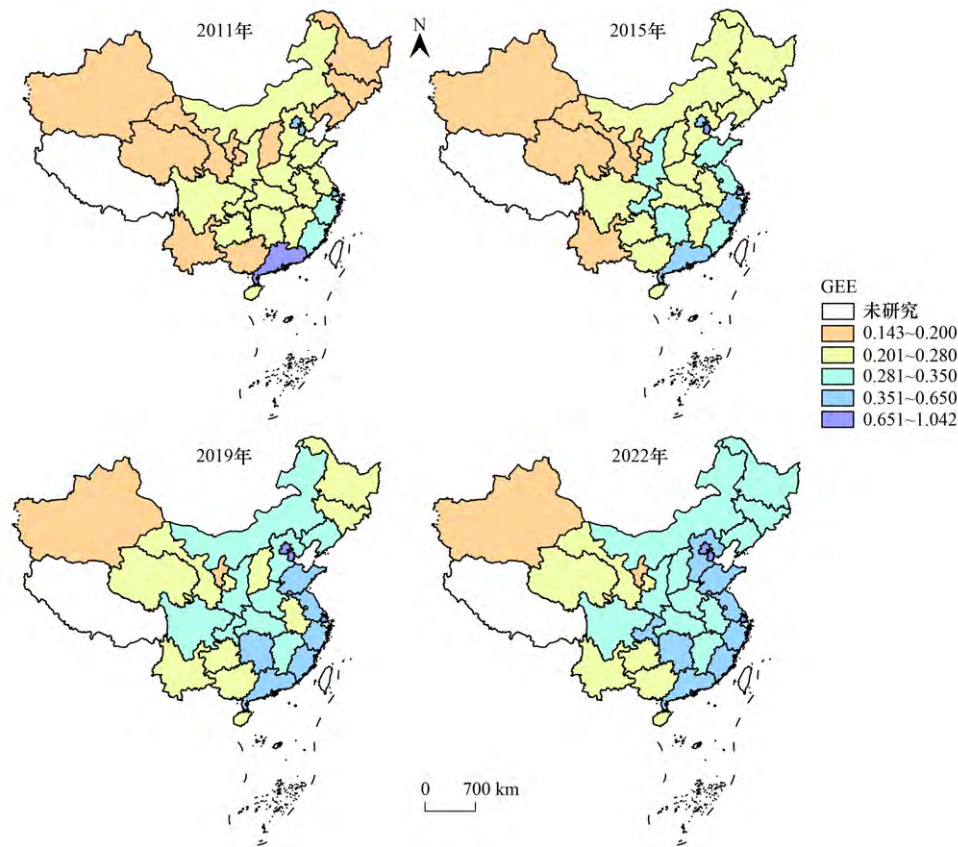
如图 3 所示,2011~2022 年,我国 GEE 整体空间格局未发生较大变化,在空间上呈现东部地区>中部地区>东北地区>西部地区的空间分布格局。2011 年,广东效率较高,北京、天津和上海处于效率第二梯队,浙江和福建处于第三梯队,新疆、青海、甘肃、宁夏、云南、广西、山西、黑龙江、吉林和辽宁处于效率最低的梯队。2011~2015 年,北京、天津、上海和广东依旧保持在效率较高的水平,浙江进入第二梯队,山东、江苏、陕西、重庆和湖南进入第三梯队,东北三省、山西和广西跳出最后一梯队。到 2019 年,北京、天津和上海三直辖市超越领先的局势形成,山东、江苏、福建和湖南效率提升进入第二梯队,内蒙古、辽宁、河北、河南、四川、湖北和江西进入第三梯队,青海、甘肃和云南进入第四梯队。2019~2022 年,三直辖市依旧领跑全国,重庆和河北进入第二梯队,黑龙江、吉林和山西进入第三梯队,新疆和宁夏依旧处于最后一梯队。由此可知:①近年来我国 GEE 空间分布具有连片区块分布特征,呈现“东南高,西北低”的空间格局,表明 GEE 具有空间相关性;②区域差距显现,东部地区>中部地区>东北地区>西部地区;③4 个直辖市效率较高,其中北京、天津和上海持续领先全国,新疆和宁夏则一直居于最后梯队,具有较高的提升空间。

为了探究空间差异来源,本文进一步采用泰尔指数方法计算东部地区、东北地区、中部地区和西部地区这 4 个地区的区域总差异、区域间差异和区域内部差异,并做折线图进行直观展示。如图 4 所示,总差异呈“W”形态,其中 2014 年达到峰值 0.155,2020 年达到低谷值 0.107。2011~2020 年,区域内部差异高于区域间差异,而 2021 年和 2022 年则为区域间差异高于区域内部差异,说明我国 GEE 的区域差异更加明显。

2.2 绿色经济效率影响因素分析

2.2.1 空间相关性分析

为了进一步探究是否存在显著的空间相关性,本文借助探索性空间数据分析方法,以中国 30 省域为对象,使用地理距离矩阵作为空间权重矩阵来考察 2011~2022 年我国 GEE 的空间相关性。表 3 给出了 2011~2022 年我国 30 省域 GEE 的全局莫兰指数检验结果。结果显示,在观测期内,前 3 年 GEE 未能通过



基于自然资源部标准地图服务网站GS(2024)0650号的标准地图制作,底图边界无修改

图3 绿色经济效率空间格局演变

Fig. 3 Evolution of spatial patterns of green economy efficiency

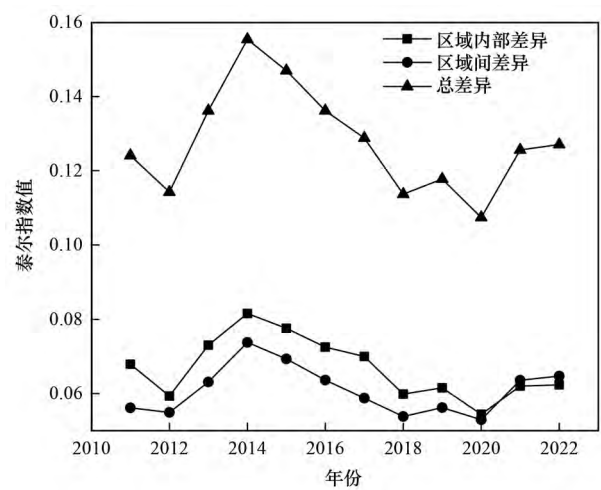


图4 泰尔指数

Fig. 4 Theil index

显著性检验,而2014~2022年的GEE均呈显著相关性,通过5%显著性检验,说明GEE在空间上的分布并非随机,各省域间具有较强的空间相关性.2014~2022年,中国GEE的莫兰指数呈增长趋势,由2014年的0.143增长至2022年的0.429,说明我国GEE的空间相关性不断增强,具有明显的空间依赖性.

显著的空间相关性说明在对GEE进行分析时,传统的OLS回归可能对结果产生误差,因此应该充

表3 2011~2022年莫兰指数¹⁾

Table 3 Global Moran's *I* index of GEE from 2011 to 2022

年份	莫兰指数	<i>Z</i>	<i>P</i>
2011	0.044	1.162	0.123
2012	0.069	1.327	0.092
2013	0.069	1.300	0.097
2014	0.143**	2.133	0.016
2015	0.169**	2.457	0.007
2016	0.202***	2.882	0.002
2017	0.251***	3.472	0.000
2018	0.323***	4.259	0.000
2019	0.317***	4.141	0.000
2020	0.382***	4.843	0.000
2021	0.420***	5.164	0.000
2022	0.429***	5.268	0.000

1)*、**和***分别表示10%、5%和1%的显著性水平

分考虑地理空间因素的影响,借助空间计量方法展开分析.

2.2.2 拟合结果对比分析

采用ArcGIS软件建立OLS、TWR、GWR和GTWR模型,并进行模型拟合结果对比.由于2011~2013年GEE的莫兰指数未能通过显著性检验,因此选取了2014~2022年进行GTWR建模.

为了避免多重共线性的影响,本文使用方差膨

胀因子(VIF)检验变量之间的多重共线性,排除了城镇化率这一变量,最终选取经济发展(X1)、产业结构(X2)、研发投入(X3)、贸易开放(X4)、人口密度(X5)、财政支出(X6)、能源强度(X7)和环境规制(X8)这8个变量作为模型自变量。

为了对不同模型进行比较,本文选取 R^2 、调整 R^2 、AICc和RSS作为评判标准来确定模型的拟合优度,其中RSS为残差平方和。在模型选择中, R^2 和调整 R^2 越大、AICc和RSS值越小,说明模型拟合效果越好。将标准化后的数据进行计算,结果如表4所示,未考虑空间关系的OLS模型拟合效果最差,TWR与GWR的拟合效果优于OLS,GTWR的拟合优度显著优于其他3个模型,其调整 R^2 达到0.98。

表4 模型拟合结果对比表

Table 4 Comparison of model fitting results

模型	R^2	调整 R^2	AICc	RSS
OLS	0.87	0.86	-557	1.86
TWR	0.89	0.88	-591	1.51
GWR	0.96	0.96	-815	0.46
GTWR	0.98	0.98	-863	0.26

2.2.3 基于GTWR的影响因素分析

图5显示了2014~2022年中国整体的影响因素系数随时间的变化情况,各回归系数的显著性比例均在88%以上,其中新疆各年的系数均达不到显著性要求,因此未纳入后续分析中。

经济发展的系数最大,对GEE呈现较大的影响,且主要表现为正向影响。本研究初期,经济发展的系数有部分为负数,而后期全部为正数,说明部分省域表现为初期的负向驱动与后期的正向驱动,体现了经济发展从粗放式向可持续性过渡的一般规律,一定程度上验证了环境库兹涅兹曲线。近年来,经济发展的系数均为正,说明我国近年生态文明建设取得一定成效,经济发展与环境保护协同增强。产业结构在研究期内呈现对部分省域GEE的促进与对部分省域GEE的抑制,抑制作用的省域数量有所增加,且系数正值减小,说明工业化的发展虽能通过促进经济增长提高GEE,但在可持续发展的背景下,其导致的环境污染能源消耗等情况也更为凸显。研发投入的系数后期有微弱上升,以正向驱动为主,说明科研投入的增长能够促进GEE的增长,应该加强对科技研发的投入。贸易开放在研究初期对GEE以正向驱动为主,后期对GEE的负向影响逐渐增大,说明外贸的增加和外商投资的增长可能更多是污染密集产业的企业,伴随着严重的资源消耗和环境污染,使得多数省域成为“污染避难所”,更多地造成“污染天堂效应”而非产生绿色技术进步^[47]。人口密度整体上表现

为对GEE的促进,说明在人口规模逐渐增多的过程中,人口集聚带来的劳动力增长会形成“人口红利”,产生知识溢出、人力资本集聚等正外部效应,带来GEE的提升。财政支出在研究期内与GEE在大多数省域表现为正相关,负向驱动较少,政府增加财政支出一方面体现在增加环境治理投资、促进降污减排,一方面体现在加大对科技研发的投入,能有效减少污染排放和能源消耗,促进GEE的增长。能源强度由初期的以促进作用为主转为后期的以抑制作用为主,说明通过能源消耗促进经济发展的方式是不可持续的,会抑制GEE的增长。一般来说,能源强度的提高会伴随着高强度的能源消耗和严重的污染排放,降低GEE,初期的促进作用可能主要表现为通过增加产能促进GEE的提升。环境规制与GEE的关系在研究初期于大多数省域表现为负向驱动,后期受负向影响的省域的数量有所减少,说明环境规制一定程度上减少了污染物的排放,提高了绿色生产水平。

为了进一步探究影响因素对不同省域的异质性影响,基于GTWR回归系数绘制各省域2014~2016年、2017~2019年和2020~2022年的系数均值柱状图,如图6所示。

初期,部分南方省域GEE受到经济发展的负向影响,如贵州、广西、海南和福建等;到中后期,经济发展对全部省域表现为正向影响,表明较高的经济发展水平为绿色经济的发展提供了重要的资本支撑,为清洁生产的进行、绿色消费需求的释放和环保意识的增强提供可能,从而提高GEE。经济发展的影响程度呈现东部至西部、北方至南方降低的趋势,其中,京津冀、东北三省和山东经济发展对GEE影响较大,青海、甘肃、云南和贵州等省域经济发展对GEE影响较小。

产业结构对不同省域的影响具有较大差异,在产业结构正向影响的省域中,京津冀和山东产业结构的正向影响最大,二产比例的增加会促进GEE的增长,以上省域可以适当提高第二产业。上海、江苏和安徽产业结构的影响由正转负,且后期受到的负向影响较大,应当加快推动产业结构朝高级化、合理化方向转变,从而优化区域环境,提高GEE。

本研究期内,研发投入对京津冀和山西GEE的促进作用增强,对云贵川、重庆和广西等省域GEE的促进作用减弱,对上海、浙江、福建和江西等东南省域的GEE具有明显抑制作用,研发投入越多,绿色经济效率反而越低,可能的原因是研发投入主要为生产技术研发,清洁型技术研发投入较少,应当加大对绿色环保技术的研发投入,促进生产技术绿色转型。

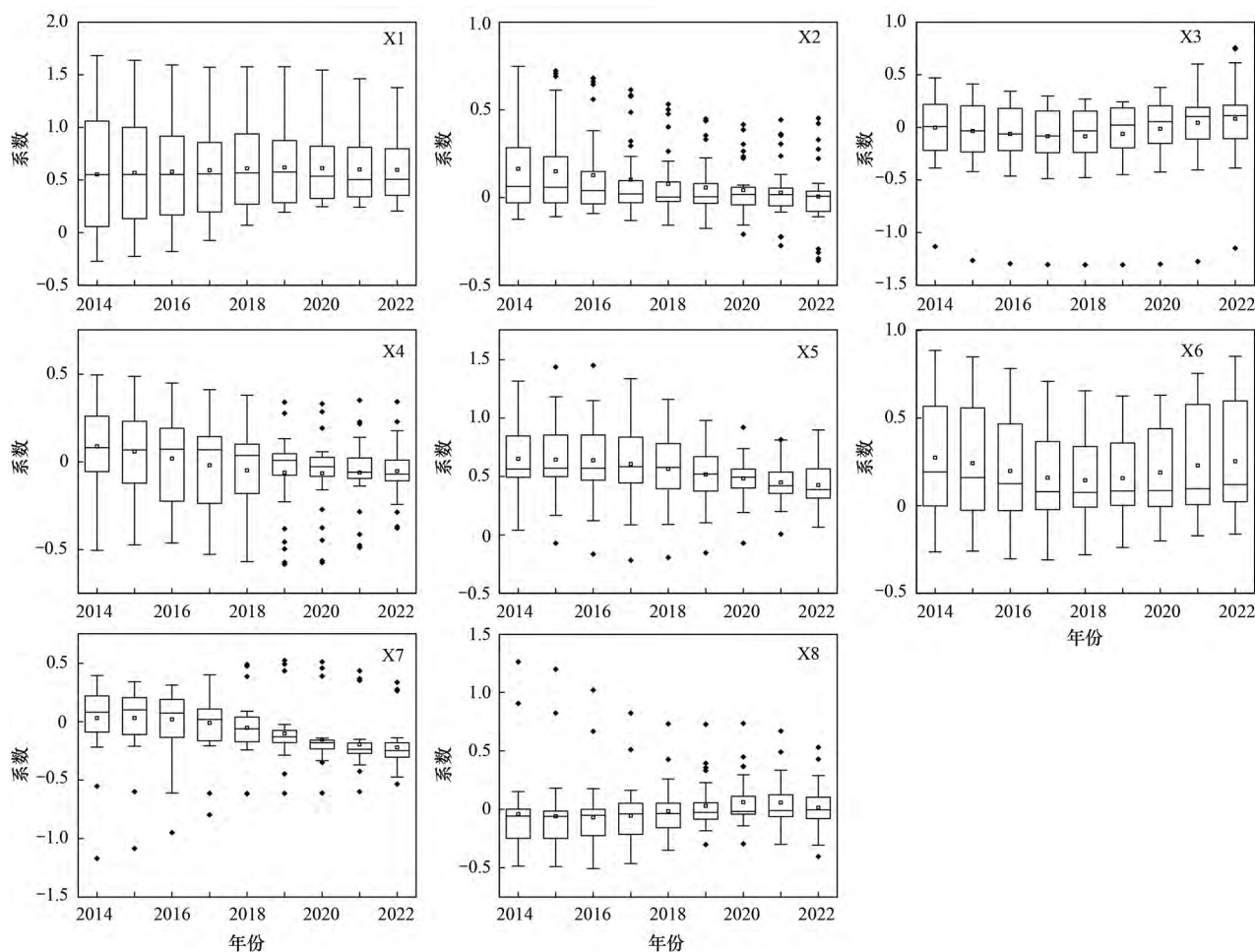


图5 GTWR系数箱线图

Fig. 5 Box line diagram of GTWR coefficients

贸易开放在研究期内呈现正向影响减弱、负向影响增强的趋势,初期对南方省域主要呈现正向影响,但影响程度减弱,且部分省域转变为负向影响。华北地区、辽宁和山东的贸易开放对GEE的负向影响最大,表明进出口贸易的增长会降低GEE,以上省域应当重视贸易开放带来的负向影响,加强外贸经济活动中的甄别力和判断力,合理发展对外贸易,激励引导拥有低污染项目和绿色清洁技术的企业融入本地,对拥有高污染的企业进行规避。青海、宁夏、内蒙古、山西、浙江和福建等省域的贸易开放对GEE持续呈现正向影响,可以充分利用贸易开放带来的正向影响,为绿色经济的发展注入活力。

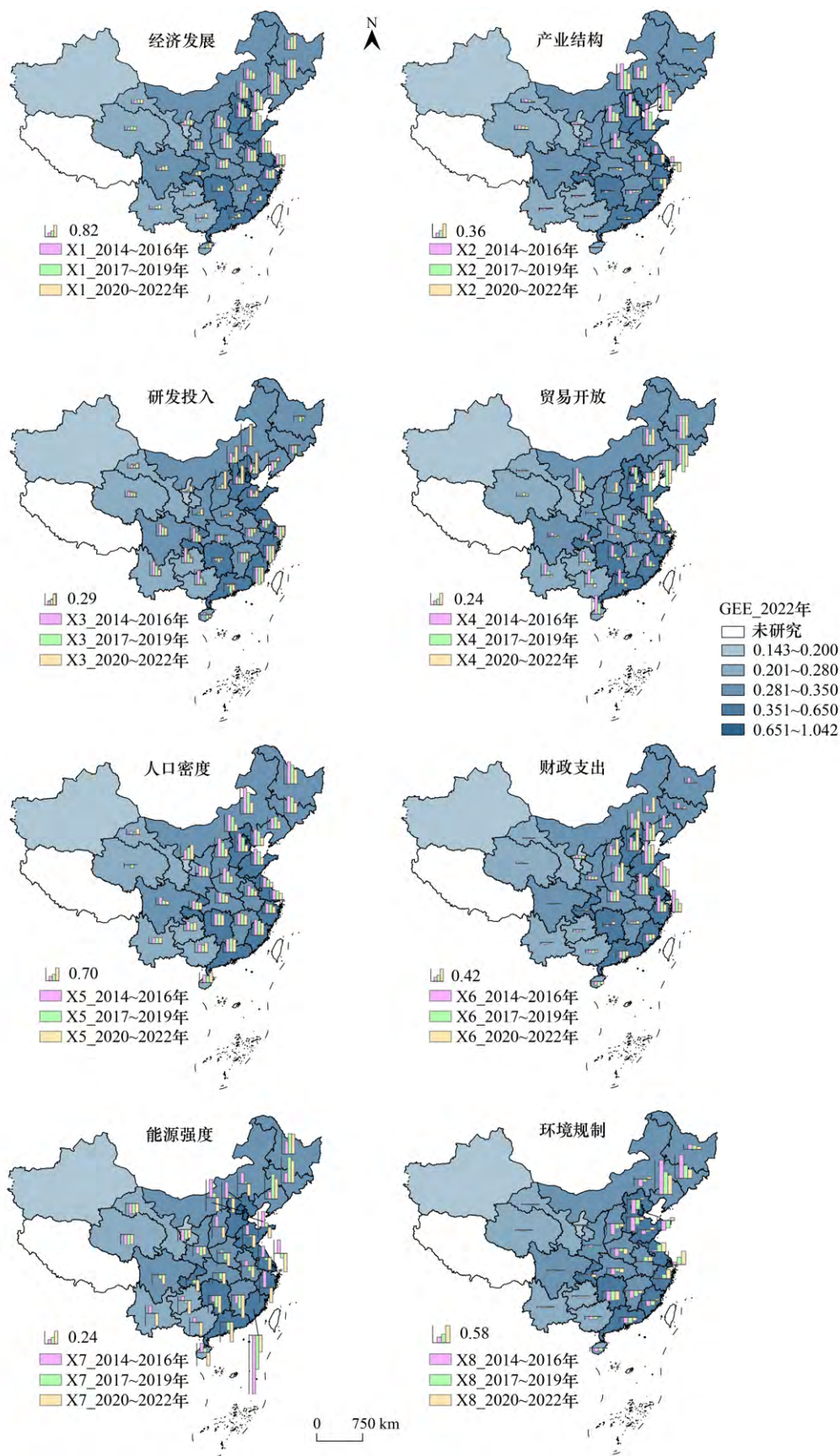
2014~2022年,人口密度整体上表现为正向效应,只有青海呈现由负转正的现象,说明人口集聚通过“劳动力池效应”为企业匹配优质劳动力并带来更大的收益^[48]。在正向效应的省域中,人口密度对北方部分省域GEE的促进作用呈降低的趋势。

财政支出在研究期内对绝大部分省域呈现正向影响,表明政府能够通过财政支出的手段对市场进行引导,有效促进GEE。在以上财政支出对GEE正向

影响的省域中,影响程度也呈现“东高西低”的局面,说明东部省域政府干预效果显著,西部省域应该加强干预,对市场进行有效引导。此外,福建、广东、广西和海南等省域应当注重财政支出对GEE的负向影响,对于市场化过程中出现的一些非理性的、一味追求经济增长而忽略生态环境保护的行为,政府应当通过经济法律行政等手段进行约束,不断规范资本市场。同时,对财政支出进行合理配置,适当增加节能环保投资,提高绿色经济发展水平。

能源强度在研究初期以促进作用为主,中后期则以抑制作用为主。随着节能减排政策的实施,各省域的能源强度都有不同程度地降低,理论上降低能源强度可以提高GEE,但部分省域能源强度的降低会产生负面影响,即仅依靠降低能耗不能提高GEE,则应该同时调整能源结构、提高能源利用效率。在能源强度对GEE具有负向影响的省域中,福建、浙江、上海和广东等东南沿海省域受到最大的负向影响,以上省域可以通过降低能源强度有效提高GEE。

环境规制在2014~2022年表现为负向影响,严格的环境规制会降低GEE,表明环境管控政策的实施



不仅体现为节能减排,也会致使一些生产活动受到限制,从而抑制了GEE的提高.此外,有研究表明不

同环境规制工具的选择对生态效率的影响表现出明显的区域差异^[49].因此各省域应当从实际发展情况

出发,考虑不同的环境规制工具,从行政、市场和公众等多角度进行差异化的环境规制工具选择,从而充分发挥环境规制的生态效益。

3 建议

(1)打破行政区域局限,实现联动发展,促进各类要素合理流动和高效集聚,发挥东部地区的辐射带动作用,引导低效率省域向高效率发展。

(2)持续提高经济发展水平,优化经济发展方式,合理利用人口集聚的优势。

(3)加大研发投入强度,鼓励科技创新,实现创新驱动发展,让科技为发展赋能;注重绿色清洁生产技术的创新,加快绿色技术转化,从而降低能源强度,提高能源利用效率。

(4)加强对市场的干预与引导,加大环境监管力度,确保企业在发展过程中严格遵守环保标准;在对外贸易的环节中提升环境准入门槛,有效防止高污染企业的进入,从而保护生态环境,实现可持续发展。

4 结论

(1)中国整体GEE呈上升趋势但数值较低,存在多级分化向两极分化转变的现象。空间分布格局未发生较大变化,呈现出“东南高,西北低”的空间格局,具有连片区块分布特征。

(2)中国各省域GEE存在空间相关性,莫兰指数呈增长趋势。

(3)经济发展对GEE的影响最大,经济发展、人口密度和财政支出对GEE的正向影响更加明显,贸易开放、能源强度和环境规制的负向影响更加明显。

参考文献:

- [1] 王桂林, 张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3447-3456.
- Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on PM_{2.5} pollution in China[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3447-3456.
- [2] 范建双, 任逸蓉, 虞晓芬. 人口城镇化影响区域绿色经济效率的中介机制分析——基于随机边界模型的检验[J]. 宏观质量研究, 2017, 5(4): 52-65.
- Fan J S, Ren Y R, Yu X F. An analysis of the mechanism between population urbanization and regional green economic efficiency—based on stochastic frontier analysis model[J]. Journal of Macro-Quality Research, 2017, 5(4): 52-65.
- [3] 白洁, 夏克郁. 政府干预、区域差异与绿色经济效率测度——基于长江经济带107个地级及以上城市的数据[J]. 江汉论坛, 2019, (7): 21-27.
- Bai J, Xia K Y. Governmental intervene, regional difference and efficiency estimation of green economy[J]. Jiangnan Tribune, 2019, (7): 21-27.
- [4] Tsionas M G, Tzeremes N G. Eco-efficiency estimation with quantile stochastic frontiers: evidence from the United States [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 320, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115876.
- [5] Zhou Y, Li G, Zhou S R, et al. Spatio-temporal differences and convergence analysis of green development efficiency of marine economy in China [J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 238, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106560.
- [6] 田超, 程琳琳, 邵盈鈔. 京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式[J]. 环境科学, 2024, 45(3): 1254-1264.
- Tian C, Cheng L L, Shao Y C. Efficiency characteristics and evolution patterns of urban carbon metabolism of production-living-ecological space in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2024, 45(3): 1254-1264.
- [7] Ding J, Liu B L, Shao X F. Spatial effects of industrial synergistic agglomeration and regional green development efficiency: evidence from China [J]. Energy Economics, 2022, 112, doi: 10.1016/j.eneco.2022.106156.
- [8] Geng Q Q, Wang Y, Wang X Q. The impact of natural resource endowment and green finance on green economic efficiency in the context of COP26[J]. Resources Policy, 2023, 80, doi: 10.1016/j.resourpol.2022.103246.
- [9] Yang T, Zhou K L, Zhang C. Spatiotemporal patterns and influencing factors of green development efficiency in China's urban agglomerations [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85, doi: 10.1016/j.scs.2022.104069.
- [10] 曹鹏, 白永平. 中国省域绿色发展效率的时空格局及其影响因素[J]. 甘肃社会科学, 2018, (4): 242-248.
- [11] Feng R, Shen C, Dai D D, et al. Examining the spatiotemporal evolution, dynamic convergence and drivers of green total factor productivity in China's urban agglomerations[J]. Economic Analysis and Policy, 2023, 78: 744-764.
- [12] Yang Y F, Wang H R, Wang C, et al. Model-based temporal evolution and spatial equilibrium analysis of green development in China's Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2018[J]. Ecological Indicators, 2022, 141, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109071.
- [13] 蔺鹏, 孟娜娜. 绿色发展效率测度及时空动态演进——基于中国八大城市群的经验证据[J]. 河北经贸大学学报, 2023, 44(5): 65-78.
- Lin P, Meng N N. Measurement and spatial-temporal dynamic evolution of green development efficiency—based on empirical evidence from eight major urban agglomerations in China [J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2023, 44(5): 65-78.
- [14] 尹天宝, 赵红岩, 仲颖佳. 数字经济对城市绿色经济效率的影响研究——基于空间面板模型的实证分析[J]. 技术经济与管理研究, 2023, (2): 18-22.
- Yin T B, Zhao H Y, Zhong Y J. Research on the impact of digital economy on urban green economic efficiency: empirical analysis based on spatial panel model[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2023, (2): 18-22.
- [15] 张泽楚, 李巍. 数字经济对黄河流域资源型城市绿色效率的驱动作用[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 475-487.
- Zhang Z C, Li W. Driving effects of digital economy on green efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 475-487.
- [16] Li J L, Chen L T, Chen Y, et al. Digital economy, technological innovation, and green economic efficiency—Empirical evidence from 277 cities in China [J]. Managerial and Decision Economics, 2022, 43(3): 616-629.
- [17] Zhou X G, Tang X M, Zhang R. Impact of green finance on economic development and environmental quality: a study based on provincial panel data from China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(16): 19915-19932.
- [18] 张扬, 晁克臣, 孟望生. 技术创新、技术引进与绿色经济增长效率[J]. 统计与决策, 2024, 40(2): 133-138.
- [19] 刘照德, 聂普焱. 经济集聚、产业结构升级与绿色经济效率协调发展——基于京津冀与粤港澳大湾区的比较分析[J]. 北京社会科学, 2023, (12): 29-43.
- Liu Z D, Nie P Y. A study on the coordinated development of economic agglomeration, industrial structure upgrading and green economy efficiency—based on the comparative analysis between Beijing-Tianjin-Hebei and Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Social Sciences of Beijing, 2023, (12): 29-43.
- [20] 姚璐, 王书华. 黄河流域金融集聚对绿色经济效率影响的空间溢出效应研究——兼论环境规制的调节作用[J]. 地理科学, 2023, 43(10): 1783-1792.
- Yao L, Wang S H. Spatial spillover effects of financial agglomeration on green economy efficiency in the Yellow River Basin: also on the regulating effect of environmental regulation [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(10): 1783-1792.
- [21] 汪彬, 阳镇, 陈泽毅, 等. 绿色经济效率影响机制[J]. 上海经济研究, 2022, (6): 62-77.
- Wang B, Yang Z, Chen Y Y, et al. Influence mechanism of green economic efficiency[J]. Shanghai Journal of Economics, 2022, (6): 62-77.
- [22] 王冉, 孙涛. 基于超效率DEA模型的环境规制对中国区域绿色经济效率影响研究[J]. 生态经济, 2019, 35(11): 131-136.
- Wang R, Sun T. Research on the influence of environmental regulation on China's regional green economy efficiency based on super efficiency DEA

- model[J]. *Ecological Economy*, 2019, **35**(11): 131-136.
- [23] Zhao X, Mahendru M, Ma X W, *et al.* Impacts of environmental regulations on green economic growth in China: new guidelines regarding renewable energy and energy efficiency[J]. *Renewable Energy*, 2022, **187**: 728-742.
- [24] 陈海盛, 沈满洪, 汪锦军. 绿色信用监管制度对绿色经济效率的影响[J]. *华东经济管理*, 2024, **38**(3): 99-107.
- Chen H S, Shen M H, Wang J J. The impact of green credit regulatory system on the efficiency of green economy[J]. *East China Economic Management*, 2024, **38**(3): 99-107.
- [25] Shuai S, Fan Z. Modeling the role of environmental regulations in regional green economy efficiency of China: empirical evidence from super efficiency DEA-Tobit model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110227.
- [26] 张颖, 王旭红, 冯子豪, 等. 基于 SEM 模型的热环境时空特征及影响因素分析: 以西安都市圈为例[J]. *环境科学*, 2024, **45**(6): 3734-3745.
- Zhang Y, Wang X H, Feng Z H, *et al.* Spatiotemporal pattern and influencing factors of thermal environment based on SEM model: a case study in Xi'an metropolitan area[J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(6): 3734-3745.
- [27] Liu Q Q, Wang S J, Li B, *et al.* Dynamics, differences, influencing factors of eco-efficiency in China: a spatiotemporal perspective analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110442.
- [28] 韩雅清, 林丽梅, 李玉水. 环境规制约束下数字金融对绿色发展效率的影响——基于 2011—2020 年省级面板数据的考察[J]. *湖南农业大学学报(社会科学版)*, 2023, **24**(4): 81-90.
- Han Y Q, Lin L M, Li Y S. Impact of digital finance on green development efficiency under environmental regulatory constraints: an examination based on provincial panel data from 2011 to 2020[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)*, 2023, **24**(4): 81-90.
- [29] 夏梁凯, 乔翔. 海洋经济绿色发展效率评价及影响因素研究——以中国沿海地区为例[J]. *中国国土资源经济*, 2022, **35**(7): 12-19.
- Xia L K, Qiao X. Study on efficiency evaluation and influencing factors of green development of marine economy—a case study of coastal areas of China[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, **35**(7): 12-19.
- [30] 陈明华, 刘文斐, 王山, 等. 黄河流域绿色发展绩效评价、差异分解及驱动因素[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, **32**(4): 126-133.
- Chen M H, Liu W F, Wang S, *et al.* Performance evaluation, difference decomposition and driving factors of green development in the Yellow River basin[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, **32**(4): 126-133.
- [31] 辛龙, 孙慧, 王慧, 等. 基于地理探测器的绿色经济效率时空分异及驱动力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, **30**(9): 128-138.
- Xin L, Sun H, Wang H, *et al.* Research on the spatial-temporal differentiation and driving force of green economic efficiency based on the geographic detector model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, **30**(9): 128-138.
- [32] Theil H. *Economics and information theory*[M]. Amsterdam: North-Holland, 1967.
- [33] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(3): 383-401.
- [34] Goldsmith R W. A perpetual inventory of national wealth [A]. In: *Studies in income and wealth* [C]. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 1951. 5-73.
- [35] 单豪杰. 中国资本存量 K 的再估算: 1952 ~ 2006 年[J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, **25**(10): 17-31.
- Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952 ~ 2006[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2008, **25**(10): 17-31.
- [36] 李汝资, 陈巧娟, 高雄愿, 等. 长江经济带城市绿色经济效率梯度转换规律及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2024, **39**(1): 125-139.
- Li R Z, Chen Q J, Gao X Y, *et al.* Gradient transformation and influencing factors of urban green economy efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(1): 125-139.
- [37] Zhuo C F, Deng F. How does China's Western Development Strategy affect regional green economic efficiency? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135939.
- [38] 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.
- [39] Liu L, Yang Y R, Liu S, *et al.* A comparative study of green growth efficiency in Yangtze River Economic Belt and Yellow River Basin between 2010 and 2020[J]. *Ecological Indicators*, 2023, **150**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110214.
- [40] 王东, 李金叶. R&D 投入强度、环境规制与区域绿色经济效率[J]. *生态经济*, 2021, **37**(9): 155-160.
- Wang D, Li J Y. R&D input intensity, environmental regulation and regional green economic efficiency[J]. *Ecological Economy*, 2021, **37**(9): 155-160.
- [41] Wang S J, Ma Y Y. Influencing factors and regional discrepancies of the efficiency of carbon dioxide emissions in Jiangsu, China [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 460-468.
- [42] Zhao X, Shang Y P, Song M L. Industrial structure distortion and urban ecological efficiency from the perspective of green entrepreneurial ecosystems [J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2020, **72**, doi: 10.1016/j.seps.2019.100757.
- [43] Chen Y F, Miao J F, Zhu Z T. Measuring green total factor productivity of China's agricultural sector: a three-stage SBM-DEA model with non-point source pollution and CO₂ emissions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **318**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128543.
- [44] Zhao P J, Zeng L E, Lu H Y, *et al.* Green economic efficiency and its influencing factors in China from 2008 to 2017: based on the super-SBM model with undesirable outputs and spatial Dubin model[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140026.
- [45] 李彦, 章紫薇, 林晓燕. 数字基础设施对中国经济双循环发展的影响[J]. *统计与决策*, 2024, **40**(13): 102-107.
- [46] 刘志华, 徐军委. 碳市场试点对省域碳排放公平性的影响及作用机制——基于多期 DID、空间 DID 与中介效应的实证研究[J]. *自然资源学报*, 2024, **39**(3): 697-711.
- Liu Z H, Xu J W. The influence and mechanism of carbon trading pilot on provincial carbon emissions equity: empirical analysis based on multi-period DID, spatial DID and intermediary effect[J]. *Journal of Natural Resources*, 2024, **39**(3): 697-711.
- [47] 向君. 自然资源禀赋、环境规制对地区绿色经济增长效率的影响[J]. *统计与决策*, 2023, **39**(8): 51-56.
- [48] Yuan H X, Feng Y D, Lee C C, *et al.* How does manufacturing agglomeration affect green economic efficiency? [J]. *Energy Economics*, 2020, **92**, doi: 10.1016/j.eneco.2020.104944.
- [49] Ren S G, Li X L, Yuan B L, *et al.* The effects of three types of environmental regulation on eco-efficiency: a cross-region analysis in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **173**: 245-255.