

# 生态足迹视角下中国能源效率的空间 差异性和收敛性研究

张文彬, 郝佳馨

**摘要:** 提高能源效率是实现经济高质量发展、环境污染治理和能源安全的重要抓手。文章以全要素能源效率表征能源效率, 分析其动态分布特征、空间差异性 & 收敛性。首先选取超效率 SBM 模型对全要素能源效率进行测度, 并在此基础上运用核密度估计分析其动态分布特征, 以刻画空间绝对差异演变规律, 然后进一步构建空间绝对  $\beta$  收敛和空间条件  $\beta$  收敛模型以探究全要素能源效率的空间收敛性。结果表明, 全国全要素能源效率整体呈现缓慢下降趋势; 空间分布呈现“沿海高、内陆低”的分异性特征; 全国全要素能源效率的区域间差异存在扩张趋势; 北部沿海、西南地区全要素能源效率区域内差异最大; 全国及八大区域全要素能源效率均存在空间绝对  $\beta$  收敛和空间条件  $\beta$  收敛趋势。

**关键词:** 全要素能源效率; 超效率 SBM; 核密度估计; 空间  $\beta$  收敛

**中图分类号:** F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2020)05-0076-15

**DOI:** 10.16493/j.cnki.42-1627/c.2020.05.008

## 一、引言

提高能源效率是推动能源革命, 实现能源清洁、低碳、高效发展的核心措施和重要驱动, 同时也是实现经济高质量发展、环境污染治理和能源安全保障等方面“多赢”的重要抓手。制定科学的能源效率提升政策, 首要的工作就是摸清能源效率“家底”。只有在厘清中国现阶段能源效率现状、基本特征以及空间差异变化趋势的基础上, 才能提出符合我国国情及区域特征的、具有针对性和行之有效的节能减排政策, 为统筹地区经济高质量发展、节能减排和环境治理的协同推进提供经验借鉴和政策参考。

从既有研究成果来看, 学者对能源效率的分布特征、区域差异以及空间演化特征进行了诸多研究。研究重点主要包括: 一是能源效率的测度, 主要采用 DEA 模型及其扩展的 SBM 和超效率 SBM 模型进行测度<sup>[1][2][3][4][5]</sup>。二是能源效率分布特征分析。早期研究多集中在“东中西”差异分析和描述层面<sup>[2][6][7][8][9]</sup>; 近些年出现采用核密度估计方法<sup>[10][11][12][13]</sup>, 以及使用变异系数、泰尔指数、Dagum 基尼系数等方法对能源效率的区域相对差异进行量化分析<sup>[4][14][15][16]</sup>。三是能源效率的

**基金项目:** 国家社科基金重点项目“基于创新驱动和环境约束的中国西部能源产业升级研究”(17AJY009); 陕西(高校)哲学社会科学重点基地项目“基于创新驱动的陕西能源企业高质量发展的财税支持政策研究”(20JZ054); 西安财经大学研究生创新基金重点项目“‘一带一路’倡议对沿线省份能源效率影响研究”(19YCZ13)

**作者简介:** 张文彬, 经济学博士, 西安财经大学西部能源经济与区域发展协同创新研究中心副教授, zhangwbxjtu@163.com (陕西 西安 710100); 郝佳馨, 西安财经大学经济学院研究生

收敛性研究, 主要包括能源效率的  $\sigma$  收敛、 $\beta$  收敛检验及俱乐部收敛等<sup>[4][17][18][19]</sup>。能源效率收敛研究是当前研究的热点, 由于样本和指标选取、模型构建以及检验方法等多方面的差异, 已有研究并未取得一致结论, 甚至存在较大冲突, 如范丹等<sup>[4]</sup>、袁晓玲等<sup>[17]</sup> 研究发现中国能源效率存在  $\sigma$  收敛趋势, 徐盈之等<sup>[18]</sup>、郭文等<sup>[20]</sup>、孟凡生等<sup>[21]</sup> 认为中国能源效率存在空间  $\beta$  收敛, 而师傅等<sup>[22]</sup>、赵金楼等<sup>[23]</sup>、吴传清等<sup>[24]</sup> 则认为中国能源效率存在发散趋势。

以上研究为本文提供了文献基础和支撑, 但在研究方法及研究深度方面还存在拓展空间。本文将做以下扩展: 首先, 选取超效率 SBM 模型测度 1995—2017 年中国 30 个省份的全要素能源效率以表征我国能源效率, 以能值法测算的生态足迹——能源足迹指标作为非期望产出。文章所研究时间跨度较长, 样本选取量大, 能够更好地探究我国全要素能源效率的发展现状及其基本特征, 并运用“能源足迹”测度全要素能源效率, 更加真实准确地反映能源消耗对于环境的压力程度, 并为全要素能源效率的测度提供新的可选指标依据。其次, 将中国 30 个省份划分为八大区域, 区域划分更为细致, 能够更全面精准地把握全要素能源效率的区域特征, 便于揭示其空间差异。最后, 引入核密度估计, 直观描述全要素能源效率的动态分布特征, 并进一步构建空间绝对  $\beta$  收敛、条件  $\beta$  收敛模型, 探讨全要素能源效率的空间收敛性。

## 二、全要素能源效率测度

### (一) 模型设定及指标选取

1. 模型设定。本文采用超效率 SBM 模型对全要素能源效率进行测度, 设定目标函数包括  $n$  个决策单元, 每个单元有相同投入  $m$  指标、产出  $r$  指标 (期望产出  $r_1$ 、非期望产出指标  $r_2$ ), 向量形式分别表示为  $x \in R^m$ ,  $y^d \in R^{r_1}$ ,  $y^u \in R^{r_2}$ ;  $X$ 、 $Y^d$  和  $Y^u$  是矩阵,  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n}$ ,  $Y^d = [y_1^d, y_2^d, \dots, y_n^d] \in R^{r_1 \times n}$ ,  $Y^u = [y_1^u, y_2^u, \dots, y_n^u] \in R^{r_2 \times n}$ 。

定义决策单元是有效的, 那么, 超效率 SBM 模型构建如下:

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

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

其中,  $\rho$  为全要素能源效率 ( $\rho \geq 1$  且冗余为 0 时, 决策单元完全有效);  $m$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  分别为投入、期望产出、非期望产出个数;  $\bar{x}$ 、 $\bar{y}^d$ 、 $\bar{y}^u$  分别为投入、期望产出和非期望产出冗余量;  $\lambda$  为投入要素的权重。当  $\rho < 0.6$  时, 被认为效率无效; 当  $0.6 \leq \rho < 0.8$  时, 认为效率中等; 当  $0.8 \leq \rho <$

1, 认为效率良好; 当  $\rho > 1$ , 认为效率高效<sup>[25]</sup>。

2. 指标选取。测度全要素能源效率包括:

(1) 投入指标: 劳动力投入、资本投入及能源消费。劳动力投入以各省份历年从业人员数表示; 资本投入以各省份固定资产投资额表示; 能源消费以煤(煤炭、焦炭)、石油(原油、燃料油、汽油、煤油、柴油)、天然气和电力等四类能源折合成其标准煤形式的消费量表示, 折合标准煤系数来源于《中国统计年鉴》(2018)。

(2) 产出指标: 包括期望产出和非期望产出。期望产出以经过平减处理之后的实际 GDP 表示(以 1995 年为基期)。非期望产出使用该地区以能值法测算的生态足迹——能源足迹指标进行衡量, 其优点是将所有的能源消耗通过客观的热值转换系数和足迹转换系数, 统一转化为能源足迹面积, 能够以一个统一的指标反映各类型能源消耗的环境污染状况和环境的压力程度, 使得全要素能源效率的测度更为准确全面。能源足迹是通过该地区煤(煤炭、焦炭)、石油(原油、燃料油、汽油、煤油、柴油)、天然气和电力的能源消费量折合成标准煤形式后, 经热值转化系数、能源足迹转换系数计算测得, 测度方法如表 1 所示。所有原始数据均来源于历年《中国统计年鉴》、《中国人口和就业统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》和各地区统计年鉴。

表 1 能源足迹测算流程

能源消费 $c$		折合标准煤系数 $d$	消费量 (万吨标准煤)	热值转换系数 $e$ (Gj/吨)	能源足迹转换系数 $f$ (Gj/ha)	能源足迹 (万 ha)
煤	煤炭	0.714 3			56	
	焦炭	0.971 4				
石油	原油	1.428 6	$C = c \times d$	29.27	73	$C \times e / f$
	燃料油	1.428 6				
	汽油	1.471 4				
	煤油	1.471 4				
	柴油	1.457 1				
电力	电力	0.122 9			1 000	
天然气	天然气	1.33			96	

注: 折合标准煤系数来源于《中国统计年鉴》(2018); 中国现行标准煤的热值标准为 7 000 大卡, 用千焦耳去度量, 即热值转换系数为 29.27; 能源足迹转换系数来源于 WWF. Living Planet Report, 2000。

## (二) 全要素能源效率测度结果分析

根据超效率 SBM 模型, 1995—2017 年全国整体层面及八大区域层面全要素能源效率的演变趋势如表 2 和图 1 所示。总体来看, 考察期间全国全要素能源效率整体处于较低水平且呈现“缓慢下降”的演变趋势。全国全要素能源效率从 1995 年的 0.831 7 下降到 2017 年 0.503 8, 年均下降率为 2.829%。1995—2005 年全要素能源效率在区间 0.6~0.8 之间呈现递减趋势, 属于效率中等; 而 2006—2017 年全要素能源效率下浮明显, 基本处于 0.6 以下水平, 呈现效率无效, 意味着该阶段我国在能源生产与消耗过程中存在较为严重的生态损耗, 资源节约和环境保护仍存在较大空间。但值得注意的是, 2013 年之后全国整体全要素能源效率呈现“企稳回升”的趋势, 原因可能在于: 1990 年代中期以来, 随着我国经济的高速增长, 化石能源消耗、环境污染随之更大规模的增长, 呈现典型的“高能耗、高污染”的粗放型经济增长方式, 全要素能源效率水平不断降低。而自 2012 年党的十八大将生态文明作为“五位一体”战略布局重要一环以来, 党和政府对节能减排和生态环境保护的重视提升至前所未有的高度, 经济发展方式逐渐由粗放型转向高质量发展, 全要素能源效率也逐渐呈现“企稳回升”的趋势。

表 2 全要素能源效率测度结果

地区 \ 年份	1995	1998	2001	2004	2007	2010	2013	2016	2017
辽宁	0.838 1	1.017 8	0.715 1	0.594 8	0.465 9	0.421 9	0.442 1	0.646 5	1.009 7
吉林	0.774 2	0.981 6	0.619 2	0.616 0	0.439 4	0.403 4	0.446 0	0.424 1	0.434 2
黑龙江	1.063 7	0.965 6	1.001 4	1.036 4	0.629 2	0.484 5	0.477 9	0.481 6	0.484 5
东北地区	0.892 0	0.988 3	0.778 6	0.749 1	0.511 5	0.436 6	0.455 4	0.517 4	0.642 8
北京	0.877 5	0.868 3	0.833 0	0.803 4	0.804 9	1.020 2	1.096 9	1.148 5	1.165 5
天津	1.002 9	0.821 6	0.805 5	0.772 3	0.718 4	0.633 7	0.716 9	0.754 8	0.768 2
河北	0.672 2	0.596 9	0.599 6	0.594 0	0.462 1	0.369 6	0.367 3	0.354 6	0.343 1
山东	0.502 3	0.506 6	0.465 0	0.405 9	0.337 5	0.296 1	0.297 6	0.262 2	0.270 4
北部沿海地区	0.763 7	0.698 4	0.675 8	0.643 9	0.580 7	0.579 9	0.619 7	0.630 0	0.636 8
上海	1.171 3	1.154 6	1.258 3	1.320 2	1.300 5	1.418 9	1.394 0	1.484 3	1.481 7
江苏	0.792 4	0.841 7	1.004 0	0.836 1	0.722 8	0.679 5	0.677 3	0.649 7	0.665 5
浙江	0.842 6	0.888 7	0.797 2	0.788 5	0.704 6	0.668 4	0.649 3	0.621 8	0.620 7
东部沿海地区	0.935 5	0.961 7	1.019 8	0.981 6	0.909 3	0.922 3	0.906 9	0.918 6	0.922 6
福建	1.134 1	1.072 7	1.077 6	1.036 3	0.822 2	0.749 3	0.718 5	0.645 5	0.629 9
广东	1.031 8	1.075 7	1.011 0	1.027 6	1.137 4	1.049 9	1.021 0	0.817 6	0.792 6
海南	1.160 8	1.075 5	1.155 7	1.006 9	0.616 3	0.463 1	0.423 4	0.356 0	0.361 0
南部沿海地区	1.108 9	1.074 6	1.081 4	1.023 6	0.858 7	0.754 1	0.721 0	0.606 4	0.594 5
山西	0.698 6	0.601 1	0.514 6	0.434 9	0.364 8	0.273 4	0.250 9	0.220 7	0.315 9
内蒙古	0.716 2	1.018 8	0.604 8	0.433 7	0.389 8	0.366 1	0.361 3	0.361 0	0.370 5
河南	0.906 5	0.709 0	0.669 8	0.567 2	0.441 2	0.378 9	0.388 4	0.367 2	0.383 9
陕西	0.667 8	0.556 9	0.516 8	0.475 1	0.379 4	0.311 0	0.300 5	0.288 6	0.288 9
黄河中游地区	0.747 3	0.721 5	0.576 5	0.477 7	0.393 8	0.332 4	0.325 3	0.309 4	0.339 8
安徽	1.015 2	1.014 6	1.024 0	0.621 4	0.491 9	0.413 9	0.403 7	0.387 2	0.388 8
江西	0.932 2	1.024 0	0.619 0	0.519 3	0.471 2	0.401 9	0.401 3	0.376 2	0.380 6
湖北	0.570 1	0.559 6	0.530 0	0.559 2	0.502 8	0.423 8	0.445 5	0.434 4	0.438 9
湖南	0.950 5	0.965 3	0.661 1	0.640 2	0.535 5	0.489 1	0.489 7	0.465 8	0.464 4
长江中游地区	0.867 0	0.890 9	0.708 5	0.585 0	0.500 3	0.432 2	0.435 1	0.415 9	0.418 2
广西	1.034 4	1.035 5	1.025 7	0.712 2	0.600 6	0.505 4	0.454 4	0.427 8	0.418 4
重庆	0.944 1	0.682 1	0.636 7	0.679 9	0.552 7	0.527 3	0.655 6	0.642 9	0.661 3
四川	0.923 8	0.611 9	0.595 1	0.573 2	0.521 4	0.470 9	0.499 8	0.488 5	0.511 8
贵州	0.641 3	0.454 5	0.330 3	0.323 1	0.322 2	0.258 8	0.220 5	0.207 8	0.212 1
云南	0.652 5	0.551 9	0.545 9	0.485 2	0.385 1	0.321 8	0.327 0	0.347 2	0.342 6
西南地区	0.839 2	0.667 2	0.626 7	0.554 7	0.476 4	0.416 9	0.431 4	0.422 8	0.429 2
甘肃	0.619 0	0.422 3	0.369 9	0.383 6	0.354 6	0.257 0	0.229 1	0.223 1	0.256 7
青海	0.641 2	0.487 0	0.390 2	0.455 3	0.377 4	0.342 1	0.287 1	0.277 3	0.285 9
宁夏	0.528 7	0.435 9	0.365 8	0.284 5	0.257 7	0.191 3	0.172 8	0.161 4	0.159 9
新疆	0.643 9	0.532 7	0.484 1	0.460 5	0.392 1	0.303 8	0.241 8	0.217 1	0.207 7
大西北地区	0.608 2	0.469 5	0.958 2	0.396 0	0.345 5	0.273 6	0.232 7	0.219 7	0.227 6
全国地区	0.831 7	0.784 3	0.781 6	0.648 2	0.550 1	0.496 5	0.495 3	0.484 7	0.503 8

分区域来看, 各地区全要素能源效率整体呈现“沿海高”、“内陆低”的分异性特征。观测期内东部沿海、南部沿海、北部沿海地区的全要素能源效率均值高于全国及其他区域 (0.6 以上), 其中, 东部沿海、南部沿海地区的全要素能源效率值均在高效水平为 1 的区间上下波动, 效率良好, 并且在 2006 年东部沿海地区的全要素能源效率赶超南部沿海地区, 处于全国最高水平; 长江中游、东北、西南地区的全要素能源效率均值略低于全国水平 (0.5~0.6 之间), 长江中游、东北、西南

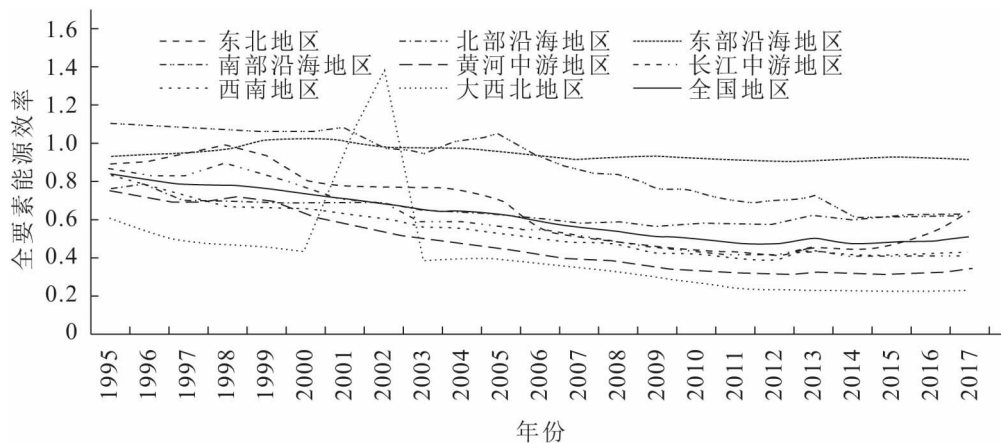


图1 1995—2017年区域全要素能源效率

地区的全要素能源效率在1995—2007年呈现“波动中下降”趋势，而在2008—2017年呈现稳定波动态势；黄河中游、大西北地区由于地理位置条件限制，经济实力、社会环境和技术水平相对落后，全要素能源效率水平较低，属于效率无效（0.4~0.5之间）。这一分布格局实际上是与区域经济发展、技术水平、要素禀赋等内外因素有着密切关系。沿海地区属于“先富起来”的地区，其经济发展水平要远高于内陆地区。这些地区经济发展、技术水平的不断提高对其节能减排和能源效率的提高有着重要的促进作用；同时，随着经济发展水平的提高，居民的节能减排与生态环境保护意识和需求也随之增加，又进一步激励了居民和政府的行为选择，促进了生态环境保护 and 能源效率的提高。而内陆地区属于“后富起来”的地区，与沿海地区经济差距明显，更多的是依靠自身丰裕的资源禀赋带动经济增长，使其经济增长呈现“高耗能、高污染”特征，不利于节能减排和能源效率的提高，加之技术水平偏低和沿海地区“高污染”产业向内陆转移，进一步恶化了内陆地区的生态环境状况，不利于全要素能源效率的提高。

从图1可见，有两点变化值得注意，一是大西北地区的全要素能源效率在2000—2003年间有一个显著的“凸起”，可能是得益于西部大开发战略的提出和实施，短期为西部地区带来了大量的资金和技术支持。二是2013年之后，部分内陆地区的全要素能源效率同样出现了“企稳回升”的趋势，特别是东北地区、黄河中游地区更加明显，可能与内陆地区的生态文明建设、经济高质量发展规划以及丝绸之路经济带建设有关。

### 三、全要素能源效率空间差异性分析

#### （一）测度模型

核密度估计是采用平滑的峰值函数拟合样本数据，利用连续的密度曲线描述随机变量的分布形态的一种非参数估计方法。假定 $f(x)$ 为随机变量 $X$ 的密度函数，选择常用的高斯核作为核函数的表达形式，如：

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

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

其中， $K(\cdot)$ 表示核函数； $N$ 表示观测值的个数； $X$ 为观测值； $x$ 为观测值的均值； $h$ 表示

为带宽, 决定了核密度曲线的光滑程度和估计精度, 带宽越大, 曲线越光滑。

(二) 空间差异分析

1. 全国整体动态分布。为了更加明确地捕捉全国及八大区域全要素能源效率差异的动态信息, 选取核密度估计方法来探究全国整体及八大区域全要素能源效率的空间动态分布、延展性及极化趋势等特征, 以揭示全要素能源效率的绝对差异 (如图 2 所示)。整体来看, 全国全要素能源效率具有以下三点特征: 第一, 全国省份全要素能源效率总体分布呈现双峰向单峰过渡、波峰左移的趋势, 表明全国全要素能源效率总体呈现缓慢下降趋势, 全国整体两极分化现象在逐渐减弱。第二, 主波峰高度升高明显, 且曲线宽度有小幅度收窄趋势, 说明全国区域间全要素能源效率差异存在一定幅度的扩大趋势, 但其绝对差异存在小幅度缩小趋势, 部分省份或区域的全要素能源效率可能在迅速下降。第三, 右拖尾存在逐年拉长现象, 分布延展性在一定程度上存在拓宽趋势, 意味着全国范围内全要素能源效率的空间差距在逐步扩大。

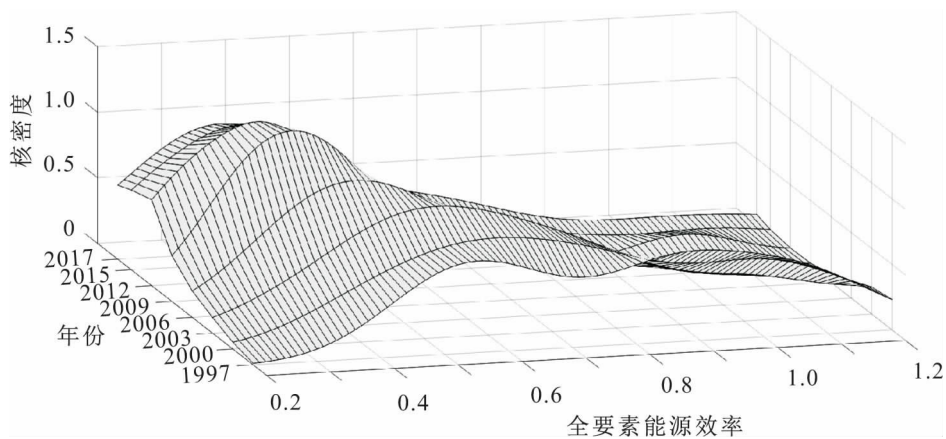


图 2 全国地区核密度估计

2. 区域差异分析。各地区全要素能源效率的核密度估计和特征差异如表 3 和图 3 所示。

表 3 中国八大区域全要素能源效率分布特征

区域 \ 特征	波峰数量变化	主峰位移	主峰变化	延展性	极化特征
全国地区	双峰-单峰	左移	高度上升、宽度变窄	右拖尾、延展收敛	两极分化-分化弱化
东北地区	均匀分布-双峰-单峰	左移	高度上升、宽度变窄	右拖尾、延展收敛	两极分化-分化弱化
北部沿海地区	双峰-单峰	左移	高度下降、宽度变宽	右拖尾、延展收敛	两极分化-分化弱化
东部沿海地区	单峰-单峰	左移	高度下降、宽度变宽	右拖尾、延展收敛	分化弱化
南部沿海地区	单峰-均匀分布	左移	高度下降、宽度变宽	左拖尾、延展拓宽	分化弱化
黄河中游地区	双峰-单峰-双峰	左移	高度上升、宽度变窄	右拖尾、延展拓宽	两极分化-分化弱化
长江中游地区	单峰-双峰-单峰	左移	高度上升-下降、 宽度变窄-变宽	右拖尾、延展收敛	分化弱化
西南地区	多峰-双峰-单峰	左移	高度下降、宽度变宽	右拖尾、延展收敛	多极或双极分化- 分化弱化
大西北地区	单峰-单峰	左移	高度上升、宽度变窄	右拖尾、延展收敛	分布弱化

(1) 在分布位置方面: 北部沿海、东部沿海、黄河中游、长江中游、西南、大西北地区均呈现“多峰-单峰”的波动趋势, 其中, 长江中游、大西北地区全要素能源效率的核密度曲线主峰宽度存在明显缩小趋势, 而北部沿海、东部沿海、黄河中游、西南地区的主峰宽度在逐年扩大, 说明长江中游、大西北地区全要素能源效率的区域内差异缩小趋势明显, 而北部沿海、东部沿海、黄河中

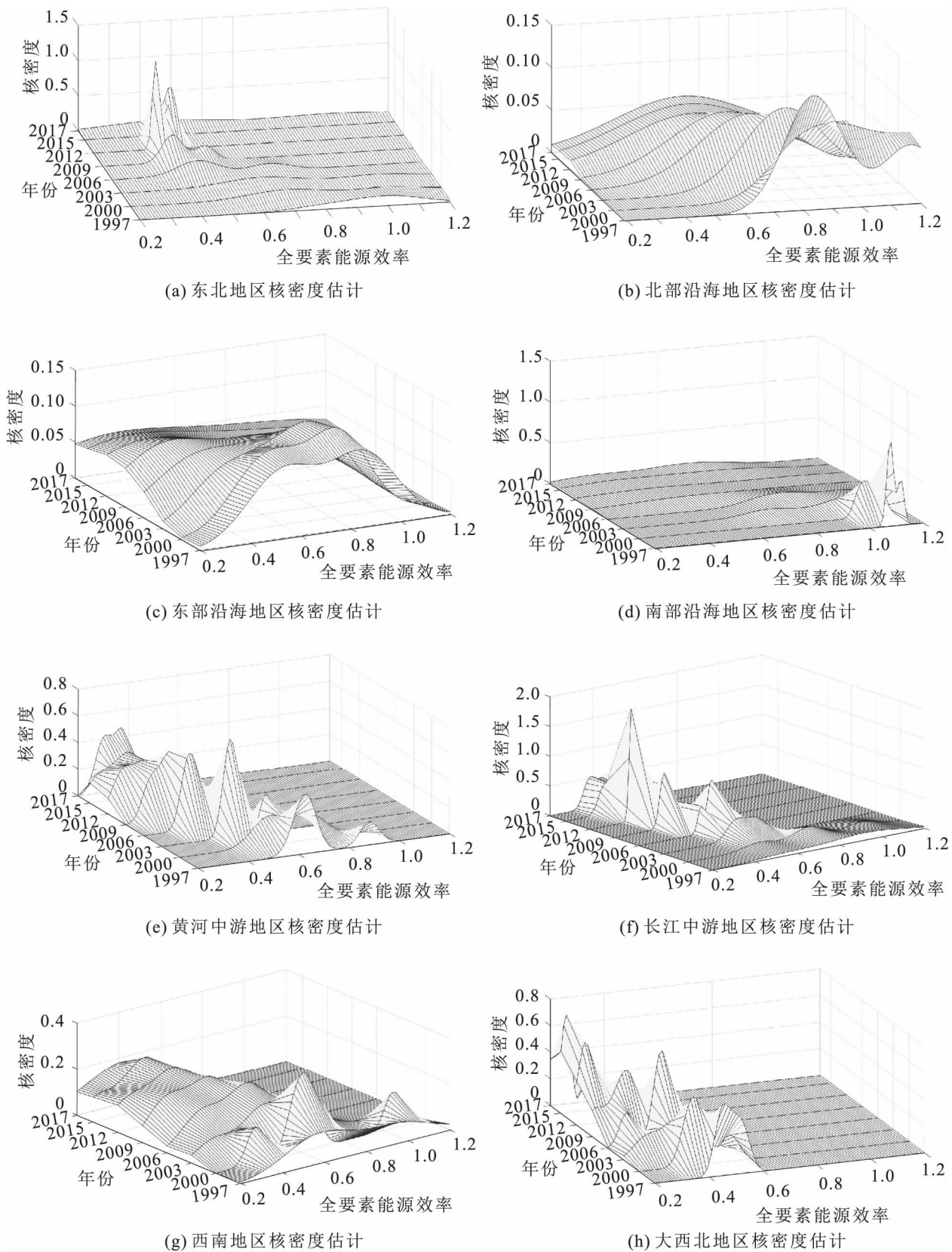


图3 全国八大地区核密度估计

游、西南地区的区域内差异存在进一步扩大趋势; 东北地区的全要素能源效率核密度曲线呈现“均匀分布-双峰-单峰”波动态势且波峰明显左移, 可见东北地区全要素能源效率下降明显, 且呈现在区域内 0.4 左右逐渐集聚, 集聚程度逐年扩大; 南部沿海地区的全要素能源效率密度曲线呈现“单峰-多峰-均匀分布”趋势, 波峰高度明显下降直至趋于均匀分布。

(2) 在延展性方面: 东北、黄河中游、长江中游、西南、大西北地区的全要素能源效率核密度曲线存在明显的右拖尾现象, 并均经历了“拓宽-收敛”的动态趋势, 但其总体呈现收敛趋势, 分别收敛于 0.4、0.3、0.4、0.5、0.3 左右水平, 说明这五大区域中全要素能源效率集聚水平高的省份存在一定程度的回落, 与平均水平的差距在逐步缩小; 南部沿海地区出现明显左拖尾并经历了“收敛-拓宽”演变趋势, 但整体呈现拓宽趋势; 北部沿海、东部沿海地区全要素能源效率整体均呈现收敛趋势。

(3) 在极化现象方面: 八大区域全要素能源效率均经历了“多级或两极分化-分化趋势减弱-趋于稳定”的变化形式。东部沿海、西南地区的两极分化现象最为严重, 说明两地区的全要素能源效率区域内差异较大。东部沿海地区在 1997 年两极分化显著, 分别在全要素能源效率为 0.5、1.0 左右明显集聚, 后分化现象逐年减弱, 2017 年呈现在 0.6 水平一极集聚, 变化趋势趋于稳定; 西南地区呈现“三极分化-两极分化-分化减弱”逐步过渡趋势, 2000 年西南地区三极分化明显, 分别在 0.4、0.7、1.1 高度集聚, 区域内差异较大, 2006 年后两极分化趋势明显, 分别在 0.4、0.7 水平集聚, 2017 年呈现在 0.4 左右一极集聚, 极化现象明显减弱。

#### 四、全要素能源效率的空间收敛分析

##### (一) 空间相关性检验

1. 莫兰指数。为检验中国全要素能源效率是否存在空间相关性, 需要对观测期内中国 30 个省份的全要素能源效率空间相关性进行度量, 检验全国全要素能源效率是否存在空间效应。采用莫兰指数进行检验, 其计算公式为:

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

对空间权重矩阵进行标准化, 则  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} = n$ 。此时, 莫兰指数  $I$  为:

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

其中,  $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$  为样本方差,  $\omega_{ij}$  为空间权重矩阵  $(i, j)$  的元素 (度量省份  $i$  省会城市与省份  $j$  省会城市之间的经纬度欧式距离作为空间权重矩阵, 并对其进行了标准化处理),  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}$  为所有空间权重之和。  $x_i$ 、 $x_j$  为第  $i$ 、 $j$  省份全要素能源效率的观测值 (由上述超效率 SBM 模型测得)。

$Moran's I$  的取值范围为  $[-1, 1]$ 。  $Moran's I > 0$ , 表明高效率值与高效率值在一起, 低效率值与低效率值在一起, 全要素能源效率存在空间正相关;  $Moran's I < 0$ , 表明高效率值与低效率值相邻, 全要素能源效率存在空间负相关;  $Moran's I = 0$ , 则表明高效率值与低效率值完全随机分布, 不存在空间相关性。

2. 检验结果。以全局空间自相关进行检验, 莫兰指数如表 4 所示。可以看到, 在考察期内不同年份的全要素能源效率莫兰指数值均为负 (-0.156 至 -0.015), 且在 1% 显著性水平上通过空



间自相关检验,表明中国全要素能源效率存在空间相关性,并在空间分布上呈现显著负相关。由此可知,中国全要素能源效率之间存在空间相关性,可以进行空间收敛分析。

表 4 莫兰指数检验

年份	<i>I</i>	<i>E</i> ( <i>I</i> )	<i>sd</i> ( <i>I</i> )	<i>z</i>	<i>p-value</i>	年份	<i>I</i>	<i>E</i> ( <i>I</i> )	<i>sd</i> ( <i>I</i> )	<i>z</i>	<i>p-value</i>
1995	-0.100	-0.034	0.018	-3.698	0.000	2007	-0.098	-0.034	0.018	-3.484	0.000
1996	-0.119	-0.034	0.018	-4.746	0.000	2008	-0.096	-0.034	0.018	-3.354	0.000
1997	-0.135	-0.034	0.018	-5.649	0.000	2009	-0.093	-0.034	0.018	-3.211	0.001
1998	-0.150	-0.034	0.018	-6.507	0.000	2010	-0.084	-0.034	0.018	-2.712	0.003
1999	-0.156	-0.034	0.018	-6.795	0.000	2011	-0.080	-0.034	0.018	-2.464	0.007
2000	-0.143	-0.034	0.018	-6.079	0.000	2012	-0.080	-0.034	0.018	-2.465	0.007
2001	-0.022	-0.034	0.019	-2.681	0.008	2013	-0.084	-0.034	0.018	-2.737	0.003
2002	-0.015	-0.034	0.020	-2.307	0.007	2014	-0.081	-0.034	0.018	-2.557	0.005
2003	-0.129	-0.034	0.018	-5.237	0.000	2015	-0.079	-0.034	0.018	-2.434	0.007
2004	-0.121	-0.034	0.018	-4.807	0.000	2016	-0.086	-0.034	0.018	-2.787	0.003
2005	-0.109	-0.034	0.018	-4.146	0.000	2017	-0.093	-0.034	0.018	-3.227	0.001
2006	-0.104	-0.034	0.018	-3.851	0.000						

(二) 全要素能源效率空间收敛分析

1. 模型构建。经典  $\beta$  收敛模型可以表示为:

$$\frac{TFEE_{i,t+1}}{TFEE_{i,t}} = \alpha + \beta TFEE_{i,t} + \sum_{k=1}^n \theta_k X_{k,i,t} + \epsilon_{i,t}$$

空间  $\beta$  收敛模型可以分为四类:空间杜宾模型 (SDM)、空间自回归模型 (SAR)、空间自相关模型 (SAC) 和空间误差模型 (SEM),具体模型表示如下:

$$\text{SDM 模型: } \frac{TFEE_{i,t+1}}{TFEE_{i,t}} = \alpha + \beta TFEE_{i,t} + \rho \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \frac{TFEE_{j,t+1}}{TFEE_{j,t}} + \sum_{k=1}^n \theta_k X_{k,i,t} + \delta \sum_{j=1,k=1}^n \omega_{ij} X_{i,t} + v_{i,t}$$

$$\text{SAR 模型: } \frac{TFEE_{i,t+1}}{TFEE_{i,t}} = \alpha + \beta TFEE_{i,t} + \rho \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \frac{TFEE_{j,t+1}}{TFEE_{j,t}} + \sum_{k=1}^n \theta_k X_{k,i,t} + v_{i,t}$$

$$\text{SAC 模型: } \frac{TFEE_{i,t+1}}{TFEE_{i,t}} = \beta TFEE_{i,t} + \rho \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \frac{TFEE_{j,t+1}}{TFEE_{j,t}} + \sum_{k=1}^n \theta_k X_{k,i,t} + u_i, u_i = a \sum_{j=1}^n \omega_{ij} u_{i,t} + v_{i,t}$$

$$\text{SEM 模型: } \frac{TFEE_{i,t+1}}{TFEE_{i,t}} = \alpha + \beta TFEE_{i,t} + \sum_{k=1}^n \theta_k X_{k,i,t} + u_i, u_i = a \sum_{j=1}^n \omega_{ij} u_{i,t} + v_{i,t}$$

其中,  $TFEE_{i,t+1}$  和  $TFEE_{i,t}$  分别表示时间为  $t+1$  和  $t$  期的第  $i$  个省份的全要素能源效率 (由上述超效率 SBM 测得);  $\alpha$  为常数项;  $\beta$  为收敛性的判别系数,是本文关注的重点,当  $\beta < 0$  时,全要素能源效率趋于收敛,当  $\beta > 0$  时,全要素能源效率则趋于发散,  $\beta = - (1 - e^{-\eta T}) / T$ ,  $\eta$  为收敛速度;  $\rho$  为空间自回归系数,测算空间溢出方向和程度的空间效应系数;  $\omega_{ij}$  为空间权重矩阵 ( $i, j$ ) 的元素 (度量省份  $i$  与省份  $j$  省会城市之间的经纬度欧式距离);  $\theta_k$  为各控制变量  $X_{i,t}$  的估计系数,同时,  $\theta_k$  也是判别绝对收敛和条件收敛的依据,当  $\theta_k = 0$  时,以上模型为  $\beta$  绝对收敛,当  $\theta_k \neq 0$  时,以上模型为  $\beta$  条件收敛;  $\delta$  为控制变量与空间权重矩阵的空间交互效应的回归系数;  $v_{i,t}$  为扰动项;  $u_i$  为空间自相关的误差项;  $a$  为空间自相关的误差项中空间自相关误差项与空间权重矩阵交互项的回归系数。

2. 指标选取。全要素能源效率水平直接使用前文超效率 SBM 模型测算结果。控制变量方面,产业结构 (STR) 选取各省份第三产业产值占各省份国内生产总值比重予以衡量;对外开放

( $\ln FDI$ ) 选取外商直接投资额的自然对数来描述；经济发展水平 ( $\ln GDP$ ) 选取省际层面通过价格指数平减之后的真实国内生产总值的自然对数衡量；政府干预 ( $GOV$ ) 选取地方政府财政投入占省际层面国内生产总值比值衡量；科技投入 ( $\ln RD$ ) 选取各省区科技经费投入的自然对数来衡量；市场化程度 ( $MAR$ ) 选取各省份国有企业总产值占省际层面国内生产总值的比重来衡量。原始数据均来自于《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、《中国人口和就业统计年鉴》及各地区统计年鉴。相关变量的统计性描述如表 5 所示。

表 5 变量统计性描述

变量	名称	均值	标准差	最小值	最大值	样本量
全要素能源效率	$TFEE$	0.611	0.279	0.146	1.492	690
产业结构	$STR$	0.463	0.080	0.190	0.590	690
科技投入	$\ln RD$	2.496	1.322	0.636	9.112	690
对外开放	$\ln FDI$	5.464	1.591	0.357	9.777	690
市场化程度	$MAR$	0.430	0.161	0.095	0.842	690
区域经济发展水平	$\ln GDP$	8.631	1.547	4.770	11.956	690
地方政府干预程度	$GOV$	0.251	0.177	0.049	1.091	690

### (三) 全要素能源效率的空间收敛检验

通过构建空间  $\beta$  收敛模型与经典收敛模型来观测全国及区域全要素能源效率的空间收敛性。首先进行 Hausman 检验，选取固定效应模型估计全要素能源效率的绝对收敛及条件收敛；然后构建 SDM、SAR、SAC、SEM 空间收敛模型，探讨全国全要素能源效率整体及区域收敛性，以确保检验结果的稳健性；最后选取最优空间收敛模型进一步分析区域全要素能源效率的收敛性，最优模型选取主要参考  $\text{Log}L$ 、 $R^2$  及  $\text{Sigma}^2$  统计量等统计指标。 $\text{Log}L$ 、 $R^2$  统计值越高， $\text{Sigma}^2$  统计值越低，说明模型拟合程度越高。通过空间绝对收敛与条件收敛模型发现，SAC 模型为最优估计模型，其  $\text{Log}L$ 、 $R^2$  统计值均为最大， $\text{Sigma}^2$  统计值最低，总体上的空间绝对  $\beta$  收敛和空间条件  $\beta$  收敛估计结果最优，故选取 SAC 模型进行分区域、分时段全要素能源效率的收敛性估计。

1. 整体情况。在对中国全要素能源效率的动态分布及区域差异讨论的基础上，构建经典  $\beta$  收敛及空间  $\beta$  收敛模型，探讨全要素能源效率的空间演变格局并揭示其空间收敛特征。

全国全要素能源效率经典及空间绝对  $\beta$  收敛的检验结果如表 6 所示。可以看出，(1) 全国整体全要素能源效率均存在明显的收敛趋势。全国空间  $\beta$  收敛系数均小于 0，且都通过了 1% 的显著性水平检验，表明在经济发展、产业结构、对外开放、政府干预、市场化程度、科研投入等影响因素相似情形下，各省份的全要素能源效率随着时间推移最终会收敛至同一稳态水平，意味着地区间全要素能源效率的收敛性使得区域间全要素能源效率的差异有缩小趋势。(2) 条件收敛速度均高于绝对收敛速度。在经典条件收敛下的收敛速度 (0.183) 远高于经典绝对收敛速度 (0.054)，空间条件  $\beta$  收敛的收敛速度也均高于空间绝对  $\beta$  收敛速度，主要原因在于条件收敛模型考虑了地区的异质性特征，缩短了收敛周期，使得全要素能源效率的收敛性检验更加准确。(3) 空间收敛速度明显高于经典收敛速度。在绝对收敛下，空间绝对  $\beta$  收敛 (0.104)、条件  $\beta$  收敛的收敛速度 (0.269) 明显高于经典绝对 (0.054)、条件收敛 (0.183)，说明由于空间因素的加入使得全要素能源效率的地理特征得以体现，地理距离相近的区域与省份的信息交流、资源共享更为密切，加剧了全要素能源效率的空间溢出，使得区域间全要素能源效率呈现收敛特征，空间差异进一步缩小，收敛速度明显加快。

表6 全国全要素能源效率收敛

变量	经典绝对收敛	空间绝对 $\beta$ 收敛				经典条件收敛	空间条件 $\beta$ 收敛			
		SDM	SAR	SAC	SEM		SDM	SAR	SAC	SEM
$\beta$	-0.054*** (0.0106)	-0.083*** (0.0225)	-0.078*** (0.0170)	-0.104*** (0.0180)	-0.179*** (0.0241)	-0.183*** (0.0288)	-0.254*** (0.1290)	-0.186*** (0.0155)	-0.269** (0.0280)	-0.183*** (0.0156)
STR						0.063 (0.0161)	0.072 (0.1330)	-0.032 (0.0148)	0.051** (0.0140)	0.053 (0.0147)
lnRD						0.095 (0.0067)	0.017 (0.0175)	0.018 (0.0027)	0.014*** (0.0049)	0.012 (0.0029)
lnFDI						-0.072 (0.0082)	-0.014 (0.0235)	-0.044 (0.0046)	-0.017 (0.0062)	-0.028 (0.0046)
MAR						-0.134*** (0.0374)	-0.072 (0.0805)	-0.012 (0.0198)	-0.043* (0.0252)	-0.023 (0.0209)
lnGDP						0.033*** (0.0079)	0.012** (0.0053)	0.011** (0.0044)	0.031*** (0.0061)	0.011** (0.0047)
GOV						0.026 (0.0363)	0.235** (0.1130)	0.039** (0.0192)	0.024 (0.0319)	0.033 (0.0238)
$\alpha$	0.943*** (0.0705)	0.384*** (0.0563)	0.332*** (0.0541)		0.932*** (0.0107)	0.566*** (0.0571)	0.045 (0.1720)	0.268*** (0.0631)		0.839*** (0.0316)
$\rho$		-0.614*** (0.0055)	-0.623*** (0.0054)	-1.157*** (0.0262)			-0.465*** (0.0074)	-0.585*** (0.0058)	-0.791*** (0.0036)	
$\delta$		3.14 (3.778)					11.78 (615)			
$\text{Sigma}^2$		0.047*** (0.0027)	0.049*** (0.0023)	0.042*** (0.0023)	0.044*** (0.0024)		0.046*** (0.0025)	0.047*** (0.0026)	0.040*** (0.0022)	0.047*** (0.0026)
LogL		819.294	812.078	852.267	817.771		851.691	825.566	868.106	823.884
R-squared	0.503	0.406	0.409	0.515	0.486	0.554	0.571	0.510	0.588	0.509
收敛率	0.054	0.083	0.078	0.104	0.179	0.183	0.254	0.186	0.269	0.183
样本量	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690
省份个数	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

注：\*\*\* $p < 0.01$ 、\*\* $p < 0.05$ 、\* $p < 0.1$ 为显著性水平，括号内为待估参数的标准误。

从控制变量的系数来看，经典条件收敛与空间条件 $\beta$ 收敛的系数基本一致，但影响程度及显著性存在一定差异。产业结构、经济发展、政府干预、科技进步的估计系数显著为正，对全要素能源效率有正向影响。外商直接投资、市场化程度的影响系数为负，对全要素能源效率的提高有抑制作用。其中，产业结构优化，高新技术产业兴起，有意识地摆脱高污染高排放的能源消费模式，能源消耗、环境污染的比重逐渐下降，可以直接或间接地促进全要素能源效率提高；经济发展有助于企业进一步扩大规模及资金，逐步追求产品的高质量、高档次与高附加值，主动承担排污设备费用，排除环境污染严重隐患，实现清洁生产、清洁工艺的逐步替代；政府干预能协调处理公众与企业的环境污染纠纷，加强执法和管理力度，避免企业存在“违法成本低、守法成本高”的不良思想，推进环境污染整治，从而提高全要素能源效率。科技进步为环境保护提供了新技术、新工艺，充分发挥技术创新优势，逐步使低成本、高利润、低污染、高技术产品成为市场主力，有助于改变人们的生产、生活方式，有利于节能减排和生态环境保护。外商直接投资对全要素能源效率有抑制作用，环境要素作为一种生产要素被考虑时，环境指标高的发达国家将高污染生产行业转移到环境指标低的发展中国家，使其成为污染避难所，导致其环境污染及能源消耗严重。国有企业占比高同样抑制全要素能源效率，国有企业往往难以以企业价值最大化进行决策，普遍存在高投入、高污染、低效率现象，对全要素能源效率有负向影响。

2. 区域全要素能源效率收敛性检验。区域全要素能源效率的空间 $\beta$ 收敛及经典收敛检验结果

如表 7 所示。可以看出, 中国八大区域全要素能源效率空间收敛速度依次呈现东北 (0.631)、南部沿海 (0.512)、大西北 (0.423)、长江中游 (0.369)、东部沿海 (0.327)、西南 (0.238)、黄河中游 (0.165)、北部沿海地区 (0.045) 逐步降低的分布格局。从资源禀赋及政策优势来看, 东北、大西北、长江中游地区的能源资源充裕, 生态环境良好, 虽然经济发展相对稍有滞后, 但整体来看资源优越、环境承载力较高, 呈现出“地广人稀、人均资源占有量高”的区域特征, 从而减缓了环境压力, 全要素能源效率收敛明显, 同时具有政策倾斜优势。国家“西部大开发”及“振兴东北老工业基地”等重要举措的实施, 促进形成了东北、大西北地区与其他区域间的信息交流、资源共享的区域合作模式, 地区经济得到快速发展, 从而推动环保节能技术扩散, 区域差异逐步缩小。东部沿海、南部沿海地区区位优势明显, 经济、人口总量及技术等条件占据全国优势地位, 为缓解能源资源消耗压力, 全要素能源效率接近生产前沿, 空间收敛优势明显。西南、黄河中游地区空间收敛速率相对较低, 原因主要在于资源贫瘠, 高污染、高排放现象仍普遍存在, 能源开采加工设备缺乏资金支持, 难以实现升级改造优化, 使得该地区整体全要素能源效率变化相对落后。北部沿海地区空间收敛速率最低, 说明能源技术与资本投入对当前能源生产与生态条件改善的边际效应存在递减趋势, 使得空间收敛速率较小。

表 7 区域全要素能源效率的条件  $\beta$  收敛

变量	东北地区		北部沿海地区		东部沿海地区		南部沿海地区	
	经典	空间	经典	空间	经典	空间	经典	空间
$\beta$	-0.607*** (0.085 2)	-0.631*** (0.073 6)	-0.042* (0.068 7)	-0.045* (0.074 6)	-0.321** (0.140 0)	-0.327*** (0.081 8)	-0.405*** (0.096 2)	-0.512*** (0.094 6)
$\alpha$	0.242 (0.208 0)		1.279*** (0.226 0)		1.241*** (0.169 0)		0.536*** (0.176 0)	
$\rho$		-0.037* (0.020 7)		-0.230*** (0.036 7)		-0.201 (0.225 0)		-0.165*** (0.021 2)
$\text{Sigma}^2$		0.0041*** (0.000 8)		0.0019*** (0.000 2)		0.0012** (0.000 6)		0.0024*** (0.000 6)
LogL		84.277 5		161.772 5		122.353		84.014 1
R-squared	0.658	0.332	0.942	0.853	0.793	0.646	0.658	0.540
收敛率	0.607	0.631	0.321	0.327	0.042	0.045	0.405	0.512
样本量	69	69	92	92	69	69	69	69
省份个数	3	3	4	4	3	3	3	3
变量	黄河中游地区		长江中游地区		西南地区		大西北地区	
	经典	空间	经典	空间	经典	空间	经典	空间
$\beta$	-0.313*** (0.089 0)	-0.165*** (0.050 8)	-0.314*** (0.078 8)	-0.369*** (0.074 8)	-0.161** (0.074 9)	-0.238*** (0.073 9)	-0.185* (0.104 0)	-0.423*** (0.161 0)
$\alpha$	0.917*** (0.116 0)		0.290 (0.186 0)		0.641*** (0.121 0)		1.076*** (0.098 2)	
$\rho$		-0.609*** (0.070 7)		-0.053 (0.259 0)		-0.678*** (0.067)		-0.373* (0.195 0)
$\text{Sigma}^2$		0.0011*** (0.000 2)		0.0038*** (0.000 6)		0.0021*** (0.000 3)		0.0019*** (0.000 3)
LogL		149.066 9		119.494 3		165.42		149.094 2
R-squared	0.850	0.687	0.621	0.581	0.694	0.648	0.612	0.572
收敛率	0.313	0.165	0.314	0.369	0.161	0.238	0.185	0.423
样本量	92	92	92	92	115	115	92	92
省份个数	4	4	4	4	5	5	4	4

注: \*\*\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*  $p < 0.1$  为显著性水平, 括号内为待估参数的标准误; 由于 SAC 模型拟合结果较好, 选择 SAC 模型进行分区域观测; 限于篇幅, 回归结果省略了 SAC 模型中的控制变量回归系数, 没有填列。

3. 分时期收敛性检验。1995—2017 年中国宏观经济环境变化明显，2008 年金融危机爆发，对我国宏观经济产生巨大冲击，为应对金融危机推出“四万亿”投资计划刺激经济迅速拉升，资金大量投入基础设施建设带来不可避免的环境问题，此外，自 2012 年起中国经济增长明显放缓，2012 年、2013 年、2014 年增速分别为 7.7%、7.7%、7.3%，经济增长迈入新常态阶段。根据我国宏观环境变化的时间节点，将考察期划分为 1995—2007 年、2008—2012 年、2013—2017 年三个阶段，分时段考察我国全要素能源效率的收敛趋势。中国全要素能源效率分时段的空间  $\beta$  收敛及经典收敛检验的回归结果如表 8 所示。

表 8 分时段全要素能源效率条件  $\beta$  收敛回归结果

变量	1995—2007		2008—2012		2013—2017	
	经典	空间	经典	空间	经典	空间
$\beta$	-0.143*** (0.023 5)	-0.418*** (0.040 4)	-0.079*** (0.020 9)	-0.446*** (0.086 6)	-0.332 (0.044 1)	-0.859*** (0.080 6)
STR	0.061 (0.080 4)	0.112 (0.152 0)	0.081 (0.065 9)	0.310* (0.017 0)	0.015 (0.018 4)	-0.059 (0.010 9)
lnRD	0.047 (0.005 3)	0.023*** (0.008 2)	0.013*** (0.003 8)	0.046*** (0.015 8)	-0.005 (0.006 7)	0.016 (0.019 4)
lnFDI	-0.012* (0.006 3)	0.007 (0.009 9)	-0.007 (0.006 8)	-0.032** (0.013 9)	0.021 (0.014 4)	0.009 (0.018 9)
MAR	-0.024 (0.035 8)	-0.036 (0.035 9)	-0.031 (0.025 1)	-0.117 (0.085 8)	-0.185*** (0.061 1)	0.303*** (0.103 0)
lnGDP	0.009 (0.007 7)	0.021* (0.010 9)	0.004 (0.007 2)	0.146*** (0.024 6)	0.032** (0.013 6)	0.037* (0.022 4)
GOV	0.156* (0.081 1)	0.382*** (0.125)	-0.003 (0.029 3)	0.208*** (0.061 3)	0.130** (0.059 9)	0.165 (0.213 0)
$\alpha$	0.804*** (0.040 6)		0.859*** (0.048 6)		1.188*** (0.137 0)	
$\rho$		-0.678*** (0.076 9)		-0.554*** (0.129 0)		-0.547*** (0.171 0)
$\text{Sigma}^2$		0.043*** (0.000 3)		0.086*** (0.000 8)		0.022*** (0.000 2)
logL		471.729		331.176		258.693
R-squared	0.417	0.407	0.558	0.405	0.412	0.529
收敛率	0.143	0.418	0.079	0.446	0.332	0.859
样本量	390	390	150	150	150	150
省份个数	30	30	30	30	30	30

注：\*\*\*  $p < 0.01$ 、\*\*  $p < 0.05$ 、\*  $p < 0.1$  为显著性水平，括号内为待估参数的标准误；由于 SAC 模型拟合结果较好，选择 SAC 模型进行分时段观测。

可以看出：(1) 与全时段收敛检验结果一致，中国全要素能源效率呈现空间  $\beta$  收敛趋势。各时段的收敛系数均通过 1% 的显著性水平检验，再次验证上述观点，模型具有稳健性。(2) 随着时间的推移，空间收敛速率呈现逐渐上升的趋势，在 2013—2017 年空间  $\beta$  收敛速率达到最大值 (0.859)。(3) 空间收敛速率明显高于经典收敛速率，空间因素存在加速了全要素能源效率的收敛性。

## 五、结论及建议

本文在测度 1995—2017 年中国全要素能源效率基础上，运用核密度估计方法分析了全国层面与八大区域层面全要素能源效率的空间差异性与特征，进一步采用构建空间绝对  $\beta$  收敛、条件  $\beta$  收

敛模型,分区域分时段探讨中国全要素能源效率的空间收敛性。得到以下主要结论:(1)从分布特征来看,全国及八大区域全要素能源效率均表现为小幅度下降趋势,呈现“沿海高、内陆低”的空间分异特征。东部、南部沿海地区全要素能源效率高于全国平均水平,呈现效率高效。黄河中游、大西北地区远低于全国平均水平,呈现效率无效。值得注意的是,2013年之后,全国及部分地区的要素能源效率呈现“企稳回升”趋势。(2)从绝对差异来看,全国全要素能源效率整体呈现“双峰-单峰”、“右拖尾”、“波峰高度上升”的特征,整体绝对差异存在小幅度下降。北部沿海、西南地区的两极分化现象最为严重,区域内差异最大。(3)从空间收敛性来看,全国整体及八大区域全要素能源效率均呈现空间 $\beta$ 收敛趋势;空间条件收敛速度均高于空间绝对收敛速度;空间收敛速度明显高于经典收敛速度;区域收敛速度最快的地区是东北地区,最慢的是北部沿海地区。基于上述研究结论,本文提出如下政策参考:

首先,充分认识并重视全国全要素能源效率呈现的“沿海高、内陆低”的非均衡空间分布特征,加强区域间的交流与合作。沿海地区应充分发挥其经济及能源效率优势,重点发展可再生能源的勘探开发、二氧化碳捕获与埋存等领域高效节能技术,并有针对性地对内陆地区广泛开展能源项目援助合作,推动区域间的要素流动和信息交流,发挥辐射带动作用。同时,内陆地区应充分利用资源优势,引进、提高新型煤炭利用技术,严抓钢铁、建材、化工等高能耗产业的节能工作,积极开发利用先进技术生产节能新产品,在提高能源效率的同时缓解能源需求、减轻环境压力。

其次,先进带后进,缩小区域内差异。区域内全要素能源效率较低的省份应积极借鉴邻近全要素能源效率较高省份的新技术、新工艺,优先实现区域内部的科技扩展和延伸,充分发挥技术溢出优势,改善生产工艺,更新机器设备,改变经营理念,优化产业结构,提高产业清洁度,缩小区域内差异。

最后,全要素能源效率呈现空间收敛趋势,在充分发挥沿海地区空间溢出效应的同时更要兼顾区域间全要素能源效率提升速度的协调性。中央政府在统筹制定推进能源均等化发展的政策方针时,依然有必要加大对内陆地区的政策倾斜力度,借助政策优势抵补区域劣势,实现富集资源与技术转移、产业迁移的良好承接。此外,应广泛开展节能环保宣传工作,实现信息-数据-流程的公开透明,保证经济-能源-环境的动态均衡,注重区域全要素能源效率速度与质量的同步提升。

#### 参考文献

- [1] Charnes, A., W. W. Cooper, E. Rhodes. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978(6).
- [2] 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).
- [3] 汪克亮,杨宝臣,杨力. 基于 DEA 和方向性距离函数的中国省际能源效率测度[J]. *管理学报*, 2018(3).
- [4] 范丹,王维国. 中国区域全要素能源效率及节能减排潜力分析——基于非期望产出的 SBM 模型[J]. *数学的实践与认识*, 2013(7).
- [5] 钱争鸣,刘晓晨. 环境管制与绿色经济效率[J]. *统计研究*, 2015(7).
- [6] 屈小娥. 中国省际全要素能源效率变动分解——基于 Malmquist 指数的实证研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2009(8).
- [7] Li, L. B., J. L. Hu. Ecological total-factor energy efficiency of regions in China[J]. *Energy Policy*, 2012(4).
- [8] 胡宗义,刘静,刘亦文. 中国省际能源效率差异及其影响因素分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011(7).
- [9] 杨志江,文超祥. 中国绿色发展效率的评价与区域差异[J]. *经济地理*, 2017(3).
- [10] 王喜平,姜晔. 碳排放约束下我国工业行业全要素能源效率及其影响因素研究[J]. *软科学*, 2012(2).
- [11] 范丹,王维国. 基于低碳经济的中国工业能源绩效及驱动因素分析[J]. *资源科学*, 2013(9).

- [12]关伟,杜海东,许淑婷,等.辽宁省能源效率测度及其时空分异研究[J].资源开发与市场,2016(5).
- [13]关伟,吴亭亭,许淑婷.中国沿海地区能源效率时空演变研究[J].哈尔滨商业大学学报(社会科学版),2018(2).
- [14]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).
- [15]汪克亮,杨宝臣,杨力.基于环境效应的中国能源效率与节能减排潜力分析[J].管理评论,2012(8).
- [16]李梦蕴,谢建国,张二震.中国区域能源效率差异的收敛性分析——基于中国省区面板数据研究[J].经济科学,2014(1).
- [17]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).
- [18]徐盈之,管建伟.中国区域能源效率趋同性研究:基于空间经济学视角[J].财经研究,2011(1).
- [19]景守武,张捷.我国省际能源环境效率收敛性分析[J].山西财经大学学报,2018(1).
- [20]郭文,孙涛,周鹏.中国区域全要素能源效率评价及其空间收敛性——基于改进的非期望SBM模型[J].系统工程,2015(5).
- [21]孟凡生,邹韵.中国生态能源效率时空格局演化及影响因素分析[J].运筹与管理,2019(7).
- [22]师博,张良悦.我国区域能源效率收敛性分析[J].当代财经,2008(2).
- [23]赵金楼,李根,苏屹,等.我国能源效率地区差异及收敛性分析——基于随机前沿分析和面板单位根的实证研究[J].中国管理科学,2013(2).
- [24]吴传清,郑开元.长江经济带城市全要素能源效率测度及影响因素研究:基于Super-MSBM模型[J].江西师范大学学报(哲学社会科学版),2020(2).
- [25]马占新.数据包络分析模型与方法[M].北京:科学出版社,2010.

## Study on Regional Differences and Convergence of Energy Efficiency in China from the Perspective of Ecological Footprint

ZHANG Wen-bin, HAO Jia-xin

**Abstract:** Improving energy efficiency is an important starting point for achieving high-quality economic growth, environmental pollution control, and energy security. The article characterizes energy efficiency indicators with total factor energy efficiency, and analyzes its distribution dynamic characteristics, spatial differences and convergence. The article first selects the super-efficiency SBM model to measure the total factor energy efficiency, and then uses kernel density estimation to analyze its dynamic distribution characteristics to characterize the evolution of spatial absolute differences, and finally constructs spatial absolute  $\beta$  convergence and spatial Conditional  $\beta$  convergence model to explore the spatial convergence of total factor energy efficiency. The study finds that the total factor of energy efficiency as a whole shows a trend of slow decline; the spatial distribution presents the characteristics of “high in coastal regions” and “low in inland regions”; The regional difference of total factor energy efficiency has a certain expansion trend; the regional difference of total factor energy efficiency is the largest in the north coastal and southwest region; there are spatial absolute  $\beta$  convergence and spatial condition  $\beta$  convergence trends for total factor energy efficiency in the whole nation as well as the eight regions.

**Key words:** total factor energy efficiency; super-efficient SBM; kernel density estimation; spatial  $\beta$  convergence

(责任编辑 朱 蓓)