

DOI: 10.5846/stxb202108022107

孙丛婷, 傅莉媛, 蒋犇, 王莹, 祝志川. 中国生态效率时空动态分布与区域差异. 生态学报, 2023, 43(4): 1366-1379.

Sun C T, Fu L Y, Jiang B, Wang Y, Zhu Z C. Distribution dynamics and regional differences of eco-efficiency development in China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1366-1379.

# 中国生态效率时空动态分布与区域差异

孙丛婷<sup>1</sup>, 傅莉媛<sup>1</sup>, 蒋犇<sup>2</sup>, 王莹<sup>1</sup>, 祝志川<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036

<sup>2</sup> 辽宁大学数学与统计学院, 沈阳 110036

**摘要:** 生态效率的积极发展对生态环境和经济协同发展具有重要意义。为研究中国生态效率的发展情况, 使用超效率 SBM 模型对中国 2005—2020 年省域生态效率进行测算, 并通过核密度函数、基尼系数、 $\sigma$  收敛和 Markov 转移矩阵进行时空动态分布和区域差异性分析。研究表明: (1) 中国生态效率呈现先下降后增长的趋势, 北京、青海、广东、海南、上海、江苏、福建、河南、云南生态效率发展较好。(2) 六大地理区域生态效率总体差异较大, 区域间差异和超变密度是总体差异的主要来源。华北地区生态效率发展较好, 东北地区生态效率最低。西北地区区域内部差异最大, 东北地区区域内差异最小。中国省域及区域生态效率发展均不具有收敛特征。(3) 全国及区域生态效率从  $t$  年向  $t+1$  年向同水平生态效率转移概率最大, 2021—2025 年省域生态效率差距仍旧较大, 整体水平下降。

**关键词:** 生态效率; 超效率基于松弛变量的测量模型 (SBM); 区域差异; 基尼系数; 马尔科夫转移矩阵

## Distribution dynamics and regional differences of eco-efficiency development in China

SUN Congting<sup>1</sup>, FU Liyuan<sup>1</sup>, JIANG Ben<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>, ZHU Zhichuan<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China

<sup>2</sup> School of Mathematics and Statistics, Liaoning University, Shenyang 110036, China

**Abstract:** The positive development of ecological efficiency is of great significance to the coordinated development of economy and ecological environment. In order to study the temporal and spatial distribution dynamics and regional differences of the ecological efficiency of China's six important geographic regions, this paper uses the Super-SBM model to calculate the provincial ecological efficiency of China from 2005 to 2020, and uses the kernel density function, Gini coefficient,  $\sigma$  convergence and Markov transition matrix to analyze the dynamics of spatial distribution and regional differences. The results show that: (1) China's overall ecological efficiency decreased first and then increased. Beijing, Qinghai, Guangdong, Hainan, Shanghai, Jiangsu, Fujian, Henan, and Yunnan have developed better ecological efficiency. (2) The overall difference in eco-efficiency is large, inter-regional differences and hypervariable density are the main sources of overall differences. There are differences in spatial distribution. The eco-efficiency of North region has developed well, while the eco-efficiency of Northeast region is the lowest. The Northwest region has the largest internal differences and the most unbalanced development; the Northeast region has the smallest regional differences, and both have poor development. The eco-efficiency development in China does not have the characteristics of convergence. (3) The national and regional eco-efficiency has the greatest transfer probability from year  $t$  to year  $t+1$  to the same level of eco-efficiency.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51832007, 12126333); 辽宁省教育厅重点攻关项目 (LZD202004); 辽宁省科学技术计划项目 (2021-MS-152)

**收稿日期:** 2021-08-02; **网络出版日期:** 2022-10-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuzhichuan@lnu.edu.cn

# 本研究尚缺中国港澳台和西藏统计数据

**Key Words:** ecological efficiency; Super-slack-based measurement (SBM); regional differences; Gini coefficient; Markov transition matrix

党的十九届五中全会提出要注重对生态系统质量和稳定性的提升,以此促进人与自然和谐共生、建设美丽中国,实现可持续和高质量发展。改革开放以来,在中国在长期的经济社会发展进程中,消耗了大量的自然资源,付出了生态环境污染严重的代价,例如雾霾、水污染、土壤重金属污染等,对人们的身心健康都造成极大伤害。耶鲁大学发布的环境绩效指数中,中国的环境污染位居世界第二位<sup>[1]</sup>,过度的追求经济发展导致的生态环境问题大量暴露,加快转变经济发展方式以此推进绿色发展刻不容缓。

生态效率一词是由 Schaltegger 和 Stum 于 1990 年提出<sup>[2]</sup>,并在 1998 年被经合组织进一步定义为表示经济社会和生态环境协同发展关系的重要概念,具体是以资源和资本作为投入,在得到一定经济产出的同时,产出更少的消极环境影响,因此,生态效率是典型的投入-产出过程。为探究经济发展和生态环境之间的关系,国内外专家学者聚焦生态效率时空格局研究和影响因素分析,在时空格局方面,Zameer 等研究发现中部地区生态效率低于东部地区但高于西部地区<sup>[3]</sup>;Dong 等研究表明中国生态效率水平低、呈现东高西低的较大差异<sup>[1]</sup>;Yasmeen 等研究发现中国东部地区高于中部地区高于西部地区<sup>[4]</sup>;韩燕等对中原城市群生态效率进行测算,显示 2003—2016 年中原城市群生态效率呈现北部和南部高、中间低的格局<sup>[5]</sup>;王兆峰等研究发现长江中游城市群呈现“东高-西低”的空间格局<sup>[6]</sup>。在影响因素方面,田泽等发现经济发展、产业结构等因素对长江经济带与黄河流域城市生态效率产生显著影响<sup>[7]</sup>,陈晓兰等发现技术进步对生态效率有显著的促进作用<sup>[8]</sup>。通过文献梳理发现,中国生态效率的研究多以东中西<sup>[4,6]</sup>、经济区域<sup>[9]</sup>、产业园区<sup>[10]</sup>为区域划分或以城市<sup>[11]</sup>及城市群为区域划分<sup>[12-13]</sup>开展研究,鲜有以六大地理区(华北、东北、华东、中南、西南、西北地区)为决策单位的研究。六大地理区在建国后设立行政区,行政区域的划分主要以政治为导向,生产要素以行政区内部具体单位进行配置,六大行政区虽在国家发展进程中被逐渐撤销,但经济文化仍旧具有区域性,因此研究中国生态效率时空演变和六大地理区域差异对中国生态效率的平衡发展及提高具有现实意义。

现阶段对生态效率的评价集中于数据包络分析(DEA)和随机前沿分析(SFA)两种评价方法,数据包络分析由 Charnes 和 Cooper 等在 1978 年正式提出<sup>[14]</sup>,属于非参数估计方法,能够避免主观因素影响,同时具有算法简化、误差较少的特点<sup>[15]</sup>,在对多输入多产出的同类型决策单位(DMU)处理上有显著的优势。DEA 模型进行不断的扩展和优化,延展出更具有针对性的 CCR、BCC、SBM 模型,在医疗<sup>[16]</sup>、金融<sup>[17]</sup>及生态环境<sup>[18-19]</sup>等方面研究中得到较好应用。对于生态效率的时空特性研究,核密度函数可以对区域差异进行直观分析,基尼系数能够在核密度函数的基础上进一步探索区域差异的来源  $\sigma$  收敛和 Markov 转移矩阵能够分析及预测区域生态效率的进一步演变趋势。上述研究方法在全要素生产率<sup>[20]</sup>、金融配置<sup>[21]</sup>、绿色经济<sup>[22]</sup>、土地利用<sup>[23]</sup>等研究的分布动态、区域差异等方面的研究上产生了积极作用,得到良好的研究结果,为平衡区域差异提供方法和途径。现有对生态效率的时空研究多集中在空间相关性,通常单独使用基尼系数探究其区域差异,难以对生态效率的时空动态演变和区域差异进行系统的分析和预测。因此,本文采取基于非期望产出的超效率 SBM(Super-SBM)模型,在规模报酬可变的条件下对中国的 30 个省、市、自治区为决策单位的生态效率进行测算和分析。为了进一步探索中国省域生态效率的时空演变和区域差异研究,以六大地理区域为研究对象,利用核密度函数、基尼系数、 $\sigma$  收敛和 Markov 转移矩阵等统计分析方法深度揭示区域间及内部生态效率差异来源和转移规律,为促进中国及区域生态效率的积极发展提供科学依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究方法

#### 1.1.1 指标体系构建

以投入-产出为框架,参考现有研究中生态效率评价指标<sup>[24-31]</sup>,以此选取本研究生态效率评价指标体系。

投入指标选取劳动力、资本以及资源三项一级指标,产出分为期望产出与非期望产出两项一级指标。具体指标体系如表 1 所示:

表 1 生态效率评价指标体系

Table 1 Eco-efficiency evaluation index system

指标体系 Indicator system	一级指标 Primary index	二级指标 Secondary index
投入 Input	劳动力投入	城镇单位就业人数/万人
	资本投入	全社会固定资产投资/亿元
	资源投入	能源消耗(煤炭消费量/万 t) 水资源消耗(供水总量/亿 t) 土地资源(建成区面积/km <sup>2</sup> )
产出 Output	期望产出	GDP 总量/亿元
	非期望产出	二氧化硫排放量/万 t
		二氧化碳排放量/×10 <sup>6</sup> t 废水排放总量/万 t

### 1.1.2 评价模型

SBM 是在数据包络分析(DEA)的基础上,为解决径向和角度选择带来的偏差和影响而提出的,由于在实际应用中出现产生多个单位决策效率值为 1 无法比较的情况,所以将超效率 DEA 模型与 SBM 模型进行组合,得到超效率 SBM,即 Super-SBM 模型<sup>[32]</sup>,其包含非期望产出线性规划公式如下:

$$\text{Min} \rho = \frac{1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1 + \frac{1}{q_1 + q_2} \left( \sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / y_{tk} \right)} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} x_k = X\lambda + s^-, y_k = Y\lambda - s^+, b_k = b\lambda + s^{b-} \\ \lambda, s_i^-, s_r^+, s_t^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\rho$  为生态效率值,  $n$  为投入指标个数,  $q_1$  为期望产出指标个数,  $q_2$  为非期望产出指标个数,  $x_{ik}$  为第  $k$  个决策单元的第  $i$  个投入指标,  $y_{rk}$  为第  $k$  个决策单元的第  $r$  个产出指标,  $y_{tk}$  为第  $k$  个决策单元的第  $t$  个产出指标,  $X$ 、 $Y$  和  $b$  为投入产出向量矩阵,  $\lambda$  表示权重向量,  $s_i^-$  和  $s_r^+$  和  $s_t^{b-}$  表示投入和产出的松弛变量。

### 1.1.3 分析方法

#### (1) 收敛性分析

本文采用变异系数法对中国区域生态效率的发展进行收敛性检验,称为  $\sigma$  收敛<sup>[33]</sup>,具体公式如下:

$$\sigma = \frac{\bar{x}_i}{\mu_i} \quad (3)$$

其中,  $\bar{x}_i$  为区域生态效率在第  $i$  年的均值,  $\mu_i$  为区域生态效率在第  $i$  年的标准差。

#### (2) 核密度函数

利用核密度函数<sup>[34]</sup>(Kernel 密度估计)对生态效率变化趋势进行分析。该方法从数据本身出发研究其数据特征,本文以各省份为变量对生态效率进行核密度分析,时间为变量对各区域生态效率进行核密度分析,其中区域生态效率指数的计算利用熵值法对各区域内部省份进行加权并求和,具体公式如下:

区域生态效率指数计算:

#### 1) 确定省份权重:

区域内第  $j$  个省份在第  $i$  年份的特征比重为:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (4)$$

第  $j$  个省份的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (5)$$

其中,  $k = \ln m$

第  $j$  个省份的信息效用值:

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

第  $j$  个省份的权重:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (7)$$

2) 区域各年加权生态效率值:

$$REE = \sum_{j=1}^n x_j \times w_j \quad (8)$$

其中,  $x_j$  为区域第  $j$  个省份的生态效率。

核密度函数估计为:

$$f(x) = \frac{1}{ph} \sum_{i=1}^p K\left(\frac{y_i - y}{h}\right) \quad (9)$$

其中,  $p$  为样本数,  $h$  为窗宽,  $K$  为核密度函数。

本文使用 MATLAB 对研究区域生态效率进行测算,并将各省、市、自治区 2005—2020 年生态效率进行平均,根据公式(4)—(9)计算各区域生态效率值并以 2005—2020 年各区域生态效率为样本绘制核密度曲线。

(3) 基尼系数

利用基尼系数对生态效率进行区域差异性分析。基尼系数是用于测定区域分配差异程度的方法, Dagum 将基尼系数进行分解,进一步对区域间和区域内差异以及超变密度进行测度<sup>[35]</sup>。具体计算公式如下:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{m=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_m} |y_{ij} - y_{mr}|}{2n^2\mu} \quad (10)$$

$$G_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} |y_{ij} - y_{ir}|}{2n_i^2\mu_i} \quad (11)$$

$$G_{im} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{n_m} |y_{ij} - y_{mr}|}{n_i n_m (\mu_i + \mu_m)}, \mu_m \leq \dots \leq \mu_i \leq \dots \leq \mu_k \quad (12)$$

$$G = G_w + G_{nb} + G_l, G_{gb} = G_{nb} + G_l, G_w = \sum_{i=1}^k G_{ii} p_i s_i \quad (13)$$

$$G_{nb} = \sum_{i=2}^k \sum_{m=1}^{i-1} G_{im} (p_i s_m + p_m s_i) D_{im} \quad (14)$$

$$G_l = \sum_{i=2}^k \sum_{m=1}^{i-1} G_{im} (p_i s_m + p_m s_i) (1 - D_{im}) \quad (15)$$

$$D_{im} = \frac{d_{im} - p_{im}}{d_{im} + p_{im}} \quad (16)$$

其中,  $G$  表示生态效率的总体基尼系数,反映中国省域间生态效率的相对差异;  $y_{ij}$  为第  $i$  个区域的第  $j$  个省份的生态效率;  $k$  为区域个数,  $n$  为省域个数;  $\mu$  为各个区域生态效率的均值,并对其进行排序;  $G_{ii}$  为第  $i$  个区域

的基尼系数,  $G_{im}$  为第  $i$  和  $m$  个区域间的基尼系数,  $D_{im}$  表示第  $i$  个和第  $m$  个区域间生态效率的相对影响,  $d_{im}$  表示区域间生态效率的差值, 即第  $i$  个和第  $m$  个区域中所有  $y_{ij} - y_{mr} > 0$  的样本值加总的数学期望,  $p_{im}$  为第  $i$  个和第  $m$  个区域中所有  $y_{mr} - y_{ij} > 0$  的样本值加总的数学期望。

#### (4) Markov 转移矩阵

利用 Markov 转移矩阵计算转移概率<sup>[36]</sup>, Markov 链在  $t$  时刻时处于  $i$  状态, 在  $t+1$  时刻处于  $j$  状态的转移概率被定义为:

$$P_{ij} = P(X_{t+1} = j | X_t = i) \quad (17)$$

根据 Cohort 方法, 在研究时间范围内从状态  $i$  转移为状态  $j$  的概率如下:

$$P_{ij} = \frac{\sum_{t=0}^T N_{it} P_{ijt}}{\sum_{t=0}^T N_{it}} \quad (18)$$

其中,  $N_{it}$  表示研究时间范围内由  $t$  年的状态  $i$  转移为  $t+1$  年的状态  $j$  的省份数量,  $N_i$  表示研究时间范围内所有处于状态  $i$  的省份数量。

## 1.2 数据来源

本文中二级指标数据获取均来自于国家统计局发布的数据, 其中二氧化碳排放量采用表观排放量核算法<sup>[37]</sup>, 以原煤、原油、天然气使用过程中产生的二氧化碳以及水泥生产过程中产生的二氧化碳综合计算得出, 原始数据来源于中国统计局能源数据。2017—2020 年部分指标的缺失数据根据 2005—2016 年数据进行趋势预测法进行补全。其他省份个别指标缺失数据利用插值法补全。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态效率时空变化分析

2005—2020 各年测算结果以六大地理区域进行划分制图(图 1), 从各地理区域整体来看, 华北地区生态效率有上升趋势, 华东、中南和西南地区存在先下降后上升再下降的趋势, 东北地区除 2005 年外, 生态效率浮动较小, 略有下降趋势, 西北地区发展呈现先上升后下降的趋势。本文研究的 30 个省、市、自治区生态效率值由高到低为北京>青海>广东>海南>上海>江苏>福建>河南>云南>浙江>内蒙古>天津>山东>宁夏>陕西>河北>重庆>湖南>贵州>四川>安徽>江西>湖北>山西>甘肃>广西>新疆>辽宁>黑龙江>吉林。排名靠前的省份中, 河南二氧化硫排放量低, 且经济发展高于全国平均水平, 长期发展稳定, 因此处于一个较高的位置, 而浙江作为经济强省, 其水资源消耗和废水排放总量远远高于全国平均水平, 且具有长期增长的趋势, 因此, 其生态效率排名也略有下降。

华北地区中北京生态效率逐年增长, 在 2020 年有短暂下降, 最高在 2019 年达 5.3259, 北京产业结构合理, 能够消耗较少的能源而获得更高的经济增长, 且污染物排放水平也较低, 因此北京生态效率为全国最高水平, 且增长率高; 2005—2018 年天津和内蒙古生态效率差异不大, 处于全国中等水平, 稳定在 1 左右, 但 2019—2020 年有下降趋势; 河北生态效率波动性较大, 山西为华北地区生态效率最低省份, 基本处于 0.5 左右, 仅在 2017 年达到 1.0063, 且山西 2005—2020 年生态效率排名大幅下降, 处于全国倒数水平, 这主要是由于山西省碳排放量的大幅上升导致。

东北地区生态效率整体较低, 除黑龙江在 2005 年达到 1 之外, 2005—2020 年东北地区三省份均低于 0.5, 这主要是由于东北三省劳动力水平低, 尤其是黑龙江, 劳动力水平呈现严重的下降, 同时东北三省经济增长缓慢, 消耗较多能源且污染物排放量大, 因此辽宁、吉林、黑龙江生态效率在全国处于“吊车尾”位置。

华东地区内部可分为三类, 上海和江苏为一类, 生态效率高且在 1.2 左右浮动, 2005—2020 年上海能源利用率高, 能源消耗水平大幅下降, 且经济持续高速增长, 污染排放量得到有效控制, 因此生态效率较高, 而江苏由于资本投入量的大幅提升, 经济增长速度快, 因此生态效率在全国始终维持在较高水平; 福建、山东、浙江为一类, 生态效率在 1.0 左右浮动, 其中浙江在 2013—2016 年局部生态效率出现正“U”型趋势, 在 2020 年下降

明显,达到最小值 0.7598,2017—2020 年山东生态效率大幅下降到 0.5 左右波动;安徽和江西为一类,整体呈现倒“U”型趋势。

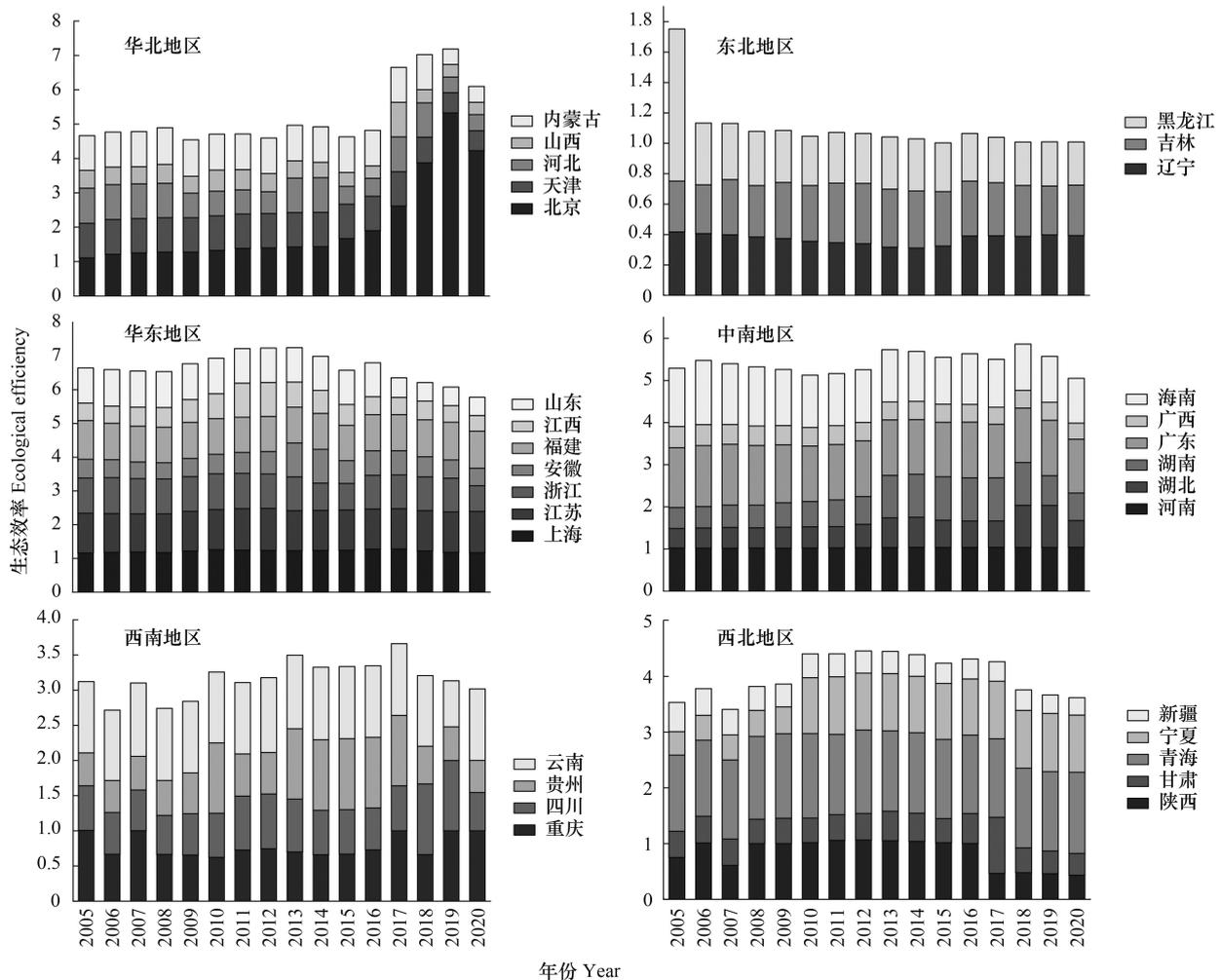


图 1 中国六大地理区域 2005—2020 年内部省域生态效率

Fig.1 The eco-efficiency of internal provinces in China's six geographic regions from 2005 to 2020

中南地区省份生态效率差距较大,2005—2020 年广东和海南整体生态效率较高,但均存在下降趋势,广东近几年生态效率较为稳定,而海南持续下降;河南生态效率波动较小,稳定在 1.0—1.1 之间;湖南 2005—2012 年生态效率较低却有增长趋势,而 2019—2020 年大幅下降,最低达到 0.6531;湖北呈现增长趋势,2014 和 2018 年出现局部峰值;广西生态效率较小且存在下降趋势,在 2020 年达到最小值 0.3822,2020 年广西生态效率在全国排名二十六,处于下游水平,主要是因为广西劳动力、资本投入都高于全国平均水平,但其经济发展远低于全国平均水平,广西人力和资本要素生产效率低,进而导致生态效率低下。

2005—2020 年西南地区中除云南外的省域生态效率波动性大且大多集中在 0.5—0.8 之间,云南生态效率较为稳定且大于 1,仅在 2019 年出现较大下降。西北地区青海生态效率较高,在 1.4 左右浮动,青海生态效率投入产出各要素在全国都排在尾部,但青海产业结构合理,第二产业比重低,第三产业比重最大,因此其二产业污染排放量较低,是使其生态效率高的主要原因;甘肃和新疆生态效率低,2005—2020 年新疆能源消耗、污染物排放量都远高于全国平均水平,而经济水平低,因此生态效率极低;陕西和宁夏分别在 2008—2016 年和 2009—2020 年生态效率较稳定,且均在 1.0 左右。

### 2.2 生态效率收敛性分析

利用公式(3)计算全国及各区域变异系数并进行 $\sigma$ 收敛性分析, $\sigma$ 下降表示区域内部省份生态效率发展的离散程度随时间推移而下降, $\sigma$ 上升表示区域内部省份生态效率发展的离散程度随时间推移而增大。如图2所示,华北地区2005—2019年变异系数波动性增长,在2017—2020年增长幅度较大,且高于全国水平,说明华北地区内省份生态效率发展差异性增大;中南地区2006—2018年变异系数高于全国,2019—2020年低于全国水平,变异系数处于降低趋势,生态效率有明显的收敛态势;东北地区(除2005年)、华东地区和西南地区变异系数低于全国水平,且变化都为先下降后增长,即地区生态效率变化前期有一定收敛性但后期出现扩张趋势,说明各地区的生态效率后期发展呈现发散趋势;西北地区除2005—2015年变异系数基本高于全国水平,2015—2020年低于全国水平,且有“增长-下降-增长”的变化趋势,该地区生态效率变化无明显收敛性,说明该地区内部各省份生态效率发展差异没有明显减小趋势。

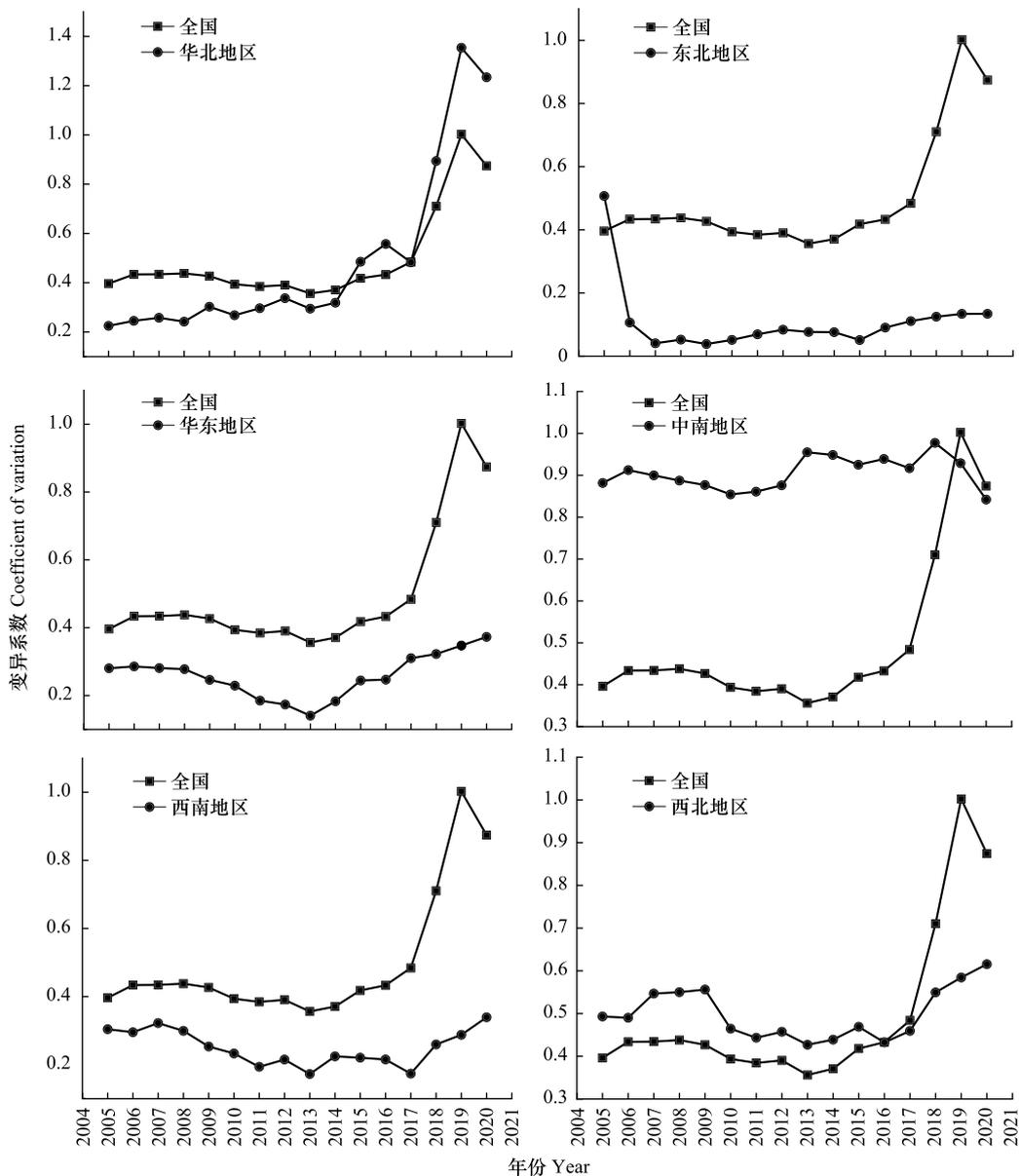


图2 2005—2020年区域 $\sigma$ 收敛曲线  
Fig.2 2005—2020 regional  $\sigma$  convergence curve

### 2.3 生态效率发展分析

#### 2.3.1 全国生态效率演变

全国生态效率发展的核密度曲线能够全面客观地展示我国生态效率的发展动态。从图 3 中可以看出 2005—2015 年,生态效率有向右移动的趋势,存在明显的双峰现象,且在 2015 年有显著的右拖尾现象,说明全国生态效率发展积极,但仍旧存在一定的两极分化现象,随着时间的增长,前波峰与峰谷差距逐渐减小,两极分化局势减弱。2015—2020 年,生态效率有向左移动的趋势,但在双峰右侧有轻微的突起,表明全国整体生态效率虽有退化现象,但个别省域生态效率发展特别优异,省域间生态效率差距加大。

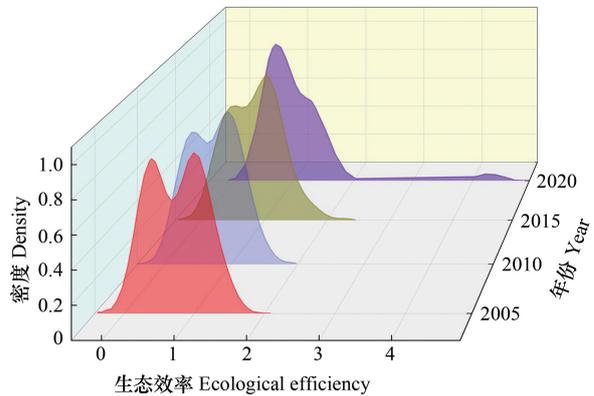


图 3 全国 2005—2020 年生态效率核密度曲线

Fig.3 National eco-efficiency nuclear density curve from 2005 to 2020

#### 2.3.2 区域生态效率发展差异

区域生态效率核密度曲线(图 4)表明,华北地区和东北地区生态效率核密度曲线差距最大,华北地区存在三峰现象,从主峰的高度来看,2005—2020 年的时间内华北地区生态效率不到 1.0 的时间居多;东北地区主要以单峰形态演化,生态效率在 0.4 之下的波峰远远高于生态效率为 0.6 的波峰。中南地区和西南地区核密度曲线峰度接近,然而中南地区整体生态效率较高,且以单峰形式呈现正态分布,中南地区与西南地区相比波峰偏右,说明在 2005—2020 年中南地区生态效率较高于西南地区。华东地区和西北地区核密度曲线宽度相近,但西北地区呈现明显的双峰现象,华东地区的波峰高度远高于西北地区的波峰,说明在 2005—2020 年西北地区生态效率较西南地区差异更大。

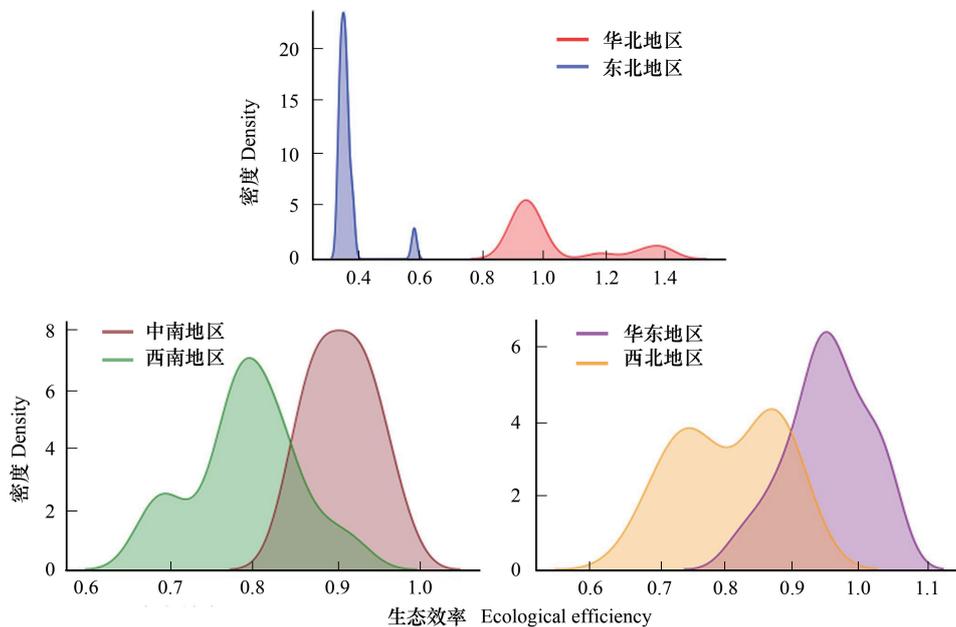


图 4 区域生态效率核密度曲线

Fig.4 Regional eco-efficiency core density

### 2.4 区域生态效率差异分析

核密度函数探索了全国及区域生态效率发展情况,为了进一步了解生态效率发展的总体差异及来源,利用基尼系数及其分解对生态效率进行分析。

### 2.4.1 六大地理区域总体差异及来源

2005—2020 年全国六大地理区域生态效率总体差异及来源结果如表 2 所示,总体基尼系数呈现“增长-下降-增长”的趋势。整体较为稳定,2005—2017 年(2013 年除外)总体基尼系数在 0.20—0.25 之间变化,在 2019 年达到最大值 0.3681,表明在 2019 年区域生态效率总体差异最大,发展最不平衡,区域生态效率总体差异呈现扩大的趋势。除 2005、2010、2015、2016、2020 年之外,所有年度对总体差异贡献度最大的均为区域间差异,其次是超变密度贡献,而区域内差异的贡献率最小。2005—2020 年区域间差异的变化趋势与总体差异相似,贡献率的变化区间为 34.70%—54.06%,2018 年对区域总体差异的贡献率达到最高。2005—2020 年区域内差异的变化很小,几乎不对区域总体差异产生影响,贡献率变化区间为 12.72%—14.81%。超变密度在 2005—2020 年与区域总体差异基本保持同一变化趋势,贡献率变化区间为 32.08%—51.18%,其中 2017—2020 年变化趋势较大。基尼系数分析结果与地区生态效率收敛性分析具有一致性,即区域生态效率发展差异日渐增大。

表 2 2005—2020 年生态效率总体差异及来源

Table 2 Overall differences and sources of ecological efficiency from 2005 to 2020

年份 Year	总体 Overall	区域内 Within the area		区域间 Inter-area		超变密度 Hypervariable density	
		来源	贡献率/%	来源	贡献率/%	来源	贡献率/%
2005	0.2215	0.0328	14.81	0.0780	35.23	0.1107	49.96
2006	0.2409	0.0334	13.87	0.1069	44.39	0.1006	41.75
2007	0.2409	0.0330	13.68	0.1073	44.53	0.1007	41.79
2008	0.2447	0.0337	13.77	0.1112	45.42	0.0999	40.81
2009	0.2409	0.0335	13.89	0.1055	43.80	0.1019	42.31
2010	0.2231	0.0308	13.82	0.0929	41.62	0.0994	44.57
2011	0.2183	0.0288	13.17	0.1032	47.28	0.0863	39.55
2012	0.2218	0.0294	13.28	0.0990	44.64	0.0934	42.09
2013	0.1972	0.0251	12.72	0.0920	46.64	0.0801	40.64
2014	0.2071	0.0275	13.27	0.0915	44.20	0.0881	42.53
2015	0.2344	0.0331	14.12	0.0814	34.70	0.1200	51.18
2016	0.2386	0.0342	14.35	0.0851	35.65	0.1193	49.99
2017	0.2396	0.0326	13.59	0.1267	52.86	0.0804	33.54
2018	0.3033	0.0420	13.86	0.1639	54.06	0.0973	32.08
2019	0.3681	0.0519	14.09	0.1695	46.04	0.1468	39.87
2020	0.3536	0.0520	14.71	0.1395	39.44	0.1621	45.85

### 2.4.2 六大地理区域内差异

2005—2020 年六大地理区域内生态效率基尼系数计算结果如表 3 所示,区域内基尼系数按均值从大到小依次为西北地区>华北地区>中南地区>华东地区>西南地区>东北地区。西北地区区域内差异最大,说明西北地区内部各省生态效率发展差距最大,且随着时间的增长,省之间差异逐渐增大。中南地区和华北地区区域内生态效率平均差异差距较小,但中南地区有下降趋势,且波动幅度较小,2005—2020 年中南地区基尼系数下降了 18.28%,说明中南地区内部省份生态效率发展水平差距逐渐减小,趋向均衡;华北地区差异有增长趋势,且在 2014—2020 年增长幅度较大、波动性较强,在 2019 年差异达到最大,基尼系数为 0.5598,2005—2020 年华北地区基尼系数增加了四倍,华北地区区域内差异的大幅上反映了该地区内部生态效率发展的极度不平衡,主要原因可能在于资源和政策两方面,北京在资源投入和政策执行方面都远胜于华北地区其他省份,因此北京生态效率与其他省份生态效率逐渐拉大,导致华北地区生态效率发展的不平衡。2005—2020 年区域内基尼系数均值表明华东地区和西南地区区域内生态效率平均差异差距较小,2005—2020 年两地区基尼系数分别上升了 42.83%和 9.71%,且都存在先下降后增长的趋势,即区域内生态效率差异先缩小后扩大。东北地区 2006—2020 年区域内差异较小,生态效率发展较为平衡。

表 3 2005—2020 年区域生态效率区域内基尼系数

Table 3 Gini coefficient of regional eco-efficiency in the region from 2005 to 2020

年份 Year	华北地区 North China	东北地区 Northeast Region	华东地区 East China Region	中南地区 Central South Region	西南地区 Southwest Region	西北地区 Northwest Region
2005	0.1018	0.2533	0.1419	0.2507	0.1612	0.2458
2006	0.1179	0.0504	0.1411	0.2610	0.1573	0.2510
2007	0.1273	0.0208	0.1419	0.2528	0.1707	0.2448
2008	0.1239	0.0283	0.1413	0.2513	0.1545	0.2801
2009	0.1686	0.0195	0.1297	0.2381	0.1215	0.2857
2010	0.1483	0.0270	0.1222	0.2281	0.1171	0.2503
2011	0.1635	0.0358	0.0925	0.2233	0.1033	0.2408
2012	0.1857	0.0428	0.0883	0.2180	0.1143	0.2503
2013	0.1512	0.0414	0.0741	0.1777	0.0921	0.2346
2014	0.1627	0.0413	0.1016	0.1693	0.1162	0.2409
2015	0.2634	0.0254	0.1375	0.1720	0.1139	0.2550
2016	0.2981	0.0488	0.1351	0.1850	0.1147	0.2379
2017	0.1948	0.0603	0.1746	0.1787	0.0779	0.2518
2018	0.4128	0.0679	0.1748	0.1327	0.1365	0.2883
2019	0.5598	0.0709	0.1866	0.1687	0.1523	0.3081
2020	0.5153	0.0728	0.2027	0.2048	0.1769	0.3230
均值	0.2309	0.0567	0.1366	0.2070	0.1300	0.2618

### 2.4.3 六大地理区域间差异

2005—2020 年生态效率区域间基尼系数反映了六大地理区域之间的差异性。如图 5、表 4 所示,分别以直方图和 2005—2020 年区域间差异均值的形式反映区域间差异分布情况。从图中可以看出,区域间差异分为两类,第一类包括华北-东北、东北-华东、东北-中南、东北-西南、东北-西北,这一类都包含东北地区,从中也可以看出东北地区生态效率发展与其他地区之间差异较大,基尼系数均值高达 0.4799,尤其是在 2017—

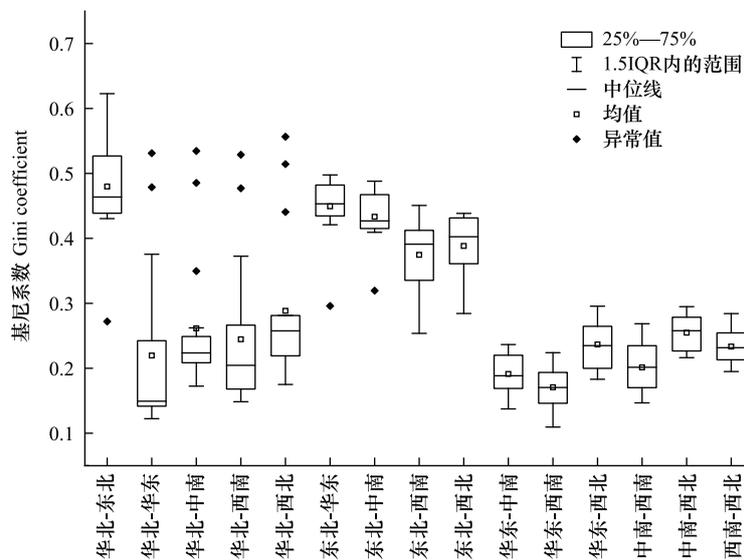


图 5 2005—2020 年生态效率区域间基尼系数

Fig.5 Gini coefficient between regions of eco-efficiency from 2005 to 2020

2020 年华北和东北地区之间的差异最大,其中在 2019 年高达 0.6228,其次东北和华东地区之间差异也较大,基尼系数均值为 0.4498,仅次于华北和东北地区之间,主要是因为东北地区内部省份生态效率水平落后严重,未来应重点加强东北地区的资源配置,强化经济和生态环境协同发展,进而提升东北地区生态效率,减小其与其他地区的差异。第二类为华北-华东、华北-中南、华北-西南、华北-西北、华东-中南、华东-西南、华东-西北、中南-西南、中南-西北、西南-西北,2005—2020 年这些地区之间基尼系数维持在 0.1—0.3 之间波动,较为稳定,说明地区间生态效率发展较为平衡。然而华北地区与其他地区之间的差异在 2018—2020 年存在较高的异常值,区域间基尼系数的突增也说明在近些年华北地区生态效率发展较快,更加注重经济和生态环境的协同发展,因此与其他地区之间生态效率水平差异增大。在第二类地区间差异中,华东-中南、华东-西南之间差异较小,基尼系数均值低于 0.2,说明地区间生态效率发展水平趋于一致。

表 4 2005—2020 年生态效率区域间基尼系数均值

Table 4 Average value of Gini coefficient between regions of eco-efficiency from 2005 to 2020

地区 Region	华北地区 North China	东北地区 Northeast Region	华东地区 East China Region	中南地区 Central South Region	西南地区 Southwest Region	西北地区 Northwest Region
华北地区 North China						
东北地区 Northeast Region	0.4799					
华东地区 East China Region	0.2197	0.4498				
中南地区 Central South Region	0.2615	0.4333	0.1913			
西南地区 Southwest Region	0.2446	0.3747	0.1708	0.2014		
西北地区 Northwest Region	0.2885	0.3883	0.2367	0.2548	0.2334	

## 2.5 状态转移分析

利用 Markov 转移矩阵对全国及六大地理区生态效率的转移规律进行探索,进行 Markov 转移矩阵计算之前要先对生态效率进行分类,由于不同地区生态效率的差异较大,为了减小不同类别中的数据量的差距,本文采用五分位数将生态效率分为五类,分别为低水平 ( $<0.4628$ )、较低水平 ( $0.4628—0.6437$ )、中等水平 ( $0.6437—1.0131$ )、较高水平 ( $1.0131—1.0988$ )、高水平 ( $>1.0988$ ),同时该分类结果符合生态效率的本质。分类后根据公式计算 Markov 转移矩阵,结果如表 5 所示,行表示该地区在第  $t$  年的状态,列表示该地区在  $t+1$  年的状态。以全国生态效率从低水平转移为例,从第  $t$  年的低水平到第  $t+1$  年的低水平、较低水平、中等水平、较高水平、高水平的转移概率分别为 0.9195、0.0690、0.0115、0.0000、0.0000。从表中可以看出全国所有省域生态效率转移从第  $t$  年到  $t+1$  年均为同类型转移概率最大,其次较低水平向中等水平、中等水平向较低水平转移概率分别为 14.77% 和 16.13%,由此可见全国生态效率处于轻微波动状态,没有明显提高或降低趋势。华北、华东、中南、西北地区转移概率与全国相似,皆为向同等水平转移的概率最大,其中华北地区高水平向高水平转移概率高达 1,低水平向较低水平和中等水平转移概率分别为 28.57% 和 14.29%,由此可以看出华北地区的生态效率有向更高水平发展的趋势;东北地区由于其本身生态效率值偏低,所以由低水平向低水平转移概率为 1,从中等水平向低水平转移概率为 1,其余转移概率皆为 0,表明东北地区生态效率的发展较差,在下一年的发展偏向于低水平;华东地区从较低水平向中等水平、中等水平向较低水平的转移概率分别为 9.52% 和 14.29%,可以看出华东地区生态效率的发展存在波动性,没有明显的提高或降低;中南地区从较低水平向中等水平、中等水平向较低水平、较高水平向较高水平转移概率分别为 14.29%、28.57% 和 4.76%,表明中南地区整体生态效率的发展具有波动性;西南地区与其他地区所不同,低水平向较低水平转移概率为 1,较低水平向中等水平、中等水平向较低水平、较高水平向中等水平转移概率分别为 26.32%、16.67% 和 30.00%,表明西南地区生态效率的发展有向中等水平集中的态势,没有明显提高或降低;西北地区从较低水平向低水平,较低水平向中等水平、中等水平向较低水平、中等水平向较高水平、较高水平向中等水平转移概率分别为 28.57%、21.43%、20.00%、30.00% 和 16.67%,表明西北地区生态效率的发展极其不稳定,波动性较强。

表 5 2005—2020 年年全样本及分区域生态效率 Markov 转移概率矩阵

Table 5 2005—2020 full sample and sub-regional ecological efficiency Markov transition probability matrix

		低水平 Lowest	较低水平 Lower	中等水平 Medium	较高水平 Higher	高水平 Highest
全国 Overall	低水平	0.9195	0.0690	0.0115	0.0000	0.0000
	较低水平	0.0909	0.7500	0.1477	0.0114	0.0000
	中等水平	0.0430	0.1613	0.6989	0.0968	0.0000
	较高水平	0.0110	0.0000	0.1209	0.8571	0.0110
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0330	0.9670
华北地区 North China Region	低水平	0.5714	0.2857	0.1429	0.0000	0.0000
	较低水平	0.1538	0.6923	0.0769	0.0769	0.0000
	中等水平	0.0833	0.1250	0.7500	0.0417	0.0000
	较高水平	0.0667	0.0000	0.0667	0.8667	0.0000
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
东北地区 Northeast Region	低水平	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	较低水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	中等水平	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	较高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
华东地区 Huadong Region	低水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	较低水平	0.0000	0.9048	0.0952	0.0000	0.0000
	中等水平	0.0000	0.1429	0.8095	0.0476	0.0000
	较高水平	0.0000	0.0000	0.0968	0.8710	0.0323
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0625	0.9375
中南地区 Central South Region	低水平	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	较低水平	0.0476	0.8095	0.1429	0.0000	0.0000
	中等水平	0.0000	0.2857	0.7143	0.0000	0.0000
	较高水平	0.0000	0.0000	0.0476	0.9524	0.0000
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0357	0.9643
西南地区 Southwest Region	低水平	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	较低水平	0.1053	0.6316	0.2632	0.0000	0.0000
	中等水平	0.0000	0.1667	0.7000	0.1333	0.0000
	较高水平	0.0000	0.0000	0.3000	0.7000	0.0000
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
西北地区 Northwest region	低水平	0.8750	0.1250	0.0000	0.0000	0.0000
	较低水平	0.2857	0.5000	0.2143	0.0000	0.0000
	中等水平	0.1000	0.2000	0.4000	0.3000	0.0000
	较高水平	0.0000	0.0000	0.1667	0.8333	0.0000
	高水平	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000

全国生态效率等级分布概率预测如表 6 所示,以 2020 年为基准,2021 年生态效率处于低水平省份占比最大,其次是较低水平省份,说明 2021 年全国生态效率发展较差且不平衡,省份之间差距较大,到 2025 年省域生态效率发展由低水平到高水平占比依次减小,分别为 31.06%、22.02%、15.08%、15.90%、15.94%。全国整体生态效率不平衡性有下降趋势,但仍处于水平较低的困境。

表 6 2020、2021、2025 年中国生态效率等级分布概率

Table 6 Distribution probability of China's eco-efficiency grades in 2020 and 2025

年份 Year	低水平 Lowest	较低水平 Lower	中等水平 Medium	较高水平 Higher	高水平 Highest
2020	0.3000	0.2667	0.1000	0.1667	0.1667
2021	0.3062	0.2368	0.1329	0.1611	0.1630
2025	0.3106	0.2202	0.1508	0.1590	0.1594

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

本文主要采取核密度函数、基尼系数、收敛性分析和 Markov 转移矩阵对 30 个省、市、自治区生态效率的分布动态和区域差异进行深入研究,结果从一定程度上相互印证,并互为补充,具有较高的现实意义,为进一步研究提供良好基础。根据结果分析不难看出,中国生态效率发展整体势头较好,但区域生态效率发展总体差异较大,为了消减区域差异,应当重点从区域间的差异入手,加强区域统筹合作,优化资源合理配置,同时也要注意区域内部差异,高生态效率省份通过加强对邻近省份的技术传导,促进产业结构升级,提升能源利用效率等手段帮助提升邻近省份生态效率。通过区域间基尼系数可见,东北地区和其他区域间差异较大,特别是华东-东北地区差异最大,而华东地区作为东北地区的邻近区域,更应当发挥其作用,带动东北地区生态效率的提升。其次,对于生态效率发展落后地区仍需采取措施提高生态效率以符合当前社会的绿色发展理念,促进区域间协同发展以减小区域间生态效率差异。从本文评价体系框架角度出发,应当提升技术手段促进能源消费结构的升级,增强能源、土地资源和水资源的利用效率,最大限度减少非期望产出二氧化硫、二氧化碳以及废水排放量,即减少污染物排放,尽快实现以大量投入生产要素的粗放型经济增长转型为集约式经济增长,同时要在有限的投入下,采取加强区域间和区域内的技术和人才等方面合作、提高生产效率以提高资源利用率等手段提升地区 GDP,使期望产出最大化,以此提高地区生态效率。

#### 3.2 结论

本文利用 Super-SBM 模型对中国省域生态效率进行了测算,并将其按六大地理区域划分进行进一步探索分析。本文创新性的将熵值法与核密度函数进行结合,对省域加权测算区域生态效率,以时间维度的区域生态效率为样本和全国空间维度的省域生态效率为样本分别进行核密度曲线的绘制,探索中国生态效率发展的演变分布特征。除此之外本文还利用基尼系数分解、 $\sigma$  收敛性检验进一步探索全国以及各区域生态效率时空发展的不平衡性和趋势。最后利用 Markov 转移矩阵探索生态效率的转移规律,为未来生态效率的预测提供研究基础。主要结论如下:

(1) 中国省域生态效率按 2005—2020 年均值排名为北京>青海>广东>海南>上海>江苏>福建>河南>云南>浙江>内蒙古>天津>山东>宁夏>陕西>河北>重庆>湖南>贵州>四川>安徽>江西>湖北>山西>甘肃>广西>新疆>辽宁>黑龙江>吉林,两极分化现象减弱,整体生态效率具有先下降后增长的趋势,不具收敛特征,个别省份生态效率发展较好。

(2) 六大地理区域生态效率发展差距明显,从区域间基尼系数和收敛性角度分析,区域总体差异性增强,区域间差异是主要差异来源,东北地区自身的生态效率低是其与其他地区之间的差异大的主要原因,华北地区在 2014—2020 年由于自身生态效率的增长扩大了与其他地区之间的差异,其他地区之间生态效率差异性较小,且均不具收敛特征。

(3) Markov 转移矩阵结果主要展示了全国及各区域的生态效率转移概率,除西南地区低水平生态效率的转移概率外,各区域均为同水平向同水平的转移概率最高。华北地区生态效率发展具有提高的态势,中南地区、华东地区和西北地区生态效率发展具有波动性,东北地区生态效率发展具有降低的态势,西南地区生态效率整体态势向中等水平发展。对 2021 和 2025 年生态效率进行预测发现全国生态效率发展差异性增强,发展水平处于较低层面。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dong F, Zhang Y Q, Zhang X Y. Applying a data envelopment analysis game cross-efficiency model to examining regional ecological efficiency: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122031.
- [ 2 ] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: ansatzpunkte zur ausgestaltung you ökologieorientierten management instrumenten. *Die Unternehmung*, 1990(4): 273-290.

- [ 3 ] Zameer H, Yasmeen H, Wang R, Tao J, Malik M N. An empirical investigation of the coordinated development of natural resources, financial development and ecological efficiency in China. *Resources Policy*, 2020, 65: 101580.
- [ 4 ] Yasmeen H, Tan Q M, Zameer H, Tan J L, Nawaz K. Exploring the impact of technological innovation, environmental regulations and urbanization on ecological efficiency of China in the context of COP21. *Journal of Environmental Management*, 2020, 274: 111210.
- [ 5 ] 韩燕, 邓美玲. 中原城市群生态效率时空演变及影响因素. *生态学报*, 2020, 40(14): 4774-4784.
- [ 6 ] 王兆峰, 王梓瑛. 长江中游城市群环境规制对旅游产业生态效率的影响及空间分异研究. *生态学报*, 2021, 41(10): 3917-3928.
- [ 7 ] 田泽, 潘晶晶, 任芳容, 毛春梅. 大保护背景下中国三大流域生态效率评价与影响因素研究. *软科学*, 2022, 36(1): 91-97.
- [ 8 ] 陈晓兰, 孟庆港, 史佳凝, 沈万芳. 中国八大综合经济区生态效率测度及时空演进分析. *经济与管理评论*, 2022, 38(02): 109-121.
- [ 9 ] 陈菁泉, 刘娜, 马晓君. 中国八大综合经济区能源生态效率测度及其驱动因素. *中国环境科学*, 2021, 41(05): 2471-2480.
- [ 10 ] 徐凌星, 杨德伟, 高雪莉, 郭青海. 工业园区循环经济关联与生态效率评价——以福建省蛟洋循环经济示范区为例. *生态学报*, 2019, 39(12): 4328-4336.
- [ 11 ] 黄和平, 胡晴, 乔学忠. 基于绿色 GDP 和生态足迹的江西省生态效率动态变化研究. *生态学报*, 2018, 38(15): 5473-5484.
- [ 12 ] 于伟, 张鹏, 姬志恒. 中国城市群生态效率的区域差异、分布动态和收敛性研究. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(01): 23-42.
- [ 13 ] 李艳, 程刚. 黄河流域省区生态效率评价研究. *洛阳师范学院学报*, 2021, 40(6): 11-15.
- [ 14 ] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429-444.
- [ 15 ] 杨国梁, 刘文斌, 郑海军. 数据包络分析方法(DEA)综述. *系统工程学报*, 2013, 28(6): 840-860.
- [ 16 ] 刘雅娟. 基于 CCR 模型的病种成本管理体系构建及管理机制研究. *中国医院管理*, 2021, 41(6): 49-54.
- [ 17 ] 苑泽明, 李田, 王红. 科技型中小企业创新效率评价研究——基于科技金融政策投入视角. *科技管理研究*, 2016, 36(16): 39-44.
- [ 18 ] 王素梅, 陈桂香. 非期望产出 SBM 模型的生态文明建设效率性评价指标构建与应用研究——基于审计的视角. *生态经济*, 2021, 37(06): 199-204.
- [ 19 ] 冯俊华, 张沁蕊, 刘静洁. 生态环境保护与农业发展区域时空差异研究——基于陕西农业环境技术效率测算的分析. *价格理论与实践*, 2020(11): 169-172.
- [ 20 ] 张洪, 陶柳延, 方文杰. "一带一路"沿线省份旅游绿色全要素生产率区域差异及影响因素. *首都经济贸易大学学报*, 2021, 23(5): 70-82.
- [ 21 ] 赵文举, 张曾莲. "双循环"视角下中国八大综合经济区金融资源配置效率分布动态、空间差异及收敛性研究. *统计与信息论坛*, 2022, 37(02): 61-78.
- [ 22 ] 郭炳南, 唐利, 张浩. 长江经济带绿色经济效率的区域差异与随机收敛. *生态经济*, 2021, 37(11): 46-53.
- [ 23 ] 瞿诗进, 胡守庚, 李全峰. 中国城市建设用地转型阶段及其空间格局. *地理学报*, 2020, 75(7): 1539-1553.
- [ 24 ] Wang Q W, Tang J X, Choi G. A two-stage eco-efficiency evaluation of China's industrial sectors: A dynamic network data envelopment analysis (DNDEA) approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 148: 879-892.
- [ 25 ] Wang L, Zhang F, Fu W, Tan Q, Chen J. Analysis of temporal and spatial differences and influencing factors of energy eco-efficiency in energy-rich area of the Yellow River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2021, 121: 102976.
- [ 26 ] Xue D, Yue L, Ahmad F, Draz M U, Chandio A A. Urban eco-efficiency and its influencing factors in Western China: Fresh evidence from Chinese cities based on the US-SBM. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107784.
- [ 27 ] Luo Y S, Lu Z N, Muhammad S, Yang H. The heterogeneous effects of different technological innovations on eco-efficiency: Evidence from 30 China's provinces. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107802.
- [ 28 ] He G J, Ma Z G, Wang X N, Xiao Z, Dong J R. Does the improvement of regional eco-efficiency improve the residents' health conditions: Empirical analysis from China's provincial data. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107387.
- [ 29 ] 傅妍芳, 韩雪, 王红新. 基于超效率 SBM 模型的安徽省区域生态效率时空动态评价. *成都工业学院学报*, 2021, 24(2): 89-93.
- [ 30 ] 华坚, 施明月, 王育芳. 科技金融、产业结构优化与区域生态效率——基于空间计量模型的实证分析. *技术经济*, 2021, 40(5): 16-26.
- [ 31 ] 邵必林, 杨会会, 王茹. 关中城市群生态效率评价——基于功能分工视角的分析. *国土与自然资源研究*, 2021(3): 61-66.
- [ 32 ] 黄和平, 李亚丽, 王智鹏. 基于 Super-SBM 模型的中国省域城市工业用地生态效率时空演变及影响因素研究. *生态学报*, 2020, 40(1): 100-111.
- [ 33 ] 张龙耀, 邢朝辉. 中国农村数字普惠金融发展的分布动态、地区差异与收敛性研究. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(03): 23-42.
- [ 34 ] 于平. 金融发展与城乡收入差距关系的研究——基于核密度曲线的实证分析. *兰州财经大学学报*, 2018, 34(2): 50-58.
- [ 35 ] Dagum C. Decomposition and interpretation of Gini and the generalized entropy inequality measures. *Statistica*, 1997, 57(3): 295-308.
- [ 36 ] 李研. 中国数字经济产出效率的地区差异及动态演变. *数量经济技术经济研究*, 2021, 38(2): 60-77.
- [ 37 ] 陈浩, 付皓. 我国省域碳排放量的测算与趋势比较研究. *统计与决策*, 2013(5): 133-135.