



移动扫码阅读

郭茹,田博文,吕爽. 基于SBM模型的区域碳排放效率评估研究[J]. 能源环境保护, 2022, 36(5):13-17.  
GUO Ru, TIAN Bowen, LYV Shuang. Evaluation of regional carbon emission efficiency based on SBM model[J].  
Energy Environmental Protection, 2022, 36(5):13-17.

# 基于SBM模型的区域碳排放效率评估研究

郭茹<sup>1,2</sup>, 田博文<sup>1</sup>, 吕爽<sup>1</sup>

(1. 同济大学环境与科学工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学碳中和研究院, 上海 200092)

**摘要:** 区域碳排放效率是影响我国碳达峰、碳中和目标的关键因素, 准确测算不同区域碳排放效率是推动双碳目标导向下区域协同治理的基础。针对聚焦区域全要素碳排放效率测度问题, 选择考虑非期望产出和松弛变量的SBM(Slacks-based measure, SBM)模型, 构建了区域碳排放效率评估方法。评估了我国省级行政区域的碳排放效率特征和时空变化情况, 并在此基础上提出区域碳减排协同治理建议。

**关键词:** 碳排放; 效率; 非期望SBM模型; 协同

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2022)05-0013-05

## Evaluation of regional carbon emission efficiency based on SBM model

GUO Ru<sup>1,2</sup>, TIAN Bowen<sup>1</sup>, LYV Shuang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Carbon Neutrality, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Regional carbon emission efficiency is one of the key factors affecting China to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality. Accurately measuring the carbon emission efficiency of different regions is the basis for promoting regional collaborative governance under the guidance of dual carbon goals. In order to measure regional total factor carbon emission efficiency, an evaluation method of regional carbon emission efficiency was developed based on the SBM (Slack-based measure, SBM) model considering unexpected output and relaxation variables. The characteristics and temporal and spatial changes of carbon emission efficiency were then evaluated at China's provincial level. Based on the above results, policy recommendations for regional carbon emission reduction and collaborative governance were put forward.

**Key Words:** Carbon emission; Efficiency; Unexpected SBM model; Synergism

## 0 研究背景

气候变化是当今全球面临的重大挑战之一, 推进低碳发展是我国实现2030年碳达峰和2060年碳中和目标的关键。当前我国已经进入了经济发展新阶段, 坚持以提高经济发展质量和效益为中心, 不断优化升级经济结构, 是实现低碳可持续发展的关键。中国幅员辽阔, 区域差异大, 因此低碳政策的制定和执行需要兼顾国家整体战略需求和地区禀赋特色。“十四五”期间是我国推动高质

量发展、建设美丽中国的重要时期, 也是落实国家自主贡献目标的关键时期。为实现经济与环境的协调发展, 必须科学测度不同区域的碳排放效率, 推动区域之间协同实现双碳目标。

已有研究中, 对碳排放效率的评价往往仅考虑能源消耗因素或经济因素, 效率测算的科学性仍有待改进和完善。虽然国内外已有学者采用数据包络分析法(Data envelopment analysis, DEA)从全要素视角对碳效率评价进行了改进, 但选择不同的效率测算模型, 往往导致了不同的研究结论,

收稿日期: 2022-06-30; 责任编辑: 金丽丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071293); 上海市生态环境局2020年度科研项目(2020-42); 国家社科基金重点资助项目(17AZD011)

第一作者简介: 郭茹(1978—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境规划与管理研究。E-mail: ruguo@tongji.edu.cn

尚未形成统一的共识。本研究对区域碳排放效率全要素测算模型进行了改进,选择考虑非期望产出和松弛变量的 Slacks-based measure (SBM) 模型,构建了区域碳排放效率评估方法,并应用于我国省域层面的碳排放效率分析。基于前述分析结果,结合当前我国不同区域碳排放现状和碳排放效率的差异性,提出了相关政策建议。

## 1 研究方法

### 1.1 数据包络分析法

数据包络分析法 (Data envelopment analysis, DEA) 是一种利用线性规划方法,用于评价多投入、多产出系统中决策单元 (Decision making units, DMU) 相对效率,已被广泛用于健康<sup>[1]</sup>、航空<sup>[2]</sup>、银行<sup>[3-4]</sup>、交通<sup>[5-6]</sup>、能源<sup>[7]</sup>、教育<sup>[8]</sup>、环境<sup>[9-10]</sup>等领域。相较于参数法,DEA 不需要假定具体的函数形式,可以用来测算包含“多投入、多产出”DMU 的相对效率。常见的 DEA 模型可以分为径向和非径向模型,CCR、BBC 模型是典型的径向 DEA 模型,而基于松弛变量的 SBM 模型是典型的非径向模型<sup>[11]</sup>。采用径向模型进行效率测算时,无效的 DMU 通过同比例的改变投入或者产出指标到达前沿面的距离,实现 DMU 有效。对于非径向 DEA 模型,DMU 的投入或者产出指标则不需要同比例的增加或者减少。

### 1.2 单要素和全要素碳排放效率评估

本研究分别从单要素指标和全要素指标两个视角对中国的碳排放效率进行评估。其中,碳排放强度是常用的单要素评价指标,定义为一个地区单位 GDP 的碳排放量,可以较好地反映 CO<sub>2</sub> 排放总量与经济发展的关系。碳排放强度作为反映区域能源利用效率的指标,较低的碳排放强度值表示较高的区域能源利用效率和较高的碳排放效率。

在单要素评估基础上,进一步从全要素视角对地区间的碳排放效率进行分析,提出改进的区域碳排放效率全要素测度模型。根据已有 DEA 评估方法的比较分析,选取非期望产出的 SBM 模型对我国 30 个省级行政区域的碳排放效率进行测算。以劳动力、资本存量、能源消耗量作为投入指标,以 GDP 作为产出指标,CO<sub>2</sub> 排放量作为非期望产出指标,将中国 30 个省级行政区作为 DMU,构建了碳排放效率评估方法。具体方法如下:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{io}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left( \sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{ro}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{ro}^b} \right)}$$

$$\text{subject to} \begin{cases} x_0 = X\lambda + s^- \\ y_0^g = Y^g\lambda - s^g \\ y_0^b = Y^b\lambda + s^b \\ \lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^g \geq 0, s^b \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $\rho^*$  表示 DMU 的效率, $m$  是投入变量的个数, $s_1$  表示产出变量的个数, $s_2$  表示非期望产出变量的个数, $x_0$ 、 $y_0^g$ 、 $y_0^b$  分别代表投入变量、产出变量和非期望产出值, $s_i^-$ 、 $s_r^g$ 、 $s_r^b$  相应的分别代表投入松弛、产出松弛和非期望产出松弛变量, $X \in R^{m \times n}$ 、 $Y^g \in R^{s_1 \times n}$ 、 $Y^b \in R^{s_2 \times n}$ 、 $s^- \in R^m$ 、 $s^b \in R^{s_2}$ 、 $s^g \in R^{s_1}$ 、 $\lambda$  表示权重向量。

## 2 结果

### 2.1 单要素碳排放效率特征

研究计算了 2000~2017 年中国各省级行政区的 CO<sub>2</sub> 排放强度。其中,中国各省级行政区碳排放数据来自 CEADs 官网的公开数据,GDP 数据来自 2001~2018 年《中国统计年鉴》中的地区生产总值(折算为 2000 年不变价)。结果表明,就单要素碳排放效率而言,区域碳排放强度呈现“北高南低”“西多东少”的特征。

具体来说,2000~2017 年间,除了山西省、海南省和宁夏回族自治区外,其他省级行政区的碳排放强度都在下降。山西省、内蒙古自治区、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区这 4 个省级行政区的碳排放强度始终处于高位。这些中西部地区化石燃料丰富,对重工业依赖程度高,能源生产和转化产业是当地经济的支撑产业,例如内蒙古自治区煤矿资源的开采、炼焦和新疆维吾尔自治区油田的加工,存在产业结构不平衡、制造业过剩、能源利用效率较低、技术落后的现象,经济增长导致了高强度的能源消耗,导致碳排放强度居于高位。

相较之下,东部地区排放强度较低,2017 年北京的碳排放强度为 0.25 t/万元、上海为 0.52 t/万元、广东为 0.59 t/万元,远低于全国平均水平的 1.94 t/万元,这些地区生产工艺和技术水平先进,碳排放强度的下降主要源于第二产业比重的不断下降,经济发展主要来自于以服务业为主的第三

产业,对能源的依赖较小。随着经济的发展,部分省级行政区在这期间的碳排放强度变化巨大,例如辽宁省、吉林省和黑龙江东北三省的碳排放强度从2000年的6.22 t/万元、5.27 t/万元和5.29 t/万元下降到2017年的2.20 t/万元、1.42 t/万元和2.23 t/万元;河北省的碳排放强度也由5.07 t/万元下降到1.59 t/万元;贵州省的碳排放强度也由5.07 t/万元下降到1.59 t/万元。江苏省、广东省的碳排放量虽然位于全国前列,但排放强度却很低。

## 2.2 全要素碳排放效率特征

基于构建的SBM模型对我国30个省级行政区的全要素碳排放效率值进行测算时,由于宁夏

回族自治区缺乏2000~2002年能耗数据、海南省缺乏2002年能耗数据,考虑到数据的一致性,研究时间尺度调整为2003~2017年。2003~2017年我国30个地区的碳排放效率测算结果见表1。从时间变化来看,相较2003年,2017年只有北京市、湖北省、重庆市、四川省和贵州省5个地区的效率上升,占比16.67%。从各省级行政区效率测算结果来看,2003~2017年各省级行政区碳排放效率值高于整体平均值的地区有13个,其中只有上海市的效率平均值始终为1;效率值低于整体平均值的地区有17个,其中,效率值低于0.3的地区有4个,分别是山西省(0.29)、贵州省(0.25)、青海省(0.25)、宁夏回族自治区(0.18)。

表1 2003~2017年我国30个省级行政区的碳排放效率

Table 1 Carbon emission efficiencies of 30 provinces in China from 2003 to 2017

地区/年份	2003	2007	2011	2014	2017
北京市	0.72	0.67	0.71	0.72	1.00
天津市	0.71	0.66	0.63	0.67	0.72
河北省	0.47	0.43	0.39	0.37	0.38
山西省	0.37	0.33	0.26	0.24	0.23
内蒙古自治区	0.56	0.36	0.32	0.31	0.31
辽宁省	1.00	0.60	0.51	0.50	0.48
吉林省	0.50	0.42	0.38	0.39	0.41
黑龙江省	0.63	1.00	0.65	0.51	0.50
上海市	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
江苏省	0.79	0.70	0.67	0.67	0.69
浙江省	0.76	0.63	0.63	0.62	0.61
安徽省	0.56	0.53	0.50	0.45	0.46
福建省	1.00	1.00	1.00	0.68	1.00
江西省	0.58	0.53	0.52	0.49	0.49
山东省	0.58	0.51	0.49	0.50	0.51
河南省	0.53	0.46	0.38	0.37	0.39
湖北省	0.55	0.57	0.60	0.59	0.60
湖南省	0.70	0.55	0.51	0.51	0.53
广东省	1.00	1.00	1.00	0.72	0.70
广西壮族自治区	0.61	0.52	0.39	0.37	0.37
海南省	1.00	0.60	0.51	0.43	0.41
重庆市	0.50	0.41	0.42	0.47	0.52
四川省	0.48	0.50	0.50	0.50	0.55
贵州省	0.23	0.27	0.26	0.25	0.24
云南省	0.45	0.38	0.34	0.31	0.31
陕西省	0.39	0.35	0.33	0.32	0.31
甘肃省	0.38	0.36	0.32	0.29	0.29
青海省	0.29	0.27	0.24	0.21	0.20
宁夏回族自治区	0.24	0.20	0.17	0.16	0.14
新疆维吾尔自治区	0.41	0.35	0.31	0.26	0.23
平均值	0.60	0.54	0.50	0.46	0.49

2003~2017年区域全要素碳排放效率平均值结果见图1。分析发现,从效率平均值来看,省域间的碳排放效率差距明显,只有上海市在2003~2017年间达到了碳排放有效。在研究期间,碳排放效率最高的地区是上海市、福建省、广东省、北京市、江苏省、天津市等东部地区。上海市、江苏省、北京市、广东省和天津市作为我国最发达的地区,以通信和信息设备制造业为代表的高科技产业可以实现较高的经济产出,因此碳排放效率处于高水平。福建省的CO<sub>2</sub>排放效率高主要归因于工业化比例低以及现代服务业主导的产业结构。在研究期间,CO<sub>2</sub>排放效率最低的地区是宁夏回族自治区、青海省、贵州省、山西省、新疆维吾尔自治区、甘肃省。就排放效率最低的地区而言,这些省级行政区大多数位于中国的西部欠发达地区,人口密度低、人才稀缺且经济发展水平相对落后。总的来看,超过一半的省级行政区的碳排放效率值低于中国平均值,多数区域还存在很大的效率提升空间和减排潜力。

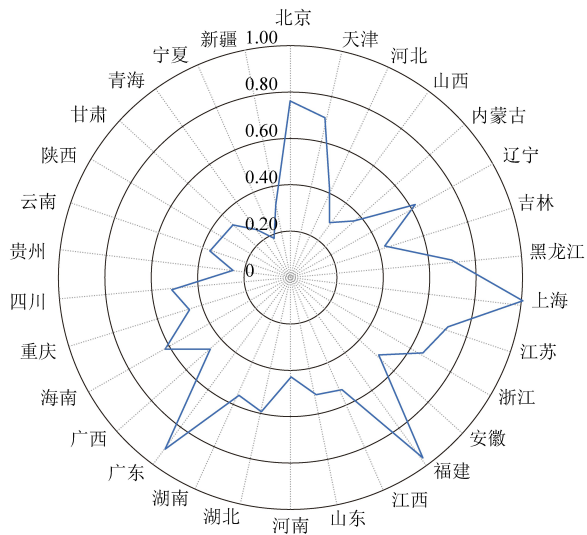


图1 2003~2017年区域全要素碳排放效率平均值

Fig.1 Average value of regional total factor carbon emission efficiency from 2003 to 2017

### 3 政策建议

根据前述研究结果,提出以下区域碳排放效率改进建议:

(1)在科学测算和综合统筹的基础上,通过逐步建立统一碳市场推动区域碳排放协同治理,发挥市场在资源配置中的主体作用,碳排放效率较高的地区适当增加获得更多碳排放配额的机会,通过地区间协同推进双碳目标的落地,实现整体

碳效率的提升。

(2)东部地区经济发达、人才集中,拥有技术创新的良好基础,应以产业结构更新和资源配置优化为重点,持续进行产业结构转型,大力推动现代服务业的优质高效发展;在提高碳排放效率方面发挥带头示范作用。例如,充分发挥长三角地区对周边地区碳排放效率的正向辐射作用。

(3)中部地区应借助其“联通东西”的区位优势,加强与东部地区的合作交流,积极推动先进产业替代落后产能,打好产业结构和能源结构转型的组合拳;合理引导和配置中部地区制造业资本投资,鼓励外资企业对高科技产业及节能环保产业进行投资,并努力将中部地区的中心城市建立成新的碳排放效率正向辐射地区,带动西部地区的发展。

(4)东北部地区作为老工业基地,应通过继续贯彻落实国家“振兴东北老工业基地”政策,完善过剩产业的退出机制,依规有序淘汰落后产能;提高核心技术研发、制造、系统集成和产业化能力,提升东北地区的低碳竞争力。

(5)西部地区应严格限制污染密集型企业发展,逐步淘汰落后产业,促进产业合理化发展,大力推动产业结构转型升级;积极吸引先进技术从沿海地区向西部地区转移,提升西部地区的绿色低碳科技水平;同时加大对外资企业投资方向的审查和把控,与外资企业展开高质量、绿色深入的合作。

### 4 结论

准确地测算中国不同区域的碳排放效率,是推动双碳目标导向下区域协同治理的基础。研究构建了基于SBM的全要素碳排放效率测算模型,以资本存量、劳动力和能源消耗量为投入指标,以地区生产总值为期望产出,以CO<sub>2</sub>碳排放量为非期望产出,建立了区域碳排放效率评估方法,并分析了我国30个省级行政区域的碳排放效率特征。结果表明,我国多数省级行政区的碳排放效率值低于国家平均值,各个区域总体上还存在很大的提升空间和减排潜力。未来应针对不同区域的资源禀赋和低碳发展优势,充分发挥市场在资源配置中的主体作用,通过地区间协同推进双碳目标的落地,实现整体碳效率的提升。

### 参考文献

[1] Li Y, Chiu Y, Lin T. The impact of economic growth and air

- pollution on public health in 31 Chinese cities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16 (3): 393.
- [2] Yu H, Zhang Y, Zhang A, et al. A comparative study of airline efficiency in China and India: A dynamic network DEA approach [J]. *Research in Transportation Economics*, 2019: 100746.
- [3] Chen Y C, Chiu Y H, Chiu C J. The performance evaluation of banks considering risk: An application of undesirable relation network DEA [J]. *International Transactions in Operational Research*, 2020, 27 (2): 1101–1120.
- [4] 何康. 利率市场化有利于改善城市商业银行效率吗——来自中国24家城市商业银行的经验证据 [J]. *南方经济*, 2015 (8): 54–66.
- He Kang. Is the interest rate liberalization conducive to improving the efficiency of Chinese city commercial banks: Empirical evidence from 24 Chinese city commercial banks [J]. *South China Journal of Economics*, 2015 (8): 54–66.
- [5] Tian N, Tang S, Che A, et al. Measuring regional transport sustainability using super-efficiency SBM-DEA with weighting preference [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118474.
- [6] Dai Q, Li L, Lei X, et al. Considering monopoly maintenance cost for an automobile purchase in China: A DEA-based approach [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2019, 32 (4): 1167–1179.
- [7] Amowine N, Ma Z, Li M, et al. Energy efficiency improvement assessment in Africa: An integrated dynamic DEA approach [J]. *Energies*, 2019, 12 (20): 3915.
- [8] Lee B L, Worthington A, Wilson C. Learning environment and primary school efficiency: A DEA bootstrap truncated regression analysis [J]. *International Journal of Educational Management*, 2019, 33 (4): 678–697.
- [9] Zhou X, Chen H, Wang H, et al. Natural and managerial disposability based DEA model for China's regional environmental efficiency assessment [J]. *Energies*, 2019, 12 (18): 3436.
- [10] Rezaee M J, Yousefi S, Eshkevari M, et al. Risk analysis of health, safety and environment in chemical industry integrating linguistic FMEA, fuzzy inference system and fuzzy DEA [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34 (1): 1–18.
- [11] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis [J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130 (3): 498–509.