

长三角区域一体化背景下安徽省城市减污降碳协同治理研究

戴红军

淮南师范学院经济与管理学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年12月9日; 录用日期: 2025年1月28日; 发布日期: 2025年2月13日

摘要

二氧化碳和碳排放同根同源, 相关性非常大, 碳排放和大气污染进行协同治理非常必要。基于长三角区域一体化的背景, 以安徽省16个地级市为研究对象, 将二氧化碳和大气污染物SO₂作为非期望产出, 运用超效率SBM模型测算2011~2019年间安徽省城市全要素绿色生产效率, 以及二氧化碳和大气污染物的减排潜力。实证结果显示, 安徽省共有13个城市的绿色全要素生产率均值低于1, 碳减排和大气污染减排潜力接近30%, 具有较大的减排空间。运用标杆管理方法, 根据各城市碳减排和大气污染减排潜力情况, 确定追赶对象和改进路径。马鞍山、淮南、淮北、铜陵和阜阳等城市为安徽省碳减排和大气污染减排协同治理的重点城市。马鞍山、淮南、淮北、铜陵按照“常州-合肥-南通”路径去改进。阜阳选择“金华-丽水”的路径。芜湖选择“杭州-南京-南通-上海”的路径。安庆和蚌埠则选择“盐城-南通”的路径。

关键词

协同治理, 绿色全要素生产率, 减排潜力, 超效率SBM模型, 标杆管理

Research on the Collaborative Governance of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Cities in Anhui Province under the Background of Yangtze River Delta Regional Integration

Hongjun Dai

School of Economics and Management, Huainan Normal University, Huainan Anhui

Received: Dec. 9th, 2024; accepted: Jan. 28th, 2025; published: Feb. 13th, 2025

文章引用: 戴红军. 长三角区域一体化背景下安徽省城市减污降碳协同治理研究[J]. 世界生态学, 2025, 14(1): 15-24.
DOI: 10.12677/ije.2025.141003

Abstract

Carbon dioxide and carbon emissions have the same root and the correlation is very large, so it is necessary to conduct collaborative treatment of carbon emissions and air pollution. Based on the background of the regional integration of the Yangtze River Delta, 16 prefecture-level cities in Anhui Province were taken as the research object, carbon dioxide and air pollutant SO₂ were taken as the non-expected outputs, and the all-factor green production efficiency and emission reduction potential of carbon dioxide and air pollutants in Anhui Province during 2011~2019 were calculated by using the super-efficiency SBM model. The empirical results show that the average green total factor productivity of 13 cities in Anhui Province is lower than 1, and the carbon emission reduction and air pollution emission reduction potential is close to 30%, which has a large space for emission reduction. Using benchmarking management method, according to the carbon emission reduction and air pollution reduction potential of each city, the catch-up object and improvement path are determined. Ma'anshan, Huainan, Huaibei, Tongling and Fuyang are the key cities in Anhui Province to reduce carbon emission and reduce air pollution. Ma'anshan, Huainan, Huaibei and Tongling will be improved according to the "Changzhou-Hefei-Nantong" path. Fuyang chose the path of "Jinhua-Lishui". Wuhu chose the path of "Hangzhou-Nanjing-Nantong-Shanghai". Anqing and Bengbu chose the path of "Yancheng-Nantong".

Keywords

Collaborative Governance, Green Total Factor Productivity, Emission Reduction Potential, Super Efficient SBM Model, Benchmark Management

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为了解决日益严重的全球变暖问题，在 2020 年 9 月 22 日，中国政府提出了 2030 碳达峰和 2060 碳中和的目标。二氧化碳排放治理和大气污染治理在生态文明建设中处于同等重要的位置。众多科学研究表明，二氧化碳和大气污染物同根同源，存在很大的相关性，因此，对碳排放和大气污染进行协同治理，是必要的，也是可行的。推进碳排放和大气污染的协同治理，可以提高生态文明建设的效率，加快生态文明建设的进程。

国内外学者对碳排放和大气污染的协同治理进行了大量的研究，其成果主要集中在协同治理路径和协同治理效应评价两个方面。协同治理路径研究方面，毛显强等(2011)对协同减排技术进行了排序，发现前端控制和过程控制比末端治理效果更好，而且和污染物的构成有关[1]。Lee T 等(2013)对环境指标和碳排放的关系进行了研究，结果显示通过提高能源利用效率，减少大气污染物的排放，能够有效减缓气候变化[2]。Liang Q M 等(2016)运用投入产出模型，辨别出引起环境问题的主要行动，从而提出大气污染物和碳排放共同治理的有效控制方式[3]。陈菡等(2020)从控制措施、管理体系和区域协同等方面探讨协同治理的作用，分析了顶层政策机制、技术体系和资金支撑等方面影响协同治理的主要因素，最后提出应该把管理协同和技术协同做保障、区域协同作为手段[4]。王雨彤(2021)则是从法制的角度探讨了减污降碳协同治理的路径[5]。协同治理效应研究方面，Nam 等(2014)运用可计算一般均衡模型，研究了协同减排对政策组合反应强度方面中美之间的区别，发现两国反应程度均不高，而且中国的反应程度还要低于

美国[6]。Dong L 等(2014)研究了中国各省份碳排放和大气污染排放的空间关系,研究环境差异和不均衡的问题[7]。Zhang 等(2015)的研究表明,碳排放和污染物的交叉价格弹性、其他污染物的价格水平,以及边际损害成本是影响碳排放和大气污染协同治理效应的主要因素[8]。Radu 等(2016)研究了气候政策和空气污染政策对二氧化碳排放,以及大气污染物排放的影响[9]。Li X 等(2016)基于协同效应的理论框架,对中国大气污染治理政策和二氧化碳减排的关系进行了实证研究[10]。汪斌等(2018)应用情景分析法,基于电力行业的数据,研究了大气污染排放和碳排放之间的数量关系[11]。王敏等(2021)研究了工业企业 NOx 和碳排放的协同治理效应[12]。综上所述,国外研究成果多聚焦于欧洲、美国等发达国家和地区,国内则倾向于关注电力、水泥、钢铁等工业部门或交通部门,对区域大气污染物排放和碳排放协同治理的研究相对较少。因此,基于长三角一体化的背景,以区域内先进城市作为标杆,研究安徽省碳排放和大气污染协同治理的问题,提出减污降碳协同路径,有利于协同实现安徽省碳排放达峰和空气质量达标,促进安徽省经济的高质量发展,加快长三角区域一体化的进程。

2. 研究方法

2.1. 基于非期望产出的超效率 SBM 模型

DEA 模型,也就是数据包络分析模型,是一种用于评价具有相同类型投入和产出的若干决策单元(DMU)相对效率的方法。最早是在 1978 年,Charnes 和 Cooper (1978)基于 Farrell (1957)的效率测度理论提出了基于规模报酬不变假设的 CCR 模型[13] [14]。后来,Banker 等(1984)提出了基于规模报酬可变假设的 BCC 模型[15]。针对传统的 CCR 模型和 BCC 模型存在的难以区分有效决策单元效率水平的差异和各决策单元投入要素“松弛”等问题,Andersen & Petersen (1993)、Tone (2001)分别提出超效率 DEA 模型和非径向非角度的 SBM 模型[16] [17]。因为在生产中会不可避免的产生一些废水、废气和废渣等非期望产出,Tone (2010)又提出了包含非期望产出的超效率 SBM 模型[18]。该模型一是处理了投入产出变量存在的松弛性问题,二是考虑到了“坏产出”的影响,三是解决了有效决策单元 DMU 之间效率水平难以区分的问题。模型构建如公式(1)所示。

$$\min \rho = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{ik}}}{1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \frac{s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{s_t^{b-}}{b_{tk}} \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq k}^n x_{ij} \lambda_j - \bar{s}_i^- \ll x_{ik} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n y_{rj} \lambda_j + s_r^+ \gg y_{rk} \\ \sum_{j=1, j \neq k}^n b_{tj} \lambda_j - s_t^{b-} \ll b_{tk} \\ 1 - \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} \frac{s_r^+}{y_{rk}} + \sum_{t=1}^{q_2} \frac{s_t^{b-}}{b_{tk}} \right) > 0 \\ \lambda, s^-, s^+ \gg 0 \\ i = 1, 2, \dots, m; r = 1, 2, \dots, q_1; t = 1, 2, \dots, q_2; j = 1, 2, \dots, n (j \neq k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ 是能源生态效率值, m 表示投入指标的个数, q_1 表示期望产出指标的个数, q_2 表示非期望产出指标的个数, n 是 DMU 的个数, x_{ij} 、 y_{rj} 和 b_{tj} 分别表示第 j 个 DMU 的 m 维投入变量、 q_1 维期望产出变

量和 q_2 维非期望产出变量, λ_j 表示强度变量, $\bar{s}_i^-$ 、 s_r^+ 和 s_i^{b-} 分别代表被评价 DMU 的投入、期望产出和非期望产出的松弛变量, x_{ik} 、 y_{rk} 和 b_{ik} 分别表示被评价 DMU 的投入变量、期望产出变量和非期望产出变量。若 $\rho < 1$, 则说明被评价的 DMU 无效, 若 $\rho \geq 1$, 则说明被评价的 DMU 有效, 而且 ρ 值越大效率越高。

2.2. 减排潜力测算模型

本文参照魏楚等(2010)、王兵等(2016)的研究思路, 将减排潜力定义为 PER_{it} 。 PER_{it} 值越大, 表示过度排放的 CO_2 , 或者过多的空气污染物, 减排潜力也越大。具体公式如下所示[19] [20]。

$$PER_{it} = \frac{LCE_{it}}{CE_{it}} \quad (2)$$

其中, CE_{it} 表示第 i 个城市在 t 年实际排放的 CO_2 , 或者大气污染物; LCE_{it} 则表示与最优生产前沿相比多排放的 CO_2 , 或者多排放的大气污染物, 也就是 CO_2 排放量, 或者大气污染物的松弛变量。

2.3. 标杆管理

标杆管理是一种有效的管理方法, 起源于二十世纪八十年代的施乐公司。其实质是根据一定的标准或方法, 确定最佳实践标杆, 也就是其他组织学习或追赶的对象。通过树立标杆, 后进组织或者对象, 就有了改进的方向指引, 也可以借鉴标杆对象的先进经验, 从而改进缺陷, 缩短与标杆对象的距离, 从而尽早实现组织目标。目前, 标杆管理已经广泛的应用到各个领域。国内有不少学者也把标杆管理方法应用到环境治理领域, 确定标杆对象的标准有能源效率、碳排放强度等[21] [22]。

3. 指标选取和数据来源

3.1. 指标选取

参照大多数学者关于全要素绿色生产率的研究成果, 本文以劳动力、资本存量及能源消费作为投入指标, 国民生产总值 GDP 作为期望产出[23] [24]。 CO_2 排放量作为非期望产出方面, 由于城市层面大气污染物统计指标差别较大, 只有 SO_2 排放指标是一致的, 而且基本没有缺失值, 故选用 SO_2 作为大气污染的指标。因此, 把 SO_2 排放量和 CO_2 排放量作为非期望产出。其中, 劳动力指标用各城市的全社会从业人员数表示; 资本存量指标用各城市固定资产投资额表示; 考虑到数据的可得性, 按照杨振华(2016)的做法, 将城市电力、煤气(人工、天然气)和液化气消耗量转换为能源消费指标, 计量单位万吨标准煤[25]; CO_2 排放量指标是按照吴建新和郭智勇(2016)的做法, 将电力、煤气、液化气、交通运输和热能等消耗排放的 CO_2 估算汇总得出[26]。

3.2. 数据来源

本文数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和各地市统计年鉴, 以及 EPS 数据库。为保证可比性, 根据每年当年价 GDP、不变价 GDP (以 1978 年为基期)、GDP 指数(以 1978 年为基期)计算出每年的平减指数, 将当年价 GDP 平减为以 2000 年为基期的 GDP。资本存量指标是按照单豪杰(2008)的做法, 换算为以 2000 年为基期的金额[27]。

4. 实证分析结果

4.1. 安徽省全要素绿色生产率分析

基于非期望产出的超效率 SBM 模型, 应用 MAXDEA 8.0 软件对长三角 41 个城市 2011~2019 年的绿

色全要素生产率进行了测算，具体结果如图 1 所示。安徽省在 2011~2019 年有安庆、马鞍山、蚌埠、芜湖、淮南等共 13 城市的能源生态效率均值低于 1，处于无效率状态，占全省城市数的 81%。仅有黄山、池州和亳州等三个城市的能源生态效率效率值大于 1。究其原因主要是受工业化程度的影响，马鞍山、蚌埠、芜湖、淮南等城市都属于安徽省内工业化程度较高的城市，而黄山和池州以旅游为主，亳州的第二产业占比相对较少，因此，绿色全要素生产率值较高。长三角区域中，上海市最为突出，其效率都优于其他城市。

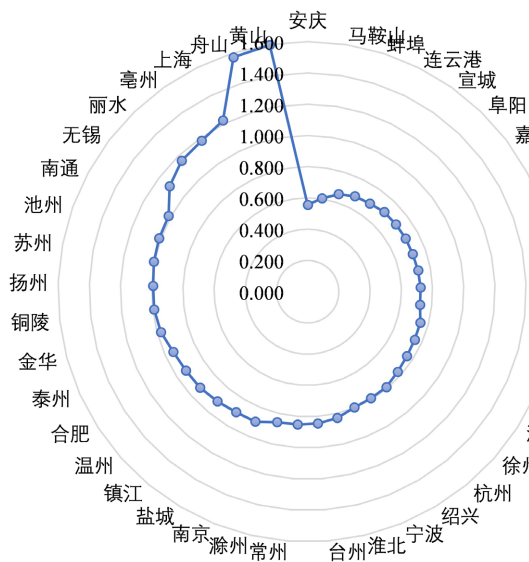


Figure 1. Average total factor green productivity of cities in the Yangtze River Delta from 2011 to 2019
图 1. 2011~2019 年长三角各城市全要素绿色生产率均值

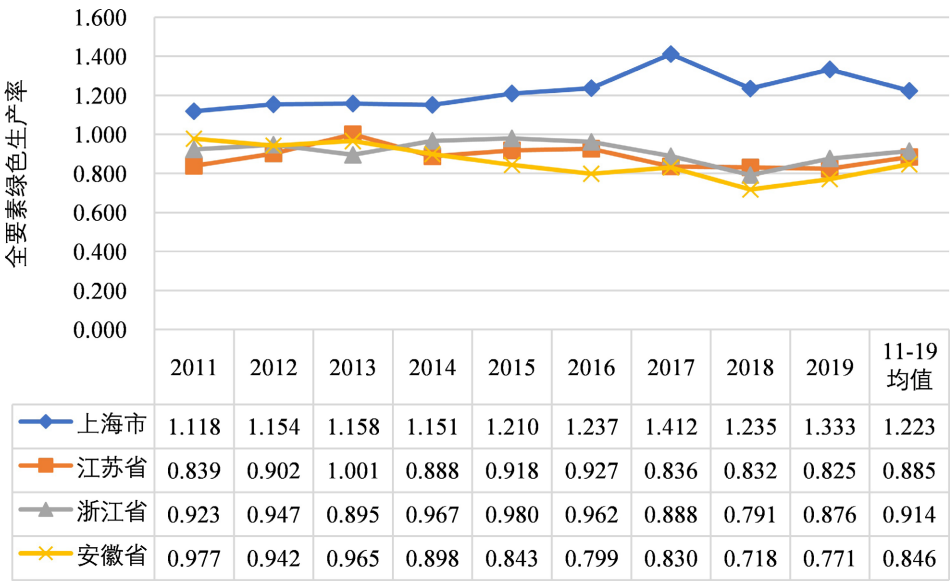


Figure 2. Trends in green total factor productivity in various regions of the Yangtze River Delta from 2011 to 2019
图 2. 2011~2019 年长三角各地区绿色全要素生产率变化趋势

再从绿色全要素生产率变化趋势的角度进行比较(图 2)，发现在长三角区域中，上海市显示出稳步上

升、遥遥领先的态势，而安徽省则呈现出明显下降的趋势，整体处于无效率的状态，在四大区域中处于最差的位置，而且远远落后于上海市。相比而言，安徽省的工业化程度要显著低于上海市，但是能源生态效率值却低于上海市。这说明安徽省各个城市在控制二氧化碳排放和大气污染物排放方面有很大的不足，这需要采取相应的措施去改进。

4.2. 安徽省碳排放和大气污染减排潜力分析

Table 1. Average CO₂ and SO₂ emission reduction potentials of cities in the Yangtze River Delta from 2011 to 2019
表 1. 2011~2019 年长三角各城市 CO₂ 减排和 SO₂ 减排潜力均值

城市	可减少 CO ₂ 量(万吨)	CO ₂ 减排 潜力(%)	可减少 SO ₂ 量(万吨)	SO ₂ 减排 潜力(%)	城市	可减少 CO ₂ 量(万吨)	CO ₂ 减排 潜力(%)	可减少 SO ₂ 量(万吨)	SO ₂ 减排 潜力(%)
上海市	0.00	0.00	0.00	0.00	常州	769.20	25.24	6801.76	28.84
蚌埠	140.77	33.19	365.43	11.55	淮安	338.01	41.79	12291.53	45.56
亳州	0.00	0.00	0.00	0.00	连云港	303.37	41.04	10308.38	42.86
池州	53.95	10.08	1255.58	15.24	南京	756.44	21.89	9886.86	11.33
滁州	174.32	14.62	1358.32	20.54	南通	58.23	3.97	701.67	1.93
阜阳	179.94	35.91	10809.85	44.60	苏州	1557.13	14.09	18230.67	27.63
合肥	66.59	3.95	2382.80	13.23	宿迁	319.96	41.12	4142.27	29.00
淮北	119.25	35.42	20211.19	67.99	泰州	166.58	8.19	4704.68	29.53
淮南	235.33	45.18	27791.32	65.49	无锡	0.00	0.00	0.00	0.00
黄山	0.00	0.00	0.00	0.00	徐州	427.33	25.06	45433.99	57.81
六安	95.95	23.09	3.20	0.14	盐城	196.82	11.30	4306.64	28.43
马鞍山	685.40	62.15	31369.32	79.44	扬州	45.18	5.89	1108.61	2.47
宿州	104.90	34.56	7358.48	38.23	镇江	234.83	14.13	11806.39	39.02
铜陵	199.73	32.65	5668.75	40.86	江苏合计	397.93	19.52	9978.73	26.49
芜湖	258.75	25.50	13948.54	55.02	衢州	417.76	51.89	22145.29	72.21
宣城	188.00	29.30	2812.36	27.19	杭州	1078.17	24.39	12366.19	32.57
安庆	289.22	50.96	1313.30	21.68	湖州	515.74	42.51	16490.49	60.12
安徽合计	174.51	27.29	7915.53	31.33	嘉兴	899.60	44.51	24296.55	56.52
					金华	426.39	16.13	3101.45	25.84
					丽水	82.30	11.05	1401.27	19.20
					宁波	1120.94	29.05	38659.97	51.41
					绍兴	884.97	32.89	12081.37	39.56
					台州	350.47	24.86	2702.53	24.01
					温州	365.96	13.60	2032.81	20.28
					舟山	0.00	0.00	0.00	0.00
					浙江合计	558.39	26.44	12297.99	36.52

从二氧化碳和大气污染物的减排潜力来看，安徽省各地市以及总体状况不佳。如表 1，总体来看，

2011~2019 年间安徽省 16 个地市可减少的 CO₂ 排放量年均 174.51 万吨，减排潜力 27.29%，可减少的 SO₂ 排放量年均 7915.53 万吨，减排潜力 31.33%。二氧化碳和大气污染物的减排潜力从总量和比例来看，都是比较大的。其中，马鞍山、淮南、淮北、铜陵、阜阳等城市的二氧化碳和大气污染物的减排量都很大，所占比例都超过 30%，面临很大的减排压力。黄山、池州和亳州，基本没有减排的压力。如图 3，相比安徽省，上海市大气污染和碳排放的减排压力基本为 0，江苏省和浙江省各城市的减排压力也较小，应该作为安徽省各地市学习追赶的目标。

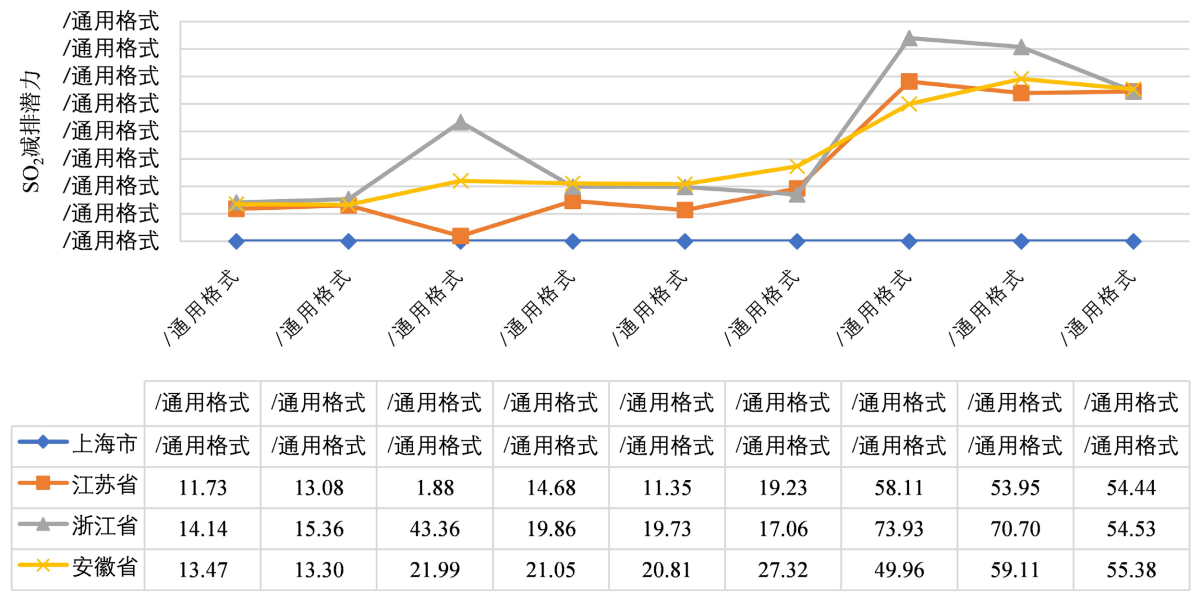


Figure 3. Trends in SO₂ emission reduction potential in various regions of the Yangtze River Delta from 2011 to 2019
图 3. 2011~2019 年长三角各地区 SO₂ 减排潜力变化趋势

4.3. 安徽省碳排放和大气污染协同减排实施路径和措施

为了明确安徽省各地市碳减排和大气污染减排的重点，根据 2011~2019 年间各城市节能潜力和减排潜力的均值，运用二维矩阵法，以节能潜力 30%和减排潜力 30%为分界线，将长三角区域 41 个城市划分为四个区域，其中：A 区域属于碳减排和大气污染减排双低的区域，其特点是碳减排和大气污染减排水平处于较好的状态，协同治理效应最高，是值得其他城市学习追赶的模范城市；B 区域属于“SO₂ 高减排 CO₂ 低减排”的区域，其特点是碳排放控制水平较搞，大气污染控制水平较低；C 区域属于碳减排和大气污染减排双高的区域，其特点是大气污染及碳排放控制水平较低，两方面减排的空间都很大。

从图 4 可以看出，在安徽省 16 个城市中，马鞍山、淮南、淮北、铜陵和阜阳等城市处于 C 区域，是安徽省碳减排和大气污染减排协同治理的重点城市，任务最重。马鞍山、淮南、淮北、铜陵，都是资源型城市，其产业结构共同的特征是以高能耗高排放企业为主。钢铁企业、火电企业和煤矿企业等高能耗高排放企业是当地支柱产业，所占比例很高，而且正处于转型发展的关键期。运用标杆管理的方法，这四个城市应该选择 A 区域中第二产业占比相对较高的城市作为追赶对象，可以沿着“常州 - 合肥 - 南通”的路径，进行改进。在加强监管的同时，重点是加大科技创新力度，积极推进这些城市高能耗高排放企业的技术升级和产能的优化，同时加大战略性新兴产业的支持力度，促进产业结构的优化和调整。阜阳的工业化程度相对较低，农业占比较大，可以选择 A 区域中的金华、丽水作为追赶的对象。芜湖处于 B 区域，工业化程度比较高，高科技产业占比也在逐年上升，因此，可以选择“杭州 - 南京 - 南通 - 上海”

的路径进行改进。安庆和蚌埠处于 D 区域,面临的压力是减少 CO₂ 排放。石油化工企业是安庆市的支柱产业,蚌埠市这事以玻璃制造业和化工企业为主,这些行业也属于高能耗高排放企业为主。因此,安庆和蚌埠应该按照“盐城-南通”的路径进行改进。六安、芜湖、滁州、合肥等 8 个城市处于 A 区域,减排压力较小。

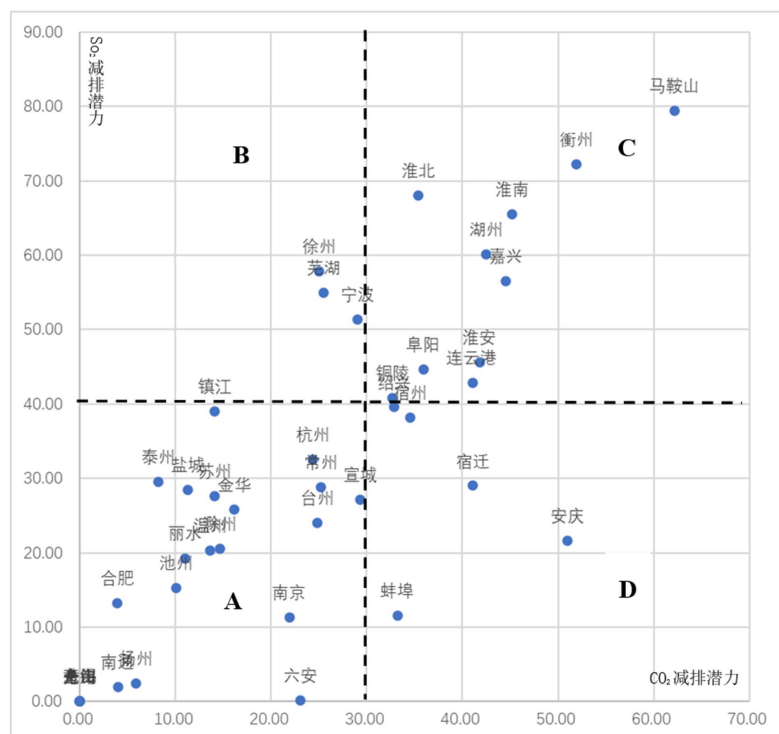


Figure 4. CO₂ emission reduction potential and SO₂ emission reduction potential status matrix
图 4. CO₂ 减排潜力和 SO₂ 减排潜力状态矩阵

5. 结论

十四五期间是安徽省实现生态文明建设目标的关键期。基于长三角一体化背景,运用超效率 SBM 模型,对 2011~2019 年间安徽省全要素绿色生产率进行了测算。研究结果显示,安徽省有 13 个城市的全要素绿色生产率处于无效率的状态,而且呈现持平并下降的趋势,总体情况落后于长三角其他区域。安徽省各地市碳排放和大气污染减排潜力较大,总体均值接近 30%,个别城市的均值甚至超过 60%,显示出较大的改进空间。运用二维矩阵法将长三角区域 41 个城市划分为四个区域,运用标杆管理方法,根据安徽省各个城市碳减排和大气污染减排的潜力情况,确定相应的追赶对象和改进路径,以实现大气污染和碳排放协同治理的目标。经过比较分析,确定马鞍山、淮南、淮北、铜陵和阜阳等城市为安徽省碳减排和大气污染减排协同治理的重点城市。马鞍山、淮南、淮北、铜陵可以采用“常州-合肥-南通”的改进路径。阜阳选择金华和丽水作为学习对象去改进。芜湖可以选择“杭州-南京-南通-上海”的改进路径。安庆和蚌埠则按照“盐城-南通”的改进路径。

本文的研究是基于长三角区域一体化的背景，拓展了减污降碳协同治理研究的范围。其次，将标杆管理的思想应用于减污降碳的研究，以区域内先进城市作为标杆，提出安徽省碳排放和大气污染协同治理的路径，提高了研究成果的应用性，能够有效促进安徽省碳排放达峰和空气质量达标，实现安徽省经济的高质量发展。

基金资助

安徽省哲学社会科学规划项目研究成果, 项目号: AHSKY2019D097。

参考文献

- [1] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 邢有凯, 刘胜强. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(12): 1-7.
- [2] Lee, T. and van de Meene, S. (2013) Comparative Studies of Urban Climate Co-Benefits in Asian Cities: An Analysis of Relationships between CO₂ Emissions and Environmental Indicators. *Journal of Cleaner Production*, **58**, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.047>
- [3] Liang, Q., Deng, H. and Liu, M. (2016) Co-Control of CO₂ Emissions and Local Pollutants in China: The Perspective of Adjusting Final Use Behaviors. *Journal of Cleaner Production*, **131**, 198-208. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.048>
- [4] 陈菡, 陈文颖, 何建坤. 实现碳排放达峰和空气质量达标的协同治理路径[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 12-18.
- [5] 王雨彤. “双碳”背景下中国减污降碳协同治理的法治化路径[J]. 世界环境, 2021(4): 88-89.
- [6] Nam, K., Waugh, C.J., Paltsev, S., Reilly, J.M. and Karplus, V.J. (2014) Synergy between Pollution and Carbon Emissions Control: Comparing China and the United States. *Energy Economics*, **46**, 186-201. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.08.013>
- [7] Dong, L. and Liang, H. (2014) Spatial Analysis on China's Regional Air Pollutants and CO₂ Emissions: Emission Pattern and Regional Disparity. *Atmospheric Environment*, **92**, 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.032>
- [8] Zhang, S., Worrell, E. and Crijns-Graus, W. (2015) Evaluating Co-Benefits of Energy Efficiency and Air Pollution Abatement in China's Cement Industry. *Applied Energy*, **147**, 192-213. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.081>
- [9] Radu, O.B., Maarten, V.D.B., Klimont, Z., et al. (2016) Exploring Synergies between Climate and Air Quality Policies Using Long-Term Global and Regional Emission Scenarios. *Atmospheric Environment*, **140**, 577-591.
- [10] Li, X., Qiao, Y. and Shi, L. (2017) The Aggregate Effect of Air Pollution Regulation on CO₂ Mitigation in China's Manufacturing Industry: An Econometric Analysis. *Journal of Cleaner Production*, **142**, 976-984. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.015>
- [11] 汪斌, 张欣欣, 解玉磊. 京津冀电力结构调整大气污染物及 CO₂ 减排效应研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 734-738.
- [12] 王敏, 冯相昭, 杜晓林, 吴莉萍, 赵梦雪, 王鹏, 安祺. 工业部门污染治理协同控制温室气体效应评价——基于重庆市的实证分析[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 296-304.
- [13] Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E. (1978) Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, **2**, 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- [14] Farrell, M.J. (1957) The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, **120**, 253-290. <https://doi.org/10.2307/2343100>
- [15] Banker, R.D., Charnes, A. and Cooper, W.W. (1984) Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, **30**, 1078-1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- [16] Andersen, P. and Petersen, N.C. (1993) A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, **39**, 1261-1264. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.10.1261>
- [17] Tone, K. (2001) A Slacks-Based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, **130**, 498-509. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00407-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00407-5)
- [18] Tone, K. (2010) Variations on the Theme of Slacks-Based Measure of Efficiency in Dea. *European Journal of Operational Research*, **200**, 901-907. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.027>
- [19] 魏楚, 杜立民, 沈满洪. 中国能否实现节能减排目标: 基于 DEA 方法的评价与模拟[J]. 世界经济, 2010, 33(3): 141-160.
- [20] 王兵, 杨雨石, 赖培浩, 於露瑾. 考虑自然环境差异的中国地区能源效率与节能减排潜力研究[J]. 产经评论, 2016, 7(1): 82-100.
- [21] 何伟, 刘帅, 宋国君. 城市能源利用效率评估[J]. 统计与决策, 2019, 35(24): 64-67.
- [22] 周曙东, 宛睿. 基于先进标杆理念的二氧化碳减排潜力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(4): 23-31.

- [23] 杜俊涛, 陈雨, 宋马林. 财政分权、环境规制与绿色全要素生产率[J]. 科学决策, 2017(9): 65-92.
- [24] 李静, 王姝兰. 基于偏向型技术进步的中国工业绿色生产率及分解——兼论偏向型技术的节水和减排效应[J]. 华东经济管理, 2020, 34(9): 30-42.
- [25] 杨振华. 要素价格扭曲、FDI 与城市能源效率——基于地级市层面的实证研究[J]. 金融与经济, 2016(12): 26-31.
- [26] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. 统计研究, 2016, 33(1): 54-60.
- [27] 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.