

分类号 C8/346
U D C 0005020

密级 公开
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 “碳中和”目标下中国省域碳排放效率测算及分析

研究生姓名: 牛士豪

指导教师姓名、职称: 韩君、教授

学科、专业名称: 统计学、应用统计硕士

研究方向: 经济统计应用

提交日期: 2023年5月30日

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 牛士豪 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 韩磊 签字日期： 2023.5.30

导师(校外)签名： 张亚东 签字日期： 2023.5.30

关于论文使用授权的说明

本人完全了解学校关于保留、使用学位论文的各项规定， 同意 (选择“同意”/“不同意”) 以下事项：

- 1.学校有权保留本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文；
- 2.学校有权将本人的学位论文提交至清华大学“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”用于出版和编入CNKI《中国知识资源总库》或其他同类数据库，传播本学位论文的全部或部分内容。

学位论文作者签名： 牛士豪 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 韩磊 签字日期： 2023.5.30

导师(校外)签名： 张亚东 签字日期： 2023.5.30

**Calculation and analysis of China's
provincial carbon emission efficiency under
the "carbon neutral" goal**

Candidate: Niu Shihao

Supervisor: Han Jun

摘 要

近年来,随着全球气候的不断恶化,温室气体减排成为当前世界各国应对气候变化的根本措施,也是人们重新审视和思考历史发展的进程后,作出的一项必要决策。为了切实解决发展过程中存在的碳排放问题,习总书记在第 75 届联合国会议上提出了碳达峰、碳中和目标,这是我国在推进构建人类命运共同体和可持续发展内在需求的基础上,作出的重要战略决定。碳中和目标的提出不仅展示了我国负责任大国的担当,同时也契合了新发展理念中绿色发展的要求。

碳中和目标虽然是在 2020 年提出,但其低碳环保的理念早在 20 世纪 90 年代就已经开始在国内广为传播,故本文将“碳中和”与碳排放效率相结合,选取 2005-2020 年中国各省相关数据,构建 DEA 模型的投入产出指标体系,并在此基础上采用三阶段 DEA 模型对我国各省在碳中和目标下的碳排放效率进行测算,根据测算结果分析产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率的影响,同时对碳排放效率的空间演变特征及改进路径进行分析,最后采用 Malmquist-Lunenberger 指数模型对碳排放效率进行动态分析。

通过分析得出以下结论:(1)“碳中和”目标对我国部分省份的碳排放效率呈现出抑制作用,但从我国整体来看促进了碳排放效率的提高,DEA 模型第三阶段效率值测算结果表明,我国虽部分地区效率值偏低,但从整体来看我国的碳排放效率较高,于 2060 年实现“碳中和”的目标有较强可行性。(2)第二阶段 SFA 回归的检验结果表明:相比于随机因素,外部环境因素和管理无效率对碳排放效率存在较大影响,SFA 回归中产业结构、城镇化水平和环境规制对各生产要素的投入均有显著影响。(3)我国各省的碳排放效率存在较为明显的空间差异,总体呈现出东部>中部>西部的空间演变特征,中部地区和东部地区碳排放效率为上升趋势,东部地区的上升速度较快,而西部地区的碳排放效率则是呈现出 U 型增长。(4)在改进路径上,效率较低的省份可以通过优化外部环境和调整生产要素投入比例从而提高碳排放效率,目前我国多数省份在产业结构、城镇化水平和环境规制中与当地的碳排放效率存在不协调,效率较低省份的外部环境因素所能带来的增长效益存在较大上升空间,同时 Malmquist-Lunenberger 指数模型的

分析结果表明,技术效率抑制了碳排放效率的进一步提升技术,而技术进步可作为提升我国碳排放效率的间接方式。

基于上述结论并结合“碳中和”目标,对绿色经济、产业结构、城镇化水平、环境规制、低碳技术创新和城市森林碳储量提出相应的政策建议:加快发展绿色经济,提高地区整体经济水平;在推动新型城镇化的发展进程中,提升城市群建设和环境规制的效能;要以推进现代产业体系构建为契机,精准实施新发展阶段产业结构的调整;应以创新驱动为引领,加强低碳技术创新体系的建设和完善;以加强生态文明建设为总目标,着力提升森林生态系统增汇固碳能力。

关键词: 碳中和 碳排放效率 三阶段 DEA 模型 ML 指数模型 改进路径

Abstract

In recent years, with the continuous deterioration of the global climate, greenhouse gas emission reduction has become the fundamental measures for countries to cope with climate change. It is also a necessary decision made by people after re-examining and thinking about the historical process. The proposal of carbon neutralization goal not only demonstrates the responsibility of our major responsible country, but also conforms to the requirements of green and low carbon development in the new development concept.

Although the goal of carbon neutrality was proposed in 2020, the concept of low carbon and environmental protection had been widely spread in China as early as the 1990s. Therefore, this paper combined "carbon neutrality" with carbon emission efficiency, selected the relevant data of Chinese provinces from 2005 to 2020, and combined the goal of carbon neutrality with carbon emission efficiency. A new input-output index system with DEA was built. On this basis, three-stage DEA model was used to measure the carbon emission efficiency in every province in our country under carbon neutralization target. The influence of industrial structure, urbanization level and environmental regulation on carbon emission efficiency was analyzed according to the calculation results, and the spatial evolution characteristics and improvement path of carbon emission efficiency were analyzed. Finally, the Malmquist-Lunenberger

index model was used to analyze the dynamic carbon emission efficiency.

The following conclusions can be drawn from the analysis: (1) The goal of "carbon neutralization" has an inhibitory effect on the carbon emission efficiency of some provinces, but it promotes the improvement of carbon emission efficiency from the perspective of China as a whole. The calculation results of the efficiency value in the third stage of DEA model show that although the efficiency value of some regions in China is low, the overall carbon emission efficiency is high. The goal of becoming "carbon neutral" by 2060 is highly feasible. (2) The test results of the second stage of SFA regression show that, compared with random factors, external environmental factors and management inefficiency have a greater impact on carbon emission efficiency. In SFA regression, industrial structure, urbanization level and environmental regulation all have a significant impact on the input of production factors. (3) There are obvious spatial differences in the carbon emission efficiency of Chinese provinces, showing the overall spatial evolution characteristics of east > central > west. The carbon emission efficiency of central and eastern regions shows an upward trend, while the eastern region shows a faster rise, while the western region shows a U-shaped growth. (4) On the improvement path, provinces with lower efficiency can improve carbon emission efficiency by optimizing the external environment and adjusting the proportion of input of production factors. At present, most of our provinces in industrial

structure, urbanization level and environmental regulation are not in harmony with local carbon emission efficiency. The growth benefit brought by external environmental factors of provinces with lower efficiency has great room for improvement. At the same time, the analysis result of Malmquist-Lunenberger index model shows that technological efficiency inhibits the further improvement of carbon emission efficiency, and technological progress can be an indirect way to improve Chinese carbon emission efficiency.

Based on the above conclusions and combined with the goal of "carbon neutrality", the corresponding policy suggestions are put forward for green economy, industrial structure, urbanization level, environmental regulation, low-carbon technology innovation and urban forest carbon storage: accelerate the development of green economy and improve the overall regional economic level; In the process of promoting the development of new urbanization, improve the effectiveness of urban agglomeration construction and environmental regulation; To promote the construction of a modern industrial system as an opportunity to accurately implement the adjustment of the industrial structure in the new development stage; The construction and improvement of low-carbon technology innovation system should be strengthened under the guidance of innovation drive. With the overall goal of strengthening ecological civilization construction, efforts should be made to enhance the capacity of

forest ecosystem to increase carbon sequestration.

Key words: Carbon neutralization; Carbon emission efficiency; Three-stage DEA model; ML index model; Improved path

目 录

1 引 言	1
1.1 研究背景与研究意义	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 文献综述	3
1.2.1 碳达峰、碳中和的相关研究.....	3
1.2.2 碳排放效率的研究.....	3
1.2.3 碳排放效率影响因素的研究.....	5
1.2.4 简要评述.....	6
1.3 研究内容与框架	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 研究框架.....	8
1.4 研究方法和创新点	10
1.4.1 研究方法.....	10
1.4.2 创新点.....	11
2 相关概念和理论基础	12
2.1 相关概念	12
2.1.1 碳达峰、碳中和.....	12
2.1.2 碳排放.....	12
2.1.3 碳排放效率.....	13
2.2 理论基础	14
2.2.1 低碳经济学相关理论.....	14
2.2.2 可持续发展理论.....	15
2.2.3 环境经济学理论.....	16
3 碳中和目标下碳排放效率的测算	18
3.1 测算方法的选择.....	18

3.2 确定决策单元.....	18
3.3 模型方法的基本原理.....	19
3.3.1 三阶段 DEA 模型.....	19
3.3.2 Malmquist-Lunenberger 指数模型.....	21
3.4 指标体系的建立原则.....	21
3.5 指标体系的构建.....	22
3.6 数据来源及处理.....	26
3.7 碳中和目标在碳排放效率中的体现.....	26
3.8 第一阶段和第三阶段效率值测算结果.....	27
4 碳中和目标下中国省域碳排放效率分析.....	28
4.1 指标数据分析.....	28
4.1.1 空间维度分析.....	28
4.1.2 时间维度分析.....	29
4.2 第一阶段碳排放效率测算结果分析.....	31
4.3 第二阶段 SFA 回归结果分析.....	31
4.3.1 产业结构影响分析.....	32
4.3.2 城镇化水平影响分析.....	33
4.3.3 环境规制影响分析.....	33
4.4 第三阶段效率测算结果分析.....	34
4.4.1 整体分析.....	34
4.4.2 环境变量对碳排放效率的影响.....	34
4.4.3 碳排放效率空间演变特征分析.....	36
4.4.4 碳排放效率提高路径分析.....	39
4.5 碳中和对碳排放效率的影响.....	42
4.5.1 整体层面分析.....	42
4.5.2 省域层面分析.....	43
4.6 Malmquist-Lunenberger 指数动态分析.....	44
4.6.1 空间效应分析.....	44
4.6.2 时间效应分析.....	46

5 结论与建议	48
5.1 主要结论	48
5.2 政策建议	50
5.3 不足与展望	52
参考文献	53
附录	57
致谢	61

1 引言

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

随着全球经济的不断增长,各国二氧化碳排放量也在不断增加,全球温室气体猛增,对生态系统形成严重威胁,由此导致的气候变化及负面影响已成为全人类共同面临的迫切问题和严峻挑战。为此在 2015 年的巴黎气候大会上,178 个国家达成了共识,同意并签署了《巴黎气候变化协定》,将全球平均气温上升幅度控制在低于工业化水平前 2 摄氏度、努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内作为长期以来的目标^[1]。中国作为有责任担当的大国,一直以来非常重视气候变化问题,从 2000 年发布的《中华人民共和国大气污染防治法》,到 2014 年提出的《国家应对气候变化规划》,再到 2020 年在第 75 届联合国大会上提出的“碳中和”目标,不仅体现了我国在改善全球气候问题上自主贡献力的不断提高,也为中国城市推进低碳建设、零碳高质量发展提供了政策方向。“碳中和”目标的实现不仅能有效解决我国在经济发展过程中的碳排放问题,助力全球达成净零二氧化碳排放,同时也顺应了全球疫情后实现绿色复苏与低碳变革的潮流。然而,减排目标的实现绝非易事,一方面,能源资源的消耗作为碳排放焦点,以其作为主要驱动力的第二产业在碳排放效率上仍然存在较大的技术问题;另一方面,我国不同地区、不同行业的经济水平和碳汇潜力也存在较为严重的发展不平衡、不充分现象,“碳中和”目标的实现任重而道远。

党的十八大以来,习近平总书记就走低碳发展道路发表一系列重要论述、作出一系列重要部署,为推进“碳中和”工作提供了科学指引^[2]。因此,在“碳中和”目标下提高碳排放效率不仅是新时代景下的焦点,同时也是实现高质量发展的内在要求。“碳中和”目标的实现本质上是净零二氧化碳排放量不断减少的过程,要实现这个目标,一方面要减少碳源,提升绿色低碳科技创新能力,促进经济绿色低碳转型,另一方面要增加碳汇,提高二氧化碳的吸收和固定^[3]。基于此,本文将“碳中和”作为最终目标来对我国各省的碳排放效率进行测算,从碳源和碳汇两个角度出发,将低碳技术创新和城市森林碳储量作为反映“碳中和”目标的两个生

产要素引入投入指标体系, 测算碳排放效率。通过不同阶段的效率值对比分析环境变量对不同地区碳排放效率的影响, 对提高碳排放效率的实现路径及其在城市森林碳储量和低碳技术创新中存在的发展潜力进行分析, 同时借鉴复合 DEA 的思想, 分析“碳中和”目标在不同地区存在的影响。

1.1.2 研究意义

提高碳排放效率是实现可持续发展的必然选择, 是对高能耗、高污染的传统经济发展方式的否定, 是中国新时代经济发展的新任务^[4]。而“碳达峰”和“碳中和”目标的提出正是为了解决经济发展过程中的碳排放问题, 从而提高碳排放的效率。在具体研究过程中, 采用三阶段 DEA 模型引入环境变量去测算碳中和目标下的碳排放效率, 分析碳中和目标对各省碳排放效率的影响以及所存在的空间演变特征, 同时通过分析 DEA 模型第一阶段和第三阶段效率值的变化得出环境变量对碳中和目标下各省碳排放效率的影响, 对效率值较低的地区进行改进路径分析, 对各地区提高碳排放效率, 助力碳中和最终目标的实现具有重要的理论意义和现实意义。

(1) 理论意义

目前学术界大多采用 DEA 模型的方法对碳排放效率进行测算, 采用的 DEA 模型投入产出指标大同小异, 投入生产要素主要围绕劳动力、资本和能源展开, 产出指标为国内生产总值和二氧化碳排放量。本文将碳中和与碳排放效率相结合, 构建新的投入产出指标体系, 在劳动力、资本和能源的基础上, 从二氧化碳减排和二氧化碳吸收的角度出发, 构建能反映碳源和碳汇的指标, 分别为低碳技术创新和森林碳储量, 该指标体系的构建将实现碳中和所必须投入的碳源和碳汇这两个生产要素引入投入产出指标体系后去测算在碳中和目标下我国各省的碳排放效率, 可以为其他地区的碳排放效率评价或者其他效率评价提供了一定的理论参考, 具有理论意义。

(2) 现实意义

将我国 30 个省份 (西藏、香港、澳门和台湾除外) 作为研究对象, 测算碳中和目标下的我国各省的碳排放效率, 为碳中和目标下我国各省的碳排放效率

评价提供了参考依据。通过三阶段 DEA 模型得出产业结构、城镇化水平和环境规制对各省碳排放效率的影响，并对低效率省份所存在的问题进行分析，使得各省在环境变量方面对自身碳排放效率的影响有进一步的认识，因地制宜的制定相关政策，为调整自身生产要素投入结构，提高碳排放效率提供改进路径。

1.2 文献综述

1.2.1 碳达峰、碳中和的相关研究

通过对文献的梳理可以发现，碳达峰与碳中和的主要研究领域包括三个方面：碳达峰与碳中和的影响因素、碳达峰与碳中和的具体实现路径，以及碳达峰与碳中和在实现过程中所面临的挑战与机遇^[5]。对碳达峰与碳中和产生影响的主要因素可分为三点，分别是能源、技术和经济；实现碳达峰与碳中和的途径主要是改变能源结构、发展低碳科技以及传统生产思维方式的变革^[6]；碳达峰与碳中和目标的实现会对我国能源产业、交通运输产业、电力产业、金融产业等产生较大的冲击，推动其走上绿色发展道路，推动其实现经济的低碳发展^[7]。现有的对碳达峰、碳中和的研究主要集中在能源、技术、经济、行业这种宏观层面，而对省级、市级、县级、个人这种微观层面的研究较少。提高碳减排不应只关注宏观政策的制定，还应考虑如何落实，比如大型城市需要更多地落实能源结构的转型，而小城市需要集中关注如何节能减排。此外，现有研究大多只是提出改进的观点与建议，没有真正落到实处去实践，仍停留在理论研究阶段，实证分析类的研究较少。总之，碳达峰与碳中和相关问题的研究还存在很多空白，有待深入探讨。

1.2.2 碳排放效率的研究

随着碳中和目标的提出，碳排放效率再次成为学术界的热点话题。学术界对于碳排放效率的研究主要集中在碳排放效率的概念以及碳排放效率的测度方法这两方面。

对于碳排放效率的研究，最早是由国外学者 Kaya 和 Yokobori^[8]提出，将国内生产总值与碳排放的比值作为碳排放效率值，用来反映单位碳排放所能产生的 GDP。随后 Mielink 和 Golder^[9]提出了与其相似的碳指数概念，用碳排放量与能源消费量的比值来衡量能源消耗强度。这两种方法均能在一定程度上反映一个国

家或地区的碳排放效率，但由于研究视角和衡量指标过于单一，对测算的碳排放效率结果存在较大争议，为此不少学者开始从多元素的视角去测算碳排放效率。Ramanathan^[10]在研究碳排放效率时，综合考虑了 Kaya 等人和 Mielink 等人的研究成果，将碳排放效率的测算同时包含了国内生产总值和能源消耗总量这两个要素，使得测算结果更加客观准确，Zaim,Taskin^[11]在对碳排放效率各要素进行分析时，提出了将碳排放作为非期望产出变量，从而使得带有非期望产出的 DEA 模型契合了碳排放效率的测算要求，该碳排放效率强调刻画以尽可能少的碳排放获取尽可能多的经济产出，符合碳排放效率的内涵，因此非期望产出 DEA 模型在碳排放效率分析中有着较多的应用。在此基础上，国内学者开始采用 DEA 模型对我国的碳排放效率展开了研究，比如徐英启，程钰，王晶晶等人^[12]采用带有非期望产出的 SBM 模型，将资本存量、劳动力、和能源消费作为投入，GDP 作为期望产出，碳排放量作为非期望产出，对我国 68 个试点城市的碳排放效率进行分析；宋敏，邹素娟^[13]采用超效率 SBM 模型，建立了同样的指标体系，对黄河流域碳排放效率进行了测算，同时运用了泰尔指数和收敛性分析了区域之间的差异；田云，林子娟^[14]也采用带有非期望产出的 SBM 模型，选取了同样的投入产出指标对中国农业碳排放效率进行了测算等。

目前，我国对碳排放效率的研究大多采用数据包络分析法（DEA 模型），而国外学者对碳排放效率的研究除了 DEA 模型之外还经常使用广义的随机前沿分析法（SFA）。相比与数据包络分析，随机前沿分析法考虑了随机误差项的效应，并且其线性回归的统计方式为效率的计算提供了极大的便利，但该方法也存在不足之处，随机前沿分析法对模型假设过强，过于单一，不能对期望产出和非期望产出等多指标输出进行有效地管理。在国外采用 SFA 方对碳排放效率所进行的研究中，Risto 等^[15]基于面板数据，利用 SFA 方法测算了各个省份的碳排放效能。Pardo^[16]等人也利用 SFA 法来分析瑞典的制造行业中的碳排放强度。WangXiping^[17]使用 SFA 法对 2000-2010 年中国的碳排放效率进行了测算，结果表明，在 2000-2010 年这一时期，中国的碳排放效率的整体水平提高了 4.1%。在此基础上，Herrala^[18]对 1997-2017 年这 10 年的全球经济发展进行了实证研究。相对于 SFA 法，DEA 模型需要设置一个有效边界，可以应对多个输入多个输出，且计算的结果更为稳定，从而提高了评价的准确度和适用范围。Ramanathan^[19]运

用数据包络分析方法,不但测算出了国家层面的碳排放效率,还研究出了碳排放效率与能源之间的联系。Zhou^[20]使用 DEA 模型,利用 MCPI 指数对高排放国的碳排放效率进行评价,并将测算结果与其他发达国家进行对比。Wang^[21]运用 Sphard 函数,提出了要使我国的碳减排实施更加有效,就不可避免的要进一步提升的科技进步。

以上学者的研究说明现阶段对于碳排放效率的测算,由于 DEA 相比与 SFA 能够克服指标过于单一,无法处理非期望产出等多指标问题,故对于碳排放效率的研究一般采用带有非期望产出的 DEA 模型,在构建指标时,投入指标从资本、劳动力和能源消耗三个方面展开作为生产要素投入,产出指标分为期望产出国内生产总值和非期望产出二氧化碳排放量,以此为基础构建 DEA 投入产出指标体系来测算碳排放效率。

1.2.3 碳排放效率影响因素的研究

提高碳排放效率路径是多样的,并且在不同条件下存在较大差异,因此在测算出碳排放效率的基础上,对其影响因素进行探究也是必要的。

国外学者对于碳排放效率影响因素的研究多集中于能源消费结构、科学技术进步、对外开放程度等。Timothy^[22]和 Buckley^[23]从“碳贸易”的角度,对我国城市土地利用中的“碳”问题进行了研究。Rarnakrishnan 和 Ramanathan^[24]不但对碳排放效率进行了测算,还重点分析了能源消耗与碳排放效率之间的关系。Bhattacharyya 等^[25]在研究了碳排放效率不同的影响因子后,得出了一个结论:能源强度对碳排放的效率影响最大。Stern 等^[26]运用 SFA 模型,全面探讨了科学技术水平、气候状况是否会对碳排放效率造成影响。Angeta^[27]首次将 LMDI 模型与碳排放效率的测算相结合,对我国工业部门的碳排放效率进行了测算,结果表明工业部门中二氧化碳的总量增长与其二氧化碳的排放之间存在着显著的正向关系。Wood^[28]等运用投入产出方法,对澳大利亚的碳排放进行了研究,得出了人口数量和经济发展水平是决定其碳排放的主要原因。Albornozetal^[29]利用公司的微观样本数据进行了实质,分析结果表明外商直接投资和公司的碳排放之间存在着显著的正向联系,也就是外商直接投资的增加会显著提高其公司的碳排放。

国内学术界对碳排放效率影响因素的实证主要有地方政府竞争、经济发展水平、环境规制、产业结构、技术进步、城镇化水平、市场分割、禀赋结构等。通

过查阅大量文献发现国内关于产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率影响的研究较多。首先,在产业结构对碳排放效率影响的研究中,视角不同所得到的结论也有所差异。比如刘志华,徐军委,张彩虹^[30]通过建立 PVAR 模型和 GMM 模型分析了我国各省产业结构对碳排放效率的影响,分析得出现阶段产业结构升级对碳排放效率有正向的促进左右,但是随着时间的推移这种正向影响会逐渐减弱。而周迪,王雪芹^[31]应用扩展的耦合模型考察了中国各省份碳排放效率与产业结构升级的耦合关系,分析发现中国碳排放效率和产业结构升级的耦合度较低,且区域间碳排放效率的固化程度远大于产业结构升级。在城镇化水平对碳排放效率影响的研究中,研究结果表明城镇化水平对碳排放效率的影响在不同地区有不同的结果,如刘林杰,杨树旺^[32]采取系统广义矩估计模型和中介效应模型分析城市化进程对碳排放效率的影响,分析结果表明城镇化水平的提高在全国层面来看对碳排放效率有促进的作用,但是从省域层面来看部分地区提高城镇化水平对碳排放效率会产生负面影响王,王鑫静,程钰^[33]则是以全球 118 个国家为研究对象利用 STIRPAT 模型探究了整体样本及不同等级城镇化水平国家城镇化发展对碳排放效率的影响机理,将 118 个国家的城镇化水平进行分类后发现只有高等城镇化国家城镇化水平的提高对碳排放效率是正向促进,中、低等城镇化国家则呈现出负相关关系。关于环境规制对碳排放效率的影响,不同的研究也得出了不同的结论,江三良,鹿才保^[34]构建空间杜宾模型对生产服务业环境规制对碳排放效率的影响进行了研究,研究发现合理执行环境规制,有利于解决区域碳排放效率差异太大的问题,从而促进区域碳排放效率的提升。马海良,董书丽^[35]在研究不同类型的环境规制对碳排放效率的影响时,在测算碳排放效率的基础上对环境规制强度也进行了测算,发现不同地区不同类型的环境规制对碳排放效率的影响效应存在较大的差异。

关于碳排放效率的影响因素,现有文献对于产业结构、城镇化水平和环境规制的影响因素,且对碳排放效率影响结果存在差异性,故本文将产业结构、城镇化水平和环境规制作为环境变量,从我国省域视角出发,采用三阶段 DEA 模型分析产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率的影响。

1.2.4 简要评述

在现有文献对于碳排放效率定义的研究视角较为单一,测算指标较为固定,

采用的投入指标为资本、劳动力、能源消耗，产出指标为国内生产总值和二氧化碳排放，涉及“碳中和”目标的相关研究目前还没有具体量化的分析指标^[5]。在这种情况下对现有文献进行梳理后，本文将“碳中和”目标与碳排放效率相结合，测算碳中和目标下我国各省的碳排放效率。DEA 模型测算指标的构建要素分成了三部分：经济、低碳和“碳中和”。经济对应碳排放效率中的期望产出，即国内生产总值；低碳指在既定经济产出下所消耗的劳动力、资本、能源以及产生的二氧化碳排放尽可能的少；“碳中和”则是从二氧化碳吸收和二氧化碳减排两个角度，将城市森林碳储量与低碳技术创新作为新的生产投入要素引入到 DEA 投入指标体系，反映在实现“碳中和”目标过程中，碳源和碳汇的投入是否能有效转化为二氧化碳的减排，从而避免在“碳中和”目标下对碳源和碳汇的投入过多或过少使得对碳排放效率产生负面影响。

对于碳排放效率影响因素的分析，已有的研究结果表明环境规制、产业结构和城镇化水平对碳排放效率有较大影响。多数学者在对影响因素进行分析时用 DEA 模型在测算出的碳排放效率值的基础上，采用计量经济学模型等方法进行因素分析，这样的处理方式在其他研究问题中也比较常见，然而从 DEA 模型与计量经济学模型之间的联系来看，并不存在关联的基础和依据。因为就 DEA 模型的特点来看，其所依赖的由投入指标与产出指标构建的指标体系本身具有进行因素分析的基础和可行性，完全没有必要将 DEA 模型测算出的综合效率值再单独放在计量经济学模型中进行因素分析，而且这时计量经济学模型所选择的影响因素是另外一套解释变量，与 DEA 模型测算的综合效率值并没有理论上和数量上的必然联系，更多的是主观臆断的结果。基于此，本文利用三阶段 DEA 模型的特点，对第二阶段 SFA 回归中通过分析中环境变量对各投入要素松弛的影响从而得出产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率的影响，同时通过第一阶段和第三阶段效率值的对比得出在产业结构、城镇化水平和环境规制共同作用下对碳排放效率的影响。

1.3 研究内容与框架

1.3.1 研究内容

本文选取的研究个体为中国 30 个省份（西藏自治区、台湾省、香港和澳门

特别行政区除外），时间跨度为 2005 年-2020 年。具体的内容共分为五个章节。

第一章，引言。对碳中和目标及碳排放的背景、意义进行分析，阐述本文的必要性与重要性，通过对相关文献的梳理总结，对文章的主要内容、研究方法、研究内容框架进行说明，还包括文章的可能存在的创新之处。

第二章，理论基础。主要包括对本文中碳达峰、碳中和及碳排放效率等相关概念进行阐述，总结得出碳中和目标下的碳排放效率的内涵。

第三章，指标体系的构建。主要包括指标选取的原则，决策单元的确定，指标体系中每个指标的选取依据以及本文分析所用数据的来源。

第四章，碳中和目标下的碳排放效率测算结果与分析。以三阶段 DEA 模型测算结果为基础，分析环境变量对碳中和目标下碳排放效率的影响，其次对其 2010 年-2020 年我国各省的碳排放效率的空间演变特征进行分析，对效率值较低省份的改进路径进行分析，并分析碳中和目标对碳排放效率存在的影响，最后采用 Malmquist-Luenberger 指数模型对动态效率值从空间效应和时间效应进行分析。

第五章，结论与建议。对本文的研究结果进行总结，并以此为我国经济的低碳发展提出对策建议。

1.3.2 研究框架

本文基于碳中和的提出背景将其和碳排放效率相结合，分析在碳中和目标下我国各省碳排放效率存在的特征及改进的路径。首先，在构建指标体系时，本文将碳中和目标下碳排放效率测算指标的构建分成了三部分：经济、低碳和碳中和。该指标体系效率测算的结果旨在能够以环境和资源容许的条件下中去限定经济发展的速度和规模，将城市绿化和低碳科技创新作为评估依据，在投入资本、劳动、能源消耗等生产要素的同时以净碳排放量最小化、经济发展水平最大化作为目标导向，构建 DEA 模型的生产前沿面来测算各省的碳排放效率，碳排放效率越高，则越有利于在经济稳步发展的前提下尽早实现“碳达峰”，乃至进一步实现“碳中和”的最终目标。然后，对于测算出的碳中和目标下碳排放效率，考虑到投入在管理层面、不同环境以及随机因素下可能造成的效率测算结果出现较大偏差，采用 SFA 对其进行剔除，并对剔除前后的效率值通过前后对比，分析环境因素

对各省碳排放效率的影响机理,同时对 2005 年至 2020 年我国各省的碳排放效率可能存在的空间差异进行分析,最后对于碳排放较低省份提出相应的改进措施的同时分析碳中和目标对碳排放效率产生的影响,助力实现“碳中和”总目标。另一方面,通过 Malmquist 指数模型对碳排放动态效率进行计算,并将其进一步分解为技术进步变化、纯技术效率变化和规模效率变化,从时间效应和空间效应两个层面进行分析,剖析其发展过程中可能存在的问题。

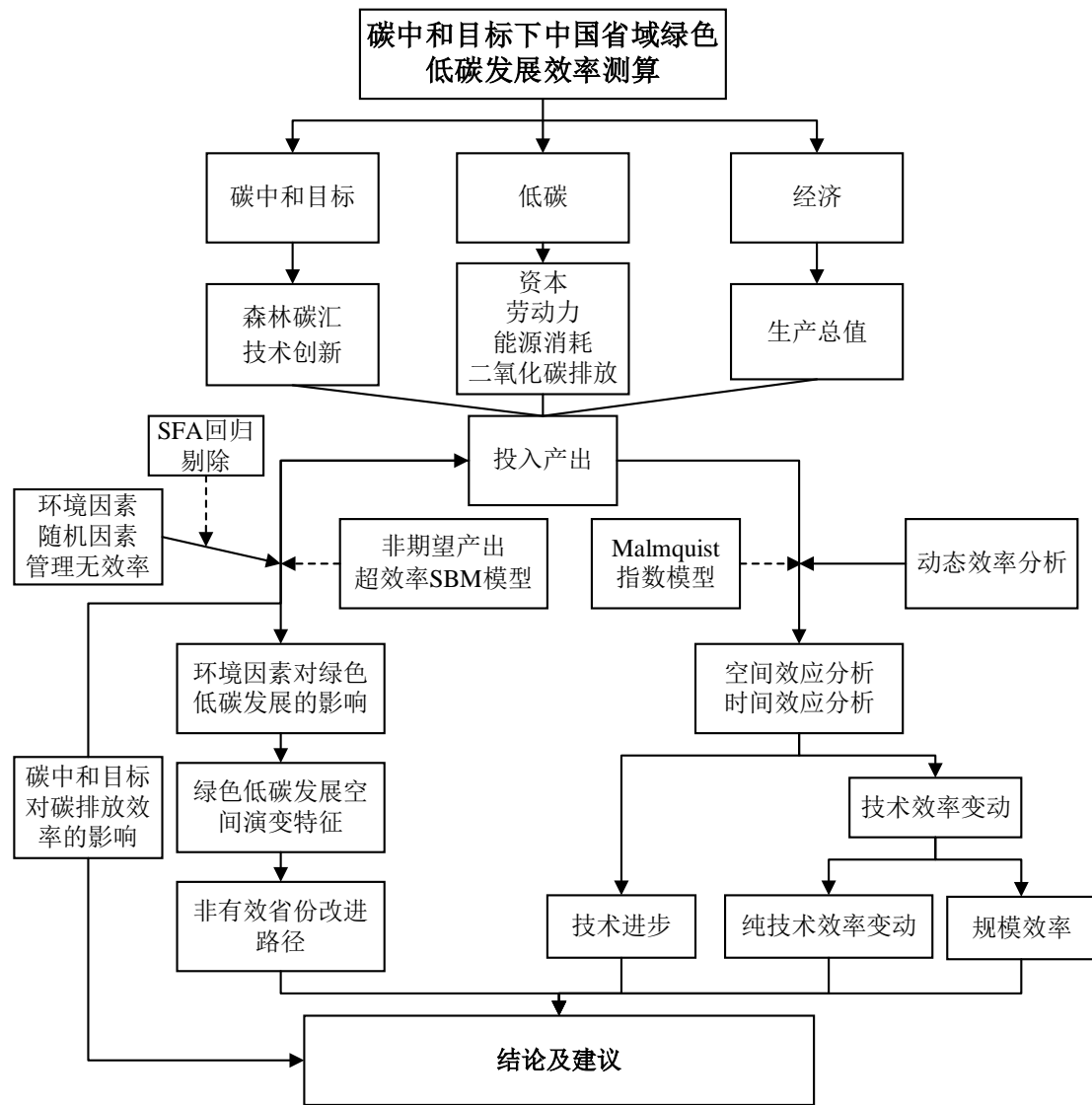


图 1.1 研究逻辑框架

1.4 研究方法和创新点

1.4.1 研究方法

(1) 文献研究法

在论文写作过程中,通过搜集有关资料,阅读了与之相关的许多关于碳排放效率的研究资料,并对这些资料进行了总结和梳理,最终归纳出论文的写作思路和总体结构,从而为模型的构建和指标的选择提供依据。

(2) 数据包络分析法

数据包络分析方法(DEA 模型)是运筹学、管理科学与数理经济学交叉研究的一个新领域。它是一种多指标投入和产出评价的研究方法,其应用数学规划模型计算比较决策单元(DMU)之间的相对效率,对评价对象做出评价。非期望产出的超效率 SBM 模型作为数据包络分析法的模型之一,是在原有传统模型的基础上作出的改进,效率值不再被限定在 0-1 之间,且引入的非期望产出,更加符合某些特定情形下的具体分析,故本文采用数据包络分析法中带有非期望产出的超效率 SBM 模型对碳排放效率进行测算。

(3) 定性分析与定量分析相结合

定性分析是定量分析的基础,决定着定量分析的方向,对事物之间的关系进行分析,然后,通过量化的数据对上述分析结果进行证实,进而让定性研究变得更有说服力。在中国各个省份,对碳排放效率的测算以及环境因素对其产生的作用,都会牵扯到各个领域,因为这些领域中存在着大量的可变因素,所以需要一种定性研究的方式来衡量这些因素,从而选择出最佳的指标数据,将定性分析与定量分析相融合,从而使得研究的结果更加精确,达到事半功倍的目的。

(4) 比较分析法

本文从纵向和横向两个角度对我国各省份碳排放效率进行分析,从纵向角度来看,探索我国各省在 2005 年-2020 年的效率变化趋势的同时,对产业结构、城镇化水平和环境规制对各省碳排放效率的影响机制进行分析,同时通过去除碳中和目标后效率值的变化来反映碳中和对碳排放效率的影响;从横向角度来看对我

国各省碳排放效率的空间演变特征进行分析,同时为我国不同地区碳排放效率的提高提供参考建议。

1.4.2 创新点

本文以全新视角对碳排放效率进行测算,相较于现有的相关文献,可能的创新点有以下三点。

第一,将“碳中和”目标与碳排放效率相结合,从二氧化碳减排和二氧化碳吸收两个角度入手,将城市森林碳储量与低碳技术创新纳入投入指标体系,测算“碳中和”目标下的碳排放效率。

第二,为避免碳排放效率测算结果出现较大偏差,同时更加客观准确的分析环境变量对碳排放效率的影响因,采用三阶段 DEA 模型,剔除管理无效率和随机噪声对效率测算结果的影响,并通前后效率值对比,分析环境变量对碳排放效率的影响机制。

第三,利用 DEA 模型分析投入变量和产出变量的冗余和不足,探究部分省份效率较低的原因,对各地区提高碳排放效率、助力实现“碳中和”目标的改进路径进行研究;同时借鉴复合 DEA 模型的思想,计算加入碳中和指标前后的碳排放效率,从整体层面和区域层面对我国以及我国各地区碳中和目标对碳排放效率存在的影响进行分析。

2 相关概念和理论基础

2.1 相关概念

2.1.1 碳达峰、碳中和

“碳达峰”指当一个区域或者一个产业的 CO₂ 排放量在达到一个历史最高值之后，开始逐渐稳定下降，这个峰值将其称为“碳达峰”，其中包括了“达峰年”和“排放最大值”两个概念，达到碳达峰的过程时经济发展和碳排放之间“脱钩”的过程，同时也是在 2020 年八项重要工作中的一项。

“碳中和”是指在一段时期之内，采取一系列方法措施来减少或抵消人类生产活动所产生的二氧化碳，从而最终实现净零二氧化碳排放。时至今日，碳中和逐渐开始为世界各国所认可，这是世界环境走向光明的一大步，中国从自身实际出发，以身作则，下决心在 2060 年之前，把这个任务做好。作为世界上最大的发展中国家，我国产业结构在全球范围内占有较高的比重，同时也是全球最大的二氧化碳排放量来源地，要想达到“碳中和”，就必须要在高能耗产业上做到最大限度的节约能源，而对于不可避免的二氧化碳排放，我们也可以采用诸如“碳捕集”之类的技术来抵消，即便实现过程需要高昂的投入，我们也必须要克服各种困难，努力降低技术成本费用。

碳达峰与碳中和存在着时间先后关系，碳达峰在前，碳中和在后，碳达峰是碳中和的前提。碳达峰的时点和峰值的高低，将直接关系到实现碳中和的时间与困难程度，碳排放越早达到峰值，相应的碳中和的压力就越小，碳排放峰值越高，技术进步和发展方式的转型越发变得困难。“碳达峰”是一种方式，“碳中和”才是最终的目标，碳达峰应该以“碳中和”目标为前提，碳排放的峰值越小，所付出的代价就越小，所面临的减少排放的压力也会逐渐减轻。

2.1.2 碳排放

从经济学角度来说，“碳”是指产品在生产、流通、使用、再使用和再循环利用过程中所引起的一系列的温室效应。而二氧化碳的“动态排放”，则是指每一种产品在生产使用的整个过程中所产生的温室效应的多少由于产品的不同导

致二氧化碳的释放也会有一定的差异。而造成这些现象的原因既有人类活动，也有自然活动。在燃油的燃烧过程中，会排放出水蒸气、氯氟化碳、二氧化碳等气体。目前，温室气体大规模释放已经造成了全球的升温，对人类的可持续发展产生了很大的冲击，通常将某一地区某一时段的碳量作为温室气体排放量的总称。现如今伴随着产业革命的不断推进，矿产资源得到了大规模的利用，矿产资源逐渐取代传统的生物质能成为主要的能量消耗方式。煤、油等矿产资源是我国最重要的矿产资源，而煤、油等都是高碳源，其大量使用不可避免的导致了二氧化碳的过量排放。所以，降低化石资源的用量，并逐渐向更多的洁净资源转型，是当前降低碳排放量的关键。

2.1.3 碳排放效率

二氧化碳排放量是一个统称，是对温室效应的衡量，通常情况下，碳排放可分为广义的和狭义的。从广义的角度来说，“碳”有很多种不同的类别，其中包括二氧化碳和甲烷，以及《京都议定书》中的其他六种温室气体。在狭义范围内，所谓的“碳”指的是造成了全球变暖问题的二氧化碳。在 2007 年度发表的一份世界范围内的研究表明，人类活动引起的二氧化碳排放量升高是当前全球变暖的重要原因，而人类所使用的化石能源是二氧化碳浓度升高的最直接原因。因此，我们所说的“碳排放”一般都是从狭义的角度来看，即二氧化碳温室气体的排放。

虽然碳排放率在生态系统研究中占有举足轻重的地位，但因为其本身的复杂程度，目前学术界还没有一个权威的界定。通俗来讲，碳排放效率是指社会经济活动在引起碳排放的时候所产生的对应效果，其实质是人们在生产和生活中对大气碳容量的消费所能产生的社会和经济效益，从前面的研究中可以看出，当前对碳排放效率的界定有两种：

第一种是单一因素的影响，主要体现在两个因素之间的比值。当前，国际上普遍使用碳排放强度、碳指数、碳排放效率作为碳排放的衡量标准。其中，碳排放强度是指获得单位经济产出时所释放出的碳排放量，在实际使用中通常以单位 GDP 的碳排放量来度量，例如，人均单位 GDP 的二氧化碳排放量或单位 GDP 的二氧化碳排放量等等。碳指数是指单位能源消耗所产生的二氧化碳排放量，一般以万吨标准煤为单位。从国际上对其应用的普遍程度来看，大多数的研究都是

以碳生产率为指标，即单位碳排放量的 GDP 产出。第二种是从全要素角度来看的碳排放效率，也就是从整体上来说的“碳排放综合效率”或者“碳排放全要素效率”。相比于单一因素的角度，虽然考虑了各种输入因素，但大部分的研究人员还是没有对其进行详细的界定。

鉴于此，为进一步明确本文的核心性概念，在借鉴相关研究的基础上，本文对碳中和目标下碳排放效率的概念做出明确性的界定：假定各投入要素不再增加，在劳动力、资本存量、能源消耗、低碳技术和森林碳储量五大投入生产要素的相互作用下，所实现的经济产出和二氧化碳排放量之间的生产关系比率，该比率的大小，反映了在产生相同或更少的二氧化碳排放前提下，所能获得产出的多少。

2.2 理论基础

2.2.1 低碳经济学相关理论

随着人类生产、生活中能耗的不断增长，二氧化碳排放量飞速增长，全球气候逐步升温，环境问题日趋严峻，降低二氧化碳等温室效应气体的排放现已成各国优先考虑的问题，降低能源消耗也被提上了国际社会的议事日程，特别是欧美等发达国家，更是在世界范围内掀起了一场“绿色变革”，推动了“绿色科技”的运用。英国在 2003 年度的一份名为《我们能源的未来:创建低碳经济》的报告中第一次提到了对低碳经济的发展。一般来说，低碳经济是以可持续发展为中心，其根本目的是要从产业结构升级、科学技术水平提高、资源利用率等方面，尽量减少煤炭、石油等一次能源的用量，减少二氧化碳排放，实现经济与生态环境的协调发展。从其发展的本质上来说，其最终目标是尽可能地通过各种途径来降低碳排放，从根源上改变能源密集型行业的发展方式。我国对低碳经济进行发展的动力机制可从如下角度进行分析：首先，要以科学技术为基础促进低碳经济的发展。低碳技术的进步，并不只是意味着对新的先进设备的应用，以及对新的技术的创造，它还包含了对工人质量的提高，以及对整个社会的创新环境的优化，它们都是一个国家发展低碳经济的一个重要指标。其次，要实现经济的低碳发展，就必须发展绿色能源。从世界能源储备的角度来看，煤炭、石油在目前的经济发展速度和开发强度下，它们分别还可以再利用差不多 200 多年和 30-40 年。所以，世界各国应将可再生能源作未来能量的主要来源，加大对风能、生物能和水能的

研发力度。最后，在推动我国发展低碳经济的进程中，体制机制的构建是推动低碳经济发展的关键。当前，国际上普遍采用碳税、碳排放市场交易和可再生能源的财政和税收优惠等方式进行减排。总之，从世界宏观视角来看，发展低碳经济是全球范围内的一次重大变革。

中国是全球第一大能源生产国和消费国，在构建新发展模式过程中，加速推动中国的低碳发展势在必行。从 2007 年开始，我们就已经清楚地意识到，低碳是我们经济发展的必由之路，因此，我们把《中国应对气候变化方案》列入了我们对未来的发展方向的重大决策，显示出我国对未来的发展充满了自信。此外，国家还组建了应对气候变化等问题的“能源与环境保护”专家组，提出了一系列客观、全面、切实可行的能源与环境保护措施。低碳经济既是为解决国际环境变化这个问题而提出的一种经济发展模式，也是人类社会发展的必然要求。以低碳经济发展为目标，促进“发展”与“绿色”的有机结合，是提升地区碳排放效率的关键。

2.2.2 可持续发展理论

在经历了工业革命之后，世界经济迅速发展起来，城镇化水平不断提高，在某些发展中国家，人们急切地需要提高第二产业的发展速度，将社会发展与经济发展简单地划上等号，于是便不顾一切的开始大力地开发重工业，忽略了对生态环境的维护，使得经济发展与环境保护出现严重失衡，生态环境因为没有受到足够的关注而持续恶化。雾霾、核泄漏、全球气候变暖、海平面上升等一系列大规模环境问题，让人们们对于这种以工业化为主导的经济增长方式提出了质疑。随着我国经济快速发展与环境被破坏之间的矛盾不断加剧，世界各地的人们也逐渐意识到，保护环境、走可持续发展的道路是实现我国低碳发展的最优途径。

可持续发展这一理念最早出现于 1987 年度的《我们共同的未来》一书中，它是未来我们的发展既能解决当前人们的需求，同时也不会对后代人需求的实现产生影响。从可持续发展的概念可以看出，可持续发展的关键是持续发展，不论是发达国家还是发展中国家，在享受发展所带来权益的同时也要承担起对环境的责任。此外，可持续发展观念中还包含着需要与限制两个方面。需要意味着这一发展思想已经是世界各国的普遍需求，也是全球经济发展的一个重要方向，应当

把这一思想摆到第一位。可持续发展是由社会、生态和经济所组成，它已经从过去的对经济发展的过分追求转变为注重社会、经济、文化、资源、环境、生活等各方面的协调发展。可持续发展是当今全球社会普遍选择的发展之路，其实现离不开公平、持续性和共同性的基本原则与标准。所谓公平性是指可持续发展原则不仅对目前的人口数量来说是公平的，而且对下代人来说，资源、机会和利益也是均等的。持续性是指在发展过程当中，存在着为确保实现可持续发展的一些限制，即人们在追求经济的发展和生存空间扩张的过程中，都不应超出该地区的环境承受范围。共同性原则是指尽管各个国家的历史和发展模式不尽相同，但是可持续发展的观念是所有的国家都要遵守的。

目前，气候变暖、环境污染等已经是全球普遍存在的重大问题。在温室效应气体的组成部分中，二氧化碳所占的比例达到了 77%，导致全球气候变暖的最重要的因素之一。如何降低温室气体的排放，推动低碳发展，是一个与时代主题紧密相联的世界性课题。中国作为全球最大的碳排放国，一直以来置身于碳减排事业中从未间断，为进一步解决碳排放问题，中国展现出了大国担当，提出于 2030 前后在全球范围内实现“最大碳排放量”，并力争在 2060 年实现碳中和目标。第一次可持续发展论坛于 2019 年在中国举行，面对贫穷、不平等和天气变化等具有时代意义的重大问题，没有一个国家可以独自面对，只有所有国家、企业和个人一起努力，才可以创造出一个更加繁荣、包容和绿色的世界。目前，可持续发展思想已成为实现这一目标的根本途径。可持续发展的实施，不仅是中国在解决环境问题上走出的关键一步，也是企业和社会走向更加光明和光明的基石。

2.2.3 环境经济学理论

环境问题并非与生俱来的，自然资源的匮乏以及对资源和环境承受力的降低存在多方面的原因。从经济方面来讲，自从产业革命以后，人类的生产力逐渐提高，但是因为对经济发展的盲目追逐，导致了不符合其发展速率的过剩的商品被制造出来，并且仅关注了短期内能够产生的经济效益，而没有从长期的角度去看待其对环境所产生的影响。在人类生活日益密集的情况下，人类对人类生活中的各种资源如水、空气、煤炭、石油、天然气等都视为取之不尽、用之不竭的能量，从大自然中获得的物质远远超出了其自身的可再生性，从而导致了地球上的物质

匮乏和环境污染。就能源的发展而言，由于人们在进行“非农业”的活动时，所排放大量的废水、废气和废渣等对生态系统造成了严重危害，同时也使得大量的废弃排放到了大气中。随着人类的社会和经济的不断发展，越来越多的自然灾害在世界各地发生，如地震，洪水，海啸，风暴潮等，使生态系统发生不可控制的退化。在这一背景下，七十年代初期“污染经济学”、“公害经济学”等论著相继问世，论述了环境治理过程中所涉及的经济学问题。环境经济学正是在这一背景下产生，是在人类在实现经济发展，解决额外的环境问题时，形成的一种新的学科。

环境经济学是指运用经济科学和环境科学的原理和方法，分析经济发展和环境保护的矛盾，以及经济再生产、人口再生产和自然再生产三者之间的关系，选择经济、合理的物质变换方式，以使用最小的劳动消耗为人类创造清洁、舒适、优美的生活和工作环境。根据环境经济学的定义可知，环境经济学的研究内容主要包括以下方面：第一，探究环境经济学的基础理论。作为一门新学科，环境经济学成为了全世界关注的热门问题，人们开始逐渐探寻经济发展与环境之间的关联，探讨最适合人们发展的资源环境承载力和人口合理容量。第二，研究了各种类型的发展方式与生态系统之间的相互影响。在人类的社会中，自然资源是最根本的生产要素，因此，自然资源的现状对一个地区的资源和环境的承受力起着重要的制约作用，对自然资源进行合理的使用，提升对资源的使用效能，对不科学的经济活动进行改革，是一种行之有效的方法。第三，基于市场机制对环境治理的作用，学者们已逐渐将经济学的方法应用到环境治理领域，为政府制定环境治理政策和项目实施提供了可借鉴的理论基础。

从当前的情况来看，环境经济学是一个发展迅速的新兴领域，已经引起了国际社会的广泛关注。环境经济学不仅为碳排放效率的研究提供了理论依据，而且为解决碳排放问题提供了相应的经济分析工具。因此，环境经济学在对环境价值核算、环境污染损失计量和环境经济相关模型建立具有重要意义。

3 碳中和目标下碳排放效率的测算

3.1 测算方法的选择

通过对现有文献的查阅与整理后发现,现阶段各种研究中主流的评价方法有三种:熵权-topsis 法,综合指数法和效率评价法。

首先是使用较为广泛的熵权-Topsis 法。该方法是将熵权法和 Topsis 法相结合,通过计算各指标数据的变异程度,得出各指标的熵权值来给予各指标不同的权重。此方法可以剔除分析者主观的赋权效果,更加贴合客观事实。TOPSIS 法的全称为“逼近于理想状态的排序法”,通过对各指标理想状态的期望将指标分为正、逆指标,当指标数据越接近理想状态时,越能表达分析者对该指标能力的认可。目前,熵权-Topsis 法已广泛应用于测评质量类的研究分析之中。

然后是综合指数法。该方法是指在研究问题的各项指标体系建立完备的前提下,对各项指标的数据进行无量纲化处理后,结合实际问题和以往经验确定合适的方法对各项指标权重进行计算,求出各项指标的折算指数后汇总进行分析评价的方法,综合指数的数值越大,说明该项指标所处的等级水平越高,反之则越低。

最后是 DEA 模型。DEA 模型是运筹学、管理科学与数理经济学交叉研究的一个新领域。它是根据多项投入指标和多项产出指标,利用线性规划的方法,对具有可比性的同类型单位进行相对有效性评价的一种数量分析方法。对产出进一步划分后可将其分为期望产出和非期望产出,带有非期望产出的 DEA 模型所计算出的排放效率能很好的契合碳排放效率的内涵,即强调刻画以尽可能少的碳排放获取尽可能多的经济产出,同时,超效率的 DEA 模型测算出的效率值不再被限定在 0-1 之间,符合某些特定情形下的具体分析,因此本文采用效率评价法,用带有非期望产出的超效率 DEA 模型来计算碳排放效率值。

3.2 确定决策单元

一个经济系统(或一个生产过程)可以被看作是一个单位(或一个部门),在既定条件下,将各种投入要素转化为相应产出的一种系统的生产过程。在这个生产过程当中,各生产要素按照事先确定好的比例进行投入的同时也在对其比例进行不断地调整,从而尽可能的获得更大的产出。而从投入到产出,要通过一系

列的决策来完成，决策的结果直接影响产出的多少，因此，这种单位（或部门）被称之为决策单元，其最根本的特征就是有特定的投入和产出。DEA 模型在对其进行全面的研究之后，能够得到各个决策单元的整体效能的量化指数，根据这些指数来对各个决策单元进行分级，从而确定出一个相对高效的决策单元，DEA 也能够对各个决策单元的生产规模大小和技术规模水平进行判定，为生产效率的提高提供客观的方法依据。

在确定决策单元的数量时，数量过多或过少会直接影响效率测算结果的准确性，一般来说 DEA 模型的决策单元数量应遵循以下原则：

$$\begin{aligned} \text{决策单元数量} &> \text{投入指标数量} \times \text{产出指标数量} \\ \text{决策单元数量} &> 3 \times (\text{投入指标数量} + \text{产出指标数量}) \end{aligned}$$

在实际应用中，决策单元是固定的，当模型区分能力不足时，只能通过减少投入或产出指标数量来提高区分度。本文决策单元为 2005 年-2020 年中国的 30 个省份（西藏自治区、台湾省、香港和澳门特别行政区除外），共计 480 个，投入指标为 5 个，产出指标为 2 个，即决策单元数大于投入指标和产出指标数量的 3 倍，可以认为本文决策单元的选取是合理的。

3.3 模型方法的基本原理

3.3.1 三阶段 DEA 模型

采用三阶段 DEA 模型对“碳中和”目标下我国省域碳排放效率进行测算。三阶段 DEA 模型由 Fried 等人^[36]于 2002 年所提出，在传统 DEA 模型的效率测算过程中加入 SFA 回归对指标数据进行调整，剔除外部环境因素、随机噪声和管理无效率可能会对效率测算结果产生的影响，使最终测算出的效率值更加真实、准确。在测算碳排放效率时，考虑了非期望产出，采用非径向非角度的超效率 SBM 模型进行测算，具体操作如下。

阶段一：采用非期望产出超效率 SBM 模型测算碳排放效率，原因主要有两点：（1）SBM 模型可以进一步将产出指标类型划分为期望产出和非期望产出，采用该方法更能契合碳排放效率的内涵；（2）超效率 SBM 模型可以对有效决策单元做进一步的区分。参考胡剑波等^[37]测算超效率 SBM 模型的方法来测算初始

效率值，具体计算公式如下：

$$\rho = \min \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^x / x_{ik}^t}{\frac{1}{r_1 + r_2} \left(\sum_{j=1}^{r_1} s_j^E / y_{jk}^t + \sum_{q=1}^{r_2} s_q^U / u_{qk}^t \right)}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, n \neq k}^N \lambda_n x_{in}^t + s_p^x = x_{ik}^t, p = 1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, n \neq k}^N \lambda_n y_{in}^t + s_l^x = y_{ik}^t, l = 1, \dots, r_1 \\ \sum_{i=1}^T \sum_{n=1, n \neq k}^N \lambda_n u_{in}^t + s_h^x = u_{ik}^t, h = 1, \dots, r_2 \\ s_i^x, s_j^E, s_q^U \geq 0, \lambda_n \geq 1, n = 1, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中， ρ 代表碳排放效率值， s_i^x 、 s_j^E 、 s_q^U 分别代表投入、期望产出和非期望产出的松弛变量， m 、 r_1 、 r_2 分别代表其个数。 $(x_{ik}^t, y_{jk}^t, u_{qk}^t)$ 代表被评价的第 k 个省份第 t 年的投入产出量。

阶段二：SFA 回归分析模型。将 DEA 模型测算结果中的松弛变量采用 SFA 回归的方法将其分解为环境因素、管理无效率和随机噪声三种因素，构造的 SFA 回归函数如下：

$$S_{ni} = f(Z_i; \beta_n) + v_{ni} + \mu_{ni}, i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中， S_{ni} 是第 i 个决策单元第 n 项投入的松弛值； Z_i 是环境变量， β_n 是环境变量的系数； $v_{ni} + \mu_{ni}$ 是混合误差项， v_{ni} 表示随机干扰， μ_{ni} 表示管理无效率。

$v \sim N(0, \sigma_v^2)$ 是随机误差项，表示随机干扰因素对投入松弛变量的影响； μ 是管理无效率，表示管理因素对投入松弛变量的影响，并假设其服从在零点截断的正态分布，即 $\mu \sim N^+(0, \sigma_\mu^2)$ 。

根据 SFA 回归的结果对指标数据进行调整，剔除外部环境因素、随机噪声和管理无效率对效率测算结果产生的影响，调整公式如下：

$$X_{ni}^A = X_{ni} + [\max(f(Z_i; \hat{\beta}_n)) - f(Z_i; \hat{\beta}_n)] + [\max(v_{ni}) - v_{ni}] \quad i = 1, 2, \dots, I; n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中， X_{ni}^A 是调整后的投入； X_{ni} 是调整前的投入； $[\max(f(Z_i; \hat{\beta}_n)) - f(Z_i; \hat{\beta}_n)]$

是对外部环境因素进行调整,从而使所有决策单元的外部环境和随机因素的影响基本一致。

阶段三:调整后的非期望产出超效率 SBM 模型。将调整后的投入数据代替原始投入数据,产出仍为原始产出数据,再次运用非期望产出超效率 SBM 模型测算效率值,该效率测算结果剔除了外部环境因素和随机噪声的影响,更真实地反映碳排放效率。

3.3.2 Malmquist-Lunenberger 指数模型

虽然非期望产出的超效率 SBM 模型在某些方面有其它模型所没有的优势,但是它是建立在技术效率的基础上,仅限于对特定时间内的技术进行静态的分析。但是实际生产是一个持续的、不断改变的过程,生产技术也在不断地改变。因而,在分析效率随时间推移的趋势上,静态模型的局限性也就凸显了。当前,大部分学者都是使用 Malmquist 指数来进行动态分析, Malmquist-Lunenberger 指数模型是 Chung and Fare^[38]根据产出导向的方向距离函数在 Malmquist 指数的基础上推导出带有非期望产出的 Malmquist 指数,并命名为 Malmquist_Lunenberger 指数。此后,我们习惯性的将带有非期望产出的 Malmquist 指数统一称为 ML 指数。目前为止,还没有发现针对非期望产出 SBM 模型 ML 指数详细的推导文献,因此,本文参考成刚^[39]直接使用非期望产出 SBM 计算的效率值套用 M 指数计算公式来计算 ML 指数。

$$\begin{aligned}
 ML_c^{t+1} &= MLEC_c \times MLTC_c \\
 ML_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t, x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1},) &= \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t, z^t)} \times \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 MLEC_c &= \frac{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^t(x^t, y^t, z^t)} \\
 MLTC_c &= \left[\frac{E_c^t(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})}{E_c^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}, z^{t+1})} \times \frac{E_c^t(x^t, y^t, z^t)}{E_c^{t+1}(x^t, y^t, z^t)} \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{4}$$

3.4 指标体系的建立原则

在对碳中和目标下我国各省的碳排放效率进行测算时,构建一套科学、客观、综合的指标体系是评价体系的核心内容。

应该遵循以下原则：

(1) 可行性原则。数据是进行统计分析研究的基础，在选取指标的过程中，要将数据收集与整理的难易程度加以考量，对模型测算结果进行大致预估，确保数据搜集的可行性和模型测算结果的准确性。

(2) 系统性原则。系统性原则指的是在选取指标的时候，应当将所要分析问题的各个方面进行考量，不能仅仅从其中一个方面来进行度量，否则很可能会导致以偏概全，造成对问题的考量不够全面，但也不能进行复制，因为复制会增加计算的难度，还会对结果产生影响。因此，在选取指标时要秉持系统性原则进行综合考虑。

(3) 区域性原则。区域性原则是指在构建指标体系时，要根据决策单元的地域情况来确定，各地区的特点各不一样，在分析时应加以区分，例如各地区自然环境、社会制度、人文环境、经济水平不一样，其特点也不尽相同。

(4) 科学性原则。所谓科学性，就是在构建指标时，必须要具有科学的基础，要能够反映出最终所要评价事物之间的关系，不能只是由于这些数据间存在着某种关联，就随意选择，因此，必须要系统的说明指标的含义及指标对测算结果的影响，并且清楚地划分出各个层级，使最后得出的评价结果具有实际的意义。

3.5 指标体系的构建

在参考国内外测算碳排放效率的方法后，结合“碳中和”目标，投入指标在资本投入、劳动力投入和能源消耗的基础上引入低碳技术创新和城市森林碳储量，产出指标以 GDP 作为期望产出，二氧化碳排放量作为非期望产出，以“碳中和”作为目标，将经济和碳排放作为研究主题，测算其碳排放效率。具体指标设定及计算方法如表 3.1 所示。

表 3.1 碳排放效率评价指标体系

变量种类	指标	具体指标计算
投入变量	资本投入	全社会固定资产投资（亿元）
	劳动力投入	年末从业人数（万人）
	能源投入	能源消费总量（万吨标准煤）
	低碳技术创新	零碳电力生产/总电力生产（%）
	城市森林碳储量	城市绿地面积（公顷）

续表 3.1 碳排放效率评价指标体系

产出变量	期望产出	GDP (亿元)
	非期望产出	二氧化碳排放量 (百万吨)
环境变量	产业结构	第二产业增加值/GDP (%)
	城镇化水平	城镇人口/年末常住人口 (%)
	环境规制	污染治理投资额/全国总额 (%)

3.4.1 投入指标

分析所用投入指标包括劳动力投入、能源消耗、资本投入、城市森林碳储量和低碳技术创新。

(1) 劳动力投入。劳动力是经济发展的主力军，理论上应包括数量和质量两个方面。劳动力的数量一般采用当期的从业人员数，劳动力的质量目前没有统一的方法，有学者建议用劳动力受教育程度比如教育年限来衡量，而不同省份的平均受教育年限无法获得，同时考虑到各省从业人员的学历及其在各行各业的劳动效率等数据不具有可得性，故本文借鉴宁论辰^[40]的做法，选用各省历年的年末从业人数（第一产业、第二产业、第三产业人数之和）来衡量各省在劳动力上的投入。

(2) 能源投入。采用我国各省历年的能源消费总量来表示能源投入水平。为了更加直观地比较各年份的能源消费情况，消除能源单位差异造成的影响，在数据分析时将各省不同年份的煤炭、石油、天然气等一次能源的消费量统一折算成标准煤，并采用电力等价值，单位为万吨标准煤。在统计年鉴中，各种能源消耗的数据已统一折算为万吨标准煤，所以直接将各省在统计年鉴上的能源消费总量来表示能源投入，能源类型包括煤炭、焦炭、石油、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油、天然气、电力。

(3) 资本投入。在参考了张军^[41]，单豪杰^[42]、张健华^[43]等人对永续盘存法的研究发现，永续存盘法作为计算资本存量的有效方法被多数学者采用，但是永续存盘法也存在一定的局限性，在以全国地区作为研究对象时，不同地区和不同资产的折旧率由于无法准确计算，导致估算结果必然会出现一定偏差，而 DEA 模型的计算结果为各省市之间的相对效率值，是否对固定资产投资采用永续盘存法进行换算，对效率计算结果不会产生较大影响，因此采用以 2005 年为基期的

全社会固定资产投资总额来反映资本投入。

(4) 城市森林碳储量。森林具有的生态净化能力使其能够有效吸收空气中的二氧化碳,在“碳中和”的实现进程中发挥重要的作用。同时,森林作为陆地生态系统的主体,在二氧化碳吸收方面更具有成本有效性,故本文从二氧化碳吸收的角度出发,选取城市森林碳储量反映各省在二氧化碳吸收方面的投入力度。参考徐新良^[44]对城市森林碳储量时空动态变化的研究可知,碳储量的估算涉及到森林类型、树木龄组、林地面积和森林蓄积量等指标的核算,现有研究多聚焦于时期数据的研究,没有时点数据。虽然各省在 2005-2020 年期间的相关数据无法获得,但考虑到 DEA 模型计算结果为相对效率评价,并非绝对值,效率值反映的是哪些省份存在提升的空间以及如何提升效率,再加上我国经济发展的重点位于城市且城市绿地面积具有较强的可调控性,故选用城市绿地面积来间接反映城市森林碳储量,对其城市森林碳储量没有进行具体核算。

(5) 低碳技术创新:低碳技术创新的本质是为了转变能源生产方式,减少污染类能源的生产。同时,“碳中和”目标的提出从侧面也强调了未来发展低碳技术的重要性,故本文从二氧化碳产出的角度综合考虑后,选用零碳电力生产占电力生产总值的比重来反应我国在二氧化碳减排方面的低碳技术创新投入力度。其中,零碳电力生产主要包括:水力发电量、核能发电量、风能发电量和太阳能发电量。

3.4.2 产出指标

产出指标包括期望产出国内生产总值和非期望产出二氧化碳排放量。

(1) 期望产出。国内生产总值是指一个国家或地区所有常住单位在一定时期内生产活动的全部最终成果,是衡量一个国家或地区经济发展水平的重要指标。故本文在测算碳排放效率时将国内生产总值作为期望产出,采用名义 GDP/GDP 平减指数的方法,计算出各省在 2005-2020 年以 2005 年为基期的实际 GDP,从而使 GDP 指标更能准确反映各省在不同时期的经济发展水平。

(2) 非期望产出:“碳中和”目标的实现本质上是排入大气的二氧化碳不断减少直至为零最终实现净零二氧化碳排放的过程,将二氧化碳排放量作为 DEA 模型的非期望产出不仅是测算碳排放效率所必须的,同时也能契合“碳中和”目标的实质内容。故本文将二氧化碳排放量作为非期望产出,单位为百万吨。该数据

是基于 IPCC 部门给出的二氧化碳排放量核算方法,根据能源消耗数据和碳排放系数计算而来的二氧化碳排放量。

3.4.3 环境变量

通过对文献整理发现城镇化水平、产业结构和环境规制对碳排放效率存在较为显著的影响,由于 DEA 模型的特点,环境变量不宜选取过多,在查阅大量文献后将城产业结构、城镇化水平和环境规制作为环境变量。

(1) 产业结构。参考刘志华^[30]对产业结构与碳排放效率之间关系的研究可知,产业结构的提升对碳排放效率的有一定的促进作用,产业结构升级对国家碳排放效率的影响主要表现在资源要素配置效应和经济发展质量的提升。在经济发展的同时实现资源要素的科学合理分配,同时也需要将产业结构调整逐步向与环境友好型转变,减少污染的同时提高了碳排放效率。产业低污染生产能否实现主要取决于投入的生产要素、产出的模式和质量以及技术创新等要素,所以碳排放效率会受到产业结构特征的变化而产生较大的影响。因此,调整产业结构往往能在源头上解决生态环境问题,减少污染,从而提高碳排放效率。

(2) 城镇化水平。王兵^[45]的研究结果表明,城镇化水平与经济增长之间存在显著的正向关系,城镇化水平的不断提高不仅降低了城市与农村之间的差距,也促进了区域经济转型,提高了居民的生活水平。但是城镇化水平的不断提高也会给当地带来一系列问题,由于人口在向城市集聚的同时增加了城市住房紧缺和供大于求的就业压力,工业发展需求进一步提高从而不可避免的导致碳排放持续增加,引发空气污染、环境污染等生态问题。所以从某种程度上来说,城镇化水平的提高对碳排放效率可能存在着负面影响^[38]。

(3) 环境规制。借鉴马海良^[35]的研究成果,本文将环境规制作为环境变量来分析其对碳排放效率的影响。不同类型的环境规制会对市场的资源配置产生不同影响,进而对碳排放效率产生明显的差异作用,碳排放效率的关注点在于经济不断在发展的同时,碳排放水平会发生怎样变化,而环境规制作为政府强制性手段,对环境污染具有较强的抑制作用,从而对碳排放效率产生较大的影响,诸如环境税、排污费等环境规制工具能有效抑制企业排污,从而提升地区整体的环境质量,对工业污染排放具有显著的负效应。但与此同时,环境规制也可能会阻碍当地经济的发展从而降低了碳排放效率。加大环境规制强度会使得企业的生产经

营成本增加,从而制约企业在环保科技方面的投入力度,导致企业生产能力减弱,不利于企业可持续发展,故环境规制也可能与碳排放效率之间呈现出负向效应。

3.6 数据来源及处理

考虑到研究的可行性和数据可得性,分析我国 30 个省、直辖市和自治区(西藏、香港、澳门和台湾除外) 2005-2020 年间在“碳中和”目标下的碳排放效率。各指标数据来自《中国统计年鉴》《中国固定资产统计年鉴》《中国社会统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国碳排放数据库 CEADs》。DEA 模型在处理多输入,特别是多输出的问题时具有绝对优势,通过对各投入和产出指标模拟计算多种权重,以尽可能包含最多决策单元的生产前沿面的权重作为依据,用加权产出/加权投入的比值来反映生产效率,所以不同计量单位对其效率值的计算影响不大,无需对其再进行无量纲化处理。

3.7 碳中和目标在碳排放效率中的体现

碳达峰与碳中和是碳减排目标的两个阶段:碳达峰是指在某一时点,二氧化碳的排放达到峰值,之后逐步回落。碳中和是指排出的二氧化碳被植树造林、节能减排等方式抵消,达到相对的零排放。

在现存研究中,没有发现被广泛认同和使用的判断“碳达峰、碳中和”的方法。在这种情况下,对现有文献进行梳理后,在资本、劳动力和能源消耗这三个广泛引用的投入指标的基础上,将森林碳汇与技术创新纳入投入指标体系,从二氧化碳吸收和二氧化碳减排两个角度,测算在加入实现碳中和目标所必须投入的两个生产要素后的碳排放效率值,从而实现测算以碳中和作为目标的我国 30 个省份的碳排放效率,该效率测度结果旨在能够以环境和资源容许的条件下中去限定经济发展的速度和规模,将城市绿化和低碳科技创新作为评估依据,在相同的生产要素投入条件下,以碳排放量最小化、经济产出最大化为导向,构建 DEA 模型的生产前沿面,测算各省份在碳中和目标下的碳排放效率,该效率值的大小,反映了在产生相同或更少的二氧化碳排放前提下,所能获得经济产出的多少。

3.8 第一阶段和第三阶段效率值测算结果

本文测算我国 30 个省份 2005 年-2020 年碳中和目标下各省碳排放效率，并罗列出其具体效率值以供后文的深入分析。考虑到效率计算结果篇幅较大，此处仅罗列我国各省第一阶段和第三阶段 2005 年、2010、2015 年和 2020 年各省的效率值数据，具体结果如表 3.2 所示。本文测算出的 30 个省份 2005 年-2020 年效率值具体测算的完整结果见附录。

表 3.2 第一阶段、第三阶段碳排放效率值比较

省份	第一阶段效率测算结果					第三阶段效率测算结果				
	2005	2010	2015	2020	均值	2005	2010	2015	2020	均值
北京	0.717	0.840	1.010	1.022	0.914	0.887	0.941	1.001	1.019	0.962
天津	1.068	0.882	1.010	1.027	0.979	1.003	1.000	1.010	1.015	1.003
河北	0.347	0.566	0.487	1.008	0.552	0.669	0.729	1.000	1.009	0.815
山西	0.385	0.357	0.350	0.327	0.354	0.644	0.919	0.734	0.543	0.853
内蒙古	0.404	0.430	0.342	0.393	0.391	0.711	0.692	0.656	0.688	0.703
辽宁	0.253	0.301	0.373	0.406	0.332	0.645	0.640	0.663	0.688	0.657
吉林	0.329	0.380	0.476	0.495	0.431	0.633	0.680	0.747	0.891	0.706
黑龙江	0.403	0.401	0.422	0.561	0.428	0.538	0.774	0.749	0.833	0.788
上海	1.187	0.825	1.009	1.030	0.984	1.000	1.001	1.000	1.017	0.999
江苏	0.488	0.849	0.855	1.030	0.832	0.747	0.973	0.897	1.028	0.923
浙江	0.314	0.481	0.608	1.025	0.550	0.705	0.802	0.914	1.025	0.829
安徽	0.354	0.357	0.396	0.489	0.381	0.725	0.685	1.001	0.723	0.823
福建	0.370	0.409	0.609	1.032	0.554	0.788	1.001	1.004	1.023	0.942
江西	0.345	0.360	0.406	0.461	0.386	0.710	0.744	0.890	1.001	0.817
山东	0.475	0.767	0.912	1.020	0.871	0.716	0.914	0.949	1.020	0.899
河南	0.269	0.372	0.738	1.023	0.569	0.662	0.713	1.000	1.022	0.839
湖北	0.205	0.269	0.419	0.624	0.352	0.636	0.690	0.759	0.934	0.735
湖南	0.238	0.301	0.487	0.814	0.413	0.660	0.727	0.864	1.000	0.789
广东	0.286	0.506	0.832	1.030	0.640	0.608	0.767	0.955	1.030	0.835
广西	0.281	0.296	0.358	0.454	0.334	0.693	0.698	0.773	1.001	0.779
海南	1.123	1.013	1.032	1.002	0.948	1.091	1.001	1.003	0.867	0.933
重庆	0.333	0.313	0.415	0.512	0.379	0.735	0.697	0.823	1.001	0.790
四川	0.187	0.239	0.418	0.590	0.332	0.635	0.670	0.770	0.933	0.729
贵州	0.234	0.266	0.310	0.354	0.284	0.383	0.687	0.751	0.812	0.684
云南	0.266	0.271	0.355	0.407	0.319	0.695	0.726	0.811	0.786	0.758
陕西	0.437	0.399	0.382	0.442	0.408	0.704	1.000	1.000	1.001	0.906
甘肃	0.336	0.344	0.372	0.388	0.361	1.000	1.000	0.790	0.743	0.888
青海	1.196	1.002	0.893	1.008	0.963	1.158	1.001	0.892	1.002	1.004
宁夏	1.038	0.935	0.534	0.473	0.772	1.006	0.931	0.679	0.715	0.881
新疆	0.381	0.354	0.304	0.302	0.331	0.507	0.693	0.649	0.644	0.677
全国	0.475	0.503	0.571	0.692	0.545	0.743	0.817	0.858	0.915	0.832

4 碳中和目标下中国省域碳排放效率分析

4.1 指标数据分析

本节以我国 30 个省份整体的空间维度和时间维度的 2005 年-2020 年的数据总和为基础,从资本投入、劳动力、能源、技术创新、森林碳储量、GDP、二氧化碳排放量年度和个体的汇总数据出发,对投入产出数据进行统计性分析。

4.1.1 空间维度分析

将我国 30 个省份 2005 年-2020 年的投入产出指标数据分别求和,对各省指标数据的汇总结果运用 ArcGIS 对其展开空间分析,如图 4.1 所示。由于各指标数据的量纲完全不同,为了更直观的显示出各指标的柱状图在不同省份之间存在的差别,对数据的量纲在单位上做了放大的处理,具体结果如图 4.1 的图例所示,其中零碳电力生产占总生产的比重做了放大十万倍的处理。

在我国经济稳步提升的条件下,为能在 2030 年实现碳达峰,2060 年实现碳中和,必须重视各地区的二氧化碳排放量。从二氧化碳排放量来看,在空间上呈现出由东向西、由偏东北向偏西南逐渐减少的趋势,其中河北、山东、江苏二氧化碳排放量相比其他地区偏高;从二氧化碳的吸收的角度来看,各地区的城市绿地面积呈现出东南到西北递减的趋势;从零碳电力生产占各省份电力生产总量的比重来看,呈现出中部地区较高,东部地区和西部地区递减的趋势。

综上所述,东部沿海地区投入产出总量较高,二氧化碳排放量也较高,森林绿地面积较大,二氧化碳吸收力度较好,但零碳电力占比较低。西部地区虽各投入产出总量较低,森林绿地面积由于地理位置和气候的原因,相比其他地区面积较小,但青海和宁夏的零碳电力占比较高,在二氧化碳减排方面有一定的贡献。同时中部地区投入产出总量相比其他省份处于中等,城市绿地面积相比东部沿海地区较低,但零碳电力占比在我国处于较高的水平。为了更好的确保碳中和目标能如期实现,中部地区在发展科技提高零碳占比的同时也要注重绿地面积的调整。东部地区在开发城市绿地面积的同时,也应适当提高自身在零碳电力生产方面的

短板，提高绿色能源的使用频率。



图 4.1 各省投入产出各指标总量分布

4.1.2 时间维度分析

为了能够从时间维度方面对我国在碳排放效率在投入产出指标上的投入进行分析，将每年各省的指标数据求和，绘制出如下图 4.2 连线后的散点图。其中零碳电力的占比则是用每一年所有省份的零碳电力生产总量比所有省份的电力生产总量计算而来。

从长期来看，各投入产出指标均为上升趋势。从产出指标的数据来看，GDP 的上升趋势最为平稳，单调递增且趋近于一条直线。而二氧化碳排放量则是呈现出 2005 年-2011 年飞速增长，2011 年-2016 年增长速度明显下降，排放量缓慢增长趋于平稳乃至出现下降，2016 年之后增长速度再次提高。通过对投入指标数据增长趋势的观察不难看出，2011 年-2016 年二氧化碳排放量增长速度出现的变化主要是受到能源消费总量及零碳电力生产占总电力生产占比的影响。从能源消

费总量和二氧化碳排放量趋势来看，二者具有极强的相关性关系，增长趋势基本相同，由此可以看出，我国的二氧化碳排放受能源消费总量的直接影响，绿色能源的生产对二氧化碳的减排有着直接影响。而零碳电力占比在 2011 年之前占比极低且不断下降，从 2011 年之后飞速提高，于此同时，二氧化碳排放量出现缓和。从 2015 年过后，零碳电力占比的增长速度开始下降，再加上能源消费总量在 2011 年-2013 年的平缓期过后开始增长，最终导致 2016 年过后的二氧化碳排放量再次呈现出逐年提高的趋势。从短期来看，近五年的投入产出数据，除了年末从业人数之外，都呈现出上升的趋势。从 GDP 的增长来看，劳动力的部分流失对我国经的增长并没有产生影响，可以猜测我国目前的劳动力可能是碳排放效率的一个冗余量。

综上所述，通过对投入产出指标数据在时间维度上的分析结果来看，本次研究选取的指标具有经济意义且符合常规分析逻辑，可以用来分析我国在“碳中和”目标下各省的碳排放效率问题。

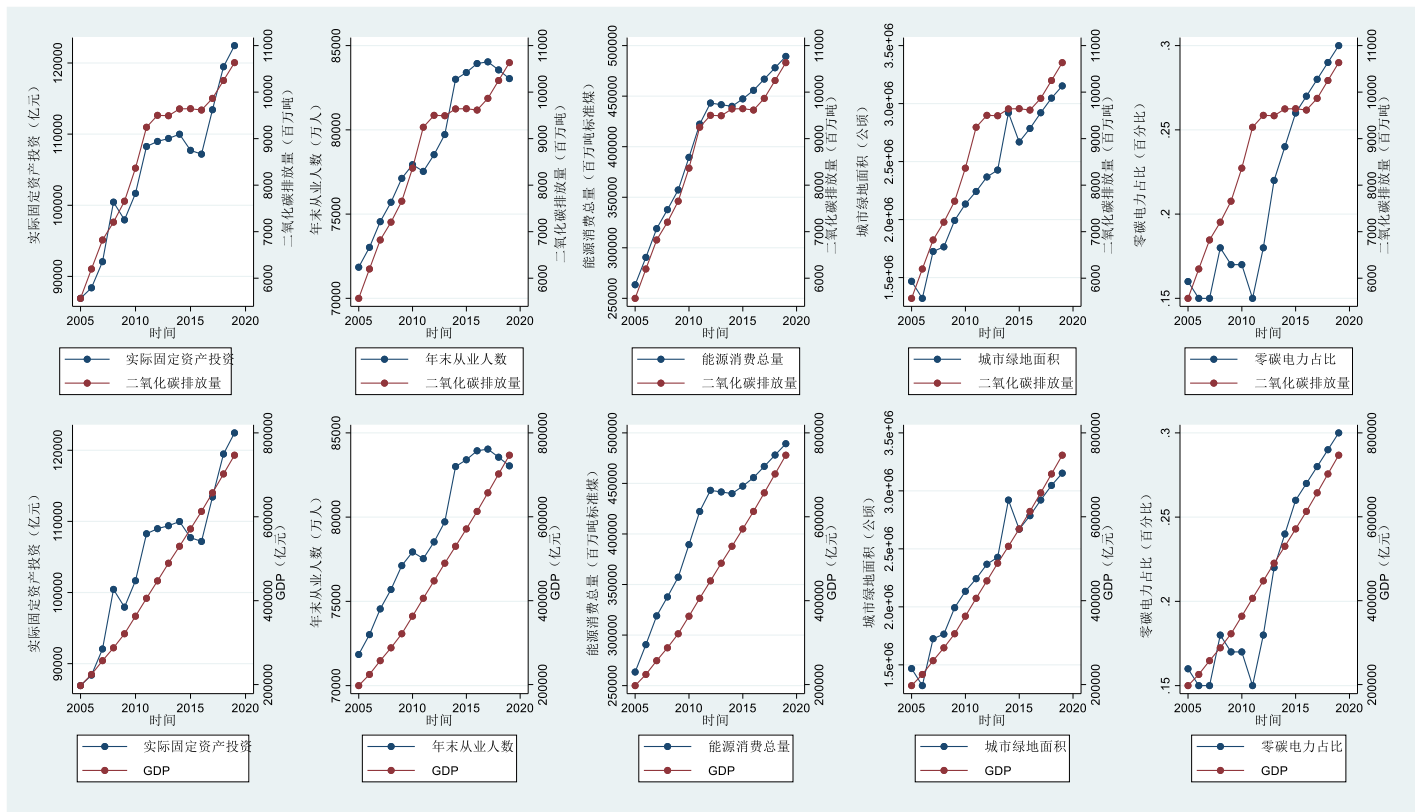


图 4.2 各指标数据的时序散点图

4.2 第一阶段碳排放效率测算结果分析

将我国各省份 DEA 模型的投入变量和产出变量数据代入非期望产出超效率 SBM 模型，测得碳排放效率值如表 2 所示，受限于篇幅原因，为使其具有代表性和全面性，表 3.2 中只列出了 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年各省份的效率值。

通过表 3.2 可以看出，在“碳中和”目标下，2005-2020 年之间我国整体的碳排放效率呈现出较为明显的上升趋势，上升幅度较小，且年均碳排放效率值为 0.545，说明在环境因素的影响下，我国整体碳排放效率目前处于较低水平，对于在 2060 年实现“碳中和”的碳减排目标来看，存在较大压力。年均碳排放效率水平靠前的省份主要为上海、天津、青海、海南、北京，其年均效率值都在 0.9 以上，年均碳排放效率水平靠后的省份主要为贵州、云南、新疆、辽宁等，其年均碳排放效率值都在 0.4 以下，与整体平均效率值还存在着较大差距，对于落实“碳中和”目标的完成，效率值过低地区应结合当地环境特点及区位优势，优化产业结构，提高环境规制强度，在经济稳步提升的同时做好节能减排工作。

总体来看，我国碳排放效率值在不同省份之间存在较大差异，对比 2020 年效率最高的福建、广东、江苏的碳排放效率不小于 1 的省份，新疆、山西、贵州、甘肃等地区的效率值与前者最高相差 0.73，由此可见我国各地区的碳排放效率存在较为严重的不平衡现象。同时，从 DEA 模型本身考虑，不同地区效率值存在的较大差异可能是因为外部环境等因素所造成的，此时，需要进一步考虑环境变量、管理无效率或是随机噪音是否对效率值产生了较大的影响，从而更准确地测算各地区的碳排放效率。

4.3 第二阶段 SFA 回归结果分析

第一阶段 DEA 模型效率测算结果中的松弛变量可能会受到外部环境因素、随机干扰项、内部管理无效率等多方面的影响，故在第二阶段通过 SFA 回归，将资本投入、劳动力投入、能源消耗、城市森林碳储量和技术创新的松弛变量作为被解释变量，将产业结构、城镇化水平和环境规制作为解释变量建立 SFA 回归模型，回归结果如表 4.1 所示。

对表 4.1 中的相关检验结果进行分析后可知：各环境变量对松弛变量的影响

除了低碳技术创新不太显著，其余均显著；单边似然比检验统计量 LR 的值均能通过 1% 的显著性水平检验，说明在各省当中存在着管理无效率现象，需要进行 SFA 回归对其进行剔除；各指标松弛变量的 γ 值均在 0.8 左右，接近于 1，且均能通过 1% 的显著性水平检验，说明外部环境因素和管理无效率是影响各投入冗余的主要原因。由此表明，该模型设定具有一定的可靠性，外部环境因素对碳排放效率存在影响，需要对其投入的原始值进行调整，剔除外部环境因素的影响。

表 4.1 第二阶段 SFA 回归结果

变量	资本投入 松弛变量	劳动力投入 松弛变量	能源消耗 松弛变量	城市 森林碳储量 松弛变量	低碳技术创新 松弛变量
常数项	1312.85*** (11.47)	3598.83*** (8.09)	8631.81*** (14.23)	-0.25 (-0.47)	51.18*** (10.3)
产业结构	4841.00*** (19.94)	2596.97*** (3.89)	2357.48*** (3.68)	10.17*** (23.05)	-5.45 (-0.76)
城镇化水平	-2118.31*** (-6.87)	-3567.77*** (-8.05)	1785.5391 (1.23)	-1.79** (2.10)	50.45*** (9.69)
环境规制	4254.39*** (706.43)	-255.23602 (-0.26)	25360.21*** (74.59)	7.19 (1.01)	1.88 (0.09)
sigma-squard	1.27×10^6 *** (1.05×10^6)	1.94×10^6 *** (2.02×10^5)	3.34×10^7 *** (3.14×10^7)	18.82*** (13.53)	4277.31*** (3.94)
γ	0.74*** (40.06)	0.85*** (81.57)	0.85*** (85.02)	0.77*** (33.18)	0.99*** (529.7)
LR 单边误差	200.92***	383.24***	391.53***	217.65***	929.54***

注：1.65<|t|<1.96 时，p<0.10；1.96<|t|<2.58 时，p<0.05；|t|大于 2.58 时，p<0.01
表中*、**、***分布表示通过了 10%、5%、1% 的显著性水平检验

4.3.1 产业结构影响分析

从产业结构对各投入要素的松弛变量的影响来看，产业结构对低碳技术创新的松弛变量影响并不显著，与资本投入、劳动力投入、能源消耗和城市森林碳储量的松弛变量之间存在较为显著的正向关系。说明第二产业所占比重越高，资本投入、劳动力投入、能源消耗和城市森林碳储量的松弛变量越高，即各项投入对应的冗余越多。其主要原因为：近年来提出的“碳中和”目标在对低碳减排提出新要求的同时，也提高了产业转型在发展战略中的地位。产业结构反映第二产业

在三大产业中所占的比重，而工业为主的第二产业以固定资产投资作为支撑，伴随着大量的能源消耗^[46]，故第二产业在占比减少的同时也伴随着资本投入和能源消耗的缩减，从而使得资本投入和能源消耗的冗余下降。产业结构的转型在一定程度上带动了有较大劳动力市场的第三产业的崛起，促进劳动力过剩的转移，避免了劳动力的投入浪费，从而减少劳动力存在的冗余。森林碳储量作为实现“碳中和”目标的重要方法，当第二产业占比减少时增加对森林碳储量的需求有助于缩小碳排放和碳吸收之间的差距，从而实现“碳中和”的最终目标。

4.3.2 城镇化水平影响分析

从城镇化水平对各投入要素的松弛变量的影响来看，城镇化水平对能源消耗的松弛变量影响并不显著，与资本投入、劳动力投入和城市森林碳储量的松弛变量呈现显著的负向关系，与低碳技术创新松弛变量呈现显著正向关系。说明当城镇化水平提高，即城市人口所占比重增加时，低碳技术创新的松弛变量增加，资本投入、劳动力投入和城市森林碳储量的松弛变量减小。其主要原因为：城镇化水平的提高需要城镇基础设施的不断投入，城镇化水平越高，所需的资本和劳动力越多，同时，在城镇中进行投资活动相对于在农村或者是乡镇中进行投资可以带来更高的经济效益^[47]，城镇化进程的加快有助于推动投资规模的扩大，从而创造出更多的劳动力需求，进一步扩大了资本和劳动力的需求，导致其投入冗余减少。城镇化水平的提高加剧了能源的消耗，进一步提高了对低碳技术创新的要求，从而使得相关投入不断增加，但是由于管理无效率的客观存在及其存在的技术难题，使其投入未能转化为有效产出，从而造成了冗余的增加。城镇化水平提高的同时也使得自然绿地面积被城镇基础设施覆盖，对城市森林碳储量的需求进一步提高，导致城市森林碳储量的投入冗余不断下降，从而提高城市绿地面积在改善城区环境上所发挥的作用，减少投入中存在的冗余，提高碳排放效率。

4.3.3 环境规制影响分析

从环境规制对各投入要素的松弛变量的影响来看，环境规制对资本投入和能源消耗的松弛变量有较为显著的影响，且呈现出正向关系。说明工业污染治理投资额与 GDP 的比值越高，资本投入和能源消耗的松弛变量越高，即资本投入和能源消耗的冗余越大。其主要原因为：工业污染治理投资额比值的增加有助于加

快工业绿色化生产的进程，促进工业技术进步，加快工业绿色转型，从而减少对于高碳排放能源的依赖，在保证产量的同时尽可能的减少能源的投入。工业技术进步的同时也减少了固定资产的使用及损耗，从而在减少资本投入的同时维持原有产量，提高碳排放效率。政府作为环境规制政策的制定者，在治理环境污染方面一直有较高的投入，但是由于投入的要素未能产生实际效益，污染问题仍然日益严重，许多没有得到有效利用的投入转化为了投入的冗余，最终反而抑制了碳排放效率的提高。

4.4 第三阶段效率测算结果分析

4.4.1 整体分析

通过 SFA 回归结果可知，环境因素和管理无效率对碳排放效率的投入要素有较大的影响，依据 SFA 回归结果对投入数据进行调整，调整后各省份的碳排放效率在一定程度上可以剔除产业结构、城镇化水平和环境规制所带来的影响。将调整后的投入和原有的产出数据再次带入非期望产出超效率 SBM 模型，测得各省份碳排放效率值如表 3.2 所示。

相较于第一阶段测得的碳排放效率值，在剔除了产业结构、城镇化水平和环境规制对效率值的影响后，不同省份的碳排放效率出现了较大的变化，调整后的碳排放效率呈现出明显的上升趋势，年均碳排放效率明显提高，效率值由 0.545 提高至 0.832。且效率较高的省份与效率较底的省份之间的差距明显缩小，从 2020 年各省份碳排放效率计算结果来看，效率值最高的广东省与效率值最低的山西省相差 0.487，相比第一阶段效率值的极差下降了 0.25，且我国的碳排放效率值整体上处于较高水平，有望于 2060 年实现“碳中和”的最终目标。

4.4.2 环境变量对碳排放效率的影响

本文利用三阶段 DEA 模型剔除环境变量前后效率值的变化来反映自 2005 年-2020 年各省的产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率的作用结果，从而甄别和探析“碳中和”目标下碳排放效率的区域异质性影响。

从第三阶段测算结果中的表 3.2 可以看出，多数省份第一阶段和第三阶段的效率值存在明显变化，为了能更客观反映外部环境对各省份碳排放效率的影响，

将我国 30 个省份第一阶段和第三阶段 2005 年-2020 年的效率值绘制折线图。从图 1 中可以看出, 各省份第一阶段和第三阶段效率值曲线呈现出相交、重合和平行的特点, 按其图形特征可定义为“交叉型”、“重合型”和“平行型”。

第一类是交叉型, 主要包括图 4.3 中第一行的 6 个省份。该类型中的省份, 其碳排放效率值的主要特征是其第一阶段和第三阶段的效率值曲线在 2020 年前后在效率值 1 点处相交。“交叉型”的省份呈现出的此种特征说明外部环境因素对其碳排放效率的抑制作用是边际递减的, 即该类型的省份在产业结构、城镇化水平和环境规制的不断调整过程中对自身的碳排放效率产生的抑制作用不断减少, 效率值不断提高。

第二类是“重合型”, 主要包括图 4.3 中第二行所有省份和第三行宁夏, 共计 7 个省份。该类型中的省份, 其碳排放效率值的主要特征是第一阶段和第三阶段的碳排放效率值虽然有些波动, 但大致相等。对于该类型的省份, 外部环境因素对其碳排放效率的影响较小, 且多数省份效率值均在 1 附近上下波动, 说明这些地区的碳排放效率较高, 其产业结构、城镇化水平和环境规制符合当地在发展经济过程中低碳排放的要求, 效率值一直维持在较高的水平。

第三类是“平行型”, 主要包括图 4.3 中后三行除宁夏以外的所有省份, 共计 17 个省份。该类型中的省份, 其碳排放效率值的主要特征是第一阶段和第三阶段大致平行且无交点, 第一阶段的碳排放效率曲线位于第三阶段的碳排放效率曲线上方, 即第三阶段的效率值整体上明显高于第一阶段的效率值, 说明外部环境因素对这些省份碳排放效率的提高是不利的。同时从图 1 中还可以看出, 属于“平行型”的省份大部分效率值低于 1, 这说明相较于“交叉型”和“重合型”的省份, “平行型”省份地区的产业结构、城镇化水平和环境规制与碳排放效率之间存在明显不协调现象, 由此可知, 提高其碳排放效率在调整投入产出比的同时, 也应重视外部环境因素对其产生的影响, 通过对外部环境的整改提高其碳排放效率, 从而实现在经济增长的同时减少碳排放, 最终实现碳中和的目标。

总体而言, 根据上述分析和比较, 在剔除了外部环境和管理无效率之后, 各省的碳排放效率均有所提高, 外部环境对效率值存在一定的抑制作用。三种类型中“重合型”省份的碳排放效率平均水平最高, “交叉型”次之, “平行型”最小。据此可以得出, 外部环境对各省的碳排放效率值存在显著影响, 影响程度在不同省

份之间存在差异。

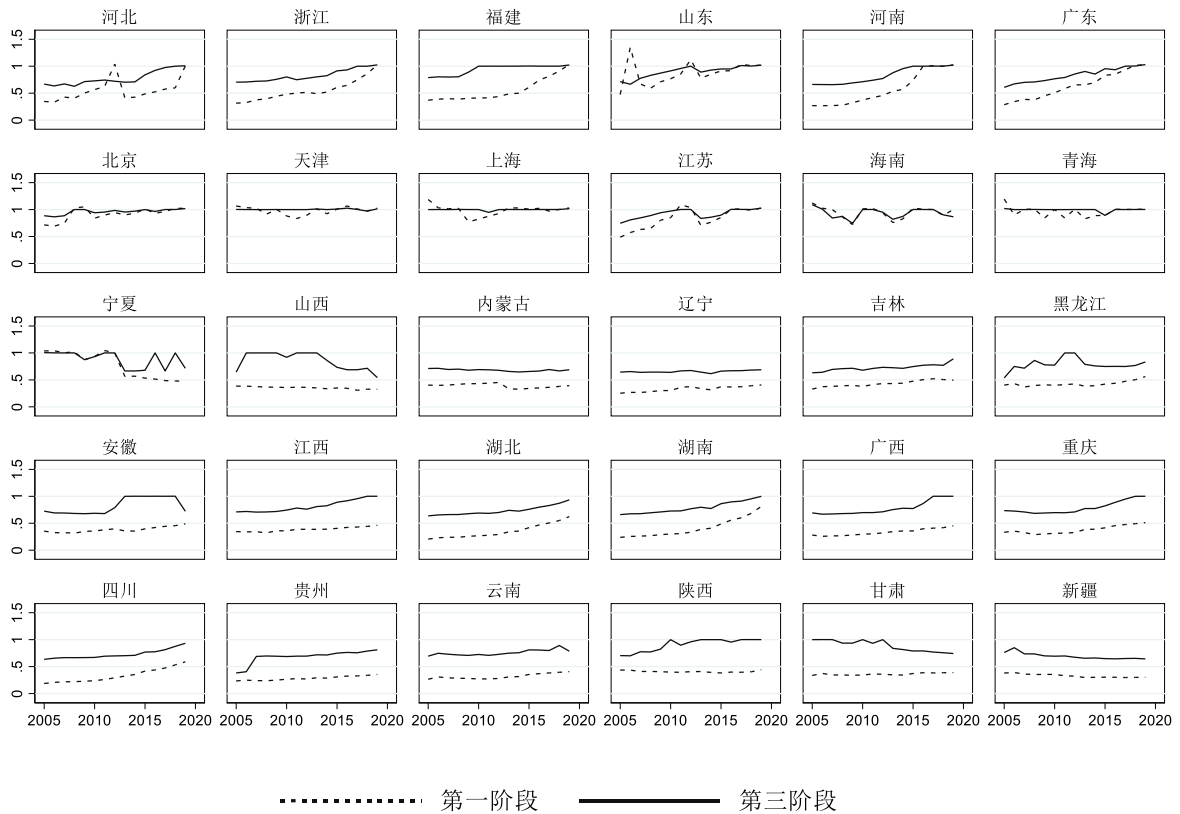


图 4.3 第一、第三阶段碳排放效率值比较

4.4.3 碳排放效率空间演变特征分析

本文通过 ArcGIS10.5 软件对我国各省份“碳中和”目标下碳排放效率进行空间刻画，选取 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的效率值数据制作的空间演变图如图 4.4-图 4.7 所示。

由图 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的效率值分布图可以看出：从整体来看，我国各地区的碳排放效率呈现出东南部地区高，西北部地区低的态势，具有一定的空间集聚性。从 2020 年的碳排放效率分布图可以看出，碳排放效率处于 1 以上的北京、天津、山东、江苏、上海、浙江等 17 个省份均处于有效水平；其他 13 省份的碳排放效率则小于 1，其中四川和湖北效率处于 0.9~1 之间，东北的黑龙江、吉林与南部的贵州、海南这四个省份效率值处于 0.8~0.9 之间，其余无效地区的效率值则相对较低，主要分布于我国的中部及西北部地区。通过对投入产出指标数据进行分析后不难发现，中部地区和部分西北地区得益于气候

和地理位置的优势,在低碳科技创新投入要素中有较大优势,即该地区零碳电力生产占电力总生产的比重较高,是我国零碳电力的主要来源之一,在一定程度上促进了周边省份的低碳发展;但是由于自身经济发展水平的相对落后,导致其碳排放效率较低。中西部地区应加大各生产要素的投入,提高生产力水平,从而进一步提高低碳科技创新能力,形成良好的内部循环,促进我国“碳中和”目标的顺利实现。

从 2005 年、2010 年、2015 和 2020 年的空间分布图来看,我国碳排放效率时空变化显著:①2005 年从整体来看我国各地区效率较低,东部沿海地区效率相较于中西部地区偏高,但仍处于无效阶段,差距不大。其中,北京、天津和上海等地区得益于地方经济的飞速发展,其效率值较高,且天津和上海效率值大于 1,处于生产有效水平。西部地区的甘肃和青海由于在 2005 年联合实施的清洁能源改造计划取得了较大成效,在低碳方面取得了较好的效果,故其效率值较高,而南部地区的海南主要得益于气候及地理条件优势,零碳电力方面有较大的投入,在二氧化碳减排方面取得了较高成效,碳排放效率也相比较较高。②2010 年后,中部地区和东部地区效率有了明显提高,上海和天津保持效率有效的同时,山东、江苏、浙江、福建等地区的效率值也提高一个等级,且 2010 年由于福建全面启动实施的“四绿”工程,使得其碳排放效率值迅速提升三个等级直接成为生产有效地区,西部地区的甘肃、宁夏和陕西等地的效率值较高,其生产处于有效水平,且伴随着以山西为中心的中部地区效率开始出现提高趋势。③到了 2015 年,中部地区从北向南各省份效率均提高一个等级,南部地区效率值有明显提高,北部地区的内蒙古,新疆仍处于低效率阶段,同时甘肃、宁夏和青海的碳排放效率值开始下降,其原因主要是由于该地区在 2005 年至 2015 年期间,清洁能源发展水平虽然较高,但是其经济发展相比于其他地区较为缓慢,从而导致其相对效率值下降。中部地区和东部地区碳排放效率进一步提高,且东部所有地区的效率值均达到了 0.9 以上的高水平,并且有明显的向中部延伸的趋势。④到了 2020 年,沿海地区的碳排放效率均步入了有效生产阶段,中部地区效率值提高的范围不断扩大,河南、湖北和湖南受东部地区生产效率不断提高的影响,增长速度比中部其他地区偏快。

总的来说,我国东部、中部和西部地区 2005 年-2020 年的碳排放效率的演变

特征存在差异：中部地区和东部地区的碳排放效率一开始较低，随着时间的推移碳排放效率值不断提高，且东部地区的增长速度要明显大于中部地区；西部地区部分省份的碳排放效率值呈现出 U 型增长，在 2005 年时效率值较高，到 2010 年以后效率值开始下降，2015 年以后效率值开始回升。除了我国西部和中部的部分地区低碳发展较为缓慢，其余地区经济的碳排放效率均在不断提高，具有明显的空间特征，同时这也说明我国碳排放效率区域间发展差异较大，缩小区域差异仍是当前需要解决的重点问题。

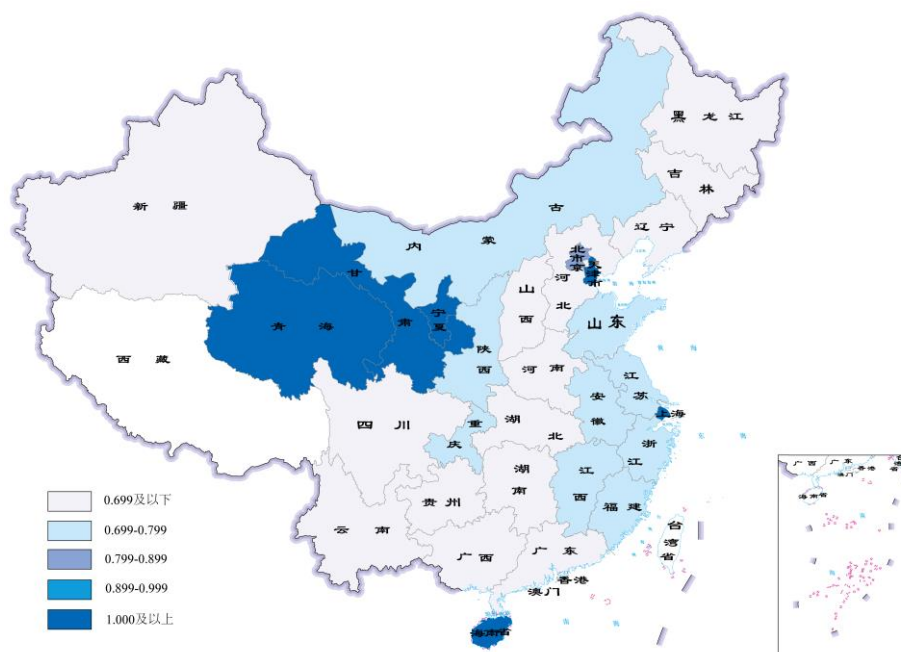


图 4.4 2005 年碳排放效率空间分布图

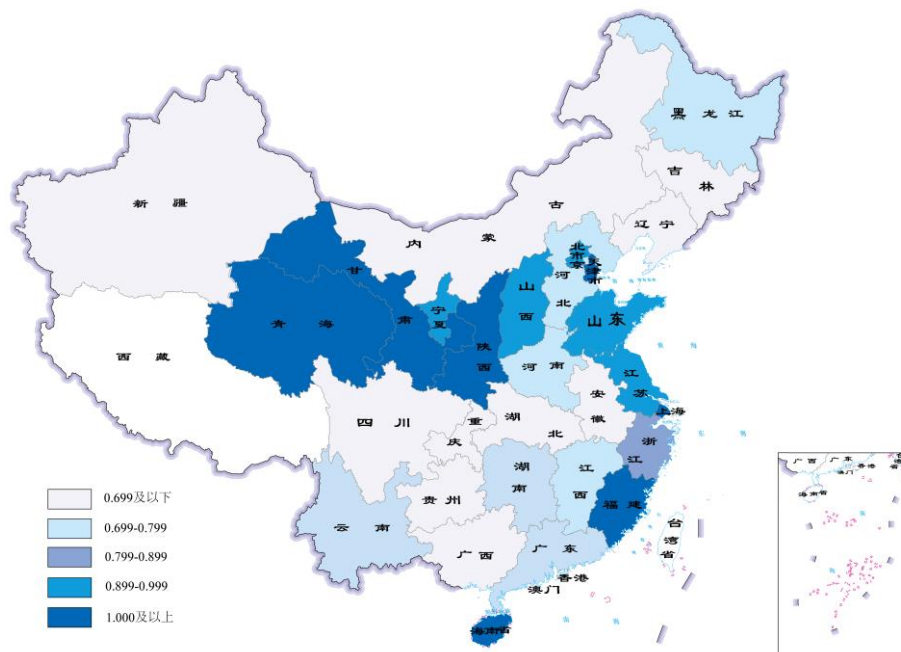


图 4.5 2010 年碳排放效率空间分布图

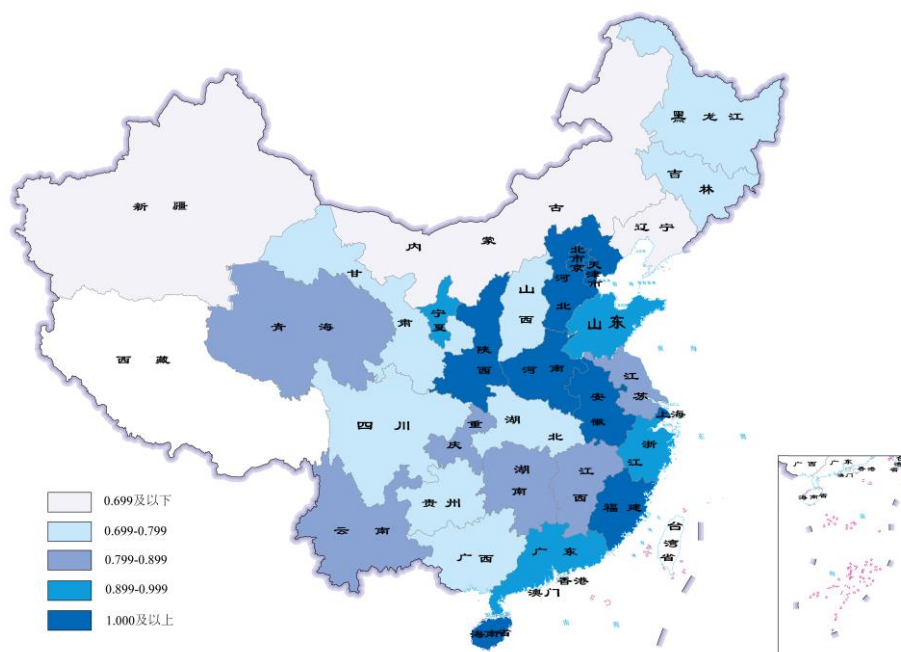


图 4.6 2015 年碳排放效率空间分布图

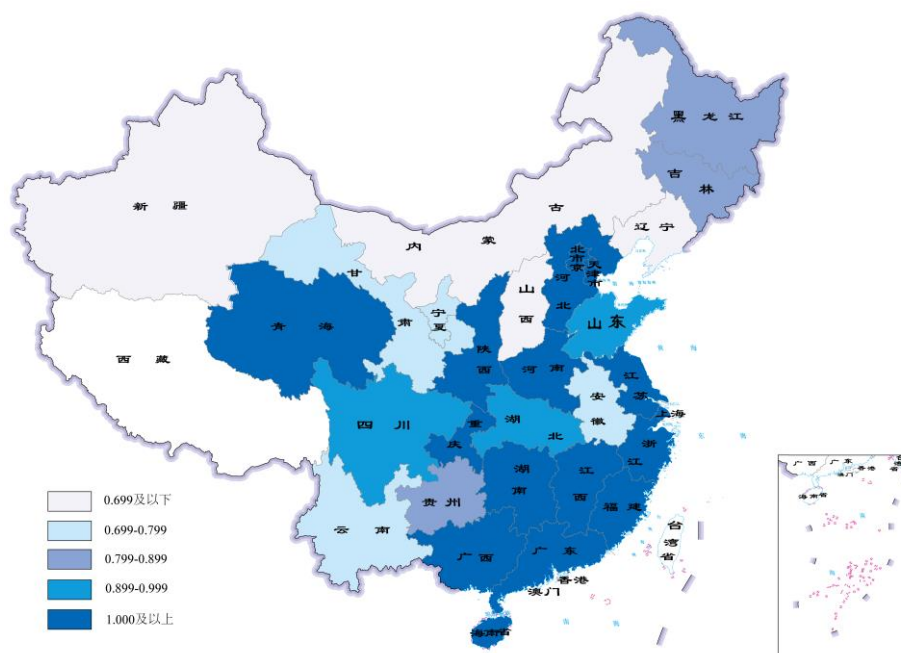


图 4.7 2020 年碳排放效率空间分布图

注：图 4.4-图 4.7 是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4630 的标准地图制作，底图无修改

4.4.4 碳排放效率提高路径分析

通过对各投入产出指标冗余和不足的分析，可以反映碳排放效率损失的原因，

有助于对低效率省份碳排放效率的提高提供路径选择。在模型运行结果的基础上,对 2020 年各省份的投入冗余、期望产出不足及非期望产出冗余进行计算,结果如表 4.2 所示。

表 4.2 2020 年我国低效率省份 DEA 投影分析结果

省份	投入冗余值					非期望产出过冗余	期望产出不足值
	资本	劳动力	能源消耗	城市森林 碳储量	低碳 技术创新	二氧化碳	GDP
辽宁	25.43	0.00	2661.81	20733.91	0.44	418.19	0.00
黑龙江	0.00	0.00	0.00	9894.05	0.00	75.50	0.00
安徽	0.00	408.61	0.00	13944.43	0.00	282.19	0.00
湖北	0.00	6.70	142.84	0.00	0.00	44.20	0.00
海南	0.00	65.23	267.50	5762.03	27.81	1.54	0.00
四川	0.00	205.77	462.66	0.00	2.35	32.01	0.00
贵州	0.00	18.56	219.39	17523.97	0.00	74.75	0.00
云南	0.00	141.05	1006.83	11435.12	10.72	75.54	0.00
甘肃	0.00	23.57	426.25	7825.72	0.00	92.67	0.00
宁夏	0.00	0.00	9.60	8999.88	0.00	125.87	0.00
新疆	0.00	0.00	1689.30	46665.91	0.00	297.82	0.00

从投入指标来看,除资本投入之外,其余各项投入指标在许多省份的碳排放效率中均明显存在冗余,这说明部分省份生产要素上的投入存在资源的浪费。从表 4.2 可以看出,劳动力投入、能源消耗投入和城市森林碳储量投入的冗余是表中各省份碳排放效率损失的首要影响因素。

劳动力投入作为生产要素的重要组成部分,是最重要的经济资源。表 4.2 中辽宁、湖北、海南、四川、贵州、云南、甘肃存在的劳动力投入冗余表明在这些省份的劳动力市场上,劳动力的初始供给大于有效供给,即存在劳动力过剩的现象。从前文 SFA 回归结果的分析可知,劳动力投入的冗余主要受到了城镇化水平的影响,城镇化水平越高,劳动力冗余越低,即在存在劳动力投入冗余的省份中存在着城乡间转移的障碍,需加大人力资本投资,使过剩就业者向高效就业者过渡,创造新的就业机会,调整就业结构。

能源消耗是绿色低碳发展的重要特征指标。从表 4.2 可以看出,除黑龙江和安徽以外,其他省份在能源消耗上存在着过度的投入或浪费的现象。从前文的 SFA 回归结果的分析可知,能源消耗主要受产业结构及环境规制的影响,说明在绿色低碳发展过程中,辽宁、黑龙江、安徽、湖北、海南、四川、贵州、云南、甘肃、宁夏、新疆地区在能源消耗上存在冗余,当地相关部门在制定产业政策方

面，一方面要调整产业结构，降低第二产业所占的比重，减少能源消耗的同时降低碳排放；另一方面要增加工业污染治理投资额，在促进工业技术进步的同时减少对于高碳排放能源的依赖。

城市森林碳储量和低碳技术创新在碳排放效率方面有着重要作用，是“碳中和”目标对于提高碳排放效率的关键要素投入，主要从二氧化碳吸收和二氧化碳减排两个角度切入。从城市森林碳储量和低碳技术创新的冗余来看，除湖北和四川以外的其余地区均在城市森林碳储量的投入中存在冗余，在低碳技术创新方面，辽宁、四川、云南、海南存在冗余，其余地区则不存在冗余。其主要原因在于 2016 年国家在加强城市规划建设管理提出的若干意见当中重点强调了绿地服务居民日常生活的重要性，要求大力发展城市绿化，这使得各省近几年以来城市绿地面积均有不同程度的扩大，而城市作为经济发展的主导力量，碳储能力有限，对于实现“碳中和”目标未来应将重点放在城区以外的森林自然保护区建设及土地开垦项目，逐步提升木材密度和森林蓄积量，减少城区绿地面积的不断扩张，从而提高碳排放效率。同时从各省低碳科技创新投入中存在的冗余来看，大部分地区不存在冗余，这说明现阶段提高低效率省份的碳排放效率，实现“碳中和”的目标，或许可将低碳技术创新作为切入点，提高零碳电力的科技研发投入，从能源生产方面减少二氧化碳排放，提高绿色低碳发展的效率，最终实现“碳中和”目标。

从产出指标来看，期望产出 GDP 没有出现不足，其主要原因是受限于自身经济生产力水平的原因，在现有的投入规模下，无法进一步提高自身的经济产出，需要在保持经济产出不变的条件下优化投入结构，减少各生产要素的投入数量，从而提高碳排放效率。而二氧化碳产出在表 4.2 所列出的省份中均存在冗余，且其冗余在各省份的二氧化碳排放原始数据中占有较高的比重，说明这些省份的经济碳排放效率低，一方面受限于自身经济发展的水平，另一方面二氧化碳的过量排放也是一个重要原因，对于低碳减排亟需提高科技创新的生产投入，从根源上减少二氧化碳排放，从而提高碳排放效率。

4.5 碳中和对碳排放效率的影响

4.5.1 整体层面分析

不考虑反映“碳中和”目标的低碳技术创新和森林碳储量，对碳排放效率重新进行测算，测算结果与碳中和目标下的碳排放效率进行对比，结果如图 4.8 所示。从整体来看，我国碳排放效率为上升趋势，在“碳中和”目标下的我国碳排放效率有明显提高，提高幅度在 0.1 左右上下波动，这说明“碳中和”目标的提出对于促进我国经济发展和碳减排有较强的积极作用，同时碳排放效率值的提高也进一步缩小了与“碳中和”目标之间的差距，从侧面也反映了我国在 2060 年实现碳中和目标是切实可行的。

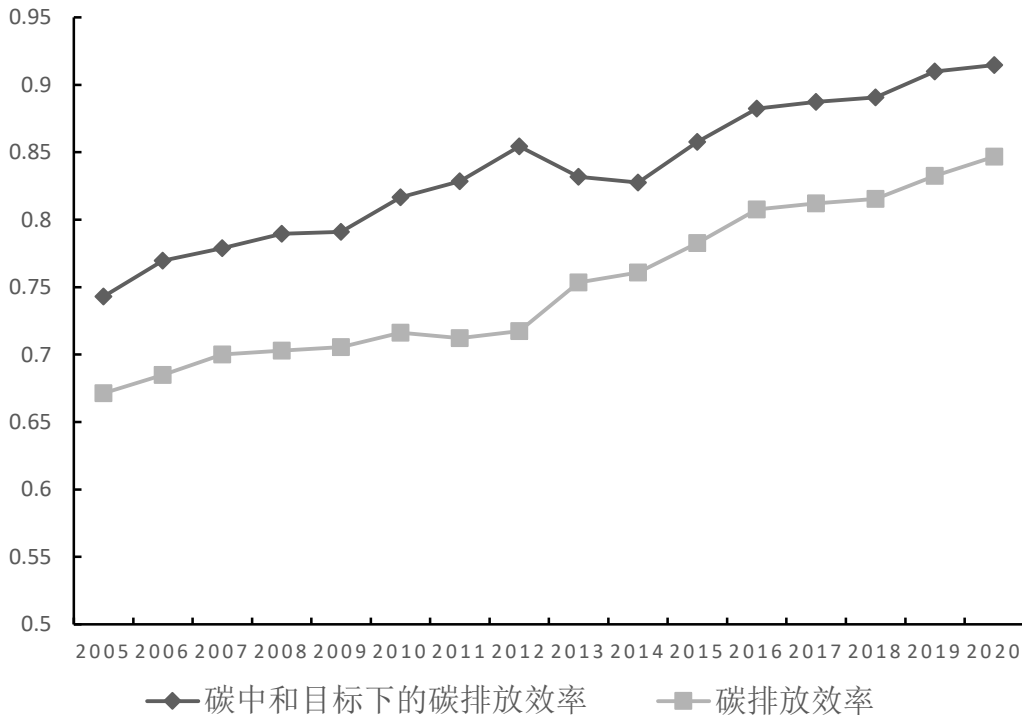


图 4.8 “碳中和”指标剔除前后我国整体碳排放效率变化趋势图

对图 4.8 中二者效率值的变化趋势图做进一步分析发现在 2012 年-2014 年间，碳排放效率值增长速度明显加快，而在“碳中和”目标下的碳排放效率值却出现了下降的趋势，在对投入数据进行分析后发现，在 2013 年和 2014 年间，各投入指标数据虽然均以一定的速率在增长，但用来反映碳中和目标的低碳技术创新和森林碳储量出现了增长速度的下降，从而导致 2013 年和 2014 年的二氧化碳排放量增幅上升，再加上 GDP 的增长速度没有出现明显加快，最终导致了碳中和

目标下的效率值出现了明显的下降,同时也再次说明了用来反映碳源和碳汇的低碳技术创新和森林碳储量对碳中和目标下的碳排放效率存在较大的影响。

4.5.2 省域层面分析

为了从省域层面分析碳中和对碳排放效率的影响,绘制如图 4.9 所示的各省在不考虑低碳技术创新和森林碳储量的前提下测算出的碳排放效率值。对比分析后发现:

“碳中和”目标下的效率值有较为明显的提高的地区有北京、天津、山西、内蒙古、上海、江苏、河北、河南、青海、安徽和山东。其中北京、天津、上海和青海的效率值处于 1 附近上下波动,说明这些地区的碳排放效率符合“碳中和”目标的要求,未来几十年北京、天津和上海可能是最先实现“碳中和”目标的省份。山西和内蒙古近几年的效率值较低,在 2020 年处于 0.6 左右的水平,实现“碳中和”目标还存在较大的压力,而江苏、安徽、河北、河南、陕西和山东在“碳中和”目标的影响下的效率值提高较快,近几年的效率值在 1 附近,说明这些地区在提高碳排放效率方面存在较大的潜力,未来江苏、安徽、河北、河南、陕西和山东地区要进一步稳固自身的碳排放效率,尽早实现“碳中和”目标。

“碳中和”目标下的效率值均没有明显变化的地区有辽宁、吉林、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、浙江、四川、贵州、云南、甘肃、新疆、内蒙古、黑龙江和宁夏,说明“碳中和”目标对以上地区的影响不太显著。其中,吉林、浙江、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川这些地区虽然“碳中和”目标下的效率值没有明显变化,但是其趋势一直保持增长,效率值在 2020 年基本上均达到 1 附近,说明这些地区的碳排放效率受碳中和目标的影响较小,未来的发展应将重点应放在投入的资本、劳动力和能源消耗在结构上的调整。辽宁、黑龙江、内蒙古、贵州、云南、甘肃、宁夏和新疆的效率值较低,要实现“碳中和”目标,提高碳排放效率,应全方位调整自身生产要素的投入结构,提高生产总值的同时将重点放在碳源和碳汇,从而避免出现经济实现快速增长但是却与“碳中和”目标背道而驰。

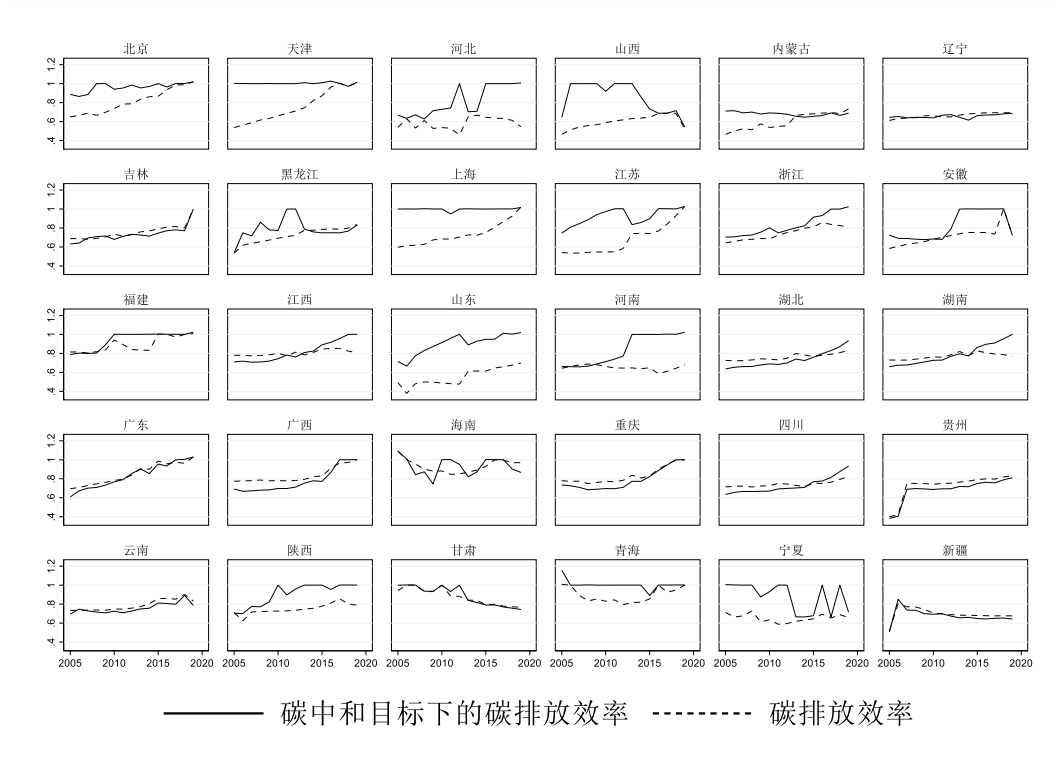


图 4.9 “碳中和”指标剔除前后我国各省碳排放效率变化趋势图

4.6 Malmquist-Lunenberger 指数动态分析

Malmquist 指数是一种以 DEA 模型为基础，反映全要素生产率动态变化的一种动态评价指标。当 Malmquist 指数的值大于 1 时，说明全要素生产率为增长趋势，若小于 1 时，则说明全要素生产率呈现下降趋势。Malmquist 指数将效率值可分解为三个部分：技术进步变化、纯技术效率变化和生规模变化。本文利用 MAXDEA 软件，采用带有非期望产出的 Malmquist-Lunenberger 指数模型计算出我国 2005—2020 年的 Malmquist 指数的动态变化值并将其进行分解，从空间效应和时间效应两个角度对其进行分析。

4.6.1 空间效应分析

为了更好反映出各省份之间存在的差异，选取 2020 年各省份的 Malmquist 指数计算结果来进行横向分析。从表 4.3 可以看出，在考虑非期望产出的情况下，综合来看，如果将非期望产出考虑在内，全国各地的全要素生产率与上年同期相比都呈上升趋势，在 2020 的年全要素生产率同比增长了 4.9%，技术进步与技术效率的贡献度分别为 6.5%和-1.6%，由此可以看出，技术进步是促进 2020 年全

要素生产力提高的一个重要因素。通过对中西部地区的分析可以看出，东部地区

表 4.3 2020 年各省份 ML 指数值变化和分解

地区	省份	malmquist	技术进步	技术效率变动	纯技术效率变动	规模效率
东部地区	辽宁	1.021	1.047	0.975	0.976	0.999
	上海	1.032	1.053	0.980	1.004	0.977
	北京	1.071	1.090	0.983	0.997	0.985
	福建	1.046	1.057	0.989	1.003	0.986
	山东	1.013	1.023	0.990	0.991	0.999
	浙江	1.043	1.047	0.996	1.005	0.990
	广东	1.064	1.066	0.998	0.999	0.999
	江苏	1.083	1.082	1.001	1.004	0.996
	河北	1.440	1.439	1.001	1.000	1.001
	天津	1.164	1.143	1.018	1.036	0.983
	海南	1.054	1.022	1.031	0.959	1.075
	广西	1.093	1.049	1.042	0.999	1.043
	均值	1.094	1.093	1.000	0.998	1.003
西部地区	甘肃	1.017	1.049	0.969	0.999	0.970
	青海	1.014	1.037	0.978	0.973	1.005
	新疆	1.037	1.043	0.994	0.997	0.997
	宁夏	1.029	1.031	0.998	1.017	0.981
	云南	0.886	1.055	0.840	0.834	1.008
	贵州	1.066	1.045	1.020	1.000	1.020
	陕西	1.100	1.048	1.050	0.998	1.051
	四川	1.093	1.032	1.059	0.932	1.135
	均值	1.030	1.043	0.988	0.969	1.021
中部地区	山西	0.995	1.040	0.957	0.750	1.276
	吉林	0.967	1.050	0.921	1.001	0.920
	内蒙古	1.027	1.052	0.976	0.999	0.977
	安徽	0.806	1.048	0.769	0.717	1.073
	河南	1.098	1.097	1.000	0.999	1.002
	江西	1.068	1.051	1.016	1.000	1.016
	重庆	1.063	1.054	1.008	0.999	1.009
	湖北	1.005	1.058	0.949	0.922	1.029
	黑龙江	1.096	1.072	1.022	1.008	1.014
	湖南	1.101	1.082	1.018	0.981	1.038
	均值	1.023	1.060	0.964	0.938	1.035
整体均值	1.049	1.065	0.984	0.968	1.020	

在 2020 年的技术效率均值为 1，说明与去年基本持平，且技术效率的下降主要由于中部地区和西部地区效率下降所导致的。对其原因进行更深一步的研究后发现，技术效率下降的主要原因是纯技术效率在各地区均有不同程度的下降，整体

下降幅度达到了了 3.2%。纯技术效率下降表明目前我国部分地区在制度、管理、技术等层面上仍存在很大的区域差距，其资源开发的能力和技术层次亟待提升。

从东部地区、中部地区、西部地区的差别来分析，三大地区的全要素生产率都取得了正增长，东部地区的增速为 9.4%，高于中部地区 2.3%的和西部地区 3%的增速。三大地区之间的技术效率变动趋势分别为：东部地区基本保持不变，中部和西部分别降低了 3.6%和 1.2%。从技术层面上来说，三个区域的技术水平都有提高，其提高速度以东部为最快，中部次之，最后是西部，说明三大地区的全要素生产率的进一步增长主要受限于技术效率的约束。通过以上分析可以发现，三大地区的全要素生产率提高的最首要的因素就是技术进步，这也间接体现出了三个区域的技术效率方面的一些问题，再次证明了我国各地区从面临着管理水平落后、生产规模与要素配置混乱、资源利用效率低下等问题。从各省的角度来看，东部地区的全要素生产率相比去年均处于增长的趋势，且河北的增长速度最快，高达 44%，全要素生产率相比去年下降最多的省份为安徽，下降了 20%。在技术进步方面，各省份均相比于去年为上升的趋势，由此可知，全要素生产率出现下降的山西、吉林、云南和安徽，技术效率的下降是其主要原因。其中，吉林技术效率的下降主要受规模效率的影响，而山西、云南和安徽技术效率的下降主要受纯技术效率的影响。

4.6.2 时间效应分析

为了更直观的展示我国全要素生产率在时序上的变化趋势，将每年的各项指数在省域上求均值并绘制折线图如图 4.10 所示。

从整体上来看，在 2006-2013 年期间，我国的全要素生产率都保持在一个较高的水平，但是在 2014 年，全要素生产率的增速出现了明显的下滑，而在 2015-2020 年期间，又开始呈现出上升趋势，并且存在一定的波动。产生这一现象的根本原因在于：在 2014 年以前，为了提高能源利用效率，我国对技术进行了大规模的投资，使得全要素生产率的增速的不断提高；而到了 2014 年，随着中国全面深化改革，对技术的投资力度逐渐减弱，部分地区的技术进步的增速逐渐放缓，有的地区甚至呈现负增长，从而导致全要素生产率的增速出现下降。随后，在改革的持续深化过程中，它的优势也逐渐显现了出来。虽然用于促进技术进步的资源投入有所下降，但改革的推进让各类科技成果能够快速进入到市场中，从而弥

补了前者所带来的负面效应，在 2015 年之后，我国全要素生产率增长速度快速回升，并随着市场变化伴随着轻微波动。

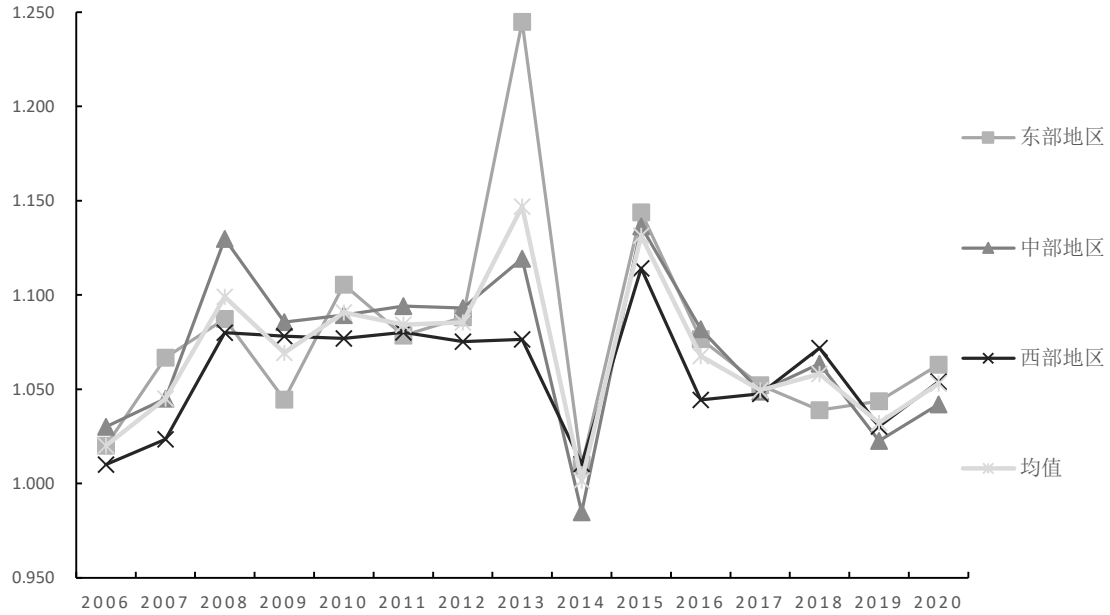


图 4.10 2006 年-2020 年全要素生产率区域变动对比

从东部地区、中部地区和西部地区的地区全要素生产率增长速度来看，中部地区和西部地区要明显低于东部地区，究其原因在于中、西部地区经济发展与东部地区存在较大差距，相对于欠发达区域，东部地区更易于吸引高端研究人员，且高科技公司更易于在该区域落地生根，因此，在全要素生产率的促进作用下，其低碳科技迅速发展，而中、西部地区的发展相对滞后。2013-2015 年，三大地区的全要素生产率均出现了较大波动，呈现出先下降后上升的趋势，东部地区的波动幅度最大，中部地区次之，西部地区波动幅度相对较小，该差异可能是由 2008 年的金融危机所导致的。国外金融危机对我国的影响在当时存在较强的滞后性，相对于中西部地区，东部地区受宏观政策环境的影响最大，故东部地区在 2014 年度内的全要素生产率增速的下滑幅度最大，但是由于其自身抵御风险实力较强，应对措施出台及时，使得其在 2015 年度内的全要素生产率增速有所恢复。中西部对宏观政策的反应虽然迟钝，但由于其企业规模相对较小，在东部地区的影响下全要素生产率的增速在 2015 年也出现了显著提高。从 2015 年以后，我国的绿色全要素生产率的增速比较接近，在 1.05 左右波动，没有明显的变化。

5 结论与建议

5.1 主要结论

本文将“碳中和”目标与碳排放效率相结合构建指标体系，首先采用三阶段 DEA 模型对我国 30 个省份 2005-2020 年碳中和目标下的碳排放效率进行测算并分析碳中和目标对碳排放效率的影响，同时对其空间演变特征进行分析，然后利用二阶段 SFA 回归的结果分析产业结构、城镇化水平和环境规制对碳排放效率投入要素松弛变量的影响，并同通过一、三阶段的效率值对比得出产业结构城镇化水平和环境规制对碳排放效率的影响结果，最后对碳排放效率的改进路径和 Malmquist-Lunenberger 指数进行分析。得出的主要结论如下：

(1) “碳中和”目标对我国部分省份的碳排放效率呈现出抑制作用，但从我国整体来看促进了碳排放效率的提高。从整体层面来看，碳中和目标下我国碳排放效率呈现出稳定的上升趋势，碳排放效率值较高，平均值达到了 0.832；而在省域层面上，碳排放效率区域间差异较大，2020 年山西省碳排放效率值与广东省相差 0.48。在碳中和目标对碳排放效率影响的分析中，碳中和目标虽然对我国碳排放效率的提高有较为明显的促进作用，但从省域层面来看有些地区的促进作用并不明显，比如辽宁、黑龙江、内蒙古、贵州等地区的碳排放效率较低，这些区域碳排放效率较低的地区主要集中在我国的西部地区和中部地区，而东部地区的效率值普遍偏高，存在较大差异，说明相比于东部地区，中部和西部部分地区未能符合碳中和目标对碳排放效率的要求，在碳源和碳汇上的投入未能有效转化为对二氧化碳排放的抑制，投入要素分配不合理存在浪费，导致碳中和目标对这些地区没有产生较大的影响，碳排放效率仍然维持在较低水平。

(2) 碳中和目标下我国各省的碳排放效率整体上呈现出由东部大于中部大于西部的空间演变特征。空间分布图显示，我国多数省份的碳排放效率值为上升趋势，其中东部地区的碳排放效率提升最快，到 2020 年时，东部地区的碳排放效率大部分大于 1，中部地区发展次之，西部地区位于最后，且大部分地区的碳排放效率值仍小于 1，处于相对较低水平。总的来说，我国东部、中部和西部地区 2005 年-2020 年的碳排放效率的演变特征存在差异：中部地区和东部地区的碳排放效率一开始较低，随着时间的推移碳排放效率值不断提高，且东部地区的

增长速度要明显大于中部地区；西部地区部分省份的碳排放效率值呈现出 U 型增长，在 2005 年时效率值较高，到 2010 年以后效率值开始下降，2015 年以后效率值开始回升，且回升的速度低于中部地区和东部地区的增长速度。

(3) 外部环境因素对“碳中和”目标下我国各省的碳排放效率存在不同的影响。在 DEA 模型第二阶段的 SFA 回归结果中，产业结构、城镇化水平和环境规制均对各生产要素的投入存在影响，通过了 1% 的显著性检验，且影响机理符合客观实际。其中，产业结构和城镇化水平对劳动力投入、资本投入和城市森林碳储量的松弛变量有显著影响，而环境规制则是对资本投入和能源消耗的松弛变量有较为显著的影响。同时从 DEA 模型第一阶段和第三阶段效率值的对比可知，产业结构、城镇化水平和环境规制对我国各省碳排放效率均影响，且影响结果存在差异性。“交叉型”省份和“平行型”省份的环境变量对碳排放效率抑制作用较为明显，其中“交叉型”省份效率值呈现上升趋势，“平行型”省份虽较为平稳但效率相对较低，而“重合型”省份如北京、天津和上海等 7 个省份的外部环境因素符合当地碳排放效率的状况，效率值比较稳定且普遍维持在较高水平。

(4) 在“碳中和”目标下，效率值较低的省份所存在的问题主要集中在能源消耗、城市森林碳储量和二氧化碳排放。对存在冗余不足的省份进行分析后发现，2020 年部分省份效率较低的原因主要是该地区在能源消耗和城市森林碳储量上存在较为明显的冗余，同时也伴随着过量的二氧化碳排放。而低碳技术创新存在明显冗余的省份除海南外其余地区均不明显，这间接说明部分地区在减少碳源方面投入力度不足，低碳技术的引入或创新处于较低水平。从碳汇的角度来看，除湖北和四川地区外，其余地区均在城市森林碳储量上存在不同程度的冗余，说明对于提高“碳中和”目标下的碳排放效率，应将提升全国碳汇能力的重点放在城市以外地区，适当控制碳储量冗余省份在城市绿地面积方面的投入，减少城市森林碳储量投入冗余，加强城市以外地区的开垦荒地、植树造林以及森林资源保护工作，在提升碳汇能力的同时加强低碳技术创新，加大零碳电力研发的投入力度，减少能源消耗，从而在根源上减少碳排放，提高碳排放效率。

(5) “碳中和”目标下的碳排放效率提升路径包括优化外部环境、调整投入生产要素的结构和技术进步。对于效率值小于 1 的省份，提高其碳排放效率主要有以下几种方式：优化外部环境因素，分析结果表明“交叉型”和“平行型”省份

在第三阶段效率值要明显高于第一阶段,说明外部环境因素对碳排放效率存在抑制作用,环境变量与当地碳排放效率存在不协调现象,可以通过调整外部环境来提升效率值;调整生产要素总量不增加的前提下,调整生产要素的投入结构,依据 DEA 模型测算结果,计算投入和产出的松弛变量,通过分析在投入中以及在非期望产出中存在的冗余,期望产出中存在的不足,从而得出改进路径,据此对投入生产要素的比例进行调整,最终提高其碳排放效率;技术进步可作为提升我国碳排放的间接方式。技术进步是我国碳排放全要素生产率提高的主要原因,而技术效率抑制了全要素生产率的进一步提升;同时从时序来看,我国碳排放全要素生产率水平由高到低分别为东部>中部>西部,西部地区需克服地理缺陷,加强东部地区的经济交流,形成更强的战略合作关系,从而提升碳排放效率。

5.2 政策建议

因此,要提升我国碳排放效率,实现“碳中和”目标,除了以上结论中所提到的改进措施以外,还需从产业结构、城镇化水平和环境规制入手,因地制宜的调整政策,改善碳排放效率的环境因素,同时以增强低碳技术创新能力为主,提升碳汇为辅,解决“碳中和”目标实现过程中在碳源和碳汇两个方面存在的问题。基于此,主要提出如下建议。

(1) 加快发展绿色经济,提高区域经济水平。经济发展程度对其碳排放效率有很大的影响,经济发展程度越高,就越能为经济环境提供充足的经济基础。结果表明,不同区域之间的发展程度有很大差别,需要采取不同的措施来推动区域间的发展。在一些比较发达的区域,例如浙江,江苏,广东,应该加速其经济结构调整,逐渐提高绿色低碳产业在工业中所占的比重,实现其可持续发展。在新疆,甘肃,辽宁,内蒙古等一些落后区域,要防止因发展而引入大量的高污染和高排放的工业,也不要采取“先污染后治”的做法,而是采取引入高科技,以科技带动发展,实现经济效益和环境效益双赢的局面。

(2) 在推动新型城镇化的发展进程中,提升城市群建设和环境规制的效能。针对我国人口基数大,处于工业化中后期的实际情况,发展城市群既可以实现人口、产业、优势资源的聚集,又能有效地推动低碳城市建设,提升城市化水平;同时也能加强对污染的集中治理,减少污染治理的费用,促进低碳生产与消费的法制观念建设,加强对环境的强制管制,健全激励型、自觉型的环境管制,把正

规管制和非正式管制有机地统一起来，从而提高我国的碳排放效率。

(3) 要以推进现代产业体系构建为契机，精准实施新发展阶段产业结构的调整。在现阶段推进构建现代产业体系，推动经济的低碳循环发展的同时，应将提升产业链现代化水平、优化区域产业链布局作为目标，强化中西部地区的产业承接能力，加强对投资项目的筛选，在产业承接时对节能环保不合格的项目进行严格的限制，逐渐减少中西部地区对资源密集型行业的过分依赖；中西部地区应避免为经济发展而放宽对高污染、高能耗、高碳排放产业的限制，要发展壮大中西部地区新兴产业，充分释放西部地区的区位优势，积极探索低碳城区建设，合理布局服务业，实现第二产业和第三产业的协同发展；最后要推进新能源高质量发展，大力发展中西部低碳清洁能源和循环经济，推进大型风光电基地及其配套调节性电源的规划建设，降低能源消耗和碳排放，从而提升中西部地区的碳排放效率。

(4) 应以创新驱动为引领，加强低碳技术创新体系的建设和完善。实现“碳中和”离不开更大力度的低碳科技创新，亟需通过强化低碳技术创新，给不同产业营造一个良好的低碳发展环境，通过能源效率的提高来促进“碳中和”目标的实现。首先要加大碳减排科技研发投入，将节能和提高新能源技术、二氧化碳等温室气体的排放控制与处置利用技术、生物工程与固碳技术、二氧化碳捕集、利用与封存等技术作为重点资金投入对象，提升低碳技术水平；其次是强化低碳技术人才的培育，以“高端”为导向，培育新型尖端人才、低碳产业领军人才、高技术人才，从而提高低碳技术人才队伍活力；最后要加速构建国家、省、市“三位一体”的低碳科技创新服务体系，优化各行各业的研究环境，使企业需求能与创新能力相匹配，实现低碳创新要素的自由循环和网络化服务。

(5) 以加强生态文明建设为总目标，着力提升森林生态系统增汇固碳能力。森林是陆地生态体系的主要组成部分，也是陆地生态体系最主要的贮碳库。各省在巩固自身碳汇能力的基础上，应大力发展人工林，全面实施绿化工程，利用坡地、荒地、废弃矿山等国土空间开展绿化，进一步扩大森林面积、增加林草资源总量。一方面，以提高森林和草地的碳汇为目的，大力推进生态环境的综合整治，通过对林业的年度监管与评估，对林地的碳汇水平进行定量、动态的监测，同时对林业和草原的碳汇进行评估，积极探索林草碳交易市场。另一方面，提高蚂蚁

森林全民义务植树活动的成效,广泛发动社会力量参与义务植树活动,拓宽义务植树的方式和渠道,鼓励社会各界人员积极参与树木管护,通过捐款捐赠、志愿服务等形式,增强市民义务植树的参与性,使市民的植树自觉性和幸福感得到增强,在宣传了低碳生活理念的同时增加了森林面积,从而不断提升生态体系碳汇增量。

5.3 不足与展望

经济发展和环境保护是发展中国家长期关注且难以短期实现平衡的问题,而碳排放效率可以从衡量二氧化碳排放多少的角度在一定程度上对我国经济发展水平和环境保护的水平的高低进行衡量。虽然本文从碳中和的视角出发,建立了碳中和目标下碳排放效率的 DEA 模型投入产出指标体系,并对测算结果从多角度进行了详细的分析,但仍存在一些不足之处:

其一,在对某一指标具体计算方法的选择上,受限于数据的可得性和知识储备方面的局限性,本文虽然加入了碳源和碳汇这两个反映碳中和投入的指标,但是在指标的具体计算方面存在较为严重的片面性。从二氧化碳的吸收和二氧化碳的减排的角度出发,采用城市绿地面积来反映碳汇,零碳电力生产占总电力生产的比重来反映碳源,可能会存在二者无法准确反映我国目前的碳源情况和碳汇水平,未来在进行研究时可以对我国各省的碳汇能力和低碳技术创新水平构建相应的指标体系去进行具体准确的核算,从而使得碳中和目标下各省的碳排放效率测算结果更加的客观、准确。其二,在对碳排放效率的空间演变特征进行分析时只采用了简单的描述分析,未能构建相应的空间模型对其进行具体的分析,未来在进行研究时可以采用相应的空间模型对碳中和目标下各省碳排放效率的空间特征做更进一步的分析;其三,在研究视角上,本文以省份为研究单元,测算省域层面的碳排放效率,在细化研究视角方面存在不足。未来可以进一步精准聚焦某一线城市的某一产业,探究城市内具体产业的发展与碳排放的关系,为新发展阶段产业结构的调整提供参考。

参考文献

- [1]张希良,黄晓丹,张达.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,38(01):35-66.
- [2]常云岐.统筹推进“双碳”目标加快建设能源强国——农工党中央开展2022年重点考察调研[J].前进论坛,2022(07):10-13.
- [3]陈迎.碳中和概念再辨析[J].中国人口资源与环境,2022,32(04):1-12.
- [4]何建坤.新时代应对气候变化和低碳发展长期战略的新思考[J].武汉大学学报(哲学社会科学版).2018,71(04):13-21.
- [5]张美一.碳达峰碳中和实现路径及影响的文献综述[J].经济管理文摘.2021,(14):173-174
- [6]邵帅,张曦,赵兴荣.中国制造业碳排放的经验分解与达峰路径——广义迪氏指数分解和动态情景分析[J].中国工业经济,2017(03):44-63.
- [7]孙旭东,张蕾欣,张博.碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究[J].中国矿业,2021,30(02):1-6.
- [8] Kaya Y, Yokobori K. Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability[M].Delhi: Bookwell Publications,1993.
- [9] Mielnik O, Goldemberg J. Communication the evolution of the “Carbonization Index” in developing countries [J]. Energy Policy, 1999. 27(5):307-308.
- [10] Ramanathan R. Combining indicators of energy consumption and CO₂ emissions: across country comparison [J].International Journal of Global Energy Issues, 2002.17:214-227.
- [11] Zaim O, Taskin F. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: Anon-parametric approach [J]. Journal of Environmental Management , 2000.58(2):95-107.
- [12]徐英启,程钰,王晶晶等人.中国低碳试点城市碳排放效率时空演变与影响因素[J].自然资源学报.2022,37(05):1261-1276.
- [13]宋敏,邹素娟.黄河流域碳排放效率的区域差异、收敛性及影响因素[J].人民黄河.2022,44(08):61-68.

- [14] 田云,林子娟. 中国省域农业碳排放效率与经济增长的耦合协调[J]. 中国人口·资源与环境. 2022,32(04):13-22.
- [15] Risto G, Herrala. Global CO₂ efficiency: country-wise estimates using a stochastic cost frontier, *Energy Policy*[R].2009. 66(4):602-607.
- [16] Pardo Martinez, Clara Ines, Silveira, Semida. Energy efficiency and CO₂ emissions in Swedish Performance[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1).
- [17] Wang Xiping, Jiang Feng. A parametric malmquist analysis of carbon emission performance and its dynamic variation in China's thermal power generation[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017(6):2801-2809.
- [18] Herrala R, Goel R K. Global CO₂ efficiency: Country-wise estimates using a stochastic cost frontier[J]. *Energy Policy*, 2012, 45(6):762-770.
- [19] Ramanathan R. A multi-factor efficiency perspective to the relationships among world GDP, energy consumption and carbon dioxide emissions[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006,73(5):483-494.
- [20] Zhou P, Ang, B. W, Han, J, Y. Total Factor Carbon Emission Performance: A Malmquist Index Analysis [J]. *Energy Economics*, 2010, (1):194-201.
- [21] Wang C. Decomposing energy productivity change: a distance function approach[J]. *Energy*, 2007,32(8):1326-1333.
- [22] Timothy N. Caon. Buyer Liability and Voluntary Inspections in International Greenhouse Gas Trading: A Laboratory Study[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2003, (25):101-127.
- [23] Neil J. Buckley. Short-Run Implications of Cap-and-Trade versus Baseline-and-Credit Emission Trading Plans: Experimental Evidence[D]. Hamilton:McMaster University Department of Economics,2004.
- [24] Ramakrishnan Ramanathan. Evaluating the Comparative Performance of Countries of the Middle East and North Africa: A DEA Application[J]. *Socio-economic Planning Science*, 2006, 40:156-167.
- [25] Bhattacharyya S C, Matsumura W. Changes in the GHG emission intensity in EU-15: lesson from a decomposition analysis[J]. *Energy*, 2010, 35(8):3315-3322.

- [26] Stern D I, Jotzo F. How ambitious are China and India's emissions intensity targets?[J].Energy Policy,2010, 38(11):6776-6783.
- [27] Ang B W, Zhang F Q, Choi K H. Factorizing changes in energy and environmental indicator through decomposition[J].Energy, 1998, 2(6):489-495.
- [28] Wood R. Structural decomposition analysis of Australia's greenhouse gas emission[J]. Energy policy,2009, 37(4):4943-4948.
- [29] Albornoz F, Cole M A, Elliott R J R, et al. In search of environmental spillovers[J]. The World Economy, 2009, 32(1):136-163.
- [30]刘志华; 徐军委; 张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率——基于省际面板数据的 PVAR 分析[J]. 自然资源学报. 2022,37(02):508-520.
- [31]周迪; 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径[J]. 自然资源学报. 2019,34(11):2305-2316.
- [32]刘林杰,杨树旺.中国城镇化进程影响全要素碳排放效率的区域异质性研究[J]. 云南社会科学. 2022,(02):101-110.
- [33]王鑫静,程钰.城镇化对碳排放效率的影响机制研究——基于全球 118 个国家面板数据的实证分析.[J]. 世界地理研究. 2020,29(03):503-511.
- [34]江三良; 鹿才保. 环境规制影响碳排放效率的外部性及异质性——基于生产性服务业集聚协同的分析[J]. 华东经济管理. 2022,36(10);56-59.
- [35]马海良; 董书丽. 不同类型环境规制对碳排放效率的影响[J]. 北京理工大学学报(社会科学版). 2020,22(04):1-10.
- [36][16] H. O. FRIED, C. A. K. LOVELL, S. S. SCHMIDT, S. YAISAWARNG. Accounting for Environmental Effects and Statistical Noise in Data Envelopment Analysis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1/2): 157-174.
- [37]胡剑波, 闫烁, 韩君. 中国产业部门隐含碳排放效率研究——基于三阶段 DEA 模型与非竞争型 I-O 模型的实证分析[J]. 统计研究, 2021, 38(6): 30-43.
- [38]Y. Chung, R. Fare, S. Grosskopf. Productivity and undesirable outputs: a directional distance function approach[J]. Journal of Environmental Management, 1997(3): 229-240.
- [39]成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M]. 知识产权出版社, 2014.

- [40]宁论辰,郑雯,曾良恩. 2007—2016 年中国省域碳排放效率评价及影响因素分析——基于超效率 SBM-Tobit 模型的两阶段分析[J].北京大学学报(自然科学版), 2021,57(01):181-188.
- [41]张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究, 2004 (10): 35-44.
- [42]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 (10): 17-31.
- [43]张健华, 王鹏. 中国全要素生产率:基于分省份资本折旧率的再估计[J]. 管理世界, 2012 (10): 8-30.
- [44]徐新良, 曹明奎, 李克让.中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展, 2007 (06): 1-10.
- [45]王兵, 唐文狮, 吴延瑞,等. 城镇化提高中国碳排放效率了吗?[J]. 经济评论, 2014 (04): 38-49.
- [46] 尹迎港, 常向东.人口老龄化、产业结构升级与区域碳排放[J].兰州财经大学学报,2022, 38(01): 60-74.
- [47] 王冬梅,孙阳阳.交通基础设施改善促进了城市经济高质量发展吗? ——基于高铁开通的准自然实验[J].兰州财经大学学报,2022,38(03): 43-54.

附录

第一阶段我国分年份各省碳排放效率值

省份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
北京	0.717	0.693	0.747	1.031	1.052	0.840	0.897
天津	1.068	1.037	1.025	0.914	1.005	0.882	0.833
河北	0.347	0.333	0.427	0.407	0.501	0.566	0.626
山西	0.385	0.383	0.377	0.364	0.367	0.357	0.365
内蒙古	0.404	0.399	0.404	0.418	0.430	0.430	0.439
辽宁	0.253	0.269	0.268	0.280	0.303	0.301	0.363
吉林	0.329	0.374	0.379	0.390	0.399	0.380	0.411
黑龙江	0.403	0.431	0.367	0.396	0.408	0.401	0.412
上海	1.187	1.032	1.017	1.023	0.773	0.825	0.878
江苏	0.488	0.574	0.631	0.648	0.802	0.849	1.090
浙江	0.314	0.325	0.376	0.395	0.442	0.481	0.502
安徽	0.354	0.325	0.324	0.317	0.348	0.357	0.380
福建	0.370	0.389	0.399	0.386	0.408	0.409	0.414
江西	0.345	0.340	0.344	0.321	0.361	0.360	0.388
山东	0.475	1.349	0.671	0.590	0.712	0.767	0.855
河南	0.269	0.267	0.271	0.275	0.324	0.372	0.419
湖北	0.205	0.231	0.240	0.241	0.258	0.269	0.277
湖南	0.238	0.256	0.261	0.268	0.289	0.301	0.309
广东	0.286	0.343	0.385	0.378	0.451	0.506	0.585
广西	0.281	0.258	0.266	0.268	0.283	0.296	0.305
海南	1.123	1.025	1.000	0.863	0.722	1.013	1.021
重庆	0.333	0.353	0.327	0.289	0.302	0.313	0.318
四川	0.187	0.207	0.218	0.221	0.229	0.239	0.262
贵州	0.234	0.248	0.240	0.238	0.250	0.266	0.278
云南	0.266	0.308	0.292	0.284	0.281	0.271	0.273
陕西	0.437	0.435	0.409	0.410	0.406	0.399	0.395
甘肃	0.336	0.373	0.345	0.345	0.341	0.344	0.363
青海	1.196	0.900	1.005	1.009	0.843	1.002	0.844
宁夏	1.038	1.040	1.004	1.019	0.874	0.935	1.045
新疆	0.381	0.391	0.362	0.353	0.356	0.354	0.332
全国	0.475	0.496	0.479	0.478	0.484	0.503	0.529

第一阶段我国分年份各省碳排放效率值

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	均值
0.946	0.901	0.934	1.010	0.931	0.965	1.025	1.024	1.022	0.914
0.895	1.015	0.922	1.010	1.067	1.011	0.973	1.000	1.027	0.979
1.040	0.413	0.426	0.487	0.525	0.576	0.598	0.803	1.008	0.552
0.362	0.352	0.336	0.350	0.345	0.308	0.328	0.328	0.327	0.354
0.454	0.333	0.328	0.342	0.351	0.362	0.379	0.386	0.393	0.391
0.375	0.338	0.316	0.373	0.368	0.374	0.392	0.399	0.406	0.332
0.433	0.431	0.439	0.476	0.504	0.522	0.507	0.501	0.495	0.431
0.425	0.383	0.393	0.422	0.437	0.472	0.504	0.533	0.561	0.428
0.925	1.032	1.031	1.009	1.024	0.973	1.003	1.017	1.030	0.984
1.038	0.708	0.766	0.855	1.005	1.015	0.986	1.008	1.030	0.832
0.517	0.490	0.521	0.608	0.645	0.748	0.862	0.944	1.025	0.550
0.396	0.357	0.355	0.396	0.421	0.443	0.456	0.473	0.489	0.381
0.438	0.487	0.500	0.609	0.743	0.814	0.913	0.973	1.032	0.554
0.388	0.387	0.390	0.406	0.423	0.430	0.442	0.452	0.461	0.386
1.120	0.777	0.852	0.912	0.918	1.038	1.009	1.015	1.020	0.871
0.457	0.537	0.570	0.738	1.001	1.009	1.001	1.012	1.023	0.569
0.293	0.341	0.355	0.419	0.468	0.505	0.551	0.588	0.624	0.352
0.334	0.388	0.408	0.487	0.558	0.601	0.684	0.749	0.814	0.413
0.656	0.653	0.699	0.832	0.850	0.935	1.015	1.023	1.030	0.640
0.321	0.345	0.357	0.358	0.398	0.409	0.419	0.437	0.454	0.334
0.939	0.759	0.829	1.032	1.004	1.001	0.892	0.947	1.002	0.948
0.328	0.385	0.390	0.415	0.457	0.476	0.492	0.502	0.512	0.379
0.292	0.324	0.354	0.418	0.438	0.474	0.533	0.562	0.590	0.332
0.270	0.293	0.287	0.310	0.324	0.327	0.339	0.347	0.354	0.284
0.281	0.309	0.316	0.355	0.369	0.382	0.395	0.401	0.407	0.319
0.407	0.409	0.393	0.382	0.399	0.396	0.404	0.423	0.442	0.408
0.359	0.348	0.344	0.372	0.387	0.383	0.387	0.388	0.388	0.361
1.007	0.829	0.888	0.893	1.007	1.002	1.004	1.006	1.008	0.963
1.002	0.563	0.569	0.534	0.515	0.487	0.480	0.477	0.473	0.772
0.323	0.299	0.302	0.304	0.303	0.298	0.300	0.301	0.302	0.331
0.567	0.506	0.519	0.571	0.606	0.625	0.642	0.667	0.692	0.545

第三阶段我国分年份各省碳排放效率值

省份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
北京	0.887	0.865	0.886	1.001	1.001	0.941	0.954
天津	1.003	1.001	1.001	1.001	1.001	1.000	1.000
河北	0.669	0.635	0.672	0.628	0.715	0.729	0.744
山西	0.644	1.000	1.000	1.000	1.001	0.919	1.001
内蒙古	0.711	0.715	0.693	0.700	0.680	0.692	0.688
辽宁	0.645	0.655	0.641	0.645	0.644	0.640	0.667
吉林	0.633	0.641	0.695	0.709	0.716	0.680	0.712
黑龙江	0.538	0.750	0.717	0.861	0.780	0.774	1.000
上海	1.000	1.002	1.000	1.004	1.001	1.001	0.949
江苏	0.747	0.809	0.846	0.888	0.941	0.973	1.003
浙江	0.705	0.707	0.721	0.726	0.757	0.802	0.750
安徽	0.725	0.692	0.690	0.682	0.678	0.685	0.680
福建	0.788	0.803	0.800	0.804	0.890	1.001	1.001
江西	0.710	0.718	0.707	0.710	0.719	0.744	0.783
山东	0.716	0.665	0.776	0.830	0.872	0.914	0.958
河南	0.662	0.660	0.659	0.665	0.690	0.713	0.740
湖北	0.636	0.654	0.661	0.662	0.678	0.690	0.684
湖南	0.660	0.676	0.678	0.694	0.710	0.727	0.729
广东	0.608	0.672	0.701	0.709	0.734	0.767	0.791
广西	0.693	0.668	0.673	0.680	0.683	0.698	0.698
海南	1.091	1.009	0.844	0.874	0.746	1.001	1.002
重庆	0.735	0.726	0.709	0.684	0.690	0.697	0.695
四川	0.635	0.657	0.667	0.666	0.668	0.670	0.693
贵州	0.383	0.406	0.689	0.697	0.693	0.687	0.694
云南	0.695	0.748	0.729	0.716	0.708	0.726	0.709
陕西	0.704	0.701	0.776	0.772	0.824	1.000	0.897
甘肃	1.000	1.002	1.001	0.937	0.935	1.000	0.933
青海	1.158	1.000	1.000	1.003	1.000	1.001	1.001
宁夏	1.006	1.002	1.001	1.001	0.876	0.931	1.001
新疆	0.507	0.851	0.737	0.736	0.699	0.693	0.698
全国	0.743	0.770	0.779	0.790	0.791	0.817	0.829

第三阶段我国分年份各省碳排放效率值

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	均值
0.985	0.955	0.971	1.001	0.965	1.002	1.002	1.011	1.019	0.962
1.000	1.011	1.000	1.010	1.027	1.003	0.972	0.994	1.015	1.003
1.001	0.704	0.710	1.000	1.001	1.001	1.001	1.005	1.009	0.815
1.001	1.001	0.862	0.734	0.689	0.689	0.716	0.630	0.543	0.853
0.678	0.657	0.647	0.656	0.664	0.692	0.666	0.834	1.001	0.703
0.674	0.645	0.616	0.663	0.670	0.672	0.683	0.686	0.688	0.657
0.734	0.726	0.715	0.747	0.772	0.781	0.771	0.831	0.891	0.706
1.000	0.789	0.760	0.749	0.750	0.749	0.768	0.801	0.833	0.788
1.000	1.003	1.001	1.000	1.001	1.002	1.002	1.010	1.017	0.999
1.003	0.836	0.858	0.897	1.004	1.004	1.002	1.015	1.028	0.923
0.776	0.803	0.824	0.914	0.932	1.000	1.000	1.013	1.025	0.829
0.789	1.000	1.002	1.001	1.001	1.001	1.002	0.863	0.723	0.823
1.001	1.001	1.002	1.004	1.002	1.002	1.001	1.012	1.023	0.942
0.761	0.809	0.824	0.890	0.917	0.956	1.001	1.001	1.001	0.817
1.001	0.890	0.929	0.949	0.949	1.013	1.003	1.012	1.020	0.899
0.773	1.000	1.001	1.000	1.000	1.003	1.001	1.012	1.022	0.839
0.700	0.740	0.725	0.759	0.798	0.830	0.871	0.903	0.934	0.735
0.769	0.797	0.774	0.864	0.896	0.911	0.954	0.977	1.000	0.789
0.855	0.904	0.854	0.955	0.935	1.000	1.004	1.017	1.030	0.835
0.713	0.754	0.779	0.773	0.866	1.001	1.001	1.001	1.001	0.779
0.951	0.821	0.874	1.003	1.002	1.002	0.902	0.885	0.867	0.933
0.710	0.773	0.773	0.823	0.887	0.948	1.000	1.001	1.001	0.790
0.699	0.703	0.709	0.770	0.776	0.814	0.876	0.905	0.933	0.729
0.695	0.720	0.716	0.751	0.764	0.757	0.789	0.801	0.812	0.684
0.728	0.750	0.758	0.811	0.807	0.799	0.893	0.840	0.786	0.758
0.960	1.001	1.000	1.000	0.955	1.001	1.002	1.002	1.001	0.906
1.000	0.839	0.817	0.790	0.792	0.770	0.757	0.750	0.743	0.888
1.001	1.001	1.001	0.892	1.002	1.001	1.002	1.002	1.002	1.004
1.000	0.667	0.665	0.679	1.000	0.666	1.000	0.858	0.715	0.881
0.674	0.656	0.661	0.649	0.645	0.651	0.653	0.649	0.644	0.677
0.854	0.832	0.828	0.858	0.882	0.891	0.910	0.913	0.915	0.832

致谢

时光荏苒，硕士研究生的学习阶段已经接近尾声，此时此刻，我想对在我的学习生涯中给予我关心和帮助的父母、老师和同学表示衷心的感谢。

首先要向我的指导老师，韩君老师表示衷心的感谢。三年以来，韩老师对我们每一位学生本着认真负责的态度，在传授专业理论知识的同时不断培养我们养成良好的学习习惯，不管是在学习上，还是在日常的工作中，韩老师都会给予我们最大的帮助和支持，尤其在论文的研究和写作过程中，多次给我们审阅、修改，并且提出很多好的建议，使得我们的论文不断完善。

其次，我也要向统计学院的所有老师表示衷心的感谢，在我论文的开题阶段为我提供了宝贵的意见，使我的论文更加完善。同时，感谢我的同学和朋友们，在研究生阶段，我们相互支持，共同进步，祝福你们在未来的日子里学业有成、工作顺利。

最后，我要感谢我的父母，不管我遇到多大的困难，他们总是给我信心。如果没有父母这么多年来对我的付出和栽培，就没有我现在的成就，是你们让我健康的成长并不断成熟。