

分类号 _____
UDC _____

密级 _____
编号 10741



硕士学位论文

论文题目 中国碳排放效率及边际减排成本研究

研究生姓名: 赵敏

指导教师姓名、职称: 宋马林 教授

学科、专业名称: 应用经济学 统计学

研究方向: 经济与社会统计

提交日期: 2022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： 赵敏 签字日期： 2022年5月30日

导师签名： 李马林 签字日期： 2022.5.30

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： 赵敏 签字日期： 2022年5月30日

导师签名： 李马林 签字日期： 2022.5.30

Carbon emission efficiency and Marginal abatement cost in China

Candidate : Min Zhao

Supervisor: Malin Song

摘要

中国作为世界能源消耗大国和二氧化碳排放量最高的国家,在未来一段时间内面临着严重的生态文明建设和碳减排压力的挑战。为实现 2030 年前达到“碳达峰”和 2060 年前达到“碳中和”的减排目标,各省市需高度重视节能环保工作,完善和制定更为严苛的碳排放管制政策,加强环保法律制度的执法力度。也可以说,研究并分析我国各省市和区域间涉及碳排放的相关经济指标尤为重要,本文从碳排放效率、碳排放效率指数变化率和二氧化碳边际减排成本三指标出发,为我国完善碳排放交易系统、发展低碳经济和达到减排目标提供理论支撑,也可作为政府部门制定相应碳减排政策和减排成本定价的科学依据。

本文基于方向性距离函数,在生产规模报酬可变的背景下,利用数据包络方法(Data Envelopment Analysis)、共同前沿方法(Meta-frontier)、群组前沿方法(Group-frontier)和全局参比(Global)下的 Malmquist-Luenberger 指数法,选取我国 30 个省市和 8 个综合经济区的投入产出面板数据,基于前三个方法实证测算 2009-2019 年中国各省域的碳排放效率(TCE)、技术落差比率(TGR)和碳边际减排成本(MAC),在此基础上利用 GM-L 指数法测算碳排放效率指数(MLCPI)并进行分解,依次得到技术效率(TEC)变化和技术进步(TC)变化两个影响因素。研究结果表明:(1)碳排放效率和技术落差比率。从省市角度来看,共同前沿下各省市的 TCE 均值普遍较低且存在显著差异,仅有广东省位于最优生产性边界,达到 DEA 有效,其余省市存在较大的效率改善空间;群组前沿下各省市的整体碳排放效率均值较高,说明八大综合经济区的区域划分合理有效,一定程度上消除了异质性干扰。从区域角度看,黄河中游和东北地区的 *metaTCE* 和 TGR 明显低于区域均值,北部沿海和西南地区的 *groupTCE* 显著低于经济区均值,反映出上述地区的资源配置状况和产业结构安排相对不合理。(2)碳排放效率指数。共同前沿和群组前沿下的 MLCPI 均出现显著的上升趋势,且部分年份的效率变化指数大于 1,表明碳排放效率较往年有所提高。其中分解值技术进步(TC)变化是促进碳排放效率持续升高的关键所在,表现在两者的变动方向显示为较为稳定的趋同性,技术效率(TEC)的均值变化较为稳定,推动作用不明显。(3)碳边际减排成本。2009-2019 年,评价单元的二氧化碳 MAC 显

示为有差异的分散式排列，但其均值呈稳定上升趋势，且 2014-2019 年的碳边际减排成本显著高于 2009-2013 年其中 18 个省市的 MAC 较低，与之相对应的是低碳减排目标；反之。中国碳边际减排成本均值为 0.854 万元/吨，表明降低或减少一单元二氧化碳排放量时须放弃的经济成本为 8540 元。

综上所述，本文得到的政策启示为：一是加强区域合作，提高能源利用效率，要充分发挥前沿省市的引领辐射作用，提升区域合作层次与水平。加快技术升级，二是构建绿色能源体系。各省市要开发新能源的应用和提高可再生能源的利用率，鼓励新兴产业发展；三是引导绿色消费，转变低碳生活理念，鼓励经济主体践行绿色低碳的生产生活方式，完善碳交易市场制度改革，从而如期到达“碳峰值”阶段和实现“碳中和”目标。

关键词：碳排放效率 碳边际减排成本 碳达峰 碳中和

Abstract

As the world's largest energy consumer and the country with the highest carbon dioxide emissions, China is facing serious challenges of ecological civilization construction and carbon emission reduction in the future. In order to achieve the emission reduction targets of "carbon peak" by 2030 and "carbon neutral" by 2060, all provinces and cities need to attach great importance to energy conservation and environmental protection, improve and formulate more stringent carbon emission control policies, and strengthen the law enforcement of environmental protection laws and regulations. Also it can be said that the research and analysis among various provinces and cities and regions in our country involves the relevant economic indicators are particularly important for carbon emissions, this article from the carbon emissions, carbon emissions efficiency index change rate and carbon dioxide three indicators, the marginal cost of perfecting our country carbon emissions trading system, development of low carbon economy and provide theoretical support to achieve emission reduction, It can also serve as the scientific basis for government departments to formulate corresponding carbon emission reduction policies and emission reduction cost pricing.

This paper based on the directional distance function, under the background of variable production scale return, Make use of the Data Envelopment Analysis, Common frontier method, Group-frontier method and Global Malmquist-Luenberger index method, Select the input and output panel data of 30 provinces and 8 comprehensive economic zones in China, Empirical calculation of carbon emission efficiency (TCE), technology gap ratio (TGR) and carbon marginal abatement cost (MAC) of China's provinces from 2009 to 2019 based on the first three methods. On this basis, the Carbon emission efficiency index (MLCPI) is calculated

and decomposed by the G-M-L index method, and two influencing factors of technological efficiency (TEC) and technological progress (TC) are obtained successively. The results show that:(1) carbon emission efficiency and technology gap ratio. From the perspective of provinces and cities, the mean TCE values of provinces and cities under the common frontier are generally low with significant differences. Only Guangdong province is located at the optimal productivity boundary and achieves DEA effectiveness, while other provinces and cities have a large space for efficiency improvement. The mean value of the overall carbon emission efficiency of all provinces and cities under the group frontier is relatively high, indicating that the regional division of the eight comprehensive economic zones is reasonable and effective, and the heterogeneous interference is eliminated to some extent. From the regional perspective, metaTCE and TGR in the middle reaches of the Yellow River and northeast China are significantly lower than the regional average, while groupTCE in the northern coastal area and southwest China are significantly lower than the mean of the economic zone, reflecting the relatively unreasonable resource allocation and industrial structure arrangement in the above regions. (2) Carbon emission efficiency index. The MLCPI of both common frontier and group frontier showed a significant upward trend, and the efficiency change index was greater than 1 in some years, indicating that the carbon emission efficiency was improved compared with previous years. Among them, the change of decomposition value technological progress (TC) is the key to promote the continuous increase of carbon emission efficiency, which is manifested in that the change direction of the two shows a relatively stable convergence, while the mean change of technical efficiency (TEC) is relatively stable, and the driving effect is not obvious. (3) Marginal cost of carbon emission reduction. From 2009 to

2019, the MAC of carbon dioxide in the evaluation unit showed a decentralized arrangement with differences, but its mean value showed a steady upward trend, and the marginal cost of carbon emission reduction from 2014 to 2019 was significantly higher than that from 2009 to 2013. The MAC of 18 provinces and cities was lower, which was corresponding to the low-carbon emission reduction target. On the other hand. The average marginal cost of carbon emission reduction in China is RMB 85,400 / ton, indicating that the economic cost to be forgone when reducing or reducing one unit of carbon dioxide emission is RMB 8,540.

To sum up, the policy implications of this paper are as follows: First, to strengthen regional cooperation and improve energy efficiency, we should give full play to the leading and radiating role of frontier provinces and cities and improve the level and level of regional cooperation. Second, we will build a green energy system. All provinces and cities should develop the application of new energy and improve the utilization rate of renewable energy and encourage the development of emerging industries. Third, guide green consumption, change the concept of low-carbon life, encourage economic entities to practice green and low-carbon production and life style, improve the reform of carbon trading market system, so as to reach the stage of "carbon peak" and achieve "carbon neutrality" as scheduled.

Keywords: Carbon emission efficiency; Carbon marginal abatement cost;
Carbon peak; Carbon neutralization

目 录

摘 要	3
1 引 言	1
1.1 选题背景	1
1.2 研究意义	2
1.2.1 理论意义.....	3
1.2.2 现实意义.....	3
1.3 本文的创新点及不足之处	4
1.4 内容框架与结构层次图	5
2 文献综述	7
2.1 碳排放效率的概念	7
2.2 碳排放量的测算	8
2.3 碳排放效率	9
2.4 碳边际减排成本	11
3 理论基础及研究方法	14
3.1 理论基础	14
3.1.1 环境经济学理论.....	14
3.1.2 低碳经济理论.....	15
3.2 方向性距离函数	16
3.3 数据包络方法	18
3.4 共同前沿模型	19
3.5 GLOBAL MALMQUIST-LUENBERGER 指数法	23
4 碳排放效率的动静态评价	26
4.1 碳排放量的计算	26

4.2 投入产出指标选取	27
4.3 碳排放效率的静态分析	29
4.4 碳排放效率指数的动态分解	34
5 碳边际减排成本估算	40
5.1 影子价格推导	40
5.2 基于 SBM 模型的边际减排成本估算	41
5.3 碳边际减排成本的实证分析	43
6 结论与政策建议	48
6.1 研究结论	48
6.2 政策建议	50
参考文献	52
致 谢	59

1 引言

1.1 选题背景

当今世界正经历着百年未有之大变局，面对国际力量对比与能源供求均衡的深刻调整，新一轮能源技术革命和产业变革方兴未艾，中国能源迈入多元转型的重要战略机遇期。其能源发展面临的矛盾层层叠加，发展不充分和不平衡现状依旧存在，过往的粗放式消耗模式未得到根本扭转，能源消费风险隐患加剧。对此，习近平主席立足我国能源基本国策，提出“四个革命、一个合作”能源安全战略，为我国新时代能源高质量发展指明方向并提供遵循依据，同时政府还颁布了有关的能耗总量控制、碳排放、新能源占比和空气污染防治等刚性政策，设立一批能源发展过程中的约束性指标，这将对全社会能源结构优化及碳减排政策实施起到有力促进作用。中国作为世界能源消耗大国和碳排放量最高的国家，在全球能源市场中占据主导地位，如何高效实现碳中和（Carbon Neutral）、处理好低碳减排、可持续发展和生态文明建设的关系是我国迫切面对的现实问题，也是建设生态文明国家的必由之路。

生态环保之路任重而道远。伴随着世界工业技术的不断发展，全球二氧化碳排放量（Dioxide Emissions）持续增加，引起的地球变暖现象致使海洋气候变化多端，导致许多自然性灾难发生，引起了世界各国的普遍关注与高度重视。对此，国际上先后联合制定了涉及气候变化的法律文件，如 1992 年通过的《联合国应对气候变化框架公约》旨在将温室气体浓度控制在一个特定水平范围内，进一步约束人类的生活生产活动；1997 年发布的《京都议定书》对发达国家温室气体减排目标进行量化并作出排放规定；2015 年制定的《巴黎气候协定》中指出，在 21 世纪末将全球平均气温较工业化时期的温度上升范围控制在 2°C ，争取实现 1.5°C 的平均温度上升；2018 年 IPCC 公布的《全球 1.5°C 升温特别报告》中指出，为达到防止全球气候变暖的温控目标，应该在本世纪 50 年代实现世界范围内的净 0 碳排放。《BP 世界能源统计年鉴 2021》中数据表明，全球二氧化碳排放量在 2018 年达到最大峰值 340.5 亿吨，较 2017 年增加了 6.17 吨，同比增长 1.85%，自 2019 年开始排放量减少，因 2020 年受 COVID-19 疫情的影响，世界上多国采

取双停、隔离等防控措施，致使全球二氧化碳排放量大幅减少，排放量仅为 319.8 亿吨，较 2019 年减少 20.56 吨，同比减少 6.04%。作为世界大国，中国的二氧化碳排放量从 2010 年的 83.3 亿吨迅速增加到 2020 年的 98.9 亿吨，位列全球第一，是排名第二国家美国二氧化碳排放量的一倍多，占全球二氧化碳排放量的比例从 30 年前即 1990 年的 10.00% 增加到 2020 年的 30.93%，占比依旧位居世界第一。

面对日益严峻的碳减排形势，我国对全球气候多端变化担起大国责任。2020 年 9 月，习近平主席在联合国一般性辩论上做出承诺，中国碳排放力争于 2030 年前达到峰值，即“碳达峰”，争取在 2060 年前实现“碳中和”目标。“碳达峰”作为实现“碳中和”目标的前提基础，主要体现为对碳排放强度的现实约束，与生态环境保护和能源结构调整息息相关，同时步入碳达峰阶段也可推动碳中和目标的尽快实现。“碳中和”目标则体现在能源消耗和产业链上，二者在本质上均与二氧化碳排放量和经济高质量发展密不可分。基于中国的实际能源消耗现状，要想早日达到碳中和目标，意味着中国必须要重点关注碳排放问题，有效减少主要污染物排放尤其是二氧化碳的排放，通过提高碳排放效率来实现碳减排，探寻适合国情的低碳发展路径，不断改善我国的绿色美丽生态环境。

1.2 研究意义

顺应当今时代发展，充分考虑生态环境保护、能源高效利用和全球气候治理问题，有效改善并提高碳排放效率是中国实行碳减排政策的必然路径，是践行高质量发展的必由之路，是推动能源发展向“三低”集约型模式转变的重要手段。在我国未来的能源战略中，应在符合经济高质量发展阶段的特征基础上，将二氧化碳排放考虑在内，刚性的碳减排约束会对碳排放效率、效率变化指数和边际减排成本的研究以及政府的相机抉择产生深远影响。林伯强等（2020）指出，自然碳汇及 CCUS 等负碳排放技术在短期内难以实现突破性进展，因此降低碳排放量的最重要手段还是依托提高能源使用效率、控制煤炭消费以及加快煤炭替代。

在约束碳排放量的前提下，国内外学术界逐步加深了对各层次碳排放效率及其相关指标的研究，以期找出最贴近经济最优成本的碳排放途径，抑或是探寻优化能源结构、开发新型能源等有效措施，对经济平稳发展和环境保护至关重要。基于此，本文考察并分析中国各省市（自治区）和八大经济区的碳排放效率、效

率变化指数及碳边际减排成本,探寻省域和区域间碳排放效率的差异性和碳边际减排成本的高低,进而分析碳排放效率指数变化和改善方向。这有利于国家有针对性的提高碳排放效率和制定碳减排政策,促进能源-经济-环境三者之间的协调发展,对能源结构优化和碳中和目标实现有重要的理论意义和实践意义。

1.2.1 理论意义

第一,在研究单元的分类上。依托国务院发展中心在《地区协调发展的战略和决策》中的界定原则,将我国按区域划分为八大综合经济区,这丰富了碳排放相关问题的研究,能够全面评价和了解各经济区的碳排放效率和变化指数差异,有利于改善碳排放效率和促进区域经济协调发展。第二,在指标体系的选取上。以往研究在评价效率时较多使用仅有合意产出的经典效率测算模型,而较少考虑能源与资源的双重约束,这不符合实际生产过程且会误估效率的真实性,抑或是使用包含多种污染物为非合意产出的全要素能源效率,从而无法真实反映出碳排放效率。本文以生产理论为基础,选取各省市的资本、劳动力和能源为投入要素,实际国内生产总值(GDP)和二氧化碳排放量依次为合意产出和非合意产出,以便综合考察碳排放效率及其指数的变动趋势,拓宽了以往仅包含碳排放强度等的单要素指标,是能源经济学在研究碳排放指标方面的新发展趋势。第三,在碳边际减排成本的分析上。使用影子价格来表示含二氧化碳的边际减排成本,定义边际减排成本(MAC)为无碳排放管制约束下的潜在生产总值和有碳排放管制约束下潜在生产总值之间的差值,同时兼顾区域和省市两个层面,可清晰反映出各地的碳减排压力。在实际生产过程中,一个国家中各个地区的碳排放水平不尽相同,处于一种极不平衡的差异状态,因此边际减排成本分析对碳排放效率的改善和碳交易市场的建立具有重要的理论指导意义。

1.2.2 现实意义

首先,对促进碳减排和能源结构调整有重要现实意义。中国正处于经济转型期的关键阶段,具体表现为国家产业结构稳步升级,二次产业比重逐渐降低。而碳排放效率及其指数的变动趋势是减少碳排放量的关键指标,从而推动降低能源结构中的煤炭等低效能源的占比,增加新能源等清洁能源的占比,达到高效控制生产过程中的二氧化碳排放量。另外,中国地域跨度范围广,各省市和经济区之

间的经济水平和产业结构存在较大差异，必须依据实际的碳排放效率值的差异程度来确定调整力度及改进措施。

其次，对技术效率和技术进步的贡献界定有重要现实意义。碳减排情境下的碳排放效率指数除了可以反映省域变化情况和区域变动趋势外，还可进一步分解为技术效率变化与技术进步变化。因此，确定影响碳排放效率增长指数提高或降低的因素属于何者意义重大。探索不同地区间这种差异化内在机理的影响路径，从而有针对性的使投入产出过程中碳排放效率指数大于零，为制定各地区的减排方案提供选择依据。

最后，对制定碳减排政策和实现碳中和目标有重要现实意义。具体碳边际减排成本的大小，可以明确企业的碳减排压力和最大化利润，能够合理制定有效的生产方案来达到规定的碳减排目标。此外，准确量化碳边际减排成本可以为国家政策制定提供科学根据，探索符合现实的碳排放税征收标准和碳交易市场运行机制，规范市场主体的碳交易活动，促进碳减排政策的高效落地和有序实行，持续推动能源与环境相统一的绿色低碳发展。

1.3 本文的创新点及不足之处

与现有研究成果相比较，本文着重从以下几点进行拓展：

(1) 研究方法上，一是根据八大经济区的产业结构差异，从生产理论角度分析有二氧化碳参与的生产过程，明确投入要素和两个产出要素，构建方向性距离函数，在此基础上使用共同前沿和群组前沿方法测算静态的碳排放效率，以期得到理想结果，即最大的生产总值和最小的碳排放量，并进一步分析省域和区域间效率差异；二是运用 G M-L 指数法度量碳排放效率指数和分解项技术进步变化、技术效率变化，根据测算结果描述各地区的动态碳排放效率变化和变化原因，从而扩展和完善了碳排放效率测算研究方法；三是选取数据包络方法中的 SBM-Undesirable 模型衡量各省市的碳边际减排成本，分析该模型的实证结果，从而为碳减排政策提供更丰富的参考依据。

(2) 研究数据上，较以往研究多从单一层面或单一模型出发的现状，本文选用更为详尽的样本数据来评价碳排放效率和度量边际减排成本，选取我国数据

可得 30 个省市和八大经济区为研究目标，同时考虑区域和省域两个层面，有利于完善实证结果的全面性。

不足之处：一方面，由于篇幅限制，本文使用的估算和评价模型均是建立在非参数方法的基础上，其测算结果相比参数方法缺少一定的经济意义，且无法对两种方法的结果差异进行对比。在后续研究中，可以结合两种方法进行测算，从而为政策制定提供多元化依据。另一方面，鉴于数据的可获得性，本文只选取各经济区的数据进行分析，而未对其相关产业结构进行效率评价，实证分析结果仅对全国宏观层面的决策单元具有指导性。

1.4 内容框架与结构层次图

文章结构分六部分，其内容框架安排如下：第一部分为绪论。在绿色低碳发展的背景下结合中国制定的能源安全战略和碳中和目标，详述了中国碳排放效率的评价与边际减排成本估算的研究背景与意义，并总结文章的可能创新点。第二部分为文献综述，涉猎国内外已有文献，系统梳理了碳排放效率的定义、碳排放量的测算方法、碳排放效率及其指数评价和碳边际减排成本的估算，明确研究思路并确定测算模型。第三部分为理论基础与研究方法。通过简单描述与研究内容密切相关的学科理论基础，如环境经济学和低碳经济等，明确主要研究方法包括方向性距离函数、数据包络分析 (SBM-Undesirable) 模型、共同前沿模型 (Meta-frontier)、群组前沿模型 (Group-frontier) 和全局参比下的 Malmquist-Luenberger 指数法。第四部分为中国碳排放效率的动静态评价。首先是确定碳排放量的计算方法和效率测算的投入产出指标体系，选取 2009~2019 年的中国 30 个省域和八大综合经济区的面板数据，采用基于投入导向且规模报酬可变的共同前沿模型和全局参比下的 G M-L 效率指数法，分别测算静态的碳排放效率和动态的碳排放效率指数，其中碳排放效率指数可表示为两项分截值技术效率变化与技术进步变化的乘积。最后是测算技术落差比率 (TGR)，并对评价结果进行综合分析和前沿面比较，探寻碳排放效率提升的多种路径。第五部分为碳边际减排成本的估算。简述影子价格与碳边际减排成本的关系，利用变量的经济关系推导非参数方法的测算公式，使用 SBM-Undesirable 模型估算影子价格，对比分析不同省市和区域碳边际减排成本差异背后的潜在原因。最后为结论与政策建议。该部分回顾并总

结本文的研究情况与成果，阐述主要研究结论、政策建议及不足之处，并结合第四部分和第五部分得到的实证分析结果，针对提高碳排放效率、降低碳边际减排成本和调整产业结构提出相适应的政策建议，以期实现中国碳排放量向世界高水平趋同。本文的研究逻辑和结构框架如下图所示：

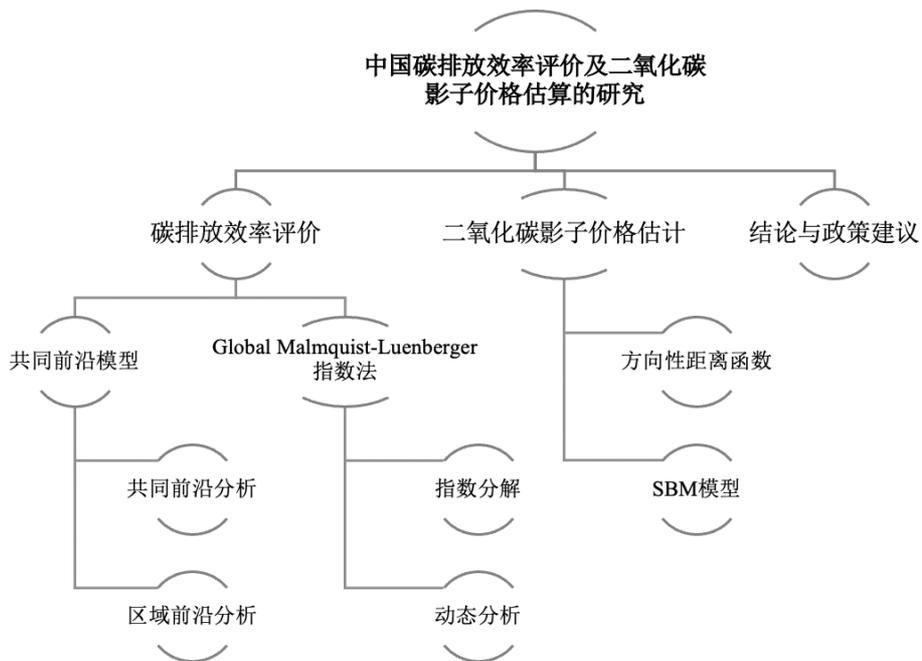


图 1.1 文章结构层次图

2 文献综述

国家气象局发布《中国气候变化蓝皮书（2021）》中指出，据全国气象系统观测的主要指标显示，全球气温变暖现象依旧存在，极端气候事件发生的风险逐步加剧，给人类生活带来严峻挑战。在既定的“碳达峰”和“碳中和”时代背景下，我国如何有效应对气候变幻带来的危害，早日实现承诺目标，已成为全社会普遍重视的问题。意味着中国必须重点关注能源消耗问题，准确估算碳排放量，提高碳排放效率，降低边际减排成本，探寻适合自身的碳排放路径和碳减排政策。本章节着重阐述碳排放效率、效率指数和碳边际减排成本的概念定义、测算方法与模型，然后就已有研究现状展开论述。

2.1 碳排放效率的概念

碳排放效率概念出现的时间颇早，但学术界尚未有统一的定义。对于碳排放效率的概念界定，研究学者主要从两个角度进行，最初从单要素效率层面，将碳排放效率定义为两种指标之间的单调比例关系，以下三个单要素指标最具代表性。第一，Kaya 和 Yokobori（1993）首次提出碳生产率的概念，以 GDP 为内在变量来描述碳生产率，定义其为 GDP 和二氧化碳排放量的比值；第二，Otavio 和 José（1999）进一步描述了碳指数概念，用单位能耗对应的碳排放量来表示，定义为碳排放量与能源消耗量的比值；第三，Zhang（2009）定义为碳强度，即狭义的人均 GDP 碳排放量，认为该指标考虑了人口、经济产出和碳排放量三个指标，在评价碳排放效率时更具代表性。其中前两个单要素指标是基于碳排放量计算的，考虑到发达国家拥有的较高碳排放技术和庞大经济体量，故以 GDP 为基底的碳生产率适合发达国家，而以能源消费总量为基底的碳指数更适合发展中国家。

单要素碳排放效率指标形式简单且易于计算，表现为两种指标的单一比例关系，但未考虑生产过程中的其他要素消耗，也无法衡量生产过程对环境产生的危害。对此，学者们逐渐开始用全要素的角度来界定碳排放效率，全要素生产率是指经济主体在一段时间内从事经济活动时产生的内部效率，是衡量生产过程中一定投入要素转化为总产出的生产率指标。Zaim et al（2000）认为准确评估生产过程对环境的影响至关重要，首次将碳排放量作为非合意产出加入非参数法测算环

境效率的过程中,提出碳排放综合评价指数并研究了经合组织成员国制造业的碳排放绩效。Ramanathan (2002) 认为部分碳排放指标不能完全衡量碳排放效率,只有将碳排放量放入整个生产体系中进行效率评价,才能够全面体现出碳排放效率。王玲等 (2013) 将碳排放效率定义为较高的经济增长产生较少的能源消耗与二氧化碳排放量。Cheng et al (2018) 利用改进的非径向方向性距离函数(NDDF),构建出一个前沿的全要素碳排放效率指数(TCEI),认为改进后的 NDDF 在衡量碳排放效率和技术落差率方面更具优势。Gao et al (2020) 认为碳排放效率决定碳排放水平,在区分直接碳排放和隐含碳排放的不同之处后,测度了产业部门在隐含情景下的碳排放效率。Li et al (2020) 为解决实践间隙比和技术间隙比效率分解值大于 1 的问题,构建了中国建筑行业的前沿全要素碳排放绩效指数(NMTCPI),并使用非径向距离函数进行修正。

2.2 碳排放量的测算

在目前的碳排放量研究中,官方权威机构不提供关于国家或地区的碳排放量数据,学者们通常是选取适宜的研究方法进行估算。刘明达等 (2014) 研究并对比了 IPCC 和中国发布碳排放量的项目清单,系统总结了常用的三种碳排放量核算方法:即排放因子法、质量平衡法和实测法。一、质量平衡法(Mass-Balance Approach),是学者近年来提出的新方法,其基本思路是根据国家年度新生产的化学原料及设备,计算新设备消耗能源或材料量的份额占比。此方法较为简单,可以衡量出实际碳排放地所有设备的具体碳排放量,还可反映出各类设施设备碳排放量的大小。二、实测法(Experiment Approach),是较为传统的估算方法,主要对排放地实际测量的数据进行汇总后得到碳排放总量。此方法测量结果准确度高,但由于排放地分布众多,获取排放数据的成本较高,此外受到样本代表性和测量误差等因素的干扰,其实用性较第一种方法相随较低。三、排放因子法(Emission-Factor Approach),是 IPCC 制定的碳排放量估算方法,其应用范围最为广泛。具体核算思路是按照国家给定的碳排放清单,确定每种排放源的活动消耗量与排放因子,二者的乘积作为该排放项目的气体排放量估算值,最后统一加总后得到碳排放量估算值(含 CO₂、CH₄ 等气体)。其中活动消耗量是指与碳排放活动相关的全部排放源排放数量,数据主要来源于排放源普查、空气监测数

据等系列统计数据；排放因子指单位排放源消耗时产生的温室气体排放量，该数据可自行计算或参照 IPCC 报告中的缺省值。

陈诗一（2009）依据 IPCC 提供的原煤排放系数加权平均值计算出碳排放系数，以煤炭、原油和天然气三种高消耗量一次能源为基准核算工业产业的二氧化碳排放量。刘海英等（2019）也使用 IPCC 公布的方法，测算了三种一次能源消费引致的二氧化碳排放量。在碳排放量测算的最新研究文献中，李慧（2019）选取含电力在内的 16 种能源的终端消费量，覆盖面最为广泛；周迪等（2019）选取了包括原煤、原油、天然气和水泥的 8 种终端能源的消耗量。闫丰等（2018）和黄煌（2020）分别选取 8 种常见化石能源，采用排放因子法测算了京津冀地区和我国省域的碳排放量，前者依据碳排放量将其转化为地区碳足迹变，后者在约束条件下将碳排放量进行分配。综合评估以上三种测算方法的优缺点以及考虑数据的可得性，本文选取排放因子法和八种一次性消耗能源来度量我国各省市的碳排放总量。

2.3 碳排放效率

碳排放效率和温室气体的排放息息相关。国内外学者对碳排放效率评价的主流方法有二，即参数法和非参数法。参数法通常以随机前沿分析（Stochastic Frontier Analysis，缩写 SFA）方法为代表，它是由 Meeusen et al（1977）和 Aigner et al（1977）联合提出的一种考虑随机变量影响的方法，其优势在于假设条件较少，能真实反映出真实生产过程，还可依据具体生产函数来考虑碳排放效率的影响因素，从而有效解决随机误差问题。杜克锐等（2011）、谌莹等（2016）构建的随机前沿模型，对我国各省份的碳排放效率和绿色全生产率进行实证分析。非参数方法中最主流且具代表性的是数据包络分析（Data Envelopment Analysis，缩写 DEA）方法，由 Charnes 和 Cooper（1978）首次提出，主要是通过生产过程中构建线性规划模型来评价全要素能源效率。李双杰等（2018）总结了非参数方法的优点，即无需提前假定具体的生产函数，设定的“多投入-多产出”指标体系不受数据单位的影响，数据包络模型投入产出要素的权重向量可以通过数学方法来确定，具有很强的客观性。近些年来，学者们对碳排放效率的主流研究方向是以 DEA 为代表的多要素生产率法，其度量和评价建立在全要素能源效率的理论基

基础上。王玲等（2013）对碳排放效率的概念做出界定，并运用序列 DEA 法分析了我国制造业的节能减排特征。

在国家与区域层面的碳排放效率测算研究中。Zhou et al（2010）、魏梅等（2010）使用环境污染物排放量作为非合意产出，运用超效率 DEA 方法对区域的碳排放效率进行考察。张伟等（2013）、董锋等（2014）、宁论辰等（2021）选取二氧化碳排放量作为非合意产出，分别使用超效率 DEA、三阶段 DEA 和超效率 SBM-Tobit 模型来分析我国各省域的全要素二氧化碳减排效率。周五七等（2012）和李慧等（2019）在全要素视角下分别衡量了我国各区域和省市的碳排放效率和收敛性。钱丽等（2015）、吴凡等（2016）、刘海英等（2019）和杨国涛等（2020）分别基于共同前沿下的 DEA 模型测算了我国的工业企业绿色技术效率、中西部地区全要素能源效率、省份 CO₂ 排放效率和农业生产效率。郭炳南等（2017）使用将碳排放量作为“坏”的产出的 SBM 模型，考察了长三角地区的碳排放效率水平与动态变化。李珊珊等（2019）和李金铠等（2020）基于 Malmquist 指数法分别对我国各省市和八大经济区的碳排放效率进行测算与分解，对其变化特征和差异性进行分析。董梅和李存芳（2020）使用 MinDS 和 Luenberger 指数研究了我国 30 个省份的低碳效率、低碳全要素生产率（LTFP）、技术落差和低碳化水平演变进程。

在行业层面的碳排放效率研究中，王娟（2019）和于克美等（2020）将二氧化碳排放量作为非期望产出，采用非径向 DEA 方法分别测算了我国工业企业和铁路运输业的碳排放效率；刘京星等（2017）和查建平等（2019）从行业异质性和区域异质性两个假设出发，使用三层级共同前沿 DEA 模型衡量了我国国有企业和旅游企业的无效率。胡剑波等（2021）基于我国 2002-2017 年投入产出表，使用投入产出法测算各产业部门的隐含碳排放量，并将其加入三阶段 DEA 碳排放效率测算模型，得到产业部门的隐含碳排放效率水平；李铭泓等（2021）使用 Global Malmquist-Luenberger 指数法分析了 2009—2016 年全国交通运输业碳排放生产率的变化情况，运用泰尔指数和变异系数探究效率差异及形成原因；Zhu et al（2021）认为能源密集型产业是资源消耗和产生碳排放的主要部门，选取三

阶段 DEA 模型探讨了中东、欧洲地区和中国密集型产业的碳排放效率，揭示了能源密集型产业对碳排放的贡献，有助于制定不同区域的产业低碳发展战略。

综上所述，国内外学者为碳排放效率的评价提供了行之有效的理论基础与应用先河。在现有研究成果中，DEA 效率评价模型应用广泛，其无需假设生产函数，可将评价单元置于生产前沿面进行效率测算，可以消除因经济发展、技术进步等因素引起的效率差异。传统 DEA 方法在使用中仍存在进一步改善空间，一方面是部分文章对区域碳排放效率的评价大多以同一前沿面作为参照依据，根据评价单元与对应前沿面的距离关系来判定效率，由于不同地区间发展水平和自然条件差异较大，因此缺乏基于不同参照面或前沿面的碳排放效率对比分析；另一方面是多数研究聚焦于某个区域或行业的效率评价，而定量刻画不同经济区、省市与整体之间的碳排放效率研究较少。因此，本文在确立碳排放效率评价指标体系的基础上，结合共同前沿与数据包络分析方法，使用共同前沿、群组前沿下的超效率 DEA 模型与 Global Malmquist-Luenberger 指数法全面评价碳排放效率，考虑各经济区技术水平差距和区域技术异质性，分别测算动静态碳排放效率变化、区域差异和技术落差比率，并进行后续实证研究分析。

2.4 碳边际减排成本

随着我国环境政策体系逐步向市场调控方向的转变，对应的减排压力激增和减排空间剧减，其中要做的基础性工作之一就是测度二氧化碳边际减排成本，以便为碳减排路径的设计提供有力支撑。蒋伟杰和张少华（2018）认为，一个有效的二氧化碳减排方案必须保证各经济体最后一单位减排的边际成本相等，因此科学揭示生产过程中二氧化碳减排的潜力成本至关重要，是实现政策转变的关键所在。边际减排成本是环境经济学的重要概念，能直接体现出全部参与者进行减排的潜在空间和实际成本，可以避免单个经济体存在的“搭便车”问题。因此，科学合理的估算二氧化碳影子价格，即碳边际减排成本，一是可以为碳排放交易权市场提供基础参考交易价格，促使边际减排成本与碳排放市场的实际价格差距反映出要素配置状况；二是能够为政府制定碳税方案提供理论依据，推动各省市和区域的碳减排活动改革（Chu et al, 2013）。

影子价格最初由 Kantorovich (1960) 提出的“最优价格”延伸而来,在资源稀缺性条件下,依托资源最优配置来生成价格机制,即由最低的边际消耗成本决定最优价格。经济学家 J. Tinbergen 和 T. Koopmans 将其命名为影子价格(Shadow Price),定义为均衡状态时生产要素或商品的内在价格,依据局部均衡分析理论推导影子价格。此后,经济学家 L. Squire 和 V. Tak 描述为生产要素或产品数量变动所引起的收益变化。二氧化碳影子价格可以用来表示碳边际减排成本,即由二氧化碳排放变化所引起的经济产出变化量。碳边际减排成本的常见估算方法有三种,一是工程意义上的专家型影子价格,其应用面较为狭窄且具有较强主观性;二是在均衡模型中加入二氧化碳约束,进而测算的经济能源型影子价格,此法假设条件较多且计算复杂;三是在微观生产理论中引入二氧化碳影子价格分析框架。第三种包括参数法与非参数法。其中参数法是在 Shephard 距离函数的基础上,使用超越对数或二次型函数将距离函数参数化。例如, Lee and Zhang (2012) 和 杨子晖等 (2019) 均使用参数法线性规划模型测算的中国各省市的二氧化碳边际减排成本; Du et al (2015) 在估算碳排放边际减排成本的基础上拟合了边际减排成本曲线,研究表明中国将在 5 年后达到碳排放强度下降 40%-50% 的目标,会导致减排成本相对于 2015 年上升 599-623 元/吨。近年来,鉴于 Shephard 距离函数受制于角度约束,部分学者开始利用非参数法来测算影子价格,即方向性距离函数,可同时考虑合意与非合意产出两方面。具体是以方向性距离函数为前提构造出最优生产前沿面,根据线性规划的对偶理论来求解边际减排成本。如 Lee et al (2002) 在以往的研究的基础上,考虑生产过程涉及的低效问题并提出效率约束准则,在线性规划方程中引入非效率因子,利用方向性距离函数和非参数法估算出污染物的影子价格。Choi et al (2012)、黄煌 (2020) 分别采用非径向方向性距离函数和 SBM-DEA 模型测算了中国各省份的二氧化碳的减排潜力和边际减排成本。Park and Lim (2009) 利用输出距离函数推导出韩国发电行业的二氧化碳边际减排成本,分析了碳排放量在限额采购与直接减排两种方式间的优劣。闫庆友等 (2020) 基于共同前沿下 SBM-Undesirable 模型,选取 2000-2017 年中国的省份面板数据,分别测算来群组前沿和共同前沿下的能源影子价格和能源环

境效率，并分析了地区差异性和演变趋势，该研究认为应考虑群组技术异质性来制定差别化的能源定价机制。

总结上述文献的研究内容可得出：参数法需要引入并估计较多参数，不能量化随机项对生产前沿面的影响，设定生产函数时易出现内生性问题；非参数法无需假定生产函数，适合多投入-多产出模式，能够通过方向性向量修正距离函数，从而更接近真实生产过程。后者属于确定性模型，因此存在无法对估算结果进行检验的问题（蒋伟杰等，2018）。本文在传统的径向与角度的非参数方法基础上，引入要素的松弛性问题，选取包含松弛变量的 SBM-Undesirable 模型。另外，上述文献中的碳边际减排成本与二氧化碳影子价格、碳减排成本、碳价格等概念意义相似、估算方法相同，且所选数据越微观其估算价格越接近，因此，本文统一使用碳边际减排成本这一专业术语进行表述，使用二氧化碳影子价格的实际估算值来表示。综上所述，第五部分从以下三方面进行展开：首先，引入方向性距离函数与生产技术集合，考虑松弛变量和碳约束问题，使用 SBM-Undesirable 模型对含二氧化碳排放的生产技术集进行建模；其次，通过利润函数描述经济参与者追求利润最大化的行为，由数据包络法推算出影子价格表达式；再次，将 DEA 模型转化为线性规划的对偶形式，进而得到碳边际减排成本的估计值。

3 理论基础及研究方法

庇古在《福利经济学》中系统地研究了外部性问题，他认为“理性人”从事生产活动时带来的社会成本与该主体承担的实际成本不相符，会对其他经济主体或社会造成不利影响，导致市场资源配置机制失效和产生负外部性。例如，企业生产商品或提供服务时引起的环境污染与资源低效使用，致使负外部性的出现，对此政府可以采取税收或行政处罚手段迫使生产者主动将负外部性内部化。其中税收手段又可称为征收庇古税，即通过对生产者赋予一种外在成本（向它征税），该成本恰好与每生产一单位产品所造成的后果相等，此时的税收额等于负外部性的边际成本。换句话说，即政府对企业每单位生产活动带来污染所收取的税收，其税收金额等于企业负外部性生产导致其他社会主体损失的边际成本，即 $MC_{society} = MC_{private}$ 。

庇古的外部性及税收理论为碳税政策制定、碳排放交易市场建立和生态环境保护等提供坚实基础。部分国家的探索与实践表明，完善的税收措施在生态环保治理中取得来显著效果，能够减少污染物排放和提升社会环保意识。现实生活中的生产性或非生产性的经济活动在生产合意产出时，都会伴随着一系列的环境污染物的排放，即非合意产出，如常见的气体 SO_2 、 CO_2 和氮氧化物等气体污染物，是引起全球气候变暖的主要源头。立足于碳中和背景，本文在生产可能性集和方向性距离函数的基础上，使用超效率数据包络方法构建效率评价模型，研究我国省域和八大经济区的碳排放效率、效率变化指数和碳边际减排成本。

3.1 理论基础

3.1.1 环境经济学理论

庇古学说是环境经济学得以发展和完善的理论基础。环境经济学（Environmental Economics）是结合了环境学科和经济学科两者的方法原理而衍生出的交叉学科，通过环境体系和经济体系互相作用、互相反应形成的复合体系，选择符合生产的物质变换方式，探索生态环保与经济绿色发展之间的内在联系。主要出发点是探寻经济资源的内在价值，为应用自然规律治理环境污染提供学科理论支柱。

随着对环境经济学理论研究的逐步深入,一些学者另辟蹊径,将经济发展带来的环境污染视为福利经济问题,责令企业支付生产引发的污染成本,或将环境看作一种生产要素,应该同其他要素一样,要求生产者对要素使用付出代价。这些观点仅立足于生产过程,忽略了环境问题的本质,即应该在社会经济发展规划中加入环境保护因素进行综合考量。绿色经济发展的规律是:要同时满足人类现实生活需求与生态环境负荷条件,在探寻环境变动特征的过程中保持自然资源的循环功能、净化功能、生产与补偿功能,从而促进资源合理利用与经济可持续发展。环境经济学的研究对象是经济活动的产品进行生产、流通、分配、消费与再生产的循环体系,生产过程与环境保护活动密切相关,通过自然界供给资源,人类使用劳动将资源变为日常需要的生产生活资料,二者共同构成社会财富的源泉。合理调节人类经济活动与环境资源间的物质形态变换,是环境经济学的主要研究内容,表明经济活动要达到生态体系均衡和遵循客观规律才能顺利实行,从而获得短期直接效益和远期间接效益。

完善资源开发利用准则、契合生产过程中的内在逻辑,是绿色发展最根本、最有效的措施。对此,需要改变过去唯 GDP (Gross Domestic Product) 为标准衡量经济发展的传统理念,将生态效益与环境保护纳入生产发展规划,使生产消费决策同环境经济学的根本要求相协调,保证生产布局 and 环境保护相统一,合理拟定资源消耗方案,推动环境与经济可持续、高质量发展,更好的协调二者之间的关系。

3.1.2 低碳经济理论

经济理论与实践活动的变动是相辅相成的,经济理论能够解释并很好的指导具体实践,实践活动的发展与进步又逐步更新着经济理论。近年来,地球的生态环境极度恶化,生态失衡和资源枯竭的矛盾加剧,压缩了人类的生存与发展空间。这种失衡局面,在促进社会各界进行反思的同时,给学术界创造出理论更新发展的现实条件,如典型的“低碳”系列概念。

“低碳”系列概念涵盖三大主流学术术语,依次为低碳经济、碳生产率和碳关税。此外,还包括“碳足迹”、“碳形象”、“碳责任”和“碳交易”等学科衍生术语。低碳经济 (Low-Carbon Economy) 一词最早来源于经济学家 Bratton, 立足经济

可持续发展思想，依托技术进步、产业转型和新能源开发等多维度举措，尽可能地降低消费高含碳能源带来的 CO₂ 排放，从而实现经济高质量发展与生态环境保护同步推动的高效模式。其实质是开发清洁能源和追求绿色生产总值，关键要领在于碳减排技术和产业结构的创新性改进，人类发展观的根本性转变，即调整传统经济发展模式，构建科技创新机制，实现低碳经济转型与践行绿色生活方式。碳生产率（Carbon Productivity）与能源产出效率概念联系紧密，定义为经济总产出与碳排放量之间的比例关系，即创造出一单位经济生产总值时所产生的碳排放量，每单位的碳排放量与碳生产率成正比关系。学者常常使用能否有效利用资源这一标准来判定企业是否属于低碳企业。碳关税（Carbon Tariff），又名边境调节税（BTAs），通常指一国或地区对进口的高碳耗商品征收 CO₂ 特别排放税，主要征收范围为工业化国家出口到非工业化国家的碳排放密集型产品，但目前全球仅有极少数国家开启征收先例。

目前，发展低碳经济已得到多数国家的认同，发达国家开始着手于将低碳经济打造为培育竞争优势的新起点，全力推动低碳技术与产业发展。在现阶段，我国能源消耗以煤为主，产业结构性矛盾仍旧突出，增长方式依旧粗放，资源利用效率不高，控制温室气体排放的压力较大。对中国而言，发展低碳经济是承担全球气候变化责任的外在表现，还是经济发展与转型的前沿方向。鉴于此，我国做出积极调整与应对措施，提升应对极端气候能力，管制温室气体排放，全面推广低碳经济发展模式和转变传统经济发展方式。推行低碳经济需要借助于全社会各经济主体的通力合作，转变生态发展观念，促使能源和产业间结构的合理调整，推动制定以低碳经济为主要内容的生态保护制度，形成资源节约型和环境友好型的发展模式，提高国家竞争优势，进一步引领全球经济低碳发展的未来趋势。

3.2 方向性距离函数

方向性距离函数是评价碳排放效率静态水平、动态变化、碳边际成本的基础，其前提是利用数据包络技术构造决策单元的全局生产可能性集合。Fare et al（2007）和 Fare et al（2015）对环境技术（Environmental Technology）做出定义，构造了即包括投入要素又涵盖合意产出（Desirable Output）和非合意产出（Undesirable Output）的生产可能性集合。具体是假定生产过程中有个 k 决策单

元 (Decision Making Units, DMU), 使用 n 种投入要素集 $x = (x_{1k}, x_{2k} \dots x_{nk}) \in R_N^+$, 生产出 m 种合意产出集 $y = (y_{1k}, y_{2k} \dots y_{mk}) \in R_M^+$ 与 z 种含环境污染物的非合意产出集 $u = (u_{1k}, u_{2k} \dots u_{zk}) \in R_Z^+$ 。

其生产可能性集合可表示为:

$$P_{(x)} = \{(y, u; x \text{ 可生产出 } (y, u))\} \quad (3-1)$$

$P_{(x)}$ 满足除闭集、有界性外, 还满足以下三点特性:

(1) 投入集合与合意产出的自由可处置性: 假设 $(y, u) \in P_{(x)}$, 若 $y^* \leq y$, 则 $(y^*, u) \in P_{(x)}$; 若 $x^* > x$, 则 $P_{(x)} \subseteq P_{(x^*)}$ 。

(2) 非合意产出的弱可处置性: 若 $(y, u) \in P_{(x)}$, 且 $0 \leq \theta \leq 1$, 则 $(\theta y, \theta u) \in P_{(x)}$, 表示当投入固定时, 两种产出的增减方向同比例变动, 即 y 变化时 u 随之变化。

(3) 合意产出与非合意产出的零结合性 (null-jointness): 若 $(y, u) \in P_{(x)}$, 且 $u = 0$, 则 $y = 0$, 表明非合意产出总是出现在合意产出的生产过程中, 因此其生产可能性边界必然经过原点。

Shepherd (2015) 曾提出线性产出距离函数, 即谢泼德距离函数 (Distance Function, 缩写 DF), 表示一定的技术水平下, 当投入要素给定时, 合意产出与非合意产出同方向同比例增加或减少的最大倍数。DF 可以用来表示技术有效性, 其函数式可表述为:

$$D_0(x, y, u) = \inf \left\{ \theta: \frac{y, u}{\theta} \in P_{(x)} \right\} \quad (3-2)$$

在 Shepherd 函数的基础上, Chung et al (1997) 做出改进并提出了方向距离函数 (Directional Distance Function, 缩写 DDF) 和 Malmquist 生产率指数, 二者可以自由设定合意产出增加或非合意产出减少的方向, 使得包含非合意产出的生产效率实际测度变为现实, 在反映经济效应变化和测算二氧化碳排放效率中得到广泛应用。其函数式可表述为:

$$\vec{D}_0(x, y, u; g_y, -g_u) = \text{Max} \{ \theta: (y + \theta g_y, u - \theta g_u) \in P_{(x)} \} \quad (3-3)$$

基于方向性距离函数的概念, 上式可继续表述为:

$$\vec{D}_0(x, y, u; g_y, -g_u) \geq 0 \Leftrightarrow (y, u) \in P_{(x)} \quad (3-4)$$

朱德进（2013）结合方向性距离函数与数据包络方法测度了碳排放效率，将方向性距离函数定义另作表述为：

$$\vec{D}_0(x, y, u; g) = \sup\{\theta: (y, u) + \theta g \in P_{(x)}\} \quad (3-5)$$

$$P_{(x)} = \{(y, u): x \text{能生产出}(y, u)\} \quad (3-6)$$

式中 g 表示合意产出升高和非合意产出降低的方向，本文设为 $(y, u; g)$ ； θ 表示两个产出要素同比例降低的最大范围。

3.3 数据包络方法

数据包络方法 (DEA) 是目前最主流的非参数方法，最初由 Charnes 和 Cooper (1978) 共同提出，常被学者用来估计方向性距离函数，进而测算 DMU 的碳排放效率。相比于参数法，该法无需考虑随机误差影响，可以有效避免计量过程中出现的内生性问题和主观意愿，使效率评价结果更为客观。因此，本文将二氧化碳排放量作为非合意产出，选取 DEA 方法进行效率评价。评价过程为：第一步是依据决策单元的投入产出集拟合最优水平曲线；第二步通过方向性距离函数计算 DMU 距离前沿面的远近，其效率大小与距离成反比。经典 DEA 线性规划模型建立在方向性距离函数的基础上，其传统 CCR 模型表达式为：

$$\begin{aligned} & \text{Max } \theta \\ & \text{s.t. } \begin{cases} x \geq \sum_{k=1}^K \lambda_k x_k \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k y_k \leq (1 + \theta)y \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k u_k = (1 - \theta)u \\ \lambda_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中 x 表示投入向量， y 表示合意产出， u 表示非合意产出， λ 表示强度向量，即权重。当权重之和 $\sum_{k=1}^K \lambda = 1$ 时，表示规模报酬可变 (Variable Return to Scale, 缩写 VRS)；反之对权重无约束，则表示 (Constant Returns to Scale, 缩写 CRS)。 θ 指距离函数值，表示在投入即定的情况下，DMU 合意产出扩张或非合意产出同方向缩小的比例。另外， θ 也可以表示为无效率，其值越大，说明 DMU 距离生产前沿面越远，效率越低，当 $\theta = 0$ 时，表示 DMU 完全有效。基于 DDF 的计算结果，可以将碳排放效率指标记为 $TCE = 1 - \theta$ 。

在 CCR 模型中添加约束条件 $\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1$, 根据 C-C 变换原则, 那么 VRS 条件下的 BCC 模型表达式为:

$$\begin{aligned} & \text{Max } \theta \\ & \text{s.t. } \begin{cases} x \geq \sum_{k=1}^K \lambda_k x_k \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k y_k \leq (1 + \theta)y \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k u_k = (1 - \theta)u \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (3-8)$$

经典 DEA 方法在评价效率过程中, 可能会出现多个 DMU 均位于某一生产前沿面且效率值均为 1 的情况, 从而无法对 DMU 进行评价与比较。而 Tone(2002) 在提出的非径向超效率 SBM 模型中加入松弛变量, 可同时处理产出和非合意产出, 能够对多个有效 DMU 进行效率比较, 从而可以解决 DMU 失效问题。SBM-Undesirable 模型表达式为:

$$\begin{aligned} \rho^* = \min \rho &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{x}_k}{x_k}}{\frac{1}{(M+Z)} (\sum_{m=1}^M \frac{\bar{y}_k}{y_k} + \sum_{z=1}^Z \frac{\bar{u}_k}{u_k})} \\ & \text{s.t. } \begin{cases} \bar{x} = \sum_{k=1}^K \lambda_k x_k + s^x \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k y_k - s^y = \bar{y} \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k u_k + s^z = \bar{u} \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, \bar{y} \leq y_k, \bar{u} \leq u_k \end{cases} \end{aligned} \quad (3-9)$$

式 (3-9) 中, ρ^* 代表全要素效率值, 当 $\rho^* < 1$ 时, DMU 处于无效状态, 产出和投入比例需要调整; 当 $\rho^* \geq 1$ 时, DMU 位于有效状态。s 是各要素的松弛变量, 表示生产中出现的投入过多或产出过少情况, 当 $\rho^* = 1, s^{x^*} = s^{y^*} = s^{u^*} = 0$ 时, 决策单元有效。

3.4 共同前沿模型

共同前沿理论认为评价单元受宏观因素的影响而存在差异。传统 DEA 在测算效率时, 通常假设 DMU 具有相似技术水平, 而我国各区域在自然资源、发展水平、创新能力和政策环境等方面存在较大差别, 导致不同地区的真实生产前沿面有所不同。因此, 当考虑到区域间异质性因素时, 仅仅采用省市数据无法准确衡量各区域真实效率, 对此学者采用分类分组的综合方法进行测算。Battese et al (2002) 和 O'Donnell et al (2008) 基于共同边界生产函数, 构建出共同前沿 (Meta-frontier) 和随机前沿 (Group-frontier) 分析方法, 并对两组前沿面之间的技术落

差比 (Technology Gap Ratio, 缩写 TGR) 进行测算。共同前沿法的群组划分标准为: 要求群组内部的 DMU 具有相近的技术水平, 不同群组之间的 DMU 具有差异较大的技术水平。本文以区域协调发展为前提, 借鉴国务院发展研究中心报告中的划分方法, 将我国采用的四个板块划分为八大综合经济区 (李金铠等, 2020), 依次为: I.东北综合经济区 (辽宁、吉林、黑龙江); II.北部沿海综合经济区 (北京、天津、河北、山东); III.东部沿海综合经济区 (上海、江苏、浙江); IV.南部沿海经济区 (福建、广东、海南); V.黄河中游综合经济区 (陕西、山西、河南、内蒙古); VI.长江中游综合经济区 (湖北、湖南、江西、安徽); VII 西南综合经济区 (云南、贵州、四川、重庆、广西); VIII.西北综合经济区 (甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆)。本文全面考虑了各经济区域间存在的技术落差, 消除经济区之间的异质性, 基于 DDF 方法来构建共同前沿和群组前沿模型。

共同前沿 (Meta) 假设所有生产单元的技术水平一致, 则全部 DMU 的生产可能性集合为共同前沿面; 群组前沿 (Group) 根据技术水平差异性进行分组, 由各组确定自己的前沿面。根据 Battese et al (2002) 提出的共同前沿模型, 设 $x \in R_N^+$ 为投入向量, $y \in R_M^+$ 为合意产出向量, $u \in R_Z^+$ 为非合意产出向量, 将八个经济区群组的投入产出向量合并到同一技术集合, 即:

$$T_r = \{(x_r, y_r, u_r): x_r \geq 0; y_r \geq 0; u_r \geq 0; x_r \text{ 能生产出 } (y_r, u_r)\} \quad (3-10)$$

故群组 r 对应的生产可能性集为:

$$P_{r(x)} = \{y: (x, y, u) \in T_r\}, r = 1, 2, \dots, 8 \quad (3-11)$$

$P_{r(x)}$ 的上边界为“群组前沿”。此时, 群组技术效率 (Group Technical Efficiency, 缩写 GTE) 等同于群组前沿距离函数, 其表达式为:

$$D_r(x, y, u) = \inf \left\{ \theta: \frac{y, u}{\theta} \in P_{r(x)} \right\} = GTE(x, y, u) \quad (3-12)$$

研究对象中的 r 个群组技术子集 T_r 构成的共同技术集为:

$$T_{meta} = \{(x, y, u): x \geq 0; y \geq 0; u \geq 0; x \text{ 能生产出 } (y, u)\} \quad (3-13)$$

在满足共同技术集的条件下, 与之对应的生产可能性集合为:

$$P_{meta(x)} = \{y: (x, y, u) \in T_{meta}\} \quad (3-14)$$

$P_{meta(x)}$ 的上边界为“共同前沿”，即 r 个群组前沿的包络曲线。因此，共同技术效率（Mutual Technical Efficiency，缩写 MTE）所对应的共同前沿距离函数可表述为：

$$D_{meta}(x, y, u) = \inf \left\{ \theta: \frac{y, u}{\theta} \in P_{meta(x)} \right\} = MTE(x, y, u) \quad (3-15)$$

在上述基础上，结合共同前沿模型评价各 DMU 的效率，假设规模报酬不变（CRS），O'Donnell et al（2008）和 Chiu et al（2012）在 BCC 模型基础上定义各 DMU 于共同前沿和群组前沿下的碳排放效率（Carbon Efficiency）分别为：

（1）共同前沿下的碳排放效率模型

$$\begin{aligned} & \text{Max } \theta_{meta} = D_s(x_k, y_k, u_k; g) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_{i,k} \geq \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{i,k}, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{j,k} \leq (1 + \theta_{meta}) y_{j,k}, j = 1, 2, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k u_{l,k} = (1 - \theta_{meta}) u_{l,k}, l = 1, 2, \dots, Z \\ \lambda_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \end{aligned} \quad (3-16)$$

其中 θ 表示即定生产技术和固定投入条件下共同前沿面的碳缩减比例； N 、 M 、 Z 分别表示投入向量和两个产出向量的数量； K 为共同前沿下的 DMU 个数。那么，共同前沿下的碳排放效率计算公式为： $TCE_{meta} = 1 - \theta_{meta}$ 。共同前沿效率 TCE_{meta} 反映了各省市的实际产值距最佳生产技术与管理水平的差值，是 DMU 的碳排放效率综合表现。

（2）群组前沿下的碳排放效率模型

$$\begin{aligned} & \text{Max } \theta_r = D_r(x_k, y_k, u_k; g) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} x_{i,k} \geq \sum_{k=1}^K \lambda_k x_{i,k}, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k y_{j,k} \leq (1 + \theta_r) y_{j,k}, j = 1, 2, \dots, M \\ \sum_{k=1}^K \lambda_k u_{l,k} = (1 - \theta_r) u_{l,k}, l = 1, 2, \dots, Z \\ \lambda_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, K_r \end{cases} \end{aligned} \quad (3-17)$$

其中 θ_r 表示群组前沿下的碳缩减比例； K_r 为群组前沿下的 DMU 个数，且东北地区的 $K_r = 3$ ；北部沿海的 $K_r = 4$ ；东部沿海的 $K_r = 3$ ；南部沿海的 $K_r = 3$ ；黄河中游的 $K_r = 4$ ；长江中游的 $K_r = 4$ ；西南地区 $K_r = 5$ ；西北地区 $K_r = 4$ 。同理，群组前沿下的碳排放效率计算公式为： $TCE_{group} = TCE_r = 1 - \theta_r$ 。群组前沿

效率 TCE_{group} 反映了各经济区在现有技术水平下的生产要素配置情况，是 DMU 的管理效率优劣的表现。

最后，技术落差比率（TGR）是指共同前沿和群组前沿下的相对效率比值，代表了两者之间的技术水平差距。TGR 趋向于 1，表示实际生产效率和潜在技术效率越接近，群组前沿面水平接近共同前沿面水平；TGR 接近于 0 时反之。TGR 指标还可以判别区域分组的科学性和合理程度，其比值越偏离 1，说明分组有必要或越合理，越接近 1，说明分组不科学（吴凡等，2016）。TGR 表达式为：

$$TGR_{(x,y,u)} = \frac{D_{meta}(x,y,u)}{D_r(x,y,u)} = \frac{MTE(x,y,u)}{GTE(x,y,u)} = \frac{1-\theta_{meta}}{1-\theta_r}, r = 1,2,3,4 \quad (3-18)$$

技术落差比率 $TGR_{(x,y,u)}$ 反映了各省市和区域在现有技术水平下与潜在生产水平的差距，是 DMU 的技术效率表现。三者的关系可分别表述为：

$$MTE(x, y, u) = GTE(x, y, u) \times TGR(x, y, u) \quad (3-19)$$

TGR 结合了共同前沿效率与群组前沿效率。共同前沿模型下的中国各省市及经济区的碳排放效率（ TCE_{meta} ）可以分解为管理效率（ TCE_{group} ）和技术效率（ TGR ）。具体分解式为：

$$TCE_{meta} = TCE_{group} \times TGR \quad (3-20)$$

图 3.1 分别描述了共同前沿面（AA'）和群组前沿面（BB'、CC'、DD'），各省市和经济区的共同前沿效率、群组前沿效率和技术落差比率分别为：

$$TCE_{meta} = \frac{OE}{OM}; TCE_{group} = \frac{OF}{OM}; TGR = \frac{OE/OM}{OF/OM} = \frac{OE}{OF} \quad (3-21)$$

当 TCE_{meta} 值趋向于 1 时，各省市的碳排放效率越高；当 TCE_{group} 值趋向于 1 时，各经济区的群组前沿面与共同前沿下的可能性生产边界越接近，碳排放效率值相近，经济区域的差异性较小；当 TGR 值接近 1 时，表示 DMU 的生产技术水平与共同前沿面相似。

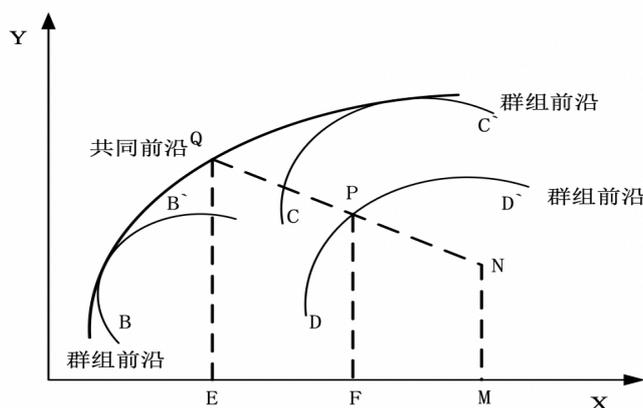


图 3.1 共同前沿、群组前沿和技术落差比率

3.5 Global Malmquist-Luenberger 指数法

全局参比下的 Global Malmquist-Luenberger 指数法为分析不同时期 DMU 的动态碳排放效率变化提供极大便利性。Paul et al (1990) 在 Farrell (1957) 的基础上改进了生产率分析法，建立起测算跨时期生产率变化 Global Malmquist-Luenberger (GM-L) 指数，通过计算 DDF 比率大小来衡量碳排放效率，进而评价两个时期的 DMU 动态生产率变化。本文假定投入要素 x 自由可处置，在规模报酬可变 (VRS) 条件下使用前沿模型测出碳排放效率值，进一步用 GM-L 生产率指数考察包含前沿下的碳排放效率变化值及其分解值。基于不同技术水平下的前沿碳排放效率指数 (Metafrontier-Malmquist-Luenberger CO₂ Performance Index, 缩写 MLCPI) 模型可定义式为：

共同前沿下碳排放效率指数 (*metaMLCPI*) 为：

$$\begin{aligned}
 metaMLCPI_{meta}^{t,t+1} &= M_{meta}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1}; x_t, y_t, u_t) \\
 &= \left[\frac{1-D_{meta}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{1-D_{meta}^t(x_t, y_t, u_t)} \times \frac{1-D_{meta}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{1-D_{meta}^{t+1}(x_t, y_t, u_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-22)
 \end{aligned}$$

群组前沿下碳排放效率指数 (*groupMLCPI*) 为：

$$\begin{aligned}
 rMLCPI_r^{t,t+1} &= M_r(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1}; x_t, y_t, u_t) \\
 &= \left[\frac{1-D_r^t(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{1-D_r^t(x_t, y_t, u_t)} \times \frac{1-D_r^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{1-D_r^{t+1}(x_t, y_t, u_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-23)
 \end{aligned}$$

上式中 (x_t, y_t, u_t) 和 $(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})$ 分别为第 t 期和 $t+1$ 期的投入产出矩阵， $1 - D^t(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})$ 和 $1 - D^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})$ 分别表示时期 t 和 $t+1$ 的技术

水平下 DMU 在时期 t+1 的距离函数; $1 - D^t(x_t, y_t, u_t)$ 和 $1 - D^{t+1}(x_t, y_t, u_t)$ 分别表示时期 t 和 t+1 的技术水平下 DMU 在第 t 期的距离函数, 可参照图 3.2 所示。

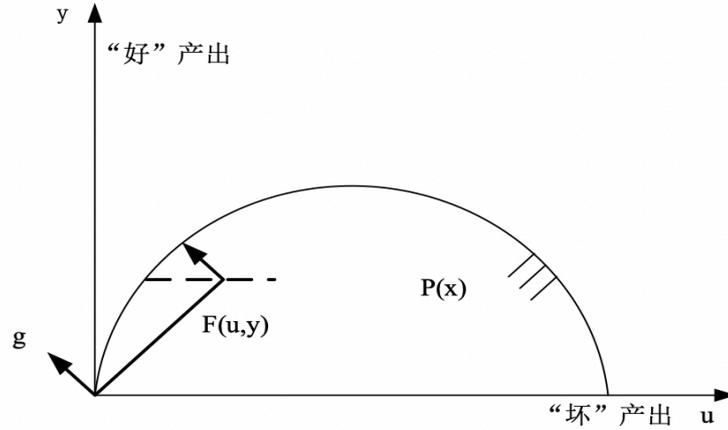


图 3.2 Global-Malmquist-Luenberger 生产率指数

在 Chen&Yang (2011) 的基础上, 可以对 MLCPI 进行分解, 以便了解碳排放效率的动态变化特征和关键驱动要素, 二层级共同前沿下的碳排放效率指数分解式为:

$$metaMLCPI_c^{t,t+1} = rMLCPI_c^{t,t+1} \times \frac{metaMLCPI_c^{t,t+1}}{rMLCPI_c^{t,t+1}} \quad (3-24)$$

首先, 根据王兵等 (2011) 分解全要素效率的过程, 将经济区域在群组前沿下的碳排放效率指数进一步分解为技术效率变化 (Technical Efficiency Change, 缩写 TEC)、技术变化 (Technical Change, 缩写 TC):

$$rMLCPI_{v,r}^{t,t+1} = TEC_{v,r}^{t,t+1} \times TC_{v,r}^{t,t+1} \times SEC_r^{t,t+1} \quad (3-25)$$

$$TEC_{v,r}^{t,t+1} = \frac{1 - D_{v,r}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1}; g)}{1 - D_{v,r}^t(x_t, y_t, u_t; g)} \quad (3-26)$$

$$TC_{v,r}^{t,t+1} = \left\{ \frac{1 - D_{v,r}^t(x_t, y_t, u_t; g)}{1 - D_{v,r}^{t+1}(x_t, y_t, u_t; g)} \times \frac{1 - D_{v,r}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1}; g)}{1 - D_{v,r}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1}; g)} \right\}^{1/2} \quad (3-27)$$

群组前沿下的碳排放效率指数 (MLCPI) 可分解为规模报酬可变条件下的技术效率变化 (TEC) 和技术进步变化 (TC)。上式可简单表述为:

$$MLCPI = TEC \times TC \quad (3-28)$$

MLCPI 的分解项的在统计概念上指为环比发展指数, 分解项指数变化是决定 MLCPI 值升高或降低的根本原因。当 MLCPI > 1 时, 说明 DMU 的碳排放效率指

数呈现出增长趋势，碳排放效率较前期有所增加；反之，当 $MLCPI < 1$ 时，表明碳排放效率指数呈现出降低趋势，碳排放效率较前期有所减少。其中TEC代表DMU从时期 t 到 $t+1$ 距离生产可能性前沿面的远近程度， $TEC > 1$ 表示跨期的技术效率提高，反之则降低；TC代表DMU从时期 t 到时期 $t+1$ 在生产可能性前沿面上的移动情况， $TC > 1$ 表示跨期的技术进步，反之则退步；SEC表示规模经济对碳排放效率变化率的影响情况。此处，还需要区别碳排放效率（TCE）和碳排放效率指数（MLCPI）的不同之处，TCE考察生产过程中某时期DMU和最优生产前沿面的距离关系，隶属于静态分析。MLCPI通过测度DMU与最优生产前沿面的位置远近来表示TEC，或者测度最优生产前沿面的位置变动来衡量TC，隶属于动态分析（王兵等，2010）。

其次，不同前沿下的碳排放效率指数比值可进一步分解：

$$\frac{metaMLCPI_c^{t,t+1}}{rMLCPI_c^{t,t+1}} = \frac{SEC_m^{t,t+1}}{SEC_r^{t,t+1}} \times PTCU_v^{t,t+1} \times FCU_v^{t,t+1} \quad (3-29)$$

等式（3-29）中左边项为区域群组边界对共同前沿边界的追赶因子，其等式右边第一个分解项的含义为：第一项 $SEC_m^{t,t+1}/SEC_r^{t,t+1}$ 反映了区域群组边界向共同前沿边界的整体趋同，其值大小表示DMU区域群组边界的调整速度相对于共同前沿边界调整的快慢程度，该项大于1表示分母共同前沿边界的调整速度快，小于1则表示调整速度慢。

$$PTCU_v^{t,t+1} = \frac{TGR_{v,r}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{TGR_{v,r}^t(x_t, y_t, u_t)} = \frac{SEC_m^{t,t+1}}{SEC_r^{t,t+1}} \quad (3-30)$$

$PTCU_v^{t,t+1}$ 反映了区域群组前沿边界对共同前沿边界的纯技术追赶，其值大于1表示区域群组前沿和共同前沿之间的生产技术水平差距缩小；小于1则表示生产技术水平差距的扩大。

$$FCU_v^{t,t+1} = \left\{ \frac{TGR_{v,r}^t(x_t, y_t, u_t)}{TGR_{v,r}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})} \times \frac{TGR_{v,r}^t(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})}{TGR_{v,r}^{t+1}(x_{t+1}, y_{t+1}, u_{t+1})} \right\}^{1/2} = \frac{TC_{v,m}^{t,t+1}}{TC_{v,r}^{t,t+1}} \quad (3-31)$$

$FCU_v^{t,t+1}$ 反映了区域群组前沿对共同前沿的技术边界追赶，其值大于1表示共同前沿的技术进步变动幅度大于群组前沿的技术变动；小于1则表示共同前沿面的技术进步变动幅度小。

4 碳排放效率的动静态评价

本章首先论述投入产出指标选取和样本数据来源；其次是利用前沿模型测算中国 30 个省市的碳排放效率 (TCE_{meta} 、 TCE_{group})，将两个前沿面下的动态碳排放效率指数进行分解，并分析部分省市和经济区碳排放效率低下的原因；最后，通过两个分解项来探究碳排放效率动态变化的源头。

4.1 碳排放量的计算

二氧化碳是温室气体的主要组成部分，由于我国统计官网上不直接公布二氧化碳的排放量数据，因此需选取合理的方法进行估计。此前，大多数学者选取三种一次性能源消耗为估计基准，这可能导致由样本量太少而产生测算不准确的现象。本文根据 2.2 节总结的碳排放量测算的最新研究成果，考虑到文章研究内容的针对性和我国电力消费量的复杂性，且存在西电东输和限电限产等情况，将电力指标不考虑在内。最终选取 8 种一次性能源消费单元，分别是煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气作为碳排放量的测算组成部分。

参照 IPCC 发布的《国家温室气体清单指南（2006）》，二氧化碳排放总量可由多种类能源消耗时产生排放量加总计算得到，其公式为：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n (CO_2)_i = \sum_{i=1}^n E_i \times NCV_i \times CEF_i \times COF_i \times (44/12) \quad (4-1)$$

式 (4-1) 中， CO_2 指经估算出的二氧化碳排放总量； i 为消费单元个数； E_i 表示实际能源消耗总量，单位为万吨标准煤； NCV_i 表示各种能源的净发热值； CEF_i 表示单位热值当量的碳排放系数； COF_i 表示碳氧化率，40/12 为 CO_2 的相对分子质量与 C 的相对原子质量之比；其中 $NCV_i \times CEF_i \times COF_i$ 的计算值为碳排放系数 (t 碳/t 标准煤)； $NCV_i \times CEF_i \times COF_i \times (44/12)$ 则为二氧化碳排放系数 (t 碳/t 标准煤)。经过整理计算，具体排放系数如表 4.1 所示。

表 4.1 中国能源折标准煤系数和碳排放系数表

能源	煤炭	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
折标准煤系	0.7143	0.9714	1.4286	1.4714	1.4714	1.4571	1.4286	13.300
碳排放系数	0.7559	0.8550	0.5857	0.5538	0.5714	0.5921	0.6185	0.4483
二氧化碳排	2.7716	3.1350	2.1476	2.0306	2.0951	2.1710	2.2678	1.6438

数据来源：联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC(2006)

4.2 投入产出指标选取

基于数据的可获性、全面性并立足于研究现状，由于西藏自治区、台湾省、香港特别行政区和澳门特别行政区 4 个省市的部分统计数据有缺失，现选取 2009-2019 年我国 30 个省份的面板数据，并将其划分为 8 个综合经济区，以劳动力 (L)、资本 (K) 和能源 (E) 作为投入量，实际国内生产总值 (G) 为合意产出，二氧化碳排放量 (C) 为非合意产出。相关指标的统计性描述见表 4.2，其具体处理过程的说明如下：

劳动力 (L)：国外学者通常使用从业人员的有效工作时间来表示，考虑到我国没有建立相关的劳动时间数据库，国内学者通常采用各省份的社会从业人数或年初/年末从业人员的平均值。本文沿用此方法，选取各省份的社会从业人数 (万人) 来衡量，数据来自各省市的统计年鉴。

资本 (K)：国内外学者通常使用资本存量表示资本投入。资本存量的最常见估算方法是从 Goldsmith 提出的永续盘存法 (Perpetual Inventory Method, PIM) 上演变而来，本文参照张军 (2004) 提出的符合中国现状的研究成果，初始资本以 2000 年为基期得到 2009-2019 年的资本存量。其测算公式为：

$$K_{i,t} = K_{i,t-1}(1 - \delta_{i,t}) + I_{i,t} \quad (4-2)$$

式 (4-2) 中 $K_{i,t}$ 指某省份在第 t 年的资本存量， δ 为折旧率，统一按照 9.6% 计， $I_{i,t}$ 指某省份在第 t 年的固定资本形成总额，并使用当年的固定资产投资价格指数进行平减。数据来源于历年的《中国统计年鉴》和《中国固定资产投资年鉴》。

能源 (E)：部分文章选取不同的能源消耗总量进行折算，由于消耗能源种类不一，其折算后数据与能源消耗总量相差较大。因此本文选取各省市的能源消耗

总量作为能源投入指标，单位为万吨标准煤，数据来源于历年的《中国能源统计年鉴》。

国内生产总值（G）：以 2000 年为基期，使用 GDP 平减指数折算出 2009-2019 年的实际国内生产总值，单位为亿元，数据来源于历年的《中国统计年鉴》。

二氧化碳排放量（C）：按照 4.1 节给出的二氧化碳排放系数法测算。

表 4.2 30 个省市 2009-2019 年投入产出指标的描述性统计

指标	观察单位	均值	最大值	最小值	标准差	
投入指标	L	330	2631.49	7150.3	286.0	1757.3
	E	330	14520.30	41390.0	1232.5	8729.2
	K	330	43334.04	171333.3	2423.4	32657.3
产出指标	G	330	14574.18	71079.1	709.2	12460.6
	C	330	42588.28	155911.4	4278.1	29689.9

另外，考虑到八大综合经济区在地理位置和经济条件等方面存在较大差异，其投入产出指标的差距明显，其投入产出变量的描述性统计如表 4.3 所示：

表 4.3 八大经济区投入产出变量的均值描述统计

分组	劳动力 (万人)	能源 (万吨标准煤)	资本存量 (亿元)	生产总值 (亿元)	二氧化碳 (万吨)
东北地区	3134.10	20666.29	61503.48	17645.31	64126.52
北部沿海	1917.91	13727.17	40531.20	10937.15	45959.86
东部沿海	3269.85	19892.71	71216.57	30152.35	51973.32
南部沿海	3185.96	14405.07	53282.71	23874.30	32822.05
黄河中游	2911.92	17902.16	47915.64	12199.27	69135.23
长江中游	3587.80	12739.97	38626.91	14676.49	32656.44
西南地区	2829.86	11303.03	32268.16	10350.79	25631.77
西北地区	829.60	7446.35	12851.19	3123.95	23387.74
全国	2631.49	14520.30	43334.04	14574.18	42588.28

4.3 碳排放效率的静态分析

根据上文构建的碳排放效率测算指标体系, 综合利用超效率 SBM-Undesirable 和前沿分析模型评价共同前沿和区域前沿下碳排放效率 TCE_{meta} 、 TCE_{group} 和技术落差比率 TGR。MaxDEA 7 软件的测算结果如表 4.4 和 4.5 所示。

表 4.4 2009-2019 年共同前沿和群组前沿下的各经济区碳排放效率描述

序号	综合经济区	共同前沿碳排放效率 TCE_{meta}				群组前沿碳排放效率 TCE_{group}			
		均值	最大值	最小值	标准差	均值	最大值	最小值	标准差
1	北部沿海	0.4799	1.0337	0.2320	0.2341	0.7193	1.2981	0.2669	0.2875
2	东北地区	0.3493	0.4316	0.2720	0.0461	0.9510	1.1822	0.7763	0.0927
3	东部沿海	0.7282	1.0290	0.3705	0.2257	0.8422	1.1229	0.5122	0.1943
4	南部沿海	0.7990	1.1617	0.4736	0.1988	0.8856	1.1729	0.6870	0.1262
5	黄河中游	0.3007	0.4379	0.2298	0.0415	0.8886	1.2324	0.6224	0.1560
6	长江中游	0.4507	0.5391	0.3729	0.0376	0.9331	1.1934	0.7254	0.0953
7	西南地区	0.4095	0.6826	0.2851	0.1174	0.7658	1.1684	0.5005	0.2213
8	西北地区	0.4589	1.1294	0.2688	0.1790	0.8652	1.1309	0.5481	0.1799
	全国	0.4970	0.8056	0.3131	0.1350	0.8563	1.1876	0.5798	0.1692

注: 根据 MaxDEA 软件计算结果汇总, 超效率模式下效率值可以大于 1, 同下表。

第一, 对不同经济区域的共同前沿碳排放效率 TCE_{meta} 和群组前沿碳排放效率 TCE_{group} 进行比较。 TCE_{meta} 和 TCE_{group} 分别是以不同前沿面作为参考基准的距离函数值, 表示投入水平相同时真实产出距离共同前沿面和群组前沿面的距离。如表 4.4 所示, 在 2009-2019 这 11 年中, 共同前沿和区域前沿下的全国碳排放效率均值分别为 0.4970 和 0.8563, 若以全国潜在前沿面的生产技术为参照, 那么二氧化碳的排放量可以减少 50.3%, 有较大的节能减排空间; 若以各经济区潜在前沿面的生产技术为参照, 二氧化碳排放量可以减少 14.37%, 节能减排空间相对较小。两种方法测试结果的差异主要是由于参照的可能性生产集合所包络的前沿面不同, 共同前沿是将所有 DMU 置于同一前沿面下, 而群组前沿仅是区域内相近省市构成的前沿面。首先, 共同前沿面下 TCE_{meta} 的均值由小到大依次排序为黄河中游、东北地区、西南地区、长江中游、西北地区、北部沿海、东部沿海和南部沿海, 其中南部沿海经济区的碳排放利用率最高, TCE_{meta} 均值为 0.7990,

说明该经济区在潜在共同边界的生产技术下存在 20.1%的节能空间，东部沿海的减排空间为 27.18%次之，其他经济区碳排放效率的改善空间较大，分别为 52.01%、54.11%、69.93%、54.93%、59.05%和 65.07%。相比而言，尾部 6 个经济区的碳排放效率较低，说明这些区域的能源消耗过程粗放、资源有效开发利用不足、资本投入不合理和劳动力人员密度不匹配，均存在一定的浪费与损耗现象。其次，群组前沿面下 TCE_{group} 的均值由小到大依次排序为北部沿海、西南地区、东部沿海、西北地区、南部沿海、黄河中游、长江中游和东北地区，对应的碳减排空间分别为 28.07%、23.42%、15.78%、13.48%、11.44%、11.14%、6.69%和 4.90%，相对于潜在的群组前沿面来讲，其效率改善空间较小，但均未达到 DEA 有效。最后， TCE_{meta} 和 TCE_{group} 前沿面比较。南部沿海和东部沿海经济区在碳排放效率的排序中靠前，排位变动幅度较小；而黄河中游、北部沿海和东北经济区在效率排位中发生很大变化，且两个效率值差值较大。究其原因，可能是因为前两个经济区的产业发展程度近似于全国潜在技术水平，其能源、资本存量和劳动力投入的比例配置优于后三个经济区，导致共同前沿和群组前沿下的技术差距变大，两个前沿面的位置距离也相对较远。

表 4.5 2009-2019 年共同前沿和群组前沿下的分省区域碳排放效率均值

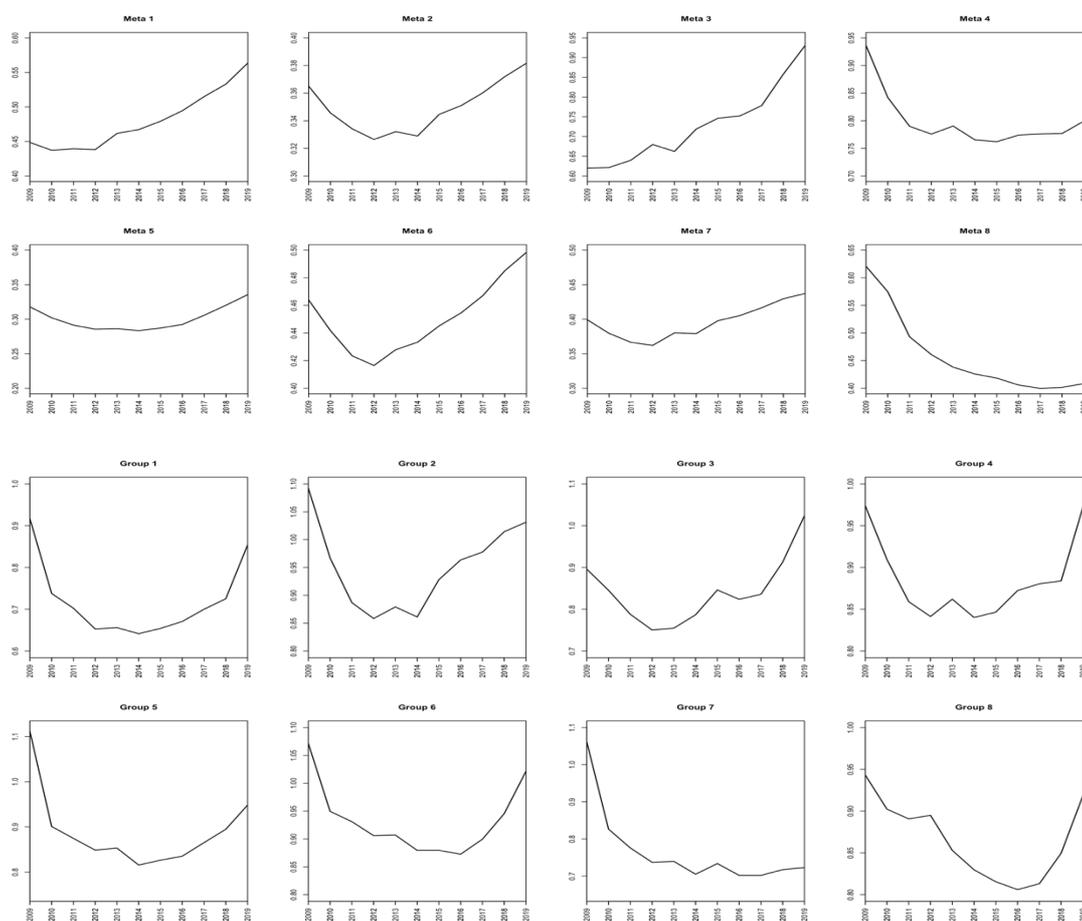
区域	省市	TCE_{meta}	Meta排序	TCE_{group}	Group排序	TGR
北部沿海 综合经济区	北京	0.8474	3	1.0058	4	0.8424
	天津	0.4704	11	0.7793	23	0.6268
	河北	0.2414	30	0.2917	30	0.8302
	山东	0.3602	19	0.8002	21	0.4575
东北综合 经济区	辽宁	0.3515	20	0.8937	18	0.3953
	吉林	0.3033	26	0.9599	11	0.3177
	黑龙江	0.3930	17	0.9993	6	0.3933
东部沿海综 合经济区	上海	0.9540	2	1.0118	2	0.9445
	江苏	0.6689	6	0.8940	17	0.7498
	浙江	0.5616	9	0.6208	26	0.9175
南部沿海综 合经济区	福建	0.5859	7	0.7814	22	0.7550
	广东	1.0068	1	1.0071	3	0.9997
	海南	0.8043	4	0.8683	19	0.9235
	山西	0.2453	29	0.6775	24	0.3684

黄河中游综合经济区	内蒙古	0.3032	27	0.9554	12	0.3184
	河南	0.3357	22	0.9329	15	0.3619
	陕西	0.3185	23	0.9886	7	0.3236
长江中游综合经济区	安徽	0.4569	13	0.9754	10	0.4687
	江西	0.4735	10	0.9837	8	0.4832
	湖北	0.4146	16	0.8264	20	0.5064
西南地区综合经济区	湖南	0.4577	12	0.9468	14	0.4849
	广西	0.3169	24	0.5833	28	0.5587
	重庆	0.5769	8	1.0185	4	0.5685
	四川	0.4460	14	0.9794	9	0.4565
	贵州	0.2979	28	0.6512	25	0.4771
西北地区综合经济区	云南	0.3409	21	0.5968	27	0.5872
	甘肃	0.3774	18	0.9539	13	0.3967
	青海	0.7099	5	1.0046	5	0.7016
	宁夏	0.4328	15	0.5741	29	0.7527
	新疆	0.3156	25	0.9280	16	0.3401

第二. 从省市(自治区)的碳排放效率来看, 表 4.5 中显示各省市的碳排放效率分布不均衡, 这与宁论辰等(2021)的研究结论相似。北部沿海地区中碳排放效率表现最好的是北京, 在共同前沿和群组前沿技术水平下的碳排放效率排名为第三、第四, TCE_{meta} 和 TCE_{group} 分别为 0.8474 和 1.0058, TCE_{group} 达到 DEA 有效。共同前沿技术水平下排名前三位的城市为广州、上海和北京, 群组前沿下前三名省市为重庆、上海和广州, 其中广州市在两个前沿面技术水平下均达到 DEA 有效, 碳排放效率值分别为 1.0068 和 1.0071; 上海在共同前沿技术水平下的效率值为 0.9540, 有 4.6% 的节能减排空间, 在群组前沿技术水平下 TCE_{group} 为 1.0118, 刚刚达到 DEA 有效。河北省的 TCE_{meta} 表现最差, 这与付丽娜等(2020)的研究结论相同, 其效率均值仅为 0.2414, 可以说在全国 30 各省份构建的共同前沿面下, 其效率改善空间达到 75.86%; 其 TCE_{group} 均值为 0.2917, 仍居于全国末位, 在北部沿海综合经济区构建的前沿面下, 具有 70.83% 的碳减排空间, 究其原因可能是河北省的投入产出结构比例不合理, 产业结构单一, 且多为重工业和传统工业等粗放性产业, 另外河北省地处平原, 人口较为集中, 承接了不少首都的重工业产业。其他省市的碳排放效率在两个前沿技术水平下的排序值不一且

差距较大，排名较为靠前的省市有青海、重庆和江西，排序在后的省市有贵州、云南、山西和广西等，未分析省市均可通过上述方法以此类推，此处不在赘述。

第三，从时间变化趋势来看。如图 4.1 所示，首先共同前沿模型下，五个经济区（序号为 1、2、5、6、7，区域排序见表 4.4）的碳排放效率呈现出先降低后升高的 V 字型变化，其波动区间不一，其下降区间大致为 2009-2012 年，谷底为 2012 年或 2014 年，其中北部沿海、东北地区 and 长江中游的 TCE_{meta} 在“十三五”期间出现显著提升，其上升可能与 2012 年党中央提出的创新驱动发展战略和五位一体总体布局有一定关联；东部沿海（Meta3）在整个测算区间内呈现了显著的上升趋势，表明该地区的能源、资本等消耗方式合理、节能减排政策有效；南部沿海（Meta4）和西北地区（Meta8）在“十二五”期间的下降趋势明显，前者“十三五”期间总体呈现出平稳趋势，总体碳排放效率值较高，但后者继续维持了下降趋势且幅度较大，究其原因可能是西北地区整体经济发展水平落后，其生产方式有待改善。



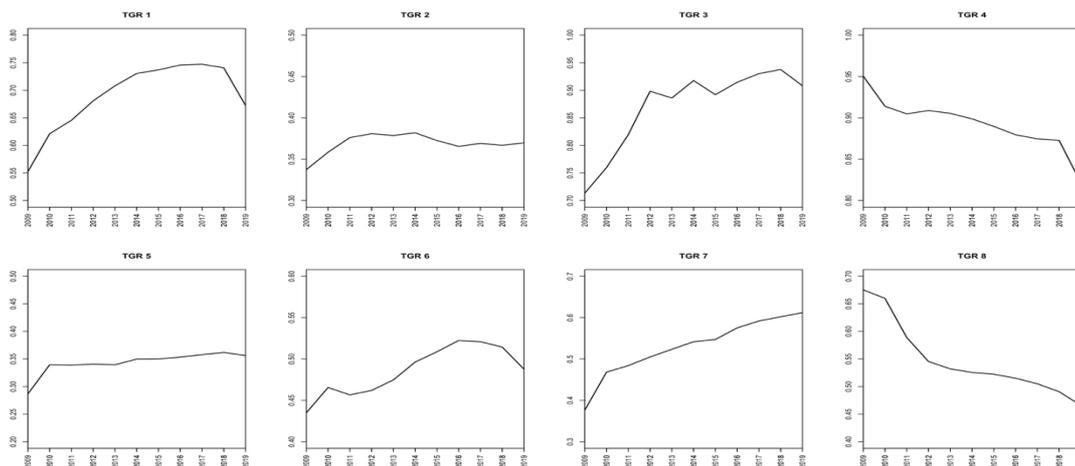


图 4.1 2009-2019 年共同前沿和群组前沿下八大经济区 TCE 和 TGR 时间变化趋势

其次在群组前沿模型下。八大经济区碳排放效率的变化规律呈现出更多的波动性，但整体生产技术水平较高，呈现出缓慢降低后升高的 U 字型变化趋势。其中除了西南综合经济区（Group7）之外，其他经济区的 TCE_{group} 在“十二五”初期出现明显的下降趋势，然后在“十三五”期间陡然提升，并与前期最高水平值相当。究其原因可能是在“十三五”期间国际经济开始逐步复苏和国内经济进入新常态阶段，我国的能源发展实现了“三大转变”，即能源消耗的硬性约束实现了从服务经济增长向建设生态文明体系的转型、主要能源需求的增加从工业逐步转向其他产业、终端能源消耗由一次能源向可再生能源过渡，进一步减少了二氧化碳排放量，提高了碳排放效率和能源利用效率。西南综合经济区的碳排放效率在“十三五”期间增长不明显，处于相对平稳状态。

第四，从技术落差比（TGR）来看。一方面，当 TGR 值趋向于 1 时，表明 DMU 的生产技术水平越接近潜在值，相应的环境制度或政策更加有效。各经济区在样本期的 TGR 值的范围在 0.3-1.0 之间，其中大于 0.9 的省市有四个，分别为广东省、上海市、海南省和浙江省，TGR 均值分别为 0.9997、0.9445、0.9235 和 0.9175，处于较高技术水平，其中广东省较为接近共同前沿技术水平，即潜在碳排放效率的 99.97%；其他省市的 TGR 值在 0.9 以下，距离共同前沿面相对较远，排名最后三位的省份为陕西、内蒙古和吉林，均值分别为 0.3236、0.3184 和 0.3177，说明其距离潜在碳排放效率有 67.64%、68.16% 和 68.23% 的效率改善空间。另一方面，从测算期的技术落差比率的变化趋势来看，北部沿海（TGR1）、

东部沿海 (TGR3) 和长江中游 (TGR6) 的 TGR 值呈现出先升高后降低的倒“V”型趋势, 峰谷出现在 2016-2018 年, 下降幅度不明显, 整体技术水平与共同边界技术水平接近, 说明具有较强的追赶效应; 东北地区和黄河中游的 TGR 变化相对稳定, 说明这些经济区的生产前沿距离共同前沿的位置不变; 南部沿海和西北地区的 TGR 值由 2009 年的 0.9505 和 0.6754 降到 2019 年的 0.8214 和 0.4660, 区域生产前沿和共同前沿的距离出现扩大趋势, 但南部沿海经济区的降幅不大, 即实际碳排放效率和潜在碳排放效率的差距扩大的不明显。

4.4 碳排放效率指数的动态分解

本文在规模报酬可变 (VRS) 条件下, 使用 Global Malmquist-Luenberger 指数法, 将共同前沿和群组前沿下的碳排放效率指数 $metaMLCPI$ 和 $rMLCPI$ 进一步分解为技术效率变化 (TEC) 和技术进步变化 (TC), 目的是分析不同经济区和省市碳排放效率指数的动态变化和增长驱动力, 通过 MaxDEA 7 软件的测试结果, 整理详见表 4.6。其中 TEC 表示某地区是否能够通过碳排放效率的提升和现有资源的合理利用达到合意产出的最大化, 即生产系统从 t 期到 $t+1$ 期对生产可能性边界的追赶程度, 其值越高, 说明技术效率有所改善, 生产过程中的投入要素配置越为合理; TC 表示生产技术从 t 期到 $t+1$ 期的变化程度, 即技术进步致使潜在共同前沿面整体向外移动, 以同样的投入组合生产出更多的产出, 代表了生产技术的创新程度。

表 4.6 各省市和经济区在共同前沿和群组前沿下的指数变化分解

省市/ 经济区	共同前沿(<i>Meta</i>)			群组前沿(<i>Group</i>)			技术落差比 (TGR)		
	$mMLCPI$	TEC	TC	$rMLCPI$	TEC	TC	TGR	TEC	TC
北京市	1.0384	1.0154	1.0233	1.0009	1.0709	0.9431	1.0379	0.9574	1.0931
天津市	0.9985	0.9872	1.0112	0.9931	0.9831	1.0065	1.0384	1.0044	1.0328
河北省	0.9964	0.9851	1.0116	1.0082	0.9874	1.0209	0.9901	0.9978	0.9929
山东省	1.0429	1.0120	1.0304	1.0075	1.0019	1.0057	1.0445	1.0100	1.0352
辽宁省	1.0057	0.9904	1.0160	1.0027	0.9978	1.0050	1.0055	0.9926	1.0149
吉林省	1.0150	1.0115	1.0033	0.9880	1.0089	0.9785	1.0318	1.0036	1.0289
黑龙江省	0.9968	0.9912	1.0058	0.9993	0.9963	1.0034	0.9984	0.9952	1.0047
上海市	1.0189	0.9989	1.0197	0.9921	1.0125	0.9827	1.0279	0.9894	1.0430

江苏省	1.0724	1.0406	1.0388	1.0072	1.0022	1.0052	1.0735	1.0381	1.0380
浙江省	1.0454	1.0052	1.0400	1.0668	1.0227	1.0475	0.9866	0.9858	1.0044
福建省	1.0037	0.9822	1.0226	1.0348	1.0201	1.0171	0.9712	0.9650	1.0096
广东省	1.0018	1.0006	1.0012	1.0019	0.9961	1.0059	0.9999	1.0046	0.9954
海南省	0.9549	1.0020	0.9536	0.9725	1.0000	0.9725	0.9825	1.0020	0.9815
山西省	0.9906	0.9955	0.9950	0.9604	1.0072	0.9530	1.0482	0.9883	1.0632
内蒙古	0.9989	0.9945	1.0046	0.9951	0.9915	1.0040	1.0061	1.0034	1.0046
河南省	1.0313	1.0084	1.0224	1.0069	1.0036	1.0031	1.0266	1.0048	1.0225
陕西省	0.9972	0.9888	1.0086	0.9852	0.9922	0.9996	1.0188	1.0075	1.0186
安徽省	0.9920	0.9862	1.0061	0.9981	0.9947	1.0034	0.9950	0.9914	1.0039
江西省	1.0115	0.9916	1.0203	0.9871	0.9597	1.0296	1.0287	1.0360	0.9937
湖北省	1.0135	0.9944	1.0196	1.0021	0.9921	1.0092	1.0191	1.0024	1.0177
湖南省	1.0148	1.0020	1.0126	1.0037	1.0045	0.9993	1.0125	0.9980	1.0150
广西	0.9894	0.9755	1.0139	0.9415	0.9641	1.0302	1.0616	1.0721	1.0461
重庆市	1.0357	1.0185	1.0171	0.9890	1.0653	0.9361	1.0491	0.9630	1.0982
四川省	1.0271	1.0117	1.0159	1.0043	0.9957	1.0085	1.0256	1.0161	1.0109
贵州省	0.9921	1.0013	0.9910	0.9354	0.9871	0.9485	1.0679	1.0145	1.0533
云南省	0.9836	0.9801	1.0034	0.9384	0.9376	0.9984	1.0636	1.0560	1.0068
甘肃省	0.9977	1.0099	0.9878	1.0023	1.0188	0.9840	0.9973	0.9914	1.0061
青海省	0.9430	1.0116	0.9354	0.9932	0.9127	1.6228	0.9497	1.7344	0.8619
宁夏	0.9583	0.9987	0.9601	0.9943	1.0683	0.9555	0.9640	0.9605	1.0317
新疆	0.9645	0.9696	0.9946	1.0036	0.9878	1.0156	0.9640	0.9815	0.9823
均值	1.0044	0.9987	1.0062	0.9939	0.9994	0.9965	1.0162	1.0256	1.0170
北部沿海	1.0190	0.9999	1.0191	1.0024	1.0108	0.9940	1.0277	0.9924	1.0385
东北地区	1.0059	0.9977	1.0084	0.9967	1.0010	0.9956	1.0119	0.9971	1.0162
东部沿海	1.0456	1.0149	1.0328	1.0221	1.0125	1.0118	1.0293	1.0044	1.0285
南部沿海	0.9868	0.9949	0.9925	1.0031	1.0054	0.9985	0.9845	0.9906	0.9955
黄河中游	1.0045	0.9968	1.0076	0.9869	0.9986	0.9899	1.0249	1.0010	1.0272
长江中游	1.0080	0.9935	1.0146	0.9977	0.9878	1.0104	1.0138	1.0069	1.0076
西南地区	1.0055	0.9974	1.0082	0.9617	0.9900	0.9843	1.0536	1.0243	1.0431
西北地区	0.9659	0.9975	0.9695	0.9984	0.9969	1.1445	0.9688	1.1670	0.9705
均值	1.0051	0.9991	1.0066	0.9961	1.0004	0.9974	1.0143	1.0230	1.0159

第一，在全国和八大经济区方面。由表 4.6 可知，共同前沿下八大综合经济区的 MLCPI、TEC 和 TC 的均值分别为 1.01、1.00 和 1.01，说明 TC 对碳排放效率的贡献率较大，而 TEC 呈现出一定的副作用。除西北地区和南部沿海的 *metaMLCPI* 小于 1 之外，分别为 0.97、0.99，碳排放效率出现一定程度的降低，下降幅度为 1.32% 和 3.41%，其余经济区的 *metaMLCPI* 均有所改善；仅东部沿海的效率变化指数 *metaTEC* 均值大于 1，该指标上升幅度为 1.49%，说明区域的技术改善有效，投入资源配置能力强，促使碳排放效率得到提升；南部沿海和西北地区的 *metaTC* 均值小于 1，其变化方向与 *metaMLCPI* 相同，存在 0.75% 和 3.05% 的技术退步现象，表明其在现有生产技术水平下的创新程度低，技术退步致使整体共同前沿面向内移动。同理，在群组前沿和 TGR 下的效率指数变化情况的分析如上，为防赘述此处不一一说明。图 4.2 反映了碳排放效率指数及其分解值变化趋势，在共同前沿下全国的整体 *metaMLCPI* 及其分解值呈现出稳定趋势，上升幅度不明显且效率改善空间较小；在群组前沿下整体 *rMLCPI* 及其分解值的变动趋势类似，三个沿海经济区的 *rMLCPI* 呈持续上升状态且指数大于 1，碳排放效率值得到有效提高；各经济区 TEC 值的增加和减少均不明显，表明区域技术无效率出现较大改善；东部沿海、长江中游和西北地区的 TC 值增加明显，尤其是西北地区在测算期间增长了 14.45%，表明该地区的技术进步明显。TGR 及其分解值同样呈现出稳定趋势。从 TEC 和 TC 的变动趋势来看，两个值大于 1 和小于 1 的情况交替出现，并没有出现长期稳定的效率提高或技术进步现象，当 TEC 的正面作用大于 TC 的负面作用时，碳排放效率就会上升，当 TEC 的正面作用小于 TC 的负面作用时，碳排放效率就会下降。总之，全国范围内二者的改善均不明显，且经济个体的变化趋势不协调或不统一。

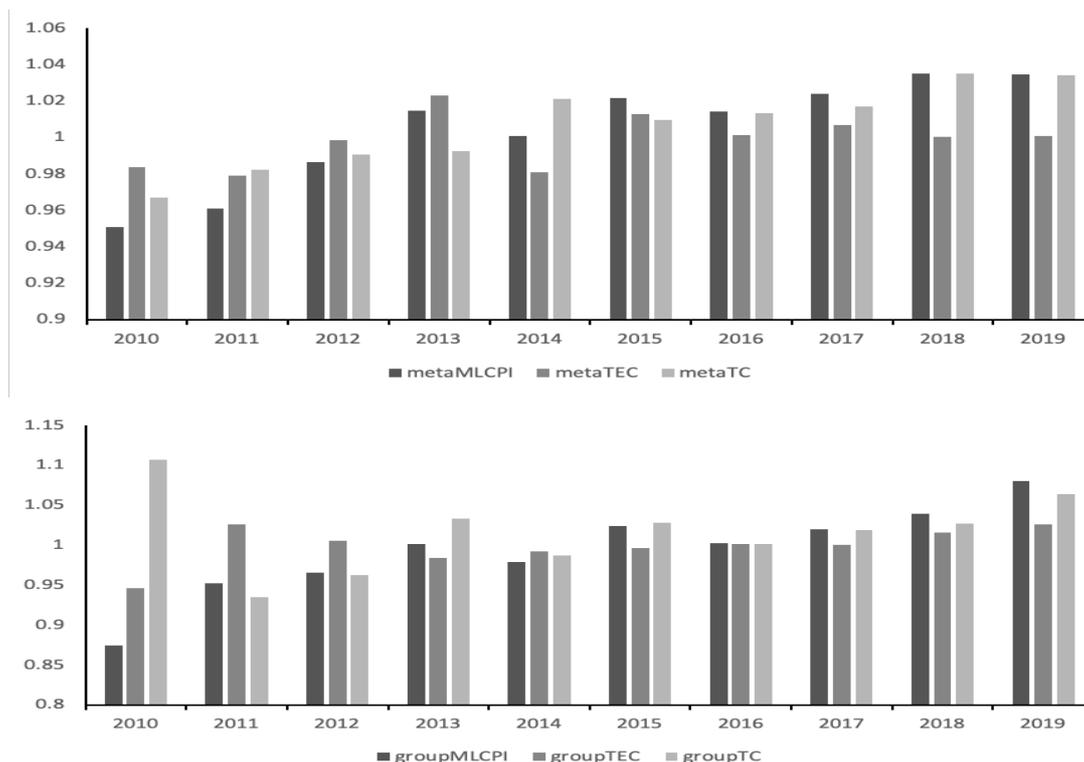


图 4.2 共同前沿和群组前沿下全国的碳排放效率指数及其分解值变化趋势

第二，在省市方面。（1）共同前沿下各省市碳排放效率的动态变化呈现出上升趋势的有 15 个省市，其中增幅明显的有浙江、江苏和山东，增长幅度分别为 7.24%、4.54%和 4.29%，这与东部沿海碳排放效率上升的趋势相吻合；其他省市的 *metaMLCPI* 小于 1，说明碳排放效率出现不同程度的下降，尤其是宁夏、海南和青海，其下降幅度依次为 4.17%、4.51%和 5.70%，侧面说明上述省市的所属经济区出现技术结构退化和效率水平低下的现象。*metaTEC* 均值排名靠前的三个省市分别是江苏、重庆和北京，技术效率贡献率分别为 7.09%、6.83%和 6.53%，排名靠后的三个省市分别是云南、广西和新疆，技术效率贡献率分别为 -4.03%、-6.24%和 -8.73%；*TC* 均值排名靠前的三个省市分别是浙江、江苏、山东，技术进步贡献率依次为 4.75%、3.02%和 2.96%，排名靠后的三个省市分别是宁夏、海南和青海，技术进步贡献率分别为 -5.15%、-5.69%和 -6.39%。可以看出江苏省的分解值均处于较高水平，其增长幅度分别为 4.06%和 3.88%，远远高于最低值新疆的 -3.04%和青海的 -6.46%。（2）群组前沿下各省市碳排放效率的动态变化呈现上升趋势的有 14 个省市，增幅居前两个省市为浙江省和福建省，分别增长了 6.68%和 3.48%。降幅居后的两个省市为云南省和贵州省，分别下降了 6.16%和 6.46%，

可见群组前沿下碳排放效率的提升不容乐观。 TEC 和 TC 值排名第一的省市分别为北京市和浙江省，其增长率分别为7.09%和4.75%，远远高于末位省市青海省的-8.73%和重庆市的-6.39%，无论是投入资源配置、产出比例关系，还是技术创新能力都呈现出很大的差异性。以山东、江苏、河南和浙江为代表的四省市呈现出“追赶态势”，成为样本期间的最优实践者，在两个前沿面下均达到最优生产边界。

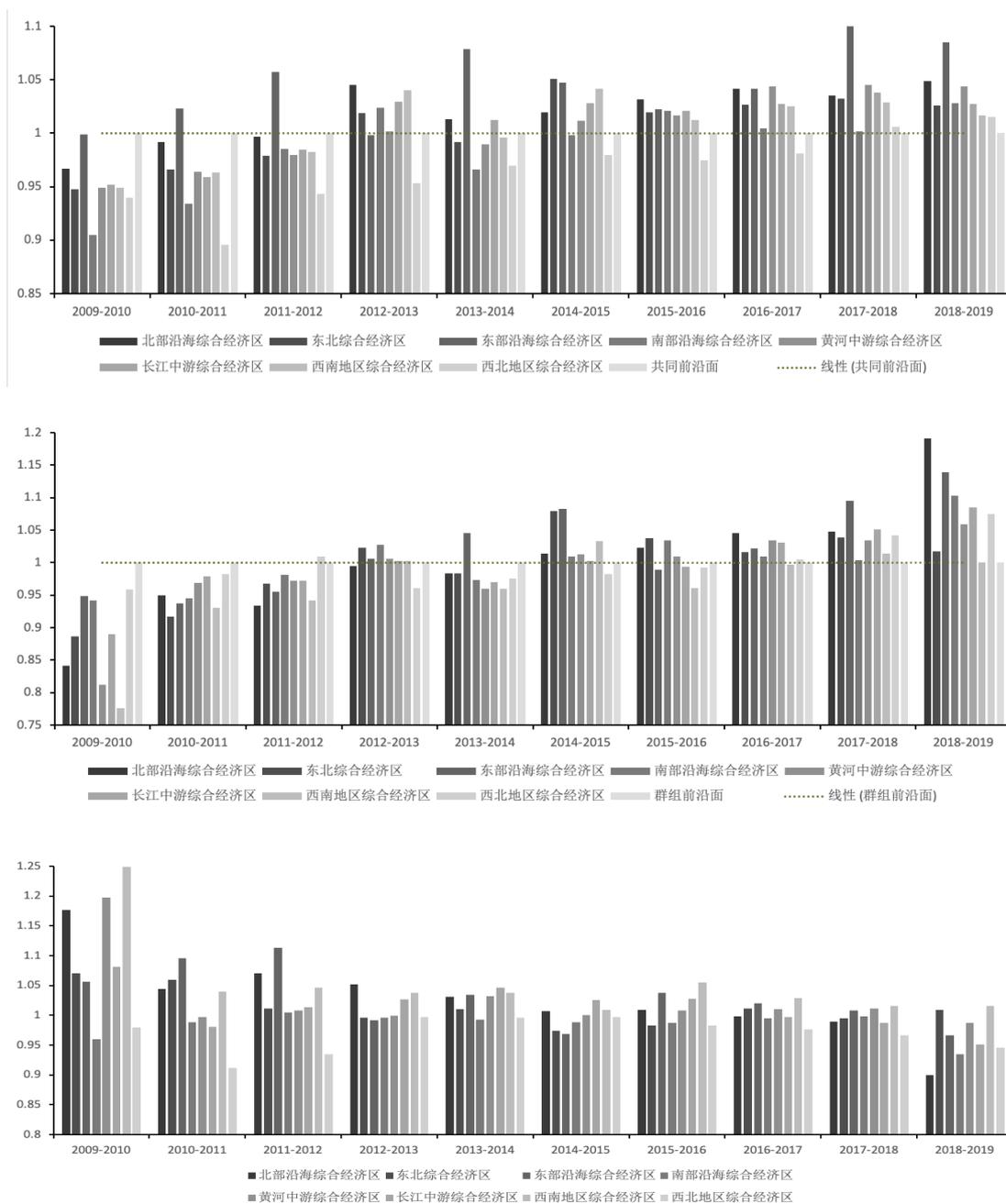


图 4.3 我国八大经济区metaMLCPI、rMLCPI和 TGR 的测算结果差异对比

图 4.3 显示了我国八大经济区的在共同前沿、群组前沿下的碳排放效率指数和技术落差比率 (TGR) 的差异情况。可看出三个数值呈现出不同的变化趋势, *metaMLCPI*和*rMLCPI*在整体上出现递增趋势, 2017-2019 年共同前沿碳排放绩效的增幅均超过 1, 除 2009-2011 年波动较大之外, TGR 的变动趋势较为稳定且接近理想水平值 1。由于共同前沿法无法确定不同省域之间的碳排放效率差异及无效率的根本原因, 而 TGR 的数据差异性可以为资源配置无效率提供解决办法 (Chiu et al, 2012), 因此该指标的理论意义至关重要。沿海地区作为我国改革开放的排头兵, 其 TGR 值显著高于西北地区, 大体上呈现出“东高西低”的格局, 这与我国实行的非平衡发展战略有关, 使得沿海地区拥有更高的市场开放度和生产技术。2012-2018 年各经济区的差距最小, 且有缩小之势, 这与我国推进的西部大开发、一带一路等战略密不可分, 同时国家还应给予一定的政策扶持和倾斜, 缩小地区差异, 形成产业互补体系。

5 碳边际减排成本估算

5.1 影子价格推导

二氧化碳影子价格反映了二氧化碳的边际使用价格和边际减排成本，合理制定碳排放成本对于合理排放二氧化碳和碳中和目标的实现至关重要。由于非期望产出（C）没有市场价格，因此本文参考 Färe&Grosskopf（2000）利用 DDF 和利润函数（Profit function）的对偶关系推导非合意产出的影子价格，即碳边际减排成本。首先引入利润函数来构建收益最大化的 DMU，然后在包含非合意产出的生产可能性集中寻求最优解，最后使用超效率 SBM 模型得到影子价格。

（1）收益函数

假定生产过程中伴随着合意产出的非合意产出会带来负的效益，令投入要素的价格向量为 $w = (w_1, w_2 \dots w_n) \in R_n^+$ ，合意产出的价格向量为 $p = (p_1, p_2 \dots p_m) \in R_m^+$ ，非合意产出二氧化碳的价格向量为 $q = (q_1, q_2 \dots q_z) \in R_z^+$ ，收益函数的表达式为：

$$R(w, p, q) = \max\{py - qu - wx : (y, u) \in P_{(x)}\} \quad (5-1)$$

利润函数代表投入给定情况下，DMU 可实现的最大收益。 $(y, u) \in P_{(x)}$ 等价于距离函数 $D_0(x, y, u; g) \geq 0$ ， $(y + \theta g_y, u - \theta g_u) \in P_{(x)}$ 表示共同前沿内部 DMU 在方向 $g: (g_y, -g_u)$ 上消除无效后的实际产出，因此利润函数还可以表示为：

$$\begin{aligned} R(w, p, q) &\geq (p - q)\{y + D_0(x, y, u; g) \cdot g_y, u - D_0(x, y, u; g) \cdot g_u\} - wx \\ &= (py - qu - wx) + pD_0(x, y, u; g) \cdot g_y + qD_0(x, y, u; g) \cdot g_u \end{aligned} \quad (5-2)$$

不等式右边是 DMU 的实际收益减去无效部分损耗后的额外收益，也可以说是减少非合意产出而带来的成本。在利润最大化条件下，对上式进一步变形，用收益函数表示的 DDF 记为：

$$D_0(x, y, u; g) = \min \left\{ \frac{R(w, p, q) - (py - qu - wx)}{pg_y + qg_u} \right\} \quad (5-3)$$

使用包络定理（Yuan et al, 2012），对式（5-3）的方向性距离函数进行求导，初步得到影子价格模型：

$$\frac{\partial D_0(x,y,u;g)}{\partial y} = \frac{-p}{pg_y+qg_u} \leq 0 \quad (5-4)$$

$$\frac{\partial D_0(x,y,u;g)}{\partial u} = \frac{q}{pg_y+qg_u} \geq 0 \quad (5-5)$$

经计算整理，二氧化碳影子价格可表示为：

$$q = -p \left(\frac{\partial D_0(x,y,u;g)/\partial u}{\partial D_0(x,y,u;g)/\partial y} \right) \quad (5-6)$$

式中大括号内的部分表示合意产出与非合意产出的边际转换率，即增加一单位合意产出时引起的非合意产出的增加值，通常指投入和产出要素的对偶值。q 为减少一单位非合意产出的机会成本，也可看作边际减排成本（Marginal Abatement Cost，缩写 MAC）的近似值（Murty&Kumar，2007）。

5.2 基于 SBM 模型的边际减排成本估算

选取规模报酬可变的 SBM-Undesirable 线性规划模型分析二氧化碳影子价格。首先，根据第三章的已有简述，DDF 模型可以解释合意产出提高和非合意产出降低的百分比，假设 $g_y = 1, g_u = -1$ ，其二次型形式为：

$$D(x, y, u; 1, -1) = \alpha_0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n x_n + \beta_1 y + \gamma_1 u + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^3 \sum_{n'=1}^3 \alpha_{nn'} x_n x_{n'} + \frac{1}{2} \beta_2 y^2 + \frac{1}{2} \gamma_2 u^2 + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n y + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n u + \mu y u \quad (5-7)$$

为测算碳边际减排成本，对上述二次型添加约束条件，确保确合意产出递增和非合意产出递减。根据公式（5-7），令 $p = 1$ ，推导约束条件下的二氧化碳影子价格表达式：

$$p^{ddf} = -p \times \frac{\frac{\partial D}{\partial u}}{\frac{\partial D}{\partial y}} = -\frac{\gamma_1 + \gamma_1 u + \sum_{n=1}^3 \eta_n x_n + \mu y}{\beta_1 + \beta_2 y + \sum_{n=1}^3 \delta_n x_n + \mu u} \quad (5-8)$$

其次，SBM-Undesirable 模型的转化如下，由于非参数方法不需要假设具体生产函数形式，通过模型（3-9）很难求解出二氧化碳的影子价格，因此，需要对其进行 Charnes-Cooper 变换后再转化为线性规划形式：

$$\pi = \min t - \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \frac{s_{nr}^x}{x_{nr}}$$

$$s. t. \begin{cases} 1 = t + \frac{1}{M+Z} (\sum_{m=1}^M \frac{s_{mr}^y}{y_{mr}} + \sum_{z=1}^Z \frac{s_{zr}^u}{u_{zr}}) \\ tx_{nr} = \sum_{i=1}^{I_r} \eta_i^r x_{nri} + S_{nr}^x \\ ty_{mr} = \sum_{i=1}^{I_r} \eta_i^r x_{mri} - S_{mr}^y \\ tu_{zr} = \sum_{i=1}^{I_r} \eta_i^r x_{zri} + S_{zr}^u \\ t \geq 0; i = 1, 2 \dots N, m = 1, 2 \dots M; z = 1, 2 \dots Z \end{cases} \quad (5-9)$$

式(5-7)中 π 是时(3-9)中 ρ^* 的不同形式表述, 假设 $(t^*, \eta^*, S_{nr}^{x*}, S_{mr}^{y*}, S_{zr}^{u*})$ 是该线性规划的最优解, 那么当 $\rho^* = \rho_{nr}^r = 1$ 且 $S_{nr}^{x*} = S_{mr}^{y*} = S_{zr}^{u*} = 0$ 时 DMU 有效。然后继续进行对偶变化, 计算对偶价格:

$$\varepsilon^* = \max \varepsilon$$

$$s. t. \begin{cases} \varepsilon + \beta^x x_{nr} - \beta^y y_{mr} + \beta^u u_{zr} \\ \sum_{i=1}^{I_r} \beta^y y_{mr} - (\sum_{i=1}^{I_r} \beta^x x_{nr} + \sum_{i=1}^{I_r} \beta^u u_{zr}) \leq 0 \\ \beta^x \geq \frac{1}{N} \left[\frac{1}{x_{nr}} \right]; \beta^y \geq \frac{\varepsilon}{M} \left[\frac{1}{y_{mr}} \right]; \beta^u \geq \frac{\varepsilon}{Z} \left[\frac{1}{u_{zr}} \right] \end{cases} \quad (5-10)$$

对线性规划式(5-10)继续变形为:

$$\max \beta^y y_{mr} - (\beta^x x_{nr} + \beta^u u_{zr})$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^{I_r} \beta^y y_{mr} - (\sum_{i=1}^{I_r} \beta^x x_{nr} + \sum_{i=1}^{I_r} \beta^u u_{zr}) \leq 0 \\ \beta^x \geq \frac{1}{N} \left[\frac{1}{x_{nr}} \right] \\ \beta^y \geq \frac{1 - \beta^x x_{nr} + \beta^y y_{mr} - \beta^u u_{zr}}{M} \left[\frac{1}{y_{mr}} \right] \\ \beta^u \geq \frac{1 - \beta^x x_{nr} + \beta^y y_{mr} - \beta^u u_{zr}}{Z} \left[\frac{1}{u_{zr}} \right] \end{cases} \quad (5-11)$$

式(5-9)中的 β^x 、 β^y 、 β^u 分别表示投入要素 x_{nr} 、合意产出 y_{mr} 和非合意产出 u_{zr} 的虚拟价格, 令 x_{nr} 、 y_{mr} 、 u_{zr} 的影子价格分别为 p_x^{sbm} 、 p_y^{sbm} 、 p_u^{sbm} 且合意产出的 $p_y^{sbm} = 1$, 那么二氧化碳的边际减排成本可以表示为:

$$p^{sbm} = \rho_y^{sbm} \times \frac{\beta^e}{\beta^y} \quad (5-10)$$

可见, 基于SBM-Undesirable模型的计算值考虑了实际DMU的碳排放绩效, 可以充分体现出二氧化碳排放量对合意产出的影响。

5.3 碳边际减排成本的实证分析

本文使用 PyCharm2021.2.4 编写的程序，基于 2009-2019 年各省市的投入产出数据，基于非径向和角度的非参数方法测算碳边际减排成本。为避免线性规划求解过程中出现收敛性问题，在使用 SBM-Undesirable 模型计算影子价格之前，遵循以往的研究惯例，首先对投入产出样本数据进行标准化，即用投入产出数据分别除以其平均值，然后进行线性规划对偶模型的求解。另外，由公式 (3-8) 可知，使用非参数法测算碳边际减排成本时可能会出现负值，因此需要剔除后进行后续分析 (Boyd et al, 1996)。

根据 SBM-Undesirable 模型的参数值和已有的研究假设，将合意产出实际生产总值的价格设为 1 (魏楚, 2014)。令碳排放效率为 0，计算出 2009-2019 年各省市的二氧化碳边际减排成本，估算结果如表 5.1 所示。可以看出东部沿海省份的碳边际减排成本相对较高，其中北京、上海和福建分别位列年均碳边际减排成本排名前三的省市，其 MAC 均值分别为：4.361、1.912 和 1.599 万元/吨，究其原因可能是受一些列“节能减排”政策而带来的经济冲击，其中北京市的边际减排成本显著高于其他省市，说明其减排空间有限，提高碳排放效率将付出巨大成本代价。上述高边际减排成本省份在实际经济活动中减少碳排放量所付出的代价须小于官方制定的碳排放权交易价格，因此，为实现收益最大化可尝试选择向低边际减排成本的省份购买碳排放权配额。新疆、宁夏和山西是碳边际减排成本排名靠后的三个省市，其 MAC 均值很小，分别为：0.176、0.106 和 0.089 万元/吨，这些省份可以继续实施既定的碳减排方案，其从事实际经济活动时减少碳排放量所付出的代价小于碳排放权交易价格，可以考虑交易剩余的碳排放权配额，在获取收入的同时实现剩余收益。样本期内全国的碳边际减排成本均值为 0.854 万元/吨，其经济意义为每减少一吨的二氧化碳排放量，合意产出需付出或放弃的经济成本约为 8540 元，此外，本文的估算结果与杨子暉 (2019) 的研究结果接近。此外，2019 年有 12 个省市的碳边际减排成本高于全国平均水平，意味着我国边际减排成本较高的省市集中在某些区域，两极分化严重，但这种分布不均匀分布现象为碳交易市场的设立和完善创造条件，并通过合理交易实现帕累托改进，达到整体收益增加的共赢现象。

表 5.1 2009-2019 年中国各省市平均二氧化碳边际减排成本（万元/吨）

DMU	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
北京	2.204	2.434	2.896	3.188	3.902	4.149	4.674	5.481	6.104	6.304	6.638
天津	0.650	0.638	0.691	0.805	1.001	1.137	1.269	1.487	1.584	1.508	1.558
河北	0.168	0.176	0.175	0.194	0.227	0.259	0.282	0.311	0.344	0.330	0.355
山东	0.329	0.342	0.366	0.388	0.494	0.493	0.497	0.510	0.562	0.577	0.591
辽宁	0.278	0.295	0.313	0.341	0.440	0.467	0.501	0.502	0.492	0.464	0.431
吉林	0.310	0.333	0.327	0.377	0.485	0.527	0.674	0.764	0.811	0.880	0.854
黑龙江	0.286	0.309	0.326	0.346	0.452	0.471	0.533	0.560	0.598	0.672	0.681
上海	1.493	1.509	1.593	1.744	1.021	1.916	1.964	2.035	2.230	2.954	2.705
江苏	0.890	0.940	0.896	0.992	0.937	1.240	1.319	1.394	1.552	1.662	1.733
浙江	0.934	1.007	0.996	1.201	0.876	1.471	1.591	1.743	1.837	1.970	2.080
福建	1.114	0.917	0.891	1.360	0.851	1.540	1.540	2.290	2.377	2.341	2.370
广东	1.343	1.094	0.763	0.529	0.887	1.475	1.412	1.426	1.674	2.181	1.937
海南	0.452	0.509	0.470	0.515	0.684	0.667	0.649	0.749	0.828	0.806	0.813
山西	0.080	0.085	0.088	0.094	0.109	0.113	0.121	0.134	0.119	0.109	0.109
内蒙古	0.157	0.174	0.162	0.181	0.234	0.243	0.270	0.289	0.283	0.244	0.220
河南	0.361	0.403	0.420	0.527	0.662	0.710	0.810	0.937	1.113	1.243	1.527
陕西	0.255	0.258	0.272	0.272	0.310	0.323	0.356	0.384	0.415	0.462	0.453
安徽	0.374	0.435	0.482	0.529	0.567	0.597	0.668	0.763	0.820	0.848	0.919
江西	0.643	0.654	0.679	0.768	0.804	0.843	0.887	0.995	1.086	1.119	1.204
湖北	0.446	0.451	0.458	0.528	0.807	0.876	1.036	1.180	1.286	1.421	1.457
湖南	0.476	0.559	0.588	0.700	0.802	1.053	1.138	1.274	1.331	1.542	1.720
广西	0.571	0.581	0.551	0.579	0.701	0.753	0.884	0.917	0.909	0.903	0.888
重庆	0.609	0.677	0.693	0.830	0.870	1.311	1.568	1.604	1.753	2.260	2.039
四川	0.428	0.519	0.629	0.690	0.817	0.833	1.041	1.224	1.430	1.713	1.708
贵州	0.115	0.139	0.148	0.157	0.187	0.221	0.264	0.293	0.344	0.418	0.453

云南	0.236	0.281	0.335	0.377	0.484	0.609	0.814	0.955	1.034	0.976	1.038
甘肃	0.190	0.201	0.201	0.221	0.252	0.275	0.320	0.381	0.388	0.382	0.401
青海	0.214	0.256	0.243	0.235	0.266	0.332	0.420	0.414	0.489	0.546	0.613
宁夏	0.081	0.082	0.069	0.073	0.083	0.092	0.100	0.115	0.100	0.094	0.090
新疆	0.175	0.176	0.163	0.156	0.161	0.163	0.180	0.187	0.192	0.194	0.191

图 5.1 进一步考察了 2009-2019 年不同省市的碳边际减排成本变化趋势，SBM 模型的估算结果用黑色实线来表示，30 个省市的平均估算结果用红棕色虚线来表示，此外，DMU1-30 的排序可参照表 5.1 所示的省市顺序。由下图的演变趋势可看出，不同省市的碳边际减排成本波动趋势展现出很大差异，除 DMU14（山西）、DMU15（内蒙古）、DMU29（宁夏）和 DMU30（新疆）四个省市的变动较为平稳之外，其余大部分省市的整体边际碳减排成本均呈现波动上升的趋势，但不同单元之间的增长幅度差别很大，其时间变动趋势与碳排放效率的变化相似。从测算结果的稳定性来看，SBM 模型是数据包络分析中的非径向和非角度方法，主要是利用松弛变量实现的最优生产技术水平来调整投入产出要素，因此其测算结果的平稳性与投入产出数据的波动有很密切的关系。

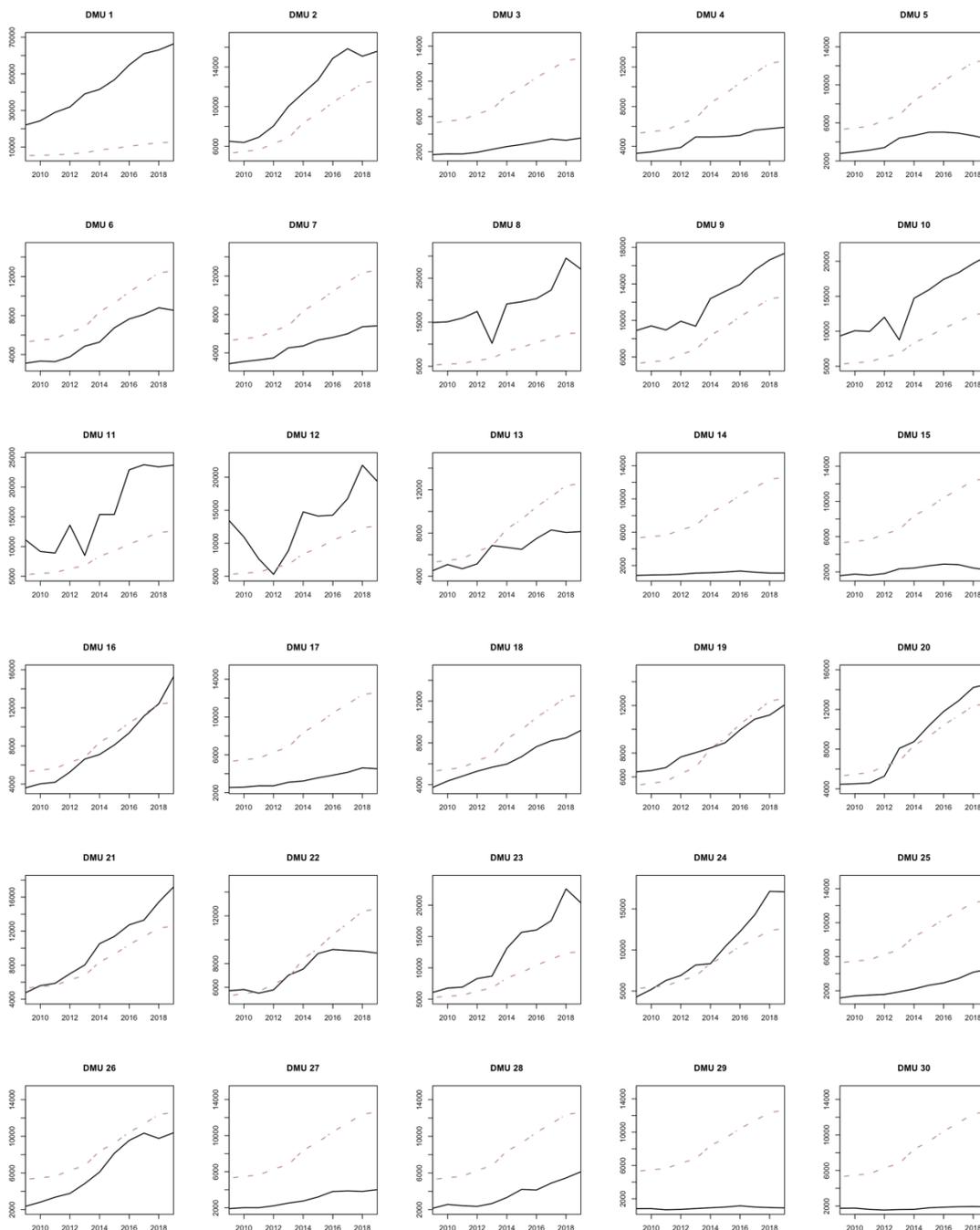


图 5.1 2009-2019 年不同省市的碳边际减排成本变化趋势

整体来看，三个沿海地区（北部沿海、东部沿海和南部沿海）的碳边际减排成本显著高于全国水平，分别为 1.552、1.528 和 1.196 万元/吨；而黄河中游和西北地区则相反，分别为 0.366 和 0.231 万元/吨。究其原因，是由于东部地区经济发展速度快，生产技术先进，环境规制对经济活动起到促进作用，从而实现了能源的高效和高质量利用。东部沿海中海南省的碳边际减排成本均值为 0.649 万元/吨，可能是由于该省的支柱产业为旅游业和农业，这些产业不属于二氧化碳排放

主要来源，因此减少一单位碳排放量所付出的经济成本相对较小。西北地区依旧存在较大的减排空间，应学习并引进先进地区的生产管理技术，从而有效提高碳减排效率。其中位于黄河中游的山西省，其二氧化碳排放量很高，但是碳边际减排成本却很低，仅为 0.106 万元/吨，这可能与二氧化碳减排过程中的规模效应有关，即碳排放浓度越大，其减排所付出的成本也越低（魏楚，2014）。总的来说，2009 年全国二氧化碳减排成本为 0.529 万元/吨，然后迅速上升到 2014 年的 0.839 万元/吨和 2019 年的 1.260 万元/吨，整体呈现出稳定上升趋势，逐步靠近碳达峰阶段。此外，图 5.2 反映了各经济区之间的碳边际减排成本差距及时间趋势，对此，可依据经济区域的差异性与特征来设定符合自身发展现状的碳减排目标，这在短期内不仅能显著降低碳减排成本，提高生产效率，还能利用节能减排技术和先进工艺优化生产过程，促进资源合理配置，也为全国范围内建立统一的碳排放交易市场提供了客观基础；长期来看，降低高耗能和高污染产业在国民经济中的比重，对集约利用国土空间和绿色低碳发展均具有重要的现实意义。

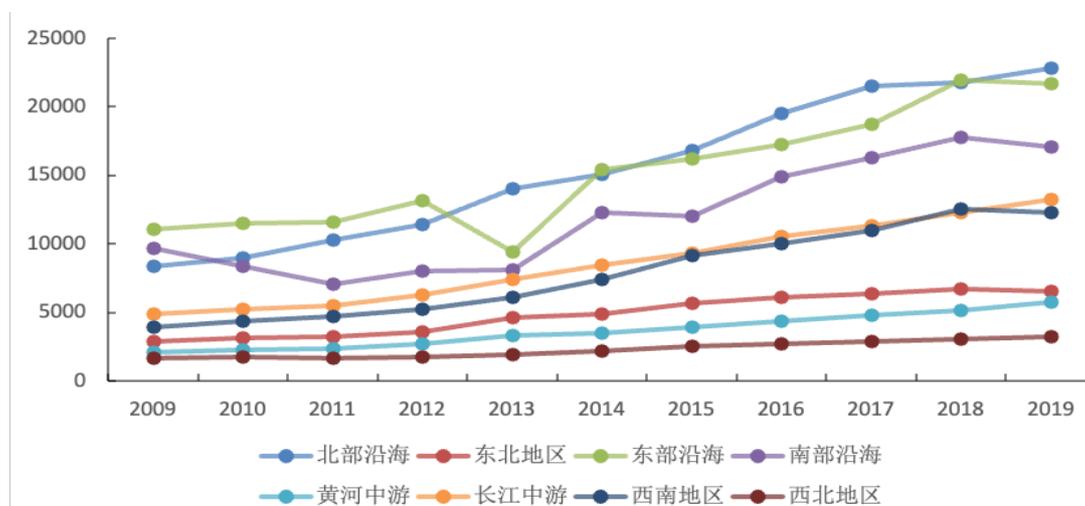


图 5.2 2009-2019 年不同经济区的 MAC 差距及时间趋势

6 结论与政策建议

6.1 研究结论

随着绿色发展理念的不断深入,中国各省市和区域生产活动的规模、结构和技术水平等都出现显著改善或提升,但部分地区还存在着一些资源配置扭曲现象,制约了能源高效利用的产业变革。对此,本文在综合运用共同前沿分析(Meta-frontier)和群组前沿分析(Group-frontier)方法测算静态碳排放效率和技术落差比率的基础上,使用基于全局参比(Global)下的Malmquist-Luenberger指数,分析了2009-2019年中国30个省市和八大经济区的碳排放效率动态变化指数和两项分解值技术效率变化和技术进步变化,并对省市和区域的差异性和时间趋势等特征进行论述;另外,使用数据包络方法(SBM-Undesirable模型)来估算各省市的碳边际减排成本并采取实证分析。文章研究结果表明:

第一,从共同前沿和群组前沿的综合碳排放效率和技术落差比率来看:(1)共同前沿和群组前沿下的全国碳排放效率均值为0.4790和0.8497,分别有52.10%和15.03%的效率改善和碳减排空间,应强化能源消耗的生产技术创新能力,重塑节能降耗、管理高效的能源生产-消费体系,保持碳消耗强度稳定下降,资源产出率持续提升。(2)两个前沿面下的省市碳排放效率均呈现出较大的时空差异性和变化复杂特征。共同前沿面下的综合碳排放效率值普遍偏小,仅广东省的 TCE_{meta} 达到DEA有效,效率均值为1.01,排名最后的三个省市分别为贵州、山西和河北, TCE_{meta} 均值分别为0.30、0.25和0.24,距离最优前沿面的位置较远;群组前沿下整体的碳排放效率较高,有5个省市位于各自区域所在的潜在生产可能性边界, TCE_{group} 均值最小的省份为河北,仅为0.29,可能是承担过多的首都工业产业,抑或是测量数据误差项较大。(3)两个前沿面下八大综合经济区的碳排放效率波动幅度较小。共同前沿碳排放效率排名靠前的区域是东部沿海与南部沿海经济区, TCE_{meta} 均值为0.80和0.73,末两位区域为东北地区和黄河中游经济区, TCE_{meta} 均值仅为0.35和0.30;群组前沿下碳排放效率表现很好的区域是东北地区和长江中游经济区, TCE_{group} 均值为0.95、0.93,表现最差的是北部沿海经济区,其 TCE_{group} 均值仅为0.72,其可能原因是受河北省共同前沿下极低

碳排放效率值的影响。(4)从技术落差比率(TGR)均值来看,各省市的TGR均值均小于1,其中广州和上海依旧居前,其均值分别为0.9997和0.9445;TGR均值最小的省市为吉林省,其均值仅为0.3117,说明实际生产效率与潜在技术效率存在一定差距,群组前沿面水平与共同前沿面水平距离较远,该分组存在一定不合理性,应给予重新调整规划。

第二,两个前沿面下碳排放效率指数(MLCPI)的分解项技术效率变化(TEC)和技术进步变化(TC)。(1)分区域的MLCPI、TEC和TC的均值结果表明,共同前沿下八大综合经济区仅南部沿海和西北地区的 $MLCPI_{meta}$ 小于1,表明其碳排放效率较过去出现不同程度的下降,下降幅度为1.32%和3.41%,存在一定的效率改善空间,这两个区域的 TC_{meta} 值也小于1,说明该地区出现碳排放效率恶化和技术退步的现象;仅有东部沿海经济区的 TEC_{meta} 值大于1,表明该区域引入先进技术,其技术效率较往年得到改善和显著提高。群组前沿下三个沿海综合经济区(北部、东部和南部)的 $MLCPI_{group}$ 大于1,表明碳排放效率较过去得到提高,但提升的幅度不明显;三个沿海区域和东北地区的 TEC_{group} 值大于1,技术效率得到不同程度的提升,仅西南地区和西北地区的 TC_{group} 值小于1,表现出0.35%和0.36%的技术退步,相当于技术进步带来的效率改善不明显。(2)分省市的MLCPI及其分解值TEC和TC的均值结果表明:共同前沿下 $MLCPI_{meta}$ 均值位列前三的省市分别是江苏、浙江和山东,表现为碳排放效率水平的提升,成为节能减排政策的最优实践者,并达到全局前沿边界; TEC_{meta} 均值位列前三的省市分别是江苏、重庆和北京,其技术效率改善明显。 TC_{meta} 均值位列前三的是浙江、江苏和山东,反映出这些省市的生产技术水平进步显著。尤其是江苏三个指标增长率分别为7.23%、4.06%和3.88%,可见该省大力推进高效清洁能源的利用,积极推动碳排放政策的科学替代,从而在优化能源生产和消费结构中取得良好效果,各地应该借鉴其相关经验。群组前沿下14个省市的 $MLCPI_{group}$ 均值和 TEC_{group} 均值大于1,反映出碳排放效率和生产效率较往年相比呈稳步上升状态,18个省市的 TC_{group} 均值大于1,但技术进步幅度较小。

第三,从碳边际减排成本的估算结果可看出:2009-2019年中国30个省市的碳边际减排成本均值为0.854万元/吨,其中北京市的MAC均值最高,为4.361

万元/吨。碳边际减排成本曲线在省市层面呈现出分散的波动趋势,大致可分为平稳波动和渐进上升两种,12个省市的MAC高于平均水平。在经济区域层面,经济区MAC均值曲线表现为先平稳变化后急剧上升趋势。其中,三个沿海综合经济区(北部、东部和南部)的MAC均值依旧位居全国前三,远远高于全国平均水平,黄河中游和西北综合经济区的MAC均值仅为0.366和0.231,这种差异性为全国统一建立碳交易市场提供了理论基础和客观条件。总的来讲,定量分析结果表明两个前沿面下碳排放效率较高的省市或经济区,其边际减排成本也相对较高,较为典型的如北京市、上海市、广东省和三个沿海经济区,但并非所有的评价单元都符合上述规律。此外,上述研究还存在一些不足之处,例如,产出指标较为单一,且非合意产出二氧化碳排放量的计算标准不统一,这可能会导致碳排放效率评价结果的失真。未来可以考虑围绕多种涉及到温室气体排放的污染物,确立合理且全面评估各类产出的综合指标。

6.2 政策建议

我国面临着严重的能源挑战,如人均资源拥有量较低、能源消费总量增长过快和能源开发利用对生态环境造成的不利影响等,是制约碳排放效率提升的关键因素。为转变经济发展方式,培育国家能源竞争优势,推动经济可持续、绿色低碳发展,结合中国各省市(自治区)和综合经济区面临的特征事实和实证结果分析,本文蕴含的政策启示有:

一、加强区域合作,提高能源利用效率。提高能源利用效率是转变发展路径和迈入低碳经济的应有之义。碳减排不是某个地区的个体责任,各省份都应该主动担当并负制定针对性的碳减排政策,要注重打造以低碳排放为优势的绿色经济,积极促进和政策扶持新能源产业发展。要加强经济区内各省市间的能源合作战略,如充分发挥北京、上海和广东等前沿省市的引领辐射与产业升级作用,探索建立跨经济区、跨经济带的长效合作机制,提升区域合作层次与水平。一方面是继续发达经济区的资源开发利用效率,加快推动发达省市的新旧动能转换,顺应科技进步规律和挖掘市场需求变化,构建技术先进、清洁安全、高附加值的优质产业体系;另一方面是继续向欠发达地区倾斜资源,强化欠发达省市的资源要素配置,加强与高水平省市的技术交流,加大科研投入力度并吸引先进技术,以节能环保

为基准升级或淘汰传统低效产业，从而发展节约低碳型产业体系。此外，三大沿海综合经济区为蓝本，探索低成本和高效率的利益分享机制与合作共赢模式，有助于优化传统的生产和产业方式，促进区域产业结构调整和创新水平提升，从而发挥各区域的比较优势，提升碳排放效率，如期实现“碳中和”目标。

二、加快技术升级，构建绿色能源体系。我国要构建在节能环保与绿色低碳方面占据竞争优势的绿色能源体系，争取以最少的资源消耗带来最大产出，进一步拓展生产生活空间。低碳竞争力与能源结构和产业结构的优化高度依存，各省市的潜力增长点应立足于以水电、风电、太阳能等为代表的新能源和提高可再生能源的利用率，鼓励并支持新兴产业发展，大幅削减煤炭资源的消耗，从根本上减少空气污染物的排放，恢复并增加环境承载力；另外，还应有针对性的制定能源绿色发展政策，在供应方面推动碳减排技术的开发应用，加大核心技术研发力度和政策扶持，建立低碳科技创新体系，增加低碳和非化石能源供给，降低经济发展对高耗能能源的需求。减少煤炭等常规资源的周期性浪费，大幅提高资源利用效率，建设清洁高效的燃煤机组和节能环保电厂，加快增长方式由粗放型向集约型的路径转型。

三、引导绿色消费，转变低碳生活理念。在生产生活模式中，引导绿色消费与发展低碳经济，其关键在于变革思维方式和理念。在人与自然和谐发展观念的指导下，通过思维方式变革，结合互联网+、人工智能等手段，鼓励生产者和消费者践行绿色低碳消费的生产生活方式，改进并创新传统发展模式，才能高效推动生态文明建设。在碳减排实践活动中，一是要推进并完善碳交易市场的交易制度和价格机制改革，发挥碳交易市场的价格发现、规模入市和配额拍卖等机制，促进碳减排成本降低，依托体系变革来达到降低 MAC 和形成低碳竞争力的双重目标。二是要确保主要高耗能产业改革，促进煤炭加工、炼油和可再生能源等行业的健康发展，加强行业污染气体的排放量控制，强化对负外部性行为的监管和执法力度。此外，政府也要转变发展思路，树立正确的低碳理念，实现了从强调碳消费强度指标控制到能源消费总量指标控制的转变，从注重碳排放量管理到资源需求管理的转变，体现了我国碳减排规划思路的转变和进步，也更加凸显了我国在未来 5~10 年间低碳绿色发展战略的整体安排。

参考文献

- [1]Aigner Dennis and Lovell C.A.Knox and Schmidt Peter. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models[J]. 1977, 6(1) : 21-37.
- [2]Battese G E , Rao D S P . Technology gap, efficiency and a stochastic metafrontier function[J]. International Journal of Business & Economics, 2002, 1(2):87-93.
- [3]Boyd G , Molburg J , Prince R . Alternative methods of marginal abatement cost estimation: Non-parametric distance functions[J]. environmentalences, 1996.
- [4]Charnes A. and Cooper W.W. and Rhodes E.. Measuring the efficiency of decision making units[J]. 1978, 2(6) : 429-444.
- [5]Chen K H ,Yang H Y. A Cross-country Comparison of Productivity Growth Using a Generalized Metafrontier Malmquist Productivity Index: with Application to Banking Industries in Taiwan and China[J]. Journal of Productivity Analysis, 2011,35(3):369-386.
- [6]Chiu Ching Ren et al. Decomposition of the environmental inefficiency of the meta-frontier with undesirable output[J]. Energy Economics, 2012, 34(5) : 1392-1399.
- [7]Du Limin and Hanley Aoife and Wei Chu. Estimating the Marginal Abatement Cost Curve of CO2 Emissions in China: Provincial Panel Data Analysis[J]. Energy Economics, 2015, 48 : 217-229.
- [8]Fare R , Grosskopf S , Pasurka C A . Environmental production functions and environmental directional distance functions[J]. Energy, 2007, 32(7):1055-1066.
- [9]Färe Rolf, Grosskopf Shawna, Theory and Application of Directional Distance Functions[J]. Journal of Productivity Analysis, 2000, 13(2) : 93-103.
- [10]Farrell M. J.. The Measurement of Productive Efficiency[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General), 1957, 120(3) : 253-290.
- [11]Gao Peng and Yue Shujing and Chen Hongtao. Carbon Emission Efficiency of China's Industry Sectors: From the Perspective of Embodied Carbon Emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 283(1): 124655.

- [12]Hojeong Park and Jaekyu Lim. Valuation of marginal CO₂ abatement options for electric power plants in Korea[J]. *Energy Policy*, 2009, 37(5) : 1834-1841.
- [13]Jeong-Dong Lee and Jong-Bok Park and Tai-Yoo Kim. Estimation of the shadow prices of pollutants with production/environment inefficiency taken into account: a nonparametric directional distance function approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(4) : 365-375.
- [14]Kantorovich L.V. *Mathematical Methods of Organizing and Planning Production*[J]. *Management Science*, 1960, 6(4):366-422.
- [15]Kaoru Tone. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1) : 32-41.
- [16]Kaya Y, Yokobori K. *Global environment, energy, and economic development held at the united nations university*[R].Tokyo, 1993.10:p.25-27.
- [17]Lee Myunghun and Zhang Ning. Technical efficiency, shadow price of carbon dioxide emissions, and substitutability for energy in the Chinese manufacturing industries[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(5) : 1492-1497.
- [18]Murty M N , Kumar S , Dhavala K K . Measuring environmental efficiency of industry: a case study of thermal power generation in India[J]. *MPRA Paper*, 2007, 38(1):31-50.
- [19]O. Zaim and F. Taskin. Environmental efficiency in carbon dioxide emissions in the OECD: A non-parametric approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2000, 58(2) : 95-107.
- [20]O'Donnell C , Rao D , Battese G . Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios[J]. *Empirical Economics*, 2008, 34(2):231-255.
- [21]Otavio Mielnik and José Goldemberg. Communication The evolution of the “carbonization index” in developing countries[J]. *Energy Policy*, 1999, 27(5) : 307-308.

- [22]P. Zhou and B.W. Ang and J.Y. Han. Total factor carbon emission performance: A Malmquist index analysis[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1) : 194-201.
- [23]Paul W. Bauer. Decomposing TFP growth in the presence of cost inefficiency, nonconstant returns to scale, and technological progress[J]. *Journal of Productivity Analysis*, 1990, 1(4) : 287-299.
- [24]R. Ramanathan. Combining indicators of energy consumption and CO₂ emissions: a cross-country comparison[J]. *Int. J. of Global Energy Issues*, 2002, 17(3) : 214-227.
- [25]Rolf Fare and Shawna Grosskopf and Dimitris Margaritis. *Advances In Data Envelopment Analysis*[M]. SG Singapore : World Scientific Publishing Company, 2015
- [26]Ronald William Shepherd. *Theory of Cost and Production Functions*[M]. PRINCETON, NEW JERSEY : Princeton University Press, 2015
- [27]W. Meeusen and J. Broeck. Technical efficiency and dimension of the firm: Some results on the use of frontier production functions[J]. *Empirical Economics*, 1977, 2(2) : 109-122.
- [28]Wei Chu and Löschel Andreas and Liu Bing. An empirical analysis of the CO₂ shadow price in Chinese thermal power enterprises[J]. *Energy Economics*, 2013, 40 : 22-31.
- [29]Wenwen Li et al. Evaluation of regional metafrontier total factor carbon emission performance in China's construction industry: Analysis based on modified non-radial directional distance function[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256.
- [30]Y.H. Chung and R. Färe and S. Grosskopf. Productivity and Undesirable Outputs: A Directional Distance Function Approach[J]. *Journal of Environmental Management*, 1997, 51(3) : 229-240.
- [31]Yongrok Choi and Ning Zhang and P. Zhou. Efficiency and abatement costs of energy-related CO₂ emissions in China: A slacks-based efficiency measure[J]. *Applied Energy*, 2012, 98 : 198-208.

- [32] Youguo Zhang. Structural decomposition analysis of sources of decarbonizing economic development in China; 1992–2006[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(8) : 2399-2405.
- [33] Yuan Peng and Liang Wenbo and Cheng Shi. The Margin Abatement Costs of CO₂ in Chinese industrial sectors[J]. *Energy Procedia*, 2012, 14(C) : 1792-1797.
- [34] Zhonghua Cheng et al. Total-factor carbon emission efficiency of China's provincial industrial sector and its dynamic evolution[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94 : 330-339.
- [35] Zhu Ruiming et al. Temporospatial pattern of carbon emission efficiency of China's energy-intensive industries and its policy implications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286.
- [36] 查建平, 钱醒豹, 赵倩倩, 谭庭. 中国旅游效率与全要素生产率的测算与分解——基于三层级共同前沿 SBM-DEA 模型的实证分析[J]. *旅游导刊*, 2019, 3(03):1-27.
- [37] 陈诗一. 能源消耗、二氧化碳排放与中国工业的可持续发展[J]. *经济研究*, 2009, 44(04):41-55.
- [38] 湛莹, 张捷. 碳排放、绿色全要素生产率和经济增长[J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(08):47-63.
- [39] 董锋, 刘晓燕, 龙如银, 周德群. 基于三阶段 DEA 模型的我国碳排放效率分析[J]. *运筹与管理*, 2014, 23(04):196-205.
- [40] 董梅, 李存芳. 中国低碳技术效率、技术差距与低碳化进程研究——基于 MinDS-Luenberger 方法的实证分析[J]. *华东经济管理*, 2020, 34(11):81-89.
- [41] 杜克锐, 邹楚沅. 我国碳排放效率地区差异、影响因素及收敛性分析——基于随机前沿模型和面板单位根的实证研究[J]. *浙江社会科学*, 2011(11):32-43+156.
- [42] 付丽娜, 彭甲超, 易明. 基于共同前沿生产函数的区域创新资源配置效率研究[J]. *宏观经济研究*, 2020(04):85-102.
- [43] 郭炳南, 林基. 基于非期望产出 SBM 模型的长三角地区碳排放效率评价研究[J]. *工业技术经济*, 2017, 36(01):108-115.

- [44]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(06):30-43.
- [45]黄煌.2030 年碳强度目标约束下中国省域碳排放总量分配——基于边际减排成本效应视角的分析[J].调研世界,2020(07):25-33.
- [46]蒋伟杰,张少华.中国工业二氧化碳影子价格的稳健估计与减排政策[J].管理世界,2018,34(07):32-49+183-184.
- [47]李慧,李玮,姚西龙.中国省域全要素碳排放效率空间特征与动态收敛性研究[J].科技管理研究,2019,39(19):98-103.
- [48]李金铠,马静静,魏伟.中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究[J].数量经济技术经济研究,2020,37(06):109-129.
- [49]李铭泓,黄羿,朱伟俊,张发根,常向阳.中国交通运输业碳排放全要素生产率研究——基于 Global Malmquist-Luenberger 指数[J].科技管理研究,2021,41(09):203-211.
- [50]李珊珊,马艳芹.环境规制对全要素碳排放效率分解因素的影响——基于门槛效应的视角[J].山西财经大学学报,2019,41(02):50-62.
- [51]李双杰,李春琦.全要素能源效率测度方法的修正设计与应用[J].数量经济技术经济研究,2018,35(09):110-125.
- [52]林伯强.中国将如何迈向“碳中和”? [N]. 21 世纪经济报道,2020-12-25(004).
- [53]刘海英,刘晴晴.中国省际能源和 CO₂ 效率评价及技术差距研究[J].统计与决策,2019,35(19):116-120.
- [54]刘京星,黄健柏,丰超.企业性质、区域差异与产能过剩治理——基于三层级共同前沿 DEA 模型的研究[J].中国软科学,2017(09):127-140.
- [55]刘明达,蒙吉军,刘碧寒.国内外碳排放核算方法研究进展[J].热带地理,2014,34(02):248-258.
- [56]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.

- [57]钱丽,肖仁桥,陈忠卫.我国工业企业绿色技术创新效率及其区域差异研究——基于共同前沿理论和 DEA 模型[J].经济理论与经济管理,2015(01):26-43.
- [58]王兵,吴延瑞,颜鹏飞.中国区域环境效率与环境全要素生产率增长[J].经济研究,2010,45(05):95-109.
- [59]王兵,朱宁.不良贷款约束下的中国银行业全要素生产率增长研究[J].经济研究,2011,46(05):32-45+73.
- [60]王娟.中国工业的能源环境效率评价与碳排放强度的影响因素研究[D].天津大学,2019.
- [61]王玲,陈仲常,马大来.节能减排、全要素能源生产率及行业异质性研究——基于中国制造业 28 个行业的实证分析[J].当代财经,2013(10):5-15.
- [62]魏楚.中国城市 CO₂ 边际减排成本及其影响因素[J].世界经济,2014,37(07):115-141.
- [63]魏梅,曹明福,江金荣.生产中碳排放效率长期决定及其收敛性分析[J].数量经济技术经济研究,2010,27(09):43-52+81.
- [64]吴凡,刘雪娇,谢文秀.基于共同前沿 DEA 的中西部地区全要素能源效率研究[J].经济问题探索,2016(11):33-38.
- [65]闫丰,王洋,杜哲,陈影,陈亚恒.基于 IPCC 排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化[J].农业工程学报,2018,34(04):15-20.
- [66]闫庆友,桂增侃,张文华,陈立忠.中国能源影子价格和能源环境效率省际差异[J].资源科学,2020,42(06):1040-1051.
- [67]杨国涛,张特,东梅.中国农业生产效率与减贫效率研究[J].数量经济技术经济研究,2020,37(04):46-65.
- [68]杨子晖,陈里璇,罗彤.边际减排成本与区域差异性研究[J].管理科学学报,2019,22(02):1-21.
- [69]于克美,武剑红,李红昌.我国铁路运输业碳排放效率与影响因素分析[J].技术经济,2020,39(11):70-76+86.
- [70]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.

- [71]张伟,朱启贵,李汉文.能源使用、碳排放与我国全要素碳减排效率[J].经济研究,2013,48(10):138-150.
- [72]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.
- [73]周五七,聂鸣.中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J].数量经济技术经济研究,2012,29(09):58-70+161.

致 谢

弹指间，三年硕士生涯，忽焉已至，身边发生的故事都历历在目，恍如昨日，让人不仅感叹时光飞逝。很庆幸在我已经结束学业的青春年华中，又重新走进兰州财经大学，在这地处闹市且生机勃勃的校园里播下学业的种子，这也是我人生收获颇丰的一个阶段。近代学者王国维曾说：“古今之成大事业、做大学问者有三种境界。而大家之作，其辞脱口而出，无矫揉之态。以其所见者真，所知者深也。”在兰州财经大学统计学院的学习生涯中，我对王国维先生提出的三种境界心向往之，虽达不到心领神会的阶段，但却有一些认知心得。

一是立鸿鹄之志。晚清名家曾国藩有云：“凡将举事，必先平意清神，清神意平，物乃可正。”通过在统计学院的学习与积淀，我确定了学习目标和科研方向，立志在学术研究的道路上有所成就。老子在《道德经》中云：“天下难事作于易；天下大事作于细。”，而统计学作为探索自然世界规律的一把钥匙，能够在数据中揭示并预测世间万物运行的规律，是一门极其重要的学科，因此必须怀有细致入微、认真钻研的态度去学习。同时我也认识到统计学理论的渊博与雄厚，而自己如沧海一粟般，在历史和真理的长河中显得十分渺小；这更让我感到知识的世界无比广阔，要志存高远、有所作为，不怕真理无穷，只要前进就好。

二是要尊师重道。韩愈先生曾说：“古之学者必有师。师者，所以传道、授业、解惑也。”亚当斯密的《国富论》或许是我学经济学的最早启蒙老师，让我产生了深深的兴趣，书中的一些观点依旧记忆犹新，如“在一只看不见的手的指导下，每个人都在尽力达到一个意愿目的，在追逐自己利益的过程中，从而也促进了社会利益。”此外，还有在学校遇到的每位老师，课堂授课时的言语或已淡忘，但身上散发出“艰苦朴素，吃苦耐劳”的精神，会铭记在心并激励我不断进取，走好人生的道路。在求学期间，尤其要特别感谢导师宋老师，感谢他在学术道路上给予的培养与关爱；感谢为我指导论文的赵师兄、李师姐和戴师兄和日常解惑的曾博士，在我的学术生涯中给予支持与帮助，师门恩情厚重，语轻情谊重，在校期间的点滴时刻都牢记于心，久久不能忘怀。

三是须再接再厉。一切过往，皆为序章。胡适先生曾说过：“昨日种种，皆成今我，切莫思量，更莫哀，从今往后，怎么收获，怎么栽。”这句话对我产生了深厚影响。回首自己的人生经历，虽不属于天赋凛然的凤毛麟角之才，也谈不上过分努力，但却没有因曾经虚度光阴而深深后悔过。求知无坦途，我心有明灯，身在这个伟大的时代，需要我们当代年轻人有抱负、有担当，不负祖国厚望，在时代进程中实现人生价值和社会价值，能够为国家和社会奉献自己的绵薄之力。每念及此，前方道路纵使困顿难行，吾辈亦当自勉砥砺前行，要深信今日之努力，必定有将来大收获。

最后，要特别感谢我的父母、弟弟、家人和男友的鼓励与陪伴，感谢无数同窗好友们的相遇和帮助，也感谢那个不惧挫败与困境也不曾放弃未来和梦想的自己——遇见你们，是我一生的幸运。

分别的日子里，愿：师长安康，同学如意；缘若未尽，后会有期！