

分类号
U D C

密级
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

论文题目 数字经济对碳排放绩效的影响研究

研究生姓名: 陈乾

指导教师姓名、职称: 王永瑜、教授

学科、专业名称: 应用经济学、统计学

研究方向: 环境与能源统计

提交日期: 2024年6月3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：陈乾 签字日期：2024.6.3

导师签名：王承瑞 签字日期：2024.6.3

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：陈乾 签字日期：2024.6.3

导师签名：王承瑞 签字日期：2024.6.3

Research on the Impact of Digital Economy on Carbon Emission Performance

Candidate: Chen Qian

Supervisor: Wang Yongyu

摘要

中国政府在第 75 届联合国大会上提出了推进碳达峰和碳中和的目标。党的二十大报告指出：“实现碳达峰和碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革”。实现“双碳”目标的关键在于两个方面：一是降低整体碳排放水平；二是在保持一定经济增长的情况下，减少单位经济活动所产生的碳排放量。数字经济具有高科技、低能耗、可测量以及宽领域的强渗透和融合能力的特点，能够为改善碳排放绩效提供有效的解决方案。然而，关键在于如何更有效地利用数字经济，使其成为“双碳”目标的有力助手。

本文的重点在于探讨数字经济对碳排放绩效的影响及作用机制，首先梳理了数字经济、碳排放绩效和数字经济影响碳排放绩效等方面的研究，分析了数字影响碳排放绩效的理论基础，提出了数字经济对碳排放绩效的可能影响机制。然后基于熵权 TOPSIS 法测算各省数字经济发展水平，并将碳排放绩效分解为碳排放量和碳排放效率。最后，采用了固定效应模型和中介效应模型，从碳减排和碳增效两个方面对数字经济发展对碳排放绩效的影响及其作用机制进行了实证分析，并进一步研究其异质性。得出以下结论：

1.数字经济在不同省份和地区的发展呈现出明显的差异。就具体情况而言，广东、江苏、北京等地的数字经济发展水平处于领先地位，而青海、宁夏等地则相对落后；总体来看，东部地区的数字经济发展水平最高，中部次之，而西部地区则处于相对较低的水平。

2.数字经济的发展对改善碳排放绩效具有显著作用，主要体现在两个方面：降低碳排放总量和提高碳排放效率。

3.数字经济通过技术创新可以显著改善碳排放绩效，不同的技术创新模式对于数字经济改善碳排放绩效的作用效果是不同的。具体来说，在促进碳排放绩效方面，自主创新模式是至关重要的，其次是模仿创新模式，而对于技术引进是没有发挥作用的。

最后，根据研究结论，从缩小数字经济省域和地区的差距，建设数字化基础设施和支持低碳技术自主创新的三个方面提出相关政策建议。

关键词：数字经济 非期望产出 SBM 模型 碳排放绩效 中介效应 技术创新

Abstract

The Chinese government proposed the goal of promoting carbon peaking and carbon neutrality at the 75th United Nations General Assembly. The report of the 20th National Congress of the Communist Party of China pointed out that achieving carbon peak and carbon neutrality is a broad and profound economic and social systemic change. The key to achieving the "dual carbon" goal lies in two aspects: first, reducing the overall carbon emissions level; The second is to reduce the carbon emissions generated by unit economic activities while maintaining a certain level of economic growth. The digital economy has the characteristics of high technology, low energy consumption, measurability, and strong penetration and integration capabilities across a wide range of fields, which can provide effective solutions for improving carbon emission performance. However, the key lies in how to more effectively utilize the digital economy and make it a powerful assistant to the "dual carbon" goals.

The focus of this thesis is to explore the impact and mechanism of the digital economy on carbon emission performance. Firstly, the research on the digital economy, carbon emission performance, and the impact of the digital economy on carbon emission performance is sorted out. The theoretical basis of the digital impact on carbon emission performance is analyzed, and the possible impact mechanism of the digital economy on

carbon emission performance is proposed. Then, based on the entropy weight TOPSIS method, the development level of digital economy in each province is calculated, and the carbon emission performance is decomposed into carbon emissions and carbon emission efficiency. The carbon emission coefficient method and the unexpected output SBM model are used to calculate them respectively. We used fixed effect models and mediation effect models to empirically analyze the impact and mechanism of digital economy development on carbon emission performance from two aspects: carbon reduction and carbon efficiency enhancement. And further study its heterogeneity. Draw the following conclusion:

- 1.The development of the digital economy shows significant differences in different provinces and regions. In terms of specific circumstances, Guangdong, Jiangsu, Beijing and other places are in a leading position in the development of digital economy, while Qinghai, Ningxia and other places are relatively backward. Overall, the digital economy development level in the eastern region is the highest, followed by the central region, while the western region is at a relatively low level.

- 2.The development of the digital economy has a significant impact on improving carbon emission performance, mainly reflected in two aspects: reducing total carbon emissions and improving carbon emission efficiency.

3. The digital economy can significantly improve carbon emission performance through technological innovation, and different technological innovation models have different effects on improving carbon emission performance in the digital economy. Specifically, in promoting carbon emission performance, independent innovation models are crucial, followed by imitative innovation models, which have no effect on technology introduction. The digital economy can significantly improve carbon emission performance through technological innovation, and different technological innovation models have different effects on improving carbon emission performance in the digital economy. Specifically, in promoting carbon emission performance, independent innovation models are crucial, followed by imitative innovation models, which have no effect on technology introduction.

Finally, based on the research findings, relevant policy recommendations are proposed from three aspects: narrowing the gap between digital economy provinces and regions, building digital infrastructure, and supporting low-carbon technology independent innovation.

Keywords: Digital economy; Unexpectedly output super efficiency global SBM model; Carbon emissions performance; Mediation effect; Technological innovation.

目 录

1 绪论	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 国内外研究现状.....	3
1.2.1 数字经济相关研究.....	3
1.2.2 碳排放绩效相关研究.....	5
1.2.3 数字经济影响碳排放绩效相关研究.....	7
1.2.4 文献述评.....	9
1.3 研究方法与技术路线.....	10
1.3.1 研究方法.....	10
1.3.2 技术路线.....	10
1.4 研究内容与创新之处.....	12
1.4.1 研究内容.....	12
1.4.2 论文主要创新之处.....	13
2 数字经济影响碳排放绩效的理论基础与作用机理	14
2.1 相关概念界定.....	14
2.1.1 数字经济.....	14
2.1.2 碳排放绩效.....	15
2.2 相关理论基础.....	15
2.2.1 低碳经济理论.....	15
2.2.2 网络外部性理论.....	16
2.2.3 可持续发展理论.....	17
2.3 数字经济对碳排放的影响机理分析.....	18
2.3.1 数字经济对碳排放绩效的直接作用.....	18
2.3.2 数字经济对碳排放绩效的间接作用.....	20
3 数字经济发展水平和碳排放的测度与分析	23
3.1 数字经济发展水平测度及分析.....	23
3.1.1 测算方法.....	23

3.1.2 指标体系构建.....	25
3.1.3 测算结果及分析.....	27
3.2 碳排放绩效测度及分析.....	32
3.2.1 碳排放量测算方法.....	32
3.2.2 碳排放量测算结果及分析.....	33
3.2.3 碳排放效率测算方法.....	36
3.2.4 碳排放效率测算结果及分析.....	38
4 数字经济影响碳排放绩效的实证分析.....	42
4.1 模型构建和数据说明.....	42
4.1.1 基准模型.....	42
4.1.2 中介模型.....	42
4.1.3 变量选取与数据说明.....	43
4.2 数字经济影响碳排放绩效实证研究.....	46
4.2.1 基准回归结果.....	46
4.2.2 稳健性检验.....	48
4.3 技术创新的中介效应.....	48
4.3.1 技术引进的中介效应.....	49
4.3.2 模仿创新的中介效应.....	49
4.3.3 自主创新的中介效应.....	50
4.4 异质性分析.....	51
4.4.1 区域异质性分析.....	51
4.4.2 高、低数字经济水平地区的异质性分析.....	53
5 研究结论与建议.....	54
5.1 结论.....	54
5.2 建议.....	54
参考文献.....	57
致谢.....	64

1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

全球气候环境问题是当今世界面临的最紧迫和重大的挑战之一。自工业化以来，人类活动引发了大规模的温室气体排放，导致全球气候变化加剧，引发了一系列的环境问题。世界气象组织发布的《2022 年全球气候状况》报告显示，全球年平均陆地气温较 1850 年至 1900 年平均值偏高 1.67°C，是自 1850 年以来的第四高。温室效应导致的海洋酸化、海平面升高、极端高温、加强暴雨等正在严重威胁着人类的健康和安全、粮食和水资源的可持续性、以及社会经济的稳定发展。随着气候变化的加剧，人类面临的生态风险和生存危机变得越来越严峻。为了应对这一挑战，2015 年几乎所有国家都共同签署了《巴黎协定》。该协定的长期目标是限制全球气温上升，力争将其控制在工业化前水平的 2°C 以内，并尽力限制在 1.5°C 以内。这为各国提供了一种共同努力来应对气候变化的指导方针。

作为全球生态文明的参与者、贡献者和引领者，中国一直以来都秉持着主动参与、积极应对的态度，致力于在全球变暖治理方面扮演一个世界大国应有的角色，为此做出了重要贡献。为加速全球碳减排进程，中国政府在 2020 年 9 月 22 日第 75 届联合国大会上宣布了两项重要的碳减排目标：2030 年实现碳达峰和 2060 年实现碳中和。然而，根据《中国能源发展报告》，2022 年全国能源消费高达 54.1 亿吨标准煤，高碳能源的使用仍然相当广泛。这意味着在短期内实现“双碳”目标将面临着巨大的挑战。2021 年国务院发布的《2030 年前碳达峰行动方案》明确了实现碳达峰目标的具体路径和措施。该行动方案强调了有序、有效地推进碳达峰目标的重要性，提出了推动生产生活方式向更加绿色的方向转变的策略，以确保按计划在 2030 年前实现碳达峰的目标。那么，数字经济对碳排放绩效是否影响？数字经济影响碳排放绩效的作用路径是什么？厘清数字经济对碳排放绩效的影响及作用机制，有助于更好地发挥数字经济的优势，

改善碳排放绩效，为实现“双碳”目标提供重要的理论指导和实践路径。

1.1.2 研究意义

气候变化对人类社会的影响日益严重，威胁着全球的可持续发展，各国纷纷认识到必须转向绿色低碳发展模式，减少温室气体排放，并实现高质量的经济增长。因此，推动绿色低碳转型已成为国际社会的共识，是为了应对气候变化和环境问题，实现可持续发展的重要举措。（ZHANG 等，2022）。因此，探讨数字经济对碳排放绩效的影响及其作用机制，无论在理论还是实践方面，都具有重要意义。

（1）理论意义

碳排放绩效作为生态环境评估的重要指标，在学界受到广泛关注。目前关于碳排放绩效的研究，主要是侧重考察碳排放总量或碳排放效率中的单一指标。本文将碳排放绩效分解为碳排放量和碳排放效率两个维度，更全面地评价碳排放绩效。而对于数字经济改善碳排放绩效的作用路径而言，当前的研究是把技术创新作为一个整体的，大多数研究都没有细分技术创新的模式。通常以专利数量作为衡量标准，然而有些创新活动可能未申请专利，导致专利数量不能完全反映出技术创新的水平和渠道。本文将从技术引进、模仿创新和自主创新三种创新模式，来实证检验数字经济影响碳排放绩效的传导路径。因此，该研究可以全面分析数字经济对碳排放绩效的影响及传导路径，具有一定的理论意义。

（2）现实意义

碳排放量的增加会加剧全球气候变化，导致极端天气事件的频发，对农业生产、水资源、生态环境等造成不利影响，进而影响国家的粮食安全和生态平衡。过高的碳排放量可能会导致能源资源的过度消耗，加剧能源供需紧张，影响国家的能源安全。为了解决这一系列问题，我国承诺在 2060 年前实现“双碳”目标，即达到碳排放峰值并实现碳中和。在这一过程中，改善碳排放绩效被认为是至关重要的。数字经济已经深度融入到经济社会的各个方面，对生产活动产生了深远影响，已被视为推动绿色低碳发展的重要动力。本文通过实证分析，深入探索数字经济对碳排放绩效的影响机理对于制定有效的政策，推动碳中和目标的实现具有重要的现实意义。

1.2 国内外研究现状

本文研究数字经济对碳排放绩效的影响，主要从数字经济相关研究、碳排放绩效相关研究和数字经济影响碳排放绩效的相关研究等方面来梳理文献。

1.2.1 数字经济相关研究

(1) 数字经济的内涵

Tapscott 在 1996 年提出的数字经济概念，强调了数字化技术在经济活动中的广泛应用和影响 (Tapscott, 1996)。数字经济作为一种新兴形态促使了经济中的微观主体，如企业、个人等，更加依赖信息技术来进行商品或服务的交易 (Beomsoo, 2002)。Carlsson (2004) 认为数字经济是一种不断发展和演变的现象，强调数字技术和互联网在经济活动中的作用，将信息和数据的数字化转变视为数字经济的核心特征。何泉吟 (2011) 指出数字经济的核心特征是利用数字技术实现了制造、管理和流通等领域的数字化。根据中国信息通信研究院 (2017) 的看法，数字经济的内涵应该涵盖将数据视为生产要素的概念，数字产业化和产业数字化的结合构成了数字经济的基本框架，推动了经济的数字化转型并提高了产业的效率水平。《数字经济及其核心产业统计分类 (2021)》将数字经济定义为一系列经济活动，其核心特征是把数据资源作为一种重要的生产要素，依托于现代信息网络，充分利用信息通信技术，推动经济活动的发展。这个定义不仅涵盖了数字经济的核心活动，还包括了那些依赖数字技术、数字基础设施、数字服务以及数据提升效率的经济活动。这样的定义相对较为全面，能够很好地反映我国数字经济的发展特点，也能够适应数字经济不断演变和发展的特性 (鲜祖德等, 2022)。

(2) 数字经济测算

在数字经济测算领域，测算方法主要有增加值测算法、数字经济指数编制法以及卫星账户法。

韩兆安等 (2021) 首先对数字经济的范围进行了明确定义，然后采用了行业增加值结构系数等一系列指标来量化数字经济的规模。中国信息通信研究院 (2022) 对数字经济的规模进行了测算，主要从数字产业化和产业数字化两个

角度进行了评估。这种方法能够更全面地了解数字经济在中国经济中的实际规模和影响，并为未来的发展提供了重要参考和指导。

经济合作与发展组织以数字交易的不同类型为基础对数字经济进行核算，这一方法为之后的研究者开展数字经济卫星账户的测算提供了基础和指导。BEA（2018）以互联网和信息通信技术为基础来定义数字经济，选择了数字经济产业进行测算。罗良清等（2021）指出，核算数字经济的范围应该包括数字技术本身以及数字技术的应用对象，因此，首先需要确定数字经济产业的产品范围，并且进行界定，以建立中国数字经济的卫星账户体系。

多数学者通过编制数字经济指数来评估数字经济的发展水平。赵涛等（2020）对数字经济的综合发展水平进行测度时，从互联网发展和数字金融普惠两个方面评估数字经济的综合发展水平。王军等（2021）从数字经济发展的不同角度，包括数字经济发展的载体、产业数字化、数字产业化，以及数字经济发展环境等方面综合衡量了数字经济发展指数。黄敦平和朱小雨（2022）对中国各地区的数字经济发展进行了评估，主要从数字化的基础设施、数字化产业变革和数字化运用三个方面进行分析，并研究了其发展演变的过程。此外，基于新发展的理念，李洁等（2023）建立数字经济综合评价指标体系，用加权TOPSIS法评估了数字经济的发展状况。

（3）数字经济与技术创新

数字经济作为技术革命的代表，在推动技术创新方面发挥着重要作用（Miller, 2001），数字经济的发展促进了新兴技术的广泛应用，数字经济时代大量的数据积累和流动成为了创新的重要驱动力。通过梳理现有文献就可以发现有以下研究进展：

首先，数字技术持续地促进着技术创新的发展。数字经济的迅速发展对技术创新产生了深远的影响。数字经济的蓬勃发展为技术创新提供了广阔的空间和更加便利的条件，推动了科技进步和经济发展的步伐（Zhang, 2022）。数字经济的迅速发展提高了市场信息的流通速度，这意味着市场上关于新产品、新技术的信息能够更快地被获取和传播，这种信息的快速流通为创新型产品的研发提供了更广阔的机会和平台，从而提升技术创新水平（安孟, 2020）。武可栋（2021）提出通过数字经济平台，企业和高校可以更轻松地获取全球范围内的

最新科研成果、市场趋势、行业动态等各种信息资源，这样有利于技术水平的提高。数字经济利用快速的信息交流和资源利用优化，降低了企业进行创新的成本和风险，数字经济通过降低市场分割的水平使得企业能更广泛地接触到不同地区和行业的需求和创新资源，从而推动了技术创新水平的不断提升（薛阳等，2023），为经济的可持续发展注入了新的动力。

其次，数字经济与技术创新之间的关系并非单纯的线性关系。温珺等（2019）在对中国 287 个地级市的研究中发现，数字经济的发展对提升技术创新能力具有积极作用，而且数字经济与技术创新之间存在着非线性关系。Dou（2022）的研究认为数字经济和传统企业绿色创新之间呈现倒 U 形关系，即数字经济初期促进了绿色创新，但随后可能出现抑制情况。Dai（2022）的研究表明，数字经济对区域绿色创新的影响存在非线性关系，当区域内的研发人员数量达到一定规模时，数字经济对绿色创新的促进作用才会显现出来，表现为绿色创新的增长率上升。

1.2.2 碳排放绩效相关研究

自 21 世纪以来，二氧化碳排放所导致的温室气体效应成为全球亟待解决的难题，这不仅对气候变化产生影响，还牵涉到经济和环境等方面的问题。在经济学领域，针对二氧化碳排放与经济问题展开了大量研究。首先，这些研究关注各国二氧化碳排放的趋势及其影响因素。它们分析了不同国家或地区的二氧化碳排放情况，探讨了导致排放量增加或减少的因素，从而为制定应对策略提供了重要依据。其次，这些研究着眼于二氧化碳排放与经济可持续增长之间的关系。它们试图寻找经济增长与环境保护之间的平衡，研究经济发展过程中对环境的影响，以及如何实现经济与环境的协调发展。另外，这些研究还从生产效率的角度探讨了二氧化碳排放问题。它们关注生产过程中能源利用效率、碳排放强度等因素对二氧化碳排放的影响，探讨如何在保持经济增长的同时降低碳排放水平。虽然过去的研究大多集中在单一要素（例如碳强度）的研究，但近年来也有一些学者开始从多要素的角度对二氧化碳排放效率进行了更全面的测算和实证检验，以更深入地理解二氧化碳排放与经济之间的关系。虽然过去的研究大多集中在单一要素（例如碳强度）的研究，但近年来也有一些学者开

始从多要素的角度对二氧化碳排放效率进行了更全面的测算和实证检验，以更深入地理解二氧化碳排放与经济之间的关系。

（1）碳排放绩效的测度

梳理相关文献可以发现，学者基本上都是用以下三种衡量标准来测度碳排放绩效。

第一种方法是采用碳排放量作为衡量指标。陶亮（2021）建立了建筑行业全生命周期各阶段的碳排放计算模型，系统地评估建筑行业的碳排放情况，并找出降低碳排放的有效途径。Guo 等（2018）使用投入产出法对碳排放量进行测算后，研究结果表明经济体系中的核心部门能够对其他部门的能源消费和碳排放产生驱动作用。碳排放系数法是一种用于估算特定活动或过程产生的碳排放量的方法，该方法基于每种能源或活动单位产生的碳排放量的系数来计算总体排放量。这些系数通常基于燃烧化石燃料或其他活动过程中释放的二氧化碳数量。通过将活动的数量与其相应的碳排放系数相乘，可以得出总体的碳排放量。2006 年，联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的碳排放系数在测算碳排放量的实践中得到了普遍运用。张君宇等（2021）将投入产出法和碳排放系数法结合起来，核算了全国 30 个省份以及 8 个行业的二氧化碳的排放量，发现工业部门以及火力发电排放了大量的二氧化碳。尹迎港和常向东（2021）使用 IPCC 估算二氧化碳的方法，结合原油、焦炭、燃料油等 8 类主要化石能源的消费量测算了二氧化碳排放量。

第二种方法是以碳排放强度作为衡量指标。Kaya 和 Yokobori（1997）将碳排放强度定义为单位 GDP 所排放的二氧化碳量，即单位经济产出所对应的碳排放量。而 Fan 等（2007）则认为碳排放强度是单位人均 GDP 所排放的二氧化碳量，即平均每个人所对应的碳排放量。

第三种方法是以碳排放效率作为衡量指标。碳排放效率的测算有数据包络分析（DEA）、碳排放弹性分析和碳市场模型等方法。由于 DEA 模型能够有效地评估多个输入和输出之间的效率，适用于复杂的生产系统和多个决策单元的情况，众多研究者根据此方法来测算碳排放效率。田云等（2020）使用 DEA-Malmquist 分解法首先利用 DEA 方法评估各个农业生产单元的碳排放效率，确定其技术效率和规模效率。然后，利用 Malmquist 指数分析不同年份之间的技

术变化和效率变化，并分解出各个因素对碳排放效率变化的贡献。以此为基础，测算了 2011 年至 2017 年湖北的农业碳排放效率。郭四代等（2018）采用 SBM-Undesirable 模型，将二氧化碳作为一种不良产出，基于 12 省份 2006—2015 年的农业面板数据，全面地评估了碳排放效率。随后，学者们通过对这两种效率评价模型的不断改进（如贾锐宁等，2022 年；徐英启等，2023 年），逐渐完善了碳排放效率的评估方法。

（2）碳排放绩效影响因素相关研究

随着全球气候变化的严峻形势，学者们开始关注碳排放问题，并深入研究其影响因素。梳理相关研究可以总结出，经济增长、技术进步、人口规模、能源生产率以及地区产业结构等因素，都对碳排放水平产生了不同程度的影响。特别是技术创新被视为推动低碳发展的关键，通过改进生产技术和采用清洁生产技术，可以有效减少碳排放（魏巍贤等，2010）。推动依赖高碳能源和高排放产业向低碳、绿色、可持续发展的方向转变，同时采用清洁生产技术可以降低生产过程中的碳排放和污染物排放，这样可以实现低碳经济的发展。张伟（2013）认为技术因素对二氧化碳减排效率产生显著影响，因此，提升碳排放效率的关键点在于不断提高技术水平和技术效率。调整产业结构也是减少碳排放的重要途径之一。陈祥兵（2017）指出高排放产业的转移可能会导致在原产地地区的碳排放减少，从而在一定程度上减缓该地区的碳排放增长。产业结构的调整通常涉及向低碳产业转型，这种转型会直接减少碳排放，并且在长期内有望实现更为可持续的发展。郭朝先（2010）使用 Kaya 恒等式作为基础，结合 SDA 方法进行碳排放影响因素的分解，研究结论表明，1992 年至 2007 年期间能源消费强度是导致碳排放增长的主要因素之一。Tamburino 等（2023）认为碳排放总量取决于总人口。人口增长可以被认为是碳排放增长的主要驱动力之一，随着人口增长，能源需求也随之增加。更多的人口意味着更多的能源消耗，这将导致更多的碳排放。

1.2.3 数字经济影响碳排放绩效相关研究

（1）数字经济影响碳排放绩效

在“双碳”目标下，数字经济对碳排放绩效的影响是一个备受关注的议题，

学者们对此进行了较多的研究。数字经济推动了信息技术和通信技术的发展，为节能减排提供了更多可能性（Zhang 等，2021）。数字技术的应用促进了生产过程的数字化和智能化，包括物联网、大数据分析、人工智能等，这些技术可以优化生产流程、减少资源浪费，从而减少碳排放（廖民超等，2023）。数字经济在推动区域低碳发展和提高碳排放绩效方面发挥着重要作用。通过数字技术的应用，可以实现资源的高效利用、生产方式的优化、生活方式的转变，从而有效降低碳排放并促进可持续发展。（Zhang 等，2021）。徐维祥等（2022）指出尽管数字经济带来了明显的减排效应，但在发展过程中也需要重视空间外溢效应。数字经济的发展可以促进不同地区之间形成一种协调的碳减排模式，这是通过数字经济的空间外溢效应所实现的（刘婧玲，2023）。然而，也有研究认为，尽管数字经济在某些方面可以降低碳排放，但它也可能带来一些负面影响，包括碳排放的增加和环境负担的加重（SHVAKOV, 2020）。Sadorsky（2012）认为数字信息技术虽然促进了经济发展，但也可能增加耗电量，导致碳排放大幅上升。缪陆军（2022）的实证研究发现，数字经济对碳排放的影响呈现出明显的倒 U 型关系。李治国（2022）认为数字经济的发展通常伴随着经济集聚效应，这可能导致能源消耗和碳排放的增加。初始阶段，数字经济的发展通常需要大量的能源和资源，因此可能会导致碳排放的增加。然而，随着数字经济的成熟和技术进步，以及环境政策的实施，数字经济可以通过提高资源利用效率、优化生产方式等途径来实现碳减排。

（2）数字经济影响碳排放绩效的路径研究

学者们就数字经济对碳排放绩效的影响展开了广泛的研究，尽管他们普遍认为数字经济对碳排放产生影响，但在这种影响的具体效果方面存在一些不同看法。在探讨数字经济对碳排放绩效的影响路径时，有一些学者着重强调了技术创新的作用。研发投资和技术进步可以推动数字经济领域的创新，促进新技术的研发和应用，而新技术的应用可以提高生产过程中资源的利用效率，减少能源和物质的浪费，从而降低碳排放（Ma, 2022）。数字经济推动创新要素的流动，为碳减排和可持续发展提供了重要的支持。通过促进技术创新、知识共享和研发投资，数字经济为实现低碳可持续发展提供了有效的途径和丰富的可能性（Wang, 2022）。科技创新和技术进步是实现碳减排、能源消费转型和环

境质量改善的关键渠道（杨莉莎，2019），通过不断推动技术创新，发展清洁能源技术、提高能源效率、促进绿色交通、支持环境监测和管理等措施，可以实现可持续发展目标，减少碳排放并改善环境质量。然而，数字经济的发展本身也是一场技术变革。数字经济的发展不仅代表着经济形态的变革，更意味着技术方面的变革，在信息技术和互联网经济的基础上进一步发展和优化的产物（ZHOU 等，2022），随着数字经济的持续发展，信息通信技术也必须不断更新和进步，以适应数字经济发展的需求。这意味着技术的更新和进步是数字经济持续发展的关键，而信息通信技术的不断更新则成为数字经济发展的基础条件之一。在探讨数字经济对碳排放绩效的传导机制时，学者们已经达成了一些共识，主要包括产业结构升级、能源结构优化以及技术进步这三个方面（Li 等，2023；谢云飞，2021；Yi 等，2022；Lee，2022）。

1.2.4 文献述评

通过以上文献的梳理，可以发现数字经济与碳排放绩效各自领域的研究成果都比较丰富。就测度来看，数字经济和碳排放绩效的测度体系趋于成熟，但仍未形成一致标准。在讨论数字经济对碳排放绩效的影响时，学者们持不同意见，有的学者认为数字经济的碳减排效应显著，也有学者指出，数字经济发展会增加碳排放。数字经济对碳排放绩效的传导机制主要有技术创新、产业结构和能源结构。

文献梳理发现现有研究存在以下不足：（1）当前有关碳排放绩效的研究是倾向于单独考察碳排放量或者碳排放效率的，很少有文献将二者共同作为碳排放绩效的代理变量来进行综合考察。（2）目前的研究倾向于将技术创新视为一个整体，来研究数字经济改善碳排放绩效的作用路径，但是却忽视了对技术创新进行更详细的分类和分析。

因此，针对现有文献的上述不足，首先，本文试图将碳排放绩效分解成碳排放量与碳排放效率两个维度，从量和效两方面综合系统分析数字经济的碳减排和碳增效的作用。其次，将技术创新分成技术引进、模仿创新和自主创新三种模式。深入分析此三种模式在数字经济改善碳排放绩效中的作用。此外还需进一步分析数字经济对碳排放绩效的异质性影响。为实现数字经济一体化发展、

碳排放绩效协同改善提供有益借鉴。

1.3 研究方法与技术路线

1.3.1 研究方法

(1) 文献分析法。根据梳理数字经济与碳排放绩效之间的关系的相关文献,全面地了解掌握关于数字经济与碳排放绩效的研究现状,总结和归纳国内外关于数字经济和碳排放绩效还需深入研究的地方,并提出自己的研究方向,从传导路径角度认识数字经济与碳排放绩效之间的关系,对两者之间的关系做出更全面的分析。

(2) 超效率 SBM 模型。在本研究中,采用超效率数据包络分析 (SBM) 模型来测算碳排放效率,并对测算结果进行分析。

(3) 固定效应模型和中介效应模型。在本研究中,固定效应模型被用来考察数字经济和碳排放绩效之间的直接关系。该模型允许控制个体间的不可观测差异,从而更准确地评估数字经济对碳排放绩效的影响。中介效应模型被用来探讨数字经济对碳排放绩效的影响是否通过中介变量的作用来实现。

1.3.2 技术路线

本文技术路线图如图 1.1 所示。

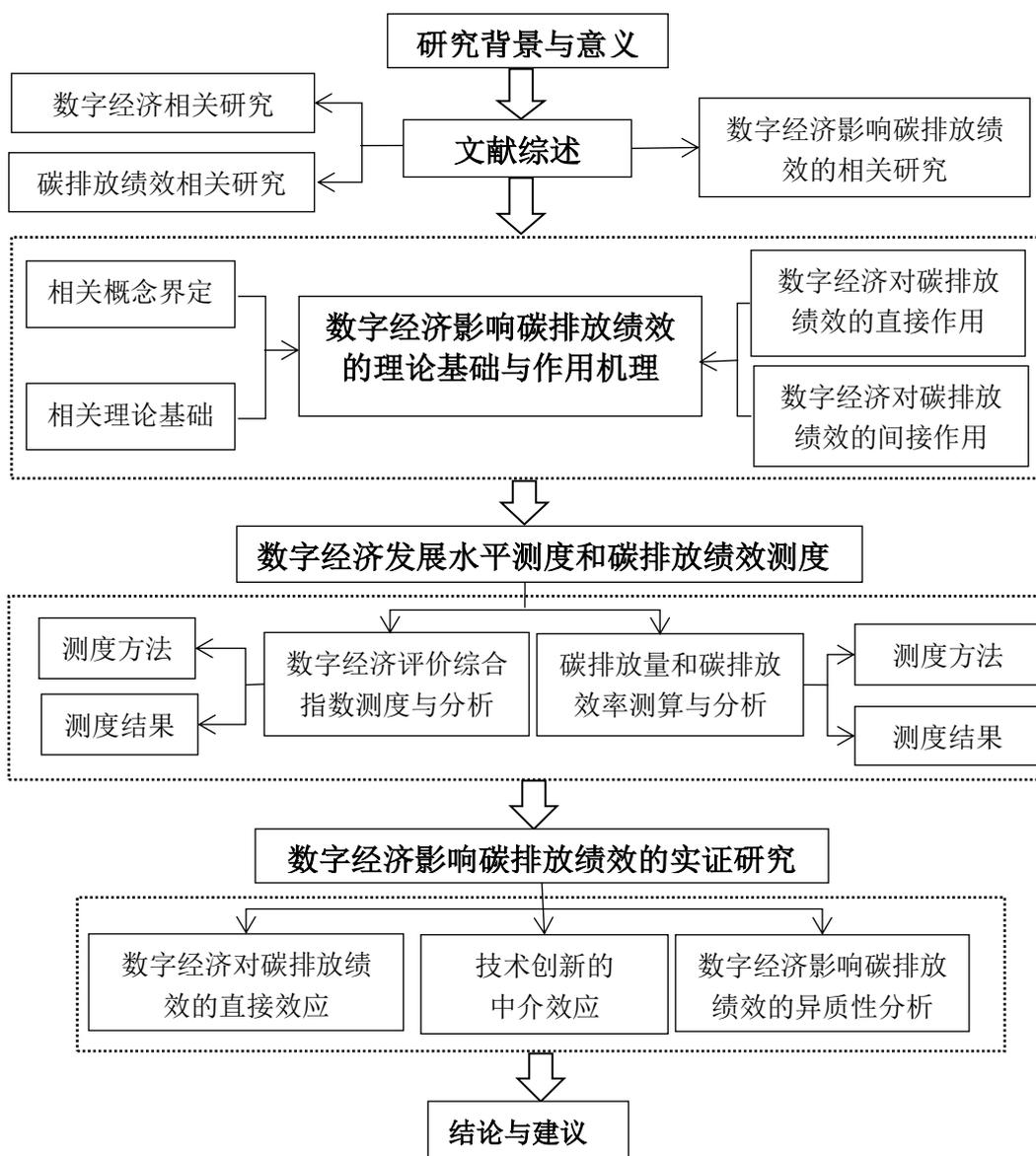


图 1.1 技术路线图

1.4 研究内容与创新之处

1.4.1 研究内容

本研究首先梳理了我国数字经济与碳排放绩效的概念及影响机制，随后利用 2011-2021 年 30 个省、直辖市和自治区数据，采用熵权 TOPSIS、碳排放系数法和超效率 SBM 模型分别测算了各地数字经济发展水平、碳排放量和碳排放效率，并分析了其现状。其次，通过构建面板数据模型和中介效应模型，探讨了数字经济对碳排放绩效的影响及作用路径。然后，还分析了数字经济对碳排放绩效的异质性影响。最后，总结研究结果并提出对策建议，以期为数字经济与碳排放绩效的可持续发展提供科学依据。

文章分为以下五个部分：

第一章 绪论。首先介绍研究的背景和意义，对国内外相关文献进行梳理，总结已有文献的研究成果，介绍数字经济的相关研究、碳排放绩效的相关研究以及数字经济影响碳排放绩效的相关研究，并介绍本文研究思路和研究方法。

第二章 数字经济与碳排放绩效的概念界定，相关理论基础以及作用机制。首先对数字经济和碳排放绩效的概念进行界定，其次在前人已有的研究基础上介绍数字经济和碳排放绩效相关的理论基础，最后分析了数字经济改善碳排放绩效的影响机理。

第三章 数字经济发展水平和碳排放绩效测度。其一，本文参考以往学者们的研究，构建了数字经济发展载体、数字产业化及产业数字化 3 个一级指标，29 个二级指标，全方位搭建数字经济评价综合指标体系，对全国 30 省、直辖市及自治区的数字经济发展水平进行测度。并从时序、区域方面进行对比分析；其二，基于政府间气候变化专门委员会提出的碳排放系数法（简称 IPCC 法）和超效率 SBM 模型分别测算中国 30 省、直辖市及自治区的碳排放量和碳排放效率，并分别从时序纵向和区域横向两个方面进行对比分析。

第四章 数字经济影响碳排放绩效的实证研究。以第三章测算出的碳排量、碳排放效率和数字经济发展水平为数据基础进行实证研究。构造基准回归模型以验证数字经济对碳排放绩效的影响效应，运用中介效应模型检验技术引进、模仿创新和自主创新在数字经济影响碳排放绩效过程中的传导作用。最后，将

样本按照地区（东、中、西部）和数字经济发展水平（高、低）进行分组，全面地分析数字经济对碳排放绩效的异质性影响。

第五章 结论与政策建议。从前文的理论研究和实证结果综合考量后，归纳整理出最终结论。基于结果，从数字经济发展的角度出发提出切实可行的建议，帮助我国改善碳排放绩效，进而促进我国经济绿色高质量发展。

1.4.2 论文主要创新之处

（1）现有研究通常仅侧重于使用单一指标，如碳排放量或碳排放效率，来评估碳排放绩效。相较之下，本文通过考虑碳减排和碳增效两个方面，对数字经济与碳排放绩效之间的内在逻辑关系进行探讨。这一研究拓展了数字经济对碳排放影响的研究。

（2）现有研究对于技术创新的影响通常作为整体来考虑，来探讨数字经济对碳排放绩效的影响途径，但对于技术创新的具体模式关注不足。本文针对此问题，实证检验技术引进、模仿创新和自主创新三种模式在数字经济改善碳排放绩效中的传导作用，进而揭示哪种创新模式对数字经济改善碳排放绩效的影响最为关键。

2 数字经济影响碳排放绩效的理论基础与作用机理

2.1 相关概念界定

2.1.1 数字经济

数字经济一词首次出现在 1994 年的牛津词典中，并在 1996 年由唐·泰普斯科特（Don Tapscott）在他的著作中得到了详细阐述。Tapscott 认为数字经济不仅是技术层面上的变革，更是一场重新构建经济关系和人际网络的革命。数字技术的发展不仅仅是单一产业或企业的革新，更是全球经济体系和社会结构的演变。2016 年 G20 峰会上对数字经济的定义，包括以下几个关键方面：①强调数字化的知识和信息是数字经济的关键生产要素。这包括了数字化的数据、信息和知识，使其成为推动经济活动的核心资源。②将现代信息网络视为数字经济的重要载体。这指的是互联网等先进信息网络，作为数字经济发展和运作的基础设施，促使信息的流通和共享。③将信息通信技术（ICT）的有效使用作为数字经济的推动力。④将数字经济看作是促进效率提升和经济结构优化的关键推动力。数字经济的发展不仅仅关乎新技术的采用，更关注通过数字化手段对经济体系进行优化和提升。这一定义体现了数字经济在中国国内的具体应用和发展方向，强调了数字技术在经济活动中的关键作用，以及数字化对经济结构和效率的全面影响。随后，学者们对数字经济的定义进行了更深入地阐述和探讨。裴长洪等（2018）认为数字经济是指在经济活动中数字技术和信息化手段的广泛应用，以推动经济发展和提升效益的经济形态。2021 年，《中国数字经济发展白皮书（2020 年）》提出了“四化”框架，其中包括数字产业化、产业数字化、数据价值化和数字化治理。这一框架强调了数字经济在不同层面的发展方向和特征。我国数字经济具有以下特征：①中国数字经济呈现出平台经济的特征，数字平台具有集聚资源、吸引用户的能力。②中国数字经济为培育独角兽企业提供了丰富的土壤，各个行业的创新和发展相互交织，推动了产业链上下游的共同成长。③中国数字经济的发展强调普惠性，即让更多的人参与、从中受益。④数字经济不仅通过技术的开放性促进创新，还强调产业之间、企业之间的协同合作。本文更加认同中国政府对数字经济提出的广义的概念界定，

数字经济正逐渐渗透到各行业、各领域，融合发展、协同发展才是数字经济发展的主要方向。本文借鉴已有文献对数字经济进行定义：数字经济以数字化信息（包括数据要素）为核心资源，依托互联网平台作为主要信息传播和交流媒介，以数字技术创新为主导力量，呈现出一系列新的商业模式和经济形态活动。

2.1.2 碳排放绩效

碳排放绩效的概念可以分为广义和狭义。广义的碳排放包括多种温室气体的排放，如二氧化碳、甲烷等。而狭义的碳排放主要指二氧化碳的排放，因其在大气中的含量最高而成为重点关注对象。碳排放绩效可被理解为社会经济活动在产生碳排放的同时所带来的积极成果。它实际上代表了人类在生产生活中消耗大气碳容量所能够带来的社会和经济效益（查建平，2014）。碳排放绩效主要由两个关键维度构成。首先是碳排放或者大气碳容量的消耗，这涉及到社会经济活动中释放的碳排放量，即生产过程中使用了多少大气碳容量。其次是碳排放所引发的产出，即在碳排放的基础上产生的经济或社会成果。学术界对于碳排放绩效的评估尚无一致标准，目前的文献主要从碳排放量（周衍平等，2023）、碳排放强度（任晓松等，2020）和碳排放效率（吴贤荣等，2014）三个方面评价碳排放绩效，且已有研究往往局限于单一考察碳排放总量或碳排放效率，为了更全面、系统地分析数字经济对碳排放绩效的影响及作用路径，本文提出了同时从碳排放量和碳排放效率两个维度综合评价碳排放绩效的方法。通过综合考虑碳排放总量和碳排放效率，可以更全面地评估数字经济对碳排放绩效的影响，揭示其对碳排放的实际贡献和效果。

2.2 相关理论基础

2.2.1 低碳经济理论

低碳经济理论是当代经济学领域中的重要理论之一，旨在应对气候变化和环境问题，实现经济的绿色和可持续发展。这一理论的核心目标是减少温室气体排放，通过市场机制、制度框架和政策创新来推动节能减排技术的研发和应用，从而推动人类社会经济向高效能、低资源耗费和低碳排放的模式转变（李

忠明等, 2010)。在低碳经济理论中, 环境专家鲁宾斯德指出了其核心特征和推动机制。这一经济模式不仅仅是一种技术革新, 更是一种全面的制度和政策变革, 旨在激励企业、社会 and 个体采用更为环保和可持续的经济活动方式。通过各种手段, 如市场激励、税收政策、补贴措施等, 鼓励人们采用能源效率更高、温室气体排放更少的技术和生产方式, 以实现环境保护和经济增长的双赢局面。低碳经济理论的实施涉及到政府、企业和个人等各方的参与和协同。政府在制定政策和法规方面发挥重要作用, 为低碳经济的发展提供法律保障和政策支持; 企业则需要技术创新、生产方式改进等方面积极参与, 提升自身的环保意识和能源利用效率; 而个人也可以通过改变生活方式、节约能源等方式来支持低碳经济的发展。

在低碳经济的背景下, 数字经济的崛起提供了释放创新活力和内在动力的机会, 推动了资源和能源效率的提升。随着数字经济政策和措施的实施, 社会各界逐渐以制度性导向为引领, 进行了自身发展方式和路径的深刻改革。在这一过程中, 各方积极响应数字经济相关政策, 充分利用数字技术的支持, 致力于优化生产和生活功能, 并努力改善碳排放绩效。这种转型以数字经济为驱动, 促进了社会结构的调整, 推动了碳排放绩效的改善, 为实现可持续发展和构建低碳经济做出了重要贡献。

2.2.2 网络外部性理论

网络外部性是源于外部性理论的概念, 是一种特定于网络结构的外部性表现。它强调了在一个网络中, 个体的行为不仅仅影响自身, 还对其他个体产生积极或消极的影响。George Gilder 提出梅特卡夫定律, 认为一个网络的价值与该网络的内节点数的平方是成正比的, 即网络的用户数量决定了其价值 (Gilder, 1993)。Katz 和 Shapiro (1985) 将网络效应分为直接和间接两种类型。直接网络效应强调消费者网络对产品价值的直接影响, 当更多的消费者使用某一产品或服务时, 直接网络效应会导致该产品或服务的价值对用户而言更高。间接网络效应是指一个人的消费决策对其他消费者的成本产生影响, 这种影响是通过产品的使用、采用或普及而非直接的交互作用产生的。一个人消费某种产品可能会影响到其他替代品和互补品的成本。如果某种产品被大量采用, 其替代品

的价格可能会受到影响。在这种情况下，产品的使用对相关市场中其他产品或服务的影响是通过间接途径实现的。数字经济所产生的网络外部效应，将深刻塑造当前社会经济的发展格局。首先数字经济打破了传统经济中信息不对称的壁垒。通过数字技术的应用，信息可以更快速、更广泛地传播，从而使市场参与者能够更充分地获取和利用信息，增强了市场的透明度和效率。这有助于减少信息不对称所带来的市场失灵问题，促进了市场的竞争性和效率。其次，数字经济增强了市场的竞争性和活力。随着网络用户数量的不断增加，用户所带来的信息规模和价值也在不断扩大。这意味着企业在数字经济环境下需要更加注重产品和服务的质量，以及创新能力，以吸引更多的用户。这种市场竞争的加剧有助于提升企业的创新水平和竞争力，推动整个产业的发展。最后，数字经济加剧了互联网资本的累积效应会加剧了市场的垄断化，这可能导致市场垄断和区域不公平竞争的问题，对于区域协调发展带来了挑战。就数字经济本身而言，随着数字经济的蓬勃发展，数字化产品和服务的生产、运营以及数据中心的运行等都需要大量的能源供应，这导致了对能源资源的高度需求和消耗，产生了一系列的负外部。

2.2.3 可持续发展理论

传统经济理论主要关注国内生产总值（GDP）和经济增长，将经济的繁荣作为主要目标。然而，这种发展模式忽视了资源的有限性和环境的容量，导致了自然资源过度开发和环境污染的问题。随着时间的推移，人们逐渐意识到必须在经济发展中考虑环境和社会的可持续性。莱切尔·卡逊在 1962 年出版的《寂静的春天》一书，揭示了杀虫剂对鸟类和生态环境的危害，从而引起了公众对环境问题的关注（Carson, 1962）。这本书被认为是现代环境运动的开端之一，为后来的环境保护活动奠定了基础。1987 年，世界环境与发展委员会发布了《我们共同的未来（1987）》，其中首次提出了可持续发展的概念。这一概念强调了满足当前世代的需求，同时不损害满足未来世代需求的能力，也为后来的可持续发展议程奠定了基础，并成为国际社会在处理气候变化、生态保护和社会公正等问题时的指导性框架。可持续发展理论的核心概念是综合性的发展。在经济方面，可持续发展追求的是经济增长的质量和速度的平衡，强调产业结

构的升级和技术创新，以实现资源的高效利用和降低对环境的影响。在环境方面，可持续发展注重生态系统的健康和生物多样性的保护，倡导低碳、循环和生态友好型的生产和消费方式。可持续发展强调经济增长和环境保护之间的平衡。数字经济的发展在一定程度上可以促进经济增长，同时也为实现环境保护提供了新的途径。通过数字化技术的应用，可以提高资源利用效率、降低能源消耗，从而减少对环境的负面影响，实现经济增长与环境保护的良性循环。

2.3 数字经济对碳排放的影响机理分析

数字经济作为一种新型经济形态，对现代社会产生了深远影响。随着数字经济的蓬勃发展，引发了对原有生产生活模式的深刻变革，同时也为碳交易市场的改善提供了新的思路和方法。数字经济的关键要素是数据信息，数据被视为一种宝贵的资源。数字经济以数字技术为核心动力，包括人工智能、大数据、物联网等在内的数字技术不断发展和应用，推动了生产方式的变革，促进了经济的增长。互联网和其他现代化信息网络的普及和发展，为数字经济提供了强大的基础设施和交流平台，促进了信息的传播和共享，推动了经济的全球化和融合。此外，数字经济的特征还包括数字化、智能化、网络化和平台化。数字化意味着传统业务和服务正在向数字化转型，智能化强调技术的智能化和自动化程度，网络化和平台化则体现在数字经济中各种业务和活动的网络化和平台化程度的提高。数字经济的发展为改善碳排放绩效提供了新的思路和方法。

2.3.1 数字经济对碳排放绩效的直接作用

数字经济对行业数字化的起至关重要的作用，能够使企业提高能源利用效率、优化产业结构、降低资源浪费，从而实现节能减排。一方面，数字技术运用到碳排放量高的行业中，企业可以优化生产流程，提高生产效率和降低能源消耗，通过数字化转型，企业可以采用更加清洁、高效的生产技术和设备。同时，数字技术也为企业提供了新的业务增长点和盈利模式，帮助企业实现产业结构的优化和升级（VAISMAN 等，2018），从而减少碳排放。另一方面，数字经济的发展为加速非碳能源的开发与应用提供了新的机遇和动力，数字技术促使可再生能源（如太阳能、风能）的大规模应用。数字化的能源系统可以更

好地整合这些可再生能源，提高发电端的清洁能源占比，减少对化石燃料的依赖，数字经济还可以推动智能电网的建设，使得电力系统更加灵活、智能。这有助于提高电网效率，减少能源在传输过程中的损耗，从而降低碳排放。其次，数字经济的蓬勃发展为城市可持续发展提供了丰富的智能化解决方案。通过智能能源管理系统、智能交通系统、智能垃圾分类与回收、数字化环境监测与治理以及数字化社区服务等措施，数字经济引导居民践行低碳生活，有效降低能源消耗和碳排放。最后，数字经济的发展为碳交易市场注入了更多智能化和数字化元素，推动碳资产管理与服务变得更加高效和精确。通过数字技术的应用，碳交易市场可以实现交易过程的自动化和智能化，提高交易的效率和便捷程度。同时，数字经济还支持碳资产的精准管理和服务，包括碳排放数据的实时监测和分析、碳资产投资组合的优化配置、碳市场趋势的预测分析等，为企业和机构提供全方位的碳管理解决方案，推动低碳经济的发展。

数字化和智能化技术作为低碳转型的重要推动力，在改善碳排放绩效方面具有显著的效率和成本优势。数字经济通过降低碳排放强度、提高碳排放效率，发挥着重要作用。

数字经济的发展推动传统生产要素向数据要素的转变（缪陆军等，2022），促进生产方式和生产关系的升级，可以减少对高污染以及高耗能资源使用（刘强等，2022），同时也能够提升资源配置效率和能源利用效率，从而降低碳排放强度。这种技术创新和生产方式的转变，不仅降低了企业的生产成本，还对环境产生了积极影响。

数字经济通过溢出效应和示范效应，激励企业进行绿色技术创新，进而提高碳排放绩效和经济运行效率。通过数字经济平台和网络，企业可以更容易地获取和分享绿色技术和创新成果，促进了绿色技术的快速传播和应用。这种技术创新和信息共享，不仅有利于企业提高竞争力，还有助于整个产业链的碳排放管理和减排。

综上所述，数字经济在降低碳排放量、提高碳排放效率方面发挥着重要作用。通过数字化和智能化技术的应用，企业可以实现生产方式的转型升级，提高资源和能源的利用效率，进而有效降低碳排放水平。同时，数字经济的发展也激励了绿色技术创新和信息共享，促进了碳排放绩效的改善和经济运行效率

的提高。因此，基于上述分析，本文提出如下假设：

H1：数字经济将通过降低碳排放量、提高碳排放效率，从而改善碳排放绩效。

2.3.2 数字经济对碳排放绩效的间接作用

技术创新在降低碳排放量和提高碳排放效率方面发挥着关键作用。数字经济的共享性和渗透性等特征进一步增强了这一趋势。技术创新通过引入新的、更为环保的技术和方法，有助于改进能源利用技术，实现碳排放量的降低和效率的提高。数字技术作为一种技术创新，对于推动经济的创新驱动型发展具有重要意义。它的优势在于更快速、更准确地识别市场需求，缩短了创新周期，降低了创新风险，从而推动了经济的持续增长和进步。技术创新在提升碳排放绩效过程中发挥着关键作用，具体表现在：创新技术的引入有助于推动新型材料、清洁能源和高效工艺的研发和广泛应用，从而降低碳排放、提高碳排放效率，促使传统产业向更为环保的新兴产业转变（AHMED 等，2022）。本文根据创新的自主程度，将技术创新可以分为三种模式：技术引进、模仿创新和自主创新。不同的技术创新模式有着不同的特点，数字经济对碳排放绩效的影响也会因不同的模式而异。

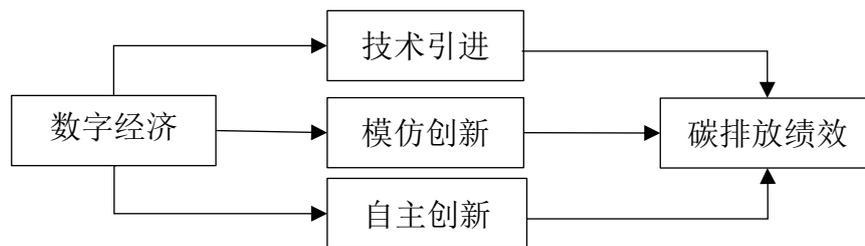


图 2.1 数字经济影响碳排放的作用路径

技术引进特指通过直接购买国外的技术和设备，是一种迅速解决技术缺失的有效途径。这一模式注重实际问题的解决，通过引进先进技术，可以在短期内显著提升生产效率、改善产品质量，从而对东道国的碳排放产生直观而明显的影响（HAO 等，2021）。通过购买先进的生产工艺和设备，企业能够快速实现生产方式的转型，减少能源浪费，优化资源利用，降低碳排放水平。这种直

接引进技术的方式在短期内可见效，对于促进产业升级、提高企业竞争力，以及推动碳排放降低方面具有显著的实用性和效益。然而，技术引进模式存在一些不利因素，首先，这种模式可能对本土创新意识和创新氛围的培养造成不利影响。由于技术引进主要关注解决当下的问题，企业可能缺乏对本土研发和创新的长远投入，导致创新能力的相对弱化。其次，企业在引进技术时往往更加关注经济效益，而对环境效益的考虑相对较少。这可能导致引进的技术并不一定是低碳环保的选择，而更注重短期内的成本效益。这在一定程度上可能影响企业的可持续发展战略，对环境保护产生负面影响。

模仿创新是指东道国在引进技术的基础上，学习和再创造的过程，东道国根据自身创新需求进行技术的适应、调整和改进。在这个过程中，东道国通过模仿技术提供国的先进技术，逐步发展出符合自身环境和条件的创新解决方案。模仿创新对碳排放的影响主要在于技术引进和应用阶段的多层次影响。通过引入先进技术，东道国在模仿创新的过程中不仅仅学习技术，更着重于适应性调整，根据本土环境和资源条件进行改造。这有望提升资源利用效率，降低能源和原材料的浪费，从而减少碳排放。模仿创新还推动清洁生产理念的普及，促使企业采用更环保的生产方式，为碳排放减缓创造有利条件。通过积累创新经验和技術能力，模仿创新有望推动技术的演进，形成更为先进、低碳的产业体系。此外，面对国际环保压力，通过模仿创新，东道国能更好地响应全球环保标准，提升国际声誉。因此，有效的模仿创新有望在减缓碳排放、促进可持续发展方面发挥积极作用。

自主创新是指一个国家、企业或个体在科技和经济领域内，依靠自身的研发能力和创新动力，独立开展创新活动并推动技术、产品或服务的发展。在自主创新过程中，主体不依赖外部技术引进，而是通过内部研发、知识创新、实验和试错等方式，自主地创造和推动新的科技成果。自主创新在碳排放绩效方面发挥着关键作用。通过引入清洁技术和绿色创新，企业能够提高生产效率，同时也可以降低能源消耗，从而改善碳排放绩效。此外，自主创新有助于提高资源利用效率，减少不必要的资源浪费，推动清洁生产理念的普及，形成更为环保的生产方式。数字化和智能化技术的应用进一步提高了生产效率，优化了供应链和物流，对碳排放绩效产生积极影响。强化企业创新能力使其更具竞争

力，在应对碳排放压力时更容易采用低碳、环保的技术和生产方式。最终，自主创新有助于形成创新驱动的生态系统，推动整个产业链向更为环保和低碳的方向发展。基于上述分析，本文提出如下假设：

H2：数字经济发展通过技术引进、模仿创新和自主创新来改善碳排放绩效，但三种新模式的作用效果可能存在差异。

3 数字经济发展水平和碳排放的测度与分析

3.1 数字经济发展水平测度及分析

3.1.1 测算方法

为了测度数字经济发展水平，首先需要对搜集到的反映其发展水平的数据进行标准化处理，以确保各项指标具有可比性。在确定权重的过程中，权衡了主观和客观赋权方法。由于数字经济相关数据的权重确定几乎不包含主观因素，因此选择了客观赋权法。客观赋权法包括多种方法，如主成分分析法和熵值法。客观赋权方法更具有普适性和稳定性，能够有效避免评估者个人偏好和主观意识对评估结果的影响，从而使评估结果更为客观和可信。本文选择熵权 TOPSIS 法作为评估数字经济发展水平的方法。熵权 TOPSIS 法通过计算数据的信息熵来客观地确定各个指标的权重，反映了数据所包含的信息量大小。这种方法能够降低主观干扰，提高评估结果的客观性和可靠性。通过熵权 TOPSIS 法，可以更加科学地分析各项指标在数字经济发展中的重要程度，从而更准确地评估数字经济的发展水平。

(1) 构造原始矩阵：对于存在 m 个指标， n 个样本的数据来说，我们先构造一个数据的原始矩阵，令 $j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n$ ，构造公式 3.1 所示原始矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中， X_{ij} 是第 i 年第 j 个指标。对于一个指标来讲，如果 X_j 的样本数据具有一定的离散性，则该项指标在指标体系中起到的作用就越大，如果该指标的值几乎都是相等的，则说明该项指标在指标体系中所起到的作用十分有限。

(2) 无量纲化处理：为了消除因指标数值单位造成的影响，使指标数值之间具有可比性，则应当对数据进行无量纲化处理，同时为了避免在无量纲化处理时出现 0 值，则在处理后的数据加上 0.0001，最终得出无量纲化处理的数据矩阵 X' ，下面介绍 X' 的计算方法。

对于正向指标而言， X' 的元素 X'_{ij} 的计算，如公式（3.2）所示

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} + 0.0001 \quad (3.2)$$

对于负向指标而言， X' 的元素 X'_{ij} 的计算，如公式（3.3）所示

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} + 0.0001 \quad (3.3)$$

（3）计算指标比重矩阵：在进行过无量纲化处理过后，求出具体一个指标每个样本数据所占的比重大小，所求得的指标比重矩阵 P 的元素 P_{ij} ，如公式（3.4）所示：

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (3.4)$$

（4）计算各指标的熵值：利用所计算的指标比重矩阵，计算每一个指标的熵值 e_j ，如公式（3.5）所示。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3.5)$$

（5）计算出指标的差异系数：指标差异系数 g_j ，如公式（3.6）所示。

$$g_j = 1 - e_j \quad (3.6)$$

（6）计算指标权重：根据所得的指标差异系数，计算出指标的权重 w_j 如公式（3.7）所示。

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (3.7)$$

（7）计算各指标加权标准化矩阵：通过已知的指标权重来计算出加权标准化矩阵 R_{ij} 如公式（3.8）所示。

$$R_{ij} = \sum_{j=1}^m w_j X'_{ij} \quad (3.8)$$

（8）矩阵标准化：得出矩阵标准化矩阵 Z 。

$$Z_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x'_{ij}{}^2}} \quad (3.9)$$

（9）确定最优方案和最劣方案：

最优方案 Z^+ 为： $Z^+ = \{\max(Z_{i1}), \max(Z_{i2}), \dots, \max(Z_{im})\}$

最劣方案 Z^- 为： $Z^- = \{\min(Z_{i1}), \min(Z_{i2}), \dots, \min(Z_{im})\}$

(10) 计算出每个评价对象与 Z^+ 和 Z^- 的距离 D_i^+ 和 D_i^- ：

$$\text{指标与最优方案的距离 } D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^+ - Z_{ij})^2}$$

$$\text{指标与最优方案的距离 } D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (Z_j^- - Z_{ij})^2}$$

(11) 计算所得的评价指数 C_i ，具体计算方式如公式 (3.10) 所示：

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (3.10)$$

其中 C_i 的取值范围为(0,1)， C_i 的值越接近于 1，评价对象越优。

3.1.2 指标体系构建

数字经济的发展是一个复杂而多元的过程，受到多个方面因素的影响。其中，数字经济发展载体、产业数字化和数字产业化是至关重要的因素。因此，对于数字经济发展水平的测度，应着眼于综合考虑数字经济的方方面面，既要注重数字经济的发展过程，又要注重数字经济的发展结果，还要注重数字经济发展的条件、应用与环境。基础设施是数字经济发展的基石。通信网络、数据中心等基础设施为数字化生产、交流和存储提供了必要的支持和平台。良好的基础设施能够提高数字化服务的可及性、效率和安全性，为数字经济的发展创造了良好的条件。产业数字化是数字经济发展的主要推动力量。传统产业采用数字技术进行转型升级，实现生产方式、管理模式和市场交易的数字化，从而提高生产效率、降低成本、优化资源配置。数字产业化为经济发展带来了新的增长点和动力，推动了传统产业的转型升级，同时也培育了新的产业形态和业态，促进了经济结构的优化和升级。

数字经济发展载体是数字经济蓬勃发展的关键前提，数字经济的发展依赖于一系列数字化技术和基础设施作为其载体，互联网作为数字经济的基础设施发挥着至关重要的作用，它提供了信息传输、交流和共享的平台，极大地促进了数字经济的发展。互联网是一个全球性的信息传输网络，通过互联网，用户可以实现跨地域、跨国界的信息传输。信息传输是数字经济运作的基础，它使得各种形式的数据和信息能够快速、便捷地在不同地点之间传递。这种高效的信息传输为企业、政府、个人提供了及时获取信息、快速响应市场的能力，推动了数字经济的发展。互联网更是一个信息交流的平台。用户可以借助互联网

以电子邮件、社交媒体、在线论坛等多种方式进行信息交流和互动。信息交流的便捷性和实时性促进了各种形式的合作和协同，推动了数字经济中的创新活动 and 价值创造。

数字产业化的推进是数字经济发展的推动力之一。数字产业化是指将数字技术应用于传统产业，推动产业实现数字化、智能化和信息化转型的过程。数字产业化涵盖了制造业、服务业、农业等各个领域。通过引入数字化技术，传统产业可以提高生产效率、优化资源配置、改善产品和服务质量，从而增强竞争力和创新能力。例如，制造业可以通过工业互联网实现设备的远程监控和智能化管理；服务业可以利用大数据和人工智能提升客户体验和个性化服务；农业可以借助物联网和智能传感器实现精准农业和智能化种植。数字产业化的推进有助于实现产业结构的优化升级，推动经济转型升级。

产业数字化是数字经济发展的具体表现之一。产业数字化是指整个产业链上的各个环节实现数字化、信息化和智能化。与数字产业化不同，产业数字化更侧重于产业链上下游各个环节的数字化程度和协同效应。产业数字化涉及到供应链、生产制造、营销销售、物流配送等多个方面。通过产业数字化，企业可以实现生产过程的数字化管理和智能化控制，提高生产效率和产品质量；供应链的数字化可以实现供需信息的实时交换和协同，降低库存成本和交易成本；营销销售的数字化可以实现精准营销和个性化服务，提升市场竞争力。产业数字化的推进有助于构建数字化产业生态系统，促进产业协同发展和价值链优化升级。具体指标如表 3.1 所示

表 3.1 数字经济指标体系

一级指标	二级指标	单位	属性	权重
数字经济 发展载体	互联网宽带接入端口数	万个	正向	0.023
	互联网宽带接入用户数	万户	正向	0.024
	域名数	万个	正向	0.051
	网页数	万个	正向	0.083
	IPV4 地址数	万个	正向	0.050
	长途光缆线路长度	公里	正向	0.014
	移动电话基站	万个	正向	0.023

续表 3.1 数字经济指标体系

一级指标	二级指标	单位	属性	权重
数字产业化	每百人移动电话用户数	户/百人	正向	0.009
	电信业务总量	亿元	正向	0.046
	软件业务收入	亿元	正向	0.069
	信息技术服务收入	亿元	正向	0.072
	电子信息制造业企业数量	个	正向	0.071
	信息传输、软件和信息技术服务业职工人数	万人	正向	0.042
产业数字化	电子商务销售额	亿元	正向	0.053
	开通互联网宽带业务的行政村所占比重	%	正向	0.002
	已通邮的行政村所占比重	%	正向	0.001
	农村宽带接入用户数	万户	正向	0.037
	农村电话年末用户数	万户	正向	0.036
	农林牧渔业增加值	亿元	正向	0.021
	农村用电量	亿万千瓦·时	正向	0.050
	工业增加值	亿元	正向	0.028
	国家专利申请授权量与规模以上工业企业 R&D 人员全时当量的比值	%	正向	0.024
	规模以上工业企业新产品销售收入占工业企业主营业务收入的比重	%	正向	0.014
	有电子商务交易活动企业比重	%	正向	0.012
	快递量	万件	正向	0.087
	企业拥有网站数	个	正向	0.034
	数字普惠金融指数	/	正向	0.026

3.1.3 测算结果及分析

表 3.2 是基于上述方法，各省市 2011 至 2021 年期间的数字经济水平综合得分的测算结果。

表 3.2 2011-2021 年省域数字经济发展水平

地区	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值	
东部地区	广东	0.262	0.291	0.323	0.351	0.379	0.414	0.454	0.525	0.601	0.649	0.631	0.444
	北京	0.223	0.248	0.264	0.294	0.341	0.358	0.381	0.406	0.444	0.473	0.513	0.359
	江苏	0.256	0.277	0.301	0.306	0.326	0.339	0.357	0.386	0.416	0.446	0.422	0.348
	浙江	0.201	0.226	0.232	0.235	0.263	0.285	0.304	0.338	0.382	0.425	0.430	0.302
	山东	0.183	0.193	0.222	0.216	0.225	0.242	0.259	0.285	0.304	0.326	0.335	0.254
	上海	0.121	0.139	0.165	0.188	0.203	0.223	0.234	0.252	0.277	0.301	0.313	0.220
	福建	0.113	0.126	0.135	0.146	0.165	0.200	0.254	0.250	0.260	0.233	0.240	0.193
	河北	0.120	0.127	0.139	0.143	0.153	0.169	0.183	0.200	0.224	0.245	0.243	0.177
	辽宁	0.117	0.123	0.136	0.144	0.148	0.147	0.154	0.158	0.168	0.178	0.176	0.150
	天津	0.088	0.096	0.104	0.102	0.120	0.123	0.133	0.141	0.152	0.164	0.175	0.127
	海南	0.064	0.074	0.088	0.099	0.120	0.125	0.126	0.137	0.156	0.197	0.211	0.127
中部地区	河南	0.129	0.137	0.145	0.153	0.171	0.182	0.196	0.224	0.251	0.279	0.260	0.193
	安徽	0.119	0.119	0.121	0.130	0.147	0.155	0.168	0.190	0.214	0.232	0.232	0.166
	湖北	0.104	0.115	0.124	0.133	0.150	0.159	0.168	0.186	0.211	0.222	0.226	0.163
	湖南	0.106	0.115	0.124	0.129	0.145	0.156	0.168	0.182	0.211	0.229	0.222	0.163
	江西	0.081	0.088	0.095	0.104	0.123	0.127	0.137	0.153	0.172	0.185	0.186	0.132
	地区	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	均值
	黑龙江	0.084	0.093	0.105	0.111	0.121	0.123	0.133	0.145	0.151	0.163	0.173	0.127
西部地区	山西	0.080	0.086	0.096	0.095	0.106	0.113	0.121	0.134	0.144	0.156	0.157	0.117
	吉林	0.079	0.083	0.088	0.095	0.106	0.110	0.119	0.133	0.143	0.156	0.156	0.115
	四川	0.117	0.124	0.136	0.147	0.179	0.200	0.220	0.248	0.293	0.322	0.314	0.209
	重庆	0.100	0.103	0.111	0.121	0.138	0.145	0.159	0.167	0.180	0.198	0.199	0.147
	陕西	0.080	0.087	0.097	0.102	0.122	0.137	0.143	0.160	0.179	0.193	0.195	0.136
	广西	0.081	0.086	0.096	0.102	0.117	0.125	0.134	0.153	0.172	0.196	0.188	0.132
	云南	0.077	0.082	0.094	0.101	0.120	0.132	0.136	0.151	0.168	0.190	0.178	0.130
	新疆	0.077	0.085	0.098	0.102	0.120	0.117	0.128	0.141	0.155	0.178	0.173	0.125
	内蒙	0.081	0.089	0.097	0.108	0.121	0.124	0.135	0.141	0.150	0.155	0.163	0.124
	贵州	0.060	0.068	0.080	0.096	0.113	0.121	0.127	0.141	0.160	0.178	0.175	0.120
甘肃	0.060	0.067	0.075	0.086	0.098	0.106	0.116	0.137	0.146	0.165	0.159	0.110	
青海	0.049	0.059	0.068	0.082	0.105	0.107	0.113	0.141	0.126	0.163	0.189	0.109	
宁夏	0.058	0.074	0.076	0.089	0.100	0.101	0.110	0.119	0.119	0.125	0.133	0.100	

(1) 全国和东、中、西地区数字经济发展水平的变化趋势

图 3.1 显示了 2011—2021 年间中国数字经济发展水平的变化趋势。中国的数字经济发展水平在这段时间内处于 0.1124 到 0.2456 之间，显示出了数字经济发展水平相对较低的情况。然而，整体趋势呈现出稳步上升的趋势，从 2011 年的 0.1124 增长至 2020 年的 0.2456，增长了约 1.186 倍。这表明中国的数字经济在过去十年中取得了显著的发展进步。此外，东部、中部和西部地区的数字经济发展水平都呈现出了向好的趋势。这可能反映了政府在全国范围内推动数字经济发展的政策措施的有效实施，以及各地区在数字化转型和创新发展方面的努力取得了成果。从整体情况来看，本文测度的数字经济水平较其他相关文献测度的水平稍低，这是因为多数文献产业数字化指标涉及的是第三产业，而本文产业数字化指标涵盖了三大产业，这样测得的数字经济发展水平更为科学。

从地区的角度来看，东部地区的数字经济发展水平超过了全国平均水平，也高于其他两个地区。东部地区的综合指数介于 0.1589 到 0.3353 之间，显示出较高的数字经济发展水平。这可能与东部地区相对发达的经济基础、先进的信息技术产业以及良好的创新环境密不可分。相比之下，虽然中部地区的数字经济发展水平平均低于全国平均水平和东部地区，但还是高于西部地区。中部地区的综合指数位于 0.0980 到 0.2015 之间，表明数字经济水平得到了一定的发展。这可能受到中部地区产业结构转型和数字化程度提升的影响，尽管相对于东部地区还存在一定差距。而西部地区的数字经济发展水平相对较低，与东部地区相比存在明显差距。这表明西部地区的数字经济基础薄弱，数字化转型和创新能力相对不足。总体而言，当前我国数字经济发展水平在不同地区存在较大差距，呈现出明显的两极分化特征。这意味着需要进一步加强对中西部地区数字经济发展的支持和引导，促进数字经济的均衡发展，缩小地区之间的数字发展差距，实现数字经济的全面发展和共享。

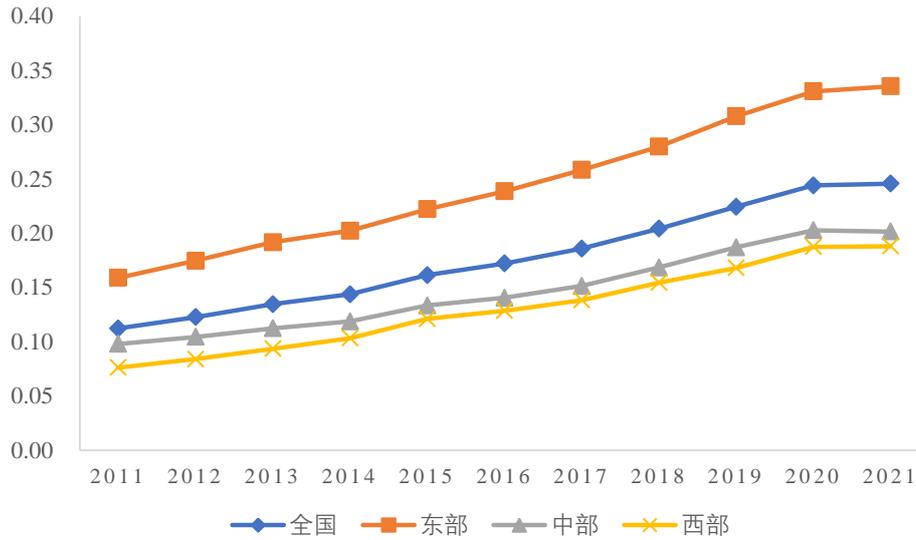


图 3.1 全国及三大地区数字经济发展水平变化趋势

(2) 省域数字经济发展水平分析

根据表 3.3 中列出的 2021 年我国 30 个省份的数字经济发展水平及排名情况，我们可以观察到各省份之间存在着显著的数字经济发展水平差异。这些数字经济综合指数的范围在 0.1335 到 0.6311 之间，表明数字经济在不同省份的发展水平存在较大差异。为了更好地理解这些差异，本文参考魏敏和李书昊（2018）的研究方法，将各省份分为四种类型：领先型、落后型、进步型和追赶型。具体来说，根据均值（E）为 0.2456，标准差（SD）为 0.1143，按照以下划分标准：领先型省份是指数字经济综合指数大于等于均值加上 0.5 倍标准差的省份，即大于等于 0.3027 的省份；落后型省份是指数字经济综合指数小于均值减去 0.5 倍标准差的省份，即小于 0.1885 的省份；进步型省份是指数字经济综合指数介于均值和均值加上 0.5 倍标准差之间的省份，即大于等于 0.2456 且小于 0.3027 的省份；追赶型省份是指数字经济综合指数介于均值减去 0.5 倍标准差和均值之间的省份，即大于等于 0.1885 且小于 0.2456 的省份。四种类型省份的区域分布见表 3.4。

表 3.3 2021 年各省份数字经济发展水平及排名

排名	省份	数字经济 发展水平	排名	省份	数字经济 发展水平
1	广东	0.6311	17	青海	0.1893
2	北京	0.5126	18	广西	0.1882
3	浙江	0.4300	19	江西	0.1859
4	江苏	0.4218	20	云南	0.1776
5	山东	0.3347	21	辽宁	0.1761
6	四川	0.3136	22	天津	0.1754
7	上海	0.3132	23	贵州	0.1753
8	河南	0.2600	24	新疆	0.1733
9	河北	0.2427	25	黑龙江	0.1729
10	福建	0.2397	26	内蒙	0.1634
11	安徽	0.2321	27	甘肃	0.1589
12	湖北	0.2258	28	山西	0.1573
13	湖南	0.2225	29	吉林	0.1558
14	海南	0.2108	30	宁夏	0.1335
15	重庆	0.1994	均值(E)	0.2456	
16	陕西	0.1951	标准差(SD)	0.1143	

根据数字经济综合指数达到 0.3027 及以上的标准，有 7 个领先型省份。按照数字经济发展水平从高到低的顺序，这些省份分别是广东、北京、浙江、江苏、山东、四川和上海。这些领先型省份在数字经济发展方面取得了显著的成就，彰显了在追求数字化转型的道路上所取得的突出成绩。特别地，广东省在这七个领先型省份中处于绝对的领先地位。广东省作为中国经济最为活跃、经济总量最大的省份之一，其强大的经济实力、先进的信息技术产业以及良好的创新环境为广东省在数字经济领域的发展提供了坚实的基础。只有河南省的数字经济发展水平达到了进步型水平，即综合指数介于 0.2456 到 0.3027 之间。这表明河南省在数字化转型过程中注重了数字经济的发展，取得了一定的成绩。尽管河南省的数字经济发展水平相对较高，但仍存在一定的上升空间。这意味着河南省在数字经济领域还有进一步提升的潜力和机会。数字经济发展水平大于等于 0.1885 且小于 0.2456 的追赶型省份有 9 个，按照数字经济发展水平从高

到低的排列顺序，分别是河北、福建、安徽、湖北、湖南、海南、重庆、陕西和青海，这些追赶型省份的数字经济发展水平处于均值以下，这表明它们相对于全国平均水平还有一定的差距。这些省份在数字经济发展方面的重视程度可能不够，需要加大对数字化转型的投入和支持。除了领先型、进步型和追赶型省份外，还有 13 个省份属于落后型，这些省份的数字经济发展水平都在 0.1885 以下，可能是这些省份不够重视数字化的发展，与其他省份相比存在较大的差距，但也意味着它们有着巨大的提升空间。在当前新时期，这些数字经济水平相对滞后的省份，需要加强对数字化转型的重视，着力提升数字经济发展水平。

表 3.4 四种类型省份的区域分布

类型	东部地区	中部地区	西部地区
领先型	广东、北京、浙江、江苏、山东、上海		四川
进步型		河南	
追赶型	河北、福建、海南	安徽、湖北、湖南	重庆、陕西、青海
落后型	辽宁、天津	江西、山西、吉林、黑龙江、	内蒙、广西、云南、贵州、新疆、甘肃、宁夏

3.2 碳排放绩效测度及分析

3.2.1 碳排放量测算方法

计算二氧化碳排放量之前，通常需要对各种能源的消费量进行统一，这样可以方便地将不同能源的消费量转化为同一单位，从而进行后续的计算。通常，使用折标准煤系数来对各种能源的消费量进行折算是一种常见的做法。折标准煤系数是一种把各种能源的消费量统一折算为标准煤消耗量的系数，以便于比较和计算。碳排放系数法是目前公认度最高，应用最广泛的一种测量碳排放量的方法，因此本文采取该方法对我国碳排放量进行测算，碳排放系数由《IPCC 国家温室气体清单 2006》获得，本文采用的能源消费种类包括原煤、焦炭、原油、汽油、燃料油、柴油、煤油、天然气。具体表达式如下：

$$EC = \sum EC_i * j_i \quad (3.11)$$

$$CO_2 = a_i * EC_i \quad (3.12)$$

其中， EC 为能源消费总量， EC_i 为第*i*种能源的能源消费量， j_i 为第*i*种能源的折标准煤系数， CO_2 为二氧化碳排放总量， a_i 为第*i*种能源的二氧化碳系数。表 3.5 为各类能源二氧化碳排放系数表。

表 3.5 各种能源二氧化碳排放系数

能源名称	平均低位发 热量 (KJ/KG)	折标准煤系数 (KGCE/KG)	单位热值含 碳量(吨碳 /TJ)	碳化率	二氧化碳排放系 数(KG-CO2/KG)
原煤	20908	0.7143	26.37	0.94	1.9003
焦炭	28435	0.9714	29.5	0.93	2.8604
原油	41816	1.4286	20.1	0.98	3.0202
汽油	43070	1.4714	18.9	0.98	2.9251
煤油	43070	1.4714	19.5	0.98	3.0179
柴油	42652	1.4571	20.2	0.98	3.0959
燃料油	41816	1.4286	21.1	0.98	3.1705
天然气	398931	1.3300	15.3	0.99	2.1622

- 注：1. 平均低位发热量以及折标准煤系数数据来源于《综合能耗计算通则》
 2. 单位热值含碳量以及碳化率数据来源于《省级温室气体清单编制指南》
 3. 二氧化碳系数=平均低位发热量*单位热值含碳量*碳化率*3.6667

3.2.2 碳排放量测算结果及分析

(1) 全国碳排放量情况

根据图 3.2 的数据显示，在 2011 年至 2021 年期间，我国的碳排放总量呈现了整体增长的趋势，年均增长率约为 2.07%。尽管我国经济发展已经进入高质量发展阶段，但仍受到工业化和城市化进程的影响，依然存在对能源资源的较大依赖，导致碳排放量依旧处于增长状态。要实现碳排放的有效控制和减少，需要投入更多的资源和资金，加快绿色低碳技术的研究和开发，提高能源利用效率，降低碳排放；需要调整产业结构，优化资源配置，促进绿色产业和环保产业的发展，减少高碳排放产业的比重，实现经济结构的绿色转型；需要大力发展清洁能源，包括风能、太阳能、水能等可再生能源，以及核能等清洁高效

能源，减少对化石能源的依赖，降低碳排放。

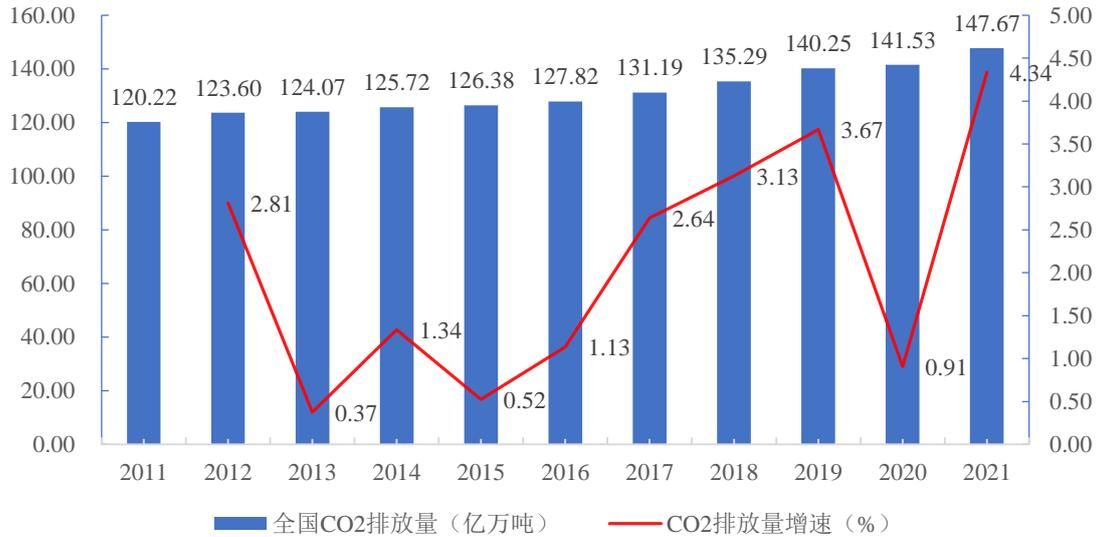


图 3.2 2011—2021 年中国 CO2 排放量及增速

(2) 三大区域碳排放量

综合来看，除了西部地区在 2015 年下降外，全国三大区域碳排放量基本呈上升趋势，但增长速度有所放缓，东部地区的碳排放量是高于全国的水平，而西部地区的碳排放量则低于全国平均水平，中部地区则基本持平。这种区域差异是由各地区经济发展水平和产业结构的差异所导致的。东部地区通常是国家经济的核心，拥有发达的工业基础。因此在重工业领域有较高的能耗和碳排放。相比之下，中部地区经济可能相对发展较慢，工业结构可能相对简单，但随着工业化和城市化的推进，碳排放水平可能逐渐增加。至于西部地区，尽管富含资源，但经济相对滞后，工业活动相对较低，因此可能具有较低的碳排放水平。

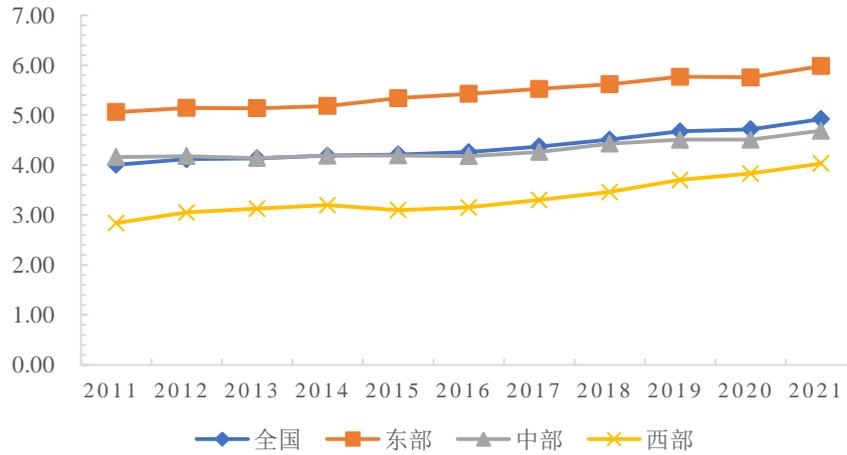


图 3.3 全国及三大区域 CO2 排放量

(3) 省域碳排放量

根据图 3.4 的数据显示, 从 2011 年到 2021 年, 中国各省市的碳排放量总体呈现出正向增长的趋势。其中, 新疆、宁夏、山西和内蒙古的碳排放量增长率居前, 分别为 8.29%、7.28%、4.85%和 4.11%。另外, 还有少数省市的碳排放量呈现小幅下降的趋势, 例如北京、河南、吉林、重庆、湖南、湖北、四川、上海、天津和河北等地区。

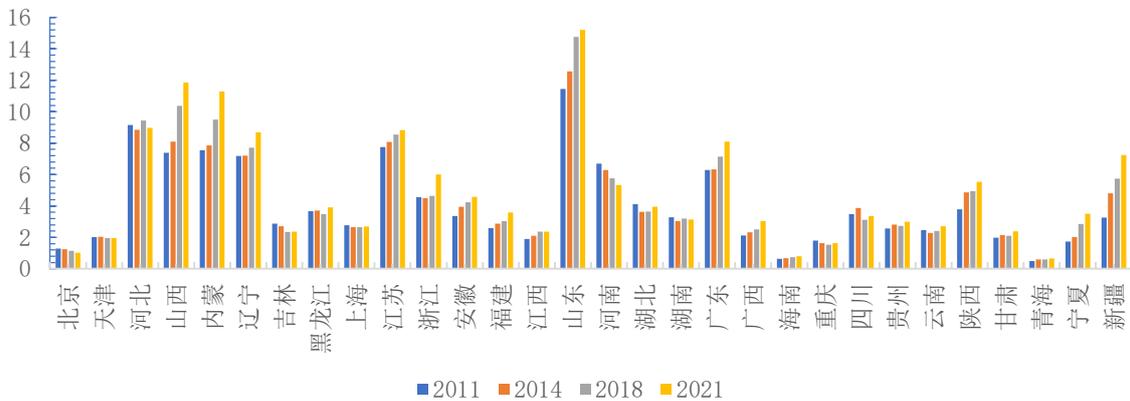


图 3.4 各省碳排放量

各省市的碳排放量存在显著差异, 山东、山西、内蒙古、河北和江苏的碳排放量位于全国前列。这可能是由于山东、江苏和河北处于工业发达地区, 拥有发达的重工业和能源行业, 对能源的需求量较大, 同时生产过程中产生的碳排放也相对较高。同时这些省份经济发展较为发达, 经济规模较大, 产业发展

相对成熟，因此能源消耗量和生产活动也较为频繁，导致碳排放量相对较高。山西和内蒙能源资源丰富，是我国的重要的能源基地，而且工业以煤炭、钢铁、化工等重工业为主，这些行业对能源的需求量大，同时也带来了大量的碳排放。特别是煤炭产业的发达，使得二氧化碳排放量较高。碳排放量明显较少的省份包括青海、海南和北京等地。可能是因为北京市的产业结构以服务业和高技术产业为主导，相对较少的重工业和能源密集型产业，而且对环保问题高度重视，实施了一系列的环保政策和措施。青海和海南碳排放量较低的原因可能是这两个省份相对于其他地区，工业化程度较低，主要以农业、旅游和服务业为主导，而这些行业相对较少的能源消耗和排放，导致碳排放较低。此外，这两个相对较多地利用清洁能源，如青海地区有丰富的风能、太阳能等资源，而海南则具备丰富的水电资源，这些清洁能源的利用比例较高，有助于降低碳排放。

3.2.3 碳排放效率测算方法

(1) 测算方法

传统 DEA (Data Envelopment Analysis) 是一种用于评估和衡量各种决策单元 (如企业、机构、部门等) 绩效的方法。它是由 Charnes、Cooper 和 Rhodes 于 1978 年首次提出的，被广泛应用于绩效评估、效率改进和资源配置等领域。传统的 DEA 模型通常涉及径向和角度两种模型，在计算效率时假设决策单元在所有指标上都达到了最优水平，忽略了一些特定情况下的松弛，可能导致效率评估不准确；Tone 在 2001 年提出了一种新型的数据包络分析 (DEA) 模型，即 Slack-Based Measure (SBM) 模型。与传统的 DEA 模型不同，SBM 模型不再仅仅关注决策单元在给定资源条件下的期望产出最大化，而是同时考虑到了环境和社会责任等非期望产出。在 SBM 模型中，有效率的决策单元被假定为 1，其他决策单元的效率值则小于 1，这样的设定允许了在一些指标上存在一定程度的松弛，更贴近实际情况，能够更准确地评估决策单元的绩效水平。本文参考以往的研究，构建考虑非期望产出的超效率全局 SBM 模型。具体如下

假设有 n 个决策单元，每个决策单元都有投入向量和产出向量，投入向量为 $X = (x_{ij}) \in R^{m \times n}$ ， m 是投入变量的数量；期望产出向量为 $Y = (y_{kj}) \in R^{s_1 \times n}$ ， s_1 表示期望产出变量的数量。非期望产出变量为 $Z = (z_{lj}) \in R^{s_2 \times n}$ ， s_2 分别代

非期望产出变量的数量。生产可能集为： $P = \{(x, y, z) | x \geq X\Lambda, y \leq Y\Lambda, z \geq Z\Lambda, X > 0, Y > 0, Z > 0\}$ ， $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \in R^n$ 是权系数向量。非期望产出的超效率全局 SBM 模型如下：

$$E_c^G(x^t, y^t, z^t) = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}^t}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} (\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}^t} + \sum_{p=1}^{s_2} \frac{s_p^z}{z_{p0}^t})} \quad (3.13)$$

$$\text{s. t. } x_{i0}^t \geq \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_{ij}^t - s_i^x, \forall k$$

$$y_{k0}^t \leq \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_{kj}^t + s_k^y, \forall k$$

$$z_{p0}^t \geq \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j z_{pj}^t - s_p^z, \forall p$$

$$1 - \frac{1}{s_1 + s_2} (\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}^t} + \sum_{p=1}^{s_2} \frac{s_p^z}{z_{p0}^t}) > 0$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_p^z \geq 0, \lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, p;$$

$s^x \in R^m$ 是投入要素上的过剩量、 $s^z \in R^{s_2}$ 是非期望产出上的过剩量， $s^y \in R^{s_1}$ 表示期望产出短缺量，E 为决策单元效率值，超效率模型是针对有效决策单元而言的，所以 E 都是大于等于 1 的。其他决策单元效率值可由如下公式得出：

$$E_c^G(x^t, y^t, z^t) = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^x}{x_{i0}^t}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} (\sum_{k=1}^{s_1} \frac{s_k^y}{y_{k0}^t} + \sum_{p=1}^{s_2} \frac{s_p^z}{z_{p0}^t})} \quad (3.14)$$

$$\text{s. t. } x_{i0}^t = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j x_{ij}^t - s_i^x, \forall k$$

$$y_{k0}^t = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j y_{kj}^t + s_k^y, \forall k$$

$$z_{p0}^t = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1, \neq 0}^n \lambda_j z_{pj}^t - s_p^z, \forall p$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$s_i^x \geq 0, s_k^y \geq 0, s_p^z \geq 0, \lambda_j \geq 0, \forall i, j, k, p;$$

(2) 指标选取的数据说明

在指标选取上，本文借鉴马大来（2015）、王星（2022）和孙景兵（2022）的研究成果，选取资本存量、劳动力和能源消耗作为投入指标，这些指标反映了各省份可用的生产资源和劳动力资源情况，以及能源使用的总量。将 GDP 和二氧化碳排放量视为产出指标。其中，地区生产总值代表了经济总量和经济增长情况，而二氧化碳排放量则反映了各省份在生产和发展过程中对环境的影响。具体指标说明如下：

(1) 投入指标：劳动力投入使用了我国大陆 30 个省（区）2011-2021 年的全社会年末从业人数数据；资本投入方面，参考了张军等（2004）等的研究成果，采用了“永续盘存法”对实际资本存量进行了测算。能源消耗：通过将各省份的各种能源消费按照与标准煤的折算关系统一转换为标准煤，然后进行加总，得到了各省市历年的能源消耗量。

(2) 期望产出指标：采用以 2000 年为基期，并剔除价格因素的实际地区生产总值作为期望产出。

(3) 非期望产出指标：以各省份的二氧化碳排放量作为非期望产出。

3.2.4 碳排放效率测算结果及分析

表 3.6 2011-2021 各省碳排放效率

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
北京	0.473	0.497	0.545	0.582	0.616	0.652	0.682	0.707	0.736	0.894	1.042
天津	0.207	0.229	0.251	0.259	0.270	0.265	0.275	0.285	0.295	0.373	0.397
河北	0.161	0.174	0.185	0.202	0.209	0.235	0.247	0.277	0.297	0.306	0.327
山西	0.160	0.171	0.182	0.188	0.190	0.197	0.212	0.231	0.247	0.259	0.287
内蒙	0.135	0.147	0.165	0.173	0.185	0.198	0.205	0.210	0.220	0.217	0.233
辽宁	0.159	0.174	0.192	0.199	0.212	0.218	0.230	0.237	0.250	0.253	0.274
吉林	0.146	0.157	0.166	0.177	0.199	0.218	0.229	0.254	0.259	0.290	0.308

续表 3.6 2011-2021 各省碳排放效率

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
黑龙江	0.162	0.172	0.189	0.201	0.222	0.237	0.253	0.271	0.282	0.294	0.315
上海	0.554	0.608	0.617	0.662	0.702	0.727	0.763	0.836	0.875	0.914	1.039
江苏	0.447	0.499	0.543	0.601	0.662	0.725	0.752	0.870	0.934	0.858	1.040
浙江	0.361	0.389	0.410	0.447	0.470	0.549	0.571	0.636	0.659	0.671	0.708
安徽	0.236	0.258	0.280	0.320	0.337	0.373	0.394	0.420	0.437	0.494	0.521
福建	0.347	0.385	0.453	0.478	0.510	0.538	0.561	0.587	0.612	0.621	0.665
江西	0.217	0.255	0.272	0.320	0.343	0.403	0.427	0.448	0.471	0.468	0.498
山东	0.297	0.322	0.362	0.385	0.399	0.423	0.450	0.478	0.498	0.533	0.592
河南	0.286	0.313	0.349	0.372	0.400	0.424	0.450	0.483	0.518	0.542	0.584
湖北	0.312	0.338	0.385	0.410	0.448	0.476	0.501	0.520	0.540	0.499	0.552
湖南	0.232	0.259	0.305	0.352	0.382	0.441	0.469	0.544	0.574	0.582	0.619
广东	0.566	0.613	0.676	0.715	0.783	0.834	0.876	1.000	1.001	1.014	1.038
广西	0.236	0.256	0.280	0.293	0.314	0.328	0.340	0.348	0.353	0.361	0.379
海南	0.213	0.229	0.244	0.252	0.258	0.266	0.272	0.287	0.294	0.287	1.013
重庆	0.219	0.245	0.298	0.320	0.374	0.409	0.431	0.529	0.550	0.663	0.698
四川	0.288	0.319	0.361	0.385	0.434	0.461	0.496	0.532	0.552	0.937	1.021
贵州	0.173	0.191	0.225	0.238	0.257	0.269	0.283	0.302	0.315	0.313	0.327
云南	0.237	0.256	0.288	0.303	0.320	0.332	0.347	0.362	0.393	0.401	0.416
陕西	0.252	0.268	0.297	0.317	0.355	0.371	0.388	0.410	0.420	0.463	0.513
甘肃	0.199	0.217	0.236	0.250	0.266	0.285	0.293	0.308	0.331	0.343	0.363
青海	0.174	0.186	0.198	0.212	0.226	0.232	0.245	0.258	0.274	0.311	0.319
宁夏	0.150	0.164	0.175	0.186	0.194	0.206	0.201	0.207	0.216	0.220	0.233
新疆	0.230	0.226	0.230	0.236	0.247	0.259	0.269	0.285	0.295	0.290	0.295

根据超效率 SBM 模型测算的碳排放效率如表 3.6，以全国平均值为基础，绘制 2011-2019 年我国碳排放效率时间序列变化折线图，如图 3.5 所示。

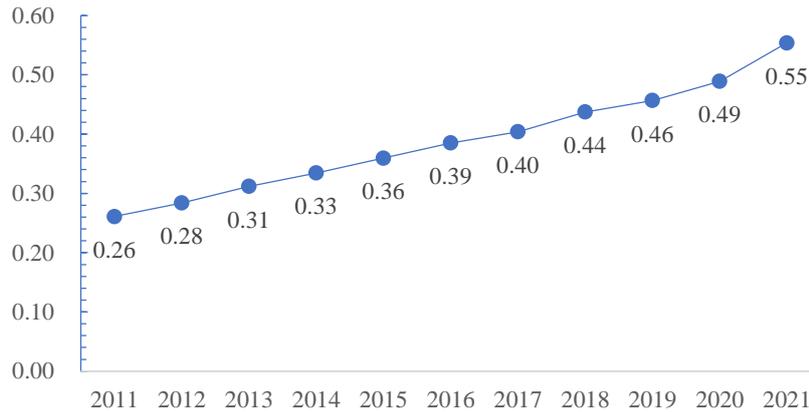


图 3.5 碳排放效率时序变化图

碳排放效率的整体变化轨迹如图 3.5 所示。碳排放效率总体呈现出不断上升的趋势。究其原因，随着我国发展低碳经济，“低碳”二字频繁出现在政府文件和民众生活中，约束企业污染排放的生产行为，并且随着资金效益和技术效应的逐渐累积，绿色产出增加，碳排放效率开始不断提升。

我国东部、中部和西部地区之间存在显著的碳排放效率差异。具体而言，东部地区的碳排放效率水平始终高于中西部地区。这种差异可以归因于多种因素的综合影响。首先，东部地区的经济发展水平相对较高。东部地区拥有发达的经济体系和先进的生产技术，这使得其生产过程中能够更加高效地利用能源资源，减少碳排放。与之相比，中西部地区的经济发展相对滞后，生产方式可能更为传统，能源利用效率较低，导致碳排放效率较低。其次，东部地区在科技创新方面投入更多。东部地区的科技创新水平较高，具有更多的技术创新能力和资源，能够采用更清洁、更高效的生产技术，从而降低碳排放。而中西部地区在科技创新方面可能相对滞后，难以采用先进的清洁生产技术，导致碳排放效率较低。此外，东部地区的产业结构更为合理。东部地区的产业结构更加多样化和现代化，包括了高技术产业和服务业等高附加值行业，这些行业通常具有较低的碳排放水平。相比之下，中西部地区的产业结构可能更为单一，可能依赖于高碳排放的重工业等传统产业，导致碳排放效率较低。最后，东部地区在环境保护政策和碳排放交易等方面的试点工作较为成熟。东部地区政府对环境保护问题的关注度更高，推行了一系列的环境保护政策和碳排放交易机制，促进了企业减排意识和技术创新，从而提高了碳排放效率。

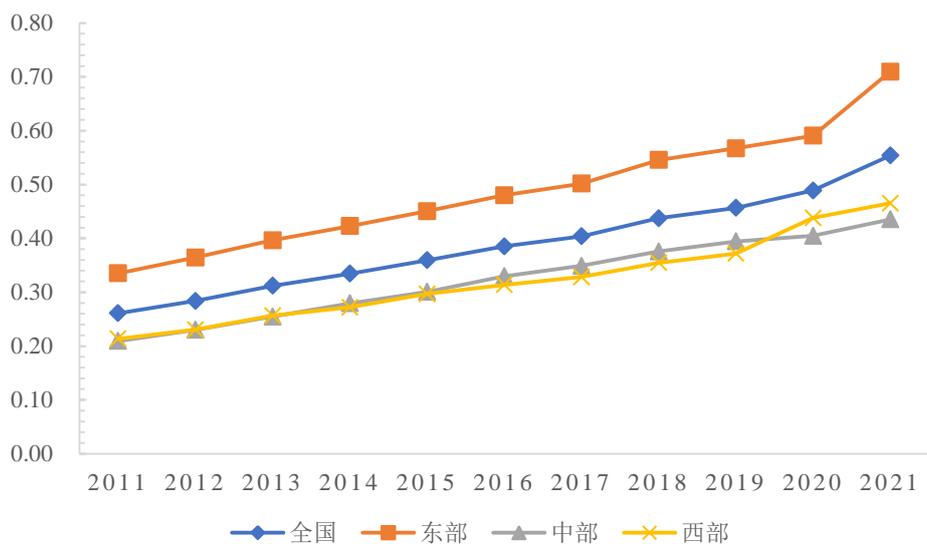


图 3.6 东、中、西地区碳排放效率的时序变化

4 数字经济影响碳排放绩效的实证分析

4.1 模型构建和数据说明

4.1.1 基准模型

为了验证数字经济对碳排放绩效的影响，构建双固定效应基准回归模型：

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dig_{it} + \alpha_2 Dig_{it}^2 + \alpha_3 \sum Control_{it} + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4.1)$$

其中：被解释变量 Y_{it} 分别是省份 i 在 t 年的碳排放量（CESC）、碳排放效率（CEEF）；核心解释变量 Dig_{it} 为省份 i 在 t 年数字经济发展水平。控制变量 $Control_{it}$ 分别是经济发展（Eco）、产业结构（Tra）、对外开放程度（Leop）、城镇化（Urb）、能耗强度（Ei）和收入水平（Inc）。 α_0 为常数项， μ_t 为时间固定效应， λ_i 为个体固定效应， ε_{it} 为随机误差项。

4.1.2 中介模型

（1）模型设定

为考察数字经济对碳排放绩效的影响机制，数字经济水平的发展可能通过促进技术引进、模仿创新、自主创新等三大方面的发展，从而实现改善碳排放绩效的目标。为验证这些作用机制是否存在，借鉴了 Baron & Kenny（1986）和温忠麟（2004）等学者的方法，采用了逐步回归法进行实证分析。模型的设定如下：

$$Y_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Dig_{it} + \alpha_2 \sum Control_{it} + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4.2)$$

$$Innov_{nit} = \beta_0 + \beta_1 Dig_{it} + \lambda_i Control_{it} + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4.3)$$

$$Y_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Dig_{it} + \rho Innov_{nit} + \lambda_i Control_{it} + \mu_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (4.4)$$

其中，被解释变量为碳排放绩效，用碳排放量和碳排放效率表示；核心解释变量为数字经济发展水平。 $Innov_{nit}$ 表示中介变量，包括技术引进（ $Innov_1$ ）变量、模仿创新（ $Innov_2$ ）变量和自主创新（ $Innov_3$ ）变量； α_0 、 β_0 和 γ_0 为常数项； $Control_{it}$ 为控制变量； μ_t 和 λ_i 分别表示个体固定效应和时间固定效应， ε_{it} 为随机扰动项。

(2) 模型的检验步骤

在中介效应模型中，图 4.1 展示了变量之间的作用机制关系。检验中介效应的步骤如下：首先，检验图 4.1 (b) 中所示总效应 c 是否存在，也就是检验式 (4.2) 的 α_1 是否显著，如果 α_1 是显著的，则进行下一步检验；否则，停止检验。其次，检验图 4.1 (a) 所示路径 a 和路径 b 是否存在，也就是检验式 (4.3) 中的 β_1 和式 (4.4) 中的 ρ 是否显著，如果 β_1 和 ρ 都是显著的，则说明存在着中介效应，如果 β_1 和 ρ 至少有一个不显著，则需要进一步进行 Sobel 检验以进一步判断；最后，检验图 4.1 (a) 中的直接效应 c' 是否存在，也就是式 (4.4) 中 γ_1 是否显著，如若 γ_1 是显著的，则表示存在部分中介效应，如果 γ_1 是不显著的，则表示存在完全中介效应。

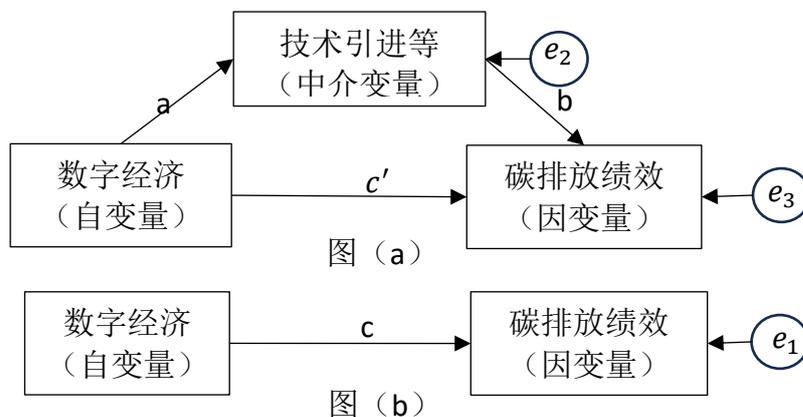


图 4.1 中介效应模型图

4.1.3 变量选取与数据说明

(1) 变量选取

被解释变量：碳排放绩效 (CE)。由碳排放量 (CESC) 和碳排放效率 (CEEF) 表示，在前文中均已测得。

核心解释变量：数字经济发展水平。数字经济发展水平利用文章中所构建的评价指标体系及测度方法得到的数据进行研究，符号记为 Dig。

中介变量：传统上，创新的产出通常以专利数量作为衡量标准，因为专利数量可以反映出—个地区或组织的技术创新活动的程度。然而，这种方法存在—个局限性，即有些创新活动可能未申请专利，导致专利数量不能完全反映出

技术创新的水平和渠道。因此，在本文中，采用创新资金投入来评估技术创新的水平。创新资金投入可以包括各种形式的研发支出、科研经费、技术开发投资等，这些投入反映了一个地区或组织对于技术创新的实际投入情况。相比专利数量，创新资金投入更能够全面地反映出地区对于创新路径的选择和投入程度，从而更全面地评估技术创新的水平。因此，借鉴刘鑫鑫和惠宁（2021）的做法，从技术创新投入角度对技术创新（ $Innov_n$ ）进行测度，包括技术引进（ $Innov_1$ ）、模仿创新（ $Innov_2$ ）和自主创新（ $Innov_3$ ）具体表示如下：

$$Innov_1 = \frac{\text{规模以上工业企业国外技术引进经费}}{\text{主营业务收入}}$$

$$Innov_2 = \frac{\text{规模以上工业企业技术吸收及改造经费}}{\text{主营业务收入}}$$

$$Innov_3 = \frac{\text{规模以上工业企业 R\&D 内部经费}}{\text{主营业务收入}}$$

控制变量：参考已有文献，选取经济发展、产业结构、对外开放水平、城镇化、能源强度和收入水平作为控制变量。

经济发展，经济增长与碳排放之间存在强关联性，根据 EKC 理论，随着人均 GDP 的增长，碳排放量一开始会增加，然后在达到一定水平后开始下降。这表明经济发展会在一定阶段后对环境产生积极影响。随着经济的发展，技术水平和创新能力得到提升，出现了更加环保的生产技术和能源利用方式。这些新技术通常更加高效，可以减少碳排放。用人均 GDP 的对数值衡量。

产业结构（Tra），第二产业，也就是制造业和建筑业等领域，通常对传统能源的需求量较大，这使得其在碳排放方面占据了重要地位。因为这些行业通常需要大量的燃料和电力来运转，而这些能源的产生和使用过程会释放出大量的碳排放。相比之下，其他产业的碳排放量通常较低。产业结构的优化升级，减少第二产业对传统能源的依赖，降低碳排放总量，并推动经济向低碳、清洁发展的方向转型。采用第三产业与第二产业比值来表示。

对外开放水平（Leop），国家的对外开放程度直接影响着其经济增长、环境产品以及能源消费与碳排放水平。通过进出口贸易，国家可以实现经济的增

长，并且在经济发展过程中，环境产品的生产与消费也会受到影响。这进一步影响了能源的使用和碳排放情况。用各省进出口总额衡量各省对外开放水平。

城镇化（Urb），城镇化对全要素碳生产率的影响是复杂而多样的，既有促进碳排放增加的因素，也有促进碳排放减少的因素。一方面，城市化过程中人口增长、能源消耗增加、交通运输需求上升等因素会导致碳排放的增加。另一方面，城市化可以带动技术创新、改善基础设施、提高劳动生产率等，这些因素有助于降低碳排放强度，提高碳生产率。城镇化用城镇人口占年末常住人口比重来衡量。

能耗强度（Ei），能源强度通常反映了一个国家或地区经济结构中能源密集型产业的相对重要性增加，以及对化石燃料的高度依赖。这类产业通常需要大量的能源，尤其是存在低能效水平和传统能源结构的情况下，导致单位能源强度上升。由于化石燃料的燃烧释放大量温室气体，这种增加的能源密度直接导致碳排放的增加。用单位 GDP 能源消费量衡量。

收入水平（Inc），随着收入增长，家庭通常会更容易承担清洁能源技术的成本，因此有更大的可能性进行能源转型（吴施美等，2022）。这种能源转型不仅有助于个体家庭减少碳排放，还能为整个社会能源转型提供推动力。收入水平用城镇居民人均可支配收入来衡量。

（2）数据来源

文章所用数据主要源自《国家统计局》《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国工业统计年鉴》以及各省份年鉴。数字金融方面的数据则来源于北京大学数字普惠金融指数。针对个别年份缺失数据的情况，采用了插值法或移动平均法进行了数据补充。各变量的描述性统计结果见表 4.1。

表 4.1 变量描述性统计信息

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放效率	CEEF	330	0.389	0.203	0.135	1.042
碳排放量	CESC	330	4.375	3.113	0.488	15.201
数字经济	Dig	330	0.177	0.098	0.024	0.672
经济发展	Eco	330	10.829	0.450	9.674	12.142
城镇化	Urb	330	59.591	12.137	35.042	89.583
单位 GDP 能耗	Ei	330	0.804	0.481	0.160	2.327

续表 4.1 变量描述性统计信息

变量	符号	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
收入水平	Inc	330	3.283	11.178	1.571	8.243
对外开放程度	Leop	330	0.271	0.282	0.008	1.428
产业结构	Tra	330	1.342	0.732	0.527	5.244
技术引进	Inoov ₁	330	0.041	0.716	0.002	0.640
模仿创新	Inoov ₂	330	0.408	0.072	0.600	2.794
自主创新	Inoov ₃	330	0.855	0.378	0.292	1.900

4.2 数字经济影响碳排放绩效实证研究

4.2.1 基准回归结果

利用 2011 年至 2021 年的中国内地 30 个省份的面板数据作为样本，通过前文建立的模型来研究数字经济对碳排放绩效的影响效应。根据 Hausman 检验的结果，统计量为 50.66，P 值为 0.000，这意味着在 1% 的显著性水平下，可以拒绝随机效应模型的假设，即固定效应模型在这种情况下更适合进行回归分析。因此，本文选择固定效应模型来进行数字经济对碳排放绩效的回归分析。根据表 4.2 的线性回归结果可以看出，第（1）列和第（3）列是仅控制个体和时间固定效应的情况，第（2）列和第（4）列是纳入控制变量的结果。由第（1）列和第（2）列的结果可以得出，不论是否考虑其他可能影响的控制变量，数字经济水平与碳排放总量之间都呈现出显著的负相关关系。这意味着随着数字经济水平的提高，碳排放总量会下降。比较第（3）列和第（4）列的结果可以得出，无论是否控制其他变量，数字经济水平与碳排放效率之间都存在着显著的正相关关系，这意味着数字经济的发展有助于提高碳排放效率。验证了假说 1。基准回归结果表明，数字经济的发展能够有效地改善资源利用效率，减少能源和其他要素的浪费，进而提高碳排放的效率，改善碳排放绩效。

表 4.2 数字经济影响碳排放绩效的基准回归

变量	CESC		CEEF	
	(1) 未添加控制变量	(2) 加入控制变量	(3) 未添加控制变量	(4) 加入控制变量
Dig	-3.008** (-2.44)	-3.361** (-2.22)	1.484*** (11.52)	1.302*** (8.01)
ECO		-2.004*** (-2.95)		0.173** (2.37)
Tra		-1.204** (-2.46)		0.230*** (3.23)
Urb		0.044** (2.08)		-0.002** (-2.03)
Leop		-1.351*** (-5.57)		0.085*** (3.27)
Ei		1.492*** (3.99)		-0.001 (-0.01)
In		0.011 (0.05)		0.074*** (3.26)
常数项	4.345*** (25.69)	23.106*** (3.51)	0.094*** (5.32)	-2.047*** (-2.90)
省份固定	固定	固定	固定	固定
时间固定	固定	固定	固定	固定
样本量	330	330	330	330
R^2	0.249	0.026	0.751	0.647

注：* P<0.10, ** P<0.05, *** P<0.01；括号中数值为 t 值，下同。

从控制变量来看，经济发展与碳排放总量的相关系数显著为负，与碳排放效率的相关系数显著为正；产业结构在 5% 的显著性水平上促进了碳减排，在 1% 的显著性水平上促进了碳排放效率的提升。这说明，目前中国经济正逐步从过去的高污染、高排放的发展方式向更为环保的绿色发展模式转型；对外开放对碳排放绩效有积极影响，说明贸易开放程度提高有利于改善国内碳排放绩效。城镇化不能有效改善碳排放绩效，城镇化速度如果扩张较快，伴随而来的大规模建设将会在一定时期内提高对资源的消耗程度，同时人口的大量流入也会不断增加资源消费，从而并不能对碳排放绩效产生积极的作用。收入水平对碳排

放量的系数为正但是不显著，在 1%的水平上显著提升了碳排放效率，这说明随着居民收入的增加，一定程度上改变家庭能源的转型，从而推动整个社会能源转型，使得清洁能源占比得到了提高，从而改善了碳排放绩效。能源强度对碳减排的作用是显著的，而对碳增效的作用是不显著的，这说明经济快速发展带来用电量的与日俱增目前，中国仍然主要依赖于火力发电，而清洁能源的比重相对较低，这导致了能源结构的不合理，同时也导致碳排放量一直居高不下。

4.2.2 稳健性检验

为了进一步确认结论的可靠性，本文进行了对基准结果的稳健性检验。检验结果如表 4.3 所示。首先，替换了被解释变量。选择了单位 GDP 碳排放量作为新的被解释变量进行估计。通过这一步，我们能够检验数字经济对单位 GDP 碳排放量的影响是否依然存在，并且是否具有相似的方向和显著性。其次，重新测算了数字经济指数。使用主成分分析方法对数字经济指数进行了重新赋权测度。最后，对各变量进行 1%分位上双侧缩尾处理。(1)~(3)与基准回归结果基本一致，说明基准回归结果的可信度较高。

表 4.3 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)		(3)	
	单位 GDP 碳排放	主成分分析法		1%缩尾处理	
		CESC	CEEF	CESC	CEEF
Dig	-1.088*** (-4.82)	-2.958*** (-2.97)	1.199*** (8.71)	-6.186*** (-3.40)	1.789*** (9.15)
常数项	12.135*** (13.10)	23.068*** (3.51)	-2.017*** (-2.90)	21.858*** (3.36)	-1.834 (-2.62)
个体固定	固定	固定	固定	固定	固定
时间固定	固定	固定	固定	固定	固定
样本量	330	330	330	330	330
R ²	0.602	0.025	0.676	0.017	0.708

4.3 技术创新的中介效应

为验证假设 2，本研究将技术引进、模仿创新和自主创新作为中介变量，

分析不同的技术创新模式在数字经济影响碳排放绩效过程中的作用。

4.3.1 技术引进的中介效应

在表 4.4 的列 (1) 至列 (3) 中, 被解释变量为碳排放量, 中介变量为技术引进。列 (1) 中数字经济的系数显著为负, 表明数字经济对于降低碳排放量是显著的。列 (2) 的回归结果中, 数字经济的系数是显著为正的, 这可以说明数字经济对技术引进有促进作用。在列 (3) 中, 将数字经济与技术引进变量同时纳入模型后, 发现数字经济的系数依然显著为负, 而技术引进的系数虽为正, 但不显著。这表明技术引进并不是数字经济影响碳排放量的主要途径。表 4.4 的 (4) 至 (6) 列显示了以碳排放效率为被解释变量、技术引进为中介变量的估计结果。在列 (4) 中, 数字经济的系数是显著为正的, 这说明数字经济可以提高碳排放效率。列 (6) 中, 数字经济的系数显著为正, 技术引进的系数为正但不显著, 说明技术引进不是数字经济影响碳排放效率的主要途径。综合上述分析, 数字经济对碳排放绩效的影响不是通过技术引进这一传导路径来实现的。

表 4.4 技术引进中介效应检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CESC	Inoov ₁	CESC	CEEF	Inoov ₁	CEEF
Dig	-3.361** (-2.22)	0.304** (2.01)	-3.089** (-2.03)	1.302*** (8.01)	0.304** (2.01)	1.305*** (7.96)
Inoov ₁			-0.895 (-1.50)			-0.012 (-0.18)
常数项	23.106*** (3.51)	1.253** (1.91)	24.228*** (3.67)	-2.047*** (-2.90)	1.253** (1.91)	-2.032*** (-2.86)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
个体固定	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定	控制	控制	控制	控制	控制	控制

4.3.2 模仿创新的中介效应

表 4.5 给出了模仿创新作为中介变量的回归结果。第 (1) 列和第 (3) 列在前面的分析中已经得到了验证, (2) 或 (5) 列说明, 数字经济对模仿创新的

回归系数在 5%的水平上显著为正，这意味着数字经济对模仿创新有正向影响。在列（3）中可以得出，加入模仿创新后，数字经济的系数仍然是显著的，并从 -3.361 上升至 -3.157，模仿创新系数显著为负，说明模仿创新充当了数字经济与碳减排之间的纽带。经计算，中介效应占总效应的 6.07%。在列（6）中可以发现，数字经济和模仿创新的系数均显著为正，其中，数字经济的系数从 1.302 降至 1.203，数字经济通过增强模仿创新的方式间接地提高了碳排放效率。经计算，中介效应占总效应的 7.60%。综上，数字经济可以通过模仿创新来改善碳排放绩效。

表 4.5 模仿创新中介效应检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CESC	Inoov ₂	CESC	CEEF	Inoov ₂	CEEF
Dig	-3.361** (-2.22)	1.382** (2.12)	-3.157** (-2.07)	1.302*** (8.01)	1.382** (2.12)	1.203*** (9.47)
Inoov ₂			-0.147** (-2.39)			0.026** (2.17)
常数项	23.106*** (3.51)	7.408*** (2.62)	24.197*** (3.64)	-2.047*** (-2.90)	7.408*** (2.62)	-2.024*** (-2.83)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
个体固定	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定	控制	控制	控制	控制	控制	控制

4.3.3 自主创新的中介效应

表 4.6 是自主创新作为中介变量的逐步回归结果。从（1）、（2）、（3）列的结果可以看出，数字经济对自主创新起到了积极作用，并通过自主创新间接降低了碳排放总量。经计算，中介效应占总效应的 21.30%。从（4）、（5）、（6）列可以看出，数字经济通过自主创新提升碳排放效率的传导机制存在。经计算，中介效应占总效应的 14.29%。综上，数字经济可以通过自主创新来改善碳排放绩效。

表 4.6 自主创新中介效应机制检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	CESC	Inoov ₃	CESC	CEEF	Inoov ₃	CEEF
Dig	-3.361** (-2.22)	0.808** (2.99)	-2.645*** (-4.18)	1.302*** (8.01)	0.808** (2.99)	1.116*** (8.27)
Inoov ₃			-0.885** (-1.79)			0.057** (2.45)
常数项	23.106*** (3.51)	-1.942 (-1.08)	21.386*** (3.34)	-2.047*** (-2.90)	-1.942 (-1.08)	-1.936*** (-2.76)
控制变量	控制	控制	控制		控制	控制
个体固定	控制	控制	控制		控制	控制
时间固定	控制	控制	控制		控制	控制

综合上述分析，假设 2 得到部分验证，即在数字经济影响碳排放绩效的过程中，技术引进的中介效应不存在，模仿创新和自主创新是具有中介效应的，而且相对于模仿创新，自主创新对数字经济改善碳排放绩效的影响更为显著。综合上述分析可以看出，自主创新是数字经济改善碳排放绩效的最关键的途径。事实上，我国的工业化进程虽然取得了显著进展，但在环境效益和生产效率之间仍存在平衡的挑战。在许多地区，人们更倾向于关注如何提高生产效率，而不是环境效益。这主要是因为许多地区仍处于工业化发展的不同阶段，可能更注重基础设施建设和产能扩张。企业和地区的引进技术的主要目标是提高生产效率以增加利润和竞争力，环境效益在技术引进过程中通常被视为次要考虑因素。

4.4 异质性分析

4.4.1 区域异质性分析

前文中已经讨论了数字经济发展水平的提高与碳排放绩效之间存在关联，即数字经济可以改善碳排放绩效。中国各省市由于地理位置不同，导致其数字经济发展水平、碳排放强度和碳排放效率存在明显的地区差异。这种差异可能导致数字经济对碳减排效果在不同地区产生差异。进一步考虑不同区域对我国碳排放绩效的影响以及作用机制。回归结果如表 4.7 所示。

表 4.7 分东中西地区回归结果

变量	东部		中部		西部	
	CESC	CEEF	CESC	CEEF	CESC	CEEF
Dig	1.082 (0.59)	1.084*** (4.41)	-53.565*** (-6.97)	0.905** (2.59)	-5.145*** (-3.35)	0.814*** (3.44)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
个体固定	是	是	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是	是	是
样本数	121	121	88	88	121	121

在表 4.7 的回归结果中，当因变量为碳排放总量时，对于东部地区而言，数字经济对碳排放量的系数为正且不显著，这可能是由于东部地区的数字经济发展已经达到相对成熟的阶段，碳减排效应已经达到了一定的极限。在这些地区，由于数字经济已经发展到了较高水平，进一步的发展空间受到了限制，因此难以释放更多的碳减排效益。对于中和西部地区，数字经济水平的碳减排效应显著存在。就中部和西部地区的比较而言，虽然这两个地区数字经济的碳减排效应都十分显著，中部地区数字经济的回归系数要更大一些，这种差异可能是因为中部地区的发展基础相对较好，并且近年来实施了中部崛起战略，逐渐有了迎头赶上东部地区的态势。相比之下，西部地区受到历史和自然环境等因素的制约，其发展基础相对较弱，基础设施建设不够完善。此外，由于数字鸿沟的存在，西部地区难以充分释放数字经济对碳减排的效应。当因变量为碳排放效率时，三大地区的数字经济系数都是显著为正的，而且东部地区的要更大一些，这也可以表明，数字经济的碳增效作用具有普遍性的特点，对于东部地区来说，其作用更强一些，根据麦特卡夫定律和网络效应，网络中用户的增加会导致网络的价值呈指数级增长。而网络效应则是指网络中的用户增加所带来的正面影响。随着企业数字化改造的推进，东部地区的企业数量和数字化程度较高，因此享受到了更大程度的网络效应。这意味着东部地区的企业在数字经济发展中更容易获得碳增效红利，即通过数字化转型来实现碳排放效率的提高。与之相比，西部地区的企业可能受限于数字化水平较低的情况，因此碳增效效应相对较低。这一现象在东部地区和西部地区之间形成了碳增效效应的差异，

东部地区的碳增效效应更高，且呈现出随着数字化程度提高而增强的趋势。

4.4.2 高、低数字经济水平地区的异质性分析

考虑到不同地区数字经济的碳减排和碳增效的效应存在差异，接下来的研究将着眼于不同数字经济水平地区的碳减排效应之间是否存在显著差异。将第3章中得到的数字经济水平以全国平均水平为界划分为高、低数字经济水平地区。京、冀、辽、沪、浙、苏、皖、鲁、豫、鄂、湘、粤、渝、川15个省市为数字经济的高水平地区，其余省市则为数字经济的低水平地区。回归结果如表4.8所示。

表 4.8 高、低数字经济水平地区回归结果

变量	高水平地区		低水平地区	
	CESC	CEEF	CESC	CEEF
Dig	-1.492** (-2.34)	0.671*** (3.69)	-22.021*** (-3.16)	1.341** (2.10)
控制变量	是	是	是	是
个体固定	是	是	是	是
时间固定	是	是	是	是
样本数	165	165	165	165

从表 4.8 结果中可以看出，数字经济的系数均显著，这说明数字经济水平均能够很好地改善碳排放绩效，然而，低数字经济水平地区改善碳排放绩效的效应更为显著（ $22.021 > 1.492$ ； $1.341 > 0.671$ ）。这可能是因为这些地区通常位于经济欠发达的省份或地区，面临着较低的经济压力。当前，高数字经济水平地区需要继续投入人力、财力和物力来维持其数字经济领先地位。低水平地区可以从高水平地区学习借鉴碳减排的成功经验和先进技术，同时改善碳排放绩效所需的成本可能相对较低。政府可能也更倾向于在低数字经济水平地区采取更多的政策支持和资金投入，促进其经济发展和环境保护。

5 研究结论与建议

5.1 结论

本文首先梳理了数字经济影响碳排放绩效的相关研究，提出自己的研究方向，界定了数字经济和碳排放绩效的概念，深入分析了相关理论基础和数字经济影响碳排放绩效的作用机制。接着，通过熵值法，碳排放系数法和非期望产出 SBM 模型分别评估了数字经济发展水平，碳排放量和碳排放效率，并对测得的结果进行了全面分析。然后，文章对数字经济对碳排放绩效的影响进行了详细的实证分析，包括模型构建、基准回归、稳健性检验以及异质性分析等内容。还探讨了技术引进、模仿创新、自主创新等三条具体的作用路径，得出自主创新是数字经济影响碳排放绩效的关键路径。得出以下主要结论：

(1) 当前中国数字经济的发展存在着明显的区域不平衡问题，主要体现在东部地区相对发达，而中西部地区发展相对落后的现状。这导致我国的数字经济发展呈现出两极分化的特征，即所谓的“马太效应”。由于区域间数字经济发展的不平衡，造成了较为严重的“数字鸿沟”。

(2) 数字经济对于改善碳排放绩效具有明显的作用，主要表现在降低碳排放总量和提高碳排放效率方面。具体来说，数字经济的碳减排效应主要体现在中西部地区和数字经济低水平地区，这表现为减少碳排放总量的趋势。而在提高碳排放效率方面，数字经济的增效作用具有普遍性的特点，并且在数字经济发展水平较低的地区表现出更为显著的作用。

(3) 数字经济通过技术创新可以改善碳排放绩效，但不同的技术创新模式对此的作用效果存在差异。具体而言，自主创新的中介效应最为显著，其次是模仿创新，而技术引进则未能发挥中介作用。

5.2 建议

“双碳”目标是指中国政府提出的达到碳排放达峰和碳中和的双重目标。具体而言，碳达峰目标是指在未来某个时间点，全国碳排放量将达到最高峰后逐渐减少，实现碳排放的顶点。而碳中和目标则意味着中国将在更长的时间尺

度内，通过减排和碳汇的手段，使净碳排放量为零，即吸收的碳等于排放的碳。为促进减排、助力“双碳”目标实现，本文提出相关政策建议：

（1）促进数字经济在各省份和地区之间的均衡发展。数字经济在不同省份和地区的发展水平存在差距，因此需要采取措施缩小这些差距，促进全国数字化发展的均衡和协调。数字经济发展水平领先省份和地区仍需稳步发展数字经济，应致力于巩固其数字经济的领先地位。可以持续推动创新，加大对数字技术的研发投入，培育高科技企业，保持在新兴数字产业的竞争优势。还可以通过技术升级和创新引领全国数字化发展的潮流，分享成功经验，促进全国数字经济的可持续增长。数字经济发展水平居中的省份和地区应向领先省份看齐，深入了解领先地区成功的经验和做法。建立更紧密的产业联盟，加强技术交流，以及吸引更多的数字科技企业入驻，还可以通过加强数字技术的研发和应用，促进数字化在传统产业中的广泛应用，进一步提升数字经济水平，逐步缩小与领先省份和地区的差距。而数字经济发展水平落后的省份和地区急需加快数字经济发展步伐，防止差距进一步扩大。增加对数字基础设施的投资，提升数字科技人才培养水平，引导企业加大对数字化的投入。还可以通过推动数字技术在关键领域的广泛应用，实现产业升级。

（2）为了推动数字经济和低碳产业的发展，应当加速千兆固网、卫星互联网等数字化基础设施建设，为数字经济提供更为稳定高效的运行环境，这不仅可以减少纸质文件的使用，推动在线办公，还可以为各行业提供更灵活的数字化解决方案，进而实现“减排”“增效”的环保效应。同时，还应该避免过度依赖粗放式增长模式，而是通过提高能源利用效率、推广节能减排技术、增强居民环保意识等途径，实现数字经济的高质量发展和集约式增长。

（3）支持低碳技术自主创新，通过加强低碳技术自主创新，可以逐步减少对国外技术的依赖，提高我们在低碳产业链中的话语权和竞争力，从而实现我国在低碳领域的自主发展。政府可以提供资金支持、研发平台建设等方面的支持，激励企业、科研机构进行更深入的低碳技术创新。数字经济作为创新的引擎，通过提升生产效率、改造传统产业、推动绿色技术创新等方式，改善碳排放绩效。针对我国国情和发展特点，建立以自主创新为主导，通过培养高端人才、完善技术创新体系等手段，打造适应我国需求的低碳技术创新体系，鼓励

企业加大在关键技术领域的研发投入，推动技术创新成果的产业化应用。加强清洁能源替代和减排技术的应用，提高能源利用效率，推动能源结构的绿色转型。通过数字化技术，实现能源系统的智能管理，减少能源浪费，促进清洁能源的更广泛应用。

参考文献

- [1] Ahmed Z, Cary M, Ali S, et al. Moving toward a green revolution in Japan: symmetric and asymmetric relationships among clean energy technology development investments, economic growth, and CO₂ emissions[J]. *Energy & Environment*, 2022, 33(7): 1417-1440.
- [2] Balodis M, Skribans V, Ivanova P. Development of a system dynamics model for evaluation of the impact of integration of renewable energy sources on the operational efficiency of energy supply facilities: Theoretical background[J]. *Economics and Business*, 2016, 28(1): 4-12.
- [3] Baron R M, Kenny D A. The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations[J]. *Journal of personality and social psychology*, 1986, 51(6): 1173.
- [4] Kim B, Barua A, Whinston A B. Virtual field experiments for a digital economy: a new research methodology for exploring an information economy[J]. *Decision Support Systems*, 2002, 32(3): 215-231.
- [5] Biesanz J C, Falk C F, Savalei V. Assessing mediational models: Testing and interval estimation for indirect effects[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2010, 45(4): 661-701.
- [6] Carlsson B. The Digital Economy: what is new and what is not?[J]. *Structural change and economic dynamics*, 2004, 15(3): 245-264.
- [7] Dai D, Fan Y, Wang G, et al. Digital economy, R&D investment, and regional green innovation—analysis based on provincial panel data in China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6508.
- [8] Dou Q, Gao X. The double-edged role of the digital economy in firm green innovation: Micro-evidence from Chinese manufacturing industry[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(45): 67856-67874.
- [9] Fritz M S, Taylor A B, Mackinnon D P. Explanation of Two Anomalous Results in Statistical Mediation Analysis[J]. *Multivariate Behavioral Research*, 2012, 47(1): 68-87.

- [10] Gilder G. Metcalfe's Law and legacy[J]. *Forbes*, 1993, 13: 58-166.
- [11] Hansen B E. Threshold effects in non-dynamic panels: Estimation, testing, and inference[J]. *Journal of econometrics*, 1999, 93(2): 345-368.
- [12] Hao Y, Ba N, Ren S, et al. How does international technology spillover affect China's carbon emissions? A new perspective through intellectual property protection[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 25: 577-590.
- [13] Hayes A F, Scharkow M. The relative trustworthiness of inferential tests of the indirect effect in statistical mediation analysis: does method really matter?[J]. *Psychological science*, 2013, 24(10): 1918-1927.
- [14] Imperatives S. Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future[J]. Accessed Feb, 1987, 10: 1-300.
- [15] Guo J, Zhang Y J, Zhang K B. The key sectors for energy conservation and carbon emissions reduction in China: evidence from the input-output method[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 179: 180-190.
- [16] Shimada K, Tanaka Y, Gomi K, et al. Developing a long-term local society design methodology towards a low-carbon economy: An application to Shiga Prefecture in Japan[J]. *Energy Policy*, 2007, 35(9): 4688-4703.
- [17] Katz M L, Shapiro C. How to license intangible property[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1986, 101(3): 567-589.
- [18] Kaya Y, Yokobori K. 'Global environment, energy, and economic development'held at the United Nations University, Tokyo, 25-27 October 1993[J]. 'Global environment, energy, and economic development'held at the United Nations University, Tokyo, 25-27 October 1993., 1997.
- [19] Kuramochi T, Ramírez A, Turkenburg W, et al. Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes[J]. *Progress in energy and combustion science*, 2012, 38(1): 87-112.
- [20] Lee C C, Yuan Y, Wen H. Can digital economy alleviate CO₂ emissions in the transport sector? Evidence from provincial panel data in China[C]//*Natural Resources Forum*. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2022, 46(3): 289-310.
- [21] Liu J, Feng T, Yang X. The energy requirements and carbon dioxide emissions of

- tourism industry of Western China: A case of Chengdu city[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(6): 2887-2894.
- [22] Ma Q, Tariq M, Mahmood H, et al. The nexus between digital economy and carbon dioxide emissions in China: The moderating role of investments in research and development[J]. *Technology in Society*, 2022, 68: 101910.
- [23] Mielnik O, Goldemberg J. Communication The evolution of the “carbonization index” in developing countries[J]. *Energy Policy*, 1999, 27(5): 307-308.
- [24] Miller P, Wilsdon J. Digital futures—an agenda for a sustainable digital economy[J]. *Corporate Environmental Strategy*, 2001, 8(3): 275-280.
- [25] Sadorsky P. Information communication technology and electricity consumption in emerging economies[J]. *Energy Policy*, 2012, 48: 130-136.
- [26] Shvakov E E, Petrova E A. Newest trends and future scenarios for a sustainable digital economy development[C]//*Scientific and technical revolution: yesterday, today and tomorrow*. Springer International Publishing, 2020: 1378-1385.
- [27] Tapscott D. *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*[J]. (No Title), 1996.
- [28] Tamburino L, Cafaro P, Bravo G. An Analysis of Three Decades of Increasing Carbon Emissions: The Weight of the P Factor[J]. *Sustainability*, 2023, 15(4): 3245.
- [29] Vaisman Y D, Nikiforova N S. Development of industrial enterprises' dynamic capabilities in the digital economy[J]. *Journal of New Economy*, 2018, 19(3): 126-136.
- [30] Wang L, Chen L, Li Y. Digital economy and urban low-carbon sustainable development: The role of innovation factor mobility in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(32): 48539-48557.
- [31] Li Z, Chen X, Ye Y, et al. The impact of digital economy on industrial carbon emission efficiency at the city level in China: Gravity movement trajectories and driving mechanisms[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2023: 103511.2
- [32] Yi M, Liu Y, Sheng M S, et al. Effects of digital economy on carbon emission reduction: New evidence from China[J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113271.

- [33] Zhang J, Lyu Y, Li Y, et al. Digital economy: An innovation driving factor for low-carbon development[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 96: 106821.
- [34] Zhang S, Wen J. Inquiry into Digital Economy Innovation: A Comprehensive Perspective[J]. Economist, 2020, 02: 80-87.
- [35] Zhang Y, Wu Z. Environmental performance and human development for sustainability: Towards to a new Environmental Human Index[J]. Science of The Total Environment, 2022, 838: 156491.
- [36] Zhou X, Zhou D, Zhao Z, et al. A framework to analyze carbon impacts of digital economy: The case of China[J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 31: 357-369.
- [37] 安孟,张诚.数字经济发展能否提升中国区域创新效率[J].西南民族大学学报(人文社会科学版),2021,42(12):99-108.
- [38] 查建平.中国工业碳排放绩效及其影响因素研究[D].西南交通大学,2014.
- [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] 郭朝先.中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术[J].中国工业经济,2010(12):47-56.
- [41] 郭四代,钱昱冰,赵锐.西部地区农业碳排放效率及收敛性分析——基于 SBM-Undesirable 模型[J].农村经济,2018(11):80-87.
- [42] 李朋林,候梦莹.数字经济发展对碳排放的影响[J].财会月刊,2023,44(10):153-160.
- [43] 韩兆安,赵景峰,吴海珍.中国省际数字经济规模测算、非均衡性与地区差异研究[J].数量经济技术经济研究,2021,38(08):164-181.
- [44] 黄敦平,朱小雨.我国数字经济发展水平综合评价及时空演变[J].统计与决策,2022,38(16):103-107.
- [45] 洪银兴.培育新动能:供给侧结构性改革的升级版[J].经济科学,2018(03):5-13.
- [46] 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.
- [47] 刘婧玲,陈艳莹.数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J].科学学研究,2023,41(05):841-853.

- [48]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.
- [49]刘鑫鑫,惠宁.互联网、技术创新与制造业高质量发展——基于创新模式的异质效应分析[J].经济问题探索,2021,42(09):143-155.
- [50]刘强,马彦瑞,徐生霞.数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J].中国人口·资源与环境,2022,32(03):72-85.
- [51]李忠民,姚宇,陈向涛.低碳经济的三重含义和我国的战略选择——一个低碳经济研究综述[J].青海社会科学,2010(05):26-30+73.
- [52]李治国,王杰.经济集聚背景下数字经济发展如何影响空间碳排放?[J].西安交通大学学报(社会科学版),2022,42(05):87-97.
- [53]李洁,王琴梅.数字经济发展水平测度及时空演变[J].统计与决策,2022,38(24):73-78.
- [54]廖民超,金佳敏,蒋玉石,等.数字平台能力与制造业服务创新绩效:网络能力和价值共创的链式中介作用[J].科技进步与对策,2023(05):55-63.
- [55]罗良清,平卫英,张雨露.基于融合视角的中国数字经济卫星账户编制研究[J].统计研究,2021,38(01):27-37.
- [56]缪陆军,陈静,范天正,吕雁琴.数字经济发展对碳排放的影响——基于278个地级市的面板数据分析[J].南方金融,2022(02):45-57.
- [57]马大来,陈仲常,王玲.中国省际碳排放效率的空间计量[J].中国人口·资源与环境,2015,25(01):67-77.
- [58]裴长洪,倪江飞,李越.数字经济的政治经济学分析[J].财贸经济,2018,39(09):5-22.
- [59]任晓松,刘宇佳,赵国浩.经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J].中国人口·资源与环境,2020,30(04):95-106.
- [60]孙景兵,薛倩.科技创新提高碳排效率了吗?[J].生态经济,2022,38(06):22-28+34.
- [61]田秀娟,李睿.数字技术赋能实体经济转型发展——基于熊彼特内生增长理论的分析框架[J].管理世界,2022,38(05):56-74.
- [62]田云,王梦晨.湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J].中国农业科学,2020,53(24):5063-5072.

- [63]王惠,卞艺杰,王树乔.出口贸易、工业碳排放效率动态演进与空间溢出[J].数量经济技术经济研究,2016,33(01):3-19.
- [64]王军,朱杰,罗茜.中国数字经济发展水平及演变测度[J].数量经济技术经济研究,2021,38(07):26-42.
- [65]王星,张乾翔.经济增长压力下金融集聚对碳排放效率的影响[J].中国人口·资源与环境,2022,32(03):11-20.
- [66]魏巍贤,杨芳.技术进步对中国二氧化碳排放的影响[J].统计研究,2010,27(07):36-44.
- [67]魏敏,李书昊.新时代中国经济高质量发展水平的测度研究[J].数量经济技术经济研究,2018,35(11):3-20.
- [68]吴施美,郑新业.收入增长与家庭能源消费阶梯——基于中国农村家庭能源消费调查数据的再检验[J].经济学(季刊),2022,22(01):45-66.
- [69]温珺,阎志军,程愚.数字经济与区域创新能力的提升[J].经济问题探索,2019,No.448(11):112-124.
- [70]武可栋,阎世平.数字技术发展与中国创新效率提升[J].企业经济,2021,40(07):52-62.
- [71]温忠麟,张雷,侯杰泰等.中介效应检验程序及其应用[J].心理学报,2004(05):614-620.
- [72]吴贤荣,张俊飏,田云等.中国省域农业碳排放:测算、效率变动及影响因素研究——基于 DEA-Malmquist 指数分解方法与 Tobit 模型运用[J].资源科学,2014,36(01):129-138.
- [73]谢云飞.数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J].当代经济管理,2022,44(02):68-78.
- [74]祥兵.产业结构、产业布局的碳排放影响及其结构性减排效应研究[D].北京邮电大学,2017.
- [75]薛阳,牛子正,段谟文等.数字经济、技术创新与高质量发展[J].统计与决策,2023,39(21):96-102.
- [76]徐维祥,周建平,刘程军.数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J].地理研究,2022,41(01):111-129.

- [77]严成樑,李涛,兰伟.金融发展、创新与二氧化碳排放[J].金融研究,2016(01):14-30.
- [78]杨莉莎,朱俊鹏,贾智杰.中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步视角[J].经济研究,2019,54(11):118-132.
- [79]杨小娟,陈耀,高瑞宏.甘肃省农业环境效率及碳排放约束下农业全要素生产率测算研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(08):13-20.
- [80]尹迎港,常向东.科技创新、产业结构升级与区域碳排放强度——基于空间计量模型的实证分析[J].金融与经济,2021(12):40-51.
- [81]余晓钟,辜穗.跨区域低碳经济发展管理协同机制研究[J].科技进步与对策,2013,30(21):41-44.
- [82]赵涛,张智,梁上坤.数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J].管理世界,2020,36(10):65-76.
- [83]张君宇,宋猛,刘伯恩.中国二氧化碳排放现状与减排建议[J].中国国土资源经济,2022,35(04):38-44+50.
- [84]张伟,朱启贵,高辉.产业结构升级、能源结构优化与产业体系低碳化发展[J].经济研究,2016,51(12):62-75.
- [85]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.
- [86]周五七,聂鸣.碳排放与碳减排的经济学研究文献综述[J].经济评论,2012(05):144-151.
- [87]左鹏飞,陈静.高质量发展视角下的数字经济与经济增长[J].财经问题研究,2021(09):19-27.
- [88]许进杰.消费的环境外部性及其对经济福利的影响[J].消费经济,2008(03):89-91+95.
- [89]周衍平,李晶,陈会英.清洁能源示范省政策对试点地区碳排放量及经济发展水平的影响:基于多期 PSM-DID 的验证[J].软科学,2023(03):1-12.

致谢

在完成本篇硕士论文的过程中，我有幸得到了许多人的关心、支持和帮助。在此，我想向所有给予我帮助和支持的人表示最诚挚的感谢。

首先，我要衷心感谢我的导师王永瑜教授。感谢王老师在我整个硕士学习期间的悉心指导和关怀。王老师不仅在学术上给予了我极大的启发和帮助，还在生活上给予了我无微不至的关心和支持。王老师教授的学识渊博、严谨的治学态度以及对我的鼓励和指导，使我能够克服困难，坚定前行，完成了这篇论文。

其次，感谢我的家人。感谢他们在我学业和生活中给予的无私支持和鼓励。他们的支持是我坚强前行的动力和信心源泉。

此外，我要感谢师门兄弟姐妹对我论文的指导和建议。你们的宝贵意见和专业知识为我的研究提供了重要的支持。

在离别之际，我想向母校致以最美好的祝愿。愿母校承袭丝路精神，继续培养更多优秀人才；衷心祝愿我的恩师身体健康，阖家幸福；祝愿所有的同窗们前程似锦！