

分类号 F062.1/73
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 数字经济发展对碳排放的影响研究

研究生姓名: 梁恬媛

指导教师姓名、职称: 刘建国 教授

学科、专业名称: 理论经济学 人口、资源与环境经济学

研究方向: 生态经济与可持续发展

提交日期: 2024年6月5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：梁丽娜 签字日期：2024年6月5日

导师签名：刘建国 签字日期：2024.6.5

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：

- 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；
- 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：梁丽娜 签字日期：2024年6月5日

导师签名：刘建国 签字日期：2024.6.5

Impact of digital economy development on carbon emissions

Candidate : Liang Tianyuan

Supervisor : Liu Jianguo

摘要

当今世界正在经历百年未有之大变局，中国需要抓住历史性机遇、妥善应对风险挑战。随着数字经济的发展，数据要素作为新型生产要素，凭借高质量的数据流通和供给，深刻影响企业行为、产业结构、政府建设和群众生活，推动新质生产力的发展。数字经济的发展有益于突破传统的经济发展方式，助力实现碳达峰碳中和。基于此，探讨数字经济发展与碳排放的关系，并在构建全国统一大市场的发展背景下进一步研究，对建成新发展格局、实现高质量发展具有重要意义。

本文聚焦数字经济发展对碳排放的影响效应及作用机制，开展文献回顾、理论分析与实证检验。在理论方面，首先，通过推导数理模型，探究在经济发展影响环境质量的过程中，数字经济起到怎样的作用；然后，构建绿色索洛模型，并与理论分析相结合，讨论数字经济影响碳排放的内在作用机制。在实证方面，首先，采用我国 2011-2022 年 288 个地级市及以上城市的面板数据，构建数字经济发展与碳排放总量指标，借助空间分位图、马尔科夫链、泰尔指数等方法探究数字经济发展和碳排放总量的空间特征及演变规律。其次，采用固定效应模型、机器学习模型进行分析，并从市场分割角度阐述了数字经济发展影响碳排放的作用路径。最后，从地区异质性、资源禀赋异质性层面深入分析，试图从理论和实证层面厘清数字经济发展影响碳排放总量的具体效应和主要机制。

研究发现：（1）中国城市数字经济发展水平与碳排放具有明显的时空异质性。研究期内，数字经济发展水平总体提升较大，在空间维度有“俱乐部收敛”特征，但目前发展水平差异仍比较大，且跳跃式转移的概率较小；绝大部分城市的碳排放总量明显降低，但总体差异明显，且呈上升趋势。（2）样本期间内，城市经济发展与碳排放间呈现“倒 U 型”关系，数字经济发展的加入使进入碳减排阶段的经济发展程度的门槛值更低，但碳排放峰值变大。（3）数字经济发展对城市碳排放存在“倒 U 型”非线性影响，且数字经济发展在促进碳排放增加时存在瓶颈期。即发展初期，数字经济减碳作用较弱，但当数字经济发展到一定阶段，数字经济发展水平小幅度提升就能使碳排放总量迅速降低。（4）数字经济对碳排放的影响存在显著的空间异质性和资源禀赋异质性。数字经济发展对碳排放总量的影响效应由强到弱依次为东部地区、东北地区、中部地区、西部地区，且资源型城市的数字经济发展减碳效应大于非资源型城市。

基于以上主要研究结论，提出以下对策建议：（1）各地级市应注重数字经济的均衡发展，缩小地级市间的数字鸿沟。（2）地级市间加强合作，加快数字经济发展，为碳减排提供新动能。（3）防范数字经济监管不严、数据垄断等问题的出现，避免市场分割状况加剧。（4）立足区域发展差异和资源禀赋差异，因地制宜发展数字经济，促进碳减排。

关键词：数字经济 碳排放 绿色索洛模型 市场分割 马尔科夫链 机器学习模型

Abstract

The world today is undergoing a great change that has not been seen in a century. China needs to seize the historic opportunities and properly address risks and challenges. As a new type of production factor, by virtue of high-quality data circulation and supply, the digital economy profoundly affects corporate behavior, industrial structure, government construction and the life of the masses. Ultimately, the digital economy promotes the development of new-quality productivity. The development of digital economy is beneficial to break through the traditional way of economic development and helps to realize peak carbon neutral. Based on this, it is of great significance to explore the relationship between the digital economy and carbon emissions, and to further study it in the context of the development of a unified national market. This study is of great significance for building a new development pattern and realizing high-quality development.

Centering on the impact and the mechanism of digital economy development on carbon emissions, this paper carries out literature review, the theoretical analysis and empirical test. In the theoretical analysis, firstly, through the derivation of mathematical models, the role of the digital economy in the process of economic development on the impact of environmental quality is explored. To reveal the impact of the digital economy on carbon emissions, the Green Thoreau model is constructed.

And combining it with the theoretical analysis to explain the above problems. In the empirical test, firstly, we select 288 prefecture-level and above cities in China to construct a panel data. And we construct the index of digital economy development and total carbon emission. through spatial quantile map, Markoff chain and Tyre index, the spatial characteristics and evolution process of digital economy and total carbon emission are explored . Secondly, from the perspective of market segmentation, we use the fixed effect model and machine learning model to analyze the impact of digital economy on carbon emissions. Finally, this paper analyzes the regional heterogeneity and resource endowment heterogeneity. In addition this, this paper tries to clarify the specific effects and main mechanisms of the digital economy development on the scale of carbon emissions.

The main findings of the study are as follows: (1) There is obvious spatio-temporal heterogeneity between the level of digital economy development and carbon emissions in Chinese cities. The total carbon emissions of most cities decreased significantly, but the overall difference was obvious and showed an upward trend. (2) During the sample period, there is an inverted U-shaped relationship between economic development and carbon emissions in Chinese cities. With the entry of digital economic development, the threshold for economic development to enter the carbon emission reduction stage is lowered, but the peak of

carbon emission rises. (3) The development of digital economy has an inverted U-shaped non-linear effect on urban carbon emissions. There is a bottleneck period for the development of digital economy to promote the increase of carbon emissions. In the early stage of the digital economy, the role of digital economy on carbon emission reduction is weak. But when the digital economy develops to a certain stage, a small increase in the level of digital economic development can quickly reduce the total amount of carbon emissions. (4) The impact of digital economy on carbon emissions has significant spatial heterogeneity and resource endowment heterogeneity. The impact of digital economic development on the scale of carbon emissions in the eastern region, the northeastern region, the central region and the western region is in order from strong to weak. The carbon-reducing effect of digital economic development in resource-based cities is greater than that in non-resource-based cities.

On the basis of the above main findings, we propose corresponding policy recommendations: (1) Prefectural cities should pay attention to the balanced development of the digital economy and reduce the digital gap between them. (2) Strengthen the cooperation between prefectural cities to accelerate the development of digital economy and provide new impetus for carbon emission reduction. (3) Preventing problems such as lax regulation of the digital economy and data monopoly, and avoiding increased market segmentation. (4) Based on differences in regional

development and resource endowment, each prefectural city should develop its digital economy in accordance with local conditions. Leveraging the strengths of the digital economy to fully contribute to carbon emission reductions.

Keywords : Digital economy; Carbon emissions; Green Solo model; Market segmentation; Markoff chain; Machine learning model

目 录

1 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	2
1.2 研究思路与方法	3
1.2.1 研究思路	3
1.2.2 研究内容	3
1.2.3 研究方法	4
1.2.4 技术路线图	5
1.3 本文创新点	6
2 文献综述	7
2.1 数字经济内涵、测度及其影响效应	7
2.1.1 数字经济内涵	7
2.1.2 数字经济测度	8
2.1.3 数字经济影响效应	9
2.2 碳排放测度及其影响因素	9
2.2.1 碳排放测度	9
2.2.2 碳排放影响因素	10
2.3 数字经济对碳排放的影响	11
2.3.1 数字经济与碳排放	11
2.3.2 数字经济、市场分割与碳排放	12
2.4 文献评述	13
3 数字经济发展影响碳排放总量的理论分析	15
3.1 理论基础	15
3.1.1 环境库兹涅茨曲线理论	15
3.1.2 新古典增长理论	15

3.2 数字经济发展影响碳排放总量的数理模型推导	16
3.2.1 含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线	16
3.2.2 绿色索洛模型	18
3.3 数字经济发展对碳排放总量的影响效应及机制理论分析	20
3.3.1 数字经济发展对碳排放的影响效应理论分析	20
3.3.2 数字经济发展对碳排放总量的市场分割机制理论分析	22
4 数字经济与碳排放现状分析	24
4.1 数字经济发展测度与现状分析	24
4.1.1 数字经济发展指数构建	24
4.1.2 数字经济发展指数测度方法	25
4.1.3 数字经济发展现状分析	26
4.2 碳排放测度与现状分析	36
4.2.1 碳排放测算	36
4.2.2 碳排放总量现状分析	37
4.3 本章小结	40
5 数字经济发展影响碳排放的实证分析	41
5.1 数据、变量与模型	41
5.1.1 数据来源	41
5.1.2 变量选取	41
5.1.3 模型构建	44
5.2 含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线	45
5.3 数字经济发展对碳排放的影响效应分析	47
5.3.1 数字经济发展影响碳排放的效应分析及机制检验	47
5.3.2 数字经济发展对碳排放的具体影响效应特征	50
5.3.3 数字经济发展影响碳排放的稳健性检验	51
5.3.4 数字经济发展影响碳排放的异质性检验	53
6 结论、对策与展望	57
6.1 主要结论	57

6.2 主要对策建议	58
6.3 研究展望	59
参考文献	60
后 记	66

1 引言

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

环境是人类赖以生存的基础，碳排放作为生态环境问题中不可忽视的一部分，在全球范围内受到普遍关注。改革开放以来，凭借着高能耗、高污染的发展方式，中国经济飞速增长。作为世界上最大的碳排放国，当今中国秉持大国态度，着力于转变发展方式，承诺于 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和。节能减排是转变生产方式、实现碳减排的重要手段。“十四五”节能减排工作方案强调，要着力提高能源利用效率，减少污染物排放总量，改善生态环境质量，助力碳达峰、碳中和目标，打赢污染防治攻坚战。

当今世界正在经历百年未有之大变局，在世界大发展大变革大调整中，中国需要抓住历史性机遇、妥善应对风险挑战。随着信息化和智能化不断推进，数字技术变革时代到来，数据要素作为新型生产要素，凭借便捷的、高质量的数据流通和数据供给，深刻影响企业行为、产业结构、政府建设和群众生活，是新质生产力发展的重要动力。依托着庞大的网络用户群体和全方位的政策扶持，数字经济在中国大地上蓬勃发展。中国信息通信研究院《中国数字经济发展白皮书（2023）》数据显示，我国数字经济进一步实现量的合理增长和质的有效提升。2022 年，我国数字经济规模达到 50.2 万亿元，占 GDP 比重达到 41.5%，服务业与工业数字化共同驱动发展，数字经济在国民经济中的地位进一步凸显。在“十四五”乃至更长时期，数字经济在提高经济运行效率、培育新发展动能、畅通国内国际双循环方面发挥越来越重要的作用。

同时，中国国内市场拥有巨大的潜力，但地区间市场仍处于“零碎分割”状态。目前我国进入战略机遇和风险挑战并存的时期，在这一发展阶段，我国面对的国际环境复杂，不确定、难预料的因素增多，“黑天鹅、灰犀牛”事件随时可能发生。在此背景下，为完成设定的各项战略目标，满足人民对美好生活的向往，保证畅通的国民经济循环，构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局就显得尤为重要。2022 年国务院指出，要打破地方保护和市场分

割，促进商品要素资源在更大范围内畅通流动，加快建设全国统一大市场。随着经济实力增强和基础设施改善，虽然市场分割状况有所改善，但全国统一大市场的活力仍未被释放出来。

数字经济的“创造性”和“破坏性”获得广泛的关注，本文将问题聚焦于数字经济的发展能否和怎样改变经济发展与环境质量间的作用曲线走势，能否助力实现双碳目标，数字经济发展能否通过市场一体化机制进而影响城市减碳进程，从理论和实证两方面充分探讨并厘清数字经济发展对城市碳排放的具体影响效应及作用机制。

1.1.2 研究意义

本文在理论层面的研究意义为：其一，证实经济发展与碳排放总量间呈现的曲线关系，并研究在城市经济发展影响碳排放总量的过程中，数字经济是否起作用，若有，数字经济对上述曲线的影响是怎样的。不仅拓展了传统理论研究视角，也补充了相关理论研究结论。其二，将数字经济、市场分割与碳排放纳入统一的分析框架，拓展出了新的研究视角，探究数字经济对碳排放的影响效果及作用机制。其三，城市是经济发展的关键力量，也是碳排放的主体，本文将数据维度下沉至地级市，旨在获得更精确的结果、提出更有操作性的政策建议。

本文在现实层面的研究意义为：其一，数字经济是新质生产力发展的重要推动力，促进新质生产力突破传统的经济发展方式。本文抓住数字经济这一新型生产要素，探究其环境效应，有助于充分发挥数字经济发展优势，助力实现高质量发展。其二，实现碳达峰碳中和是一场深刻的经济社会系统性变革，本文立足我国能源资源禀赋，旨在助力控制碳排放总量，全面建成人与自然和谐共生的中国式现代化，推动绿色发展。其三，本文关注和探讨了在数字经济蓬勃发展背景下，如何抓住要素配置变化机遇、深化要素市场化改革，对加快构建全国统一大市场、助力实现“双碳”目标，以及推动实现中国式现代化有一定的现实意义。

1.2 研究思路与方法

1.2.1 研究思路

为探究我国城市数字经济发展对碳排放的影响，并分析市场分割在数字经济减碳效应中所起的作用，本文研究思路如下：首先，通过文献梳理，在经济学理论和前人研究的基础上，建立理论和数理模型双重分析框架，并将数字经济、市场分割、碳排放纳入统一的分析框架，系统梳理数字经济对碳排放的影响效应及作用机制。其次，将研究视角聚焦于我国城市发展，构建数字经济发展和碳排放总量指标体系并测算，运用空间分布图、马尔科夫链、泰尔指数等工具描绘我国数字经济与碳排放的发展现状与分布特征。再次，使用计量分析模型和分析工具，结合机器学习模型，检验数字经济对碳排放的影响效果和作用机制，探究数字经济通过市场分割影响碳排放的作用路径。最后，进行稳健性检验，并开展地区异质性分析和资源禀赋异质性分析，以盼能够得到可靠的结果，助力我国数字经济发展，加快推进全国统一大市场的构建，推动“双碳”目标的实现。

1.2.2 研究内容

本研究主要内容和行文思路如下：

第一章引言。本章主要说明研究背景与主要问题、研究目的与意义、研究思路与方法、技术路线图及可能的创新点。

第二章文献综述。本章主要梳理相关文献，搭建“数字经济-市场分割-碳排放”的理论分析框架，具体包括四个方面：一是对数字经济内涵、测度及影响效应的梳理；二是梳理了碳排放的测度及影响因素；三是归纳梳理数字经济、市场分割和碳排放相关文献；四是进行文献评述。

第三章数理模型和理论分析。本章通过严谨的数学推导，结合理论分析框架，系统梳理了数字经济与碳排放之间的关系，探究市场分割在数字经济助力减碳过程中起到的作用，为后续实证分析打下基础。

第四章数字经济发展与碳排放总量的现状分析。根据概念界定和研究需求，对数字经济和碳排放数据进行测度，借助空间分位图、传统马尔科夫链、空间马尔科夫链、泰尔指数等方法，解构数字经济和碳排放的空间分布特征，为后文的

实证研究提供数据支撑和现实依据。

第五章实证研究。本文的实证研究由三部分构成。第一部分，探究经济发展与碳排放间的关系，并使用固定效应模型分析数字经济对二者关系的影响。第二部分，使用固定效应模型分析数字经济对碳排放总量的总体效应，并检验数字经济通过市场分割影响碳排放的作用机制。同时，构建机器学习模型探究数字经济对碳排放总量的具体影响特征。第三部分，采用缩尾、替换变量等方法对上述结果进行稳健性检验，并展开地区异质性分析和资源禀赋异质性分析。

第六章结论、对策与展望。本章首先总结研究内容、研究方法及主要结论，并根据研究结论提出相应可行性建议，同时阐述目前研究中存在的不足，以及有待进一步拓展的方向。

1.2.3 研究方法

本文在总结已有文献基础上，围绕数字经济、市场分割和碳排放展开分析，主要采取以下研究办法：

(1) 文献分析法。系统回顾了数字经济、市场分割和碳排放相关文献，对数字经济的内涵、测度、经济效应，碳排放的测度、影响因素，二者间的相互关系，以及“数字经济-市场分割-碳排放”的作用路径进行梳理和总结，针对现有文献的不足，基于相关理论和经济学基本原理，提出本文的研究方向和主要问题。

(2) 数理模型。首先，用数学公式推导城市经济发展与碳排放之间的关系，并讨论数字经济在经济发展影响碳排放的过程当中所起的作用。其次，在索洛模型的基础上，考虑碳排放和数字经济发展，构建绿色索洛模型，分析数字经济对碳排放的影响效应，为后续实证分析奠定理论基础，为得到可靠的结论和有价值的建议提供有力的支撑。

(3) 机器学习模型。为进一步刻画数字经济与碳排放之间的关系，直观地展示数字经济对城市碳排放的作用效果曲线走势，提高研究结论的科学性和可靠性，补充现有研究，本文采用机器学习模型作为补充分析工具，刻画城市碳排放对数字经济发展的偏依赖关系，进一步探讨数字经济发展对碳排放总量的影响效应。

1.2.4 技术路线图

论文的技术路线图如图 1.1 所示：

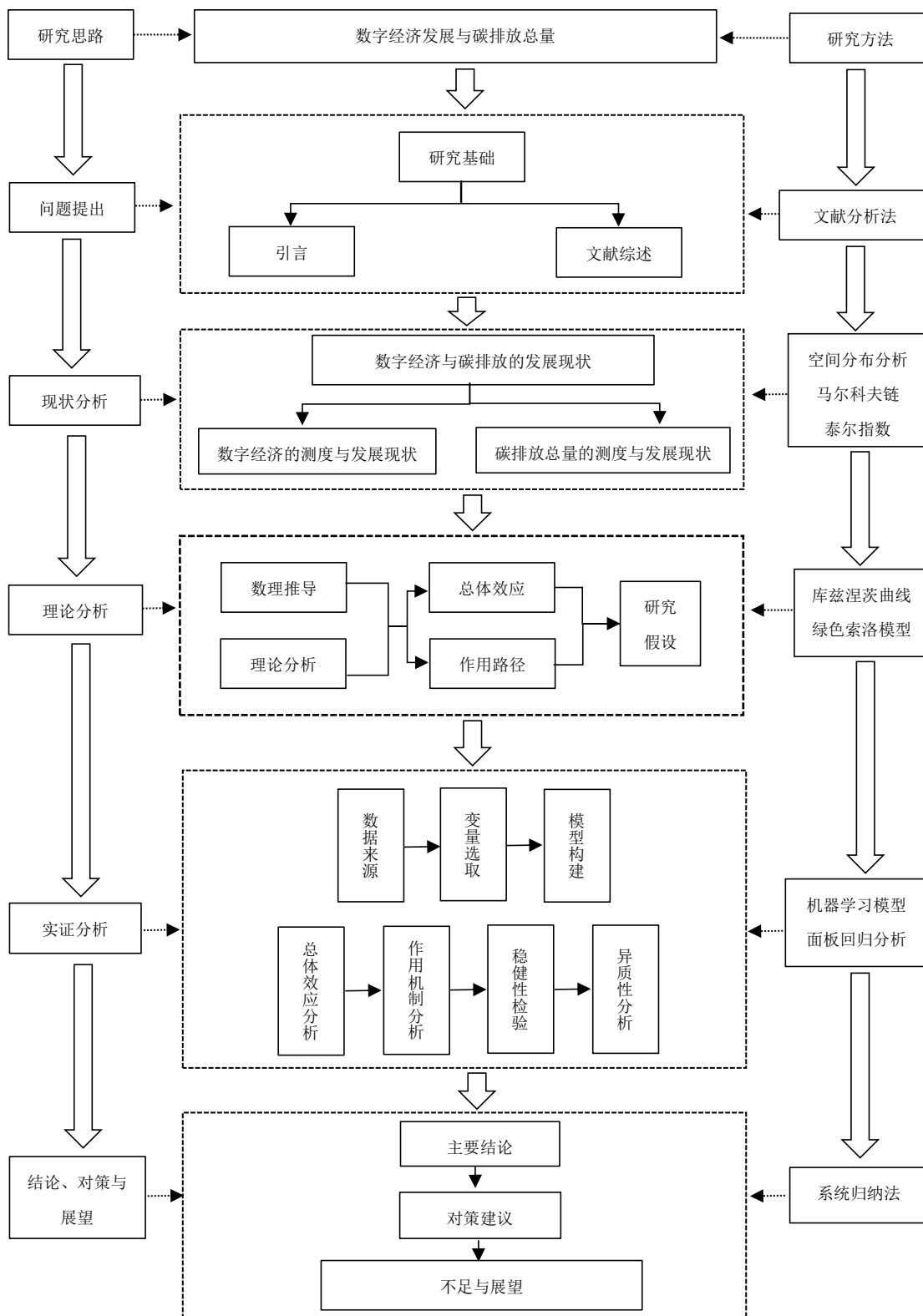


图 1.1 技术路线图

1.3 本文创新点

研究视角上的创新。本文从市场分割角度研究数字经济对城市碳排放总量的影响效应及作用机制，将数字经济、市场分割与碳排放总量纳入统一的分析框架，并实证检验了“数字经济-市场分割-碳排放”这样一个作用路径，拓展了数字经济环境效应方面的研究，探索了减碳新手段。同时，本文将研究尺度下沉至地级市，基于我国 288 个地级市及以上城市面板数据进行分析，扩大了样本容量，丰富和拓展了现有研究。

研究方法上的创新。首先，本文运用 ArcGis10.7 绘制了数字经济和碳排放总量的空间分位图，借助马尔科夫链以及泰尔指数，反映数字经济发展水平与碳排放总量的时空发展特征及趋势。同时，不同于以往的研究，本文在探究数字经济发展对碳排放总量的影响效应过程中，不仅采用面板模型进行计量分析，也构建了机器学习模型进行补充研究分析，刻画了数字经济发展影响碳排放总量的具体效应。

研究内容上的创新。首先，探究经济发展如何影响碳排放，研究数字经济的发展在上述作用中起到怎样的作用。其次，利用固定效应模型和机器学习模型探究数字经济与碳排放之间的影响效应，验证数字经济发展对碳排放的非线性影响过程。再次，从市场分割角度分析了数字经济影响碳排放总量的作用机制。最后进行稳健性检验和异质性分析，确保结果的可信度。

2 文献综述

2.1 数字经济内涵、测度及其影响效应

2.1.1 数字经济内涵

Dan Tapscott (1966) 首次提出数字经济这一概念, 并从电子商务角度探讨数字经济的发展。随着数字技术的发展, 数字经济对经济社会生活产生深刻影响, 那么, 仅以电子商务理解数字经济有一定的局限性。国内外学者、国际组织、政府机构均对数字经济的概念内涵展开研究, 但目前结论仍未得到统一。

国内外学者从不同维度定义数字经济。乌家培 (2000) 将数字经济定义为网络经济。Turcan 等 (2014) 侧重于从信息化发展阐述数字经济的内涵。Bukht 和 Heeks (2018) 从三个维度给数字经济分类, 涉及到从电信服务部门到农业等诸多领域。

国际组织和政府机构把握数字经济发展特征, 从多个角度定义数字经济。美国商务部经济分析局 (BEA) 采取列举定义法, 从数字使能基础设施、电子商务和数字媒体三方面定义数字经济。经济合作与发展组织 (OECD) 倾向于突出数字技术的赋能特征, 将数字经济定义为包括大数据、物联网、人工智能和区块链等技术的、持续在经济社会中进行数字化转型的生态系统。我国主要将数字经济定义为经济活动。2016 年 G20 杭州峰会强调数字经济的三个关键特征, 在《二十国集团数字经济发展与合作倡议》中将其定义为以使用数字化的知识和信息为关键生产要素, 以现代信息网络为重要载体、以信息通信技术的有效使用作为效率提升和经济结构优化的重要推动力的一系列经济活动。以上定义在国内学术界和组织、机构中有较高的接受度。2022 年, 国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》沿用上述定义, 将数字经济定义为以数据要素为关键要素, 以现代信息网络为主要载体, 以信息通信技术融合应用、全要素数字化转型为重要推动力, 促进公平与效率更加统一的新经济形态。

参照我国政府对数字经济的定义以及本文的研究视角, 本文对数字经济的定义如下: 数字经济是以数据要素为关键生产要素, 依托现代信息网络进行的, 具有替代效应、渗透效应和协同效应的, 能够提升经济效率、优化经济结构的经济

活动。

2.1.2 数字经济测度

从既有研究来看，测度数字经济主要有两大类方法：单一指标评价和综合指标评价。

第一类是使用单一评价指标，主要着眼于数字经济的单一特征，如数字经济基础设施，文献中常用选用互联网用户渗透率、移动电话渗透率、宽带渗透率等（伦晓波和刘颜，2022）指标。随着数字技术的不断发展和应用，数字经济广泛且深刻地影响生活方式和生产模式，因此，单一的指标难以准确全面地衡量并反映数字经济发展状况。

第二类是使用综合评价指标。这类研究基于多维度多方面，利用综合评价方法测算综合评价指标。欧盟委员会从五个方面计算数字经济与社会指数（赵放和刘一腾，2022）。联合国国际电信联盟发布的 ICT 发展指数被广泛应用（伦晓波和刘颜，2022）。中国信息通信研究院从宏观经济、基础能力、基础产业和融合应用角度编制中国数字经济指数。腾讯研究院侧重个人对互联网的使用，从数字产业、数字文化、数字生活和数字政务四个方面测算得到数字经济指数。在“数字中国”的布局 and 推进之际，城市发展与数字化创新之间的联系正日益紧密。新华三集团以服务城市管理者为理念，从数据及信息化基础设施建设、城市服务、城市治理、产业数字化、数字产业化等方面编制中国城市数字经济指数，为“数字中国”的建设和数字经济的发展赋能添智，也为开展学术研究提供全新参考。除各组织编制的数字经济指数外，也有学者构建指标体系来衡量数字经济发展水平。赵涛等（2020）从互联网发展和数字普惠金融角度衡量城市数字经济发展状况。Li 和 Liu（2021）从数字化产业、数字化应用和基础设施水平衡量数字经济水平。Ma 和 Zhu（2022）从工业数字化发展、数字基础设施、数字可持续发展、数字产业融合衡量各城市的数字经济发展水平。此外，也有学者借鉴国外经验，采用投入产出法框架（韩君和高瀛璐，2022）、增长核算框架（朱发仓，2021）等多维度全方位测度数字经济。综合评价指标体系能够基于多维度、多方面测度数字经济，测算结果更贴合现实。因而，本文基于前人研究，构建数字经济发展综合评价指标，以确保结果更科学可靠。

2.1.3 数字经济影响效应

随着数字经济在中国大地上的蓬勃发展，互联网、大数据、信息技术等数字技术在数字金融、平台经济、实体经济上广泛应用。数字经济作为一种新的经济形态，深刻影响着生产生活。学术界从多角度出发，讨论数字经济如何影响农业产出（罗浚文等，2020）、就业与劳动收入（罗小芳和王素素，2021；孟祺，2021）、产业结构优化升级（迟明园和石雅楠，2022；刘翠花，2022），探讨数字经济与实体经济融合能力和融合情况（杨庐峰和张会平，2021），进一步探索数字经济对高质量发展的影响（赵涛等，2020）。

数字经济的快速发展改变着当下的经济社会生活，中国经济发展进入工业4.0时代，数字经济在转变经济发展方式、推动生态文明建设中扮演着重要角色。学界对数字经济环境效应的讨论归纳起来主要有三种观点。第一种观点认为，互联网技术、大数据技术通过环境动态监测提高环境监管能力，同时优化企业生产结构和生产规模，提升企业绿色生产效率（刘强等，2022；张帆等，2022），减少环境污染、改善环境质量（邓荣荣和张翱翔，2022），助力生态文明建设。第二种观点认为，数字经济发展刺激企业加大技术创新投入以增加利润，这部分投入挤占有限的资金预算空间，倒逼企业增加能源消费（Hamdi H等，2014），进而延缓绿色发展步伐（金培振等，2014）。第三种观点认为，数字经济与环境之间可能呈现类似环境库兹涅茨曲线的非线性关系（李治国和王杰，2022）。通过文献梳理发现，学界关于数字经济对生态环境的作用效果的讨论并未达成共识，相关研究仍待深入。

2.2 碳排放测度及其影响因素

2.2.1 碳排放测度

国外对碳排放的测度起步早，且已形成成熟的测算方法。例如，橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心测算了一百多年间世界各国和地区的碳排放量，但该方法由于资料限制，应用范围有限。在实际研究中，IPCC推荐的碳排放估算方法运用更广泛。

目前，碳排放估算的相关文献较多。Alam 等（2012）和赵玉焕（2018）、黄和平等（2021）均利用 IPCC 方法，估算不同尺度下的碳排放量。但由于数据限制，传统 IPCC 方法估算碳排放一般以国家、省级区域、大中型城市或经济带为计算单元。碳排放主要包括二氧化碳等温室气体的排放，是导致全球变暖的重要原因。城市碳排放包括辖区内所有温室气体直接排放以及由城市内部活动引起、来源于辖区外的间接碳排放。从经济学角度来看，商品生产、流通、交换、使用过程中产生的温室气体统称为碳排放，与前文的“直接排放”相对应。碳排放总量可通过实测法直接获取数据，或按照碳排放内涵，通过编制城市碳排放清单、利用排放因子进行核算。相较于实测法，排放因子核算虽然在精准度上有所欠缺，但数据可得性和可操作性更强。

另外，1997 年，Elvidge 等（2010）提出国家级夜间灯光数据与二氧化碳排放量间存在关联。近年来我国也有学者使用夜间灯光数据衡量城市碳排放水平（邓荣荣和张翱翔，2021），认为夜间灯光数据能够直观地反映城市的经济发展程度，进而得到城市能源消耗情况。城市能源消耗越大，碳排放总量越多。但此方法仍存在争议。Zhao 等（2015）的研究中指出用夜间灯光数据估算碳排放量的局限性，认为在夜间灯光亮度和碳排放总量之间，线性相关关系与指数相关关系并存。

2.2.2 碳排放影响因素

碳排放受到多种因素的影响。国内学者对碳排放影响因素的研究主要基于 IPAT 等式（王丽等，2017）和拓展的 STIRPAT 框架（马宏伟等，2015），引入环境库兹涅茨曲线（许华和王莹，2021），采用空间计量模型、结构分解模型（王长建等，2021）、指数分解模型（李治国和王杰，2021）等方法展开。

碳排放主要来源于工业活动。王文举（2014）认为产业结构升级能够有效推动实现节能减排目标，Zhang（2014）、Wang（2016）、李志学（2019）研究不同产业对碳排放的影响，认为第二产业比重增加与碳排放强度正相关、与碳排放效率负相关。另外，能源结构和能源消费强度均与碳排放效率负相关（王新利等，2020；蔺雪芹，2021），能源消费总量与碳排放水平之间也存在密切的联系（李云燕和张硕，2023）。对外开放水平、环境规制、城镇化率等因素也会影响城市

碳排放。王惠（2016）从空间角度研究对外开放水平对本地和邻地碳排放的影响，认为出口贸易提升本地碳排放效率，但对于邻地工业碳排放效率的作用相反。李珊珊（2019）、Sun（2020）研究发展，环境规制、城镇化率、对外开放程度和政府干预水平均与碳排放效率呈非线性关系。资源禀赋（Wang，2019）、资源错配（苏颀，2021）、市场分割（洪倩倩，2021）与碳排放效率负相关。

2.3 数字经济对碳排放的影响

2.3.1 数字经济与碳排放

上世纪 90 年代初，Grossman 和 Krueger（1995）提出环境库兹涅茨曲线，描述经济发展与环境污染之间的倒“U”型关系。数字经济作为推动经济转型、绿色发展的关键要素，其环境效应受到了广泛关注。学者们聚焦于数字经济的碳减排效应，展开了丰富的研究。

一种观点认为，数字经济有效推动碳减排。数字经济降低交通运输过程中的碳排放（Lee C C 等，2022），减少企业在人员流动、产品运输过程中产生的碳排放。数字经济在各个领域均表现出提升效能的作用（Wang 和 hao，2023），在数字技术和数字普惠金融（惠献波，2021）的支持下，企业不仅能够准确匹配市场需求、降低低碳技术成本（邬彩霞，2020），也能够优化产业结构、缓解资源错配（惠献波，2021），还拥有多元融资渠道（汪克亮，2021），促进绿色全要素生产率的提升，实现碳减排。

另一种观点则主张，数字经济存在一定的“绿色盲区”，会增加碳排放。数字经济发展产生潜在的反弹效应会增加碳排放（Lange 等，2020），数字产业自身的发展会增加碳排放（易子榆，2021），例如 ICT 行业隐含的碳排放是表现出的直接影响的十余倍（Zhou 等，2019）。蒋金荷（2020）研究数字产业化与碳排放的关系，认为数字经济增加煤电资源消耗，进而增加碳排放。

还有学者综合考虑了数字经济与碳排放之间多重复杂影响，认为数字经济与碳排放之间并非简单的线性关系。Shobande 等（2021）和 Higon 等（2017）关注 ICT 行业的发展与碳排放之间的关系，研究结论指出 ICT 的变化在长期来看最终会引起碳排放的减少，但 Higon（2017）认为短期内，二者是正向关系。而

李治国和王杰（2022）、Cheng 等（2023）通过经验研究证明数字经济发展对碳排放的影响呈倒“U”形,能源回弹效应是倒“U”形形成的主要原因（樊轶佚和徐昊，2021）。缪陆军等（2022）运用多种计量模型证实数字经济发展对碳排放的影响具有非线性特征，二者之间呈现出“倒 U 型”关系，且数字经济能够通过影响创新效应，进而影响碳排放。

综上，学界关于数字经济与碳排放间关系的讨论结果尚未达成统一，目前有数字经济发展促进碳减排、数字经济发展增加碳排放量、数字经济发展与碳排放间存在非线性关系三种结论。

2.3.2 数字经济、市场分割与碳排放

数字经济能够渗透进企业管理及运行过程中，改变产品生产流通过程，最终影响碳排放量。

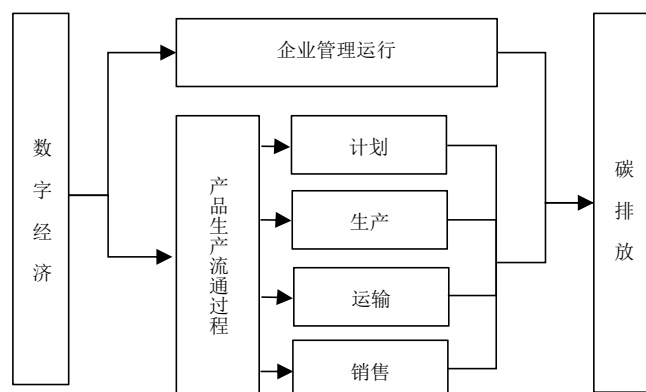


图 2.1 数字经济对碳排放的影响

受到地理距离和地方保护主义的限制，我国区域间缺乏交流合作，存在市场分割。根据陈伟光等（2022）的研究，破除市场分割的核心在于正确处理市场、企业、政府间的关系，而数字经济具有重塑三者关系、打破市场分割的功能。数字经济具有跨时空信息传播、共享信息等优势，能够提供高质量、高效的数据信息，提高信息交流效率和资源匹配效率（荆文君和孙宝文，2019），降低企业内部管理成本及市场交易成本，弱化经济活动在传统部门间、地域间的边界（赵涛等，2020）。数字经济也能够提升信息传播效率，缓解政府和居民的信息不充分、不对称（李三希等，2021），影响政府决策准确性和民众决策监督能力（Mavrodieva

A V 等, 2019), 有效缓解市场失灵。此外, 数字平台具有明显的规模经济、范围经济、网络外部性特征, 数字经济发展到一定阶段将会进入自我强化的良性循环, 突破时空限制, 发挥长尾效应, 填补市场需求, 整合市场、扩大内需, 打破市场边界, 缓解市场分割。同时, 若得不到及时监管, 为占据垄断地位、获取超额利润, 大型数字平台将会使用垄断数据资源 (Jones C I&Tonetti C, 2020)、进行算法歧视 (胡键, 2021) 等手段恶性竞争, 损害消费者利益, 引发“赢者通吃”的局面, 扰乱市场秩序, 影响全国统一大市场的建立。

市场的零碎分割状态往往伴随着资源配置扭曲、产业结构畸形和企业效率损失 (Young, 2000), 不利于经济长期可持续发展 (曹春方等, 2015)。理论上, 如果存在市场分割与地方保护主义, 那么当地企业更可能选择“坏的”生产方式 (聂辉华和张雨潇, 2015), 从而阻碍企业技术进步 (孙早等, 2014), 损失资源配置效率和全要素能源效率 (沈坤荣, 2008), 提高碳排放强度。陆远权和张德纲 (2016) 也检验了市场分割与碳排放强度之间的正相关关系。

2.4 文献评述

综上, 国内外学者对数字经济、碳排放及数字经济的减碳效应已进行大量的研究。针对数字经济与碳排放的关系, 现有研究主要从数字经济自身特征入手, 探讨数字经济对碳排放总量和强度的影响, 将影响路径聚焦实体经济发展, 具体探讨数字经济通过产业结构、能源结构等方面对碳排放的影响。

虽已有大量研究探讨数字经济与碳排放的关系, 但数字经济对碳排放作用方向的相关研究结论并未达成一致。大多学者认为数字经济助力实现减碳目标, 也有部分学者认为二者为非线性关系。同时, 已有文献大多仅通过理论分析影响路径, 缺少数理模型推导。我们也注意到, 现有文献对数字经济影响碳排放的作用机制挖掘局限于中观和微观层面, 讨论数字经济、市场分割与碳排放的文献不多, 但实际上, 数字经济发展背景下的市场分割可能会扭曲资源配置, 影响企业行为, 进而影响碳排放, 三者关系有待进一步探索。

基于此, 本文将研究聚焦于碳排放这一特定环境污染问题上, 首先, 研究数字经济在城市经济发展影响碳排放过程中发挥的作用。其次, 将数字经济、市场分割和碳排放纳入统一的分析框架, 基于索洛模型进行数理推导。再次, 运用地

级市及以上城市面板数据，讨论数字经济发展对城市碳排放的影响效应，并试图从市场分割这一新的视角探究数字经济影响碳排放的作用机制。最后，进行稳健性检验和异质性分析。丰富和拓展现有文献，为我国数字经济助推实现“双碳”目标提供有价值的参考和借鉴。

3 数字经济发展影响碳排放总量的理论分析

3.1 理论基础

3.1.1 环境库兹涅茨曲线理论

环境污染和经济发展一直以来是学界关注的问题。二十世纪五十年代，Kuznets 提出了经济发展与收入分配“倒 U 型”曲线的理论，并受到学界的关注和认可，多用于讨论区域发展与贫富差距问题。1995 年，Grossman 和 Krueger 将该非线性理论应用于环境经济中，主张经济发展与环境污染之间同样存在先增加后减少的非线性关系，具体做法是将经济发展的二次项引入方程，检验经济发展与环境污染的非线性关系。

具体来看，经济发展与环境污染之间存在“倒 U 型”非线性关系，即在经济发展前期，环境不断恶化，当经济发展到达拐点，环境污染最严重，当经济发展越过拐点，环境污染问题将逐渐缓解。随后，环境领域的研究进一步深化、细化，学者们研究讨论了雾霾治理、二氧化硫、二氧化碳等环境因素与经济的关系。

由于现实情况是多元的、复杂的，环境库兹涅茨曲线的“倒 U 型”特征受到了质疑。当下经济结构已经出现变化，且研究区域有差异，经济发展对环境污染的影响可能不符合经典的“倒 U 型”特征，甚至在部分地区某些发展阶段中出现“N 型”曲线特征（张昭利等，2012）。

鉴于数字经济发展对经济发展以及碳排放总量均有重要作用，本文首先尝试证实样本期间内，经济发展与碳排放总量是否符合传统环境库兹涅茨曲线的“倒 U 型”关系，接着验证数字经济对此“倒 U 型”曲线产生的影响。

3.1.2 新古典增长理论

新古典经济增长模型，由罗伯特索洛提出，又称为索洛经济增长模型或外生经济增长模型，是新古典经济学框架内的经济增长模型。1956 年，麻省理工学院的教授罗伯特索洛在凯恩斯以前的经济学家所使用的古典模型基础上，首次引入长期经济增长模型，研究经济均衡增长路径，由此，新古典经济增长模型出现，

并受到关注。索洛模型的基本思路是，先让劳动力和技术保持不变，逐步放宽假设，模拟劳动力变化或技术进步的情况，研究经济增长。在新古典经济增长模型中，稳态是指经济长期均衡状态，是不管经济初始水平如何，最终都会达到的稳定状态。

Brock（2010）和 Taylor（2004）将索洛模型和污染排放结合起来，提出绿色索洛模型，为污染排放随人均收入的变化呈现出“倒 U 型”曲线的机制提供了新的思路。数字经济发展能够影响劳动力生产效率，因此，本文以绿色索洛模型为基础，将数字经济引入其中，通过数理推导，探究数字经济对碳排放的影响效应，接着实证检验数字经济发展与碳排放总量之间的关系特征。

3.2 数字经济发展影响碳排放总量的数理模型推导

3.2.1 含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线

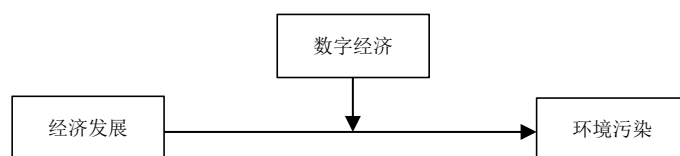


图 3.1 数字经济对经济发展影响碳排放作用曲线的影响

借鉴胡留所等（2023）的研究思路，本文首先假设完全竞争市场中的个人和社会在成本和收益方面均取决于人均收入（ Y ）和环境效益（ E ）。个人收益最大化的函数表达式为：

$$\max NP = B(E, Y) - C(E, Y) \quad (3.1)$$

NP 表示个人收益， B 表示个人在收入和环境方面获得的总收益， C 表示个人在环境保护中付出的成本。在人均收入不变的前提下，个人收益要实现最大化就要满足边际收益等于边际成本：

$$\frac{\partial B}{\partial E} - \frac{\partial C}{\partial E} = EMB - EMC = 0 \quad (3.2)$$

根据上式，对 Y 求导，可以分析个人收入对个人收益均衡的影响：

$$(EMB_Y - EMC_Y) + (EMB_E - EMC_E) \frac{dE}{dY} = 0 \quad (3.3)$$

那么，人均收入变动对个人收益均衡的影响可以表示为：

$$a = \frac{dE}{dY} = \frac{(EMB_Y - EMC_Y)}{(EMC_E - EMB_E)} \quad (3.4)$$

当 $a > 0$ ，环境污染会随着人均收入的增加而增加，反之，环境污染随人均收入增加而减少。反映在图像中，我们就可以得到一个与经济发展呈倒“U”型的环境曲线。基于此，提出假设一：

H1：经济发展与环境污染之间存在“倒U型”关系。

数字经济的发展会影响经济发展水平和环境治理成本。从收益角度分析，数字经济的发展能够促进经济水平提升，进而刺激居民对绿色商品的购买意愿，并提升其支付能力，企业借助数字技术更迅速、准确地掌握消费者偏好，调整生产和经营模式，促进产业结构优化升级，得到更高的效益。从成本角度来看，数字经济作为生产要素投入到生产中，提高生产效率和资源配置效率，改善能源消费结构，节约经济投入，降低环境边际成本。但数字经济自身的发展需要大量的基础设施建设，影响能源消费结构，导致经济成本和环境治理成本的增加。

根据上述分析，假设数字经济通过改变产业结构（ P ）改善影响环境边际收益，通过改变能源消费结构（ I ）影响环境边际成本，那么新的均衡式可以写为：

$$EMB(E, Y, P) = EMC(E, Y, I) \quad (3.5)$$

可以进一步得到：

$$(EMB_Y - EMC_Y) + (EMB_E - EMC_E) \frac{dE}{dY} + (EMB_P \frac{dP}{dY} - EMC_I \frac{dI}{dY}) = 0 \quad (3.6)$$

$$dE = \frac{(EMB_Y - EMC_Y)dY}{(EMC_E - EMB_E)} + \frac{(EMB_P dP - EMC_I dI)}{(EMC_E - EMB_E)} \quad (3.7)$$

$EMB_P > 0$ ， $EMC_I < 0$ ，因此，数字经济的加入会通过改善消费者偏好、优化产业结构，进而改善环境污染状况，使经济发展促进减碳的阶段更早地到来。但根据上述分析，数字经济所需的基础设施建设可能会改变能源消费结构，在数字经济发展初期导致环境恶化，增加碳排放，具体表现即为碳排放峰值增加。

基于此，提出假设二：

H2：数字经济发展能够降低进入减碳阶段的经济发展门槛值，同时，会导致碳排放峰值增加。

3.2.2 绿色索洛模型

(1) 生产函数假设

将一个公司的生产函数假设为哈罗德中性技术进步形式, 可以将其表示为式 3.8:

哈罗德中性技术进步是指在资本-产出比不变的情况下, 使得利润和工资在国民收入中的分配比率不发生变化的技术进步。

$$Y = F(K, DL) \quad (3.8)$$

在式 3.8 中, Y 代表公司的产出水平, K 为资本投入总量, L 代表劳动力投入总量, D 代表公司的数字经济水平。数字经济水平提升可以优化生产要素配置、提高劳动力的生产效率。经济体内每个公司的生产函数均为此形式, 且满足规模报酬不变、边际效应递减规律。用式 3.9 表示:

$$F(\lambda K, \lambda L) = \lambda F(K, L), \forall \lambda > 0 \quad (3.9)$$

根据假定, 可以得到 $F_1 > 0$, $F_{11} < 0$, $F_2 > 0$, $F_{22} < 0$, 以及 $F(0, L) = F(K, 0) = 0$, $\lim_{x_i \rightarrow 0} F_i(x_1, x_2) = +\infty$, $\lim_{x_i \rightarrow +\infty} F_i(x_1, x_2) = 0$, $i = 1, 2$ 。

根据前文假设的规模报酬不变前提, 有效劳动的人均产出可以表示为有效劳动人均资本的函数:

$$\hat{y} = \frac{Y}{DL} = F\left(\frac{K}{DL}, 1\right) = f(\hat{k}) \quad (3.10)$$

式 3.10 中的 $\hat{k} = \frac{K}{DL}$, 代表每单位有效劳动的资本投入量, $\hat{y} = \frac{Y}{DL}$, 代表每单位有效劳动的产出。

假设劳动力以 n 的速率增长, 数字经济, 也就是劳动力生产率以 g_D 的速率增长:

$$\dot{L} = nL \quad (3.11)$$

$$\dot{D} = g_D D \quad (3.12)$$

(2) 动态行为和经济稳态

当商品市场达到均衡状态时, 储蓄等于投资。在此条件下, 我们将整个经济体的资本积累表示为:

$$\dot{K} = s(Y - \delta K - E) \quad (3.13)$$

$$E = \theta z(Y) \quad (3.14)$$

在式 3.13 中, s 是固定不变的储蓄率, 资本折旧率为 δ , E 为碳排放治理成本, 式 3.14 中的 Z 是单个公司排放二氧化碳的函数, 由其产出决定, θ 为每单位二氧化碳的治理成本。那么, 有效劳动治理碳排放的成本就可以写为:

$$\hat{e} = \frac{E}{DL} = \frac{\theta z(Y)}{DL} = \theta z(\hat{y}) = \theta z(\hat{k}) \quad (3.15)$$

将式 3.13 和式 3.14 代入资本积累函数中, 左右两边均除以 K 可得:

$$\frac{\dot{K}}{K} = s \left(\frac{Y}{K} - \delta - \frac{K}{K} \right) = s \left(\frac{f(\hat{k}) - \hat{e}}{\hat{k}} \right) - s\delta \quad (3.16)$$

因此, 动态均衡下, 有效劳动的人均资本可以写为:

$$\frac{\dot{\hat{k}}}{\hat{k}} = \frac{\dot{K}}{K} - \frac{\dot{D}}{D} - \frac{\dot{L}}{L} = \frac{s}{\hat{k}} [f(\hat{k}) - \theta z(\hat{k})] - s\delta - g_D - n \quad (3.17)$$

$$\dot{\hat{k}} = s [f(\hat{k}) - \theta z(\hat{k})] - \hat{k}(s\delta - g_D - n) \quad (3.18)$$

$$z(\hat{k}) = \frac{1}{\theta} [f(\hat{k}) - \delta \hat{k}] - \frac{g_D + n}{s\theta} \hat{k} \quad (3.19)$$

当经济达到稳态, 有效资本的增长率 $\dot{\hat{k}} = 0$, 可以得到有效劳动的碳排放量函数表达式。观察式 3.19 可知, 二氧化碳排放量由有效劳动人均资本数字经济增长率和人口增长率决定, 模型在此假定数字经济增长率和人口增长率是固定不变的。左边是有效劳动二氧化碳排放量, 右边第一部分表示由于资本积累带来的产出增加, 最终引致二氧化碳排放量增加, 右边第二部分表示劳动力数量增加和生产率提高的减碳效应。

结合上述推导, 我们可以更好地理解最初有效劳动人均资本为 0 时, 产出和碳排放都为 0。在资本积累的初期, 碳排放量随着企业的大规模生产而增加, 在这一阶段, 产出增加带来的碳排放高于劳动力数量增加和质量提升的减碳效应, 二氧化碳的排放速率高于减碳速率。当资本积累达到一定水平, 数字经济水平也有所提升。减碳效应仍无法完全抵消二氧化碳的排放量, 但二氧化碳的排放速率低于其治理速率。当经济持续发展到一定阶段, 数字经济的发展也达到了一定高度。从量上看, 数字经济带来的减碳总量高于排放量, 这就意味着, 数字经济的发展不仅能降低二氧化碳排放量, 也能通过技术进步或其他途径改善环境。这在理论上刻画了碳排放和数字经济发展的倒“U”型关系, 即随着数字经济的发展, 碳排放量先增加后减少。

基于上述分析，提出假设三：

H3：数字经济发展与碳排放量间呈现“倒 U 型”非线性影响关系。

3.3 数字经济发展对碳排放总量的影响效应及机制理论分析

3.3.1 数字经济发展对碳排放的影响效应理论分析

数字经济发展对碳排放的影响效应的理论分析从微观、中观、宏观三个视角展开，具体分析了数字经济发展对企业、产业、公众、政府与市场不同的影响。具体影响效应如图 3.2。

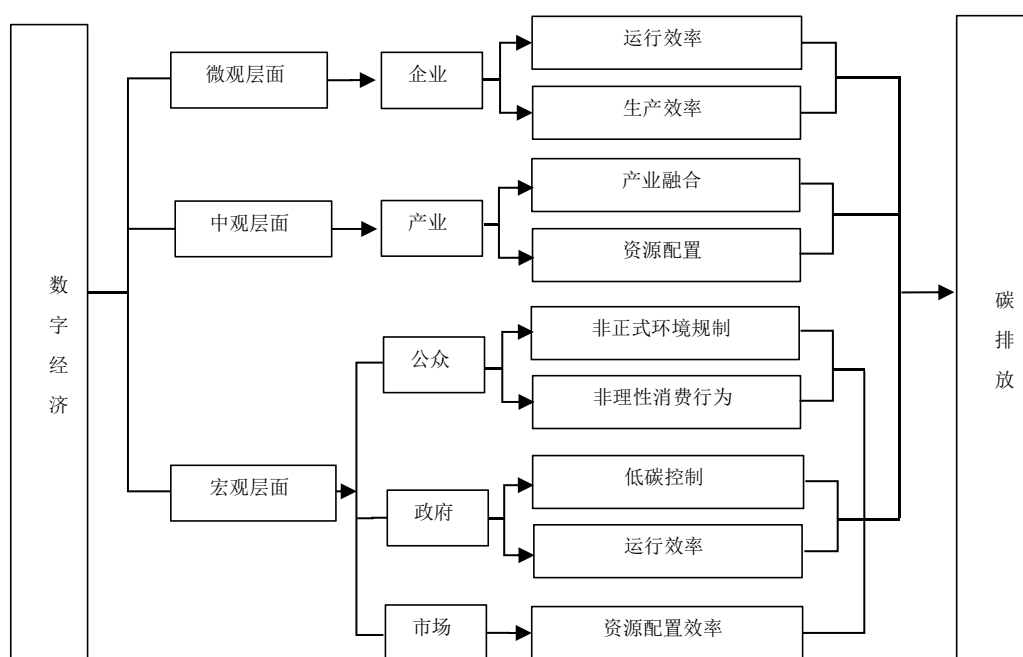


图 3.2 数字经济发展对碳排放总量的影响

(1) 微观视角：企业层面

对于企业来说，数字经济发展将会从运行效率和生产效率两方面影响碳排放。

从运行效率来说：其一，伴随着数字技术基础设施的完善，企业能够更好地进行数据采集、数据分析，以便及时调整污染治理策略和管理能源模型，实现减碳目标。其二，数字技术能够发挥其替代效应。例如随着数字经济的发展，企业可能实现无纸化办公，降低能源消耗，同样，管理过程中人员流动、办公物品运输等一定程度上减少，降低碳排放。其三，数字经济的发展能够重新配置生产要

素，降低劳动力及资本错配风险，控制配置过程中产生的不必要碳排放。其四，为在数字经济背景下获得市场竞争力，企业引进数字技术，增加数字技术基础设施建设，增加碳排放。

从生产效率来说：其一，数字经济发展使企业更准确、更迅速地捕捉多样化的消费者偏好，实现供需双方对接，制定更合理的生产计划。其二，数字经济提高资源配置效率，优化生产流程。其三，数字经济的发展改变了产品运输形式，提高运输效率，降低流通成本，抑制碳排放。其四，数字经济的发展带来居民可支配收入增加，刺激居民的消费意愿，提高其消费能力，企业为应对这部分需求增加产量，碳排放增加。

（2）中观视角：产业层面

从产业层面来说，数字经济发展将会从产业融合和资源配置两方面影响碳排放。

从产业融合的角度来看：其一，数字技术与传统产业融合，能够促进传统制造业优化升级。其二，利用数字经济的规模效应和竞争效应，跨行业跨领域资源实现融合共享，提升企业和城市创新动力能力，为绿色创新发展提供环境。其三，数字经济实现产业链和价值链升级，提升生产效率。其四，倒逼此环境中的低端产业转型升级，实现减碳目标。

从资源配置的角度来看：数字经济背景下劳动力和资本优化配置，产业结构向高端发展。第二产业是能源消费的主力，产业结构优化升级意味着二产比重发生变化，也就意味着能源消费结构发生变化，碳排放状况改变；同时，产业结构优化意味着要素更多地流向高边际报酬的产业部门，比如绿色环保产业部门，有利于减少碳排放总量。

（3）宏观视角：公众、政府与市场层面

宏观视角从公众层面、政府层面和市场层面三个角度剖析数字经济发展对碳排放总量的影响。

从公众层面来看：其一，数字经济的发展通过互联网等传播更多的绿色发展信息，能够提升公众的环保意识，形成更强力的非正式环境规制；其二，互联网的发展拓宽了消费者的消费渠道、便捷了支付方式、简化了交易过程，可能形成部分非理性消费，增加碳排放。

从政府层面来看：其一，数字技术基础设施的建设和完善有助于政府进行碳排放状况预测，以便及时调整管理方案，更好地进行低碳控制；其二，政府运行管理过程中人员流动、物品运输的减少，以及资源配资效率的提高均有助于低碳目标实现；政府为保证经济持续高质量发展，推动数字技术基础设施投资和建设，增加碳排放。

从市场层面来看：数字经济极大地提高了资源配置效率，便捷交易流通过程，实现更清晰准确快速的供需匹配，完善价格机制，提高市场运行效率。

3.3.2 数字经济发展对碳排放总量的市场分割机制理论分析

（1）数字经济对市场分割的影响

数字经济能够影响商品流通效率、改善营商环境、推动分工深化，进而缓解市场分割。

从商品流通效率层面来讨论，数字经济能够从流通时间和流通费用两个途径影响市场分割。马克思的观点为，市场是流通领域本身的总表现，流通效率的提高与市场的互动沟通产生影响，缓解市场分割、形成全国统一大市场的关键在于流通效率的优化提升。数字经济发展一方面能够影响商品的流通时间。电子商务产业链和运送体系的发展和完善极大地缩短了采购时间和货物周转速率。另一方面能够降低流通费用。支付交易效率的提升降低支付、流通成本；运输网络的形成节约运输费用；使用数字技术进行存货、库存管理节约保管费用。

从营商环境改善层面来讨论，营商环境主要包括外部宏观的稳定性和开放性、制度管理的合理性、基础设施质量三个方面。数字经济主要通过改善政府管控和制度合理性、提升基础设施质量两个方面改善营商环境。营商环境改善一方面减轻制度性分割的路径依赖，一方面带来报酬递增，促进经济增长、缓解扭曲的资源配置结构和产出配置结构

从推动分工深化层面来讨论，在收益方面，数字经济推动企业识别多样化需求，提升企业利润，同时实现要素和生产环节的优化配置，提升企业竞争力，改善企业收益状况；在成本方面，数据收集、链接、管理、分析成本的下降降低了企业的时间和内容消耗，降低交易费用。由分工深化成本收益对比可知，数字经济促进了产业聚集进程，以便实现区域内部技术溢出，缓解市场分割。

此外，数字经济的发展若得不到合理的、及时的监管，大型数字平台将会使用垄断数据资源、算法歧视等手段进行恶性竞争，以占据垄断地位、获取超额利润，最终会损害消费者利益，引发“赢者通吃”的局面，破坏稳定的市场秩序，影响全国统一大市场的建立。

(2) 市场分割对碳排放的影响

根据 Lanz 和 Piermartini (2018) 的假设，借鉴黎新伍 (2022) 的分析思路，最终产品的生产需要 N 个企业配合，共经历 S 个阶段，最终产品的生产成本 C 包括生产成本、贸易成本，中间品价值增值为 V_1 。其中，贸易成本包括可积贸易成本 t_s 和可加贸易成本，可加贸易成本包括运输成本 F_s 、制度成本 G_s 、沉没成本 M_s 。

$$C(s) = (1 + t_s)[(1 + t_{s-1})V_{I-1} + F_{s-1} + G_{s-1} + M_{s-1}] + (1 + t_s)V_I + F_s + G_s + M_s \quad (3.20)$$

在此假设三家企业按顺序生产了最终产品，设 $T = 1 + t_s$ ，那么，可以将三家企业的生产成本表示为：

$$C(1) = T_1V_{I1} + F_{s1} + G_{s1} + M_{s1} \quad (3.21)$$

$$C(2) = T_2C(1) + T_2V_{I2} + F_{s2} + G_{s2} + M_{s2} \quad (3.22)$$

$$C(3) = T_3C(2) + T_3V_{I3} + F_{s3} + G_{s3} + M_{s3} \quad (3.23)$$

最终产品的生产成本取决于不同生产阶段生产成本和贸易成本的总和，市场分割会显著增加上下游企业在运输、营销过程中的贸易成本，影响企业行为，阻碍能源消费结构和产业结构优化升级。

从企业层面分析，市场分割意味着极强的地方保护主义存在，对本地企业而言，加大研发投入的动力不足，阻碍绿色技术的创新；同时，由于相对较弱的竞争，企业改善产品质量和提升生产技术的动力不足，阻碍企业创新升级进程；市场分割阻碍技术流通，限制企业管理能源策略和生产运行过程的优化。从产业层面分析，地方保护主义造成区域间、行业间资源低效率配置，诱发产业对低端要素的依赖，能源消费结构和产业结构升级缓慢。从政府和公众层面分析，市场分割不但阻碍要素、产品、服务的流通，更阻碍了思想、知识、技术的传播，加剧了技术垄断，阻碍本地管理制度的优化以及非正式环境规制的形成。

基于上述分析，提出假设四：

H4：数字经济通过影响市场分割状况，进而影响碳排放总量。

4 数字经济与碳排放现状分析

4.1 数字经济发展测度与现状分析

数字经济形态不同于以往其他经济形态，具有数字经济的信息化特征，能够将数字技术传播至实体经济领域，影响产业结构和企业生产，最终反映到生态环境当中。上文已从微观、中观、宏观三个视角分析数字经济对碳排放总量的影响效应，并从市场分割角度详细阐述了数字经济发展影响碳排放总量的作用机理。为了更细致地分析数字经济发展现状，得到可靠的实证分析结论，在此构建数字经济发展指标体系就显得尤为重要。

4.1.1 数字经济发展指数构建

数字基础设施是数字经济发展的基础；金融是资源配置的枢纽和发展实体经济的重要驱动力，数字普惠金融是数字生活中必不可少的部分；数字产业发展是数字经济发展的核心。因此，本文从数字基础设施、数字普惠金融和数字产业发展三个层面构建数字经济发展指标体系，具体指标构建如表 4.1。

表 4.1 数字经济发展指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明
	数字基础设施	宽带互联网基础	每万人国际互联网用户数量
		移动互联网基础	每万人移动电话用户数量
		覆盖广度	数字普惠金融覆盖广度指数
数字经济发展	数字普惠金融	使用深度	数字普惠金融使用深度指数
		数字化程度	数字普惠金融数字化程度指数
	数字产业发展	信息产业基础	信息传输、计算机服务和软件从业人数
		电信产业产出	人均电信业务量

借鉴黄群慧等（2019）的方法，对于城市层面的数字基础设施的测度，采用宽带互联网基础和移动互联网基础两个方面的指标。以上 2 个指标对应的实际内

容是：每万人国际互联网用户数量、百万人中移动电话用户数。以上指标的原始数据均可从《中国城市统计年鉴》中获得。对于数字金融发展的测度，采用中国数字普惠金融指数，该指数由北京大学数字金融研究中心和蚂蚁金服集团共同编制（郭峰等，2020）。城市层面数字产业发展测度采用信息产业基础和电信产业产出两个方面的相关指标，具体来看为信息传输、计算机服务和软件业从业人员数、人均电信业务总量。

4.1.2 数字经济发展指数测度方法

通过主成分分析的方法，将以上指标的数据标准化并进行降维处理，最终得到数字经济综合发展指数。

多元分析处理的是多指标的问题。增加指标的原意是为了使分析更贴近现实，更完整，但过多的指标会增加分析的复杂度。实际工作中，指标间经常具备一定的相关性，主成分分析法是综合处理这种问题的强有力的工具，能够在保证反映原有信息的基础上，选择出较少的指标来代替较多的指标。从数学角度来看，这是一种降维技术。

假设有 n 个样本，每个样本有 p 个变量，构成一个 $n \times p$ 的数据矩阵，当 p 较大时，就需要进行降维处理。首先要计算相关系数矩阵，具体系数矩阵表示为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

r_{ij} 为原变量 x_i 与 x_j 的相关系数， $r_{ij} = r_{ji}$ ，其计算公式为：

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4.2)$$

接下来解特征方程，计算特征值 λ_i 与特征向量 e_i ，要求 $\|e_i\| = 1$ ，即 $\sum_{j=1}^p e_{ij}^2 = 1$ 。

然后计算主成分贡献率 $\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k}$ ($i = 1, 2, \dots, p$)及贡献率 $\frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k}$ ($i = 1, 2, \dots, p$)。

第四步，计算主成分载荷 $l_{ij} = p(z_i, x_j) = \sqrt{\lambda_i} e_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, p$)。

最后，得到各主成分得分，具体矩阵为：

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1m} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.1.3 数字经济发展现状分析

(1) 数字经济发展现状空间分布特征

中国数字经济的发展大致经历了三个阶段：技术孕育阶段、爆发增长阶段，目前处于融合协同阶段。

1994年至2004年为技术孕育阶段。这一阶段内，一系列互联网企业诞生，并迅速发展壮大，互联网基础设施建设受政府重视，形成中国数字经济的基本格局和发展前提。2005年至2015年为爆发增长阶段。在此阶段，数字基础设施快速发展推动互联网应用向深度和广度迈进，网民数量上的突破和应用需求的多元化对数字经济设施建设提出更高的要求。移动互联网和智能手机普及，平台经济爆发式增长，移动支付等具有中国特色的互联网商业模式出现，数字经济的创新从商业模式创新转变为自发式创新，数字经济进入爆发增长阶段。第三阶段是2016年至今，为融合协同阶段。2016年，在中国的主导下，《G20数字经济发展与合作倡议》通过，明确并深化了数字经济内涵。在此阶段，中国对内融合发展，对外积极引领和参与全球数字经济治理，重视数字经济发展、提高对数字经济的发展要求，政府积极推动数字经济和实体经济深度融合，探索数字经济治理体系建设，从顶层设计上明确发展思路、目标和任务，不断做强做优做大数字经济。

本文运用 ArcGis10.7 绘制了 2011-2022 年 289 个城市的数字经济空间分位图。首先通过自然间断点法将 2011 年中国城市数字经济发展水平划分为五个等级，并将其作为标准，用不同颜色区分发展水平，观察数字经济发展的空间分布变化趋势。由于篇幅限制，在此只展示 2011、2016 和 2022 年的数字经济发展水平空间分布特征图。

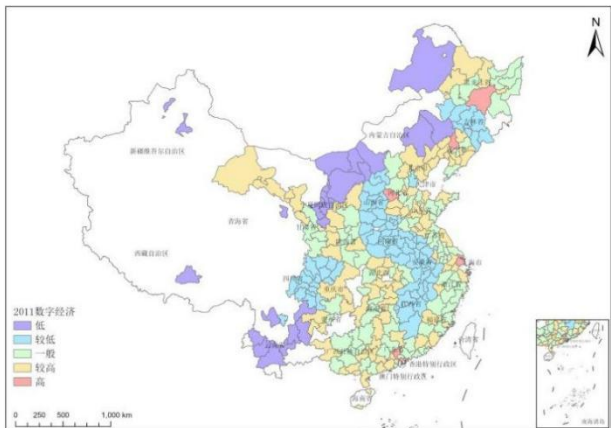


图 1.1 2011 年数字经济发展

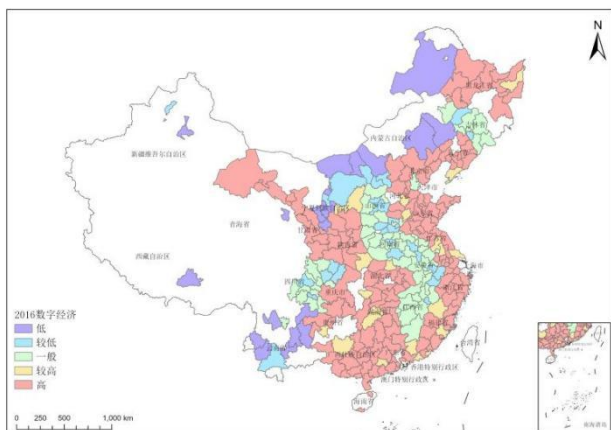


图 4.2 2016 年数字经济发展

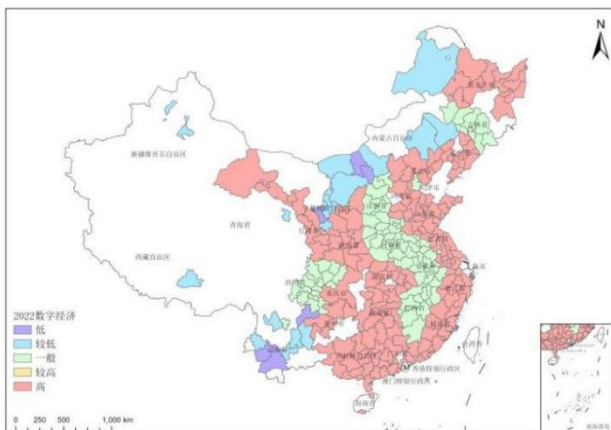


图 4.3 2022 年数字经济发展

注：本文使用的地图审图号为 GS(2019)1822 号，底图无修改，下同。

由图 4.1-4.3 可知，中国城市数字经济发展水平有明显的空间异质性特征。

具体来看，2011 年，我国数字经济处于爆发增长阶段，有一定数量样本城市的数字经济水平已经发展至“一般”级别以上，但大部分地区的数字经济水平仍有较大的上升空间。

2016 年是我国数字经济发展进入融合协同期的第一年，相较于 2011 年，数字经济水平达到“一般”级别以上的城市数目明显增多，空间分布由分散到相对集中。自 2011 年至 2015 年年底，中国经济高速增长，数字基础设施建设和电子商务等业态加速发力，经济发展和人口红利推动平台经济发展和盈利模型创新，中国数字经济实现从追赶到创新的跨越式发展，整体数字经济水平上升。

2022 年，数字经济水平进一步提升，发展水平为“较高”的城市数量增加、分布进一步呈现出集中特征，除云南省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区仍存在极少数数字经济发展处于“低”水平的城市，其余省份城市数字经济发展水平相对较高。2016 年起，数字经济和实体经济融合发展、数字技术和实体经济深度融合，传统产业数字化转型。党的二十大提出，打造具有国际竞争力的数字产业集群目标，政府高度重视、积极探索，推动我国城市数字经济进一步发展。此外，数字经济发展水平空间分布呈现出明显的空间溢出特征，“高”级别城市由零星分布变为群集分布，全国城市数字经济发展水平有明显上升。

（2）数字经济发展的时空转移特征

1. 基于传统马尔科夫链的空间转移路径分析

空间分布图可以反映地理现象时空演变规律和空间分布特征，但更偏重于反映静态过程和区域整体信息，不能直接反映区域现象变化的动态发展过程及内部信息。为弥补以上不足，马尔科夫链方法引入了转移概率矩阵分析方法，细分区域内个体在不同时期的动态演变特征，能够反映出每个地区的状态和转移流动性。

1906 年，马尔科夫（A.A.Markov）提出传统马尔科夫链，其优势是具有随机性、稳定性和无后效性等。传统的马尔科夫链被广泛运用于地理和经济领域，又来描述自然地理和社会经济中的“俱乐部趋同”现象。空间经济学中讲到，一定区域在某时段出现的自然地理演化和社会经济现象无后效性。因此，马尔科夫链被认为是探索区域地理现象、经济社会变化规律、演变路径和转移概率的理想方法。传统马尔科夫链将连续数据离散成多种类型，在时间和状态均离散的条件

下，计算每个类型概率分布和转移概率。构建马尔科夫链需要满足以下条件：条件一，在研究期内，区域数字经济发展任意时序节点状态随机；条件二，区域数字经济发展类型的时序节点转移依据不同概率的路径实现；条件三， t 时期区域数字经济发展类型只取决于 $t-1$ 期的状态类型。满足上述条件之后，将各空间单元 2011-2022 年数字经济发展水平按自然断点法进行等级划分，形成 k 个类型，而后构造 $k \times k$ 的反映状态转移概率矩阵，记录数字经济发展水平转移概率分布，用以描述区域数字经济发展水平时空移动动态演变过程。其表达式为：

$$M_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (4.4)$$

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} n_{11} & \cdots & n_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{i1} & \cdots & n_{ij} \end{bmatrix}_{k \times k} \quad (4.5)$$

M_{ij} 为状态转移概率矩阵， n_{ij} 为研究期内，数字经济发展水平由第 t 年 i 状态变为第 $t+1$ 年 j 状态的空间单元数量之和， n_i 为研究其内数字经济发展水平为 t 状态的空间单元数量之和。

为深入分析中国城市数字经济发展水平的时空演变特征，本文首先构建传统的马尔科夫转移概率矩阵。根据马尔科夫链原理，本文记录 2011-2022 年全国 278 个地级市数字经济发展水平类型，根据自然断点法，将数字经济发展水平离散为低、中、高 3 种状态，并分别用 $k = 1, 2, 3$ 表示。表为 2011-2022 年中国城市数字经济发展水平的四阶矩阵传统马尔科夫转移概率矩阵，其中，对角线上的概率表示区域数字经济发展水平维持原状态的概率，对角线外为数字经济发展水平类型转移的概率。

表 4.2 数字经济发展传统马尔科转移概率

t/t+1	n	1	2	3
1	1043	0.907	0.093	0.000
2	1055	0.048	0.682	0.270
3	960	0.000	0.122	0.878

根据表 4.2 计算结果可得以下四个结论。结论一，对角线的概率值远大于非对角线概率值，说明中国城市数字经济发展水平的类型转移具有一定的稳定性，

有较大的概率维持原状。结论二，中国城市数字经济发展水平存在明显的“俱乐部收敛”，数字经济发展水平低和高的类型在下一阶段维持原状态的概率较高，且概率值接近，分别为 0.907 和 0.878。结论三，中国城市数字经济发展水平类型向上转移的概率均大于向下转移的概率。例如，中等水平城市（类型 2）降为低水平城市（类型 1）的概率为 0.048，而提高为高水平城市（类型 3）的概率为 0.270。说明在传统马尔科夫过程中，中国城市数字经济发展水平提高的概率更大。结论四，中国城市数字经济发展呈现渐进式特征，在临近年份的城市数字经济发展水平类型实现跳跃式转移的概率极小。低水平和高水平之间的跳跃式转移概率均为 0。

2. 基于空间马尔科夫链的时空转移路径分析

实际上，资源禀赋、生产资源配置及政策差异都会造成经济现象在地理空间上并非随机分布。不同区位的数字经济活动密度和强度均有落差，因而区域数字经济发展水平亦有差异。从经济地理学研究视角，讨论区域数字经济发展水平差异时，并不能忽略其空间关联特征。由地理学第一定律可知，任何经济现象都不是脱离空间关系孤立存在的，区域数字经济发展过程中，各地区间的联系日益密切，数字经济的发展也不仅仅是依靠内生动力，区域数字经济发展在地理空间上存在较强的空间依赖性和空间相关性。因此，在解释区域数字经济发展水平动态演变时，不能忽略区域因素的影响。空间马尔科夫链结合了传统马尔科夫链和局部空间统计方法，考虑邻近单元产生的空间溢出效应对目标单元状态产生的影响。本研究邻近状态的空间滞后条件，用空间马尔科夫链分析数字经济发展状态转移的变化规律，以及不同空间滞后类型背景对数字经济发展状态转移概率的影响。

区别于传统马尔科夫链，空间马尔科夫链转移概率矩阵是由 k 个 $k \times k$ 的转移矩阵组合而成， $M_{ij}(k)$ 表示，以空间单元在 t 年的空间滞后因子 k 为条件，数字经济发展水平从 t 年的 i 类型转移至 $t + 1$ 年的 j 类型的空间转移概率，空间滞后值的大小决定了空间单元的空间滞后类型。表达式为：

$$Lag = \sum_{i=1}^n y_i w_{ij} \quad (4.6)$$

上式中， Lag 表示空间滞后值， n 代表空间单元总数， y_i 表示空间单元 i 的属性值， w_{ij} 是空间权重矩阵 (W) 中的元素。

在传统马尔科夫链的基础上,本文考虑了空间滞后条件对区域数字经济发展水平转移路径的影响,换句话说,就是考虑了邻近城市的数字经济发展水平状态对目标城市数字经济发展水平状态发生转移的概率的影响。借助不同空间滞后条件的空间马尔科夫转移概率矩阵,描述空间关系对各地级市数字经济发展水平类型时空转移的影响和空间效应。

本文将数字经济发展水平在相邻类型发生变动的现象定义为向上(或向下)转移,将跨相邻类型的转移定义为向上(或向下)跳跃式转移。例如,由低水平(类型1)向中水平(类型2)的变动称为向上转移,由低水平(类型1)向高水平(类型3)的变动称为向上跳跃转移。表4.3是以邻域状态为空间滞后条件的,2011-2022年中国城市数字经济发展水平类型的空间马尔科夫转移概率矩阵计算结果。

表 4.3 数字经济发展空间马尔科夫转移概率

邻域类型	t/t+1	n	1	2	3
1	1	10	0.895	0.205	0.000
	2	220	0.000	0.716	0.284
	3	19	0.000	0.000	1.000
2	1	857	0.889	0.101	0.010
	2	835	0.061	0.598	0.341
	3	913	0.003	0.124	0.873
3	1	55	1.000	0.000	0.000
	2	12	0.004	0.740	0.256
	3	57	0.000	0.000	1.000

由表4.3中结果可分析得出以下结论:其一,城市数字经济发展水平与区域数字经济发展水平类型不具有协同性。当邻域类型为低水平时,在t时段处于中等水平的城市数量明显多于其他类型的城市数量,当邻域类型为中等水平时,在t时段处于高水平的城市数量明显多于其他类型的城市数量,但当邻域类型为高水平时,在t时段处于低水平和高水平的城市数量相当,且明显高于中水平城市数量。其二,空间马尔科夫转移概率矩阵在空间维度仍具有“俱乐部收敛”特征。

受邻域数字经济发展水平类型的溢出效应的影响,一定的地理空间范围内,中国城市数字经济发展水平类型的转移容易出现趋同现象,即出现“俱乐部收敛”特征。无论处于何种类型的数字经济发展区域,数字经济发展水平类型均呈现出稳定状态,即各个区域中的任意类型城市保持原状的概率均大于转移概率。

比较传统马尔科夫链和空间马尔科夫转移概率矩阵,可以分析邻域城市发展类型是否会对目标城市数字经济发展水平转移过程产生影响。如果低水平的传统马尔科夫转移概率计算出的数值大于空间马尔科夫转移概率计算出的数值,说明邻域城市处于低水平会阻碍低水平城市数字经济发展水平类型向上转移。如果对任意的*i*和*j*,传统和空间马尔科夫转移矩阵数值均相等,那说明邻域城市的数字经济发展类型不会对本地数字经济发展类型产生影响,即地级市之间不存在数字经济发展的空间溢出效应。

与数字经济发展水平处于低水平和中等水平的区域为邻时,该城市数字经济发展水平类型向下转移的概率增大,与数字经济发展水平处于高水平的区域为邻时,处于中等水平城市的数字经济发展水平类型向上转移的概率上升,但状态稳定的概率明显更大。因此,在该地理范围内,城市数字经济发展水平的变化表现出更明显的“俱乐部收敛”。

3.基于马尔科夫过程的稳态预测

经过长时间的转移,系统将出现一个终极状态,即稳定状态。这个终极状态不再随时间变化,对应的概率就是终极状态概率,也叫作平衡状态概率。马尔科夫转移概率矩阵结合极限就能够算出这个终极状态。利用随机过程的平衡分布概率预测马尔科夫过程的未来趋势。根据极限定义可得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k+1) = \pi \quad (4.7)$$

将式 4.7 代入马尔科夫预测公式中可得:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} \pi(k) M \quad (4.8)$$

π 为马尔科夫过程终极状态矩阵,若 $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1, 0 \leq \pi_i \leq 1$ 满足,可以计算出传统马尔科夫过程的平衡状态概率。若将此原理引用到空间马尔科夫链中,可以得到不同空间滞后状态下的平均状态概率。表 4.4 为中国城市数字经济发展水平长期演变趋势的预测结果。

表 4.4 马尔科夫转移概率稳态

状态类型		1	2	3
不考虑空间滞后	初始状态	0.374	0.604	0.022
	终极状态	0.042	0.268	0.593
考虑空间滞后	1	0.614	0.366	0.020
	2	0.138	0.230	0.632
	3	0.126	0.307	0.566

由表 4.4 中的预测结果可知，初始状态下，超过 60%的城市数字经济发展处于中等水平，高水平城市仅占 2.2%。在不考虑空间滞后条件时，根据传统马尔科夫转移概率矩阵求解，发现处于低水平和中等水平的城市数量均在减少，处于高水平的城市数量明显增加，最终可以达到 59.3%。这说明从长期看，中国城市数字经济发展水平类型将随着时间的推移逐步从低级状态向高级状态转移，数字经济发展整体水平逐步提高。在考虑空间滞后条件后，中国城市数字经济发展水平的演变趋势预测结果较之前有明显变化。从长期来看，与数字经济发展水平处于低水平城市为邻的样本中，61.4%的城市稳定于低水平，36.6%的城市可以向上转移为中等水平，跳跃式向上转移的城市占比几乎为 0。说明与低水平城市邻近的城市样本整体数字经济发展水平进步空间较大。为与数字经济发展水平处于中等水平和高水平的城市为邻，城市数字经济发展水平类型稳态处于高水平的数量远高于中等水平和低水平。说明在该邻域背景下，城市数字经济发展的“马太效应”逐渐弱化，并趋于向高水平集聚。

总之，无论是否考虑空间滞后条件，我国城市数字经济发展均表现出了明显的“俱乐部收敛”现象，数字经济发展水平相对稳定，并具有阶梯式转移特征，仅有极小的概率能够实现跳跃式向上或向下转移。但就长期来看，我国城市数字经济整体发展水平将逐步上升，达到稳态时，将有六成城市的数字经济发展处于高水平。另外，处于数字经济发展高水平区域时，城市数字经济发展的“极化”现象更容易被弱化，高水平城市对邻近城市数字经济发展水平具有一定的带动作用。

(3) 数字经济发展的空间差异

通常，我们可以按照某种标准将总体划分为不同的群组，再利用泰尔指数将总体差异分解为组内差异和组间差异，帮助我们分析总体差异在结构上的特征。对于区域差异来说，采用泰尔指数可以将总体的区域差异分解成地区内部和地区间的差异两个部分，以便更好地识别不同部分在总体区域差异中的贡献。

在泰尔指数的实际应用中，通常需要设置不同的权重构造泰尔指数。权重主要有以下四种：以 GDP 为权重构造的“泰尔 T 指数” ($Thiel-T$)，以人口为权重构造的“泰尔 L 指数” ($Thiel-L$)，广义熵指数 ($\alpha = 1$) 的泰尔指数 ($Thiel-GE1$)，广义熵指数 ($\alpha = 0$) 的泰尔指数 ($Thiel-GE0$)。

泰尔指数是广义熵家族指数中的重要指数，广义熵指数通常可以按照以下公式计算：

$$GE_{\alpha}(y) = \frac{1}{n} \frac{1}{\alpha(\alpha-1)} \sum_i \left[\left(\frac{y_i}{\mu} \right)^{\alpha} - 1 \right] \quad (4.9)$$

在 $\alpha = 0$ 时， $GE_0(y) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{1}{\alpha(\alpha-1)} \sum_i \left[\left(\frac{y_i}{\mu} \right)^{\alpha} - 1 \right] = \frac{1}{n} \sum_i \log \frac{\mu}{y_i}$ ；在 $\alpha = 1$ 时， $GE_1(y) = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{1}{n} \frac{1}{\alpha(\alpha-1)} \sum_i \left[\left(\frac{y_i}{\mu} \right)^{\alpha} - 1 \right] = \frac{1}{n} \sum_i \frac{y_i}{\mu} \log \frac{y_i}{\mu}$ 。

在 $GE(1)$ 泰尔指数模型中，总体泰尔指数 $T = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \frac{y_{ij}}{\mu} \log \frac{y_{ij}}{\mu}$ ，某分组的泰尔指数 $T_i = \frac{1}{n} \sum_j \frac{y_{ij}}{\mu_i} \log \frac{y_{ij}}{\mu_i}$ ，分解整体泰尔指数 $T = \sum_i \frac{n_i \mu_i}{n \mu} T_i + \frac{1}{n} \sum_i n_i \frac{\mu_i}{\mu} \log \frac{\mu_i}{\mu} = T_{WR} + T_{BR}$ 。在上述各指数中， y 为需要分析的变量， μ 为 y 的平均值， i 代表分组， j 代表某分组中的某个个体， n 代表个体数目， T_{WR} 为区域内泰尔指数， T_{BR} 表示区域间泰尔指数。

为了深入剖析数字经济发展水平城市差异，本文在测算中国城市数字经济发展水平泰尔指数时，综合考虑了社会经济、政策等因素，最终参照国家发展和改革委员会的划分标准，将样本城市归类为东部、中部和西部地区三大类。东部是最早实行沿海开放政策的地区，经济发展水平较高；中部是指经济次发达地区；西部指的是经济欠发达地区，西部地区的国土面积占比高于东部和中部地区之和。三大地区之间数字经济发展水平整体差异、组内差异、组间差异以及贡献率在表 4.5 中展示。

表 4.5 数字经济发展泰尔指数计算

年份	泰尔指数						贡献率				
	整体	东部	中部	西部	区域内	区域间	东部	中部	西部	区域内	区域间
2011	0.056	0.010	0.050	0.108	0.041	0.015	8.450	29.406	35.516	73.371	26.629
2012	0.058	0.011	0.056	0.106	0.043	0.015	8.885	31.572	33.551	74.008	25.992
2013	0.056	0.010	0.051	0.105	0.041	0.016	8.652	29.575	34.315	72.541	27.459
2014	0.057	0.010	0.052	0.102	0.041	0.016	8.743	29.936	33.169	71.848	28.152
2015	0.059	0.011	0.057	0.107	0.044	0.015	9.048	32.042	33.988	75.078	24.922
2016	0.058	0.011	0.052	0.114	0.044	0.014	9.175	29.929	36.251	75.355	24.645
2017	0.056	0.011	0.051	0.103	0.041	0.015	9.291	30.573	34.002	73.866	26.134
2018	0.057	0.011	0.057	0.100	0.043	0.015	9.023	32.972	32.531	74.527	25.473
2019	0.057	0.011	0.053	0.102	0.041	0.016	8.972	30.553	32.706	72.231	27.769
2020	0.058	0.010	0.055	0.104	0.042	0.015	8.708	31.501	33.291	73.501	26.499
2021	0.059	0.011	0.055	0.106	0.043	0.016	8.835	30.681	33.557	73.072	26.928
2022	0.057	0.012	0.055	0.099	0.042	0.015	9.777	31.836	32.181	73.793	26.207

由表 4.5 中测算结果可得：其一，中国城市数字经济发展水平总体差异明显，该差距在观测期间内在一定区间内波动，但总体呈现上升趋势。总体泰尔指数在 0.0558 至 0.0587 间波动，整体差异较明显。2011 年至 2012 年，整体差异增长幅度最大，可能是因为 2011 年，我国数字经济处于高速发展阶段，但各地区资源禀赋、政策倾向均有差异，相应地，数字经济发展水平整体差异也大幅增加。2016 年至 2017 年，整体差异减小幅度最大，原因可能在于，数字经济逐步发展成熟，中心城市的数字经济高水平发展带动了其他城市数字经济发展，数字技术有效传播，整体差异变小。这也证明了当数字经济发展到一定阶段时，数字经济高发展水平的城市会带动其他城市数字经济发展，数字经济发展的“马太效应”有所弱化。但总体来看，整个观测年份内，整体泰尔指数呈上升趋势，整体差异增大，说明目前城市数字经济发展水平差异仍在增大，部分城市数字经济水平仍有较大的发展空间。其二，从发展差异结构来看，研究样本期间内，中国城市数字经济发展水平差异主要来源于区域内的差异，其贡献率均高于 71%，甚至在 2016 年时达到了 75.36%，远高于区域间的差异。这样的测算结果说明，我国数字经济

发展水平在区域内部存在较大差异。其三，就我国三大区域城市数字经济发展水平内部差异来看，数字经济发展水平的内部差异由大到小排列为西部、中部、东部。西部地区内部差异几乎均大于 0.10，明显高于中部和东部地区，说明西部地区内部数字经济发展水平存在较大的不平衡。但西部组内差异虽在部分年份上升，但整体呈降低趋势，而东部和中部地区组内差异均呈上升趋势，说明西部数字经济发展不平衡的状况有所缓解，但东部和中部地区数字经济发展不平衡的状况加剧。

综上，我国城市数字经济发展水平总体差异较明显，从差异结构看，总体差异主要来源于区域内差异，西部地区区域内差异远高于东部和中部地区，但西部地区区域内差异有缩小趋势，东部和中部地区区域内差异仍在扩大。

4.2 碳排放测度与现状分析

低碳减排是十四五期间的重要工作任务，科学测度碳排放有助于学界进行碳排放相关研究。当下测度碳排放的方法仍有争议。本文通过分析，采取大多数学者认可的方法测度城市碳排放总量，根据测算结果绘制碳排放总量的空间分布图，并使用泰尔指数分析空间差异，期望能为学界相应理论分析做出边际贡献。

4.2.1 碳排放测算

中国各地级市的碳排放数据，采用最新的范围 1、范围 2 和范围 3 核算，具体标准为：范围 1 是指城市辖区内的所有直接排放，主要包括交通和建筑、工业生产过程、农林业与土地利用变化、废弃物处理活动产生的温室气体排放。范围 2 是指发生在城市辖区外的与能源有关的间接排放，主要包括为满足城市消费而外购的电力、供热和/或制冷等产生的排放。范围 3 是指由城市内部活动引起，产生于辖区之外，但不包括于范围 2 的其他间接排放，包括城镇从辖区外购买的所有物品在生产、运输、使用和废弃物处理环节的温室气体排放。具体计算过程为：

总的碳排放=范围 1 排放+范围 2 排放+范围 3 排放。

其中，范围 1 排放=交通和建筑的排放+工业生产过程的排放+农林业与土地利用变化的排放+废弃物处理活动的排放，范围 2 排放=外购电力排放+供热制冷

排放。碳排放的单位是万吨二氧化碳。

4.2.2 碳排放总量现状分析

(1) 碳排放总量的空间分布特征

为探究我国城市碳排放的发展现状，本文运用 ArcGis10.7 绘制了 2011-2022 年，全国 288 个地级市及以上城市的碳排放总量的空间分位图，直观地反映空间维度的碳排放现状，深入分析我国城市碳排放总量的空间分布和变化特征。受篇幅限制，在此只呈现 2011、2016、2022 年碳排放总量的空间分布图。

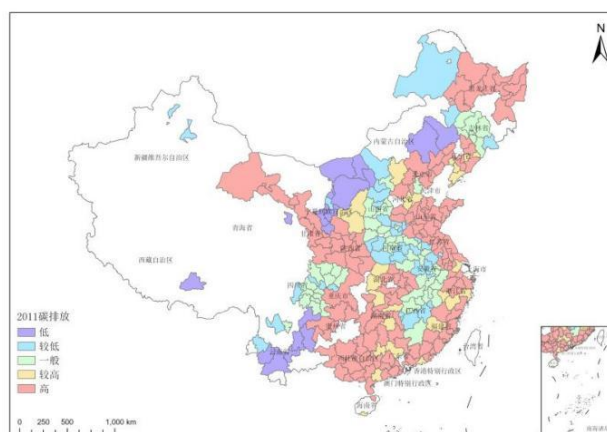


图 4.4 2011 年碳排放总量

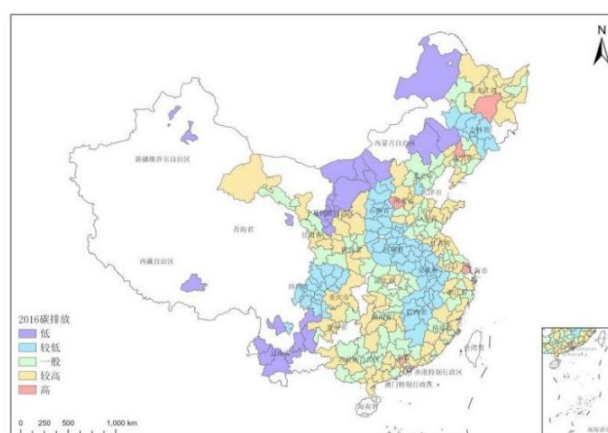


图 4.5 2016 年碳排放总量

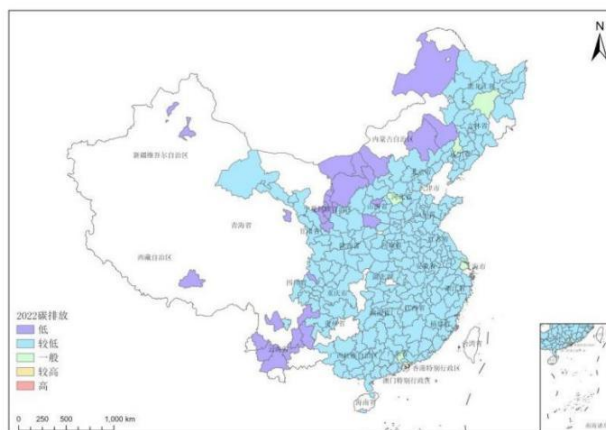


图 4.6 2022 年碳排放总量

如图 4.4-图 4.6 所示，城市碳排放总量存在时空分布特征。

整体来看，全国大部分城市碳排放总量降低，2011 年时，碳排放总量处于“高”级别的城市数量仍较多，碳排放总量为“一般”及以上级别的城市占比较大，2016 年仅个别城市碳排放量仍处于“高”级别，大部分城市碳排放总量降级，且城市碳排放总量等级之间呈现集中特征。而 2022 年，仅个别城市碳排放总量处于“一般”级别，绝大部分城市碳排放总量已降至“较低”级别。这样的变化趋势说明我国城市碳排放总量明显降低，在全国范围内，减碳步伐均稳步迈进，碳减排措施取得一定成效。

黑龙江省和辽宁省碳排放总量较大，且在观测期内减碳速度略慢于其他地区，这可能是由于这两省大部分城市长期进行以燃煤为主的生产消费活动，资源依赖严重。山西省、安徽省、河南省、江苏省、吉林省以及四川省大部分城市在观测期内碳排放总量小，且总体上仍有下降。内蒙古自治区、西藏自治区、云南省大部分城市在观测期内碳排放总量均处于“低”水平，可能是因为这些地区的生产生活方式对能源消耗的依赖程度较低，且人口密度相对较小，生产生活的碳排放量较少，最终反映在较低的总体碳排放量上。

（2）碳排放总量的空间差异

综合考虑自然地理和经济人口等多方面因素，本文运用泰尔指数分析中国城市碳排放总量东部、中部、西部的总体差异、区域内差异、区域间差异及其贡献率，具体如表 4.6 所示。

表 4.6 碳排放总量泰尔指数计算

年份	泰尔指数						贡献率				
	整体	东部	中部	西部	区域内	区域间	东部	中部	西部	区域内	区域间
2011	0.049	0.005	0.050	0.089	0.036	0.013	4.487	33.734	35.134	73.356	26.644
2012	0.054	0.005	0.054	0.102	0.039	0.015	4.485	32.656	35.321	72.462	27.538
2013	0.054	0.004	0.054	0.106	0.039	0.014	3.732	33.466	36.322	73.520	26.480
2014	0.055	0.004	0.054	0.110	0.041	0.014	3.904	32.389	37.940	74.233	25.767
2015	0.055	0.004	0.056	0.109	0.041	0.015	3.496	33.774	36.177	73.448	26.552
2016	0.053	0.005	0.053	0.107	0.040	0.014	4.161	32.841	37.814	74.815	25.185
2017	0.053	0.004	0.052	0.104	0.039	0.015	3.849	32.083	36.696	72.628	27.372
2018	0.056	0.004	0.054	0.116	0.041	0.015	3.706	31.887	38.455	74.048	25.952
2019	0.052	0.004	0.050	0.104	0.038	0.014	3.958	32.076	36.810	72.844	27.156
2020	0.051	0.004	0.054	0.096	0.038	0.014	3.643	34.319	35.296	73.259	26.741
2021	0.056	0.005	0.053	0.114	0.041	0.014	4.109	31.792	38.294	74.195	25.805
2022	0.054	0.005	0.052	0.110	0.040	0.014	4.096	32.099	37.435	73.629	26.371

观察表 4.6 中计算结果可得以下结论：其一，中国城市碳排放量总体差异明显，在观测年份内，总体差异不断波动，但整体呈现上升趋势。总体泰尔指数除 2011 年的 0.0484 外，均大于 0.0514，2015、2018、2021 年均高于 0.0554，这证明碳排放量总体差异仍较大，推动碳减排需要关注碳排放总量呈现出的总体差异拉大的趋势。其二，从差异结构来看，2011-2022 年研究样本期间内，中国城市碳排放总量上的差异主要来源于区域内的差异。区域内差异的贡献率均高于 72%，2016 年，贡献率高达 74.82%。结果说明，中国城市碳排放总量三个区域内部差异较大，其对整体差异的影响远高于区域间差异。其三，就我国三大区域城市碳排放总量内部差异来看，由大到小排列为西部、中部、东部。西部地区内部差异明显高于中部和东部地区，可能因为说明西部地区内部产业发展状况差异较大，导致碳排放总量存在较大的不平衡。就趋势来看，西部和中部地区的碳排放总量内部差异均呈现上升趋势，而东部地区内部差异基本稳定。这种结果出现，可能是因为东部地区由于早期政策倾向，产业发展已经相对稳定，且政策覆盖率高，内部差异较小，且较为稳定，而中部和西部地区产业结构仍在不断调整，内部城

市侧重发展的产业选择也有差异，造成中部和西部地区内部差异趋于扩大。

结果表明，我国城市碳排放总量有明显差异，且区域内部差异对总体差异的影响远高于区域间差异，就结构来看，西部地区内部差异远大于东部和中部，且西部和中部地区内部差异呈现扩大态势，东部地区内部差异小且稳定。

4.3 本章小结

中国城市数字经济发展水平与碳排放具有明显的时空异质性。本文借助空间分位图、传统马尔科夫链、空间马尔科夫链，以及泰尔指数，发现数字经济发展水平总体提升较大，在观测年份内，我国城市的数字经济发展水平由零星分布转为集聚分布，在空间维度有“俱乐部收敛”的特征，但总体发展水平差异较大，跳跃式转移的概率较小；绝大部分城市的碳排放总量明显降低，总体差异明显且呈上升趋势，区域内部差异对总体差异的影响远高于区域间差异。通过动态考察不同城市的数字经济发展和碳排放总量，发现绝大部分城市的数字经济水平在逐渐提高，碳排放总量在逐步缩小。

5 数字经济发展影响碳排放的实证分析

5.1 数据、变量与模型

5.1.1 数据来源

本文整理并制备了 2011-2022 年全国 288 个地级市及以上城市的面板数据，各变量指标的相关数据来源于历年“北京大学数字普惠金融指数”课题组发布的数字普惠金融指数、《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《人口与就业统计年鉴》等。原始数据缺失值较少，为保证数据的完整性，利用线性插值法补充缺失数据。剔除我国港澳台地区、数据缺失严重的城市 and 地区后，最终制备 288 个地级市及以上城市 12 年的面板数据，共 3456 个样本进行后续实证检验。

5.1.2 变量选取

实证分析以 2011-2022 年 288 个地级市为对象，变量选择如下：

被解释变量：碳排放总量 (Cei)。如上文所述，中国各地级市的碳排放数据，采用最新的范围 1、范围 2 和范围 3 核算，总的碳排放等于范围 1、范围 2 和范围 3 排放量加总。

核心解释变量：城市数字经济 (Dig)。对于城市层面的数字经济发展水平的测度，借鉴黄群慧等 (2019) 的指标选取思路，本研究从数字基础设施、数字普惠金融和数字产业发展三方面衡量，通过主成分分析的方法，将以上指标的原始数据标准化并进行降维处理，最终得到数字经济综合发展指数。

机制变量：市场分割 (Seg)。借鉴毛其林和盛斌 (2011) 的算法，对这些城市的市场整合水平进行测算。本研究使用的是 2 维 ($1 * m * k$) 的截面数据集，在这里 m 为地区， k 为商品。各个城市的居民消费价格指数均来源于各个城市公布的统计年鉴及统计公报。考虑到部分城市公布的统计年鉴里物价指数种类相差较大，我们选用 7 大类居民消费价格指数进行测算。具体计算方法如下：

首先，计算出相对价格的绝对值 $|\Delta Q_{jt}^k|$ ，由于本研究所分析的是截面数据，

所以也可以直接记为 $|\Delta Q_{ij}^k|$ ，本研究收集到数据是以 2011 年为 100 的环比指数，所以可以直接采用价格指数取对数后进行一阶差分计算出相对价格：

$$\begin{aligned}\Delta Q_{ijt}^k &= \ln(p_{it}^k/p_{jt}^k) - \ln(p_{it-1}^k/p_{jt-1}^k) \\ &= \ln(p_{it}^k/p_{jt-1}^k) - \ln(p_{it}^k/p_{jt-1}^k)\end{aligned}\quad (5.1)$$

其次，需要去除掉商品的异质性，即对商品价格进行去均值处理：给定了某类商品 k ，对这 11476(152*151/2)个城市组合的相对价格 $|\Delta Q_{ij}^k|$ 求得平均值 $|\Delta \bar{Q}^k|$ ，之后用这 11476 个 $|\Delta Q_{ij}^k|$ 分别与均值相减，得到用于计算方差的相对价格变动部分：

$$q_{ij}^k = \varepsilon_{ij}^k - \bar{\varepsilon}_{ij}^k = |\Delta Q_{ij}^k| - |\Delta \bar{Q}_t^k| \quad (5.2)$$

然后，通过以上方法计算出地区 i 与地区 j 之间 7 类商品的相对价格波动 q_{ij}^k ，并由此计算出 11476 个城市组合的方差 $Var(q_{ij})$ ，将这 11476 个相对价格方差按照城市进行合并，得到了这个城市与全国其他城市的市场分割指数 $Var(q_j) = (\sum_{i \neq j} Var(q_{ij}))/N$ 。

控制变量：为了保证研究结果科学可靠，本文基于研究目标和已有研究成果，选取经济发展 (Ed)、人口密度 (Pop)、技术水平 (Tep)、环境规制 (Er)、政府干预 (Gov) 5 个控制变量，从生活富裕、人口因素、技术水平等因素深入解析城市发展对碳排放总量的影响。

经济发展 (Ed)。一个地区的经济发展水平会影响该地区能源消费水平和碳排放量。考虑到城市经济发展和碳排放量之间的关系，本文将经济发展作为碳排放总量重要的影响因素纳入研究，选择人均 GDP 为代理变量。

人口密度 (Pop)。人口密度可以反映城市人口的空间状况。人口密度越大，能源利用效率和环境治理效率越高 (Shao et al.,2017)，同时也会阻碍碳减排 (Li et al.,2019)。本文选择使用城市人口数与行政区划面积的比值衡量城市人口密度，研究其对碳排放总量的影响效应。

技术水平 (Tep)。绿色全要素生产率可以衡量经济社会可持续发展水平，综合考虑经济增长和环境污染多方因素，对绿色发展进行定性和定量的分析。考

考虑到已有研究和数据获得情况,本文采用超效率 SBM 模型测算城市绿色全要素生产率,以此作为城市技术水平的代理变量。其中,期望产出变量为平减后的实际 GDP。非期望产出变量包括固体废弃物、工业废水、工业废气、碳排放量和 PM2.5。投入要素选择资本存量和就业人数。资本存量采用永续盘存法计算,计算公式如下:

$$K_{ipt} = (1 - \delta)K_{ip(t-1)} + \frac{I_{ipt}}{P_{ipt}} \quad (5.3)$$

式 5.3 中, K_{ipt} 为当期资本存量, I_{ipt} 代表资产投资, P_{ipt} 代表投资指数, 折旧率 δ 参考既有文献, 取值为 9.6%。

环境规制 (Er)。环境规制能够直接或间接地降低碳排放总量 (徐盈之等, 2015)。本文测算环境规制指数作为环境规制的代理变量。本文整理城市工业废水、二氧化硫和烟尘排放量, 标准化后使用调整系数计算出环境规制指数 (叶琴等, 2018)。

政府干预 (Gov)。政府行为对我国经济发展、技术水平均产生着重要影响, 在双碳目标提出后, 政府行为在推动碳减排中起到的作用也不容小觑。本文使用一般公共预算支出与一般公共预算收入的比值衡量政府干预程度。

变量选取如表 5.1 所示:

表 5.1 变量说明

	变量	定义
被解释变量	碳排放总量	二氧化碳排放总量
核心解释变量	经济发展	人均 GDP
	城市数字经济	主成分分析法计算
机制变量	市场分割	市场分割指数
	人口密度	城市总人口数/行政区划面积
控制变量	技术水平	超效率 SBM 计算
	环境规制	环境规制指数
	政府干预	一般公共预算支出/一般公共预算收入

5.1.3 模型构建

(1) 含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线

在数理模型推导的基础上,本文设定碳排放总量和经济增长之间的函数关系,验证中国城市碳排放和经济增长之间的关系特征。方程设定为:

$$Cei_{it} = \alpha + \beta_1 Ed_{it} + \beta_2 Ed_{it}^2 + \gamma X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5.4)$$

式 5.4 中, Cei_{it} 表示 i 城市 t 年的碳排放总量, Ed_{it} 表示 i 城市 t 年的经济发展水平, α 为常数项, X_{it} 代表控制变量组, ε_{it} 为随机误差项。

为探究含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线特征,将数字经济变量引入上式。得到方程:

$$Cei_{it} = \alpha + \beta_1 Ed_{it} + \beta_2 Ed_{it}^2 + \lambda_1 Dig_{it} + \gamma X_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5.5)$$

式 5.5 中, Dig_{it} 表示 i 城市 t 年的数字经济发展水平。当人均 GDP 二次方的系数 $\beta_2 > 0$ 时,碳排放和经济增长呈“U 型”关系;当 $\beta_2 = 0$ 或者不显著,而 β_1 显著时,碳排放和经济增长为线性相关; $\beta_2 < 0$ 时,碳排放和经济增长呈“倒 U 型”关系,拐点时的人均 GDP 为 $-\frac{\beta_1}{2\beta_2}$ 。

(2) 数字经济发展对碳排放总量的影响效应及机制检验

基于理论分析,本文首先考虑建立基准回归模型,实证分析数字经济发展对碳排放总量的影响效应。基准模型设置如下:

$$Cei_{it} = \alpha_0 + \beta_1 Dig_{it} + \beta_2 sDig_{it} + \beta_3 Seg_{it} + \beta_4 Ed_{it} + \beta_5 Pop_{it} + \beta_6 Tep_{it} + \beta_7 Er_{it} + \beta_8 Gov_{it} + \mu_i + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (5.6)$$

式 5.6 中, Cei_{it} 、 Dig_{it} 表示 i 城市第 t 年的二氧化碳排放总量和数字经济发展水平, $sDig_{it}$ 表示 i 城市第 t 年数字经济发展水平的平方项, Seg_{it} 为市场分割指数, Ed_{it} 、 Pop_{it} 、 Tep_{it} 、 Er_{it} 和 Gov_{it} 分别为 i 城市第 t 年经济发展、人口密度、技术水平、环境规制和政府干预情况, μ_i 、 σ_i 和 ε_{it} 为个体效应、时间效应和随机干扰项。

基于前文分析,数字经济发展本身对市场分割具有影响,能够通过市场分割机制作用于碳排放。为验证上述推论,本文以市场分割为被解释变量,数字经济为核心解释变量进行回归估计,模型设定如下:

$$Seg_{it} = \alpha_0 + \beta_1 Dig_{it} + \beta_2 sDig_{it} + \beta_3 Ed_{it} + \beta_4 Pop_{it} + \beta_5 Tep_{it} + \beta_6 Er_{it} + \beta_7 Gov_{it} + \mu_i + \sigma_i + \varepsilon_{it} \quad (5.7)$$

5.2 含数字经济的经济发展与碳排放的“倒 U 型”曲线

基于地级市面板数据，实证检验中国城市经济发展与碳排放间的关系，并验证数字经济对此关系的影响，本文运用 Hausman 检验选择固定效应模型进行后续实证检验。回归结果如表 5.2 所示。

表 5.2 面板回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	碳排放			
经济发展水平	0.1382*** (0.0098)	0.1427*** (0.0100)	0.1570*** (0.0110)	0.1794*** (0.0115)
经济发展水平 ²	-0.0019*** (0.0004)	-0.0020*** (0.0004)	-0.0024*** (0.0004)	-0.0029*** (0.0004)
数字经济			-1.0001*** (0.2679)	-1.7726*** (0.2776)
人口密度		0.0003*** (0.0001)		0.0003*** (0.0001)
技术水平		-0.2352 (0.3110)		-0.2507 (0.3090)
环境规制		-0.0009 (0.0007)		-0.0012 (0.0007)
政府干预		1.2314*** (0.1496)		1.5143*** (0.1551)
_cons	2.5174*** (0.0436)	2.4053*** (0.3272)	2.7734*** (0.0812)	2.8392*** (0.3321)
<i>N</i>	3456	3456	3456	3456
<i>R</i> ²	0.091	0.112	0.095	0.124
碳排放拐点	5.030	4.951	5.341	5.614
拐点时人 GDP	36.368	35.675	32.708	30.931

注：括号里为 t 统计量，***、**、* 分别表示在 0.01、0.05 和 0.1 的显著性水平上显著，下同。

整体来看, 无论是否考虑数字经济和控制变量, 经济发展水平二次项系数均为负, 且统计结果均显著, 具有较好的解释性。这样的结果表明城市经济发展与碳排放总量之间存在明显的“倒 U 型”关系, 即随着经济发展水平提高, 碳排放量呈先增后减的变化趋势。回归结果证实了 H1。

在未考虑控制变量组时, 加入数字经济后, 碳排放拐点左移并上移。拐点时的经济发展水平由 36.368 减少到 32.708, 表明数字经济的加入能够使碳排放更早地达到峰值, 碳排放峰值由 5.030 增加至 5.341, 表明虽然数字经济会带来一定的环境效益, 但其造成的环境成本增加更值得关注。

考虑控制变量组之后, 数字经济的加入仍使碳排放总量的拐点左移并上移。加入数字经济后, 达到拐点时的碳排放量从 4.951 增加至 5.614, 有一个明显的上涨, 而达到拐点时的经济发展水平要求由 35.675 减少至 30.931。这表明, 数字经济的加入虽由于自身的发展特点和要求, 在一定程度上增加了碳排放拐点值, 拉高了碳排放的安全线, 但数字经济能够显著促进碳排放与经济发展间的“倒 U 型”曲线的后半段减碳阶段更早地到达, 降低了经济发展促进减碳阶段对经济发展的要求门槛值。回归结果证实了 H2。

就控制变量来看, 人口密度和政府干预对碳排放存在显著的正向作用, 而绿色技术水平和环境规制估计系数为负, 对碳排放起到抑制作用。具体来看, 人口密度回归系数为正, 且在 5% 统计水平下显著, 说明人口密度的增加会提升碳排放总量, 可能是因为, 人口密度的增加会带来人自身呼出的二氧化碳总量增加, 同时, 人口集聚带来的交通、住房建造等生活环境成本及生产强度的增加都会增加碳排放总量。政府干预回归系数为正, 且在 5% 统计水平下显著, 说明政府干预在一定程度上阻碍了碳减排。虽然在双碳目标约束下, 政府积极响应号召, 表现出碳减排倾向, 但由于上下级政府之间、政府与公众之间信息不对称, “晋升锦标赛”机制一直存在, 在此情形下, 政府仍需要将注意力放在经济建设上, 可能会致使碳排放总量有所增加。绿色技术水平回归系数为负, 说明绿色技术水平的提升能够促进碳减排, 这一结果与现实是相符的。绿色技术水平提升能提高生产率、降低生产成本, 也意味着更低的环境成本。环境规制系数为负, 说明环境规制能够抑制碳排放总量扩大, 这一结果与现实相符。

5.3 数字经济发展对碳排放的影响效应分析

5.3.1 数字经济发展影响碳排放的效应分析及机制检验

为检验数字经济发展与碳排放之间的关系，廓清数字经济发展影响碳排放的机制效应，本文首先基于 Hausman 检验结果，选择固定效应模型展开后续研究。

表 5.3 面板回归及机制检验结果

	基准回归				机制检验
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	碳排放				市场分割
数字经济	1.0641*** (0.2477)	-1.0562*** (0.2619)	4.9898*** (0.9116)	0.2271* (0.9184)	-0.0370*** (0.0030)
数字经济 ²			-5.0273*** (1.1237)	-2.3293* (1.0811)	-0.0071* (0.0036)
市场分割				13.2991* (5.3282)	
经济发展		0.1087*** (0.0063)		0.1033*** (0.0065)	-0.0003*** (0.0000)
人口密度		0.0004*** (0.0001)		0.0004*** (0.0001)	-0.0000*** (0.0000)
技术水平		-0.2548 (0.3116)		-0.2412 (0.3113)	-0.0002 (0.0010)
环境规制		-0.0012 (0.0007)		-0.0012 (0.0007)	-0.0000 (0.0000)
政府干预		1.3421*** (0.1546)		1.2823*** (0.1561)	-0.0044*** (0.0005)
_cons	2.8360*** (0.0849)	2.8683*** (0.3349)	2.1485*** (0.1754)	3.0070*** (0.4109)	0.0343*** (0.0012)
N	3456	3456	3456	3456	3456
R ²	0.006	0.109	0.012	0.112	0.555

本文首先将数字经济一次项纳入回归模型,未控制其他可能影响碳排放总量的变量时,结果为表 5.3 中列(1)所示,城市数字经济发展水平对碳排放的回归系数为 1.0641,且在 1%统计水平下显著,控制其他变量后,结果由表 5.3 列(2)所示,回归系数由正转负,变为-1.0562,说明数字经济对碳排放总量存在负向影响效应。根据前文理论分析,数字经济发展对碳排放总量可能存在非线性影响效应,但这一非线性关系尚未在统计模型上得以证实。因此,在表 5.3 列(3)和表 5.3 列(4)的回归中,将数字经济的二次项纳入其中,考察数字经济是否以非线性的关系影响碳排放量,未加入控制变量组之前的回归结果如表 5.3 列(3)所示,数字经济一次项系数为正,二次项系数为负,且均通过 1%的显著性检验,数字经济和碳排放总量之间呈现显著的“倒 U 型”关系。加入控制变量组后,数字经济对城市碳排放总量的影响效应仍呈现“倒 U 型”非线性关系。

回归结果证实了假设 H3。在数字经济发展初期,对数字基础设施需求增加,引发大量投资建设提升了碳排放量,数字经济发展不成熟,数字技术应用的高投入、高成本导致碳排放增加。与此同时,在数字产业化、产业数字化的过程中,企业为增加竞争力不断进行改革创新,进一步促使碳排放增加。此外,数字经济的发展伴随着消费渠道的拓宽、支付方式的便捷和交易过程的简化,刺激居民消费意愿,促使消费者进行非理性消费,因这一部分非理性消费而进行的生产、保存、运输、销售等过程中产生的碳排放再次叠加。因此,数字经济发展前期,碳排放总量只增不降。当数字经济发展到一定的规模和阶段时,前期投入的资本、人力等的正向效应逐渐显现。其一,企业运行效率和生产效率均有所提高,环境成本降低,碳排放减少。其二,产业结构优化升级,传统产业和低端产业转型升级,资源跨行业、跨领域流通,资源优化配置,能源消费结构变化,碳排放总量减少。其三,数字经济发展传播绿色信息,培养公众的环保意识,同时保证政府的碳排放监控及管理,形成环境规制合力,推动碳减排。其四,互联网销售平台和管理制度逐渐完善,市场供需精准匹配,消费者个性化需求被满足,在此背景下,互联网购物的试错成本降低,环境成本降低,碳排放状况也得到改善。

其余变量中,市场分割回归系数为正,且通过显著性检验。说明市场分割越严重,越难实现碳减排。其原因可能在于,其一,市场分割意味着地方保护主义阻碍本地企业改革创新、引进技术、优化升级,阻碍绿色发展;其二,区域间、

行业间长期低效率的资源配置诱发产业对低端要素和能源消费的依赖,产业优化升级受阻,碳排放持续增加;其三,市场分割阻碍技术、知识、思想的传播,形成技术垄断,阻碍本地企业绿色生产,同时,阻碍非正式环境规制的形成,扩大碳排放量。经济发展水平系数显著为正。说明经济水平的提高,居民可支配收入增加,当居民预算约束提高,个人和家庭会选择加大对生活能源的使用量,同时,消费需求的增加会促使企业增加供给,消费的总环境成本增加,导致碳排放增加。人口密度回归系数为正,且在 1%水平下显著,说明人口密度对碳排放具有正向促进作用。其一,人口集聚会增加城市生活能源消耗;其二,人口密度增加产生更大的消费需求,企业为扩大产出以满足消费者需求,增加碳排放;其三,人口集聚的规模效应会带动产业集群和经济发展,居民可支配收入增加,生活能源需求和消费需求进一步增加,导致碳排放总量增加。技术水平回归系数为负,说明技术水平和碳排放呈负相关,但回归结果并不显著。说明绿色技术水平的进步对碳排放总量的影响可能具有双重性,在考察期内,技术水平进步的减排效果并不显著。环境规制回归系数为负,但并未通过显著性检验。这说明环境规制的实施是有效果的,有利于促进碳减排,但可能由于政策时滞性等原因,环境规制的减碳效果在实证中并未得到证实。政府干预回归系数为正,且在 1%显著性水平下显著,说明政府干预会增加碳排放。可能原因在于,虽然地方政府积极协调完成双碳目标,但由于政府纵向横向信息不对称,地方政府为取得上级政府的支持和公众的认可,就必须重视经济发展,被迫加入“晋升锦标赛”,政府支出多用于经济建设和基础设施建设,增加碳排放总量。

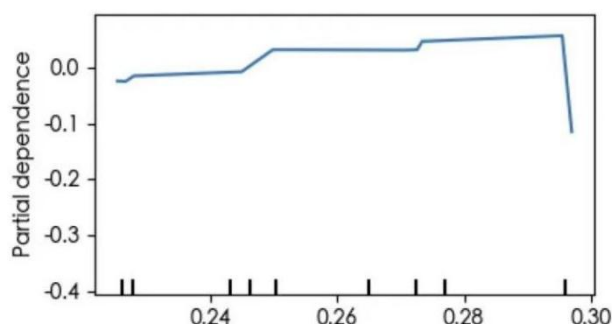
表 5.3 列(5)展示了数字经济发展对市场分割影响机制的实证检验结果,并证实了 H4。在控制个体和时间效应后,数字经济二次项为负,且在 10%显著性水平下显著,说明数字经济对市场分割具有先促进后抑制的“倒 U 型”关系。其原因可能在于,数字经济在发展初期,需要大量地投入建设信息化基础设施、培养数字化专业人才,而大量的创新投入和创新产出之间存在时滞性,不成熟的设备和技术无法传播和普及,尚未完善的监督制度也会造成严重的知识和技术垄断,加剧市场分割程度。当数字经济发展到一定程度,数字技术的应用在各领域传播且成熟,数字经济带来的规模效应和网络效应显现出来,可能从以下三个方面缓解市场分割:其一,降低商品流动时间和流通费用,流通效率提升,交易成

本下降；其二，改善政府管控和制度的合理性，提升基础设施质量，改善营商环境；其三，数字经济发展有助于优化资源配置，精准识别多样化、个性化需求，提升企业生产效率和生产利润。

5.3.2 数字经济发展对碳排放的具体影响效应特征

为具体研究数字经济发展对碳排放总量的非线性影响效应，本研究接着对基础数据集运用机器学习-随机森林模型。“偏峰”或“截尾”特征在各地区数字经济的出现和发展过程中十分明显，因此，本文推测其发展程度产生的具体经济效益和环境效应也具有相似特征。以“数据驱动”为理念的机器学习模型能以预测准确度为准绳充分利用变量信息，展示出更接近真实情况的复杂函数形式。此外，随机森林模型选取一个变量进行节点分裂，对无解析式的黑箱函数，运用画出 $(x_1, \hat{\Phi}(x_1))$ 的偏依赖图展示数字经济对碳排放总量的边际效应。其中， $\hat{\Phi}(x_1)$ 表示因变量 x_1 的偏函数，其他变量 (x_1, x_2, \dots, x_p) 对因变量的影响已经被积分掉。在运用样本均值估计总体均值，可以得到 $\hat{\Phi}(x_1) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n f(x_1, x_{j2}, \dots, x_{jp})$ 。

为进一步剖析数字经济对碳排放总量的具体影响效应，运用机器学习模型分析数字经济的非线性效应。针对因变量为连续变量的随机森林模型，以回归树为基本学习器，以最小均方误差为优化准则选择分裂节点。随机森林模型比经典线性模型具有更大的拟合优势。图展示了碳排放总量对数字经济的偏依赖关系，曲线刻画了偏依赖函数，横坐标内部刻度为 1/10、2/10、……9/10 分位数。



5.1 碳排放总量对数字经济发展的偏依赖关系

如图 5.1 所示，数字经济发展水平处于 1/10 至 9/10 分位区间内，数字经济

的发展对碳排放总量的影响呈现出一个缓慢的、阶梯状的正向促进作用，因此，对大多数地区而言，数字经济的发展对碳排放总量的影响为正。在 9/10 分位前存在 4 个函数几乎为水平线的区域，当数字经济发展到一定阶段时，其对碳排放总量的影响明显为正。这说明数字经济的发展在促进碳排放时存在瓶颈期。而数字经济水平达到 9/10 分位后，数字经济的发展促使碳排放总量迅速减小。呈现这种结果的原因可能在于，数字经济发展的早期阶段，主要是数字基础设施和数字产业化的积累过程，能源消费结构改变，表现为数字经济促使碳排放总量增加。此后，随着数字经济的进一步发展，数字经济服务实体经济的能力增强、效果显著，对碳减排产生了显著的正向影响。

5.3.3 数字经济发展影响碳排放的稳健性检验

中国不同城市之间的经济发展差异较大，资源禀赋和核心产业差距明显，因此，变量可能存在极端值，影响结果的稳健性。为了控制变量可能存在的极端值，保证结果的稳健性，本文在此对样本进行了 5%分位上的双边缩尾，并重新回归，结果如下表所示。

表 5.4 双边缩尾再回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	碳排放			市场分割	
数字经济	1.4241*** (0.2635)	-1.4101*** (0.3735)	7.7759*** (1.5102)	3.6066* (1.4555)	-0.0129** (0.0048)
数字经济 ²			-8.5645*** (2.0052)	-6.8680*** (1.9261)	-0.0442*** (0.0064)
市场分割		-9.7369 (5.3041)		-12.0634* (5.3343)	
_cons	2.7188*** (0.0892)	3.1934*** (0.3873)	1.6396*** (0.2679)	2.3897*** (0.4475)	0.0305*** (0.0014)
N	3456	3456	3456	3456	3456
R ²	0.009	0.108	0.015	0.112	0.556

通过观察表 5.4 中的回归结果可知,对变量进行双边缩尾后,数字经济二次项的系数为-6.8680,且在 1%显著性水平下显著,说明变量双边缩尾排除极端值影响后,中国城市数字经济发展与碳排放总量之间仍呈现“倒 U 型”影响关系,估计结果与前文估计结果基本一致,说明回归结果具有一定的稳健性。此外,对变量进行双边缩尾后,数字经济二次项对市场分割的回归系数仍为负,且在 1%显著性水平下显著,说明数字经济对市场分割的“倒 U 型”非线性关系存在,与前文机制检验的结果基本一致,进一步证明了市场分割机制的稳健性。

为进一步保证模型估计与回归分析具有较强的稳健性,本文使用熵值法重新计算城市数字经济发展水平,并替换核心解释变量再次进行回归。结果如下表所示。

表 5.5 替换核心解释变量再回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	碳排放			市场分割	
数字经济	-4.9979*** (1.9746)	-1.8250*** (1.9747)	9.1035*** (3.4915)	4.1303*** (3.5872)	-0.0535*** (0.0245)
数字经济 ²			-159.2359*** (114.3153)	-79.8436*** (104.4543)	-1.0641*** (0.7634)
市场分割		-66.1266*** (3.0243)		-5.8451*** (3.1396)	
_cons	3.5577*** (0.0155)	3.8391*** (0.2339)	3.7246*** (0.0189)	3.6972*** (0.2308)	0.0211*** (0.0017)
N	2133	2133	2133	2133	2133
R ²	0.272	0.517	0.347	0.533	0.443

通过观察表 5.5 中回归结果可知,回归结果整体上并未出现显著变异和偏离,数字经济二次项的系数仍为负,且在 1%显著性水平下显著,表明在改变数字经济计算方法后,中国城市数字经济发展与碳排放总量之间的“倒 U 型”关系仍然成立,说明本文所做的实证分析结果具有稳健性。此外,数字经济二次项与市场分割间的“倒 U 型”关系存在,与前文机制检验结果一致,表明市场分割机

制具有其稳健性。

5.3.4 数字经济发展影响碳排放的异质性检验

(1) 数字经济发展影响碳排放的地区异质性

我国区域发展不平衡较明显,本文试图从空间角度进一步解析数字经济发展影响碳排放总量的主要影响效应及其作用机制。故此,本文将样本城市划分为东部、中部、西部和东北部地区进行空间异质性分析。回归结果如表 5.6 所示。

表 5.6 地区异质性分析结果

	东部地区		中部地区		西部地区		东北地区	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	碳排放							
数字经济	9.0084*** (2.0467)	6.4206** (2.1426)	4.7675* (1.8509)	4.4405* (1.8364)	3.2231 (1.8638)	2.6995 (1.7129)	5.5088* (2.2357)	5.1575** (1.6854)
数字经济 ²	-9.0586*** (2.3058)	-5.7396** (2.2102)	-5.7301* (2.7699)	-7.4149** (2.7611)	-3.3883 (2.6527)	-3.1731 (2.4961)	-5.3268* (2.5277)	-6.6074*** (1.7723)
控制变量	否	是	否	是	否	是	否	是
_cons	1.7307*** (0.4560)	1.7081 (0.9396)	1.8679*** (0.2964)	3.9098*** (0.6490)	2.1025*** (0.2940)	3.7428*** (0.7173)	2.1960*** (0.4698)	4.2201*** (0.8120)
N	1188	1188	1032	1032	768	768	468	468
R ²	0.020	0.190	0.010	0.041	0.007	0.181	0.016	0.570

如表 5.6 回归结果所示: 其一, 数字经济发展对碳排放总量的影响在区域内呈现出“倒 U 型”的非线性特征。无论是否加入控制变量, 东部地区、中部地区、西部地区和东北地区的数字经济发展与碳排放总量之间均存在先增加后减小的影响关系, 但西部地区回归结果在统计意义上并不显著。其二, 数字经济发展对碳排放总量的影响由强到弱依次为东部地区、东北地区、中部地区、西部地区。这也意味着, 数字经济的减碳效应在东部地区最强, 在西部地区表现最弱。可能的原因在于, 东部地区数字经济发展相对较早, 且引入清洁型能源也较早, 能够迅速地引入并适应数字技术融入传统产业, 促进技术进步和产业转型升级, 数

数字经济在东部地区能更好地发挥规模效应和结构效应,促进东部地区降低碳排放。而西部地区生活燃煤较多,且可能存在大量需要燃煤的产业,节能减排的难度相对较大,且数字经济发展所需的基础设施水平也相对较低,所需投入较多,因此,数字经济发展在西部地区的减碳效应相对较弱。

为检验市场分割机制在不同地区表现出的差异,本文将样本城市分为东部地区、中部地区、西部地区和东北地区,以市场分割为机制变量进行实证检验。回归结果如表 5.7 所示。

表 5.7 地区异质性机制检验

	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区
	(1)	(2)	(3)	(4)
	市场分割			
数字经济	-0.0929*** (0.0064)	0.0007 (0.0057)	0.0004 (0.0062)	-0.0263*** (0.0071)
数字经济 ²	0.0592*** (0.0069)	-0.0409*** (0.0083)	-0.0504*** (0.0088)	-0.0249*** (0.0075)
_cons	0.0542*** (0.0025)	0.0262*** (0.0018)	0.0206*** (0.0025)	0.0387*** (0.0029)
<i>N</i>	1188	1032	768	468
<i>R</i> ²	0.630	0.582	0.496	0.692

如表 5.7 回归结果所示,中部地区、西部地区和东北地区数字经济发展对市场分割均呈现出“倒 U 型”非线性影响特征,而东部地区的数字经济发展与市场分割之间存在“U 型”影响关系,即先减少后增加的非线性关系。可能的原因在于,东部地区较早引入清洁型能源,且技术水平较高,产业结构相对合理,数字经济发展前期能够提高生产效率和管理效率,降低企业经济成本和环境成本,优化产业结构和营商环境,进一步促进碳减排。但当数字经济发展到一定阶段,企业经济效益的增加和社会经济的发展会吸引更多的劳动力流入,过度的人口集聚增加生活和生产的碳排放,最终表现为碳排放增加。

(2) 数字经济发展影响碳排放的资源禀赋异质性

本文为探究城市资源禀赋有差异的条件下,数字经济发展对碳排放总量的影响差异,根据国务院印发的《全国资源型城市可持续发展规划(2013-2020)》将观测期的样本城市划分为资源型城市和非资源型城市,分别进行回归。其中,样本期间内,资源型城市名单结合资源储量条件、开发利用情况动态评估调整。结果如表 5.8 所示。

表 5.8 资源禀赋异质性回归结果

	资源型城市			非资源型城市		
	碳排放 (1)	碳排放 (2)	市场分割 (3)	碳排放 (4)	碳排放 (5)	市场分割 (6)
数字经济	7.4470*** (1.7850)	6.5810*** (1.6886)	0.0019 (0.0055)	4.6917*** (1.1301)	2.5490* (1.1563)	-0.0470*** (0.0038)
数字经济 ²	-9.0322*** (2.4356)	-9.9481*** (2.3434)	-0.0564*** (0.0074)	-4.4069*** (1.3315)	-3.4506** (1.2892)	0.0048 (0.0043)
控制变量	否	是	是	否	是	是
_cons	1.6326*** (0.3069)	2.8001*** (0.6054)	0.0286*** (0.0018)	2.2895*** (0.2291)	3.4157*** (0.5658)	0.0364*** (0.0017)
<i>N</i>	1380	1380	1380	2076	2076	2076
<i>R</i> ²	0.016	0.128	0.596	0.012	0.085	0.552

根据表 5.8 中所示回归结果可知,无论是资源型城市,还是非资源型城市,数字经济发展对碳排放总量均具有先增加后减小的非线性影响效应。即数字经济发展前期,数字经济的发展将会扩大碳排放总量,当数字经济发展到一定阶段后,数字经济的减碳效应显现出来。

资源型城市的数字经济发展减碳效应大于非资源型城市,可能原因是资源型城市拥有丰富的能源和资源,在城镇化和工业化推进过程中,更大的资源禀赋优势给予这部分城市更丰富的初始资源,数字经济渗透进传统产业,更充分地利用资源优势,促使资源型城市数字经济表现出更明显的减碳效应。非资源型城市更多地依赖于创新驱动的发展模式,虽然借助数字经济时代发展的机遇能够加快传统产业升级、推动绿色技术创新、促使产业结构优化配置,但非资源型城市拥有

的初始资源优势较小，产生的减碳效应小于资源型城市。

此外，资源型城市数字经济发展影响碳排放的过程中，数字经济对市场分割表现出了先增加后减少的“倒U型”非线性影响效应，但在非资源型城市的影响过程中表现为负向的线性影响。可能原因在于，对资源型城市而言，资源型产业为主的发展模式表现出路径依赖，在数字经济发展前期，知识、技术的革新给企业带来更高的生产率，同时，为行业设置了更高的进入壁垒，引发恶性竞争，扰乱市场秩序，加剧市场分割。而对于以创新为主要发展驱动的非资源型城市而言，数字经济规模效应和范围效应的优势充分发挥，实现跨时空信息传播和信息共享，提高信息传播和交流效率，缓解信息不充分、不对称，因此，数字经济发展缓解了非资源型城市的市场失灵和市场分割问题。

6 结论、对策与展望

6.1 主要结论

随着城市数字化不断发展,数字经济正在引领新一轮社会变革,数字技术与传统产业相融合,催生新兴绿色产业,为低碳发展带来了新的发展机遇。与此同时,数字经济发展也深刻影响着市场分割状况,牵动着统一大市场的构建步伐。基于此,首先,本文将数字经济与碳排放纳入统一分析框架中,多角度开展文献回顾与理论分析,一方面,通过数理模型推导,探究数字经济对经济发展与城市碳排放间非线性特征的影响;另一方面,构建绿色索洛模型,利用数理模型分析数字经济与碳排放的关系。其次,本研究采用我国 2011-2022 年 288 个地级市及以上的城市层面面板数据,构建数字经济发展与碳排放总量指标并计算,利用空间分位图、马尔科夫链、空间马尔科夫链、泰尔指数分别分析二者分布特征及时空演变特征。再次,使用面板固定效应回归、机制检验、机器学习模型探究数字经济发展与城市碳排放间的关系及作用机制。最后,进行稳健性检验,并进一步分析地区异质性、资源禀赋异质性,深入探究二者间的影响效应及作用机制。

本文的主要结论如下:

(1) 数字经济发展水平与碳排放具有明显的时空异质性。本文借助空间分位图、传统马尔科夫链、空间马尔科夫链,以及泰尔指数,发现数字经济发展总体提升较大,且在观测期间由零星分布转为集聚分布,在空间维度有“俱乐部收敛”的特征,但总体发展水平差异较大,跳跃式转移的概率较小;绝大部分城市的碳排放总量明显降低,但总体差异大且呈上升趋势,区域内部差异对总体差异的影响远高于区域间差异。动态考察不同城市的数字经济发展水平和碳排放总量,绝大部分城市的数字经济发展水平在逐渐提高,碳排放总量在逐步缩小。

(2) 样本期间内,城市经济发展与碳排放总量间呈现“倒 U 型”非线性关系,且数字经济发展使此“倒 U 型”曲线的拐点左移并上移。数字经济的加入能够带来一定的环境效应,降低了减碳阶段对经济发展的要求值和门槛值,使碳排放更早地达到拐点,进入经济发展助力减碳的发展阶段。但由于自身的发展要求和发展特点,数字经济也会造成环境成本的增加,这也意味着,数字经济的加入拉高了拐点的碳排放总量。

(3) 数字经济发展对城市碳排放总量存在先促进, 后抑制的“倒 U 型”非线性影响关系。即在越过阈值之前, 数字经济发展会促进碳排放总量增加, 当达到阈值时, 碳排放总量达到峰值, 在越过阈值之后, 数字经济发展的碳减排效应表现出来, 在此阶段, 数字经济的发展能够有效抑制碳排放。此外, 数字经济发展初期, 数字经济发展导致碳排放总量增加的过程存在瓶颈期, 但当数字基础设施和产业数字化积累达到一定水平, 数字经济发展的减碳效果显著。

(4) 数字经济对碳排放总量的影响存在显著的空间异质性和资源禀赋异质性。在空间异质性方面, 数字经济发展对全区域内样本城市的碳排放总量均呈现出“倒 U 型”的影响效应, 作用效应由强到弱依次为东部地区、东北地区、中部地区、西部地区。在资源禀赋异质性方面, 资源型城市和非资源型城市的数字经济发展均对碳排放总量具有先增加后减小的非线性影响效应, 但资源型城市的数字经济发展减碳效应大于非资源型城市。

6.2 主要对策建议

(1) 各地级市应加快推进数字经济发展和应用, 充分发挥其减碳优势, 为碳减排提供新动能。处理好数字经济发展与环境保护之间的关系, 在加快承载数字技术的新型基础设施建设, 为数字产业化和产业数字化提供基础, 促进数字经济与产业和企业深度融合发展的同时, 加强地区间合作, 推动数字基础设施建设的低碳转型, 考虑建设过程中使用可再生能源, 推动可持续发展。

(2) 随着数字时代的到来, 中国在把握数字经济浪潮时应注意各地区数字经济的均衡发展, 缩小国内地区间的数字鸿沟, 充分利用数字经济减碳效应。对于数字经济欠发达地区要进一步完善数字基础设施, 引导传统产业的数字化转型, 培养优秀的数字化人才, 优化数字经济发展环境, 帮助数字经济欠发达地区跨越数字鸿沟, 降低数字经济发展的“马太效应”。

(3) 防范数字经济监管不严、数据垄断等问题的出现, 守住碳排放峰值安全线, 缓解市场分割。充分发挥数字经济建设对国内统一大市场建立的促进和带动作用, 在细化监管准则、完善相关法律法规和执法规章制度的同时, 构建良好的数字经济发展环境, 推动东部地区产业数字化, 加强中部、西部、东北地区的数字基础设施建设, 有效地促进构建统一开放、竞争有序的统一的国内大市场。

(4) 立足区域发展差异和资源禀赋差异，因地制宜地发展数字经济，促进碳减排。实施差异化的数字经济发展战略，数字经济发展政策向西部和非资源型城市适当倾斜，构建、优化数字经济发展环境，提升和强化数字经济发展和绿色低碳发展，制定优惠政策和扶持政策，培育数字经济专业人才，消除地区间数字鸿沟，充分发挥数字经济的减碳效应。

6.3 研究展望

本文在尽可能全面、准确测算中国城市碳排放总量和数字经济发展水平的基础上，讨论了数字经济发展与碳排放总量间的关系，并从市场分割角度解释了作用机制，得到了一系列研究结论，最后针对性地提出对策建议。然而，受到时间、能力的限制，目前研究仍存在不足，在未来的研究中，应进一步拓展和深入以下几方面的工作。

(1) 数据上有待细化。随着我国统计工作的进一步发展完善，未来地级市、县级等尺度的能源数据以及数字经济相关统计数据将成为可能，这将能够建立更加科学合理的碳排放估算体系和数字经济发展评价指标，能够更全面地、准确地反映我国的碳排放情况和数字经济发展状况。数据精度进一步增强，能够为模型的有效性和真实性提供借鉴和参考。

(2) 作用机制有待挖掘。本文从市场分割的视角出发，探究了数字经济发展影响碳排放总量的作用机制，但碳排放的主体是企业，在企业层面，数字经济发展对碳排放总量的总体影响是否仍遵循“倒U型”特征，市场分割是否仍为其作用机制？从企业层面，更加微观地讨论这一问题构成了进一步的研究方向。

参考文献

- [1] Bukht R, Heeks R. Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy[J]. Development Informatics Working Paper, 2017.
- [2] Cheng Yu, Zhang Yue, Wang Jingjing, Jiang Jinxing. The impact of the urban digital economy on China's carbon intensity: Spatial spillover and mediating effect[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2023, 189.
- [3] Dolores Añón Higón, Roya Gholami, Farid Shirazi. ICT and environmental sustainability: A global perspective[J]. Telematics and Informatics, 2017, 34(4): 85-95.
- [4] Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, Baugh K E, Ziskin D, Tuttle B T. Creating a Global Grid of Distributed Fossil Fuel CO₂ Emissions from Nighttime Satellite Imagery[J]. Energies, 2010, 3: 1895-1913.
- [5] Grossman G M, Krueger A B. Economic Growth and the environment[J]. The quarterly journal of economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [6] Hamdi H, Sbia R, Shahbez M. The nexus between electricity consumption and economic growth in Bahrain[J]. Economic Modelling, 2014(38): 227-237.
- [7] Jones C I, Tonetti C. Nonrivalry and the economics of data[J]. American Economic Review, 2020, 110(9): 2819-2858.
- [8] 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.
- [9] Li Z, Shao S, Shi X, et al. Structural transformation of manufacturing, natural resource dependence, and carbon emissions reduction: Evidence of a threshold effect from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 920 - 927.
- [10] Li Zhiqiang, Liu Ying. Research on the Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Digital Economy Development in China[J]. IEEE ACCESS, 2021, 9: 63094-63106
- [11] Ma Dan, Zhu Qing. Innovation in emerging economies: Research on the digital economy driving high-quality green development[J]. Journal of Business Research,

2022,145:801-813

- [12] Mavrodieva A V, Rachman O K, Harahap V B, et al. Role of social media as a soft power tool in raising public awareness and engagement in addressing climate change[J]. *Climate*, 2019,7(10):122.
- [13] Mohanmmad Jahangir Alam et al. Energy consumption, carbon emissions and economic growth nexus in Bangladesh: Cointegration and dynamic causality analysis[J]. *Energy Policy*, 2012,45:217-225.
- [14] Shao S, Tian Z, Yang L. High speed rail and urban service industry agglomeration: Evidence from China ' s Yangtze River Delta Region[J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 64: 174 - 183.
- [15] Shobande Olatunji Abdul. Decomposing the Persistent and Transitory Effect of Information and Communication Technology on Environmental Impacts Assessment in Africa: Evidence from Mundlak Specification[J]. *Sustainability*, 2021,13(9):4683.
- [16] Steffen Lange, Johanna Pohl, Tilman Santarius. Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?[J]. *Ecological Economics*, 2020,176,106760.
- [17] Sun W, Huang C. How does urbanization affect carbon emission efficiency? Evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020(272): 122-828.
- [18] Taylor M S, Brock W A. The Green Solow Model[J]. *National Bureau of Economic Research*.2004.
- [19] Tapscott D. *The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*[J]. New York: McGraw Hill, 1996: 69-71.
- [20] TBrock W A, Taylor M S, The Green Solow Model[J]. *Journal of Economic Growth*, 2010,15(2):127-153.
- [21] Turcan V, Gribincea A A, Birca I. Digital Economy - A Premise for Economic Development in the 20th Century[J]. *Economy & Sociology Theoretical & Scientifical Journal*, 2014(2):109-115
- [22] Wang K, Wu M, Sun Y, et al. Resource abundance, industrial structure, and regional carbon emissions efficiency in China[J]. *Resources Policy*, 2019(60): 203-214.

- [23] Wang Lianghu, Shao Jun. Digital economy, entrepreneurship and energy efficiency. *Energy*, 2023,269.
- [24] Wang Z, Zhang B, Liu T. Empirical analysis on the factors influencing national and regional carbon intensity in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016,(55): 34-42.
- [25] Zhang Y J, Liu Z, Zhang H, et al. The impact of economic growth, industrial structure and urbanization on carbon emission intensity in China[J]. *Natural hazards*, 2014, 73(2): 579-595.
- [26] 曹春方,周大伟,吴澄澄,张婷婷.市场分割与异地子公司分布[J].*管理世界*,2015(09):92-103+169+187-188.
- [27] 陈伟光,裴丹,钟列炀.数字经济助推全国统一大市场建设的理论逻辑、治理难题与应对策略[J].*改革*,2022(12):44-56.
- [28] 迟明园,石雅楠.数字经济促进产业结构优化升级的影响机制及对策[J].*经济纵横*,2022(04):122-128.
- [29] 邓荣荣,张翱翔.中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J].*资源科学*,2021,43(11):2316-2330.
- [30] 樊轶侠,徐昊.中国数字经济发展能带来经济绿色化吗?——来自我国省际面板数据的经验证据[J].*经济问题探索*,2021(09):15-29.
- [31] 郭峰,王靖一,王芳,孔涛,张勋,程志云.测度中国数字普惠金融发展:指数编制与空间特征[J].*经济学(季刊)*,2020(04).
- [32] 韩君,高瀛璐.中国省域数字经济发展的产业关联效应测算[J].*数量经济技术经济研究*,2022,39(04):45-66
- [33] 洪倩倩,李石强.市场分割对工业碳排放效率的空间影响研究[J].*生态经济*,2021,37(10):32-39.
- [34] 胡键.算法治理及其伦理[J].*行政论坛*,2021,28(04):41-49.
- [35] 胡留所,胡健,卢山冰.数字经济赋能低碳发展的机理分析与实证检验[J].*济南大学学报(社会科学版)*,2023,33(05):69-80.
- [36] 黄和平,易梦婷,曹俊文等.区域贸易隐含碳排放时空变化及影响效应——以长江经济带为例[J].*经济地理*,2021,41(03):49-57.

- [37] 黄群慧,余泳泽,张松林.互联网发展与制造业生产率提升:内在机制与中国经验[J].中国工业经济, 2019(08).
- [38] 惠献波.数字普惠金融与城市绿色全要素生产率:内在机制与经验证据[J].南方金融, 2021, 1(5): 20-31.
- [39] 蒋金荷.可持续数字时代:数字经济与绿色经济高质量融合发展[J].企业经济,2021,40(07):23-30+161.
- [40] 金培振,张亚斌,彭星.技术进步在二氧化碳减排中的双刃效应——基于中国工业 35 个行业的经验证据[J].科学学研究,2014,32(05):706-716.
- [41] 荆文君,孙宝文.数字经济促进经济高质量发展:一个理论分析框架[J].经济学家,2019(02):66-73.
- [42] 李三希,王泰茗,武珣璠.数字经济的信息摩擦:信息经济学视角的分析[J].北京交通大学学报(社会科学版),2021,20(04):12-22.
- [43] 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.
- [44] 黎新伍,黎宁,谢云飞.数字经济、制造业集聚与碳生产率[J].中南财经政法大学学报,2022(06):131-145.
- [45] 李云燕,张硕.中国城市碳排放强度时空演变与影响因素的时空异质性[J].中国环境科学,2023,43(06):3244-3254.
- [46] 李永友,沈坤荣.我国污染控制政策的减排效果——基于省际工业污染数据的实证分析[J].管理世界,2008(07):7-17.
- [47] 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.
- [48] 李治国,王杰.中国城乡家庭碳排放核算及驱动因素分析[J].统计与决策,2021,37(20):48-52.
- [49] 李志学,李乐颖,陈健.产业结构、碳权市场与技术创新对各省区碳减排效率的影响[J].科技管理研究,2019,39(16):79-90.
- [50] 陆远权,张德钢.环境分权、市场分割与碳排放[J].中国人口·资源与环境,2016,26(06):107-115.
- [51] 蔺雪芹,边宇,王岱.京津冀地区工业碳排放效率时空演化特征及影响因素[J].

经济地理,2021,41(06):187-195.

[52] 刘翠花.数字经济对产业结构升级和创业增长的影响[J].中国人口科学,2022(02):112-125+128.

[53] 刘军,杨渊璠,张三峰.中国数字经济测度与驱动因素研究[J].上海经济研究,2020(06).

[54] 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.

[55] 伦晓波,刘颜.数字政府、数字经济与绿色技术创新[J].山西财经大学学报,2022,44(04):1-13.

[56] 罗浚文,李荣福,卢波.数字经济、农业数字要素与赋能产值——基于 GAPP 和 SFA 的实证分析[J].农村经济,2020,No.452(06):16-23.

[57] 罗小芳,王素素.数字经济、就业与劳动收入增长——基于中国家庭追踪调查(CFPS)数据的实证分析[J].江汉论坛,2021,No.521(11):5-14.

[58] 马宏伟,刘思峰,赵月霞,马开平,袁潮清.基于 STIRPAT 模型的我国人均二氧化碳排放影响因素分析[J].数理统计与管理,2015,34(02):243-253.

[59] 孟祺.数字经济与高质量就业:理论与实证[J].社会科学,2021(02):47-58.

[60] 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,2022,1(2):45-57.

[61] 聂辉华,张雨潇.分权、集权与政企合谋[J].世界经济,2015,38(06):3-21.

[62] 苏颀,王婷,付江月.能源错配对制造业碳排放效率的影响研究[J].生态经济,2021,37(04):19-24+43.

[63] 孙早,刘李华,孙亚政.市场化程度、地方保护主义与 R&D 的溢出效应——来自中国工业的经验证据[J].管理世界,2014(08):78-89.

[64] 王长建,张虹鸥,叶玉瑶,苏泳娴,陈伟莲.广东省能源消费碳排放影响机理分析——基于 IO-SDA 模型[J].热带地理,2017,37(01):10-18.

[65] 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.

[66] 汪克亮,赵斌.“双碳”目标背景下数字金融对能源效率的影响研究[J].南方金融,2021(09):20-31.

- [67] 王丽,欧阳慧,马永欢.经济社会发展对环境影响的再认识——基于 IPAT 模型的城市碳排放分析[J].宏观经济研究,2017,No.227(10):161-168.
- [68] 王文举,向其凤.中国产业结构调整及其节能减排潜力评估[J].中国工业经济,2014(01):44-56.
- [69] 王新利,黄元生,刘诗剑.优化能源消费结构对河北省碳强度目标实现的贡献潜力分析[J].运筹与管理,2020,29(12):140-146.
- [70] 邬彩霞,高媛.数字经济驱动低碳产业发展的机制与效应研究[J].贵州社会科学,2020(11):155-161.
- [71] 乌家培.网络经济及其对经济理论的影响[J].学术研究,2000(01):4-10.
- [72] 许华,王莹.EKC 视角下陕西经济增长与碳排放量实证研究[J].调研世界,2021,No.328(01):54-59.
- [73] 徐盈之,杨英超,郭进.环境规制对碳减排的作用路径及效应——基于中国省级数据的实证分析[J].科学学与科学技术管理,2015,36(10):135-146.
- [74] 杨庐峰,张会平.数字经济与实体经济深度融合发展的着力向度与治理创新——以贵州省的融合发展实践为例[J].理论与改革,2021(06):140-150.
- [75] 叶琴,曾刚,戴劭劭等.不同环境规制工具对中国节能减排技术创新的影响——基于 285 个地级市面板数据[J].中国人口·资源与环境,2018,28(2):115-122.
- [76] 张帆,施震凯,武戈.数字经济与环境规制对绿色全要素生产率的影响[J].南京社会科学,2022(06):12-20+29.
- [77] 张昭利,任荣明,朱晓明.我国环境库兹涅兹曲线的再检验[J].当代经济科学,2012,34(05):23-30+124.
- [78] 赵放,刘一腾.我国数字经济发展及其与制造业融合发展的空间差异研究[J].贵州社会科学,2022(02):144-152.
- [79] 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.
- [80] 赵玉焕,李浩,刘娅等.京津冀 CO₂ 排放的时空差异及影响因素研究[J].资源科学,2018,40(01):207-215.
- [81] 朱发仓,乐冠岚,李倩倩.数字经济增加值规模测度[J].调研世界,2021(02):56-64.

后记

思考许久,我决定还是以我跳脱的思维逻辑和惯用的行文方式为我的学生时代写上一个暂时的句号。可能一时思考不周,却是我此时此刻最想表达的。

考完最后一场求职面试已经下午六点半,在家乡熟悉的、炙热的阳光下,我收到了同门小丁的消息:“我把你写进我的致谢里啦!”我的第一反应是反问她:“怎么现在就写致谢呀?”在她不到一秒的回复时间里,我突然感觉头顶的阳光更猛烈地灼烧我的头皮。绿灯亮起,我看到小丁的回复:“该定终稿了,当然要写致谢了。”我穿着还没适应的皮鞋走向马路对面,因为冲击而停滞的时间重新开始流动。

毫不夸张地说,实际上从确定录取的那天开始我就时不时会思考我的致谢是什么样的,也在各大平台收藏了各种华丽的、有趣的词句,但此刻却只想说心里话。我常反思,这三年带给我的是什麼,现在我确定了,兰州的夕阳、山顶的星光、无数个黄河边散步的夜晚、和恩师还有同门相处时总湿润的眼眶,这三年给我喘息和改变的机会,让我能够清楚地看自己、看世界、看人生。感谢三年前复试时慷慨激昂地说出“我要回家乡,为中华之崛起而读书!”的自己,感谢愿意收下我并指引我人生方向的导师,感谢永远支持我的妈妈,感谢愿意为我排忧解难的、让我解惑的朋友们,感谢一切的人生经历,感谢时间给予我和我们这段珍贵的回忆。

首先想感谢我的导师刘建国老师,我每过一段时间总想向他表达我累积的感恩和祝福,只是碍于我本身羞涩、能力有限,表达出来的不及十分之一的情感也总是词不达意,后来我想,老师如果能因为我的话舒心一分钟,那也足够。刘老师是我学术路上的指引者。论文和日常学习的每个环节都有他的鼓励、指引和监督,肯定我天马行空的想法、毫不吝啬地鼓励和表扬我,让我时至今日都相信自己是有能力的、是优秀的小孩。刘老师实际上更是我人生方向的指引者。遇到想不通的事情、以为自己抗不过的压力和困难,我总愿意第一时间跟老师沟通,无论是凌晨还是课间,无论是我愁眉苦脸还是哭哭啼啼,老师总是耐心地平复我的情绪、支持我的选择和想法、教我勇敢地面对生活,也总是肯定我的小小成就,让我坚信我的存在和付出是有价值、有意义的。感谢老师,让我在迷雾中看到灯

塔发出的光。在此，依旧用最真心实意的祝福为这段短暂时光结尾：祝老师身体健康，万事顺利！

其次想感谢我的朋友们，在任何时候都愿意接住我、温暖我、照亮我，做我人生路上的镇痛剂和开心果。我和小丁总开玩笑，说我们俩是师门里最大的刺头，老是有很多鬼点子，在彼此的鼓励和协助下也总敢付诸行动，也总能实现。我们俩见过对方的眼泪、听过彼此之前二十年的点点滴滴（包括家门口好吃的餐馆）、一起在兰州的大雨里听《倒数》、一起坚持运动、一起去散步、一起旅游、一起参加我的家庭聚会，就在刚刚，我们约定好了要去黄河边完成我们的见面流程，要努力生活以后年假可以一起看海。我们是性格测试结果完全不同的两种人，却也是彼此三年的依靠和支撑，是拥有很多美好回忆和光明未来的好友。我也想感谢我的师姐、师哥、师妹和师弟们，我们可以互相帮助的、无话不谈的好友，是可以一起进步的家人。此外，也要感谢小梅、感谢彤彤，感谢我的老朋友和新朋友们，感谢各个阶段的好朋友，陪我长大，陪我经历一切。祝我们每个人在各自选择的路上渐入佳境！

最想感谢的是我的家人，为我提供了最安全的港湾和最坚实的后盾。最想感谢、最该感谢的是我的妈妈，虽然我习惯以行动表达一切，从未面对面地向她表达过我的爱。我崇拜她，是个伟大的、坚强的、敬业的、万能的超人母亲，我也心疼她，需要成为一个这样的母亲。我的妈妈知道我所有的秘密、认识我所有的好友、支持我所有的选择，一心向我，毫无怨言，实际上这也很大程度上是我选择毕业回家的原因，无论未来是否后悔，此刻我只想陪伴她、尽可能照顾她。我还想感谢的是我的爸爸，一个开明的、有趣的、细心的、爱我的父亲。很久没有喊过这个称呼，即使打字也有点不习惯。我感谢他陪我度过我美好的、幸福的人生前十八年，感谢他教我洗碗、教我开车、教我爱人、教我坚强、教我勇敢地走人生路。风轻轻吹，如今我也不愿是你在敲打我的窗棂，一切都好，愿你也放心以及如愿。此外，也感谢我的姑姑，永远热的、我爱吃的饭菜，永远干净的衣服和铺好的被子，让我有了第二个家；感谢我的姨姨姨夫舅舅们和哥哥姐姐们，为我的生活带来无数的温暖和依靠。

我最后想感谢的是祖国的繁荣富强，可以容我尽情走遍大好河山，吹和煦的春风、赏皑皑的白雪、尝无数的美食、认识有趣的朋友，选择和体验属于我的人

生。

对于命运，每个人都在一生追赶大雪，每个人都一身雪白。我时刻提醒自己，允许一切发生，所有的经历都是老天对我的馈赠和指点，我庆幸自己拥有特别的人生，庆幸自己在漫漫长夜中找到了人生的出口，与自己和解，与命运和解。如同我面试中说的，我要有“咬定青山不放松”的坚毅信念、要有“勇立潮头敢为先”的斗争精神、要有“十年磨一剑”的信心和勇气、要做“苦行僧”，要越过巍峨的山，去见广阔的海。至此，我更庆幸我一度觉得幼稚的初心没变：“为中华之崛起而读书”。

最后是我所有随笔的结尾：祝好，祝各位顺颂时祺，百无禁忌。